제 출 문

국토해양부장관(국토교통과학기술원장) 귀하

이 보고서를 "기후변화 대비 댐 및 저수지 안정성 평가를 위한 위험도 해석기법 개발에 관한 연구"과제의 최종보고서로 제출합니다.

2015. 04. 22.

주관연구기관명 : 전북대학교 산학협력단
주관연구책임자 : 권 현 한
연구조원 : 김 진 영 외 24명
공동연구기관명 : (주)신한피앤디
공동연구책임자 : 이 경 주

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>11기술혁신
C02</td><td>해당단계
연구기간</td><td>2013.05.29.~
2014.12.28.</td><td>단계구분</td><td>3/3</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">건설교통기술연구개발사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">건설기술혁신사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">기후변화 대비 댐 및 저수지 안정성 평가를 위한 위험도 해석기법 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">권 현 한</td><td>해당단계
참여
연구원수</td><td>총 : 16명
내부 : 6명
외부 : 10명</td><td>해당단계
연구비</td><td>정부 : 329,000천원
기업 : 110,000천원
계 : 439,000천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참여
연구원수</td><td>총 : 25명
내부 : 9명
외부 : 16명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 564,000천원
기업 : 190,000천원
계 : 754,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속부서명</td><td colspan="2">전북대학교 산학협력단</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">(주)신한피앤디 기술연구소</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="2">상대국명 :</td><td colspan="3">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="2">연구기관명 :</td><td colspan="3">연구책임자 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">기후변화 영향분석의 핵심 요소는 분석한 결과에 대한 불확실성을 효과적으로 평가하는 것이며, 통계학적 모형인 Bayesian 모델은 불확실성을 정량적으로 해석하는데 있어서 가장 진보된 해석 모형으로 인정되고 있다. 따라서 본 연구에서는 기후변화에 따른 수공구조물에 불확실성을 종합적으로 고려할 수 있는 Bayesian Network 기반 위험도 해석기법을 개발하는 것이 주된 목적이다. Bayesian Network 모형은 위험인자 간의 상호작용을 양방향으로 해석할 수 있으며 불확실성을 기본적으로 고려하도록 고안된 모형으로서 향후 수공구조물의 위험도 분석에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색인어
(각 5개 이상)</td><td>한글</td><td colspan="4">댐 및 저수지 위험도 평가, 기후변화, 극치수문변량, 강우-유출모형, Bayesian Network 모형</td></tr>
<tr><td>영어</td><td colspan="4">Dam and Reservoir Risk Analysis, Climate Change, Hydrologic Extremes, Rainfall-Runoff Model, Bayesian Network Model</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제목

: 기후변화 대비 댐 및 저수지 안정성 평가를 위한 위험도 해석기법 개발

Ⅱ. 연구개발과제 개요

1. 연구개발의 목적

가. 연구개발 개요

(1) 위험도 분석은 시스템 전반의 파괴 확률과 파괴로 인한 인명 및 재산상의 손실을 추정하는 것으로서 확률과 파괴결과로서 정의될 수 있음. 시스템의 기능 또는 재난을 유발시키는 요소들에 대한 잠재성을 검증하고 위험도를 감소시키는 수단을 찾기 위한 일환으로 사용.

(2) 본 연구에서는 수리·수문학적 댐 위험도를 정량적으로 해석할 수 있는 진보된 해석 기법을 개발하는 것을 주된 목적으로 하고 있음.

나. 최종목표

(1) 댐 위험도 분석을 위한 불확실성 요소 도출 및 실행함수 개발
  (가) 기존 댐 안정성 평가 방법 검토
  (나) 구조물의 구조적 요소, 수문기상학적 요소, 수리학적 요소, 유역 요소 등으로부터 불확실성 요소 도출
  (다) 불확실성 요소를 고려한 위험도 평가 실행함수 개발

(2) 극치수문변량 재현 기법 기술 개발
  (가) 정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발
  (나) 기후변동성을 고려한 비정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발
  (다) 수문, 구조, 지반 등 불확실성 극치 변량의 다변량 모의기법 개발

(3) 강우-유출 과정의 불확실성 해석 기법 개발
  (가) Bayesian 기반 HEC-1 강우-유출 모형 개발
  (나) Bayesian 기반 HEC-5 댐 운영 모형 개발
  (다) Bayesian 기반 강우-유출 및 댐 운영 통합 모델 개발

(4) Bayesian Network 기반 위험도 해석 기법 기술 개발
  (가) 댐 파괴 모델 및 하류 피해 해석 기술 개발
  (나) 홍수 위험도 분석을 위한 Bayesian Network 모델 개발 및 적용
  (다) 풍파 위험도 분석을 위한 Bayesian Network 모델 개발 및 적용
  (라) 홍수/풍파를 동시에 고려한 Bayesian Network 모델 기반 신뢰성 개발 및 적용
  (마) 댐 주요 파괴 모드별 하류 피해 및 경제성 평가 모델 적용

2. 연구개발의 필요성

가. 연구개발 개요

(1) 댐과 같은 수공구조물의 치수능력부족은 구조물의 파손이나 붕괴에 직결되며, 대규모 인명피해와 재산피해가 불가피. 따라서 수공구조물의 정밀안전진단에 있어서 이에 대한 검토는 필수적임.

(2) 현재의 수공구조물 안정성 평가는 주로 수리·수문학적으로 불확실성을 고려한 빈도별 강우량 및 홍수량을 산정하고 이에 따른 수위 변동성을 고려하여 여유고 개념의 결정론적 해석이 주로 행해지고 있음.

(3) 최근 증가하는 기상변동성을 능동적으로 고려할 수 있는 위험도 해석기반의 확률 수문사상들의 영향을 평가하고 중요한 수리·수문 변수들에 대해서 불확실성을 고려한 신뢰도 분석이 실시되어야 함.

(4) 댐에 대한 위험도 해석 기술은 미국을 중심으로 이루어지고 있음. 그러나 실질적인 위험도 해석에 필요한 위험요소별 파괴확률 및 파괴모드 해석기술은 전 세계적으로 연구가 미진한 실정임. 따라서 선제적인 기술선점을 위해 한국형 위험도 해석기법 개발이 요구됨.

Ⅲ. 연구개발의 목표 및 내용

1. 연구개발의 목표

가. 댐 위험도 분석을 위한 불확실성 요소 도출 및 실행함수 개발

(1) 기존 댐 안정성 평가 방법 검토

(2) 구조물의 구조적 요소, 수문기상학적 요소, 수리학적 요소, 유역 요소 등으로부터 불확실성 요소 도출

(3) 불확실성 요소를 고려한 위험도 평가 실행함수 개발

나. 차년도별 연구수행 내용

(1) 정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발

(2) 강우-유출 모형 및 댐 운영 모델의 불확실성 해석 기법 개발

(3) Bayesian Network 기반 위험도 해석 기법 기술 개발 및 적용

2. 연구내용

(1) 정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발

연차	연구내용	연구내용의 범위
1차년도	■기존 댐 안정성 평가 방법 검토	■기존 댐 안정성 평가 사례들을 종합적으로 조사 분석하여 문제점 검토 위험도 해석 모형에 반영 계획 수립
	■구조물의 구조적 요소, 수문기상학적 요소, 수리학적 요소, 유역 요소 등으로부터 불확실성 요소 도출	■댐 형식, 수리수문학적 취약성에 따른 불확실성 요소들을 추출하기 위해서 국내외 사례분석, 국내 주요 댐의 피해이력조사 등을 실시하여 위험도 해석 모형 구축 시 이들 특성 고려
	■불확실성 요소를 고려한 위험도 평가 실행함수 개발	■도출된 불확실성 요소를 고려하여 댐 형식에 따라서 위험도 평가 수행을 위한 실행함수 개발
		■개발된 실행함수를 기반으로 주요 파괴모드별 위험도 해석 기법 결정 및 평가 방법 수립
	■정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발	■비정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발에 앞서 극치수문변량 모의기법에 적합한 새로운 개념의 확률밀도함수 유도방법 개발을 위한 이론적 연구 실시
		■이를 토대로 프로그램 개발을 실시하고 주요 댐 유역을 대상으로 개발된 모형의 적합성을 실험 및 실증 실시

(2) 강우-유출 모형 및 댐 운영 모델의 불확실성 해석 기법 개발

연차	연구내용	연구내용의 범위
2차년도	■기후변동성을 고려한 비정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발	■비정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발에 앞서 극치수문변량 모의기법에 적합한 새로운 개념의 확률밀도함수 유도방법 개발을 위한 이론적 연구 실시 ■이를 토대로 프로그램 개발을 실시하고 주요 댐 유역을 대상으로 개발된 모형의 적합성을 실험 및 실증 실시
	■불확실성 극치 변량의 다변량 모의기법 개발	■주요 극치수문자료간의 조건부 발생확률을 고려할 수 있는 알고리즘 개발을 통해서 댐 위험도 해석시 다중 하중의 발생으로 인한 위험도 평가가 가능한 기초해석 기술 및 프로그램 개발
	■불확실성 분석을 위한 Bayesian 기반 강우-유출 및 댐 운영 통합 모델 개발	■HEC-1(및 HEC-5) 강우-유출 모형의 Fortran 코드를 분석하고 입력 자료의 불확실성 및 매개변수들의 불확실성 정량화가 가능하도록 Bayesian 해석기법을 HEc-1(HEC-5) 강우-유출(댐 운영) 모형과 연동작업 실시 ■ 기 개발된 Bayesian HEC-1 및 HEC-5 모델이 서로 연동해서 진행 될 수 있도록 통합모델 개발
	■댐 파괴 모델 및 하류 피해 해석 기술 개발	■홍수 유입량 및 댐 운영에 따른 댐 붕괴 모의가 가능하도록 댐 파괴 모델을 활용하며 매개변수들의 불확실성 정량화가 가능하도록 Bayesian 해석기법 적용 기술 개발 ■모니터링자료 및 기존 댐 파괴 이력 조사를 이용하여 댐 붕괴 모의를 위한 구조/지반공학적 입력자료 구축 방안 수립 ■댐 붕괴 모델을 통해서 홍수파가 고려된 하류 피해분석 통계 모델 개발

(3) Bayesian Network 기반 위험도 해석 기법 기술 개발 및 적용

연차	연구내용	연구내용의 범위
3차년도	■홍수 위험도 분석을 위한 Bayesian Network 모델 개발 및 적용	■1,2차 년도를 통해서 도출된 홍수로 인한 댐 위험도 해석 모형을 근간으로 각 위험요소를 Dynamic Bayesian Network 모형으로 구축하여 홍수로 인한 위험도 해석 모듈 개발 ■실증 댐을 대상으로 홍수로 인한 위험도 해석을 실시하여 모형의 적합성을 검증
	■풍파 위험도 분석을 위한 Bayesian Network 모델 개발 및 적용	■1,2차 년도를 통해서 도출된 풍파로 인한 댐 위험도 해석 모형을 근간으로 각 위험요소를 Dynamic Bayesian Network 모형으로 구축하여 풍파로 인한 위험도 해석 모듈 개발 ■실증 댐을 대상으로 풍파로 인한 위험도 해석을 실시하여 모형의 적합성을 검증
	■홍수/풍파를 동시에 고려한 Bayesian Network 모델 기반 신뢰성 기법 개발 및 검증	■홍수/풍파를 동시에 고려할 수 있는 해석 모듈 개발 ■실증 댐을 대상으로 홍수/풍파로 인한 위험도 해석을 실시하여 모형의 적합성을 검증
	■댐 주요 파괴 모드별 하류 피해 해석 및 경제성 평가 모델 적용	■주요 파괴형태별 댐 붕괴 해석 모델 적용 ■주요 파괴모드별 댐 하류 피해 분석 모델 적용 ■위험도 저감 계획 평가를 위한 경제성 평가 모델 개발 및 적용

Ⅳ. 연구개발 결과 및 평가

1. 연구개발 결과

가. 당해연도 연구개발 결과 요약(제3차년도)

연차	연구내용	연구 수행방법 및 결과
3차년도	■홍수 위험도 분석을 위한 Bayesian Network 모델 개발 및 적용 ■풍파 위험도 분석을 위한 Bayesian Network 모델 개발 및 적용	■국내외 논문, 보고서 및 학술발표회 참가를 통해 최근 댐 위험도 평가 경향을 파악하였으며, 댐 위험도 방법론을 조사 검토하였음. ■Bayesian Network 연구의 경우 토목분야를 제외한 농업, 통신 분야 등에서 널리 이용되고 있음. ■이에 본 연구에서는 댐 위험도 해석시 새로운 기법의 연구를 수행하기 위해 Bayesian Network 기법을 도입하여 댐 위험도 해석 모형을 개발하였음. ■Bayesian Network 기법의 파괴인자의 경우 1,2차년도에 도출된 수문학적 파괴인자를 채택하여 연구를 진행하였음. ■각 수문학적 변량간의 조건부확률(conditional probability table, CPT)는 Copula 함수를 활용하여 산정하였음. ■이러한 새로운 기법의 도입으로 각 수문학적 변량들의 상호 관계가 댐 위험도 해석에 영향을 미치는 것을 정량적으로 산정하였으며, 기존 댐 위험도 해석과의 비교를 통해 결과를 제시하였음. ■최종적으로 본 연구에서 개발한 Bayesian Network 기법 결과를 이용하면 실무자가 댐 보수·보강 시 우선순위 결정을 지원할 수 있을 것으로 판단됨.
	■홍수/풍파를 동시에 고려한 Bayesian Network 모델 기반 신뢰성 기법 개발 및 검증	■기존 댐 위험도 해석 시 확률강우량 산정, 강우-유출 모형, 댐 운영 모의 순으로 연구가 진행되고 있음. ■그러나 기존 댐 위험도 해석시 확률홍수량을 산정한 후 월류확률을 산정하였지만, 풍파에 대한 고려는 미비한 실정이였음. ■이러한 이유로 댐 월류확률 산정시 풍파에 대한 영향을 고려한 결과, 풍파만을 고려하였을 때에는 댐 파괴확률에 영향을 끼치지 않은 것으로 산정되었지만, 홍수와 풍파를 동시에 고려한 결과 기존 댐 위험도 해석시 월류 확률보다 댐 파괴확률이 높아지는 것을 확인 할 수 있었음. ■따라서 이것과 관련한 댐 위험도 해석의 수문학적 파괴인자에 대한 적절성을 논물을 통해 입증하였으며, 이를 Bayesian Network 모형으로 확장하여 댐 위험도 해석 모형을 산정하였음.
	■댐 주요 파괴 모드별 하류 피해 해석 및 경제성 평가 모델 적용	■댐 위험도 해석 후 하류부의 침수범람도를 작성하여 댐 하류부 피해액 산정 모형을 개발하였음. ■댐 하류부 피해액에는 다차원법을 도입하여 홍수피해액을 산정하였으며, 인명피해액 산정 기법을 도입하여 침수심별 인명피해를 정량적으로 산정하였음. ■최종적으로 GIS 기반 홍수피해액 산정 기법 프로그램을 개발하였으며, 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 GUI 형식으로 개발하였음.

나. 당해연도 정량적 성과목표 달성도(제3차년도)

연차	성과목표	성과지표		측정방법	목표치	가중치	달성도
3차년도	(질적지표) 댐 위험도 해석 통합 모형 적용 및 평가	관련 자료 DB구축 개수		개발기술 달성여부 검토	2개	15%	15%
		위험도 해석 모드 개수			3개	30%	30%
		하류 피해 해석 여부			인명 피해산정	15%	15%
		경제성 모델 적용			피해액 산정	15%	15%
		현장적용 건수		개발성과물의 현장적용 건수	1건	25%	25%
	소 계					100%	100%
	(양적지표) 댐 위험도 요소 도출 및 파괴모드별 실행함수 개발	국내외 학술지 게재논문 건수	SCI급	SCI급 학술지 게재논문 건수	1건	20%	20%
			비SCI급	국내학술지 및 국외학술지(비SCI) 게재논문 건수	3건	25%	17% (2건)
		국내외 학술회의 발표		국내 및 국외 학술회의에서 발표한 논문 건수	6건	10%	8.5% (5건)
		소프트웨어 (S/W) 등록 건수		S/W등록 출원건수	2건	10%	10%
		분야별 인력양성 배출실적		해당과제를 통해 양성된 인력	2인 (석사)	5%	5%
		연구개발 DB 구축/등록/활용		DB의 구축여부, DB활용도(연구결과의 신규등록 건수 등)	1건	10%	10%
		현장적용 건수		개발성과물의 현장적용 건수	1건	20%	20%
	소 계					100%	90.5%
	총 계					90.5%	

2. 연구개발 평가

· 본 연구는 총 3차년도에 걸쳐 수행되었으며, 댐 및 저수지 위험도 분석을 위한 불확실성 요소를 도출하고 댐 위험도 해석을 위한 위험도 해석 방법을 정립하는데 목적을 두고 있음.

- 연구개발의 우수성 및 창의성

(1) 극치강수량 모의기법 개발을 통한 극치강수량 재현 오차 개선

(2) 대표 강우-유출 모형인 HEC-1 모형과 Bayesian 기법을 통합한 모형 구축

(3) Bayesian Network 댐 위험도 해석 모형 개발을 통한 위험도 해석 신뢰성 개선

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

1. 위험도 해석 프로그램의 개발 및 실용화

· 본 연구에서는 최근 증가하는 기상변동성을 능동적으로 대처할 수 있는 위험도 해석 기반의 확률론적 댐 위험도 평가기법을 개발하는 것이며, 이를 위해 본 연구에서는 댐 위험도 해석에 적합한 극치수문변량 재현 기법, 불확실성을 고려할 수 있는 Bayesian 강우-유출 및 댐 운영 연계 모델 개발, 최종적으로 Dynamic Bayesian Network 모델 기반 위험도 해석 모형을 구축하고자 하며 각 모듈별로 프로그램으로 실용화하여 댐 실무자가 용이하게 위험도 해석에 이용할 수 있도록 하고자 함.

2. 위험도 해석을 통한 구조물 안정성 평가

· 위험도 해석을 통한 구조물 안정성 평가는 전세계적으로 보편화 되고 있으며 우리나라 건설 분야 중 철도, 교량구조, 조선, 원자력 등 다양한 분야에서도 이미 위험도 해석에 근거한 안정성 평가가 이루어지고 있는 현실임 따라서 파괴로 인한 사회경제적 피해가 막대할 것으로 예상되는 대형 수공구조물에 대한 위험도 해석 기술에 대한 정부, 수자원공사, 안전진단 업체 등의 수요가 커질 것으로 예상되며 새로운 연구 및 산업 활동에 충분한 계기를 제공할 것으로 판단됨.

3. 유관기관과의 공동 연구수행체계 구축

· 현재까지 위험도 평가를 위한 위험도모형 구축에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있으나, 실질적인 위험도 해석에 필요한 위험요소별 파괴확률 및 파괴모드 해석기술은 연구가 미진한 실정이며, 따라서 선제적인 기술선점이 가능함 한편, 연구개발 성과 활용 및 확산을 보다 활발히 하기 위해서 한국수자원공사, 한국농어촌공사와 공동으로 연구를 수행하는 방안을 수립. 2기관과 협의하여 시범지역을 선정하고 개발된 모형의 적합성을 공동으로 평가할 수 있는 체계를 구축할 계획임.

4. 연구결과의 활용 범위 및 향후 연구계획

· 현재 국내의 댐 위험도 해석 기준은 마련되어 있지 않은 실정이므로 일반적으로 국외에서 주로 이용되고 있는 USBR Tier-1, USBR Tier-2, BC Hydro, ANCOLD 등을 사용하고 있으며, 이중 USBR의 기준이 가장 보편적으로 이용되고 있음. 이러한 이유로 국내 댐 위험도 해석연구를 지속적으로 수행하고, 추후 국내 정책 결정시 국내 주요 댐을 고려할 수 있도록 Check list를 개발하여 위험도 분석에 대한 활용성을 높여야 한다고 사료됨.

목 차

< 제 목 차 례 >

제 1 장 연구개발과제의 개요 ····· 1
제 1 절 연구개발 개요 ····· 1
1. 연구의 목적 및 필요성 ····· 1
2. 연구개발의 중요성 ····· 5
제 2 절 연구개발 목표 및 내용 ····· 6
1. 연구개발 최종목표 ····· 6
2. 연차별 연구목표 및 내용 ····· 7

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 19
제 1 절 연구개발실적 조사 ····· 19
1. 확률적 해석기법을 통한 위험도 분석 ····· 19
2. 신뢰성 해석기법을 통한 위험도 분석 ····· 21
3. 정성적 해석기법을 통한 위험도 분석 ····· 21
제 2 절 국내외 관련 기술 및 산업동향 ····· 22
1. 국내 기술 및 산업동향 ····· 22
2. 국외 기술 및 산업동향 ····· 25
3. 특허 동향 ····· 27
4. 정부지원정책 현황 ····· 27
5. 결 론 ····· 28

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과(연차별) ····· 29
제 1 절 1차년도 연구수행내용 ····· 29
1. 기존 댐 안정성 평가 방법 검토 ····· 29
2. 구조물의 구조적, 수문기상학적, 수리학적, 유역 등으로부터 불확실성 요소 도출 ····· 34
3. 댐 붕괴 원인 조사 ····· 45
4. 댐 붕괴 요소 도출 ····· 50
5. 정상성 기반 극치수문변량 모의 기법 개발 ····· 54
제 2 절 2차년도 연구수행내용 ····· 69
1. 기후변동성을 고려한 비정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발 ····· 69
2. 불확실성 분석을 위한 Bayesian 기반 강우-유출 모형 개발 ····· 98
3. 불확실성 분석을 위한 Bayesian 기반 댐 운영모델 개발 ····· 113
4. 댐 파괴 모델 및 하류 피해 해석 기술 개발 ····· 135
5. 댐 위험도 프로그램 개발 ····· 163

제 3 절 3차년도 연구수행내용 ····· 166
1. 지역빈도해석 모형 개발 ····· 166
2. 수문학적 해석모듈 GUI 개선 ····· 193
3. 실증댐 적용 사례 ····· 200
4. Bayesian Network 기반 위험도 해석 기법 기술 개발 및 적용 ····· 249

제 4 장 연구개발목표 달성도 ····· 269

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 277

제 6 장 참고문헌 ····· 279

< 그 림 차 례 >

<그림 1-1> 연구개발의 필요성 ····· 1
<그림 1-2> 위험도 분석 절차 ····· 2
<그림 1-3> 연구의 비전 ····· 4
<그림 1-4> 연구 흐름도 ····· 4
<그림 1-5> 본 연구의 세부연구과제 목표 ····· 7
<그림 1-6> 댐 위험도 해석 절차 ····· 8
<그림 1-7> 홍수로 인한 파괴 실행함수 설정 예 ····· 9
<그림 1-8> 홍수 및 풍파로 인한 위험도 해석 예 ····· 10
<그림 1-9> Dynamic Bayesian Network모형을 통한 비정상성 다변량 강수모의 모형 ··· 11
<그림 1-10> 강수량 모의 시 단일지점 및 다지점 모형에서 유역상관성 재현성 개념 ····· 12
<그림 1-11> Dynamic Bayesian Network 구성 예 ····· 12
<그림 1-12> Bayesian 모형을 활용한 강우-유출 매개변수 최적화 및 수문곡선 유도 예 ····· 13
<그림 1-13> 다중 수문시나리오와 수문모형을 통한 Super Ensemble 도출 개념 ····· 14
<그림 1-14> 댐 위험도 평가를 위한 Fault Tree ····· 15
<그림 1-15> 댐 위험도 평가를 위한 Bayeisan Network 모델 구성 예 ····· 16
<그림 3-1> 국내외 위험도 해석기법의 분류 ····· 30
<그림 3-2> 15m 이상 댐의 유형별 붕괴원인(ICOLD) ····· 35
<그림 3-3> 연천댐 붕괴 후 사진 ····· 38
<그림 3-4> 장현저수지(좌)와 동막저수지(우) 붕괴 후 사진 ····· 39
<그림 3-5> Banqiao Dam(좌)과 Vajont Dam(우) 붕괴 후 사진 ····· 40
<그림 3-6> South Fork 댐(좌)과 Buffalo Creek 댐(우) 붕괴 후 사진 ····· 41
<그림 3-7> 댐 안전도 평가방법 ····· 52
<그림 3-8> 댐 위험도 해석을 위한 수문변량 모의 개념도 ····· 55
<그림 3-9> 고정 핵밀도함수 예시 ····· 59
<그림 3-10> 다양한 핵밀도 함수 예시 ····· 60
<그림 3-11> 일강수량 모의를 위한 불연속 Kernel Pareto 분포의 적용 예시 ····· 62
<그림 3-12> PKPD 모형을 이용한 3개 강수지점의 강수량 모의 결과 ····· 64
<그림 3-13> Gamma 분포형을 이용한 3개 강수지점의 강수량 모의 결과 ····· 64
<그림 3-14> PKPD 모형으로 강수량의 통계 특성 재현 결과(July-August-September) ····· 65
<그림 3-15> 극치강수량 재현 효과를 비교하기 위한 누가확률밀도함수 ····· 66
<그림 3-16> 본 연구의 기후변화 시나리오 생산 과정 개념도 ····· 70
<그림 3-17> CMIP5의 두 초점 영역에 개략도 ····· 70
<그림 3-18> CMIP5에 장기 실험의 개략도 ····· 71
<그림 3-19> 시나리오별 시간에 따른 복사 강제력에 변화 ····· 72
<그림 3-20> 기후변화 시나리오에 의해 생산된 강수량과 실측 강수량의 비교 ····· 74
<그림 3-21> GCM 기후변화 시나리오의 불확실성 정량화 예 ····· 75
<그림 3-22> GCM 기후변화 시나리오의 불확실성 정량화 예 ····· 75

<그림 3-23> 계층적 Bayesian 모형의 최적의 기후변화 시나리오 추정 개념 ····· 77
<그림 3-24> 계층적 Bayesian 모형의 최적의 기후변화 시나리오 추정 개념 ····· 78
<그림 3-25> 강수량 관측값과 RCP 시나리오 모의값의 분포와 편의 보정 결과(2011년~2040년) ····· 79
<그림 3-26> 강수량 관측값과 RCP 시나리오 모의값의 분포와 편의 보정 결과(2041년~2070년) ····· 80
<그림 3-27> 강수량 관측값과 RCP 시나리오 모의값의 분포와 편의 보정 결과(2070년~2100년) ····· 80
<그림 3-28> 계층적 Bayesian 모형으로부터 추정된 강수량의 평균, 분산, 증가경향의 변동 분포(2011년~2040년) ····· 81
<그림 3-29> 계층적 Bayesian 모형으로부터 추정된 강수량의 평균, 분산, 증가경향의 변동 분포(2041년~2070년) ····· 82
<그림 3-30> 계층적 Bayesian 모형으로부터 추정된 강수량의 평균, 분산, 증가경향의 변동 분포(2071년~2100년) ····· 82
<그림 3-31> 한강유역 월단위 RCP 시나리오의 최적 MME 구축 결과(2011년~2100년) ····· 83
<그림 3-32> NMWSM 모형 구조 및 적용 단계 ····· 83
<그림 3-33> 소양강 댐 유역 ····· 87
<그림 3-34> 소양강댐 유역내 강수발생 상관행렬 재생 능력 검증 ····· 87
<그림 3-35> 다변량 비정상성 Downscaling 모형의 계절강수량 재현 효과 검증 ····· 88
<그림 3-36> 다변량 비정상성 Downscaling 모형의 일강수량 통계치 재현 효과 검증 ····· 89
<그림 3-37> 다변량 비정상성 Downscaling 모형으로 추출된 소양강댐 유역 Weather State ····· 89
<그림 3-38> 소양강댐 유역 Weather State별 강우발생 빈도 및 강우량 발생 특성 비교 ····· 90
<그림 3-39> 다변량 비정상성 Downscaling 모형의 극치강수량 재현효과 검증 ····· 90
<그림 3-40> 다변량 비정상성 Downscaling 모형의 확률강수량 재현효과 ····· 91
<그림 3-41> 다변량 비정상성 Downscaling 모형을 이용한 미래 상세기후변화 시나리오 ····· 91
<그림 3-42> 유역별 강수량 상관성 ····· 95
<그림 3-43> 모의 강수량의 기본 통계치 결과 ····· 96
<그림 3-44> 소양강 댐 12개 지점 2일 최대 강수량 모의 결과 ····· 96
<그림 3-45> 모의 면적 강수량의 분포특성 ····· 97
<그림 3-46> 강우(PMP)앙상블 도출 ····· 97
<그림 3-47> 초기값을 이용한 강우-유출 모의 결과(2003) ····· 102
<그림 3-48> 초기값을 이용한 강우-유출 모의 결과(2006) ····· 103
<그림 3-49> 초기값을 이용한 강우-유출 모의 결과(2007) ····· 103
<그림 3-50> 초기값을 이용한 강우-유출 모의 결과(2009) ····· 103
<그림 3-51> 강우-유출 매개변수 수렴 과정(CN, 2006) ····· 104
<그림 3-52> 강우-유출 매개변수 수렴 과정(Tc, 2006) ····· 104
<그림 3-53> 강우-유출 매개변수 수렴 과정 (R, 2006) ····· 104
<그림 3-54> Bayesian 모형을 유도된 매개변수의 사후분포(CN) ····· 104
<그림 3-55> Bayesian 모형을 유도된 매개변수의 사후분포(Tc) ····· 105
<그림 3-56> Bayesian 모형을 유도된 매개변수의 사후분포(R) ····· 105
<그림 3-57> Bayesian 방법 및 Nelder방법으로 최적화된 수문곡선 비교(2003) ·· 105
<그림 3-58> Bayesian 방법 및 Nelder방법으로 최적화된 수문곡선 비교(2006) ·· 105

<그림 3-59> Bayesian 방법 및 Nelder방법으로 최적화된 수문곡선 비교(2007)·· 106
<그림 3-60> Bayesian 방법 및 Nelder방법으로 최적화된 수문곡선 비교(2009)·· 106
<그림 3-61> Bayesian 모형을 유도된 유역별매개변수의 사후분포····· 109
<그림 3-62> Bayesian 방법 및 Nelder방법으로 최적화된 수문곡선 비교····· 109
<그림 3-63> 매개변수의 불확실성을 고려한 HEC-1 모의 결과 앙상블····· 112
<그림 3-64> HEC-1 모형을 통한 확률홍수량 산정결과····· 113
<그림 3-65> 수문 조작이 없는 저수지추적····· 113
<그림 3-66> 주여수로 및 비상여수로의 모든 수문이 작동할 때····· 120
<그림 3-67> 주여수로 및 비상여수로의 모든 수문이 작동할 때····· 120
<그림 3-68> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 1개 파괴시····· 121
<그림 3-69> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 1개 파괴시 앙상블····· 121
<그림 3-70> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 2개 파괴시····· 122
<그림 3-71> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 2개 파괴시 앙상블····· 122
<그림 3-72> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 3개 파괴시····· 123
<그림 3-73> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 3개 파괴시 앙상블····· 123
<그림 3-74> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 4개 파괴시····· 124
<그림 3-75> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 4개 파괴시 앙상블····· 124
<그림 3-76> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 5개 파괴시····· 125
<그림 3-77> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 5개 파괴시 앙상블····· 125
<그림 3-78> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 7개 파괴시····· 126
<그림 3-79> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 7개 파괴시 앙상블····· 126
<그림 3-80> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 7개 파괴시····· 127
<그림 3-81> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 7개 파괴시 앙상블····· 127
<그림 3-82> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 8개 파괴시····· 128
<그림 3-83> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 8개 파괴시 앙상블····· 128
<그림 3-84> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 9개 파괴시····· 129
<그림 3-85> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 9개 파괴시 앙상블····· 129
<그림 3-86> 주여수로 기반에서 모든 수문이 작동할 때····· 130
<그림 3-87> 주여수로 기반에서 모든 수문이 작동할 때 앙상블····· 130
<그림 3-88> 주여수로 기반에서 수문 1개 파괴시····· 131
<그림 3-89> 주여수로 기반에서 수문 1개 파괴시 앙상블····· 131
<그림 3-90> 주여수로 기반에서 수문 2개 파괴시····· 132
<그림 3-91> 주여수로 기반에서 수문 2개 파괴시 앙상블····· 132
<그림 3-92> 주여수로 기반에서 수문 3개 파괴시····· 133
<그림 3-93> 주여수로 기반에서 수문 3개 파괴시 앙상블····· 133
<그림 3-94> 주여수로 기반에서 수문 4개 파괴시····· 134
<그림 3-95> 주여수로 기반에서 수문 4개 파괴시 앙상블····· 134
<그림 3-96> 월류에 의한 붕괴형상(Johnson and Illes, 1976)····· 136
<그림 3-97> 국내치수 경제성 분석 기준의 변천····· 143

<그림 3-98> 다차원 홍수피해액 산정방법(MD-FDA) ····· 144
<그림 3-99> 다차원 홍수피해액 산정방법 ····· 145
<그림 3-100> GIS 기반 건축물 알고리즘 ····· 146
<그림 3-101> GIS 기반 건물 내용물 알고리즘 ····· 147
<그림 3-102> GIS 기반 농경지 알고리즘 ····· 148
<그림 3-103> GIS 기반 비닐하우스 알고리즘 ····· 149
<그림 3-104> GIS 인터페이스 초기화면 ····· 150
<그림 3-105> 수어댐 하류 홍수범람도 및 건물지도 ····· 151
<그림 3-106> 수어댐 하류 홍수범람도 및 토지이용도 ····· 151
<그림 3-107> 수어댐 하류 건물피해액 산정 결과 ····· 152
<그림 3-108> 파이핑으로 인한 붕괴 시나리오에 대한 경보 및 대피 타임라인(예) ···· 154
<그림 3-109> 건물별 홍수심에 따른 사망률 ····· 155
<그림 3-110> 인명손실 추정을 위한 재해지대(Jonkman, 2007) ····· 156
<그림 3-111> 빠른 수위상승 지점에서 수심에 대한 사망률 함수 ····· 156
<그림 3-112> 보존지대에서 수심에 대한 사망률 함수 ····· 157
<그림 3-113> 수심, 수위상승률 및 유속함수로써의 사망률 함수 ····· 158
<그림 3-114> 적용대상 구간 ····· 159
<그림 3-115> 유입수문곡선(PMF) ····· 159
<그림 3-116> 댐 붕괴 유출수문곡선 ····· 160
<그림 3-117> 하류부 첨두유량 변화 ····· 160
<그림 3-118> 하류부 최고수위 변화 ····· 161
<그림 3-119> 댐 붕괴에 따른 홍수범람도 ····· 162
<그림 3-120> 불확실성을 고려한 강우 모의발생 모형 실행화면 ····· 163
<그림 3-121> 강수 입력자료 형태(Box 영역이 하나의 지점을 나타냄) ····· 163
<그림 3-122> Bayesian HEC-1 강우-유출 모형 구동화면 ····· 164
<그림 3-123> Matlab 기반 HEC-5 댐 모의 운영 모델 구동화면 ····· 165
<그림 3-124> 댐 모의 운영 모형 실행 결과 ····· 165
<그림 3-125> 계층적 Bayesian 모형의 개념도 ····· 170
<그림 3-126> 모의횟수에 따른 L-모멘트와 HBRFA 모형 비교 ····· 172
<그림 3-127> 전라북도 유역내 기상청 관측소 현황 ····· 173
<그림 3-128> GEV 분포형의 적합도 검정 결과 ····· 174
<그림 3-129> 계층적 Bayesian 모형을 통한 GEV 매개변수의 사후분포 결과 ····· 175
<그림 3-130> 계층적 Bayesian 모형으로 산정한 지점별 확률강우량 산정 결과 및 불확실성 정량화 도시 결과 ····· 176
<그림 3-131> 기존 L-모멘트 기법과 HBRFA 모형 기반으로 산정된 전라북도 유역내 지역빈도해석 결과 비교 ····· 178
<그림 3-132> 공간정보를 고려한 계층적 지역빈도해석 모형 개념도 ····· 181
<그림 3-133> 한강유역내 18개 기상청 관측소 ····· 183
<그림 3-134> Gumbel 분포 확률분포형 산정 결과 ····· 184

<그림 3-135> 지형특성인자와 Scale 매개변수와의 관계(기상청&국토교통부) ····· 186
<그림 3-136> 지형특성인자와 Location 매개변수와의 관계(기상청&국토교통부) ··· 186
<그림 3-137> 지형특성인자와 Scale 매개변수와의 관계(기상청) ····· 187
<그림 3-138> 지형특성인자와 Location 매개변수와의 관계(기상청) ····· 187
<그림 3-139> 각 매개변수들의 사후분포 산정 결과 ····· 188
<그림 3-140> 각각 다른 4개의 빈도별 확률강우량 산정 결과 ····· 189
<그림 3-141> L-모멘트법과 HBRFA의 확률강우량 산정결과 및 불확실성 정량화 ····· 191
<그림 3-142> Quantile별(2.5,50,97.5%) 100년 빈도 확률강우량 산정 결과 ····· 191
<그림 3-143> 수문학적 해석모듈 메인화면 ····· 193
<그림 3-144> Step 1 - Rainfall Simulation Model ····· 194
<그림 3-145> Step 1 - 입력 예시 ····· 195
<그림 3-146> Step 1 - 확률강우량 산정 결과 그림 예시 ····· 195
<그림 3-147> Step 2 - Rainfall-Runoff Model ····· 196
<그림 3-148> 댐별 자료 ····· 196
<그림 3-149> Step 2 - 입력 예시 ····· 197
<그림 3-150> Step 2 - 확률홍수량 산정 결과 그림 예시 ····· 197
<그림 3-151> Step 3 - Dam Operation Model ····· 198
<그림 3-152> Step 3 입력 예시 ····· 198
<그림 3-153> Step 3 댐 운영 모의 결과 그림 예시 ····· 199
<그림 3-154> 광동댐 평면도 ····· 202
<그림 3-155> 댐체 표준단면도 ····· 202
<그림 3-156> 광동댐 유역 12시간 최대 확률강우량 모의 결과 ····· 203
<그림 3-157> 기존 HEC-1 모형(좌) 및 Bayesian MCMC 모형(우) ····· 204
<그림 3-158> 광동댐 유역 Bayesian MCMC 매개변수 수렴 결과 ····· 205
<그림 3-159> Bayesian HEC-1 매개변수 사후분포 결과 ····· 205
<그림 3-160> 광동댐 유역 확률홍수량 산정 결과 ····· 207
<그림 3-161> 광동댐 댐 운영 모의 결과 ····· 208
<그림 3-162> 광동댐 수위-AEP ····· 208
<그림 3-163> 광동댐 유역 홍수피해액 자료 구축 ····· 209
<그림 3-164> 광동댐 유역 농작물 피해 산정 결과 ····· 210
<그림 3-165> 홍수피해액 산정결과 ····· 210
<그림 3-166> 운문댐 유역도 ····· 211
<그림 3-167> 운문댐 유역특성 분석 ····· 213
<그림 3-168> 운문댐 유역 평면도 ····· 214
<그림 3-169> 운문댐 표준 단면도 ····· 215
<그림 3-170> 운문댐 유역 확률강우량 산정결과 ····· 216
<그림 3-171> 기존 HEC-1 모형 결과(좌) 및 Bayesian MCMC 산정 결과(우) ··· 216
<그림 3-172> 운문댐 유역 Bayesian MCMC 산정 결과 ····· 217
<그림 3-173> Bayesian HEC-1 매개변수별 사후분포 결과 ····· 217

<그림 3-174> 운문댐 유역 확률홍수량 산정 결과 ····· 219
<그림 3-175> 운문댐 댐 운영 모의 결과 ····· 219
<그림 3-176> 운문댐 수위-AEP ····· 220
<그림 3-177> 운문댐 유역 홍수피해액 자료 구축 ····· 220
<그림 3-178> 운문댐 유역 농작물 피해 산정 결과 ····· 221
<그림 3-179> 홍수피해액 산정결과 ····· 221
<그림 3-180> 영천댐 유역도 ····· 222
<그림 3-181> 영천댐 유역특성분석 ····· 223
<그림 3-182> 영천댐 유역 12시간 최대 확률강우량 모의 결과 ····· 224
<그림 3-183> 기존 HEC-1 모형(좌) 및 Bayesian MCMC 모형(우) ····· 225
<그림 3-184> 영천댐 유역 Bayesian MCMC 매개변수 수렴 결과 ····· 225
<그림 3-185> Bayesian HEC-1 매개변수 사후분포 결과 ····· 226
<그림 3-186> 영천댐 유역 확률홍수량 산정 결과 ····· 227
<그림 3-187> 영천댐 댐 운영 모의 결과 ····· 227
<그림 3-188> 영천댐 수위-AEP ····· 228
<그림 3-189> 영천댐 유역 홍수피해액 자료 구축 ····· 228
<그림 3-190> 영천댐 유역 농작물 피해 산정 결과 ····· 229
<그림 3-191> 홍수피해액 산정결과 ····· 229
<그림 3-192> 달방댐 유역도 ····· 230
<그림 3-193> 유역 지형 분석자료 ····· 231
<그림 3-194> 달방댐 평면도 ····· 232
<그림 3-195> 댐체 표준단면도 ····· 233
<그림 3-196> 달방댐 유역 확률강우량 산정결과 ····· 234
<그림 3-197> 기존 HEC-1 모형 결과(좌) 및 Bayesian MCMC 산정 결과(우) ··· 234
<그림 3-198> 달방댐 유역 Bayesian MCMC 산정 결과 ····· 235
<그림 3-199> Bayesian HEC-1 매개변수별 사후분포 결과 ····· 235
<그림 3-200> 달방댐 유역 확률홍수량 산정 결과 ····· 237
<그림 3-201> 달방댐 댐 운영 모의 결과 ····· 237
<그림 3-202> 달방댐 수위-AEP ····· 238
<그림 3-203> 달방댐 유역 홍수피해액 자료 구축 ····· 238
<그림 3-204> 달방댐 유역 농작물 피해 산정 결과 ····· 239
<그림 3-205> 홍수피해액 산정결과 ····· 239
<그림 3-206> 수어댐 전경 ····· 240
<그림 3-207> 수어댐 평면도 ····· 242
<그림 3-208> 댐체 표준단면도 ····· 242
<그림 3-209> 여수로 종단면도 ····· 243
<그림 3-210> 수어댐 취수탑 현황도 ····· 243
<그림 3-211> 수어댐 유역 12시간 최대 확률강우량 모의 결과 ····· 244
<그림 3-212> 매개변수의 불확실성을 고려한 HEC-1 모의 결과 앙상블 ····· 245

<그림 3-213> 수어댐 정상운영 상태 일 때 ····· 246
<그림 3-214> 정상운영 상태일 때 수위-AEP ····· 246
<그림 3-215> 수어댐 유역 홍수피해액 자료 구축 ····· 247
<그림 3-216> 수어댐 유역 건물피해액 산정 결과 ····· 247
<그림 3-217> 수어댐 홍수피해액 산정결과 ····· 248
<그림 3-218> Bayesian Network 개념도 ····· 250
<그림 3-219> Gibbs Sampling 방법을 이용한 Bayesian MCMC 개념도 ····· 252
<그림 3-220> 홍수경보 방송을 이용한 Bayesian Network 개념도 ····· 253
<그림 3-221> Bayesian network 기반의 댐 위험도 해석 구성도 ····· 256
<그림 3-222> Bayesian Network 기반의 댐 위험도 해석 모형 예시 ····· 256
<그림 3-223> Bayesian Network 기반의 댐 파괴확률 ····· 257
<그림 3-224> 정성적 자료로부터 Bayesian Network Node별 조건부 확률 추정 개념도 ····· 258
<그림 3-225> 댐 위험도 해석을 위한 Bayesian Network 모형 개념 ····· 260
<그림 3-226> 수문학적 파괴인자의 각 확률분포형 도시 결과 ····· 263
<그림 3-227> Copula 함수를 활용한 댐 초기수위 모의 결과 ····· 264
<그림 3-228> 기존 댐 운영룰에 및 수위변동성을 고려한 댐 운영 모의 비교 결과 · 264
<그림 3-229> 기존 댐 위험도 해석(좌) 및 초기수위를 고려한 댐 위험도 해석 모형(우) ···· 265
<그림 3-230> 극한강우량을 부여한 Bayesian Network 모의 결과 ····· 266
<그림 3-231> 극한 강우량 및 초기수위를 고려한 기존 댐 위험도 해석 모형과의 결과 비교 ····· 266
<그림 3-232> 바람을 고려한 댐 위험도 해석 모형 결과 ····· 267

< 표 차 례 >

<표 2-1> 세부기술별 국내 기술개발 현황 ····· 22
<표 2-2> 세부기술별 국내 기술개발 수준 ····· 23
<표 2-3> 세부기술별 국내 연구 인프라 수준 ····· 24
<표 2-4> 기후변화 적응 기술 개발로 인한 경제적 파급 효과 ····· 25
<표 2-5> 세부기술별 국외 주요 연구기관 현황 ····· 26
<표 3-1> 댐 붕괴 원인 요약(1981, Lou) ····· 35
<표 3-2> 우리나라 소류지 및 댐 붕괴사례 ····· 36
<표 3-3> 1960-1998년에 발생한 미국의 댐 붕괴사례 현황(USBR, 1999) ····· 42
<표 3-4> 기타 국가의 댐 붕괴사례 현황 ····· 43
<표 3-5> 댐 형식별 댐 붕괴사례 현황 ····· 44
<표 3-6> 댐 형식별 댐 붕괴사례 현황 ····· 44
<표 3-7> 1986년까지 11,192개 흙댐에 대한 붕괴 현황 ····· 46
<표 3-8> 흙댐 붕괴의 빈도비교 ····· 46
<표 3-9> 댐 붕괴원인의 잠재적 요소 및 붕괴모드 ····· 51
<표 3-10> 댐 위험도 해석에서 다루어지는 변량 ····· 53
<표 3-11> 2-state Markov Chain 모형의 천이확률 ····· 58
<표 3-12> 강우-유출 분석시 사용된 강우 지점 자료 ····· 63
<표 3-13> 관측치와 모이치의 천이확률 재현 결과 ····· 65
<표 3-14> PKPD 모형을 통한 모의결과의 통계적 비교 (July-August-September) ····· 66
<표 3-15> PKPD 모형을 통한 모의결과의 통계적 비교 (October-November-December) ····· 67
<표 3-16> RCP 시나리오 구성 ····· 71
<표 3-17> RCP기반 시나리오 출력자료 ····· 72
<표 3-18> RCP기반 시나리오 출력자료 및 출력기간 ····· 73
<표 3-19> 본 연구에서 사용된 CMIP RCP 시나리오 구성 ····· 73
<표 3-20> 강우-유출 모형 매개변수의 초기 가정치 ····· 102
<표 3-21> 각 매개변수별 사후분포로부터 추정된 불확실성 구간(2006) ····· 106
<표 3-22> 모의결과에 대한 통계적인 일치성 검토 결과 ····· 108
<표 3-23> 모의결과에 대한 통계적인 일치성 검토 결과 ····· 110
<표 3-24> 주여수로, 보조여수로의 작동 여부에 따른 확률 ····· 116
<표 3-25> 주여수로만의 작동 여부에 따른 확률 ····· 118
<표 3-26> 댐 붕괴 및 해석요소(Singh, 2003) ····· 137
<표 3-27> 침수심별 피해율 ····· 147
<표 3-28> 도시유형별 평가액 ····· 148
<표 3-29> 논/밭의 침수심별 피해율 ····· 149
<표 3-30> 댐 하류부 자산피해액 산정 결과 ····· 152
<표 3-31> 소양강 댐 붕괴 홍수파 해석결과(PMF) ····· 161
<표 3-32> 전라북도 유역내 기상청 관측소 자료의 기본적인 통계치 ····· 173
<표 3-33> 사후분포로부터 도출된 확률강우량의 불확실성 구간 산정 결과 ····· 177

<표 3-34> Case별 DIC 값 비교 결과 ····· 182
<표 3-35> 기상청 18개 관측소의 지형학적 정보 ····· 183
<표 3-36> 연구대상 유역내 관측소의 기본적인 통계치 ····· 185
<표 3-37> 불확실성 분포로부터 도출된 기본 통계치 및 불확실성 정량화 ····· 188
<표 3-38> 지점별 불확실성 구간 정량화 산정 결과 ····· 190
<표 3-39> 광동댐 유역 수문특성인자 ····· 200
<표 3-40> 광동댐 치수능력증대사업 추진 경과 ····· 200
<표 3-41> 광동댐 주요제원 ····· 201
<표 3-42> Bayesian MCMC와 BHEC-1의 검정 통계치 ····· 206
<표 3-43> 운문댐 주요제원 ····· 212
<표 3-44> 운문댐 유역 수문특성인자 ····· 214
<표 3-45> Bayesian MCMC와 BHEC-1의 검정 통계치 ····· 218
<표 3-46> 영천댐 주요제원 ····· 223
<표 3-47> 영천댐 유역 수문특성인자 ····· 224
<표 3-48> Bayesian MCMC와 BHEC-1의 검정 통계치 ····· 226
<표 3-49> 달방댐 유역 수문특성인자 ····· 230
<표 3-50> Bayesian MCMC와 BHEC-1의 검정 통계치 ····· 236
<표 3-51> 수어댐 주요 제원 ····· 241
<표 3-52> 유역 A, B의 홍수 발생 확률 ····· 253
<표 3-53> 홍수에 따른 경고 시스템 작동 확률 ····· 253
<표 3-54> 홍수 경보에 따른 지자체 A와 B의 홍수 사상 전달 확률 ····· 253
<표 3-55> 정성적 자료로부터 Bayesian Network Node별 조건부 확률 추정 결과 ····· 258
<표 3-56> 정성적 자료로부터 Bayesian Network Node별 조건부 확률 추정 결과 ····· 259
<표 3-57> Copula 함수 분포 (Nelsen, 2006) ····· 261
<표 3-58> 변량들의 통계치 및 Quantile 값 ····· 262

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발 개요

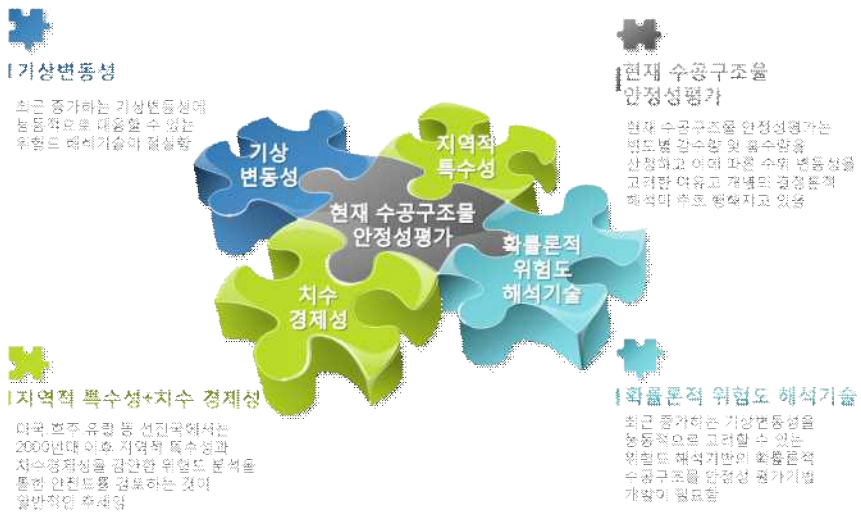
1. 연구의 목적 및 필요성

· 댐과 같은 수공구조물의 치수능력부족은 구조물의 파손이나 붕괴에 직결되며, 대규모 인명피해와 재산피해가 불가피함. 따라서 수공구조물의 정밀안전진단에 있어서 이에 대한 검토는 필수적이라 할 수 있으며, 이미 오래전부터 원자력, 조선, 철도, 플랜트 등의 분야에서는 위험도 해석에 근거한 안정성 평가를 도입하여 구조물 신뢰성평가, 사업우선순위 결정, 위험도 저감 계획 수립, 잠재적 위험도 처리 등 다양한 목적으로 위험도 해석기술을 이용하고 있음.

· 현재 미국, 호주, 유럽 등 선진국에서는 2000년대 이후로 지역적 특수성과 치수경제성을 감안한 위험도 분석을 통하여 안전도를 검토하는 것이 일반적인 추세인 반면, 우리나라의 수공구조물 안정성 평가는 주로 수리·수문학적으로 불확실성을 고려한 빈도별 강수량 및 홍수량을 산정하고 이에 따른 수위 변동성을 고려한 여유고 개념의 결정론적 방식에 입각한 해석이 주로 이루어지고 있는 실정임.

· 따라서 최근 증가하는 기상변동성을 능동적으로 고려하기 위해서는 위험도 해석기반의 확률론적 수공구조물 안정성 평가기법 개발이 필요하며 이를 위하여 수자원 시스템에 대한 수문사상들의 영향을 평가하고 중요한 수리·수문 변수들에 대해서 불확실성을 고려한 신뢰도 분석은 반드시 선결되어야 하는 연구 분야임.

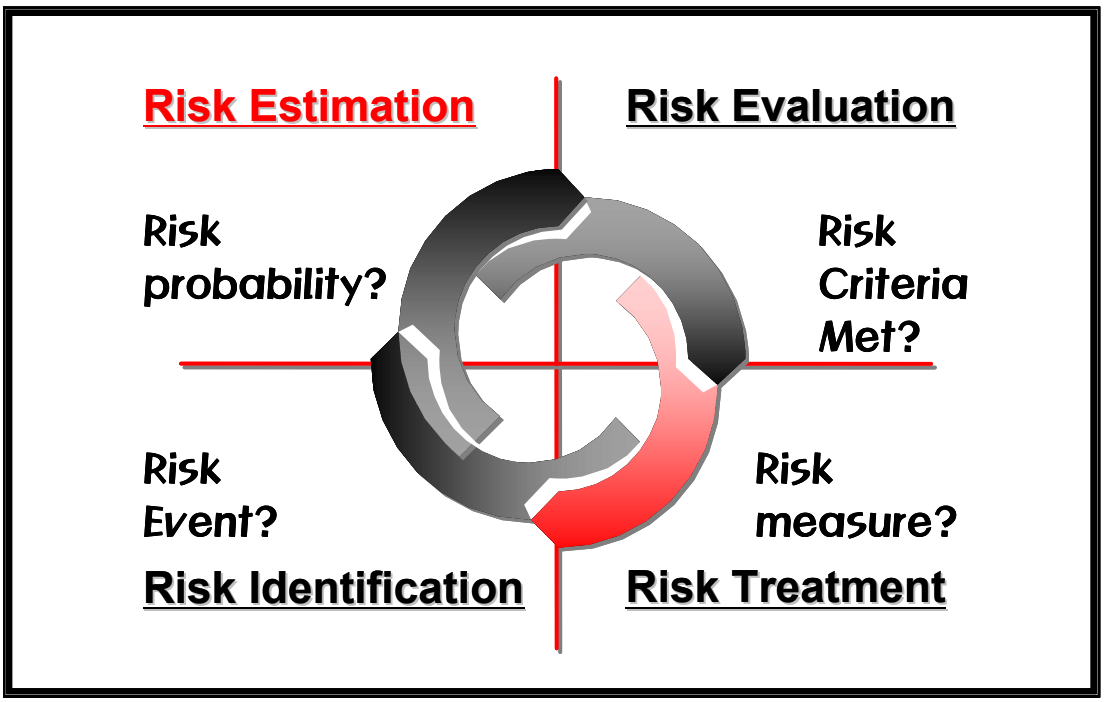
· 한편, 이와 관련한 주요 연구 및 댐에 대한 위험도 해석 기술은 미국을 중심으로 이루어지고 있으나, 실질적인 위험도 해석에 필요한 위험요소별 파괴확률 및 파괴모드 해석기술은 전 세계적으로 연구가 미진하므로 선제적인 기술선점을 위해서라도 한국형 위험도 해석기법 개발이 요구되는 시점임.



<그림 1-1> 연구개발의 필요성

가. 연구개발 개요

(1) 위험도 분석(risk analysis)은 위험요소규명(risk identification), 위험도추정(risk estimation), 위험도분석평가(risk assessment), 위험도 관리(risk management)의 과정을 통해 시스템 전반의 파괴 확률과 파괴로 인한 인명 및 재산상의 손실을 추정하는 방법론으로 일반적인 위험도 분석 절차는 다음 <그림 1-2>와 같음



<그림 1-2> 위험도 분석 절차

(2) 위험도는 확률과 파괴결과로서 정의될 수 있으며, 위험도 분석은 시스템의 기능 또는 재난과 재난을 유발시키는 요소들에 대한 잠재성을 검증하고 위험도를 감소시키는 수단을 찾기 위한 일환으로 사용되고 있음

(3) 위험도 분석은 댐과 같이 낮은 파괴확률에도 불구하고 파괴시 막대한 피해를 주는 분야에 중점적으로 적용되고 있으며 미국, 영국, 네덜란드, 호주 등을 중심으로 발전되어왔다. 위험도분석평가는 위험도분석과 분석결과를 가지고 위험도평가를 수행하는 전 과정을 의미함

(4) 위험도평가 수행 중 가장 중요한 부분은 위험요소를 인지하고 각 위험요소로 인해 발생하는 위험도를 정량적으로 추정하는 것임. 발생 위험도를 정확히 인지하는 것이 전체적인 위험도 해석 결과의 신뢰성을 결정짓는 가장 중요한 사항이며 본 연구에서는 수리수문학적 위험도를 정량적으로 해석할 수 있도록 진보된 해석기법을 개발하는 것이 본 연구의 주된 목적임

나. 연구개발 기술의 정의

(1) 과거 수공구조물 안정성 검토의 개념이 과거자료에 근거한 현재의 위험도를 인지하는 수준이었다면 앞으로는 공학적으로 미래의 위험도에 대한 적극적인 고려와 경제적으로 효율성을 고려한 접근이 서로 연결된 새로운 개념으로 전환되고 있음

(2) 위험도 해석 기술은 기후변화로 인해 증가하는 기상변동성 및 불확실성 증가는 기존 수공구조물에 안정성을 저해하는 요인으로 작용하고 있으며 기존의 결정론적 해석방법의 근거한 안정성 해석기법의 한계점을 보완

(3) 위험도 관리 개념이 확대되고 증가하는 극치수문사상에 대한 사회기반시설의 안정성 확보 요구가 강조됨에 따라 이에 부응할 수 있는 수공구조물의 위험도 해석기법 기술 및 운영 계획을 개발

(가)건설기술 측면에서의 위험도 관리 방안 구축

① 건설기술측면에서 수공구조물 신뢰성 평과와 관련된 타 분야와 연계·통합하여 증가되는 기상변동성에 따른 위험도 관리를 효율적으로 수행할 수 있도록 사업 영역을 확보하고 제도적 근거 및 관리 방안을 구축을 위한 위험도 관리 기술 개발

(나)기존 선행 연구 및 진행 중인 과제와 연계된 체계적인 위험도 해석 기술 개발

① 수공구조물 위험도 분석기법은 수리수문학, 신뢰성공학, 확률통계학, 수문기상학 등 다양한 학문분야가 융합될 때 비로소 다양한 하중에 대해서 유연하게 대응할 수 있는 체계적인 위험도 해석이 가능

② 이러한 문제점을 극복하기 위하여 기존 선행연구 및 진행 중인 과제에 대한 조사를 철저히 진행하고 연계·활용 전략을 수립하여 위험도 해석 기술을 개발

(다) 실용화 및 현업화를 기반의 위험도 해석 기술 개발

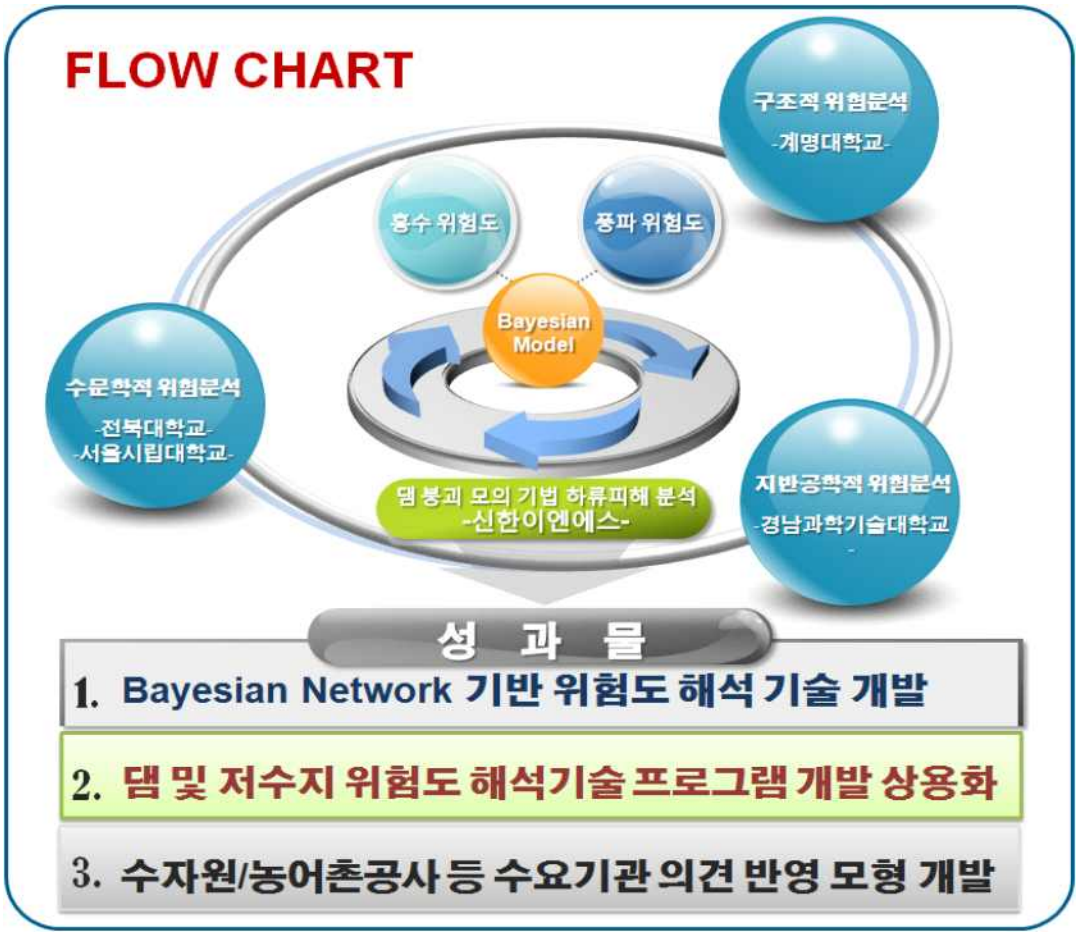
① 공공기반기술개발은 사업의 특수성으로 인해 기존 연구 성과물은 설계 및 가이드라인 제작에 머물러 있으며 실질적으로 활용 사례는 발생하지 못하고 있음

② 본 연구에서는 실질적인 구현 뿐 만 아니라 수자원공사, 농어촌공사 및 한국시설안전공단 등에서 실용화 및 현업화에 기반을 둔 기술을 개발추진

다. 연구의 비전



<그림 1-3> 연구의 비전



<그림 1-4> 연구 흐름도

2. 연구개발의 중요성

· 국내외적으로 수공구조물에 위험도 분석은 주로 단편적인 해석에 그치고 있으며 기후변화와 같은 외력으로 인한 해석기법은 전무한 상태로서 최근 증가하는 기상변동성을 고려할 때 기술개발이 시급함.

가. 기술적 측면

(1) 국내외적으로 수공구조물에 위험도 분석은 주로 단편적인 해석에 그치고 있으며 기후변화와 같은 외력으로 인한 해석기법은 전무한 상태로서 최근 증가하는 기상변동성을 고려할 때 기술개발이 시급함

(2) 선진국에서에는 1970년대 후반 수자원 분야에서 기후변화로 인한 비정상성 연구가 시작되어 지금까지 30여년 연구가 진행되고 있음. 그러나 기후변화에 따른 구조물의 안전도 및 위험도 관련 연구는 매우 부족한 실정임

(3) 기후변화 대비 수공구조물 안정성 평가를 위한 완전 연동 Bayesian Network 위험도 해석기법 개발』이 효과적으로 이루어진다면 국내외적으로 수공구조물 위험도 해석기법의 수준을 진일보 시키는 역할을 할 것으로 판단되며 기존 수공구조물에 수명 연장 등 국가 정책인 녹색기술로서도 역할이 기대됨

나. 경제산업적 측면

· 기후변화로 인해 집중호우 발생빈도가 증가하고 지역적 편차가 심화되고 있으며, 이로 인해, 홍수 피해액은 '70년대 0.17조원에서 최근('02년~ '06년) 2.7조원으로 증가하였음. 이에 홍수 피해에 대비하기 위한 국가 차원의 효율적 수자원 관리가 현안으로 부상하고 있음. 특히 기존 수공구조물의 안정성이 크게 약화되고 있는 현실에서 새로운 개념의 안정성 평가기법과 위험도정보의 제공에 대한 수요가 증가하고 있음.

· 기존 수공구조물에 대한 안정성 평가는 주로 현재의 위험도에 초점을 맞춰 주기적인 모니터링을 기본으로 하고 있으나 증가하는 기상학적 변동성을 고려하지 못하는 현실적인 어려움이 있음. 국가기관 및 수공구조물 운영 주체가 되는 전문기관들이 장기적인 위험도 관리를 위한 정보를 취득하는데 한계가 있으며 이에 대한 정보제공을 통한 유지관리 비용저감 및 위험도 처리 비용 감소가 요구되고 있음.

· 최근 기후변화에 대응하기 위해서는 새로운 위험도 평가 기술을 통해 현재의 위험도 뿐만 아니라 예측관점에서의 위험도 추정이 가능한 방법론을 개발함으로서 수공구조물 취약분야에 대한 보완 및 대응전략을 미리 준비하여 경제적 손실을 저감할 수 있을 것으로 예상.

· 수공구조물 유지관리 관점에서 새로운 개념도입이 가능한 방법론을 개발함으로서 국제적으로 수자원 및 안전진단분야에 경쟁력을 높일 수 있고 위험도 해석 기술의 해외 이전을 통한 국가 브랜드 가치 창출 효과 발생이 가능할 것으로 예상.

· 따라서 수공구조물 위험도 관리 관련 산업의 발전이라는 직접적 효과뿐만 아니라 관련 기술 해외 이전 등 다양한 파급효과가 발생할 수 있기 때문에 기후변화 대비 위험도 관리 기술 확보는 경제적으로 국가 경쟁력 향상에 기여 전망.

제 2 절 연구개발 목표 및 내용

1. 연구개발 최종목표

가. 최종목표

(1) 댐 위험도 분석을 위한 불확실성 요소 도출 및 실행함수 개발
  (가)기존 댐 안정성 평가 방법 검토
  (나)구조물의 구조적 요소, 수문기상학적 요소, 수리학적 요소, 유역 요소 등으로부터 불확실성 요소 도출
  (다)불확실성 요소를 고려한 위험도 평가 실행함수 개발
(2) 극치수문변량 재현 기법 기술 개발
  (가)정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발
  (나)기후변동성을 고려한 비정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발
  (다)수문, 구조, 지반 등 불확실성 극치 변량의 다변량 모의기법 개발
(3) 강우-유출 과정의 불확실성 해석 기법 개발
  (가)Bayesian 기반 HEC-1 강우-유출 모형 개발
  (나)Bayesian 기반 HEC-5 댐 운영 모형 개발
  (다)Bayesian 기반 강우-유출 및 댐 운영 통합 모델 개발
(4) Bayesian Network 기반 위험도 해석 기법 기술 개발
  (가)댐 파괴 모델 및 하류 피해 해석 기술 개발
  (나)홍수 위험도 분석을 위한 Bayesian Network 모델 개발 및 적용
  (다)풍파 위험도 분석을 위한 Bayesian Network 모델 개발 및 적용
  (라)홍수/풍파를 동시에 고려한 Bayesian Network 모델 기반 신뢰성 기법 개발 및 적용
  (마)댐 주요 파괴 모드별 하류 피해 해석 및 경제성 평가 모델 적용



<그림 1-5> 본 연구의 세부연구과제 목표

2. 연차별 연구목표 및 내용

· 댐의 있어서 위험도평가는 위험도분석결과를 바탕으로 위험도의 허용정도를 기준으로 삼아, 수리·수문학적·구조적·환경적인 측면을 고려하여 위험도의 정도를 판단하는 과정임.(<그림 1-6>)

· 본 연구를 통해서 개발하고자 하는 모형은 『기후변화 대비 댐 안정성 평가를 위한 완전 연동 Bayesian Network 위험도 해석기법 개발』

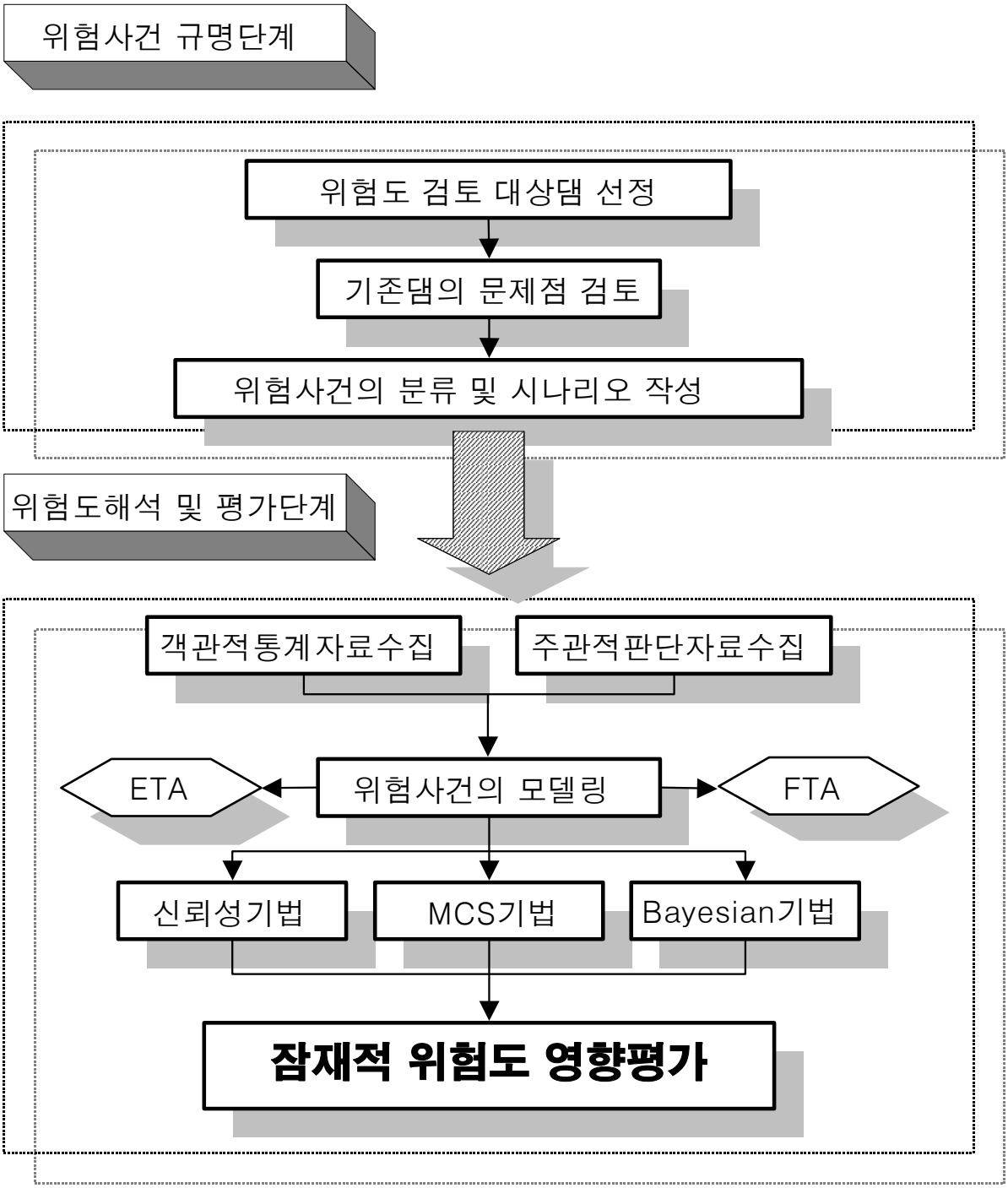
– 기후변화 영향분석에서 불확실성을 효과적으로 평가하는 것이 핵심 요소임

– 통계학적 모형인 Bayesian 모델은 불확실성을 정량적으로 해석하는데 있어서 가장 진보된 해석 모형으로 인정되고 있음

– 따라서 본 연구에서는 기후변화에 따른 수공구조물에 불확실성을 종합적으로 고려할 수 있는 Bayesian Network 기반 위험도 해석기법을 개발하고자 함

– Bayesian Network 모형은 위험인자 간의 상호작용을 양방향으로 해석할 수 있으며 불확실성을 기본적으로 고려하도록 고안된 모형으로서 수공구조물의 위험도 분석에 효과적으로 적용될 수 있음

– 『기후변화 대비 댐 안정성 평가를 위한 완전 연동 Bayesian Network 위험도 해석기법 개발』을 구현하기 위해서는 기본적으로 다음과 같은 해석 모듈 개발이 선결되어야 함



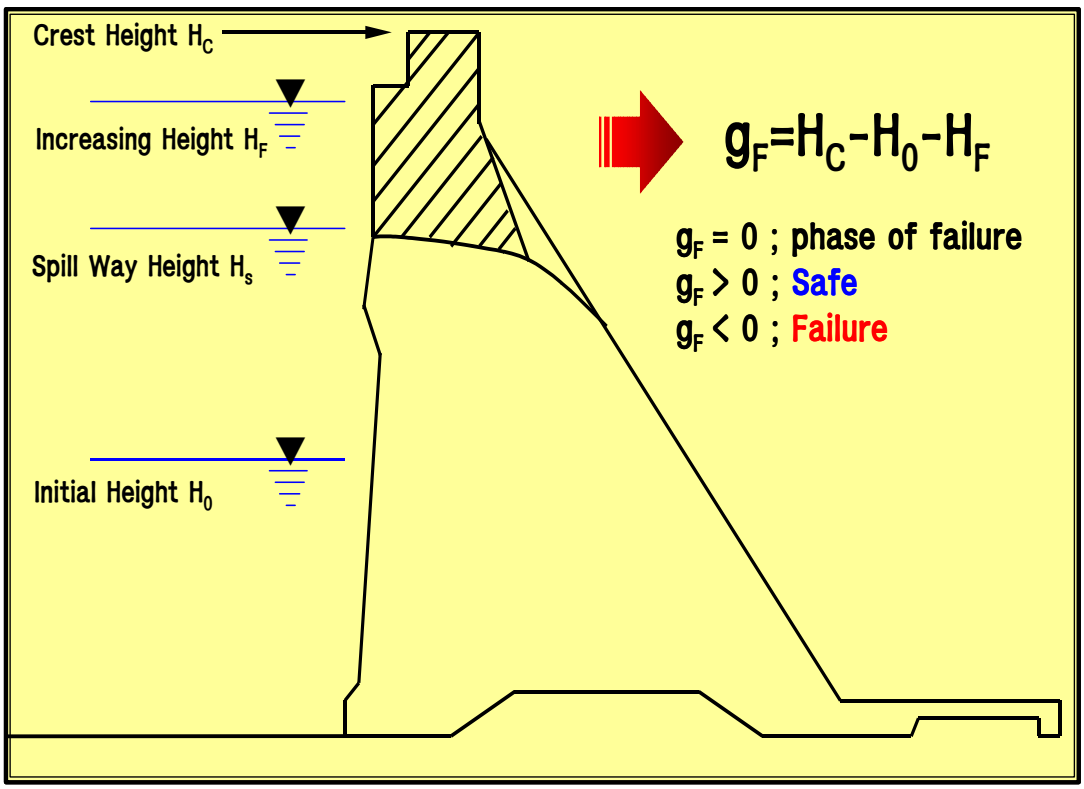
<그림 1-6> 댐 위험도 해석 절차

가. 연구목표 및 내용(총괄)

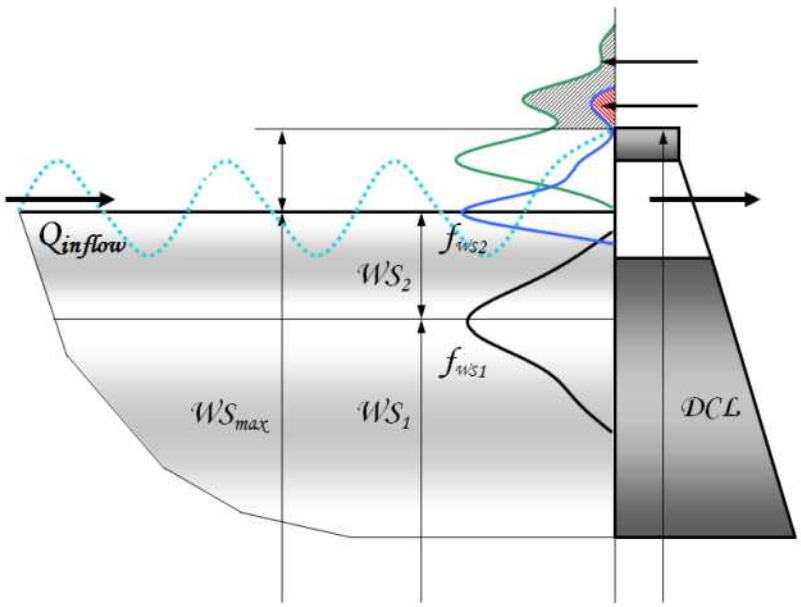
(1)댐 위험도 분석을 위한 불확실성 요소 도출 및 실행함수 개발

연 차	주요 연구내용	수행방법
1차년도	■기존 댐 안정성 평가 방법 검토	■기존 댐 안정성 평가 사례들을 종합적으로 조사 분석하여 문제점 검토 위험도 해석 모형에 반영 계획 수립
	■구조물의 구조적 요소, 수문기상학적 요소, 수리학적 요소, 유역 요소 등으로부터 불확실성 요소 도출	■댐 형식, 수리수문학적 취약성에 따른 불확실성 요소들을 추출하기 위해서 국내외 사례분석, 국내 주요 댐의 피해이력조사 등을 실시하여 위험도 해석 모형 구축 시 이들 특성 고려
	■불확실성 요소를 고려한 위험도 평가 실행함수 개발	■도출된 불확실성 요소를 고려하여 댐 형식에 따라서 위험도 평가 수행을 위한 실행함수 개발 ■개발된 실행함수를 기반으로 주요 파괴모드별 위험도 해석 기법 결정 및 평가 방법 수립

· 기존 여수로 방류능력의 수리·수문학적 분석과정 및 결과를 검토하여 댐의 안전에 영향을 주는 불확실성 변량에 대한 검토를 실시하고 댐의 형식 및 유지 상태에 따라 댐 위험도를 발생시키는 불확실성 요소를 고려하여 “홍수로 인한 월류 위험도”, “풍파로 인한 월류 위험도”, “홍수와 풍파의 동시 발생으로 인한 월류 위험도” 등의 3가지로 나누어 위험도 해석 방안을 도출함.



<그림 1-7> 홍수로 인한 파괴 실행함수 설정 예



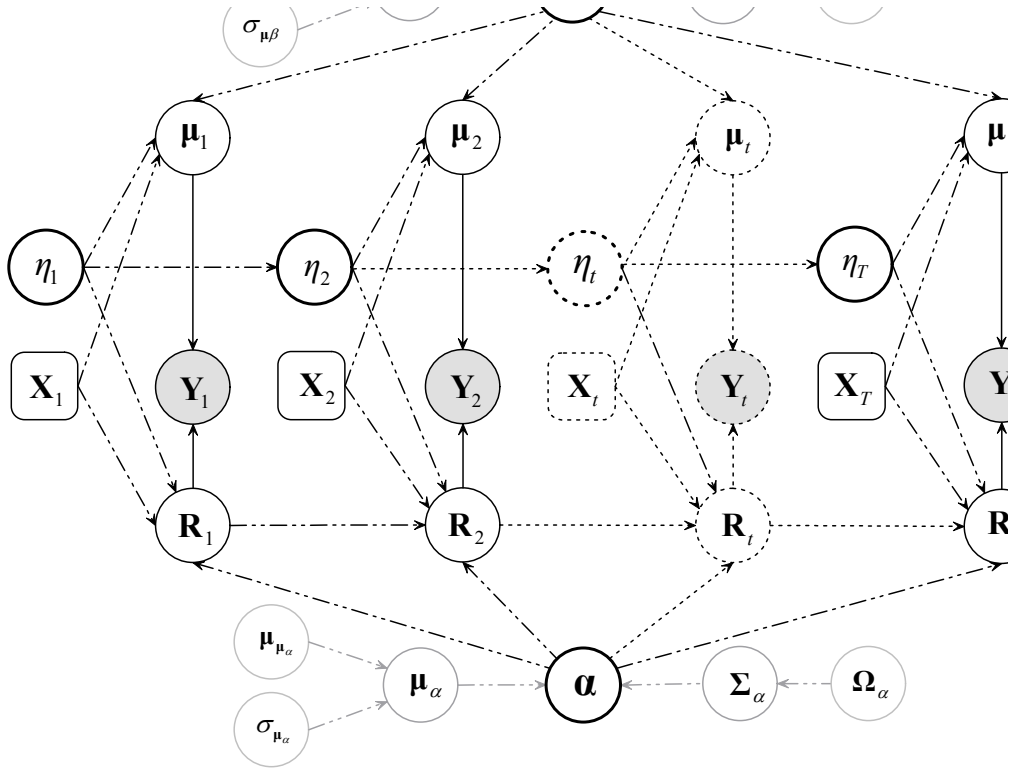
<그림 1-8> 홍수 및 풍파로 인한 위험도 해석 예

· 댐 파괴 사상의 함수적 관계를 나타내는 함수를 실행함수라 하며 M-Dimension 공간에서 파괴 표면을 나타냄. 따라서 파괴는 실행함수가 음의 값을 가지는 경우에 발생. 이러한 실행함수 설정시에 댐의 형식, 제원 및 저수용량 등이 기본 자료로서 중요한 요소로 작용하게 되므로 위험도 실행함수 설정에 앞서 기존댐의 형식, 경과 연수, 저수용량, 댐 높이 등 댐 제원과 특성을 기존 보고서 및 참고자료를 통해 분석함.

