과제 번호

기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망 연구보고서

2012

국토해양부 한국건설교통기술평가원

Land Transport and Maritime R&D Report

건설기술혁신사업 최종보고서

R&D / ○○○○-○○○○

기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망 연구보고서

2012. 12. 29.

주관연구기관 / 서울대학교 산학협력단
협동연구기관 / 세종대학교 산학협력단

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

한국건설교통기술평가원장 귀하

본 보고서를 “기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망”의 최종보고서로 제출합니다.

2012. 12. 29.

주관연구기관 : 서울대학교 산학협력단

협력단장 성 노 현

주관연구기관명 : 서울대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 서울대학교 김 영 오

연 구 원 : 건국대학교 김 성 준

〃 : 서울대학교 김 용 대

〃 : 고려대학교 공 정 식

〃 : 건국대학교 박 근 애

〃 : 건국대학교 신 형 진

〃 : 건국대학교 박 민 지

〃 : 건국대학교 박 종 윤

〃 : 건국대학교 김 상 호

〃 : 건국대학교 하 림

〃 : 건국대학교 이 지 완

〃 : 건국대학교 정 충 길

〃 : 건국대학교 조 형 경

〃 : 건국대학교 김 샛 별

〃 : 건국대학교 유 영 석

〃 : 건국대학교 박 혜 선

〃 : 건국대학교 정 혁

〃 : 건국대학교 임 형 일

〃 : 건국대학교 강 현 욱

〃 : 건국대학교 김 철 근

〃 : 건국대학교 오 태 진

〃 : 건국대학교 이 강

〃	:	건국대학교	김 기 락
〃	:	건국대학교	임 영 규
〃	:	건국대학교	류 정 선
〃	:	서울대학교	이 재 경
〃	:	서울대학교	강 태 호
〃	:	서울대학교	박 준 형
〃	:	서울대학교	서 승 범
〃	:	서울대학교	안 국 현
〃	:	서울대학교	이 경 태
〃	:	서울대학교	김 초 롱
〃	:	서울대학교	최 수 웅
〃	:	서울대학교	서 영 호
〃	:	서울대학교	류 영
〃	:	서울대학교	김 재 석
〃	:	서울대학교	전 종 준
〃	:	서울대학교	김 우 성
〃	:	서울대학교	김 광 수
〃	:	서울대학교	황 재 성
〃	:	서울대학교	오 미 애
〃	:	고려대학교	정 민 철
〃	:	고려대학교	김울안이
〃	:	고려대학교	이 지 오
〃	:	고려대학교	최 형 민
〃	:	고려대학교	이 원 우
협동연구기관명	:	세종대학교 산학협력단	
협동연구책임자	:	세종대학교	배 덕 효
연 구 원	:	부산대학교	신 현 석
〃	:	단국대학교	강 부 식
〃	:	세종대학교	이 상 훈
〃	:	세종대학교	손 경 환
〃	:	세종대학교	이 문 환
〃	:	세종대학교	신 상 훈
〃	:	세종대학교	김 동 찬
〃	:	세종대학교	지 희 숙
〃	:	부산대학교	김 미 은
〃	:	부산대학교	주 재 승
〃	:	부산대학교	임 지 예
〃	:	단국대학교	문 수 진
〃	:	단국대학교	김 정 중
〃	:	단국대학교	김 진 겸
공동연구기관명	:	연세대학교 산학협력단	
공동연구책임자	:	연세대학교	허 준 행
연 구 원	:	중부대학교	이 주 헌
〃	:	경북대학교	김 광 섭
〃	:	연세대학교	엄 명 진
〃	:	연세대학교	남 우 성

	〃	: 연세대학교	주 경 원
	〃	: 중부대학교	김 창 주
	〃	: 중부대학교	박 민 재
	〃	: 중부대학교	장 호 원
	〃	: 경북대학교	김 종 필
	〃	: 경북대학교	이 기 춘
	〃	: 경북대학교	이 준 원
공동연구기관명		: 미래자원연구원	
공동연구책임자		: 미래자원연구원	박 성 제
	연 구 원	: 미래자원연구원	류 시 생
	〃	: 미래자원연구원	이 영 근
	〃	: 미래자원연구원	김 성 헌
	〃	: 미래자원연구원	김 시 준
	〃	: 미래자원연구원	김 영 노
	〃	: 미래자원연구원	김 용 현
	〃	: 미래자원연구원	김 재 준
	〃	: 미래자원연구원	김 주 영
	〃	: 미래자원연구원	민 건 영
	〃	: 미래자원연구원	배 우 리
	〃	: 미래자원연구원	송 인 희
	〃	: 미래자원연구원	안 선 영
	〃	: 미래자원연구원	이 상 하
	〃	: 미래자원연구원	이 애 라
	〃	: 미래자원연구원	이 정 은
	〃	: 미래자원연구원	이 종 근
	〃	: 미래자원연구원	이 종 화
	〃	: 미래자원연구원	최 진 도
공동연구기관명		: 한국수자원공사	
공동연구책임자		: 한국수자원공사	박 두 호
	연 구 원	: 한국수자원공사	민 경 진
	〃	: 한국수자원공사	권 형 준
	〃	: 한국수자원공사	김 동 환
	〃	: 한국수자원공사	김 상 문
	〃	: 한국수자원공사	류 문 현
	〃	: 한국수자원공사	이 상 신
	〃	: 한국수자원공사	장 석 원
	〃	: 한국수자원공사	조 은 채
	〃	: 한국수자원공사	최 한 주
	〃	: 한국수자원공사	주 덕
	〃	: 한국수자원공사	최 용 준
	〃	: 한국수자원공사	박 고 은
	〃	: 한국수자원공사	이 종 화
	〃	: 한국수자원공사	김 은 옥
위탁연구기관명		: 국립기상연구소	
위탁연구책임자		: 국립기상연구소	강 현 석
	연 구 원	: 국립기상연구소	이 조 한

〃	:	국립기상연구소	박 수 희
〃	:	국립기상연구소	현 유 경
〃	:	국립기상연구소	성 장 현
위탁연구기관명	:	EPS Solution	
위탁연구책임자	:	EPS Solution	강 우 영
연 구 원	:	EPS Solution	박 변 주
〃	:	EPS Solution	이 홍 복
〃	:	EPS Solution	나 정 엽
〃	:	EPS Solution	이 재 성
〃	:	EPS Solution	이 상 혁
〃	:	EPS Solution	김 성 진
〃	:	EPS Solution	양 세 안
〃	:	EPS Solution	소 상 석
〃	:	EPS Solution	허 선 영
〃	:	EPS Solution	유 정 식
〃	:	EPS Solution	조 주 원
〃	:	EPS Solution	박 훈 상
〃	:	EPS Solution	이 덕 주

기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망 연구단 최종성과물 일람

1. (1세부) 수문변동 전망, 세종대학교(연구책임자 배덕효)

구 분	과제명	최종성과명	성과물의 정의	기존 기술과의 차별성[1]	최종 성과물의 형태[2]	성과물 발생 시기	최종 수요처[3]	활용실적(실적발생시) 및 활용방안(미발생시)[4]	기대효과[5]	기술실시계약[6]	비고[7]
1-1 (주관)		HadGEM3-RA의 극치 기후 시나리오 생산	RCP 기반의 HadGEM3-RA로 생산된 극치기후시나리오	- 수자원 분야의 활용을 위한 고해상도 기후시나리오의 극치 사상 모의 여부 평가 (성능개선)	보고서	12년12월	- 본 연구단 및 기후변화 연구	-(실적) “기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망” 연구단의 타 단위과제의 입력자료로 활용	-국가 및 각 지자체의 치수 계획 수립 시 활용될 것으로 기대됨	- 미체결	해당사항 없음
		SRES 및 RCP기반의 기후 및 수문시나리오	AR4의 기준 시나리오인 SRES 기후시나리오에 대한 국내 표준 수문시나리오를 생산하였으며, 향후 발간될 AR5의 기준시나리오인 RCP 기후시나리오에 대한 수문시나리오를 생산하였음	- 기존에 가용한 GCM을 사용한 것과 달리 국내 유역에 적합한 GCM 선정 및 AR5 기준 시나리오인 RCP를 활용하여 수문시나리오 생산(성능개선 및 신기술)	데이터 및 보고서	12년12월	- 본 연구단 및 기후변화 연구	-(실적) “기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망” 연구단의 타 단위과제의 입력자료로 활용 -(방안) 국가 수자원장기종합계획(제II편. 물이용 종합계획 제4장.물수급 전망)에서 활용	-국가 및 각 지자체의 치수와 물이용 대비 계획 수립 시 활용될 것으로 기대됨	- 미체결	해당사항 없음
		동적분위사상 (Dynamic Quantile Mapping)	기후변화 연구에 주로 사용되는 GCM (Global Climate Model)자료의 관측값과의 오차를 보정하기 위해 사용되는 기법으로 기존 기법인 Quantile Mapping과 개발한 Dynamic Quantile Mapping 기법을 모두 사용 가능한 프로그램	- 기존 Quantile mapping기법을 개선한 Dynamic Quanitle mapping 기법 개발 (성능개선)	S/W	12년11월	- 기후변화 연구	- “기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망” 연구단의 단위과제인 1-1-3 유역단위 시공간적 스케일 상세화에 활용(3차년도 2011. 06. 29~2012. 12. 28) - “기후변화 대응 다목적댐 기후자료 상세화 및 모델구축” 학술연구용역과제에 상세화 입력자료 구축에 활용 (2차년도 2012. 01. 26~12. 20)	- 기후변화 상세전망에 있어서의 표준화된 방법론과 결과를 제시함으로써, 직접적으로는 미래의 홍수 및 가뭄등 물관련 재해 및 수잔원 분야, 수질 및 생태 분야 등 소위 영향평가모형을 에서의 신뢰성있는 입력자료를 구축하는데 기여할 것으로 기대됨 - 본 프로그램등의 기술을 확보함으로써 국내 수자원 기술력을 선진국과 비견되는 기술수준을 확보하였다고 평가할 수 있음	- 미체결	해당사항 없음
		추계학적 태풍모의 (Stochastic Typhoon Simulation)	Stochastic Typhoon Simulation 기법은 누적확률분포에 무작위 표본(Random samples)를 적용하여 값을 생성시키는 방법으로 과거 통계분포모수를(평균/최대값/최소값)이용한 혼합확률분포를 통해 미래의 태풍 모의값을 생성하는 프로그램	- 혼합확률분포를 이용한 추계학적 태풍모의 기법 개발 (신기술)	S/W	12년11월	- 기후변화 연구			- 미체결	해당사항 없음
		확률축차 모형 (Radom Cascade Model)	수문기상분야에서 쓰이는 상세화(Downscaling)기법 중 격자상세화 기법인 Random Cascade를 적용하는 프로그램으로써, 강수대의 공간적 형상을 재현하는 프로그램	- Random Cascade 기법을 이용한 강수의 공간적 형상을 재현프로그램 (신기술)	S/W	12년11월	- 기후변화 연구			- 미체결	해당사항 없음
1-2		기후변화	기후변화 시나리오와 GCM	- 기존 기술은 유출	보고서	12년12월	- 수공구조물	-(방안) 기후변화에 대한 극한홍수	- 기후변화에 따른 극	- 미체결	해당사항 없음

구 분	과제명	최종성과명	성과물의 정의	기존 기술과의 차별성[1]	최종 성과물의 형태[2]	성과물 발생 시기	최종 수요처[3]	활용실적(실적발생시) 및 활용방안(미발생시)[4]	기대효과[5]	기술실시계약[6]	비고[7]
(협동)		시나리오에 따른 미래 극한홍수량 전망	에 의한 미래 강우에 의한 5대강 유역의 극한홍수량	총량 변화에 초점을 맞추나 본 기술은 수공구조물 설계에 사용되는 극한홍수량 변화에 초점을 맞춤 - 일단위 강우 자료로부터 시단위 확률강우량을 추정하는 기술			설계 지침을 제시하는 관계 부처 -하천 및 하천시설물 계획 및 설계를 수행하는 업체	량 전망 결과에 대한 홍보 및 설계지침에 대한 적용 방안 제시 / 국토해양부 / 향후 5년 이내	한홍수량 변화를 고려한 설계 지침 제시로 미래에 발생 가능한 풍수해 대비 - 풍수해 대비를 통한 인명·재산 피해 및 피해 복구 비용 감소		
		기후변화 시나리오에 따른 극한가뭄 전망	기후변화 시나리오에 따른 5대강 유역의 극한 가뭄 변화	- 기존 기술은 기후변화에 따른 단순 가뭄지수의 변화만 제시하였다면, 본 연구에서는 가뭄의 시공간적 특징을 해석하였으며, 또한, 위험도 분석을 수행하였음(성능개선)	보고서	12년12월	- 수공구조물 설계 지침을 제시하는 관계 부처	-(방안) 기후변화에 따른 극한가뭄으로 인한 수자원 전망은 향후 수자원장기종합계획(제Ⅳ편. 물이용 종합계획, 제4장 물 수급 전망)에서 우리나라의 수자원확보 필요량 기준으로 설정되어 있는 30년 빈도의 가뭄에 대한 재설정이 가능	- 실질적인 행정구역별 가뭄대책과 이를 위한 기초자료에 유용하게 활용될 것으로 판단	- 미체결	해당사항 없음

2. (2세부) 수문변동 정량화 및 수자원 정책 수립, 서울대학교(연구책임자 김영오)

구 분	과제명	최종성과명	성과물의 정의	기존 기술과의 차별성[1]	최종 성과물의 형태[2]	성과물 발생 시기	최종 수요처[3]	활용실적(실적발생시) 및 활용방안(미발생시)[4]	기대효과[5]	기술실시계약[6]	비고[7]
2-1	하천유역의 물수지 및 수문순환 변동 정량화	기후변화 평가용 분포형 수문모형 (PGA-CC)	미래 기후변화에 따른 수문 변화를 총체적으로 분석하기 위한 한국형 수문순환 평가모형	우리나라실정에 맞고 기후변화 시나리오와 연계할 수 있도록 구축된 국내형 수문순환모형	S/W	12년 9월	- 기후변화연구 - 국내 수자원 및 수문순환시스템 관련 연구	- (방안) 미래 국토계획 수립 및 수문순환 예측에 활용도가 높을 것으로 예상	- 우리나라 실정에 맞는 수자원 영향 평가가 제대로 이루어 지며, 향후 미래 기후변화에 따른 대응방안 마련의 발판이 될 것	미체결	해당사항 없음
		가중값 산정 기법을 이용한 미래 물부족 예측 기법	기후변화를 고려한 물수급 전망기법 적용을 통한 미래 물부족량 산정기법	기존 기술의 한계(1. 기후변화를 미반영한 미래 물수지 분석/ 2. GCM 모의값 직접활용으로 인한 물수지 분석의 불확실성)를 개선할 수 있는 미래 물부족량 산정 신기술	특허 및 보고서	12년 5월	- 정부부처 - 기후변화를 고려한 물수지 분석 관련 연구처	- (방안) 물관련 정부부처에서 국가수자원계획 수립시 기후변화를 고려한 물수급 분석에 활용가능	- 향후 장기수자원계획 시, 미래 기후변화를 고려한 물수급 분석을 통해 보다 안장적인 장래 용수공급 전략 수립 가능	미체결	해당사항 없음
		DB 시스템 및 표출시스템 개발 (EPS 솔루션)	웹을 이용한 DB 시스템 개발 및 연구단 성과물 표출 시스템 구축과 운영	-	시스템 (웹페이지)	12년 12월	- 기후변화연구	- (실적) 본 연구단에 필요한 주요 자료 보관 및 배포 - (방안) 웹을 통하여 일반인 및 연구자 접근가능하도록 운영	- 연구결과 및 자료들을 공유함으로서 차 후 기후변화 연구 진행시 연구방향 제시로 연구시간 절약 가능	미체결	해당사항 없음
		1) Scaled Ridge	기후변화를 고려한 수	불확실성 정량화 신기술	보고서	12년 10월	- 기후변화연구를	- (방안) 수문전망, 기온 및 강수량 전	- 전망과정에 있어서 보	미체결	해당사항

		and Weighted Scaled Ridge 2) Residual mixture and Leave-one-out BMA	문 전망과정의 불확실성 정량화 기법				비롯한 불확실성의 조합을 필요로 하는 모든 수요처	망, 극치사상 전망과정에 분포의 추정이 필요한 경우 활용가능	다 정확한 전망 가능 - 분포의 추정을 통한 불확실성 정량화		없음
		수공구조물의 취약도 곡선	기후변화 따른 수공구조물 영향분석	기존 수공구조물 현황을 분석하고 기후변화에 따른 수공구조물의 안정성 및 취약성 평가	보고서	11년 12월	- 수공구조물 설계 지침을 제시하는 관계 부처 - 하천 및 하천시설물 계획 및 설계를 수행하는 업체	- (방안) 수공구조물 설계기준 수정 및 향후 기후변화 영향을 고려한 신규 구조물 건설에 지침자료로 활용가능	- 기후변화 영향을 고려한 수공구조물 안정도 평가를 위해 구조물 안정성 개선방안 모색 및 신규 건설기준 개정	미체결	해당사항 없음
2-2	기후변화 대응 수자원 정책 수립	기후변화를 고려한 물관련 재해(홍수 및 가뭄) 피해액 전망	기후변화가 물관리에 미치는 사회/경제적 영향평가	현재 기후변화를 고려한 물관련 재해 전망에 따른 사회경제적 피해액 추정결과 미미	보고서 (피해액 전망치)	12년 12월	- 물관련 정부부처 - 재해 보험사 및 투자사 등	- (방안) 미래 기후변화를 고려한 물관련 대응 및 적응전략 예산수립시 객관적인 참고자료로 활용가능	- 수자원 분야에서의 기후변화로 인한 이수/치수 측면에서의 경제적 손실 절감	미체결	해당사항 없음
2-3	기후변화를 대비한 법,제도 개선 및 수자원정책 제시	1) 기후변화 적응 법·제도안 기본 가이드라인 2) 기후변화 적응 물 관련 법령 개정 방안 3) 국가 물관리 적응전략 로드맵	기후변화를 대비한 법/제도 개선방안 및 수자원정책 제안	- 현재 물관리 전략 분석과 법령/제도 설정을 위한 전문가 설문을 통한 인식조사를 통해 현여건의 법제도적 가이드라인을 제시 - 현재의 물순환체계 및 법령의 평가를 통해 기후변화가 고려된 관련법령의 새로운 개선방향 제시	계획 및 지침	12년 12월	- 국토해양부 (수자원정책관) - 환경부 (물환경정책국) - 지자체 조례 등	- (방안) 신정부에서 전개될 물관리 제도정비 및 기후변화 적응 물관련 법령 및 정책 개편에 활용가능	- (기술적 측면) 물관련 기술발전에 필요한 제도정비의 효과 - (정책/경제적 측면) 통합적 시각의 물관련 법제도 및 정책정비로 사회적 경제적 효과 도출	미체결	해당사항 없음

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td></td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2009.12.29
-2012.12.28</td><td>단 계 구 분</td><td>(1단계)/
(총 1단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">건설기술혁신사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4">기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>김 영 오</td><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 126명
내부 : 34명
외부 : 92명</td><td>총연구비</td><td>정부: 3,426,000천원
기업: 300,000천원
계: 3,726,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">서울대학교
건설환경공학부</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">한국수자원공사</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td rowspan="2">위 탁 연 구</td><td colspan="5">연구기관명 : 국립기상연구소 연구책임자 : 강현석</td></tr>
<tr><td colspan="5">연구기관명 : (주)EPS솔루션 연구책임자 : 강우영</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>515</td></tr>
<tr><td colspan="6">기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망 연구단에서는 단위과제별로 연구개발한 해당 기술을 적용유역인 한반도 4대강 유역(한강, 낙동강, 금강, 영산·섬진강 유역)에 시범적용 하였다. 그 결과 한반도 4대강 유역에 대한 장기, 중단기 기후변화 시나리오, 확률강우량, 가뭄지수, 물부족 전망 결과를 도출하였다. 이를 통해 기후변화에 따른 표준 수문·기상 시나리오를 생산하였고, 미래 수자원의 변화를 정량적으로 전망하였으며, 기후변화에 따른 기상/수문의 영향을 정량적으로 분석하였다. 이와 더불어 홍수, 가뭄 등의 재해에 의해 발생하는 재해피해액을 기후변화에 따른 영향을 고려하여 산정하였으며, 기후변화에 따른 상황적 변화를 고려하여 법·제도 개선안을 제안하였다.
또한 위와 같은 전망 결과와 과거 수문/기상 관측자료를 모아 적용 및 분석을 할 수 있는 Warehouse를 구축하였으며, 상세화기법, 한국형 수문모형 관련 소프트웨어를 각각 출시하였다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">기후변화 시나리오, 수자원 전망, 수문변동 분석,
불확실성 정량화, 수자원 경제 및 정책</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Climate Change Scenarios, Water Resources Projection,
Hydrological Change Analysis, Uncertainty
Quantification, Water Resources Economic & Policy</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

국내 수자원 분야 기후변화 연구는 1990년 중반부터 시작되었으나 산발적으로 수행되었고 표준화가 이루어지지 못해 연구결과마다 매우 상이한 결과를 보이고 있다. 따라서 연구결과가 관련 정책에 적용되지 못하고 있음은 물론 국제적 공조를 위한 기초 자료로도 활용되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 우리나라는 지금까지의 이 분야 국내 연구결과를 종합적으로 정리하여 그 방법론을 표준화 할 필요가 있고(표준화의 필요성), 표준화된 방법으로 전망한 결과가 학술적 성과에 그치지 않고, 국토해양부의 수자원 정책 수립과 관련 제도 개선에 반영되어야 하며(실용화의 필요성), 마지막으로 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change), UNFCC나 G-20 정상회의 등의 국제회의에서 활용될 수 있도록 심도 있는 연구가 필요한(국제화의 필요성) 시점에 서있다. CCAPH-K는 다음과 같은 최종목표를 수립하였다.

○ 기후변화에 따른 미래 수자원 전망 기술 표준화
○ 기후변화에 따른 미래 극치사상(홍수 및 가뭄) 추정 기술 개발
○ 기후변화를 고려한 물순환 및 물수급 정량화 기술 개발
○ 기후변화를 고려한 경제성 평가 및 수자원 정책 수립

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

○ 단위과제 1-1-1: 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망
  - 기후변화에 따른 수문시나리오 생산기술 문헌 및 연구동향 조사
  - 기후변화에 따른 표준 시나리오 생산모델 구축
  - 기후변화에 따른 표준수문시나리오 생산 및 불확실성 분석
○ 단위과제 1-1-2: 기후변화에 따른 중단기 수문전망
  - 기후변화에 따른 중단기 수문 전망기법 문헌 및 연구동향 조사
  - 한국 수문변수 통계적 경향성 분석 및 중단기 전망
  - 한국 수문변수 탄성도 분석 및 중단기 전망
  - 유역단위 통합 비선형 시공간 수문예측 모형 개발
○ 단위과제 1-1-3: 유역단위 시공간적 스케일 상세화
  - 역학적/통계적 상세화기법 문헌 및 연구동향 조사
  - 인공신경망기반의 Random Cascade 합성모형(ARDAS; Assembled Regional climate Downscaling & Analysis System) 개발 및 적용
  - ARDAS 소프트웨어 패키지 개발

○ 단위과제 1-2-1: 극한 홍수량의 전망 기술 개발
- 기후변화에 의한 극한홍수량 전망기술 문헌 및 연구동향 조사
- 기후변화에 따른 극한홍수량 전망 알고리즘 제시
- 표준 기후변화 시나리오를 바탕으로한 극한 홍수량 전망
○ 단위과제 1-2-2: 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망
- 기존 가뭄빈도 해석기술 현황, 가뭄평가방법 문헌 및 연구동향 조사
- 기후변화 평가용 최적 가뭄지수 선정
- 가뭄지수 및 빈도해석 기술을 활용한 극한 가뭄의 정량화
- 극한 가뭄 따른 유역별 수자원 전망 및 수문학적 리스크 전망
○ 단위과제 1-2-3: 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석
- 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석방법 문헌 및 연구동향 조사
- 수문기상인자의 도출기술 및 수문해석기술 개발
- 수문통계의 비정상성을 고려한 확률 강우량 산정
- 극치 홍수량 전망에 대한 불확실성 분석기법 개발
○ 단위과제 2-1-1: 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가
- 기후변화에 의한 수문순환 평가방법 문헌 및 연구동향 조사
- 한국형 장기유출 수문모형 기본모듈 개발
- 자체 개발된 분포형 수문순환모형의 적용
○ 단위과제 2-1-2: 기후변화에 따른 물수급 전망
- 기후변화에 따른 물수급 전망기법 문헌 및 연구동향 조사
- 기후변화 평가를 위한 한국형 물수급 모형의 확장방안 제시
- 개선된 기법을 적용한 미래 한반도 물수급 전망결과 제시
- Database Storage 개발 및 운영 (EPS솔루션)
○ 단위과제 2-1-3: 기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 정량화
- 수문 전망과정의 불확실성 정량화방법 문헌 및 연구동향 조사
- 기후변화 불확실성 전망의 조합 기술 개발
- 기후변화 불확실성의 정량화 기술 개발
- 기후변화 불확실성의 요인별 분해 기술 개발
- 기후변화에 따른 한반도 수자원 전망의 불확실성 제시
○ 단위과제 2-2-1: 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석
- 기후변화에 따른 수자원시설물 영향분석기법 문헌 및 연구동향 조사
- 기상변화 관련 설계 인자에 대한 수공구조물 안전 민감도 분석
- 기후변화 불확실성을 고려한 주요 수공구조물 안전도 분석
○ 단위과제 2-2-2: 기후변화를 대비한 법제도 개선 및 수자원정책 제시
- 기후변화 적응 물관리 법제도 분석 및 국내외 물관리 정책 분석
- 기후변화 적응을 위한 법제적 개선방향 논의
- 기후변화 적응 법제도 및 물관련 법령 개선방향 및 가이드라인 제시
- 기후변화 적응 국가 물관리 적응전략 로드맵 작성
○ 단위과제 2-2-3: 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가
- 물관리에 따른 사회·경제적 영향평가방법 문헌 및 연구동향 조사

- 기후변화에 따른 홍수피해비용 전망
- 기후변화에 따른 가뭄피해비용 전망

Ⅳ. 연구개발결과

○ 연구단 총괄
- 연구내용 적용: 한반도 4대강 유역
- 연구단 Database 구축
- 연구단 Warehouse 및 표출시스템 구축
- 연구단 소프트웨어 출시
- 단위과제별 핵심기술

○ 단위과제 1-1-1: 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망
- 국내 기후를 고려한 미래기후시나리오 표준화 방안 도출
- 지역 기후변화 시나리오 생산 및 수문전망을 위한 수문변수 생산 및 제공
- 기후변화에 따른 미래 기후 및 수문전망 시나리오의 불확실성 평가

○ 단위과제 1-1-2: 기후변화에 따른 중단기 수문전망
- 지점별, 유역별, 수문요소별 통계적 경향성 분석결과를 통한 중단기 수문전망결과 정량화
- 지점별, 유역별, 수문요소별 탄성도 분석결과를 통한 중단기 수문전망결과 정량화
- 경향성 및 탄성도 분석기술을 이용한 비시나리오(통계) 기반 수문자료의 중단기 전망

○ 단위과제 1-1-3: 유역단위 시공간적 스케일 상세화
- 인공신경망 기반의 복합상세화기법을 통한 시공간적 스케일 상세화 기법 개발
- Random Cascade 모형 기반의 상세화를 통한 1 km 고해상도 격자강우 생성
- 유역단위 시공간적 스케일 상세화 모형인 ARDAS s/w 개발

○ 단위과제 1-2-1: 극한 홍수량의 전망 기술 개발
- 표준 기후 시나리오에 의한 일단위 강우로부터 시단위 확률강우량 산정 기법 개발
- GCM 모의 결과 미보유 지점에 대한 확률강우량 산정 기법 개발
- 기후변화에 따른 극한홍수량 전망 알고리즘 제시
- IPCC AR4 시나리오 기반의 한반도 확률 강우량 및 극한 홍수량 변화 전망

○ 단위과제 1-2-2: 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망
- 기후변화 평가용 가뭄지수의 적용성 검토 및 최적가뭄지수 선정
- Drought Spell을 이용한 극한 가뭄의 발생 빈도 및 가뭄의 시, 공간적 분포특성 분석
- 유역별 극한가뭄의 전망 및 가뭄에 따른 유역별 수자원 전망

○ 단위과제 1-2-3: 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석
- 비정상성을 고려한 확률 강수량 분석방법 개발
- 수문통계의 비정상성을 고려한 확률 강우량 산정
- 관측자료 기반과 GCM 시나리오 기반 결과를 연계한 확률강우량 비교 분석

○ 단위과제 2-1-1: 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가
- 기후변화를 고려한 한국형 수문순환 평가방법의 개발
- 개발된 모듈의 연계 및 통합기법 개발
- 자체 개발된 분포형 수문순환모형의 한반도 적용

○ 단위과제 2-1-2: 기후변화에 따른 물수급 전망
- 기존 국내 물수급 방법론의 개선 및 기후변화에 따른 전망기법의 개발
- 개선된 방법론의 한반도 적용 및 미래 물수급 전망결과 비교 분석
- 한반도 표준 시나리오 선정기법 제안
- 각 단위과제 상호간의 연계성 및 호환성을 고려한 Database Storage 개발 및 운영(EPS 솔루션)

○ 단위과제 2-1-3: 기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 정량화
- 시나리오 중요도에 따른 최적 가중치 산정을 통한 불확실성 전망 조합기법 제시
- 통계적 분포형을 활용한 불확실성 정량화
- Delta method를 이용한 불확실성 요인별 분해
- 불확실성 조합 및 정량화 기술을 이용한 한반도 수자원 전망 불확실성의 제시

○ 단위과제 2-2-1: 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석
- 국내 수공구조물 현황 분석
- 수공구조물 모델링을 통한 안정성 평가 및 취약도 산출
- 기후변화를 고려한 수공구조물 위험도 분석

○ 단위과제 2-2-2: 기후변화를 대비한 법제도 개선 및 수자원정책 제시
- 국내외 기후변화에 적응 물 관련 법·제도 및 정책 분석
- 기후변화 적응 법·제도안 기본 가이드라인 및 물 관련 법령 개정방안 제시
- 기후변화 적응을 위한 수자원 분야 국가 물 관리 적응전략 로드맵 제시

○ 단위과제 2-2-3: 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가
- 호우사상의 강우특성과 피해액 상관관계 분석을 통한 기후변화에 따른 홍수피해 비용 산정
- CGE(Computable General Equilibrium) 모형을 이용한 기후변화에 따른 권역별 가뭄피해 비용 산정

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

○ 단위과제 1-1-1: 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망
- 국가 표준 기후·수문시나리오 생산 및 연구단 단위과제 연구의 입력자료 제공
- 국가사업의 기후변화 적응대책 수립시 기초자료로 활용
- 기후변화를 고려한 장기 수자원관리 및 계획 수립을 위한 가이드라인 제공

○ 단위과제 1-1-2: 기후변화에 따른 중단기 수문전망
- 과거의 관측자료를 통한 유역별, 지점별 중단기 수문전망
- GCM 시나리오 기반 전망결과의 불확실성 저감을 위한 보완적 결과 산정
- 경향성 분석 및 탄성도 분석 기법(비시나리오 기반)을 이용한 중단기 수문전망

예측을 통해 유역별 유출량 평가

○ 단위과제 1-1-3: 유역단위 시공간적 스케일 상세화
- 일 단위의 강수 전망자료로 활용
- 극한 가뭄에 따른 수자원 전망의 활용
- 장기유출모형을 이용한 수문순환평가의 활용
- 장기물수지모형을 이용한 권역별 물수지 전망의 활용

○ 단위과제 1-2-1: 극한 홍수량의 전망 기술 개발
- 홍수에 따른 미래 피해 산정시 기초 자료로 활용
- 홍수량 산정과 관련된 지침 수립을 위한 기초 자료로 활용
- 기후변화 적응대책 수립시 기초자료로 활용

○ 단위과제 1-2-2: 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망
- 극한 가뭄에 대한 유역별 현실적인 적응, 전략 구축이 가능
- 각각의 유역특성에 적합한 유역별 또는 행정구역별 가뭄대책 수립에 활용
- 30년 빈도의 가뭄에 대한 정량적 해석 가능
- 특정 재현기간과 지속기간 및 기후변화를 고려한 가뭄의 정량화를 통해 이수안전도 설정에 활용

○ 단위과제 1-2-3: 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석
- 비정상성 빈도해석 기법을 통한 극치사상 추정량은 향후 하천설계기준 수정시 가이드라인으로 활용
- 기후변화를 고려한 비정상성 빈도해석기법 활용을 통해 미래 홍수, 범람 등으로 인한 피해 최소화
- 기후변화를 고려한 비정상성 빈도해석기법 활용을 통한 홍수범람모형, 범람지도 작성 연구에 기초자료로 활용

○ 단위과제 2-1-1: 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가
- 기후변화를 고려한 한국형 수문순환 평가를 통해 한반도 미래 수자원 변화량 분석 가능
- 미래 수자원 변화량 분석을 통한 수자원 관리 대책수립 및 정책 결정에 활용

○ 단위과제 2-1-2: 기후변화에 따른 물수급 전망
- 기후변화 불확실성을 고려한 미래 한반도 물수급 전망 가능
- 전체 불확실성을 유지하는 한반도 표준 시나리오를 제시하여 수자원분야 대표 시나리오 선정 기법을 제시하여 추후 연구에 적용 가능
- Warehouse 구축을 통한 연구성과 공개 및 향후 기후변화 연구와의 연속성을 위한 관련 자료 및 s/w 제공 (EPS 솔루션)

○ 단위과제 2-1-3: 기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 정량화
- 개발된 불확실성 전망 조합기술의 향후 다양한 분야에 적용이 가능
- 불확실성의 정량화 및 수문 전망 단계별 불확실성 발생요인의 분석을 통하여 불확실성이 증대되는 과정을 파악하고 이 과정에 대한 대비를 통해 한반도 수자원의 관리의 효율성을 높임

○ 단위과제 2-2-1: 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석
- 추후 수공 구조물의 설계에 있어 적정 위험도 수준을 고려한 확률 기반 최적 설

계가 가능
- 댐 설계 기준안 “6.2.4 제체의 안정성검토 및 일반사항“ 중 현재 정성적으로 작성되어 있는 기존의 방법 대신 수위변화를 고려한 취약도 곡선방법 사용이 가능
- 추후 통합 수공구조물 관리 프로그램의 개발을 위한 입력자료의 단순화에 기여

○ 단위과제 2-2-2: 기후변화를 대비한 법제도 개선 및 수자원정책 제시
- 향후 국가가 기후변화의 적응전략을 수립하는데 기초자료로 활용
- 기후변화 적응 법령개정과 제도개편의 방향성 구축에 활용
- 기후변화 적응 국가 물관리 적응전략 로드맵 구축에 활용

○ 단위과제 2-2-3: 기후변화가 물관리에 미치는 사회・경제적 영향평가
- 기후변화에 따른 사회경제적 영향평가는 시공간적으로 국가 예산투자의 우선순위 선정에 활용
- 권역별 전망과 취약성 평가 결과는 향후 전개될 국가 기후변화 적응전략은 물론 유역별 방재계획, 그리고 지방자치단체의 기후변화 대응 물관리 정책의 기초자료로 활용

S U M M A R Y

Ⅰ. Title

Climate Change Assessment & Projection for Hydrology in Korea

Ⅱ. The purpose and necessity of research

Most domestic studies of the impact of climate change have produced varying results, because they were performed sporadically and without standardization. Moreover, the results could not be applied to related policies or even to fundamental data as a way of facilitating global cooperation. Therefore, it is essential that the methodologies utilized to assess climate change are standardized based on the results of existing research (necessity of standardization). Also, the result derived from the standardized methodology should feed into water resources policies and help improve related policies of the Ministry of Land, Transport and Maritime Affair. The result should also assist with discovering new academic findings (necessity of practicality). Last, in-depth studies should be conducted so that they can be utilized for international conferences such as IPCC, UNFCC, and G-20 (necessity of internationalization). The ultimate objectives of CCAPH-K are delineated below.

○ Standardization of Water Resources Projection according to Climate Change
○ Technical Development of Extreme Event Estimation according to Climate Change
○ Development of Quantitative Analysis of Hydrological Process and Water Budget according to Climate Change
○ Establishment of Economic Estimation and Water Resources Management Plan according to Climate Change

Ⅲ. The contents of research

○ Unit Project 1-1-1: Standardization and Projection of Long-term Hydrologic Scenarios According to Climate Change
- Literature review of hydrologic scenarios generating techniques according to climate change
- Construction of standardized scenarios projection processes according to climate change

- Production of standardized climate and hydrologic scenarios according to climate change and uncertainty analysis

○ Unit Project 1-1-2: Medium-term Hydrologic Projections According to Climate Change
- Literature review of medium-term hydrologic projections according to climate change
- Statistical trend analysis and medium-term hydrologic projections of hydrologic factors in Korea
- Elasticity analysis and medium-term hydrologic projections of hydrologic factors in Korea
- Development of the nonlinear spatial-temporal hydrological projection model at unit of watershed

○ Unit Project 1-1-3: Spatial and Temporal Downscaling of Watershed Unit
- Literature review of dynamic/statistical downscaling techniques
- Development & application of random cascade downscaling model (ARDAS; Assembled Regional climate Downscaling & Analysis System) based on an artificial neural network
- Development of ARDAS software package

○ Unit Project 1-2-1: Development of Extreme Flood Projection Technique
- Literature review of extreme flood projection techniques according to climate change
- Development of extreme flood projection algorithm according to climate change
- Estimation of extreme flood projections based on standardized climate change scenarios

○ Unit Project 1-2-2: Water Resources Outlook Considering Extreme Drought
- Literature review of conventional drought analysis and drought frequency analysis
- Selection of the optimum drought index for climate change assessment
- Quantification of extreme droughts by utilizing SPI and frequency analysis
- Outlook for water resources and hydrological risks in different watersheds related to extreme droughts

○ Unit Project 1-2-3: Nonstationary Hydrologic Model Interpretation Considering Climate Change
- Literature review of nonstationary hydrologic model interpretation according to climate change
- Development of hydrologic analysis techniques and estimation of hydro-meteorological factors
- Determination of design rainfall depending on nonstationarity of hydrologic statistics
- Development of uncertainty analysis techniques on extreme flood projection

○ Unit Project 2-1-1: Evaluation of Korean Hydrologic Process According to Climate Change
- Literature review of hydrologic process evaluation according to climate change
- Development of basic modules for the long-term hydrological model for Korea
- Application of the developed hydrological process model for Korea

○ Unit Project 2-1-2: Water Balance Projection According to Climate Change
- Literature review of water balance projections according to climate change
- Development of the measure to expand the Korean-type water balance model for climate change assessment
- Water balance projections in the Korean peninsula using the developed technique
- Development and operation of the database storage system (EPS Solution)

○ Unit Project 2-1-3: Quantification of Hydrologic Projection Uncertainty According to Climate Change
- Literature review of quantification of hydrologic projection uncertainty
- Development of a combining technique for projection uncertainty in climate change
- Development of a quantification method for projection uncertainty in climate change
- Development of a factor decomposition method for uncertainty projection in climate change
- Presentation of projection uncertainty of water resources in the Korean peninsula

○ Unit Project 2-2-1: Hydrologic Variation Impact Assessment and Structure Impact Analysis According to Climate Change
- Literature review of impact analysis techniques in water resources facilities according to climate change
- Sensitivity analysis on the safety of hydraulic structure design parameters according to climate change
- Analysis on the change of safety grades of hydraulic structures considering climate change uncertainties

○ Unit Project 2-2-2: Water Policy and Legislation for Responding to Climate Change
- Analysis on current researches regarding water management laws for climate change adaptation
- Discussion on legal system improvement for climate change adaptation
- Suggestion on water legal system improvement and guidelines for legislation improvement in climate change adaptation
- Development of the road map of a national water management strategy for climate change adaptation

○ Unit Project 2-2-3: Socioeconomic Impact Assessment of Water Management According to Climate Change
- Literature review of socioeconomic impact assessment of water management
- Estimating flood damage costs caused by climate change
- Estimating drought damage costs caused by climate change

Ⅳ. Results

○ Overall Results
- Application of research findings: Korean peninsula
- Establish and operate a research team Database Storage system
- Launch a research team software
- Key technology for each unit task

○ Unit Project 1-1-1: Standardization and Projection of Long-term Hydrologic Scenarios According to Climate Change
- Standardization of future climate and hydrologic scenarios for Korea
- Production of hydrologic variables for projections of future hydrologic performance and standardized climate scenarios
- Assessment of uncertainties in future climate and hydrologic scenarios

○ Unit Project 1-1-2: Medium-term Hydrologic Projections According to Climate Change
- Quantification of medium-term hydrologic projections for each station, watershed, and hydrologic factor by trend analysis
- Quantification of medium-term hydrologic projections for each station, watershed, and hydrologic factors by elasticity analysis
- Medium-term projections based on hydrologic data by non-scenario approach using trend analysis and elasticity analysis

○ Unit Project 1-1-3: Spatial and Temporal Downscaling of Watershed Unit
- Development of the spatial and temporal downscaling technique (ARDAS) based on an artificial neuron network
- Generation of 1 km high resolution precipitation grid by the downscaling technique based on the Random Cascade model
- Development of ARDAS software package downscaling spatially and temporally regarding climate change scenarios

○ Unit Project 1-2-1: Development of Extreme Flood Projection Technique
- Development of the hourly design rainfall estimation technique from daily rainfall data by standardized climate and hydrologic scenarios
- Determination of design rainfall for regions without GCMs simulated data
- Development of extreme flood projections algorithm according to climate

change
- Projections of design rainfall and extreme flood in Korea based on IPCC AR4 scenarios

○ Unit Project 1-2-2: Water Resources Outlook Considering Extreme Drought
- Selection of the optimum drought index (SPI) for climate change assessment
- Analysis on extreme drought frequency and severity using a drought spell
- Projections of extreme drought and its impacts on water resources in Korea

○ Unit Project 1-2-3: Nonstationary Hydrologic Model Interpretation Considering Climate Change
- Development of nonstationary hydrologic model for estimation of extreme precipitation considering climate change
- Estimation of design rainfall considering nonstationarity of hydrologic statistics
- Comparison of precipitation projections between the observed extreme values and the projected future extreme values

○ Unit Project 2-1-1: Evaluation of Korean Hydrologic Process According to Climate Change
- Development of Korean hydrologic process modules
- Integration of developed modules with existing techniques
- Application of the newly developed hydrologic process model to the Korean peninsula

○ Unit Project 2-1-2: Water Balance Projection According to Climate Change
- Improvement of the existing water balance methodology and development of the technique for water balance projections according to climate changes
- Application of the improved methodology for water balance projections to the Korean peninsula
- Suggestion of a technique to select standardized climate scenarios for the Korean peninsula
- Operation of the Database Storage system that has taken the connection and compatibility of each unit task into account

○ Unit Project 2-1-3: Quantification of Hydrologic Projection Uncertainty According to Climate Change
- Development of the optimal combining technique for projections uncertainty
- Quantification of hydrologic projections uncertainty using statistical distributions
- Decomposition of hydrological projection uncertainty using the delta method
- Analysis on uncertainties of hydrological projection considering climate change in Korea using the optimal combining technique and quantification method

○ Unit Project 2-2-1: Hydrologic Variation Impact Assessment and Structure Impact Analysis According to Climate Change
- Review of the status of existing hydraulic structures

- Estimation of the stability on hydraulic structures by modelling and deducting fragility curves factor
- Risk analysis on hydraulic structures considering climate change by the FEM program

○ Unit Project 2-2-2: Water Policy and Legislation for Responding to Climate Change
- Analysis on the status of current researches in water management and improvement of water management laws for climate change adaptation
- Suggestion on water legal system improvement and guidelines for legislation improvement in climate change adaptation
- Development of the road map of national water management strategies for climate change adaptation

○ Unit Project 2-2-3: Socioeconomic Impact Assessment of Water Management According to Climate Change
- Estimating flood damage costs caused by climate change by analyzing correlation between rainfall events and damages
- Estimating drought damage costs caused by climate change by the CGE (Computable General Equilibrium) model

Ⅴ. Applications

○ Unit Project 1-1-1: Standardization and Projection of Long-term Hydrologic Scenarios According to Climate Change
- Production and provision of the climate change scenarios to other unit project
- Provision of the base data for national climate change adaptation plans
- Guidelines for establishing long-term water resources management and plans considering climate change

○ Unit Project 1-1-2: Medium-term Hydrologic Projections According to Climate Change
- Medium-term hydrologic analysis and projections using historical data
- Supplementary data making up for projection uncertainty based on GCM scenarios
- Assessment of changes in runoff by mid-term hydrologic projections using trend analysis and elasticity analysis

○ Unit Project 1-1-3: Spatial and Temporal Downscaling of Watershed Unit
- Application to daily rainfall projection
- Application to water resources projections according to extreme drought
- Application to long-term hydrologic process assessment
- Application to regional water balance projection

○ Unit Project 1-2-1: Development of Extreme Flood Projection Technique
- Basic data for estimating future damage costs caused by flood.
- Basic data for establishing the guidelines related to flood estimation
- Basic data for climate change adaptation measures

○ Unit Project 1-2-2: Water Resources Outlook Considering Extreme Drought
- Establishment of practical adaptation strategies for extreme drought management
- Establishment of the drought management plan reflecting characteristics of each watershed and administrative district
- Quantitative analysis on 30-year drought
- Establishment of the water supply reliability considering extreme droughts under climate change

○ Unit Project 1-2-3: Nonstationary Hydrologic Model Interpretation Considering Climate Change
- Guidelines for modification of the existing river design criteria considering extreme events
- Minimization of flood damages by estimated design rainfall.
- Basic data for developing an inundation map and flood model

○ Unit Project 2-1-1: Evaluation of Korean Hydrologic Process According to Climate Change
- Application to analyze changes in future water resources in Korea under climate change
- Application to the establish water resources management strategies responding to climate change in Korea

○ Unit Project 2-1-2: Water Balance Projection According to Climate Change
- Application of water balance projections considering climate change to establish a long-term national water resources management plan
- Application to future researches on water resources under climate change using the standard climate scenarios in Korea
- Provision of data and materials efficiently for future researches on climate change

○ Unit Project 2-1-3: Quantification of Hydrologic Projection Uncertainty According to Climate Change
- Application of newly developed combining techniques to other relative researches on climate change
- Increase in the efficiency of water resources management in Korea by analyzing and quantifying uncertainties in hydrologic projections under climate change

○ Unit Project 2-2-1: Hydrologic Variation Impact Assessment and Structure Impact Analysis According to Climate Change

- Application of the optimal design technique to design future hydraulic structures regarding climate change
- Application of the fragility curves to modify the existing design criteria with quantitative analysis
- Simplification of the input data for developing hydraulic structure management programs

○ Unit Project 2-2-2: Water Policy and Legislation for Responding to Climate Change
- Basic data for the establishing future national adaptation strategies responding to climate change
- Application to the modification and improvement of water legal system for climate change adaptation
- Application of the road map to establish national water management strategies for climate change adaptation

○ Unit Project 2-2-3: Socioeconomic Impact Assessment of Water Management According to Climate Change
- Setting up the priority of the national budget allocation to prepare the climate change
- Establishment of regional disaster prevention plans and water management policies

CONTENTS

Chapter 1 INTRODUCTION ····· 1

Section 1 Objectives and Necessities ····· 1
Section 2 Scope ····· 2
1. Standardization and Projection of Long-term Hydrologic Scenarios According to Climate Change ····· 2
2. Medium-term Hydrologic Projections According to Climate Change ····· 3
3. Spatial and Temporal Downscaling of Watershed Unit ····· 4
4. Development of Extreme Flood Projection Technique ····· 5
5. Water Resources Outlook Considering Extreme Drought ····· 6
6. Nonstationary Hydrologic Model Interpretation Considering Climate Change ····· 7
7. Evaluation of Korean Hydrologic Process According to Climate Change ····· 9
8. Water Balance Projection According to Climate Change ····· 10
9. Quantification of Hydrologic Projection Uncertainty According to Climate Change ····· 11
10. Hydrologic Variation Impact Assessment and Structure Impact Analysis According to Climate Change ····· 12
11. Water Policy and Legislation for Responding to Climate Change ····· 13
12. Socioeconomic Impact Assessment of Water Management According to Climate Change ····· 14

Chapter 2 PRESENT STATUS OF RESEARCH AND TECHNOLOGY ····· 15

Section 1 Standardization and Projection of Long-term Hydrologic Scenarios According to Climate Change ····· 15
Section 2 Medium-term Hydrologic Projections According to Climate Change ····· 27
Section 3 Spatial and Temporal Downscaling of Watershed Unit ····· 29
Section 4 Development of Extreme Flood Projection Technique ····· 32
Section 5 Water Resources Outlook Considering Extreme Drought ····· 42
Section 6 Nonstationary Hydrologic Model Interpretation Considering Climate Change ····· 51
Section 7 Evaluation of Korean Hydrologic Process According to Climate Change ····· 57
Section 8 Water Balance Projection According to Climate Change ····· 66
Section 9 Quantification of Hydrologic Projection Uncertainty According to Climate Change · 67
Section 10 Hydrologic Variation Impact Assessment and Structure Impact Analysis According to Climate Change ····· 69
Section 11 Water Policy and Legislation for Responding to Climate Change ····· 70
Section 12 Socioeconomic Impact Assessment of Water Management According to Climate Change ····· 71

Chapter 3 CONTENTS AND RESULT OF THE STUDY ····· 73

Section 1 Overall ····· 73
1. Flow chart of research ····· 73
2. Summary of overall research results ····· 76
3. Representative GCM scenarios on the Korean peninsula for water resources ····· 77
4. Launching of research team software ····· 78
5. Establishment of a research team database ····· 80
6. Establishment of a research team Warehouse ····· 81
7. Key technology for each unit task ····· 83
8. Application of research findings ····· 88
Section 2 Standardization and Projection of Hydrologic Scenarios According to Climate Change ·· 90
1. Introduction ····· 90
2. Standardization and projection of long-term hydrologic scenarios according to climate change ····· 91
3. Medium-term hydrologic projections according to climate change ····· 122
4. Spatial and temporal downscaling of watershed unit ····· 150
5. Evaluation of korean hydrologic process according to climate change ····· 166
6. Quantification of Hydrologic Projection Uncertainty According to Climate Change ····· 181
7. Conclusion ····· 202
Section 3 Projection of extreme hydrologic events according to climate change ····· 204
1. Introduction ····· 204
2. Development of extreme flood projection technique ····· 206
3. Nonstationary Hydrologic Model Interpretation Considering Climate Change ····· 236
4. Water Resources Outlook Considering Extreme Drought ····· 266
5. Conclusions ····· 293
Section 4 Vulnerability assessment of climate change on the water resources ····· 295
1. Introduction ····· 295
2 Water Balance Projection According to Climate Change ····· 297
3. Hydrologic Variation Impact Assessment and Structure Impact Analysis According to Climate Change ····· 329
4 Socioeconomic Impact Assessment of Water Management According to Climate Change355
5 Conclusion ····· 390
Section 5 Establishment of adaptation strategy preparing climate change ····· 398
1. Introduction ····· 398
2. Water Policy and Legislation for Responding to Climate Change ····· 399
3. Conclusion ····· 431

Chapter 4 ACHIEVEMENT AND CONTRIBUTION ····· 432

1. Standardization and Projection of Long-term Hydrologic Scenarios According to Climate Change ····· 432

2. Medium-term Hydrologic Projections According to Climate Change ····· 433
3. Spatial and Temporal Downscaling of Watershed Unit ····· 434
4. Development of Extreme Flood Projection Technique ····· 435
5. Water Resources Outlook Considering Extreme Drought ····· 436
6. Nonstationary Hydrologic Model Interpretation Considering Climate Change ····· 438
7. Evaluation of Korean Hydrologic Process According to Climate Change ····· 440
8. Water Balance Projection According to Climate Change ····· 441
9. Quantification of Hydrologic Projection Uncertainty According to Climate Change ····· 442
10. Hydrologic Variation Impact Assessment and Structure Impact Analysis According to Climate Change ····· 443
11. Water Policy and Legislation for Responding to Climate Change ····· 444
12. Socioeconomic Impact Assessment of Water Management According to Climate Change ····· 445

Chapter 5 APPLICATION PLAN OF THE STUDY RESULTS ····· 446

1. Standardization and Projection of Long-term Hydrologic Scenarios According to Climate Change ····· 446
2. Medium-term Hydrologic Projections According to Climate Change ····· 446
3. Spatial and Temporal Downscaling of Watershed Unit ····· 446
4. Development of Extreme Flood Projection Technique ····· 447
5. Water Resources Outlook Considering Extreme Drought ····· 447
6. Nonstationary Hydrologic Model Interpretation Considering Climate Change ····· 447
7. Evaluation of Korean Hydrologic Process According to Climate Change ····· 448
8. Water Balance Projection According to Climate Change ····· 448
9. Quantification of Hydrologic Projection Uncertainty According to Climate Change ····· 449
10. Hydrologic Variation Impact Assessment and Structure Impact Analysis According to Climate Change ····· 450
11. Water Policy and Legislation for Responding to Climate Change ····· 451
12. Socioeconomic Impact Assessment of Water Management According to Climate Change ····· 453

Chapter 6 COLLECTED INFORMATION FROM FOREIGN TECHNICAL LITERATURE ····· 454

1. Standardization and Projection of Long-term Hydrologic Scenarios According to Climate Change ····· 454
2. Medium-term Hydrologic Projections According to Climate Change ····· 455
3. Spatial and Temporal Downscaling of Watershed Unit ····· 456
4. Development of Extreme Flood Projection Technique ····· 457
5. Water Resources Outlook Considering Extreme Drought ····· 458
6. Nonstationary Hydrologic Model Interpretation Considering Climate Change ····· 464
7. Evaluation of Korean Hydrologic Process According to Climate Change ····· 465
8. Water Balance Projection According to Climate Change ····· 465

9. Quantification of Hydrologic Projection Uncertainty According to Climate Change ····· 466
10. Hydrologic Variation Impact Assessment and Structure Impact Analysis According to Climate Change ····· 467
11. Water Policy and Legislation for Responding to Climate Change ····· 468
12. Socioeconomic Impact Assessment of Water Management According to Climate Change ····· 469

Chapter 7 Reference ····· 475

목 차

제 1 장 서론 ····· 1

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 1
제 2 절 연구목표 및 내용 ····· 2
1. 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망 ····· 2
2. 기후변화에 따른 중단기 수문전망 ····· 3
3. 유역단위 시공간 스케일 상세화 ····· 4
4. 극한 홍수량의 전망 기술 개발 ····· 5
5. 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망 ····· 6
6. 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석 ····· 7
7. 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가 ····· 9
8. 기후변화에 따른 물수급 전망 ····· 10
9. 기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 정량화 ····· 11
10. 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석 ····· 12
11. 기후변화를 대비한 법제도 개선 및 수자원정책 제시 ····· 13
12. 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가 ····· 14

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 15

1. 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망 ····· 15
2. 기후변화에 따른 중단기 수문전망 ····· 27
3. 유역단위 시공간적 스케일 상세화 ····· 29
4. 극한홍수량 전망 기술 개발 ····· 32
5. 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망 ····· 42
6. 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석 ····· 51
7. 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가 ····· 57
8. 기후변화에 따른 물수급 전망 ····· 66
9. 기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 정량화 ····· 67
10. 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석 ····· 69
11. 기후변화를 대비한 법제도 개선 및 수자원정책 제시 ····· 70
12. 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가 ····· 71

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 73

제 1 절 연구단 총괄 ····· 73
1. 연구흐름도 ····· 73
2. 연구 성과 총괄 요약 ····· 76
3. 수자원 분야 대표 GCM 시나리오 제시 ····· 77
4. 연구단 소프트웨어 출시 ····· 78
5. 연구단 Database 구축 ····· 80

6. 연구단 Warehouse 및 표출시스템 구축 ····· 81
7. 단위과제별 핵심기술 ····· 83
8. 연구내용 적용 ····· 88
제 2 절 기후변화에 따른 수문시나리오 표준화 및 전망 ····· 90
1. 서론 ····· 90
2. 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망 ····· 91
3. 기후변화에 따른 중단기 수문전망 ····· 122
4. 유역단위 시공간 스케일 상세화 ····· 150
5. 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가 ····· 166
6. 기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 정량화 ····· 181
7. 결론 ····· 202
제 3 절 기후변화에 따른 극치 수문전망 ····· 204
1. 서론 ····· 204
2. 극한 홍수량의 전망 기술 개발 ····· 206
3. 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석 ····· 236
4. 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망 ····· 266
5. 결론 ····· 293
제 4 절 기후변화에 따른 수자원 취약성 평가 ····· 295
1. 서론 ····· 295
2. 기후변화에 따른 물수급 전망 ····· 297
3. 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석 ····· 329
4. 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가 ····· 355
5. 결론 ····· 390
제 5 절 기후변화를 대비한 적응대책 수립 ····· 398
1. 서론 ····· 398
2. 기후변화를 대비한 법제도 개선 및 수자원정책 제시 ····· 399
3. 결론 ····· 431

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 432

1. 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망 ····· 432
2. 기후변화에 따른 중단기 수문전망 ····· 433
3. 유역단위 시공간적 스케일 상세화 ····· 434
4. 극한홍수량 전망 기술 개발 ····· 435
5. 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망 ····· 436
6. 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석 ····· 438
7. 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가 ····· 440
8. 기후변화에 따른 물수급 전망 ····· 441
9. 기후변화를 고려한 수문 전망 과정의 불확실성 정량화 ····· 442
10. 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석 ····· 443
11. 기후변화를 대비한 법제도 개선 및 수자원정책 제시 ····· 444
12. 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가 ····· 445

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 446

1. 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망 ····· 446
2. 기후변화에 따른 중단기 수문전망 ····· 446
3. 유역단위 시공간적 스케일 상세화 ····· 446
4. 극한홍수량 전망 기술 개발 ····· 447
5. 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망 ····· 447
6. 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석 ····· 447
7. 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가 ····· 448
8. 기후변화에 따른 물수급 전망 ····· 448
9. 기후변화를 고려한 수문 전망 과정의 불확실성 정량화 ····· 449
10. 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석 ····· 450
11. 기후변화를 대비한 법제도 개선 및 수자원정책 제시 ····· 451
12. 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가 ····· 453

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 454

1. 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망 ····· 454
2. 기후변화에 따른 중단기 수문전망 ····· 455
3. 유역단위 시공간적 스케일 상세화 ····· 456
4. 극한홍수량 전망 기술 개발 ····· 457
5. 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망 ····· 458
6. 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석 ····· 464
7. 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가 ····· 465
8. 기후변화에 따른 물수급 전망 ····· 465
9. 기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 정량화 ····· 466
10. 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석 ····· 467
11. 기후변화를 대비한 법제도 개선 및 수자원정책 제시 ····· 468
12. 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가 ····· 469

제 7 장 참고문헌 ····· 475

표 목 차

Table 1.2.1 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(1-1-1세부과제) ····· 2
Table 1.2.2 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(1-1-2세부과제) ····· 3
Table 1.2.3 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(1-1-3세부과제) ····· 4
Table 1.2.4 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(1-2-1세부과제) ····· 5
Table 1.2.5 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(1-2-2세부과제) ····· 6
Table 1.2.6 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(1-2-3세부과제) ····· 8
Table 1.2.7 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(2-1-1세부과제) ····· 9
Table 1.2.8 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(2-1-2세부과제) ····· 10
Table 1.2.9 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(2-1-3세부과제) ····· 11
Table 1.2.10 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(2-2-1세부과제) ····· 12
Table 1.2.11 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(2-2-2세부과제) ····· 13
Table 1.2.12 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(2-2-3세부과제) ····· 14
Table 2.1.1 국내 기후변화 수자원 영향평가 사례 조사 ····· 24
Table 2.1.2 국가별 수자원 영향평가 비교 ····· 26
Table 2.1.3 각 기술별 기술 요소 적용 검토 ····· 28
Table 2.1.4 상세화기법 비교 (Wilby, 1998) ····· 30
Table 2.1.5 Classification of statistical downscaling (Wilby, 2004) ····· 31
Table 2.1.6 문헌 조사 범위 ····· 32
Table 2.1.7 기후변화를 고려한 극한수문량 전망 - 국외 연구동향 ····· 34
Table 2.1.8 기후변화를 고려한 극한수문량 전망 - 국내 연구동향 ····· 41
Table 2.1.9 문헌조사에 사용된 저널의 가뭄지수별 활용비율 ····· 45
Table 2.1.10 연구보고서별 가뭄관련 연구내용 비교표 ····· 46
Table 2.1.11 세부별 국내 주요업체 현황 ····· 51
Table 2.1.12 세부별 국내 전문가 및 연구기관 현황 ····· 51
Table 2.1.13 국내 기술개발 수준 ····· 52
Table 2.1.14 국내 인프라 수준 ····· 52
Table 2.1.15 강수량 자료의 빈도해석과 관련된 국내외 연구문헌 조사범위 ····· 53
Table 2.1.16 국외 현황 ····· 53
Table 2.1.17 국외 문헌 조사 범위 ····· 58
Table 2.1.18 국외 문헌동향 목록 정리 ····· 59
Table 2.1.19 국내 문헌 조사 범위 ····· 63
Table 2.1.20 국내 문헌동향 목록 정리 ····· 63
Table 2.1.21 기후변화 적응 수자원정책 연구의 국제비교 및 국내비교 ····· 70
Table 3.1.1 CCAPH-K 최종 성과물 ····· 76
Table 3.1.2 CCAPH-K에서 기후·수문 전망에 적용한 GCM ····· 77
Table 3.1.3 CCAPH-K Database 구성과 내용 ····· 80
Table 3.1.4 웨어하우스 기능정의서 ····· 81
Table 3.1.5 기능에 대한 테이블 정의서 ····· 82
Table 3.1.6 단위과제별 연구내용 및 적용유역 ····· 88
Table 3.2.1 고해상도 및 저해상도 기반의 기후시나리오와 관측치의 극한 기후지수 ····· 97
Table 3.2.2 통계적·역학적 상세화(A2, ECHO-G/S) 강수인자의 과거 대비 미래의 변화 ····· 99

Table 3.2.3 최종 Score index를 이용한 GCM 선정 결과 ····· 109
Table 3.2.4 SRES 기반의 계절별 강수량 변화(%) ····· 113
Table 3.2.5 대상유역의 검정 및 보정기간 분류 ····· 114
Table 3.2.6 유역별 PRMS, SWAT, SLURP 매개변수 검보정 결과 ····· 114
Table 3.2.7 3개 유역의 매개변수 지역화에 따른 유출모의 결과 ····· 115
Table 3.2.8 NDVI와 기온과 강수의 다중 회귀식 ····· 115
Table 3.2.9 기존 사업의 수문전망 결과와 금회 산정된 수문전망 결과와의 비교 ····· 119
Table 3.2.10 Trend analysis data of Korea climate change ····· 128
Table 3.2.11 Result of areal average precipitation : elasticity analysis of long-term runoff 136
Table 3.2.12 Results of areal average precipitation in reservoir: elastisity analysis of inflow 138
Table 3.2.13 Results of analysis of observed data using trend and elasticity method ····· 143
Table 3.2.14 Results in rate of hydrological factors for mid-term prediction though output of trend analysis, (%) ····· 143
Table 3.2.15 Results from rate of runoff of mid-term prediction though output of elasticity analysis (%) ····· 144
Table 3.2.16 Results from rate of runoff of mid-term prediction though output of trend analysis and elasticity method, (%) ····· 147
Table 3.2.17 주성분 분석에 사용한 고유벡터(Eigenvector)값 (비홍수기) ····· 154
Table 3.2.18 인공신경망 학습 결과 ····· 155
Table 3.2.19 인공신경망 검증 결과 ····· 155
Table 3.2.20 기후변화 상세화 단계별 모의값 비교(A1B) ····· 156
Table 3.2.21 예측시나리오별 연평균 강우량 추세분석 결과 ····· 158
Table 3.2.22 예측시나리오별 홍수기 강우 추세분석 결과 ····· 159
Table 3.2.23 예측시나리오별 비홍수기 강우 추세분석 결과 ····· 159
Table 3.2.24 예측시나리오별 무강우 일수 추세분석 결과 ····· 161
Table 3.2.25 예측시나리오별 일 최대강우량 추세분석 결과 ····· 161
Table 3.2.26 시범적용 개요 ····· 170
Table 3.2.27 모형의 매개변수 ····· 171
Table 3.2.28 모형의 보정에 의해 결정된 매개변수 ····· 172
Table 3.2.29 모형의 토양수분 검보정 결과 ····· 174
Table 3.2.30 CNR A2, A1B, B1 시나리오의 시기별 변화 분석 ····· 176
Table 3.2.31 CSR A2, A1B, B1 시나리오의 시기별 변화 분석 ····· 176
Table 3.2.32 MIU A2, A1B, B1 시나리오의 시기별 변화 분석 ····· 177
Table 3.2.33 UKC A2, A1B, B1 시나리오의 시기별 변화 분석 ····· 177
Table 3.2.34 서울 지역 GCM 상관계수 ····· 184
Table 3.2.35 MSE ····· 187
Table 3.2.36 혼합 모형의 IGN, CRPS, coverage probability, coverage width ····· 193
Table 3.2.37 GA, S-BMA, L-BMA의 CRPS, IGN, coverage probability, coverage width ····· 194
Table 3.2.38 임실지역 불확실성 요인별 분해 기술 적용 결과 ····· 197
Table 3.2.39 A2 시나리오 강수량 전망 ····· 198
Table 3.2.40 A2 시나리오 기온 전망 ····· 199
Table 3.2.41 B1 시나리오 강수량 전망 ····· 199
Table 3.2.42 B1 시나리오 기온 전망 ····· 199

Table 3.2.43 RCP 8.5 시나리오 강수량 전망 ····· 200
Table 3.2.44 RCP 8.5 시나리오 기온 전망 ····· 200
Table 3.3.1 한강 유역 강우관측소 현황 ····· 210
Table 3.3.2 금강 유역 강우관측소 현황 ····· 211
Table 3.3.3 낙동강 유역 강우관측소 현황 ····· 212
Table 3.3.4 섬진강 유역 강우관측소 현황 ····· 213
Table 3.3.5 영산강 유역 강우관측소 현황 ····· 213
Table 3.3.6 본 연구에 사용된 GCMs 정보 ····· 213
Table 3.3.7 유역별 지역 구분 결과 ····· 214
Table 3.3.8 5대강 유역의 전망기간별 극한홍수량 증가율(%) (지속기간 24시간, 재현기간 100년) ····· 222
Table 3.3.9 5대강 유역의 전망기간별 극한홍수량 증가율(%) (지속기간 24시간, 재현기간 200년) · ····· 222
Table 3.3.10 Results of Trend and Stationarity Tests of 55 Weather Stations ····· 238
Table 3.3.11 Probable Precipitation Amount and Ratio of Increase for Target Years (1 hour) ··· ····· 244
Table 3.3.12 Probable Precipitation Amount and Ratio of Increase for Target Years (24 hour) · ····· 245
Table 3.3.13 Probable Precipitation using linear Regression Analysis for Target Year in Seoul ····· 252
Table 3.3.14 Probable Precipitation using logistic Regression Analysis for Target Year in Seoul ····· 253
Table 3.3.15 Probable Precipitation using RPM for Target Year in Seoul and Incheon ····· 254
Table 3.3.16 Probable Precipitation using Power Model for Target Year in Seoul ····· 255
Table 3.3.17 Rate of increase comparing stationary about A2 scenario (%) ····· 258
Table 3.3.18 Rate of increase comparing stationary about A1B scenario (%) ····· 261
Table 3.3.19 Rate of increase comparing stationary about B1 scenario (%) ····· 264
Table 3.3.20 20개 대권역의 유역명과 유역면적 ····· 267
Table 3.3.21 본 연구에 사용된 4개 GCM의 정보 ····· 268
Table 3.4.1 물안보과제의 물 부족량 전망결과 ····· 299
Table 3.4.2 GCM Information ····· 303
Table 3.4.3 최대 물부족량 산정을 위한 통계특성치 ····· 307
Table 3.4.4 2020s 한반도 평균 물부족량 전망 결과(m3/년) ····· 308
Table 3.4.5 2020s 한반도 최대 물부족량 전망 결과(m3/년) ····· 309
Table 3.4.6 2050s 한반도 평균 물부족량 전망 결과(m3/년) ····· 311
Table 3.4.7 2050s 한반도 최대 물부족량 전망 결과(m3/년) ····· 312
Table 3.4.8 2080s 한반도 평균 물부족량 전망 결과(m3/년) ····· 314
Table 3.4.9 2080s 한반도 최대 물부족량 전망 결과(m3/년) ····· 315
Table 3.4.10 한반도 물부족량 전망결과 종합 ····· 316
Table 3.4.11 GCM 유량 시나리오 직접 입력에 따른 물부족량 산정 결과 (사례: 한강, A2) ····· 323
Table 3.4.12 기존 연구 방법론과 본 방법론의 물부족량 전망 결과 비교(사례: 한강, A2) ····· 324
Table 3.4.13 4대강에 신규 건설된 보와 개수 ····· 325
Table 3.4.14 4대강 사업에 따른 한반도 물부족량 전망결과 비교 ····· 326

Table 3.4.15 기준별 수공구조물의 분류 ····· 331
Table 3.4.16 하천수계별 목적별 댐 현황 ····· 331
Table 3.4.17 각 구조물별 안정성 검토 방법 ····· 332
Table 3.4.18 한강 유역 중력식 콘크리트 댐 제원 ····· 334
Table 3.4.19 규모에 따른 간략한 제원 ····· 334
Table 3.4.20 서울지역 지반별 지반정수 범위 ····· 335
Table 3.4.21 태양복사에 따른 빙압력 ····· 337
Table 3.4.22 대상 유역 제방 제원 ····· 339
Table 3.4.23 대상유역 지반 구성 현황 ····· 341
Table 3.4.24 대상 유역 지반 물성치 ····· 342
Table 3.4.25 수위에 따른 콘크리트 중력식 댐 민감도 분석 ····· 345
Table 3.4.26 수위에 따른 제방 민감도 분석 ····· 348
Table 3.4.27 댐 설계기준 개선안 제안 방향(예) ····· 353
Table 3.4.28 산업별 분류 ····· 378
Table 3.4.29 권역별 분류 ····· 378
Table 3.4.30 수도권의 수자원 부족 시나리오(단위 : 106 m3) ····· 379
Table 3.4.31 충청권의 수자원 부족 시나리오(단위 : 106 m3) ····· 379
Table 3.4.32 전라권의 수자원 부족 시나리오(단위 : 106 m3) ····· 380
Table 3.4.33 경상권의 수자원 부족 시나리오(단위 : 106 m3) ····· 380
Table 3.4.34 분석시나리오 설계 ····· 381
Table 3.4.35 한반도 수자원 전망결과 종합(A2) ····· 392
Table 3.4.36 한반도 수자원 전망결과 종합(B1) ····· 393
Table 3.4.37 중권역별 GCMs의 평균 수자원 전망 결과 ····· 394
Table 3.5.1 기후변화관련 영국 국내법 제정현황 ····· 402
Table 3.5.2 물관리지침의 실행계획 ····· 404
Table 3.5.3 물관리지침의 영국 국내법 적용 ····· 405
Table 3.5.4 기후변화에 대비한 정부의 주요 물관리 시스템 정책현황 ····· 409
Table 3.5.5 국내외 기후변화 적응 물관리 정책 비교 ····· 412
Table 3.5.6 프랑스 물 관련 거버넌스의 수준 ····· 415
Table 3.5.7 기후변화 적응 법제도 개편방향 가이드라인 ····· 417
Table 4.1.1 연구개발목표 달성도(단위과제 1-1-1) ····· 432
Table 4.1.2 연구개발목표 달성도(단위과제 1-1-2) ····· 433
Table 4.1.3 연구개발목표 달성도(단위과제 1-1-3) ····· 434
Table 4.1.4 연구개발목표 달성도(단위과제 1-2-1) ····· 435
Table 4.1.5 연구개발목표 달성도(단위과제 1-2-2) ····· 437
Table 4.1.6 연구개발목표 달성도(단위과제 1-2-3) ····· 439
Table 4.1.7 연구개발목표 달성도(단위과제 2-1-1) ····· 440
Table 4.1.8 연구개발목표 달성도(단위과제 2-1-2) ····· 441
Table 4.1.9 연구개발목표 달성도(단위과제 2-1-3) ····· 442
Table 4.1.10 연구개발목표 달성도(단위과제 2-2-1) ····· 443
Table 4.1.11 연구개발목표 달성도(단위과제 2-2-2) ····· 444
Table 4.1.12 연구개발목표 달성도(단위과제 2-2-3) ····· 445
Table 5.1.1 댐 설계기준 개선안 제안 방향(예) ····· 450

Table 6.1.1 주요 연구내용 및 적용기술 ····· 455
Table 6.1.2 SDSM 3.1의 주요기능 (Wilby, 2004) ····· 456
Table 6.1.3 예측인자와 상세화기법(San-Martin, D et al., 2008) ····· 456
Table 6.1.4 물 산업연관표에 있어서의 투입계수 행렬 A의 구조 ····· 473

그 림 목 차

Fig. 2.1.1 미국 워싱턴 주의 기후변화에 의한 각 분야 평가 기법 ····· 16
Fig. 2.1.2 미국 캘리포니아 주의 기후변화에 의한 수자원 영향 평가 기법 ····· 16
Fig. 2.1.3 미국의 수문시나리오 생산 과정 ····· 17
Fig. 2.1.4 UKCP09의 기후 시나리오 및 각종 정보 제공 현황 ····· 18
Fig. 2.1.5 National Assessment of Change in River Flows 연구 수행 절차 ····· 18
Fig. 2.1.6 The Sustainable Yield Projects 수행 절차 ····· 19
Fig. 2.1.7 호주의 기후변화 수자원 영향평가 연구 모식도 ····· 20
Fig. 2.1.8 일본의 기후통일 시나리오 이용 ····· 21
Fig. 2.1.9 21세기 기후변화 예측 혁신 프로그램 개요 및 시나리오 생성 과정 ····· 21
Fig. 2.1.10 지구온난화에 관련된 정책지원과 계몽 및 보급을 위한 기후변화 시나리오에 관한 종합적 연구 모식도 ····· 22
Fig. 2.1.11 일본의 기후시나리오 생성과 수문시나리오 생성 과정 ····· 23
Fig. 2.1.12 국가개발연구사업의 기후변화 수자원 영향평가 ····· 25
Fig. 2.1.13 스케일상세화 기법의 분류 및 적용빈도 조사 결과 ····· 30
Fig. 2.1.14 문헌조사에 사용된 저널의 가뭄지수 사용비율 ····· 46
Fig. 2.1.15 시간 축 방향으로 자료를 조합하는 방법 ····· 49
Fig. 2.1.16 시나리오 축 방향으로 자료를 조합하는 방법 ····· 49
Fig. 2.1.17 자료처리 목적 별로 분류한 가뭄빈도해석 연구동향의 일반론 ····· 50
Fig. 2.1.18 국외에서의 선행 연구 연별 분류 ····· 58
Fig. 2.1.19 국외에서의 선행 연구 국가별 및 모형별 분류 ····· 59
Fig. 2.1.20 국내에서의 선행 연구 연별 분류 ····· 63
Fig. 2.1.21 국내에서의 선행 연구 모형별 분류 ····· 65
Fig. 3.1.1 CCAPH-K 1세부 연구 흐름도 ····· 74
Fig. 3.1.2 CCAPH-K 2세부 연구 흐름도 ····· 74
Fig. 3.1.3 CCAPH-K Database 화면 ····· 80
Fig. 3.1.4 웨어하우스 및 표출시스템의 화면구성 ····· 82
Fig. 3.2.1 Relative Variations(%) of Mean Runoff for 2015s, 2045s and 2075s relative to the Reference Period under the A2 Scenario in Korean Sub-Basins (Bae et al., 2008b) ····· 92
Fig. 3.2.2 Relative Variations (%) of Mean Runoff for 2020s, 2050s and 2080s relative to the Reference Period (배덕효 등, 2011) ····· 93
Fig. 3.2.3 기후 및 수문시나리오 표준화 개념 ····· 94
Fig. 3.2.4 기후 및 수문시나리오 생산 표준 기법 ····· 94
Fig. 3.2.5 수문시나리오 생산의 각 과정별 일반적인 고려사항 ····· 95
Fig. 3.2.6 수문시나리오의 표준 생산방안 도출을 위한 과정별 평가의 구성 ····· 96
Fig. 3.2.7 관측자료와 모의자료의 여름철(5월-9월) 시간대별 평균강수량의 비교 ····· 97
Fig. 3.2.8 통계적 기법을 통한 GCM 유용성 평가 기법 (Le and Bae, 2013) ····· 98
Fig. 3.2.9 Climate Change Factor Method을 이용한 확률홍수량 산정방법 ····· 101
Fig. 3.2.10 관측 및 모의자료를 통해 산정된 확률강우량의 절대상대오차 ····· 102
Fig. 3.2.11 기후변화에 따른 기후 및 수문 시나리오 생산 방안 ····· 103
Fig. 3.2.12 확률론적 불확실성 평가 기법 ····· 104

Fig. 3.2.13 서울과 대구 관측소의 일단위 강수량의 비교 ····· 109
Fig. 3.2.14 중권역별 관측 및 모의 월평균강수량의 비교 ····· 110
Fig. 3.2.15 SRES 기반의 과거 대비 미래기간(2020s, 2050s, 2080s)의 기온 변화 ····· 111
Fig. 3.2.16 SRES 기반의 과거 대비 미래기간(2020s, 2050s, 2080s)의 강수량 변화 ····· 112
Fig. 3.2.17 SRES 기반의 과거 대비 미래기간(2020s, 2050s, 2080s)의 증발산량 변화 ····· 116
Fig. 3.2.18 SRES 기반의 과거 대비 미래기간(2020s, 2050s, 2080s)의 유출량 변화 ····· 117
Fig. 3.2.19 SRES A2 기반의 계절별 유출량의 변화 ····· 118
Fig. 3.2.20 Outline of used data for trend analysis ····· 127
Fig. 3.2.21 Flow chart of trend analysis of meteorological factors ····· 127
Fig. 3.2.22 Selected 24 sites in five rivers of Korea ····· 129
Fig. 3.2.23 Flow chart of this study ····· 130
Fig. 3.2.24 Results of trend analysis of temperature ····· 130
Fig. 3.2.25 Results of trend analysis of temperature in year and seasonal ····· 131
Fig. 3.2.26 Results of sen test analysis of temperature in year and seasonal ····· 132
Fig. 3.2.27 Results of trend analysis of precipitation in year time-series ····· 133
Fig. 3.2.28 Results of trend analysis of precipitation in year and seasonal ····· 134
Fig. 3.2.29 Results of sen test slope analysis of precipitation in year time-series ····· 134
Fig. 3.2.30 Spatial characteristic of areal average precipitation results: ····· 135
elasticity analysis of long-term runoff ····· 135
Fig. 3.2.31 Spatial characteristic of areal average precipitation results: ····· 137
elasticity analysis of inflow ····· 137
Fig. 3.2.32 Comparison with results of observed data and projection using trend analysis results on temperature ····· 139
Fig. 3.2.33 Comparison with results of observed data and projection using trend analysis results on precipitation ····· 140
Fig. 3.2.34 Comparison with results of observed data and projection using trend analysis results on annual maximum rainfall ····· 141
Fig. 3.2.35 Comparison with results of observed data and projection using elasticity analysis results ····· 142
Fig. 3.2.36 Resulting in prediction of hydrological factors at each of the sites in Han River 145
Fig. 3.2.37 Resulting in prediction of hydrological factors at each of the sites in Nakdong River ····· 146
Fig. 3.2.38 Resulting in prediction of hydrological factors at each of the sites in Geum River ·· ····· 146
Fig. 3.2.39 Resulting in prediction of hydrological factors at each of the sites in Sumjin River ····· 147
Fig. 3.2.40 Resulting in prediction of hydrological factors at each of the sites in Youngsan River ····· 147
Fig. 3.2.41 Rate of prediction of runoff over mid-term using elasticity method though 95% confidence limit analysis, (%) ····· 148
Fig. 3.2.42 ARDAS (Assembled Regional climate Downscaling & Analysis System) ····· 151
Fig. 3.2.43 ARDAS 소프트웨어 시작화면 ····· 151
Fig. 3.2.44 ARDAS 소프트웨어 메인화면 ····· 151

Fig. 3.2.45 ARDAS 소프트웨어 메인메뉴 버튼 ····· 152
Fig. 3.2.46 CGCM3.1/T47의 격자형태(좌)와 CGCM3.1/T63의 격자형태(우) ····· 153
Fig. 3.2.47 기후변화 상세화 단계별 모의값 비교(A1B) ····· 157
Fig. 3.2.48 예측시나리오별 연평균 강우량 추세분석 결과 ····· 158
Fig. 3.2.49 예측시나리오별 홍수기 강우 추세분석 결과 ····· 160
Fig. 3.2.50 예측시나리오별 비홍수기 강우 추세분석 결과 ····· 160
Fig. 3.2.51 예측시나리오별 무강우 일수 추세분석 결과 ····· 162
Fig. 3.2.52 예측시나리오별 일 최대강우량 추세분석 결과 ····· 162
Fig. 3.2.53 2010년 레이더 강우를 이용한 매개변수 β 추정 결과 ····· 163
Fig. 3.2.54 Random Cascade 모형 상세화 결과 ····· 163
Fig. 3.2.55 본 연구의 흐름도 ····· 167
Fig. 3.2.56 분포형 모형의 구조 ····· 167
Fig. 3.2.57 현재 산림식생도와 예측된 산림식생도 검증 ····· 169
Fig. 3.2.58 시스템 개요 및 구성 ····· 169
Fig. 3.2.59 시범 적용한 용담댐유역도 ····· 171
Fig. 3.2.60 모형의 유출 검보정 ····· 173
Fig. 3.2.61 미래 평균강수량 및 평균기온 분포도 (RCP 시나리오) ····· 175
Fig. 3.2.62 용담댐 유역 미래 2040s와 2080s 유출, 증발산, 토양수분 변화량 분포도 ····· 175
Fig. 3.2.63 UKC 모델 결과에 따른 미래 남한 2040s와 2080s의 유출, 증발산, 토양수분 변화량 분포도 ····· 177
Fig. 3.2.64 식생변화 적용 전후의 분포형 수문순환 결과 비교 ····· 178
Fig. 3.2.65 관측값과 OLS의 예측값 ····· 185
FIg. 3.2.66 관측값과 Ridge의 예측값 ····· 185
Fig. 3.2.67 관측값과 Scaled Ridge의 예측값 ····· 186
Fig. 3.2.68 Sridge 잔차의 히스토그램 ····· 188
Fig. 3.2.69 기후변화 전망 도식화 ····· 195
Fig. 3.2.70 기후변화 전망과정의 분해 ····· 196
Fig. 3.3.1 지속기간별 모멘트 ····· 208
Fig. 3.3.2 모멘트 차수별 스케일 지수 ····· 208
Fig. 3.3.3 한강 유역의 동질 지역 ····· 215
Fig. 3.3.4 금강 유역의 동질 지역 ····· 216
Fig. 3.3.5 낙동강 유역의 동질 지역 ····· 217
Fig. 3.3.6 섬진강・영산강 유역의 동질 지역 ····· 218
Fig. 3.3.7 시단위 확률강우량 산정 방법 모식도 ····· 219
Fig. 3.3.8 전망 기간별 극한홍수량 증가율 (A2 시나리오 기반, 지속기간 24시간, 재현기간 100년) ····· 224
Fig. 3.3.9 전망 기간별 극한홍수량 증가율 (B1 시나리오 기반, 지속기간 24시간, 재현기간 100년) ····· 226
Fig. 3.3.10 전망 기간별 극한홍수량 증가율 (A1B 시나리오 기반, 지속기간 24시간, 재현기간 100년) ····· 228
Fig. 3.3.11 전망 기간별 극한홍수량 증가율 (A2 시나리오 기반, 지속기간 24시간, 재현기간 200년) ····· 230
Fig. 3.3.12 전망 기간별 극한홍수량 증가율 (B1 시나리오 기반, 지속기간 24시간, 재현기간 200

년) ····· 232
Fig. 3.3.13. 전망 기간별 극한홍수량 증가율 (A1B 시나리오 기반, 지속기간 24시간, 재현기간 200년) ····· 234
Fig. 3.3.14 Assemble means based on Observations and Climate Models ····· 240
Fig. 3.3.15 Power Model for Accumulative Average Extreme Precipitation of Han River and Deviation from Seoul (1 hour) ····· 241
Fig. 3.3.16 Power Model for Accumulative Average Extreme Precipitation of Han River and Deviation from Seoul (24 hour) ····· 241
Fig. 3.3.17 Linear Regression for Location and Scale Parameter (1 hour) ····· 242
Fig. 3.3.18 Linear Regression for Location and Scale Parameter (24 hour) ····· 242
Fig. 3.3.19 Probable Precipitation Amount at Seoul and Daegu for Target Years ····· 243
Fig. 3.3.20 Probable Precipitation Amount for Return Periods (2020 year) ····· 246
Fig. 3.3.21 Probable Precipitation Amount for Return Periods (2050 year) ····· 247
Fig. 3.3.22 Probable Precipitation Amount for Return Periods (2080 year) ····· 248
Fig. 3.3.23 Probable Precipitation Amount for Return Periods (2020 year) ····· 249
Fig. 3.3.24 Probable Precipitation Amount for Return Periods (2050 year) ····· 250
Fig. 3.3.25 Probable Precipitation Amount for Return Periods (2080 year) ····· 251
Fig. 3.3.26 Target year 2020s Probable Precipitation for Return periods (A2 scenario, 1 hour) ·· ····· 256
Fig. 3.3.27 Target year 2050s Probable Precipitation for Return periods (A2 scenario, 1 hour) ·· ····· 257
Fig. 3.3.28 Target year 2080s Probable Precipitation for Return periods (A2 scenario, 1 hour) ·· ····· 258
Fig. 3.3.29 Target year 2020s Probable Precipitation for Return periods (A1B scenario, 1 hour) ····· 259
Fig. 3.3.30 Target year 2050s Probable Precipitation for Return periods (A1B scenario, 1 hour) ····· 260
Fig. 3.3.31 Target year 2080s Probable Precipitation for Return periods (A1B scenario, 1 hour) ····· 261
Fig. 3.3.32 Target year 2020s Probable Precipitation for Return periods (B1 scenario, 1 hour) ·· ····· 262
Fig. 3.3.33 Target year 2050s Probable Precipitation for Return periods (B1 scenario, 1 hour) ·· ····· 263
Fig. 3.3.34 Target year 2080s Probable Precipitation for Return periods (B1 scenario, 1 hour) ·· ····· 264
Fig. 3.3.35 54개 기상관측소 및 대권역의 위치 ····· 267
Fig. 3.3.36 1976-2009년에 대한 관측자료 및 4개 GCM(CNRM:CM3, CSIRO:MK3, CONS:ECHOG, UKMO:HADCM)의 월강수량 시계열 ····· 268
Fig. 3.3.37 과거 관측자료를 이용하여 산정된 서울, 대구, 대전 및 광주관측소의 SPI(6) 시계열 (1976-2009년) ····· 270
Fig. 3.3.38 서울지점을 대상으로 한 4개 GCM의 미래 SPI 시계열 ····· 270
Fig. 3.3.39 가뭄우심도 작성방법 ····· 271
Fig. 3.3.40 수문학적 위험도 분석 결과(심한가뭄, SPI3≤-1.5, 금호강 유역) ····· 272

Fig. 3.3.41 기후변화에 의한 계절별 보통가뭄 월의 발생빈도 변화분석 ····· 275
Fig. 3.3.42 기후변화에 의한 계절별 가뭄심도의 변화분석 ····· 276
Fig. 3.3.43 관측자료와 CNRM 모델을 통해 산정된 SPI(6)를 이용하여 유도된 서울, 대전, 광주 관측소의 SDF곡선 ····· 278
Fig. 3.3.44 관측자료를 통해 작성된 재현기간 200년 빈도의 지속기간별 가뭄우심도 ····· 279
Fig. 3.3.45 관측자료를 통해 작성된 재현기간 200년 빈도의 지속기간별 가뭄우심도 ····· 280
Fig. 3.3.46 과거자료와 A2 시나리오를 적용한 4개 GCM 전망자료를 통해 작성된 가뭄우심도 283
Fig. 3.3.47 과거자료와 B1 시나리오를 적용한 4개 GCM 전망자료를 통해 작성된 가뭄우심도 · 284
Fig. 3.3.48 기후변화에 따른 가뭄우심지역의 변화(재현기간 200년, 지속기간 6개월) ····· 286
Fig. 3.3.49 과거 대비 미래 가뭄우심도의 평균 가뭄심도 변화율(재현기간 200년, 지속기간 6개월) ····· 287
Fig. 3.3.50 과거 자료에 대한 중권역별 수문학적 위험도 산정결과 (1974-2005년) ····· 288
Fig. 3.3.51 기후변화 시나리오에 대한 중권역별 수문학적 위험도 산정결과 (SPI3≤-1.5) ····· 289
Fig. 3.3.52 기후변화 시나리오에 대한 중권역별 수문학적 위험도 산정결과 (SPI6≤-1.5) ····· 289
Fig. 3.3.53 4개 GCMs의 평균 수문학적 위험도 분석결과 (SPI3≤-1.5) ····· 290
Fig. 3.3.54 4개 GCMs의 평균 수문학적 위험도 분석결과 (SPI6≤-1.5) ····· 291
Fig. 3.4.1 본 연구의 흐름도 ····· 300
Fig. 3.4.2 observed runoff/ GCM raw/ GCM QM 과거 30년평균 ····· 304
Fig. 3.4.3 5대강 유역 과거대비 미래 월별 유량변동 패턴 ····· 305
Fig. 3.4.4 한강 유역 평균 물부족 전망 결과 ····· 317
Fig. 3.4.5 낙동강 유역 평균 물부족 전망 결과 ····· 318
Fig. 3.4.6 금강 유역 평균 물부족 전망 결과 ····· 319
Fig. 3.4.7 영산·섬진강 유역 평균 물부족 전망 결과 ····· 320
Fig. 3.4.8 한반도 평균 물부족량 전망지도 ····· 321
Fig. 3.4.9 한반도 평균 물부족량 전망 과거대비 증감 ····· 322
Fig. 3.4.10 GCM 유량 시나리오 직접 입력에 따른 물부족량 산정(사례: 한강, 2020s, A2) ····· 323
Fig. 3.4.11 기존 기후변화 연구 방법론과 본 연구 방법론의 물부족량 전망 결과 Box-Whisker plot (2020s, 한강유역, A2) ····· 324
Fig. 3.4.12 기후변화에 의한 수공구조물 영향평가 및 시설물 영향분석 연구수행 절차 ····· 330
Fig. 3.4.13 양압력 ····· 336
Fig. 3.4.14 적용하중 모식도 ····· 336
Fig. 3.4.15 콘크리트 중력식 댐 모델링 mesh형상 ····· 338
Fig. 3.4.16 콘크리트 중력식 댐 거동형상 ····· 338
Fig. 3.4.17 대상유역 제방 단면도 ····· 340
Fig. 3.4.18 입도분포곡선 ····· 340
Fig. 3.4.19 제방 모델링 mesh 형상 ····· 343
Fig. 3.4.20 제방 모델링 일반적인 해석 결과 ····· 343
Fig. 3.4.21 일반적인 취약도 곡선 형태 ····· 344
Fig. 3.4.22 압축응력에 따른 규모별 콘크리트 중력식 댐 취약도 곡선 ····· 346
Fig. 3.4.23 인장응력 취약도 곡선 ····· 347
Fig. 3.4.24 동수경사를 이용한 사면 경사별 암반별 침투 취약도 곡선 ····· 349
Fig. 3.4.25 유출속도를 이용한 사면 경사별 암반별 침투 취약도 곡선 ····· 349
Fig. 3.4.26 동수경사를 이용한 사면경사별 침투 취약도 곡선 ····· 350

Fig. 3.4.27 유출속도를 이용한 사면경사별 침투 취약도 곡선 ····· 350
Fig. 3.4.28 일별 충주댐 유역 유출량 시나리오 ····· 351
Fig. 3.4.29 일별 충주댐 수위 시나리오 산정 ····· 351
Fig. 3.4.30 확률론적 충주댐 위험도 분석 예 (1980년대) ····· 351
Fig. 3.4.31 취약도곡선 기반 10년 주기 충주댐 파괴확률 산정 ····· 352
Fig. 3.4.32 취약도곡선 기반 10년 주기 극한강우시 충주댐 파괴확률 산정 ····· 352
Fig. 3.4.33 강우량을 고려한 수공구조물 관리 프로세스 예시(안) ····· 354
Fig. 3.4.34 일반균형모형의 소비구조 ····· 368
Fig. 3.4.35 일반균형모형의 생산구조 ····· 372
Fig. 3.5.1 EU 회원국 중 국가 기후변화 적응전략 수립 현황 ····· 400
Fig. 3.5.2 2009년 OECD 회원국의 물 공급 및 위생설비 ODA 현황 ····· 427
Fig. 5.1.1 강우량을 고려한 수공구조물 관리 프로세스 예시(안) ····· 450
Fig. 5.1.2 국가정책 수립 활용방안 ····· 452
Fig. 5.1.3 연구개발 결과의 활용계획 ····· 453
Fig. 6.1.1 STARDEX 홈페이지 첫 화면 ····· 457
Fig. 6.1.2 NDMC 메인페이지 ····· 459
Fig. 6.1.3 NDMC 가뭄모니터링시스템 메인화면 ····· 459
Fig. 6.1.4 NDMC 가뭄모니터링시스템 구성도 ····· 460
Fig. 6.1.5 NOAA 가뭄전망시스템 메인화면 ····· 460
Fig. 6.1.6 NOAA 가뭄전망시스템 구성도 ····· 461
Fig. 6.1.7 SADM 가뭄모니터링시스템 메인화면 ····· 461
Fig. 6.1.8 SADM 가뭄모니터링시스템 구성도 ····· 462
Fig. 6.1.9 가뭄의 통합적 경제적 파급효과 ····· 472

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

국내 수자원 분야 기후변화의 연구는 1990년 중반부터 시작되었으나 산발적으로 수행되었고 표준화가 이루어지지 못해 연구결과마다 매우 상이한 결과를 보이고 있다. 따라서 연구결과가 관련 정책에 적용되지 못하고 있음은 물론 국제적 공조를 위한 기초 자료로도 활용되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 우리나라는 지금까지의 이 분야 국내 연구결과를 종합적으로 정리하여 그 방법론을 표준화할 필요가 있고(표준화의 필요성), 표준화된 방법으로 전망한 결과가 학술적 성과에 그치지 않고, 국토해양부의 수자원 정책 수립과 관련 제도 개선에 반영되어야 하며(실용화의 필요성), 마지막으로 IPCC (Inter-governmental Panel on Climate Change), UNFCC나 G-20 정상회의 등의 국제회의에서 활용될 수 있도록 심도 있는 연구가 필요한(국제화의 필요성) 시점에 서있다. 또한 지구 온난화로 인한 강수와 기온의 변화는 수자원의 시공간 변화를 야기하게 되며, 이는 미래 수자원 확보에 대한 불확실성을 가중시킬 것으로 전망되고 있다. 따라서 기후변화로 인한 향후 수자원의 변동성을 분석하는 것은 안정적이고 지속적인 수자원 공급을 위해 요구되는 가장 중요한 사안 중 하나이다. 기후변화에 능동적으로 대처하기 위해서는 기후변화에 따른 수자원의 변화를 정량적으로 평가할 수 있는 표준화 된 수자원 영향평가 기법이 필요하며, 일반적으로 GCM을 이용해 산출된 시나리오를 기반으로 영향평가를 수행하는 것이 보편화 되어있다. 기후변화 전망결과의 신뢰도 향상을 위해 기후시나리오는 지역기후 및 유역특성에 적합한 결과가 내재되어 있어야 하며, 수문시나리오는 불확실성을 정량화하고 저감시킬 수 있는 기법이 필요하다. 본 연구의 표준화 대상으로는 한반도에 적합한 GCM 시나리오의 구축, 기후시나리오 상세화 기법의 개발 등을 포함한다.

따라서 본 연구의 목적은 수자원 분야에 있어 현재 한반도에서 기후변화의 영향을 정량적으로 평가하고, 미래 수자원의 변화와 수자원시스템에 대한 기술적 및 경제적 영향을 표준화된 방법으로 전망하는 기술을 개발한다.

제 2 절 연구목표 및 내용

1. 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망

한반도의 시공간 및 극치 기상 현황을 고려한 기후시나리오의 표준화 및 상세화 기법을 개발하고, 이를 반영한 기후시나리오 자료를 생산하고자한다. SRES 및 RCP기반의 기후 및 수문 시나리오 생산을 위해 기후변화에 따른 수문시나리오 표준화 사례를 조사하고 그에 따른 생산 및 전망 기술을 구축한다. 구축된 기술을 통해 표준 기후변화 시나리오를 생산하고, 최종적으로 생산된 표준 기후 및 수문시나리오의 불확실성 분석을 수행한다. 이를 위한 연차별 세부 연구목표 및 연구내용은 Table 1.2.1과 같다.

Table 1.2.1 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(1-1-1세부과제)

구분	연구목표	주요 연구내용
1차 년도	▪ 기후변화에 따른 수문시나리오 표준화 사례조사	▪ 국내외 기후변화 표준화 방안 및 상세화 기법과 극치사상 반영이 가능한 GCM 모의기법 조사(국립기상연구소) ▪ 국내외 기후변화 활용 유출 모형 특성 조사 ▪ 국내외 기후변화 수자원전망 분석기법 조사 및 기 생산된 유망 시나리오 제공
2차 년도	▪ 기후변화에 따른 표준 수문·기상 시나리오 생산 및 전망기술 개발	▪ 국가 표준 기후시나리오 생산모델 구축(국립기상연구소) ▪ 식생 및 토지피복변화를 고려한 수문시나리오 생산모델구축 ▪ 극치사상을 반영한 수문시나리오 생산모델 구축 ▪ CCAPH-K 수문시나리오 초기 생산 및 검증
3차 년도	▪ 기후변화에 따른 표준수문시나리오 생산 및 불확실성 분석	▪ 시·공간 상관성을 고려한 기후시나리오 생산 ▪ 기후변화에 따른 표준 수문시나리오 생산 ▪ 기후 및 수문시나리오의 불확실성 분석

2. 기후변화에 따른 중단기 수문전망

한국의 관측자료를 기반으로 한 기후변화-수문영향 통계적 경향 및 기후변화 탄성도 분석을 실시하고, 유역단위로 통합 비선형된 시공간 수문예측 모형을 개발하고자 하며, 장단기 이벤트(태풍 등) 전망 예측기술을 개발한다.

Table 1.2.2 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(1-1-2세부과제)

구분	연구목표	주요 연구내용
1차 년도	▪ 비시나리오 기반의 기후변화 수자원전망 기법조사	▪ 국내외 문헌 조사 및 분석 ▪ 한국 기후변화-수문 관측자료 DB 구축 ▪ 한국 기후변화-수문 경향성 분석
2차 년도	▪ 비시나리오 기반의 기후변화 수문전망기술 개발	▪ 한국 수문변수 통계적 경향성 분석 및 중단기전망 시범 대유역 중단기 수문변화 전망 예측 및 검증 ▪ 유역단위 통합 비선형 시공간 수문예측 모형 개발
3차 년도	▪ 한국 유역단위 중단기 수문변화 전망 분석 및 DB 생성 ▪ 유역단위 장기 수문전망과의 연계 기술 개발	▪ 유역별 분석 시나리오 작성 ▪ 유역별 중단기 전망자료 생성 ▪ 유역별 중단기 전망자료 신뢰도 분석 ▪ 유역별 중단기 전망자료 표출 DB구축 ▪ 시나리오-비시나리오 장단기 예측자료 통계적 교차검증 (Cross-Validation) 기술 ▪ 장중단기 수문전망 연계표출 프로그램 방안 제시

3. 유역단위 시공간 스케일 상세화

기후변화로 인한 연구를 위해서 많은 기반자료로 전지구기후모형(GCM, Global Climate Model)이 활용되고 있다. 전지구 기후모형은 자연대기중의 온실가스를 이산화탄소에 대한 등가치로 환산하여 2001년부터 2100년까지 100년간 온실가스 증가추세와 환경정책의 추진에 따른 감축량을 고려하여 기후인자(기온, 강수, 습도, 바람 등)들의 미래기후정보를 수치모의한 자료로써, 기후변화 영향이 어디서, 어떻게 미칠지 전망하여, 그 피해를 최소화하기 위한 대응책을 마련할 수 있게 하는 기반자료로 할 수 있다. 하지만, 하천의 유출과 관련된 강우, 토양수분, 증발, 기저유출 등의 수문학적 성분은 GCM과 같은 대규모 대기모형의 격자에서는 작은 유역규모에서의 스케일에서 큰 변동성을 갖는다. 따라서 GCM을 바탕으로 한 신뢰성 있는 수문학적 전망을 수행하기 위해서는 적절한 스케일 상세화(downscaling)과정을 거쳐 활용해야 한다.

본 연구에서는 기후변화연구에 핵심기술의 하나로 지역규모의 기후모의로부터 유역규모의 상세수문정보를 생산하는 원천 기술을 확보함으로써, 미래 수자원 전망에 있어 표준화 된 스케일상세화기법을 제시하고 새로운 기후변화 시나리오가 주어지는 상황에서도 탄력적으로 상세화를 수행할 수 있는 기반을 만들고자한다. 자세한 연차별 연구목표 및 연구내용은 Table 1.2.3와 같다.

Table 1.2.3 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(1-1-3세부과제)

구분	연구목표	주요 연구내용
1차 년도	▪ 유역단위 시공간 스케일 상세화 기법 도출	▪ 역학적/통계적 상세화기법 조사 ▪ 유역단위의 수문변수 상세화기법 도출
2차 년도	▪ 유역단위의 시공간적 스케일 상세화 모형 개발	▪ 인공신경망기반의 Random Cascade 상세화기법 개발 ▪ 해상도 변경에 따른 수문자료 변동성해석 기술 개발
3차 년도	▪ 인공신경망과 Random Cascade Downscaling기법 보완 및 안정화 ▪ Grid-based Statistical Downscaling Model (GSDM) 소프트웨어 패키지 시제품 제작 ▪ GSDM의 타수계 Test bed 확대적용	▪ 강우장의 시공간적 상관구조분석 ▪ Random Cascade모형 매개변수 최적화 ▪ GSDM 소프트웨어 개발에 따른 기능정의 및 I/O 설계 및 제작 ▪ GSDM 사용자 interface 설계 및 제작 ▪ GSDM의 타수계 Test bed 검증 및 확대적용

4. 극한 홍수량의 전망 기술 개발

본 연구에서는 기후변화가 극한홍수량에 미치는 영향을 분석하기 위해 IPCC AR4에서 활용한 A2, B1, A1B 시나리오에 근거한 4개 GCM의 모의 결과를 상세화(downscaling) 시켜 얻은 기상청 강우 관측 지점의 일강우 자료를 바탕으로 지역빈도해석과 강우의 scaling invariance 개념을 근거로 시단위 확률강우량을 추정하였다. 기존 유역종합치수계획에서 구축한 강우-유출 모의 조건에서 GCM 모의 결과에 근거한 미래의 홍수량을 전망하기 5대강 유역의 유역종합치수계획에서 구축한 HEC-1 모형을 바탕으로 홍수량을 산정하였다. 3차년도에 걸친 연구목표 및 주요 연구내용은 다음과 같다.

Table 1.2.4 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(1-2-1세부과제)

구분	연구목표	주요 연구내용
1차 년도	▪ 기후변화에 의한 극한홍수량 전망기술 조사	▪ 장기 기후변화 시나리오에 의한 극한홍수량 전망기술 분석
2차 년도	▪ 기후변화에 의한 극한홍수량 전망기술 개발	▪ 전지구 모델에 의한 강수 자료의 시단위 확률강우량 산정 기법 개발 ▪ 기후변화 시나리오에 따른 극한홍수량 전망 기술 개발
3차 년도	▪ 표준 기후변화 시나리오를 바탕으로 한 극한홍수량 전망 기술 개발	▪ 전지구 모델에 의한 강수 자료의 시단위 확률강우량 산정 기법 개선 및 검증 ▪ 기후변화 시나리오를 바탕으로 한 극한홍수량 전망 알고리즘 개발

5. 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망

최근 기후변화에 의한 수문영향 평가에서 가뭄에 대한 관심이 높아지고 있으나 기후변화에 의한 가뭄전망이나 가뭄빈도 해석에 대한 연구는 홍수분야에 비해서 상대적으로 소홀히 다루어지고 있는 실정이다. 우리나라의 경우에도 최근 가뭄모니터링 시스템 구축과 같은 단기간의 가뭄대책 수립을 지원하기 위한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 가뭄대책 수립을 위해서 절대적으로 필요한 장기 가뭄전망 및 기후변화에 의한 미래 가뭄전망 등과 같은 연구가 매우 미진하다.

따라서 가뭄지수를 이용한 극한가뭄의 빈도해석뿐만 아니라 기후변화에 따른 극한가뭄 전망기술의 개발이 절실하게 필요한 실정이다. 특히, 본 연구에서는 기후변화로 예상되는 극한가뭄에 따른 유역별 수자원전망과 가뭄에 따른 중권역별 수문학적 리스크를 분석함으로써 미래의 극한 가뭄에 대비하는 수자원계획 수립의 기본자료를 제공하고자 한다.

Table 1.2.5 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(1-2-2세부과제)

구분	연구목표	주요 연구내용
1차 년도	▪ 기존 가뭄평가방법 분석 ▪ 가뭄빈도 해석기술 현황 분석	▪ 가뭄모니터링 관련 기술 및 연구 현황 조사 ▪ 가뭄전망 관련 연구현황 조사 ▪ 국내외 기후변화 활용 유출 모형 특성 조사 ▪ 수문시계열 자료를 활용한 가뭄빈도해석 연구현황 분석 ▪ 기후변화와 가뭄심도의 변화에 대한 기존 연구 분석
2차 년도	▪ 가뭄지수의 적용성 검토 ▪ 기후변화 평가를 위한 최적가뭄지수 선정 ▪ 가뭄지수 및 빈도해석 기술을 활용한 극한가뭄의 정량화	▪ SPI, PDSI, MSWSI등 가뭄지수의 적용성 검토 ▪ 기후변화 평가를 위한 최적가뭄지수의 선정 ▪ 가뭄의 경향성 분석 ▪ 가뭄의 주기성 분석 ▪ Dry Spell에 의한 가뭄의 시,공간 분포특성 분석 ▪ 가뭄지수를 활용한 가뭄빈도해석 기술 개발
3차 년도	▪ 유역별 극한가뭄의 전망 ▪ 가뭄에 따른 유역별 수자원 전망	▪ 기후변화로 인한 유역별 극한가뭄의 전망 ▪ 기후변화를 고려한 주요관측소별 SDF곡선의 유도 ▪ 한반도 가뭄우심도의 작성 ▪ 기후변화를 고려한 중권역별 자연유출량 전망 ▪ 가뭄에 따른 중권역별 수문학적 리스크분석

6. 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석

최근 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로도 발생 시기나 규모를 벗어난 가뭄, 홍수 등 이상 기후현상이 빈번하게 관측되고 있다. 특히 강수의 경우, 기상청 발표에 따르면 최근 20년간 우리나라 전체 강수량은 약 7% 정도 증가한 반면에 강수일수는 오히려 14% 정도나 감소한 것으로 나타났으며, 일 80mm 이상의 호우일수는 증가하고 있는 추세로 나타났다. 이러한 현실에서 전통적인 빈도해석기법을 적용한 설계 강우량 산정과 적용에 한계가 잇다. 지금까지 우리나라 여러 선진국들에서는 정상성 가정 하에서 수자원관리를 위한 시스템을 계획하고 운영해왔다. 하지만 최근 들어 각국들은 이러한 정상성 가정은 불합리적이며 더 이상 수자원계획 및 운영에 있어서 기본가정으로 받아들이기 힘들다고 주장하고 있다. 기후변화 패턴은 매우 복잡하고 불확실성이 크며 기후변화에 대한 인식과 이해도 빠르게 변화하고 있으며, 기후변화의 관점에서 볼 때 표본자료나 평균, 분산 등 자료 자체의 통계적 특성은 시간이 지남에 따라서 변화해왔다. 이러한 변화는 관측자료의 정상성 가정에 대한 의문을 제기한다. 비정상성 시계열의 빈도해석에 있어 분포 매개변수나 그 분포 자체 또한 시간에 따라 변화하기 때문에 기존의 정상성 가정에 근거한 빈도해석과는 다른 새로운 접근방법이 요구되며, 초과확률이나 관련된 불확실성 추정에 있어서도 마찬가지로 비정상성을 고려할 수 있는 새로운 접근법이 요구된다. 따라서 관측자료가 독립적이고 정상성을 띈다는 기본 가정을 벗어나는 요소들은 빈도해석결과의 타당성에 영향을 미친다. 최근 수문학적 시계열 자료를 모형화 하고 특정 재현기간의 극치사상을 추정하기 위해 사용되는 통계학적 방법은 비정상성을 가진 자료에 대해서는 적용될 수 없다. 최근 연구들에서는 확률분포를 관측자료에 적합시킬 때 시계열 자료의 비정상성 측면을 고려할 수 있는 여러 가지 기법들을 검토하고 있다. 본 연구에서는 기후변화와 관련하여 강수량 관측자료의 비정상성 빈도해석에 대한 국내외 연구사례들을 조사·분석하여 향후 우리나라에 적용할 수 있는 최적의 비정상성 빈도해석기법을 개발하고자 한다.

Table 1.2.6 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(1-2-3세부과제)

구분	연구목표	주요 연구내용
1차 년도	▪ 극한강우 선정기법 및 수문해석 기술 조사·분석	▪ 국내외 극한강우 연계 수문해석기술 분석 ▪ 극치수문량의 불확실성 분석기법 조사·분석
2차 년도	▪ 극한강우 연계 수문해석모델 구축	▪ 수문통계의 비정상성 빈도해석 기술 개발 및 적용 ▪ 극치수문전망에 대한 불확실성 분석
3차 년도	▪ 수문통계의 비정상성 빈도해석 기술 적용 ▪ 극한강우 선정기법 기술 적용 ▪ 극치수문량 전망에 대한 불확실성 분석기법 적용	▪ 정상성 확률강우량과 비정상성 확률강우량의 확률강우량도 비교 분석 ▪ 기후변화를 고려한 비정상성 확률강우량의 확률강우량도 작성 ▪ 강우의 비정상성을 고려한 극한강우 정량적 제시 ▪ 기후변화를 반영한 비정상성 빈도해석의 불확실성 평가를 위한 검정통계기법 선정 ▪ Monte-Carlo모의기법을 활용한 비정상성 빈도해석의 불확실성 평가

7. 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가

기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가 기법 개발을 위한 기반기술 조사하고 자체 개발된 분포형 수문순환모형을 시범적용 함으로써 그 결과의 제시와 비교분석에 의해 향후 개발될 분포형 수문순환모형의 전체적인 구조와 방법론은 제시하였다.

Table 1.2.7 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(2-1-1세부과제)

구분	연구목표	주요 연구내용
1차 년도	▪ 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가 기법 개발을 위한 기반기술 조사 및 방법론 제시	▪ 국내외 기후변화에 따른 수문순환 평가사례 조사 ▪ 자체 개발된 분포형 수문순환모형의 용담댐유역 시범적용 ▪ 향후 개발될 분포형 수문순환모형의 전체구조와 방법론 제시
2차 년도	▪ 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가	▪ 한국형 장기유출 수문모형의 기본 모듈 개발 ▪ 개발된 분포형 수문모형의 한강유역에 대한 적용성평가 ▪ 한강유역에 대한 미래기후변화 영향 평가
3차 년도	▪ 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가	▪ 기후변화에 따른 식생 및 융설 예측 기법 개발 ▪ 한국형 분포형 수문모형 전 모듈 개발 및 연계, 통합기법 개발 ▪ 한반도에 대한 미래기후변화 영향 평가

8. 기후변화에 따른 물수급 전망

기후변화에 따른 물수급 전망에서는 기존 수자원장기종합계획의 물수급 방법론의 문제점은 물론, 기존의 기후변화 연구에 적용되어온 물수급 분석 방법론의 문제점 또한 개선하여 기후변화를 고려한 물수급 분석 방법론을 새롭게 제안하였다.

Table 1.2.8 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(2-1-2세부과제)

구분	연구목표	주요 연구내용
1차 년도	▪ 기후변화에 따른 물수급 전망 국내외 기술 비교분석 ▪ Data Base Storage 개발 구성 및 시범운영(EPS 솔루션)	▪ 기후변화를 고려한 물수급 전망 국내외 연구동향 조사 및 물수급 모형 분석 ▪ 선정된 전망 프로그램을 용담댐유역에 시범적용하여 물수급 적용성 평가 ▪ Warehouse 개발을 위한 수요조사 및 주요 구성 모듈 개발착수(EPS 솔루션)
2차 년도	▪ 기후변화에 따른 물수급 기법 개발 및 적용 ▪ 기후변화 평가를 위한 한국형 물수급 모형의 확장방안 제시 ▪ Data Base Storage 운영 및 보완 (EPS 솔루션)	▪ 기존 국내 물수급 방법론을 개선 ▪ 기후변화에 따른 물수급 전망기법 개발 ▪ 개선된 방법론의 한강유역 적용 ▪ 한반도 표준 시나리오 선정기법 분석 ▪ 각 단위과제 상호간의 연계성 및 호환성을 고려한 Data Base Storage 개발 및 운영 (EPS 솔루션)
3차 년도	▪ 개발된 전망기법을 통한 미래 한반도 물수급 전망 ▪ Data Base Storage 개선 및 개발완료(EPS 솔루션)	▪ 개선된 방법론을 통한 미래 한반도 물수급 전망 제시 ▪ 한반도 표준 시나리오 선정기법 및 선정 시나리오 제시 ▪ 각 단위과제 상호간의 호환성을 고려한 Data Base Storage 운영 및 GUI개선 (EPS 솔루션)

9. 기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 정량화

기후변화를 고려한 수문전망과정의 불확실성 정량화에 대해 선진국을 중심으로 한 연구사례 조사 및 분석을 바탕으로 국내 기후변화 연구에서 발생하는 불확실성 요인을 분석하고 이를 정량화 및 저감하여 표현한다.

Table 1.2.9 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(2-1-3세부과제)

구분	연구목표	주요 연구내용
1차 년도	▪ 국내외 불확실성 평가 기술 비교·분석 ▪ 국내 기후변화 연구들의 불확실성 정량화	▪ 불확실성 요인 분석기법 관련 문헌조사 및 연구동향 조사 ▪ 불확실성 정량화 기법 관련 연구동향 조사 ▪ 기존 연구분석 및 비교를 통한 연구현황 정량화
2차 년도	▪ 기후변화 시나리오 조합 및 저감 기법 개발 ▪ 불확실성 정량화 기법 관련 연구동향 조사	▪ 시나리오 중요도에 따른 최적 가중치 산정 ▪ 분포에 기반한 불확실성 저감 기법 개발 ▪ 불확실성 정량화 방법 문헌 조사
3차 년도	▪ 기후 변화 불확실성 전망의 조합 기술 개발 ▪ 기후 변화 불확실성의 정량화 기술 개발 ▪ 기후 변화 불확실성의 요인별 분해 기술 개발 ▪ 기후변화에 따른 한반도 수자원 전망의 불확실성 제시	▪ 미래 기후 전망에 대한 불확실성의 조합 기술 개발 ▪ 수문 전망에서 불확실성을 정량화하여 표현 할 수 있는 기법 개발 ▪ 수문 전망에서 단계별로 발생 가능한 모든 요인을 분석할 수 있는 기법을 개발하고 요인을 분석 ▪ 한반도 수자원 전망의 정량화된 불확실성 제시

10. 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석

기후 변화 불확실성을 고려하기 위해 타 세부과제에서 개발된 기후 변화 모델을 이용 주요 수공 시설물의 취약도 곡선 적용을 통한 위험도 평가 기법 개발 및 한강유역 주요 수공 시설물의 안전도 변화를 분석하고 설계 개선 및 보강 방안을 제시한다. 기후변화의 불확실성을 고려한 수문변동의 영향 평가 및 이에 따른 구조물의 영향 분석 수행을 통해, 기후변화에 의한 수문변동에 대한 영향을 고려한 수공 구조물 위험도 평가와 정량화 기법 개발 및 해수면 상승 후에도 상승 이전과 동일한 안정성 및 기능성 회복을 위한 대처방안을 마련한다.

Table 1.2.10 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(2-2-1세부과제)

구분	연구목표	주요 연구내용
1차 년도	▪ 기후변화에 따른 수자원시설물 영향분석기법 조사	▪ 관련 문헌조사 및 연구동향 조사 ▪ 기존 연구 분석비교를 통한 통한 연구방향 정립 ▪ 수공구조물 분류 및 설계 과정 분석을 통한 영향평가 대상 구조물 선정
2차 년도	▪ 기상변화 관련 설계 인자에 대한 수공 구조물 안전 민감도 분석	▪ 구조물분류 및 구조물별 안정성평가 기법조사 ▪ 기상변화와 관련된 수공구조물의 주요 설계인자 분석 및 도출 ▪ 설계인자 변화에 의한 구조물의 안전 민감도 산출
3차 년도	▪ 기후 변화 불확실성을 고려한 주요 수공구조물 안전도 변화분석	▪ 구조물 선정 및 변동인자 결정 ▪ 주요 외부 하중에 대한 구조해석 및 구조물 취약도 곡선 산출 ▪ 기후 변화에 대비한 시설물 설계 기준 개선안 제안

11. 기후변화를 대비한 법제도 개선 및 수자원정책 제시

본 연구는 기존의 기후변화 적응 수자원 연구사업이 공학적인 접근에 치중되어 있어서 물 관련 법령과 정책을 포괄적이고 분석하는 과정이 필요하다는 인식에서 출발하였다. 이에 따라 공학적인 분석으로 도출된 수자원의 기후변화 영향을 최소화 하는 적응전략을 수립하기 위하여 정책적 및 제도적인 차원에서 접근하는 방식을 채택하고 있다. 따라서 본 연구의 목적은 기후변화에 적응하는 물 관련 법제도의 개선방안과 국가 수자원 정책의 중장기 로드맵 그리고 국제협력의 방향성을 제시하는 것이다.

기후변화에 대비하는 우리나라 물관리의 적응전략을 구축하기 위하여, 물 관련 법령 개정(안), 제도개선(안), 정책개선(안)안 제시하고 수자원정책의 중장기 전략과 로드맵을 작성하였다.

Table 1.2.11 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(2-2-2세부과제)

구분	연구목표	주요 연구내용
1차 년도	▪ 기후변화 물관리 연구동향 분석 ▪ 기후변화 물관리 법제도 분석 ▪ 기후변화 적응 물관리 정책 분석	▪ IPCC 평가보고서 및 관련 문헌 조사 ▪ 주요 선진 외국의 물관리 법제도 조사 ▪ 국내 법제도의 문제점 및 현황 파악 ▪ 물 관련 원조사업의 현황과 문제점 분석
2차 년도	▪ 기후변화 적응 물관리 전략 분석 ▪ 법령/제도 설정을 위한 설문조사 ▪ 물관리 국제협력 방향성 구축	▪ 기후변화 적응 물관리 전략 도출 ▪ 설문조사 분석을 통한 법령/제도 개편방향 도출 ▪ 물관리 개선방향 제시를 위한 가이드라인 제시 ▪ 물관리 국제협력의 방향성 구축
3차 년도	▪ 물관련 법령 개선방안 제시 ▪ 의견수렴을 위한 공청회 개최 ▪ 물관리 국제협력의 전략제시	▪ 기후변화 적응 법령개정 및 정책개선(안) 제시 ▪ 전문가 의견수렴을 위한 정책토론회 개최 ▪ 기후변화 적응 국가 물관리 적응전략 로드맵 작성 ▪ 물관리 국제협력의 로드맵 제시

12. 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가

본 연구과제의 최종목표는 기후변화에 따른 우리나라 물관리 분야의 파급효과를 사회·경제적 측면에서 분석하는데 있으며 연차별 목표는 다음과 같다.

○ 1차년도 : 기후변화에 따른 수자원의 사회·경제적 영향평가기법 조사

○ 2차년도 : 기후변화에 따른 수자원의 사회·경제적 영향평가기법 개발

○ 3차년도 : 기후변화에 따른 미래 한반도 수자원의 사회·경제적 영향평가

Table 1.2.12 세부과제 연구목표 및 주요연구내용(2-2-3세부과제)

구분	연구목표	주요 연구내용
1차 년도	▪ 기후변화와 사회경제적 영향평가 문헌조사 ▪ 기후변화와 이수, 치수 및 하천환경 부문의 영향 (권역별, 부문별) 및 상호 연관성 분석 ▪ 기후변화 비용추정방법론	▪ 기후변화 영향평가 문헌조사 ▪ 기후변화에 따른 물관리 분야 영향 문헌조사 ▪ 기후변화의 사회경제적 비용추정 방법론 정리
2차 년도	▪ 홍수피해분석 ▪ 가뭄피해분석 ▪ 기후변화에 따른 수문-경제 모형 개발 ▪ 기후변화와 국내외 물관리 예산	▪ 홍수(가뭄)피해비용추정에 대한 기존 방법의 비교·검토를 통한 방법론 정립 ▪ 과거 홍수피해액 자료와 강우특성과의 관계정립을 위한 과거자료에 대한 Data Base구축 및 사전분석 ▪ 홍수피해자료와 홍수피해함수를 이용한 홍수피해 Historical data 분석 ▪ 가뭄에 대해 산업연관표를 이용한 선형계획법을 기반으로 한 수문-경제모형의 Sub-Model 구축 ▪ 구축된 Sub-Model을 이용해 가뭄에 따른 사회경제적 피해비용 산정 ▪ 기후변화와 사회경제적 피해비용추정을 위한 국내외 물관리 예산 비교
3차 년도	▪ 기후변화 시나리오에 따른 기후변화의 사회경제적 피해비용 추정 ▪ 기후변화가 물관리에 미치는 사회 경제적 파급효과 분석	▪ 홍수: 과거 자료에 기반한 요인분석 및 예측 ▪ 가뭄: 산업구조 내(I-O분석) 물의 잠재가격 도출 및 피해비용 추정 ▪ 일반연산모형(CGE)을 통한 홍수 및 가뭄피해의 사회경제적 파급효과 분석

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1. 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망

가. 선진국의 수자원 영향평가 사례조사

(1) 미국

미국의 기후변화에 대응하기 위한 연구는 전지구 변화 연구프로그램(US Global Change Research Program; USGCRP)에 의해 주도적으로 진행되고 있다. 이 프로그램에서는 기후변화 진단기술 개발, 모델의 불확실성 저감, 기후변화의 과학적 메커니즘과 영향 등 기후변화에 대한 전반적인 연구를 수행하고 있다. 하지만 미국은 다른 국가와는 달리 각 분야의 영향 평가 및 적응대책 수립의 경우에 국가적인 단위보다는 지역적(주 단위)으로 수행하고 있다. 그 중 미국의 북서부에서는 대부분의 수자원을 봄 및 여름철의 융설량을 기반으로 관리하기 때문에 지구 온난화에 따른 적설량 감소 및 융설의 조기화에 상당히 취약할 것으로 예상되었다. 또한 최근에 잦은 홍수 및 가뭄의 발생으로 인해 워싱턴 주를 비롯한 여러 주에서 기후변화에 관한 연구가 상대적으로 다른 지역에 비해 많이 수행되었다. 따라서 본 절에서는 이 중 대표적으로 워싱턴 주와 캘리포니아 주의 기후변화에 의한 수자원 영향 평가 기법에 대해 분석·제시하고자 한다.

지역통합과학평가(Regional Integrated Science Assement; RISA)의 기후영향그룹(Climate Impact Group; CIG)에서는 워싱턴 주의 기후변화에 관한 연구를 Fig. 2.1.1과 같이 수행하고 있다. CIG에서는 SRES의 2개의 온실가스배출시나리오(A1B, B1)를 기반으로 AR4에 사용된 AOGCMs 중 A1B 시나리오는 20개, B1 시나리오는 19개를 이용하여 총 39개 미래 기후시나리오를 생산하였다. 생산된 기후시나리오를 Delta Method기법을 통해 1/16° 해상도로 상세화하여 수문모형인 VIC(Variable Infiltration Capacity) 모델에 적용하여 수문 시나리오를 생산하였다. 이를 기반으로 “Urban Storm Water Infrastructure”, “Hydrology & Water Management”, “Energy”, “Agriculture & Economics”, “Salmon & Ecosystems”, “Forest”, “Human Health”, “Coast”등의 분야로 나누어 평가하였다. 특히 “Hydrology & Water Management” 분야에서는 워싱턴 주 전역에 대한 미래 수문 전망자료(토양수분, 적설, 하천유량)를 생산했을 뿐만 아니라 워싱턴 주내의 Puget Sound 지역(도시지역) 및 Yakima river 지역(과수지역)의 물 관리에 대한 연구를 수행하였다.

캘리포니아 주의 경우 California Department of Water Resources에서 CCCC (California Climate Change Center)를 설립하여, 기후변화에 의한 수자원의 영향을 평가하고 적응 대책 수립에 필요한 정보를 제공하고 있다. CCCC에서는 기후변화에 의한 수자원 영향평가를 Fig. 2.1.2과 같이 2개(A2, B1)의 온실가스 배출시나리오를 기반으로 6개의 GCMs (GFDL-CM2.1, NCAR-PCM1, CNRM-CM3, MPI-ECHAM5, MIROC4.3 medium resolution, NCAR-CCSM3)를 사용하여 기후 시나리오를 생산하였다. 이를 유출모형에 적용하기 위해 상세화기법(Bias Correction and Spatial Disaggregation; BCSD)을 이용하였으며, 상세화된 기후 시나리오를 VIC (Variable Infiltration Capacity) 모형에 적용하여 하천의 유출량을 생산하였다. 이와 더불어 기후변화에 따른 저수지 유입량, 농업 및 도시 용수 수요량, 해수면 상승 시나리오 등을 생산하였다. 생산된 시나리오들을

Cal-SimⅡ 모형에 적용하여 지하수 취수량, 수자원 시스템의 취약성, 저수지 저장량 등을 평가하였는데, 평가 결과 캘리포니아에서 미래의 물 공급의 안정성을 향상시키기 위해 필요한 적응대책을 수립하여야 한다고 제시하였다(California Climate Change Center, 2009).

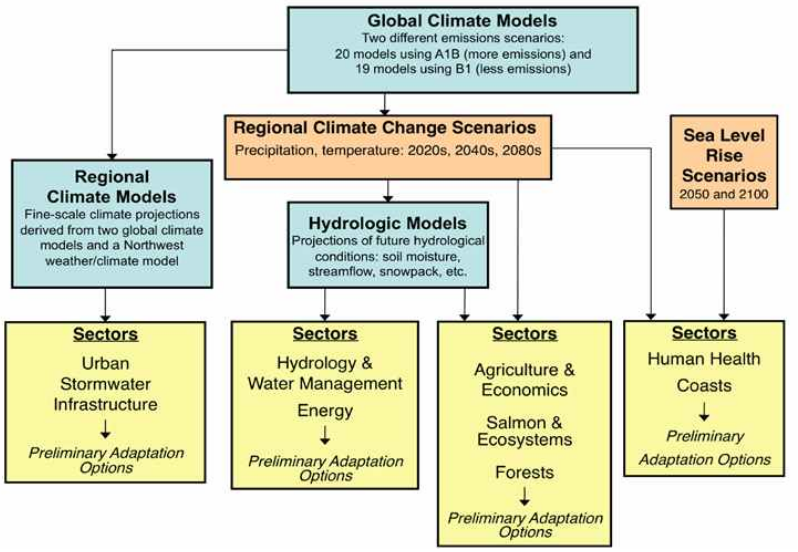


Fig. 2.1.1 미국 워싱턴 주의 기후변화에 의한 각 분야 평가 기법

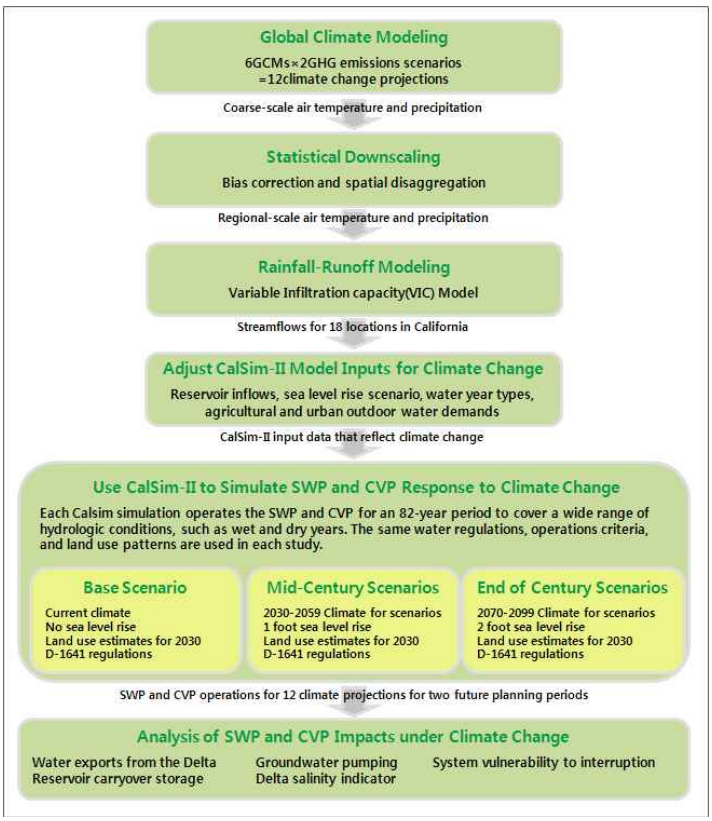


Fig. 2.1.2 미국 캘리포니아 주의 기후변화에 의한 수자원 영향 평가 기법

미국의 기후변화에 의한 수자원 영향평가는 지역적으로 수행되기 때문에 각 지역에 따라 세부적인 평가 기법에서는 차이가 있으나, Fig. 2.1.3에서 보는 바와 같이 전반적인 과정은 동일하다. 미국의 큰 특징이라고 할 수 있는 것은 기후시나리오의 경우 Multi-Model Ensemble을 쓰며, 상세화 기법은 통계적인 기법을 사용하여 1/8°, 1/16°의 해상도 자료를 생산하였다는 것이다. 또한 수문시나리오의 경우는 VIC 모형을 공통적으로 사용하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

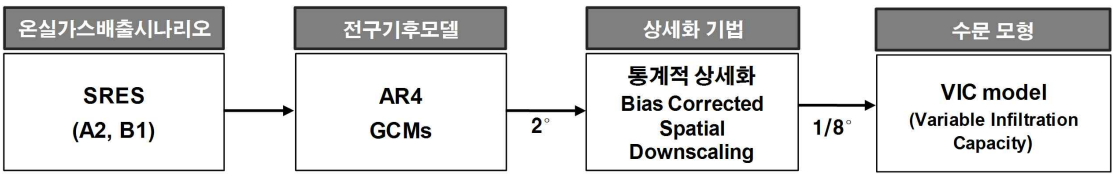


Fig. 2.1.3 미국의 수문시나리오 생산 과정

(2)영국

20세기 들어서 영국의 잉글랜드 중부 지역의 온도는 1970년 이래 평균 1℃ 상승하였다. 또한 2006년에는 48년 만에 가장 더운 겨울을 기록했으며, 영국 전역에서는 겨울철 강수량과 집중호우가 증가한 반면 여름철 강수량은 감소하고 있다. 이 밖에 지구온난화의 영향으로 영국의 평균 해수면은 1㎜ 상승하였다.

이에 따라 영국정부는 기후변화에 의한 영향평가 및 적응정책 수립을 위해서 환경식품농무부(Department for Environment, Food and Rural Affairs; DEFRA) 산하의 영국기후영향프로그램(UK Climate Impacts Programme; UKCIP)을 1999년도부터 시작하였다. 이는 미국의 CCSP, 일본의 기후변화 프론티어와 함께 대표적인 기후변화 예측·적응 연구 프로그램으로 UKCIP는 2002년에 UKCIP02 기후시나리오를 생산하였고, 2009년에 UKCP09(UK Climate Projection 2009)를 생산하였다. UKCP09는 UKCIP02를 업데이트한 것으로 3가지 high, medium, low 온실가스 배출 시나리오에 따른 기후변화 영향을 분석하였다. 중간수준(medium)의 온실가스 배출 시나리오에 따르면, 영국의 2080년 여름철 평균기온은 약 3~4℃ 상승, 여름철 평균 강수량은 17~23% 감소, 겨울철 평균 강수량은 14~23% 증가할 것으로 예측되었다. UKCP09는 이러한 자료들을 기후변화 대응계획을 세우는 기관과 관련업체에게 기술적 자문과 함께 무료로 제공하고 있으며, 제공되는 정보의 형태는 크게 관측경향 자료, 미래 기후 전망자료와 해양관련 자료로 구분할 수 있다. 세부적으로 제공하는 정보는 Fig. 2.1.4와 같다. 이를 통해서 영국의 기후변화에 관련된 다양한 분야에서 많은 연구가 수행되고 있다.

그 중 생태수문연구소(Centre Ecology and Hydrology; CEH)에서는 영국 전역을 대상으로 수문변동에 대한 연구를 수행하였다. 연구의 목적은 영국 전역의 하천을 대상으로 기후변화에 의한 유출의 변동성을 평가하는 것으로, 전반적인 연구 수행 방법은 Fig. 2.1.5와 같다.

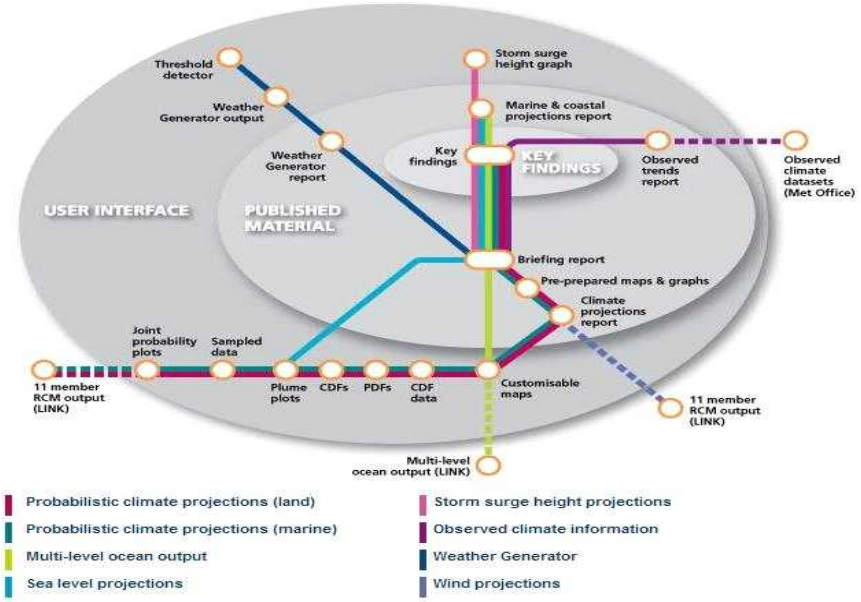


Fig. 2.1.4 UKCP09의 기후 시나리오 및 각종 정보 제공 현황

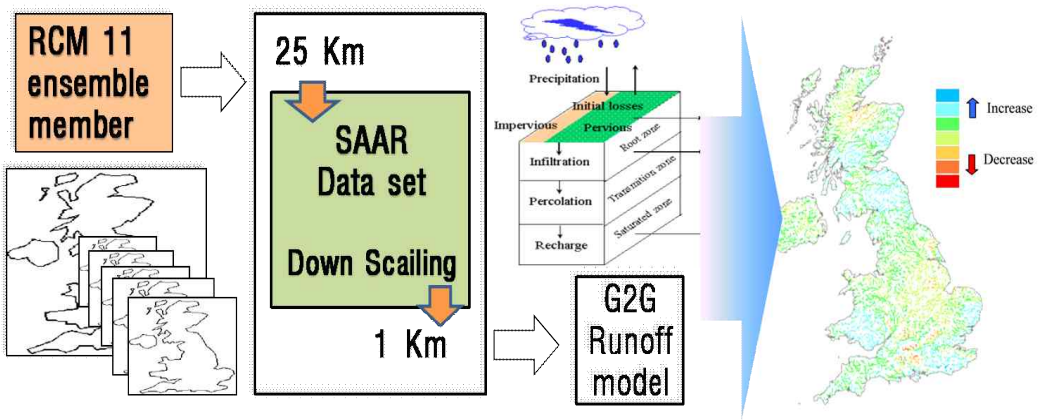


Fig. 2.1.5 National Assessment of Change in River Flows 연구 수행 절차

이 연구에서 사용하는 UKCP09의 11개 앙상블 시나리오는 1개의 SRES A1B medium 시나리오를 사용하였다. 사용된 GCM으로는 HadCM3로 UK Hedley Centre에서 만든 해양-대기 결합 모델(AOGCM)이다. HadCM3는 연직 19개의 대기층과 20개의 해양층으로 구성 되었으며, 해상도는 대기와 육지에서는 2.5°x3.75°, 바다에서는 1.25°x1.25°의 공간해상도를 가진다. 앙상블시나리오는 전술한 1개의 SRES 시나리오와 HadCM3 GCM을 바탕으로 역학적 상세화에서 오는 불확실성을 평가하기 위해서 각기 다른 매개변수를 가진 11개 HadRM3의 역학적상세화 모의를 통해 생산되며, 25㎞의 공간해상도를 가지는 일단위 시나리오이다. 이렇게 생산된 UKCP09의 11개 앙상블 시나리오는 수문모형에 적용되기 위해서 SAAR(Standard Average Annual Rainfall) 자료군을 사용하여 상세화 되었다. 여기서 SAAR 자료군은 영국 전역을 대상으로 1㎞ 격자단위의 과거관측 자료를 통해서 구축한 년-평균 강우 데이터군을 말한다. SAAR 자료군을 통해 25㎞ 격자에서 1㎞ 격자로 상세화된 자료는 G2G 분포형 수문모형의 입력 자료로 사용된다. G2G 수문모형은 Grid To Grid의 뜻을 가지며, 영국의 생태 수문 연구소에서 직접 개발한 모형으로써

강우와 잠재증발산량을 입력 자료로 사용하는 모형이다. G2G 수문모형에서 산출된 결과를 이용하여 영국전역에 수자원 영향평가를 수행하였으며, 11개의 RCM 모의를 통하여 생산된 결과는 서로 유사하였다.

UKCP09 시나리오를 통한 수자원 관련 연구는 이 외에도 Newcastle University에서 수행한 「Using UKCP09 to inform resource planning and management」가 있다. 이 연구는 수자원의 불확실성평가 및 정책에 어떻게 반영될지를 평가하는 것을 목적으로 일기발생기를 이용하여 생산된 기후 시나리오를 수문모형 CatchMOD에 적용하였으며, 관측 자료는 유출모형 매개변수를 검·보정하는데 사용하였다(UKCP, 2009b). Anglian Water에서 수행한 「Using UKCP09 to update existing research」 연구의 경우는 수자원 변동 평가방법을 개발하는 것을 목적으로 UKCP09에서 제공하는 일기상발생기와 수문모형(Stanford watershed)을 사용하여 하천의 유출량을 산정하였으며, 물수지 모형(OSAY)을 사용하여 저수지의 저류량을 모의하였다(UKCP, 2009c). 이 외에도 많은 영국 내 기관에서 UKCP09 정보를 이용하여 수자원 또는 수문학적 변동에 대한 연구가 진행 중에 있으며, 추후 더 많은 연구결과 발표가 예상된다.

(3) 호주

호주정부는 기후변화와 물수요량의 증가에 따른 호주 전역의 지속적인 수자원 확보를 위해 「Water for the Future」라는 정책을 시행하고 있다. 정책의 일환으로 2007년 시작된 「The Sustainable Yield Projects」를 통하여 권역별로 현재의 수자원 현황을 분석하고 기후변화 시나리오를 이용하여 미래의 수자원 영향평가를 진행 중이다(Fig. 2.1.6).

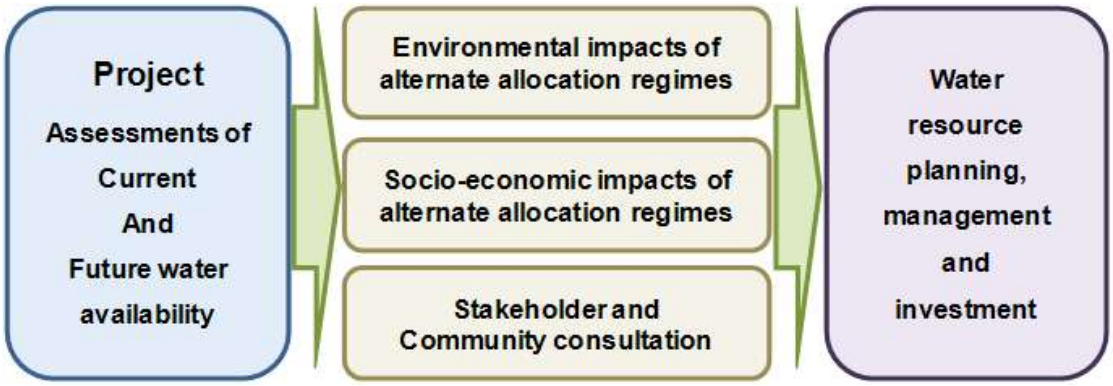


Fig. 2.1.6 The Sustainable Yield Projects 수행 절차

「The Sustainable Yield Projects」중에서 대표적인 Murray-Darling 프로젝트의 수자원 영향평가에서는 SRES의 3개의 온실가스 배출시나리오(B1, medium, A1T)를 기반으로 IPCC 4차 보고서에서 활용된 15개 GCMs (CCCMA T47, CCCMA T63, CNRM, CSIRO-MK3.0, GFDL2.0, GISS-AOM, IAP, INMCM, IPSL, MIROC-M, MIUB, MPI-ECHAM5, MRI, NCAR-CCSM, NCAR-PCM1)를 이용하여 4개의 기후시나리오를 생산하였다. 생산된 기후시나리오 결과를 통계적 상세화 기법인 "Dailyscaling Method"를 이용하여 5㎞×5㎞ 해상도로 상세화하고 강우-유출 모형인 SIMHYD 및 Sacramento

모형에 적용하여 수문시나리오를 생산하였다. 생산된 수문 시나리오를 물수지 시스템에 적용하여 미래 수문 변동성을 평가하였다(Fig. 2.1.7).

미래 유출량의 변동성을 평가한 결과, 남쪽지방은 2007년부터 지속적으로 가뭄이 발생하는 것으로 나타났으며, 기후변화로 인하여 Murray-Darling 전역의 지표수는 2008년 대비 2030년에 34% 감소하고, 연평균 유출량은 9% 감소하는 것으로 나타났다.

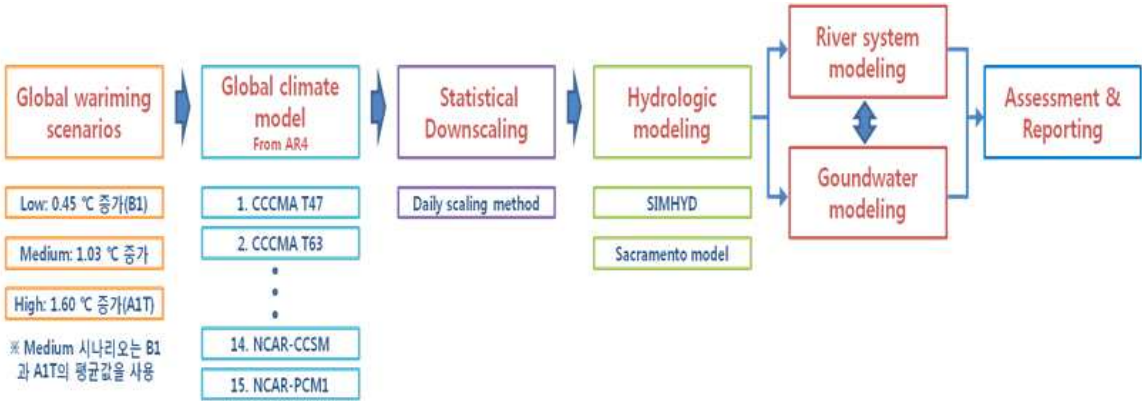


Fig. 2.1.7 호주의 기후변화 수자원 영향평가 연구 모식도

호주의 수자원 영향평가의 특징으로는 3개의 온실가스 배출시나리오와 15개 GCMs를 이용하여 온실가스 배출시나리오와 GCM 모델 차이에서 오는 불확실성을 고려하여 연구를 수행하였다는 점과 강우-유출 모형으로는 개념적 모형인 SIMHYD 모형을 사용하였다는 점을 들 수 있다.

(4) 일본

일본에서는 범정부적으로 지구온난화에 관한 연구를 추진하고 있으며 「온난화의 영향 및 위험성평가 연구」 프로그램 하에서 지구온난화가 자연생태계, 농업, 건강 등 여러 분야에 미치는 영향에 대해서 연구를 진행하고 있다. 하지만 「온난화의 영향 및 위험성 평가 연구」에서 공통적으로 적용할 수 있는 일본 부근의 상세화된 기후변화 시나리오가 없으므로 영향평가에는 어려움이 있었다. 이러한 이유로 일본 기상청에서는 2003년 기후통일 시나리오 제1판을 제공하였으며, 2004년 9월에는 전지구모형(CGCM2)의 결과를 지역 기후모델(RCM20)을 이용하여 역학적 상세화를 통한 일본부근의 기온 및 강수량 등을 20km 해상도로 예측하여 그 결과를 「온난화의 영향 및 위험성 평가 연구」에 사용할 수 있도록 제공하였다. 기후 통일시나리오는 특별히 정의되지 않았지만 기존의 GCM 결과로는 일본과 같은 지형이 좁고 복잡한 지역은 제대로 모의할 수 없을 뿐 아니라, 특히 동경과 같은 도시 지역의 기후를 제대로 모의할 수 없기 때문에 이러한 단점을 극복할 수 있는 시나리오의 생산을 목적으로 만들어졌다. Fig. 2.1.8과 같이 통일된 기후 시나리오를 생산하여 기후변화에 의한 자연생태계, 농업, 산림, 건강, 재해 등의 여러 분야에서 이용되고 있다.

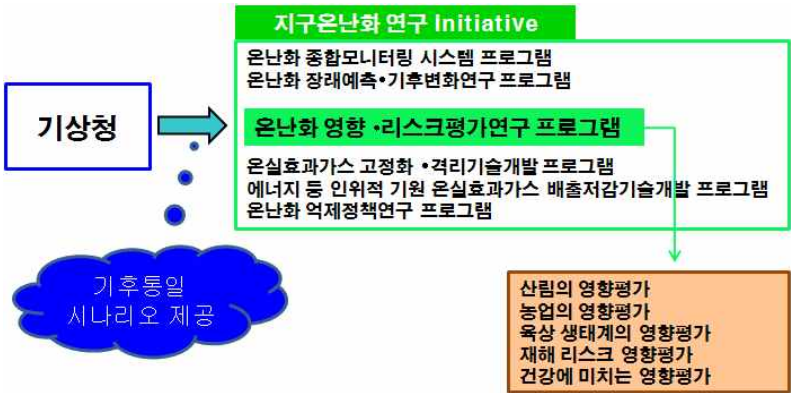


Fig. 2.1.8 일본의 기후통일 시나리오 이용

일본 문부과학성에서는 21세기 기후변화예측 혁신 프로그램(KAKUSHIN)을 2007년부터 2011년까지 5개년 계획으로 연구를 진행하였다. 이 프로그램은 주로 기후시나리오 생산을 목적으로 하고 있으며, Fig. 2.1.9와 같이 온난화 예측모델의 고도화 및 예측, 불확실성의 정량화 및 저감, 자연재해에 관한 영향평가 또한 수행되고 있다. 온난화 예측 모델의 고도화 및 예측분야에서는 지구규모에서 하천유역까지 폭넓은 스케일의 복잡한 대기, 해양, 육지의 물리과정, 생물·지구화학과정을 고려한 온난화 예측 모델을 발전시켜 정확도 높은 고해상도의 온난화 예측을 연구하고 있다. 불확실성의 정량화 및 저감 연구에서는 여러 모델과 데이터를 이용하여 계산과정의 비교 및 자료동화 기법(데이터의 시공간적 보간)의 개발을 통한 예측실험 결과의 불확실성을 정량화하고, 원인규명과 개선책의 확립에 의한 불확실성의 폭을 저감하는 연구를 진행하였다. 자연재해에 관한 영향평가에서는 예측정보를 근거로 한 기온, 강수량, 풍속 등과 관계가 깊은 극한사상(태풍, 열파, 집중호우, 고조, 폭설, 가뭄 등)의 빈도와 강도에 주목한 해석을 통하여 사회적 피해의 위험성 평가 등 자연재해의 영향평가를 실시하고 있다. 이 프로그램에서는 전구모델을 이용하여 20km 해상도의 기후시나리오를 생산하고 있으며, 생산된 20km 자료를 지역모델을 이용해서 최고 1km까지 상세화하여 집중호우 등의 극한사상을 분석하고 있다. 이러한 고해상도 시나리오는 수자원 영향평가를 위해 주로 이용된다.

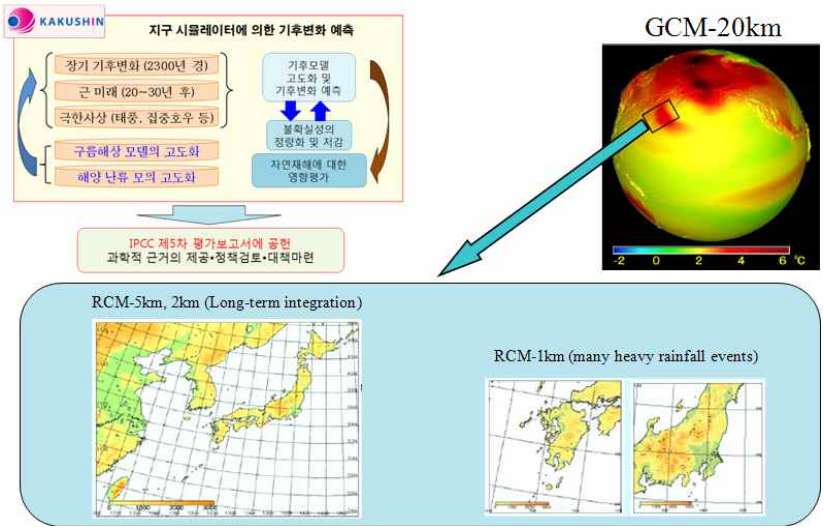


Fig. 2.1.9 21세기 기후변화 예측 혁신 프로그램 개요 및 시나리오 생성 과정

또한 일본 환경성에서는 지구온난화에 관련된 정책지원과 계몽 및 보급을 위한 기후변화 시나리오에 관한 종합적 연구라는 제목으로 현재 연구를 진행하고 있다. 이 연구는 Fig. 2.1.10과 같이 여러 기관들이 모여 기후모델의 온난화 미래예측결과의 종합적 해석, 지역모델의 이용에 의한 공간상세화, 그리고 사회경제시나리오의 공간적 상세화 등을 이용하여 기후변화에 의한 사회의 구체적 영향을 포함한 종합적인 기후변화 시나리오를 창출하여 사회에 적용 가능한 정보를 전달하기 위한 방법론을 확립하는 것을 목적으로 하고 있는 연구이다. 기존의 우리나라 연구에서는 외국의 기후 시나리오를 이용하여 MME 기법으로 분석을 하고 있지만 이 연구에서는 자국에서 사용되고 있는 GCM 모델을 이용하여 MME 기법으로 분석하고 있는 것이 다르며, 또한 영향평가 결과를 국내/국외의 시책에까지 제공하여 공헌하고 있으며, 다른 프로젝트와 연계하여 진행하고 있는 것이 특징이라 할 수 있다. 이 연구에서는 21세기 기후변화 예측 혁신 프로그램과 연계하여 종합적 기후변화 시나리오를 구축하고 있으며, 시나리오를 이용하여 수문·수자원 예측은 물론 생태계에서 사회전반에 걸친 예측과 영향평가 연구가 이루어지고 있다.

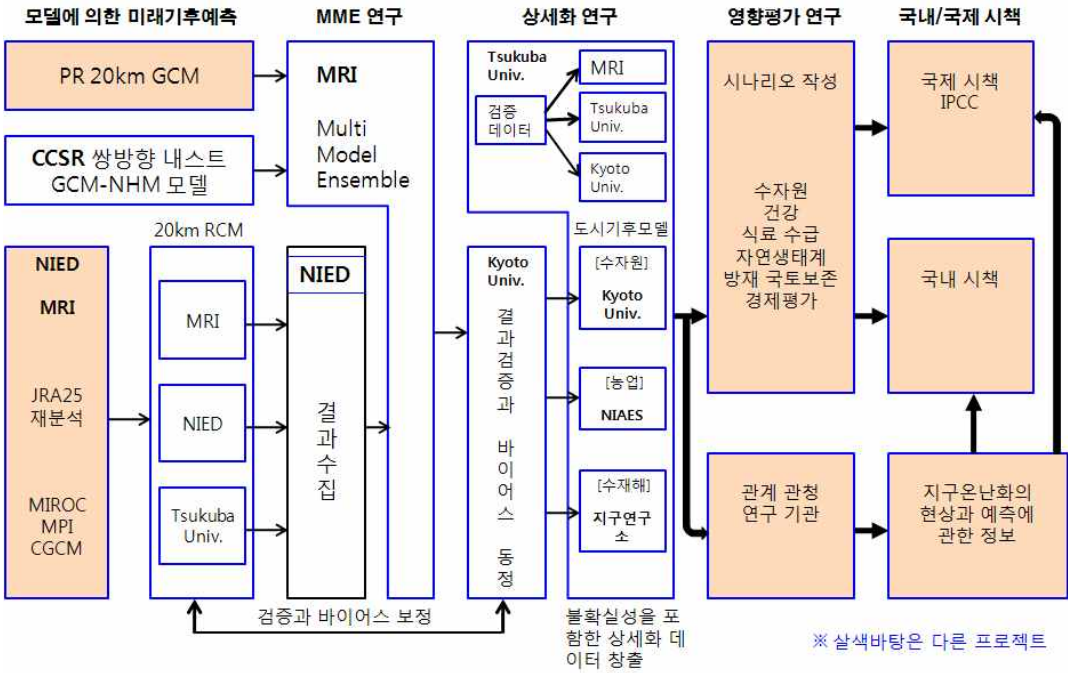


Fig. 2.1.10 지구온난화에 관련된 정책지원과 계몽 및 보급을 위한 기후변화 시나리오에 관한 종합적 연구 모식도

이와같이 일본은 정부 차원에서 대형 프로젝트를 계획하여 종합적인 기후변화 시나리오를 구축하고 있으며, 구축된 기후변화 시나리오를 이용하여 다 방면에서 예측 및 영향평가가 이루어지고 있다. Fig. 2.1.11은 일본의 기후시나리오의 생성과 수문모형을 이용한 수문시나리오 생성과정의 개요를 나타내고 있다. GCM의 해상도가 높아지면서 역학적 상세화 방법을 주로 사용하고 있으며, 2000년대 초반에는 MME기법을 주로 이용했지만 최근에는 자국에서 공동으로 개발한 하나의 GCM, RCM을 사용하고 있다. 그리고 기후변화에 의한 극치사상을 반영할 수 있는 전구 20km의 고해상도 기후시나리오를 생산하여 집중호우 및 홍수의 영향평가를 실시하고 있다. 실제 전구 20km 기후시나리오에서는

시간강수량 100mm 이상의 강수도 표현되고 있기 때문에 기후변화에 의한 극치사상을 모의하는데 상당히 유용한 시나리오라 할 수 있다. 이렇게 생산된 기후시나리오를 이용하여 수자원 영향평가를 위한 수문시나리오를 생성하게 된다. 수자원 영향평가를 위한 수문모형은 독자적으로 개발한 수문모형이나 영향평가 모형을 주로 사용하고 있다. 수문시나리오에 관해서는 특별히 정의를 하고 있지는 않지만, 국가적 차원에서 생산된 기후변화 시나리오를 유출모형에 적용하여 수문시나리오를 생산한 후 수문분석을 수행하고 있다. 수문시나리오 산출에 많이 사용되고 있는 모형은 1998년 일본의 교토대학교에서 개발한 Hydro-BEAM이다. 이 모형은 분포형 유출모형으로 증발산량의 추정은 Thornthwaite법, 융설량의 추정은 Degree day법을 사용하여 랜덤하게 특정 해외 과거의 관측데이터를 추출하여 그 해의 월 강수량이 먼저 보정된 기후모델의 값과 일치하도록 관측데이터에 일정 비율을 더해주어 결과를 생산하는 것이 특징이다. MATSIRO-LSM (Minimal Advanced Treatment of Surface Interaction and Runoff-Land Surface Model)모델 또한 사용되고 있으며, 이 모델은 21세기 아시아의 수자원변동예측 연구에서 미래 수자원 예측에 사용되었다.

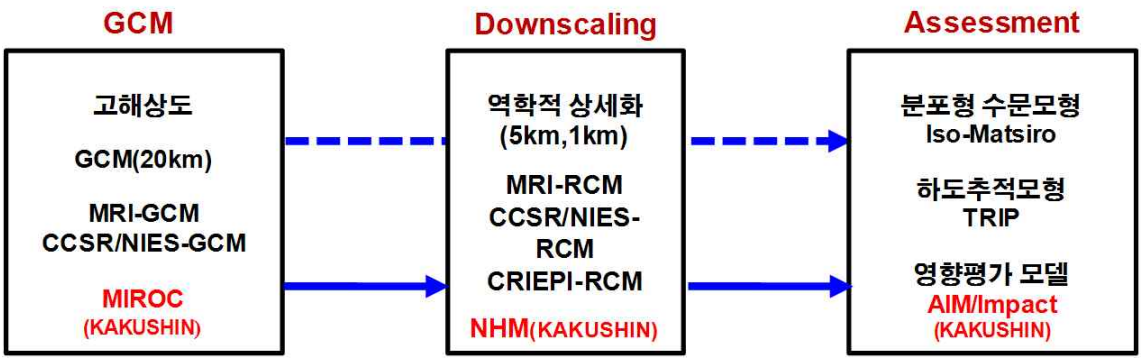


Fig. 2.1.11 일본의 기후시나리오 생성과 수문시나리오 생성 과정

이러한 수문모형을 이용하여 일본의 수문시나리오는 생산되고 있으며, TRIP 모형은 수문모형의 유출량 자료를 받아 전국하도망지도를 이용하여 유출변화를 예측하는 하도추적모형으로 일본전역의 84개 하천에 대한 홍수예보를 실시간으로 제공하고 있는 모형이다. 그리고 AIM/Impact 모형은 온실가스배출을 추정하여 전국평균기온을 산출하고, 산출된 전국평균기온을 이용하여 하천유량 및 유량확률지수를 산정하는 모형이다. 지금까지 언급한 일련의 과정을 거쳐 일본의 기후시나리오와 수문시나리오는 생산이 되며, 여기서 생산된 수문시나리오를 이용하여 수자원 및 수재해 등의 영향평가가 수행된다.

(5) 한국

국내에서는 1990년대 이후부터 기후변화 연구의 필요성을 인지하고 몇몇 연구가 진행되어 왔다. 기후변화에 따른 수자원 측면에서의 영향평가 연구로는 「기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발 Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ」(한국과학기술연구원, 1993, 1994a, 1994b),「지구환경의 변화에 따른 한반도 수문환경의 변화 연구」(윤용남 등, 1998), 「기후변화에 따른 수자원계획의 영향평가」(한국건설기술연구원, 2000),「기후변화에 의한 수자원 영향평가 체

계구축」(과학기술부, 2007), 「기후변화 영향평가모형의 개발; 물관리부문 중심으로」(환경부, 2007년)등의 연구가 수행되었다.

이후 프론티어사업단의 「기후변화에 의한 국가 수자원 영향 분석 및 평가 체계 적용」(2007~2011년)에서는 영향평가 시 발생하는 불확실성을 분석하기 위해 Multi-Model Ensemble 기법을 도입하였고, 그 결과로 3개 시나리오(A2, A1B, B1), 13개 GCM, 8개 유출모형을 이용하여 국내 109개 유역에 39개 미래 기후 시나리오, 312개 미래 수문 시나리오를 생산하여 영향평가를 수행하였다(Table 2.1.1).

Table 2.1.1 국내 기후변화 수자원 영향평가 사례 조사

	1	2	3	4	5	6
대상유역	금강유역 4개 기상관측지점	용담댐유역	금강유역	국내 139개 단위유역	139개 한강 소유역	국내 109개 중권역
자료기간		1961~1980 2031~2050	1980~2049	1971~2100	2010~2090	1971~2099
온실가스배출시나리오	1CO2, 2CO2	1CO2, 2CO2	B1	A2, B2	A2	A2, A1B, B1
기후모델	MRI GCM	YONUGCM	5개 GCM	ECHO-G	ECHO-G	13개 AOGCM
상세화 기법 I	SDMAM	전이함수 모형	SNURCM	MM5	RegCM3	CSEOF 및 다중선형회귀분석
상세화 기법 II	IRSHAM96	WG(WGEN)		LARS-WG	비정상성 Marcov Chain 축소기법	WG(WXGEN)
수문모형	IRSHAM96	SLURP	abcd	PRMS	SLURP	PRMS, SWAT, SLURP
강수량 분석결과	2CO2일 경우 강수량 감소			2075s ,최대 15% 증가		2090년 경에 A2: 6% 증가 등
유출량 분석결과		7.6% 감소		2075s 전체 유역의 변화율 0.86~1.2	총 유출량의 경우 1.1% 증가	전체 유역 평균 2080s 14.3% 증가 등

참조 1. 윤용남 등(1994) 지구온난화에 따른 한반도 수문환경의 변화 연구
2. 김병식 등(2004) 기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향
3. 강동현 등(2006) 기후변화에 따른 금강유역의 취약성 및 적응전략
4. 배덕효 등(과기부, 2007b) 기후변화에 의한 수자원 영향평가 체계 구축
5. 국토해양부(2009) 기후변화대비 국가 물안보 확보방안
6. 배덕효 등(교과부, 2009) 기후변화에 의한 국가 수자원 영향 분석 및 평가 체계 적용

최근 국가개발연구사업 중 「기후변화 대비 국가 물안보 확보방안」(국토해양부, 2009) 연구에서는 수자원에 대한 기후변화의 영향을 평가하고, 기후변화로 인해 발생하는 홍수, 가뭄 그리고 생태환경 변화에 대처할 수 있는 국가 물안보 확보 방안을 제시하였다. 다만, 단일 기후시나리오 및 수문시나리오를 기반으로 분석된 결과이므로 미래의 기후변화에 따른 수자원의 영향을 평가하는데 전제가 되는 불확실성을 정량화하는 부분

이 미비하다고 분석되었으며, 분석유역이 특정유역에 국한되어 있다는 점에서 한계가 있다. 또한, 프론티어사업단의 「기후변화에 의한 국가 수자원 영향 예측 및 평가시스템 구축」연구에서는 다양한 GCMs와 시나리오의 적용을 통해 전망 결과의 불확실성과 지역기후모형의 적용성을 평가하였으며, 도시화로 인한 유역특성과 토지이용도의 변화가 미래 수자원에 미치는 영향을 평가하였다. 일기발생기를 통한 유역스케일 기후시나리오 생산 적합성을 평가하였으며, 이를 유역의 수문모형의 수문시나리오로 입력하여 유역의 수문량 변동성을 분석·평가하였다. 특히 기후변화에 따른 국내 수자원 영향평가 결과를 우리나라 전역에 대해서는 최초로 제시하였다. 다만, 극치사상을 반영한 기후시나리오의 평가가 미진하였으며, 상세화 과정에서 시공간 상관성을 고려하지 못하는 한계를 가지고 있다(Fig. 2.1.12).

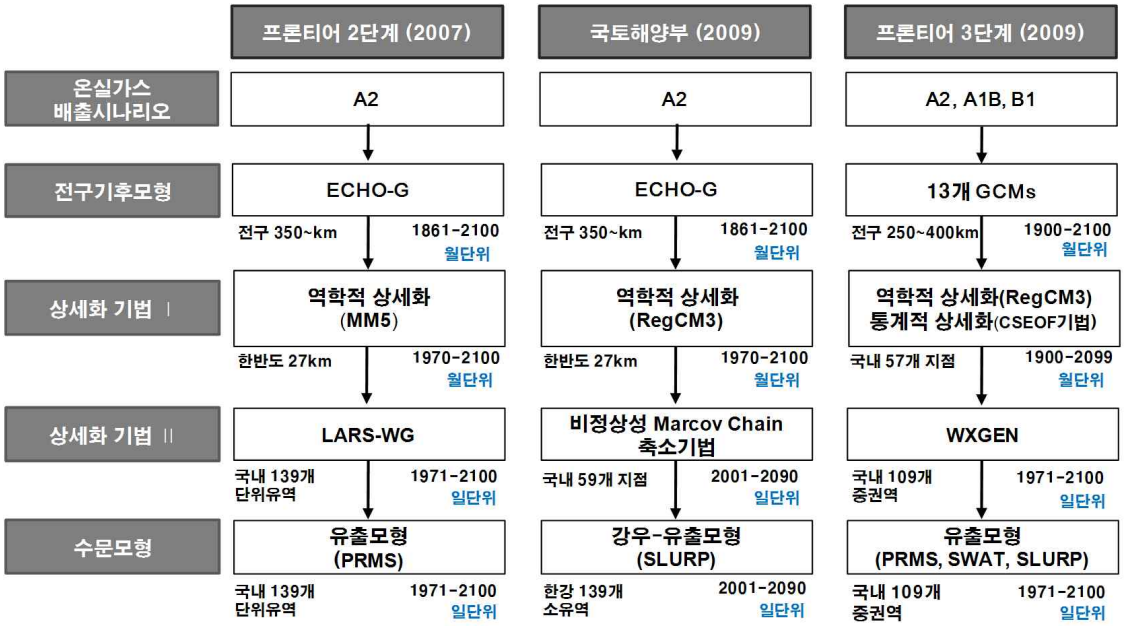


Fig. 2.1.12 국가개발연구사업의 기후변화 수자원 영향평가

(6) 국가별 비교

국내외 연구사례에서 살펴본 바와 같이 대부분의 수자원 영향평가는 온실가스 배출시나리오 및 GCM 기반의 기후시나리오를 이용하여 수행되었다. 이러한 연구들에서의 주요 특징으로는 AR4에서 사용된 배출시나리오 및 GCMs을 활용하여 기후변화 시나리오를 생산하였다는 점과 MME 기법을 적용하여 배출시나리오 및 GCMs 모델차이에서 오는 불확실성을 고려하여 수자원 영향평가를 수행하였다는 점, 국가적 유출특성을 반영할 수 있는 강우-유출 모형을 활용하였다는 점을 들 수 있다. 일본의 경우 최근 IPCC에서 제시한 대표농도시나리오(RCP)를 기반으로 연구를 수행 중이며, 고해상도의 GCM 및 RCM 결과를 이용하여 극치사상을 모의하는 기후시나리오를 생산하고 있다. Table 2.1.2는 각 국가별 수자원 영향평가 시 사용되었던 온실가스배출시나리오, GCM, 상세화기법, 수문모형들을 비교하여 제시한 것이다.

Table 2.1.2 국가별 수자원 영향평가 비교

국가	온실가스 배출시나리오	GCM	상세화기법	수문모형
미국	A2, B1	AR4에 참여한 모델들	통계적상세화 (Bias Correction & Down Scaling)	VIC model(분포)
영국	A1B, B, A1FI	HadCM3	역학적상세화(HadRM3)	G2G model(분포)
호주	A1T, B1, 평균치	AR4에 참여한 15개 모델	통계적상세화 (Daily scaling method)	SIMHYD(집중)
일본	A2, A1B	MRI-GCM,CCSR/ NIES, MIROC	역학적상세화 (MRI-RCM, CCSR/NIES-RCM, NHM)	Iso-Matsiro (분포)
한국	A2, A1B, B1	AR4에 참여한 13개 모델	통계적상세화/역학적상세화 (CESOF,다중선형회귀분석, WXGEN/MM5, RegCM3)	PRMS(준분포) SWAT(준분포) SLURP(준분포)

나. IPCC AR5을 위한 RCP 시나리오 생산

IPCC에서는 1990년에 First Assessment Report (FAR), 1995년에 Second Assessment Report (SAR), 2001년 Third Assessment Report (TAR)를 발표하였다. 2007년에 발표한 IPCC 4차 평가보고서(AR4)에서는 SRES(Special Report on Emission Scenario)에서 발표한 온실가스 배출시나리오를 기준 시나리오로 채택하였다. 최근 발표된 대부분의 기후변화 연구는 AR4 기후시나리오 기반으로 평가되었으며, 이는 기후변화 연구에 있어 IPCC 기후시나리오가 공인된 자료라고 할 수 있다.

최근에는 IPCC 제5차 보고서에 기여하기 위해 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)가 추진 중이다. 또한 온실기체의 증가 양상에 대해 이전과 달리 대표 농도시나리오를 도입하였다. 대표적인 농도 변화(Representative Concentration Pathways; RCP)에 대한 시나리오를 결정하기 위해서 300여 개 이상의 논문과 보고서에 출간된 시나리오들을 점검하였다. 이 중에서 주요한 복사 강제력을 고려한 30개의 시나리오를 후보로 선택하여 각 시나리오마다의 온실 가스 배출 최고·최저치를 나타내었다. 그리고 이 30개의 후보에서 바람직한 범위, 안정성, 개수, 분리성, 포괄성 등에 기초하여 최종적으로 가장 이상적인 4개의 시나리오를 선택하였다. 이 시나리오들은 4개의 그룹 (MES-A2R, AIM, MiniCAM, IMAGE)에서 개별적으로 개발하였으며, 이를 각각 RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5, RCP 3이라고 명명하였다.

따라서, 2013년 경에 발표예정인 AR5 수록을 위해 대부분의 국가와 기상 전문기관에서 RCP 시나리오를 이용한 기후시나리오 생산에 돌입하였으며, 국내 기상연구소에서도 2011년에 RCP4.5, RCP8.5를 기반으로 한 기후시나리오를 생산하였다.

2. 기후변화에 따른 중단기 수문전망

국내외 문헌 조사를 통하여 기후변화-수문/기상 변동, 통계분석/예측 기술, 기후변화로 분류하고 다시 세분류로 기후변화 수문/기상 변동부분은 기상, 수문, 수환경, 통계분석, 시나리오기반예측, 비시나리오기반 예측, 취약성, 통계분석/예측 기술 부분은 통계적 추세분석, 신경망예측모형, Wavelet분석, 기후변화 부분은 기후변화의 특성 및 현황으로 조사 및 분석을 실시하였다.

국외 기후변화로 인한 수문 변화 분석기술은 단일 혹은 여러 전 지구 기후모형(Global Climate Models, GCMs)으로부터의 미래기후정보를 바탕으로 이를 직접적으로 사용하거나 적절한 기법을 통하여 규모상세화한 결과를 강우-유출모형에 적용하여 유역의 유출반응을 살펴보는 방향을 취하는 것이 일반적이다(Hanratty and Stefan, 1998; Stonefelt, 2000; Gosain et al., 2006; Jha et al., 2006; Githui et al., 2008). 특히, Bouraoui et al.(2002)에서 살펴볼 수 있는 바와 같이 수질에 대한 영향을 분석하는 연구 또한 진행되고 있다. 또한 여러 GCM의 결과를 바탕으로 이에 대한 불확실성분석(Takle et al., 2005)이나 GCM 결과를 유역모형에 적용함에 따라 발생되는 불확실성 분석(Jha et al., 2004) 등도 찾아볼 수 있다. 그리고 Noriatusu Ozaki et al(2008)에서 살펴보면 일본의 Ota, Shinano, Tama, Okuri, Hoshioki 강의 기온, 강우, 유출, 수질의 일자료를 수집하여 변동성분석, 지구온난화로 인한 수온의 상승, 수질 변화를 분석하였고, Jean C. et al.(2005)에서는 전 세계 13개국 43개강의 일기온자료 및 최대, 최소값을 GLOBE(Global Learning and Observation to Benefit the Environment)에서 획득하고, 미래 기온변화 분석을 위하여 SRES3 시나리오를 사용하여 기후변화와 기온, 수온과의 관계를 분석하여 기후변화로 인한 기온환경에 끼치는 영향을 분석하였다. 또한 신경망-Wavelet 시계열 예측 기술로는 Paulin Coulibaly(2001)와 F.S. MPELASOKA(2001)이 실시하였으며, 연구에 따르면 신경망 기법 특징은 Non-parametric, Non Statlonary Optimal Prediction and Forecasting이고, 수문/기상 예측 분야에 이제는 범용으로 활용을 하고 있으며, 세계적인 기후변화 분야에는 아직 국한적으로 활용하고 있다고 나타내었다. 그리고 비시나리오 예측에 유리함을 나타내었다. 또한 미국에서 워싱턴 기후변화 영향평가(2009)연구사례를 살펴보면 GCM과 RCM을 적용하여 기후변화 영향을 분석하였으며, 기후변화에 따른 다방면 즉 하천유량, 수자원 관리, 수력발전, 해안지역, 해수면상승, 농업, 산림, 생태계, 도시강우 처리시설 그리고 공공위생의 영향에 대하여 분석하였고, Francis Chung(2009)를 보면 과거자료를 통한 비시나리오 기반 기후변화 경향을 GCMs을 적용하여 분석하였으며, 기후변화에 따른 하천유량, 해수면, 저수지 공급량, 지하수 양수량, 수력발전 전력공급량의 영향에 대하여 분석한 사례를 볼 수 있다. 또한 Kieran conlan(2005)를 살펴보면 기후변화에 따른 담수생태계 변화에 주목하여 연구를 실시하였으며, 수문모형 및 개념적인 생태모델을 적용하여 하천유량, 생태계 변화영향을 분석하는 등의 기술을 보유하고 있었다.

분석 결과 비시나리오 기반 중단기 수문예측기술은 4가지 분석기술요소로 분류 할 수 있으며, 기후변화 통계 특성 분석기술로서 Statistical Trend Analsis와 Regression Analsis, Elasticity Analsis를 포함하고, 공간 특성 분석 기술로서 Kliging, Neural Networks를 포함한다. 그리고 주기 특성 분석 기술로서 Stochastic Tech와 Neural

Networks를 포함하고, 시계열 예측 기술로서 Fourier Transform과 Wavelets을 포함하며 각 기술 요소별로 검토기술 및 적용 검토하였다.

Table 2.1.3 각 기술별 기술 요소 적용 검토

기술 요소	검토 기술	적용 검토
1. 기후변화 통계특성 분석 기술 (Statistical Characteristic Analysis, SCA I)	• Statistical Trend Analysis (STA) - Parametic Method (PM) - Non-Parametic Method (NPM)	• 가능한 다양한통계분석 기술 활용 (주요기술성분) • STA-NPA • RA-GRNN • EA-CEA/MEA
	• Regression Analysis (RA) - Linear Regression (LA) - Non-Linear Regression (NLA) - General Regression Neural Net (GRNN)	
	• Elasticity Analysis - Cross-Elasticity (CEA) - Multiple-Elasticity (MEA)	
2. 공간 자료 분석기술 (Spatial Characteristic Analysis, SCA II)	• Statistical SCA II (SSCA) - Kriging (OK) - Universal Kriging (UK) - Block Kriging (BK) • Non-linear SCA II(NSCA) - Neural-Kriging (NK) - Spatial Analysis NN (SANN)	• 통계 공간 분석 기법과 비선형 공간분석기법 동시 사용 비교 - UK - SANN(자체개발)
3. 주기 특성 분석 기술 (Spectrum Characteristic Analysis, SCA II)	• Fourier Transform (FT) • Wavelet Transform (WT) - Continouse WT (CWT) - Discrete WT (DWT) - Cross WT (CWT) - Packet WT (PWT)	• 주기 특성 분석기본적으로 WT 적용 - DWT (단일자료) - CWT (복합자료)
4. 시계열예측 기술 (Time-Series forecasting, TSF)	• Stochastic TSF (STSF) - MARIMA - Transfer Function Model (TFM) • Neural Network TSF (NTSF) - Back Propagation (BP) - Radial Basis Function (RBFN) - Probabilistic NN (PNN) - General Regression NN (GRNN) - Probabilistic Forecasting NN (PFNN) - Wavelet-Neural Network (WNTSF) - WNTSF-DP - WNTSF-PFNN	• 신경망 예측 기법 중심으로 추계기법 비교 분석 - NTSF-BP - NTSF-RBFN - NTSF-PFNN (자체개발) • Wavelet과 NN을 통합한 예측 모형 개발 -WNTSF-PFNN(자체개발)

본 연구에서의 주요연구 내용으로는 한국 수문 변수 통계적 경향성 분석과 한국 유역 단위 중단기 수문전망 그리고 태풍특성 분석 및 전망을 들수 있는데 한국 수문 변수 통계적 경향성 분석의 상세 분석으로 비모수적 경향 특성 분석과 변수간 비선형 상관회귀 특성, 변수간 탄성도 분석, 주기특성분석이 포함되며, 한국 유역 단위 중단기 수문전망의 상세분석은 경향(추세)예측, 다변 시계열 예측, 비선형 공간분포 예측이 포함된다. 또한 태풍특성 분석 및 전망의 상세분석은 태풍 빈도/강도 시계열 특성과 태풍 빈도 주기 특성이 포함된다.

3. 유역단위 시공간적 스케일 상세화

스케일상세화가 의미를 가지기 위해서는 몇 가지 전제조건이 형성되어야 한다. 첫째는 평가모형(impact model)이 GCM모형의 스케일에 비하여 현격히 상세한 스케일의 정보를 요구하는 상황이어야 한다. 여기서 평가모형이란 환경평가(environmental impact), 생태평가(ecological impact), 수문평가(hydrologic impact) 등을 포함하고 있는데, 만일 평가모형이 GCM모형에서 제공하는 수준의 상세정보로 평가가 가능하다면 굳이 상세화를 수행할 이유가 없으며, 평가모형에서 요구하는 상세화수준에 따라서도 상세화기법의 종류를 적절히 선택해야 한다. 둘째는 계산부하가 작아야 한다. 기후변화연구는 본질적으로 미래에 대한 예측이 아니고 가상적으로 설정한 시나리오에 대한 대기상태변화를 추정하는 작업이다. 따라서 설정된 시나리오 자체에서부터 모형의 알고리즘, 초기 및 경계조건등 다양한 소스로부터 불확실성이 개입하게 된다. 따라서 전망과 함께 전망의 불확실성이 동시에 중요한 의미를 지니며, 불확실성을 산정하는 기법으로서 앙상블기법이 가장 보편적으로 활용되고 있다. 앙상블기법은 반복계산을 요구하는 과정이며, 따라서 상세화모형의 계산부하가 작을수록 반복계산에 유리하다. 셋째는 원스케일(original scle)과 목표스케일(target scale)을 감안하여 최적의 기법을 선택해야 한다. 이를 위해서는 평가의 목적에 따라 적절한 목표스케일을 설정하는 것이 우선적으로 중요하며, 원스케일과 목표스케일사이의 스케일분석(scaling analysis)를 통하여 스케일에 따른 변수값의 변화패턴을 분석하고 스케일특성에 적합한 상세화기법을 선택해야 한다.

스케일 상세화 기법은 모델링의 방법에 따라 크게 통계적(Statistica) 상세화기법과 역학적(dynamic) 상세화기법이 사용되고 있다. 역학적 상세화기법은 GCM의 모의값과 유역에서의 관측값 사이의 중규모(meso-) 혹은 미소(micro-)규모에 대한 스케일특성에 따른 물리적 관계를 이용시키는 기법으로 GCM의 큰 격자(100km~300km)에서 작은 boundary를 주어 지역의 상세한 분석을 실시한다. 하지만 계산부하나 방대한 요구자료, 모형의 검보정 등이 문제가 되고 있으며, 흔히 범지구 기후모형에서 사용하는 매개변수들은 지역에서의 실험에 의하여 결정되고, 이것이 지구모의를 수행하는데 사용됨으로 인하여 변수의 지역값을 모의하는데 신뢰성을 의심받기도 한다(von Storch et al. 1933). 더욱이 역학적 과정에 대한 이해의 부족, 아격자 단위의 매개변수화의 필요성, 초기조건이나 경계조건에 대한 정확한 정보의 부족 등으로 말미암아 현재의 물리적 기반의 대기모형은 스케일에 따른 관측강우의 통계적 특성을 충분히 모의하는데는 문제점을 보이고 있다. 통계적 상세화기법은 과거 관측자료로부터 GCM 기후변수들간의 상관관계를 추정하여 미래전망을 모의하는 기법으로 낮은 계산부하와 수문시나리오 앙상블 생산을 통해 불확실성에 대한 분석이 가능하다는 장점을 가지고 있다(Table 2.1.4). 최근에는 인공신경망(ANN; Artificial Neural Network)이나 퍼지이론 등의 인공지능기법을 이용한 비선형 적합모형도 활발히 적용되고 있으며, ±25km수준까지는 역학적 모형을, 그 이하는 확률모형을 적용하는 혼합모형(Hybrid model)이 시도되고 있다(Williems et al., 2009).

Table 2.1.4 상세화기법 비교 (Wilby, 1998)

	통계적 상세화기법	역학적 상세화기법
장점	- GCM스케일의 결과값으로부터 **관측소 스케일의 기후정보생산**이 가능 - 저비용, **낮은 계산부하**, 전송이 용이 - **수문시나리오 앙상블 생산**을 통해 리스크/불확실성분석이 가능	- GCM스케일의 결과값으로부터 **10~50km 해상도의 기후정보**생산이 가능 - 서로 다른 외부강제력에 대하여 **물리적으로 일관성있는 반응**을 생산 - 산지효과와 같은 물리적요소에 대한 **대기과정을 현실적으로 모의**가능
단점	- GCM경계조건에 지나치게 의존적 - 도메인크기와 위치의 선택이 결과에 영향을 미침 - 모형검증을 위하여 고품질 자료가 요구됨 - **비정상적(non-stationary) 경험식**이 사용됨 - **예측인자(predictor)의 선택**이 결과에 영향을 미침	- GCM경계조건에 지나치게 의존적임 - 도메인크기와 위치의 선택이 결과에 영향을 미침 - **고성능 연산장비**가 요구됨 - **앙상블모의자료 생산이 곤란** - 초기조건이 결과에 영향을 미침

본 연구에서는 통계적 상세화기법의 기법과 관련된 문헌조사 및 최근 연구성과에 대하여 집중적으로 조사하고 분석하고자 하였다. 통계적 상세화기법과 인공신경망(Artificial Neural Network)기법에 대한 연구논문 및 보고서에 대하여 조사하였으며, 통계적 상세화기법은 Weather generator 기법, Weather typing, Regression법에 대하여 조사・분석하였다(Fig. 2.1.13).

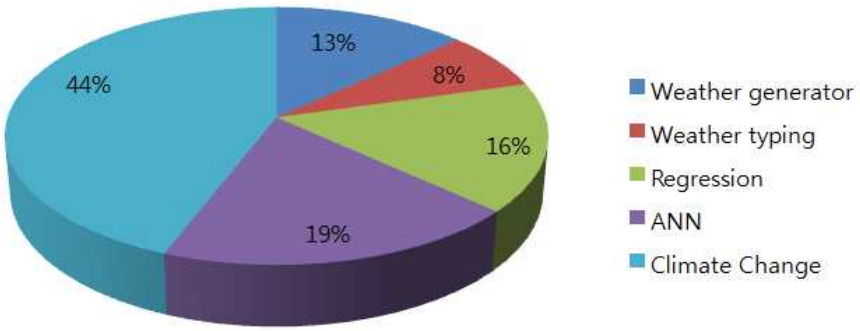


Fig. 2.1.13 스케일상세화 기법의 분류 및 적용빈도 조사 결과

초기의 상세화기법은 지역규모의 대기예측변수(해수면기압, 기온, 와도 등)를 기온이나 강우 등에 대한 관측밀도 스케일로 내삽하는데 사용되었다(Kim et al. 1984, Epstein and Ramirez 1993, 1994). 대부분 그들은 월평균이나 면적평균(105~106 km^2)값을 예측변수로 사용하였으나, Epstein and Ramirez(1993, 1994)는 일자료값을 사용하기도 하였다. 상세화기법은 크게 2가지의 범주로 구분되는데, 첫 번째로 역학적 상세화기법은 물리적 과정을 바탕으로 한 둥지격자 기반의 대기모의모형이다. 두 번째로 통계적 상세화기

법이며, 대표적인 기법으로 Weather typing, Weather generator, Regression모형 등이 있고 각 기법의 장단점은 Table 2.1.5에 정리되어 있다. Weather typing기법은 아나로그법, 합성법, 퍼지분류법, 자기조직도등의 기법을 포함하고 있으며, 주로 극치사상해석을 위해 적용되고 있다. Weather generator기법은 마코프연쇄모형과 같은 추계학적모형이 해당되며, 불확실성분석이나 극치분석을 위한 앙상블 생성에 유리한 모형이다. Regression기법은 인공신경망, 주성분상관분석모형 등이 대표적이고 이해하기 쉬운 직관적모형이며 기 개발된 패키지들이 가용하다는 장점이 있다.

Table 2.1.5 Classification of statistical downscaling (Wilby, 2004)

기법	장점	단점
Weather typing	- 지표면기후에 대하여 **물리적으로 해석가능한 결과**를 생산 - 융통성 (지표면기후, 대기질, 홍수, 세굴 등에 적용) - **극치사상해석**을 위해 합성	- 기상분류를 위한 추가작업이 요구됨 - 순환기반기법(circulation-based scheme)이 미래기후강제력에 민감하게 반응하지 않을 수 있음 - 지표면기후에 있어서 내부형태 변동성이 구현되지 않을 수 있음
Weather generator	- 불확실성분석이나 극치분석을 위한 **앙상블생성**이 가능 - 지형태정보를 이용한 모형 **매개변수의 공간내삽** - **일단위이하의 정보생산**이 가능	- 미래 기후에 대한 매개변수의 임의적 보정 - 강수매개변수변화에 대한 2차 변수들의 불필요한 영향
Regression 법	- 상대적으로 **직관적 접근** - 가용한 예측인자 전체를 사용 할 수 있음 - 기 개발된 소프트웨어 사용가능	- 관측된 분산정보에 대한 재현이 미흡 - 자료의 선형성 및 정규성을 가정 - 극치사상의 재현이 미흡

국내에서의 상세화연구는 최근에서야 주목을 받고 있다. 김맹기(2005)는 NCEP/NCAR 재분석자료를 이용하여 동아시아 몬순영역에 대한 월평균자료를 이용하여 1954~2000년 기간에 대하여 통계적 상세화모형을 수립하고 검증하였다. 신진호 등(2009)은 경험적 직교함수를 이용하여 ECHO-G/S에 의하여 모의된 기온자료에 대한 상세화를 수행하였다. 강우전망에 주목하는 수공학분야에서의 최근 상세화연구성과로 권현한과 김병식(2009)이 비정상성 마코프연쇄모형(Markov Chain Model)을 이용하였는데, 천이확률과 확률분포모수를 외부인자와 연동하여 비정상성을 구현하였다.

4. 극한홍수량 전망 기술 개발

전 세계적으로 이상홍수, 극한홍수, 열대성 저기압 등의 빈번한 발생으로 인해 홍수피해가 급증하고 있으며, 기후변화가 수문량에 미치는 영향에 대한 관심도 높아지고 있는 만큼 설계홍수량 산정을 비롯하여 극한홍수량 산정 기술은 지속적으로 사용될 것으로 예상된다.

전세계적으로 극한 홍수에 대비하기 위한 노력이 이루어지고 있으나 기후변화 시나리오와 전지구모형 및 지역기후모형을 활용하는 최신 기술로부터 극한 강우 및 극한 홍수를 추정하는 기술의 개발은 미비한 실정이다. 이러한 상황에서 본 연구를 통해 개발하고자 하는 기후변화를 고려한 극한홍수량 전망 기술은 우리나라뿐만 아니라 해외에서의 관련 연구에서도 관심을 기울일 만한 내용이 될 수 있다.

기후변화가 수자원에 미치는 영향에 대한 연구는 1990년대 들어 꾸준히 진행되어 왔고, 최근에는 기후변화로 인한 극한수문량의 미래 상황을 전망하는 연구도 활발히 진행되고 있으나 이에 대한 국내 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 다양한 기후변화 시나리오를 적용한 홍수량 전망의 국내외 연구 사례들을 검토하여 기후변화를 고려한 극한홍수량 전망 기술 개발을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

기후변화를 고려한 극한홍수량 전망에 대한 연구는 1990년을 기점으로 연구가 진행되어 왔으나 본 연구에서는 2000년부터 2010년까지 최근 문헌들을 중심으로 조사, 분석하였다. 문헌 조사는 Table 2.1.6에 제시한 조사 범위를 바탕으로 국내외 학술지와 국내 연구 보고서를 중심으로 수행하였다.

Table 2.1.6 문헌 조사 범위

Journal	연도	2000년 ~ 2010년
	총 편수	26편
	저널명[1)]	KWRA(5) HP(2) JH(13) CC(2) 기타(4)
Research Report	연도	2000년 ~ 2010년
	총 편수	9편(다년도과제 포함)
주요 내용		기후변화에 따른 강우량 및 유출량 전망, 기후변화에 따른 극한강우량 및 극한홍수량 전망 등
키워드		climate change, GCM, RCM, (extreme) precipitation(rainfall), (extreme) runoff/discharge, flood, IDF 등

1) CC: Climate Change
JH: Journal of Hydrology (ScienceDirect)
KWRA: Korea Water Resources Association
HP: Hydrological Processes
기타: Hydrology and Earth System Sciences
Journal of Geophysical Research
Korean Society of Civil Engineers
Theoretical and Applied Climatology
Quaternary International

기후변화가 수자원에 미치는 영향을 고려하기 위하여 GCM으로부터 유출량을 전망하는 기술이 개발되었고, 이에 대한 연구는 꾸준하게 진행되고 있다. 국외의 GCM은 1990년대 기상학 분야에서 개발되었으며 수문학 분야에서도 1990년대부터 활용되었다. 일반적으로 기후변화 시나리오와 GCM을 선택, 조합하여 산출된 결과를 강우-유출 모형에 입력하고 그 결과 산정된 유출량을 분석함으로써 기후변화에 따른 수자원의 변동성과 그 영향을 평가하는 방법이 주를 이뤄 왔다. GCM은 지역적 특성을 반영하기에는 해상도가 충분하지 않으므로 상세화 과정을 적용한 RCM을 생성하는 기법이 개발되었고, GCM을 RCM으로 상세화 시키는 방법과 RCM을 활용하는 방법에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. RCM의 활용 이후 전반적인 수자원의 변동에 국한되었던 기후변화 연구는 기후변화가 극한수문량에 미치는 영향을 검토할 수 있는 정도로 확장되었고, 최근 들어 기후변화에 따른 극한홍수량 전망과 관련된 연구가 진행되고 있는 것으로 판단된다.

대표적으로 Cameron(2006)은 UKCIP02 시나리오를 기반으로 한 HadRM3H 모형 결과와 TOPMODEL을 활용하여 스코틀랜드 북부 Lossie 유역의 홍수 빈도 변화를 분석하였고, Kay et al.(2006a, 2006b)은 UKCIP02 시나리오를 기반으로 한 HadRM3H 모형 결과와 PDM(Probability Distributed rainfall-runoff Model)을 활용하여 영국 15개 유역에 대해 연강우량과 홍수 빈도의 상관관계를 밝히고, 강우분포가 홍수 빈도에 미치는 영향을 검토한 바 있다. Lenderink et al.(2007)은 A2 시나리오를 기반으로 한 HadRM3H 모형 결과와 유출 모의 기법을 바탕으로 확률홍수량의 변화를 분석한 바 있다. 이와 같은 문헌 이외의 기후변화를 고려한 유출량 및 극한강우량과 극한홍수량 산정에 대한 국외 문헌조사 내용을 Table 2.1.7에 정리하였다.

미국의 경우 NWS(National Weather Service) 산하의 NOAA에서 미국 내 기후가 비슷한 지역별로 확률강우량도 및 가능최대강수량도를 작성해 나감으로써 극한수문량 발생에 대비할 수 있는 기초 자료를 구축해 나가고 있다. 영국의 경우 Institution of Hydrology에서 홍수빈도해석에 적합한 확률분포형으로 Generalized Logistic 분포를 추천하면서 지역빈도해석을 적용할 것을 권장하였고, Center of Ecology & Hydrology에서 강우-유출 모형인 ReFH를 개발하여 기저유출과 직접유출을 구분하여 유출량을 산정할 수 있도록 하고 있다. 호주의 경우 Institution of Engineers에서 유역특성정보를 활용한 면적 가능최대강수량 모형을 구축하고 Australian rainfall and runoff model을 개발하여 기후변화를 고려한, 지속적인 기술개발을 이루어 나가고 있다.

Table 2.1.7 기후변화를 고려한 극한수문량 전망 - 국외 연구동향

번호	저자	출판 년도	주요내용				구분
			적용지역	모형 및 시나리오	강우유출모형	주요 결과	
1	Yu et al.	2002	Taiwan		HBV	- HBV 모델을 적용하여 타이완 남부 지역의 과거기후변수들의 경향성을 분석하고 미래의 유출량을 예측 - 전망 기간의 유출량은 우기에 증가하고 건기에는감소하는 것으로 나타남.	기후변화에 의한 유출량 변화
2	Legesse et al.	2003	Ethiopia		PRMS	- PRMS 모델로 토지피복변화와 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 시뮬레이션 하였으며 일 단위와 월 단위 모두에 잘 맞는 것으로 나타남. - 강수량, 온도, 토지 피복도 모두 유역의 유출량에 영향을 미치는 것으로 나타남.	기후변화에 의한 유출량 변화
3	Drouge et al.	2004	Luxembourg	- KNMI CE - KNMI UE - UKHI	HRM	- 중규모 유역에서 다양한 기후변화 시나리오의 적용은 유출량과 공간적 분포에 막대한 영향을 미치며,수문학적 변수들에 따라 중규모의 기후변화의영향은 크게 달라질 수 있음. - 중규모 유역의 기후 및 물리, 지형적 특징은 유출의 공간적 변동성에 크게 영향을 받음.	기후변화에 의한 유출량 변화
4	Eckhardt and Ulbrich	2003	Germany	- B1-low - A2-high	SWAT-G	- SWAT 모형을 이용하여 2가지 기후변화 시나리오를 비교한 결과, 온난화로 인한 적설량은 감소하였으나 겨울의 홍수위험도는 증가함. - 여름에는 월평균 지하수 충전량과 지표유출량은50%까지 감소할 것으로 예측됨.	기후변화에 의한 유출량 변화
5	Merritt et al.	2006	British Columbia	- CGCM2 - SCIROMk2 - HadCM3	UBC	- 모든 시나리오는 해빙기가 일찍 시작되어, 강우가 수문곡선의 대부분을 차지할 것이라고 예측하였으며 봄 기간의 유출량이 크게 감소할 것이라고 예측 - 기후모델 중 CGCM2가 기후변화에 미치는 영향이 가장 작게 예측되었고, SCSIROMk2 모델이 적설량이 가장 크게 줄어들 것이라 예측함.	기후변화에 의한 유출량 변화
6	Thodsen	2007	Denmark	- HIRHAM	NAM	- 시뮬레이션 결과, 1961~1990년대보다 예측된 기간에 연평균강수량이 7% 상승, 증발산량은 3% 증가, 유출량은 12% 증가, 극한홍수량과 극한강우량도 증가하는 것으로 나타남. - 재현기간 100년의 홍수량도 11% 증가하는 것으로 나타남.	기후변화에 의한 극한수문량 변화

번호	저자	출판 년도	주요내용				구분
			적용지역	모형 및 시나리오	강우유출모형	주요 결과	
7	Xu et al.	2009	China	- CGCM2 - CCSR - CSIRO - HadCM3	SWAT	- 4개의 GCM 모델과 두 개의 상세화 기법 모두에서 최고기온 및 최저기온이 크게 증가한다고 예측하였고, 강우량은 약간 증가한다고 예측 - 황하 유역의 연평균유출량은 전체적으로 증가한다고 예측	기후변화에 의한 유출량 변화
8	Mailhot et al.	2007	Quebec, Canada	- SRES-A2 - CRCM	-	- CRCM 추정치가 관측치에 의한 추정치와 유사함. - 미래에는 공간적 상관성이 감소되는데, 이는 연최대강우사상이 더욱 국지적이 됨을 의미함.	기후변화에 따른 강우량 변화
10	Ekström et al.	2005	UK	- HadRM2 - HadRM3H - SRES A2	-	- A2 시나리오를 바탕으로 영국에서 RFA/GBA를적용하여 미래의 극한강우량 변화를 살펴봄. - 짧은 지속기간(1~2일)의 경우 Scotland에서 재현기간 25~50년에 대해 30%이상 증가함. - 나머지 지역의 경우 10% 증가를 보이나, 재현기간이 더클 경우에는 오히려 20%이상 감소함.	기후변화에 따른 극한강우량 산정
11	Kyselý and Beranová	2009	Central Europe(Czech Republic)	- RCM - GHG - SRES A2 - SRES B2	-	- 극한일강우사상에 대한 기후변화의 효과를 추정하기 위해 RCM에 POT 기법을 적용하였음. - 극한강우사상은 겨울 및 여름철에 증가함. - 변화의 양상과 크기 측면에서 모형들의 변동성과 관련된 불확실성은 크나, 시나리오들은 이 지역에서 관찰되는 강우의 경향과 일치하는 경향이 있음.	기후변화에 따른 극한강우량산정
12	Fowler et al.	2005	UK	- HadRM2 - HadRM3H	-	- 관측값과 모형값 사이의 해상도 차이에도 불구하고 RCM은 영국 대부분 지역에서 50년 빈도 이상의 극한강우량을 잘 산정함. - RCM은 기후변화 상황에서 극한강우가 어떻게 변화하는지를 잘 보여줄 것으로 기대됨.	기후변화에 따른 극한강우량산정
13	Booij	2002	The Meuse basin situated in France, Belgium and the Netherlands.		-	- 기후변화가 홍수량에 미치는 영향 평가를 위한 적절한 river basin model의 선정 절차 개발 - 기후변화에 따른 연평균유출량의 감소, 유출량의 변동성과 극한홍수량의 증가 - 기후변화에 따른 극한홍수량의 불확실성은 강우의 외삽오차에 의한 영향이 가장 큰 것으로 판단됨.	기후변화에 따른 극한홍수량산정
14	Lenderink et al.	2007	the river Rhine	- HadRM3H	RhineFlow	- 연평균유출량이 겨울철에 30% 증가, 여름철에 40% 증가	기후변화에 따른 극한홍수량산정

번호	저자	출판 년도	주요내용				구분
			적용지역	모형 및 시나리오	강우유출모형	주요 결과	
						- direct approach를 사용할 경우 100년 빈도 홍수량 10% 증가, delta approach를 사용할 경우 100년 빈도 홍수량 30% 증가	
15	Kay et al.	2006a	15 catchments across Great Britain	- HadRM3H	Probability Distributed rainfall-runoff model (PDM) of Moore	- 자료의 한계로 재현기간 10년에 대한 값과 500km^2 이하의 소규모 유역에 적용 - 홍수빈도곡선이 과소추정 되는 경향이 있으나 관측값과 비교적 잘 맞음.	기후변화에 따른 극한홍수량산정
16	Kay et al.	2006b	15 catchments across Great Britain	- HadRM3H - UKCIP02	Probability Distributed rainfall-runoff model (PDM) of Moore	- 한 유역을 제외한 모든 유역에서 연강우량의 감소에도 불구하고 8개 유역은 대부분의 재현기간에서 홍수빈도의 증가를 보인 반면 두 유역은 홍수빈도의 상당한 감소를 보임. - 연강우량의 오차와 홍수빈도의 오차가 양의 상관 관계에 있음을 보인 위의 논문 결과를 감안할 때 강우량의 전반적인 감소에도 홍수빈도가 증가한 것은 강우 분포의 변화가 큼을 의미하는 것으로 판단됨.	기후변화에 따른 극한홍수량산정
17	Cameron	2006	Lossie catchment in the northeast of Scotland, UK	- HadRM3H - UKCIP02	TOPMODEL	- 시나리오에 따른 홍수빈도 변화	기후변화에 따른 극한홍수량 산정
18	Wigley	2009				- 기후변화가 극한수문량에 미치는 영향에 대한 정량적 해석	기후변화에 따른 극한수문량 변화
19	Cooley	2009				- 기후변화가 극한수문량에 미치는 영향 분석을 위한 EVA(Extreme Value Analysis) 적용	기후변화에 따른 극한수문량 변화
20	Prudhomme et al.	2002				- 홍수빈도해석을 위한 상세화 기법 적용에 대한 검토	기후변화에 따른 극한홍수량 산정
21	Frei et al.	2006	The Alpine region	- 6 European RCMs - SRES A2		- 북유럽 지역에서 미래의 20년 재현기간에 해당하는 값이 현재 기후의 40~100년 재현기간에 해당함. -	기후변화에 따른 극한강우량 산정
22	Leander and Buishand	2007	The river Meuse in	- the KNMI regional	HBV rainfall-runoff	- GCM 결과를 비교적 간단한 비선형 편의 보정 기법으로 보정한 결과 관측값과 잘 맞는 강우량과	- GCM으로부터의 강우 편의 보정

번호	저자	출판 년도	주요내용				구분
			적용지역	모형 및 시나리오	강우유출모형	주요 결과	
			Western Europe	climate model RAMCO - HadAM3H - ERA40	model	극한홍수량을 추정할 수 있었음.	- 기후변화에 따른 극한홍수량 산정

국내의 경우 기후변화가 수문량에 미치는 영향에 대한 연구는 미비한 실정이고, 특히 극한 수문량에 대한 연구는 더욱 미흡한 상황이나 최근 들어 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 평가한 몇 건의 연구과제가 진행되고 있고, 논문들도 발표되고 있다. 기후변화가 수자원에 미치는 영향과 관련된 연구과제로는 21세기 프론티어연구개발사업의 일환인 “기후변화에 의한 수자원 영향평가 체계 구축”과 환경부에서 수행한 “국제환경현안 대응·해결기술-기후변화에 의한 물순환의 예측 및 영향 평가” 및 국토해양부에서 수행한 “기후변화 대비 국가 물안보 확보 방안” 등이 있다. 이들 연구과제에 대한 개략적인 내용을 가-다에 소개하였다. 이러한 연구과제 뿐만 아니라 연구 논문들도 국내에서 출판되고 있는 상황이고, 이에 대한 개략적인 내용을 라에 소개하였다.

가. 21세기 프론티어 연구개발 사업 - 기후변화에 의한 수자원 영향분석 및 평가체계 개발(과학기술부, 2009)

21세기 프론티어 연구개발 사업의 세부과제인 「기후변화에 의한 수자원 영향분석 및 평가체계 개발」은 기후변화에 따른 국가 수자원 영향 분석 및 평가 체계 개발과 적용을 최종 목표로 현재 3차년도가 진행중에 있다. 1차년도에는 기후변화에 따른 수자원 영향평가의 불확실성 원인을 규명하고, 2차년도에서는 수자원 영향평가에서 발생하는 불확실성을 정량화하며, 3차년도에서는 불확실성을 최소화하기 위한 연구를 수행중에 있다.

1차년도부터 3차년도까지의 주요 연구 내용은 다음과 같다.

- 앙상블 기후변화 시나리오 생산 및 기후변화 전망
- 시공간 상관성을 고려한 일기산출기 개발
- 기후변화에 의한 수자원 영향평가 및 취약성 평가
- 기후변화에 의한 식생변화를 고려한 수문예측기술 개발
- 관측자료에 의한 기후변화 수자원 영향의 통계적 평가
- 기후변화의 사회경제적 평가를 통한 수자원 부문의 적응정책 개발

1차년도부터 3차년도까지의 주요 연구 내용에서 알 수 있는 것처럼 이 연구과제에서는 기후변화에 따른 수자원 부문의 전반적인 영향 평가를 목표로 하고 있기 때문에 극한 수문량에 대한 영향은 검토되지 않고 있다.

나. 국제환경현안 대응·해결기술-기후변화에 의한 물순환의 예측 및 영향 평가(환경부, 2006)

이 연구과제에서는 기후변화가 물순환에 미치는 영향 평가에 초점을 맞추면서 기후변화가 집중호우, 장마 등 극한 강우량에 미치는 영향을 비교적 상세하게 분석하였다. 분석을 위해 한반도 지역 기후를 SNURCM을 이용하여 모의하였고, 이를 바탕으로 다음과 같은 강수 및 극한 강우량에 미치는 영향을 검토하였다.

- 기후변화에 의한 한반도 강수와 지상온도의 변화

- 강수 특성과 에너지수지의 변화
- 집중호우와 여름철 강수강도의 변화
- 장마의 변화
- 일 강수의 변화

하지만 이를 바탕으로 기후변화가 극한 홍수량에 미치는 영향 검토는 이루어지지 않았다.

다. 기후변화 대비 국가 물안보 확보 방안(건설교통부, 2008; 국토해양부, 2009)

이 과제는 수자원에 대한 기후변화의 영향을 평가하고 그 변동성을 정량적으로 제시하며 기후변화로 인해 발생하는 홍수, 가뭄 그리고 생태환경 변화에 대처할 수 있는 장기 수자원 정책의 개발에 목적을 둔 연구이다. 전체 3단계 과업 중 3차년도 과업이 진행중에 있다.

1차년도 연구의 주요 내용은 다음과 같다.

- 기후변화의 국제적 협약 조사 및 분석
- 기후변화가 사회 경제적으로 미치는 영향평가 사례 조사 및 분석
- 기후변화가 수자원에 미치는 영향평가 사례조사
- 국외의 기후변화에 대비한 수자원 정책 수립 사례조사 및 분석
- 한반도의 수문기상자료의 변동성 및 경향성
- 한반도의 물 순환 구조의 변동성 및 경향성 분석
- 한반도의 극치 사상의 변동성 및 경향성

2 차년도 과업은 기후변화가 한반도 물 순환 구조에 미치는 영향을 평가하고 이를 바탕으로 향후 수자원시스템에 미치는 취약성을 평가하였고 기후변화에 따른 수자원 예측과 대응 방안을 마련하기 위한 유역 규모의 수자원 평가기법을 개발하고 체계를 구축하였다.

2차년도 연구의 주요 내용은 다음과 같다.

- 물과 관련된 기후변화 전망
- 전구기후모형(GCM)을 이용한 기후변화 시나리오의 작성 및 분석
- 유역규모의 고해상도 기후변화 시나리오 작성 및 전망
- 기후변화가 토지피복변화에 미치는 영향평가
- 기후변화가 유역규모의 물 순환 구조에 미치는 영향 평가
- 기후변화가 유역규모의 수자원시스템에 미치는 영향 평가

이 과제의 연구 내용 중 기후변화가 유역규모의 수자원시스템에 미치는 영향 평가에서 전지구기후모형 결과를 바탕으로 기후변화가 극한강우량과 극한홍수량에 미치는 영향을 평가하고 있어 본 과제의 극한 홍수량의 전망 기술 개발과 직접적인 관련이 있는 연구가 진행된 사례라 할 수 있다.

라. 기후변화가 수문량에 미치는 영향을 평가한 연구 논문

국내의 경우 기후변화가 수문량에 미치는 영향에 대한 연구는 미비한 실정이고, 특히 극한수문량에 대한 연구는 더욱 미흡한 상황이다. 기후변화 시나리오를 이용한 유출모형의 적용은 안재현 등(2001)이 GCM의 결과로부터 대청댐 유역의 유출량 변화를 파악하기 위하여 물수지 모형을 적용하였고, 김병식 등(2003)과 과학기술부(2004)는 YONU GCM에 의해 작성된 우리나라 기후변화 시나리오를 전이함수 모형을 이용하여 용담댐 유역에 적용하고, 날씨모의장치(일기발생모형)의 매개변수를 수정하여 미래 일수문시계열 자료를 작성하였으며, SLURP 모형에 입력하여 기후변화가 용담댐 유역의 유출량과 수자원에 미치는 영향을 평가하였다. 신형진 등(2005)은 CCMA GCM2 모의 결과값을 사용하여 SLURP 모형에 적용하고 2050년과 2100년 융설 변화를 분석하였다. 환경부(2006)는 지면모델인 CLM을 RCM에 접합시킨 SNURCM을 개발하였으며 물수지모형과 연계하여 4대강 유역의 유출량을 산정하였다. 또한 국토해양부(2008)에서는 기후변화가 유역 유출에 미치는 영향을 분석하기 위하여 기상청의 RCM과 축소기법을 이용하여 작성된 일 강수량, 일평균 온도 자료와 토지피복자료를 이용하여 SLURP 모형으로부터 유출변화 시나리오를 작성하였다. 이처럼 국내의 기후변화 연구는 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 검토하여 유출량의 증감을 예측하는 정도로 이루어져 왔다. 국내에서 기후변화를 고려한 홍수량 산정의 연구동향과 문헌조사 내용을 Table 2.1.8에 정리하였다.

Table 2.1.8 기후변화를 고려한 극한수문량 전망 - 국내 연구동향

번호	저자	출판 년도	주요내용			주요 결과	구분
			적용지역	모형 및 시나리오	강우유출 모형		
1	김병식 등	2008	한국	- SRES B2		- B2 시나리오와 YONU CGCM을 이용하여 미래 극한강우 및 IDF 분석 수행 - MBLRP 모형의 분해기법을 적용하여 일단위 자료를 시단위 자료로 모의 - 미래 시나리오에 의해 작성된 확률분포형이 오른쪽으로 이동하는 것을 확인 - IDF 분석 결과 지속기간이 길어질수록 강우강도가 증가 - 분해기법으로부터 추정된 시단위 자료가 과소추정되는 경향이 있음.	기후변화에 따른 극한강우량 및 IDF 산정
2	권현한 등	2009	한국	- SRES A2, B1		- 여름철의 경우 2015년에는 중부내륙 및 남부지방에서 강우가 증가하는 현상 발생, 2045년에는 강우 감소경향 발생, 2075년에는 강우량 증가가 크게 발생 - A2 시나리오 및 B1 시나리오에 근거하여 강우량 비교결과 강우량 발생에 대한 공간적 편차와 변동성은 크게 발생	기후변화에 따른 극한강우량 산정
3	이정호 등	2009	소양강댐 한국	-		- Gumbel Mixed 모형을 이용한 이변량 홍수빈도해석 수행 - 이변량 빈도해석을 통해 홍수사상변수들 간의 결합분포, 결합재현기간 등을 추정함.	극한홍수량 산정
4	나양선	2010	남한강 한국	- SRES A2	HEC-1	- A2 시나리오에 따른 미래 확률강우량 산정 결과 과거기간에 대한 미래기간의 확률강우량이 13~15% 증가 - 미래 확률강우량에 따른 100년 빈도 확률홍수량은 29~32% 증가. - 남한강(충주댐-팔당댐 구간)에서 부등류 해석 수행결과 미래 홍수량 발생 시 침수위험구간 결정	기후변화에 따른 극한수문량 산정

5. 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망

가뭄과 관련된 연구는 크게 가뭄을 정확하게 모니터링하고 정량화하기 위한 기술 개발 분야와 또한 각종 기후자료 및 수문, 지형학적 자료를 기반으로 하여 가뭄을 전망하는 분야로 구분될 수 있다. 가뭄과 관련된 연구의 선진국으로는 가뭄에 의해서 매년 막대한 피해를 보고 있는 미국 및 호주가 중심이 되고 있으며 아시아에서는 인도, 한국 등이 매우 활발하게 가뭄과 관련된 연구를 진행하고 있다.