(2)극치수문변량 재현 기법 기술 개발

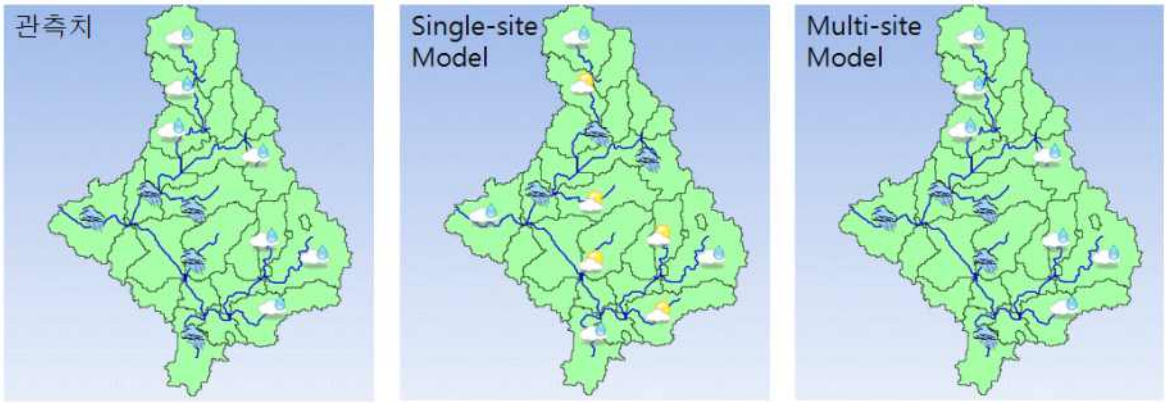
연 차	주요 연구내용	수행방법
1차년도	■정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발	■비정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발에 앞서 극치수문변량 모의기법에 적합한 새로운 개념의 확률밀도함수 유도방법 개발을 위한 이론적 연구 실시 ■이를 토대로 프로그램 개발을 실시하고 주요 댐 유역을 대상으로 개발된 모형의 적합성을 실험 및 실증 실시
2차년도	■기후변동성을 고려한 비정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발	■1차년도에 정상성 기반 극치수문변량 모의를 위해 특화된 기법을 근간으로 기후변동성이 고려될 수 있는 비정상성 모형으로 확장이 가능하도록 이론적 연구 실시 및 프로그램 개발 ■주요 댐 유역을 대상으로 개발된 모형의 적합성을 실험 및 실증 실시
	■수문, 구조, 지반 등 불확실성 극치 변량의 다변량 모의기법 개발	■주요 극치수문자료간의 조건부 발생확률을 고려할 수 있는 알고리즘 개발을 통해서 댐 위험도 해석 시 다중 하중의 발생으로 인한 위험도 평가가 가능한 기초해석 기술 및 프로그램 개발

· 기존 수공구조물 위험도 해석에서 문제점은 과거의 수문특성이 미래에도 동일하게 유지된다는 정상성 가정을 기반으로 하고 있어 기후변화와 같은 외력을 효과적으로 고려할 수 비정상성(nonstationarity) 해석 모형 개발이 요구됨
· <그림 1-9>는 Dynamic Bayesian Network를 이용한 비정상성 다변량 강수모의기법의 구조를 나타냄. Y가 일강수량이 되며 R은 강수의 발생을 나타내며 외부인자 X에 의해서 강수의 발생 확률 및 강수량이 조건부로 연동해서 추정됨



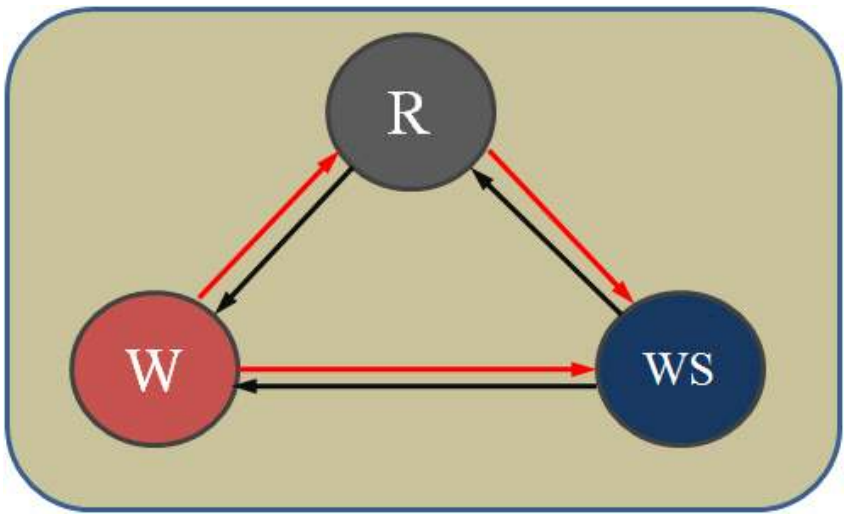
<그림 1-9> Dynamic Bayesian Network모형을 통한 비정상성 다변량 강수모의 모형

· 수문모형에서 입력자료로 사용되는 강수 및 온도 등이 수문관측지점마다 독립적으로 모의된다면 유역에서 산정되는 수문량은 물리적인 의미를 상실하게 됨. 따라서, 수문사상의 모의 과정에서 유역내 공간적인 동질성을 유지하기 위해서는 유역단위 공간상관성을 고려할 수 있는 다변량 수문변량 모의 모형 개발이 필요
· <그림 1-10>이 유역에서 강우 발생 시 나타나는 강우의 패턴이라 가정했을 때, 단일지점 모의기법의 경우 유역내 관측소간의 상관성이 결여되게 되지만, 다변량 수문기상 모의 기법의 경우 유역상관성을 효과적으로 재현할 수 있음
· 모의를 통해 추정된 면적강수량에 대한 극치수문량 재현 특성을 비교하여 유역상관성을 고려한 모형이 실측자료의 극치수문량 모의가 가능함을 검증
· 지점자료 기반의 모의결과를 공간적으로 보간할 수 있는 Kriging 기법, Interpolation 기법 등을 고려하여 상대적으로 기상관측이 어려운 지역에 적용이 가능하도록 연구를 수행하며 모의실험을 통해서 적합성을 검증



<그림 1-10> 강수량 모의 시 단일지점 및 다지점 모형에서 유역상관성 재현성 개념

· 본 연구에서 개발하는 수문변량 모의기법은 댐 및 저수지 위험도 해석모형을 위해서 사용되므로 특히 극치사상 재현이 효과적으로 이루어질 필요가 있으며 이를 위해서 기존 수문변량 모의기법과 차별성을 갖도록 모형을 개선하고 검증작업을 수행함
· 기존 위험도 분석은 수문변량을 독립적으로 간주해서 해석하는 단편적인 모형으로서 실제 수문현상을 효과적으로 모의하는데 역부족 임. 이러한 문제점을 개선할 수 있는 Copula 또는 Bayesian모형을 활용한 다변량 모의발생 기법 개발. 예를 들어 강수량(R), 풍속(W), 저수위(WS) 등은 수문기상학적 관점에서 모두 연관성을 가지고 댐 위험도에 영향을 주고 있음. 즉 2변량 이상의 다변량 수문변량들이 가지는 관계를 규명하고 각 변량간의 조건부 확률이 유지될 수 있는 모의기법 개발



<그림 1-11> Dynamic Bayesian Network 구성 예

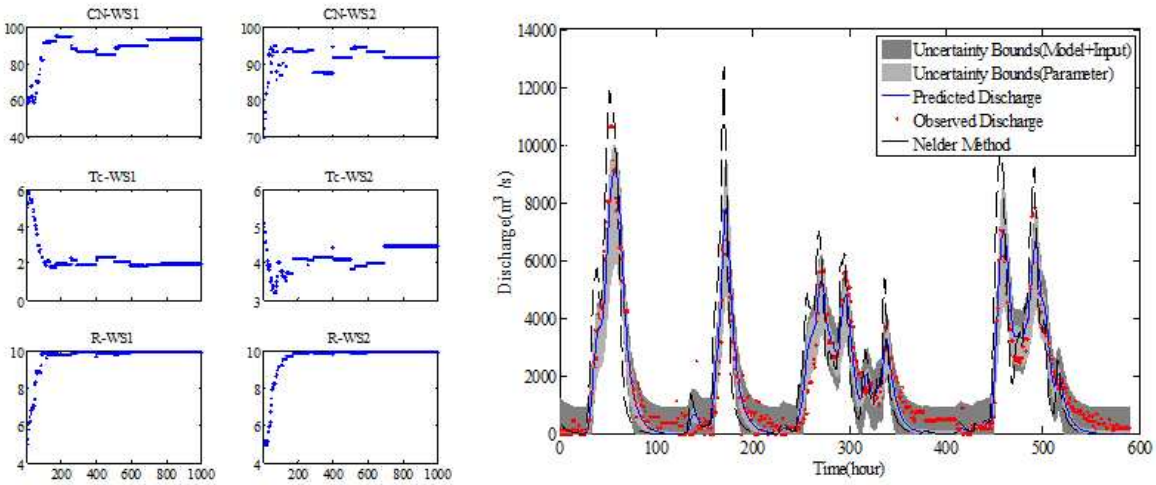
(3)강우-유출 모형 및 댐 운영 모델의 불확실성 해석 기법 개발

연 차	주요 연구내용	수행방법
2차년도	■불확실성 분석을 위한 Bayesian 기반 강우-유출 및 댐 운영 통합 모델 개발	■HEC-1 강우-유출 모형의 Fortran코드를 분석하고 입력 자료의 불확실성 및 매개변수들의 불확실성 정량화가 가능하도록 Bayesian 해석기법을 HEC-1 강우-유출 모형과 연동작업 실시 ■HEC-5 댐 운영 모형의 Fortran코드를 분석하고 입력 자료의 불확실성 및 매개변수들의 불확실성 정량화가 가능하도록 Bayesian 해석기법을 HEC-5 댐운영 모형과 연동작업 실시 ■기 개발된 Bayesian HEC-1 모델과 HEC-5 모델이 서로 연동해서 진행될 수 있도록 통합모델 개발

· 수공구조물에 안정성 검토를 위해서는 최종적으로 강우-유출 모형을 통해서 강우를 유출로 변화하는 작업이 필수적임. 강우-유출 모형에서 가지는 불확실성을 정량화 하여 댐 위험도 분석시에 활용할 수 있는 방안 필요

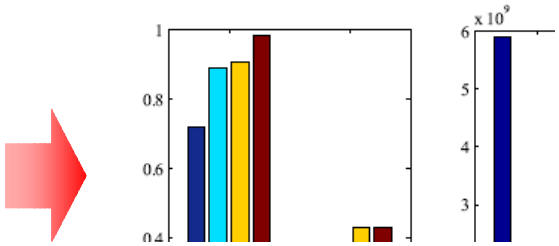
· 기존 댐 안정성 평가에서는 강우-유출 과정 모의를 위해서 HEC-1 모형이 주로 이용되고 있으며 모형의 검정을 위한 자료의 부족으로 추정되는 매개변수에 대한 불확실성이 매우 큼. 이러한 점에서 본 연구에서는 HEC-1 모형의 매개변수를 최적화함과 동시에 불확실성을 고려할 수 있도록 Bayesian 모형을 HEC-1과 연동시킬 수 있는 방법론을 개발하고자 함

· 본 연구에서 제안하는 Bayesian 기법은 주어진 다변량 확률분포가 복잡하여 이를 따르는 IID 난수를 얻을 수 없는 경우에 사용가능한 기법으로서 IID 난수 대신 다변량의 Markov Chain 난수를 추출하여 사용



<그림 1-12> Bayesian 모형을 활용한 강우-유출 매개변수 최적화 및 수문곡선 유도 예

· 강우-유출분석 후 기존 댐 안전성 분석에서는 주로 HEC-5 모형을 통해 댐 운영 모의를 실시하여 댐의 월류 여부를 판단. HEC-1 모형과 동일하게 기존 HEC-5 모형은 매개변수가 가지는 불확실성을 고려하지 못하는 문제점이 있으며 결과적으로 계산된 수위에 신뢰성이 결여되는 문제점이 존재함
· 이러한 점에서 Bayesian HEC-1 모형과 동일하게 HEC-5 모형에 Bayesian 모형을 연동하도록 모형을 개발하고 최종적으로 HEC-1과 HEC-5가 결합된 형태의 모형을 개발하여 댐 위험도 해석에 활용
· 최종적으로 다양한 수문시나리오, 매개변수의 변동성 고려 등 종합적인 불확실성이 가능하도록 Super Ensemble 개념의 불확실성 정량화 모형 제시



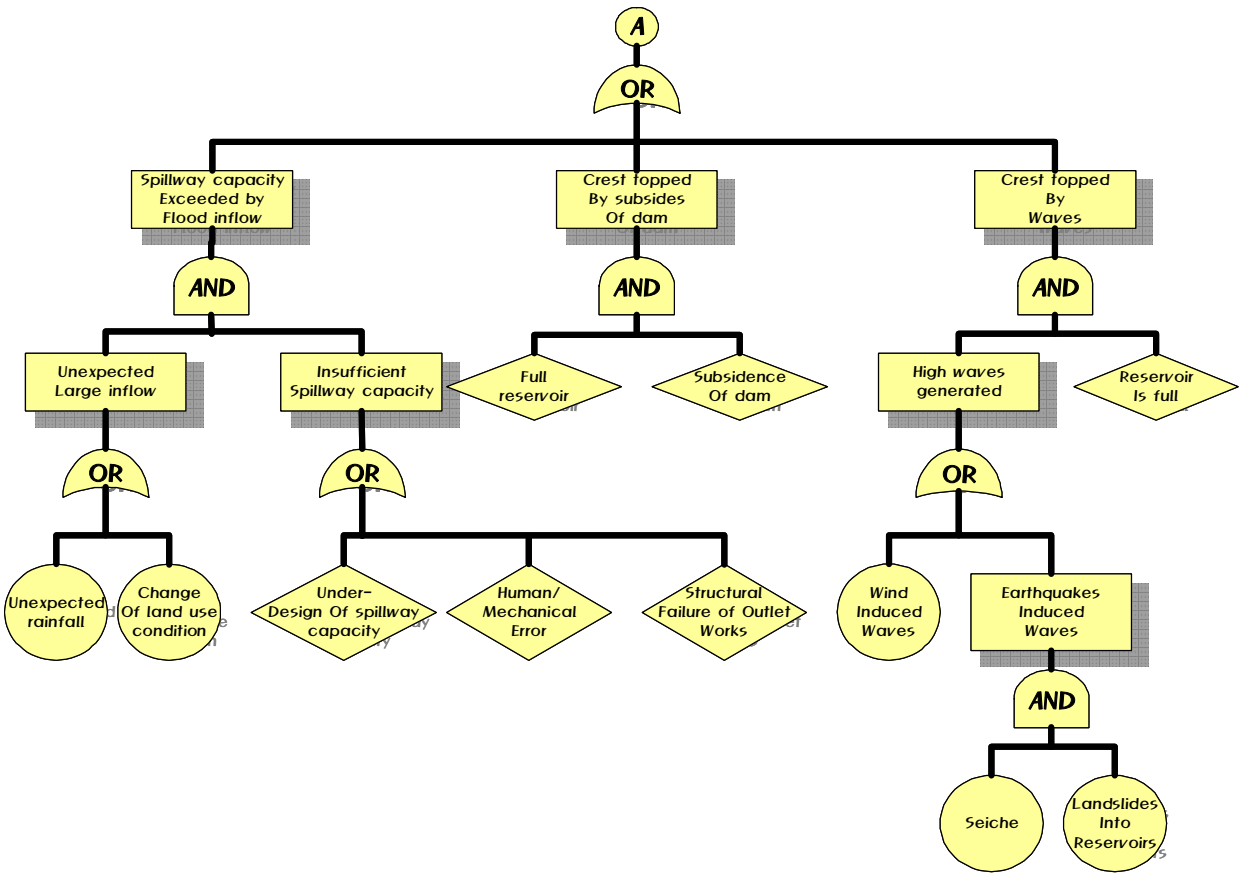
<그림 1-13> 다중 수문시나리오와 수문모형을 통한 Super Ensemble 도출 개념

(4)Bayesian Network 기반 위험도 해석 기법 기술 개발 및 적용

연 차	주요 연구내용	수행방법
2차년도	■댐 파괴 모델 및 하류 피해 해석 기술 개발	■모니터링자료 및 기존 댐 파괴 이력 조사를 이용하여 댐 붕괴 모의를 위한 구조/지반공학적 입력자료 구축 방안 수립 ■홍수 유입량 및 댐 운영에 따른 댐 붕괴 모의가 가능하도록 댐 파괴 모델을 활용하며 매개변수들의 불확실성 정량화가 가능하도록 Bayesian 해석기법 적용 기술 개발 ■댐 붕괴 모델을 통해서 홍수파가 고려된 하류 피해분석 통계 모델 개발

연 차	주요 연구내용	수행방법
3차년도	■홍수 위험도 분석을 위한 Bayesian Network 모델 개발 및 적용	■1,2차 년도를 통해서 도출된 홍수로 인한 댐 위험도 해석 모형을 근간으로 각 위험요소를 Dynamic Bayesian Network 모형으로 구축하여 홍수로 인한 위험도 해석 모듈 개발 ■실증 댐을 대상으로 홍수로 인한 위험도 해석을 실시하여 모형의 적합성을 검증

연 차	주요 연구내용	수행방법
	▪풍파 위험도 분석을 위한 Bayesian Network 모델 개발 및 적용	▪1,2차 년도를 통해서 도출된 풍파로 인한 댐 위험도 해석 모형을 근간으로 각 위험요소를 Dynamic Bayesian Network 모형으로 구축하여 풍파로 인한 위험도 해석 모듈 개발 ▪실증 댐을 대상으로 풍파로 인한 위험도 해석을 실시하여 모형의 적합성을 검증
	▪홍수/풍파를 동시에 고려한 Bayesian Network 모델 기반 신뢰성 기법 개발 및 검증	▪홍수/풍파를 동시에 고려할 수 있는 해석 모듈 개발 ▪실증 댐을 대상으로 홍수/풍파로 인한 위험도 해석을 실시하여 모형의 적합성을 검증
	▪댐 주요 파괴 모드별 하류 피해 해석 및 경제성 평가 모델 적용	▪주요 파괴형태별 댐 붕괴 해석 모델 적용 ▪주요 파괴모드별 댐 하류 피해 분석 모델 적용 ▪위험도 저감 계획 평가를 위한 경제성 평가 모델 개발 및 적용



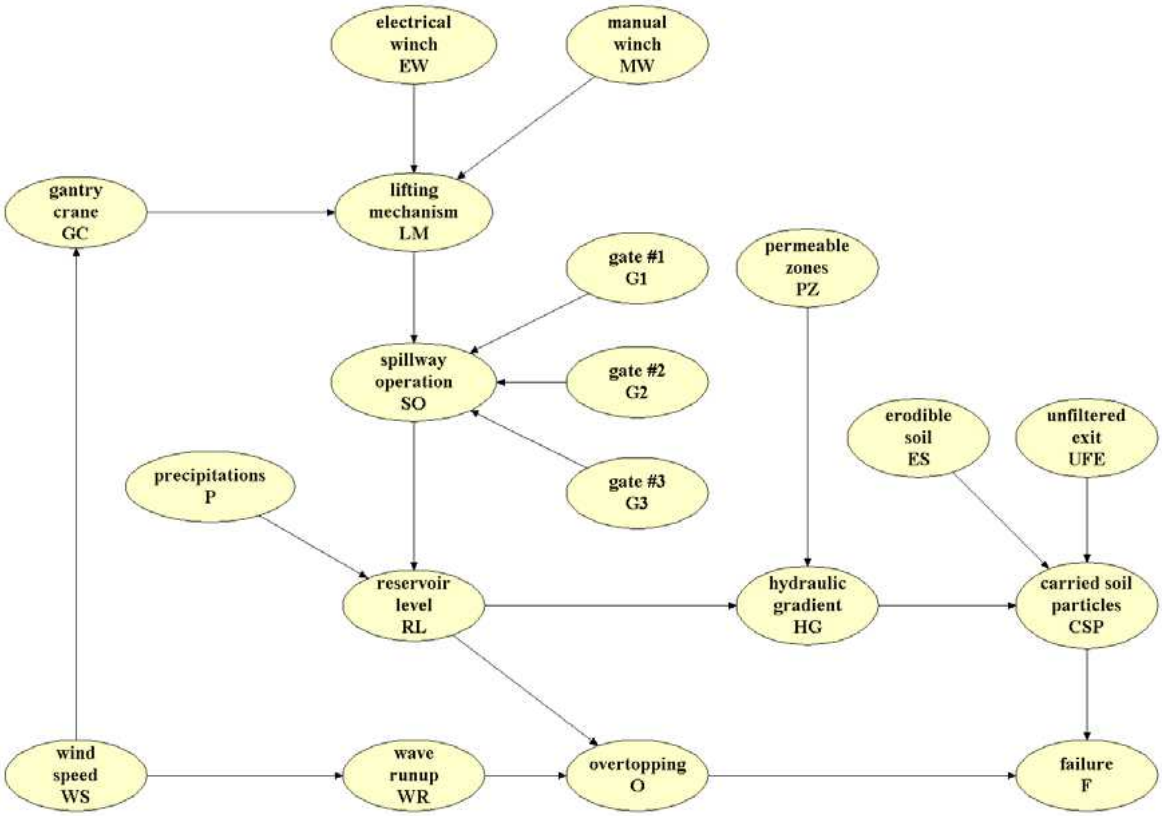
<그림 1-14> 댐 위험도 평가를 위한 Fault Tree

· 기존 댐 위험도 해석 시 파괴모드 추정에 있어서 가장 큰 문제점은 각 Node에서 전이되는 과정이 단일 방향으로 설정되어 있어 파괴인자간의 상호작용을 자유롭게 고려하지 못하는 문제점이 있음.

· 이러한 문제점을 개선하고자 본 연구에서는 파괴인자간의 쌍방향 해석을 가장 효과적으로 고려할 수 있는 Dynamic Bayesian Network 모형을 활용한 위험도 해석

기법을 개발하고자 함

· Dynamic Bayesian Network 모형은 각 파괴인자를 Node의 형태로 정의하고 확률을 부여하는 형식으로 인자간의 상호작용을 매우 효과적으로 고려할 수 있는 방법임
· 수리수문학적 댐 위험도를 평가하기 위해서 <그림 1-15>와 같이 Fault Tree가 일반적으로 활용되며 가능한 모든 파괴 원인을 상향식으로 평가하면서 이루어 짐. 이 Fault Tree를 Bayesian Network 모형으로 전환을 위해서 각각의 파괴 원인이 확률변수로 가정되며 최종적으로 각 Node별로 확률밀도함수가 부여됨으로서 다음 그림과 같이 Dynamic Bayesian Network 모형으로 전환



<그림 1-15> 댐 위험도 평가를 위한 Bayeisan Network 모델 구성 예

· Bayesian Network 모형은 각 파괴인자를 Node의 형태로 정의하고 확률을 부여하는 형식으로 위험 인자간의 상호작용을 매우 효과적으로 고려할 수 있는 방법임
· 수리수문학적으로 고려되는 위험요소 중 우선적으로 고려되는 모형으로서 본 연구에서는 홍수, 풍파, 홍수/풍파를 동시에 고려할 수 있는 Bayesian Network 기반 위험도 해석모형을 제시하고자 함
· 기존 댐 및 저수지 안정성 평가 결과를 수집하여 동일 댐 및 저수지에 대해서 Bayesian Network 기반 위험도 해석 방법론을 적용하며 이를 통해서 해석결과에 대한 차이점을 비교 검토 수행함. 특히 기존 정성적 위험도 등급방법을 활용한 방법론을 개발하여 기존 해석결과와 비교를 수행함
· 기후 변동성 및 기후변화가 고려된 강수, 다변량 수문인자, Bayesian 강우-유출 & 댐 운영 연동 모형을 통합하여 댐 위험도 해석을 위한 수문 모의 기법으로 활용

나. 연차별 정량적 성과목표(총괄)

연차	성과목표	성과지표		측정방법	목표치	가중치
1차년도	(질적지표) 댐 위험도 요소 도출 및 파괴모드별 실행함수 개발	댐 및 저수지 위험도 해석기법 조사 개수		개발기술 달성여부 검토	20개	20%
		해석모형의 불확실성요소 개수			5건	20%
		극치강수량 재현효과 오차율			15%이내	30%
		극치풍속 재현효과 오차율			15%이내	30%
	소 계					100%
	(양적지표) 댐 위험도 요소 도출 및 파괴모드별 실행함수 개발	국내외 학술지 게재논문 건수	SCI급	SCI급 학술지 게재논문 건수	–	–
			비SCI급	국내학술지 및 국외학술지(비SCI) 게재논문 건수	1건	40%
		국내외 학술회의 발표		국내 및 국외 학술회의에서 발표한 논문 건수	2건	40%
		연구개발 DB 구축/등록/활용		DB의 구축여부, DB활용도(연구결과의 신규등록 건수 등)	1건	20%
	소 계					100%
2차년도	(질적지표) 댐 위험도 해석 모듈 개발	기후변화 시나리오 적용개수		개발기술 달성여부 검토	2개	10%
		극치강수량 재현효과 오차율			15%이내	10%
		강우-유출 모형 불확실성 정량화 여부			앙상블 시나리오	20%
		유출량 오차율			15%이내	10%
		댐운영 모형 불확실성 정량화 여부			앙상블 시나리오	20%
		댐운영 시나리오 개수			2개	10%
		파괴모드 해석 개수			2개	10%
		댐파괴 모형 불확실성 정량화 여부			앙상블 시나리오	10%
	소 계					100%
	(양적지표) 댐 위험도 해석 모듈 개발	국내외 학술지 게재논문 건수	SCI급	SCI급 학술지 게재논문 건수	1건	20%
			비SCI급	국내학술지 및	3건	30%

				국외학술지(비SCI) 게재논문 건수		
		국내외 학술회의 발표		국내 및 국외 학술회의에서 발표한 논문 건수	6건	20%
		소프트웨어(S/W)등록 건수		S/W등록 출원건수	1건	20%
		분야별 인력양성 배출실적		해당과제를 통해 양성된 인력	2인 (석사)	5%
		연구개발 DB 구축/등록/활용		DB의 구축여부, DB활용도(연구결과의 신규등록 건수 등)	1건	5%
	소 계					100%
3차년도	(질적지표) 댐 위험도 해석 통합 모형 적용 및 평가	관련 자료 DB구축 개수		개발기술 달성여부 검토	2개	15%
		위험도 해석 모드 개수			3개	30%
		하류 피해 해석 여부			인명피해 산정	15%
		경제성 모델 적용			피해액산정	15%
		현장적용 건수		개발성과물의 현장적용 건수	1건	25%
	소 계					100%
	(양적지표) 댐 위험도 해석 통합 모형 적용 및 평가	국내외 학술지 게재논문 건수	SCI급	SCI급 학술지 게재논문 건수	1건	20%
			비SCI급	국내학술지 및 국외학술지(비SCI) 게재논문 건수	3건	25%
		국내외 학술회의 발표		국내 및 국외 학술회의에서 발표한 논문 건수	6건	10%
		소프트웨어(S/W)등록 건수		S/W등록 출원건수	2건	10%
		분야별 인력양성 배출실적		해당과제를 통해 양성된 인력	2인 (석사)	5%
		연구개발 DB 구축/등록/활용		DB의 구축여부, DB활용도(연구결과의 신규등록 건수 등)	1건	10%
		현장적용 건수		개발성과물의 현장적용 건수	1건	20%
	소 계					100%

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 연구개발실적 조사

과거 10년 동안, 수공구조물의 위험도 해석 기법의 발전과 적용이 빠르게 이루어졌으며 더욱 널리 보급 되고 있으며 특히 댐을 대상으로 한 위험도 분석이 선진국을 중심으로 활발히 이루어지고 있다. 위험도 해석기법에는 크게 정성적인 위험도 분석평가(qualitative risk assessment)와 정량적인 위험도분석평가(quantitative risk assessment)로 나누어지며 정성적인 평가방법에는 FMEA(Failure Mode and Effects Analysis)가 정량적인 평가방법에는 Monte Carlo Simulation이 대표적인 방법이라 할 수 있다.

최근 수공구조물의 위험도 분석은 여러 나라에서 채택되어 이용되고 있으며 나라에 따라 약간의 차이를 가지고 있으며, 외국의 경우 위험도 분석시 정성적 평가방법을 기본으로 하는 나라는 영국으로서 주로 FMEA, FMECA(Failure Mode and Effects Critical Analysis)를 이용하여 수공구조물의 안전도 문제를 다루고 있으며 이러한 분석들은 구조물의 위험도 조사와 저감 작업의 우선순위를 정하는데 이용되고 있다. 반면, 네덜란드, 노르웨이는 정량적인 해석을 주요 해석방법으로 이용하고 있다. 네덜란드에서는 정량적인 해석 기법이 저수지의 안전도 해석을 위해 매우 발전되었으며 로테르담에 주요 홍수조절 구조물의 설계에 이용되고 있다. 노르웨이에서는 정량적인 해석기법을 채택하고 있으며 댐 안전도 확보의 한 부분으로서 위험도 분석을 고려하도록 하는 새로운 규정들이 추가되고 있다. 또한 미국과 스웨덴에서는 두 가지 해석방법을 모두 사용하여 댐의 안전도 문제를 검토하고 있으며, 스웨덴의 경우 FMECA와 정량적인 해석기법을 사용하고 있으며, 미국에서는 연방 댐을 관리하는 주요 주체인 USBR과 공병단이 각각 다른 방법으로 관리하고 있다. 즉, USBR은 정량적인 해석기법을 주요 결정 수단으로 사용하고 있지만 공병단은 단지 시험적인 수단으로 정량적인 해석을 이용하고 있다는 것이다. 미국의 워싱턴 주는 간략화한 정량적인 해석을 이용하고 있으며, 몬태나 주는 최근 여수로 크기에 초점을 맞추어 위험도 분석을 실시한 사례가 있다. 프랑스와 호주에서는 다양한 방법론이 시험적인 수단으로 시도되고 있으며 법적 기준을 만들기 위한 수단으로서 이용되고 있다.

본 절에서는 이러한 다양한 외국의 연구사례와 관련하여 국내·외 위험도 분석 논문 및 보고서에서 적용된 해석 기법에 따라 확률적 해석기법, 신뢰성해석기법, 정성적 해석기법의 3가지로 나누어 조사하였으며, 정리한 결과는 다음과 같다.

1. 확률적 해석기법을 통한 위험도 분석

- Prendergast, J.D(1979); 불확실성을 고려한 댐 위험도를 평가하기 위해서 하중과 저항 개념을 도입하여 콘크리트 중력댐의 위험도를 평가하기 위한 모델 제시
- Lee and Mays(1983); 수문학 및 수리학적 불확실성을 동시에 존재하는 수공구조물의 전체적인 위험도를 반영하기 위해 동적(dynamic) 위험도 분석 모델에 대해서 논의
- Kreuzer and Bury(1984); 주요 파괴 원인과 위험요소를 규명하고, 하중 조합을 선

택한 다음 각각의 조합에 대한 원인-파괴 분석을 수행하게 되며 얻어진 정보는 위험도 평가를 수행하는데 이용

- Serafim(1984); 전체파괴확률의 결정에 근거한 콘크리트댐의 신뢰성을 판단하기 위한 모델을 제안
- McCann, Franzini, Kavazanjian, and Shah(1985); 댐의 파괴확률을 지수분포를 가지는 년당 평균 파괴확률, λ_T, 추정. 본 연구에서는 B/C 평가와 더불어 수문학적 및 지진에 대한 위험도 분석을 다루고 있음
- Cheng, Yen, and Tang(1986); 홍수 및 바람으로 기인하는 월류 위험도를 추정하기 위한 과정을 개발
- DeKay and McClelland(1993); 경고시간(Warning Time, WT)과 위험에 노출된 수(Population At Risk, PAR), 댐 파괴의 역사적 기록으로부터 홍수와 logistic 회귀분석을 통한 돌발홍수 사례로부터 홍수파력(Forcefulness, Force)으로서 인명피해(Loss of Life, LOL)을 식으로 유도.
- Thomson, Stedinger, and Heath(1997); 댐의 안정성을 평가하기 위해서 Event Tree, Monte Carlo Sampling, Latin Hypercube Sampling, Importance Sampling, Stratified Monte Carlo 방법 등을 검토
- Bowles(1988); 정량화된 위험도 평가에 대한 필요성을 언급하였고, 다음의 3가지 경우에 댐 위험도 문제를 해결하기 위한 방법으로 Event Tree 분석을 제안. ① 적은 피해를 주는 댐에 대한 적절한 위험도 기준의 결정, ② 불충분한 용량을 가진 여수로에서의 위험도를 감소시키는 대안의 평가, ③ 의사결정자가 일반적인 설계 기준의 적용성에 의문을 가지는 경우
- 한건연, 이종석, 김상호 (1996); 저수지에 대한 위험도 해석기법으로서 Monte Carlo Simulation과 AFOSM을 제시하였으며 국내 저수지에 대해서 모형의 적합성을 평가
- 이종석(2002); 댐 안정성 평가를 위한 구체적인 모형 구축방안, 위험요소 인지, 인지된 위험요소별 반응확률 추정, 위험도 평가, 저감 계획 등 위험도 평가기법에 대한 다양한 방법론과 가이드라인을 제시하였음.
- 권현한, 박대형, 문영일(2004); 단일사상 강우-유출 모형의 불활실성 분석을 통해서 댐 유입량에 대한 위험도를 평가.
- 권현한, 문영일, 최병규, 윤용남(2005); 위험도 분석과 신뢰성 분석을 통해서 기존 댐 재개발의 적절규모 결정에 응용한 사례가 있음
- Kwon and Moon(2006); 홍수, 풍파, 홍수/풍파 등 3개의 수문학적 하중을 고려한 해석모형을 제시. 기본적으로 Latin Hypercube Sampling과 비매개변수적 방법을 결합한 댐 위험도 해석 모형을 개발하여 소양강댐에 대해서 적용
- Kuo, Hsu, Tung, Yeh, Wu(2008); 불확실성을 고려한 수문학적 월류확률을 추정하기 위해서 Monte Carlo Simulation을 도입하였으며 대만 지역의 댐에 대해서 모형의 적합성을 검증
- Hsu, Tung, Kuo(2011); 바람과 홍수의 불확실성을 고려한 댐 위험도 분석을 실시. 이를 위해서 다양한 확률분포를 활용한 홍수빈도해석과 풍속빈도해석을 수행하여 댐의 월류확률을 평가

2. 신뢰성 해석기법을 통한 위험도 분석

· Yen, Cheng, and Tang(1980); Culverts의 설계에 신뢰성 개념을 응용하였으며 FOSM은 파괴확률과 신뢰성을 결정하는데 이용.
· Cheng, Yen, and Tang(1982); 위험도 산정에 대한 다양한 방법을 연구하였다. 이 논문에서 위험도 산정에 이용된 주요방법은 재현기간법, 직접적분법, Monte Carlo Simulation, MFOSM이며, 최종적으로 AFSOM방법 등을 선택하여 위험도 평가가 이루어 짐
· Yen, Cheng, and Melching(1986); FOSM과 AFOSM 방법에 대해 논의. 이 논문은 복잡한 구조를 가지는 위험도 해석에 있어서 FTA의 유용성에 대해서도 언급
· Melching, Wenzel, and Yen(1987); 매개변수의 불확실성을 고려한 홍수사상의 초과확률의 해석적인 유도를 위해서 강우유출 모형의 AFSOM방법을 응용하여 해석

3. 정성적 해석기법을 통한 위험도 분석

· Von Thun(1984); 기존댐 파괴로 인한 사회에 대한 위험도 저감의 문제를 논의. 전체 위험도 비용은 하중 타입과 하중단계별로 추정된 위험도 비용을 합산함으로서 정의
· Widman(1984); 댐의 안정성을 검토하기 위해서 댐 설계시 적절한 모니터링 설치를 의무화 해야 한다고 제안. 이 논문은 주로 댐 및 저수지의 모니터링과 유지관리에 초점을 맞추고 있음
· Fanelli, Giuseppetti, Bonaldi, Marazio, and Riccioni(1984); 수명연장을 위한 시설물의 모의 개념과 이를 통한 구체적인 대안 제시 방법 검토
· Mays(1987); 기존 수공구조물의 위험도 및 신뢰성 분석에 대해서 수행된 작업을 검토. 정적 및 동적하중 또는 시간 연속적인 특성을 고려할 수 있는 신뢰성 모델을 논의
· Bureau of Reclamation Safety of Dams Program(1989); 댐 안전도 연구를 위해서 댐의 파괴, 홍수범람 연구, 인명피해 평가를 다루고 있음
· Bowles(1990); 안전도 평가를 위한 포괄적인 평가 과정을 제시. 댐 운영자, 기술자, 위험도 평가 전문가, 보험 회사 관계자들의 역할 및 평가체계에 대한 구체적 논의
· Systems Safety and Reliability Office(1992); 소프트웨어적으로 논리적 설계를 다루는 FMEA를 수행하기 위한 지침서를 개발
· Alla(1996); 극한 상태에서의 댐 안전도, 안정성, 조작신뢰성, 기능성의 유지에 관계하여 Fusegate의 역할에 대해서 논의

제 2 절 국내외 관련 기술 및 산업동향

1. 국내 기술 및 산업동향

가. 세부기술별 국내 주요 연구기관 현황

(1) 국내에서는 수공구조물 위험도 해석에 대한 연구가 소극적으로 진행되고 있으며 위험도 해석의 전반적인 평가과정을 포함하는 연구 및 산업 활동은 미진한 실정임

(2) 수문학적으로 수공구조물의 위험도 해석을 위해서는 다음과 같은 세부 연구주제로 선행되어야 함

- 극치수문변량 재현 기법 기술 개발
- 기후변화 영향을 고려한 극치수문변량 재현기법 개발
- 강우-유출 과정의 불확실성 해석 기법 개발
- 신뢰성분석 기법 기술 개발
- 강우-유출, 댐 운영, 신뢰성해석 통합기법 개발
- 댐 붕괴 모의 모델 개발
- 수공구조물 붕괴로 인한 하류 피해액 평가 기법 개발

나. 세부기술별 국내 기술 개발 현황

<표 2-1> 세부기술별 국내 기술개발 현황

세부기술	업체명	보유 기술 또는 특허	최고기술보유기관
극치수문변량 재현 기법 기술 개발	전북대학교	비정상성 다지점 강수모의기법 및 Piecewise Kernel 기법을 이용한 극치수문량 재현 기술	-
	서울시립대학교	비매개변수적 수문변량 재현 기술	Columbia University
기후변화 영향을 고려한 극치수문변량 재현기법 개발	전북대학교	Bayesian Network Model, Hierarchical Bayesian Model, Nonhomogeneous Hidden Markov Chain Model를 활용한 다지점/다변량 수문변량 모의 기술	Columbia University/IRI
강우-유출 과정의 불확실성 해석 기법 개발	전북대학교	Bayesian 모형을 이용한 강우-유출 모형 매개변수 추정 및 불확실성 분석기술	University of Arizona
	서울대학교	강우-유출 앙상블 모형을 통한 불확실성 평가 모델	University of Colorado
	충남대학교	GLUE 모형을 통한 강우-유출 모형 매개변수의 불확실성 정량화	University of Arizona
신뢰성분석 기법 기술 개발	전북대학교	Bayesian Network/Hierarchical	Columbia University

		Bayesian 모델을 이용한 위험도 정량화 기술, 비매개변수적 Monte Carlo Simulation, Importance Sampling 기술	
	경북대학교	AFOSM, FOSM을 활용한 신뢰성 해석 기술	Utah State University
	서울시립대학교	조건부 Monte Carlo Simulation 모델	-
강우-유출, 댐운영, 신뢰성해석 통합기법 개발	전북대학교	Monte Carlo Simulation 모형을 통한 댐 위험도 분석 기술	-
	경북대학교	AFOSM 기반 댐 월류 위험도 해석기술	University of California
댐 붕괴 모의 기술 개발	경북대학교	Dambrk/FLDWAV 모형과 Monte-Carlo 기법을 활용한 댐 붕괴 홍수모의에 대한 불확실성 해석 기술	National Weather Service, USA
댐 붕괴에 따른 하류피해액 평가 기술 개발	경북대학교	댐 붕괴 해석을 위한 2차원 홍수범람모형 기술 및 하류피해액 평가 기술	National Weather Service, USA

다. 국내 기술개발 수준

<표 2-2> 세부기술별 국내 기술개발 수준

세부기술	현재 기술수준			기술개발 완료시 국내 기술수준		
	기술 수준 (%)	기술 격차 (년)	비고	기술 수준 (%)	기술 격차 (년)	비고
극치수문변량 재현 기법 기술 개발	80	3	경쟁단계	95	0	경쟁단계
기후변화 영향을 고려한 극치수문변량 재현기법 개발	80	3	경쟁단계	95	0	경쟁단계
강우-유출 과정의 불확실성 해석 기법 개발	75	5	도입단계	90	0	경쟁단계
신뢰성분석 기법 기술 개발	70	5	도입단계	95	0	경쟁단계
강우-유출, 댐운영, 신뢰성해석 통합기법 개발	75	5	도입단계	90	0	경쟁단계
댐 주요 파괴 모드별 하류 피해 해석 및 경제성 평가 모델 개발	75	5	도입단계	90	0	경쟁단계

라. 국내 연구 인프라 수준

<표 2-3> 세부기술별 국내 연구 인프라 수준

기술분야	인프라 항목	선진국 대비 인프라 수준				
		부족	다소부족	동등	우월	보다우월
극치수문변량 재현 기법 기술 개발	전문인력 보유정도	○				
	인프라 구축정도		○			
기후변화 영향을 고려한 극치수문변량 재현기법 개발	전문인력 보유정도	○				
	인프라 구축정도		○			
강우-유출 과정의 불확실성 해석 기법 개발	전문인력 보유정도	○				
	인프라 구축정도	○				
신뢰성분석 기법 기술 개발	전문인력 보유정도	○				
	인프라 구축정도	○				
강우-유출, 댐운영, 신뢰성해석 통합기법 개발	전문인력 보유정도	○				
	인프라 구축정도	○				
댐 주요 파괴 모드별 하류 피해 해석 및 경제성 평가 모델 개발	전문인력 보유정도	○				
	인프라 구축정도	○				

마. 국내 시장 동향

- 국내에서는 댐 등 대형 수공구조물에 대한 안정성 평가가 주기적으로 이루지고 있으나 모니터링에 근거한 현재의 안정성 위주로 평가가 이루어지고 있어 기후변화와 같은 새로운 위험요소에 대한 적극적인 고려가 어려운 현실임
- ICOLD 등을 중심으로 위험도 해석에 근거한 안정성 평가가 미래의 위험도 추정 및 안정성 개선, 우선순위 결정 등 댐 및 저수지 유지관리에 적합하다고 추천되고 있음
- 우리나라 건설 분야 중 철도, 교량구조, 조선, 원자력 등 다양한 분야에서는 이미 위험도 해석에 근거한 안정성 평가가 이루어지고 있는 현실임
- 따라서 파괴로 인한 사회경제적 피해가 막대할 것으로 예상되는 대형 수공구조물에 대한 위험도 해석 기술에 대한 정부, 수자원공사, 안전진단 업체 등의 수요가 커질 것으로 예상되며 새로운 연구 및 산업 활동에 충분한 계기를 제공할 것으로 판단됨
- 위험도 평가를 위한 전체적인 모형 구축에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있으나 위험도 해석에 필요한 위험 요소별 파괴확률 및 파괴모드 해석기술에 대한 연구는 미진한 실정이며 따라서 선제적인 기술선점을 위해서 한국형 위험도 해석기법 개발이 요구됨
- 기후변화로 기인하는 강우패턴 변화로 최근 10년간 기상재해 총 피해액이 17.7조원이며, 태풍, 집중호우 등 기상재해로 인한 재산피해액 급격하게 증가[1)]

1) 주참: 한국과학재단(2008)

<표 2-4> 기후변화 적응 기술 개발로 인한 경제적 파급 효과

구분	경제 & 자원	기후변화의 영향	경제적 이익
국가분야	기상재해 해수면 상승 수자원 사망자 수 대기환경	기하급수적 이상기후 증가 연안침수-서울지역의 1.6배 수자원의 심각한 감소-26억톤 폭염에 의한 사망 증가 황사의 증가	11조 원/년
산업분야	제조업 건설업 소매업 금융업 농업 에너지업	제품수요의 변화 설계/시공의 환경 변화 판매수요의 변화 날씨파생상품 수요 증가 농업생산량의 변화 에너지수요의 변화	8.1조원/년
세계자원경제	원자재 가격 변동 에너지 가격 변동 곡물 가격 변동	홍수/태풍으로 인한 생산량 감소 태풍/폭설에 의한 공급의 감소 태풍/호우/가뭄에 의한 피해 증가	3.3조 원/년
총액			22.4조 원/년

· 기후변화로 인해 증가하는 기상재해는 수공구조물에 대한 안정성을 저해하는 요인으로 작용하여 기존 수공구조물의 잠재적인 위험도 가중시킬 것으로 예상되며 이를 위해서 국가차원에서 구조적/비구조적 대책들이 진행 중에 있음
· 따라서 기후변화 적응기술로서 위험도 해석기술에 대한 산업전반에서 크게 증가될 것으로 예상됨

2. 국외 기술 및 산업동향

가. 국외 기술 동향

· 국외에서는 수공구조물 중 댐 및 제방에 대한 정량적인 위험도 해석과 정성적인 위험도 해석을 병립하여 운영하고 있으며 주로 미국, 호주, 대만, 유럽 등에서 적극적인 방법론 도입이 이루어지고 있음
· 미국의 경우 USACE(U.S.Army Corps of Engineers)가 주도적으로 569개의 댐에 대한 안정성을 관리하는 주체로서 역할을 하고 있음. 댐 안전성 평가를 위한 검토 우선순위, 재정투자 우선순위, 위험도 저감 계획 등을 수행하기 위한 기본 도구로서 위험도 분석을 이용하고 있음
· ICOLD, ANCOLD 등 대댐회를 중심으로 수공구조물 위험도 분석에 대한 가이드라인 및 분석 방법 등이 제공되고 있으나 실질적인 분석 보다는 정성적인 평가 방법을 제공하는데 그치고 있음
· 미국의 경우 주정부의 감독아래 USACE, USBR의 주도로 수공구조물 위험도 분석이 시행되고 있으며 위험도 해석을 위한 전반적인 Framework는 매우 구체적이고 포괄적으로 발전되어 왔음
· 그러나 실질적으로 위험요소별 발생확률 등을 정량적으로 해석할 수 있는 기법 및

모형의 개발은 상대적으로 미미하며 엑셀 등을 활용한 간단한 해석만이 이루어지고 있는 현실임

· 위험도 해석을 위한 상용프로그램으로 @Risk, QUADRANT, Integrated Decision Making in Excel 등이 국제적으로 활용되고 있으나 방법론적으로 볼 때 수공구조물 위험도 분석을 위한 도구로서는 한계가 있으며 수공구조물 위험도 분석 시 부분적으로 활용이 가능

나. 세부기술별 국외 기술 개발 현황

<표 2-5> 세부기술별 국외 주요 연구기관 현황

세부기술	업체명	보유 기술 또는 특허	최고기술보유기관	비고
Risk Formulation Technique	Utah State University	Dam Failure Mode Identification, Portfolio Risk Assessment (PRA) approach	-	
	USACE	Dam Security Risk (and vulnerability) Assessment. (RAM-D, EPRI tool)	-	
Risk Assessment Technique	Utah State University	FTA, ETA Analysis, Dam Break Modeling	-	
Risk Assessment Tool	Palisade	@Risk, Integrated Decision Making in Excel: 위험도 모형 구축, 해석 가능	-	
	ISACA	Risk Assessment Tools: A Prime: 위험도 모형 구축, 해석 가능	-	
	USACE	RAM-D, EPRI's Hydro Facility Vulnerability Assessment Tool, RBPS: 댐 위험도 위한 모형구축, 평가 가능	-	

다. 해외 시장예측 및 발전전망

· 앞서 언급되었듯이 국외에 위험도 해석 기술은 주로 해석을 위한 전체적인 Framework을 구성하는데 초점이 맞춰져 있으며 수공구조물을 위한 전문 해석 프로그램에 대한 개발 사례는 매우 제한적임

· 이와 더불어 실질적인 위험도 해석을 위한 위험요소별 위험도 추정 기술은 전세계적으로 미진한 실정으로 본 연구를 통해서 국제적으로 이용 가능한 모형 개발로 이어진다면 수공구조물 위험도 해석모형으로 수출 및 기술 이전이 가능

라. 해외 연구기관과의 공동연구 필요성 및 추진 방안

· 본 연구에서는 기존 위험도 해석 기법에서 탈피해 미래 기상학적 변동성을 고려할

수 있는 기술개발, 파괴 요소 간 상관성 고려, 불확실성 정량화 등 진보된 해석기술이 요구됨

· 이들 진보된 해석기술이 포함된 위험도 해석 모형을 개발하기 위해서는 다학재간 연구가 필수적으로 요구되며 이를 위해서 본 모형에서 요구되는 세부 요소별 선도 연구기관과 공동연구를 추진할 계획

· 수공구조물 위험도 분석에 있어서 연구 경험이 많은 Utah State University와 공동연구 추진

· 극치강수량 재현기법, 기후변화를 고려한 극치강수량 재현기법, 수문해석모형의 불확실성 분석 및 모형 최적화 연구 등은 Columbia University Water Center/IRI와 University of Colorado와 공동연구 추진

마. 해외 시장 진출 방안

· 위험도 해석을 위한 상용프로그램으로 @Risk, QUADRANT, Integrated Decision Making in Excel 등이 국제적으로 활용되고 있으나 수공구조물 위험도 분석 시 부분적으로 활용이 가능한 실정

· 국내 수공구조물 유지관리에 있어서 상당부분을 차지하는 수자원공사, 농어촌공사, 한국시설안전공단 등과 해석프로그램 상용화를 추진하고 수공구조물 위험도 해석 전용 프로그램으로 발전시켜 해외 시장 진출 가능성 모색

3. 특허 동향

· 수공구조물 위험도 해석과 관련된 해석기법 및 전용프로그램 개발은 매우 미진한 실정이며, 구체적으로 특허 등을 통한 댐 위험도 해석기술 보유는 매우 제한적임

4. 정부지원정책 현황

가. 관련법령, 정부 정책 및 담당기관

· 국가 주요 시설물에 대한 안전진단은 『시설물의 안전관리에 관한 특별법』에 의해서 이루어짐

  –시설물의 안전관리 관한 특별법(시특법): 이 법은 시설물의 안전점검과 적정한 유지관리를 통하여 재해와 재난을 예방하고 시설물의 효용을 증진시킴으로써 공중(公衆)의 안전을 확보하고 나아가 국민의 복리증진에 기여함을 목적으로 한다.

  –시특법에서는 “1종시설물”로 도로 · 철도 · 항만 · 댐 · 교량 · 터널 · 건축물 중 수공구조물로 분류되는 댐에 대한 정기적인 안전진단을 규정하고 있으며 국토해양부 주무부처로서 수자원개발과가 이를 담당하고 있음

나. 정부지원 정책사업 종류와 현황

· 본 연구에서 개발하고자 하는 모형은 기후변화에 대비한 대형 수공구조물의 위험도 평가기술로서 기후변화에 대비한 자연재해 적응 능력 향상을 목표로 하고 있으므로

『저탄소 녹색성장 기본법』 제정 취지에 부합됨

· 저탄소 녹생성장 기본법: 법은 경제와 환경의 조화로운 발전을 위하여 저탄소(低炭素) 녹색성장에 필요한 기반을 조성하고 녹색기술과 녹색산업을 새로운 성장 동력으로 활용함으로써 국민경제의 발전을 도모하며 저탄소 사회 구현을 통하여 국민의 삶의 질을 높이고 국제사회에서 책임을 다하는 성숙한 선진 일류국가로 도약하는 데 이바지함을 목적으로 한다.

5. 결 론

· 최근 증가하는 기상변동성으로 극치강수의 발현빈도가 증가하고 있으며 기존 수공구조물의 안정성을 저해하는 요인으로 작용하고 있음

· 대형 수공구조물은 정기적인 안전진단이 시행되고 있으나 미래의 잠재적인 위험인자를 인지하고 정량적으로 위험도를 추정하는데 구조적으로 어려운 면이 있으며 이를 위해서 세계대댐회에서는 위험도 기반의 댐안정성 평가를 추천하고 있음

· 수자원관리 강국인 미국, 호주, 스페인, 브라질 등은 위험도 해석에 기준을 둔 댐안정성 평가를 20여 년 전부터 수행하고 있으나 우리나라는 이에 대한 연구 및 적용사례가 매우 제한적임

· 원자력, 철도, 조선, 플랜트 등 타 건설 분야에서는 오래전부터 위험도 해석의 근거한 안정성 평가의 중요성을 인지하고 시행되고 있으며 따라서 구조물 파괴로 인한 사회경제적 피해가 막대할 것으로 예상되는 수공구조물에 적합한 한국형 위험도 해석기술 개발이 시급함

· 수공구조물 위험도 평가 분야에서 세부기술개발 측면에서 충분히 경쟁력을 갖춘 모형 개발이 가능

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과(연차별)

제 1 절 1차년도 연구수행내용

1. 기존 댐 안정성 평가 방법 검토

· 기존 댐 안정성 평가 방법에 대한 문제점을 파악하기 위해 본 연구에서는 국내외 보고서, 논문 등을 조사 평가하였음. 댐 안전도 평가에서는 확률분포의 문제점을 지적한 연구가 다수 진행되었으며 사용되는 방법론에 대한 전체결과의 민감도를 평가하여 댐 위험도 해석에 이용하였음(Kwon and Moon, 2006, Kuo et al., 2008, Hsu et al.,2011).

· 댐의 안정성 평가를 위헌 기준 개발은 국외를 중심으로 이루어졌으며 1985년 NRC 위원회의 책임 하에 다수의 연구자가 참여하여 이루어 졌음. 또한 수문학적 위험도 이외에 파이핑, 구조적 원인, 지진으로 인한 다양한 위험도 해석 방법론이 제안되었음(Kreuzer and Bury; 1984; McCann et al.,1985; Altarejos-Garcia et al., 2012). 최근 일반적인 경향은 댐 안전도 평가에서 위험도 해석을 보다 중요하다는 인식이 이루어지고 있음(McCann et al.,1985; 권현한 등, 2002; 권현한 등, 2003;).

· 과거 10년 동안, 수공구조물의 위험도 해석기법의 발전과 적용이 빠르게 이루어졌으며 더욱 널리 보급 되고 있으며 특히 댐을 대상으로 한 위험도 분석이 선진국을 중심으로 활발히 이루어지고 있음. 위험도 해석기법에는 크게 정성적인 위험도 분석평가(qualitative risk assessment)와 정량적인 위험도분석평가(quantitative risk assessment)로 나누어지며 정성적인 평가방법에는 FEMA(Failure Mode and Effects Analysis)가 정량적인 평가방법에는 Monte Carlo Simulation이 대표적인 방법이라 할 수 있음.

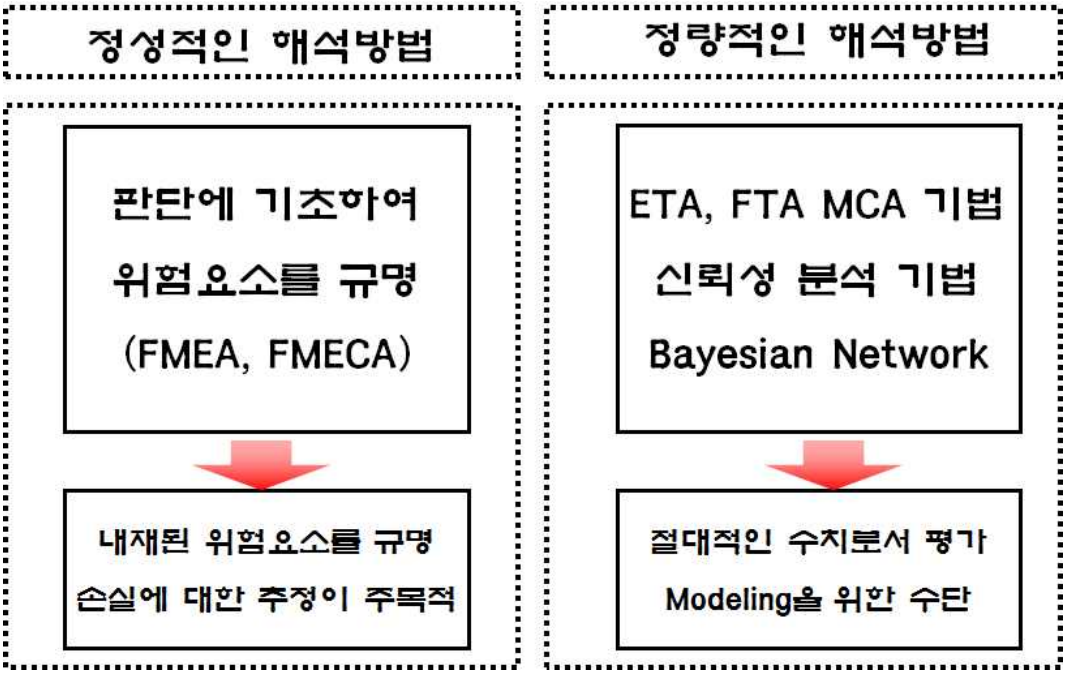
· 최근 수공구조물의 위험도 분석은 여러 나라에서 채택되어 이용되고 있으며 나라에 따라 약간의 차이를 가지고 있으며, 외국의 경우 위험도 분석시 정성적 평가방법을 기본으로 하는 나라는 영국으로서 주로 FMEA, FMECA(Failure Mode and Effects Critical Analysis)를 이용하여 수공구조물의 안전도 문제를 다루고 있으며 이러한 분석들은 구조물의 위험도 조사와 저감 작업의 우선순위를 정하는데 이용되고 있음. 반면, 네덜란드, 노르웨이는 정량적인 해석을 주요 해석방법으로 이용하고 있음. 네덜란드에서는 정량적인 해석 기법이 저수지의 안전도 해석을 위해 매우 발전되었으며 로테르담에 주요 홍수조절 구조물의 설계에 이용되고 있으며, 노르웨이에서는 정량적인 해석기법을 채택하고 있으며 댐 안전도 확보의 한 부분으로서 위험도 분석을 고려하도록 하는 새로운 규정들이 추가되고 있음.

· 또한 미국과 스웨덴에서는 두 가지 해석방법을 모두 사용하여 댐의 안전도 문제를 검토하고 있으며, 스웨덴의 경우 FMECA와 정량적인 해석기법을 사용하고 있고, 미국에서는 연방 댐을 관리하는 주요 주체인 USBR과 공병단이 각각 가든 방법으로 관리하고 있음.

· 즉, USBR은 정량적인 해석기법을 주요 결정 수단으로 사용하고 있지만 공병단은 단지

시험적인 수단으로 정량적인 해석을 이용하고 있다는 것임. 미국의 워싱턴 주는 간략화한 정량적인 해석을 이용하고 있으며, 몬테나 주는 최근 여수로 크기에 초점을 맞추어 위험도 분석을 실시한 사례가 있음. 또한, 프랑스와 호주에서는 다양한 방법론이 시험적인 수단으로 시도되고 있으며 법적 기준을 만들기 위한 수단으로서 이용되고 있음.

· 이러한 이유로 1차년도에서는 이러한 다양한 외국의 연구사례와 관련하여 국내외 위험도 분석 논문 및 보고서에서 적용된 해석 기법에 따라 확률적 해석기법, 신뢰성 해석기법, 정성적 해석기법의 3가지로 나누어 조사하였으며, 정리한 결과는 다음과 같음.



<그림 3-1> 국내외 위험도 해석기법의 분류

가. 확률통계학적 해석기법을 통한 위험도 분석

· 확률통계학적 해석기법을 과거 문헌으로부터 현재까지 평가해본 결과 Monte Carlo 모의 기법을 해석 수단으로 이용하고 있음

· 최근에는 불확실성을 보다 체계적으로 해석하기 위해서 Bayesian 모형의 개발이 국외를 중심으로 이루어지고 있으나 국내에서는 이에 대한 연구가 매우 미진한 실정임

· 기후변화와 이상기후로 인한 수문학적 취약성을 평가하는 연구들이 다수 수행되고 있으나 이를 수공구조물의 신뢰성 평가와 연계시키는 활발히 이루어지지 않고 있음

  · Prendergast, J.D(1979); 불확실성을 고려한 댐 위험도를 평가하기 위해서 하중과 저항 개념을 도입하여 콘크리트 중력댐의 위험도를 평가하기 위한 모델 제시
  · Lee and Mays(1983); 수문학 및 수리학적 불확실성을 동시에 존재하는 수공구조물의 전체적인 위험도를 반영하기 위해 동적(dynamic) 위험도 분석 모델에 대해서 논의
  · Kreuzer and Bury(1984); 주요 파괴 원인과 위험요소를 규명하고, 하중 조합을 선택한 다음 각각의 조합에 대한 원인-파괴 분석을 수행하게 되며 얻어진 정보

는 위험도 평가를 수행하는데 이용

- Serafim(1984); 전체파괴확률의 결정에 근거한 콘크리트댐의 신뢰성을 판단하기 위한 모델을 제안
- McCann, Franzini, Kavazanjian, and Shah(1985); 댐의 파괴확률을 지수분포를 가지는 년당 평균 파괴확률, λ_T, 추정. 본 연구에서는 B/C 평가와 더불어 수문학적 및 지진에 대한 위험도 분석을 다루고 있음
- Cheng, Yen, and Tang(1986); 홍수 및 바람으로 기인하는 월류 위험도를 추정하기 위한 과정을 개발
- DeKay and McClelland(1993); 경고시간(Warning Time, WT)과 위험에 노출된 수(Population At Risk, PAR), 댐 파괴의 역사적 기록으로부터 홍수와 logistic 회귀분석을 통한 돌발홍수 사례로부터 홍수파력(Forcefulness, Force)으로서 인명피해(Loss of Life, LOL)을 식으로 유도.
- Bowles(1988); 정량화된 위험도 평가에 대한 필요성을 언급하였고, 다음의 3가지 경우에 댐 위험도 문제를 해결하기 위한 방법으로 Event Tree 분석을 제안. ① 적은 피해를 주는 댐에 대한 적절한 위험도 기준의 결정, ② 불충분한 용량을 가진 여수로에서의 위험도를 감소시키는 대안의 평가, ③ 의사결정자가 일반적인 설계 기준의 적용성에 의문을 가지는 경우
- 한건연, 이종석, 김상호 (1996); 댐 및 저수지에 대한 위험도 해석기법으로서 Monte Carlo Simulation과 AFOSM을 제시하였으며 국내 저수지에 대해서 모형의 적합성을 평가
- 이종석(2002); 댐 안정성 평가를 위한 구체적인 모형 구축방안, 위험요소 인지, 인지된 위험요소별 반응확률 추정, 위험도 평가, 저감 계획 등 위험도 평가기법에 대한 다양한 방법론과 가이드라인을 제시하였음.
- 권현한, 박대형, 문영일(2004); 단일사상 강우-유출 모형의 불활실성 분석을 통해서 댐 유입량에 대한 위험도를 평가.
- 권현한, 문영일, 최병규, 윤용남(2005); 위험도 분석과 신뢰성 분석을 통해서 기존 댐 재개발의 적절규모 결정에 응용한 사례가 있음
- 자연재해 발생 및 피해와 연관된 불확실성을 고려할 수 있는 해석기법으로 Bayesian Network 모형을 제시하여 재해인자와 피해결과에 대한 상호작용을 확률적으로 분석
- Kwon and Moon(2006); 홍수, 풍파, 홍수/풍파 등 3개의 수문학적 하중을 고려한 해석모형을 제시. 기본적으로 Latin Hypercube Sampling과 비매개변수적 방법을 결합한 댐 위험도 해석 모형을 개발하여 소양강댐에 대해서 적용
- Kuo, Hsu, Tung, Yeh, Wu(2008); 불확실성을 고려한 수문학적 월류확률을 추정하기 위해서 Monte Carlo Simulation을 도입하였으며 대만 지역의 댐에 대해서 모형의 적합성을 검증
- Hsu, Tung, Kuo(2011); 바람과 홍수의 불확실성을 고려한 댐 위험도 분석을 실시. 이를 위해서 다양한 확률분포를 활용한 홍수빈도해석과 풍속빈도해석을 수행하여 댐의 월류 확률을 평가

나. 신뢰성 해석기법을 통한 위험도 분석

· 확률통계학적 해석기법과 함께 가장 일반적인 형태의 위험도 해석 모형으로서 다양한 분야에 응용되고 있음

· 그러나 댐 위험도 해석 분야에서는 과거에서부터 주로 이용되어왔던 MFOSM, AFSOM, REPEM, HPEM 등이 현재에도 주요 해석수단으로 활용되고 있으며 새로운 신뢰성 분석 방법의 개발은 미지한 실정임

· 이는 확률통계학적 해석 방법에 비해 해석과정이 복잡하고 해석학적으로 파괴면을 유도하는 것이 상당히 난해한 점에 기인한 결과로 판단됨

- Yen, Cheng, and Tang(1980); Culverts의 설계에 신뢰성 개념을 응용하였으며 FOSM은 파괴확률과 신뢰성을 결정하는데 이용
- Cheng, Yen, and Tang(1982); 위험도 산정에 대한 다양한 방법을 연구하였다. 이 논문에서 위험도 산정에 이용된 주요방법은 재현기간법, 직접적분법, Monte Carlo Simulation, MFOSM이며, 최종적으로 AFSOM방법 등을 선택하여 위험도 평가가 이루어 짐
- Yen, Cheng, and Melching(1986); FOSM과 AFOSM 방법에 대해 논의. 이 논문은 복잡한 구조를 가지는 위험도 해석에 있어서 FTA의 유용성에 대해서도 언급
- Melching, Wenzel, and Yen(1987); 매개변수의 불확실성을 고려한 홍수사상의 초과확률의 해석적인 유도를 위해서 강우유출 모형의 AFSOM방법을 응용하여 해석
- Altarejos-Garcia et al.(2012); 콘크리트댐의 안정성을 평가하기 위하여 FOSM, PEM, ASM Hasofer-Lind 방법을 이용하였으며 최종적으로 한계상태 해석과 파괴확률을 산정하였음

다. 정성적 해석기법을 통한 위험도 분석

· FMEA(Failure Mode and Effects Analysis), FMECA(Failure Mode Effect and Critical Analysis)가 일반적인 해석방업으로 이용되고 있으며 정량적인 해석에 앞서 전반적인 구조물의 안정성 상태를 개략적으로 평가하기 위해 이용되고 있음

· 다수의 댐 및 저수지의 위험도를 파악하기 위한 방법론으로 이용이 가능하며 투자우선순위 및 댐 위험도 포트폴리오를 구성하는데 이용

- · Von Thun(1984); 기존댐 파괴로 인한 사회에 대한 위험도 저감의 문제를 논의. 전체 위험도 비용은 하중 타입과 하중단계별로 추정된 위험도 비용을 합산함으로서 정의
- · Widman(1984); 댐의 안정성을 검토하기 위해서 댐 설계시 적절한 모니터링 설치를 의무화해야 한다고 제안. 이 논문은 주로 댐 및 저수지의 모니터링과 유지관리에 초점을 맞추고 있음
- · Mays(1987); 기존 수공구조물의 위험도 및 신뢰성 분석에 대해서 수행된 작업을 검토. 정적 및 동적하중 또는 시간 연속적인 특성을 고려할 수 있는 신뢰성 모델을 논의
- · Bureau of Reclamation Safety of Dams Program(1989); 댐 안전도 연구를 위해서 댐의 파괴, 홍수범람 연구, 인명피해 평가를 다루고 있음
- · Bowles(1990); 안전도 평가를 위한 포괄적인 평가 과정을 제시. 댐 운영자, 기술자, 위험도 평가 전문가, 보험 회사 관계자들의 역할 및 평가체계에 대한 구체적 논의
- · Alla(1996); 극한 상태에서의 댐 안전도, 안정성, 조작신뢰성, 기능성의 유지에 관계하여 Fusegate의 역할에 대해서 논의

2. 구조물의 구조적, 수문기상학적, 수리학적, 유역 등으로부터 불확실성 요소 도출

· 본 연구를 통해 제안하고자 하는 Bayesian Network 기반 댐 위험도 해석 모형 구축 시 입력 인자를 결정하기 위해서 국내외 사례분석, 국내외 주요 댐 피해이력조사 등을 실시하였음. 또한 세부내용 연구를 진행하기 위해서 국내 댐 및 저수지의 형식 및 제원들을 조사·평가하여 DB로 작성하였음. 이와 더불어 기존 댐 파괴 사례 및 치수증대 사례 등을 조사 정리하였으며 최종적으로 수문학적 댐 위험도 분석을 위한 주요 고려 대상 인자를 선택하였음.

가. 댐 붕괴로 인한 피해예측 방법론 검토

· 댐과 같은 수공구조물은 우리 사회에 많은 편익을 제공하지만 건설된 댐의 파괴로 인한 홍수는 지난 20세기 동안 가장 심각한 재해 중의 하나로 인식되어 왔으며 대규모의 물을 저류, 소통하는 수공구조물의 예기치 못한 붕괴로 인한 피해는 막대한 것으로 나타났음. 또한 댐이 파괴될 때 재산피해의 발생은 일정하지만 인명피해는 범람구역의 확장으로 인해 급격히 증가할 수 있음.

· 외국에서 댐이 붕괴된 자료를 살펴보면, 1950년 이전에 미국에서는 220개의 필 댐이 붕괴되었다고 보고되었고, 1946년부터 1965년까지 20년간 전 세계적으로 붕괴된 300여개 댐에 대한 조사분석을 실시하였으며, 미육군공병단의 자료에 의하면 미국내의 50,000여개의 댐 중 약 40%가 붕괴시 하류부의 인명과 재산에 커다란 위험이 있으며 이들 중 대부분은 필 댐으로 조사되었음. 특히 Costa는 전 세계의 모든 댐 붕괴와 관련된 11,100건 이상의 재난 중 60퍼센트가 대략 세 가지 유형의 파괴로 발생되어 왔다고 보고하였음.

· 이탈리아 Vaiont Dam 붕괴(풍파의 활동으로 인한 콘크리트 아치댐의 월류 현상으로 2,600명 사망, 1963년), 미국 Pennsylvania 주의 Johnstown 댐 붕괴(제방 댐의 월류로 인해 2,200명 사망, 1889년), 그리고 인도 Machhu Ⅱ댐 붕괴(건설 중 제방 댐의 월류로 2,000명 사망, 1974) 등임.

· 이들 각각의 붕괴사례는 모두 댐 하류부에 거주하는 대규모 인구가 미흡한 예경보체계나 아예 작동하지 않는 예경보체계에 노출된 경우임. 특히, 예경보체계가 미흡하거나 없을 때에 댐 붕괴로 인한 평균 재난건수가 19배나 증가한다고 보고하였음.

· 여기서 분석된 댐 붕괴의 주요 원인은 불충분한 여수로 용량에 기인한 월류(34%), 기초부 결함(30%), 파이핑 및 누수(28%) 등 이었음. 한편, <표 3-1>은 전 세계의 여러 학자들에 의해 조사된 댐 붕괴 원인에 대한 결과를 집계한 것임.

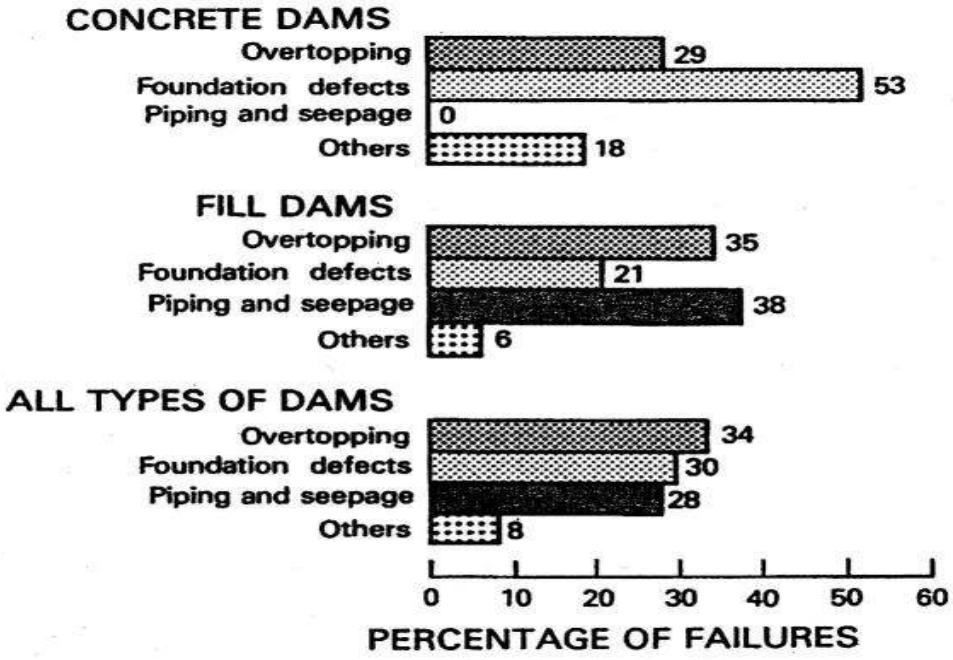
<표 3-1> 댐 붕괴 원인 요약(1981, Lou)

붕괴 원인	Middlebrooks (1953)	Grunner (1967)	Takase (1967)	Babb와 Mermel (1968)	Biswas와 Chatterjee (1971)	USCOLD (1975)
월 류	30	23	28	36	35	38
파이핑과 침윤	38	40	44	30	25	44
활 동	15	2	10	15	–	9
기 타	17	35	18	19	40	9

· 파이핑 현상은 압밀된 충전재(fill)를 통해 누수되는 재료입자들을 포함한 수체로부터 발생함. 내부 침식을 유발하는 압력이 저항력보다 더 클 때 내부 토양 이탈이 파이핑 과정을 초기화시킴. 이러한 현상은 주로 흙댐에서 보편적으로 발생하지만 종종 사전에 감지되거나 보수될 수 있음.

· 월류 현상은 중력식 콘크리트 댐으로 하여금 활동현상을 야기하거나 흙댐이나 록필댐으로 하여금 총체적 또는 부분적인 파괴를 야기할 수 있음. 이러한 월류의 주된 요인은 불충분한 수문자료나 수문학적 설계오류 등을 들 수 있음.

· 국제대댐회(ICOLD)에 따르면 1900년과 1973년 사이에 붕괴된 높이 15m이상의 댐에 대한 조사결과 주요한 세 가지의 붕괴 요인은 <그림 3-2>과 같이 월류 및 부적절한 여수로(34%), 기초부 결함(30%), 파이핑(28%) 등 이었음. 콘크리트 댐의 주요 붕괴 원인은 기초부 결함(53%)이었으며, 토사댐의 경우, 파이핑과 침투(38%) 및 월류에 의한 붕괴(35%)로 나타으며, 댐 붕괴의 주요 원인들은 댐 설계시에 설계홍수량의 크기와 빈도를 과소 산정하였거나 기초지질의 부적절한 시공에 기인한 것으로 조사되었음.



<그림 3-2> 15m 이상 댐의 유형별 붕괴원인(ICOLD)

나. 국내 댐 붕괴 피해사례 조사

· 국내의 경우 다목적 댐과 같은 대규모 댐이 붕괴된 경우는 없으나 소규모 농업용댐의 붕괴사례가 대부분을 차지하고 있으며 대표적인 사례로 1961년 효기리댐, 1996년 연천댐, 2002년 강릉지역 장현 및 동막저수지 붕괴 등이 있음. <표 3-2>는 우리나라의 댐 및 소류지 붕괴사례를 요약한 것이며 자료 중 1987년과 1998년의 자료가 많은 것은 다른 해에 비하여 전국적으로 태풍과 집중호우가 많이 발생하고 장기간 호우로 인하여 댐 제체가 포화한 데서 기인한 결과로 보임. 이 중 효기리댐, 연천댐 및 2002년 태풍 "루사"에 따른 장현, 동막저수지에 대한 사례를 세부적으로 검토하였음.

<표 3-2> 우리나라 소류지 및 댐 붕괴사례

저수지명	위 치		붕괴 연도	저수량 (천㎥)	제당길이 (m)	제당높이 (m)	비 고
	도	시·군					
농도원	인천광역시	강 화	1998	9	150	10	
신 평	〃	강 화	1998	13	100	7	
백 교	경기도	구 리	1998	2	30	3	
서 경	〃	이 천	1998	198	180	6	
연천댐	〃	연 천	1996	13,000	169.0	22	
고 막	〃	김 포	1998	30	146	4	
양 택	〃	김 포	1998	38	191	7	
먹 골	〃	남양주	1998	15	67	6	
어 둔	〃	양 주	1998	7	70	3	
윤오골	강원도	양 구	1998	8	90	5	
장 현	〃	강 릉	2002	2,176	170	14.8	
동 막	〃	강 릉	2002	943.7	420	24.1	
월 곡	경상북도	포 항	1998	40	130	10.8	
둔 기	〃	포 항	1998	13	45	8.5	
홍 계	〃	포 항	1998	4	20	10	
도장골	〃	포 항	1998	6	52	5	
초곡2	〃	포 항	1998	5	34	6	
덕 성	〃	포 항	1998	79	90	12	
남 실	〃	포 항	1998	6	54	3	
세장골	〃	포 항	1998	4	73	4	
대 안	〃	포 항	1998	12	49	6	
정 운	〃	구 미	1998	23	87	7	
핏 골	〃	영 주	1998	4	40	7	
녹 동	〃	군 위	1998	13	60	8	
신 방	〃	군 위	1998	106	220	11	
내 곡	경상북도	의 성	1998	21	150	7	
불매곡	〃	청 도	1998	1	25	6	

저수지명	위 치		붕괴년도	저수량 (천㎥)	제당길이 (m)	제당높이 (m)	비 고
	도	시·군					
내 곡	〃	청 도	1998	14	127	6	
상장기	〃	청 도	1998	5	58	8	
순 덕	〃	청 도	1998	5	50	6	
향 죽	〃	청 도	1998	11	60	9	
오가실	〃	상 주	1998	7	120	4	
상산명	충청남도	논 산	1999	2	54	5	
장 곡	〃	홍 성	1999	173	170	18	
산 골	〃	공 주	1987	22.4	58	8	
도 산	〃	당 진	1988	36	100	4	
대 덕	〃	당 진	1988	29	67	4	
신 시	〃	당 진	1988	60	323	4	
용 연	〃	당 진	1988	54	116	6	
항 곡	〃	당 진	1988	66	200	7	
족 교	〃	부 여	1987	2.5	84	2.1	
차 동	〃	부 여	1987	10.2	103	4.7	
성 북	〃	서 천	1987	14.5	85	7	
교 암	충청북도	보 은	1998	2	51	8	
길 탕	〃	보 은	1987	-	30	8	
성 리	〃	보 은	1998	28	60	9	
샛 터	〃	보 은	1998	6	60	5	
적 음	〃	보 은	1987	-	35	14	
증산골	〃	보 은	1998	47	107	6	
평 각	〃	보 은	1998	17	137	5	
한각골	〃	보 은	1998	30	93	10	
한 실	〃	보 은	1998	24	51	7	
홍 골	〃	보 은	1998	9	42	6	
관 기	〃	영 동	1987	-	20	4	
효기리댐	전라북도	남 원	1961	270	115	15	
용 산	〃	남 원	1998	93	120	20	
치 목	〃	무 주	1998	94	84	3	
중리2	전라남도	해 남	1999	19	117	9	
송 암	〃	영 광	1999	7	125	5	
진 정	〃	영 광	1998	14	86	7	

[출처] 1. 수해방지대책보고서(1999, 수해방지기획단)
2. 수해방지사업계획서(2002, 농업기반공사 강릉지사)

(1) 효기리댐 붕괴

· 효기리댐은 전북 남원군 효기리에 위치하여 1961년 7월에 붕괴되었음. 댐의 높이는 약 15m, 댐 길이 약 115m, 저수용량 270천㎥이며 1961년 7월 11일 20시에서 22시 30분 사이에 내린 150mm 강우량으로 댐의 여수로 및 방수로의 작용이 증가한 유입량을 제어하지 못하여 홍수위가 갑자기 상승하여 제방을 월류하였고 약 60m 구간이 결괴·유실되었음. 이러한 갑작스런 결괴로 인한 홍수로 57명이 사망하고 98명이 실종되었으며 7천 8백여명의 이재민이 발생하였음.

(2) 연천댐 붕괴

· 연천 소수력 발전소는 1986년 11월에 준공된 우리나라 최초의 소수력 발전소로 붕괴 당시까지 운영중인 소수력 발전소 가운데 가장 큰 규모였음. 이 댐은 경기도 포천군 청산면 궁평리를 좌안, 경기도 연천군 전곡면 신답리를 우안으로 하여 한탄강을 가로지르며 댐의 길이는 169.5m, 높이는 22m이며, 총저수용량이 13백만㎥인 콘크리트 문비형 토사혼합식 댐이었음.

· 1996년 7월 26일부터 28일 오전까지 계속된 집중호우로 약 700mm의 강우가 기록되었고 1일 최대 강우량은 약 400mm에 달했음. 이 댐은 1996년 7월 27일 오전 9시가 넘어서 댐 양안으로 월류 되면서 30분 만에 우측 댐체가 붕괴된 것으로 알려졌으며, 월류된 홍수류가 댐 하류부 양안을 급속히 세굴 시키면서 우측 댐체와 우안 기반암과의 연결부까지 세굴시켜 댐체가 수압에 못 견디고 파괴된 것으로 추정되었으나, 붕괴원인에 대한 정확한 연구결과는 나오지 않았음.

· 1996년 10월 한국수자원학회에서 발간된 「96년 7월 경기 · 강원 북부지역 홍수피해」에서 조사한 결과에 의하면 7월 27일 오전 9시경 유입량은 약 7,540㎥/s로 추정하고 있으며, 이는 연천댐 200년 빈도 설계홍수량 5,230㎥/s보다 약 2,300㎥/s 초과하는 유량임. 이 댐의 붕괴로 인하여 하류에 위치한 한탄강 유원지의 가옥 약 50여채가 전파된 것으로 나타났으나, 이 댐은 홍수조절용량이 없는 소규모댐이기 때문에 댐의 붕괴가 하류부에 얼마나 큰 피해를 가중시켰는지에 대해서는 알려져 있지 않음.



<그림 3-3> 연천댐 붕괴 후 사진

(3) 장현, 동막저수지 붕괴

· 장현 및 동막저수지 붕괴의 직접 원인은 2002년 8월 30일 강원지역에 내습한 태풍"루사"에 의한 집중호우임. 당시의 기상상황을 살펴보면 영동지역은 2002년 8월 30일 4시부터 비가 오기 시작하였으며 강릉권의 집중호우는 8월 31일 3시까지 9월 1일 1시까지 계속되었음.

· 영동지역에 발생한 강우량은 24시간 최대강우량이 334~944.5mm로 기록되었으며 강릉지역의 강우량은 건설교통부(2002)에서 추정한 강릉지역의 25㎢에 대한 기존 PMP 강우량을 초과하였으며, 이는 강릉에서 발생 가능한 24시간 최대강우량에 근접한 규모임. 이 지역의 강우량 분포는 8월 31일 오전 8시에서 9시 사이의 2시간 동안 45.5mm/hr이상의 강우강도를 나타내고 있고 19시에서 23시 사이의 5시간동안에는 56mm/hr이상의 강우강도를 기록하였으며 시간당 최대강우량은 23시에 발생되었음. 특히 56mm/hr이상의 강우강도로 5시간 동안 집중호우가 발생된 동 시간대에 장현저수지 붕괴, 오봉댐의 최고수위 도달, 강릉시가지 대규모 침수, 가옥유실 및 매몰 등과 같은 대규모 수해가 집중되었음.

· 장현저수지와 동막저수지는 농업용 저수지로서 홍수조절기능이 전혀 없으며 이들 저수지의 붕괴로 하류지역의 가옥유실, 농경지 침수, 교량붕괴, 제방유실 등의 피해와 많은 인명피해가 발생하였음.



<그림 3-4> 장현저수지(좌)와 동막저수지(우) 붕괴 후 사진

· 장현저수지는 제당 길이가 170m이고 높이가 14.8m인 농업용 저수지임. 유역면적은 11.52㎢로서 섬석천 수계에 위치하고 있음. 장현저수지는 여수로의 설계홍수량 190㎥/s를 초과하는 313㎥/s 이상의 홍수량으로 인하여 여수로 시설을 포함한 약 53m가 유실되었음. 장현저수지의 여수로 폭은 80m으로 측수로형식으로 되어 있었으며 우안측을 월류한 홍수량이 좌안측 월류부 직하류로 합류하도록 되어 있었음.

· 장현저수지는 8월 31일 오전 10시 50분경에 홍수위를 넘어섰으며, 11시 10분경에는 여수로가 유실되었고 21시 10분경에 완전 붕괴되어 약 200만㎥의 저수량이 약 1시간에 걸쳐 유출되었음. 여수로의 과도한 홍수량으로 인하여 여수로에서 발생된 흐름의 영향으로 좌안측 댐 제체가 약 80m정도 유실되었음. 이와 같은 저수지의 붕괴로 인해 하류지역에 위치한 모산의 13가구가 유실되어 큰 인명피해를 당하였으며, 저수지의 영향권에 있는 약 1.5㎞구간의 농경기자 침수되거나 매몰되는 피해를 입었음.

· 동막저수지는 제당길이가 420m이고 높이가 24.1m이며 유역면적은 1.86㎢로 섬석천 수계에 위치하고 있음. 저수지의 붕괴는 장현저수지와 마찬가지로 여수로의 설계홍수량 14㎥/s를 초과하는 67㎥/s 이상의 홍수량으로 인하여 여수로 시설을 포함한 약 57m가 유실되었음. 여수로 형식은 장현저수지와 같이 측수로식 여수로이나 월류한 물이 여수로의 중앙으로 모이도록 되어있음. 동막저수지에서는 계획홍수위를 초과하는 수위상승과 저수지 붕괴에 따른 수위급강하에 의한 것으로 판단되는 제체 포락이 약 175m정도로 발생되었음. 저수지의 완전붕괴는 8월 31일 20시 이후에 발생되었으며 이로 인하여 하류지역 주택침수 및 붕괴, 농경지 침수, 하천범람, 교량파괴 등이 발생하였음.
· 장현저수지와 동막저수지에 설치되어 있는 여수로의 형식은 설계홍수량을 초과하는 홍수가 발생할 경우 흐름이 복잡하여 파괴되기 쉬우며 태풍 “루사”에 의한 피해에서도 여실히 드러났음. 댐 하류지역의 하천에서는 저수지 붕괴에 따라 일시에 유하하는 홍수량을 감당할 수 없었으며 따라서 대규모 피해가 발생되었음.

다. 국내 댐 붕괴 피해사례 조사

· 조사된 자료에 의하면 12세기 이후 세계적으로 2,000여개의 댐이 붕괴되었으며 수천개의 자연 댐이 붕괴되었음. 특히, 지난 1세기 동안에 약 200여개의 특이할 만한 인공 댐들의 붕괴가 발생하였는데 이로 인하여 11,100명 이상의 인명이 희생되었음.
· 그 중 전 세계적으로 가장 최악의 댐 붕괴사고는 1975년 8월에 발생한 중국 허난성의 Banqiao Dam과 Shimantan Dam의 붕괴로서 약 26,000여명의 사망자가 발생하고 수백만명의 이재민이 발생한 것으로 보고되었으며 그에 따른 전염병과 기아로 인해 230,000여명의 사상자를 기록하였음. 붕괴원인은 태풍 내습으로 인한 저수지 수위상승으로 추정되었음.
· 또한 유럽에서 발생한 최악의 댐 붕괴사례로는 이탈리아 북부에 위치한 Vaiont댐 붕괴(1963년)로 댐 하류부 지역에 막대한 피해가 발생하여 2,000여명의 사망자를 기록한 것으로 보고되었음. 붕괴원인은 댐 상류부의 산사태로 인한 저수위 급상승으로 인해 댐체 월류가 발생한 것으로 추정되었음.



<그림 3-5> Banqiao Dam(좌)과 Vajont Dam(우) 붕괴 후 사진

· 미국에서도 다수의 주요 댐 붕괴사고가 발생하였는바 그 중 대표적 사례로는

Pennsylvania주의 Johnstown 댐으로 알려진 South Fork 댐 붕괴(1889년 5월)로 댐 하류부 22.4km 이내의 지역에서 2,209명의 사망자가 발생하여 미국의 댐 붕괴 사고 가운데 최악의 재난으로 기록되었음. 본 댐은 Earthfill 댐 형식으로 축조된 지 36년이 지났으며 총 저수용량이 142억 톤이며 붕괴원인은 25년 빈도의 호우로 인한 댐체 월류로 추정되었으며, 미국에서 발생하였던 50명 이상의 사상자를 낸 주요 댐 붕괴 사고를 요약하면 다음과 같음.

· Massachusetts주의 Mill River 댐으로 알려진 Williamsburg 댐 붕괴사고(1874년 5월)로 댐 하류부 11km 이내의 지역에서 138명이 사망하고 750명의 이재민이 발생하였음. 본 댐은 축조된 지 9년이 지난 댐으로 붕괴원인은 제방 슬라이딩을 야기하는 충전재를 이탈시키는 누수현상으로 인해 발생한 심벽(core wall)의 붕괴로 추정됨.

· 또한 1890년 2월에는 Arizona주의 Walnut Grove 댐이 붕괴되어 댐 하류부 24km 지역의 건설현장을 덮쳐 70-100여명의 사망자를 발생시킨 것으로 보고되었음. 본 댐은 축조된 지 2년이 지났으며 붕괴원인은 호우로 인한 저수위 상승으로 댐체 월류로 추정되었음.



<그림 3-6> South Fork 댐(좌)과 Buffalo Creek 댐(우) 붕괴 후 사진

· Pennsylvania주의 Austin 댐은 1911년 9월에 축조된 지 2년 만에 기초부 결함으로 인해 정상적인 기상상황에도 불구하고 콘크리트 중력식 댐이 붕괴되어 댐 하류부 3.2km 지역에서 최소 78명의 사망자가 발생함. 또한 1928년 3월에는 California주에 있는 Saint Francis 댐이 구조적인 결함으로 정상적인 수문조건에도 불구하고 건설된 지 2년 만에 붕괴되어 420명의 사망자를 발생시킴.

· 1972년 2월에는 West Virginia주에 있는 Buffalo Creek Coal Waste 댐이 2년 빈도의 강우조건하에서 붕괴되어 댐 하류부 24km 지역에서 125명의 사망자가 발생한 것으로 기록되었음. 붕괴 원인으로는 강우기간 동안 구조면의 Slumping으로 인한 Coal Waste Pile 구조물의 파괴로 조사되었음. 또한 1972년 9월에는 South Dakota주의 Canyon Lake Dam이 붕괴되어 첨두홍수량 1,420 cms의 물이 댐 하류부로 전파되어 33명의 사망자가 발생된 것으로 추정되었으며, 본 댐은 건설된 지 39년이 지났으며 붕괴원인은 Black Hills Flash Flood로 인해 발생한 댐체 월류로 조사되었음.

· 이 밖에 지난 39년간(1960-1998년) 미국에서 발생한 인명피해가 보고된 댐 붕괴

자료를 붕괴원인과 사망자수 등에 대한 댐별 현황을 정리하면 <표 3-3>과 같다. 또한 그 밖에 기타 국가별 주요 댐 붕괴사례를 정리하면 <표 3-4>와 같음.

· 외국의 댐 붕괴에 대한 자료를 각종 문헌 및 인터넷을 통해 조사된 155건의 댐 붕괴사례에 대한 국가별 현황을 살펴보면 <표 3-5>와 같이 총 23개 나라의 154건이며 이중에 미국의 사례가 107건으로 가장 많고 그 다음이 독일, 이탈리아, 남아프리카공화국, 인도 순으로 나타남.

<표 3-3> 1960-1998년에 발생한 미국의 댐 붕괴사례 현황(USBR, 1999)

댐 명	위 치	붕괴 일자	경과 년수	댐 형식	붕괴 원인	댐높이 (m)	저수용량 ($10^6 m^3$)	사망자수
Mohegan Park	Norwich, 코네티컷	1963. 3.6	110	Earthfill	강우에 의한 저수위 상승중 파이핑	6.1	0.170	6
Little Deer Creek	Hanna 인근, 유타	1963. 6.16	1	-	정상기상조건에서 파이핑	26.2	1.419	1
Baldwin Hills	LA, 캘리포니아	1963. 12.14	12	Earthfill	정상기상하에서 파이핑	20.1	1.10	5
Swift	northwest 몬타나	1964. 6.8	49	Earthfill	홍수기간 월류	47.9	42.31	19
Lower Two Medicine	northwest 몬타나	1964. 6.8	51	-	여수로 측면 제방유실	11.0	25.82	9
Lee Lake	East Lee, 메사추세츠	1968. 3.24	3	-	파이핑	7.6	0.370	2
Buffalo Creek Coal Waste	Logan County, W.버지니아	1972. 2.26	0	광미댐	2년빈도 홍수기간 댐 Slumping	14.0	0.498	125
Canyon Lake	Rapid City, S.다코다	1972. 6.9	39	Earthfill	홍수시 풍파에 의한 제체세굴 및 월류	11.3	6	33
Bear Wallow	Buncombe County, N.케롤라이나	1976. 2.22	n/a	-	호우로 인한 월류	11.0	0.037	4
Teton	Wilford, 아이다호	1976. 6.5	0	Earthfill	기초부 댐 코어의 파이핑	93.0	308.4	11
Laurel Run	Johnstown, 펜실베니아	1977. 7.20	16	Earthfill	월류	12.8	0.555	40
Sandy Run	Johnstown, 펜실베니아	1977. 7.20	63	Earthfill	월류	8.5	0.057	5
Kelly Barnes	Toccoa Falls, 조지아	1977. 11.6	78	Earthfill	10년빈도 홍수조건 사면파괴	12.2	0.777	39
Lawn Lake/ Cascade Lake	Estes Park, 콜로라도	1982. 7.15	79/ 74	Earthfill	정상기상하에서 파이핑/ 월류	7.9/ 5.2	0.831/ 0.031	3

D.M.A.D.	Delta, 유타	1983. 6.23	24	–	하류부 취수댐 붕괴에 의한 후면절리 발생	8.8	19.74	1
Nix Lake	Henderson, Texas	1989. 3.29	55	Earthfill	댐 월류	7.0	1.030	1
Evans/ Lockwood	Fayetteville, N.케롤라이나	1989. 9.15	23/ 30	–	댐 월류/ 댐 월류	5.5/ 4.3	0.089/ 0.039	2
Kendall Lake	Camden, S.케롤라이나	1990. 10.10	90	Earthfill	댐 월류	5.5	0.851	4
Timber Lake	Lynchburg, 버지니아	1995. 6.22	69	Earthfill	댐 월류	10.1	1.787	2
Bergeron Pond	Alton, 뉴헴프셔	1996. 3.13	2	Earthfill	콘크리트 여수로내 파괴부 발생	11.0	0.238	1

<표 3-4> 기타 국가의 댐 붕괴사례 현황

댐 명	국 가	붕괴 연도	경과 년수	댐형식	붕괴 원인	댐높이 (m)	저수용량 (106㎥)	사망 자수
Banqiao	중국	1975	–	Earthfill	전도에 의한 댐체 파괴	118.0		26,000
Bradfield	영국	1864	1	콘크리트	여수로 용량부족 및 채움채 다짐불량에 의한 지진균열발생	29.0	3.20	238
Briesis	호주	1929	–	CFRD	설계홍수량 초과로 인한 댐 월류	24.0		11-14
Euclides de Cunha	브라질	1977	19	Earthfill	설계홍수량 초과로 인한 댐 월류	61.0	13.60	–
Hans Strijdom	남아공	1980	–	Rockfill	설계홍수량 초과로 인한 댐 월류	57.0		
Tigra	인도	1917	0	Con'c Gravity	집중호우에 따른 월류에 의한 슬라이딩	25.0		1000
Machhu II	인도	1979	7	Earthfill	댐 누수 붕괴	20.0	110.0	1300
Nanaksagar	인도	1967	5	Earthfill	파이핑	–	210.0	100
Malpasset	프랑스	1959	5	Con'c Arch	댐 양단부 붕괴	66.0	22	421
Gleno	이탈리아	1923	0	Con'c Arch	부실설계에 따른 구조부 붕괴	35.0		600

Babii Yar	우크라이나	1961	?	Earthfill	풍파에 의한 댐 월류			145
Bila Desna	체코	1916	1	Earthfill	파이핑			65
Eigiau and Coedty	웨일즈	1925	12	Con'c Gravity	하류부 댐 월류에 의한 기초부 파이핑	11.0	0.31	16
Vega de Tera	스페인	1959	4	Con'c Slab	구조물 붕괴	34.0	7.8	144

<표 3-5> 댐 형식별 댐 붕괴사례 현황

국가명	사 례	국가명	사 례	국가명	사 례	국가명	사 례
남아공	4	소 련	2	중 곡	1	호 주	1
독 일	6	아르헨티나	1	체 코	1	일 본	3
리비아	1	영 국	3	캐나다	3	필리핀	1
미 국	107	이탈리아	5	프랑스	2	멕시코	1
브라질	3	인 도	4	스페인	1	칠 레	1
불가리아	1	인도네시아	1	유 고	1	계	154

· 또한 수집자료 155건 중 댐 형식으로 구분할 수 있는 132건의 자료를 이용하여 댐 형식을 구분하면 <표 3-6>에 정리한 바와 같이 콘크리트댐은 16개이고 나머지 116건은 필댐임. 콘크리트댐 16개는 아치형 7개, 중력식 6개, 부벽식 등 기타가 3개로 나타났으며, 댐 116건에는 흙댐(Earthfill Dam) 94개, 석괴댐(Rockfill Dam) 14개, 사력댐(Earth-Rockfill Dam) 및 기타가 8개로 나타남.

<표 3-6> 댐 형식별 댐 붕괴사례 현황

계	필 댐					콘크리트댐				
	소 계	흙 댐	석괴댐	사력댐	기타	소 계	중력식	아치식	부벽식	기타
132	116	94	14	6	2	16	6	7	1	2

· 한편 댐의 붕괴 원인을 살펴보기 위한 목적으로 조사사례 중 붕괴원인이 밝혀진 144개 사례에 대하여 분석한 결과 파이핑이 56건으로 전체 38.9%를 차지하여 댐 붕괴의 가장 많은 원인으로 나타났고 다음으로는 월류가 52건으로 36.1%를 차지하였고 누수가 11건 7.6%, 지진 등이 9건 6.3%, 폭격 및 폭파가 7건 4.9%, 활동이 5건 3.5% 및 기초불량 4건 2.8% 순으로 나타남.
· 이상의 원인별 분석을 댐 형식별로 적용하면 콘크리트댐 16개소에서 댐 붕괴 원인이 명확한 15개소에서는 폭격 및 폭파 등 인위적인 원인이 5건으로 가장 많았고 월류, 누수, 활동, 기초 및 시공불량이 각각 2건, 파이핑 및 균열이 각각 1건으로 콘크리트

댐의 주요 붕괴원인은 인위적인 측면이 많은 것으로 나타남.

· 또한, 필댐에서는 116건의 사례 중 원인분석이 가능한 108개 자료를 이용하여 분석한 결과 파이핑이 45건(41.7%), 월류가 44건(40.7%)으로 파이핑 및 월류가 총 82.4%를 차지하여 필댐의 붕괴원인 중 가장 많은 부분을 차지하는 것으로 나타났으며, 누수가 8건(7.4%), 지진 및 균열이 6건(5.6%), 활동 및 폭격 등이 각각 3건(2.8%), 2건(19%)순으로 나타나 필댐에서 월류 및 누수에 대한 안정조건이 중요한 인자로 조사됨.

3. 댐 붕괴 원인 조사

· 미육군공병단(US Army Corps of Engineers)은 미국 내의 8,639개 댐에 대하여 실시한 안전도 진단에서 약 1/3이 불안전 한 것으로 판정되었으며, 주된 결함원인은 82%가 여수로 단면부족임. 조사에 의하면 1799~1944년 기간에 308건의 댐 붕괴 사건이 있었는데 이 중 57%가 흙댐이었고, 23%는 중력댐, 3%는 아치댐, 나머지 17%는 기타 형식임.

· 붕괴의 주된 요인으로는 부등침하 및 지진 등을 포함한 기초부 유실이 51%, 부적당한 여수로가 23%, 파이핑과 침투가 7%, 부실시공 및 운영실수 등의 기타원인이 19%였음. 세계 전역의 300개 이상의 댐에 대하여 검토한 결과, 35%가 여수로 통수능을 초과한 홍수로 인한 붕괴, 25%가 침투, 파이핑, 초과간극수압, 부적절한 절토, 침하, 활동 등의 기초부 문제였고, 40%가 부실시공 및 불량재료, 파랑의 작용, 전쟁 등으로 인한 붕괴였음.

· 댐 붕괴에 대한 주요원인을 월류, 파이핑 및 누수파괴로 보고하였는데 15m 높이 이상의 댐들이 전체 댐 붕괴의 1% 미만을 차지한다고 보고하였으며 상대적으로 댐 건설 수령 초기에 기초부 파괴가 주로 발생하고 전체 댐 붕괴의 50%가 15-20m 사이의 높이의 댐들임. 아울러 전체 댐 붕괴의 74%가 흙댐이 차지한 것으로 조사됨.

가. 흙댐 붕괴 원인

· 흙댐 붕괴는 월류붕괴, 누수붕괴 및 구조적 붕괴 등 세 가지 범주로 분류될 수 있음. 보고한 바에 따르면, 흙댐 붕괴의 35%가 월류에 의한 원인이며 파이핑 및 누수에 의한 원인은 38%, 기초부 붕괴는 21%, 그리고 기타 원인에 의한 붕괴는 6%로 나타났음. 보다 최근의 연구는 1986년까지 전세계 총 11,192개의 흙댐을 대상으로 검토하였으며 붕괴모드들을 분석하였음. <표 3-7>은 붕괴모드와 붕괴건수를 정리하였으며 단지 1%이상의 흙댐들이 실제적으로 붕괴되었다는 사실을 보여줌. <표 3-8>에 정리된 것처럼 1950년대 이후로 건설된 15m 높이 이상의 흙댐들 중 0.5%가 어떠한 요인에 의해 붕괴되었다는 사실을 보여줌.

<표 3-7> 1986년까지 11,192개 흙댐에 대한 붕괴 현황

붕괴 모드	붕괴건수	붕괴확률(%)
월류(여수로 수문월류 포함)	62	48.4
파이핑	59	46.1
제방	39	
기초부	19	
제방부터 기초부까지	2	
슬라이드	7	3.7
상류부	6	
하류부	1	
기타	2	1.6
지진, 액상화(liquefaction)		
불	8	
총계	136	1.2%

<표 3-8> 흙댐 붕괴의 빈도비교

댐 건설 시기	1950년 이전	1950-1986년
흙댐의 수	2,356	8,836
전체 붕괴건수	88	48
붕괴확률(%)	3.7%	0.5%

(1) 월류 붕괴(Overtopping Failures)

· 홍수유출량을 소통시키는데 불충분한 여수로용량에 기인한 월류는 가장 보편적인 댐 붕괴 원인 중 하나임. 여수로 용량이 너무 작고 홍수위가 댐의 정부를 월류하여 유출될 만큼 높게 상승된다면 어떠한 댐이라도 붕괴될 것임. 월류 붕괴는 제방에서 물의 침식작용으로부터 초래됨. 침식현상은 댐의 주변 인접부에 조절되지 않은 흐름에 기인함. 흙댐은 월류되지 않도록 설계되기에 부분적으로 침식작용에 민감함. 짧은 지속시간의 월류사상(예를 들면 seiche파)은 단지 부차적 피해만을 야기할 수 있음.

(2) 누수(seepage)와 파이핑(piping) 붕괴

· 모든 흙댐들은 댐과 그 기초부를 통해 느리게 침투하는 물로부터 발생하는 누수현상을 가짐. 이러한 누수현상은 유속과 수량 모두를 조절해야만 함. 만일 조절되지 않는다면 제방이나 그 기초부로부터 토양을 점차적으로 침식시킬 수 있으며 이것은 댐의 급격한 붕괴를 일으킴. 토양의 침식작용은 댐 본체나 기초부 모두 댐 제방의 하류부면에서 시작되며 이것은 저수지쪽 상류부로 점차적으로 작용하며 결국은 저수지의 직접 연결부를 발달시키는데 이러한 현상을 파이핑이라고 일컬음. 파이핑 작용은 증가하는 누수유량, 토사유량이나 변색된 물, 제방이나 그 부근의 배수구 혹은 저수지

에서의 와류에 의해 인식될 수 있음.

· 일단 와류가 저수지 표면에서 관측된다면 대략 수분 내에 댐의 완전붕괴가 동반될 것임. 월류와 더불어 완전하게 발달된 파이핑은 실제적으로 조절하기 불가능하며 붕괴를 야기할 수 있을 것임. 토양은 유수에 의해 침식될 수 있으며 침식현상은 토양입자가 침투수에 의해 세척되고 이송될 수 있을 정도로 큰 개구부나 암반에 균열이나 공동구가 있다면 지하에서 발생할 수 있음. 파이핑 방지는 안전한 댐 설계에서 가장 먼저 고려되어야 할 사항임. 누수는 토양기공에서의 높은 압력을 생성하거나 사면을 포화시킴으로써 사면파괴를 발생시킬 수 있음. 제방내의 누수압은 적절한 장비 없이 결정하기가 어렵다. 포화되고 슬라이드가 발달된 사면이 초과누수압의 신호를 보여줄 수도 있음.

(3)구조적 붕괴(structural failure)

· 구조적 붕괴는 제방이나 그 부속물에서 발생할 수 있으며 여수로, 저수지배수로나 다른 부속물의 구조적 파괴는 침식에 의한 제방파괴를 야기 시킬 수 있음. 균열, 침하와 활동 등은 제방의 구조적 붕괴에 대한 보다 구체적인 신호임. 적합하지 않은 형태의 건설자재(예를 들어 실크)의 이용이나 채움재의 불충분한 다짐은 제방댐의 내부침식이나 파이핑 파괴를 가져올 수 있음. 그 사례가 1976년 미국 아이다호 주에서 발생한 Teton Dam 붕괴임.

(4)복합붕괴(combination failure)

· 전술된 세 가지 형태의 붕괴는 종종 복합적인 형태로 상호관계를 가짐. 구조적 붕괴는 침투경로를 단축시킬 수도 있으며 파이핑 붕괴를 가져올 수 있고, 표면침식은 구조적 붕괴를 초래 할 수 있음. 제방의 균열과 같은 부수적 결함은 주요 문제에 대한 최초의 시각적 신호일 수도 있으며 이것은 구조물의 붕괴를 가져옴.

(5)기초부 붕괴(foundation failure)

· 1928년 St Francis Dam 파괴는 기초부에서 지질학적 문제점에 기인되었음. 붕괴후에 기초부 암반 일부와 역암토가 암반이 포화될 때 그 강도가 모두 손실되도록 물에 잠길 때 붕괴된다는 사실을 발견하였음. 이것은 최초로 물에 포화되는 새롭게 완성된 댐에서 일어나는 현상이며 이후로 댐이 급격히 붕괴되며, 기초부 붕괴는 또한 토양이 강도가 약해지거나 지진 중에 액상화가 진행될 때 발생할 수 있음.

(6)저수지 산사태

· 댐 정부를 월류하여 수면파를 보내는 저류용 저수지로 흘러드는 불안정한 사면은 댐을 붕괴시킬 수 있음. 역으로 비록 파괴성 홍수라 하더라도 콘크리트 축조가 여전히 하도 하류부를 황폐화시킬 수 있다면 그 댐은 보존될 수 있음. 이러한 현상은 1963년 이탈리아의 Vaiont Dam에서 발생하였음. 파를 야기 시키는 저수지로의 산사태에 있어서, 대규모의 저수지 체적이 급격히 대체되어야 함. 댐을 월류하는 파에 있어서 파가 저수지내에서 감쇄되지 않도록 충분히 폐쇄를 발생시키거나 파가 댐에 도달할 때 가용한 여유고를 초과해야 발생하는 현상임.

(7)지진

· 지진은 댐에 피해를 야기하지만 지진에 기인한 대규모 댐의 완전한 파괴는 발생하기 어려움. California의 Lower San Fernando Dam이 1971년에 지진발생 중 붕괴되었으며 이는 댐 제방에서의 충재가 댐 상류부 붕괴를 초래하는 액상화를 야기시킴. 저수지 수위가 지진이 발생하는 시간에서 낮아지게 되고 어떠한 물도 하류부로 빠져나가지 않기 때문에 파괴적인 홍수가 방지되어짐. 흙댐은 댐의 거동, 댐 충진재의 액상화, 댐 월류를 일으키는 지진에 의해 야기되는 파동, 기초부재료의 액상화와 단층에 위치된 댐에 의해 야기되는 직접적 피해를 포함하여 여러 방식으로 지진에 의해 피해를 입을 수 있음.

(8)부절절한 댐 운영

· 어떠한 시간에서 댐의 부적절한 운영은 댐의 월류와 붕괴를 초래할 수 있으며 대표적인 사례로 1977년에 붕괴된 브라질의 Euclides da Cunha Dam이 있음.

(9)운영후 붕괴

· 댐 본래 목적이 더 이상 요구되지 않는다 할지라도 댐은 여전히 존재할 것이며 이 기간 동안 댐 운영에 위험스런 변경이나 댐 구조물이 붕괴를 야기할 수 있으며 대표적 사례로는 1889년에 붕괴된 미국 Johnstown의 South Fork Dam 이 있음.

나. 콘크리트 중력식 댐의 잠재적 붕괴 원인

· 콘크리트댐 붕괴의 세 가지 주요 잠재모드는 1) 초과응력(overstressing), 2)댐의 균열된 표면이나 기초부내의 취약면에 따른 슬라이딩, 그리고 3) 하류부 방향으로 회전력에 의해 야기되는 슬라이딩 등임. 중력식 콘크리트댐은 초과응력을 받거나 슬라이딩에 대한 마찰력을 받거나 회전력이 없어진 복수의 단면들에서 붕괴될 수 있음. 많은 연구들이 심한 지반진동(ground shaking)하에서 일반적인 중력식 댐 단면이 기초부에서 또는 상부 급경사면 주변에서 인장균열의 피해를 입을 수 있다는 사실을 보여주었음. 상부 균열은 대개 댐의 상류부나 하류부면으로부터 초기화되며 수평방향으로 또는 반대면 쪽의 각도로 전개됨. 이러한 균열이 댐 단면을 통해 확장된다면, 분리된 블록의 회전불안정이나 슬라이딩의 결과를 초래할 수도 있음.

· 중력식 댐 붕괴의 지배적인 모드는 댐의 저부나 기초부내의 취약면에 따른 슬라이딩이며 많은 댐들이 슬라이딩 위험이 무시되거나 불충분한 주의로 붕괴되어왔음. 비록 이러한 붕괴들 중 어느 것도 지진에 의해 발생되지 않았다 하더라도 기초부와 콘크리트간에 혹은 초과응력 이음부와 기초부 결함면간의 접합부를 파괴할 수 있는 극한 지진은 댐의 슬라이딩이나 전도현상을 촉진시킬 수 있음. 따라서 슬라이딩 붕괴모드에 대한 가능성이 댐 안전도 평가에서 고려되어져야 함.

다. 부벽식댐의 잠재적 붕괴 원인

· 슬래브 및 부벽 또는 다중 아치댐의 지진에 대한 반응은 시스템 형태가 3차원이고 지진하중에 대한 세 가지 요소에 반응하기 때문에 단일 아치댐의 그것과 많은 유사점을 가짐. 부벽식 댐 반응과 아치댐의 그것과의 가장 중요한 차이는 부벽이 횡단하

천의 지진가속에 민감하다는 것임. 더 오래된 부벽식 댐의 설계는 대개 중력과 수압 하중만을 고려하며 부벽식 형태는 그러한 부하에 요구되는 저항력을 제공하는데 매우 효율적이다. 하지만 효율면에서, 부벽식은 매우 빈약해서 횡단하천 가속에 저항하는데 매우 작은 강도를 가짐.

· 가장 강한 진동하에서, 이러한 방식으로 설계된 더 오래된 슬래브 및 부벽 또는 다중 아치댐은 두드러진 균열현상이 생길 수 있고 부벽의 연속적 붕괴에 의해 도미노 형태를 보일 수 있음. 비록 지진에 의해 발생되지는 않았으나 1959년에 스페인 북서부에서 발생한 Vega de Tera Dam 붕괴가 이러한 붕괴 메커니즘의 대표적 사례임.

라. 아치댐의 잠재적 붕괴 원인

· 잠재적으로 아치댐은 주로 세 가지 잠재적 원인으로 인한 결과로 붕괴될 수 있는데 즉, 1) 초과 수축이음 개구부가 캔틸레버 장력균열과 합성된 경우, 2) 댐 양단부 암반쇄기의 이동이 암반 불연속면으로 형성되어질 경우, 3) 완만한 경사의 댐 양안부 경계면을 따라 슬라이딩이 발생하는 경우 등임.

· 연직 수축이음들은 극소수가 있거나 어떠한 인장저항력도 없는 것으로 알려져 있으며 지진 인장 아치응력이 정적 압축 아치응력을 초과할 때 극한 지진진동 동안에 반복적으로 개폐될 수 있음. 수축이음 개구부는 인장 아치응력을 상쇄시키지만 인장 캔틸레버 응력을 증가시킴. 이러한 증가된 캔틸레버 응력은 수평균열을 일으키는 콘크리트나 리프트 라인의 인장강도를 초과할 수 있음. 여기서 초래되는 개방된 수축이음에 의해 경계가 지어진 부분 블록들과 균열된 리프트 라인은 댐 붕괴를 유발하는 불안정한 상태로 될 수 있음.

· 아치댐의 안정성에 특히 한계적인 또 다른 붕괴모드는 운동학적으로 이동할 수 있는 댐 양단부 암반쇄기를 포함함. 이러한 현상은 1971년 San Fernando 지진과 1994년 Northridge 지진 발생기간에 Pacoima 아치댐에서 관측되었음. 또한 댐 기초부 영역 부근의 초과캔틸레버 응력은 댐 저부에서 균열을 발달 시킬 수 있거나 파쇄된 기초부 암반 이동 및 이음 개구부를 통해 완화될 수도 있음.

· 이러한 경우 해당 영역에서 댐의 인장저항 능력이 손실될 것임. 균열되거나 붕괴된 기초부 영역이 작다면 댐은 그 영역에 걸쳐 가교역할을 함으로써 안정된 상태가 될 수 있음. 하지만 커다란 균열이나 붕괴영역은 특히 완만한 경사의 양안부에서 균열된 캔틸레버 블록의 슬라이딩을 유발할 수 있으며 이것은 인장력이 아니라 압축력 및 전단력에 의해 저항할 수 있는 힘임. 이러한 상황에서 댐의 슬라이딩 가능성은 중력식 댐과 마찬가지로 아치댐의 안전도를 평가하는데 고려되어져야 함.

4. 댐 붕괴 요소 도출

– 미육군공병단(US Army Corps of Engineers)은 미국 내의 8,639개 댐에 대하여 실시.

가. 댐 붕괴 요소 도출

· 앞서 검토한 국내외 댐 붕괴 사례로부터 일반적 범주 내에서 댐 붕괴의 가장 보편적인 상호 원인은 다음과 같이 정리할 수 있음.

· 월류:
① 불충분한 여수로 설계
② 토석류에 의한 여수로 폐색
③ 댐 정부 침하

· 기초부 결함:
① 부등 침하
② 슬라이딩 및 사면 불안정
③ 높은 양압력
④ 조절되지 않은 기초부 누수

· 파이핑 및 누수:
① 누수에 의해 야기되는 댐을 통한 내부 침식
② 배수관이나 여수로와 같은 수리구조물에 걸친 누수 및 침식
③ 댐의 균열
④ 관로의 조인트나 균일에 의한 제방재료 파이핑

· 기타:
① 제방부 함몰
② 지진 피해
③ 풍파에 의한 월류
④ 월류파 유발 산사태

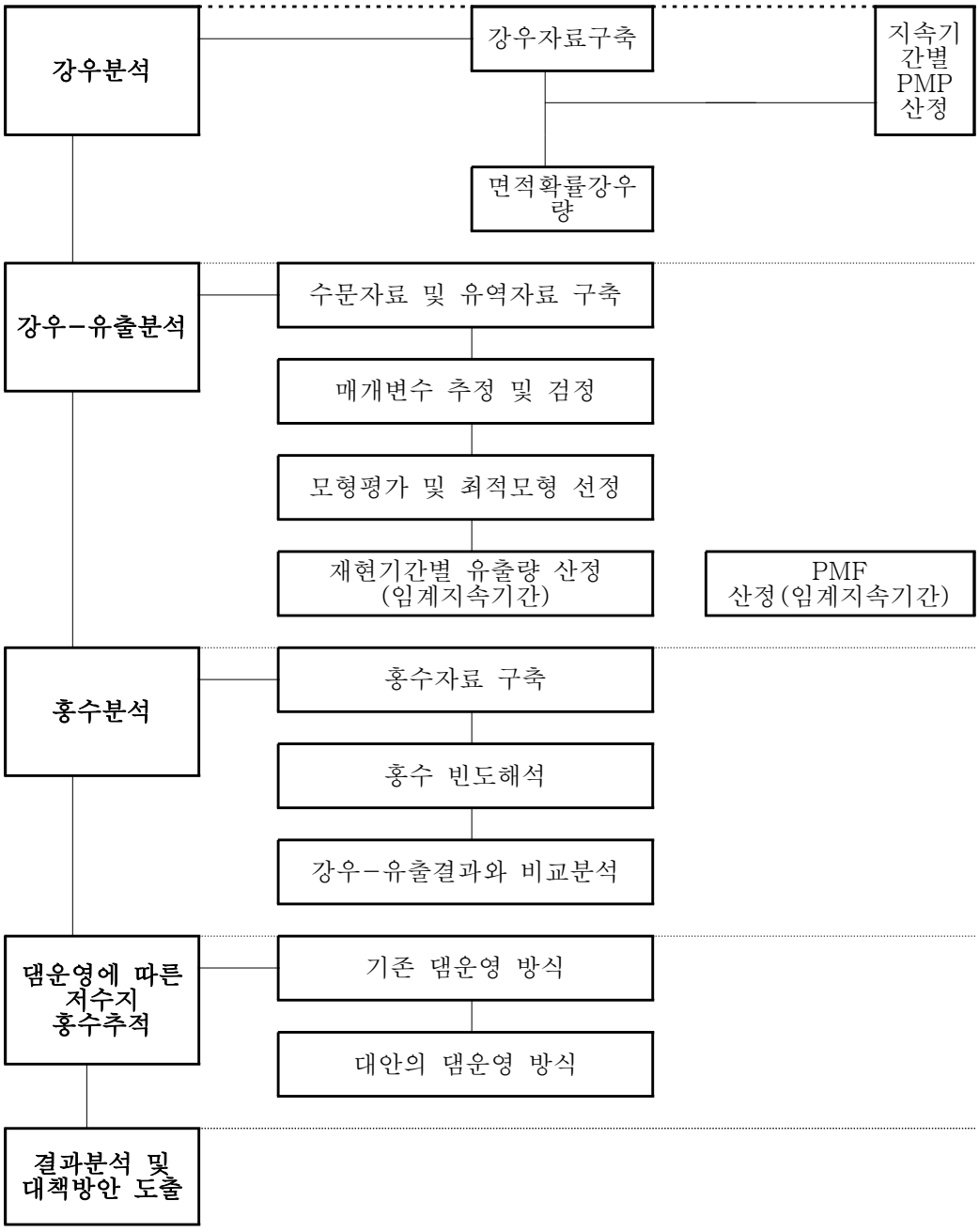
· 이와 같이 실제 댐 붕괴사례를 토대로 댐의 여러 잠재적 붕괴요인들을 검토한 결과, 댐 붕괴모드는 크게 홍수로 인한 붕괴와 지진으로 인한 붕괴, 그리고 내부 붕괴로 분류할 수 있음. 홍수로 인한 붕괴모드로 월류, 댐 하단부 침식(toe erosion) 및 풍파에 의한 침식(wave action) 등을 고려할 수 있으며 지진에 의한 붕괴모드로써 댐 기초부 및 제방의 액상화(liquefaction) 등을 고려할 수 있음.
· 지진에 의한 붕괴모드는 초기 액상화를 일으키는 일련의 사상과 그에 뒤따르는 안정성 파괴, 그리고 붕괴부 형성 등으로 구성된다. 한편, 제방 파이핑 및 사면 안정성은 내부 붕괴모드(정상적인 댐 운영 조건)로 고려될 수 있음. 이를 토대로 댐 붕괴의 잠재적 요소와 댐 붕괴모드별 예상되는 반응 시나리오를 정리하면 <표 3-9>와 같음.

<표 3-9> 댐 붕괴원인의 잠재적 요소 및 붕괴모드

분류	부하조건	붕괴 원인	붕괴 모드
홍수기 조건	극한홍수(PMF)	여수로 능력 부족	월류 붕괴
		댐 정부 침하	
		여수로 폐색	
		파랑에 의한 월류	
		여수로 침식	외부 침식 붕괴
		파랑에 의한 제방 침식	
		댐 제방 하단부 침식	
		댐 제방 누수	파이핑 붕괴
		댐 기초부 누수	
	댐건설 기간의 홍수	부분 저류 손실	월류 붕괴
정상 조건	중간 지진	댐 제방 누수	파이핑 붕괴
	(운전기준지진, OBE)	사면불안정	
		저수지산사태	월류 붕괴
		파랑에 의한 월류	
		댐 기초부 액상화	기초부 붕괴
	대규모 지진	댐 제방 누수	파이핑 붕괴
	(최대설계지진, MDE)	사면불안정	
		단층균열에 의한 누수	
		저수지산사태	월류 붕괴
		단층균열에 의한 월류	
		파랑에 의한 월류	
		댐 기초부 액상화	기초부 붕괴
	정상운영 조건	댐 제방 누수	파이핑 붕괴
		댐 기초부 누수	
		사면불안정	
		저수지주변 사면 불안정	월류 붕괴

나. 댐의 수문학적 안전도 평가방법

· 불확실성 요소들을 도출하기에 앞서 본 연구에서는 기존 수문학적 댐 안전도 평가방법에 대해서 간략히 검토 수행하였음.



<그림 3-7> 댐 안전도 평가방법

· 일반적인 수문학적 댐 안정성 평가는 실측유량을 통해서 강우-유출 모형의 매개변수를 검정 및 검증을 실시하여 확률강우량 및 PMP에 따른 홍수량을 산정함. 또한 충분한 자료가 구축외어 있다면 홍수량에 대한 빈도분석을 실시하여 강우-유출 모형에서의 홍수량과 비교 검토하여 유역의 유출량을 결정하며, 최종적으로 댐 운영 방식에 따른 저수지 홍수추적을 실시하여 여수로의 방류능력을 검토하는 것이 일반적임.

· 위 <그림 3-7>과 같이 기존 수문학적 안정성평가는 강우-유출간의 불확실성, 사용되는 수문기상자료에 대한 불확실성 등을 효과적으로 고려하지 못하고 있으며 특히 다양한 위험 인자로 인한 댐의 안정성을 평가하는데 적합하지 않음. 댐 안전과 관계된 대부분의 변량들은 주로 불확실성에 의존하며, 각 변량들의 통계적인 정보들은 이미 알고 있거나 과거자료, 직접 측정, 관련된 자료, 주관적 판단 등으로부터 예측됨. 이러한 점에서 본 연구에서는 댐의 위험도를 초래하는 변량들은 다음 5개의 그룹으로 구분하였음.

<표 3-10> 댐 위험도 해석에서 다루어지는 변량

주요구성 요소	불확실성 변량 종류
수문학적 요소	홍수빈도, 홍수량, 홍수의 최대치와 시간분포, 강우-유출 관계, 홍수 이전의 저수지에서 초기수위, 저수지의 침전 퇴적물 등.
수리학적 요소	여수로 용량, 홍수추적, 파랑, 취수구, 수문, 침식 및 세굴 방지공, 수문과 밸브의 결함 등.
유역 요소	유역면적, 하도길이, 표고차 등
풍파에 관련된 요소	풍속, 취송거리, 취송거리에 따른 평균 저수지 수심, 저수지의 정수시의 수위 등

다. 댐의 구조적 요소

(1) 수문학적 요소

· 자연 상태에서 강우의 강도 및 지속시간 등은 일정하지 않다. 상이한 지속시간, 계절, 장소에 대한 우량주상도에서의 첨두발생시간의 비(比)는 다른 지속시간에 대해서는 비교적 일관적이나 계절과 위치에 따라 변함. 토양유형, 토양피복, 토지이용상태, 선행함수상태 등은 강우-유출 관계에서 유효우량을 결정하는 요소임. 초기 저수지 수위는 홍수가 발생하기 전 유입, 유출, 증발, 기타 손실에 대한 물수지 균형의 결과. 계절에 따라 크게 변화하며 초기 저수위 수위의 불확실성은 과거의 댐 수위 기록이나 장래의 저수지조작 등으로부터 계산됨.

(2) 수리학적 요소

· 댐의 홍수소통능력은 여수로 폭, 여수로 높이, 유량계수 등에 의해 산정되는 여수로 방류용량에 의해서 결정됨. 여수로 폭과 여수로 높이의 불확실성은 측정의 오차와 여수로 정상부에서 잡물, 식생, 나뭇가지 등의 장애물에 의해 발생한다. 유량계수는 통상 측면수축, 여수로 표면의 조도, 여수로를 월류하는 수위의 함수이며, 실험으로 결정됨.

(3) 수리학적 요소

· 유역면적, 유로연장, 표고차는 지형도나 야외조사로 결정할 수 있으며, 이들 값의 결정에서 오차는 주로 유역의 경계와 긴 하도길이를 결정하는데 대한 불확실성, 측정의 오차, 지도의 오차 등에 기인함.

(4) 수리학적 요소

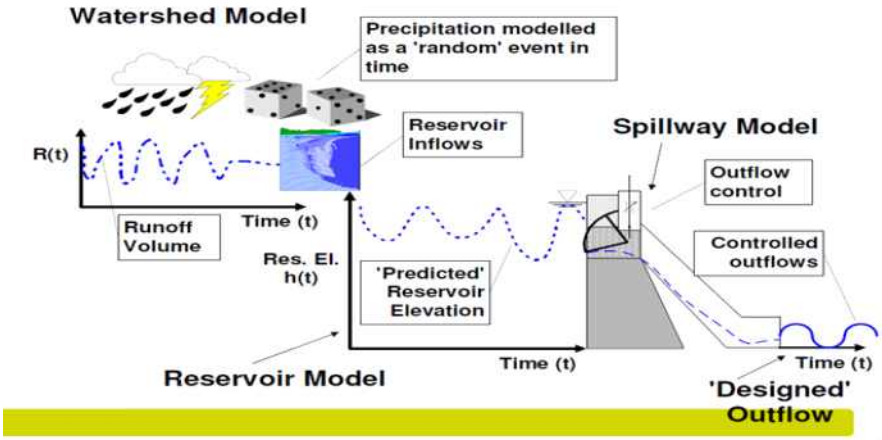
· 풍속 – 댐지점에 장기간 관측자료가 없을 때는 인근의 관측자료를 이용함. 일반적으로 우리나라의 지역별 풍속의 최고치는 13.3~42.4(m/s)를 가지며 지역 및 계절에 따라 임의적인 값을 나타냄. 풍파에 의한 쳐올림 높이를 계산하는데 이용되는 풍속은 저수지의 수면 위에서 측정되고, 그것은 육지에서 측정한 것보다 크게 나타남. 육지에서 측정한 자료로 저수지에서 풍속을 추정하려면 환산계수를 적용함.
· 취송거리, 취송거리에 따른 평균 저수지 수심, 저수지의 정수시의 수위, 댐 높이 등. 유효 취송거리는 서로 다른 저수지의 형태에 따라 가중치의 취송거리이고, 취송거리와 파고사이의 더 좋은 상관관계를 얻기 위해 적용함.

5. 정상성 기반 극치수문변량 모의 기법 개발

· 본 절에서는 댐 위험도 해석시 다양한 시나리오 생성을 위해 요구되는 극치수문변량 모의기법에 대한 연구를 수행함. 본 연구에서는 Mixture분포 형태의 확률밀도함수를 활용하여 극치값을 효과적으로 재현할 수 있는 알고리즘을 개발하였으며, 기존 모의기법에 비해 15%이상의 정확도를 향상할 수 있었음. 수문학적 댐 위험도 분석에 있어서 극치수문변량은 매구 중요한 부분으로서 기존 HEC-1 모형과 불확실성 분석이 가능한 Bayesian 모형의 연계운영의 가능성을 평가하기 위해서 정상성 기반 극치수문변량 모의기법을 개발 결과를 도출하였음.

가. 위험도 해석을 위한 수문 모의 개념

· 수문학적 위험도 해석을 위해서는 Bayesian Network의 파괴인자에 부여될 확률이 추정되어야 하며 이를 위해서 수문시스템에 대한 해석이 필수적으로 요구됨. 즉, 강우모의발생, 강우-유출 모의, 댐 운영 등의 수문해석과정이 요구되며 위험도 해석에 필수적인 불확실성 분석이 동시에 이루어질 필요가 있음. 본 연구에서는 수문해석 시에 주요 입력 자료인 강우를 효과적으로 모의할 수 있는 방법론 개발과 강우-유출 분석 시 매개변수, 입력 자료의 불확실성이 고려될 수 있는 강우-유출 모형을 개발함.



<그림 3-8> 댐 위험도 해석을 위한 수문변량 모의 개념도

나. 극치강수량 모의기법 개요

· 수자원에서 일강수량 모의기법은 기본적으로 수공구조물 설계 및 수자원계획을 수립하기 위한 입력 자료로서 이용되고 있으며, 장기적인 목적을 가지고 수행되기 때문에 장기간의 일강수량자료의 입력이 요구됨. 그러나 우리나라의 경우 통계적으로 유의성을 갖는 30년 이상 관측된 자료가 부족하기 때문에 일반적으로 단기간의 일강수량자료를 이용하여 장기간의 일강수량을 모의 추정하여 이용하는 실정임. 이러한 관점에서 본 연구에서 적용한 극치강수량 모의발생 기법은 수자원계획 수립에 있어서 미래에 발생 가능한 시나리오를 제공함과 동시에 불확실성 정량화를 수행하여 신뢰성을 정량적으로 평가하였음.

· 일강수량을 모의하는데 있어서 강수계열의 단기간의 기억(memory)을 활용한 Markov Chain 모형이 가장 일반적이며, Markov Chain 모형은 크게 두 부분으로 나누어짐. 첫째, 강수의 발생(rainfall occurrence)을 결정짓게 되며, 둘째, 강수일에 대해서 강수량(rainfall amount)을 결정하는 과정으로 구분됨. 기존 Markov Chain 모형이 주고 이용되며, 강수일과 무강수일 간의 또는 무강수일과 강수일간의 천이확률(transition probability)을 통해 정의되며 모의됨.

· 다음 단계로서 앞에서 언급한 바와 같이 강수일에 일강수량을 부여하게 되며 확률분포형(probability distribution)을 통해서 구체화함. 일반적으로 일강수량은 주로 Gamma 분포, Exponential 분포 등에 의해서 모의되게 되며 일강수량의 통계적 특성을 효과적으로 모의한다고 알려져 있으며, 기존 2-State Markov Chain 모형에 Gamma 분포 및 Exponential 분포를 활용한 강수량 추정에서 2차 모멘트 이상의 통계치를 재현하는데 어려움이 있음. 즉, 일강수량의 평균을 재현하는 데에는 문제가 없지만 일강수량 계열의 극치 값이 관측된 값에 비해 현저하게 과소 추정되는 문제가 있음.

· 이러한 문제점을 해결하기 위해서 다양한 확률분포형을 적용하여 평균적인 일강수량과 극치강수량을 동시에 복원하고자 하는 연구가 진행되어 왔으나, 수문통계학적으로 일강수량과 극치강수량의 통계적인 분포특성이 다르기 때문에 이를 동시에 구현하는데 근본적인 어려움이 있음. 즉, 극치강수량은 Tail이 두꺼운 극치분포를 따르기 때문에 이러한 점이 고려될 수 있는 모형이 적용되어야 하며, Pareto 분포형은 이에 대한 적절한 방법이라 할 수 있는 것임.

· Pareto 분포는 일반적으로 GPD(generalized pareto distribution) 분포형으로 알려

져 있으며, 극치수문량을 추정하는데 매우 유리한 것으로 알려져 있음. Pareto 분포형은 주로 설계강수량 및 설계홍수량을 추정하는데 국한해서 적용된 사례가 있으며, 기존 연구에서는 이에 대한 활용성 제고 방안 및 관련 매개변수 추정연구가 진행된 바 있음.

· 이에 대한 국내 연구를 살펴보면 빈도별 설계홍수량이 GEV(generalized extreme value), GLO(generalized logistic distribution) 분포형에 의한 빈도별 설계홍수량 보다 신뢰성이 높은 결과가 나오는 것을 도출하였음. GPD 분포형을 활용한 빈도해석 모형에서 최적의 Threshold를 찾기 위해서 Monte Carlo Simulation을 활용하였으며, 국외에서는 GPD 분포를 이용한 Quantiles 추정에 있어서 ML(method of maximum likelihood), MM(method of moments), PWM(method of probability weighted moments), GPWM(method of generalized probability weighted moments) 방법들 중 알맞은 선택을 할 수 있는 조건을 제시하였음. 2변수 GPD (generalized pareto distribution)의 추정에 대해 7가지 추정방법에 대해서 평가 비교한 결과 PWM 방법과 L-moments 방법으로 추정한 결과가 다른 매개변수 추정방법들에 비해 우수한 결과를 주고 있다고 언급한 바 있음.

· 일강수량 모의에서 일강수량 통계치를 효과적으로 복원하기 위해서 특정 분포형의 가정 없이 적용이 가능한 비매개변수적 방법이 활용되어져 왔음(권현한 등, 2005;). 그러나 기존 매개변수적 방법에 비해 통계치 복원에 유리한 측면이 있지만 여전히 극치강수량을 효과적으로 모의하는 데는 어려움이 존재하였음. 즉, 내삽(interpolation) 측면에서는 매우 유리하지만 외삽(extrapolation)에서 광역폭에 영향을 많이 받으며 극치값의 존재 여부에 따라서 외삽시에 극치강수량 복원에 어려움이 존재함.

· 이러한 점에서 본 연구에서는 새로운 관점에서 일강수량의 분포 특성을 효과적으로 재현할 수 있는 방법론을 제시하였으며, 기존 2-State Markov Chain 모형에서 일강수량에 평균적인 특성과 극치특성을 동시에 재현할 수 있도록 불연속 Piecewise Kernel-Pareto Distribution(PKPD)을 적용한 강수발생모형을 적용하였음.

· PKPD 분포형은 핵밀도함수의 장점과 Pareto 분포형의 장점을 동시에 고려할 수 있도록 고안된 불연속확률분포형인 PKPD 모형은 특정 Threshold를 넘는 극치강수량에 대해서 Thick-Tail을 가지는 Pareto 분포형을 적용하고 극치강수량을 제외한 일반적인 강수량에는 핵밀도함수를 적용하게 되어, 기존 극치강수량 모의기법에 비해 높은 재현율을 보여주었으며, 이에 대한 불확실성 정량화를 수행한 결과 기존 대비 높은 신뢰성을 보여주었음.

· 따라서 본 연구에서는 장기간 자료를 보유하고 있는 한강유역 강수량에 대해서 모형의 적합성을 검토하였으며, 한강유역 춘천, 강릉, 서울 관측소에 대해서 제안된 방법론의 적합성을 평가하였음.

다. 불연속 Kernel-Pareto 분포를 활용한 일강수량 모의 (Markov Chain 모형)

· 강수자료간의 계열 상관성(serial correlation)을 고려하여 미래의 상태를 현재와 과거의 상태들과의 상관관계를 이용하여 추계학적으로 재추출하는 과정을 Markov 과정 (Markov process)이라 하며 과거 상태의 고려를 위해서 결정되는 2차 또는 3차와 같이 한정적인 상태공간에서의 Markov 과정을 Markov Chain이라 함.

· 일반적으로 일강수량 자료계열은 Markov 과정을 따르는 것으로 알려지고 있으며

Markov Chain을 적용하면 일강수의 특성을 잘 묘사하는 것으로 알려져 있음(Kwon et al., 2009). Markov Chain의 기본개념의 많은 연구에서 언급되었으며 간략히 요약하면 다음과 같음.

· Markov Chain의 기본 개념은 수문시스템의 움직임을 예측하고자 할 때 그 계의 과거이력을 통해 미래 상태를 예측하는 것임. 따라서 미래상태의 확률은 현재 또는 과거의 조건부 확률로써 다음과 같이 나타낼 수 있음.

$$P(R_{n+1} \mid R_n, R_{n-1}, R_{n-2}, \cdots, R_1) \quad (1)$$

· 여기서 R_n은 현재의 상태, R_{n-1}, R_{n-2}, R_1은 과거의 강수 상태를 나타냄. 미래의 강수상태가 아주 먼 강수 상태와는 독립이며 단지 가장 근접한 현재의 강수 상태에 의해서만 영향을 받는다면 이때 Markov Chain은 아래와 같은 조건부 확률로 나타낼 수 있으며 이를 1차 Markov Chain이라 함.

$$P(R_{n+1} \mid R_n) \quad (2)$$

· 2-State 1차 Markov Chain모형에서 각 상태공간에 존재하는 강수사상의 수인 벡터(S)와 사상의 발생과 비 발생의 확률을 나타내는 천이확률(transition probability)은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있으며, 이는 2×2 천이확률 행렬이 정의됨.

$$P_{tr_{i,j}} = \frac{[S_{i,j}]}{\sum_{j=1}^{2} S_{i,j}} \quad (3)$$

· 여기서, $P_{tr_{i,j}}$는 상태 i에서 상태 j로 천이되는 확률을 나타내며 상태 S_i에서는 반드시 $S_{i,1}, S_{i,2}$ 중 한 곳으로 천이 되므로 하나의 상태에서 발생되는 천이확률의 합은 반드시 1이 됨. 만약 3-State 2차 Markov Chain 모형을 통해서 2일전까지의 강수량을 고려하여 모의한다면 천이확률은 3×3 행렬로 정의될 수 있음.

· 식 (3)의 천이확률의 각 원소의 합이 1일 때의 행렬을 확률행렬(probability matrix)이라 정의하며 각각의 확률행렬은 하나의 Markov 과정을 정의하며, 강우 발생여부를 판단하게 됨. 따라서 천이확률 P_{tr}을 추정하게 되면 Markov Chain의 초기상태만을 통해 강수발생을 모의할 수 있다. <표 3-11>은 상태-2의 1차 Markov Chain 모형에 의한 강수발생의 천이확률 행렬(transition probability matrix)을 나타낸 것임.

<표 3-11> 2-state Markov Chain 모형의 천이확률

t(day) / t-1 (day)	Dry	Wet
Dry	1-a	a
Wet	b	1-b

· <표 3-11>에서 0≤a≤1, 0≤b≤1로서, a는 건조일 다음에 습윤일이 발생할 확률이고 b 는 습윤일 다음에 건조일이 올 확률임. 일단 2-State 1차 Markov 모형을 통해서 발생여부가 결정되면 강수일에 대해서 강수량을 결정해야 한다. 이를 위해서 확률분포형이 적용되며 과거 일강수량 통계치를 최대한 복원할 수 있는 확률분포형을 적용하게 됨. 지금까지 일강수량 모의를 위해서는 Gamma 분포형이 일반적으로 적용되어지고 있으며 일강수량의 통계치를 복원하는데 유리한 측면이 있는 것으로 알려지고 있음. 본 연구에서 개발된 모형과 비교를 위해서 사용된 Gamma 분포형에 대해서 간략히 요약하여 나타내었음. 2변수 Gamma분포의 확률밀도함수(probability density function)는 다음과 같음.

$$f(x) = \frac{\lambda^{\eta} x^{\eta-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(\eta)} \tag{4}$$

· 여기서, $x, \lambda, \eta > 0$이고 λ는 축척매개변수(scale parameter)를, η는 형상매개변수(shape parameter)를 나타냄. Gamma 함수의 식 (5)의 누가분포함수(cumulative density function)는 확률밀도함수를 적분함으로서 얻어질 수 있으며, 누가분포함수로부터 강수량은 다음 식 (5)의 Quantile함수로 부터 추정이 가능함.

$$F(x) = \int_0^x \frac{\lambda^{\eta} x^{\eta-1} e^{-\lambda t}}{\Gamma(\eta)} dt \tag{5}$$

$$x = F^{-1}\left(\int_0^x \frac{\lambda^{\eta} x^{\eta-1} e^{-\lambda t}}{\Gamma(\eta)} dt \right) \tag{6}$$

(1) 불연속 Kernel-Pareto Distribution

· 앞서 언급했듯이 일강수량자료는 대부분 Gamma 분포에 의해서 적합이 이루어지며 평균을 중심으로 한 일강수량의 특성을 효과적으로 모의할 수 있음. 즉, 일강수량의 특성상 0을 주임으로 대부분의 자료가 집중되어 있고 일강수량 전체적인 특성은 Gamma 분포에 의해서 모의가 가능하나 극치강수량이 혼재하는 일강수량 전체는 하나의 Gamma 분포로 적합 시키게 되며 극치강수량의 정보를 잃을 수 있는 개연성이 큼. 즉, 분포형의 양쪽 끝단에서 나타나는 극소 및 극대강수량 정보를 효과적으로 재현하기 어려운 문제점이 있음.

· 이러한 점에서 본 연구에서는 내삽에서 가장 우수한 재현능력을 가지는 핵밀도함수(kernel density function)방법과 극치강수량 재현에 유리한 GPD 분포를 동시에 고려할 수 있는 분포형을 개발하고 이를 일강수량모의기법에 적용하고자 함.

· 핵밀도함수 방법과 GPD 분포형에 대해서 간단히 살펴보면 다음과 같음. 비매개변수적 핵밀도함수 해석방법은 어떤 분포의 가정이 필요 없이 관측자료 자체에서 분포형을 유도할 수 있기 때문에 분포형 선정의 어려움을 해소할 수 있고 또한 관측자료의 적정한 분포형을 선정할 수 있으며 특히, 내삽시에 매우 우수한 능력을 발휘함.

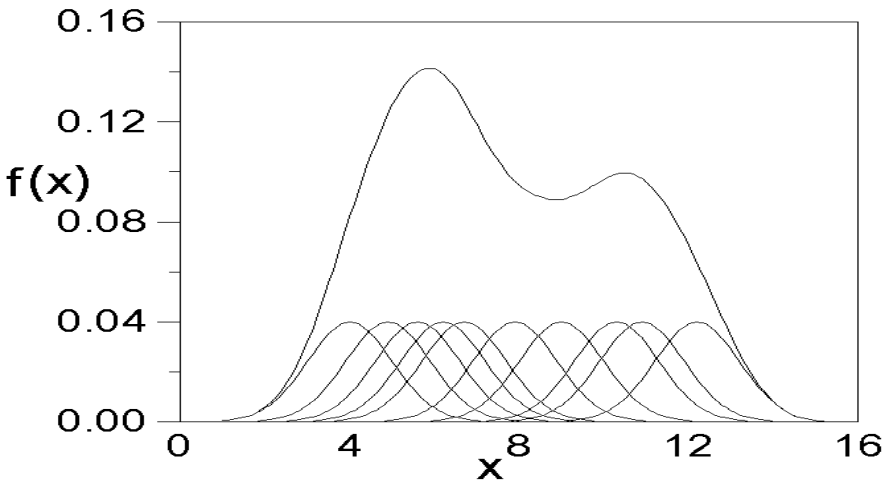
· 모든 자료가 발생되어진 각각의 위치에 막대그래프의 중앙을 위치하도록 하여, 구간을 이동시킬 수 있는 이동 히스토그램을 이용한 핵밀도함수 추정법을 개발하였으며, 이는 모든 실수 x에 대하여 식 (7)과 같이 정의하였음.

$$f(x) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{h}K\left(\frac{x-X_i}{h}\right) \qquad (7)$$

· 여기에서, $X_1, X_2, \cdots, X_n$은 독립적으로 동일하게 분포된 실관측치이고, K(.)는 핵함수, h는 양의 광역폭(bandwidth)임. 본 연구에서는 광역폭을 추정하기 위해서 간단한 Rule of thumb을 이용하여 계산하였음.

$$\hat{h_0} = 2.78\hat{\sigma}n^{-1/5} \qquad (8)$$

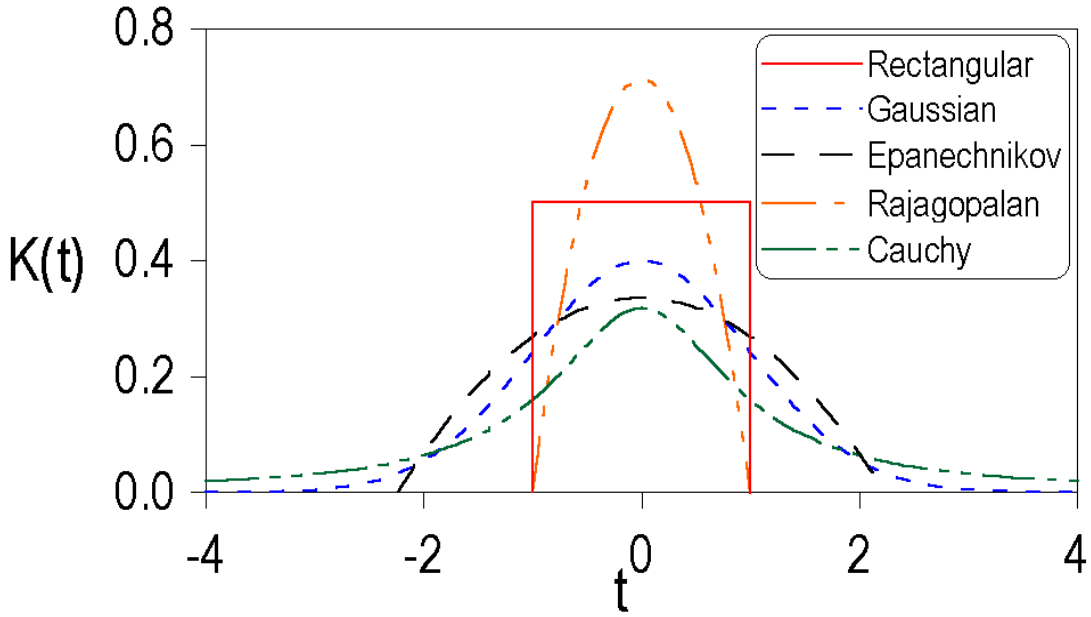
· <그림 3-9>는 관측된 자료위치에 핵함수를 각각 위치하여 합산한 후 확률밀도함수로 표현하였음. <그림 3-9>에서 관측자료의 개수 10, 광역폭 h가 1인 핵함수를 사용한 핵밀도함수를 나타냄. 위에서 언급된 핵밀도함수 추정법은 광역폭 h의 변화 없이 일정한 값을 갖기 때문에 이를 고정 핵밀도함수 추정법 (fixed kernel density function estimator)이라 함.



<그림 3-9> 고정 핵밀도함수 예시

· 일반적인 핵함수는 중앙에서 최대치를 가지며 연속적이고 대칭인 방정식의 형태를 가짐. 확률밀도 추정시에 일반적으로 사용되는 핵밀도함수는 <그림 3-10>과 같음. 일반적으로 해석 특성에 맞는 임의의 핵함수를 사용하여도 최적의 핵함수와 비슷한 효율을 갖는다고 하였음.

· 그러나 사용목적에 따라 각 핵함수의 적용성을 검토할 필요가 있다. 예를 들면 연속적이고 미분 가능한 밀도함수가 필요한 경우는 경계를 갖는 핵함수보다는 경계를 갖지 않는 핵함수를 사용하는 것이 적용상에 유리함. 본 연구에서는 극치강수량이 아닌 일반적인 강수량을 모의하기 위함이므로 일반적으로 사용되는 Gaussian 핵함수를 이용하였음.



<그림 3-10> 다양한 핵밀도 함수 예시

· 다음으로 GPD 분포형에 대해서 살펴보면 다음과 같다. 본 연구에서 사용한 GPD분포의 확률밀도함수와 누가확률분포함수는 각각 식 (9), (10)과 같음.

$$f(x)=\frac{1}{\alpha}\left[1-\frac{k}{\alpha}(x-\epsilon)\right]^{-1+\frac{1}{k}} \tag{9}$$

$$F(x)=1-\left[1-\frac{k}{\alpha}(x-\epsilon)\right]^{\frac{1}{k}} \tag{10}$$

· 여기서, k, α, ϵ는 각각 Shape Parameter, Scale Parameter, Threshold를 나타내며, 누가확률밀도함수 $F(x)$와 매개변수를 고려하면 극치강수량은 다음 식 (11)의 Quantile 함수를 통해서 추정됨.

$$x = \epsilon + \frac{\alpha}{k}\left[1-(1-F)^{k}\right] \qquad (11)$$

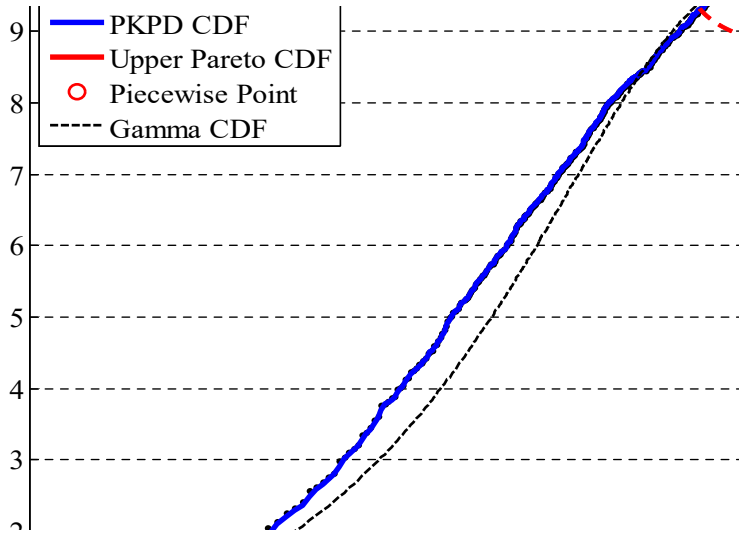
· 지금까지 설명된 두 개의 확률밀도함수 추정방법의 장점을 최대한 활용하기 위해서 일반적인 강우량에 대해서는 핵밀도함수를 적용하고자 하며 극치강수량에 대해서 GPD분포를 적용하였음. 즉, 두 개의 누가확률밀도함수를 연결시키게 되며 예를 들어 비초과확률 0.9이상에서는 GPD분포를 활용하고 0부터 0.9까지는 핵밀도함수를 활용하여 강수량을 모의하게 됨.

· 이렇게 되면 2개의 확률밀도함수가 적용되게 되며 각각의 구간에서는 독립된 확률밀도함수로부터 강수량이 모의되게 됨. 이러한 확률분포형의 형태를 불연속확률밀도함수(piecewise probability density function)이라고 하며 최근에 혼합분포와 함께 복합적인 성분을 동시에 모의하기 위해서 통계학 분야에서 많은 연구가 진행되고 있음.

· 본 연구에서 제안하는 PKPD 분포형의 개념은 <그림 3-11>에 도시하였다. <그림 3-11>에서는 0.95이상의 극치강수량에 대해서는 GPD 분포가 적용되었고 0부터 0.95까지는 핵밀도함수가 적용되었음. 이를 경험적 누가확률밀도함수와 일강수량 모의발생에 많이 이용되는 Gamma 분포형과 비교하여 나타었음.

· 한편, 경험적인 누가확률밀도함수와의 비교결과 PKPD CDF의 경우 분포형의 양 끝단에서 매우 일치되는 결과를 기존의 Gamma 분포형에서는 왜곡된 모습을 보여주고 있음. 그림에서 Gamma 분포형은 0.9이상에서 1에 빠르게 수렴하고 있는 반면에 PKPD 분포형은 원자료가 가지는 극치특성을 매우 잘 묘사하고 있음.

· 분포형에서 Tail의 거동은 극치강수량을 재현하는데 매우 민감한 요소로서 Gamma 분포형은 극치강수량을 모의하는데 무리가 있음을 그림으로부터 확인할 수 있음. 이와 더불어 0.1 이하의 누가확률부분에서도 PKPD 분포는 경험적인 누가확률밀도함수와 유사한 특성을 보이고 있으나 Gamma 분포는 꼬리가 길게 늘어져 실제 강수량이 가지는 특성이 왜곡될 가능성이 크다 할 수 있음.



<그림 3-11> 일강수량 모의를 위한 불연속 Kernel Pareto 분포의 적용 예시

(2) 불연속 Kernel-Pareto 분포를 활용한 일강수량 모의기법 적용

· 본 연구에서 제안한 방법론의 적합성은 한강유역의 서울, 강릉, 춘천 지점의 기상청 강수량을 대상으로 평가하였음. 3지점 모두 30년 이상의 자료를 보유하고 있으며 특히 강릉지점의 경우 태풍 루사 등의 영향으로 기존의 Gamma 분포를 활용한 Markov 방법을 통해서는 극치강수량을 모의하는데 매우 어려움이 큰 것으로 알려지고 있다. 본 연구에서 사용된 강수지점에 대한 정보는 <표 3-12>와 같음.

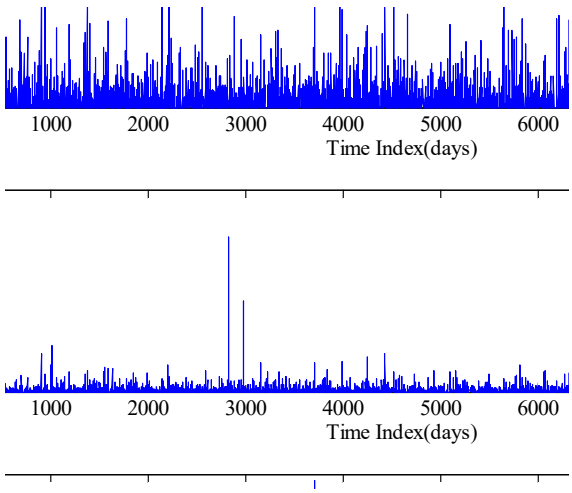
· 모든 지점에서 30년 이상의 일강수량을 보유하고 있으며 본 연구에서는 일강수량을 대상으로 모형을 검토하였음. 일반적으로 Markov Chain 모형은 계절별로 모형을 구축하여 모형을 실시하게 되는 것임.

· 본 연구에서 제시한 방법론에 대해서 일반적인 강수 재현 능력과 여름에 극치강수량 재현 능력을 동시에 평가하기 위해서 7~9월 여름강수량과 10~12월 가을강수량을 대상으로 모의 결과를 평가하였음. 모형의 적합성은 여름강수량을 위주로 평가하여 설명한 후 가을강수량에 대해서는 결과위주로 나타내었음.

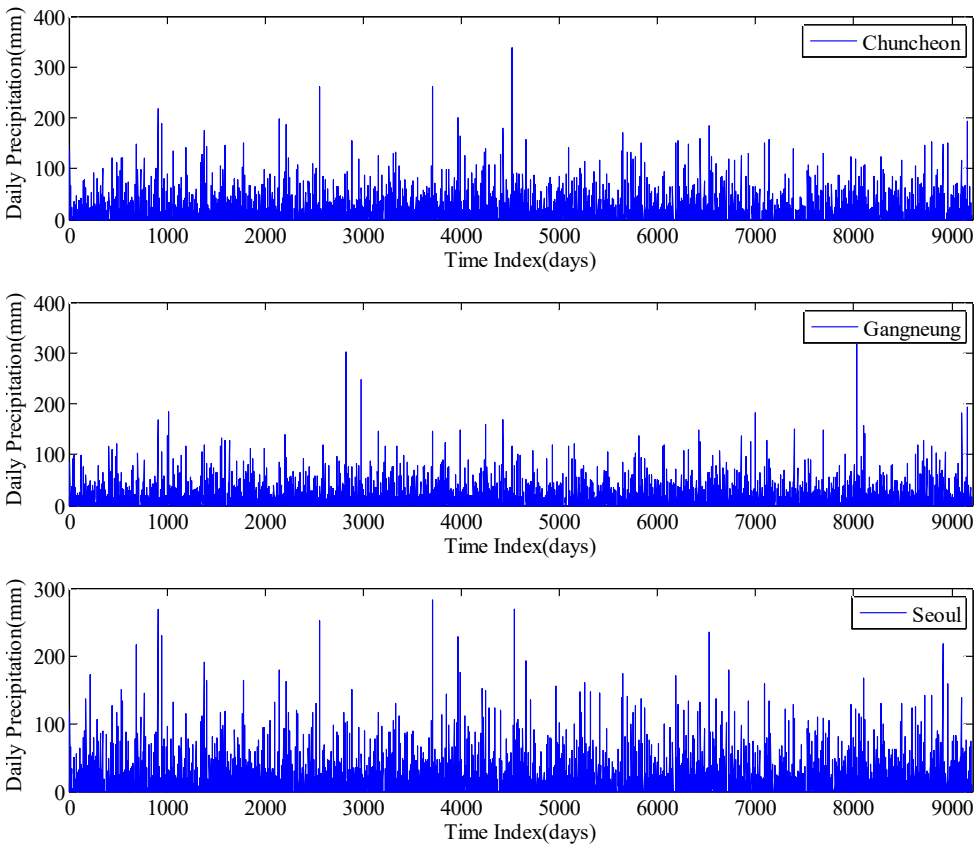
<표 3-12> 강우-유출 분석시 사용된 강우 지점 자료

No.	Station Code	Station Name	Location(degree)		Observation period until 2008(year)	
			Latitude	Longitude	Daily	Hourly
1	101	Chuncheon	37.90	127.73	43	43
2	105	Gangneung	37.75	128.88	97	48
3	108	Seoul	37.57	126.95	101	48

· <그림 3-12>은 한강유역 3개의 관측소에 대해서 PKPD 확률분포에 기반한 Markov Chain 모형을 이용해 여름강수량을 모의한 결과를 나타내었음. 모의기간은 7-9월 3개월간 총 92일을 100년 모의한 결과이다. 그림에서 특이할 점은 강릉관측소에 대해서 모의된 일강수량이 900mm를 상회하는 값으로 모의되고 있다는 점임. 이는 태풍 루사 당시 발생했던 일최대강수량을 반영한 결과로 효과적으로 극치값이 재현되고 있는 것으로 판단됨. <그림 3-12>은 Gamma 확률분포에 기반한 Markov Chain 모형을 이용해 여름강수량을 모의한 결과이며, PKPD 확률분포에 비해서 강수량이 과소 추정되고 있음을 강수시계열로부터 확인할 수 있음.



<그림 3-12> PKPD 모형을 이용한 3개 강수지점의 강수량 모의 결과

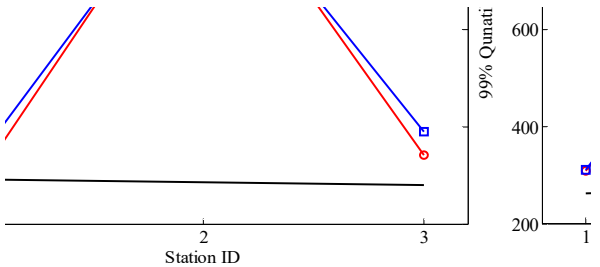


<그림 3-13> Gamma 분포형을 이용한 3개 강수지점의 강수량 모의 결과

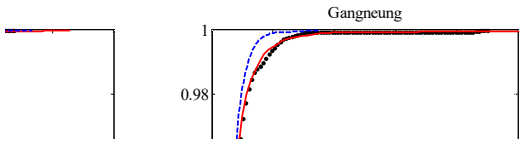
· 모형의 적합성을 평가하기 위해서 가장 우선적으로 검토한 사항은 모의된 강수계열이 관측 강수계열의 천이확률의 재현 여부에 있으며, <표 3-13>은 관측강수계열과 모의강수계열로부터 추정된 천이확률을 나타내며 모의강수계열로부터 추정된 천이확률과 관측값으로부터 추정된 천이확률과 거의 동일한 값으로 모의되는 것을 확인할 수 있음.

<표 3-13> 관측치와 모이치의 천이확률 재현 결과

Station	Transition Probability	Observation	Simulation
Chuncheon	p01	0.26	0.26
	p10	0.44	0.45
Gangneung	p01	0.30	0.30
	p10	0.41	0.41
Seoul	p01	0.26	0.26
	p10	0.40	0.41



<그림 3-14> PKPD 모형으로 강수량의 통계 특성 재현 결과(July-August-September)



<그림 3-15> 극치강수량 재현 효과를 비교하기 위한 누가확률밀도함수

· 다음으로 모의된 강수계열로부터 4가지 통계치를 추출하여 관측강수량을 비교하였음. 모형의 적합성을 평가하기 위해서 사용되는 통계치는 중간값, 표준편차, 왜곡도, 100년 빈도 강수량임. <그림 3-16>는 이들 통계치를 관측값과 본 연구에서 비교 대상인 Gamma 분포형 기반 Markov Chain 모형과 비교한 그림임.
· 그림에서 보는바와 같이 본 연구에서 제안하고 있는 PKPD 기반 Markov Chain 모형이 1-3차 모멘트까지 관측치의 특성을 매우 효과적으로 재현하는 것을 확인할 수 있음. 반면 Gamma 분포 기반 Markov Chain 모형은 2차 모멘트 이상에서 강수량의 특성을 효과적으로 재현하지 못하고 있음.
· <그림 3-16>에서는 극치강수량의 재현 특성을 보다 상세하게 비교하기 위해서 관측치, PKPD분포, Gamma분포의 누가핵밀도함수를 비교하였음. 분포형의 Tail거동을 자세히 평가하기 위해서 비초과확률 0.9이상만을 도시하여 나타내었음. 그림에서 보는바와 같이 Gamma분포는 100mm이상에서 PKPD분포에 비해 1에 빠르게 수렴하고 있으며 결국 이러한 특징이 극치강수량을 재현하는데 어려움으로 작용하게 됨. <그림 3-14>에서 나타낸 통계치들의 특성을 상세히 비교하여 <표 3-14>에 정리하였음.

<표 3-14> PKPD 모형을 통한 모의결과의 통계적 비교 (July-August-September)

Stations	Statistics	Observation	PKPD	Gamma Dist.
Chuncheon	100-Year Design Rainfall (mm)	308.5	310.3	261.4
Gangneung		870.5	909.5	274.6
Seoul		332.8	376.3	275.5
Chuncheon	Median (mm)	9.5	9.3	12.1
Gangneung		6.3	6.0	9.5
Seoul		8.6	8.6	12.0
Chuncheon	Mean (mm)	22.6	22.1	22.9
Gangneung		18.5	18.0	19.2
Seoul		22.8	22.7	23.7
Chuncheon	Standard Deviation (mm)	32.8	32.5	29.5
Gangneung		38.8	37.7	25.6
Seoul		36.2	36.0	31.4
Chuncheon	Skewness	3.1	3.5	2.9
Gangneung		9.8	9.6	2.9
Seoul		3.4	3.9	2.8

· <표 3-15>는 가을강수량을 모의한 결과로서 여름강수량과 동일하게 평균, 표준편차, 극치강수량, 왜곡도 등을 비교하였음. 10-12월에 100년 빈도 강수량은 수자원설계 관점에 중요하지 않지만 여름계절과 모의결과와 일관성 있는 평가를 위해서 가을강수량의 100년빈도를 추정하여 비교하였음. 모든 면에서 기존 Gamma 기반 Markov Chain 모형에 비해 우수한 재현능력을 보여주고 있음.

<표 3-15> PKPD 모형을 통한 모의결과의 통계적 비교 (October-November-December)

Stations	Statistics	Observation	PKPD	Gamma Dist.
Chuncheon	100-Year Design Rainfall (mm)	70.6	65.8	45.3
Gangneung		304.0	295.0	151.0
Seoul		79.4	79.1	47.3
Chuncheon	Median (mm)	2.5	2.6	3.6
Gangneung		4.4	4.4	7.4
Seoul		2.8	3.0	3.9
Chuncheon	Mean (mm)	5.4	5.5	5.8
Gangneung		13.4	12.9	13.7
Seoul		5.8	5.9	6.2
Chuncheon	Standard Deviation (mm)	8.0	7.8	6.5
Gangneung		22.8	22.2	17.5
Seoul		8.7	8.6	6.8
Chuncheon	Skewness	3.5	3.4	2.2
Gangneung		5.1	5.3	2.8
Seoul		3.8	4.0	2.1

· 강수량 모의발생 기법은 수공학에서 다양한 방면으로 활용되고 있음. 특히 수공구조물 설계와 같이 불확실성을 가지는 미래 수자원을 계획하는데 있어서 필수적인 기법인 것임. 그러나 기존 Markov Chain 모형을 통한 일강수량모의에서 가장 큰 문제점은 극치강수량을 재현하기 어렵다는 점임.
· 이러한 문제점은 수자원설계에서 홍수 및 이수 안전도를 정량적으로 해석하는데 어려움을 주고 있으며 특히 일강수량 모의기법을 통해서 과소 추정된 빈도강수량을 이용한 수공구조물 설계 시에 신뢰성이 결여되는 문제점이 있음. 이러한 점에서 본 연구에서는 기존 Gamma 분포의 문제점을 개선할 수 있는 새로운 해석방법을 제안하였음. 즉, Markov Chain 모형에서 일강수량에 평균적인 특성과 극치특성을 동시에 재현할 수 있도록 불연속 Kernel-Pareto Distribution 기반의 일강수량모의기법을 개발하였으며, 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같음.
· 첫째, 기존 Gamma 분포 기반 Markov Chain 모형은 일반적으로 평균적인 특성을 잘 재현하는 것으로 알려져 왔으나 여름의 일강수량 모의 시 Median 값을 효과적으로 모의하지 못하는 문제점이 나타났음. 여름의 일강수량의 평균적인 특성뿐만 아니라 2차모멘트 이상에서 관측치의 특성을 반영하지 못하고 평활화 되는 문제점이 나타났으나, 가을의 일강수량에선 여름에 비해 많이 개선된 결과를 보여주고 있었음.
· 둘째, 본 연구에서 제시한 불연속 Kernel-Pareto 분포형 기반 Markov Chain 모형은 여름의 일강수량 모의 시 강수계열의 평균적인 특성뿐만 아니라 표준편차 및 왜곡도의 경우에도 관측치의 통계측성을 매우 효과적으로 재현하는 것으로 나타났음.