추가적으로 문헌조사를 통해 2000년 이후의 최근 기술 및 연구동향을 살펴 보았다. 가뭄전망기술 연구는 지수(index), 전망(outlook), 예측(forecast), 빈도해석(Frequency Analysis)을 키워드로 조사하였으며 하천 건천화 관련 연구는 건천화 현황 및 원인조사, 건천화의 정의, 기준유량 및 평가기법과 건천화 방지대책 관련 연구에 대하여 조사하였다. 자료 수집을 위해서 국내·외 검색사이트를 이용하여 기후변화와 가뭄관련 저널목록을 찾고 국회도서관 및 학회사이트 등을 통해 보고서와 저널을 내려 받아 정리하였다.

가. 가뭄 정량화 기술 연구동향

현재 기후변화와 관련한 가뭄연구에서 지수를 이용한 연구가 많이 진행되고 있다. 따라서 가뭄지수에 대한 정리의 필요성이 있어 보고서, 저널 등을 참고하여 가뭄지수를 사용한 가뭄 정량화 연구를 정리하였다.

(1) 연구보고서

‘농업가뭄지표 실용화 및 정보제공방안 연구(최종)(2005)’에서는 우리나라 실정에 적합한 농업가뭄지표의 선정과 농업가뭄정보시스템의 개발에 목적을 두고 있다. 국내·외 농업가뭄 연구 동향을 조사하고 과거 가뭄기록을 이용하여 가뭄 상황을 분석하고 가뭄 해석 방법을 검토하였다. PDSI, CMI, SPI, 평균치비율(percent of normal), 십분위(deciles), Percent of Median 지수를 선정하고 프로그램을 이용하여 각 가뭄지수의 특성을 비교하여 국내 실정에 맞는 가뭄지표를 산정 및 적용성 분석을 하였다. 또한 농업가뭄평가시스템과 웹기반 농업가뭄정보시스템을 개발하여 농업가뭄평가체제를 구축하였다.

‘농업가뭄정보시스템의 실용화 지원기술 개발(2008)’에서는 농업가뭄의 발생현황을 분석하고 다양한 수요자에게 정보를 신속하게 제공하기 위한 정보시스템을 구축하기 위하여 수행되었다. 전 세계적으로 많이 쓰는 평균치비율, 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI), 파머가뭄지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI), 작물수분지수(Crop Moisture Index, CMI), 지표수공급지수(Surface Water Supply Index, SWSI), 개척한발지수(Reclamation Drought Index, RDI), 십분위(deciles)의 특징을 비교하여 국내 적용성을 검토하였다. 그 결과 우리나라 농업가뭄에는 SPI(3)가 가뭄발생 시기와 심도가 잘 맞는 것으로 나타났으며 PDSI, SWSI 등은 입력자료가 필요하여 모형에 이용하기 어려운 것으로 나타났다. 또한, 농업가뭄정보시스템을 구축하여 2009년 영농기 농업가뭄전망을 하였다.

‘산업기상지수 산출기술개발(Ⅲ) 최종보고서(기상청, 2008)’에서는 기상학적 가뭄을 평가하기 위한 지수를 검토하고 개선하는데 초점을 두고 한국형 기상학적 가뭄을 정립하고

정의를 내렸다. SWSI를 제외한 PDSI, SPI, 정상강수백분율, 십분위수, EDI , RDI를 비교 및 분석하여 파머지수가 다른 지수들에 비해 실제 가뭄 발생을 즉각적으로 표현하지 못하는 특성이 나타나 파머지수를 개선하고 검증하였으며 다양한 기상학적 가뭄에 대한 정보를 제공하기 위해 기존 가뭄지수중 우리나라에 적합한 최적의 가뭄지수를 선정하고 가뭄 주요 척도를 선정하여 다양한 지수를 활용한 통합가뭄심도를 산정하였다. 또한, 자외선에 관한 다양한 정보제공을 위해 자외선 지수를 개선하였다. 국내·외의 자외선 지수 서비스 현황을 조사하고 오존전량과 에어로졸을 개선하여 자외선 지수를 개선하였다. 마지막으로 개선된 가뭄지수와 자외선지수를 제공하기 위한 표출시스템을 구축하였다.

'국가 가뭄재해정보시스템 시범개발 <1차년도 보고서>(2008)'은 가뭄모니터링시스템 개발, 가뭄피해지역 분석시스템 개발, 가뭄재해 대응시스템, 가뭄 자료관리 시스템 개발로 구성되었다. 가뭄모니터링 시스템 개발에서는 국내·외의 가뭄지수를 조사하였으며 SPI, PDSI, MSWSI, SMI의 지수 특성을 비교 분석하고 가뭄전망기법을 조사하였다. 가뭄 피해지역 분석시스템 개발에서는 지역의 재난위험 강도를 정량적으로 평가하기 위해 사전적으로 평가되어지는 연구인 취약성 평가를 하였다. 우선, 취약성 평가와 관련된 지역안전도, 홍수피해 잠재능 등의 영향인자를 분석해 활용방안을 냈으며 국외 취약성 지수 개발사례 및 활용사례를 조사하여 우리나라 가뭄 취약성 평가를 할 수 있는 방안을 모색하였다. 가뭄재해 대응시스템 개발에서는 국내·외의 가뭄재해 대응방안 및 법제도 현황을 조사 분석하여 국내 가뭄재해 대응방안 법제도 문제점의 개선방향을 제시하였다. 가뭄 자료관리 시스템 개발에서는 국내 기술동향 현황 조사를 하였으며 가뭄자료를 표준화 및 분류를 하여 자료를 구축하고 가뭄자료관리시스템을 구축하였다.

'가뭄관리모니터링체계수립 (2005)' 에서는 가뭄상황을 종합적으로 모니터링하고 가뭄의 상태를 정량적으로 평가할 수 있는 가뭄관리모니터링 체계를 수립하여 가뭄관리정보체계 구축 기반을 마련하고자 하였다. 제2장에서는 수문학적 가뭄지수를 개발하기 위해서 기존의 가뭄지수를 비교 분석하였으며 기존 SWSI(Surface Water Supply Index)의 입력인자에 지하수위 인자를 추가하여 유역별로 수문학적인 가뭄을 평가할 수 있는 MSWSI(Modified-Surface Water Supply Index)를 개발하였다. 제3장 "가뭄상황의 분석기법 개발"에서는 SPI, PDSI, MSWSI를 비교, 검토하여 각 지수 간에 미치는 영향을 분석하고 조합하여 가뭄 상황을 종합적으로 평가할 수 있는 방법을 개발하였다. 각 지수가 가뭄을 정량적으로 표현할 수 있는 5단계의 가뭄단계를 설정하고 단계별 대책과 기준을 제시하였으며 최종적으로 결정된 지수별 가중치를 조합하여 예측가뭄도를 작성하여 전망하였다. 제4장 "가뭄관리모니터링체계 구현"에서는 SPI, PDSI, MSWSI 및 통합가뭄지수를 산정 및 가뭄관련 기초자료를 관리하기 위한 가뭄관리프로그램과 가뭄관련 정보를 웹을 통해 제공함으로써 일반인들이 가뭄관련 정보습득과 가뭄진행 상황에 대한 이해를 목적으로 개발된 가뭄정보시스템으로 구성된 가뭄관리모니터링체계를 구현하였다. 마지막으로 자연재해에 대비하여 체계적이고 조직적인 가뭄경감대책을 위해 가뭄관리정보체계 마스터플랜을 수립하였다.

'가뭄관리정보체계 수립 (2006)'에서는 농업과 식생에 중요한 연관관계가 있는 토양수분을 활용한 가뭄평가의 필요성으로 토양수분가뭄지수 SMI를 개발하였으며 SMI는 토양수분에 의한 가뭄을 나타내므로 사람이 느끼는 가뭄보다 식생이나 작물이 느끼는 가뭄에 더 민감하게 반응하므로 농업적인 가뭄평가에 효과적인 지표로 사용될 수 있을 것으로

기대된다. SMI는 일별모의가 단기 가뭄이나 선행적이 가뭄을 나타낼 수 있다는 특징을 가지나 토양수분을 이용하여 평가하므로 비 식생지역에는 적용이 힘든 것으로 판단된다. 또한, 가뭄관리모니터링체계수립(한국수자원공사, 2005)에서 개발한 MSWSI와 SMI를 이용하여 117개 유역에 확대적용하고 월단위에서 주단위로 가뭄평가주기를 단축하여 수문학적 가뭄평가에 대한 신뢰도를 향상 및 검증하였다.

'가뭄정보시스템 시험운영 - 1차년도 보고서 (2007)'에서는 2006년에 구축한 가뭄정보시스템을 지속적으로 시험운영 하여 안정성을 확보하였으며 자료취득의 효율성을 확보 및 가뭄정보를 제공하도록 시스템을 개선하였다. 유역특성에 적합한 가뭄지수의 해석방법을 위해 현재 시험운영 중에 있는 가뭄모니터링 시스템이 지역적으로 가뭄정보를 적절하게 제공하고 있는지를 분석하고, 신뢰성 있는 가뭄정보 제공을 위한 통합가뭄지수의 보완 방안을 제시하였으며 가뭄모니터링 기능과 함께 향후 추가적으로 구축되어야 할 가뭄전망 기능을 완성하고 실용화하기 위한 마스터플랜을 수립하였다. 또한, 가뭄과 밀접히 관련되어 있는 토양층의 수분변화를 파악하기 위해 토양수분관측망을 설치 운용을 하였다.

'가뭄정보시스템 - 물 공급 Guideline 중심으로 (2008)'에서는 가뭄지수산정의 신뢰도를 향상시키기 위해 SPI, PDSI, SMI, MSWSI의 지수를 보완했으며 위성영상을 통해 가뭄지수를 산정하고 가뭄평가 방법을 개발하였다. 또한, 기존의 SWSI 가뭄지수를 보완한 농업가뭄지수(ASWSI)와 SWSI의 입력인자인 강우량, 저수지 유입량 및 저수량을 사용하여 농업가뭄을 평가하였다. 농업가뭄지수(ASWSI)를 이용하여 가뭄시 단계별 농업용수 공급능력을 검토하고 단계별 생·공 용수공급 Guideline을 제시하였다. 전국적인 가뭄의 분석을 위하여 수공 보유 우량관측소에 토양수분측정기를 설치하여 체계적인 토양수분측정자료를 분석하여 SMI 추정토양수분량과 비교하여 측정값의 경향성이 유사함을 얻었다.

(2) 학술논문

학술논문 또한 국내외에서 많은 연구가 진행이 되어 있었으며 기술과 연구결과에 대하여 정리하였다. 대부분의 연구가 가뭄지수를 활용한 가뭄모니터링에 초점을 맞추어서 진행 되었으며 보고서와 마찬가지로 PDSI 지수와 SPI 지수등의 가뭄지수를 적용한 정량화 연구가 많은 부분을 차지하고 있었다.

이동률 등(2000)은 한반도를 대상으로 PDSI 지수를 계산하여 가뭄의 공간적 분포양상을 분석하였으며 PDSI, SPI(3), SPI(6), SWSI 지수를 조합하여 가뭄단계의 적절성을 검토하였다. 장연규 등(2004)은 한반도를 대상으로 SPI 지수를 산정한 후 경험적 직교함수분석을 통하여 가뭄의 공간적 특성을 도출하였다. 권현중 등(2006)은 한반도를 대상으로 PDSI 지수와 SWSI 지수를 보완한 MSWSI 지수를 개발하여 제한급수 및 운반급수와 같은 우리나라의 수문학적인 가뭄상태를 표현하는데 있어 MSWSI가 적합한 것으로 판단하였다. 김보경 등(2006)은 한반도를 대상으로 공간분포를 적용한 SPI를 산정하여 주요 가뭄사상을 식별 및 분석하여 영향면적별 가뭄지수를 산정하고 이에 따라 가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기간 관계곡선을 도식하였다. 김대하 등(2006)은 한반도를 대상으로 SPI(3) 지수를 이용하여 가뭄심도-지속기간-생긴빈도 해석을 실시하여 남한전체 가뭄심

도의 공간적인 분포특성을 분석하였다.

경민수 등(2007)은 한반도를 대상으로 SPI 지수를 이용 군집별로 EOF 분석을 통하여 핵심정보를 추출 Kriging 이론에 적용하여 우리나라전역에 확장시킨후 군집별로 1, 3, 6, 9, 12개월의 지속기간을 가지는 가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기간 곡선을 작성하였다. 김광섭 등(2008)은 AVHRR과 MODIS 위성영상을 이용하여 금호강유역의 DevNDVI를 산출하고 위성의 해상도에 다른 가뭄지수 판단 적용성을 검토하였다. 이영임 등(2008)은 아시아를 대상으로 PDSI 지수와 SPI 지수를 이용하여 가뭄 추세를 분석하기 위해 가뭄 영역의 변화를 시계열 분석하고 각 격자별로 가뭄의 추세와 횟수, 평균기간을 계산하여 공간분포로 살펴보았으며 두 지수의 계급별 빈도의 확률분포에 대해 분석하였다. 서형덕 등(2008)은 금강유역, 용담댐, 대청댐을 대상으로 MSWSI 지수를 사용하였으며 가뭄관리를 위한 물 공급모형을 구축하여 가뭄단계(D0～D4)에 따라 여러 가지 댐 운영방안을 설정하여 가상가뭄모의운영을 실시하였다.

박정술 등(2009)은 한반도를 대상으로 월 단위로 합성된 NDVI 지수와 월 간격으로 산정된 PDSI 및 SPI 지수의 상관성을 분석하여 공간분포맵과 53개 기상관측지점을 통해 비교 하였다.

(3) 문헌조사를 통한 가뭄지수의 활용비율

가뭄지수를 사용한 보고서와 저널 등을 조사·비교한 결과, Table 2.1.9과 같이 지수 중에서는 기상학적 가뭄지수의 하나로 강수량, 기온 등을 이용한 PDSI와 강수량 자료를 이용한 SPI를 가장 많이 사용하고 있는 것으로 조사되었다.

최근에는 강수량, 기온, 습도 등을 이용한 토양수분지수 SMI지수와 위성데이터를 이용한 NDVI지수의 사용이 증가하고 있다. 또한, 지형적 특색을 반영하여 최적의 가뭄지수를 선정하기 위한 다양한 변수자료를 이용한 연구도 일부 진행되고 있다. 아래의 Table 2.1.9은 연구보고서를 비교한 내용과 문헌조사에 사용된 저널에 쓰인 지수의 사용비율이다.

Table 2.1.9 문헌조사에 사용된 저널의 가뭄지수별 활용비율

구 분	가뭄지수							
분 류	SPI	PDSI	(M)SWSI	NDVI	EDI	DDI	SMI	PN
퍼센트 (%)	37	31	12	6	4	4	4	2
변 수	· 강수량	· 강수량 · 기온 · 유효토양 수분량	· 강수량 · 융설량 · 하천유량 · 저수지 저류량	· 근적외선 밴드의 분광반사도 · 적외선 밴드의 분광반사도	· 강수량	· 강수량	· 강수량 · 기온 · 습도 · 풍속	· 강수량

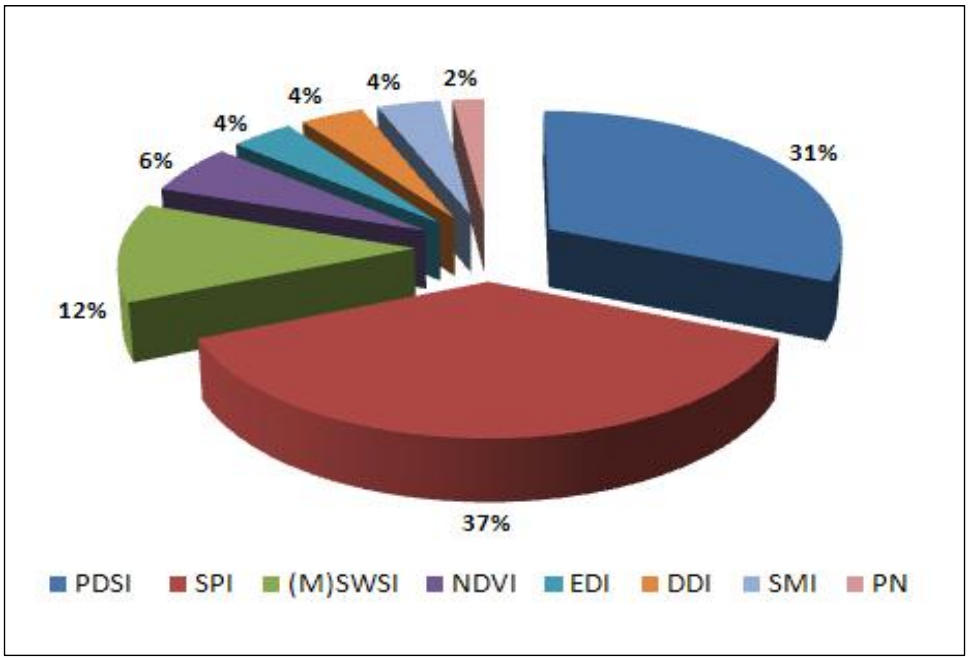


Fig. 2.1.14 문헌조사에 사용된 저널의 가뭄지수 사용비율

Table 2.1.10 연구보고서별 가뭄관련 연구내용 비교표

보고서	기관	지수	변수	전망여부
산업기상지수 산출기술 개발 (Ⅲ)	기 상 청	PDSI, SPI, Deciles, EDI, RDI, Percent of Normal	강수량, 기온, 적설량, 하천유량 유효토양수분량, 저수지 저수량	X
농업가뭄지표 실용화 및 정보제공방안 연구	농업기반공사, 농어촌 연구원	PDSI, SPI, Deciles, CMI, Percent of Normal, Percent of Median	강수량, 기온, 유효토양수분량	X
가뭄정보시스템	한국수자원공사	PDSI, SPI, SWSI, SMI NDVI, RRQM, RSQM	강수량, 기온, 습도, 풍속, 유효토양수분량, 적설량, 하천유량, 저수지 저수량, 위성 식생 자료	▲
농업가뭄 정보 시스템의 실용화 지원기술 개발	농어촌 연구원, 생산 자원 연구원	PDSI, SPI, Deciles, CMI, RDI, Percent of Normal	강수량, 기온, 유효토양수분량, 적설량, 하천유량, 저수지 저수량	X
국가 가뭄재해 정보 시스템 개발	소방방재청	PDSI, SPI, Deciles, SMI, MSWSI	강수량, 기온, 유효토양수분량 ,적설량	X

나. 가뭄 전망기술 연구동향

과거 가뭄전망기술과 관련된 연구는 실제 강수량이나 온도 등의 기상예측 자료를 활용하여 중, 장기의 가뭄현상을 전망하기 위한 비시나리오 기반의 가뭄연구가 진행되었다. 최근에 들어서 기후변화를 고려하여 미래기후변화 시나리오를 기반으로 한 많은 연구가 진행되고 있으나 국내연구의 경우 국외연구에 비해 상대적으로 미흡한 실정이다. 시나리오 기반의 연구는 IPCC(Intergovernmental Panel On Climate Change)에서 제시한 온실가스 배출시나리오를 바탕으로 GCM(Global Climate Model), RCM(Regional Climate Model)등의 기후모델과 가뭄지수를 이용하여 미래 가뭄을 전망하고 있다.

김병식 등(2008)은 과거의 가뭄과 미래의 가뭄을 정량적으로 분석하고 비교하기 위하여 A2 시나리오와 기상청 RegCM3 RCM자료를 이용하였다. 전국 59개 관측소를 대상으로 SPI를 산정하고 이들의 공간적 특성을 비교하기 위해 EOF분석을 실시하여 공간적 특성의 경향이 변화하는 것을 확인하였다.

경민수 등(2009)은 NCEP자료, BCM2 A2 시나리오를 이용하여 인공신경망이론과 최근린법을 이용하여 미래 서울지점의 온도와 강우를 월 단위로 예측하였다. 최근린 법으로 축소된 월 단위강수량을 이용하여 서울지점의 SPI를 산정하였으며 가뭄의 지속기간이 길어짐에 따라 가뭄이 더욱더 심하게 될 것이라는 결과를 얻을 수 있었다.

김보경 등(2008)은 극한지수를 이용하여 극한 기상사상의 변화를 분석하였다. 강우와 기온에 관련하여 객관성과 일관성을 유지할 수 있는 극한지수를 설정하고, 기상청 산하 66개 관측소의 과거자료를 분석하여 이들의 통계적 유의성을 파악하기 위해 통계적 진단으로 선형회기 및 Kendall-Tau 방법을 적용하여 이 지수들의 경향성을 분석하였다.

Subimal Ghosh 등(2007)은 GCMs과 시나리오를 결합한 총 19개의 시나리오를 사용하여 인도 오리사주를 대상으로 2000~2100년 까지를 전망하였다. SPI(12)지수를 사용하였으며 빈도해석은 시나리오 축과 시간 축으로 조합하였다. 시나리오 조합의 경우 정규분포를 사용하였으며 각 연도별로 가뭄정도에 따른 확률을 확률분포형을 통해 나타냈다. 시간 축 조합의 경우 10년 단위별 확률분포로 장기간 단계별 확률을 산정하였으며 가로축을 10년간의 가뭄을 가뭄단계별로 세로축을 확률로 정한 막대그래프로 나타내었다. 미래 10년 단위별 가뭄전망 결과 severe & extreme drought가 증가하였으며 near-normal condition은 감소함을 알 수 있었다.

A. Loukas 등(2008)은 A2, B2 시나리오와 CGCM2 모델을 이용하여 그리스의 테살리아 지역을 대상으로 2020~2050, 2070~2100년을 전망하였으며 지수는 SPI(1,3,6,9,12)를 사용하였다. 빈도해석은 시간 축으로 조합하였으며 확률분포는 Drought-Timescale-Frequency 그래프로 연 가뭄심도, 단위시간, 빈도와의 관계를 조합된 결과로 나타냈으며 2020~2050년에는 현재와 가뭄 심도의 큰 차이가 없지만 2070~2100년에는 현 상태보다 심도가 현저히 증가함을 알 수 있었다.

Bernhard Lehner 등(2008)은 유럽대륙을 대상으로 '2020s'(mid-term future)과 '2070s'(long-term future)을 전망하였으며 Baseline-a water use 시나리오와 HadCM3, ECHAM4/OPYC3 GCMs을 사용하였다. 빈도해석은 시간 축으로 자료를 조합하였으며 확률분포는 Log Pearson Type-3를 사용하였으며 100년 빈도 가뭄심도를 유럽대륙 Map에 표시하였다.

Jean-Philippe Vidal 등(2008)은 A2, B2 시나리오와 6개의 GCM 모델을 이용하여 잉글랜드의 Stour CAMS 지역과 스코틀랜드의 Lochalsh WFD 유역을 대상으로 2020, 2050, 2080년을 전망하였으며 지수는 SPI 지수를 선정하였다. 빈도해석은 시간 축으로 자료를 조합하였으며 확률분포는 EV-1(Gumbel, EVI)을 사용하였다. 그 결과 A2, B2 시나리오 모두 전반적으로 가뭄 심도가 증가하고 멀티모델에서도 가뭄심도가 증가하는 것으로 나타났다.

A. K. Mihra 등(2009)은 인도의 Kansabati 강 유역을 대상으로 2001~2050, 2050~2100년을 전망 하였다. A2, B2 시나리오와 6개의 GCM 모델을 이용하였으며 지수는 SPI를 이용하였다. 빈도해석은 시간 축으로 자료를 조합하였으며 확률분포는 EV-1(Extreme Value Type-1)을 사용하였다. 그 결과 SPI-3, SPI-12 모두 여러 지역에 걸쳐 가뭄이 발생될 것으로 나타났다.

조사 결과, 기후변화를 고려한 대부분의 가뭄전망연구의 경우 다원화 사회 시나리오인 A2 시나리오, 지역 공존화 시나리오인 B2 시나리오와 GCM 모델을 이용하여 중, 장기 미래 가뭄을 예측하고 있으며 지수의 경우 강수량을 사용하는 SPI 지수와 강수량, 기온, 유효토양수분량의 변수를 사용하는 PDSI 지수를 사용하였다.

다. 가뭄 빈도해석기술 연구동향

기후변화에 의한 가뭄빈도해석에 대한 국내 연구는 국외의 연구 사례와 비교해보았을 때 상대적으로 저조한 것으로 조사되어 국외연구를 중심으로 조사하였다. 국외의 경우 미국, 유럽, 인도 등지에서 2007년부터 현재까지 활발하게 진행되어 오고 있으며 조사한 문헌들 중 단일시나리오를 사용한 경우가 대부분이었다. 하지만, 최근들어 모델들 간의 불확실성이 제기되면서 MME(Multi Model Ensemble)와 같이 시나리오를 결합하여 불확실성을 줄이는 방법으로 연구가 진행되는 추세이다.

분석결과 크게 시나리오 결합의 방법에 따라 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 Fig. 2.1.15에 나타낸 것과 같이 시간 축 방향으로 자료를 조합 하는 방법이다. 즉, 일정기간동안 산출된 하나의 시나리오나 여러 개의 시나리오 혹은 시나리오의 평균값을 각각 시간 축 방향으로 적정한 확률분포를 선택하여 결합하는 것이다. 결과적으로 첫 번째 방법을 통해 시간과는 무관하지만 장기간의 가뭄정도를 확률적으로 알 수 있으며 가뭄 심도에 대한 재현기간을 알 수 있다. 두 번째로는 Fig. 2.1.16이 설명하는 것은 시나리오 축 방향으로 자료를 조합하는 방법이다. Fig. 2.1.16에 나타낸 2020~2040년처럼 일정기간 동안 산정된 여러 개의 시나리오를 시나리오 축 방향으로 결합하여서 특정 시점의 가뭄 정도를 확률적으로 알 수 있다.

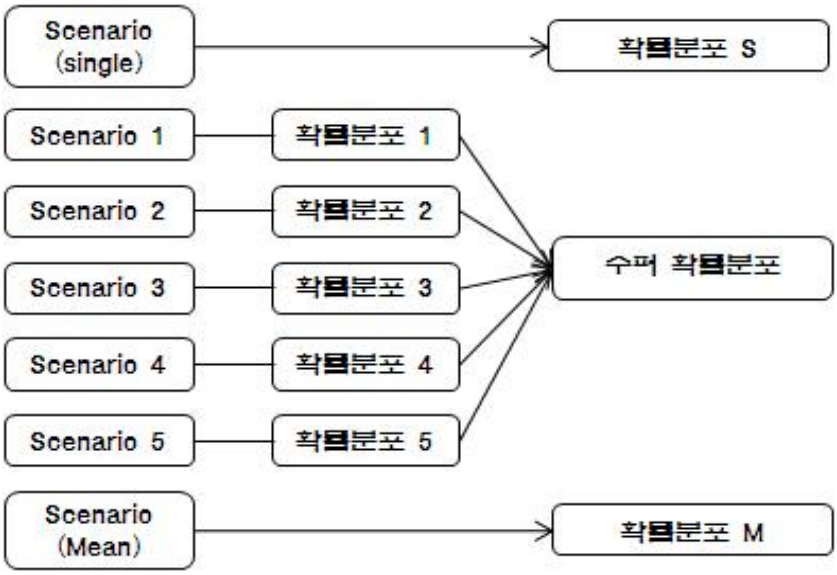


Fig. 2.1.15 시간 축 방향으로 자료를 조합하는 방법

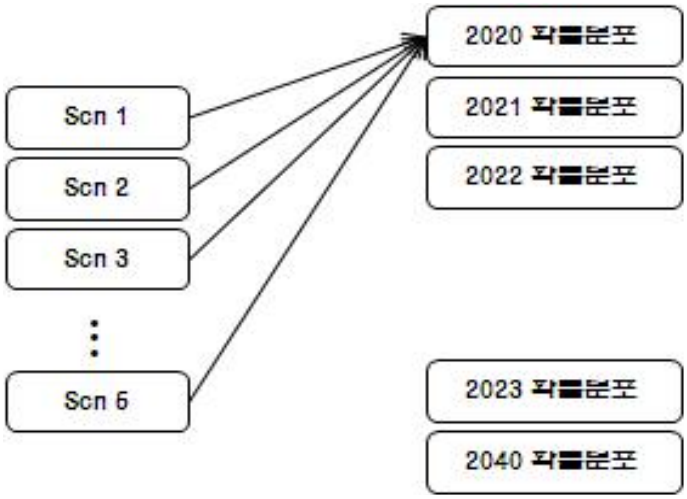


Fig. 2.1.16 시나리오 축 방향으로 자료를 조합하는 방법

시나리오 결합 방법의 이해를 돕기 위해 아래 Fig. 2.1.17과 같이 그래프로 나타내었다. 아래의 그래프를 보면 x축은 시간, y축은 시나리오 기반 데이터를 가리키고, z축은 시나리오 데이터인 강수량이나 가뭄지수 및 갈수량(가뭄을 정의하는 변수)을 나타낸다. 따라서 위의 곡선들은 다양한 시나리오의 가뭄 데이터를 시계열로 나타낸 것이다.

X축과 평행한 가로방향 점선은 시나리오 축을 고정하고 시간 축 방향으로 조합한 것으로 일반적인 빈도해석의 방법으로 장기간의 가뭄 정도를 확률적으로 알 수 있다. 그리고 Y축과 평행한 세로방향의 점선은 앞서 제시했던 두 번째 방법으로 특정 시점에 대해서 여러 개의 시나리오의 데이터를 추출하여 확률분포로 나타낸 것으로 시나리오 축으로 조합한 방법이다. 이를 통해 위 그림에 나타난 것처럼 특정시점의 가뭄 정도를 확률적으로 알 수 있다.

이와 같이 두 가지로 분류한 자료처리 방법은 다른 종류의 결과물을 나타내기 때문에 가뭄빈도의 목적 별로 달리 이용될 수 있으므로 연구할 가치가 있다고 말할 수 있다.

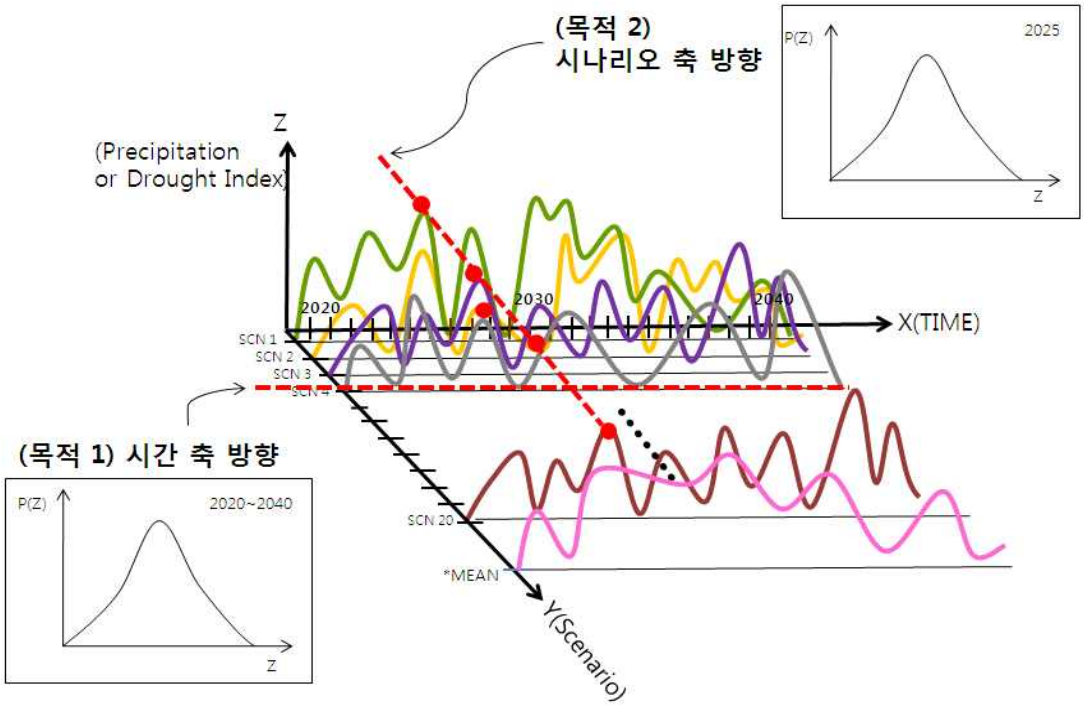


Fig. 2.1.17 자료처리 목적 별로 분류한 가뭄빈도해석 연구동향의 일반론

6. 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석

가. 국내 관련기술 현황

우리나라에서는 아직도 비정상성을 고려한 빈도해석 기법이 표준화 되어 실무에 적용되고 있지 않으며, 표준 기후변화 시나리오를 채택하지 않은 상태로 선진국에서 제시하는 것과 같이 기후변화에 따른 극한강우량 산정과 관련하여 표준화된 기법제시가 미흡한 상태이다. 개별적인 연구 차원에서 한반도의 강우변동성과 전구 기후 지수들과의 상관분석을 실시하고 비정상성 빈도해석이 수행되고 있으며 각종 시나리오에 대한 지역별 기온 및 강우량 변화에 따른 홍수위험에 대한 분석 결과들이 개별적으로 제시되고 있는 상태이다.

Table 2.1.11 세부별 국내 주요업체 현황

세부기술	업체명	보유 기술 또는 특허	최고기술보유기관	비고
극한강우연계 수문기상인자 도출기술		극한강우와 연계될수 있는 수문기상인자 도출 및 분석	기상청	
비정상성 빈도해석 기술		모수 및 비모수 비정상성 빈도해석 기술	연세대	
기후변화고려 설계강우량 산정 기술		기후변화를 고려한 설계강우량 산정기술	연세대	

Table 2.1.12 세부별 국내 전문가 및 연구기관 현황

세부기술	전문가	소속기관	기술개발현황	해외의 최고 기술보유기관	비고
극한강우연계 수문기상인자 도출기술	권원태	기상청	극한강우와 연계될수 있는 수문기상인자 도출	미기상청	
비정상성 빈도해석 기술	허준행	연세대	비정상성 빈도해석 기술 개발 초기단계	미육군공병단	
기후변화고려 설계강우량 산정 기술	허준행	연세대	기후변화를 고려한 설계강우량 산정기술 개발 연구단계	영국환경부	

Table 2.1.13 국내 기술개발 수준

세부기술	현재 기술수준			기술개발 완료시 국내 기술수준		
	기술수준 (%)	기술격차 (년)	비고	기술수준 (%)	기술격차 (년)	비고
극한강우연계 수문기상인자 도출기술	80	4		90	1	
비정상성 빈도해석 기술	70	5		90	1	
기후변화고려 설계강우량 산정 기술	60	6		90	1	

Table 2.1.14 국내 인프라 수준

기술분야	인프라 항목	선진국 대비 인프라 수준				
		부족	다소부족	동등	우월	보다우월
극한강우연계 수문기상인자 도출기술	연구 시설 및 설비, 기초인력, 표준화기반, 국제기술협력기반		○			
비정상성 빈도해석 기술	연구 시설 및 설비, 기초인력, 정보화, 신뢰성평가, 표준화기반, 기술이전 및 거래, 국제기술협력기반	○				
기후변화고려 설계강우량 산정 기술	연구인력, 신뢰성평가, 표준화기반, 기술이전 및 거래	○				

기후변화로 인한 지역 수문인자에 대한 영향으로 국가 물 안보 확보 및 홍수방재의 새로운 패러다임 설정에 대한 필요성을 인지하고 개별적인 연구들이 수행되고 있는 상황이나 선진국에서와 같이 정책적인 반영은 미흡한 실정이다. 기후변화를 고려한 설계홍수량 산정 표준화 기술 등이 제공되고 이러한 기술이 정책적으로 채택될 경우 건설 및 국가 방재 전반에 대한 새로운 시장 창출뿐만 아니라 국가적으로 경제적 사회적 안정성 확보에 기여할 것으로 판단된다.

강수량 자료의 비정상성 빈도해석과 관련된 연구는 최근 들어 활발히 이루어지고 있으며, 본 연구에서는 1999년 이후부터 현재까지 최신의 연구동향에 대해서 집중적으로 조사·분석하였다. 국외는 Journal of Hydrology, Climate Change 등 7가지 학술지로부터 33편의 연구논문과 2편의 연구보고서, 국내는 한국수자원학회지, 대한토목학회지 등 2가지 학술지로부터 10편의 연구논문과, 4편의 연구보고서가 조사되었다. 다음 Table 2.1.15은 강수량 자료의 비정상성 빈도해석과 관련되어 조사된 국내외 연구문헌들의 조사범위를 정리하여 나타낸 것이다.

Table 2.1.15 강수량 자료의 빈도해석과 관련된 국내외 연구문헌 조사범위

학술지	대상기간	August, 1999 - January, 2010
	총 편수(국내/국외)	10/33
	학술지명[1)]	한국수자원학회논문집(3), 대한토목학회논문집(7) JH(18), CC(2), AWR(5), AWRA(1), IJCC(4), JAOT(1), JGPC(2)
연구 보고서	대상기간	February, 2001 - January, 2010
	총 편수(국내/국외)	4/2
주요내용		Climate change, Non-stationary for hydrometeorological data, Frequency analysis
핵심용어		Non-Stationarity Frequency Analysis; Return-Level; Climate Change; Extreme Values; Peak-Over-Threshold; Monte Carlo Simulation; Bayesian MCMC; Bayesian analysis; Design rainfall; GEV Distribution; Generalized Pareto Distribution; Log-Pearson Type 3 distribution; Log-normal Distribution

1) JH: Journal of Hydrology (ScienceDirect), CC: Climate change (SpringerLink), AWR: Advance in Water Resources (ScienceDirect), AWRA: American Water Resources Association, IJC: International Journal of Climate Change, JAOT: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, JGPC: Journal of Global and Planetary Change (ScienceDirect)

국내에서는 비정상성을 고려한 빈도해석기법에 관한 연구는 아직 초기단계에 있으며, 대부분의 연구가 기후변화 시나리오 자료에 대한 빈도해석을 중심으로 이루어지고 있다. 본 연구에서는 빈도해석기법뿐만 아니라 강수량 빈도해석 관련 연구, 극치 수문량 추세검정 및 평가와 관련된 국내 연구 등에 대하여 조사하였다. 김양수 등(1995)은 우리나라 강우자료를 이용해 강우빈도해석에 많이 이용하고 있는 분포형을 선정하고, 모멘트법 및 확률가중모멘트법으로 매개변수를 추정하여 모의된 결과의 왜곡도를 검토하였다. 그 결과, 확률가중모멘트법은 분포함수의 매개변수 추정시 안정적이며 극대 강우사상이 포함된 자료계열에도 큰 왜곡특성이 나타나지 않는다고 하였다. 그 반면에, 모멘트법은 분포함수의 매개변수 추정시 분포형별로 매우 민감하였으며 극대자료가 포함된 경우 분포함수가 많이 왜곡되어 나타난다고 하였다. 허준행 등(2007)은 수문자료의 관측기간이 짧은 경우 정확도에 문제가 발생할 수 있는 지점빈도해석의 단점을 보완하기 위해 우리나라 강우자료에 대하여 지역빈도해석을 수행하였다. 이를 위해 우리나라 378개 강우 관측지점의 지속기간별 강우자료를 구축한 후 Fuzzy 기법을 이용하여 전국을 14개 지역으로 구분하였다. 해당 지역별로 지역형상추정법과 지수홍수법, 그리고 지점빈도해석을 시행한 결과, 지역빈도해석 기법 중에서는 지수홍수법의 사용이 우리나라 강우자료의 L-변동계수의 특성상 더 바람직하다고 제안하였다. 김보경 등(2008)은 강우와 기온에 관련하여 객관성과 일관성을 유지할 수 있는 극한지수를 설정하였다. 이에 근거하여 우리나라 전역에 위치한 총 66개 관측소의 과거자료를 분석하여 이들 자료의 통계적 유의성을 파악하기 위해 선형회귀 및 Kendall-Tau 방법을 적용하였다. 김상욱과 이길성(2008)은 일반최소자승법을 이용한 Bayesian 다중회귀분석을 적용하여 저수량 지역 빈도분석을 수행하였고, 불확실성측면에서의 효과를 탐색하기 위해 Bayesian 다중회귀분석에 의한 추정치와 t분포를 이용하여 산정한 일반 다중회귀분석의 추정치의 신뢰구간을 비교분석하였다. 저수량 지역 빈도분석을 수행하는 경우, Bayesian 다중회귀분석이 일반 회귀분석보다 불확실성을 표현하는데 있어서 우수하다는 연구결과를 얻었다고 하였다. 신홍준 등(2008)은

홍수지수법의 불확실성을 평가하기 위해 우리나라 강우자료의 지역빈도해석에 적합한 generalized logistic 분포형의 분위수에 대한 점근 분산식을 이용하여 성장곡선에 대한 신뢰구간을 산정하였다. 또한 빈도해석의 효율성 지표를 계산하기 위해 지점빈도해석과 지역빈도해석에 의한 분위수의 분산을 이용하였다. 우리나라 378개 강우 관측 지점을 바탕으로 구분한 14개 동질 지역에 대해 효율성 지표를 계산한 결과, 홍수지수법이 지점빈도해석보다 불확실성이 더 작은 분위수를 추정하는 것으로 나타났다고 하였다. 권영문과 김태웅(2009)은 서울 강우관측소의 46개년(1961-2006)시 강우자료를 Gumbel 혼합모형에 적용하여 빈도해석을 수행하였다. 이변량 강우빈도해석을 통해 결합누적분포함수를 산정한 후, 결합 재현기간, 그리고 조건부 재현기간을 산정하였다. 이와 같은 이변량 강우빈도해석은 다양한 호우특성들의 확률적 거동에 대한 예측정보를 제공함으로써 수공구조물의 계획 및 설계 그리고 위험도평가 등의 문제해결에 유용하게 사용될 수 있다고 제안하였다. 권현한과 김병식(2009)은 Markov Chain 모형의 매개변수인 천이확률과 확률분포형의 매개변수 등을 연결함수(link function)를 통해 외부인자와 연동하도록 하였으며 정준상관분석을 통해 매개변수를 추정하였다. 개발된 모형을 서울지방 1961-2006년까지의 일강수량 자료를 대상으로 검증하였고, 추정된 결과가 계절강수량의 특성뿐만 아니라 일강수량의 특성 또한 적절하게 모의된다고 하였다. 또한 본 연구와 관련된 4편의 연구보고서에 대해서도 조사되었으며, 주요내용은 다음과 같다.

기후변화가 한반도의 수문기상학적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 현재 강수량과 미래 강수량 자료의 특성 및 확률밀도를 비교하였다. 확률강우량 산정 (재현기간별 RCM 강수량과 공간분포, 각 지점별 빈도분석)을 실시하였고, SPI를 이용한 기상학적 가뭄의 공간특성을 비교하였다.

과거 한반도 기후변화 추세분석을 통하여 연강수량, 일최다강수량의 시공간을 분석하였다. 800mm/일, 90mm/일, 100mm/일 등 호우사상의 발생빈도변화 분석을 실시하였으며, 지속시간별 최대호우의 시공간 분석 및 지점별 지속시간별 최대 강우강도변화를 분석하였다.

강수량 자료의 시공간 변동특성을 분석하였다. 시공간 상관성을 고려한 일기산출기(weather generator) 모형으로는 일차적 일기산출기 모형과 다지점 일기산출기 모형이 있다. 일차적 일기산출기 모형으로는 일별 강수유무(Markov chain 모형)과 강수량(모수추정은 최대우도법, 확률분포형은 혼합지수분포, Gamma 분포, log-normal분포)등이 있으며, 다지점 일기산출기 모형은 다단계 일반화 모형(HGLMS)을 도입하였다.

연최대 강우량 추정 회귀모형을 개발하였으며 목표연도(2030년) 확률분포 모수추정, 확률분포함수 추정 및 산정을 하였다. 또한 IDF 곡선을 작성하였고, 미육군공병단 EST(Empirical Simulation Technique) 기법과 모수적 지점빈도해석에 의한 확률강우량을 비교하였다.

나. 국외 관련기술 현황

Table 2.1.16 국외 현황

세부기술	업체명 (국적)	보유 기술 또는 특허	기술 수준	비고
비정상성빈도 해석기술	미육군공병단(미국)	Empirical Simulation Technique(EST)을 이용한 비정상성 빈도해석 기술	비정상성 빈도해석에 따른 설계강우량 제시 (90%)	
비정상성 빈도해석 기술	UCAR (미국)	비정상성 강수자료 빈도해석 기술	기후변화를 고려한 비정상성 자료 빈도해석 (90%)	
기후변화를 고려한 설계강우량 보정기술	영국환경청 (영국)	기후변화를 고려한 최대강우강도, 최대하천유량, 연안풍속 및 극한파고의 기간별 보정계수 제시	기후변화에 따른 지역 보정계수 제시 (90%)	

관련 기술 선진국에서는 기후변화에 따른 지역영향에 대한 분석, 특히 강우 시공간 변동성을 파악하고 빈도해석 시 자료의 1, 2차 모멘트 거동에 대한 반영을 위하여 추세 변동과 분산거동을 정량화하고 이를 반영하기 위한 모수 및 비모수 비정상성 빈도해석 기법을 개발하여 설계강우량 산정에 반영하고 있다. 이는 기후변화로부터 보다 안전한 사회 안전망 구축 및 경제 활동 보장을 위하여 선택요인이 아닌 필수요인으로 인식하고 있다. 향후 수자원관리, 홍수재해 예방, 가뭄 대비 등 다양한 기후변화에 지역 수문영향 분석 및 전망기술의 개발과 적용은 국가차원에서 필수적이며 해외건설시장 진출시에도 필수적인 기초기술이라 판단되어진다.

본 연구에서 조사된 국외 연구문헌은 극치수문량 추세검정 및 평가와 관련된 연구, 극치분포의 매개변수 추정기법, 비정상성 빈도해석기법 등으로 나눌 수 있다. 전체 조사된 연구문헌은 총 33편이지만 여기에서는 대표적인 문헌 몇 가지만을 표로 정리하였으며, 그 중 몇 편의 주요 내용은 다음과 같다. Strupczewski et al.(2001)은 비정상성 홍수빈도해석을 위하여 56개 모형을 구성하고 Akaike 정보판정법(Akaike Information Criterion, AIC)을 사용하여 최적의 비정상성 빈도해석모형을 선정하였으며, 최우추정법(Maximum Likelihood Estimation, MLE)을 적용하여 매개변수를 추정한 바 있다. Cunderlik and Burn(2003)은 지역 홍수빈도해석을 위하여 2차 비정상성 접근법을 제안하였다. 이 연구에서는 비정상성 분위수(quantile) 함수를 위치 매개변수와 축척 매개변수로 구성되며 시간에 대해서 종속적인 지점성분과 2차 비정상성 가정 하에서 시간에 대해서 독립적으로 고려될 수 있는 지역성분으로 분리하였다. 또한 비정상성 자료의 위치 및 축척매개변수를 추정함에 있어서 모형의 성능을 평가하기 위하여 Monte-Carlo 모의실험을 수행하였다. Renard et al.(2006)은 몇 가지 확률모형과 네 가지 극치분포형(지수분포형, Generalized Pareto (GP) 분포형, Gumbel 분포형 그리고 Generalized Extreme Value (GEV) 분포형)을 고려하여 Bayesian 기법을 적용하고자 하였다. 이 연구에서는 분위수에 대한 지역적 사전정보를 사용함으로써 사전분포을 특성화하고, 사후분포는 확률모형을 정량화함으로써 보다 현실적인 빈도해석모형을 도출할 수 있으며, 그러한 이유로 Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 방법이 요구된다고 하였다. Blasone et al.(2008)은

MCMC 기법을 변형한 Shuffled Complex Evolution Metropolis (SCEM-UA)를 적용하여 Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) 기법을 개선하고자 하였다. GLUE 기법은 Bayesian 추정을 결합한 Monte Carlo 분석시 발생할 수 있는 불확실성을 예측하기 위하여 개발된 기법이다. Sugahara et al.(2009)은 Brazil Sao Paulo의 1933-2005년까지 일강수량 극치 빈도해석을 위하여 Peaks-Over-Threshold (POT)와 GP 분포형을 적용하였으며, 비모수적 추세검정을 위하여 Mann-Kendall 검정을 수행한 바 있다. Villarini et al.(2009)은 도시지역에서의 홍수빈도해석은 토지이용변화와 도시빗물시설의 개발과 관련된 연 최대기록의 비정상성에 의해 복잡해진다고 하였다. 이 연구에서 제안한 홍수빈도해석기법은 비정상성 조건 하에서 시계열 자료를 모형화할 수 있는 Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape parameters (GAMLSS)에 기초를 두어 발전되어 왔다. North Carolina에 위치한 Charlotte의 도시화된 유역인 Little Sugar Creek의 연 최대정상방출기록에 적용시킨 결과, 선택된 모수적 분포의 매개변수를 모형화함으로써 연 최대유량의 평균과 분산변화를 묘사할 수 있다고 하였다.

7. 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가

2007년 2월 2일 유엔(United Nations, UN) 정부간 기후변화위원회(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 기후변화에 관한 종합 보고서를 6년 만에 발표해 지구 온난화는 인간이 초래한 것이라고 강력히 지적하고 금세기 안에 지구표면 온도가 섭씨 1.8~4.0도 상승할 것이라고 전망하였으며 이러한 기후변화가 앞으로 더 심한 폭우와 해빙, 가뭄, 폭염, 그리고 해수면 상승이 있을 것이라고 경고하였다(IPCC, 2007a). 우리나라는 이와 같은 기후변화 상태에서 가장 기온상승이 높은 지역으로 예측되어 2100년에는 아열대 기후로 변화할 것으로 예측되었다. 이러한 지구온난화에 의한 미래 기온의 상승과 강수량의 패턴변화는 증발산이나 토양수분 등의 변화로 이어져 궁극적으로는 물 순환의 변화를 초래하며 유출량 변화로 이어지게 되며(안재현 등, 2001; 유철상과 이동률, 2000), 이로 인해 겪게 될 물 문제는 하천유량, 수생태계, 농업, 홍수, 가뭄, 수질 등 미래의 수자원에 커다란 영향을 미칠 것으로 예상된다.

기후변화 영향에 대한 정량적 평가를 위해서는 일반적으로 기후수치모형인 전지구기후모형 (GCM; General Circulation Models)에서 모의한 기후변화 시나리오별 기후모의 결과를 사용하게 된다. 그러나 GCM은 모형의 종류가 매우 다양할 뿐만 아니라 모형의 특성과 사용된 입력자료에 따라 모의결과가 상이하게 나올 수 있다. IPCC의 GCM평가결과(IPCC, 2007)는 대체로 “현재의 기후모형들은 관측된 대규모(반구규모 혹은 대륙규모) 기후의 여러 양상들을 비교적 정확히 모의할 수 있지만 지역규모 모의에서는 정확성이 떨어진다”고 지적하고 있다. 따라서 GCM모의결과를 지역규모에 적용하기 위해서는 각별한 주의를 요하게 된다.

따라서 본 연구에서는 GCM의 시나리오를 이용하여 수문순환모형으로 기후변화에 따른 수자원 영향 평가를 실시한 국내외 연구사례를 조사하였으며, 그 내용의 범위를 참고하여 향후 우리나라가 나아가야 할 방향을 살펴보았다.

가. 국외 관련기술 현황

기후변화에서 수문순환모형을 이용하여 수자원영향평가를 실시한 국외 연구문헌을 조사하기 위해 살펴본 대표적 문헌으로 Hydrological Processes, Journal of Hydrology, International Journal of Climatology, Climate Research, Water Resources Research, Transactions of the ASA1BE 등이 있으며, 연구문헌의 조사기간은 2000년 이후로 하였다. 그 결과 35편의 관련 문헌이 수집되었으며, 문헌 중 Hydrological Processes에서는 무려 14편의 논문이 수집되어 전체 수집논문의 약 40%를 차지하였다. 그 다음으로 Journal of Hydrology에서 5편(약 14%), International Journal of Climatology에서 4편(약 11%)으로 기후변화와 수문순환모형을 이용한 수자원평가관련 논문이 수집되었다.

국외에서는 기후변화에 따른 수자원영향평가를 위하여 다양한 수문순환모형을 이용하고 있는 것으로 조사되었는데, 그 중 분포형 수문모형을 이용한 논문은 7편(20%)이었다. Jasper et al. (2004)이 WaSiM-ETH 모형을, Booij (2005), Bergström et al. (2001), A1Bdo et al. (2009)는 HBV 모형을, Koster et al. (2005)는 대상유역에 적합한 분포형 모형을 USAFLOW, TANAFLOW로 개발 및 명명하여 수자원영향평가를 실시하였다. 또

한 Gületal (2010)가 MIKESHE를, Asokan and Dutta (2008)이 DHM을 이용하여 결과를 도출하였다. 조사한 문헌들 대부분은 기후변화에 따른 수문순환 영향 평가시 수문요소 중 주로 유출량과 증발산량의 변화를 월별, 연별로 분석하였다. 하지만 기후변화 평가를 위해 미래 식생, 토지이용을 예측하여 고려한 경우는 전무한 실정이다.

수집된 35편의 논문을 Fig. 2.1.18와 같이 연별로 분석해본 결과 2007년에 약 20%로 7편의 논문이 이 기간에 발표된 것이며, 가장 최근인 2010년에 17%의 6편이 기후변화에 따른 수자원연구의 주제로 발표가 되었다. IPCC 4차보고서가 2007년에 발표됨으로써 기후변화와 관련된 연구가 활발해진 것으로 판단된다.

Table 2.1.17 국외 문헌 조사 범위

Journals	**Research date**	Jan. 2000 - Mar. 2010
	Total number	35
	Name	Hydrological Processes (14) Journal of Hydrology (5) International Journal of Climatology (4) Climate Reserch (2) Water Resources Research (2) Transactions of the ASA1BE (2) Climatic Change (1) Permafrost and Periglacial Processes (1) Agricultural and Forest Meteorology (1) Irrigation and Drainage (1) Earth Surface Processes and Landforms (1) Ecohydrology (1)
Contents		Climate change scenario, Hydrological cycle model, Assessment of water resources
Key words		Climate change, Water resources, Scenario, Hydrological model

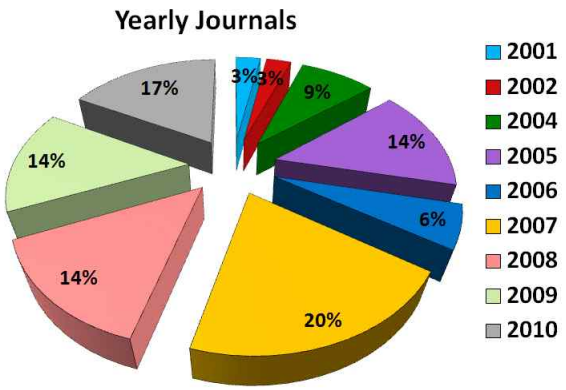


Fig. 2.1.18 국외에서의 선행 연구 연별 분류

한편, 본 주제와 관련하여 어느 나라에서 가장 활발한 연구가 이루어지고 있는지를 살펴본 결과 Fig. 2.1.19와 같이 나타났다. 약 46%가 유럽에서 연구되었으며, 그 다음 아시아, 북미 순으로 기후변화에 따른 수자원영향평가의 연구가 활발한 것으로 분석되었다. 유럽 중에서도 스위스와 영국에서, 북미 중에서는 미국에서, 아시아 중에서는 중국에서 활발한 연구가 이루어지고 있었다. 본 연구와 관련하여 수집된 국외 연구문헌목록을 Table 2.1.18에 나열하였다.

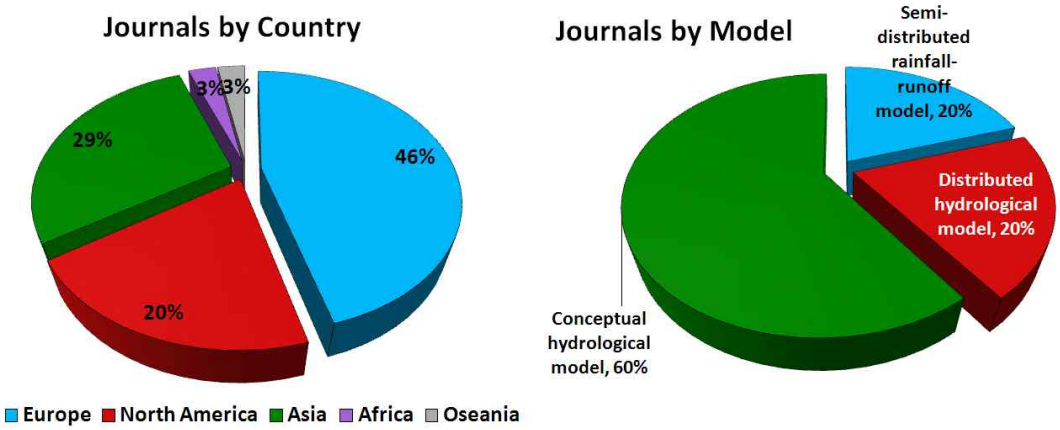


Fig. 2.1.19 국외에서의 선행 연구 국가별 및 모형별 분류

Table 2.1.18 국외 문헌동향 목록 정리

Country		Author	Title	Year	Model	Hydrological component	Time Scale
Europe	Switzerland	Burlando and Rosso	Effects of transient climate change on basin hydrology. 2. Impacts on runoff variA1Bility in the Arno River, central Italy	2002	Semi-distributed drainfall-runoff model PRMS	Runoff Evapotranspiration Soil moisture	Daily Monthly Annual
		Jasper et al.	Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine river basins	2004	Distributed hydrological model WaSiM-ETH	Runoff Evapotranspiration Soil moisture	Daily Monthly Seasonal Annual
		Horton et al.	Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty	2006	Conceptual reservoir-based model GSM-SOCONT	Runoff Evapotranspiration	Monthly Annual
		Huss et al.	Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate	2008	Aglacio-hydrological model GERM	Runoff Evaporation	Daily Monthly Annual
	UK	Diaz-Nieto and Wilby	A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on lowflows in the River Thames, United Kingdom	2005	Water balance model CATCHMOD	Runoff Potential evaporation	Daily Monthly
		Wilby	Uncertainty in water resource model parameters used for climate change impact assessment	2005	Water balance model CATCHMOD	Runoff	Daily Seasonal Annual
		Herrera-Pantojaand Hisock	The effects of climate change on potential groundwater recharge in Great Britain	2008	Simple soil moisture balance model	Groundwater	Annual Seasonal

Country		Author	Title	Year	Model	Hydrological component	Time Scale
	Netherlands	Booij	Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions	2005	Distributed hydrological model HBV	Runoff	Daily
		Koster et al.	Water balance modelling of (sub-)arctic rivers and freshwater supply to the Barents Sea Basin	2005	Spatially-distributed water balance model USAFLOW,TANAFLOW	Evapotranspiration Runoff Snowmelt	5-daily Monthly Annual
	Sweden	Bergström et al.	Climate change impacts on runoff in Sweden -assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling	2001	Distributed hydrological model HBV	Runoff Evapotranspiration	Daily Monthly Annual
	Luxembourg	Drogue et al.	Simulating the spatio-temporal variA1Bility of streamflow response to climate change scenarios in a mesoscale basin	2004	Lumped reservoir model HRM	Runoff Evapotranspiration	Monthly Seasonal
	Germany	Bronstert et al.	Comparison and evaluation of regional climate scenarios for hydrological impact analysis: General scheme and application example	2007	Water balance model developing	Runoff Evapotranspiration Soil moisture Groundwater	Seasonal Annual
	France	CA1Ballero et al.	Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change	2007	Hydrometeorological model SIM	Runoff Evapotranspiration Soil moisture Groundwater	Monthly Seasonal Annual
	Portugal	Nunes et al.	VulnerA1Bility of water resources, vegetation productivity and soil erosion to climate change in Mediterrancean watersheds	2008	Semi-distributed rainfall-runoff model SWAT	Runoff Evapotranspiration	Annual
	Belgium	Githui et al.	Climate change impact on SWAT simulated streamflow in western Kenya	2009	Semi-distributed rainfall-runoff model SWAT	Runoff	Monthly
	Denmark	Gületal.	Assessing climate change impacts on river flows and environmental flow requirements at catchment scale	2010	Distributed hydrological model MIKESHE	Runoff	Monthly
North America	USA	Zhang and Liu	Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tA1Bleland region on the Loess Plateau of China	2005	Water erosion model WEPP	Runoff Evapotranspiration Percolation Soil moisture	Daily Annual
		Serrat-Capdevila et al.	Modeling climate change impacts – and uncertainty – on the hydrology of a riparian system: The San PedroBasin (Arizona/Sonora)	2007	Groundwater-surface waterflow model GMS	Runoff Evapotranspiration	Annual
		Franczyk and Chang	The effects of climate change and urbanization on the runoff of the Rock Creek basin in the Portland metropolitan area, Oregon USA	2009	Semi-distributed rainfall-runoff model SWAT	Runoff	Monthly Seasonal
		Mishra etal.	A regional scale assessment of land use/land cover and	2010	Macro-scale hydrological	Runoff Evapotranspiration	Monthly Seasonal

Country		Author	Title	Year	Model	Hydrological component	Time Scale
			climatic changes on water and energy cycle in the upper Midwest United States		model VIC	Snow water equivalent	Annual
	Canada	Scibek and Allen	Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels	2006	Water balance model HELP	Runoff Groundwater	Monthly Annual
		Yao et al.	Hydrological impacts of climate change predicted for an inland lake catchment in Ontario by using monthly water balance analyses	2009	Water balance model	Runoff Evapotranspiration	Daily Monthly
		Verhaar etal.	Numerical modelling of climate change impacts on Saint-Lawrence River tributaries	2010	Lumped rain and snowfall runoff model HSAMI	Snow melt runoff	Annual
Asia	China	Zhang et al.	Potential effects of climate change on runoff in the Yellow River Basin of China	2007	Water balance model	Runoff	Annual
		Zhang et al.	Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe River Basin using the SWAT model	2007	Semi-distributed rainfall-runoff model SWAT	Runoff	Monthly Seasonal Annual
		Jiang et al.	Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China	2007	Water balance models TM,VUB,XAJ,GM,WM,SM	Runoff Evapotranspiration Soil moisture	Monthly
		Liu et al.	Impacts of climate change on hydrological processes in the headwater catchment of the Tarim River basin, China	2010	Macro-scale hydrological model VIC	Runoff Evapotranspiration	Daily Monthly
		Maetal.	Sensitivity of streamflow from a Himalayan catchment to plausible changes in land cover and climate	2010	Semi-distributed rainfall-runoff model SWAT	Runoff Groundwater Evapotranspiration	Annual
	Japan	Fujihara et al.	Assessing the impacts of climate change on the water resources of the Seyhan River Basins in Turkey: Use of hynamically downscaled data for hydrologic simulation	2008	Land surface model SiBUC	Runoff Evapotranspiration	Daily Monthly Annual
		Somura et al.	Impact of climate change on the Hii River basin and salinity in Lake Shinji: a case study using the SWAT model and a regression curve	2009	Semi-distributed rainfall-runoff model SWAT	Snow water equivalent Evapotranspiration	Daily Monthly Seasonal
	India	Singh and Bengtsson	Hydrological sensitivity of a large Himalayan basin to climate change	2004	Conceptual hydrological model NWSRFS	Runoff Snow melt runoff	Daily Seasonal Annual
	Thailand	Asokan and Dutta	Analysis of water resources in the Mahanadi River Basin, India under projected climate conditions	2008	Distributed hydrologic model DHM	Runoff	Monthly Annual
	Iran	Morid and Bavani	Exploration of potential adaptation strategies to climage change in the Zayandeh Rud Irrigation	2010	Rainfall-runoff simulations ANN	Runoff	Monthly Annual

Country		Author	Title	Year	Model	Hydrological component	Time Scale
			System, Iran				
Africa	Ethiopia	A1Bdo et al.	Assessment of climate change impacts on the hydrology of Gilgel A1Bay catchment in Lake Tana basin, Ethiopia	2009	Distributed hydrological model HBV	Runoff	Daily
Oseania	Australia	Charles et al.	Effect of GCM bias on downscaled precipitation and runoff projections for the Serpentine catchment, Western Australia	2007	Water balance model LUCICAT	Runoff	Monthly Annual

국외에서는 기후변화에 따른 수자원영향평가를 위하여 다양한 수문순환모형을 이용하고 있는 것으로 조사되었는데, 그 중 분포형 수문모형을 이용한 논문은 7편(20%)이었다. Jasper et al. (2004)이 WaSiM-ETH 모형을, Booij (2005), Bergström et al. (2001), A1Bdo et al. (2009)는 HBV 모형을, Koster et al. (2005)는 대상유역에 적합한 분포형 모형을 USAFLOW, TANAFLOW로 개발 및 명명하여 수자원영향평가를 실시하였다. 또한 Gületal (2010)가 MIKESHE를, Asokan and Dutta (2008)이 DHM을 이용하여 결과를 도출하였다. 조사한 문헌들 대부분은 기후변화에 따른 수문순환 영향 평가시 수문요소 중 주로 유출량과 증발산량의 변화를 월별, 연별로 분석하였다. 하지만 기후변화 평가를 위해 미래 식생, 토지이용을 예측하여 고려한 경우는 전무하다.

나. 국내 관련기술 현황

국내에서는 국외와 마찬가지로 기후변화에 따른 수자원영향평가를 위하여 다양한 수문순환모형을 이용하고 있는 것으로 조사되었지만, 국외와 같이 분포형 수문순환모형을 개발 및 이용하여 평가한 경우는 거의 없는 것으로 조사되었다.

본 주제와 관련하여 국내 연구문헌을 조사하기 위해 살펴본 대표적 문헌으로 한국수자원학회논문집, 대한토목학회논문집, 대한원격탐사학회논문집, 한국지리정보학회논문집, 한국농공학회 논문집 등이 있다. 그 결과 24편의 관련 문헌이 수집되었으며, 문헌 중 한국수자원학회논문집에서는 무려 18편의 논문이 수집되어 전체 수집논문의 약 75%를 차지하였다. 그 다음으로 대한토목학회논문집에서 3편(약 13%)으로 기후변화와 수문순환모형을 이용한 수자원평가관련 논문이 수집되었다(Table 2.1.19 참조).

Table 2.1.19 국내 문헌 조사 범위

Journals	Research date	Jan. 2000 - Mar. 2010
	Total number	24
	Name	Journal of Korea Water Resources Association (18) Journal of Civil Engineering (3) Stoch Environ Res Ris Assess (1) Transactions of the ASA1BE (1) Paddy Water Environ (1)
Contents		Climate change scenario, Hydrological cycle model, Assessment of water resources
Key words		Climate change, Water resources, Scenario, Hydrological model

수집된 24편의 논문을 Fig. 2.1.20과 같이 연별로 분석해본 결과 2009년에 약 29%로 7편의 논문이 이 기간에 발표된 것이며, 그 다음으로 2007년, 2008년에 각 17%로 4편씩 이 기후변화에 따른 수자원연구의 주제로 발표가 되었다. 이는 국외에서 2007년에 이 주제와 관련하여 많은 연구가 이루어진 것과 비교해 국내의 연구진행과 약 2년 정도 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

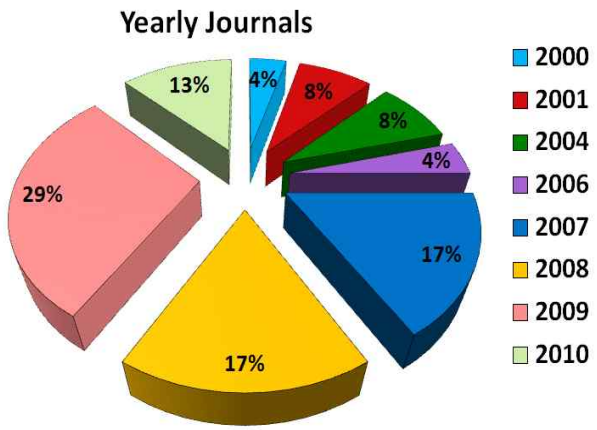


Fig. 2.1.20 국내에서의 선행 연구 연별 분류

Table 2.1.20 국내 문헌동향 목록 정리

Author	Title	Year	Model	Hydrological component	Time Scale	Study area
신사철	기후변화 시나리오에 의한 하천 유황의 해석	2000	일강우-유출모형 TANK	유량 저수량	일단위	안동댐유역
안재현 등	GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석	2001	물수지모형[방정식]	증발산량 유출량 토양함수비	월단위 계절단위	대청댐상류유역
안재현 등	지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여 : 2. 물수지 모형을 이용한 대청댐 상류 유역 수문환경의 변화 분석		물수지모형[방정식]	증발산량 유출량 토양함수비	월단위 연단위	대청댐상류유역
김병식 등	기후변화가 용담댐 유역의	2004	준분포형강우-유출모형	유출량	일단위	용담댐유역

Author	Title	Year	Model	Hydrological component	Time Scale	Study area
	유출에 미치는 영향		SLURP		월단위 계절단위 연단위	
김응태 등	기후변화에 따른 대청댐 유역의 유출 영향 분석		장기유출모형 NWS-PC	유출량	월단위 계절단위 연단위	용담댐유역
임혁진 등	CA-Markov 기법을 이용한 기후변화에 따른 소양강댐 유역의 수문분석	2006	준분포형강우-유출모형 SLURP	유출량 증발산량	일단위 연단위	소양강댐유역
김병식 등	Impact of climate change on water resources in Yongdam Dam Basin, Korea	2007	준분포형강우-유출모형 SLURP	유출량	일단위	용담댐유역
황준식 등	기후변화 영향평가를 위한 월물수지모형의 적용성 검토		월물수지모형 : Thornthwaite & Mather, A1Bcd, GR2M, Xiong 일강우-유출모형 : SSARR, TANK	유출량	일단위 월단위	금강유역
정일원 등	수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(II): 유역별 유출시나리오 구축		준분포형강우-유출모형 PRMS	유출량 증발산량	월단위	6개댐유역[도암댐,괴산댐, 안동댐,합천댐, 임하댐,섬진댐]
배덕효 등	A2 시나리오에 따른 국내 수자원의 변동성 전망		준분포형강우-유출모형 PRMS	유출량	월단위 계절단위 연단위	5대강유역
정일원 등	유출모형이 기후변화 수자원 영향평가에 미치는 영향 분석	2008	준분포형강우-유출모형 PRMS,SLURP,SWAT	유출량 증발산량	월단위 연단위	안동댐유역
정상만 등	기후인자의 변화에 따른 대청댐유역의 유출민감도 모의평가 - 4th IPCC 보고서의 결과를 기준으로 -		준분포형강우-유출모형 SWAT	유출량 융설량 증발산량 지하수량	월단위 연단위	대청댐유역
안소라 등	미래토지이용 및 기후변화에 따른 하천유역의 유출특성 분석		준분포형강우-유출모형 SLURP	유출량 증발산량	일단위 연단위	경안천유역
이용준 등	SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화 및 토지이용 변화에 따른 안성천 유역 수문 - 수질 변화 분석 (I)		준분포형강우-유출모형 SWAT	유출량	일단위 연단위	안성천유역
안소라 등	기후변화가 경안천 유역의 수문요소에 미치는 영향 평가	2009	준분포형강우-유출모형 SLURP	유출량 증발산량 토양수분 지하수량	일단위 계절단위 연단위	경안천유역
한수희 등	토양수분의 추계학적 거동과 기후변화가 미치는 영향		토양수분을 위한 추계학적 모형	토양수분	월단위	옥천군
박종윤 등	기후변화가 충주댐 유역의 하천수질에 미치는 영향평가를 위한 유역 모델링		준분포형강우-유출모형 SWAT	유출량 증발산량 지하수량	일단위 월단위 연단위	충주댐유역
최대규 등	CGCM 미래기후정보를 이용한 기후변화가 병성천 유역 수문 및 수질반응에 미치는 영향분석		준분포형강우-유출모형 SWAT	유출량 증발산량 토양수분	일단위 월단위 연단위	병성천유역
박경신 등	기후변화 및 도시화에 따른 유황곡선 및 BOD 농도지속곡선 변화		연속유출모형 HSPF	유출량	월단위 연단위	안양천유역
박근애 등	Assessment of climate change impact on the inflow and outflow of two agricultural reservoirs in Korea		준분포형강우-유출모형 SLURP	유출량 증발산량	일단위 월단위 계절단위 연단위	안성천유역
박근애 등	Future potential impacts of climate change on agricultural watershed hydrology and the adaptation strategy of paddy rice irrigation reservoir by release control		준분포형강우-유출모형 SLURP	유입량	일단위 월단위 계절단위 연단위	안성천유역
박근애 등	SLURP 모형을 이용한 기후, 식생, 토지이용변화가 농업용 저수지유역과 하천유역에 미치는 기여도 평가(II) –모형의 검·보정 및 적용 –	2010	준분포형강우-유출모형 SLURP	유출량 증발산량 토양수분 지하수량	일단위 월단위 계절단위 연단위	안성천유역
김수전 등	고해상도 RCM자료를 이용한		준분포형강우-유출모형	유출량	일단위	한강유역

Author	Title	Year	Model	Hydrological component	Time Scale	Study area
	기후변화가 한강유역의 수자원(이수적 측면)에 미치는 영향 평가		SLURP 물수지모형 K-WEAP		월단위 연단위	
김병식 등	기후변화와 토지피복변화를 고려한 한강 유역의 수자원 영향 평가		준분포형강우-유출모형 SLURP	유출량	일단위 월단위 계절단위 연단위	한강유역

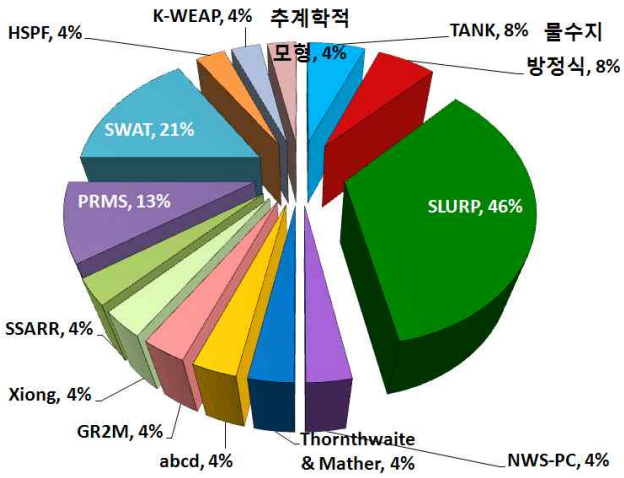


Fig. 2.1.21 국내에서의 선행 연구 모형별 분류

본 연구와 관련하여 수집된 국내 연구문헌목록을 Table 2.1.20에 나열하였다. 국내에서는 국외와 마찬가지로 기후변화에 따른 수자원영향평가를 위하여 다양한 수문순환모형을 이용하고 있는 것으로 조사되었지만, 국외와 같이 분포형 수문순환모형을 개발 및 이용하여 평가한 경우는 거의 없는 것으로 조사되었다(Fig. 2.1.21 참조).

8. 기후변화에 따른 물수급 전망

가. 국외 관련기술 현황

기후변화에 따른 물수지 전망 분야에 대해 살펴보면, Lettenmaier et al.(1999)은 GCM 결과를 미국의 대표적인 6개의 수자원시스템에 적용하였으며, 이 중 STELLA를 주로 사용하였다. Hamlet et al.(1999) 는 미국 Columbia 유역에 대하여 GCM 기후변화 시나리오를 VIC 모형에 입력하여 유역유출량을 산정 후, ColSim(Columbia river Simulation model)에 입력하여 Columbia 유역에 대한 물관리를 수행하였다. Wood et al.(2004), Payne et al.(2004), Christensen et al.(2004)은 Halmet et al.(1999) 연구보다 기후변화 시나리오를 더 다양하게 하여 미국 Colorado와 Columbia 유역에 대하여 ColSim을 이용하여 Columbia 유역에 대한 물관리를 수행하였다. 최근 미국 California 주정부의 기후변화 행동팀(Climate Change Action Team, CAT)에서는 GCM 기후변화 시나리오, VIC 강우-유출 모형, CalSim(California river Simulation model) 유역물관리 모형, DSM2(Delta Simulation Model2)를 기후변화 Toolkit으로 하여 California 유역에 대하여 미래 유역물관리에 대해 수행하였다(California DWR, 2006).

기후변화에 의한 물수지 및 수문순환변동 분야에서 살펴보면, 선진국에서는 이미 20여 년 전부터 기후변화 연구가 시작되어 수많은 전망결과와 영향평가 결과가 도출되었으나 이들의 연구결과가 상당이 다르다는 문제에 직면해 있다. 따라서 도출된 결과의 불확실성을 파악하고 이를 줄여나가는 연구가 향후 10년 동안 유럽과 미국을 중심으로 더욱 활발해질 것으로 판단된다.

나. 국내 관련기술 현황

기후변화에 따른 물수급 전망에 대한 연구들을 살펴보면, 한국환경정책평가연구원(2004)에서는 물 순환에 미치는 기후변화의 영향을 평가하기 위해, IPCC의 권장 시나리오인 SRES 시나리오의 기후모형결과와 지역 기후모형결과를 수집·정리하고 토양수분 변화에 기초한 장기 수문모형을 개발하였다. 환경부(2006)는 5개의 GCM 기후변화 시나리오를 물수지 모형에 입력하여 유출량을 모의하고 이를 객체 지향형(object-oriented) 모형인 STELLA(System Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation)를 통하여 금강유역의 수자원 시스템의 거동을 파악하였다. 김수전 등(2009)은 A2 시나리오 바탕의 RegCM3 기후모형의 결과를 SLURP 모형에 입력하여 유출량을 모의한 후, 물수지 기반의 수자원 평가계획모형인 K-WEAP을 이용하여 한강 유역의 물 부족량을 검토하였다.

현재 국내의 물수급 전망 기술개발 수준은 선진국에 비해 70%의 수준으로서 5년여 정도 격차를 보이고 있는 것으로 판단된다. 본 연구과제를 통해 기후변화에 따른 물수급 분석 기술의 개선을 이루게 된다면 선진국 대비 약 90%의 수준으로 격상되어 기술 격차를 3년여로 줄여 경쟁단계의 수준에 이를 수 있다고 예상된다.

9. 기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 정량화

가. 국내 관련기술 현황

기후변화 불확실성 분석에 대한 국내 연구들을 살펴보면, 이재경 등(2007)은 Girogi et al.(2002)이 제안한 Reliability Ensemble Average(REA) 기법을 소개하고 이를 개선한 Modified-REA(M-REA)를 제안하였다. 두 방법을 5개의 전지구모형에 적용하여 불확실성을 줄이는 연구를 수행하였다. M-REA를 이용하여 결합한 결과가 기존 REA의 결과보다 기후정보의 불확실성을 더 저감하는 것을 확인하였다. 배덕효 등(2009)도 총 39개의 기후시나리오와 8개의 수문모형을 우리나라 4대강 유역 109개 중권역에 대해 Multi-Model Ensemble 기법을 적용하였다. 생산된 유출시나리오를 미래 2020s, 2050s, 2070s로 나누어 변화율을 분석한 결과, 여름철 유출량과 겨울철 유출량이 증가할 것으로 전망하였으며, 겨울철 유출량 전망이 상대적으로 불확실성이 큰 것으로 나타났다.

나. 국외 관련기술 현황

불확실성을 줄이는 방법 중 하나로 여러 모형의 결과를 조합하여 기후변화 전망을 제시하는 Multi-Model Ensemble 기법(Raisanen et al., 2001; Rajagopalan et al., 2002; Doblas-Reyes et al., 2005, Raftery et al., 2005)이 대두되고 있다. Multi-Model Ensemble 기법은 정확성이 높은 GCM에는 높은 가중치(weight)를 주고 정확성이 낮은 GCM에는 낮은 가중치를 주는 각 GCM의 모의능력에 따라 가중치를 부여하고 결합하는 방법이다. 또한 이러한 다양한 시나리오들로부터 기후변화 전망의 불확실성을 추정하는 연구(Allen et al., 2000; Giorgi et al., 2002; Murphy et al., 2004; Maurer et al., 2005; Wilby et al., 2006; Maurer, 2007)도 중요하게 다루어지고 있다.

단계별로 이루어지는 모형에서 최초의 입력값과 최종 결과값의 불확실성만을 정량화하는 것이 아니라 최종 결과값을 각 단계별 불확실성으로 나누어 표현하는 것은 매우 까다로우며 이러한 방법에 대한 연구 사례는 특히나 부족하다. 따라서 수문학 분야이외에 다양한 다른 학문의 분야에서 불확실성 정량화 관련 기법의 연구동향을 조사하였다.

수문학에서는 강우-유출 모형에서 다루어진 연구 사례가 있는데 수문 전망과정의 한 단계인 강우-유출 모형에서 강수량에 불확실성을 있으므로 강우-유출 모형에서 나온 유출량에도 불확실성이 발생 할 것이다. 따라서 강우-유출 모형의 전체 불확실성을 모형 입력값의 불확실성과 모형의 불확실성으로 나눌 수 있다(Krzysztofowicz 1999). 또한 강우-유출 모형에서 모형 자체에 있는 모수의 불확실성도 발생할 수 있다(Todini 2007). 이러한 불확실성에 사전 확률 분포를 가정하면 베이즈 정리에 의해 사후 확률 분포가 계산되어 지면 정확한 사후 확률 분포가 나오지 않는 경우 Monte Carlo Markov Chain을 이용하여 계산할 수 있다. 이러한 사후 확률 분포로 불확실성을 정량화 할 수 있다.

단계별로 이루어진 모형에서의 불확실성 정량화 기법은 수문학 분야가 아닌 다른 분야에서 조사하였다. 교외배수시설 모형을 다루는 연구에서 분산 분해 방법을 통해서 불확실성을 정량화 하였다(Freni 2010). 이 연구에서는 하수구 시설, 폐수처리장치, 물수역으로 이루어지는 단계적 구조에서 전체의 불확실성과 단계별로 나타나는 불확실성을 분산 분해를 통해서 구하였다.

또한 evidence theory(Dempster-Shafer Theory)를 이용한 불확실성 정량화 기법이 개발되었다. 이 방법에서는 관심있는 모형의 입력변수와 모형의 모수에 대한 확실한 정보의 양을 나타내는 측도인 belief와 입력변수와 모수에 대한 가능한 정보의 양을 나타내는 측도인 plausibility를 정의하며 두 측도의 차이를 이용하여 불확실성을 정의한다(Agarwal et. al.).

10. 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석

가. 국외 관련기술 현황

수공구조물 안정성 관련 국내외 연구 현황은 타 사회제반시설물과 비교하여 연구 성과가 활발한 분야는 아니지만 꾸준히 연구결과를 산출하고 있다. 특히 2000년대에 들어와 기후변화가 급변하고 장기호우, 가뭄 등으로 인한 피해가 증가하자 선진국을 시작으로 기후변화에 대처하기위한 행동 방침을 수립하고 있다.

선진국에서는 1970년대 후반 수자원 분야에서 기후변화로 인한 비정상성을 연구하는 논문이 발표되어 지금까지 30여년의 연구가 진행되어 왔다. 하지만 기후변화에 따른 구조물의 안전도 및 위험도 관련 연구는 비교적 부족하며 그 연구 내용 또한 매우 부정확한 것이 현실이다. 구조물 취약도 분석은 주로 지진에 대한 구조물의 성능을 평가한다. Dario Roside 등은 “Seismic risk assessment of levees″ 연구를 통하여 취약도 분석을 통한 구조물의 지진 영향 평가를 수행하였으며, 그 외에도 Kazi R.Karim 등의 ”Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation″, Masanobu Shinozuk 등의 “Nonlinear static procedure for fragility curve development” 등과 같은 연구에서 취약도 분석을 통한 구조물의 성능 평가를 수행하였다. 가장 최근 취약도 곡선 관련 연구는 2010년 US Army Corps of Engineers에서 진행한 “Beyond the factor of safety : Developing fragility curves to characterize system reliability” 등이 있다.

나. 국내 관련기술 현황

국내에서는 1990년대 중반부터 기후변화 연구가 수자원 분야에서 시작되어 15년 정도의 연구 경험을 가지고 있으나, 산발적으로 수행되었고 표준화가 이루어지지 못해 연구결과마다 매우 상이한 결과를 보이고 있으며, 특히 기후변화에 따른 수공구조물의 영향분석과 관련한 연구는 매우 부족하다. 안상진(2003)등은 “호우로 인한 수공구조물 홍수피해 영향” 연구를 통해 호우발생 시 수공구조물의 피해 정도를 연구하였고, 임정열(2006) 등은 “피해 결과 분석에 따른 국내 댐 파괴 경향 예측” 연구를 통해 통계적인 방법을 이용하여 국내 댐의 파괴 원인을 정밀하게 분석하였다. 구조물의 정량적 위험도 평가와 관련한 연구로 공정식 등(2009)은 “영주댐 신뢰성 분석” 연구를 통해 실제 수공 구조물의 위험 영향 인자의 확률론적 신뢰성 분석을 통한 정량적 위험도 평가를 수행하였다. 이종헌(2009) 등은 “지진의 변화에 따른 교량의 해석적 손상도 곡선의 안전성” 연구를 통해 취약도 분석을 통한 구조물의 내진 성능평가 연구를 수행하였으며, 이진학 등(2004)도 “지진취약도분석을 통한 교량의 지진위험도 평가” 연구를 통해 지진 취약도 분석을 통한 교량 구조물의 내진 성능 평가 및 위험도 분석을 수행하였다. 구조물의 위험도 및 성능평가와 관련한 국내 연구는 그 연구 성과의 신뢰도가 높고 관련 연구가 정착한 반면, 기후 변화를 고려한 수위 변화에 따른 수공구조물의 영향 분석과 관련한 연구는 매우 부족하다.

11. 기후변화를 대비한 법제도 개선 및 수자원정책 제시

본 연구에서 실시한 기후변화 적응전략에 대한 연구는 미국과 영국 등의 선진국에서는 이미 오래전에 시작하였다. 우리나라에서는 한국건설기술연구원과 인하대하교 등에서 2007년 이후 산발적으로 진행되었다. 그러나 기후변화 적응 수자원정책에 대한 본격적인 연구는 사실상 본 연구단에서 처음 시도된 것으로 판단된다.

Table 2.1.21 기후변화 적응 수자원정책 연구의 국제비교 및 국내비교

세부기술	현재 기술 국제비교			현재 기술 국내 비교		
	기술수준 (%)	기술격차 (년)	비고	기술수준 (%)	기술격차 (년)	비고
기후변화 대응 수자원 관리 전략 구축	70%	4년	도입단계	95%	1년	경쟁단계
기후변화 대응 법제도 구축	70%	4년	도입단계	100&	0년	성숙단계

12. 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가

기후변화와 관련된 연구는 주로 '불확실성(Uncertainty)'을 줄이기 위해 과거 재해기록으로 부터 기후변화의 물리적·경제적 영향을 계량화하고, 개연성 있는 시나리오를 예상해 기후변화 대응에 따른 효과상의 차이에 대응되는 경제적 편익들을 추정하여 왔다. 미국의 Maryland University의 연구팀이 작성한 The US Economic Impacts of Climate Change and the Costs of Inaction(2007)은 미국 전역에서 발생한 경제적 손실과 이득에 대해 지방별로 정리하였는데, 현재 기록에 의거해 기후변화의 경제적 영향을 조사한 대표적인 연구사례로 꼽힌다. 따라서 본 연구에서도 이러한 배경에 의해 현재 또는 과거자료를 기반으로 기후변화에 따른 우리나라 홍수 및 가뭄 피해비용 추정방법론의 구축을 위한 연구를 수행하였으며, 이에 대한 각 분야의 국·내외 기술개발 현황은 다음과 같다.

홍수 부분의 경우 대부분의 홍수피해비용 추정 방법의 목적은 단위유역의 치수시설물 설계에 따라 편익 산정을 위한 것으로, 주로 단위 개발 프로젝트에 적용되어 왔다. 이에 해당하는 방법들로는 수위-피해액 곡선법, 다차원법 등이 있으며, 이러한 방법들은 우리나라에서도 도입되어 현재 실무에 널리 이용되고 있다(Kates, 1965; Davis와 Skaggs, 1992; Cannon 등, 1995; BTE, 2000; Jonkman 등, 2008; 최승안 등, 2004, 하천시설기준, 2005). 또 다른 접근법에 의한 방법으로는 빈도 분석에 의한 연평균 피해액 산정법이 있으며, 이는 주로 과거 홍수피해액들의 시계열 자료들을 기반으로 재현기간의 개념 등을 도입한 방법이다. 이러한 방법들은 주로 국가 재정 또는 피해지표 산정 등에 이용되어 왔다(Beard, 1997; 국토연구원, 2005). 그러나 이상의 방법들은 본 연구목표를 도출하기에는 기본가정 또는 적용상 어려움이 있으며, 이에 대한 자세한 이유는 3장 1절에 설명하였다. 그러나 본 연구과정인 홍수부분에 특화된 기후변화에 따른 피해비용산정에 근접한 접근방법에 대한 연구는 해외의 경우 전무한 실정이며, 국내에서는 장옥재와 김영오(2009), 권현한(2011) 등의 연구가 진행되었으나, 아직 전국적인 규모의 결과를 도출하여 일반화하기에는 어려운 단계로 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

가뭄의 피해는 천천히 오래 지속되고 그 피해 범위가 넓어 피해비용을 산정하는 것이 어렵다. 그 결과 실제 피해자료 구축이 어려우며 피해추정에 대한 연구 또한 매우 부족한 실정이다. 국내에서는 가뭄의 구체적 규모를 알기위해 실제 가뭄의 피해지역과 그에 대한 가뭄대책 수립 등을 조사한 보고서를 공공기관 중심으로 발간하고 있다(건설교통부, 2002; 한국수자원공사, 2001; 행정자치부(중앙안전대책본부), 2000,2009). 또한 정책입안을 위한 가뭄원인 분석과 대책 수립에 관한 연구가 함께 진행된 바 있다(한국건설기술연구원, 2002;, 국립방재연구소, 2009). 가뭄의 기술적 연구는 주로 학계에서 연구되어왔는데 류재희(2002)는 가뭄에 영향을 끼치는 수문인자를 수치화하여 유역의 가뭄지수를 산정하고 비교하였고 이동률(2002)은 가뭄예방 및 관리 대책으로서 가뭄의 민감도 분석 등에 대한 가뭄평가 기법을 제시하였다. 김성원(1999), 유철상(2003)은 가뭄빈도와 크기를 해석하고 가뭄지수를 제시하였으며 차기욱(2009)은 실제적인 가뭄의 대응방안을 댐 공급량 조절, 비상용량 활용, 가뭄지역 지원, 상수도의 연계운영, 지하수 관측정운용, 비상급수등 구체적으로 제시하여 가뭄을 대비하고 대응할 수 있는 정보를 제공하였다. 그 외의 연구로는 변희룡(2009), 서순덕 등(2009)이 있다.

본 연구의 목표인 경제적 파급효과를 통한 가뭄 피해액추정에 관한 연구로는 최장환

(2000), 최충익(2010)등이 있으나 설문을 기반으로 가뭄피해액을 추정하였고 공급측면에서 가뭄의 피해액의 파급효과를 파악하는데 그쳐 본 연구에서 실시하고자 하는 수요•공급모두의 측면을 모두 고려한 가뭄피해액을 파악하는 연구는 전무한 실정이다. 본 연구에서 구축한 수자원 경제모형은 기존의 가뭄피해 연구들에 비해 좀 더 수자원과 경제를 통합하는 모형에 가깝다고 판단된다.

국외에서 연구된 Ding 등(2010)은 가뭄을 농업과 비농업부문 가뭄으로 나누어 각 부문에서 가뭄으로 인한 파급효과 연구 결과를 언급하였으며 2차적 피해추정방법을 산업연관분석(IO분석: Input-Output Analysis)과 연산일반균형분석(CGE : Computable General Equilibrium)으로 제시하였고 이를 통한 지금까지 연구되어온 가뭄의 경제적 파급효과 결과를 미국, 호주, 캐나다, 스페인, 멕시코를 중심으로 구체적 화폐가치로 제시하고 있다. 또한 Salami 등(2009)은 1999~2000년에 있었던 이란의 가뭄에 대한 피해를 선형과 거시경제모델(ECM)을 통해 접근하여 가뭄의 경제적 영향을 살피고 그에 대한 피해액을 화폐단위로 가치화하였다. 일본에서 최근 연구된 물의 화폐가치를 통한 경제적 파급효과에 관한 연구로는 후쿠이시 유키오(2010)가 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구단 총괄

1. 연구흐름도

기후변화 관련 연구는 미래 전망, 취약성 평가, 적응대책 수립의 3단계로 나누어볼 수 있다. 미래의 기온, 강수, 증발 등 기후에 대해 전망을 하고, 이러한 전망 자료를 바탕으로 확률홍수, 빈도가뭄 등의 취약성 평가를 통해 기후변화가 미래 수자원에 미칠 영향을 평가하게 된다. 마지막으로 위와 같은 평가과정을 통해 나타난 양상을 기초하여, 미래 기후변화에 적응하기에 적합한 전략을 수립한다.

CCAPH-K는 미래 전망 단계에 대해 현재 다양하게 난립해있는 연구들을 대표성 있게 통합하고자 하였으며, 그 성과물로 수자원 분야 기후변화 대표 시나리오를 작성하여 기후변화에 따른 기후·수문 전망의 기준을 제시하였다. 세부과제 1-1-1은 세부과제 2-1-2와 합작하여 IPCC AR4 온실가스 배출 시나리오를 기반으로 한 GCM들 중 한반도에 가장 적합한 시나리오를 결정하였으며, 이를 바탕으로 기후변화 대표 장기 기후·수문 시나리오를 생성하였다. 세부과제 1-1-1에서 수행된 장기 기후·수문 전망 과정의 핵심 기술인 통계적 축소화 기법과 강우-유출에 대해 세부과제 1-1-3과 2-1-1은 보다 기술수준을 심화하고 한반도에 최적화한 소프트웨어 ARDAS, PGA-CC를 개발함으로써 보다 쉬운 후속 연구를 가능하도록 하였다. 중단기에 대해 세부과제 1-1-2는 관측강우, 유출량에 대한 분석을 바탕으로 중단기 전망 시나리오를 생성하였다. 더불어 세부과제 2-1-3은 미래 기후·수문 전망과정의 불확실성을 정량화함으로써, 향후 적응대책 수립에 앞서 연구 결과의 불확실성 정도를 평가할 수 있는 잣대를 제공하였다.

미래 전망 과정을 통해 생성된 기후변화 대표 시나리오는 치수와 이수에 대한 극치수문전망에 활용되었다. 세부과제 1-2-1은 기후변화 대표 시나리오를 한반도 4대강 유역에 적용하여 미래 확률강우량 및 확률홍수량을 생성하여 미래 한반도에서의 기후변화에 따른 미래 홍수 전망을 수행하였다. 이에 세부과제 1-2-3은 확률강우량 전망 결과에 대해 비정상성 빈도해석 기법을 적용함으로써 미래 전망에 따른 불확실성을 저감, 홍수 전망 결과의 적용성을 높였다. 미래 가뭄 전망은 세부과제 1-2-2의 가뭄빈도해석을 통해 각각 수행되었다. 세부과제 1-2-2는 기후변화 대표 시나리오를 한반도 4대강 유역에 적용하여 가뭄빈도해석을 통해 미래 가뭄우심도를 생성하였다.

기후변화에 따른 수문분야 취약성 평가는 현재 다양한 연구들이 시도되고 있는 실정이며, 본 연구단에서는 수공 구조물, 물부족량, 그리고 사회·경제적 피해에 대해 이를 수행하였다. 세부과제 2-2-1은 미래 수문전망에 따른 수공구조물의 신뢰도를 평가하였고, 세부과제 2-1-2에서는 기존 물수지 분석방법이 기후변화 연구에서 갖는 한계점을 극복한 미래 한반도 물부족량 생성을 통해 미래 한반도 기후변화에 따른 이수 취약성을 평가하였다. 세부과제 2-2-3은 사회·경제적 측면에서의 피해 양상 분석을 수행하였다.

기후변화 연구의 적응대책 수립 단계는 아직 연구가 미비하며, 본 연구에서 또한 해당 연구영역의 길을 여는 의미를 가지고 있다. 세부과제 2-2-2는 기후변화에 따른 수자원 변화에 적응하기 위한 법·제도적 측면에서의 적응대책 수립을 제언하였다.

3장은 본 연구과제의 개발수행 내용 및 결과를 요약한 것으로, 앞서 구분하여 설명한 대로 기후 및 수문전망, 극치 수문전망, 취약성 평가 그리고 적응대책 수립으로 연구를 구분하였다. '2절 시나리오 표준화 및 전망'에 세부과제 1-1-1, 1-1-2, 1-1-3, 2-1-1, 2-1-3이 포함되고, '3절 극치 수문전망'에 세부과제 1-2-1, 1-2-2, 1-2-3이 포함되며, '4절 취약성 평가'에 세부과제 2-1-2, 2-2-1, 2-2-3이 포함된다. 마지막으로 '5절 기후변화 대비 적응대책 수립'에 세부과제 2-2-2가 포함된다. 보다 자세한 세부과제별 연구개발보고서는 별책 1에 실었다.

'1절 연구단 총괄'에서는 각 세부과제들이 유기적으로 연계하여 얻은 연구결과를 요약하였으며, 보다 자세한 연구단 총괄 성과물은 별책 2에 실었다.

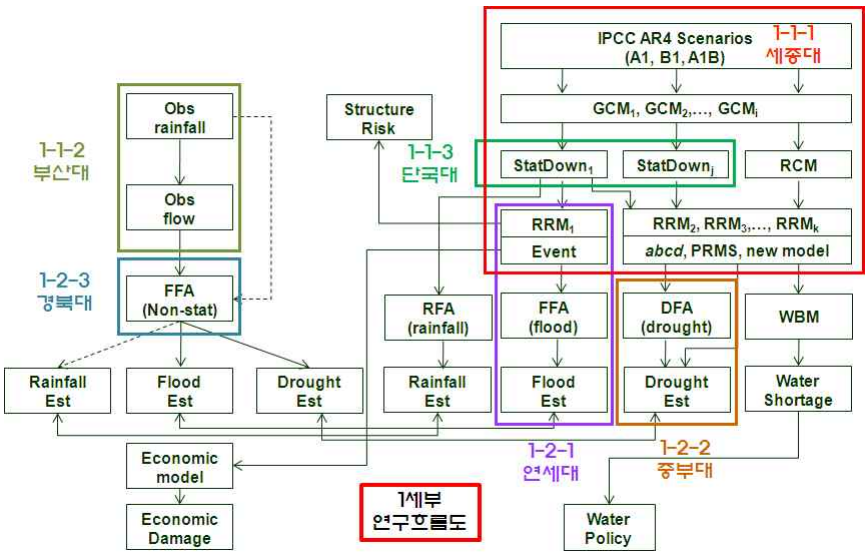


Fig. 3.1.1 CCAPH-K 1세부 연구 흐름도

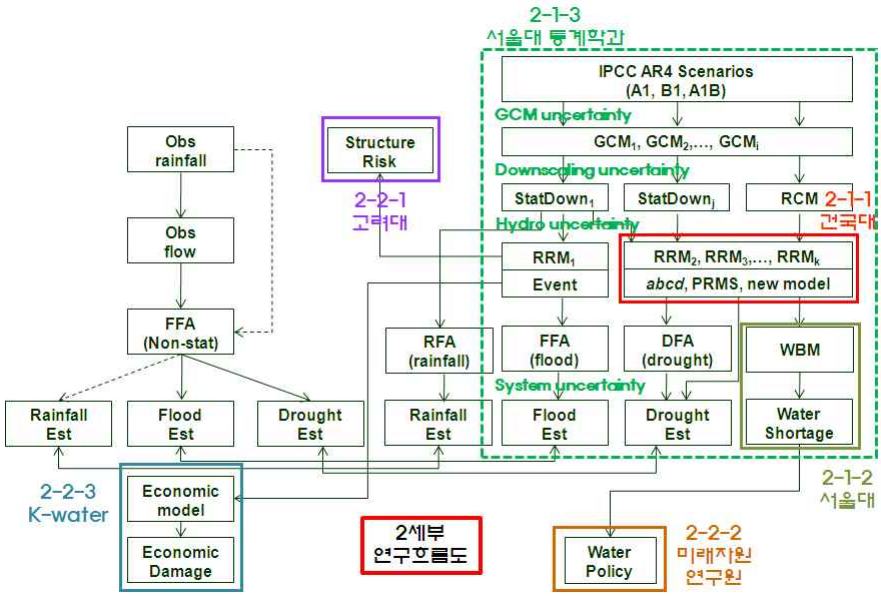


Fig. 3.1.2 CCAPH-K 2세부 연구 흐름도

Fig. 3.1.1, 3.1.2의 연구흐름도 내 용어 및 약어에 대한 설명은 아래와 같다.

- IPCC AR4 Scenarios: IPCC (International Panel on Climate Change)의 4차 평가보고서를 기반으로 한 온실가스 시나리오
- GCM: Global Climate Model, 전지구기후모형
- StatDown: Statistical Downscaling method, 통계학적 축소화 기법
- RCM: Regional Climate Model, 지역기후모형
- RRM: Rainfall-Runoff Model, 강우-유출 모형
- abcd: abcd 모형, 물수지 개념의 월 단위 강우유출 모형
- PRMS: Precipitation Runoff Modeling System, USGS에서 개발한 물리적 기반의 강우유출 모형
- RFA: Rainfall Frequency Analysis, 강우빈도분석
- FFA: Flood Freguency Analysis, 홍수빈도분석
- DFA: Drought Frequency Analysis, 가뭄빈도분석
- WBM: Water Balance Model, 물수지 모형
- Rainfall Est.: Rainfall Estimation, (확률)강우량
- Flood Est.: Flood Estimation, (확률)홍수량
- Drought Est.: Drought Estimation, (확률)가뭄량
- Water Shortage: 물부족량
- Obs.: Observation, 관측자료

2. 연구 성과 총괄 요약

본 1절은 각 세부과제들이 유기적으로 연계하여 얻은 최종 성과물을 담았는데, Table 3.1.1은 최종 성과물을 목록으로 담았다.

먼저 세부과제 1-1-1, 2-1-2의 연구 결과에 따라 수자원 분야 기후변화 대표 시나리오를 생성하였다. 제공기간은 2011~2100년이며, 한반도 4대강 유역 중권역의 기온, 강수, 유량을 월 단위로 작성하였다. 이와 세부과제 1-1-2에서 생성한 중단기 시나리오를 적용하여 미래 한반도의 확률홍수량, 갈수량, 물부족량 등 수문변수들을 정량적으로 전망하였다.

세부과제 1-1-3, 2-1-1에서 개발한 소프트웨어들까지 기후변화 연구 관련 정보를 Warehouse에 담아 향후 기후변화 연구를 하고자 하는 연구자들을 위해 제공하고 있다. Warehouse의 데이터페이스는 관련 문헌, 과거 실측 기상수문 자료, 미래 전망자료 등을 포함하고 있으며, 연구 과정에서는 세부과제별로 공조하여 연구결과를 생산하는데 활용되기도 하였다.

위와 같은 연구 성과물을 창출하기 위한 방법론들은 기후변화 영향평가를 위해 제안된 많은 기법 중 가장 최신이거나 활용빈도 및 적용성이 높은 기법을 보다 개선하거나 최적화하여 본 연구에서 적용되었으며, 각 세부과제들은 이와 같은 기후변화 영향평가 표준 기술을 '별책1: 세부과제별 연구보고서'에서 자세히 다루고 있다.

덧붙여, 본 연구에서 생산한 기후변화 대비 적응방안 중 핵심으로, 기후변화를 대비한 법·제도 개선안 및 수자원정책은 각 세부과제의 연구 성과물을 바탕으로 세부과제 2-2-2에서 생산되었다.

Table 3.1.1 CCAPH-K 최종 성과물

최종 성과물	기타
▪ 수자원 분야 기후변화 대표 시나리오 제시	▪ 단위과제 1-1-1, 2-1-2
▪ 기후변화 영향평가 표준 기술 제시	▪ 단위과제별 핵심기술
▪ 미래구간(단기 및 장기)별 정량적 전망 - 단기: 2015~2020년 - 중장기: 2030s,2050s,2070s,2100s	▪ 전망변수 - 온도, 강수, 유출 평균변화 전망 및 신뢰구간 - 확률홍수량 및 갈수량 변화 전망 - 물부족 전망 - 홍수 및 갈수 피해 전망
▪ 소프트웨어 개발	▪ 단위과제 1-1-3: 상세화기법 개발 ▪ 단위과제 2-1-1: 한국형 수문모형 개발
▪ 정책, 법, 제도 개선안	▪ 단위과제 1-2-1, 1-2-3, 2-1-2, 2-2-1, 2-2-2, 2-2-3
▪ Warehouse 구축	▪ 포함정보 - 관련 문헌(국내외 논문 및 보고서) - 과거 실측 기상수문 자료 - 미래 전망 자료

3. 수자원 분야 대표 GCM 시나리오 제시

현 시점에서의 미래 기후변화에 따른 기후·수문 전망은 다양한 방법론과 입력자료에 의해서 같은 시점과 같은 지점에 대해 서로 다른 결과물을 나타내고 있으며, 본 연구에서는 이와 같이 미래 전망 단계에 난립한 연구들을 대표성 있게 통합하고자 하였다.

온실가스 배출 시나리오는 현 시점에서 가장 활용빈도수가 높은 IPCC 4차 보고서에 기반한 SRES A1B, A2, B1을 선정하였다. 기상청에서 제공한 IPCC 5차 보고서의 온실가스 배출 시나리오 RCP 4.5, 8.5을 HadCM3-RA에 적용한 전망결과 또한 생성하였으나, 시기상 완전한 5차 보고서의 전망 결과를 담을 수 없기 때문에 참고용으로 하였다.

세부과제 1-1-1과 2-1-2에서는 서로 다른 최적의 방법론을 통해 한반도에 가장 적합한 GCM을 선정하였으며, 공통의 결과물로 Table 3.1.2와 같이 CNRM의 CM3, UKMO의 HadCM3, CSIRO의 Mk3.0, MIUB의 ECHO-G로 4개 GCM이 선정되었다.

수자원 분야 대표 GCM 시나리오는 기상변수(강수, 온도)와 수문변수(유량)에 대해 전망결과를 도출하였으며, 적용지역은 전국 4대강 유역의 중권역 단위이다. 전망기간은 2020s(2011～2040), 2050s(2041～2070), 2080s(2071～2100)이며, 시간단위는 월 단위의 전망결과를 담았다.

Table 3.1.2 CCAPH-K에서 기후·수문 전망에 적용한 GCM

국가	센터	GCM
France	CNRM	CM3
UK	UKMO	HadCM3
Australia	CSIRO	Mk3.0
Germany/Korea	MIUB	ECHO-G

4. 연구단 소프트웨어 출시

가. 상세화기법 관련 소프트웨어 출시(단위과제 1-1-3)

(1) 프로그램 크기

30~50Mbyte (내장GCM의 종류와 개수에 따라 가변적)

(2) 주요 특징

본 연구에서 개발한 ARDAS(Assembled Regional climate Downscaling Analysis & System)은 기존 인공신경망기법과 Random Cascade 기법을 합성한 새로운 형태의 상세화를 시도한 기법으로 GCM에 대한 격자상세화와 지역화를 동시에 적절히 수행할 수 있는 기법이다. 지금까지 국내외 연구성과들의 대부분은 장단점을 지니고 있는 특정한 단일기법을 적용하는데 그쳤으며, 모의값에 대하여 관측값과의 비교를 통한 신뢰성을 제시하지 못하고 있다. 본 연구에 개발된 Hybrid Random Cascade 기법인 ARDAS는 전망의 신뢰성을 확보하기 위하여 여러기법의 장점을 조합한 합성기법을 개발하였으며, 특히 이를 강우의 공간분포에 대한 프랙탈특성을 이용하여 상세격자단위에서 구현함으로써 강우의 공간적 변동성분을 적절히 재현할 수 있었고 이를 통하여 유역유출이나 하천유출전망의 신뢰도를 개선한 기법이다.

향후 다양한 형태의 GCM 모의결과와 새로운 기후변화 시나리오가 주어지는 상황에서도 탄력적으로 상세화를 수행할 수 있는 기반이 만들어진다는데 중요한 의미를 부여할 수 있다.

(3) 기존 프로그램과의 차별화/파급효과

Fractal 이론의 적용을 통한 효율적인 강우cluster모의로 현실적인 강우공간분포 모의가 가능하며, 예측인자로 GCM Precipitation을 포함하여 Surface Air Pressure와 Relative Humidity등을 사용하여 예측의 신뢰도를 높이고자 시도했다. 또한 예측모형 자체의 관점에서 보면, Weather Generator는 단순한 공간내삽법의 일종인데 반해 인공신경망은 비선형 시계열 예측기법으로서 최근에 통계적상세화기법으로서 적용사례가 증가하고 있다. 또한, 기존의 SDSM등 downscaling package는 상세화엔진이 단일사이트에 대한 weather generator기반으로 구축되어 있는데 반해, ARDAS는 인공신경망기반의 비선형모형이고, 공간상세화에서의 공간적 상관성을 유지하기 위하여 Space-Time Random Cascade모형을 적용하였다.

향후 IPCC 5차평가보고서(AR5)에서 사용되는 RCP시나리오에 대한 기상청/국립기상연구소의 GCM/RCM를 내장함으로써 기존의 AR4기반의 상세화프로그램으로부터 업데이트된 프로그램으로 제시하게 되는 특징을 가지고 있다.

나. 한국형 수문모형 관련 소프트웨어 출시(단위과제 2-1-1)

(1) 프로그램 크기

500~1Gbyte (포함되는 모듈의 크기에 따라 가변적)

(2) 주요특징

기후변화를 반영한 국내유역에 적합한 분포형 장기유출 수문모형을 개발한다는데 의의가 있다. 본 연구에서 개발중인 한국형 수문모형은 다음과 같은 특징이 있다.

- GIS 기반의 기후변화에 따른 식생 및 융설 예측 기법 및 프로그램
- 기후변화에 따른 수자원 부존량 예측 기법을 개선한 프로그램
- 기후변화에 따른 융설 예측 기법을 반영한 프로그램

(3) 기존 프로그램과의 차별화/파급효과

우선 GIS기반의 기후변화에 따른 식생 예측 기법 및 프로그램을 개발하여 반영하였다. 또한 기존에 국내에 고려되지 않았던 기후변화에 따른 융설 예측 기법을 개발하였으며, 한국형 장기유출 수문모형의 전 모듈을 개발하고 각 모듈의 연계, 통합기법 개발 하여 한반도 기후변화 영향 평가가 가능한 모델이다.

기존에 기후변화에 따른 영향을 제대로 반영하는 국내외 수문모형이 없었다. 따라서 국내에 적합한 수문모형을 개발함으로써 국제적으로 기후변화 영향평가에 대한 경쟁력을 가질 수 있다. 또한 보다 정확한 기후변화에 따른 수자원 부존량을 예측함으로서 국내 수자원관리에 기여할 수 있다.

5. 연구단 Database 구축

CCAPH-K에서 수행하는 기후변화에 따른 수문 영향분석과 전망을 위해서는 과거 수문/기상 관측자료, 전구모형에 의해 생성되는 미래 기후변화 시나리오 등 방대한 자료의 적용 및 분석이 필요하다. 또한 단위과제간 연구수행에 필요한 자료를 원활하게 주고받는 자료 공유 및 동일한 자료를 사용하기 위한 Database가 필요하다. 이를 위해 위탁과제를 맡고 있는 EPS솔루션에서는 CCAPH-K의 각 단위과제에서 공용으로 활용할 수 있는 Database를 구축하였다. Database의 구성은 아래 Table 3.1.3 및 Fig. 3.1.3 과 같다.

Table 3.1.3 CCAPH-K Database 구성과 내용

구성	내용
공통게시판	▪ CCAPH-K 연구단 공지 등의 내용 올림
최신등록자료	▪ 자료를 등록할 경우에 이를 알림
관측자료	▪ 다음과 같은 인자들에 대한 자료를 올림 - 기상자료, 수문자료, 극한자료
모의자료	▪ 다음과 같은 인자들에 대한 자료를 올림 - GCM, 상세화자료, 수문자료, 극한자료
전망자료	▪ 다음과 같은 인자들에 대한 자료를 올림 - GCM, 상세화자료, 수문자료, 극한자료
사용자관리	▪ D/B 관리자 관리



(a) CCAPH-K D/B 로그인 화면 (b) CCAPH-K D/B 구성 화면

Fig. 3.1.3 CCAPH-K Database 화면

6. 연구단 Warehouse 및 표출시스템 구축

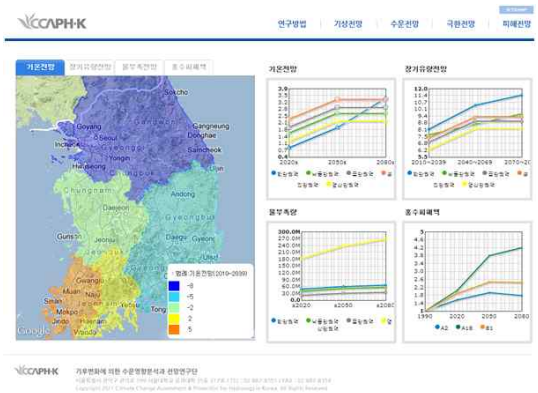
본 연구단에서 수행하는 연구결과는 강우전망, 유출량전망, 기온전망 등 다양한 종류의 전망자료가 생성되며, 이러한 전망자료들을 한곳에서 확인하고, 검토할 수 있는 Warehouse 및 표출시스템이 필요하다. 이러한 시스템은 각 단위과제별 전망 자료를 한곳에 취합하고, 이렇게 취합된 자료를 직관적으로 확인할 수 있도록 표, 그래프, 맵핑 등의 다양한 표출방법 기술들이 적용된 시스템으로 구축되어져야 한다. 이를 위해 EPS솔루션에서는 CCAPH-K의 각 단위과제의 결과를 취합하여 표출할 수 있는 Warehouse 및 표출시스템을 구축하였으며, 이 시스템의 구성은 아래 Table 3.1.4 및 3.1.5와 같다. 또한 화면의 구성은 Fig 3.1.4와 같다.

Table 3.1.4 웨어하우스 기능정의서

순번	대메뉴	중메뉴	페이지명	연구주체
1	기상전망	기온전망	m_t_t.asp	세종대
2		중단기 강수량전망	m_p_s_t.asp	세종대
3		장기 강수량전망	m_p_l_t.asp	세종대
4		증발산량전망	m_e_t.asp	세종대
5	수문전망	중단기 유량전망	h_f_s_t.asp	세종대
6		장기 유량전망	h_f_l_t.asp	세종대
7	극한전망	확률강우량전망	e_p_t.asp	연세대/경북대
8		확률홍수량전망	e_f_t.asp	연세대
9		물부족전망	e_w_t.asp	서울대
10		가뭄우심도전망	e_d_t.asp	중부대
11	피해전망	홍수피해액 전망	d_f_t.asp	수공
12		가뭄피해액 전망	d_d_t.asp	수공
13	연구방법	연구흐름도	r_t_d.asp	시스템
14		GCM	r_g_d.asp	시스템
15		시공간적상세화	r_d_d.asp	시스템
16		수문모형	r_m_d.asp	시스템
17		결과항목	r_r_d.asp	시스템

Table 3.1.5 기능에 대한 테이블 정의서

No.	Category	Table Name(KOR)	Table Name(ENG)	Department
1	기상전망	기온전망	m_t_t	세종대학교
2	기상전망	중단기강수량전망	m_p_s_t	세종대학교
3	기상전망	장기강수량전망	m_p_l_t	세종대학교
4	기상전망	증발산량전망	m_e_t	세종대학교
5	수문전망	중단기 유량전망	h_f_s_t	세종대학교
6	수문전망	장기 유량전망	h_f_l_t	세종대학교
7	극한전망	확률강우량전망	e_p_t	연세대/경북대
8	극한전망	확률홍수량전망	e_f_t	연세대
9	극한전망	물부족전망	e_w_t	서울대
10	극한전망	가뭄우심도전망	e_d_t	중부대
11	피해전망	홍수피해액 전망	d_f_t	수자원공사
12	피해전망	가뭄피해액 전망	d_d_t	수자원공사
13	좌표테이블	시도행정경계	adm_sido_t	시스템
14	좌표테이블	대권역경계	w1_t	시스템



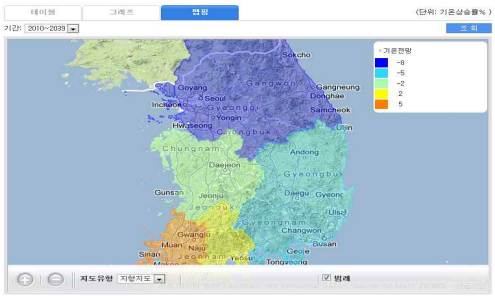
(a) 웨어하우스 및 표출시스템 메인화면



(b) 표출시스템 표형식의 데이터 표출화면



(c) 표출시스템 그래프형식의 데이터 표출화면



(d) 표출시스템 맵핑형식의 데이터 표출화면

Fig. 3.1.4 웨어하우스 및 표출시스템의 화면구성

7. 단위과제별 핵심기술

가. 단위과제 1-1-1 : 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망

단위과제	관련기술 문헌조사	기술(혹은 정책)	핵심기술	기타
1-1-1	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ 확률론적 불확실성 기법을 이용한 최적 GCM 선정 기술	
		▪ 기술 개발 완료	▪ 식생 및 토지이용변화를 고려한 수문해석기술	
		▪ 기술 개발 완료	▪ 공간 상관성을 고려한 일 기상자료 생산기술	
		▪ 기술 개발 완료	▪ 고해상도 기후시나리오의 최적 편의보정기술	

본 단위과제에서는 불확실성 평가를 통한 최적 GCM 선정 기술, 식생 및 토지이용 변화를 고려한 수문해석 기술, 공간상관성을 고려한 일기상자료를 생산기술을 구축하였으며, 이를 통하여 SRES 기반의 기후 및 수문 시나리오를 생산하였다. 또한, 최적 편의보정 기법을 개발하여, 국립기상연구소에서 생산한 RCP기반의 기후시나리오에 적용하여 최종 수문시나리오를 생산하였다.

나. 단위과제 1-1-2 : 기후변화에 따른 중단기 수문전망

단위과제	관련기술 문헌조사	기술(혹은 정책)	핵심기술	기타
1-1-2	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ 비시나리오 기반 중단기(수문요소) 예측	

다. 단위과제 1-1-3 : 유역단위 시공간적 스케일상세화

단위과제	관련기술 문헌조사	기술(혹은 정책)	핵심기술	기타
1-1-3	조사완료	▪ 기술 개발 완료	▪ ARDAS (Assembled Regional climate Downscaling & Analysis System) 기술 개발	

본 단위과제에서는 GCM모의를 바탕으로 신뢰성 있는 수문학적 전망을 수행하기 위해서 GCM에 대한 격자상세화와 지역화를 동시에 수행할 수 있는 Hybrid Random Cascade 기법인 ARDAS를 개발하였으며, 기법의 소프트웨어 개발로 향후 새로운 기후변화 시나리오가 주어지는 상황에서도 탄력적으로 상세화 앙상블전망을 수행할 수 있는 기반을 만들었다.

라. 단위과제 1-2-1 : 극한 홍수량의 전망기술 개발

단위과제	관련기술 문헌조사	기술(혹은 정책)	핵심기술	기타
1-2-1	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ 기후변화를 고려한 극한홍수량 산정 알고리즘	
		▪ 기술 개발 완료	▪ 일단위 기후 시나리오로부터 시단위 확률강우량 산정 기법	
		▪ 기술 개발 완료	▪ GCM 모의 결과 미보유 지점에 대한 확률강우량 추정 기법	

마. 단위과제 1-2-2 : 극한가뭄으로 인한 수자원 전망

단위과제	관련기술 문헌조사	기술(혹은 정책)	핵심기술	기타
1-2-2	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ 가뭄지수를 이용한 가뭄빈도해석기술	

바. 단위과제 1-2-3 : 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석

단위과제	관련기술 문헌조사	기술(혹은 정책)	핵심기술	기타
1-2-3	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ 비정상성 빈도해석	

본 연구를 통하여 개발된 비정상성 빈도해석기법 및 제시된 결과는 향후 기후변화를 고려한 설계강우량 산정 시 기초자료로 활용될 수 있을 것이며, 경제·산업적 측면으로 기후변화의 영향을 반영할 수 있는 비정상성 빈도해석기법의 개발로 향후 예상되는 홍수, 범람 등으로부터 발생할 수 있는 피해를 최소화하는데 기여할 것으로 기대된다.

본 연구의 결과로 제시될 비정상성 빈도해석기법은 홍수범람모형, 범람지도 작성 등의 연구에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사. 단위과제 2-1-1 : 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가

단위과제	관련기술 문헌조사	기술(혹은 정책)	핵심기술	기타
2-1-1	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ 기후변화를 고려한 한국형 수문모형	

우리나라실정에 맞고 기후변화 시나리오와 연계할 수 있도록 구축된 국내형 수문순환 모형개발을 통해 국내의 지형조건을 고려한 미래 기후변화에 따른 수문 변화를 총체적으로 분석하는 수문순환 모델링 기법이다.

아. 단위과제 2-1-2 : 기후변화에 따른 물수급 전망

단위과제	관련기술 문헌조사	기술(혹은 정책)	핵심기술	기타
2-1-2	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ 기후변화를 고려한 (가중·평균) 물수급 전망 기술	
	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ 한반도 표준 시나리오 선정기법	

GCM 기후변화 시나리오를 활용한 기후변화에 따른 미래 유량 전망 결과를 바탕으로 과거 유량 시나리오에 가중값을 부여하는 물수급 전망 기술을 개발하였다. 이는 기존의 물수급 방법론과 동일한 입력 자료(과거 유량 시나리오)를 적용하지만 각 시나리오별 각기 다른 확률(가중값)을 부여함으로서 기후변화의 영향을 고려한 물수급 전망 결과를 제시할 수 있는 기법이다. 또한, 한반도 표준 시나리오 선정 기법은 기후변화에 따른 수문 전망 과정에서 발생되는 불확실성을 정량화하고 시나리오 reduction을 통해 향후 한반도 기후변화를 대표할 수 있는 시나리오를 선정하는 기법이다.

자. 단위과제 2-1-3 : 기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 정량화

단위과제	관련기술 문헌조사	기술(혹은 정책)	핵심기술	기타
2-1-3	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ Scaled Ridge 결합방법, Weighted Scaled Ridge 결합방법	
	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ Spatial Regression 결합방법	
	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ Residual Mixture regression 불확실성 정량화 방법	
	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ Leave-one-out Bayesian Model Avarage 불확실성 정량화방법	

다양한 GCM 모델들을 조합하는 불확실성 저감 기법들 중에 GCM 모델들의 상관관계가 있는 경우 회귀분석의 결과는 불확실성이 커지므로 Ridge 회귀분석을 이용하면 불확실성이 저감된다. 하지만 이러한 방법은 편의가 발생하므로 이러한 편의를 줄이기 위하여 Scaled ridge 및 Weighted Scaled Ridge 방법을 제안하였다. 그리고 지역 정보를 이용한 spatial 회귀분석 기술을 적용하였다. 불확실성을 정량화 하는 기법으로 Residual Mixture Regression 방법과, BMA를 일반화 시킨 Leave-one-out BMA 방법을 제시하였다.

차. 단위과제 2-2-1 : 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향 분석

단위과제	관련기술 문헌조사	기술(혹은 정책)	핵심기술	기타
2-2-1	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ 수공구조물(흙 댐, 콘크리트 중력식 댐) 주요 인자 민감도 비교	
	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ 한강유역 중력식 콘크리트 댐과 제방의 위험도 곡선(Vulnerability curve)	

기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향 분석의 해당연도 연구를 통해 최종적으로 수공구조물(흙 댐, 중력식 콘크리트 댐)의 주요 인자를 선정 및 각 인자별 민감도를 산출하고 비교하여 우선순위와 상대 민감 정도를 도출한다. 이를 기반으로 한강유역 강우량의 확률적 분포를 고려한 한강 유역의 중력식 콘크리트 댐과 제방의 위험도 곡선을 산출한다.

차. 단위과제 2-2-2 : 기후변화를 대비한 법·제도 개선 및 수자원정책 제시

단위과제	관련기술 문헌조사	기술(혹은 정책)	핵심기술	기타
2-2-2	조사 완료	▪ 정책: 개발중 (기후변화 대응 물 관련 정책안)	▪ 기후변화 적응 수자원 관련 법령 개정(안) ▪ 기후변화 적응 수자원 관련 정책 개선(안) ▪ 수자원 정책/법령/국제협력 로드맵	

단위과제 2-2-2에서는 기후변화 대응 국내외 물 관련 법령 및 정책 개선 가이드라인을 제시하기에 앞서 일차적으로 국내외 수자원 분야 법령 및 정책 관련 문헌을 심층적으로 비교·분석하였다. 설문조사 등을 통해 물 분야 전문가들의 의견을 수렴하여 기후변화 대응 물 분야 법·제도 및 정책 개선안을 마련한 후 이를 바탕으로 최종적으로 기후변화 대응 수자원정책 로드맵을 구축 및 제시하고자 한다.

카. 단위과제 2-2-3 : 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가

단위과제	관련기술 문헌조사	기술(혹은 정책)	핵심기술	기타
2-2-3	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ 가뭄시 산업구조 내에서 물의 잠재가격 도출 및 피해비용 추정기법 - Input-Output 모델 구축 ▪ 가뭄피해의 사회경제적 파급효과 추정기법 - CGE 모델 구축	
	조사 완료	▪ 기술 개발 완료	▪ 홍수피해 발생 인자 추정기법 및 홍수피해의 2, 3차 효과 예측기법 - 요인분석 기술 - Economic-hydro Model 구축	
	조사 완료	▪ 정책토론 완료	▪ 기후변화 적응 수자원 정책토론회 개최 - 정부주요부처 담당자를 참석시켜 향후 물관리에 필요한 정책 및 예산의 반영 방향 제시	

본 세부과제에서는 가뭄시 산업구조 내에서 물의 잠재가격 및 피해비용을 Input-Output 모델을 개발하여 산정 후 물부족으로 발생할 수 있는 국가경제적 파급효과을 CGE 모델을 개발하여 분석하였으며, 홍수피해 발생인자 추정 및 홍수피해의 2, 3차 효과 예측기법을 개발하여 분석하였다.

본 과제의 연구결과는 기후변화 적응을 위한 가뭄 및 홍수피해저감을 위한 국가 정책 및 예산의 반영에 가이드라인을 제공하고자 한다.

8. 연구내용 적용

CCAPH-K에서는 단위과제별로 연구개발한 해당 기술을 적용유역인 한반도 4대강 유역(한강, 낙동강, 금강, 영산·섬진강 유역)에 시범적용 하였다. 각 단위과제별로 적용한 연구내용과 적용지역을 아래 Table 3.1.6과 같이 정리하였다.

Table 3.1.6 단위과제별 연구내용 및 적용유역

단위과제	기관	내용	지역
1-1-1	세종대	▪ 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망 - 표준화 기후 및 수문시나리오 생산 - 기후변화에 따른 미래 기후 및 수문 전망 및 불확실성 평가	한반도 4대강 유역 (한강, 낙동강, 금강, 영산·섬진강 중권역 단위)
1-1-2	부산대	▪ 한국 수문변수 통계적 경향성 분석 및 중단기 전망 - 지점별, 유역별, 수문요소별 통계적 경향성 분석 - 수문요소별 기후변화 탄성도 분석 ▪ 중단기 수문변화 전망 예측 및 검증	한반도 4대강 유역 (한강, 낙동강, 금강, 영산·섬진강 중권역 단위)
1-1-3	단국대	▪ 유역단위 시공간적 스케일 상세화 - 인공신경망 기반의 Random Cascade 합성모형 개발 (ARDAS; Assembled Regional climate Donwscaling Analysis & System) - ARDAS 소프트웨어 개발	한강유역(10개 지점)
1-2-1	연세대	▪ 극한 홍수량의 전망 기술 개발 - 표준 기후 시나리오에 의한 일단위 강우로부터 시단위 확률강우량 산정 기법 개발 - GCM 모의 결과 미보유 지점에 대한 확률강우량 산정 기법 개발 - 기후변화에 따른 극한홍수량 전망 알고리즘 제시 - 표준 기후 시나리오에 의한 미래 극한홍수량 전망	한반도 5대강 유역 (한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강 소유역 단위)
1-2-2	중부대	▪ 가뭄지수의 적용성 검토 및 최적가뭄지수 선정 - SPI, PDSI 등의 가뭄지수의 적용성 검토 및 기후변화 평가를 위한 최적가뭄지수의 선정 ▪ 가뭄지수 및 빈도해석기술을 활용한	한반도 4대강 유역 (한강, 낙동강, 금강, 영산·섬진강 중권역 단위)

		극한가뭄의 정량화 - 가뭄의 경향성 및 주기성 분석 - Dry Spell에 의한 가뭄의 시, 공간적 분포특성 분석 - 가뭄지수를 활용한 가뭄빈도해석기술 개발 ▪ 유역별 극한가뭄의 전망 및 가뭄에 따른 유역별 수자원 전망 - 기후변화를 고려한 SDF 곡선의 유도 및 한반도 가뭄우심도 작성 - 기후변화를 고려한 중권역별 수문학적 리스크 분석	
1-2-3	경북대	▪ 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석 - 비정상성 빈도해석 기술을 활용하여 빈도별 극한강우 산정기법을 제시 - 비정상성 빈도해석에 따른 확률강수량 제시	한반도 4대강 유역 (한강, 낙동강, 금강, 영산·섬진강 중권역 단위)
2-1-1	건국대	▪ 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가 - 개발된 분포형 수문모형을 이용한 한반도 미래 기후변화 영향 평가	한반도 4대강 유역 (한강, 낙동강, 금강, 영산·섬진강 중권역 단위)
2-1-2	서울대	▪ 기후변화를 고려한 물수급 전망기법 개발 및 한반도 정량적 물부족 전망결과 제시 - 기존 국내 물수급 분석 방법론의 개선을 위한 기후변화를 고려한 물수급 기법 개발 및 적용 - 기후변화 평가를 위한 한국형 물수급 모형의 확장방안 제시	한반도 4대강 유역 (한강, 낙동강, 금강, 영산·섬진강 중권역 단위)
2-2-1	고려대	▪ 기후 변화 불확실성을 고려한 주요 수공구조물 안전도 변화분석	한강유역 (중력식콘크리트댐, 제방)

제 2 절 기후변화에 따른 수문시나리오 표준화 및 전망

1. 서론

국내 수자원 분야의 기후변화 연구는 1990년 중반부터 시작되었으나 산발적으로 수행되어 연구결과마다 매우 상이한 결과를 보이고 있으며, 이로 인해 연구결과가 관련 정책에 반영되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 우리나라는 지금까지의 이 분야 국내 연구결과를 종합적으로 정리하여 그 방법론을 표준화할 필요가 있고, 표준화된 방법으로 생산된 시나리오를 이용하여 수자원 제반분야의 영향평가를 수행해야 할 것이다. 이러한 평가 결과가 학술적 성과에 그치지 않고, 수자원 정책 수립과 관련 제도 개선에 반영되어야 한다. 따라서 기후변화에 능동적으로 대처하기 위해서는 기후변화에 따른 수자원의 변화를 정량적으로 평가할 수 있는 표준화된 수자원 영향평가 기법이 필요하다.

본 연구단의 최종목표는 표준화된 수자원 영향평가 기법을 제시하고, 그에 따른 수문전망 결과를 토대로 수자원 제반분야의 영향평가를 수행하는 것이다. 본 절에서는 그에 앞서 기후변화에 따른 수자원 제반 분야 별 평가에 앞서 미래 기후 및 수문변동을 전망하고자 한다. 일반적으로 미래 기후 및 수문 전망기법은 전세계적으로 온실가스 배출시나리오를 가정하고 그에 따른 전구기후모형을 통해 생산된 기후변화 시나리오를 이용하는 것이 사용되고 있다. 그 외에도 과거 관측자료의 경향성을 토대로 미래를 예측하는 방법이 있다. 하지만 이 방법은 과거자료의 통계적 경향이 미래에도 그대로 유지된다고 가정하기 때문에 단기간의 전망에는 어느 정도 타당성이 있는 결과를 제시할 수 있으나, 먼 미래를 예측하기에는 한계가 있다. 따라서 본 절에서는 온실가스 배출시나리오와 기후모형으로 생산된 기후시나리오를 이용한 미래 수문변화를 전망하는 기법을 시나리오기반의 미래 수문변동 전망이라 하였으며, 미래 2100년까지의 변화를 평가하였다. 관측자료의 경향성을 기반으로 미래 수문변화를 전망하는 것을 비시나리오 기반의 미래 수문변동 전망이라 하였으며, 미래 2020년까지의 단기간의 변화를 평가하였다. 또한 시나리오 기반의 미래 수문 전망 기법의 국내 기술력 향상을 위해 상세화 기법 및 수문모형을 독자 기술로 개발하고자 하였다. 상세화기법은 기존 인공신경망기법과 Random Cascade 기법을 합성한 새로운 형태의 상세화를 시도한 기법으로 GCM에 대한 격자상세화와 지역화를 동시에 수행할 수 있도록 개발하였다. 수문모형은 우리나라실정에 맞고 기후변화 시나리오와 연계할 수 있도록 개발하였다. 더불어 수문 전망과정에서 발생하는 불확실성을 정량화하고 저감하는 기술은 수문 전망과정에 있어서 신뢰성이 높은 전망이 가능하므로 기후변화에 대비한 적응전략까지 더 신뢰성 있게 마련할 수 있는 기술이다. 그에 따라 본 연구단에서는 기후변화를 고려한 수문 전망과정 전체에서의 불확실성을 정량화하였다.

따라서 2절에서는 '2. 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망', '3.기후변화에 따른 중단기 수문전망', '4. 유역단위 시공간 스케일 상세화', '5. 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가', '6. 기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 정량화'로 나누어 제시하였으며, 최종적으로 '7. 결론'에서 생산된 전망 결과와 개발한 기술들에 대해 종합적으로 제시하였다.

2. 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망

가. 서론

지구 온난화로 인한 강수와 기온의 변화는 수자원의 시공간적 변화를 야기하며, 이는 미래 수자원 확보에 대한 불확실성을 가중시킬 것으로 전망되고 있다(Bae et al., 2008a). 따라서 기후변화로 인한 미래 수자원의 변동성을 분석하는 것은 안정적이고 지속적인 수자원 공급을 위해 요구되는 핵심 사안 중 하나이다. 기후변화에 능동적으로 대처하기 위해서는 기후변화에 따른 수자원의 변화를 정량적으로 평가할 수 있는 표준화된 수자원 영향평가 기법이 필요하다. 일반적으로 수자원 영향평가는 GCM을 통해 산출된 시나리오를 기반으로 수행하기 때문에 기후변화 전망결과의 신뢰도 향상을 위해 기후시나리오는 지역기후 및 유역특성에 적합한 결과가 내재되어 있어야 하며, 수문시나리오는 생산자료의 불확실성을 평가할 수 있고 최소화할 수 있는 기법이 개발되어야 한다.

현재까지 기후변화에 따른 수자원 영향을 평가한 대표적인 국가 연구개발 사업으로는 「기후변화에 의한 수자원 영향 평가 체계 구축(수자원의 지속적 확보기술개발사업단 2단계, 2004-2007)」, 「기후변화 대비 국가 물안보 확보 방안(국토해양부, 2007~2011)」, 「기후변화에 의한 국가 수자원 영향 평가 및 체계 적용(수자원의 지속적 확보기술개발사업단 3단계, 2007~2011)」등이 있다. 「기후변화에 의한 수자원 영향 평가 체계 구축」에서는 최초로 한반도 전체 유역에 대해 기후변화에 따른 수자원 영향평가 결과를 제시하였는데, 이 연구에서는 IPCC SRES (Special Report on Emission Scenarios)의 A2 시나리오 상황에서 공간해상도 27km의 역학적으로 상세화된 RCM 결과가 이용되었다(배덕효 등, 2007). 그 결과 우리나라의 북부지역에서는 연유출량이 증가하고, 남부지역에서는 감소할 것으로 전망되었다(Fig. 1). 또한, 계절적으로는 봄철유량의 감소와 여름철 유량의 증가가 예상되어 우리나라의 기후변화에 따른 수자원 영향은 홍수 및 가뭄에 더욱 부정적인 영향을 미칠 것으로 평가하였다(과학기술부, 2007). 「기후변화 대비 국가 물안보 확보 방안」에서도 위 사업과 동일한 RCM 자료가 이용되었으며, 축소기법으로 생산된 시나리오와 SLURP 모형을 이용하여 수자원의 영향을 평가하였다. 평가 결과 과거에 비해 미래 총 유출량은 1.1% 증가하였으며 5월~7월에는 감소하고 8월부터 4월까지 증가하는 것으로 나타났다(국토해양부, 2009). 이러한 영향평가 결과를 도출하였음에도 불구하고 이들 결과가 국가 수자원 계획 등에 활용되지 못하고 있는데, 그 대표적인 이유는 평가 결과마다 상이한 연구결과가 도출되기 때문이다. 이는 즉 하나의 온실가스 배출시나리오와 GCM 결과, 그리고 하나의 유출모형만을 이용하여 도출된 결과로써 각 단계에 대한 불확실성들을 규명하지 못한 한계를 가지기 때문이라 할 수 있다.

일반적으로 기후변화에 따른 수자원의 변화를 전망하기 위해서는 온실가스 배출시나리오, 기후모델, 그리고 유출모델이 이용된다. 평가절차는 온실가스 배출시나리오를 선정하여 이를 기반으로 기후모델을 통해 기후를 전망하고, 이 결과를 유출모형에 입력하여 유출량의 변화를 평가하는 것이다. 이 과정에서는 크게 4가지의 불확실성이 고려되어야 하는데(Maurer, 2007), 첫째는 미래 온실가스 배출시나리오 예측의 부정확성, 두 번째는 이 배출시나리오를 고려하여 기후를 모의하는 GCMs의 결과 차이, 세 번째는 GCM 결과를 상세화하는 방법에 따른 결과 차이, 그리고 마지막으로 유출모형의 선정과 적용에 따

른 불확실성이다. 다양한 배출시나리오와 GCM 결과를 이용하는 것은 첫째와 두 번째 불확실성을 평가할 수 있는 최선의 방법으로 GCMs 결과를 단순평균하거나 가중치를 부여하여 MME(Multi-Model Ensemble) 기법으로 계산하는 방법이 주로 이용되고 있다. 수문모델링에서 발생하는 불확실성은 유출모형의 구조나 매개변수 보정의 부정확성에 기인한다. 특히 최근의 연구들에 의하면 유출모형에 따라서 기후변화 영향평가 결과에 큰 영향을 미칠 수 있다고 제시되고 있다(Jiang et al., 2007; 정일원 등, 2008; Bae et al., 2011).

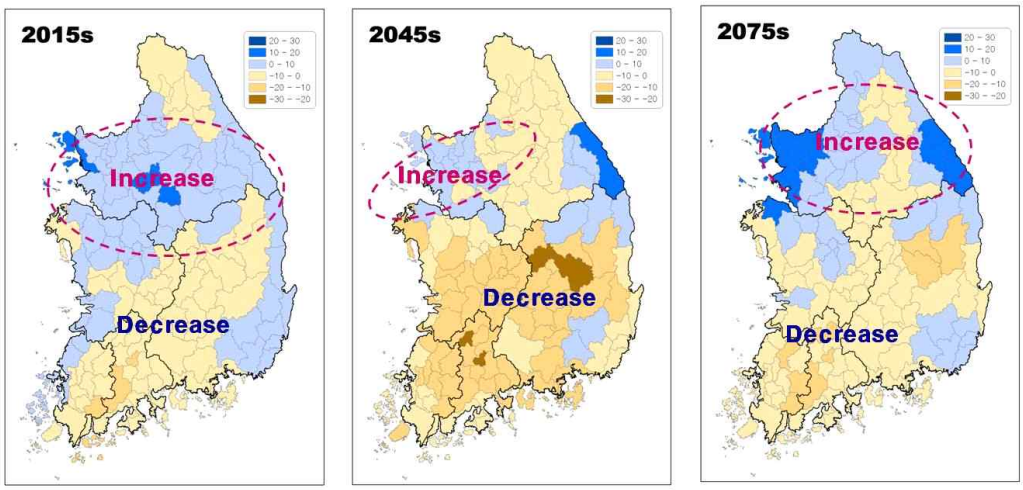


Fig. 3.2.1 Relative Variations(%) of Mean Runoff for 2015s, 2045s and 2075s relative to the Reference Period under the A2 Scenario in Korean Sub-Basins (Bae et al., 2008b)

온실가스 배출시나리오, GCM 및 유출모형의 불확실성을 고려하여 국내 수자원의 변화를 전망하기 위해 「기후변화에 의한 국가 수자원 영향 평가 및 체계 적용」에서는 IPCC AR4에 적용되었던 3개 시나리오 (A2, A1B, B1)에 대한 13 GCMs 결과를 이용하였으며, 유출모형 구조 및 증발산량 산정방법에 따른 영향을 고려하기 위해 PRMS, SWAT, SLURP 모형을 선정하였고 각 모형별로 2~3개의 증발산량 산정 방법을 고려하여 총 312개 앙상블 시나리오를 생산하여 평가하였다(배덕효 등, 2011, Jung et al., 2013). 평가 결과, Fig. 2와 같이 연평균 유출량은 +13.1%(2020s), +13.2%(2050s), +14.3%(2080s)의 변화를 보였다. 연평균 유출량에서는 공간적으로는 한강유역이 유역에서 가장 큰 변화(+29.2%, 2080s)를 보였으며 이해 비해 낙동강 하구지역에서 가장 적은 변화(+0.1%, 2080s)가 나타났다.

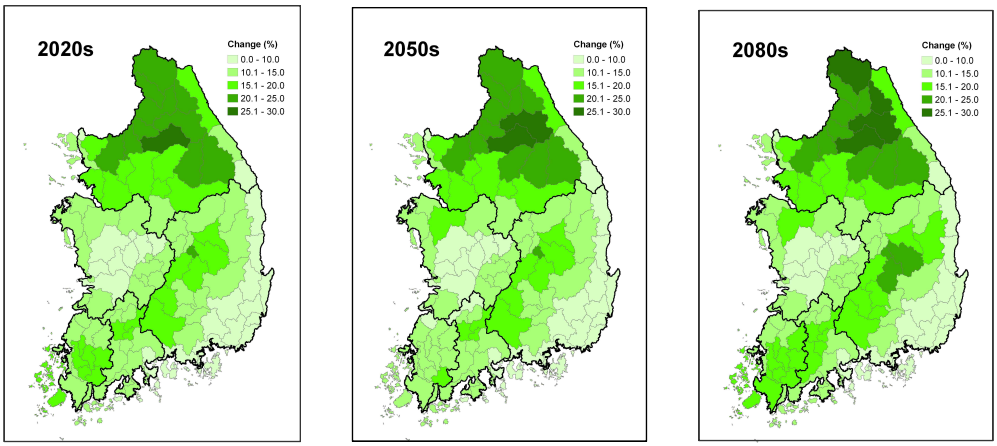


Fig. 3.2.2 Relative Variations (%) of Mean Runoff for 2020s, 2050s and 2080s relative to the Reference Period (배덕효 등, 2011)

이러한 수자원 영향 평가는 월, 계절 및 연 평균유출량의 변화를 예측하는 문제이기 때문에 지금 사용되는 방법론으로도 충분히 합리적인 결과를 도출하였다고 할 수 있다. 그러나 홍수 및 가뭄과 같은 극치사상을 평가하기에는 한계가 있기 때문에 이를 고려할 수 있는 평가기법의 개발이 필요하고, 그에 따른 수자원 제반분야의 영향 평가가 이루어져야 할 것이다. 따라서 본 연구팀에서는 수자원 제반 분야를 합리적으로 평가할 수 있는 기후 및 수문 시나리오 생산 표준기법을 제시하고, 그에 따른 미래 기후 및 수문변동 전망을 수행하고자 한다.

나. 미래 수문시나리오 생산의 표준기법 개발

(1) 표준화의 개념 및 방법

일반적으로 기후변화로 인한 수자원의 영향을 분석하는 방법은 GCM을 통해 산출된 시나리오를 기반으로 영향평가를 수행하는 것이 보편화되어 있으며, 기후 및 수문 시나리오의 표준화를 위해서는 4가지 조건이 고려되어야 한다(Fig. 3.2.3). 첫째는 기후변화에 따른 수자원 영향평가 연구에 일반적으로 쓰이는 보편타당한 방법론이어야 하며, 두 번째는 최신의 연구기법이 적용되어야 한다. 일반적으로 가장 최근 연구결과가 초기의 연구결과보다 더 신뢰성 있는 결과를 제시하고 있기 때문이다. 세 번째는 지역기후 및 각국의 유역특성에 적합한 결과를 담고 있어야 하며, 네 번째는 연구목적에 부합하여야 한다. 영향평가 목적에 따라 요구되는 시간 및 공간 해상도의 차이가 있으므로 목적에 적합한 시나리오를 선정하는 것이 선결되어야 한다. 이와 같은 조건들을 만족하는 표준화 방안을 수립하고, 그에 따른 기후변화 시나리오를 생산한 뒤 수자원 분야의 영향평가를 수행할 필요가 있다.

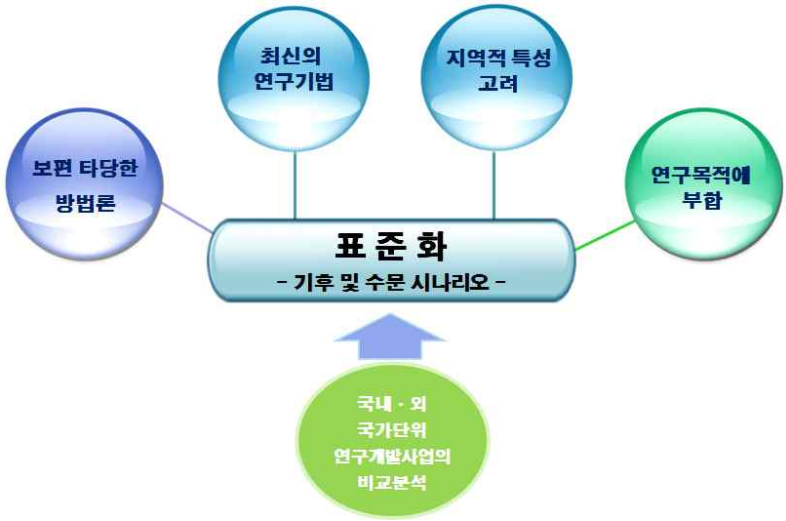


Fig. 3.2.3 기후 및 수문시나리오 표준화 개념

본 연구에서 제안하는 기후 및 수문시나리오 생산의 표준 기법 개발은 크게 3단계로 구성되어있다. 1단계는 기후변화에 따른 수문시나리오 생산의 각 과정별 주요 고려사항들을 검토해야 하고, 2단계에서는 현재 국내·외에서 가용한 시나리오와 생산 기법들을 정량적으로 분석하기 위한 실험적 평가를 수행해야 한다. 3단계는 자료생산의 주요 고려사항들과 실험적 평가결과를 통해 현 상황에서의 기후 및 수문 시나리오 생산 표준 방법론을 도출한다. 만약 시대적 상황이 변하거나 새로운 과학기술이 진전된 경우 2단계 및 3단계를 다시 수행하여 새로운 표준화된 기후 및 수문시나리오 생산기법을 도출해야 한다(Fig. 3.2.4).

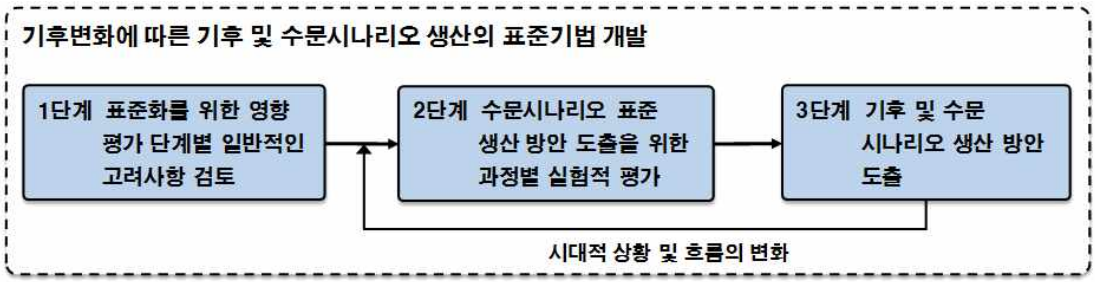


Fig. 3.2.4 기후 및 수문시나리오 생산 표준 기법

(2) 수문시나리오 생산의 각 과정별 일반적인 고려사항

국내외 사례를 살펴보면 일반적인 수문시나리오 생산 방법은 온실가스 배출시나리오와 GCM을 통한 전구 기후시나리오 생산, 상세화기법을 통한 지역 기후시나리오 생산, 수문모형을 통한 수문시나리오 생산 등 일련의 과정으로 구성된다. 이러한 수문시나리오는 최종적으로 홍수, 가뭄 등 수자원 분야에 활용되기 때문에 몇 가지 조건들이 요구된다. 따라서 현재 기술적 수준에서 표준화 방안을 도출하기 위해서는 Fig. 5와 같이 각 평가 과정별 주요 고려사항 등을 검토해야 한다. 그 중 온실가스 배출시나리오는 어떤 시나리오를 선정하여 평가할 것인지가 중요하다. AR4 기준시나리오인 SRES에서도 A1Fi, A2, A1B, B1, B2 등 다양할 뿐 아니라 최근에는 RCP 기후시나리오까지 제공되고 있다.

기후변화에 따른 수자원 영향 평가 시 시나리오 선정에 따라 미래 전망결과에 영향을 미치기 때문에 시나리오 선정 시 주의가 필요하다. GCM은 영향평가 전체 단계에서 가장 불확실성이 큰 부분으로 어떤 모형을 사용하여 평가할 것인지가 중요하다. 최근에는 GCM 및 RCM의 경우 여러 모형을 이용하여 평가하는 Multi-Model Ensemble (MME) 기법이 많이 활용되고 있는데, 여기서 어떠한 모형들로 앙상블 멤버를 구성하는 지가 최근 핵심연구 중 하나이다. 상세화기법의 경우 평가하고자 하는 목적 및 자료 가용 여부에 따라 역학적 상세화기법과 통계적 상세화기법을 선정해야 한다. 특히 역학적 상세화기법을 선정하였을 경우 모형에서 발생한 편의를 어떤 기법으로 보정하여 영향평가에 활용할 것인지와 통계적 상세화기법의 경우 지역적 특성을 잘 반영할 수 있는지를 검토해야 한다. 수문모형은 모형의 선정, 매개변수 최적화, 매개변수 지역화 이외에도 유출에 영향을 줄 수 있는 요인의 변화 상황을 고려할 수 있는 지 여부가 중요할 것이다. 따라서 이러한 주요 고려사항을 국내외 기술 개발 현황, 평가 목적, 지역적 특성 등을 면밀히 검토하여 궁극적인 기후 및 수문 시나리오 생산방안을 도출해야 한다.



Fig. 3.2.5 수문시나리오 생산의 각 과정별 일반적인 고려사항

(3) 수문시나리오 생산 표준기법 도출을 위한 실험적 평가

최종적인 수문시나리오의 생산 표준기법 도출을 위한 각 과정별 평가는 Fig. 6과 같이 구성하였다. AR5 기반의 기후시나리오를 생산하고, 수자원 활용에 있어 시단위 강수량 자료의 검증 및 미래 극치 호우사상의 변화를 평가하고자 한다. 또한 일본기상연구소(MRI) 고해상도 전지구 모델의 강수량 자료를 수집하여 극치사상 반영 여부에 대한 비교 분석을 수행하고, AR4 GCM을 이용할 경우 모델간의 불확실성을 규명하여 국내 유역에 적합한 GCM을 선정한다. 또한, AR4 GCM의 상세화 기법(역학적 상세화, 통계적 상세화)에 따른 미래 기후 전망 결과를 비교하고자 한다. 통계적 상세화 기법을 사용할 경우 기존 공간상관이 고려되지 않은 일기발생기와 공간상관이 고려된 일기발생기의 적용결과를 비교 평가하고자 한다. 역학적 상세화된 시나리오를 사용할 경우를 위해 최적 편의보정 기법을 개발하여 기존 편의보정기법과 비교·평가한다. 생산된 기후시나리오를 이용하여 수문시나리오를 생산하기 위해 수문모형을 구축하며, 또한 미래 식생 및 토지피복 변화를 고려하기 위한 미래 식생 및 토지피복을 전망하고자 한다. 생산된 기후 및

수문 시나리오에 근거한 미래 확률강우량 및 확률홍수량을 평가하기 위해 climate change factor method와 scale invariance의 적용성을 평가하고자 한다.

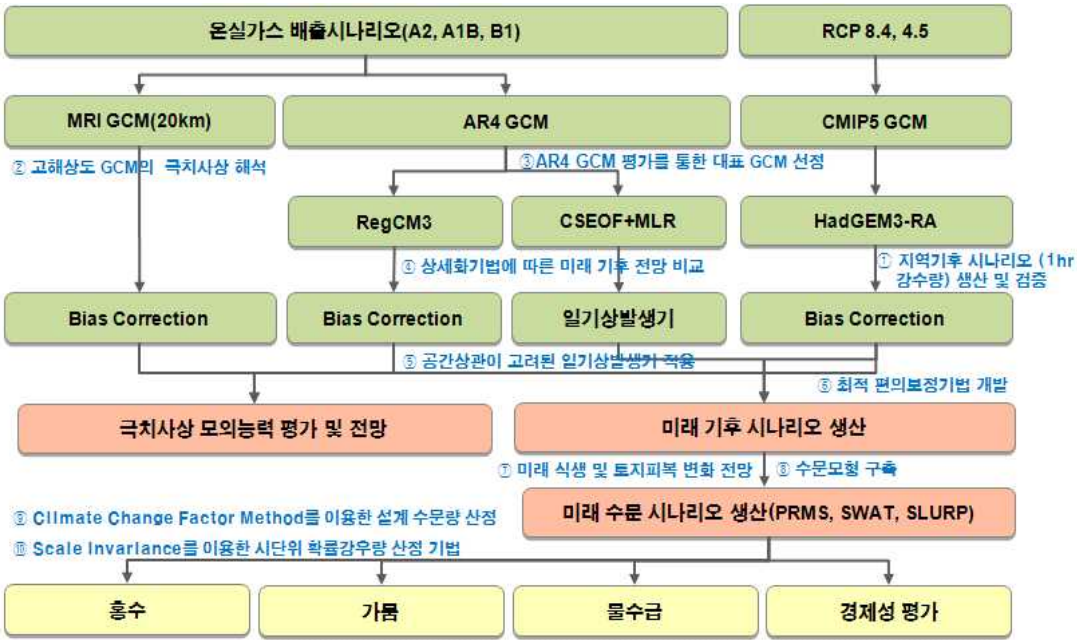
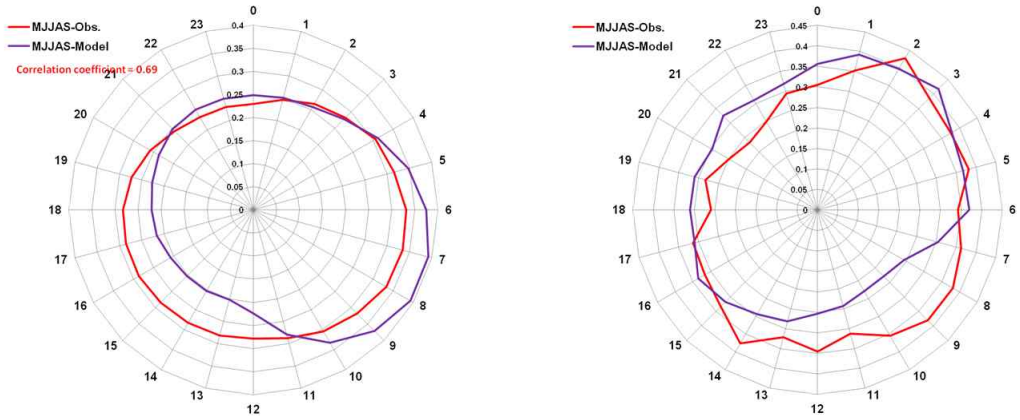


Fig. 3.2.6 수문시나리오의 표준 생산방안 도출을 위한 과정별 평가의 구성

위에서 제시한 10가지 적용성 평가에 대해 자세한 내용(평가의 필요성, 방법론, 결과 등)은 별책 보고서에서 기술하였고, 여기서는 도출된 핵심 결과에 대해 간략하게 기술하고자 한다.

(가) 지역기후시나리오 생산 및 검증

본 세부과제에서는 '국가 표준 기후시나리오의 수자원 전망 활용'이란 과제명으로 국립기상연구소에서 위탁 연구를 수행하였다. 주요 내용은 RCP 기반의 기후시나리오를 수자원 분야에 활용하기 위해 시간단위 강수량 자료를 생산하고 검증하는 것이며, RCP 기반의 기후시나리오를 통해 미래 극치 호우사상의 변화를 평가하는 것이다. RCP 기후시나리오 생산 기법 및 기후모형의 이론, 전구 및 아시아 지역의 기후 전망, 국내 극치 기후 전망 결과에 대한 자세한 내용은 별책 보고서 '제3장 연구개발수행 내용 및 결과'의 '제2절 국가 표준 기후시나리오의 수자원 전망 활용'에서 확인할 수 있다. 기후값 및 극치분석의 결과를 관측지점 기준으로 비교하기 위하여 겹선형 보간(bilinear interpolation)을 적용하였다. 시간별 기후값 분석은 모델이 여름철 강수의 집중시간을 잘 모사하는지를 알아보기 위하여 5월부터 9월까지의 시간에 따른 20년 강수 평균값을 관측값과 비교하였다. 그 결과 관측이나 모델 모두 강수가 새벽에 집중되고 있으며, 생산한 지역기후시나리오에서 시단위 강수량의 발생패턴을 적절히 반영하고 있는 것으로 나타났다(Fig. 3.2.7).



a) 68개 지점 평균　　b) 서울 기상관측소

Fig. 3.2.7 관측자료와 모의자료의 여름철(5월-9월) 시간대별 평균강수량의 비교

(나) 고해상도 GCM의 극치사상 해석

고해상도 기후시나리오와 저해상도 기후시나리오의 강수량을 비교·분석하여 과연 고해상도 기후시나리오가 저해상도 기후시나리오에 비해 극치사상을 얼마나 잘 모의하는지 평가해야 할 필요가 있다. 이를 위해 일본기상청과 기상연구소(MRI)에서 개발한 JMA-GSM0103 GCM의 기후시나리오를 수집하였다. 해상도는 약 20km로 전지구를 남북방향 1,920개, 동서방향 960개 격자로 생산하였다. 실험기간은 20세기 1979년 1월~2005년 12월, 21세기 2075년 1월~ 2099년 12월까지이며, 경계조건은 MRI-CGCM 2.3의 A1B 시나리오로 산출된 해수면온도를 사용한 자료이다. 평가의 비교대상은 과거기간에 대한 관측자료와 국립기상연구소에서 RegCM3를 통해 생산한 20km 해상도의 시나리오를 이용하였다. 따라서 서울 기상관측소(108)의 관측치와 RegCM3, JMA-GSM0103의 서울 기상관측소에서 가장 가까운 격자의 기후시나리오를 이용하여 극한 기후지수를 산정하였다. 산정 결과, JMA-GSM0103이 극치사상을 정확히 모의하지는 못하지만 RegCM3에 의해 생산된 결과에 비해 좋은 결과를 보였다. 특히 PN80, PX1D, PX2D 등 홍수와 연계된 극치 모의에 있어서는 RegCM3를 통해 생산된 시나리오에 비해 개선된 결과를 보였다(Table 3.2.1).

Table 3.2.1 고해상도 및 저해상도 기반의 기후시나리오와 관측치의 극한 기후지수

	PANU	PN80	PN50	PN10	PN90	PX1D	PX2D	PX3D
RegCM3	763.53	0.63	2.04	18.83	91.71	75.67	101.42	169.46
GCM20	1079.24	1.29	3.71	27.88	90.21	103.71	137.63	230.33
Observation	1387.86	2.96	6.83	33.08	79.04	164.75	207.88	364.71

주) PN80 : 일강수량이 80mm 이상인 날의 수
PN50 : 일강수량이 50mm 이상인 날의 수
PN10 : 일강수량이 10mm 이상인 날의 수
PN01 : 일강수량이 1mm 이상인 날의 수
PN90 : 전체 상위 90%의 일강수량을 초과하는 강수사상들의 개수
PX1D : 1일동안의 최대강수량
PX2D : 2일동안의 최대강수량
PX3D : 3일동안의 최대강수량

(다) AR4 GCM 평가를 통한 대표 GCM 선정

신뢰성 있는 미래 기후변화 전망 결과를 도출하기 위해 GCM간의 불확실성(오차)을 규명하여 국내 유역에 적합한 GCM을 선정할 필요가 있다. 본 연구에서는 GCM간의 불확실성을 규명하기 위해 Fig. 3.2.8과 같이 확률론적 불확실성 평가기법으로 GCM에 따른 극한 사상 모의 능력을 평가하고, 상관계수와 RMSE를 산정하여 GCM의 평균적인 모의 능력을 평가하였다. 두 분석의 결과를 종합적으로 평가하기 위해 Score index를 개발하였으며, 이를 통해 GCM의 유용성을 정량화하여 대표 GCM을 선정하였다. 자세한 이론 및 적용 결과는 '2.4.2 GCM 자료 및 최적 GCM 선정 방법', '3.1 최적 GCM 선정 결과'에서 제시하고자 한다.

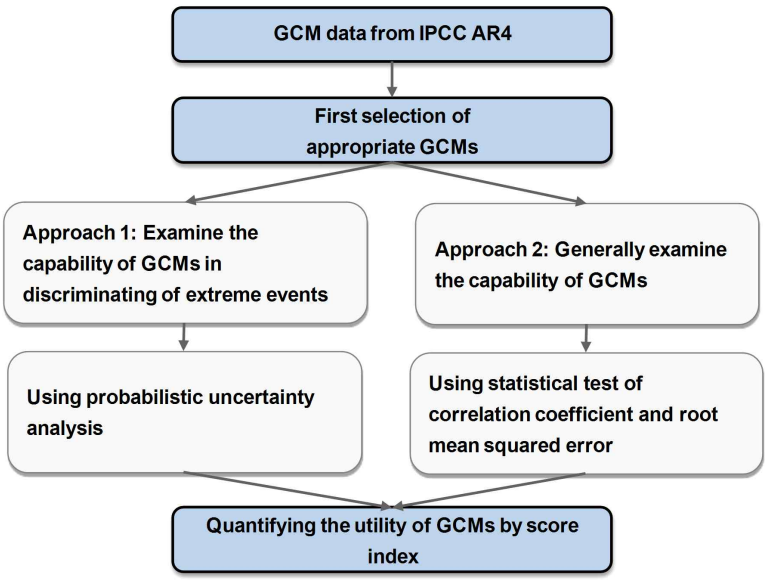


Fig. 3.2.8 통계적 기법을 통한 GCM 유용성 평가 기법 (Le and Bae, 2013)

(라) 상세화기법에 따른 미래 기후 전망

전지구를 20km 해상도의 GCM으로 해석하는 것은 시간적·물리적으로 한계가 있다. 일본에서는 Earth Simulator를 이용하여 모의하였지만, 아직 전 세계적으로는 저해상도의 기후모델이 보편적으로 이용되고 있다. 특히 고해상도 GCM은 극치사상 재현에는 좋은 성능을 가지고 있지만, 평균적인 기후 모의는 고해상도 GCM이라고 무조건 정확히 모의한다는 것은 아니라는 연구결과가 제시되고 있다. 따라서 현재 구축되어 있는 IPCC AR4 기후시나리오를 이용하여 극치사상을 해석할 필요가 있으며, 이를 위해서는 극치사상 해석에 적합한 상세화기법을 적용해야 한다. 따라서 본 연구에서는 역학적 상세화를 통해 생산된 기후시나리오와 통계적 상세화를 통해 생산된 기후시나리오의 비교·분석을 통해 역학적 상세화와 통계적 상세화기법의 특성을 도출하였다. 평가결과, Table 3.2.2와 같이 역학적 상세화의 경우 통계적 상세화기법에 비해 먼 미래의 비선형적 예측이 가능한 것으로 판단된다. 강수 유무(강수일수, 무강수일수 등)의 변화는 통계적 상세화에서 반영하지 못하는 한계가 나타나며, 이는 사용한 일기산출기의 경우 강수일수, 무강수일수가 입력자료로 활용되어 과거와 미래에 동일한 변수를 가지게 되기 때문으로 판단된다. 통계적 상세화 및 역학적 상세화의 경우 평균적인 거동은 GCM의 결과에 큰 차이가 발

생하지 않지만, 극치 강수인자의 경우 통계적 상세화에 비해 역학적 상세화기법이 더욱 잘 반영하는 것으로 나타났다. 따라서 가용하다면 통계적 상세화보다 역학적 상세화기법이 극치 사상 평가에는 더욱 적절한 것으로 판단된다.

Table 3.2.2 통계적·역학적 상세화(A2, ECHO-G/S) 강수인자의 과거 대비 미래의 변화

		PX1D	PN80	PN01	MDRY	DRYM	PANU
역학적 상세화	2020s	10.9%	39.2%	2.0%	-1.8%	2.9%	8.2%
	2050s	16.6%	58.2%	2.0%	0.0%	4.2%	11.6%
	2080s	35.4%	132.9%	7.4%	-4.5%	0.8%	34.1%
통계적 상세화	2020s	10.2%	20.8%	-1.0%	0.0%	0.4%	5.7%
	2050s	21.9%	40.8%	-0.1%	0.0%	0.0%	13.9%
	2080s	13.4%	24.8%	0.1%	0.0%	-0.2%	11.0%

주) MDRY : 연속 무강수일수의 최대값
DRYM : 연속 무강수일수의 평균값
PANU : 연평균 강수량

(마) 공간상관이 고려된 일기발생기 적용

기존에 개발된 일반적인 일기발생기들은 Markov chain 또는 자기회귀모형에 의해 과거 및 현재 시점의 시간적 상관성은 고려되지만, 기본적으로 단일지점(single location) 일기 산출기 모형이기 때문에 공간적 상관성을 고려하지 않는다는 한계점이 있다. 공간상관을 고려하기 위해 다단계 일반화 선형모형(Hierarchical Generalized Linear Models, HGLMs)을 이용하였으며, 자세한 이론 및 적용 결과는 '2.4.3. 통계적 상세화', '3.2 상세화 기법의 적용성 평가'에서 제시하고자 한다.

(바) 최적 편의보정기법 개발

역학적 상세화 자료는 대상지역에 대해 공간적으로 자세한 정보를 얻을 수 있다. 또한 물리적으로 생산하기 때문에 비선형적 예측이 가능하며, 비정상성을 기초로 자료를 생산할 수 있어 급격히 변화될 기후변화를 모의할 수 있는 장점이 있다. 하지만 RCM 구조 및 모수화 과정 등의 한계로 인하여 관측치와 편의가 발생하며, 이로 인해 Hanel and Buishand (2010)은 RCM에서 생산된 결과값을 그대로 영향평가에 사용하는 것보다 통계적인 보정기법에 의해 보정한 후 사용하는 것이 필요하다고 제시하였다. 본 연구에서는 수자원 영향평가를 위해 기후시나리오에 요구되는 것을 크게 2가지로 판단하였으며, 첫 번째는 관측자료의 월 및 계절적 변동성, 두 번째는 극한 사상(high, low) 모의 여부이다. 이러한 관점에서 RCM으로 모의된 강수량을 총 3구간(극치호우사상, 무강수일수, 기타)으로 나누어 각 구간에 따라 각기 다른 방법을 적용하여 보정하는 기법(단계적 스케일링 기법)을 개발하였으며, 평가를 통해 적용성을 검증하였다. 검증결과 단계적스케일링 기법이 기존에 제시된 선형보정법(Linear scaling method), 분위사상법(Quantile mapping method) 및 일기상발생기를 이용한 기법에 비해 편의보정 효과가 우수한 것으로 나타났다.

(사) 미래 식생 및 토지피복 변화 전망

유출모형은 복잡한 자연현상인 강우-유출현상을 단순화하여 수식으로 표현하기 때문에 유출모형을 이용한 유출분석 결과에는 불확실성이 발생하게 된다. 주로 모형 매개변수 추정의 불확실성, 입력자료의 불확실성 및 유출모형의 구조에서 발생하는 불확실성이 존재한다. 그 중 유출모형의 입력자료 또는 매개변수로 사용되는 대상유역의 토지피복과 식생의 변화는 대상 유역의 특성에 따라 그 영향력이 다르게 나타나기 때문에 연구의 목적과 대상 유역의 면적에 따라서 고려되어야 할 불확실성 요소 중 하나이다. 기후변화에 따른 영향평가 연구에서는 대상 유역면적과 이에 따른 유출모형의 구조가 유역의 유출특성을 적절히 반영할 수 있는가를 검토하여야 한다. 뿐만 아니라 식생변화는 유출에 미치는 영향뿐만 아니라 증발산량, 탄소순환, 산림 생태계 등 다양한 방면에 영향을 미친다. 특히 증발산량을 산정하는데 있어서 토지피복과 식생변화의 영향은 매우 크기 때문에 이를 함께 고려할 수 있도록 미래의 토지피복 및 식생변화 시나리오의 개발이 요구된다. 본 연구에서 사용한 식생 및 토지이용 변화는 '2.4.5 미래 식생 및 토지이용 예측 기법', '4.2 미래 식생 변화'에서 제시하고자 한다.

(아) 수문모형 구축

복잡한 자연현상인 강우-유출현상을 간략히 수식화하여 표현함으로 인해 유출모형을 이용한 유출분석 결과에는 불확실성이 발생하게 된다. 주로 모형 매개변수 추정의 불확실성, 입력자료의 불확실성 및 유출모형의 구조에서 발생하는 불확실성이 있다(Bae et al., 2011). 신뢰성 높은 유출분석을 위해서는 이러한 불확실성을 최소화하는 것이 필요하다. 따라서 분석목적에 가장 잘 부합되는 유출모형의 선정을 위해서는 대상유역에 대한 적용성 문제, 매개변수 추정방법의 정확성과 모형별 제한사항들을 신중하게 고려하여 결정해야 한다. 유출분석의 시간스케일도 분석목적에 적합하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 PRMS, SWAT, SLURP를 이용하여 영향평가에 활용하였다. 유출모형은 많은 매개변수를 포함하고 있다. 이러한 매개변수를 정확히 결정하는 것은 유출분석의 정확도를 높이는 것이며, 이는 곧 기후변화 영향평가 결과의 불확실성을 감소시켜 분석결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 따라서 매개변수의 최적화는 수문모형 구축에 있어서 중요한 부분 중 하나이다. 매개변수 결정을 위해서는 관측유량자료가 필요하지만, 실제 관심지점의 장기유출량 자료를 보유한 지점은 소수에 불과하다. 따라서 매개변수의 직접적인 추정이 어려우므로 간접적인 방법을 사용하여 유출분석을 수행하여야 한다. 본 연구에서 사용한 수문모형의 특성, 매개변수 최적화 및 지역화는 '2.4.4 수문모형', '4.1 수문모형 구축 및 적용성 평가'에서 제시하고자 한다.

(자) Climate Change Factor Method를 이용한 설계수문량 산정

기후변화에 따른 미래 홍수 영향평가의 대상은 주로 수공구조물 설계에 활용되는 확률강우량 및 확률홍수량이다. GCM에서 생산된 기후시나리오 자료가 과거 관측자료와 유사하게 극치호우를 모의한다면, 기존의 방법과 동일한 방법으로 연최대치계열의 자료를 구축하여 강우빈도해석을 통해 확률강우량을 산정할 수 있을 것이다. 그러나 생산된 기후시나리오를 이용할 경우 기후변화 시나리오에서는 확률강우량을 산정하기엔 한계가 있기 때문에 Fig. 3.29와 같이 확률강우량의 변화를 이용해서 확률 수문량을 평가하는 방

법을 많이 사용하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서도 이 기법의 활용성을 평가하였으며, 남한강 유역에 확률강우량, 확률홍수량, 확률홍수위를 평가하여 본 기법의 적용성을 검토하였다.

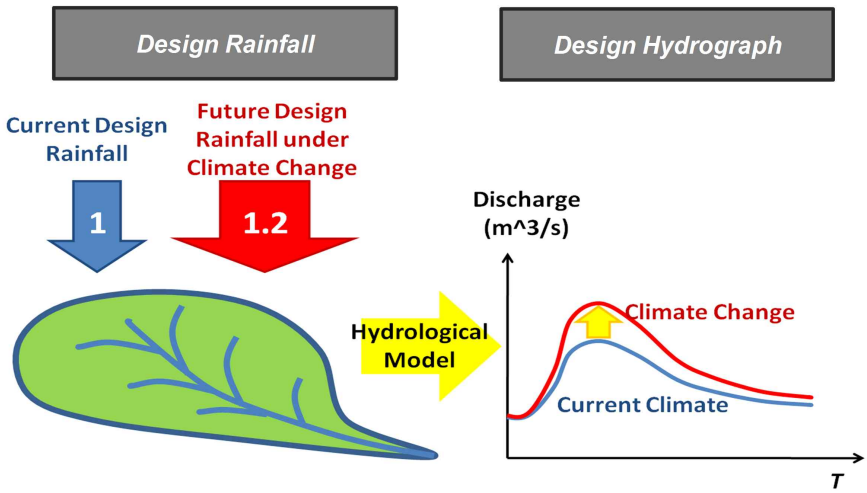


Fig. 3.2.9 Climate Change Factor Method을 이용한 확률홍수량 산정방법

(차) Scale invariance를 이용한 시단위 확률강우량 산정기법

본 연구에서는 일단위 이하의 짧은 지속시간을 갖는 집중호우의 기후변화 영향을 평가할 수 있는 스케일 특성 기법의 적용성을 평가하였다. 스케일 특성을 이용한 상세화기법은 스케일 불변성(scale invariance or scaling)을 기반으로 한다. 스케일 불변성이란 측정의 단위가 변해도 확률분포는 변하지 않는 것을 의미하며, 즉 확률변수에 어떤 환산값을 곱하거나 나누어 단위를 바꾸어도 어느 구간 내에 있을 확률은 변하지 않는 것을 의미한다. 이는 어떤 한 함수 f(x)와 스케일된 함수 f(λx)가 λ에 항상 비례한다면, 함수 f(x)는 스케일 불변성을 가지고 있다고 가정할 수 있다(Burlando and Rosso, 1996).

평가결과, Fig. 3.2.10과 같이 재현기간 100년 빈도 이상, 지속시간 1~2시간 이내의 확률강우량에서는 기후시나리오의 스케일 특성을 이용하여 산정한 결과와 관측자료의 빈도분석을 통해 산정한 결과의 오차가 크게 나타나지만 그 외의 경우에는 어느 정도 합리적인 결과를 도출한다고 판단된다. 두 확률강우량의 오차가 크게 나타나는 것은 기본적으로 24시간 지속시간을 갖는 확률강우량이 차이가 나기 때문이다. 이러한 오차가 발생하는 주요 원인으로는 스케일특성을 이용한 확률강우량 산정기법의 불확실성 뿐만 아니라, 기후시나리오에서 오는 불확실성, 빈도분석에서 발생하는 불확실성이 포함되어 있기 때문이다. 기후변화를 고려했을 경우 이러한 불확실성들을 지니고 산정되기 때문에 이러한 한계를 감안하여 이용해야 한다.

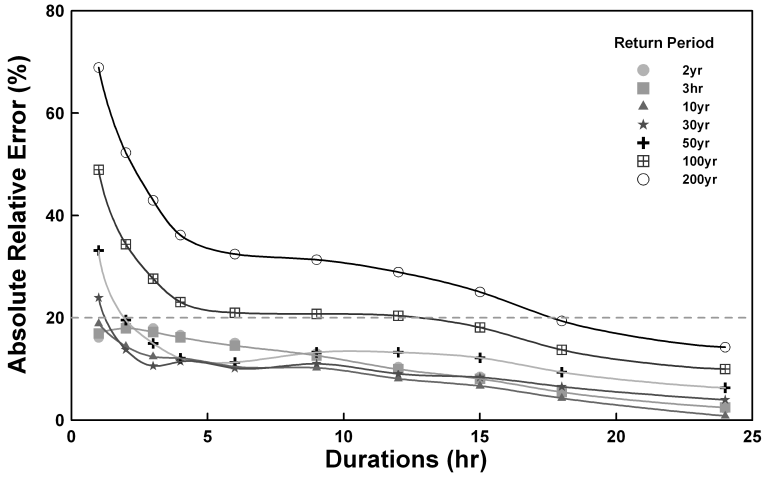


Fig. 3.2.10 관측 및 모의자료를 통해 산정된 확률강우량의 절대상대오차

(4) 기후 및 수문 시나리오 생산 방안

(가) 방법론

본 세부과제의 연구 목표는 기후변화에 따른 표준 기후 및 수문시나리오 생산 방안을 구축하는 것으로 기후변화에 따른 영향평가 시의 각 과정별 핵심 기술 및 모형에 대한 적용성 평가를 수행하였다. 고해상도 GCM의 극치사상 해석을 수행하여 일반 저해상도 GCM을 역학적으로 상세화하는 것보다 고해상도 GCM으로 모의할 경우 극치사상을 더 현실적으로 모의하는 것으로 나타났다. 또한 역학적 상세화기법과 통계적 상세화기법을 평가한 결과 평균적인 모의능력은 유사하나, 미래의 비선형적 변화나 비정상적인 거동은 역학적 상세화가 우수한 것으로 나타났다. 하지만 고해상도 시나리오의 생산과 역학적 상세화를 통한 지역 기후시나리오 생산 등은 컴퓨팅 능력과 시간이 많이 필요하기 때문에 현 시점에서는 통계적 상세화를 이용하여 Multi-Model Ensemble 기법으로 전망하는 것이 가장 객관적인 분석 결과를 제시할 수 있다고 판단된다.

따라서 표준화(Fig. 3.2.3 참조)란 측면에서 접근해보면 현시점에서는 AR4 기후시나리오에 대한 최종 정립이 필요하고, AR5 기반의 기후시나리오에 대한 적용 및 평가가 요구된다. 최종 기후 및 수문시나리오 생산 방안을 Fig. 3.2.11과 같이 구축하였다. 기후시나리오 관련하여 AR4 기반의 미래 기후·수문 시나리오 생산 및 최근에 국립기상연구소에서 RCP 기반으로 생산한 국가 기후시나리오에 대한 수문 시나리오를 생산하고자 한다. AR4 기반의 시나리오는 기존 교육과학기술부 (2011) 시나리오를 개선하는 방향으로 진행되며, 여기에 GCM의 불확실성 평가를 통한 최적 GCM을 선정하고, 기존 공간상관이 고려되지 않은 일기발생기에서 공간상관이 고려된 일기발생기를 사용하여 최종 시나리오를 생산하고자 한다. 또한, 국립기상연구소에서 제공한 RCP 기반의 기후시나리오는 수자원 분야의 활용을 위한 최적 편의보정(bias correction) 기법을 제안하고, 이를 적용하여 최종 기후 및 수문시나리오를 생산하고자 한다. 하지만 본 보고서에서는 RCP 기반의 기후시나리오는 본 연구단의 타 세부과제와 범위의 일치를 위해 생략하기로 한다. 본 보고서에는 본 연구단의 타 단위과제들과 전망 결과 제시를 통일하기 위하여 SRES 기반의 전망결과만을 제시하고자 한다. RCP 기반의 기후시나리오에 대해서는 별책보고서에 제시되어 있다.

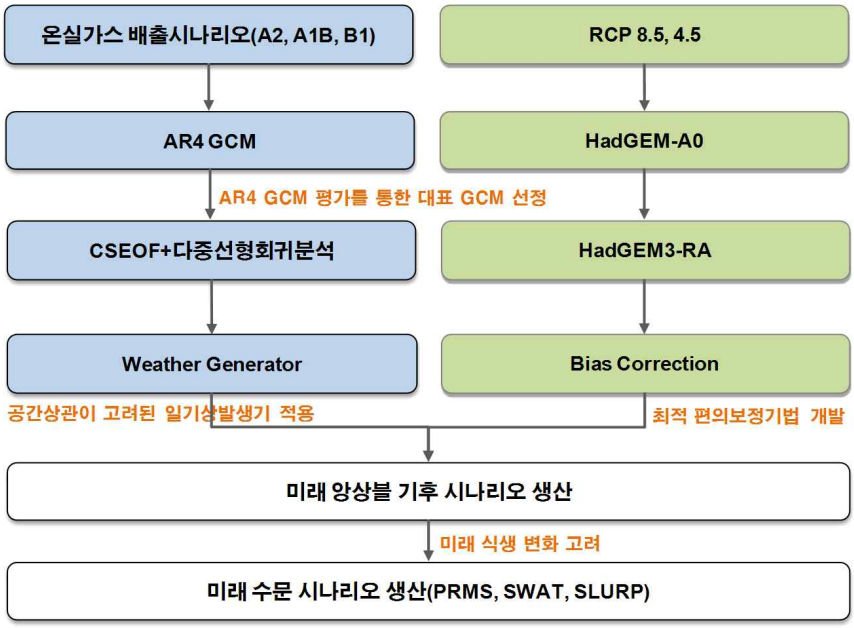


Fig. 3.2.11 기후변화에 따른 기후 및 수문 시나리오 생산 방안

(나) GCM 자료 및 최적 GCM 선정 방법

IPCC Data Distribution Center (http://www.ipcc-data.org)에서는 SRES를 기초로 생산된 23개 GCM 결과를 제공하고 있으며, 국립기상연구소(METRI)에서는 23개 GCM 결과를 수집하여 2.5°×2.5°로 등격자화 하였다(김민지 등, 2008). 본 연구에서는 이 결과 중에서 IPCC AR4 (Fourth Assessment Report)에 적용된 A2, A1B, B1 세 개의 시나리오에 대해 공통적으로 결과를 제공하는 14개 GCM을 선택하여 이용하였다. A2 시나리오는 온실가스 배출에 관한 규제가 적용되지 않았을 경우의 시나리오(2100년 CO2 830ppm)로 고배출시나리오, B1은 꾸준한 온실가스의 감축이 진행되었을 경우의 시나리오(2100년 CO2 550ppm)로 저배출시나리오를 대표한다. A1B는 A2와 B1 사이의 시나리오로 IPCC AR4에서 기준 배출 시나리오(2100년 CO2 720ppm)로 이용되었다.

극한 사상 모의능력 평가를 위해 본 연구에서 사용한 기법은 일반적인 적합도 검증기법 가운데 하나인 Kolmogorov-Smirnov 검증 기법을 이용한 확률론적 기법으로 특정 유역 인근 노드점의 GCM 모의값이 해당 유역의 실제 현상, 즉 관측자료를 어느 정도 유사하게 모의한다는 가정하에 적용되었다. 확률론적 불확실성 해석기법은 Fig. 3.2.12와 같은 절차로 이루어진다. 우선, 특정 월 또는 계절에 해당하는 과거기간 GCM 모의결과의 경험적 확률분포 곡선을 이용하여 과거자료의 high tercile과 low tercile로 구분한다. high와 low영역에 있는 년도를 임의로 추출하고 그 해당년도에 있는 과거 관측자료를 이용하여 누가도수함수(CDF)를 구성한다. 만약 두 구간의 CDF가 동일 분포형이면 강수량이 많은 것과 적은 것은 구분하지 못하는 것으로 간주하고, 다른 분포형이면 이를 모의 가능하다고 판단하여 극한사상 모의에는 적합한 것으로 간주한다. 확률분포형의 적합도 검증에는 Kolmogorov-Smirov 검증 기법을 이용하였으며, Monte Carlo 모의 기법을 적용하여 Eq. (1)과 같이 E_p를 산정하였다. 해당 유의수준을 10%로 선정하고 E_p가 유의수준보다 작으면 극한사상 모의에 적합한 것으로 간주한다. 본 기법의 개념 및 적용성에 대한 보다 자세한 내용은 Georgakakos (2003), 정창삼 등(2004)을 참고하길 바란다.

$$E_p = \frac{1}{N_\lambda K} \sum_{n=1}^{N_\lambda} \sum_{k=1}^{K} P_{KS}(D < D_{n,k}) \tag{3.2.1}$$

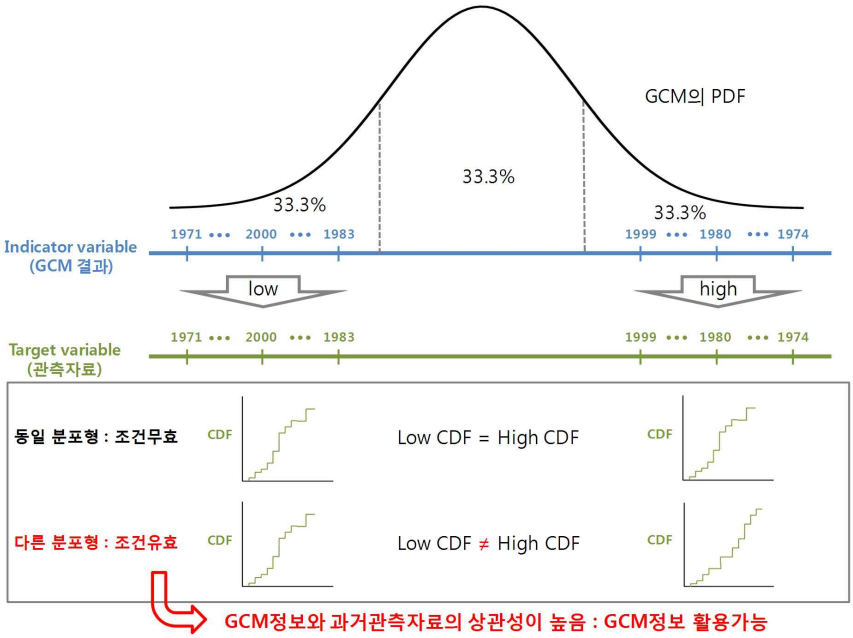


Fig. 3.2.12 확률론적 불확실성 평가 기법

한편, 평균적인 모의 능력을 평가하기 위해서는 상관계수(Eq. 3.2.2)와 RMSE(Eq. 3.2.3)을 사용하였다. 상관계수는 -1에서 1의 값을 가지는 무차원 계수로서 표준편차의 비율을 이용하여 두 인자의 모양의 일치정도를 파악하는 지표이다. RMSE는 해석하고자 하는 변량과 같은 차원을 갖는 지표로 평균적으로 어느 정도의 오차가 발생하는지 나타내는 지표이다. 관측자료와 기후시나리오를 이용하여 상관계수와 RMSE를 GCM별로 산정하는데, 여기서, 14개 GCM에 대한 평균 RMSE와 상관계수를 구한다. RMSE의 경우 해당 GCM의 RMSE가 평균보다 작으면 1, 크면 0으로 계산하고, 이와 반대로 상관계수는 해당 GCM의 상관계수가 평균보다 크면 1, 작으면 0으로 하여 Score를 계산한다. 이는 RMSE는 작을수록, 상관계수는 클수록 모의 능력이 좋은 것을 반영하기 위함이다.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{nS_xS_y} \tag{3.2.2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2} \tag{3.2.3}$$

확률론적 불확실성 평가 결과의 Score Index 공식은 Eq. (3.2.4)와 같다. $S_{i,j,k}$는 계절별 분석 결과를 나타낸 것이며, $S_{i,j,l}$은 월별 분석한 결과를 나타낸 것이다. 여기서, i는 유역개수, j는 데이터 종류(강수량, 기온), k는 계절, l은 각 월을 뜻한다. 통계적 평가의 Score Index(여기서, i는 유역개수, j는 데이터 종류(강수량, 기온), k는 계절, l은 각 월을 나타냄)는 Eq. (3.2.5)와 같이 산정한다. 각 분석 결과를 통해서 분석별 Total score를 산

정하고 이를 Eq. (3.2.6)을 이용하여 Normalized score를 산정, 최종적으로 Eq. (7)에 대입하여 최종 Score Index를 산정한다.

$$S_{P,total} = \sum_{i=1}^{n_b}\sum_{j=1}^{n_d}\sum_{k=1}^{4} S_{i,j,k} + \sum_{i=1}^{n_b}\sum_{j=1}^{n_d}\sum_{l=1}^{12} S_{i,j,l} \tag{3.2.4}$$

$$S_{r,total}(S_{RMSE,total}) = \sum_{i=1}^{n_b}\sum_{j=1}^{n_d}\sum_{k=1}^{4} S_{i,j,k} + \sum_{i=1}^{n_b}\sum_{j=1}^{n_d}\sum_{l=1}^{12} S_{i,j,l} \tag{3.2.5}$$

$$S_{t,normalized,m} = \frac{S_{t,total,m} - S_{t,total,min}}{S_{t,total,max} - S_{t,total,min}} \tag{3.2.6}$$

$$S_{overall,normalized,m} = S_{P,normalized,m} + 0.5(S_{r,normalized,m} + S_{RMSE,normalized,m}) \tag{3.2.7}$$

(다) 통계적 상세화

통계적 상세화는 예측변수(predictor variables)의 GCM 결과와 관측자료 사이의 통계적 관계를 이용하여 기후모델 결과의 편의를 보정하는 기법이며, 통상 3가지 방법(일기상발생기, 전이함수, 일기도 분류)으로 구분된다(IPCC, 2001). 본 연구에서는 전이함수를 이용하여 공간적으로 상세화하고, 일기상발생기를 이용하여 시간적으로 상세화하는 조합(hybrid) 기법을 선택하였다. 본 연구에서 사용한 전이함수는 주성분분석 기법중 하나인 CSEOF (CycloStationary Empirical Orthogonal Function)와 다중선형회귀분석을 이용하여 100~350km의 GCM 결과를 국내 기상관측소 54개 지점으로 공간적으로 상세화하였으며, 일기상발생기를 이용하여 월단위 기후시나리오를 일단위로 시간적 상세화를 수행하였다. CSEOF 분석은 특정 주기를 가지는 패턴(연주기, 경년주기 등)을 가장 잘 추출할 수 있는 기법 중 하나로 추출된 주성분 시계열을 이용하면 광역규모 변수와 지역규모 변수사이의 물리적·역학적 연관성을 파악할 수 있다(신진호 등, 2009).

일반적인 일기발생기들은 마르코프 체인(Markov chain) 또는 자기회귀모형에 의해 과거 및 현재 시점의 시간적 상관성은 고려되지만, 기본적으로 단일지점(single location) 일기 산출기 모형이기 때문에 공간적 상관성을 고려하지 않는다는 한계점이 있다. 강수량 과정을 강수 발생 유무(occurrence)와 강수량(amount) 두 가지의 과정으로 분리해서 모형화하였다. 우선, 강수발생 유무를 고려하기 위해 다음과 같이 3개의 전이확률을 갖는 마르코프 체인 모형을 가정하였다(Eqs. 3.2.8~10).

$$p_{001} = Pr[wet\ on\ day\ t \mid dry\ on\ day\ t-1\ and\ dry\ on\ day\ t-2] \tag{3.2.8}$$

$$p_{101} = Pr[wet\ on\ day\ t \mid dry\ on\ day\ t-1\ and\ wet\ on\ day\ t-2] \tag{3.2.9}$$

$$p_{11} = Pr[wet\ on\ day\ t \mid wet\ on\ day\ t-1] \tag{3.2.10}$$

공간상관을 고려하기 위해 다단계 일반화 선형모형(HGLMs)를 이용하였다. i 번째 지역에서 t 시점에서 비가 오면 1, 오지 않으면 0의 값을 가지는 강수 유무에 대한 이항변수를 y_{it}라고 한다. 공간 상관성을 나타내는 변량효과 v_{it}가 주어졌을 때, 종속 변수 y_{it}는 확률이 p_{it}인 Bernoulli 분포를 따르고, 다음 Eq. (3.2.11)에 의해 설명됨을 가정한다.

$$\log\frac{p_{it}}{1-p_{it}} = \mu_i + \alpha_i y_{it-1} + v_{it} \quad (3.2.11)$$

여기서, μ_i와 α_i는 고정효과이고, y_{it-1}는 t-1 시점에서의 강수발생 유무변수이고, 그리고 v_{it}는 공간 상관성과 관련된 변량효과이다. 변량효과 $v_t = (v_{1t},...,v_{Kt})^T$ 는 평균이 0, 공분산 행렬이 Σ_v 인 다변량 정규분포를 따른다고 가정한다. 이때, 공분산 행렬 Σ_v 의 (i,j) 번째 원소 σ_{ij} = $\exp(\lambda_0 - \lambda_1 d(i,j))$이고, $d(i,j)$는 i와 j 두 지역간의 거리로 두 지역간의 거리가 멀어지면 멀어질수록 두 변량효과의 공분산은 감소하는 모형을 사용하였다. 강수량을 모의하기 위해 k지역의 t시점에서의 강수량을 $Y_t(k)$라고 하면, 이때, $X_t(k)$=1 이면 $Y_t(k)$>0 이고 $X_t(k)$=0이면 $Y_t(k)$=0이다. $Y_t(k)$를 생성하는 모수적 접근 방법은 $Y_t(k)$| $X_t(k)$=1이 어떠한 이론적 확률 분포를 따른다고 가정하고, 최대 우도 추정방법 (Maximum Likelihood Estimation)을 이용하여 각 확률밀도함수 (PDF)의 모수를 추정함으로써 계산된 확률 밀도함수로부터 k지역의 t시점 강수량 $Y_t(k)$을 무작위로 생성한다 (교육과학기술부, 2011).

(라) 수문모형

기후변화 영향평가에는 다양한 모형들이 이용되고 있다. 각 모형들은 개발 목적에 따라 유출량산정 알고리즘에서 차이가 있다. 따라서 수자원 영향평가 목적에 적합한 유출모형을 선정하는 것은 중요한 문제이다. 일반적으로 유출모형들은 유역의 공간적인 특성을 표현하는 방법에 따라 집중형(lumped), 준분포형(semi-distributed), 분포형(distributed)으로 구분할 수 있다. 집중형 모형의 경우 유역을 하나의 가상 저수지로 가정하여 유출분석을 수행하는 모형으로 유역의 공간적인 특성을 고려하지 못하는 한계가 있다. 분포형 모형은 유역을 유출특성이 동일한 격자 단위로 구분하여 유출분석을 수행하는 모형으로 공간적인 특성을 반영하여 모의가 가능하지만, 매개변수 추정이 어렵고 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 이에 비해 준분포형 모형들은 물리적 기반의 모형으로 GIS를 이용하여 유역특성 매개변수들을 직접적으로 추정할 수 있으므로 적용성이 우수하여 최근 다양한 기후변화 연구에 활용되고 있다(Bae et al., 2008b; Jha et al., 2006; Kite and Haberlant, 1999). 따라서 본 연구에서는 국내 유역의 수자원 영향평가를 위한 모형을 선정하기 위해 유출모형에 대한 적용사례를 검토하였으며, 그 결과 최근 기후변화 영향평가에 많이 적용되고 있는 PRMS, SLURP, SWAT 3개 모형을 선정하였다 (Jung et al., 2013).

PRMS와 SWAT은 대상유역을 HRU (Hydrologic Response Unit), SLURP는 ASA (Aggregated Simulation Area)라 불리는 수문학적 반응이 유사한 계산단위로 구분하여 수문성분 발생량을 모의하고 각 소유역의 합을 유역의 총유출량으로 정의한다. 그러나 이들 세 모형은 융설, 토양수분 모의, 유출성분을 모의하는 알고리즘에서는 서로 상이하다. PRMS는 토양층을 2개 층으로 구분하는데 반해 SLURP는 1개, SWAT은 토양특성에 따라 10개까지 고려할 수 있다. 또한 각 모형은 2~3개의 증발산량 방법 중 하나를

선택하여 이용할 수 있다. Hamon 방법은 일평균기온과 일조시간을 이용하여 잠재증발산량(potential evapotranspiration, PET)을 산정하며, Jensen-Haise 방법(Jensen and Haise, 1963)은 일평균기온 및 태양복사량으로 PET를 산정한다. Penman-Monteith 방법(Monteith, 1965)은 증발에 필요한 에너지 항과 수증기를 지표로부터 탈출시키는 공기동역학 항으로 구성된 혼합방법으로 널리 이용되고 있는 방법이다. Granger 방법(Granger, 1991)은 Penman (1948) 방법의 수정된 방법이며, Spittlehouse과 Black 방법(Spittlehouse, 1989)은 에너지 복사량으로 산정된 증발산을 토양수분의 상태를 고려하여 산정한다. Hargreaves 방법(Hargreaves, 1975)은 8년간의 초지 증발산 측정계(Alta fescue grass lysimeter) 자료를 이용하여 도출된 방법이다.

본 연구에서는 계측유역에서 유출모형들의 매개변수를 추정하기 위해 GIS 자료를 이용하여 추정 가능한 매개변수(물리변수)들은 직접 추정하였고, 나머지 매개변수(과정변수)들은 최적화기법에 의해 추정하였다. 유출모형들의 매개변수를 추정하기 위해 댐별 유출량 자료기간을 보정기간과 검정기간으로 구분하여 보정기간에서 매개변수를 보정하고 검정기간에서는 추정된 매개변수의 적합성을 평가하였다.

수문모형의 매개변수를 결정하기 위해서는 장기간의 신뢰성 있는 유출량이 필요한데 비해, 우리나라는 장기간의 신뢰성 있는 유출량 자료를 보유한 관측소의 수가 제한적이다. 따라서 미계측유역에서 유출모형의 매개변수를 결정하기 위해서는 지역화방법이 요구되며(Beven, 2000), 이병주 등(2009)은 국내에서 준분포형 모형에 적합한 지역화 방법을 제시한 바 있다. 이들은 본 연구에서와 동일한 한국의 109개 유역에 대해 주성분분석(Principal Components Analysis, PCA)과 군집분석(cluster analysis)등을 적용한 지역화 방법을 제안하였다. 이 방법은 유역의 수문지형학적 특성변수(예, 면적, 경사, 표고, 토양특성치)를 이용하여 유역을 수문학적으로 동질한 유역으로 그룹화하는 것이다. 이 방법에서는 동일 그룹으로 구분된 유역들은 수문학적 특성이 유사한 것으로 가정하였다. 이병주 등(2009)은 SWAT 모형을 적용하여 괴산댐, 안동댐, 섬진강댐, 임하댐, 합천댐, 용담댐 자료를 이용하여 매개변수를 추정하고, 소양강댐, 충주댐, 대청댐에 대해 지역화 방법을 검증하였다. 본 연구에서도 미계측유역에서의 각 모델의 매개변수 추정을 위해 동일한 방법을 적용하였다.

(마) 미래 식생 및 토지이용 예측 기법

기후변화는 온도, 강수, 운량, 복사량 등과 같은 수문기상 변수 이외에도 토지피복과 식물의 생리적 활동에 영향을 미칠수 있으며, 이러한 관점에서 볼 때 기후변화가 유출량에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 수문기상변수의 변화와 함께 식생의 생리적 활동 변화도 고려되어야 한다(김병식, 2005). 따라서 수문 기상변수인 기온, 강수와 토지피복별 식생의 관계를 파악하는 것은 미래의 식생정보를 예측하는데 있어서 매우 중요한 일이다.

한편 수문분야에서 사용되는 여러 식생정보 중에서도 대표적으로는 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI)와 정규화식생지수(NDVI)를 들 수 있다. 본 연구에서는 식생의 양, 분포, 상태와 활성도를 정량적으로 표현할 수 있는 정규화식생지수를 이용하였다. NDVI는 증발산량을 추정하기 위한 목적으로 개발하였으며 Eq. (3.2.12)와 같다.

$$NDVI = \frac{ch.2 - ch.1}{ch.2 + ch.1} \quad (3.2.12)$$

여기서, ch.1은 위성영상의 가시광선의 반사율이며, ch.2는 근적외선의 반사율을 의미한다. NDVI는 -1부터 1까지의 범위를 가지며 식생의 활성도가 높을수록 NDVI는 1에 근접하게 된다. 식생이 거의 없는 암반 또는 나지와 같은 지역에서는 반사율이 같아지게 되어 0값에 근접하게 된다. 본 연구에서는 식생의 활성도가 기온과 강수에 큰 영향이 있기 때문에 기온과 강수에 대한 회귀식을 산정하였고, 이를 위하여 2001년부터 2010년까지 Terra 위성의 MODIS 영상자료와 기온 및 강수자료를 수집하였다. 이들을 바탕으로 토지피복별 회귀식을 산정하였다. 미래 기온 및 강수의 변화를 회귀식에 적용하여 식생의 활력도를 산정하였다.

다. 미래 기후 전망

(1) 최적 GCM 선정 결과

계절별, 월별 강수량과 기온에 대해 확률론적 불확실성 분석과 상관계수 및 평균제곱근 오차를 분석하여 적정 GCM을 선정하였다. 계절별 강수량의 경우 CM3와 ECHO-G의 모의 결과가 가장 유효한 것으로 나타났으며, ECHO-G가 낙동강을 제외한 모든 유역에서 2개 이상의 계절에 유효한 결과가 나타났다. 월별 강수량자료를 이용한 불확실성 분석 결과, 고해상도 GCM인 ECHAM5에 비해 저해상도 GCM인 CM3에서 기온 및 강수량의 결과가 더 유효한 것으로 나타났다. 이는 GCM의 해상도가 높을수록 무조건 모의능력이 좋다고 할 수는 없다는 것을 의미한다. 계절별 기온 및 강수량 자료를 이용한 불확실성 분석 결과, CM3의 모의 결과가 가장 유효하였다. 월별 기온 자료를 이용한 불확실성 분석 결과, CM3, HadGEM1, BCM2.0의 유효성이 크게 나타났다.

상관계수를 이용한 분석결과에서는 CSIRO (MK3.0), UKMO (HadCM3), CONS (ECHO-G)가 높게 산정되었으며, RMSE 분석의 경우 CNRM (CM3), UKMO (HadCM3), NCAR (CCSM3)가 높게 산정되었다. 그러나 이러한 평가 결과는 결과의 형태 및 단위가 다르기 때문에 이를 종합적으로 평가할 수 있는 지표가 요구된다. 본 연구에서는 Score index를 통해 GCM의 효용성을 정량화하여 최적 GCM 선정하였다.

평가 결과는 Table 3.2.3과 같고, 최종 선정한 GCM은 CNRM (CM3), UKMO (HadCM3), CSIRO (MK3.0), CONS (ECHO-G), CCCMA (CGCM3_T47)으로 총 5개이다. 기본적으로 본 연구팀에서 제시한 5개의 GCM을 이용하여 평가하고자 하였으나, 2-1-2 단위과제에서 제시한 대표 시나리오 연구결과와 공통적으로 제시되는 CNRM(CM3), UKMO (HadCM3), CSIRO (MK3.0), CONS (ECHO-G)을 국내 대표 GCM으로 선정하여 모든 영향평가에 적용하였다.

Table 3.2.3 최종 Score index를 이용한 GCM 선정 결과

No.	Model(agency: version)	Probabilistic uncertainty analysis	Statistical uncertainty analysis		Total	Remarks
			CC	RMSE		
1	NCAR: CCSM3	51	76	202	0.76	
2	MPIM: ECHAM5	39	63	148	0.11	
3	CSIRO: MK3.0	52	119	185	1.05	3rd
4	GFDL: CM2	48	69	162	0.39	
5	GFDL: CM2_1	51	75	148	0.40	
6	BCCR: BCM2.0	62	64	137	0.39	
7	CNRM: CM3	105	89	207	1.73	1st
8	NIES: MIROC3_2_MED	42	78	169	0.43	
9	MRI: CGCM2_3_2	48	79	159	0.46	
10	NCAR: PCM	47	90	132	0.36	
11	UKMO: HADCM3	93	103	205	1.66	2nd
12	IPSL: CM4	60	76	181	0.76	
13	CCCMA: CGCM3_T47	63	87	182	0.91	5th
14	CONS: ECHO-G	57	103	176	0.92	4th

(2) 상세화 기법의 적용성 평가

앞서 선정한 4개의 GCM 기후시나리오를 CSEOF 및 다중선형회귀식을 이용하여 공간적으로 상세화하였으며, 이를 공간상관을 고려한 일기상발생기에 적용하여 일별 기온 및 강수량을 산정하였다. Fig. 3.2.13은 과거 기준기간(30년, 1973~2002년)의 20mm 이상의 강수량을 분석한 결과를 나타낸 것으로 검은색 선이 관측치, 파란색 선이 기존 일기발생기(WXGEN), 빨간색 선이 공간상관이 고려된 일기상발생기의 결과이다. 서울 및 대구 관측 지점의 공간상관이 고려된 일기발생기가 기존 일기발생기에 비해 보다 나은 현실 모의하는 것을 확인하였다. 특히 항상 과소 모의되고 있는 30mm 이상의 강수량에서 많이 개선된 결과가 나타났다.

Fig. 3.2.13 서울과 대구 관측소의 일단위 강수량의 비교

수자원 분야에서는 분석하는 단위가 대부분 유역 중심이기 때문에 지점 강수보다는 유역평균강수량 모의능력이 중요하다. 따라서 Fig. 3.2.14는 4개의 주요 상류댐 중권역 별 유역평균강수량을 산정하여 평가한 결과이며, 기존 Weather generator에 비해 보다 나은 현실 모의가 가능한 것을 확인하였다. 특히 안동댐 유역(2001)의 경우 기존 일기발생기의 경우 6, 7, 8월에 과다모의하는 경향이 발생하는데, 공간상관을 고려한 일기발생기는 개선되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 4개 유역의 강수량 연평균 편차를 산정한 결과 WXGEN(100mm/year)보다 현 일기발생기(30mm/year)가 적게 나타나 개선되는 것을 확인하였다.