· 이를 100년 빈도 확률강수량을 통해 다시 한 번 검증한 결과 실측 강수량으로부터 추정된 값과 매우 유사한 값으로 모의되었음. 가을 일강수량의 경우에도 기존 Gamma 분포 기반 Markov Chain 모형에 비해 모든 통계치에서 개선된 결과를 제시해 주었음.
· 본 연구에서 제시한 방법론은 전체적으로 기존 Markov Chain 모형에 비해 극치강수량을 재현하는데 유리한 기법으로 판단됨. 또한 극치강수량을 일반강수량으로부터 분리하여 모의함으로서 평균 및 중간값 등 낮은 차수에 모멘트를 더욱 정확하게 재현할 수 있는 부가적인 장점도 확인할 수 있었음.

제 2 절 2차년도 연구수행내용

1. 기후변동성을 고려한 비정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발

가. 기후변화 영향을 고려한 강우모의기법 개발 모형 개요

· 지구온난화에 의한 기후변화로 수자원, 수질, 생태계, 식량안보, 주거지와 사회, 인간 보건 등에 영향을 미칠 것으로 전망되고 있음. 지구온난화로 기인하는 미래의 기상학적 변동 성 및 기후변화 영향은 지구순환모형(Global Circulation Models, GCMs)을 통해서 구체화 되며 가장 일반적인 기후변화 전망자료로서 활용되고 있음.

· GCMs은 전 지구를 대상으로 기상학적 역학 관계를 수치적으로 모의하게 되며 대규모 기상장(large scale climate pattern)을 비교적 정확하게 묘사하는 것으로 알려지고 있으나 GCMs 모형에 내재해 있는 시공간적 편의(spatio-temporal bias) 및 불확실성으로 인해 GCMs 으로 부터 생산된 기후변화 시나리오의 직접적인 이용에 대한 어려움이 존재함.

· 선진국을 중심으로 기후변화 시나리오에 내재한 불확실성에 대한 정량적인 해석과 이를 반영한 기후변화 시나리오 보정에 대한 중요성이 강조되고 있다. 그러나 우리나라에서는 기후변화 시나리오 분석에 초점이 맞추어져 있어 불확실성에 대한 정확한 이해 및 처리방안에 대한 연구는 미진한 실정임.

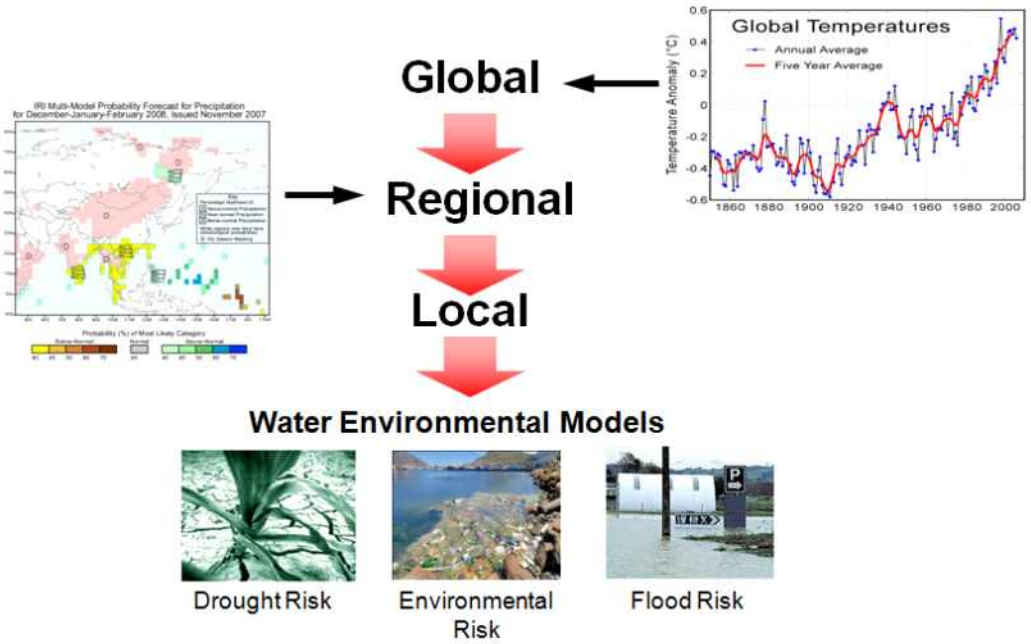
· 이러한 점에서 본 연구에서는 IPCC 5차보고서에서 활용될 예정인 GCMs 모형을 대상으로 각 모형이 가지는 특성을 살펴봄과 동시에 모형이 가지는 불확실성을 평가하고자 함. 다양한 관점에서 IPCC GCMs 기후변화 시나리오의 불확실성을 원인별, 현재 및 미래로 구분하여 정량화하며 이를 기후변화 시나리오의 반영하여 한반도의 기후변화 시나리오를 재산출 하고자 함. GCM으로 얻어지는 기후변화 시나리오는 구조적, 역학적으로 불확실성을 기본적으로 포함할 수밖에 없기 때문에 이러한 불확실성에 대한 정확한 이해가 필수적임.

· 본 연구에서는 기후변화 시나리오에서 나타나는 불확실성을 계층적으로 분리해서 평가할 수 있도록 새로운 개념의 기후변화 불확실성 정량화 기법을 개발하고자 함. 본 연구를 통해 개발하고자 하는 불확실성 평가 기법은 Bayesian 모형을 근간으로 구성되며 평균, 분산, 경향성의 변동성을 현재, 미래로 분리하여 추정이 가능하도록 계층적 모형을 구성하고자 함. 이를 위해서 최신 통계학 기법인 Hierarchical Bayesian 기법을 도입하였으며 각 GCM 모형의 불확실성을 정량화함과 동시에 한반도 전체의 최적 기후변화 시나리오 생산을 위한 Multi-Model Ensemble을 유도하는 것을 본 연구의 주된 목적임. 본 연구를 통해 산출된 기후변화 시나리오는 GCMs 모형에 내재된 편의가 제거된 최적의 시나리오로서 기후변화에 따른 댐 위험도 평가를 위한 입력 자료로서 최종적으로 활용하고자 함.

· 일단 기후변화 시나리오의 불확실성 정량화 작업과 동시에 편의를 제거한 후 실제 기후변화로 인해 증가하는 수공구조물의 위험도 분석을 위해서는 수문모형의 입력자료들에 시공간적 스케일에 준하는 입력자료의 생산이 필수적으로 요구됨.

· 이러한 점에서 최적 GCM을 입력자료로 하는 비정상성 다지점 Downscaling 모형을 활용하여 시공간적 Downscaling을 수행함. 즉, 강수지점 수준으로 공간적 Downscaling을 실시하고 동시에 계절단위 강수량 및 온도 시나리오를 일단위자료계열로 시간적 Downscaling을 수행하여

최종적으로 수문모형 입력 자료를 구축.

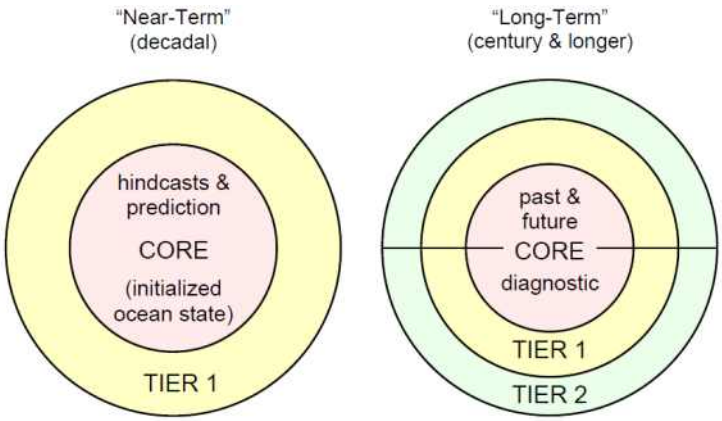


<그림 3-16> 본 연구의 기후변화 시나리오 생산 과정 개념도

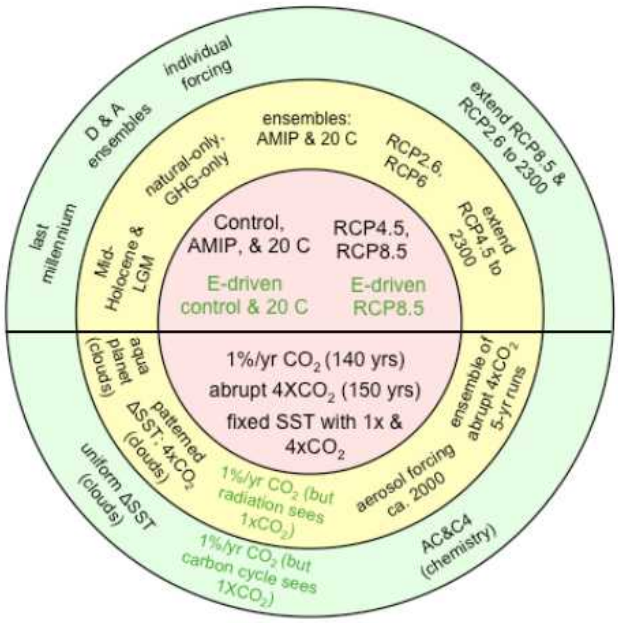
나. 기후변화 시나리오

· 2013/14년 발간 예정인 IPCC 5차 평가 보고서를 위하여 IPCC에서는 새로운 온실가스 시나리오인 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)를 확정하였으며, 세계기후연구프로그램(WCRP) 사업의 일환인 5단계 결합모델 상호비교 프로젝트(Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5, CMIP5)에서는 2009년부터 RCPs 시나리오를 다른 강제시나리오와 함께 사용하여 GCMs을 개발·비교검증하고 있음.

· IPCC 5차 평가보고서(5th Assessment Report)에 이용될 RCPs 시나리오 기반 GCMs은 28개 기관이 참여하고 있는 CMIP5 프로젝트로부터 도출될 계획임. CMIP5에 실험체계는 <그림 3-17~18>과 같이 단기적 관점과 장기적 관점의 2가지 구조로 구분되어지며 RCPs를 이용한 GCMs 모형은 장기적인 관점에 초점을 맞춘 실험에 해당됨.



<그림 3-17> CMIP5의 두 초점 영역에 개략도

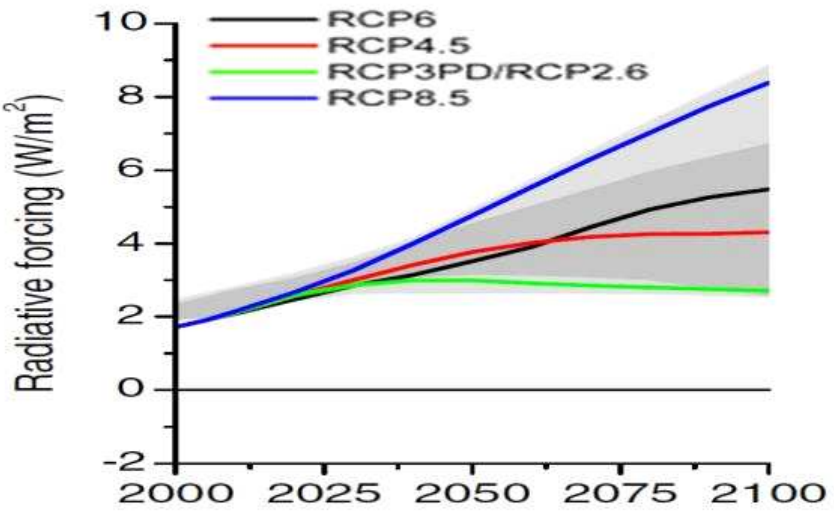


<그림 3-18> CMIP5에 장기 실험의 개략도

· RCPs에 이용된 4가지 대표 시나리오는 2.6, 4.5, 6.0, 8.5로 구분되어지며, 아래 <표 3-16>은 온실가스에 따른 RCP 시나리오의 선정기준을 보여주며, <그림 3-19>는 각 시나리오 및 시간 흐름에 따른 복사 강제력에 변화량을 나타냄. RCPs 시나리오에 숫자는 복사강제력, 즉 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 의미하는 양으로서 단위는 W/m^2. 지상에 도달되는 태양복사가 약 $238W/m^2$ 이므로 RCP 8.5/6.0/4.5/2.6의 복사강제력은 입사 태양복사량의 약 3.6%, 2.5%, 1.9%, 1.1%에 해당됨.

<표 3-16> RCP 시나리오 구성

Scenario	산정 기준	온실가스 농도 CO_2기준(ppm)
2.6	인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우	421
4.5	온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우	538
6.0	온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우	670
8.5	현재 추세(저감없이)로 온실가스가 배출되는 경우	936



<그림 3-19> 시나리오별 시간에 따른 복사 강제력에 변화

<표 3-17> RCP기반 시나리오 출력자료

Oclim	Monthly Mean Ocean Climatology
Oyr	Annual Mean Ocean Fields, Including Biogechemical Fields
Amon	Monthly Mean Atmospheric Fields and Some Surface Fields
Omon	Monthly Mean Ocean Fields, Including Biogechemical Fields
Lmon	Monthly Mean Land Fields, Including
Limon	Monthly Mean Land Cryosphere Fields
Oimon	Monthly Mean Ocean Cryosphere Fields
aero	Monthly Mean Aerosol-Related Fields
day	Daily Mean Atmosphere, Ocean and Surface Fields
6hrLev	Fields (Sampled Every 6 Hours) for Driving Regional Models
6hrPlev	Fields for Storm-Track Analysis and other Advanced Diagnostic Applications
3hr	2-D Atmospheric and Surface Fields Sampled Every 3 Hours

<표 3-18> RCP기반 시나리오 출력자료 및 출력기간

Scenario	historical	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP6
Simulation Period	1850-2005	2006-2100	2006-2100	2006-2100	2006-2100
Oclim	1986-2005 monthly climatology	-	-	-	-
Oyr	all	all	all	all	all
Amon	all	all	all	all	all
Omon	all	all	all	all	all
Lmon	all	all	all	all	all
Limon	all	all	all	all	all
Oimon	all	all	all	all	all
aero	1850,1870,1890,...,1950,1960,1970,...,2000	2010, 2020, 2040, 2060, 2080, & 2100	2010, 2020, 2040, 2060, 2080, & 2100	2010, 2020, 2040, 2060, 2080, & 2100	2010, 2020, 2040, 2060, 2080, & 2100
day	all	all	all	all	all
6hrLev	1950-2005	all	all	-	-
6hrPlev	1950-2005	all	all	-	-
3hr	1960-2005	2026-2045, 2081-2100	2026-2045, 2081-2100	2026-2045, 2081-2100	2026-2045, 2081-2100

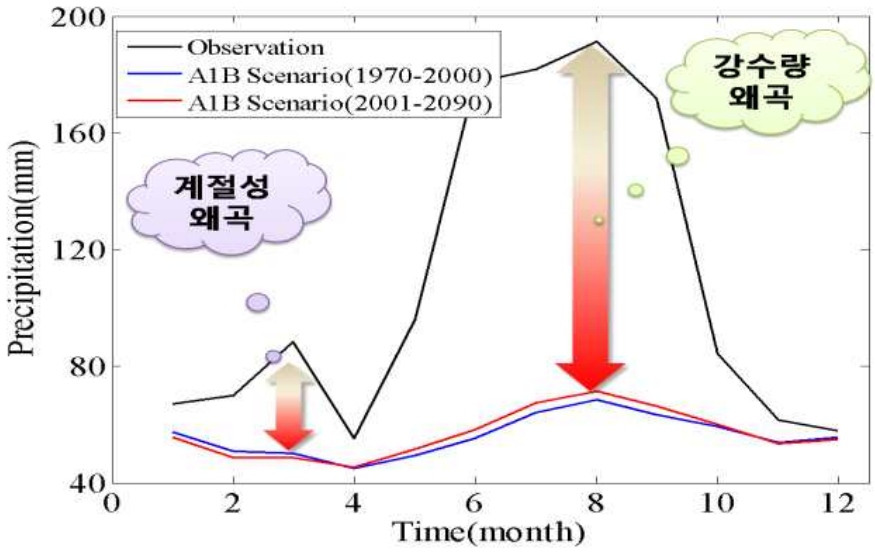
<표 3-19> 본 연구에서 사용된 CMIP RCP 시나리오 구성

No	GCMs	Ensemble Nember		
		historical	rcp45	rcp85
1	ACCESS1-0	1	1	1
2	ACCESS1-3	1	1	1
3	CCSM4	5	5	5
4	CanESM2	5	5	5
5	CNRM-CM5	1	1	5
6	CSIRO-Mk3-6-0	10	10	10
7	EC-EARTH	7	7	7
8	FGOALS-s2	3	3	3
9	GFDL-CM3	1	1	1
10	GFDL-ESM2G	1	1	1
11	GFDL-ESM2M	1	1	1
12	GISS-E2-R p1	5	5	1
13	GISS-E2-R p2	5	5	1
14	GISS-E2-R p3	5	5	1
15	HadGEM2-ES	4	4	4
16	IPSL-CM5A-LR	4	4	4
17	IPSL-CM5A-MR	1	1	1
18	MIROC5	3	3	3
19	MIROC-ESM	1	1	1
20	MIROC-ESM-CHEM	1	1	1
21	MPI-ESM-LR	3	3	3
22	MPI-ESM-MR	1	1	1
23	MRI-CGCM3	1	1	1
24	NorESM1-M	1	1	1
25	bcc-csm1-1	1	1	1
26	inmcm4	1	1	1

· CMIP5에서는 RCP 시나리오를 이용한 지구순환모형 산출시 필요한 출력 자료의 형식 및 시간스케일에 따른 분야별 목록을 제시함으로서 모형별 비교가 용이하도록 하였으며, <표 3-17~18>은 RCP 시나리오에 따른 출력자료 형식을 나타냄.
· 본 연구에서는 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오를 기반으로 하는 GCMs 기후변화 시나리오 Inventory 구축하였으며, <표 3-19>는 구축에 이용된 GCM 시나리오에 앙상블 개수를 보여주고 있음.

다. 기후변화 시나리오의 문제점 검토

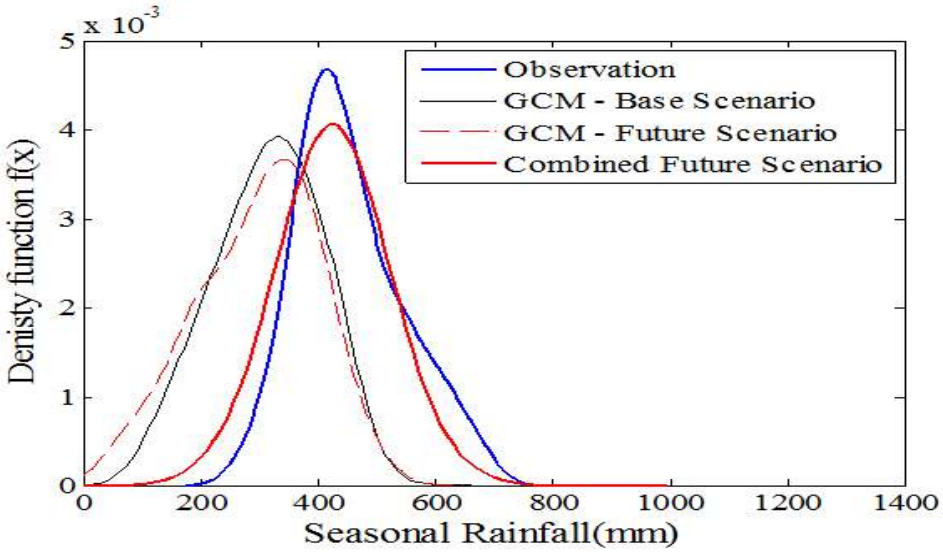
· 기후모형인 GCM 및 RCM(regional climate model)은 거시적인 관점에서 미래의 기후학적인 변동성을 평가하는 것이 주요 목적이며 수질 및 수자원을 위한 상세 수문정보를 생산하는데 문제점을 나타내고 있다고 알려지고 있음. 일반적으로 기후모형으로부터 추정된 기후변동성은 실제 수문현상을 왜곡시키는 경우가 있음. 첫째, 기후변화 시나리오는 예측값이 아니고 모의값이기 때문에 시간에 대해서 과거자료와 일대일로 비교하기 힘들다. 즉, 일반적인 시계열 분석방법으로는 해석이 곤란함.
· 일반적으로 기후변화 시나리오는 세밀하게는 3시간에서 1일 간격에 자료를 생산하도록 되어있음. 이는 시공간적으로 연속적인 적분을 해나가는 과정에서 나타나는 자연적인 현장으로서 격자별 매우 자세한 시간 스케일의 자료를 제공함. 그러나 기후변화 시나리오는 예측자료가 아닌 모의자료라는 점임. 즉, 일반적으로 우리가 사용하고 있는 기후변화 시나리오는 시간개념이 결여되어 있는 모의자료임. 따라서 자료가 시계열의 형태로 제공되기는 하지만 모의가 진행된 후 일정부분을 제거하고 사용되게 되므로 엄밀하게 시간개념이 있다고 보기에는 어려움.



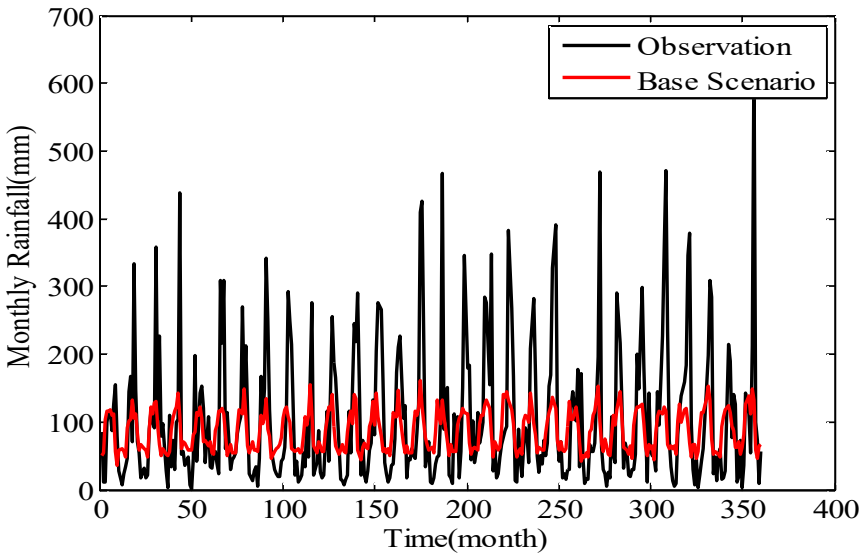
<그림 3-20> 기후변화 시나리오에 의해 생산된 강수량과 실측 강수량의 비교

· 또한 기후변화 모형 자체에서 발생하는 불확실성을 정량화하는 과정은 반드시 필요함. 일반적으로 기후변화 연구에서 GCM은 여러 모형을 동시에 고려하는 Ensemble

개념이 일반적이며 이들의 불확실성을 고려하면서 최적의 조합을 찾는 것 또한 매우 중요한 사항임. <그림 3-21>은 기후변화 시나리오의 불확실성을 통계학적으로 정량화 한 사례를 나타내며 그림에서처럼 평균의 이동은 매우 작은 반면 실제 강수량에 비해서 200mm 이상 평균적으로 작게 추정되는 것을 확인할 수 있음.



<그림 3-21> GCM 기후변화 시나리오의 불확실성 정량화 예



<그림 3-22> GCM 기후변화 시나리오의 불확실성 정량화 예

라. 기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 개념 정립

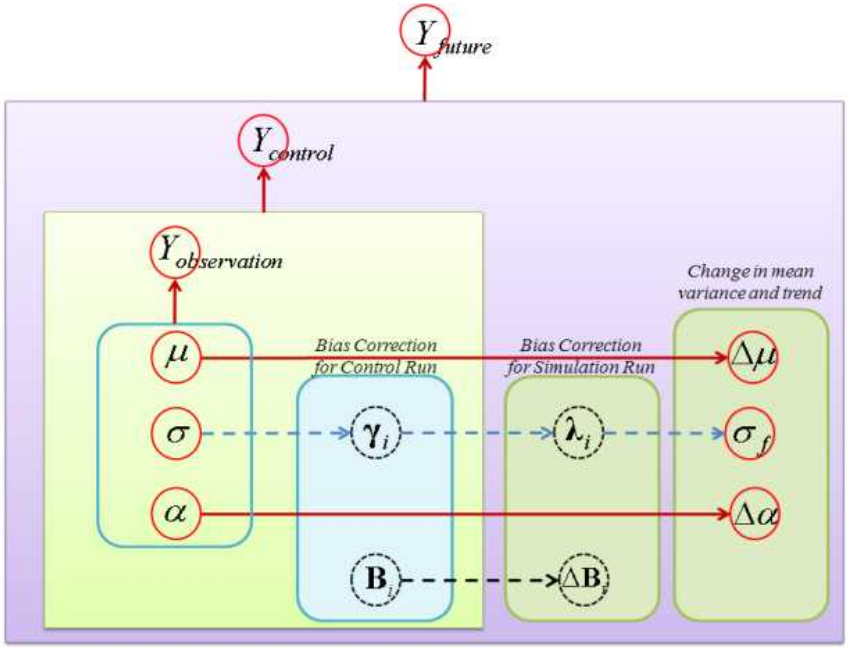
· 지역규모 기후변화 영향 분석에 있어서 확률적인 분석의 필요성이 최근 여러 연구에서 대두되고 있음. 기후변화 연구에서 GCM을 통한 기후변화 전망은 가장 기본적인 요소로서, 주로 동역학적 또는 통계학적으로 Downscaling의 입력자료로 활용되고 있음. 단독적으로 사용되는 GCM의 경우 실측치와 큰 차이를 보이거나 물리적인 의미를 재현하지 못하는 경우가 종종 발생하게 되며 이러한 점에서 다양한 모델들을 조합하고 이용하는 것이 필요하게됨. 특히 지역기후단위에서 이러한 확률론적 접근 방법은 모형의

신뢰성 및 적용성을 개선시키는 효과가 큼.

- 최근에 기상학 및 수문기상학분야에 주된 관심하는 결정론적 예측시스템에서 확률론적 시스템으로의 전이라 할 수 있음. 이러한 점에서 미래 기후변화 전망을 확률분포형 형태로 제시하는 것은 정책결정을 용이하게 해주고 다양한 문제점을 고려할 수 있는 편의를 제공함. 특히 Bayesian 방법은 단순히 통계학적으로 불확실성을 평가하는데 사용하는 단순한 방법론으로 인식되기 보다는 기후변화 전망 관점에서 자료를 확충하면서 실제 분포형을 찾아내는 자연스러운 접근 방식으로 인식되고 있음.
- Bayesian 방법의 수문기상학적 접근은 매우 다양하며, Bayesian 방법은 매개변수를 추정하는데 그치지 않고 불확실성 정량화, 최적 모형 추정, 통계적인 추론 등 다양한 분야에 적용 및 응용되고 있으며 기존 확률론적 방법에 비해 통계학적으로 매우 우수한 해석능력을 가지고 있음.
- 이를 실제로 응용하기 위해서 수치적인 접근이 필요하게 되는데 일반적으로 Markov Chain Monte Carlo 기법이 응용되고 있음. 최근 연구를 살펴보면 MME 기후변화 시나리오생산, 빈도해석(Kwon et al, 2008a), 여름 극치강수량 예측모형(권현한과 문영일, 2007; Kwon et al, 2008b) 등 다양한 수리기상학 문제에 하나의 대안으로 적용되고 있음.
- 본 연구에서는 자료간의 상호정보 교환, 불확실성의 Shrinkage, Ensemble 모형의 최적 가중함수(weighting function) 추정 등의 월등한 성능을 발휘하는 계층적 Bayesian 해석모형(Hierarchical Bayesian model, HBN)을 도입하여 기후변화 시나리오의 불확실성 정량화 및 최적 시나리오 구성을 실시하고자 함.

마. 기후변화 시나리오의 불확실성 분석 및 최적 MME 생산을 위한 HBN 모형

- HBN 모형은 기후변화 시나리오와 같이 여러 모형으로 구성된 자료 계열의 경우 각각의 모형에 대해서 확률분포(Probability Density Function, PDF)를 적용함과 동시에 각각 PDF들이 상위단계에 대표 PDF에 의해 조정을 받는 형식으로 자연적으로 최적의 MME(Multi Model Ensemble) 구성이 가능하며 사후분포(Posterior Distribution) 형태로 추정되어 확률분석이 가능함.



<그림 3-23> 계층적 Bayesian 모형의 최적의 기후변화 시나리오 추정 개념

· 여기서 $Y_{obs,t}$는 실측강수량을 의미하며, $Y_{base,t}$는 기준시나리오(base scenario)를, $Y_{future,t}$는 편의가 보정된 기후변화 시나리오를 나타내며 각 단계별 확률분포형의 적용 사항을 정리하면 다음과 같음.

$$Y_{abs,t} \sim N\left(\mu + \alpha(t - T_C),\ \sigma^2\right) \quad (12)$$

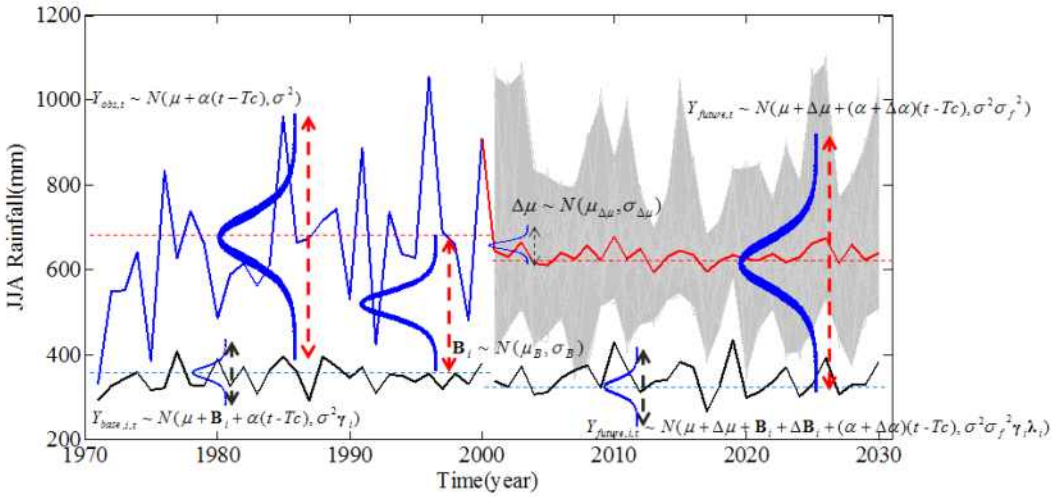
$$Y_{base,t} \sim N\left(\mu + B_i + \alpha(t - T_C),\ \sigma^2\gamma_i\right) \quad (13)$$

$$Y_{future,i,t} \sim N\left(\mu + \Delta\mu_i + B_i + \Delta B_i + (\alpha + \Delta\alpha)(t - T_C),\ \sigma^2\sigma_f^2\,\gamma_i\lambda_i\right) \quad (14)$$

$$Y_{future,t} \sim N\left(\mu + \Delta\mu + (\alpha + \Delta\alpha)(t - T_C),\ \sigma^2\sigma_f^2\right) \quad (15)$$

$$\mu \sim N(\mu_\mu, \sigma_\mu),\ \ \Delta\mu \sim N(\mu_{\Delta\mu}, \sigma_{\Delta\mu})$$
$$B_i \sim N(\mu_B, \sigma_B),\ \ \Delta B_i \sim N(\mu_{\Delta B}, \sigma_{\Delta B})$$
$$\alpha \sim N(\mu_\alpha, \sigma_\alpha),\ \ \Delta\alpha_i \sim N(\mu_{\Delta\alpha}, \sigma_{\Delta\alpha})$$
$$\sigma \sim Ga(k, \theta),\ \ \sigma_f \sim Ga(k_f, \theta_f)$$
$$\gamma_i \sim Ga(k_\gamma, \theta_\gamma),\ \ \lambda_i \sim Ga(k_\lambda, \theta_\lambda)$$

· <그림 3-24>는 기후변화 Base 시나리오로부터 미래 시나리오까지 실제 HBN 모형이 적용되는 과정을 개념적으로 나타내는 모식도로서 계층적으로 불확실성을 정량화하고 최종적으로 편의와는 구별되는 평균의 변동성 및 분산의 변동성을 확률밀도함수의 형태로 정량화가 가능함.



<그림 3-24> 계층적 Bayesian 모형의 최적의 기후변화 시나리오 추정 개념

· 식 (12)에서 관측 자료는 정규분포로 가정되며 μ는 평균을 α는 경향성분의 기울기, σ^2는 분산을 나타낸다. T_C는 자료길이의 절반을 나타내며 회귀방정식에 추정되는 절편이 자연적으로 평균의 의미를 갖도록 조정하기 위함임.

· 기후변화 시나리오는 일반적으로 편의가 발생하며 이를 관측기간과 동일하게 모의된 기후변화 Base 시나리오와 비교함으로서 평가가 가능함. 이를 위해서 식 (13)에서는 기후변화 Base 시나리오를 대상으로 관측 자료를 기준으로 평균 및 분산의 관점에서 어느 정도 편의를 가지고 있는지를 평가하였음. 즉 B_i는 각 GCMs 모형이 가지는 평균의 편의를 제거하기 위해서 사용되는 변량이며 γ_i는 분산에 나타나는 편의를 보정하기 위한 변량으로 도입됨. 이러한 과정을 통해서 관측 자료와 기후변화 Base 시나리오간의 평균 및 분산의 변동성의 차이를 정량적으로 해석할 수 있음.

· 식 (14)에서는 미래구간에서 기후변화 시나리오의 불확실성을 평가하고자 함. 미래 기후변화 시나리오에서 나타날 수 있는 평균의 이동을 $\Delta\mu$로 미래 기후변화 시나리오 분산을 σ_f^2로 표현하였음. 미래 기후변화 조건을 모의하는데 있어서 각 모형이 나타낼 수 있는 평균의 편의를 B_i와 구별해서 ΔB_i로 나타내고 동일하게 분산에 대해서 γ_i와 구별되게 λ_i가 도입됨.

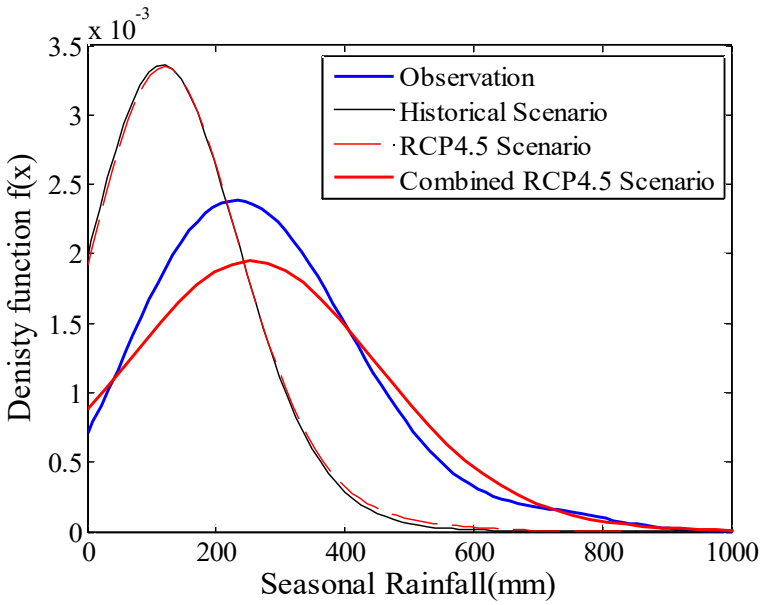
· 식 (15)에서 중요한 점은 우리가 미래의 기상자료는 현재 존재하지 않은 다는 것임. 즉 관측치가 없다는 것임. 앞서 식 (12)과 식 (13) 에서는 평균의 이동, 편의 등은 정량적으로 해석이 가능하였지만 식 (14)에서 $\Delta\mu$, ΔB_i, σ_f^2, γ_i는 개별적으로 구별하기 어렵다는 것임. 다시 말해서 $\Delta\mu+\Delta B_i$의 값을 추정할 수 있지만 $\Delta\mu$와 ΔB_i를 구별해서 추정할 수 없기 때문에 미래기후변화에서 나타나는 변동성이 실제로 평균이 변한 것인지 아니면 모형의 편의 때문인지를 구별할 수 없다는 것임.

· Bayesian 모형을 통해서 기후변화 시나리오의 불확실성 평가 및 최적의 MME를 산출하기 위해서는 앞서 가정한 식 (12)~(15)를 통합하여 해석이 필요하며 이를 Likelihood로 표현하면 식 (16)와 같음. 식 (16)를 통해서 기후변화 시나리오의 편

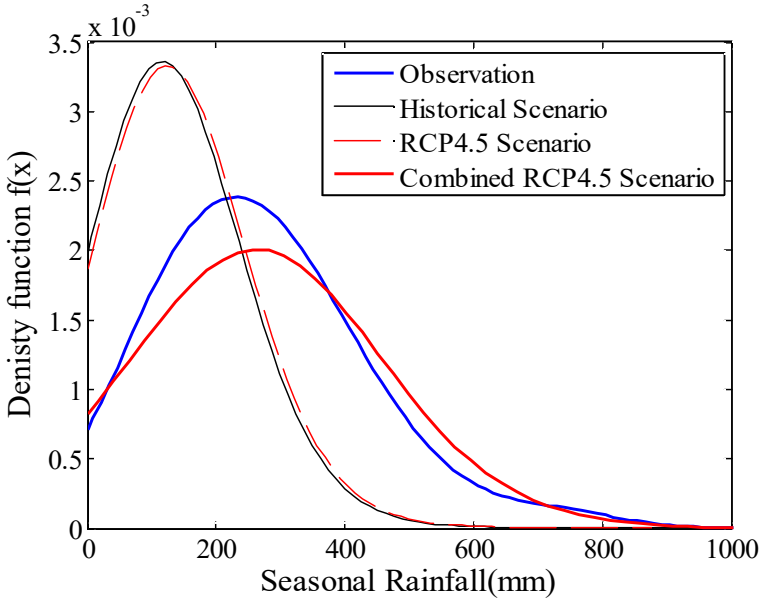
의가 제거된 각 모형별 최적 시나리오가 결정되면 이를 통합한 최적 MME를 산출하는 것이 필요한대 본 연구에서는 식 (17)과 같은 가중함수를 통해서 최적의 MME를 산출하였음. 식 (17)에서 보면 Base 시나리오와 미래시나리오를 구분하여 각각 GCM이 전체 GCMs들의 평균적으로 거리가 가까울 때 가중치를 크게 주는 방식으로 가중함수를 구축하였음.

$$p(y \mid \odot) = \prod_{i=1}^{T} N\left(y_{obs,t} \mid \mu + \alpha(t - T_C),\ \sigma^2\right) \times \prod_{t=1}^{T}\prod_{t=1}^{NM} N\left(y_{\triangle,t} \mid \mu + B_i + \alpha(t - T_C),\ \sigma^2\,\gamma_i\right) \times \prod_{t=1}^{T}\prod_{t=1}^{NM} N\left(y_{future,t} \mid \mu + B_i + \Delta B_i + (\alpha + \Delta\alpha)(t - T_C),\ \sigma^2\,\sigma_f\,\gamma_i\,\lambda_i\right) \quad (16)$$

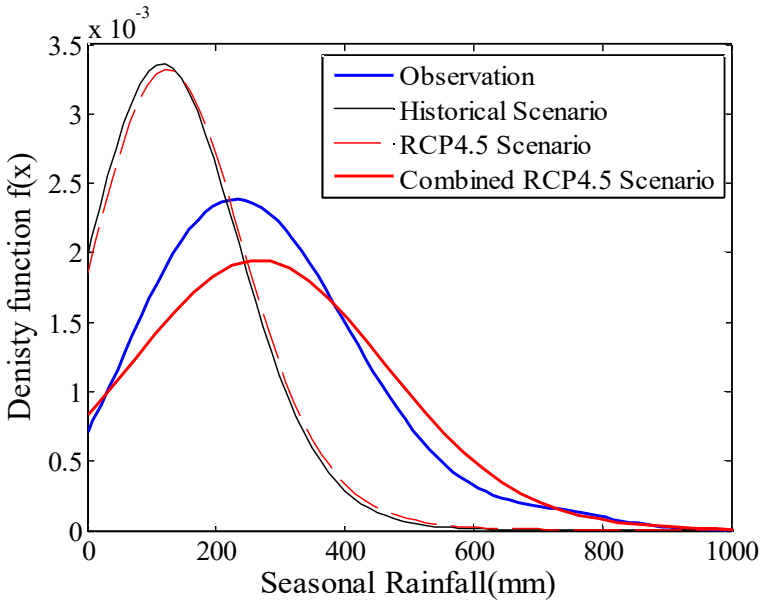
$$w_i \approx \frac{1}{\left|y_{i,base} - \overline{y_{base}}\right| + \sigma_f \lambda_i \left|y_{i,future} - \overline{y_{future}}\right|} \quad (17)$$



<그림 3-25> 강수량 관측값과 RCP 시나리오 모의값의 분포와 편의 보정 결과(2011년~2040년)



<그림 3-26> 강수량 관측값과 RCP 시나리오 모의값의 분포와 편의 보정 결과(2041년~2070년)



<그림 3-27> 강수량 관측값과 RCP 시나리오 모의값의 분포와 편의 보정 결과(2070년~2100년)

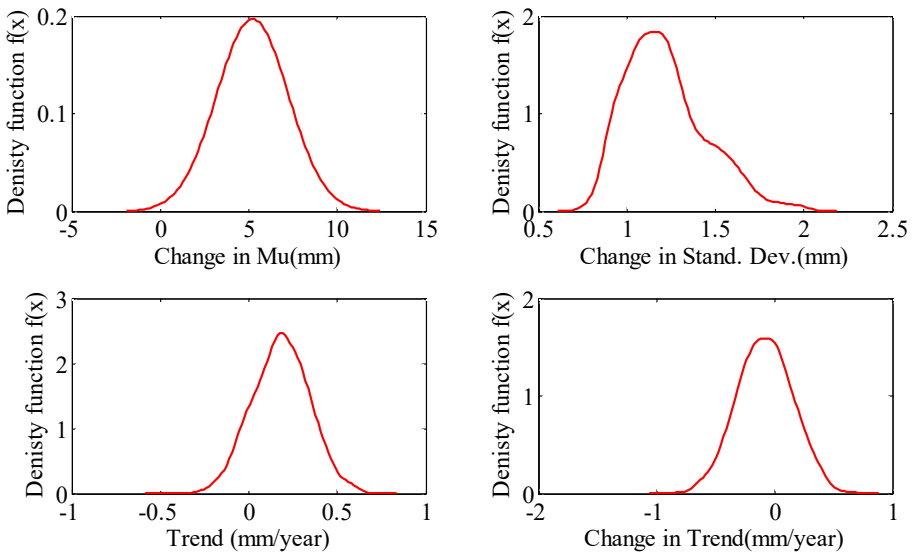
바. 기후변화 시나리오 해석결과 요약

· <그림 3-28~30>는 2011~2040년, 2041년~2070년, 2071년~2100년에 RCP시나리오에 대한 8월 강수량의 관측값과 GCM 기반의 모의 강수량을 확률밀도함수의 형태로 나타낸 것으로, 파란색으로 표시된 관측치의 평균과 검은색으로 나타낸 Historical 시나리오가 1976-2005년의 동일기간을 가지는 강수량임에도 불구하고

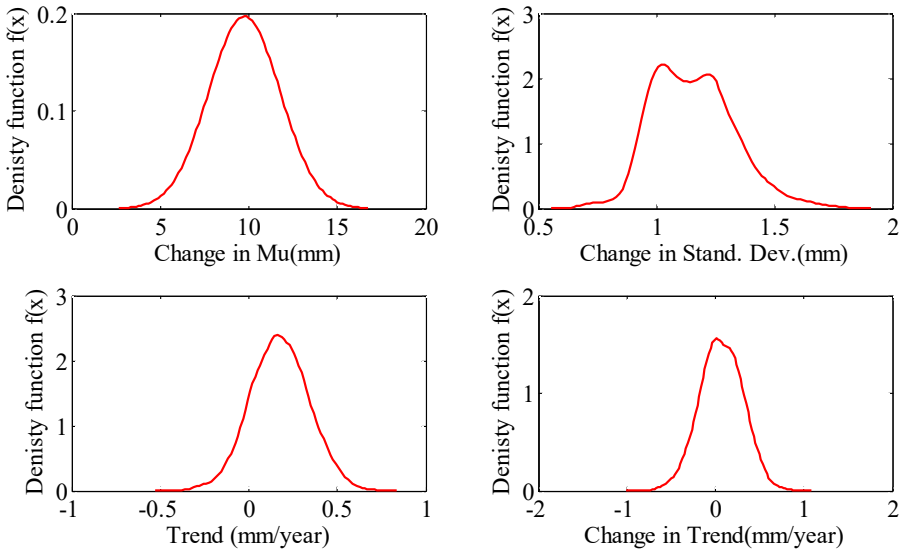
평균과 분산에서 많은 차이가 나타나고 있음.

· RCP 기후변화 시나리오의 경우에 Historical 시나리오와 비교가 가능하지만 관측치와는 많은 차이를 나타내고 있음. 이러한 편의를 정량적으로 해석한 후 이를 제거한 미래 기후변화 시나리오를 빨간 실선으로 나타내었음. 결론적으로 기후변화 조건에서 발생하는 평균의 변동은 모형자체가 가지고 있는 불확실성에 비해 상대적으로 적음을 확인할 수 있음. 30년을 기준으로 분석한 결과 전체적인 경향은 유사하게 추정되고 있음을 확인할 수 있음. 8월에 해당하는 모의 강수량의 경우 관측값에 비하여 과소 추정 되고 있음을 <그림 3-28~30>를 통하여 확인할 수 있음.

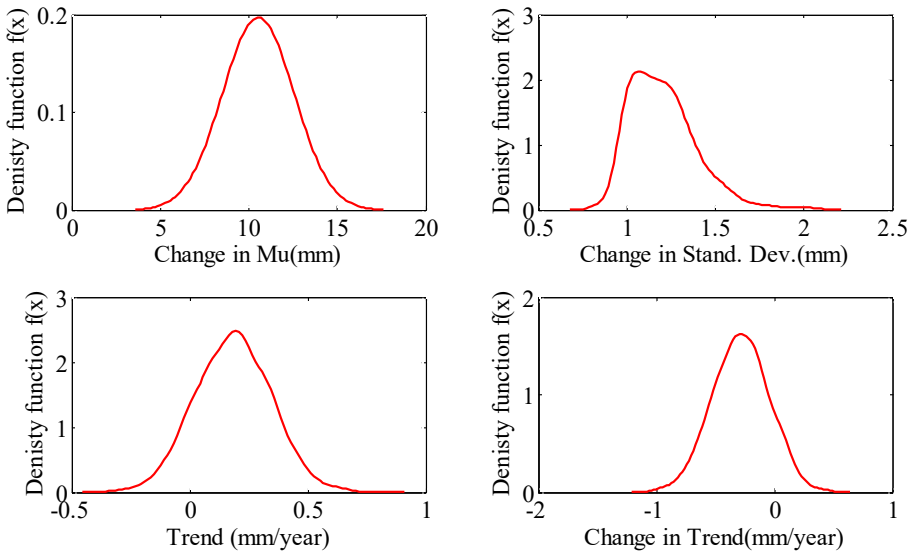
· <그림 3-31~33>는 2011~2040년, 2041년~2070년, 2071년~2100년에 RCP 시나리오에 대한 8월 강수량의 기후변화로 인한 변동성을 확률밀도함수를 기반으로 정량적인 분석을 실시하였음. 2020년대에 변동성을 살펴보면 현재대비 5mm 전후에 평균적 증기가 전망되며, 분산에 대한 사후분포의 불확실성 구간이 모두 양의 값을 보이므로 강수량이 증가할 가능성이 커질 것으로 판단됨. 2050년대에 경우 평균이 10mm 전후로 증가하며, 분산에 사후분포의 중심이 1이상에 위치하여 강수량에 변동폭이 증가할 것으로 예상됨. 경향성의 경우 현재 약한 증가경향을 나타내고 있으며 2050's에 경향성 변동의 사후분포가 0을 중심으로 위치하고 있으므로 기후변화에 따른 경향성의 변동은 나타나지 않을 것으로 전망됨. 2080년대에 경우 평균이 10mm 내외의 증가하며, 약한 증가경향을 유지할 것으로 전망되며 분산에 변동성이 미소하게 증가할 것으로 판단됨.



<그림 3-28> 계층적 Bayesian 모형으로부터 추정된 강수량의 평균, 분산, 증가경향의 변동 분포(2011년~2040년)

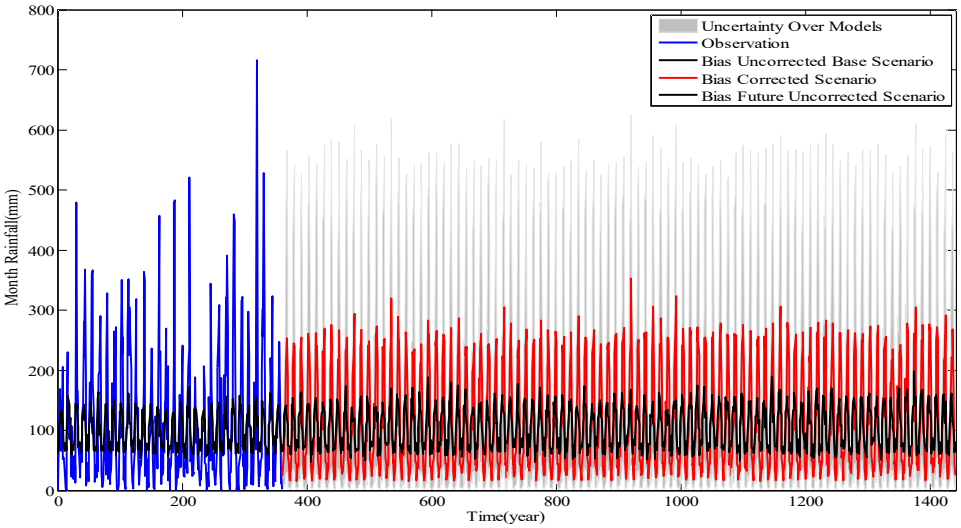


<그림 3-29> 계층적 Bayesian 모형으로부터 추정된 강수량의 평균, 분산, 증가경향의 변동 분포(2041년~2070년)



<그림 3-30> 계층적 Bayesian 모형으로부터 추정된 강수량의 평균, 분산, 증가경향의 변동 분포(2071년~2100년)

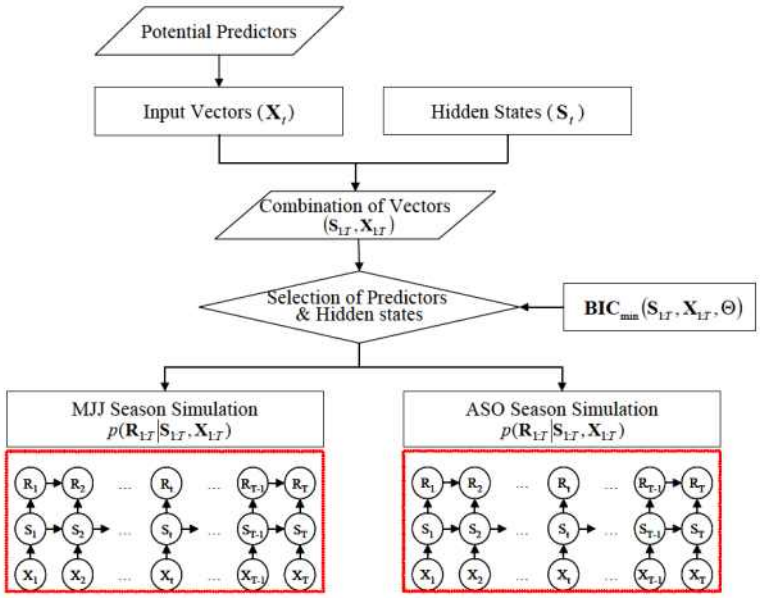
· <그림 3-31>은 본 연구를 통해서 제안된 기후변화 시나리오 보정 및 최적 MME산출 모형을 한강유역의 월별로 적용하여 도출된 최적 RCP 앙상블 기후변화 시나리오를 나타냄. RCP 앙상블 기후변화 시나리오는 다음에서 제안되는 기후변화 시나리오 상세화기법의 입력자료로 활용됨. 이를 통해서 기후변화에 따른 댐 위험도 분석을 위해서 상세기후변화 시나리오를 도출하게 되며 수문모형에 최종 입력자료로 활용됨.



<그림 3-31> 한강유역 월단위 RCP 시나리오의 최적 MME 구축 결과(2011년~2100년)

사. 상세기후변화 시나리오 생산을 위한 비정상성 강우모의기법 개발

· 비정상성 모형 서술에 앞서 정상성 Weather State 모형(stationary multi-site weather state model, SMWSM) 먼저 언급하자면 NMWSM에 대한 이론은 Kwon et al.(2009)의 연구에서 좀 더 구체화되었으며 일강수량 모의 및 예측에 적용 되었음. <그림 3-32>은 NMWSM의 적용단계 및 해석단계를 도시한 것임.



<그림 3-32> NMWSM 모형 구조 및 적용 단계

· SMWSM은 Weather State에 기초하여 상위단계에서 이러한 Weather State가 Markov

chain 과정을 따르며, 즉 Weather State에 따른 조건부 확률을 추정하여 일강수량을 모의하게 됨. 본 연구에서 제시하는 방법론은 포괄적인 범위에서 Bayesian Network 모형으로서 <그림 3-32>에서 보는 것처럼 강수량, Weather State, 기상인자가 하나의 Node로서 확률분포를 가지며 서로 확률적으로 연결되어 있는 형태를 가지게 됨.

· 이러한 일강수량 모의 과정에서 각각의 날짜에 대한 사후확률분포 $p(\theta, y) = p(\theta)p(y|\theta)$는 주어진 선행 강우와 Weather State를 기준으로 조건부 확률분포함수가 결정되고 결과적으로 Bayesian Network의 형태를 이루게 됨.

· 유역내에 M개의 관측소에 대한 시간 t에서의 일강수량 관측값 벡터를 $R_t = (R_t^1, \ldots, R_t^M)$와 같이 차원이 M인 벡터로 표현하고, $R_{1:T} = R_1, \ldots, R_T$는 길이 T인 일련의 강우자료 벡터를 나타낸다고 하자. 일련의 일강수량 관측값인 $R_{1:T}$는 1부터 최적의 Weather State K까지 값을 갖는 은닉 Weather State인 $S_{1:T} = (S_1, \ldots, S_T)$로 이루어지며 이들 Weather State는 Markov Chain에 의해 모의됨. SMWSM에서는 $R_{1:T}$와 $S_{1:T}$의 결합 확률을 정의할 때 아래와 같은 두 개의 조건부 독립 가정을 이용.

· 현재의 Weather State $S_{1:T}$의 진행은 오로지 이전 일에 Weather State k에 의해 결정. 즉 Markov chain 과정을 따르며 첫 번째 모델($k=1$)에 대해 살펴보면

$$p(S_1, \ldots, S_T) = p(S_1) \prod_{t=2}^{T} p(S_t | S_{t-1}) \tag{18}$$

· SMWSM의 경우 $p(S_1)$이 첫 번째 Weather State의 확률 벡터이고, 이러한 Weather Stater간의 천이확률(transition probability)는 $\Gamma = \{\gamma_{ij}\}$, $1 \le i, j \le K$로 나타낼 수 있음. 만약 최적의 Weather State가 K=5라면 5×5 행렬을 가지게 되며, 개개의 강수량 R_t는 Weather State S_t로 주어진 다른 모든 변수들과 조건부 독립.

$$p(R_{1:T} | S_{1:T}) = \prod_{t=1}^{T} p(R_t | S_t) \tag{19}$$

· 일강수량과 은닉 Weather State의 조건부 확률은 다음 식 20 과 같이 나타낼 수 있음

$$p(R_{1:T} | S_{1:T}) = \left[p(S_1) \prod_{t=2}^{T} p(S_t | S_{t-1}) \right] \left[\prod_{t=1}^{T} p(R_t | S_t) \right] \tag{20}$$

· M개의 관측소에 대해서 시간 t에서의 강수량 R_t^M은 주어진 각각의 다른 Weather State인 S_t로부터 조건부 독립으로 간주. 이러한 이유로 공간 상관성은 유역내에 다지점에 공통적으로 부여되는 Weather State 변수로 간접적으로 모형화 되며, 아래 식과 같이 나타낼 수 있음.

$$p(R_T | S_T) = \prod_{m=1}^{M} p(R_t^m | S_t) \tag{21}$$

· M개의 관측소에 걸친 R_t의 공간적 상관성 구조 또한 고려할 수 있으나, 본 연구에서는 적용하지 않았음. 각각의 관측소에서의 강수량 R_t^m에서의 확률분포는 무강우(p_{imo}) 모의를 위한 혼합분포(mixture distribution)이 도입. 즉, 무강우를 위해서는 $p_{imo}=0$에서의 Delta Function과 강수($p_{imc}=1$)를 모의하기 위한 C 지수 성분의 Delta 혼합분포에 의해 근사적으로 구해지며, 다음과 같이 나타낼 수 있음. 여기서 모든 $m=1,...,M$과 $i=1,...,K$에 대하여 $p_{imc}\geq 0$이고, $\sum_{c=1}^{C} p_{imc}=1$.

$$p(R_t^m=r\,|\,S_t=i)=\begin{cases} p_{im0} & r=0 \\ \sum_{c=1}^{C} p_{imc}\lambda_{imc}e^{-\lambda_{imcr}} & r>0 \end{cases} \qquad (22)$$

· 모형의 매개변수들을 추정하기 위해서 기본적으로 관측된 강수량 자료에 기초하며 해석방법으로는 최적화 기법인 EM(expectation−maximization) 알고리즘을 이용하여 추정. EM 알고리즘에 의한 추정방법은 강수 발생여부에 대한 이진수 모형을 제시한 Kwon et al.(2009)의 연구에 자세히 서술되어 있음.
· NMWSM의 전제 가정은 강수량이 SST(sea surface temperature), SLP(sea level pressure), Global Circulation Model(GCM), Regional Climate Model(RCM) 등과 같은 기상인자에 조건부로 종속되어 생성된다는 것.
· NMWSM은 강수발생 여부와 독립적으로 강수량과 같은 양적인 변수들의 확률분포를 관측값으로부터 추정하여 이용하게 되며 복잡한 강수특성을 Weather State의 형태로 범주화 한 후 이에 대한 확률분포를 독립적으로 부여하기 때문에 매개변수가 늘어나는 단점이 있지만 보다 자세한 강수모의가 가능한 장점이 있음(Kwon et al., 2009c).
· 즉, SMWSM에 양적인 모의를 위한 모형을 포함하여 확장함으로써 강수량 예측모형을 구성할 수 있음. 무강우일을 모의하기 위한 Delta 함수와 강우일의 강우량을 모의하기 위한 Gamma 또는 Exponential 확률분포들의 조합이 각각 모델에 적용되었으며, EM 알고리즘을 이용하여 매개변수들을 추정.
· 조건부 독립 가정은 <그림 3−32>에 도시한 SMWSM 모식도를 통해 확인할 수 있다. 즉, $X_{1:T}=(X_1,...,X_T)$는 각각의 일강수량자료에 대응하는 일련의 외부 입력변수 벡터 즉 기상정보가 되며, GCMs, SST 및 SLP 등이 이에 해당됨. NMWSM에서 Weather State의 천이확률 행렬 Γ는 비정상성을 갖음. 즉, 시간에 따른 Γ의 변화는 다변량 예측변수인 $X_{1:T}$의 함수로 조건부로 변화하게 되며 NMWSM은 다음의 식과 같이 나타낼 수 있음.

$$p(R_{1:T}, S_{1:T} | X_{1:T}) = \left[p(S_1 | X_1) \prod_{t=2}^{T} p(S_t | S_{t-1}, X_t) \right] \left[\prod_{t=1}^{T} p(R_t | S_t) \right] \quad (23)$$

· 본 연구에서는 최적의 매개변수를 추정하기 위해서 Bayesian 모형 형태에서 균일분포를 가지는 사전분포를 적용하여 우도(likelihood)를 최대화하도록 하는 사후분포를 추정하여 이용. 연도별로 연속된 관측값들은 조건부 독립으로 가정하여 모델에 적용된다. NMWSM에서 입력자료인 강수량 관측값의 조건부 Log-likelihood $LL(\Theta)$은 다음과 같이 정의됨.

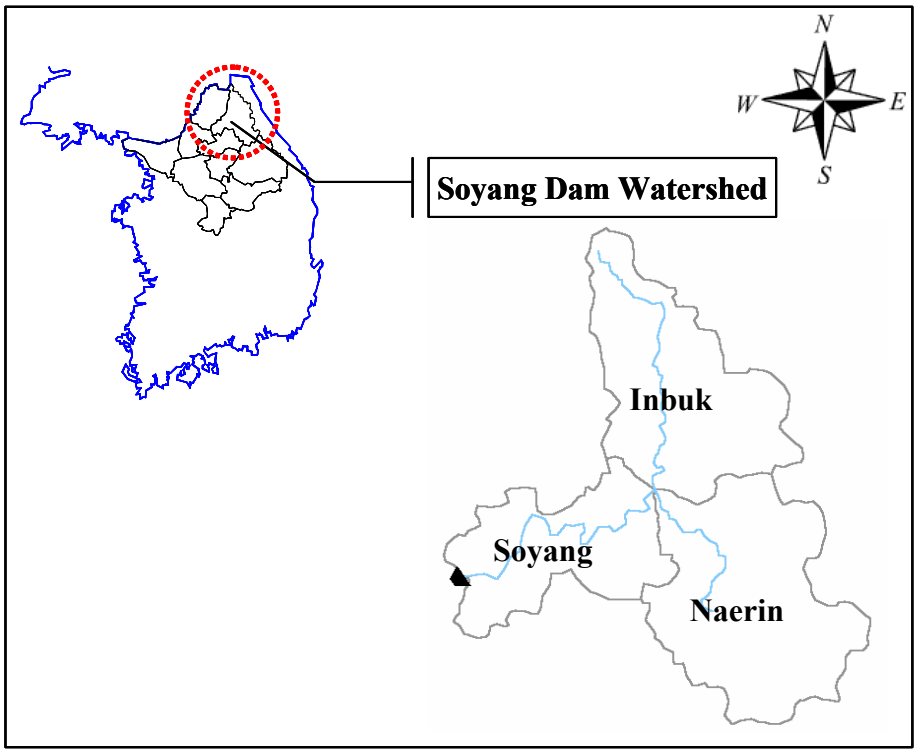
$$\begin{aligned} LL(\Theta) &= \ln p(R_{1:T} | X_{1:T}, \Theta) \\ &= \sum \ln \sum_{S_{1:T} \in [1,\ldots,K]^T} \left[p(S_1 | X_1, \Theta) \prod_{t=2}^{T} p(S_t | S_{t-1}, X_t, \Theta) \right] \left[\prod_{t=1}^{T} p(R_t | S_t, \Theta) \right] \end{aligned} \quad (24)$$

· 위 우도식을 최대로 만드는 계수 Θ 에 해당하는 값들을 EM 알고리즘을 이용하여 찾게 됨. 이러한 최대값은 해석적으로 찾을 수 없으나, EM 알고리즘의 반복계산을 통해 Θ 계수 공간에서 $LL(\Theta)$을 최대로 만드는 값을 구할 수 있음. 식 (25)의 Weather State 천이관계는 다항분포의 로지스틱 회귀분석(multinomial logistic regression)을 이용하여 이루어 짐. 여기서 모든 σ들은 실수로 표현된 계수들이며, ρ들은 D차원의 실수 값들로 이루어진 계수 벡터임.

$$p(S_t = b | S_{t-1} = a, X_t = x) = \frac{\exp(\sigma_{ab} + \rho'_b x)}{\sum_{k=1}^{K} \exp(\sigma_{ak} + \rho'_k x)} \quad (25)$$

아. 비정상 다변량 Downscaling 모형 적용 (소양강댐 유역을 중심으로)

· 본 연구에서는 소양강댐 유역 12개 강우관측소를 대상으로 비정상성 다변량 Downscaling 모형을 적용하여 기후변화에 따른 강수량 변동성을 평가하였으며 이를 통해서 제시된 방법론의 적합성을 검증하였음.



<그림 3-33> 소양강 댐 유역

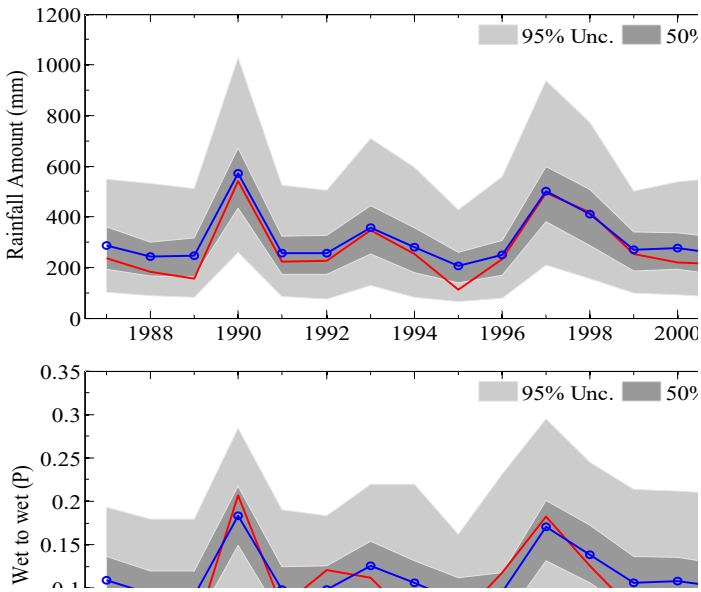
· 본 연구에서 제시하는 Downscaling 기법은 다변량 모형으로서 유역단위에서 발생하는 강우의 공간적 상관성을 재현할 수 있는 모형으로서 이를 검증하기 위해서 소양강 댐 유역 12개 강우관측소를 대상으로 지점간의 상관성을 평가하였음. 아래 그림에서 보는바와 같이 관측지점에서는 지점간의 강우발생 상관도가 0.5에서 0.8의 값을 가지며 본 연구에서 제시된 방법론의 경우에도 관측지점과 거의 유사한 상관성을 확보하는 것을 확인할 수 있음. 특히 관측값과 모의값의 차이를 행렬의 형태로 나타내면 오차가 0.05 이내로 매우 정확히 모의되는 것으로 확인됨.

Observation Simulation Difference

<그림 3-34> 소양강댐 유역내 강수발생 상관행렬 재생 능력 검증

· 본 연구에서 제시하는 Downscaling 기법은 비정상성 모형으로서 입력값으로 사용된 강수량을 총량개념에서 동일하게 재현해주는 과정이 반드시 필요함. 즉, 강우의 경년

변화를 효과적으로 모의하는 것이 필요하며 본 연구에서는 모형 구축과정에서 입력된 계절강수량의 재현여부를 검증하기 위해서 모의된 일강수량을 유역단위에서 평균하여 입력된 계절강수량과 비교하여 다음과 같이 비교하였음.



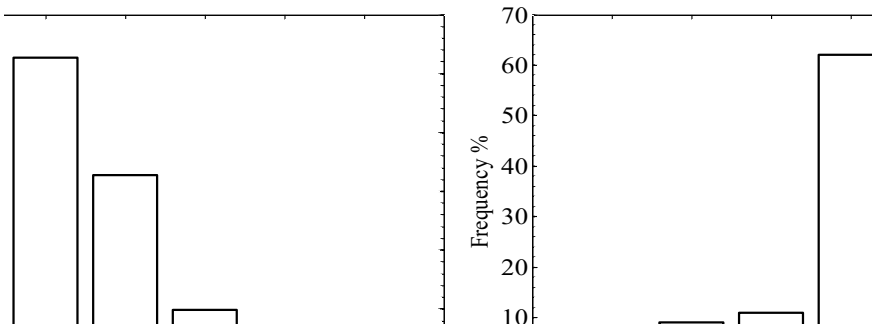
<그림 3-35> 다변량 비정상성 Downscaling 모형의 계절강수량 재현 효과 검증

· <그림 3-36>은 다변량 비정상성 Downscaling 모형의 계절강수량 재현 효과를 검증한 결과로서 모의된 일강수량을 합하여 계절강수량과 비교한 결과 상관계수가 0.9이상으로서 강우의 경년변화를 효과적으로 모의하는 것으로 판단되었음. 특히 계절단위에서의 강우발생 확률에 경우에도 매우 정확도가 높게 모의되는 것을 확인하였음.
· <그림 3-37>은 다변량 비정상성 Downscaling 모형의 일강수량 통계특성의 재현 여부를 검증한 결과로서 소양강댐 유역에서 결측치가 적은 7개 지점에 대해서 비교를 실시하였음. 모의결과 일강수량 통계치별로 Boxplot안에 관측값이 모두 위치하는 것을 확인할 수 있음. 앞서 검증된 계절강수량과 함께 다양한 시간규모에서 강수량 모의 결과에 대한 정확성을 검증하였음.

<그림 3-36> 다변량 비정상성 Downscaling 모형의 일강수량 통계치 재현 효과 검증

· 본 연구에서 제시하는 모형은 Weather State 모형으로서 과거 강수량의 패턴을 최적화 기법을 통해서 분류할 수 있음. 최적화 과정을 통해 추출된 Weather State를 통해서 강우량 모의가 이루어짐. 본 연구를 통해서 추출된 소양강댐 유역 여름철 일강수량의 최적 Weather State는 다음 <그림 3-37>과 같이 나타낼 수 있으며 각 Weather State별 강우발생 특성을 나타내면 <그림 3-38>과 같음.
· 소양강댐 유역의 경우 5개의 Weather State가 존재하며 State 1은 강우발생빈도가 10 %이하이지만 전체강우량의 50%를 상회하는 값으로서 집중호우와 연관성이 크며, State 4의 경우 강우발생빈도는 60% 이상의 값을 가지지만 강우량은 10%이하로 매우 작은 강우형태를 보이고 있음. 결과적으로 이러한 기상상태간의 천이확률을 이용하여 복잡한 강수특성을 효과적으로 모의할 수 있는 장점을 가지는 모형으로서 기후변화 연구뿐만 다양한 수문학적 연구에 응용할 수 있을 것으로 판단됨.

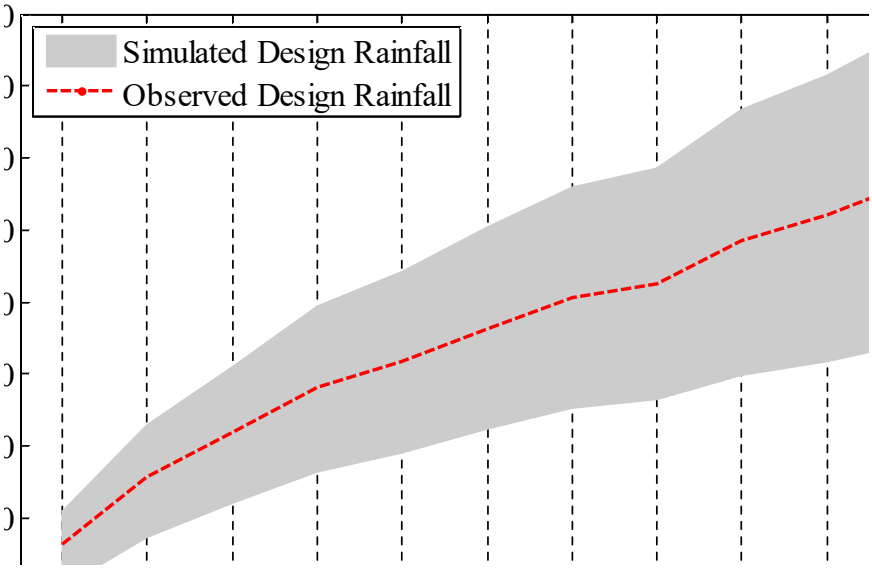
<그림 3-37> 다변량 비정상성 Downscaling 모형으로
추출된 소양강댐 유역 Weather State



<그림 3-38> 소양강댐 유역 Weather State별 강우발생 빈도 및 강우량 발생 특성 비교

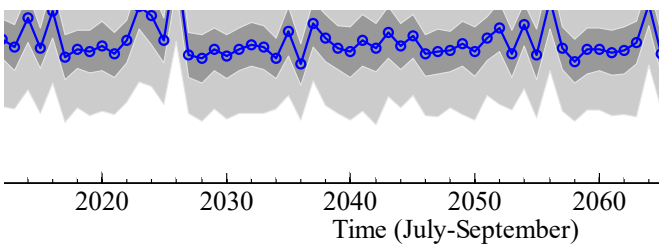
· 최종적으로 모의된 일강수량으로부터 연최대치자료만을 추출하여 빈도해석을 수행하였음. 이를 통해 댐 위험도 분석에 입력자료로 활용될 수 있는지에 대한 검토를 진행하였음. 본 연구에서는 소양강댐 유역의 면적강수량을 도출한 후 우리나라 대표확률분포인 Gumbel 확률지(probability plot)에 적합시켜 비교하였음. Downscaling 모형으로부터 도출된 연최대치자료가 Gumbel 분포의 이론적 곡선에 위치하고 있어 극치강수량 자료 계열이 Gumbel 분포의 특성을 효과적으로 재현하고 있음을 확인할 수 있었으며 관측값과 비교해도 큰 차이를 나타내지 않는 등 전체적으로 우수한 극치값 재현능력을 검증할 수 있었음. 확률강수량의 경우에도 모의된 결과로부터 도출된 불확실성 구간에 실측강수량이 가운데 위치하는 등 극치강수량 재현능력을 확인할 수 있었음.

<그림 3-39> 다변량 비정상성 Downscaling 모형의 극치강수량 재현효과 검증 (왼쪽: 관측치, 오른쪽: 모의치)



<그림 3-40> 다변량 비정상성 Downscaling 모형의 확률강수량 재현효과

· 기 구축된 다변량 비정상성 Downscaling 모형과 최적 기후변화 시나리오를 이용하여 소양강댐 유역의 미래 상세기후변화 시나리오를 추출하여 나타내면 다음과 그림과 같음.



<그림 3-41> 다변량 비정상성 Downscaling 모형을 이용한 미래 상세기후변화 시나리오

자. 극치강수량 재현 오차율

(1) 강우모의기법

· 수자원에서 극치강수량 모의기법은 기본적으로 수공구조물 설계 및 수자원계획을 수립하기 위한 입력자료로서 이용되고 있으며, 장기적인 목적을 가지고 수행되기 때문에 장기간의 일강수량자료의 입력이 요구됨. 하지만 우리나라의 경우 통계적으로 유의성을 갖는 30년 이상 관측된 자료가 부족하기 때문에 일반적으로 단기간의 일강수량자료를 이용하여 장기간의 일강수량을 모의하는 추정하여 이용하는 실정임. 또한 유역단위의 수자원계획 수립 및 유출해석 등을 위해서는 유역내 관측지점간의 공간적인 강우 패턴이 유지되어야 함.

· 이러한 관점에서 본 연구에서는 유역내 관측지점간의 공간상관성을 재현해주는 강우모의기법을 개발하였음. 본 연구에서 이용된 확률론적 강우모의기법은 수자원계획 수립에 있어서 미래 발생 가능한 시나리오를 제공함으로서 강우 변동성에 따른 불확실성을 고려할 수 있는 장점이 있음.

· 일강수량을 모의하는데 있어서 강수계열의 단기간의 기억(memory)을 활용한 Markov Chain 모형이 가장 일반적임. 이런 Markov Chain 모형은 크게 두 부분으로 나누어짐. 첫째, 강수의 발생(rainfall occurrence)을 결정짓게 되며, 둘째, 강수일에 대해서 강수량(rainfall amount)을 결정하는 과정으로 구분되어짐. 기존 Markov Chain모형에서 강수의 발생은 이전일의 강수사상만을 고려하는 2-State Markov Chain 모형이 주로 이용되며, 강수일과 무강수일 간의 또는 무강수일과 강수일간의 천이확률(transition probability)을 통한 정의로 모의됨. 다음 단계로 언급한 바와 같이 강수일에 일강수량을 부여하게 되며 확률분포형(probability distribution)을 통해서 구체화 하게 됨.

· 따라서 본 연구에서는 연 최대치 자료를 활용한 극치강수량 모의기법을 개발하기 위해서 Gumbel, GEV 등 대표 극치분포를 적용하여 강우를 모의하는 MCS(Monte Carlo Simulation) 방안이며 다양한 지속시간의 강수에 대하여 적용할 수 있고, 계산부하가 작기 때문에 다년 자료의 모의에 용이하고 연 최대치 자료만을 활용하므로 일부 결측치가 존재하더라도 적용이 가능함.

(2) 공간상관성 재현기법

· 표준정규분포(standard normal distribution)을 따르는 n개의 독립된 표본 Z_i(여기서, $i=1,2,\cdots,n$)가 존재하면, 계수 c와 표본 Z를 이용하여 생성한 식 (26)은 평균과 분산의 특성인 식 (27), (28)에 의하여 평균이 0이고 분산이 σ^2인 정규분포를 따름.

$$c_1Z_1+c_2Z_2+\cdots+c_nZ_n \tag{26}$$

$$E(c_1Z_1+c_2Z_2+\cdots+c_nZ_n)=c_1E(Z_1)+c_2E(Z_2)+\cdots c_nE(Z_n)$$
$$=c_10+c_20+\cdots+c_n0=0 \tag{27}$$

$$Var(c_1Z_1+c_2Z_2+\cdots+c_nZ_n)=c_1^2\,Var(Z_1)+c_2^2\,Var(Z_2)+\cdots+c_n^2\,Var(Z_n)$$
$$=c_1^2+c_2^2+\cdots+c_n^2=\sigma^2 \tag{28}$$

· 식 (26) ~ (28)의 과정을 행렬을 이용하여 일반화시키면, 식 (29)와 같이 표현할 수 있음.(여기서, C는 $n \times m$ 행렬이고 $Z=(Z_1\ Z_2\ \cdots\ Z_n)^T$이다.)

$$C^T Z \sim MN(0,\ C^T C = \Sigma) \tag{29}$$

· 식 (29)는 좌변과 같이 표준정규분포를 따르는 표본에 계수행렬 C^T를 곱해줌으로서 생성되는 새로운 표본은 평균이 0이고 분산이 $C^T C$인 정규분포로 표현할 수 있음을 보여줌. 즉, $C^T C$와 같이 표현할 수 있는 계수행렬을 찾을 수 있다면, 표준정규분포를 따르는 분포를 특정정규분포의 형태로 수정할 수 있음.

· $C^T C = \Sigma$에서 $C^T C$는 Σ의 Cholesky Decomposition결과를 나타냄. 즉, Cholesky Decomposition으로 분해 가능한 계수행렬 Σ를 이용함으로서 식 (29)에 적용이 가능하다. Cholesky Decomposition은 특정 행렬 A가 대칭행렬이며(symmetric matrix), 양의 부호 행렬(positive-definite matrix)이면, 행렬 A는 식 (30)와 같이 상부 삼각행렬 R로 분해됨.

$$A = R^T R \tag{30}$$

· 확률분포형을 이용한 일강수량 모의기법은 임의의 무작위 확률을 균등분포(uniform distribution)에서 추출한 후, 추출된 확률을 임의의 확률분포모형에 CDF값으로 대입하여 일감수량을 모의함. 따라서 공산상관성을 고려한 무작위 확률의 생성방법은 다음과 같음.

· 첫째, 식 (29)의 계수행렬 C를 생성하기 위해서 Cholesky 분해가 가능한 대칭이며 양의 정부호 행렬인 상관행렬(correlation matrix)을 이용함.

· 둘째, 공간상관성을 고려할 지점의 수만큼 표준정규분포를 따르는 확률변수를 생성함.

· 셋째, 둘째 단계에서 생성한 관측지점 수 n에 해당되는 확률변수 Z와 첫 번째 단계에서 구한 관측지점간의 $n \times n$ 상관행렬 Σ를 식 (30)과 같이 분해한 후 식 (29)에 대입하여 식 (31)을 도출함.

$$\begin{bmatrix} R'_{1,1} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ R'_{2,1} & R'_{2,2} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ R'_{3,1} & R'_{3,2} & R'_{3,3} & 0 & \cdots & 0 \\ R'_{4,1} & R'_{4,2} & R'_{4,3} & R'_{4,4} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R'_{n,1} & R'_{n,2} & R'_{n,3} & R'_{n,4} & \cdots & R'_{n,n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & Z_{1,3} & Z_{1,4} & \cdots & Z_{1,k} \\ Z_{2,1} & Z_{2,2} & Z_{2,3} & Z_{2,4} & \cdots & Z_{2,k} \\ Z_{3,1} & Z_{3,2} & Z_{3,3} & Z_{3,4} & \cdots & Z_{3,k} \\ Z_{4,1} & Z_{4,2} & Z_{4,3} & Z_{4,4} & \cdots & Z_{4,k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n,1} & Z_{n,2} & Z_{n,3} & Z_{n,4} & \cdots & Z_{n,k} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} R'_{1,1}Z_{1,1} & \cdots & R'_{1,1}Z_{1,k} \\ R'_{2,1}Z_{1,1} + R'_{2,2}Z_{2,1} & \cdots & R'_{2,1}Z_{1,k} + R'_{2,2}Z_{2,k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R'_{n,1}Z_{1,1} + R'_{n,2}Z_{2,1} + \cdots + R'_{n,n}Z_{n,1} & \cdots & R'_{n,1}Z_{1,1} + R'_{n,2}Z_{2,1} + \cdots + R'_{n,n}Z_{n,1} \end{bmatrix} \tag{31}$$

· 식 (31)의 각각의 행에서 1번 행의 분산은 $R_{1,1}^2$을 2번 행의 분산은 $R_{2,1}^2+R_{2,2}^2$를, 3번 행의 분산은 $R_{3,1}^2+R_{3,2}^2+R_{3,3}^2$, n번 행의 분산은 $R_{n,1}^2+R_{n,2}^2+\cdots+R_{n,n}^2$을 나타냄. 즉, 식 (31)의 결과는 1번 관측소를 기준으로 관측소간의 상관성이 고려된 결과를 보여주고 있으며, 각각의 확률변수는 정규분포 $MN(0,\Sigma)$를 따름.

· 마지막으로, 식 (31)으로 생성된 각각의 확률변수들은 식 (32)의 표준화를 통하여 표준정규변수로 변환한 후, 식 (33)의 표준정규분포의 누가분포함수를 통하여 CDF 값으로 변환함. 즉, 식 (33)을 통해 변환된 CDF 값은 일강수량 모의기법에 적용 가능한 관측지점간의 상관성이 고려된 누가 확률 값임.

$$u_{\text{standard normal distribution}} = \frac{R'Z-0}{R'R} \tag{32}$$

$$F(u) = \int_{-\infty}^{u} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \tag{33}$$

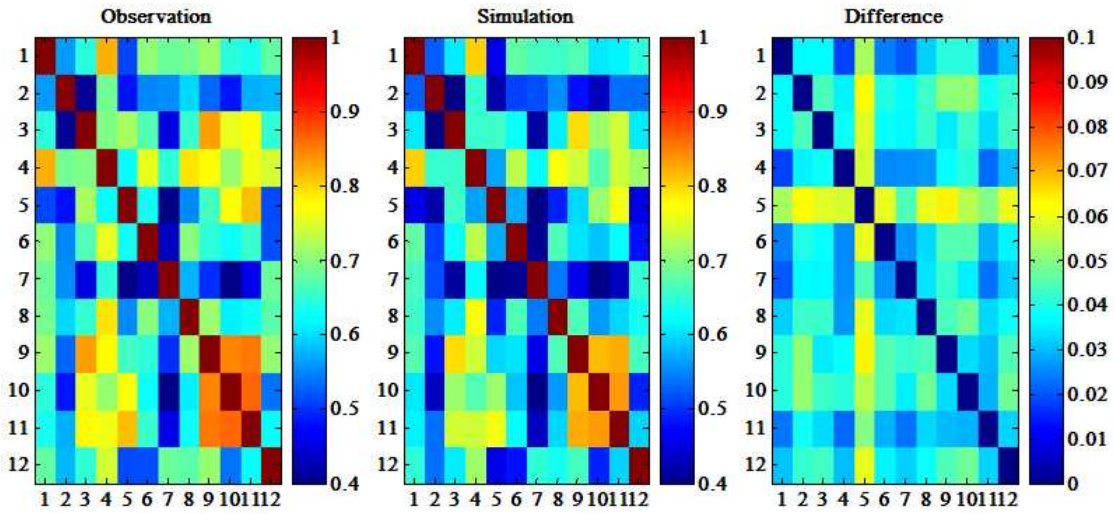
(3) 불확실성을 고려한 Monte Carlo Simulation 모형

· 댐 운영모의에 활용되는 강수자료가 가능최대 강수량(PMP)인 극치 강수량인 점에서 자료의 극치특성을 효과적으로 재현해 주는 확률분포모형인 GEV, Gumbel 분포를 기반으로 불확실성을 고려할 수 있도록 수정한 강우모의기법을 수행하였음.

· 확률분포모형 기반의 MCS 적용방법은 첫째, 임의의 0~1사이에 난수를 발생시키고 둘째, 발생한 난수를 이용하여 확률분포모형의 누가확률분포에 적용시켜 특정 CDF에 해당되는 확률강수량을 얻음. 마지막으로 이와 같은 과정을 n회 반복하여 n개의 임의 표본을 추출함.

· 본 연구에서 적용한 불확실성을 고려한 MCS 강우모의기법은 GEV 또는 Gumbel 분포를 선택한 후 최우도법(Maximum Likelihood Method)을 통해 매개변수를 산정했음. 또한 매개변수에 공분산(covariance)행렬을 이용한 불확실성 구간을 설정한 후 불확실성 구간을 적용한 매개변수 추출과 MCS 기법을 통해 강우모의발생을 하였음. 최종적으로 공간상관성을 고려한 지점별 난수를 입력값으로 하는 MCS 과정을 적용하여 강수량을 도출하였음.

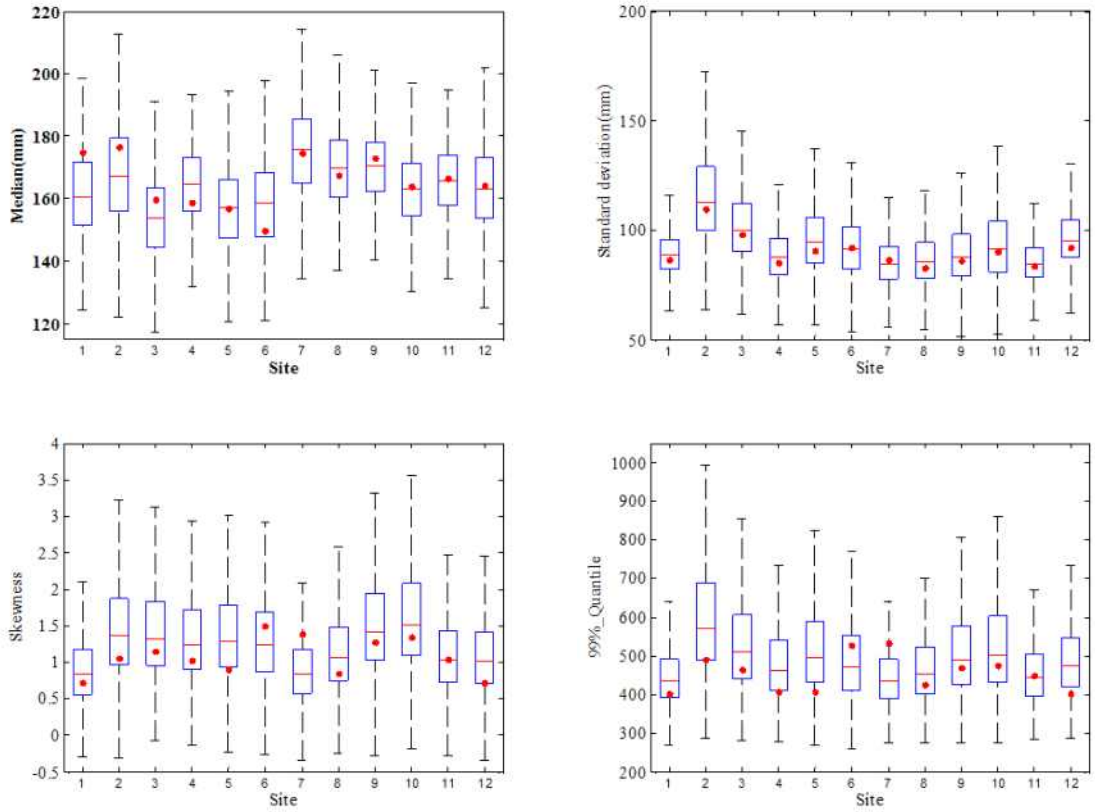
· 아래 <그림 3-42~45>는 GEV분포를 기반으로 한 소양강댐 유역의 강우모의발생 결과를 보여주고 있으며, 결과를 살펴보면 기존 소양강댐 유역에 강수특성을 효과적으로 모의하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 소양강 댐 유역 12개 지점에 대한 공산상관성을 나타내고 있는 <그림 3-42>에서 모의강수량에 상관 행렬값이 관측값과 동일한 공간 패턴을 보여주며, 상관행렬의 차이가 0~0.06 범위에 분포함으로 관측 지점간에 공간상관성을 효과적으로 모의하고 있음을 확인할 수 있음.



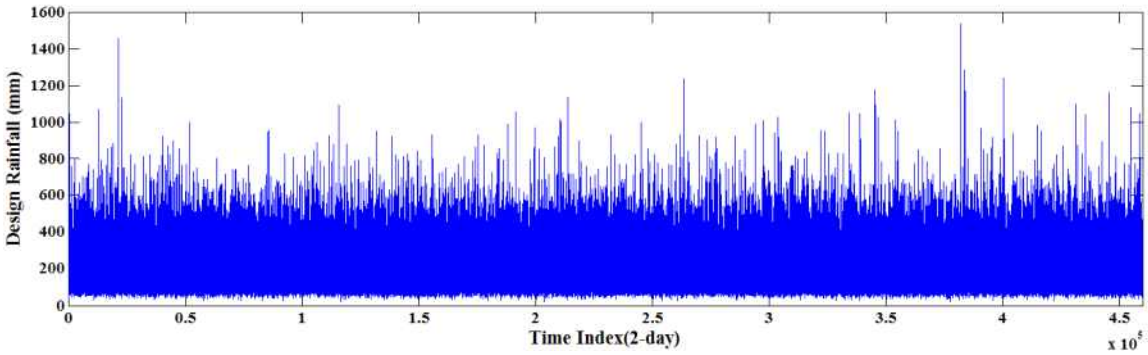
<그림 3-42> 유역별 강수량 상관성

· <그림 3-43>은 관측값과 모의값에 통계적 특성값인 중간값, 표준편차, 왜곡도, 100년 빈도 2일 최대강수량을 도시한 결과이며 가로 축은 관측지점을 세로축은 각각의 통계값을 나타내고 있음. 중간값과 표준편차의 경우 관측값이 모의값의 50% 신뢰구간 안에 위치하며, 왜곡도와 100년 빈도 강수량의 경우 모의값에 대한 평균이 관측값 보다 크게 나타나는 경향이 있지만 마찬가지로 50% 신뢰구간 안에 관측값이 위치함으로써 강수 모의가 효과적으로 이루어졌음을 확인할 수 있음.

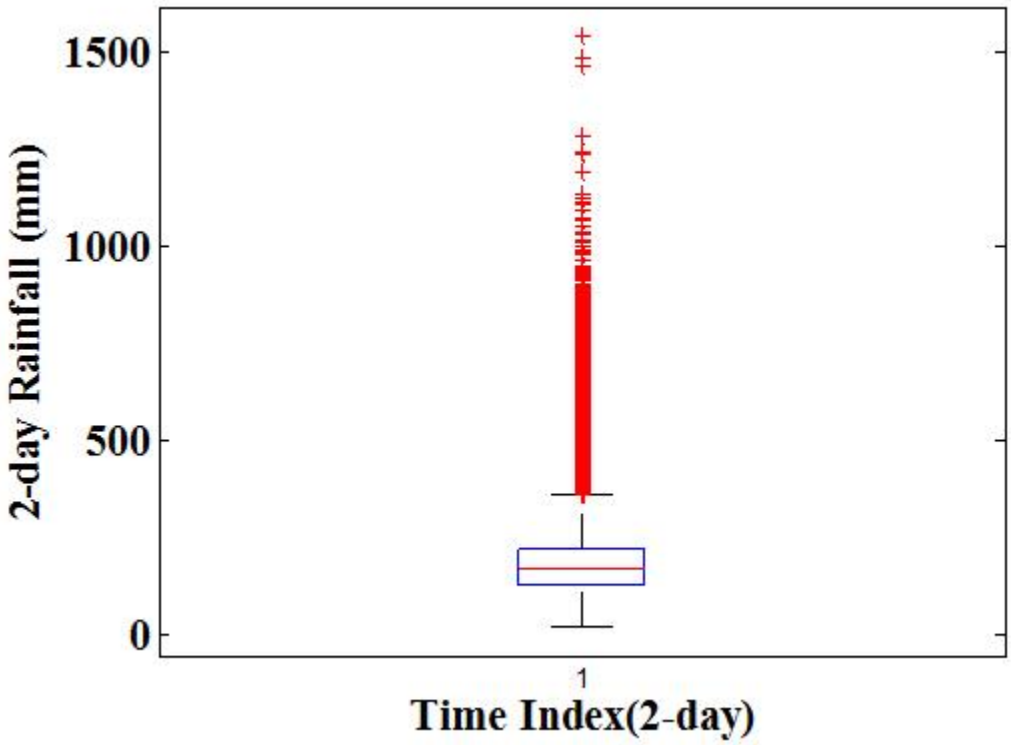
· <그림 3-44~45>는 모의된 지점강수량을 이용하여 구한 면적강수량의 결과를 보여주고 있음. <그림 3-44>는 모의자료에 대한 시계열 그림을 보여주며 1회 모의시 관측기간과 같은 46년 기간을 모의하였으며 총 10,000번에 강수 모의를 실시한 결과를 보여주고 있음. <그림 3-45>은 <그림 3-44>에 나타난 강수 모의결과를 이용한 강수량에 분포특성을 도시한 것으로 GEV 모형에 특성으로 꼬리가 긴 분포특성을 보여주고 있으며 약 500mm를 초과하는 강수량이 95% 신뢰구간을 초과하는 이상치로 구분되어지고 있음을 확인할 수 있음.



<그림 3-43> 모의 강수량의 기본 통계치 결과

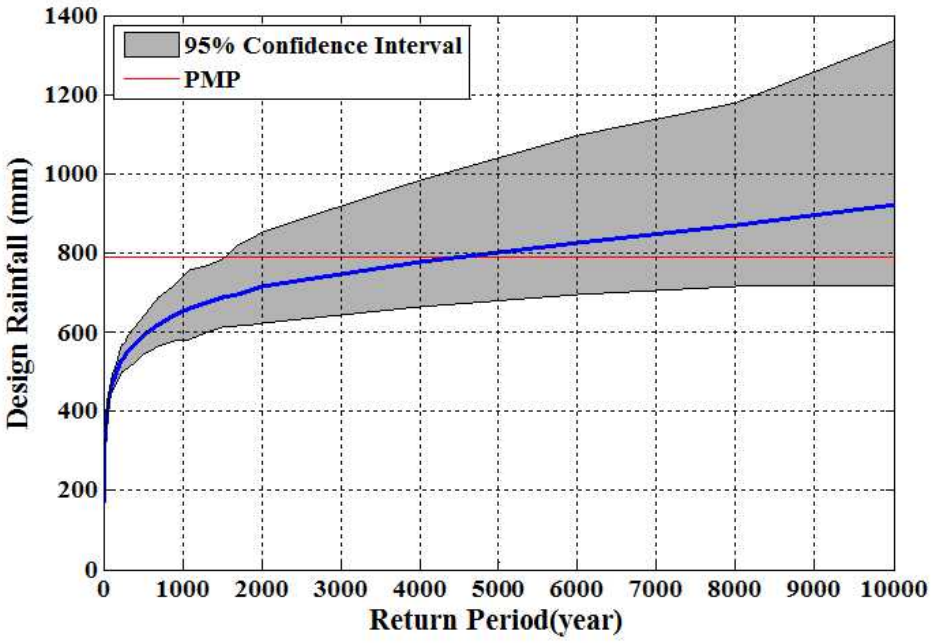


<그림 3-44> 소양강 댐 12개 지점 2일 최대 강수량 모의 결과



<그림 3-45> 모의 면적 강수량의 분포특성

· <그림 3-46>은 모의 면적강수량으로 나타낸 빈도별 확률강수량을 보여주고 있음. 기존 PMP값은 모의 강수량에 대해 약 4,500년 빈도에 해당되어짐을 확인할 수 있었으며, 특정 빈도의 확률강수량이 95%신뢰구간에 대하여 분포하고 있는데 이는 강우 불확실성 범위를 나타내는 결과임. 이러한 결과는 기존의 정상성 해석 결과와는 다르게 불확실성을 정량적으로 제시 할 수 있음.



<그림 3-46> 강우(PMP)앙상블 도출

2. 불확실성 분석을 위한 Bayesian 기반 강우-유출 모형 개발

· 수문순환과정을 모의하기 위해서 다양한 형태의 수문모형들이 사용되고 있으며, 그 중 가장 대표적인 모형은 강우-유출 모형으로서 강우로 인한 유역의 유출 특성을 평가하는데 주고 이용되고 있음.

· 강우-유출 과정의 물리적인 관계는 관측된 강우, 유량, 증발산 등의 매개변수(parameter)들의 최적화(optimization) 과정을 통해서 추정되고 있으며, 다양한 매개변수들로 인하여 이용되는 강우-유출 모형은 국내외적으로 그 종류가 매우 다양함.

· 그러나 수문순환 과정을 정확히 모의하기 위해서 요구되는 수문자료의 질적, 양적 기준에는 매우 미흡한 실정으로 신뢰성 있는 유출 분석을 어렵게 하는 원인으로 작용하므로 강우-유출 분석에서 불확실성 분석은 반드시 요구되는 분석과정임.

· 그러나 불확실성을 정량화하는 것은 통계학에서도 쉽지 않은 연구 분야로서 가장 진보된 불확실성 해석 방법으로는 Bayesian 방법이 컴퓨터의 발전과 더불어 많은 학문 분야에서 이용되고 있음. 특히, Bayesian 방법은 매개변수의 추정과 불확실성을 동시에 수행할 수 있는 방법으로 추정되는 매개변수들은 사후분포(posterior distribution)로 귀결되며 최종적으로 확률분포형(probability density function)의 형태를 갖게 되어 신뢰성 있는 유출 분석이 가능함.

· 신뢰성 분석과 관련한 국외의 연구사례를 보면, Monte Carlo Simulation(MCS), Latin Hypercube Sampling(LHS), Mean First Order Second Moment(MFOSM), Advanced Mean First Order Second Moment(AFOSM), Rosenbruth's Point Estimation Method(RPEM), Harr's Point Estimation Method(HPEM)를 포함하는 강우-유출 모형의 다양한 신뢰성 분석 기법을 적용하였음(Kwon et al., 2007). 이와 더불어 많은 연구자들은 다양한 신뢰성 분석 방법의 상대적인 수행능력을 비교 검토하였음.

· 매개변수적 LHS를 이용한 강우-유출모형의 불확실성 해석기법을 개발하여 소양강댐 유역에 대해서 모형의 적합성을 평가하였으며, Kwon et al. (2007) 비매개변수적 LHS기법을 이용하여 강우-유출 모형의 불확실성 분석에서 효율성을 극대화시키는 연구를 수행하였음. 또한 권현한 등(2008)은 Bayesian 기법과 Sacramento 장기유출 모형을 통합한 Bayesian Sacramento 모형을 개발하여 소양강댐 유역의 장기유출 과정의 불확실성을 평가한 바 있음.

· 본 연구의 주된 목적은 국내외에서 대표적으로 이용되는 HEC-1 단일강우사상 모형과 연동할 수 있는 Bayesian Markov Chain Monte Carlo(MCMC) 기반의 Bayesian HEC-1(BHEC-1) 통합 모델을 개발하는 것이며, 다음 사항에 주안점을 두었음.

① 기존 HEC-1 모형의 모든 해석과정을 포함하고 입력 및 출력 양식의 형태를 그대로 활용할 수 있는 해석기법의 개발하고자 함.

② 기존 HEC-1 모형에서 사용되는 최적화 기법은 다수의 유역을 대상으로 매개변수 최적화 수행 시에 유역이 여러 개인 경우, 매개변수가 발산되는 문제점이 있어 유역을 분리하여 매개변수 최적화를 수행하는 등의 적용상에 문제점이 있었음. 이러한 점을 고려하여 다수의 유역인 경우에도 해석이 가능하도록 모형을 개발하고자 함.

③ 매개변수의 최적화와 불확실성 추정이 동시에 가능한 모형을 개발하며 강우-유출 모의과정에서 나타나는 모형, 매개변수, 입력 자료 등의 불확실성을 고려한 해석이 가능하도록 개발하고자 함.

· 본 연구에서는 대상 유역의 강우-유출 관계를 추정하기 위해 국내외에서 범용되고 있는 단일강우사상모형인 미공병단의 HEC-1 Flood Package Code를 수정하였으며, 유출모의방법에는 SCS 유출곡선지수 방법, Clark 순간단위도법, Muskingum 하도추적 방법 등을 이용하였음. 주요 매개변수는 SCS방법의 CN.No, Clark 순간단위도법의 도달시간 T_c와 저류상수(R)가 있음.

가. Bayesian Markov Chain Monte Carlo 모의방법

· Bayesian 방법은 확률을 발생 빈도나 어떤 시스템의 물리적 속성이라고 여기는 것과는 다른 해석적 접근방법임. Bayesian 확률은 사전확률(prior probability)을 기준으로 자료의 증가에 의해서 정보가 갱신되며 최종적으로 사후확률(posterior probability)을 추정하는 과정임.

· Bayes 정리(Bayes's rule)는 두 확률 변수의 조건부확률과 경계 확률 사이의 관계를 나타내는 정리로, 확률론의 Bayesian 해석에 따르면 Bayes 정리는 새로운 사후 근거가 제시될 때 신뢰값(belief)을 어떻게 갱신 또는 정정할 것인가를 설명하고 있음.

· 주어진 확률변수 θ와 y가 있을 때, 두 확률변수들의 결합확률분포(joint probability distribution)는 사전분포(prior distribution) $p(\theta)$와 우도(likelihood) $p(y|\theta)$의 곱으로 표현할 수 있음.

$$p(\theta, y) = p(\theta)p(y|\theta) \tag{34}$$

· 수리적으로 계산이 불가능하거나 복잡한 적분, 추정 등의 문제에 사용되는 Monte Carlo 기법은 최근에 수리 수문학 분야에서 위험도 및 불확실성을 평가하는 수단으로 널리 이용되고 있음. Monte Carlo기법은 관심이 있는 값을 확률변수의 기대값으로 포현하고 이를 모의를 통하여 추출된 동일한 분포를 따르며 서로 독립(Independent and identical Distributed: iid)인 표본들의 표본평균을 이용하여 추정하는 방법이라고 할 수 있음.

· 이에 반해 Markov Chain Monte Carlo 기법은 주어진 다변량 확률분포가 복잡하여 이를 따르는 iid 난수를 얻을 수 없는 경우에 사용가능한 기법으로서 iid 난수 대신 Markov Chain 난수를 추출하여 사용함. Markov Chain을 통해 난수를 발생시킨다고 해서 정확하게 관심이 되는 확률분포를 따르지 않지만 이를 일정 시간동안 반복 후에 얻어지는 난수들은 추출을 원하는 분포에 수렴하게 됨.

· 따라서 Markov Chain Monte Carlo기법은 복잡한 다변량 확률분포 및 매개변수의 추정을 요하는 문제에서 주로 사용되며 또한 Bayesian 통계 기법에서 사후분포의 추

론의 이용될 수 있음.

· 본 연구에서는 2가지 관점에서 Markov Chain Monte Carlo 기법을 이용하게 된다. 즉 강우-유출 모형의 여러 매개변수의 최적 해를 구할 뿐만 아니라 이에 따른 매개변수의 사후분포를 추정하게 됨. 최근에 Bayesian Markov Chain Monte Carlo 기법을 응용하여 극치강수량 예측모형(권현한과 문영일, 2007) 및 Bayesian Markov Chain Monte Carlo 기법을 통한 강우-유출 모형 매개변수의 최적화 및 불확실성 분석(권현한 등, 2008) 등 다양한 수리수문학적 문제에 하나의 대안으로서 적용되고 있음.

· 본 연구에서는 앞서 Bayesian Network 모형 개발 부분에서 언급되었던 Gibbs Sampling을 이용하여 연구를 진행하였음. 또한 단일사상 강우-유출 모형 구축을 위한 매개변수 추정 및 불확실성 분석을 수행하기 위해 목적함수를 설정하고 각 사상별로 5,000회 이상 모의하여 다양한 표본공간으로부터 매개변수들이 추출될 수 있도록 하였음.

나. Bayesian 기법을 이용한 HEC-1 모형 최적화

· 강우-유출 모형을 구성하는데 있어서 SCS Curve No.와 Clark 합성단위유량도 2개의 매개변수를 최적화 대상으로 하였음. 대청댐 유역의 경우 총 7개 유역으로서 유역마다 3개의 매개변수가 최적화 대상이므로 총 21개의 매개변수를 최적화 하였다. 본 연구에서는 21개의 매개변수를 정규분포로 가정하였으며, 21개의 매개변수에 대한 결합확률(joint probability)는 식 (36)과 같음.

$$CN_n \sim N(\mu_{cn_n}, \sigma^2_{cn_n}) \qquad n=1,...,7 \tag{35a}$$

$$Tc_n \sim N(\mu_{tc_n}, \sigma^2_{tc_n}) \qquad n=1,..,7 \tag{35.b}$$

$$R_n \sim N(\mu_{r_n}, \sigma^2_{r_n}) \qquad n=1,..,7 \tag{35.c}$$

$$p(CN_{1,...,7}, Tc_{1,...,7}, R_{1,...,7}) \propto 1 \tag{36}$$

· Bayes 정리에 의해서 매개변수의 사후분포는 다음과 같이 전개될 수 있음.

$$p(\Theta \mid y) = \frac{p(\Theta, y)}{p(y)} \propto p(y \mid \Theta) \bullet p(\Theta) \tag{37}$$

· 여기서, $\Theta = [CN_{1,...,7}, Tc_{1,...,7}, R_{1,...,7}]$는 전체매개변수들의 집합을 나타내며, $p(\Theta)$는 매개변수들의 사전분포를 $p(y \mid \Theta)$는 유입량자료 y의 우도함수(likelihood function)를 의미함.

$$p(y \mid \Theta) \propto \prod_{t=1}^{T} N(y_t \mid \mu(t), \sigma) \bullet \\ N(\mu(t) \mid CN_{1,..7}, Tc_{1,..7}, R_{1,..7}, \sigma^2_{cn}, \sigma^2_{tc}, \sigma^2_r) \tag{38}$$

· 식 (38)은 모든 매개변수에 대한 적분을 통해 직접적으로 추정하는 것은 불가능함. 따라서 본 연구에서는 앞서 언급한 MCMC 방법을 도입하여 매개변수들의 사후분포를 추정하게 됨. 각각의 매개변수들은 MCMC 방법 중 깁스표본법을 이용하여 추정하였으며 모형의 효과적인 매개변수 수렴(convergence)을 위해서 3개의 Chain을 독립적으로 시행하여 표본이 혼합(mixing) 되도록 하였음.
· Bayesian MCMC 방법은 앞서 언급하였듯이 우리가 정확히 알지 못하는 다변량 분포들의 결합확률밀도 대신에 변량간의 조건부분포를 효과적으로 찾아낼 수 잇는 방법론으로서 HEC-1 모형을 예를 들어 설명하면 다음과 같음.
· 어떤 유역의 SCS Curve No., Clark의 Tc와 R값을 찾는 등 연속적으로 Chain의 형태를 가지고 진화해 감. 즉, 단순히 변량을 모의발생 시키는 Monte-Carlo 모의가 아니라 변량간의 관계를 규정하고 이를 유지하면서 다음 변량을 추정하는 등 이름 그대로 Markov Chain의 형태를 가지게 됨.

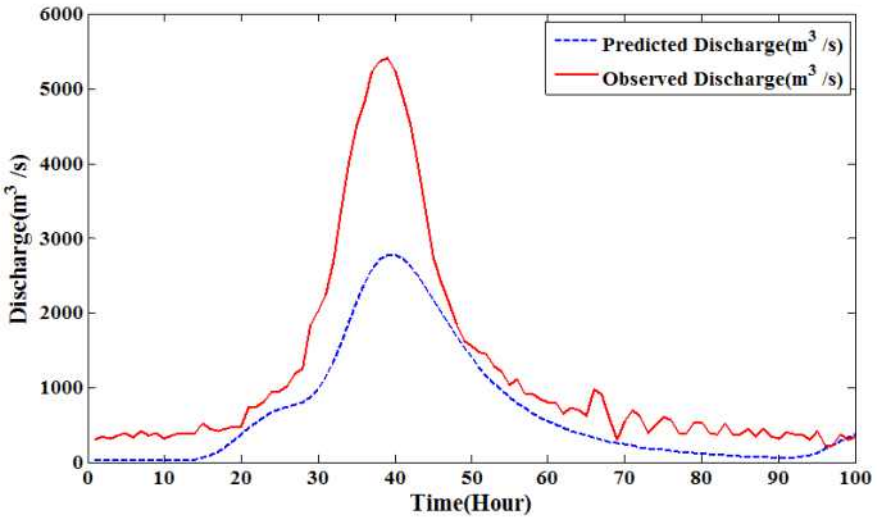
다. Bayesian HEC-1 모형 적용 결과

· 강우-유출 모형의 정확성은 주로 모델의 매개변수에 의존하게 됨. 그러나 강우-유출 사상의 매개변수 검정시에 각 사상별로 검정에 따른 매개변수가 다르게 추정되는 문제점이 발생하며 이는 유역의 초기함수조건이나 강우의 발생형태 등의 상이함으로 초래되는 결과임. 본 연구에서는 대청댐 유역의 실측 강우-유출 사상을 중심으로 HEC-1 모형에서 제공하는 매개변수 최적화 방법을 통해 매개변수 검정을 실시하였으며, 각 유역 대표 매개변수에 대해 범위를 추정하였으며, 최종적으로 추정된 범위를 기초로 하여 BHEC-1 모형을 통해 매개변수의 불확실성 분석을 포함하는 매개변수 최적화하는 것임.
· 본 연구에서 제안한 BHEC-1 모형의 적용에 앞서 GIS 분석을 통해 도출된 유역 정보로부터 경험공식 등을 이용하여 강우-유출 모형의 매개변수들의 초기값을 도출하였음. 이들 매개변수들의 초기값과 기존 HEC-1 최적화기법을 이용하여 매개변수를 검정하였음. 매개변수 검정은 2003년, 2006년, 2007년, 2009년 총 4개의 강우-유출 사상을 대상으로 하였음. 각 유역별 매개변수 검정 결과는 <표 3-20>에 요약하여 나타내었으며, 매개변수가 일정한 범위로 추정되는 것을 확인할 수 있음. 이는 앞서 언급되었듯이 강우강도, 강우지속시간, 유역의 선행함수조건 등의 상이함으로 기인되는 것으로 판단됨.

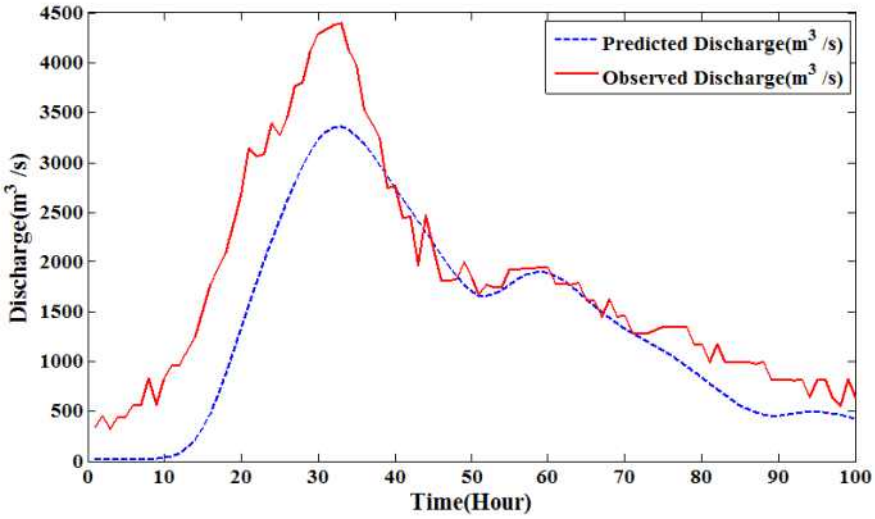
<표 3-20> 강우-유출 모형 매개변수의 초기 가정치

Basin Name	Time of Concentration(hr)			Storage Coefficient(hr)			CN No.		
	Minimum	Average	Maximum	Minimum	Average	Maximum	Minimum	Average	Maximum
Yongdam Dam	2.45	3.14	3.92	2.67	3.22	3.92	81.2	88.3	94.5
Namdae-cheon	4.15	5.87	7.34	4.46	6.33	7.60	81.4	86.0	98.4
Youngdong-cheon	4.95	6.89	8.48	5.25	6.57	8.59	80.6	84.1	99.1
Chogang	3.76	5.78	6.93	4.24	5.84	7.65	80.2	84.1	97.3
Bocheong-cheon	4.63	6.13	8.29	4.65	6.81	9.75	81.4	85.6	99.1
Daecheong Dam Up	1.38	2.12	2.93	1.88	3.00	4.18	85.2	89.4	97.7
Daecheong Dam	4.28	6.46	10.86	4.89	5.99	7.83	81.4	87.7	97.3

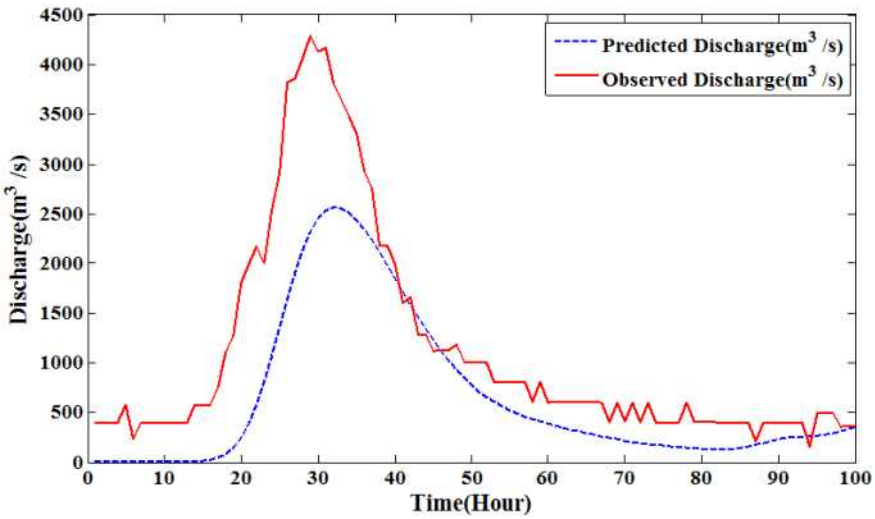
· <그림 3-47~50>는 기존 HEC-1 모형을 통해 최적화된 수문곡선을 나타냄. 그림에서와 같이 첨두유량의 발생시간은 유사한 거동을 보이고 있으나 모의된 유출 수문곡선의 첨두유량이 관측수문곡선의 첨두유량을 재현함에 있어 그 성능이 저하되어 있음을 확인하였음. 이러한 결과가 발생하게 된 주요 원인에는 모형 자체에서 기인하는 불확실성과 매개변수의 불확실성, 관측된 자료의 불확실성 등이 복합적으로 발생한 결과로 사료됨.



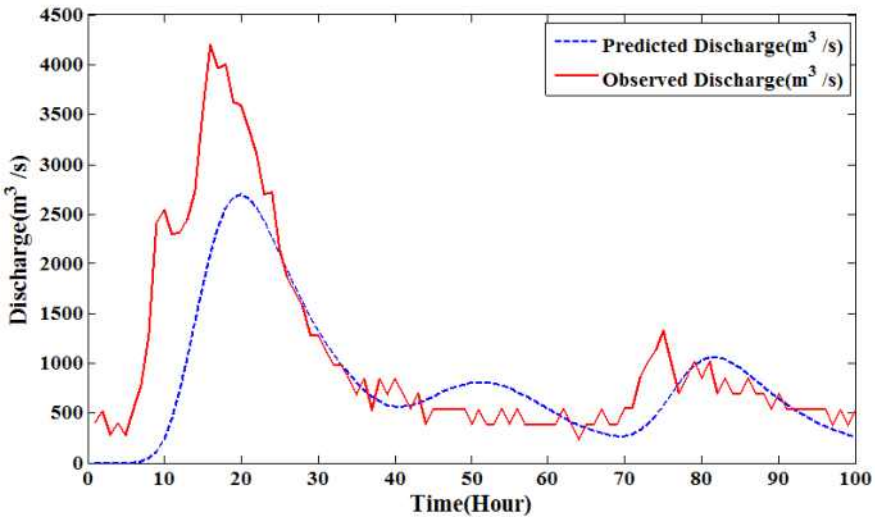
<그림 3-47> 초기값을 이용한 강우-유출 모의 결과(2003)



<그림 3-48> 초기값을 이용한 강우-유출 모의 결과(2006)



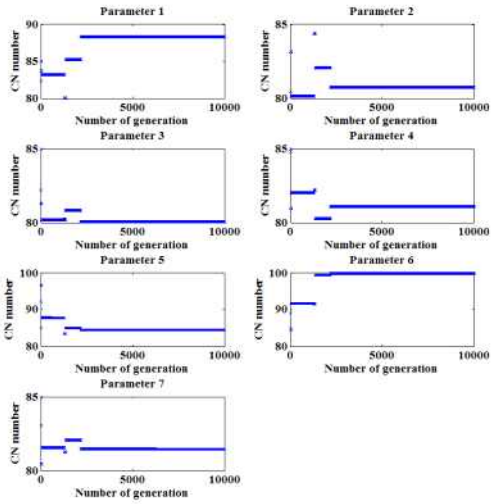
<그림 3-49> 초기값을 이용한 강우-유출 모의 결과(2007)



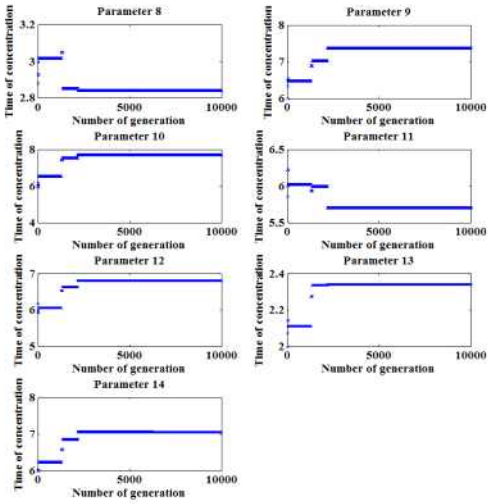
<그림 3-50> 초기값을 이용한 강우-유출 모의 결과(2009)

· 본 연구에서는 앞서 평가된 기존 HEC-1을 이용한 강우유출 분석의 문제점을 개선시키기 위해 Bayesian 모형을 적용하였음. 기본적으로 BHEC-1 모형을 적용하기 위해서 사전분포를 정의하는 것이 필요하며 본 연구에서는 앞서 기존 HEC-1 모형 최적화 과정으로부터 추정된 매개변수 <표 3-20>을 기준으로 사전분포를 정의하였음.

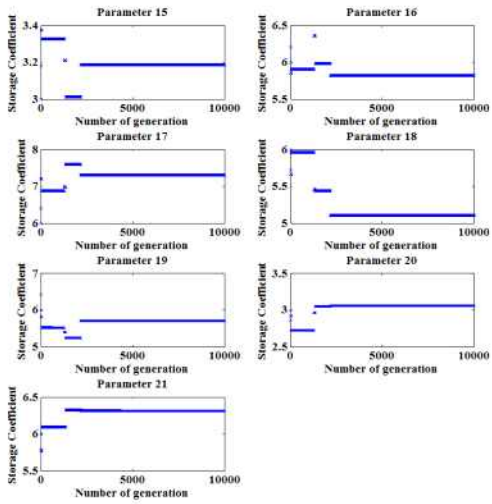
· 앞서 언급되었듯이 본 연구에서는 7개 소유역을 동시에 최적화 대상으로 하였으며 각 소유역별 3개의 매개변수, 즉 총 21개의 매개변수를 동시에 최적화하였음. 총 4개의 강우-유출 사상을 대상으로 BHEC-1모형을 적용하였으며 매개변수가 충분히 수렴할 수 있도록 10,000번 모의를 수행하여 최종적으로 매개변수별 사후분포를 도출하였음. 매개변수들의 수렴과정을 나타내면 <그림 3-51~56>과 같다. 10,000번 모의를 통해서 추정된 매개변수별 사후분포를 핵밀도함수로 나타내면 <그림 3-57~60>과 같음.



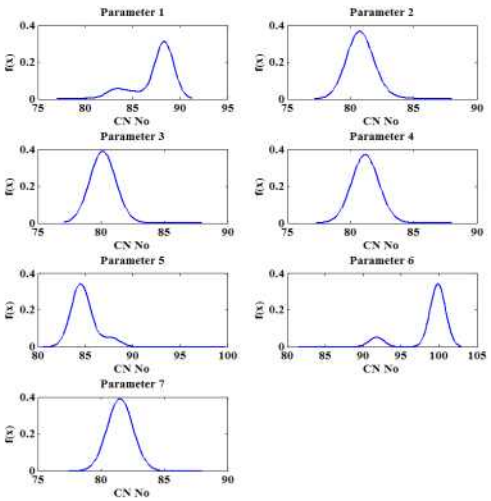
<그림 3-51> 강우-유출 매개변수 수렴 과정(CN, 2006)



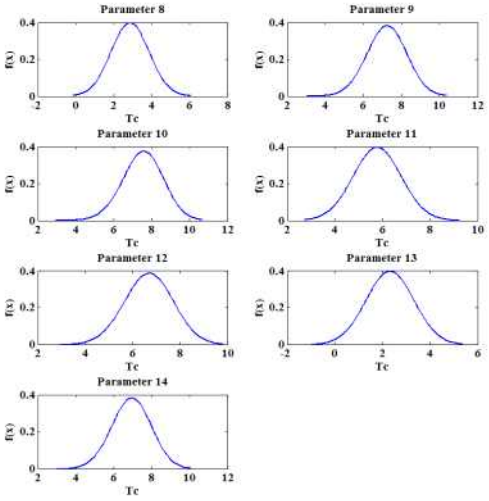
<그림 3-52> 강우-유출 매개변수 수렴 과정(Tc, 2006)



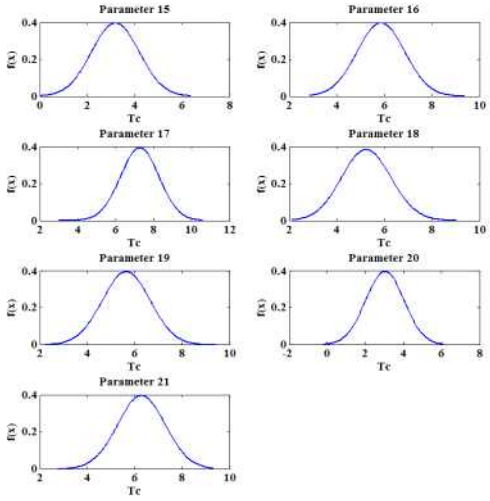
<그림 3-53> 강우-유출 매개변수 수렴 과정 (R, 2006)



<그림 3-54> Bayesian 모형을 유도된 매개변수의 사후분포(CN)

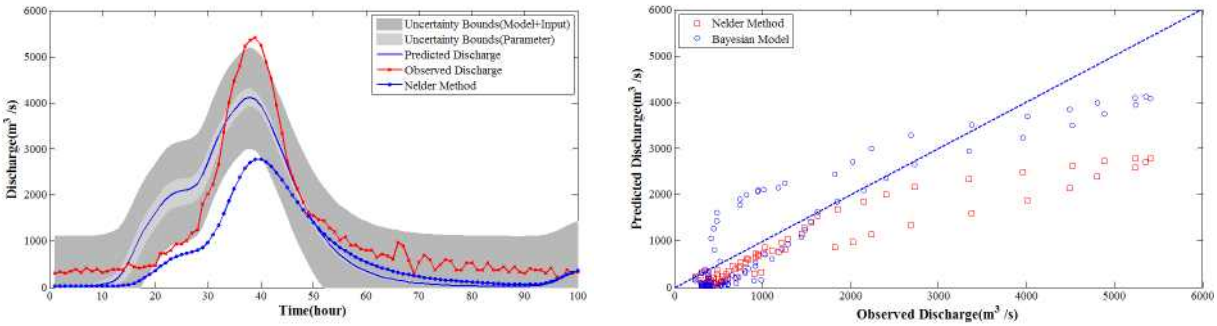


<그림 3-55> Bayesian 모형을 유도된 매개변수의 사후분포(Tc)

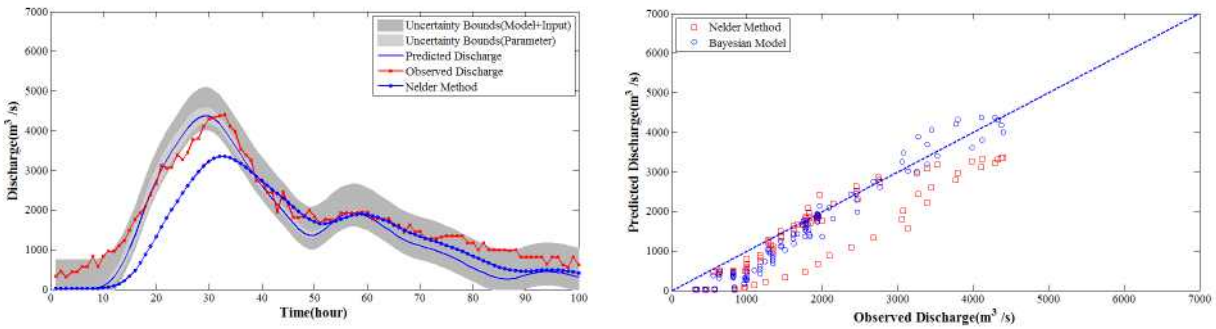


<그림 3-56> Bayesian 모형을 유도된 매개변수의 사후분포(R)

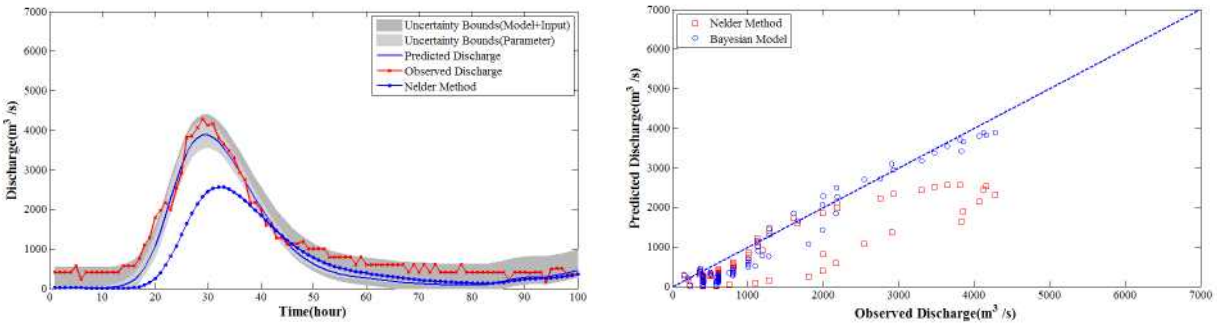
· 각 유역별 SCS 유출곡선번호, 도달시간, 저류상수의 사후분포로부터 2.5%, 50%, 97.5%의 Quantile을 추출하여 매개변수의 신뢰구간을 추정하였으며, <표 21>은 도출된 사후분포로부터 최종적으로 매개변수의 불확실성 범위를 나타낸 결과임. <그림 3-57~60>과 같이 BHEC-1 기법을 통해 모의된 수문곡선과 실측수문곡선을 시각적으로 비교해보면 거의 일치된 값을 보여주고 있으며, 기존에 HEC-1 매개변수 최적화 방법인 Nelder Method에 비해 모의능력 현저하게 개선되었음을 확인할 수 있음.



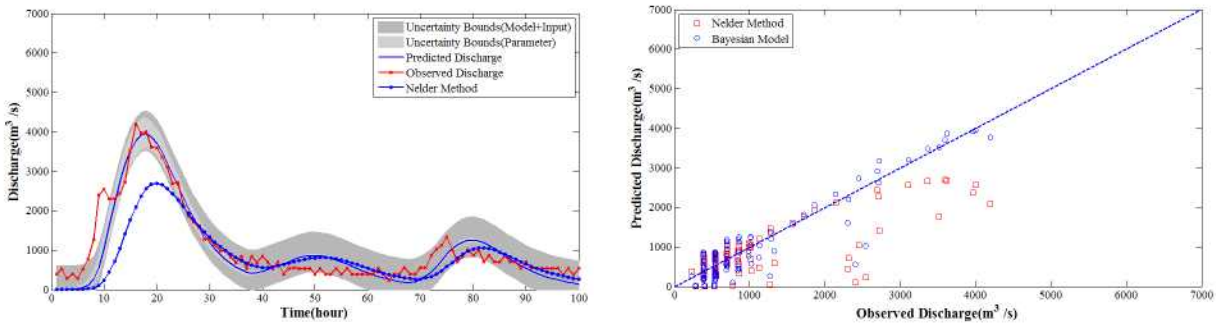
<그림 3-57> Bayesian 방법 및 Nelder방법으로 최적화된 수문곡선 비교(2003)



<그림 3-58> Bayesian 방법 및 Nelder방법으로 최적화된 수문곡선 비교(2006)



<그림 3-59> Bayesian 방법 및 Nelder방법으로 최적화된 수문곡선 비교(2007)



<그림 3-60> Bayesian 방법 및 Nelder방법으로 최적화된 수문곡선 비교(2009)

<표 3-21> 각 매개변수별 사후분포로부터 추정된 불확실성 구간(2006)

Parameters	Credible Bounds		
	Median	2.5%	97.5%
CN_1	89.38	88.02	99.39
CN_2	84.88	81.32	85.28
CN_3	80.19	80.01	87.07
CN_4	80.29	80.02	82.15
CN_5	80.94	80.89	81.43
CN_6	99.29	86.33	99.95
CN_7	85.48	80.70	82.27
Tc_1	3.09	2.78	3.10
Tc_2	6.08	5.75	6.26
Tc_3	5.74	5.66	6.45
Tc_4	6.66	6.28	6.78
Tc_5	5.25	5.20	5.34
Tc_6	2.06	1.83	2.08
Tc_7	4.00	3.92	5.34
R_1	2.98	2.96	3.14
R_2	5.91	5.45	5.97
R_3	6.54	5.72	6.60
R_4	6.52	5.82	6.60
R_5	6.37	5.62	6.45
R_6	3.21	2.93	3.22
R_7	5.98	5.94	6.14

· 이를 통계적인 지표를 통해 정량적으로 비교 검토하였으며, 본 연구에서는 통계적 평가 수단으로 상관계수(correlation coefficient, CC), 편의(bias), 평균제곱오차(root mean squre error, RMSE), Nash-Sutcliffe 계수(N-S), 일치계수(Index of agreement, IoA)를 사용하여 모형의 적합성을 평가하였음.

· Nash-Sutcliffe 계수는 통계적 기준으로 편의를 줄일 수 있는 무차원계수이고, 모의된 수문곡선이 실측 수문곡선과 잘 일치할수록 1에 가까워지는 성질이 있음. 이 기준은 무차원양으로서 자료의 개수에 관계없이 절대적 평가기준이 될 수 있음.

$$NS = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2} \tag{39}$$

$$F^2 = \sum_{i=1}^{n} [q_0(t) - q_s(t)]_i^2 \tag{40}$$

$$F_0^2 = \sum_{i=1}^{n} [q_0(t) - \overline{q_0}]_i^2 \tag{41}$$

· 여기서, q_0는 실측유량을 q_s는 모의 유량을 나타내며, 통계적으로 F^2는 총제곱오차를 나타내며 F_0^2는 총제곱편차를 의미함. 즉 전체변동에 대한 오차의 정도로 해석될 수 있음. 편의와 평균제곱오차는 다음 식 (42), (43)로 정의될 수 있음. 평균제곱오차는 비선형 유출모형의 수행능력을 평가하기 위함이며 모형 수행결과 평균적으로 어느 정도의 유량만큼 오차가 발생하는지를 나타내는 지표로 일종의 평균치라고 할 수 있음.

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n} (q_0(t) - q_s(t)) \tag{42}$$

$$\mathrm{SE} = \left(\frac{1}{\mathrm{n}} \sum_{\mathrm{t}=1}^{\mathrm{n}} (\mathrm{q_0(t)} - \mathrm{q_s(t)})^2 \right)^{0.5} \tag{43}$$

· 다음의 상관계수는 모형의 효율성을 나타내는 무차원 기준으로 1에 근접할수록 모형의 모의능력이 우수함을 뜻함.

$$CC = \frac{\sum_{t=1}^{n} (q_o(t) - \overline{q_0})(q_s(t) - \overline{q_s})}{(n-1)} \tag{44}$$

· 평균과 분산사이의 차이를 추정할 때 상관계수의 근거한 통계치의 민감성을 보완하고자 일치계수를 개발하였으며, 일치계수는 식 (45)과 같음. 일치계수는 0부터 1의 범위를 가지며 1에 가까울수록 모형의 예측능력이 우수함을 뜻함.

$$IoA = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{n}(q_0(t) - q_s(t))^2}{\sum_{t=1}^{n}\left(\left|q_s(t) - \overline{q_o}\right| + \left|q_o(t) - \overline{q_o}\right|\right)^2} \quad (45)$$

· 전체적인 검정결과를 통계적으로 분석하여 비교하면 <표 3-22>와 같고, 전체적으로 상관계수는 크게 차이를 보이지고 않고 있으나 N-S 계수, IoA, Bias, RMSE 등은 BHEC-1 모형이 상대적으로 우수한 모의능력을 나타내고 있음. 이밖에도 모형의 편의 및 자료자체의 기본 특성치를 모의하는데 있어서는 상대적으로 BHEC-1 방법이 향상된 결과를 보이고 있음. 무엇보다도 BHEC-1방법론의 가장 큰 장점은 매개변수의 불확실성을 정량화 할 수 있다는 것임.

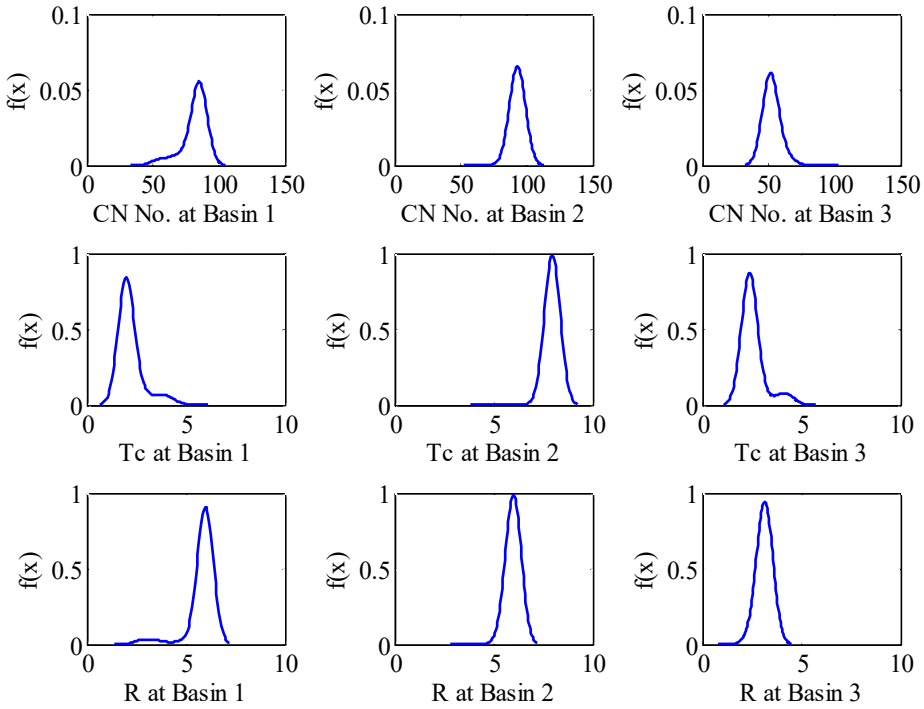
<표 3-22> 모의결과에 대한 통계적인 일치성 검토 결과

Statistics (Estimation)	2003(Year)		2006(Year)		2007(Year)		2009(Year)	
	Nelder	Bayesian	Nelder	Bayesian	Nelder	Bayesian	Nelder	Bayesian
R	0.96	0.91	0.91	0.98	0.91	0.98	0.79	0.93
COE	0.62	0.81	0.68	0.85	0.59	0.91	0.55	0.85
IoA	0.86	0.95	0.92	0.97	0.86	0.98	0.84	0.96
Bias	541.19	175.54	417.44	273.71	478.32	257.39	246.43	77.18
RMSE	840.68	589.79	601.11	411.45	703.67	333.95	650.41	376.58
Median(Obs.)	1,216.60		1,799.34		1128.51		1,082.40	
Median(Sim.)	675.41	1,041.06	1,381.90	1,525.63	650.19	871.12	835.97	1,005.22
SD(Obs.)	1,373.51		1,072.51		1103.63		975.77	
SD(Sim.)	806.02	1,298.75	999.36	1,288.79	770.68	1173.00	665.48	1,014.93
Cv(Obs.)	1.13		0.60		0.98		0.90	
Cv(Sim.)	1.19	1.25	0.72	0.84	1.19	1.35	0.80	1.01

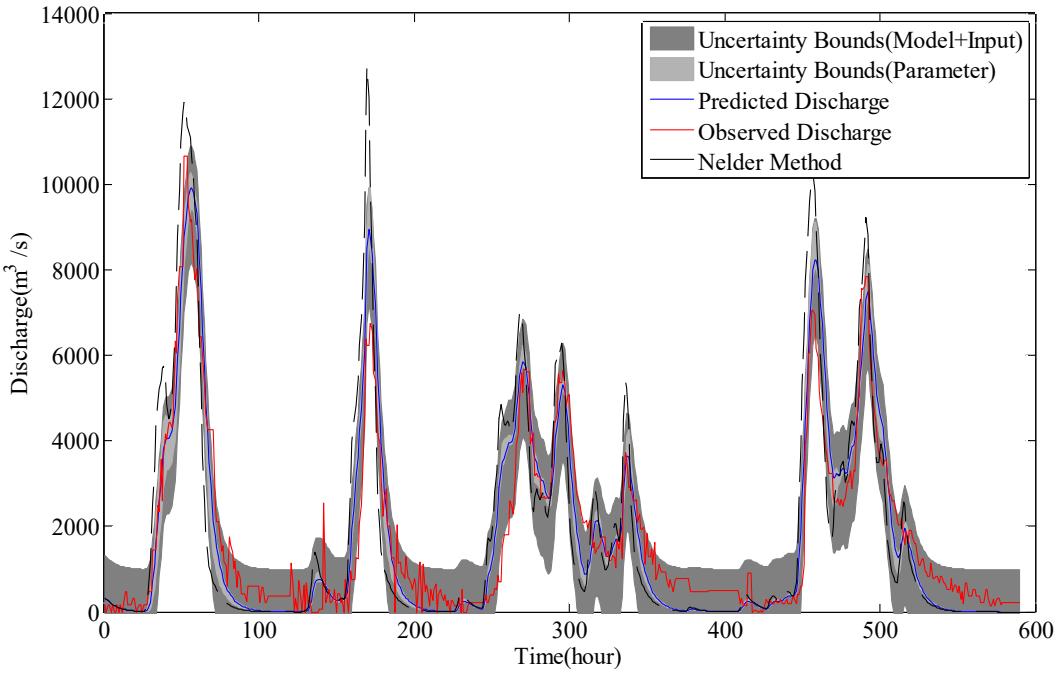
· 본 연구에서는 소양강댐을 추가로 연구분석을 수행하였으며 앞서 대청댐 분석시 적용한 기법을 동일하게 적용하여 분석하였음. 이때 소양강댐의 강우-유출 사상은 4개 사상을 합성한 하였음. 이러한 이유는 기존 HEC-1 모형의 경우 첨두유량 및 이중첨두 재현에 따른 문제점이 발생하지만 Bayesian HEC-1 모형의 경우 이와 같은 단점을 극복할 수 있는 모형임을 입증하기 위함임.

· <그림 3-61>의 경우 소양강댐 유역의 매개변수에 대한 도출된 사후분포를 도시한 결과임. 도출된 결과를 활용하여 매개변수의 사후분포로부터 유도된 결과로 강우-유

출 사상별로 불확실성의 구간을 제시한 그림은 <그림 3-62>와 같음.



<그림 3-61> Bayesian 모형을 유도된 유역별매개변수의 사후분포



<그림 3-62> Bayesian 방법 및 Nelder방법으로 최적화된 수문곡선 비교

· 산정결과 대청댐과 동일하게 기존 최적화 분석 기법인 Nelder 방법 보다 정확하게 관측값을 모의할 수 있었으며 불확실성 까지 정량화 할 수 있는 장점을 확인할 수

있었음. 여기서 파란실선은 Bayesian HEC-1을 이용한 확률홍수량의 중간(median)을 나타내며, 빨간신설은 관측값, 검은실선은 기존 최적화 방법인 Nelder 방법을 이용한 결과임.

· 또한 전체적인 검정결과틀 통계적으로 분석한 결과 기존 Nelder 기법보다 우수한 결과를 재 입증하였으며, 대부분의 통계치에서 비슷한 결과를 보였지만, Bias 및 RMSE 측면에서는 상당히 우수한 결과를 <표 3-23>과 같이 도출할 수 있었음.

<표 3-23> 모의결과에 대한 통계적인 일치성 검토 결과

Statistics	Bayesian HEC-1	Nelder
CC	0.947	0.879
N-S	0.863	0.589
IoA	0.969	0.919
Bias	45.569	-40.189
RMSE	769.351	1334.170
Mean(Obs.)	1778.666	
Mean(Sim.)	1733.096	1818.856
SD(Obs.)	2085.350	
SD(Sim.)	2359.699	2726.742

· 강우-유출과정의 물리적인 관계를 모의하기 위해서 다양한 강우-유출 모형이 개발되어 적용되고 있으나 사용되는 표본자료의 제약, 이상화 된 모형의 제약, 부정확 한 매개변수 추정 방법 등으로 인해 나타나는 불확실성은 신뢰성 있는 유출해석을 저해하는 주요 요인임.

· 국내외에서 단일사상에 대한 홍수량 분석시 미육군 공병단에서 개발된 HEC-1 모형이 주로 이용되고 있으며 일반적으로 모형의 검정을 위한 자료의 부족으로 추정되는 매개변수에 대한 불확실성이 매우 큰 문제가 있음. 그럼에도 불구하고 과거에 추정되었던 매개변수를 그대로 이용하거나 소수의 과거 사상만을 통하여 매개변수 최적화가 수행되기 때문에 홍수량의 신뢰성이 결여되는 문제점이 있음.

· 이러한 점에서 본 연구에서는 국내외에서 대표적으로 이용되는 HEC-1 단일강우사상 모형과 연동할 수 있는 Bayesian Markov Chain Monte Carlo(MCMC) 기반의 Bayesian HEC-1(BHEC-1) 통합 모델을 개발하였음. 본 연구를 통해 제안된 BHEC-1 모형을 대상으로 대청댐 유역에 실측 강우-유출 사상에 대해서 모형의 적합성을 평가하였으며 도출된 결론 및 제언은 다음과 같음.

· 첫째, 기존 HEC-1 모형의 모든 해석과정을 포함하면서 해석이 가능한 통합 모형을 개발할 수 있었고, 기존 해석에서 사용되었던 입력 자료들을 효과적으로 연계시킬 수 있는 통합모형으로서 적용이 가능할 것으로 판단됨.

· 둘째, 기존 HEC-1 모형에서 사용되는 최적화 기법은 다수의 유역을 대상으로 매개

변수 최적화 수행이 어려운 문제점이 존재하였음. 현재 실무에서는 HEC-1모형의 매개변수를 추정하는데 있어서 다수의 유역이 존재하는 경우 이를 수동으로 하나씩 매개변수를 보정하면서 매개변수 최적화를 수행하고 있어 해석시간이 오래 걸리고 추정된 매개변수의 신뢰성을 담보할 수 없는 단점이 있었으나 본 연구에서는 대청댐 유역의 7개 유역의 21개의 매개변수를 동시에 추정한 결과 해의 발산 없이 안정된 매개변수 추정이 가능하였음.

· 셋째, 본 연구에서 적용된 BHEC-1모형은 Bayesian 모형을 근간으로 하기 때문에 최종결과로서 매개변수들의 사후분포(posterior)의 추정이 가능한 장점이 있음. 따라서 자연적으로 강우-유출 모형 매개변수의 불확실성을 정량화 할 수 있었으며 이를 통해 모형과 입력 자료가 가지는 불확실성을 효과적으로 파악할 수 있었음.

라. Bayesian HEC-1 모형 실증댐 적용 결과

· 앞서 대청댐 유역을 대상으로 개발한 Bayesian HEC-1 모형을 활용하여 소양강댐 유역에 적용하였음. 이때 입력되는 확률강우량의 경우 앞서 "극치강수량 재현 오차율"에서 산정한 확률강우량을 이용하였음.

· 소양강 댐 유역의 경우 총 3개의 유역으로서 유역마다 3개의 매개변수가 최적화 대상이므로 총 9개의 매개변수를 최적화하기 위해 본 연구에서는 9개 매개변수 모두 정규분포로 가정하였음. 9개 매개변수에 대한 결합확률(joint probability)는 다음 식과 같음.

$$CN_n \sim N(\mu_{cn_n}, \sigma^2_{cn_n}) \qquad n=1,...,9 \tag{46}$$

$$Tc_n \sim N(\mu_{tc_n}, \sigma^2_{tc_n}) \qquad n=1,..,9 \tag{47}$$

$$R_n \sim N(\mu_{r_n}, \sigma^2_{r_n}) \qquad n=1,..,9 \tag{48}$$

$$p(CN_{1,...,9}, Tc_{1,...,9}, R_{1,...,9}) \propto 1 \tag{49}$$

· Bayes 정리에 의해서 매개변수 사후분포는 다음과 같이 전개될 수 있음.

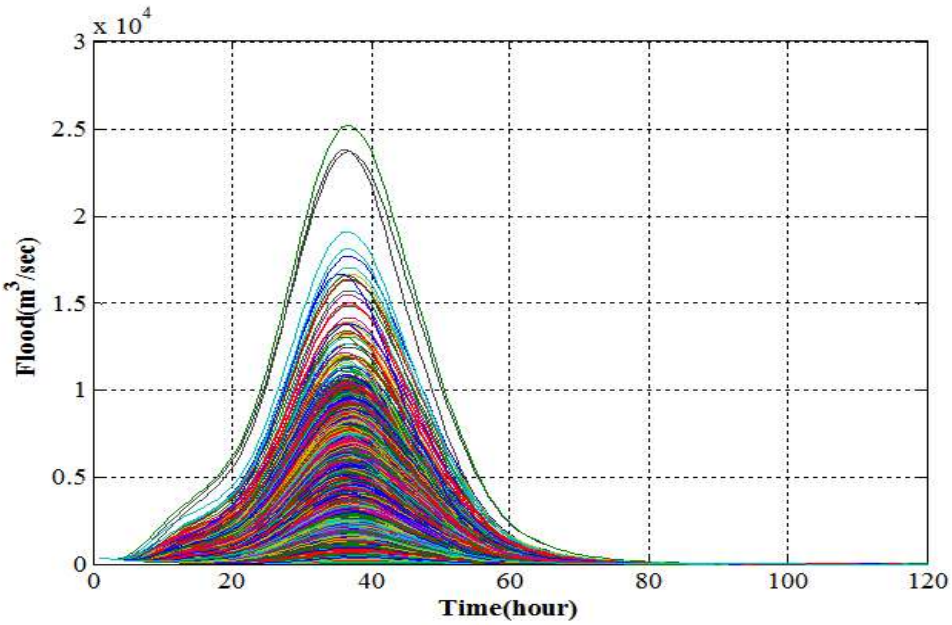
$$p(\Theta \mid y) = \frac{p(\Theta, y)}{p(y)} \propto p(y \mid \Theta) \cdot p(\Theta) \tag{50}$$

· 여기서, $\Theta = [CN_{1,...,9}, Tc_{1,...,9}, R_{1,...,9}]$는 전체매개변수들의 집합을 나타내며, $p(\Theta)$는 매개변수들의 사전분포를 $p(y \mid \Theta)$는 유입량자료 y의 우도함수(likelihood function)를 의미함.

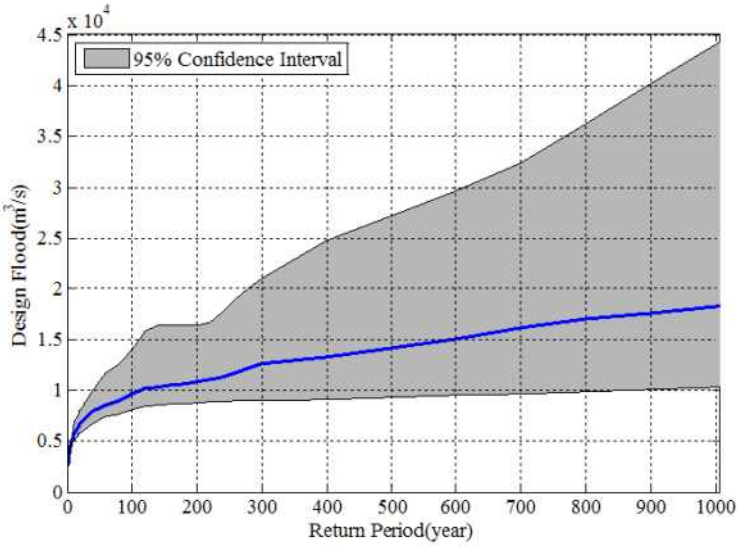
$$p(y \mid \Theta) \propto \prod_{t=1}^{T} N(y_t \mid \mu(t), \sigma) \cdot N(\mu(t) \mid CN_{1,..9}, Tc_{1,..9}, R_{1,..9}, \sigma^2_{cn}, \sigma^2_{tc}, \sigma^2_r) \tag{51}$$

· 식 (51)은 모든 매개변수에 대한 적분을 통해 직접적으로 추정하는 것은 불가능함. 따라서 본 연구에서는 앞서 언급한 MCMC 방법을 도입하여 매개변수들의 사후분포를 추정하게 됨. 각각의 매개변수들은 MCMC 방법 중 깁스표본법을 이용하여 추정하였으며 모형의 효과적인 매개변수 수렴(convergence)을 위해서 3개의 Chain을 독립적으로 시행하여 표본이 효과적으로 혼합(mixing)되도록 하였음.

· 다음 <그림 3-63>은 모의 확률강수량을 입력 자료로 하여 본 연구에서 개발한 Bayesian HEC-1 모형에 적용하여 홍수량 산정결과를 보여주고 있음. 이와 같은 결과는 HEC-1 매개변수들의 불확실성을 고려한 결과를 보여주고 있으며, <그림 3-64>은 이러한 그림에서 <그림 3-63>에서 보여 지는 결과를 이용한 확률홍수량 산정결과를 보여주고 있음. <그림 3-64>에서 600년 빈도 이상의 확률 홍수량의 경우 불확실성 구간이 급격하게 증가하고 있음을 확인 할 수 있음.



<그림 3-63> 매개변수의 불확실성을 고려한 HEC-1 모의 결과 앙상블

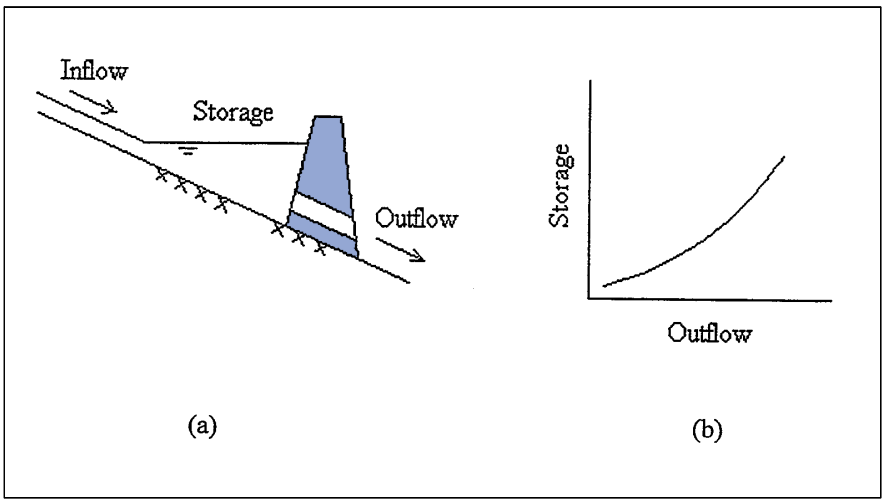


<그림 3-64> HEC-1 모형을 통한 확률홍수량 산정결과

3. 불확실성 분석을 위한 Bayesian 기반 댐 운영모델 개발

가. 댐 모의운영 기법

· 여수로(spillway)나 방수로(outlet)에 수문이 없는 저수지의 경우에는 <그림 3-65(a)>와 같이 유출량 및 저류량이 수위의 함수로서 표시될 수 있으므로 홍수추적이 비교적 간단하며 이를 단순저수지 홍수추적(Flood routing in a sample reservoir)이라 함. 한편 수문이 있는 경우일지라도 수문의 개폐정도가 고정되면 단순 저수지로 취급하여 홍수 추적을 계산할 수 있음. 즉, 단순 저수지로 유입수문곡선이 주어지면 <그림 3-65(b)>와 같은 단일 유출량-저류량 관계곡선을 통하여 유출수문곡선을 계산할 수 있음.



<그림 3-65> 수문 조작이 없는 저수지추적

· 다목적 댐의 주된 기능 중의 하나가 홍수조절인데, 홍수 규모를 저감시키기 위한 방

법으로는 최대유량(peak)을 저감시키는 방법, 일정량 이상 유량에 대한 지속시간을 단축시키는 방법, 홍수 파형을 변형시키는 방법 등이 있음. 이 중 최대 유량을 저감시키는 방법은 댐 하류 하천주변이 높은 홍수위로 인해 피해가 발생하기 때문에 적용되는 방법임. 이 중 최대 유량을 저감시키는 방법은 댐 하류 하천주변이 높은 홍수위로 인한 피해가 발생하기 때문에 적용되는 방법임.

- 홍수조절방식으로는 일반적으로 다음과 같이 자연조절방식, 일정률 조절방식 (Auto ROM(Reservoir Operation Method), 일정률-일정량 조절방식(Rigid ROM), Technical ROM, Spillway Rule Curve(SRC) ROM 등으로 구분할 수 있음.
- 첫째, 자연조절방식은 여수로에 수문을 두지 않는 자연유하식 댐에서 자연적으로 위어를 월류하면서 조절되는 방식으로 주로 소규모댐이나 단일목적댐에서 채용되는 방식임.
- 둘째, Auto ROM은 가장 간단한 저수지 운영방법으로 댐 수위가 목표수위(상시만수위 또는 홍수기 제한수위)보다 낮은 경우는 목표수위에 도달할 때 까지 방류를 실시하지 않고, 목표수위보다 높을 경우는 Spillway Discharge Rating Curve(Gate Full Open 기준)에 따라 유입량 전량을 방류시켜 목표수위를 유지하게 하는 방법임.
- 셋째, 일정률 조절방식은 하류 하천의 상태가 작은 규모의 홍수에도 피해가 발생하는 원시적인 경우에 홍수피해를 최소화할 수 있는 조절방식임. 60년대와 70년대에 국내에 건설된 다목적댐에서 주로 채택한 방식임.
- 넷째, 일정량 조절방식은 하류 하천이 어느 정도 홍수규모에는 방어능력이 있으나 하천 주변이 개발되어 큰 홍수가 발생하는 경우 급속도로 피해규모가 커지는 경우 채택하는 방식임.
- 다섯째, 일정률-일정량 조절방식(Rigid ROM)은 현재시간의 유입량 관측치와 댐 수위를 근거로 하여, 예측 유입량이 Peak에 이를 때까지는 유입량의 일정율을 방류하고, Peak에 도달한 후에는 Peak일 때의 유입량만큼의 일정량을 방류하는 방법임. Peak 유입이후의 일정방류량이 유입량과 같게 될 때 댐 수위도 동시에 기준수위(홍수위 또는 목표수위)에 도달하게 하여 댐의 홍수조절용량을 최대한 활용함.
- 여섯째, Technical ROM은 유입량 수문곡선에 의거 현재시점(예측시점)의 댐 수위로부터 댐 운영수위(계획홍수위, 홍수기 제한수위 또는 목표수위)까지의 홍수조절용량을 최대한 활용할 수 있는 방류량을 결정하는 방법으로서 현재시점 이후의 예측유입량을 댐에 저류함에 있어서 댐 저류량이 목표로 한 홍수조절용량과 일치되도록 방류량을 결정하는 방법임.
- 마지막으로, SRC ROM은 댐의 여수로 설계시의 빈도별 홍수량의 첨두유량을 감소시키기 위해 수문조작이 고려되어 미리 결정된 Spillway Rule Curve에 의해 홍수량을 조절하는 방식임.

나. Bayesian HEC-5 모의결과

- 본 연구에서는 소양강 댐의 수문작동여부에 따른 댐 파괴확률을 불확실성을 고려하여 분석하였음. 또한 최종적으로는 다양한 수문시나리오, 매개변수의 변동성 고려 등 종합적인 불확실성이 가능하도록 분석하여 불확실성의 정량화가 가능한 모형을 개발하였음.
- 앞에서도 언급하였듯이 본 연구는 댐의 위험도 분석에서 시스템 전반의 파괴 확률을 기반으로한 해석 모형을 개발하는 것이 주요 목적임. 다양한 파괴형태를 고려하여 댐

의 파괴 확률을 정량적으로 제시하였으며, 최근 급증하는 기후변화의 영향으로 예상하지 못한 큰 홍수가 발생 하였을 때 소양강 댐의 주여수로(5개) 및 비상여수로(4개)의 작동여부에 따른 소양강 댐의 방류능력을 산정하였음. 또한 주여수로만을 고려한 소양강 댐의 방류능력을 산정하여 도시하였음.