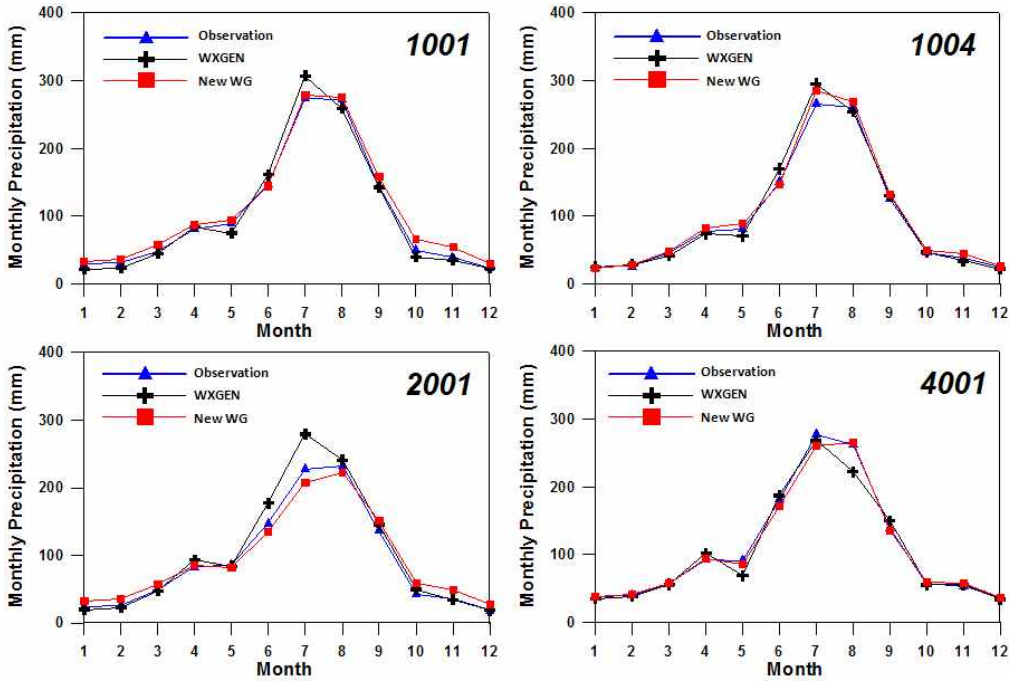
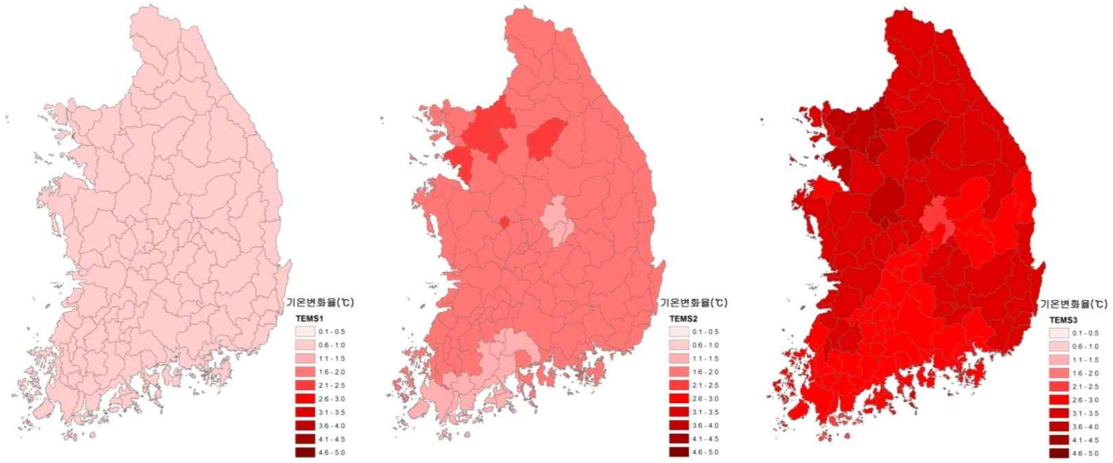


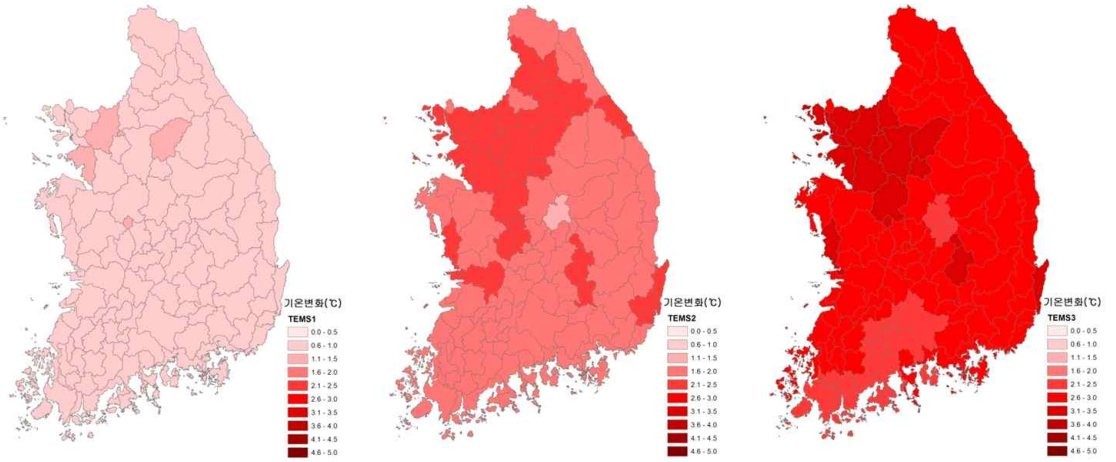
Fig. 3.2.14 중권역별 관측 및 모의 월평균강수량의 비교

(3) 미래 기온 및 강수의 변화 전망

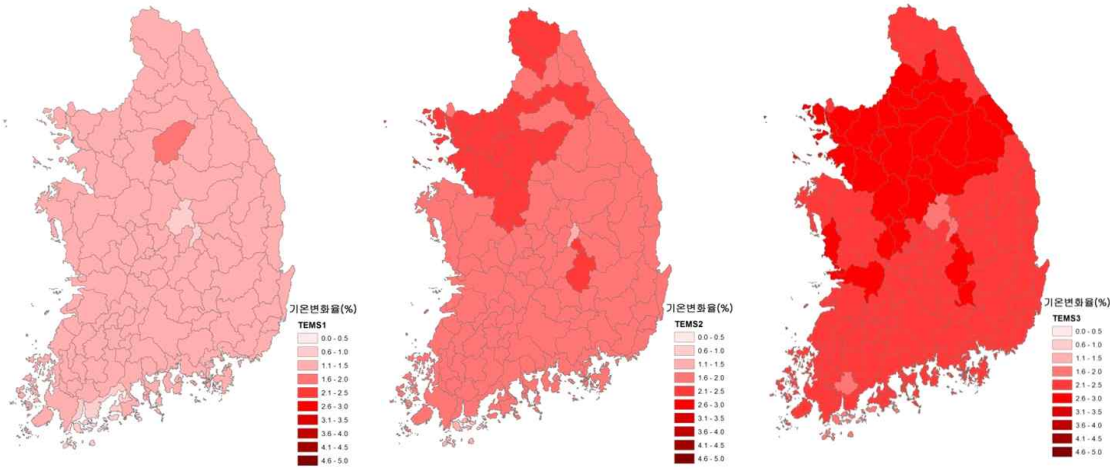
상세화된 기후시나리오를 이용하여 과거기간(1971~2005년) 대비 미래 3기간(2020s, 2050s, 2080s)의 연평균 기온 및 강수량의 변화를 산정하였다. Fig. 3.2.15는 국내 5대강 유역의 중권역별 연평균 기온 변화 결과를 나타낸 것으로, 과거기간 대비 2020s, 2050s, 2080s 기간에 대해 A2 시나리오는 0.8℃, 1.7℃, 3.1℃, A1B 시나리오는 0.8℃, 1.9℃, 2.8℃, B1 시나리오는 1.2℃, 1.8℃, 2.4℃ 상승할 것으로 전망된다. 특히 남부지역에 비해 북부지역의 기온상승이 더 큰 것으로 나타났으며, 서울·경기 지역의 기온 상승률이 다른 지역에 비해 큰 것으로 나타났다. 4개 GCM 중 ECHO-G(CONS)가 가장 높은 상승 폭(1.23℃, 2.39℃, 4.21℃)을, MK3.0(CSIRO)이 가장 낮은 상승 폭(0.27℃, 0.91℃, 2.00℃)으로 나타났다. Fig. 16은 중권역별 연평균 강수량 결과를 나타낸 것으로, 과거기간 대비 2020s, 2050s, 2080s 기간에 대해 A2 시나리오는 6.0%, 7.2%, 9.1%, A1B 시나리오는 5.5%, 5.1%, 7.9%, B1 시나리오는 6.4%, 7.5%, 9.7% 증가할 것으로 전망된다. 특히 한강권역의 증가폭이 가장 크게 나타났으며(2080s, 13.8%), 낙동강 유역에서 가장 작게 증가하는 것으로 나타났다(2080s, 7.3%).



a) A2 시나리오

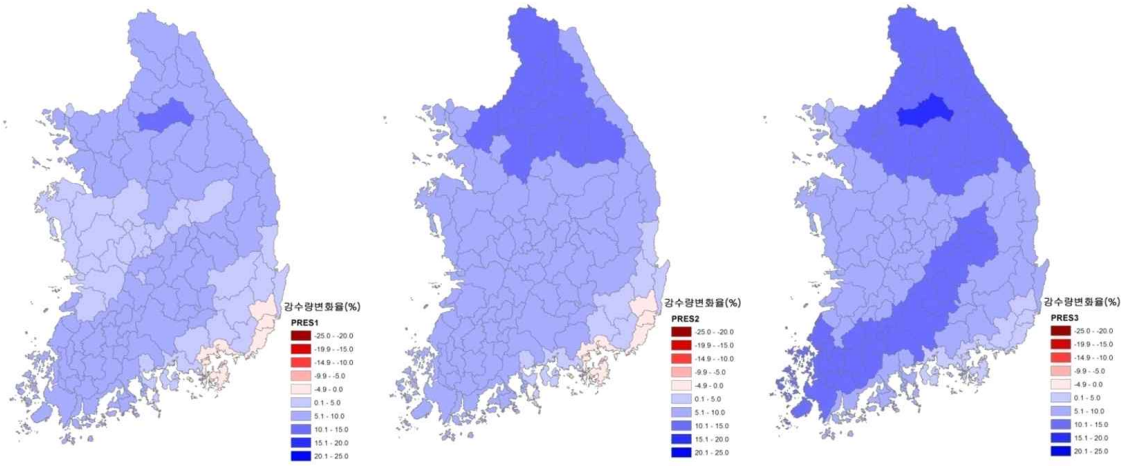


b) A1B 시나리오

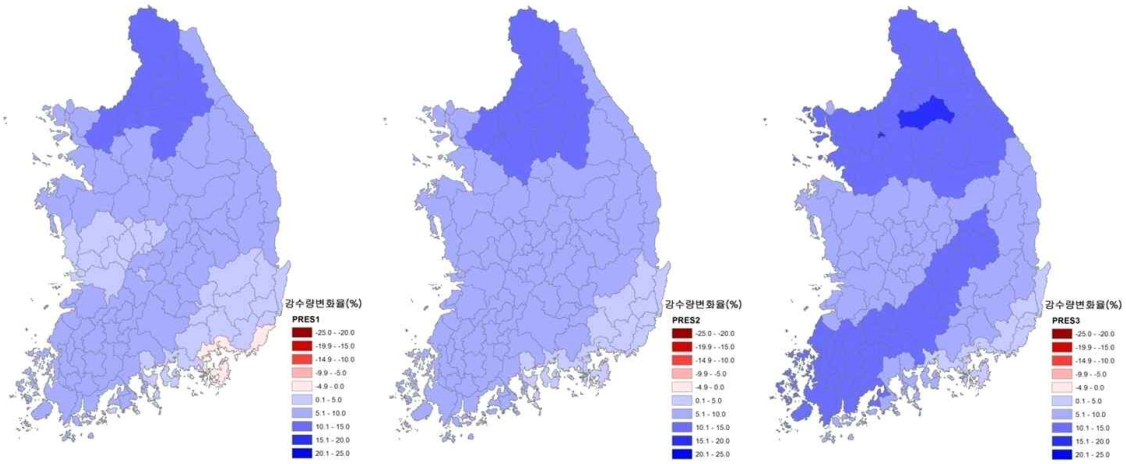


c) B1 시나리오

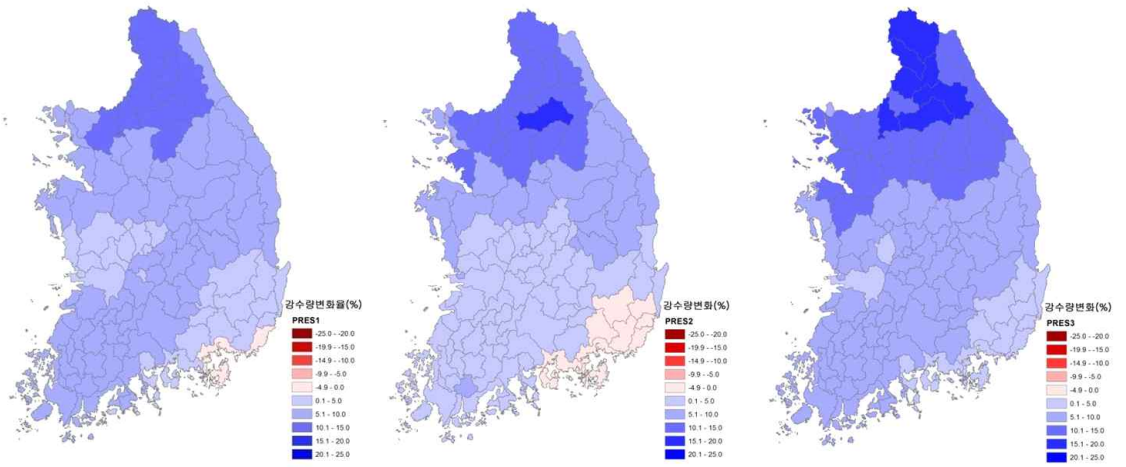
Fig. 3.2.15 SRES 기반의 과거 대비 미래기간(2020s, 2050s, 2080s)의 기온 변화



a) A2 시나리오



b) A1B 시나리오



c) B1 시나리오

Fig. 3.2.16 SRES 기반의 과거 대비 미래기간(2020s, 2050s, 2080s)의 강수량 변화

계절별 강수량의 변화를 살펴본 결과, 모든 시나리오에서 봄철 감소경향과 여름철 증가경향이 뚜렷하게 나타났다. 반면, 겨울철의 경우 A2 시나리오는 증가경향이 A1B와 B1 시나리오는 감소경향이, 가을철에도 시나리오 및 유역에 따라 변화 경향이 다르게 나타났다. 봄철의 경우 A2 시나리오에서 7~12% 감소, A1B 시나리오에서는 15~21% 감소, B1 시나리오에서는 11~17% 감소할 것으로 전망되었다. 여름철의 경우 A2 시나리오에서는 최대 30%, A1B는 36%, B1은 29%까지 증가하는 것으로 나타났다(Table 3.2.4). 이러한 평가 결과는 봄철 가뭄과 여름철 홍수의 위험이 더 커질 가능성이 높다는 것을 의미한다. 이러한 기후변화에 따른 강수량의 변화는 물수급 및 홍수에 대한 영향을 정량적으로 평가하는데 이용될 것이다.

Table 3.2.4 SRES 기반의 계절별 강수량 변화(%)

시나리오	권역	봄			여름			가을			겨울		
		2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s
A2	한강	0.9	-8.8	-7.4	24.7	28.4	22.4	-0.2	1.6	11.1	13.0	10.4	20.1
	낙동강	3.4	-8.7	-9.5	22.5	30.2	23.8	-9.3	-7.4	3.8	11.1	3.0	19.1
	금강	3.7	-7.8	-8.1	20.7	28.0	21.6	-10.8	-9.1	1.5	4.1	-5.5	5.8
	영·섬강	3.0	-11.3	-12.2	16.3	23.6	16.2	-13.3	-12.1	-4.2	3.8	-8.6	-0.3
A1B	한강	-2.5	-12.5	-15.2	21.6	27.9	32.2	3.2	-0.9	1.6	12.6	2.6	-6.4
	낙동강	-0.5	-14.4	-17.0	24.3	33.0	36.2	-7.5	-12.6	-8.8	8.3	-4.9	-11.4
	금강	-0.5	-13.2	-14.6	21.2	29.4	33.2	-8.3	-13.5	-10.2	-1.3	-16.5	-21.0
	영·섬강	-2.9	-18.6	-21.0	16.9	24.1	26.1	-12.8	-19.0	-15.7	-3.8	-20.2	-26.3
B1	한강	-0.3	-6.2	-11.9	21.3	24.4	28.5	0.9	2.0	6.9	10.6	6.7	6.6
	낙동강	1.2	-5.3	-13.7	22.4	25.4	28.7	-8.6	-6.1	-1.8	10.6	4.4	1.0
	금강	2.6	-3.6	-11.7	19.2	22.8	26.2	-8.6	-7.8	-4.0	1.7	-3.8	-9.7
	영·섬강	-0.3	-7.8	-16.9	15.3	18.7	21.3	-12.9	-13.1	-8.6	-1.4	-9.4	-14.2

라. 미래 수문 전망

(1) 수문모형 구축 및 적용성 평가

본 연구에서는 계측유역에서 유출모형들의 매개변수를 추정하기 위해 GIS 자료를 이용하여 추정이 가능한 매개변수(물리변수)들은 직접 추정하였고, 나머지 매개변수(과정변수)들은 최적화 과정을 통해 추정하였다. 매개변수를 추정하기 위해 댐별 유출량 자료기간을 보정기간과 검정기간으로 구분하여 보정기간에서 매개변수를 보정하고 검정기간에서는 추정된 매개변수의 적합성을 평가하였다(Table 3.2.5). 유출모형의 지형관련 매개변수를 추정하기 위해 국가수자원관리종합정보시스템(http://www.wamis.go.kr)에서 제공하는 DEM, 토양도, 식생도, 토지피복도 등의 GIS 자료를 활용하였다.

6개 계측유역에 대해 보정된 유출모형의 모의능력을 분석한 결과 관측유량에 근사하게 모의하는 것으로 나타났다. 섬진강유역을 제외한 나머지 유역에서 모든 모형들이 보정기간에서는 상관계수 0.85 이상, Nash-Sutchliffe 효율 계수 0.72 이상, 검증기간에서는

상관계수 0.85 이상, Nash-Sutchliffe 효율 계수 0.70 이상의 높은 적합성을 보였다(Table 3.2.6). 섬진강댐유역의 경우 갈수기인 겨울철에 유입량이 0 값을 가진 기간이 많아 통계치가 좋지 않게 나타났다. 그러나 이 기간들을 제외하고는 전체적으로 관측치에 근접하게 모의하는 것으로 확인되었다. 잠재증발산(PET) 산정방법은 동일 유출모형에 대해서도 유출용적에서 차이를 보였다. Table 3.2.7은 6개 댐유역에서 보정된 매개변수를 3개 댐유역으로 지역화하여 적용성을 평가한 결과이다. 모든 모형들이 3개 유역에서 관측치에 근접한 유출분석이 가능한 것으로 나타났다. 이것은 본 연구에서 적용한 준분포형 유출모형들이 미계측유역에서도 상당수의 물리변수를 GIS 자료를 이용하여 추정할 수 있고, 일부 과정변수만이 지역화되기 때문인 것으로 판단된다.

Table 3.2.5 대상유역의 검정 및 보정기간 분류

Dam Name	Total Period	Verification Period	Calibration Period
Geosan Dam	1982-2005	1996-2005	1982-1995
An-dong Dam	1977-2005	1996-2005	1977-1995
Sumjin river Dam	1975-2005	1996-2005	1975-1995
Imha Dam	1993-2005	1999-2005	1993-1998
hapcheon Dam	1989-2005	1999-2005	1989-1998
Yongdam Dam	2001-2005	2003-2005	2001-2002

Table 3.2.6 유역별 PRMS, SWAT, SLURP 매개변수 검보정 결과

Basin	Model	Calibration period				Verification period			
		R^2	RMSE	NSE	VE	R^2	RMSE	NSE	VE
괴산댐	PRMS	0.85	3.42	0.72	5.6	0.87	2.89	0.76	-4.8
	SWAT	0.80	3.85	0.64	6.4	0.83	3.35	0.68	-5.3
	SLURP	0.84	3.60	0.69	4.7	0.86	3.04	0.74	-3.9
안동댐	PRMS	0.85	3.40	0.72	2.3	0.85	2.35	0.71	-6.0
	SWAT	0.92	2.90	0.80	4.7	0.89	2.07	0.77	-1.4
	SLURP	0.86	3.28	0.74	0.6	0.84	2.42	0.69	-4.3
임하댐	PRMS	0.86	3.73	0.72	-6.1	0.85	2.71	0.70	-10.9
	SWAT	0.87	3.52	0.75	5.3	0.84	2.79	0.68	12.9
	SLURP	0.88	3.43	0.77	-0.4	0.83	2.77	0.69	10.0
합천댐	PRMS	0.90	3.35	0.77	0.8	0.91	2.06	0.82	6.8
	SWAT	0.92	2.95	0.82	-0.5	0.91	2.24	0.79	5.4
	SLURP	0.84	4.13	0.65	-1.3	0.85	2.63	0.71	6.8
섬진강댐	PRMS	0.75	5.10	0.56	-2.0	0.71	4.17	0.50	5.5
	SWAT	0.74	5.31	0.53	12.7	0.63	4.79	0.34	20.7
	SLURP	0.75	5.07	0.57	0.8	0.77	3.74	0.60	3.7
용담댐	PRMS	0.89	4.58	0.76	-1.6	0.90	3.08	0.80	-10.4
	SWAT	0.90	4.63	0.76	1.2	0.90	3.02	0.81	-5.6
	SLURP	0.87	4.76	0.74	-2.0	0.88	3.51	0.74	-9.9

Table 3.2.7 3개 유역의 매개변수 지역화에 따른 유출모의 결과

Basin	Model	R^2	RMSE	NSE	VE
소양강댐	PRMS	0.90	3.15	0.81	-8.10
	SWAT	0.94	2.88	0.84	-11.87
	SLURP	0.87	3.52	0.76	-9.59
충주댐	PRMS	0.83	3.76	0.69	2.33
	SWAT	0.90	3.01	0.80	8.80
	SLURP	0.88	3.20	0.78	-2.38
대청댐	PRMS	0.83	2.98	0.68	8.39
	SWAT	0.90	2.38	0.80	15.34
	SLURP	0.76	3.73	0.50	9.86

(2) 미래 식생 변화

미래의 식생지수 변화를 SWAT 모형에 반영하기 위하여 기온과 강수의 상관관계를 이용하여 유역별로 회귀식을 산정하였다. 우선 Terra의 MODIS 영상을 이용하여 과거기간의 식생지수를 구축하였고, 토지피복별 식생지수들을 추출하였다. 과거기간의 강수와 기온자료를 구축하여 각 토지피복별 회귀식을 산정하였다. 산정된 회귀식의 형태는 Eq. (13)이며, 그 결과는 Table 3.2.8과 같다. 여기서, i는 토지피복, m은 각 월, T_m은 월평균 기온(℃), P_m은 월강수량(mm/month), α, β, ɣ는 회귀상수를 의미한다.

$$NDVI_{m,i} = \alpha_i T_m + \beta_i P_m + \gamma_i \qquad (3.2.13)$$

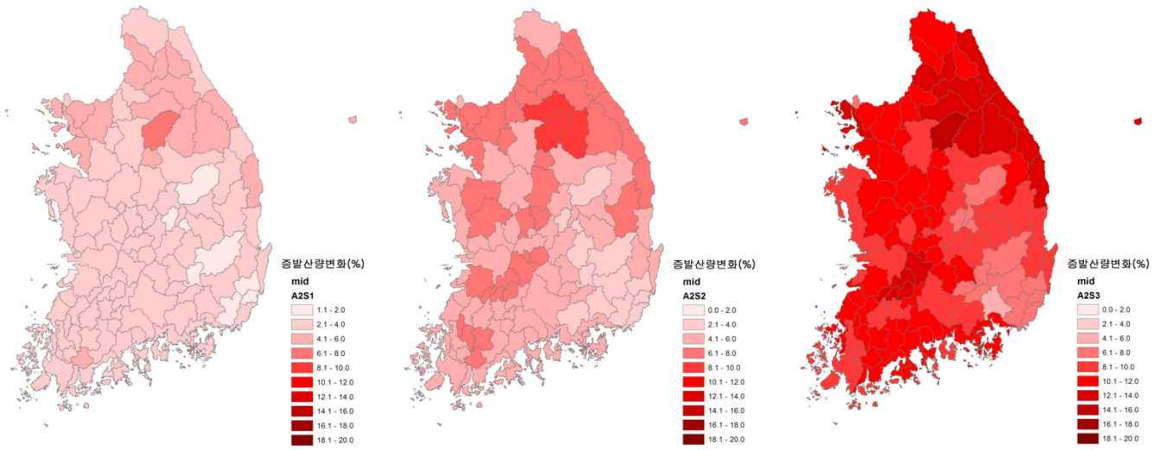
Table 3.2.8 NDVI와 기온과 강수의 다중 회귀식

유역	토지피복	기온의 계수(α)	T(월)	강수의 계수(β)	P(월)	상수(C)	결정계수
한 강	밭	0.015	T_m	0.001	P_m	0.323	0.756
	논	0.015	T_m	0.001	P_m	0.299	0.758
	숲	0.015	T_m	0.001	P_m	0.403	0.729
	초지	0.015	T_m	0.001	P_m	0.332	0.753
	도시	0.01	T_m	0	P_m	0.235	0.744
금 강	밭	0.015	T_m	0	P_m	0.287	0.736
	논	0.014	T_m	0.001	P_m	0.293	0.721
	숲	0.014	T_m	0	P_m	0.411	0.737
	초지	0.015	T_m	0	P_m	0.292	0.74
	도시	0.013	T_m	0	P_m	0.273	0.727
낙동강	밭	0.015	T_m	0	P_m	0.302	0.78
	논	0.014	T_m	0	P_m	0.334	0.788
	숲	0.014	T_m	0.00002459	P_m	0.441	0.733
	초지	0.013	T_m	0	P_m	0.361	0.768
	도시	0.01	T_m	0.00004553	P_m	0.257	0.788
섬진 영산강	밭	0.012	T_m	-0.00004718	P_m	0.374	0.72
	논	0.013	T_m	0	P_m	0.304	0.717
	숲	0.012	T_m	0	P_m	0.439	0.7
	초지	0.013	T_m	-0.0008774	P_m	0.373	0.713
	도시	0.012	T_m	0	P_m	0.281	0.719

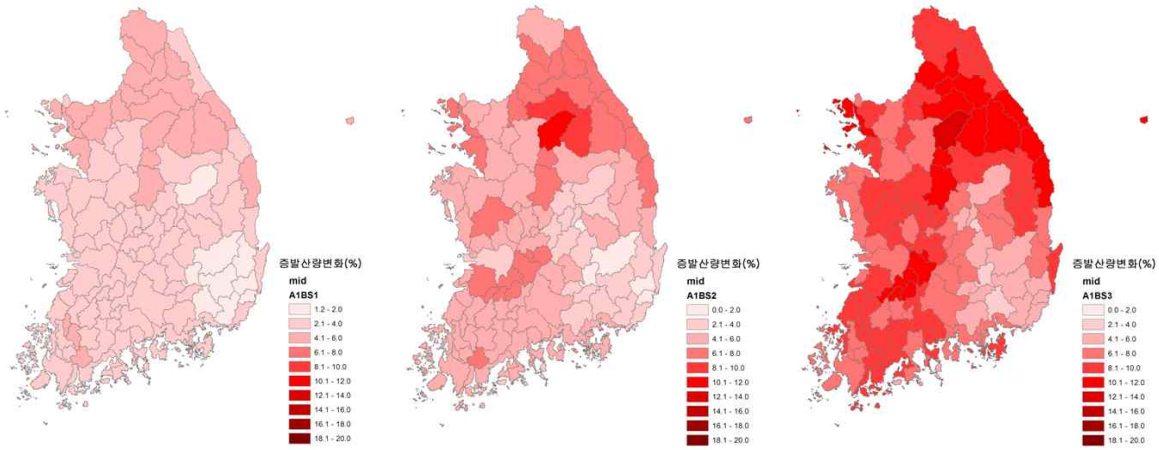
식생관련 매개변수는 LAI와 관련되어 있기 때문에 NDVI와 LAI의 상관 관계식을 이용하여 예측된 NDVI를 LAI로 변환하였다. 따라서 과거기간 대비 미래기간 2020s, 2050s, 2080s의 LAI 변화율을 산정하였고, 이를 이용하여 수문모형의 입력자료를 변화시켜 분석하였다.

(3) 미래 유출 및 증발산량 변화 전망

연평균 증발산량과 유출량의 변화를 평가하였으며, 결과는 Fig. 3.2.17~18과 같다. 연평균 증발산량의 경우 과거기간 대비 2020s, 2050s, 2080s 기간에 대해 A2 시나리오는 3.3%, 5.5%, 10%, A1B 시나리오는 3.3%, 5.0%, 7.9%, B1 시나리오는 4.9%, 6.8%, 8.2% 증가할 것으로 전망된다(Fig. 3.2.17). 한강 상류지역, 고도가 높은 지역, 산림지역 등에서 증발산량 증가율이 높은 것으로 분석되었으며, 특히, 평창강 유역(1002)과 섬강 유역(1006)에서는 최대 15%까지 증발산량이 증가하는 것으로 나타났다. 연평균 유출량의 경우 과거기간 대비 2020s, 2050s, 2080s 기간에 대해 A2 시나리오는 9.1%, 9.8%, 9.9%, A1B 시나리오는 7.8%, 6.0%, 8.7%, B1 시나리오는 6.9%, 7.7%, 10.5% 증가할 것으로 전망된다(Fig. 3.2.18). 연평균유출량의 변화는 연평균 강수량의 변화와 비슷한 패턴을 보이며, 남부지역에 비해 북부지역에서 더 높은 증가율이 나타났다. 특히 부산을 포함한 낙동강 하류유역에서는 유출량이 감소하는 것으로 나타났다.

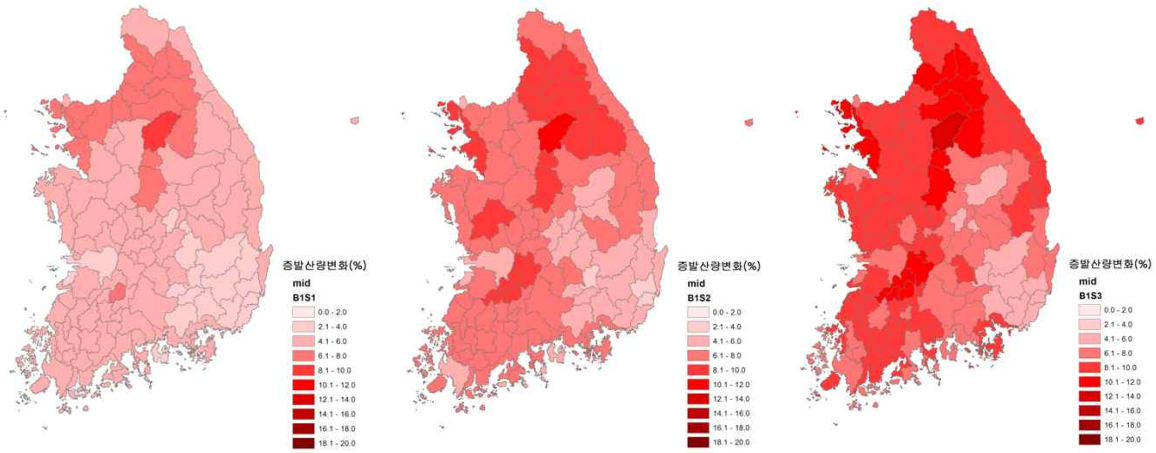


a) A2 시나리오



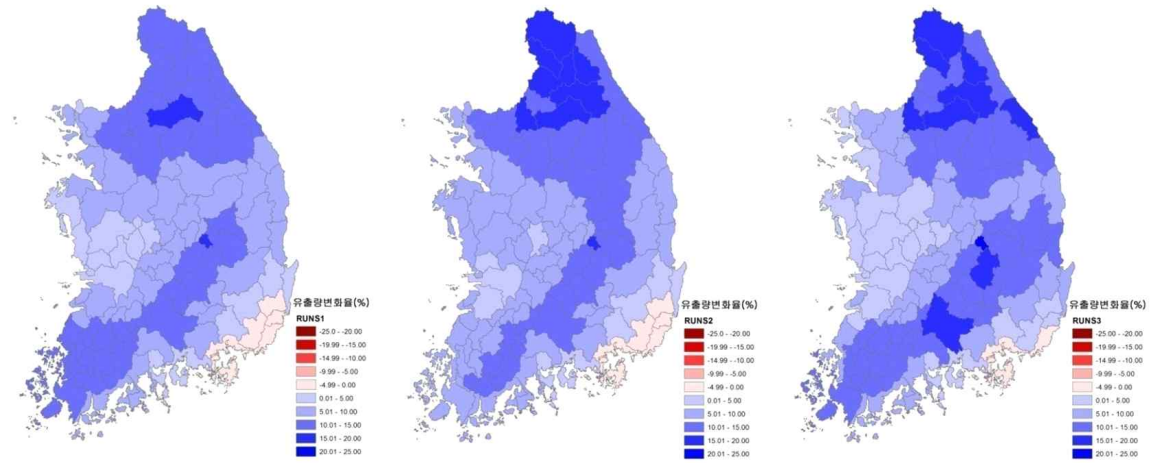
b) A1B 시나리오

Fig. 3.2.17 SRES 기반의 과거 대비 미래기간(2020s, 2050s, 2080s)의 증발산량 변화

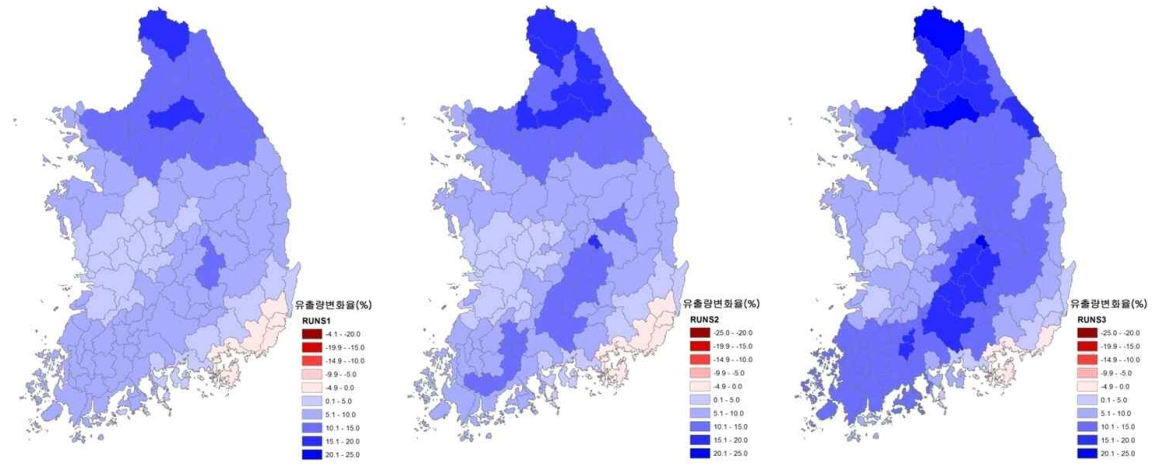


c) B1 시나리오

Fig. 3.2.17 SRES 기반의 과거 대비 미래기간(2020s, 2050s, 2080s)의 증발산량 변화 (계속)

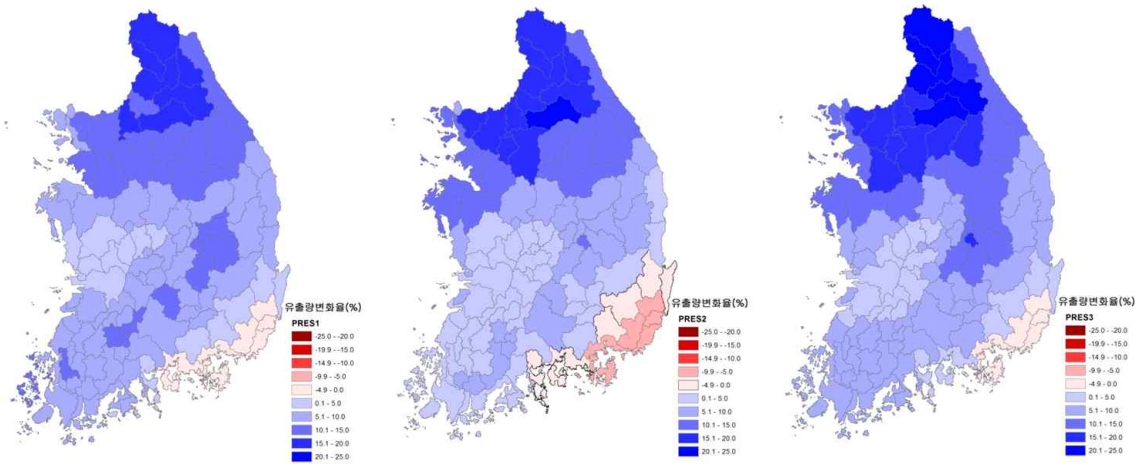


a) A2 시나리오



b) A1B 시나리오

Fig. 3.2.18 SRES 기반의 과거 대비 미래기간(2020s, 2050s, 2080s)의 유출량 변화



c) B1 시나리오

Fig. 3.2.18 SRES 기반의 과거 대비 미래기간(2020s, 2050s, 2080s)의 유출량 변화(계속)

계절별 유출량의 변화를 평가한 결과, 여름 및 겨울철 증가, 봄 및 가을철 감소 경향이 나타났다. 특히 여름철에 국내 대부분의 유역에서 유출량이 크게 증가하며, 2020s(13~20%)에서 2080s(16~21%) 기간으로 갈수록 증가율이 커지는 것으로 전망된다. 반면에, 봄철은 2020s 기간에는 유출량이 증가하나, 2050s, 2080s 기간으로 갈수록 크게 감소하는 유역의 수가 증가하였다. 또한, 여름철 및 가을철에 비해 봄 및 겨울철에 유역별로 차이가 크게 나타났다(Fig. 3.2.19).

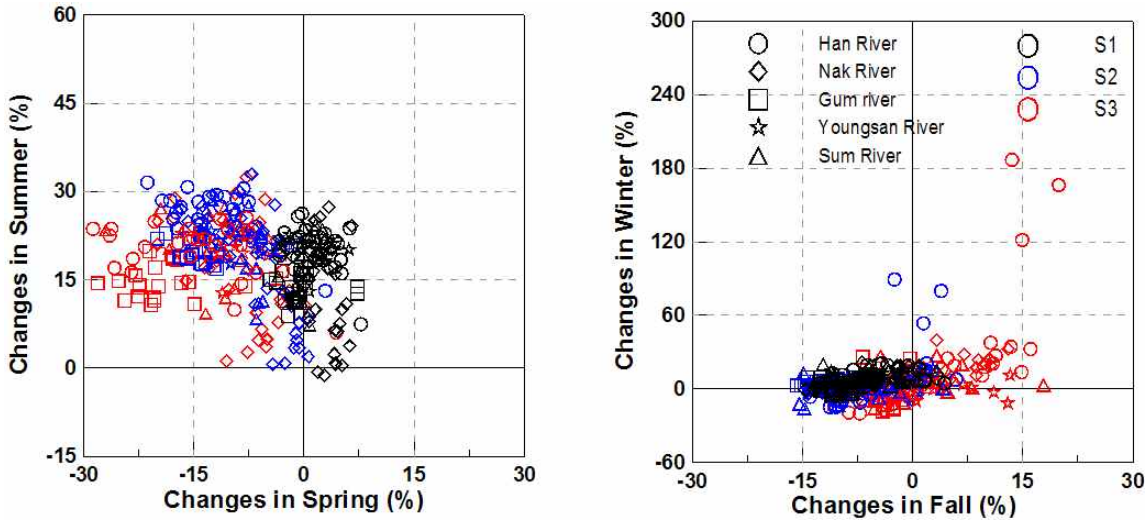


Fig. 3.2.19 SRES A2 기반의 계절별 유출량의 변화

마. 기존 연구결과와의 비교

기존에 도출된 기후변화 영향평가 결과와 본 연구의 결과를 비교하였으며, Table 3.2.9는 21세기 2080s(2070~2099년)에 대한 결과를 제시한 것이다.

Table 3.2.9 기존 사업의 수문전망 결과와 금회 산정된 수문전망 결과와의 비교

		프론티어 2단계* (A2)	국토해양부 국가물안보 (A2)	프론티어 3단계(AR4)			건기평(AR4)		
				A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
연평균 기온	한강	3.5~4.3 ℃ 증가	남한 유역 3.64℃ 상승	+3.3	+2.9	+2.4	+3.4	+3.1	+2.6
	낙동강			+2.9	+2.6	+2.1	+3.0	+2.7	+2.3
	금강			+3.0	+2.7	+2.2	+3.1	+2.8	+2.5
	영섬강			+2.7	+2.5	+2.0	+2.8	+2.5	+2.2
연평균 강수량	한강	+ 10%	+12.2	+14.1	+13.4	+13.6	+11.4	+13.1	+12.6
	낙동강	+3%	+13.0	+8.4	+7.1	+7.23	+7.6	+5.5	+7.6
	금강	+8%	+9.9	+9.00	+7.8	+8.36	+7.3	+6.8	+8.0
	영섬강	+1%	+17.1	+11.0	+9.5	+10.0	+10.1	+6.9	+10.6
연평균 유출량	한강	+ 3%	+14.3	+20.0	+20.9	+21.3	+11.2	+16.1	+14.1
	낙동강	-8%	+10.8	+12.2	+11.2	+11.9	+8.8	+6.1	+9.3
	금강	0%	-4.3	+11.7	+11.1	+12.7	+4.1	+6.4	+6.4
	영섬강	-8%	+18.1	+15.6	+14.4	+15.5	+10.0	+6.9	+11.6
계절별 유출량	한강	봄철 감소 여름, 겨울철 증가	여름철 유출량 감소	봄철 감소, 여름 및 겨울철 증가 경향			봄철 감소, 여름 및 겨울철 증가 경향		
	낙동강								
	금강								
	영섬강								
비고 전망기법	GCM	ECHO-G	ECHO-G	AR4 13개 GCMs			선정된 AR4 4개 GCMs		
	상세화	MM5		PCA + MLR			PCA + MLR		
	상세화	LARS-WG		WXGEN			시공간상관을 고려한 WGEN		
	수문모형	PRMS	SLURP	PRMS, SWAT, SLURP			PRMS, SWAT, SLURP		

*연평균 유출량의 경우 북부지역 증가, 남부지역 감소경향

바. 결론

본 연구에서는 홍수, 가뭄, 물수급 등 수자원 제반분야를 합리적으로 평가할 수 있는 수문시나리오의 표준 생산기법을 도출하였으며, 그에 기반하여 현재 시점에서 최선의 기후 및 수문시나리오를 생산하였다. RCP 기반의 기후시나리오는 별책보고서에 제시하였으며, 본 보고서에서는 SRES 시나리오 기반의 기후 및 수문시나리오 생산 및 미래 전망 결과를 제시하였다. 기존의 연구와 차별화하면서 신뢰성 있고 합리적인 결과 도출을 위해 AR4 GCM 모형의 불확실성 평가를 통한 최적 GCM을 선정하였고, 공간상관이 고려된 일기상발생기의 적용성을 평가하였다. 최종적으로 생산된 시나리오를 토대로 미래 기후 및 수문 영향 분석을 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 상세화된 기후시나리오를 이용하여 과거 대비 미래 3기간의 연평균 기온 및 강수량의 변화를 평가한 결과, 연평균 기온은 과거기간 대비 2020s, 2050s, 2080s 기간에 대해 A2 시나리오는 0.8℃, 1.7℃, 3.1℃, A1B 시나리오는 0.8℃, 1.9℃, 2.8℃, B1 시나리오는 1.2℃, 1.8℃, 2.4℃ 상승할 것으로 전망되었다. 연평균 강수량의 경우 과거기간 대비 2020s, 2050s, 2080s 기간에 대해 A2 시나리오는 6.0%, 7.2%, 9.1%, A1B 시나리오는 5.5%, 5.1%, 7.9%, B1 시나리오는 6.4%, 7.5%, 9.7% 증가할 것으로 전망되었다.

2) 연평균 증발산량의 경우 과거기간 대비 2020s, 2050s, 2080s 기간에 대해 A2 시나리오는 3.3%, 5.5%, 10%, A1B 시나리오는 3.3%, 5.0%, 7.9%, B1 시나리오는 4.9%, 6.8%, 8.2% 증가할 것으로 전망되었다. 또한 연평균 유출량의 경우 과거기간 대비 2020s, 2050s, 2080s 기간에 대해 A2 시나리오는 9.1%, 9.8%, 9.9%, A1B 시나리오는 7.8%, 6.0%, 8.7%, B1 시나리오는 6.9%, 7.7%, 10.5% 증가할 것으로 전망되었다.

3) 계절별 유출량의 변화를 평가한 결과, 여름 및 겨울철 증가, 봄 및 가을철 감소 경향이 나타났다. 특히 여름철에 국내 대부분의 유역에서 유출량이 크게 증가하며, 2020s(13~20%)에서 2080s(16~21%) 기간으로 갈수록 증가율이 커지는 것으로 전망되었다. 반면에, 봄철은 2020s 기간에는 유출량이 증가하나, 2050s, 2080s 기간으로 갈수록 크게 감소하는 유역의 수가 증가하였다.

본 연구에서 기존 기법과 비교할 때 개선된 점은 기후 및 수문시나리오 생산을 위한 표준화된 방법론을 도출하였다는 점이다. 이를 위해서 국내·외에서 가용한 자료와 기법을 이용하여 시나리오 생산 과정에서 검토해야 할 사항들을 평가하였으며, 현재 국내 기술수준과 본 연구의 목적에 맞도록 최종 시나리오 생산 방안을 도출하였다. 특히, 기존에 단일 온실가스 배출시나리오-단일 전구기후모형-단일 수문모형을 적용한 것과 달리 Multi Model Ensemble 기법을 도입하였으며, 전구기후모형은 확률론적 불확실성 해석기법을 통해 국내 최적 GCM을 선정하여 불확실성을 저감하였다. 이렇게 생산된 기후 및 수문시나리오는 홍수, 가뭄, 물수급 등 수자원 제반분야의 영향평가에 있어 더욱 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 이러한 영향평가 결과를 토대로 취약성 분석 및 적응대책 수립에 활용될 수 있을 것이다.

하지만, 본 연구성과에서도 여러 가지 한계점 및 규명되지 못한 부분들이 있다. 특히,

본 연구에서 생산한 최종 시나리오는 현시점에서 선택할 수 있는 최선의 선택일 뿐이지 최고의 수문시나리오라고 단언할 수 없다. 그 이유는 앞에서도 제시한 바와 같이 고해상도 전구기후모형으로 생산된 기후시나리오가 극치호우사상을 반영하는데 더 유리하며, 통계적 상세화에 비해 역학적 상세화된 시나리오가 좁은 지역에 극치호우사상을 반영하는데 유리하다. 하지만 현재 국내에서는 고해상도 전구기후모형을 운영하지 못하고 있는 실정이며, RCM 역시 단일모형으로만 결과를 생산할 뿐 많은 시나리오와 모형의 종류에 따른 결과를 제시하지 못하는 한계가 있다. 따라서 이러한 점이 개선되어 시나리오 생산이 더욱 활발해진다면 현재보다는 더욱 개선된 분석결과를 도출할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라 향후에 IPCC AR5가 발간되면 그에 따른 RCP 기반의 기후시나리오가 제공될 것이다. 이는 기후변화에 따른 영향평가의 기준 시나리오가 변경됨을 의미하고, 추가적인 분석을 통해 연구결과가 도출되어야 한다. 또한, 본 연구에서 도출한 RCP 단일 시나리오에 의한 영향 평가결과는 공간적인 패턴 및 계절별 변화가 SRES 기반의 분석결과와 상이하게 나타나 추후 연구를 통해 규명이 필요한 것으로 판단된다.

3. 기후변화에 따른 중단기 수문전망

가. 서 론

전지구적으로 발생하는 기후변화는 강수, 지하수 함양 및 유출, 저류량, 증발산량 등으로 연결되는 물순환 평형의 균형을 파괴하고 있다. IPCC(2007)는 미래 기후변화로 인한 인간 환경의 영향 중 가장 취약한 부분으로 기후시스템 변화로 인한 강우 패턴의 변화를 선정하고 이에 강우의 경향성과 특성변동에 관한 연구 뿐 아니라 유출량 변동에 관한 연구가 세계적으로 다양하게 수행되어 오고 있다. 현재 우리나라의 연평균 강수량은 해에 따라 편차가 크게 나타나고 있으며 장기적으로 증가 추세를 보이고 있다. 이로 인하여 수자원 관리 측면에서 미래 기후변화의 경향성을 분석하고 예측하는 일은 기후변화의 대응에 있어 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 이와 같이 기후변화로 인한 수문변화 분석기술은 단일 혹은 여러 전 지구 기후모형인 GCMs(Global Climate Models)로부터 미래기후정보를 바탕으로 이를 직접적으로 사용하거나 적절한 기법을 통하여 규모 상세화한 결과를 강우-유출 모형에 적용하여 유역의 유출반응을 살펴보는 방향을 취하는 것이 일반적이다. 이와 관련한 국내외의 연구사례를 살펴보면, IPCC(2007)는 미래 기후변화로 인한 인간 환경의 영향 중 가장 취약한 부문으로 기후시스템 변화로 인한 강수 패턴의 변화를 선정하고 있다. 이에 월, 계절 및 년 강수량에 대한 연구가 국지적 규모에서 그 경향성을 밝혀내기 위하여 세계의 많은 지역에서 수행되고 있으며, 수자원 수량의 확보와 계획의 중요성에 의한 연 유출량 경향성을 분석하고자 많은 연구가 수행되어 오고 있다. 국내의 경우, 연최대강수량과 연강수량을 대상으로 변동 및 경향을 분석한 연구가 진행되었고(이상복 등, 2004), 또한 연강수량, 연강수일수, 연평균기온, 연평균상대습도 등의 자료를 대상으로 기본통계량, 선형회귀분석, 5년 이동평균을 통해 수문기상인자의 기본적인 특성을 파악하고 통계적 기법을 이용해 경향성을 분석하는 연구를 최근 수행하였다(이재준 등, 2010). 또한 미래기후변화에 따른 하천유역의 유출 및 강우 특성을 분석하여 정량적으로 산정하는 연구가 진행되어 왔다. 안소라 등(2008)은 미래토지이용 및 기후변화에 따른 하천유역의 유출 특성을 미래기후변화 시나리오에 의한 기상자료 및 식생지수 정보를 고려하여 SLURP 준 분포형 수문모형을 이용하여 영향을 분석한 바 있으며, 김병식 등(2004)은 YONU GCM모의 결과값을 이용하여 통계학적 축소기법으로 상세화한 뒤 2CO2 배증상황에서 SLURP 모형에 적용하여 용담댐 유역의 유출량을 모의한 결과 전체적으로 7.6% 유출량 감소를 보였으며, 단일 GCM 결과를 규모내림한 후 이를 유역모형에 적용하여 유역의 수환경 변화에 대한 영향을 분석한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다(김문성 등, 2007; 이용준 등, 2008; 이기하 등, 2008; 한수희 등, 2009). 하지만 GCM-RCM 기법을 이용한 미래기후전망의 경우 공간범위가 축소된 지역의 기후자료를 산출하는데 한계가 있으며 우리나라와 같이 산지가 발달한 지역에 지형효과를 보다 현실감 있게 고려할 수 있음에도 불구하고 GCM에 나타나는 예측값의 편의(bias)는 여전히 문제점으로 지적되고 있다(이동률 등, 2009). 또한 GCM을 이용한 기상요소의 산정과 이를 이용한 유출모형 적용에 따른 전망결과는 유출모형에 따라 상이한 결과를 보이는 모의 결과를 보였다. 유출모형의 영향평가의 불확실성과 유출 모형별 불확실성이 크다면 하나의 유출 모형을 적용할 경우 평가 결과는 어느 정도 신뢰할 수 있는가 하는 문제점

이 있다. 또한 일반적으로 2020s에 비해 2080s 간에 연별 및 월별 변동성의 크기와 범위가 증가한다. 반면, 유출량의 경우 유역별로 뚜렷한 차이를 보이지는 않는다(수자원의 지속적 확보기술개발 사업단, 2009).

기후변화에 따른 수자원의 변동 및 경향성을 찾기 위해서는 수문요소의 장기간 자료를 이용하여 시계열 분석이 이루어져야 한다. 이러한 기존의 관측 자료 분석 결과를 이용하여 중단기 수문을 전망한다. 이와 같은 방법을 비시나리오 기반의 중단기 수문전망이라 하고 중단기 전망은 5~10년의 기간으로 시간 범위를 설정한다. 공간적인 범위는 중유역 단위의 5대강 유역 내 24개 지점을 대상으로 연구하고 이에 따른 통계적 기법을 이용한 비시나리오 적용의 한계 및 예측 신뢰정도를 확보하고, 공간적인 범위의 선정 및 전망 기술의 적용성을 확보하였다.

본 연구에서는 과거자료를 기반으로 국내 기후변화의 수문영향을 통계기술적으로 정량화하고 평가하고 예측할 수 있는 비시나리오 기반의 중단기 전망 기술을 개발하였다.

나. 연구방법

(1) 연구방법의 이론

(가) 경향성 분석 기법

T-test는 자료수 N인 자료가 $Y_1, Y_2, ..., Y_N$ 으로 주어졌을 때 자료의 선형적 경향을 분석하는 방법으로 다음과 같은 Eq. (3.2.14)의 선형방정식을 사용한다.

$$Y_t = a + bt, \quad t = 1, ..., N \tag{3.2.14}$$

여기서 주어진 자료가 선형적 경향을 갖고 있다면 계수 b는 0 이 아닌 다른 값을 갖게 된다. 그러므로 기울기 b 가 0인가 아닌가에 대한 귀무가설이 곧 주어진 자료에 대한 선형적 경향의 귀무가설이 된다.

가정한다. 자료수 N 인 자료 $Y_1, Y-2, .., Y_N$ 를 크기순으로 작은 값부터 큰 순서로 정리된 자료를 $X_1, X_2, ..., X_N$ 이라 하고 Y_t의 순서값(rank)을 $R(Y_t)$라 하면 검정 통계량은 다음 Eq. (3.2.15)와 같이 주어지고,

$$T = \sum_{t=0}^{1} \left[R(Y_t) - t \right]^2 \tag{3.2.15}$$

검정통계량 T의 상한계와 하한계는 Eq. (3.2.16), (3.2.17)과 같이 주어진다.

$$T_U = \frac{N(N^2-1)}{6} + u_{1-\alpha/2} \frac{N(N^2-1)}{6\sqrt{N-1}} \tag{3.2.16}$$

$$T_L = \frac{N(N^2-1)}{6} - u_{1-\alpha/2} \frac{N(N^2-1)}{6\sqrt{N-1}} \tag{3.2.17}$$

여기서 Eq. (3.2.15)에서 계산된 T 값이 Eq. (3.2.16) 및 Eq. (3.2.17) T_U, T_L의 밖에 존재하면 주어진 자료의 선형 경향은 유의수준 α의 범위 내에서 받아들여진다고 할 수 있다.

Detection of Nonlinear Trends는 자료가 Nonlinear Trend라고 가정하고 각 인자들이 경향성이 있다고 가정한다. 여기서 X_t는 시계열 자료로 다음과 같이 Eq. (3.2.18)로 정의한다.

$$X_t = t \ , \ t = 1,...,N \tag{3.2.18}$$

Y_t를 아래와 같은 H차 다항식 Eq. (3.2.19)으로 표현할 수 있다.

$$Y_t = a + b_1 X_t + b_2 X_t^2 + b_3 X_t^3 \cdot \cdot \cdot + b_H X_t^H \tag{3.2.19}$$

여기서 차수 H와 계수를 구하는 방법으로는 all-forward regression, backward regression, stepwise regression 등(Draper and Smith, 1989)이 있다. 자료의 분석결과 위의 Eq. (3.2.19)에서 차수 H 가 2이상인 경우에는 비선형 경향을 갖는다고 할 수 있다.

Mann-Kendall test는 자료 $Y_t (t = 1,2,...,N)$에 대하여 $Y_{t'} (t' = 1,2,...,N-1)$과 $Y_t (t = t' + 1,...,N)$의 크기를 비교하여 다음과 같이 정의한다.

$$Z_k = 1 \quad \text{if} \quad Y_t > Y_{t'} \tag{3.2.20}$$

$$Z_k = 0 \quad \text{if} \quad Y_t = Y_{t'} \tag{3.2.21}$$

$$Z_k = -1 \quad \text{if} \quad Y_t < Y_{t'} \tag{3.2.22}$$

여기서 $k = (t' - 1)(2N - t') + (t - t')$ 라 하면 Mann-Kendall test 의 검정통계량은 다음과 같이 Eq. (3.2.23)으로 주어진다.

$$S = \sum_{t'=1}^{N-1} \sum_{t=t'+1}^{N} Z_k \tag{3.2.23}$$

모든 $Y_t - Y_{t'}$의 범위 내에 Y_t 가 추정될 때, S는 양의 값과 음의 값으로 제시된다. $N \le 40$일 때 α의 유의성에서 상향 경향성은 Eq. (3.2.23)에서 양의 값이거나 $\alpha < \gamma_{s,n}$의 범위에서 수용되고 반대로 하향 경향성은 Eq. (3.2.23)에서 음의 값이거나 $\alpha > \gamma_{s,n}$의 범위에서 수용되다. 변량 $\gamma_{s,n}$ 는 Eq. (3.2.23)과 샘플 크기 N에 의하여 결정되어진다. $N > 40$ 일 때, test의 통계량은 다음 Eq. (3.2.24)과 같다.

$$U_c = \frac{S + j}{[V(S)]^{1/2}} \tag{3.2.24}$$

여기서

$$V(S)=\frac{1}{18}\left[N(N-1)(2N+5)-\sum_{i=1}^{G}E_i(E_i-1)(2E_i+5)\right] \quad (3.2.25)$$

$S<1$ 이면 $j=1$, $S>1$ 이면 $j=-1$, $S=0$ 이면 $j=0$ 의 값을 가지고, G는 같은 값을 갖는 자료군의 총수이며, E_j 는 i 번째 자료군에 속하는 같은 값을 갖는 자료의 수이다. 아래 식의 조건이 만족되면 유의수준 α에서 주어진 자료가 상향(upward) 또는 하향 경향(downward trend)을 갖는다고 할 수 있다.

$$|U_c|>u_{1-\alpha/2} \quad (3.2.26)$$

주어진 자료에 대하여 $S=0$ 이면 $U_c=0$ 으로 경향을 갖지 않으며, S가 양수인 경우에는 상향 경향을 가지며, S가 음의 값을 갖는 경우에는 하향 경향을 갖는다.

$$V(S)=\frac{1}{18}\left[N(N-1)(2N+5)-\sum_{i=1}^{G}E_i(E_i-1)(2E_i+5)-\sum_{j=1}^{H}W_j(W_j-1)(2W_j+5)RIGHT\right]$$

$$+\frac{\sum_{i=1}^{G}E_i(E_i-1)(E_i-2)\sum_{i=1}^{H}W_j(W_j-1)(W_j-2)}{9N(N-1)(N-2)}+\frac{\sum_{i=1}^{G}E_i(E_i-1)\sum_{j=1}^{H}W_j(W_j-1)}{2N(N-1)} \quad (3.2.27)$$

여기서, H는 자료의 기간의 수, W_j는 J^{th} 기간의 자료의 수를 말한다.

Sen test는 Sen(1968)에 의해 제안된 비매개변량적 방법으로, 주어진 자료 $Y_t(t=1,2,...,N)$에 대하여 다음과 같이 새로운 변량 Z_k 는 Eq. (3.2.28)과 같이 정의한다.

$$Z_k=\frac{Y_j-Y_i}{j-i} \quad (3.2.28)$$

여기서 모든 i 와 j 에 대해 $j>i$ 이고, Z_k를 다시 크기순으로 정렬한 값을 X_k 로 정의하면 Sen의 경사에 대한 검정통계량은 다음과 같은 Eq. (3.2.29), (3.2.30)으로 주어진다.

M이 홀수일 때, $S=X_{(M+1)/2}$ (3.2.29)

M이 짝수일 때, $S=\frac{1}{2}\left[X_{M/2}+X_{(M+2)/2}\right]$ (3.2.30)

여기서 $M=N(N-1)/2$ 로 위 식에서 구한 검정통계량이 다음의 신뢰한계 안에 있게 되면 유의수준 α에서 경향을 갖는다고 할 수 있다.

$$\left[X_{M_L},X_{M_U}\right] \quad (3.2.31)$$

여기서,

$$M_L = \frac{M - u_{1-\alpha/2}[V(S)]^{1/2}}{2} \tag{3.2.32}$$

$$M_U = 1 + \frac{M + u_{1-\alpha/2}[V(S)]^{1/2}}{2} \tag{3.2.33}$$

이고 $V(S)$는 식 $V(S) = \frac{1}{18}\left[N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^{G} E_i(E_i-1)(2E_i+5)\right]$ 를 이용하여 구한다. 그러므로 하한계 X_{M_L}은 X 값 중 가장 작은 값으로부터 M_L번째 값이고, 상한계 X_{M_C}는 M_U 번째 값이 된다.

(나) 탄성도 분석 기법

일반적인 탄성도의 개념, 특히 강우-유출의 탄성도(Schaake, 1990; Sankarasubramanian et al., 2001; Chiew, 2006)는 Eq. (3.2.34)와 같다.

$$\varepsilon_p(P,Q) = \frac{dQ/Q}{dP/P} = \frac{dQ}{dP}\frac{P}{Q} \tag{3.2.34}$$

Sankarasubramanian et al. (2001)은 Eq. (3.2.35)과 같이 기후요소의 평균으로 탄성도를 정의하는 유용한 방법을 개발하였다.

$$\varepsilon_p = \frac{dQ}{dP}\frac{\overline{P}}{\overline{Q}} \tag{3.2.35}$$

여기서 P는 강우량, Q는 유출량을 나타내며 dQ는 유출량의 순간변화율, dP는 강우의 순간 변화율을 나타낸다. 그러나 강우와 유출량의 순간변화율을 산정할 수 없으므로 Eq. (3.2.36)와 같이 Vogel 등.(1999)이 제안한 비모수 산정식(nonparametic estimator)을 이용하여 탄성도를 산정할 수 있다.

$$\varepsilon_p(P,Q) = median\left[\frac{Q_t - \overline{Q}}{P_t - \overline{P}}\frac{\overline{P}}{\overline{Q}}\right] \tag{3.2.36}$$

여기서 일련의 강우량 및 유출량의 시계열 자료가 있다면, Q_t 및 P_t는 각각 해당 시간의 강우량 및 유출량이며 $\overline{P}$, $\overline{Q}$는 강우 및 유출량의 평균이다.

일반적으로 강우-유출 탄성도에 관해서는 많은 연구가 있지만 다른 항목에 적용한 사례는 많지 않고 특히 수질 요소에 적용한 연구는 전무한 실정이다. 이에 본 연구에서는 기상, 수자원, 수환경 등의 다양한 인자 간의 탄성도를 산정하여 기후변화의 영향에 관하여 분석하였다.

(2) 연구방법

(가) 경향성 분석

한국 수문변수를 지점별, 유역별, 수문요소별로 통계적 경향성 분석을 실시하였다. Fig. 3.2.20과 3.2.21에 나타낸 바와 같이 전국 지점의 총 24개 지점의 강우와 기온 자료를 수집하여 시간별, 일별, 월별, 계절 및 연별로 다음의 항목에 대하여 분석을 실시하였다. 평균강우/지속시간별 연 최대강우/강우강도 30mm, 70mm/일, 계절, 연 평균기온의 분석한 자료를 경향성 분석(T test, Hoteling Pabst test, Non Linear test, Mann-Kendall test, Sen test)을 실시하였고 결과는 검정의 유의수준으로 99% 이상을 1등급, 99~95%는 2등급, 95~90%는 3등급, 90% 미만은 4등급으로 구분유의 수준별 분석 결과를 등급화 하여 DB를 구축하였다.

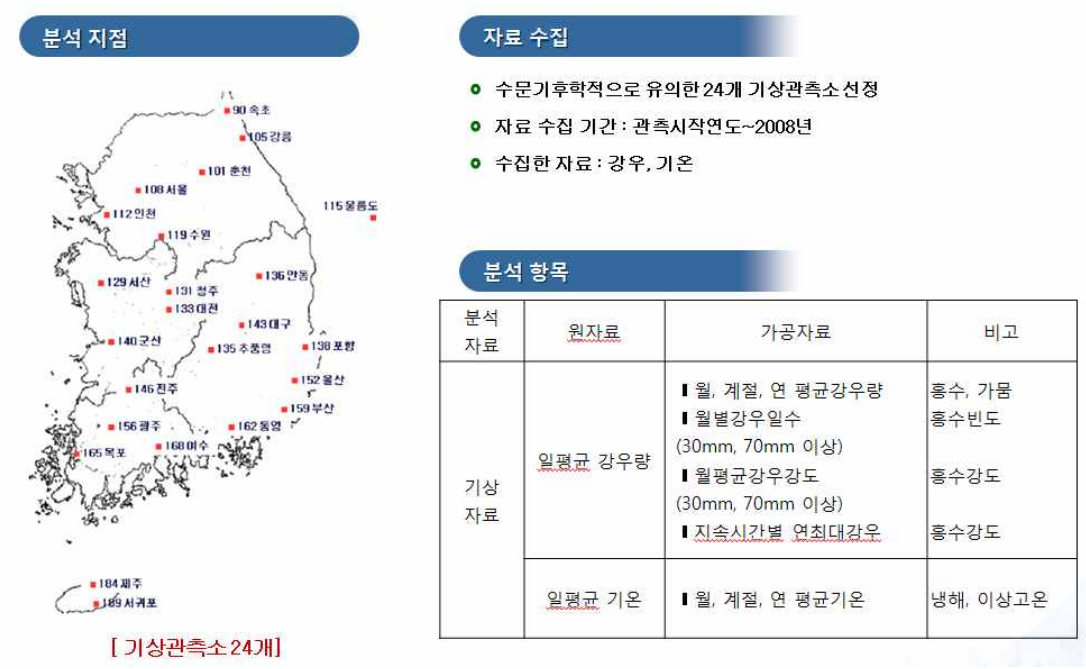


Fig. 3.2.20 Outline of used data for trend analysis

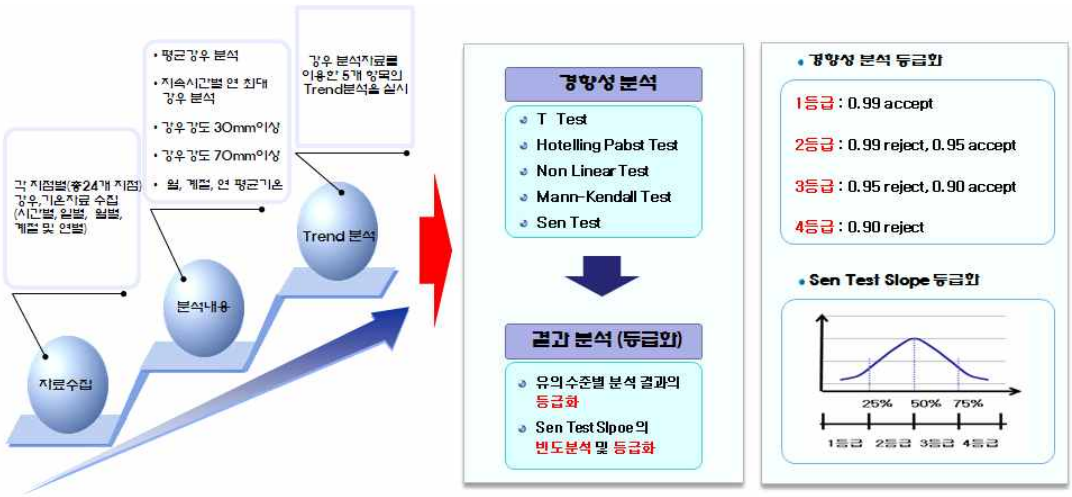


Fig. 3.2.21 Flow chart of trend analysis of meteorological factors

Table 3.2.10 Trend analysis data of Korea climate change

항목	원자료	가공자료	비고
기상 자료 (전국)	일평균강수량	평균강우량	
		강우일수(30mm이상) 강우일수(70mm이상) 강우강도(30mm이상) 강우강도(70mm이상)	6~9월
		지속시간별 연최대강우	1, 2, 3, 4, 6, 9, 12, 15, 18, 24, 36, 48, 56, 72hr
	일평균기온	평균기온	

(나) 탄성도 분석

탄성도 분석 기법을 이용하여 기후변화에 따른 강우 및 유출 변동 특성을 분석하여 중단기 수문 전망을 실시하였다. 우선 연구대상지역으로 우리나라 전체 5대강 권역에 내 강우 및 유출의 과거 30년 이상의 자료를 확보할 수 있는 Fig. 3.2.22와 같이 각 유역 내 24개 지점을 대상으로 하였다. 각 지점 내 1966~2001년까지의 연 단위의 면적평균강우량 및 유출량 관측 자료를 수집하였고 이를 기본 통계 분석을 통하여 지점별 자료의 특성을 분석하였다. 기본 통계 분석으로 자료의 특성을 파악한 후 각 수문요소에 대한 연 시계열 분석을 위하여 연 면적평균강우량 및 유출량 자료에 대하여 경향성 분석 및 탄성도 분석 기법을 이용하여 실시하였다. 경향성 분석으로는 Sen test 분석을 실시하였다. 과거 관측 자료 분석을 통하여 얻은 Sen test slope의 결과를 이용하여 가까운 미래인 2013, 2015, 2017, 2020년의 중단기 수문 전망 결과에 대한 권역의 변동 특성을 경향성 분석 기법과 탄성도 분석 기법의 결과를 기반으로 각각의 전망 결과를 산출하였다. 즉 한국 수문변수 중단기 전망 분석을 실시하기 위하여 수문변수-면적평균강우량 및 유출량 성분에 대하여 경향성 분석을 실시하였고 경향성 분석 결과 중 Sen test slope의 결과를 이용하여 각 수문변수에 대한 중단기 (2013, 2015, 2017, 2020) 전망을 수행하였다.

$$Y = \alpha + \beta X \tag{3.2.37}$$

여기서, α는 과거 수문자료 중 평균값과 가장 근사한 값을 가지는 연도의 수문자료, β는 Sen-test slope, X는 해당 관측자료의 연도와 전망년도 간의 연수를 의미한다. 이러한 산정방법은 과거의 장기 관측 자료의 패턴을 기초로 하여 미래에도 이러한 패턴을 따른다는 정상성에 기초하며 가까운 미래의 기후변화는 과거부터 현재까지의 패턴에서 크게 벗어나지 않는다는 과거 자료의 결과에서 도출될 수 있다. 경향성 분석 기법을 이용한 중단기 수문전망은 위와 같으며, 과거 장기 관측자료를 기반으로 탄성도 분석 기법을 이용한 중단기 수문 전망의 경우 위에 제시된 Eq. (3.2.37)에 제시된 기법을 기반으로 면적평균강우량과 유출량 간의 상관관계를 이용한 다른 요소의 변화량에 대한 한 요소의 변화량을 이용하여 중단기 수문전망을 실시한 후 경향성 분석 기법과 탄성도 분석 기법의 수문 전망 결과를 비교한다.



Fig. 3.2.22 Selected 24 sites in five rivers of Korea

(다) 비시나리오 기반 중단기 수문전망

비시나리오 기반의 연구 중 통계적 기법을 이용하여 기후변화에 따른 강우 및 유출 변동 특성을 분석하여 중단기 수문 전망을 실시하였다. 우선 연구대상지역으로 우리나라 전체 유역에 대하여 각 유역 내 24개 지점을 대상으로 하였다. 각 지점 내 1966~2001년까지의 연 단위의 면적평균강우량 및 유출량 관측 자료를 수집하였고 이를 기본 통계 분석을 통하여 지점별 자료의 특성을 분석하였다. 기본 통계 분석으로 자료의 특성을 파악한 후 각 수문요소에 대한 연 시계열 분석을 위하여 연 면적평균강우량 및 유출량 자료에 대하여 경향성 분석 및 탄성도 분석 기법을 이용하여 실시하였다. 경향성 분석으로는 T test 및 Sen test 분석을 실시하였다. 과거 관측 자료 분석을 통하여 얻은 Sen test slope의 결과를 이용하여 가까운 미래인 2013, 2015, 2017, 2020년의 중단기 수문 전망 결과에 대한 권역의 변동 특성을 경향성 분석 기법과 탄성도 분석 기법의 결과를 기반으로 각각의 전망 결과를 산출하였다. 즉 한국 수문변수 중단기 전망 분석을 실시하기 위하여 수문변수-면적평균강우량 및 유출량 성분에 대하여 경향성 분석을 실시하였고 경향성 분석 결과 중 Sen-test slope의 결과를 이용하여 각 수문변수에 대한 중단기 (2013, 2015, 2017, 2020) 전망을 수행하였다.

$$Y = \alpha + \beta X \tag{3.2.38}$$

여기서, α는 과거 수문자료 중 평균값과 가장 유사한 연도의 수문자료, β는 Sen-test slope, X는 해당 관측자료의 연도와 전망년도 간의 연수를 의미한다.

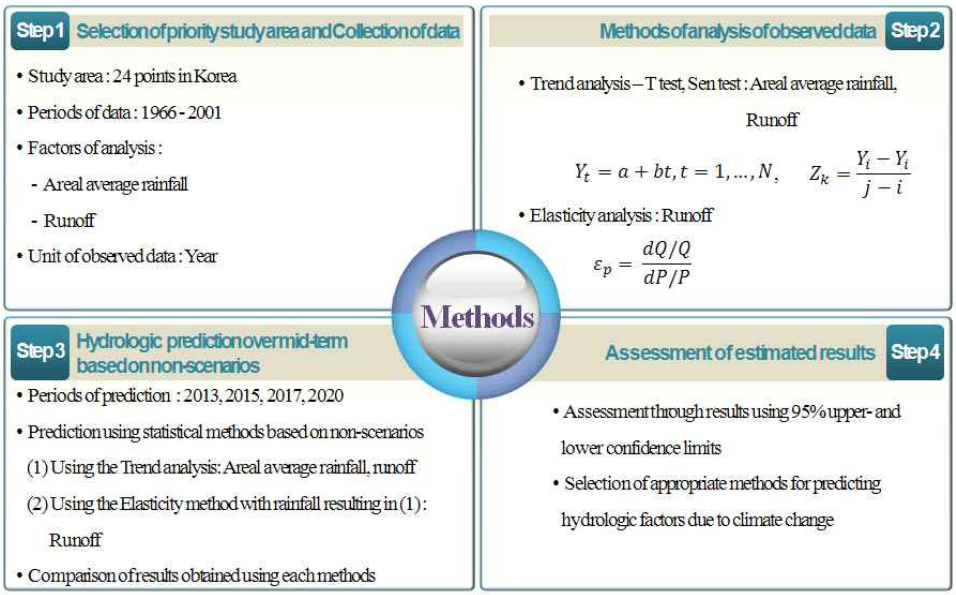


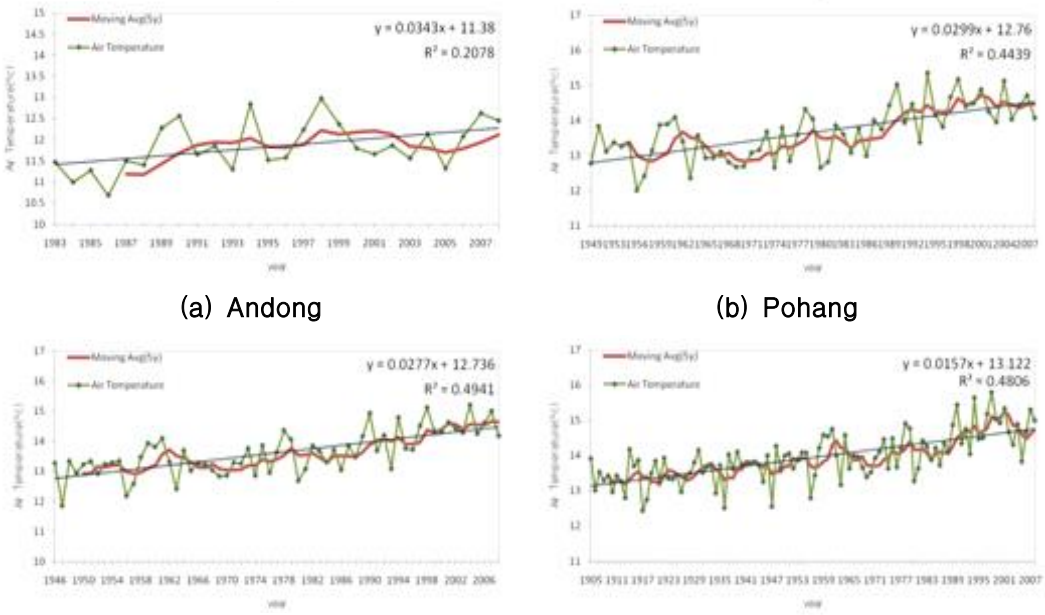
Fig. 3.2.23 Flow chart of this study

다. 연구결과

(1) 경향성 분석에 의한 결과

(가) (기온 경향성 분석) 연 시계열 선형 회귀 분석

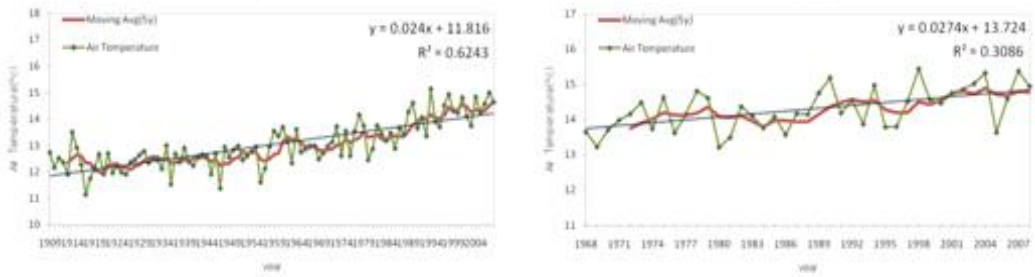
기상관측 개시일로부터 일 평균 기온자료를 취득하여 계절, 연별로 재추출하여 연 시계열 선형회귀 분석 실시하였고 연 시계열 선형회귀 분석의 기울기는 안동 0.0343, 포항 0.0299, 대구 0.024, 포항 0.0277, 부산 0.0157, 통영 0.0274의 결과를 보였다. 전 지점에서 연 평균기온이 증가하고 있었으며 낙동강 유역은 연 평균 약 0.02~0.03℃의 기온증가의 경향을 나타내었다. Fig. 3.2.24는 기온에 대한 경향성 분석 결과를 나타낸 것이다.



(a) Andong (b) Pohang

(d) Ulsan (e) Busan

Fig. 3.2.24 Results of trend analysis of temperature



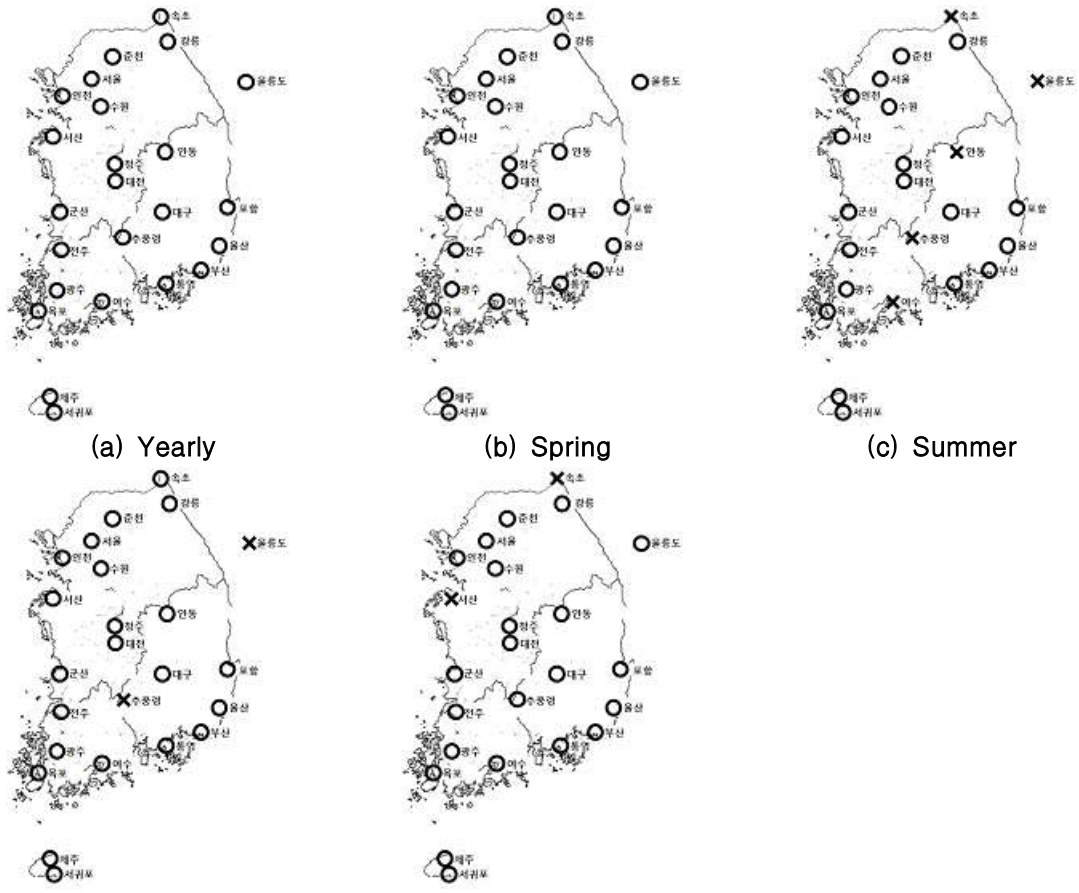
(c) Daegu (f) Tongyoung

Fig. 3.2.24 Results of trend analysis of temperature (계속)

(나) (기온 경향성 분석) Trend 분석- 연, 계절

Trend 분석에 의한 기온의 연 및 계절 분석의 결과 대부분의 지점에서 기온의 증가 경향이 나타내었다.

- ○ 계절별 : 봄 > 겨울 > 가을 > 여름, 특히 겨울, 봄 기온 증가 추세 뚜렷함
- ○ 유역별 : 금강(청주) > 낙동강 (안동) > 한강(수원) > 영산강(광주)순으로 기온증가가 큼
- ○ 지점별 : 수원, 청주, 춘천, 안동, 포항, 청주, 대전, 광주 순으로 크게 분석 특히 내륙지역, 하천 상류의 기온증가 추세가 뚜렷함 → 수환경 영향 메케니즘:



(a) Yearly (b) Spring (c) Summer

(d) Fall (e) Winter

0: 증가 경향성 있음 X: 경향성 없음

Fig. 3.2.25 Results of trend analysis of temperature in year and seasonal

(다) (기온 경향성 분석) Sen-Test Slope 분석- 연, 계절

대부분의 지점에서 기온의 증가 경향이 나타나고 있으며, 겨울>봄>가을>여름 순으로 Sen-Test Slope가 크게 분석 된다.

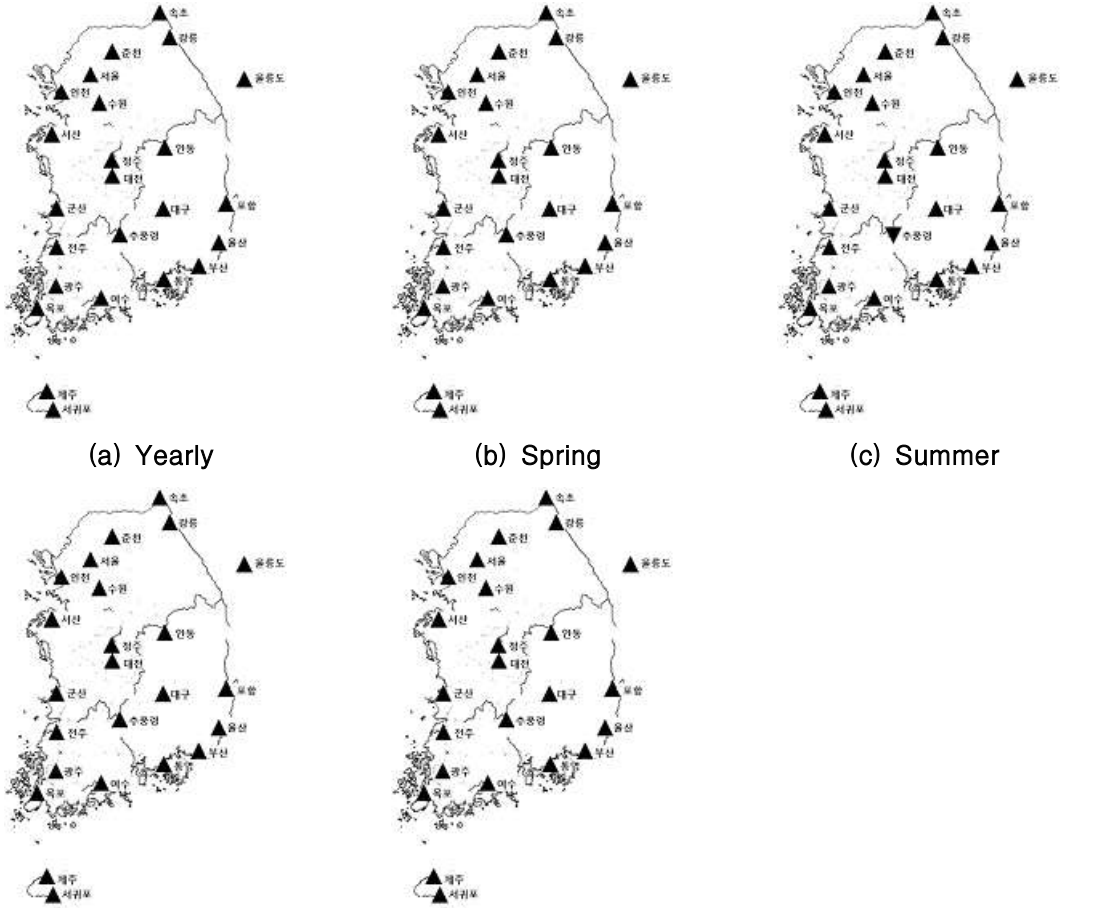
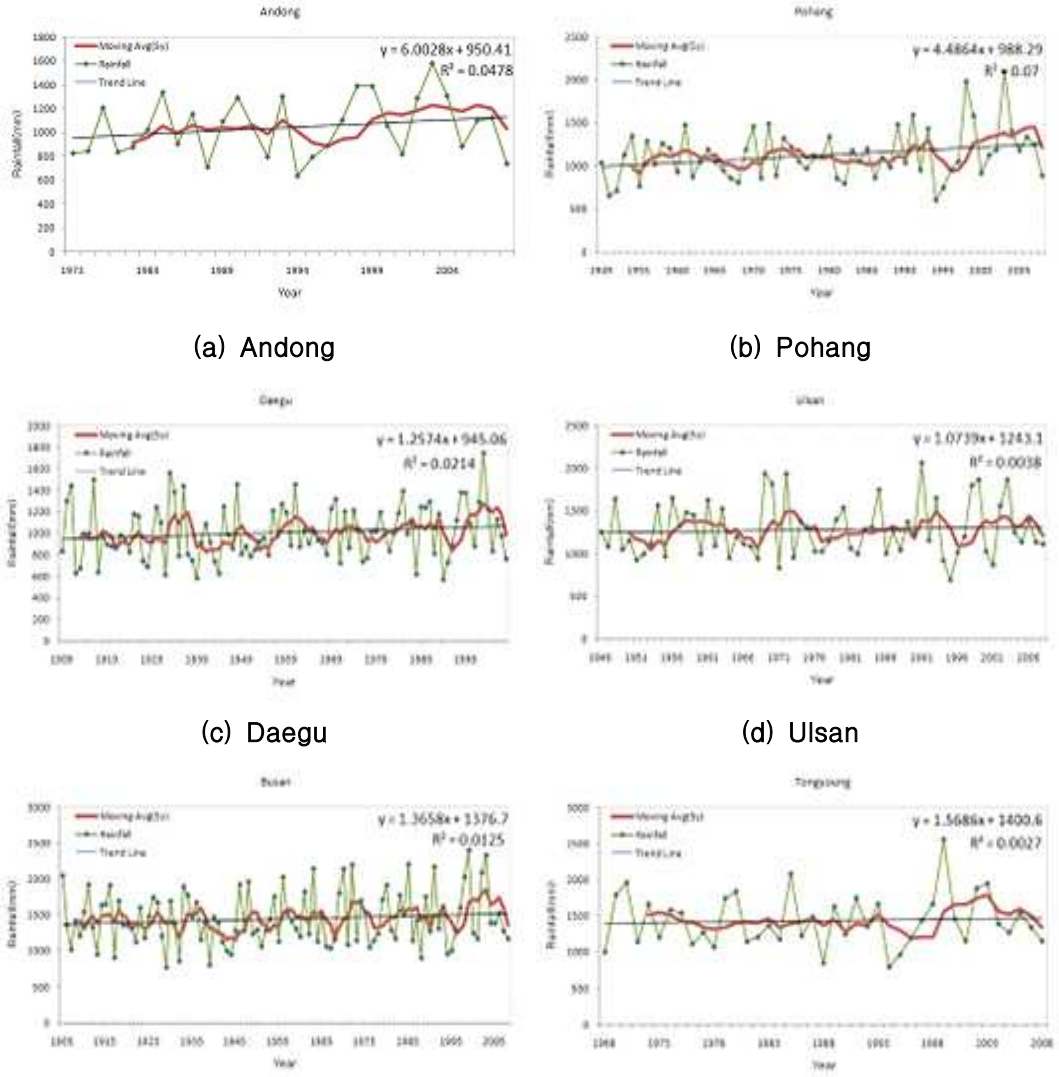


Fig. 3.2.26 Results of sen test analysis of temperature in year and seasonal

(라) (강우 경향성 분석) 연 시계열 선형 회귀 분석

기상관측 개시일로부터 일 강우자료를 취득하여 계절, 연별로 재추출하여 연 시계열 선형회귀분석을 실시하였다. 연 시계열 경향성분석의 기울기는 안동 6.0028, 포항 4.4864, 대구 1.2574, 포항 1.0739, 부산 1.3658, 통영 1.5686 안동 및 포항지점에서 강우의 증가 경향이 뚜렷하였다.



(a) Andong (b) Pohang

(c) Daegu (d) Ulsan

(e) Busan (f) Tongyoung

Fig. 3.2.27 Results of trend analysis of precipitation in year time-series

(마) (강우 경향성 분석) Trend 분석-연, 계절

연 자료 Trend 분석에서 대체로 증가의 경향을 보이나 남부 해안지방에서는 증가의 경향성이 나타나지 않았으며, 중부 내륙 지방에서 강한 강우의 증가 경향을 보인다. 특히, 여름철 통영을 제외한 전 지점에서 강우의 증가 경향을 뚜렷이 나타내고 있다.

- 유역 : 한강 > 영산강 > 낙동강 >금강
- 계절 : 여름 강수증가 추세 뚜렷, 가을, 겨울 약한 강우감소 추세
- 지역(여름) : 영산강 > 낙동강 > 한강 > 금강 순
- 연강우량 증가 추세 특히 동해권 및 서해권 해안 지역 강우 증가 추세 뚜렷

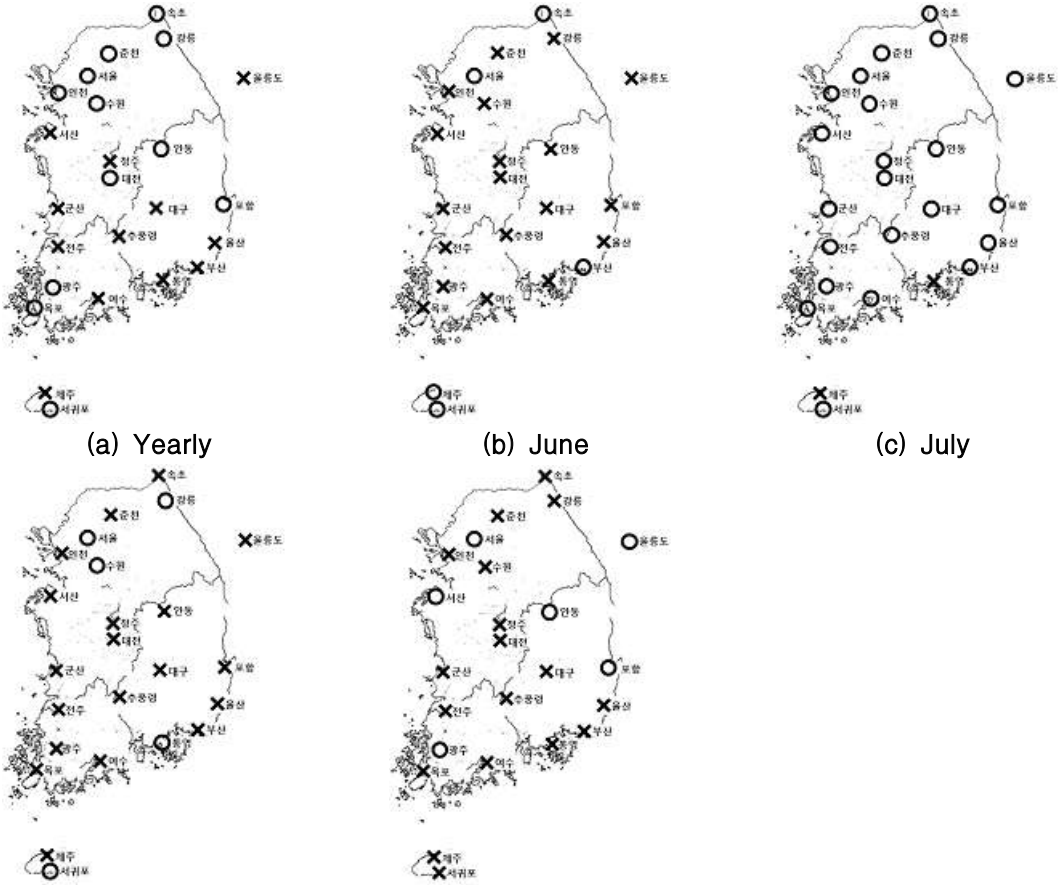


Fig. 3.2.28 Results of trend analysis of precipitation in year and seasonal

(바) (강우 경향성 분석) Sen-Test Slope 분석- 연, 계절

연자료 Sen-Test Slope 분석에서 대부분의 지점에서 기온의 증가 경향이 나타나고 있다. 여름철 전 지점에서 강우가 증가하고 있으며 가을, 겨울은 대부분의 지점에서 강우가 감소하는 경향을 나타내고 있다.

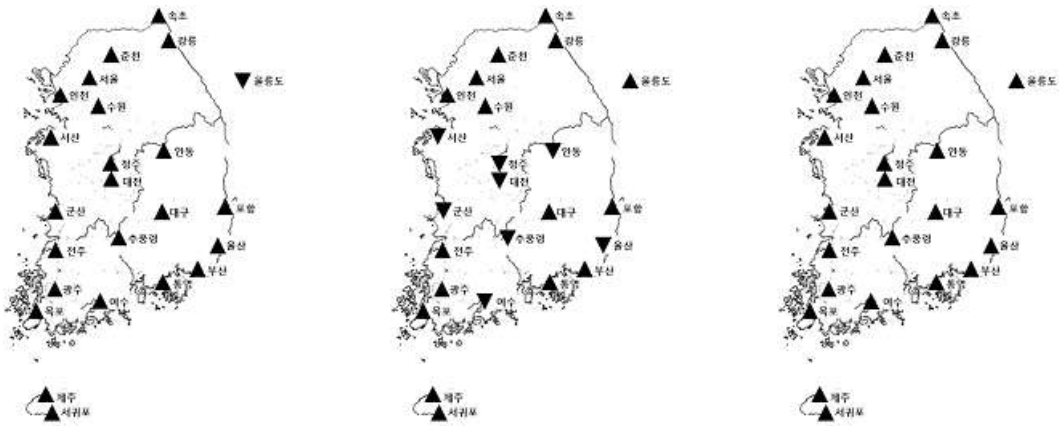
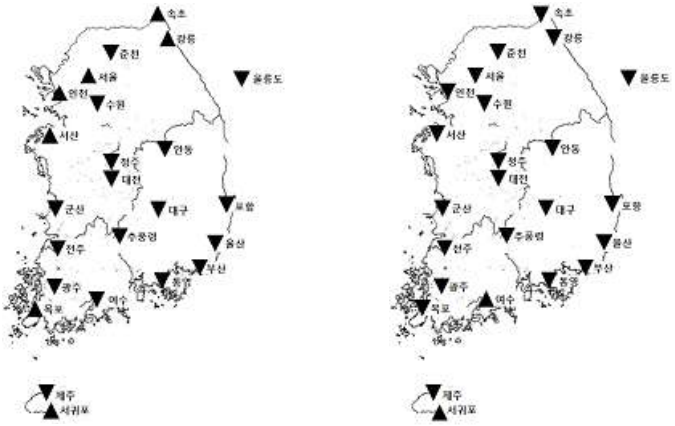


Fig. 3.2.29 Results of sen test slope analysis of precipitation in year time-series

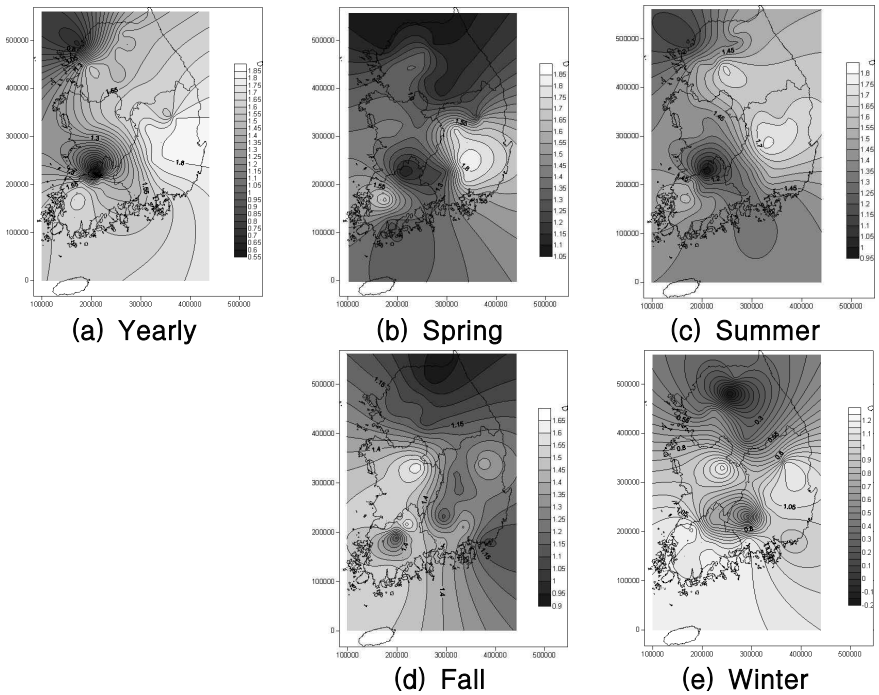


(d) August (e) Semtember

Fig. 3.2.29 Results of sen test slope analysis of precipitation in year time-series (계속)

(2) 탄성도 분석에 의한 결과

유역평균강우량과 장기유출량의 탄성도 분석 결과 연자료에서 전국 평균은 1.546으로 섬진강댐의 최소값 0.461에서 임하댐의 최대값 1.800, 표준편차 0.250의 값을 보이며, 낙동강 유역은 1.666으로 전체 유역에서 가장 높은 탄성도를 보이므로 강우의 증감에 따른 유출량의 변동이 가장 민감한 유역으로 나타났다. 권역별-계절별 탄성도는 한강은 여름에 1.497, 낙동강은 봄에 1.570, 금강은 가을에 1.574, 섬진강은 가을에 1.520, 영산강은 봄에 1.499로 각각 가장 큰 탄성도를 보였고, 한강 유역과 금강 유역의 경우 여름에 높은 탄성도를 보이므로 하절기 홍수와 하천 관리의 중요성이 높은 유역으로 볼 수 있고 낙동강 유역, 섬진강 유역, 영산강 유역은 봄에 높은 탄성도를 보이므로 겨울과 봄의 갈수기의 하천 수질 관리의 중요성이 높은 유역이라고 판단된다.



(a) Yearly (b) Spring (c) Summer

(d) Fall (e) Winter

Fig. 3.2.30 Spatial characteristic of areal average precipitation results: elasticity analysis of long-term runoff

Table 3.2.11 Result of areal average precipitation : elasticity analysis of long-term runoff

지점		YEARLY		SEASONAL							
				SPRING		SUMMER		FALL		WINTER	
		탄성도	등급	탄성도	등급	탄성도	등급	탄성도	등급	탄성도	등급
한강	충주댐	1.638	3	1.129	1	1.635	4	1.245	2	0.322	1
	소양강댐	1.433	1	1.092	1	1.385	2	0.961	1	−0.009	1
	여주수위표	1.460	1	1.180	1	1.701	4	1.046	1	0.456	2
	남한강	1.484	2	1.346	3	1.721	4	1.141	2	0.441	2
	북한강	1.534	2	1.301	2	1.404	2	1.039	1	−0.234	1
	팔당댐	1.515	2	1.354	3	1.496	3	1.120	2	0.518	2
	화천댐유역	1.531	2	1.105	1	1.530	3	0.922	1	0.325	1
	한강대교	1.568	3	1.340	2	1.510	3	1.109	1	0.383	1
	임진강하구	0.670	1	1.072	1	1.088	1	1.160	2	0.353	1
Mean		1.426		1.392		1.527		1.172		0.597	
낙동강	안동댐	1.555	3	1.272	2	1.604	3	1.281	3	0.848	2
	임하댐	1.800	4	1.575	4	1.700	4	1.398	3	1.144	4
	합천댐	1.490	2	1.257	2	1.370	1	1.116	2	0.336	1
	남강댐	1.471	1	1.342	2	1.297	1	1.409	3	1.142	4
	낙동	1.782	4	1.776	4	1.722	4	1.187	2	0.867	2
	왜관	1.759	4	1.756	4	1.768	4	1.181	2	1.020	3
	고령교	1.777	4	1.823	4	1.626	4	1.291	3	0.986	3
	진동	1.685	4	1.764	4	1.541	3	1.416	3	0.958	3
	낙동강하구언	1.676	4	1.565	4	1.386	2	1.082	1	0.887	3
Mean		1.666		1.570		1.557		1.262		0.910	
금강	대청댐	1.573	3	1.323	2	1.433	2	1.645	4	1.191	4
	공주수위표	1.500	2	1.403	3	1.371	1	1.569	4	1.030	3
	규암수위표	1.374	1	1.415	3	1.453	2	1.509	4	0.950	3
Mean		1.482		1.380		1.419		1.574		1.057	
섬진강	섬진강댐	0.461	1	1.088	1	0.909	1	1.483	4	0.770	2
	주암본댐	1.505	2	1.426	3	1.413	2	1.438	3	1.137	4
	섬진강하류	1.403	1	1.196	1	1.183	1	1.640	4	0.758	2
Mean		1.123		1.237		1.168		1.520		0.888	
영산강	광주댐	1.572	3	1.517	3	1.323	1	1.096	1	1.100	3
	나주댐	1.614	3	1.282	2	1.385	2	1.548	4	1.136	4
	장성댐	1.540	3	1.465	3	1.468	3	1.533	4	1.217	4
	나주수위표	1.680	4	1.731	4	1.573	3	1.341	3	1.135	4
Mean		1.601		1.499		1.437		1.380		1.147	
총계	Mean	1.546		1.392		1.527		1.172		0.597	
	S.D.	0.250		0.255		0.180		0.145		0.399	
	SK.	−2.607		0.528		−0.753		0.250		−0.332	

댐 유역평균강우량과 댐 유입량의 전체 연자료의 탄성도는 전국 평균 1.777, 최소 유역은 한강 유역에서 1.587, 최대 유역은 섬진강 유역에서 2.125의 값을 보이며 표준편차는 0.439로 탄성도가 가장 큰 유역인 섬진강 유역을 제외하면 비슷한 탄성도 분포를 나타고 있음을 알 수 있다. 전체 계절자료의 탄성도는 여름 1.585, 가을 1.583, 봄 1.329, 겨울 0.672의 순으로 유역평균강우량과 장기유출량간의 탄성도 분석결과의 계절적 탄성도와 같이 여름에 가장 민감한 것으로 나타났으며 이는 댐유역에서도 기후변화로 인한 여

름의 강수 증가에 따른 유출량의 증가의 민감도가 큰 것을 의미하며 여름의 집중호우시나 홍수기의 댐 운영에 더욱 주의가 필요할 것이다. 권역별-계절별 탄성도는 한강은 여름에 1.506, 낙동강은 여름에 1.509, 금강은 여름에 1.633, 섬진강은 가을에 1.816으로 가장 큰 탄성도를 보이고 있으며 대부분의 권역이 여름에 탄성도 큰 것으로 나타났다. 지점별 탄성도는 봄에는 충주댐의 1.668, 임하댐의 1.954로 큰 탄성도를 보이고, 여름에는 충주댐의 1.661, 임하댐의 2.002, 주암본댐의 2.221로 큰 탄성도를 보인다. 가을에는 충주댐의 1.681, 섬진강댐의 1.790, 주암본댐의 1.842로 탄성도가 크게 나타나고, 겨울에는 임하댐의 1.710으로 탄성도가 크게 나타나며 전체 지점에서는 대청댐, 임하댐, 주암댐 유역의 탄성도가 크게 분석되었다.

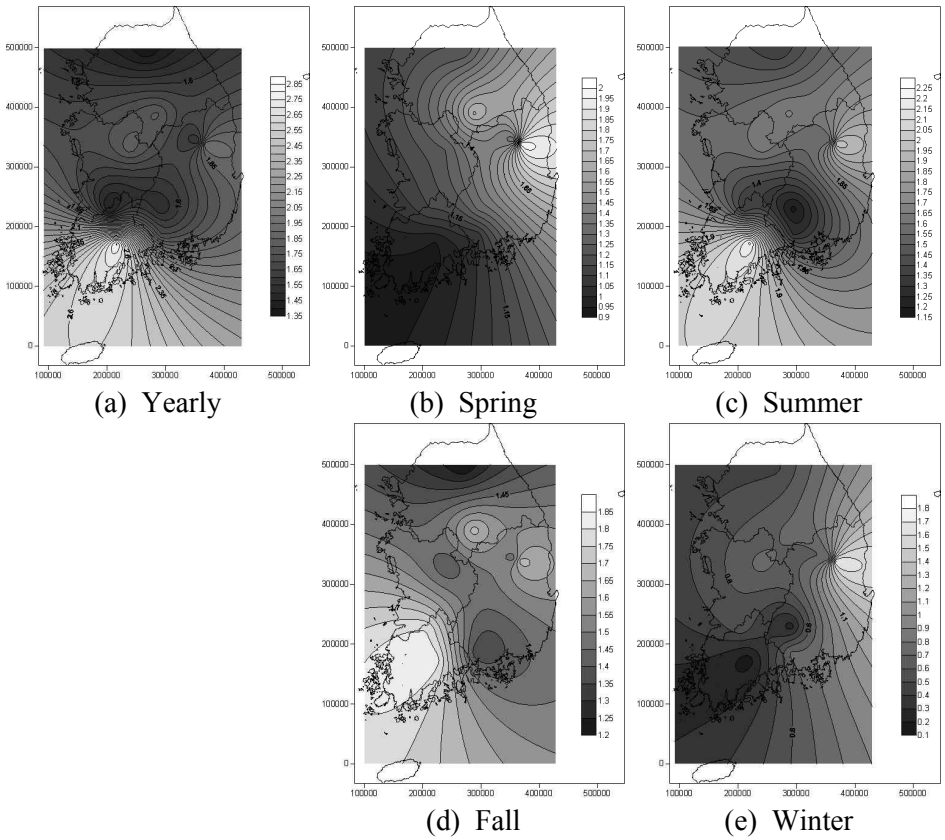


Fig. 3.2.31 Spatial characteristic of areal average precipitation results: elasticity analysis of inflow

Table 3.2.12 Results of areal average precipitation in reservoir: elastisity analysis of inflow

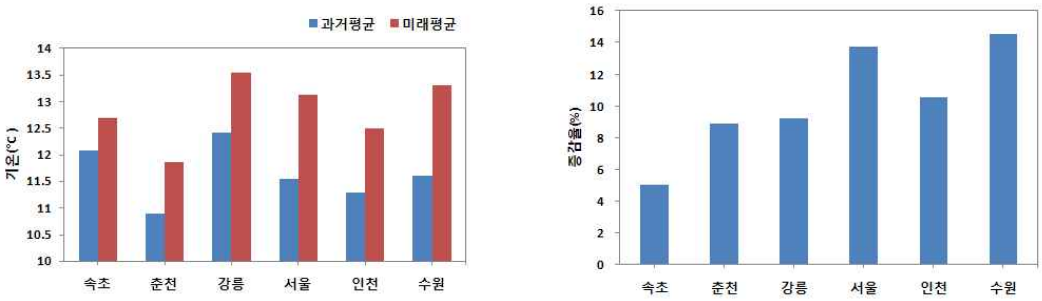
지점		YEARLY		SEASONAL							
				SPRING		SUMMER		FALL		WINTER	
		탄성도	등급	탄성도	등급	탄성도	등급	탄성도	등급	탄성도	등급
한강	충주댐	1.814	3	1.668	4	1.661	3	1.681	3	0.721	3
	소양강댐	1.360	1	1.204	2	1.352	2	1.204	1	0.479	1
Mean		1.587		1.436		1.506		1.442		0.600	
낙동강	안동댐	1.551	2	1.359	4	1.560	2	1.478	3	0.722	3
	임하댐	1.954	4	1.998	4	2.002	4	1.679	3	1.710	4
	합천댐	1.517	1	1.310	3	1.178	1	1.421	2	0.247	1
	남강댐	1.715	3	1.071	1	1.296	1	1.352	1	0.725	4
Mean		1.684		1.435		1.509		1.482		0.851	
금강	대청댐	1.829	4	1.257	3	1.633	3	1.395	2	0.733	4
Mean		1.829		1.257		1.633		1.395		0.733	
섬진강	섬진강댐	1.431	1	1.144	2	1.362	2	1.790	4	0.578	2
	주암본댐	2.820	4	0.947	1	2.221	4	1.842	4	0.135	1
Mean		2.125		1.045		1.792		1.816		0.356	
총계	Mean	1.777		1.329		1.585		1.538		0.672	
	S.D.	0.439		0.322		0.343		0.218		0.448	
	SK.	1.900		1.235		0.860		0.021		1.573	

(3) 비시나리오 기반의 중단기 수문전망 결과

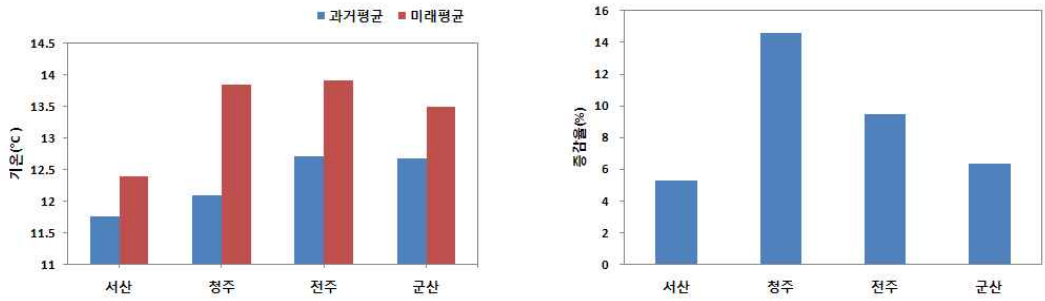
㉠ **(경향성 분석 기반의 중단기 전망: 기온)** 기온의 경우 모든 유역의 지역에서 증가하는 것을 알 수 있으며, 청주에서 가장 높은 증가율을 보이며 제주도에서 가장 낮은 증가율을 보였다. 유역별로는 한강이 가장 높은 증가율을 나타내며 다음으로 금강, 낙동강, 영산강 및 기타 도서지역 순으로 나타났다.

㉡ **(경향성 분석 기반의 중단기 전망: 강우)** 강우의 경우 수원을 제외한 전국의 모든 지역에서 증가를 보였고, 대체적으로 한강권역에서 가장 높은 증가율을 보이며 그 다음으로 영산강 유역이 높은 증가율을 보임을 알 수 있다. 특히 포항과 강릉, 속초에서 높은 증가율을 나타내며 수원은 감소함을 확인하였다. 연최대강수량의 경우 섬지역인 울릉도와 제주도에서 아주 높은 증가율을 보이고, 다음으로 한강, 금강, 낙동강, 영산강 순으로 증가율을 보이며, 부산, 통영, 여수에서는 감소하는 것을 알 수 있다.

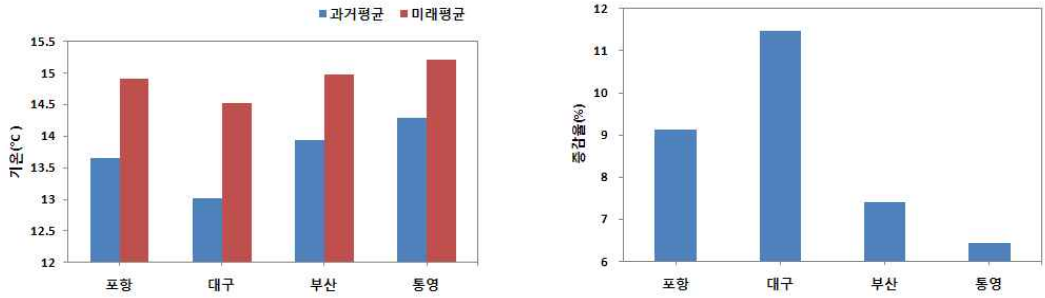
㉢ **(탄성도 분석 기반의 중단기 전망)** 탄성도 분석을 이용한 현재와 미래의 유출량 예측 결과, 모든 분석지점에서의 미래 평균유출량이 현재 평균유출량보다 높은 값을 나타냄을 알 수 있다. 이로써 미래 평균유출량은 증가할 것으로 예측된다. 증가율의 경우, 영산강권역에서 대체적으로 높은 증가율을 보이며, 특히 목포지점에서 가장 큰 증가율 변동을 보이나, 유출량의 실제 변화량은 그리 크지 않다. 이에 반해, 부산 지점의 경우, 현재 평균유출량과 미래 평균유출량 값의 차이가 거의 없어 기후변화에 따른 유출량 영향을 다른 지점에 비해 적게 받음을 예측 할 수 있다.



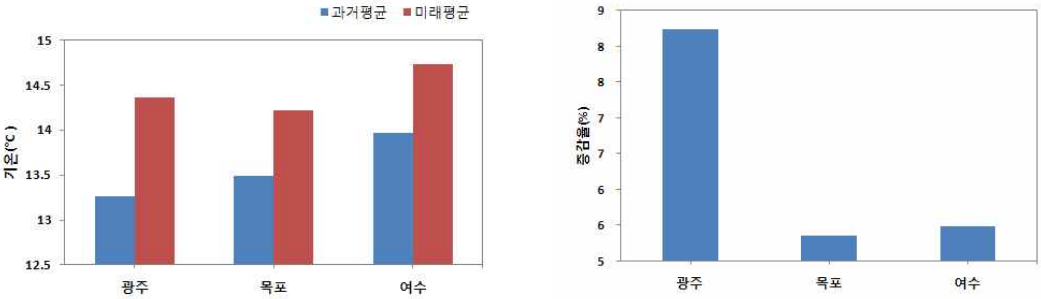
(a) Han River



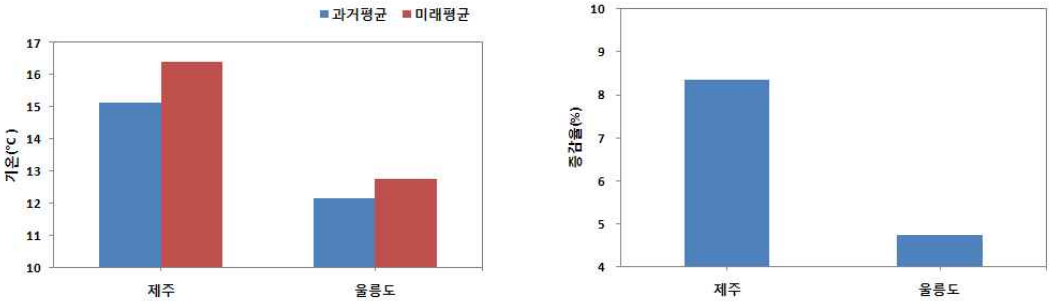
(b) Geum River



(c) Nakdong River

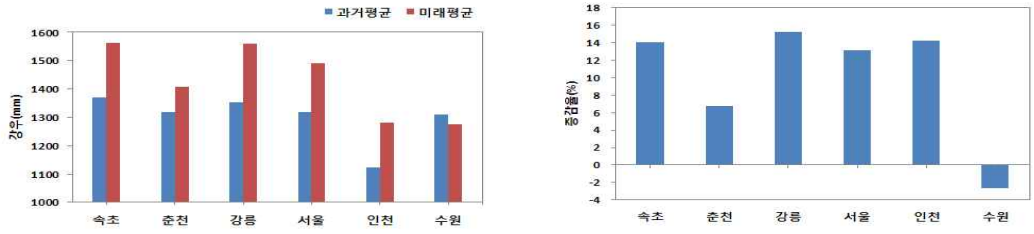


(d) Youngsan River

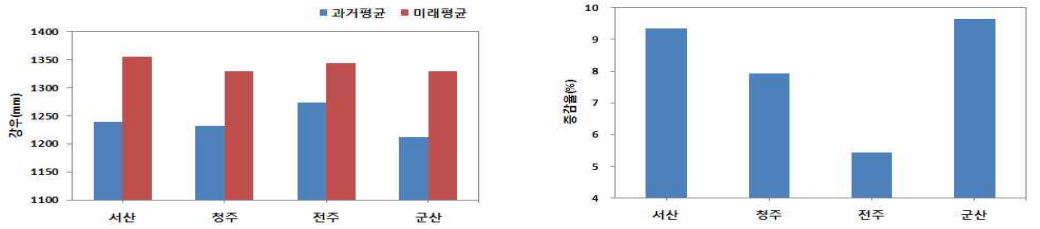


(e) Other sites

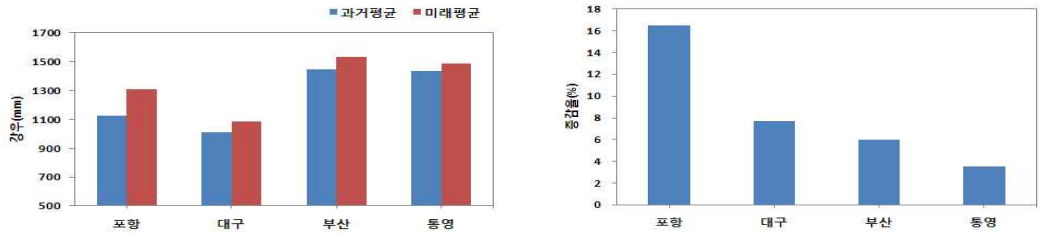
Fig. 3.2.32 Comparison with results of observed data and projection using trend analysis results on temperature



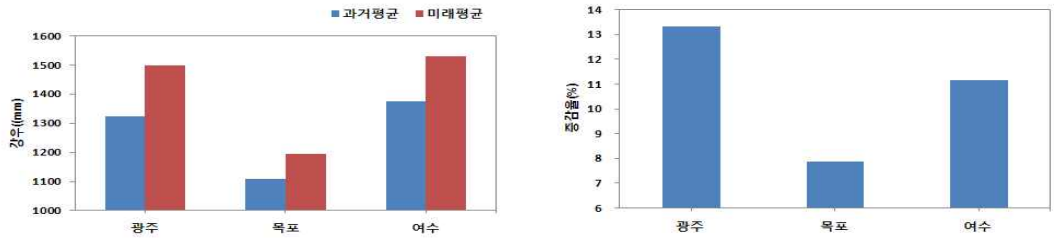
(a) Han River



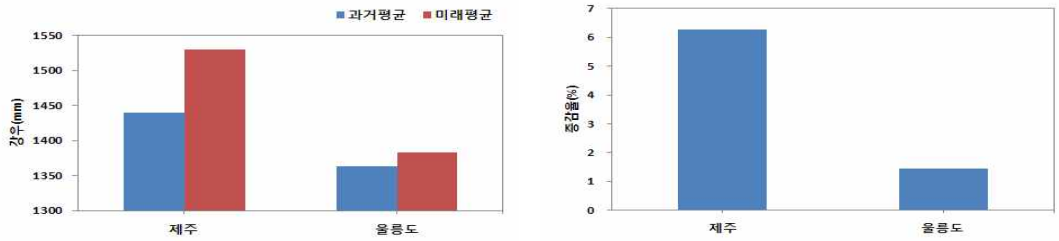
(b) Geum River



(c) Nakdong River

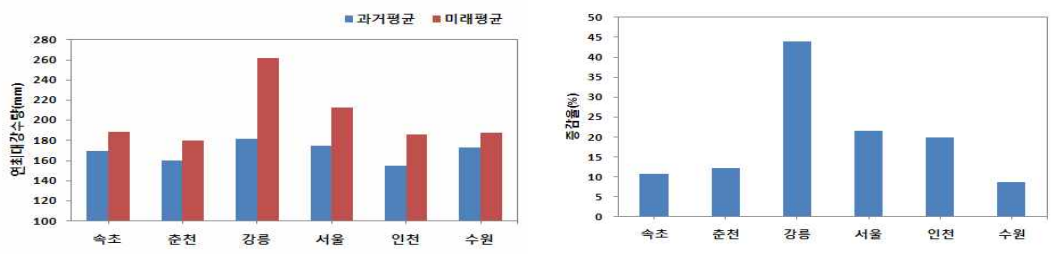


(d) Youngsan River

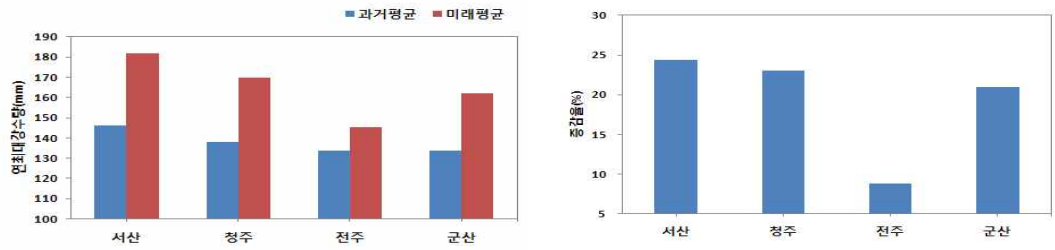


(e) Other sites

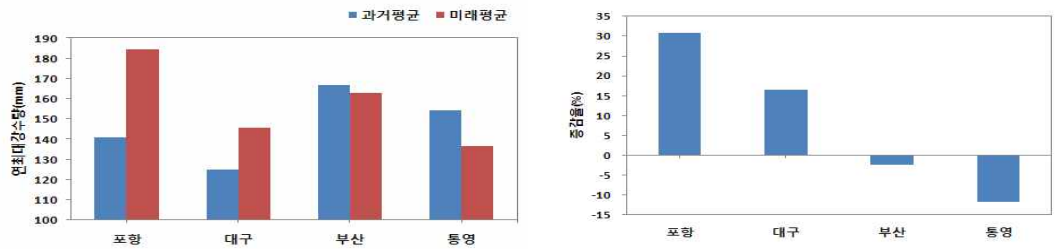
Fig. 3.2.33 Comparison with results of observed data and projection using trend analysis results on precipitation



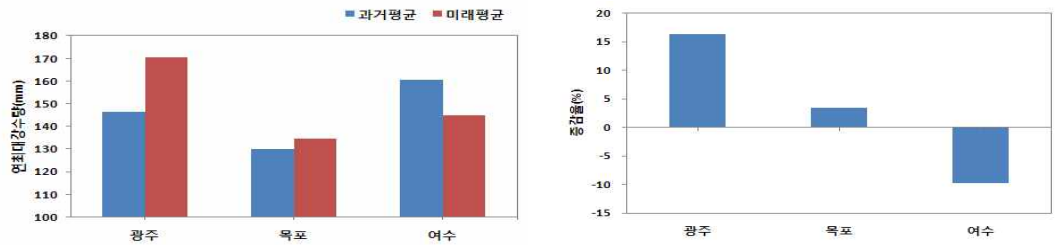
(a) Han River



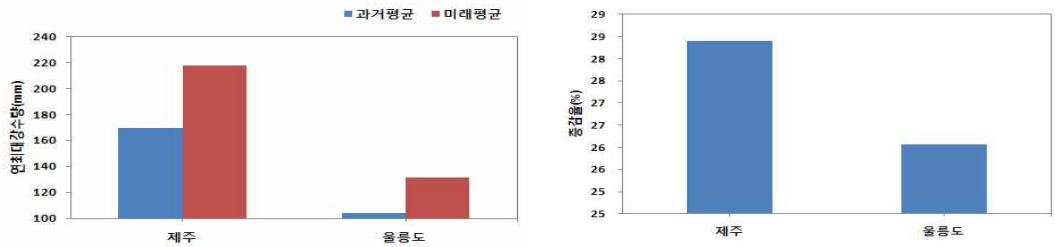
(b) Geum River



(c) Nakdong River

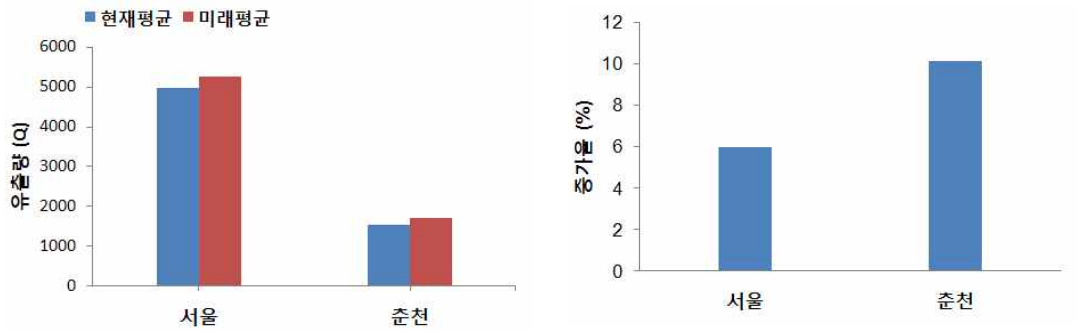


(d) Youngsan River

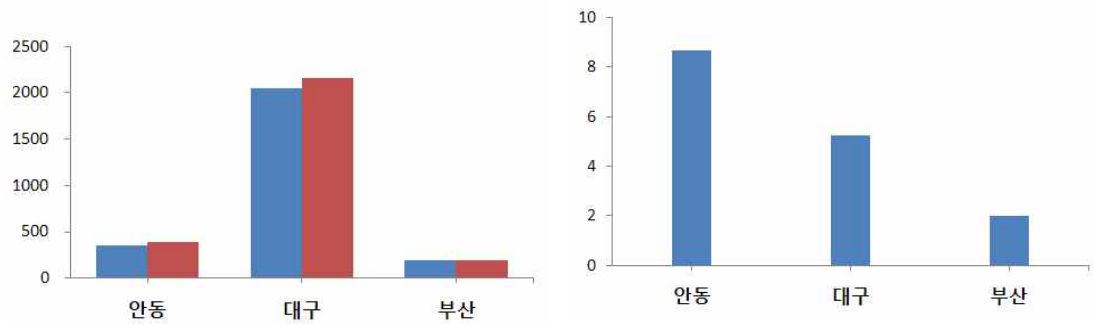


(e) Other sites

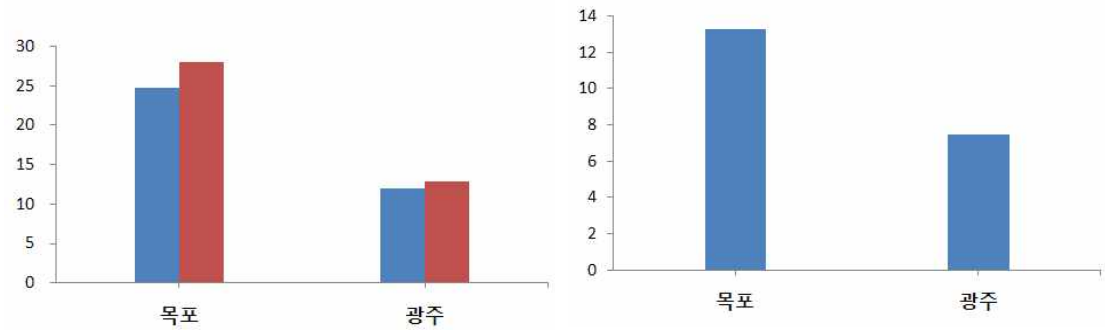
Fig. 3.2.34 Comparison with results of observed data and projection using trend analysis results on annual maximum rainfall



(a) Han River



(b) Nakdong River



(c) Youngsan River

Fig. 3.2.35 Comparison with results of observed data and projection using elasticity analysis results

□ 경향성 분석 및 탄성도 분석 결과를 이용한 중단기 전망 결과의 비교 분석

기본 관측 수문자료를 이용하여 변동성과 경향성에 대한 자료의 특성을 분석하기 위하여여 경향성 분석 및 탄성도 분석 기법을 적용하였다. Table 3.2.13은 경향성 분석 및 탄성도 분석을 이용한 분석 결과이다. 경향성 분석의 경우 소양강댐과 화천댐유역 및 낙동강 유역 내 지점을 제외한 지점에서는 증가 경향을 보인 반면 유출량 분석의 결과 한강 유역 내 남한강, 팔당댐, 한강대교, 낙동강 유역에서는 낙동, 왜관, 교령교, 진동, 금강 유역에서는 공주 및 규암 지점에서 다소 큰 증가 및 감소의 경향을 보였다. 탄성도 분석의 결과를 살펴보면, 0.4~1.7 내의 탄성도 값을 보였다. 이는 강우 증가에 따라 유출 역시 증가하였음을 의미한다.

Table 3.2.13 Results of analysis of observed data using trend and elasticity method

Observed data: 1966-2001	Trend Analysis		Elasticity Analysis
	Areal average rainfall	Runoff	Runoff
Choongju-dam	3.385	-2.356	1.638
Soyang-river-dam	-0.669	-0.94	1.433
Yeoju	3.488	2.673	1.460
Namhan-river	2.552	8.349	1.484
Paldang-dam	0.668	-9.445	1.515
Hwacheon-dam	-0.820	-1.326	1.531
Han-river Bridge	0.561	-7.873	1.568
Andong-dam	7.288	3.514	1.555
Imha-dam	4.029	0.944	1.800
Habcheon-dam	-0.153	1.915	1.490
Nam-river-dam	4.279	4.202	1.471
Nakdong	5.357	15.408	1.782
waegwan	5.106	18.268	1.759
Goryoung bridge	4.673	21.452	1.777
Jindong	5.463	36.37	1.685
Daecheong-dam	3.889	-	-
Gongju	5.08	11.191	1.500
Guam	5.68	13.858	1.374
Seomjin-river	2.142	-1.551	0.461
Jooam-dam	5.349	0.739	1.505
Gwangju-dam	8.012	0.077	1.572
Naju-dam	-0.372	0.099	1.614
Jangsung-dam	-0.313	0.024	1.540
Naju	2.121	4.341	1.680

이러한 경향성 분석 및 탄성도 분석의 결과를 이용하여 비시나리오 기반의 중단기(5~10년) 수문 전망 분석을 실시하여 산정된 결과는 아래의 Table 3.2.14와 Table 3.2.15에 나타내었다.

Table 3.2.14 Results in rate of hydrological factors for mid-term prediction though output of trend analysis, (%)

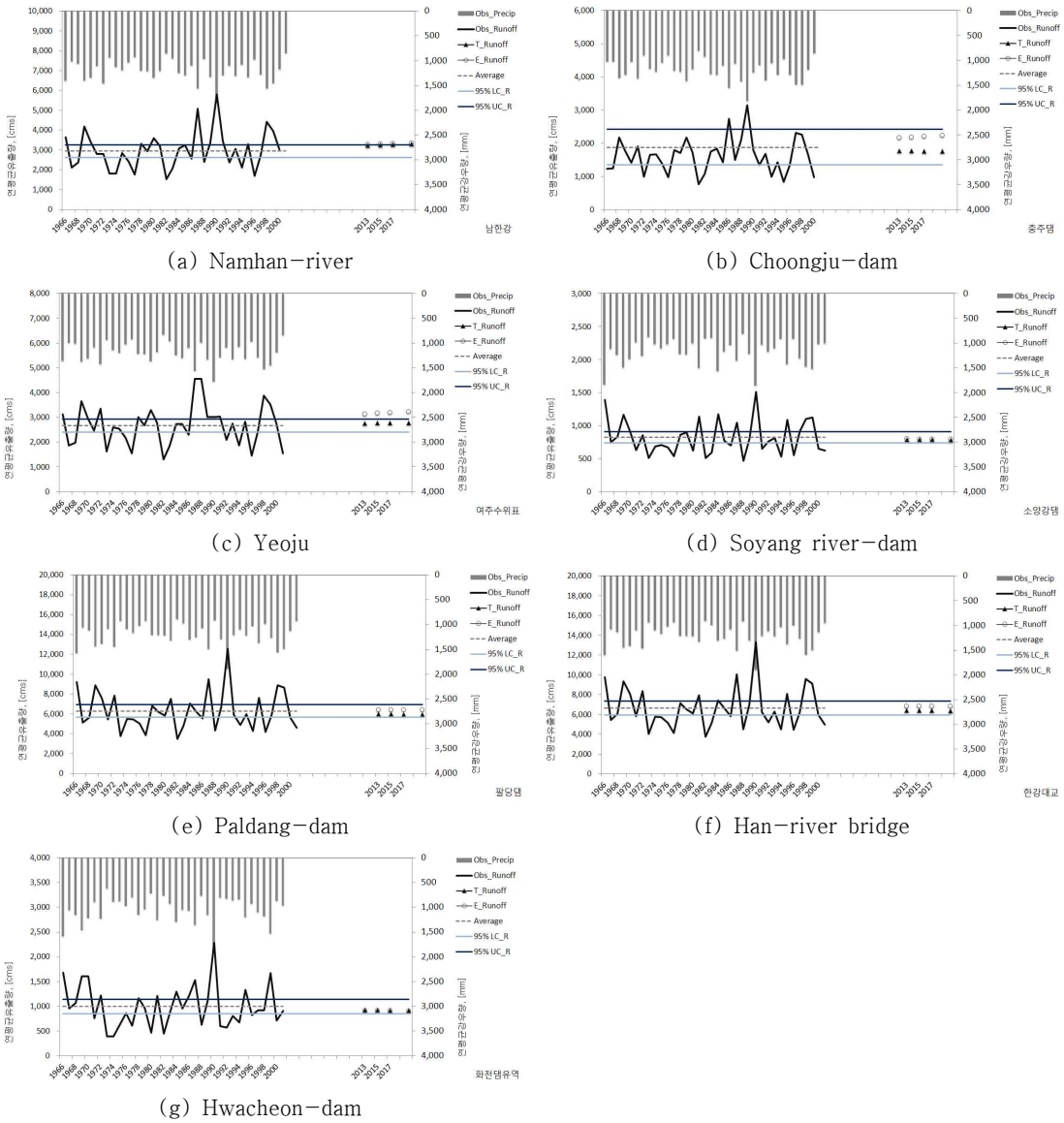
Watershed	Rate of areal average rainfall, (%)				Rate of runoff, (%)			
	2013	2015	2017	2020	2013	2015	2017	2020
Han-river	3.88	4.09	4.31	4.63	-4.85	-5.11	-5.37	-5.75
Nakdong-river	10.99	11.75	12.51	13.65	8.74	9.58	10.43	11.69
Geum-river	13.54	14.34	15.15	16.36	11.64	13.05	14.46	16.57
Sumjin-river	5.60	6.12	6.65	7.43	-13.02	-13.41	-13.80	-14.38
Youngsan-river	4.66	5.01	5.35	5.86	5.19	5.94	6.68	7.80

Table 3.2.15 Results from rate of runoff of mid-term prediction though output of elasticity analysis (%)

Watershed	Rate of runoff, (%)			
	2013	2015	2017	2020
Han-river	5.78	6.14	6.51	7.07
Nakdong-river	23.68	25.46	27.27	30.03
Geum-river	7.91	9.19	10.48	12.43
Sumjin-river	4.71	5.43	6.16	7.27
Youngsan-river	6.63	7.15	7.67	8.45

▫ 중단기 수문전망 결과의 유효성 검증 결과

비시나리오 기반의 수문 중단기 전망 결과에 대하여 신뢰성 및 유의성을 부여하기 위하여 95%의 신뢰도 분석 기법을 적용하여 상한 및 하한계의 범위를 설정하였다. 산정된 결과를 95%의 상한 및 하한의 신뢰도 분석 기법을 통하여 우리나라 5대강 권역에 대하여 권역별로 산정된 결과값은 Fig. 3.2.36~3.2.40에 나타낸 바와 같으며, 이 중 권역별-지점별로 신뢰도 분석 결과를 이용하여 95% 신뢰구간 범위를 벗어나는 지점에 대하여 필터링하여 중단기 수문 전망결과를 중단기별(2013, 2015, 2017, 2020) 유출율(%)을 재산정한 결과는 Table 3.2.16과 같다. 또한 탄성도 분석 기법을 이용한 수문 중단기 전망의 증감율은 Fig. 3.2.41과 같다.



(a) Namhan-river

(b) Choongju-dam

(c) Yeoju

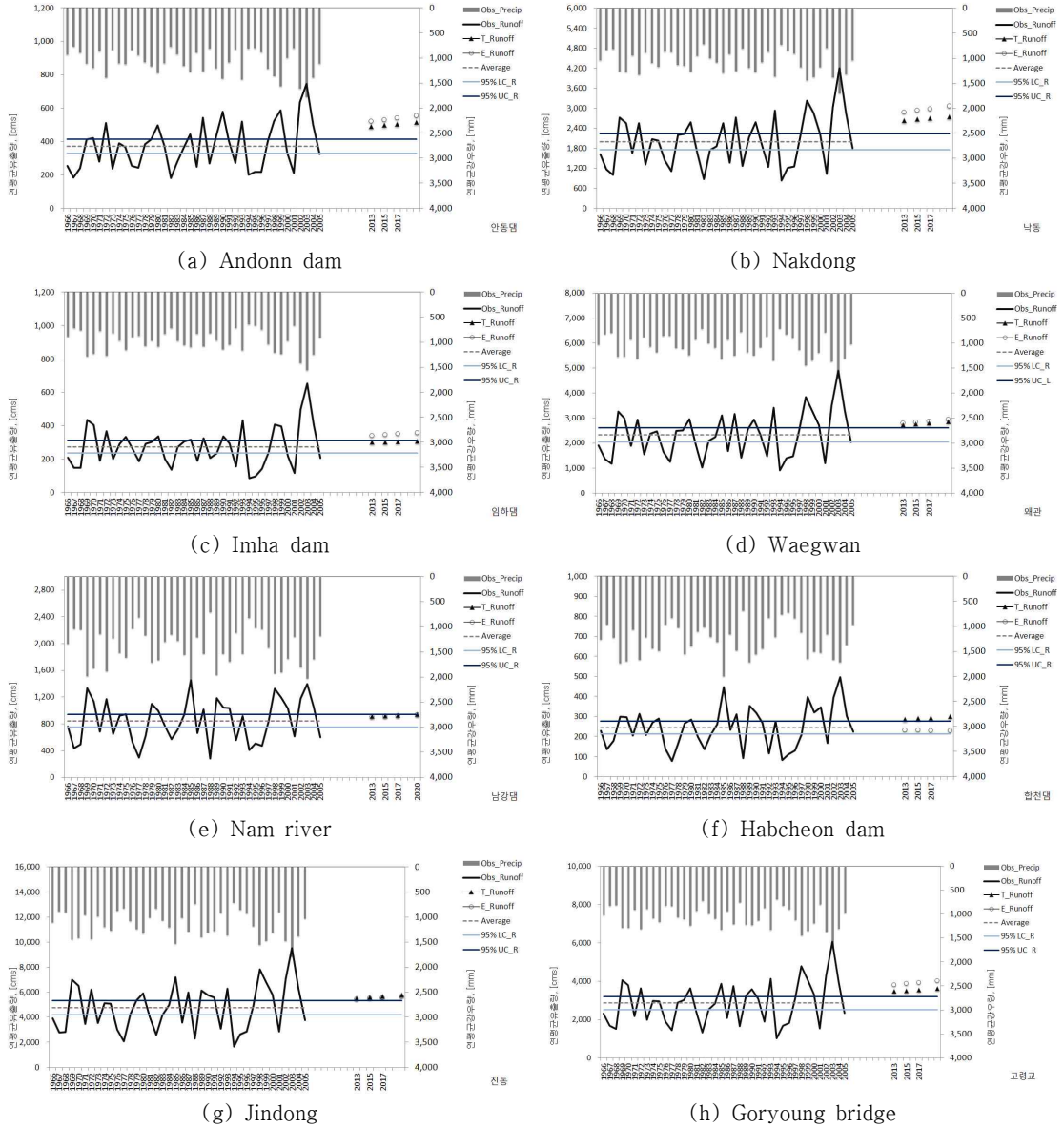
(d) Soyang river-dam

(e) Paldang-dam

(f) Han-river bridge

(g) Hwacheon-dam

Fig. 3.2.36 Resulting in prediction of hydrological factors at each of the sites in Han River



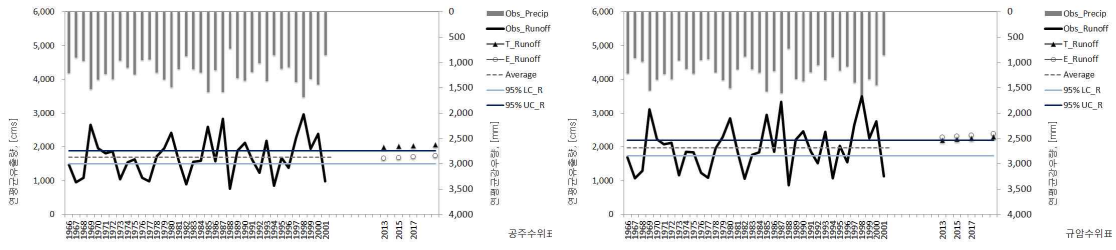
(a) Andonn dam (b) Nakdong

(c) Imha dam (d) Waegwan

(e) Nam river (f) Habcheon dam

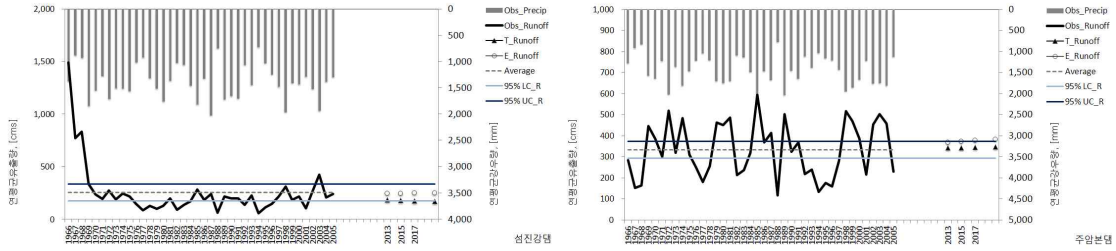
(g) Jindong (h) Goryoung bridge

Fig. 3.2.37 Resulting in prediction of hydrological factors at each of the sites in Nakdong River



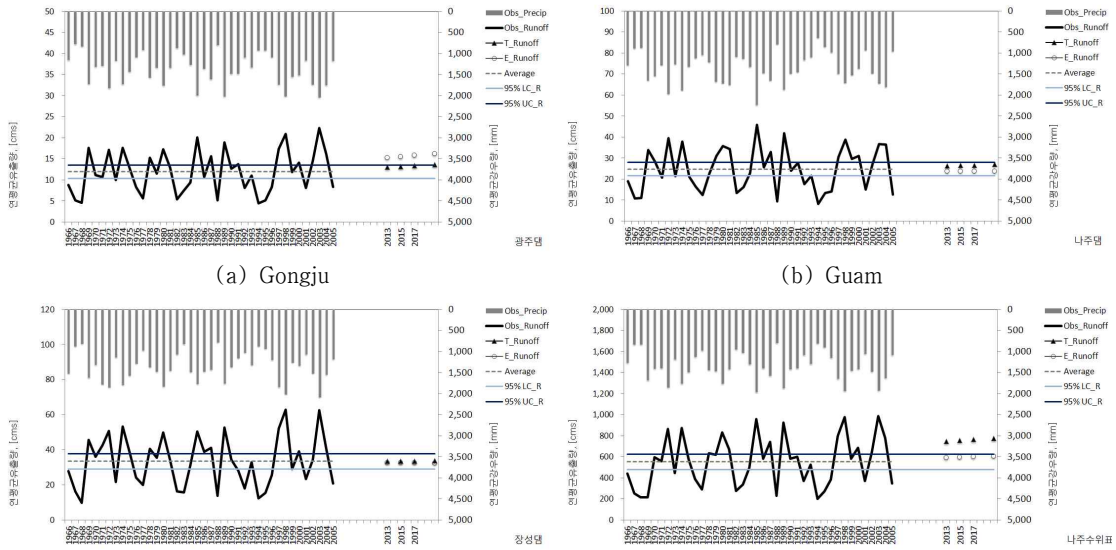
(a) Gongju (b) Guam

Fig. 3.2.38 Resulting in prediction of hydrological factors at each of the sites in Geum River



(a) Sumjin river dam (b) Jooam dam

Fig. 3.2.39 Resulting in prediction of hydrological factors at each of the sites in Sumjin River



(a) Gongju (b) Guam

(c) Imha dam (d) Waegwan

Fig. 3.2.40 Resulting in prediction of hydrological factors at each of the sites in Youngsan River

Table 3.2.16 Results from rate of runoff of mid-term prediction though output of trend analysis and elasticity method, (%)

Watershed	Trend analysis				Elasticity			
	2013	2015	2017	2020	2013	2015	2017	2020
Han-river	-4.85	-5.11	-5.37	-5.75	1.91	2.11	2.31	2.62
Nakdong-river	8.74	9.58	10.43	11.69	0.93	1.38	1.83	2.51
Geum-river	11.64	13.05	14.46	16.57	-2.01	-0.81	0.40	2.24
Sumjin-river	-13.02	-13.41	-13.80	-14.38	3.76	4.42	5.08	6.07
Youngsan-river	5.19	5.94	6.68	7.80	0.19	0.32	0.45	0.65

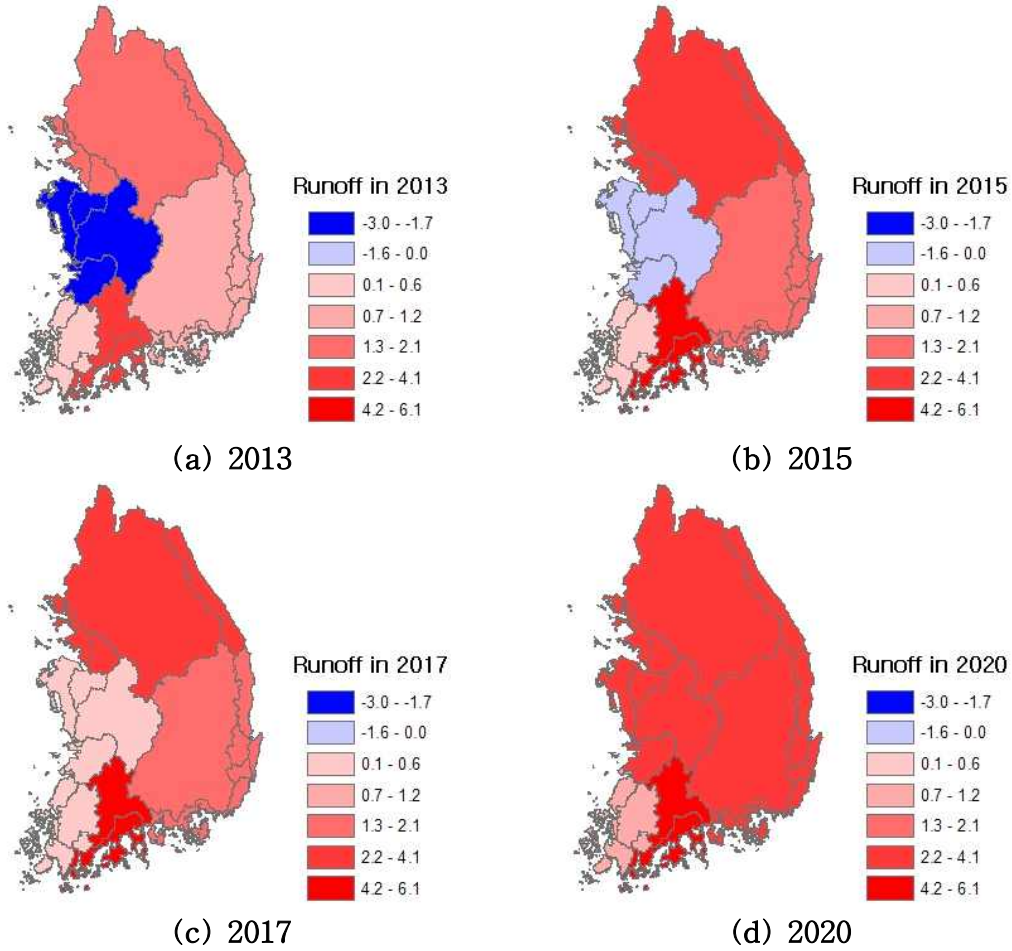


Fig. 3.2.41 Rate of prediction of runoff over mid-term using elasticity method though 95% confidence limit analysis, (%)

라. 결 론

본 연구에서는 기후변화에 따른 과거 수문 자료에 기초한 경향성 분석 연구를 바탕으로 통계적 기법 및 탄성도 기법을 이용하여 기본 수집된 자료를 분석하고 이를 활용하여 경향성 및 탄성도 기법을 각각 적용하여 중단기(2013, 2015, 2017, 2020) 수문전망을 실시하였다. 경향성 분석과 탄성도 기법을 이용한 수문 중단기 전망을 통하여 한강권역 내 미래 유출량을 산출하고 이를 통하여 과거 관측자료와 각 미래 전망 기간에 대한 전망값의 증감율을 비교 · 분석하였다. 본 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 한강유역 내 지점의 수문 시계열 자료의 특성에 대한 분석을 실시하기 위하여 기본 통계분석을 실시하였다. 1966~2001년의 면적평균강우량 자료의 분석의 결과, 연중 최대값과 최소값의 차이가 큰 것은 전형적인 우리나라의 강우 특성을 보여주고 있다. 장기유출량 역시 최대 및 최소값의 편차로 유출 변동이 큼을 알 수 있다.

2) 한강유역 내 연 단위의 강우 및 유출량 자료를 이용한 선형회귀분석을 실시한 결과, 소양강댐과 화천댐유역에서 음의 기울기를 나타내었고 이외의 지역에서는 양의 기울기를 가지는 증가의 경향을 확인할 수 있다. 충주댐에서는 면적평균강우량과 유출량의

기울기를 보아 상당한 증가의 경향을 나타내고 있으며 남한강 지점에서는 연평균유출량의 기울기 역시 상당한 증가의 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

3) Sen test의 면적평균강우량과 유출량의 자료를 이용한 경향성 분석을 실시한 결과, 소양감댐과 화천댐유역은 면적평균강우량 및 유출량의 값이 감소 추세를 보이고 있으며 충주댐, 팔당댐, 한강대교 지점은 면적평균강우량이 증가하고 유출량이 감소하는 추세를 보이고 있음을 알 수 있다. 반면 탄성도 분석 기법을 이용하여 유출량을 분석한 결과, 1.4~1.7 사이의 값을 보이고 있으며 이는 강우 증가 시 유출 역시 증가하는 범위 내의 값을 의미한다.

4) 하지만 이러한 경향성 분석 기법을 적용한 결과에 대하여 국내의 관측 유출량 자료가 양적 및 질적으로 매우 부족한 실정이며 수위 관측소의 관측자료 역시 관측기간에 맞는 수위-유량 관계 곡선이 제대로 제시되지 않아 비현실적인 유출량 값을 제시하는 경우가 많기 때문에 이에 대한 문제점을 고려해볼 필요가 있으며, 최근 기후변화가 많이 반영된 결과로 불확실성이 있음을 고려해야 한다.

5) 위의 경향성 및 탄성도 분석 결과를 이용하여 중단기 (2013, 2015, 2017, 2020) 수문 전망을 실시하였다. 이는 비시나리오를 기반으로 한 수문 전망 결과로써 경향성 분석을 이용하여 면적평균강우량의 미래 전망값을 산정한 결과, 2013년에는 현재(1966~2001)보다 3.88 % 증가, 2015년은 4.09 % 증가, 2017년은 4.31 % 증가, 2020년에는 4.63 %의 강우가 증가될 것으로 전망되었다. 유출 성분에 대한 전망을 경향성 분석 및 탄성도 분석을 이용하여 산정한 중단기 유출량의 증감율의 산정결과를 95 % 신뢰도 분석을 통하여 결과를 재추출하였다. 그 결과 경향성 분석을 통한 수문 중단기 전망의 결과를 살펴보면 시간이 흐를수록 감소하는 경향을 보였고 탄성도 분석 결과를 이용하여 수문 중단기 전망을 실시한 결과를 살펴보면 2013년 1.91 %, 2015년 2.11 %, 2017년 2.31 %, 2020년 2.62 % 증가하는 경향을 보였다. 탄성도 분석 기법을 이용한 수문 전망 결과는 과거 관측 수문자료에 대한 분석 결과의 경향과 상응하며 미래 강우 및 유출량 증가를 예측하는 수문 전망의 기법으로써 경향성 분석 기법을 이용한 전망 보다는 탄성도 분석 기법을 이용한 중단기 수문 전망의 결과가 더 적절하다고 판단된다. 또한 중단기 수문 전망의 신뢰성 있는 기간 선정으로는 결과에 대한 95% 신뢰성 분석의 결과 2013년에서 최대 2017년까지는 그 결과가 유효한 것으로 도출되었다.

6) 기후변화 시나리오 기반으로 생산된 미래 한강유역의 연평균 유출량의 변화는 2020s (2010~2039)에 8~12% 정도 증가할 것으로 전망되는 것으로 나타났다. 비시나리오 기반의 전망결과와 기간이 달라 정확히 비교하기는 힘들지만, 일단 다소 증가하는 경향은 유사하게 나타난다고 할 수 있다.

본 연구는 통계적 분석을 이용하여 과거의 수문 자료에서 기후변화를 분석하고 미래 기후변화를 예측하였으나 분석 요소들 간의 상호 작용을 고려하지는 못하였으므로 향후의 연구에서는 다양한 기상 및 수문 요소들 간의 상관성 분석이 시행되어야 할 것이다.

4. 유역단위 시공간 스케일 상세화

가. 서 론

하천의 유출과 관련된 강우, 토양수분, 증발, 기저유출 등 수문학적 성분은 GCM과 같은 대규모 스케일보다 유역단위 스케일에서 유의한 변동성을 갖는 경우가 많다. 따라서 GCM모의를 바탕으로 신뢰성 있는 수문학적 전망을 수행하기 위해서는 상세화과정을 거쳐 유역단위에서의 변동성분을 재현하고, 일관성을 갖춘 의미 있는 정보들을 추출하기 위한 지역화 과정을 동시에 적절히 수행할 수 있는 기법의 개발이 매우 중요하다.

본 연구에서 개발한 ARDAS(Assembled Regional climate Downscaling Analysis & System)은 기존 인공신경망기법과 Random Cascade 기법을 합성한 새로운 형태의 상세화를 시도한 기법으로 GCM에 대한 격자상세화와 지역화를 동시에 적절히 수행할 수 있는 기법이다. 또한 ARDAS 기법의 소프트웨어 개발로 향후 다양한 모델의 GCM 모의결과와 새로운 기후변화 시나리오가 주어지는 상황에서도 탄력적으로 상세화 앙상블전망을 수행할 수 있는 기반이 만들어진다는데 중요한 의미를 부여 할 수 있으며, 선진국대비 100%의 기술력확보가 이루어진 시도이다.

나. ARDAS(Assembled Regional climate Downscaling Analysis & System) 기법

지금까지 상세화기법에 대한 국내·외 연구성과들은 특정한 단일기법을 적용하는데 그쳤으며, 모의값에 대하여 관측값과의 비교를 통한 신뢰성을 제시하지 못하고 있다. 본 연구에서 개발된 Hybrid Random Cascade 기법인 ARDAS는 전망의 신뢰성을 확보하기 위하여 여러 기법의 장점을 조합한 합성기법이다. 특히 강우의 공간분포에 대한 프랙탈 특성을 이용하여 상세격자단위에서 구현함으로써 강우의 공간적 변동성분을 적절히 재현할 수 있었고 이를 통하여 유역유출이나 하천유출전망의 신뢰도를 개선한 기법이다.

본 기법은 크게 지역상세화와 격자상세화 과정으로 구분할 수 있다. 지역상세화단계는 인공신경망기법을 적용하였으며, 기존의 단일 인공신경망 기법이 아닌 인공신경망 학습 시 계산부하를 줄이기 위한 주성분분석, 과거기간(baseline)과 모의기간(projection)의 강우량 보정을 위한 비정상성분위사상법(Nonstationary qauntile mapping), 태풍모의를 위한 Stochastic Typhoon Simulation기법을 적용한 인공신경망기반의 복합상세화기법을 개발하여 지역상세화 전망결과의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 마지막으로 관측소이격거리를 기본스케일로 하는 격자강우를 생성하고, 통계적 격자상세화기법인 Random Cascade모형을 적용함으로써, 모의결과에 대한 1km×1km의 고해상도 격자강우를 생성하는 합성모형을 개발하였다. 다음 Fig. 3.2.42는 본 연구에서 개발한 ARDAS기법의 순서도이다.

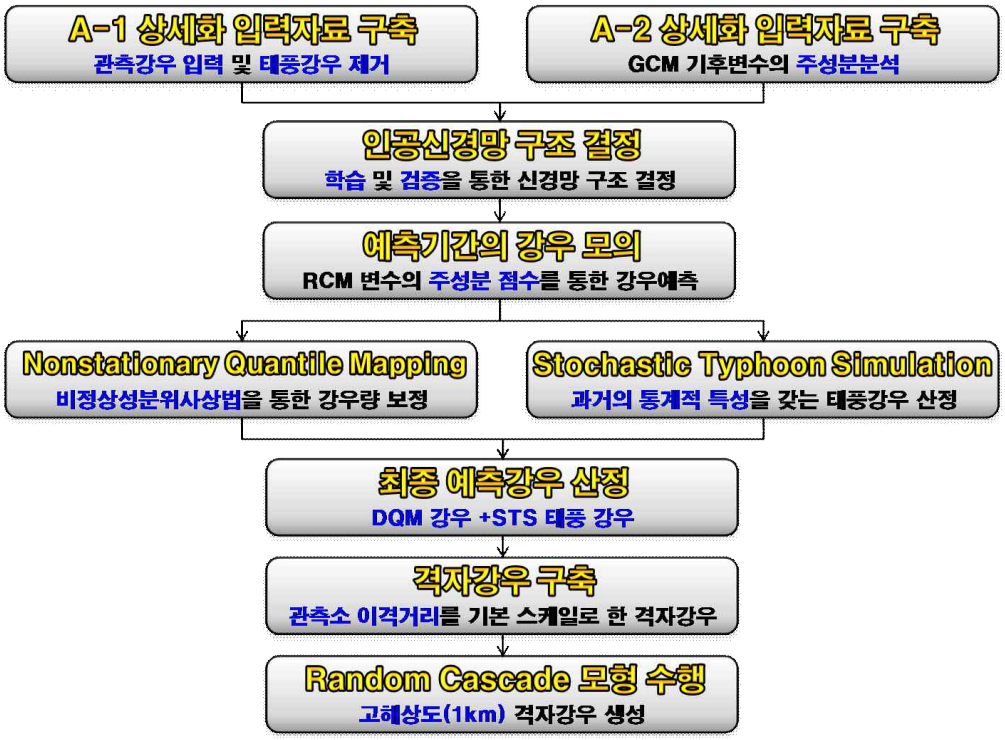


Fig. 3.2.42 ARDAS (Assembled Regional climate Downscaling & Analysis System)

다. 사용자인터페이스 개발

다음 Fig. 3.2.43과 Fig. 3.2.44는 본 연구에서 개발한 ARDAS 소프트웨어 실행화면 및 메인화면이다. Fig. 3.2.45의 경우 본 연구에서 제안한 ARDAS 기법의 전체 흐름도와 같다. 본 프로그램의 입력자료의 형식은 엑셀(.xls) 및 텍스트(.csv)포맷으로 이루어져 있으며, 각 상세화 단계별 입력자료에 대한 Sample파일을 제공하고 있다.

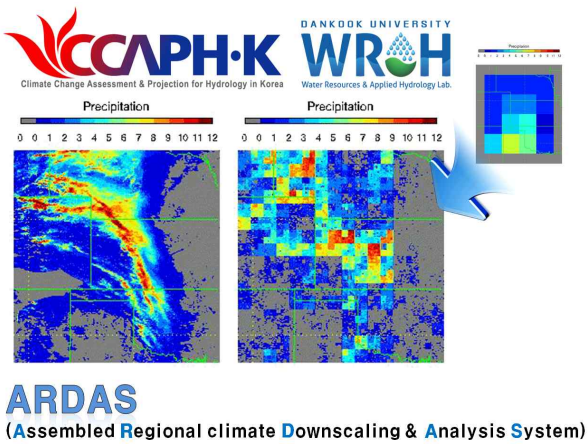


Fig. 3.2.43 ARDAS 소프트웨어 시작화면

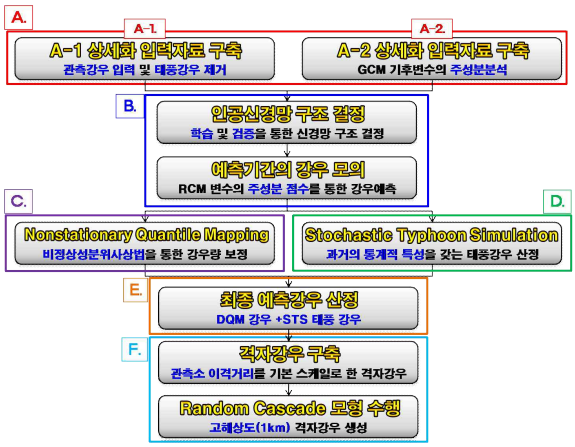


Fig. 3.2.44 ARDAS 소프트웨어 메인화면



Fig. 3.2.45 ARDAS 소프트웨어 메인메뉴 버튼

라. ARDAS의 적용성 평가

(1) 대상유역

본 연구에서는 제시한 ARDAS기법의 검증을 위해 대상유역으로 한강유역을 선정하였다. 한강유역은 한반도 중부지역에 위치해 있으며, 총 유역면적이 23,292km2인 유역이다. 한강유역의 연평균강우량은 1,208mm로 6월과 9월사이에 총 강우의 65%가 발생하는 특징을 가지고 있다. 관측기간이 충분한 10개의 지상관측소를 선정하였고, 지상관측소의 자료는 한국기상청(KMA)에서 제공된 1981년~2000년까지의 일 강우를 수집하였다. 1981년~1995년은 인공신경망 학습을 위한 목표값으로 사용하였고, 1996년~2000년까지는 인공신경망 구조의 검증자료로 사용되었으며, 홍수기강우의 특징을 제고하기 위하여 비홍수기와 홍수기를 구분하였다. 또한, 태풍모의를 위해 한강유역에 영향을 미친 태풍사상을 조사하고, 각 관측소 별 통계적 모수(발생 빈도, 평균/최대/최소 강우량)에 대한 월별 분석을 통해 태풍모의의 매개변수를 산정하였다.

(2) 대상 기후변화시나리오

본 연구에서는 CCCma(Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis)에서 제공되고 있는 CGCM3.1/T63모형을 선정하였으며, CGCM3.1/T63모형은 128×64 가우시안 그리드(경도 2.81°×위도 2.81°)에 63층의 연직층으로 구성되어 수평해상도가 높다.

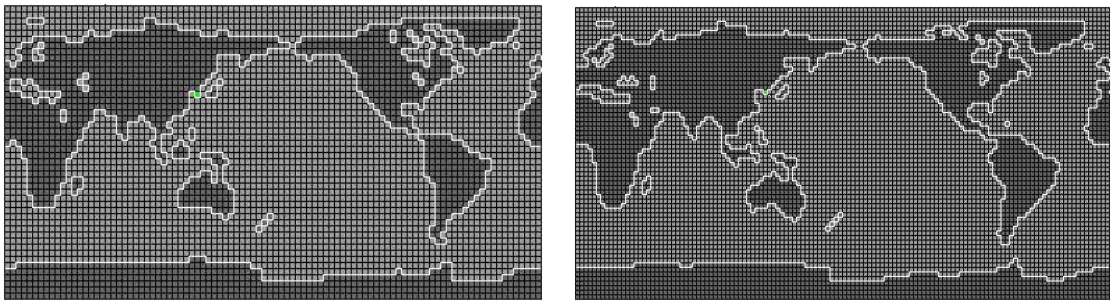


Fig. 3.2.46 CGCM3.1/T47의 격자형태(좌)와 CGCM3.1/T63의 격자형태(우)

인공신경망 학습에 사용되는 CGCM3.1/T63 20C3M시나리오(reference scenario)는 기존의 기후변화시나리오의 모의값과 관측값 사이의 관계를 재분석한 자료로 20C3M 뿐만 아니라 SRES A1B, A2, B1 시나리오에 대하여 가강우를 포함한 총 24개의 기상변수들을 제공하고 있다.

(3) ARDAS 단계별 결과

(가) 주성분분석 결과

본 연구에서 적용한 CGCM3.1/T63 모형의 기상변수들은 총 24개의 다양한 기상변수를 전망자료로 제시하고 있다. 하지만 많은 수의 예측인자를 사용함으로써, 인공신경망을 통한 상세화시 계산부하가 높아지는 단점을 가지고 있다. 이에 따라 총 24개의 다양한 기상변수를 모두 고려하고 예측인자의 계산부하가 높아짐을 막기 위해 주성분분석을 사용하였다.

주성분 분석은 여러 변수사이의 상관관계를 기초로 자료의 손실을 최소화 하면서 하나 또는 몇 개의 종합적 지표로 전체 자료의 변동을 설명하고자 하는 통계분석법으로, 주성분 분석을 통해 구한 새로운 변수의 값을 주성분 점수라고 한다.

홍수기와 비홍수기를 나누어 독립적으로 구성하고 학습 시에 사용된 변수의 특성이 반영되도록 같은 고유벡터 값을 사용하여, 검증기간(1996년~2000년)과 예측기간(2011년~2100년)에 대한 주성분분석을 실시하였다. 주성분 수의 채택에 대한 명확한 기준은 없으나 일반적으로 누적기여율 70~80%이상 또는 고유값이 1이상인 경우의 주성분 수를 채택하고 있다(노형진, 2002). 이에 따라 본 연구에서는 학습, 검증 예측기간에 대하여 대부분 평균 누적기여율이 90%이상 또는 고유값이 1이상인 주성분 수를 채택함으로써 변수의 수를 24개에서 5개로 축소시킬 수 있었다.

Table 3.2.17 주성분 분석에 사용한 고유벡터(Eigenvector)값 (비홍수기)

변 수	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5
evsps	0.076	-0.049	-0.037	0.077	-0.134
hfls	0.076	-0.050	-0.039	0.077	-0.137
hfss	0.023	-0.091	-0.209	0.195	0.123
huss	0.079	-0.044	0.012	-0.023	-0.130
mrro	0.022	-0.059	-0.095	-0.440	0.221
GCM_prec	0.055	-0.056	-0.053	-0.300	-0.060
prsn	-0.056	0.011	-0.169	-0.077	-0.349
ps	0.032	0.181	-0.154	-0.026	-0.007
psl_a2	0.032	0.182	-0.155	-0.026	-0.005
psl_12h	0.032	0.182	-0.156	-0.026	-0.005
psl_6h	0.032	0.182	-0.155	-0.026	-0.006
rlds	0.080	0.000	0.003	-0.064	-0.104
rlus	0.082	0.013	-0.030	0.001	-0.026
rlut	0.066	0.104	-0.004	0.113	0.025
rsds	0.057	-0.113	-0.160	0.046	0.133
rsus	-0.003	-0.145	-0.280	0.017	-0.016
SND(m)	-0.060	-0.051	-0.183	-0.062	-0.302
snr	-0.034	-0.001	-0.104	-0.211	0.523
snw	-0.059	-0.065	-0.182	-0.076	-0.222
tas(℃)	0.080	-0.039	0.045	-0.014	-0.021
tasmax(℃)	0.079	-0.051	0.019	-0.008	-0.013
tasmin(℃)	0.079	-0.022	0.078	-0.027	-0.013
uas(m/s)	-0.023	-0.022	-0.176	0.390	0.260
vas(m/s)	0.070	-0.079	-0.068	0.046	0.068

(나) 인공신경망 구조결정

한강유역의 10개 관측소에 대한 월 누적강우 자료를 인공신경망의 목표값으로 설정하여 관측소 단위로 한 상세화를 실시하였다. 강수와 같이 비선형성이 강한 기상변수는 일 자료에 대한 변화와 강수발생의 빈도를 학습하기에는 다소 무리가 있다. 따라서, 강우는 일 강우량을 월 누적값으로 변환하여 인공신경망을 구성하였다. GCM 강우의 경우 태풍 사상과 같은 극치강우사상을 모의하고 있지 않다는 단점을 고려하여, 여름철 극치강우(태풍)을 제거하고 홍수기와 비홍수기를 분리하여 상세화를 실시함으로써, 홍수기간의 학습성과를 제고 시키고자 하였다. 입력변수는 CGCM3.1/T63모형의 24개의 기후변수에 대한 주성분 점수를 사용하였고, 학습기간은 1981년~1995년, 검증기간은 1996년~2000년으로 구성하여, 관측강우와의 상관계수 및 오차분석을 통해 인공신경망 구조를 결정하였다. 상관계수(CORR; coefficient of correlation)는 스케일 상세화된 값과 관측값이 일치하는 경우 CORR은 1의 값을 가지며 값의 범위는 -1에서 1의 값을 가진다.

$$CORR = \frac{\sum_{t=1}^{T}(F_m^t - \overline{F_m})(O_o^t - \overline{O_o})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{T}(F_m^t - \overline{F_m})^2}\sqrt{\sum_{t=1}^{T}(O_o^t - \overline{O_o})^2}} \quad (3.2.39)$$

여기서, F_m^t 은 시간 t에서의 스케일상세화를 통해 보정된 값, $\overline{F_m^t}$ 은 스케일상세화를 통해 보정된 값의 평균, O_0^t 는 시간 t에서의 관측값, $\overline{O_0^t}$ 는 평균 관측값이다. 또한, 신경망 결과를 통한 보정된 값의 오차분석을 위해서 RMSE(root mean square error)를 사용하였다. RMSE의 범위는 0에서 ∞의 범위를 가진다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{T}(F_m^t - O_0^t)^2}{n}} \quad (3.2.40)$$

여기서, n은 데이터의 개수, F_m^t 은 시간 t에서의 스케일상세화를 통해 보정된 값, O_0^t 는 시간 t에서의 관측값을 나타낸다.

이처럼, CORR과 RMSE의 검증을 통해 결정된 인공신경망의 결과는 Table 3.2.18~3.2.19와 같다. 인공신경망 학습 및 검증결과 관측강우와의 상관계수가 학습의 경우 평균 0.288에서 0.733, 검증기간의 경우 0.370에서 0.669로 크게 향상된 결과를 보였으며, RMSE의 경우 평균 4.019에서 2.802, 검증의 경우 3.767에서 2.998로 상관계수와 마찬가지로 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

Table 3.2.18 인공신경망 학습 결과

관측소	CORR	RMSE
대관령	0.672 (0.216)*	3.137 (4.541)*
서울	0.750 (0.322)*	2.723 (3.967)*
양평	0.738 (0.285)*	3.052 (4.175)*
원주	0.764 (0.290)*	2.573 (3.826)*
이천	0.731 (0.261)*	2.864 (4.182)*
인제	0.754 (0.323)*	2.135 (3.319)*
제천	0.721 (0.255)*	3.158 (4.388)*
춘천	0.737 (0.334)*	2.863 (3.924)*
충주	0.713 (0.275)*	2.724 (3.881)*
홍천	0.752 (0.323)*	2.794 (3.982)*
평균	0.733 (0.288)*	2.802 (4.019)*

Table 3.2.19 인공신경망 검증 결과

관측소	CORR	RMSE
대관령	0.542 (0.330)*	3.920 (4.755)*
서울	0.659 (0.423)*	2.902 (3.571)*
양평	0.734 (0.542)*	2.430 (2.960)*
원주	0.760 (0.436)*	2.402 (3.312)*
이천	0.641 (0.354)*	3.480 (4.264)*
인제	0.714 (0.241)*	2.961 (4.095)*
제천	0.694 (0.452)*	2.480 (3.131)*
춘천	0.677 (0.254)*	3.466 (4.483)*
충주	0.640 (0.360)*	2.575 (3.246)*
홍천	0.631 (0.312)*	3.360 (4.151)*
평균	0.669 (0.370)*	2.998 (3.767)*

* 기존 RCM과 관측강우와의 비교결과

이 때, 대관령의 경우 다른 관측소에 비해 비교적 낮은 상관관계를 보였는데 대관령은 해발고도가 높은 산악지형으로, 지형의 특징 때문에 국지성호우가 빈번히 발생하며 특히 겨울에 눈이 많이 내리는 기후적 특징을 가지고 있다. 또한 GCM 모의값이 다른 관측소에 비해 낮은 상관관계를 보이고 있어 이에 따른 신경망 모의결과 또한 낮은 상관관계를 나타낸 것으로 판단된다.

(다) 인공신경망기반 복합상세화

관측소를 단위로한 다지점 인공신경망을 적용하여 학습 및 검증을 통해 인공신경망구조를 결정하였고, 결정된 인공신경망구조를 통해 CGCM3.1/T63 SRES A1B, A2, B1 시나리오에 대한 2011년부터 2100까지 월 누적강우에 대한 모의를 수행하였다. 또한 신경망의 baseline(1981년~2000년)과 projection(2011년~2100년)의 모의값의 보정을 위한 Nonstationary Quantile Mapping 기법과 제거된 여름철 태풍사상 모의를 위한 Stochastic Typhoon Simulation기법을 적용함으로써, 최종적인 모의값을 재생성하였다. 미래 분석기간을2020s, 2050s, 2080s으로 3개의 구간으로 설정하고, 티센계수를 이용한 한강유역에 대한 평균 강우량에 대하여 연 평균강우량, 홍수기/비홍수기 월 누적강우량, 무강우 일수 및 일 최대강우량에 대한 추세분석을 실시하였다. 또한, A1B 시나리오에 대하여 기후변화 상세화 단계별 모의값 비교를 함으로써, 모형의 신뢰성이 얼마나 향상되는지는 알아보고자 하였다.

Table 3.2.20 기후변화 상세화 단계별 모의값 비교(A1B)

구분	Baseline (Obs.)	Baseline (Sim.)	2020s	2050s	2080s
CGCM (mm)	1342.9	1103.9 (-17.8%)**	1151.4 (4.3%)***	1192.0 (8.0%)***	1261.4 (14.3%)***
ANN (mm)	1223.9*	1023.5 (-16.4%)**	908.0 (-11.3%)***	1038.5 (1.5%)****	1108.6 (8.3%)***
ANN+NSQM (mm)	1223.9*	1220.8 (-0.3%)**	1290.4 (5.7%)***	1439.4 (17.9%)***	1496.8 (22.6%)***
ANN+NSQM+STS (mm)	1342.9	1333.6 (-0.7%)**	1370.9 (2.8%)***	1538.4 (15.4%)***	1602.0 (20.1%)***

* Baseline(Obs.) 태풍사상 제거한 연평균 강우량

** Baseline(Obs.) 대비 Baseline(Sim) 증감율

*** Baseline(Sim.) 대비 Period별 Simulation 증감율

원시 CGCM 가강우량의 경우 Baseline의 관측값(Obs.)와 비교 시 강우량의 차이가 -17.8%(239.0mm)로 상당히 큰 차이를 보이며 과소추정하는 경향을 나타냈으며, 단일 인공신경망 적용시의 경우 -16.4%(200.4mm)로 원시 GCM보다 약간 향상된 결과를 보였으나 여전히 큰 차이를 보였다. 장기시계열의 예측편차를 보정하고 원시 GCM 의 추세를 반영하는 Nonstationary Quantile Mapping 적용한 결과 강우량의 보정을 통해 Baseline(Sim.)과 Baseline(Obs.)의 오차가 -0.3%(3.1mm)로 상당히 향상됨을 확인 할 수 있었다. 마지막으로 Stochastic Typhoon Simulation기법을 통해 모의된 태풍사상을 합산

한 결과 -0.7%(9.3mm)로 Nonstationary Quantile Mapping적용 결과보단 오차가 약간 높아졌으나, 기존 GCM의 -17.8%(239.0mm)보다 크게 향상 된 결과를 보임으로써, 본 연구에서 제시한 상세화기법에 대한 높은 신뢰성을 보였다.

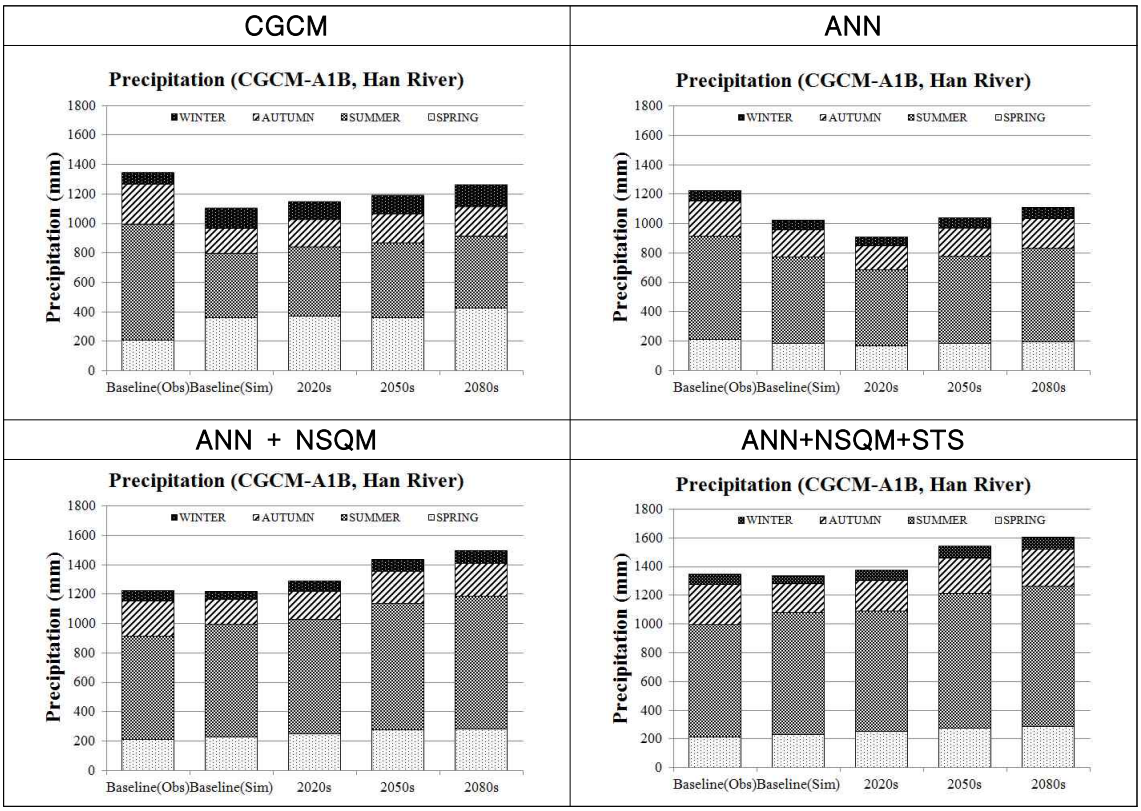


Fig. 3.2.47 기후변화 상세화 단계별 모의값 비교(A1B)

(라) 추세분석

2011년부터 2100년까지 CGCM3.1/T63 SRES A1B, A2, B1 시나리오에 대한 상세화를 실시하여 월누적강우에 대한 예측을 실시하였다. 앞서 말한바와 같이 미래 분석기간을 2020s, 2050s, 2080s로 3개의 구간으로 설정하여 연평균강우량에 대한 추세분석을 실시하였다.

각 구간별 증감율을 살펴보면 A2 시나리오의 경우 2020s에 7.1%, 2050s에 13.9%, 2080s에 27.3%, A1B 시나리오는 2020s에 2.8%, 2050s에 15.4%, 2080s에 20.1%, B1시나리오는 2020s에 1.7%, 2050s에 5.9%, 2080s에 11.0%로 증가하는 것으로 전망되었다. 이 결과는 GCM의 배출시나리오의 온실가스 증가율과 비례하여 A2, A1B, B1 순서대로 큰 증가율을 보임을 확인 할 수 있다.

Table 3.2.21 예측시나리오별 연평균 강우량 추세분석 결과

Precipitation (mm)	Baseline (Obs.)	Baseline (Sim.)	2020s	2050s	2080s
A2 Scenario	1342.9	1333.6 (-0.7%)*	1428.3 (7.1%)**	1519.1 (13.9%)**	1698.0 (27.3%)**
A1B Scenario	1342.9	1333.6 (-0.7%)*	1370.9 (2.8%)**	1538.4 (15.4%)**	1602.0 (20.1%)**
B1 Scenario	1342.9	1333.6 (-0.7%)*	1356.2 (1.7%)**	1412.2 (5.9%)**	1480.0 (11.0%)**

* Baseline(Obs.) 대비 Baseline(Sim.) 증감율

** Baseline(Sim.) 대비 Period별 Simulation 증감율

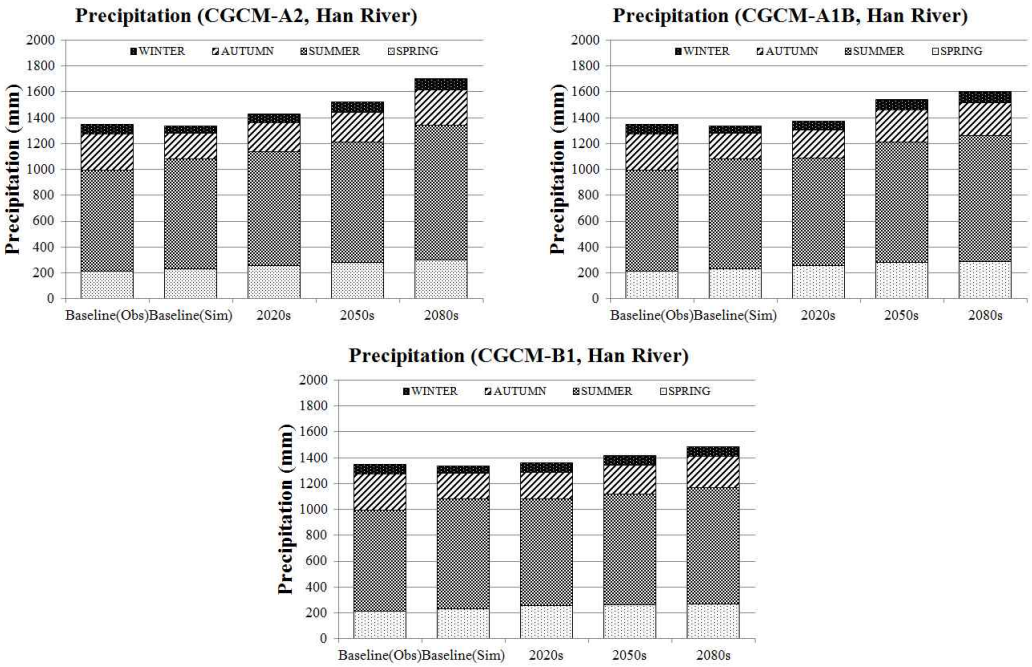


Fig. 3.2.48 예측시나리오별 연평균 강우량 추세분석 결과

① 홍수기/비홍수기 강우량 추세분석

홍수기와 비홍수기 모두 2080s으로 갈수록 증가하는 경향을 보였으며, 연평균강우량 추세분석 결과와 마차가지로 A2시나리오가 가장 큰 변화폭을 보였다. 홍수기기간의 각 구간별 증감율을 살펴보면 A2 시나리오의 경우 2020s에 6.3%, 2050s에 12.3%, 2080s에 27.4%, A1B 시나리오는 2020s에 0.8%, 2050s에 14.0%, 2080s에 19.1%, B1시나리오는 2020s에 -0.7%, 2050s에 4.0%, 2080s에 10.0%로 증가하는 것으로 전망되었다.

비홍수기에서는 A2 시나리오의 경우 2020s에 12.6%, 2050s에 22.0%, 2080s에 30.9%, A1B 시나리오는 2020s에 11.6%, 2050s에 22.8%, 2080s에 29.1%, B1시나리오는 2020s에 11.7%, 2050s에 14.5%, 2080s에 17.1%로 증가하는 것으로 전망되었다.

Table 3.2.22 예측시나리오별 홍수기 강우 추세분석 결과

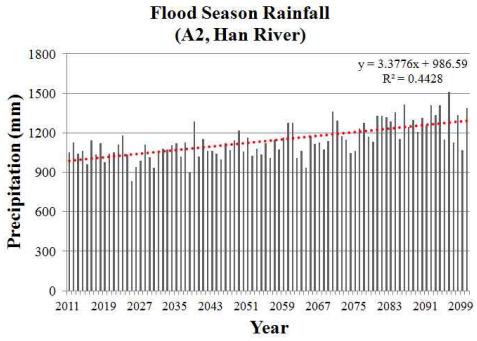
Precipitation (mm)	Baseline (Sim.)	2020s	2050s	2080s
A2 Scenario	988.5	1051.1 (6.3%)*	1110.3 (12.3%)*	1259.5 (27.4%)*
A1B Scenario	988.5	996.7 (0.8%)*	1127.1 (14.0%)*	1177.4 (19.1%)*
B1 Scenario	988.5	981.9 (-0.7%)*	1028.5 (4.0%)*	1087.6 (10.0%)*

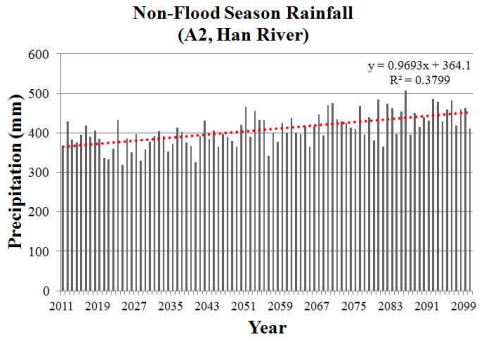
* Baseline(sim) 대비 구간별 증감율

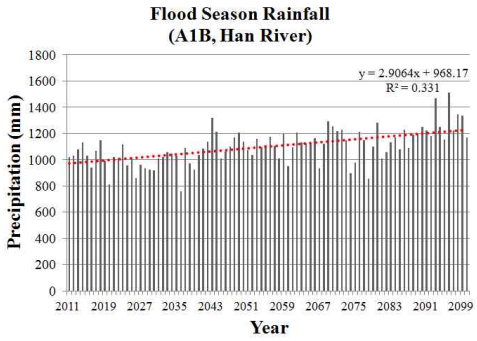
Table 3.2.23 예측시나리오별 비홍수기 강우 추세분석 결과

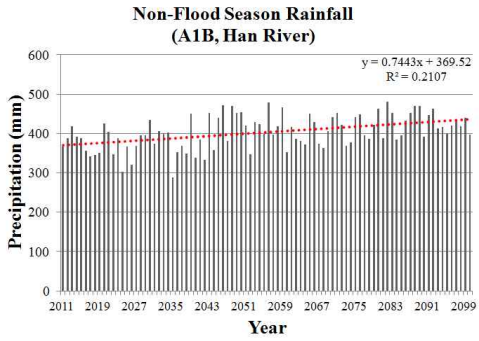
Precipitation (mm)	Baseline (Sim.)	2020s	2050s	2080s
A2 Scenario	335.1	377.2 (12.6%)*	408.9 (22.0%)*	438.5 (30.9%)*
A1B Scenario	335.1	374.1 (11.6%)*	411.4 (22.8%)*	424.7 (29.1%)*
B1 Scenario	335.1	374.3 (11.7%)*	383.7 (14.5%)*	392.4 (17.1%)*

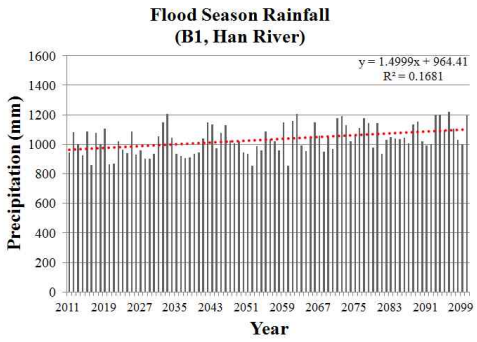
* Baseline(sim) 대비 구간별 증감율











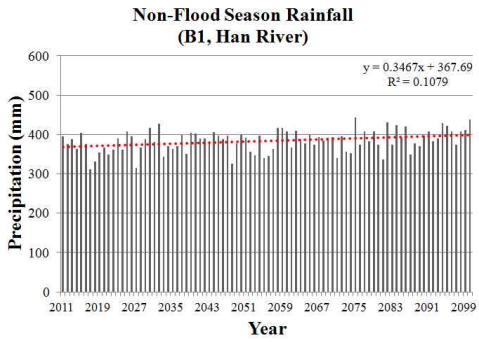


Fig. 3.2.49 예측시나리오별 홍수기 강우 추세분석 결과

Fig. 3.2.50 예측시나리오별 비홍수기 강우 추세분석 결과

② 무강우 일수 및 일 최대강우량 추세분석

CGCM 3.1/T63 모형의 경우 일자료의 확보가 가능하다는 점을 이용하여 GCM의 일 강우(P_{GCMday})에 월누적강우에 대한 모의 후 월누적강우의 비($P_{ANNmonth}/P_{GCMmonth}$)를 이용하여 보정하였다.

$$P'_{GCMday} = P_{GCMday} \times \frac{P_{ANNmonth}}{P_{GCMmonth}} \tag{3.2.41}$$

보정한 일 강우를 통하여 무강우 일수 및 일 최대강우량에 대한 추세분석을 실시하였다. 추세분석 결과 모든 시나리오에서 2080s로 갈수록 무강우 일수는 줄어드는 경향을 보였으며일 최대강우량의 경우 예측시나리오마다 다른 추세를 보였다. 연평균 강우량 추세분석 결과와 마찬가지로 일 최대강우량의 경우 A2시나리오가 가장 큰 변화폭을 보였으나, 무강우 일수의 경우 다른 추세분석결과와는 다르게 A1B시나리오가 가장 큰 변화

폭을 보였다.

무강우 일수에 대한 각 구간별 증감율을 살펴보면 A2 시나리오의 경우 2020s에 -5.1%, 2050s에 -5.1%, 2080s에 -8.6%, A1B 시나리오는 2020s에 -4.6%, 2050s에 -9.1%, 2080s에 -11.2%, B1시나리오는 2020s에 -5.1%, 2050s에 -5.6%, 2080s에 -7.6%로 감소하는 것으로 전망되었고, 일 최대강우량대해서 A2 시나리오는 2020s에 13.6%, 2050s에 24.5%, 2080s에 37.7%, A1B 시나리오는 2020s에 7.4%, 2050s에 5.8%, 2080s에 14.5%, B1시나리오는 2020s에 12.6%, 2050s에 10.0%, 2080s에 2.8%로 전망되었다.

Table 3.2.24 예측시나리오별 무강우 일수 추세분석 결과

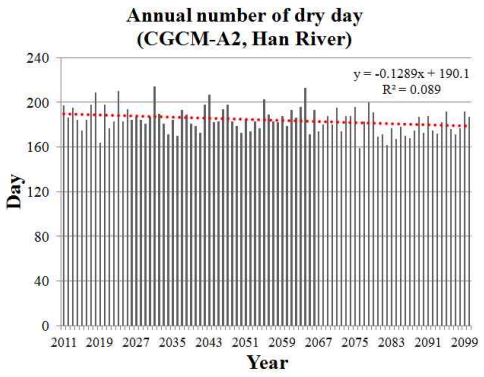
Precipitation (mm)	Baseline (Sim)	2020s	2050s	2080s
A2 Scenario	197	187 (-5.1%)*	187 (-5.1%)*	180 (-8.6%)*
A1B Scenario	197	188 (-4.6%)*	179 (-9.1%)*	175 (-11.2%)*
B1 Scenario	197	187 (-5.1%)*	186 (-5.6%)*	182 (-7.6%)*

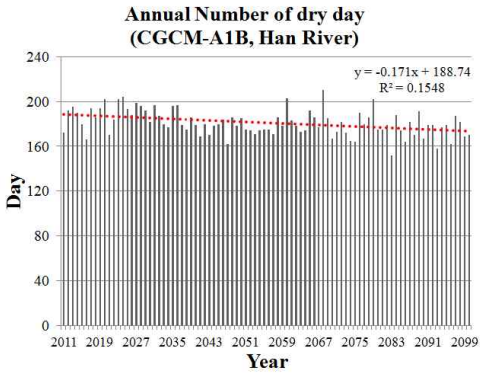
* Baseline(sim) 대비 구간별 증감율

Table 3.2.25 예측시나리오별 일 최대강우량 추세분석 결과

Precipitation (mm)	Baseline (Sim)	2020s	2050s	2080s
A2 Scenario	122.6	139.2 (13.6%)*	152.6 (24.5%)*	168.9 (37.7%)*
A1B Scenario	122.6	131.7 (7.4%)*	129.7 (5.8%)*	140.4 (14.5%)*
B1 Scenario	122.6	138.0 (12.6%)*	134.9 (10.0%)*	126.1 (2.8%)*

* Baseline(sim) 대비 구간별 증감율





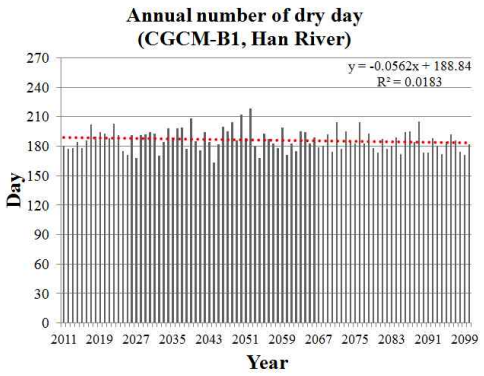
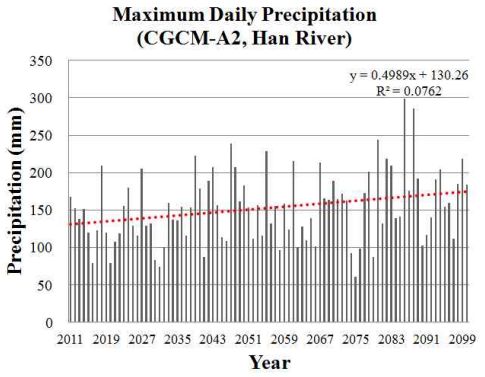
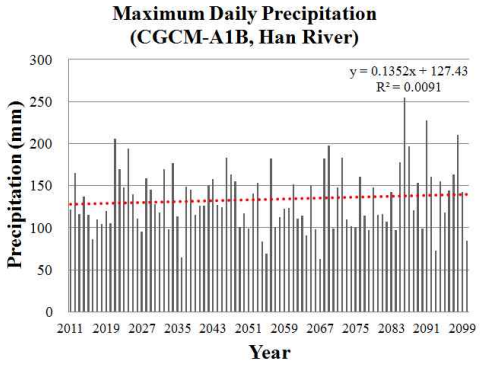


Fig. 3.2.51 예측시나리오별
무강우 일수 추세분석 결과





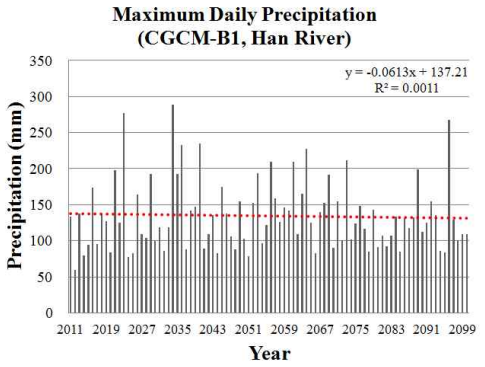


Fig. 3.2.52 예측시나리오별
일 최대강우량 추세분석 결과

(마) Random Cascade 모형 적용

본 연구에서 이용하고자 하는 Random Cascade 모형의 경우 패턴스케일링의 일종으로 모든 스케일에서의 시공간적 강수와 관측강수의 자기유사 거동등을 모의할 수 있고 스케일링 특성을 이용하여 매개변수의 수를 줄임으로서 계산효율이 높은 모형을 구성할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만, Kang and Ramirez(2001)는 대규모 스케일로 스케일을 확장하면서 특정한 스케일에 이르면 강우발생기후에 영향을 주는 외부강제력의 효과로 인하여 자기유사성이 깨어지게 됨을 밝힌바 있다. 즉 대규모 강우장에서는 변동성이 주로 대규모 기후 강제력에 크게 좌우됨을 나타낸다. 또한 미중부대륙의 경우 소규모 스케일에서 대규모스케일로의 전이는 32 km를 전후해서 이루어진다는 것을 통계적으로 밝혀내었으며 이때의 스케일을 상관스케일(correlation scale)이라 한다. 이에 따라 32km×32km 아래의 격자강우를 산정할 필요가 있다고 판단하였으며 Random Cascade기

법은 구현된 강수형상에 있어서 불연속적인 격자형상을 갖거나 시간분해모델링에 있어서 시공간적 상관성 구현이 다소 불완전하다는 단점이 있기 때문에 인공신경망기반 복합상세화기법을 적용하여 1km×1km의 스케일까지 축소하고자 하였다.

한강유역의 2011~2100년까지 예측된 A1B, A2, B1 시나리오의 상세화자료를 통해 티센면적을 고려한 32km×32km의 기본 스케일로 한 격자강우를 생성하였으며 2010년 레이더강우를 이용한 Random Cascade 모형의 매개변수 β를 추정하여, Random Cascade 모형을 통한 상세화를 수행함으로써, 1km 고해상도 격자강우를 생성하였다.

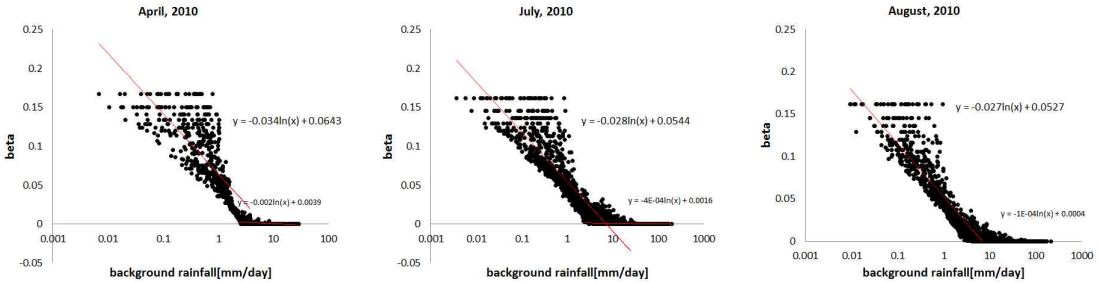
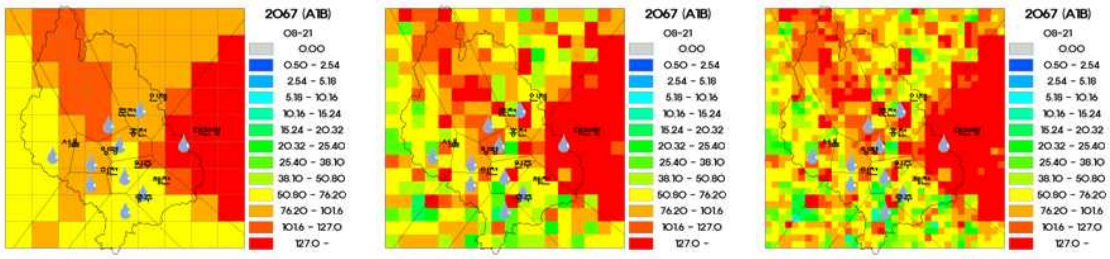
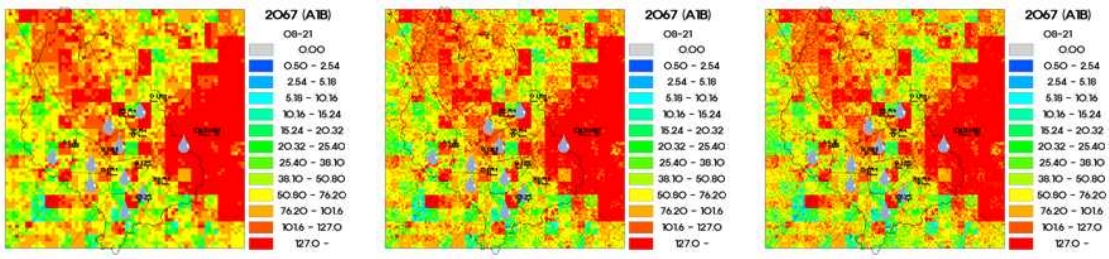


Fig. 3.2.53 2010년 레이더 강우를 이용한 매개변수 β 추정 결과



9 by 9 (32km) 18 by 18 (16km) 36 by 36 (8km)



72 by 72 (4km) 144 by 144 (2km) 288 by 288 (1km)

Fig. 3.2.54 Random Cascade 모형 상세화 결과

마. 결 론

본 연구에서 개발한 Hybrid Random Cascade 기법인 ARDAS는 기존의 기법인 인공신경망기법과 본 연구진이 보유한 Random Cascade 기법을 합성한 기법으로 GCM 모의결과에 대한 지역화(regionalization)과정과 격자상세화를 동시에 수행할 수 있는 기법이다. 지역상세화 과정의 경우 인공신경망 단일 기법이 아닌 계산부하를 줄이기 위한 주성분분석, Baseline (1981년~2000년)과 Projection(2011년~2100년)의 모의값의 보정을 위한 Nonstationary Quantile Mapping과 여름철 태풍사상 모의를 위한 Stochastic Typhoon Simulation기법을 적용하는 인공신경망 기반의 복합상세화기법을 제시함으로써, 모의결과에 대한 불확실성을 최소화 하고자 하였다. 각 관측소별 모의결과에 대하여 티센면적을 고려한 32km×32km의 기본 스케일로 한 격자강우를 생성하여 Random Cascade 모형을 통한 상세화를 수행하여 1km의 고해상도 격자강우를 생성하였다.

본 연구에서 적용한 기법의 검증을 위하여 한강유역을 대상유역으로 선정하여 ARDAS 기법을 통한 상세화를 수행하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 인공신경망 학습 및 검증결과 관측강우값과의 상관계수가 학습의 경우 평균 0.288에서 0.733, 검증기간의 경우 0.370에서 0.669로 크게 향상된 결과를 보였으며, RMSE의 경우상관계수와 마찬가지로 평균 4.019에서 2.802, 검증의 경우 3.767에서 2.998로 향상된 결과를 얻을 수 있었음.

2) CGCM 가강우량의 경우 Baseline의 관측값(Obs)과 비교 시 강우량의 차이가 -17.8%(239.0mm)로 상당히 큰 차이를 보임을 알 수 있으며, 단일 인공신경망 적용에 대한 연평균 강우량 비교 시 -16.4%(200.4mm)로 관측강우량과의 오차가 원시 GCM보다 약간 향상된 결과를 보였음. 또한, 원시 GCM에서 보이지 않았던 Baseline(Sim)과 2011년~2040년기간 사이에 강우량에 대한 연결성이 떨어지는 부적합성을 보임으로써 인공신경망 단일 기법의 한계성을 보였음.

3) Nonstationary Quantile Mapping 적용 결과 Baseline과 2011년~2040년기간 사이의 부적합성이 사라짐을 확인 할 수 있었고, Baseline의 관측강우량과의 오차가 -0.3%(3.1mm)로 상당히 향상됨을 확인 할 수 있었음.

4) Stochastic Typhoon Simulation기법을 통해 모의된 태풍사상을 합한 최종 모의값에 대한 비교 결과 -0.7%(9.3mm)로 Nonstationary Quantile Mapping 적용 결과보단 오차가 약간 높아졌으나, 기존 GCM의 -17.8%(239.0mm)보다 크게 향상 된 결과를 보임으로써, 본 연구에서 제시한 인공신경망 기반의 복합상세화기법에 대한 높은 신뢰성을 보였음.

5) 2011년부터 2100년까지 CGCM3.1/T63 SRES A1B, A2, B1 시나리오에 대하여 월누적강우에 대한 예측을 실시하였음. 모의값에 대한 추세분석결과 연평균강우량, 홍수기/비홍수기 강우량은 모든 시나리오에서 증가하는 경향을 보였으며, A2시나리오에서 가장 큰 변화 폭을 보였음.

6) GCM 3.1/T63 모형의 경우 일자료의 확보가 가능하다는 점을 활용하여 모의된 월누적강우량를 일단위의 강우량으로 변환하였음. 변환된 일단위 강우량 통해 무강우 일수 및 일 최대강우량에 대한 추세분석 결과 일 최대강우량의 경우 시나리오별로 다른 추세

를 보였으며, 무강우 일수의 경우 모든 시나리오에 대해 감소하는 경향을 보였음.

7) 티센면적을 고려한 32km×32km의 기본 스케일로 한 격자강우를 생성하였으며 2010년 레이더강우를 이용한 Random Cascade 모형의 매개변수 β를 추정하여, Random Cascade 모형을 통한 상세화를 수행함으로써, 1km 고해상도 격자강우를 생성하였음.

8) 본 연구에서 제안한 ARDAS 기법의 일련의 과정을 소프트웨어로 개발함으로써, 향후 새로운 기후변화 시나리오가 주어지는 상황에서도 탄력적으로 상세화를 수행할 수 있는 기반을 만들었으며, 앞으로의 기후변화 연구에 있어 매우 중요한 초석이 될 것으로 기대됨. 또한 상세화자료는 일 단위 기반의 장기유출모형 및 물 수지 모형, 가뭄지수 전망을 위한 강우 입력자료로 활용될 수 있을 것으로 기대됨.

5. 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가

가. 서 론

우리나라는 협소한 국토면적과 과다한 인구로 토지나 수자원 등 국토자원 이용의 강도가 다른 나라에 비하여 현저하게 높기 때문에 지구온난화에 따른 기후변화와 같은 약간의 기후변동으로도 심각한 수자원 문제가 발생할 가능성이 내포되어 있다. 그러므로 기후변화에 따른 수자원 예측과 대응 방안을 마련하기 위해서는 기후변화와 수문순환과의 관계가 지역(유역 규모)차원에서 예측되고 평가되기 위한 시스템이 구축되어야 하며, 장기적인 국가 수자원계획을 위해서는 기후변화에 의한 한반도 및 유역 규모의 수자원에 미치는 영향 예측 및 평가가 필요하다고 할 수 있다. 하지만 아직까지 우리나라실정에 맞고 기후변화 시나리오와 연계할 수 있도록 구축된 국내형 수문순환모형이 없어 기후 및 기상변화로 인한 우리나라에서의 수자원 영향 평가가 제대로 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 이를 위해, 국내의 지형조건을 고려한 미래 기후변화에 따른 수문 변화를 총체적으로 분석하기 위한 수문순환 모델링 기법을 개발할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 본 연구에서는 GCM의 시나리오를 이용하여 수문순환모형으로 기후변화에 따른 수자원 영향 평가를 실시한 국내외 연구사례를 조사하였으며, 현재까지 개발 된 모형을 개선한 후(김성준 등, 2000; 김성준과 채효석, 1999, 2000; 채효석 등, 1999; 홍우용, 2010; 홍우용 등, 2010), 향후 우리나라가 나아가야 할 방향을 살펴보았다. 또한 국내 실정에 맞는 분포형 모형 소프트웨어 개발을 완료하여 시범유역 적용테스트 과정을 통해 활용성을 검토하였다.

연구에 사용 된 기후변화 시나리오는 SRES A2, B1와 A1B 배출 시나리오를 적용하였으며 이용된 GCM은 CNR, CSR, MIU와 UKC이다. 그리고 RCP 4.5와 8,5 시나리오를 이용하여 한반도 5대강 권역별 모델 적용 결과를 현재시기인 2000s (1980-2009년)를 기준으로 미래시기 2020s (2010년-2019년), 2050s (2040년-2049년), 2080s (2070년-2079년)에 대해 기상수문요소의 변화량 분포도로 작성하였다.

본 연구의 목적은 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가 기법 개발을 위한 기반기술 조사하고 자체 개발된 분포형 수문순환모형을 시범적용 함으로써 그 결과의 제시와 비교분석에 의해 향후 개발될 분포형 수문순환모형의 전체적인 구조와 방법론을 제시하고자 하였다.

나. 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가 기법 제안

본 연구에서는 우리나라실정에 맞고 기후변화 시나리오와 연계할 수 있도록 구축된 국내형 수문순환모형개발을 통해 국내의 지형조건을 고려한 미래 기후변화에 따른 수문변화를 총체적으로 분석하는 수문순환 모델링 기법을 제시하였다.

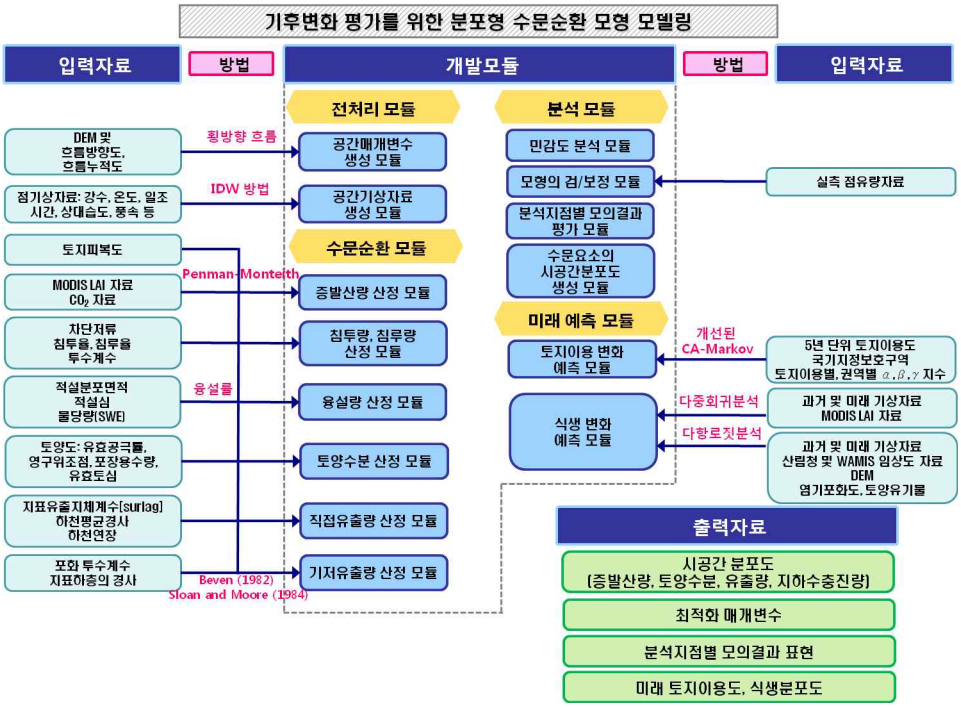


Fig. 3.2.55 본 연구의 흐름도

(1) 분포형 모형 이론 및 적용

본 모형은 토양층을 3개로 나누어 계산하는 3단구성의 형태를 가지며 각 토양층에서 지표면유출, 중간유출, 기저유출, 침투, 침루 등이 모의된다(Fig. 3.2.56). 일단위로 수문순환을 산정하며, 유출모듈, 증발산모듈, 토양수분 모듈로 구성되었다.

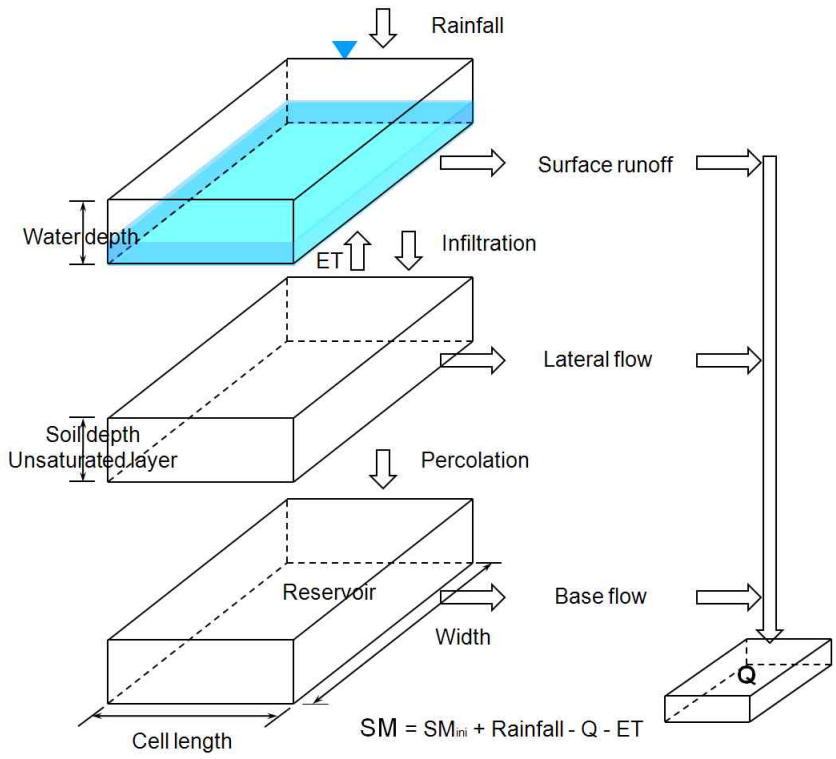


Fig. 3.2.56 분포형 모형의 구조

침투는 토양 표면에서 토양층으로 물이 들어가는 것을 말하며, 침투가 진행됨에 따라 토양은 습기가 증가하고, 침투 속도가 평형이 될 때까지 감소하는 원인이 된다. 초기 침투속도는 지표면의 물이 유입되기 전의 토양 내 수분함량에 좌우 되고, 최종 침투속도는 포화수리전도도(saturated hydraulic conductivity)와 같아진다. 증발산은 하천, 호수, 나지, 식물 표면으로부터의 증발과 식물 잎으로부터의 증발(증산), 얼음 및 눈의 표면으로부터의 승화 등을 포함하며, 본 모형에서는 Penman-Monteith 식을 사용하였다. 또한 일강우량과 최대 잠재보유수량을 이용해서 지표유출량과 첨두유출량을 모의하였다. 중간유출은 토양층(0~20 m)에서 재배분에 의해 동시에 계산된다.

유출량은 강우 전 토양의 저류능을 추적하여 SCS (Soil Conservation Service)에서 개발한 식에 대입해 강우 시 지표면 유출체적을 산정하였으며, 유출의 재 배분을 위하여 감수곡선식을 이용해 첨두 유량에 도달 한 후 점차 감소하는 유량을 모의하였다. 먼저, SCS-CN법에서는 유효우량의 크기에 직접적으로 영향을 미치는 인자로서 강우가 있기 이전의 유역의 선행토양함수조건(Antecedent Soil Moisutre Condition, AMC)과 유역을 형성하고 있는 토양의 종류(Soil Type), 토지이용상태(Landuse) 및 식생피복의 처리상태(Vegetation Cover Treatment), 그리고 토양의 수문학적 조건(Hydrocondition) 등을 고려하였으며 이들 인자들이 지표유출량(혹은 유효우량)에 미치는 복합적인 영향을 양적으로 표시하여 강우 유출량 자료가 없는 미계측 유역에서도 유효강우량을 산정할 수 있고, 분석 자료의 획득이 비교적 용이하며 계산이 간편한 방법이다.

지표유출이 감수곡선을 따라 점차 감소하는 동안 침투와 침루는 계속되어 지하수위를 상승시킴으로써 하천 유량에 더 많은 보탬을 주게 되며 시간이 지남에 따라 지하수 감수곡선(groundwater depletion curve)을 따라 더욱더 감소하게 된다. 일반적으로 유역규모의 거의 모든 공간수문학적 모형은 비포화상태의 측방흐름을 무시하고 포화상태에서 지표하 흐름이 일어난다고 가정하고 있으며, 연속방정식과 Darcy의 법칙을 결합한 형태로 지표하흐름을 모형화 하고 있다(정인균, 2008). 따라서 지표하흐름은 포화상태에서 일어난다는 가정에 의하여 다음 식을 적용하였다(Beven, 1982; Sloan과 Moore, 1984). 단, 지표하 흐름은 토양층의 수분이 포장용수량을 초과할 때 발생하도록 하였다.

증발산량 추정을 위하여 FAO Penman-Monteith 공식(Verhoef and Feddes, 1991)을 사용하였으며, 공기동역학 저항 산정 시 위성영상으로부터 추출한 LAI (Leaf Area Index) 자료를 이용함으로써 실제증발산량으로 변환하여 사용하였다(Neitsch et al, 2002).

식생변화를 고려하기 위해 기상관측자료(1982-2011)를 이용하여 현재의 기후를 판정하고, 임상도에 의한 현존 식생분포도와 환경인자(강수량, 기온, 지형인자, 토양 등)간의 상관분석을 실시하여 상관관계가 높은 주요 환경변수들을 결정하였다. 이들을 종속변수로 하는 다항로짓모형을 구성하여 현재 산림청 통계를 토대로 추정된 산림식생 분포도의 검증을 수행 후 적용하였다(Fig. 3.2.57).

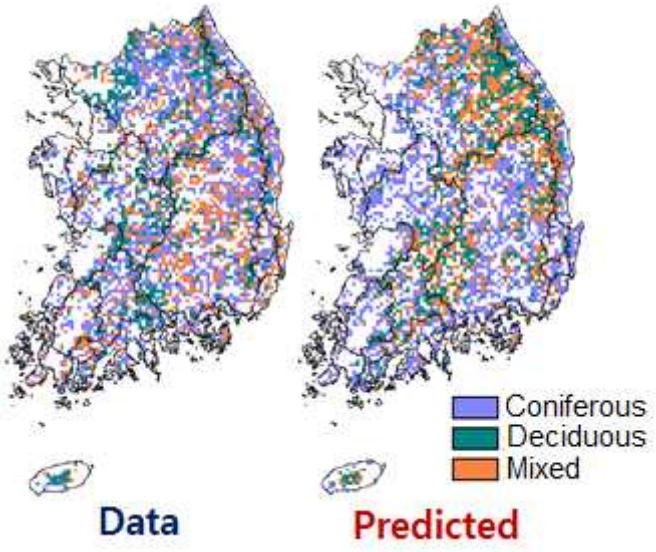


Fig. 3.2.57 현재 산림식생도와 예측된 산림식생도 검증

(2) GIS 기반 PGA-CC S/W 개발

본 시스템은 수문순환 현상을 격자기반의 강우-유출 모의로 물리적 모델화한 PGA-CC 모델을 탑재하여 그에 따른 자료의 활용성 및 사용자 편의성 증대를 위한 통합 GUI 환경을 구축, GIS 기반 분포형 장기유출 수문순환 S/W로 완성하였다. 또한 GCM (General Circulation Model) 기후변화 시나리오에 따른 수자원 영향 평가를 할 수 있도록 시간적 변화를 고려한 기능들을 개발하였다. PGA-CC 시스템 개요 및 구성은 Fig. 3.2.58과 같다.

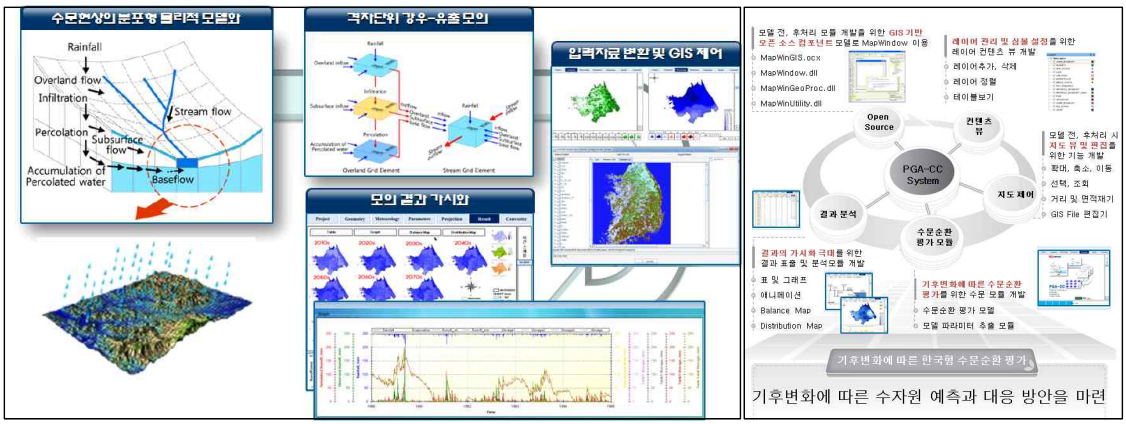


Fig. 3.2.58 시스템 개요 및 구성

시스템의 가장 큰 특징 중 하나는 오픈소스 GIS 기반 자료처리 기능의 탑재로서 지리정보시스템 (GIS: Geographic Information System)은 수자원, 도로, 상하수, 환경, 도시계획, 물류교통 등 다양한 분야에서 접목되어 그 사용분야가 급격히 증가되고 있으나, 요구되는 H/W, S/W의 구축환경에 과다한 비용이 투자되고 있으며, 실제 투입비용 대비 운용성이 저하되고 있다. 이에 대해 최근 오픈소스 지리정보시스템 (Open Source GIS)

의 활용이 활성화됨으로서 이를 이용한 지리정보 시스템 구축이 점차 증가하는 추세에 있고 현재 고비용의 상용 GIS 시스템의 대체 방안으로 대두되고 있다. 오픈 소스란 소프트웨어의 설계도에 해당하는 소스코드를 무상으로 공개하여 누구나 그 소프트웨어를 개량하고, 이것을 재배포할 수 있도록 하는 것으로서, 소프트웨어의 사용에 있어 상용 소프트웨어에 비해 보다 쉽게 호환성을 확보할 수 있을 뿐 아니라 사용자의 요구에 부합하는 일관성과 함께 일치성을 보장받을 수 있는 장점이 있다. 구글어스 뿐 아니라 다수의 맵핑 프로젝트에 사용된 GDAL (Geospatial Data A1Bstraction Library), Java 기반 맵핑 S/W인 GeoTools, 미 육군에서 만든 GIS S/W인 GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) 등은 모두 Open GIS 기반 S/W들의 좋은 예이다. 따라서 본 프로그램의 핵심 코어(core)인 분포형 수문모델은 Fortran으로 개발하여, Compaq Fortran 6.6c을 이용하여 컴파일 되었으며 사용자 편의 환경을 제공하기 위한 GUI (Graphic User Interface)는 Visual C#으로 개발되었다. 그 중 GIS 기능과 테이블, 표와 같은 인터페이스를 구성하고 있는 대부분의 요소들은 오픈소스를 이용하였다.

다. 시범유역 모형 적용 결과

기후변화에 따른 수자원영향 평가를 위하여 수문순환모형을 많이 이용하긴 하지만 국외에 비해 국내에서는 기존상용모형을 이용하는 경우가 대부분이었다. 따라서 광역적 범위의 공간적 변화를 파악하는데 적합하고 공간 지형자료와 강우자료로부터 추정된 초기 매개변수의 값에 의한 유출모의가 집중형 모형에 비해 정확한 장점을 가지고 있는 분포형 모형을 국내의 지형을 최적으로 고려하여 개발할 필요가 있으며 이러한 셀기반의 분포형 수문모형은 미래 식생, 토지이용, 융설 예측자료 활용에 적합하며 CO2농도를 고려할 수 있는 모형으로 개발할 필요가 있다.

따라서 본 시범적용에서는 용담댐유역(Fig. 3.2.59)을 대상으로 지난 3년간 자체 개발한 분포형 수문순환모형을 적용하여 대상유역의 공간적 변화를 평가해 보았다. 본 시범적용의 목적은 타 단위과제 연구 결과와의 연계성을 검토하고 발생 가능한 문제점을 파악하는데 있었으며, 시범적용에 대한 개요를 아래 Table 3.2.26에 나타냈다.

Table 3.2.26 시범적용 개요

목적		PGA-CC의 수문순환 평가 시범 적용
적용	적용 모형	PGA-CC
	사용 자료	대상유역 기상자료 유출량, 토양수분 실측 자료
적용범위	공간적 범위	용담댐유역
	시간적 범위	일, 월, 계절, 연 단위 분석 및 결과 표현

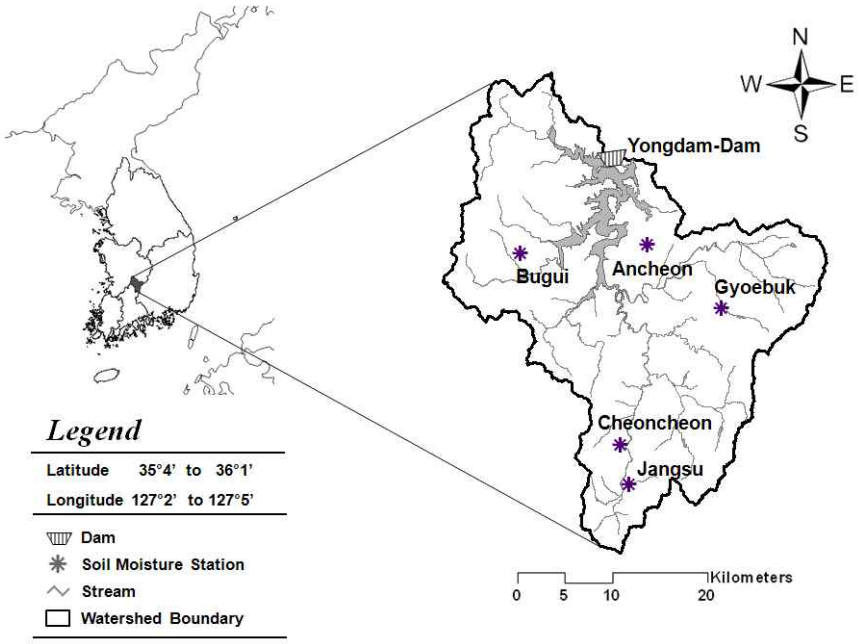


Fig. 3.2.59 시범 적용한 용담댐유역도

(1) 모형 검보정 결과

본 과제에서 개발한 모형에서 사용하는 매개변수는 Table 3.2.27과 같다. 이 중 유출과 토양수분에 민감하며 변경이 가능한 매개변수 6개를 선정하여 보정에 사용하였다.

Table 3.2.27 모형의 매개변수

No.	Parameter	Unit
1	Initial soil moisture contents	%
2	Soil infiltration ratio	%
3	Soil percolation ratio	%
4	Surface lag coefficient	-
5	Lateral flow ratio	-
6	Stream length	km
7	Max elevation	m
8	Min elevation	m
9	Lateral flow recession curve slope	mm/day
10	Lateral basin lag time	day
11	Base flow recession curve slope	mm/day
12	Base basin lag time	day

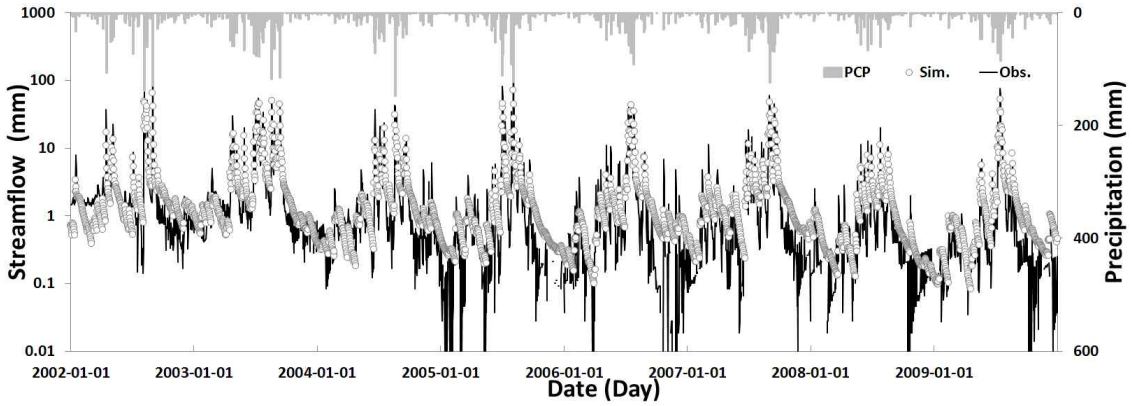
본 과제에서는 연구지역인 용담댐 유역의 출구지점에서의 유출 자료를 이용하여 유역을 모형으로부터의 결과가 관측 기록 자료에 일치되도록 보정을 실시하였다. 초기 매개변수를 안정화하기 위하여 2001년을 초기 안정화 기간으로 지정하고, 2002-2006년을 보정기간, 2007-2009년을 검증기간으로 사용하였으며, 첨두 유출 및 기저 유출 기준으로 유량과 감수곡선에 영향을 미치는 매개변수를 선정하여 보정을 실시하였다. 보정 방법은 민감도 분석 결과를 참고하여 총 유출량을 기준으로 지표유출량과 첨두 및 기저유출, 감수곡선 형태를 기준으로 보정을 실시하였다. Table 3.2.28은 보정 시 사용한 PGA-CC 매

개변수와 보정 값을 정리한 것이다.

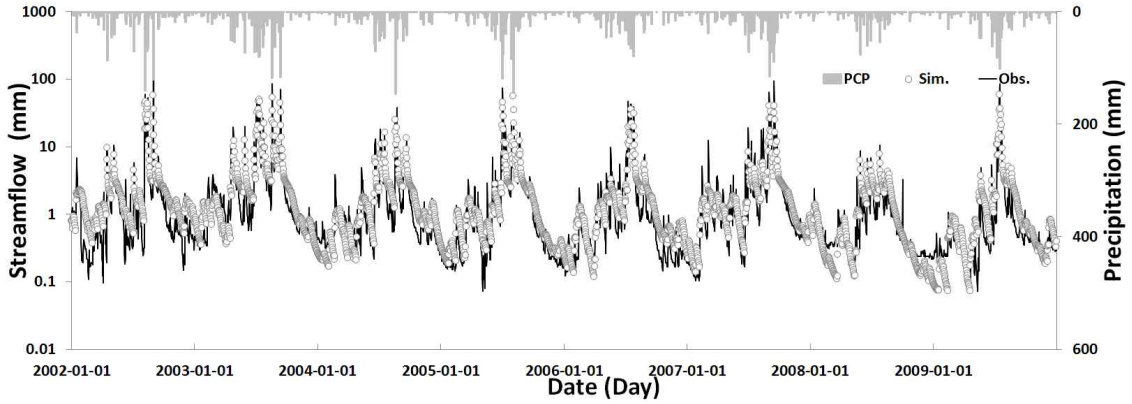
Table 3.2.28 모형의 보정에 의해 결정된 매개변수

No.	Parameter	Unit	Value
1	Soil infiltration ratio	%	0.0062
2	Soil percolation ratio	%	0.17
3	Surface lag coefficient	-	4
4	Lateral flow recession curve slope	mm/day	0.8
5	Lateral basin lag time	day	6
6	Base flow recession curve slope	mm/day	0.3
7	Base basin lag time	day	7

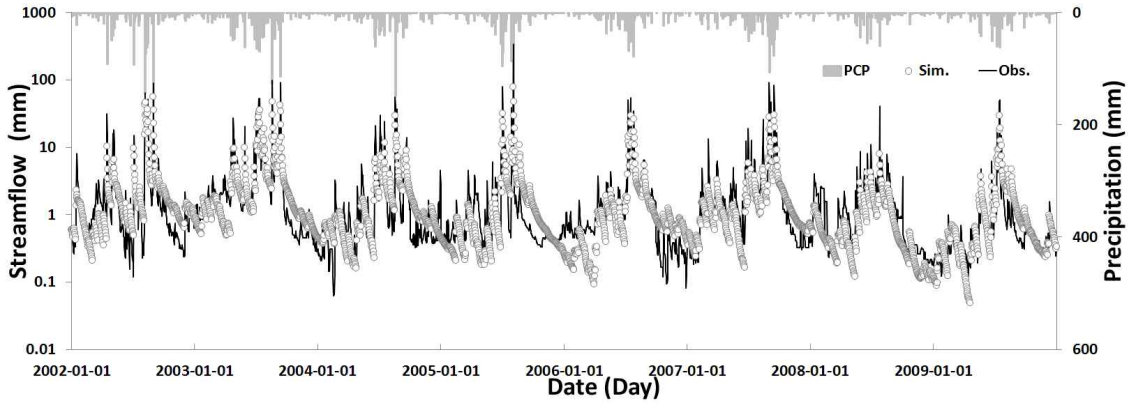
Fig. 3.2.60은 보정 및 검증기간 동안의 실측치와 모의치 수문곡선을 비교한 것으로, 출구 지점에 대한 연평균 일 유출량을 비교한 결과 유출률은 전체적으로 약 16 % 크게 모의 되었고, 비교적 연 강우량이 적은 2001, 2004년과 2008년에 특히 과대추정 되었다. NSE는 보정기간에 0.84, 검증 기간에 0.91, R^2는 0.80과 0.87로 각각 분석되었고, RMSE는 각각 2.27 mm/day, 1.91 mm/day로 나타났다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.2.60 모형의 유출 검보정

유역의 유출구인 용담지점에서의 유출률은 관측치와 모의값과의 차이가 2.6 %였으며, 천천지점은 2.4 %로 모의가 적절히 이루어진 것으로 확인되었다. 하지만 동향지점은 관측치의 유출률이 72.1 %로 모의값인 55.1 %와 큰 차이를 보였으며, 이는 모의에서의 오류가 아닌 관측치가 비교적 크게 관측된 것으로 판단된다.

(2) 토양수분 검보정 결과

본 연구에서는 모의된 토양수분의 적용성을 평가하기 위해 실측자료를 통한 검보정을 수행하였다. 토양수분 분포도에서 토양수분의 지점자료는 분포도에서 토양수분 관측지점에 해당하는 셀의 값을 추출해내어 그 지점의 실측자료와 비교하였다. 연구지역인 용담댐 유역이 토양수분 측정 지점은 총 5개가 있으며, 그 중 장수 지역의 토양수분 자료는 농촌진흥청에서 운영하는 농업기상정보시스템(http://weather.rda.go.kr/)에서 제공하고, 계북, 부귀, 안천, 천천 지역의 토양수분 자료는 한국수자원공사에서 측정한 자료를 이용하였다. 용적수분함량 또는 TDR 방식으로 측정하였으며, 평균 10 cm 측정 자료이다. 자료기간은 장수지역이 약 2004년 6월부터 2008년 5월까지이며, 계북, 부귀, 안천, 천천 지역은 2008년 5월부터 8월까지이다. Table 3.2.29는 토양수분 지점의 정보를 나타낸 것이다. 지점의 토양 속성과 토지이용을 기준으로 토양수분을 추출하여 실측자료와 비교하였다.

Table 3.2.29 모형의 토양수분 검보정 결과

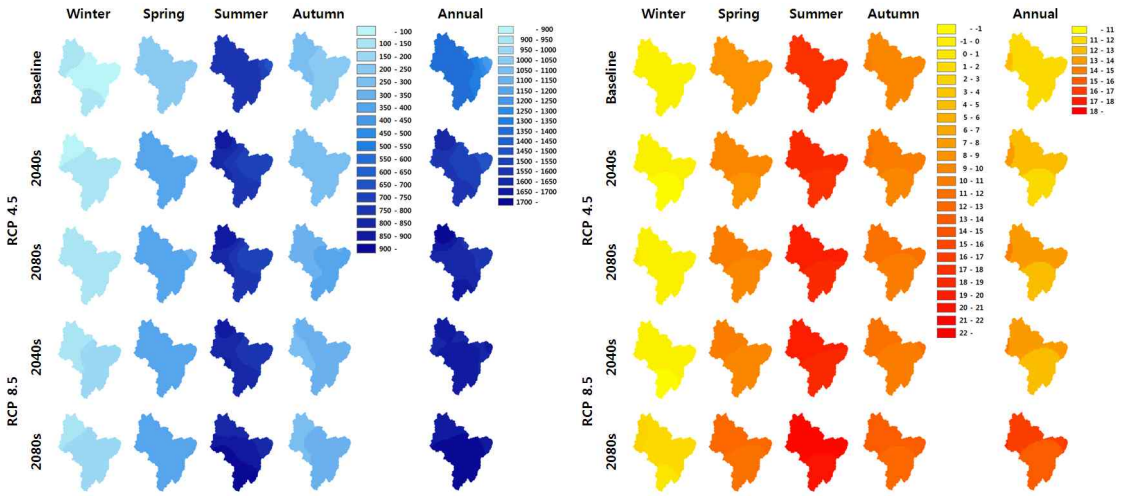
Station	period	R^2	NSE
Jangsu	2004/06 ~ 2008/05	0.36	0.44
Ancheon	2008/05 ~ 2008/08	0.86	0.52
cheoncheon	2008/05 ~ 2008/08	0.47	0.18
Gyeobuk	2008/05 ~ 2008/08	0.67	0.38
Bugui	2008/05 ~ 2008/08	0.59	0.58
Average		0.59	0.42

(3) 시범유역 미래 수문순환 변화 전망

구축된 미래 기상자료를 이용하여 본 연구에서 개발한 분포형 수문순환모형에 적용하여 미래 수문요소들의 변화를 평가하였다.

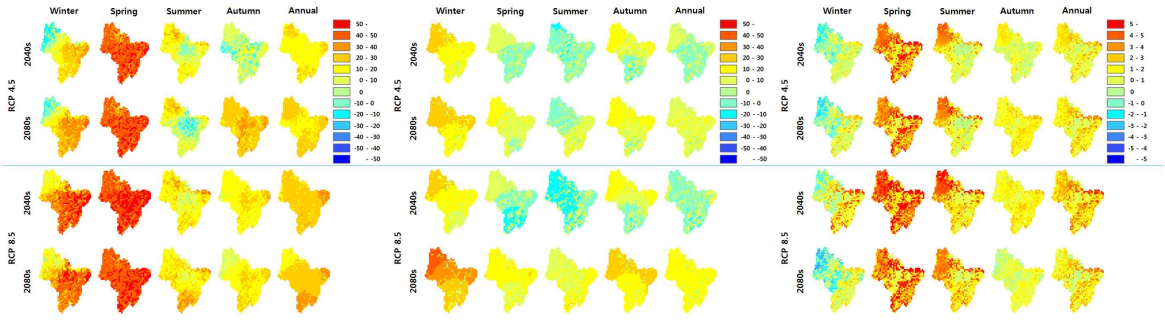
본 연구에서 개발한 분포형 수문모형을 이용하여 평가한 용담댐유역의 미래 기후변화 영향에 대해 좀 더 체계적으로 살펴보기 위하여 과거 및 현재시기인 Baseline을 기준으로 미래시기 2040s (2020년-2059년), 2080s (2060년-2099년)에 대해 기상수문요소의 변화량을 분포도로 작성하였다. 이를 Fig. 7에 나타내었다. 결과를 자세히 살펴보면, RCP 시나리오의 경우에 강우량이 한강유역의 25개의 중권역 중에 한강하류(1024)와 한강서해(1201)유역을 제외하고는 모두 증가하는 경향을 보였다. 특히 2080s에는 남한강상류(1001), 평창강(1002), 섬강(1006), 강릉남대천(1302)유역의 강우량 가장 크게 증가하는 것으로 나타났다. 온도는 전체적으로 증가하며, 2080s에는 시화호(1202)유역의 온도가 가장 크게 증가하였고 섬강(1006), 경안천(1016), 팔당댐(1017), 한강서울(1018), 한강고양(1019), 한강서해(1201)유역이 그 다음으로 크게 증가하는 것으로 나타났다.

용담댐유역을 대상으로 미래기후변화영향 평가를 실시하기 위하여 기상청에서 제공하는 기후시나리오자료(RCP 4.5, 8.5 시나리오)를 이용하였다. 80년(2020년-2099년) 동안의 일 자료를 이용하였으며, 권역별 6개의 기상요소별로 자료가 구성되어있다. 이를 IDW법을 이용한 공간분포맵을 작성하여 본 모형에서 이용할 수 있는 자료로 기후시나리오자료를 구축하였다.



(a) (b)

Fig. 3.2.61 미래 (a) 평균강수량 및 (b) 평균기온 분포도 (RCP 시나리오)



(a) (b) (c)

Fig. 3.2.62 용담댐 유역 미래 2040s와 2080s (a) 유출, (b) 증발산, (c) 토양수분 변화량 분포도

(4) 남한 전체 미래 수문순환 변화 전망

CNR 모델의 각 시나리오 적용에 따른 결과는 현재(Baseline)를 기준으로 2020s, 2050s, 2080s의 변화 및 변화율을 나타낸다. 2080s로 갈수록 강수와 온도는 최대 8.0 %, 3.3 ℃증가하고 있으며, 증발산량도 26.8 %까지 증가하고 있다. 유출량은 지표유출은 많이 A2 시나리오에서 최대 11.9 % 증가하나 중간유출 및 기저유출은 13.8 %, 10.0 % 감소하고 있으며, 총유출량은 5.6 % 증가하고 있다. 토양수분은 최대 1.1 % 감소하는 것으로 나타났다. A1B, B1 시나리오에서도 A2 시나리오보다 적지만 비슷한 경향을 보여주고 있다.

CSR 모델의 결과는 2080s로 갈수록 강수와 온도는 최대 8.6 %, 1.8 ℃증가하고 있으며, 증발산량도 15.9 %까지 증가하고 있다. 지표유출은 A2 시나리오에서 최대 11.2 % 증가하나 중간유출 및 기저유출은 -4.1 %, +2.0 % 변화하고 있으며, 총유출량은 8.3 % 증가하고 있다. 토양수분은 최대 0.1 % 감소하는 것으로 나타났다.

MIU 모델 결과는 강수와 온도는 2080s로 갈수록 최대 12.6 %, 3.8 ℃증가하고 있으

며, 증발산량도 15.9 %까지 증가하고 있다. 지표유출은 A1B 시나리오에서 최대 23.1 % 증가하나 중간유출 및 기저유출은 -17.4 %, -14.3 % 변화하고 있으며, 총유출량은 12.3 % 증가하고 있다. 토양수분은 최대 1.5 % 감소하는 것으로 나타난다. A2, B1 시나리오에서도 A1B 시나리오보다 적지만 비슷한 경향을 보여주고 있다.

UKC 모델의 결과는 2080s로 갈수록 강수와 온도는 최대 5.9 %, 3.4 ℃증가하고 있으며, 증발산량도 42.5 %까지 증가하고 있다. 지표유출은 B1시나리오에서 최대 10.0 % 증가하나 중간유출 및 기저유출은 -28.4 %, -22.1 % 변화하고 있으며, 총유출량은 0.8 % 증가하고 있다. 토양수분은 최대 2.2 % 감소하는 것으로 나타난다.

Table 3.2.30 CNR A2, A1B, B1 시나리오의 시기별 변화 분석

Element	Baseline (1980-2009)	A2 Scenario			AB Scenario			B1 Scenario		
		2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s
PREC (mm)	1192.7	1262.3 (+5.8%)	1258.5 (+5.5%)	1288.0 (+8.0%)	1245.7 (+4.4%)	1258.8 (+5.5%)	1284.2 (+7.7%)	1243.6 (+4.3%)	1243.6 (+4.3%)	1258.4 (+5.5%)
Tmean (℃)	12.6	13.5 (+0.9℃)	14.5 (+1.9℃)	15.9 (+3.3℃)	13.5 (+0.9℃)	14.7 (+2.1℃)	15.2 (+2.6℃)	14.2 (+1.6℃)	14.4 (+1.8℃)	14.9 (+2.3℃)
EVAPO (mm)	435.2	490.0 (+12.6%)	508.7 (+16.9%)	552.1 (+26.8%)	489.3 (+12.4%)	525.1 (+20.6%)	534.2 (+22.7%0	524.0 (+20.4%)	530.9 (+22.0%)	543.1 (+24.8%)
SMOIS (%)	23.3	23.1 (-0.2%)	22.7 (-0.6%)	22.2 (-1.1%)	23.0 (-0.3%)	22.3 (-1.0%)	22.4 (-0.9%)	22.5 (-0.8%)	22.4 (-0.9%)	22.2 (-1.1%)
Qsurf (mm)	581.5	623.3 (+7.2%)	625.1 (+7.5%)	650.5 (+11.9%)	606.9 (+4.4%)	631.7 (+8.6%)	640.4 (+10.1%)	611.5 (+5.2%)	607.2 (+4.4%)	624.8 (+7.4%)
Qmid (mm)	6.1	5.9 (-3.8%)	5.6 (-8.7%)	5.3 (-13.8%)	5.7 (-6.9%)	5.1 (-16.9%)	5.2 (-15.5%)	5.3 (-13.1%)	5.2 (-15.6%)	5.1 (-16.5%)
Qsub (mm)	227.7	225.7 (-0.9%)	215.9 (-5.2%)	204.9 (-10.0%)	222.3 (-2.4%)	203.2 (-10.7%)	206.0 (-9.5%)	208.3 (-8.5%)	205.2 (-9.9%)	203.0 (-10.9%)
Qtot (mm)	815.3	854.9 (+4.9%)	846.6 (+3.8%)	860.7 (+5.6%)	834.9 (+2.4%)	840.0 (+3.0%)	851.6 (+4.4%)	825.1 (+1.2%)	817.6 (+0.3%)	832.9 (+2.2%)

PCP : precipitation, Tmean : mean value temperature, EVAPO : evapotranspiration, SMOIS : soil moisture, Qsurf : surface flow, Qmid : lateral flow, Qsub : subsurface flow, Qtot : total flow

Table 3.2.31 CSR A2, A1B, B1 시나리오의 시기별 변화 분석

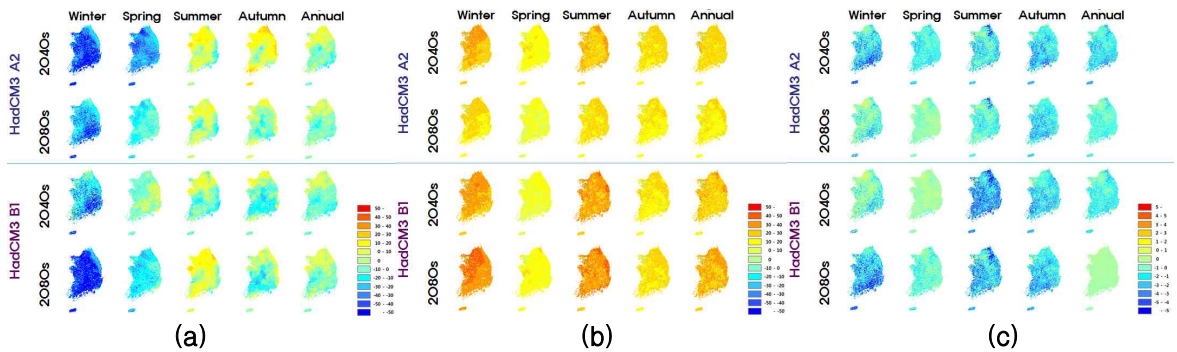
Element	Baseline (1980-2009)	A2 Scenario			AB Scenario			B1 Scenario		
		2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s
PREC (mm)	1192.7	1234.9 (+3.5%)	1220.6 (+2.3%)	1295.4 (+8.6%)	1242.0 (+4.1%)	1231.3 (+3.2%)	1219.7 (+2.3%)	1232.2 (+3.3%)	1259.0 (+5.6%)	1276.9 (+7.0%)
Tmean (℃)	12.6	12.8 (+0.2℃)	13.4 (+0.8℃)	14.4 (+1.8℃)	13.1 (+0.5℃)	13.6 (+1.0℃)	14.3 (+1.7℃)	12.8 (+0.2℃)	13.3 (+0.7℃)	13.6 (+1.0℃)
EVAPO (mm)	435.2	464.0 (+6.6%)	481.8 (+10.7%)	489.5 (+12.5%)	464.3 (+6.7%)	474.6 (+9.0%)	504.4 (+15.9%)	453.5 (+4.2%)	462.8 (+6.3%)	474.9 (+9.1%)
SMOIS (%)	23.3	23.4 (+0.1%)	23.2 (-0.1%)	23.2 (-0.1%)	23.3 (+0.0%)	23.0 (-0.3%)	22.6 (-0.7%)	23.4 (+0.1%)	23.3 (+0.0%)	23.3 (+0.0%)
Qsurf (mm)	581.5	594.8 (+2.3%)	582.9 (+0.2%)	646.4 (+11.2%)	607.9 (+4.5%)	605.0 (+4.0%)	590.7 (+1.6%)	604.0 (+3.9%)	627.7 (+7.9%)	635.9 (+9.4%)
Qmid (mm)	6.1	6.0 (-1.3%)	5.9 (-4.1%)	6.0 (-2.1%)	6.0 (-2.2%)	5.8 (-5.4%)	5.3 (-13.2%)	6.0 (-1.4%)	5.9 (-3.1%)	6.0 (-2.0%)
Qsub (mm)	227.7	232.3 (+2.0%)	228.8 (+0.5%)	230.6 (+1.3%)	230.1 (+1.1%)	222.1 (-2.5%)	210.8 (-7.4%)	231.9 (+1.9%)	229.2 (+0.7%)	230.4 (+1.2%)
Qtot (mm)	815.3	833.2 (+2.2%)	817.6 (+0.3%)	883.1 (+8.3%)	844.0 (+3.5%)	832.8 (+2.1%)	806.8 (-1.0%)	842.0 (+3.3%)	862.8 (+5.8%)	872.3 (+7.0%)

Table 3.2.32 MIU A2, A1B, B1 시나리오의 시기별 변화 분석

Element	Baseline (1980-2009)	A2 Scenario			AB Scenario			B1 Scenario		
		2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s
PREC (mm)	1192.7	1250.0 (+4.8%)	1325.0 (+11.1%)	1293.8 (+8.5%)	1258.2 (+5.5%)	1274.8 (+6.9%)	1343.5 (+12.6%)	1245.3 (+4.4%)	1284.2 (+7.7%)	1309.3 (+9.8%)
Tmean (℃)	12.6	13.7 (+1.1℃)	14.7 (+2.1℃)	16.4 (+3.8℃)	13.6 (+1.0℃)	14.9 (+2.3℃)	16.4 (+3.8℃)	13.8 (+1.2℃)	14.7 (+2.1℃)	15.5 (+2.9℃)
EVAPO (mm)	435.2	509.7 (+17.1%)	537.0 (+23.4%)	576.4 (+32.4%)	491.6 (+12.9%)	526.5 (+21.0%)	560.5 (+28.8%)	499.6 (+14.8%)	534.2 (+22.7%)	541.4 (+24.4%)
SMOIS (%)	23.3	22.5 (-0.8%)	22.1 (-1.2%)	22.2 (-1.1%)	22.8 (-0.5%)	22.0 (-1.3%)	21.8 (-1.5%)	22.8 (-0.5%)	22.5 (-0.8%)	22.3 (-1.0%)
Qsurf (mm)	581.5	629.5 (+8.3%)	698.4 (+20.1%)	651.5 (+12.0%)	632.7 (+8.8%)	657.6 (+13.1%)	715.6 (+23.1%)	610.6 (+5.0%)	637.6 (+9.7%)	661.4 (+13.7%)
Qmid (mm)	6.1	5.6 (-8.8%)	5.4 (-12.2%)	5.8 (-5.8%)	5.7 (-7.2%)	5.0 (-18.9%)	5.1 (-17.4%)	5.5 (-9.4%)	5.4 (-12.1%)	5.2 (-14.9%)
Qsub (mm)	227.7	212.3 (-6.8%)	205.4 (-9.8%)	212.6 (-6.6%)	217.1 (-4.7%)	196.8 (-13.6%)	195.1 (-14.3%)	217.0 (-4.7%)	211.3 (-7.2)	205.8 (-9.6%)
Qtot (mm)	815.3	847.4 (+3.9%)	909.2 (+11.5%)	869.9 (+6.7%)	855.4 (+4.9%)	859.4 (+5.4%)	915.8 (+12.3%)	833.1 (+2.2%0	854.3 (+4.8%)	872.4 (+7.0%)

Table 3.2.33 UKC A2, A1B, B1 시나리오의 시기별 변화 분석

Element	Baseline (1980-2009)	A2 Scenario			AB Scenario			B1 Scenario		
		2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s
PREC (mm)	1192.7	1218.6 (+2.2%)	1212.8 (+1.7%)	1245.9 (+4.5%)	1230.5 (+3.2%)	1191.6 (-0.1%)	1227.5 (+2.9%)	1249.4 (+4.8%)	1228.5 (+3.0%)	1263.4 (+5.9%)
Tmean (℃)	12.6	13.6 (+1.0℃)	14.6 (+2.0℃)	15.9 (+3.3℃)	13.5 (+1.0℃)	14.7 (+2.1℃)	15.6 (+3.0℃)	14.5 (+1.9℃)	15.3 (+2.7℃)	16.0 (+3.4℃)
EVAPO (mm)	435.2	517.9 (+19.0%)	534.8 (+22.9%)	575.9 (+32.3%)	508.4 (+16.8%)	543.9 (+25.0%)	562.1 (+29.1%)	582.5 (+33.8%)	599.1 (+37.6%)	620.2 (+42.5%)
SMOIS (%)	23.3	22.6 (-0.7%)	21.8 (-1.5%)	21.4 (-1.9%)	22.8 (-0.5%)	21.7 (-1.5%)	21.2 (-2.1%)	22.3 (-1.0%)	21.6 (-1.7%)	21.1 (-2.2%)
Qsurf (mm)	581.5	591.5 (+1.7%)	603.7 (+3.8%)	626.8 (+7.8%)	593.1 (+2.0%)	585.2 (+0.6%)	631.5 (+8.6%)	603.7 (+3.8%)	601.2 (+3.4%)	639.7 (+10.0%)
Qmid (mm)	6.1	5.4 (-11.5%)	4.7 (-23.2%)	4.6 (-24.8%)	5.6 (-8.9%)	4.7 (-23.9%)	4.4 (-27.8%)	5.3 (-14.0%)	4.7 (-23.8%)	4.4 (-28.4%)
Qsub (mm)	227.7	211.5 (-7.1%)	191.1 (-16.1%)	185.1 (-18.7%)	218.0 (-4.3%)	189.6 (-16.7%)	179.0 (-21.4%)	208.9 (-8.3%0	189.1 (-16.9%)	177.5 (-22.1%)
Qtot (mm)	815.3	808.4 (-0.8%)	799.5 (-1.9%)	816.5 (+0.1%)	816.7 (+0.2%)	779.5 (-4.4%)	814.9 (-0.1%)	817.8 (+0.3%)	795.0 (-2.5%)	821.6 (+0.8%)



(a) (b) (c)

Fig. 3.2.63 UKC 모델 결과에 따른 미래 남한 2040s와 2080s의 (a) 유출, (b) 증발산, (c) 토양수분 변화량 분포도

(5) 미래 식생변화 적용 전·후 분포형 모형 결과 비교

식생 변화의 적용 전, 후 결과를 분포형 모형을 이용하여 분석해 본 결과 다음 Fig. 10과 같이 증발산량이 미래에 51.0 % 까지 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 침엽수가 현재에 비해 2080s -37.0 % 줄어들며, 활엽수와 혼효림은 각각 최고 16.6 %와 20.4 % 늘어나는 것에 기인한 변화량으로 추정되며, 식생 변화를 고려하지 않았을 때 보다 14 % 더 많이 증가하는 결과를 보였다. 토양수분은 식생변화를 적용 하였을 경우 0.9 % 감소하였으며, 적용하지 않았을 때 보다 0.6 % 더 감소하였다. 유출량은 오히려 식생 변화 적용 전이 더 많은 유출이 일어나는 것으로 분석되었다. 특히 지표유출은 조금 감소하는 것으로 추정되었으며, 중간유출은 적용 전과 5.4 % 차이를 보였다.

따라서 식생 변화에 따른 수문순환 변동을 추적하는 연구에 본 모델은 유용할 것으로 판단되며, 향후 지속적인 실측 데이터와의 검증 및 추가 연구를 통한 보정이 필요할 것으로 사료된다.

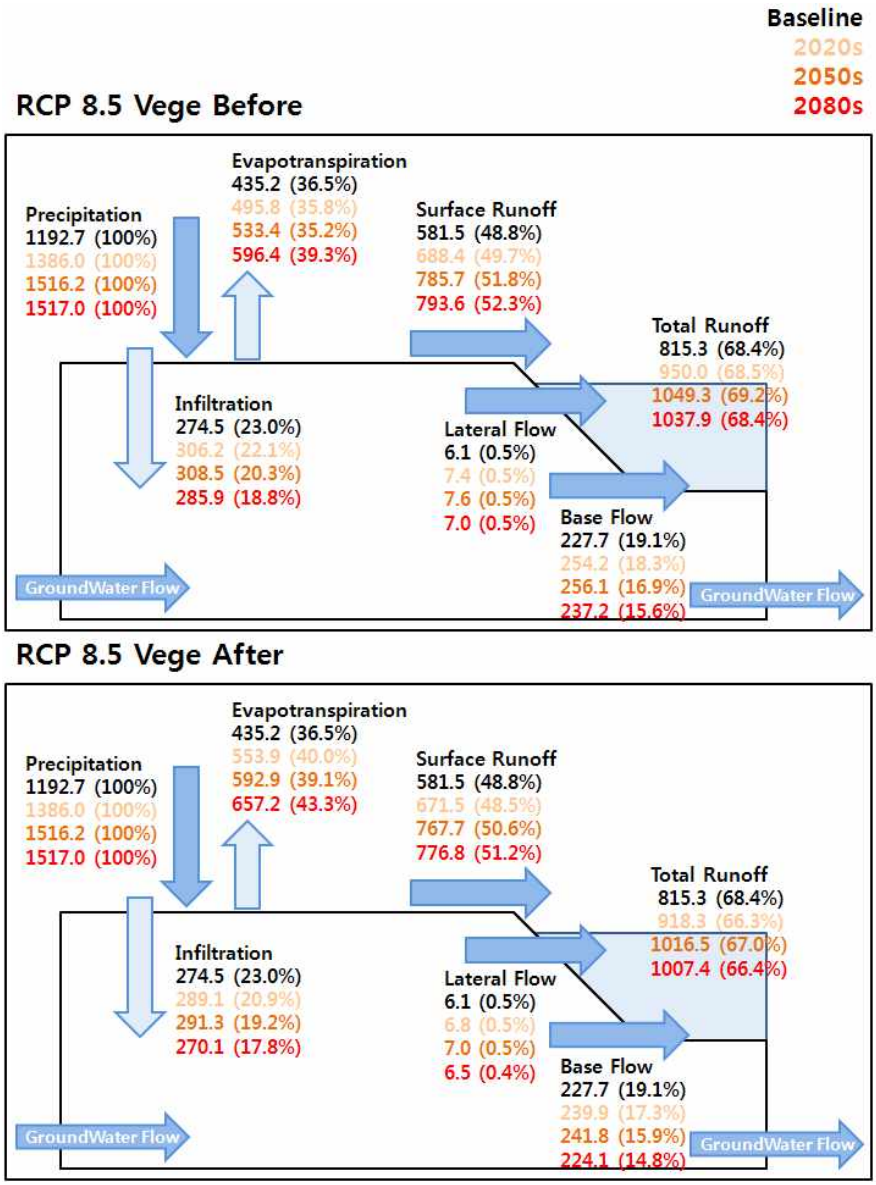


Fig. 3.2.64 식생변화 적용 전후의 분포형 수문순환 결과 비교

라. 결론

본 연구에서는 국내의 지형조건을 고려한 미래 기후변화에 따른 수문 변화를 총체적으로 분석하기 위한 수문순환 모델링 기법의 필요성에 기인하여, 우리나라실정에 맞는 기후변화 시나리오 연계 및 영향 평가가 가능한 국내형 수문순환모형개발을 목표 다양한 기법을 제시하였다. S/W 개발은 GUI (Graphic User Interface) 적용으로 사용자 편의성을 증대시켰으며, 입출력 자료의 일괄처리 및 프로젝트 단위의 관리로 모형 효율성을 높였다. 또한 기후변화 관련 모듈 개발을 통해 권역별 기후변화를 고려한 수문변화 전망이 가능하도록 하였으며, GIS (Geographic Information System) 일부 기능 지원을 통한 분포형 자료의 시각적 기능 강화시킴과 동시에 모델링 절차 표준화, 공간자료 처리 자동화 등을 고려하였다. 개발 된 모델을 이용하여 시범유역 테스트를 통해 모델 적용성을 검토하였으며, Baseline 기간을 비롯한 미래 2020s, 2050s, 그리고 2080s 기간별 분석 결과를 제시하였다. 본 연구 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

1) 본 과제에서는 남한전체를 대상으로 4 km 해상도로 셀기반의 분포형 수문모형을 개발하였으며, 적용성을 평가하였다.

2) 개발된 격자기반의 분포형 수문순환모형은 미래 기후변화 평가를 위한 국내유역에 적합한 모형으로써, 유역내의 수문거동을 공간정보로 얻어낼 수 있으며, 남한전체의 공간적 변화를 파악하고 미래 식생, 토지이용, 융설예측자료 활용하는데 적합한 장점을 가지고 있다. 또한 기후변화 평가를 위해 기존의 수문모형들에 비해 식생상태와 CO2농도를 최대한으로 고려하였다.

3) 분포형 모형의 적용성 평가를 위해 검보정 한 결과 충주댐, 소양강댐, 청평댐지점 각각에 대한 통계분석 결과는 NSE, RMSE와 R^2를 사용하였으며, 충주댐지점 유출률은 전체적으로 약 4 % 크게 모의 되었고, 비교적 연 강우량이 적은 2001년과 많은 2003년과 2006년에 특히 과대추정 되었다. 소양강댐지점과 청평댐은 유출률이 각각 약 9 %, 15 % 과소평가 되었다. 소양강댐지점은 2003년, 2007년, 2009년에 각각 14 %, 13 %, 21 % 적게 모의 되었으나 전체적 통계치는 실측 패턴을 잘 반영 하는 것으로 나타났으며 국내유역 적용성이 높다고 판단되었다.

4) 한강 유역에서의 미래 기후변화 시나리오 적용 결과 강우량과 온도는 모든 시나리오에서 증가하는 것으로 나타났으며, 유출량의 변화는 강우량과 비슷한 경향으로 전체적으로 7.0 %~27.1 % 증가하는 것으로 분석되었다. 증발산량은 일부 경우를 제외하고 증가하는 경향을 보였다.

5) 또한 용담댐 유역 적용을 통해 기존 개발 과정 중 개선점에 대한 수정을 마쳤으며, 2001년부터 2009년까지 자료를 이용하여 검증한 결과 용담지점에서의 유출률은 관측치와 모의값과의 차이가 2.6 %였으며, 천천지점은 2.4 %로 모의가 적절히 이루어진 것으로 확인되었다. 이어서 미래기후변화영향 평가를 위해 기상청 제공 기후시나리오자료(RCP 4.5, 8.5 시나리오)를 사용하였으며, 유출량은 봄에 가장 큰 변화율을 나타냈으며, 겨울, 가을 그리고 여름 순서로 변화율이 크게 나타났다. 하지만 연간 변화량을 살펴보면 여름의 유출량 변화율과 비슷한 분포를 나타내고 있다. 증발산량은 여름을 제외한 나머지 계절에서 증가하고 있으며, 전반적으로 고르게 증가하고, 토양수분은 모든 계절에서 증가하

고 있으나 겨울에 일부지역이 감소하고 있음을 확인할 수 있었다.

6) 분포형 모형의 남한 전체 적용 결과 현재(Baseline)를 기준으로 CNR 결과는 2080s로 갈수록 강수와 온도는 최대 8.0 %, 3.3 ℃증가하고 있으며, 증발산량도 26.8 %까지 증가하고 있다. 유출량은 지표유출은 많이 A2 시나리오에서 최대 11.9 % 증가하나 중간유출 및 기저유출은 13.8 %, 10.0 % 감소하고 있으며, 총유출량은 5.6 % 증가하고 있다. 토양수분은 최대 1.1 % 감소하는 것으로 나타났다. CSR 결과는 강우량을 기준으로 각 요소별로 차지하는 비율은 크게 변화하지 않으나, 증발산량, 총유출량과 지표유출은 증가하며, 침투량, 중간유출과 기저유출을 감소하는 경향을 보여준다. MIU는 2080s로 갈수록 강우량을 기준으로 각 요소별로 차지하는 비율은 크게 변화하지 않으나, 증발산량, 총유출량과 지표유출은 증가하며, 침투량, 중간유출과 기저유출을 감소하는 경향을 보여준다. UKC는 증발산량과 지표유출은 증가, 침투량, 중간유출과 기저유출을 감소하며, 총유출량은 변화가 작은 경향을 나타냈다.

7) 식생변화를 적용 전 후 결과를 비교하면 증발산량이 미래 식생변화를 고려했을 경우 14 % 더 증가하는 결과를 보였고, 토양수분은 오히려 0.9 % 감소하였으며, 적용하지 않았을 때 보다 0.6 % 더 감소하는 결과를 보였다. 따라서 식생 변화에 따른 수문순환 변동을 추적하는 연구에 본 모델은 유용할 것으로 판단되며, 향후 지속적인 실측 데이터와의 검증 및 추가 연구를 통한 보정이 필요할 것으로 사료된다.

8) 결과적으로 본 연구에서 개발한 한국형 분포형 수문모형 검증을 통해 미래 수문순환을 예측해 본 결과 좀 더 세밀한 보정과정을 거쳐 미래 수자원 부존량 예측 및 대응에 적극 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 모형의 사용자들의 의견을 반영하여 인터페이스 개선 및 활용성을 증대 시키는 노력 또한 필요하다고 사료된다.

6. 기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 정량화

가. 서론

2007년에 발표된 Intergovermental Panel on Climate Change(IPCC) 제 4차 평가보고서에 따르면 다양한 온실가스 배출 시나리오와 기후모델을 이용한 결과 미래에 심각한 기후 변화가 있을 수 있다고 경고하였다. 일반적으로 기후변화 영향 평가 및 전망 연구들에서는 전지구 모형들의 결합으로 미래 기후를 전망하는 기법들이 사용되는데, 가장 간단한 기법으로 단순 평균으로 전망할 수 있고 연구자의 경험적 방법, 회귀 분석법, 혼합모형 분석법등으로 전망 할 수 있다. 특히 수자원 분야의 경우, 기후변화를 고려한 수문 전망과정은 크게 배출 시나리오, 전지구 모형(GCM), 상세화(donwscaling) 기법, 강우-유출 모형으로 구성되며 각 단계마다 불확실성이 발생하여 수문 전망과정 전체는 큰 불확실성을 가지고 있다.

미래 기후를 전망하기 위하여 많은 전지구 모형들이 전망값들을 제시하고 있으며, 어떤 전지구 모형을 선택하느냐에 따라 동일한 유역이라도 상이한 연구 결과를 나타내고 있다. 즉 최적의 전지구 모형을 선정하였다고 하더라도 그 최종 결과는 수문 전망과정을 거침에 큰 불확실성을 가지고 있음을 의미한다. 이러한 불확실성을 저감하는 기법을 통해서 미래기후 전망에 있어서 불확실성을 줄이고 전망의 신뢰도를 높일 수 있다.

기후변화 불확실성 분석에 대한 국내 연구들을 살펴보면, 이재경 등(2007)은 Girogi et al.(2002)이 제안한 Reliability Ensemble Average(REA) 기법을 소개하고 이를 개선한 Modified-REA(M-REA)를 제안하였다. 두 방법을 5개의 전지구모형에 적용하여 불확실성을 줄이는 연구를 수행하였다. M-REA를 이용하여 결합한 결과가 기존 REA의 결과보다 기후정보의 불확실성을 더 저감하는 것을 확인하였다. 배덕효 등(2009)도 총 39개의 기후시나리오와 8개의 수문모형을 우리나라 5대강 유역 109개 중권역에 대해 Multi-Model Ensemble 기법을 적용하였다. 생산된 유출시나리오를 미래 2020s, 2050s, 2070s로 나누어 변화율을 분석한 결과, 여름철 유출량과 겨울철 유출량이 증가할 것으로 전망하였으며, 겨울철 유출량 전망이 상대적으로 불확실성이 큰 것으로 나타났다.

불확실성을 줄이는 방법 중 하나로 여러 모형의 결과를 조합하여 기후변화 전망을 제시하는 Multi-Model Ensemble 기법(Raisanen et al., 2001; Rajagopalan et al., 2002; Doblas-Reyes et al., 2005, Raftery et al., 2005)이 대두되고 있다. Multi-Model Ensemble 기법은 정확성이 높은 GCM에는 높은 가중치(weight)를 주고 정확성이 낮은 GCM에는 낮은 가중치를 주는 각 GCM의 모의능력에 따라 가중치를 부여하고 결합하는 방법이다. 또한 이러한 다양한 시나리오들로부터 기후변화 전망의 불확실성을 추정하는 연구(Allen et al., 2000; Giorgi et al., 2002; Murphy et al., 2004; Maurer et al., 2005; Wilby et al., 2006; Maurer, 2007)도 중요하게 다루어지고 있다.

단계별로 이루어지는 모형에서 최초의 입력값과 최종 결과값의 불확실성만을 정량화하는 것이 아니라 최종 결과값을 각 단계별 불확실성으로 나누어 표현하는 것은 매우 까다로우며 이러한 방법에 대한 연구 사례는 특히나 부족하다. 따라서 수문학 분야이외에 다양한 다른 학문의 분야에서 불확실성 정량화 관련 기법의 연구동향을 조사하였다.

수문학에서는 강우-유출모형에서 다루어진 연구 사례가 있는데 수문 전망과정의 한

단계인 강우-유출 모형에서 강수량에 불확실성을 있으므로 강우-유출모형에서 나온 유출량에도 불확실성이 발생 할 것이다. 따라서 강우-유출 모형의 전체 불확실성을 모형 입력값의 불확실성과 모형의 불확실성으로 나눌 수 있다(Krzysztofowicz 1999). 또한 강우-유출 모형에서 모형 자체에 있는 모수의 불확실성도 발생할 수 있다(Todini 2007). 이러한 불확실성에 사전 확률 분포를 가정하면 베이즈 정리에 의해 사후 확률 분포가 계산되어 지면 정확한 사후 확률 분포가 나오지 않는 경우 Monte Carlo Markov Chain을 이용하여 계산할 수 있다. 이러한 사후 확률 분포로 불확실성을 정량화 할 수 있다.

단계별로 이루어진 모형에서의 불확실성 정량화 기법은 수문학 분야가 아닌 다른 분야에서 조사하였다. 교외배수시설 모형을 다루는 연구에서 분산 분해 방법을 통해서 불확실성을 정량화 하였다(Freni 2010). 이 연구에서는 하수구 시설, 폐수처리장치, 물수역으로 이루어지는 단계적 구조에서 전체의 불확실성과 단계별로 나타나는 불확실성을 분산 분해를 통해서 구하였다.

또한 evidence theory(Dempster-Shafer Theory)를 이용한 불확실성 정량화 기법이 개발되었다. 이 방법에서는 관심있는 모형의 입력변수와 모형의 모수에 대한 확실한 정보의 양을 나타내는 측도인 belief와 입력변수와 모수에 대한 가능한 정보의 양을 나타내는 측도인 plausibility를 정의하며 두 측도의 차이를 이용하여 불확실성을 정의한다.(Agarwal et. al.)

나. 연구목표

본 연구는 수문 전망과정에서 발생하는 불확실성을 정량화하고 저감하는 기술을 개발하는데 목표를 두고 있다. 신뢰성이 높은 전망이 가능하므로 기후변화에 대비한 적응전략까지 더 신뢰성 있게 마련할 수 있는 기술이다. 기후변화 연구에 있어 또 하나의 중요한 키워드는 불확실성이다. 국내 기후변화 연구들은 동일한 유역을 전망함에 있어 매우 상이한 연구결과를 보이고 있다. 다른 나라도 마찬가지 실정이어서 선진국의 기후변화 연구는 이러한 불확실성의 정량화 및 저감과 결과의 이질성을 극복하는데 초점을 맞추고 있다.

따라서 기후변화를 고려한 수문전망과정의 불확실성 정량화에 대해 선진국을 중심으로 한 연구사례 조사 및 분석을 바탕으로 국내 기후변화 연구에서 발생하는 불확실성 요인을 분석하고 이를 정량화 및 저감하여 표현한다.

다. 기후 변화 불확실성 전망의 조합 기술 개발

2007년에 발표된 Intergovermental Panel on Climate Change(IPCC) 제 4차 보고서에 따르면 다양한 방출 시나리오와 기후모델을 이용한 결과 미래에 심각한 기후 변화가 있을 수 있다고 경고하였다. 이러한 기후변화를 고려한 수문 전망과정은 방출 시나리오, 전지구 모형, 상세화 기법, 강우-유출모형로 구성되며 각 단계마다 불확실성이 발생하여 수문 전망과정 전체는 큰 불확실성을 가지고 있다.

미래 기후를 전망하기 위하여 많은 전지구 모형들이 전망값들을 제시하고 있으며, 어떤 전지구 모형을 선택하느냐에 따라 동일한 유역이라도 상이한 연구 결과를 나타내고 있다. 즉 최적의 전지구 모형을 찾더라도 그 결과는 큰 불확실성을 가지고 있음을 의미

한다. 따라서 전지구 모형들의 결합으로 미래 기후를 전망하는 기법들이 사용된다. 가장 간단한 기법으로 단순 평균으로 전망할 수 있고 연구자의 경험적 방법 , 회귀 분석법, 혼합모형 분석법등으로 전망 할 수 있다. 이러한 불확실성 전방의 조합 기술을 통해서 미래기후 전망에 있어서 불확실성을 줄이고 전망의 신뢰도를 높일 수 있다.

(1) 기존 불확실성 조합 기법

먼저 y_t는 관측값, $t=1,...,T$, T는 자료수, $f_{t,k}$는 GCM모형의 전망값, $k=1,...,K$, K는 GCM수로 기호를 정의하고 기존의 불확실성 저감 기법들을 아래에 간략하게 나열하였다.

(가) Reliability Ensemble Average(REA)

$$w_k=(S_{kp}^1 \cdot S_{kc}^1)^{1/mn}, \quad S_{kp}^1=\left[\frac{\tilde{y}}{|\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}f_{tk}-\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}y_t|}\right]^m S_{kc}^1=\left[\frac{\tilde{y}}{|\Delta f_k-\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\Delta f_k|}\right]^n$$

여기서 $\tilde{y}$는 관측값의 평균, $\Delta f_k=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}f_{tk}-\frac{1}{T_2-T_1}\sum_{t=T_1}^{T_2}f_{tk}$, T_1은 미래전망의 시작 시간이고 T_2는 미래전망의 마지막시간이다.

(나) Regional Skill Score(RSS)

$$w_k=(S_{kp}^2\times S_{kc}^2)^2, \quad S_{kp}^2=\frac{|\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\overline{y_n}|}{[\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(\overline{f_{nk}}-\overline{y_n})^2]^{1/2}}, \; S_{kc}^2=\frac{|\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\overline{y_n}|}{[\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(\overline{f_{nk}}-\overline{f_n})^2]^{1/2}}$$

여기서 $\overline{y_n}$은 n번째 지역의 관측값의 평균, $\overline{f_{nk}}$는 n번째 지역의 k번째 모형의 평균 전망값이고 $\overline{f_n}=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{K}\overline{f_{nk}}$이다.

REA와 RSS방법에서 S_{kp}^1, S_{kp}^2는 전지구 모형의 정확성 정도를 나타내며 S_{kc}^1, S_{kc}^2는 모형간의 상이한 정도를 나타내며 일반적으로 전지구 모형중에 과거에 정확성이 높고 미래전망에서는 개별 전지구 모형들과 비슷한 전지구 모형에 가중치를 높게 주는 방법이다.

(다) 회귀분석(OLS)

$$Q=\sum_{t=1}^{T}(y_t-\sum_{k=1}^{K}w_k f_{tk})^2$$

Q를 최소로하는 w_k를 찾는 것을 Regression 방법임. 즉 관측값과 전망값들의 차이의 제곱이 최소로 되는 w_k를 찾아 가중치로 사용함. Q를 최소로 하는 방법 외에도 entropy 최대법 혹은 CRPS 최소법등이 있다.

(라) Ridge

회귀분석의 $Q=\sum_{t=1}^{T}(y_t-\sum_{k=1}^{K}w_k f_{tk})^2$에 w_k에 $\sum(w_k)^2 \le \lambda$ 제약을 주어서 가중치 w_k를 추정하는 방법이다. 회귀분석에서 설명변수들 간의 상관이 큰 경우 기존방법보다 제약을 이용한 Ridge 방법의 예측력이 높은 것으로 알려져 있다. 회귀분석과 Ridge와 같은 선형방법 외에도 Neural network과 support vector machine 과 같은 비선형방법과 Bayesian regression과 Bayes factor를 이용한 Bayesian방법도 있다.

(2) 기존 방법론의 개선 및 새로운 기법의 제안

(가) Scaled Ridge

회귀분석에서 설명변수들 간의 상관이 큰 경우 기존방법보다 제약을 이용한 Ridge 방법의 예측력이 높은 것으로 알려져 있다. 아래의 Table 3.2.34은 서울지역에서의 5개 GCM들의 상관계수를 나타내고 있다.

Table 3.2.34 서울 지역 GCM 상관계수

GCM	CSR	GF1	MIU	MRI	UKC
CSR	1				
GF1	0.817	1			
MIU	0.759	0.763	1		
MRI	0.699	0.799	0.617	1	
UKC	0.545	0.663	0.579	0.677	1

Table 3.2.34에서 보는 것과 같이 GCM들의 상관관계가 큰 것을 알 수 있다. 따라서 일반적인 OLS보다는 Ridge를 이용한 방법이 예측력이 더 높을 것이라 생각할 수 있다.

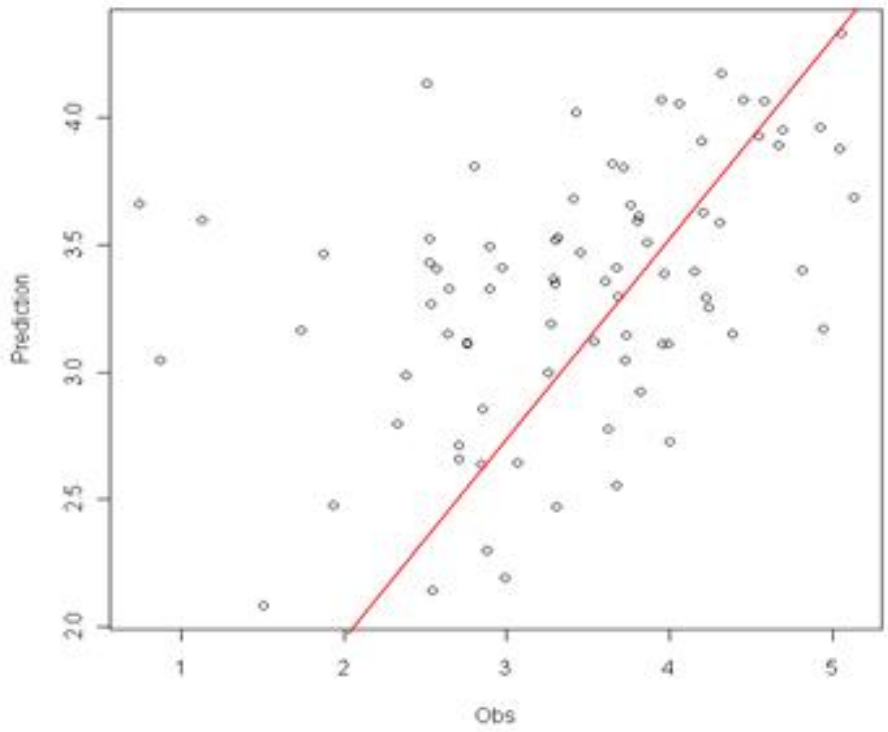
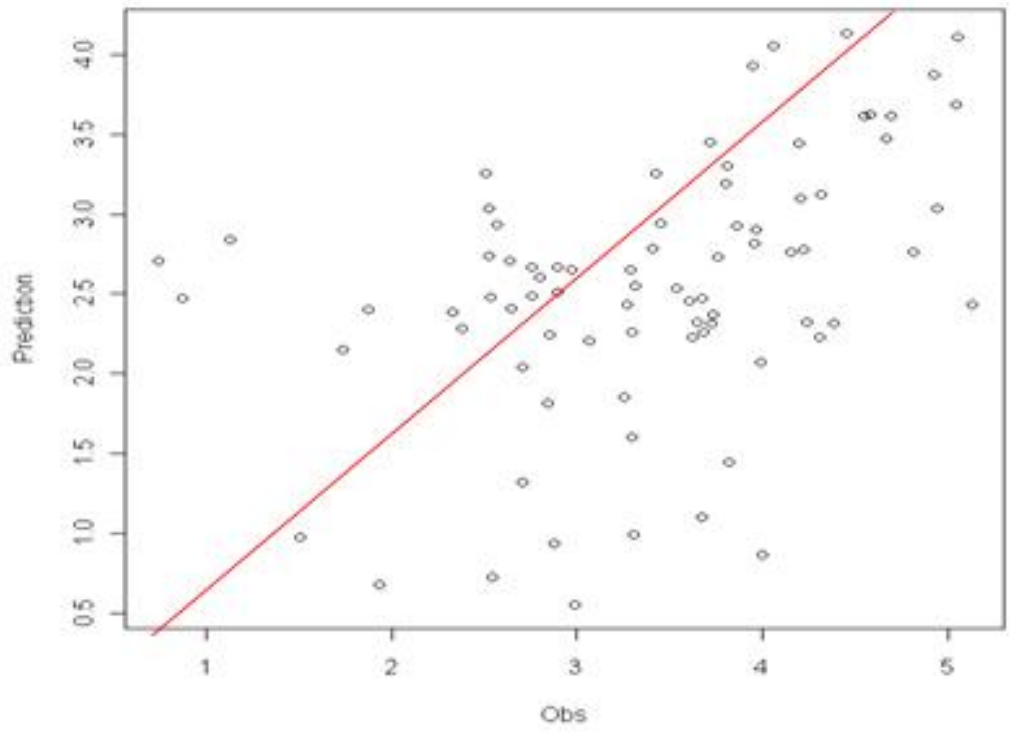


Fig. 3.2.65 관측값과 OLS의 예측값



Flg. 3.2.66 관측값과 Ridge의 예측값

위의 그림은 서울지역에서 관측값과 OLS와 Ridge 방법의 예측값을 나타낸다. 보는 것과 같이 OLS 예측값은 편의가 적지만 분산 즉 불확실성이 큰 것을 알 수 있고 Ridge 예측값은 편의가 있지만 불확실성이 작은 것을 알 수 있다. 두 가지 방법의 장점을 살리기 위해 우리는 아래의 Scaled Ridge방법을 제안한다.

$$\hat{w}^{sr} = \alpha \hat{w}^{r}$$

여기서 $\hat{w^r}$은 Ridge방법의 가중치이고 $\alpha \geq 1$는 상수이다. 즉 Ridge방법의 가중치에 적절한 상수를 곱하기 하여 편의를 줄이고 대신 분산을 조금 늘리는 방법이다.

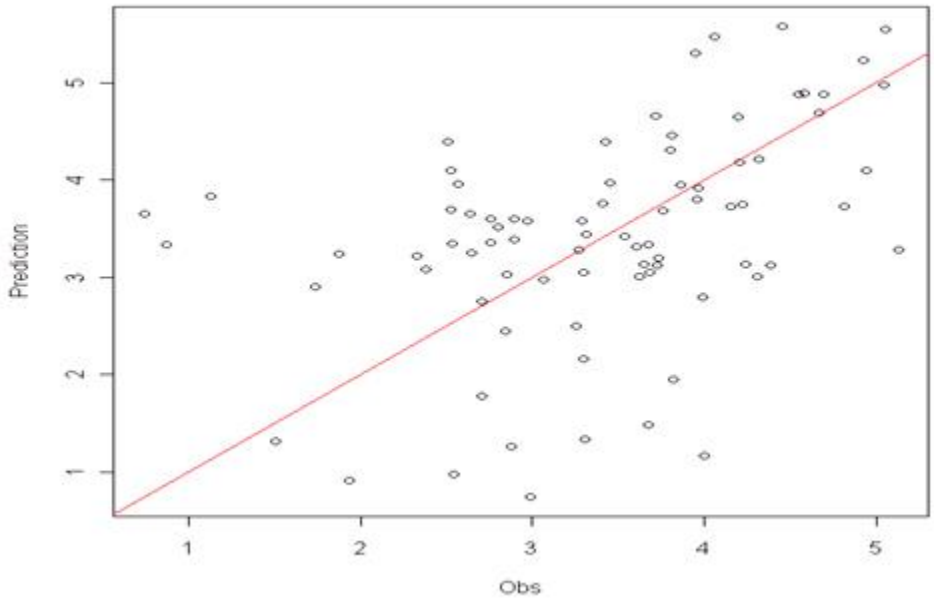


Fig. 3.2.67 관측값과 Scaled Ridge의 예측값

위의 그림은 서울지역에서 관측값과 Scaled Ridge 방법의 예측값을 나타낸다. Ridge 보다 편의가 줄었고 분산이 조금 늘어난 것을 알 수 있다.

(나) Weighted Scaled Ridge

앞에서 제안한 Scaled ridge의 경우 ridge 기법의 가중치 $\hat{w}$에 대해 상수 α를 곱하여 편의를 보정하였다. 이러한 경우 주어진 문제의 해가 유일하게 존재하지 않는 문제가 발생하며, 가중치 w와 상수 α를 구하기 위해 다양한 (w, α) 쌍에 대하여 오차제곱합의 최소값을 계산해야하는 문제점이 발생한다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 다음과 같은 weighted scaled ridge 방법을 제안하였다.

$$\widehat{w^{wr}} = \mathrm{argmin}_w \sum_{t=1}^{T} (y_t - \sum_{k=1}^{K} w_k f_{tk})^2 + \lambda \sum_{k=1}^{K} \sigma_k^2 w_k^2$$

이때 σ_k^2는 k번째 GCM의 분산이다.

이러한 weighted scaled ridge 방법은 σ_k^2을 통해 각각의 GCM의 변동 혹은 불확실성을 고려하기 때문에 ridge 방법에 비하여 더 좋은 불확실성의 조합을 할 수 있게 되고, scaled ridge 방법보다 계산이 용이 할 뿐만 아니라 작은 예측 오차를 제공한다.

(3) 기존방법과의 비교

아래의 Table 3.2.35는 한반도 10개 지역의 MSE를 나타낸다. 표에서 알 수 있듯이 임실, 부산, 광주 지역을 제외한 지역에서 MSE가 제안한 Scaled Ridge 방법과 Weighted Scaled Ridge(WSR)가 기존의 저감방법인 OLS와 Ridge 방법보다 좋으며 OLS가 가장 좋은 지역을 제외한 7개 지역에서 Scaled Ridge 방법보다 WSR이 좋은 것을 알 수 있다.

Table 3.2.35 MSE

	OLS	Ridge	Scaled ridge	WSR
임실	92.985	93.005	94.100	94.291
서울	106.639	106.148	106.039	105.468
부산	111.066	111.085	112.564	113.994
대구	89.137	89.053	89.036	88.237
광주	83.892	83.907	85.480	87.464
대전	88.977	88.984	89.393	88.186
춘천	93.669	92.762	92.739	91.392
강릉	121.304	121.315	122.098	121.283
전주	87.575	87.591	88.348	86.867
인천	88.661	88.191	88.165	87.63

라. 기후변화 불확실성 정량화 기술 개발

기후 변화에 있어서 불확실성의 저감 기술은 앞선 기후 변화 불확실성 저감 기술에서도 언급한 것과 같이 다양한 GCM의 값들을 가중 평균과 같은 방법을 이용하여 하나의 기후 변화 모형을 제시하는 것이라면 불확실성의 정량화 기술은 이와 관련된 분포의 추정과 관련되어 있다. 기존 정량화 기술로는 대표적으로 Bayesian Model Average(BMA)가 있다. 이러한 정량화 기술은 CPRS, IGN, PIT와 같은 측도로 그 정량화 정도를 평가할 수 있으며, 새로운 방법으로 Residual Mixture Model을 제안하였으며. BMA를 일반화 시킨 Leave-one-out BMA 제안하였다.

(1) 기존 정량화 기술: Baysian Model Average(BMA)

$$f(y) = \sum_{m=1}^{M} p(M_m|y^{tr})p(y|M_m)$$

여기서 M_m은 m번째 모형, $p(M_m|y^{tr})$은 y^{tr}이 주어졌을 때 m번째 모형이 선택될 확률, y^{tr}은 training자료, $p(y|M_m)$은 M_m이 주어졌을 때 y의 확률 밀도함수이다. 즉 관측값은 여러 가지 확률 밀도함수들의 합으로 이루어졌다고 가정한다. BMA는 아래의 모형을 가정한다.

$$f(y) = \sum_{k=1}^{K} w_k p_k(y|f_k)$$

여기서 확률 밀도함수는 정규 분포를 가정하고 평균은 $a_k + b_k f_k$, 분산은 σ^2로 가정한다. 따라서 BMA는 혼합모형에서 $M = K$인 특수한 경우이다. BMA에서 모수들을 바로 추정할 수 없어 EM 알고리즘으로 추정한다.

(2) 기존 방법론의 개선 및 새로운 기법의 제안

(가) Residual Mixture Model

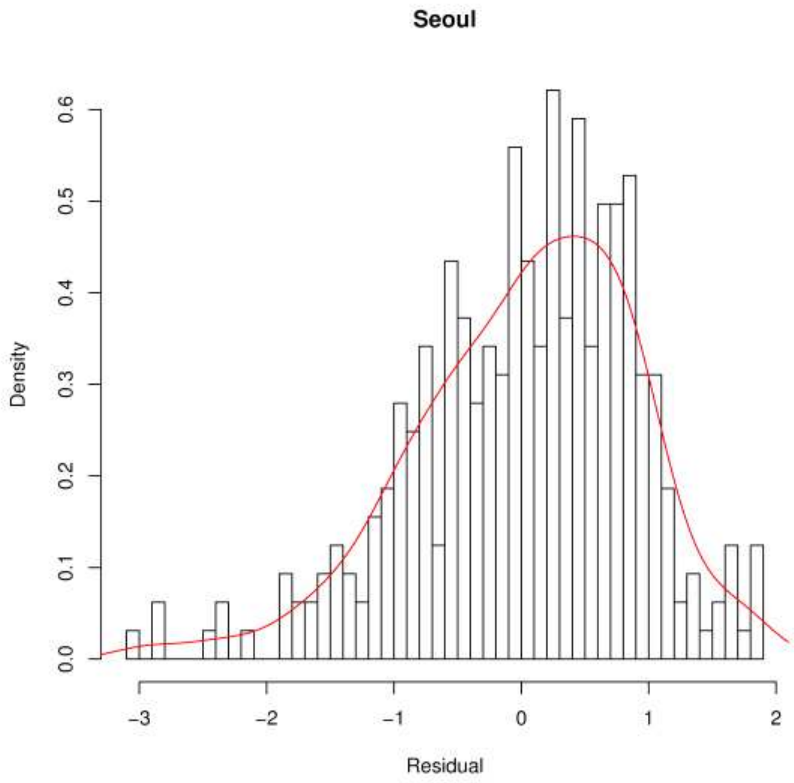


Fig. 3.2.68 Sridge 잔차의 히스토그램

위의 그림은 Scaled Ridge방법에서 구한 잔차($\hat{e_t} = y_t - \hat{y_t}$)의 히스토그램이다. 히스토그램을 통해서 잔차가 정규분포를 따르지 않고 왼쪽으로 꼬리가 긴 분포임을 알 수 있다. 이러한 문제가 발생하는 경우 통계학에서는 혼합 모형을 이용하여 해결 할 수 있다. 잔차에 대한 혼합 모형은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$f(\hat{e}) = \sum_{m=1}^{M} w_m g_m(\hat{e})$$

여기서 g_m은 평균이 μ_m이고 분산이 σ_m^2인 정규분포의 밀도한수라 가정한다. 혼합 모형의 개수는 Cross-Validation방법으로 구할 수도 있지만 이번 분석에서 2개로 고정하였다(뒷부분 자료분석에서 2개로 고정한 이유를 설명할 예정). 혼합 모형에 대한 로그 우도는 다음과 같다.

$$l(\boldsymbol{w},\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\sigma^2}|\hat{e}) = \sum_{t=1}^{T} \log\left(\sum_{m=1}^{M} w_m g_m(\hat{e_t}|\boldsymbol{w},\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\sigma^2}) \right)$$

여기서 $\boldsymbol{w} = (w_1,...,w_M)$, $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1,...,\mu_M)$, $\boldsymbol{\sigma^2} = (\sigma_1^2,...,\sigma_M^2)$이다. 이 로그 우도를 모수에 대하여 최대하기는 어려움이 있기 때문에 Expectation-Maximize algorithm(EMA)을 이용하여 모수들을 수치적으로 추정한다. 만일 $\hat{e_t}$가 m번째 모형에 들어가면 $z_{mt} = 1$이고 아니면 0인 잠재 변수 z_{mt}를 정의하자. Expectation 단계에서는

$$\widehat{z_{mt}^{(i)}} = \frac{\widehat{w_m^{(i-1)}} g_m(\hat{e_t}|\boldsymbol{\widehat{\mu^{(i-1)}}},\boldsymbol{\widehat{\sigma^{2(i-1)}}})}{\sum_{m=1}^{M} \widehat{w_m^{(i-1)}} g_m(\hat{e_t}|\boldsymbol{\widehat{\mu^{(i-1)}}},\boldsymbol{\widehat{\sigma^{2(i-1)}}})}$$

로 잠재 변수를 추정할 수 있다. 여기서 $a^{(i)}$는 모수 a를 i번째 반복에서 추정한 값이다. Maximize 단계에서는

$$\widehat{w_m^{(i)}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} \widehat{z_{mt}^{(i)}}, \quad \widehat{\mu_m^{(i)}} = \frac{\sum_{t=1}^{T} \widehat{z_{mt}^{(i)}} \hat{e_t}}{\sum_{t=1}^{T} \widehat{z_{mt}^{(i)}}}, \quad \widehat{\sigma_m^{2(i)}} = \frac{\sum_{t=1}^{T} \widehat{z_{mt}^{(i)}} (\hat{e_t} - \widehat{\mu_m^{(i)}})^2}{\sum_{t=1}^{T} \widehat{z_{mt}^{(i)}}}$$

로 모수들을 추정 할 수 있다.

미래 전망에서 만일 분포에 대한 모수, θ를 알면

$$f(y_s, s > T) = \prod_{s>T} f(y_s|f_s,\theta)$$

로 계산 할 수 있다. 만일 모르는 경우 가장 단순한 방법은 $t < T$에 추정한 $\hat{\theta}$를 대입할 수 있다. 이 경우 일반적으로 미래 전망의 불확실성이 작아지는 경향을 보이게 된다. 이러한 문제는 Bayesian 방법의 주변 밀도 함수를 계산하는 방법이 있는데 $\hat{\theta}$의 분포를 알 수 없기 때문에 bootstrap 방법으로 계산할 수 있다. 즉 bootstrap 표본을 B번 뽑아 $\widehat{\theta_{1,}},...,\widehat{\theta_B}$를 추정하여

$$f^b(y_{s,}s > T) = \prod_{s>T} \sum_{b=1}^{N} f(y_s|f_{s,}\widehat{\theta_b})/B$$

로 미래 전망에 대한 분포를 추정할 수 있다.

(나) Leave One Out Baysian Model Average(LOOBMA)

BMA 모형의 추정에 있어서 분산 σ_k^2과 가중치 w_k의 추정이 평균의 추정보다 중요하다. 이러한 방법을 확장하여 다음과 같은 LOO BMA 모형을 제안한다.

$$p^{LOO}(y|f,\theta) = \sum_{k=1}^{K} w_k g_k(y|f_{(-k)})$$

이때 $f_{(-k)} = (f_l, l \neq k)$이고 g_k는 평균이 $\beta_0^{(k)} + \sum_{l \neq k} \beta_l^{(k)} f_l$인 정규분포이며, $w_k, k = 1,\cdots,K$는 g_k에 대한 가중치이다. LOO BMA 모형은 평균에 대한 추정을 여러 GCM 중 k번째 GCM을 제외한 나머지 GCM으로 추정하는 방법으로 앞서 기술한 Rafetery et. al.(2005)를 일반화 시킨 모형이다.

모형의 모수를 추정하기 위하여 앞의 3가지 BMA방법 중 두 번째 방법을 사용한다. 이는 이 방법이 가장 좋은 예측 성능을 나타내기 때문이다.

우선 $\beta_0^{(k)}$와 $\beta_l^{(k)}, l \neq k$는

$$\sum_{t=1}^{T} (y_t - \beta_0^{(k)} - \sum_{l \neq k} \beta_l^{(k)} f_{tl})^2$$

을 최소화 하는 값으로 추정한다. 다음으로 LOO BMA 모형의 우도함수

$$L(\theta) = \prod_{t=1}^{T} p^{LOO}(y_t|f_t,\theta)$$

를 최대화 하는 $w_k, \sigma_k^2, k = 1,\cdots,K$를 EM 알고리즘을 통해 추정한다. LOO BMA의 로그우도함수는

$$l_{comp} = \sum_{t=1}^{T}[\sum_{k=1}^{K} I(\delta_t = k)\left\{-\frac{1}{2}log\sigma_k^2 - \frac{(y_t - \hat{\mu}_k(f_{(-k)}))^2}{2\sigma_k^1} + \log w_k\right\}$$

이며 이때 δ_t는 확률이 $w_1,\cdots,w_K$인 다항분포의 확률 벡터이며, $\hat{\mu}_k(f_{(-k)}) = \hat{\beta}_0^{(k)} + \sum_{l \neq k}\hat{\beta}_l^{(k)} f_{tl}$이다.

EM 알고리즘에서 E-step에서는 $v_{kt} = E(I(\delta_t = k)|data,\eta^c)$를 추정한다. 이때 η^c는 모수 $\eta = (\sigma_k^2, w_k, k = 1,\cdots,K)$의 현재 단계에서의 추정량이다. 앞의 v_{kt}의 추정량으로

$$v_{kt} = \frac{w_k^c \phi(y_t|\hat{\mu}(f_{(-k)}),\sigma_k^{c2})}{\sum_{l=1}^{K} w_k^c \phi(y_t|\hat{\mu}_k(f_{(-k)}),\sigma_l^{c2})}$$

을 사용하며 $\phi(y|\mu,\sigma^2)$은 평균이 μ이고 분산이 σ^2인 정규분포의 밀도함수이다.

M-step에서는 σ_k^2과 w_k를 로그우도함수의 기대값을 최대화 하는 방향으로 갱신한다. 이때 로그우도함수의 기댓값은

$$E(l_{comp}|data,\eta^c) = \sum_{t=1}^{T}\left[\sum_{k=1}^{K} v_{kt}\left\{-\frac{1}{2}log\sigma_k^2 - \frac{(y_t - \widehat{\mu_k}(f_{(-k)}))^2}{2\sigma_k^2} + \log w_k\right\}\right]$$

이다. 따라서 이를 최대화 하는 $\hat{\sigma_k^2}$와 $\hat{w}_w$는

$$\hat{\sigma_k^2} = \sum_{t=1}^{T} v_{kt}(y_t - \hat{\mu}_k(f_{(-k)}))^2 / \sum_{t=1}^{T} v_{kt}$$

$$\hat{w}_k = \frac{\sum_{t=1}^{T} v_{kt}}{\sum_{l=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} v_{lt}}$$

이 된다. 이러한 E-step과 M-step을 번갈아가면서 로그우도함수가 수렴할 때 까지 반복하면 주어진 LOO BMA의 최적해를 계산 할 수 있다.

(3) 기존방법과의 비교

아래의 Table 3.2.36은 한반도 10개 지역에 혼합모형을 적용하였을 때 IGN, CRPS, coverage probability, coverage width를 나타낸다. 표에서 Sridge(MM)은 앞에서 언급한 혼합모형을 나타낸다. SR(MM)방법이 기존방법보다 IGN에서는 10개 지역에서 7개 지역이 좋고 CRPS는 6개 지역이 좋은 것을 확인 할 수 있다. coverage probability를 보면 SR(MM)방법이 50% 구간에서 약간 작게 추정하지만 다른 방법보다 가장 정확하게 추정한다. 90% 구간에서는 가장 정확한 것을 확인 할 수 있다. Coverage width는 coverage interval의 길이를 나타낸다. SR(MM)방법이 다른 방법보다 50%, 90% 구간 모두 가장 좁으므로 불확실성을 가정 잘 저감한 것을 알 수 있다. 제안한 방법이 가장 정확한 coverage interval을 구하는 것은 물론 불확실성도 가장 저감하는 것을 확인 할 수 있다.

Table 3.2.37은 정규분포를 가정한 회귀모형(GA)„ Raftery el. al.(2005)가 제안한 BMA(S-BMA)와 우리가 제안한 LOO BMA(L-BMA)의 CRPS, IGN, coverage probability, coverage width를 비교한 결과이다. Table 3.5.4를 통해서 GA가 가장 좋지 않은 결과를 보여주며 L-BMA가 가장 좋은 결과를 보여준다는 것을 알 수 있다. CRPS를 기준으로 하였을 때, 서울, 인천, 대전을 제외한 지역에서 L-BMA가 가장 좋으며, IGN을 기준으로 하였을 경우 인천, 대전, 부산을 제외한 모든 지역에서 L-BMA가 가장 좋다. GA, S-BMA, L-BMA방법의 50%와 90% coverage probabilities를 비교한 결과 L-BMA방법이 50% coverage probability는 GA보다는 정확하나 S-BMA보다는 정확하지 않다. 하지만 90% coverage probability에서는 세가지 방법중에서 가장 정확하다는 것을 알 수 있다. 50%와 90% coverage interval의 길이를 통해서 L-BMA방법이 기존의 S-BMA나 GA방법보다 50%, 90% 구간 모두 가장 좁으므로 불확실성을 가장 잘 저감한 것을 알 수 있다. 이는 제안한 방법이 가장 정확한 coverage interval을 구하는 것은 물론 불확실성도 가장 저감하는 것을 확인 할 수 있다.

Table 3.2.36 혼합 모형의 IGN, CRPS, coverage probability, coverage width

지역	방법	IGN	CRPS	coverage prob.		coverage width	
				50%	90%	50%	90%
서울	OLS	153.686	0.478	0.608	0.933	1.341	3.271
	Sridge(MM)	145.457	0.461	0.533	0.917	1.12	2.98
	BMA	151.838	0.467	0.592	0.942	1.319	3.255
인천	OLS	167.759	0.541	0.583	0.917	1.445	3.524
	Sridge(MM)	158.498	0.525	0.458	0.892	1.160	3.220
	BMA	165.964	0.534	0.550	0.933	1.396	3.444
대전	OLS	141.536	0.437	0.567	0.958	1.246	3.038
	Sridge(MM)	143.100	0.436	0.458	0.933	0.960	2.980
	BMA	142.876	0.443	0.508	0.967	1.209	2.974
대구	OLS	196.689	0.617	0.592	0.950	1.547	3.774
	Sridge(MM)	177.309	0.623	0.383	0.917	1.080	3.670
	BMA	199.910	0.615	0.592	0.942	1.517	3.695
부산	OLS	189.312	0.597	0.650	0.958	1.652	4.031
	Sridge(MM)	173.517	0.605	0.517	0.892	1.140	3.680
	BMA	189.908	0.592	0.650	0.925	1.579	3.899
임실	OLS	141.050	0.439	0.550	0.942	1.178	2.873
	Sridge(MM)	146.720	0.439	0.408	0.908	0.860	2.730
	BMA	141.692	0.438	0.542	0.933	1.129	2.834
전주	OLS	138.085	0.423	0.592	0.917	1.141	2.785
	Sridge(MM)	141.480	0.426	0.433	0.925	0.830	2.750
	BMA	139.840	0.431	0.533	0.925	1.100	2.718
광주	OLS	139.995	0.426	0.617	0.925	1.103	2.690
	Sridge(MM)	134.242	0.419	0.550	0.917	0.880	2.600
	BMA	140.169	0.437	0.592	0.917	1.060	2.620
춘천	OLS	152.242	0.477	0.567	0.917	1.204	2.934
	Sridge(MM)	148.830	0.470	0.525	0.883	1.070	2.730
	BMA	149.536	0.477	0.525	0.908	1.180	2.912
강릉	OLS	215.993	0.665	0.583	0.950	1.508	3.680
	Sridge(MM)	178.687	0.654	0.425	0.908	1.050	3.310
	BMA	218.129	0.666	0.592	0.942	1.484	3.658

Table 3.2.37 GA, S-BMA, L-BMA의 CRPS, IGN, coverage probability, coverage width

지역	방법	CRPS	IGN	coverage prob.		coverage width	
				50%	90%	50%	90%
서울	GA	47.822	152.712	0.600	0.933	1.301	3.173
	S-BMA	46.027	149.54	0.533	0.925	1.179	3.078
	L-BMA	46.177	147.735	0.533	0.925	1.140	2.928
인천	GA	54.049	168.238	0.517	0.908	1.396	3.405
	S-BMA	52.672	161.526	0.517	0.908	1.235	3.238
	L-BMA	52.935	164.212	0.475	0.900	1.186	3.062
대전	GA	43.224	139.027	0.550	0.958	1.205	2.939
	S-BMA	44.796	145.053	0.433	0.933	1.084	2.981
	L-BMA	43.666	141.938	0.442	0.958	1.000	2.803
대구	GA	61.625	195.519	0.583	0.950	1.501	3.661
	S-BMA	62.869	176.611	0.492	0.925	1.274	3.400
	L-BMA	62.084	176.501	0.425	0.925	1.163	3.204
부산	GA	59.618	192.645	0.625	0.942	1.596	3.891
	S-BMA	59.629	170.095	0.483	0.917	1.269	3.360
	L-BMA	58.643	170.535	0.517	0.900	1.182	3.108
임실	GA	43.876	141.684	0.525	0.917	1.131	2.757
	S-BMA	43.169	140.816	0.425	0.875	0.920	2.407
	L-BMA	42.88	138.391	0.392	0.900	0.913	2.430
전주	GA	42.261	139.383	0.575	0.908	1.104	2.693
	S-BMA	42.579	137.82	0.450	0.917	0.942	2.624
	L-BMA	41.788	135.49	0.442	0.917	0.905	2.514
광주	GA	42.617	146.35	0.608	0.900	1.068	2.603
	S-BMA	43.211	138.637	0.567	0.883	0.966	2.464
	L-BMA	42.382	135.85	0.517	0.908	0.940	2.438
춘천	GA	47.712	154.696	0.567	0.892	1.168	2.849
	S-BMA	47.588	152.232	0.500	0.917	1.115	2.858
	L-BMA	46.96	148.523	0.533	0.900	1.091	2.703
강릉	GA	66.517	211.997	0.567	0.950	1.455	3.548
	S-BMA	67.551	185.195	0.458	0.875	1.091	2.959
	L-BMA	65.784	181.746	0.442	0.858	1.079	3.011

마. 기후 변화 불확실성의 요인별 분해 기술

기후 변화의 전망에 과정은 기후변화 시나리오, 전지구모형의 제시, 지역에 맞는 downscaling, 수문모형의 단계로 이루어진다. 이를 도식화 하면 다음과 같다.

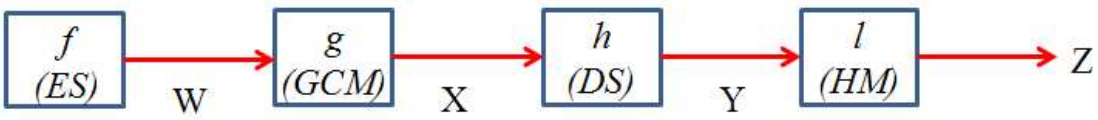


Fig. 3.2.69 기후변화 전망 도식화

여기서 W, X, Y는 각 단계에서의 출력변수이며 다음단계의 입력변수가 된다. f, g, h, l은 각 단계에서의 모형함수이다. Z는 기후 변화 전망의 최종 출력변수이며 이는 다음단계가 없기 때문에 입력변수가 되지는 않는다.

최종 출력변수 Z가 가지는 불확실성은 f, g, h, l로 대표되는 각 단계에서의 모형함수가 만들어내는 불확실성의 영향을 받게 되며, 각각의 W, X, Y가 가지는 불확실성의 합이 될 것이다. 통계적으로 불확실성은 확률변수의 분산으로 생각할 수 있으며, 이러한 불확실성의 분해는 통계적 방법중의 하나인 Delta method를 이용한다.

$Z = \{z_1, z_2, \cdots, z_n\}$를 최종 출력변수라 하자. 전체 불확실성 분해식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Var(Z) &= Var(l(Y)) = (l(Y) - l(\mu_X))^2 \\ &\approx (l'(\mu_Y)(Y - \mu_Y)^2 = l'(\hat{Y})^2 Var(Y) \quad \text{(using delta method)} \\ &\approx (l'(\mu_Y))^2 (h'(\mu_X))^2 (g'(\mu_w))^2 Var(W) \quad (3.2.42) \end{aligned}$$

→ (HM 불확실성)×(DS 불확실성)×(GCM 불확실성)×(ES 불확실성)

Eq. (3.2.42)에서 각 단계별 불확실성은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} (l'(\mu_Y))^2 &= Var(Z) / Var(Y) \\ (h'(\mu_X))^2 &= Var(Y) / Var(X) \\ (g'(\mu_W))^2 &= Var(X) / Var(W) \end{aligned} \quad (3.2.43)$$

이는 함수의 불확실성은 입력자료의 변동성(불확실성)과 출력자료의 변동성의 비로 표현 할 수 있음을 의미한다. Eq. (3.2.43)를 Eq. (3.2.42)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$Var(Z) = \left(\frac{Var(Z)}{Var(Y)}\right) \times \left(\frac{Var(Y)}{Var(X)}\right) \times \left(\frac{Var(X)}{Var(W)}\right) \times Var(W) \quad (3.2.44)$$

(HM 불확실성)×(DS 불확실성)×(GCM 불확실성)×(ES 불확실성)

즉 Fig. 3.2.70의 전체 과정은 단계별 분리하여 다음과 같이 보일 수 있음을 의미한다.

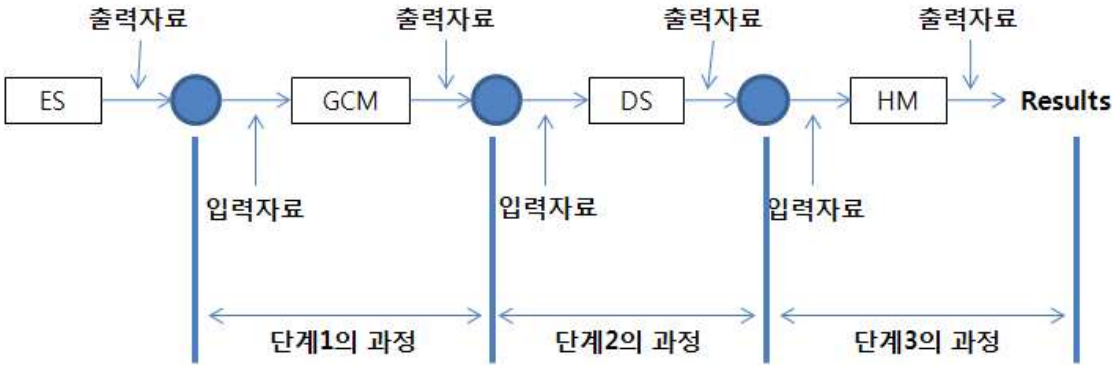


Fig. 3.2.70 기후변화 전망과정의 분해

각 단계는 Eq. (3.2.43)과 같이 구성된다.

입력자료→모형→출력자료

이때 출력자료는 앞서 언급한 것과 같이 다음 단계의 입력자료가 된다. 따라서 Eq. (3.2.44)는 다음과 같이 분리하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{단계1: } Var(W)\times\left(\frac{Var(X)}{Var(W)}\right)\approx Var(X)\\ &\text{단계2: } Var(X)\times\left(\frac{Var(Y)}{Var(X)}\right)\approx Var(Y)\\ &\text{단계3: } Var(Y)\times\left(\frac{Var(Z)}{Var(Y)}\right)\approx Var(Z) \end{aligned} \tag{3.2.45}$$

이를 기호로 나타내면 다음과 같다.

단계1: $U_i^1\times U_m^1=U_o^1$, 단계2: $U_i^2\times U_m^2=U_o^2$, 단계3: $U_i^3\times U_m^3=U_o^3$

이에 따라 단계별 불확실성은

$U_i^n\times U_m^n=U_o^n$ 단, $U_o^{n-1}=U_i^n$

이 되고, 전체 불확실성은 아래의 Eq. (3.2.46)과 같다.

$$U_i^1\times U_m^2\times\cdots\times U_m^n=U_o^n=U_T \tag{3.2.46}$$

실제 불확실성의 요인분해에 있어서 중요한 것은 각 단계에서 나타나는 불확실성의 양이 아니라 전체 단계에서 차지하는 비율이 중요하다. 따라서 이를 확률적으로 표현하기 위해 Eq. (3.2.46)를 다음과 같이 표현하면,

$$U_i^1 \times U_m^2 \times \cdot\ \cdot \times U_m^n = U_o^n = U_T$$
$$\rightarrow \ln U_i^1 + \ln U_m^2 + \cdot\ \cdot + \ln U_m^n = \ln U_T \quad (3.2.47)$$

이 되고 Eq. (3.2.47)을 이용하여 다음과 같이 단계별 불확실성이 차지하는 비율을 표현하면,

$$1\text{단계 불확실성 } \% = \ln U_i^1 / \ln U_T \times 100(\%)$$
$$2\text{단계 불확실성 } \% = \ln U_m^2 / \ln U_T \times 100(\%)$$
$$\vdots$$
$$n\text{단계 불확실성 } \% = \ln U_m^n / \ln U_T \times 100(\%)$$

로 표현할 수 있다.
대표지역으로 임실을 설정하고 이를 적용시킨 결과는 다음과 같다.

Table 3.2.38 임실지역 불확실성 요인별 분해 기술 적용 결과

수행단계		Entropy	Variance	모형의 불확실성
ES	A2	5.60	18018.59	
	B1	5.60	13935.49	
	Ave	**5.60**	**15977.04**	
GCMs	CSIRO	5.56	29046.10	
	ECHAM5	5.65	13745.22	
	MIUB-ECHO-G	5.65	10989.50	
	MRI-CGCM2.3.2	5.48	9771.14	
	Ave	**5.59**	**15887.99**	**0.99**
DS	BR	5.32	17528.60	
	ANN	5.43	7396.56	
	Ave	**5.37**	**12462.58**	**0.78**
HM	*abcd*	5.97	50042.69	
	GR2M	5.91	61574.80	
	Ave	**5.94**	**55808.74**	**4.48**
All	**Total**	**5.94**	**55808.74**	**3.49**

이를 통해서 보았을 때 모형의 불확실성은 수문모형에서 가장 크며 전체에서 차지하는 비중이 가장 높음을 알 수 있다.

바. 기후 변화에 따른 한반도 수자원 전망의 불확실성 제시

한반도 전 지역에 대한 수자원 전망은 기존에 이루어져 왔지만 이에 대한 불확실성 제시에 대한 연구는 깊게 이루어진 바가 없다. 앞서 개발한 다양한 조합 기법들(Scaled Ridge, Weighted Scaled Ridge, Spatial Regression), 불확실성 정량화기법들(Residual Mixture Model, BMA, Leave-one-out BMA)방법을 한반도 수자원 전망의 불확실성 제시에 사용할 수 있다. 그중 특히 조합 기법으로 Scaled Ridge, 정량화 기법으로 Residual Mixture Model을 사용하여 불확실성의 제시를 하고자 한다.

IPCC 4차 보고서의 배출 시나리오 중 A2, B1시나리오를 사용하였고, IPCC 5차보고서의 시나리오로서 RCP 8.5를 사용하였다. RCP 8.5의 경우 오직 1개의 GCM 결과만을 얻을 수 있었기 때문에 BMA기법을 사용할 수 없는 한계가 있기 때문에 Scaled Ridge 방법과 Residual Mixture Model만을 복합하여 사용하였다.

각 시나리오에 대하여 S1(2010~2039), S2(2040~2069), S3(2070~2099)기간에 대한 불확실성을 제시하였고, 불확실성의 제시는 각 분포의 90%, 95%, 99% 초과 확률의 분위수를 제시함으로서 그 변동의 폭을 쉽게 알 수 있게 하였다.

Table 3.2.39~3.2.44는 한반도 전 지역 강수량 및 기온 전망 결과에 대한 평균적인 결과 요약이다. 이를 보면 강수량과 기온 모두 증가하는 것으로 나타났다. A2시나리오의 경우 B1 시나리오보다 강수량, 기온의 증가량이 적다는 것을 알 수 있으며, RCP 8.5는 A2, B1시나리오 보다 더 큰 증가폭을 보여준다. 이는 RCP 8.5에는 GCM 결과가 하나뿐이기 때문일 수도 있다.

(1) A2 시나리오 기반

(가) 강수량 전망

Table 3.2.39 A2 시나리오 강수량 전망

		평균	90%초과	95% 초과	99% 초과
s1	예측 연 평균 강수량	1455.21	1567.64	1608.22	1698.82
	과거 대비 증가량	149.71	262.14	302.72	393.32
s2	예측 연 평균 강수량	1455.95	1571.61	1610.97	1709.50
	과거 대비 증가량	150.45	266.11	305.47	404.00
s3	예측 연 평균 강수량	1456.91	1571.99	1612.96	1701.43
	과거 대비 증가량	151.42	266.49	307.46	395.93

단위 : mm

(나) 기온 전망

Table 3.2.40 A2 시나리오 기온 전망

		평균	90%초과	95% 초과	99% 초과
s1	예측 연 평균 기온	13.13	13.27	13.30	13.37
	과거 대비 증가량	0.82	0.96	0.99	1.06
s2	예측 연 평균 기온	14.10	14.24	14.28	14.35
	과거 대비 증가량	1.79	1.93	1.97	2.04
s3	예측 연 평균 기온	15.55	15.68	15.72	15.79
	과거 대비 증가량	3.24	3.37	3.41	3.48

단위 : ℃

(2) B1 시나리오 기반

(가) 강수량 전망

Table 3.2.41 B1 시나리오 강수량 전망

		평균	90%초과	95% 초과	99% 초과
s1	예측 연 평균 강수량	1510.05	1639.67	1690.09	1817.43
	과거 대비 증가량	204.55	334.17	384.59	511.93
s2	예측 연 평균 강수량	1523.48	1658.71	1708.61	1848.71
	과거 대비 증가량	217.98	353.21	403.12	543.21
s3	예측 연 평균 강수량	1551.72	1690.44	1742.94	1868.31
	과거 대비 증가량	246.22	384.95	437.44	562.81

단위 : mm

(나) 기온 전망

Table 3.2.42 B1 시나리오 기온 전망

		평균	90%초과	95% 초과	99% 초과
s1	예측 연 평균 기온	13.6	13.74	13.78	13.84
	과거 대비 증가량	1.29	1.43	1.46	1.53
s2	예측 연 평균 기온	14.24	14.37	14.41	14.49
	과거 대비 증가량	1.93	2.06	2.1	2.18
s3	예측 연 평균 기온	14.83	14.96	15	15.07
	과거 대비 증가량	2.52	2.65	2.69	2.76

단위 : ℃

(3) RCP 8.5 시나리오 기반

(가) 강수량 전망

Table 3.2.43 RCP 8.5 시나리오 강수량 전망

		평균	90%초과	95% 초과	99% 초과
s1	예측 연 평균 강수량	1477.91	1636.63	1717.92	1998.63
	과거 대비 증가량	161.87	320.58	401.88	682.59
s2	예측 연 평균 강수량	1575.39	1746.02	1832.8	2142.43
	과거 대비 증가량	259.35	429.98	516.75	826.39
s3	예측 연 평균 강수량	1592.24	1764.84	1853.38	2157.18
	과거 대비 증가량	276.2	448.79	537.34	841.13

단위 : mm

(나) 기온 전망

Table 3.2.44 RCP 8.5 시나리오 기온 전망

		평균	90%초과	95% 초과	99% 초과
s1	예측 연 평균 기온	14.02	14.15	14.18	14.25
	과거 대비 증가량	1.67	1.8	1.83	1.9
s2	예측 연 평균 기온	15.87	16	16.03	16.09
	과거 대비 증가량	3.52	3.64	3.68	3.74
s3	예측 연 평균 기온	18.01	18.13	18.16	18.23
	과거 대비 증가량	5.66	5.78	5.81	5.88

단위 : ℃

사. 요약 및 결론

본 연구에서는 한반도 10개지역(서울, 부산, 대구, 대전, 광주, 인천, 춘천, 강릉, 임실, 전주)을 선정하고 기후변화 시나리오로 산출된 전지구 모형의 월 강수량을 사용하여 미래 강수량에 대한 불확실성 정도를 평가하였다. 또한 이러한 방법론을 이용하여 한반도 전지역에 대한 강수량과 기온의 전망 및 그 불확실성을 제시하였다.

1-1-1 단위과제로부터 A2 배출 시나리오와 5개의 GCM으로 산출한 기후변화 시나리오를 사용하였으며 전체 자료를 training자료와 test자료로 나눠 training자료로 모수들을 추정하고 test 자료로 불확실성 정도를 평가하였다. 제안하는 방법의 우수성을 살펴보기 위해 기존의 방법들과 비교 분석 하였다.

본 연구의 성과를 요약하면 아래와 같다

◦ 제안된 Scaled Ridge방법이 MSE를 비교 했을때 회귀분석, Ridge방법보다 대체적으로 낮아 예측에 대하여 정확성이 높다.

◦ Scaled Ridge 방법의 계산상의 문제점의 해결을 위해 제안한 Weighted Scaled

Ridge의 경우 Scaled Ridge보다 MSE가 작은 결과를 주었으며, 계산에 있어서도 용이하다.

◦ Scaled Ridge 방법과 Weighted Scaled Ridge 방법의 경우 지역적 상관성을 고려하지 않기 때문에 이를 고려하는 모형으로 Spatial regression을 적용하였다.

◦ 강수량의 분포를 살펴 보았을때 정규분포라고 가정하기 힘들므로 혼합 모형을 이용 하였을때 IGN, CRPS 낮고 Coverage interval이 정확하여 분포를 좀 더 정확하게 추정하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 coverage interval의 길이가 기존 방법들 보다 좁으므로 불확실성이 잘 저감 되는 것을 확인 할 수 있다.

◦ 기존의 불확실성 정량화 방법인 Bayesian Model Average 방법을 일반화한 Leave-one-out BMA 방법을 제시하였으며 L-BMA는 IGN, CRPS 가 기존의 BMA 보다 낮고 coverage probability가 정확하며, coverage interval이 더 좁기 때문에 불확실성의 저감 역시 잘된다는 것을 알 수 있다.

◦ Delta method를 이용하여 추정한 기후변화 불확실성 전 과정에서 발생하는 불확실성은 대부분 수문전망 과정에서 발생한다는 것을 알 수 있다.

◦ 한반도 전 지역에 대한 수자원 전망으로 전망기간에 대하여 강수량과 기온을 전망하였다. A2, B1, RCP 8.5 세 시나리오에 대하여 각각의 전망기간에서 대부분 강수량, 기온이 모두 증가하였다.

7. 결론

본 절에서는 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망, 기후변화에 따른 중단기 수문전망, 유역단위 시공간 스케일 상세화, 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가를 수행하였다. 각 연구 별 도출된 결과는 아래와 같다.

1) 시나리오 기반으로 생산된 연평균 유출량의 경우 과거기간 대비 2020s, 2050s, 2080s 기간에 대해 A2 시나리오는 9.1%, 9.8%, 9.9%, A1B 시나리오는 7.8%, 6.0%, 8.7%, B1 시나리오는 6.9%, 7.7%, 10.5% 증가할 것으로 전망되었다. 계절별 유출량의 변화를 평가한 결과, 여름 및 겨울철 증가, 봄 및 가을철 감소 경향이 나타났다. 특히 여름철에 국내 대부분의 유역에서 유출량이 크게 증가하며, 2020s(13~20%)에서 2080s(16~21%) 기간으로 갈수록 증가율이 커지는 것으로 전망되었다. 반면에, 봄철은 2020s 기간에는 유출량이 증가하나, 2050s, 2080s 기간으로 갈수록 크게 감소하는 유역의 수가 증가하였다.

2) 경향성 및 탄성도 분석 결과를 이용하여 중단기 (2013, 2015, 2017, 2020) 수문 전망을 실시하였다. 이는 비시나리오를 기반으로 한 수문 전망 결과로써 경향성 분석을 이용하여 면적평균강우량의 미래 전망값을 산정한 결과, 2013년에는 현재(1966~2001) 보다 3.88 % 증가, 2015년은 4.09 % 증가, 2017년은 4.31 % 증가, 2020년에는 4.63 %의 강우가 증가될 것으로 전망되었다.

3) 기후변화 시나리오 기반으로 생산된 미래 한강유역의 연평균 유출량의 변화는 2020s (2010~2039)에 8~12% 정도 증가할 것으로 전망되는 것으로 나타났다. 비시나리오 기반의 전망결과와 기간이 달라 정확히 비교하기는 힘들지만, 일단 다소 증가하는 경향은 유사하게 나타난다고 할 수 있다.

4) 인공신경망기법과 Random Cascade 기법을 합성하여 GCM 모의결과에 대한 지역화(regionalization)와 격자상세화를 동시에 수행할 수 있는 상세화 프로그램인 ARDAS를 개발하였다. 개발된 상세화기법을 통해 각 관측소별 모의결과에 대하여 32km×32km의 기본 스케일로 한 격자강우를 생성하여 Random Cascade 모형을 통한 상세화를 수행하여 1km의 고해상도 격자강우를 생성하였다.

5) 본 연구에서 개발된 격자기반의 분포형 수문순환모형은 미래 기후변화 평가를 위한 국내유역에 적합한 모형으로써, 유역내의 수문거동을 공간정보로 얻어낼 수 있으며, 남한전체의 공간적 변화를 파악하고 미래 식생, 토지이용, 융설예측자료 활용하는데 적합하다. 또한 기후변화 평가를 위해 기존의 수문모형들에 비해 식생상태와 CO_2농도를 최대한으로 고려할 수 있다.

6) 예측에 대한 정확성이 가장 높은 방법은 Weighted Scaled Ridge 방법으로 MSE가 가장 낮은 결과를 보였으며, 이에 지역적 상관성을 고려하기 위해 spatial regression을 적용하였다. 강수량의 분포는 혼합모형을 이용했을 때 IGN, CRPS 등 지표가 낮게 나타나고 coverage interval이 정확하게 나타나는 등 분포를 좀 더 정확하게 추정하는 것을 확인하였다. 불확실성 정량화방법은 기존의 Bayesion Model Average방법을 일반화하여 Leave-one-out BMA 방법을 제시하였는데, 이 방법이 IGN, CRPS 등 지표가 낮게 나타

나고 coverage probability가 더 정확하게 모의되는 것을 확인하였고, 또한 coverage interval가 더 좁게 나타나는 등 불확실성 저감에도 우수함을 확인할 수 있었다. 또한 Delta method를 이용하여 기후변화 연구 전 과정에서 발생하는 불확실성 중 대부분은 수문전망 과정에서 발생한다는 것을 확인하였다.

생산된 시나리오 기반의 장기 수문시나리오 및 비시나리오 기반의 단기 수문시나리오는 현재 국내 기술력을 통해 생산할 수 있는 최선의 전망 결과라고 할 수 있다. 이러한 전망 결과를 기반으로 수자원 제반분야(홍수, 가뭄, 용수공급 등)의 영향을 평가하고자 한다. 또한 개발된 상세화기법 및 수문모형은 기후변화에 따른 수자원 영향 평가 기술의 국내 기술력 향상에 이바지할 것으로 사료된다.

제 3 절 기후변화에 따른 극치 수문전망

1. 서론

최근까지 관측 자료를 살펴보면 고빈도의 강우 사상이 빈번하게 발생하고 있으며 산지뿐만 아니라 도시지역에서도 집중호우 발생 빈도가 증가함에 따라 홍수로 인한 재해도 증가하고 있다. 국외의 경우 자연 재해가 다양화되고 대형화되면서 이로 인한 홍수 피해 또한 증가하는 추세를 보이고 있어 이를 전 지구적인 문제점으로 인식하고 그에 대비한 연구가 꾸준히 진행 중이다. 이처럼 기후변화의 원인으로 발생하는 가뭄 및 홍수와 같은 극한수문량의 변동은 사회적, 경제적으로 큰 영향을 주기 때문에 우리나라 역시 기후변화에 대한 연구가 진행되고 있으나 기후변화가 극한수문량에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 시간적으로 상세화된 미래 자료는 미래 예측에 대한 불확실성 때문에 대체로 일단위로 제공되고 있으며, 극한수문량 추정에는 시단위 자료가 필요하기 때문에 일단위 자료로부터 시단위 극한수문량 수문량을 추정하기 위한 방법이 필요하다.

한편, 기상청 발표에 따르면 최근 20년간 우리나라 전체 강수량은 약 7% 정도 증가한 반면에 강수일수는 오히려 14% 정도나 감소한 것으로 나타났으며, 일 80mm 이상의 호우일수는 증가하고 있는 추세로 나타났다. 이러한 현실을 고려하면, 지금까지의 정상성 가정은 불합리적이며 더 이상 수자원계획 및 운영에 있어서 기본가정으로 받아들이기 힘들다. 특히 기후변화 패턴은 매우 복잡하고 불확실성이 크며, 표본자료나 평균, 분산 등 자료 자체의 통계적 특성은 시간이 지남에 따라 변화함으로써 정상성 가정에 대한 의문을 제기한다. 비정상성 시계열의 빈도해석에 있어 분포 매개변수나 그 분포 자체 또한 시간에 따라 변화하기 때문에 기존의 정상성 가정에 근거한 빈도해석과는 다른 새로운 접근방법이 요구되며, 초과확률이나 관련된 불확실성 추정에 있어서도 마찬가지로 비정상성을 고려할 수 있는 새로운 접근법이 요구된다.

20세기 최대 자연재해 중 상위 5위안에 4개의 가뭄이 기록될 정도로 물부족으로 인한 재해는 그 피해가 다른 재해와 비교하여 심각한 것으로 나타나고 있다(IPCC, 2007). 최근에 진행된 기후변화와 관련된 연구들이 기후변화가 수자원이용 및 관리에 부정적 영향을 끼칠 것을 우려하고 있다. 1900년 이후 지구의 평균기온은 0.76℃ 상승(IPCC, 2007)하였으며 이로 인해 해수면이 상승하고, 강수량과 적설량의 변화가 관측되고 있다. 기온 상승으로 인한 강수량의 변동은 수자원시스템에 막대한 영향을 끼쳐, 수자원의 이용 및 관리가 더 어렵게 만들고 이로 인한 수자원의 부족이 대형 가뭄의 발생으로 이어질 것이다.

기후변화는 장기수자원계획 수립시 더욱 심도있게 고려되어야 하는데, 기후변화를 고려한 물수급 전망이 중요한 이유는 대상 유역에서의 물공급 변화량을 파악하고 그로 인한 물부족량을 산정함으로써 기후변화로 인한 사회·경제적 피해를 최소화하기 위해서이다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 4차 평가보고서(Assessment Report, 2007)에 따르면 2050년대 지구평균 온도는 2-3℃ 증가하고 유출과 수자원의 지역적 불균형으로 인해 전 세계 인구의 약 10-20억명이 물부족에 취약할 것으로 전망하고 있다.

따라서 본 연구단에서는 미래 극치 수문전망을 위하여 세부과제 1-2-1에서 미래 수문

전망에 따른 홍수빈도해석을 실시하였으며, 세부과제 1-2-3에서 미래 수문전망에 따른 비정상성 홍수빈도해석을 실시하였다. 일단위로 제공되는 상세화된 미래 기후 시나리오 자료에 의한 확률강우량으로부터 scale invariance 개념을 이용하여 시단위 확률강우량을 추정하고, 국내 유역 관리의 기본이 되는 유역종합치수계획에서 구축한 강우-유출 모형인 HEC-1 모형에 입력하여 기후변화에 따른 극한홍수량을 전망하였다. 또한 강수량 관측자료의 비정상성 빈도해석에 대한 국내외 연구사례들을 조사·분석하여 향후 우리나라에 적용할 수 있는 최적의 비정상성 빈도해석기법으로 Gumbel 분포와 Power model을 각각 이용한 비정상성 빈도해석 방법을 적용하였다. 또한 미래 수자원전망을 위하여 강수량 자료와 수문자료의 통계적 분석을 통하여 가뭄의 크기를 정량화 하는 방법을 통해 세부과제 1-2-2에서 통계적 가뭄분석을 실시하였다.

본 연구는 미래시나리오를 사용하여 정상성 가정 하의 홍수빈도해석과 비정상성 가정 하의 홍수빈도해석, 그리고 가뭄빈도해석을 통하여 장기적인 중권역별 기후변화에 따른 극치 수문전망을 하는데 그 목적이 있다. '2. 극한 홍수량의 전망 기술 개발'에서는 세부과제 1-2-1에서 실시한 미래 홍수빈도분석 결과를 서술하였고, '3. 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석'에서는 세부과제 1-2-3에서 실시한 미래 비정상성 확률강우량 전망 결과를 분석하였다. 그 다음으로 '4. 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망'에서는 세부과제 1-2-2에서 실시한 가뭄분석 결과를 서술하였다. 마지막으로 '5. 결론'에서는 두 단위에서 수행한 연구의 결과를 비교 분석하였다.

2. 극한 홍수량의 전망 기술 개발

가. 서 론

전 세계적으로 기상이변이 빈번하게 발생하면서 기후변화가 수문환경에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기후변화 연구에는 대체로 이산화탄소 배출 시나리오에 근거한 GCM 모의 결과가 사용되며, GCM 자료를 바탕으로 미래의 수문량 변화를 예측하는 방법으로 진행된다. 기후변화가 강우에 미치는 영향과 관련해서는 기후변화가 총강우량에 미치는 영향에 대한 연구가 주를 이뤄왔으나 극한강우량에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한 상세화(downscaling) 된 강우 자료가 월단위 또는 일단위이기 때문에 극한홍수량 산정에 필요한 시단위 극한강우량 추정에는 한계가 있다.

본 연구에서는 기후변화가 극한홍수량에 미치는 영향을 분석하기 위해 A2 시나리오에 근거한 4개 GCMs 모델의 모의 결과를 상세화시켜 얻은 한강 유역 내의 9개 강우 관측 지점의 일강우 자료를 바탕으로 지역빈도해석과 강우의 scaling invariance 개념을 근거로 시단위 확률강우량을 추정하였다. 또한 유역종합치수계획에서 산정한 홍수량과 GCM 모의 결과에 근거한 미래의 홍수량을 비교하기 위해 유역종합치수계획에서 구축한 HEC-1 모형을 바탕으로 홍수량을 산정하였다.

나. 기후변화를 고려한 시단위 확률강우량 추정

치수 계획 수립을 위한 극한홍수량 산정을 위해서는 대개 시단위 지속기간에 대한 확률강우량을 강우-유출 모형의 입력 자료로 활용한다. 하지만 GCM 모의 결과로부터 상세화 된 강우 자료는 대개 일단위 자료이기 때문에 더 짧은 지속기간에 대한 확률강우량을 구하기 위한 방법이 필요하며, 본 연구에서는 scaling invariance 개념을 이용하여 시단위 확률강우량을 산정하였다. scaling 기법을 적용하는 데 필요한 스케일 지수(scale exponent)를 산정하기 위해 정영훈 등(2008)에서와 같이 강우 자료의 모멘트의 scaling invariance 특성에 근거한 지수 산정 방법을 활용하였다.

(1) Scale invariance 특성에 근거한 시단위 확률강우량 추정

(가) Scale invariance 특성

지속기간 T에 따른 확률강우량 $\xi_q(T)$는 Eq. (3.3.1)과 같은 형태로 표현할 수 있다 (Gupta and Waymire, 1990).

$$h = \xi_q(T) = A_q T^{m_q} \tag{3.3.1}$$

여기서, A_q와 m_q는 지속기간 T에 따른 확률강우량의 산정에 필요한 매개변수이다. 강우가 scale invariance의 특성을 보인다면 빈도 q에 독립적인 스케일 지수(scaling exponent) m_q는 이론적으로 감소하는 형태를 보이게 되며, 이와 같은 특징을 좁은 의미의 단일 스케일(strict sense simple scaling)이라 한다(Gupta and Waymire, 1990).

좁은 의미의 단일 스케일의 개념을 서로 다른 지속기간의 강우량에 적용하여 나타내

면 Eq. (3.3.2)와 같다.

$$Z_{\lambda T}(t) \overset{d}{=} \lambda^n Z_T(t) \tag{3.3.2}$$

여기서 λ는 스케일 인자(scaling factor), n은 스케일 지수(scaling exponent)로 일정한 값을 가지며, '$\overset{d}{=}$'은 동일한 확률분포형 내에서 같다는 의미로 $Z_T(t)$와 $Z_T(t)$을 λ^n으로 rescale한 $Z_{\lambda T}(t)$는 같은 확률분포형을 가지는 특성을 보인다. 따라서 Eq. (3.3.1)과 같은 스케일 특성은 최대강우량 뿐만 아니라 빈도 q에 대한 확률강우량과 강우량의 모멘트에도 적용할 수 있으며 이를 식의 형태로 나타내면 다음과 같다(Gupta and Waymire, 1990).

$$H_{\lambda t}(t) \overset{d}{=} \lambda^n H_T(t) \tag{3.3.3}$$

$$\xi_q(\lambda T) \overset{d}{=} \lambda^n H_q(T) \tag{3.3.4}$$

$$E\left[H_{\lambda T}^l\right] \overset{d}{=} \lambda^{ln} E\left[H_T^l\right] \tag{3.3.5}$$

여기서 l은 모멘트의 차수를 나타낸다. 이와 같은 모멘트에 대한 스케일 관계는 좁은 의미의 단일 스케일보다 넓은 의미의 단일 스케일로 정의된다(Gupta and Waymire, 1990). 실제 확률분포형에 스케일 성질을 적용하는 것은 가용 자료 기간의 제약으로 인해 어려움이 따르므로 넓은 의미의 단일 스케일을 이용하여 자료의 특성을 분석할 수 있다.

(나) 스케일 인자와 스케일 지수의 추정

임의의 지속기간 T에 대한 확률강우량을 추정하기 위해서는 스케일 인자 및 스케일 지수의 추정이 필요하며 이중 스케일 인자 λ는 스케일 성질을 적용하고자 하는 지속기간 사이의 비율을 이용하여 산정할 수 있다. 지속기간 T의 확률강우량에 스케일 성질을 적용하여 임의의 지속기간 T의 확률강우량을 추정할 경우 스케일 인자는 Eq. (3.3.6)과 같이 산정된다.

$$\lambda = \frac{T}{T'} \tag{3.3.6}$$

스케일 지수는 넓은 의미의 단일 스케일에 근거하여 지속기간별 모멘트를 이용하여 추정한다. 우선 강우자료에 대한 지속기간별 모멘트를 모멘트차수 $l = 1,2,3,\cdots,m$에 대해 산정한다. 스케일 지수를 산정하기 위해서는 5차까지의 모멘트를 전대수지 상에 지속기간별로 도시한 후에(Fig. 3.3.1), 다시 이 값들을 이용하여 차수별로 선형회귀선의 기울기

를 도시하면, Fig. 3.3.2를 얻을 수 있고 모멘트 차수 l에 대한 모멘트의 기울기 ln은 각 모멘트 차수별 스케일 지수가 되고 넓은 의미의 단일 스케일에 의해 n은 평균적인 스케일 지수가 된다.

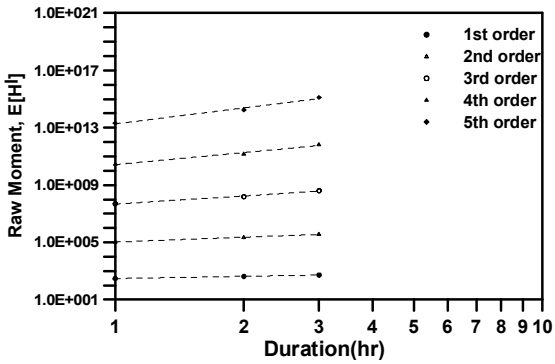


Fig. 3.3.1 지속기간별 모멘트

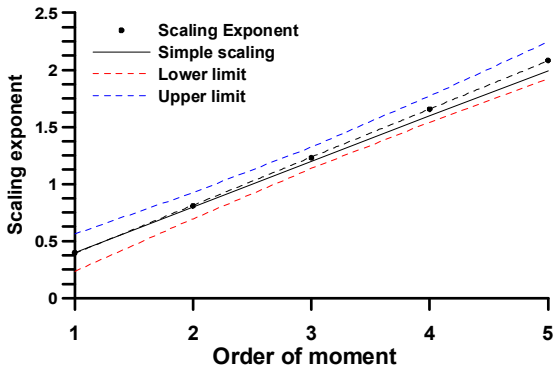


Fig. 3.3.2 모멘트 차수별 스케일 지수

(2) 지역빈도해석을 이용한 미계측 지점의 확률강우량 추정

홍수량 산정 시 사용되는 강우-유출 모형인 HEC-1 모형의 정확도는 유역 내의 강우 관측 지점의 밀도가 높을수록 향상된다. 유역종합치수계획에서는 홍수량을 산정하기 위해 HEC-1 모형을 활용하고 있으며, 대상 유역이 대유역으로서 이 유역들에 대한 신뢰할 만한 홍수량 산정을 위해서는 유역 내 강우 관측 지점수가 어느 정도 보장되어야 한다. 하지만 GCM 모의 결과를 보유한 지점은 기상청 관할의 54개 지점에 불과하여 유역종합치수계획에서 구축한 HEC-1 모형을 통한 모의에 제약이 따르는 실정이다. 일례로 한강 유역종합치수계획에서는 HEC-1 모형을 구축하는 데 56개의 강우 지점 자료를 활용하였으나, 현재 GCM 모의에 의해 활용할 수 있는 자료는 기상청 관할의 9개 지점에 불과하다. 따라서 47개 지점은 GCM 모의 결과가 없는 미계측 지점이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 미계측 지점의 확률강우량을 추정하기 위해 9개 지점의 자료를 바탕으로 지역빈도해석에 근거한 방법을 통해 나머지 47개 지점의 확률강우량을 추정할 수 있도록 하였다.

(가) 동질 지역의 구분

지역빈도해석을 수행하기 위해서는 수문학적 동질 지역 구분이 선행되어야 한다. 한강 유역의 경우 본 연구에서는 북한강, 남한강, 한강 본류의 유역 경계를 고려하고, 지역빈도해석의 장점이 보장되는 20개가량의 지점이 한 지역에 포함되도록 하였으며, GCM 모의 자료를 보유한 지점이 각 지역에 고루 분포되도록 지역을 구분하였다. 각 지역의 동질성 여부를 각 지점의 관측값 자료와 Hosking and Wallis (1997)가 제안한 기준 ($H<1$)을 근거로 검토하였다.

(나) 미계측 지점 확률강우량 추정의 정확도

각 지역의 GCM 보유 지점을 바탕으로 미계측 지점의 확률강우량을 추정할 경우, GCM 보유 지점에 의한 성장곡선(growth curve)이 그 지역을 어느 정도 대표할 수 있어

야 한다. 이를 검증하기 위해 한강 유역의 56개 지점의 관측값을 사용하여 각 지역의 3개 지점 자료만으로 추정한 성장곡선과 각 지역 내의 모든 지점 자료로 추정한 성장곡선을 비교하였다. 비교 결과 Gumbel 분포를 적용할 경우 3개 지점 자료에 의한 성장곡선과 동질 지역 내의 모든 지점 자료에 의한 성장곡선이 큰 차이를 보이지 않아 3개 지점 자료에 의한 성장곡선이 그 지역을 잘 대표할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 GEV 분포를 적용할 경우 재현기간이 커짐에 따라 3개 지점에 의한 성장곡선과 동질 지역 내의 모든 지점 자료에 의한 성장곡선의 차이가 증가하므로 3개 지점에 의한 성장곡선이 그 지역을 대표하는 데 문제가 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 Gumbel 분포를 활용하여 미계측 지점의 확률강우량을 추정하였다.

(다) 미계측 지점의 미래 확률강우량 추정

지역빈도해석에 의한 확률강우량은 그 지역을 대표하는 성장곡선에 각 지점의 연최대값 평균을 곱하여 산정한다. 미래 기간의 지역별 성장곡선은 각 지역에 포함된 GCM 모의 결과 보유 지점의 자료를 바탕으로 구할 수 있으므로, 미계측 지점의 연최대값 평균을 추정할 수 있으면, 미계측 지점의 확률강우량을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 GCM 모의 자료에서 과거 대비 미래 기간의 연최대값 평균의 변화율을 계산하고, 미계측 지점의 관측 자료의 연최대값 평균에 그 변화율을 고려하여 미래 기간의 연최대값 평균을 추정하였다. 이렇게 추정된 미래 기간의 연최대값 평균과 각 지역 내의 GCM 모의 결과 보유 지점을 활용하여 구한 성장곡선을 적용하여 각 지점의 확률강우량을 전망하였다.

다. 기후변화에 따른 미래 극한홍수량 전망

앞서 설명한 방법을 바탕으로 미래 기간의 확률강우량을 추정하고, 5대강의 유역종합치수계획에서 구축한 HEC-1 모형을 바탕으로 극한홍수량을 추정하였다.

(1) 기후변화에 따른 미래 확률강우량 산정

Table 3.3.1 ~ Table 3.3.5는 5대강 유역의 강우관측소 현황이며, GCMs 모의 자료를 보유하고 있는 강우관측소는 음영으로 표시하였다. 한강 유역의 경우 Table 3.3.1과 같이 56개의 관측소가 분석에 활용되었고, 9개의 관측소가 GCMs 모의 자료를 보유하고 있다. 금강 유역의 경우 Table 3.3.2와 같이 41개의 관측소가 분석에 활용되었고, 7개의 관측소가 GCMs 모의 자료를 보유하고 있다. 낙동강 유역의 경우 Table 3.3.3과 같이 60개의 관측소가 분석에 활용되었고, 16개의 관측소가 GCMs 모의 자료를 보유하고 있다. 섬진강 유역의 경우 Table 3.3.4와 같이 16개의 관측소가 분석에 활용되었고, 5개의 관측소가 GCMs 모의 자료를 보유하고 있다. 영산강 유역의 경우 Table 3.3.5와 같이 6개의 관측소가 분석에 활용되었고, 2개의 관측소가 GCMs 모의 자료를 보유하고 있다.

본 연구에서 활용한 GCMs 모의 자료는 IPCC AR4에 적용된 A2, B1, A1B 시나리오를 기반으로 Table 3.3.6의 4개 GCMs 모의 결과를 분석하여 미래 극한수문량을 전망하였다. GCMs 모의 결과는 통계적 상세화(Statistical downscaling)를 통해 편의 보정되었고, 전이함수(transfer function)를 이용한 공간적 상세화와 일기상발생기(weather generator)를 이용한 시간적 상세화가 조합된(hybrid) 기법이 사용되었다. 이러한 과정을

통해 본 연구에서는 100~350km의 GCMs 결과를 국내 기상관측소 54개 지점으로 공간적 상세화시켰고, WXGEN(Sharply and Williams, 1990)을 이용하여 월 단위 기후시나리오를 일단위로 시간적 상세화시켰다.

Table 3.3.1 한강 유역 강우관측소 현황

번호	관측소	관 할	경 도	위 도	해발고
1	철 원	기상청	127-18-00	38-09-00	152.4
2	서 울	기상청	126-58-04	37-34-07	85.5
3	춘 천	기상청	127-44-16	37-53-60	76.8
4	원 주	기상청	127-56-56	37-20-05	149.8
5	홍 천	기상청	127-52-57	37-40-51	140.6
6	양 평	기상청	127-29-48	37-29-09	49.0
7	이 천	기상청	127-29-11	37-15-41	68.5
8	인 제	기상청	128-10-09	38-03-26	198.6
9	제 천	기상청	128-11-47	37-09-23	264.4
10	충 주	기상청	127-57-17	36-58-03	69.4
11	대관령	기상청	128-45-40	37-41-03	842.5
12	안 양	국토부	126-54-19	37-24-07	27.0
13	구 로	국토부	126-53-23	37-29-32	35.0
14	의정부	국토부	127-02-59	37-44-30	42.0
15	퇴계원	국토부	127-09-14	37-38-50	31.0
16	성 남	국토부	127-07-28	37-27-57	24.0
17	낙 생	국토부	127-03-09	37-23-21	40.0
18	남한산성	국토부	127-11-14	37-28-34	20.0
19	용 인	국토부	127-11-21	37-13-51	87.0
20	청 평	국토부	127-23-56	37-42-36	180.0
21	하 면	국토부	127-21-20	37-48-54	117.0
22	서 면	국토부	127-40-21	37-41-26	130.0
23	내 촌	국토부	128-05-22	37-48-40	150.0
24	서 석	국토부	128-11-19	37-42-39	320.0
25	가 평2	국토부	127-31-12	37-49-43	60.0
26	추 양	수 공	127-53-01	38-01-20	210.0
27	부 평	국토부	128-04-51	37-57-59	250.0
28	현 리	수 공	128-20-18	37-56-39	320.0
29	창 촌	수 공	128-22-52	37-45-57	620.0
30	원 통	수 공	128-15-33	38-08-19	320.0
31	서 화	수 공	128-12-41	38-15-14	330.0
32	사 내	국토부	127-31-24	38-04-00	260.0
33	상 서	국토부	127-32-18	38-10-23	420.0
34	화천댐	국토부	127-46-43	38-06-52	180.0
35	방 산	국토부	127-56-43	38-12-26	350.0
36	청 운	국토부	127-42-45	37-33-12	110.0
37	여 주	국토부	127-38-58	37-17-33	45.0
38	생 극	국토부	127-36-32	37-1-52	100.0
39	문 막	국토부	127-48-51	37-18-15	65.0
40	간 현	국토부	127-50-31	37-21-33	70.0
41	횡 성	국토부	127-59-13	37-29-21	130.0
42	청 일	국토부	128-09-10	37-34-50	85.0
43	법 천	국토부	127-45-21	37-12-07	80.0
44	목 계	국토부	127-55-02	37-05-01	80.0
45	괴 산	수 공	127-44-11	36-48-56	200.0
46	속리산	국토부	127-48-29	36-30-27	330.0
47	백 운	수 공	128-01-29	37-08-10	200.0
48	청 풍	수 공	128-10-21	36-59-37	180.0
49	단 양	수 공	128-19-37	36-56-20	265.0
50	상 동	수 공	128-37-01	37-08-11	540.0
51	영 월1	수 공	128-24-41	37-11-29	200.0
52	수 주	수 공	128-16-56	37-16-56	270.0
53	평 창	수 공	128-23-21	37-22-30	295.0
54	정 선	국토부	128-40-22	37-23-05	300.0
55	진 부	수 공	128-34-41	37-39-29	574.0
56	임 계	수 공	128-49-12	37-29-39	498.0

Table 3.3.2 금강 유역 강우관측소 현황

번호	관측소	관 할	경 도	위 도	해발고
1	대 전	기상청	127-22-27	36-22-08	62.6
2	청 주	기상청	127-26-34	36-38-10	56.4
3	추풍령	기상청	127-59-40	36-13-11	240.9
4	보 은	기상청	127-44-02	36-29-15	173
5	부 여	기상청	126-55-14	36-16-20	11
6	금 산	기상청	127-28-54	36-06-20	170.6
7	군 산	기상청	126-45-47	36-00-07	26.9
8	장 수	기상청	127-31-12	35-39-25	407
9	천 안	기상청	127-07-16	36-46-46	21.3
10	함 열	국토부	126-57-55	36-04-47	300.0
11	연 산	국토부	127-12-25	36-12-48	32.0
12	복 룡	국토부	127-04-05	36-20-44	88.0
13	홍 산	국토부	126-45-45	36-13-03	30.0
14	청 양	국토부	126-48-24	36-27-13	100.0
15	정 산	국토부	126-56-51	36-24-59	40.0
16	공 주	국토부	127-07-40	36-28-13	18.0
17	정 안	국토부	127-07-21	36-36-32	77.0
18	반 포	국토부	127-14-35	36-24-13	80.0
19	병 천	국토부	127-18-02	36-45-56	75.0
20	가 덕	국토부	127-34-39	36-34-41	130.0
21	증 평	국토부	127-35-18	36-47-00	70.0
22	진 천	국토부	127-27-22	36-52-09	79.0
23	오 류	국토부	127-29-02	36-58-21	93.0
24	부 강	국토부	127-22-16	36-31-45	50.0
25	안 내	국토부	127-39-42	36-23-39	88.0
26	능 월	국토부	127-44-01	36-22-24	180.0
27	장 선	국토부	127-16-45	36-05-28	80.0
28	강 경	국토부	127-00-36	36-09-28	48.0
29	진 안	국토부	127-25-23	35-46-60	308.0
30	무 주	국토부	127-39-47	36-00-43	230.0
31	부항2	국토부	127-56-50	36-01-40	637.0
32	성 환	국토부	127-08-53	36-56-59	20.0
33	대 불	국토부	127-21-55	35-57-44	396.0
34	군 북	수공	127-32-30	36-23-06	75
35	이 원	수공	127-39-03	36-14-32	175
36	보 은	수공	127-52-34	36-28-38	460
37	황 간	수공	127-54-59	36-14-09	200
38	영 동	수공	127-47-32	36-06-48	270
39	금 산	수공	127-32-05	36-04-27	200
40	무 주	수공	127-39-37	35-53-35	390
41	북 상	수공	127-48-36	35-46-19	348

Table 3.3.3 낙동강 유역 강우관측소 현황

번호	관측소	관 할	경 도	위 도	해발고
1	태백	기상청	128-59	37-10	714.2
2	봉화	기상청	128-55	36-56	320.9
3	안동	기상청	128-42	36-34	140.7
4	영주	기상청	128-31	36-52	210.5
5	문경	기상청	128-09	36-37	170.8
6	의성	기상청	128-41	36-21	82.6
7	구미	기상청	128-19	35-07	47.4
8	대구	기상청	128-37	35-53	57.3
9	영천	기상청	128-57	35-58	93.3
10	거창	기상청	127-54	35-40	221.4
11	합천	기상청	128-10	35-33	33
12	산청	기상청	127-52	35-24	138.6
13	진주	기상청	128-02	35-09	27.1
14	밀양	기상청	128-45	35-29	10.7
15	울산	기상청	129-19	35-33	34.6
16	부산	기상청	129-02	35-06	69.2
17	포항	기상청	129-23	36-02	1.3
18	남해	기상청	127-56	34-48	43.2
19	마산	기상청	128-34	35-10	36.8
20	통영	기상청	128-26	34-51	30.8
21	추풍령	기상청	127-59	36-13	242.2
22	현서	국토부	128-53-54	36-16-22	555
23	길안	국토부	128-54-34	36-25-37	120
24	지보	국토부	128-22-02	36-31-37	50
25	풍산	국토부	128-34-48	36-35-47	180
26	일직2	국토부	128-40-20	36-28-05	120
27	동로2	국토부	128-20-21	36-42-15	350
28	농암2	국토부	127-59-09	36-34-20	340
29	상주	국토부	128-09-31	36-25-41	
30	안계	국토부	128-26-25	36-23-02	50
31	의흥	국토부	128-42-53	36-10-32	140
32	김천	국토부	128-06-44	36-06-57	160
33	부항2	국토부	127-57-19	36-01-25	670
34	왜관	국토부	128-23-40	36-00-01	20
35	장천	국토부	128-29-44	36-07-50	40
36	신령	국토부	128-47-22	36-02-44	120
37	가창	국토부	128-36-10	35-46-50	200
38	고령	국토부	128-16-47	35-43-34	60
39	대가	국토부	128-11-25	35-53-25	140
40	창녕	국토부	128-27-18	35-31-38	40
41	봉수	국토부	128-14-18	35-28-31	140
42	진양	국토부	128-15-48	35-10-24	50
43	함안	국토부	128-24-02	35-17-33	8
44	수산	국토부	128-42-58	35-21-44	10
45	청도	국토부	128-45-32	35-41-17	300
46	용성	국토부	128-52-25	35-46-23	250
47	상북	국토부	129-04-08	35-24-56	180
48	김해	국토부	128-52-39	35-13-35	10
49	의촌	수공	128-51-21	36-42-52	210
50	부남	수공	129-04-19	36-19-47	275
51	영양	수공	129-06-32	36-39-01	225
52	석보	수공	129-08-36	36-32-33	225
53	북상	수공	127-48-45	35-46-09	348
54	청연	수공	127-54-57	35-36-00	588
55	태수	수공	127-53-34	35-16-12	85
56	삼가	수공	128-07-03	35-24-50	80
57	운봉	수공	127-33-49	35-26-53	520
58	안의	수공	127-48-56	35-37-40	200
59	함양	수공	127-43-53	35-30-49	180
60	신안	수공	127-59-45	35-19-12	55

Table 3.3.4 섬진강 유역 강우관측소 현황

번호	관측소	관 할	경 도	위 도	해발고
1	전 주	기상청	127-09-17	35-49-17	61
2	임 실	기상청	127-17-07	35-36-44	248
3	남 원	기상청	127-19-58	35-24-19	93.5
4	순 천	기상청	127-14-20	35-04-29	74.4
5	장 흥	기상청	126-55-10	34-41-19	44.5
6	장 수	국토부	127-31-22	35-38-53	430.0
7	진 안	국토부	127-25-23	35-46-60	308.0
8	순 창2	국토부	127-08-07	35-22-18	131.0
9	구 례2	국토부	127-27-22	35-09-45	35.0
10	번 암2	국토부	127-32-27	35-32-33	240.0
11	하 동2	국토부	127-44-34	35-03-49	20.0
12	복 내	국토부	127-08-12	34-53-36	112
13	보 성	국토부	127-08-50	34-48-08	130
14	성 수	수공	127-20-37	35-42-46	420
15	쌍 치	수공	126-58-15	35-29-17	350
16	동복댐	수공	127-06-15	35-04-50	174

Table 3.3.5 영산강 유역 강우관측소 현황

번호	관측소	관 할	경 도	위 도	해발고
1	광 주	기상청	126-53-37	35-10-12	70.9
2	목 포	기상청	126-22-59	34-38-49	53.4
3	북 이	국토부	126-46-30	35-26-26	240.0
4	삼 서	국토부	126-38-52	35-13-44	20.0
5	함 평	국토부	126-31-11	35-03-53	10.0
6	능 주	국토부	126-53-54	35-00-01	40.0

Table 3.3.6 본 연구에 사용된 GCMs 정보

No.	Model (agency: version)	Country	Resolution	
			Atm.	Ocn.
1	CNRM : CM3	France	128*64	180*170
2	CSIRO : MK3	Australia	192*96	192*189
3	CONS: ECHOG	Germany/Korea	96*48	128*117
4	UKMO: HADCM	USA	96*73	288*144

(가) 미래 확률강우량 산정을 위한 동질 지역 구분

본 연구에서 GCMs 모의 결과를 보유한 지점은 한강 유역의 경우 54개 기상청 관측 지점이지만 홍수량 산정을 위해 구축된 HEC-1 모형에서 활용한 강우 관측 지점은 54개 지점 이외의 국토해양부 및 한국수자원공사 관할의 관측소도 포함되어 있다. 따라서 54개 지점 이외의 지점에 대한 확률강우량 역시 산정할 필요가 있으며, 이를 위해 본 연구에서는 앞서 기술한 지역빈도해석 기반의 미계측 지점 확률강우량 산정 기법을 적용하였다.

지역빈도해석을 수행하기 위해서는 수문학적으로 동질한 지역을 구분해야 하는데 한 지역 내에 약 20개 정도의 지점이 포함되어 있을 때 상대적으로 더 정확한 추정을 하는 것으로 알려져 있다(Hosking and Wallis, 1997). 따라서 동질 지역 구분 시 한 지역에 약 20개 정도의 지점이 포함되도록 지역을 구분하였다. 또한 GCMs 결과 보유 지점으로부터 성장곡선(growth curve)을 유도해야 하기 때문에 구분된 동질 지역 내에 GCMs 결과 보유 지점이 포함되어 있어야 한다. 이러한 조건을 충족시키기 위해 동질 지역 구분 시 유역에 포함된 GCMs 결과 보유 지점이 각 지역에 고루 분포되도록 하였다.

유역별 지역 구분 결과는 Table 3.3.7과 같다. 한강 유역은 각 지역에 3개의 GCMs 모의 결과 보유 지점이 포함되도록 하여 3개의 동질 지역으로 구분하였고, 금강 유역은 GCMs 모의 결과 보유 지점이 각각 4개, 3개가 포함되도록 2개의 동질 지역으로 구분하였으며, 낙동강 유역은 GCMs 모의 결과 보유 지점이 각각 5개, 5개, 6개가 포함되도록 3개의 동질 지역으로 구분하였다. 섬진강과 영산강은 인접하는 유역으로서 섬진강 유역은 GCMs 모의 결과 보유 지점 5개를 포함한 16개 지점을 보유하고 있는 반면, 영산강 유역은 GCMs 모의 결과 보유 지점 2개를 포함하여 6개 지점에 불과하므로 두 유역을 하나의 유역으로 간주하여 지역을 구분하였다. 두 유역의 강우 관측 지점은 22개에 불과하므로 유역 전체를 7개의 GCMs 모의 결과 보유 지점을 포함한 하나의 동질 지역으로 구분하였다. 각 유역의 강우 관측소 위치 및 지역 구분 결과는 Fig. 3.3.3 ~ Fig. 3.3.6과 같으며, 검정 타원으로 표시된 지점은 GCMs 모의 결과 보유 지점을 의미한다.

Table 3.3.7 유역별 지역 구분 결과

한강			금강			낙동강			영산강·섬진강		
지역	지점수	시나리오 보유 지점수	지역	지점수	시나리오 보유 지점수	지역	지점수	시나리오 보유 지점수	지역	지점수	시나리오 보유 지점수
HAN1	16	3	KUM1	23	4	NAK1	22	5	YS1	22	7
HAN2	18	3	KUM2	18	3	NAK2	18	5			
HAN3	22	3				NAK3	21	6			

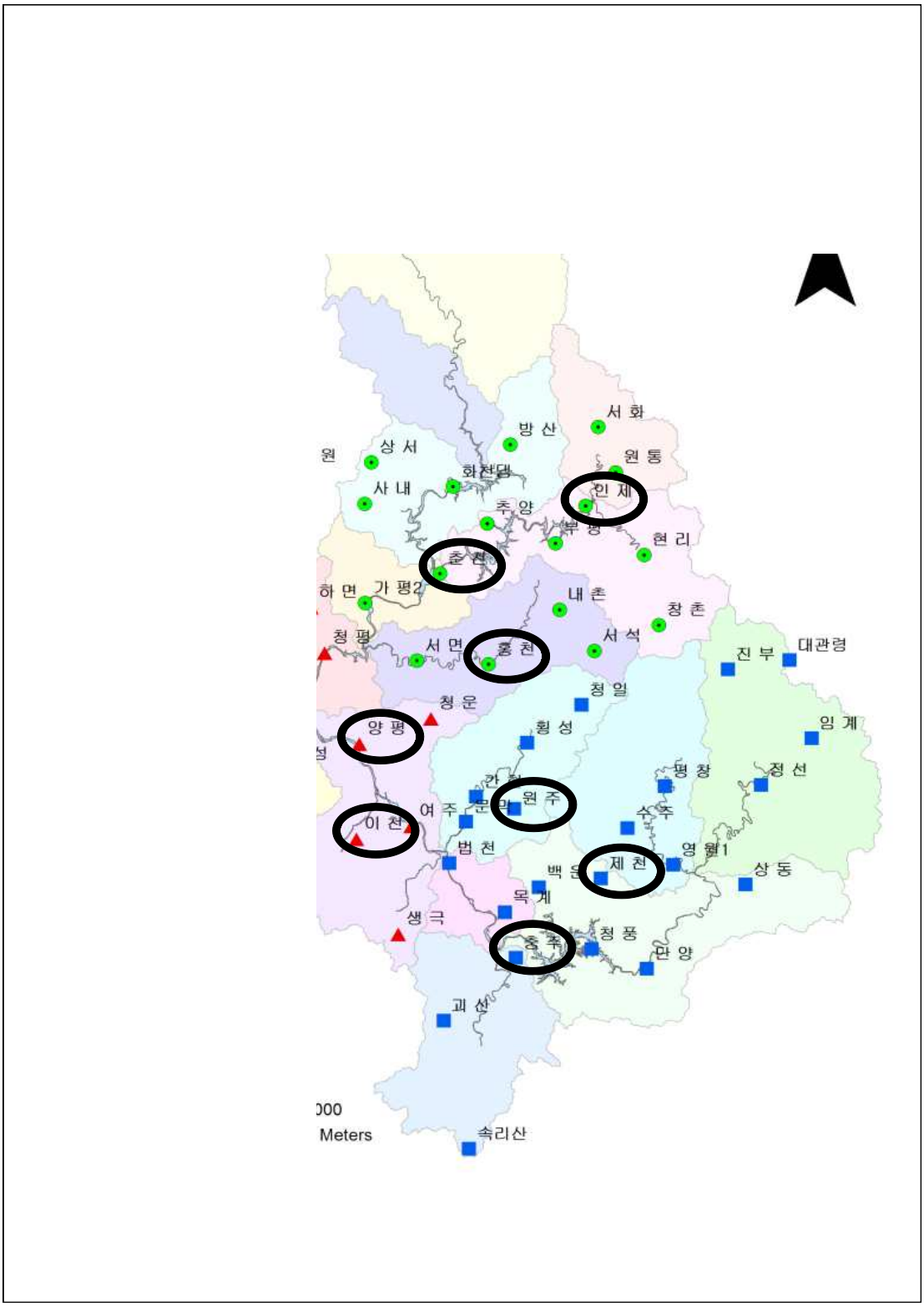


Fig. 3.3.3 한강 유역의 동질 지역

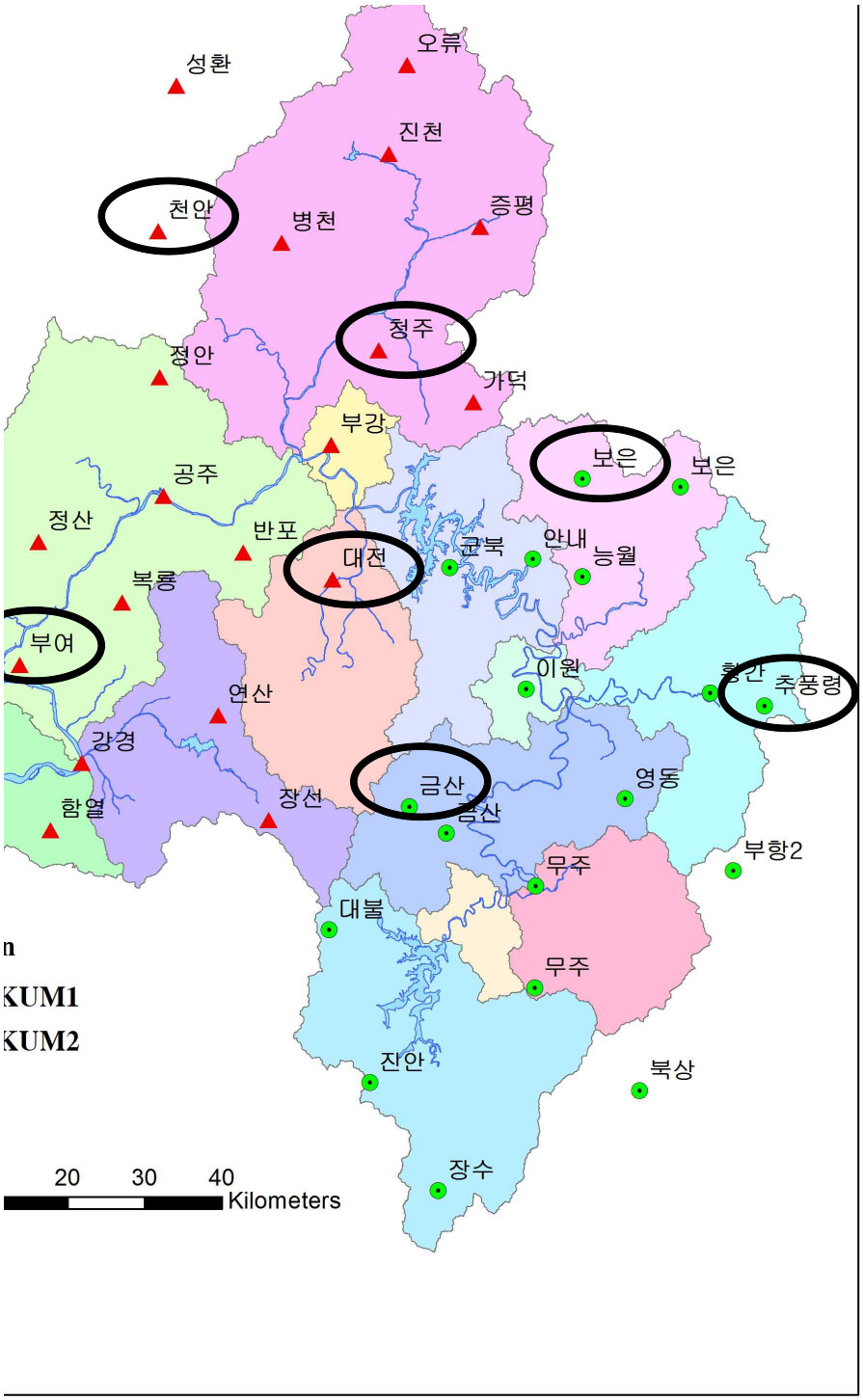


Fig. 3.3.4 금강 유역의 동질 지역

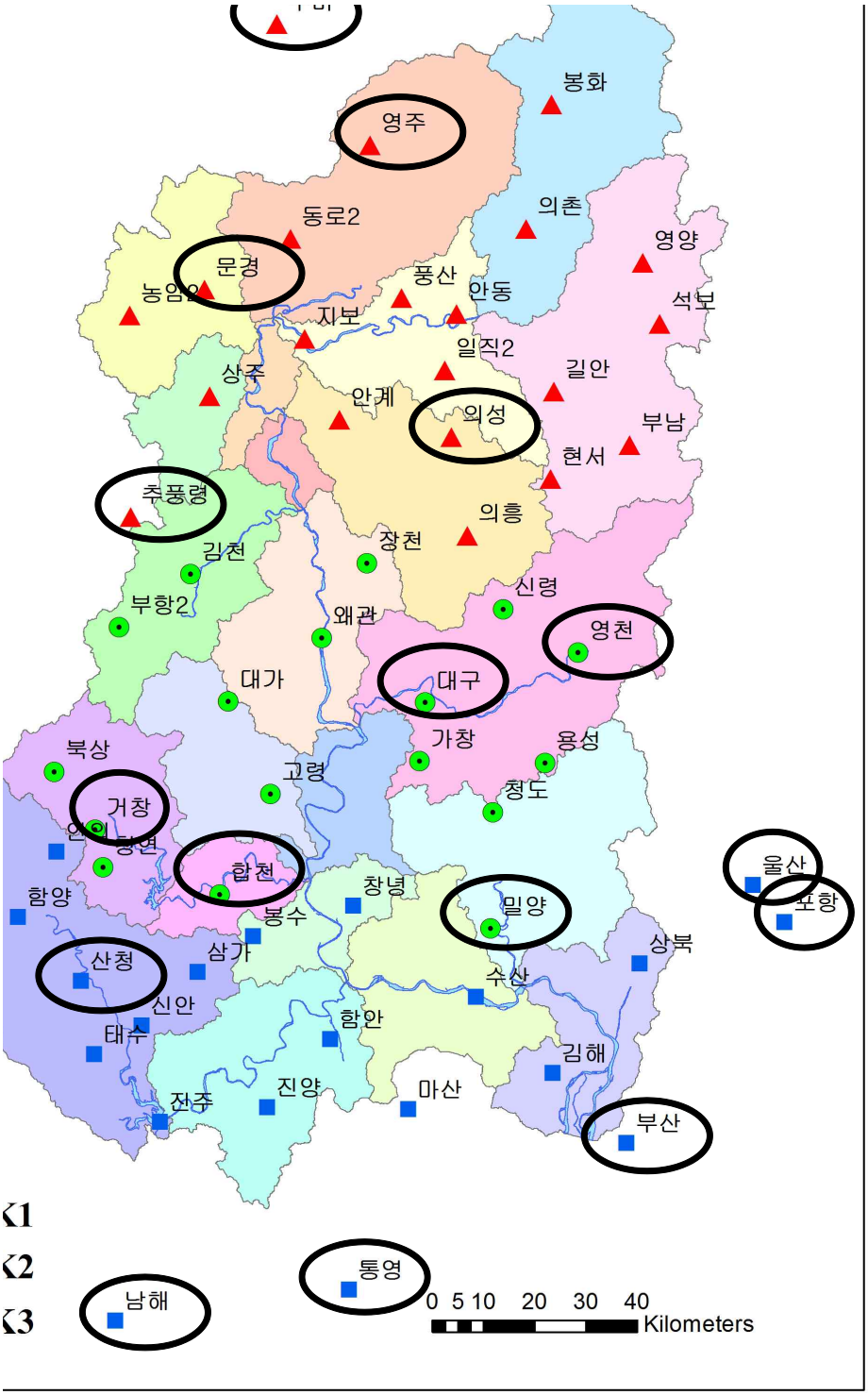


Fig. 3.3.5 낙동강 유역의 동질 지역

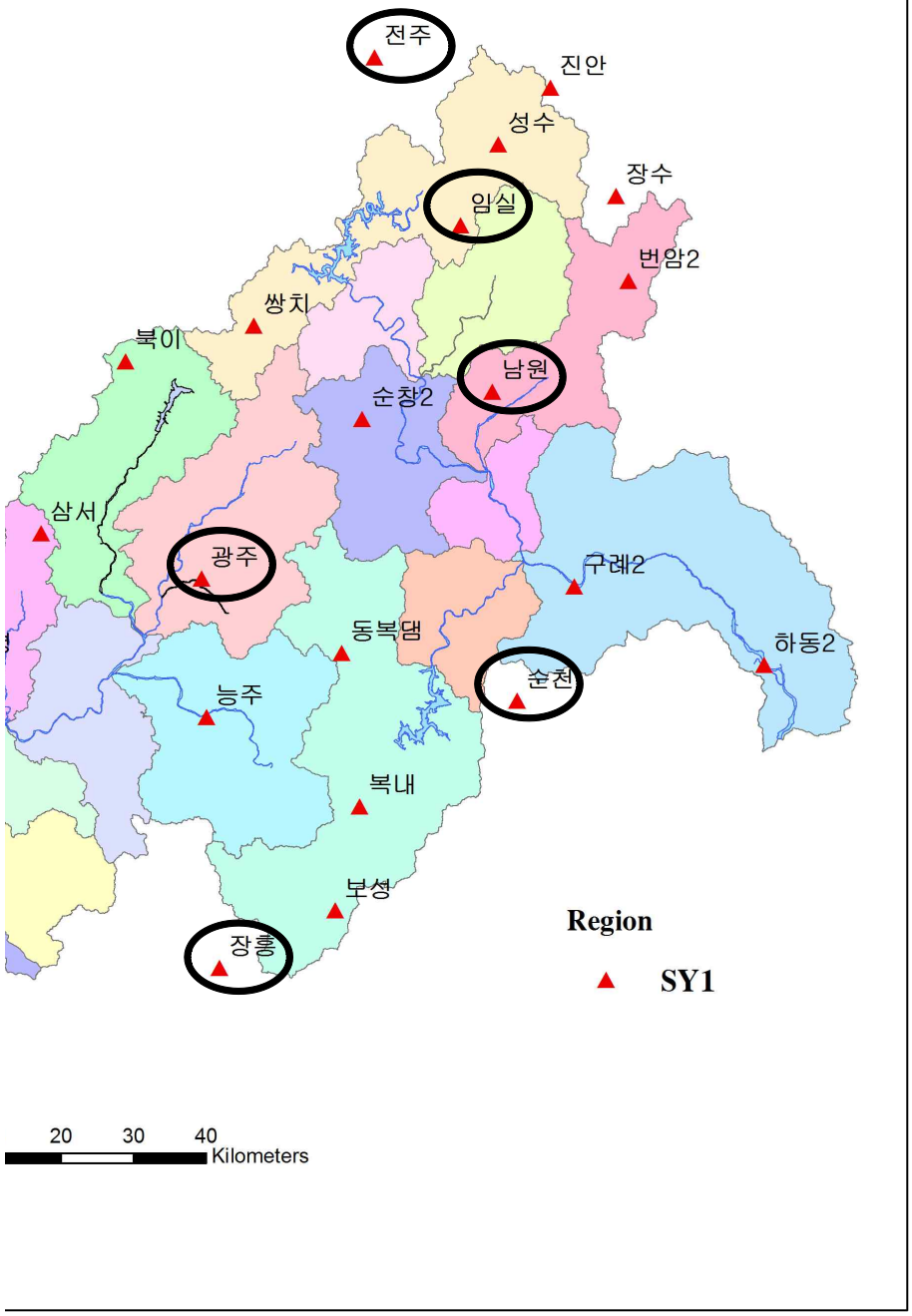


Fig. 3.3.6 섬진강·영산강 유역의 동질 지역

(나) 시단위 확률강우량 산정

HEC-1 모형을 이용하여 홍수량을 산정하기 위해서는 입력 자료로서 시단위 확률강우량이 필요하다. 하지만 GCMs 모의 자료를 상세화시킨 자료는 일단위로 제공되기 때문에 본 연구에서는 강우의 scale invariance 특성을 이용하여 시단위 확률강우량을 산정하였다. 일단위로 제공되는 GCMs 모의 자료로부터 지속기간 24, 48, 72 시간에 해당하는 연최대값 자료를 추출하고, 이를 빈도해석하여 확률강우량으로부터 24, 48, 72시간에 해당하는 확률강우량을 산정하였다. 24시간 이하의 지속기간에 대한 확률강우량은 Eq. (3.3.6)의 스케일 인자(λ)와 평균 스케일 지수(n)를 이용하여 산정하였다. 24, 48, 72시간 사이의 지속기간에 대한 확률강우량은 scale invariance 특성을 이용하여 산정할 경우 GCMs 모의 결과로부터 산정된 24, 48, 72시간 확률강우량과 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 GCMs 모의 결과에 의한 값을 기준으로 하기 위해 지속기간 24, 48, 72 시간 사이의 지속기간에 대한 확률강우량은 선형보간을 통해 산정하였다. 시단위 확률강우량 산정과 관련된 이러한 방법론을 도시하면 Fig. 3.3.7과 같다.

평균 스케일 지수는 각 강우 관측 지점별로 산정되는데 이를 위해서는 지속기간별 모멘트를 산정할 필요가 있다. 하지만 일단위로 제공되는 GCMs 자료로부터 모멘트를 산정할 경우 Fig. 3.3.1의 각 그래프의 기울기가 거의 0에 가까운 값을 보여 평균 스케일 지수를 산정하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 현재의 평균 스케일 지수가 미래에도 일정하게 유지된다고 가정하고, 관측 시강우 자료로부터 지속기간별 연최대값을 산정하여 지속기간별 모멘트를 산정함으로써 평균 스케일 지수를 계산하였다.

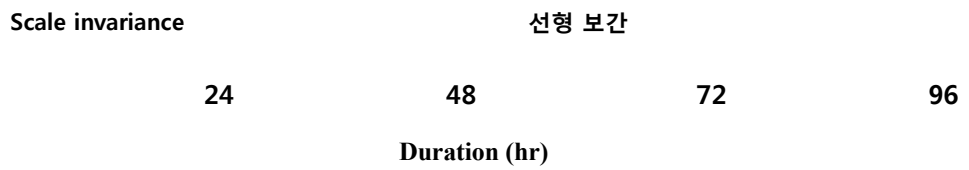


Fig. 3.3.7 시단위 확률강우량 산정 방법 모식도

(2) 기후변화에 따른 미래 극한홍수량 전망

앞 절에서 산정된 확률강우량을 HEC-1 모형의 입력 자료로 하여 미래 극한홍수량을 전망하였다. 미래 극한홍수량은 현재(1971～2009) 대비 30년 단위의 미래 기간인 2020s(2010～2039), 2050s(2040～2069), 2080s(2070～2099)에 대해 산정하였다. 5대강 유역의 전망 기간별 재현기간 100년 및 200년에 대한 극한홍수량 증가율은 Table 3.3.8 및 Table 3.3.9와 같고, 이를 유역별로 도시하면 Fig. 3.3.8 ～ Fig. 3.3.13과 같다. 그림에서 빨간선은 최대값을 나타내고, 파란선은 최소값을 나타내며, 점선은 GCMs별 극한홍수량 증가율을 가리킨다.

한강 유역의 지속기간 24시간에 대한 재현기간 100년 홍수량의 경우, Table 3.3.8에 제시된 것처럼 A2 시나리오 하에서 2020s 기간에 30.3%～46.8%, 2050s 기간에 40.7%～55.8%, 2080s 기간에 23.8%～59.5% 증가할 것으로 전망된다. 평균적으로 각 전망 기간의 홍수량 증가율은 2020s 기간에 39.9%, 2050s 기간에 48.1%, 2080s 기간에 42.8% 증가할 것으로 예상된다. B1 시나리오 하에서는 2020s～2080s 기간 각각에 28.8%～39.2%, 35.9%～58.2%, 28.8%～57.3% 증가할 것으로 전망되고, 평균적으로는 각 전망 기간에 33.8%, 43.3%, 44.7% 증가할 것으로 예상된다. A1B 시나리오 하에서는 각 전망 기간에 28.2%～49.3%, 38.8%～65.6%, 56.1%～67.0%의 확률강우량 증가가 예상되고, 평균적으로는 각 전망 기간에 40.3%, 65.6%, 67.0% 증가할 것으로 전망된다. 전망 기간별로 평균증감율을 비교해 보면, Fig. 3.3.8 ～ Fig. 3.3.10의 (a)에서 도시된 것처럼 2020s 기간에 비해 2050s, 2080s 기간의 증가율이 더 커짐을 알 수 있다. 이는 동일한 재현기간에 대한 홍수량이 미래로 갈수록 증가함을 의미하며, 현재의 임의 재현기간에 대한 홍수량이 미래에는 더 작은 재현기간에 대한 홍수량이 되어, 재해를 발생시킬 수 있는 홍수가 더 빈번하게 발생할 수 있음을 나타낸다.

금강 유역의 경우, Table 3.3.8에 제시된 것처럼 A2 시나리오 하에서 홍수량이 2020s 기간에 17.6%～29.8%, 2050s 기간에 21.4%～45.7%, 2080s 기간에 19.7%～44.2% 증가할 것으로 전망된다. 평균적으로 각 전망 기간의 홍수량 증가율은 2020s 기간에 25.4%, 2050s 기간에 33.3%, 2080s 기간에 31.2% 증가할 것으로 예상된다. B1 시나리오 하에서는 2020s～2080s 기간 각각에 10.5%～29.0%, 23.5%～35.8%, 23.1%～39.0% 증가할 것으로 전망되고, 평균적으로는 각 전망 기간에 21.3%, 29.2%, 33.0% 증가할 것으로 예상된다. A1B 시나리오 하에서는 각 전망 기간에 18.0%～34.2%, 28.9%～56.6%, 31.2%～55.9%의 확률강우량 증가가 예상되고, 평균적으로는 각 전망 기간에 26.9%, 39.0%, 42.3% 증가할 것으로 전망된다. 전망 기간별 평균증감율은 Fig. 3.3.8 ～ Fig. 3.3.10의 (b)에서 도시된 것처럼 한강 유역의 경우와 동일하게 2020s 기간에 비해, 2050s, 2080s 기간의 증가율이 더 커지는 것으로 전망되었다.

낙동강 유역의 경우, Table 3.3.8에 제시된 것처럼 A2 시나리오 하에서 홍수량이 2020s 기간에 18.6%～37.0%, 2050s 기간에 26.7%～47.0%, 2080s 기간에 24.4%～39.9% 증가할 것으로 전망된다. 평균적으로 각 전망 기간의 홍수량 증가율은 2020s 기간에 27.0%, 2050s 기간에 35.0%, 2080s 기간에 33.7% 증가할 것으로 예상된다. B1 시나리오 하에서는 2020s～2080s 기간 각각에 13.9%～24.1%, 20.0%～32.7%, 25.9%～41.8% 증가할 것으로 전망되고, 평균적으로는 각 전망 기간에 20.9%, 28.1%, 33.5% 증가할 것으로 예

상된다. A1B 시나리오 하에서는 각 전망 기간에 18.3%~34.7%, 26.7%~50.6%, 32.4%~57.9%의 확률강우량 증가가 예상되고, 평균적으로는 각 전망 기간에 26.6%, 36.3%, 41.5% 증가할 것으로 전망된다. 전망 기간별 평균증감율은 Fig. 3.3.8 ~ Fig. 3.3.10의 (c)에서 도시된 것처럼 한강 및 금강 유역의 경우와 동일하게 2020s 기간에 비해, 2050s, 2080s 기간의 증가율이 더 커지는 것으로 전망되었다.

섬진강 유역의 경우, Table 3.3.8에 제시된 것처럼 A2 시나리오 하에서 홍수량은 2020s 기간에 21.3%~40.3%, 2050s 기간에 20.7%~47.1%, 2080s 기간에 22.3%~42.7% 증가할 것으로 전망된다. 평균적으로 각 전망 기간의 홍수량 증가율은 2020s 기간에 28.7%, 2050s 기간에 32.3%, 2080s 기간에 29.9% 증가할 것으로 예상된다. B1 시나리오 하에서는 2020s~2080s 기간 각각에 14.2%~22.8%, 15.4%~33.0%, 31.4%~38.7% 증가할 것으로 전망되고, 평균적으로는 각 전망 기간에 19.0%, 27.7%, 35.1% 증가할 것으로 예상된다. A1B 시나리오 하에서는 각 전망 기간에 20.9%~25.8%, 18.7%~39.8%, 30.5%~46.6%의 홍수량 증가가 예상되고, 평균적으로는 각 전망 기간에 23.5%, 30.0%, 39.2% 증가할 것으로 전망된다. 전망 기간별 평균증감율은 Fig. 3.3.8 ~ Fig. 3.3.10의 (d)에서 도시된 것처럼 한강, 금강, 낙동강 유역의 경우와 동일하게 2020s 기간에 비해, 2050s, 2080s 기간의 증가율이 더 커지는 것으로 전망되었다.

영산강 유역의 경우, Table 3.3.8에 제시된 것처럼 A2 시나리오 하에서 홍수량은 2020s 기간에 33.2%~58.6%, 2050s 기간에 32.4%~67.8%, 2080s 기간에 34.3%~65.3% 증가할 것으로 전망된다. 평균적으로 각 전망 기간의 홍수량 증가율은 2020s 기간에 44.3%, 2050s 기간에 49.5%, 2080s 기간에 49.9% 증가할 것으로 예상된다. B1 시나리오 하에서는 2020s~2080s 기간 각각에 22.7%~35.8%, 25.3%~51.2%, 48.4%~58.8% 증가할 것으로 전망되고, 평균적으로는 각 전망 기간에 30.1%, 43.2%, 54.4% 증가할 것으로 예상된다. A1B 시나리오 하에서는 각 전망 기간에 34.6%~41.1%, 30.3%~59.6%, 48.8%~69.1%의 홍수량 증가가 예상되고, 평균적으로는 각 전망 기간에 37.7%, 47.4%, 61.4% 증가할 것으로 전망된다. 전망 기간별 평균증감율은 Fig. 3.3.8 ~ Fig. 3.3.10의 (e)에서 도시된 것처럼 한강, 금강, 낙동강 유역의 경우와 동일하게 2020s 기간에 비해, 2050s, 2080s 기간의 증가율이 더 커지는 것으로 전망되었다.

5대강 유역 전체의 홍수량 변화를 살펴보면, Fig. 3.3.10(f)와 같이 A2 시나리오의 경우, 2020s~2080s 기간 각각에 17.6%~58.6%, 20.7%~67.8%, 19.7%~65.3%의 증가를 보이는 것으로 전망되었다. 평균적으로 각 전망 기간에 33.0%, 39.6%, 37.5%의 홍수량 증가가 예측되었다. B1 시나리오의 경우, Fig. 3.3.11(f)와 같이 각 전망기간에 대해 10.5%~39.2%, 15.4%~58.2%, 23.1%~58.8%의 증가를 보이며, 평균적으로는 25.0%, 34.3%, 40.1%의 확률강우량 증가가 전망되었다. A1B 시나리오의 경우, Fig. 3.3.12(f)와 같이 각 전망기간에 대해 18.0%~49.3%, 18.7%~65.6%, 30.5%~69.1%의 증가를 보이며, 평균적으로는 31.0%, 41.8%, 49.6%의 확률강우량 증가가 전망되었다. 3가지 탄소배출 시나리오 모두 확률강우량의 경우와 마찬가지로 2020s 에 비해 2050s, 2080s 기간에 더 큰 홍수량 증가를 보이는 것으로 전망되었고, B1과 A1B 시나리오 하에서는 홍수량 증가율이 지속적으로 커지는 것으로 전망되었다. 각 전망 기간에 대해 홍수량 증가율의 범위를 살펴보면, 확률강우량의 경우와 마찬가지로 2050s 기간이 2020s, 2080s 기간에 비해 큰 값을 보여 전망 결과의 불확실성이 상대적으로 크게 나타났다.

Table 3.3.9와 Fig. 3.3.11 ~ Fig. 3.3.13의 지속기간 24시간 확률강우량에 대한 재현기간 200년의 홍수량 전망 결과 역시 재현기간 100년 홍수량과 비슷한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

Table 3.3.8 5대강 유역의 전망기간별 극한홍수량 증가율(%) (지속기간 24시간, 재현기간 100년)

유역	전망 기간	A2			B1			A1B		
		Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
한강	2020s	30.3	39.9	46.8	28.8	33.8	39.2	28.2	40.3	49.3
	2050s	40.7	48.1	55.8	35.9	43.3	58.2	38.8	56.3	65.6
	2080s	23.8	42.8	59.5	28.8	44.7	57.3	56.1	63.8	67.0
금강	2020s	17.6	25.4	29.8	10.5	21.3	29.0	18.0	26.9	34.2
	2050s	21.4	33.3	45.7	23.5	29.2	35.8	28.9	39.0	56.6
	2080s	19.7	31.2	44.2	23.1	33.0	39.0	31.2	42.3	55.9
낙동강	2020s	18.6	27.0	37.0	13.9	20.9	24.1	18.3	26.6	34.7
	2050s	26.7	35.0	47.0	20.0	28.1	32.7	26.7	36.3	50.6
	2080s	24.4	33.7	39.9	25.9	33.5	41.8	32.4	41.5	57.9
섬진강	2020s	21.3	28.7	40.3	14.2	19.0	22.8	20.9	23.5	25.8
	2050s	20.7	32.3	47.1	15.4	27.7	33.0	18.7	30.0	39.8
	2080s	22.3	29.9	42.7	31.4	35.1	38.7	30.5	39.2	46.6
영산강	2020s	33.2	44.3	58.6	22.7	30.1	35.8	34.6	37.7	41.1
	2050s	32.4	49.5	67.8	25.3	43.2	51.2	30.3	47.4	59.6
	2080s	34.3	49.9	65.3	48.4	54.4	58.8	48.8	61.4	69.1
5대강	2020s	17.6	33.0	58.6	10.5	25.0	39.2	18.0	31.0	49.3
	2050s	20.7	39.6	67.8	15.4	34.3	58.2	18.7	41.8	65.6
	2080s	19.7	37.5	65.3	23.1	40.1	58.8	30.5	49.6	69.1

Table 3.3.9 5대강 유역의 전망기간별 극한홍수량 증가율(%) (지속기간 24시간, 재현기간 200년)

유역	전망 기간	A2			B1			A1B		
		Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
한강	2020s	29.8	39.1	45.9	28.4	33.2	38.5	30.0	40.2	48.5
	2050s	40.0	47.1	54.7	35.3	42.5	57.0	38.1	55.3	64.3
	2080s	23.4	42.0	58.5	28.2	43.9	56.1	55.1	62.6	65.8
금강	2020s	17.0	24.5	28.7	28.4	33.2	38.5	22.6	29.4	33.0
	2050s	20.6	32.1	44.0	35.3	42.5	57.0	27.8	42.7	54.5
	2080s	19.0	30.1	42.6	28.2	43.9	56.1	38.6	46.7	53.9
낙동강	2020s	17.5	25.7	35.6	13.5	19.9	22.8	17.2	25.1	32.9
	2050s	25.3	33.5	45.2	19.0	26.9	31.8	25.3	34.6	48.3
	2080s	23.0	32.2	38.4	24.7	32.1	40.7	33.8	42.1	55.5
섬진강	2020s	21.9	29.3	40.8	14.8	19.6	23.5	21.6	24.0	26.2
	2050s	21.3	32.9	47.6	16.0	28.4	33.8	19.4	30.6	39.8
	2080s	23.0	30.6	43.2	32.2	35.9	39.4	31.2	39.8	46.6
영산강	2020s	32.1	42.6	56.3	22.0	29.1	34.4	33.3	36.3	39.5
	2050s	31.3	47.7	65.1	24.3	41.6	49.3	29.2	45.6	57.4
	2080s	33.1	48.0	62.7	46.7	52.3	56.5	47.0	59.0	66.4
5대강	2020s	17.0	32.3	56.3	10.1	24.5	38.5	17.2	31.0	48.5
	2050s	20.6	38.7	65.1	16.0	33.5	57.0	19.4	41.7	64.3
	2080s	19.0	36.6	62.7	22.3	39.2	56.5	31.2	50.0	66.4

(a) 한강 유역

(b) 금강 유역

(c) 낙동강 유역

(d) 섬진강 유역

(e) 영산강 유역

(f) 5대강 유역

Fig. 3.3.8 전망 기간별 극한홍수량 증가율
(A2 시나리오 기반, 지속기간 24시간, 재현기간 100년)

(a) 한강 유역

(b) 금강 유역

(c) 낙동강 유역

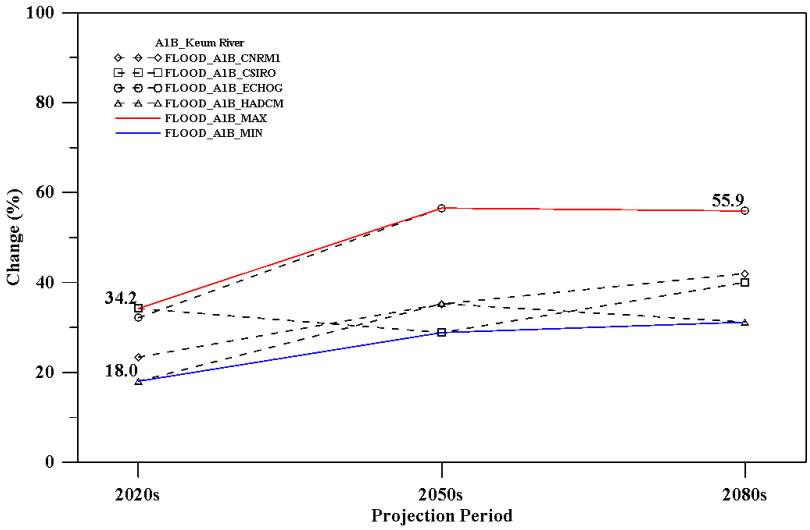
(d) 섬진강 유역

(e) 영산강 유역

(f) 5대강 유역

Fig. 3.3.9 전망 기간별 극한홍수량 증가율
(B1 시나리오 기반, 지속기간 24시간, 재현기간 100년)

(a) 한강 유역



(b) 금강 유역

(c) 낙동강 유역

(d) 섬진강 유역

(e) 영산강 유역

(f) 5대강 유역

Fig. 3.3.10 전망 기간별 극한홍수량 증가율
(A1B 시나리오 기반, 지속기간 24시간, 재현기간 100년)

(a) 한강 유역

(b) 금강 유역

(c) 낙동강 유역

(d) 섬진강 유역

(e) 영산강 유역

(f) 5대강 유역

Fig. 3.3.11 전망 기간별 극한홍수량 증가율
(A2 시나리오 기반, 지속기간 24시간, 재현기간 200년)

(a) 한강 유역

(b) 금강 유역

(c) 낙동강 유역

(d) 섬진강 유역

(e) 영산강 유역

(f) 5대강 유역

Fig. 3.3.12 전망 기간별 극한홍수량 증가율
(B1 시나리오 기반, 지속기간 24시간, 재현기간 200년)

(a) 한강 유역

(b) 금강 유역

(c) 낙동강 유역

(d) 섬진강 유역

(e) 영산강 유역

(f) 5대강 유역

Fig. 3.3.13. 전망 기간별 극한홍수량 증가율
(A1B 시나리오 기반, 지속기간 24시간, 재현기간 200년)

라. 결 론

본 연구에서는 기후변화에 따른 극한홍수량 변화를 전망하기 위해 전 세계적으로 기후변화 연구를 위해 활용하고 있는 탄소배출 시나리오와 GCM에 의한 미래의 강우량을 강우-유출 모형에 입력하여 홍수량을 산정하였다. GCM 결과를 지역적으로 적용하기 위해 시·공간적 상세화 과정에 의한 일단위 강우 자료가 사용되지만 홍수량 산정을 위해서는 시단위 확률강우량 산정이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 일단위 확률강우량으로부터 시단위 확률강우량을 추정하기 위해 scale invariance 개념에 근거한 방법을 활용하였다. 또한 홍수량을 산정하기 위한 강우-유출 모형으로 5대강 유역의 유역종합치수계획에서 활용한 HEC-1 모형을 사용하였다. 유역종합치수계획에서는 홍수량 산정을 위해 기상청 강우 관측 지점 이외에 국토해양부나 한국수자원공사 관할의 강우 관측 지점도 활용하고 있지만, GCM 결과를 보유한 지점은 기상청 지점에 국한되어 있으므로 본 연구에서는 지역빈도해석에 의해 기상청 이외의 지점에 대한 확률강우량을 산정하였다. 이러한 방법론을 바탕으로 산정된 미래의 극한홍수량 전망 결과에 의한 주요 결론은 다음과 같다.

1) 확률강우량의 변화에 따라 재현기간 100년, 200년의 홍수량은 5대강 유역 전체에 걸쳐 평균적으로 약 25%~50% 가량 증가할 것으로 전망되며, 한강과 영산강 유역이 상대적으로 홍수량 증가율이 클 것으로 전망된다.

한강 유역은 약 34%~64% 가량 증가
금강 유역은 약 21%~42% 가량 증가
낙동강 유역은 약 21%~42% 가량 증가
섬진강 유역은 약 19%~39% 가량 증가
영산강 유역은 약 30%~61% 가량 증가

2) 현재 대비 2020s 기간의 증가율보다 2050s, 2080s 기간의 증가율이 대체로 커서 미래로 갈수록 자연재해 발생 위험이 증가할 것으로 전망된다.

3) 2050s, 2080s 기간의 증가율 범위(최대증가율-최소증가율)가 2020s 기간에 비해 상대적으로 커지는 경향을 보이며, 이는 먼 미래로 갈수록 전망 결과의 불활실성이 증가함을 의미하므로 먼 미래일수록 전망 결과의 활용에 대한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

4) 탄소배출의 양을 기준으로 기후변화가 심한 정도는 A2, A1B, B1 순이지만, 극한홍수량 증가율은 A2와 A1B가 B1에 비해 상대적으로 큰 값을 보여 반드시 탄소배출 양에 따른 순위를 따르지 않는 것으로 판단된다. 이에 대한 원인은 향후 연구를 통해 분석되어야 할 것으로 보인다.

3. 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석

가. 서 론

최근 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로도 발생 시기나 규모를 벗어난 가뭄, 홍수 등 이상 기후현상이 빈번하게 관측되고 있다. 특히 강수의 경우, 연강수량은 증가하는 반면에 강수일수는 오히려 감소하고, 일강수량 80mm 이상의 호우일수는 증가하는 추세를 보인다. 이러한 현실에서 전통적인 빈도해석기법을 적용한 설계 강우량 산정과 적용에 한계가 있다. 지금까지 우리나라나 여러 선진국들에서는 정상성 가정 하에서 수자원관리를 위한 시스템을 계획하고 운영해왔다. 하지만 최근 들어 각국들은 이러한 정상성 가정은 불합리적이며 더 이상 수자원계획 및 운영에 있어서 기본가정으로 받아들이기 힘들다고 주장하고 있다. 기후변화 패턴은 매우 복잡하고 불확실성이 크며 기후변화에 대한 인식과 이해도 빠르게 변화하고 있으며, 기후변화의 관점에서 볼 때 표본 자료나 평균, 분산 등 자료 자체의 통계적 특성은 시간이 지남에 따라서 변화해 왔다. 이러한 변화는 관측 자료의 정상성 가정에 대한 의문을 제기하였다. 비정상성 시계열의 빈도해석에 있어 분포 매개변수나 그 분포 자체 또한 시간에 따라 변화하기 때문에 기존의 정상성 가정에 근거한 빈도해석과는 다른 새로운 접근방법이 요구되며, 초과확률이나 관련된 불확실성 추정에 있어서도 마찬가지로 비정상성을 고려할 수 있는 새로운 접근법이 요구되어진다. 따라서 관측 자료가 독립적이고 정상성을 띈다는 기본가정을 벗어나는 요소들은 빈도해석결과의 타당성에 영향을 미친다. 최근 수문학적 시계열 자료를 모형화하고 특정 재현기간의 극치사상을 추정하기 위해 사용되는 통계학적 방법은 비정상성을 가진 자료에 대해서는 적용될 수 없다. 최근 연구들에서는 확률분포를 관측 자료를 적합 시킬 때 시계열 자료의 비정상성 측면을 고려할 수 있는 여러 가지 기법들을 검토하고 있다. 본 연구에서는 기후변화와 관련하여 강수량 관측 자료의 비정상성 빈도해석 기법을 개발하여 최적의 비정상성 빈도해석 모형을 제시하고자 하였다. 또한, 비정상성 빈도해석 기술을 활용하여 빈도별 극한강우 산정기법을 제시하고 극치 수문량 전망에 대한 불확실성 분석 기법을 제시하고자 한다. 이는 기후변화의 영향을 반영할 수 있는 비정상성 빈도해석기법의 개발로 향후 예상되는 홍수, 범람 등으로부터 발생할 수 있는 피해를 최소화하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

나. 연구 대상지점 선정 및 확률분포함수

(1) 경향성 및 정상성 검정

본 연구에서는 30년 이상의 강우 자료를 보유하고 있는 59개의 지점 중 한강유역에 속하는 14개 지점을 대상으로 통계적 검정을 실시하였다. 선정된 지점의 지속시간 1시간 및 24시간에 대한 연 최대 강우량 자료를 대상으로 경향성 분석을 실시하였다. 강우의 빈도해석에 있어 관측강우로부터 추출한 지속시간 연 최대 강우량의 자료가 정상성임을 가정하여 적용하기 때문에 경향성 검정을 수행하는 것이 일반적이다(권영문 등, 2009). 본 연구에서는 Mann- Kendall, Wald-Wolfowitz, Run 검정법을 이용하여 지속시간 1시간 및 24시간 연 최대 강우량 자료의 경향성 검정을 실시하였다. 경향성 검정을 수행한 결과, Table 1과 같이 나타났다. 지속시간 1시간의 경우 속초, 대관령, 춘천 등 9개 지점에서 세 방법 중 한 가지 이상 경향성이 나타났으며, 지속시간 24시간의 경우에는 충주, 강화, 인제, 제천 지점에서만 경향성이 있는 것으로 나타났다.

일반적으로 비정상성 빈도해석에 있어 경향성 검정만을 사용하여 대상 지점을 선정하여, 그 지점만을 대상으로 비정상성 빈도해석을 실시하였다(권영문 등, 2009; 이정주 등, 2010; 장선우 등, 2011). 경향성 분석만으로 분석 지점을 선정하는데 한계가 있다고 판단된 바, 본 연구에서는 경향성 검정뿐만 아니라 정상성 검정까지 실시하여 비정상성 빈도해석을 적용할 대상 지점을 확대하였다. Augmented Dickey-Fuller(ADF), Phillips Perron(PP), Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin(KPSS) 검정을 이용해 각 지점의 정상성을 판별하였으며, 그 결과로 지속시간 1시간의 경우에는 제천을 제외한 13개 지점, 지속시간 24시간의 경우에는 양평을 제외한 13개 지점에서 세 가지 검정 방법 중 한 가지라도 만족하는 것으로 나타났다. 한강유역 14개 지점의 지속시간 1시간 및 24시간 연 최대 강수량 자료를 이용해 경향성과 정상성 검정을 수행한 결과, 지속시간 1시간의 경우에는 한강유역의 모든 지점이 경향성을 가지거나 비정상성임이 나타남을 보였으나, 지속시간 24시간의 경우에는 양평 지점을 제외한 모든 지점에서 경향성을 가지거나 비정상성임이 나타났다 . 하지만 본 연구는 Power Model을 이용해 한강유역의 확률강수량을 산정하는데 목적을 둔 바, 지속시간 24시간 연 최대 강수량 자료에 대하여 제천 지점도 포함하여 확률강수량을 산정하였다.

Table 3.3.10 Results of Trend and Stationarity Tests of 55 Weather Stations

지속시간 1시간

경향성 검정							정상성 검정						
지 점	Kendall		Wald		Run		지점	ADF		PP		KPSS	
속 초	0.044	O	0.913	X	0.245	X	속 초	0.015	X	0.01	X	0.079	O
대관령	0.480	X	0.010	O	0.407	X	대관령	0.086	O	0.01	X	0.100	O
춘 천	0.006	O	0.112	X	0.067	X	춘 천	0.090	O	0.01	X	0.010	X
강 릉	0.019	O	0.139	X	0.620	X	강 릉	0.300	O	0.01	X	0.044	X
서 울	0.069	X	0.024	O	0.030	O	서 울	0.216	O	0.01	X	0.050	O
인 천	0.219	X	0.746	X	0.030	O	인 천	0.177	O	0.01	X	0.100	O
원 주	0.714	X	0.269	X	0.871	X	원 주	0.245	O	0.01	X	0.100	O
수 원	0.283	X	0.346	X	0.245	X	수 원	0.017	X	0.01	X	0.100	O
충 주	0.157	X	0.041	O	0.864	X	충 주	0.423	O	0.01	X	0.100	O
강 화	0.844	X	0.132	X	0.371	X	강 화	0.280	O	0.01	X	0.100	O
양 평	0.283	X	0.402	X	0.704	X	양 평	0.048	X	0.01	X	0.100	O
이 천	0.425	X	0.407	X	0.407	X	이 천	0.050	X	0.01	X	0.100	O
인 제	0.004	O	0.245	X	0.084	X	인 제	0.255	O	0.01	X	0.014	X
제 천	0.001	O	0.067	X	0.036	O	제 천	0.044	X	0.01	X	0.013	X

지속시간 24시간

경향성 검정							정상성 검정						
지 점	Kendall		Wald		Run		지점	ADF		PP		KPSS	
속 초	0.108	X	0.927	X	0.864	X	속 초	0.233	O	0.010	X	0.100	X
대관령	0.147	X	0.084	X	0.407	X	대관령	0.391	O	0.010	X	0.100	X
춘 천	0.069	X	0.759	X	0.402	X	춘 천	0.100	O	0.010	X	0.100	X
강 릉	0.089	X	0.153	X	0.407	X	강 릉	0.463	O	0.010	X	0.100	X
서 울	0.108	X	0.567	X	0.864	X	서 울	0.380	O	0.010	X	0.100	X
인 천	0.082	X	0.873	X	0.620	X	인 천	0.101	O	0.010	X	0.100	X
원 주	0.209	X	0.948	X	0.402	X	원 주	0.250	O	0.010	X	0.100	X
수 원	0.105	X	0.626	X	0.402	X	수 원	0.198	O	0.010	X	0.100	X
충 주	0.209	X	0.055	X	0.030	O	충 주	0.369	O	0.010	X	0.100	X
강 화	0.628	X	0.001	O	0.620	X	강 화	0.133	O	0.065	O	0.100	X
양 평	0.102	X	0.830	X	0.132	X	양 평	0.038	X	0.010	X	0.085	X
이 천	0.170	X	0.962	X	0.132	X	이 천	0.434	O	0.010	X	0.100	X
인 제	0.019	O	0.680	X	0.620	X	인 제	0.010	X	0.010	X	0.030	O
제 천	0.016	O	0.029	O	0.864	X	제 천	0.128	O	0.010	X	0.062	X
O : 경향성 O / X : 경향성 X							O : 비정상성 / X : 정상성						

(2) 확률분포함수 및 매개변수 추정

본 연구에서는 Gumbel 분포를 이용하여 한강유역 14개 지점에 대한 비정상성 빈도해석을 실시하였다. Gumbel 분포는 일반화된 극치분포(Generalized Extreme Value Distribution, GEV)에서 형상 매개변수(shape parameter) $\beta = 0$일 때를 나타내며, Type-I 극치분포(Extreme Value Type-I, EV1)라 부르기도 한다. 이 분포는 극치자료 중에서도 연 최대 홍수량 및 강수량 자료의 빈도분석에 많이 사용되고 있으며, '한국 확률강우량도 작성'(건설교통부, 2000)에서도 모든 관측소에 대하여 최적 확률분포형에 있어 Gumbel 분포를 채택하여 제시한 바가 있다. 따라서 본 연구에서도 Gumbel 분포를 이용하여 목표연도 2020년, 2050년, 2080년에 대한 확률강우량을 산정하였으며, Gumbel 분포의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha}\exp\left[-\frac{1}{\alpha}(x-x_0) - \exp\left(-\frac{1}{\alpha}(x-x_0)\right)\right], \quad -\infty < x < \infty \tag{3.3.7}$$

여기서, α는 축척매개변수(scale parameter)이며, x_0는 위치매개변수(location parameter)이다. 또한 Eq. (3.3.7)을 적분하면 다음과 같이 누적분포함수가 나타난다.

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right)\right] \tag{3.3.8}$$

매개변수의 추정법은 자료에 이상치가 있는 경우에도 왜곡특성이 크게 나타나지 않고 표본의 크기가 작아도 영향을 덜 받으며, 상대적으로 안정적인 장점을 지니고 있어, 최근에 많이 사용되고 있는 확률가중모멘트법을 사용하였다. Gumbel 분포의 위치매개변수와 축척매개변수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{l_2}{\ln 2}, \quad x_0 = l_1 - 0.5772157\alpha \tag{3.3.9}$$

여기서, l_1과 l_2는 표본자료의 1차 및 2차 L-모멘트를 표시한다.

목표연도 재현기간별 확률강우량 산정에 사용된 Gumbel 분포의 누적분포함수의 역함수는 다음과 같다.

$$x_T = x_0 - \alpha \ln[-\ln F(x)] \tag{3.3.10}$$

(3) Power Model

변수들 사이의 함수적 선형 관계를 탐색하는 분석기법인 선형회귀분석에 기초하여 자료를 탐색하는 과정에서 실제 두 변수의 관계가 선형으로 나타나지 않거나 한 변수 내 수치적 차이가 커서 실제의 선형관계보다 더 과대한 선형관계를 보이는 경우가 있는데, 이 경우 선형회귀분석을 수행하기 위해 변수의 변환방법을 이용한다. 이러한 변수의 변환들은 이론적 또는 경험적 근거에 의해서 여러 가지 형태의 함수로 선택되는데, 이때 선형함수로 변환할 수 있는 모든 비선형함수는 선형가능함수라고 불린다. 특히 변수내부의 수치적 차이가 큰 경우 변수의 로그 변환을 시도하는데, 변수의 변이를 무디게 하는 동시에 비대칭성을 줄이는 효과가 있다. 특히 종속변수와 설명변수 모두에 있어 로그변환을 시킨 후 선형회귀분석에 적용하는 모형을 Power Model(Power regression 또는 Log-Log regression)이라 부른다. Power Model을 통해 선형회귀분석을 실시할 경우 모형은 다음 식과 같다.

$$\log(Y) = \beta_0 + \beta_1 \log(X) + \epsilon \tag{3.3.11}$$

여기서 β_0는 설명변수 X가 1일 때, 변환된 종속변수 $\log(Y)$의 값, β_1은 변환된 설명변수 $\log(X)$의 한 단위 변화할 때의 변환된 종속변수 $\log(Y)$에 미치는 영향력의 정도, ϵ은 예측하지 못하는 확률오차를 나타내며 ϵ은 독립인 표준정규분포를 따르는 확률변수로 볼 수 있다.

(4) 관측기반 및 기후모형 기반의 취합 방법

기상관측 자료를 이용하여 Power Model을 통한 비정상성 빈도해석을 수행하여 전국 55개 지점의 확률강수량을 산정하였다. 이를 GCM 자료 시나리오별 (A2, A1B, B1)로 Power Model을 이용한 확률강수량과 취합하여 하나의 전국 52개 지점에 대한 확률강수량을 산정하였다. 기상관측자료와 GCM 자료간의 확률강수량을 산정한 지점 중에서 52개 지점만이 동일한 지점으로 나타나, 전국 52개 지점에서 GCM 자료와 취합된 확률강수량을 산정하였다. Fig. 3.3.14는 관측기반 및 기후모형 기반의 확률강수량을 연계하여 전국의 확률강수량을 산정하는 방법을 나타낸 그림이다. Power Model을 이용하여 산정된 확률강수량과 GCM 자료를 이용하였으며, 정상성 결과 대비 편차 및 분산을 이용해 구성된 가중함수를 각 확률강수량에 적용하였다. 그 중에서 분산을 이용해 가중된 가중함수를 각 확률강수량에 적용하여 전국 52개 지점에 대하여 확률강수량을 산정하는 방법을 적용하였다. 또한 최종적으로 확률강수량의 정상성 결과 대비 증감율을 유역별로 분류하여 분석하였다.

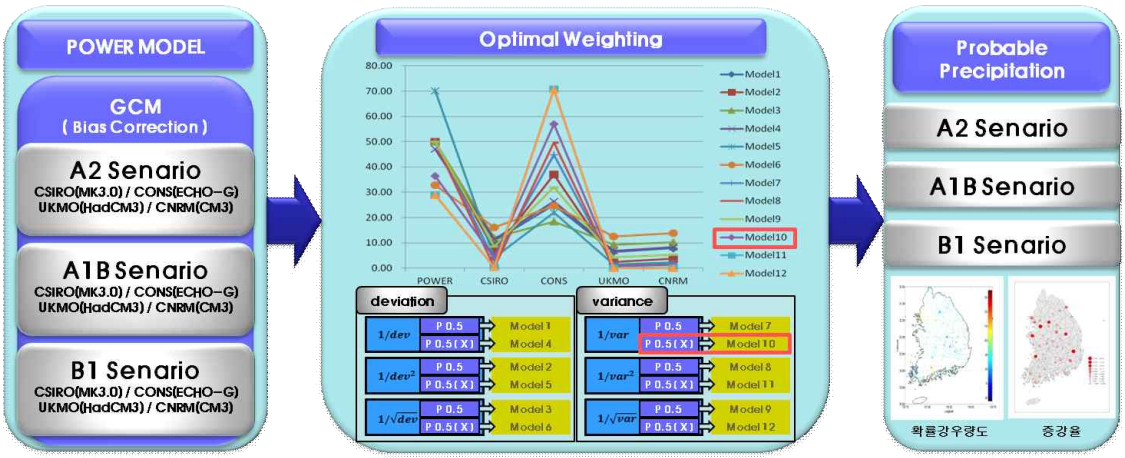
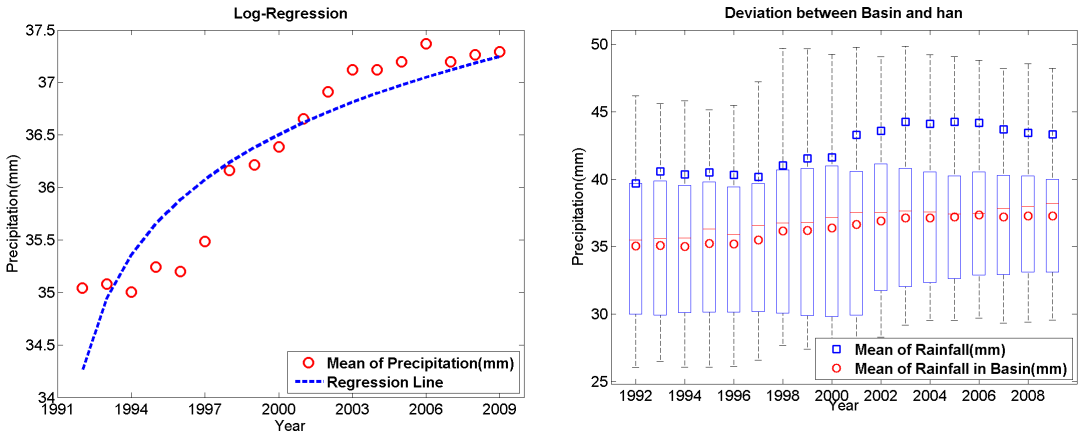


Fig. 3.3.14 Assemble means based on Observations and Climate Models

다. 분석결과

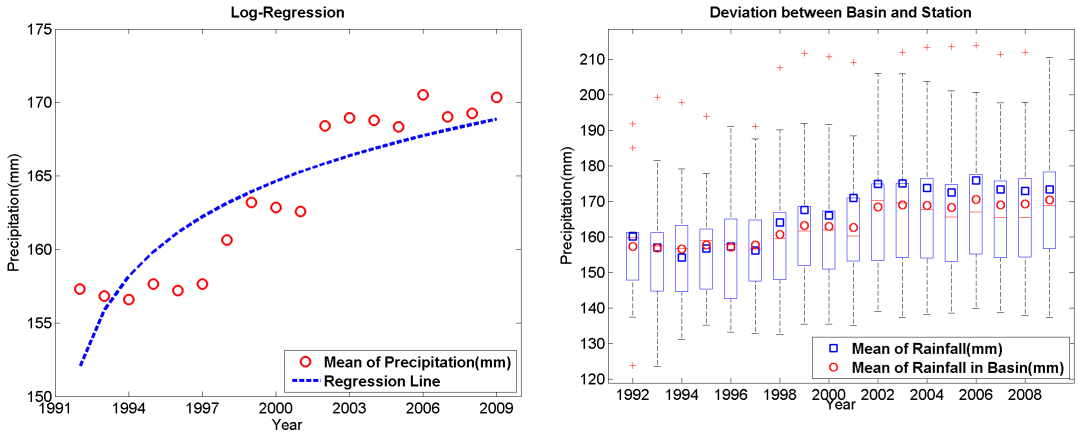
(1) 목표연도별 평균 강수량 산정

본 연구에서는 한강유역 14개 지점의 목표연도 2020년, 2050년, 2080년에 대한 확률강수량을 산정하기 위해, 대상 지점들의 1973년부터 2009년까지 시 강수량 자료를 이용하여 지속시간 1시간 및 24시간에 대한 연 최대 강수량을 구축하였다. 또한 초기 20년을 기준으로 1년씩 강수 자료를 누적시켜 기간으로 평균함으로써, 각 기간별 누적평균 강수량을 산정하였고, Gumbel 분포의 매개변수인 위치매개변수와 축척매개변수를 확률가중모멘트법을 이용하여 산정하였다. 한강유역 전 지점의 누적평균 강수량을 이용하여 한강유역의 평균 강수량을 구축해 Power Model을 이용하여 목표연도별 한강의 평균 강수량을 산정해 각 지점의 최대편차를 통해 각 지점의 목표연도별 평균 강수량을 산정하였다. Fig. 3.3.15와 Fig. 3.3.16은 지속시간 1시간 및 24시간에 대한 한강유역의 평균강수량 및 서울 지점과의 편차를 나타낸 것이다.



(a) Mean of Precipitation of Han River (b) Precipitation Deviation from Seoul

Fig. 3.3.15 Power Model for Accumulative Average Extreme Precipitation of Han River and Deviation from Seoul (1 hour)



(a) Mean of Precipitation of Han River (b) Precipitation Deviation from Seoul

Fig. 3.3.16 Power Model for Accumulative Average Extreme Precipitation of Han River and Deviation from Seoul (24 hour)

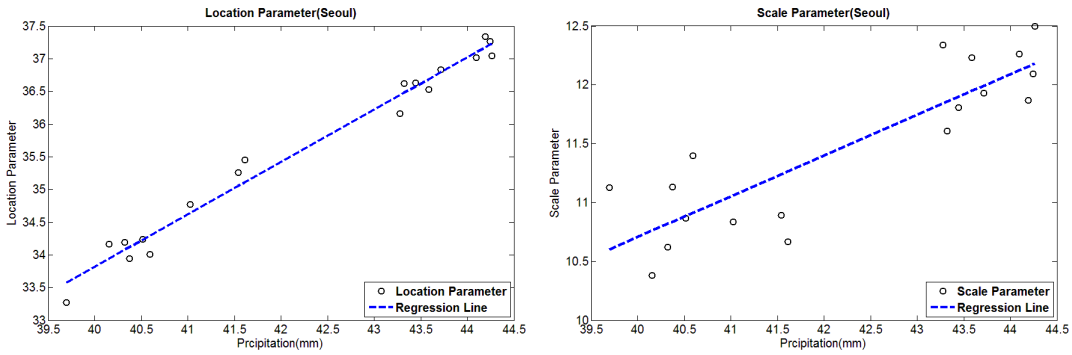
(2) 목표연도별 평균 강수량 산정

Fig. 3.3.17과 Fig. 3.3.18은 서울지점의 지속시간 1시간 및 24시간 연 최대 강수량 자료의 초기 20년을 기준으로 1년씩 추가하면서 산정한 누적평균 강수량과 위치 및 축척매개변수간의 관계를 나타낸 것이다. 목표연도별 위치매개변수와 축척매개변수는 Eq. (3.3.12)와 (3.3.13)과 같이 선형회귀식을 이용하여 산정하였다.

$$\overline{x_Y} = c \times R_Y + d \tag{3.3.12}$$

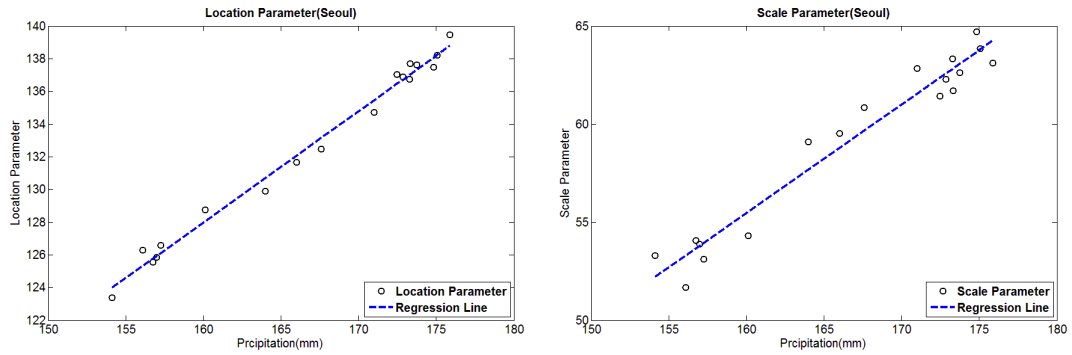
$$\alpha_Y = e \times R_Y + f \tag{3.3.13}$$

여기서, $\overline{x_Y}$는 목표연도(Y)의 위치 매개변수, α_Y는 목표연도(Y)의 축척 매개변수를 나타내며, R_Y는 목표연도의 평균 강수량, c와 d는 누적평균 극치강수량과 위치 매개변수간 선형회귀식의 매개변수, e와 f는 누적평균 극치강수량과 축척 매개변수 간 선형회귀식의 매개변수이다.



(a) Location Parameter (b) Scale Parameter

Fig. 3.3.17 Linear Regression for Location and Scale Parameter (1 hour)

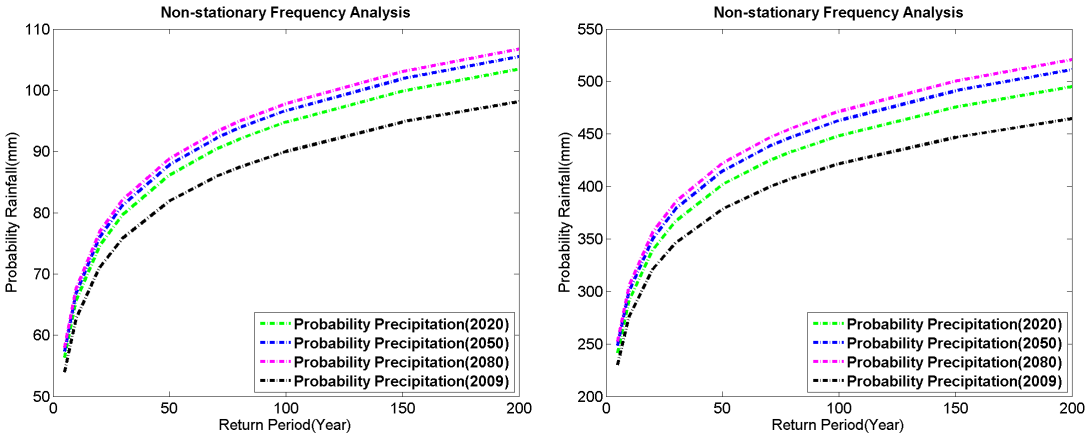


(a) Location Parameter (b) Scale Parameter

Fig. 3.3.18 Linear Regression for Location and Scale Parameter (24 hour)

(3) 목표연도별 확률강수량 산정

한강유역 14개 지점에 대한 연 최대 강수량 자료를 이용해 누적평균 강수량 및 위치, 축척매개변수를 산정하였고, 누적평균 강수량으로부터 목표연도별(2040, 2050, 2080년) 평균 강수량을 구축하였다. 구축된 평균 강수량으로부터 위치 및 축척매개변수를 구하여 확률강수량을 산정하였다. Fig. 3.3.19는 서울 지점 지속시간 1시간 및 24시간의 각 목표연도별 재현기간에 따른 확률강수량을 나타내었다. 지속시간 1시간 및 24시간에 대하여 모두 정상성임을 가정하여 산정된 확률강수량에 비하여 증가하는 것으로 나타났다. 지속시간 1시간의 경우, 정상성 대비 약 5~9%의 증가율을 보였고 지속시간 24시간의 경우에는 약 6~12%의 증가를 보여 지속시간 24시간에서 더 큰 증가폭을 보였다(Table 3.3.11, 3.3.12). 한강유역 전 지점에 대한 확률강수량 산정에 있어 지속시간 1시간에 대한 확률강수량은 제천 지점을 제외한 모든 지점에서 정상성임을 가정하여 산정한 확률강수량에 비해 증가하는 것으로 나타났으며, 대관령 지점이 한강유역 중 약 12~28%의 가장 높은 증가율을 보였다. 지속시간 24시간의 경우에도 춘천 지점을 제외한 모든 지점에서 정상성 대비 확률강수량이 증가하는 것으로 나타났으나, 춘천 지점은 목표연도가 증가할수록 오히려 확률강수량이 더 감소하는 것으로 나타났다. 또한 증가율이 강화 지점에서 약 16~28%의 가장 높은 증가율이 나타났다.