<표 3-24> 주여수로, 보조여수로의 작동 여부에 따른 확률

Full Gate Open			Gate Failure #1		
AEP	Max Stage	Max In	AEP	Max Stage	Max In
0.5	190.5	2406.9	0.5	190.6	2242.6
0.2	191.4	3118.1	0.2	191.6	2955.0
0.1	192.1	3725.7	0.1	192.3	3548.7
0.05	192.8	4395.8	0.05	193.0	4180.6
0.02	193.8	5462.8	0.02	194.1	5208.9
0.01	194.8	5500.2	0.01	195.0	6325.8
0.002	197.9	8296.4	0.002	197.9	9284.7
0.001	198.0	10610.6	0.001	198.3	9815.7
0.0005	199.7	12976.1	0.0005	200.2	12341.2
0.0002	201.0	14986.6	0.0002	201.6	14279.6
5.60E-05	206.0	23828.8	5.60E-05	206.8	22572.5
5.00E-05	206.5	24657.6	5.00E-05	207.3	23349.5
4.00E-05	207.4	26289.5	4.00E-05	208.3	24879.3
3.00E-05	208.5	28393.3	3.00E-05	209.5	26851.5
2.00E-05	210.2	31358.5	2.00E-05	211.2	29631.3
1.00E-05	213.0	36427.5	1.00E-05	214.1	34383.3
Gate Failure #2			Gate Failure #3		
AEP	Max Stage	Max In	AEP	Max Stage	Max In
0.5	190.8	2075.6	0.5	191.0	1901.3
0.2	191.8	2772.3	0.2	192.1	2571.1
0.1	192.6	3344.9	0.1	192.9	3109.3
0.05	193.4	3949.7	0.05	193.7	3681.4
0.02	194.5	4929.6	0.02	194.9	4596.8
0.01	195.4	5776.5	0.01	195.8	5309.6
0.002	198.0	8330.8	0.002	198.2	7441.4
0.001	198.6	9021.4	0.001	199.1	8328.7
0.0005	200.8	11557.6	0.0005	201.5	10825.1
0.0002	202.3	13492.9	0.0002	203.1	12561.3
5.60E-05	207.9	21288.7	5.60E-05	209.1	19803.5
5.00E-05	208.4	22021.6	5.00E-05	209.6	20485.2
4.00E-05	209.4	23464.6	4.00E-05	210.7	21827.6
3.00E-05	210.7	25324.9	3.00E-05	212.1	23558.3
2.00E-05	212.5	27947.0	2.00E-05	214.0	25997.5
1.00E-05	215.6	32429.4	1.00E-05	217.4	30167.4

<표 3-24> 주여수로, 보조여수로의 작동 여부에 따른 확률(계속)

Gate Failure #4			Gate Failure #5		
AEP	Max Stage	Max In	AEP	Max Stage	Max In
0.5	191.2	1719.2	0.5	191.4	1518.8
0.2	192.4	2349.6	0.2	192.8	2089.2
0.1	193.3	2848.1	0.1	193.7	2536.9
0.05	194.1	3373.9	0.05	194.6	3012.6
0.02	195.4	4223.4	0.02	196.0	3774.6
0.01	196.4	4887.1	0.01	197.0	4382.1
0.002	198.8	6733.7	0.002	199.6	6051.9
0.001	199.8	7620.9	0.001	200.7	6871.5
0.0005	202.4	9949.6	0.0005	203.5	8964.2
0.0002	204.1	11564.5	0.0002	205.3	10565.4
5.60E-05	210.5	18179.7	5.60E-05	212.3	16276.5
5.00E-05	211.1	18802.3	5.00E-05	213.0	16791.7
4.00E-05	212.3	20028.1	4.00E-05	214.3	17806.1
3.00E-05	213.8	21608.5	3.00E-05	215.9	19114.0
2.00E-05	215.9	23835.9	2.00E-05	218.3	20957.3
1.00E-05	219.5	27643.7	1.00E-05	222.3	24108.5
Gate Failure #6			Gate Failure #7		
AEP	Max Stage	Max In	AEP	Max Stage	Max In
0.5	191.8	1253.0	0.5	192.3	938.0
0.2	193.3	1742.2	0.2	193.9	1316.7
0.1	194.3	2125.7	0.1	195.0	1613.3
0.05	195.3	2538.2	0.05	196.2	1935.9
0.02	196.8	3175.1	0.02	197.8	2433.2
0.01	197.9	3707.6	0.01	199.0	2842.1
0.002	200.7	5124.7	0.002	202.1	3923.1
0.001	202.0	5828.6	0.001	203.5	4488.6
0.0005	205.0	7565.0	0.0005	206.8	5956.8
0.0002	206.9	8887.6	0.0002	209.1	6859.2
5.60E-05	214.8	13681.4	5.60E-05	218.0	10391.2
5.00E-05	215.5	14117.2	5.00E-05	218.8	10721.5
4.00E-05	217.0	14975.3	4.00E-05	220.5	11371.9
3.00E-05	218.8	16081.6	3.00E-05	222.6	12210.4
2.00E-05	221.5	17640.8	2.00E-05	225.6	13392.3
1.00E-05	226.0	20306.3	1.00E-05	230.7	15412.6

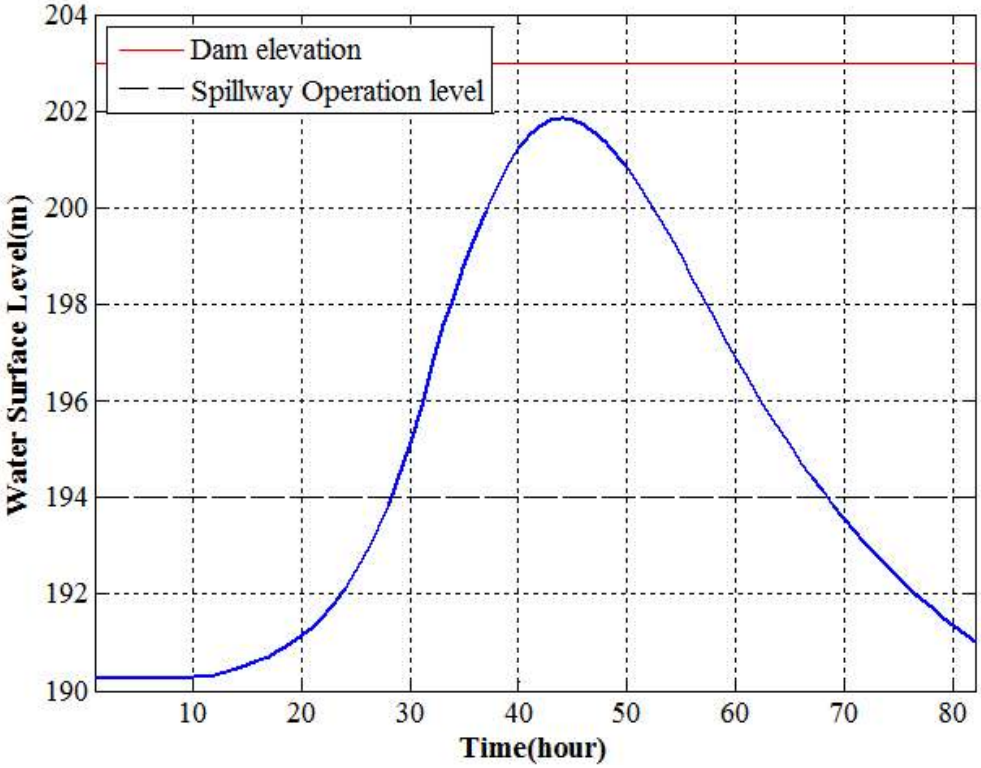
<표 3-25> 주여수로만의 작동 여부에 따른 확률

Full Gate Open			Gate Failure #1		
AEP	Max Stage	Max In	AEP	Max Stage	Max In
0.5	191.3	1610.7	0.5	191.6	1395.3
0.2	192.6	2221.2	0.2	193.0	1939.9
0.1	193.5	2706.1	0.1	194.0	2375.7
0.05	194.4	3227.8	0.05	194.9	2842.2
0.02	195.7	4053.8	0.02	196.3	3567.4
0.01	196.7	4693.6	0.01	197.4	4147.1
0.002	199.1	6425.1	0.002	200.0	5678.0
0.001	200.2	7273.8	0.001	201.2	6478.6
0.0005	202.9	9440.6	0.0005	204.1	8333.7
0.0002	204.7	10950.9	0.0002	206.0	9817.3
5.60E-05	211.4	17208.7	5.60E-05	213.4	15141.5
5.00E-05	212.0	17796.7	5.00E-05	214.1	15623.4
4.00E-05	213.2	18954.4	4.00E-05	215.4	16572.3
3.00E-05	214.8	20447.0	3.00E-05	217.2	17795.7
2.00E-05	217.0	22550.7	2.00E-05	219.6	19519.9
1.00E-05	220.8	26147.0	1.00E-05	223.9	22467.5
Gate Failure #2			Gate Failure #3		
AEP	Max Stage	Max In	AEP	Max Stage	Max In
0.5	192.0	1145.4	0.5	192.4	855.4
0.2	193.5	1614.9	0.2	194.1	1216.3
0.1	194.5	1987.7	0.1	195.2	1502.0
0.05	195.6	2385.2	0.05	196.4	1804.1
0.02	197.1	2980.5	0.02	198.1	2261.2
0.01	198.2	3475.1	0.01	199.3	2629.9
0.002	201.1	4783.0	0.002	202.4	3635.8
0.001	202.4	5454.5	0.001	203.9	4103.6
0.0005	205.5	6986.9	0.0005	207.3	5441.8
0.0002	207.6	8325.9	0.0002	209.6	6269.0
5.60E-05	215.8	12618.8	5.60E-05	218.9	9490.8
5.00E-05	216.6	13020.3	5.00E-05	219.7	9792.3
4.00E-05	218.1	13811.0	4.00E-05	221.4	10385.9
3.00E-05	220.0	14830.4	3.00E-05	223.6	11151.2
2.00E-05	222.8	16267.1	2.00E-05	226.7	12229.8
1.00E-05	227.5	18723.1	1.00E-05	232.0	14073.7

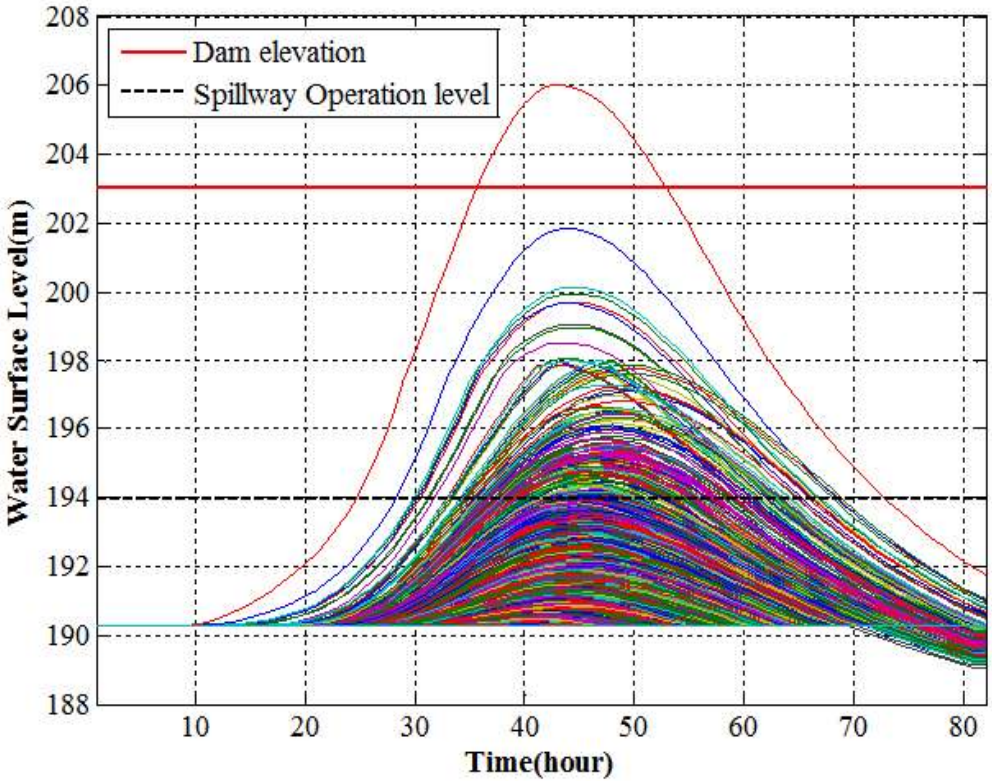
<표 3-25> 주여수로만의 작동 여부에 따른 확률(계속)

Gate Failure #4		
AEP	Max Stage	Max In
0.5	193.0	491.3
0.2	194.9	707.0
0.1	196.2	876.5
0.05	197.5	1053.7
0.02	199.3	1315.5
0.01	200.8	1543.0
0.002	204.2	2095.1
0.001	205.9	2393.6
0.0005	209.7	3146.8
0.0002	212.5	3623.5
5.60E-05	223.0	5461.8
5.00E-05	224.0	5634.2
4.00E-05	226.0	5973.8
3.00E-05	228.5	6411.6
2.00E-05	232.0	7028.6
1.00E-05	238.1	8083.4

· 소양강 댐의 주여수로 및 보조여수로의 작동여부를 고려하여 시간에 따른 수위와 이를 10,000번 모의한 앙상블 자료를 아래 그림과 같이 도시하였다. <그림 3-66~85>는 10,000번의 앙상블 자료를 활용한 결과로서 동일한 홍수량에 대하여 댐의 여수로 작동에 따른 HEC-5 모의 결과를 보여주고 있음. <그림 3-66>은 소양강 댐의 9개 여수로가 모두 작동했을 경우의 결과로 댐 최고 수위를 나타내는 빨간 실선에 1m 부족한 202m까지 수위가 상승한 42시간 이후로 수위가 급격히 하강함으로서 특정 홍수량에 안전함을 보여주고 있음.

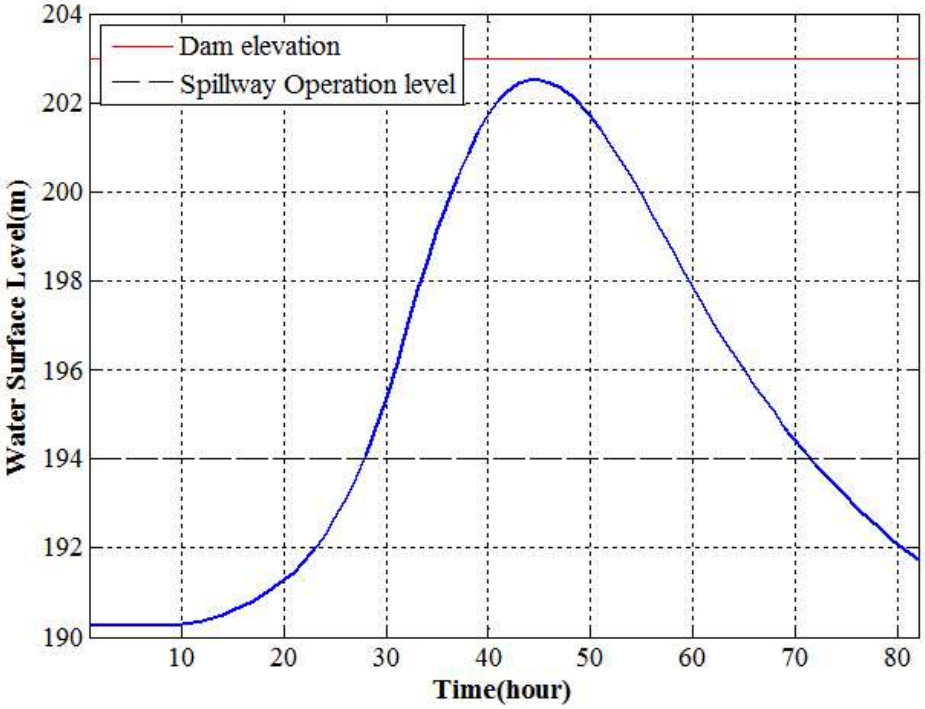


<그림 3-66> 주여수로 및 비상여수로의 모든 수문이 작동할 때

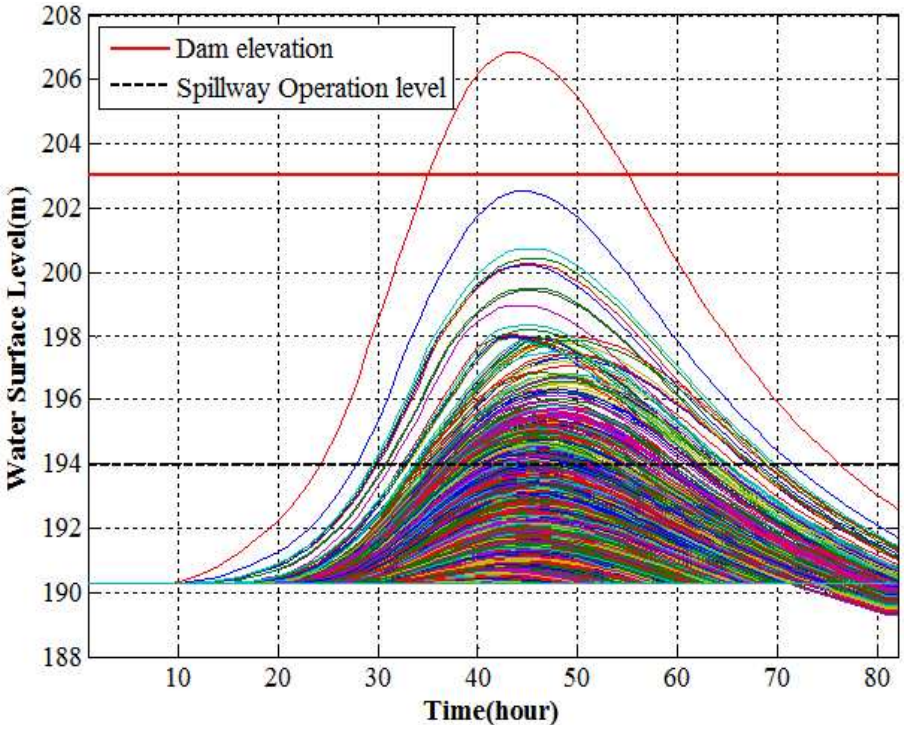


<그림 3-67> 주여수로 및 비상여수로의 모든 수문이 작동할 때

· <그림 3-67>는 10,000개의 앙상블에 대한 HEC-5 모의결과를 보여주고 있으며 모든 수문이 작동할 때, 댐 최고수위를 초과하는 사상이 1번 발생하고 있음을 확인할 수 있음.



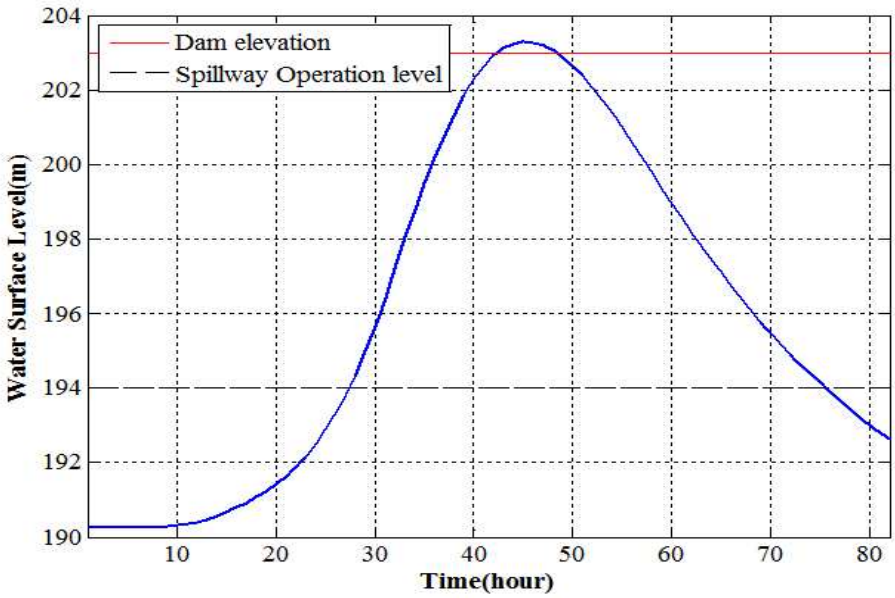
<그림 3-68> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 1개 파괴시



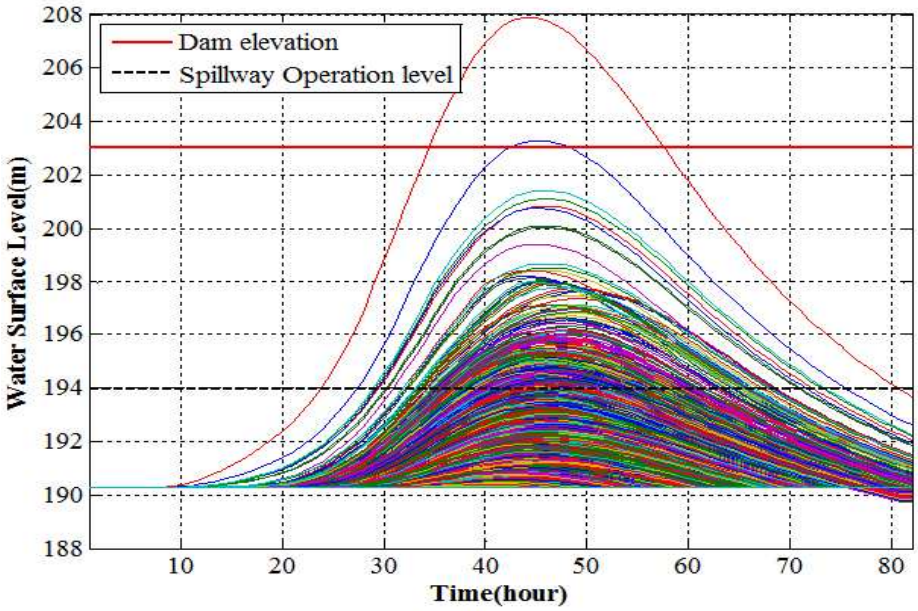
<그림 3-69> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 1개 파괴시 앙상블

· <그림 3-68>은 주여수로 1개 파괴시 10,000개의 앙상블에 대한 HEC-5 모의결과로서 <그림 3-67>의 결과보다 전체 수위가 상승하였음을 확인할 수 있음.

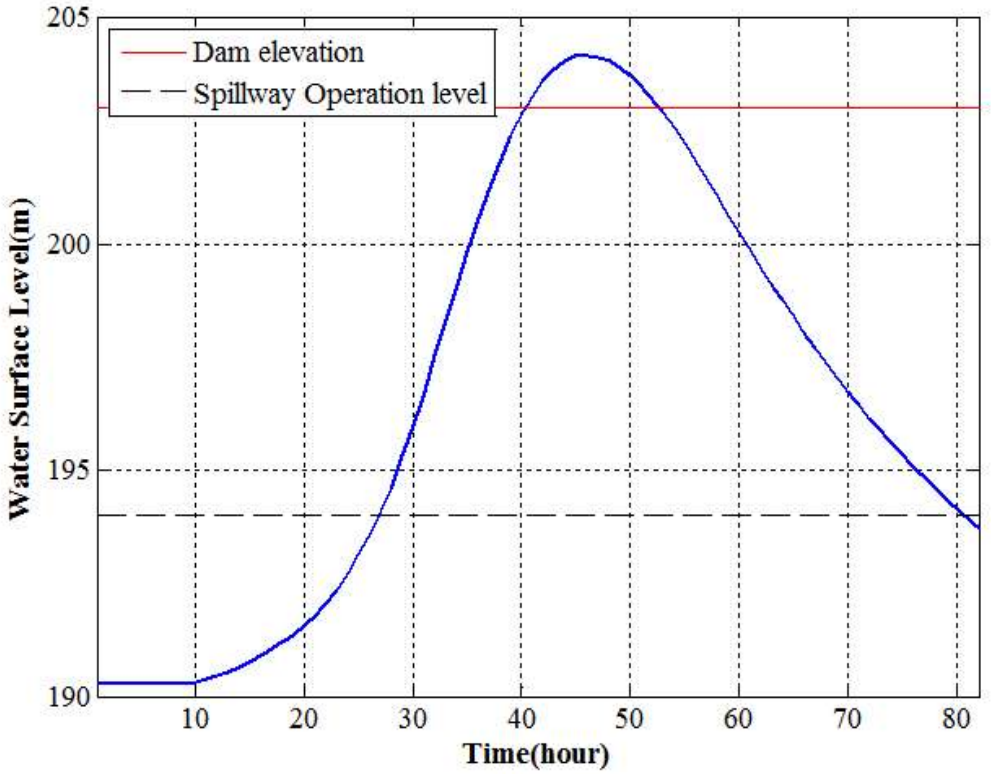
· 이와 같이 아래 그림들은 여수로 파괴형태에 따른 HEC-5 모의결과를 보여주고 있으며, 수문의 파괴 개수가 늘어날수록 동일 홍수사상에 대한 수위가 상승하며, 수위 하강시 소요되는 시간이 증가하고 있음을 확인할 수 있었음. 동일 홍수 사상을 적용한 예시에서 수문 2개가 파괴되는 경우부터 홍수사상에 따른 댐 파괴가 나타났으며, 10,000개의 앙상블에 대한 HEC-5 모의결과 댐 파괴로 사상이 증가하고 있음. 이러한 결과는 수문의 파괴로 인하여 동일 수위에 대한 연초과확률이 증가함으로서 댐 파괴가 일어날 위험도가 커지고 있음을 보여줌.



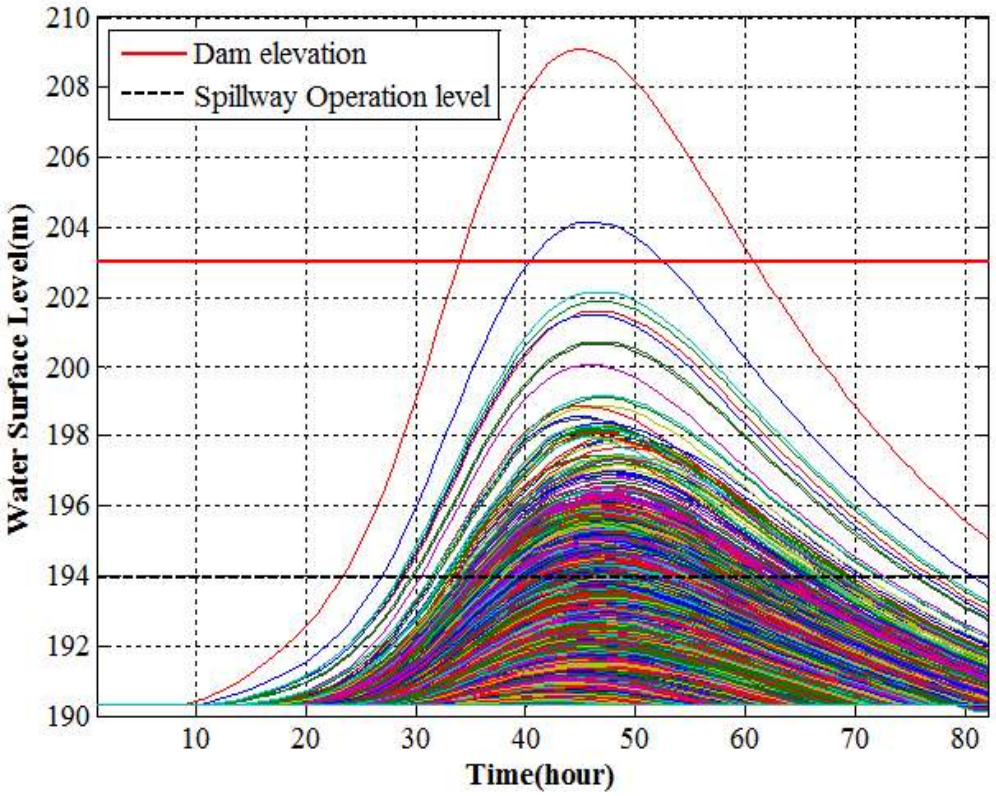
<그림 3-70> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 2개 파괴시



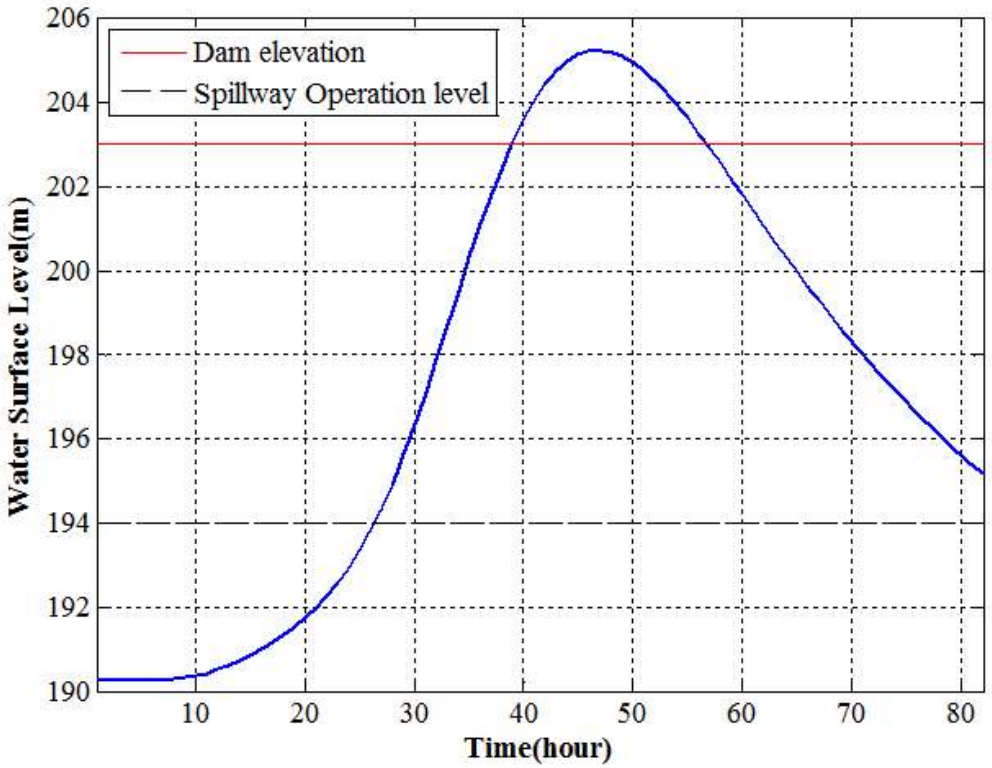
<그림 3-71> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 2개 파괴시 앙상블



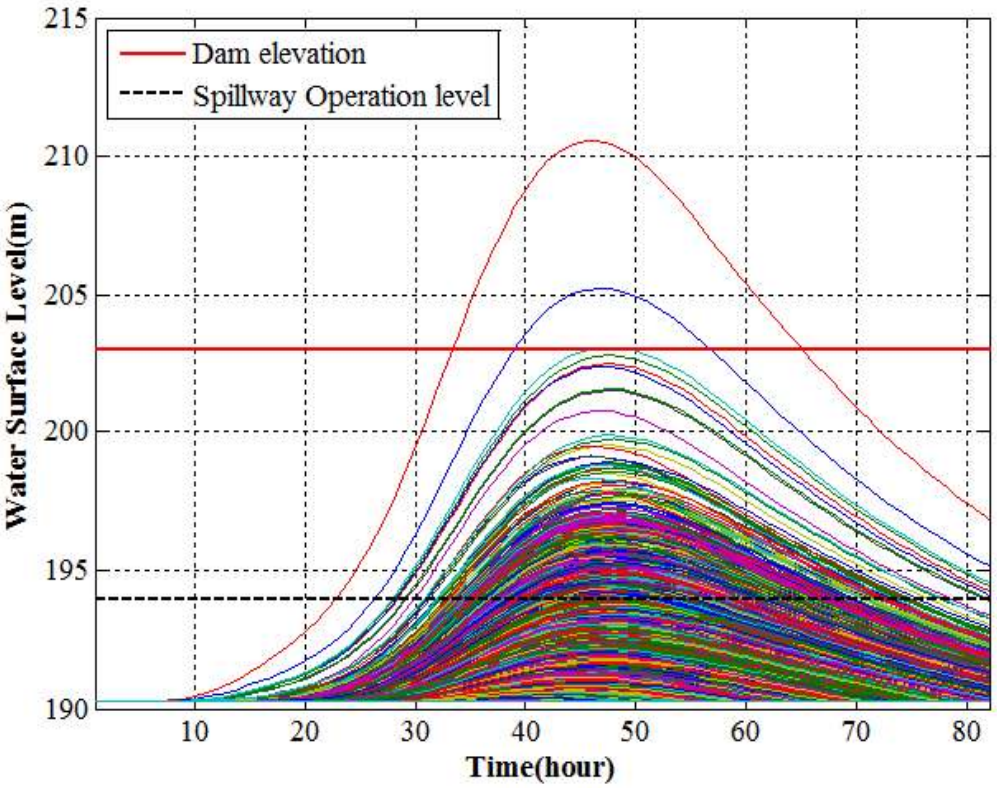
<그림 3-72> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 3개 파괴시



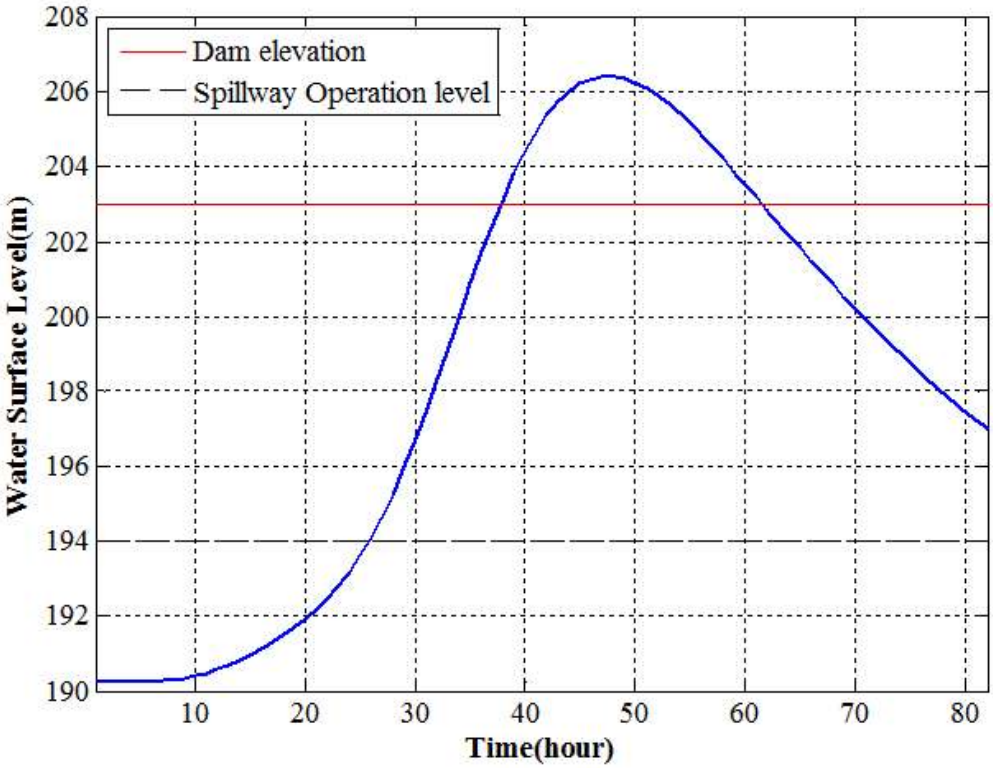
<그림 3-73> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 3개 파괴시 앙상블



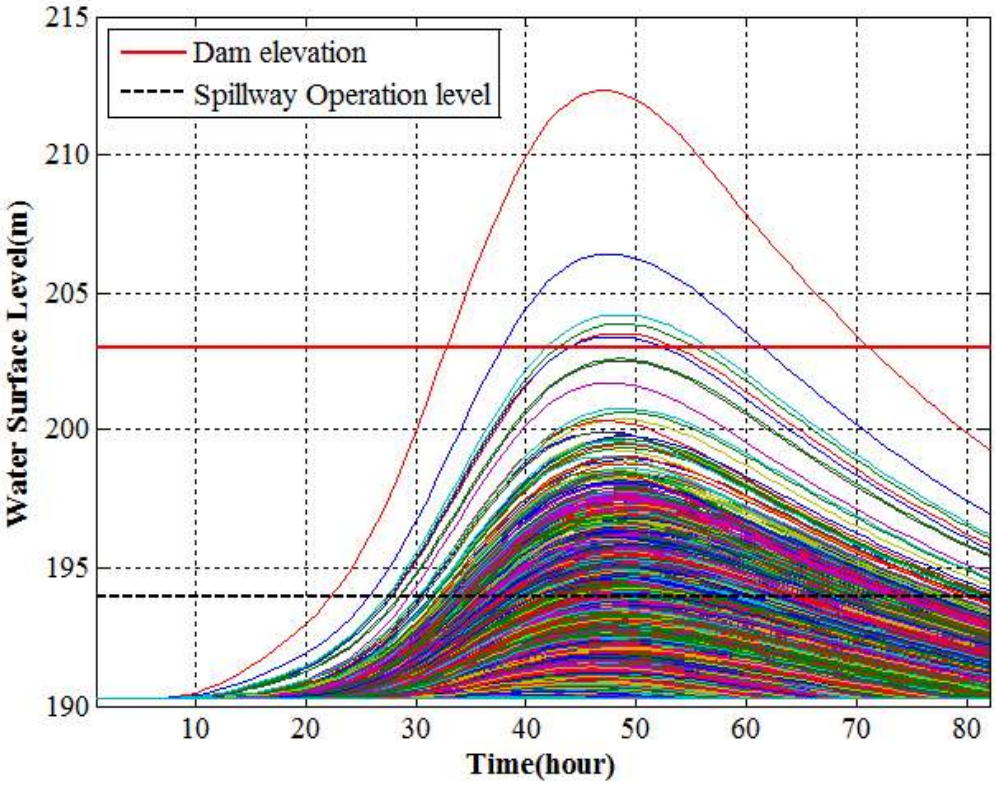
<그림 3-74> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 4개 파괴시



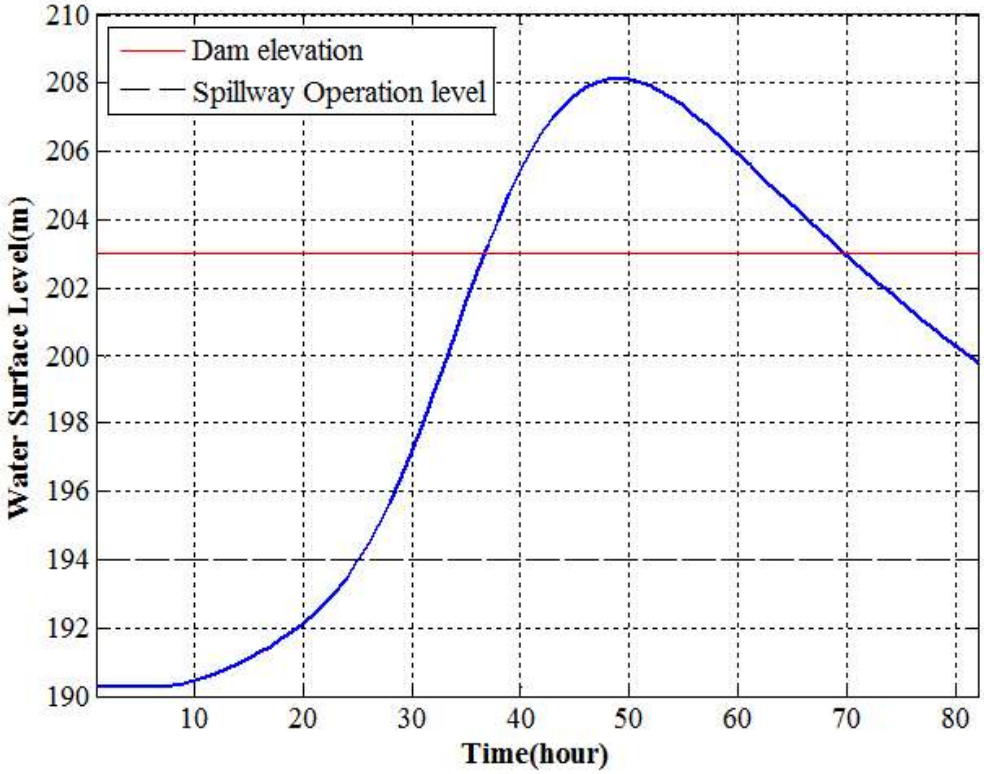
<그림 3-75> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 4개 파괴시 앙상블



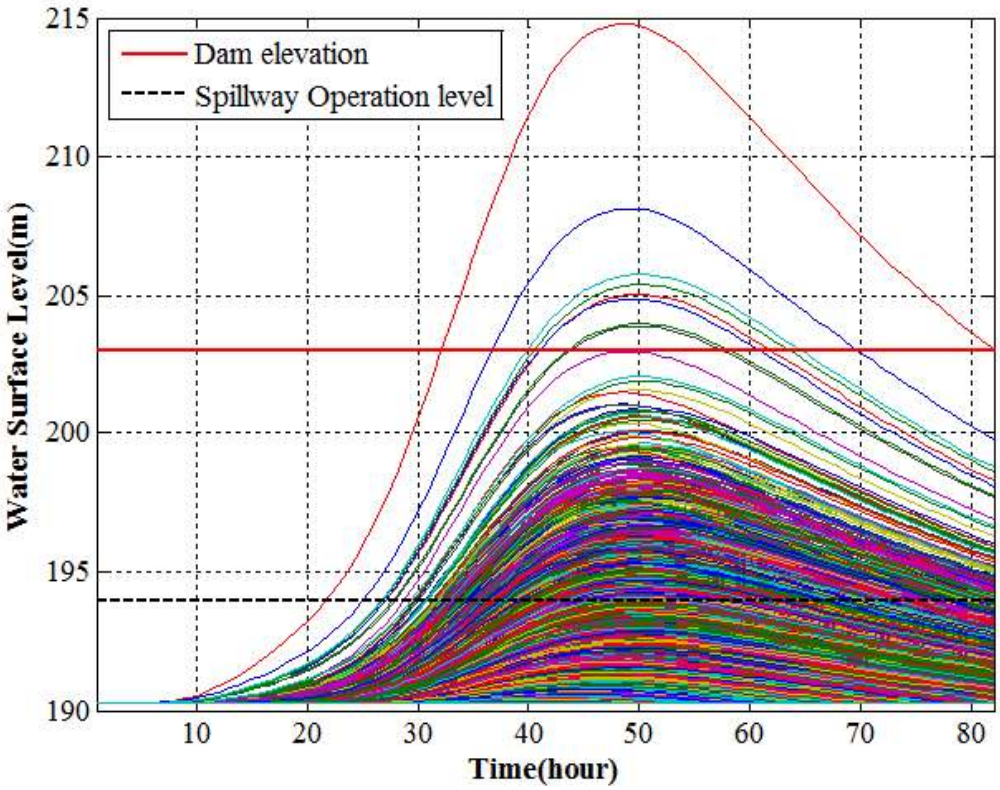
<그림 3-76> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 5개 파괴시



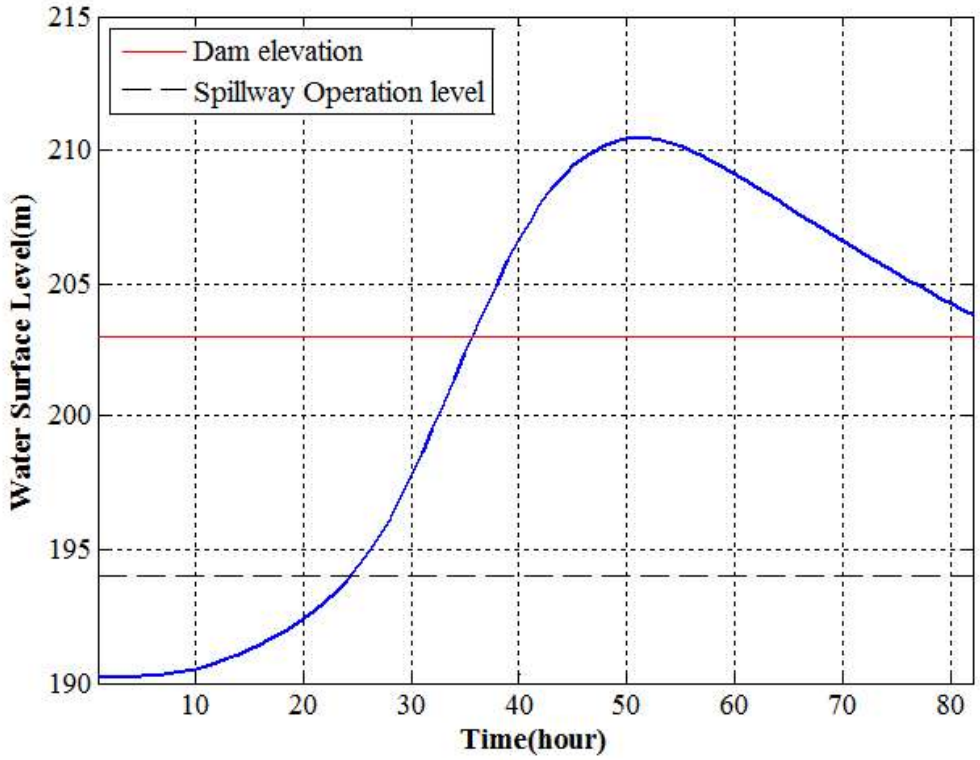
<그림 3-77> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 5개 파괴시 앙상블



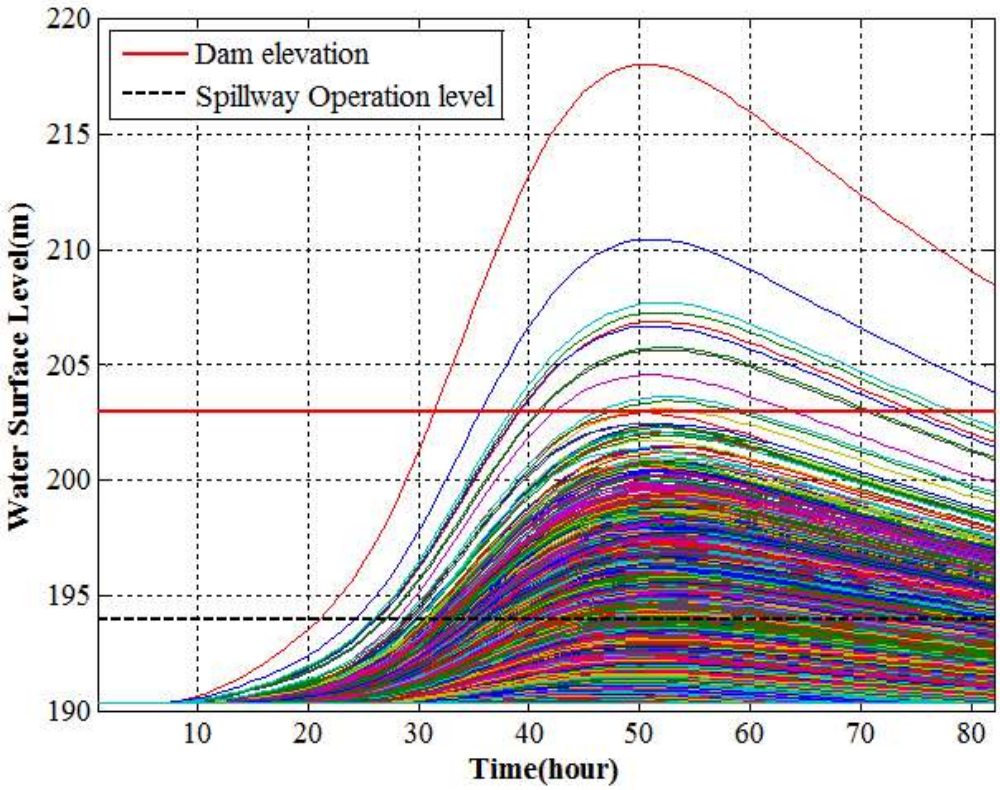
<그림 3-78> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 7개 파괴시



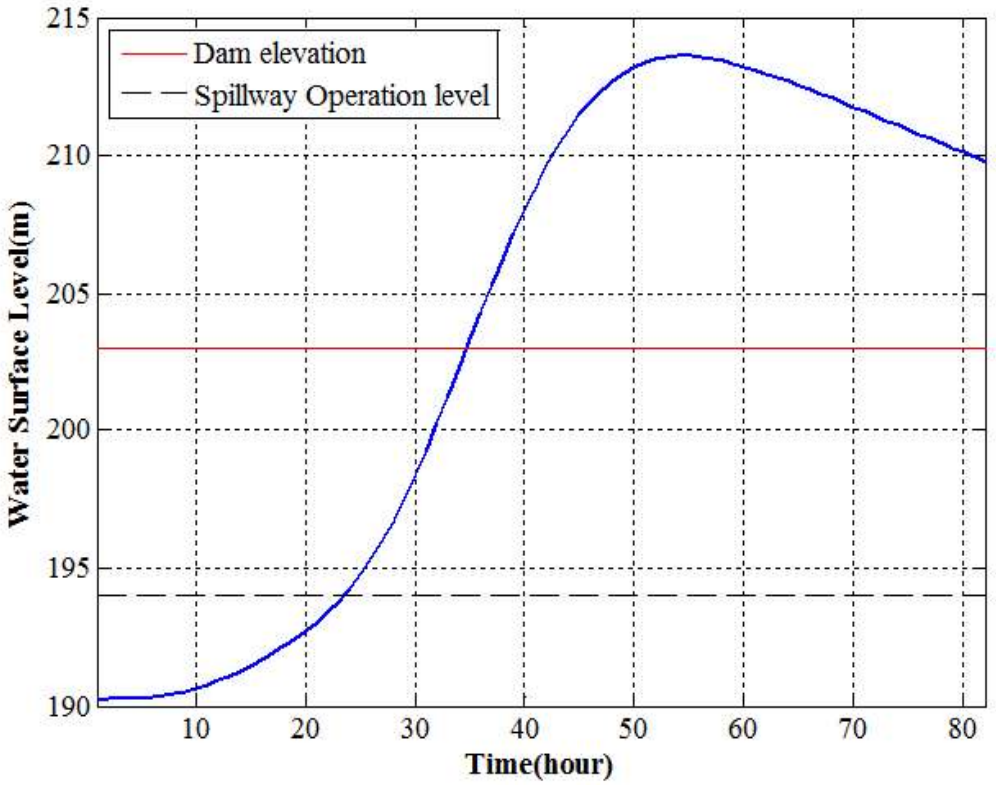
<그림 3-79> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 7개 파괴시 앙상블



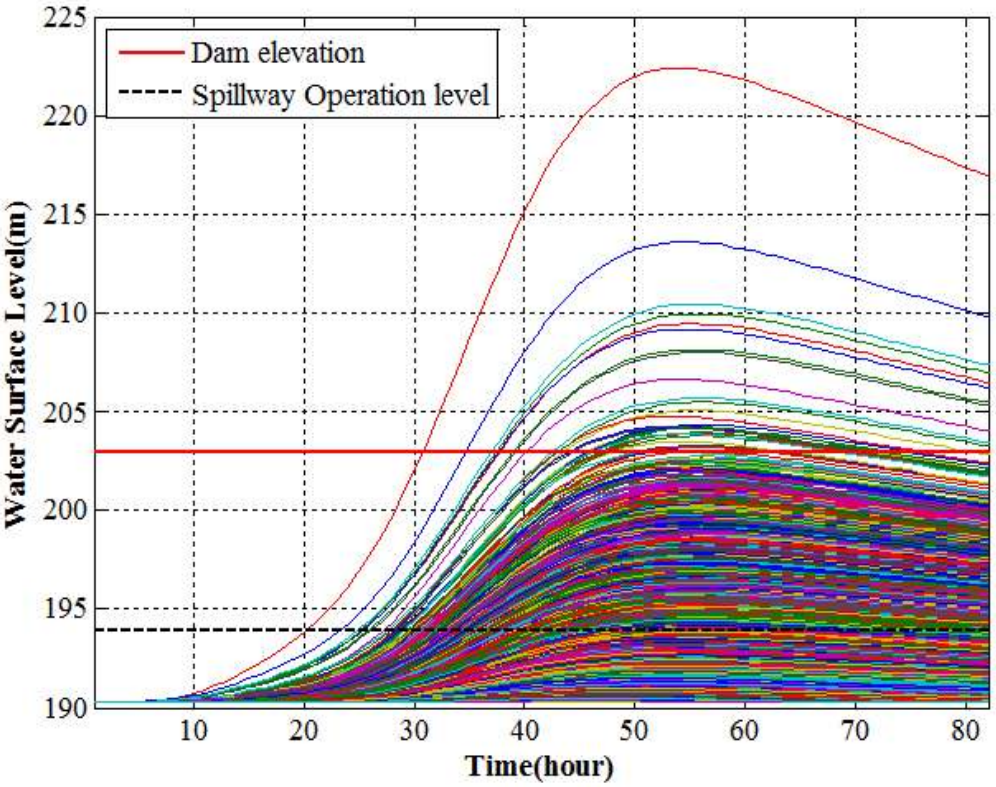
<그림 3-80> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 7개 파괴시



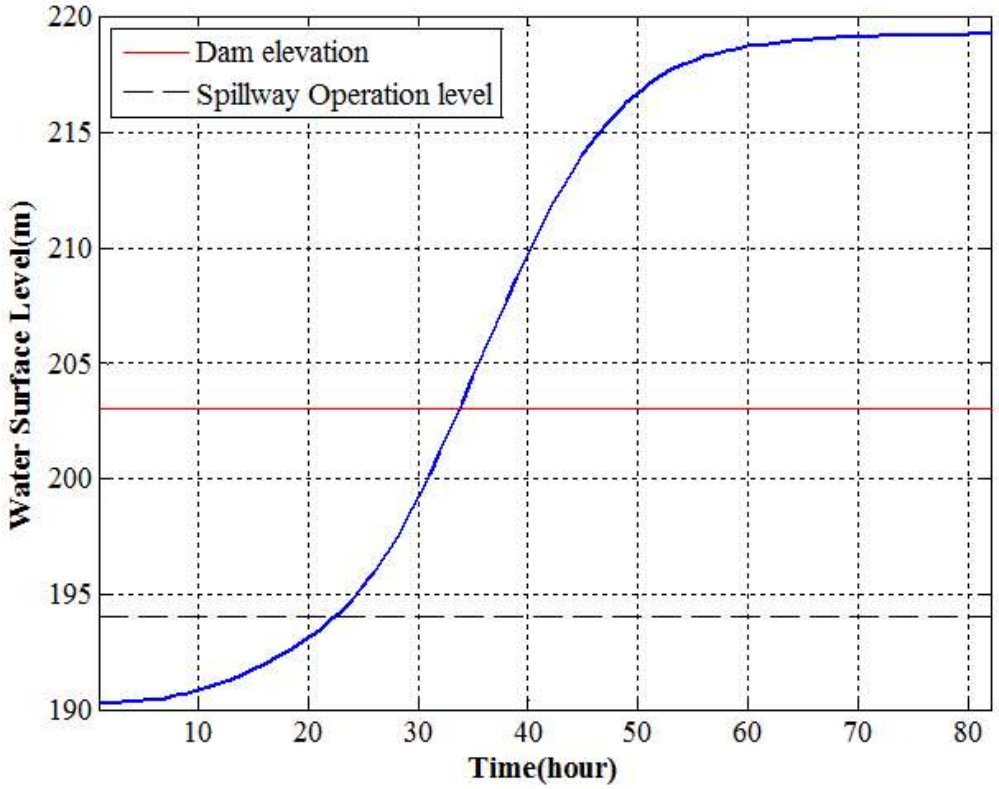
<그림 3-81> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 7개 파괴시 앙상블



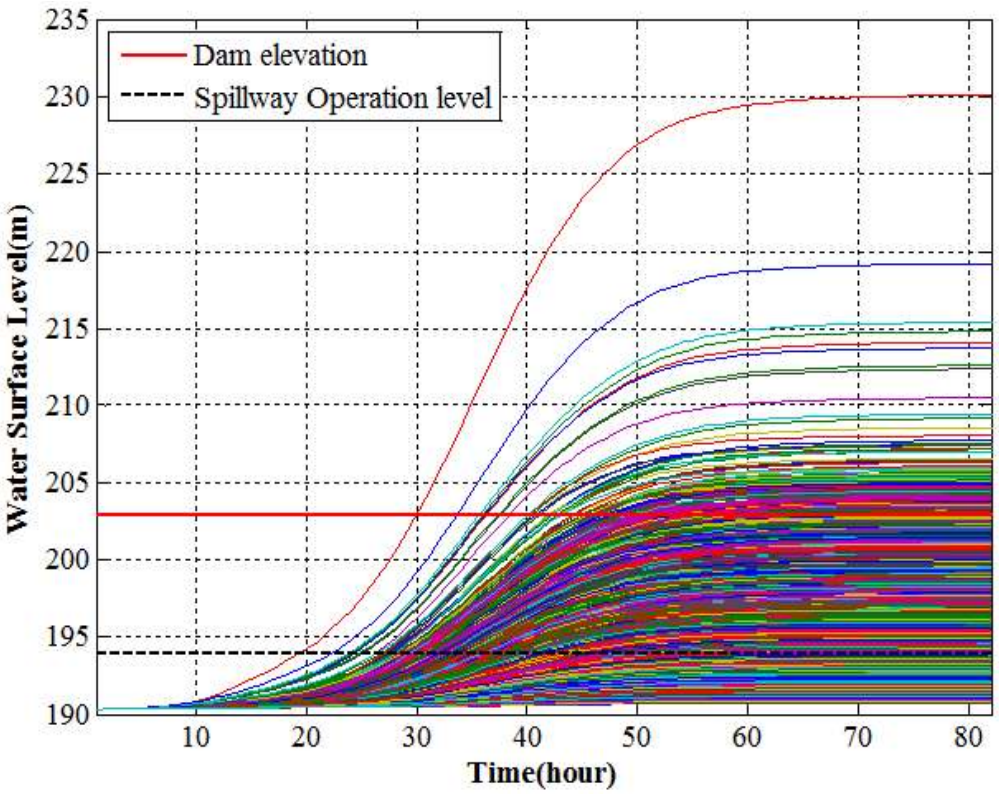
<그림 3-82> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 8개 파괴시



<그림 3-83> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 8개 파괴시 앙상블

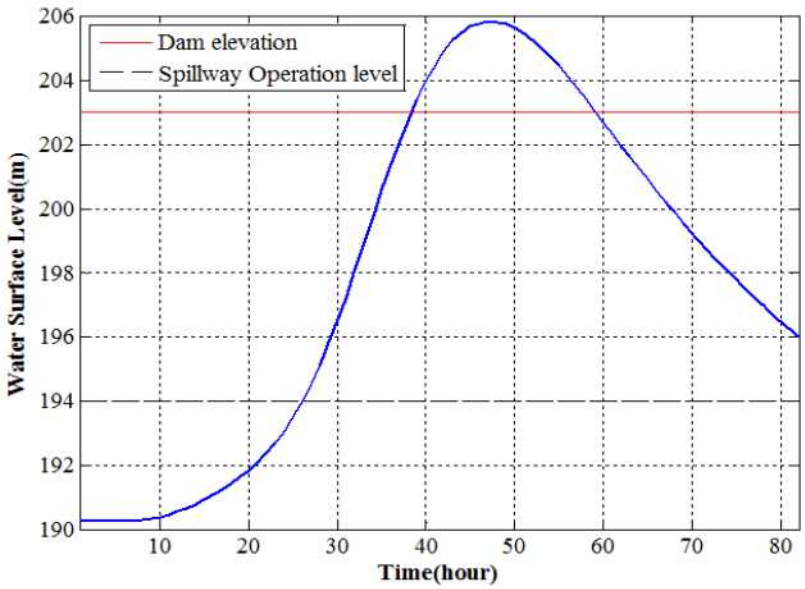


<그림 3-84> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 9개 파괴시

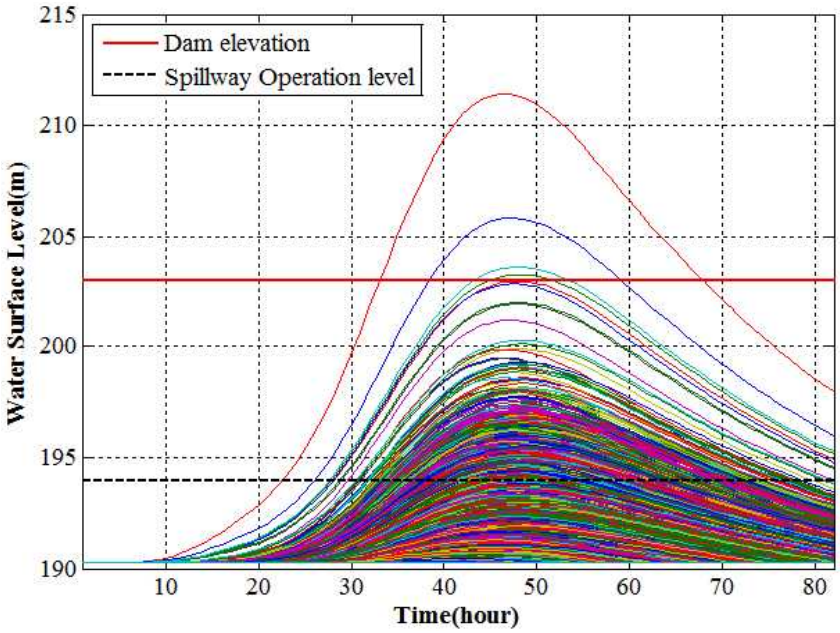


<그림 3-85> 주여수로, 비상여수로 기반에서 수문 9개 파괴시 앙상블

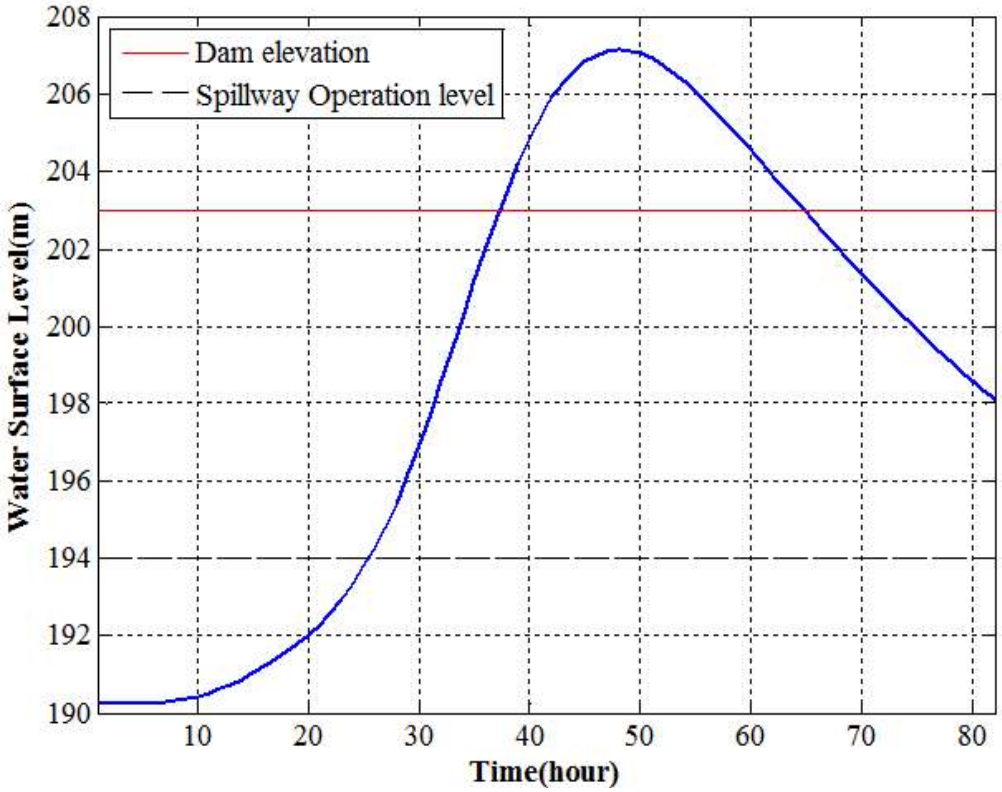
· <그림 3-86~95>는 앞의 <그림 3-66~85>의 주여수로, 비상여수로 기반과 달리 소양강 댐에 주여수로만이 존재할 시 동일한 홍수사상에 대한 댐에 적용능력을 평가한 결과임. <그림 3-86>은 주여수로 기반에서 모든 수문이 작동할 경우 <그림 3-66>에서와 동일한 홍수사상을 적용할 때 약 38시간 경과시 댐 월류가 나타나고 있음. 이러한 결과는 보조여수로에 따른 위험도 개선효과를 보여주고 있으며, 동일하게 <그림 3-77>의 경우 10,000개의 앙상블에 대한 HEC-5 모의결과로서 5회의 댐 파괴 사상 나타났는데 이는 보조여수로와 주여수로가 작동한 <그림 3-67>의 경우 1회의 댐 파괴사상에 비하여 굉장히 큰 차이를 보여주고 있음.



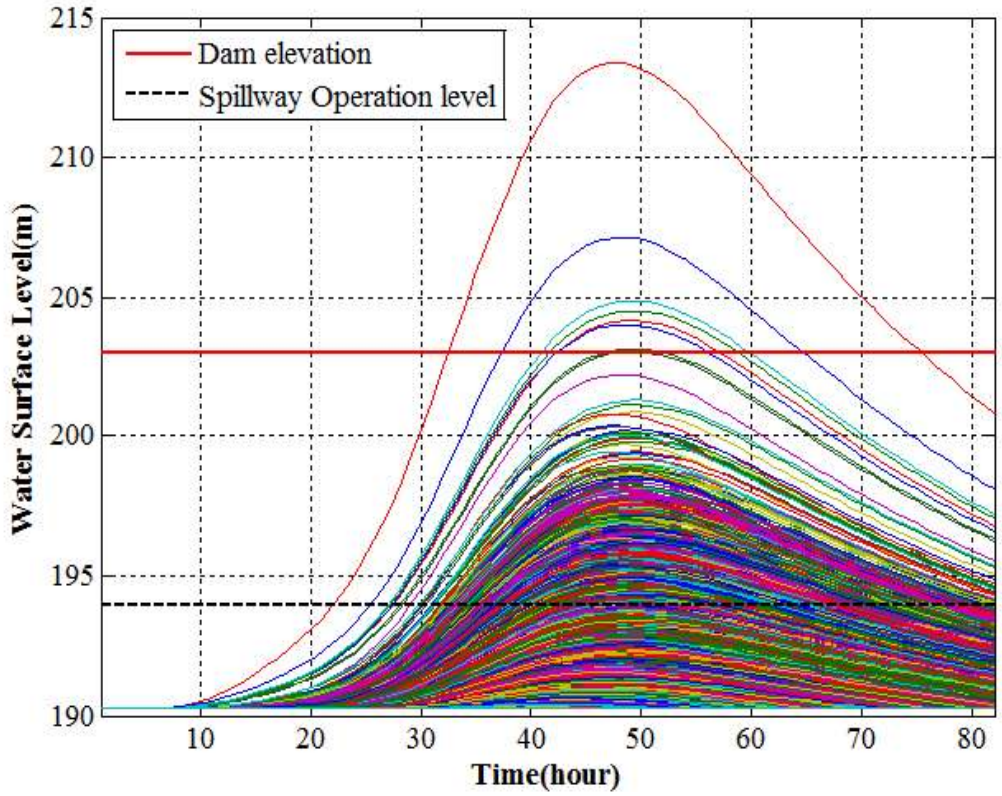
<그림 3-86> 주여수로 기반에서 모든 수문이 작동할 때



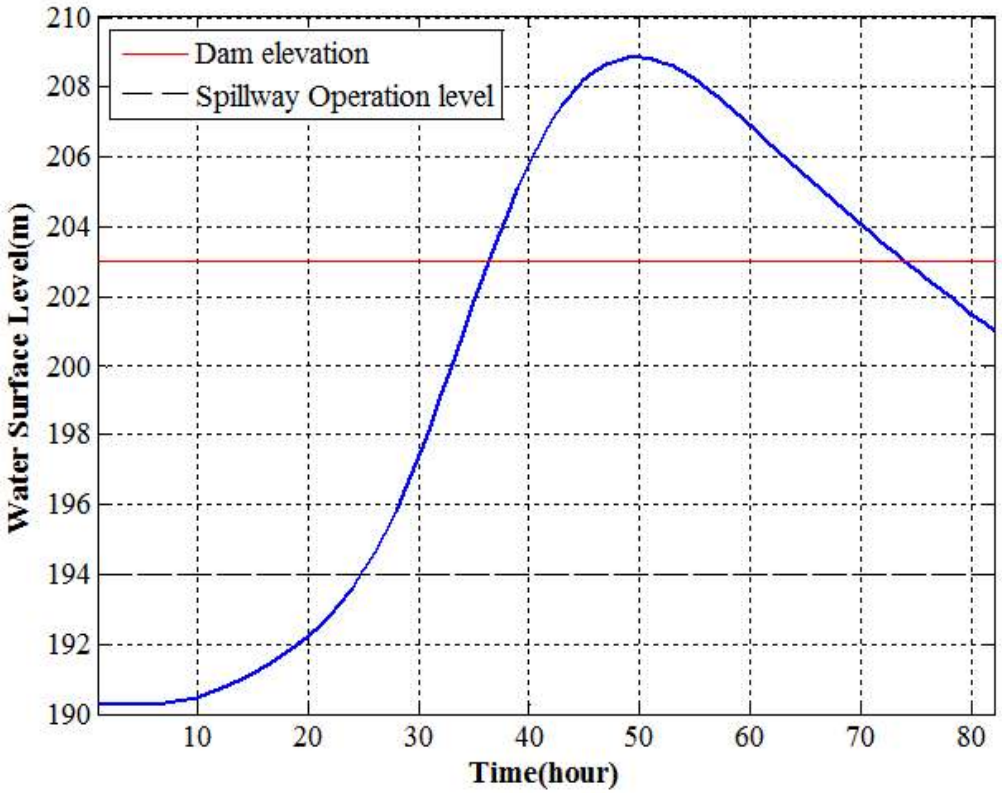
<그림 3-87> 주여수로 기반에서 모든 수문이 작동할 때 앙상블



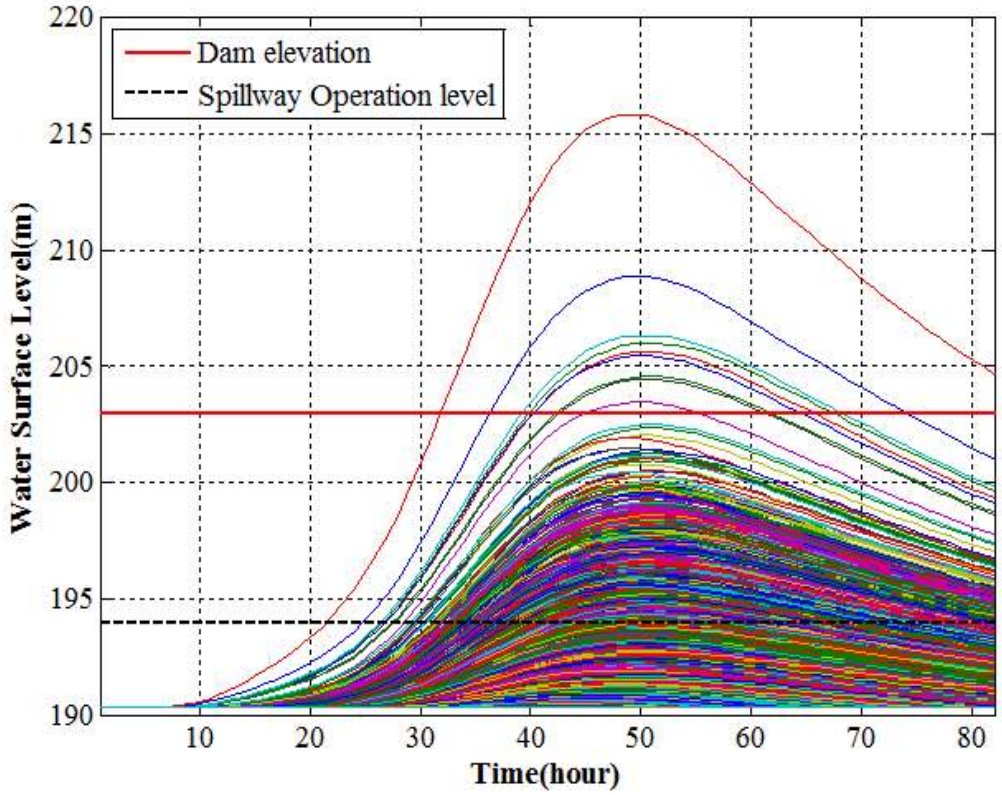
<그림 3-88> 주여수로 기반에서 수문 1개 파괴시



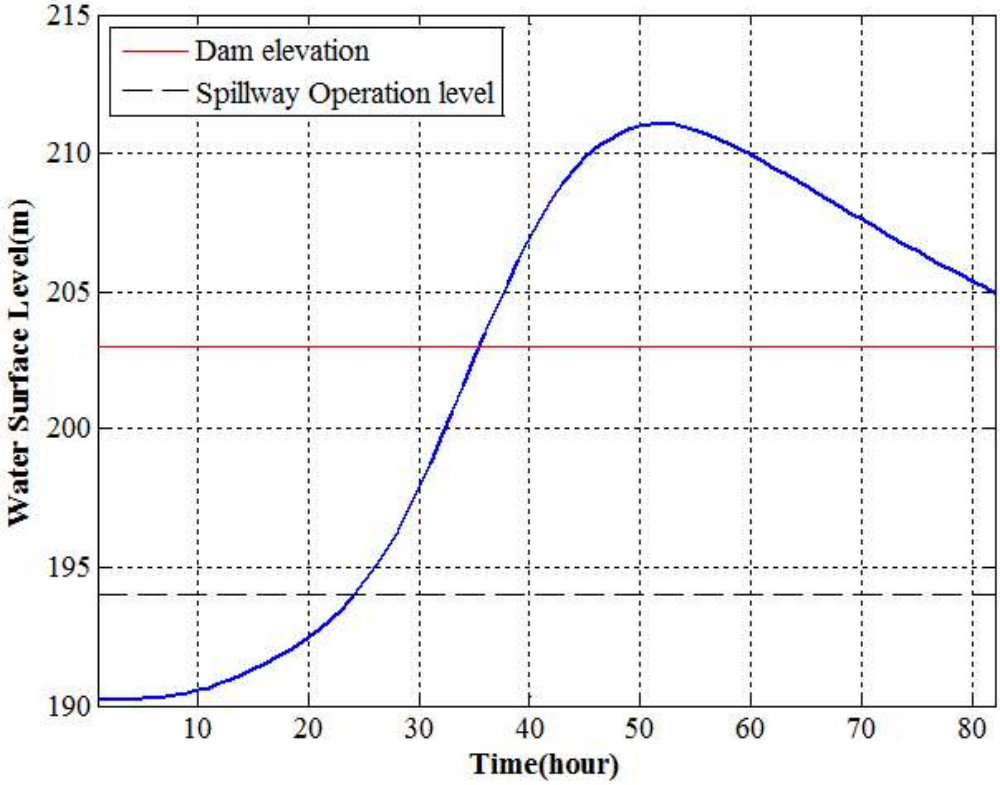
<그림 3-89> 주여수로 기반에서 수문 1개 파괴시 앙상블



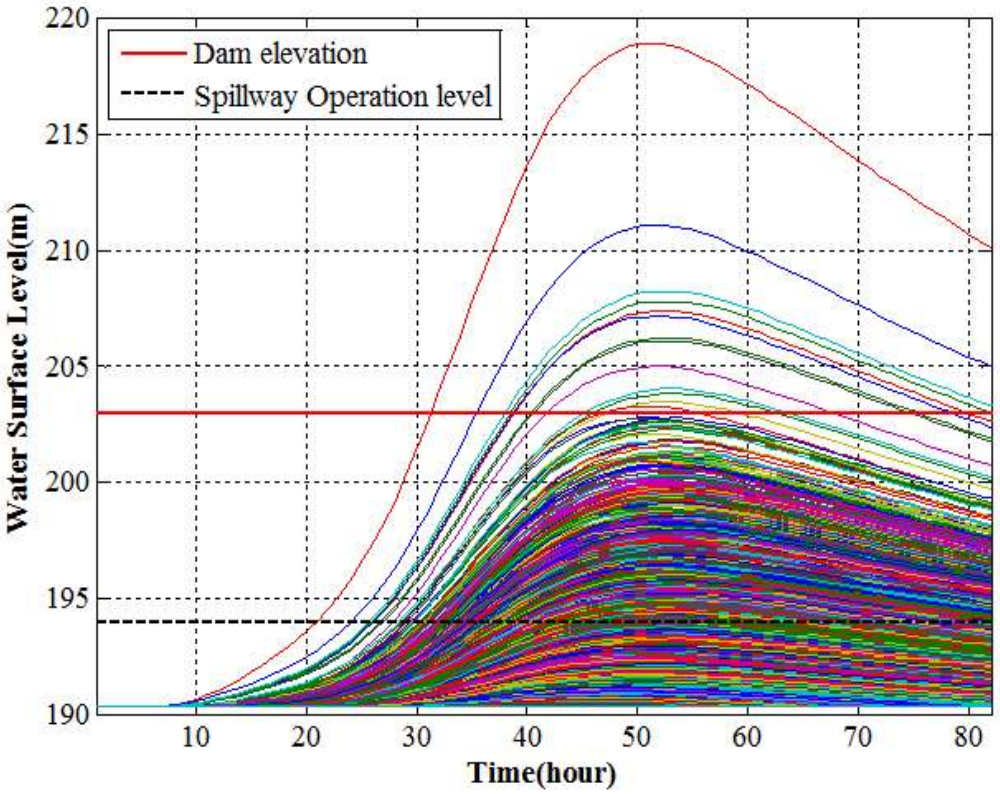
<그림 3-90> 주여수로 기반에서 수문 2개 파괴시



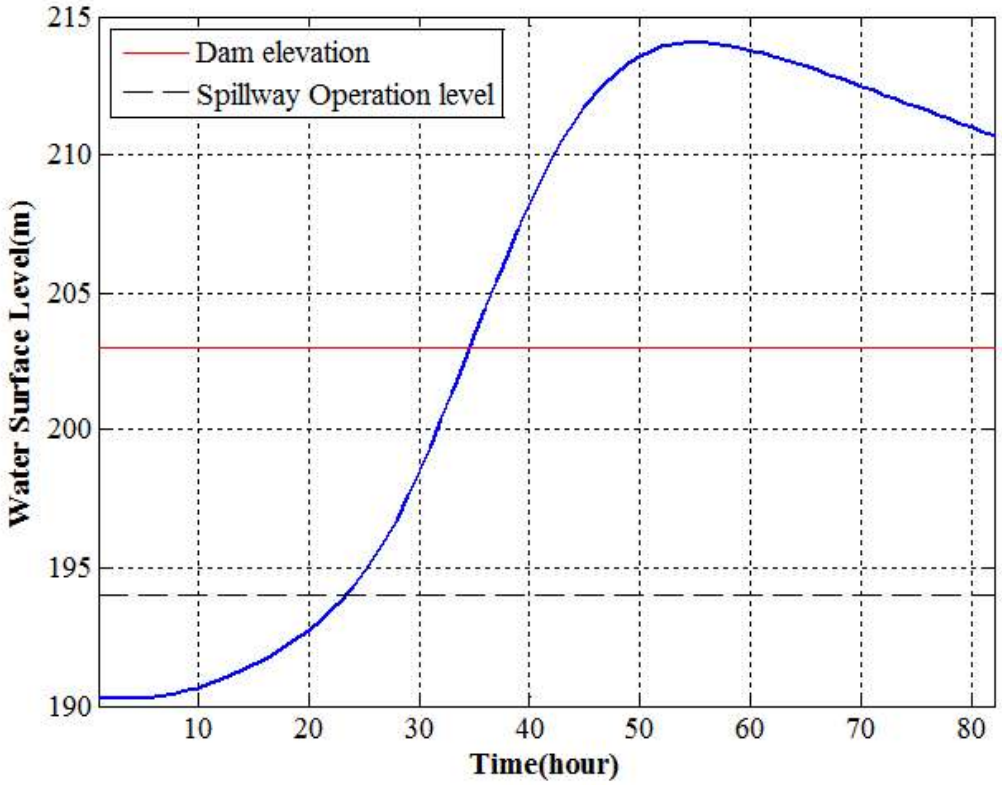
<그림 3-91> 주여수로 기반에서 수문 2개 파괴시 앙상블



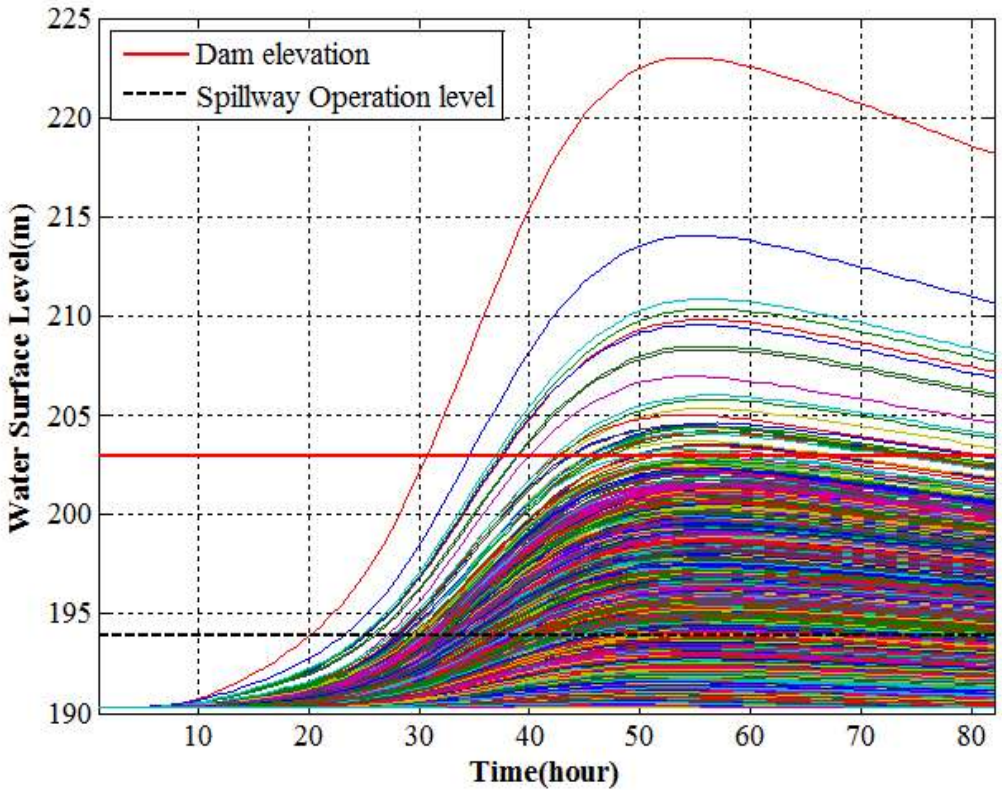
<그림 3-92> 주여수로 기반에서 수문 3개 파괴시



<그림 3-93> 주여수로 기반에서 수문 3개 파괴시 앙상블



<그림 3-94> 주여수로 기반에서 수문 4개 파괴시



<그림 3-95> 주여수로 기반에서 수문 4개 파괴시 앙상블

4. 댐 파괴 모델 및 하류 피해 해석 기술 개발

가. 댐 붕괴로 인한 홍수피해 예측

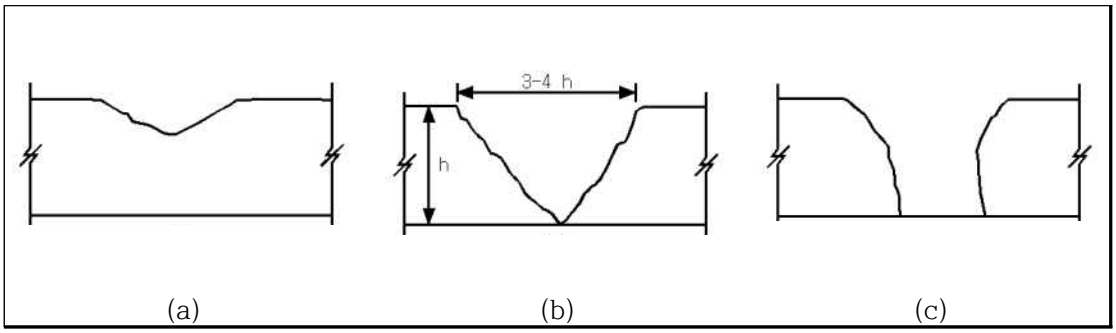
· 일반적으로 댐의 순간적인 붕괴나 점진적인 붕괴시 막대한 양의 물이 급격히 방류되며 붕괴로 인한 홍수파는 댐 하류부 인명과 공공 및 산업시설 등에 막대한 피해를 발생시킴. 이러한 붕괴 홍수파는 가옥 및 교량, 산업시설 등을 심각하게 훼손하고 교통 및 사회기능을 마비시키는 결과를 가져옴. 특히 많은 인명피해가 예상되며 하류부의 침식, 농경지 훼손 그리고 생태계를 급격히 변화시키는 요인으로도 작용하는바 이러한 홍수피해의 규모는 매우 크기 때문에 국가적 차원의 재난으로 사회경제적으로 큰 충격을 줄 가능성이 있음.

· 댐은 순간적, 또는 점진적으로 파괴되며, 붕괴원인과 댐의 형식에 따라 그 붕괴양상이 결정됨. 순간적인 댐 붕괴이 경우, 댐 직하류부에서는 붕괴파를 발생시키며, 홍수파는 하도를 따라 전파됨. 한편, 점진적인 댐 붕괴의 경우, 붕괴가 지속됨에 따라 붕괴부가 확장되며, 이러한 붕괴양상은 대체로 필댐의 형식에서 발생함. 실제로 흙댐의 피해사례를 분석해 보면 주로 점진적인 붕괴양상을 보이는 것으로 분석됨. 흙댐의 붕괴시간은 15분에서 5시간까지 다양한 것으로 분석되었으며, 붕괴시간이 3시간부터 12시간까지 지속되는 것으로 조사 및 분석하였음.

· 댐의 붕괴는 구조물의 자연적 노화, 집중호우나 홍수, 지진, 토사퇴적, 제체전도, 파이핑, 침윤발생, 월류 및 파랑 등에 의한 자연적 상황 등이 요인이 될 수 있으며, 시공결함, 사고 또는 테러와 같은 인위적인 요인으로도 발생할 수 있음. 이는 장기간 호우로 인하여 댐 제체가 포화한 데서 기인한 결과로 보임. 전 세계 300여개의 댐을 대상으로 조사한 결과, 댐 붕괴 요인의 23%가 여수로 설계홍수량을 초과하는 홍수에 의한 것으로 조사되었음. 또한 댐의 준공 이후 초기에는 누수, 침윤선 상승 및 슬라이딩이 주된 붕괴요인이며, 이는 설계 및 시공에서 결함에 기인하는 것임.

· 필댐의 붕괴양상은 댐으로부터 방류 및 월류로 인한 제체 구성 재료의 침식 과정으로 나타남. 붕괴 원인은 주로 댐 마루부의 월류이며, 댐 사면의 침식 및 침투, 누수로 인한 내부 침식 및 파이핑 등의 순서임. 댐의 월류는 불충분한 설계수문량 또는 계획규모를 초과하는 이상홍수와 부족한 여유고에 의해 발생할 수 있음. 또한 제체를 통한 침윤선의 발달은 내부 침식 현상으로 확대될 수 있음.

· 월류에 의한 초기 붕괴부의 발생과 제체 사면에서의 큰 전단응력이 한계치를 초과하게 되면 침식이 급격히 발달됨. 붕괴 초기에는 제체 재료의 전단강도가 약한 지점에서부터 시작되고 대규모 붕괴로 빠르게 진행됨. 초기 붕괴부는 <그림 3-96>의 (a)와 같이 형성되며, 월류가 지속됨에 따라 (b),(c)와 같이 붕괴 형상이 발달됨. 그러나 초기 붕괴발생 위치와 형상을 정확히 예측하기란 실제적으로 매우 어려움.