(a) 1 hour (b) 24 hour

Fig. 3.3.19 Probable Precipitation Amount at Seoul and Daegu for Target Years

Table 3.3.11 Probable Precipitation Amount and Ratio of Increase for Target Years (1 hour)

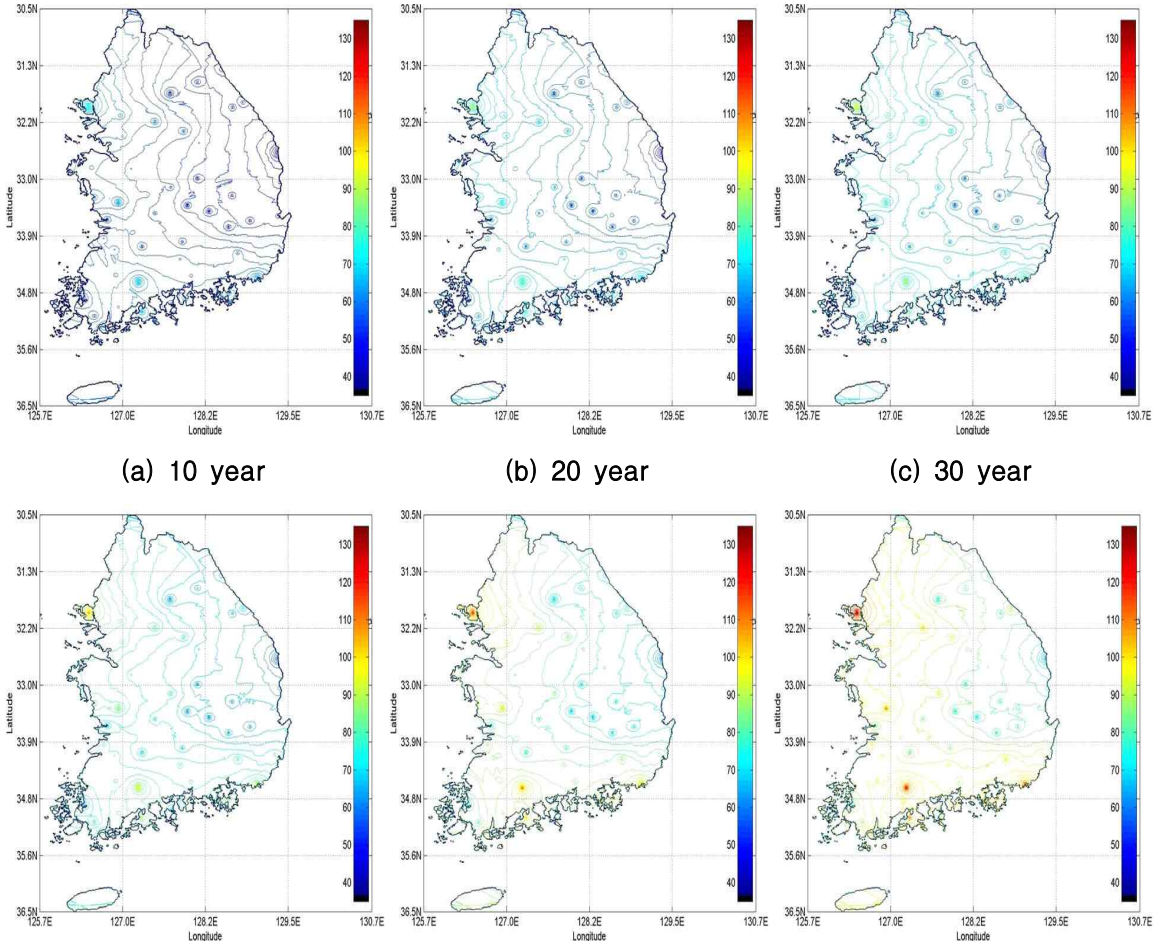
목표연도	속초 지점(mm)						대관령 지점(mm)					
	10	20	30	50	100	200	10	20	30	50	100	200
2009	45.10	51.30	54.90	59.40	65.50	71.50	42.10	47.40	50.50	54.40	59.60	64.80
2020	48.07	54.98	58.96	63.93	70.63	77.31	47.22	53.95	57.82	62.65	69.18	75.68
증가율(%)	6.58	7.17	7.39	7.62	7.83	8.13	12.17	13.81	14.49	15.17	16.07	16.78
2050	49.62	56.86	61.03	66.24	73.26	80.26	49.31	56.59	60.78	66.02	73.08	80.12
증가율(%)	10.03	10.85	11.17	11.51	11.85	12.25	17.12	19.39	20.36	21.36	22.62	23.65
2080	50.54	57.97	62.25	67.60	74.81	82.00	50.53	58.14	62.52	68.00	75.38	82.74
증가율(%)	12.05	13.01	13.39	13.80	14.21	14.68	20.03	22.67	23.81	25.00	26.48	27.68
목표연도	춘천 지점(mm)						강릉 지점(mm)					
2009	45.70	51.10	54.20	58.10	63.40	68.60	54.00	62.60	67.60	73.90	82.30	90.70
2020	46.47	52.00	55.18	59.15	64.52	69.86	55.85	65.08	70.39	77.02	85.98	94.89
증가율(%)	1.69	1.76	1.81	1.81	1.76	1.83	3.43	3.96	4.13	4.23	4.47	4.62
2050	47.19	52.69	55.85	59.80	65.13	70.45	57.69	67.37	72.94	79.90	89.29	98.64
증가율(%)	3.26	3.10	3.04	2.93	2.74	2.69	6.83	7.62	7.90	8.12	8.49	8.76
2080	47.61	53.09	56.24	60.18	65.50	70.79	58.77	68.72	74.44	81.59	91.23	100.85
증가율(%)	4.18	3.89	3.77	3.58	3.31	3.20	8.83	9.77	10.11	10.40	10.86	11.19
목표연도	서울 지점(mm)						인천 지점(mm)					
2009	62.70	71.10	75.90	81.90	90.00	98.10	58.80	67.00	71.70	77.60	85.60	93.50
2020	65.66	74.59	79.72	86.14	94.80	103.43	62.59	71.76	77.04	83.63	92.53	101.39
증가율(%)	4.72	4.90	5.04	5.18	5.34	5.44	6.44	7.10	7.44	7.77	8.09	8.44
2050	66.90	76.02	81.27	87.83	96.68	105.50	64.15	73.66	79.12	85.96	95.18	104.37
증가율(%)	6.70	6.92	7.08	7.24	7.43	7.54	9.10	9.93	10.36	10.77	11.19	11.62
2080	67.63	76.87	82.18	88.83	97.79	106.72	65.07	74.77	80.35	87.33	96.74	106.12
증가율(%)	7.86	8.11	8.28	8.46	8.65	8.79	10.66	11.60	12.07	12.54	13.02	13.50
목표연도	원주 지점(mm)						수원 지점(mm)					
2009	58.50	66.50	71.00	76.80	84.50	92.20	57.30	64.90	69.20	74.70	82.00	89.40
2020	63.00	71.60	76.54	82.72	91.06	99.36	63.26	72.58	77.94	84.63	93.67	102.67
증가율(%)	7.70	7.66	7.80	7.71	7.76	7.77	10.40	11.83	12.62	13.30	14.23	14.85
2050	63.72	72.28	77.21	83.37	91.68	99.95	65.42	75.32	81.02	88.15	97.75	107.33
증가율(%)	8.92	8.70	8.75	8.55	8.49	8.41	14.17	16.06	17.08	18.00	19.21	20.05
2080	64.14	72.69	77.61	83.75	92.04	100.30	66.69	76.94	82.84	90.21	100.16	110.07
증가율(%)	9.64	9.31	9.30	9.05	8.93	8.79	16.38	18.55	19.71	20.77	22.14	23.12
목표연도	충주 지점(mm)						강화 지점(mm)					
2009	51.30	58.30	62.40	67.40	74.30	81.10	73.00	83.60	89.80	97.40	107.80	118.10
2020	55.56	63.16	67.54	73.01	80.38	87.73	80.15	92.56	99.70	108.63	120.66	132.65
증가율(%)	8.30	8.34	8.23	8.32	8.19	8.18	9.80	10.72	11.03	11.52	11.93	12.32
2050	56.28	63.86	68.21	73.66	81.01	88.33	82.14	95.06	102.49	111.79	124.32	136.81
증가율(%)	9.70	9.53	9.32	9.29	9.03	8.92	12.51	13.71	14.13	14.77	15.33	15.84
2080	56.70	64.26	68.61	74.05	81.38	88.69	83.30	96.53	104.13	113.65	126.47	139.26
증가율(%)	10.53	10.23	9.96	9.86	9.53	9.36	14.11	15.46	15.96	16.68	17.32	17.91
목표연도	양평 지점(mm)						이천 지점(mm)					
2009	60.40	68.60	73.30	79.20	87.20	95.10	55.70	63.00	67.10	72.30	79.30	86.30
2020	66.06	75.69	81.23	88.16	97.50	106.81	58.44	66.04	70.41	75.87	83.23	90.57
증가율(%)	9.37	10.34	10.82	11.31	11.82	12.32	4.92	4.82	4.93	4.93	4.96	4.95
2050	67.69	77.69	83.44	90.63	100.33	109.99	59.03	66.54	70.86	76.26	83.54	90.79
증가율(%)	12.07	13.25	13.83	14.43	15.05	15.65	5.98	5.62	5.60	5.47	5.34	5.21
2080	68.65	78.86	84.74	92.08	101.99	111.85	59.37	66.83	71.12	76.49	83.72	90.93
증가율(%)	13.66	14.96	15.60	16.26	16.96	17.62	6.60	6.08	5.99	5.79	5.57	5.36
목표연도	인제 지점(mm)						제천 지점(mm)					
2009	46.10	52.50	56.20	60.70	66.90	73.00	53.70	60.70	64.70	69.70	76.50	83.20
2020	48.33	55.36	59.41	64.47	71.29	78.08	53.41	60.06	63.88	68.65	75.10	81.52
증가율(%)	4.84	5.45	5.71	6.20	6.56	6.96	-0.53	-1.06	-1.27	-1.50	-1.83	-2.02
2050	50.37	57.94	62.30	67.74	75.08	82.40	54.09	60.68	64.48	69.22	75.61	81.99
증가율(%)	9.26	10.36	10.85	11.60	12.23	12.88	0.72	-0.03	-0.35	-0.69	-1.16	-1.46
2080	51.57	59.46	64.00	69.67	77.32	84.94	54.48	61.05	64.83	69.55	75.92	82.26
증가율(%)	11.86	13.25	13.87	14.77	15.57	16.36	1.46	0.58	0.20	-0.22	-0.76	-1.13

Table 3.3.12 Probable Precipitation Amount and Ratio of Increase for Target Years (24 hour)

목표연도	속초 지점(mm)						대관령 지점(mm)					
	10	20	30	50	100	200	10	20	30	50	100	200
2009	268.70	309.20	332.50	361.70	401.00	440.10	344.60	402.40	435.60	477.10	533.10	588.90
2020	283.21	327.51	352.99	384.84	427.81	470.62	364.53	428.05	464.58	510.26	571.86	633.24
증가율(%)	5.40	5.92	6.16	6.40	6.69	6.94	5.78	6.37	6.65	6.95	7.27	7.53
2050	293.06	339.65	366.46	399.97	445.16	490.20	376.78	443.61	482.07	530.13	594.96	659.56
증가율(%)	9.07	9.85	10.21	10.58	11.01	11.38	9.34	10.24	10.67	11.12	11.60	12.00
2080	298.88	346.83	374.42	408.90	455.42	501.76	384.01	452.81	492.39	541.87	608.61	675.10
증가율(%)	11.23	12.17	12.61	13.05	13.57	14.01	11.44	12.53	13.04	13.58	14.16	14.64
목표연도	춘천 지점(mm)						강릉 지점(mm)					
2009	242.10	278.80	299.90	326.30	361.90	397.40	328.20	388.30	423.00	466.20	524.60	582.80
2020	244.48	277.40	296.33	320.01	351.94	383.75	346.03	411.84	449.70	497.02	560.86	624.46
증가율(%)	0.98	-0.50	-1.19	-1.93	-2.75	-3.43	5.43	6.06	6.31	6.61	6.91	7.15
2050	245.03	276.25	294.21	316.66	346.94	377.10	358.65	427.95	467.82	517.65	584.87	651.84
증가율(%)	1.21	-0.92	-1.90	-2.96	-4.14	-5.11	9.28	10.21	10.59	11.04	11.49	11.85
2080	245.36	275.57	292.95	314.67	343.98	373.18	366.11	437.47	478.52	529.83	599.05	668.01
증가율(%)	1.34	-1.16	-2.32	-3.56	-4.95	-6.10	11.55	12.66	13.12	13.65	14.19	14.62
목표연도	서울 지점(mm)						인천 지점(mm)					
2009	276.50	321.00	346.50	378.50	421.50	464.50	259.80	304.20	329.70	361.60	404.70	447.60
2020	291.73	339.71	367.31	401.81	448.35	494.72	267.49	312.19	337.90	370.05	413.40	456.60
증가율(%)	5.51	5.83	6.01	6.16	6.37	6.51	2.96	2.63	2.49	2.34	2.15	2.01
2050	300.41	350.19	378.83	414.63	462.91	511.02	272.27	317.09	342.87	375.10	418.57	461.88
증가율(%)	8.65	9.09	9.33	9.54	9.82	10.01	4.80	4.24	3.99	3.73	3.43	3.19
2080	305.55	356.39	385.63	422.19	471.51	520.64	275.10	319.98	345.81	378.08	421.62	465.00
증가율(%)	10.50	11.02	11.29	11.54	11.86	12.09	5.89	5.19	4.88	4.56	4.18	3.89
목표연도	원주 지점(mm)						수원 지점(mm)					
2009	248.80	285.60	306.70	333.20	368.80	404.40	263.00	303.20	326.30	355.20	394.10	432.90
2020	269.87	311.37	335.24	365.09	405.34	445.44	277.16	318.21	341.83	371.35	411.16	450.83
증가율(%)	8.47	9.02	9.31	9.57	9.91	10.15	5.38	4.95	4.76	4.55	4.33	4.14
2050	278.01	321.07	345.84	376.80	418.57	460.18	282.35	323.69	347.48	377.21	417.31	457.26
증가율(%)	11.74	12.42	12.76	13.09	13.49	13.79	7.36	6.76	6.49	6.20	5.89	5.63
2080	282.82	326.80	352.10	383.73	426.39	468.89	285.42	326.93	350.81	380.67	420.94	461.06
증가율(%)	13.67	14.43	14.80	15.16	15.61	15.95	8.52	7.83	7.51	7.17	6.81	6.50
목표연도	충주 지점(mm)						강화 지점(mm)					
2009	206.90	236.90	254.10	275.60	304.60	333.60	323.20	375.90	406.30	444.20	495.40	546.40
2020	232.54	268.35	288.96	314.72	349.46	384.07	375.42	442.16	480.55	528.55	593.28	657.78
증가율(%)	12.39	13.28	13.72	14.19	14.73	15.13	16.16	17.63	18.27	18.99	19.76	20.38
2050	240.91	278.39	299.95	326.90	363.26	399.48	387.78	457.91	498.25	548.67	616.69	684.46
증가율(%)	16.44	17.51	18.04	18.61	19.26	19.75	19.98	21.82	22.63	23.52	24.48	25.27
2080	245.86	284.32	306.44	334.10	371.41	408.58	395.09	467.21	508.70	560.57	630.52	700.22
증가율(%)	18.83	20.02	20.60	21.23	21.93	22.48	22.24	24.29	25.20	26.20	27.28	28.15
목표연도	양평 지점(mm)						이천 지점(mm)					
2009	287.20	334.00	361.00	394.60	440.10	485.30	262.00	302.50	325.80	354.90	394.20	433.30
2020	292.76	341.37	369.33	404.29	451.44	498.42	267.07	306.12	328.58	356.66	394.54	432.28
증가율(%)	1.94	2.21	2.31	2.46	2.58	2.70	1.94	1.20	0.85	0.50	0.09	-0.24
2050	301.08	351.33	380.23	416.37	465.11	513.67	271.07	309.89	332.23	360.15	397.82	435.34
증가율(%)	4.83	5.19	5.33	5.52	5.68	5.85	3.46	2.44	1.97	1.48	0.92	0.47
2080	305.99	357.21	386.67	423.50	473.18	522.67	273.43	312.12	334.39	362.21	399.75	437.15
증가율(%)	6.54	6.95	7.11	7.32	7.52	7.70	4.36	3.18	2.64	2.06	1.41	0.89
목표연도	인제 지점(mm)						제천 지점(mm)					
2009	240.30	277.80	299.30	326.30	362.60	398.80	242.20	279.90	301.60	328.80	365.40	401.90
2020	241.48	278.81	300.29	327.14	363.35	399.43	250.55	289.57	312.01	340.07	377.91	415.62
증가율(%)	0.49	0.37	0.33	0.26	0.21	0.16	3.45	3.45	3.45	3.43	3.42	3.41
2050	247.19	285.04	306.81	334.03	370.74	407.32	256.80	296.56	319.44	348.03	386.60	425.03
증가율(%)	2.87	2.61	2.51	2.37	2.25	2.14	6.03	5.95	5.91	5.85	5.80	5.76
2080	250.56	288.71	310.66	338.10	375.11	411.98	260.49	300.70	323.83	352.74	391.74	430.59
증가율(%)	4.27	3.93	3.80	3.62	3.45	3.30	7.55	7.43	7.37	7.28	7.21	7.14

(4) 전국 확률강우량도 작성(지속시간 1시간)

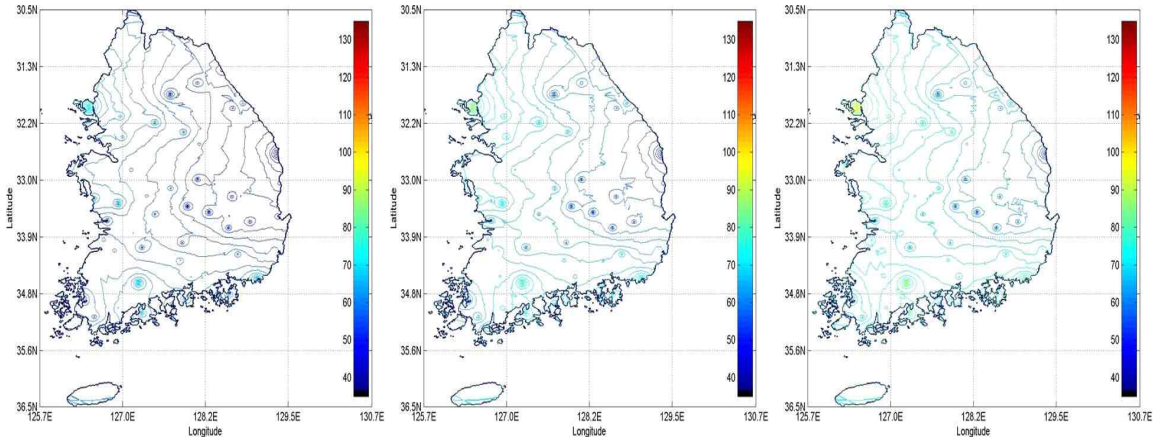
지속시간 1시간에 대하여 Power Model을 이용해 전국의 목표연도별 재현기간에 따른 확률강수량을 산정한 결과를 통해 전국의 확률강우량도를 작성하였다. 재현기간이 증가함에 따라 남해와 서해 지역에서 가장 높은 확률강수량이 나타남을 보였다. 특히 지속시간 1시간의 확률강우량도의 경우, 경도의 변화에 따라 확률강수량의 분포가 달리 나타남을 보였다(Fig. 3.3.20 ~ 3.3.22).



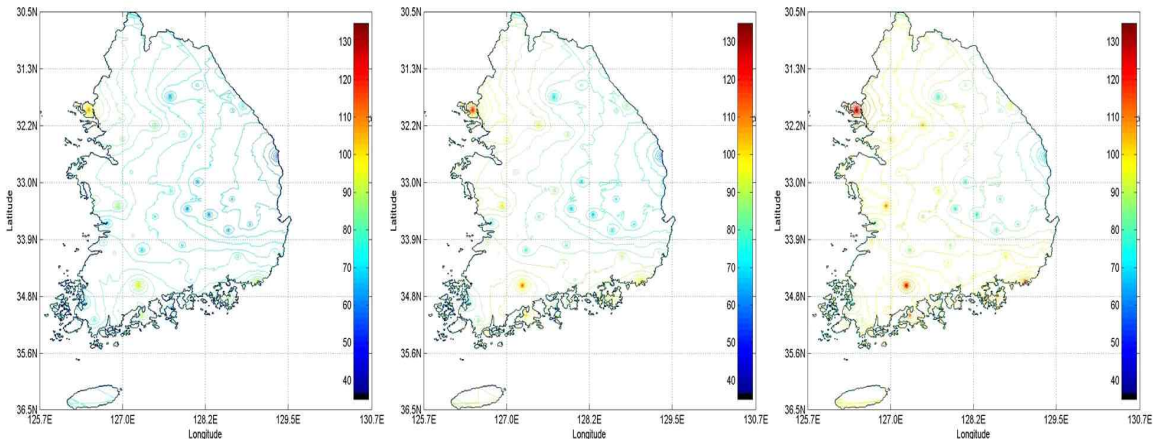
(a) 10 year (b) 20 year (c) 30 year

(d) 50 hour (e) 100 hour (f) 200 hour

Fig. 3.3.20 Probable Precipitation Amount for Return Periods (2020 year)

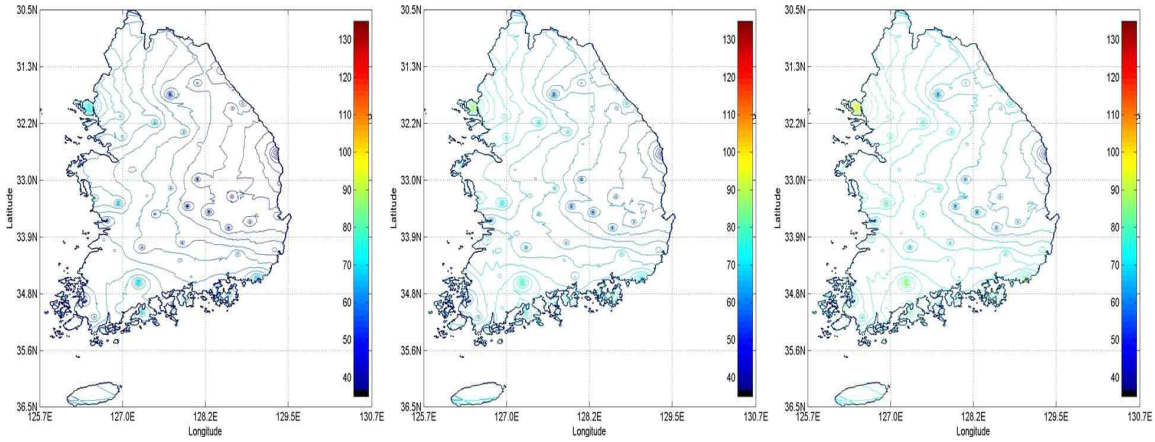


(a) 10 year (b) 20 year (c) 30 year

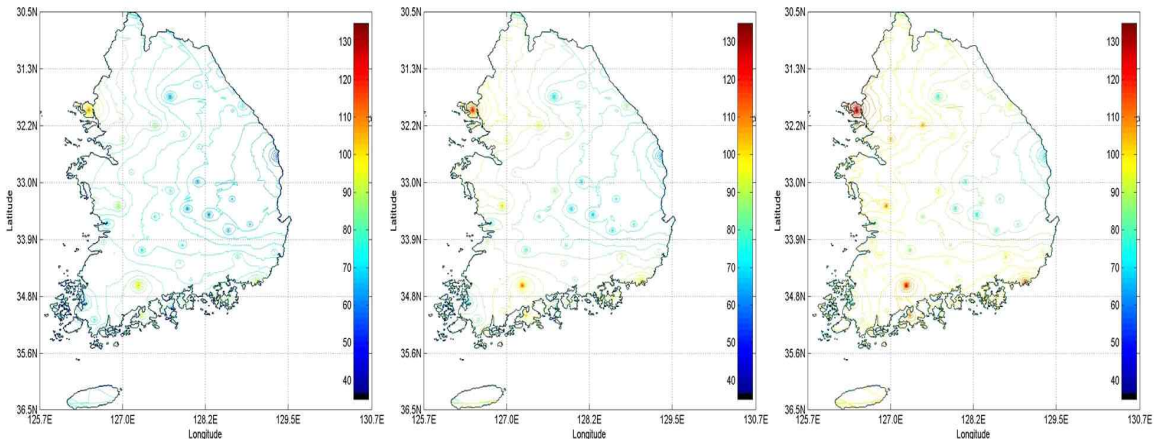


(d) 50 year (e) 100 year (f) 200 year

Fig. 3.3.21 Probable Precipitation Amount for Return Periods (2050 year)



(a) 10 year (b) 20 year (c) 30 year

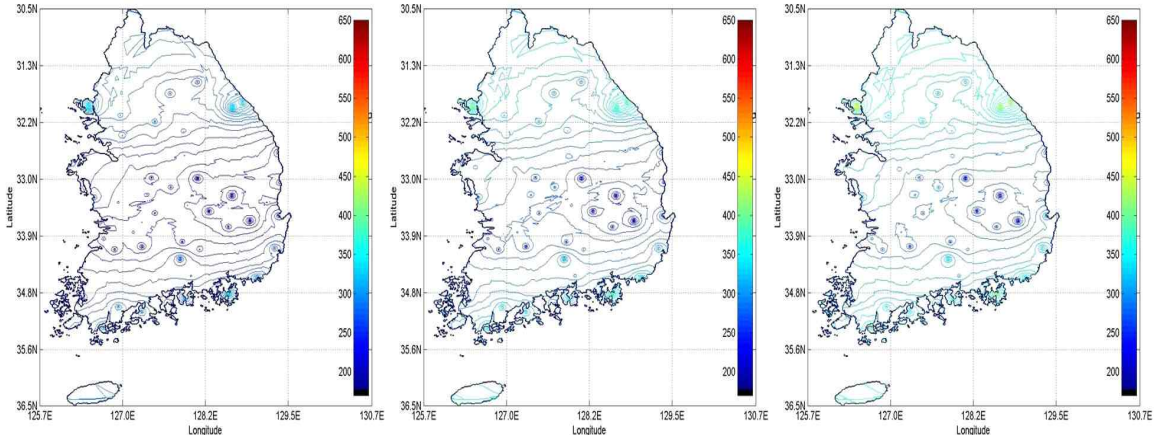


(d) 50 year (e) 100 year (f) 200 year

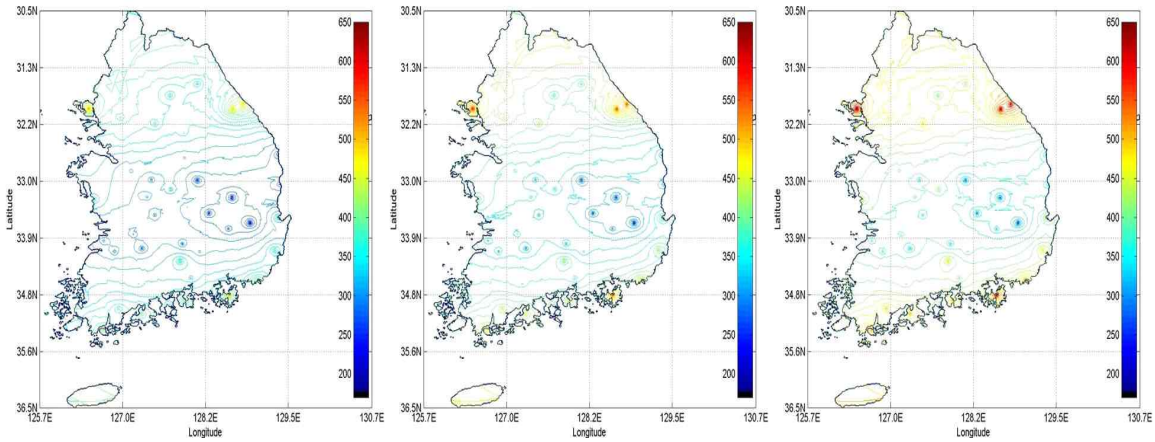
Fig. 3.3.22 Probable Precipitation Amount for Return Periods (2080 year)

(5) 전국 확률강우량도 작성(지속시간 24시간)

지속시간 1시간에 대한 확률강수량과는 달리, 지속시간 24시간의 경우 위도의 변화에 따라 확률강수량의 분포가 달리 나타남을 보였다. 또한 경북지역과 전북지역에서 전체적으로 낮은 강수량을 보였으며, 대관령과 거제 지역에서는 강수량이 높게 나타났다(Fig. 3.3.23 ~ 3.3.25).

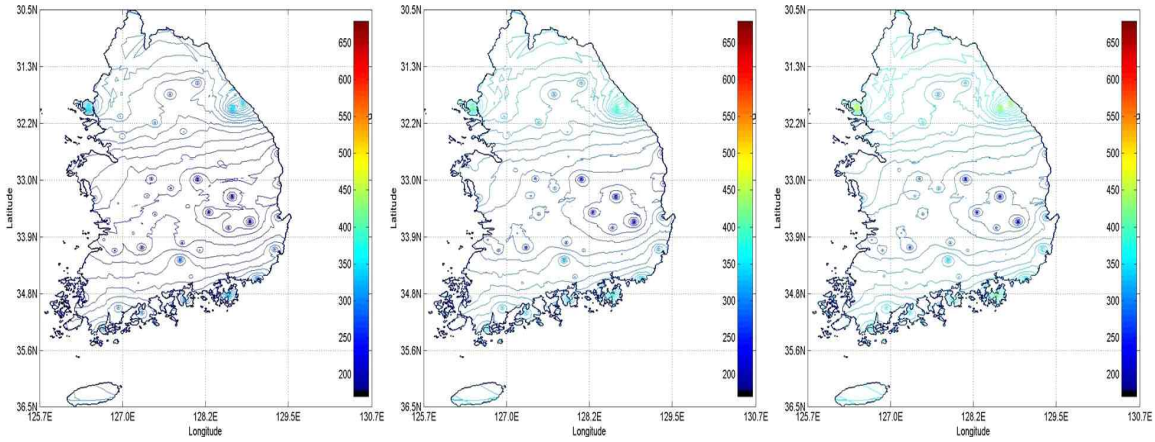


(a) 10 year (b) 20 year (c) 30 year

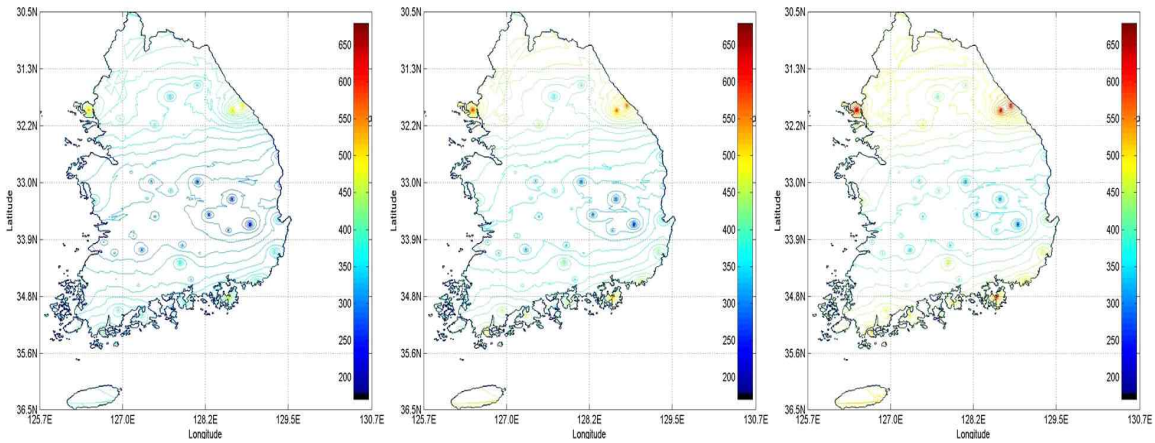


(d) 50 year (e) 100 year (f) 200 year

Fig. 3.3.23 Probable Precipitation Amount for Return Periods (2020 year)

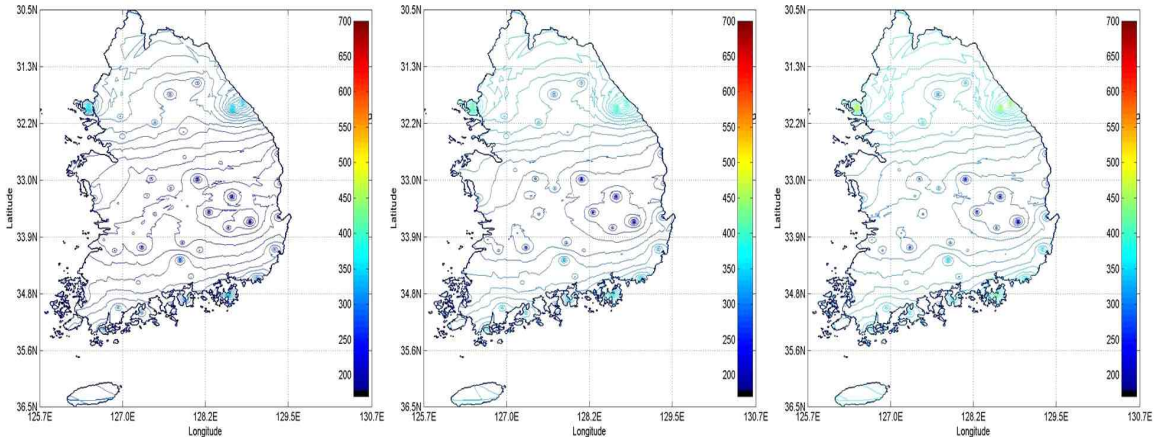


(a) 10 year (b) 20 year (c) 30 year

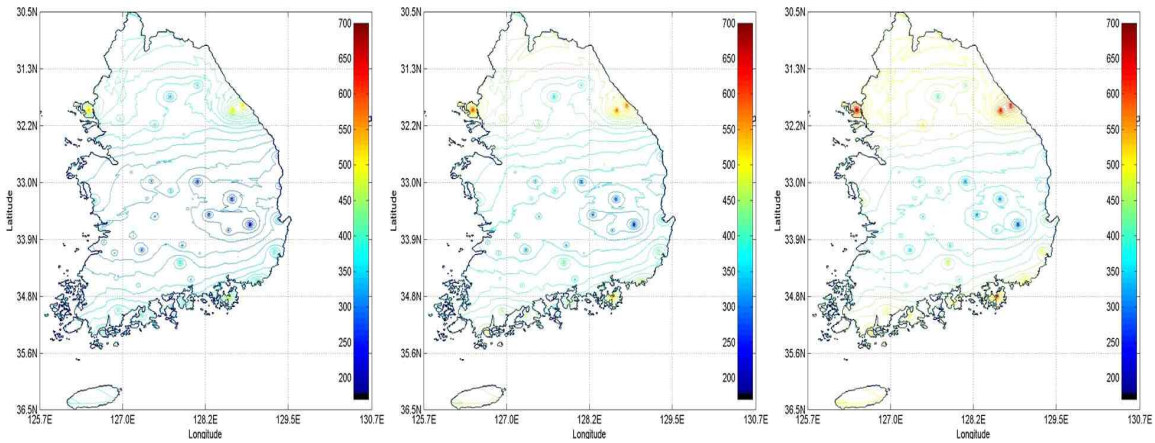


(d) 50 year (e) 100 year (f) 200 year

Fig. 3.3.24 Probable Precipitation Amount for Return Periods (2050 year)



(a) 10 year (b) 20 year (c) 30 year



(d) 50 year (e) 100 year (f) 200 year

Fig. 3.3.25 Probable Precipitation Amount for Return Periods (2080 year)

(6) 선형회귀분석을 이용한 비정상성 빈도해석

Table 3.3.13은 지점 평균거동과 선형회귀분석을 이용한 서울 지점의 비정상성 빈도해석 결과를 정상성을 가정하여 산정된 확률강수량과 정량적인 증가를 나타낸 표이다. 지속시간 1시간 연 최고치 강수량 자료를 이용하여 비정상성 빈도해석을 실시한 결과, 목표연도 2040s에 26.1-28.32%, 2070s에 47.5-51.18%, 2100s에 68.97- 74.03%의 증가가 나타났다. 지속시간 24시간 연최고치 자료를 이용하였을 때는 목표연도 2040s, 2070s, 2100s에 각각 32.02-36.14%, 59.29-66.6%, 86.57- 97.06%의 증가가 나타났다. 하지만 2070s, 2100s 확률강수량 산정의 결과값으로부터, 선형회귀식을 통해 산정한 목표연도의 평균, 강수량, 위치매개변수, 축척매개변수를 추정하여 확률강수량을 구하는 것은 한계가 있다고 판단되었다.

Table 3.3.13 Probable Precipitation using linear Regression Analysis for Target Year in Seoul

지속시간 1시간		재현기간					
		10년	20년	30년	50년	100년	200년
2009	강수량	62.75	71.11	75.91	81.92	90.03	98.1
2040	강수량	79.13	90.18	96.54	104.49	115.21	125.89
	%	26.1	26.83	27.17	27.55	27.97	28.32
2070	강수량	92.58	105.75	113.33	122.8	135.58	148.31
	%	47.54	48.72	49.29	49.9	50.6	51.18
2100	강수량	106.03	121.32	130.12	141.12	155.95	170.73
	%	68.97	70.62	71.41	72.26	73.22	74.03
지속시간 24시간		재현기간					
		10년	20년	30년	50년	100년	200년
2009	강수량	276.55	320.96	346.52	378.46	421.54	464.46
2040	강수량	365.1	428.27	464.6	510.03	571.3	632.34
	%	32.02	33.43	34.08	34.77	35.53	36.14
2070	강수량	440.53	519.3	564.61	621.26	697.67	773.8
	%	59.29	61.79	62.94	64.16	65.51	66.6
2100	강수량	515.95	610.33	664.62	732.5	824.04	915.25
	%	86.57	90.16	91.8	93.55	95.48	97.06

(7) 유역평균거동과 Logistic 회귀분석을 이용한 비정상성 빈도해석

지속시간 1시간 연최고치 강수량 자료를 구축하여 유역평균거동에 따라 Logistic 회귀분석을 이용한 비정상성 빈도해석을 실시한 결과, 편차의 평균을 이용한 확률강수량은 0.27-0.78%, 편차의 최고치를 이용한 확률강수량은 3.41- 4.13%의 증가를 보였다. 또한 24시간 연최고치 강수량 자료를 이용하여 비정상성 빈도해석을 수행하였을 때, 편차의 평균을 이용한 확률강수량은 0.56-1.01%, 편창의 최고치를 이용한 확률강수량은 4.57-5.15%의 증가를 보였다. Logistic 회귀분석을 이용한 비정상성 빈도해석은 선형회귀분석에 비하여 보다 안정적인 증가를 보인다. 하지만 Logistic 회귀분석을 이용해 누적평균강수량을 산정하여 매개변수를 추정하는데 있어, 목표연도에 도달하기 전에 미리 수렴하여 모든 누적평균강수량의 값이 동일하게 나타남으로써, 목표연도별로 같은 확률강수량의 값이 나타남을 보였다(Table 3.3.14).

Table 3.3.14 Probable Precipitation using logistic Regression Analysis for Target Year in Seoul

지속시간 1시간		재현기간					
		10년	20년	30년	50년	100년	200년
2009	강수량	62.75	71.11	75.91	81.92	90.03	98.1
2040	강수량	62.92	71.41	76.3	82.41	90.65	98.87
	%	0.27	0.43	0.51	0.6	0.7	0.78
	강수량	64.89	73.7	78.76	85.1	93.64	102.15
	%	3.41	3.65	3.76	3.88	4.01	4.13
2070	강수량	62.92	71.41	76.3	82.41	90.65	98.87
	%	0.27	0.43	0.51	0.6	0.7	0.78
	강수량	64.89	73.7	78.76	85.1	93.64	102.15
	%	3.41	3.65	3.76	3.88	4.01	4.13
2100	강수량	62.92	71.41	76.3	82.41	90.65	98.87
	%	0.27	0.43	0.51	0.6	0.7	0.78
	강수량	64.89	73.7	78.76	85.1	93.64	102.15
	%	3.41	3.65	3.76	3.88	4.01	4.13
지속시간 1시간		재현기간					
		10년	20년	30년	50년	100년	200년
2009	강수량	276.55	320.96	346.52	378.46	421.54	464.46
2040	강수량	278.09	323.25	349.23	381.71	425.51	469.16
	%	0.56	0.71	0.78	0.86	0.94	1.01
	강수량	288.34	335.62	362.82	396.82	442.68	488.38
	%	4.26	4.57	4.71	4.85	5.02	5.15
2070	강수량	278.09	323.25	349.23	381.71	425.51	469.16
	%	0.56	0.71	0.78	0.86	0.94	1.01
	강수량	288.34	335.62	362.82	396.82	442.68	488.38
	%	4.26	4.57	4.71	4.85	5.02	5.15
2100	강수량	278.09	323.25	349.23	381.71	425.51	469.16
	%	0.56	0.71	0.78	0.86	0.94	1.01
	강수량	288.34	335.62	362.82	396.82	442.68	488.38
	%	4.26	4.57	4.71	4.85	5.02	5.15

(8) Rectangular Pulse Model을 이용한 비정상성 빈도해석

서울 지점의 시강수자료를 RPM에 의한 비정상성 빈도해석을 통하여, 서울 지점은 목표연도별 18.85-43.9%의 증가를 보였고, 인천지점은 7.05-29.61%의 증가가 나타났다. 선형회귀분석과 Logistic 회귀분석을 이용한 비정상성 빈도해석과 달리, Pulse 모형에서는 재현기간이 길어짐에 따라 확률강수량의 증가의 비율이 점점 낮아짐을 보였다. 정상성을 가정한 확률강수량에 비하여 18.85-43.9% 정도 높게 나타났다. RPM을 이용한 비정상성 빈도해석 시, 모형변수 거동에 따른 목 목표연도별 영향이 미비한 것으로 나타났다 (Table 3.3.15).

Table 3.3.15 Probable Precipitation using RPM for Target Year in Seoul and Incheon

서울 지점		재현기간					
		10년	20년	30년	50년	100년	200년
2009	강수량	62.75	71.11	75.91	81.92	90.03	98.1
RPM(2009)	강수량	90.3	96.38	99.94	104.43	110.51	116.6
	%	43.9	35.55	31.65	27.47	22.75	18.85
2040	강수량	91.09	97.23	100.82	105.34	111.48	117.62
	%	45.16	36.74	32.81	28.59	23.83	19.89
2070	강수량	91.09	97.23	100.82	105.34	111.48	117.62
	%	45.16	36.74	32.81	28.59	23.83	19.89
2100	강수량	91.09	97.23	100.82	105.34	111.48	117.62
	%	45.16	36.74	32.81	28.59	23.83	19.89
인천 지점		재현기간					
		10년	20년	30년	50년	100년	200년
2009	강수량	62.75	71.11	75.91	81.92	90.03	98.1
RPM(2009)	강수량	81.17	86.64	89.84	93.88	99.35	104.82
	%	29.36	21.85	18.35	14.6	10.35	6.85
2040	강수량	81.33	86.81	90.02	94.06	99.54	105.02
	%	29.61	22.09	18.58	14.82	10.57	7.05
2070	강수량	81.33	86.81	90.02	94.06	99.54	105.02
	%	29.61	22.09	18.58	14.82	10.57	7.05
2100	강수량	81.33	86.81	90.02	94.06	99.54	105.02
	%	29.61	22.09	18.58	14.82	10.57	7.05

(9) Power Model을 이용한 비정상성 빈도해석

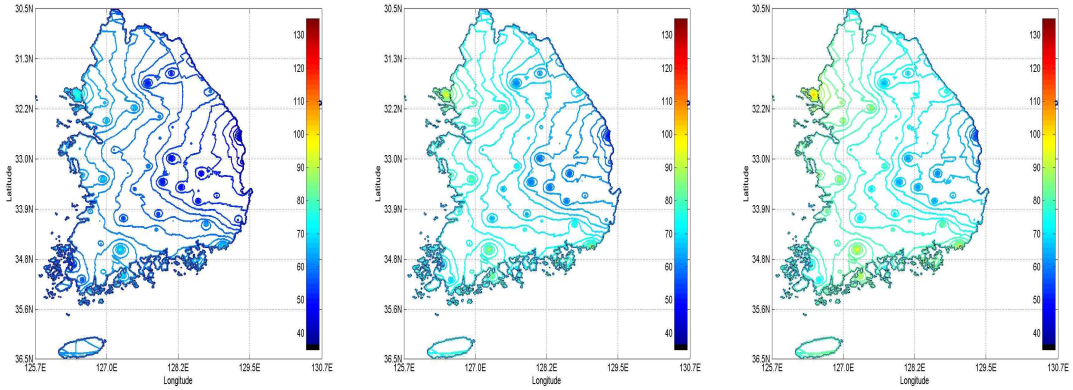
Table 3.3.16은 지속시간 1시간과 24시간의 목표연도별 확률강수량과 정상성('2009'로 표기)임을 가정하여 산정된 확률강수량 대비 증감률을 나타낸 것이다. 전반적으로 장기간에도 안정적인 확률강수량의 증가를 보였다.

Table 3.3.16 Probable Precipitation using Power Model for Target Year in Seoul

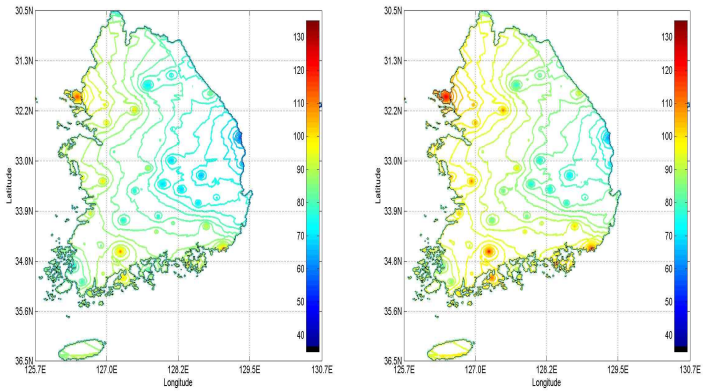
지속시간 1시간		재현기간					
		10년	20년	30년	50년	100년	200년
2009	강수량	62.70	71.10	75.90	81.90	90.00	98.10
2020	강수량	65.66	74.59	79.72	86.14	94.80	103.43
	%	4.72	4.90	5.04	5.18	5.34	5.44
2050	강수량	66.90	76.02	81.27	87.83	96.68	105.50
	%	6.70	6.92	7.08	7.24	7.43	7.54
2080	강수량	67.63	76.87	82.18	88.83	97.79	106.72
	%	7.86	8.11	8.28	8.46	8.65	8.79
지속시간 24시간		재현기간					
		10년	20년	30년	50년	100년	200년
2009	강수량	276.50	321.00	346.50	378.50	421.50	464.50
2020	강수량	291.73	339.71	367.31	401.81	448.35	494.72
	%	5.51	5.83	6.01	6.16	6.37	6.51
2050	강수량	300.41	350.19	378.83	414.63	462.91	511.02
	%	8.65	9.09	9.33	9.54	9.82	10.01
2080	강수량	305.55	356.39	385.63	422.19	471.51	520.64
	%	10.50	11.02	11.29	11.54	11.86	12.09

(10) 관측기반 및 기후모형 기반의 확률강우량을 연계한 전국 확률강수량 산정

지속시간 1시간에 대하여, A2 배출시나리오에 의한 확률강수량과 Power Model을 이용하여 산정된 확률강수량의 경우 Fig. 3.3.26 ~ 3.3.28과 같다. 일반적으로 경도의 변화에 따른 확률강수량의 변화가 나타남을 보였으며, 강화 지점과 남해안 지역에서 높은 확률강수량이 나타남을 보였다. 2020s은 지속시간 1시간과 24시간 모두 유역별로 약 10% 내의 증가율을 보였으며, 2050s의 경우에는 최대 13% 대의 증가율이, 2050s은 약 14% 대의 증가율을 나타내었다. 또한 일반적으로 지속시간 1시간의 경우 한강유역에서 가장 높은 증가율을 보였고 영산/섬진강 유역에서 가장 낮은 증가를 나타냈다. 지속시간 24시간의 경우에는 한강유역이 가장 높은 증가율을 보였고 낙동강 유역이 가장 낮은 증가율을 보였다(Table 3.3.17).

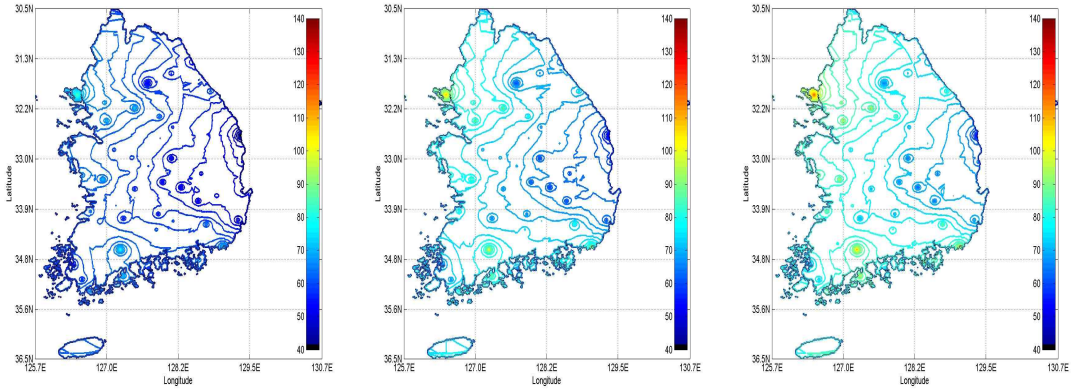


(a) 10 year (b) 30 year (c) 50 year

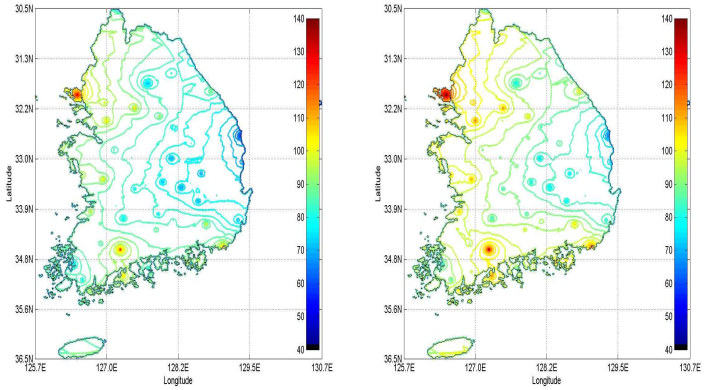


(d) 100 year (e) 200 year

Fig. 3.3.26 Target year 2020s Probable Precipitation for Return periods (A2 scenario, 1 hour)

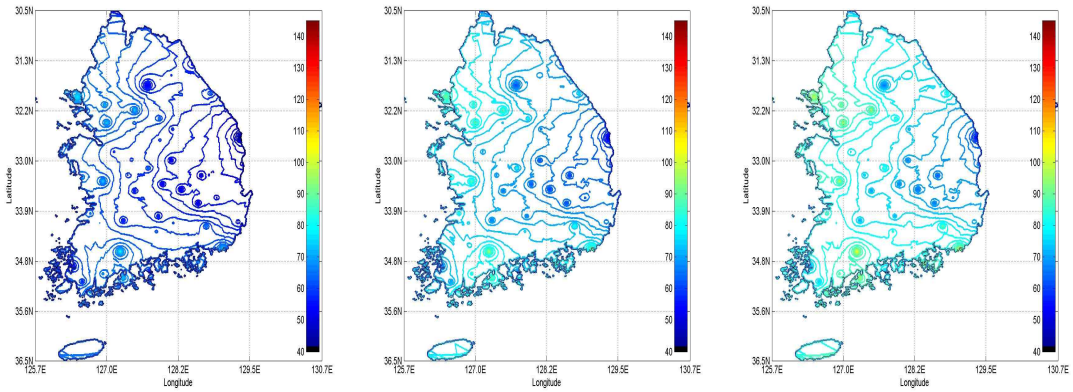


(a) 10 year (b) 30 year (c) 50 year

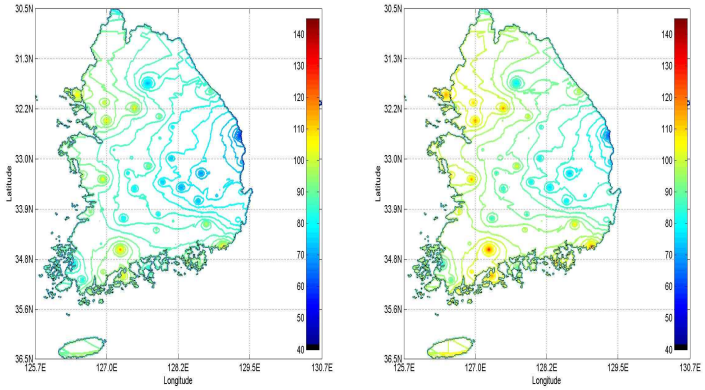


(d) 100 year (e) 200 year

Fig. 3.3.27 Target year 2050s Probable Precipitation for Return periods (A2 scenario, 1 hour)



(a) 10 year (b) 30 year (c) 50 year



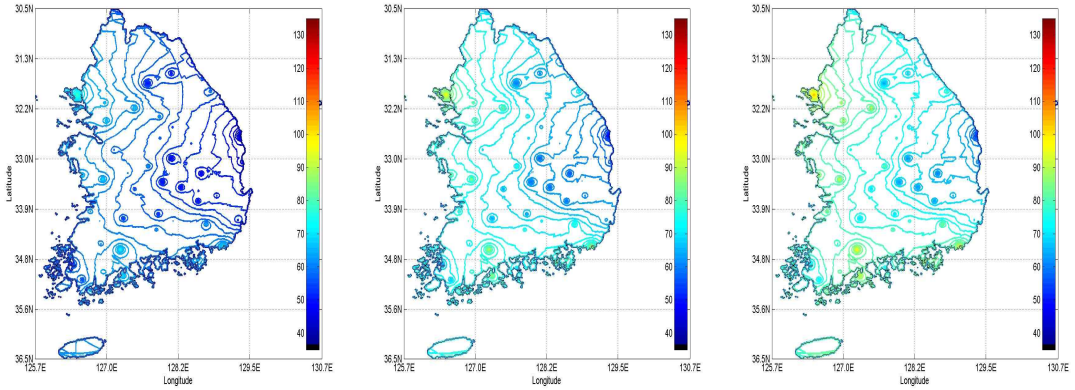
(d) 100 year (e) 200 year

Fig. 3.3.28 Target year 2080s Probable Precipitation for Return periods (A2 scenario, 1 hour)

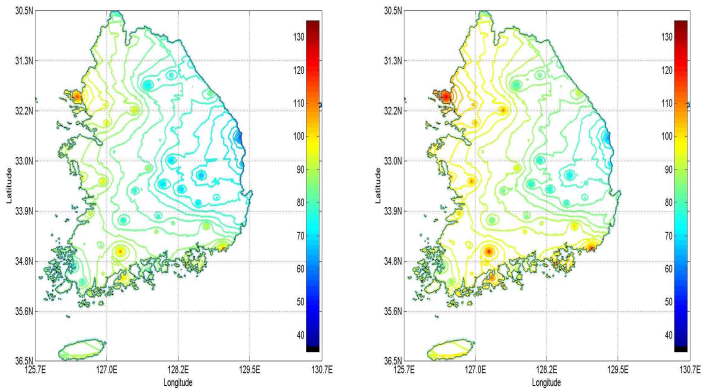
Table 3.3.17 Rate of increase comparing stationary about A2 scenario (%)

목표연도	재현기간	지속시간 1시간				지속시간 24시간			
		한강	낙동강	금강	영산/섬진강	한강	낙동강	금강	영산/섬진강
2020s	10년	**9.60**	**5.57**	**7.65**	**4.91**	**7.55**	**4.03**	**9.11**	**5.78**
	30년	**9.25**	**5.80**	**7.26**	**4.37**	**6.93**	**3.95**	**8.76**	**5.25**
	50년	**9.13**	**5.87**	**7.12**	**4.21**	**6.72**	**3.93**	**8.65**	**5.07**
	100년	**8.97**	**5.98**	**6.96**	**4.03**	**6.50**	**3.90**	**8.52**	**4.87**
	200년	**8.85**	**6.04**	**6.84**	**3.84**	**6.30**	**3.86**	**8.42**	**4.71**
2050s	10년	**13.39**	**7.43**	**8.86**	**6.97**	**12.00**	**6.16**	**11.00**	**6.38**
	30년	**13.31**	**7.35**	**8.41**	**6.25**	**11.35**	**5.78**	**10.43**	**5.76**
	50년	**13.26**	**7.34**	**8.27**	**6.01**	**11.12**	**5.65**	**10.23**	**5.55**
	100년	**13.19**	**7.32**	**8.09**	**5.72**	**10.88**	**5.50**	**10.02**	**5.31**
	200년	**13.16**	**7.28**	**7.97**	**5.46**	**10.68**	**5.37**	**9.84**	**5.13**
2080s	10년	**14.04**	**9.88**	**9.46**	**9.12**	**10.25**	**8.87**	**12.14**	**7.98**
	30년	**13.17**	**8.94**	**8.98**	**8.22**	**9.10**	**7.67**	**11.64**	**7.16**
	50년	**12.85**	**8.61**	**8.80**	**7.93**	**8.71**	**7.26**	**11.47**	**6.88**
	100년	**12.49**	**8.25**	**8.59**	**7.59**	**8.29**	**6.80**	**11.28**	**6.57**
	200년	**12.22**	**7.93**	**8.43**	**7.28**	**7.95**	**6.41**	**11.12**	**6.32**

A1B 기후변화 시나리오와 Power Model을 이용하여 산정한 확률강수량과의 취합을 통한 확률강우량도의 경우, A2 시나리오와의 취합과 같이 경도의 변화에 따른 확률강수량의 변화가 대체적으로 나타났고, 목표연도가 증가할수록 확률강수량도 대부분 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 3.3.29 ~ 3.3.31). Table 3.3.18은 관측자료를 이용하여 Power Model을 통해 산정된 확률강수량과 A1B 기후변화 시나리오를 이용한 확률강수량을 취합하여 생성된 전국 52개 지점의 확률강수량을 유역별로 분류하여, 정상성 대비 증감율을 나타낸 표이다. 2020년은 약 10% 내의 증가율을 보였고 2050년의 경우에는 최대 14% 대의 증가율이, 목표연도 2080년에는 약 16% 대의 증가율을 나타내었다. 지속시간 1시간의 경우 한강유역이, 지속시간 24시간의 경우에는 금강유역에서 가장 높은 증가율을 보였으며, 영산/섬진강 유역과 낙동강 유역이 각각 지속시간 1시간과 24시간의 확률강수량에서 가장 낮은 증가율을 나타냈다.

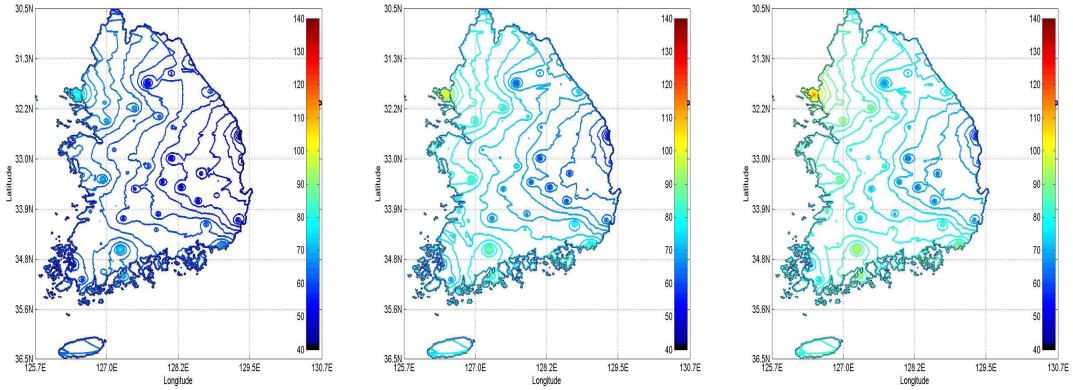


(a) 10 year (b) 30 year (c) 50 year

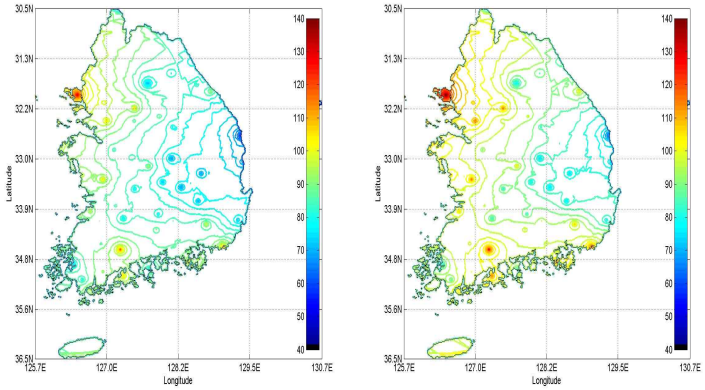


(d) 100 year (e) 200 year

Fig. 3.3.29 Target year 2020s Probable Precipitation for Return periods (A1B scenario, 1 hour)

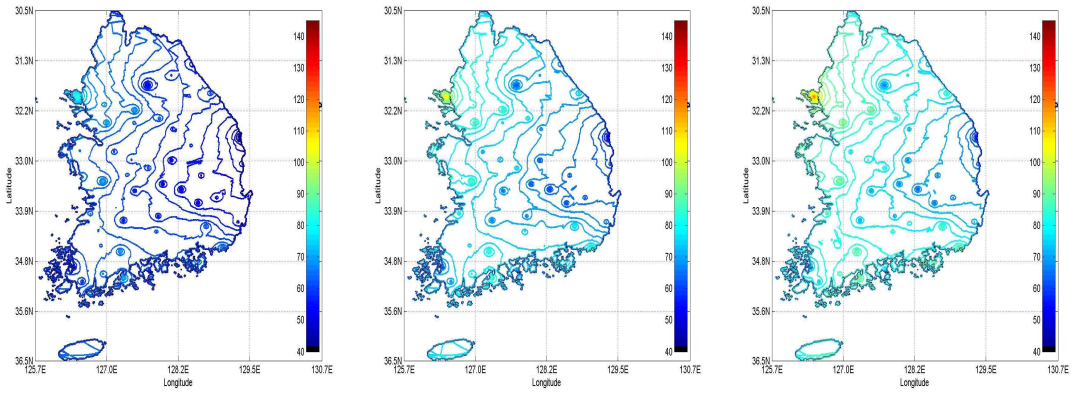


(a) 10 year (b) 30 year (c) 50 year

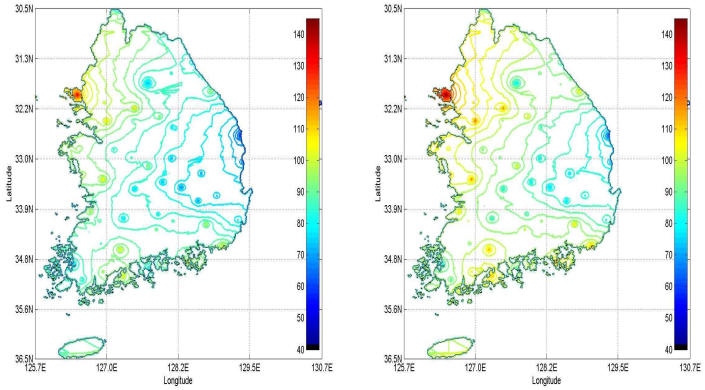


(d) 100 year (e) 200 year

Fig. 3.3.30 Target year 2050s Probable Precipitation for Return periods (A1B scenario, 1 hour)



(a) 10 year (b) 30 year (c) 50 year



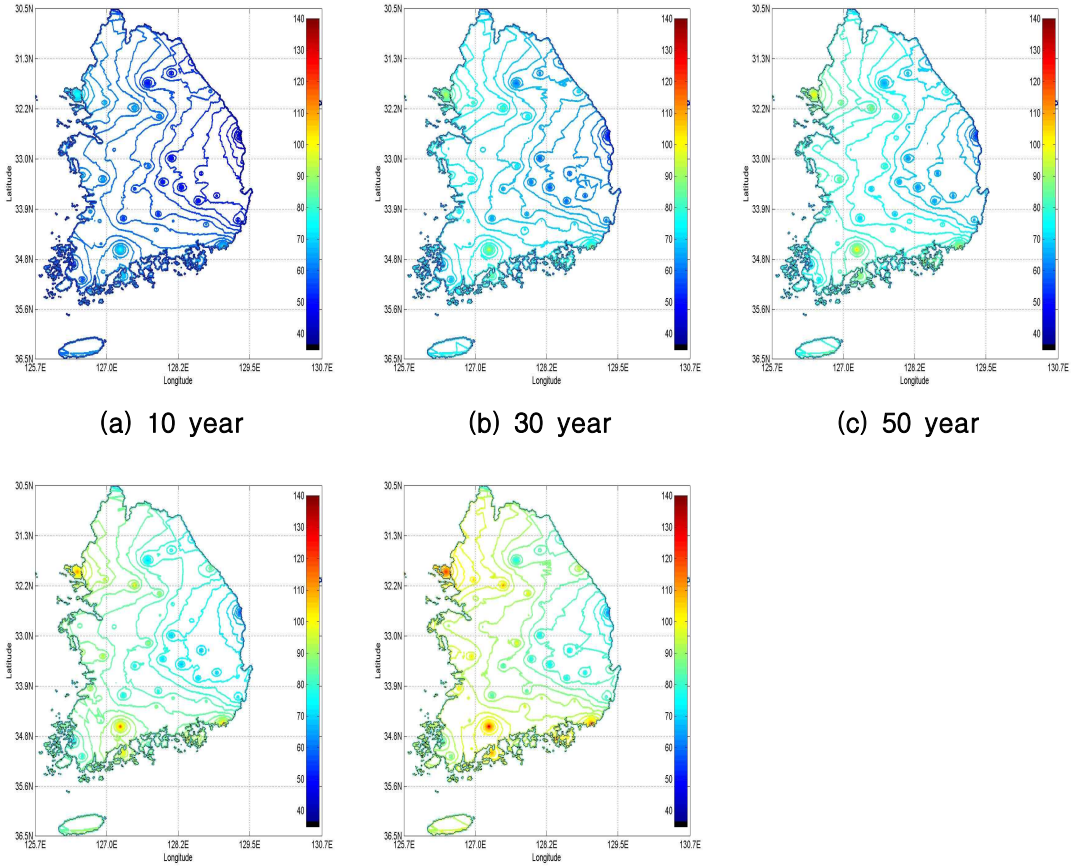
(d) 100 year (e) 200 year

Fig. 3.3.31 Target year 2080s Probable Precipitation for Return periods (A1B scenario, 1 hour)

Table 3.3.18 Rate of increase comparing stationary about A1B scenario (%)

목표연도	재현기간	지속시간 1시간				지속시간 24시간			
		한강	낙동강	금강	영산/섬진강	한강	낙동강	금강	영산/섬진강
2020s	10년	**9.40**	**4.99**	**7.27**	**4.61**	**6.85**	**4.10**	**10.15**	**5.54**
	30년	**8.97**	**4.77**	**6.80**	**3.95**	**5.80**	**3.67**	**9.82**	**5.00**
	50년	**8.82**	**4.68**	**6.65**	**3.75**	**5.44**	**3.53**	**9.71**	**4.81**
	100년	**8.63**	**4.61**	**6.43**	**3.51**	**5.05**	**3.36**	**9.59**	**4.60**
	200년	**8.51**	**4.52**	**6.29**	**3.28**	**4.73**	**3.22**	**9.49**	**4.44**
2050s	10년	**14.03**	**6.66**	**9.92**	**7.18**	**11.52**	**6.15**	**13.61**	**6.51**
	30년	**14.03**	**6.56**	**9.85**	**6.42**	**10.51**	**5.67**	**13.33**	**6.11**
	50년	**14.03**	**6.51**	**9.83**	**6.19**	**10.17**	**5.50**	**13.24**	**5.97**
	100년	**14.00**	**6.48**	**9.80**	**5.93**	**9.80**	**5.31**	**13.14**	**5.81**
	200년	**14.02**	**6.44**	**9.79**	**5.68**	**9.49**	**5.15**	**13.06**	**5.69**
2080s	10년	**16.01**	**9.90**	**11.24**	**7.16**	**14.49**	**9.12**	**16.74**	**7.89**
	30년	**16.48**	**9.15**	**10.78**	**5.99**	**14.05**	**8.12**	**16.42**	**6.91**
	50년	**16.64**	**8.92**	**10.61**	**5.60**	**13.90**	**7.78**	**16.32**	**6.57**
	100년	**16.78**	**8.63**	**10.41**	**5.15**	**13.74**	**7.39**	**16.20**	**6.20**
	200년	**16.94**	**8.40**	**10.26**	**4.76**	**13.61**	**7.08**	**16.11**	**5.90**

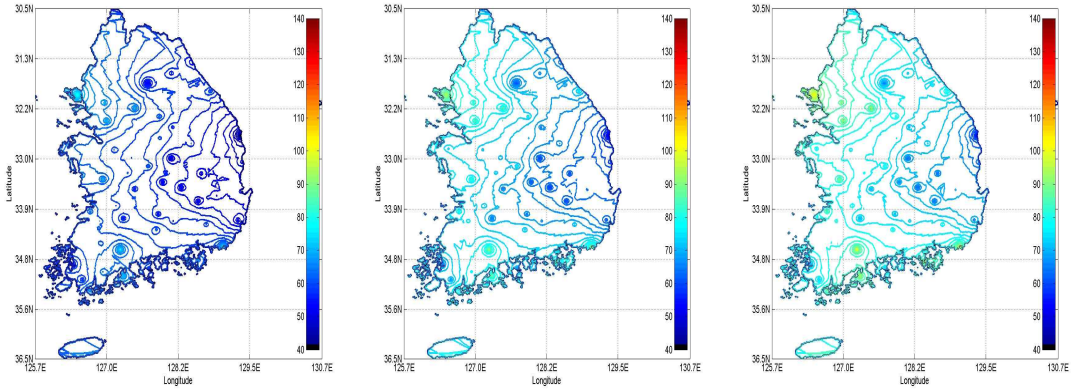
Fig. 3.3.32 ~ 3.3.34는 B1 기후변화 시나리오의 확률강수량과 기상관측자료를 이용하여 Power Model을 통해 산정한 확률강수량을 취합한 확률강우량도를 나타내고 있다. B1 기후변화 시나리오와의 취합한 결과도 A2, A1B와 같은 형태를 지니는 것으로 나타났으며, 강수량의 경우, 3개의 GCM 자료와 취합한 결과 중 가장 적은 값을 가지는 것으로 나타났다. B1 기후변화 시나리오와 Power Model을 이용한 강수량과의 취합한 결과, A2 시나리오와 A1B 시나리오 취합 때와 같이 약 10% 내외의 안정적인 증가율이 나타남을 보였으며, 대체적으로 목표연도가 증가함에 따라 증가율 또한 높아지는 것으로 나타났다. 전반적으로 한강 유역에서 가장 높은 증가율이 나타나는 반면, 영산/섬진강 유역에서 가장 낮은 증가율이 나타남을 보였다(Table 3.3.19).



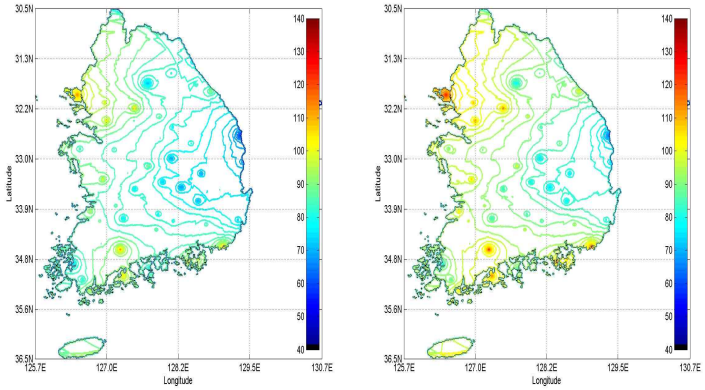
(a) 10 year (b) 30 year (c) 50 year

(d) 100 year (e) 200 year

Fig. 3.3.32 Target year 2020s Probable Precipitation for Return periods (B1 scenario, 1 hour)

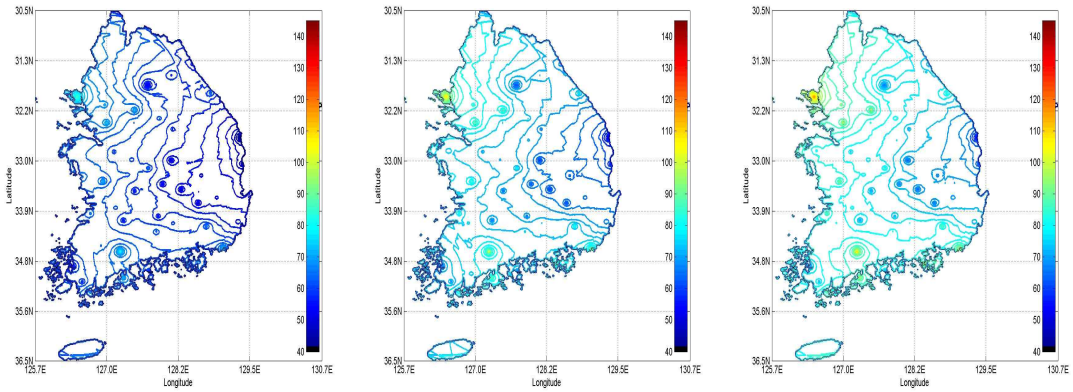


(a) 10 year (b) 30 year (c) 50 year

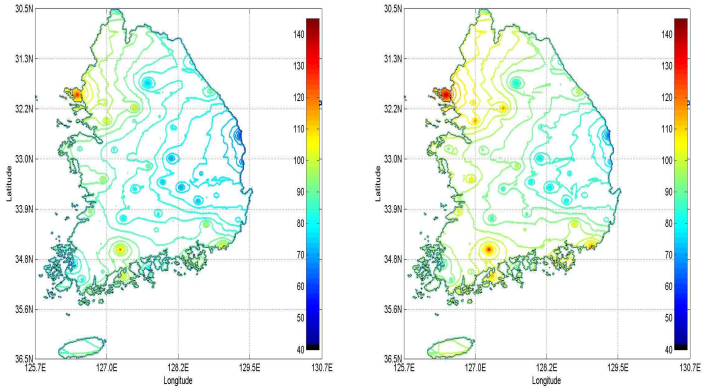


(d) 100 year (e) 200 year

Fig. 3.3.33 Target year 2050s Probable Precipitation for Return periods (B1 scenario, 1 hour)



(a) 10 year (b) 30 year (c) 50 year



(d) 100 year (e) 200 year

Fig. 3.3.34 Target year 2080s Probable Precipitation for Return periods (B1 scenario, 1 hour)

Table 3.3.19 Rate of increase comparing stationary about B1 scenario (%)

목표연도	재현기간	지속시간 1시간				지속시간 24시간			
		한강	낙동강	금강	영산/섬진강	한강	낙동강	금강	영산/섬진강
2020s	10년	**9.20**	**4.77**	**7.06**	**5.49**	**7.05**	**3.84**	**7.79**	**4.80**
	30년	**8.40**	**4.34**	**5.87**	**4.47**	**5.98**	**3.48**	**6.39**	**3.71**
	50년	**8.12**	**4.18**	**5.46**	**4.13**	**5.63**	**3.36**	**5.91**	**3.34**
	100년	**7.79**	**4.02**	**4.97**	**3.74**	**5.24**	**3.22**	**5.38**	**2.93**
	200년	**7.54**	**3.88**	**4.61**	**3.38**	**4.91**	**3.10**	**4.95**	**2.60**
2050s	10년	**13.05**	**6.65**	**9.12**	**6.65**	**9.54**	**5.81**	**11.15**	**5.48**
	30년	**12.57**	**6.03**	**7.65**	**5.56**	**8.29**	**4.87**	**9.66**	**4.58**
	50년	**12.41**	**5.81**	**7.15**	**5.21**	**7.87**	**4.55**	**9.15**	**4.27**
	100년	**12.19**	**5.59**	**6.57**	**4.80**	**7.40**	**4.17**	**8.59**	**3.93**
	200년	**12.06**	**5.39**	**6.11**	**4.45**	**7.02**	**3.86**	**8.13**	**3.64**
2080s	10년	**16.13**	**9.03**	**10.89**	**8.08**	**12.31**	**8.21**	**11.67**	**7.03**
	30년	**15.66**	**8.77**	**9.32**	**6.94**	**10.97**	**7.63**	**10.01**	**6.22**
	50년	**15.50**	**8.69**	**8.79**	**6.58**	**10.52**	**7.43**	**9.45**	**5.94**
	100년	**15.29**	**8.60**	**8.17**	**6.15**	**10.03**	**7.20**	**8.82**	**5.64**
	200년	**15.14**	**8.51**	**7.68**	**5.77**	**9.62**	**7.01**	**8.31**	**5.38**

라. 결 론

(1) A2 시나리오 기반

목표연도 2020s에는 약 10% 내의 증가율을 가지며 2050s에는 최대 13% 대의 증가율이 나타나고, 2080s에는 최대 14% 대의 증가율이 나타났다. 지속시간 1시간의 경우 일반적으로 한강 유역에서 가장 높은 확률강수량의 증가율이 나타나며, 영산/섬진강 유역에서 일반적으로 가장 낮은 증가율을 보였다. 52개 지점에 대한 정상성 대비 증가율은 중부 지역에서 일반적으로 확률강수량의 증가율이 높은 것으로 나타남. 또한 남해안 지역에서 증가율이 낮은 것으로 나타났다. A2시나리오취합에 따른 유역별 정상성 대비 증감율에서 목표연도에 따른 재현기간이 늘어날수록 한강, 낙동강, 금강, 영산 및 섬진강유역은 전체적으로 증감율이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 A2시나리오의 재현기간 200년 확률강수량의 정상성 대비 증감율은 목표연도 2020s에서 내륙지방위주로 높게 나타났으며, 목표연도 2050s에는 경기도지역, 목표연도 2080s에는 북부지역을 위주로 증감율이 높게 나타났다.

(2) A1B 시나리오 기반

전반적으로 10% 내외의 증가율이 나타남을 보였다. 한강 유역에서 일반적으로 높은 확률강수량의 증가율이 나타났으며, 영산/섬진강 유역에서 가장 낮은 증가율이 나타났다. 지점별 증가율을 분석하였을 때, 해안지역에서의 확률강수량의 증가가 낮은 것으로 나타났으며, 목표연도가 증가함에 따라 감소하는 지점이 줄어드는 것을 보였다. 또한 목표연도별 재현기간이 증가함에 따라 확률강수량의 정상성 대비 증감율은 전반적으로 감소하는 경향을 나타났으며, 재현기간 200년의 확률강수량의 정상성 대비 증감율은 목표연도 2020s에서 내륙지방 위주로, 목표연도 2050s에는 북부지방 위주로, 목표연도 2080s에도 북부지방을 위주로 정상성 대비 증감율이 증가하는 경향을 나타냈다.

(3) B1 시나리오 기반

지속시간 1시간의 경우 한강 유역에서 가장 높은 확률강수량의 증가율을 보였으며, 그 뒤로 금강, 낙동강, 영산/섬진강 유역 순으로 확률강수량의 증가율이 높은 것으로 나타났다. 지속시간 24시간의 경우에도 지속시간 1시간의 경우와 같은 결과를 보였다. 전 유역에서 전반적으로 약 10% 내외의 증가율이 나타났다. 해안지역에 비해 내륙지역에서 확률강수량이 높은 것으로 나타났으며, 대부분 정상성을 가정하여 산정된 확률강수량에 비해 증가하는 것으로 나타났다. B1 시나리오취합에 따른 유역별 정상성 대비 증감율은 목표연도별 재현기간이 증가함에 따라 증감율은 감소하는 경향을 나타냈으며, 재현기간 200년의 목표연도별 확률강수량 정상성 대비 증감율은 목표연도 2020s에서 내륙지방 위주로, 목표연도 2050s에는 경기도 지역 및 내륙지방 위주로, 목표연도 2080s에는 북부지방 위주로 정상성 대비 증감율이 증가하는 경향을 나타냈다.

4. 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망

가. 서 론

미래 가뭄을 전망하기 위한 가장 일반적인 방법으로는 기후변화 시나리오가 적용된 GCM(General Circulation Model)을 통해 생산된 수문자료를 활용하는 것이며, 이들 수문자료는 가뭄지수로 변환되어 가뭄을 판단하는 지표로 사용되고 있다. 본 연구에서는 기후변화에 의한 극한가뭄을 대비하기 위해 가뭄의 공간적인 분포특성 및 발생패턴을 분석하여 가뭄에 대한 지역적인 취약성을 전망하고 기후변화에 대한 가뭄대책을 제시하고자 한다.

본 연구에서는 한반도 5대강 유역을 대상으로 서로 다른 GCMs(A2 & B1시나리오 적용) 자료와 과거에 관측된 기상자료를 바탕으로 지속기간 6개월의 SPI를 산정하였다. S1(2010～2039), S2(2040～2069), S3(2070～2099)에 대해 중권역 단위로 극한가뭄 및 가뭄에 따른 수문학적 리스크 전망을 수행하였다.

분석방법으로는 검증된 SPI를 이용하여 가뭄의 경향성 및 주기성 분석을 실시하였으며 발생빈도를 분석하기 위한 Drought Spell 분석을 실시하였다. 또한, 가뭄빈도해석을 통해 관측소별 SDF 곡선을 유도하였으며 이를 이용하여 가뭄우심지역을 추정하였다. 추가적으로 SPI와 유출량을 이용하여 권역별 수문학적 위험도를 분석하였다.

나. 분석자료 및 연구방법

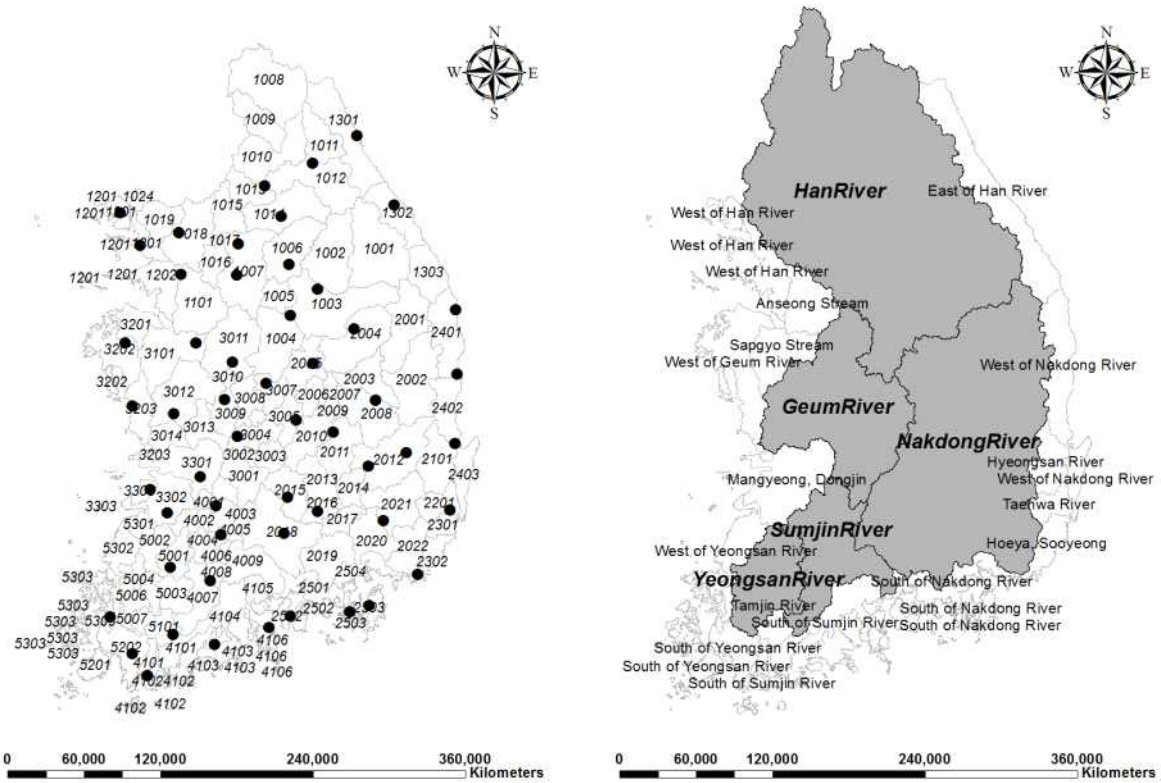
(1) 연구범위 및 강수자료

본 연구에서는 기후변화에 의해 가뭄우심지역의 공간적, 시간적 변화를 평가하기 위하여 가뭄빈도해석(drought frequency analysis)을 실시하였으며 이를 통해 작성된 SDF (Severity-Duration-Frequency) 곡선을 이용하여 한반도의 가뭄우심도(Potential Drought Hazard Map)를 작성하였다.

가뭄빈도해석을 위한 가뭄지수를 산정하기 위해 자료의 신뢰성이 확보된 기상청 산하 54개 기상관측소를 선정하였으며 강수자료는 1976-2009년간 관측된 과거자료를 이용하였다. 미래가뭄 전망을 위해서는 기후변화 시나리오를 반영한 4개 GCM을 통해 생산된 강수량 자료를 이용하였으며 자료기간은 2010-2099년이다.

한반도 전역에 대한 가뭄우심지역을 평가하기 위해 가뭄빈도해석을 통해 유도된 54개 관측소의 SDF 곡선을 유도하였으며, 산정된 관측소별 SDF 곡선을 109개 중권역에 대해 공간분포를 실시하였다. 이 과정에서 한강 이북지역에 해당하는 4개 중권역(1020:고미탄천, 1021:임진강상류, 1022:한탄강, 1023:임진강하류)과 제주도에 위치한 4개 중권역(6001:제주서해, 6002:제주북해, 6003:제주남해, 6004:제주동해)은 연구 범위에서 제외하였다.

Fig. 3.3.35(a)는 분석을 위해 선정한 54개 관측소와 109개 중권역 정보이며 Fig. 3.3.35(b)는 109개 중권역이 속해 있는 20개의 권역을 나타내고 있다. 한반도를 대표하는 5대강 유역인 한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강 유역은 남한면적의 약 68%에 해당하며 73개의 중권역이 속해있다. Table 3.3.20은 20개 권역의 유역명과 유역면적을 나타내고 있다.



(a) 54개 관측소 및 109개 중권역의 위치 (b) 20개 대권역의 위치

Fig. 3.3.35 54개 기상관측소 및 대권역의 위치

Table 3.3.20 20개 대권역의 유역명과 유역면적

Basin Name	ID	Area(㎢)	Basin Name	ID	Area(㎢)
Han River	10	23,293	Geum River	30	9,914
Anseong Stream	11	1,659	Sapgyo Stream	31	1,668
West of Han River	12	1,993	West of Geum River	32	2,932
East of Han River	13	3,338	Mangyeong, Dongjin	33	3,023
Nakdong River	20	23,702	Sumjin River	40	4,914
Hyeongsan River	21	1,140	South of Sumjin River	41	3,385
Taehwa River	22	661	Yeongsan River	50	3,470
Hoeya, Sooyeong	23	865	Tamjin River	51	506
West of Nakdong River	24	2,895	South of Yeongsan River	52	1,507
South of Nakdong River	25	2,449	West of Yeongsan River	53	2,117

(2) GCMs의 선정

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) Data Distribution Center (http://www.ipcc-data.org)에서는 SRES를 기초로 생산된 23개 GCM 결과를 제공하고 있으며, 한국국립기상연구소(METRI-National Institute of Meteorological Research of Korea)에서는 23개 GCM결과를 수집하여 2.5°×2.5°로 등격자화 하였다. 본 연구에서는 23개의 GCM 결과 중 본 연구단(기후변화에 의한 수문영향분석과 전망 연구단)에서 표준시나리오로 선정한 4개 GCM 자료를 이용하여 분석하였으며 GCM의 정보는 Table 3.3.21와 같다.

Table 3.3.21 본 연구에 사용된 4개 GCM의 정보

No.	Model (agency: version)	Country	Resolution	
			Atm.	Ocn.
1	CNRM : CM3	France	128X64	180X170
2	CSIRO : MK3	Australia	192X96	192X189
3	CONS: ECHOG	Germany/Korea	96X48	128X117
4	UKMO: HADCM	UK	96X73	288X144

(3) GCM을 이용한 강수량 특성 분석

일반적으로 기후변화에 따른 수자원의 변화를 전망하기 위해서는 우선 온실가스 배출시나리오를 선정하고, 이를 기반으로 기후모델을 이용하여 기후를 전망한다. 이 과정에서 여러가지의 불확실성이 발생하게 된다(Maurer, 2007). 첫째는 미래 온실가스 배출시나리오 예측의 부정확성, 둘째는 이 배출시나리오를 고려하여 기후를 모의하는 GCM의 한계, 셋째는 저해상도(coarse scale) GCM결과의 시공간적인 편의(bias)를 보정하는 방법에 따른 오차이다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 본 연구에서는 다양한 GCM 모의결과를 이용함으로써 기후변화 시나리오에 의해 전망된 미래자료가 갖는 불확실성을 최소화하고자 하였다.

GCMs을 통해 projection된 강수자료의 신뢰성에 대한 검증을 위해서 1976-2009년에 대해서 한반도의 중부지방에 위치하는 서울관측소를 대상으로 관측자료와 모의된 자료에 대해서 통계학적 특성치를 비교하여 보았다.

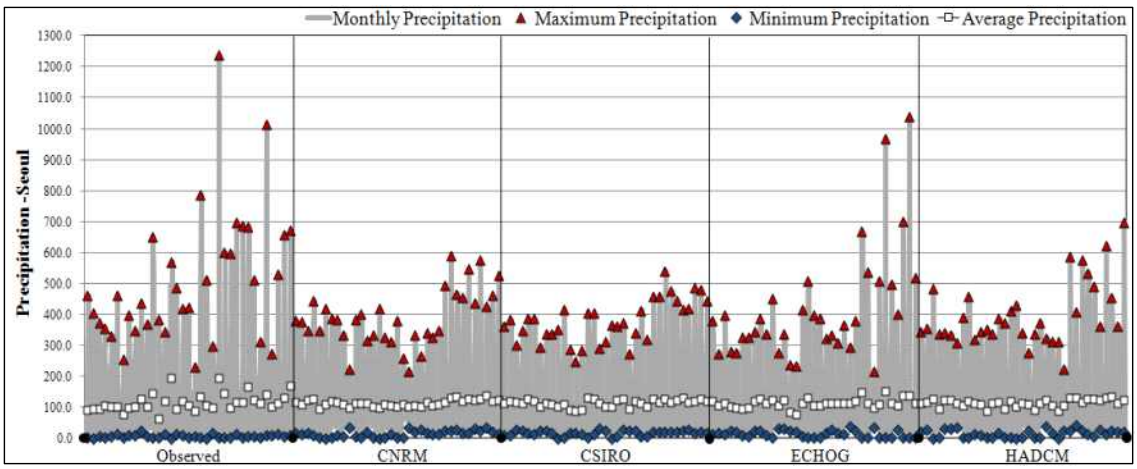


Fig. 3.3.36 1976-2009년에 대한 관측자료 및 4개 GCM(CNRM:CM3, CSIRO:MK3, CONS:ECHOG, UKMO:HADCM)의 월강수량 시계열

Fig. 3.3.36은 1976-2009년의 관측자료 및 CNRM:CM3, CSIRO:MK3, CONS:ECHOG, UKMO:HADCM을 통해 생산된 월 강수량(gray shading), 연최대강수량(red triangle), 연평균강수량(white quadrilateral), 연최소강수량(blue rhombus)를 나타내었다.

연최대강수량의 경우 관측자료에서는 전반적으로 1976-1995년에서는 약 200-600mm의 강수량이 나타났으며 1996-2010년에서는 약 500-700mm의 강수량이 나타났다. 1998년 1237.8mm, 2006년 1014.5mm로 1000mm 이상의 높은 강수량을 나타내기도 했다. 4개 GCM 자료의 1976-2000년에서는 약 400mm, 2001-2010년에서는 약 400-600mm의 강수

량이 나타났다. 35년치 자료 중 600mm 이상의 강수량 횟수를 비교하면 관측자료의 경우 9회가 발생한 반면 CNRM:CM3과 CSIRO:MK3 모델의 경우 0회, CONS:ECHOG 4회, UKMO:HADCM 2회로 4 GCMs data의 강수량 횟수가 낮게 나타났다.

이러한 결과는 분석에 사용된 4개 GCM 자료가 관측자료와 달리 모의과정에서 태풍과 같은 극치사상을 반영하지 못했기 때문인 것으로 분석된다. 하지만, 연최대강수량과 달리 연평균강수량과 연최소강수량은 관측자료와 유사하게 나타나고 있어 본 가뭄연구에서는 최대치가 아닌 최소치가 활용된다는 점을 감안할 때 GCMs에 의해 생산된 강수자료의 활용이 가능할 것으로 분석되었다. 또한, 각 모델간의 강수자료가 다소 차이가 발생하는 이유로는 GCMs이 각기 다른 역학체계와 격자크기 및 모수화(parametrization)과정, 물리과정으로 인한 것으로 분석된다(Im et al., 2010).

(4) 가뭄지수의 선정 및 적용성 검토

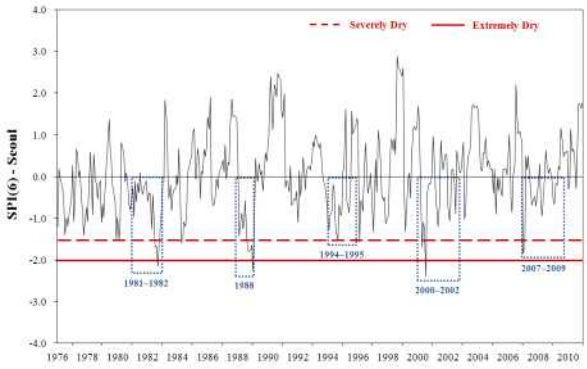
가뭄을 정량적으로 해석하기 위해서 수문 및 기상자료를 직접 활용하거나 또는 수문, 기상자료를 가뭄지수로 변환하여 가뭄연구에 활용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 가뭄지수를 활용하여 과거 가뭄에 대한 평가 및 미래 가뭄전망을 시도하였다. 대표적인 가뭄지수로서 SPI(Standardized Precipitation Index), PDSI(Palmer Drought Severity Index), SWSI(Surface Water Supply Index)가 있으며 이외에도 CMI(Crop Moisture Index), SMI(Soil Moisture Index) 등이 있다.

WMO(World Meteorological Organization)에서는 여러 차례의 논의를 거친 끝에 SPI의 실용성 및 적용성 등에 대해 긍정적으로 평가하였다. 또한, 국제적으로도 기상학적인 가뭄을 평가하는 표준지수로 관련분야 전문가들로부터 동의를 얻어내었다. 따라서, 본 연구에서는 여러 가뭄지수들 중 SPI가 미래의 가뭄을 정량화하고 전망하는 방법으로 가장 효율적이라는 결론을 내렸다.

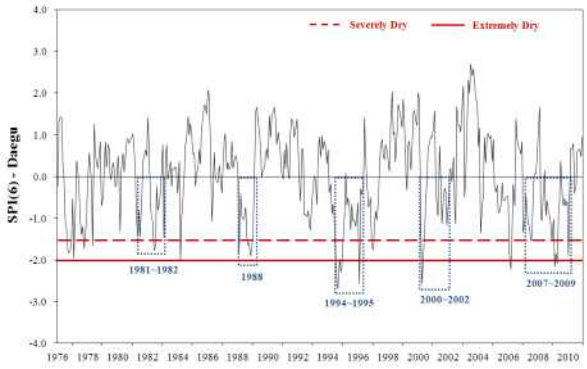
본 연구에서는 여러 시간단위(1, 3, 6, 12개월)의 지속기간을 갖는 SPI를 산정하여 연구에 이용하였으며, 여기에서는 지속기간 6개월의 SPI를 적용한 분석결과를 제시하고자 한다. Fig. 3.3.37은 과거자료를 이용하여 산정된 주요 관측소별 SPI(6) 시계열로서, 서울, 대구, 대전, 광주 관측소는 각각 한강, 낙동강, 금강, 영산강 유역을 대표할 수 있는 관측소로서 54개 관측소의 적용결과를 대표하여 나타내었다.

과거가뭄사상은 가뭄기록조사보고서(MLTM, 1995; MLTM, 2002) 및 신문 등의 미디어에 보고된 기사를 토대로 조사하였으며 1981-1982년, 1988년, 1994-1995년, 2000, 2001, 2002년, 2007, 2009년에 큰 가뭄이 발생했던 것을 확인할 수 있었다(이주헌과 김창주, 2011). 산정된 SPI(6)는 이들 과거의 가뭄사상을 가뭄피해연도에 따른 가뭄피해지역에 따라 Extremely Dry (-2.0≥SPI)와 Severely Dry(-1.5≥SPI≥-2.0)로 적절히 표현하고 있는 것을 확인할 수 있다.

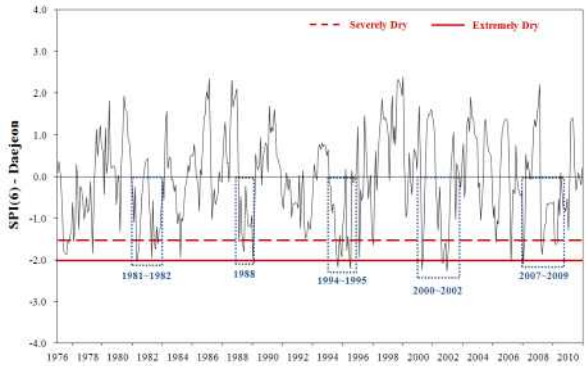
Fig. 3.3.38은 서울지점을 대상으로 한 1976-2099년(1976-2009년 : 서울지점의 과거관측자료, 2010-2099년 : 4개 GCM을 통해 생산된 강수자료)의 SPI(6) 시계열을 나타내고 있다. 4개 GCM을 이용하여 전망된 미래의 SPI는 과거 SPI와 같이 심한가뭄(with -1.5≥SPI>-2.0)과 극한가뭄(with -2.0≥SPI)을 잘 표현하는 것으로 나타났다.



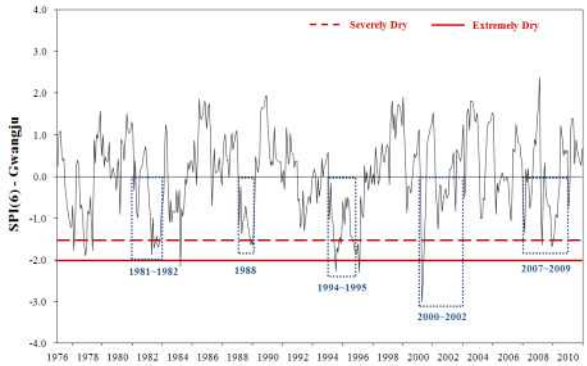
(a) 서울관측소(한강유역)



(b) 대구관측소(낙동강유역)

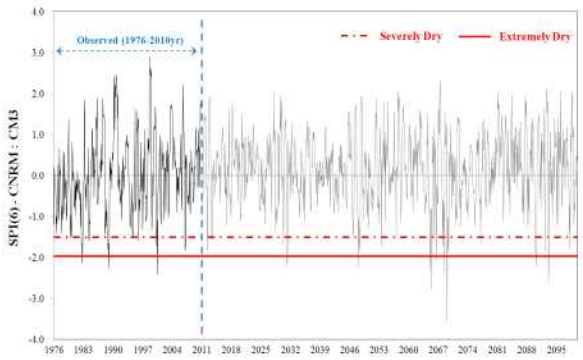


(c) 대전관측소(금강유역)

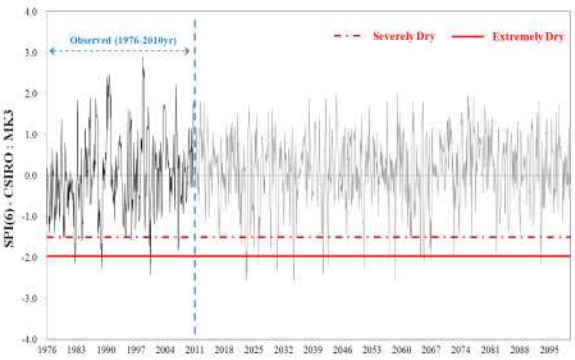


(d) 광주관측소(영산강유역)

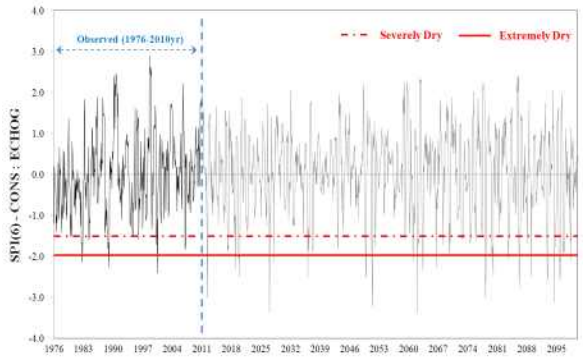
Fig. 3.3.37 과거 관측자료를 이용하여 산정된 서울, 대구, 대전 및 광주관측소의 SPI(6) 시계열(1976-2009년)



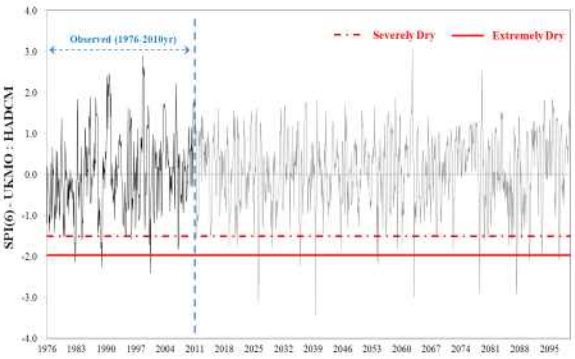
(a) CNRM:CM3



(b) CSIRO:MK3



(c) CONS:ECHOG



(d) UKMO:HADCM

Fig. 3.3.38 서울지점을 대상으로 한 4개 GCM의 미래 SPI 시계열

(5) 가뭄빈도해석 및 가뭄우심도 작성 절차

본 연구에서 개발하고자 하는 가뭄우심도(Potential Drought Hazard Map)란 가뭄에 의해서 실제로 물 부족이 발생했거나 또는 농작물의 피해가 발생한 지역을 지도로 나타내는 개념이 아니라, 일정기간 동안의 강수의 부족이 발생하여 물 부족을 유발할 수 있는 가능성이 있는 잠재 피해가능 지역을 가뭄도로 표현하는 개념이다. 즉, 수문학적 가뭄 또는 농업적 가뭄 피해지역이 아닌 기상학적 가뭄이 빈번하게 발생하여 가뭄에 의한 잠재피해 가능성이 큰 지역을 의미하게 된다. 가뭄지수를 활용한 가뭄우심도 작성방법은 Fig. 3.3.39와 같은 절차에 의해 수행되었다.

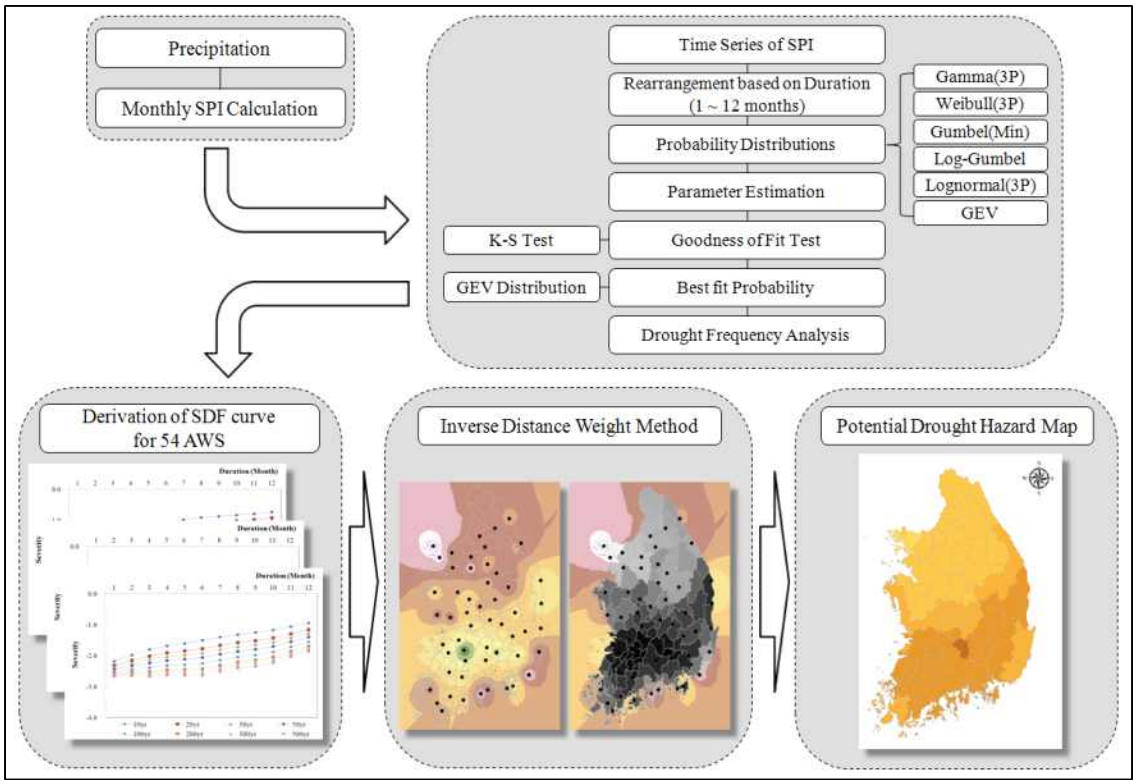


Fig. 3.3.39 가뭄우심도 작성방법

과거 관측자료와 4개의 GCMs 자료를 통해 산정된 SPI(6)를 지속기간 1개월에서 12개월까지 연속된 최대가뭄심도를 갖는 계열로 재구성한다. 과거의 경우 1976-2009년 까지 산정된 월별 SPI(6)를 전기간치 계열로 구성하였다(S0기간). 미래의 경우 30년 단위(2010-2039년, 2040-2069년, 2070-2099년)로 분류하여 3개의 분석기간(S1, S2, S3 기간)으로 재구성하였다.

가뭄빈도해석을 위한 최적 확률분포형을 선정하기 위해 Gamma, GEV(General Extreme Value), Gumbel, Log-Gumbel, Lognormal, Log-Pearson type Ⅲ, Normal, Pearson type Ⅲ, Weibull, Wakeby 분포형 등의 확률분포형을 대상으로 적합도 검정을 실시하였다. 적합도 검정 방법으로는 Kolmogorov-Smirnov test를 이용하였다.(Significance Level : 5%). 적합도 검정 결과, 가장 높은 순위의 적합성을 나타낸 GEV(General Extreme Value) 분포형을 가뭄빈도해석을 위한 최적확률 분포형으로 선정하였다.

산정된 SPI(6)를 이용하여 지속기간별 재현기간별 가뭄빈도해석을 실시하였으며 54개 관측소에 대한 SDF 곡선을 유도하였으며, 마지막으로 54개 관측소의 가뭄심도-지속기간-생기빈도(Severiy-Duration-Frequency, SDF) 곡선을 이용하여 한반도 전역에 대하여 IDW(Inverse Distance Weight) 방법에 의한 공간분포를 실시하여 가뭄우심도를 추정하였다.

(6) 수문학적 위험도 분석

본 연구에서는 기후변화 시나리오에 따른 극치 가뭄의 시공간적 특성을 파악하고 가뭄 조건을 적용한 수문학적 유출의 지역적 분포 특성을 분석하였다. 한반도 5개 권역 109개 중권역 유역을 대상으로 SPI(3)≤-1.5에 따른 과거 가뭄에 대한 평가 및 미래 가뭄 전망을 분석하였다. 미래 가뭄 전망을 위하여 기후변화 시나리오를 반영한 4개 GCM을 통해 생산된 강수량 자료를 적용하여 지속기간 3개월의 SPI 가뭄 지수를 산정하였다.

전체 관측 및 미래 자료에 대한 초과확률을 산정하여 수문학적 조건부 위험도 분석을 실시하였으며 위험도 결과에 대한 통계적 검증을 위해서는 bootstrap resampling을 통한 유의성 분석을 적용하였다.

본 연구에서는 극한가뭄에 의한 유역별 수자원의 안정성 분석을 위하여 중권역별 수문학적 위험도를 지수화하여 제시하고자 하였다. 수문학적 위험도 지수란 저유량(Q25)에 대한 극한가뭄(SPI≤-1.5)의 조건부와 비조건부의 초과 확률의 비로 정의되는 값이다. 수문학적 위험도가 1인 경우 SPI의 심한가뭄 조건에 따라 유출의 변화가 없는 상태를 의미하며, 1보다 큰 경우 수문학적 리스크가 크게 나타나 극치가뭄 발생시 유출량의 가용성이 적고 가뭄에 취약함을 보여주는 중권역인 것이다. 다음 Fig. 3.3.39는 금호강 유역에 대한 심한가뭄(SPI≤-1.5)에 대한 수문학적 위험도 분석의 예를 보여주고 있다. 금호강 유역의 경우 수문학적 위험도 2.04를 보여 심한가뭄에 지역적 유출의 변화가 민감하게 반응한 것으로 나타났다.

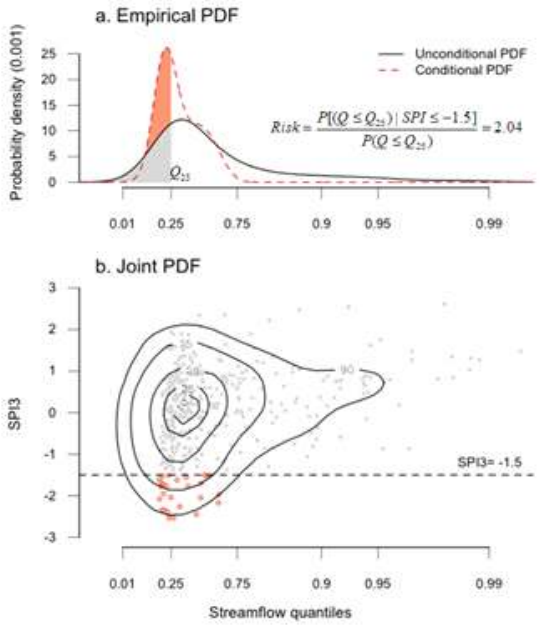


Fig. 3.3.40 수문학적 위험도 분석 결과(심한가뭄, SPI3≤-1.5, 금호강 유역)

다. 연구결과

(1) 계절별 보통가뭄의 발생빈도 및 심도의 변화

앞서 분석한 주요 관측소별 심한가뭄의 발생빈도 및 심도변화 분석을 확장하여 한반도 20개 대권역(109개 중권역)에 대한 계절별 가뭄의 발생 빈도 및 심도변화를 분석하였다.

분석기간은 과거의 경우 1976-2009년의 월별 SPI(6)를 전 기간치 계열로 구성하였으며 미래의 경우 자료기간이 길어 30년 단위(S1:2010-2039년, S2:2040-2069년, S3:2070-2099년)로 구분하여 재구성하였다. 계절의 경우 봄은 3-5월, 여름은 6-8월, 가을은 9-11월, 겨울은 12-2월에 해당한다. 분석방법은 관측자료와 4개 GCMs을 통해 산정된 SPI(6)를 보통가뭄(with -1.0≥SPI) 이하로 구분한 뒤 계절별(S1-S3)로 분석하였다. Fig. 3.3.40-41은 Drought-Spell 분석을 이용하여 분석한 계절별 가뭄 월의 발생빈도 및 가뭄심도 결과를 나타내고 있다.

관측자료를 이용하여 과거 한반도의 계절별 가뭄 월의 발생빈도를 분석한 결과, 봄 가뭄이 여름, 가을, 겨울가뭄에 비해 높은 발생빈도를 나타내었는데 금강(26.65%), 삽교천(26.67%), 금강서해(23.89%), 만경・동진강(25.81%), 섬진강(23.70%) 유역에서 높은 발생빈도를 나타냈다. 여름에는 낙동강(16.52%), 만경・동진강(18.21%), 섬진강(19.41%), 섬진강남해(17.52%), 탐진강(18.55%)에서 가을에는 만경・동진강(17.50%), 섬진강(17.65%), 섬진강남해(17.20%), 탐진강(17.36%), 영산강서해(16.33%)유역에서 높은 발생빈도를 나타냈다. 겨울에는 회야・수영강(19.30%), 낙동강동해(18.34%), 낙동강남해(19.14%), 만경・동진강(20.17%), 탐진강(18.91%) 유역에서 높은 발생빈도를 나타냈다.

4개 GCMs을 이용하여 미래 한반도의 계절별 가뭄 월의 발생빈도 변화를 분석한 결과, 전 유역에서 가뭄이 크게 완화되는 것으로 분석되었다. 4개 GCMs의 기간별(S1-S3) 증감량을 평균하여 비교한 결과, 봄의 경우 과거 높은 발생빈도를 나타냈던 유역인 금강(111.60%), 삽교천(113.30%), 금강서해(95.04%), 만경・동진강(111.11%), 섬진강(85.68%) 유역에서 약 2배 이상 가뭄 월의 발생빈도가 낮아졌다. 여름에는 섬진강(107.03%), 섬진강남해(75.60%), 영산강(78.97%), 탐진강(111.10%), 영산강남해(73.22%)유역에서 가뭄 월의 발생빈도가 낮아졌으며 가을에는 섬진강(114.16%), 섬진강남해(132.93%), 영산강(117.26%), 탐진강(201.80%), 영산강남해(151.24%)유역에서 가뭄 월의 발생빈도가 낮아졌다. 여름과 가을 모두 공통적으로 섬진강, 섬진강남해, 영산강, 탐진강, 영산강남해 유역에서 과거에 비해 가뭄 월의 발생빈도가 낮아졌으며 가을이 여름에 비해 크게 낮아졌다. 겨울에는 형산강(58.00%), 낙동강동해(75.34%), 만경・동진(76.64%), 섬진강(58.32%), 탐진강(67.80%) 유역에서 과거에 비해 가뭄 월의 발생빈도가 낮아졌다. 4개 GCM을 이용하여 미래 한반도의 발생빈도를 분석한 결과, 4개의 GCM은 다소 차이를 보였지만 전반적으로 과거에 비해 가뭄 월의 발생빈도가 낮아지는 것으로 나타났다.

관측자료를 이용하여 과거 한반도의 계절별 가뭄심도를 분석한 결과, 봄과 겨울이 여름과 가을에 비해 심한가뭄(with -1.5≥SPI)이 나타나는 유역이 많은 것으로 분석되었다. 특히, 봄에는 회야・수영강(-1.56), 낙동강남해(-1.64), 만경・동진강(-1.57), 섬진강(-1.59), 섬진강남해(-1.63), 영산강서해(-1.56) 유역, 겨울에는 낙동강(-1.56), 형산강(-1.61), 낙동강동해(-1.55), 삽교천(-1.55), 섬진강(-1.57)유역에서 가뭄심도가 가장 낮게

나타났다. 여름에는 한강동해(-1.50), 섬진강(-1.52), 영산강서해(-1.50) 유역, 가을에는 낙동강(-1.50), 형산강(-1.54), 낙동강동해(-1.59), 금강서해(-1.52)유역 심한 가뭄으로 분석되었다.

4개 GCMs을 이용하여 미래 한반도의 계절별 가뭄심도의 변화를 분석한 결과, 가을을 제외한 봄, 여름, 겨울에서 과거에 비해 가뭄심도가 심화되는 것으로 분석되었다. 봄에는 한강(6.82%), 안성천(6.08%), 한강서해(11.67%), 한강동해(11.05%), 태화강(3.19%), 낙동강동해(5.71%)유역, 여름에는 한강(6.70%), 한강서해(9.96%), 태회강(8.09%), 회야・수영강(13.53%), 낙동강남해(10.75%) 유역에서 가뭄심도가 심화되는 것으로 분석되었다. 겨울에는 한강(12.64%), 한강서해(9.28&), 회야・수영강(7.93%), 탐진강(8.28%), 영산강남해(9.23%) 유역에서 가뭄심도가 심화되는 것으로 분석되었다. 가을의 경우 모든 유역에서 가뭄심도가 완화되었지만 태화강(3.05%), 회야・수영강(11.27%), 낙동강남해(8.35%)유역에서는 가뭄심도가 심화되는 것으로 분석되었다.

계절별 Drought-Spell 분석결과, 미래에는 가을을 제외한 봄, 여름, 겨울에서 과거에 비해 심한가뭄 월의 발생빈도는 감소하지만 가뭄심도는 더욱 심화되는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 미래에는 가뭄의 강도와 피해가 크게 나타날 수 있음을 의미하는데 가뭄에 대한 실질적 가뭄대책과 각 유역을 중심으로 하는 행정구역별 대책의 마련이 필요할 것으로 판단되었다.

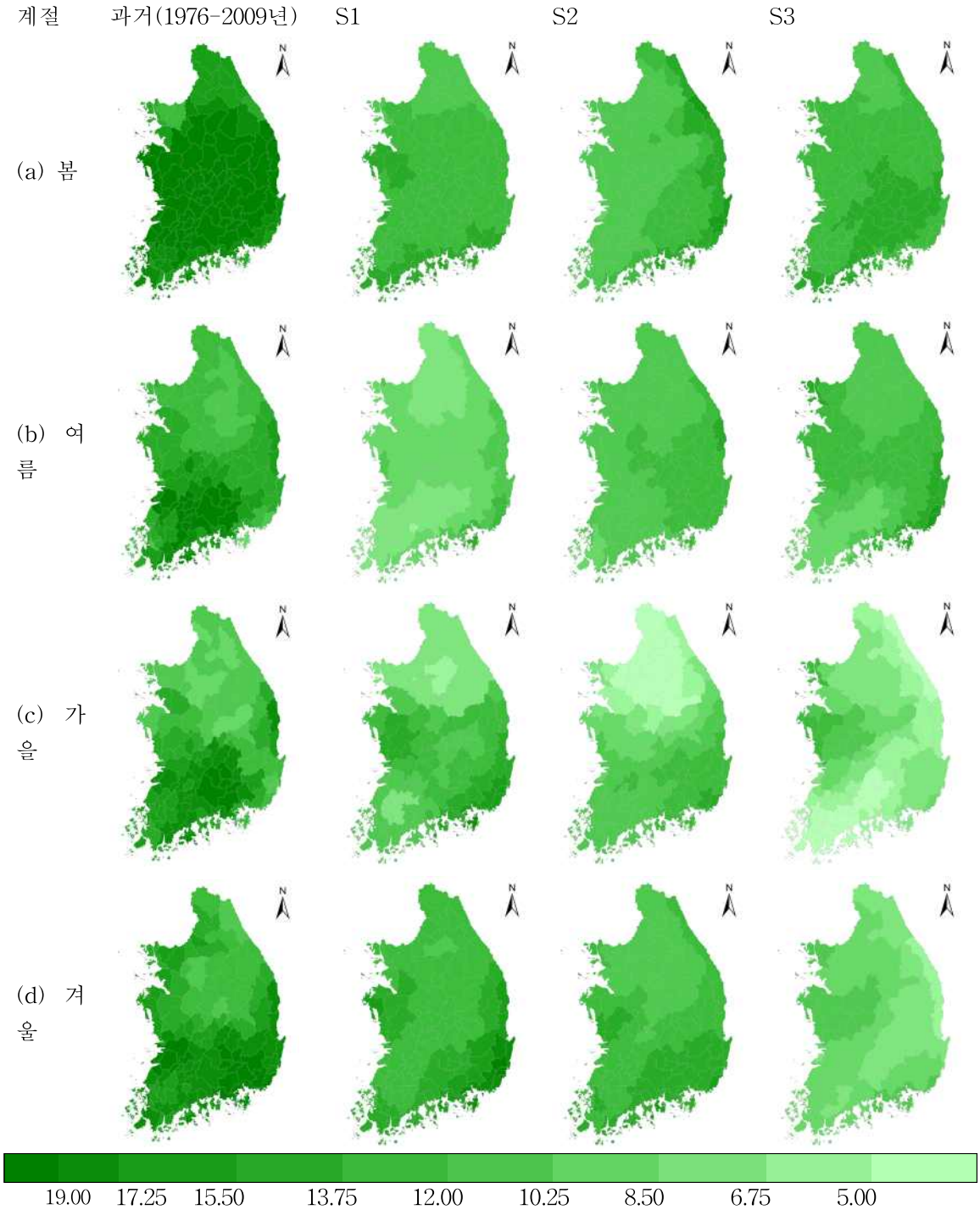


Fig. 3.3.41 기후변화에 의한 계절별 보통가뭄 월의 발생빈도 변화분석

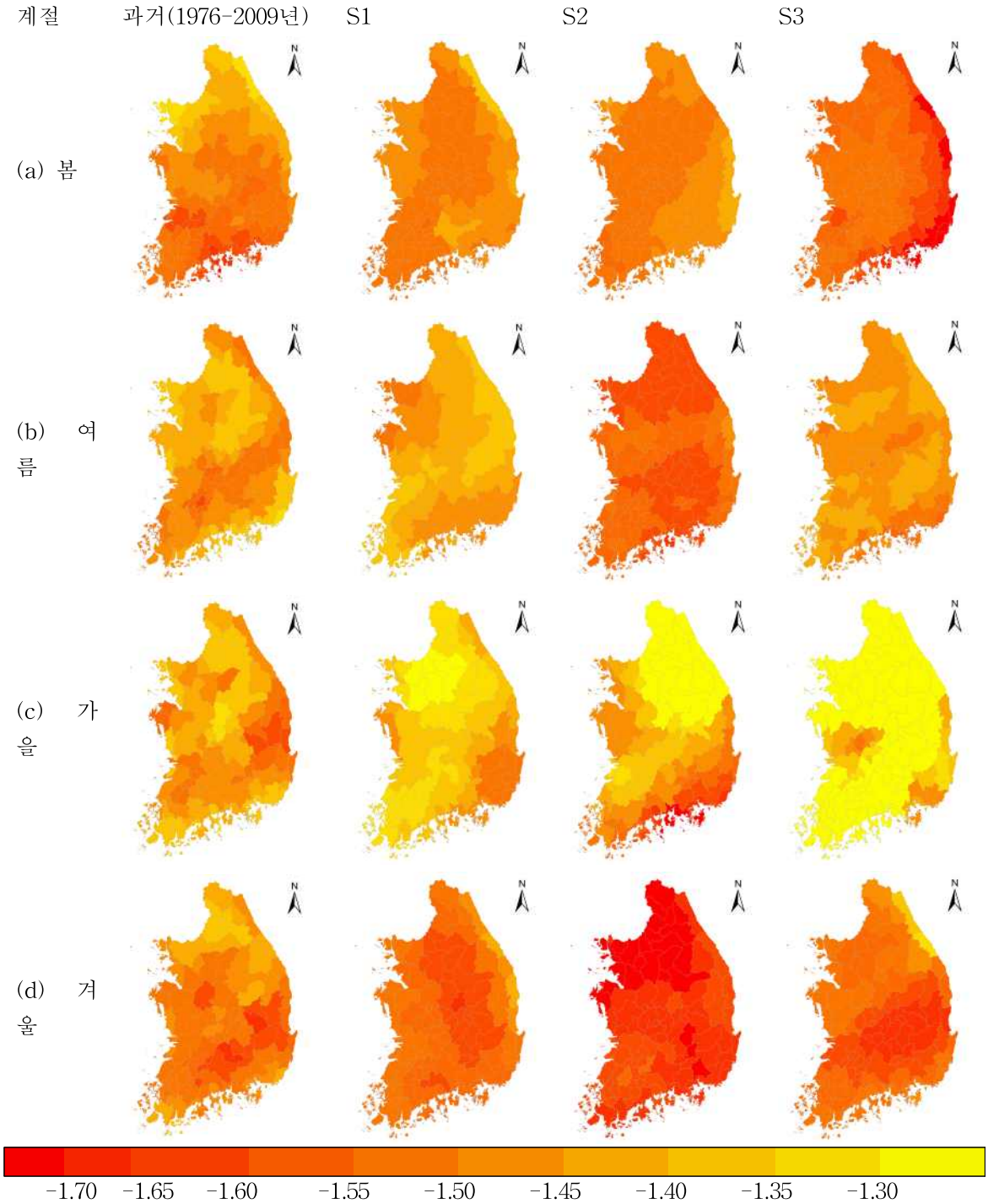
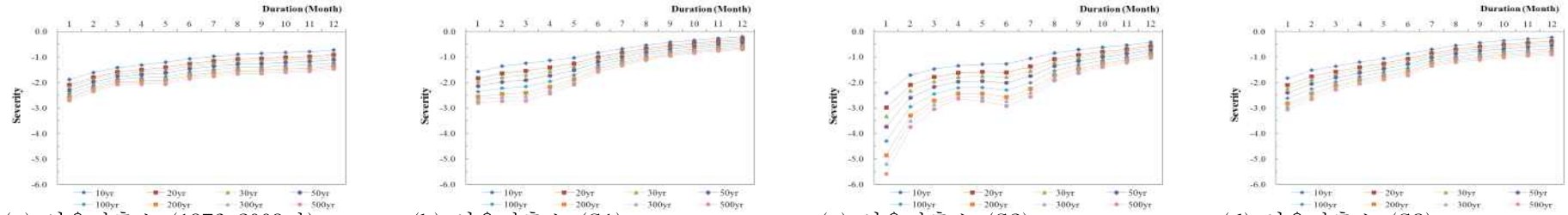


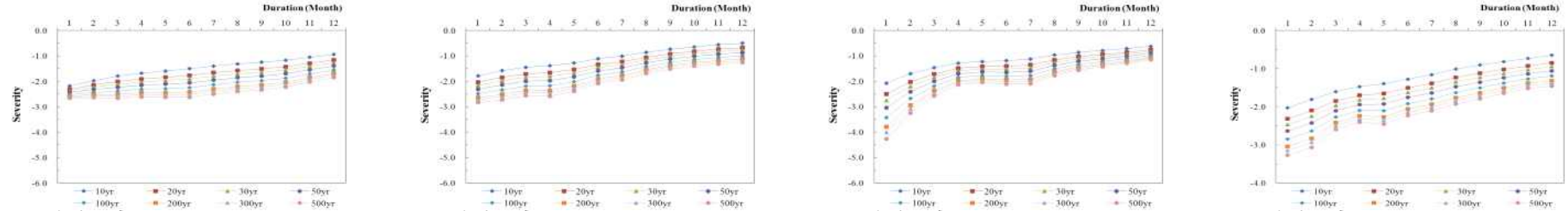
Fig. 3.3.42 기후변화에 의한 계절별 가뭄심도의 변화분석

(2) 계절별 보통가뭄의 발생빈도 및 심도의 변화

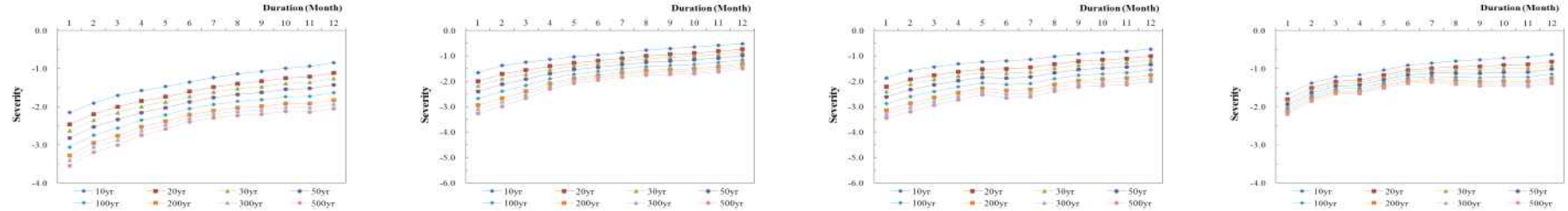
본 연구에서는 가뭄지수를 활용한 빈도해석을 통하여 54개 기상관측소에 대한 SDF 곡선을 유도하였으며 Fig. 3.3.43은 과거 관측자료와 CNRM 모델을 이용한 서울, 대전, 광주 관측소의 SDF 곡선을 나타내고 있다. X축은 지속기간(1개월-12개월), Y축은 가뭄빈도해석을 통해 산정된 가뭄심도를 나타내고 있으며 재현기간은 10, 20, 30, 50, 100, 200, 300, 500년으로 설정하였다. 재현기간별 심도의 차이에서는 한반도의 중부지방에 위치한 서울, 대전 관측소에 비해 남부지방에 위치한 광주 관측소의 가뭄심도가 낮게 나타났다. 특징적인 것은 CNRM 모델을 통해 미래가뭄을 전망하였을 때 서울, 대전관측소의 가뭄심도는 심화되고 있는 것으로 나타나고 있어서, 미래에는 남부지방 뿐만 아니라 중부지방에도 가뭄이 심화될 것으로 전망되었다.



(a) 서울관측소 (1976-2009년) (b) 서울관측소 (S1) (c) 서울관측소 (S2) (d) 서울관측소 (S3)



(e) 대전관측소 (1976-2009년) (f) 대전관측소 (S1) (g) 대전관측소 (S2) (h) 대전관측소 (S3)



(i) 광주관측소 (1976-2009년) (j) 광주관측소 (S1) (k) 광주관측소 (S2) (l) 광주관측소 (S3)

Fig. 3.3.43 관측자료와 CNRM 모델을 통해 산정된 SPI(6)를 이용하여 유도된 서울, 대전, 광주 관측소의 SDF곡선

(3) 과거자료에 의한 가뭄우심도 (재현기간별, 지속기간별)

Fig. 3.3.44는 SPI를 활용하여 작성된 남한의 재현기간별 200년 빈도의 지속기간별(1, 3, 6, 12개월) 가뭄우심도를 나타내고 있다. 분석대상에 해당되는 남한 즉, 117개의 중유역은 5대강(한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강) 유역을 포함한 총 21개의 대유역에 속해있다. 재현기간 200년빈도의 지속기간별 가뭄우심도를 작성한 결과, 지속기간이 1개월에서 12개월로 길어질수록 태화강을 제외한 20개의 대유역에서의 가뭄심도가 완화되는 것으로 분석되었다.

지속기간별 남한의 가뭄우심도를 보면 지속기간 1개월의 가뭄우심도에서는 태화강과 한강서해를 제외한 나머지 19개의 대유역에서 극심한 가뭄이 나타났으며, 그 중 탐진강 유역(-3.25)에서 가장 심한 가뭄심도가 나타났다. 탐진강 유역 다음으로는 영산강(-3.22), 섬진강(-3.22), 섬진강남해(-3.17) 유역에서 가뭄심도가 낮게 나타났다. 지속기간 3개월의 가뭄심도의 경우에도 지속기간 1개월과 마찬가지로 한강서해 유역과 태화강 유역을 제외한 19개의 대유역에서 극심한 가뭄이 나타났다. 지속기간 1개월에 비해 남한의 가뭄심도가 평균 0.4017 높아지며 가뭄이 완화되었다. 지속기간 3개월의 가뭄심도에서는 섬진강 유역(-2.89)에서 가뭄심도가 가장 낮게 나타났으며, 섬진강 유역 다음으로 가뭄심도가 낮게 나타난 유역은 낙동강남해(-2.80), 섬진강남해(-2.74), 영산강(-2.73) 유역 순으로 심도가 낮게 나타났다. 지속기간 6개월의 가뭄우심도에서는 지속기간 3개월에 비해 남한의 평균 가뭄심도가 0.37 높아지며 가뭄이 완화되었다. 금강서해, 삽교천, 한강동해, 회야(수영), 안성천, 한강 유역이 극심한 가뭄에서 심한가뭄으로 가뭄이 완화되었고, 나머지 13개 유역에서는 가뭄심도는 완화되었지만 여전히 극심한 가뭄을 나타내고 있었다. 가장 낮은 가뭄심도를 나타낸 유역으로는 섬진강 유역(-2.43)이었으며, 그다음으로 가뭄심도가 낮게 나타난 유역으로는 만경(동진)(-2.37), 제주도(-2.32), 낙동강동해(-2.29) 유역이다. 지속기간 12개월의 가뭄우심도에서는 지속기간 6개월에서 극심한 가뭄을 나타냈던 13개의 유역이 모두 심한가뭄으로 변화하였으며, 남한 평균가뭄심도가 0.53 높게 나타났다. 또한 금강서해, 한강동해, 안성천, 한강, 회야(수영) 유역은 모두 심한가뭄에서 보통가뭄으로 가뭄이 많이 완화되었다.

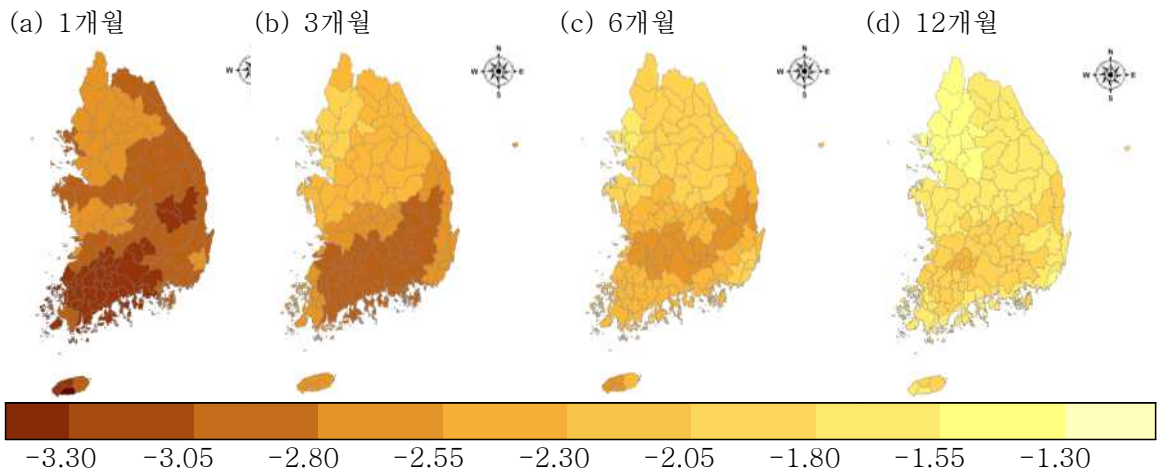


Fig. 3.3.44 관측자료를 통해 작성된 재현기간 200년 빈도의 지속기간별 가뭄우심도

Fig. 3.3.45는 SPI(6)를 활용하여 작성된 남한의 지속기간 6개월의 재현기간별(10, 50, 100, 200년빈도) 가뭄우심도(Potential Drought Hazard Map)를 나타낸 것이다.

재현기간 10년의 가뭄우심도의 경우 제주도, 한강, 한강서해, 태화강 유역을 제외한 17개의 유역에서 극심한 가뭄이 나타났으며 섬진강(-2.35) 유역에서 가장 낮은 가뭄심도가 나타났다. 섬진강 유역 다음으로 탐진강(-2.27), 낙동강(-2.26), 낙동강남해(-2.25) 유역의 심도가 낮게 나타났다.

재현기간 30년의 가뭄우심도에서는 재현기간 10년의 가뭄우심도에 비해 남한의 평균가뭄심도 값이 -0.45 낮아지며 가뭄이 심화되었다. 재현기간 10년과 마찬가지로 한강서해, 태화강 유역을 제외한 19개의 유역에서 극심한 가뭄을 나타났으며 섬진강(-2.88) 유역에서 가장 낮은 가뭄심도가 나타났다.

재현기간 100년의 가뭄우심도의 경우에는 탐진강(-3.07), 섬진강(-3.06), 영산강(-3.03) 유역에서 -3 이하의 낮은 가뭄심도가 나타났으며 재현기간 50년의 가뭄우심도에 비해 남한의 가뭄심도가 평균 -0.15 낮게 나타났다. 재현기간 50년과 재현기간 10년의 가뭄우심도와 마찬가지로 한강서해, 태화강 유역을 제외한 19개의 유역에서 극심한 가뭄을 나타내었다.

재현기간 200년의 가뭄우심도에서는 가뭄심도값이 재현기간 100년의 가뭄우심도보다 가뭄심도가 -0.13 낮게 나타났으며 탐진강(-3.26), 섬진강(-3.22), 영산강(-3.03) 유역에서 낮은 가뭄심도를 나타냈고 한강서해, 태화강 유역을 제외한 19개 유역에서 극심한 가뭄을 나타냈다.

지속기간별, 재현기간별 가뭄우심도 작성 결과를 분석하여 본 결과, 한반도의 가뭄은 재현기간이 길어질수록 가뭄심도가 낮아져 가뭄이 많이 심화되는 것을 나타냈다.

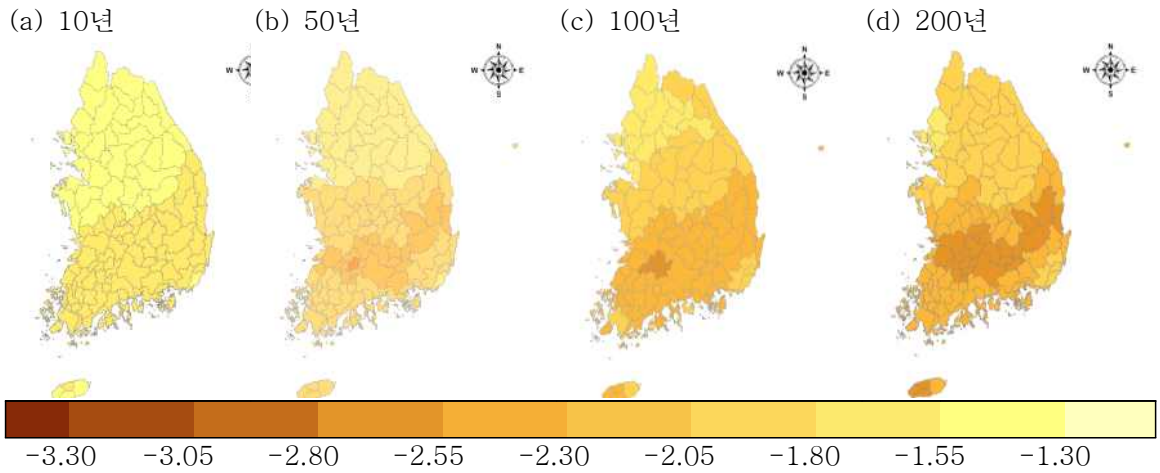


Fig. 3.3.45 관측자료를 통해 작성된 재현기간 200년 빈도의 지속기간별 가뭄우심도

(4) A2 시나리오에 의한 가뭄우심도

Fig. 3.3.46은 관측자료와 A2 시나리오를 적용한 4개 GCM(CNRM:CM3, CSIRO:MK3, CONS:ECHOG, UKMO:HADCM)을 통해 작성된 가뭄우심도를 나타내고 있다. 작성된 가뭄우심도는 재현기간 200년, 지속기간 6개월에 해당하며 과거와 미래(S1-S3)로 구분되어 나타내었다.

CNRM:CM3 모델을 이용한 가뭄우심도 작성결과, S1 기간에서는 태화강(-2.09, 4.47%), 회야·수영강(-2.15, 15.68%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 심화되었다. S2기간에서는 낙동강, 낙동강 동해, 금강, 만경·동진강, 섬진강 유역을 제외한 전 유역에서 가뭄이 심화되었는데 한강(-2.46, 36.55%), 안성천(-2.60, 43.06%), 한강서해(-2.51, 56.61%), 한강동해(-2.63, 36.59%), 회야·수영강(-2.47, 32.90%), 삽교천(-2.49, 28.43%) 유역에서 가뭄이 크게 심화되었다. S3 기간에서는 태화강(-2.22, 11.37%), 회야·수영강(-2.31, 23.90%) 유역에서 가뭄이 심화되었다. CSIRO:MK3모델을 이용한 가뭄우심도 작성결과, S1기간에서는 섬진강 유역을 제외한 전 유역에서 과거에 비해 가뭄이 심화되었는데 한강(-2.59, 43.75%), 안성천(-2.62, 43.80%), 한강서해(-2.54, 58.79%), 태화강(-2.82, 41.20%), 회야·수영강(-2.90, 55.72%) 유역에서 가뭄이 크게 심화되었다. S2기간에서는 태화강(-2.45, 22.63%), 회야·수영강(-2.58, 38.70%), 낙동강남해(-2.82, 28.42%) 유역에서 가뭄이 크게 심화되었으며 S3기간에서는 회야·수영강(-2.00, 7.18%) 유역을 제외한 전 유역에서 과거에 비해 가뭄이 완화되었다.

CONS:ECHOG모델을 이용한 가뭄우심도 작성결과, S1기간에서는 한강(-2.32, 28.77%), 안성천(-2.33, 28.05%), 한강서해(-2.25, 49.90%), 회야·수영강(-2.28, 22.48%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 심화되었다. S2 및 S3 기간에서는 전 유역에서 과거에 비해 가뭄이 심화되는데 S2 기간에서는 안성천(-2.76, 51.66%), 한강서해(-2.61 63.27%), 태화강(-3.16, 57.96%), 회야·수영강(-3.39, 81.93%), 낙동강 동해(-3.58, 63.12%), 삽교천(-2.94, 51.81%) 유역, S3 기간에서는 한강(-2.59, 43.86%), 한강서해(-47.73, 47.73%), 한강동해(-2.69, 39.90%), 동강동해(-2.61, 39.95%) 유역에서 가뭄이 크게 심화되었다. CONS:ECHOG 모델을 이용한 가뭄우심도 작성결과 타 GCM에 비해 가뭄이 가장 극심하게 나타나는 것으로 분석되었다. UKMO:HADCM 모델을 이용한 가뭄우심도 작성결과, S1 기간에서는 태화강(-3.02, 51.21%), 회야·수영강(-3.10, 66.39%), 낙동강남해(-3.12, 41.81%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 크게 심화되었다. S2 기간에서는 한강서해(-1.69, 5.89%), 회야·수영강(-1.96, 5.04%) 유역을 제외한 전 유역에서 과거에 비해 가뭄이 완화되었다. S3 기간에서는 한강동해(-2.69, 39.72%), 형산강(-3.02, 33.26%), 태화강(-3.21, 60.76%), 회야·수영강(-3.16, 69.89%), 낙동강동해(-3.09, 34.77%) 유역에서 가뭄이 크게 심화되었다.

(5) B1 시나리오에 의한 가뭄우심도

Fig. 3.3.47은 관측자료와 B1 시나리오를 적용한 4개 GCM을 통해 작성된 가뭄우심도를 나타내고 있다. 작성된 가뭄우심도는 재현기간 200년, 지속기간 6개월에 해당하며 과거와 미래(S1-S3)로 구분되어 나타내었다.

CNRM:CM3 모델을 이용한 가뭄우심도 작성결과, S1 기간에서는 한강(-2.18, 21.37%), 한강서해(-2.13, 33.18%), 회야·수영강(-2.16, 16.30%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 심화되었다. S2 기간에서는 태화강(-2.54, 26.97%), 회야·수영강(-2.65, 42.26%) 유역, S3 기간에서는 한강(-2.16, 19.87%), 안성천(-2.23, 22.74%), 한강서해(-2.12, 32.48%), 한강동해(-2.38, 23.39%), 태화강(-2.59, 29.84%), 회야·수영강(-2.72, 45.94%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 크게 심화되었다. CSIRO:MK3 모델을 이용한 가뭄우심도 작성결과, S1 기간에서는 태화강(-2.81, 40.72%), 회야·수영강(-2.93, 57.52%), 낙동강남해(-2.94, 33.67%) 유역에서 S2 기간에서는 한강서해(-1.92, 19.87%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 크게 심화되었다. S3 기간에서는 전 유역에서 가뭄이 과거에 비해 가뭄이 심화되었는데 안성천(-2.37, 30.41%), 한강서해(-2.25, 40.81%), 태화강(-2.66, 33.14%), 회야·수영강(-2.64, 41.57%), 삽교천(-2.53, 30.64%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 크게 심화되었다.

CONS:ECHOG 모델을 이용한 가뭄우심도 작성결과, S1 기간에서는 한강서해(-1.73, 8.02%), 태화강(-2.32, 16.28%), 회야·수영강(-2.35, 26.45%) 유역, S2 기간에서는 회야·수영강(--2.07, 10.96%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 심화되었으며 S3 기간에서는 전 유역에서 과거에 비해 가뭄이 크게 완화되었다. UKMO:HADCM 모델을 이용한 가뭄우심도 작성결과, S1 기간에서는 전 유역에서 가뭄이 완화되었으며 S2 기간에서는 한강동해(-2.63, 36.33%), 태화강(-2.93, 46.75%), 회야·수영강(-3.17, 69.97%), 낙동강남해(-3.22, 46.51%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 크게 심화되었다. S3 기간에서는 한강서해(-1.94, 21.48%), 형산강(-2.56, 13.10%), 태화강(-2.66, 32.99%), 회야·수영강(-2.71, 45.49%) 유역에서 가뭄이 심화되었다.

B1 시나리오를 이용한 4개 GCM별 가뭄우심도는 A2 시나리오를 이용한 가뭄우심도에 비해 가뭄심도가 과거에 비해 완화되는 것으로 분석되었다.

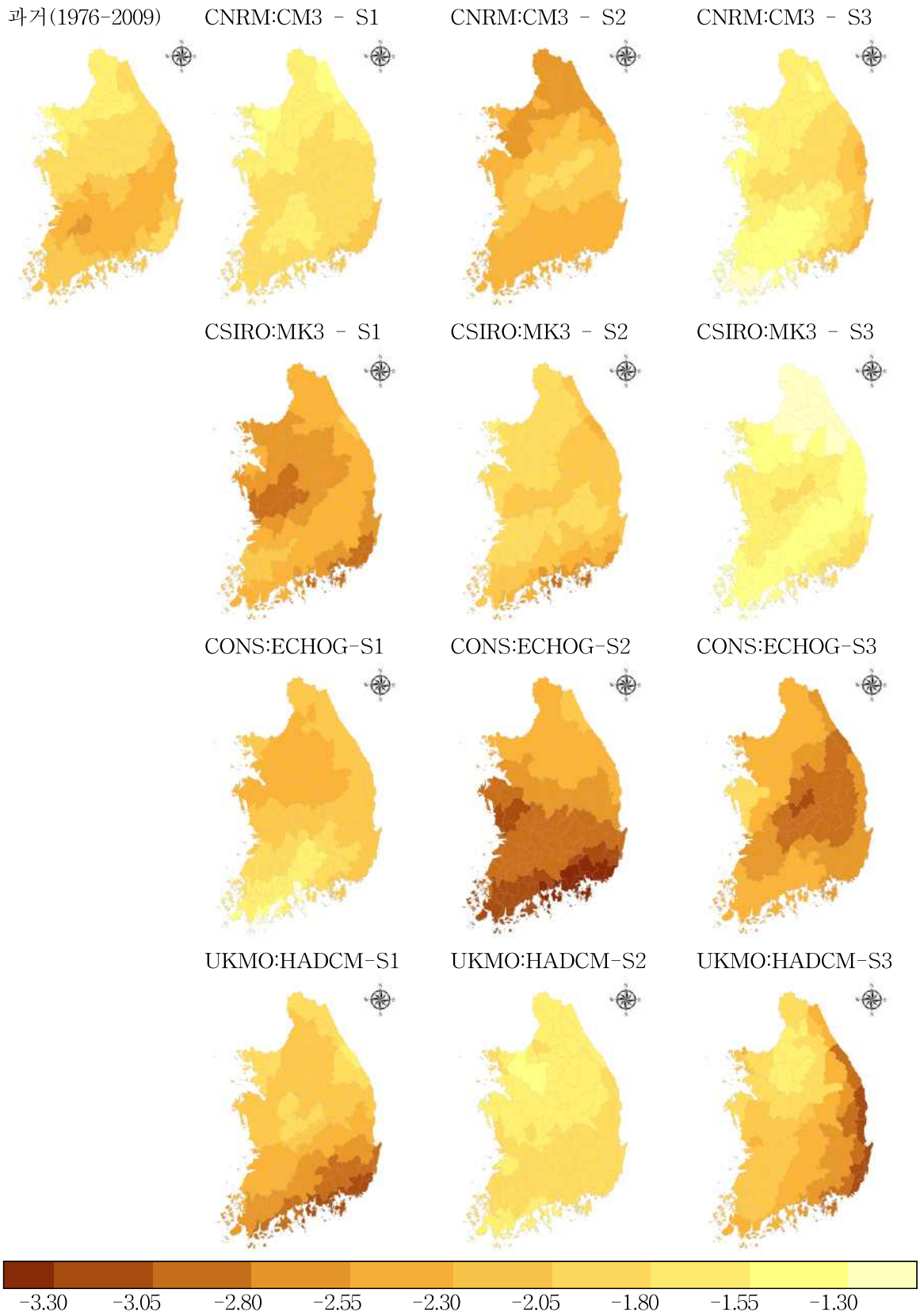


Fig. 3.3.46 과거자료와 A2 시나리오를 적용한 4개 GCM 전망자료를 통해 작성된 가뭄우심도

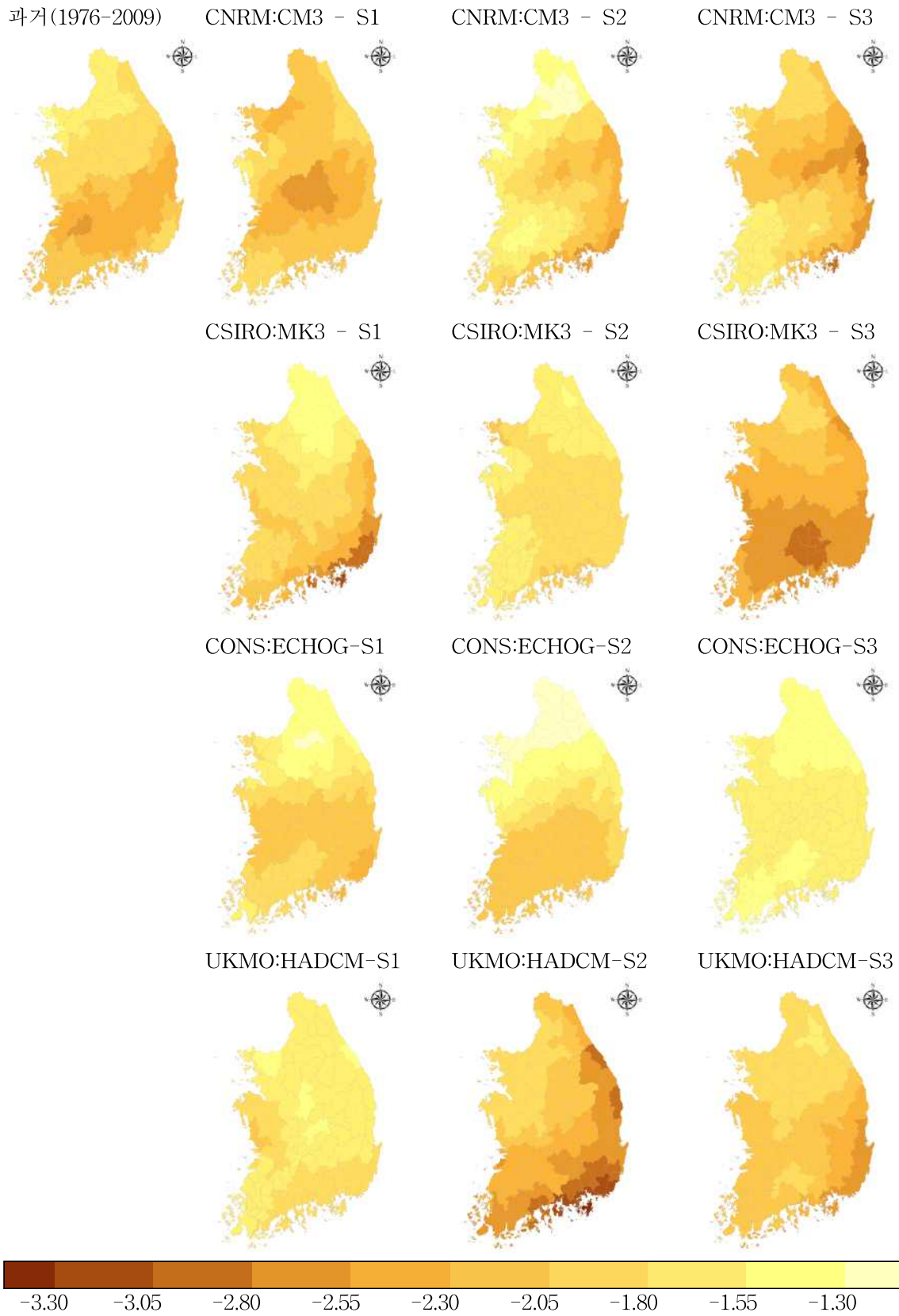


Fig. 3.3.47 과거자료와 B1 시나리오를 적용한 4개 GCM 전망자료를 통해 작성된 가뭄우심도

(6) A2 및 B1 시나리오에 의한 가뭄우심도 비교

Fig. 3.3.48-49는 과거 관측자료 및 A2 및 B1시나리오를 적용한 미래 GCM을 통해 작성된 가뭄우심도로써 과거 대비 미래 가뭄심도의 증감량을 비교하고 있다. A2 및 B1 시나리오의 경우 4개 GCM을 앙상블한 평균자료를 이용하여 과거와 비교하였다.

A2 시나리오의 경우, S1기간에서는 한강(-2.17, 20.71%), 안성천(-2.16, 18.70%), 한강서해(-2.09, 30.39%), 태화강(-2.55, 27.52%), 회야·수영강(-2.61, 40.07%) 유역, S2 기간에서는 안성천(-2.21, 21.52%), 한강서해(-2.15, 34.45%), 태화강(-2.51, 25.70%), 회야·수영강(-2.60, 39.64%), 낙동강남해(-2.68, 21.80%) 유역, S3기간에서는 한강서해(-1.88, 17.65%), 태화강(-2.48, 24.02%), 회야·수영강(-2.52, 35.23%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 크게 심화되었다.

B1 시나리오의 경우, S1 기간에서는 한강서해(-1.83, 14.66%), 태화강(-2.30, 15.07%), 회야·수영강(-2.33, 25.26) 유역, S2 기간에서는 태화강(-2.36, 18.16%), 회야·수영강(-2.48, 32.92%), 낙동강남해(-2.52, 14.76%) 유역, S3 기간에서는 한강서해(-1.97, 23.09%), 태화강(-2.39, 19.82%), 회야·수영강(-2.44, 30.82%) 유역에서 과거에 비해 가뭄이 크게 심화되었다.

A2 및 B1 시나리오를 통해 작성된 가뭄우심도를 검토한 결과, 두 시나리오 모두 공통적으로 과거 가뭄우심지역으로 평가된 낙동강 유역은 물론 태화강, 회야·수영강, 낙동강남해 유역에서 가뭄이 크게 심화되는 것으로 분석되었다. 특히, 중부지방에 위치한 한강, 안성천, 한강서해, 한강동해 유역 또한 가뭄이 크게 심화될 것으로 분석되고 있어 미래에는 심한가뭄에 의한 가뭄우심지역이 과거의 우심지역이었던 한반도의 남부에서 중부지방으로 이동될 것으로 전망되었다.

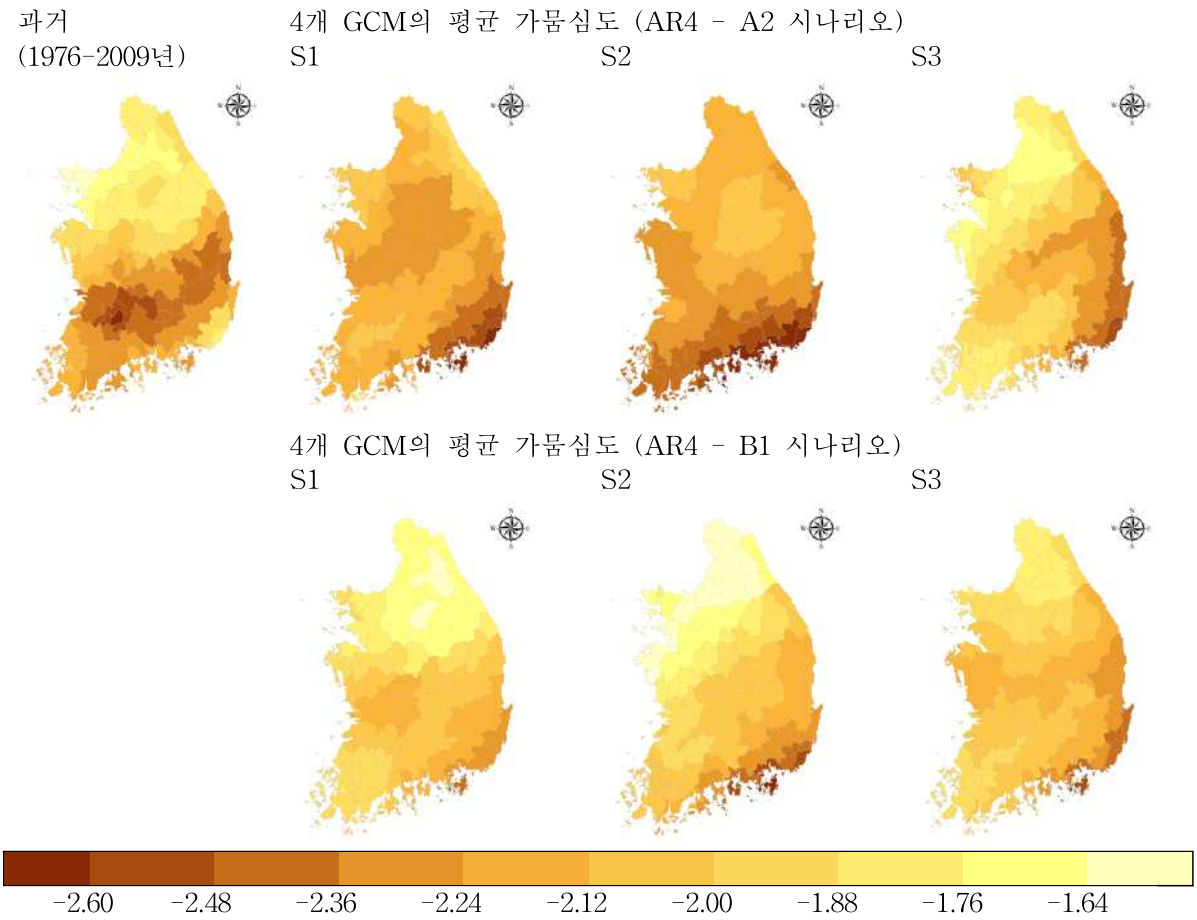


Fig. 3.3.48 기후변화에 따른 가뭄우심지역의 변화(재현기간 200년, 지속기간 6개월)

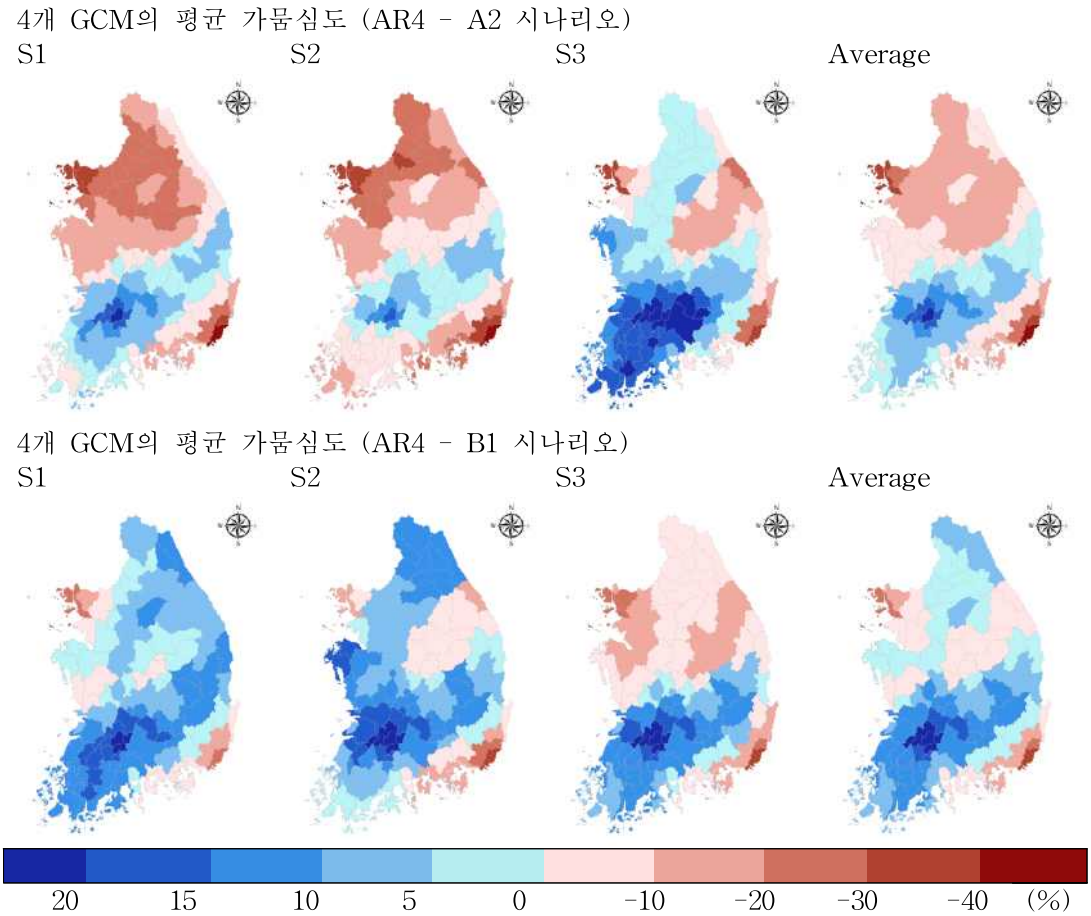


Fig. 3.3.49 과거 대비 미래 가뭄우심도의 평균 가뭄심도 변화율(재현기간 200년, 지속기간 6개월)

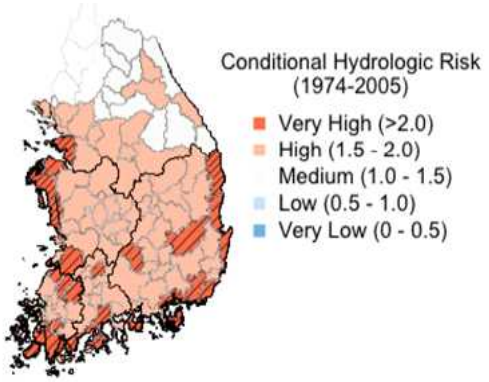
(7) 기후변화와 극한가뭄에 따른 수문학적 위험도(Hydrologic Risk) 분석

기후변화는 강우패턴의 변화로 홍수 및 가뭄의 발생확률을 증가시키고 있다.(정대일 등, 2008) 자연재해중 가뭄의 발생은 다른 재해와는 달리 장기간에 걸쳐 나타나고, 넓은 범위에 발생하게 되며 자연재해로 인한 피해 이외에도 사회•경제적으로 큰 피해가 야기된다 (Wilhite, 2000). 최근 연구에서는 가뭄의 심도를 평가하기 위해서 가뭄지수를 이용하여 다각적인 분석을 실시하고 있다.(이주헌과 김창주, 2011; 오태석 등, 2011). 그러나 유역의 특성에 맞는 극한 가뭄사상에 대한 정량적인 평가가 제대로 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 극한 가뭄사상과 이에 따른 유역별 자연유출량을 고려한 한반도 권역에 대한 시공간적 수문학적 위험도(Hydrologic Risk)를 평가하여 기후변화에 대비한 현실적인 가뭄평가 방법을 제시하고자 한다.

Fig. 3.3.50은 과거 자료 (1974-2005)에 대한 SPI3와 SPI6 조건에 따른 중권역별 수문학적 위험도 산정결과의 지역적 분포를 나타내고 있다. 그림에서 위험도가 큰 지역과 (very high >2.0) 지역과 통계적으로 유의한 지역 (95% 유의수준)은 빗금으로 표시하였으며, 이 지역은 가뭄에 대한 유출의 가용성이 부족한 지역으로 우선적으로 관리가 필요한 지역을 나타내고 있다. 본 연구결과는 유출과 강우의 상관성이 크고 SPI 가뭄지수가 강우 자료를 이용하여 도출된 결과이기 때문에 극치가뭄 (SPI≤-1.5)이 발생하였을 경우, 한반도 전체

유역에서 저유량이 많이 발생하여 수문학적 위험도가 크게 나타난 결과라 사료된다. 유출의 경우 지역적 특성, 선행강우, 토지이용, 토양조건, 증발산 등 다양한 유역 특성 변화로 인하여 지역적으로 약간 차이를 나타내고 있다. 그러나 한강 유역의 경우 다른 유역보다 가뭄에 대한 수문학적 위험도가 적게 나타나는 것으로 분석되었으며, 한강이남과 동해안지역에는 상대적으로 위험도가 크게 나타났다.

(a) 1974-2005 (SPI3≤-1.5)



(b) 1974-2005 (SPI6≤-1.5)

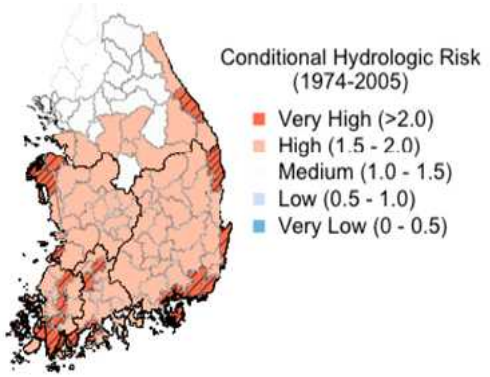


Fig. 3.3.50 과거 자료에 대한 중권역별 수문학적 위험도 산정결과 (1974-2005년)

Fig. 3.3.51-52는 기후변화 시나리오를 적용하여 4가지 GCMs별로 시나리오 기간 S1(2010-2039), S2(2040-2069), S3(2070-2099)에 대한 SPI3과 SPI6에 대한 수문학적 위험도 결과를 도시하고 있다. 4 GCMs별로 다른 결과를 나타내고 있으나, 전반적으로 과거 자료에 비하여 가뭄의 수문학적 리스크가 많이 완화되는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 이는 유출의 증가경향과 상관성이 있는 것으로 사료된다. 그러나 본 연구결과에서 주목해야 할 점은 모형별로 상반된 결과를 나타내기도 한다는 것이다. 예를 들면 ECHOG 결과의 경우 S1과 S2기간에 한강과 금강, 그리고 낙동강 유역 전체에 수문학적 위험도가 큰 것으로 보였으며, S3기간의 경우 간헐적으로 위험도가 큰 유역이 나타났으나 전반적으로 큰 변화가 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 그러나 나머지 3개의 GCMs의 경우 HADCM의 S3기간을 제외하고는 전반적으로 수문학적 리스크가 크지 않아 과거에 비하여 가뭄이 많이 완화되는 것으로 분석되었다.

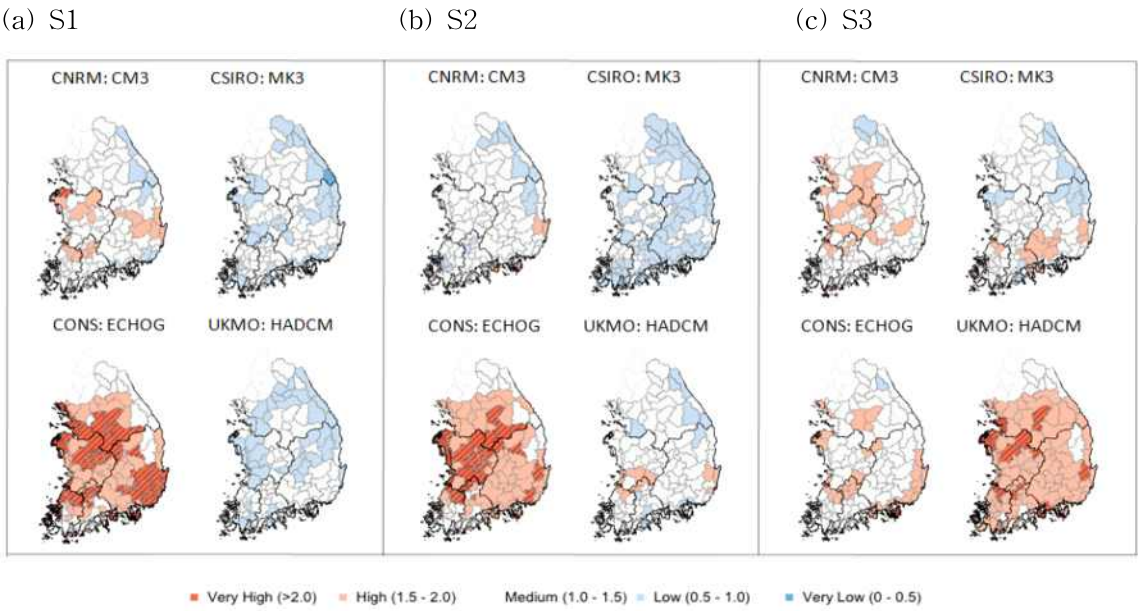


Fig. 3.3.51 기후변화 시나리오에 대한 중권역별 수문학적 위험도 산정결과 (SPI3≤-1.5)

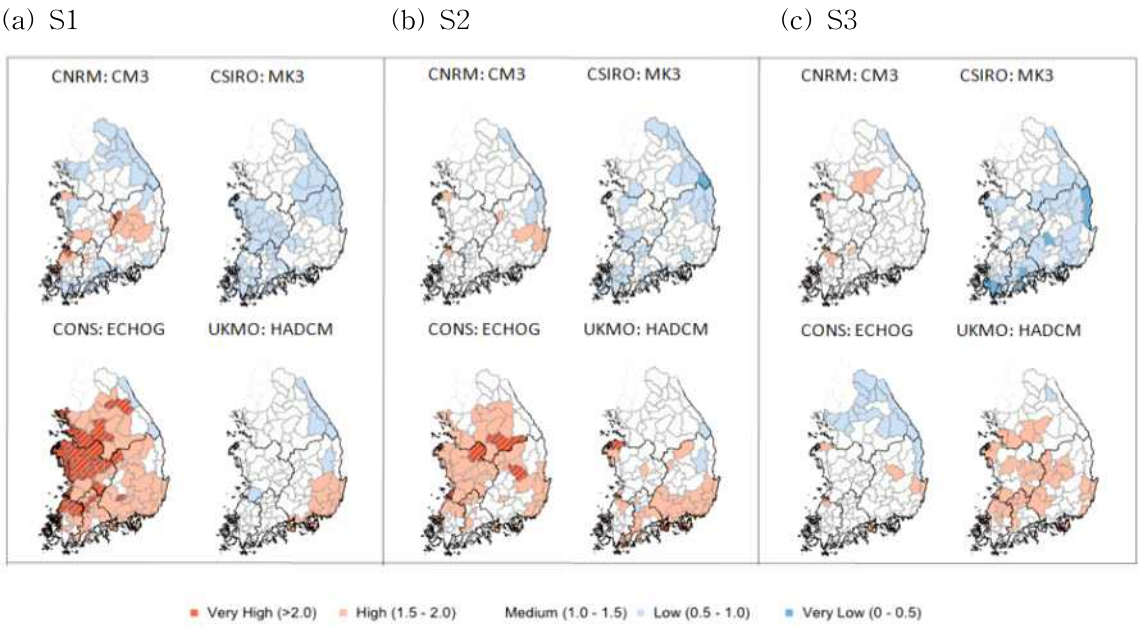


Fig. 3.3.52 기후변화 시나리오에 대한 중권역별 수문학적 위험도 산정결과 (SPI6≤-1.5)

아래의 Fig. 3.3.53-54는 기후변화 시나리오에 대한 4개 GCMs의 평균 수문학적 위험도 결과를 도시하고 있으며, 2011-2099년까지 3개 구간으로 나누어 분석하였다. 분석 결과, 한강의 일부 유역을 제외한 한반도 전역에서 1.5이상의 위험도를 보였으며, 시나리오 기간 중 S3(2071-2099)의 경우 동해안 및 남해안 일부 지역을 제외한 유역 전역에서 가뭄에 대한 유출의 취약성을 보이는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 제안한 SPI 조건에 따른 유출 특성 분석은 시공간적, 수문학적 위험도 평가

에 유용하게 적용될 수 있다. 한반도 가뭄 분석결과, 지역적 특성이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 특히 봄철 가뭄의 경우 전국적으로 심화될 것으로 전망된다. 따라서, 취약지점을 중심으로 지역의 특성을 반영한 정량적인 위험도 분석 방법이 무엇보다도 요구되며, 연구의 결과는 기후변화에 따른 한반도의 가뭄 예측 및 극치 가뭄에 대한 현실적인 적응, 전략 구축을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

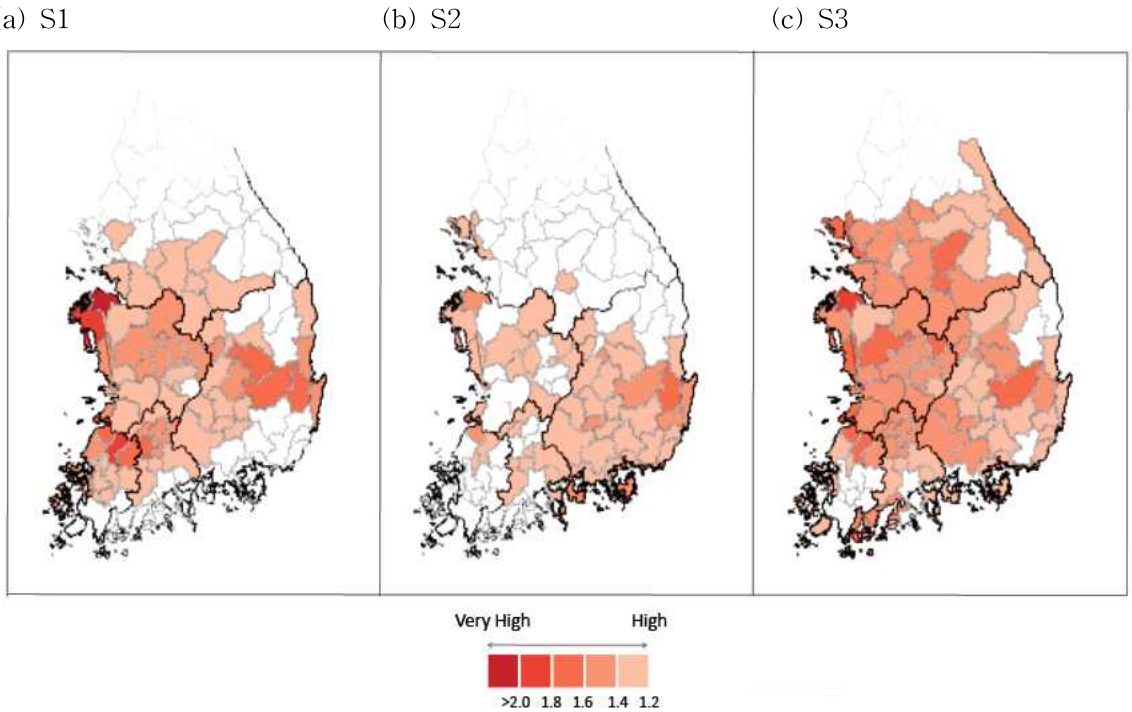


Fig. 3.3.53 4개 GCMs의 평균 수문학적 위험도 분석결과 (SPI3≤-1.5)

(a) S1 (b) S2 (c) S3

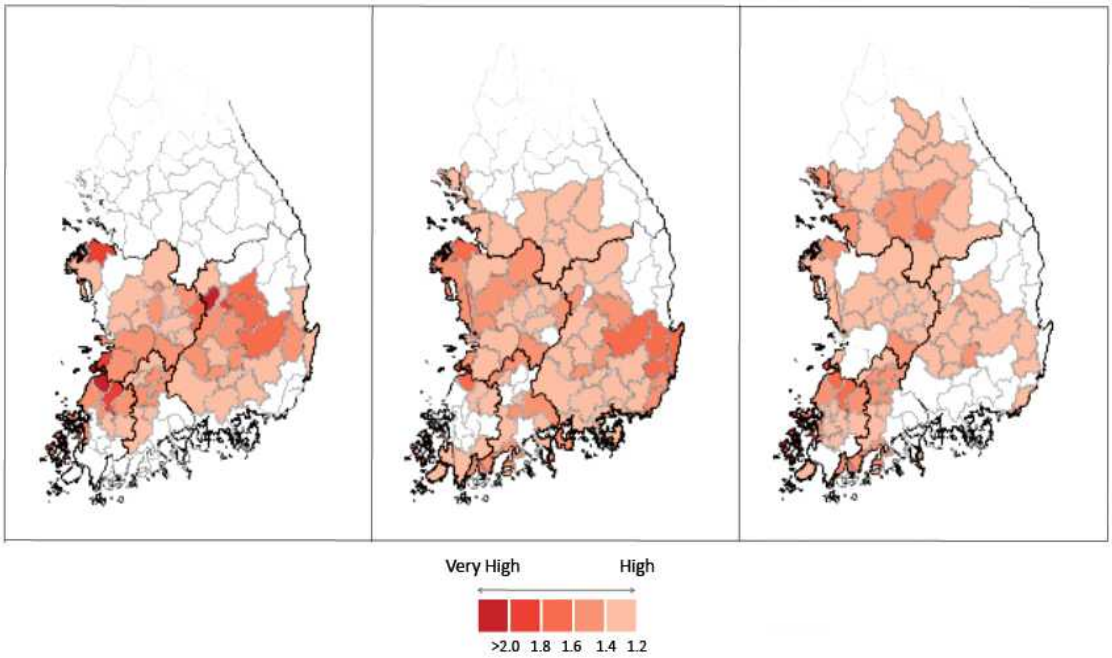


Fig. 3.3.54 4개 GCMs의 평균 수문학적 위험도 분석결과 (SPI6≤-1.5)

라. 결 론

본 연구에서는 기후변화에 따라 발생될 가뭄의 통계학적 특성을 해석하고 극한가뭄의 시, 공간적인 분포특성을 전망하고자 하였다. 이를 위해 SPI를 이용한 가뭄의 경향성, 주기성, 발생빈도 및 가뭄우심지역을 추정하였다. 추가적으로 극한가뭄에 의한 유역별 수자원을 전망하기 위하여 극한 가뭄발생시의 중권역별 자연유출량을 적용한 수문학적 위험도를 분석하였다. 기후변화를 고려한 미래 가뭄의 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 기후변화를 고려한 가뭄의 경향성 분석결과, 과거 가뭄은 전반적으로 봄과 겨울철 가뭄이 심화되는 것으로 분석된 반면 GCM 자료를 이용한 경향성 결과는 과거와 다소 상이한 결과를 나타났다. CSIRO:MK3과 UKMO:HADCM 모델은 과거와 동일한 봄과 겨울철 가뭄이 심화되는 것으로 분석되었지만 CNRM:CM3과 CONS:ECHOG 모델은 여름과 겨울철 가뭄이 심화되는 것으로 분석되었다.

2) 기후변화를 고려한 가뭄의 주기성 분석결과, 과거 가뭄은 약 4-8년 주기에서 강한 성분이 나타난 반면 미래 가뭄은 약 2-4년 주기로 과거에 비해 낮은 주기에서 강한성분이 나타났다. 이는 과거에 비해 미래 가뭄이 더욱 빈번히 발생할 것을 전망하고 있다.

3) 기후변화를 고려한 미래 가뭄의 발생빈도 및 가뭄심도를 분석한 결과, 미래에는 과거에 비해 가뭄의 발생빈도가 낮아지는 반면 가뭄심도는 더욱 심화되는 것으로 분석되고 있어 미래에는 가뭄의 강도와 피해가 더욱 크게 나타날 것으로 전망되었다.

4) 가뭄빈도해석을 통해 미래 가뭄우심지역을 추정한 결과, A2 및 B1 시나리오 모두 공통적으로 과거 가뭄우심지역으로 평가된 낙동강 유역은 물론 태화강, 회야·수영강, 낙동강 남해 유역에서 가뭄이 크게 심화되는 것으로 분석되었다. 특히, 중부지방에 위치한 한강, 안성천, 한강서해, 한강동해 유역 또한 가뭄이 크게 심화될 것으로 분석되고 있어 미래에는 심한가뭄에 의한 가뭄우심지역이 과거의 우심지역이었던 한반도의 남부에서 중부지방으로 이동될 것으로 전망되었다.

5) 극한가뭄에 의한 유역별 수문학적 위험도를 분석한 결과, 한강의 일부 유역을 제외한 한반도 전역에서 1.5이상의 위험도를 보였으며, 시나리오 기간 중 S3(2071-2099)의 경우 동해안 및 남해안 일부 지역을 제외한 유역 전역에서 가뭄에 대한 유출의 취약성을 보이는 것으로 분석되었다.

기후변화를 고려한 분석결과 가뭄에 취약한 지역으로 분류된 유역에 대해서는 재해를 경감하기 위한 적합한 가뭄대책의 수립이 필요할 것으로 판단되며 극한가뭄에 대비한 지하수의 개발, 소규모 저류시설의 건설과 같은 비상용수자원 공급시설의 확보가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 기후변화에 따라 변동될 한반도의 극치 수문전망을 수행하였다. 일단위 미래 기후 시나리오의 강우, 홍수빈도해석 결과로부터 scale invariance 개념을 이용해 시단위 전망결과를 추정하는 방법으로 미래 확률강우량, 확률홍수량 전망 결과를 도출하였으며, 그리고 Gumbel 분포, Power model을 이용한 비정상성 빈도해석 방법을 적용한 미래 확률강우량 전망 결과를 분석의 대상으로 하고, 앞선 결과와 비교하였다. 또한 수자원 전망을 위하여 통계적 분석을 통한 가뭄지수와 위험도를 산정하는 방법을 적용하였다.

세부적인 결과는 앞선 내용에서 각각 설명하였으므로, 본 단락에서는 홍수전망의 두 세부연구단위에서 공통연구범위에 대하여 비교 분석하고, 또 가뭄전망의 연구결과를 요약하였다. 기후변화를 고려한 극치 수문전망 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 비정상성과 정상성 가정하의 홍수전망 결과 비교

비정상성과 정상성 가정하에서 산정된 각각의 확률강우량의 증가율을 비교해보면 다음과 같다. 세부과제 1-2-1의 홍수빈도해석에 의한 확률강우량은 약 21%~42% 증가할 것으로 전망되었으며, 세부과제 1-2-3의 비정상성 빈도해석에 의한 확률강우량은 5대강 유역 전체에 걸쳐 약 10%~14% 증가할 것으로 전망되었다.

증가비율의 차이에서 알 수 있듯, 비정상성을 가정하지 않는 경우가 상대적으로 과대추정하게 된다. 미래 홍수전망 결과는 비교 대상이 될 관측 자료가 없기 때문에 어느 경우가 더 적합한지에 대한 절대적인 평가는 불가능하지만, 증가율의 폭을 상식적인 선에서 판단했을 때, 비정상성을 가정하여 산정한 경우가 더 합리적으로 판단된다.

나. 확률강우량과 극한홍수량에 의한 홍수전망

비정상성 가정하의 홍수전망은 확률강우량에 대해서만 산정되었으나, 정상성 가정하의 경우 확률강우량을 산정하고 이를 유역종합치수계획에서 구축한 HEC-1 모형에 입력하여 극한홍수량을 전망하였다. 그에 따라 확률강우량과 극한홍수량의 차이를 분석하였다.

확률강우량은 한강 유역에서 약 27%~50% 증가, 금강 유역에서 약 17%~37% 증가, 낙동강 유역에서 약 17%~35% 증가, 섬진강 유역에서 약 21%~41% 증가, 영산강 유역에서 약 22%~45% 증가할 것으로 전망되었다.

극한홍수량은 한강 유역에서 약 34%~64% 증가, 금강 유역에서 약 21%~42% 증가, 낙동강 유역에서 약 21%~42% 증가, 섬진강 유역에서 약 19%~39% 증가, 영산강 유역에서 약 30%~61% 증가할 것으로 전망되었다.

확률강우량과 극한홍수량 모두 한강 유역에서 최대 증가율을, 금강, 낙동강, 섬진강 유역에서 낮은 증가율을 보인다는 점에서 유사함을 확인할 수 있다. 그러나 한 차례 모형을 이용한 모의과정이 추가됨으로써 불확실성의 증가로 인한 편차의 증가와 과대평가가 발생하였다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 앞선 '가.'에서 분석하였듯이 과대평가를 막기 위해 비정상성 빈도해석을 하는 것이 효과적일 것으로 보인다.

다. 대권역별 홍수전망

비정상성 가정하의 확률강우량은 5대강 유역 전체에 걸쳐 평균적으로 약 10%~14% 가량 증가할 것으로 전망되며, 특히 한강 유역의 증가율이 가장 높다. 대권역별로 살펴보면, 한강 유역에서 약 13%~20% 가량 증가. 낙동강 유역에서 약 10%~14% 증가, 금강 유역에서 약 9%~13% 증가, 영산·섬진강 유역에서 약 5%~9% 증가할 것으로 전망된다.

정상성 가정하의 극한홍수량은 5대강 유역 전체에 걸쳐 평균적으로 약 25%~50% 가량 증가할 것으로 전망되며, 특히 한강과 영산강 유역이 상대적으로 홍수량 증가율이 클 것으로 전망된다. 대권역별로 살펴보면, 한강 유역에서 약 34%~64% 가량 증가, 금강 유역에서 약 21%~42% 가량 증가, 낙동강 유역에서 약 21%~42% 가량 증가, 섬진강 유역에서 약 19%~39% 가량 증가, 영산강 유역에서 약 30%~61% 가량 증가할 것으로 전망된다.

두 홍수전망 결과 모두 한강 유역에서 증가율이 높을 것으로 전망되었으며, 섬진강 유역에서 가장 낮을 것으로 전망되었다. 그 외 대권역들은 대개 평균에 가까운 평이한 증가율을 보이는데, 특기할 점은 영산강 유역에서의 증가율이 각각의 결과에서 상반되게 나타난다는 점이다.

라. 전망기간별 홍수전망

비정상성 가정하의 확률강우량은 5대강 유역 전체에 걸쳐 2020s 기간에 약 10%~11% 증가, 2050s 기간에 약 12%~13% 증가, 2080s 기간에 약 14% 증가할 것으로 전망되었다. 정상성 가정하의 극한홍수량은 5대강 유역 전체에 걸쳐 2020s 기간에 약 21%~33% 증가, 2050s 기간에 약 31%~42% 증가, 2080s 기간에 약 36%~50% 증가할 것으로 전망되었다.

두 홍수전망 결과 모두 현재 대비 2020s 기간의 증가율보다 2050s, 2080s 기간의 증가율이 대체로 커서 미래로 갈수록 자연재해 발생 위험이 증가할 것으로 전망된다. 2050s, 2080s 기간의 증가율 범위(최대증가율-최소증가율)가 2020s 기간에 비해 상대적으로 커지는 경향을 보이며, 이는 먼 미래로 갈수록 전망 결과의 불활실성이 증가함을 의미하므로 먼 미래일수록 전망 결과의 활용에 대한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

마. 가뭄전망 요약

기후변화를 고려한 가뭄의 경향성 분석결과, 과거 가뭄은 전반적으로 봄과 겨울철 가뭄이 심화하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 물수급 분석에서도 나타났다. 대권역별로 살펴보면 한강유역과 낙동강유역의 가뭄심도가 과거보다 심화하며, 이에 따른 지속적인 수자원 관리가 필요하다. 반면 금강유역은 가뭄심도의 변동폭이 거의 없으며, 영산 섬진강유역은 가뭄심도는 다소 나아지는 경향을 보였다. 중권역별로 봤을 때 과거 가뭄우심지역으로 평가된 낙동강 유역은 물론 태화강, 회야·수영강, 낙동강남해 유역에서 가뭄이 크게 심화하는 것으로 분석되었다. 중부지방에 있는 한강, 경안천, 달천, 안성천, 한강서해, 한강동해 유역 또한 가뭄이 크게 심화할 것으로 나타나 미래에는 한반도의 중부지방 역시 수자원 수급에 문제가 발생할 것으로 전망되었다.

제 4 절 기후변화에 따른 수자원 취약성 평가

1. 서론

기후변화 연구는 전술한 바와 같이 1단계 전망, 2단계 취약성 평가, 3단계 적응대책 수립의 3단계로 이루어진다. 본 연구단은 수문현상에 대한 포괄적인 전망을 수행함으로써 기후변화 연구의 1단계를 충실히 하였으나, 취약성 평가는 미래 물부족량 산정, 경제적 피해 산정 등 일부분만을 연구의 범위에 포함하였다. 취약성 평가는 공급(또는 재해) 뿐 아니라 수요(또는 대응력)까지 고려해야 하는 영역을 의미하며, 미래의 기후변화에 따른 영향을 전망하는 단계를 넘어서 이에 대응하는 현재의 사회시스템에 대한 능력 평가가 수반되는 것이기 때문에 연구의 복잡성이 높다.

우리나라의 경우 지난 100여년간(1912-2008) 평균기온 상승은 1.7℃로 전지구 평균기온 상승률에 비해 높았다(국립기상연구소, 2011). 우리나라의 연평균강수량은 세계 평균의 1.6배에 달하지만 여름철 홍수기에 연중 강수량의 약 74%가 집중적으로 내리는 강우특성과 높은 인구밀도, 산악지형의 특성, 수자원을 비롯한 국토자원의 높은 이용강도 때문에 효과적인 수자원관리와 계획이 필요하며(국토해양부, 2011), 기후변화가 심화될수록 그 중요성은 더욱 커질 것이다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 4차 평가보고서(Assessment Report, 2007)에 따르면 2050년대 지구평균 온도는 2-3℃ 증가하고 유출과 수자원의 지역적 불균형으로 인해 전 세계 인구의 약 10-20억명이 물부족에 취약할 것으로 전망하고 있다.

또한 급작스런 기후로 인해 발생하는 피해의 빈도가 증가하고 있으며 이런 피해가 발생하는 가장 큰 이유 중 하나로 이전보다 그 발생 빈도와 강도가 증가한 기후변화로 판단되는 점 또한 취약성 평가의 원인이 된다. 지구 온난화에 따른 중요한 영향으로 강우량 및 홍수 수위의 불확실성 증가와 수문 증가 등을 꼽을 수 있으며, 이러한 변화는 기존 수공 구조물의 안정성 및 기능성을 약화시킬 수 있다. 따라서 기후 변화에 따른 수위 증가 및 강우량 불확실성 증가 등에 따라 구조물의 안정성 및 기능성이 얼마나 약화되었는지를 평가할 수 있어야 하며, 또한 그 결과를 이용하여 보수·보강 대책이 수립되어야 한다.

마지막으로 기후변화의 영향으로 특정 지역에 일시적인 강우가 집중될 확률도 높아지는 반면 가뭄이 발생할 확률이 높아질 것이라고 많은 전문가들은 예상하고 있으며, 최근 10여 년간 발생한 홍수와 가뭄 등 물 관련 재해가 분명히 과거와는 다른 패턴을 보이고 있으며, 이로 인한 재해피해 규모는 해마다 늘어나고 있다. 이런 추세로는 사회·경제적으로 미치는 영향도 점점 증가하고 있다. 그러나 아직까지는 기후변화의 영향 평가 및 적응대책 분야에 대한 연구는 부족한 실정이다.

미래 수자원의 취약성을 평가하는 방법은 세부과제 2-1-2에서 실제적인 강우 유출 모의를 통하여 유출량을 계산한 후 이 유출량과 실제 물수요량을 비교하는 물수급 분석을 통하여 물부족량을 정량화하였으며, 세부과제 2-2-1에서는 기후변화 전망이 고려된 수공구조물 영향분석, 세부과제 2-2-3에서는 기후변화에 의해 예상되는 수자원 분야에서의 사회·경제적 피해 양상 전망을 수행하였다.

본 4절의 '2. 기후변화에 따른 물수급 전망'에서는 세부과제 2-1-2에서 실시한 미래

물수급 결과를 분석하였고, ‘3.기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석’에서는 세부과제 2-1-1에서 실시한 미래 기후변화를 고려한 수공구조물 영향평가 방법을 제안하였다. 또한 ‘4. 기후변화가 물관리에 미치는 사회・경제적 영향평가’에서는 홍수피해와 가뭄피해로 나누어서 피해액 전망 모형을 개발하고, 다른 세부과제에서 전망한 미래 홍수 및 가뭄 전망을 적용하여 향후 홍수 및 가뭄피해액을 전망하였으며, 마지막으로 ‘5. 결론’에서는 두 단위에서 수행한 연구의 결과를 권역별로 비교 분석하였다.

2. 기후변화에 따른 물수급 전망

가. 서 론

전 세계적으로 기후변화가 수자원에 미치는 영향에 대한 다양한 연구가 진행중에 있으며, GCM 시나리오와 수문모형 등을 결합하여 미래 유량변화에 대한 영향평가를 수행하는 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 더 나아가, 수자원의 효율적 관리 측면에서의 미래 기후변화를 고려한 물수급 분석에 대한 연구는 이러한 미래 유량변화 전망결과를 물공급 시나리오로 적용하여 미래 물부족량을 전망하는 것으로, 1990년대 후반부터 선진국들을 중심으로 수행되고 있다. 미국 서부지역의 경우는 기후변화로 인한 록키산맥의 적설량(snowpack)의 감소와 해빙시기의 변동으로 인해 가용 수자원양이 줄어들고 있음이 관측됨에 따라(Hamlet et al., 2003; Vano et al., 2010) 이 지역에서는 기후변화의 불확실성에 따른 지역적 유출특성 및 물수급 전망에 대한 연구가 21세기 들어 활발히 진행중에 있다.

Christensen et al.(2004)은 기후변화 시나리오에 대한 물배분량의 변화와 물부족 확률을 신뢰도 지수로 표현하여 나타내었으며 Vicuna et al.(2007)은 CalSim II 모형을 개선하여 2개의 배출 시나리오와 2개의 GCM을 조합한 4개의 기후변화 시나리오를 적용하여 21세기 캘리포니아 유역의 물수급 전망을 예측하였다. 또한, M-Azuara et al.(2008)은 공학-경제성 최적화 모형인 CALVIN을 사용하여 캘리포니아 유역의 목표연도 2050년에 대한 물부족량과 수자원 공급 시스템 운영비용을 전망하였으며 Purkey et al.(2008)은 WEAP 모형을 통해 새크라멘토 유역에 GCM을 사용한 4개의 기후변화 유출 시나리오를 적용한 후 각 시나리오별 물 부족량을 산정하였다. 이 외에 미국 텍사스 지역에서는 Wurbs et al.(2005)이 WRAP 모형에 기후변화 시나리오를 적용하여 브라조강 유역의 저수용량 및 물공급 신뢰도를 산정하고 그 변화를 분석하였으며, 캐나다 퀘벡지역에서는 페리본카강 유역을 대상으로 ResSim 모형에 10개의 다양한 기후변화 시나리오를 적용하여 시나리오별 저수지들의 물공급 신뢰도 및 취약도를 산정한 후 기후변화의 불확실성을 비교하였다(Minville et al., 2010). 유럽을 살펴보면, Fowler et al.(2007)은 Mospa 모형에 기후변화 시나리오를 적용하여 영국의 IRZ(the north-west England Integrated Resource Zone)지역의 미래 가용 수자원량을 공급원 별로 산정한 후 현재의 사용량과의 비교를 통해 미래 물수급 전망을 수행하였으며 Hoff et al.(2007)은 이스라엘의 요르단강 유역을 대상으로 WEAP 모형에 기후변화 지역기후모형(Regional Climate Model, RCM) 시나리오를 적용하여 물부족량을 나타내고 기후변화 모의에 대한 WEAP의 적용성을 증명하였다. Fujihara et al.(2008)은 지역특화 물수급 모형인 SiBUC 모형을 사용하여 터키 세이한강 유역의 미래 물수급 전망을 수행하였다. 아시아 지역에서는, Islam et al.(2005)가 일본 도쿄의 톤강 유역을 대상으로 CROPWAT 모형에 12개의 가상 기후변화 시나리오를 사용하여 각 시나리오별 물공급 비율을 산정한 후 가뭄지수를 산정하여 미래 물수급 전망을 비교하였으며 Kirono et al.(2007)는 호주 윌슨스강 유역의 Rous County 지역을 대상으로 통합 수자원 모형인 IQQM에 가상의 물수요 및 물공급 시나리오를 적용하여 미래 물수급 전망을 수행하였다. 또한 Raje et al.(2010)은 인도의 마한디강 유역에 9개의 기후변화 시나리오를 선정하여 SDP(Stochastic Dynamic Programming)을 통해 산정한

최적운영률을 반영하여 미래 저수지 물수급 전망을 수행하였다.

국내의 경우는 서용원 등(2000)이 금강유역의 기후변화 유출 시나리오를 적용한 대청댐 운영 모의를 통하여 수자원 영향평가를 수행하였으며 강동현(2007)은 GCM 모형에 따른 6개의 기후변화 시나리오에 대한 금강 유역의 용담댐과 대청댐의 운영 모의를 통하여 용수부족량 및 신뢰도, 회복도 및 취약도 등의 지수를 산정하였다. 그리고 최근에 김수전 등(2010)은 고해상도 RCM 자료를 바탕으로 K-WEAP 모형을 사용하여 한강유역 물수급 전망을 수행하였다.

이렇듯 최근에 수행되고 있는 기후변화 연구들을 보면 대부분 GCM으로 모의한 유량 전망 결과를 직접 물수급 모형에 입력하여 미래 물수급 전망을 수행하고 있다. 하지만 GCM-driven 유량 전망을 직접 사용할 경우 우리는 두 가지 문제점을 생각할 수 있다. 첫째, 지금까지 대부분의 나라에서의 수자원 계획을 위한 물수급 분석은 과거 유량자료를 활용하여 수립하였다는 것이다. 기후변화의 영향을 고려하기 위해서 갑자기 과거 자료를 버리고 GCM-driven 자료를 사용한다면, 이제까지 수립해온 수자원계획과의 연속성은 무너질 것이다. 그러므로 기후변화의 영향을 고려한다 하더라도 기존의 국가 수자원계획의 방법론을 최대한 유지하는 원칙이 필요하다. 둘째 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 GCM이라 하더라도 그 불확실성이 매우 커 GCM-driven 전망결과를 바탕으로 국가 수자원계획을 실제로 수립한다는 것은 아직 위험하다는 것이다. 그러므로 기후변화 영향을 고려하긴 하되 GCM-driven 자료를 직접 사용함으로써 발생하는 위험을 줄이는 전략이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 GCM 입력자료의 직접 입력 대신에 GCM 미래 기후변화 정보를 입력자료(과거 시나리오)의 가중값 부여에 반영하는 새로운 방법론을 제안하였다. 다시 말해, GCM 자료의 직접 입력에 따른 불확실성을 피함은 물론 기존의 국가 물수급 분석 방법론의 틀을 최대한 유지함과 동시에 기후변화의 영향을 반영할 수 있는 새로운 기후변화에 따른 물수급 분석 기법을 소개하고 이를 한반도의 물수지 사례에 적용하여 그 효용성을 증명하였다.

나. 연구목표

본 연구의 목적은 기후변화의 불확실성을 고려한 새로운 물수급 전망기법을 제안하는 데 있다. 이를 위해 먼저 국내외 기후변화를 고려한 물수급 분석 방법론의 문제점을 분석하고 그 적절한 대안을 검토한 후 현재 GCM 모의결과의 직접 입력을 통한 미래 전망을 수행하는 기존 기후변화 연구 방법론의 단점을 극복할 수 있는 대안을 제시하고자 한다. 그리고 앞서 분석한 개선방안들을 바탕으로 새로운 물수급 전망기법을 제안할 것이다. 또한, 제안한 기법을 한강유역에 적용하여 미래 한반도유역의 물수급 전망결과를 제시한 후 기존 연구 방법론의 모의결과와의 비교를 통해 그 차이를 분석하고자 한다.

다. 기후변화를 고려한 물수급 전망 기법 제안

(1) 기존 물수급 전망 기법

최근에 이르러 다양한 유출 시나리오의 적용을 통해 기후변화에 따른 물공급 취약성을 분석해야 한다는 요구에 따라 미래 GCM 유출 시나리오를 반영하여 물수급 전망을 제시하는 연구가 전 세계적으로 수행되고 있으며, 국내에서도 최근 기후변화 대비 국가 물안보 확보 방안(국토해양부, 2009, 이하 '물안보과제)을 통해 GCM 및 고해상도 RCM 자료를 바탕으로 미래 한강유역의 물수급 전망 결과를 제시한 바 있다.

하지만, 물공급 시나리오에 있어 과거 유출자료에서 GCM 미래 유출자료로 입력자료를 변경하는 것은 기후변화의 영향을 반영한다는 측면에서는 필수적이지만 연구 방법론의 급격한 변화일 수 있다. 이는 기존의 방법론에 급격한 변화가 전망 결과의 불확실성을 가중시켜 정책결정권자들에게 혼란을 야기할 수 있으며, 실제로 물안보과제를 통해 산정한 물 부족량 결과는 수자원장기종합계획(건설교통부 등, 2006, 이하 '수장기)의 결과와 비교하였을 때 연구기법의 불일치에 따라 모의결과에 큰 차이가 발생하였다(Table 3.4.1 참조). 따라서, 국가의 수자원계획을 개선함에 있어 기존의 분석 틀을 최대한 유지함은 물론 점진적인 기후변화의 영향을 고려할 수 있는 연구기법으로의 개선이 필요하다고 판단된다.

Table 3.4.1 물안보과제의 물 부족량 전망결과

남한 전체의 물부족 전망결과	수자원장기종합계획 `06		물안보과제	
	전망구간	2020 년	전망구간	2040s
	입력자료	(1967-2003)	입력자료	(2031-2060)
최대 물부족량 (106 m3)	869		3,300	
변화율1) (%)			+ 279%	

1) 변화율: 기후변화 영향을 고려하지 않았던 수자원장기종합계획 `06의 물부족 전망결과와의 비교 를 통해 % 변화율 산정함. 즉, 기후변화의 영향으로 인한 물부족량의 증가를 나타냄

(2) 기존 방법론의 개선 방향

본 연구에서는 GCM 시나리오에 따른 미래 유량 전망결과를 직접 입력하지 않고 대신 기존의 입력자료인 과거 유출 시나리오에 대한 가중값을 산정하여 반영하는 기법을 제안하였다. 과거 시나리오는 1967-2003년(총 37개)의 연 유출 시나리오가 되며, 미래 GCM 전망결과를 바탕으로 각각의 시나리오에 대해 미래 재현확률을 반영한 가중값을 산정하는 것이다. 즉, 기존의 방법론에서 미래 GCM 유량 전망결과를 통해 물 부족량을 산정하여 전망된 연도별 물 부족량에 등가중값(1/N)을 적용하여 평균 물부족량을 산정함과는 달리 본 연구에서는 과거 유출량을 통해 전망된 연도별 물부족량에 (기후변화 영향을 고려한) 각각의 가중값을 부여한 후 가중평균값으로 평균 물부족량을 산정하게 되는 것이다. 예를 들어, 수자원장기종합계획의 평균 물부족량 산정은 과거 37년(1967-2003) 유량 시나리오에 따른 각 연도별 물부족량의 평균값으로 산정하는데 이는 각 37개의 전망결과에 대해 등가중값(1/37)을 주어 계산한 결과이다. 이에 반해 본 연구에서 제안하는 방법론은 기후변화의 영향에 따라 재현(발생)확률이 높은 연도의 유량 시나리오에 보다 많은 가중값을 주고, 재현확률이 낮은 시나리오에는 가중값을 주지 않음으로서(예를 들

면, 발생확률이 높은 7개 연도에 1/7의 가중값을 각각 부여하고 나머지 30개 연도에 0을 부여함) 기후변화 영향을 고려한 미래 평균 물부족량을 전망하게 되는 것이다. 본 연구에서 제안하는 기후변화를 고려한 물수급 전망 흐름도는 다음 Fig. 3.4.1과 같다.

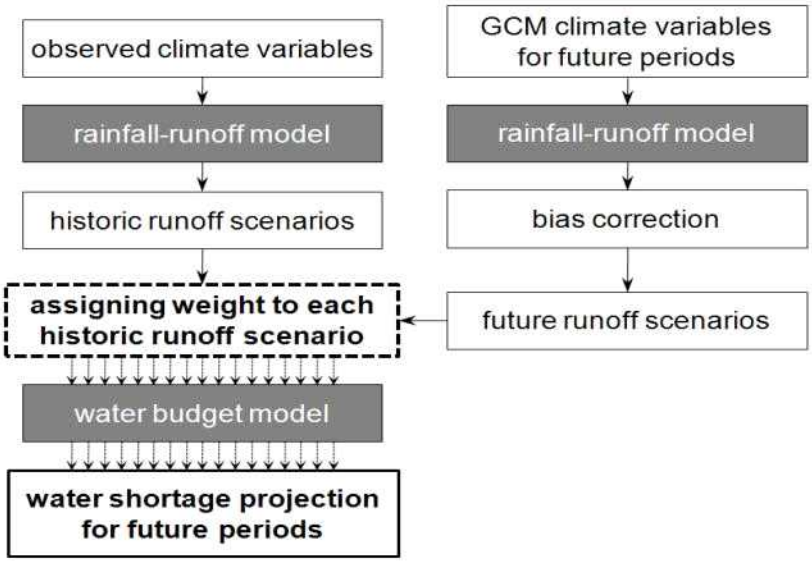


Fig. 3.4.1 본 연구의 흐름도

(3) 기후변화를 고려한 물수급 전망 기법

본 연구에서는 기후변화에 따른 기상 및 수문자료 생성에 적용된 사례(Groves et al., 2008; Sharif and Burn, 2006; Yates, 2003)가 있는 K-nearest neighbor(K-nn) bootstrap resampling algorithm의 가중값 산정 기법을 적용하였다. K-nn bootstrap resampling기법은 미래 전망값이 실제 과거에 기록되었던 수문자료 값들로부터 추출(sampling)되므로 과거의 수문자료의 통계적 특성이 잘 유지되는 장점이 있다. 본 연구에서는 미래 특정연도의 물부족량을 전망하기 위해 GCM 유량 전망값과 같거나 비슷한 결과를 나타내는 과거 유량 시나리오를 다수 선택한 후 그 과거 자료를 입력하여 모의한 물부족 결과를 가중평균하여 미래 물부족량을 전망하였다. 가중값 부여는 연 단위 유량 시나리오로 결정하였으며, 가중값 산정 알고리즘은 다음과 같다.

(가) 가중값 산정 기법: K-nn algorithm

1) 미래 전망구간의 선정(e.g. 30 years)

2) 전망구간 시작연도의 GCM 유량값과 가장 가까운 K개의 과거 시나리오 선택

$$K = \sqrt{N} \text{(Lall and Sharma, 1996)} \qquad (3.4.1)$$

여기서, N은 총 과거 유량 시나리오 개수

3) 선정된 K개의 과거 시나리오에 대한 각각의 가중값 계산

$$W(j) = \frac{1/j}{\left(\sum_{j=1}^{K} 1/j\right)} \qquad (3.4.2)$$

여기서, j는 최근린 순서 $(j = 1,2,...,K)$

4) 전망구간 마지막 연도까지 위 3단계 반복

즉, 최근린 순서대로 선정된 K개의 과거 시나리오에는 3단계의 가중값 산정식으로 계산된 가중값이 부여되고 나머지 (N-K)개의 과거 시나리오에는 가중값이 0이 되는 것이다.

(나) 평균 물부족량 전망

평균 물부족량 산정을 위해 미래 목표 전망구간(30년)의 GCM 유량 모의결과를 바탕으로 연도별 과거 샘플 시나리오들을 추출하여 가중값을 산정한 후 이를 바탕으로 평균 물부족량을 산정한다. 앞서 2장에서 제안한 K-nn 가중값 산정기법을 바탕으로한 평균 물부족량을 산정하는 절차는 아래와 같다.

1) 첫 번째 전망연도의 미래 GCM 유량 전망값과 가장 일치하는 유량값을 가진 K개의 표본을 과거 유량 시나리오에서 최근린 순서대로 선정

2) 선정된 K개의 표본 유량 시나리오 대한 물부족량을 K-WEAP을 통해 산정

3) 선정한 K개의 표본에 최근린 순서대로 가중값을 부여한 후 각 물부족량에 대한 가중평균값으로 첫 번째 전망연도의 물부족량을 산정

4) 위 세 단계를 최종 전망연도까지 반복 수행한 후 30년 결과의 평균값으로 목표 전망구간의 평균 물부족량을 산정

(다) 최대 물부족량 전망

미래 구간을 대표하는 각각의 표본 시나리오의 물부족량의 경우 과거 최대값을 넘어서는 값을 전망할 수 없다. 이는 표본 시나리오가 K-nn 알고리즘을 통해 과거 유량 시나리오로 부터 추출되기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 한계점을 극복하기 위해 미래 구간별 물부족량 전망 결과의 CDF를 추정한 후 과거 최대 물부족량과 동일한 재현 빈도를 갖는 값으로 사상함으로서 구간별 최대 물부족량을 전망하였다. 미래 최대 물부족량 산정 절차는 아래와 같다.

1) 과거 구간의 연도별 물 부족량의 분포함수를 추정

2) 추정된 CDF를 통해 기왕 최대값에 해당되는 Cumulative Density를 산정

$$F_X^{historic}(Maximum\ Water\ Shortage) = Cumulative\ Density \quad (3.4.3)$$

3) 미래전망 구간의 연도별 물 부족량으로 새로운 매개변수를 추정. 여기서 연도별 물 부족량은 표본 시나리오 선정시 최근린 값에 해당되는 시나리오의 물부족량을 의미함 (분포함수는 과거 구간과 동일한 분포를 따른다고 가정)

4) 새롭게 산정된 미래구간의 CDF의 역함수에 앞서 2) 단계에서 산정한 Cumulative Density 값을 입력하여 미래구간 최대 물 부족량을 산정

$$F_X^{future^{-1}}(Cumulative\ Density\ of\ step\ 2) \quad (3.4.4)$$
$$= Maximum\ Water\ Shortage\ of\ the\ future\ period$$

여기서 $F_X^{historic}(x)$는 과거 구간 물부족량의 CDF

$F_X^{future^{-1}}(x)$는 미래 구간 물부족량의 inverse CDF

즉, 미래 구간의 경우 각 연도별로 각각의 표본 시나리오들이 새롭게 추출된 후 가중평균에 의해 물부족량이 전망되므로 그 통계적 특성이 (과거 대비) 변화된다. 따라서, 미래 구간 물부족량의 분포함수의 매개변수 역시 달라지게 되며 이를 반영한 미래 구간 CDF에 과거 구간과 동일한 재현빈도를 가지는 값을 사상시킴으로서 미래 구간을 대표하는 최대 물부족량을 산정하게 되는 것이다.

라. 한반도 미래 유량 전망

(1) 기후변화 시나리오

유량변화를 전망하기 위한 기후변화 시나리오를 세종대학교 수자원 연구실로부터 제공 받았으며, 세종대학교 연구팀은 AR4 A2 온실가스 배출시나리오에 대해 IPCC에서 제공하고 있는 GCM 결과들을 토대로 CSEOF 기법과 다중선형회귀분석을 이용하여 공간적으로 스케일상세화한 후 Weather Generater(WXGEN)을 통해 시간적 스케일상세화를 수행하였다(과학기술부, 2007). 따라서 본 연구에서는 AR4 A2 배출시나리오와 4개의 GCM(Table 3.4.2 참조)의 모의결과에 따른 130년(1970-2099년) 기간의 소유역별 일 단위 기후 시나리오를 적용하였다.

Table 3.4.2 GCM Information

No.	Model (agency: version)	약어	개발국가	해상도	
				Atm.	Ocn.
1	CSIRO: MK3.0	CSR	호주	192×96	192×189
2	CNRM: CM3	GNR	프랑스	128×64	182×152
3	CONS: ECHO-G	MIU	독일/대한민국	96×48	128×117
4	UKMO: HadCM3	UKC	영국	192×144	360×216

(2) 미래 유량변화 전망

강우를 상호 연결된 수학적 함수를 통해 유량으로 변환하는 주요 수단으로 개념적 강우-유출 모형(Conceptual Rainfall-Runoff Model)이 개발 되어 왔다. 우리나라에서는 NWSRFS-SMA(NWS River Forecasting System - Soil Moisture Account) 모형, SSARR 모형, TOPMODEL, TANK 모형 등을 사용해왔으며, 현재 수장기에서는 토양수분 저류구조를 가진 TANK 모형(Sugawara 등, 1984)을 국가계획을 위한 강우-유출 모형으로 사용하고 있다. 수자원장기종합계획(2006)에서는 각 소유역의 38년간(1966-2003년) 일 강수량자료를 수집한 후, 현재 운영되고 있는 댐 지점들과 일부 본류 하천 지점들의 유출량 자료를 바탕으로 TANK 모형 매개변수의 보정과 검증을 수행하였으며, 따라서 본 연구에서도 TANK 모형을 통해 기후변화에 따른 한강유역의 미래 유량변화를 모의하였다.

(3) 편이보정

기후변화 모형으로 모의되고 상세화된 결과들은 실제 관측값과 일정정도의 편이를 보이게되며, 이러한 편이를 보정하기 위하여 가장 일반적으로 사용하는 방법이 Quantile Mapping이다. Quantile Mapping은 유출량을 보정하는 방법으로 주로 사용되었으며(Hamlet et al., 2003; Hashino et al., 2007) 기후변화 연구에 관련해서는 VanRheenen et al.(2003), Fowler et al.(2007) 등이 GCM 자료의 보정을 위해서 사용한 바 있다. Quantile Mapping은 미래의 GCM 자료가 과거 GCM(hindcast)에서 어느 정도의 비초과확률을 갖는지를 산정하고 동일한 비초과확률을 가지는 관측치를 통해 보정하는 방식이며(Wiley, 2004), 편이보정값은 아래의 Eq. (3.4.5)로 산정하게 된다. 보다 자세한 사항은

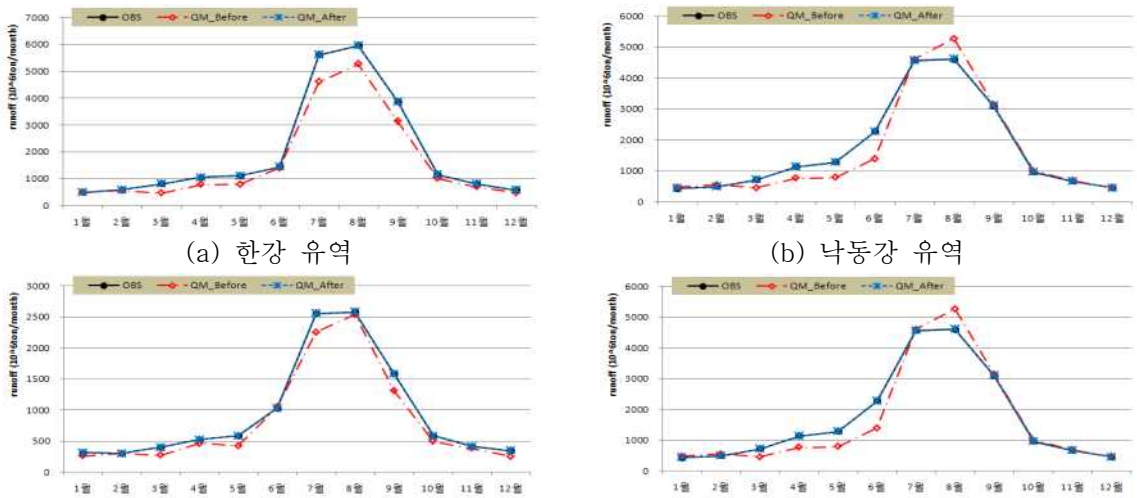
Wiley(2004)의 연구에 상세하게 제시되어 있다.

$$Z_i = F_{oi}^{-1}(F_{si}(\widehat{Y_i})) \tag{3.4.5}$$

여기서, $\widehat{Y_i}$ 는 미래유량 추정값, Z_i 는 편이보정값

$F_{si}(\bullet)$와 $F_{oi}(\bullet)$는 각각 해당변수의 모의값과 관측값에 대한 경험적 누가분포함수

현재 모든 소유역별로 실측 유량자료가 존재하지는 않으므로, 실측 강우자료를 TANK 모형에 입력하여 산정한 유량을 실측유량으로 간주하였다. 본 연구에서는 과거 30년(1971-2000년) 동안의 월별 유량의 경험적 누가분포함수를 산정하여 모든 소유역별로 Quantile Mapping을 실시하였으며, 과거기간에 대한 한반도 모든 소유역의 편이를 보정하고 그 결과를 Fig. 3.4.2에 나타냈다.



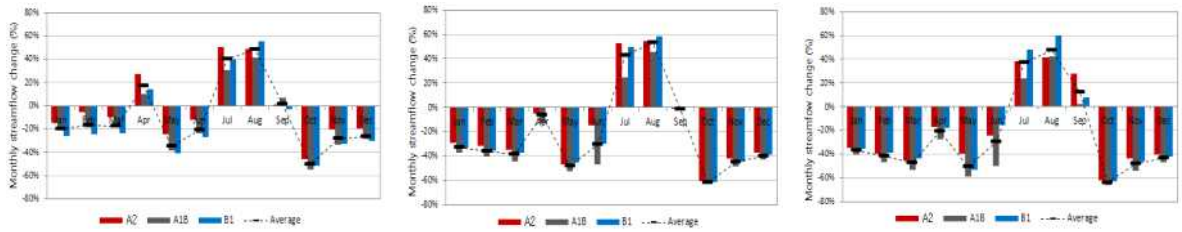
(a) 한강 유역 (b) 낙동강 유역

(c) 금강 유역 (d) 낙동강 유역

Fig. 3.4.2 observed runoff/ GCM raw/ GCM QM 과거 30년평균

(4) 미래 유량변화

각 GCM별 일단위로 상세화된 강우량 및 증발산량 자료를 TANK 모형에 입력하여 Future Scenario(2010-2099년, 90년)의 일단위 미래 유량 시나리오를 모의하고 그 결과를 2020s(2010-2039), 2050s(2040-2069), 2080s(2070-2099) 세 구간으로 나누어 각 구간별 월평균 유량을 Fig. 3.4.3에 나타내었다. Fig. 3.4.3을 살펴보면 GCM별 차이는 존재 하지만 전반적으로 홍수기 유량은 장기적으로 다소 증가하는 추세를 보여주는 반면 비홍수기 유량은 다소 감소할 것이라는 전망 결과를 보여주었다. 또한 미래구간으로 갈수록 GCM별 모의결과의 편차가 더욱 커지는 것으로 보아, 전망연도가 장기미래로 갈수록 GCM에 따른 불확실성이 커지게 됨을 알 수 있었다. GCM에 따른 결과를 비교해 보면 A1B 시나리오에서 특히 이수기 유량의 감소가 두드러짐을 알 수 있다.



(a) 과거대비-2020s (b) 과거대비-2050s (c) 과거대비-2080s

Fig. 3.4.3 5대강 유역 과거대비 미래 월별 유량변동 패턴

마. 한반도 미래 물수급 전망

소유역별 물수급 분석을 위해 수장기에서 사용하는 K-WEAP 모형을 적용하였다. K-WEAP 모형은 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 한국건설기술연구원과 SEI-B(Stockholm Environment Institute - Boston Center)에서 공동개발한 한국형 수자원평가계획 모형으로 그 적용성이 선행연구들을 통하여 확인되었다(국토해양부, 2009). K-WEAP에서는 수요처의 만족도와 수요자가 사용하는 특정 하천에서의 필요량을 극대화하기 위해 선형계획법(LP, Linear Programming)이 사용되며 공급우선순위, 수요처 선호도, 물수지 및 기타 제약조건 등을 고려한다. 본 연구에서는 공급우선순위를 각 소유역별 수요처에 1, 각 저수지에 2를 부여하였다(숫자가 작을수록 우선순위임). K-WEAP은 모든 제약조건과 우선순위를 만족시키며 수요처의 공급을 최대화함이 목적이므로, 우선순위 1인 수요처에 물을 먼저 분배한 후 우선순위 2인 저수지의 목표수위를 계산한다. K-WEAP의 보다 자세한 사항은 “K-WEAP 사용자 안내서”(한국건설기술연구원, 2005)를 참조할 수 있다.

한반도 4개 대권역별 물수급 전망을 수행하기 위하여 K-WEAP을 활용하여 물수급 네트워크를 구축하였다. 수자원장기종합계획 보완(06년)과 동일한 기준을 적용하여 2004년 수립된 수도정비기본계획을 검토하여 광역 물 이동 현황을 조사하였으며, 많은 양의 취수가 이루어지는 지방상수도에 대한 현황도 조사하여 물수급 네트워크 구축시 반영하였다.

(1) 물수급 전망 기법

(가) 가중값 부여 기준유량 선정

가중값 부여를 위한 K개의 최근린 샘플을 선정할 때는 미래 전망결과와 과거 시나리오의 비교기준이 될 기준유량이 필요하다. 기준유량을 결정하기 위해, 과거 37년의 연도별 물부족량과 연도별 유량값 사이의 순위상관관계를 분석하였으며, Spearman의 순위상관계수(Rank Correlation Coefficient)를 통해 물부족량의 순위와 가장 강한 상관관계를 가지고 있는 기준유량을 결정하였다. 이를 위해 연 총유량, 비홍수기 유량(10월-6월) 계절별 유량(4-6월) 등 다양한 연 단위 유량을 조합한 후 순위상관계수를 산정하였다. 순위상관계수 r_s는 아래 Eq. (3.4.6)과 같이 계산하였다.

$$r_s = 1 - \frac{6 \times \sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n(n^2-1)} \qquad (3.4.6)$$

여기서, d_i는 두 계열 x_i, y_i 사이의 순위차, n는 자료의 총 수

순위검정 결과 비홍수기(10월-6월) 유량의 순위가 물부족량의 순위와 가장 강한 상관관계를 가지고 있음이 확인되었으며, 이는 비홍수기의 유량이 연총유량 및 다른 구간의 유량보다 물부족량 산정 결과에 가장 많은 영향을 반영한다는 것을 보여주는 것이다. 따라서 가중값 산정 기준유량으로 비홍수기 유량을 선정하였다.

(나) 평균 물부족량 전망

목표 전망구간에 대한 평균 물부족량 산정절차는 다음과 같다.

1) 전망연도의 미래 GCM 유량값과 가장 일치하는 유량값을 가진 K개의 시나리오를 과거 표본 시나리오에서 선정함

2) 그리고 K-WEAP 모형을 통해 산정한 K개의 샘플 시나리오 연도에 대한 물부족량 결과를 가져옴

3) 그리고 선정한 K개의 시나리오에 최근린 순서대로 가중값을 부여한후 가중평균하여 전망연도 대한 물부족량을 전망함

4) 위 1-3단계를 전망구간의 마지막 연도까지 수행한 후 전체 전망 기간의 평균값으로 전망구간 평균 물부족량을 산정함

(다) 최대 물부족량 전망

목표 전망구간에 대한 최대 물부족량 산정절차는 다음과 같다.

1) 과거 연물부족량 시나리오('67~ '03년, 37개년)의 확률분포함수 추정

2) 1)에서 추정한 확률분포함수에 대한 기왕 최대 물부족량 시나리오의 비초과확률 계산

3) 첫 번째 전망연도의 미래 GCM 유량값(비홍수기 기준)과 가장 근사한 유량값(1st nearest neighbor) 샘플 시나리오를 과거 표본 시나리오에서 추출

4) 상기 3)단계를 구간의 최종 연도까지 수행한 후 총 30개년의 샘플 시나리오를 이용하여 1)단계에서 추정한 확률분포함수에 대한 매개변수를 새로이 추정 (단, 이때 과거 시나리오의 확률분포함수가 미래에도 동일하다고 가정)

5) 2)단계에서 계산한 비초과확률을 4)의 미래 시나리오 확률분포함수에 적용하여 미래 최대 물부족량 산정

앞서 기술한 절차에 따라 과거(37개년, 1967-2003년) 물부족 자료에 대한 확률분포함수를 추정하였다. 확률분포형으로는 2변수-Lognomal, 2변수-Gamma, 3변수-GEV, 2변수

-Weibull 확률분포 등 4가지 분포형을 적용하였으며, 매개변수 추정은 모멘트(MOM)을 사용하였다. 적합도 검증은 Chi-aquire 검정과 Kolmogrove-Sminorv 검정을 유의수준 $a=0.05$로 실시하였다. 모든 경우에 대하여 적합성 검정을 실시해본 결과 상기 4개 분포형 모두 적합성 검정에 통과하였으나, 이 중 2변수-Lognormal 분포형이 국내 극치분석에 널리 이용되고 하한계가 모든 경우에 대해 만족을 하였기에 2변수-Lognormal 분포를 과거 물부족량 자료에 대한 최적 확률분포로 선정하여 적용하였다. 단, 금강의 경우에는 과거 37개년 중 연물부족량 발생이 17개년으로 5대강 유역 중 과거 물부족 발생빈도가 적었으며, 이러한 과거 시나리오 특성을 보다 잘 반영할 수 있도록 2변수-GEV 분포를 선정하였다. Table 3.4.3은 선정된 확률분포함수에 따른 유역별 기왕 최대 물부족량의 비초과확률을 나타낸다.

Table 3.4.3 최대 물부족량 산정을 위한 통계특성치

	과거(1967-2003) 최대 물부족량 (m3/년)	확률분포 선정	비초과확률	재현빈도
한강 유역	122,138,312	Lognormal	0.943	17년
낙동강 유역	127,265,085	Lognormal	0.957	23년
금강 유역	71,456,302	GEV	0.978	46년
영산/섬진강 유역	541,014,891	Lognormal	0.978	49년

(2) 한반도 물수급 전망 결과

(가) 전망구간별 물수급 전망 결과

① 전망구간(S1) I: 2020s

2020s 구간(2010-2039년, 30년 구간)의 미래 GCM 유량 모의결과를 바탕으로 연도별 과거 샘플 시나리오를 추출하여 가중값을 산정하고, 앞서 제시했던 물부족량 산정 절차에 따라 4개 GCM과 3개의 배출시나리오에 대한 평균 물부족량과 최대 물부족량을 산정였다.

Table 3.4.4에서 2020s에는 5대강 유역 물부족이 과거(S0) 대비 증가할 것으로 전망되었다. 이는 앞서 5대강 유역의 강우량 및 유량이 미래에 점차 감소되고 특히 이수기의 감소가 두드러지는 것으로 전망된 것과 일치된 결과를 보여주고 있다. 권역별로 살펴보면, HS 대비 금강 유역에 가장 큰 물부족이 발생하고, 낙동강, 한강, 영산섬진강 순으로 물부족이 발생하였다. 시나리오 별로 살펴보면, B1, A1B, A2 순으로 평균 물부족이 발생하였다. 2020s 구간의 5대강유역 평균 물부족량이 약 23%(약 3.2억 m^3/년) 증가할 것으로 전망되었다.

미래 2020s에 대한 배출시나리오별 한반도 최대 물부족량은 Table 3.4.5와 같다. 최대 물부족량을 살펴보면, GCM 간에 최대물부족량의 편차가 심한 것을 알 수 있다. 또한, 배출시나리오 별로 살펴보면 평균 물부족량 발생과 동일한 형태로 B1 배출시나리오에서 최대물부족량이 발생하고, A1B, A2 순으로 최대 물부족량이 발생하였다. 유역 별로 살펴보면, 상대적으로 유역간 편차가 크지 않으며, 평균적으로 약 18% 최대물부족량의 증가가 있었다.

Table 3.4.4 2020s 한반도 평균 물부족량 전망 결과(m3/년)

(a) A2 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2020s, A2)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	41,979,592	47,055,598	42,313,004	51,600,971	52,912,837	48,470,602
(과거대비 증감)		(+12%)	(+1%)	(+23%)	(+26%)	(+15%)
낙동강 유역	29,528,506	40,682,464	30,168,921	38,497,303	45,048,494	38,599,295
(과거대비 증감)		(+38%)	(+2%)	(+30%)	(+53%)	(+31%)
금강 유역	9,936,113	22,070,524	14,832,467	23,969,940	23,773,745	21,161,669
(과거대비 증감)		(+122%)	(+49%)	(+141%)	(+139%)	(+113%)
영산섬진강 유역	181,325,000	171,465,804	150,436,907	181,078,089	223,926,304	181,726,776
(과거대비 증감)		(+5%)	(-17%)	-	(+24%)	-
5대강 유역	262,769,211	281,274,389	237,751,299	295,146,303	345,661,380	289,958,343
(과거대비 증감)		(+7%)	(-10%)	(+12%)	(+32%)	(+10%)

(b) A1B 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2020s, A1B)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	41,979,592	53,399,432	50,262,396	50,662,783	51,383,801	51,427,103
(과거대비 증감)		(+27%)	(+20%)	(+21%)	(+22%)	(+23%)
낙동강 유역	29,528,506	44,467,256	39,771,660	46,414,926	44,782,810	43,859,163
(과거대비 증감)		(+51%)	(+35%)	(+57%)	(+52%)	(+49%)
금강 유역	9,936,113	25,119,706	22,471,145	26,711,304	20,807,424	23,777,395
(과거대비 증감)		(+153%)	(+126%)	(+169%)	(+109%)	(+139%)
영산섬진강 유역	181,325,000	213,054,315	185,943,754	222,798,923	217,150,533	209,736,881
(과거대비 증감)		(+18%)	(+3%)	(+23%)	(+20%)	(+16%)
5대강 유역	262,769,211	336,040,709	298,448,955	346,587,935	334,124,569	328,800,542
(과거대비 증감)		(+28%)	(+14%)	(+32%)	(+27%)	(+25%)

(c) B1 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2020s, B1)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	41,979,592	63,224,351	39,918,221	60,248,268	54,425,883	54,454,181
(과거대비 증감)		(+51%)	(-5%)	(+44%)	(+30%)	(+30%)
낙동강 유역	29,528,506	54,646,173	32,730,308	54,085,665	46,151,508	46,903,414
(과거대비 증감)		(+85%)	(+11%)	(+83%)	(+56%)	(+59%)
금강 유역	9,936,113	35,071,663	14,020,311	31,337,837	25,544,155	26,493,491
(과거대비 증감)		(+253%)	(+41%)	(+215%)	(+157%)	(+167%)
영산섬진강 유역	181,325,000	274,473,830	142,761,093	242,916,944	219,566,502	219,929,592
(과거대비 증감)		(+51%)	(-21%)	(+34%)	(+21%)	(+21%)
5대강 유역	262,769,211	427,416,017	229,429,933	388,588,713	345,688,049	347,780,678
(과거대비 증감)		(+63%)	(-13%)	(+48%)	(+32%)	(+32%)

Table 3.4.5 2020s 한반도 최대 물부족량 전망 결과(m3/년)

(a) A2 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2020s, A2)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	122,138,312	100,393,720	107,784,656	234,980,373	166,630,387	152,447,284
(과거대비 증감)		(+18%)	(+12%)	(+92%)	(+36%)	(+25%)
낙동강 유역	127,265,085	130,806,775	113,841,556	134,179,959	251,791,236	157,654,882
(과거대비 증감)		(+3%)	(+11%)	(+5%)	(+98%)	(+24%)
금강 유역	71,456,302	83,385,102	72,205,417	73,797,855	82,196,322	77,896,174
(과거대비 증감)		(+17%)	(+1%)	(+3%)	(+15%)	(+9%)
영산섬진강 유역	541,014,891	465,619,000	386,597,549	560,531,646	781,120,135	548,467,083
(과거대비 증감)		(-14%)	(-29%)	(+4%)	(+44%)	(+1%)
5대강 종합	861,874,590	780,204,598	680,429,179	1,003,489,833	1,281,738,080	936,465,422
(과거대비 증감)		(-9%)	(-21%)	(+16%)	(+49%)	(+9%)

(b) A1B 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2020s, A1B)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	122,138,312	144,997,788	171,603,446	109,772,679	124,379,986	137,688,475
(과거대비 증감)		(+19%)	(+40%)	(+10%)	(+2%)	(+13%)
낙동강 유역	127,265,085	107,130,081	180,341,428	149,744,350	134,001,141	142,804,250
(과거대비 증감)		(-16%)	(+42%)	(+18%)	(+5%)	(+12%)
금강 유역	71,456,302	89,923,373	82,787,176	88,344,590	83,579,145	86,158,571
(과거대비 증감)		(+26%)	(+16%)	(+24%)	(+17%)	(+21%)
영산섬진강 유역	541,014,891	638,195,649	598,271,166	709,918,191	703,029,662	662,353,667
(과거대비 증감)		(+18%)	(+11%)	(+31%)	(+30%)	(+22%)
5대강 종합	861,874,590	980,246,890	1,033,003,216	1,057,779,812	1,044,989,934	1,029,004,963
(과거대비 증감)		(+14%)	(+20%)	(+23%)	(+21%)	(+19%)

(c) B1 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2020s, B1)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강유역	122,138,312	181,791,702	84,350,190	154,190,362	124,251,194	136,145,862
(과거대비 증감)		(+49%)	(-31%)	(+26%)	(+2%)	(+11%)
낙동강유역	127,265,085	140,187,685	120,050,505	189,251,804	140,509,183	147,499,794
(과거대비 증감)		(+10%)	(-6%)	(+49%)	(+10%)	(+16%)
금강유역	71,456,302	116,298,899	79,952,324	97,224,103	88,044,479	95,379,951
(과거대비 증감)		(+63%)	(+12%)	(+36%)	(+23%)	(+33%)
영산섬진강유역	541,014,891	898,850,034	322,464,505	991,879,095	634,176,926	711,842,640
(과거대비 증감)		(+66%)	(-40%)	(+83%)	(+17%)	(+32%)
5대강 종합	861,874,590	1,337,128,321	606,817,524	1,432,545,364	986,981,783	1,090,868,248
(과거대비 증감)		(+55%)	(-30%)	(+66%)	(+15%)	(+27%)

② 전망구간(S2) II: 2050s

2050s 구간(2040-2069년, 30년 구간)의 미래 GCM 유량 모의결과를 바탕으로 연도별 과거 샘플 시나리오를 추출하여 가중값을 산정하였다. 앞서 제시했던 물부족량 산정 절차에 따라 4개 GCM과 3개의 배출시나리오에 대한 물부족량을 모두 산정였다.

2050s 구간의 물부족량을 5대강 유역별로 배출시나리오와 GCM별로 Table 3.4.6에 산출하였다. 결과를 살펴보면, 과거(S0)를 통한 물부족량과 비교하여 볼 때, A1B 배출시나리오의 경우 과거 대비 물부족량이 크게 발생하며, B1, A2 배출시나리오 순으로 과거대비 증가폭을 나타내었다. 유역별로 살펴보면, 금강 유역에서 가장 많은 물부족 증가가 전망되었고, 절대적인 부족량 측면에서는 영산섬진강 유역의 물부족량이 전체 5대강 유역의 61% 가장 많은 비율을 차지하였다.

본 연구에서 제시한 방법론을 적용하여 산정한 미래 2050s에 대한 배출시나리오별 한반도 최대 물부족량은 Table 3.4.7과 같다. 최대 물부족량을 살펴보면, GCM 간에 최대 물부족량의 편차가 더욱 심화 되었으며, 배출시나리오에 따라 A2와 B1 에서는 유사한 비율로 최대 물부족 발생량이 증가한 반면 A1B 배출시나리오에서는 약 61%에 최대 물부족량 증가가 발생 하였다. 유역 별로 살펴보면, 상대적으로 유역간 편차 역시 증가하였으며, 평균적으로 약 50% 최대 물부족량의 증가가 있었다. 이러한 양은 2020s의 18%에 비해 두 배 넘게 증가한 값으로, 기후변화의 영향으로 미래시대로 갈수록 물부족에 대한 취약성 정도가 심해지는 것으로 나타났다.

Table 3.4.6 2050s 한반도 평균 물부족량 전망 결과(m3/년)

(a) A2 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2050s, A2))				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	41,979,592	55,711,075	49,579,297	59,826,810	70,943,279	59,015,115
(과거대비 증감)		(+33%)	(+18%)	(+43%)	(+69%)	(+41%)
낙동강 유역	29,528,506	50,853,641	33,691,169	49,192,489	68,934,212	50,667,878
(과거대비 증감)		(+72%)	(+14%)	(+67%)	(+133%)	(+72%)
금강 유역	9,936,113	30,886,471	20,605,549	27,071,940	41,448,629	30,003,147
(과거대비 증감)		(+211%)	(+107%)	(+173%)	(+32%)	(+202%)
영산섬진강 유역	181,325,000	241,009,698	169,892,216	213,331,032	323,712,878	236,986,456
(과거대비 증감)		(+33%)	(+6%)	(+18%)	(+79%)	(+31%)
5대강 유역	262,769,211	378,460,884	273,768,231	349,422,271	505,038,999	389,131,507
(과거대비 증감)		(+44%)	(+4%)	(+33%)	(+92%)	(+43%)

(b) A1B 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2050s, A1B)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	41,979,592	69,554,549	56,224,624	74,509,143	73,722,005	68,502,581
(과거대비 증감)		(+66%)	(+34%)	(+77%)	(+76%)	(+63%)
낙동강 유역	29,528,506	67,484,338	41,721,555	72,158,092	73,001,263	63,591,312
(과거대비 증감)		(+129%)	(+41%)	(+144%)	(+52%)	(+92%)
금강 유역	9,936,113	42,203,951	24,405,315	43,657,488	43,762,861	38,507,404
(과거대비 증감)		(+325%)	(+146%)	(+339%)	(+340%)	(+288%)
영산섬진강 유역	181,325,000	338,002,126	206,648,638	357,562,912	380,660,368	320,718,511
(과거대비 증감)		(+86%)	(+14%)	(+97%)	(+110%)	(+77%)
5대강 유역	262,769,211	517,244,964	329,000,132	547,887,635	571,146,497	491,319,807
(과거대비 증감)		(+97%)	(+25%)	(+109%)	(+117%)	(+87%)

(c) B1 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2050s, B1)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	41,979,592	66,253,581	52,183,796	64,648,053	71,787,655	63,718,271
(과거대비 증감)		(+58%)	(+24%)	(+54%)	(+71%)	(+52%)
낙동강 유역	29,528,506	56,560,195	40,453,920	52,321,690	63,727,206	53,265,753
(과거대비 증감)		(+92%)	(+37%)	(+77%)	(+116%)	(+84%)
금강 유역	9,936,113	34,417,292	21,671,020	31,055,541	40,736,481	31,970,083
(과거대비 증감)		(+246%)	(+118%)	(+213%)	(+310%)	(+222%)
영산섬진강 유역	181,325,000	284,956,269	179,990,671	206,535,784	289,226,876	240,177,400
(과거대비 증감)		(+57%)	(-1%)	(+14%)	(+60%)	(+33%)
5대강 유역	262,769,211	442,187,337	294,299,407	354,561,068	465,478,218	389,131,507
(과거대비 증감)		(+68%)	(+12%)	(+35%)	(+77%)	(+48%)

Table 3.4.7 2050s 한반도 최대 물부족량 전망 결과(m3/년)

(a) A2 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2050s, A2)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	122,138,312	149,323,855	90,946,053	187,493,110	203,919,680	157,920,675
(과거대비 증감)		(+22%)	(-26%)	(+54%)	(+67%)	(+29%)
낙동강 유역	127,265,085	140,784,518	65,186,208	216,370,010	228,610,540	162,737,819
(과거대비 증감)		(+11%)	(-49%)	(+70%)	(+80%)	(+28%)
금강 유역	71,456,302	122,691,092	84,178,483	93,311,958	128,308,297	107,122,458
(과거대비 증감)		(+72%)	(+18%)	(+31%)	(+80%)	(+50%)
영산섬진강 유역	541,014,891	861,177,257	372,990,153	805,995,901	1,190,005,460	807,542,193
(과거대비 증감)		(+59%)	(-31%)	(+49%)	(+120%)	(+49%)
5대강 종합	861,874,590	1,273,976,722	613,300,897	1,303,170,978	1,750,843,977	1,235,323,144
(과거대비 증감)		(+48%)	(-29%)	(+51%)	(+103%)	(+43%)

(b) A1B 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2050s, A1B)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	122,138,312	180,895,954	178,357,125	211,521,150	185,290,153	189,016,096
(과거대비 증감)		(+48%)	(+46%)	(+73%)	(+52%)	(+55%)
낙동강 유역	127,265,085	216,430,190	99,213,541	236,673,109	218,699,073	192,753,979
(과거대비 증감)		(+70%)	(-22%)	(+86%)	(+72%)	(+51%)
금강 유역	71,456,302	118,459,867	84,621,109	133,349,634	126,304,947	115,683,890
(과거대비 증감)		(+66%)	(+18%)	(+87%)	(+77%)	(+62%)
영산섬진강 유역	541,014,891	1,024,371,796	600,854,650	1,145,345,404	792,949,974	890,880,456
(과거대비 증감)		(+89%)	(+11%)	(+112%)	(+47%)	(+65%)
5대강 종합	861,874,590	1,540,157,808	963,046,426	1,726,889,298	1,323,244,148	1,388,334,420
(과거대비 증감)		(+79%)	(+12%)	(+100%)	(+54%)	(+61%)

(c) B1 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2050s, B1)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	122,138,312	179,269,419	159,551,473	190,102,545	236,855,781	191,444,805
(과거대비 증감)		(+47%)	(+31%)	(+56%)	(+94%)	(+57%)
낙동강 유역	127,265,085	190,815,997	138,156,423	150,853,272	199,939,071	169,941,191
(과거대비 증감)		(+50%)	(+9%)	(+19%)	(+57%)	(+34%)
금강 유역	71,456,302	103,050,955	79,585,063	97,610,264	120,893,265	100,284,887
(과거대비 증감)		(+89%)	(+56%)	(+51%)	(+85%)	(+70%)
영산섬진강 유역	541,014,891	1,016,497,584	444,637,226	613,209,171	1,100,141,422	793,621,351
(과거대비 증감)		(+88%)	(+18%)	(+13%)	(+103%)	(+47%)
5대강 종합	861,874,590	1,489,633,956	821,930,185	1,051,775,252	1,657,829,540	1,255,292,233
(과거대비 증감)		(+73%)	(-5%)	(+22%)	(+92%)	(+46%)

③ 전망구간(S3) III: 2080s

2080s 구간(2070-2099년, 30년 구간)의 미래 GCM 유량 모의결과를 바탕으로 연도별 과거 샘플 시나리오를 추출하여 가중값을 산정하였다. 앞서 제시했던 물부족량 산정 절차에 따라 4개 GCM과 3개의 배출시나리오에 대한 물부족량을 모두 산정하였다.

2080s 구간의 물부족량을 5대강 유역별로 배출시나리오와 GCM별로 산출하였다. 결과를 살펴보면, 과거(S0)를 통한 물부족량과 비교하여 볼 때, A1B 배출시나리오의 경우 과거 대비 물부족량이 크게 발생하며, B1, A2 배출시나리오는 유사하게 과거대비 증가폭을 나타내었다. 2020년대와 2050년대와 유사하게 GCM의 경우는 CSIRO가 전반적으로 작게 전망되며 유역별 특징은 금강 유역이 역시 특히 큰 것으로 나타났다(Table 3.4.8 참조). 2080년대 한반도 평균물부족량은 A2 배출시나리오를 기반할 때, 423,187,138 ㎥/년이고, A1B 배출시나리오 기반은 516,513,671 ㎥/년이며 B1 배출시나라오는 410,369,705 ㎥/년으로 큰 차이를 나타내지 않았으나 전망구간 2020s에 비해 다소 큰 것으로 전망되었다.

본 연구에서 제시한 방법론을 적용하여 산정한 미래 2080s(2070-2099년)에 대한 배출시나리오별 한반도 최대 물부족량은 Table 3.4.9과 같다. 최대 물부족량을 살펴보면, 최대 물부족량의 발생 모의 결과의 편차가 GCM 간, 시나리오 간에 작아 거의 모든 시나리오에서 약 65% 정도의 최대 물부족량 증가를 모의함에 따라, 물부족을 겪을 확률이 매우 높을 것으로 전망된다. 또한 A2와 B1 에서는 유사한 비율로 증가하는 양상이 유지되어 A2와 B1 그리고 A1B 간에 편차가 있음을 보여주고 있다. 유역별로 살펴보면, 상대적으로 유역 간 편차는 감소하였다.

Table 3.4.8 2080s 한반도 평균 물부족량 전망 결과(m3/년)

(a) A2 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2080s, A2))				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	41,979,592	72,764,769	55,807,335	60,628,657	74,574,920	65,943,920
(과거대비 증감)		(+73%)	(+33%)	(+44%)	(+78%)	(+57%)
낙동강 유역	29,528,506	61,978,727	36,910,848	53,802,397	70,946,975	55,909,736
(과거대비 증감)		(+110%)	(+25%)	(+82%)	(+140%)	(+89%)
금강 유역	9,936,113	41,160,799	23,009,293	29,841,589	43,906,444	34,479,531
(과거대비 증감)		(+314%)	(+132%)	(+200%)	(+342%)	(+247%)
영산섬진강 유역	181.325,000	251,885,289	189,899,955	265,437,114	360,193,445	266,853,951
(과거대비 증감)		(+39%)	(+5%)	(+46%)	(+99%)	(+47%)
5대강 유역	262,769,211	427,789,584	305,627,431	409,709,757	549,621,784	423,187,138
(과거대비 증감)		(+63%)	(+16%)	(+56%)	(+109%)	(+61%)

(b) A1B 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2080s, A1B)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	41,979,592	73,668,044	70,014,890	75,651,629	76,019,961	73,838,631
(과거대비 증감)		(+75%)	(+67%)	(+80%)	(+81%)	(+76%)
낙동강 유역	29,528,506	67,148,350	53,494,329	72,090,424	77,754,695	67,621,950
(과거대비 증감)		(+127%)	(+81%)	(+144%)	(+52%)	(+101%)
금강 유역	9,936,113	42,420,204	33,245,178	43,738,212	47,032,472	41,609,017
(과거대비 증감)		(+327%)	(+235%)	(+340%)	(+373%)	(+319%)
영산섬진강 유역	181,325,000	339,115,462	230,755,362	344,440,974	419,464,494	333,444,073
(과거대비 증감)		(+87%)	(+27%)	(+90%)	(+131%)	(+84%)
5대강 유역	262,769,211	522,352,060	387,509,759	535,921,239	620,271,622	516,513,671
(과거대비 증감)		(+99%)	(+48%)	(+104%)	(+136%)	(+97%)

(c) B1 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2080s, B1)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	41,979,592	74,192,918	49,008,586	77,018,093	72,775,814	68,248,853
(과거대비 증감)		(+77%)	(+17%)	(+83%)	(+73%)	(+63%)
낙동강 유역	29,528,506	61,332,248	35,383,862	57,587,216	64,008,390	54,577,929
(과거대비 증감)		(+108%)	(+20%)	(+95%)	(+117%)	(+85%)
금강 유역	9,936,113	40,790,158	17,365,643	38,930,041	42,698,555	34,946,099
(과거대비 증감)		(+311%)	(+75%)	(+292%)	(+330%)	(+252%)
영산섬진강 유역	181,325,000	275,539,357	175,929,358	233,006,259	325,912,322	252,596,824
(과거대비 증감)		(+52%)	(-3%)	(+29%)	(+80%)	(+39%)
5대강 유역	262,769,211	451,854,681	277,687,449	406,541,609	505,395,081	410,369,705
(과거대비 증감)		(+72%)	(+6%)	(+55%)	(+92%)	(+56%)

Table 3.4.9 2080s 한반도 최대 물부족량 전망 결과(m3/년)

(a) A2 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2080s, A2)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	122,138,312	192,447,062	127,903,778	220,652,054	208,807,988	187,452,721
(과거대비 증감)		(+58%)	(+5%)	(+81%)	(+71%)	(+53%)
낙동강 유역	127,265,085	259,131,683	108,435,451	235,716,477	214,220,713	204,376,081
(과거대비 증감)		(+104%)	(-15%)	(+85%)	(+68%)	(+61%)
금강 유역	71,456,302	127,790,466	86,014,741	97,407,234	135,014,215	111,556,664
(과거대비 증감)		(+79%)	(+20%)	(+36%)	(+89%)	(+56%)
영산섬진강 유역	541,014,891	976,873,373	522,001,298	1,235,372,250	1,084,687,167	954,733,522
(과거대비 증감)		(+81%)	(-4%)	(+128%)	(+100%)	(+76%)
5대강 종합	861,874,590	1,556,242,584	844,355,269	1,789,148,016	1,642,730,084	1,458,118,988
(과거대비 증감)		(+81%)	(-2%)	(+108%)	(+91%)	(+69%)

(b) A1B 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2080s, A1B)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	122,138,312	197,715,836	187,521,888	198,564,096	195,676,754	194,869,643
(과거대비 증감)		(+62%)	(+54%)	(+63%)	(+60%)	(+60%)
낙동강 유역	127,265,085	220,903,546	129,754,764	215,137,339	302,592,346	217,096,999
(과거대비 증감)		(+74%)	(+2%)	(+69%)	(+138%)	(+77%)
금강 유역	71,456,302	132,894,581	101,108,469	129,545,890	141,537,768	126,271,677
(과거대비 증감)		(+86%)	(+41%)	(+81%)	(+98%)	(+77%)
영산섬진강 유역	541,014,891	937,498,660	653,520,351	1,303,870,641	1,081,776,424	994,166,519
(과거대비 증감)		(+73%)	(+21%)	(+141%)	(+100%)	(+84%)
5대강 종합	861,874,590	1,489,012,623	1,071,905,472	1,847,117,965	1,721,583,292	1,532,404,838
(과거대비 증감)		(+73%)	(+24%)	(+114%)	(+100%)	(+78%)

(c) B1 시나리오 기반

	Historic (1967-2003)	GCMs (2080s, B1)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
한강 유역	122,138,312	252,309,496	97,148,763	209,465,626	218,811,742	194,433,907
(과거대비 증감)		(+107%)	(+20%)	(+71%)	(+79%)	(+59%)
낙동강 유역	127,265,085	332,821,109	118,884,308	161,701,200	240,950,113	213,589,182
(과거대비 증감)		(+162%)	(-7%)	(+27%)	(+89%)	(+50%)
금강 유역	71,456,302	125,760,890	75,752,474	97,604,500	129,406,688	107,131,138
(과거대비 증감)		(+76%)	(+6%)	(+37%)	(+81%)	(+50%)
영산섬진강 유역	541,014,891	1,025,304,331	579,094,807	723,260,750	1,399,011,313	931,667,800
(과거대비 증감)		(+90%)	(+7%)	(+34%)	(+159%)	(+72%)
5대강 종합	861,874,590	1,736,195,826	870,880,352	1,192,032,076	1,988,179,855	1,446,822,027
(과거대비 증감)		(+101%)	(+1%)	(+38%)	(+131%)	(+68%)

④ 한반도 전망결과 종합

한반도 유역의 물수급 전망 결과를 전체 미래구간과, 모든 GCM 시나리오에 대해서 요약 정리하였다. 그 결과는 Table 3.4.10과 같으며, A1B 시나리오에서 상대적으로 큰 물부족이 산정 되었으며 이는 A1B의 모의 유량값이 가장 작았기 때문으로 생각된다.

대권역별 전망결과를 분석하면 영산·섬진강 유역에서 다른 대권역과 비교하여 물부족의 절대적인 양이 비해 크다. 이는 영산·섬진강 유역은 5대강권역 대비 물수급이 가장 취약한 대권역으로, 과거부터 가장 많은 물부족이 발생한 지역이기 때문으로, 시나리오에 따른 평균 물부족량 증감 결과는 유사하지만 절대적인 부족양에 있어서 다른 권역에 비해 약 5-10배에 이른다. 이에 반해 낙동강 유역의 물수급이 원활하던 지역으로 물부족이 거의 발생하지 않았던 유역이다. 따라서 기후변화에 따라 물부족이 심화될 경우 물부족의 절대적인 양은 많지 않지만, 다른 유역에 비하여 그 취약도가 높다고 볼수 있다.

Table 3.4.10 한반도 물부족량 전망결과 종합

(a) 배출 시나리오 기반

배출시나리오	전망구분	미래 전망구간		
		2020s	2050s	2080s
A2 시나리오	평균 물부족량 (㎥/년)	289,958,343	389,131,507	423,187,138
	과거대비 증감 (%)	(+10%)	(+43%)	(+61%)
	최대 물부족량 (㎥/년)	936,465,422	1,235,323,144	1,458,118,988
	과거대비 증감 (%)	(+9%)	(+43%)	(+69%)
A1B 시나리오	평균 물부족량 (㎥/년)	328,800,542	491,319,807	516,513,671
	과거대비 증감 (%)	(+25%)	(+87%)	(+97%)
	최대 물부족량 (㎥/년)	1,029,004,963	1,388,334,420	1,532,404,838
	과거대비 증감 (%)	(+19%)	(+61%)	(+78%)
B1 시나리오	평균 물부족량 (㎥/년)	347,780,678	389,131,507	410,369,705
	과거대비 증감 (%)	(+32%)	(+48%)	(+56%)
	최대 물부족량 (㎥/년)	1,090,868,248	1,255,292,233	1,446,822,027
	과거대비 증감 (%)	(+27%)	(+46%)	(+68%)

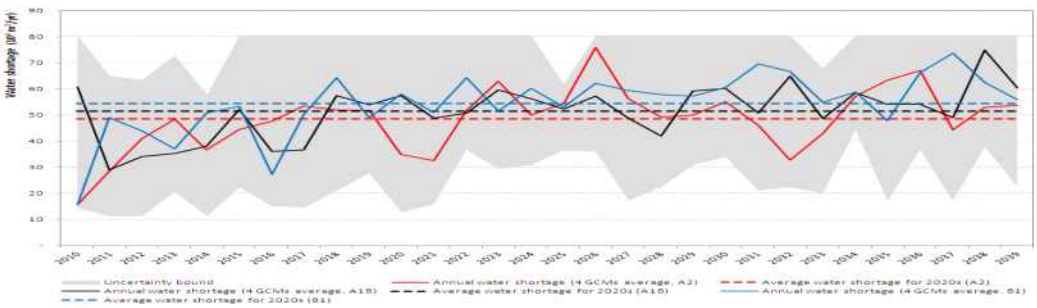
(b) 대권역 기반

	Historic (1967-2003)	평균 물부족량	Historic (1967-2003)	최대 물부족량
한강 유역	41,979,592	61,513,251	122,138,312	171,268,830
(과거대비 증감)		(+ 47%)		(+ 40%)
낙동강 유역	29,528,506	52,777,381	127,265,085	178,717,131
(과거대비 증감)		(+ 79%)		(+40%)
금강 유역	9,936,113	31,438,648	71,456,302	103,053,934
(과거대비 증감)		(+ 216%)		(+ 44%)
영산섬진강 유역	181,325,000	251,352,274	541,014,891	810,586,137
(과거대비 증감)		(+ 39%)		(+ 50%)
5대강 종합	262,769,211	398,465,878	861,874,590	1,263,626,031
(과거대비 증감)		(+ 52%)		(+ 47%)

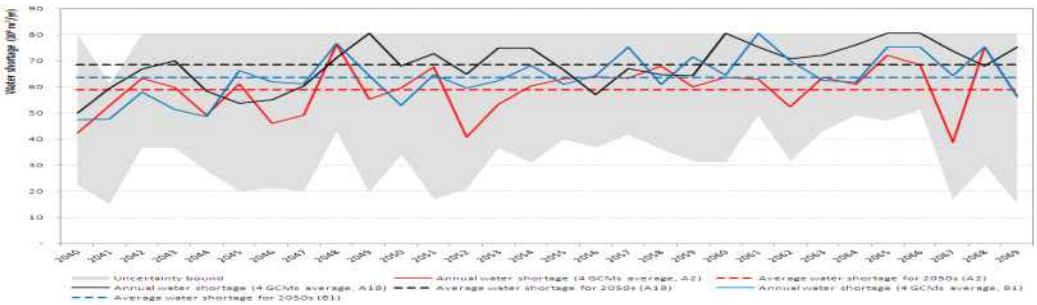
(나) 대권역별 전망 분석

① 한강 유역

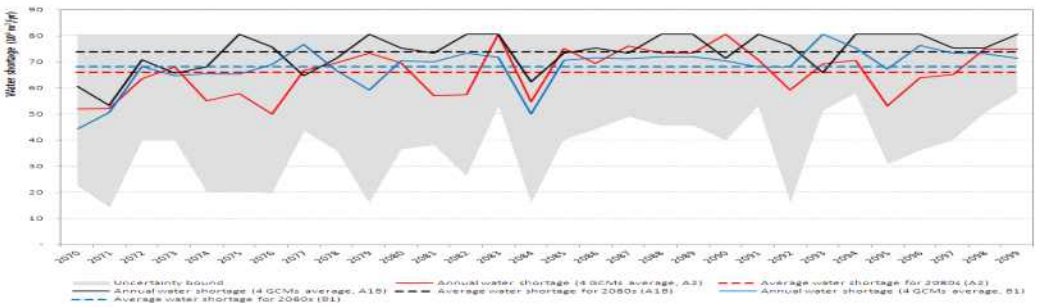
한강 유역 중권역별 평균 물부족량 전망결과를 Fig. 3.4.4에 나타내었다. 한강 유역 시나리오 별로 살펴보면 A1B 시나리오의 평균 물부족량 발생이 가장 크며 그 다음으로 B1, A2 시나리오 순으로 나타났다. 또한 A1B 시나리오에서는 유역 1007, 1010, 1016, 그리고 1019에서 평균 물부족량이 많은 것으로 전망되었다. 2020s 한강유역 평균 물부족 전망을 살펴보면, 3개의 배출 시나리오 모두에서 물부족이 증가하는 경향이 있다. 2050s에 접어들어 A1B 시나리오의 물부족 현상이 두드러지고, 2080s에는 A2와 B1 시나리오의 차이는 점차 감소하였다. 2020s에서 가장 많은 평균 물부족이 발생했던 B1 시나리오의 증감은 상대적으로 작아서, 2050s에는 2번째로 많은 물부족, 2080s에는 A2 시나리오의 유사한 양의 물부족이 발생하였다.



(a) 2020s



(b) 2050s

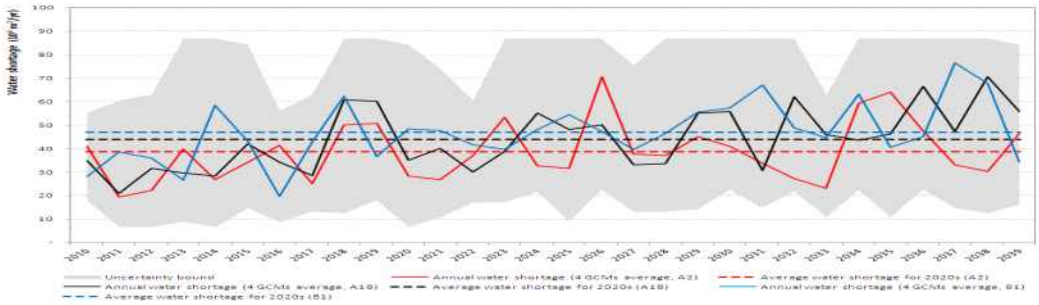


(c) 2080s

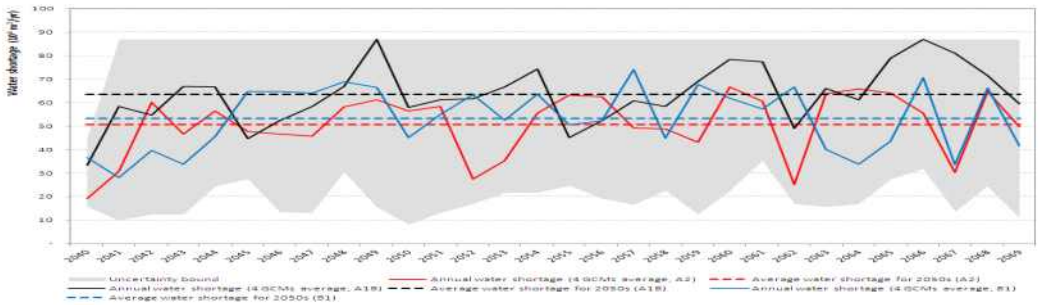
Fig. 3.4.4 한강 유역 평균 물부족 전망 결과

② 낙동강 유역

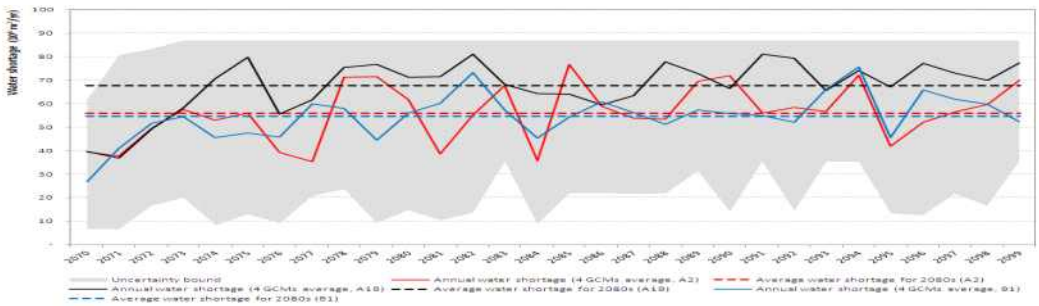
낙동강 유역에서의 평균 물부족량 전망결과를 Fig. 3.4.5에 나타내었다. 2020s에 물부족량을 살펴보면 3개의 배출 시나리오 모두에서 물부족이 증가하는 경향이 있으며, 중권역에 따른 물부족량의 변동 추이는 GCM 별로 큰 차이를 보이지만, 낙동강 유역 평균 물부족 값은 3개 배출 시나리오에서 유사하다. 2050s 에 접어들어 A1B 시나리오의 물부족 현상이 두드러지고, 2080s 으로 갈수록 A2와 B1 시나리오의 차이는 점차 감소하는 반면, 2020s에서는 2번째로 많은 평균 물부족이 발생했던 A1B 시나리오의 증감은 상대적으로 커서, 2050s에는 1번째로 많은 물부족이 발생하고, 2080s에는 다른 두 시나리오 비교하여 현저하게 평균 물부족 발생이 심화되었다.



(a) 2020s



(b) 2050s

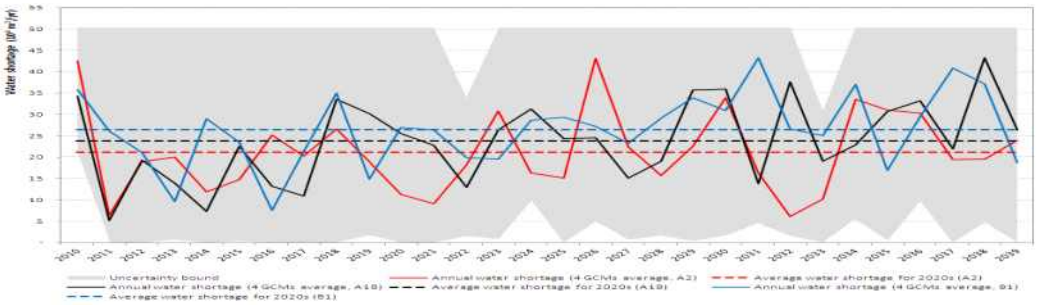


(c) 2080s

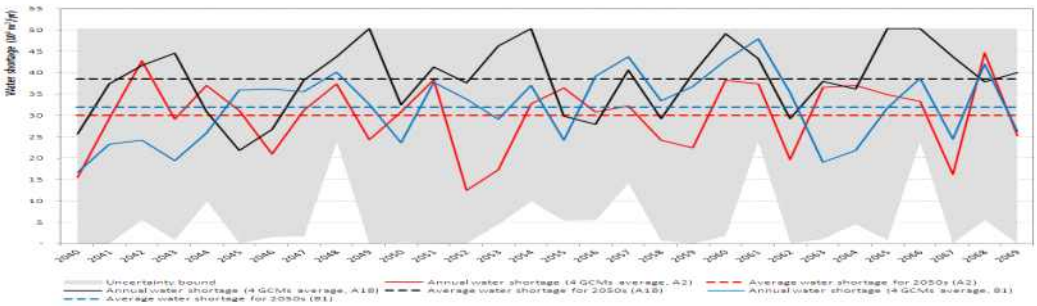
Fig. 3.4.5 낙동강 유역 평균 물부족 전망 결과

③ 금강 유역

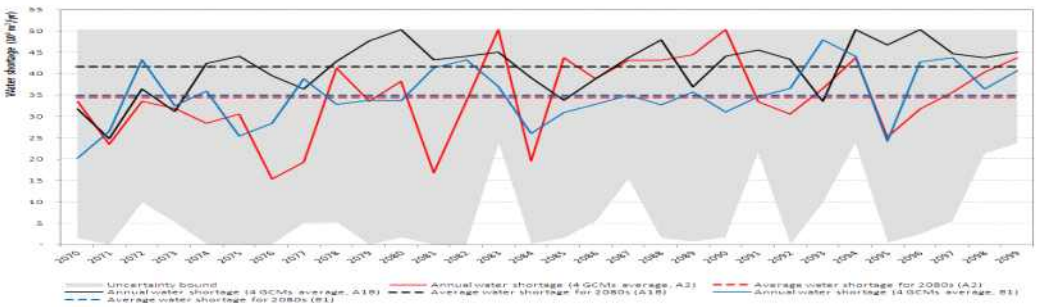
금강 유역 중권역별 이수기 유량, 평균 물부족량 전망결과를 Fig. 3.4.6에 표현하였다. 2020s의 금강 유역 평균 물부족 전망을 살펴보면 물부족은 3개의 시나리오 모두에서 물부족이 증가하는 경향이 있고, 2020s의 금강 유역 평균 물부족량은 3개 시나리오에서 유사하다. 2050s에 접어들어 A1B 시나리오의 물부족 현상이 두드러지고, 2080s 으로 갈수록 A2와 B1 시나리오의 차이는 점차 감소하는 반면, 2020s 2번째로 많은 평균 물부족이 발생했던 A1B 시나리오의 증감은 상대적으로 커서, 2050s 에는 1번째로 많은 물부족이 발생하고, 2080s에는 다른 두 시나리오 비교하여 현저하게 평균 물부족 발생이 심화되었다. 하지만 다른 대권역에 비해 GCM에 따른 물부족량의 변동성이 작아, 다른 대권역에 비해 물수급이 안정적일 것으로 전망된다. 또한 그 절대적인 물부족 양도 작아 상대적으로 물수급의 안정성이 높은 지역이다.



(a) 2020s



(b) 2050s

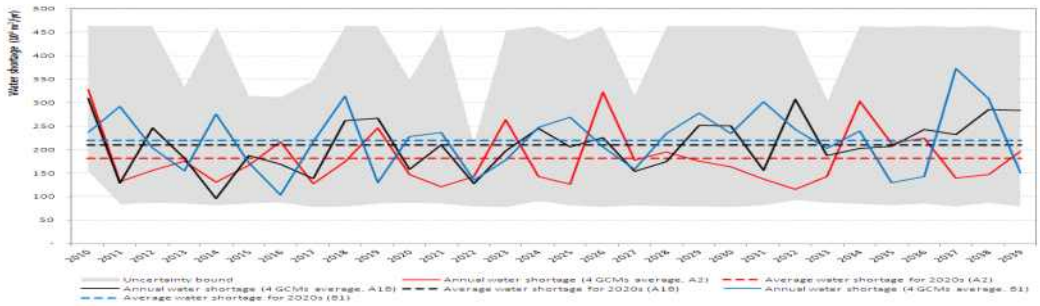


(c) 2080s

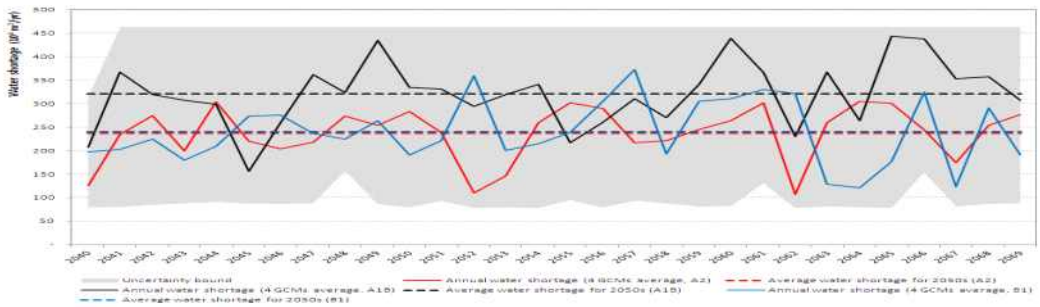
Fig. 3.4.6 금강 유역 평균 물부족 전망 결과

④ 영산・섬진강 유역

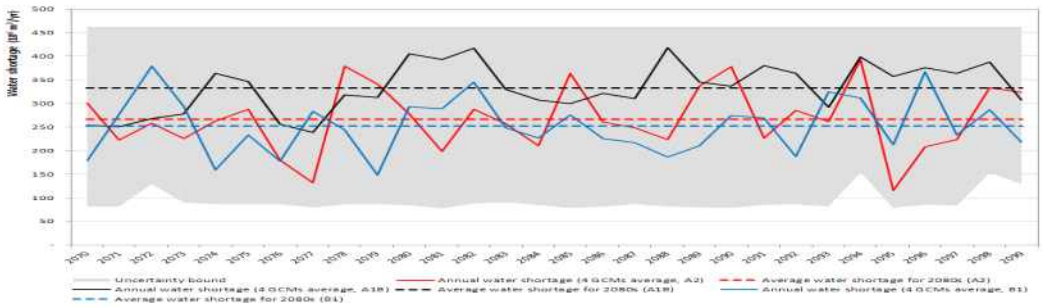
영산・섬진강 유역 중권역별 이수기 평균 물부족량 전망결과를 Fig. 3.4.7에 나타내었다. 영산・섬진강 유역은 예로부터 물부족 발생이 심각한 유역이다. 2020s의 영산・섬진강 유역 평균 물부족 전망을 살펴보면 상대적으로 다른 대권역에 비해서 큰 것을 알 수 있다. 2050s, 2080s 미래 구간으로 변화할수록 물 부족량의 증가율은 약 10% 내외 차이로 다른 대권역의 결과와 유사하지만, 예초부터 발생했던 물부족량이 크기 때문에, 절대적인 물부족량은 다른 권역에 비해 클 것으로 예상된다. 시나리오 별로 살펴 보면 약 5천만 ㎥/년 평균 물부족 증가가 발생하였으며, A1B 시나리오에서는 그 증가 폭이 1억 ㎥/년을 넘는 것으로 전망 되었다. 따라서 영산・섬진강 유역은 상대적으로 물부족의 절대적인 발생량이 크기 때문에 집중적이고 효율적인 물관리가 필요하며, 비구조적 대책 뿐만 아니라 댐 건설 같은 구조적 정책도 병행 되어야 원활한 물수급이 가능 할 것으로 전망된다.



(a) 2020s



(b) 2050s



(c) 2080s

Fig. 3.4.7 영산・섬진강 유역 평균 물부족 전망 결과

⑤ 한반도 물부족량 전망지도

산정된 미래 평균 물부족량값을 이용하여 물부족 발생의 공간적 분포를 제시하기 위해 소유역별 평균 물부족량과 과거대비 변화량을 Fig. 3.4.8-9에 각각 나타내었다. 한반도 전체적으로 남부 지역의 물부족이 상류지역에 비해 크게 전망되었으며, 지역적으로는 한강 경안천 유역과 금강 용담댐 유역이 물부족이 심한 중권역으로 나타났다. 이는 수도권 지역에 물수요가 집중되는 현상은 물론 비홍수기 유량이 다른 지역에 비해 큰 폭으로 줄어들었기 때문이다. 또한 금강유역에 경우 농업용수에 대한 수요가 많아 물부족이 빈번하게 발생하는 지역이다.

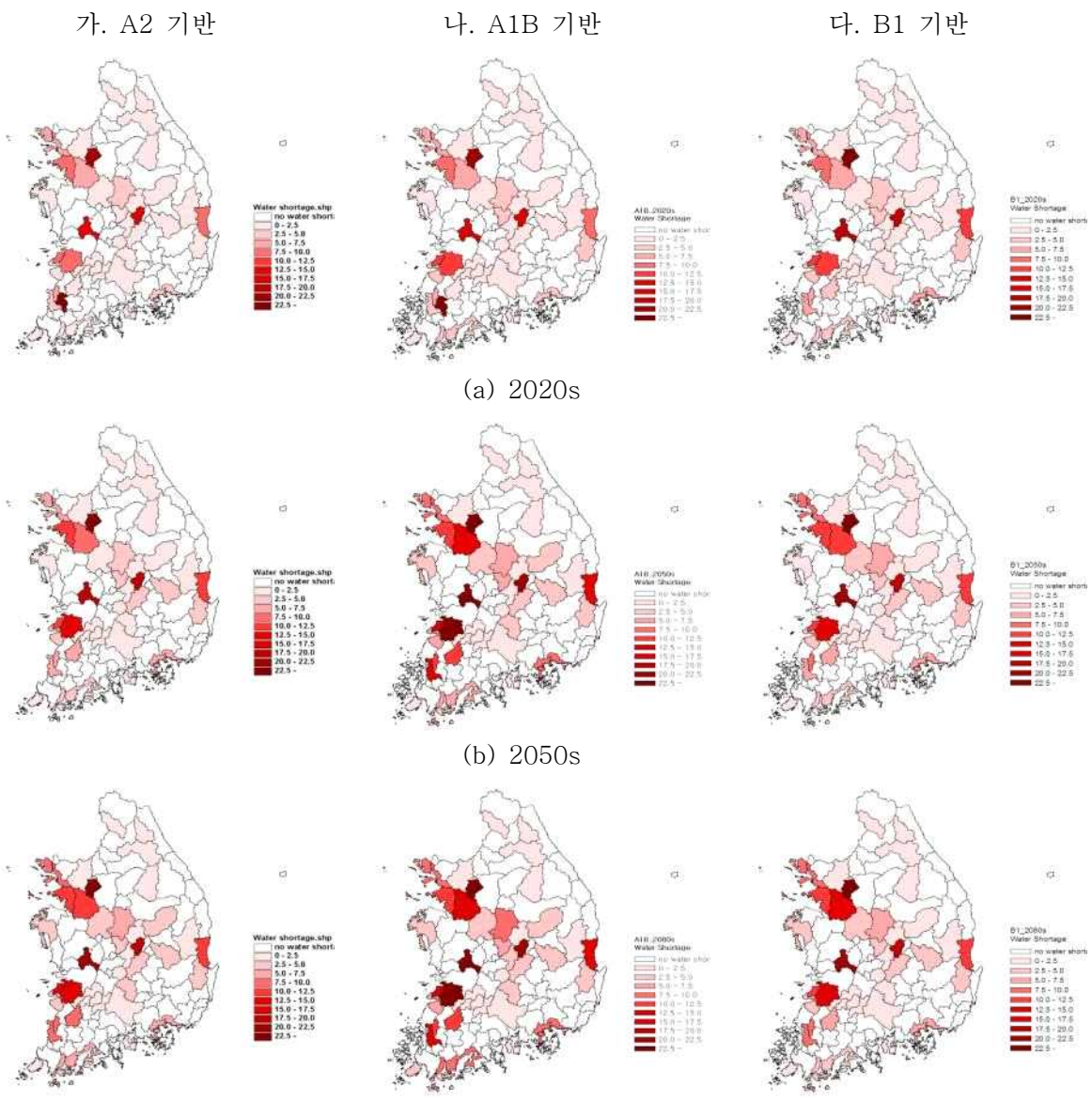
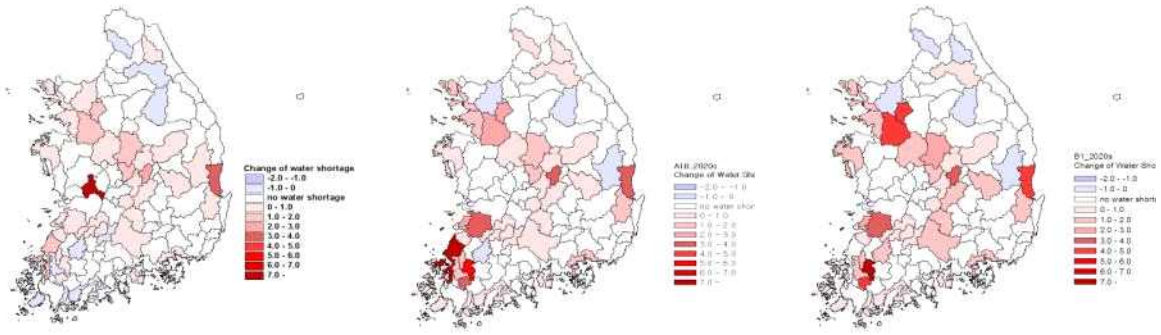
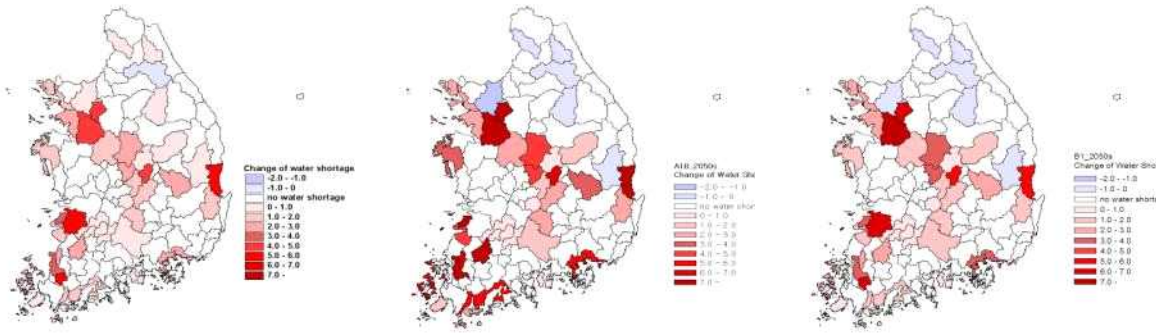


Fig. 3.4.8 한반도 평균 물부족량 전망지도

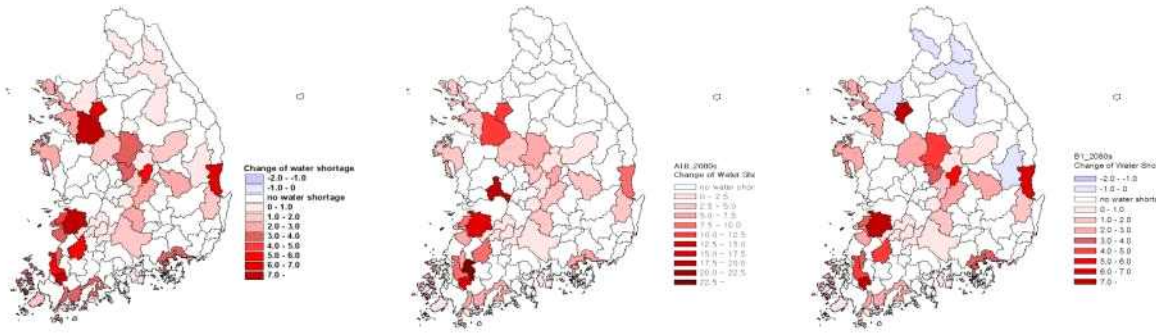
가. A2 기반　　나. A1B 기반　　다. B1 기반



(a) 2020s



(b) 2050s



(c) 2080s

Fig. 3.4.9 한반도 평균 물부족량 전망 과거대비 증감

(다) 기존 연구결과와의 비교

미래에 대한 전망결과는 실측 자료와 같은 객관적인 자료와의 검증이 불가능하며, 특히 물부족량에 대해서는 실제로 구축된 자료가 거의 전무하기 때문에 전망결과를 전적으로 신뢰하기는 어렵다. 하지만 향후 물부족을 전망하는 과정에서 기후변화의 영향을 고려해야함은 자명하기 때문에 본 연구의 전망 결과를 주목해야 한다. 따라서 본 연구에서는 기존의 기후변화 연구 방법론의 미래 전망 결과와 본 연구에서 제안한 미래 전망 결과를 기왕 자료와 비교하여 분석하였다. 기존 기후변화의 연구 방법을 적용하기 위하여, 본 연구에서 적용한 4개 GCM의 유량 시나리오를 한강 유역에서의 2020s 전망구간에 대하여 K-WEAP에 직접 입력을 통한 물부족량을 모의 하였으며, 과거 대비 물부족량 변화를 비교하였다. GCM 미래 유량 시나리오를 직접 입력하여 산정한 물 부족량을 아래 Fig. 3.4.10과 Table 3.4.11에 나타내었다.

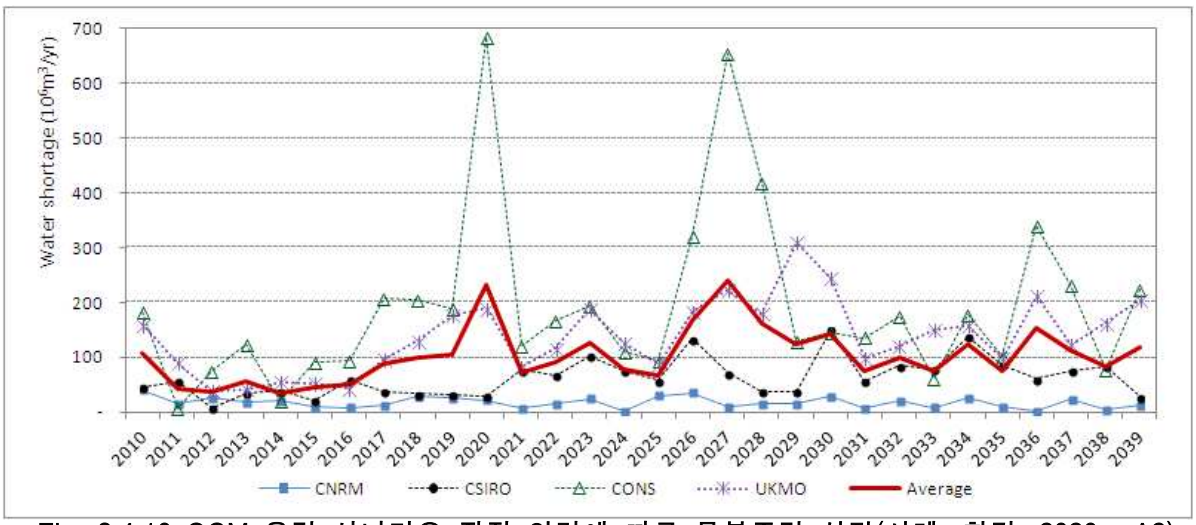


Fig. 3.4.10 GCM 유량 시나리오 직접 입력에 따른 물부족량 산정(사례: 한강, 2020s, A2)

Table 3.4.11 GCM 유량 시나리오 직접 입력에 따른 물부족량 산정 결과 (사례: 한강, A2)

	historic (1967-2003)	GCMs 직접입력 (한강유역, 2020s)				
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	Average
평균 물부족량 (m3/년)	41,979,592	17,384,925 (-58.6%)	63,415,750 (51.2%)	192,212,621 (357.9%)	137,612,789 (227.8%)	102,665,521 (144.6%)
최대 물부족량 (m3/년)	122,138,312	40,418,725 (-66.9%)	150,617,624 (23.3%)	684,489,813 (460.4%)	308,969,166 (153.0%)	296,123,832 (142.5%)

Table 3.4.11을 보면 GCM 유량자료를 K-WEAP에 직접 입력하여 산정한 물부족량 전망이 본 연구에서 제안한 방법보다 훨씬 과대 모의됨으로서 과거보다 상당한 양의 물부족이 증가할 것이라고 전망하고 있다. 특히, 사용된 GCM에 따라서 물부족 모의값이 상당한 차이를 보이는데, 이는 다수의 GCM 중 선택적 GCM 활용을 통한 미래 기후변화 영향 전망결과 불확실성 단적으로 보여주고 있는 것이다.

아래 Table 3.4.12는 기존 기후변화 물수급 연구방법의 결과와 본 연구의 결과를 비교하였다. 결과를 보면 GCM 유량 시나리오를 직접 입력하여 모의한 물부족량 결과가 본 연구의 결과보다 상당히 과대 모의 된다는걸 알 수 있는데, 이는 입력자료의 급격한 변화에서 기인했다고 볼 수 있다. GCM 시나리오는 공간 및 시간에 대한 스케일상세화를 거치면서 많은 불확실성이 가해질 수 있는데 이러한 권역별 반순단위의 유량자료를 직접 입력하여 모의하는 과정에서 그 불확실성이 반영될 수 있기 때문이다. 이러한 불확실성에 대한 정량화는 본 단위과제의 범위를 벗어나므로 정량화된 분석 결과를 제시할 순 없지만, 현재의 기술 수준에서 시공간적으로 상세화된 GCM 시나리오를 직접 입력하여 수자원시스템 모의를 하는 것은 아직 신뢰할 수 있는 단계라고 말하기 어렵다.

Table 3.4.12 기존 연구 방법론과 본 방법론의 물부족량 전망 결과 비교(사례: 한강, A2)

	historic (1967-2003)	GCM 전망 (2020s, A2)		비고
		raw-simulation (기존 연구)	K-nn 가중평균 (본 연구)	
평균 물부족량 (m3/년)	41,979,592	102,665,521 (+144%)	48,470,602 (+15%)	raw-simulation이 약 130% 과대 모의
최대 물부족량 (m3/년)	122,138,312	296,123,832 (+142%)	152,447,284 (+25%)	raw-simulation이 약 118% 과대 모의

위 결과를 Fig. 3.4.11에 Box-Whisker plot으로 나타냈다. raw-simulation의 미래 불부족량 전망 결과가 과거자료 기반 전망치 보다 상당히 과대 모의되고 있음을 보여주며, K-nn 가중평균법에 의한 전망 결과와도 큰 차이를 보여주었다.

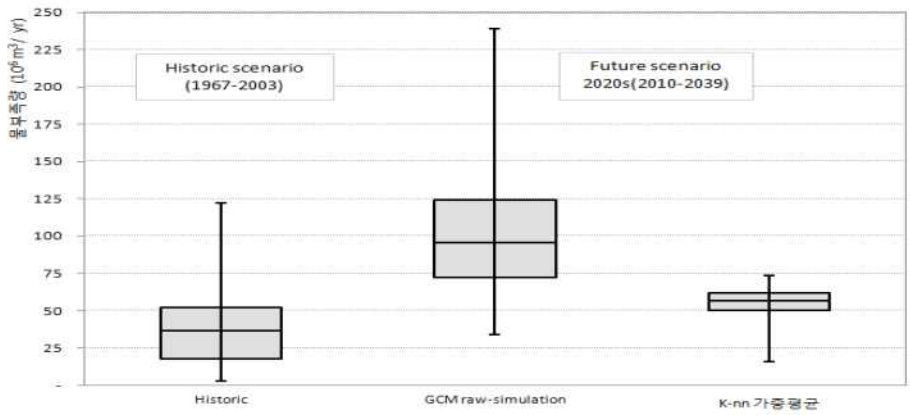


Fig. 3.4.11 기존 기후변화 연구 방법론과 본 연구 방법론의 물부족량 전망 결과 Box-Whisker plot (2020s, 한강유역, A2)

(라) 기존 연구결과와의 비교 4대강 사업을 반영한 전망결과 비교

4대강 정비 사업은 2008년 하반기부터 이명박 정부가 추진하고 있는 한국형 녹색 뉴딜 사업이다. 한강, 낙동강, 금강, 영산강 등에 총 14조 원을 투입해 노후 제방 보강과 하천 생태계 복원, 중소 규모 댐 및 홍수 조절지 건설, 하천 주변 자전거길 조성, 친환경 보설치 등을 추진하는 계획으로 이루어져 있다. 2012년 완공된 4대강 산업은 준설과 재방복원 등을 통하여 수계가 가지고 있는 저류능력을 향상 시키고 물수급 능력을 크게 개선하였다는 평가를 받고 있다. 하지만 4대강 사업을 건설효과를 반영하여 본 연구를 진행하기에는 연구 종료시점에 맞추어 4대강 사업이 완공되어 모의를 위한 시간의 부족과, 통계적 분석을 위한 신뢰도 높은 과거 자료 및 결과값의 검정 및 보정을 위한 자료가 제한적이었다. 따라서 본 연구에서는 수자원장기종합계획(2011 보완계획) 수립에 참여한 한국건설기술연구원으로부터 4대강 중권역별 TANK 모형으로 모의한 과거 유출량(1967-2007년, 41개년)과 새로이 건설된 보를 반영하여 구축된 네트워크를 적용하여 모의된 2020년 물부족량 모의값을 제공받았다. 한국건설기술연구원에서는 수자원장기종합계획(2011 보완계획)을 위해 기존의 과거 유출자료와 더불어 신규 건설된 보에 따른 저수용량을 추가하여 물수급 분석을 실시하였다(Table 3.4.13 참조).

Table 3.4.13 4대강에 신규 건설된 보와 개수

4대강 유역	보	개수
한강 유역	이포보, 여주보, 감천보	3
낙동강 유역	상주보, 낙단보, 구미보, 칠곡보, 감정보, 달성보, 합천보, 하만보	8
금강유역	금산보, 금강보, 부여보	3
영산섬진강 유역	송천보, 죽산보	2

본 연구에서는 제공받은 자료를 바탕으로 A2 배출 시나리오에 기반한 GCM 유량변화 시나리오를 이용하여 기후변화를 고려한 물수급 전망기법을 적용하였고, 4대강 사업을 반영한 2020s의 평균 물부족 전망결과를 Table 3.4.14에 나타내었으며, 4대강 살리기 사업을 반영한 물수급 모의를 바탕으로 미래 물부족을 전망한 결과 기본 한반도 평균 물부족량 전망결과에 비해 약 53.6% 감소된 전망을 보였다.

Table 3.4.14 4대강 사업에 따른 한반도 물부족량 전망결과 비교

	2020s 평균 물부족 전망 (106 m3)			
	4대강 사업 전 전망		4대강 사업 후 전망 (보 건설 효과 반영)	
	수장기 2020 (2006 개정)	기후변화 연구단 물수급전망	수장기 2020 (2010 개정)	기후변화 연구단 물수급전망
한강 유역	41.9	48.5	7.9	10.3
낙동강 유역	29.5	38.6	12.5	18.5
금강 유역	9.9	21.2	3.2	6.2
영산섬진강 유역	181.3	181.7	96.9	99.4
5대강 종합	262.8	289.9	120.6	134.4
증감율(%)	262.8	+ 10%		-49%

4대강 사업 건설 효과를 고려하지 않은 수자원장기종합계획 2006년 보안계획과 4대강 사업 건설 효과를 반영한 2011년 보완계획에서 제시하는 과거 이수기 유량의 변동은 약 1.6%로 그 변화율이 미비하였으나, K-WEAP 모의를 통한 2020년 한반도 물부족량 전망값은 약 55%가 감소한 134.4백만 ㎥/년으로 약 155.5백만 ㎥/년의 차이가 있었다. 본 연구는 GCM 모의 미래 유량 시나리오와 과거 유량 시나리오를 비교하여, 최근린 시나리오를 추출한 후 이에 대응하는 물부족량에 대한 각기 다른 가중값을 부여하는 것이다. 새로이 제공받은 K-WEAP 물부족량 모의값의 경우 K-WEAP에 과거와 같은 유량이 적용되어도 보 건설로 인한 저수량 확보가 미래 물공급량의 증가로 이어져 기존의 물부족량 전망결과와 비교하여 물부족량이 매우 과소 전망된 것으로 사료된다.

마. 요약 및 결론

본 연구에서는 기후변화를 고려한 물수급 전망을 위해 기존의 연구방법론, GCM 모의값을 물수급 모형에 직접 입력하는 방법의 전망결과의 불확실성과 비연속성을 인지하고 이를 개선하고자 GCM 미래 유량 시나리오를 물수급 모형에 직접 입력하는 대신 과거 유량 시나리오의 가중값(재현확률)을 부여하는 새로운 물수급 전망기법을 제안하였다.

본 개선방법론을 통해 5대강 대권역(한강, 낙동강, 금강, 영산·섬진강)에 대한 미래 평균 물부족량과 최대 물부족량을 산정하였으며 주요 결과사항은 다음과 같다.

(1) 시간 변동에 따른 전망 추이

미래 한반도 물부족량은 먼 미래(2080s, 2070-2099년)로 갈수록 지속적으로 심화될 것으로 전망되었으며, 평균 물부족량 증가율은 과거대비(HS), 2020s에는 10-32%, 2020s에는 43-87%, 2080s에는 56-97% 보였다. 최대 물부족량 증가율은 과거대비(HS), 2020s에는 9-32%, 2020s에는 43-61%, 2080s에는 56-78% 보였다. 따라서 기후변화에 따른 물부족 증가에 대비하기 위해서, 다가오는 2020s의 물부족 해결을 위한 단기적인 대책과 함께, 증가하는 물수급 불안정에 대비하여 장기적인 대책 또한 마련해야 할 것이다.

(2) 공간 범위에 따른 전망 추이

본 개선 방법을 통해 5대강 유역의 물부족과 최대 물부족을 전망하였다. 대권역 별로 살펴보면, 한강 유역과, 낙동강 유역에서 각각 90년 평균 6천만 ㎥/년의 평균 물부족과, 5천만 ㎥/년 평균 물부족이 발생하였다. 관측결과 안정적인 물수급이 가능했던 금강 유역의 경우 약 3천만 ㎥/년 평균 물부족 발생이 모의 되었으며, 과거부터 안정적인 물수급이 어려웠던 영산·섬진강의 경우 다른 유역의 약 7배에 이르는 2억 6천만 ㎥/년의 평균 물부족이 모의 되었다. 이는 다른 유역의 모든 물부족량을 합친 것 보다 많은 수준으로, 영산·섬진강유약에 구조적 비구조적인 물수급 대책이 필요할 것이다.

최대 물부족 전망에 경우 90년(2010-2099) 최대 물부족량 전망값이 한강유역 2억 ㎥/년, 낙동강 2.2억 ㎥/년, 금강 1.3억 ㎥/년 에 비하여, 영산·섬진강 경우 약 10억 ㎥/년 육박하여, 기후변화에 따른 물수급 취약지대인 것으로 모의 되었다.

(3) 기후변화 시나리오(GCM 및 배출시나리오)에 따른 전망 추이

본 연구에서는 A2, B1, A1B 3가지 배출시나리오와 CNRM, CONS, CSIRO, UKMO 4가지 GCM을 사용하여 연구를 진행하였다. 물부족량과 최대 물부족의 경우, GCM별로 값의 차이가 커서 미래의 한 가지 GCM만 확정적으로 사용하기에는 미래 전망값의 불확실성이 크다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 4개의 GCM의 평균값을 비교하여 사용하였고, 3개의 배출시나리오의 경우, 그 값이 B1, A1B, A2 순으로 모의 되었는데, 이는 세종대에서 계산한 이수기에 강수량 모의 패턴, TANK 모형으로 인한 유출량 변화의 모의 형태와 유사함을 확인할 수 있었다. 이는 개선된 방법론이 GCM이 가지고 있는 강수정보를 잘 보존하여 물부족량 산정에 있어 신뢰도를 높인다고 할 수 있다.

(4) 기타

개선방법론은 물수급 모형을 사용하지 않고 과거 유량 시나리오로부터 가중값을 사용하여 미래 물부족 전망기법을 개발하였다. 따라서 본 연구는 미래의 물 수요의 변화와 하천정비 사업으로 인한 물 이수 능력 증가와 같이 미래 변동 시나리오의 비정상성의 고려가 불가능 하다는 단점이 있다. 또한, 통계적인 방법으로 물부족을 전망한 결과, GCM을 직접 사용하지 않았지만, GCM 자료의 사용으로 GCM 자료가 가진 이상치의 통계적 특성이 보존되어 결과값에 영향을 미쳤다. 따라서 본 연구에서 Quantileing Mapping을 통해 GCM을 보정하였지만, 추후 연구에서는 이상 자료에 대한 보정방법의 개선을 통해 전망 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 생각된다.

3. 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석

가. 서 론

(1) 연구 배경

2005년 8월, 중심기압은 902hpa이며 최대풍속 78m/s, 최대강우량 457mm를 동반한 허리케인 카트리나가 미국 뉴올리언스에 상륙하면서 지역 제방들이 순차적으로 붕괴되었고 시는 7.5m 깊이로 수몰되었다. 이로 인해 약 12,000명의 인명피해와 100조원이상의 재산피해가 발생했으며, 공장의 부수 물질 유출 등으로 추가적으로 피해를 입었다. 카트리나는 2002년 태풍 루사와 비교하였을 때 풍속은 강했으나, 루사의 강우량인 870mm보다 적은 비가 내리고 중심기압도 낮았지만 미국 자연재해 사상 최대의 피해를 기록했다. 이런 결과를 초래한 원인으로는 무분별한 개발로 인해 뉴올리언스 인근 해안환경의 심각한 파괴와 토사의 흐름 정체, 지구 온난화의 영향으로 70년대에 비해 3배정도 증가한 허리케인 강도 등이 있다. 또한 뉴올리언스는 도시 자체의 지반 침하가 진행되고 있었으며, 제방 설계도 3등급 허리케인에 대해 시공되어있어 시에서는 정부에 보수보강 요청을 지속적으로 하고 있었다. 하지만 예산 문제 등으로 적시에 보수보강을 하지 못했고 그 결과는 참담했다. 카트리나 경우 외에도 예측하지 못한 강도 높은 기후로 인해 발생하는 피해 사례가 많다. 우리나라의 경우 1996년 집중호우로 인한 홍수량의 증가로 연천댐체 일부가 파괴되어 주변지역이 침수되는 일이 있었고 2002년 8월 낙동강 우역 장기홍수, 2002년 태풍 루사 및 2003년 태풍 매미 등에 의한 홍수로 사회적 경제적으로 큰 피해를 입었다. 2011년 8월 역시 전년 통계와 판이한 강수량, 연일 기록을 깨는 장기 호우, 국지성 집중호우 등으로 전국 곳곳이 물에 잠겼고 많은 재산피해와 인명피해를 겪었다. 급작스런 기후로 인해 발생하는 피해는 현대에 와서 그 빈도가 증가하고 있으며 이런 피해가 발생하는 가장 큰 이유 중 하나는 이전보다 그 발생 빈도와 강도가 증가한 기후변화로 판단된다. 지난 100년간 한반도는 세계 평균 기온상승 온도인 0.6도보다 훨씬 높은 1.5도의 온도상승을 기록했으며 이는 하루라도 빠른 시급한 대책 마련의 필요성을 시사한다.

(2) 연구 목적

지구 온난화에 따른 중요한 영향으로 강우량 및 홍수 수위의 불확실성 증가와 수문증가 등을 꼽을 수 있으며, 이러한 변화는 기존 수공 구조물의 안정성 및 기능성을 약화시킬 수 있다. 따라서 기후 변화에 따른 수위 증가 및 강우량 불확실성 증가 등에 따라 구조물의 안정성 및 기능성이 얼마나 약화되었는지를 평가할 수 있어야 하며, 또한 그 결과를 이용하여 보수·보강 대책이 수립되어야 한다. 본 연구에서 신뢰성 해석에 기반을 둔 구조물의 취약도 곡선 산출을 위해 불확실한 기후 변화나 외력 등의 확률적 특성, 재료물성의 변동특성, 시공오차에 의한 치수의 변동특성, 설계규준식의 불확실성 등을 종합적으로 고려하여 시설물이 기후변화에 따른 외력 증감에 의해 발생할 수 있는 각종 파손모드의 발생 확률을 산정하여 취약도를 평가하는데 초점을 두고 있다. 도출한 취약도 곡선은 이상호우 발생 시 구조물의 거동을 간략하고 신속하게 예측할 수 있으며 새로운 구조물 설계 시 시행착오 횟수감소에 기여할 수 있고 나아가 지역의 특성을 나타냄으로써 지역

최적화 설계가 가능하다. 또한 지진하중에 집중되어 사용되는 취약도 곡선 연구를 새로운 하중영역에 접목시킴으로써 향후 취약도 곡선 이론의 적용 다양화에 이바지할 것이다.

(3) 주요 연구내용 및 연구 수행 절차

본 연구에서는 신뢰성 해석을 이용하여 기후변화에 기인한 강우량 또는 홍수 예측의 불확실성 증가와 수위 상승 등에 영향을 받는 댐, 제방 등의 수공 구조물의 안정성 및 기능성을 정략적으로 평가하기 위한 위험도 평가를 수행하였다. 이는 기후변화에 따른 영향에도 이전과 동일한 안정성 및 기능성 회복을 위한 대처방안 마련과 보수·보강 방안 제시 및 새로운 구조물 설계 시 관련 구조물의 설계변수 강화 정도 판단을 위한 기초 지표로 이용될 수 있을 것으로 기대한다. 이처럼 기후변화의 수문 영향에 따른 한강유역 구조물의 정량적 위험도 분석이라는 최종 목표 달성을 위한 연차별 주요 연구 내용은 다음과 같다. 1차년도에는 기후변화에 의한 수문 상승, 강수량 및 홍수 수위 등의 불확실성 증가 등의 변화에 따른 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석, 시설물 위험도 평가 등과 관련한 선진국의 연구사례를 조사하며, 이를 토대로 국내 상황에 적합한 연구방향을 제시하였다. 2차년도는 기상 변화와 관련된 수공 구조물의 주요 설계인자를 분석 및 도출하고, 이를 바탕으로 기상변화 관련 설계 인자에 대한 수공 구조물의 안전 민감도를 산출하였으며, 3차년도는 다양한 기후 변화 모형 변화에 따른 주요 수자원 시설물의 안전도 변화를 분석하고, 기후 변화에 따른 주요 수자원 시설물의 취약도 곡선을 산출하였다. 이와 더불어 기후 변화 불확실성을 고려한 한강유역 주요 수자원 시설물의 안전도 변화 분석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 이상 기후에 대비하여 기존 댐 및 제방 등 수공 구조물에 대한 안전 평가 및 보강 방안 등을 제안하여 기상 변화에 대비한 시설물 설계 기준 개선 방안의 적용 가능안을 제시하였다.

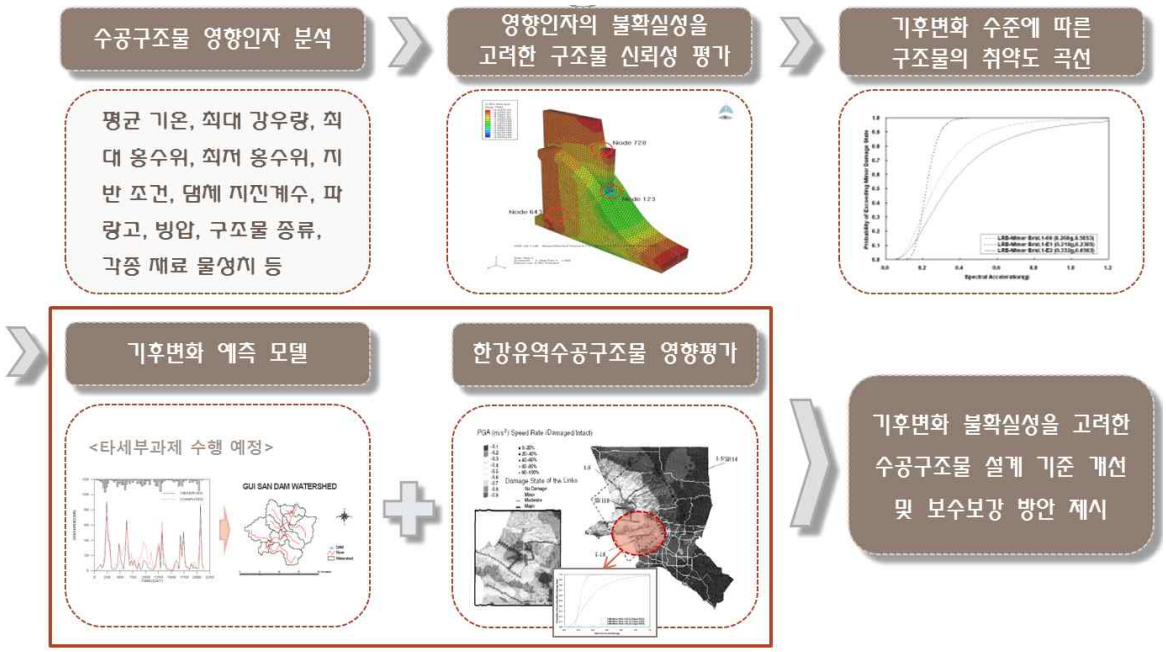


Fig. 3.4.12 기후변화에 의한 수공구조물 영향평가 및 시설물 영향분석 연구수행 절차

(4) 국내 수공구조물 현황

하천시설물, 수리구조물 등으로 불리는 수공구조물은 유역을 포함하여 하천에 대한 치수, 이수, 하천에 관한 환경보전의 기능을 원활히 수행하기 위해 건설되는 제반시설과 그 구조물을 총칭하는 것으로서, 크게 하천부속물과 기타시설물 그리고 하천 내 점용시설물로 구분할 수 있다. 이는 하천법과 하천설계기준에 따라 다르게 구분되며, 각 기준별 수공구조물의 분류는 Table 3.4.15에 나타내었다.

Table 3.4.15 기준별 수공구조물의 분류

기 준	시 설 물	개 수
하천법	댐, 하굿둑, 제방, 호안, 수제, 보 갑문, 수문, 수로터널, 운하, 관측시설, 점용시설물	총 13개
하천설계기준	제방, 호안, 수제, 하상유지시설, 보, 수문, 취수시설, 내수배제시설, 수로터널, 주운시설, 하구시설, 사방시설, 기타시설물	총 13개

Table 3.4.15와 같이 수공구조물은 댐에서 수로나 하구시설까지 광범위하나 기후변화에 의한 수위변동으로 파괴 시 가장 큰 영향을 미치는 것은 댐과 제방으로 그 범위를 축소시킬 수 있다. 본고에서는 이에 따라 대상구조물을 댐과 제방으로 축소하여 집중 연구하였다. 댐은 그 기능에 따라 다목적댐, 발전용댐, 생공용수댐, 관개용수댐, 홍수조절댐 등으로 분류할 수 있다. 하천수계별 목적별 댐 현황은 Table 3.4.16과 같다.

Table 3.4.16 하천수계별 목적별 댐 현황

구분	계	다목적	생공용수	발전용	관개용수	홍수조절
전국	1,213	14	63	21	1,114	1
한강	130	3	5	9	112	1
낙동강	310	5	5	7	293	-
금강	137	2	4	2	129	-
영산강	72	-	9	-	63	-
섬진강	103	2	1	1	98	-
기타	461	2	39	2	419	-

국내는 현재 총 1213개의 댐의 있으며 그 중 다목적댐은 소양강댐, 충주댐, 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐, 대청댐, 섬진강댐, 주암댐, 부안댐, 보령댐, 횡성댐, 밀양댐, 용담댐, 탐진댐으로 총 15개소이며 영주댐이 새로 축조 중에 있다. 댐은 재료에 따라 크게 흙댐과 콘크리트댐으로 나뉘고 흙댐은 차수방법에 따라 중심코어형흙댐, 표면차수벽형댐 등으로 재분류된다. 한국의 댐 형식은 지형적 요인 때문에 흙댐과 콘크리트댐이 대부분이며 아치댐 등의 특수형댐은 시공사례가 없다. 1965년 이전인 댐 건설 초기에는 균질형 흙댐이 많

은 비중을 차지하였고, 이후 중력부분에 암석을 쌓아올리는 흙댐 형식이 급격하게 증가하였고 1996년 이후에는 표면차수벽형댐이 본격적으로 증가하고 있다. 다목적댐만 고려했을 때 15개소 중 흙댐이 8개소(53.3%)로 가장 많고 콘크리트댐 3개소(20%), 표면차수벽형댐 3개소(20%) 순이다.

나. 수위에 따른 수공구조물 모델링

(1) 대상 유역 선정

본 연구에서는 과거 국내 수문자료 사용 시 한강유역을 대상으로 자료를 수집하고 통계치를 도출하였다. 콘크리트 중력식 댐과 제방의 해석에 사용되는 지반정수는 서울시 하천정비기본계획을 포함한 다양한 문헌을 바탕으로 하고, 국내 공사 시추자료를 보유하고 있는 지반정보 DB geoinfo 사이트를 통하여 한강 유역 시추자료를 이용하여 실제 구현에 가깝도록 하였다. 댐과 제방의 규모적인 제원은 국가 수자원관리 시스템과 여러 보고서와 논문을 포함한 문헌 자료를 통해 수치를 확보하고 통계적인 처리를 하여 설정하였다. 수위에 관해서는 각 구조물의 최대홍수량을 기준으로 MCS기법에 의한 취약도 곡선의 구현에 적합한 개수의 외부하중을 주었다.

(2) 수공구조물 안전성 평가 기준

구조물 형식별 안정성 검토 방법을 대략적으로 나타내면 아래 Table 3.4.17과 같다. 본 장에서는 각각 구조물의 안정성 평가기법에 대해서 좀 더 자세히 알아보고 각각 카테고리별 실제 구조물을 선정하여 그 특징을 알아보도록 한다. 또한 주된 연구 방법인 민감도 평가에 대해서 소개할 것이며 그것을 이용해 어떠한 방법으로 연구가 이루어질 것인지 보일 예정이다.

Table 3.4.17 각 구조물별 안정성 검토 방법

구 조 물	안정성검토방법
제 방	침투에 대한 한정성 : 한계동수경사법, 한계유속법 / 비탈면 안정성
필 댐	제방과 동일
표면차수벽형댐	본체 안정성 : 제방과 동일 / 벽체 안정성 : 모멘트, 인장
중 력 식 댐	활동에 대한 안정성 / 전도에 대한 안정성 / 지지력에 대한 안정성

(가) 제방 안전성 평가

제방 안정성 문제는 홍수위 또는 담수로 인한 제체 내 침투와 수위급강하, 제체 재료 및 시공품질의 문제로 제방비탈면의 활동 등이 일어날 수 있으며, 제방 기초지만의 지지력 부족으로 인한 과다침하가 발생할 수 있다. 제방의 안정조건은 제체가 활동하지 않고, 저수가 댐마루를 넘지 않으며, 비탈면이 안정되어 있고, 기초지반이 압축에 대해 안전한 것이다. 이들 구조물은 단면형상이 크고 저폭이 넓어 단위면적당 작용하는 하중이 작아 기초에 전달되는 응력이 작다는 특징을 가진다. 따라서 제방이나 필댐의 안정성을 검토할

때에 전도에 대한 안정성은 고려하지 않고 침투에 대한 안정해석과 비탈면 안정해석을 주기준으로 삼는다.

(나) 콘크리트 중력식댐 안전성 평가

콘크리트중력식댐은 댐과 기초암반의 접촉면에 관해 외력 및 자중에 대해서 활동, 전도, 지지력 및 응력에 대한 안정성 평가가 이루어진다.

① 활동에 대한 안정

활동에 대한 안정은 댐체가 일정 전단강도를 가져 전단파괴가 일어나지 않는지 여부를 검토하는 단계이다. 제체와 기초암반의 접촉면 및 기초 암반내의 약점이라고 생각되는 면의 전단마찰 저항력은 전단력에 대하여 필요한 안전율을 가져야 한다.

② 전도에 대한 안정

전도에 대한 안정은 모멘트 발생으로 댐체 전체의 회전에 대한 안정성을 검토하는 것으로 만수위 지진 시에 제체 상류면에 인장응력이 발생되지 않는 조건(Middle Third의 조건)에 의하여 실시한다. 이것은 제체에 작용할 하중의 합력이 중앙삼분점의 가운데 있다고 하는 조건이다.

③ 지지력에 대한 안정

지지력에 대한 안정은 댐체가 존재하는 지반이 적절한 강도로 침하에 대한 안정성을 검토하는 것으로 댐 콘크리트와 기초암반의 접촉면에서 발생하는 최대압력은 기초암반의 허용 지지력을 넘어서는 안 된다.

④ 응력·변형 검토

응력·변형 검토는 정적상태 시 구조물의 역학적 거동 특성 파악 및 일부 취약부분에 대한 안정성검토와 댐체 저면의 인장응력 검토를 위해 주로 사용된다. 댐의 응력상태를 적절히 판단할 수 있는 구조물 응력해석을 수행하여 제체 내에 발생하는 응력이 허용응력인지를 확인하여야 한다.

(3) 콘크리트 중력식 댐 모델링

콘크리트 중력식 댐의 모델링은 유한요소해석프로그램 ABAQUS로 수행하였으며, 본고에서 모델링 상세 단계는 생략하였다. 모델링을 위해서 많은 문헌과 시추자료로 물성치를 채택하였고 그 결과는 다음과 같다.

(가) 규모 물성치

본 연구에서는 목적과 관련 없이 한강 수계 댐 중 콘크리트 중력식 댐 6개에 대해 규모 및 제원을 통계적 처리를 이용하여 대, 중, 소 규모로 분류하였다. 각 댐의 제원은 한강호수예보(2008)에 따랐으며 한강 수계 콘크리트 댐 현황을 정리하면 Table 3.4.18과 같다.

Table 3.4.18 한강 유역 중력식 콘크리트 댐 제원

	팔당댐	충주댐	청평댐	의암댐	춘천댐	화천댐
높이	29	97	31	23	40	81.5
정상표고	32	147.5	53	77	107	184.5
바닥표고	3	50.5	22	54	67	103
계획홍수위	27	145	52	73.4	104.9	183
상시만수위	25.5	141	51	71.5	103	181
저수위	25	110	46	66.3	98	156.8
사수위	18.7	84	46	66.3	98	156.8

위의 제원들은 편차가 크기 때문에 단순 평균을 이용하여 모델링 제원을 설정할 경우, 높이는 19m, 50m, 81m의 소, 중 ,대 값을 가지게 된다. 단순 평균 방법보다는 각 댐 제원 값 중에 소, 중, 대 값을 설정하고 나머지를 분류하여 군별로 묶었다. 즉, 의암댐과 춘천댐, 충주댐의 제원을 소, 중, 대 값으로 결정하고 화천댐은 충주댐과 같은 대규모, 청평댐은 중규모, 팔당댐은 소규모로 분류하였다. 댐 설계·실무요령(2002)에 의하면 일반적으로 댐의 하류쪽 기울기는 $0.7\left(\frac{1}{1.43}\right) \sim 0.8\left(\frac{1}{1.25}\right)$의 값을 가지며, 댐마루폭은 2m~6m의 값을 가진다. 이에 따라 각 높이에 따른 설계도를 작성했으며 작성 시 사용한 물성치는 다음과 같다.

Table 3.4.19 규모에 따른 간략한 제원

	높이(H)	마루(b)	배수공	바닥길이
소규모	23	2	3	18
중규모	40	4	6	32
대규모	97	6	11	78

(나) 재료 물성치

댐설계지침(2004) 2편 6장에 따르면 일반적으로 콘크리트 단위중량은 2.3t/m3 이상의 값을 가진다. 또한 댐 설계・실무요령(2002)에 의하면 콘크리트 포아송비는 0.167의 값을 가지며, 지반과 구조물 사이의 마찰계수는 0.65~0.8사이의 값을 가진다. 본 연구에서는 한강 유역을 대상으로 비교적 넓은 구간을 다루기 때문에 지반에 대한 영향도 함께 알아보기 위해 지반이 연암, 보통암, 경암일 경우로 구분하여 각각 해석하였다. 해석에 사용한 지반정수는 Table 3.4.20과 같다.

Table 3.4.20 서울지역 지반별 지반정수 범위

	단위중량 (t/m3)	점착력 (t/m2)	마찰각	탄성계수 (t/m2)	포아송비
연암	2.3~2.5	30~60	30~40	20~40	0.25~0.3
보통암	2.4~2.6	60~150	35~40	40~100	0.25
경암	2..5~2.7	150~200	35~45	100~400	2

위의 값은 지하철공사를 위한 조사를 바탕으로 작성된 서울지역의 자료이며, 각 값은 범위를 가지고 있기 때문에 실제 모델링에는 중간값을 구하여 적용하였다.

(다) 적용 하중

본 연구에서 제안하는 중력식 콘크리트 댐에 작용하는 외부 하중은 자중, 정수압력, 퇴사압력, 양압력, 빙압력의 5가지이다. 정수압력은 파랑고를 고려한 높이에 대해서 계산해야 하며 본 과제에서는 바람에 의한 파랑고를 산정하여 적용하였다. 바람에 의한 파랑고는 1.04m이다.

$$\text{수평정수압 } P_{wh} = \frac{1}{2} W_w \ h^2$$

$$\text{연직정수압 } P_{wv} = W_W A h$$

퇴사압력은 일반적으로 $P_s = C_e W_s h$ 식으로 구하며 여기서 C_e는 0.4~0.6, 수중단위중량 W_s는 1.5~1.8t/m3의 값이 주로 사용되며 퇴사고h는 일본의 경우 저수지 수심의 30~60%라고 가정한다.

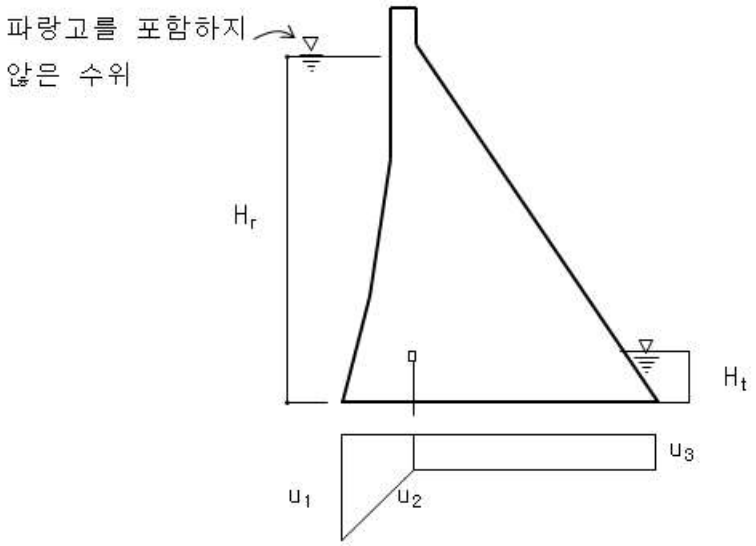


Fig. 3.4.13 양압력

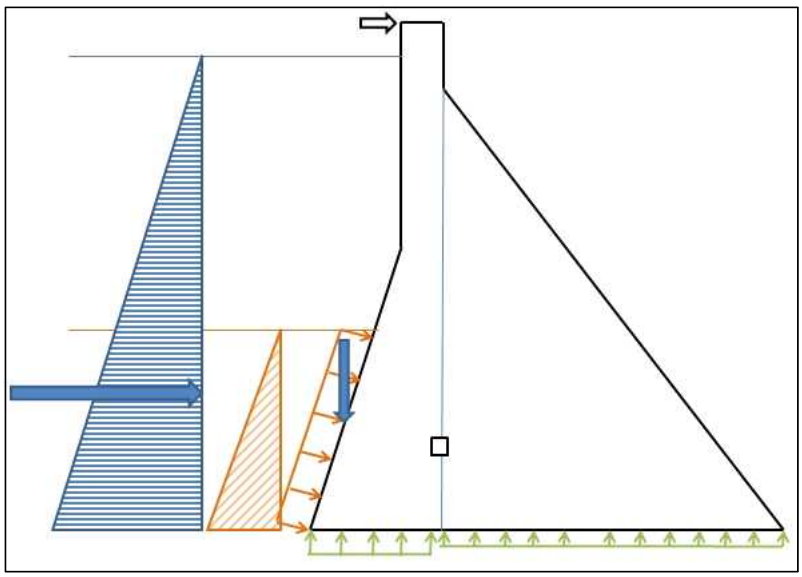


Fig. 3.4.14 적용하중 모식도

양압력은 지반 내의 수압으로 인해 구조물이 위로 떠오르게 하는 방향으로 작용하며 심할 경우 부동침하, 구조물 부상, 전도 등의 결과를 초래한다. 이를 구하기 위해서는 Fig. 3.4.13에서처럼 u1, u2, u3에 대한 값을 먼저 구하여야 한다. 관련 식은 다음과 같다.

$$u_1 = W_w \times H_r$$

$$u_2 = \frac{1}{5}(H_r - H_t)\, W_w + u_3$$

$$u_3 = W_w \times H_t$$

Table 3.4.21 태양복사에 따른 빙압력

변화량 (C/hr)	t/m	KN/m
2.8	10	98
5.6	15	147
8.4	22.5	221

빙압력의 경우, Table 3.4.21과 같이 태양복사열에 따라 적용하중이 달라지며 본고에서는 태양복사를 고려하고 양안 구속, 얼음 두께는 50cm로 가정하였다. 자중, 정수압력, 퇴사압력, 양압력, 빙압력을 적용하여 해석을 수행하였으며 Fig. 3.4.14는 상위 하중이 작용하는 구조물의 하중 모식도를 나타낸 것이다.

(라) 프로그램을 통한 모델링

콘크리트 중력식 댐의 모델링은 유한요소해석프로그램 ABAQUS로 수행하였으며 각 모델링은 규모별로 분류하여 진행되었고 아래에 단계별로 간략하게 서술하였다. 소, 중, 대 규모별 도면을 제작하고 적용수위 단계별로 하중을 산정한 후 프로그램을 통해 콘크리트 댐체와 지반을 각각 모델링하여 접합하는 방법을 사용하였다. ABAQUS의 경우 각각 재료의 물성치 단위를 따로 설정하는 것이 아니라 치수와 재료특성에 관해 사용자가 통일하여 사용해야 함을 주의해야 하며 본 해석에서는 kN과 m단위를 이용하였다. 콘크리트 댐체와 지반의 연결은 tie 접합을 하였고, 마찰계수는 0.73을 사용하였다. 지반 경계조건은 양면과 아래면 모두 무한영역으로 인식할 수 있도록 설정하였다. 지반의 영향을 충분히 고려하기 위해 아래 지반영역의 가로 길이가 댐체 높이의 5배정도 되도록 넉넉하게 모델링 하였으며 보다 정확한 유한해석을 위해 삼각형태의 mesh를 선택하였다. 일련의 모델링과정이 끝나면 후처리를 위한 해석이 실시된다. 콘크리트 중력식 댐은 저수위일 경우 뒤로 넘어가는 형상을 나타내기도 하지만 일반적으로 앞쪽으로 쏠리는 형태로 거동하며 그 형상은 Fig. 3.4.16과 같다.

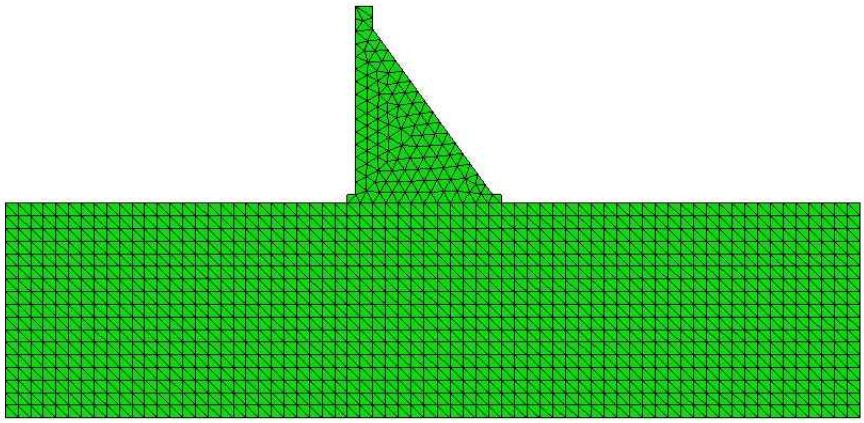


Fig. 3.4.15 콘크리트 중력식 댐 모델링 mesh형상

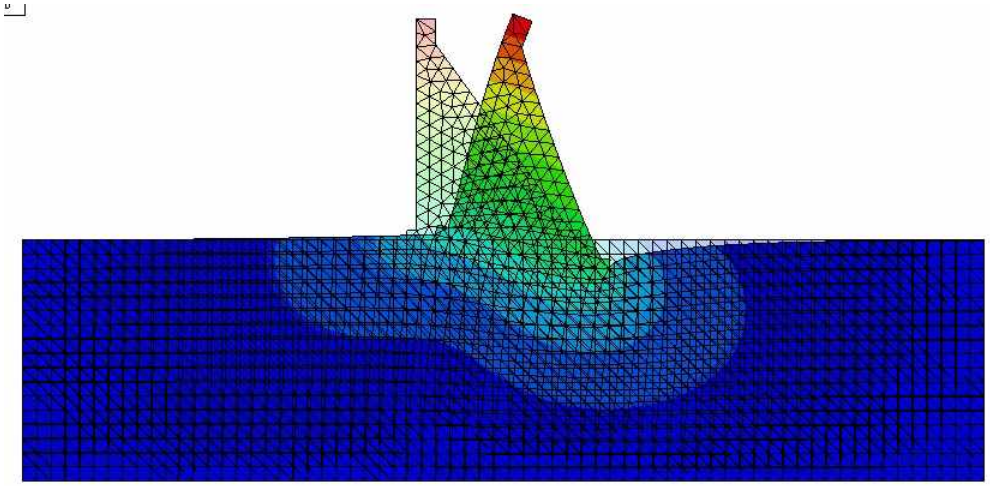


Fig. 3.4.16 콘크리트 중력식 댐 거동형상

(4) 제방 모델링

제방의 모델링은 토질유한요소해석 프로그램인 seep/w와 slope/w를 이용하여 수행하였으며, 본 요약보고서에서 모델링 상세 단계는 생략하였다. 모델링을 위해서 많은 문헌과 시추자료로 물성치를 채택하였고 그 결과는 다음과 같다.

(가) 규모 물성치

Table 3.4.22 대상 유역 제방 제원

측점	거리		계획	계획	하폭	기설제방고		비고
	구간	누가	홍수량	홍수위	현재	좌안	우안	
0	0	0	37000	7.00	2403	9.20	14.50	합류
1	342	342		7.08	2138	9.00	12.55	
2	448	790		7.14	1898	9.00	9.14	
3	400	1190		7.15	1713	9.30	9.47	
4	368	1558		7.24	1630	9.00	9.21	
5	440	1998		7.28	1440	9.20	9.28	
6	366	2364		7.40	1628	9.62	9.21	
…								
167	432	75549	37000	23.36	332	산	23.59	
168	402	75951		23.93	396	산	23.46	
169	403	76354		24.02	370	산	23.18	
170	371	76725		24.52	414	산	25.34	팔당댐
평균				15	1234	17	17	
편차				4.49	355	4.82	4.49	
c.o.v.				0.30	0.29	0.29	0.27	

해석에 사용된 제방 규모 물성치는 한강 하천정비 기본계획을 바탕으로 하였으며, 한강 수계 국가하천구간 중 한강본류 하류부 구간 팔당댐~곡릉천합류점 구간 76.725km를 대상으로 하였다. 본 구간은 서울특별시, 인천광역시, 경기도 16시 2군으로 형성되어 있으며, 제 1지류의 중랑천, 안양천, 곡릉천 등 국가하천 4개소, 홍릉천, 왕숙천, 탄천, 반포천, 홍제천, 창릉천, 굴포천 등 지방2급하천 25개소를 포함하고 제 2지류의 청계천 지방1급하천 1개소와 진건천, 용암천, 성복천, 양재천, 우이천, 불광천 등 지방2급하천 78개소를 포함한다. 하천정비기본계획(2002)에서 측점 170개소에서 측정한 200개 데이터를 통해 계획홍수위, 하폭, 제방고를 평균하면 Table 3.4.22와 같다. 본 연구에서는 제방 좌안과 우안 구분 없이 하나의 경우를 지정하여 해석하였으며, 제방고는 좌안과 우안의 평균값인 17m, 표준편차 4.66, c.o.v 0.28을 사용하였다. Fig. 3.4.17는 수치를 통해 간략화한 대상 유역의 제방 단면도이다.

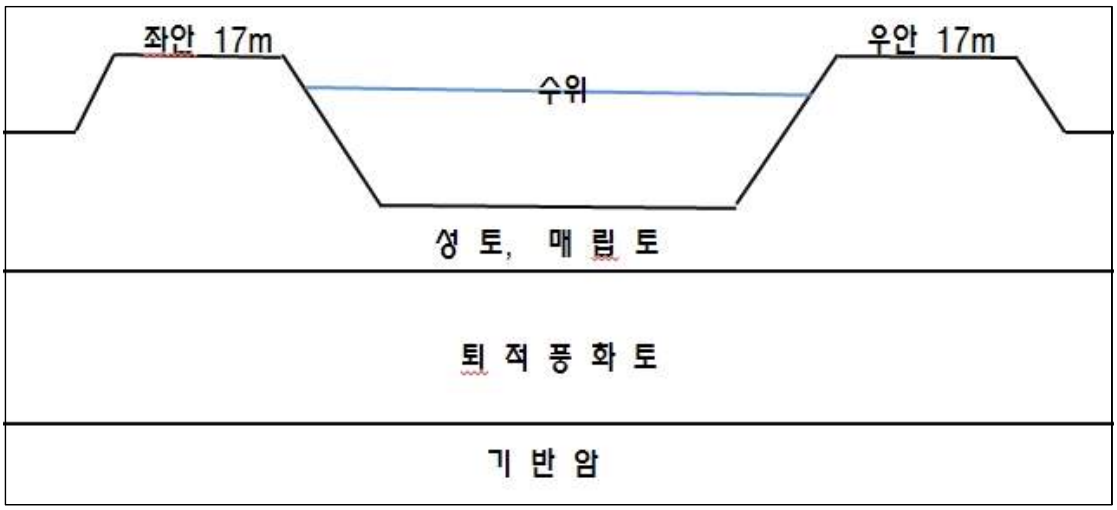


Fig. 3.4.17 대상유역 제방 단면도

(나) 재료 물성치

제방을 구성하는 재료는 흙으로 특성상 정확한 물성치를 얻기 위해서 재료 시험은 매우 중요하다. 하지만 그렇게 하지 못할 경우 다양한 문헌을 통해 얻어야 하며 가장 위험측의 값을 택하여 해석하는 방법을 사용해야 한다.

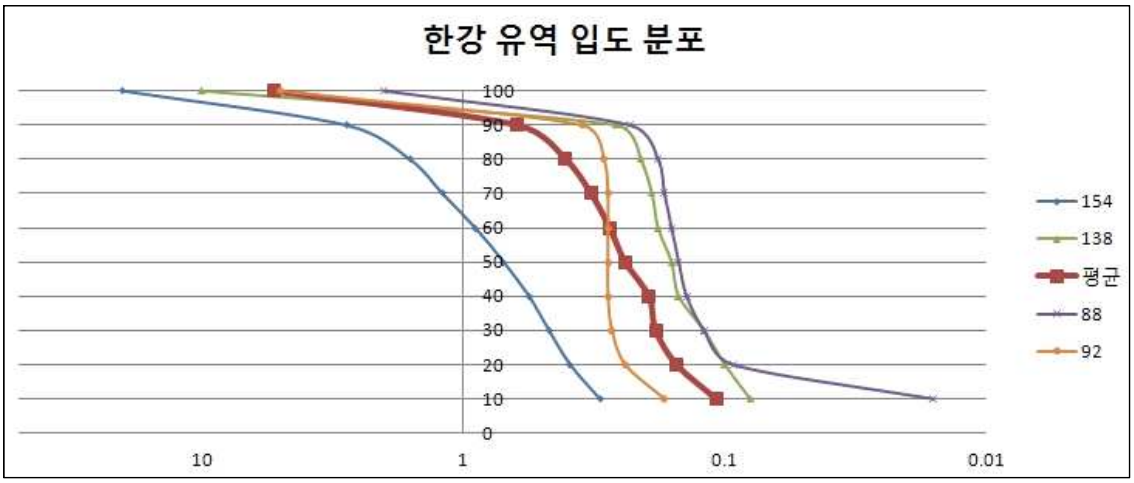


Fig. 3.4.18 입도분포곡선

위 그림은 한강 유역 하상의 입도분포 곡선이다. 제방은 주로 하상 굴착을 통해 성토함에 초점을 맞추어 하천정비기본계획의 입도분포 시험자료를 성토재의 물성치로 사용하였다. 또한 지반정보 DB 포털 geoinfo에서 얻은 시추주상도 140여개의 자료를 이용하여 제방 아래의 지반에 대한 정보를 얻었다.

Table 3.4.23 대상유역 지반 구성 현황

	매립토	풍화토	기반암
층후 (m)	3.09	12.59	6.91
표고 (m)	5.33	-7.21	-13.95
심도 (m)	3.09	15.80	22.36

지반을 평균한다는 것은 다소 위험하기는 하나, 대상 유역 전반에 대한 평가를 위해 시행하였으며 향후 본고를 바탕으로 다양한 층후와 크기에 대한 해석을 진행하면 사이 값들에 대해서 보간법을 적용할 수 있을 것이다. Table 3.4.23에 나타난 것처럼 매립토는 지표에서 약 3m 두께를 가지고 있으며 입도가 불량한 모래지반의 형태를 띠었다. 풍화토층은 매립토 아래 13m 정도의 두께로 주로 아래 화강암의 풍화형태를 띄거나 풍화된 토질의 퇴적층으로 이루어졌으며 N치는 20~40 내외의 값을 가졌다. 기반암층은 주로 화강암, 연암으로 이루어져있으며 풍화가 되더라도 매우 조밀한 형태로 40이상의 N치를 가져 기반암으로서 나쁘지 않음을 보였다. Table 3.4.23에 나타낸 물성치 외에 지표 평균값은 약 8.42m로 나타났으며, 하천정비기본계획을 바탕으로 하상고는 약 -3m임을 구했다. 아래 표에 시험자료를 참고하여 다양한 문헌을 통해 제방 재료 물성치 값을 결정하여 Table 3.4.24에 정리하였다.

Table 3.4.24 대상 유역 지반 물성치

성토재	투수계수 (cm/s)	댐설계기준		1.00×10-3
		서울시 물순환		1.30×10-3
		입도분포	Hazen식	1.16×10-3
			Creager식	4.45×10-3
			Das	1.00×10-2 ~ 1.00×10-4
	함수비	촘촘 균등한 가는 모래 (토질역학,김상규)		0.33 ~ 0.36
	간극비			0.49 ~ 0.56
	건조단위중량			1.7 ~ 1.8
	습윤단위중량			1.8 ~ 2.1
	포화단위중량			2 ~ 2.1
	습윤단위중량	입도 나쁜 모래 (도로설계요령)		1.9
	마찰각			30
	점착력			0
퇴적 풍화토	투수계수 (cm/s)	지반공학		1.00×10-6 ~ 1.00×10-2
		서울시 물순환		5.70×10-6 ~ 5.03×10-3
		한반도의 지질과 지하수		5.79×10-6 ~ 1.16×10-5
	함수비	소성이 큰 점토 (토질역학,김상규)		30 ~ 40
	간극비			0.43 ~ 0.67
	건조단위중량			1.8 ~ 2
	습윤단위중량			1.7 ~ 2.2
	포화단위중량			1.9 ~ 2.9
	습윤단위중량	굳은 점성토 (도로설계요령)		1.8
	마찰각			25
	점착력			5이하
	함수비	작골제, 자유로 교란시료시험결과		27
	비중			2.66
	습윤단위중량			1.765

(다) 프로그램을 통한 모델링

제방의 모델링은 유한요소해석프로그램 SEEP/W로 수행하였으며 각 모델링은 제방 경사와 지반종류에 따라 분류하여 진행되었고 아래에 단계별로 간략하게 서술하였다. 제내지와 제외지의 경사는 동일하게 변화시켜주었으며 경사에 따라 스케치를 달리하여 모델링에 변화를 주었다. 프로그램에서 스케일을 정해주고 스케치 기능을 통해 간략하게 스케치한 후 토층별 물성치를 입력하고 mesh를 짜준다.

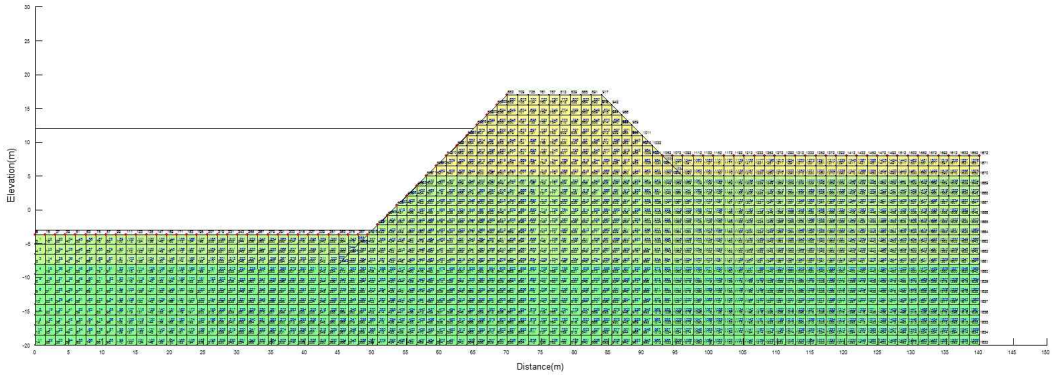


Fig. 3.4.19 제방 모델링 mesh 형상

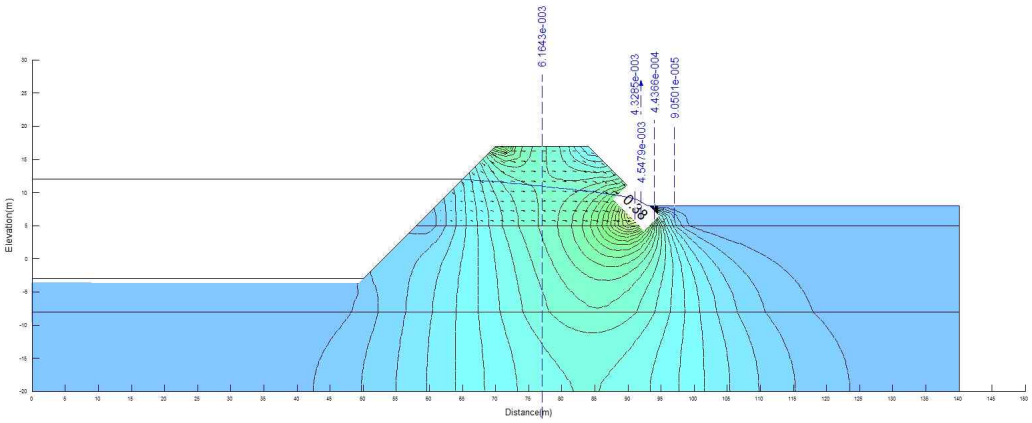


Fig. 3.4.20 제방 모델링 일반적인 해석 결과

Fig. 3.4.19는 보다 상세한 해석을 위해 잘게 mesh를 설정한 것이며 토층 경계부위에서 mesh가 어긋나지 않도록 주의해야 한다. 경계조건을 변화시키면서 모델링 해석을 후처리하였으며 일반적인 거동 형태는 다음과 같다. 위 Fig. 3.4.20에 나타난 형상은 동수경사이며 파란 화살표로 나타낸 수치는 그 단면의 유량을 뜻한다. 후처리과정에서는 필요정보에 따라 전수두, 압력수두, 유출속도, 동수경사 등을 변화시킬 수 있다.

다. 수위에 따른 수공구조물 취약도 산출

(1) 취약도곡선

취약도 곡선이란 어떤 구조물이 임의 크기의 외력에 대하여 구조물이 손상 상태에 도달하거나 초과하는 확률을 나타내는 것으로, 임의 외력에 대한 구조물의 취약성을 나타내는 것이다. 여기서 말하는 취약도(Fragility)는 신뢰성이론의 하나로 랜덤변수 간의 관계가 명확하지 않거나 복잡할 경우 유용하게 사용되는 개념이다. 취약도 곡선은 특정한 손상 상태에 대한 다양한 단계의 외력에 대해 손상 상태에 도달하거나 초과하는 조건부 확률을 계산하여 얻는다. 이렇게 계산된 조건부 확률과 임의 크기의 외력 특성과의 관계를

나타낸 것이 그 손상 상태에 대한 취약도 곡선이다. 이론의 바탕이 되는 식은 다음과 같다.

$$V_f(t) = P[G(R,S,t) \le | S(t) = s] * P[S(t) = s]$$

여기서 $V_f(t)$는 구조적 취약도를 뜻하며 $G(x)$는 한계상태함수, S는 하중효과를 의미한다. 즉, 식에서 나타나는 구조적 취약도는 임의의 하중 s가 발생할 확률 내에서 구조물의 한계상태함수가 파괴에 도달할 조건부 확률이다.

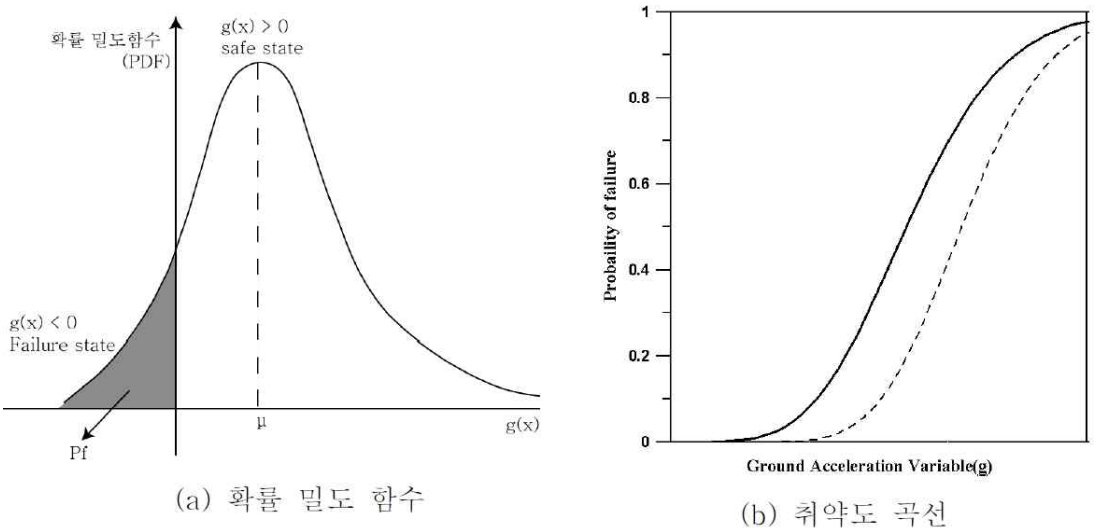


Fig. 3.4.21 일반적인 취약도 곡선 형태

이처럼 취약도 분석의 목적은 구조응답이 내력을 초과하여 파괴에 이르게 되는 외력을 확률적으로 평가하는데 있으며 이를 도식화한 일반적인 취약도 곡선 형태는 Fig. 3.5.16과 같다. 이상의 과정에서 보듯이 취약도 분석은 취약도 곡선을 이용하여 확률적으로 구조물의 안전성을 정량적으로 평가 하는 것이다. 취약도 곡선은 1970년 TMI 원전 사고 이후 안전개념의 확대에 따라 확률적 지진취약도 평가로부터 시작되었으며 1980년대 초 원자력발전소의 확률적 지진 안전성 분석을 위하여 개발되었다. 이러한 취약도 분석에 대한 연구는 국내에서도 활발히 진행되고 있으며 지진·풍하중 취약도 평가기법의 연구로 활용성은 점점 증대되고 있다.

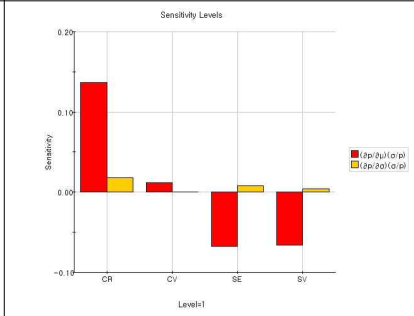
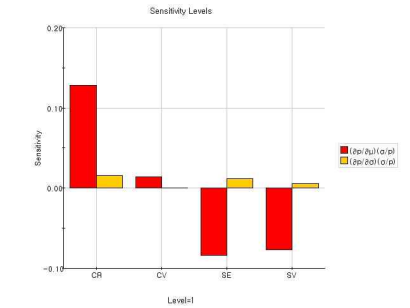
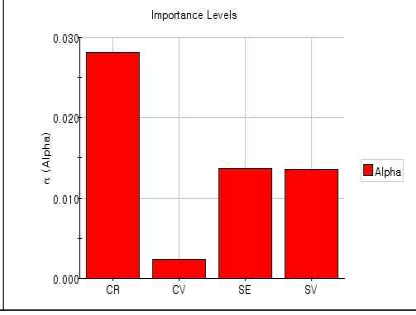
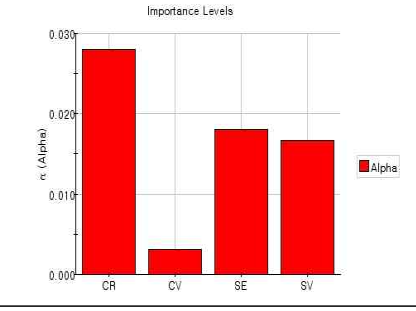
(2) 콘크리트 중력식 댐의 취약도 곡선

본 연구에서는 수위에 따른 콘크리트 중력식 댐의 취약도 곡선에 변수들의 변동성을 포함하기 위해 여러 가지 방법 중 MCS 기법을 이용하였으며, 세부 과정을 생략하고 연구 결과를 중심으로 기술하였다.

(가) 민감도 분석을 통한 영향인자 선정

콘크리트 중력식 댐의 거동에 영향을 미치는 인자들의 민감도를 분석하여 취약도 곡선 도출 시 영향력 있는 인자를 결정하였다. 간단한 모델링을 통해 수위를 저수위와 고수위로 나누고 콘크리트 단위중량, 콘크리트 포아송비, 지반 탄성계수, 지반 포아송비를 랜덤변수로 설정하였다. Table 3.4.25에 수위에 따른 랜덤변수의 응력 민감도를 나타내었다. 분석 결과에서 알 수 있듯이 콘크리트 단위중량이 가장 큰 영향을 미치며 지반 탄성계수와 지반 포아송비가 그 뒤를 이었다. 콘크리트 포아송비의 영향은 다른 인자들에 비해 미약하였다.

Table 3.4.25 수위에 따른 콘크리트 중력식 댐 민감도 분석

	저수위	고수위
전체 민감도		
주요 민감도		

콘크리트 중력식 댐에서 댐체의 중력은 전체 거동 및 응력 변형에 많은 영향을 미치므로 중력에 직접적인 영향을 미치는 콘크리트 단위중량이 가장 중요한 변수임을 알 수 있다. 하지만 비율적으로 저수위 일 때 콘크리트 단위중량은 약 67.5%의 영향을 미치고 지반탄성은 16.2%, 지반 포아송비는 15.9% 정도이나 고수위 일 때 각각 55.9%, 23.4%, 19.9%로 지반의 영향이 약 43%로 높아짐을 알 수 있다. 이를 바탕으로 본고에서는 콘크리트 중력식 댐의 취약도 곡선을 위한 영향인자로 콘크리트 포아송비를 제외한 콘크리트 단위중량, 지반 탄성계수, 지반 포아송비를 택하였다.

(나) 한계상태함수 선정 및 취약도 분석 결과

구조물의 성능과 하중에 의한 요구 간 상관관계를 표현하는 한계상태함수는 대부분의 경우 강도한계상태와 사용성한계상태로 나누어 고려한다. 시스템의 수준에서 본다면 시스템이 가질 수 있는 파괴모드에 따라 복수의 한계상태함수가 고려되는 경우도 있다. 고려

된 복수의 한계상태함수에 대한 신뢰도 해석 결과는 파괴모드의 상호관계 특성에 따라 확률적으로 통합된다. 콘크리트 댐체의 강도파괴에 대한 안전성검토를 위하여 콘크리트 댐체에 발생하는 최대응력에 대한 극한강도 한계상태함수를 고려하였으며, 임의 요소에서 발생하는 최대의 응력이 콘크리트의 설계기준 허용응력을 초과하는 상태를 파괴라고 규정하였다.

① 압축응력에 대한 취약도 곡선

압축응력의 경우, 댐설계·실무요령(2002)에 따라 설계강도를 정하고 허용압축응력을 사용하면 모든 경우에 있어서 파괴가 발생하지 않고 취약도 곡선은 0에서 수평인 형태가 된다. 충주다목적댐 제3차 정밀안전진단 보고서에 명시된 수치를 이용하면 허용압축응력은 약 4.41MPa로 소규모, 중규모는 벗어나는 수치 없이 안전함을 보였고 대규모일 경우 수위에 따른 변동을 나타내어 취약도 곡선을 도출할 수 있었다. 그 결과, 콘크리트 중력식 댐의 경우 과도할 만큼 안전 측으로 설계하기 때문에 수위가 댐체 높이보다 높아져서 월류하더라도 허용압축응력을 쉽게 넘지 않는다. 따라서 본고에서는 파괴기준을 월류로 정하여 월류가 발생했을 때를 극한상태로 하고 그때의 압축응력에 대한 취약도 곡선을 도출하였다.

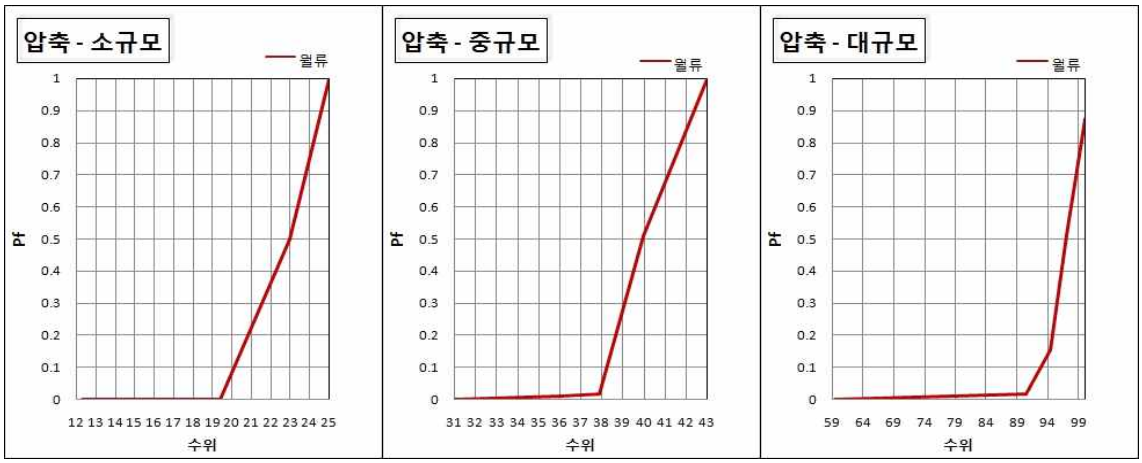


Fig. 3.4.22 압축응력에 따른 규모별 콘크리트 중력식 댐 취약도 곡선

소, 중 대 규모 중 대규모일 경우 월류에 대해 최고수위 다다를수록 취약도의 증가정도가 급격하게 나타남을 알 수 있다. 월류는 지진만큼 큰 영향을 주는 것은 아니지만 월류가 발생하면서 콘크리트 댐체가 받는 하중이 증가하고 균열에 대한 잠재적 원인이 되므로 월류에 대한 취약도 곡선을 도출하여 취약도를 파악하는 것은 안전 측에서 의미가 있다.

② 인장응력에 대한 취약도 곡선

인장응력의 경우, 댐설계·실무요령(2002)에 따라 설계강도를 정하고 허용인장응력 0.64MPa를 사용하면 그 결과는 다음과 같이 도출된다. 허용압축응력에 대해 매우 안정적

인 결과를 보였던 것과는 달리 허용인장응력에 대해서는 비교적 높은 취약도 결과를 나타내었다. 특히 수위가 증가함에 따라 대규모에서 파괴는 높은 것으로 나타났다. 하지만 대규모 댐의 전신인 충주댐의 경우, 충주다목적댐 제3차 정밀안전진단 보고서에 따라 허용인장응력을 약 1.2MPa로 설정하였고 이는 본고에서 적용하는 허용압축응력 기준보다 약 2배가량 높음을 알 수 있다. 따라서 대규모에 대해서는 1.2MPa를 기준으로 인장응력 취약도 곡선을 추가적으로 산출하였다.

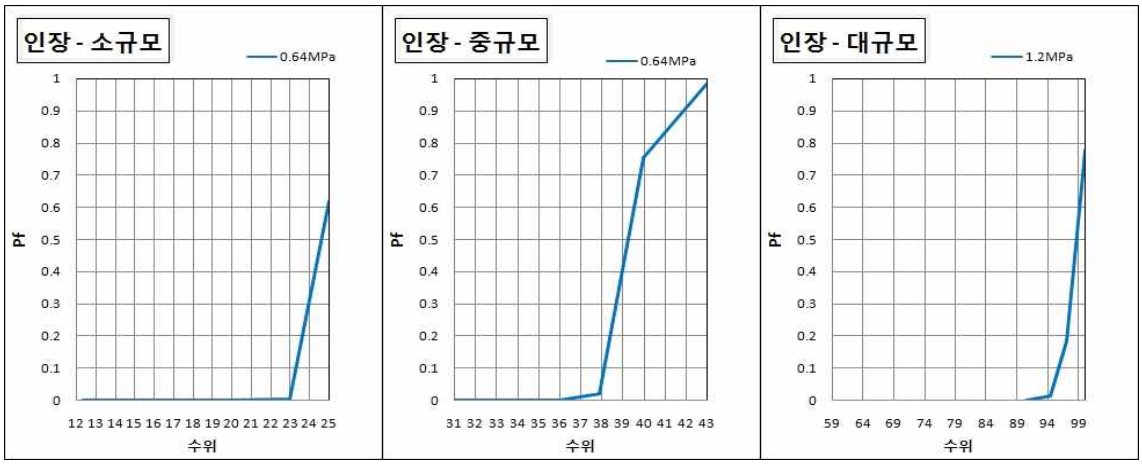


Fig. 3.4.23 인장응력 취약도 곡선

취약도 곡선에서 나타나는 파괴확률은 전체적 구조물 파괴 및 사용불가를 뜻하는 것이 아니라 사용자가 정해놓은 기준에 따른 파괴확률을 뜻한다. 예를 들어 본고에서 수행한 결과를 바탕으로 Fig. 3.4.23의 분석결과 중 소규모·중규모 댐은 0.64MPa를 기준으로 하는 국부적인 구조물 손상에 대한 취약도라고 정하고, 대규모 댐은 1.20MPa를 기준으로 하는 전체적 손상에 대한 취약도라고 할 수 있다. 국부적인 손상은 낮은 수위에서도 비일비재하게 발생이 가능하므로 저수위에서부터 다소 높은 파괴확률을 나타내고 전체적손상은 고수위 부근에서 발생하기 시작하므로 Fig. 3.4.23과 같이 고수위에서부터 파괴확률이 나타나기 시작하여 수위증가에 따라 급격하게 증가함을 알 수 있다.

(3) 제방의 취약도 곡선

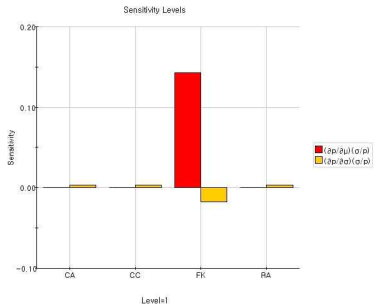
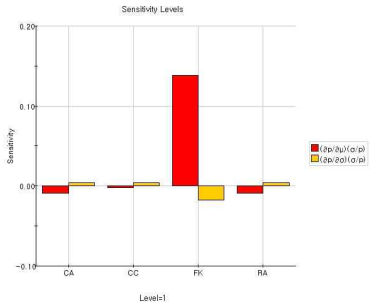
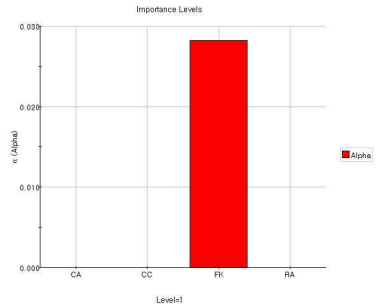
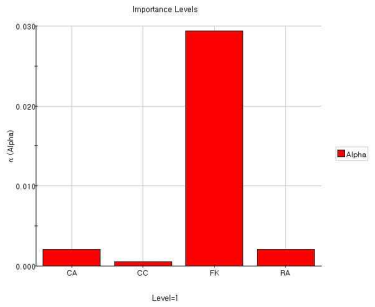
본 연구에서는 수위에 따른 제방의 취약도 곡선에 변수들의 변동성을 포함하기 위해 여러 가지 방법 중 MCS 기법을 이용하였으며, 세부 과정을 생략하고 연구 결과를 중심으로 기술하였다.

(가) 민감도 분석을 통한 영향인자 선정

제방의 침투 거동에 영향을 미치는 인자들의 민감도를 분석하여 취약도 곡선 도출 시 영향력 있는 인자를 결정하였다. 간단한 모델링을 통해 수위를 저수위와 고수위로 나누고 층별 투수계수, 점착력, 마찰각을 랜덤변수로 설정하였다. Table 3.4.26에 수위에 따른 랜덤변수의 침투 민감도를 나타내었다. 분석 결과에서 알 수 있듯이 상층 투수계수의 영향

은 다른 랜덤변수와 비교할 수 없을 정도로 영향을 많이 미치는 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로 본고에서는 제방의 취약도 곡선을 위한 영향인자로 흙의 점착력과 마찰각을 제외하고 각 지반의 투수계수를 택하였다.

Table 3.4.26 수위에 따른 제방 민감도 분석

	저수위	고수위
전체 민감도		
주요 민감도		

(나) 한계상태함수 선정 및 취약도 분석 결과

구조물의 민감도 및 신뢰도는 한계상태함수의 형태로 표현되는 성능기준에 대하여 평가된다. 침투에 대한 한계상태함수를 구하기 위해 침투에 대한 안정성 평가방법 중 한계동수경사를 이용한 방법과 Justin의 한계유속을 이용한 방법을 사용하였다.

① 암반지역에 대한 취약도 곡선

결정한 한계상태함수식을 통하여 화강암지역과 편마암지역에서 동수경사와 유출속도를 이용한 침투 취약도 곡선을 구하면 다음과 같다. 모든 사면 경사에서 유출속도보다 동수경사에 대한 취약도가 크게 나타났으며 화강암지역이 편마암지역보다 취약도가 큰 것을 알 수 있었다. 일반적으로 화강암지역이 편마암지역보다 강도가 세다고 알려져 있지만 본고에서 사용한 수치는 서울 한강유역의 지반 자료를 바탕으로 한 것으로 해당 지역 한정적 자료라고 할 수 있다. 동수경사에 대한 침투 취약도 곡선은 경사가 완만할수록 화강암과 편마암 사이 차이가 거의 없었으나 유출속도에 대해서는 화강암지역 유출속도가 더 커서 취약도가 크게 나오는 것을 확인할 수 있었다.

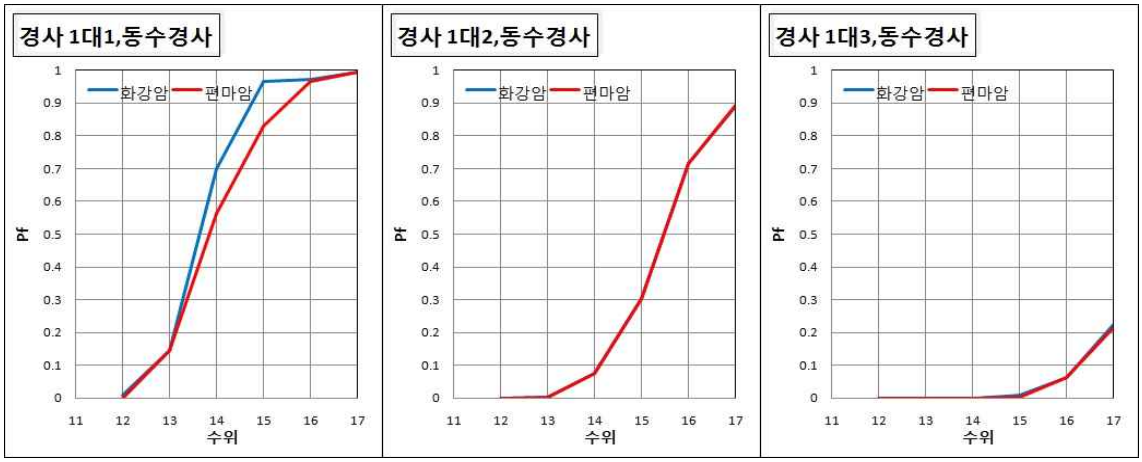


Fig. 3.4.24 동수경사를 이용한 사면 경사별 암반별 침투 취약도 곡선

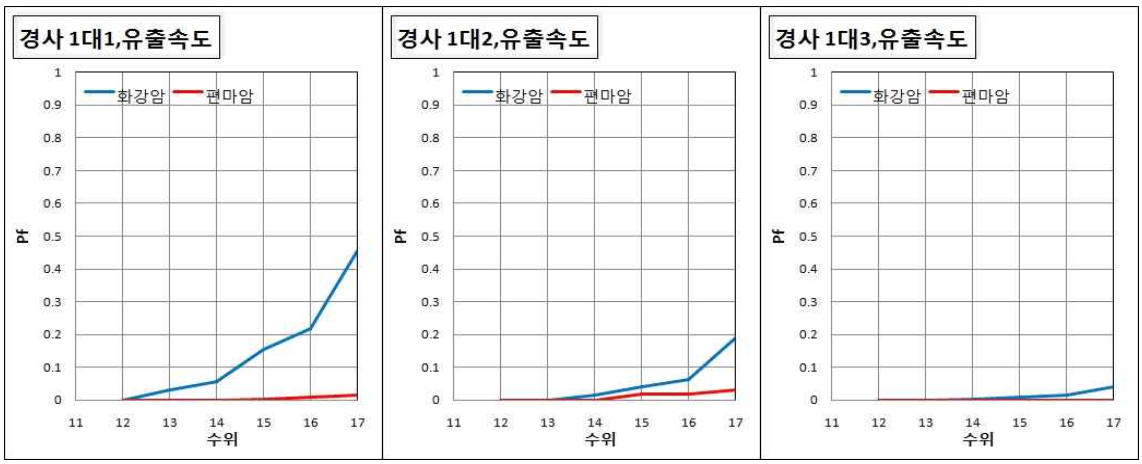


Fig. 3.4.25 유출속도를 이용한 사면 경사별 암반별 침투 취약도 곡선

② 경사에 대한 취약도 곡선

결정한 한계상태함수식을 통하여 화강암지역과 편마암지역에서 동수경사와 유출속도를 이용한 침투 취약도 곡선을 구하면 다음과 같다. 사면 경사가 침투에 미치는 영향이 미약할 것으로 여겨졌으나 사면 경사가 1대1에서 1대3으로 될수록 취약도는 확연히 작은 값을 가짐을 보여줌으로써 사면 경사가 완만할수록 침투에 대한 파괴확률이 감소함을 나타내었다. 사면 경사가 1대1일 경우 초반 13~14m에서 급격한 파괴확률 변화를 보이며 1대2일 경우 15~16m에서 파괴확률이 급변하였고, 1대3일 경우는 제방고와 같은 높이의 수위가 되더라도 파괴할 확률이 작음을 알 수 있다. 동수경사를 이용하여 침투 취약도 곡선을 이용할 경우 화강암과 편마암에 대한 차이는 크게 없으며 따라서 본 침투 취약도 곡선 이용 시 암반지역을 먼저 선택한 후 사면 경사에 따른 파괴확률을 이용하는 것을 추천하는 바이다. 유출속도를 이용한 침투 취약도의 경우 화강암지역은 사면 경사에 따라 확연한 차이를 보이며 후에 이용할 수 있을 만큼 수치를 보였지만 편마암지역은 매우 안정함을 보여 현재 기준의 취약도 곡선은 거의 사용할 수 없다. 따라서 화강암지역일 경우 동수경사와 유출속도 두 가지 측면 모두에서 파괴확률을 확인하여야 하며 편마암 지역에서는 동수경사를 이용한 침투 취약도 곡선을 이용해야 한다.

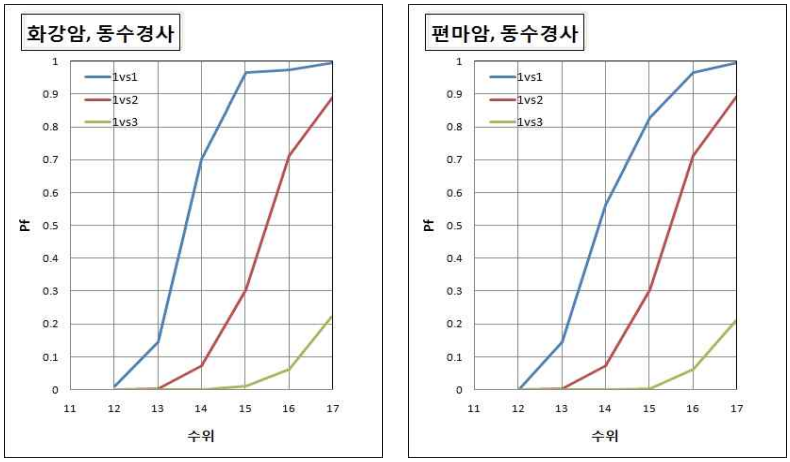


Fig. 3.4.26 동수경사를 이용한 사면경사별 침투 취약도 곡선

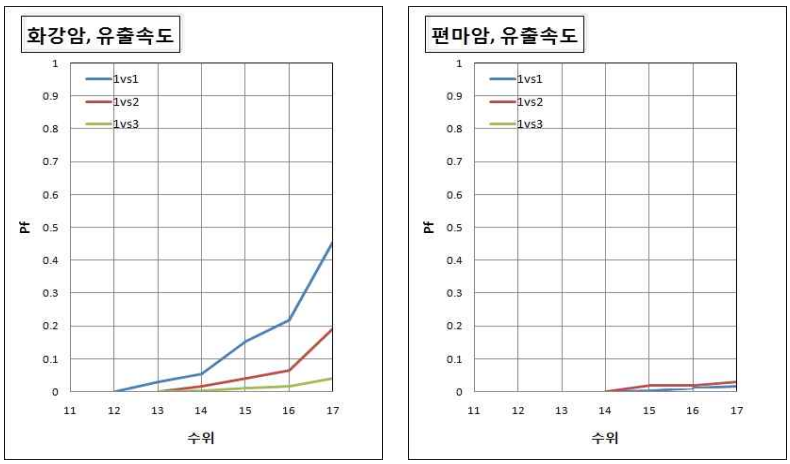


Fig. 3.4.27 유출속도를 이용한 사면경사별 침투 취약도 곡선

(4) 기후 변화를 고려한 구조물 위험도 분석

본 연구에서는 타 세부과제에서 수행한 기후변화 예측 시나리오를 기반으로 댐 유역의 유출량 및 수위 시나리오를 예측하고 이를 기반으로 구조물의 취약도 분석 기반 위험도를 평가할 수 있는 기법을 제안하였으며, 한강 댐 유역 중 일별 유출량 시나리오를 확보한 충주댐 유역에 대한 분석을 수행하여 이를 검증하였다.

(가) 일별 유출량 및 수위 시나리오

Fig. 3.4.28은 본 연구단의 세종대학교(1-1-1)로부터 확보한 일별 유출량 시나리오 중 충주댐 유역에 대한 정보이다. 댐 구조물은 수시 방류를 통해 적정 수위를 유지하지만, 극한 강우가 쏟아지는 경우 순간적으로 유입량이 방류량을 초과하여 댐의 수위가 높아지는 경우가 발생하며, 이는 구조물의 거동에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 이런 극한상황을 가정, 강우가 유입되는 순간의 방류량을 무시하고, '하천설계기준'의 수위·유량 곡선을 이용하여 충주댐 유역의 유출량 시나리오를 적용한 충주댐 수위를 산정하였다. 이는 Fig. 3.4.29와 같다. 또한 분석 결과를 10년 주기로 구분하고 각각의 10년 주기에서의 수위 분포를 확률적으로 분석하여 취약도 분석 기반 구조물 위험도 평가에 적용하였다.

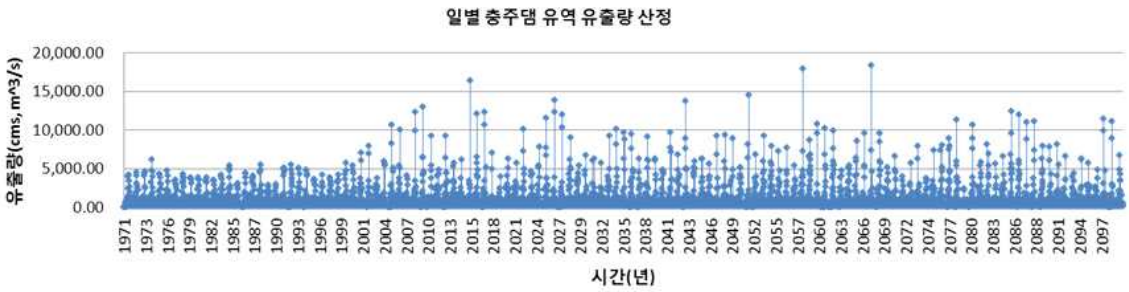


Fig. 3.4.28 일별 충주댐 유역 유출량 시나리오

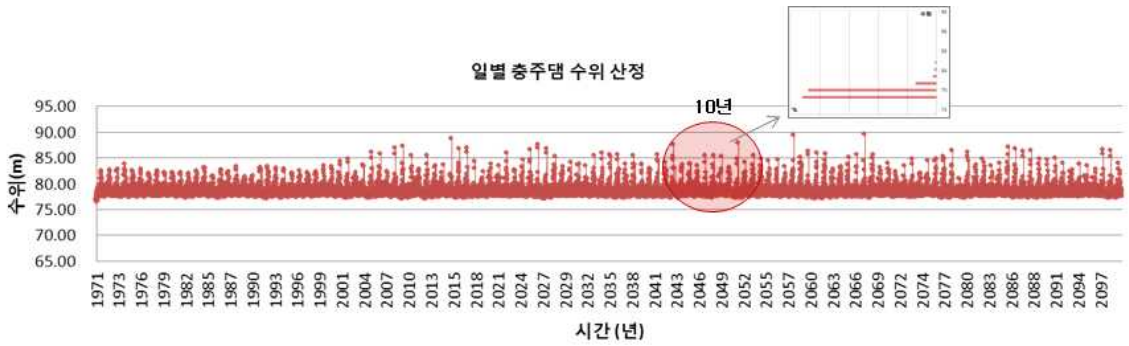


Fig. 3.4.29 일별 충주댐 수위 시나리오 산정

(나) 기후변화를 고려한 확률론적 구조물 위험도 분석

기후변화를 고려한 구조물의 확률론적 위험도는 앞 절에서 분석한 구조물 취약도 곡선과 수위의 확률분석 결과를 적용, 분석할 수 있다. 본 연구에서는 유출 시나리오를 수위 유량곡선을 적용하여 수위로 환산하였고, 이를 10년 주기로 구분, 10년 동안의 충주댐 수위의 확률적 분포를 산정하였다. 이와 같이 구한 10년간의 수위의 확률적 분포 분석 결과를 앞 절에서 구한 취약도 곡선에 적용하여 분석 구조물의 파괴확률을 산출하였다.

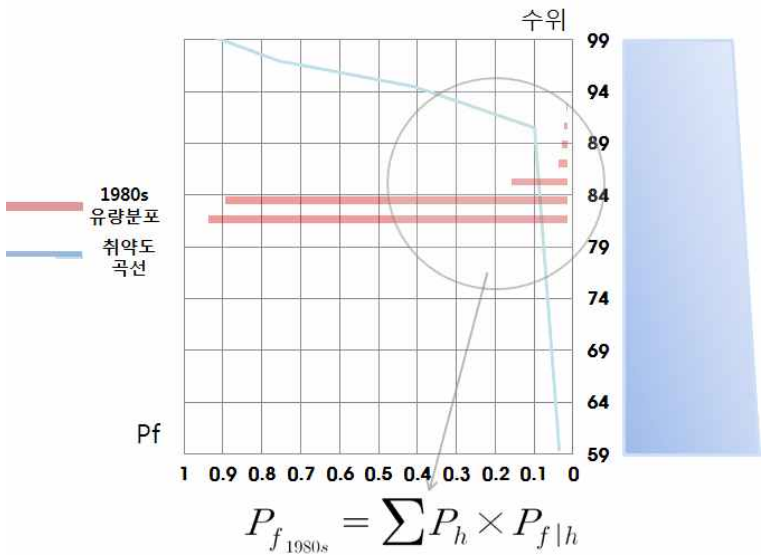


Fig. 3.4.30 확률론적 충주댐 위험도 분석 예 (1980년대)

Fig. 3.4.30은 1980년부터 1989년 10년간의 유출량 시나리오를 적용한 충주댐 위험도 분석 과정을 보여준다. 그림의 막대그래프는 수위별 발생 확률 분포를 나타내며, 그림의 곡선은 충주댐의 수위별 취약도 곡선을 나타낸다. 10년간의 충주댐 파괴확률은 수위의 발생 확률과 해당 수위에서의 구조물 파괴 확률 곱의 총 합으로 정의할 수 있으며, 이는 다음과 같이 도식화할 수 있다.

$$P_f = \sum P_h \times P_{f|h}$$

이와 같은 방식으로 10년 주기 충주댐의 파괴확률을 산정하였다. Fig. 3.4.31은 수위의 확률적 분포를 고려한 10년 주기 취약도 곡선 기반 충주댐 파괴확률 산정 곡선이다. 또한 수위의 확률적 분포 외에, 10년 중 최극한 강우시 수위에서의 구조물의 파괴확률을 산정할 수 있으며, Fig. 3.4.32는 극한 강우시의 수위를 고려한 10년 주기 취약도 곡선기반 충주댐 파괴확률 산정 곡선이다.

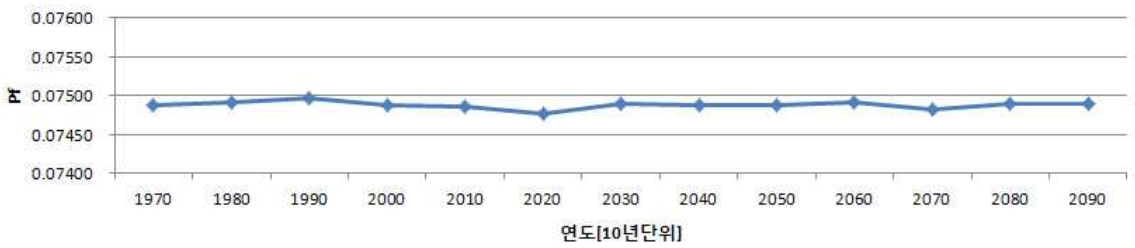


Fig. 3.4.31 취약도곡선 기반 10년 주기 충주댐 파괴확률 산정

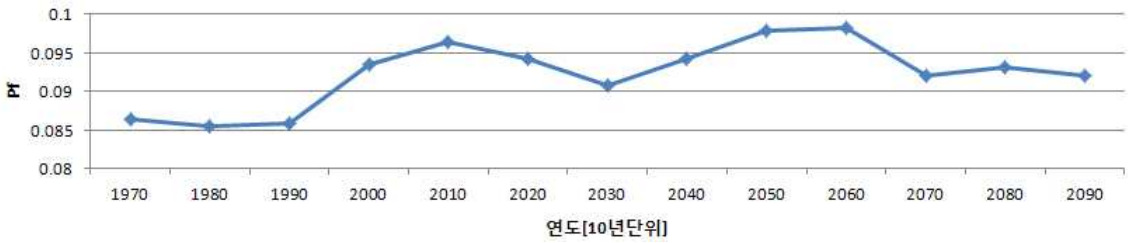


Fig. 3.4.32 취약도곡선 기반 10년 주기 극한강우시 충주댐 파괴확률 산정

라. 결론 및 향후 연구계획

본 연구에서는 지진하중에 대한 안정성을 위해 신뢰성 해석에 기반을 두고 개발된 취약도 곡선을 수위하중에 적용하여 수위에 따른 수공구조물의 거동에 적용시켰다. 또한 기후변화에 따라 수위가 급격히 증가함에 따라 수공구조물의 거동이 어떠한 방향으로 진행되는지 예측하고 타 세부과제의 유량 시나리오를 적용하여 한강유역 중 충주댐의 파괴확률 분석 수행을 통해 개발한 기법을 검증하였다. 거시적인 관점에서 예측할 수 있었던 결과와 취약도 곡선에서 표현되는 결과가 일치함으로 취약도 곡선의 수위하중에 대한 수공구조물 파괴 거동 예측은 어느 정도 타당성이 있다고 할 수 있다.

본 연구의 취약도 곡선은 정확한 수치를 요구하는 상세설계에 앞서 대략적인 설계를 할 때 유용하게 사용될 것이며 본 연구에서 수위에 대한 취약도 곡선의 적정성을 확인하였다. 따라서 후에 실질적 사용을 위해 취약도 곡선이 필요한 유역에 대해 상세 지반조사, 현장시험, 실내시험 등을 바탕으로 취약도 신뢰도를 높인 곡선의 개발이 요구된다. 또한, 교량에 대한 지진 취약도 곡선을 작성할 때, 회전연성에 따라 교량의 손상 단계가 정해져 있어 그에 따른 취약도 곡선이 산출된다. 반면, 수공구조물의 손상 단계는 정성적인 손상등급 구분은 있으나 정확한 수치나 수식에 대한 기준이 없는 실정이므로 후에 댐의 균열, 제방의 침투에 대한 손상등급을 정하는 연구가 선행된다면, 수공 구조물의 설계에 있어 적정 위험도 수준을 충족할 수 있는 확률 기반 최적 설계가 가능할 것으로 기대한다.

Table 3.4.27 댐 설계기준 개선안 제안 방향(예)

항목	기존내용	CCAPH-K 개선방향
제 6장 콘크리트중력댐 6.2 설계조건	6.2.4 제체의 안정성검토 및 일반사항 댐의 응력해석은 댐에 작용하는 댐의 자중, 정수압, 동수압, 양압력, 파압, 빙압, 퇴사압 및 지진력 등의 크기와 방향에 따라 응력상태를 적절히 판단되는 방법에서 행한다. (중략) 특히, 현저한 기초변형이 예상되는 댐에서는 저면 부근에 연직방향과 수평방향의 인장응력이 일어날 수도 있어 이 경우에는 이에 대응하는 대책을 강구해야 한다.	현재 정성적으로 작성되어 있는 해당 부분에 수위변화가 급변함을 강조하면서 해당 상황발생 시 대략적으로 수치를 알 수 있도록 취약도 곡선 방법을 제시하면서, 한강유역을 예로 규모별 압축 및 인장 취약도를 제시한다.

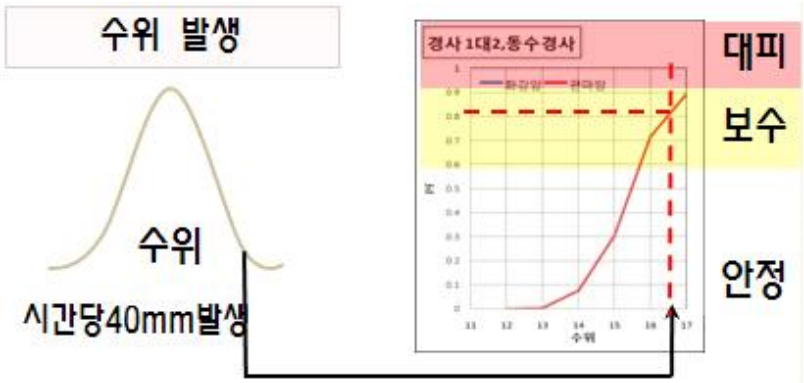


Fig. 3.4.33 강우량을 고려한 수공구조물 관리 프로세스 예시 (안)

또한 미국의 HAZUS, 일본의 DIS, 대만의 TELES 등 지진 발생 시 취약도 곡선을 기반으로 지진피해를 평가하고 초기 손실을 추정하여 피해단계를 지도로 표시하거나 수치로 나타내는 프로그램의 개발은 수위에 따른 수공구조물의 거동에도 충분히 적용이 가능하다. 추후 Fig. 3.4.33과 같이 이상 호우를 확률적인 과정을 통해 간단한 수위로 환산하고 이를 입력치로 하여 구조물의 거동을 예측, 결과로 피해 비용 산출까지 가능한 통합 수공구조물 관리 프로그램의 개발 등의 연구를 실현한다면, 최적 유지관리를 통해 기후변화에 따른 수공구조물의 피해를 감소시킬 수 있을 것으로 기대한다.

4. 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가

가. 서론

최근 10여 년간 우리나라에서 발생한 홍수와 가뭄 등 물 관련 재해가 분명히 과거와는 다른 패턴을 보이고 있는 등 최근 물 관리에 직접적인 영향을 주는 기상이변들의 발생이 증가하고 있는 추세이다. 이런 기상이변에 의한 각종 재해의 발생은 반드시 사회적인 비용을 초래한다.

따라서 본 연구에서는 이러한 기상재해 중 일반적인 국가 경제 및 정책에 가장 큰 영향을 미치는 홍수 및 가뭄에 대한 분석을 실시하여 두 재해요소의 기후변화에 따른 예측 피해비용 산정 방법론을 설정하고 설정된 방법론에 기후 변화시나리오에 적용하여 우리나라의 기후변화에 따른 홍수 및 가뭄으로 인한 경제적 파급효과를 추정하였다.

나. 기후변화와 물관리의 경제학적 접근

스턴 보고서는 기후변화를 경제학적 개념인 외부효과[1](externality)로 규정하였다. 그러나 기후변화는 우리가 일반적으로 말하는 외부효과와는 다른 원인과 결과가 전지구적이며, 영향이 장기적이고 지속적이며, 불확실성과 위험이 크며, 회복하기 어려울 정도의 경제적 충격이 발생하는 것과 구분됨을 제시하였다(Stern, 2007). 이와 같이 기후변화의 충격은 그 범위가 광범위하고 다른 시장의 실패(market failure)와 함께 경제 전반에 큰 영향을 줄 것이라고 예상한 것이다. 여기서 말하는 시장의 실패는 국가 물 관리도 포함이 된다. 가령 기후변화의 영향으로 특정 지역에 일시적인 강우가 집중될 확률도 높아지는 반면 가뭄이 발생할 확률 또는 높아질 것이라고 많은 전문가들이 예상하고 있으며 그것이 기후변화와 관련된 물 관리 분야의 주장이라고 할 수 있다.

기후변화로 인한 경제적 파급효과를 정량적으로 추정하는 것은 다음과 같은 측면에서 의미가 있다. 첫째, 기후변화에 대한 지역공동체나 국가의 취약성을 가늠하게 한다. 둘째, 기상재난의 피해를 방지하거나 완화시키는 사회간접자본(SOC)투자에 대한 경제적 타당성을 확보한다. 셋째, 기후변화로 인해 발생하는 기상이변에 대한 적절한 원조수분의 판단 근거로 활용될 수 있다. 넷째, 복구에 대한 의사결정에 도움을 준다. 다섯째, 불확실한 기후변화에 대해 리스크관리를 담당하는 보험사들에게 예상 가능한 피해범주의 정보를 제공하며 공공적인 측면에서도 기후변화에 취약한 계층을 보호하기 위한 국가의 정책적 시사점을 제공한다.

우리나라는 기후변화에 대한 적응정책의 출발점에 서 있으며 이러한 정책방향에 대한 기준이 필요하며, 지금까지 수행된 기후변화에 따른 수자원 대응연구의 대부분은 수리수문학적 연구에 그치고 있으며, 이를 경제적인 관점으로 전환시키는 연구는 미흡한 실정이다.

---

1) it entails costs that are not paid for by those who create the emissions

다. 기후변화에 따른 홍수피해 추정

홍수 피해 분석기간 중 가장 큰 홍수피해가 발생한 해는 2002년이었으며, 무려 7조5천억원에 해당하는 피해가 발생한 것으로 조사되었다. 2002년에는 기록적인 호우를 동반했던 태풍 '루사'가 발생한 해로, 이 당시의 피해는 다른 해에 비해 압도적으로 큰 값을 나타내고 있다. 두 번째로 큰 피해가 발생한 해는 2003년으로 약 5조 3천억원의 피해액을 기록하였다. 2003년은 2002년의 태풍 '루사'에 못지 않았던 태풍 '매미'가 발생한 해로서 2002년에 버금가는 엄청난 피해를 유발하였다. 세 번째의 큰 피해가 발생한 해는 2006년으로 앞선 경우와 동일하게 태풍이 주된 이유였다. 2006년의 경우 태풍 '에위니아' 등으로 인해 많은 피해가 발생했으며 약 2조원의 피해액을 기록하였다.

지역별 피해액을 살펴보면, 가장 큰 피해가 발생했던 지역은 강원도이며, 두 번째는 경상북도, 세 번째는 경상남도로 나타났다. 2002년 태풍 '루사'로 인한 피해가 가장 크게 발생했던 곳은 강릉을 중심으로 한 강원도 지역이며, 2003년 태풍 '매미' 때는 김천 등을 중심으로 한 경상북도가 가장 큰 피해를 입은 바 있다. 또한 2006년 태풍 '에위니아' 등은 경상남도에 큰 피해를 발생시킨 것으로 기록되어있다.

이처럼 분석기간 동안 전국적으로 큰 피해가 발생한 해는 2002년, 2003년, 2006년으로 초대형 태풍으로 인해 대규모 피해가 발생했던 해와 일치하는 경향을 보여주고 있으며, 이는 우리나라 홍수피해의 많은 부분이 태풍으로 인한 것임을 짐작하게 해주는 결과이다.

(1) 지역별 홍수피해 특성 분석

본 연구에서는 재해피해액 총액이 500만원 이상인 재해사상을 대상으로 하였으며, 또한 피해가 발생했을 당시 총 누가강우량이 30mm이상인 재해사상만을 분석에 사용하였다. 이러한 조건에 해당하는 홍수피해 발생횟수는 전국적으로 총 1,070회에 달하였다. 지역별로 구분하면 전라남도 지역이 120회(11.2%)로 가장 많은 것으로 나타났고, 경상북도, 경기도의 순으로 재해가 많이 발생한 것으로 나타났다. 반대로 대구지역의 경우는 총 26회(2.4%)로 전라남도 지역에 비해 1/5의 수준으로 재해발생 빈도가 상대적으로 낮은 것으로 조사되었다. 전반적으로, 광역시에 비해 도(道)의 피해발생 횟수가 높은 것으로 나타났다. 이는 호우의 지역적인 특성과 지역별 방재능력의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 또한 큰 피해액을 기록한 피해사상을 살펴보면 강원도, 경상남도, 경상북도, 경기도 등에서 많이 관찰되고 있다. 가장 많은 홍수피해 발생횟수를 기록했던 전라남도의 경우, 평균피해액은 다른 지역에 비해 상대적으로 낮게 나타나고 있다. 즉, 발생횟수는 많으나, 그에 따른 피해액은 상대적으로 낮은 것으로 나타나고 있다. 가장 높은 평균피해액을 기록한 지역은 강원도로 홍수피해사상 1회당 평균 900억원의 피해가 발생하는 것으로 조사되었다. 이는 전국대비 약 26%에 해당하는 금액이다. 그 다음으로는 경상남도, 경상북도, 그리고 경기도의 순으로 평균피해액이 높은 것으로 나타났다.

평균피해액이 가장 낮은 지역은 인천시와 광주시로 각각 28억, 29억의 평균피해액을 기록하였다. 광역시 중에서 가장 높은 평균피해액을 기록한 지역은 부산시로 112억을 기록하였으며, 이는 강원도의 1/8, 그러나 인천시의 4배에 해당하는 값이다. 평균피해액이

가장 높은 지역(강원도)과 낮은 지역(인천시)을 비교하면 그 피해액이 무려 30배 이상 차이가 나는 것으로 나타났다. 분석기간 동안 조사된 가장 큰 피해사상은 2002년 8월30일~9월1일에 태풍 '루사'가 강원도 지역에 기록한 3조1천억원이었으며, 이 당시 3일동안 내린 총 누가강우량은 270mm로 그리 크지 않았으나, 1시간 최대 27.6mm, 3시간 최대 66.3mm, 6시간 최대 118.9mm 등 짧은 시간에 많은 양의 비를 내린 것으로 조사되었다. 두 번째로 큰 피해사상은 2003년 9월12~13일에 발생했던 태풍 '매미'에 의해 발생한 경상남도지역의 피해로 피해규모는 2조3천억원에 달했다.

다음으로, 분석기간(1985~2009, 25년)동안 발생했던 피해사상을 모두 고려한 누적홍수피해액을 지역별로 정리하였다. 누적피해액은 재해사상의 단일규모 평균피해액 뿐만 아니라, 재해의 발생횟수도 모두 고려하여 해당 지역에서 과거 25년간 발생했던 홍수피해를 모두 합산한 결과이다. 광역시에 비해 도(道)의 누적피해액이 월등히 높은 것으로 나타나고 있다.

가장 피해액이 높은 지역은 강원도로 25년간 누적피해액이 7조 9천억원으로 전국대비 25%에 해당하는 값이다. 다음으로는 경상남도, 경상북도, 그리고 경기도의 순으로 피해액이 큰 것으로 조사되었다. 가장 피해액이 적었던 지역은 대구지역으로 피해액은 천백억원, 이는 전국대비 0.4%에 해당하는 값이다. 누적피해액이 가장 큰 강원도와 가장 적은 대구시의 피해액 차이는 무려 70배인 것으로 조사되었다.

강원지역의 경우, 총 피해발생횟수는 많지 않으나, 평균피해액이 커서, 누적피해액이 가장 큰 것으로 나타나고 있다. 반대로 대구시의 경우, 평균피해액은 인천시보다 1.5배 크지만, 피해발생횟수가 인천시의 절반으로 호우에 의한 누적피해액은 가장 낮은 것으로 조사되었다.

흥미로운 결과는 8개 도(道)의 과거 25년간 누적피해액이 전국대비 94.1%를 차지한다는 것이다. 그 중, 강원도, 경상남도, 경상북도, 경기도 등 4개 지역이 전국대비 67.2%에 해당하는 누적피해액을 차지하고 있다. 전국 7개 광역시의 누적피해액은 5.9%에 불과한 것으로 조사되었다. 따라서, 8개 도(道), 그 중에서도 과거 피해가 컸던 4개 지역의 홍수피해저감 방안이 시급한 것으로 나타났다.

(2) 지역별 강우 특성 분석

앞선 지역별 홍수피해 특성분석 결과, 광역시에 비해 도(道)의 홍수피해액이 월등히 높은 것으로 조사되었다. 본 절에서는 각 지역별로 홍수피해가 발생했을 당시의 강우자료를 수집하여 홍수피해시 강우사상의 지속시간별 크기, 강우강도, 강우지속시간 등을 종합적으로 분석하였다. 본 연구에 사용된 강우자료는 각 지역에 설치된 관측소에서 측정한 강우량자료를 수집하여 평균한 값이므로, 관측소의 조밀도, 지역면적 등의 영향을 받을 것임을 짐작할 수 있다.

본 연구를 통해 지역별로 강우 사상의 특성과 피해액 발생 양상의 관계를 정량적으로 연계할 수 있다면 강우 사상의 특성에 의한 피해액을 추정할 수 있고, 지역 간의 특성도 비교 평가가 가능할 것이다. 따라서 강우사상의 크기, 특성, 발생빈도 등을 종합적으로 분석해서 피해액과의 비교 평가를 수행할 필요가 있다.

(가) 피해사상별 1시간 최대강우량

지역별로 피해가 발생하였던 당시의 호우사상에 대해 1시간 최대강우량을 분석하였다. 지역별 홍수피해 발생현황은 전반적으로 7개 광역시의 시간최대 강우량이 8개 도(道)에 비해 2배 이상 큰 것으로 조사되었다(이는 해당 지역의 크기, 강우 관측소의 밀도 등에 영향을 받을 것으로 판단됨). 특히 서울지역의 경우 평균 시간최대 강수량이 34mm로 경상북도지역의 8mm에 비해 4배 이상 큰 것으로 나타났다.

서울시는 2001년 7월5일~7월15일에 발생한 호우로 시간당 90mm에 해당하는 기록적인 강우량을 기록한 바 있다. 당시 홍수피해액은 538억으로 서울시에 과거 25년간 발생한 피해액 중 두 번째로 큰 피해사상이었다. 따라서, 서울지역의 경우 시간최대 강우량과 홍수피해액이 일정한 상관관계를 갖고 있음을 짐작할 수 있다.

(나) 피해사상별 24시간 최대강우량

지역별로 피해가 발생하였던 당시의 호우사상에 대해 24시간 최대강우량을 분석하였다. 전반적으로 광역시의 평균값이 도(道)에 비해 높은 것으로 조사되었으나, 그 차이가 그리 크지 않다. 지역별로 가장 큰 평균값을 갖는 지역은 서울시로 재해발생시 24시간 평균 132mm의 강우가 내린 것으로 조사되었다.

서울시는 1998년 7월31일-8월18일에 발생한 호우로 24시간동안 최대 332.6mm의 비가 내렸으며, 당시 피해액은 626억으로 서울시에 과거 25년간 발생한 피해액 중 가장 큰 피해사상이었으며, 따라서, 24시간최대 강우량과 홍수피해액이 일정한 상관관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 강원도의 경우 2002년 8월30일-9월1일에 (태풍 '매미') 24시간 최대 253.1mm의 호우가 발생하였으며, 당시 역대 강원지역의 최대 피해액인 3조1천억원을 기록하였다. 따라서, 강원지역도 마찬가지로 24시간최대 강우량을 홍수피해액 추정에 사용할 수 있을 것이다.

(다) 피해사상별 누적강우량

지역별로 피해가 발생하였던 당시의 호우사상에 대해 누적강우량을 분석하였다. 지역별로 가장 큰 평균값을 갖는 지역은 서울시로 재해발생시 누적강우량이 평균 241mm로 조사되었다. 서울시는 1998년 7월31일-8월18일에 발생한 호우로 총 1081.0mm의 기록적인 강우가 내렸으며, 당시 피해액은 626억으로 서울시에 과거 25년간 발생한 피해액 중 가장 큰 피해사상이다. 따라서, 24시간 최대강우량과 마찬가지로 누적강우량도 홍수피해액과 양(+)의 상관관계를 갖고 있음을 알 수 있다.

경기지역의 경우 같은 기간 796.8mm의 누적강우량이 내렸으며, 당시 피해액은 5603억원으로 역대 가장 큰 피해사상이었다. 하지만, 대구시와 광주시의 경우 많은 누적강우량을 기록한 호우사상이 반드시 큰 피해를 일으키는 것은 아닌 것으로 조사되어, 지역별로 유의한 강우인자가 상이함을 알 수 있다.

(라) 피해사상별 강우지속시간

지역별로 피해가 발생하였던 당시의 호우사상에 대해 강우의 지속시간을 분석하였다. 강우량과는 반대로, 전반적으로 도(道)의 강우지속시간이 광역시에 비해 긴 것으로 조사되었으며, 이는 지역면적과 관계가 있을 것으로 판단된다. 주목할 사항은 가장 긴 지속시간을 기록한 호우 사상이 지역별로 동일하다는 것이다. 2006년 7월9일-7월29일에 발생한 장기간의 장마가 전국적으로 영향을 미친 것으로 판단되며, 이 시기는 태풍 '에위니아'가 발생한 시기이기도 하다.

강우지속시간은 호우피해액과 밀접한 상관관계를 발견할 수 없었는데, 일반적으로 큰 피해가 발생하는 호우사상은 긴 장마철보다는 짧은 시간에 큰 비가 순간적으로 내리는 집중호우에 의해 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

(마) 피해사상별 평균 강우강도

지역별로 피해가 발생하였던 당시의 호우사상에 대해 평균 강우강도를 조사하였다. 즉, 피해발생시 내린 총 누가강우량을 강우의 지속시간으로 나누어 강우강도를 계산하였다. 일반적으로 큰 홍수피해는 짧은 시간에 큰 비가 순간적으로 내렸을 때 발생하는 것으로 알려져 있으므로 강우강도가 큰 호우가 발생하였을 때 큰 피해가 발생할 것임을 짐작할 수 있다. 지역별로 가장 큰 강우강도가 발생한 호우사상은 모두 강우의 지속시간이 2일 이내인 짧은 사상이었음을 알 수 있다.

대구시와 경상남도의 경우, 강우강도가 가장 크게 발생한 호우에 분석기간 중 가장 큰 피해가 각각 발생했던 것으로 조사되었으며, 따라서 이들 지역의 홍수피해규모 예측을 위해서는 강우강도를 입력인자로 활용하는 것이 바람직할 것이다.

(3) 지역별 특성 분석

(가) 서울

피해사상별 평균피해액은 49억원으로 전국대비 1.4%에 해당하고 25년 누적피해액은 2,165억으로 전국대비 0.7%에 해당된다. 피해사상별 강우자료를 살펴보면 평균 1시간 최대강우량, 24시간 최대강우량, 누가강우량 등에서 가장 큰 값을 나타낸다. 과거 발생했던 호우사상에 비해 피해액은 상대적으로 낮은 것으로 조사되었다.

(나) 부산

피해사상별 평균피해액은 113억원으로 전국대비 3.3%에 해당하고, 7개 광역시 중 가장 높은 값을 보인다. 25년 누적피해액은 6,830억으로 전국대비 2.2%에 해당하며 이 또한 광역시 중 가장 큰 값이다. 피해사상별 강우자료를 살펴보면 평균 1시간 최대강우량, 24시간 최대강량이 서울지역 다음으로 높은 것으로 조사되었다. 강우강도는 전국에서 가장 높은 것으로 조사되었다. 부산시는 광역시 중 가장 피해규모가 큰 것으로 조사되었다.

(다) 인천

피해사상별 평균피해액은 29억원으로 전국대비 0.8%에 해당하고, 전국에서 가장 낮은

것으로 조사되었다. 25년 누적피해액은 1,894억으로 전국대비 0.6%에 해당한다. 피해사상별 강우자료를 살펴보면 누가강우량이 전국에서 서울지역 다음으로 높은 것으로 나타났으며, 강우지속시간은 광역시 중 가장 긴 것으로 조사되었다. 인천시는 상대적으로 호우피해액이 낮으며 강우인자 중 누가강우량, 강우지속시간이 높은 것으로 조사되었다.

(라) 대구

대구시는 전국에서 피해발생회수가 가장 낮은 것으로 조사되었다. 피해사상별 평균피해액은 44억원으로 전국대비 1.3%에 해당하고, 25년 누적피해액은 1,149억으로 전국대비 0.4%에 해당하며 이는 전국에서 가장 낮은 것으로 조사되었다. 피해사상별 강우자료를 살펴보면 지역특성상 강우량 등이 전국에서 가장 낮은 것으로 조사되었으며, 강우인자 중 강우강도가 홍수피해규모 예측에 가장 상관성이 높은 것으로 나타났다.

(마) 대전

피해사상별 평균피해액은 38억원으로 전국대비 1.1%에 해당하고, 25년 누적피해액은 1,795억으로 전국대비 0.6%에 해당하며 이는 전국에서 세 번째로 낮은 것으로 조사되었다. 대전시는 조사된 강우인자 중 홍수피해액과 일정한 상관관계를 갖는 인자를 발견할 수 없었다.

(바) 광주

피해사상별 평균피해액은 29억원으로 전국에서 인천시 다음으로 낮은 것으로 나타났으며, 25년 누적피해액은 1,601억으로 전국대비 0.5%에 해당하며 이는 전국에서 대구시 다음으로 낮은 것으로 조사되었다. 피해사상별 강우자료를 살펴보면, 강우인자 중 24시간 최대강우량이 홍수피해규모 예측에 상관성이 높은 것으로 나타났다. 광주시는 평균피해액이나 누적피해액이 전국에서 가장 낮은 수준인 것으로 조사되었다.

(사) 울산

울산시는 전국에서 피해발생회수가 두 번째로 낮은 것으로 조사되었다. 피해사상별 평균피해액은 67억원으로 광역시 중 부산지역 다음으로 높은 것으로 나타났다. 25년 누적피해액은 2,911억으로 광역시 중 부산지역 다음으로 높은 값이다. 조사된 강우인자 중 홍수피해액과 일정한 상관관계를 갖는 인자를 발견할 수 없었으나 전반적으로 피해규모가 광역시 중 높은 것으로 조사되었다.

(아) 경기도

경기도는 전국에서 피해발생회수가 전라남도, 경상북도 다음으로 높은 것으로 조사되었다. 피해사상별 평균피해액은 322억원으로 전국대비 9.3%에 해당하고, 25년 누적피해액은 3조2천억으로 전국대비 10.2%에 해당한다. 피해사상별 강우자료를 살펴보면, 강우인자 중 24시간 강우량, 누가강우량, 강우강도가 홍수피해규모 예측에 상관성이 높은 것으로 나타났다.

(자) 강원도

피해사상별 평균피해액은 898억원으로 전국대비 25.9%로 가장 높고, 25년 누적피해액도 7조9천억으로 전국에서 가장 높다. 피해사상별 강우자료를 살펴보면, 강우인자 중 1시간 최대 강우량, 24시간 최대강우량 등이 홍수피해규모 예측에 가장 상관성이 높은 것으로 나타났다. 강원도는 전국에서 가장 홍수피해에 취약한 지역으로, 피해액이 전국의 1/4에 해당한다. 특히 여름철 태풍이나 짧은 기간에 내리는 돌발홍수에 취약한 것으로 조사되었다.

(차) 충청남도

피해사상별 평균피해액은 240억원으로 전국대비 6.9%에 해당하고, 25년 누적피해액은 2조3천억으로 전국대비 7.3%에 해당한다. 피해사상별 강우자료를 살펴보면, 강우인자 중 24시간 강우량, 누가강우량 등이 홍수피해규모 예측에 상관성이 높은 것으로 나타났다.

(카) 충청북도

충청북도는 전국 도(道)중에서 피해발생회수가 가장 낮은 것으로 조사되었다. 피해사상별 평균피해액은 240억원으로 전국대비 6.9%에 해당하고, 25년 누적피해액은 1조8천억으로 전국대비 5.9%로 전라북도에 이어 낮은 것으로 조사되었다.

(타) 경상남도

피해사상별 평균피해액은 632억원으로 전국대비 18.2%에 해당하고, 이는 강원도 다음으로 높은 값이다. 25년 누적피해액은 5조8천억으로 전국대비 18.6%에 해당하며 역시 강원도 다음으로 전국에서 가장 높은 값이다. 피해사상별 강우자료를 살펴보면, 강우인자 중 평균 강우강도가 홍수피해규모 예측에 상관성이 높은 것으로 나타났다.

(파) 경상북도

경상북도는 전라남도 다음으로 피해발생회수가 높은 것으로 조사되었다. 피해사상별 평균피해액은 392억원으로 전국에서 세 번째로 높은 값이며, 25년 누적피해액은 4조1천억으로 전국대비 13.1%에 해당하며 이 역시 전국에서 세 번째로 높은 값이다. 경상북도는 강원도와 마찬가지로 지역특성상, 여름철 태풍이나 짧은 기간에 내리는 돌발홍수에 취약한 것으로 조사되었다.

(하) 전라남도

전라남도는 피해발생회수가 전국에서 가장 높은 것으로 조사되었다. 피해사상별 평균피해액은 224억원으로 전국대비 6.5%에 해당하고, 25년 누적피해액은 2조8천억으로 전국대비 9.1%에 해당한다. 전라남도는 피해발생횟수는 높으나 평균피해액이 낮아 누적피해

액도 다른 도에 비해 상대적으로 낮은 것으로 조사되었다. 전라남도는 조사된 강우인자 중 홍수피해액과 일정한 상관관계를 갖는 인자를 발견할 수 없었다.

(거) 전라북도

피해사상별 평균피해액은 146억원으로 전국 도(道)중에서 가장 낮은 것으로 조사되었다. 25년 누적피해액 역시 1조4천억으로 전라남도의 절반정도에 불과하다. 피해사상별 강우자료를 살펴보면 강우량 등이 여타 도(道)에 비해 낮은 것으로 조사되었다.

(너) 지역별 분석 시사점

본 연구에 사용된 강우자료는 각 지역별 관측소의 평균값이므로, 상대적으로 관측소가 조밀한 광역시의 강우량 값이 도(道)에 비해 크게 산정될 수 있을 것이다. 따라서 1시간 최대 강수량, 24시간 최대 강수량, 누적강수량, 강우강도 등은 광역시에서 더 크게 산정되었다. 그와 반대로, 호우 시 평균 강우지속시간은 도(道)에서 더 긴 것으로 조사되었는데, 이는 지역면적이 큰 변수로 작용한 것으로 판단된다.

피해액은 각 지역별 시군구에서 수집한 자료들을 합산한 값이므로, 지역면적, 지역 내 시설물, 그리고 지역 내 방재시설의 유무 등에 영향을 받을 것이다. 조사 결과, 면적이 큰 도(道)의 평균 및 누적 피해액이 광역시에 비해 크게 나타났다. 아울러, 우리나라의 호우피해는 지속시간이 긴 장마 보다는 단기간에 많은 비가 내리는 집중호우 및 태풍에 의해 큰 피해가 발생하는 것으로 강우자료의 분석결과 확인되었다.

지역별로는 강원도, 경상남도, 경상북도, 경기도 등 4개 지역이 전국대비 67.2%에 해당하는 누적피해액을 차지하고 있어, 이들 지역에 대한 재해대비가 특히 시급한 것으로 조사되었다. 8개 도(道)의 과거 25년간 누적피해액이 전국대비 94.1%를 차지하고 광역시의 누적피해액은 5.9%에 불과한 것으로 조사되었다. 광역시 중에는 부산시의 피해액이 가장 큰 것으로 나타났다.

(4) 홍수피해함수 산정

(가) 분석모형 및 방법

본 연구에서는 홍수피해함수 산정에 Growth Function 형태의 함수를 이용하였다.

이러한 Growth Function을 홍수 피해추정에 사용한 예로는 Boyd 등(2005)이 과거 7차례 큰 태풍으로 인해 미국에서 발생한 침수심과 재해사망율(지역 전체 인구 대비 홍수로 인한 사망자의 수)의 관계를 Growth Function을 이용하여 표현한 바 있다.

$$F_D = \frac{0.34}{1 + \exp(20.37 - 6.18 \times h)} \quad \text{(Boyd 등, 2005)} \qquad (3.4.7)$$

여기서 F_D = 재해사망율, h = 침수심(m)을 나타낸다.

이와 같이 S형 곡선의 비대칭함수가 선택된 이유는 경험적으로 극한 홍수가 발생하더라도 사람들은 사전에 대피하거나 지붕이나 고지대로 올라가서 홍수를 피하기 때문에 재해사망율이 1이 되는 즉, 지역에 거주민 모두가 사망하는 것은 아주 드물 것이라고 판단했기 때문이다. 본 연구에서도 아무리 많은 비가 특정 지역에 내리더라도 도시 전체의 자산이 모두 피해를 입는 경우는 아주 드물 것이라고 판단되었고, 이것이 Growth Function을 선택한 또 다른 이유이다.

최종적으로 본 연구에 적용된 피해함수식은 다음과 같다.

$$Y(\text{피해액}) = \frac{K}{1+\mathrm{E}\exp(b_0+b_1\times x_1+b_2\times x_2)} \tag{3.4.8}$$

여기서, Y는 피해액(억원) K는 함수의 최대 수렴값(억원)이며 본 연구에서는 과거기록된 홍수피해 최대액을 적용하였다. 또한 b_0, b_1 및 b_2는 각각 지역화 회귀계수를 나타내며, 이러한 지역화 회귀계수들은 홍수 피해를 저감 또는 증가시키는 지역적 특성을 나타내는 인자들로, 수학적으로 계수 b_0값이 크면 피해금액이 급격히 증가하는 시점이 우측으로 이동하게 되고, b_1, b_2는 일반적으로 이 둘의 상대적인 크기에 따라서 각 지역이 총강우량에 취약한지 강우강도에 취약한지를 판단할 수 있는 계수이다(장옥재, 김영오, 2009). 또한 x_1 및 x_2는 각각 호우기간중의 일 최대 강우량(mm)과 총강우량(mm)을 나타낸다. 이러한 독립변수들이 홍수피해를 어느 정도 정확하게 모의할 수 있는지에 대한 의문은 미지수이다. 그러나 이러한 변수들을 선정한 이유는 AR-4 기후변화 시나리오가 일단위로 제공되기 때문에 이를 적용할 수밖에 없기 때문이다. 물론 향후 좀 더 시간적으로 세분화된 기후변화 시나리오가 제공된다면 좀 더 다양한 독립변수들을 추가하여 적용할 수 있을 것이다. 각 광역지자체별로 강우특성들과 피해액의 상관관계를 Growth Function으로 표현하기 위해 먼저 관측값에서 함수의 초기값을 결정하였고, SPSS 12(SPSS INC., 2003) 프로그램으로 최종값을 추정하였다. 목적함수로는 관측값과 모의값의 차이인 편차(Bias) 제곱의 합인 RMSE가 최소가 되는 경우를 선택하였으며 비선형 회귀식 추정방법으로 Levenberg-Marquart 방법을 적용하였다. 광역자치단체별로 다소 차이를 나타내기는 하였으나 대부분 지역의 적합도가 0.9 이상으로 회귀결과가 우수한 것으로 판단된다.

실제 과거 관측자료의 피해액에 대한 일 최대강우량의 최소값은 지역별로 약 10~30mm로 나타났다. 그러나 실제적으로는 이 강우량에 대해 매번 피해가 발생하는 것은 아니기 때문에 피해함수를 기후변화 시나리오에 적용하기 위해서는 적절한 최소값을 설정해 주어야 한다. 즉, 이상에서 도출된 피해함수를 기후변화 시나리오에 적용하기 위해 독립변수의 최소값을 결정하였다. 독립변수 중 호우사상기간 동안의 누가강우량은 일 최대강우량을 포함하기 때문에 별도로 최소값을 결정하지 않고 다만 일 최대 강우량에 대한 최소값만을 결정하였다. 최소값은 다음 그림과 같이 계급구간을 5mm로 나누어 지역별로 홍수피해 발생확률 누가분포를 산정해 15%에 해당하는 강우량값을 근사적으로 결정하였다.

(나) 적용결과

A2시나리오의 경우 홍수피해 증감율의 경우 2020s의 경우 부산광역시는 1990s 대비 0.93로 약간 감소할 것으로 나타났으며, 울산은 1.01로 현재와 비슷할 것으로 전망되었다. 또한 대구광역시와 경상북도는 2배 이상 증가할 것으로 전망되었으며, 그 외의 지역은 1.42~1.99배로 2배 이내에서 증가할 것으로 나타났다. 20년대를 지나 2050s에는 울산광역시와 부산광역시의 경우 1900s와 비슷한 홍수피해가 발생할 것으로 전망되었으며, 2020s에 비해 현재대비 2배 이상의 홍수피해가 전망되는 지역이 급증할 것으로 예측되었으며, 경상남도, 전라남도, 대구광역시, 인천광역시, 경상북도, 경기도, 충청남도 및 전라북도가 이에 속하며, 경상북도의 경우 약 5.91배까지 증가될 것으로 전망되었다. 2080s의 경우에는 2050s와 유사한 홍수피해 증가가 발생될 것으로 전망되었으며 이 기간 역시 경상북도의 홍수피해가 현재와 비교하여 가장 큰 폭으로 증가될 것으로 나타났다.

연평균 피해액의 경우 예측기간에서 대전광역시, 대구광역시, 인천광역시 및 광주광역시가 대부분 연평균 10억원 미만으로 예측된 반면 강원도, 경상북도 및 경상남도의 경우에는 연평균 홍수피해액이 3,000억 이상 발생될 것으로 예측되었다.

A1B 시나리오는 다른 두 시나리오 비해 홍수피해측면에서 가장 취약한 시나리오로 나타났다. 전 기간 전국평균 홍수피해증감비율이 A2 시나리오는 2.001, B1 시나리오는 2.080인데 비래 A1B 시나리오는 2.922로 나타났다. 따라서 모든 시나리오에 대한 최대피해증감율은 A1B 시나리오 2080s기간의 경기도의 경우로, 6.65로 나타났으며, 최대 연평균 홍수피해액 전망도 A1B 시나리오 2080s기간의 강원도로 약 9,500억원으로 전망되었다.

이 시나리오에 따르면 홍수피해 증감의 경우 비교적 부산광역시와 울산광역시의 경우 기후변화에 의한 홍수피해 증감의 영향은 미비한 것으로 나타난 반면, 대구광역시, 경기도, 충청남도에는 큰 영향을 줄 것으로 예측되었다.

피해액 측면에서 볼 경우 A2 시나리오와 마찬가지로 7대 광역시의 피해액이 가장 적게 발생할 것으로 전망되었으며, 특히 광주광역시, 대전광역시, 울산광역시가 가장 작은 피해가 발생할 것으로 전망되었다. 반면 도의 경우에는 비교적 광역시 보다 큰 규모의 홍수피해가 발생할 것으로 예측되었으며, 특히 경상북도, 경기도, 경상남도, 강원도 순으로 피해액이 크게 발생할 것으로 전망되었다.

B1 시나리오는 세 시나리오 중 홍수피해에 비교적 가장 적게 영향을 미치는 시나리오로 나타났다. 2020s의 경우 부산광역시 및 울산광역시는 오히려 현재보다 홍수피해가 적게 발생할 것으로 예측되었으며, 이후의 기간에서도 홍수피해에 대한 기후변화의 영향이 미비한 것으로 전망되었다. B1 시나리의 경우에는 비교적 경기도, 대구광역시의 홍수피해가 현재 대비 큰 폭으로 증가할 것으로 전망되었다. 홍수피해액의 경우에는 앞의 두 시나리오와 마찬가지로 도의 경우 광역시보다 크게 발생할 것으로 전망되었으며, 대전광역시, 광주광역시시가 홍수피해가 비교적 적게 발생할 것으로 예상된 반면, 강원도, 경상남도 및 경상북도의 피해가 클 것으로 전망되었다.

지역별로 연대에 따른 홍수피해 증감변화를 살펴보기 위해서 종축의 최소값을 0.0, 최대값을 7.0으로 통일하여 나타내었다. 대부분의 모든 지역 및 시나리오에서 미래로 갈수

록 홍수피해 증감율이 커짐을 알 수 있었다. 따라서 이러한 기후변화로 인한 미래 홍수피해에 대해 정확히 얼마라고 딱 부러지게 제시하기는 어렵겠지만 분명한 것은 확실히 피해규모는 커질 것이라는 것은 알 수 있다. 이러한 금적적인 피해의 증가는 반드시 인명상의 피해 역시 증가시킬 것이다. 따라서 국가적 차원에서 국민의 인적·금전적 피해예방을 위해서는 기후변화에 관심을 더욱 기울여야 할 것이며 이에 대한 적응 및 대응을 위해 모두가 노력하여야 할 것이다.

지역별로 살펴보면 광역시의 경우 부산광역시(0.90~1.39)와 울산광역시(0.98~1.23)는 모든 시나리오에서 기후변화에 따른 홍수피해의 증감이 현재대비 미비하게 변할 것으로 전망되었으며, 그 뒤를 이어 대전광역시(1.27~3.23), 광주광역시(1.30~2.74), 서울특별시(1.56~4.19), 인천광역시(1.57~4.29)의 순으로 예측되었다. 또한 광역시 중 최대 증가율을 나타내는 곳은 대구광역시(2.02~4.56)로 나타났다. 도의 경우 전라북도(1.57~2.82), 충청북도(1.58~3.26), 강원도(1.61~3.21), 경상남도(1.55~3.71)의 순이며, 그 뒤를 이여 경상북도(1.96~5.91)와 경기도(1.83~6.65)의 영향이 가장 클 것으로 예측되었다.

치수방재시설이 잘 갖추어져 있는 광역시의 경우에는 과거 관측된 홍수피해액의 규모가 도의 경우보다 작기 때문에 홍수피해 증감율이 커지더라도 전체적인 홍수피해액의 증가는 비교적 적은 편으로 나타났다. 즉 기후변화에 따른 홍수피해 전망을 위해서는 미래 홍수피해 증감 예측결과와 과거 홍수피해현황을 모두 고려하여야 할 것으로 판단된다. 이러한 결과는 연평균 홍수피해액이 1,000억원이 넘는 경기도, 경상북도, 경상남도 및 강원도의 경우 모든 시나리오 및 연대에서 홍수피해 전망결과가 상위권에 위치하고 있음을 보면 쉽게 이해될 것이다. 또한 비교적 내륙에 위치한 전라북도, 충청남도 및 충청북도가 다른 도에 비해 홍수피해에 대한 기후변화의 영향을 좀더 적게 받을 것으로 예측되었다.

라. 기후변화와 가뭄피해 추정

가뭄의 경제적 피해추정을 위해 자원의 효율적 배분이라는 경제적 관점에서 실증적으로 분석하고자 한다. 경제학에서는 물이 풍부할 경우에는 그 가치는 중요하지 않다. 그러나 가뭄과 같이 물이 희귀해지는 상황에서 물의 가치는 증가하게 된다. 경제는 생산 활동의 투입요소로서 물을 사용한다. 그러나 물이 희귀해질 경우, 각 경제주체는 한정된 물을 가지고 서로 경쟁하게 된다. 이 과정에서 물의 가치는 점점 증가하게 된다. 이러한 개념을 반영하여 가뭄과 같은 물 공급의 제약이 있을 경우의 산업에서의 물의 가치를 추정하고자 한다. 본 연구는 미시적인 수준에서의 생산함수적 접근보다는 거시적인 입장에서의 산업적 접근방식을 취한다. 물 공급제약이 심해질수록 물의 경제적 가치를 추정하기 위해 금액과 물량이 혼합된 물 투입산출표를 구성한다. 이를 위해 농업, 공업, 서비스업, 가계 등 4개의 경제부분을 고려한다. 특히 농업과 서비스업은 하나의 산업으로 분류하며 공업을 10개의 산업으로 분해하였다. 물량의 상태 변화에 따라 경제적 성과 (예를 들어, 국내총생산(GDP))가 어떻게 변화하는가를 시뮬레이션해볼 수 있다면 물 공급 제약의 경제적 효과를 평가할 수 있다. 즉, 정책적으로 논의되거나 수자원과 관련된 국가기관, 지자체 등 이해당사자 그룹에서 제시하는 다양한 용수제약 시나리오를 설정하고 이를 특정한 경제

모형을 구성하여 모의시행 할 경우 경제에 미치는 영향 등을 파악할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 목적에 부합되면서 상대적으로 모형 구성을 위한 물 사용 자료가 적은 점을 감안하여, 이론적으로나 정책실무적으로 유용한 선형계획법 모형(Linear programming model)을 선택하여 결과를 도출하고자 하며 9개의 시나리오에 따른 물의 잠재가격을 추정하고자 한다.

(1) 분석모형

일반균형 모형은 경제현상의 중요한 특성이 모형 내에서 반영될 수 있을 정도로 복잡하면서도 상호 연관관계에 있는 경제 변수간의 연결고리의 움직임을 쉽게 파악할 수 있을 정도로 현실 경제를 단순화시킨 경제모형이다. 연산 일반균형모형에 의한 분석기법은 정책변화에 따른 생산자 비용의 변화와 본원적 생산요소의 상대가격이 모형 내에서 변화하는 것을 고려하게 되고, 이에 따라 생산자는 생산비용극소화를 달성하기 위한 중간재와 본원적 생산요소투입 간의 최적 비율을 달성하게 해 준다. 즉, 정책 변화가 중간재 투입물의 상대가격 변화를 통해 각각의 균형에서 생산요소의 부가가치와 중간재 구성 비율에 영향을 미치는 것이 모형 내에서 고려된다는 것이다. 반면에 부분균형분석은 생산요소가격이 항상 일정하게 고정되어 있다. 그러나 일반적으로 모든 가격은 경제 환경 변화에 따라 변화하는 것이 일반적이다. 따라서 다국간 일반균형모형을 이용한 분석의 가장 큰 장점은 부분균형 분석에서는 고려되지 않는 시장가격변화의 상호작용을 고려할 수 있다는 점이다.

(가) 소비체계

연산 일반균형 모형은 여러 지역 및 상품으로 구성되어 있으며 각 지역마다 그 지역의 대표적인 소비자가 존재한다. 후생에 관한 소비자 선호체계로서 수요함수가 사용되며, 이 함수를 통해 각 재화의 복합재 소비(composite consumption)와 지역별 소비자의 후생수준을 결정하게 된다. 먼저 각 재화별로 복합재의 양이 결정되고, 그 이후에 경제주체들은 후생을 극대화하는 복합재 소비를 국내에서 생산한 재화로 소비하거나 수입재로 소비하게 될 것이다. 이와 같은 일련의 과정을 거치면서 국내 생산 재화의 소비량이 결정되고 동시에 수입재는 가격기능에 의해 물량이 결정된다. 이와 같은 일련의 소비자 수요체계를 요약하면 아래의 Fig. 3.4.34과 같다.