<그림 3-96> 월류에 의한 붕괴형상(Johnson and Illes, 1976)

· 기록적인 댐 붕괴 사례를 정리하고 붕괴특성을 검토하였음. 이 연구결과에서는 일반적인 붕괴형상으로서 붕괴초기에는 2:1의 경사를 갖는 삼각형의 측벽경사를 이루다가 붕괴가 제체 바닥까지 도달할 때에는 2:1 사면을 갖는 사다리꼴 형상의 붕괴단면을 보여주는 것으로 분석하였음. 이러한 상황은 붕괴 폭이 제체 길이보다 짧을 경우에 적용됨. 한편, 제체가 양질의 재료로 충실히 시공된 댐의 경우에 대하여 연구하였으며, 이때의 붕괴경사면은 1:1의 사다리꼴 측벽경사를 형성하는 것으로 분석하였음.
· 일단 초기붕괴가 시작되면 침식된 재료가 하류로 이동하면서 침식이 발달되며, 붕괴형상은 V자 형태를 이루며 3~4시간 사이에 깊고 넓게 붕괴부를 확장시켜 나감. 댐이 유실되는 동안 댐체의 약한 구성 재료는 하류 방향으로 유실되고, 붕괴부의 종단경사는 붕괴단면이 발달하면서 점차 완만해지며, V자 형상은 침식이 진행되어 <그림 3-96>의 (c)와 같이 결국 직사각형 또는 사다리꼴 형상이 됨. 최종적인 붕괴부의 폭은 저류지의 크기와 저류수의 용적에 의해 결정됨. 침식은 물의 침식능력이 댐 재료의 저항력보다 작을 때까지 지속되다가 침식 깊이가 기초부에 도달되면 저수지 물의 방출이 지속될 때까지 측방 침식이 진행됨.
· 흙댐 붕괴의 또 다른 원인으로는 파이핑(piping)이 있으며 파이핑에 대비하기 위해 평상시 이를 예측, 조사하여 심각한 상황이 되기 전에 보수가 이루어지도록 함. 제체를 통한 침투현상에 의해 발달된 파이핑은 댐의 안전에 필수적 재료인 작은 입자를 연행해 나가면서 흐름을 발달시켜 나감. 특히, 사질 토양의 내부 침식은 도관이나 박스의 접촉부에서 발생하여 붕괴 원인이 되고 있음. 파이핑에 의한 침식(subterranean erosion)은 여과수가 토양입자를 교란하고 관수로 형상의 지하수로를 형성하면서 급속히 붕괴부를 확대 시켜 나감.

나. 댐 붕괴 홍수파 해석모형

(1) 적용 모형

· 댐의 붕괴해석을 위한 여러 모형의 기능을 비교·검토한 결과는 <표 3-26>과 같음. 본 연구에서는 그동안 우리나라에서 그 안정성과 정확성이 검증된바 있는 DAMBRK 모형을 댐 붕괴 해석에 사용하였으며, 이를 이용하여 댐의 위험도 분석을 위해 붕괴 홍수파로 인한 하류부의 영향을 분석하고자 하였음.

<표 3-26> 댐 붕괴 및 해석요소(Singh, 2003)

모 형	개발자 (년도)	저수지 홍수추적		댐 월류 해석			붕괴형태 고려			하도흐름 추적	
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
Cristofano	Cristofano (1965)	X	X	X	◎	X	◎	◎	X	X	X
HW1	Harris and Wagner(1967)	X	◎	X	◎	X	◎	◎	X	X	X
BRDAM	Brown and Rogers(1977)	◎	◎	X	◎	X	◎	◎	X	◎	X
PT	Ponce and Tsivoglu(1981)	X	◎	X	◎	◎	◎	◎	X	X	X
Lou	Lou(1981)	X	◎	X	◎	◎	◎	◎	X	X	X
Nogueira	Nogueira(1984)	◎	◎	X	◎	◎	◎	◎	◎	X	X
DAMBRK	Fread(1984a)	◎	◎	◎	◎	X	X	◎	X	◎	◎
SMPDBK	Wetmore and Fread(1984)	X	X	◎	◎	X	X	◎	X	◎	X
BREACH	Fread(1984b)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	X	X
BEED	Singh and Scarlatos(1986)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

[주] ◎ : 모의 가능, X : 모의 불능

① 유입수문곡선 추적(Inflow Routing)　② 저수지 수위(Reservoir Water Elevation)

③ 제체월류량(Flow over the Crest)　④ 붕괴부(Flow through the Breach)

⑤ 댐 직하류부 붕괴 흐름(Flow through the Breach on the Downstream Face)

⑥ 유사이동(Sediment Transport)　⑦ 붕괴형상(Breach Shape)

⑧ 붕괴측벽경사(Side Slopes Collapsing)　⑨ 하도 추적(Channel Routing)

⑩ 홍수터 추적(Floodplain Routing)

(2) 모형의 개요

· 댐 붕괴로 인한 유출수문곡선의 유도와 이로 인한 댐 하류부에서의 홍수파 전달특성을 해석하기 위하여 본 연구에서는 그동안 국내·외에서 많은 연구와 적용성 평가를 거친 미국 기상청의 DAMBRK(1988)모형을 적용하였음. 본 모형은 저수지로부터의 유출 수문곡선의 유도와 하류부에서의 홍수추적을 수리학적으로 해석하기 위해 개발되었음.

· DAMBRK 모형에서 사용하는 지배방정식은 부정류에 관한 1차원 Saint-Venant 방정식으로서 하류구간에서의 급변류, 단면의 변화, 교량 등의 영향을 내부 경계조건으로 반영할 수 있도록 개발되었음. 검토대상 하도구간의 상류 및 하류단에서의 경계조건들을 도입하여 구성된 방정식들은 가중 4점 음해법에 의하여 그 해를 구하게 됨. 하류의 흐름은 상류 및 사류에 대하여 모두 계산 가능하도록 되어있고, 저수지지점의 붕괴유출수문곡선은 저수지내로의 유입량과 유출량에 따른 저수용량의 변화가 고려된 저류방정식으로부터 유도되며 붕괴 지점의 시간, 크기, 형태 등의 변수들로부터 산정됨. 또한 하도의 홍수터의 영향, 만곡의 영향 등도 고려할 수 있도록 되어 있으며, 계산결과는 주요지점별로 원하는 형식으로 출력이 가능하도록 설계되어 있음.

(3) 붕괴유출수문곡선의 유도

· 임의의 시간 t에서의 총유출량 Q는 붕괴부를 통한 유출량 Q_b와 여수로를 통한 유출량 Q_s의 합으로 표시됨. 월류에 의한 붕괴의 경우에는 넓은 마루웨어의 공식, 파이핑의 경우에는 오리피스의 유량공식 등이 사용되며 저수지 내의 수위, 붕괴부의 형상 및 하류부의 수위 등의 함수로서 붕괴부에서 홍수량 Q_b는 식 52로 표현됨.

$$Q_b = c_v k_s \left[3.1 b_i (h - h_b)^{1.5} + 2.45 Z (h - h_b)^{2.5} \right] \tag{52}$$

여기서, c_v : 접근유속 보정치
b_i : 순간붕괴 하저부 폭(m)
h : 저수지의 수위(m)
h_b : 붕괴부 바닥의 표고(EL.m)
Z : 붕괴부 측벽경사
k_s : 직하류부 수위와 관계된 잠수 보정치

$$K_s = 1.0 - 27.8 \left[\frac{h_t - h_b}{h - h_b} - 0.67 \right]^3 \quad \text{if} \quad \frac{h_t - h_b}{h - h_b} > 0.67 \tag{53}$$

$$C_v = 1.0 + \frac{0.023 Q_i^2}{\left[B_d^2 (h - h_{bm})^2 (h - h_b) \right]} \tag{54}$$

여기서, B_d : 댐지점 저수지 폭
h_{bm} : 붕괴부 최종수위(EL.m)
h_t : 댐 직하류부의 수위(EL.m)

· 한편, 여수로 및 수문 등으로의 방류와 제체부로의 월류 및 방류구에서의 유량 Q_s는 식 55와 같음.

$$Q_s = k_{sp} c_s L_s (h - h_s)^{1.5} + \sqrt{2g}\, c_g A_g (h - h_g)^{0.5} + k_d c_d L_d (h - h_d)^{1.5} + Q_t \tag{55}$$

여기서, k_{sp} : 댐 직하류부 영향으로 인한 잠수 보정치
c_s : 비조절 여수로의 유량계수
h_s : 비조절 여수로의 최대수위(EL.m)
c_g : 방수로의 유량계수
h_g : 방수로의 중심선 수위 또는 직하류부 최대 수위
k_d : 댐 직하류부 영향으로 인한 잠수 보정치
c_d : 댐 제체 월류량의 유량계수
L_s : 여수로의 길이
A_g : 고정수문으로 방류되는 유량의 면적

L_d : 댐 제체의 길이(여수로가 제체에 위치한 경우에는 L_s를 제외함)
Q_t : 별도 방류구의 유량

· 붕괴부를 통한 유출이 직하류부 수위 상승으로 수중에서 이루어지는 경우에는 유출량이 보정되어야 함. 수중 방류구간에는 와류영역이 발생되고 불완전 도수현상이 발생되기도 하며, 이때의 잠수 보정치는 식 56와 같음.

$$k = Q/Q' \leq 1.0 \tag{56}$$

여기서, Q : 잠수 상태에서의 유출량
Q' : 자유흐름 상태에서의 유출량

· 실용적인 면에서 k를 구하는 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 첫째는 이미 수리실험으로 부터 얻은 결과를 토대로 작성된 도표를 이용하는 것이고, 둘째는 넓은 마루웨어의 불완전 월류 이론을 이용하여 구하는 방법임. 결국, 저수지에서의 저류방정식은 질량보존의 법칙에 의하여 다음의 식 57으로 표시할 수 있음.

$$ds/dt = Q_i(t) - Q_b(h,\ t) - Q_s(h,\ t) \tag{57}$$

여기서 ds/dt : 시간에 따른 저류량의 변화율
$Q_i(t)$: 저수지내로의 유입량
$Q_b(h,t)$: 붕괴부를 통한 유출량
$Q_s(h,t)$: 비붕괴부를 통한 유출량

· 붕괴에 따른 저류방정식이 유도되고 붕괴부 수위 및 하류 수위와의 관계에 의한 잠수계수가 결정되면 붕괴시의 유출수문곡선이 유도될 수 있음. 식 57을 유한차분형태로 나타내면 다음의 식 58과 같이 표시되는데, 여기서 A_s는 저수지의 수표면적, (*) 표시는 계산 초기상태를 나타냄.

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} - \frac{Q_i^* + Q_i}{2} + \frac{Q_s^* + Q_s}{2} + \frac{Q_b^* + Q_b}{2} = 0 \tag{58}$$

여기서, $\Delta s = \left(\frac{A_s^* + A_s}{2}\right)(h^* - h)$

· 또한, 식 56, 57를 식 58에 대입하여 정리하면 다음과 같음.

$$\frac{1}{\Delta t}(A_s^* + A_s)(h^* - h) + C_1\beta(h-h_b)^{1.5} + C_2\beta(h-h_b)^{2.5} + C_3(h-h_s)^{1.5}$$

$$+ C_4 a(h-h_g)^{0.5} + C_5(h-h_{dm})^{1.5} + Q_t + Q_b^* + Q_s^* - Q_i^* - Q_i = 0 \quad (59)$$

· 식 59에서 A_s는 수위 h의 함수이고, h이외의 다른 값들은 기지이기 때문에 미지의 h에 대하여 Newton-Raphson 반복계산법을 이용하여 계산할 수 있음. 보통 5~6회 정도의 반복계산으로 구해진 h값을 식 56, 57에 대입하여 시간적분을 통하여 임의의 시간 t에서 유출량 Q를 구해나가면 저수지붕괴로 인한 유출수문곡선이 유도됨.

(4) 홍수추적 알고리즘

· DAMBRK의 동역학적 홍수추적에서는 부정류의 Saint-Venent 식을 비선형 음형 유한차분법으로 해석하였으며, 자연하천에 대해서 일반화된 부정류의 연속방정식과 운동량 방정식은 각각 다음과 같음.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial (A + A_o)}{\partial t} - q = 0 \quad (60)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e\right) + L = 0 \quad (61)$$

여기서,

$$S_f = \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^{4/3}} = \frac{|Q| Q}{K_c^{\,2}} \quad (62)$$

$$S_e = \frac{K_e \, \partial (Q/A)^2}{2g \partial x} \quad (63)$$

여기서, Q = 유량, A = 흐름단면적, A_0 = 저류단면적, q = 측방유입량,
x = 거리, t = 시간, h = 수위, S_f = 마찰경사, S_e = 단면 확대·축소경사,
B = 하폭, n = 조도계수, L = 지류에 의한 운동량의 변화

· 위의 비선형 편미분방정식을 비선형 대수방정식으로 변환하기 위하여 다음의 식으로 표현되는 가중 4점 유한차분기법이 사용되었음.

$$\frac{\partial K}{\partial t} = \frac{K_i^{j+1} + K_{i+1}^{j+1} - K_i^j - K_{i+1}^j}{2\Delta t^j} \quad (64)$$

$$\frac{\partial K}{\partial x} = \theta \frac{K_{i+1}^{j+1} - K_i^{j+1}}{\Delta x_i} + (1-\theta)\frac{K_{i+1}^j - K_i^j}{\Delta x_i} \quad (65)$$

$$K=\frac{\theta}{2}(K_i^{j+1}+K_{i+1}^{j+1})+\frac{1-\theta}{2}(K_i^j+K_{i+1}^j) \tag{66}$$

· 여기서, 가중치 θ가 0.5일 경우는 box기법, 1.0일 경우는 완전음해기법임. 무조건적인 수치안정성과 좋은 정확도를 제공받기 위해서는 θ를 0.55에 가깝게 채택하는 것이 바람직함. 정확도는 θ가 0.5에서 1.0으로 가까워질수록 감소되는데 이러한 영향은 시간간격의 크기를 증대시킴에 따라 더욱 명백하게 나타남.

· DAMBRK에서는 θ가 입력자료로 사용하게 되어있는데 일반적으로 0.55~0.60의 값이 0.5를 사용하였을 때 나타나는 불안정성의 문제를 해결하고 정확도의 손실을 최소화할 수 있어 일반적으로 사용됨. 식 64~66에 나타난 유한차분근사식을 식 60, 61에 대입하고 Δx_i를 곱하여 정리하면 식 66, 67의 유한차분식이 유도됨. 즉,

$$\begin{aligned}
&\theta(Q_{i+1}^{j+1}-Q_i^{j+1}-\bar{q}_i^{j+1}\Delta x_i)+(1-\theta)(Q_{i+1}^j-Q_i^j-\bar{q}_i^j\Delta x_i) \\
&\quad +0.5\Delta x_i/\Delta t^j[(A+A_o)_i^{j+1}+(A+A_o)_{i+1}^{j+1}-(A+A_o)_i^j \\
&\quad -(A+A_o)_{i+1}^j]=0
\end{aligned} \tag{66}$$

$$\begin{aligned}
&0.5\Delta x_i/\Delta t^j(Q_{i+1}^{j+1}+Q_i^{j+1}-Q_i^j-Q_{i+1}^j)+\theta[(Q^2/A)_{i+1}^{j+1}-(Q^2/A)_i^{j+1} \\
&\quad +arA_i^{j+1}(h_{i+1}^{j+1}-h_i^{j+1}+\Delta x_i\bar{S}_{f_i}^{j+1}+\Delta x_i\bar{S}_{e_i}^{j+1}) \\
&\quad + LTAx_i(L+\overline{W}_f\overline{B})_i^{j+1}]+(1-\theta)[(Q^2/A)_{i+1}^j-(Q^2/A)_i^j \\
&\quad + \bar{A}_i^j(h_{i+1}^j-h_i^j+\Delta x_i\bar{S}_{f_i}^j+\Delta x_i\bar{S}_{e_i}^j)+\Delta x_i L]=0
\end{aligned} \tag{67}$$

여기서,
$$\bar{A}_i=0.5(A_i+A_{i+1})$$
$$\bar{B}_i=0.5(B_i+B_{i+1})$$
$$\bar{S}_{f_i}=\frac{\bar{n}_i^2|\bar{Q}_i|\bar{Q}_i}{\bar{A}_i^2R_i^{4/3}}=|\bar{Q}_i|\bar{Q}_i/\bar{K}_{c_i}^2$$
$$\bar{Q}_i=0.5(Q_i+Q_{i+1})$$
$$R_i=A_i/B_i$$
$$\bar{K}_{c_i}=0.5(K_{c_i}+K_{c_{i+1}})$$
$$\bar{S}_{e_i}=K_{e_i}[(Q/A)_{i+1}^2-(Q/A)_i^2]/(2g\Delta x_i)$$

· (−)표시는 단면구간 i와 $i+1$간의 거리인 Δx_i 구간에 대한 변수의 평균치이고, i는 격점구간번호를 의미하며, 격점번호는 1에서 N까지이고, 전 격점에서 구간번호는 1에서 $N-1$까지임.

· 결국, 식 66과 67은 시간대 $j+1$에서 i 및 $i+1$점에 대한 미지수 h, Q의 비선형

대수방정식계를 구성하게 되며, 각 기지시간대 j와 관련 모든 값들은 초기 및 경계조건과 이전 시간대로부터 확정됨. 즉, 식 66, 67은 시간대 $j+1$에서 i 및 $i+1$점에 h, Q가 4개의 미지수로 존재하며, 상류 및 하류경계 간의 $(N-1)\Delta x$ 구간 각각에 대하여 $2N$개의 미지수를 가진 $(2N-2)$개의 식이 얻어질 수 있음.

· 상류단 및 하류단 경계조건에서 두 개의 조건식을 제공하게 될 것이므로 결국 $2N$개의 미지수를 가진 $2N$개의 비선형방정식의 계가 구성되며, 식 Newton-Raphson 방법에 의하여 그 해가 구해지게 된다. Newton-Raphson 방법은 2차항 및 고차항의 모든 항들을 무시하는 비선형함수의 Taylor의 급수전개 이론에서부터 유도되며 식 68과 같이 표현됨.

$$J'(X^k)\Delta X = -f(X^k) \tag{68}$$

· 여기서, X^k = 벡터량, J' = Jacobian (X^k)값에 대한 편미분치들로 구성되는 계수 매트릭스, $f(X^k)$ = X^k 값에 대한 비선형방정식, ΔX = $2N$개의 미지수를 포함하는 벡터임. 식 69은 미지의 벡터 ΔX가 선형일 경우의 연립방정식을 나타내며, 미지값 ΔX에 대한 식 69의 해는 Gauss 소거법과 같은 적절한 역행렬계산기법 등으로 구할 수 있음. 실제로 ΔX 벡터는 식 69와 같은 초기추정치와 개량된 추정치 간의 차이를 나타내게 됨.

$$\Delta X = X^{k+1} - X^k \tag{69}$$

· 여기서, k = 반복횟수, X^k = 초기추정치, X^{k+1} = 개량된 추정치를 나타내며, 미지의 유량 $(Q_i^{j+1}, Q_{i+1}^{j+1})$과 수위 $(h_i^{j+1}, h_{i+1}^{j+1})$항을 포함하는 ΔX가 허용한계 이내보다 작을 경우 보통 1~2회 반복계산으로 만족한 결과를 얻을 수 있음.

다. 홍수피해액 산정

(1) GIS 기반 홍수피해액 분석

· 우리나라는 홍수피해를 평가하기 위한 방법으로 간편법과 개선법을 사용하였다가 현재는 2004년도에 개발된 다차원 홍수피해액 산정기법을 활용하고 있음. 따라서 본 절에서는 GIS 자료를 기초로 다차원 홍수피해액 산정기법을 이용한 댐 하류지역의 홍수피해액 평가 Tool을 개발하였음. 홍수피해액 분석은 하천시설기준(건설부, 1993년)부터 2004년 하천설계기준(건설교통부, 2004)년에 이르기까지 매우 중요한 사항으로 인식되어지고 있음. 본 연구에서 개발한 GIS 기반 홍수피해액 분석은 DuraMap-Xr 엔진 기반 기본 인터페이스를 구현하였음.



<그림 3-97> 국내치수 경제성 분석 기준의 변천

(가) 국내 치수경제성 분석 기준

· 치수경제성 분석기준은 1985년 "하천시설기준"에서 마련된 경제성분석방법을 그대로 적용한 "하천시설기준"(건설교통부, 1993) 이후부터 "수자원개발의 경제성 분석모델 개발-다목적댐 편익산정을 중심으로" 보고서가 나오기 전까지 엄밀한 이론적 검토 없이 그대로 사용되어 왔음. 또한 이후 "하천설계기준"(건설교통부, 2000)이 발간되었지만 내용면에 있어서는 "하천시설기준"(건설교통부, 1993)을 그대로 유지하는 모습을 보였음.

· 국토해양부에서는 "치수사업 경제성 분석 개선방안 연구"(건설교통부, 2001)를 발간하여 개선안을 도출하였고, "하천설계기준"(건설교통부, 2002)에서 그 내용을 따르고 있음. 그러나 몇 년 동안의 적용결과 여러 가지 문제점들이 지적되었으며, 보다 타당하고 합리적인 방법론의 필요성이 대두되었음. 이에 따라 국토해양부에서는 기존 방법론들의 문제점과 외국의 홍수피해액 산정방법론을 검토하여 "치수사업 경제성분석 방법 연구"(건설교통부, 2004a)를 제시하였음.

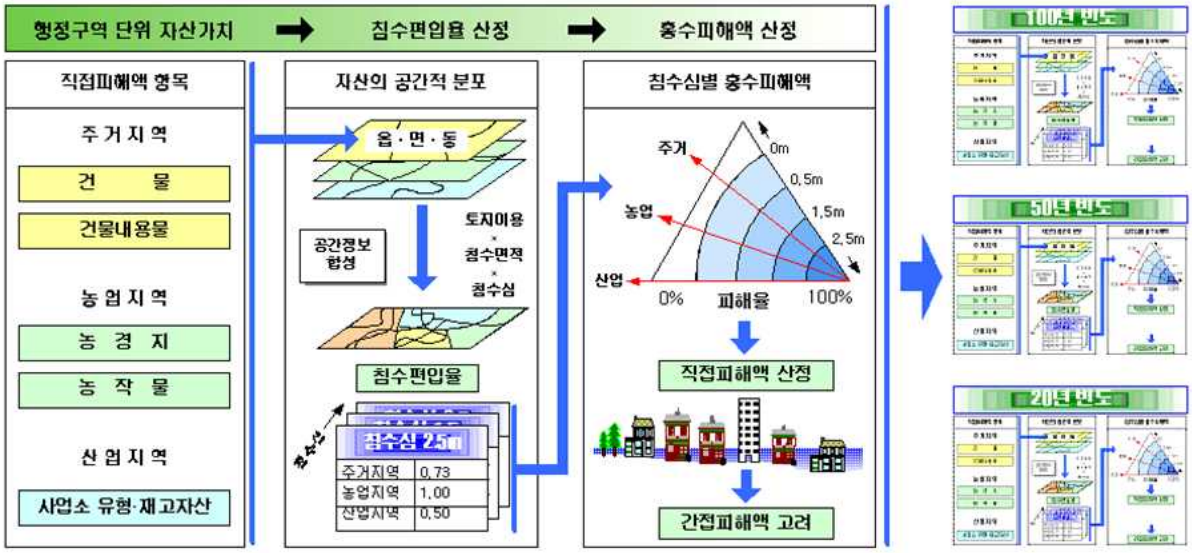
· 또한, 한국개발연구원(KDI)의 "수자원(댐)부문 사업의 예비타당성 조사의 주요 대상사업으로서 다양한 항목의 환경성 검토를 포함하여 여러 측면의 정책적 부석이 요구되는 댐 건설사업에 대한 타당성 평가에 그 초점을 두고 있음. 편익항목으로는 용수공급편익, 홍수조절천익, 관개편익, 발전편익, 그리고 기타편익 등 모두 댐 건설 사업의 타당성 분석에 근본하고 있음.

(나) 다차원 홍수피해액 산정기법

· 본 연구에서는 앞서 언급한 다차원 홍수피해액 안정기법을 본 연구에 맞게 프로그램화 하였음. 본 연구에서 개발한 방법은 다음과 같음. 다차원 홍수피해액 산정기법(MD-FDA : Multi Dimensional Flood Damage Assessment)은 회귀식에 의한 기존 개선법의 문제점을 보완하기 위하여 국토해양부에서 개발한 홍수 피해액 산정방법임.

· 침수심을 고려한 다차원 홍수피해액 산정방법은 범람지역 내의 피해자산을 산정하여 침수심

에 맞는 피해율을 곱해서 직접피해를 산정함. 직접피해액 항목은 크게 인명피해액, 건물피해액, 건물 내용 피해액, 농경지 피해액, 농작물 피해액, 사업소 유형 · 재고자산 피해액, 공공시설 피해액으로 즉, 7가지로 분류됨. 이중 인명피해액과 공공시설 피해액을 제외한 5가지 피해액은 일반자산에 대한 직접 피해액을 일반자산의 평가액을 근거로 산정함. 또한 수해 후 같은 장소에서 다시 생활을 시작하기 위해서 사람들은 가옥이나 가재 등을 재조달하는 경우가 많기 때문에 실제로 사람들이 지출하는 피해액에 가까운 재조달 가격을 근거로 직접적인 피해액을 산정하게 됨. 이는 <그림 3-98>에 도시하였음.

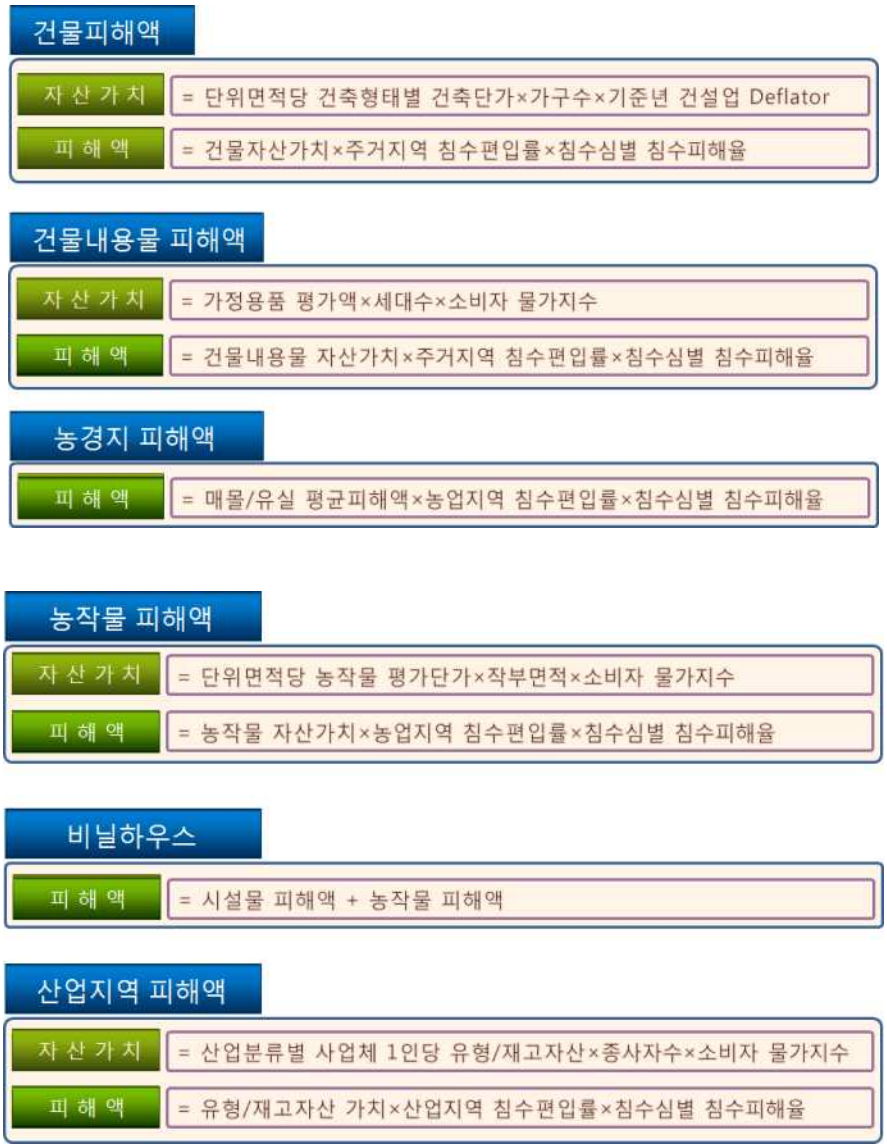


<그림 3-98> 다차원 홍수피해액 산정방법(MD-FDA)

- 직접피해 산정의 대산자산은 인간이 생존이나 생활을 하기 위한 거주지나 농업, 제조업 그리고 서비스업 등 경제활동을 영위하기 위하여 축적해온 동산 및 부동산 등을 그 대상으로 함. 즉, 건물, 건물내용물, 농경지, 농작물, 사업소 유형 · 재로자산이 이에 해당함. 이러한 직접피해 산정의 기본 단위로는 홍수지역의 범위가 홍수피해액에 주는 영향을 구체적으로 측정하기 위하여 홍수지역의 범위를 행정구역상의 읍면동 단위로 설정하게 됨.
- 물론 읍면동 단위보다 더 작은 단위로 지역의 범위를 설정하는 것이 피해액 산정 결과의 정확도를 훨씬 높일 수 있겠으나, 피해액 산정방식의 정확성, 가능성, 편의성, 그리고 단순성 등 산정방식이 가져야 할 바람직한 특성들을 최대한 조화롭게 만족시켜 줄 수 있는 현실적인 단위를 읍면동으로 판단하였음.
- 직접피해액을 구체적으로 산정하기 위해서는 직접피해의 대상자산에 대한 자료, 침수심-피해율 관계, 해당지역의 침수심 자료 등이 있어야 함. 그러므로 직접 피해액 산정식을 사용하여 실제 홍수 피해액을 산정하기 위해서는 정보를 사전에 준비하기 위하여 산정식을 미리 설정해두고, 실제로 특정한 홍수가 발생하게 되면 이러한 정보를 산정식에 대입함으로써 실제 홍수 피해액을 산정하게 됨.
- 기존의 홍수피해액 산정방법에서는 피해지역을 대도시, 중소도시, 전원도시, 농촌지역, 산간지역 등으로 특성에 따라 구분하고 특성별 가중치나 속성 값들을 침수면적에 곱하는 1차원적인 방법으로 피해액을 계산하였음. 이러한 기존 방법은 최소 구분단위를 시 · 군 · 구로 하고 있어서 그 정밀도가 낮을 뿐 아니라 지역의 대표적 특성을 인구라는 하나의 독립변수만

으로 구분하고 있어서 실제 피해지역의 자산가치가 올바르게 반영되었다고 할 수 없음.

· 또한 침수지역에 대한 공간적 정의 없이 수치적으로만 침수면적을 산정하기 때문에 침수심에 대한 고려가 불가능하며, 피해지역 내에서도 토지의 이용형태나 인구밀집도 등에 따라 피해액 산정방법이 달라야 함에도 이를 반영하지 못하는 단점이 있었음. 하지만 다차원 홍수피해액 산정법에서는 피해지역의 읍·면·동 단위 행정구역, 침수구역 및 침수심, 토지이용상태 등의 공간정보를 본 연구에서 개발한 Tool과 연계하여 행정구역 내에서도 침수피해지역의 침수심에 따라 주거지역, 농업지역, 산업지역별로 침수편입율을 산정할 수 있도록 하였음. 침수편입율이란 행정구역 내에서 주거, 산업, 농업 등 지역 특성요소의 총자산가치를 실제 침수된 부분에 대한 자산가치로 환산하기 위해 지역특성요소별로 지리요소인 공간객체들의 위치정보를 침수심별로 중첩하여 전체에 대한 비율로 나타낸 것임. 따라서 본 연구에서 개발한 GIS 기반 홍수피해액 Tool은 다음과 같은 산정방법으로 모델을 구축하였음.



<그림 3-99> 다차원 홍수피해액 산정방법

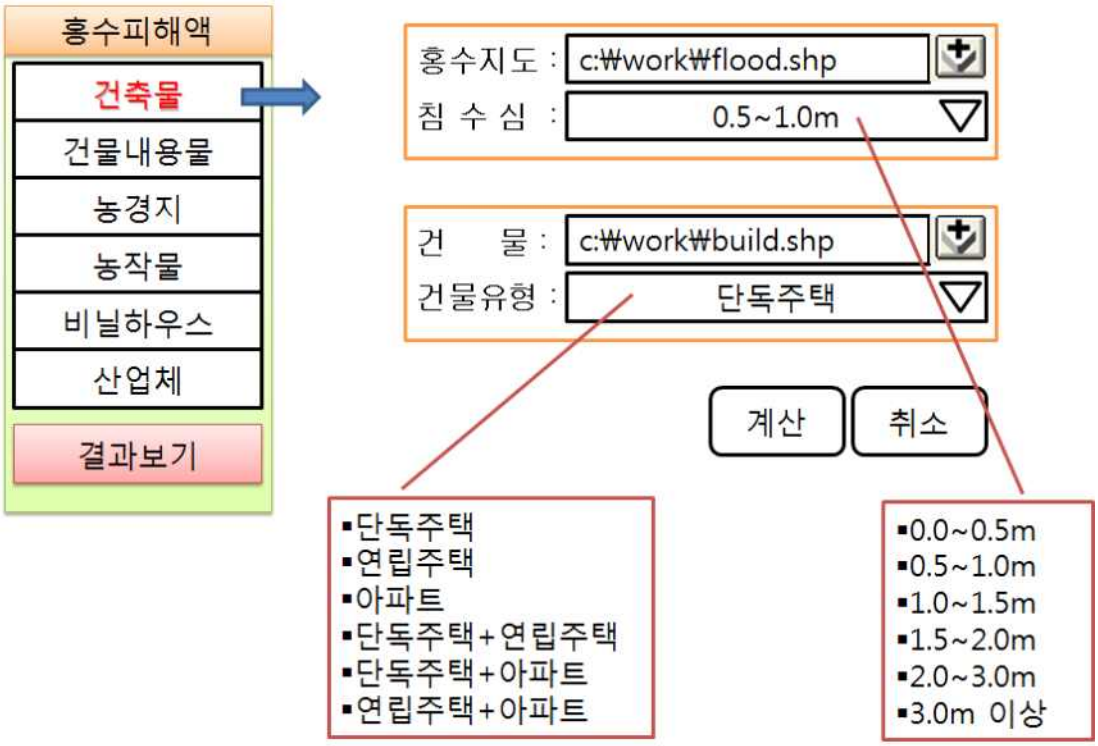
· 본 연구에서 개발한 GIS Tool은 침수예상도, 건축물도, 토지이용도 등이 GIS DB가 활용이

가능하며, 건축물/건축내용물/농경지/농작물/비닐하우스/산업체 항목별 평가방법 등을 GIS DB 여건을 고려하여 개선하였음. 또한 GIS 시스템 구현 부분에서는 신속하면서 간편하게 사용자가 홍수피해액을 현실적으로 평가할 수 있도록 벡터 기반의 GIS 시스템을 개발하였으며, 사용자가 침수심, 건물형태, 도시유형 등을 선택적으로 적용할 수 있도록 인터페이스 및 분석 알고리즘을 구현하였음.

(다) 적용 알고리즘

· 본 절에서는 본 연구에서 개발한 GIS 기반 홍수피해액 Tool의 사용방법을 소개하고자 함. 앞서 언급한 건축물, 건물 내용물, 농경지, 농작물, 비닐하우스, 산업체에 대한 GIS 기반 홍수피해액 Tool의 알고리즘은 다음과 같음.

① 건축물



<그림 3-100> GIS 기반 건축물 알고리즘

ㄱ. 건물레이어와 홍수지도를중첩 하여 홍수지도 영역 안에 포함된 건물만 추출한 후 아래 과정을 수행한다.

ㄴ. 건물레이어 필드 생성 및 피해액 계산

· 건물면적 : name(area build)/ 소수점 1자리/ 면적 자동계산

· 피해율 : name(ratio build)/ 소수점 2자리/ 침수심별로 아래 표의 수치 입력

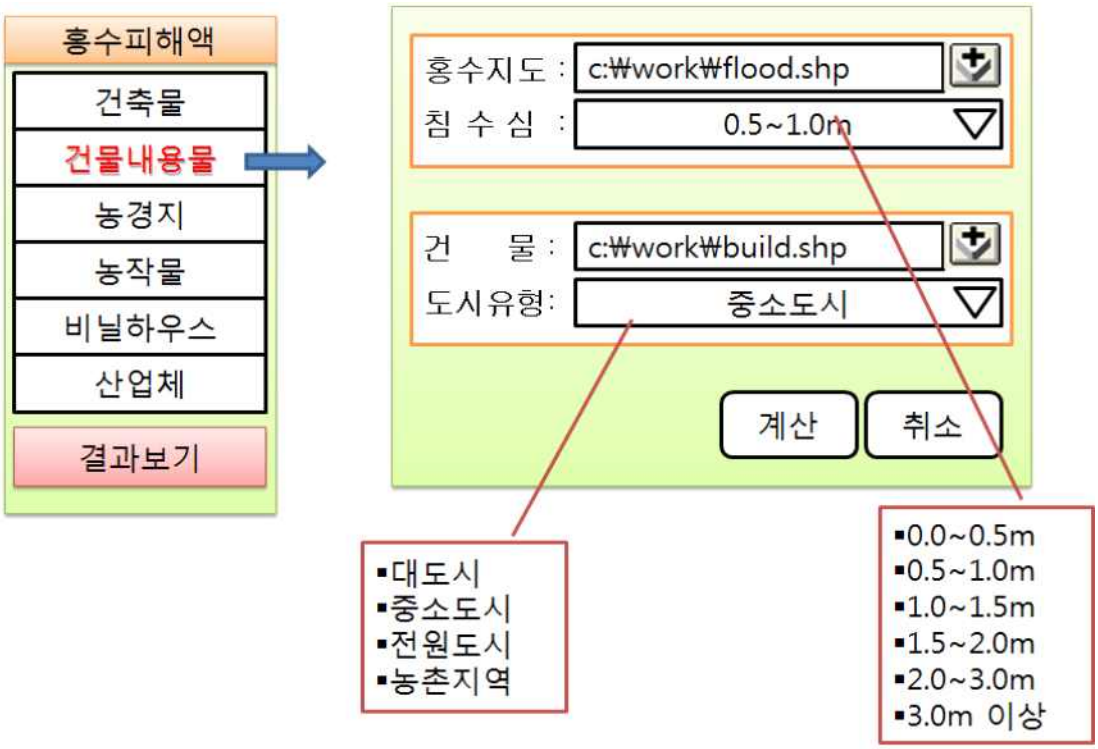
<표 3-27> 침수심별 피해율

침수심	0.0~0.5m	0.5~1.0m	1.0~2.0m	2.0~3.0m	> 3.0 m
피해율	0.15	0.32	0.64	0.85	1.00

· 계산 : name(cal build) = 건축면적 × 건축단가 × 피해율
(* 이때 건축단가는 사용자가 지정한 건물유형 별로 정해짐)
* 단독주택(722,822원/m3), 연립(566,000원/m3), 아파트(566,000원/m3)
단독주택 + 연립주택(650,000원/m3), 단독주택 + 아파트(605,000원/m3),
연립주택 + 아파트(566,000원/m3)

ㄷ. 건축물 피해액 : 건물별로 계산된 피해액을 모두 합산

② 건물 내용물



<그림 3-101> GIS 기반 건물 내용물 알고리즘

ㄱ. 건물레이어와 홍수지도를 중첩 하여 홍수지도 영역안에 포함된 건물만 추출한 후 아래 과정을 수행한다.
ㄴ. 건물레이어 필드 생성 및 피해액 계산
· 건물면적 : name(area build)/ 소수점 1자리/ 면적 자동계산
· 도시유형별 가정용품 평가액 : name(price city)/ 정수

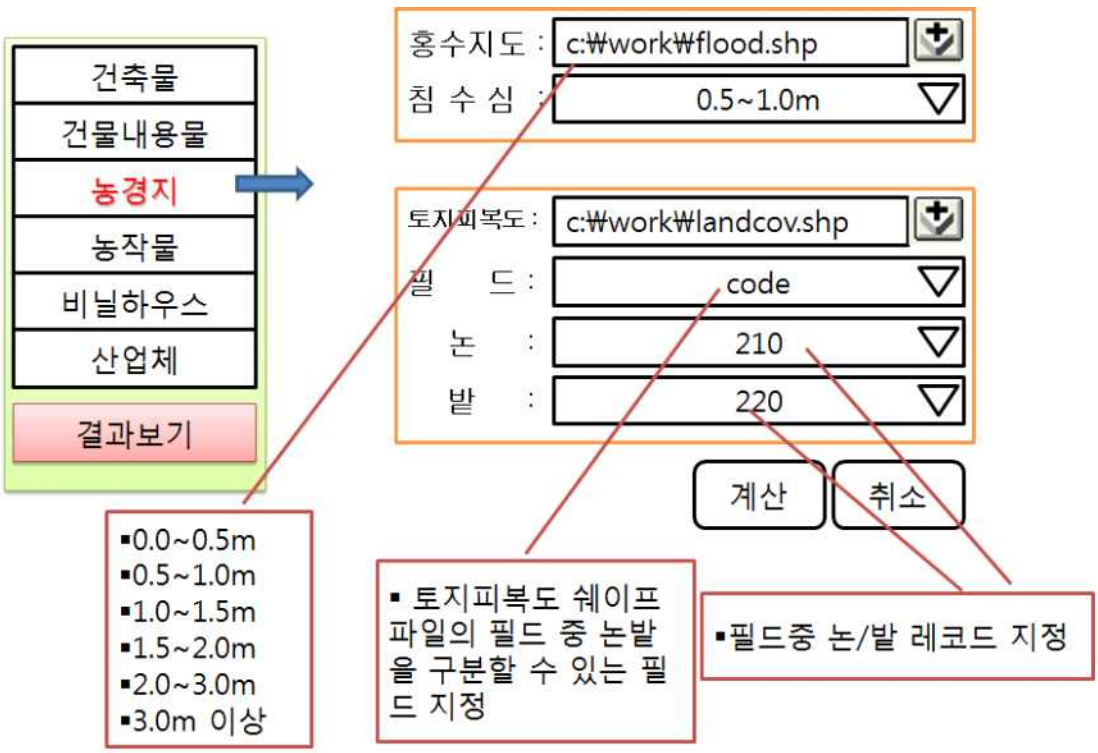
<표 3-28> 도시유형별 평가액

도시유형	대도시	중소도시	전원도시	농촌지역	산간지역
평가액/세대	27,402,902	22,329,401	17,255,900	12,182,399	7,108,898

· 피해율 : name(cal home)/ 소수점 3자리/ 침수심별로 아래 표의 수치 입력
· 계산 : name(cal home) = 가정용품평가액(원/세대) × 건물면적 × A (세대/m2) × 피해율
(* A : 대도시(0.0090), 중소도시(0.0076)/전원도시, 농촌/산간지역(0.0065)

ㄷ. 건축내용물 피해액 : 건물별로 계산된 피해액을 모두 합산

③ 농경지



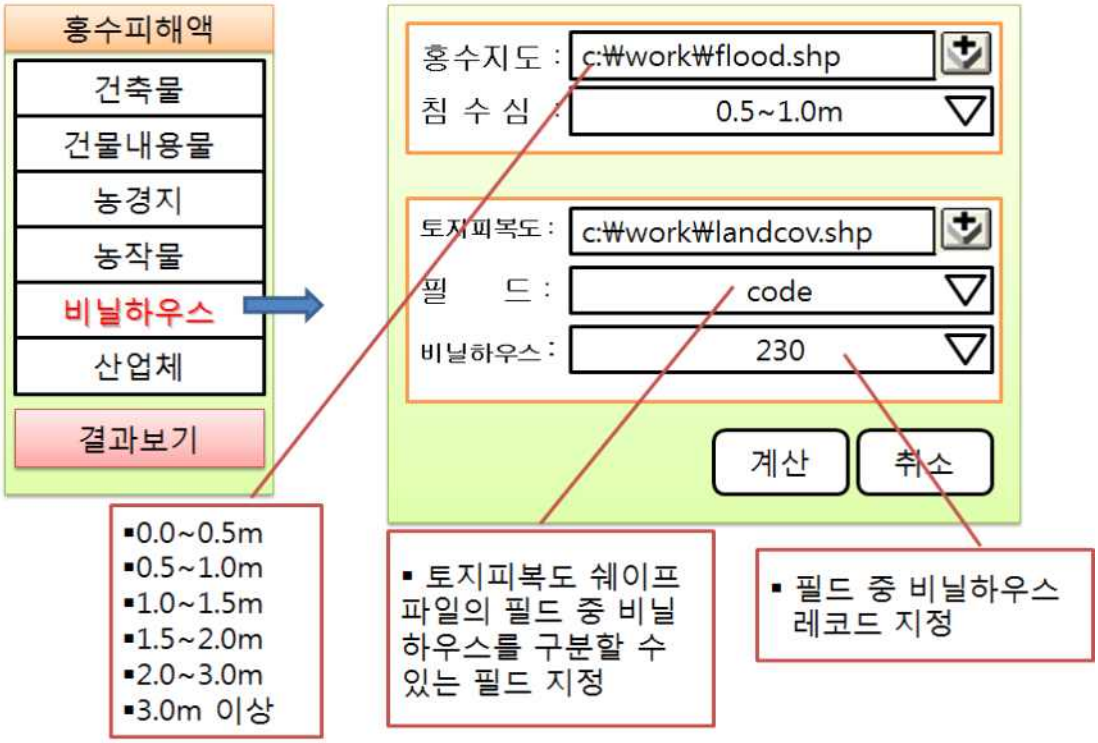
<그림 3-102> GIS 기반 농경지 알고리즘

ㄱ. (토지피복 레이어 + 홍수지도) 중첩한 후 홍수지도 영역내의 토지피복도 추출 → 논/밭 feature 선택 후 저장
ㄴ. 토지피복 레이어 필드 생성 및 피해액 계산
· 농작물면적 : name(area_agri2)/ 소수점 1자리/ 면적 자동계산
· 피해액 : name(cal nong) = 면적(m2) × A × B
ㄷ. 농작물 피해액 : 농작물별로 계산된 총 피해액을 모두 합산

<표 3-29> 논/밭의 침수심별 피해율

	침수심별 피해율 [A]		농작물 자산가치 [B]
	< 1m	> 1m	
논	0.47	1.0	607원/m2
밭	0.51	1.0	1,581원/m2

④ 비닐하우스



<그림 3-103> GIS 기반 비닐하우스 알고리즘

ㄱ. (토지피복 레이어 + 홍수지도) 중첩한 후 홍수지도 영역내의 토지피복도 추출 → 비닐하우스 속성 선택 후 저장

ㄴ. 토지피복 레이어 필드 생성 및 피해액 계산

· 비닐하우스 면적 : name(area_ghouse)/ 소수점 1자리/ 면적 자동계산

· 농작물피해액 : name(cal_gagri) = [area_ghouse] × 2,221(원/m2)

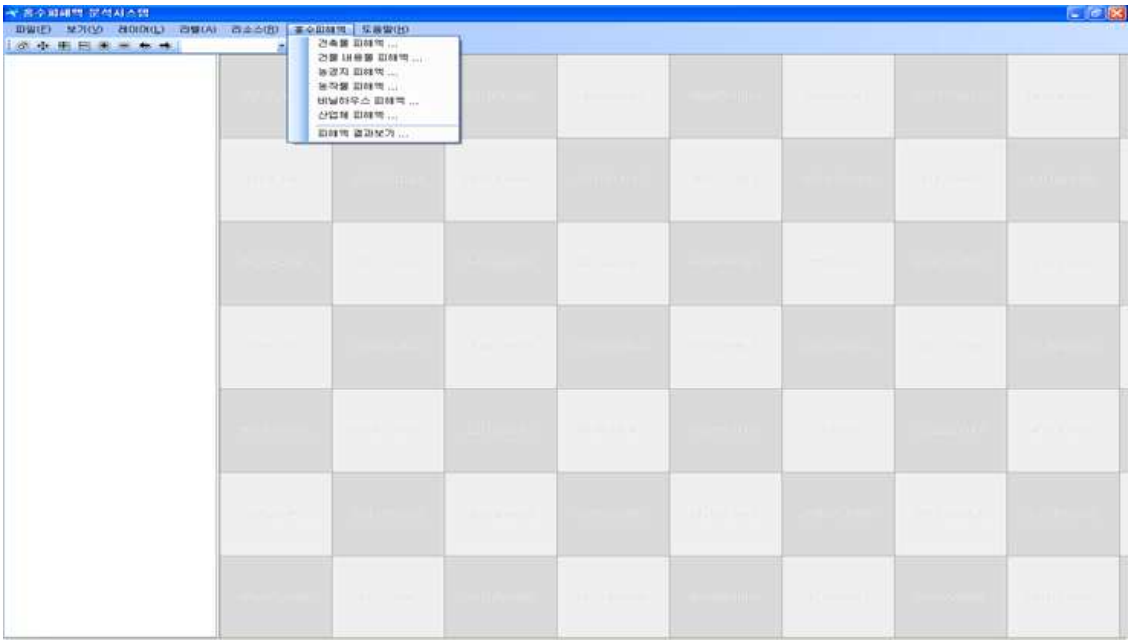
ㄷ. 비닐하우스 피해액 : 비닐하우스 별로 계산된 총 피해액을 모두 합산

(라) GIS Tool을 이용한 피해액 산정 (수어댐 예제)

· 본 연구에서는 Duramap-Xr 엔진을 이용하여 댐 하류부의 홍수피해액을 앞서 언급한 다차원법으로 산정할 수 있는 GIS Tool을 개발하였음. 본 연구에서 개발한 GIS Tool은 댐 하류부의 홍수범람도가 산정되면 이에 따른 건축물도, 토지이용도 등을 활용하여 건축물, 건축내용물, 농경지 등의 피해액을 산정할 수 있음. 또한 하류부의 홍수범람도에서 붕괴지역(breach zone), 급격한 수위 증가 지역(zones with rapidly rising waters), 보존지역(remaining zone)을 각각 설정하고, 면적당 인구를 설정하면 인명피해 수까지 계산이 되도록 모형을 구축하였음.

① 시스템 입력 화면

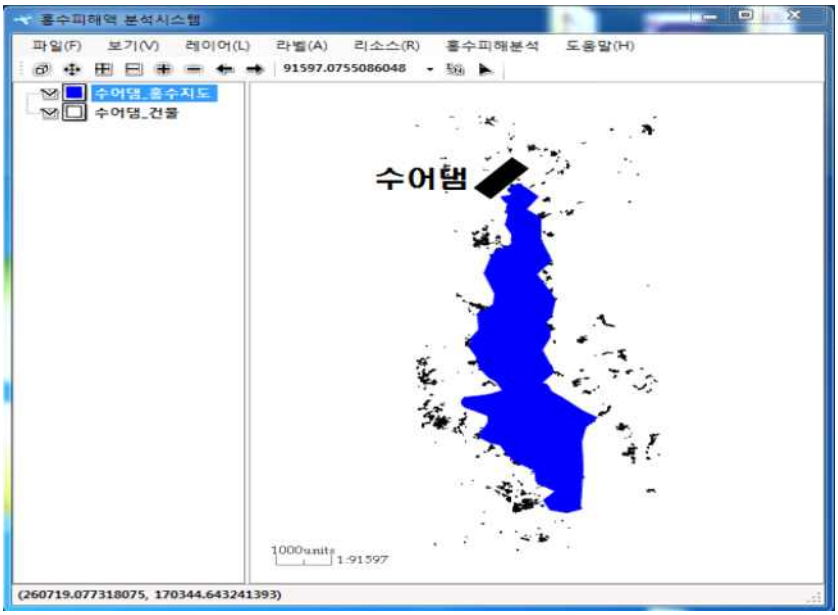
· 본 연구에서는 앞서 언급하였듯이 Duramap-Xr 엔진을 이용하여 GIS Tool 모형을 개발하였으며, 입력자료로는 홍수범람도, 건축물도, 토지피복도가 GIS DB로 구축됨. 또한 평가항목에 대한 특성이 반영될 수 있도록 인터페이스를 구현하였음.



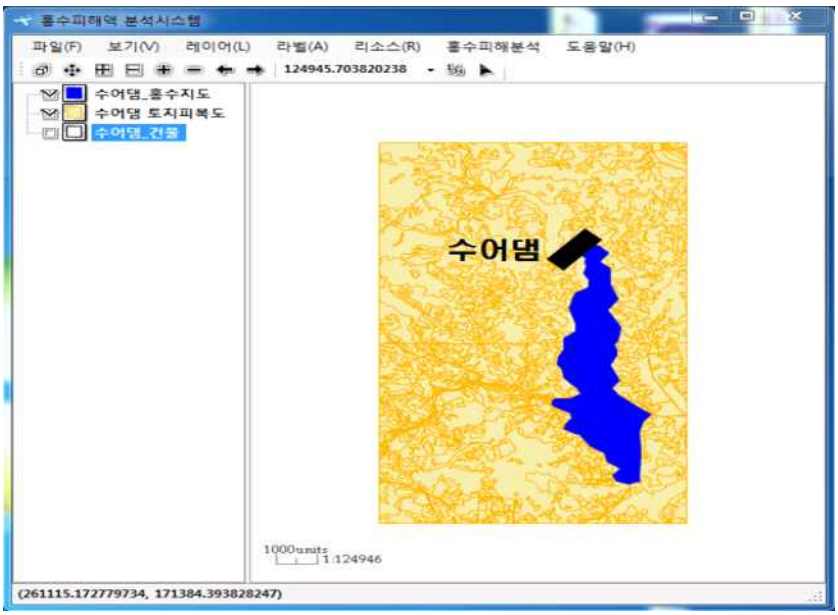
<그림 3-104> GIS 인터페이스 초기화면

② GIS Tool을 이용한 홍수피해액 분석 입력자료

· 본 연구에서 개발한 GIS Tool은 기본적으로 댐 하류부의 홍수범람도의 자료가 구축이 되어 있어야 하고, 이에 따른 댐 하류부의 건물도, 토지피복도가 구축이 되어 있어야 함. 아래 <그림 3-105, 106>와 같이 홍수에 따른 건물 및 토지피복도의 양상을 볼 수 있으며, 각 레이어 속성에 맞게 계산이 가능하도록 입력자료를 구축하였음.

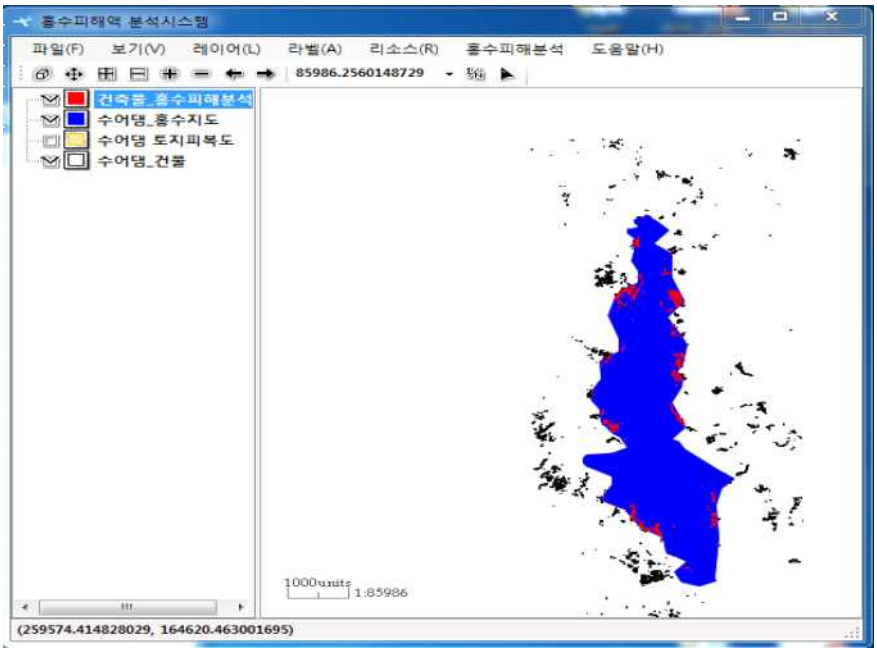


<그림 3-105> 수어댐 하류 홍수범람도 및 건물지도



<그림 3-106> 수어댐 하류 홍수범람도 및 토지이용도

· <그림 3-105, 106>와 같이 수어댐 하류의 입력자료를 구축하고 "홍수피해분석" 탭에서 사용자가 원하는 홍수심을 선택하면 그에 따른 건물 및 농경지 피해액을 산정할 수 있음. <그림 3-107>에서 볼 수 있듯이 홍수범람도 내에 빨간색으로 하이라이트가 되어 있는 부분이 수어댐 하류에서 건물이 홍수에 의해 잠겨 피해액이 산정되는 부분임.



<그림 3-107> 수어댐 하류 건물피해액 산정 결과

· 따라서 건물도를 이용하면 건물 피해액, 건물 내용물 피해액이 산정이 가능하며, 토지피복도를 이용하면 농작물, 농경지, 유실 매몰 등을 사용자가 선택하는 침수심에 맞는 피해액 분석이 가능함.

③ GIS Tool을 이용한 홍수피해액 분석 결과

· 본 절에서는 수어댐 홍수범람도 내에 모든 지형이 1.0~2.0m 침수가 되었다고 가정하고 분석을 수행하였음. 앞서 구축한 자료를 토대로 침수구역 내에 건축물, 건축내용물, 농경지 등의 분석을 수행하였으며, 산정한 결과의 값은 <표 3-30>과 같음.

<표 3-30> 댐 하류부 자산피해액 산정 결과

피해항목		피해액(원)	비고
건축물		33,262,569,659	단독주택 + 연립주택
건물내용물		6,893,135,952	도시유형 : 중소도시
농경지	매몰	1,553,729,117	논, 밭 선택 (각 환경부 코드 : 210, 220)
	유실	5,982,385,582	
농작물		3,679,479,123	
비닐하우스		15,528,434,558	비닐하우스 환경부 코드 : 230
산업체	유형자산	91,885,807,534	산업체 중 제조업 선택 (산업체 환경부 코드 : 120)
	재고자산	11,498,934,156	
합계		170,284,475,682	

· GIS Tool을 이용한 분석 결과 수어댐 하류부의 홍수범람도 내에 1.0~2.0m의 침수가 되었다고 가정했을 때 총 피해금액은 173,408,975,697원이였으며 산업체 유형자산, 건축물, 비닐하우스 순으로 피해금액이 산정되었음.

(2) 댐 붕괴 홍수파에 따른 인명손실 추정법

· 대규모 댐 붕괴 홍수의 경우, 댐 붕괴 홍수파의 영향에 노출된 인명이 제한된 생존기회를 가질 때 경보시간은 매우 중요한 요소로 작용하며, 이러한 홍수형태는 댐 붕괴 홍수, 쯔나미, 폭풍해일 및 하천홍수 등이 고려될 수 있으나 본 연구에서는 댐 붕괴 홍수파에 의한 인명손실을 고려하였음. 홍수사상에 의해 야기된 인명손실을 추정하기 위해 다음 세 가지 단계를 고려하는 것이 제시될 수 있음.

① 홍수수심, 수위상승율 및 유속과 같은 홍수특성치에 대한 분석
② 경보, 대피 및 피난처의 효과를 포함하는 노출된 인명수의 추정
③ 홍수에 노출된 인원가운데 사망자수에 대한 평가

· 대피, 피난처 및 구조에 대한 가능성을 분석함으로써 홍수류에 노출된 총 인원수(NEXP)가 추정될 수 있으며, 노출된 인구에서 사망률(FD)이 추정될 수 있고, 사망률은 노출된 인원수에 의해 나누어진 사망자 수로써 정의되어짐.

· 기왕의 인명손실율이 추정되어온 세 개의 홍수지대를 정의하였고 이러한 사망률이 인명손실을 추정하기 위해 HEC-FIA에서 이용되어 졌음. 각각 홍수지대는 아래에 요약된 것처럼, 가용한 대피소와 국지적 홍수심 및 유속간의 상호작용에 의해 물리적으로 정의됨.

- 가능지대(chance zone) : 홍수류에 완전 노출된 경우. 홍수피해자들은 일반적으로 하류부로 휩쓸려가거나 수중에 빠지게 되며 생존자는 가능성에 크게 의존하고, 가능지대에서 기왕의 사망률은 50%~100%의 범위를 가지며 평균치로 91%를 사용한다.
- 완충지대(compromised zone) : 홍수류에 일부 노출되어 부분적인 피난처 역할을 하는 경우. 여기서는 격렬한 홍수류에 홍수희생자의 노출이 증가되면서 가용한 대피소가 홍수에 의해 심하게 피해를 입음. 완충지대에서 기왕의 사망률은 0~50%까지의 범위를 가지며 평균치로 12%를 사용함.
- 안전지대(safe zone) : 홍수류에 노출되지 않는 최소치로 완전한 피난처 역할을 하는 경우. 일반적으로 건조하고 상대적으로 고요한 홍수류에 노출되거나 사람을 휩쓸어버릴 수 있는 얕은 홍수에 노출되는 경우. 안전지대에서 사망률은 거의 0이며 평균치는 0.02%를 사용함.

(3) LIFESim 모형의 인명피해(LOL)모듈을 적용한 인명피해 추정법

(가) LIFESim 모형의 인명손실 모듈을 활용한 방법(미국)

· HEC-FIA 프로그램 내에 적용된 Simplified LIFESim 방법론은 선택된 사상-노출(Event-Exposure) 시나리오 및 주어진 인구를 포함한 건물 목록에 대해 다음의 절차에 따라 산정한다.

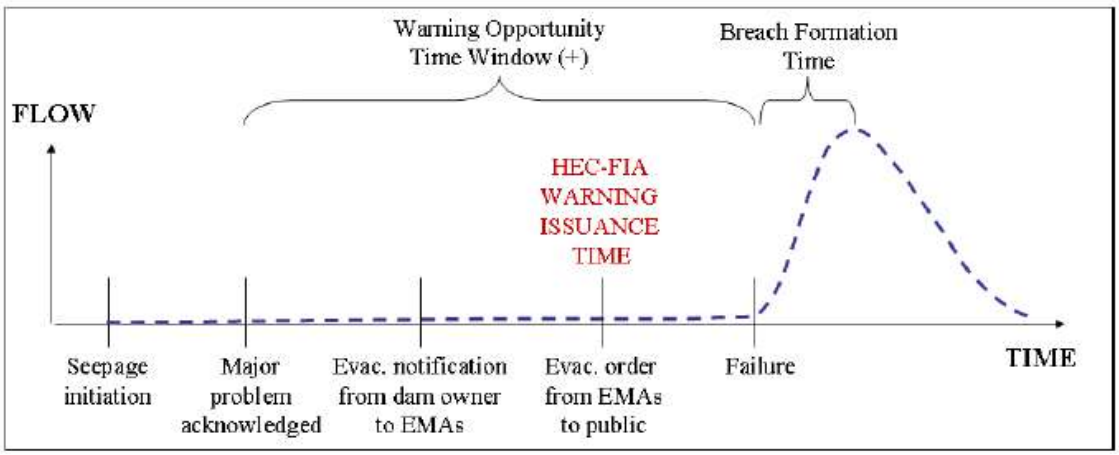
① 각 건물에 대한 댐 붕괴 홍수파 도달시간을 계산함. 도달시간은 건물 위치에서 홍수수심이 건물 거주자가 건물 내에 머무르거나 건물을 떠나서 발생하는 위험요인 대신에 건물위층으로 대피하는 것을 고려할 만큼 홍수위가 예측되었을 때의 시간임.

② 1단계로부터 각각의 댐 붕괴 홍수파 도달시간과 공중 경보발령 시간간의 차이를 알아냄으로써 각 건물에 대한 경보시간을 계산함. 경보시간은 개별 건물의 인구가 경보를 인지하고 이동하는데 소요되는 시간을 나타냄.

③ 개별 건물에 대해 대피에 요구되는 시간을 계산하며 이것은 건물 안에 있는 사람들이 이동 후에 완전한 지점으로 대피할 수 있는 시간에 대해 추정함.

④ 사용자 정의의 경보와 이동곡선을 하나의 상관관계로 합성하여 경보를 인식하고 이동하는 사람의 수를 추정함.

⑤ 각각의 대피결과 범주(evacuation outcome category)에 있는 인구의 백분율을 계산함. 각각의 건물에 대해 댐 붕괴 홍수파의 도달시간에서 세 가지 가능한 대피범주로 분류되는 거주자들의 백분율을 추정함.



<그림 3-108> 파이핑으로 인한 붕괴 시나리오에 대한 경보 및 대피 타임라인(예)

⑥ 각각의 건물에 대해, 이전에 기술된 것처럼 각각의 대피결과에서 사람들에 대한 치사율 지대(lethality zone)를 지정함.

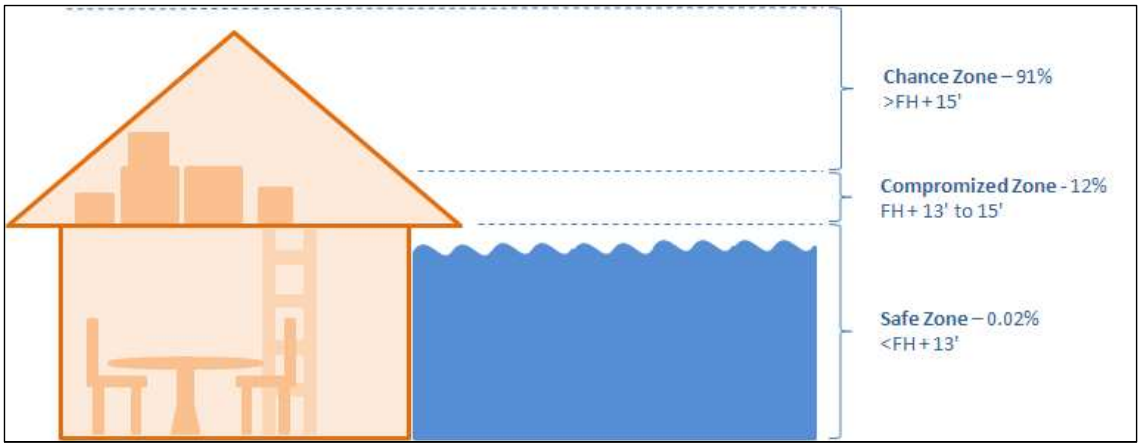
⑦ 각 대피결과 범주에 대해 치사율을 합산함으로써 각 건물에 대해 초기에 지정된 거주자들에 대한 전체 치사율을 계산함.

a) 대피별과 범주 1(cleared)에 대한 치사율은 0

b) 대피결과 범주 2(caught)에 대한 치사율은 대피중인 caught 사람들의 백분율에 0.91을 곱한 것과 같음.

c) 대피결과 범주 3(not mobilized)에 대한 치사율은 홍수지대(건물에서 최대

범람수심에 좌우되는)에 대한 사망률과 건물 내에 머물고 있는 사람들의 백분율을 곱한 값과 같음.



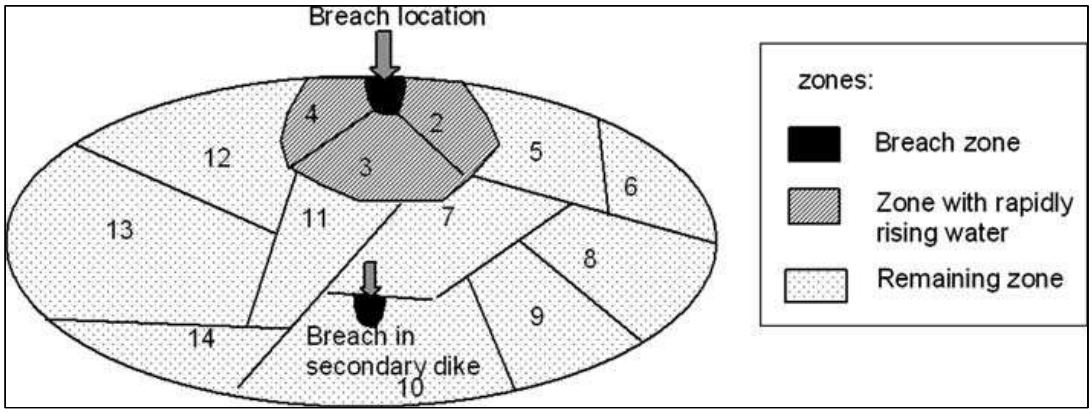
<그림 3-109> 건물별 홍수심에 따른 사망률

⑧ 단계 2에서 얻어진 각 건물의 초기인구에 단계7로부터 얻어진 각각의 전체 사망률을 곱함으로써 각 건물에 대한 인명손실 추정치를 계산함.
⑨ 단계8로부터 모든 건물에 대한 인명손실 추정치를 합산함으로써 총 인명 손실 추정치를 계산함.

(나) 사망률 함수에 의한 인명손실 추정기법(EU)

· 홍수가 발생한 지역에서 사망률 함수는 상이한 지대별로 다르게 나타나며 이것은 구분된 위험지대(hazard zone)에 따라 제시되었으며, 세 개의 전형적인 재해지대가 붕괴부에 대해서 구분됨.

- 붕괴부 지대(breach zone) : 홍수방어시설의 붕괴부를 통한 유입에 기인하여 빠른 유속이 일반적으로 붕괴부 후면에 발생한다. 이것은 건물의 붕괴와 흐름에 저항하는 인원의 불안정 상태를 야기한다.
- 빠른 수위상승 지대(zones with rapidly rising waters) : 빠르게 상승하는 수위에 기인하여 사람은 더 높은 지대나 건물의 더 높은 층의 피난처에 도달할 수 없음.
- 보존지대(remaining zone) : 이 지대에서 홍수조건은 보다 안정적이며 피난처를 찾을 더 나은 가능성을 제공함. 사망자수는 피난처를 찾지 못하거나 피난처의 인원에 대한 확대된 노출과 관련된 불리한 건강상태에 기인하여 발생할 수 있음.



<그림 3-110> 인명손실 추정을 위한 재해지대(Jonkman, 2007)

① 붕괴부 지대에서의 사망률

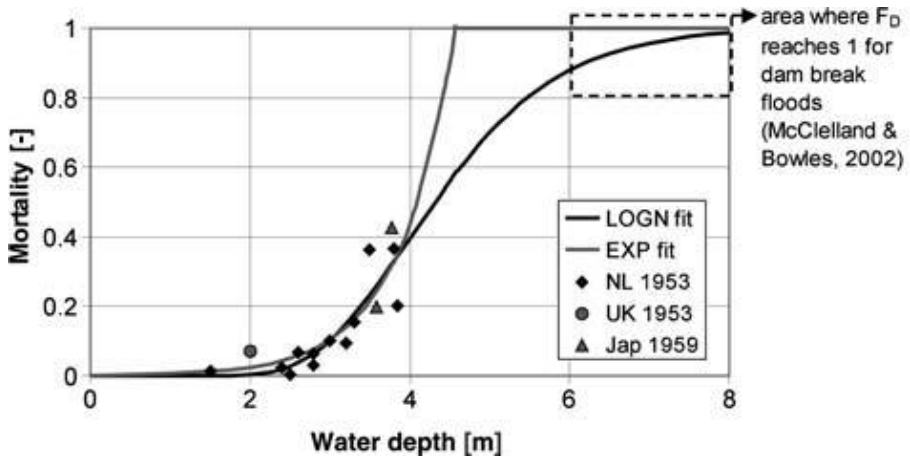
· 일반적으로 사람의 불안정 상태와 건물에 대해 피해는 모두 수심-유속의 곱에 대한 함수로써 추정됨. 흐름조건에서 건물의 피해에 대한 기준을 수심과 유속의 곱으로 제시하였음.

$$hv \geq 7m^2/s \quad \text{and} \quad v \geq 2m/s \tag{70}$$

· 붕괴부 지대의 경계를 정의하기 위해 이러한 함수를 이용하는 것이 제시되었으며, 홍수기 동안 대부분의 인원이 내부에 남아있고 사람들이 건물 붕괴시 생존하지 않는다고 가정하면 붕괴부 지대에서의 사망률 $FD = 1$과 같다고 가정.

② 빠른 수위상승 지대에서의 사망률

· 빠른 수위상승 지대는 $0.5m/h$의 상승속도를 가지며 유도된 사망률 함수는 이러한 경계값 이상의 상승률을 가진 상황에 적용될 수 있음. 그림에서 대수정규분포(lognormal distribution)에 대해 유도된 사망률 함수는 다음과 같음.



<그림 3-111> 빠른 수위상승 지점에서 수심에 대한 사망률 함수

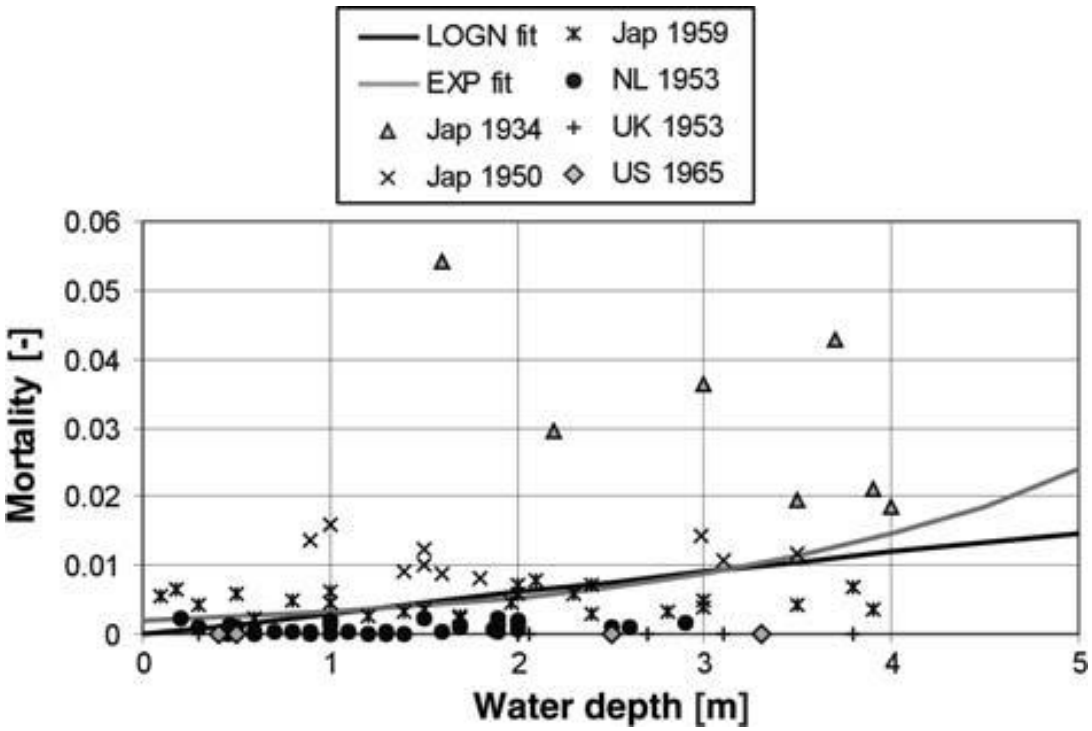
$$F_D(h) = \Phi_N(\frac{\ln(h) - \mu_N}{\sigma_N}) \quad (71)$$

$$\mu_N = 1.46, \ \sigma_N = 0.28 \quad (72)$$

· 여기서 Φ_N은 누가정규분포, μ_N은 정규분포의 평균이며 σ_N은 정규분포의 표준편차임.

③ 보존지대

· 보존지대는 붕괴부 지대 및 빠른 수위상승 지대 외부의 사망자를 고려하여 구분되며 이러한 지대에서 홍수조건은 대피소를 찾을 더 높은 가능성을 제공함으로써 수위상승 속도는 $0.5m/h$ 이하로 나타남. 그림에서 대수정규분포로부터 유도된 사망률 함수는 다음과 같음.



<그림 3-112> 보존지대에서 수심에 대한 사망률 함수

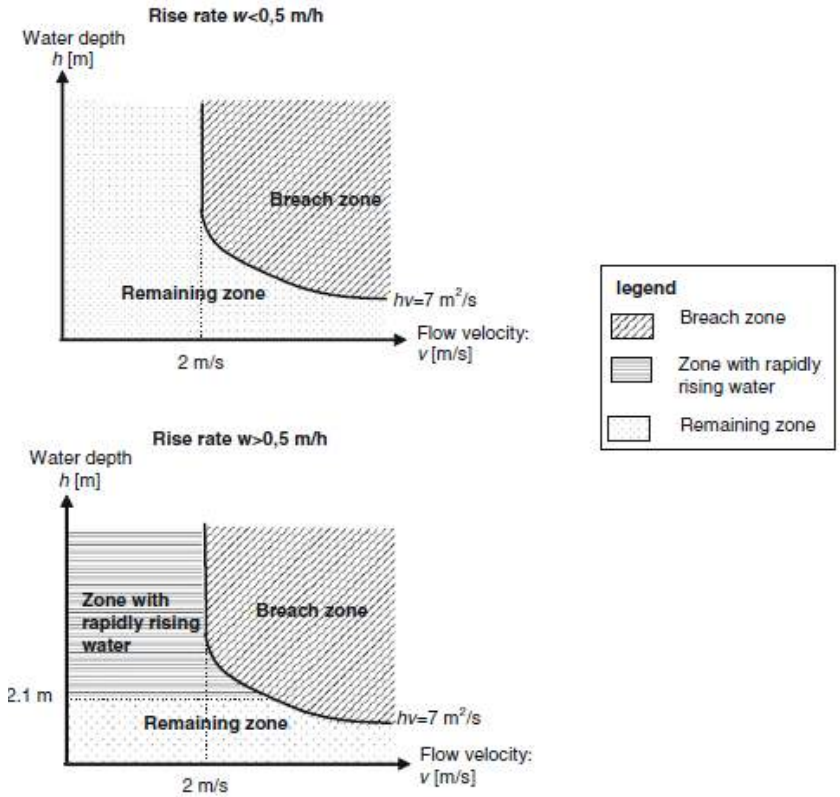
$$F_D(h) = \Phi_N(\frac{\ln(h) - \mu_N}{\sigma_N}) \quad (73)$$

$$\mu_N = 7.60, \ \sigma_N = 2.75 \quad (74)$$

$$\text{if } (\omega < 0.5m/h \text{ or } (\omega \geq 0.5m/h \text{ and } h < 2.1m)) \text{ and } (hv < 7m^2/s \text{ or } \nu < 2m/s)$$

· 상기에 제시된 사망률 함수들이 적용될 수 있는 홍수조건에 대한 범위는 <그림 3-113>에 제시된 것과 같으며 사망률 지대의 홍수조건은 홍수위 상승속도가 경계

치인 ω=0.5 m/h로 구분될 수 있다. 제시된 사망률 함수들은 네덜란드에서 이용된 표준피해모형(standardized damage model)에 적용되어짐.



<그림 3-113> 수심, 수위상승률 및 유속함수로써의 사망률 함수

(다) 소양강 댐 붕괴 모의 적용구간

· 소양강댐 붕괴에 대한 하류부 홍수추적을 위해 소양강댐~ 의암댐 상류부 구간 약 21.01km의 하도구간에 대한 단면을 구성하여 모의에 적용하였음. 소양강댐 하류의 DAMBRK 입력 자료는 소양강 하천정비기본계획(2002, 원주청) 및 북한강 하천정비기본계획(2002, 원주청)의 하도단면을 이용하여 단면형식을 변환한 후 <그림 3-114>의 대상구간에 적용하였음. 총 단면수는 38개로 단면간 거리는 평균 0.5km 이며 계산시간간격은 0.1시간이며 총 모의시간은 90시간으로 수행하였음.

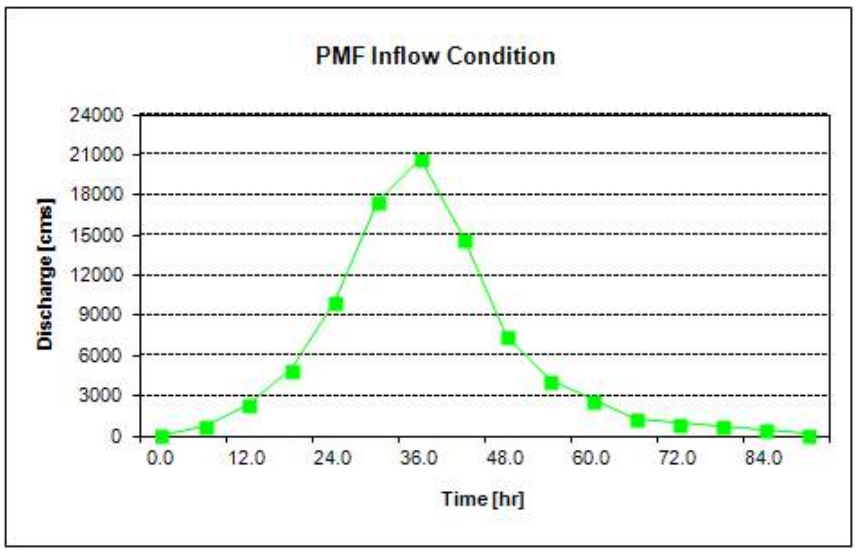
· 상류부 경계조건은 저수지 유입수문곡선으로 가능최대홍수량을 적용하였고 하류부 경계조건은 하천정비기본계획상의 500년 빈도의 홍수위를 적용하였음. 또한, 각 단면은 제내지 홍수터 및 제외지까지 포함하여 제내지 하도단면 변화에 대해 수위영향이 없도록 하였음. PMF 붕괴모의 시나리오 하에서 저수지 유입수문곡선은 저수지 상류유역의 PMF 유입수문곡선을 이용하였으며, PMF 조건하에서 소양강 합류부 상류의 북한강 유입수문곡선은 소양강댐 붕괴 홍수량에 비해 상대적으로 작은 유량이므로 본 연구에서는 무시하였음.



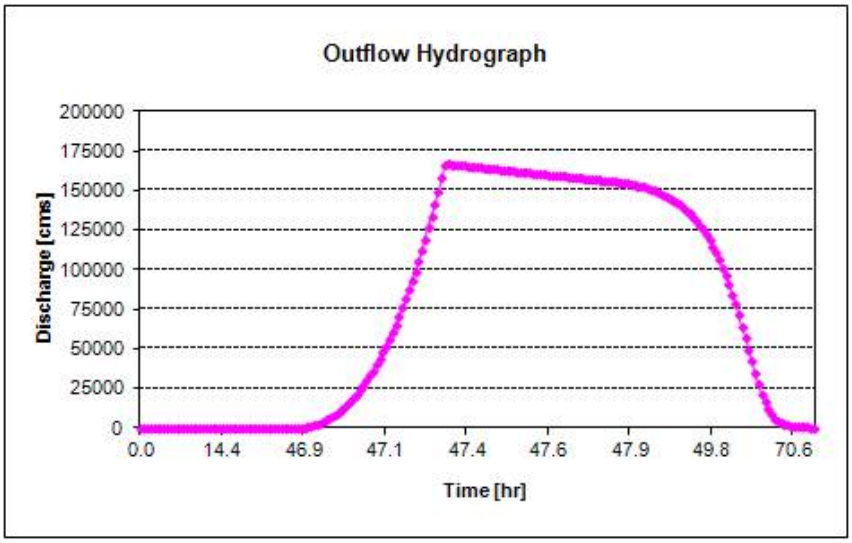
<그림 3-114> 적용대상 구간

① 소양강 댐 붕괴 모의 결과

· 극한홍수조건(PMF)의 시나리오로 댐 붕괴 모의수행 결과, 유입경계조건으로 이용된 저수지 유입수문곡선은 <그림 3-115>에, 저수지 홍수추적 후 유도된 댐 지점에서의 붕괴유출 수문곡선은 <그림 3-116>과 같음.