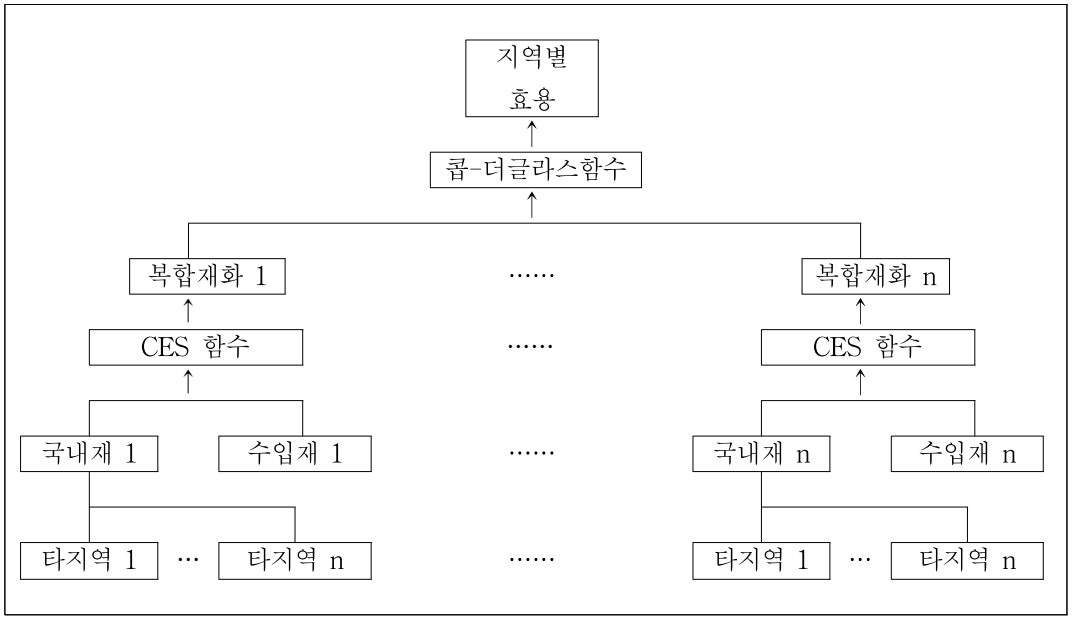


Fig. 3.4.34 일반균형모형의 소비구조

수요체계는 각 지역별 경제주체의 수요방정식과 예산제약식을 나타내고 있다. Eq. (3.4.9)는 산업부문별 복합재의 중간재수요를 나타낸다. 최종재화 생산을 위한 중간복합재 수요량은 산업부문별 산출량에 투입·산출계수를 곱하여 계산되어진다. 즉, 산업부문별 산출량 중 일부는 산업생산활동에 중간재로 투입된다.

$$IOT_{jr} = \sum_{i=1}^{n} io_{jir} \; XD_{ir} \tag{3.4.9}$$

여기에서 IOT_{jr}는 r지역에서 j재화의 중간투입재 합계, io_{jir}은 투입·산출계수, XD_{jr}는 총산출을 나타낸다.

가계는 원천적으로 소유하고 있는 노동과 자본을 생산활동에 공급하여 얻는 요소소득에서 정부 보조금을 더하고 각종 조세를 뺀 가처분소득의 제약하에서 효용함수를 극대화하는 방식으로 재화들을 소비한다. 가계 수요방정식은 Eq. (3.4.10)의 제약하에서 효용극대화의 1차 필요조건에 의해 도출될 수 있다. 본 연구에서는 지역별 효용함수의 형태를 콥-더글라스 함수로 설정하였다. 구체적인 함수형태는 다음과 같다.

$$Max \; U_r = \prod_{i=1}^{n} CD_{ir}^{c_{ir}} \tag{3.4.10}$$

$$Subject \; to \quad \sum_{i=1}^{n} P_{ir} CD_{ir} = (Y_r - HS_r) \tag{3.4.11}$$

단, $\sum_{i=1}^{n} c_{ir} = 1, \quad c_{ir} \geq 0$

가계의 상품별 최종수요는 가처분소득에서 가계저축을 뺀 후 가계소비 분배모수를 곱한 것으로 정의된다. 이러한 가계의 수요방정식은 효용극대화의 1차 필요조건에 의해 도출된 것이다.

$$P_{ir}\ CD_{ir} = c_{ir}(Y_r - HS_r) \tag{3.4.12}$$

여기에서 P_{ir}은 r지역의 복합재 가격, CD_{ir}은 가계소비, Y_r는 가계 가처분소득, HS_r은 가계저축, c_{ir}은 가계소비 분배모수를 나타낸다.

가계의 수요방정식을 도출하는데 있어 가처분소득을 이용하였는데, 가계의 가처분소득은 국민소득에서 직접세를 뺀 것으로 정의된다.

$$Y_r = (1 - dtr_r)(\sum_{i=1}^{n} PVA_{ir} VA_{ir}) \tag{3.4.13}$$

여기에서 dtr_r은 r지역의 직접세율, PVA_{ir}은 부가가치 가격, VA_{ir}은 부가가치를 나타낸다.

각 지역별 가계저축은 가계의 가처분소득에 가계의 저축성향을 곱한 것으로 정의된다.

$$HS_r = s_r \cdot Y_r \tag{3.4.14}$$

여기에서 HS_r은 r지역의 가계저축, s_r은 가계저축성향, Y_r은 가처분소득을 나타낸다.

정부 수입(收入)은 관세, 간접세, 직접세의 합으로 정의된다.

$$GR_r = TR_r + IDT_r + \left(\frac{dtr_r}{1-dtr_r}\right) Y_r \tag{3.4.15}$$

여기에서 GR_r은 r지역의 정부수입, TR_r은 관세총액, IDT_r은 간접세총액, dtr_r은 직접세율을 나타낸다.

정부도 가계와 마찬가지로 주어진 예산제약하에서 효용을 극대화하는 최종 수요함수를 도출한다. 정부 수요방정식도 콥-더글라스 형태의 효용함수를 가정함으로써 모수 g_i 값을 투입·산출자료로부터 직접 계산할 수 있다. 정부 수요방정식은 효용극대화의 1차

필요조건의 결과로서 유도되어진다. 정부도 소비지출을 하며 직접세, 간접세 및 관세로 구성된 정부 수입(收入)중에서 일정률의 정부저축을 제외한 나머지를 정부지출로 하여 가계소비와 같은 다층적 구조를 가진 콥-더글라스형 효용함수를 극대화하는 방식으로 재화들을 소비한다. 정부의 최종수요는 아래의 식과 같다.

$$P_{ir}\ GD_{ir} \ = \ g_{ir}(GR_r \ - \ GS_r) \tag{3.4.16}$$

여기에서 GD_{ir}은 r지역의 정부소비, g_{ir}은 정부소비 분배모수, GS_r은 정부저축을 나타낸다.

관세 방정식은 총수입액에 관세율과 환율을 곱한 것으로 정의된다.

$$TR_r \ = \ \sum_{i=1}^{n}\sum_{s=1}^{1} t_{irs}\ er_r \cdot PWM_{irs}\ M_{irs} \tag{3.4.17}$$

여기에서 t_{irs}은 i상품에 대한 r지역의 관세율, er_r은 환율, PWM_{irs}은 수입재의 국제시장가격, M_{irs}은 수입물량을 나타낸다.

간접세 방정식은 국내 총산출량에 간접세율을 곱한 것으로 정의된다.

$$IDT_r \ = \ \sum_{i=1}^{n} idtr_{ir}\ PD_{ir}\ XD_{ir} \tag{3.4.18}$$

여기에서 IDT_r은 r지역의 간접세총액, $idtr_{ir}$은 간접세율, PD_{ir}은 총산출재 가격, XD_{ir}은 총산출재를 나타낸다.

정부저축은 정부 수입(收入)에 정부저축율을 곱한 것으로 정의된다.

$$GS_r \ = \ gmps_r \cdot GR_r \tag{3.4.19}$$

여기에서 GS_r은 r지역의 정부저축, $gmps_r$은 정부저축율, GR_r은 정부수입을 나타낸다.

다지역 일반균형모형에서 총투자는 총저축과 일치하는데, 총저축은 가계저축, 정부저축, 해외저축의 합으로 정의된다.

$$P_{zr}\ Z_r = HS_r + GS_r + FS_r \quad (3.4.20)$$

여기에서 P_{zr}은 r지역의 자본재 가격, Z_r은 자본재, HS_r은 가계저축, GS_r은 정부저축, FS_r은 해외저축을 나타낸다.

아래의 식은 무역수지(해외저축)를 나타낸다.

$$FS_r = (\sum_{i=1}^{n}\sum_{s=1}^{1} er_r \cdot PWM_{irs}\ M_{irs}) - (\sum_{i=1}^{n}\sum_{s=1}^{1} er_r \cdot PWE_{irs}\ E_{irs}) \quad (3.4.21)$$

여기에서 PWE_{irs}은 r지역의 수출재의 국제시장가격, E_{irs}은 수출재, PWM_{irs}은 소비재의 국제시장가격, M_{irs}은 수입재를 나타낸다.

(나) 생산체계

다지역 일반균형모형에 있어서 모든 생산부문은 완전경쟁을 가정한다. 그러므로 완전경쟁 기업은 규모에 대한 수익불변(Constant Return to Scales)의 생산기술하에서 생산활동을 영위한다. 생산자는 이윤극대화의 조건인 가격과 한계생산비용이 일치하는 점에서 생산활동을 하며 동시에 기업이 균형상태에 있다는 가정을 함으로 기업들은 총평균비용과 가격이 같아지게 되고 따라서 순이익이 존재하지 않는다. 모든 기업은 노동과 자본의 본원적 생산요소와 중간 투입재를 생산요소로 사용한다. 노동과 자본 모두 각 지역 내에서 산업간에 자유로운 이동이 가능한 것으로 전제한다. Fig. 3.4.35는 다지역 일반균형모형에서 재화와 서비스의 생산구조를 나타낸다. 재화와 서비스는 각 지역의 소비자에 의하여 최종소비재로 소비될 수 있고 생산부문에서는 중간재로도 사용된다. 본원적 생산요소는 콥-더글라스 함수를 이용하여 집계되는 과정을 거쳐 부가가치가 된다. 생산구조의 맨 윗부분은 고정계수 생산방식인 레온티에프 생산함수를 사용하여 부가가치와 복합중간재를 연결한다. 즉, 재화 한 단위를 생산하기 위해서는 일정량의 부가가치와 일정량의 복합중간재가 투입되어야한다. 복합중간재는 국내에서 생산한 재화와 수입재화의 CES함수로 집계된다.

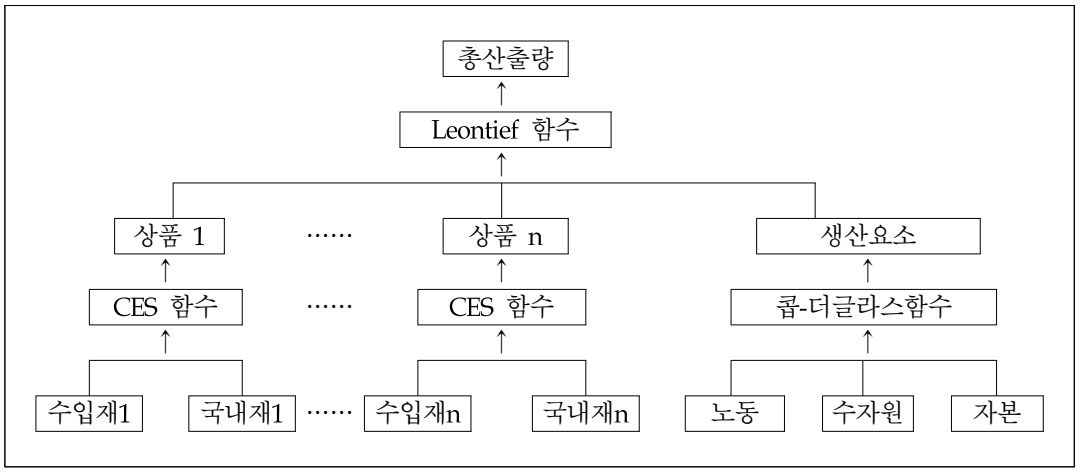


Fig. 3.4.35 일반균형모형의 생산구조

생산측면에서는 국내판매재와 수출재가 생산되어 국내총생산이 발생하는데, 부문별 산출량(XD_{jr})은 노동과 자본, 수자원이라는 본원적 생산요소에 의하여 생산되는 부가가치(VA_{jr})와 국내재와 수입재로 구성된 복합중간재(IN_{jjr})들을 투입물로 하여 생산된다. 일반적으로 생산함수에는 콥-더글라스 생산함수, CES 생산함수, 일반화된 CES 생산함수, 2단계 CES 생산함수, Translog 생산함수, 레온티에프 생산함수, 일반화된 레온티에프 생산함수, VIPS 생산함수 등이 있다. 본 연구에서는 부가가치가 다음과 같은 콥-더글라스형 함수에 의하여 생산되는 것으로 가정한다.

$$VA_{ir} = AD_{ir} \left[L_{ir}^{bl_{ir}} \; K_{ir}^{bk_{ir}} W_{ir}^{bw_{ir}} \right] \qquad (3.4.22)$$

여기에서 VA_{ir}은 r지역의 부가가치, L_{ir}은 노동수요, K_{ir}은 자본수요, W_{ir}는 수자원 수요, AD_{ir}은 생산함수의 상수값, b_i는 생산함수의 분배모수를 나타낸다.

부가가치를 생산하는데 투입되는 노동의 수요방정식과 자본의 수요방정식, 그리고 수자원 수요방정식은 비용극소화의 1차 필요조건으로부터 다음과 같이 구할 수 있다. Eq. (3.4.23)은 노동의 수요방정식이고, Eq. (3.4.24)는 자본의 수요방정식을 나타낸다. 그리고 Eq. (3.4.25)는 수자원의 수요 방정식을 의미한다.

$$P_{Lr}\ L_{ir} = bl_{ir}\ PVA_{ir}\ VA_{ir} \tag{3.4.23}$$

$$P_{Kr}\ K_{ir} = bk_{ir}\ PVA_{ir}\ VA_{ir} \tag{3.4.24}$$

$$P_{Wr}\ W_{ir} = bw_{ir}\ PVA_{ir}\ VA_{ir} \tag{3.4.25}$$

여기에서 P_{Lr}은 r지역의 임금, P_{Kr}은 자본재의 가격, PVA_{ir}은 부가가치 가격을 나타낸다.

생산구조의 최상부를 형성하는 레온티에프 생산함수를 수식으로 나타내면 아래와 같다.

$$XD_{jr} = Min[\frac{VA_{jr}}{v_{jr}},\ \frac{IN_{1jr}}{io_{1jr}},\ \frac{IN_{2jr}}{io_{2jr}},\ \cdots,\frac{IN_{njr}}{io_{njr}}] \tag{3.4.26}$$

여기에서 XD_{jr}은 r지역의 산출량이고, VA_{jr}은 부가가치, IN_{ijr}는 복합중간재 투입량을 나타낸다. 그리고 v_{jr}는 r지역의 부가가치계수이고, io_{ijr}는 투입·산출계수이다.

다지역 일반균형 모형에서 각 산업은 하나의 상품을 생산한다고 가정한다. 다지역을 고려한 일반균형 모형에서 각 산업의 수출재는 국내판매재와 다른 재화로 분류 가능하다. 국내판매재는 국내시장에서 흡수되어지고 수출재는 해외시장에 판매된다. 주어진 생산수준, 국내판매재의 가격과 수출재의 국내가격하에서 각 산업은 수출재와 국내판매재의 산출량을 결정한다. 산출량이 주어졌을 때 다음과 같은 불변전환탄력성함수(CET)에 의하여 부문별 산출은 국내판매재와 수출재로 나누어진다고 가정한다. 변환탄력성 $\tau_{ir} = \frac{1}{1 - \gamma_{ir}}$이다.

$$XD_{ir} = AT_{ir}[q_{ir}E_{irs}^{\gamma_{ir}} + (1 - q_{ir})XS_{ir}^{\gamma_{ir}}]^{\frac{1}{\gamma_{ir}}} \tag{3.4.27}$$

단, $AT_{ir} > 0,\ 0 \le q_{ir} \le 1,\ \gamma_{ir} \le 1$

여기에서 XD_{ir}는 r지역의 총산출, XS_{ir}은 국내판매, E_{irs}은 수출을 나타낸다. AT_{ir}은 r지역 CET함수의 상수값, q_{ir}은 CET함수의 구성비율, γ_{ir}은 CET함수의 지수를 나타낸다.

국내재와 수출재의 비율은 Eq. (3.4.27)의 제약하에서 국내판매재 가격 극대화의 1차 필요조건에서 도출된다.

$$\frac{E_{irs}}{XS_{ir}} = \left[\frac{PE_{irs}}{PS_{ir}}\frac{1-q_{ir}}{q_{ir}}\right]^{\frac{1}{\gamma_{ir}-1}} \tag{3.4.28}$$

여기에서 PE_{irs}은 r지역 수출재의 국내가격이고, PS_{ir}은 국내판매재의 가격을 나타낸다.

수입재와 국내판매재는 아밍턴함수에 의해 복합재로 전환된다. 국내판매재와 수입재를 소비하는 경제활동은 가계 및 정부의 최종수요, 기업들의 중간수요, 투자수요, 수출수요로 구성된다. 다국간 일반균형모형에서는 일반적으로 국내판매재와 수입재에 대한 가계와 정부의 최종수요, 중간수요 및 투자수요는 국내판매재 및 수입재의 구성으로 이루어진 복합재수요로 가정한다. 산업부문별 복합재(X_{ir})는 Eq. (3.4.29)와 같이 수입재(M_{irs})와 국내판매재(XS_{ir})의 불변대체탄력성(CES)함수인 것으로 가정하며, α_i는 불변대체탄력도함수의 지수로서 대체탄력성 $\sigma_{ir} = \frac{1}{(1+\alpha_{ir})}$가 된다.

$$X_{ir} = AC_{ir}\left[d_{ir}M_{irs}^{-\alpha_{ir}} + (1-d_{ir})XS_{ir}^{-\alpha_{ir}}\right]^{-\frac{1}{\alpha_{ir}}} \tag{3.4.29}$$
$$\text{단, } AC_{ir} > 0,\quad 0 \le d_{ir} \le 1,\quad -1 \le \alpha_{ir}$$

여기에서 X_{ir}은 r지역의 복합재, M_{irs}은 수입재, XS_{ir}은 국내판매재를 나타낸다. AC_{ir}은 r지역의 아밍턴함수의 상수값, d_{ir}은 아밍턴함수의 구성비율, α_{ir}은 아밍턴함수의 지수를 나타낸다.

수입재와 국내판매재의 비율은 Eq. (3.4.29)의 제약조건하에서 복합재 가격의 비용극소화 1차 필요조건에서 도출된다. 산업부문별 복합재 수요량이 주어졌다면 복합재 생산자는 최소의 비용으로 수입재와 국내판매재를 구입함으로써 비용을 극소화하려 할 것이다. 이는 수입재와 국내판매재를 투입하여 복합재를 최소비용으로 생산하는 것과 같다. 국내판매재와 수입재의 가격이 주어졌다면 비용극소화의 1차 필요조건은 한계대체율과 상대가격이 일치하도록 수입재와 국내판매재를 구입하는 것이다.

$$\frac{M_{irs}}{XS_{ir}} = [\frac{PS_{ir}}{PM_{irs}}\frac{d_{ir}}{1 - d_{ir}}]^{\frac{1}{1 + \alpha_{ir}}} \quad (3.4.30)$$

여기에서 PM_{irs}은 r지역의 수입재의 국내가격, PS_{ir}은 국내판매재의 가격이다.

다지역 모형에서는 지역별 이입과 이출에 대한 수식관계의 설정이 필요하다. 먼저 지역별 산출량이 지역 내에 공급되거나 다른 지역으로 이출되는 관계식은 아래와 같다.

$$XS_{ir} = AT_{ir}^{d}[q_{ir}^{d}DE_{irs}^{\gamma_{ir}} + (1 - q_{ir}^{d})XSS_{ir}^{\gamma_{ir}}]^{\frac{1}{\gamma_{ir}^{d}}} \quad (3.4.31)$$

단, $AT_{ir} > 0, \quad 0 \leqq q_{ir} \leqq 1, \quad \gamma_{ir} \leqq 1$

여기에서 XS_{ir}는 r지역의 국내판매, XSS_{ir}은 지역내 판매, DE_{irs}은 이출을 나타낸다.

지역내 판매재와 이출재의 비율은 Eq. (3.4.31)의 제약하에서 지역내 판매재 가격 극대화의 1차 필요조건에서 도출된다.

$$\frac{DE_{irs}}{XSS_{ir}} = [\frac{PDE_{irs}}{PDS_{ir}}\frac{1 - q_{ir}^{d}}{q_{ir}^{d}}]^{\frac{1}{\gamma_{ir}^{d} - 1}} \quad (3.4.32)$$

여기에서 PDE_{irs}은 r지역 이출재의 국내가격, PDS_{ir}은 지역내 판매재의 가격이다.

지역내 공급재와 이입재의 결정관계식은 아래와 같다.

$$XS_{ir} = AC_{ir}^{d}[d_{ir}^{d}DM_{irs}^{-\alpha_{ir}^{d}} + (1 - d_{ir}^{d})XSS_{ir}^{-\alpha_{ir}^{d}}]^{-\frac{1}{\alpha_{ir}^{d}}} \quad (3.4.33)$$

단, $AC_{ir} > 0, \quad 0 \leq d_{ir} \leq 1, \quad -1 \leq \alpha_{ir}$

여기에서 DM_{irs}은 이입재, XSS_{ir}은 지역내 판매재를 나타낸다.

이입재와 지역내 판매재의 비율은 Eq. (3.4.33)의 제약조건하에서 복합재 가격의 비용극소화 1차 필요조건에서 도출된다.

$$\frac{DM_{irs}}{XSS_{ir}} = [\frac{PDS_{ir}}{PDM_{irs}}\frac{d_{ir}^{d}}{1 - d_{ir}^{d}}]^{\frac{1}{1 + \alpha_{ir}^{d}}} \quad (3.4.34)$$

여기에서 PM_{irs}은 r지역의 수입재의 국내가격이고, PS_{ir}은 국내판매재의 가격을 나타낸다.

(다) 가격체계

가격체계는 각 상품별 가격방정식으로 여러 재화들의 가격이 상호 연관되어 있다는 것을 나타내고 있다. 가격방정식은 초과이윤이 0이 되는 시장청산조건을 의미한다.

Eq. (3.4.35)는 국내총산출재의 가격방정식으로, 각 산업의 수입(收入)은 생산비용과 동일하다는 조건이다. 각 산업의 생산비용은 본원적 생산요소의 가치와 중간재 투입요소 가치의 합과 같다. 즉, 각 산업별로 정상이윤 이외의 초과이윤은 존재하지 않는다.

$$PD_{ir}\,[1 - idtr_{ir}] = PVA_{ir} + \sum_{j=1}^{n} io_{jir}\ P_{jr} \qquad (3.4.35)$$

여기에서 PD_{ir}은 r지역의 총산출재의 가격, PVA_{ir}은 부가가치 가격, P_{jr}은 복합재의 가격을 나타낸다. $idtr_{ir}$은 r지역의 간접세율, io_{jir}은 투입·산출계수를 나타낸다.

Eq. (3.4.36)은 복합재의 가격방정식으로, 각 복합재 공급의 가치는 복합재 생산비용과 동일하다는 조건이다. 산업부문별 복합재 가격은 국내판매재의 가격과 수입재 국내가격의 가중치 합과 같다.

$$P_{ir}\ X_{ir} = PS_{ir}\ XS_{ir} + PM_{irs}\ M_{irs} \qquad (3.4.36)$$

여기에서 P_{ir}은 r지역 복합재의 가격, X_{ir}은 복합재, PS_{ir}은 국내판매재 가격, XS_{ir}은 국내판매재, PM_{irs}은 수입재의 국내가격, M_{irs}은 수입재를 나타낸다.

Eq. (3.4.37)은 수출재의 가격방정식으로, 수출에 있어 정상이윤의 가정을 나타내는 방정식이다. 수출재의 국내가격은 수출재의 국제시장가격과 환율에 의해 결정된다.

$$PE_{irs} = er_{r} \cdot PWE_{irs} \qquad (3.4.37)$$

여기에서 PE_{irs}은 r지역 수출재의 국내가격, PWE_{irs}은 수출재의 국제시장가격, er_{r}은 환율을 나타낸다.

Eq. (3.4.38)은 수입재의 가격방정식으로, 수입에 있어 순수이윤의 가정을 나타내는 방정식이다. 수입재의 국내가격은 국제시장가격과 관세율, 환율에 의해 결정된다.

$$PM_{irs} = (1 + t_{irs})\ er_{r} \cdot PWM_{irs} \qquad (3.4.38)$$

여기에서 PM_{irs}은 r지역 수입재의 국내가격이고, t_{irs}은 i상품에 대한 관세율,

PWM_{irs}은 수입재의 국제시장가격을 나타낸다.

Eq. (3.4.39)는 국내산출재의 가격방정식으로, 부문별 산출량의 가격으로서 국내판매재의 가격과 수출재 국내가격의 가중치 합으로 정의된다.

$$PD_{ir}\ XD_{ir} = PS_{ir}\ XS_{ir} + PE_{irs}\ E_{irs} \tag{3.4.39}$$

여기에서 PD_{ir}은 r지역 총산출재의 가격, XD_{ir}은 총산출재, PS_{ir}은 국내판매재 가격, XS_{ir}은 국내판매재, PE_{irs}은 수출재의 국내가격, E_{irs}은 수출재를 나타낸다.

(라) 시장균형조건

복합재의 시장청산조건에서 수요의 합은 중간재수요, 가계의 최종수요, 정부의 최종수요, 자본재생산을 위한 복합재수요량이다. 생산자와 가계의 수요·공급 결정의 역할을 하는 균형변수는 생산물 가격과 생산요소 가격이다.

$$X_{ir} = IOT_{ir} + CD_{ir} + GD_{ir} + ID_{ir} \tag{3.4.40}$$

여기에서 X_{ir}은 r지역의 복합재, IOT_{ir}은 중간재 합계, CD_{ir}은 가계소비, GD_{ir}은 정부소비, ID_{ir}은 투자수요를 나타낸다.

노동에 대한 총수요는 각 산업별 노동수요의 합과 같다.

$$\sum_{i=1}^{n} L_{ir} = L_r^* \tag{3.4.41}$$

여기에서 L_{ir}은 r지역의 산업별 노동수요, L_r^*은 노동의 총공급을 나타낸다.

자본에 대한 총수요는 각 산업별 자본수요의 합과 같다.

$$\sum_{i=1}^{n} K_{ir} = K_r^* \tag{3.4.42}$$

여기에서 K_{ir}은 r지역의 산업별 자본수요, K_r^*은 자본의 총공급을 나타낸다.

수자원에 대한 총수요는 각 산업별 수자원수요의 합과 같다.

$$\sum_{i=1}^{n} W_{ir} = W_r^* \tag{3.4.43}$$

여기에서 W_{ir}은 r지역의 산업별 수자원수요, W_r^*은 수자원의 총공급을 나타낸다.

(2) 분석자료 및 시나리오

이 연구에서는 수자원 부족에 따른 산업별 효과를 분석하기 위하여 산업을 11개로 재분류하였다. 수자원 이용에 따른 특성과 자료 제약하에서 농림수산업, 음식료 및 담배, 섬유 및 가죽, 석유정제화학, 일반기계 등으로 분류하였다.

Table 3.4.28 산업별 분류

	산 업
1	농림수산업
2	음식료 및 담배
3	섬유 및 가죽
4	목재, 종이, 출판
5	석유정제화학
6	비금속 및 1차 산업
7	일반기계
8	전기 및 전자기기
9	정밀기기
10	운송장비
11	가구 및 기타제조

이 연구에서는 주요 권역별 수자원 부족의 경제적 파급효과를 분석하기 위하여 우리나라를 4개 지역으로 세분화하였다. 지역구분의 근거는 4대강 유역을 중심으로 하여 수도권, 충청권, 전라권, 경상권으로 분류하였다. 현재 지역별 산업연관 자료는 2005년 자료가 가장 최근 자료이기 때문에 분석년도는 2005년으로 설정하였다.

Table 3.4.29 권역별 분류

	권 역	지 역
1	수도권	서울, 경기, 인천, 강원
2	충청권	충북, 대전, 충남
3	전라권	광주, 전북, 전남
4	경상권	대구, 부산, 울산, 경북, 경남

배출 시나리오에 따른 수도권의 수자원부족량은 A2 시나리오의 경우 최대 187.45백만

m^3로 나타났으며, RCP 8.5 시나리오의 경우가 다른 배출 시나리오보다 낮게 나타났다. 배출 시나리오별로 수자원 부족량이 상이한데, 이러한 부족량에 따른 파급영향을 분석할 필요가 있다.

Table 3.4.30 수도권의 수자원 부족 시나리오 (단위 : 10^6 m^3)

배출 시나리오		시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3
A2	평균	48.47	59.01	65.94
	최대	152.45	157.92	187.45
B1	평균	54.45	63.72	68.25
	최대	136.15	191.44	194.43
RCP 8.5	평균	36.03	27.83	26.77
	최대	101.53	72.95	70.43

배출 시나리오에 따른 충청권의 수자원부족량은 B1 시나리오의 경우 최대 111.56백만 m3로 나타났으며, RCP 8.5 시나리오의 경우 평균 1.32백만 m3로 나타났다. 상대적으로 RCP 8.5 시나리오의 경우 수자원 부족량이 낮은 것으로 분석되었다.

Table 3.4.31 충청권의 수자원 부족 시나리오 (단위 : 10^6 m^3)

배출 시나리오		시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3
A2	평균	21.16	30.00	34.48
	최대	77.9	107.12	111.56
B1	평균	26.49	31.97	30.96
	최대	95.37	100.28	107.13
RCP 8.5	평균	6.79	1.34	1.32
	최대	71.57	71.46	71.46

배출 시나리오에 따른 전라권의 수자원부족량은 A2 시나리오의 경우 최대 266.85백만 m3로 나타났으며, 이는 다른 권역보다 수자원 부족량이 심각한 것으로 나타났다. RCP 8.5 시나리오의 경우 평균 94.38백만 m3로 나타났는데, 이는 상대적으로 RCP 8.5 시나리오의 경우 수자원 부족량이 낮은 것으로 분석되었다.

Table 3.4.32 전라권의 수자원 부족 시나리오 (단위 : 10^6 m^3)

배출 시나리오		시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3
A2	평균	181.73	236.99	266.85
	최대	548.47	807.54	954.73
B1	평균	219.93	240.18	252.6
	최대	711.84	793.62	931.67
RCP 8.5	평균	137.7	120.79	94.38
	최대	404.29	263.81	155.22

배출 시나리오에 따른 전라권의 수자원부족량은 B1 시나리오의 경우 최대 54.58백만 m3로 나타났으며, RCP 8.5 시나리오의 경우 평균 14.76백만 m3로 나타났다.

Table 3.4.33 경상권의 수자원 부족 시나리오 (단위 : 10^6 m^3)

배출 시나리오	Index	시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3
A2	평균	38.6	50.67	55.91
	최대	157.65	162.74	204.38
B1	평균	46.9	53.27	54.58
	최대	147.5	169.94	213.59
RCP 8.5	평균	23.03	17.31	14.76
	최대	109.08	76.71	89.56

배출 시나리오와 수자원 부족량의 시나리오를 종합적으로 고려하여 총 18개의 분석 시나리오를 설계하였다. 즉 시나리오 A2_mean_01은 A2 배출 시나리오 하에서 수자원 부족량의 평균값을 적용한 것이다. 이에 반해 시나리오 A2_max_01은 A2 배출 시나리오 하에서 수자원 부족량의 최대값을 적용하였다.

Table 3.4.34 분석시나리오 설계

배출 시나리오		시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3
A2	평균	시나리오 A2_Mean_01	시나리오 A2_Mean_02	시나리오 A2_Mean_03
	최대	시나리오 A2_Max_01	시나리오 A2_Max_02	시나리오 A2_Max_03
B1	평균	시나리오 B1_Mean_01	시나리오 B1_Mean_02	시나리오 B1_Mean_03
	최대	시나리오 B1_Max_01	시나리오 B1_Max_02	시나리오 B1_Max_03
RCP 8.5	평균	시나리오 RCP_Mean_01	시나리오 RCP_Mean_02	시나리오 RCP_Mean_03
	최대	시나리오 RCP_Max_01	시나리오 RCP_Max_02	시나리오 RCP_Max_03

(3) 분석결과

(가) A2 배출 시나리오 하의 경제적 효과

A2 배출 시나리오 하에서 수자원 부족의 평균과 최대값에 따른 권역별 생산 변화효과를 분석하였다. 먼저 수자원의 부족량 최대값 시나리오 1의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.632% 감소하는 것으로 분석되었다. 이에 반해 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.267% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 1% 이상 감소하는 것으로 분석된다. 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.907% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 A2_Max_01의 경우 수자원 부족에 따른 권역별 거시경제 변화효과를 분석하였다. 수자원 부족에 따른 수도권의 GRDP는 0.053% 감소하고, 소비는 0.061%, 투자는 0.029% 감소하는 것으로 분석되었다. 충청권은 GRDP는 0.240% 감소하고, 소비는 0.225%, 투자는 0.101% 감소하는 것으로 분석된다. 이에 반해 전라권은 GRDP는 4.854% 감소하고, 소비는 2.853%, 투자는 3.804% 감소하는 것으로 분석되었다. 즉 다른 권역에 비해 수자원 부족량이 큰 전라권의 피해가 크다는 것을 알 수 있다. 경상권은 GRDP는 0.202% 감소하고, 소비는 0.170%, 투자는 0.231% 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 A2_Max_02 하에서 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.644% 감소하는 것으로 분석되었다. 이에 반해 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.79% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 1% 이상 감소하는 것으로 분석된다. 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소

가 매우 높게 나타났다. 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.973% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 A2_Max_02 항세ㅓ 수도권의 GRDP는 0.054% 감소하고, 소비는 0.062%, 투자는 0.029% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.340% 감소하고, 소비는 0.319%, 투자는 0.143% 감소하는 것으로 분석된다. 이에 반해 전라권은 GRDP는 9.55% 감소하고, 소비는 5.85%, 투자는 7.35% 감소하는 것으로 분석되었다. 경상권은 GRDP는 0.209% 감소하고, 소비는 0.176%, 투자는 0.239% 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 A2_Max_03 하에서 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.777% 감소하는 것으로 분석된다. 이에 반해 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.877% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 1% 이상 감소하는 것으로 분석된다. 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출 감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 2.515% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 A2_Max_03 하에서 수도권의 GRDP는 0.065% 감소하고, 소비는 0.075%, 투자는 0.036% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.357% 감소하고, 소비는 0.334%, 투자는 0.150% 감소하는 것으로 분석되었다. 이에 반해전라권은 GRDP는 9.55% 감소하고, 소비는 5.85%, 투자는 7.35% 감소하는 것으로 분석된다. 경상권은 GRDP는 0.267% 감소하고, 소비는 0.225%, 투자는 0.305% 감소하는 것으로 나타났다.

시나리오 A2_Mean_01의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.196% 감소하는 것으로 분석된다. 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출 감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.326% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 감소하는 것으로 분석된다. 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.455% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석되었다.

시나리오 A2_Mean_01의 경우 수도권의 GRDP는 0.016% 감소하고, 소비는 0.019%, 투자는 0.009% 감소하는 것으로 분석되었다. 충청권은 GRDP는 0.062% 감소하고, 소비는 0.058%, 투자는 0.026% 감소하는 것으로 분석된다. 이에 반해 전라권은 GRDP는 0.585% 감소하고, 소비는 0.351%, 투자는 0.507% 감소하는 것으로 분석되었다. 경상권은 GRDP는 0.048% 감소하고, 소비는 0.040%, 투자는 0.055% 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 A2_Mean_02의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.242% 감소하는 것으로 분석되었다. 이에 반해 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.465% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반해 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출 감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.593% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석되었다.

시나리오 A2_Mean_02의 경우 수도권의 GRDP는 0.020% 감소하고, 소비는 0.023%, 투자는 0.011% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.088% 감소하고, 소비는 0.082%, 투자는 0.037% 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반해 전라권은 GRDP는 0.814% 감소하고, 소비는 0.489%, 투자는 0.704% 감소하는 것으로 분석되었다. 마지막으로 경상권은 GRDP는 0.062% 감소하고, 소비는 0.053%, 투자는 0.071% 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 A2_Mean_03 하에서 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.266% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.539% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반해 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출 감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 마지막으로 경상권은 수자원 부족시 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.655% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 A2_Mean_03 하에서 수도권의 GRDP는 0.022% 감소하고, 소비는 0.026%, 투자는 0.012% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.102% 감소하고, 소비는 0.096%, 투자는 0.043% 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반해 전라권은 GRDP는 0.956% 감소하고, 소비는 0.575%, 투자는 0.826% 감소하는 것으로 분석되었다. 마지막으로 경상권은 GRDP는 0.069% 감소하고, 소비는 0.058%, 투자는 0.079% 감소하는 것으로 분석된다.

(나) B1 배출 시나리오 하의 경제적 효과

시나리오 B1_Max_01의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.561% 감소하는 것으로 분석된다. 이에 반해 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.581% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 1% 이상 감소하는 것으로 분석되었다. 특히 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출 감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 마지막으로 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.774% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 B1_Max_01의 경우 수도권의 GRDP는 0.047% 감소하고, 소비는 0.054%, 투자는 0.026% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.30% 감소하고, 소비는 0.281%, 투자는 0.126% 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반해 전라권은 GRDP는 9.55% 감소하고, 소비는 5.85%, 투자는 7.35% 감소하는 것으로 분석되었다. 마지막으로, 경상권은 GRDP는 0.188% 감소하고, 소비는 0.158%, 투자는 0.215% 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 B1_Max_02의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.789% 감소하는 것으로 분석된다. 이에 반해 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.666% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 1% 이상 감소하는 것으로 분석되었다. 특히 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의

산출 감소가 매우 높게 나타났다. 마지막으로 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 2.057% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 B1_Max_02의 경우 수도권의 GRDP는 0.066% 감소하고, 소비는 0.076%, 투자는 0.036% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.316% 감소하고, 소비는 0.296%, 투자는 0.133% 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반해 전라권은 GRDP는 9.55% 감소하고, 소비는 5.85%, 투자는 7.35% 감소하는 것으로 분석되었다. 마지막으로 경상권은 GRDP는 0.218% 감소하고, 소비는 0.184%, 투자는 0.249% 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 B1_Max_03의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.801% 감소하는 것으로 분석된다. 이에 반해 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.79% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 1% 이상 감소하는 것으로 분석되었다. 특히 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 마지막으로 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 2.635% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 B1_Max_03의 경우 수도권의 GRDP는 0.067% 감소하고, 소비는 0.078%, 투자는 0.037% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.340% 감소하고, 소비는 0.319%, 투자는 0.143% 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반해 전라권은 GRDP는 9.55% 감소하고, 소비는 5.85%, 투자는 7.35% 감소하는 것으로 분석되었다. 마지막으로 경상권은 GRDP는 0.280% 감소하고, 소비는 0.236%, 투자는 0.320% 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 B1_Mean_01의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.219% 감소하는 것으로 분석된다. 이에 반해 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.407% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 1% 이상 감소하는 것으로 분석되었다. 특히 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출 감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 마지막으로 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.547% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 B1_Mean_01의 경우 수도권의 GRDP는 0.018% 감소하고, 소비는 0.021%, 투자는 0.010% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.077% 감소하고, 소비는 0.072%, 투자는 0.032% 감소하는 것으로 나타났다. 전라권은 GRDP는 0.741% 감소하고, 소비는 0.445%, 투자는 0.642% 감소하는 것으로 분석되었다. 마지막으로 경상권은 GRDP는 0.058% 감소하고, 소비는 0.048%, 투자는 0.066% 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 B1_Mean_02의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.254% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.498% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반해 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.624% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 B1_Mean_02의 경우 수도권의 GRDP는 0.021% 감소하고, 소비는 0.025%, 투자는 0.012% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.094% 감소하고, 소비는 0.088%, 투자는 0.040% 감소하는 것으로 나타났다. 전라권은 GRDP는 0.829% 감소하고, 소비는 0.498%, 투자는 0.718% 감소하는 것으로 분석되었다. 마지막으로 경상권은 GRDP는 0.066% 감소하고, 소비는 0.055%, 투자는 0.075% 감소하는 것으로 나타났다.

시나리오 B1_Mean_03의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.277% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.481% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 감소하는 것으로 분석되었다. 이에 반해 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 마지막으로 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.640% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 B1_Mean_03의 경우 수도권의 GRDP는 0.023% 감소하고, 소비는 0.027%, 투자는 0.013% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.091% 감소하고, 소비는 0.085%, 투자는 0.038% 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반해 전라권은 GRDP는 0.888% 감소하고, 소비는 0.534%, 투자는 0.768% 감소하는 것으로 분석된다. 마지막으로 경상권은 GRDP는 0.067% 감소하고, 소비는 0.057%, 투자는 0.077% 감소하는 것으로 나타났다.

(다) RCP8.5 배출 시나리오 하의 경제적 효과

시나리오 RCP_Max_01의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.418% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.159% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반해 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 마지막으로 경상권은 수자원 부족시 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.303% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 RCP_Max_01의 경우 수도권의 GRDP는 0.035% 감소하고, 소비는 0.040%, 투자는 0.019% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.220% 감소하고, 소비는 0.206%, 투자는 0.092% 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반해 전라권은 GRDP는 5.60% 감소하고, 소비는 2.019%, 투자는 6.287% 감소하는 것으로 분석된다. 마지막으로 경상권은 GRDP는 0.138% 감소하고, 소비는 0.116%, 투자는 0.157% 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 RCP_Max_02의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.301% 감소하는 것으로 분석된다. 이에 반해 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.15% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 감소하는 것으로 분석된다. 특히 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 마지막으로 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.905% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 RCP_Max_02의 경우 수도권의 GRDP는 0.025% 감소하고, 소비는 0.029%, 투자는 0.014% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.218% 감소하고, 소비는 0.204%, 투자는 0.092% 감소하는 것으로 나타났다. 전라권은 GRDP는 0.940% 감소하고, 소비는 0.565%, 투자는 0.812% 감소하는 것으로 분석된다. 경상권은 GRDP는 0.095% 감소하고, 소비는 0.080%, 투자는 0.109% 감소하는 것으로 나타났다.

시나리오 RCP_Max_03의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.289% 감소하는 것으로 분석된다. 이에 반해 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.151% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 감소하는 것으로 분석된다. 특히 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 마지막으로 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.063% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 RCP_Max_03의 경우 수도권의 GRDP는 0.024% 감소하고, 소비는 0.028%, 투자는 0.013% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.218% 감소하고, 소비는 0.204%, 투자는 0.092% 감소하는 것으로 나타났다. 전라권은 GRDP는 0.485% 감소하고, 소비는 0.291%, 투자는 0.422% 감소하는 것으로 분석된다. 경상권은 GRDP는 0.112% 감소하고, 소비는 0.094%, 투자는 0.128% 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 RCP_Mean_01의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.15% 감소하는 것으로 분석되었다. 이에 반해 정밀기기, 가구 및 기타제조업은 산출이 증가하는 것으로 나타났다. 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.102% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 감소하는 것으로 분석된다. 이에 반해 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.272% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석되었다.

시나리오 RCP_Mean_01의 경우 수도권의 GRDP는 0.013% 감소하고, 소비는 0.014%, 투자는 0.007% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.019% 감소하고, 소비는 0.018%, 투자는 0.008% 감소하는 것으로 나타났다. 전라권은 GRDP는 0.422% 감소하고, 소비는 0.253%, 투자는 0.367% 감소하는 것으로 분석된다. 마지막으로 경상권은 GRDP는 0.029% 감소하고, 소비는 0.024%, 투자는 0.033% 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 RCP_Mean_02의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.115% 감소하는 것으로 분석되었다. 이에 반해 일부 산업은 생산요소 이동효과 등으로 인해 산출이 증가하는 것으로 나타났다. 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.023% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 감소하는 것으로 분석된다. 이에 반해 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 마지막으로 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.196% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 RCP_Mean_02의 경우 수도권의 GRDP는 0.010% 감소하고, 소비는 0.011%, 투자는 0.005% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.004% 감소하고, 소비는 0.004%, 투자는 0.002% 감소하는 것으로 나타났다. 전라권은 GRDP는 0.365% 감소하고, 소비는 0.219%, 투자는 0.317% 감소하는 것으로 분석된다. 경상권은 GRDP는 0.021% 감소하고, 소비는 0.017%, 투자는 0.024% 감소하는 것으로 나타났다.

시나리오 RCP_Mean_03의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.103% 감소하는 것으로 분석되었다. 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.023% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 감소하는 것으로 분석된다. 이에 반해 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 마지막으로 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 0.165% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

시나리오 RCP_Mean_03의 경우 수도권의 GRDP는 0.009% 감소하고, 소비는 0.010%, 투자는 0.005% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 GRDP는 0.004% 감소하고, 소비는 0.004%, 투자는 0.002% 감소하는 것으로 나타났다. 전라권은 GRDP는 0.278% 감소하고, 소비는 0.166%, 투자는 0.242% 감소하는 것으로 분석된다. 경상권은 GRDP는 0.017% 감소하고, 소비는 0.015%, 투자는 0.020% 감소하는 것으로 나타났다.

마. 결론

본 연구에서는 기후변화에 따른 사회경제적 파급효과를 물관리의 대표적인 홍수와 가뭄에 대하여 연구하였다.

1) 기후변화에 따른 홍수 피해비용을 시나리오별로 분석한 결과(A2, A1B, B1)

- A2시나리오 : 2020s의 경우 부산광역시는 1990s 대비 0.93로 약간 감소 울산은 1.01로 현재와 비슷할 것으로 전망되었다. 대구광역시와 경상북도는 2배 이상 증가할 것으로 전망되었으며, 그 외의 지역은 1.42~1.99배로 2배 이내에서 증가할 것으로 나타났다. 2050s에는 울산광역시와 부산광역시의 경우 1900s와 비슷한 홍수피해가 발생할 것으로 전망되었으며, 2020s에 비해 현재대비 2배 이상의 홍수피해가 전망되는 지역이 급증할 것으로 예측되었으며, 경상남도, 전라남도, 대구광역시, 인천광역시, 경상북도, 경기도, 충청남도 및 전라북도가 이에 속하며, 경상북도의 경우 약 5.91배까지 증가될 것으로 전망되었다. 2080s의 경우에는 2050s와 유사한 홍수피해 증가가 발생될 것으로 전망되었으며 이 기간 역시 경상북도의 홍수피해가 현재와 비교하여 가장 큰 폭으로 증가될 것으로 나타났다.

- A1B 시나리오 : 전 기간 전국평균 홍수피해증감비율이 A2 시나리오는 2.001, B1 시나리오는 2.080인데 비해 A1B 시나리오는 2.922로 나타났다. 따라서 모든 시나리오에

대한 최대피해증감율은 A1B 시나리오 2080s기간의 경기도의 경우로, 6.65로 나타났으며, 최대 연평균홍수피해액 전망도 A1B 시나리오 2080s기간의 강원도로 약 9,500억원으로 전망되었다.

· B1 시나리오 : 2020s의 경우 부산광역시 및 울산광역시는 오히려 현재보다 홍수피해가 적게 발생할 것으로 예측되었으며, 이후의 기간에서도 홍수피해에 대한 기후변화의 영향이 미비한 것으로 전망되었다. B1 시나리오의 경우에는 비교적 경기도, 대구광역시의 홍수피해가 현재 대비 큰 폭으로 증가할 것으로 전망되었다. 홍수피해액의 경우에는 앞의 두 시나리오와 마찬가지로 도의 경우 광역시보다 크게 발생할 것으로 전망되었으며, 대전광역시, 광주광역시가 홍수피해가 비교적 적게 발생할 것으로 예상된 반면, 강원도, 경상남도 및 경상북도의 피해가 클 것으로 전망되었다.

이상의 결과들을 바탕으로 경제적인 관점에서 볼 경우 광역시 보다는 도의 방재대책이 우선적으로 필요할 것으로 판단된다. 그러나 광역지자체의 경우 인구가 밀집되어 있기 때문에 인명상의 관점에서는 이와 반대되는 논리의 치수방재정책도 필요할 것이다. 따라서 본 연구에서는 순순히 경제적인 관점에서만 검토된 결과임을 다시 한 번 주지하고자 한다. 또한 기후변화 시나리오의 불확실성, 상세화 과정의 불확실성 및 피해함수 모형도출과정에서의 불확실성 등 많은 불확실성을 내포하고 있기 때문에 전망된 피해액을 그대로 받아들이는 것에는 자칫 큰 위험성을 내포할 수 있다. 따라서 과거 피해규모에 대비하여 얼마만큼의 피해가 증가할 것인가에 초점을 맞추어야 할 것이다.

2) 기후변화에 따른 가뭄 피해비용을 시나리오별로 분석한 결과(A2, B1, RCP8.5)

· A2 시나리오 : 수자원의 부족량 최대값 시나리오 1의 경우 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.632% 감소하는 것으로 분석되었다. 이에 반해 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.267% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 1% 이상 감소하는 것으로 분석된다. 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.907% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

· B1 시나리오 : 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.561% 감소하는 것으로 분석된다. 이에 반해 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.581% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 1% 이상 감소하는 것으로 분석되었다. 특히 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 마지막으로 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의

산출이 1.774% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

· RCP8.5 시나리오 : 수도권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 기준균형 대비 0.418% 감소하는 것으로 분석된다. 충청권은 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.159% 감소하고, 농림수산업, 목재, 종이, 출판의 산출도 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반해 전라권의 경우 수자원 부족에 따른 산출감소가 다른 권역보다 매우 높게 나타났다. 산업별로는 전기 및 전자기기, 목재, 종이, 출판, 음식료 및 담배, 농림수산업의 산출 감소가 매우 높게 나타났다. 마지막으로 경상권은 수자원 부족 시 섬유 및 가죽산업의 산출이 1.303% 감소하고, 석유정제화학의 산출도 감소하는 것으로 분석된다.

5. 결론

본 연구에서는 기후변화에 따른 수자원의 취약성을 물부족량, 수공구조물 신뢰도 그리고 사회·경제적 영향에 대해 평가하였다. 세부적인 결과는 앞선 내용에서 각각 설명하였으므로, 본 단락에서는 연구결과를 분석 및 요약하였다. 물부족량의 경우에는 3절의 미래 가뭄전망과 비교하여 분석하였으며, 수공구조물 영향분석과 사회·경제적 영향평가의 경우에는 연구 결과를 요약하였다.

가. 물부족의 계절성

기후변화를 고려한 가뭄의 경향성 분석결과, 과거 가뭄은 봄과 겨울철 가뭄이 심화되었다. 이러한 결과는 물수급 분석에서도 나타났는데, 물부족량과 과거의 월별 유량의 상관성을 분석한 결과 이수기 유량과 물부족량이 높은 상관성을 보임이 관찰되었다. 따라서 두 연구단위의 연구결과를 종합해 보면 과거의 물 부족은 이수기 유량의 부족 때문에 발생하였으며, 미래의 물 부족 역시 봄과 겨울철과 같은 이수기에 집중될 것이다.

나. 가뭄 전망과 물수급 전망의 비교

한반도 전역에 걸쳐 가뭄심도의 변화는 크지 않지만, 평균 물부족량은 모든 유역에서 증가한다. 이러한 현상은 미래에는 과거와 비교하여 가뭄의 발생빈도가 낮아지지만 가뭄심도는 더욱 심화하여 가뭄의 강도와 피해가 더욱 크게 나타나는 것과 결과가 일맥상통한다. 따라서 두 세부과제에서 모두 미래로 갈수록 평균 물부족량이 증가하고 가뭄심도가 심화하는 결과를 보여 모든 유역에서 체계적인 수자원 관리가 필요한 것으로 나타났다.

다. 대권역별 수자원 전망

대권역별로 살펴보면 한강유역의 가뭄심도가 과거보다 심화하는 것을 알 수 있다. 반면에 평균 물부족량의 경우 다른 권역과 비교하여 약 37.71% 증가하여 다른 권역과 비교하여 작은 편이다. 이러한 이유는 가뭄심도가 심화함에도 다른 권역과 비교하여 수자원관리 시스템이 잘 구축되어 있어 미래에도 안정적인 수자원 공급이 가능함에 따른 결과로 보인다. 낙동강유역은 수자원 분석 결과 과거부터 수자원 수급이 어려웠던 지역으로 나타났다. 미래 수자원 분석결과 또한 가뭄심도가 심화하고 평균 물부족량이 증가하는 것으로 나타나 지속적인 수자원 관리가 필요하다. 금강유역은 가뭄심도의 변동폭이 거의 없는 반면, 물수급 분석 결과는 평균 물부족량이 평균 187.3% 급증하는 것으로 나타났다. 이는 과거 금강유역의 수자원분석 결과를 기초로 분석해 볼 때, 금강유역은 과거 수자원 부족이 거의 발생하지 않았던 지역으로 한강유역과 다르게 수자원관리 시스템이 잘 갖추어지지 않아 기후변화에 민감하게 평균 물부족량이 증가하였다. 따라서 정책결정자는 금강유역이 물수급에 대하여 안정적인 지역이라는 생각을 버리고 미래 평균 물부족량 증가에 대비한 새로운 정책 및 물관리 대책이 수립해야 할 것이다. 영산 섬진강유역은 가뭄심도는 나아지지만, 평균 물부족량은 증가하였다. 이러한 두 연구단위의 다른 전망결과는 앞

서 설명한 가뭄 전망결과와 수자원 전망결과에 차이에 기인한 것으로 가뭄빈도가 감소함에도 그 강도는 증가하여 가뭄으로 말미암은 피해는 증가하게 되므로 영산 섬진강유역의 미래 수자원 수급은 악화할 것으로 전망되었다.

라. 중권역별 수자원 전망 결과

두 연구 모두 과거 가뭄우심지역으로 평가된 낙동강 유역은 물론 태화강, 회야·수영강, 낙동강남해 유역에서 가뭄이 크게 심화하는 것으로 분석되었다. 중부지방에 있는 한강, 경안천, 달천, 안성천, 한강서해, 한강동해 유역 또한 가뭄이 크게 심화할 것으로 나타나 미래에는 한반도의 중부지방 역시 수자원 수급에 문제가 발생할 것으로 전망되었다. 긍정적인 측면은 한강은 수자원 시스템이 잘 갖추어져 있어 미래 극심한 기후변화 환경에도 상대적으로 대부분의 중권역에서 안정적인 수자원 수급이 가능하다는 점으로 수자원 수급이 어려운 지역을 중심으로 장기적인 수자원관리 대책이 마련되어야 할 것이다. 또한, 과거부터 수자원 수급에 문제점이 있었던 영산 섬진강 유역의 영산강중류, 고막원천, 영암천, 와탄천, 신안군에 대해서도 근본적인 수자원 수급 대책이 마련되어야 한다.

다. 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석

지진하중에 대한 안정성을 위해 신뢰성 해석에 기반을 두고 개발된 취약도 곡선을 수위하중에 적용하여 수위에 따른 수공구조물의 거동에 적용시켰다. 콘크리트 중력식 댐의 경우 소·중규모의 경우 고수위에 다다르기 전부터도 0.5 정도의 파괴확률을 보였으나, 대규모에서는 고수위 직전까지도 안전함을 나타내었다. 제방은 일반적으로 침투에서 파괴가 시작되기 때문에 침투 취약도를 작성함으로써 화강암지역, 동수경사가 급한 지역 등에서 취약도가 높음을 확인하였다. 특히 유출속도(한계유속)의 측면보다 한계동수경사의 측면에서 작성한 침투 취약도가 더 민감한 결과를 보였다.

마. 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가

미래의 기후변화에 따른 홍수 및 가뭄 피해액 전망결과에 대해서 경제적인 관점에서 봤을 때는 광역시보다 도의 방재대책이 우선적으로 필요할 것으로 판단되나, 광역지자체는 도에 비하여 인구 밀집도와 주요 기반시설 분포를 고려했을 때는 외려 반대의 논리가 가능하다. 따라서 본 연구의 전망결과는 아직 다양한 변수를 고려하지 못한 초기의 연구로 판단하고, 위와 같은 구체적인 부분들을 고려하여 정책적인 우선순위의 근거로 활용할 수 있는 수준의 섬세함을 가질 수 있도록 향후 연구가 진행되어야 한다.

또한 기후변화 시나리오 및 상세화 과정에서의 불확실성 못지않게 피해함수모형 도출과정에서의 불확실성이 아직 상당히 큰 단계이기 때문에, 전망결과로 도출된 피해액을 중요한 결과물로 받아들이기 힘들다. 경제적인 부분은 정책 입안 시 민감하게 고려되어야 할 요소로, 이와 같은 불확실성을 내포한 채로 적용하기는 힘들 것으로 보인다. 따라서 무엇보다 사회·경제적인 영향평가의 결과물은 불확실성을 가능한 저감하여 신뢰도를 높이는 것이 최우선 해결 과제가 되어야 할 것으로 보인다.

Table 3.4.35 한반도 수자원 전망결과 종합(A2)

(a) 한강유역 수자원 전망

	Historic (1967-2003)	S1 (2011-2040년)	S2 (2041-2070년)	S3 (2071-2099년)	Average (%)
가뭄심도	-1.80	-2.17	-2.13	-1.86	-2.05
(과거대비 증감)		(-20.174%)	(-18.85%)	(-3.49%)	(-14.19%)
평균 물부족량	41,979,592	48,470,602	59,015,115	65,943,920	57,809,879
(과거대비 증감)		(+15%)	(+41%)	(+57%)	(+37.71%)
최대 물부족량	122,138,312	152,447,284	157,920,675	187,452,721	165,940,227
(과거대비 증감)		(+25%)	(+29%)	(+53%)	(+35.86%)
* 평균증감량(%) : 과거 대비 미래 S1-S3기간의 가뭄심도 증감량[(+) : 가뭄완화, (-) : 가뭄심화].					

(b) 낙동강유역 수자원 전망

	Historic (1967-2003)	S1 (2011-2040년)	S2 (2041-2070년)	S3 (2071-2099년)	Average (%)
가뭄심도	-2.29	-2.27	-2.30	-2.18	-2.25
(과거대비 증감)		(+0.59%)	(-0.77%)	(+4.81%)	(+1.54%)
평균 물부족량	29,528,506	38,599,295	50,667,878	55,909,736	48,392,303
(과거대비 증감)		(+31%)	(+72%)	(+89%)	(+63.88%)
최대 물부족량	127,265,085	157,654,882	162,737,819	204,376,081	174,922,927
(과거대비 증감)		(+24%)	(+28%)	(+61%)	(+37.45%)
* 평균증감량(%) : 과거 대비 미래 S1-S3기간의 가뭄심도 증감량[(+) : 가뭄완화, (-) : 가뭄심화].					

(c) 금강유역 수자원 전망

	Historic (1967-2003)	S1 (2011-2040년)	S2 (2041-2070년)	S3 (2071-2099년)	Average (%)
가뭄심도	-2.19	-2.25	-2.13	-1.86	-2.19
(과거대비 증감)		(-2.71%)	(-1.95%)	(4.61%)	(-0.02%)
평균 물부족량	9,936,113	21,161,669	30,003,147	34,479,531	28,548,116
(과거대비 증감)		(+113%)	(+202%)	(+247%)	(+187.32%)
최대 물부족량	71,456,302	77,896,174	107,122,458	111,556,664	98,858,432
(과거대비 증감)		(+9%)	(+50%)	(+56%)	(+38.35%)
* 평균증감량(%) : 과거 대비 미래 S1-S3기간의 가뭄심도 증감량[(+) : 가뭄완화, (-) : 가뭄심화].					

(d) 영산 섬진강유역 수자원 전망

	Historic (1967-2003)	S1 (2011-2040년)	S2 (2041-2070년)	S3 (2071-2099년)	Average (%)
가뭄심도	-2.34	-2.135	-2.345	-1.92	-2.13
(과거대비 증감)		(+8.76%)	(-0.21%)	(17.95%)	(8.81%)
평균 물부족량	181,325,000	181,726,776	236,986,456	266,853,951	228,522,394
(과거대비 증감)		-	(+31%)	(+47%)	(+26.03%)
최대 물부족량	541,014,891	548,467,083	807,542,193	954,733,522	770,247,599
(과거대비 증감)		(+1%)	(+49%)	(+76%)	(+42.37%)
* 평균증감량(%) : 과거 대비 미래 S1-S3기간의 가뭄심도 증감량[(+) : 가뭄완화, (-) : 가뭄심화].					

Table 3.4.36 한반도 수자원 전망결과 종합(B1)

(a) 한강유역 수자원 전망

	Historic (1967-2003)	S1 (2011-2040년)	S2 (2041-2070년)	S3 (2071-2099년)	Average (%)
가뭄심도	-1.80	-1.71	-1.72	-1.94	-1.79
(과거대비 증감)		(+5.19%)	(+4.65%)	(-7.84%)	(+0.67%)
평균 물부족량	41,979,592	54,454,181	63,718,271	68,248,853	62,140,435
(과거대비 증감)		(+30%)	(+52%)	(+63%)	(+48%)
최대 물부족량	122,138,312	136,145,862	191,444,805	194,433,907	174,008,191
(과거대비 증감)		(+11%)	(+57%)	(+59%)	(+42%)
* 평균증감량(%) : 과거 대비 미래 S1-S3기간의 가뭄심도 증감량[(+) : 가뭄완화, (-) : 가뭄심화].					

(b) 낙동강유역 수자원 전망

	Historic (1967-2003)	S1 (2011-2040년)	S2 (2041-2070년)	S3 (2071-2099년)	Average (%)
가뭄심도	-2.29	-2.09	-2.16	-2.17	-2.14
(과거대비 증감)		(+8.49%)	(+5.69%)	(+5.16%)	(+6.45%)
평균 물부족량	29,528,506	46,903,414	53,265,753	54,577,929	51,582,365
(과거대비 증감)		(+59%)	(+84%)	(+85%)	(+75%)
최대 물부족량	127,265,085	147,499,794	169,941,191	213,589,182	177,010,056
(과거대비 증감)		(+16%)	(+34%)	(+50%)	(+39%)
* 평균증감량(%) : 과거 대비 미래 S1-S3기간의 가뭄심도 증감량[(+) : 가뭄완화, (-) : 가뭄심화].					

(c) 금강유역 수자원 전망

	Historic (1967-2003)	S1 (2011-2040년)	S2 (2041-2070년)	S3 (2071-2099년)	Average (%)
가뭄심도	-2.19	-2.08	-1.95	-2.12	-2.05
(과거대비 증감)		(+4.85%)	(+10.94%)	(+3.09%)	(+6.29%)
평균 물부족량	9,936,113	26,493,491	31,970,083	34,946,099	31,136,558
(과거대비 증감)		(+167%)	(+222%)	(+252%)	(+213%)
최대 물부족량	71,456,302	95,379,951	100,284,887	107,131,138	100,931,992
(과거대비 증감)		(+33%)	(+70%)	(+50%)	(+41%)
* 평균증감량(%) : 과거 대비 미래 S1-S3기간의 가뭄심도 증감량[(+) : 가뭄완화, (-) : 가뭄심화].					

(d) 영산 섬진강유역 수자원 전망

	Historic (1967-2003)	S1 (2011-2040년)	S2 (2041-2070년)	S3 (2071-2099년)	Average (%)
가뭄심도	-2.34	-1.97	-2.04	-2.01	-2.01
(과거대비 증감)		(+15.81%)	(+12.03%)	(+14.10%)	(+14.32%)
평균 물부족량	181,325,000	219,929,592	240,177,400	252,596,824	237,567,939
(과거대비 증감)		(+21%)	(+33%)	(+39%)	(+31%)
최대 물부족량	541,014,891	711,842,640	793,621,351	931,667,800	812,377,264
(과거대비 증감)		(+32%)	(+47%)	(+72%)	(+50%)
* 평균증감량(%) : 과거 대비 미래 S1-S3기간의 가뭄심도 증감량[(+) : 가뭄완화, (-) : 가뭄심화].					

Table 3.4.37 중권역별 GCMs의 평균 수자원 전망 결과

대권역	중권역 번호	중권역명 (대상유역)	유역면적 (km2)	수문학적 위험도(SPI3≤-1.5)			수문학적 위험도(SPI6≤-1.5)			평균 물부족량(m^3/km^2)			평균 물부족량 증감(m^3/km^2)		
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
한강유역	1001	남한강상류	2447.85	0.89	0.95	1.08	0.89	1.05	1.03	0	0	0	0	0	0
	1002	평창강	1773.89	1.19	1.09	1.23	1.07	1.23	1.33	25	23	22	-17	-19	-20
	1003	충주댐	2483.82	1.22	1.14	1.43	1.16	1.24	1.27	0	0	0	0	0	0
	1004	달천	1614.36	1.32	1.10	1.51	1.11	1.30	1.35	2,022	3,389	4,054	944	2,311	2,976
	1005	충주댐하류	524.42	1.34	1.21	1.75	1.08	1.31	1.72	0	0	0	0	0	0
	1006	섬강	1491.01	1.33	1.16	1.60	1.12	1.24	1.55	0	0	0	0	0	0
	1007	남한강하류	2072.72	1.36	1.15	1.59	1.13	1.21	1.54	0	0	0	0	0	0
	1008	금강산댐	2083.03	1.11	1.03	0.86	0.90	1.14	1.14	0	0	0	0	0	0
	1009	평화의댐	351.34	1.16	1.08	0.95	1.04	1.17	1.22	106	105	93	-5	-7	-18
	1010	춘천댐	1587.39	1.15	0.97	1.05	0.96	1.13	1.20	0	0	0	0	0	0
	1011	인북천	931.3	1.04	0.97	0.79	0.74	1.05	1.06	74	57	56	-7	-24	-25
	1012	소양강	1852.02	1.13	1.04	1.35	1.00	1.19	1.22	1	1	1	0	-0	-0
	1013	의암댐	721.71	1.15	1.03	1.46	1.10	1.14	1.29	0	0	0	0	0	0
	1014	홍천강	1566.02	1.11	1.01	1.29	1.00	1.18	1.21	0	0	0	0	0	0
	1015	청평댐	760.61	1.11	1.03	1.45	1.09	1.06	1.30	0	0	0	0	0	0
	1016	경안천	561.13	1.31	1.09	1.31	1.02	1.15	1.41	40,318	46,848	50,009	5,146	11,676	14,837
	1017	팔당댐	43.87	1.06	0.87	1.14	0.98	0.98	1.28	1,265	1,224	1,096	-621	-662	-790
	1018	한강서울	1537.22	1.03	1.08	1.42	0.96	1.09	1.26	502	489	432	-249	-263	-319
	1019	한강고양	826.31	1.22	1.17	1.48	0.91	1.10	1.32	0	0	0	0	0	0
	1024	한강하류	146.41	1.06	1.25	1.66	0.73	1.29	1.38	0	0	0	0	0	0
	1101	안성천	1658.65	1.29	1.07	1.42	1.05	1.23	1.29	3,544	6,276	7,793	1,714	4,447	5,964
	1201	한강서해	1031.64	1.11	1.25	1.73	0.92	1.26	1.40	6,322	7,407	7,666	1,217	2,301	2,560
	1202	시화호	961.25	1.37	1.13	1.53	1.14	1.22	1.42	9,893	10,969	11,155	1,473	2,550	2,736
	1301	양양남대천	1300.85	0.82	0.93	1.21	0.74	0.92	0.99	0	0	0	0	0	0
	1302	강릉남대천	1050.11	1.07	1.16	1.40	0.71	1.12	1.12	0	0	0	0	0	0
	1303	삼천오십천	986.6	0.99	0.93	1.30	0.78	0.81	0.95	0	0	0	0	0	0

Table 3.4.37 중권역별 GCMs의 평균 수자원 전망 결과(계속)

대권역	중권역 번호	중권역명 (대상유역)	유역면적 (km2)	수문학적 위험도(SPI3≤−1.5)			수문학적 위험도(SPI6≤−1.5)			평균 물부족량(m^3/km^2)			평균 물부족량 증감(m^3/km^2)		
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
낙동강유역	2001	안동댐	1628.68	0.97	0.96	1.23	0.79	1.12	1.13	0	0	0	0	0	0
	2002	임하댐	1975.77	1.19	0.83	1.08	1.06	0.92	1.08	4	4	1	−4	−3	−4
	2003	안동댐하류	980.41	1.34	1.22	1.49	1.65	1.24	1.33	0	0	0	0	0	0
	2004	내성천	1816.06	1.13	1.10	1.36	1.17	1.36	1.15	1,033	1,395	1,485	273	635	725
	2005	영강	914.43	1.32	1.23	1.51	1.34	1.31	1.31	206	200	205	60	54	59
	2006	병성천	433.11	1.53	1.36	1.57	2.06	1.52	1.36	39,395	44,410	45,486	7,246	12,261	13,337
	2007	낙동상주	224.13	1.23	1.11	1.31	1.38	1.19	1.10	0	0	0	0	0	0
	2008	위천	1405.99	1.62	1.26	1.47	1.71	1.41	1.38	1,317	2,479	2,814	666	1,828	2,163
	2009	낙동구미	179.2	1.65	1.44	1.53	1.86	1.46	1.45	0	0	0	0	0	0
	2010	감천	1005.33	1.27	1.30	1.36	1.53	1.27	1.30	1,705	2,979	3,308	846	2,121	2,450
	2011	낙동왜관	1106.16	1.43	1.27	1.34	1.57	1.34	1.25	0	0	0	0	0	0
	2012	금호강	2092.42	1.67	1.45	1.67	1.67	1.73	1.34	0	0	0	0	0	0
	2013	회천	781.7	1.25	1.27	1.28	1.39	1.29	1.27	0	0	0	0	0	0
	2014	낙동고령	547.95	1.39	1.36	1.37	1.48	1.42	1.41	0	0	0	0	0	0
	2015	합천댐	928.94	1.29	1.22	1.51	1.42	1.29	1.30	1,732	2,760	3,121	940	1,967	2,328
	2016	황강	387.16	1.39	1.47	1.51	1.51	1.49	1.33	0	0	0	0	0	0
	2017	낙동창녕	473.26	1.32	1.37	1.35	1.37	1.31	1.08	0	0	0	0	0	0
	2018	남강댐	2293.42	1.28	1.30	1.45	1.35	1.33	1.17	688	700	756	410	422	479
	2019	남강	1185.08	1.08	1.32	1.42	1.27	1.27	1.15	0	0	0	0	0	0
	2020	낙동밀양	1004.68	1.09	1.39	1.26	1.21	1.36	1.18	0	0	0	0	0	0
	2021	밀양강	1422.3	1.18	1.37	1.28	1.26	1.33	1.14	0	0	0	0	0	0
	2022	낙동강하구언	915.84	0.80	1.31	1.16	1.00	1.35	1.15	0	0	0	0	0	0
	2101	형산강	1139.99	1.64	1.74	1.42	1.46	1.77	1.24	2,345	3,077	3,230	895	1,627	1,780
	2201	태화강	660.86	1.18	1.49	1.34	1.13	1.67	1.20	0	0	0	0	0	0
	2301	희야강	324.16	1.10	1.38	1.28	1.14	1.45	1.15	0	0	0	0	0	0
	2302	수영강	541.28	0.98	1.36	1.28	1.07	1.48	1.31	0	0	0	0	0	0
	2401	왕피천	1332.77	1.24	1.10	1.17	1.01	0.94	1.05	0	0	0	0	0	0
	2402	영덕오십천	905.65	1.51	1.27	1.27	1.25	1.12	1.07	10,720	13,180	14,070	4,335	6,794	7,684

Table 3.4.37 중권역별 GCMs의 평균 수자원 전망 결과(계속)

대권역	중권역 번호	중권역명 (대상유역)	유역면적 (km2)	수문학적 위험도(SPI3≤−1.5)			수문학적 위험도(SPI6≤−1.5)			평균 물부족량(m^3/km^2)			평균 물부족량 증감(m^3/km^2)		
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
(계속)	2403	대종천	656.59	1.58	1.53	1.29	1.25	1.62	1.14	0	0	0	0	0	0
	2501	가화천	785.56	0.90	1.38	1.13	0.81	1.39	1.10	0	0	0	0	0	0
	2502	남해도	358.7	1.10	1.56	1.39	1.10	1.47	1.15	645	1,239	1,342	190	784	887
	2503	거제도	533.83	1.11	1.52	1.30	1.12	1.30	1.10	0	0	0	0	0	0
	2504	낙동강남해	770.55	1.04	1.32	1.27	1.19	1.30	1.18	5,994	9,532	10,330	1,684	5,222	6,021
금강유역	3001	용담댐	930.43	1.27	1.22	1.56	1.50	1.41	1.48	0	0	0	0	0	0
	3002	용담댐하류	127.72	1.29	1.10	1.43	1.36	1.21	1.26	0	0	0	0	0	0
	3003	무주남대천	464.08	1.12	1.05	1.32	1.21	1.15	1.24	16	32	35	5	22	24
	3004	영동천	705.51	1.28	1.17	1.48	1.33	1.27	1.35	0	0	0	0	0	0
	3005	초강	664.62	1.40	1.31	1.53	1.68	1.43	1.21	1,637	2,824	3,247	903	2,090	2,513
	3006	대청댐상류	120.42	1.43	1.25	1.58	1.29	1.33	1.27	0	0	0	0	0	0
	3007	보청천	553.56	1.43	1.30	1.74	1.41	1.35	1.34	5,018	8,181	9,272	2,799	5,962	7,053
	3008	대청댐	667.48	1.40	1.18	1.48	1.23	1.36	1.31	0	0	0	0	0	0
	3009	갑천	648.98	1.55	1.27	1.45	1.40	1.35	1.33	0	0	0	0	0	0
	3010	대청댐하류	129.82	1.45	1.21	1.60	1.40	1.48	1.31	0	0	0	0	0	0
	3011	미호천	1854.98	1.51	1.22	1.56	1.36	1.42	1.35	890	1,440	1,599	510	1,060	1,219
	3012	금강공주	1843.73	1.58	1.31	1.74	1.26	1.48	1.37	0	0	0	0	0	0
	3013	논산천	666.1	1.41	1.21	1.48	1.24	1.37	1.21	25,212	32,273	34,945	14,921	21,982	24,653
	3014	금강하구언	536.58	1.39	1.17	1.45	1.24	1.42	1.28	0	0	0	0	0	0
	3101	삽교천	1668.39	1.26	1.05	1.21	0.94	1.29	1.17	0	0	0	0	0	0
	3201	대호방조제	685.06	2.54	1.41	1.80	1.95	1.60	1.58	0	0	0	0	0	0
	3202	부남방조제	1336.04	1.80	1.26	1.42	1.20	1.48	1.33	1,118	2,107	2,591	627	1,617	2,101
	3203	금강서해	910.96	1.40	1.22	1.66	0.92	1.45	1.26	0	0	0	0	0	0
	3301	만경강	1600.51	1.34	1.19	1.52	1.59	1.29	1.16	0	0	0	0	0	0
	3302	동진강	1161.52	1.30	1.15	1.42	1.47	1.26	1.15	9,082	14,701	16,430	2,243	7,862	9,591
	3303	직소천	260.51	1.59	1.33	1.60	1.97	1.46	1.26	39,400	51,775	54,364	6,146	18,521	21,110
	4001	섬진강댐	763.47	1.22	1.25	1.41	1.24	1.41	1.20	582	650	647	205	273	269
	4002	섬진강댐하류	237.08	1.43	1.29	1.50	1.32	1.38	1.42	1,568	1,768	1,762	551	751	745

Table 3.4.37 중권역별 GCMs의 평균 수자원 전망 결과(계속)

대권역	중권역 번호	중권역명 (대상유역)	유역면적 (km2)	수문학적 위험도(SPI3≤−1.5)			수문학적 위험도(SPI6≤−1.5)			평균 물부족량(m^3/km^2)			평균 물부족량 증감(m^3/km^2)		
				S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
영산/섬진강유역	4003	오수천	370.89	1.51	0.98	1.59	1.41	1.10	1.53	34	39	38	12	16	16
	4004	순창	431.24	1.69	0.77	1.58	1.53	0.84	1.48	0	0	0	0	0	0
	4005	요천	486.67	1.52	1.01	1.50	1.46	1.10	1.47	1,033	1,671	1,752	201	840	920
	4006	섬진곡성	183.24	1.52	1.28	1.44	1.45	1.39	1.43	0	0	0	0	0	0
	4007	주암댐	1029.52	1.39	1.21	1.32	1.31	1.27	1.39	0	0	0	0	0	0
	4008	보성강	283.78	1.35	1.27	1.34	1.36	1.43	1.35	0	0	0	0	0	0
	4009	섬진강하류	1128.43	1.27	1.39	1.37	0.91	1.47	1.19	0	0	0	0	0	0
	4101	섬진강서남해	1074.4	1.09	1.15	1.41	0.97	1.41	1.40	2,387	4,814	5,526	354	2,782	3,494
	4102	완도	384.61	1.18	1.13	1.60	1.01	1.17	1.13	5,043	7,303	7,883	854	3,114	3,694
	4103	금산면	124.07	1.05	1.11	1.25	0.82	1.35	1.31	3,430	5,478	6,136	616	2,664	3,322
	4104	이사천	1048.4	1.03	1.11	1.15	0.83	1.19	1.11	0	0	0	0	0	0
	4105	수어천	612.71	1.14	1.34	1.30	0.95	1.28	1.06	0	0	0	0	0	0
	4106	여수시	140.6	0.98	1.49	1.35	1.09	1.45	1.28	0	0	0	0	0	0
	5001	영산강상류	714.8	1.69	1.17	1.50	1.50	1.22	1.42	3,719	9,574	12,047	375	6,231	8,704
	5002	황룡강	565.04	1.86	1.39	1.63	1.83	1.38	1.69	0	0	0	0	0	0
	5003	지석천	663.98	1.33	1.08	1.14	1.30	1.12	1.24	0	0	0	0	0	0
	5004	영산강중류	421.18	1.36	1.05	1.15	1.37	1.11	1.30	65,777	92,864	100,986	10,233	37,281	45,403
	5005	고막원천	218.95	1.36	1.21	1.27	1.42	1.16	1.33	27,735	40,272	43,860	4,888	17,425	21,013
	5006	영산강하류	470.58	1.28	0.93	1.07	1.16	1.08	1.23	9,307	18,694	21,933	1,543	10,930	14,169
	5007	영암천	264.34	1.28	0.99	1.13	1.09	1.15	1.38	168,500	192,250	199,082	10,437	34,162	40,993
	5008	영산강하구언	150.71	1.20	1.00	1.05	1.16	1.18	1.24	0	0	0	0	0	0
	5101	탐진강	505.52	1.12	1.04	1.19	0.91	1.29	1.03	0	0	0	0	0	0
	5201	진도	437.43	1.16	1.05	1.23	1.09	1.23	1.36	1,459	3,723	4,646	156	2,419	3,342
	5202	영암방조제	1069.31	1.11	1.02	1.02	0.98	1.20	1.05	0	0	0	0	0	0
	5301	주진천	511.11	1.65	1.41	1.72	2.13	1.63	1.60	4,695	9,189	10,753	1,014	5,386	6,950
	5302	와탄천	1097.99	1.43	1.16	1.35	1.54	1.13	1.48	40,425	52,887	55,997	5,886	18,348	21,459
	5303	신안군	507.71	1.50	1.09	1.33	1.49	1.24	1.82	86,553	91,014	92,249	1,957	6,417	7,652

제 5 절 기후변화를 대비한 적응대책 수립

1. 서론

기후변화에 대비하는 수자원관리에는 적응대책의 수립이 매우 유용하다. 그러나 적응이란 기후변화의 영향을 받는 대상이 경험하는 모든 행동과 과정을 의미하고, 적응능력이란 인적자본, 거버넌스, 구조, 제도, 기술, 관리, 정책 등 대상에 따라 다양하게 존재한다. 문제는 이러한 적응능력을 향상시키기 위해서는 사회구조의 변화에 따른 막대한 비용이 필요하고 때로는 이해당사자들 간에 심각한 갈등이 유발되기도 한다. 최근에 기후변화에 대한 우려가 높아지고 있으나, 우리나라의 수자원관리는 사실상 기후변화의 영향을 거의 고려하고 있지 않다. 따라서 수자원 관련 제도의 정비작업을 통하여 기후변화의 대응 정도를 제고시키면, 수자원관리의 법적 안정성과 정책의 실효성을 획기적으로 높이게 될 것이다.

그러나 기후변화 연구의 마지막 세 번째 단계에 해당하는 적응대책 수립은 아직 국내에서 연구가 수행되거나 그 결과가 적용된 사례가 적으며, 해외에서도 사례가 많지 않다. 본 연구단에서는 수자원 분야에서는 국내 최초로 기후변화에 따른 경제적 피해액을 산정하였다. 하지만 국내의 경우 피해 자료가 양과 질 모두에서 열악하기 때문에 전망 결과의 신뢰도가 향후 상당히 개선되어야 하며, 또한 본 연구에서 제시한 법/제도/정책 제시안은 향후 학회 등을 통해 공식적으로 적응대책이 실현될 수 있도록 국가적 지원이 있어야 하겠다.

본 연구는 기후변화를 고려한 향후 적응대책 수립에 대해 논하는데 그 목적이 있다. ‘2. 기후변화를 대비한 법·제도 개선 및 수자원 정책 제시’에서 현재 수자원 관련 법·제도 및 정책들이 기후변화를 대비하기 위해 나아가야 할 방향을 제언하였으며, ‘3. 향후 연구’에서 앞으로 기후변화 연구가 취약성 평가, 적응대책 수립의 단계에 대하여 향후 어떤 연구를 이어나가야 할지에 대해 논하였다.

2. 기후변화를 대비한 법제도 개선 및 수자원정책 제시

가. 서 론

기후변화에 대비하는 수자원관리에는 적응대책의 수립이 매우 유용하다. 그러나 적응이란 기후변화의 영향을 받는 대상이 경험하는 모든 행동과 과정을 의미하고, 적응능력이란 인적자본, 거버넌스, 구조, 제도, 기술, 관리, 정책 등 대상에 따라 다양하게 존재한다. 문제는 이러한 적응능력을 향상시키기 위해서는 사회구조의 변화에 따른 막대한 비용이 필요하고 때로는 이해당사자들 간에 심각한 갈등이 유발되기도 한다. 최근에 기후변화에 대한 우려가 높아지고 있으나. 우리나라의 수자원관리는 사실상 기후변화의 영향을 거의 고려하고 있지 않다. 따라서 수자원 관련 제도의 정비작업을 통하여 기후변화의 대응 정도를 제고시키면, 수자원관리의 법적 안정성과 정책의 실효성을 획기적으로 높이게 될 것이다.

따라서 본 연구의 목적은 수자원에 대한 기후변화의 대응 정도를 제고시키기 위하여 수자원 관련 법제도의 개선방안과 국가 수자원정책의 중장기 로드맵 그리고 국제협력의 방향성을 제시하는 것에 있다. 이를 위하여 기후변화에 적응하는 국제적인 동향과 선진국의 사례 그리고 전문가 설문조사를 통하여 우리나라의 제도적인 문제점을 파악하였다. 도출된 문제점에 따라 기후변화 적응 법제도 가이드라인과 전략을 설정하고, 이를 전문가 정책토론회에서 검토하였다. 최종적으로 완성된 기후변화에 대비하는 물 관련 정책 및 법제도의 적응전략은 수자원 관련 법령개정(안), 제도개선(안), 정책개선(안), 그리고 수자원정책의 중장기 전략과 로드맵으로서 제시하였다. 법령개정(안)은 신규법령의 제정과 기존법령의 개정으로 구분하여 제시하고. 기존법령의 개정은 하천법 등 국토해양부 소관의 법령을 위주로 검토하였다.

나. 해외 법제도 및 정책 동향

(1) 국제동향 분석

(가) EU

EEA는 유럽 국가들의 기후변화 적응전략의 수립을 유도해왔다. 개별 국가들은 2010년 1월까지 각각 국내 상황을 반영한 기후변화적응전략을 수립하여 EEA에 제출하였고, 몇몇 조치들은 국가 단위 또는 수준이 아니라 여러 국가들이 공유하는 수준 또는 인접지역 간 다양한 지역 간 협력의 수준에서 행해지도록 작성되었다[1]. EU의 기후변화적응전략은 European Climate Adaptation Platform에서 찾아볼 수 있다. EU에 속하는 모든 국가가 국가기후변화적응전략을 수립한 것은 아니지만, 상당수의 국가가 정부 차원에서 기후변화적응전략(National Adaptation Strategy, NAS)을 수립한 상태이다. 2009년에 수립된 EU의 백서 “Adapting to climate change: Towards a European framework for action"에 왜 EU 차원에서 기후변화적응전략을 수립하고 있는지에 대한 근거가 제시되어 있다.

아래 그림은 국가 기후변화 적응전략의 수립현황이다. 그림에서 녹색으로 표시된 지

1) European Environment Agency. http://www.eea.europa.eu/themes/climate/national-adaptation-strategies. 검색일: 2012.06.07.

역은 전략이 수립된 지역이고, 노란색으로 표시된 부분은 미수립된 지역을 의미한다. 개별 국가들은 각각 국별 보고서를 제출하는데, 이것은 National Communications (Annex Ⅰ), National Communications(Non-Annex Ⅱ), Greenhouse Gas Inventories (Annex Ⅰ), National Adaptation Programmes of Action (NAPAs)으로 이루어져 있다[2].

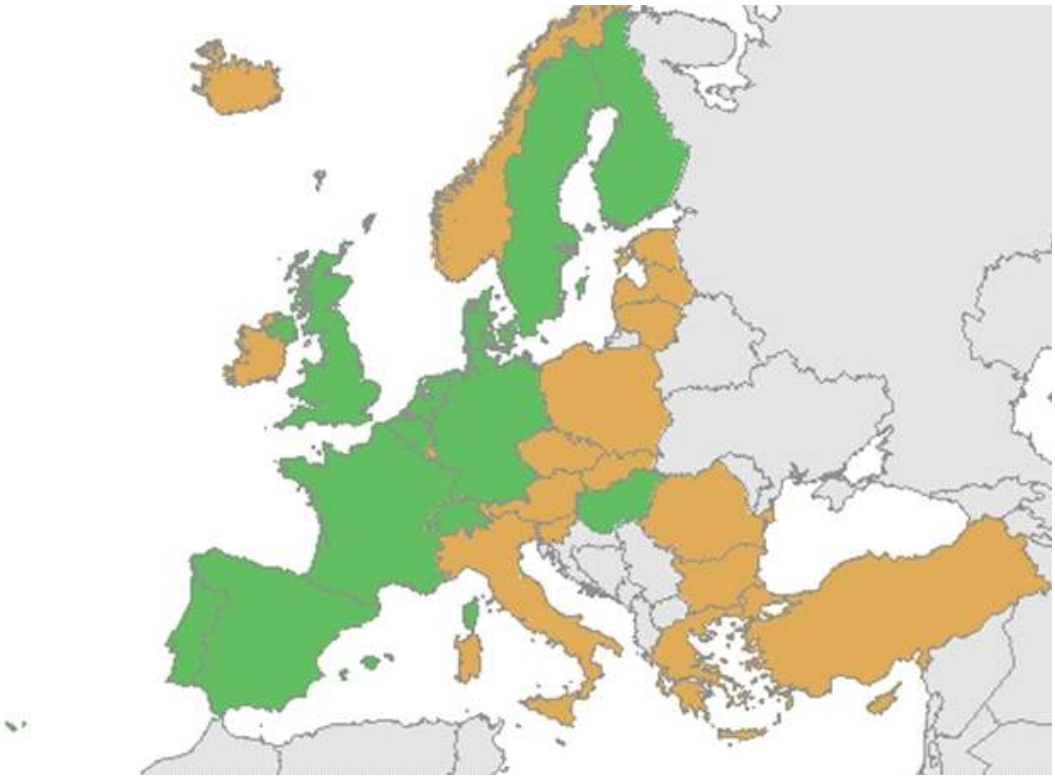


Fig. 3.5.1 EU 회원국 중 국가 기후변화 적응전략 수립 현황

한편, EU는 수자원부문에 있어서도 기후변화 적응전략을 추진해왔다. 2000년 발효된 EU의 물관리지침(Water Framework Directive)이 바로 그것이다. 물관리 지침은 영국을 비롯한 EU 회원국들의 지속가능한 물관리에 필요한 요소들을 제공하고 있다. 물관리 지침의 목표는 2015년까지 회원국들의 수질이 'Good' 수준[3]에 도달할 수 있도록 담수, 국가 간·행정구역간의 공유 수자원, 해안수(Coastal Waters)와 지하수 보호를 위한 단계별 목표치 설정 및 제도적 관리의 틀 마련이다[4]. EU의 물관리 지침은 유역 내 수질과 수자원, 물리적 생태계, 지표수와 지하수의 범위를 모두 포괄하고 있다는 점에서 과거의 물관리 방침과 비교하여 여러모로 색다르다. 그러나 EU의 물관리 지침은 지침에 따라 환경적 목표에 도달하는데 있어 극복해야 하는 기후변화로 인한 위험요소들에 대한 언급이 없다. 그리고 바로 이점이 EU 가입국 간 또는 개별국가 내부의 지역적, 국가적 기후변화 적응정책의 틀 또는 메커니즘을 형성하는데 기초로 작동하고 있다[5]. 따라서 EU의

2) United Nations Framework Convention on Climate Change. http://unfccc.int/national_reports/items/1408.php. 검색일: 2012.07.02.

3) EU의 물관리지침은 지표수자원의 생태학적 상태를 'high', 'good', moderate', 'poor;, bad'의 5가지 상태로 분류하였다. 즉, 물관리지침에 따른 2015년 EU 물관리의 목표수준은 'good'으로 위에서 두 번째 단계에 해당한다. European Commission(2010), Water Framework Directive, p.2.

4) 이승호(2004), 외국수자원정책 사례연구: 영국과 프랑스, *2004년도 대한토목학회 정기 학술대회*, pp.4861-4862.

물관리지침과 회원국인 영국의 국내법 간의 유기적 관계를 분석함을 통해 국내법의 법제도적 개선과 국제공조를 연계하는 방법과 이웃 국가들이 제도적인 측면에서 상호 협력하여 기후변화적응능력을 제고해 가는 방법을 알아낼 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 현재 이들 간의 관계에 대해 분석한 선진 사례는 찾기 어렵다 또한, 이들 간의 관계를 통해 국내법과 국제 규정 간의 상호 보완적 관계 설정방안을 모색하고 국내 법제도 및 정책과 국제협력 간의 연계성을 도출할 수 있을 것으로 생각된다.

물관리 지침의 주요목적은 물의 상태에 영향을 미치는 광범위한 활동과 모든 오염요소들을 통제하고 규명함으로써 공동체 내부의 수질을 관리하고 향상시키는데 있다. 그리고 부수적으로 지하수와 지표수의 양을 통제하고 수생태계와 습지대를 보호하기 위한 목적도 갖고 있다. 화학적, 생태적 관점에서 수량과 수질, 오염관리 수준 모두를 포괄하는 'good' 수준을 달성함으로써 총체적으로 물의 상태를 향상시키고 있다. 지침은 유럽의 물정책을 위임받아 존재하고 법속으로 새로운 지역들을 유인하고 있다. 따라서 물관리 지침은 두 가지 이유에서 국내 물관리 계획체계에 영향을 미치고 있다. 첫째, 토지이용보다 생태적, 환경적 이슈들에 보다 더 관심이 있는 것처럼 보이고, 둘째, 유역관리청들에 의해 유역관리계획이 세워져오고 있다. WFD의 주요 메커니즘은 개별 강 유역 관리계획(River Basin Management Plan, RBMP)를 포함하는 유역관리구역으로 개별 회원 국가들의 영토를 분류하는 것이다. 이로써 국가 간 공유하천에 대한 책임은 개별 정부들 간에 분산되고, 하나의 물관리 비전이 수립되게 된다. 자연적 지형적, 수문학적 단위를 따라 구분된 강과 호수의 통합된 관리는 행정적, 정치적 범위와는 반대로 EU의 새로운 혁신적 제도로 자리 잡고 있다. 이와 같은 수자원관리와 정책의 변화는 전통적인 계획체계의 작동에 영향을 미치는 중요한 변화이다[6].

EU의 물관리 지침은 물환경관리에 기후변화 시나리오를 도입하게끔 하는 플랫폼을 제공하고 있다. 물관리 지침은 회원국들이 2015년까지 물관리 지침의 목표를 달성해가는 과정에서 발생 가능한 위험을 평가하고 관리하게 하기 때문이다. 이 과정에서 가장 중점적으로 관심을 갖게 되는 부분은 어떻게 하면 장기간동안 직면한 기후변화의 다양성과 변화에 적응할 수 있는 실행방법을 결정할 수 있는가이다. 6년 단위로 갱신되는 하천유역관리계획(River Basin Management plans)은 물관리 지침의 목표를 달성하기 위한 핵심적 요소이다. 영국의 경우, 지침은 홍수방어계획(flood defence scheme) 시 기후변화영향의 허용치를 분류하는 기준을 제공한다. 개별 유역수준에서는 홍수 위험과 수자원가용성과 연관 있는 계획 그리고 기후변화로 인한 오염의 확산과 담수의 종 다양성 관리를 위한 국가적 지침 등이 존재하지 않는다. 그러나 Planning Policy Statement 25 아래, 어떻게 그들이 지역적, 공간적 전략으로 기후변화를 고려해야 하는 지에 관한 새로운 지침이 UK 계획자들에게 제출되었다. 그리고 기후변화를 EU 물관리 지침 아래 지역적 수준에서 강유역과 해안 유역을 나란히 배분할 수 있도록 하고 있다[7].

---

5) R.L.Willby, H.G.Orr, M.Hedger, D.Forrow, M.Blackmore(2006), Risks posed by climate change to the delivery of Water Framework Directive objectives in the UK, *Environmental International*, 32(8), p.1043.

6) Joe Howe, Iain White(2010), The Potential Implications of the European Union Water Framework Directive on Domestic Planning Systems: A UK Case Study, European Planning Studies, 10(8), pp.1028-1029.

7) R.L. Wilby, H.G. Orr, M. Hedger, D. Forrow, M. Blackmore(2006), Risks posed by climate change to the delivery of Water Framework Directive objectives in the UK, Environment International, 32, pp.1045-1046.

(나) 영국

영국은 세계 최초로 기후변화적응을 고려하여 법제정에 반영한 나라이다. 2001년 제정된 「The Climate Change Levy(Registration and Miscellaneous Provisions) Regulations 2001」이 이에 해당한다. 현재, 영국에는 기후변화가 명시된 법률은 UK Public General Acts로는 「Climate Change Act 2008」과 「Climate Change and Sustainable Energy Act 2006」의 2가지가 있고, UK Statutory Instruments에 해당하는 법령 39개, Scottish Statutory Instruments에 해당하는 법령 7개, Acts of the Scottish Parliament에 해당하는 1개 법령이 있다.

Table 3.5.1 기후변화관련 영국 국내법 제정현황

법령명	연도 및 번호	
UK Public General Acts		
Climate Change Act 2008	2008	c.27
Climate Change and Sustainable Energy Acts 2006	2006	c.19
UK Statutory Instruments		
The Climate Change Levy(General)(Amendment) Regulations 2012	2012	No.943
The Climate Change Act 2008(Credit Limit) Order 2011	2011	No.1602
The Climate Change Levy(Suspension of Transport Exemption)(Revocation) Order 2011	2011	No.1178
The Climate Change Levy(Suspension of Transport Exemption) Order 2011	2011	No.1025
The Climate Change Levy(General)(Amendment) Regulations 2011	2011	No.1023
The Climate Change Levy(Fuel Use and Recycling Processes)(Amendment) Regulations 2011	2011	No.684
The Climate Change Levy(General)(Amendment) Regulations 2010	2011	No.616
The Climate Change Agreements(Eligible Facilities)(Amendment) Regulations 2009	2010	No.3338
The Climate Change Act 2008(2020 Target, Credit Limit and Definitions) Order 2009	2009	No.2458
The Secretary of State for Energy and Climate Change Order 2009	2009	No.229
The Climate Change and Sustainable Energy Act 2006(Sources of Energy and Technologies) Order 2008	2008	No.1767
The Climate Change Levy (General) (Amendment) Regulations 2007	2007	No.2903
The Finance Act 2007 (Climate Change Levy: Reduced-rate Supplies etc) (Appointed Day) Order 2007	2007	No.2902
The Finance Act 2006 (Climate Change Levy: Amendments and Transitional Savings in Consequence of Abolition of Half-rate Supplies) (Appointed Day) Order 2007	2007	No.2901
The Climate Change and Sustainable Energy Act 2006 (Commencement) Order 2007	2007	No.538
The Climate Change Agreements (Eligible Facilities) (Amendment) Regulations 2006	2006	No.1931

The Climate Change Agreements (Miscellaneous Amendments) Regulations 2006	2006	No.1848
The Climate Change Levy (General) (Amendment) Regulations 2006	2006	No.954
The Climate Change Agreements (Eligible Facilities) Regulations 2006	2006	No.60
The Climate Change Agreements (Energy-intensive Installations) Regulations 2006	2006	No.59
The Climate Change Levy (Miscellaneous Amendments) Regulations 2005	2005	No.1716
The Climate Change Levy (Fuel Use and Recycling Processes) Regulations 2005	2005	No.1715
The Climate Change Levy (Combined Heat and Power Stations) Regulations 2005	2005	No.1714
The Climate Change Levy (General) (Amendment) (No. 2) Regulations 2003	2003	No.2633
The Climate Change Levy (Combined Heat and Power Stations) Prescribed Conditions and Efficiency Percentages (Amendment) Regulations 2003	2003	No.861
The Climate Change Levy (Use as Fuel) (Amendment) Regulations 2003	2003	No.665
The Climate Change Levy (General) (Amendment) Regulations 2003	2003	No.604
The Climate Change Levy (General) (Amendment) Regulations 2002	2002	No.1152
The Climate Change Levy (Combined Heat and Power Stations) Prescribed Conditions and Efficiency Percentages Regulations 2001	2001	No.1140
The Climate Change Agreements (Energy-intensive Installations) Regulations 2001	2001	No.1139
The Climate Change Levy (Use as Fuel) Regulations 2001	2001	No.1138
The Climate Change Levy (Solid Fuel) Regulations 2001	2001	No.1137
The Climate Change Levy (Electricity and Gas) Regulations 2001	2001	No.1136
The Climate Change Levy (General) Regulations 2001	2001	No.838
The Climate Change Agreements (Eligible Facilities) Regulations 2001	2001	No.662
The Climate Change Levy (Combined Heat and Power Stations) Exemption Certificate Regulations 2001	2001	No.486
The Climate Change Levy (Registration and Miscellaneous Provisions) Regulations 2001	2001	No.7
Scottish Statutory Instruments		
The Forestry Commissioners (Climate Change Functions) (Scotland) Order 2012	2012	No.77
The Climate Change (Limit on Carbon Units) (Scotland) Order 2011	2011	No.440
The Climate Change (Annual Targets) (Scotland) Order 2011	2011	No.353
The Climate Change (Annual Targets) (Scotland) Order 2010	2010	No.359
The Climate Change (International Aviation and Shipping) (Scotland) Order 2010	2010	No.218

The Climate Change (Limit on Carbon Units) (Scotland) Order 2010	2010	No.217
The Climate Change (Scotland) Act 2009 (Commencement No. 1) Order 2009	2009	No.341 (C.27)
Acts of the Scottish Parliament		
Climate Change(Scotland) Act 2009	2009	asp 12

영국의 국가 기후변화적응체계는 1994년 수립된 기후변화프로그램(UKCCP, UK Climate Change Programme)과 1997년에 수립된 기후변화에 의한 영향프로그램(UK Climate Impact Programme)을 중심으로 운영되고 있으며, 기후변화에 의한 영향프로그램은 국토 및 도시계획과 관련하여 기후변화 적응정책 기본계획(Adaptation Policy Framework)을 수립하는 것이나 수자원과의 관련성이 부족하다. 물관리와 관련성을 갖는 기후변화프로그램은 주로 환경식품농림부(DEFRA)의 재정적 지원을 받아 운영되고 있다.[8] 수자원관리 측면에서 유역통합수자원관리체계를 안정적으로 구축한 선진물관리 국가인 영국의 물관리방식은 2015년까지 단계적으로 시행되고 있는 EU의 물관리지침을 통해 EU 회원국가로 확대되고 있다.[9]

Table 3.5.2 물관리지침의 실행계획

목표연도	실행 목표
2000	물관리지침 발효
2003	국내법 내 물관리지침의 이전 유역관리구역과 유역관리청의 규정
2004	유역관리구역의 물리적 특성에 관한 1차 분석 완료 및 유역관리구역에 대한 인간과 오염 및 기타 요소들에 의한 영향평가, 개별 유역관리구역의 보호지역 등록 실시
2006	환경감시프로그램 구축
2008	자문을 위한 유역관리계획 초안 편찬
2009	1차 유역관리계획 완료 및 편찬
2010	물 값 정책 확정 준비
2012	(물관리 지침 실행) 메커니즘의 충분한 작동 보증
2013	1차 유역관리계획 과정의 Review
2014	자문을 위한 유역관리계획의 2차 초안 편찬
2015	1차 유역관리계획에 규정된 환경 목표 달성
2021	2차 유역관리계획에 규정된 환경 목표 달성
2027	3차 유역관리계획에 규정된 환경 목표 달성

영국은 환경식품농림부가 EU 등과 진행되는 국제적 협상을 사실상 주관해 왔고 물관리지침[10]은 2003년 북아일랜드 법령(Northern Ireland Statutory Rules) No.544, 영국의 행정입법(Statutory Instruments) No.3242와 No.3245를 통해 영국 국내법제도권 내에 이

8) 서울시정개발연구원, 2011, 영국의 기후변화 대응체계와 런던·사우스이스트의 기후변화 적응 사례.
9) 이승호(2004), p.4861.
10) 물관리지침은 유역관리구역과 유역별 관리계획의 수립을 요구하며, 유역관리계획은 유역관리구역의 물리적 특성 파악과 환경영향 평가(characterization and assesment of impacts on river basin districts), 환경감시(environmental monitoring), 환경목표 설정(the setting of environmental objectives), 목표 달성에 필요한 프로그램의 구상과 실행(the design and implementation of the programme of measures need to achieve them)의 4개의 요소로 구성되어있다. JNCC(Joint Nature Conservation Committe). <http://jncc.defra.gov.uk/page-1375>.

전되었다. 각각은 북아일랜드, 잉글랜드와 웨일즈, 스코틀랜드 지역에 영향을 미치는 제도로 이들의 순차적 제정을 통해 영국은 물관리지침의 국내법 적용이 완료된 것이다. 이들 법령들은 각각 관할 지역과 주관 기관, 법령의 구조 및 세부 구성에 있어서는 차이가 있지만, 유역관리구역과 공유하천구역(River Basin District and International River Basin Districts)의 범위를 규정하고 구역의 물리적 특성의 분석과 관련된 내용과 유역 내 물이용의 경제적 분석과 보호 구역의 등록, 모니터링, 유역관리계획 등에 관한 내용을 담고 있다는 점에서 공통점을 갖는다. 그리고 EU의 물관리지침에 따라 새롭게 제정된 법들은 물관리지침의 개별 조항들뿐만 아니라 영국의 국내법의 기존 법령의 조항들과도 관계를 맺고 있다. 북아일랜드 지역의 「The water Environment(Water Framework Directive) Regulations (Northern Ireland) 2003」의 경우, 붙임 2(Schedule 2)에서 타법과의 관계를 설명하고 있다. 동 법의 개별 조항은 1955년과 1970(a)년에 제·개정된 「The Lough Neagh Drainage Acts」와, 「Fisheries Act(Northern Ireland) 1966」, 「Section 2(2) of the European Communities Act 1972(c)」 등과 관계를 맺고 있다.

Table 3.5.3 물관리지침의 영국 국내법 적용

법령명	연도 및 번호	입법 유형
The Water Framework Directive(Priority Substances and Classification) Regulations(Northern Ireland)2011	2011. No.10	Northern Ireland Statutory Rules
The Water Environment(Water Framework Directive) (Solway Tweed River Basin District) Regulations 2004	2004. No.99	UK Statutory Instruments
The Water Environment(Water Framework Directive)(Northumbria River Basin District) Regulations 2003	2003. No.3245	UK Statutory Instruments
The Water Environment(Water Framework Directive)(England and Wales) Regulations 2003	2003. No.3242	UK Statutory Instruments
The Water Environment(Water Framework Directive) Regulations(Northern Ireland) 2003	2003. No.544	Northern Ireland Statutory Rules

영국 국내법 체계에 도입된 물관리지침은 통합수자원관리의 내용을 기본골격으로 하는 물관리의 포괄적인 목표를 담고 있으면서 모니터링의 법적 근거로 작동하고 있다. 생태환경보전을 위한 포괄적 수질관리에 목적을 두고 있는 물관리지침의 시행으로 잉글랜드 및 웨일스와 같은 영국의 지역들은 과거 수질과 수량 등으로 분절되어 시행되었던 데서 벗어나 통합적인 시각에서 모니터링을 실시할 수 있게 되었다. 또한, 유역의 물관리 조직과 절차를 체계적으로 제시된 물관리지침이 국내법에 도입됨에 따라 EU와 국가차원, 국가와 유역차원을 종횡하여 고려하여, 보다 유기적으로 수자원을 관리할 수 있게 되었다.[11] 물관리지침은 수질관리를 생태학적이거나 화학적인 관점에서 접근한다는 점과 개별 수역 별로 환경목표를 설정하여 이의 달성을 촉진하게끔 한다는 점에서는 미시적인

측면이 강조되고 있다고 볼 수 있지만, 의사결정 프로세스와 물관리지침의 실행일정 및 방법과 계획, 정보교환 플랫폼 제공 등과 관련하여 물관리지침이라는 동일한 잣대를 적용할 수 있게 한다는 점에서 거시적 측면도 강조되고 있다고 볼 수 있다.

EU의 물관리지침이 영국 국내의 물관리 법제도 체계에 도입된 뒤, 점차 그 역할이 증대됨에 따라 물관리지침이 영국 국내 하천의 수질 관리에 미치는 영향력 또한 증대되고 있다. 여기서 가장 중요한 것은 전 유럽 지역에 유역관리의 개념을 널리 보급하고 있다는 점이다. 또한 물관리지침은 물관리 지역에 할당된 수량과 친수용수, 환경보전, 경제적 중요 종 등에 관한 보호기준을 제공하고 있을 뿐만 아니라, 지침의 목표자체가 수량부터 호수와 강, 지하수와 강어귀와 바다까지를 아우르는 물관리 전반에 관한 통합적 접근을 담고 있기에 물관리지침의 도입 이후, 물관리 지침의 목표 달성 수단으로서 유역관리계획의 역할과 중요성이 커지고 있다.[12] 이는 행정구역의 경계를 넘나드는 통합유역관리의 도입 시, 직면하게 되는 문제점을 해결하기 위하여 물관리지침이 유역에 기반을 둔 물관리와 이해당사자들의 참여에 관한 내용을 담고 있기 때문이다. 그러나 물관리지침은 통합과 협력의 강력한 메커니즘으로 작용하고 있다는 점에서 의미가 있지만, 물관리의 일반적인 측면과 기후변화 적응차원 모두에서 물관리의 또 다른 핵심 축인 수량에 대한 고려가 누락되어있다는 점은 보완이 필요하다.[13] 그리고 이 점에서 유역관리계획은 물관리지침의 중요한 보완 수단으로 활용될 수 있다고 볼 수 있다.

영국의 물관리전략 및 계획은 비교적 주체와 내용의 수준과 범위가 비교적 명확한 위계질서 하에 운영되고 있다. 작성주체에 따라 연방정부 차원에서 작성되는 것과 공급기업 또는 개별지역에 의해 작성되는 것으로 분류할 수 있고, 각각은 작성의 시공간적 범위에서 연방정부차원의 중장기전략 및 비전 제시와 유역 및 관할 지역별 실질적 물관리계획의 수립으로 나누어 살펴볼 수 있기 때문이다.

우선, 영국의 물관리전략은 DEFRA(Department for Environment Food and Rural Affairs)에서 작성한다. DEFRA는 자연환경, 종 다양성, 동식물, 식량과 농어업, 동물건강과 복지, 환경보호와 오염통제, 지역공동체 관련 문제들과 관련된 정책을 수립하고 법을 제정하는 역할을 담당하는 정부부처로, 주 관리 지역은 잉글랜드 지역이고 웨일스와 스코틀랜드, 북아일랜드지역과도 긴밀하게 협력하고 있으며, EU와 국제사회와의 협상도 담당하고 있다.[14] DAFRA가 수립하는 국가물관리전략에 해당하는 '미래 수자원(Future Water - The Government's water strategy for England)'[15]은 2004년~2006년 간 잉글랜드 남동부에서 발생한 가뭄과 2007년에 발생한 홍수로 인해 기후변화적응에 대한 필요성이 높아진데 기인하여 작성된 것으로 2030년까지 물관리 영역의 관리계획과 방법에 관한 전반적이고 중장기적인 내용을 담고 있다. 구체적으로 지속가능한 물 공급, 수질 및 물환경 개선, 물환경보호, 지표수 배수시스템 운영 개선, 강과 해안가 홍수 관리, 온실가스배출감소, 물 요금 관련 사항, 물관리 관련 규정, 물 회사의 구조, 물관리 및 물산업의

11) 한국과학기술정보연구원(2012), 잉글랜드와 웨일스지역의 물관리지침, pp.1-62.
12) Martin Griffiths(2002), The European Water Framework Directive: An Approach to Integrated River Basin Management, pp.1-4.
13) Rutger van der Brugge and Jan Rotmans(2007), Towards transition management of European water resources, Water Resour Manage, 21, pp.249-250.
14) DEFRA. <http://www.defra.gov.uk/corporate/>.
15) '미래 수자원'은 2008년 2월 State for Environment, Food and Rural Affairs의 장관(the Secretary)에 의해 의회에 제출되었다.

경쟁과 혁신에 관한 내용이 들어 있다.

실질적인 지역별 물관리 전략과 계획을 작성하는 기관은 EA(Environment Agency)이다. EA의 잉글랜드와 웨일스 지역의 수자원전략(Water Resources Strategy for England and Wales)은 사람과 환경을 유지하는데 충분한 물관리의 실시를 목표로 수립되는 장기 전략으로 잉글랜드와 웨일스 지역의 물이용에 관한 정보와 물 공급 상황, 미래 문제와 경향, 전략 등에 대해 포괄적으로 다루고 있다. 이 외에도 EA는 유역의 홍수관리 계획도 수립하고 있는데, 이는 하천과 지표수, 지하수로 인한 모든 유형의 홍수를 고려한 것으로 기후변화에 의한 영향을 저감하고 다음 세대의 물 수요를 충족시키는 방안까지 포괄하고 있다. 영국의 유역별 물관리계획에는 EU의 물관리지침의 목표와 내용이 포함되어 있음에 대해서는 전술한 바 있다. SEPA(Scottish Environment Protection Agency) 등의 지역환경보호청에서 수립되는 유역관리계획이 바로 그것이다. SEPA가 수립한 Scotland River Basin Management Plan(2009~2015)를 사례로 살펴볼 경우, 해당 계획은 EU의 물관리기본지침에 근거하여 수립된 것으로 공공기관과 기업, 개인이 6년간 지켜야 할 물관리 및 물환경보호지침, 환경영향평가에 관한 내용이 포함되어 있다.

(2) 국내 법제도 및 정책 분석

기후변화가 물과 물관리에 미치는 영향은 IPCC 제6차 기술보고서(IPCC Technical Paper Ⅵ)에서 잘 기술하고 있다. 보고서에 따르면, 극한 홍수와 가뭄의 빈번한 발생과 호우 빈도의 증가와 강도의 증가로 강수패턴이 불규칙해졌으며, 강수의 총량은 지속적으로 증가하는 추세라고 한다. 우리나라 수자원 역시 기후변화의 영향을 받아 강수량과 80mm 이상의 호우일수는 증가하는 반면에 강수일수는 감소한다. 이와 같이 물관리의 제반 조건을 변화시키는 기후변화의 주요 원인인 온실가스는 이미 배출된 것 이외에도 산업화와 도시화의 과정에서 필연적으로 배출될 가능성이 상존하므로 이에 대비한 적응대책 마련의 필요성이 제기되고 있다.[16] 적응정책은 완화정책에 비해 상대적으로 비용이 적게 들고 효과도 빠르게 나타나 바람직해 보이지만, 지속적이고 급격한 미래 기후변화에 적응하기 위해서는 적응정책과 더불어 계획적인 완화정책도 병행되는 것이 필요하다.[17]

2008년 4월 개정된 하천법과 하천법시행령에 따라 수자원장기종합계획에는 기후변화에 따른 국가 물확보 방안이 포함되었다.[18] 기후변화로 인해 국내 물관리 여건이 변하고 있음을 반영한 것이다. 기후변화가 야기한 물순환의 변동성은 물부족을 야기할 뿐만 아니라, 물과 관련된 사회경제 전반에 막대한 영향을 끼치므로 변화하는 현실에 적응력이 부족한 기존의 방식을 답습하기보다는 기후변화에 적응한 물관리제도를 구축해야할 필요성이 있다. 2010년 7월 국토해양부의 중앙하천관리위원회가 발표한 수자원 부문의 정책

16) 국립환경과학원(2010), *국가기후변화적응센터 발전방향 마련 연구*, pp.35-44.
17) 고재경, 김희선(2009), 경기도 기후변화 취약성 평가 연구, 정책연구, 11(1-1), p.10.
18) 「하천법 시행령」 제19조(수자원장기종합계획의 수립)에는 「하천법」 제23조 제1항에 따른 수자원장기종합계획의 작성 시, 포함되어야 할 내용으로 여덟 가지를 제시하고 있다. 첫째는 수자원에 영향을 미치는 자연환경 및 사회·경제적 여건이고, 둘째는 물 수급 현황 및 전망이다. 셋째는 수자원의 개발과 공급 및 관리계획이고 넷째는 홍수재해의 방지계획이다. 다섯째는 하천의 환경보전 및 다목적 이용계획이고, 여섯째는 수자원에 관한 조사·연구 및 기술개발이다. 일곱째는 기후변화에 따른 국가의 물 확보 방안이고, 여덟째는 그밖에 수자원의 관리 및 보전에 관한 사항이다. 「하천법 시행령」 시행 2008.4.7.

방향인 ‘미래 수자원 전략’ 보고서를 통해 살펴볼 수 있다. 해당 전략은 다음의 다섯 가지 추진전략[19]을 포함하고 있다.

1. 기후변화 시나리오로 변화예측하고 기온/강수량/유량/수질 등의 모니터링 강화
2. 4대강 살리기 사업 등을 통해 극한 홍수에 대한 방어능력 향상
3. 4대강 살리기 사업과 중소댐 건설을 통해 이상가뭄에 대한 적응능력 향상
4. 하천정비사업을 통해 기후변화로 인한 수질 및 하천환경변화에 대비
5. 물부족으로 인한 지역 간 물 분쟁을 해소하기 위한 제도개선

또한 기획재정부 외 10개 정부부처는 2011년에 “저탄소 녹색성장 기본법 시행에 따른 국가 기후변화 적응대책(2011-2015)”을 발표하였다. 이는 중앙행정기관 및 지방자치단체의 기후변화적응대책 마련의 법적 근거인「저탄소 녹색성장 기본법」의 시행결과로, 기후변화 영향의 불확실성을 감안한 범정부적 차원의 5년 단위 종합계획이다.[20] 건강, 재난・재해, 농업, 산림, 해양・수산업, 물관리, 생태계, 기후변화감시예측, 적응산업에너지, 교육홍보 및 국제협력의 10개 분야로 구성된 해당 보고서는 13개 중앙부처가 공동으로 작성에 참여하였다.

특히, 물관리 부문에는 국토해양부와 환경부가 참여하였으며, 두 부처는 홍수와 가뭄 등 기후변화의 영향으로부터 안전한 물관리 체계를 구축하기 위해 다음과 같은 대책을 마련하였다.

1. 기후변화의 물관리 영향을 수질, 수생태, 수자원 등의 부문별로 취약성을 평가하여 기초자료를 축적하고 기후변화 적응 미래 수자원분야 전략을 수립한다.

2. 유역별・하천별로 기후변화가 물관리에 미치는 영향과 현행 물관리제도가 가진 취약성을 평가하여 미래 전망과 향후의 전략적 계획을 수립한다.

3. 기후변화로 인한 집중호우의 급증에 대비하여 차세대 홍수예보시스템을 구축하고 국가하천을 대상으로 홍수위험지도를 제작하여 홍수대책 마련 시 활용하도록 하며, 기존 수방시설의 안정성을 재검토하여 치수능력을 향상시키고 기후변화의 영향을 고려하여 유역단위 종합치수계획의 수립을 추진한다.

4. 용수수요 증가에 대비하여 물 사용자가 능동적으로 수요관리를 할 수 있도록 실천방안과 국가적 전략에 대한 교육과 홍보를 실시하고 절수형 물이용 시설의 개발과 보급에 힘쓴다.

5. 빈번한 가뭄과 용수수요증가에 대비하여 안정적인 수자원을 확보할 수 있도록 기존 시설의 용수공급능력을 평가・관리・개선하고, 중소규모의 댐을 신규로 건설하며 지하수자원을 체계적으로 관리, 이용할 수 있는 방안을 마련하고, 기타 용수관리 체계를 완비한다.

6. 대체수자원과 대체수자원개발기술의 수요시장 확대에 발맞춰 시설을 확충하고 취약시설에 보급한다.

7. 4대강 살리기 사업과 같은 국가의 하천정비사업을 통한 홍수피해의 구조적・근본적 해결을 추진하고 하천관리제도를 개선하여 기후변화 적응수준을 제고한다.

---

19) 한국환경정책·평가연구원(2011), *물관리 취약성과 물안보 전략. 3.* pp.2-6, 14-15.
20) 환경부 보도자료. 2011.08.19. “녹색생활 실천으로 녹색성장 기반 구축.”

8. 물관리 기술을 선진화하여 기후변화 적응도를 제고하는 한편 급증하고 있는 세계 물 시장에 진출할 수 있도록 돕는다.

9. 기온상승, 수량 감소 등 기후변화의 영향으로 인해 증가하고 있는 수질오염에 대비하여 기존의 관리체계를 보완, 강화한다.

10. 수량 확보·수질개선·수생태계 복원과 관련된 일련의 사업의 추진 시, 3개 부문에 대한 총체적 접근과 상류부터 하류까지 전 구간에 대한 체계적 접근을 실시한다.[21]

이상에서 언급한 국가기후변화적응대책(2011-2015)의 물관리 대책은 기후변화의 영향 및 취약성 평가, 홍수 및 가뭄 대비 수량과 수질 상황 개선방안 및 수생태계 관리대책 수립으로 정리할 수 있다. 그러나 열 가지 대책과 아래의 표에서 언급한 기후변화에 대비한 정부의 주요 물관리 시스템 정책현황은 대부분이 기술적, 행정적 대책으로 안정적이고 효율적으로 개발된 전략과 기술을 적용하기 위해서는 법제도의 개선이 반드시 병행되어야 한다.

Table 3.5.4 기후변화에 대비한 정부의 주요 물관리 시스템 정책현황

소부문	주요 적응프로그램	이행 실적 및 계획	담당 부처
기후변화 대비 수자원 계획 수립 및 안정적 용수공급	기후변화 영향 고려 수자원 중장기계획 수립	수자원장기종합계획 1차 수정계획수립(‘10.6), 2차 수정계획수립(’12.1)	국토해양부
		환경영향평가제도 전면 개편(‘12.7 시행)	환경부
	수자원정보화	수자원분야 정보시스템들 간 연계, 정보공동활용체계 구축(2006-2014년)	국토해양부
	기후변화대비 안정적 용수공급시스템 구축	댐간 통합연계 운영시스템 구축(낙동강수계(‘05), 한강수계(’09), 섬진강수계(‘10), 금강수계(’11))	국토해양부
		수도정비기본계획 용역 착수(‘08), 지자체간 수도사업 통합운영(’09~), 수도정비계획 체제 재편(’11)	국토해양부
		낙동강(‘09), 한강(’10), 본류 간접취수 가능지역 타당성 조사	환경부
		강변여과수 시설 개발(창원·김해·의령 등 3개소 사업추진)	환경부
		도서지역 해수담수화 시설 등 지원(‘12년 16개소 327억원 지원, 신규 3개소 21억원, 계속 13개소 306억원)	환경부
		수자원의 지속적 확보기술 21C 프론티어 사업단(‘01~’11)	과학기술부
		기후변화 대비 국가 물안보 확보방안(‘08~)	국토해양부
		물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률(‘10.6)제정	환경부
	기온상승에 따른 물 수요증가관리	국가 물 수요관리 종합대책 추진(‘03.3 마련·추진)	환경부
기후변화	기후변화영향	농촌·도시지역 비점오염저감시설 설치(‘08 14개소)	환경부
		비점오염 Zero화 시범사업(‘09~’11)	환경부

21) 관계부처합동. 2010. *저탄소 녹색성장 기본법 시행에 따른 국가 기후변화 적응대책(2011-2015).* pp.187-19.

소부문	주요 적응프로그램	이행 실적 및 계획	담당 부처
에 따른 물환경관리	최소화 물환경 관리대책	TP, COD 하천환경기준 신설('09.10)	환경부
		하수처리장 선진화(4대강 마스터플랜, '12까지 처리시설 700개소 확충, 170개 지역하수관거 정비, '11년 말까지 하수처리장의 총인처리시설 보강사업 추진)	환경부
		가축분뇨 공공처리시설(확충('09, 37개소 648억원)	환경부
		수자원·수질부문 기후변화 영향평가 및 적응대책 인벤토리 발굴연구('08~'09)	환경부
		물, 생태계 취약성지도 작성('09~'12)	환경부
		전국 지방하천 대상 생태자연도 조사·평가·생태등급 설정(13,000여 구간)	환경부
		수생생물 서식현황 변화 모니터링 강화(하천 수생태계 건강성 조사 지점 '11년 88개소에서 '12년 960개소로 확대)	환경부
		건강보호 예비항목의 위해성 평가 및 환경기준안 도출('12.6), 건강보호 항목 추가지정('12.12. 17→20개), 수생생물보호기준 도입을 위한 위해도 평가 방안 마련('12.10)	환경부
	기후변화적응 하천관리	생태우수지역에 대한 자연환경 보호지역 신규지정('12.12. 보호지역 6개소, 람사르 습지 1개소 추가), 보호지역 업무통합관리지침 마련('12.11), 국립습지센터 개원('12.5), 제2차 국가습지보전기본계획('12~'16) 수립('12.6), 훼손습지 복원 사업 실시('12.3~)	환경부
		수변생태벨트조성 시범사업(유역별 1개 이상)실시 및 효과분석('12.12)	환경부
		100개 하천 생태복원('09, 87개 100km, 20개 도랑)	환경부
		청계천+20 사업('09 1단계 사업 10개소 타당성 조사 및 기본계획 수립, '10 2단계 사업 10개소 착수 '12~'15 완공예정)	환경부
		수질예보제 본격 시행('12.1), 조류경보제 시행구간 확대	환경부
		유역관리를 기반으로 수요자 중심 통합형 지류개선 추진(매년 10개)	환경부
		4대강 살리기 사업의 성공적 마무리('11.12.22.기준 전체 90.1%, 본류 96.4% 공정률)	국토해양부
홍수에 강한 국토기반 조성	홍수저감능력 극대화	유역종합치수계획 수립('08, 12대 하천)	국토해양부
		권역별 하천기본계획 수립('08~'17)	국토해양부
	기후변화대비 수방시설물 안전도 강화	댐 치수능력 증대사업(11개 댐('08)→23개 댐('15))	국토해양부
		이상기후 대비 시설기준 연구단('05~10)	국토해양부
	이상홍수 대비 홍수예보시스	차세대 홍수방어기술개발 연구단('08~13)	국토해양부
		국가하천홍수위험지도 제작('12)	국토해양부

소부문	주요 적응프로그램	이행 실적 및 계획	담당 부처
	템 강화		
	도시지역 홍수 피해 저감대책	우수유출저감시설 확대	지방자치단체
해수면 상승 적응	연안침식모니터링 및 방지기술 개발	연안침식 모니터링 시스템 운영('03~)	국토해양부
		주요 백사장 비디오모니터링 시스템 확대 설치(24개소('07)→36개소('10))	국토해양부
		연안침식예측기술 및 방지(저감)기술 연구개발('09~12)	국토해양부
지방자치단체 적응 전략	기후변화 적응 전략 연구	기후변화에 적응한 서울시 물관리 전략('08)	서울시정개발연구원
		기후변화에 대한 지방자치단체의 적응방안연구('08)	경기개발연구원
		지역주민·지자체·관계기관 등의 공동참여 '하천관리 거버넌스'구축('12.6), 지속가능한 하천이용 가이드라인 제시('12.1)	국토해양부
	기후변화 적응 안내	지자체 업무 안내서: 기후변화 적응('09)	환경부
		완충저류시설 확대 설치(김천 등 8개 지역 계속공사 추진 및 영천 등 신규지역 2개소 설계 착수)	환경부

한편, 국가기후변화적응전략과 물관리가 상호 밀접하게 연결되어 있다. 따라서 선진국들은 일찍부터 수자원관리 법제도의 정비를 통하여 통합수자원관리체계를 구축해왔고, 앞선 기술력과 법제도를 앞세워 해외 물 시장을 선점해가고 있다. 통합수자원관리의 실현으로 국가주도형 이·치수사업의 하양식의 추진보다 지역경쟁력 강화, 지역 주민의 삶의 질 향상 등이 수자원관리의 주요목적으로 부각되고 있다. 선진국들은 수자원관리 법제도 개선 시, 정책적 요소와 더불어 수자원의 경제적 가치를 고려해왔다. 수자원관리 관련 제도의 변화가 지역주민의 경제적 수단 및 환경과 사회적 관습에 미치는 영향을 감안하여 개선함으로써 수자원 관리와 물 시장 활성화 및 물 산업 육성을 결부·발전시켜온 것이다[22]. 그 결과, 선진국들은 다양한 지역적 특색이 반영된 물관리기술을 개발할 수 있었고, 이에 따라 자국의 물 기업 및 물시장의 육성을 바탕으로 해외 시장에 진출하여 국익을 창출할 수 있게 되었다.

선진국은 기후변화 적응 수자원관리 측면 또한, 국가 물 안보 차원에 국한하지 않고 녹색성장과 결부하여 접근하고 있다. 그러나 우리나라의 물관리 법제도의 기후변화 적응 수준은 선진국과 비교하여 낮다고 볼 수 있다.

22) 송재석(2010), 우리나라 제도적 물레짐의 개혁적 진화 : 수리권과 수자원 정책의 변화, 한국지방자치학회보, 22(2), pp.5-6.

Table 3.5.5 국내외 기후변화 적응 물관리 정책 비교

주요국	정책(계획 수립)	기후변화 적응
미국	▪국가 물 계획(2008, 미국 환경청) - 캘리포니아 물 계획 (CWP)	▪기후변화 적응 물 계획 수립(2008) - CWP update를 통한 적응 전략
영국	▪UK 물 계획 (2008, 영국 환경청) - 수자원 전략계획(2009) 수립 (국가, 지방, 유역, 물관리 회사 등 전략 및 계획의 체계적 수립)	▪기후영향 프로그램(UK-CIP)과 연계, 기후변화 영향을 각 전략계획에 반영하여 수립(2009)
한국	▪ 물 관련 계획 - 수자원장기종합계획 - 물 환경관리 기본계획 - 국가안전관리 기본계획 (계획 수립의 체계성, 연속성 미비, 통합계획 부재, 부처별 계획)	▪녹색성장전략 및 5개년계획(2009), 기후변화적응 종합기본대책(2008-2012) 등의 세세부 항목으로 구체화 ▪수장기계획 수정안(2011)에 기후변화 반영

다. 법제도 개선방안

(1) 법제도 개편방향

연방정부가 아닌 개별 주정부가 물관리를 주관하고 있는 호주의 경우, 유역통합수자원관리 체계를 도입함으로써 안정적 수자원 확보를 위한 정책적 노력을 계속하고 있다. 호주 정부는 국가 물관리계획인 NWI(National Water Initiative)를 바탕으로 통합수자원관리를 수행하고 있으며, NWI에 반영된 통합수자원관리는 기본적으로 지역 차원에서 물관리 체계를 마련하고 관리 실행 계획들에 대한 이해당사자 간 협의를 통해 물관리 목표를 달성할 것을 제시한다[23]. 호주의 대표적인 통합물관리 사례로는 머레이-다링 유역(Murray-Darling Basin)이다. 동남부 지역 4개 주를 관통하며 호주 면적의 1/7을 차지하는 머레이-다링 유역은 유역면적이 100만㎢를 넘는 호주 최대 강 유역으로, 지역 인구의 물 사용량이 많은 데 비해 강우량이 상대적으로 적어 안정적 용수 확보가 필요한 유역 중 하나다. 연방정부를 비롯하여 뉴사우스웨일즈 주(New South Wales State)와 빅토리아 주(Victoria State), 사우스오스트레일리아(South Australia) 주 정부가 머레이-다링 유역 관리에 참여하고 있으며, 전체 유역의 수자원을 통합적으로 관리·계획하는 머레이-다링강 유역청(MDFA, Murray-Darling Basin Authority)을 설립하여 계획 및 지역사회 이해당사자들의 광범위한 참여 아래 지표수, 지하수를 비롯한 유역의 환경 자원들을 관리하고 있다.[24]

뉴질랜드의 경우, 1990년대 자원관리법(Resource Management Act)이 통과되면서 물관리는 토지, 대기, 연안 자원 등을 비롯한 여러 자연자원 관리와 통합·관리 되어왔다.[25] 뉴질랜드의 통합수자원관리 및 하천유역관리는 침식(erosion)과 홍수 통제 문제에 대한

23) Melanie Durette (2010). Global Trends in Integrated Water Management. p.2. (http://www.synexe.com/assets/Uploads/201001+IWRM.pdf).
24) 국회입법조사처. (2010). 수자원 관리체계의 변화에 따른 법 및 제도의 정비방안 연구, p.37.
25) Melanie Durette. *Op. cit.* p.1.

인식으로부터 시작되었으며, 2009년 중반 뉴질랜드 정부의 자원관리 개혁 차원에서 물관리 방향이 제시되면서 본격적으로 시작되었다. 뉴질랜드의 하천관리는 1868년 하천위원회(River Boards)의 설립과 함께 시작되었다. 1930년대의 침식 및 홍수 문제는 1941년 「토양 및 하천 통제법(Soils and Rivers Control Act)」과 1967년「물 및 토양법(Water and Soils Act)」의 제정으로 이어졌다. 이러한 법령은 물 관련 정책뿐 아니라 토양 보존, 홍수 경감, 물공급, 생태계 보호 등의 광범위한 이슈를 다루었다.[26] 1980년대의 지방 및 지역 위원회 재구성, 1987년의「보존법(Conservation Act)」, 1991년의「자원관리법(Resource Management Act)」, 2002년의「지방정부법(Local Government Act)」등은 모두 지속가능한 물 사용과 수자원 시스템 원칙을 바탕으로 뉴질랜드 통합수자원관리의 제도적 초석이 되었다.[27]

뉴질랜드 통합수자원관리의 대표적 사례는 모투에카 통합저수관리 프로그램(Motueka Integrated Catchment Management Program)을 들 수 있다. 뉴질랜드 남단의 모투에카 유역과 태즈먼 만(Tasman Bay) 지역에서 이루어진 동 프로그램은 유역 이해당사자들의 적극적 참여를 바탕으로 한 통합적인 접근방식을 통해 수자원관리 이슈를 제시하는 데 그 목적을 두고 있다. 이와 같이 뉴질랜드의 IWRM 체계는 대부분 각 지역에서 수립된 계획에 따른 정책 및 규정을 바탕으로 실행되고 있다. 뉴질랜드는 크게 12개 지역위원회와 5개의 단일 위원회로 구분되어 있으며, 각 12개 지역위원회는 각 지역 상황에 맞는 유역별 물관리 계획을 작성한다.[28] 그러나 중앙정부의 역할과 지역위원회 간 역할 불균형으로 인해 각 지역별 서로 다른 수질 규정으로 혼선이 빚어지고 있는 점은 개선할 부분으로 남아있다.[29]

인도네시아의 경우, 독일연방교육연구청(The German Federal Ministry of Education and Research, BMBF) 주도로 2008년부터 2013년까지 인도네시아 Gunung Kidul지역에 통합물관리(IWRM)프로젝트가 실시되고 있다. 이 프로젝트에 앞서 BMBF는 극심한 물 부족을 경험하고 있던 자바(Java)섬 중간 남쪽 해안에 위치한 Gunung Sewu(Thousand hills)지역에서 지하수관리의 실행가능성에 대한 연구를 목적으로 Karlsruhe 대학의 수자원관리·수력·농공학 연구소(the Institute of Water Resources Management, Hydraulic and Rural Engineering(IWK), University of Karlsruhe)의 지하수 저수지 건설에 투자하였다. 이 지역은 카르스트 지형으로 물의 침투속도가 빨라 일부 지역에서 디젤 펌핑 시스템을 이용하고 있음에도 불구하고 개별가정용수의 수요조차 충족시키지 못했다. 극악한 삶의 조건으로 인해 지역 내 사람들의 이주율이 높았고 이 지역은 자바섬 내에서도 가장 가난한 지역이 될 수밖에 없었다.

이에 경제적, 생태학적 관점에서 지속가능한 물의 이용을 주제로 이 지역에서 2003년에서 2005년까지 '인도네시아요그야카르타(Yogyakarta)의 카르스트 지역의 지하수의 수자원관리(Water Resources management of Underground River in an Karst Area, Yogyakarta Special Area, Indonesia)' 프로젝트가 시행되었고 400,000m3 규모의 지하수

26) Matthew D. Davis & John Threlfall (2006). "Integrated Water Resource Management in New Zealand: Legislative Framework and Implementation," Journal of Contemporary Water Research&Education, 135(1), p.87.
27) *Ibid.* p.90.
28) *Ibid.* p.90.
29) *Ibid.* p.95.

저수지(underground water reservoir)가 Gua Bribin 동굴에 설치되었다. 그 결과 지하수 저장량은 기하급수적으로 늘어났으나 폐수도 동시에 늘어나 우기동안 오염된 물로 인해 사람들이 박테리아 감염 등의 피해를 입기 시작했다. 충분하고 안전한 물관리 체계에 대한 필요성이 대두되었다. 이를 개선하고자 BMBF는 2008년부터 2013년까지 Gunang Kidul 지역에서 IWRM 도입을 지원하고 있다. 이 프로젝트의 목적은 첫째, 새로운 음용수 자원의 확보, 둘째, 물배분 인프라의 구축, 셋째, 수문학적·위생학적·생태학적·사회적·문화적·경제적 조건 등을 고려한 폐기물의 처리 등 여러 측면을 아우르고 있다.[30]

인도네시아 IWRM은 폐수로 인한 수자원 오염의 방지와 안전한 물배분을 목적으로 진행되고 있으며 결과 감시에 기초를 둔 인도네시아의 물관리 개념은 세 부분으로 나뉜다. 첫째, 첫 번째 저수지를 지나면서 central sand filtraton으로 우선 물의 혼탁과 박테리아를 제거한다. 둘째, 물 배분 네트워크에서 증가한 물의 오염도는 질병예방의 차원에서 다른 수자원을 이용한 소독, 살균 기술을 이용하여 적합한 관리를 한다. 마지막으로 Point-of-use 세라믹 여과법을 도입하였다.[31]

프랑스의 수자원 정책은 3단계의 과정을 걸쳐 변화해왔다. 첫째, 제2차 세계대전 이후 1964년 이전까지의 시기로 중앙정부의 조정과 통제 없이 지자체가 개별적으로 수자원을 관리했던 시기이다. 둘째, 1964년 물법 제정을 계기로 유역통합수자원관리를 도입하고 수자원 이용 및 관리에 대한 종합적인 정책을 실시했던 시기로, 이 시기에 현재의 유역관리공사(Agencies de l'eau) 주도 유역통합수자원관리체계가 확립되었다. 셋째, 1992년 이후 현재까지의 시기로 1992년 물법을 개정하고 유역차원에서는 유역수자원계획을 수립하고 각 지역에서는 지역수자원관리개선계획을 수립 및 시행하는 이원화된 체계가 구축되었다. 프랑스는 프랑스 전역을 6개 유역으로 나누고 각 유역마다 유역관리공사 및 유역위원회를 설치하고 중앙정부에서는 전국 수자원관리에 대한 조정과 통제기능을 계속 유지하되 지방정부는 지역실정에 맞는 수자원을 개발, 관리 및 상하수도 사업진행에 지원을 바는 행정 및 정치적 경계를 넘어 유역에 기반한 효율적 수자원관리를 시행하고 있다.[32] 궁극적으로 프랑스는 물 배분과 수질관리를 '공익사업(public utility)'의 관점에서 접근하고 있고, '유역'에 기초를 둔 유역위원회와 프랑스법에 기초를 두고 물관리지침에서 강조된 바 있는 '대중의 참여'로 이루어진다.[33]

---

30) G.Schumitt. (2010). Geodetic contribution to IWRM-projects in middle Java, Indonesia. *Journal of Applied Geodesy*. 4(4), pp.168-171.

31) Kerstin Matthies. (2010). Concept of appropriate water and waste water treatment in the karst region Gunung Kidul, South Java, Indonesia. *IWRM Karlsruhe 2010-conference proceedings Hartwig steusloff(ED.)*, pp.122-128.

32) 이승호, 이동률. (2004). 외국수자원정책 사례연구:영국과 프랑스. *2004년도 대한토목학회 정기 학술대회*. pp.4857-4860.

33) Davis, Matthew D. (2007). Integrated Water Resources Management and Water Sharing. *Journal of Water Resources Planning & Management*. 133(5), p.440.

Table 3.5.6 프랑스 물 관련 거버넌스의 수준

수준	구성원	상세 내용
유럽공동체	EU 개별 국가들	국내법이 반드시 확인해야 하는 지침
국가정부	프랑스	국가의 행위와 사용자 간 조화와 관리의 규칙과 일반적인 행동규범
6개 강 유역위원회와 유역하천청	정부, 지방정부, 사용자	오염과 요금을 통한 자원의 계획과 관리, 투자지원
공동체와 간공동체	중유역, 지방정부, 사용자	서비스의 제공과 기술적·행정적·정치적 관리

(2) 법제도 개선 기본 가이드라인

(가) 「하천법」(법률 제10331호, 2010.05.31, 타법 개정)

「하천법」의 목적은 하천 사용의 이익을 증진하고 하천을 자연친화적으로 정비·보전하여, 하천의 유수로 인한 피해를 예방하기 위하여 하천의 지정·관리·사용 및 보전에 대한 사항을 규정하는 데 있다. 이는 일반적인 하천의 기능을 염두에 두고 하천의 공공성을 강조하고 있으며, 기후변화의 하천에 대한 영향의 정도에 따라 하천법상의 목적의 달성도는 크게 좌우될 수 있다. 그러나 동 법에서는 하천의 복합적인 기능에 대해 한정적인 의미만을 부여함으로써 하천이 인간생활에 미치는 광범위한 영향이 과소평가 되고 있는 것으로 보인다. 동 법 4조에 의하면 국가와, 지방자치단체, 그리고 국민이 하천 관리에 노력해야 할 책무를 지고 있음을 명기하고 있다. 그러나 이는 어떠한 권리나 의무를 동반하지 않는 추상적인 조항에 지나지 않으므로, 법의 적극적인 기능이 강조될 필요가 있다. 동 법에서는 하천을 국가하천과 지방하천으로 구분하고 있다.(제7조~15조) 현재 물관리기본법(안) 등을 통해 기후변화 적응을 극대화할 수 있는 유역단위 수계 중심의 하천관리의 중요성이 강조되고 있다. 따라서 수자원에 관한 국가하천계획의 기후변화 적응 정도(제23조~26조)에서는 국가계획의 수립에 있어 기후변화의 영향을 고려할 수 있는 조항을 삽입하는 사항에 대한 추가적인 연구가 필요하다.「하천법」은 수자원을 이용·개발·보호하기 위한 중요한 법률체계임에도 불구하고 기후변화에 적응 능력을 가지고 있다고 보기는 어렵다. 따라서 하천법이 물 관련 전반에 미치는 영향의 중대성을 감안하여 기후변화 적응 정도를 논의할 필요가 있다.

(나) 「댐건설 및 주변지역지원 등에 관한 법률」(법률 제10331호, 2010.5.31, 타법 개정)

「댐 건설 및 주변지역지원 등에 관한 법률」의 목적은 수자원을 합리적으로 개발 및 이용하여 국민경제의 발전을 도모하는 데 있다. 댐의 건설에서 유지 및 관리에 이르는 부분은 다기능·다목적적인 사항으로 사회·경제·환경·문화에 이르기까지 광범위한 영역에 영향을 미치고 있다. 동 법 16조에서는 댐의 저수로 인한 공익의 증진, 피해의 제거

또는 경감에 유의하고 댐사용권을 침해하여서는 안 된다고 규정하고 있으며 18조에서는 댐의 저수를 방류함으로써 하류에 현저한 변화가 초래된다고 인정하는 경우 위해방지를 위한 조치를 취해야 한다고 규정하고 있다. 그러나 사전에 예측하지 못한 강우가 발생할 시를 감안한 상류 혹은 하류 우선 정책이나 방류 혹은 저류의 선택 기준 등의 댐의 운영 및 관리 기준이 모호하다. 또한 댐의 건설 및 철거로 인한 해당 지역의 기후변화 적응 능력의 변화에 대한 평가가 필요하다. 「댐건설 및 주변지역지원 등에 관한 법률」이 기후변화에 적응하는 부분은 거의 없다고 볼 수 있으나, 동 법의 기능이 한정적임에도 불구하고 기후변화에 적극적으로 적응하기 위한 법 개정이 이루어질 경우, 법적 안정성을 해칠 가능성이 있다. 따라서 본 법령에서 그러한 적극적 기능을 요구하기 위해서는 우선순위에 따른 관련 법의 정비에 따라 이루어지는 것이 바람직하다.

(다) 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」(법률 제10219호, 2010.3.31, 타법개정)

「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」은 수질오염으로 인한 국민건강 및 환경상의 위해를 예방하고 하천·호소 등 공공수역의 수질 및 수생태계를 적정하게 관리·보전하는 데 그 목적을 두고 있다. 그러나 동 법에서는 기후변화가 야기할 수 있는 수질 및 수생태계의 변화에 대하여 고려하고 있지 않다. 제4조의 1~9에서는 오염총량관리에 대한 기본 구상을 언급하고 있으나 인위적인 오염발생 사항을 상정한 사전적·사후적 관리에 초점을 두고 있을 뿐 불확실성이 강한 자연재해는 염두에 두고 있지 않은 것으로 보인다. 또한 오염총량목표수질을 달성 및 유지하기 위하여 필요하다고 인정되는 경우의 조치 사항에 관해서도 인위적 오염발생만을 고려하고 있다. (제4조의 5) 2010년 3월, 동 법의 일부 개정된 사항에서는 상수원의 수질개선을 위한 특별조치를 규정함으로써 인위적인 수질오염에 대한 처벌을 강화하고 있다. (제21조의 3) 실제로「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」의 기후변화의 적응 정도는 거의 전무한 상태이므로, 오염총량관리기본계획에 더하여 극한 홍수나 가뭄 등과 같이 기후변화로 인한 자연 현상을 위한 관리 지침을 마련할 필요가 있다. 현재 수질 및 수생태계 관리의 책임은 환경부 장관 또는 지방자치단체의 장에게 일임되어 총체적인 기후변화의 영향에 적응하기에는 역부족일 수 있다.

우리나라는 녹색성장위원회 출범, 저탄소녹색성장기본법 추진과 함께 국가 기후변화 관련 계획을 본격적으로 수립하고 있다. 현재 국내 기후변화적응의 최상위 정책은 녹색성장국가전략 및 녹색성장 5개년 계획이다. 동 계획들에는 기후변화의 영향저감 및 적응과 관련된 물관리 계획들이 다수 포함되어 있다. 녹색성장국가전략의 3대 전략 중 첫 번째가 기후변화 적응 및 에너지 자립 전략이며, 동 전략의 정책방향으로 기후변화 적응역량 강화가 있으며 수자원 부문 전략 및 정책방향이 포함되어 있다. 녹색성장 전략 및 녹색성장 5개년 계획에 나타난 수자원 부문 기후변화 적응정책 추진방향은 안정적 수자원 관리능력 강화를 목적으로 하고 있다. 핵심적인 추진방향은 홍수·가뭄의 근원적 방지 및 깨끗한 물환경 조성, 물 수요관리 강화, 그리고 능동적 수자원관리 분야로 구성된다. 세부 내용으로는 가뭄대비 안정적 물공급체계 구축, 먹는샘물 국제브랜드화 및 수출확대 외에, 효율적 물 이용 및 절약추진, 물 재이용 활성화를 위한 법제도적 기반 마련 등 구체적인 정책 추진방향이 제시되었다.[34] 2010년 6월에는 물의 재이용 촉진 및 지원에 관

34) 녹색성장 5개년 계획: 2009~2013, 2009, 녹색성장위원회.

한 법률[35]이 제정되어 그 성과를 맺기도 하였다.

그러나 수립된 정책방향의 세부사항 대부분은 물관리 부처의 업무 중복 가능성이 농후하여 중장기적 추진에 난항이 예상된다. 녹색성장계획은 기후변화에 적응한 성장전략을 주로 다루고 있으며, 기존의 국내 물 관련 계획들은 아직까지 기후변화 영향을 고려해 수립된 바가 없다. 따라서 녹색성장계획과 기존의 물관리 계획과의 연속성과 일관성 등 효율적 연계방안을 모색할 필요가 있다.

현재 4대강 살리기사업 추진을 계기로 우리나라 물관리에 대한 국민적 관심이 다시 고조되고 있는 상황이다. 18대 국회 들어 물관리기본법안이 세 차례나 발의된 것은 이러한 국민적 관심이 반영된 것으로도 해석할 수 있다. 이들 법안들은 각자의 제안배경과 목표를 가지고 현재 물관리체계의 문제점을 개선하기 위한 개편안에 대해 구체적인 방안들을 마련하였다. 이들은 법제적인 기본 바탕에서 검토가 이루어진 후 제도적인 개선이 이루어져야 한다는 판단에서 이루어진 것으로, 국내 물관리체계가 선행연구나 체계적인 계획 없이 진행되어 온 것에 대한 해결안으로 제안된 것이다. 단지, 3개의 법안에 기후변화 적응에 대한 언급이 없거나 형식적인 표현에 그치고 있다는 점은 동 법안의 제정 움직임과 함께 심도 있게 고려해야 할 사항이라고 볼 수 있다.

Table 3.5.7 기후변화 적응 법제도 개편방향 가이드라인

법령	조항	내용	개선 가이드라인
하천법	제4조	국가, 지자체, 국민이 하천관리에 노력해야 할 책무를 지니고 있음을 명기	▪권리 및 의무를 동반하지 않은 추상적 조항의 성격이 강하므로 법의 적극적 기능을 강조할 필요가 있음 ▪물관리기본법(안) 등을 통해 기후변화 적응을 극대화할 수 있는 유역단위 수계중심의 하천관리 강조 필요 ▪국가계획 수립에 기후변화 영향을 고려하는 조항을 삽입할 필요가 있음 ▪이수, 치수 중심에서 하천의 자연적 기능에 주목할 필요가 있음
	제7조~15조	국가하천과 지방하천으로 구분	
	제23조~26조	수자원에 대한 국가 하천계획의 기후변화 적응 정도 명기	
댐건설 및 주변지역 지원에 관한 법률	제16조~18조	댐관리 및 댐 방류로 인한 위해 방지 조치 명기	▪「하천법」 및 관련 법의 개정 상황에 따라 제한적으로 개선할 필요 있음 ▪기후변화로 인한 예측불가능한 강우로 인한 댐 운영관리 기준을 제시할 필요가 있음

35) 법률 제10359. 2010년 6월 8일.

수질 및 수생태 보전에 관한 법률	제1조	「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」목적 명기	▪기후변화로 인한 수질 및 수생태계 변화에 대한 고려가 필요함 ▪기후변화의 영향을 가장 크게 받는 분야임에도 불구하고 근본적 논의가 부족한 것은 현상유지에 대한 의지가 반영된 것으로 판단됨 ▪정책결정자의 물 관련 법 및 기후변화 적응 연계 전략 관련 개선책을 강구할 필요가 있음
저탄소녹색성장 기본법	제1조	녹색기술 및 녹색산업에 의한 녹색성장의 목적 명기	▪기후변화가 주요 내용으로 기능하기 보다는 새로운 개발전략을 모색하는 경향이 강하므로 수자원 적응 전략을 도출하기에 곤란이 따름 ▪현행법은 단순한 개발법에 지나지 않으므로 기후변화와 저탄소 정책의 의의 규정을 보완할 필요가 있음
	제38조	제5항은 소극적 적응 규정임 자연환경의 변화 및 그에 따른 인간 행동의 변화와 관련하여 보다 적극적인 조항을 삽입할 필요가 있음	

(3) 물관련 법령 개정안 및 제도 개선안

(가) 하천법 개정안

항목	기존내용	CCAPH-K 개선방향
제1장 1조 (목적)	*"하천사용의 이익을 증진하고 **하천을 자연친화적으로 정비·보전하며 하천의 유수(流水)로 인한 피해를 예방하기 위하여** 하천의 지정·관리·사용 및 보전 등에 관한 사항을 규정함으로써 하천을 적정하게 관리하고 공공복리의 증진에 이바지함을 목적으로 한다."*	기후변화에 따른 하천의 취약성을 보완하고, **기후변화 적응력 제고를 위한 하천관리 측면** 언급
제1장 4조 (하천관리의 원칙)	*"하천 및 하천수는 공적 자원으로서 국가는 **공공이익의 증진에 적합한 방향으로** 적절히 관리하여야 한다."*	기후변화에 적극 적응하기 위한 **유역관리 원칙에 따른 하천관리 측면** 언급
제2장 7조 (하천의 구분 및 지정)	*"하천은 국가하천과 지방하천으로 구분한다."*	**기후변화 적응 차원**에서의 하천의 **일원적 관리** 언급
제2장 14조 (하천시설의 관리규정)	*④ "국토해양부장관은 **홍수로 인한 재해의 방지와 수자원의 효율적인 운영을 위하여** 필요한 경우에는 2 이상의 하천시설 간의 유기적인 연계운영에 관한 관리규정을 정할 수 있다."<개정 2009.4.1>* *⑤ "국토해양부장관은 제4항에 따른 관리규정에 근거하여 **홍수방지 등을 위하여 필요한 조치**를 명할 수 있다."<개정 2009.4.1>*	**기후변화 및 이상기후에 따른 홍수에 적응하는 하천관리 시설 설치** 및 기존 하천시설의 홍수 적응능력 강화 조치 필요
제3장 제17조 (수문조사의 실시)	*① "국토해양부장관은 **하천유역의 물 순환 구조의 파악, 하천시설의 설치, 각종 구조물의 설계, 하천 주변지역의 이용 및 관리 등을 위하여** 하천의 수위·유량·유사량 및 하천유역의 강수량·증발산량과 하천유역의 토양에 함유된 수분의 양을 과학적인 방법으로 관찰·측정 및 조사[이하 "수문조사"라 한다]하여야 한다.<개정 2009.4.1>* *④ 국토해양부장관은 수문조사업무의 발전 등을 체계적·효율적으로 달성하기 위하여 대통령령으로 정하는 바에 따라 **10년 단위의 수문조사 기본계획을 수립·시행하여야한다.** <개정 2009.4.1>*	10년 단위 수문조사기본계획에 **기후변화에 따른 하천 물순환 구조, 강수량, 토양에 함유된 수분의 양** 등에 대한 **수문조사 실시 필요**

(나) 지하수법 개정안

항목	기존내용	CCAPH-K 개선방향
제1장 1조 (목적)	*"이 법은 지하수의 적절한 개발·이용과 효율적인 보전·관리에 관한 사항을 정함으로써 **적정한 지하수개발·이용을 도모하고 지하수오염을 예방하여** 공공의 복리증진과 국민경제의 발전에 이바지함을 목적으로 한다."*	**기후변화 적응을 위한 물순환 체계 구축 및 수자원 확보 측면** 언급

기존내용	CCAPH-K 신규추가(안)
제3장 12조 지하수의 보전·관리를 위한 지하수 보전구역 지정	**기후변화에 따른 지하수의 보전 및 관리 원칙 추가** 및 기후변화 영향을 고려한 지하수보전구역 설정
제3장 17조 전국적 지하수 관측시설을 통해 지하수 수위변동실태 조사	**기후변화에 따른 지하수질, 수량, 수위 변동실태 조사 추가**

(다) 국토의 계획 및 이용에 관한 법률 개정안

항목	기존내용	CCAPH-K 개선방향
제1장 3조 (국토이용 및 관리 기본원칙)	*"국토는 자연환경의 보전과 자원의 효율적 활용을 통하여 **환경적으로 건전하고 지속가능한 발전**을 이루기 위하여 다음 각 호의 목적을 이룰 수 있도록 이용되고 관리되어야 한다."* - 환경의 건전하고 지속가능한 발전관리 및 도시의 지속가능성 평가	**기후변화 적응 차원**에서의 환경 및 도시 지속가능성 관리 항목 삽입

기존내용	CCAPH-K 신규추가(안)
제3조의 2 (도시의 지속가능성 평가) *① "국토해양부장관은 도시의 지속가능하고 균형 있는 발전을 위하여 **도시의 지속가능성을 평가**할 수 있다.* *② 제1항에 따른 도시의 지속가능성을 평가하기 위한 절차 및 기준 등에 관하여 필요한 사항은 대통령령으로 정한다.* *③ 국가와 지방자치단체는 제1항에 따른 평가 결과를 도시·군계획의 수립 및 집행에 반영하여야 한다.<개정 2011.4.14>"*	도시의 지속가능성 평가 시 **기후변화의 영향을 고려한 지속가능성 평가 항목 제시** (시행령 혹은 시행규칙의 개정 사항)

(라) 저탄소 녹색성장 기본법 개정안

항목	기존내용	CCAPH-K 개선방향
제3조 (저탄소녹색성장 추진의 기본원칙)	*"1.정부는 기후변화·에너지·자원문제의 해결, **성장 동력 확충, 기업의 경쟁력 강화,** 국토의 효율적 활용 및 쾌적한 환경 조성 등을 포함하는 종합적인 국가발전전략을 추진한다.* *2.정부는 **시장기능을 최대한 활성화**하여 민간이 주도하는 저탄소 녹색성장을 추진한다.…* *4.정부는 … **성장잠재력과 경쟁력이 높은 녹색기술 및 녹색산업 분야에 대한 중점투자 및 지원을 강화**한다.* *7.정부는 **환경오염이나 온실가수 배출로 인한 경제적 비용이 재화, 또는 서비스의 시장가격에 합리적으로 반영되도록** 조세체계와 금융체계를 개편하여 자원을 효율적으로 배분하고 국민의 소비 및 생활방식이 저탄소 녹색성장에 기여하도록 적극 유도한다. "*	**기후변화적응이라는 기본적 측면에 보다 중점을 둔 법으로 개선될 필요성 있음** (현행법은 기후변화적응에 대한 고려보다는 녹색기술과 산업의 활용을 통한 경제성장에 초점이 맞춰져 있음) **녹색기술의 이용과 녹색산업의 시장활성화하기 위한 경제적 유인에 대한 형평성 있는 분배 계획** 삽입 요망
제9조 (저탄소녹색 성장국가전략)	*"①정부는 국가의 저탄소 녹색성장을 위한 정책목표·추진전략·중점추진과제 등을 포함하는 저탄소 녹색성장국가전략(녹색성장국가전략)을 수립·시행하여야 한다.* *② 녹색성장국가전략에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.* *1. 제22조에 따른 **녹색경제 체제의 구현에 관한 사항*** *2. **녹색기술·녹색산업에 관한 사항*** *3. 기후변화적응정책, 에너지 정책 및 지속가능발전 정책에 관한 사항* *4. 녹색생활, 제51조에 따른 저탄소 교통체계 등에 관한사항* *5. **기후변화 등 저탄소 녹색성장과 관련된 국제협상 및 국제협력에 관한 사항*** *…* *③정부는 녹색성장국가전략을 수립하거나 변경하려는 경우에는 제14조에 따른 **녹색성장위원회의 심의 및 국무회의의 심의를 거쳐야 한다.** 다만, 대통령령으로 정하는 경미한 사항을 변경하는 경우에는 그러하지 아니한다. "*	녹색성장국가전략은 이름부터 성장에 초점을 두고 있음 (**기후변화를 고려한 유일한 기본법으로서 기후변화적응전략의 수립을 추가적으로 삽입해야 할 필요**가 있음) 녹색성장국가전략의 수립과 변경의 주체는 환경전문가가 아니라 경제와 행정부문의 전문가임
제14조 (녹색성장위원회)	*"①국가의 저탄소 녹색성장과 관련된 주요 정책 및 계획과 그 이행에 관한 사항을 **심의하기 위하여 대통령소속으로 녹색성장위원회를 둔다.*** *…* *③**위원회의 위원장은** 국무총리와 제4항 제2호의 위원 중에서 **대통령이 지명하는 사람**이 된다.* *④위원회의 위원은 다음 각 호의 사람이 된다.* *1. **기획재정부 장관, 교육과학기술부 장관, 지식경제부 장관, 환경부 장관, 국토해양부 장관 등 대통령령으로 정하는 공무원*** *2. 기후변화, 에너지·자원, 녹색기술·녹색산업, 지속가능발전 분야 등 저탄소 녹색성장에 관한 학식과 경험이 풍부한 사람 중에서 대통령이 위촉하는 사람* *…* *⑦위원장이 부득이한 사유로 직무를 수행할 수 없는 때에는 **국무총리인 위원장이 미리정한 위원이 위원장의 직무를 대행한다.…"***	현재의 녹색성장위원회의 구성은 국가의 기후변화적응전략이 정책적 도구로 활용될 가능성이 다분하여 개선이 필요함. (보다 **기후변화와 환경관리의 측면에 중점을 둔 법으로 개선**되어야 함)

제38조 (기후변화적응의 기본원칙)	*"정부는 저탄소 사회를 구현하기 위하여 기후변화적응 정책 및 관련 계획을 다음 각 호의 원칙에 따라 수립·시행하여야 한다* *2. **온실가스 감축의 비용과 편익을 경제적으로 분석하고 국내 여건 등을 감안하여 국가온실가스 중장기 감축 목표를 설정하고, 가격기능과 시장원리에 기반을 둔 비용효과적 방식의 합리적 규제체제를 도입함으로써 온실가스 감축을 효율적·체계적으로 추진**한다.* *3. **온실가스**를 획기적으로 감축하기 위하여 정보통신·나노·생명공학 등 첨단기술 및 융합기술을 적극 개발하고 활용한다.* *4. **온실가스** 배출에 따른 권리·의무를 명확히 하고 이에 대한 시장거래를 허용함으로써 다양한 감축수단을 자율적으로 선택할 수 있도록 하고, 국내 탄소시장을 활성화하여 국제탄소시장에 적극 대비한다.* *5. **대규모 자연재해, 환경생태와 작물상황의 변화에 대비하는 등 기후변화로 인한 영향을 최소화하고 그 위험 및 재난으로부터 국민의 안전과 재산을 보호한다."***	**기후변화적응전략의 초점이 온실가스 감축에만 초점을 두고 있어 보완이 필요함** 비용감소와 편익증진의 경제적 측면에 치중하여 기후변화적응전략을 구성해놓아 방향의 전환이 필요함 기후변화적응전략을 통해 국민의 안전과 재산을 보호하겠다는 원론적인 언급에 그치며, **실질적인 적응원칙은 누락되어 있음**

기존내용	CCAPH-K 신규추가(안)
제38조(기후변화적응의 기본원칙) *정부는 저탄소 사회를 구현하기 위하여 기후변화적응 정책 및 관련 계획을 다음 각 호의 원칙에 따라 수립·시행하여야 한다.*	**기후변화적응방향 또는 초점(가령 예방 중심, 또는 신속대처 중심)에 대한 명기가 시급**해 보임
제52조(기후변화적응을 위한 물관리) *정부는 기후변화로 인한 가뭄 등 자연재해와 물부족 및 수질악화와 수생태계 변화에 효과적으로 적응하고 모든 국민이 물의 혜택을 고루 누릴 수 있도록 하기 위하여 다음 각 호의 사항을 포함하는 시책을 수립·시행하여야 한다.* ***1. 깨끗하고 안전한 먹는 물 공급과 가뭄 등에 대비한 안정적인 수자원의 확보*** ***2. 수생태계의 보전·관리와 수질개선*** ***3. 물 절약 등 수요관리, 빗물이용·하수 재이용 등 순환체계의 정비 및 수해의 예방*** ***4. 자연친화적인 하천의 보전·복원*** ***5. 수질오염 예방·처리를 위한 기술개발 및 관련 서비스 제공 등***	기후변화가 물관리에 미치는 영향이 큰 만큼 **물관리 관련 타법과의 관계설정에 관한 조항 삽입 요망** 기후변화로 인한 물관리 시책의 일환으로 예방과 관리의 측면 외에 (피해상황발생시)적응의 측면에 대한 언급도 추가되어야 할 필요성 있음

(마) 수자원장기종합계획 개선안

수자원분야 적응대책 수립 시 유역단위 기후변화 영향평가 및 취약성 분석을 반영하였다. 유역기반의 통합물관리계획을 반영한 수자원부문 국제화 전략을 마련하였으며, 수자원분야 종합 컨설팅 계획을 수립하였다.

항목	기존내용	CCAPH-K 개선방향
제VI편 하천환경 종합계획	1.1 의의 및 필요성 *지방자치제의 정착으로 **하천환경정비사업의 추진과 관리에 지역주민이 참여하는 주민참여형 하천사업 추진방안 도입 필요*** *(수장기 보고서 143쪽)*	**유역관리차원의 주민참여강화기제** 반영
제VII편 수자원 조사 및 연구개발계획	1.1 의의 및 필요성 *수자원조사와 정책, …중략… **합리적인 기술 및 정책개발의 중요성 증대*** *이상기상 등에 따른 …중략… **국가적 차원의 조사·연구 체계 제시*** *종합적이고 체계적인 …중략… **수문조사 및 수자원정보의 선진화와 연구 기술인력의 양성** . . . (중략) . . .* *과거 성장 위주의 수자원개발정책에 따른 사회적 갈등 해소와 국민들의 사회·문화적 인식 변화에 대처하기 위한 **수자원관련 기술개발 필요*** *(수장기 보고서 173쪽)*	▪**수자원관리 연구개발을 통한 물산업 확대 내용** 추가 ▪기술개발과 협력을 통한 **수자원분야 국제협력 네트워크 구축** 추가 ▪**국가차원의 전략적 물산업 육성계획** 반영

그 외 세부계획 보완결과는 아래와 같다.

항목	기존내용	CCAPH-K 개선방향
제Ⅲ편 수자원 현황분석 1 수자원 특성 및 현황분석 1.1 수문현황	1.1.1 강수량 1.1.2 유출량 *물의 순환과정 중에서 수자원 이용에 기본이 되는 **우리나라의 강수 및 유출의 특성 분석을 통계기법을 통하여 실시** 하였다.* *(수장기 보고서 141쪽)*	▪**기후변화에 따른 표준화된 장기 기후 및 수문시나리오**를 제시함으로서 우리나라의 수자원 특성 및 현황 분석에 적용
제IV편 제4장 3. 물수급 전망 과정과 특징	다. 전망방법 ***자연유량 산정방법*** (수장기 보고서 437쪽) ['01년 장기계획과 분석 방법 비교] 항목 / '01년 장기계획 / 금회 보완계획 자연유량 / · 1966.10~1998.09 기간 적용 · 탱크모형에 의한 자연유량 산정 · 반순(5일) 물수지 분석 / · 1966.10~2003.09 기간 적용 · PRMS, 토양수분을 고려한 탱크모형에 의한 자연유량 산정 및 비교평가 (댐 상류유역의 경우에는 실측유입량 자료이용) · 반순(5일) 물수지 분석	▪자연유량 산정뿐만 아니라 **기후변화가 고려된 미래 자연유량 산정을 통해 물수급 미래 전망에 기본자료를 제공**하고자 함
제IV편 제4장 3. 물수급 전망 과정과 특징	마. 물 수급 전망의 가정과 개선방향 *물 수급 전망의 기본적인 가정은 **과거 1967년 이후 발생한 최대 가뭄이 계획대상인 목표연도(2011, 2016, 2020년)에 발생한다는 가정**에서 수요 및 공급에 대한 균형평가를 수행한다는 점이다. 따라서 향후 . . . (중략) . . . 향후 본 계획에서 검토되지 않은 다양한 가뭄 시나리오 및 **기후변화 영향에 의한 물 공급 취약성에 대해서 추가적인 분석 및 평가가 필요**하다. (수장기 보고서 439쪽)*	▪기존 국가수자원계획 방법론의 **기본틀을 유지하면서 기후변화의 영향을 반영**한 미래 물수급 전망결과를 새롭게 제시

(바) 제4차 계획(2011～2020)의 변화와 신규 제안

항목	기존내용	CCAPH-K 개선방향
제Ⅱ편 물이용 종합계획 제Ⅲ편 치수종합계획 제Ⅳ편 하천환경 종합계획	2.1.3 계획 수립을 위한 공간적 범위 설정 *○ 물수요 및 물 수급 전망을 위한 공간적 범위로는 수자원단위지도를 기준으로 구성* *○* ***수자원단위지도의 중권역을 최소 단위로 하며, 우리나라의 물 공급 및 관리체계를 고려하여 5대강 유역을 감안한 6개 권역(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강, 기타권역)을 설정****한 후 이를 구성하는 117개 중권역에 대해 물수요 및 물수급 전망 수행* *(수장기 보고서 31쪽)* 4.1.1 정책의 변천, 성과 및 문제점 다. 현안문제점 *○ 하천환경복원·보전에 대해 주민참여 부족* *- 대부분의 하천환경정비 사업이 관 주도형으로 추진됨에 따라* ***지역사회의 참여 부족과 호응도 저감을 초래*** *- 하천환경 정비 이후에도 이를 체계적으로 관리하기 위해서는* ***지역사회의 적극적 참여가 필요하나 이를 유도하기 위한 제도적 프로세스가 부족*** *(수장기 보고서 159쪽)*	▪**기존의 유역별종합치수계획과의 연계성에 대한 설명**이 없음 (중복성을 피하고 상위계획으로서의 위상을 정립하기 위해서 연계성에 대한 설명이 필요함) ▪**4대강 사업으로 늘어난 농업용 저수지 내의 물관리에 대한 계획과 전략이 필요** ▪**유역관리차원의 주민참여 강화기제 반영**
제Ⅵ편 수자원 미래과제 적응 전략수립 (신설)	***제1장 기후변화 적응 계획*** ***제2장 수자원분야 국제협력전략*** ***제3장 해외 물 시장 진출전략*** 3.나 추진계획 *○ 대형 전문 물기업 육성, 해외 물시장 진출 경쟁력 확보* *○ 협력에 의한 해외시장 진출 메커니즘 구축* *○ 국가차원의 기술 HUB 시스템 구축* *○ 물산업과 연관된 Water Grid 기술개발* *○ 국제협력과 연계한 전략적 홍보 및 마케팅 추진* *○ 물산업 해외진출 중장기 계획 수립* ***제4장 남북 공유하천 관리계획*** ***제5장 수자원 법령 및 제도정비 방안 제시*** *(수장기 보고서 191-237쪽, 분절된 장으로 존재)*	▪수자원미래과제적응전략의 세부 항목들은 서로 연계성이 있으므로 **세부과제별 추진체계와 계획 간의 연계성을 제시하여 시너지 효과를 기대하도록** 함 ▪제Ⅵ편의 구성은 피상적인 전략명만 나와 있을 뿐 **기대효과 부분이 누락되어 보완이 필요** ▪**국내 물산업과 물 시장의 발전에 대한 계획 및 전략에 대한 내용의 추가 필요**

(사) 유역종합치수계획

기존내용	CCAPH-K 개선방향
유역종합치수계획과 *3,885개 하천에 대한* ***하천정비기본계획의 수립시기 및 방법 등이 합리적으로 조정되어 있지 않음*** ▸**「하천법」내 관련 조항 中** **제24조(유역종합치수계획의 수립)** *① …중략… 10년 단위의 유역종합치수계획을 수립하여야 한다. …중략…* *③ 유역종합치수계획에 포함되어야 하는 사항, 유역종합치수계획을 수립하는 수계, 주요 지점별로 할당된 홍수량의 지정, 그 밖에 유역종합치수계획에 필요한 사항은 대통령령으로 정한다.*	▪**효과적인 기후변화적응을 위해 유역종합치수계획과 하천정비기본계획 간 과업내용 조정 필요** (중복성 및 비효율성 방지)

「하천법 시행령」 제20조(유역종합치수계획의 수립) ① 국토해양부 장관은 법 제24조 제1항에 따른 유역종합치수계획을 한강(임진강 유역은 제외한다)·임진강·안성천·삽교천·금강·만경강·동진강·영산강·탐진강·섬진강·낙동강·태화강 및 형산강 유역에 대하여 각각 수립하여야 한다. ② 유역종합치수계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다, 1. 국토계획 등 각종 개발계획과의 연관성에 관한 사항 2. 도로·철도 등 사회기반시설과의 연관성에 관한 사항 3. 하천유역의 주요 지점별 홍수량 할당에 관한 사항 4. 그 밖에 유역종합치수계획의 수립에 필요한 사항 ⑦ 유역종합치수계획은 수자원장기종합계획의 범위 안에서 수립되어야 하며 제25조에 따른 하천기본계획의 기본이 된다. 제25조(하천기본계획) ① …중략… 10년 단위의 하천기본계획을 수립하여야 한다. …중략… ④ 하천기본계획에 포함되어야 하는 사항은 대통령령으로 정한다. 「하천법 시행령」 제24조(유역종합치수계획의 수립) …중략… ② 하천기본계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다. 1. 하천기본계획의 목표 2. 하천의 개황에 관한 다음 각 목의 사항 가. 유역의 특성 등 일반 현황 나. 강우·기상 등 자연조건 다. 하천의 수질 및 생태 라. 수해 및 가뭄의 피해현황 …중략… 6. 하천공사의 시행에 관한 다음 각 목의 사항 가. 기본홍수량 및 홍수량의 배분에 관한 사항 나. 계획홍수량 …중략…	
14개 유역종합치수계획 중 국가하천은 모두 포함되었으나 지방 1,2급 하천은 유역에 따라 100% 또는 일부만이 포함됨 유역종합치수계획에 포함되지 않은 지방하천은 해당유역의 유역종합치수계획과 연계되지 못하고 유역분담계획을 수립하지 못함 「하천법 시행령」 제20조(유역종합치수계획의 수립) ① 국토해양부 장관은 법 제24조 제1항에 따른 유역종합치수계획을 한강(임진강 유역은 제외한다)·임진강·안성천·삽교천·금강·만경강·동진강·영산강·탐진강·섬진강·낙동강·태화강 및 형산강 유역에 대하여 각각 수립하여야 한다.	▪유역 내 모든 국가, 지방1·2급 하천을 과업대상에 포함시켜 일관성 확보 필요
유역종합치수를 위한 유역분담 홍수량의 저감시설물인 천변저류지, 방수로, 홍수조절지 등의 시설물의 입지를 용이하게 하는 법적근거 부재 「하천법 시행령」 제24조(유역종합치수계획의 수립) ② 하천기본계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다. 1. 하천기본계획의 목표 2. 하천의 개황에 관한 다음 각 목의 사항 3. 제방·댐·저류지·홍수조절지·방수로 등 홍수방어시설의 홍수방어계획 4. 토지이용계획 등에 따른 홍수방어계획 5. 홍수방어계획의 연차별 시행방안 6. 하천공사의 시행에 관한 다음 각 목의 사항 7. 하천구역·하천예정지 및 홍수관리구역의 결정을 위한 기초자료의 제공에 관한 사항 8. 자연친화적 하천조성에 관한 사항 9. 그 밖의 하천의 환경보전과 적절한 이용에 관한 사항	▪홍수량 저감시설물에 대한 토지보상근거, 관리주체 등 명확한 근거 마련 (저감시설물의 설계, 조성, 운영, 유지관리를 위한 지침 마련)

(아) 댐건설장기계획

기존내용	CCAPH-K 개선방향
10년마다 수립되는 법정계획이지만(1999년 제정된 댐건설 및 주변지역지원 등에 관한 법률 제4조에 의거) ***수자원장기종합계획의 실천계획이나 계획수립기간과 상이함*** ▸ **관련 조항 비교** ***「댐법」 제4조(댐건설장기계획)*** *① 국토해양부장관은 수자원을 효율적이고 환경친화적으로 개발하기 위하여 **10년마다** 다음 각 호의 사항이 포함된 댐건설장기계획을 수립하여야 한다. …중략…* ***「하천법」 제23조(수자원장기종합계획의 수립)*** *① 국토해양부장관은 대통령령이 정하는 바에 따라 수자원의 안정적인 확보와 하천의 효율적인 이용·개발 및 보전을 위한 **20년 단위**의 수자원장기종합계획을 수립하여야 한다. …중략…*	▪**댐건설장기계획의 수립년도(10년)을 수장기수립년도(20년)와 통일되게 조정할 필요**가 있음
댐건설장기계획에 대한 수립지침서의 부재 ***「댐 법」 제4조(댐건설장기계획)*** *① …중략…* *1. 댐건설의 기본방침* *2. 각종용수의 수급전망* *3. 수계별 댐건설계획(농업용수댐은 저수량이 1천만톤 이상인 것으로 한정한다)* *4. 재원조달계획* *5. 입지선정기준* *6. 댐건설이 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위한 방안* *7. 그 밖에 대통령령으로 정하는 사항 …중략…*	▪홍수 및 가뭄극복과 기후변화에 적응하기 위하여 "댐건설"위주의 계획보다는 **기존 댐의 효율적인 운용 및 활용성을 극대화하기 위한 계획수립이 필요함**
댐개발계획은 부처별로 각각 용도별 댐 개발이 이루어지고 있기 때문에 ***타 계획 간의 연계성 및 구속력이 부족함*** ***「하천법」 제2조(정의)*** *…중략… 3. 하천시설* *나. 댐·하구둑(「방조제관리법」에 따라 설치한 방조제를 포함한다)·홍수조절지·저류지·지하하천·방수로·배수펌프장(「농어촌정비법」에 따른 농업생산기반시설인 배수장과 「하수도법」에 따른 하수를 배제하기 위하여 설치한 펌프장은 제외한다)·수문 등 하천수위의 조절을 위한 시설* ***「댐 법」 제2조(정의)*** *…중략…1. "댐"이란 하천의 흐름을 막아 그 저수를 생활용수, 공업용수, 농업용수, 환경개선용수, 발전, 홍수조절, 주운, 그 밖의 용도로 이용하기 위한 **높이 15미터 이상의 공작물**을 말하며 여수로·보조댐과 그 밖에 해당 댐과 일체가 되어 그 효용을 다하게 하는 시설이나 공작물을 포함한다. …중략…* ***「농어촌정비법」 제2조(정의)*** *…중략…6. "농업생산기반시설"이란 농업생산기반사업으로 설치되거나 그 밖에 **농지보전이나 농업 생산에 이용되는 저수지**, 양수장, 관정 등 지하수 이용시설, 배수장, 취입보, 용수로, 배수로, 유지, 도로, 방조제, 제방 등의 시설물 및 그 부대시설과 농수산물의 생산·가공·저장·유통시설 등 영농시설을 말한다.…중략…*	▪농수산부(농업용수댐), 환경부(식수전용댐), 지경부(수력발전댐) 등 **타 부처간 계획간의 연계성 확보 필요**

「댐 법」 제4조(댐건설장기계획) *① **국토해양부장관**은 수자원을 효율적이고 환경친화적으로 개발하기 위하여 10년마다 다음 각 호의 사항이 포함된 댐건설장기계획을 수립하여야 한다.…(중략)…* ***「수도법」 제5조(전국수도종합계획의 수립)*** *① **환경부장관**은 국가 수도정책의 체계적 발전, 용수의 효율적 이용 및 수돗물의 안정적 공급을 위하여 수도정비기본계획을 바탕으로 하는 전국수도종합계획을 10년마다 수립하여야 한다. …중략…* ***「전원개발촉진법」 제5조(전원개발사업 실시계획의 승인)*** *① 전원개발사업자는 전원개발사업실시계획을 수립하여 **지식경제부 장관의 승인**을 받아야 한다. 다만, 대통령령으로 정하는 전원개발사업에 대하여는 그러하지 아니하다.…중략…* ***「농어촌정비법 시행령」 제23조(농어촌용수 이용 합리화계획의 수립 등)*** *① 법 제15조제1항에 따른 농어촌용수 이용합리화계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.* *1. 농어촌용수의 수요와 개발에 관한 사항* *2. 농어촌용수의 이용·배분과 보전·관리에 관한 사항* *3. 농어촌용수구역의 범위에 관한 사항* *4. 다른 공공계획과의 관련 사항* *5. 그 밖에 농림수산식품부령으로 정하는 사항* *② **농림수산식품부장관**은 농어촌용수 이용 합리화계획을 세울 때는 국토계획을 기본으로 하되 시·도지사의 의견을 들은 후 환경부장관 및 국토해양부장관과 협의하여야 한다. …중략…*	

라. 국제협력 및 적응전략 로드맵

(1) 국제협력 추진방안

정부의 물관리 국제개발협력의 선진화 방안은 우리나라의 성장전략과 원조수원국에서 공여국으로의 전환의 경험의 보급을 통해 국제사회에 기여하는 것을 목표로 하는 정부의 국제협력 확대추진의 맥락에서 전개되고 있다. 중국, 인도, 동남아시아 등 동아시아 지역 내 신흥국의 경제성장과 인구증가, 도시화로 인하여 물관리 분야는 우리나라의 국제협력의 진출가능성이 크다.[36] 우리나라의 경우 그동안 청계천, 4대강 살리기 사업, 국가·지방하천 정비 사업 등을 통해 축적된 경험과 기술역량을 바탕으로 물관련 해외시장을 선점·리드해 갈 필요가 있다고 보고 2010년 대통령직속 녹색성장위원회 보고대회에서 '기후변화적응 미래수자원전략'[37]이 발표하였다.[38] 우리의 해외 물관리 국제협력의 가능성을 타진하기 위해서는 새로운 한국형 모델을 잘 구축하는 것이 필요하다. 이미 해외 물 관련 국제협력에서 두각을 보이고 있는 일본의 경우 뛰어난 기술을 활용하여 장비, 소재, 약품 등을 수출하는 비즈니스 모델을 구축한다거나 전략적 협력 대상국을 선정하고 '물정책 대화'라는 협의 채널을 추진하여 상대국의 물 환경과 당면 과제를 파악하는 노력 등을 해오고 있다.[39]

36) 정성춘 외(2010), 같은 책, pp.159-161.

37) ① 대규모 홍수방어 능력 제고, ② 이상가뭄 대처능력 확보, ③ 수질 및 하천환경 개선, ④ 기후변화 예측기술 및 물관련 R&D 투자확대, ⑤원활한 물확보 및 공정한 물이용을 위한 제도 개선.
기후변화적응미래수자원 5대전략 수립. (http://www.ricon.re.kr/html/sub0402_detail.html?seq=2570).

38) 대통령직속 녹색성장위원회. "미래에는 우리도 물 강국," 기후변화 적응 미래수자원 5대 전략 수립.
(http://www.greengrowth.go.kr/www/tendency/today_issue/userBbs/bbsView.do?bbs_cd_n=14&bbs_seq_n=207)

39) 정성춘 외(2010), 같은 책, pp. 198-207.

한국형 콘텐츠 개발, 한국형 모델의 구축을 하는데 우리가 중점을 두고 진출할 아시아 지역의 물관리 ODA 현황에서 압도적인 비율을 차지하고 있는 일본의 사례는 좋은 참고자료가 될 것이다. 이를 위해 녹색성장위원회 보고회에서는 국가하천정비 사업을 통해 4대강 수계를 대상으로 다양한 기술을 실증해 보임으로써 기술의 신뢰성 및 시장을 확보하고 단순한 토목사업의 수준을 뛰어넘어 조사, 설계, 시공, 운영 등의 전 과정에서 정보통신기술을 융합하는 새로운 형태의 물관리를 해나갈 것이며, 이를 개도국을 중심으로 사업타당성을 분석하여 우선순위에 따라 진출할 것[40]이라 밝혔다.

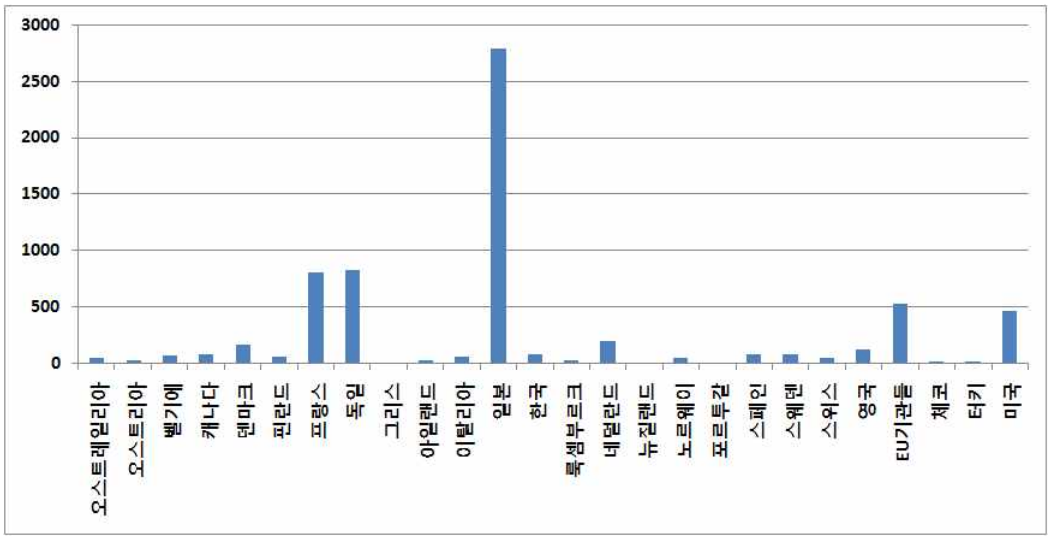


Fig. 3.5.2 2009년 OECD 회원국의 물 공급 및 위생설비 ODA 현황

40) 대통령직속 녹색성장위원회, 같은 글.

(2) 국가 물관리 적응전략 로드맵

(가) 국가 물관리 적응전략 총괄 로드맵(향후 10년 계획)

	1단계(착수): 3년	2단계(이행): 3년	3단계(안정화): 4년
총괄	▪수자원 법제도 정비 ▪중장기 정책계획 수립	▪2021 수장기종합계획 수정계획 ▪중장기 정책이행 체계 수립	▪유역기반 통합수자원 관리 체계 수립
국내	▪기후변화 영향평가 가이드라인 개발 (하천, 댐, 상하수도, 지하수부문) ▪개별 물 관련 법령 개정안 마련 또는 물관리기본법(안) 채택	▪유역단위 기후변화 영향평가 시범산정 및 적응대책 개발 ▪수장기계획에 반영 ▪유역기반 통합관리 체계 전환	▪물관리기본계획에 기후변화영향평가 반영 ▪유역단위계획 수립 ▪통합물관리 이행
국외	▪4대강사업 완료 및 성과 홍보, 후속사업 추진 ▪국제 네트워크 확대 ▪국제 물산업 수요조사	▪대개도국 국제협력 개발사업 추진 ▪종합컨설팅사업 착수	▪해외 물시장 사업 확장 ▪국제기구 협력사업 추진 확대 ▪추진성과 평가 및 모범 사례 구축

(나) 물관리 분야별 세부 로드맵(향후 10년 계획)

	1단계(착수): 3년	2단계(이행): 3년	3단계(안정화): 4년
수질	▪수질 관련 기본계획에 기후변화 요소 반영 ▪기후변화에 따른 수질 및 수생태계 영향 조사	▪실시간 수질 측정망 확대 ▪기후변화 영향 모니터링 체계 구축	▪기후변화 수질부문 통합 영향 예측 및 평가 모델 개발
수량	▪체계적 수자원관리를 위한 수자원 기초자료 확보 ▪기후변화에 따른 수량변화 예측 및 취약성 평가	▪기후변화에 따른 미래 수량 전망 및 물순환/수급 정량화 ▪유역별 수량 분야 취약성 평가를 바탕으로 DB 구축 및 정보제공	▪수자원 분야 전략계획 수립
하천 환경	▪실시간 하천환경 관리를 위한 수문조사 자동화 확대방안 검토 ▪기후변화에 따른 하천 생태계 변화, 취약성 파악을 위한 모니터링 확대	▪IT기반 하천 통합관리시스템 구축	▪하천관리기술 선진화 및 해외수출 ▪하천생태계를 고려한 생태하천 조성 및 이상기후에도 안전한 치수 공간 조성

물안보	▪안정적 용수공급을 위한 수도시설 간 비상연계 시설 확충 ▪재난대비 지하수 공급체계 구축	▪물 부족 대비 대체수원 기술 수요시장 확대 (해수담수화, 빗물관리, 용수 재활용)	▪물안보 확보를 위한 유역별 일관된 종합계획 수립 및 시행
수재해	▪홍수 및 가뭄 대비 모니터링 시스템 강화 ▪전국 국가하천에 대한 홍수위험지도 제작	▪첨단 기술을 바탕으로 차세대 홍수예보 시스템 구축 ▪기존 댐의 안전성 확보를 위한 치수능력 증대사업 추진	▪국가홍수/가뭄예보시스템 구축 ▪기후변화 영향을 고려한 유역단위 종합치수 계획 추진체계 구축

(다) 수자원 분야 국제협력 로드맵

	1단계(기술개발 단계) 2012~2015	2단계(시장개척 단계) 2016~2020	3단계(시장확대 단계) 2021~2025
물산업 해외진출 전략	▪기술시범 지역 선정	▪시범지역 인프라 창출	▪물관리 취약 개도국 인프라 확대
핵심기술	▪한국형 수계수질 관리모델 개발 ▪대체수자원 확보 기술 개발	▪한국형 수계수질관리 평가모델 개발 ▪개도국 시범지역 TF 구축	▪한국형 통합수자원관리 마스터플랜 구축 기술 확보 ▪개도국 현지적응형 물관리기술 개발
제도	▪국내 통합수자원관리 시범시행 ▪국제개발협력을 위한 시행주체 다양화	▪2021년 수자원장기종합계획에 국제개발협력 부분 확대	▪국내외 한국형 통합수자원관리 정착
기대효과	▪4대강사업 성과 홍보를 통한 개도국 내 한국형 물관리 방법에 대한 인지도 향상	▪개도국 내 안정적 물 공급 확대 ▪한국형 물관리 모델의 개도국 보급 및 확대	

마. 요약 및 결론

(1) 요약

본 연구에서는 기후변화 대비 수자원의 적응전략을 구축하기 위하여 수자원의 법령개정(안), 제도개선(안), 정책개선(안) 그리고 수자원정책의 중장기 전략과 로드맵을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 국내외 여건분석, 적응전략의 방향성 도출, 적응전략의 대안제시의 단계별 연구를 진행한 결과는 다음과 같다.

첫째, 수자원 관련 법령 및 정책 개선의 국제적 동향을 파악한 결과, 기후변화 대비 수자원의 적응전략은 상명하달식 수직적 물관리 구조가 아니라 원활한 교류를 통한 수평적 접근방식을 취하는 통합수자원관리 형태의 나선형 구조로서 사회·경제·환경적 측면에서 지속적으로 반응하면서 나아가는 지속가능한 관리형태가 중요하다. 둘째, 기후변화에 적응하는 기본 가이드라인을 검토하여 수자원 관련 법령인 하천법, 댐건설 및 주변지역 지원 등에 관한 법률, 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 등의 기후변화 적응 정도를 분석하여 개편방향을 도출하고 기후변화 적응 법・제도의 개편방향 가이드라인을 제시하였다. 또한 기후변화 적응 물 관련 법령의 개정안을 제시하였다. 셋째, 수자원 국제협력의 방안으로서 한국이 개도국에 지원하는 ODA 시업으로서의 수자원분야 국제협력 동향과 방향 그리고 시사점 및 향후 추진방향을 제시하였다. 끝으로, 기후변화에 적응하는 장기전략으로서 국가 물 관리 적응전략 총괄 로드맵과 분야별 세부 로드맵 그리고 수자원분야 국제협력 로드맵을 제시하였다.

(2) 결론

본 연구에서는 기후변화에 대응하기 위한 수자원의 적응전략을 법제도와 정책적인 측면에서 접근하였다. 기후변화에 대한 종합적인 제도적 접근은 우리나라 최초의 시도로 볼 수 있다는 점에서 그 의의는 크다고 할 것이다. 그러나 해외사례에서 보이는 바와 같이 우리나라의 경우 기후변화에 대응하기 위한 제도적 기반이 대단히 취약하다. 본 연구에서는 국가 물관리전략의 차원에서 고찰하였으므로 본 연구의 방향성을 충분히 검토 한 후 후속적인 연구로, 각 법령 및 제도적 기반에 대한 상세연구가 필요하다.

현재 우리나라 물관련 법령의 최상위에 위치한 하천법에 있어서 기후변화 대응 규정은 따로 존재하지 않는다. 다만 시행령 19조에서 수자원장기종합계획을 수립함에 있어서 기후변화에 따른 물 확보 방안을 고려할 것을 규정한 것이 전부이다. 이와 같은 제도적인 미비는 목전에 다가온 기후변화 대응정책을 탄력적으로 수행할 수 없게 할 뿐 아니라 기후변화 관련 재해에의 취약성을 지속적으로 상승시키게 된다는 점에 유의할 필요가 있다. 기후변화의 예측 및 그에 따른 처리를 위한 기술적·공학적인 연구는 빠른 속도로 진행되고 있는 것에 반해서 사회·경제적 기반을 기반으로 하는 제도적인 연구결과는 좀처럼 나타나지 않고 있다. 기후변화에 대응하기 위한 기술과 제도가 균형 있게 발전할 수 있도록 향후에는 보다 정치화(精緻化)된 학제간 연구가 절실하다.

3. 향후 연구

‘법·제도 개선 및 수자원 정책’에서는 현재의 수자원 관련 법, 제도, 정책 등에 대하여 미래 기후변화에 적응하기 위한 준비가 되었는지, 어떤 방향으로 수정해나가야 하는지에 대해 고민하였다.

현재 우리 사회에 기후변화에 따른 영향에 대해 적응하는 준비를 충분히 하지 못하고 있다고 이해할 수 있다. 추후 연구에서는 이와 같은 점이 최대한 보완되어야 할 것인데, 적응 준비가 필요한 분야 혹은 주무 부처의 인식변화 등을 중심으로 하여 단기간 내에 해결되기는 힘들 문제로 보인다.

대개의 수자원 관련 법령 및 정책 개선 국제적 동향은 수직적이지 않고 원활한 교류를 통한 수평적 접근방식을 취하는 통합수자원관리 형태의 나선형 구조가 필수적이었다. 이는 수자원으로부터 연결되는 사회·경제·환경적 측면까지 지속적으로 반응하면서 나아가는, 지속가능한 관리 형태가 필요로 하기 때문이다. 이러한 부분과 맞물려 국내 전문가들은 설문조사를 통해 현행 물 관련 법·제도 부문에서 수량·수질의 이원적 관리와 같은 구조적인 문제나 물 관련 법령, 계획의 비효율성 문제를 지적하였다.

본 연구에서는 위 조사결과를 바탕으로 각 수자원 관련 법령에 대한 가이드라인, 국제협력 추진방향, 각종 로드맵 등을 제안하였다. 이와 같은 기후변화에 대한 종합적, 제도적 접근은 우리나라 최초의 시도로 의의를 볼 수 있다.

해외사례에서 보는 바와 같이 우리나라의 경우 기후변화에 대응하기 위한 제도적 기반이 매우 취약하다. 현재 우리나라 물 관련 법령의 최상위에 위치한 하천법에 있어서 기후변화 대응 규정이 따로 존재하지 않고, 시행령 19조를 통해 수자원장기종합계획에서 기후변화에 따른 물 확보 방안을 고려할 것을 규정한 것이 전부이다.

이와 제도적 미비는 기후변화의 예측 및 그에 따른 처리에 관한 기술적·공학적 연구가 빠른 속도로 진행되는 것에 반하여 좀처럼 연구도, 결과도 나타나지 않고 있다. 기후변화에 대응하기 위한 기술과 제도가 균형있게 발전할 수 있도록 향후에는 보다 정치화된 학제간 연구가 절실하다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

1. 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망

본 연구에서는 이수 및 치수 분야의 기후변화 영향평가를 위하여 고해상도 지역 기후변화 시나리오 시스템을 구축하여, 자료를 생산하였다. 수자원 뿐만 아니라 기후변화 관련 영향평가를 다양한 분야의 전문가들의 수요에 맞춰 상세화된 시공간적 규모의 자료를 생산하였으며, 연구목적에 맞게 검색하여 자료를 제공받을 수 있다. 이러한 고해상도 기후변화 시나리오는 미래 기후변화에 의해 영향을 받는 사회의 다양한 분야의 기후변화 영향평가와 적응대책 마련을 위해 필수적인 자료로서 역할이 기대된다.

Table 4.1.1 연구개발목표 달성도(단위과제 1-1-1)

구분	목 표	달 성 도 (%)	내 용
1차년도	▪ 기후변화에 따른 수문시나리오 표준화 사례 조사	100	▪ 국내외 기후변화 표준화 방안, 상세화 기법, 극치사상 반영이 가능한 GCM 모의 기법 조사 ▪ 국내외 기후변화 수자원전망 분석기법 조사
2차년도	▪ 기후변화에 따른 표준 수문·기상 시나리오 생산 및 전망기술 개발	100	▪ 국가 표준 기후시나리오생산모델 구축 ▪ 극치사상을 반영한 수문시나리오 생산 모델 및 미래 식생 및 토지피복변화를 고려한 수문시나리오 생산 모델 구축
3차년도	▪ 기후변화에 따른 표준 수문시나리오 생산 및 불확실성 분석	100	▪ 시공간 상관을 고려한 기후시나리오 생산 ▪ 기후변화에 따른 표준 수문시나리오 생산 및 불확실성 분석

2. 기후변화에 따른 중단기 수문전망

본 연구의 “기후변화에 따른 중단기 수문전망” 목표에 따라 아래의 표에 제시된 바와 같이 평가의 착안점을 두었다. 이에 따라 경향성 분석과 탄성도 분석 기법에 의하여 수문변수의 분석을 실시하였고 이를 통하여 중단기 수문전망을 실시하였다. 본 연구의 비시나리오 기반의 중단기 수문전망 기법은 타 연구와 달리 과거 관측자료를 기반으로 실시되었다. 이는 전망에 있어 복잡한 전망기법과는 확연히 다르며 이를 통하여 기존 국가수자원계획 방법론의 기본틀을 유지하면서 기후변화의 영향을 반영한 미래 중단기 수문전망 결과를 새롭게 제시하므로써 유역별 유출량 평가를 가능하게 할 것이라 사료된다.

Table 4.1.2 연구개발목표 달성도(단위과제 1-1-2)

구분	목 표	달 성 도 (%)	내 용
1차년도	▪ 비시나리오 기반의 기후변화 수자원전망 기법조사	100	▪ 국내외 문헌 조사 및 분석 ▪ 한국 기후변화-수문 관측자료 DB 구축 ▪ 한국 기후변화-수문 경향성 분석
2차년도	▪ 비시나리오 기반의 기후변화 수문전망기술 개발	100	▪ 한국 수문변수 통계적 경향성 분석 및 중단기 전망 ▪ 유역단위 통합 비선형 시공간 수문예측 모형 개발
3차년도	▪ 한국 유역단위 중단기 수문변화 전망 분석 및 DB 생성	100	▪ 유역별 중단기 전망자료 신뢰도 분석 ▪ 유역별 중단기 전망자료 신뢰도 분석 및 표출 DB구축
	▪ 유역단위 장기 수문전망과의 연계 기술 개발		▪ 시나리오-비시나리오 장단기 예측자료 통계적 교차검증 (Cross-Validation) 기술 ▪ 장중단기 수문전망 연계표출 프로그램 방안 제시

3. 유역단위 시공간적 스케일 상세화

현재 기후변화 대응 국내 수자원 기술력은 전망 분야의 경우 선진국 대비 현재 85% 정도(수자원의 지속적 확보 기술개발 사업단, 2007)로 판단되고 있으나, 특히 스케일 상세화 기법은 기후변화전망을 위한 핵심기술로서 국외에서도 기술개발이 활발한 분야이지만, 국내에서는 국외에서 개발된 기법을 적용하는데 그쳐왔고 원천기술확보가 이루어지지 않았던 분야이다. 본 연구에서 개발된 Hybrid Random Cascade기법은 기존기법과 본 연구진이 보유한 Random Cascade기법을 합성한 새로운 형태의 상세화를 시도한 기법으로서 우리의 기술력을 선진국과 비견되는 기술수준을 확보하였다고 평가할 수 있다

특히 기후변화에 따른 수자원전망이 수자원장기종합계획에 반영되어야 한다는 다수의 목소리에도 불구하고 쉽게 현실화되지 못했던 중요한 이유 중의 하나가 수자원전망에 대한 신뢰도를 확신하지 못했다는 점을 고려한다면, 전망의 신뢰도를 개선하는데 직접 기여하게 된 본 연구의 의미는 매우 크다고 할 수 있다.

또한 ARDAS 소프트웨어 개발로 향후 다양한 모델의 GCM 모의결과와 새로운 기후변화 시나리오가 주어지는 상황에서도 탄력적으로 상세화 앙상블전망을 수행할 수 있는 기반이 만들어진다는데 중요한 의미를 부여할 수 있다.

Table 4.1.3 연구개발목표 달성도(단위과제 1-1-3)

구분	목 표	달 성 도 (%)	내 용
1차년도	▪ 유역단위 시공간 스케일 상세화 기법 도출	100	▪ 역학적/통계적 상세화기법 조사 ▪ 유역단위의 수문변수 상세화기법 도출
2차년도	▪ 유역단위의 시공간적 스케일 상세화 모형 개발	100	▪ 인공신경망기반의 Random Cascade 상세화기법 개발 ▪ 해상도 변경에 따른 수문자료 변동성해석 기술 개발
3차년도	▪ 인공신경망과 Random Cascade Downscaling 기법 보완 및 안정화	100	▪ 강우장의 시공간적 상관구조분석 ▪ Random Cascade모형 매개변수 최적화
	▪ Grid-based Statistical Downscaling Model (GSDM) 소프트웨어 패키지 시제품 제작	100	▪ GSDM 소프트웨어 개발에 따른 기능정의 및 I/O 설계 및 제작 ▪ GSDM 사용자 interface 설계 및 제작
	▪ GSDM의 타수계 Test bed 확대적용	100	▪ GSDM의 타수계 Test bed 검증 및 확대적용

4. 극한홍수량 전망 기술 개발

본 연구는 극한 홍수량 전망기술 개발을 위한 문헌조사, 시단위 확률강우량 산정 및 극한 홍수량 산정 알고리즘 개발, 기후변화 시나리오에 따른 극한수문량 전망에 주안점을 두었다. 현재 전지구모델에 의한 시나리오 기반의 기후변화 연구는 시나리오에 극값이 제대로 반영되지 않는 한계 때문에 수문량의 총량 변화에 초점이 맞추어져 있다. 따라서 본 연구는 기후변화가 극한수문량에 미치는 영향을 전망하기 위한 향후 연구에 기초 자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4.1.4 연구개발목표 달성도(단위과제 1-2-1)

구분	목 표	달 성 도 (%)	내 용
1차년도	▪ 기후변화에 의한 극한 홍수량 전망기술 조사	100	▪ 장기 기후변화 시나리오에 의한 극한홍수량 전망기술 분석
2차년도	▪ 기후변화에 의한 극한 홍수량 전망기술 개발	100	▪ 전지구 모델에 의한 강수 자료의 시단위 확률강우량 산정 기법 개발 ▪ 기후변화 시나리오에 따른 극한홍수량 전망 기술 개발
3차년도	▪ 표준 기후변화 시나리오를 바탕으로 한 극한홍수량 전망 기술 개발	100	▪ 전지구 모델에 의한 강수 자료의 시단위 확률강우량 산정 기법 개선 및 검증 ▪ 기후변화 시나리오를 바탕으로 한 극한홍수량 전망 알고리즘 개발

5. 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망

본 연구에서 수행한 연구의 달성도는 100%로서 자세한 내용은 『제3장 연구개발수행 내용 및 결과』에 수록하였다.

가뭄의 경우는 홍수와 달리 진행속도가 느리기 때문에 가뭄의 진행상황을 사람들이 인식하기 쉽지 않지만 가뭄에 의한 피해규모, 피해지역과 가뭄으로 인한 파급효과는 홍수에 비해 훨씬 심각한 수준으로 나타나고 있다. 따라서, 본 연구에서는 가뭄지수를 이용한 다양한 통계학적 분석을 통해 다양한 관점으로 가뭄의 특징을 해석하고자 하였으며, 극한가뭄의 시·공간적인 분포특성을 전망하여 실질적인 가뭄피해를 줄이기 위한 대안을 모색하였다. 실제 관측된 과거자료와 A2 시나리오를 반영하여 생산된 미래자료를 이용하여 가뭄을 분석한 결과, 미래에는 과거와 동일한 봄과 겨울철 가뭄이 심화되고 가뭄 주기에 있어서도 과거 지배적이던 약 6년 주기에서 약 2-4년 주기로 낮아지고 있어 가뭄이 더욱 빈번히 발생할 것으로 전망되었다. 가뭄우심지역의 경우 과거 주요 우심지역으로 평가된 낙동강(태화강, 회야·수영, 낙동강 남해)유역이 미래에도 가뭄이 더욱 심화되는 것으로 나타났으며 우리나라의 전통적인 가뭄우심지역인 남부지방과 다소 거리가 있는 한강유역에도 가뭄이 심화될 것으로 전망되었다.

추가적으로 극한가뭄에 의한 유역별 수자원을 전망하기 위하여 극한 가뭄발생시의 중권역별 자연유출량을 적용한 수문학적 위험도를 분석한 결과, 미래에는 한강의 일부 유역을 제외한 전역에서 수문학적 위험도가 큰 것으로 나타났으며 2071~2099년의 경우 동해안 및 남해안 일부지역을 제외한 유역 전체에서 가뭄에 대한 유출의 취약성을 보이는 것으로 나타났다. 이상과 같은 분석결과를 이용하여 우리나라에서 발생했던 과거 가뭄의 계절적, 공간적 경향성, 주기성 및 가뭄우심지역이 평가되었으며, 기후변화에 따른 미래의 가뭄을 전망하여 가뭄우심지역이 어떻게 공간적, 시간적으로 변화하는지에 대해서 제시하였다. 이상의 연구결과는 우리나라의 정부기관별(행정부처), 물관리 기관별(공사 및 공단) 및 지방자치단체별 가뭄대책을 수립함에 있어서 중요한 기초자료로 활용될 수 있으며, 가뭄 우심지역으로 분류된 유역 또는 그렇지 않은 유역에 대한 맞춤형 가뭄대책의 수립이 가능할 것으로 기대된다. 특히 수문학적 위험도가 크게 나타난 유역의 경우에는 극한 가뭄에 의한 유출의 변동성이 매우 취약한 유역으로서, 가뭄시 활용할 수 있는 비상용 수자원의 확보가 절실한 유역으로 평가되며, 가뭄우심 지역과 중권역별 수문학적 위험도전망결과는 유역별 가뭄대책의 수립 및 극한 가뭄에 대한 현실적인 적응, 전략 구축을 위한 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Table 4.1.5 연구개발목표 달성도(단위과제 1-2-2)

구분	목 표	달 성 도 (%)	내 용
1차년도	▪ 기존 가뭄평가방법 분석	100	▪ 가뭄모니터링 관련 기술 및 연구 현황 조사 ▪ 가뭄전망 관련 연구현황 조사
	▪ 가뭄빈도 해석기술 현황 분석	100	▪ 수문시계열 자료를 활용한 가뭄빈도해석 연구현황 분석
2차년도	▪ 가뭄지수의 적용성 검토	100	▪ SPI, PDSI, MSWSI등 가뭄지수의 적용성 검토
	▪ 기후변화 평가를 위한 최적가뭄지수 선정	100	▪ 기후변화 평가를 위한 최적가뭄지수의 선정
	▪ 가뭄지수 및 빈도해석 기술을 활용한 극한가뭄의 정량화	100	▪ Dry Spell에 의한 가뭄의 시,공간 분포특성 분석 ▪ 가뭄지수를 활용한 가뭄빈도해석 기술 개발
3차년도	▪ 유역별 극한가뭄의 전망	100	▪ 기후변화로 인한 유역별 극한가뭄의 전망 ▪ 한반도 가뭄우심도의 작성
	▪ 가뭄에 따른 유역별 수자원 전망	100	▪ 기후변화를 고려한 중권역별 자연유출량 전망 ▪ 가뭄에 따른 중권역별 수문학적 리스크분석

6. 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석

비정상성 빈도해석 기술을 활용하여 빈도별 극한강우 산정기법을 제시하고 극치 수문량 전망에 대한 불확실성 분석 기법을 제시하기 위하여, 한반도의 극한강우와 연계할 수 있는 수문기상인자의 도출기술 조사 및 분석을 목표로 reanalysis 자료, 지상관측망 자료 수집 및 QC를 수행하였다. 또한 기후변화를 반영할 수 있는 기상인자의 조사 및 분석을 수행하였으며, 극한강우와 연계할 수 있는 수문기상인자의 도출기술을 조사 및 분석하였다. 한반도의 극한강우와 연계할 수 있는 수문해석기술 조사 및 분석을 목표로 각종 수문기상인자와 우리나라 극한 강우사상과의 상관분석 기법을 조사하였고, 극한강우와 연계할 수 있는 수문해석기술을 조사, 분석 하였다. 수문통계의 비정상성 빈도해석 기술을 조사하기 위하여 모수 비정상성 빈도해석 기법 조사 및 분석을 수행하였으며, 비모수 비정상성 빈도해석을 조사 및 분석하였다. 극한강우 선정기법 기술을 수행을 위하여 극한강우 변동성 분석기법 조사 및 극한강우 선정기법을 산정하였다. 또한 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석을 위하여 한반도 극한강우와 수문기상인자의 상관 분석 및 극한강우 연계 수문기상인자 도출을 목표로 reanalysis 자료의 각종 수문기상인자와 한반도의 극한강우 상관분석, 한반도의 극한강우와 연계할 수 있는 수문기상인자의 도출을 수행하였다. 또한 모수 비정상성 빈도해석기법 비교분석 및 최적 비정상성 빈도해석모형 개발을 목표로 모수 및 비모수 비정상성 빈도해석 기법을 비교검토 하였으며, 최적 비정상성 빈도해석 모형을 개발하였다. 극한강우의 시공간 변화도 분석을 목표로 하여 극한강우 시간분포특성 및 공간분포특성의 분석을 수행하였다. 극한강우 전망에 대한 불확실성 분석을 위하여 극치수문량 전망에 대한 불확실성 분석을 수행하였다.

본 연구를 통하여 개발된 비정상성 빈도해석기법 및 제시될 결과는 향후 기후변화를 고려한 설계강우량 산정시 기초자료로 활용될 수 있을 것이며, 경제·산업적 측면으로 기후변화의 영향을 반영할 수 있는 비정상성 빈도해걱기법의 개발로 향후 예상되는 홍수, 범람 등으로부터 발생할 수 있는 피해를 최소화하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구의 결과로 제시될 비정상성 빈도해석기법은 홍수범람모형, 범람지도 작성 등의 연구에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4.1.6 연구개발목표 달성도(단위과제 1-2-3)

구분	목 표	달 성 도 (%)	내 용
1차년도	▪ 극한강우 선정기법 및 수문해석 기술 조사·분석	100	▪ 국내외 극한강우 연계 수문해석기술 분석 ▪ 극치수문량의 불확실성 분석기법 조사·분석
2차년도	▪ 극한강우 연계 수문해석모델 구축	100	▪ 수문통계의 비정상성 빈도해석 기술 개발 및 적용 ▪ 극치수문전망에 대한 불확실성 분석
3차년도	▪ 수문통계의 비정상성 빈도해석 기술 적용	100	▪ 정상성 확률강우량과 비정상성 확률강우량의 확률강우량도 비교 분석 ▪ 기후변화를 고려한 비정상성 확률강우량의 확률강우량도 작성
	▪ 극한강우 선정기법 기술 적용	100	▪ 강우의 비정상성을 고려한 극한강우 정량적 제시
	▪ 극치수문량 전망에 대한 불확실성 분석기법 적용	100	▪ 기후변화를 반영한 비정상성 빈도해석의 불확실성 평가를 위한 검정통계기법 선정 ▪ Monte-Carlo모의기법을 활용한 비정상성 빈도해석의 불확실성 평가

7. 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가

아직 우리나라 실정에 맞는 기후변화 시나리오와 연계할 수 있도록 구축된 국내형 수문순환모형이 없어 기후 및 기상변화로 인한 우리나라에서의 수자원 영향 평가가 제대로 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 이를 위해, 국내의 지형조건을 고려한 미래 기후변화에 따른 수문 변화를 총체적으로 분석하기 위한 수문순환 모델링 기법을 개발할 필요가 있다. 본 연구에서는 GCM의 시나리오를 이용하여 수문순환모형으로 기후변화에 따른 수자원 영향 평가를 실시한 국내외 연구사례를 조사하였으며, 그 내용의 범위를 참고하여 향후 우리나라가 나아가야 할 방향을 살펴보았다. 또한 국내 실정에 맞는 분포형 모형을 개발하여 시범유역에 적용하여 사용가능성을 검토하였다.

Table 4.1.7 연구개발목표 달성도(단위과제 2-1-1)

구분	목 표	달 성 도 (%)	내 용
1차년도	▪ 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가 기법 개발을 위한 기반 기술 조사 및 방법론 제시	100	▪ 국내외 기후변화에 따른 수문순환 평가사례 조사 ▪ 자체 개발된 분포형 수문순환모형의 용담댐유역 시범적용 ▪ 향후 개발될 분포형 수문순환모형의 전체구조와 방법론 제시
2차년도	▪ 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가	100	▪ 한국형 장기유출 수문모형의 기본 모듈 개발 ▪ 개발된 분포형 수문모형의 한강유역에 대한 적용성평가 ▪ 한강유역에 대한 미래기후변화 영향 평가
3차년도	▪ 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가	100	▪ 기후변화에 따른 식생 및 융설 예측 기법 개발 ▪ 한국형 분포형 수문모형 전 모듈 개발 및 연계, 통합기법 개발 ▪ 한반도에 대한 미래기후변화 영향 평가

8. 기후변화에 따른 물수급 전망

개발된 물수급 모형은 기술적 측면에서 다양한 시나리오를 물수급 모형에 반영이 가능하고, 통계적 분석을 사용하여 자료 입·출력에 소비되는 시간을 단축하였다. GUI 적용하여 다양한 기후변화 시나리오에 따른 미래 물수급 전망 결과를 알아보기 쉽게 제시할 수 있다. 또한 기존 모형에 비하여 물 부족 전망의 정확성을 향상시켜 수자원 계획 수립의 효율성을 높이고, 보다 정확한 수자원 계획을 통하여 물 부족 및 가뭄 등에 의한 정량적 피해액 저감을 기대할 수 있다.

Table 4.1.8 연구개발목표 달성도(단위과제 2-1-2)

구분	목 표	달 성 도 (%)	내 용
1차년도	▪ 기후변화에 따른 물수급 전망 국내외 기술 비교분석	100	▪ 기후변화를 고려한 물수급 전망 국내외 연구동향 조사 및 물수급 모형 분석 ▪ 선정된 전망 프로그램을 용담댐유역에 시범적용하여 물수급 적용성 평가
	▪ Data Base Storage 개발 구성 및 시범운영(EPS 솔루션)	100	▪ Warehouse 개발을 위한 수요조사 및 주요 구성 모듈 개발착수(EPS 솔루션)
2차년도	▪ 기후변화에 따른 물수급 기법 개발 및 적용 ▪ 기후변화 평가를 위한 한국형 물수급 모형의 확장방안 제시	100	▪ 기존 국내 물수급 방법론을 개선 ▪ 기후변화에 따른 물수급 전망기법 개발 ▪ 개선된 방법론의 한강유역 적용 ▪ 한반도 표준 시나리오 선정기법 분석
	▪ Data Base Storage 운영 및 보완(EPS 솔루션)	100	▪ 각 단위과제 상호간의 연계성 및 호환성을 고려한 Data Base Storage 개발 및 운영(EPS 솔루션)
3차년도	▪ 개발된 전망기법을 통한 미래 한반도 물수급 전망	100	▪ 개선된 방법론을 통한 미래 한반도 물수급 전망 제시 ▪ 한반도 표준 시나리오 선정기법 및 선정 시나리오 제시
	▪ Data Base Storage 개선 및 개발완료(EPS 솔루션)	100	▪ 각 단위과제 상호간의 호환성을 고려한 Data Base Storage 운영 및 GUI 개선(EPS 솔루션)

9. 기후변화를 고려한 수문 전망 과정의 불확실성 정량화

기존에 조사되었던 다양한 기후변화 불확실성 저감기법의 문제점을 파악하고 새로운 모형을 제시하였다. 가중치의 편의와 불확실성을 줄이는 Scaled Ridge 방법을 제안하였고 이를 개량한 Weighted Scaled Ridge 방법을 제시하였으며 지역적 상관성을 반영한 Spatial regression을 적용하였다. 강수량에 따라 분포를 달리하는 Mixture Model을 제안하였으며 BMA 기법을 개량한 Leave-one-out BMA방법을 제안하였다. 또한 Delta method를 이용하여 기후변화 전망 시 발생하는 불확실성의 요인을 각 단계별로 분해하였다. 이러한 불확실성 저감기법의 개발과 정량화, 요인별 분해는 통계적 방법이 제안되지 않은 수문 분야 및 다양한 분야에서 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4.1.9 연구개발목표 달성도(단위과제 2-1-3)

구분	목 표	달 성 도 (%)	내 용
1차년도	▪ 국내외 불확실성 평가 기술 비교·분석	100	▪ 불확실성 요인 분석기법 관련 문헌조사 및 연구동향 조사
	▪ 국내 기후변화 연구들의 불확실성 정량화	100	▪ 불확실성 정량화 기법 관련 연구동향 조사
2차년도	▪ 기후변화 시나리오 조합 및 저감 기법 개발	100	▪ 기존의 기후변화 불확실성 저감 기법의 문제점을 파악하고 새로운 모형 제시 -가중치의 편의와 불확실성을 줄이는 Scaled Ridge 방법 제안 -강수량에 따라 분포를 달리하는 Mixture Model을 제안 ▪ 미래 평균 전망의 기존 기법의 문제점을 파악하고 새로운 모형 제시
	▪ 국내외 불확실성 정량화 기법 관련 연구동향 조사	100	▪ 불확실성 정량화 기법 관련 연구동향 조사
3차년도	▪ 기후 변화 불확실성 전망의 조합 기술 개발	100	▪ 기존의 기후변화 불확실성 저감 기법의 문제점을 파악하고 새로운 모형 제시 -가중치의 편의와 불확실성을 줄이는 Scaled Ridge 방법 제안 -Sclaed Ridge 방법의 계산상의 문제점을 해결한 Weighted Scaled Ridge 방법 제안 -지역적 상관성을 고려한 Spatial Regression 모형의 제안
	▪ 기후 변화 불확실성의 정량화 기술 개발	100	▪ 기존의 기후변화 불확실성 정량화 기법의 문제점을 파악하고 새로운 모형 제시 -계절적 요소가 나타나는 기후의 특성에 따른 Residual Mixture Model의 제안 -BMA 방법을 개량한 Leave-one-out BMA 기법 제안
	▪ 기후 변화 불확실성의 요인별 분해 기술 개발	100	▪ Delta method를 이용한 불확실성의 요인분해 방법 제안
	▪ 기후변화에 따른 한반도 수자원 전망의 불확실성 제시	100	▪ 한반도 전지역에 대한 강수량, 기온의 전망 및 초과확률의 분위수 제시를 통한 불확실성의 제시

10. 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석

본 연구에서는 지진하중에 대한 안정성을 위해 신뢰성 해석에 기반을 두고 개발된 취약도 곡선을 수위하중에 적용하여 수위에 따른 수공구조물의 거동에 적용시켰다. 또한 기후변화에 따라 수위가 급격히 증가함에 따라 수공구조물의 거동이 어떠한 방향으로 진행되는지 예측하고 타 세부과제의 유량 시나리오를 적용하여 한강유역 중 충주댐의 파괴확률 분석 수행을 통해 개발한 기법을 검증하였다. 거시적인 관점에서 예측할 수 있었던 결과와 취약도 곡선에서 표현되는 결과가 일치함으로 취약도 곡선의 수위하중에 대한 수공구조물 파괴 거동 예측은 어느 정도 타당성이 있다고 할 수 있다. 본 연구의 취약도 곡선은 정확한 수치를 요구하는 상세설계에 앞서 대략적인 설계를 할 때 유용하게 사용될 것이며 본 연구에서 수위에 대한 취약도 곡선의 적정성을 확인하였다. 따라서 후에 실질적 사용을 위해 취약도 곡선이 필요한 유역에 대해 상세 지반조사, 현장시험, 실내시험 등을 바탕으로 취약도 신뢰도를 높인 곡선의 개발이 요구된다. 또한, 교량에 대한 지진 취약도 곡선을 작성할 때, 회전연성에 따라 교량의 손상 단계가 정해져 있어 그에 따른 취약도 곡선이 산출된다. 반면, 수공구조물의 손상 단계는 정성적인 손상등급 구분은 있으나 정확한 수치나 수식에 대한 기준이 없는 실정이므로 후에 댐의 균열, 제방의 침투에 대한 손상등급을 정하는 연구가 선행된다면, 수공 구조물의 설계에 있어 적정 위험도 수준을 충족할 수 있는 확률 기반 최적 설계가 가능할 것으로 기대한다.

Table 4.1.10 연구개발목표 달성도(단위과제 2-2-1)

구분	목 표	달 성 도 (%)	내 용
1차년도	▪ 기후변화에 따른 수자원시설물 영향분석기법 조사	100	▪ 관련 문헌조사 및 연구동향 조사 ▪ 기존 연구 분석비교를 통한 통한 연구방향 정립 ▪ 수공구조물 분류 및 설계 과정 분석을 통한 영향평가 대상 구조물 선정
2차년도	▪ 기상변화 관련 설계인자에 대한 수공 구조물 안전 민감도 분석	100	▪ 구조물분류 및 구조물별 안정성평가 기법조사 ▪ 기상변화와 관련된 수공구조물의 주요 설계인자 분석 및 도출 ▪ 설계인자 변화에 의한 구조물의 안전 민감도 산출
3차년도	▪ 기후 변화 불확실성을 고려한 주요 수공구조물 안전도 변화분석	100	▪ 구조물 선정 및 변동인자 결정 ▪ 주요 외부 하중에 대한 구조해석 및 구조물 취약도 곡선 산출 ▪ 기후 변화에 대비한 시설물 설계 기준 개선안 제안

11. 기후변화를 대비한 법제도 개선 및 수자원정책 제시

본 연구는 기후변화에 대비하는 물관리의 적응전략에 대한 정책연구이다. 이를 위하여 기후변화가 물과 물관리에 미치는 영향에 따른 정책과 제도변화를 국제적인 차원과 국내적인 차원에서 파악하고 이를 선진국의 사례를 통하여 방향성을 구축하는 것이다. 그 동안 국내에서 기후변화에 대한 물관리의 연구는 거의 대부분이 기술적인 접근에 치중하여 왔다. 그러나 물관리 적응전략이 적절한 효과를 거두기 위해서는 지역에 거주하는 주민들의 직접적인 참여와 이해당사자들의 공감대 형성이 매우 중요하다. 본 법제도 및 정책 제시의 연구는 물관리 정책연구가 일천한 국내에서 이러한 방향성을 제시하고, 기술적인 접근과 정책적인 접근의 조화를 이루었다는 점에서 큰 의미가 있다.

Table 4.1.11 연구개발목표 달성도(단위과제 2-2-2)

구분	목 표	달 성 도 (%)	내 용
1차년도	▪ 기후변화에 대응 국내외 물관리 법제도 및 정책 분석	100	▪ 선진국과 한국의 연구동향 파악 분석
		100	▪ 선진국과 한국의 법제도 현황분석
		100	▪ 선진국과 한국의 정책방향 현황분석
		100	▪ 선진국과 한국의 사례 비교분석
	▪ 기후변화 대응 물관리 국제협력 구조 분석	100	▪ 국제협력의 내용과 전략을 파악함
2차년도	▪ 기후변화 적응전략 추진 위한 국내외 법제도 및 전략분석	100	▪ 선진국/한국의 법제도 적응전략 분석
		100	▪ 선진국/한국의 법제적 논의사항 검토
		100	▪ 선진국/한국의 기후변화 적응전략 분석
	▪ 법령/제도 설정 목적 설문조사	100	▪ 전문가 대상 설문조사 실시
	▪ 기후변화 대응 물관리 국제협력 방향성 구축	100	▪ 대개도국 ODA 공여전략 검토
	▪ 기후변화 대응 법제도 개선방향 가이드라인 제시	100	▪ 법령개선 가이드라인 작성
3차년도	▪ 기후변화 대응 물관련 법령 개선방안 및 정책 추진전략 수립	100	▪ 법령(안), 제도(안), 정책(안) 제시
		100	▪ 제도개선에 의한 기대효과 파악
		100	▪ 정책개선 방향과 개선안 제시
	▪ 개발정책 의견수렴을 위한 공청회 개최	100	▪ 전문가 정책토론회 개최
	▪ 기후변화 적응전략의 국제협력관계 구축 및 물관리사업 모형 구축	100	▪ 대개도국 ODA 협력사업 로드맵 구축
		100	▪ 국제협력의 방향과 전략제시
	▪ 기후변화 대응 국가 물관리 적응전략 로드맵 작성	100	▪ 적응전략의 로드맵 작성

12. 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가

본 연구의 연구개발 목표는 기후변화 시나리오에 따른 기후변화의 사회경제적 피해비용을 추정하여 기후변화가 물관리에 미치는 사회경제적 파급효과를 분석하였다. 이러한 결과는 기후변화로 초래되는(일정한 시나리오를 전제하여) 수자원분야의 가능한 모든 사회적 비용을 최소화하기 위한 요소 기술, 국가 정책 가이드라인 수립 및 기후변화 대응 물관리 정책의 기초자료로 제공될 것이다.

Table 4.1.12 연구개발목표 달성도(단위과제 2-2-3)

구분	목 표	달 성 도 (%)	내 용
1차년도	▪ 기후변화와 사회경제적 영향평가 문헌조사	100	▪ 기후변화 영향평가 문헌조사
	▪ 기후변화와 이수, 치수 및 하천환경 부문의 영향(권역별, 부문별) 및 상호 연관성 분석	100	▪ 기후변화에 따른 물관리 분야 영향평가 문헌조사
	▪ 기후변화 비용추정방법론	100	▪ 기후변화의 사회경제적 비용추정 방법론 정리
2차년도	▪ 우리나라 특성을 고려한 기후변화 비용추정 방법론수립	100	▪ 홍수(가뭄)피해비용추정에 대한 기존 방법의 비교·검토를 통한 방법론 정립
	▪ 홍수피해 분석	100	▪ 과거 홍수피해액 자료와 강우특성과의 관계정립을 위한 과거자료에 대한 Data Base 구축 및 사전분석 ▪ 홍수피해자료와 홍수피해함수를 이용한 홍수피해 Historical data 분석
	▪ 가뭄피해 분석	100	▪ 과거 가뭄피해현황 사례조사 ▪ 기후변화의 사회경제적 피해비용 추정을 위한 가상시나리오 별 가뭄피해 비용 산정
	▪ 기후변화에 따른 수문-경제 모형 개발	100	▪ 가뭄에 대해 산업연관표를 이용한 선형계획법을 기반으로 한 수문-경제모형의 Sub-Model 구축 ▪ 구축된 Sub-Model을 이용해 가뭄에 따른 사회경제적 피해비용 산정
	▪ 기후변화와 국내외 물관리 예산	100	▪ 기후변화와 사회경제적 피해비용추정을 위한 국내외 물 관리 예산비교
3차년도	▪ 기후변화 시나리오에 따른 기후변화의 사회경제적 피해비용추정	100	▪ 홍수: 과거 자료에 기반한 요인분석 및 예측 ▪ 가뭄: 산업구조 내(I-O분석) 물의 잠재가격 도출 및 피해비용 추정
	▪ 기후변화가 물관리에 미치는 사회경제적 파급효과 분석	100	▪ 일반연산모형(CGE)을 통한 홍수 및 가뭄피해의 사회경제적 파급효과 분석

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망

기후변화에 따른 표준화된 장기 기후 및 수문시나리오 결과는 본 연구단의 단위과제 연구에 입력자료로 활용되며, 향후 국가 수자원장기종합계획(제II편. 물이용 종합계획 제4장.물수급 전망)에서 활용 가능하다. 뿐만 아니라 국가 및 각 지자체의 치수와 물이용 대비 계획 수립 시 활용될 수 있으며, 최근 '저탄소녹색성장기본법'을 통해 각 지자체별로 수립되고 있는 기후변화 적응대책의 기초자료로 활용이 가능하다.

RCP 기반의 지역 기후변화 시나리오 개발에 따른 고품질 기후변화 정보 생산은 수문종사자 수요에 맞춘 기후변화 시나리오 제공 및 국내 기후변화 영향평가 및 적응 대책 수립에 기여할 것으로 전망된다. 또한 이러한 RCP 기반의 기후시나리오는 IPCC 5차 평가보고서 작성에 활용될 것으로 기대되는 바 국제적 기후변화 대응 노력에 동참하게 될 것이다.

2. 기후변화에 따른 중단기 수문전망

본 연구는 국내 기후변화-수문 경향성 분석결과를 이용하여 시나리오 및 비시나리오 기반의 중단기 수문예측 결과를 도출하여 국내(2건)의 논문과 국내(8건), 국외(3건)의 학술회의 발표 논문을 발표함으로써 기술적 연구성과를 도출하고 기후변화에 따른 중단기 수문전망의 통하여 실용화 및 사업극대화를 추진할 계획이다. 또한 분야별 인력양성 배출을 통하여 과업을 통한 인력을 양성할 계획이다.

기존의 GCM 시나리오에 의존하는 방법과 달리 과거의 관측자료를 통한 유역별-지점별 자료의 분석과 이를 활용한 비시나리오 기반의 중단기 수문전망 결과는 GCM 기법의 불확실성 또는 신뢰성 있는 결과 도출을 보완 가능하며, 비시나리오 기반인 경향성 분석 및 탄성도 분석 기법을 적용한 중단기 수문전망 예측 기법을 활용하여 기존 국가 수자원 계획 방법론의 기본틀을 유지하면서 기후변화의 영향을 반영한 미래 중단기 수문전망 결과를 새롭게 제시하므로써 유역별 유출량 평가 시 활용할 계획이다.

3. 유역단위 시공간적 스케일 상세화

본 연구는 GCM 기후모의 자료의 수문학적 활용을 위한 스케일상세화에 있어서 모의 신뢰도를 극대화하기위한 방법론을 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. 연구를 통한 상세전망자료는 일단위 기반의 장기유출모형 및 물수지 모형, 가뭄지수전망을 위한 강우입력자료로 활용 될 수 있을 것으로 기대되며, 향후에는 극한홍수사상전망을 위한 IDF전망 기법의 적용가능성을 검토하여 활용하고자 한다.

4. 극한홍수량 전망 기술 개발

하천설계기준 “제15장 하천유역종합계획”과 “제16장 설계 수문량”에 대해 재현기간별 강수량과 대응하는 홍수유출량 산정 시 기후변화를 고려한 홍수량 산정 알고리즘이 반영될 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 재현기간별 강수량과 대응하는 홍수유출량 산정 시 기후변화를 고려한 극한홍수량 산정 알고리즘이 반영될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망

『제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과』에 수록된 가뭄 연구내용을 기반으로 미래의 가뭄우심 지역 및 가뭄의 발생기간을 중심으로 한 정량적인 연구결과는 향후 정부의 가뭄대책 수립에 중요한 지표로 활용될 수 있을 것으로 기대되며 『앞선 ‘제 4 장 개발목표 달성도 및 관련분야에서의 기여도』에서 언급한 바와 같이 실질적인 행정구역별 가뭄대책과 이를 위한 기초자료에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

특히, 기후변화에 따른 극한가뭄으로 인한 수자원 전망은 향후 수자원장기종합계획(제Ⅳ편. 물이용 종합계획, 제4장 물 수급 전망)에서 우리나라의 수자원확보 필요량 기준으로 설정되어 있는 30년 빈도의 가뭄에 대한 재설정이 가능하며 기후변화를 고려한 30년 빈도 가뭄의 변화량 추정 및 전망에도 긴요하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

또한 미래의 극한가뭄 전망결과는 우리나라의 정부기관별(행정부처), 물관리 기관별(공사 및 공단) 및 지방자치단체별 가뭄관리 대책(drought management plan)을 수립함에 있어서 중요한 기초자료로 활용될 수 있으며, 가뭄 우심지역으로 분류된 유역 또는 그렇지 않은 유역에 대한 맞춤형 가뭄대책의 수립에 매우 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

특히 수문학적 위험도가 크게 나타난 유역의 경우에는 극한 가뭄에 의한 유출의 변동성이 매우 취약한 유역으로서, 가뭄시 활용할 수 있는 비상용 수자원의 확보가 절실한 유역으로 평가되며, 가뭄우심 지역과 중권역별 수문학적 위험도전망결과는 유역별 가뭄대책의 수립 및 극한 가뭄에 대한 현실적인 적응, 전략 구축을 위한 중요한 기초자료로 활용될 수 있다.

6. 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석

국내외 수문통계의 수문해석기술을 조사, 분석함으로써 향후 본 연구에서 개발하고자 하는 비정상성 빈도해석 프로그램 개발을 위한 기초자료로 활용하고자 한다. 또한 기후변화에 따른 극치사상 추정량은 향후 개정될 “하천설계기준”의 설계수문량 산정 가이드라인 등에서 활용될 수 있을 것이다. 또한 연구결과의 기술적·경제 및 산업적 측면을 기대할 수 있다. 본 연구를 통하여 개발된 비정상성 빈도해석기법 및 제시될 결과는 향후 기후변화를 고려한 설계강우량 산정 시 기초자료로 활용될 수 있을 것이며, 기후변화의 영향을 반영할 수 있는 비정상성 빈도해석기법의 개발로 향후 예상되는 홍수, 범람 등으로부터 발생할 수 있는 피해를 최소화하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 연구의 결과로 제시될 비정상성 빈도해석기법은 홍수범람모형, 범람지도 작성 등의 연구에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

7. 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가

1, 2, 3차년도의 연구 성과를 바탕으로 기후변화에 따른 수문순환 평가를 위한 분포형 수문순환 모형의 개발 방향을 제시할 수 있어 향후 미래 기후변화 평가 연구의 초석이 될 것으로 예상된다.

본 단위과제에서 도출될 남한전체에 대한 토지이용 예측 결과를 이용하여 미래 국토계획수립시 그 일부를 활용할 수 있을 것이며 그 기법을 기초로 농업지역의 정밀토지이용에 대한 예측 시 활용 가능하다.

8. 기후변화에 따른 물수급 전망

본 연구에서는 기존의 단일 시나리오를 사용하여 물수급 전망을 했던 것과 다르게 기후변화에 따른 물수급 전망을 위해여 우리나라 수문 특성에 적합한 GCM과 3가지 배출시나리오를 사용하였다. 다양한 기후 시나리오의 고려를 위하여 통계적 분석 방법이 적용 되었으며 이에 따라 다양한 시나리오를 고려함에도 불구하고 모의 정확도가 우수하고 모의 속도가 뛰어난 모형을 개발 할 수 있었다. 다양한 시나리오를 고려한 물수급 모의 값은 단일 시나리오를 사용하여 한가지의 확정적인 물수급 전망을 했던 기존의 방법과 비교하여 전망값의 범위를 제시함으로서 전망값의 신뢰도를 높일 수 있었다. 하지만 다양한 물수급 전망값의 실직적인 적용을 위해서는 다양한 대안을 활용한 의사결정 방법의 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

미래에 대한 전망결과는 실측 자료와 같은 객관적인 자료와의 검증이 불가능하고, 특히 물부족량에 경우에는 실제로 구축된 자료가 거의 전무하기 때문에 전망결과를 전적으로 신뢰하기는 어려운 것이 사실이다. 하지만 물부족 전망값은 미래에 대한 정책수립과 구조물 설계를 위한 기초자료이고, 물부족 전망값의 신뢰도를 높이기 위해서는 기후변화의 영향을 고려해야함은 자명한 사실이기 때문에 본 연구의 전망 결과를 주목해야 하는 것이다. 따라서 본 연구의 결과 값은 기존의 분석틀을 최대한 유지하면서 새롭게 기후변화의 영향을 반영할 수 있는 물수급 분석 방법론을 제시하였기 때문에 물부족 전망과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 줄인 보수적인 결과값을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 물수급 전망값은 미래 수자원 관리 측면에서의 정책 수립을 위한 기초 자료로 사용이 가능하고, 또한 물수급에 관한 경제적인 영향평가와 같은 2차 3차적인 연구를 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

9. 기후변화를 고려한 수문 전망 과정의 불확실성 정량화

기후변화 연구에 있어 중요한 키워드는 불확실성이다. 단계별 불확실성 정량화 기법은 아직 미미하며 통계학에서 검증 받은 정량화 기법들을 검토하고 분석하여 국내 기후변화 연구에 적합하게 개선하여야 할 필요성이 증대되고 있다. 기술적 측면으로 단계별 불확실성 정량화 및 요인분해 기술에 관련된 국제적인 최신 기술의 보유는 기후변화 연구에 있어서 기술 선점의 효과를 기대할 수 있으며, 이러한 기술의 개발은 기후변화 연구 뿐만 아니라 타 산업 분야에서 연구결과의 활용은 물론 방법론을 벤치마킹 하는 기술적 파급효과를 가지고 올 수 있다. 경제-산업적 측면으로 기후변화에 따른 수문 전망과정의 불확실성은 사회 경제적인 손실을 야기한다. 불확실성 정량화 및 요인분해 기술 개발은 수문 전망 과정에서 발생하는 불확실성을 정량적으로 측정하며 이러한 불확실성을 수문 전망 과정 각 단계별로 분해함으로써 사회 경제적인 손실이 중점적으로 발생하는 요인을 파악할 수 있다.

수문 전망과정의 불확실성 정량화 기법으로 도출될 단위과제 1-1-1의 수자원 분야 기후변화 표준 시나리오는 수자원장기종합계획 및 이 분야 모든 학술 연구의 기초자료로 활용할 수 있다.

연구성과 활용 세부항목을 보면 먼저 수자원장기종합계획에서 제 IV 편. 물이용 종합계획, 3. 물수급 전망 항목의 분석기간에 활용될 계획이다. 기존 계획에서는 과거 기간을 적용하였지만 미래 기후변화의 영향을 고려하기 위해 미래 전망구간을 반영한다면 미래 GCM을 이용하여야 한다. 이 때 불확실성이 저감된 전망값으로 물수급 전망을 할 수 있다.

다음으로 제V편. 치수종합계획, 3. 치수 특성 평가 및 전망에서도 과거기간이 아닌 미래 기간을 적용한다면 불확실성이 저감된 GCM 전망값으로 미래 강우 확률을 계산 할 수 있다.

10. 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석

본 연구에서는 기후변화에 따라 수위가 급격히 증가함에 따라 수공구조물의 거동이 어떠한 방향으로 진행되는지 예측하고 실제 강우량 예측 모델을 바탕으로 한강유역의 콘크리트 중력식 댐과 제방의 취약도 곡선을 산출하였다.

취약도 곡선은 정확한 수치를 요구하는 상세설계에 앞서 대략적인 설계를 할 때 유용하게 사용될 것이며 본고에서 수위에 대한 취약도 곡선의 적정성을 확인하였다. 따라서 후에 실질적 사용을 위해 취약도 곡선이 필요한 유역에 대해 상세 지반조사, 현장시험, 실내시험 등을 바탕으로 취약도 신뢰도를 높인 곡선의 개발이 요구된다. 한편, 교량에 대한 지진 취약도 곡선을 작성할 때, 회전연성에 따라 교량의 손상 단계가 정해져 있어 그에 따른 취약도 곡선이 산출된다. 수공구조물의 손상 단계는 정성적인 손상등급 구분은 있으나 정확한 수치나 수식에 대한 기준이 없는 실정으로 후에 댐의 균열, 제방의 침투에 대한 손상등급을 정하는 연구가 선행되어야 할 것으로 판단한다.

본 연구의 취약도 곡선은 정확한 수치를 요구하는 상세설계에 앞서 대략적인 설계를 할 때 유용하게 사용될 것이며 본 연구에서 수위에 대한 취약도 곡선의 적정성을 확인하였다. 현재 홍수에 대비한 댐 설계기준의 경우 수공구조물의 손상 단계는 정성적인 손상등급 구분은 있으나 정확한 수치나 수식에 대한 기준이 없는 실정이므로 후에 댐의 균열, 제방의 침투에 대한 손상등급을 정하는 연구가 선행된다면, 수공 구조물의 설계에 있어 적정 위험도 수준을 충족할 수 있는 확률 기반 최적 설계가 가능할 것으로 기대한다.

Table 5.1.1 댐 설계기준 개선안 제안 방향(예)

항목	기존내용	CCAPH-K 개선방향
제 6장 콘크리트중력댐 6.2 설계조건	6.2.4 제체의 안정성검토 및 일반사항 댐의 응력해석은 댐에 작용하는 댐의 자중, 정수압, 동수압, 양압력, 파압, 빙압, 퇴사압 및 지진력 등의 크기와 방향에 따라 응력상태를 적절히 판단되는 방법에서 행한다. (중략) 특히, 현저한 기초변형이 예상되는 댐에서는 저면 부근에 연직방향과 수평방향의 인장응력이 일어날 수도 있어 이 경우에는 이에 대응하는 대책을 강구해야 한다.	현재 정성적으로 작성되어 있는 해당 부분에 수위변화가 급변함을 강조하면서 해당 상황발생 시 대략적으로 수치를 알 수 있도록 취약도 곡선 방법을 제시하면서, 한강유역을 예로 규모별 압축 및 인장 취약도를 제시한다.

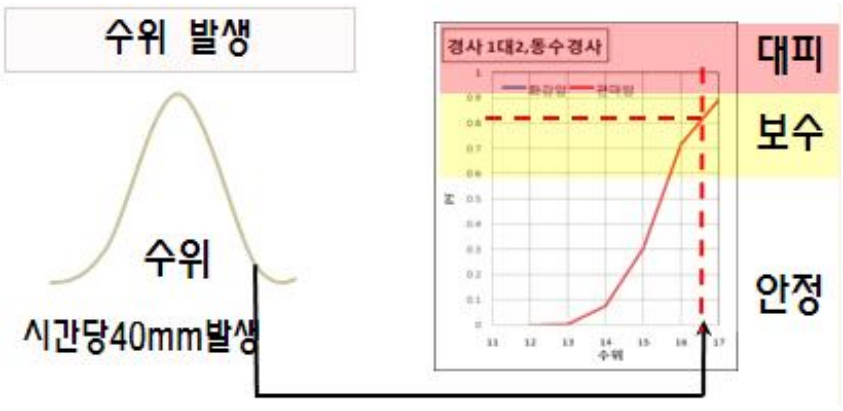


Fig. 5.1.1 강우량을 고려한 수공구조물 관리 프로세스 예시(안)

또한 미국의 HAZUS, 일본의 DIS, 대만의 TELES 등 지진 발생 시 취약도 곡선을 기반으로 지진피해를 평가하고 초기 손실을 추정하여 피해단계를 지도로 표시하거나 수치로 나타내는 프로그램의 개발은 수위에 따른 수공구조물의 거동에도 충분히 적용이 가능하다. 추후 그림과 같이 이상 호우를 확률적인 과정을 통해 간단한 수위로 환산하고 이를 입력치로 하여 구조물의 거동을 예측, 결과로 피해 비용 산출까지 가능한 통합 수공구조물 관리 프로그램의 개발 등의 연구를 실현한다면, 최적 유지관리를 통해 기후변화에 따른 수공구조물의 피해를 감소시킬 수 있을 것으로 기대한다.

11. 기후변화를 대비한 법제도 개선 및 수자원정책 제시

본 연구는 기후변화에 대비하는 물관리의 적응전략의 제도적 기반에 관한 최초이자 본격적인 연구라 할 수 있다. 따라서 선진 외국의 사례분석과 국내의 현황 및 시사점 도출을 위한 연구가 심층적으로 수행되었다. 또한 본 연구에서 기후변화에 대한 물관리의 적응전략 수립과 개선방향을 제시하였으나 급변하는 국제적인 흐름을 실시간으로 잡아내기는 어려운 점이 많았다. 더구나 19대 국회에서는 물에 대한 포괄적인 법령인 물기본법이 본격적으로 논의될 가능성이 많다. 추가연구에서는 이러한 변화를 반영한 더욱 세밀한 접근이 요망된다.

본 연구의 결과는 당초 설정한 연구개발의 목표를 성공적으로 달성하였으며, 이를 통하여 관련 분야의 기술발전에 크게 기여할 것으로 판단된다. 본 연구를 진행하는 과정에서 도출된 연구의 성과는 2010년 국토해양부에서 발간한 '미래 수자원 전략'의 준비팀과 정부합동으로 발간한 '기후변화 적응대책 수립'의 내용에 일부 반영되었다. 이를 통하여 본 연구의 일부 성과는 국가전략 정책보고서에 반영하게 되었다.

본 연구의 성과는 학술기사와 학술논문으로 작성하여 한국수자원학회지와 학회논문집 또는 대한토목학회 논문집에 투고를 하였거나 앞으로 게재될 전망이다. 이를 통하여 국내 전문가의 연구능력 향상에 기여하게 될 것이다.

2013년 신정부의 출범과 더불어 보다 기능화된 정부조직개편이 이루어졌으며, 이에 따른 행정 및 정책실현의 집중화가 용이하게 된 것으로 평가된다. 본 연구에서 제안한 법제도 가이드라인과 법제도 로드맵은 향후 정부 및 공공기관에서 기후변화 대비 수자원 적응전략을 수립하는데 기본자료로 활용될 것이다. 또한 지방 시도에서 앞으로 수립할 지역의 기후변화 적응전략 수립에 활용될 것으로 믿는다.

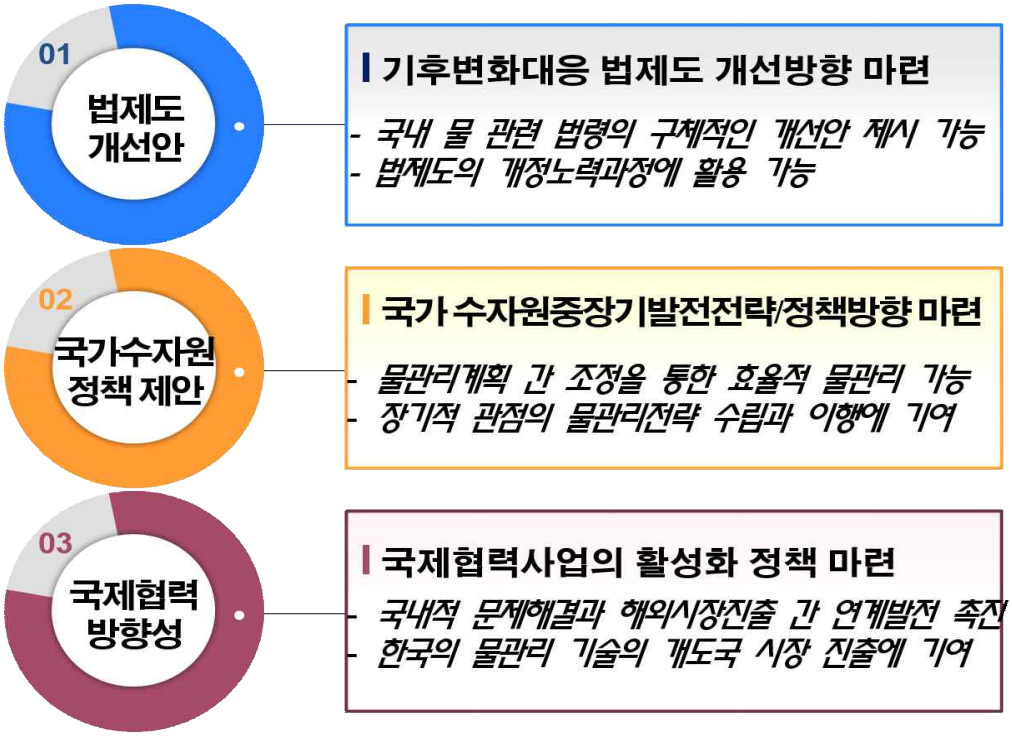


Fig. 5.1.2 국가정책 수립 활용방안

12. 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가

본 연구에서는 홍수 및 가뭄의 과거자료를 토대로 피해액에 대해 분석하였으며 또한, 기후변화 시나리오에 따른 분석을 통하여 사회·경제적으로 미치는 피해비용에 대하여 추정하였다. 그러나 수자원분야에 대한 국가 예산에 따른 재정투입의 효과성에 대한 분석은 이루어지지 못하였다. 이와 같은 연구가 이루어진다면 예산에 대한 직접적인 효과를 분석할 수 있으므로 추가적인 연구가 필요할 것이다.

본 연구에서는 기후변화의 물관리 분야 사회·경제적 영향평가의 국내적용을 위한 중간 단계의 연구로서, 향후 기후변화가 우리나라에 미치는 경제적 피해비용 추정을 위한 연구방법의 체계적 정리로 후발 유사연구자의 연구진행에 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 연구개발 내용에서도 언급했듯 물 관리분야의 재난에 대한 경제적 피해산정 시 유용한 툴을 제공할 것으로 기대된다.

Fig. 5.1.3에서 기존의 많은 연구들의 대부분은 전지구적 비용평가로 인해 지역적 특성이 강한 기후변화의 특징을 제대로 반영하지 못한 광범위한 추정에 머물렀다면, 본 연구는 국내 지역에 적합한 시나리오와 국내 특성을 고려한 수문사상을 이용해 피해비용을 추정함으로서 보다 합리적이고 정확한 결과를 도출 할 수 있을 것으로 기대 되며, 향후 본 연구의 최종결과물은 기후변화 대응 및 적응을 위한 물관리 정책 수립의 근거를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

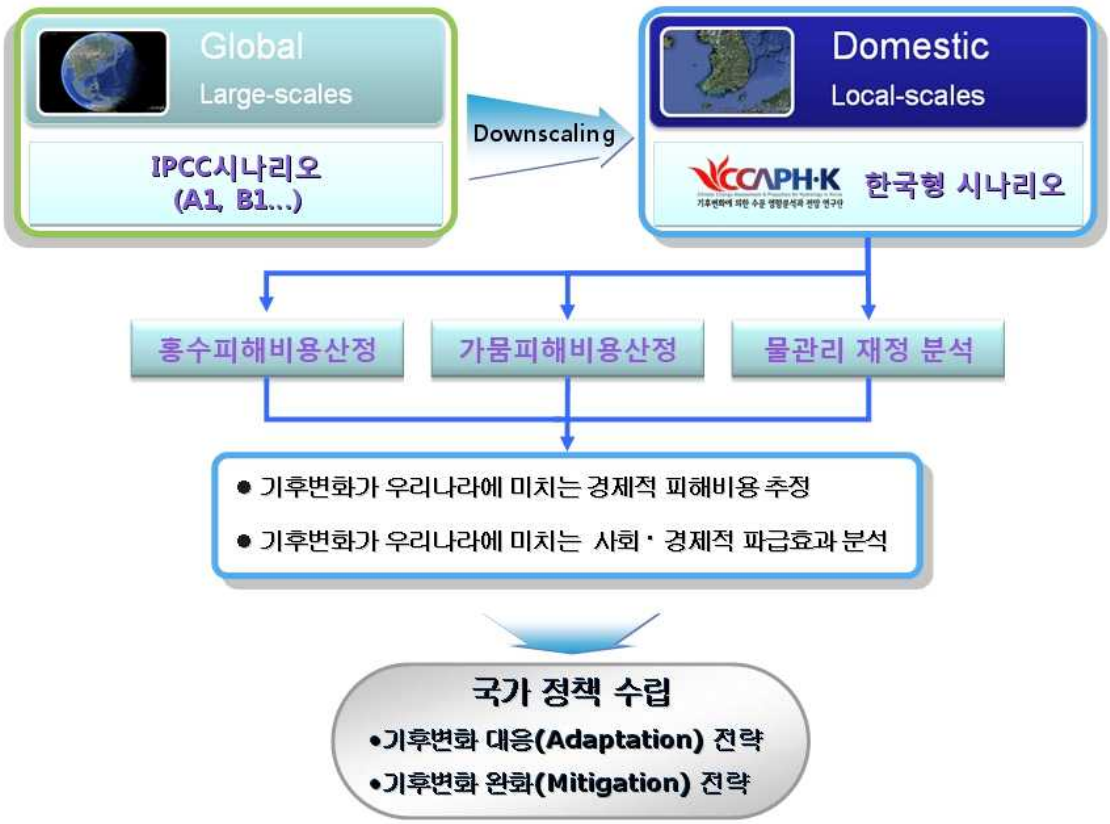


Fig. 5.1.3 연구개발 결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. 기후변화에 따른 장기수문시나리오 표준화 및 전망

수문기상선진국의 국가단위 프로젝트 보고서를 수집하여 사례조사를 실시하였으며, 그 결과 지역기후 및 각국의 유역특성을 반영하는 기후 및 수문시나리오를 생산하고 있었다. 공통적인 특징은 AR4에서 사용된 배출시나리오 및 GCMs을 활용하여 기후변화 시나리오를 생산하였고, MME 기법을 적용하여 배출시나리오 및 GCMs 모델차이에서 오는 불확실성을 고려하여 수자원영향평가를 수행하였으며 각국의 유출특성을 반영할 수 있는 강우-유출 모형을 활용하고 있었다. 이러한 정보를 통해 국내 표준 기후 및 수문시나리오 생산기술을 개발하고 미래 수문기상의 변화를 정량적으로 평가하였다.

또한, IPCC 5차 평가보고서에 기여하기 위한 결합모델 상호비교 실험(CMIP5) 자료를 수집하였다. IPCC에서는 AR5 시나리오에서 기존 SRES 시나리오를 대체할 새로운 개념의 RCP 시나리오를 제안하였으며, CMIP5에서는 이 시나리오를 기반으로 미래기후변화 전망 자료를 생산하고, 기후모델별 결과 차이를 분석하고 있다. 국립기상연구소에서도 2009년 RCP 시나리오를 수집하고 AR5 참여를 위해 전지구 및 지역 기후변화 시나리오를 생산하였다. 고해상도 지역 기후변화 시나리오 산출 과정은 우선, 새로운 온실가스 배출 시나리오인 RCP 시나리오에 기초해 전지구 대기-해양 결합모델인 HadGEM2-AO 로 약 135 km 해상도의 전지구 기후변화 시나리오를 산출한다. 전지구 기후변화 시나리오 자료에 기초해 지역기후모델 HadGEM3-RA[1] 로 동아시아 지역에 대한 50 km 해상도의 지역 기후변화 시나리오와 우리나라 지역에 대한 12.5 km 해상도의 지역 기후변화 시나리오를 산출하였다.

1) HadGEM3-RA: Atmospheric Regional climate model of Hadley Centre Global Environment Model version 3, 영국기상청 해들리센터의 HadGEM3 대기모델 기반 지역기후모델

2. 기후변화에 따른 중단기 수문전망

기후변화에 따른 중단기 수문전망을 실시하기 위하여 국외의 선진 사례를 수집 및 조사, 분석을 실시하였다. 그 결과 대부분 GCM-RCM 기법을 통한 강우, 기온, 유출량 등의 수문 및 기상요소에 대하여 전망을 실시하고 이에 따라 발생되는 불확실성 연구 및 평가에 관한 연구가 실시되고 있었다. 이에 반하여 과거 관측자료를 기반으로 한 기후변화의 통계특성 분석 기술인 통계 경향성 분석 기법으로 Statistical Trend Analysis 기법과 Elasticity Analysis 기법을 통하여 시계열 자료를 분석하고 수문전망을 실시하는 연구가 진행되고 있었다. 이러한 해외 선진 연구사례를 통하여 비시나리오 즉 GCM-RCM 기법 기반의 연구가 아닌 실제 과거 관측자료를 기반으로 실측자료의 통계적 기법 적용을 통한 분석과 이의 결과를 활용하여 수문전망을 실시함으로써 수문성분의 변화를 정량적으로 평가하였다. 즉 수문변수에 대한 통계적 경향성 분석으로 비모수적 경향 특성을 분석하고 변수간 비선형 상관회귀특성, 변수간 탄성도(민감도) 분석을 실시하고 이를 통하여 유역 단위의 중단기 수문전망을 정량적으로 평가하고 변화정도를 산정하였다.

해외 선진 연구사례를 통한 한국 내 수문전망에 적용 가능한 주요 연구내용 및 적용기술에 대하여 Table 6.1.1에 정리하였다.

Table 6.1.1 주요 연구내용 및 적용기술

주요 연구내용	상세 분석 내용	적용 기술(안)
한국 수문 변수 통계적 경향성 분석	• 비모수적 경향 특성 분석 • 변수간 비선형상관회귀특성 • 변수간탄성도(민감도) 분석 • 주기특성 분석	• STA-NPM • RA-GRNN/LP/NLP • EA-CEA/MEA • WT-DWT/CWT
한국 유역 단위 중단기 수문전망 (비시나리오 기반)	• 경향(추세) 예측 • 다변 시계열 예측 • 비선형 공간분포 예측	• RA-GRNN/CP/NCP • NTSF-BP/RBFN/PFNN • NSCA-SANN

3. 유역단위 시공간적 스케일 상세화

현재 통계적 상세화 기법을 이용한 다양한 패키지들이 개발되어 사용되고 있으며, 그 중 두 가지 패키지에 대하여 소개하고자 한다. 두 가지 패키지 모두 영국에서 개발되었다. 먼저 R.L. Wilby와 C.W. Dawson이 개발한 SDSM (Statistical DownScaling Model) 3.1은 A Consortium for the Application of Climate Impact Assessments(ACACIA)와 Canadian Climate Impacts Scenarios (CCIS) Project, Environment Agency of England and Wales에서 지원하고 있으며, 주요기능은 다음과 같다(Table 6.1.1 참조).

Table 6.1.2 SDSM 3.1의 주요기능 (Wilby, 2004)

품질관리 및 자료전송	자료의 시스템오류 보정, 결측치 보완, 이상치 보정
Downscaling 예측인자 선택	유저의 최적변수선정을 지원
모형검보정	dual simplex algorithm을 이용한 다중선형회귀식의 매개변수 계산
일기발생기 (Weather Generator)	NCEP re-analysis과정 모의 : 주어진 대기관측자료로부터 일단위 기상앙상블을 생성
자료분석	일련의 대기진단결과를 표현
그래픽분석	Compare Results Screen, Time Series Plot Screen
시나리오 생성	GCM모의자료를 이용하여 일단위 기상앙상블 생성

또한 UK Met Office에서 개발한 ENSEMBLES Downscaling Portal 패키지는 Hadley Center for Climate Prediction and Research이 주관기관으로 관리하고 있으며, 연구비지원은 European Commission에서 하고 있다. ENSEMBLES Downscaling Portal에서 소개하고 있는 예측인자와 상세화 기법은 다음과 같다(Table 6.1.2 참조).

Table 6.1.3 예측인자와 상세화기법(San-Martin, D et al., 2008)

예측인자	상세화 기법
▪ PCMDI CGCM3. Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, including 20th century (from 1951 to 2000) and scenarios A1B, B1 (daily data in pressure levels is only included for the periods 2046-2065 and 2081-2100) ▪ CERA MPI-ECHAM5, including 20th century data (1961-2000) and scenarios A1B, B1, and A2 (2001-2100). ▪ CNRM-CM3, including 20th century (1961-2000) and scenarios A1B, B1, and A2 (2001-2100).	▪ Regression or Transfer functions based on linear or nonlinear models ▪ Weather typing based on a pre-classification into a finite number of weather types obtained according to their synoptic similarity ▪ Weather Generator which simulates daily climate values based on the available monthly average predictins

4. 극한홍수량 전망 기술 개발

전지구모델이 생산하는 기후변화 시나리오가 극값 반영에 한계가 있기 때문에 기후변화가 극한 수문량에 미치는 영향을 분석하는 연구는 미비한 실정이다. Nguyen et al. (2007)은 scaling 기법을 바탕으로 전지구모델에서 생성된 일 단위 극한 강우량에서 시단위 극한 강우량을 추정한 바 있다. 이와 비슷한 연구가 Nguyen et al. (2009, 2010)와 Nguyen and Nguyen (2010) 등에서 진행되었다.

유럽에서는 STARDEX(STAtistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions)라는 공동 프로젝트를 통해 극한 수문량 시나리오 생성을 위한 통계적, 역학적 상세화 기법에 대한 각국의 연구 결과를 공유하고 있다(Fig.). 이 프로젝트에서는 각국의 연구 결과의 비교를 통해 가장 안정적인 기법을 확인하고, 유럽의 시범 지역에 대해 기후변화에 따른 극한 강우 발생 시나리오를 생산할 목적을 갖고 있다.



Fig. 6.1.1 STARDEX 홈페이지 첫 화면

5. 극한 가뭄으로 인한 수자원 전망

국내에서는 가뭄모니터링시스템과 가뭄정보시스템을 운영 중이거나 구축 중에 있는 것을 알 수 있었다. 가뭄정보시스템은 지속적인 가뭄 모니터링을 지원하기 위한 도구로 전문가에게는 가뭄과 관련된 의사결정을 지원하고 일반인들에게는 가뭄과 관련된 다양한 정보를 제공하기 위한 목적으로 개발된 매우 중요한 시스템이지만 기후변화로 인한 이상기후의 위험요소를 줄이기 위한 가뭄예측 및 전망시스템은 미비한 상태이다. 따라서, 비교적 가뭄과 관련한 연구가 앞서 있는 미국과 기타 지역의 가뭄정보 및 전망시스템을 조사하였다. 또한, 본 연구에서 시도한 가뭄의 경향성 및 주기성 분석과 가뭄빈도해석 방법을 조사하였다.

가. 가뭄정보시스템

(1) 미국 국립가뭄경감센터(http://drought.unl.edu/dm/monitor.html)

미국의 국립가뭄경감센터에서는 1995년 이후 부터 가뭄모니터링 의사결정시스템(Drought Monitoring - Decision Support System: DM-DSS)을 통해 가뭄의 전개과정 및 심도 등의 가뭄정보를 미국 전역에 걸쳐 웹상에서 제공하고 있다. 가뭄모니터링 의사결정시스템은 연방정부, 특히 국립해양기상청(National Oceanic and Atmospheric Administration)에 속한 국립기상자료센터(National Climatic Data Center)를 비롯하여, 미농무성(United States Department of Agriculture)과 네브라스카 주립대학교(The University of Nebraska-Lincoln)에 위치하고 있는 국립가뭄경감센터(National Drought Mitigation Center)와 함께 자료공유 및 해석을 통한 전국가뭄상황을 모니터링 하는데 초점을 두며 기관간의 공동연구를 통해 운영되고 있다.

또한, 국립가뭄경감센터에서 제공되고 있는 가뭄모니터링 지도는 미국전역을 행정구역 혹은 수문학적 대유역으로 구분하여 지역에 따라 짧게는 단기적인 농업가뭄, 길게는 장기적인 수문가뭄까지 세부적으로 가뭄정보를 제공하기도 한다.



Fig. 6.1.2 NDMC 메인페이지

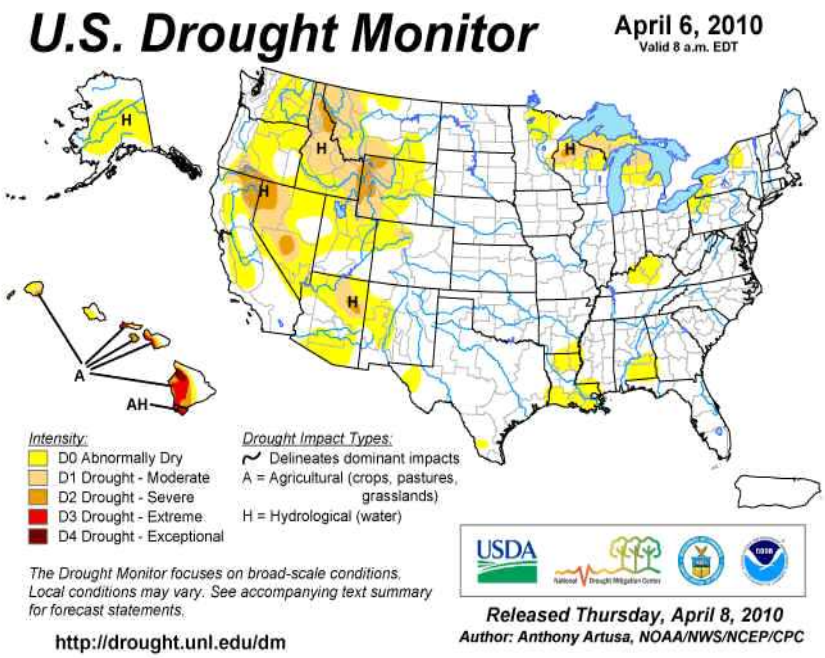


Fig. 6.1.3 NDMC 가뭄모니터링시스템 메인화면

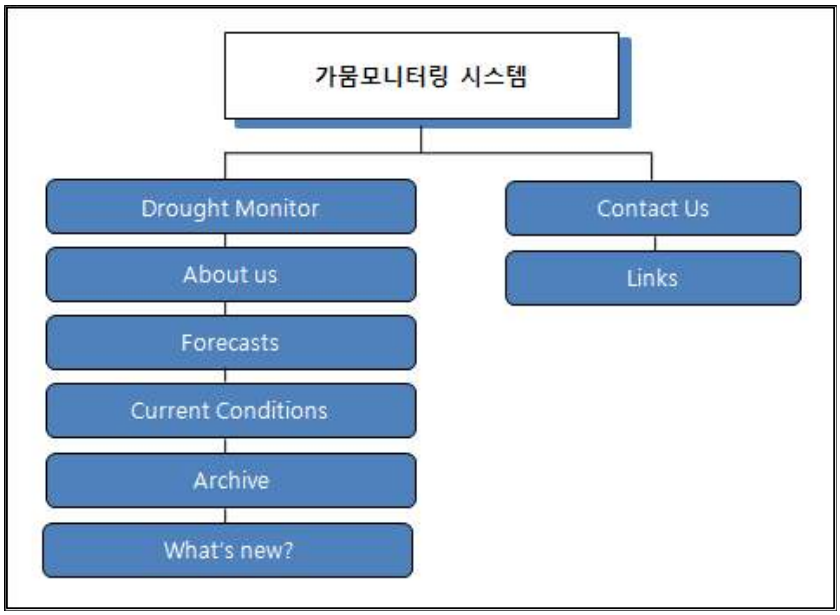


Fig. 6.1.4 NDMC 가뭄모니터링시스템 구성도

(2) 미국 국립해양기상청(National Oceanic Atmospheric Administration)

계속적인 기후변화로 인한 기상학적 변동과 이상기후를 통한 수문학적 영향이 중요시됨에 따라 가뭄모니터링만으로 향후 발생할 수 있는 위험요소를 줄일 수 없기 때문에 가뭄의 예측을 통한 가뭄조기경보시스템의 도입이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

미국국립해양기상청에서 개발한 계절가뭄전망 (Seasonal Drought Outlook)의 단기가뭄 그리고 장기가뭄을 동시에 예측할 수 있는 기능을 가진 도구가 가뭄예측의 실례를 보여주고 있다.

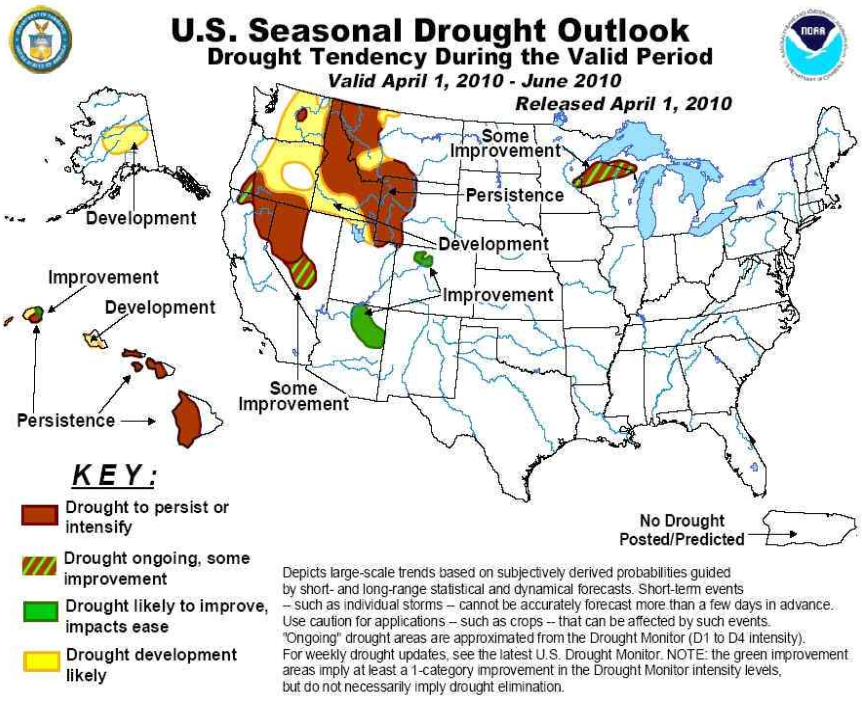


Fig. 6.1.5 NOAA 가뭄전망시스템 메인화면

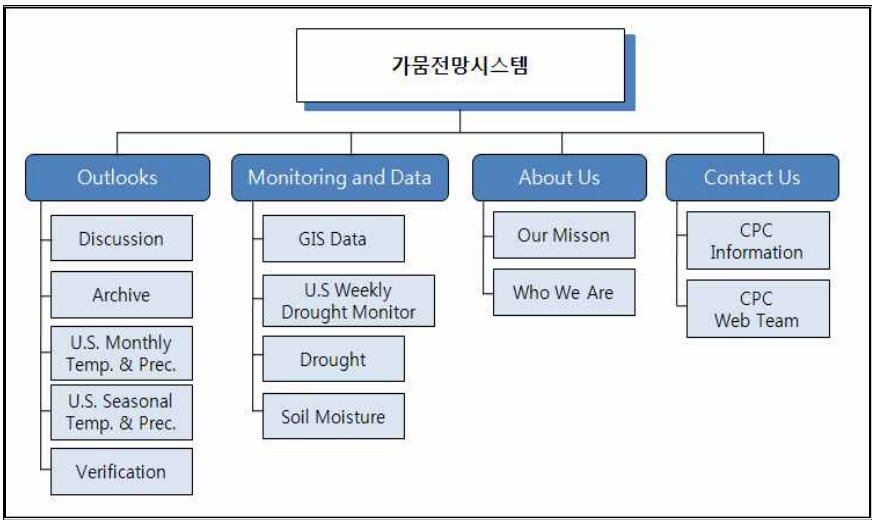


Fig. 6.1.6 NOAA 가뭄전망시스템 구성도

(3) SADM(Southwest Asia Drought Monitoring)

SADM(http://dms.iwmi.org/index.asp)은 원격 감지 데이터를 기반으로 진화한 가뭄 모니터링 도구이다. 이것은 가뭄의 발병, 진행 등을 적시에 제공하는 것을 목표로 하는 실시간 가뭄모니터링 및 보고시스템으로서 현재 아프가니스탄, 파기스탄과 인도의 서쪽 부분을 다루고 있다.

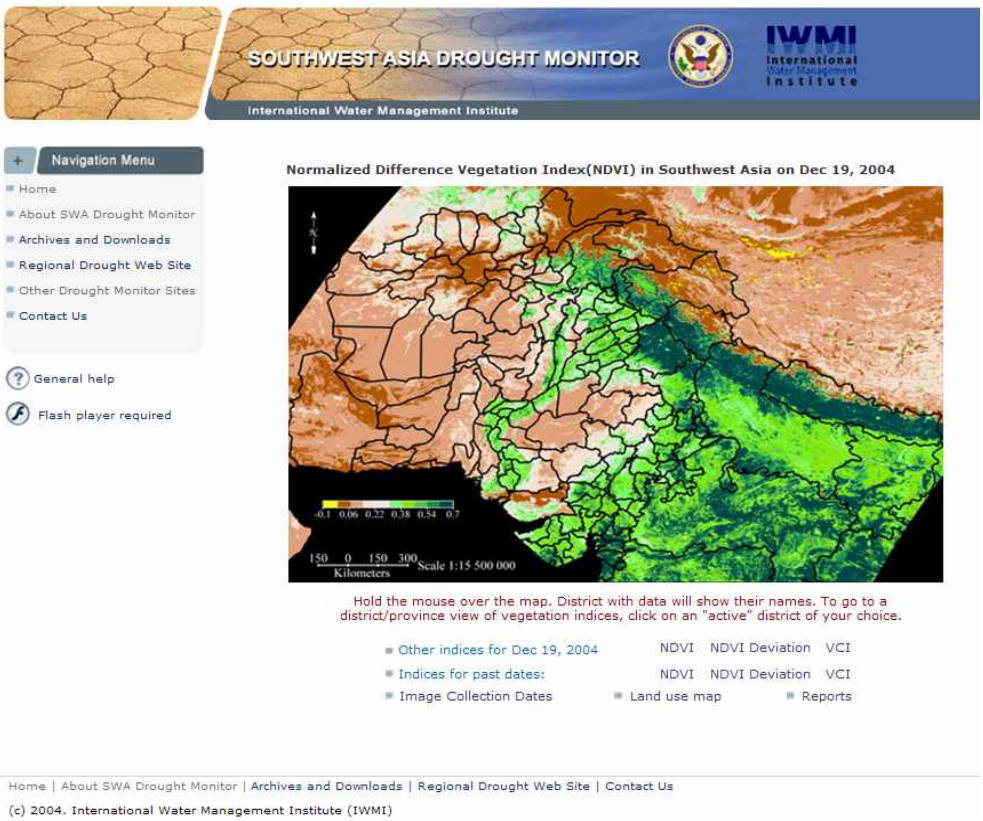


Fig. 6.1.7 SADM 가뭄모니터링시스템 메인화면



Fig. 6.1.8 SADM 가뭄모니터링시스템 구성도

나. 경향성 및 주기성 분석 연구

국내 연구사례로는 권현한과 문영일(2005a)은 Wavelet transform 분석법을 소개하고 수문시계열에 대한 적용성을 평가하였으며 권현한과 문영일(2005b)은 ENSO(El Nino/La Nina-Southern Oscillation)지수와 PDSI(Palmer Drought Severity Index)의 저빈도 상관성분석을 실시하였고 이를 위해 Cross Wavelet transform과 MSSA(Multi-Channel Singular Spectrum Analysis)을 수행하였다. 김상단(2004)는 미국 California의 강수량 변동성을 Wavelet transform을 이용하여 분석하였으며 윤영일 등(1997)은 지역별로 계속시간별 가뭄지수를 산정하여 기존에 발생했던 주요 가뭄사상을 평가하였다. 김창주 등(2011)은 기후변화로 인해 미래에 나타날 수 있는 가뭄의 경향성 및 주기성을 분석하기 위하여 한반도의 유역별 대표 기상관측 지점을 대상으로 SPI(6- months)를 이용한 Mann-kendall 검정 및 Wavelet transform 분석을 실시하였다. 이주헌 등 (2012)은 관측자료를 통해 산정된 SPI(3, 6, 12- months)와 PDSI를 이용하여 유역별 Mann-kendall 검정 및 Wavelet transform 분석을 실시하였다. 계절별 경향성 분석결과 봄과 겨울철에는 가뭄이 심화되는 경향을 보였으며 주기성 분석결과에서는 4-6년의 주기성을 나타내었다.

국외 연구사례의 경우, Torrence and Compo (1998)은 Wavelet transform 분석법을 소개하고, 엘니뇨와 ENSO 시계열을 이용하여 적용방법을 설명하였으며 Grinsted et al. (2004)은 다양한 시계열에 대하여 경향성과 주기성을 분석함에 있어 Cross Wavelet transform(XWT)와 Wavelet Coherence (WTC) 분석법을 적용하여 그 적용성을 입증하였다. 이렇듯 가뭄을 해석하기 위하여 수문자료와 가뭄지수 등 다양한 자료를 이용한 경향성 및 주기성을 분석을 실시하고 있다(이주헌과 김창주, 2012).

다. 가뭄빈도해석 연구

최근 들어, 미래가뭄의 공간적인 특성을 분석하기 위해 SAD(Severity-Area-Duration), SAF(Severity-Area-Frequency), SDF(Severity-Duration-Frequency) 등의 통계학적 가뭄해석방법을 적용하여 가뭄의 특성을 분석하는 연구가 진행되고 있다.

SAD 방법은 DAD(Depth-Area-Duration)에서 우량깊이(Depth)를 적절한 가뭄지수로 대체하여 가뭄사상을 분석하는 도구로써 김대하와 유철상(2006)은 가뭄심도에 따른 영향면적과 지속기간을 고려하여 SAD 곡선을 제시하였다. 김호성 등(2010)은 현재 및 과거의 SAD 곡선을 비교하여 현재의 수자원 공급 시스템에 대한 기후변화 취약성 평가가 시급함을 제시하였다.

SAF 방법은 가뭄의 재현특성(recurrent characteristics) 및 영향면적을 산정할 수 있는 도구(Heriques and Santos, 1999;Chang et al, 2006)로써 Loukas et al(2008)은 CGCM2를 통해 산정된 SPI(1-, 3-, 6-, 9-, 12- months)를 이용하여 SAF를 유도하고 기후변화에 따른 심도변화를 연구하였다. Akhtari et al(2008)은 SPI(12- months)를 이용한 SAF curve를 유도하여 이란의 Razavi와 남부 호라산(South Khorasan)지역의 가뭄특성을 분석하였다.

SDF 방법은 가뭄사상에 대한 재현기간을 추정하는 것이 가능한 도구(유철상과 김대하, 2006)로써 이주헌과 김창주(2011)는 가뭄빈도해석을 통한 주요 기상관측소의 SDF(severity-duration-frequency) 곡선을 유도하여 과거에 발생했던 가뭄사상의 빈도 및 지속기간을 정량적으로 평가하였다. 김대하와 유철상(2006)은 SPI와 구형펄스 모형(rectangular pulse model)을 이용하여 유도된 SDF 곡선을 적용하여 한반도의 가뭄분석을 수행하고, 이를 통해 남한전체 가뭄심도의 공간분포를 특성화하였다.

6. 기후변화를 고려한 비정상성 수문모형 해석

본 연구에서 조사된 국외 연구문헌은 극치수문량 추세검정 및 평가와 관련된 연구, 극치분포의 매개변수 추정기법, 비정상성 빈도해석기법 등으로 나눌 수 있다. Strupczewski et al.(2001)은 비정상성 홍수빈도해석을 위하여 56개 모형을 구성하고 Akaike 정보판정법(Akaike Information Criterion, AIC)을 사용하여 최적의 비정상성 빈도해석모형을 선정하였으며, 최우추정법(Maximum Likelihood Estimation, MLE)을 적용하여 매개변수를 추정한 바 있다. Cunderlik and Burn(2003)은 지역 홍수빈도해석을 위하여 2차 비정상성 접근법을 제안하였다. 이 연구에서는 비정상성 분위수(quantile) 함수를 위치 매개변수와 축척 매개변수로 구성되며 시간에 대해서 종속적인 지점성분과 2차 비정상성 가정 하에서 시간에 대해서 독립적으로 고려될 수 있는 지역성분으로 분리하였다. 또한 비정상성 자료의 위치 및 축척매개변수를 추정함에 있어서 모형의 성능을 평가하기 위하여 Monte-Carlo 모의실험을 수행하였다. Renard et al.(2006)은 몇 가지 확률모형과 네 가지 극치분포형(지수분포형, Generalized Pareto (GP) 분포형, Gumbel 분포형 그리고 Generalized Extreme Value (GEV) 분포형)을 고려하여 Bayesian 기법을 적용하고자 하였다. 이 연구에서는 분위수에 대한 지역적 사전정보를 사용함으로써 사전분포을 특성화하고, 사후분포는 확률모형을 정량화함으로써 보다 현실적인 빈도해석모형을 도출할 수 있으며, 그러한 이유로 Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 방법이 요구된다고 하였다. Blasone et al.(2008)은 MCMC 기법을 변형한 Shuffled Complex Evolution Metropolis (SCEM-UA)를 적용하여 Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) 기법을 개선하고자 하였다. GLUE 기법은 Bayesian 추정을 결합한 Monte Carlo 분석시 발생할 수 있는 불확실성을 예측하기 위하여 개발된 기법이다. Sugahara et al.(2009)은 Brazil Sao Paulo의 1933-2005년까지 일강수량 극치 빈도해석을 위하여 Peaks-Over-Threshold (POT)와 GP 분포형을 적용하였으며, 비모수적 추세검정을 위하여 Mann-Kendall 검정을 수행한 바 있다. Villarini et al.(2009)은 도시지역에서의 홍수빈도해석은 토지이용변화와 도시빗물시설의 개발과 관련된 연 최대기록의 비정상성에 의해 복잡해진다고 하였다. 이 연구에서 제안한 홍수빈도해석기법은 비정상성 조건 하에서 시계열 자료를 모형화할 수 있는 Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape parameters (GAMLSS)에 기초를 두어 발전되어 왔다. North Carolina에 위치한 Charlotte의 도시화된 유역인 Little Sugar Creek의 연 최대정상방출기록에 적용시킨 결과, 선택된 모수적 분포의 매개변수를 모형화함으로써 연 최대유량의 평균과 분산변화를 묘사할 수 있다고 하였다.

7. 기후변화에 따른 한국형 수문순환 평가

국외에서는 기후변화에 따른 수자원영향평가를 위하여 다양한 수문순환모형을 이용하고 있는 것으로 조사되었으며, 이를 살펴보면 다음과 같다. Jasper et al. (2004)이 WaSiM-ETH 모형을, Booij (2005), Bergström et al. (2001), A1Bdo et al. (2009)는 HBV 모형을, Koster et al. (2005)는 대상유역에 적합한 분포형 모형을 USAFLOW, TANAFLOW로 개발 및 명명하여 수자원영향평가를 실시하였다. 또한 Gületal (2010)가 MIKESHE를, Asokan and Dutta (2008)이 DHM을 이용하여 결과를 도출하였다. 조사한 해외기술들은 대부분은 기후변화에 따른 수문순환 영향 평가시 수문요소 중 주로 유출량과 증발산량의 변화를 월별, 연별로 분석하였다. 하지만 현재 기후변화 평가를 위해 미래 식생, 토지이용을 예측하여 고려한 경우는 전무한 실정이다.

8. 기후변화에 따른 물수급 전망

미국 서부 지역의 경우는 기후변화의 불확실성에 따른 지역적 유출 특성 및 물수급 전망을 분석하는 연구가 활발히 수행중에 있다. 예를 들어, 캘리포니아 새크라멘토 유역에선 물수급 모형 WEAP의 적용성을 검토하고, 여러 기후변화 시나리오를 통한 미래 물수급 전망을 예측하였으며(Purkey et. al., 2008; Yates et. al., 2009), WEAP을 사용하여 새크라멘토 유역에 GCM을 사용한 4개의 기후변화 유출 시나리오를 적용한 후 각 시나리오별 물 부족량을 산정하고 전망기간(2005~2099)에 대한 물수급을 전망하고, 기후변화에 따라 농업수요 수요량이 증가하므로 이에 대한 대응전략으로 물 수요량의 감소 방안을 제시한 후 물수급 모형에 적용하는(Purkey et. al., 2008) 연구를 수행하였다. 또한, Vicuna et. al.(2007)은 CalSim II 모형을 개선하여 2개의 배출 시나리오와 2개의 CGM을 조합한 4개의 기후변화 시나리오를 적용하여 21세기 캘리포니아 유역의 물수급 전망을 예측하였으며, 저수지 저수용량 및 물 수요 충족량으로 부터 물 공급 신뢰도를 산정하여 결과를 표출하였다. Azuara et. al.(2008)은 공학적 경제성 최적화 모형인 CALVIN을 사용하여 캘리포니아 유역의 목표연도 2050년에 대한 물 부족량과 수자원 공급 시스템 운영 비용을 전망하였으며, Christensen et. al.(2004)은 적용 시나리오에 대한 물배분량의 변화와 물부족 확률을 신뢰도 지수로 표현하여 나타내고 수력발전소의 비발전방류량과 그 확률을 전망기간별로 제시하여 기후변화의 영향을 정량화하였다.

텍사스 주는 최근 가용 수자원 모델링(WAM, Water-Availability Modeling) 시스템을 개발하여 물 관리를 수행하고 있으며, WAM은 텍사스 지역의 물수급 분석을 위한 모형인 WRAP(Water-Rights Analysis Package) 모형과 23개 강 유역의 구축된 자료들로 구성되어 있다(Wurbs et. al., 2005). Wurbs et. al.(2005)은 WRAP 프로그램에 기후변화 시나리오를 적용하여 브라조 강 유역의 저수용량 및 물공급 신뢰도를 산정하고 그 변화를 분석하였다.

유럽을 살펴보면, 최근 기후변화에 의해 빈번해지는 극치 홍수 및 가뭄 사상들에 대한 대비로서 미래 수자원 시스템의 대응책에 대한 연구가 수행되기 시작하였다(McGuffile et. al., 1999). 영국에서는 Mospa 모형에 기후변화 시나리오를 적용하여 IRZ(The north-west England Integrated Resource Zone)의 미래 가용 수자원량을 공급

원 별로 산정한 후 현재의 사용량과의 비교를 통해 미래 물수급 전망을 수행하였고(Fowler et. al., 2007),

호주 윌슨스강 유역의 Rous County 지역에서는 통합 수자원 모형인 IQQM에 가상의 물 수요 및 공급 시나리오를 적용하여 미래 물수급 전망을 분석하였으며(Kirono et. al., 2007), 일본 도쿄의 톤강 유역에서는 CROPWAT 모형에 12개의 가상 기후변화 시나리오를 사용하여 각 시나리오별 물공급 비율을 산정한 후 가뭄 지수를 산정하여 미래 물수급 전망을 비교하였다(Islam et. al., 2005).

9. 기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 정량화

수문전망 과정에서 발생하는 불확실성을 정량화하고 각 과정에서 발생하는 요인별로 분해하는 기법에 관한 문헌 조사를 통해 비교, 분석하였다. 수문학에서는 강우-유출 모형에서 다루어진 연구 사례가 있는데 수문 전망과정의 한 단계인 강우-유출 모형에서 강수량에 불확실성을 있으므로 강우-유출 모형에서 나온 유출량에도 불확실성이 발생할 것이다. 따라서 강우-유출 모형의 전체 불확실성을 모형 입력값의 불확실성과 모형의 불확실성으로 나눌 수 있다(Krzysztofowicz 1999). 또한 강우-유출 모형에서 모형 자체에 있는 모수의 불확실성도 발생할 수 있다(Todini 2007). 이러한 불확실성에 사전 확률 분포를 가정하면 베이즈 정리에 의해 사후 확률 분포가 계산되어 지면 정확한 사후 확률 분포가 나오지 않는 경우 Monte Carlo Markov Chain을 이용하여 계산할 수 있다. 이러한 사후 확률 분포로 불확실성을 정량화 할 수 있다.

단계별로 이루어진 모형에서의 불확실성 정량화 기법은 수문학 분야가 아닌 다른 분야에서 조사하였다. 교외배수시설 모형을 다루는 연구에서 분산 분해 방법을 통해서 불확실성을 정량화 하였다(Freni 2010). 이 연구에서는 하수구 시설, 폐수처리장치, 물수역으로 이루어지는 단계적 구조에서 전체의 불확실성과 단계별로 나타나는 불확실성을 분산 분해를 통해서 구하였다.

또한 evidence theory(Dempster-Shafer Theory)를 이용한 불확실성 정량화 기법이 개발되었다. 이 방법에서는 관심있는 모형의 입력변수와 모형의 모수에 대한 확실한 정보의 양을 나타내는 측도인 belief와 입력변수와 모수에 대한 가능한 정보의 양을 나타내는 측도인 plausibility를 정의하며 두 측도의 차이를 이용하여 불확실성을 정의한다(Agarwal et. al.).

10. 기후변화에 의한 수문변동의 영향평가 및 시설물 영향분석

본 연구에서는 지진하중에 대한 안정성을 위해 신뢰성 해석에 기반을 두고 개발된 취약도 곡선을 수위하중에 적용하여 수위에 따른 수공구조물의 거동에 적용시켰다. 거시적인 관점에서 예측할 수 있었던 결과와 취약도 곡선에서 표현되는 결과가 일치함으로 취약도 곡선의 수위하중에 대한 수공구조물 파괴 거동 예측의 타당성을 확인하였다. 이는 기존 국내외 연구에서 주로 지진에 대한 위험도 평가에 집중되어있는 확률기반 취약도 분석을 수공구조물의 위험도 평가에 적용시킨데 의의를 가진다. 또한, 콘크리트 중력식 댐의 경우, 한강 수계의 현황을 따라 팔당댐, 충주댐, 청평댐, 의암댐, 춘천댐, 화천댐을 규모별로 소규모(의암댐, 팔당댐), 중규모(청평댐, 춘천댐), 대규모(화천댐, 충주댐)로 그룹화 하였으며, 분석에 대한 신뢰성을 높이기 위해 모델링에 사용한 물성치는 실제 한강유역의 물성치 값을 사용하였다. 이는 기존 국외 연구와 차별화되어, 실제 국내 환경을 고려하여 기존 국내 수공구조물에 적용 가능한 위험도 평가 모델 제안 및 검증 등을 수행하였다는데 의의를 가진다. 끝으로 미국의 HAZUS, 일본의 DIS, 대만의 TELES 등 지진발생 시 취약도 곡선을 기반으로 지진피해를 평가하고 초기 손실을 추정하여 피해단계를 지도로 표시하거나 수치로 나타내는 프로그램의 개발을 수위에 따른 수공구조물의 거동에 적용함으로서, 추후 이상 호우를 확률적인 과정을 통해 간단한 수위로 환산하고 이를 입력치로 하여 구조물의 거동을 예측, 결과로 피해 비용 산출까지 가능한 통합 수공 구조물 관리 프로그램의 개발 등의 연구에 적용 가능할 것으로 기대한다.

11. 기후변화를 대비한 법제도 개선 및 수자원정책 제시

본 연구에서는 국제적인 동향을 파악하기 위하여 선진 외국에서 논의된 기후변화 대비 물관리 적응전략과 정책을 체계적으로 분석하고 정리하였다. 특히 기후변화 적응과 관련한 EU의 국가별 적응전략 수립 내용, 영국의 국가계획과 조직개편, 호주의 기후변화 적응 사례, 미국 캘리포니아주의 물계획 수립, 선진국의 대개도국 원조공여 방향성 등은 중요한 해외정보수집의 사례들이다.

EU의 산하기관인 the European Environment Agency(EEA)는 유럽 국가들의 기후변화 적응전략의 수립을 유도해왔다. 2009년에 수립된 EU의 백서 “Adapting to climate change: Towards a European framework for action"에서는 EU 차원에서 기후변화적응 전략을 수립하는 이유를 언급하고 있다. EU, 영국, 미국의 사례를 소개하면 아래와 같다.

영국은 세계 최초로 기후변화 적응을 고려하여 법제정에 반영한 나라이다. 영국에는 기후변화가 명시된 법률은 UK Public General Acts로는 「Climate Change Act 2008」과 「Climate Change and Sustainable Energy Act 2006」의 2가지가 있고, UK Statutory Instruments에 해당하는 법령 39개, Scottish Statutory Instruments에 해당하는 법령 7개, Acts of the Scottish Parliament에 해당하는 1개 법령이 있다.

미국은 1990년 세계변화에 대한 연구법(Global Change Research Act of 1990)을 제정하고 백악관의 대통령 직속 과학자문위원회를 통해 세계변화연구계획(Global Change Research Program)을 시행해 왔다. GCRP에서는 5년 주기의 기후변화연구전략(Climate Change Research Initiative)을 수립하여 기후의 불확실성과 중대한 변화에 대한 과학적 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 이러한 자료들을 정책 및 법학 전문가들의 시각으로 분석하고 방향을 제시하였다는 점에서 의미가 있다. 기존의 유사 연구는 대부분이 기술자들의 시각에서 정책과 제도를 접근하였기 때문이다.

12. 기후변화가 물관리에 미치는 사회·경제적 영향평가

어떠한 자연 현상에 대한 정확한 분석을 위해서는 가장 우선적으로 정확한 자료의 획득이 선행되어야 할 것이다. 미국에서는 약 100여년 동안의 홍수피해액 자료를 이용하여 이에 대한 자료의 일관성 등의 검증작업을 실시하였으며, 피해액 자료들의 특성에 대한 분석을 실시하였다. 특히 홍수피해액 자료 추정 시 발생하는 오차에 대한 특성을 분석한 점이 주목된다. 이러한 결과는 홍수 피해비용분석을 위한 시·공간적 기준설정에 참조되어야 할 것으로 판단된다. 또한 향후 우리나라의 홍수피해 자료에 대한 검증작업에 유용한 지침서가 될 것으로 기대된다.

가뭄의 경우는 가뭄피해가 어떤 기준으로 어느 지역으로 국한되느냐에 따라서 피해액 산정의 결과가 매우 달라진다. 피해가 천천히 진행되며 국지적인 가뭄의 특성으로 인함인데 이로 인해 가뭄의 피해액 추정을 위한 연구는 농업에 집중되어왔다. Ya Ding 외(2010)의 연구는 지금까지 연구되었던 각각의 가뭄의 연구 분야를 통합하여 기준의 골자를 제시하였다는 점에서 앞으로의 가뭄피해추정의 방향성에 영향을 미칠 것으로 기대된다. 또한, 기존의 경제전반의 공급측면만을 고려한 산업연관분석을 업그레이드시켜 수자원-경제모형이라는 수요·공급측면을 모두 고려한 통합적 모형을 제시한 후쿠이시 유키오(2010)의 연구는 수자원을 통한 산업 전반의 공급측면뿐만이 아니라 수요 측면까지 고려한 전 통합적 산업 경제적 파급효과를 파악할 수 있을 것이다. 아울러 이 분야를 넘어 수요·공급부문에 재화요소 투입을 통한 경제적 파급효과를 파악하는데 큰 도움을 될 것이라 판단된다. 2가지 연구를 제시한다.

- Flood Damage in the United States, 1926-2000 ;
  A Reanalysis of National Weather Service Estimates

다양한 홍수조절관리 노력에도 불구하고 미국의 홍수피해액은 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 홍수와 관련된 피해비용과 취약성의 정확한 자료가 필요다. 그러나 불행하게도 정책 평가, 과학적인 분석 및 재해저감 계획 등을 위해 필요한 자세한 과거 홍수피해 기록들의 취득은 매우 어려운 실정이다.

본 연구에서는 미국 국립기상청(NWS, National Weather Service)의 1925-2000년 사이의 홍수피해자료를 재분석하였다. NWS는 미국 전역에 걸쳐서 장기간의 홍수 피해자료를 보유하고 있는 유일한 기관이며, 이러한 자료는 빙설과 강우로 인한 물리적인 직접 피해액 자료이다. NWS는 홍수 직후 취합된 다양한 자료로부터 홍수 피해액을 산정하고, 실제 지출을 통해 이를 검증한다. 따라서 본연구의 주요 목적은 홍수 피해자료들의 질적 향상을 위해 NWS 홍수피해 추정액의 범위, 정확도 및 일관성을 조사하고 이들의 적합한 사용법과 해석법에 대한 권장사항을 제공하고자 한다.

이 보고서는 다음의 3종류의 자표를 이용하였으며, 이러한 자료는 www.flooddamagedata.org에서 취득할 수 있다.

- 미국의 총 홍수피해액(1926-1979, 1983-2000; 회계연도)
- 각 주(州)의 홍수피해액(1955-1979; 역년(calendar year), 1983-2000; 회계 연도)
- 유역별 홍수피해액(1933-1975; 역년(calendar year))

본 연구를 통해 1976-1982년을 제외한 1934-2000년까지의 NWS에서 수집 처리된 홍수피해자료가 적합한 일관성을 갖음을 알 수 있었으며, NWS와 여러 기관들로부터 획득된 자료로부터 1976-1979년 사이의 각 주(州)별 및 국가 홍수피해액을 복원 할 수 있었다. 그러나 1980-1982년 사이의 수집된 일부자료는 큰 오차를 포함하고 있어 재분석과정에서 제외하였다.

피해액 추정의 정확도 평가 결과 다음의 사항들을 도출할 수 있었다.

(1) 대규모 홍수구역 내에서 소규모 홍수나 관할 지역에 대한 개별적인 홍수피해액은 매우 부정확한 경향을 나타냈다. 주(州)에서의 홍수피해액이 5,000만 $이하일 경우 NWS나 다른 기관들에 의해 추정된 값들과 대체적으로 불일치했다.

(2) 피해액의 집적(Aggregation)도가 높아질수록 홍수피해액의 정확도는 높아진다. 주(州)에서의 홍수피해액이 50,000만 $이상일 경우 NWS나 다른 기관들로부터 추정된 피해액과의 불일치도는 상대적으로 낮다(40% 이하). 가장 큰 우려를 불러일으키는 대규모 홍수들은 총 홍수피해의 큰 부분을 차지하기 때문에, 연간 주요피해에 대한 기상청과 주(州)의 추정액은 상대적으로 비슷한 결과를 보였다.

(3) NWS 자료 중 중규모 피해액을 일으키는 홍수는 때때로 누락되거나 과소 또는 과대 추정된다. 주(州)의 요청에 따라 5,000만 $의 누락된 NWS의 피해액들이 발견되었다.

요컨대, NWS의 홍수 피해는 실제 비용과 정확하게 일치하지 않을뿐더러 홍수로 인해 발생 가능한 모든 손실을 포함하지 못하고 있다. 다만 공공시설물, 작물 및 부동산에 대한 물리적인 직접 피해의 개략적인 추정값이다. 홍수사상 각각의 피해액은 대체로 부정확하지만 많은 사상들의 피해액이 합해지는 경우에는 오차가 줄어드는 것으로 나타났다.

국가차원에서, 이러한 사실들로부터 많은 홍수 사상들의 홍수피해액의 합인 연 총 피해액은 적절한 정확도를 나타낼 수 있음을 의미한다. 반면 주(州) 단위의 연 피해액의 사용은 유의해야 할 것이다. 대부분의 주에서는 매년 홍수피해가 발생하지 않기 때문에 피해의 빈도 및 정도는 반드시 고려되어야 할 것이다.

집적(Aggregation)은 피해액 오차를 줄이는 열쇠가 된다. 주(州)에서의 피해액과 집적된 피해액을 비교하기 위하여 다년간의 피해액을 집적하고 합을 비교하였으며, 년도별 비교를 위하여 여러 주(州)의 각 년도별 피해액을 집적하였다. 그러나 비록 높은 집적도의 피해액의 경우에도 추정오차에 따른 다양한 변동성을 유의하여야 하며, 그에 따라 결과를 해석하여야 한다.

재분석된 NWS 피해자료의 적절한 사용은 연구 또는 의사결정자들의 미국에서의 홍수피해 특성 변화양상의 이해를 돕는데 유용한 도구가 될 것이며, 재분석된 자료의 사용자들은 다음의 사항들을 유의하여야 한다.

· 시간에 따른 홍수 피해액을 비교하기 위해서는 인구, 생활정도 및 발전정도를 고려하여야 한다.

· 지리적인 지역차이를 비교하기 위해서는 연구 기간의 극치 기상 발생과 인구차이를 고려하여 한다.

· 각 사상별 개별적인 홍수피해액의 사용은 큰 오차를 포함할 수 있음을 유념하여야 하며, 개별적인 홍수사상의 비교를 위해서는 명목수준(nominal level) 또는 서열수준(ordinal level)을 이용할 것을 추천한다.

· 각 기관마다 “flood"와 "flood damage"를 약간 다르게 정의하므로, 자료의 집적 또는 적용을 위해서는 이를 꼭 확인하여야 한다.

NWS 피해 자료의 특정 재해 완화도 측정을 위한 비용-효율 평가나 홍수재해보험의 할증률 산정 등의 중대한 결정의 기초자료로서의 활용은 매우 위험하다. 홍수 피해를 줄이기 위해 설계된 구체적인 완화 조치의 효과를 평가하기 위해서는 양질의 피해자료가 필요할 것이다.

- Ya Ding, Michael J. Hayes, and Melissa Widhalm, 2010;
  Measuring Economic Impact of Drought : A Review and DiscussionFlood Damage in the United States, 1926-2000 ;

정책 및 타당성의 경제성 평가 대한 분석은 대부분 비용-편익분석(Cost-benefit analysis)을 사용하여 총편익과 총비용을 비교한다. 그러나 가뭄의 경우, 이러한 경제성평가가 매우 어렵다 왜냐하면, 가뭄을 줄이기 위한 비용이 예상보다 클 수 있으며, 가뭄을 방지하기 위한 편익도 불확실할 뿐만 아니라 추정하기도 매우 어렵기 때문이다. 가뭄감소를 위한 정책(대안)의 편익이 가시적으로 나타난 가뭄피해비용으로만 식별될 수 있기 때문에 가뭄방지정책의 화폐적 편익을 이해하기 위해서는 가뭄의 경제적 영향정도를 설정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 가뭄 영향을 농업부문의 단편적인 접근이 아닌 경제 전 산업에 걸친 파급경로를 분석하고 이에 대한 경제적 평가가 이루어져야 함을 제시하고 있다. 농업뿐만 아니라 비농업부문의 피해, 그리고 가뭄으로 인해 발생하는 사업지장이나 실업과 같은 2차적 영향 및 수질악화, 수생태계파괴와 같은 환경적 영향까지 통합하여 경제 전체적인 관점에서 가뭄의 경제적 파급효과를 추정해야 함을 제시하고 있다. 특히 미국, 호주, 캐나다, 멕시코 등 가뭄피해의 경제적 파급효과를 분석한 연구를 제시하여 주로 농업 국한되었던 가뭄피해의 연구 분야를 농업 외 연구까지 확장하여 연구결과를 제시하고 있다(Diersen et al, 2002; Diersen and Taylor, 2003; Kulshreshtha et al., 2003; Horridge et al., 2005)

본 연구에서는 가뭄의 범위를 National Academy of science(1999)와 Cochrane and Rose(1997)의 연구를 바탕으로 가뭄의 직접 및 간접적 영향까지 포함하고 있다. 특히, Cochrane and Rose(1997)의 연구에서는 직접비용의 정의를 물리적 피해뿐만이 아니라 조업중단과 실업까지 포함하였고, 간접적 요인은 경제를 구성하고 있는 산업들 간의 상호작용에 의한 파급효과로 재정의하였다.

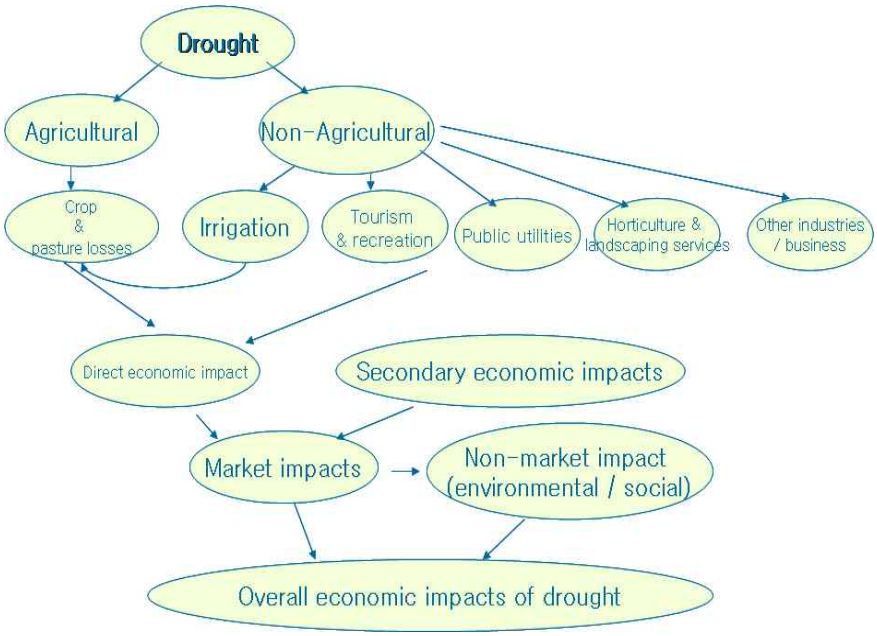


Fig. 6.1.9 가뭄의 통합적 경제적 파급효과

(1) 농업부문

농업부문에서 가뭄의 영향은 분명하게 식별할 수 있다. 가뭄으로 인해 작물이 죽거나 농지가 훼손되거나 초목이 말라죽는다. 그러나 가뭄으로 인한 손실은 생산측면에서만 발생하는 것이 아니라 생산 감소로 인한 농산물 가격 상승으로 가뭄생산측면에서만 발생하는 것이 아니라 생산 감소로 인한 농산물 가격 상승으로 가뭄의 피해가 소비자에게까지 전달된다. 이와 같이 농업부문의 피해만을 가뭄으로 인한 실제적인 영향이라고 판단할 수 없다. 그러므로 전체 가뭄의 영향뿐만이 아니라 그에 따른 이해관계자들에 대한 피해를 계량화하는 작업은 매우 중요하다.

(2)비농업부문

가뭄은 또한 비 농업적 부문에 영향을 미친다. 가뭄은 하천유량, 저수지, 습지, 지하수의 공급에 영향을 미친다. 또한, 관광, 레크리에이션, 공공사업, 원예 조경서비스에도 영향을 미치게 되며 산업과 기업의 물 소비에도 영향을 미친다.

관광과 오락부문에서 많은 활동들이 물과 관련되어있다. 가뭄의 영향은 하계 레크리에이션 활동에 영향을 주며 많은 숙박시설들은 물 사용에 대한 추가비용과 갈등을 유발한다. 이외에도 묘목과 조경 서비스 사업에 대해서도 가뭄으로 인한 큰 영향이 있다. 가뭄은 작물의 묘목에 대한 물 비용, 식물을 새로 식재하고 유지하는 비용을 증가시킨다.

(3) 2차 영향

2차적 영향은 가뭄뿐만 아니라 산업과 그 부문에 대한 상호작용의 결과로 나타난다. 하나의 산업부문의 산출물은 다른 산업부문에 투입물이 된다. 그러므로 가뭄으로 인해 경제적 영향은 상위 산업부터 하위산업까지 영향을 미치게 된다. 예를 들어 가뭄은 농산물 산업에 영향을 주며 이는 에탄올산업과 음식산업에 영향을 준다. 이러한 이유로 소비자는 높은 가격으로 인해 피해를 받게 된다. 즉, 상위·하위기업들이 상호 간접적인 영향을 주고 받게 된다.

외부충격에 대한 2차적 영향을 추정하는 모델은 input-Output모델이 있다. I-O모델

은 생산물의 산출이 다른 부문의 투입과 동일하며 모든 사용자들이 구입한다고 가정한다. I-O모델은 산업간의 투입계수가 고정적이며 가격영향이 없음을 가정하고 있다. 또한 IMPLAN(IMacpt analysis for PLANning, 고용창출모델)과 CGE(computable General Equilibrium, 일반균형모형)도 이차적 영향을 추정할 수 있는 모형이다.

(4) 가뭄의 비시장적 영향

가뭄의 비시장적 영향에는 경제, 환경, 사회 등의 영향이 있다. 가뭄과 산업의 범위에서 가뭄의 영향으로 2차적 영향으로부터 경제, 환경 사회의 경제적 영향을 도출해 낼 수 있다. 가뭄의 비시장적 영향은 가뭄으로 인한 거주지의 피해, 사람들의 불안, 가뭄으로 인한 사람의 건강피해, 스트레스 등이 있다. 이러한 후생손실은 가뭄으로 인한 후생손실이다. 이러한 후생변화를 계량화하기 위한 방법으로는 여행비용평가법, 헤도닉 가격기법, 조건부가치측정 등 비시장 가치측정의 방법론이 있다.

- 福石幸生 , 2010 :

経済学と水資源:日本におけるのシャドウ・プライスの 測定

KEO Discussion Paper NO.123

본 연구에서는 수자원의 이론과 경제학의 연결성을 매우 강조하고 경제주체들이 수자원을 사용하여 경제활동을 하고 있음을 불가결한 요소이자 연구의 핵심으로 제시하고 있다. 산업연관표를 이용하여 경제주체와 수자원의 통합을 시도하였다. 산업연관표에 수자원행과 열을 삽입하여 수자원-경제통합모형을 작성한 후 선형계획법을 이용하여 일본의 상황에 적용하여 일본의 물 수요함수와 각 산업에 대한 물의 잠재가격을 도출하였다.

수자원은 모든 경제재에 있어서 직•간접적으로 필요 불가결한 투입요소로 수자원의 이용가능 양과 그 품질은 생산의 산출, 경제성장에 큰 영향을 미치고 있으나 대부분의 경제학적 연구는 이를 무시하고 있다. 가뭄의 경제적 파급효과를 올바로 판단하기 위해서는 일반적인 선형계획모형이나 일반균형모형으로는 한계가 있으며 수자원과 경제를 통합한 수자원-경제모형을 실시해야 함을 주장하였다. 이를 위해 본 연구는 수자원과 경제모형을 통합한 물산업연관표를 작성하였다.

Table 6.1.4 물 산업연관표에 있어서의 투입계수 행렬 A의 구조

구 분	경제부문	물공급 부문
경제 부문	원/원	원/m^3
물공급 부문	m^3/원	m^3/m^3

왼쪽위는 원/원부문은 산업부문의 1 단위의 산출에 있어서 산업부문으로 부문의 수자원 투입을 나타낸다. 원/m^3 부문은 물공급 부문의 1 단위의 산출에 있어서 산업부문으로부터의 투입을 나타내며 m^3/원부문은 산업부문의 1 단위의 산출에 있어서의 물공급 부문으로부터의 투입을 나타낸다. 마지막으로 m^3/m^3부문은 물공급 부문의 1 단위의 산출에 있어서의 물공급 부문으로부터의 투입을 나타낸다.

이러한 계수는 선형성과 투입계수의 고정 등의 몇 가지 가정이 존재한다. 물산업연관표를 이용하기 위해서는 물공급부문이 강조되는데 산업 간의 물의 배분과 사용되는 가격

의 변화가 수자원의 국내물량의 변화를 통해서 영구적으로 균형을 맞추는 것을 가정한다. 투입계수행렬을 사용하여 레온티에프 역행열을 응용하는 것은 최종수요, 각 부문의 산출, 그리고 레온티에프 역행렬 사이의 관계는 대수적인 관계로 경제의 수요와 공급 관계를 나타낼 수 있으며 이를 이용하면 담수취수행렬을 도출할 수 있음을 제시하였다.

제 7 장 참고문헌

강부식, 이승춘, 권진욱 (2009). “정상성 및 동질성 테스트를 통한 한반도 수문자료의 기후변화 특성 분석.” **제35회 대한토목학회 정기 학술대회**, 대한토목학회, pp. 2534 -2537.

강부식, 홍일표 (2008). “수자원분야 국제협력 현황 및 전망.” **물과 미래**, 한국수자원학회, 제41권, 제2호, pp. 10-17.

강성호 (2006). “밀레니엄개발목표(MDGs)를 통한 동아시아 빈곤퇴치 전략과 지역협력 가능성.” **OUGHTOPIA**, 경희대학교인류사회재건연구원, 제21권, 제1호, pp. 107-118.

건설교통부 (1992). 한강수계치수기본계획: 하천정보기본계획.

건설교통부 (1995). 가뭄기록조사 보고서.

건설교통부 (2000). 1999년도 수자원 관리 기법 개발 연구조사 보고서-제1권 한국 확률강우량도 작성, pp. 29-72.

건설교통부 (2001). 수자원 장기종합 계획.

건설교통부 (2002a). 2001년 가뭄기록조사 보고서.

건설교통부 (2002b). 하천설계기준.

건설교통부 (2002c). 한강 하천정비기본계획(보완) (팔당댐~하구).

건설교통부 (2002d). 가뭄기록조사보고서.

건설교통부 (2002e). 2001 가뭄기록조사 보고서.

건설교통부 (2003). 댐시설기준.

건설교통부 (2004). 치수사업 경제성분석 방법연구.

건설교통부 (2005). 가뭄관리모니터링체계수립, pp. 74-114.

건설교통부 (2006a). 2006수자원장기종합계획.

건설교통부 (2006b). 가뭄관리정보링체계수립, pp. 228-301.

건설교통부 (2006c). 수자원장기종합계획 보고서(2006-2020).

건설교통부 (2006d). 수자원장기종합계획(2006~2020). 건설교통부, 한국수자원공사.

건설교통부 (2007). 가뭄정보시스템 시험운영-1차년도보고서, pp. 38-74.

건설교통부 (2010). 수자원 장기종합 계획.

건설부 (1985). 하천시설기준.

건설부 (1986). 하천개수사업의 투자효율 산정기준.

경민수, 김상단, 김보경, 김형수 (2007). “군집분석을 통한수문학적 가뭄의 가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기간 곡선의 작성.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제3B호, pp. 267-276.

경민수, 이용원, 김형수, 김병식 (2009). “기후변화가 서울지역의 기온 및 가뭄에 미치는 영향평가 : AR2 SRESA2 시나리오를 기반으로.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권, 제2B호, pp. 181-191.

고연우, 허준행, 김규호 (2000). “확률강우량 산정시 GEV분포형 및 Gumbel 분포형의 역전현상.” **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, 제3권, pp. 55-58.

과학기술부 (2007)a. 기후변화에 의한 수자원 영향평가 체계 구축. 수자원의 지속적 확보기술개발사업, 21세기 프론티어연구개발사업.

과학기술부 (2007b). 수자원 및 기술 가치 평가 시스템 구축.

교육과학기술부 (2010). 기후변화에 의한 국가 수자원 영향분석 및 평가체계 적용.

교육과학기술부 (2011). 기후변화에 의한 국가 수자원 영향 분석 및 평가 체계 적용. 3단계 최종보고서, 수자원의 지속적확보기술개발 사업단, 21세기 프론티어연구개발사업.

국리환경과학원 (2008). 지자체 기후변화 취약성 현황에 기초한 적응대책 수립 가이드라인 개발.

국립기상연구소 (1996). 국가 표준 기후변화 시나리오 생산을 위한 로드맵 구축.

국립기상연구소 (2008). 지구시스템모델 개발(I). pp. 469.

국립기상연구소 (2009). 기후변화 이해하기 - IPCC 4차 평가보고서 실부그룹 Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ기술요약보고서 표와 그림을 중심으로.

국립기상연구소 (2011a). 기후변화 예측기술 지원 및 활용연구(III).

국립기상연구소 (2011b). IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011.

국립환경과학원 (2008a). 지자체 기후변화 취약성 분석, 대응정

국립환경과학원 (2008b). 한국 스턴보고서 작성을 위한 기초연구.

국무조정실 (2008). 국가 기후변화 적응 종합계획.

국무조정실 기후변화대책기획단 (2008). 기후변화 종합기본계획.

국무총리실 국제개발협력위원회 (2010). 국제개발협력 선진화 방안.

國土交通省 (2008). 地球溫暖化に伴う氣候変化が 水災害に及ぼす影響について.

국토교통성 (2008). 害分野における地球溫暖化に伴う氣候変化への適応策のあり方につい.

국토연구원 (2000). 하천 유역 별 통합 물관리체계 연구.

국토연구원 (2005). 홍수피해특성 분석 및 홍수피해지표 개발에 관한 연구.

국토연구원 (2009). 기후변화에 대응한 지속가능한 국토관리 전략3 : 지역특성별 실천계획 수립 및 제도 개선방안.

국토해양부 (2007). 한강유역 물개발 평가연구.

국토해양부 (2008). 가뭄정보시스템(물공급 Guideline 중심으로) 보고서, pp. 11-128.

국토해양부 (2009a). 기후변화 대비 국가 물안보 확보방안(2차년도). 국토해양부.

국토해양부 (2009b). 기후변화 대비 국가 물안보 확보방안(2차년도). 국토해양부.

국토해양부 (2011). 수자원장기종합계획(2011~2020). 국토해양부, 한국수자원공사.

국회 법제실 (2007). 물관리의 문제와 개선방안.

국회예산정책처 (2010a). 2011년도 예산안 부처별 분석 Ⅰ [국토해양·농림수산식품·지식경제·기획재정].

국회예산정책처 (2010b). 2011년도 예산안 부처별 분석 Ⅱ [보건복지·여성·환경노동·교육과학기술·문화체육관광방송통신].

국회예산정책처 (2010c). 2011년도 예산안 부처별 분석 Ⅲ [국방·외교통상통일·행정안전·법제사법·정무·운영].

권영문, 김태웅 (2009). “이변량 강우 빈도해석을 이용한 서울지역 I-D-F 곡선 유도.” **대한토목학회논문집**,

대한토목학회, 제29권, 제2B호, pp. 144-162.

권율, 김한성, 박복영, 황주성, 홍수연 (2006). 우리나라 대외원조정책의 선진화 방안: 국제개발협력 패러다임의 변화와 한국 ODA의 개혁과제. 대외경제정책연구원, pp. 150-154.

권현한 (2011). 2010년 분과위원회 연구과업 보고서 - 극치강수의 비정상성 빈도해석.

권현한, 김병식 (2009). "비정상성 Markov Chain Model을 이용한 통계학적 Downscaling 기법 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제3호, pp. 213-225.

권현한, 김병식, 김보경 윤석영 (2008). "기후변화에 따른 극치사상 영향 평가를 위한 비정상성 수문빈도해석기법 개발." **제34회 대한토목학회 정기 학술대회**, 대한토목학회, pp. 605-608.

권현한, 문영일 (2005a). "Wavelet Transform을 이용한 수문시계열 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제65호, pp. 439-448.

권현한, 문영일 (2005b). "Palmer 가뭄지수(PDSI)와 ENSO 지수와의 상관성 분석." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제5호, pp. 355-358.

권형준 (2010). "기후변화에 대응한 물 관리 제도 개선방안." **저널 물 정책・경제**, 한국수자원공사, 제14권, pp. 74-92.

기상연구소 기후연구실 (2004). 한반도 기후 100년 변화와 미래 전.

기상청 (2008). 기후변화 현황 및 대책수.

기상청 (2010). **기상연보**.

기상청 국가태풍센터 (2011). 태풍백서, 기상청.

김고은, Rees, J.A. (2006). "국제 물 거버넌스와 통합수자원관리." 국토, 제302호, pp. 81-87.

김광섭 (2006). 수문-기상자료해석을 위한 통계기법에 대한 고찰. 2006년도 분과위원회 연구과업보고서, 한국수자원학회, pp. 373-398.

김길호, 이명호, 이충성, 심명필 (2006). "게임이론을 이용한 물 분쟁 해결의 조정안 도출." **한국수자원학회학술대회**. 한국수자원학회. pp. 1352-1356.

김대하, 유철상 (2006). "가뭄심도-지속기간-빈도해석을통한 우리나라 가뭄의 공간분포 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제9호, pp. 745-754.

김맹기 (2005). "한반도 기후변화 시나리오를 위한 통계적 규모축소법의 적용성." **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제41권, 제2-1호, pp. 217-227.

김문성, 고익환, 김상단 (2009). "CGCM의 미래 기후 정보를 이용한 기후변화가 낙동강 유역 유황에 미치는 영향분석." **수질보전 한국물환경학회지**, 제25권, 제6호, pp. 863-871.

김민지, 신진호, 이효신, 권원태 (2008). "동아시아지역의 AOGCM 불확실성 평가 및 미래 기후전망." 한국기상학회, 제18권, 제4호, pp. 507-524.

金炳國, 李秀澈 (2009).
日韓の環境政策と環境行財政制度(兩國の新しい環境行財政ガバナンス構築のための課題).

김병식 (2005). *기후변화에 따른 유역의 수문요소 및 수자원 영향평가*. 박사학위논문, 인하대학교.

김병식 경민수, 이건행, 김형수 (2007). "기후변화를 고려한 IDF곡선 추정방안에 대한 연구" **한국수자원학회**

학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 774-779.

김병식, 김수전, 김형수, 전환돈 (2010). “기후변화와 토지피복변화를 고려한 한강 유역의 수자원 영향 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제3호, pp. 309-323.

김병식, 서병하, 김남원 (2003). “전이함수모형과 일기발생모형을 이용한 유역규모 기후변화시나리오의 작성.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제3호, pp. 345-363.

김보경, 김병식, 김형수 (2008). “극한지수를 이용한 극한 기상사상의 변화 분석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제1B호, pp. 41-53.

김보경, 김상단, 경민수, 김형수 (2006). “가뭄심도-영향면적-지속기간곡선을 이용한 가뭄의 시공간적 정량화.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1991-1995.

김상욱, 이길성 (2008). “Bayesian 다중회귀분석을 이용한 저수량(Low flow) 지역 빈도분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제3호, pp. 325-340.

김성원, Salas Jose, D. (1999). “하천수위표지점에서 신경망기법을 이용한 홍수위의 예측”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제2호, pp.247-262.

김소남 (2009). 물관리기본법안. 국회의안정보시스템.

김수전, 전환돈, 김병식, 김형수 (2009). “기후변화를 고려한 한강유역의 미래 물 부족 평가.” **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp 129-133.

김승 (2008). “물관리 체제 개편의 시발점: 물관리기본법.” **물과 미래**, 한국수자원학회, 제41권, 제3호, pp. 39-42.

김양수, 허준행, 류희정 (1995). “강우빈도해석에 확률가중모멘트의 적용에 관한 연구.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제15권, 제6호, pp. 1647-1658.

김은미, 김지영 (2010). 한국원조체계의 분절이 원조효과성에 미치는 영향 및 개선방안. 한국국제협력단.

김종덕, 김정곤 (2012). “EU 탄소배출권거래제(ETS)의 외국항공사 적용에 따른 국제분쟁 : 판결과 시사점.” **KIEP 지역경제포커스**, 대외경제정책연구원, 제6권, 제3호, pp. 2-10.

김종원 (2000). 하천 유역별 통합 물관리체계 연구. 국토연구원.

김종원, 김창현, 심우배 (2005). 유역통합관리를 위한 재원확보방안 연구.

김창주, 서지원, 박민재, 신정수, 이주헌 (2011). “기후변화에 의한 한반도의미래 가뭄경향성분석.” **한국방재학회 학술발표회 논문집**, 한국방재학회, pp. 205.

김호석 (2010). 기업경쟁력에 미치는 기후변화의 영향: 경쟁력 결정요인과 측정지표 개발.

김호성, 박진혁, 윤재영, 김상단 (2010). “극한가뭄의 시공간적 특성에 대한 기후변화의 영향을 평가하기위한SAD곡선의적용.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제30권, 제6B호, pp. 561-569.

노형진, 정한열 (2002). Statistica에 의한 알기 쉬운 통계분석. 형설출판사, pp. 535-556.

녹색성장위원회, 기상청 (2011). 국가 표준 기후변화 시나리오워크숍.

대외경제협력기금 (2009). 2009년도 우리나라 ODA 통계(확정치)의 주요내용.

류재희, 이동률, 안재현, 윤용남 (2002). “가뭄평가를 위한 가뭄지수의 비교 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제4호, pp.397-410.

문정호, 양하백, 김선희 (2006). 참여시대 공공계획의 패러다임에 관한 연구. 국토연구원.

미래기획위원회 (2009). 기후변화 대응 물관리 전략 구축 방안 연구.

박경원 (2011). *격자기반 2차원 홍수범람모형의 적용성 평가 및 피해액 산정.* 석사학위논문, 충남대학교.

박근애, 정인균, 이미선, 신형진, 박종윤, 김성준 (2008). "Analysis of Land Use Change Impact on Storm Runoff in Anseongcheon watershed." **대한원격탐사논문집**, 대한원격탐사학회, 제24권, pp. 35-43.

박두호, 김선영 (2011). "Panel data 분석을 통한 홍수피해와 복구비 관계분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제1호, pp. 1-8.

박민지, 권형중, 김성준 (2005). "HSPF 모형을 이용한 토지피복변화에 따른 유출 변화 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제6호, pp. 495-504.

박상현, 하상섭 (2012). "에너지안보의 국제정치." 정치정보연구, 제15권, 제1호, pp. 329-348.

박성제 (1998). "변모하는 미국의 물 관리 정책." **국토**, 국토연구원, pp. 98-108.

박성제 (2004a). "미국의 수자원정책 : 변화과정과 향후과제." **한국수자원학회지**, 한국물환경학회, 제37권, 제4호, pp. 44-54.

박성제 (2004b). 통합 수자원관리 구현을 위한 유역관리의 역할과 과제. 2004년도 분과위원회 연구과업보고서, 한국물환경학회, pp. 275-299.

박성제 (2008a). 효율적인 물 관리 체제 구축의 필요성과 방향.

박성제 (2008b). 효율적인 물 관리 체제 구축의 필요성과 방향. 물 기본법과 정부구조개편에 관한 토론회 자료집, pp. 6.

박성제, 이승호 (2008). "효율적인 물 관리 체계 구축의 방향." **한국수자원학회지**, 한국물환경학회, 제41권, 제3호, pp. 10-16.

박성제, 이영근, 이종근 (2009). "물 분쟁 관련 법제도의 문제점과 개선방향." **정기학술대회논문집**, 대한토목학회.

박성제, 이재응 (2003). "물관리체계 개선을 위한 여건과 인식." **한국수자원학회지**, 한국물환경학회, 제36권, 제4호, pp. 15-23.

박한규, 장봉석 (2005). "국내 대댐의 현황." **대한토목학회지**, 대한토목학회, 제53권, 제10호, pp. 206-218.

박효순, 김헌애, 홍순희, 박남철, 최광연 (2008). "한국형 가뭄지수 개발과 검증." **학술대회 논문집**, 한국기상학회, pp. 380-381.

박홍식 (2008). "KOICA의 물 관련 국제협력과 전망." **물과 미래**, 한국수자원학회, 제41권, 제2호, pp. 26-34.

방용석 (1997). 물관리기본법안. 국회의안정보시스템.

방재연구소 (2009). 극한가뭄 대응방안에 관한연구.

배덕효 (2007). 기후변화에 의한 수자원 영향평가 체계 구축. 과학기술부.

배덕효, 정일원, 권원태 (2007). "수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(I): 유역별 기후시나리오 구축." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 191-204.

배덕효, 정일원, 이병주 (2007). "A2 시나리오에 따른 국내 수자원의 변동성 전망." **한국수자원학회논문집**,

한국수자원학회, 제40권, 제12호, pp. 921-930.

배덕효, 정일원, 이병주, 이문환 (2011). “GCM과 수문모형의 불확실성을 고려한 기후변화에 따른 한반도 미래 수자원 전망.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제5호, pp. 389-406.

법무부 (2010a). 자연재해대책법.

법무부 (2010b). 재난 및 안전관리기본법.

福石幸生 (2010). 経済學と水資源 : 日本におけるのシャドウ・プライスの, KEO Discussion No. 123.

부경온, 권원태, 백희정, 오재호 (2004). “지역 기후 변화 모의 자료를 이용한 한반도 가뭄 지수 분석.” **한국수자원학회 학술발표회**, 한국수자원학회, pp. 875-877.

삼성경제연구소 (2010). 기상이변의 경제학. SERI경제포커스 제278.

서동일 (2009). “4대강 살리기 사업을 위한 유역 관리의 필요성.” **대한토목학회지**, 대한토목학회, 제57권, 제4호, pp. 26-28.

서순석, 김덕길, 이건행, 김형수, 김태웅 (2009). “농업 및 생활용수 부문에 대한 가뭄 피해액 산정”, **한국습지학회지**, 제11권, 제2호, pp. 77-87.

서울시정개발연구원 (2011). 영국의 기후변화 대응체계와 런던・사우이사트의 기후변화 적응 사례.

서울특별시 (2002). 2001 수해백서.

서울특별시 (2004). 서울시 물순환기본계획 연구.

서울특별시 (2006). 지반조사편람.

서울특별시 한국환경·사회정책연구소 (2001). 도림천 건천화 방지대책.

西川正夫 (2009). 全水道の水木本法案及び水道・下水道事業の在り方に關する考え方, 第8回水循環基本法研究會, pp. 1-6.

細田衛士研究會 (2009). 再生水ネットワーク 構刀築による渴水對策 排水の最適利用に向けて.

소방방재청 (1985~2009). **재해연보**.

소방방재청 (2010a). 기후변화로 인한 도시홍수 피해실태 분석 및 새로운 방재 패러다임 설정을 위한 연구.

소방방재청 (2010b). 기후변화를 고려한 도시방재성능 목표 설정 방안 연구.

소병천 (2003). “물 관리 기본법의 제정 필요성과 그 방향 및 내용.” **환경법연구**, 한국환경법학회, 제25권, 제2호.

小寺正一/農林環境課 (2009). 水問題をめぐる世界の現狀と課題.

손경환, 이병주, 배덕효 (2010). “Multi-GCMs의 기후시나리오를 이용한 홍수특성변화 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제9호, pp. 789-799.

송재식 (2010). “우리나라 제도적 물레짐의 개혁적 진화: 수리권과 수자원 정책의 변화.” **한국지방자치학회보**, 한국지방자치학회, 제22권, 제2호, pp. 5-27.

수자원기구 (2010). 獨立行政法人水資源機構1決算等說明資料.

수자원의 지속적 확보기술개발 사업단 (2009). 2009 가뭄 심포지엄. 가뭄의 역사, 현황, 대책 그리고 극복기술.

水資源研究室 (2010). 給水制限を考慮した渴水被害レベルの區分.

水制度改革國民會議 (2009). 水循環基本法案要綱案の項目別に整理した六省廳八課の意見槪要, 第10回水制度改革國民會議會合資料.

市橋 勝 (2010). 中國及び北京市における 水資源価格変動の影響分析.

신선경 (2010). 에너지관리공단: '동아시아기후파트너십' 업무협약 체결. Electric Power, 제4월호, pp. 28.

신진호, 이효신, 권원태 (2010). 역학적 상세화 기법을 활용한 우리나라 극한 강수사상 전망: 일최대강수량 변화.

신진호, 이효신, 권원태, 김민지 (2009). "한반도 미래 기온 변화 예측을 위한 ECHO-G/S 시나리오의 통계적 상세화에 관한 연구." **대기**, 한국기상학회, 제19권, 제2호, pp. 107-125.

신현석, 김상단, 강두기, 손태석 (2009). "기후변화를 고려한 환경유량 산정 및 물환경 적응방안." **한국수자원학회 학술발표회초록집**, 한국수자원학회, pp. 350.

신홍준, 남우성, 정영훈, 허준행 (2008). "Generalized logistic 분포형을 이용한 지역빈도해석의 불확실성 추정" **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제6B호, pp. 723-729.

심명필 (2006a). "치수경제성 분석의 응용(Ⅰ)." **한국수자원학회지**, 제39권, 제1호, pp. 78-83.

심명필 (2006b). "치수경제성 분석의 응용(Ⅱ)." **한국수자원학회지**, 제39권, 제2호, pp. 72-79.

심순보 (1972). "頻度分析法에 의한 洪水被害算定에 관하여." **대한토목학회논문집**, 제20권, 제4호, pp. 106-119.

안소라, 이용준, 박근애, 김성준 (2008). "미래토지이용 및 기후변화에 따른 하천유역의 유출특성 분석." **대한토목학회논문집**, 제28권, 제2호, pp. 215-224.

안재현 (2007a). "외국의 물관리 현황검토 및 국내적용방안 연구(1): 미국의 물관리 조직 및 운영시스템." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제1호, pp. 51-61.

안재현 (2007b). "외국의 물관리 현황검토 및 국내적용방안 연구(2): 유럽연합 및 일본의 물관리 조직 및 운영시스템." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제40권, 제2호, pp. 39-45.

안재현, 유철상, 윤용남 (2001). "GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 335-345.

안형기 (2009). "물 관리 정책의 진화과정과 4대강정비사업." **한국정책과학학회보**, 한국정책과학학회, 제13권, 제4호, pp. 143-170.

에너지경제연구원 (2004). 기후변화협약 제3차 국가보고서 작성을 위한 기반구축연구.

여규동 (2003). *지역특성을 고려한 예상홍수피해액 산정방법 연구*. 석사학위논문, 인하대학교.

연제문, 김태웅, 이정규, 위성욱 (2006). "이변수 가뭄 해석을 통한 서울지점의 가뭄평가." **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1121-1215.

오태석, 문영일, 오근택 (2008). "군집분석과 변동핵밀도함수를 이용한 지역빈도해석의 확률강우량 산정." **대학토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제2B호, pp. 169-278.

우주호 (2004). *우리나라 유역통합관리체계의 구축방안*. 박사학위논문, 부산대학교.

유철상, 류소라 (2003). "서울지점 가뭄의 재현 및 지속특성 분석," **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제4호, pp. 561-573.

윤용남, 유철상, 이재수 (1994). 지구환경의 변화에 따른 한반도 수문환경의 변화 연구. 한국과학재단연구보고서.

윤주환 (2009). “물환경 측면에서 본 강 살리기.” **대한토목학회지**, 대한토목학회, 제57권, 제8호, pp. 5-10.

이경미, 성장현, 김영오, 이승호 (2011). ″한국에서 평균기온 및 극한기온의 변화시점 분석.″ **대한지리학회지**, 대한지리학회, 제46권, 제5호, pp. 583-596.

이기하, 타카라 카오루, 타치카와 야수토, 사야마 타카히로 (2009). “분포형 강우-유출 모형의 매개변수 불확실성에 대한 시.공간적 유역 응답.″ **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 2215-2219.

이동률 (2009). 미래의 기후변화와 중장기적 재해예방 대책. K-water TechZine, 한국수자원공사, 2009년 가을호.

이문환, 신상훈, 배덕효 (2012). “스케일 특성을 이용한 미래 확률강우량 산정기법의 적용성 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제45권, 제3호, pp. 253-262.

이문환, 정일원, 배덕효 (2011). “기후변화에 따른 국내 홍수 취약성 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제8호, pp. 653-666.

이병석 (2009). 물관리기본법안. 국회의안정보시스템.

이병주, 정일원, 배덕효 (2009). “다변량 통계분석을 이용한 준분포형 유출모형 매개변수 지역화.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제2호, pp. 149-160.

이상일, 이상신 (2010). “게임이론을 활용한 강변여과 개발 적지선정.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제42권 1호. pp. 95-105.

이상헌 (2008). “국가주의적 수리권에서 민주적인 수리권으로.” **환경과 생명**, 환경과 생명, 제56권, pp. 157-165.

이승호 (2008a). 물관리기본법 연구와 구체적 실행방법 제시. 수자원의 지속적 확보기술개발사업단 자료집.

이승호, 박성제, 김현정 (2008b). “외국의 유역통합관리 제도에 대한 소고, 환경법 연구.” **한국환경법학회**. 한국환경법학회, 제30권, 제1호. pp. 189-224.

이승호, 이동률 (2004a). “영국의 수자원정책.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp. 14-23.

이승호, 이동률 (2004b). “프랑스의 수자원정책.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp. 24-33.

이승호, 이동률 (2004c). “외국수자원정책 사례연구: 영국과 프랑스.” **2004년도 대한토목학회 정기학술대회**, 대한토목학회, pp. 4857-4862.

이용준, 박종윤, 박민지, 김성준 (2008a). “SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화 및 토지이용 변화에 따른 안성천 유역 수문-수질 변화 분석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, pp. 653-663.

이용준, 안소라, 강부식, 김성준 (2008b). “SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화 및 토지이용 변화에 따른 안성천 유역 수문 : 수질 변화 분석 (Ⅰ,Ⅱ).” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제6B호, pp. 665-673.

이윤성 외 (2009). 물관리기본법안. 국회의안정보시스템.

이재경, 김영오 (2008). "기후변화 영향평가의 불확실성 저감연구." **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 345-351.

이재경, 김영오, 이경택 (2009). "기후변화 시나리오의 조합기법에 관한 연구." **제35회 대한토목학회 정기학술대회**, 대한토목학회, pp. 624-629.

이종근, 박성제, 이영근, 류시생 (2010). "일본 통합수법의 논의과정과 추진동향." **물과 미래**, 한국수자원학회, 제43권, 제4호, pp. 61-68.

이주헌, 김창주 (2011). "가뭄빈도해석을 통한 가뭄심도-지속기간-생기빈도 곡선의 유도." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제11호, pp. 889-902.

이주헌, 서지원, 김창주 (2012). "가뭄지수를 활용한 한반도 가뭄의 경향성, 주기성 및 발생빈도 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제45권, 제1호, pp.75-89.

이주헌, 정상만, 김성준, 이명호 (2006a). "가뭄모니터링 시스템 구축: 1. 정량적 가뭄모니터링을 위한 가뭄지수의 적용성 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제 39권, 제9호, pp. 787-800.

이주헌, 정상만, 김재한, 고양수 (2006b). "가뭄모니터링 시스템 구축: 2. 정량적 가뭄 모니터링 및 가뭄전망기법개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제9호, pp. 801-812.

이창재 (1995). 우리나라 공적개발원조: 현황 및 정책방향, 대외경제정책연구원, pp. 17-20.

이창환, 안재현, 김태웅 (2010). "비정상성 강우빈도해석법에 의한 확률강우량의 평가." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제2호, pp. 187-199.

이충성 (2007). *유역치수계획 최적대안 결정을 위한 의사결정모형의 개발*. 박사학위논문, 인하대학교.

日本 建設省 河川局 (2000). 治水経済調査マニュアル(案).

日本 國土交通省 國土技術政策總合研究所國 (2010). 國土技術政策總合研究所 プロジェクト 研究報告書.

日本プロジェクト産業協議會 (1998). 米國の水資源開發の概要 米國水資源事情調査報告書.

임혁진, 권형중, 배덕효, 김성준 (2006). "CA-Markov 기법을 이용한 기후변화에 따른 소양강댐 유역의 수문분석." 한국수자원학회, 제39권, 제5호, pp. 453-466.

장근호 (2009). "기후변화에 대비한 온실가스 배출권 거래제도 도입 동향과 정책적 시사점." **조세연구**, 한국조세연구포럼, 제9권, 제2호, pp. 62-118.

장연규, 김상단, 최계운 (2004). "SPI 가뭄지수의 EOF 분석을 이용한 가뭄의 공간적 특성 연구." **2004년도 대한토목학회 정기학술대회논문집**, 대한토목학회, pp. 4897-4902.

장연규, 김상단, 최계운 (2006). "SPI 가뭄지수의 EOF 분석을 이용한 가뭄의 시공간적인 특성연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제8호, pp. 671-702.

장옥재, 김영오 (2009). "지역회귀분석을 이용한 홍수피해위험도 산정." **한국방재학회논문집**, 제9권, 제4호, pp. 71-80.

정대일, 제리 스테딘저, 성장현, 김영오 (2008). "기후변화를 고려한 홍수 위험도 평가." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제1B호, pp. 55-64.

정덕훈(2007). 기업측면에서의 재난관리 대책방안. Green Samsung 웹진, 삼성지구환경연구소. 2007 봄.

정성춘, 김규판, 이형근, 김균태, 오태현 (2010). 일본과 EU의 환경분야 대외협력 전략과 시사점.

경제인문사회연구회 녹색성장 종합연구 총서 연구보고서10-14, 대외경제정책연구원, pp. 29-32.

정성호 (2008). “기후변화와 물에 관한 국제적 논의와 함의.” 사회과학연구, 제47권, 제2호, pp.1-16.

정영훈, 김수영, 김태순, 허준행 (2008). “스케일 성질을 이용한 확률강우량의 추정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제9호, pp. 873-884.

정은성, 공기서, 이길성, 유진채 (2008). “실험선택법과 대안 평가지수를 이용한 대안의 편익산정”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제1호, pp 101-113.

정인균, 이미선, 박종윤, 김성준 (2008). “격자기반 운동파 강우유출모형 KIMSTORM의 개선 (I) - 이론 및 모형 -.” 대한토목학회, 제28권, 제6B호, pp. 697-707.

정일원, 이병주, 전태현, 배덕효 (2008). “유출모형이 기후변화 수자원 영향평가에 미치는 영향분석” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제9호, pp.907-917.

정재완, 권경덕 (2003a). 메콩강 유역개발: GMS 프로그램 10년의 평가와 시사점. 대외경제정책연구원. pp. 29-33.

정재완, 권경덕 (2003b). 메콩강 유역개발현황과 한국의 참여방안. 대외경제정책연구원, pp. 41-42.

정재준 (2001). *수도권의 도시성장 수도권의 도시성장 분석 및 예측을 위한 셀룰라 오토마타 모델링.* 박사학위논문, 서울대학교.

정제호 (2010). *기후변화를 고려한 댐유역의 수질변화 분석.* 박사학위논문, 경북대학교.

정종호, 윤용남 (2009). 수자원설계와 실무. 구미서관.

정지원, 박수경 (2010). 개도국의 기후변화 대응을 위한 국제사회의 지원-논의동향 및 쟁점 분석. 대외경제정책연구원, pp. 72-73.

정창삼 (2006). “국내수자원의 주요 통계자료.” **대한토목학회지**, 대한토목학회, 제54권, 제7호, pp. 130-138.

조영훈, 심창학 (2011). “탈산업화와 복지국가의 변모: 신제도주의에 대한 평가.” **사회복지정책**, 한국사회복지정책학회, 제38권, 제3호, pp. 105-129.

중앙재난안전대책본부 (2009). 2008~2009 가뭄극복추진 성과보고서.

차기욱 (2009). “가뭄재해관련 광동댐 운영 및 수자원 확보방안.” **물과 미래**, 한국수자원학회, 제 42권, 제6호, pp. 31-36.

참여연대 국제연대위원회 (2010). 한국 구속성 원조의 현황과 문제점. ODA 정책보고서.

최동진, 이미홍(2008). “게임이론을 통한 남북 공유하천 관리 전략 도출.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 4호, pp. 353-363.

최승안, 이충성, 김형수, 심명필 (2004). “GIS를 이용한 예상홍수피해액 산정방법 연구.” **2004년도 한국수자원학회 학술발표회**, 한국수자원학회, pp.784-789.

최승안, 이충성, 심명필, 김형수 (2006). “다차원 홍수피해산정방법(Ⅰ): 원리 및 절차.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제1호, pp. 1-9.

최승업 (2003). 미국의 수자원 관리체계와 지역수리권 연구. 강원발전연구원.

최승업 (2004). 미국의 수자원 관리체계와 지역수리권 연구. 강원발전연구원.

최장환, 허은녕, 심명필 (2000). “가뭄시 용수공급지장으로 인한 경제적 파급효과 분석.”

한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제33권, 제5호, pp.647-658.

최정진 (2008). “동북아 환경협력체제의 문제점과 대응전략.” **OUGHTOPIA**, 경희대학교인류사회재건연구원, 제23권, 제1호, pp. 141-166.

최충익(2010). “도시가뭄지해 피해액산정에 관한 기초연구.” **대한국토 도시계획학회지**, 국토계획, 제45권, 제4호, pp.171-181.

최홍식, 이웅희 (2012). “하천유역기반 통합홍수관리의 법・제도 고찰.” **물과 미래**, 한국수자원학회, 제45권, 제2호, pp. 34-41.

한국건설기술연구원 (2008). 신재난안전관리. R&D프레스.

한국감정원 (2009). 녹색성장을 위한 수자원 정책과 새로운 리더십.

한국건설기술연구원 (2000). 수자원계획의 최적화 연구(Ⅳ): 기후변화에 따른 수자원 계획. 영향평가건설교통부, 한국수자원공사, pp. 155-157.

한국건설기술연구원, 한국환경정책평가연구원, 한국수자원학회, 대한상하수도학회 (2003). 물 관리 체제 개선방안 연구. 환경관리공단, 한국수자원공사.

한국과학기술연구원 (1993). 기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발 연구. 한국과학기술연구원.

한국과학기술연구원 (1994a). 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구환경 관련 대책 연구. 한국과학기술연구원.

한국과학기술연구원 (1994b). 기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발 연구 II. 한국과학기술연구원.

한국과학기술정보연구원 (2012). 잉글랜드와 웨일스지역의 물 관리지침.

한국수자원공사 (2001). 2001 전국가뭄조사보고서.

한국수자원공사 (2002). 댐 설계・실무요령(Ⅰ).

한국수자원공사 (2004a). 다목적댐 운영 실무편람. 한국수자원공사.

한국수자원공사 (2004b). 댐 설계지침.

한국수자원공사 (2007). **수자원 및 기술가치 평가시스템 구축.**

한국수자원공사 (2008). 물관리기본계획 구축방안 연구.

한국수자원공사・한국건설기술연구원 (2002). 가뭄관리 종합대책 수립연구.

한국수자원학회 (2005). 댐 설계기준.

한국은행 (2010). 산업연관표 2008.

한국지질자원연구원 (2008). 기후변화 대응 정책 수립을 위한 과학연구의 중요성 분석.

한국환경정책·평가연구원 (2004). 기후변화영향평가모형 개발 -물관리 부분을 중심으로-. 한국환경정책평가연구원.

한국환경정책・평가연구원 (1998). 물관리체계의 구조조정 방안.

한국환경정책・평가연구원 (2001). 중앙정부와 지방정부간 환경기능의 적정배분・통합에 관한 연구.

한국환경정책・평가연구원 (2005a). 기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축(1).

한국환경정책・평가연구원 (2005b). 기후변화 영향평가・적응.

한국환경정책・평가연구원 (2006). 기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축(2).

한국환경정책・평가연구원 (2007). 기후변화 영향평가 및 적응시스템 구**축**(3).

한국환경정책・평가연구원 (2009a). 기후변화 적응 강화를 위한 사회기반 시설의 취약성 분석및 대응 방안 연구 Ⅰ.

한국환경정책・평가연구원 (2009b). 기후변화 대응을 위한 물환경 관리전략 및 정책방향(1).

한국환경정책・평가연구원 (2009c). 기후변화 대응을 위한 미래지향적 물 관리체계 구축방안 연구.

한국환경정책・평가연구원 (2009d). 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안.

한국환경정책・평가연구원 (2009e). 물관리 취약성과 물안보 전략(1).

한수희, 유가영, 김상단 (2009). "식생 물 부족지수의 추계학적 거동과 기후변화가 그에 미치는 영향." **수질보전한국물환경학회지**, 제25권, pp. 507-514.

허준행, 이영석, 신홍준, 김경덕 (2007). "우리나라 강우자료의 지역빈도해석 적용성." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제2B호, pp. 101-111.

현대경제연구소 (2008). 기후경제학의 대두와 대응전략-기후변화 위협에 대한 역발상.

환경관리공단 (2001). 상하수도사업 민영화 기본계획 수립 연구.

환경부 (2000). 기후변화 영향평가모형의 개발: 물관리부문 중심으로.

환경부 (2006a). 국제환경현안 대응·현안기술: 기후변화에 의한 물순환의 예측 및 영향평가. 환경부.

환경부 (2006b). 물환경관리기본계획.

환경부 (2008a). 국가 기후변화 적응 마스트플랜 수립연구.

환경부 (2008b). 국가 기후변화 적응 종합계획.

환경부 (2008c). 기후변화 현황 및 대책 수립. 한국환경정책평가연구원.

환경부 (2009). 우리나라 기후변화의 경제학적 분석(1).

환경정책평가연구원 (2008). 기후변화 대응 정책 수립을 위한 과학연구의 중요성 분석.

厚生勞働省健局水道課 (2006). 水道事業の費用對効果分析マQニュアル.

経濟産業省 (2008). 2008年 エネルギー白書: エネルギーに關する年次報告書.

藏治光一郎 (2008). 水をめぐるガバナンスー日本、アジア、中東、ヨーロッパの現場から. 東信堂.

國土交通省 (2008). 地球溫暖化に伴う氣候変化が 水災害に及ぼす影響について.

國土交通省 (2008). 害分野における地球溫暖化に伴う氣候変化への適応策のあり方につい.

金炳國, 李秀澈 (2009). 日韓の環境政策と環境行財政制度(兩國の新しい環境行財政ガバナンス構築のための課題).

福石幸生 (2010). 経濟學と水資源 : 日本におけるのシャドウ・プライスの, KEO Discussion No. 123.

西川正夫 (2009). 全水道の水木本法案及び水道・下水道事業の在り方に關する考え方, 第8回水循環基本法研究會, pp. 1-6.

細田衛士研究會 (2009). 再生水ネットワーク 構刀築による渴水對策 排水の最適利用に向けて.

小寺正一/農林環境課 (2009). 水問題をめぐる世界の現狀と課題.

水資源研究室 (2010). 給水制限を考慮した渴水被害レベルの區分.

水制度改革國民會議 (2009). 水循環基本法案要綱案の項目別に整理した六省廳八課の意見概要, 第10回水制度改

革國民會議會合資料.

水制度改革國民會議通信 第1-5号

市橋 勝 (2010). 中國及び北京市における 水資源価格変動の影響分析.

日本 建設省 河川局 (2000). 治水経濟調査マニュアル(案).

日本 國土交通省 國土技術政策總合研究所國 (2010). 國土技術政策總合研究所 プロジェクト 研究報告書.

日本プロジェクト産業協議會 (1998). 米國の水資源開發の概要 米國水資源事情調査報告書.

國土交通省 (2006). 水資源政策 -水資源計畫のあり方-.

國土交通省 (2007). 河川社業概要2007 : 河川行政の轉換と取り組み.

國土交通省 (2008a). 氣候変動等によるリスクを踏まえた統合的水資源マネジメントについて(中間とりまとめ).

國土交通省 (2008b). 水關連災害分野における地球溫暖化に伴う氣候変動への適応策のあり方について(中間とりまとめ).

國土交通省 (2009a). 平成21年度版 日本の水資源. 日本水資源機構. 水とともに. 73号. pp. 23-26.

國土交通省 (2009b). “日本の水資源.”, 國土交通省 土地水資源局 水資源部.

國土交通省 社會資本整備審議會 (2008). 水災害分野における地球溫暖化に伴う氣候変化への適応策のあり方について(答申).

國土交通省 土地水資源局 水資源部 (2009). 日本の水資源.

國土技術政策總合研究所 (2010). 國土技術政策總合研究所 プロジェクト研究報告.

國土技術研究センター (2011). 歐米諸國における治水事業實施システム.

A. Sankarasubramanian, Richard M. Vogel, James F. Limbrunner. (2001). "Climate elasticity of streamflow in the United States." Water Resources Research, Vol. 37, No. 6, pp.1771-1781.

A.K. Mishra, and Desai V.R. (2006). “Drought forecasting using feed-forward recursive neural network.” *Ecological Modelling*, Vol. 198, No. 1-2, pp. 127-138.

Abramowitz M, Stegun A. (1965). *Handbook of mathematical formulas, graphs, and mathematical Tables*. Dover Publications Inc: New York, USA.

Adam Rose (1995). "Input-output economics and computable general equilibrium models." *Structural change and economic Dynamics*, Vol. 6, No. 3, pp. 295-304.

Agarwal, H., Renaund, J.E., Preston E.L., and Padmanabhan, D. (2004). "Uncertainty quantification using evidence theory in multidisciplinary design optimization." R*eliability Engineering and System Safety*, Vol. 85, pp. 281-294.

Ajami, N. K., Duan, Q., Sorooshian, S. (2007). "An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction." *Water Resources Research*, Vol. 43, W01403.

Akhtari R, Bandarabadi SR, Saghafian B. (2008). “Spatio-temporal pattern of drought in Northeast of Iran. International Conference on Drought management: Scientific and technological innovations.” CIHEAM-IAMZ, Zaragoza (Spain).

Alain Haurie and Laurent Viguier (2010). “The coupling of climate and economic dynamics.”

Alcamo, J., Dill, P., Kaspar, F., and Siebert, S. (1997). Global change and global scenarios of water use and availability: An application of WaterGAP1.0. Report A9701, *Center for Environmental Systems Research*, University of Kassel, Germany.

Andy Baker, and Chris Brunsdon. (2003) “Non-linearities in drip water hydrology: an example from stump cross caverns, Yorkshire.” *Journal of Hydrology*, Vol. 277, pp. 151-163.

Arab Water Council (2009). *Vulnerability of arid and semi-arid regions to climate change-Impacts and adaptive strategies*.

Arnell, N. W. (2006). “The relationship between rainfall and human density and its implications of future water stress in sub-Saharen Africa.” *Ecological Economics*, Vol. 66, No. 2-3, pp. 319-336.

Arnell, N.W., and Reynard, N.S. (1996). “The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain.” *Journal of Hydrology*, Vol. 183, pp. 397-424.

Arnell. N.W. and Delaney, E.K. (2006). *Adapting to climate change: Public water supply in England and Wales*.

Ashok K. Mishra, V., Singh, P. (2010). "A review of drought concepts." *Journal of Hydrology*, Vol 391, No 1-2, pp. 202-216.

Ast, J.A., and Boot, S.O. (2003). "Participation in European water policy." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, pp. 1499-1506.

Atthanan Lekuthai and Suphat Vongvisessomjai (2001). “Intangible flood damage quantification.” *Water Resources Management*, Vol. 15, No. 5, pp. 343-362.

Bae, D.H., Jung, I.W., and Chang, H. (2008a). "Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins." *Hydrological Processes,* Vol. 22, pp. 2644-2656.

Bae, D.H., Jung, I.W., and Chang, H. (2008b). "Potential changes in Korean water resources estimated by high-resolution climate simulation." *Climate Research,* Vol. 35, p.p 213-226.

Bae, D.H., Jung, I.W., Lee, B.J., and Lee, M.H. (2011). “Future Korean water resources projection considering uncertainty of GCMs and hydrological models.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 5, pp. 389 - 406 (in Korean).

Bae, D.H., Jung, I.W., and Lettenmaier, D.P. (2011). “Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju basin, Korea.” *Journal of Hydrology*, Vol. 401, pp. 90-105.

Bailey, I. (2007). "Market environmentalism, new environmental policy instruments and climate policy in the United Kingdom and Germany." *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 97, No. 3, pp. 530-550.

Bardossy, A., Stehl´ık, J., and Caspary, H.J. (2002). "Automated objective classification of daily circulation patterns for precipitation and temperature downscaling based on optimized fuzzy rules."

Climate Research. Vol. 23, pp. 11-22.

Beard, L.R. (1997). "Estimation flood frequency and average annual damage." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, No. 2, pp. 84-88.

Bellman, R.E.(1957). *Dynamic programming*. Princeton University Press, Princeton, NJ.

Beniston, M., and Coauthors (2007). "Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections." *Climatic Change*, Vol. 81, pp. 71-95.

Beven, K. (1982). "On subsurface stormflow: Predictions with simple kinematic theory for saturated and unsaturated flows." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 6, pp. 1627-1633.

Beven, K.J. (2000)."Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 4, No. 2, pp. 203 - 213.

Blasone, R.S., Vrugt, J.A., Madsen, H., Posbherg, D., Robinson, B.A. and Zyvoloski, G.A. (2008). "Generalized likelihood uncertainty estimation(GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling." *Advances in Water Resources*, Vol. 31, pp. 630-648.

Blong, R.J. (1985). *Gully sidewall development in New South Wales, Australia.* Soil erosion and conservation, Edited by El-Swanify, S.A., Moldenhauer, W.C., and Lo, A., Soil Conservation Society of America., Ankeny, Iowa, pp. 574-584.

Boer, G.J. (2004). "Long time-scale potential predictability in an ensemble of coupled climate models." *Climatic Dynamics*, Vol. 23, pp. 23-44.

Boer, G.J. and Lambert S.J. (2008). "Multi-model decadal potential predictability of precipitation and temperature." *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L05706.

Bogan, T. Mohseni, O., and Stefan, H. G., (2003). "Stream temperature-equilibrium temperature relationship." *Water Resources Research*, Vol 39. pp. SWC7.1-SWC7.12

Boo, K.-O., Kwon, W.-T., Oh, J.-H., and Baek, H.-J. (2004). "Response of global warming on regional climate change over Korea: an experiment with the MM5 model." *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L21206, DOI:10.1029/2004GL021171.

Boyd E, Levitan M, van Heerden I. (2005). *Further specification of the dose-response relationship for flood fatality estimation*. Paper presented at the US-Bangladesh workshop on innovation in windstorm/storm surge mitigation construction. National Science Foundation and Ministry of Disaster & Relief, Government of Bangladesh. Dhaka, pp. 19-21.

Brander,L., Florax,R. and Vermaat, J. (2003). *The empirics of wetland valuation: A comprehensive summary and meta-analysis of the literature.* DINAS-Coasst Working Paper 8, Istitute for Environmental Studies, Vrije Universiteit, Amsterdam.

Brekke L. D., J.E. Kiang, J.R. Olsen, S.P. Pulwarty, D.A.Raff, D.P. Turnipseed, R.S. Webb and K.D. White (2009). *Climate change and water resources management; A federal.*

Bruch, C., and Troell, J. (2011). "Legalizing adaptation : Water law in a changing climate." *Water*

International, Vol. 36, No. 7, pp. 828-845.

Brugge, R.V.D., and Rotmans, J. (2007). "Towards transition management of European water resources." *Water Resources Management*, No. 21, pp. 249-267.

Burke, E.J., S.J. Brown, and N. Christidis (2006). "Modelling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first centry with the Hadley Centre Climate Model." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 7, pp. 1113 - 1125.

Burn, D. H and, Hag Elnur, M. A. (2002). "Detection of hydrologic trends and variability." *Journal of Hydrology*, Vol. 255, No. 1-4, pp. 107 - 122,

Burton, I. (1992). *Adapt and thrive*. unpublished manuscript, Canadian Climate Centre: Downsview, Ontario.

California Climate Change Center. (2009). *Using future climate projections to support water resources Decision making in California*.

California Department of Water Resources (2006). *Progress on incorporating climate change into management of California's water resources*.

California Environmental Protection Agency (2006). *Climate Action Team Report to Governor Schwarzenegger and the Legislature*, Climate Action Team, California.

California natural resources agency (2008). *2009 California Climate Adaptation Strategy*.

Cannon, M.G., Phelan, P.E., Jennifer, M., and Passaro, M. (1995). "Procedural guidelines for estimating residential and business structure value for use in flood damage estimations." *U.S. Army Engineer Institute for Water Resources*, Water Resources Support Center, Alexandria, Virginia.

Chang, H., and Kwon, W.-T. (2007). "Spatial variation of summer precipitation trends in south Korea, 1973-2005." *Environmental Research Letters,* doi:10.1088/1748-9326/2/4/045012.

Chen, J., Brissette, F.P., and Leconte, R. (2011). "Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology." *Journal of Hydrology*, Vol. 401, pp. 190-202.

Chiew F.H.S., Teng, J., Vaze, J., and Kirono, D.G.C. (2009). "Influence of global climate model selection on runoff impact assessment." *Journal of Hydrology*, Vol. 379, pp. 172-180.

Chiew, F.H.S. and McMahon, T.A. (2002). "Modelling the impacts of climate change on Australian streamflow." *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 1235-1245.

Choi, Y. (2002). "Trends in daily precipitation events and their extremes in the southern region of Korea." *Environmental Impact Assessment*, Vol. 11, pp. 189-203.

Christel Prudhomme, S. (2003). "Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments." *Journal of Hydrology*, Vol 277, pp. 1-23.

Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, K., Kwon, W.T., Laprise, R., Magana., Rueda, V., Mearns, L., Menendez, C.G., Raisanen, J., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P. (2007). *Regional climate projections, In: Climate change 2007. The Physical Science*

Basis. Contribution of WGI to the IPCC AR4. Solomon, Edied by S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. Cambridge University Press, Cambridge and New York.

Christensen, N.S., Wood, A.W., Voison, N., Lettenmaier, D.P., Palmer, R.N. (2004). "The effect of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado river basin." *Climate Change*, Vol. 62, pp. 337-363.

Chu, H.J., Lin, Y.P., Huang, C.W., Hsu, C.Y., Chen, H.Y. (2010). "Modelling the hydrologic effects of dynamic land-use change using a distributed hydrologic model and a spatial land-use allocation model." *Hydrological Processes*, Vol. 24, No. 18, pp. 2538 - 2554.

Chunsheng Ma (2005). "A class of stationary random fields with a simple correlation structure." *Journal of Multivariate Analysis*, Vol 94, pp. 313-327.

CIER (2007). *The US economic impacts of climate change and the costs of inaction*.

Cigizoglu, H. K., Bayazit, M., and Onoz, B. (2003). "Trends on the maximum, mean and low flows of Turkish rivers." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 6, pp. 280-295.

Climate Impact Group (2009a). *The Washington climate change impacts assessment - Evaluating Washington's future in a changing climate*. The Climate Impact Group, University of Washington.

Climate Impact Group (2009b). *The Washington climate change impacts assessment*. The Climate Impacts Group, University of Washington.

Cochrane, H. (1997a). "Economic impact of a midwest earthquake." *NCEER Bulletin*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-19.

Cochrane, H. (1997b). *Forecasting the economic impact of a midwest earthquake*. Economic Consequences of Earthquakes: Preparing for the Unexpected, Edited by Jones G., NCEER, Buffalo, USA, pp. 223-248.

Cole, S. (2003). *An insurance matrix approach for social accounting*. Department Urban and regional Planning, University at Buffalo, The International Conference and Workshop on Flood Impact Assessment in Delft, Netherlands, pp. 22-24.

Cole, S., E. Pantoja, V. Razak. (1993). *Social accounting for disaster preparedness and recovery planning.* NCEER, Buffalo, USA.

Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Hinton, T., Jones, C. D., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Totterdell, I., Woodward, S., Reichler, T., and Kim, J. (2008). *Evaluation of HadGEM2 model.* Hadley Centre Technical Note, 74.

Conover, W. J., (1980). *Practical nonparametic statistics.* 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York.

Cover, T.M. and Thomas, J.A. (1991). *Elements of information theory.* Wiley.

CSIRO (2008a). *Climate data for hydrologic scenario modelling across the Murray-Darling Basin*.

CSIRO (2008b). *Rainfall-runoff modelling across the Murray-Darling Basin*.

CSIRO (2008c). *Water availability in the Murray-Darling Basin*.

Cunderlik, J.M. and Burn, D.H. (2003). "Non-stationary pooled flood frequency analysis." *Journal of Hydrology*, Vol. 276, pp. 210-223.

Cusack, S., J. M. Edwards, and J. M. Crowther (1999a). "Investigating k-distribution methods for parameterizing gaseous absorption in the Hadley Centre climate model." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, pp. 2051-2057.

Dario Rosidi (2007). "Seismic risk assessment of levees." *Civil Engineering Dimension*, Vol. 9, No. 2, pp. 57-63.

David Adamson, Thilak Mallawaarachchi, John Quiggin. (2007). "Climate change and climate uncertainty in the Murray-Darling Basin." *51st Australian Agricultural and Resource Economics Society Conference*, Queenstown New Zealand, pp. 2-26.

David Jeff Harris, Arlen D.Feldman (2001). *Hydrologic research needs for dam safety*. FEMA Workshop.

Davies, T., M. J. P. Cullen, A. J. Malcolm, M. H. Mawson, A. Staniforth, A. A. White, and N. Wood, (2005). "A new dynamical core for the Met Office's global and regional modelling of the atmosphere." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Soceity*, Vol. 131, pp. 1759-1782.

Defra's (2009). *Climate Change Plan 2010*.

Department for Environment Food and Rural Affairs (2010). *Adapting to climate change: Analysing the role of government*.

Deque, M., Jones, R.G., Wild, M., Giorgi, F., Christensen, J.H., Hassell, D.C., Vidale, P.L., Rockel, B., Jacob, D., Kjellstrom, E., de Castro, M., Kucharski, F., and van den Hurk, B. (2005). "Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe: quantifying confidence level from PRUDENCE results." *Climate Dynamics*, Vol. 25, pp. 653-670.

Diaz-Nieto, J., and Wilby, R.L., (2005) "A comparison statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the river Thanes, United Kingdom." *Climatic Change*, Vol. 69, pp. 245-268.

Diersen, M. A., and G., and Taylor (2003). *Examining Economic Impact and Recovery in South Dakota from the 2002 Drought*. Economics Staff Paper, December, Department of Economics, South Dakota State University.

Diersen, M. A., G. Taylor, and A. May (2002). *Direct and indirect effects of drought on south Dakota's economy*. Economics Commentator, No. 432.

Doblas-Reyes, F.J., Hagendorn, R., and Palmer, T.N. (2005). "The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting - II. Calibration and combination." *Tellus*, Vol. 57A, pp. 234-252.

Douglass A.R., Prather, M.J., Hall, T.M., Strahan, S.E., Rasch, P., Sparling L.C., Coy, L., and Rodriguez, J.M. (1999). "Choosing meteorological input for the global modeling initiative assessment of

high-speed aircraft." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. 27, pp. 545-564.

Downton, R.A., and Pielke, R.A. (2005). "How accurate are disaster loss data? The case of U.S. flood damage." *Natural Hazards*, Vol. 35, No. 2, pp. 211-228.

Drogue, G., Pfister, L., Leviandier, T., Elldrissi, A., Iffly, J.F., Matgen, P., Humbert, J., Hoffmann, L. (2004). "Simulating the spatio-temporal variability of streamflow response to climate change scenarios in a mesoscale basin." *Journal of Hydrology*, Vol. 293, No. 1-4, pp. 255-269.

Duan, Q., Ajami, N.K., Gao, X., and Sorooshian, S. (2007). "Multi-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging." *Advanced in Water Resources*, Vol. 30, pp. 1372-1386.

Dubrovsky, M., Buchtele, J., and Zalud, Z.. (2004). "High-frequency and low frequency variability in stochastic daily weather generator and its effect on agricultural and hydrologic modelling." *Climatic Change*, Vol. 63, pp. 145-179.

Dufournaud, C. (1982). "On the mutually beneficial cooperative scheme: dynamic change in the payoff matrix of international river basin schemes." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 764-772.

Dutch central government (2009). *2009-2013 National water plan.*

DWR : Department of Water Resources (2008). *Climate change adaptation strategies for Calofornia's water.*

EA, UK, (2009a). *Water resouces strategy for England and Wales 2009.*

EA, UK, (2009b). *Water resources action plan for England and Wales.*

EA, UK, (2009c). *River basin management plan.* Anglian River Basin District.

Earle, J.R., Blacklocke, S., Buren, M., Almeida, G., and Keating, D. (2011). "Integrating the implementation of the European union water framework directive and floods directive in Ireland." *Water Science & Technology*, Vol. 64, No. 10, pp. 2044-2051.

Edwards DC, McKee TB. (1997). *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple yime scales*. Climatology Report, Number 97 - 2, Colorado State University Fort Collins CO.

Edwards, J.M., and A. Slingo (1996). *Studies with a flexible new radiation code. I: Choosing a configuration for a large-scale model.* Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 122, pp.689-719

European Environment Agency (2007). *Climate change and water adaptation issues.* European Environment Agency Technical report.

Environment Agency(EA) (2006). *Environment agency corporate plan 2006-08 (Translating strategy into action).*

Environment Agency(EA) (2007). *Environment agency corporate plan 2009-12 (Creating a better place - Translating strategy into action).*

Environment, Food and Rural Affairs Committee (2010). *Future flood and water management legislation.*

Epstein, D., and Ramirez, A. (1993). *A Statistical climate inversion scheme and its application in hydrologic impact assessment studies associated with global climate variability.* Proceedings Third

International Symposium on Engineering Hydrology, ASCE Conference, San Francisco, C. Y. Kuo Ed., pp. 61-66.

Epstein, D. and Ramirez, A. (1994). “Spatial disaggregation for studies of climatic hydrologic sensitivity." *Journal of hydraulic Engineering*, Vol. 120, No. 12, pp. 1449-1467.

Epstein, E.S. and Murphy, A.H. (1989). “Skill scores and correlation coefficients in model verification.” *Monthly Weather Review*, Vol. 117, pp. 572-581.

Essery, R. L. H., Best, M. J., Betts, R. A., Cox, P. M., Taylor, C. M. (2003). "Explicit representation of subgrid heterogeneity in a gcm land-surface scheme." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 43, pp. 530-543.

European Climate Support Network (ECSN) (1995). *Climate of Europe: Recent variation, present state and ruture prospects*. KNMI, De Bilt.

European Pariliament & Council (2000). *Water framework directive*.

F.A. Buujs, H.A.J.M.van Gelder (2004). “Application of reliability based flood defence design in the U.K..” *Heron*, Vol. 49, No. 1, pp. 33-50.

Fikri Acar (2009). *Rapid damage assessment of infrastructure components in the central united states*. F Acar-MAE Center.

Fowler, H.J., Blenkinsop, S., and Tebaldi C. (2007). "Review: Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling." *International Journal of Climatology*, Vol. 27, pp. 1547-1578.

Fowler, H.J., Kilsby, C.G,, and O'Connell, P.E. (2000). "A stochastic rainfall model for the assessment of regional water resource systems under changed climatic conditions." Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 4, pp. 261-280.

Fowler, H.J., Kilsby, C.G., and Stunell, J. (2007). "Modeling the impacts of projected future climate change on water resources in north-west England." *Hydrology & Earth System Sciences*, Vol. 11, No. 3, pp. 1115-1126.

Francis Chiew. (2007). *Climate change implication on Australian river flows*. 3rd International Symposium on Riverine Landscapes.

Furen JIANGE (2005). *Economic loss estimation of water supply shortage based on questionnaire survey in industrial sectors MATSUURA*. Report of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention.

G.-H. Zhang, M.A Nearing, B.-Y. Liu. (2005). "Potential effect of climate change on rainfall erosivity in the Yellow river basin of China." *American Society of Agriculture Engineers*, Vol. 48, No. 2, pp. 511-517.

G.L. Sivakumar Babu, Amit Srivastava, V. Sahana (2007). “Analysis of stability of earthen dams in kachchh region, Gujarat, India.” *Engineering Geology*, Vol. 94, No. 3-4, pp. 123-136.

Gagnon-Lebrun, F. and S. Agrawala (2006). *Progress on adaptation to climate change in developed countries: An Analysis of Broad Trends.* ENV/EPOC/GSP(2006)1/FINAL, OECD, Paris

Ganguly, A. R. (2007). *Climate extremes hydro-meteorological extremes and impacts.* fall creek Falls 2007 Workshop.

Gay, C. and Estrada, F. (2010). "Objective probabilities about future climate are a matter of opinion." *Climatic Change*, Vol. 99, pp. 27-46.

Gellens, D., Roulin, F. (1998). "Streamflow response of belgian catchments to IPCC climate change ccenarios." *Journal of Hydrology,* Vol. 210, pp. 242 - 258.

Georgakakos, K.P. (2003). "Probabilistic climate-model diagnostics for hydrologic and water resources impact studies", *Journal of Hydrometeorology,* Vol. 4, pp. 92-105.

Gfiffis, V.W. and Stedinger J.R. (2005). "The LP3 distribution and its use for flood frequency analysis." *World Water Congress 2005:Impacts of Global Climate Change.*

Ghosh, S., and Mujumdar, P.P. (2007). "Nonparametric methods for modeling GCM and scenario uncertainty in drought assessment." *Water Resources Research,* Vol. 43, No. 7, pp. W07405-W07406.

Gibbons, J.D. (1990). *Handbook of statistical methods for engineers and scientists,* McGrawHill, Edited by Harroson M.W.

Gilbert, R.O. (1987). *Statistical methods in water resources.* Elsevier, Amsterdam, pp. 522.

Giorgi F, Mearns L.O. (1991). Approaches to the simualtion of regioanl climate change - A review. *Reviews of Geophysics* Vol. 29, pp. 191 - 1216.

Giorgi, F. and Mearns, L.O. (2002). "Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the "Reliability Ensemble Averaging" (REA) method." *Journal of Climate,* Vol. 5, pp. 1141-1158.

Gleckler P.J., Taylor, K.E., and Doutriaux, C. (2008). "Performance metrics for climate models." *Journal of Geophysical Research,* Vol. 113, D06104.

Global Water Intelligence (2010). Global Water Market 2011-Meeting the world's water and wastewater needs until 2016.

Goodess, C.M., and Palutikof, J. (1998). "Development of daily rainfall scenarios for southeast Spain using a circulation - type approach to downscaling." *International Journal of Climatology,* Vol. 18, pp. 1051-1083.

Goodwin, P. (2000). "Correct or combine? Mechanically integrating judgmental forecasts with statistical methods." *International Journal of Forecasting,* Vol. 16, pp. 261-275.

Grabs. (2011). "Grabs briefing water management and adaptational to climate change." *Innovation & Environment Regions of Europe Sharing Solutions,* EU.

Granger, R.J. (1991). *Evaporation from natural nonsaturated surfaces.* Ph.D. Thesis, Department of Agricultural Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, pp. 140.

Grant, A. L., and A. R. Brown (1999). "A similarity hypothesis for shallow cumulus transports." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,* Vol. 125, No. 558, pp. 1913-1936.

Greenwood, J.A., Landwehr, J.M., Matalas, N. C., and Wallis, J. R. (1979). "Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distributions expressible inverse form." *Water Resources Research,* Vol. 15, pp. 1049-1054.

Gregory, D., and P.R. Rowntree (1990). "A Mass Flux Convection Scheme with Representation of Cloud Ensemble Characteristics and Stability- Dependent Closure." *Monthly Weather Review,* Vol. 118 pp.1483-1506.

Griffiths, M. (2002). "The european water framework directive: An approach to integrated river basin management." *European Water Association,* pp 1-15.

Grimsted, A., Moorel, J.C., and Jevrejeva, S. (2004). "Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series." *Nonlinear Processes in Geophysics,* Vol. 11, No, 6, pp. 561-566.

Groisman, P.Y., Knight, R.W., Karl, T.R. (2001). "Heavy precipitation and high streamflow in the contiguous United States: trends in the twentieth century." *Bullettin of American Meteorology Society,* Vol. 82. No. 2, pp. 219 - 246.

Groves, D.G., Yates, D., and Tebaldi, C. (2008). "Developing and applying uncertain global climate change projections for regional water management planning." *Water Resources Research,* Vol. 44, pp. 16.

Gyeonggi Research Institute. (2004). *A study for drought monitoring method at Northern Gyeonggi Province,* Gyeonggi Research Institute, Korea.

Habibolaah Salami, Naser Shahnooshi, and Kenneth J. Thomson (2009). "The economic impacts of drought on the economy of Iran: An integration of linear programming and macroeconometric modelling approaches." *Ecological Economics,* Vol. 68, No.4 pp. 1032-1039.

Hamlet, A.F. and Lettenmair, D.P. (1999). "Effects of climate change on hydrology and water resources in the Columbia River basin." *Journal of American Water Resources Association,* Vol. 35, No. 6, pp. 1597-1623.

Hamlet, A.F. and Lettenmair, D.P. (1999). "Effects of climate change on hydrology and water resources in the Columbia river basin." *Journal of American Water Resources Association,* Vol. 35, No. 6, pp. 1597-1623.

Hamlet, A.F., and Lettenmaier, D.P. (1999). "Effects of climate change on hydrology and water resources objectives in the Columbia river basin." *Journal of the American Water Resources Association,* Vol. 35, pp. 1597-1624.

Hamlet, A.F., Lettenmaier D.P., and Mote, P. (2003). "Climate change streamflow scenarios for water planning studies in the Pacific Northwest." *American Meteorological Society,* Vol. 84, pp. 1513-1518.

Hanel, M., and Buishand, T.A. (2010). "On the value of hourly precipitation extremes in regional climate

model simulations." *Journal of Hydrology*, Vol. 393, pp. 265-273.

Hanel, M., and Buishand, T.A. (2011). "Analysis of precipitation extremes in an ensemble of transient regional climate model simulations for the Rhine basin." *Climate Dynamics,* Vol. 36, pp. 1135-1153.

Hargreaves, G.L., Hargreaves, G.H., and Riley, J.P. (1985). "Agricultural benefits for Senegal river basin." *Journal of Irrigation and Drainage*, Vol.111 No. 2 pp. 113-124.

Hargreaves, G.L., Hargreaves, G.H., Riley, J.P. (1985). "Agricultural benefits for Senegal river basin." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* Vol. 111, No. 2, pp. 113-124.

Hashino, M. (1996). *Evaluation of characteristic changes of precipitation events in main Japanese climatic regions due to global warming,* Report for the River Environment Fund (No.1994-1-(1)-13 and No.1995-1-(1)-14), the Foundation of River and Watershed Environment Management (in Japanese).

Hashino, T., Bradley, A.A., and Schwartz, S.S. (2006). "Evaluation of bias- correction methods for ensemble stream flow." *Hydrology and Earth System Sciences Discussion,* Vol. 3, Number 2, pp. 561-594.

Hashio, T., Bradley, S., and Schwartz, S. (2007). "Evaluation of bias-correction methods for ensemble streamflow volume forecasts." *Hydrology and Earth System Sciences,* pp. 939-950.

Hassan, A.E., Bekhit, H.M. and Chapman, J.B. (2009). "Using Markov Chain Monte Carlo to quantify parameter uncertainty and its effect on predictions of a groundwater flow model." *Environmental Modelling & Software,* Vol. 24, pp. 749-763.

Haurie, A., and Viguier, L. (2010). *The coupling of climate and economic dynamics: Essays on integrated assessment.* Springer

Hay, L.E., Wilby R.L., and Leavesley, G.H. (2000). "A comparison of delta change and downscaling GCM scenarios for three mountainous basins in the United States." *Journal of American Water Resources Association,* Vol. 36, pp. 387-398.

Haylock, M. and Nicholls, N. (2000). "Trends in extreme rainfall indices for an updated high quality data set for Australia." *International Journal of Climatology,* Vol. 20, pp. 1533-1541.

Hellstrom, C., Chen, D., Achberger, C., and Raisanen, J. (2001). "Comparison of climate change scenarios for Sweden based on statistical and dynamical downscaling of monthly precipitation." *Climate Research,* Vol. 19, pp. 45-55.

Henriques AG, Santos MJJ. (1999). "Regional drought distribution mode.l" *Physics and Chemistry of the Earth(B),* Vol. 24, No. 1-2, pp. 19 - 22.

Hirsch, R. M., Helsel, D. R., Cohn, T. A. and Gilroy, E. J. (1993). *Statistical analysis of hydrologic data (chapter 17),* In Handbook of Hydrology, D. R. Maidment (editor), McGraw-Hill Inc., New York.

Holwerda F., S. (2010). "Rainfall and cloud water interception in mature and secondary lower montane cloud forests of central Veracruz, Mexico." *Journal of Hydrology,* Vol 384, pp. 84-96.

Horridge, M., J. Madden, and G. Wittwer (2005). ""The Impacts of the 2002-2003 Drought on Australia."" *Journal of Policy Modeling*, Vol. 27, pp. 285-308.

Hosking, J.R., and Wallis, J.R. (1997). *Regional frequency analysis: anapproach based on L-moments*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Hosking, J.R., Wallis, J.R., and Wood, E. F. (1985). "Estimation of the GEV distribution by the method of probability-weighted moment." *Technometrics,* Vol. 27, No. 3, pp. 251-261.

Howe, J., and White, I. (2010). "The potential implications of the European Union Water Framework Directive on domestic planning systems: A UK Case Study." *European Planning Studies,* Vol. 10, No. 8, pp. 1027-1038.

Hughes, B.L., Saunders, M.A. (2002). "A drought climatology for Europe." *International Journal of Climatology,* Vol. 22, No. 13, pp. 1571 - 1592.

Hugo A.L., (2003). "Sustainability and groundwater." *IUGG 2008*, Sapporo.

Hulme, M. (1992). "Rainfall Changes in Africa: 1931-1996 to 1961-1990." *International Journal of Climatology,* Vol. 12, pp. 685-699.

Huth, R. (1999). "Statistical downscaling in central Europe: evaluation of methods and potential predictors." *Climate Research,* Vol. 13, pp. 91-101.

Im, E.S., and Kwon, W.T. (2007). "Characteristics of extreme climate sequences over Korea using a regional climate change scenario." *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 3, pp. 17-20.

Im, E.S., Jung, I.W., Chang, H., Bae, D.H., Kwon, W.T. (2010). "Hydroclimatological response to dynamically downscaled climate change simulations for Korean basins." *Climatic Change,* Vol. 100, No. 3-4, pp. 485-508.

Intergovermental Panel on Climate Change (2007). *Climate change 2007:* Synthesis report, pp. 55.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2008). *Climate Change and Water.* IPCC Technical Paper Ⅳ.

International Institute for Environment and Development (2008). *The Cost of Avoiding Deforestation.*

IPCC (2001a). *Climate change 2001: Impacts. adaptation and vulnerability.* Contribution of Working Group Ⅱ to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 75-104.

IPCC (2001b). *Climate Change 2001 'Mitigation'. C*ontribution of Working Group Ⅲ to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by Metz B., Davidson O., Swart R. and Pan J., Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC (2001c). *Climate change 2001: The Scientific basis,* Contribution of Working Group Ⅰ to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panmel on Climate Change, Cambrige University Press, Cambridge.

IPCC (2007a) *Climate Change 2007: Synthesis Report.* Contribution of Working Group I, II and III to the

Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.

IPCC (2007b). *Climate Chanage 2007: The Physical Science Basis.* Working group I contribution to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Summary for Policymakers, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC (2007c). *Guidance on Water and Adaptation to Climate Change.*

IPCC (2007d). *Summary for Policymakers.* Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Interovernmental Panel on Climatic Change, Edited by Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., Hanson, C. E., Climate change 2007, Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Cambridge University Press, Cambridge, UK : 11.

IPCC (2008). *Climate change and water.* Technical Paper Series IV.

Jaynes, E.T. (1957). "Information theory and statistical mechanics." *The Physical Review,* Vol. 106. No. 4, pp. 620-630.

Jean Louis Pinault. and Igor G. Dubus. (2008). "Stationary and non-stationary autoregressive processes with external inputs for predicting trends in water quality" *Journal of Contaminant Hydrology,* Vol 100, pp. 22-29.

Jeffrey M. Richard H., Josue M., and Duncan M. (2010). *A retrospective estimate of the economic impacts of reduced water supplies to the San Joaquin vally in 2009.* pp. 1-15.

Jensen, M.E., and Haise, H.R. (1963). "Estimating evapotranspiration from solar radiation." Proceedings of the American Society of Civil Engineers. *Journal of Irrigation and Drainage,* Vol. 89, No. IR4, pp. 15-41.

Jeong, D.I., Stedinger, J.R., Kim, Y.-O., and Sung, J.H. (2008). "Flood risk assessment with climate change." *The KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 28, No. 1B, pp. 55-64.

Jha, M., Arnold, J.G., Gassman, P.W., Giorgi, F., and Gu, R.R. (2006). "Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi river basin streamflows using SWAT." *Journal of the American Water Resources Association,* Vol. 42, No. 4, pp. 997-1016.

John T. Christian, Charles C., Gregory B. (1994). "Reliability applied to slope stability analysis." *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 12, pp. 2180-2205.

John W. van de Lindt, Thang N. Dao (2009). "Performance-Based Wind Engineering for Wood-Frame Buildings." *Journal of Structural Engineering,* pp. 169-177.

Johnson, F.M. and Sharma, A. (2009). "Assessing future droughts in Australia: A nesting model to correct for long-term persistence in general circulation model precipitation simulations." In Anderssen, RS, RD Braddock and LTH Newham, *18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation.* 2377-83.

Jones, B.G. (1997). *Economic consequences of earthquakes: preparing for the unexpected,* NCEER,

Buffalo, USA.

Jonkman, S.N., Bočkarjova, M., Kok, M., and Bernardini, P. (2008). "Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands." *Ecological Economics,* Vol. 66, No. 1, pp. 77-90.

JRC (2009). *Climate change impacts in Europe.*

Juckem, P.F., Hunt, R.J., Anderson, M.P., Robertson, D.M. (2008). "Effects of climate and land management change on streamflow in the driftless area of Wisconsin." *Journal of Hydrology,* Vol. 355, No. 1-4, pp. 123-130.

Julie A. Vano, S. (2010). "Climate change impacts on water management in the Puget Sound region,Washington State, USA." *Climatic Change*, Vol. 102, pp. 261-286.

Jung, I.W., Bae, D.H. and Kim, G. (2011). "Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea." *International Journal of Climatology*, Vol. 31, pp. 359-370.

Jung, I.W., Bae, D.H., and Lee, B.J. (2012). "Possible change in Korean streamflow seasonality multi-model climate projections." *Hydrological Processes,* DOI:10.1002/hyp.9215.

Kang, B., and Ramírez, J.A. (2001). "Comparative study of the statistical features of random cascade models for spatial rainfall downscaling." *Proc. AGU Hydrology Days 2001,* Hydrology Days Publications, Fort Collins, CO, pp. 151-164.

Karagiannidis, A., Karacostas, T., Maheras, P.,and Makrogiannis, T. (2009). "Trends and seasonality of extreme precipitation characteristics related to mid-latitude cyclones in Europe." *Advances in Geosciences,* Vol. 20, pp. 39-43.

Karen Hardee and Clive Mutunga (2009). *Strengthening the link between climate change adaption and national development plans: lessons from the case of population in National Adaption Programmes of Action.*

Karpouzos, D. K., Kavalieratou, S., and Babajimopoulos, C. (2010). "Trend analysis of precipitation data in Pieria region (Greece)." *European Water,* Vol. 30, pp. 31-40.

Katz R.W. (2001). *Techniques for estimating uncertainty in climate change scenarios and impact studies.* Environmental and Societal Impacts Group Report, National Centers for Atmospheric Research.

Kay, A.L., Davies, H.N., Bell, V.A., and Jones, R.G. (2009). "Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England." *Climatic Change,* Vol. 92, pp. 41-63.

Kazi R. Karim, Fumio Yamazaki (2001). "Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics,* Vol. 30, No. 12, pp. 1839-1856.

Keith, W. Hipel, R.K. Ragade and T.E. Unny (1974). "Metagame Analysis of Water Resources Conflicts." *Journal of the Hydraulics Division,* Vol. 100, No. 10, pp. 1437-1455.

Khadr, M. (2009). "Analysis of Meteorological Drought in the Ruhr Basin by Using the Standardized

Precipitation Index." *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 57, pp. 607-616.

Khaliq M.N., S. (2006). "Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review." *Journal of Hydrology*, Vol. 329, pp. 534-552.

Kim KY, North GR. (1997). "EOFs of harmonizable cyclostationary processes." *Journal of the Atmospheric Sciences,* Vol. 54, No. 19, pp. 2416 - 2427.

Kim KY. (2002). "Investigation of ENSO variability using cyclostationary EOFs of observational data." *Meteorology and Atmospheric Physics,* Vol. 81, No. 3 - 4, pp. 149-168.

Kim, G., Yim, T.K., and Park, C.H. (2009). "Analysis of the secular trend of the annual and monthly precipitation amount of south Korea." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation,* Vol. 27, No. 2, pp. 188-197.

Kim, J.W., Chang, J.T., Baker, N.L., Wilks, D.S., and Gates, W.L. (1984). "The statistical problem of climate inversion: determination of the relationship between local and large-scale climate." *Monthly Weather Review,* Vol. 112, No. 10, pp. 2069-2077

Kim, S.D. (2004). "Wavelet analysis of precipitation variability in northern California, U.S.A." *Journal of Korean Society Civil Engineering,* Vol. 8, No. 4, pp. 471-477.

Kite, G.W., and Haberlant, U. (1999). "Atmospheric model data for macroscale hydrology." *Journal of Hydrology,* Vol. 217, pp. 303-313.

Kite, G.W., Dalton, A., Dion, K. (1994). "Simulation of streamflow in a macroscale watershed using general circulation model data." *Water Resources Research,* Vol. 30, No.5, pp. 1547-1559.

Kite, G.W., HA1Berlant, U. (1999). "Atmospheric model data for macroscale hydrology." *Journal of Hydrology,* Vol. 217, pp. 303 - 313.

Kleeman, R. (2002). "Measuring dynamical prediction utility using relative entropy." *Journal of the Atmospheric Sciences,* Vol. 59, pp. 2057-2072.

Koo, G.S., Boo, K.O., and Kwon, W.T. (2009). "Projection of temperature over Korea using an MM5 regional climate simulation." *Climate Research,* Vol 40, pp. 241 - 248.

Kothyari, U. C. and Singh, V.P. (1996). "Rainfall and temperature trends in India." *Hydrological Processes,* Vol. 10, pp. 357-372.

Koutsoyiannis, D., Efstratiadis, A. and Georgakakos, K.P. (2005). "Uncertainty assessment of future hydroclimatic predictions: A comparison of probabilistic and scenario-based approaches." *Journal of Hydrometeorology,* Vol. 8, No. 3, pp. 261-281.

Krzysztofowicz (1999). "Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model." *Water Resources Research,* Vol. 35, pp. 2738-2750.

Kulshreshtha, S.N., Grant, C.W., Marleau, R., and Guenther, E. (2003). *Technical report: Canadian droughts of 2001 and 2002.* Saskatchewan Research Council.

Kurbis, K., Mudelsee, M., Tetzlaff, G., and Brazdil, R. (2009). "Trends in extremes of temperature, dew

point, and precipitation from long instrumental series from central Europe." *Theoretical and Applied Climatology,* Vol. 98, pp. 187-195.

Kwadijk, J., Rotmans, J. (1995). "The impact of climate change on the river Rhine: a scenario study." *Climatic Change*, Vol. 30, pp. 397 - 426.

Kwon, W.T., and Baek, H.J. (2006). "Change of extreme events of temperature and precipitation over Korea using regional projection of future climate change." *Geophysical Research Letters,* Vol. 33, L01701, doi:10.1029/2005GL023378.

Laurens M. Bouwer and Jeroen C.J.H. Aerts Researchers (2009). *Financing climate change adaptation.*

Laurent, C. and Parey, S. (2007). "Estimation of 100-year-return-period temperatures in France in a non-stationary climate: Results from observations and IPCC scenarios." *Global and Planetary Change,* Vol. 57, pp. 177 - 188.

Leclerc, M. and Ouarda, T.B.M.J. (2007). "Non-stationary regional flood frequency analysis at ungauged sites." *Journal of Hydrology,* Vol. 343, pp. 254-265.

Lee, D., An, H., Lee, Y., Lee, J., Lee, H., and Oh, H. (2010) " Improved multisite stochastic weather generation with applications to historical data in South Korea." *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science*, Vol. 46, No. 4, pp. 497-504.

Lee S., and Bae, D.H (2012). "Local effects of climate change over South Korea with a high-resolution climate scenario." *Climate Research,* Vol. 54, pp. 85-93.

Lee, J.H., Kim, C.J. (2012). "A multimodel assessment of the climate change effect on the drought severity-duration-frequency relationship." *Hydrological Process,* DOI:10.1002/hyp.9390.

Lehner, B., Doll, P., Alcamo, J. (2008). "Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis." *Climatic Change*, Vol. 75, No. 3, pp. 273- 299.

Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., and Wallis, J. R. (1994). "Hydroclimatological trends in the continental United States, 1948 - 88." *Journal of Climate,* Vol. 7 pp. 586 - 606.

Lettenmaier, D.P. and Sheer, D.P. (1991). "Climatic sensitivity of California water resources.", *Journal of Water Respirces Planning and Management*, Vol. 117, No. 1, pp. 108-125.

Lettenmaier, D.P., Wood, A.W., Palmer, R.N., Wood, E.F., and Stakhiv, E.Z. (1999). "Water Resources Implications of Global warming: A U.S. Regional Perspective." *Climate Change,* Vol. 43, pp. 537-579.

Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F. and Burges, S.J. (1994). "A Simple hydrologically Based Model of Land Surface Water and Energy Fluxes for GSMs." *Journal of Geophysical Research,* Vol. 14, pp. 415-428.

Lim Y.K., Shin D.W., Cocke S., Larow T.E., Schoof J.T., O'9Brien J.J., Chassignet E.P. (2007). "Dynamically and statistically downscaled seasonal simulations of maximum surface air temperature over the southeastern United States." *Journal of Geophysical Research,* 112: D24102. DOI: 10.1029/2007JD008764

Lin, Y.P., Hong, N.M., Wu, P.J., Verburg, P.H. (2007). "Impacts of land use change scenarios on hydrology and land use patterns in the Wu-Tu watershed in Northern Taiwan." *Landscape and Urban Planning,* Vol. 80, No. 1-2, pp. 111-126.

Lins, H. F. and Slack, J. R. (1999). "Streamflow trends in the United States." *Geophysical Research Letters,* Vol. 26, No. 2, pp. 227 - 230.

Linsley, R.K., Kohler M.A., and Paulhus J.L.H. (1982). Hydrology for engineers. McGraw-Hill, New York.

Liu Y., Gupta H. V. (2007). "Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimiliation framework." *Water Resources Research,* Vol. 43, W07401.

Liu, B. H., Xu, M., Henderson, M., and Qi, Y. (2005). "Observed trends of precipitation amount, frequency, and intensity in China, 1960 - 2000." *Journal of Geophysical Research - Atmospheres,* Vol. 110 No. D8 (Art. No. D08103).

Lock, A. P., A. R. Brown, M. R. Bush, G. M. Martin, and R. N. B. Smith (2000). "A new boundary layer mixing scheme. Part I: Scheme description and SCM tests." *Monthly Weather Review,* Vol. 128, pp. 3187-3199.

Loland, A., Aldrin, M., Ona, E., Hjellvik V., and Holst, C. (2007). "Estimating and decomposing total uncertainty for survey based abundance estimate of Norwegian spring-spawning herring." *International Council for the exploration of the sea*, Vol. 64, pp. 1302-1312.

Loukas, A, Vasiliades, L., and Tzabiras, J.(2008). "Climate change effects on drought severity." *Advances in Geosciences,* Vol 17, pp. 23-29.

LTS International Ltd. (2008). *Capability and cost assessment of the major forest nations to measure and monitor their forest carbon for office.*

Lu, L., and Stedinger, J. R. (1992). "Variance of 2- and 3-paremeter GEV/PWM quantile estimators: formulas, confidence intervals and a comparison." *Journal of Hydrology,* Vol. 138, pp. 247-268.

Ma, K. and Cao, J. (1999). "Climatic noise and potential predictability of monthly mean temperature over China." *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 69, pp. 231-237.

Mahe, G., Olivry, J.C. and Wotling, G. (2001). "Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa: 1951-1989." *Hydrological. Science Journal*, Vol. 46, No. 2, pp. 211-226.

Marloes Bakker and Henk van Schaik (2010). *Climate change adaptation in the water sector - Financial issues.*

Martin Leclerc. and Taha B.M.J. Ouarda. (2007). "Non-stationary regional flood frequency analysis at ungauged sites." *Journal of Hydrology,* Vol 343, pp. 254-265.

Martin T. Schultz, Ben P. Gouldby, Jonathan D. Shimm, Johannes L. Wibowo (2010). Beyond the factor of safety: Developing fragility curves to characterize system reliability. US Army Corps of Engineers.

Martin, E.S., and Stedinger, J.R. (2000). "Generalized maximum likelihood GEV quantile estimator for hydrologic data." *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 11, pp. 3001-3010.

Martin, G.M., M.A. Ringer, V.D. Pope, A. Jones, C. Dearden, and T.J. Hinton (2006). "The physical properties of the atmosphere in the new Hadley Centre Global Environmental Model (HadGEM1). Part I: Model description and global climatology." *Journal of Climate,* Vol. 19, pp. 1274-1301.

Masanobu Shinozuka, M.Q.Feng, Jongheon Lee, Toshihiko Naganuma (2000). "Statistical analysis of fragility curves." *Journal of Engineering Mechanics*, pp. 1224-1231.

Mason, S.J. (2004). "Simulating climate over western north America using stochastic weather generator." *Climatic Change*, Vol. 62, pp. 155-187.

Maurer, E.P. (2007). "Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios." *Climatic Change,* Vol. 82, pp. 309-325.

May, W. (2008). "Potential future changes in the characteristics of daily precipitation in Europe simulated by the HIRHAM regional climate model." *Climate Dynamics*, 30, pp. 581 - 603.

Mazozara, M., Bailey, M., and Kerchner, C. (2007). "Distribution of impacts of natural disasters across income groups: A case study of New Orleans." *Ecological Economics,* Vol. 63, No. 2-3, pp.299-306.

Mckee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration of time scales." *8th Conference on Applied Climatology,* Jan., Aneheim, CA, pp. 179-184.

McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1995). "Drought monitering with multiple time scales preprints." *9th Conference on Applied Climatology,* 15-20 Janiary, Dallas, TX, pp. 233-236.

Mendelsohn, R.O., W.N. Morrison, M.E. Schlesinger and N.G. Andronova (1998). "Country-specific market impacts of climate change." *Climatic Change*, Vol. 45, No. 3-4, pp. 553-569.

Michanel A Toman (2001). *Climate change economics and policy.*

Ministry of Land, *Transport and Maritime Affairs (MLTM). 1995. 1995 Historical Drought Event Survey Report (in Korean).*

Ministry of Land, *Transport and Maritime Affairs (MLTM). 2002. 2001 Historical Drought Event Survey Report (in Korean).*

Minville, M., Brissette, F., and Leconte, R. (2008). "Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed." *Journal of Hydrology,* Vol. 368, pp. 70-83.

Mishra, A.,K., and Singh, V.P. (2009). "Analysis of drought severity-area frequency curves using a general cir-culation model and scenario uncertainty." *Journal of Geophysical Research,* Vol. 114, D06120, doi:10.1029/2008JD010986.

Mishra, A.K., and Singh, V.P. (2009). "Analysis of drought severity-area frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty." *Journal of Geophysical Research,* Vol. 114, D06120.

Mohseni, O., Stefan, H. G., Erickson, T. R., (1998). "A nonlinear regression model for weekly stream temperatures." *Water Resources Research,* Vol 34, No. 10, pp. 2685-2692.

Monteith, J.L. (1965). "Evaporation and the environment. In The state and movement of water in living

organisms." *XIXth Symposium.* Soc. for Exp. Biol., Swansea, Cambridge University Press, p.p. 205-234.

Morlet, J., Arens, G., Forgeau, I., and Giard, D. (1982) "Wave propagation and sampling theory." *Geophysics*, Vol. 47, pp. 222-236.

Moron, V. (1994). "Guinean and Sahelian Rainfall Anomaly Indices at Annual and Monthly Scales (1933-1990)." *International Journal of Climatology,* Vol. 14, pp. 325-341.

Morrill, J. C., Bales, R. C., Conklin, M. H. (2005). "Estimating Stream Temperature from Air Temperature: Implications for Future Water Quality." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 131, No. 1, pp. 139-146.

Moss, R., M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, L. Erda, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J. F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O'Neill, R. Pichs, Keywan Riahi, Steven Rose, Paul Runci, Ron Stouffer, Detlef van Vuuren, John Weyant, Tom Wilbanks, J. P. van Ypersele, and M. Zurek. (2008). "Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies." *Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, pp. 132.

Moussaoui, S., Carteret, C., Brie, D. and Mohammad-Djafari, A. (2006). "Bayesian analysis of spectral mixture data using Markov Chain Monte Carlo Methods." *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,* Vol. 81, pp. 137-148.

Munich Re (2005). "Topics Geo : Natural catastrophes analyses, assessments, positions."

Murphy A.H. (1989). "Skill scores based on the mean-square error and their relationships to the correlation coefficient." *Monthly Weather Review,* Vol. 116, pp. 2417-2424.

Murphy, A.H. (1996). "General decompositions of MSE-based skill scores: Measures of some basic aspects of forecast quality." *Monthly Weather Review,* Vol. 124, pp. 2353-2369.

Nash, J.(1953). "Two-person cooperative games." Econometrica. Vol. 21, No. 1, pp. 128-140.

National Academy of Sciences (1999). *The Impacts of Natural Disasters: A Framework for Loss Estimation.*

National Institute of Meteorological Research (2009). *Understanding of climate change - climate change in Seoul*, National Institute of Meteorological Research, Korea.

Natural Environment Research Council: NERC (1975). *Flood Studies Report.* Vol. I. NERC, London. UK.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R, King, K.W. (2002). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2000.* Grassland, Soil and Water Research LABoratory, Agricultural Research Service, 808 East Blackland Road, Temple, TX.

Netanyahu, S. (1998). *Bilateral water policy coordination.* Edited by R.E. Just and S. Netanyahu, Conflict and Cooperation on Trans-Boundary Water Resources, Boston.

New Mexico Water Resources Research Institute (2001). *Institutional adjustments for coping with*

prolonged and sever drought in the RIO GRANDE BASIN, NEW MEXICO WRRI Technical Completion Report No. 317.

Nguyen, V.T.V, Nguyen, T.D., and Cung, A. (2007). "A statistical approach to downscaling of sub-daily extreme rainfall processes for climate-related impact studies in urban areas." *Water Science & Technology,* Vol. 7, No. 2, pp. 183-192.

Nicholas Stern (2007). *The economics of climate change - the Stern review.*

Nicholson, S. E. (1993). "An Overview of African Rainfall Fluctuations of the Last Decade." *Journal of Climate,* Vol. 6, No. 5, pp. 1463-1466.

Nicol, A., and Kaur, N. (2009). *Adapting to climate change in the water sector.*

NIgel W. Arnell (2010). "Adapting to climate change: an evolving research programme." *Climatic Change,* Vol. 100, No. 1, pp. 107-111.

Nordhaus, W.D. and J.G. Boyer (2000). *Warming the world: The economics of the greenhouse effect.* Cambridge, MA: MIT Press.

Noriatusu Ozaki, Takehiko Fukushima, Hideo Harasawa, Toshiharu Kojiri, Katsunori Kawashima, and Miyuki Ono (2003). "Statistical analyses on the effect of air temperature fluctuation on river water qualities" *Hydrological Processes,* Vol. 17, No. 14, pp. 2837-2853.

OECD (2008). *Donor profiles on aid to water supply and sanitation - aid at a glance and development co-operation policies.*

OECD (2010). *Country case studies on financing water resources management.*

Okuyama, Y., G. Hewings, M. Sonis (2002). "Economic impacts of unscheduled events: sequential interindustry models (SIM) approach." *Proc. 14th International Conference on Input-Output Techniques,* Montreal, Canada.

Osborne, M.J. (2003). *An Introduction to Game Theory.* Oxford Univ Press.

Palmer, W.C. (1965). *Meteorological Drought.* Research Paper No. 45, U.C. Weather Bureau, Washington D.C.

Panofsy, H.A. and Brire, G.W. (1963). *Some application of statistics to meteorology.* Pennsylvania State University, Universtiy Park, Pennsylvania, pp. 224.

Park, J.-S., Kang, H.-S., Lee, Y. S., and Kim, M.-K. (2010). "Changes in the extreme daily rainfall in South Korea." *International Journal of Climatology*, DOI:10.1002/joc.2236.

Partal, T. and Kahya, E. (2006). "Trend analysis in Turkish precipitation data." *Hydrological Processes*, Vol. 20, pp. 2011-2026.

Paturel, J. E., E. Servat, B. Kouame, H. Lubes, M. Ouedraogo, and J. M. Masson, (1997). "Climatic variability in humid Africa along the gulf of Guinea. Part Two: An Integrated regional approach." *Journal of Hydrology*, Vol. 191, pp. 16-36.

Paulo AA, Ferreira E, Coelho C, Pereira LS. (2005). "Drought class transition analysis through Markov

and Loglinear models, an approach to early warning." *Agricultural Water Management*, Vol. 77, No. 1 - 3, pp. 59 - 81.

Paulo, A.A., Ferreira, E., Coelho, C., Pereira, L.S. (2005). "Drought class transition analysis through Markov and Loglinear models, an approach to early warning." *Agricultural Water Management*, Vol. 77, No. 1-3, pp. 59-81.

Payne, J.T., Wood, A.W., Hamlet, A.F., Palmer, R.N., and Lettenmair, D.P. (2004). "Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia river basin." *Climate Change*, Vol. 62, pp. 233-256.

Penman, H.L. (1956). "Evaporation: An introductory survey." *Netherlands Journal of Agricultural Science*, Vol. 4, pp. 7-29.

Perkins, S.E. and Pitman, A.J. (2009). "Do weak AR4 models bias projections of future climate changes over Australia?." *Climatic Change*, Vol. 93, pp. 527-558.

Perkins, S.E., Pitman, A.J., Holbrook, N.J., and Mcaneney, J. (2007). "Evaluation of the AR4 climate models' simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions." *Journal of Climate*, Vol. 20, pp. 4356-4376.

Pielke, R.A., Downton, M.W., and Miller, J.Z.B. (2002). *Flood damage in the United States, 1926 - 2000:A reanalysis of national weather service estimates,* Environmental and Societal Impacts Group.

Pilgrim, J. M., Fang, X., Stefan, H. G. (1998). "Stream temperature correlations with air temperatures in Minnesota: Implications for climate warning." *Journal of the american water resources association*, Vol. 34, No. 5, pp. 1109-1121.

Pitman, A.J. and Perkins, S.E. (2008). "Regional projections of future seasonal and annual changes in rainfall and temperature over Australia based on skill-selected AR4 models." *Earth Interactions,* Vol. 12, No. 12, pp. 1-50.

Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. (1986). *Numerical recipes*. Cambridge University press: Cambridge, UK.

Prudhomme, C. and Davies, H. (2009). "Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 2: future climate." *Climatic Change*, Vol. 93, pp. 197-222.

Qi, S., Sun, G., Wang, Y., McNulty, S,G., Moore Myers, J.A. (2009). "Streamflow response to climate and landuse changes in a coastal watershed in north Carolina." *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 52, No. 3, pp. 739-749.

Quevauviller, P. (2010). "Is IWRM achievable in practice? Attempts to break disciplinary and sectoral walls through a science-policy interfacing framework in the context of the EU Water Framework Directive." *Irrigation & Drainage System*, Vol. 24, No. 3/4, pp. 177-189.

Racsko, P., Szeidl, L., and Semenov, M. (1991). "A serial approach to local stochastic weather models." *Ecological Modelling*, Vol, 57, pp. 27-41.

Raftery, A. E., Gneiting, T, Balabdaoui, F. and Polakowski, M. (2005). "Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensemble." *Monthly Weather Review*, Vol. 133, pp. 1155-1174.

Raisanen, J. (2007). "How reliable are climate models?" *Tellus*, Vol. 59, pp. 2-29.

Rebecca J. Romsdahl and Christopher R. Pyke (2009). "What does decision support mean to the climate change research community." *Climatic Chnage*, Vol. 95, pp. 1-10.

Regional Climate Projections. In Climate Change (2007). *The Physical Science Basis. Contribution of WGI to the IPCC AR4*. Editted by Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M, Miller H.L., Cambridge University Press: Cambridge and New York.

Reichler T. and Kim, J. (2008). "How well do coupled models simulate today's climate?" *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 89, pp. 303-311.

Renard, B., Lang, M. and Bois, P. (2006). "Statistical analysis of extreme events in a non-stationary context via a Bayesian framework: case study with Tpeak-over-threshold data." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 21, pp. 97-112.

Reynard, N.S., Prudhomme, C. and Crooks, S.M. (2001). "The flood characteristics of large U.K. Rivers: potential effects of changing climate and land use." *Climatic Change*, Vol. 48, pp. 343-359.

Richardson CW. (1981). "Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar-radiation." *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 1, pp. 182 - 190.

Rivest, C., Staniforth, A. and Robert, A. (1994). "Spurious resonant response of semi-Lagrangian discretisations to orographic forcing: diagnosis and solution." *Monthly Weather Review*, Vol. 122, pp. 366-376.

Rob V.D.V. (2010). *Financing Water Resources Management in the Netherlands*. Rijkswaterstaat Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Rogers, P. (1969). "A game theory approach to the problems of international river basins." *Water Resources Research*, Vol. 5, pp. 749-760.

Rogers, P. (1991). *International river basins: Pervasive unidirectional externalities.* Paper presented at a conference on the Economics of Transnational Commons, April 25-27, Universita di Siena, Siena, Italy.

Rojas, R.(1996). "Neural Networks." Springer-Verlag, Berlin.

Rose, A., J. Benavides. (1998). "Regional economic impacts." *Engineering and Socioeconomic Impacts of Earthquakes: an Analysis of Electricity Lifeline Disruption in the New Madrid Area,* Edited by M. Shinozuka et al., MCEER, Buffalo, pp. 95-123.

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*, Mc Graw-Hill, New York.

SalgueiroAnaRita, EreiraHenriqueGarcia, RicoMaria-Teresa (2008). "Application of correspondence analysis in the assessment of mine tailings dam breakage risk in the mediterranean region." *Risk Analysis*, Vol. 28, No. 1, pp. 13-23.

San-Martin, D., Cofino, A.S., Herrera S., and Gutierrez, J.M. (2008). *The ENSEMBELES statistical downscaling portal. An end-to-end tool for regional impact studies*, Preprint submitted to Environmental Modeling & Software.

Sanso, B. and Guenni, L. (1999). "Venezuelan rainfall data analysed by using a Bayesian space-time model." *Journal of Applied Statistics*, Vol. 48, No. 3, pp. 345-362.

Schaake, J. C. (1990). "From climate to flow." *Climate Change and U.S. Water Resources*. Edited by Waggoner, P.E., John Wiley, New York, pp. 177-206.

Schonwiese, C. D., and Rapp, J. (1997). *Climate trend Atlas of Europe - Based on observations 1891-1990*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.

Sefton, C.E.M., Boorman, D.B. (1997). "A regional investigation of climate change impacts on UK streamflows." *Journal of Hydrology*, Vol. 195, pp. 26 - 44.

Sen, A. and Srivastava, M. S., (1975). "On tests for detecting change mean." *Annals of Statistics*, Vol 3, pp. 98-108.

Shannon, C.E. (1948) "A mathematical theory of communication." *Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379-423.

Sharif, M. and Burm, D.H, (2006). "Simulating climate change scenarios using an imroved K-nearest neighbor model." *Journal of Hydrology*, Vol. 325. No. 1-4, pp. 179-196.

Sharply, A.N., and Williams, J.R. (1990). *Erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation*, U.S.Dept.of Agric., Washington D.C., Tech.Bul. 1768.

Shiau, J.T., Song F., and Saraless N. (2007). "Aceeseement of hydrological drought for the Yellow River China, using copulas." *hydrological processes*, Vol. 21, No. 16, pp. 2157-2163.

Shukla, J., Delsole, T., Fennessy, M., Kinter, J., and Paolino, D., (2006). "Climate model fidelity and projections of climate change." *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L07702.

Simon, A. Herbert (1955). "A behavioral model of rational choice." *Quarterly journal of Economics*, Vol. 69, No. 1, pp. 99-118.

Sin, G., Gernaey, K.V., Neumann, M.B., Loosdrecht, M., Gujer, W. (2009). "Uncertainty analysis in WWTP model applications: A critical discussion using an example from design." *Water Research*, Vol. 43, pp. 2794-2906.

SIWI (2009). *Water and Climate Change Adaptation.*

Sloan, P.G., Moore, I.D. (1984). "Modeling Subsurface Stormflow on Steeply Sloping Forested Watersheds." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 12, pp. 1815-1822.

Smith (1996). *Adapting to Climate Change-Assessments and Issues.*

Smith, R. N. B. (1990). "A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 116, pp. 435-460.

Smith, R.N.B. Gregory, D., Wilson, C., Bushell, A.C. (1999). *Calculation of saturated specific humidity*

and large-scale cloud. Unified model documentation paper 29, version 4.1.

Spittlehouse, D.L. (1989). “Estimating evapotranspiration from land surfaces in British Columbia.” *Estimation of Areal Evapotranspiration,* Vancouver, B.C., Canada, pp. 245-256.

SPSS INC. (2003). *SPSS base 12.0 user guide.* Chicago.

Stakhiv (1993). *Evaluation of IPCC Adaptation Strategies*.

Stedinger, J. R., Vogel, R. M., and Foufoula-Georgiou, E. (1993). “Frequency analysis of extreme events” *Handbook of Hydrology*, edited by Maidment, D.R., McGraw-Hill.

Stern, Nicholas (2007). *The economics of climate change - the Stern review.* Cambridge University Press.

Strupczewski, W.G., Singh, V.P. and Mitosek, H.T. (2001). "Non-stationary approach to at-site flood frequency modelling III: Flood analysis of Polish rivers." *Journal of Hydrology*, Vol. 248, pp. 152-167.

Sugahara, S. (2009). "Non-stationary frequency analysis of extreme daily rainfall in Sao Paulo, Brazil." *International Journal of Climatology*, Vol. 29, pp. 1339-1349.

Sun,T. and Wang, J.(2007). "A simple model for assessing output uncertainty in stochastic simulation system." *Advances in Artificial Intelligence*, Vol. 4827, pp. 337-347.

Suzuki, M. and Nakayama, M. (1976). “The Cost Assignment of the Cooperative Water Resource Development: A Game Theoretical Approach.” *Management science*, Vol. 22, No. 10, pp. 1081- 1086.

Taylor K.E. (2001). “Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. D7, pp. 7183-7192.

The 2030 Water Resources Group (2009). *Charting our water future - Economic frameworks to inform decision-making*.

The World Bank (2006). *Clean energy and development: towards an investment framework*.

The World Bank (2010). *Development and Climate Change*.

Theil, H. (1971). *Applied economic forecasting, North Holland Publishing Company, Amsterdam, Netherlands*.

Thom HCS. (1958). "A note on the gamma distribution." *Monthly Weather Review,* Vol. 86, pp. 117 - 122.

Todini (2007). "Hydrological catchment modelling: past, present and future." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 11, pp. 486-482.

Tol, R.S.J. (2002). "Estimates of the damage costs of climate change. part II: dynamic estimates." *Environmental and Resource Economics,* Vol. 21, pp. 135-160.

Tol, R.S.J.(2005). "The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties." *Energy Policy*, Vol. 33, No. 16, pp. 2064-2074.

Tomer, M.D., Schilling, K.E. (2009). "A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology." *Journal of Hydrology*, Vol. 376, No. 1-2, pp. 24-33.

Torrence, C., and Compo, G.P. (1998). “A practical guide to wavelets analysis.” *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 79, No. 1, pp. 61-78.

U.N. Environment Programme (2008). *Global green new deal, UNEP Green Economy Initiative.*

U.N. Environment Programme (2009a). *A global green new deal, Febuary : Final Report.*

U.S. Climate Change Science Program (2008). *Revised research plan for the U.S.*

U.S. Climate Change Science Program and Global Change Research (2003). *Strategic plan for the U.S. CCSP.*

U.S. Environmental Protection Agency (2008). *National water programme strategy*: Response to Climate Change. pp. ii.-9.

UK House of Lords (2005). *Select Committee on Economic Affairs*, The Economics of Climate Change, July.

UKCP (2009a). *National assessment of change in river flows.*

UKCP(2009b). *Using UKCP09 to inform resource planning and management.*

UKCP(2009c). *Using UKCP09 to update existing research.*

Um, M.-J., Cho., W., and Heo, J.-H. (2010). “A comparative study of the adaptive choice of thresholds in extreme hydrologic events." *Stochastic Environmental Research Risk Assessment*, Vol. 24, pp. 611-623.

UN (2009). *Guidance on water and adaptation to Climate Change 2009.*

UNDP (2008). *Human development report 2007/2008.*

UNECE/WHO (2008). *Draft Guidance on water and climate adaptation.* United Nations Economic Commission for Europe/World Health Organisation Regional Office for Europe, Geneva, Switzerland / Rome, Italy.

UNESCO (2010). **UN 세계물개발보고서 I.**

UNFCCC (2007a). *Investment and financial flow - towards an investment framework.*

UNFCCC (2007b). *Impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries.*

Unie van Waterschappen (2008). *the Netherlands, climate change and Dutch water management.*

University of Guelph. (2006). *Task force on climate adaptation*, Occasional Paper, No.19.

UN-Water and Global Water Partnership(GWP) (2007). *Roadmapping for Advancing Integrated Water Resources Management(IWRM) processes.*

van der Veen, A., Vetere Arellano, A.L., Nordvik, J.-P. (eds.) (2003). *In search of a common methodology for damage estimation.* Joint NEDIES and University of Twente Workshop, Report EUR 20997 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Italy.

Verhoef, A., Feddes, R.A. (1991). *Preliminary review of revised FAO radiation and temperature methods*. Land and Water Division, FAO, Rome.

Vidal, J.P., and Wade, S. (2007). “A multimodel assessment of future climatological droughts in the

United Kingdom." *International Journal of Climatology*, Vol. 29, No. 14, pp. 2056-2071.

Villarini, G. (2009). "Flood frequency analysis for nonstationary annual peak records in an urban drainage basin." *Advances in Water Resources*, Vol. 32, pp. 1255-1266.

Vincent, L. A. and Mekis, E. (2006). "Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the twentieth century." *Atmosphere-Ocean*, Vol. 44, No. 2, pp. 177-193.

Vogel, R. M., Wilson, C. Daly. (1999). "Regional regression models of annual streamflow for the United States." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 125, No. 3, pp. 148-157.

Walters, D. N., Best, M. J., Bushell, A. C., Copsey, D., Edwards, J. M., Falloon, P. D., Harris, C. M., Lock, A. P., Manners, J. C., Morcrette, C. J., Roberts, M. J., Stratton, R. A., Webster, S., Wilkinson, J. M., Willett, M. R., Boutle, I. A., Earnshaw, P. D., Hill, P. G., MacLachlan, C., Martin, G. M., Moufouma-Okia, W., Palmer, M. D., Petch, J. C., Rooney, G. G., Scaife, A. A., and Williams, K. D. (2011). "The Met office unified model global atmosphere 3.0/3.1 and JULES global land 3.0/3.1 configurations." *Geoscientific Model Development Discussion*, Vol. 4, pp. 1213-1271.

Wang, W., Van Gelder, P.H., and Vrijling, J. K. (2005). "Trend and stationarity analysis for streamflow processes of rivers in Western Europe in the 20th Century." *IWA International Conference on Water Economics, Statistics, and Finance*, 8 - 10 July, Rethymno, Greece.

Wang, X. and Smith, K. (2006). "Characteristic-based clustering for time series data." *Data Mining and Knowledge Discovery*, Vol. 13, pp. 335-364.

Warren, R. (2006). "Impacts of global climate change at different annual mean global temperature increases." *Avoiding Dangerous Climate Change*, Edited by Schellnhuber, H.J., Cramer, W., Nakicenovich, N., Wigley, T., and Yohe, G., Cambridge University Press.

Watts, M., Goodess, C.M., and Jones, P.D. (2004). *The CRU Daily Weather Generator.* BETWIXT Technical Briefing Note 1, Version 2, February 2004.

Webb B. W. and Noblis F., (1997). "Long-term perspective on the nature of the air-water temperature relationship: A case study." *Hydrological Process*, Vol. 11, pp. 137-147.

Webb B. W., Clack P. D. and Walling D. E., (2003). "Water-air temperature relationships in Devon river system and the role of flow." *Hydrological Process*, Vol. 17, pp. 3069-3084.

Webb B. W., Hannah, D. M., Moore, R. D.,Brown, L. E. and Nobilis, F. (2008). "Recent advances in stream and river temperature research." *Hydrological Process*, Vol. 22, pp. 902-918.

Webster, S., A. R. Brown, D. R. Cameron, and C. P. Jones (2003). "Improvements to the representation of orography in the Met Office Unified Model" *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 129, pp. 1989-2010.

Wei-Chiang Hong. (2008). "Rainfall forecasting by technological machine learning models." *Applied Mathematics and Computation*, Vol 200, pp. 41-57.

Wilby, R.L. and Harris, I. (2006). "A framework for assessing uncertainties in climate change impacts:

Low-flow scenarios for the River Thames, U.K..” *Water Resources Research*, Vol. 42, W02419.

Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B. Whetton, P., and Mearns, LO. (2004). *Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods*, Technical report, Data Distribution Centre of the IPCC.

Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., and Mearns, L.O. (2004). “Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods.” *Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, available from the DDC of IPCC TGCIA, 27.

Wilby, R.L., Orr, H.G., Hedger, M., Forrow, D., and Blackmore, M. (2006). "Risks posed by climate change to the delivery of water framework directive objectives in the UK." *Environmental International*, Vol. 32, No. 8, pp. 1043-1055.

Wilby, R.L., Wigley, T.M.L., Conway, D., Jones, P.D., Hewitson, B.C., Main, J. and Wilks, D.S. (1998). “Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods.” *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 11, pp. 2995-3008.

Wiley, M.W. (2004). *Anlaysis techniques to imcorporate climate change information into Seattle's long range water supply planning. Mater thesis*, University of Washington, US.

Wilks D.S. (2005). *Statistical methods in the atmospheric sciences*, 2nd edition, Academic Press, New York. pp. 648.

Wilks, D.S. (1992). "Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies." *Climatic Change*, Vol. 22, pp. 67-84.

Willems, P. (2008). "Quantification and relative comparison of different types of uncertainties in sewer water quality modeling." *Water Research*, Vol. 42, pp. 3539-3551.

Wilson, D. R., and S. P. Ballard (1999). "A microphysically based precipitation scheme for the Met Office Unified Model." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 125, pp. 1607-1636.

Winter C.L. and Nychka D. (2010). “Forecasting skill of model averages.” *Stochastic Environmental Resources Risk Assessment*, Vol. 24, pp. 633-638.

Wojthiewicz, S.F. (2001). *Uncertainty quantification in large computational engineering models.* American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA-2001-1455.

Wolock, D.M. and McCabe, G.J. (1999). “Estimates of runoff using water-balance and atmospheric general circulation models.” *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, pp. 1341-1350.

Wood AW, Leung LR, Sridhar V, Lettenmaier DP. (2004). "Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs." *Climatic Change*, Vol. 62, No. 1 - 3, pp. 189 - 216.

Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V., and Lettenmaier, D.P. (2004). "Hydrologic Implications of Dynamical and Statistical Approaches to Downscaling Climate Model Outputs." *Climatic Change*, Vol.

62, pp. 189-216.

Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V., and Lettenmair, D.P. (2004). "Hydrologic implication of dynamic and statistical approaches to downscaling climate model outputs." *Climate Change*, Vol. 62, pp. 189-216.

World Bank (2006). *Clean energy and development: towards an investment framework.*

World Bank (2009). *The cost to developing countries of adapting to climate change.*

World Bank (2010). *World development report 2010 - Development and climate change.*

World Bank Analytical and Advisory Assistance (AAA) Program (2006). *Water Resources Management in Japan Policy*, Institutional and Legal Issues.

World Water Assessment Programme (2008). *Climate change and Dutch water management.*

Ya Ding, Michael J. Hayes, and Melissa Widhalm (2011). "Measuring Economic Impact of Drought : A Review and Discussion." *Disaster Prevention and Management*, Vol. 20 No. 4, pp. 434 - 446.

Yan-Fang Sang, S. (2009). "The relation between periods' identification and noises in hydrologic series data." *Journal of Hydrology*, Vol 368, pp. 165-177.

Yates, D. (2003). "A technique for generating regional climate scenarios using a nearest-neighbor algorithm." *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 7, 1199, doi:10.1029/2002WR001769.

Yohan Davit, S. (2010). "Modeling non-equilibrium mass transport in biologically reactive porous media." *Advances in Water Resources*, Vol 33, pp. 1075-1093.

Yoo CS, Kim DH. (2006). "Evaluation of Drought Events Using the Rectangular Poisson Process Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 4, pp. 373 - 382 (in Korean).

Yue, S. and Hashino. M. (2003). "Long term trends of annual and monthly precipitation in Japan." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 39, No. 3 , pp. 587-596.

Zarmudio, H.M. (2011). "Predicting the future and acting now : Climate change, the clean water act, and the lake champlain phosphorus TMDL." *Vermount Law Review*, Vol. 35, No. 4, pp. 975-1002.

Zhai, P. M., Sun, A., Ren, F. M., Liu, X., Gao, B., and Zhang, Q. (1999). "Changes of climate extremes in China." *Climate Change*, Vol. 42, pp. 203 - 218.

Zhang, Q., Xu, C. Y., Zhang, Z., Chen, Y. D., and Liu, C. L. (2009). "Spatial and temporal variability of precipitation over China, 1951 - 2005." *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 1 - 2, pp. 53 - 68.

Zhang, X., Harvey, K. D., Hogg, W. D., and Yuzyk, T. R. (2001). "Trends in Canada streamflow." *Water Resources Research*, Vol. 37, pp. 987-998.

Zhang, X., Srinivasan, R., Hao, F. (2007). "Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe river basin using the SWAT Model." *Transaction of the ASAIBE*, Vol. 50, No. 3, pp. 901-910.

Zorita, E., and von Storch, H. (1999). "The analog method as a simple statistical downscaling technique: Comparison with more complicated methods." *Journal of Climate*, Vol, 12, pp. 2474-2489.

국가수자원관리종합정보시스템 (http://www.wamis.go.kr/)

대통령직속녹색성장위원회. (http://www.greengrowth.go.kr/www/green/Is/is.cms)

동아시아 기후파트너십. (http://eacp.koica.go.kr/)

부산광역시 재난안전대책본부. (http://bangjae.busan.go.kr/)

외교통상부 ODA KOREA. (http://www.odakorea.go.kr/main.php)

한국국제협력단. (http://www.koica.go.kr/)

한국수자원공사. 국가수자원관리정보시스템(WAMIS). (http://www.wamis.go.kr/).

ADB. Greater Mekong Subregion. (http://www.adb.org/GMS/projects/reta-6121.asp)

ADB. Projects. (http://www.adb.org/Projects/)

Bowdoin (http://academic.bowdoin.edu/geology/studentwork/html/fudge.shtml)

CSIRO (http://www.clw.csiro.au/UGD/DB/ Tokyo/Tokyo.html)

Data Distribution Centre (http://www.ipcc-data.org/)

ICLEI-Local Governments for Sustainability. Water Programs. (http://www.iclei.org/index.php?id=799)

Ministry of Foreign Affairs of Japan (http://www.mofa.go.jp/announce/announce/2006/3/0320.html.)

National Hydropower Association (http://www.hydro.org/shp.htm)

OEXD. StatExtracts. (http://stats.oecd.org/Index.aspx?DatasetCode=CRSNEW)

USAID. Environmental Cooperation-Asia(ECO-Asia).
(http://www.usaid.gov/rdma/documents/ECO-Asia_Mekong_FINAL_20061030_508.pdf)

USGS (http://az.water.usgs.gov/ projects/16600.html)

USGS (http://water.usgs.gov/pubs/FS/FS-080-96)

WWF Global (http://www.panda.org/europe/freshwater/ initiatives/danube.html)

주 의

1. 이 보고서는 국토해양부에서 시행한 건설기술혁신사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 건설기술혁신사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.