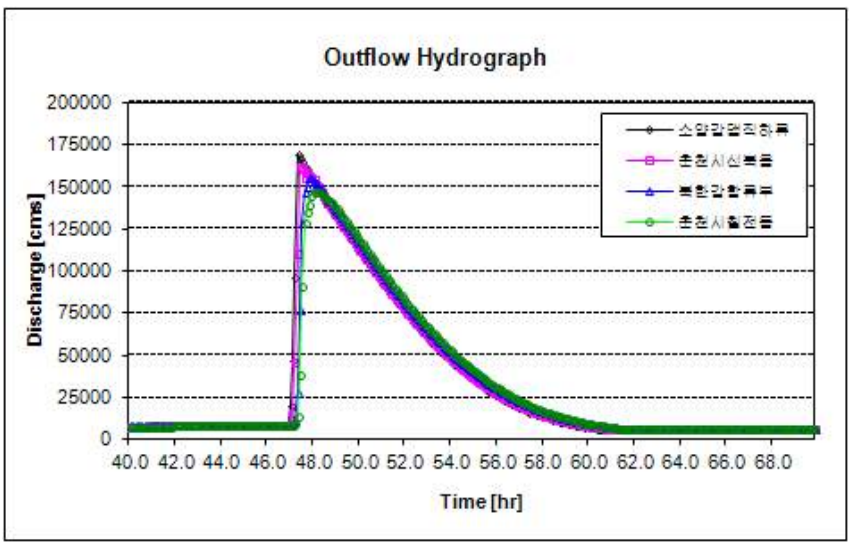


<그림 3-115> 유입수문곡선(PMF)

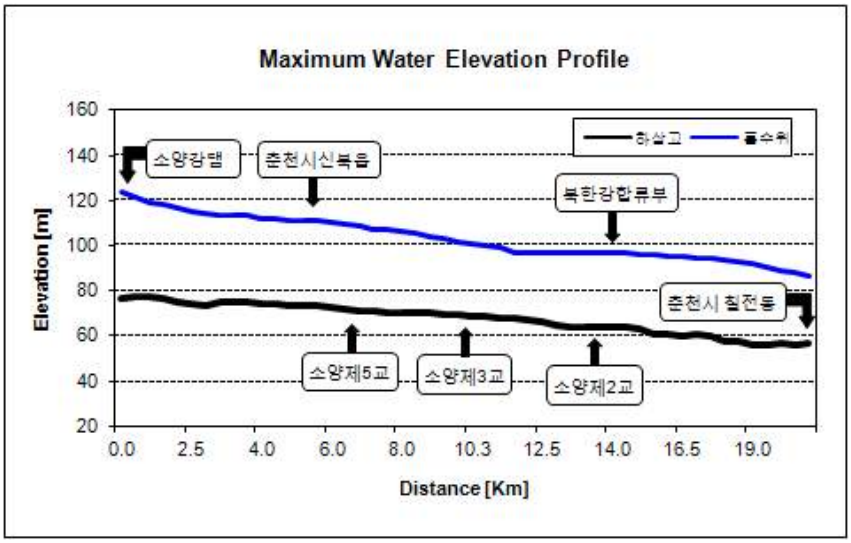


<그림 3-116> 댐 붕괴 유출수문곡선

· 극한홍수조건(PMF)에서 댐붕괴 유출수문곡선을 하류부로 홍수추적 한 결과 주요 지점별 첨두유량의 변화양상 <그림 3-117>과 최고수위의 변화양상 <그림 3-118>을 예측할 수 있었음. 본 시나리오에서 모의결과 주요 지점별 첨두유량은 제체 직하류부 169,578m^3/s, 춘천시 신북읍 부근 162,045m^3/s, 소양 제5교 157,232m^3/s, 소양 제3교 156,062m^3/s, 소양 제2교 148,404m^3/s, 북한강 합류점 147,094m^3/s, 춘천시 칠전동 부근 143,290m^3/s를 나타내고 있는데, 이 경우 최고홍수위는 제체 직하류부 EL. 123.55m, 춘천시 신북읍 부근 EL. 111.03m, 소양 제5교 EL. 107.72m, 소양 제3교 EL. 100.58m, 소양 제2교 EL. 96.63m, 북한강 합류점 EL. 96.54m, 춘천시 칠전동 부근 EL. 86.55m로 산정되었음. 한편, 주요 범람지역은 소양강 상류부 신북읍 구간, 북한강 합류전 춘천시 신사우동 구간, 북한강 합류후 춘천시 근화동 구간으로 제방 월류가 발생하였음.



<그림 3-117> 하류부 첨두유량 변화

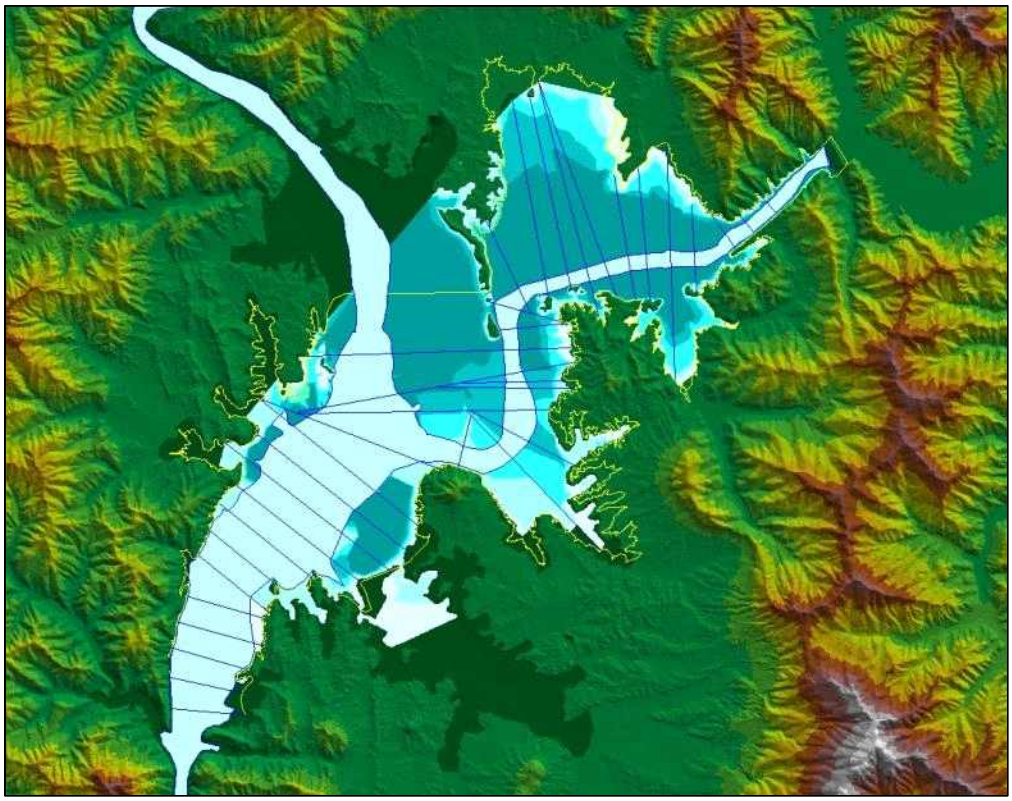


<그림 3-118> 하류부 최고수위 변화

· <표 3-31>은 극한홍수조건(PMF)에서 소양강 댐 붕괴시 하류부 주요 지점의 홍수추적 결과를 요약한 것임. 모의결과 소양강 댐 붕괴시 의암댐 상류부인 춘천시 칠전동 부근까지 홍수파 도달시간은 1.3시간이 소요되는 것으로 예측되었으며 북한강 합류부에 위치한 춘천시가지는 1.05시간이내에 홍수파가 도달하여 범람이 발생하는 것으로 나타남.

<표 3-31> 소양강 댐 붕괴 홍수파 해석결과(PMF)

지점명	댐에서 거리(m)	첨두유량(㎥/s)	최고홍수위(EL.m)	도달시간(hr)
댐 직하류부	0	169,578	123.55	0.00
춘천시 신북읍	5.450	162,045	111.03	0.50
소양제5교	7.140	157,232	107.72	0.60
소양 제3교	10.290	156,062	100.58	0.90
소양 제2교	13.907	148,404	96.63	1.00
북한강 합류점	14.450	147,094	96.54	1.05
춘천시 칠전동	21.010	143,290	86.55	1.30



<그림 3-119> 댐 붕괴에 따른 홍수범람도

② 댐 하류부 홍수피해액 산정

· 댐 붕괴로 인한 홍수피해 예측은 댐의 붕괴로 인해 하류부에서 발생하는 피해를 산정하고, 인명과 재산의 잠재적인 피해액을 추정하는 것임. 이러한 피해예측모델의 수립으로, 잠재적인 홍수취약지구를 분석하고 사전 수공구조물의 홍수방어능력을 강화하기 위한 계획수립에 근거자료로 활용할 수 있음.

· 홍수피해액 산정을 위해, 수리학적 모델인 DAMBRK 모형을 적용하여 댐 붕괴에 따른 하류부 홍수범람구역을 홍수범람도를 작성함으로써(<그림 3-120>) 예측한 후 이에 해당하는 각 행정구역의 자산 DB를 구축하였는 바 다차원 홍수피해예측법에서 산정하는 직접피해액 항목인 인명 피해액, 주거지 피해액, 농경지 피해액, 농작물 피해액, 공공시설물 피해액, 기타 피해액의 6가지로 분류하여 산정하였음.

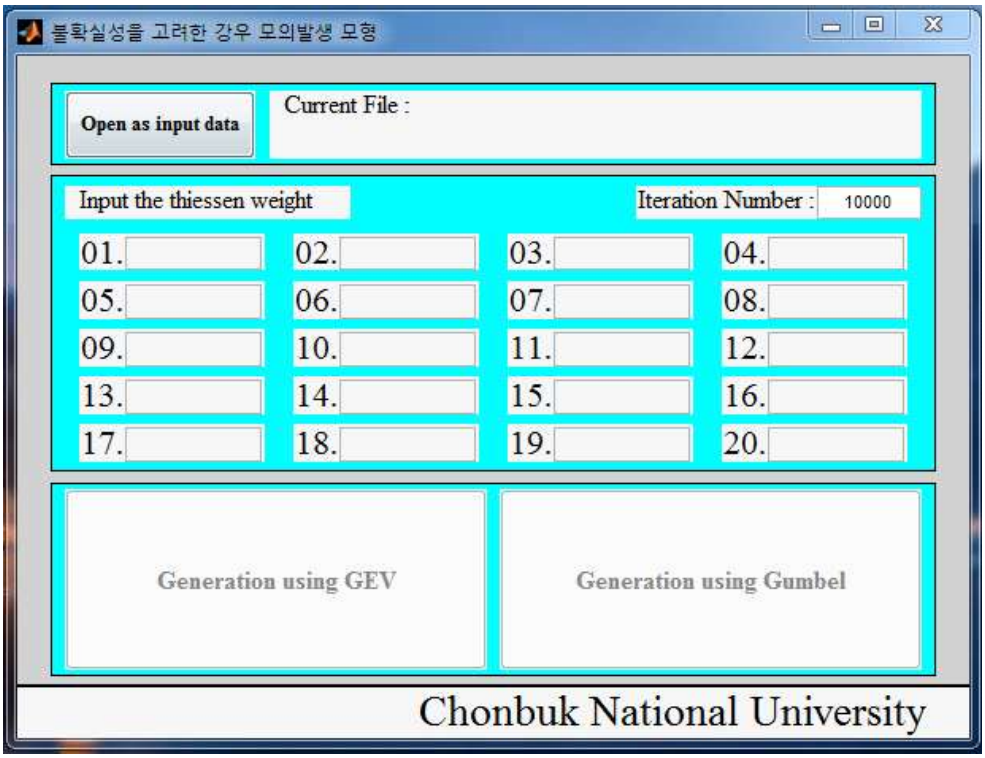
· 다차원 홍수피해예측법을 적용하여 소양강댐 붕괴에 따른 댐 하류부의 총 홍수피해액은 인명피해액, 일반자산(주거지, 농경지, 농작물) 피해액, 공공시설물 피해액, 기타 피해액의 합으로 산정되었음.

5. 댐 위험도 프로그램 개발

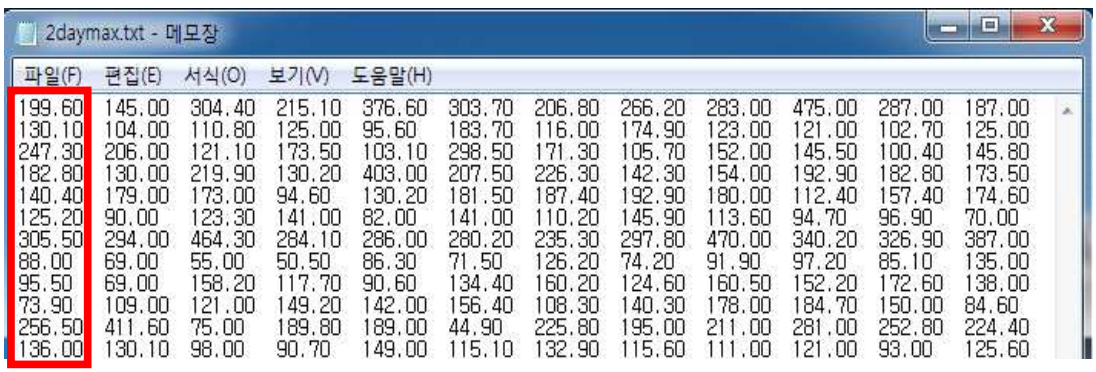
· 본 연구에서는 실무자가 용이하게 일련의 댐 위험도 해석 수행이 가능하도록 댐 운영 프로그램을 개발하였음. Matlab 기반의 댐 위험도 해석 프로그램은 ① 불확실성을 고려한 강우 모의발생 모형, ② Bayesian HEC-1 강우-유출 모형, ③ 불확실성을 고려한 댐 운영 모의 기법 순으로 진행 됨.

가. 불확실성을 고려한 강우 모의발생 모형 소프트웨어

· 다음 <그림 3-120>은 "불확실성을 고려한 강우 모의발생 모형 소프트웨어"의 첫 화면으로서 강수량의 모의발생 횟수를 지정(초기값 : 10,000번)하고, 각 유역에 대한 Thiessen 가중치를 입력하여 모의 강우량이 발생됨.



<그림 3-120> 불확실성을 고려한 강우 모의발생 모형 실행화면

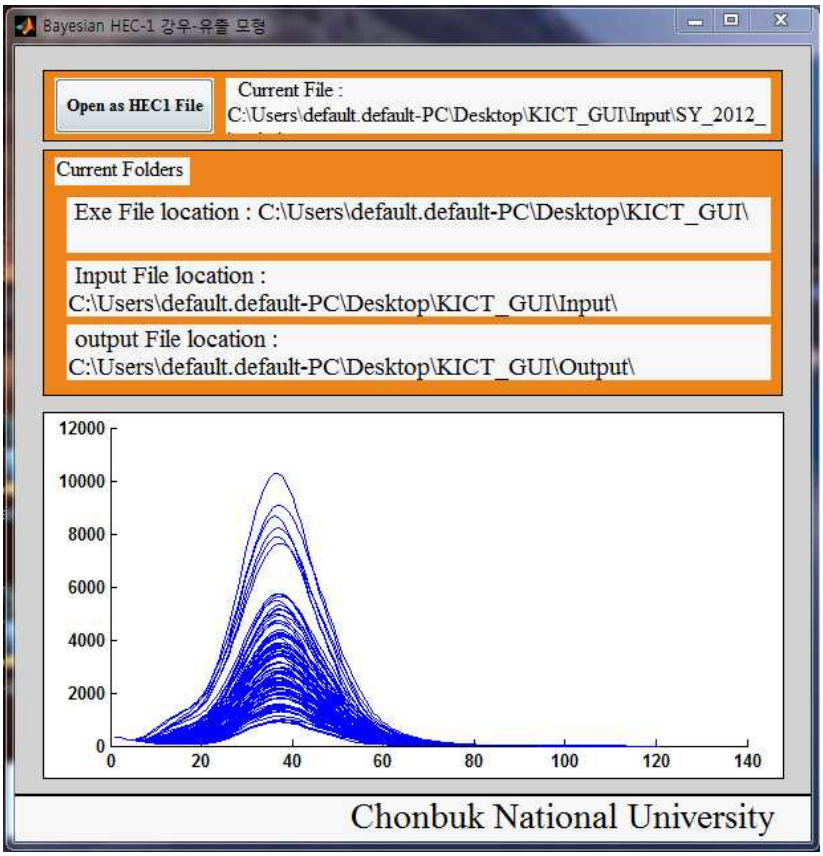


<그림 3-121> 강수 입력자료 형태(Box 영역이 하나의 지점을 나타냄)

· 생성하고자 하는 강우 발생 분포 버튼을 클릭하여 수행하면 Output 폴더내에 해당 분포형에 따른 강우 모의발생 결과 파일이 .txt형식을 생성되어짐. 여기서 생성된 .txt파일은 “Bayesian HEC-1 강우-유출 모형”의 입력자료로 이용됨.
(생성 파일명 > GEV : RF_gev.txt, Gumbel : RF_gum.txt)

나. Bayesian HEC-1 강우-유출 모형 소프트웨어

· 강우 모의 발생 모형의 결과 값을 통해 “Bayesian HEC-1 강우-유출 모형 소프트웨어”의 홍수량 산정 모형은 <그림 3-122>와 같으며 다음과 같이 구성되어 있음.
· 첫째, 모의 강수량에 따른 홍수량 산정결과가 그림으로 도시되어짐. (10,000번 모의)
· 둘째, Input 폴더에 위치하는 해당 댐의 HEC-1 입력자료 파일을 불러옴.
· 구동결과 <그림 3-122>와 같이 모의 횟수에 따른 홍수량 결과가 도시되어지며, 이 홍수량 결과값은 후에 댐 운영모의 기법에서 개발할 모형의 입력자료로 이용됨.

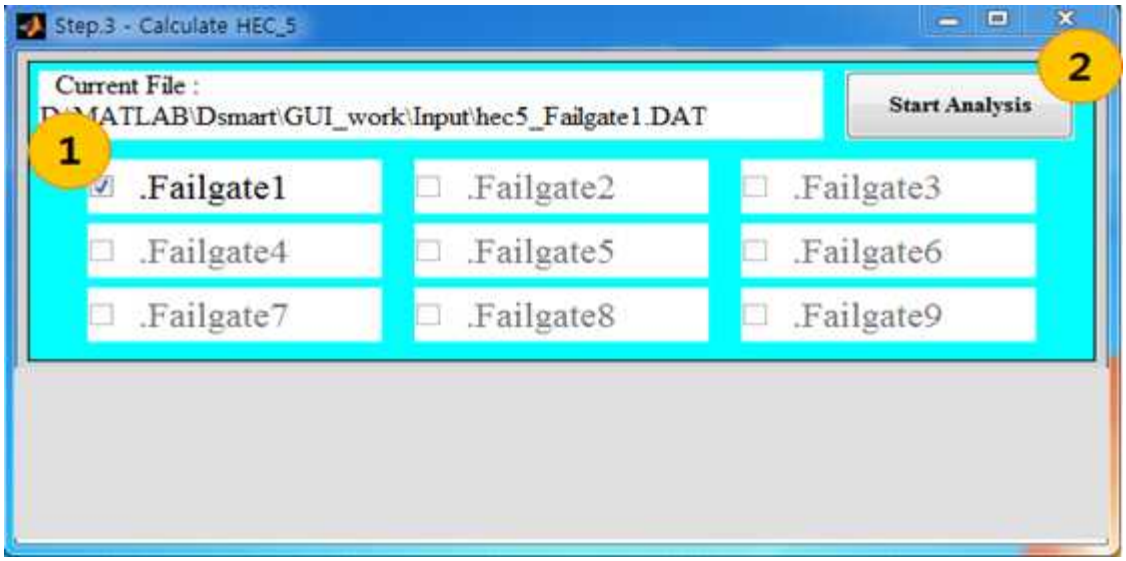


<그림 3-122> Bayesian HEC-1 강우-유출 모형 구동화면

다. HEC-5 댐 모의 운영 모델 개발

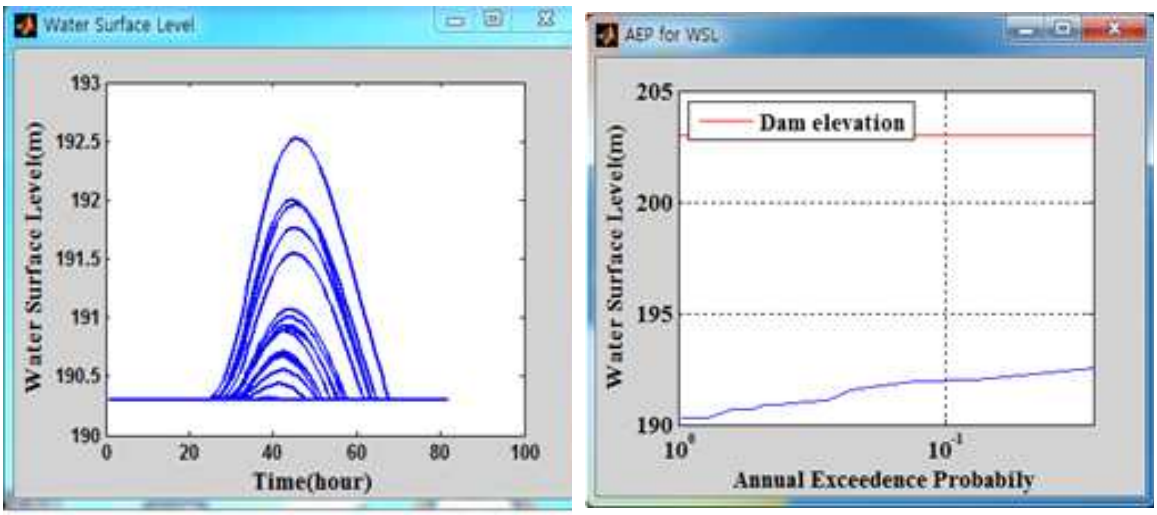
· 댐 위험도 분석은 불확실성을 기본적으로 고려한 해석이 이루어지는 것이 필요하며 이를 위해서 다수의 모의실험이 요구됨.
· 기존 HEC-5 모형은 도스기반의 모형으로서 입출력 구성이 매우 불편하기 때문에 다수의 모의실험이 불가능한 상태임. 이러한 문제점에 착안하여 Matlab 기반의 HEC-5 댐 모의 운영 모델을 개발하여 앞서 개발된 Bayesian HEC-1 모형과 연계

작업을 수행하였음.



<그림 3-123> Matlab 기반 HEC-5 댐 모의 운영 모델 구동화면

· <그림 3-123>은 Matlab 기반 HEC-5 댐 모의 운영 모델의 구동화면이며, 댐 운영 모의 모형은 Current 파일에서와 같이 초기 값으로 모든 게이트가 운영될 경우에 방류량이 기록된 HEC-5 입력자료가 주어져 있으며, 게이트 파괴에 따른 평가를 위해서 사용자가 원하는 게이트 파괴횟수를 선택하여 주면 게이트 파괴에 따른 방류량이 계산됨.
· 구동 결과 홍수모의에 결과에 따른 댐 운영결과를 시간-수위곡선을 통해 나타나며 전체 모의 결과에 따른 연 초과 확률-수위 곡선을 도시하여 결과로 나타냄.



<그림 3-124> 댐 모의 운영 모형 실행 결과

제 3 절 3차년도 연구수행내용

1. 지역빈도해석 모형 개발

· 수공구조물의 설계 및 수자원 관리계획 수립을 위한 재현기간별 확률강수량을 산정하기 위해 일반적으로 극치수문자료를 이용한 수문빈도해석을 수행하며, 빈도해석은 단일 관측소를 해석대상으로 하는 점빈도해석(point frequency analysis)과 유역내 다수의 관측소를 이용하는 지역빈도해석(regional frequency analysis)으로 구분됨.

· 빈도해석을 수행하고자 하는 대상지역 또는 유역의 크기가 매우 작으며, 인근에 기상관측소가 위치하고 그 관측기간이 충분히 길 경우에는 지점빈도해석을 이용한 확률수문량 산정 및 적용에 무리가 없겠으나, 대상유역의 면적이 상대적으로 커 하나의 관측소 자료가 해당 유역의 수문특성을 대표하기에 무리가 있거나, 인근에 관측소가 존재하지 않을 경우에는 지역빈도해석을 통해 확률수문량을 산정하는 것이 효율적이며 안정적인 확률수문량을 산정하는 방법임.

· 이러한 점에서 지점빈도해석을 위한 대상 자료가 충분히 확보되지 않아 통계적으로 신뢰성이 결여되는 문제가 발생하여 국내외적으로 이러한 문제점을 개선하고자 지역빈도해석을 통한 확률수문량 결정방안이 제안되었음.

· 전통적으로 지역빈도해석은 3단계로 이루어짐. 첫째, 수문학적으로 동질한 지역으로 구분하고, 둘째, 각 관측지점의 연최대치자료를 추출함. 마지막으로 확률분포형을 적용하여 확률수문량을 결정하고 다시 각 관측지점에 해당하는 기준값을 이용하여 원자료의 크기로 변환함.

· 이러한 지역빈도해석에서는 확률분포형 매개변수 추정방법으로 L-모멘트 방법이 널리 활용되고 있음. 최대치 혹은 최소치 등의 극치자료계열의 발생빈도를 분석하는데 일반적으로 GEV 또는 Gumbel 분포가 활용되고 있음. 먼저 GEV 분포형의 확률밀도함수와 누가확률밀도함수는 다음 식 (75), (76)과 같음. 여기서 μ는 위치매개변수(location parameter), σ는 규모매개변수(scale parameter), ξ는 형상매개변수(shape parameter)임.

$$f(x;,\mu,\sigma,\xi) = \frac{1}{\sigma}\left[1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{(-1/\xi)-1} \tag{75}$$

$$F(x;,\mu,\sigma,\xi) = \exp\left[-\left[1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-1/\xi}\right]\right] \tag{76}$$

· 일반적으로 GEV 분포의 매개변수를 추정하는 방법에는 최우도법(Maximum Likelihood method, ML), L-모멘트 등의 방법으로 사용하는 것이 일반적임. 본 연구에서는 국내에서 일반적으로 이용되고 있는 L-모멘트 기법을 활용하였음. L-모멘트 방법은 확률가중모멘트법(Probability Weighted Moment, PWM)의 선형조합으로서 모멘트에 가중치를 부여하는 방식으로 편의가 제거된 모멘트를 구하는 방법임.

· L-모멘트법은 L-모멘트비를 이용하여 기존 확률분포의 매개변수를 추정하는데 용이하며 구간 추정 및 가설검증도 가능한 장점이 있음. 확률가중모멘트의 선형조합인

L-모멘트는 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있음.

$$l_1 = \beta_0 \tag{77a}$$

$$l_2 = 2\beta_1 - \beta_0 \tag{77b}$$

$$l_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \tag{77c}$$

$$l_4 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0 \tag{77d}$$

· 식 77은 L-모멘트의 일반적인 형태이며, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$은 확률가중모멘트를 의미 함. 식 77를 이용하여 L-변동계수(L-coefficient of variation), L-왜곡도 계수(L-skewness), L-첨예도계수(L-kurtosis)는 다음과 같음.

$$L-C_v : t = \frac{l_2}{l_1},\ 0 < t < 1 \tag{78a}$$

$$L-C_s : t_3 = \frac{l_3}{l_2},\ -1 < t_3 < 1 \tag{78b}$$

$$L-C_k : t_4 = \frac{l_4}{l_2},\ 0.25(5t_3^2 - 1) \le t_4 \le 1 \tag{78c}$$

· GEV 확률분포형 매개변수 추정에 있어서 많이 사용되고 있는 L-모멘트방법은 순차로 정리된 관측치의 선형조합이므로 L-모멘트 방법으로 산정된 무차원화 된 변동계수나 왜곡도의 추정치는 거의 편의 되어 있지 않으며 정규분포에 가까워서 많이 이용되고 있는 추정방법임. 형상매개변수 ξ는 다음 식을 통해 추정이 가능함.

$$\hat{k} = 7.8590C + 2.9554C^2 \tag{79}$$

$$C = \frac{2b_1 - b_0}{3b_2 - b_0} - \frac{\log 2}{\log 3} \tag{80}$$

· 일단 k가 결정되며 위치매개변수 μ와 축척매개변수 σ는 다음 식의 의해서 산정됨. b_0, b_1, b_2는 확률가중모멘트 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$의 표본추정치를 나타냄.

$$\hat{\sigma} = \frac{(2b_1 - b_0)\hat{k}}{\Gamma(1+\hat{k})(1-2^{-\hat{k}})} = \frac{l_2\hat{k}}{\Gamma(1+\hat{k})(1-2^{-k})} \tag{81}$$

$$\hat{\mu} = b_0 + \frac{\hat{\alpha}}{\hat{k}}[\Gamma(1+\hat{k}) - 1] = l_1 + \frac{\hat{\sigma}}{\hat{k}}[\Gamma(1+\hat{k}) - 1] \tag{82}$$

· GEV 분포 다음으로 극치자료계열 분석에 많이 이용되고 있는 Gumbel 분포는 Extreme Value 분포 중에서 Type-1에 해당하는 극치분포임. 이는 GEV 분포에서 형상매개변수(shape parameter, ξ)가 0인 경우로 강수 및 홍수 빈도분석에 많이 이용되는 확률분포형 중 하나임. 다음 식 83, 84는 Gumbel 분포형의 확률밀도함수

및 누가확률밀도함수를 나타냄.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} exp[-\frac{x-\mu}{\sigma} - e^{-(\frac{x-\mu}{\sigma})}] \quad (83)$$

$$F(x) = \exp[-e^{-(\frac{x-\mu}{\sigma})}] \quad (84)$$

· 여기서 μ는 위치 매개변수(location parameter)이고, σ는 규모 매개변수(scale parameter)임. L-모멘트 방법은 앞서 언급하였듯이 지역빈도해석에서 매개변수를 추정하는 가장 대표적인 방법으로 확률가중모멘트법(PWM)의 선형조합으로 이루어지며, 매개변수의 편의를 저감시키는데 가장 유용한 것으로 알려지고 있음. L-모멘트법을 이용한 Gumbel 분포의 매개변수 추정방법은 다음과 같음.

$$\beta_r = \frac{m}{1+r} + \frac{\alpha \log(1+r) + \epsilon}{1+r} \quad (85)$$

· 여기서, ϵ는 Euler수(Euler' s number)이며 $\epsilon = 0.5772157$이다. Gumbel 분포의 매개변수인 $\hat{\mu}$와 $\hat{\sigma}$는 다음 식으로 구해짐.

$$\hat{\mu} = (2b_1 - b_0)/\log(2) = l_2/\log(2) \quad (86)$$

$$\hat{\sigma} = b_0 - 0.5772157\hat{\alpha} = l_1 - 0.5772157\hat{\alpha} \quad (87)$$

가. 계층적 Bayesian 모형 기반 지역빈도해석 모형 개발

· 앞서 언급한 지역빈도해석 모형의 경우 일반적으로 수행되고 있는 지역빈도해석의 절차임. 그러나 기존 지역빈도해석시 매개변수 추정에 대한 불확실성 및 매개변수의 지역화를 고려하지 못하는 단점이 존재하였음. 이에 본 연구에서는 계층적 Bayesian 모형을 개발하여 새로운 지역빈도해석에 대해 연구를 수행하였음.

· 본 연구에서 제안하고자 하는 HBRFA(hierarchical bayesian regional frequency analysis) 모형은 기존 해석 절차와 크게 다른 점은 2가지로 요약할 수 있음. 첫째, 기존 지역빈도해석 절차는 동질성이 확보된 지역에 대해서 대상 자료를 Pooling 하여 대표 확률분포형을 선정하고 빈도해석을 수행하는 반면 본 연구에서 제안하는 계층적 Bayesian 모형은 각 기점의 확률분포형이 적용되지만 지역적인 확률분포형을 상위단계에 배치함으로서 지역의 대표 매개변수를 취득하는 방법임. 즉, 유사한 통계적 특성을 가지는 자료집단들이 정보를 서로 교환함으로서 추정되는 매개변수의 불확실성을 저감하도록 고안된 계층적 Bayesian 모형의 장점을 이용하는데 목적이 있음. 둘째, 본 연구에서는 Bayesian 모형을 기반으로 매개변수의 불확실성을 정량화할 수 있도록 모형을 개발함으로서 추정되는 확률수문량의 신뢰성을 개선할 수 있도록 개선하였음.

· 본 연구에서 제안하는 방법론에 대해서 간략히 요약 정리하면 다음과 같음. 본 연구에서 적용하고자 하는 GEV 분포의 사후분포(posterior distribution)의 형태는 다음

과 같이 나타낼 수 있음. 즉, 매개변수들의 사전분포(prior distribution)인 $P(\mu), P(\sigma), P(\xi)$와 우도 $P(x \mid \mu,\sigma,\xi)$의 곱으로 나타내게 됨. 식 (88)의 분모는 표준화 상수(normalizing constant)라 하며 적분의 함수로 표시됨.

$$P(\mu,\sigma,\xi|x) = \frac{P(x|\mu,\sigma,\xi) \cdot P(\mu) \cdot P(\sigma) \cdot P(\xi)}{\int_{\theta} P(x|\mu,\sigma,\xi) \cdot P(\mu) \cdot P(\sigma) \cdot P(\xi) d(\mu) d(\sigma) d(\xi)} \tag{88}$$

· 식 (88)에서 가장 핵심이 되는 부분은 표준화 상수를 추정하는 부분이며 최근 컴퓨터의 발달과 새로운 알고리즘의 개발로 수치적 해석이 가능하게 되었음. 즉, Bayesian Markov Chain Monte Carlo(MCMC) 모의가 가장 대표적인 수치적 해석 방안으로서 본 연구에서도 Bayesian MCMC 기반의 해석모형을 개발하였음. Bayesian MCMC 기법은 주어진 다변량 확률분포가 복잡하여 이를 따르는 IID(Independent and identically distributed) 난수를 얻을 수 없는 경우에 사용가능한 기법으로서 IID 난수 대신 Markov Chain 난수를 추출하여 사용함. MCMC 기법의 대표적인 방법으로 메트로폴리스-헤스팅 알고리즘(Metropolis-Hastings algorithm)과 깁스표본법(Gibbs Sampling) 등이 있으며, 본 연구에서는 깁스표본법을 이용하였음. 깁스표본법에 대한 자세한 내용은 기존 연구문헌들을 참조할 수 있음(Kwon et al., 2008; 이정주와 권현한, 2010).

· 지역빈도해석을 위한 연최대치자료계열(annual maximum series)이 GEV 분포를 따른다고 가정할 때, 계층적 Bayesian 모형은 다음과 같이 나타낼 수 있음.

$$\mathbf{Y}_{t,n} \sim GEV(\mu_s, \sigma_s, \xi_s), \quad s = 1,...,n \tag{89}$$

$$\mu_s \sim N(\mu_\mu, \sigma_\mu) \quad s = 0,..,n \tag{90}$$

$$\sigma_s \sim G(k_\sigma, s_\sigma) \quad s = 0,..,n \tag{91}$$

$$\xi_s \sim N(\mu_\xi, \sigma_\xi) \quad s = 0,..,n \tag{92}$$

· 여기서, $\mathbf{Y}$는 벡터자료로서 n의 강우관측지점의 연최대치자료를 의미하며 μ_s,σ_s,ξ_s는 강우관측지점별 GEV분포의 n개의 매개변수를 나타냄. Bayesian 모형 하에서, 식 (89)의 모든 매개변수들은 확률분포를 가지게 됨. 즉, μ_s,σ_s,ξ_s가 사전분포를 가지게 되며 각 강수지점별 매개변수는 식 (90)~(92)와 같이 상위단계의 확률분포로부터 추정되는 것으로 가정하였음. 결과적으로 식 (90)~(92)의 6개 매개변수를 추정하는데 충분한 자료들이 있기 때문에 Non-Informative 사전분포(e.g. 독립적인 균등분포)를 통한 매개변수 추정이 가능하며(Gelman et al., 2004; Gelman, 2005), 식 (93)과 같음.

$$p(\mu_\mu, \sigma_\mu, k_\sigma, s_\sigma, \mu_\xi, \sigma_\xi) \propto 1 \tag{93}$$

· 식 (88)은 Bayes 정리에 의해서 다음과 같은 형태의 사후분포로 재정리할 수 있음.

$$p(\Theta \mid \mathbf{Y}) = \frac{p(\Theta \mid \mathbf{Y})}{p(\mathbf{Y})} \propto p(\mathbf{Y} \mid \Theta) \cdot p(\Theta) \quad (94)$$

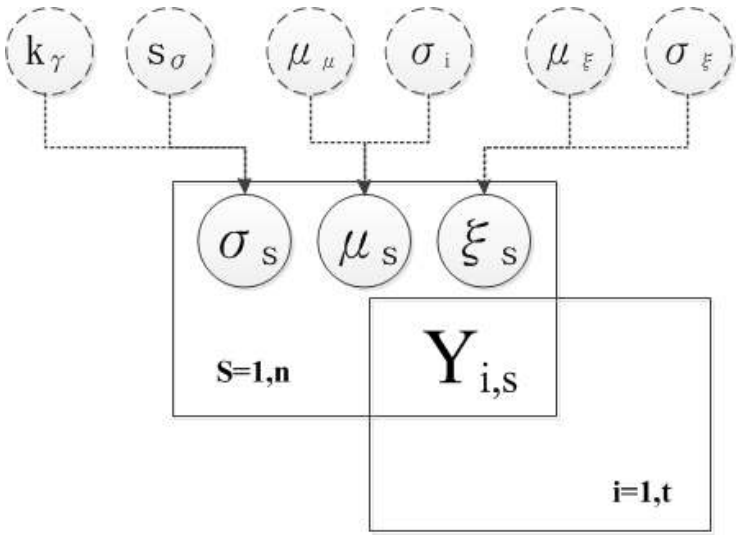
· 여기서 $\Theta = [\mu_s, \sigma_s, \xi_s, \mu_\mu, \sigma_\mu, k_\sigma, s_\sigma, \mu_\xi, \sigma_\xi]$, $s = 1, \ldots, n$으로서 n은 지역빈도해석을 위한 지점의 수를 나타낸다. $p(\Theta)$는 사전분포를 나타내며 $p(\Theta \mid \mathbf{Y})$는 우도함수를 나타내며 다음과 같이 표현할 수 있음.

$$p(\mathbf{Y} \mid \Theta) = \prod_{s=1}^{n} \prod_{i=1}^{t} GEV(Y_{i,s} \mid \mu_s, \sigma_s, \xi_s) \quad (95)$$

· 식 (89), 식 (90), 식 (91), 식 (92), 식 (93)을 식 (95)에 대입시킴으로서 매개변수들의 결합사후분포(joint posterior distribution)를 추정할 수 있음.

$$p(\mathbf{Y} \mid \Theta) = \prod_{s=1}^{n} \prod_{i=1}^{t} GEV(Y_{i,s} \mid \mu_s, \sigma_s, \xi_s) \cdot N(\mu_s \mid \mu_\mu, \sigma_\mu) \cdot G(\sigma_s \mid k_\sigma, s_\sigma) \cdot N(\xi_s \mid \mu_\xi, \sigma_\xi) \quad (96)$$

· 식 (96)은 모든 매개변수에 대한 적분을 통해 직접적으로 추정하는 것은 불가능하며 본 연구에서는 앞서 언급한 MCMC방법을 도입하여 매개변수들의 사후분포를 추정하게 됨. 본 연구에서는 MCMC 방법 중 깁스표본법을 이용하여 회귀매개변수들을 추정하였으며 모형의 Convergence를 확증하기 위해서 3개의 Chain을 독립적으로 시행하여 Sampling이 효과적으로 혼합(mixing)되도록 하였음. <그림 3-125>은 본 연구에서 구성한 계층적 Bayesian 모형 기반의 지역빈도해석에 대한 개념도를 나타냄.



<그림 3-125> 계층적 Bayesian 모형의 개념도

(1) 모의자료를 통한 모형의 검정

· 기존 L-모멘트 기반의 지역빈도해석과 본 연구에서 제안하는 HBRFA 기반 지역빈도해석 결과를 비교하기 위하여 Monte-Carlo 모의를 실시하였음. 모의실험은 대표 분포형으로

선정된 GEV 분포형을 모집단으로 가정하였으며 2가지 방법에 대하여 자료에 개수에 따른 RMSE를 비교하는 방식으로 수행되어짐. 모의실험에 대한 요약은 다음과 같음.

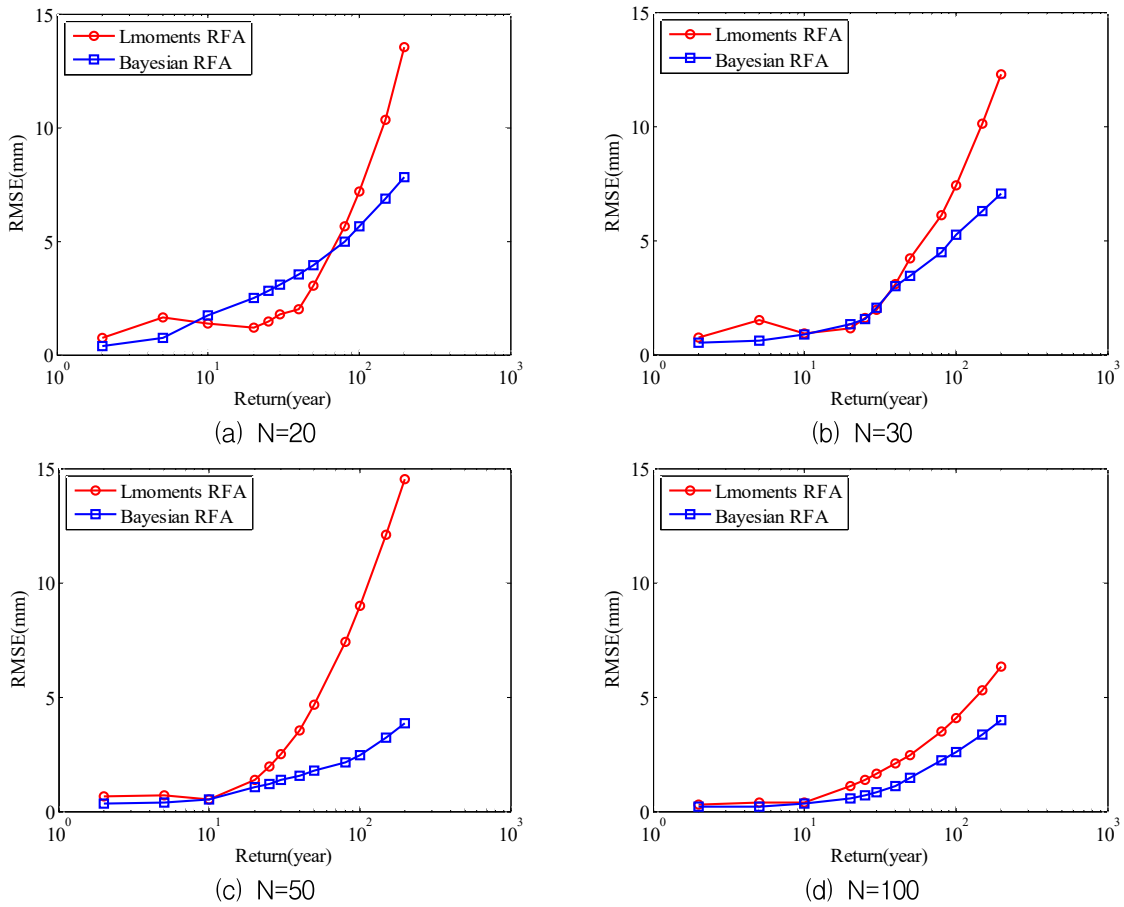
ㄱ. 본 연구에서는 지역빈도해석을 위한 10개 관측소가 동질성을 가진다고 가정하였으며 GEV 분포의 지역매개변수(regional parameter)로서 형상매개변수, 규모매개변수, 위치매개변수가 각각 0.2,32,95인 모집단으로 규정하였음.

ㄴ. 모집단으로부터 자료의 개수가 N=30, N=50, N=100가 되도록 10개 관측소를 대상으로 Monte-Carlo 모의를 실시하였음. 이 과정을 통해 지점간의 Sampling Error가 발생하며 모의가 되지만 지역의 전체적인 분포의 특징은 모분포로 가정된 GEV 분포를 따르게 됨.

ㄷ. 10개 관측소에 대해서 모의된 강우량을 대상으로 L-모멘트를 이용한 지역빈도해석 절차와 본 연구에서 제안하는 HBRFA 모형을 이용한 지역빈도해석을 실시하고 CDF 값, P = 0.5,0.8,0.9,0.95,0.96,0.9667,0.975,0.98,0.9875,0.99,0.9933,0.9950에 해당하는 Quantile 값을 계산하였음.

ㄹ. 최종적으로 평균제곱근오차(root mean square error, RMSE)를 계산하여 비교하였음.

· <그림 3-126>에서는 10개의 모의강수지점에 대해서 표본자료 개수와 재현기간에 따른 Quantile의 평균제곱근오차 결과를 도시하여 나타내었음. <그림 3-126a>는 자료의 개수가 20개인 경우로서 50년 빈도 이상에서 L-모멘트 기반 지역빈도해석의 편의가 커지고 있음. <그림 3-126b>는 자료의 개수가 30개인 경우로서 HBRFA 해석방법이 전체적으로 우수한 결과를 나타내고 있음. 특시 50년 빈도 이상에서 HBRFA 방법이 상대적으로 편의가 크게 적어지는 것을 확인할 수 있었음. <그림 3-126c>는 자료의 개수가 50개인 경우로서 HBRFA 해석방법이 우수한 결과를 나타내고 있음. <그림 3-126d>는 자료의 개수가 100개인 경우로서 HBRFA 해석방법이 앞서 다른 경우와 동일하게 높은 빈도에서 우수한 결과를 나타내고 있음. 전체적으로 기존 L-모멘트 방법에 비해서 Bayesian 방법에서 편의가 작게 발생하는 것을 얻을 수 있었으며 상대적으로 자료가 작은 경우에 좀 더 개선된 결과를 얻을 수 있었음.

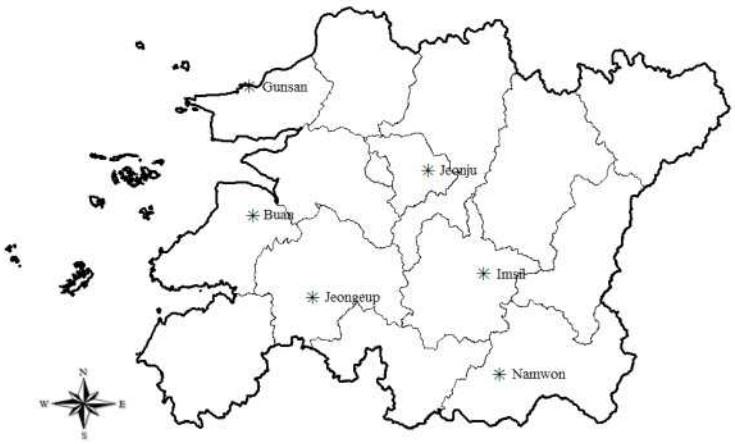


<그림 3-126> 모의횟수에 따른 L-모멘트와 HBRFA 모형 비교

(2) 전라북도 지역 지역빈도해석

· 앞 절에서 모의자료를 이용하여 자료 연한에 따른 HBRFA 모형의 적합성을 평가하였음. 적합성 평가결과 자료의 개수가 적은 경우 좀 더 개선된 효과를 확인할 수 있었으며 매개변수의 불확실성도 효과적으로 파악할 수 있었음. 본 절에서는 40년 내외에 자료를 보유하고 있는 전라북도 강수지점에 대한 적용을 통해 기존 지역빈도해석방법과 비교 검토를 수행하였음.

· 본 연구에서는 대상유역으로 전라북도 유역을 선정하였으며 기상청 산하의 군산(140), 전주(146), 부안(243), 정읍(245), 남원(247), 임실(244) 등 6개 관측소를 대상으로 연구를 진행하였음. <그림 3-127>은 전라북도 지역에 위치한 기상청 관측소를 나타냄. 6개 관측소로부터 24시간 지속시간 연최대치자료를 추출 하였으며 추출된 자료계열의 기본적인 통계치는 다음 <표 3-32>와 같음.



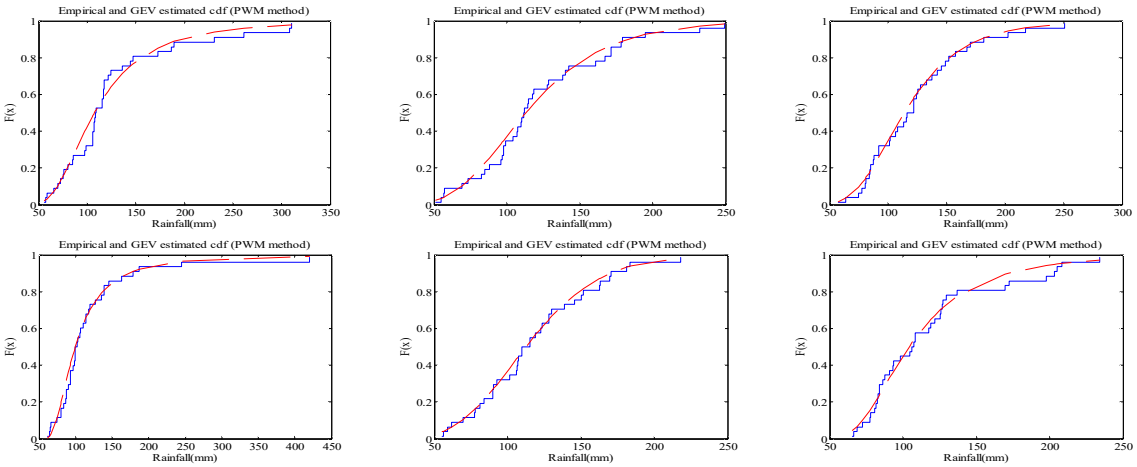
<그림 3-127> 전라북도 유역내 기상청 관측소 현황

<표 3-32> 전라북도 유역내 기상청 관측소 자료의 기본적인 통계치

	Mean (mm)	Stan. Dev. (mm)	Skewness	Kurtosis	Minimum (mm)	Maximum (mm)	Period (year)
Gunsan	124.8	62.1	1.7	5.3	56.2	310.0	1973-2011 (39)
Junju	120.9	46.3	0.8	3.5	51.3	249.5	
Buan	121.9	42.7	1.0	3.9	57.4	250.5	
Junguep	117.1	61.8	3.3	16.2	61.5	420.0	
Namwon	116.6	39.0	0.5	2.7	55.5	218.0	
Imsil	116.1	44.3	1.2	3.4	65.3	234.0	

(3) 적합도 검정 및 최적 분포형 선정

· 본 연구에서는 앞서 언급하였듯이 GEV 분포형을 대상으로 연구를 진행하였으며 연구를 진행하기에 앞서 가정된 GEV 분포의 적합성을 평가하였음. 적합성 평가는 6개 관측소에 대해서 χ^2검정, KS검정, CVM검정, PPCC 검정을 수행하였으며 확률밀도함수 및 누가확률밀도함수를 통한 시각적인 검토도 실시하였음. 적합성 검정결과 6개 지점 모두 유의수준 5%에서 적합성을 통과하는 것을 확인할 수 있었음. <그림 3-128>은 이론적인 GEV 분포로부터 추정된 누가확률밀도함수와 경험적인 누가확률밀도함수를 지점별로 도시한 그림으로서 유사한 거동을 보임을 확인할 수 있음. 이러한 점에서 본 연구에서는 GEV확률분포형을 대표분포형으로 가정하고 지역빈도해석을 수행하였음.



<그림 3-128> GEV 분포형의 적합도 검정 결과

(4) 매개변수 및 확률강수량 추정

· 모의실험을 통하여 기존 L-모멘트기반의 지역빈도해석과 HBRFA 모형을 통한 지역빈도해석 결과를 비교하였으며 본 연구에서 제안하는 모형이 기존 L-모멘트 방법보다 개선된 확률강수량 추정이 가능하였음. 본 절에서는 본 연구에서 제안한 HBRFA 모형을 이용하여 전라북도 지역의 6개 관측소에 대해서 지역빈도 해석을 수행하고 모형의 적절성을 최종적으로 평가하고자 함. 기존 L-모멘트 기반의 지역빈도해석과 비교하여 HBRFA 모형의 또 다른 장점은 추정되는 매개변수의 불확실성을 정량적으로 해석할 수 있다는 점임. 즉, 앞서 제시된 식 (97)와 같이 결합사후분포를 추정할 수 있으며 이와 더불어 각 매개변수들의 조건부사후분포(conditional posterior distribution)를 결정할 수 있음.

· 분석에 앞서서 해석 대상인 전라북도 지역 6개 강우관측소의 수문학적 동질성을 파악하는 과정이 필요하며 본 연구에서는 이질성척도 H를 이용하여 동질성을 검증하였음. 이질성척도 H는 다음 식과 같이 평균과 이산정도의 차와 모의발생자료의 표준편차의 비로 정의함(Hosking, 1990).

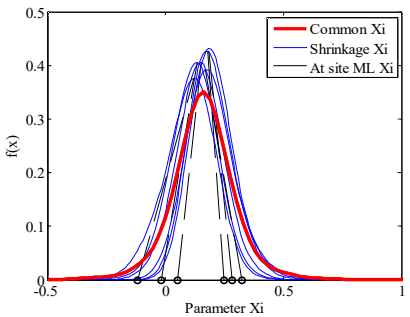
$$V = \frac{\sum_{i=1}^{N} n_i (t^{(i)} - t^R)^2}{\sum_{i=1}^{N} n_i} \tag{97}$$

$$\mathrm{H} = \frac{V - \mu_v}{\sigma_v} \tag{98}$$

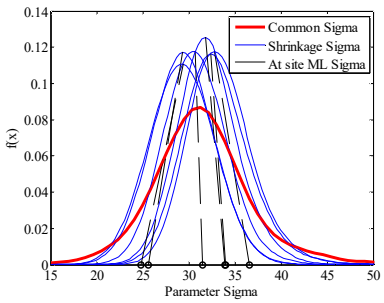
· 여기서, n_i는 지점별 자료수, N은 유역내 지점수, $t^{(i)}$는 표본 L-모멘트비, t^R은 n_i에 가중한 표본자료 집단의 평균 L-변동계수이며 마지막으로 μ_V, σ_V는 V의 평균 및 표준편차이임. Hosking과 Wallis(1997)는 사용된 L-모멘트비에 따라 이질성 척도 H를 H_1(L-변동계수), H_2(L-왜도계수), 그리고 H_3(L-첨도계수)의 세 가지 형태로 제시하였으며, $\mathrm{H} < 1$인 경우에 수문학적으로 동질성이 인정된다. 본 연구에서는 $\mathrm{H}_1 = -0.8413$, $\mathrm{H}_2 = 0.4387$, $\mathrm{H}_3 = 0.3997$로서 수문학적 동질성이 확보된 것으로 판단하였음.

· <그림 3-129>는 전북지역 6개 관측소부터 추정된 GEV 매개변수들의 사후분포를 나타냄. <그림 3-129>에서 빨간 실선으로 나타낸 매개변수들의 사후분포는 전라북도 6개 지역을 대표하는 지역매개변수를 나타냄. 이와 함께 x축에 나타낸 원은 각 강우지점에서 최우도법에 근거한 지점빈도해석을 통해 추정된 매개변수를 의미하며 파란 점선으로 나타낸 사후분포는 HBRFA를 통해서 추정된 각 강우지점의 매개변수의 사후분포를 나타냄. <그림 3-129>의 형상매개변수, 축척매개변수, 위치매개변수 모두에서 지역매개변수로 Shrinkage 되는 경향을 확인할 수 있으며 이는 지점간의 상호정보를 교환하는 과정에서 나타나는 결과로서 계층적 Bayesian 모형의 대표적인 특징 중 하나임. 빨간 실선으로 나타낸 지역매개변수로부터 지점의 매개변수가 모의되는 과정으로서 모의과정을 통해서 지역매개변수의 사후분포가 자연적으로 도출됨.

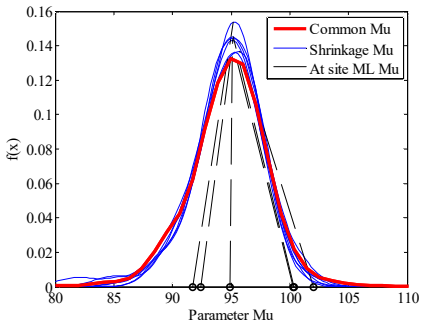
· 즉, 지점빈도해석으로부터 추정된 매개변수의 최우추정치(maximum likelihood estimator)와 파란 점선으로 나타낸 사후분포의 중앙값을 비교해보면 매개변수의 중심이 빨간 실선으로 나타낸 지역매개변수 주위로 이동된 것을 확인할 수 있음. 이와 같이 최우추정치가 공통평균(common mean) 주위로 이동하는 과정은 계층적 Bayesian 통계의 대표적인 특징으로서 Shrinkage라고 함. 앞서 언급하였듯이 계층적 Bayesian 통계학에서는 유사한 통계적 성질을 가지는 집단의 매개변수 추정 시에 매개변수간의 정보를 서로 교환하도록 허용함으로서 추정되는 매개변수의 불확실성을 저감시킬 수 있는 장점이 있으며 <그림 3-129>에서도 이러한 특징을 확인할 수 있다. <그림 3-129>의 두꺼운 빨간 실선은 공통평균을 나타내며 검은 점선은 최우도법에 의해 추정치와 Shrinkage 후에 평균에 이동을 보여주기 위해서 나타내었음.



(a) Shape Parameter



(b) Scale Parameter

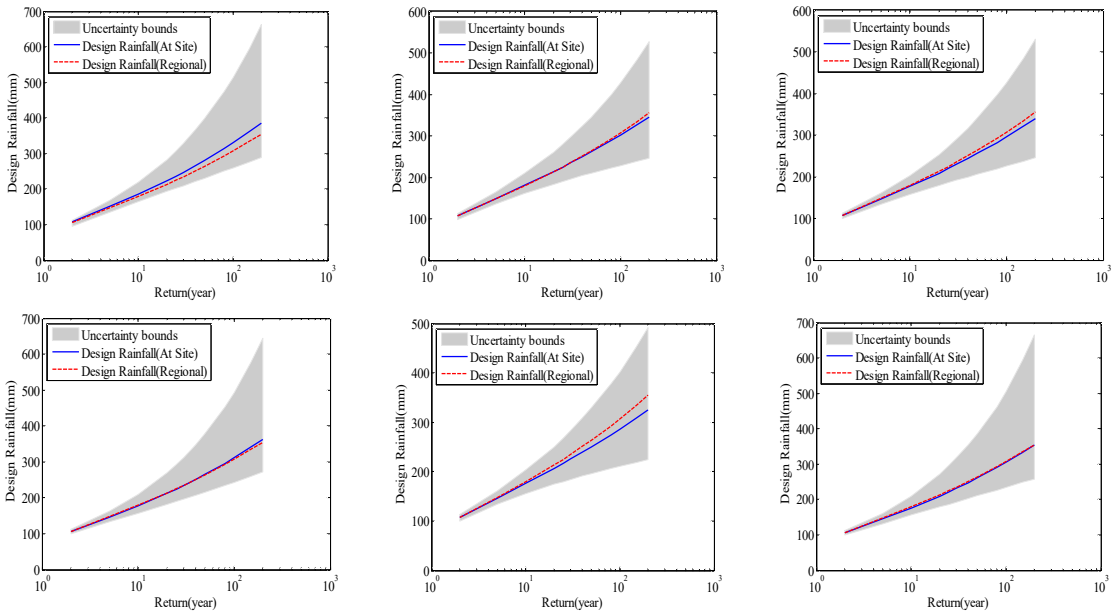


(c) Location Parameter

<그림 3-129> 계층적 Bayesian 모형을 통한 GEV 매개변수의 사후분포 결과

· 최종적으로 추정된 매개변수를 이용하여 지점별 확률강수량과 지역확률수문량을 추정하여 <그림 3-130>과 <표 3-33>에 나타내었음. Bayesian 모형으로부터 추정된 사후분포로부터 확률강수량의 불확실성을 추정하여 도시하였음. <그림 3-130>에 도시된 불확실성 구간은 지점별로 추정된 매개변수로부터 유도된 결과로서 군산, 정읍, 임실이 불확실성이 크게 나타나고 있는 반면 전주, 부안, 남원은 상대적으로 작은 불확실성을 나타내고 있음.

· 함께 도시한 지역확률강수량과 비교해보면 불확실성 구간에 위치하고 있으며 군산, 남원을 제외하고는 거의 동일한 확률강수량으로 추정되고 있음. 여기서 빨간 점선은 전라북도 전체의 확률강수량을 나타내며 파란 실선은 지점별로 추정된 확률강수량을 의미함.

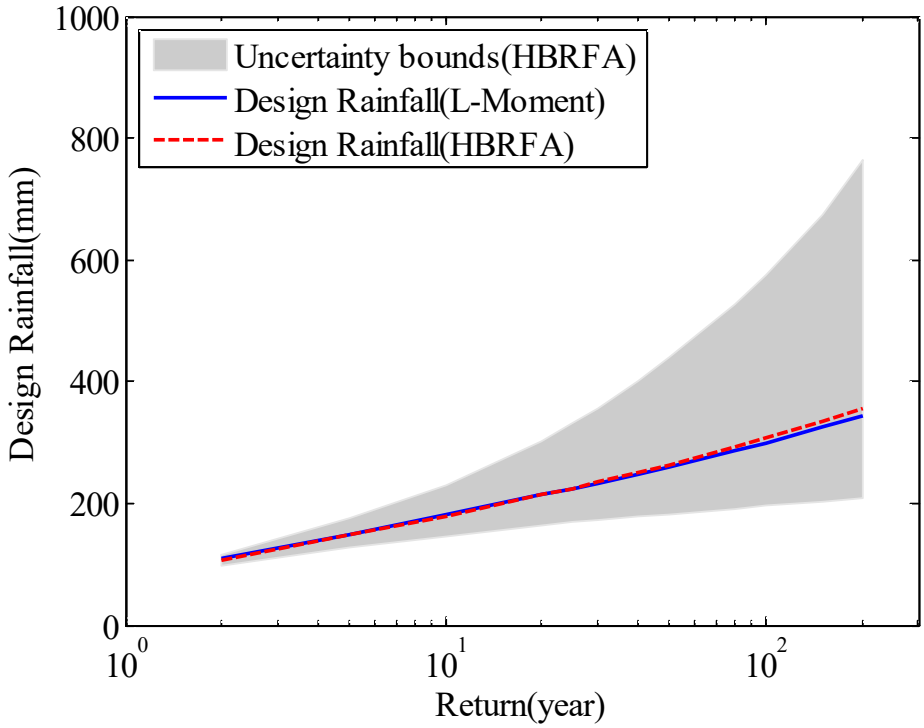


<그림 3-130> 계층적 Bayesian 모형으로 산정한 지점별 확률강우량 산정 결과 및 불확실성 정량화 도시 결과

<표 3-33> 사후분포로부터 도출된 확률강우량의 불확실성 구간 산정 결과

Sta.	Return Period	HBRFA (2.5%)	HBRFA (50%)	HBRFA (97.5%)	L-moment	Sta.	Return Period	HBRFA (2.5%)	HBRFA (50%)	HBRFA (97.5%)	L-moment
Gun san	5	136.4	151.4	168.4	156.3	Jeong Eup	5	132.5	146.1	162.2	146.6
	10	165.3	185.8	219	188.6		10	156.9	177.7	209.8	177
	20	193.4	223.9	283.8	222.7		20	182	212.5	270	209
	30	209.8	247.8	329.6	243.9		30	197	234.7	312.9	228.9
	50	230.9	280.8	397.6	271.9		50	216.3	265.3	378.7	255.2
	100	260.1	330.6	513.8	312.9		100	243.8	311.4	493.3	293.7
	200	289.4	386.4	662.9	357.7		200	271.7	363.6	645.2	335.7
Jeon Ju	5	136.8	149.4	164.9	151.3	Nam Won	5	134.5	146.8	162.2	146
	10	161.5	180.8	209.1	182.6		10	155.8	176.1	203	176.2
	20	183.6	214	261.3	215.7		20	174.5	206.8	250.4	208.1
	30	195.5	234.6	296.3	236.2		30	184.3	225.4	283.1	227.9
	50	210	261.6	345.8	263.4		50	196.2	250.3	329.4	254
	100	228.6	301.7	428.3	303.1		100	211.3	286.2	401.2	292.3
	200	246.9	345	526.9	346.4		200	224.8	324.9	492.8	334.2
Bu an	5	134.3	146.5	160.9	152.6	Im Sil	5	131.8	145.6	161.4	145.3
	10	157.6	176.7	202.6	184.1		10	155.6	176.5	210.1	175.4
	20	179.2	209	253.6	217.4		20	179.2	210.1	272.7	207.1
	30	191.1	229.2	289	238.1		30	192.9	231.6	317.5	226.8
	50	206	256.2	340.9	265.5		50	210.3	260.9	385.7	252.9
	100	226.4	295.7	425.8	305.5		100	234	304.9	506.6	291.1
	200	245.8	340.3	531.5	349.2		200	258.4	354.8	665.7	332.7

· 마지막으로 <그림 3-131>에서는 기존 L-모멘트 기반의 지역확률강수량과 본 연구에서 제안하고 있는 HBRFA 기반의 지역확률강수량을 비교하여 나타냈었음. 그림에 나타낸 불확실성 구간은 지역매개변수의 사후분포로부터 유도된 결과로서 50년 빈도 이상에서 불확실성이 커지고 있음을 확인할 수 있음. 이는 본 연구에서 사용된 자료의 연한이 39년인 점을 감안하면 타당한 결과로서 자료 연한을 넘어서는 계획빈도에서 발생하는 Sampling Error가 상대적으로 크게 나타남을 의미함. 기존 L-모멘트 기반의 확률강수량과 거의 유사한 거동을 보이고 있으며 동시에 불확실성까지 정량화 할 수 있는 장점을 확인할 수 있었음. 여기서 빨간 점선은 본 연구에서 제안된 HBRFA 방법에 의한 전라북도 전체의 확률강수량을 나타내며 파란 실선은 기존 L-모멘트를 이용한 지역빈도해석 결과를 의미함.



<그림 3-131> 기존 L-모멘트 기법과 HBRFA 모형 기반으로 산정된 전라북도 유역내 지역빈도해석 결과 비교

나. 공간정보를 활용한 계층적 Bayesian Spatial 지역빈도해석

· 본 연구에서는 앞서 개발한 계층적 Bayesian 모형을 보다 정확하고, 고도화 할 수 있는 기법 개선을 위해 매개변수 추정시 공간정보를 활용한 계층적 Bayesian Spatial 지역빈도해석 모형을 개발하였음.

· 매개변수 추정방법으로 널리 활용되는 L-모멘트법은 매개변수의 불확실성을 정량적으로 해석하는데 어려움이 있으며, 매개변수의 외부인자(covariate)를 고려할 수 없다는 단점이 있는 것으로 알려지고 있음(Katx et al., 2002). 이와 더불어 기존 지역빈도해석에서는 관측지점중심으로 산정된 확률강우량은 Thiessen 망을 통해 유역면적강우량으로 변환하여 사용하는 것이 일반적이나 우리나라의 산지특성과 여름철 강우처럼 시공간적 변동성이 큰 경우 면적평균강우를 추정하는데 있어서 오차가 크게 발생할 수 있다고 알려지고 있음(Yoo and Jung, 2001). 즉, 확률강우량 산정시 Thiessen 망을 통해 유역면적강우량으로 변환하여 사용하고 있으나 유역전반의 지리적 및 기후 특성에 의해서 이질성이 나타날 개연성이 크며 공간적으로 보간시 문제를 보완하기 위해서 지리적 및 기후학적 특성이 반영된 모형 개발이 요구되고 있음.

· 이러한 이유로 본 연구에서는 확률강우량 추정에 있어서 매개변수의 불확실성을 고려하는 동시에 강우지점들간의 정보를 서로 공유하면서 매개변수를 추정할 수 있는 계층적 Bayesian 모형 기반 공간적 극치 해석 모형을 개발하였으며 한강유역에 대해서 모형의 적합성을 평가하였음. 본 연구에서는 첫째, 한강유역의 기상청산하 18개 관측소를 대상으로 지역특성(위도, 경도, 고도)과 Gumbel 분포 매개변수의 관계를 평가하였음. 둘째, 지리적 및 기후적 특성을 반영하여 극치수문량의 공간적 해석이 가능한 계층적 Bayesian 모형 기반의 공간적 지

역빈도해석을 수행하였음.

(1) Gumbel 분포

· Gumbel 분포는 Extreme Value 분포 중에서 Type-1에 해당하는 극치분포로서 GEV 분포에서 형상매개변수(Shape parameter, ξ)가 0인 경우로 강수 및 홍수 빈도분석에 많이 이용되는 확률분포형 중 하나임. 다음 식은 Gumbel분포형의 확률밀도함수 및 누가확률밀도함수를 나타냄.

$$f(x)=\frac{1}{\sigma}exp[-\frac{x-\mu}{\sigma}-e^{-(\frac{x-\mu}{\sigma})}] \tag{99}$$

$$F(x)=\exp[-e^{-(\frac{x-\mu}{\sigma})}] \tag{100}$$

· 여기서 μ는 위치 매개변수(location parameter)이고, σ는 규모 매개변수(scale parameter)임. 본 연구에서 제안하는 계층적 Bayesian 지역빈도해석 방법과의 비교 목적으로 L-모멘트방법을 활용하였음. L-모멘트 방법은 지역빈도분석에서 매개변수를 추정하는 가장 대표적인 방법으로 확률가중모멘트법(probability weighted moment, PWM)의 선형조합으로 이루어지며 매개변수의 편의를 저감시키는데 가장 유리한 것으로 알려지고 있음. L-모멘트 법은 L-모멘트비를 이용하여 확률분포의 매개변수를 추정하는데 용이하며 구간 추정 및 가설검증도 가능한 장점이 있음(Hosking et al., 1985). L-모멘트법를 이용한 Gumbel 분포의 매개변수 추정방법은 다음과 같음(Greenwood et al., 1979; Hosking and Wallis, 1986a).

$$\beta_r=\frac{m}{1+r}+\frac{\alpha\log(1+r)+\epsilon}{1+r} \tag{101}$$

· 여기서, ϵ는 Euler수(Euler' s number)이며 $\epsilon=0.5772157$이며, Gumbel 분포의 매개변수인 $\hat{\mu}$와 $\hat{\sigma}$는 다음 식으로 구해짐.

$$\hat{\mu}=(2b_1-b_0)/\log(2)=l_2/\log(2) \tag{102}$$

$$\hat{\sigma}=b_0-0.5772157\hat{\alpha}=l_1-0.5772157\hat{\alpha} \tag{103}$$

(2) 계층적 Bayesian 기법 기반의 공간적 지역빈도해석 모형

· 일반적으로 지역빈도해석 시 L-모멘트를 이용한 Gumbel 분포의 매개변수 추정에서의 단점은 매개변수에 외부인자(covariates)에 대한 영향을 평가하기가 어렵다는 점임. 이와 더불어 L-모멘트 방법은 매개변수 추정 시 불확실성을 정량적으로 해석하는데 어려움이 따름. 이러한 점에서 본 연구에서는 외부인자의 영향을 고려하고 불확실성을 정량적으로 해석할 수 있는 계층적 Bayesian 기법 기반의 공간적 지역빈도해석 모형을 개발하고자 함.

· 본 연구에서 제안하는 계층적 Bayesian 기법 기반의 공간적 지역빈도해석 모형은 기존 Gumbel 분포의 매개변수 μ, σ의 추정시 유역의 위도, 경도, 고도 등의 지리적인 정보를 고려

하여 매개변수를 추정할 수 있으며 동시에 추정된 매개변수에 대해서 불확실성을 정량화 할 수 있는 장점이 있음. 계층적 Bayesian 지역빈도 해석모형은 지점빈도해석처럼 각 강수지점의 확률분포형이 개별적으로 적용되지만 각 강수지점의 확률분포형의 매개변수들은 유역의 대표 매개변수 즉 지역매개변수에 종속되어 추정됨으로서 개념적으로 지역빈도해석 개념에 부합된다 할 수 있음. 이러한 과정을 통하여 유사한 통계적 특성을 가지는 자료집단들이 정보를 서로 교환함으로서 추정되는 매개변수의 불확실성을 저감하도록 고안된 계층적 Bayesian 모형의 장점을 이용하는데 목적이 있음. 지역빈도해석을 위한 연최대치자료계열(annual maximum series)이 Gumbel 분포를 따른다고 가정할 때, 다음과 같이 나타낼 수 있음.

$$\mathbf{Y}_{s,t} \sim Gumbel(\mu_s, \sigma_s), \quad s=1,...,n,\ t=1,...,n_t \tag{104}$$

· 여기서 Y는 벡터자료로서 n개의 강우관측지점의 t년의 연최대치자료를 의미하며 μ_s,σ_s는 강우관측지점별 Gumbel 분포의 매개변수를 나타내며 $n\times 2$개의 행렬을 가짐. 식 (104) μ_s,σ_s의 매개변수에 대해서 지리적/지형적 특성을 고려하기 위해서 GLM(generalized linear model) 형태의 연결함수를 도입하였으며 다음 식 (105)~(108)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (105)의 경우는 지리적/지형적 특성을 배제한 기존 지역빈도해석 모형으로서 비교목적으로 검토하였음.

$$\text{Case1}: \begin{aligned}\mu_s &= \alpha_s \\ \sigma_s &= \beta_s\end{aligned} \tag{105}$$

$$\text{Case2}: \begin{aligned}\mu_s &= \alpha_1 + \alpha_2{}^*Lat(s) + \alpha_3{}^*Long(s) + \alpha{}^*Altitude(s) \\ \sigma_s &= \beta_1 + \beta_2{}^*Lat(s) + \beta_3{}^*Long(s) + \beta_4{}^*Altitude(s)\end{aligned} \tag{106}$$

$$\text{Case3}: \begin{aligned}\mu_s &= \alpha_1 + \alpha_2{}^*Lat(s) + \alpha_3{}^*Long(s) + \alpha_4{}^*Altitude^2(s) \\ \sigma_s &= \beta_1 + \beta_2{}^*Lat(s) + \beta_3{}^*Long(s) + \beta_4{}^*Altitude^2(s)\end{aligned} \tag{107}$$

$$\text{Case4}: \begin{aligned}\mu_s &= \alpha_1 + \alpha_2{}^*Lat(s) + \alpha_3{}^*Lat^2(s) + \alpha_4{}^*Altitude(s) + \alpha_5{}^*Altitude^2(s) \\ \sigma_s &= \beta_1 + \beta_2{}^*Lat(s) + \beta_3{}^*Lat^2(s) + \beta_4{}^*Altitude(s) + \beta_5{}^*Altitude^2(s)\end{aligned} \tag{108}$$

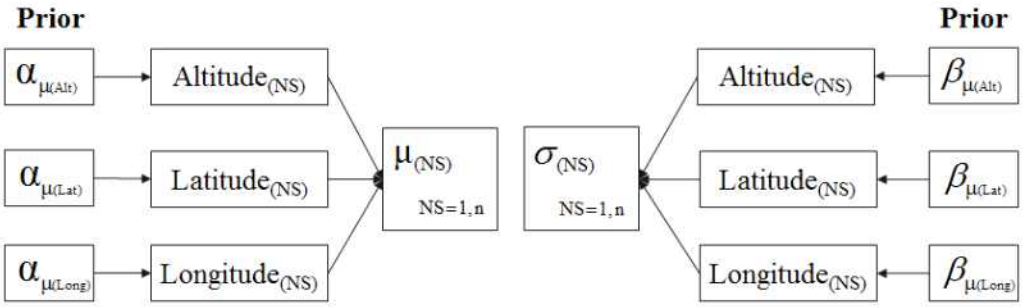
· 본 연구에서는 식 (105)~(108)과 같이 4가지 Case와 같이 지리적/지형적 특성을 Gumbel 분포 매개변수와 연계한 해석을 실시하였음. 즉, Gumbel 분포의 매개변수 μ,σ에 관측소별 지형학적 인자인 위도, 경도, 고도 정보를 입력자료로 GLM 형태의 모형을 구성하며 GLM 회귀모형의 매개변수는 계층적 Bayesian 기법을 적용하여 각 매개변수의 사후분포(posterior distribution)를 추정하였음.

$$\alpha_m \sim N(\mu_{\alpha_m}, \sigma_{\alpha_m}) \qquad m=1,...,p \tag{109}$$

$$\beta_m \sim N(\mu_{\beta_m}, \sigma_{\beta_m}) \qquad m=1,...,p \tag{110}$$

· 여기서 α,β는 GLM의 매개변수로서 n개의 강우지점의 p개의 매개변수의 추정이 필요함. 지점별로 추정되는 GLM 매개변수 a_m, β_m는 정규분포를 따른다고 가정하였음. 계층적

Bayesian 모형은 이러한 매개변수의 Pooling 과정을 통해 지점간의 정보를 서로 공유하며 지역 대표매개변수를 추정할 수 있는 장점을 제공함. 본 연구에서 제시하는 계층적 Bayesian 모형을 이용한 공간적 지역빈도해석 개념도는 <그림 3-132>와 같음.



<그림 3-132> 공간정보를 고려한 계층적 지역빈도해석 모형 개념도

· Case 1은 기존 지역빈도 해석 방법으로 매개변수를 추정하는 방법이며, Case 2~4는 대상유역 내 다양한 지리적/지형적 특성을 고려할 수 있도록 GLM 모형을 도입하여 매개변수 추정에 활용하였음. 본 연구에는 가장 적합한 모형을 채택하기 위해서 Bayesian 모형 선택의 기준으로 가장 많이 이용되고 있는 DIC(Deviance information criterion) 기준을 활용하여 분석하였음. DIC 값은 Bayesian 모형 선택의 기준으로 잘 알려져 있으며, Spiegelhaltar et al(2002)가 처음 제안한 방법임. 모형에 통합성 추정된 우도(likelihood)와 모형에 사용된 매개변수 개수에 벌칙함수를 부여하는 방식으로 모형을 평가하며 기존 모형에서 적합성 방법으로 이용되어온 AIC(Akaike information criterion)과 BIC(Bayesian information criterion)와 유사한 방법이라 할 수 있음.

$$DIC = \overline{D} + P_D \tag{111}$$

$$\overline{D} = E_{\theta|y}[-2\ln f(y|\theta)] \tag{112}$$

· 여기서 $\overline{D}$는 모형의 적합(fitting) 정도를 나타나는 기댓값으로 식 (112)와 같이 나타낼 수 있으며 $\overline{D}$가 클수록 모형의 적합정도는 떨어짐. 식 (112)에서 $f(y|\theta)$는 주어진 관측치의 우도함수를 나타내며 θ는 매개변수를 나타냄. 두 번째 항인 P_D는 모형의 복잡성을 나타내는 지표로서 유효 매개변수의 개수를 의미함. 즉, 우도가 큰 경우와 매개변수 θ의 개수가 적을수록 DIC 값이 작은 값을 가지며 통계적 관점에서 우수한 모형으로 정의될 수 있음. Berg et al. (2004)은 DIC가 모형 선택의 좋은 기준이 될 수 있음을 제안하였는데, 다양한 확률통계학적 모형에 대해 매개변수 추정 결과와 DIC 계산결과를 제시하여 비교하였음. 따라서 본 연구에서는 상기와 같은 이유에 근거하여 각 Case 1~4를 평가하였을 때 최종적으로 DIC 값이 가장 작은 Case 4 방법을 통하여 결과를 도출하였음.

<표 3-34> Case별 DIC 값 비교 결과

	$\overline{D}$	P_D	DIC
Case 1	640.23	35.144	675.37
Case 2	646.81	8.059	654.87
Case 3	641.59	7.958	649.55
Case 4	637.25	9.963	647.21

(3) 분석기법 및 대상유역

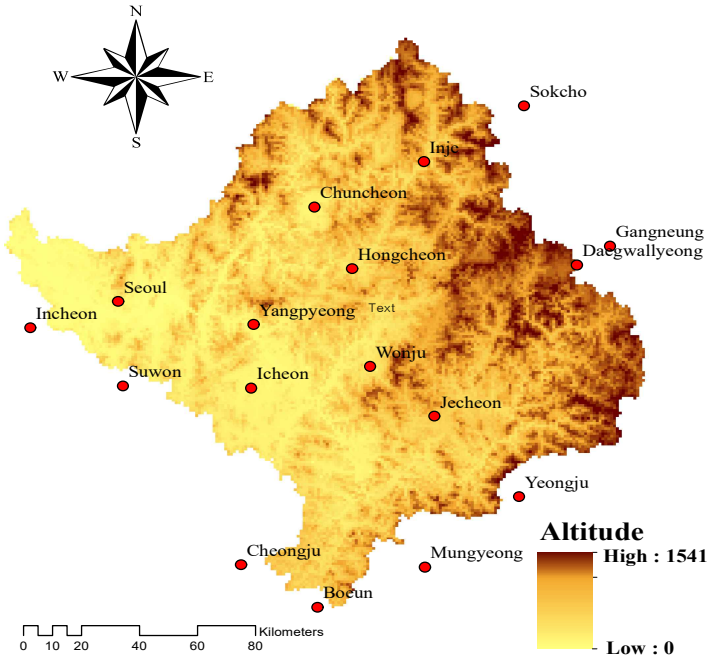
· 본 연구에서는 Gumbel 분포를 모집단으로 가정하여 지리적/지형적 특성을 고려할 수 있는 계층적 Bayesian 모형 기반 공간적 지역빈도해석을 수행하였으며, 수행한 방법은 다음과 같이 요약할 수 있음.

ㄱ. 본 연구에서는 지역빈도해석을 위해 한강유역내 18개 기상관측소가 모두 동질성을 가진다고 가정하였으며, 강우량, 위도, 경도, 고도 자료는 매개변수 추정의 안정성을 확보하기 위하여 각각 정규화하여 자료를 구축하였음.

ㄴ. Gumbel 분포로부터 산정된 위치 및 규모매개변수와 위도, 경도, 고도와의 관계를 평가하였음. 그 결과 위도와 경도에서는 각 매개변수와 선형적인 관계를 지니고 있으나, 고도의 경우는 특정 높이 이상에서 증가하는 경향을 보이고 있으므로 비선형관계로 가정하였음.

ㄷ. 계층적 Bayesian 기법을 기반으로 GLM 모형 매개변수별 불확실성을 정량화 하였으며, 최종적으로 한강유역내 빈도별 확률강수량을 산정하였음.

· 본 연구에서는 한강유역을 대상으로 분석을 수행하였음. 한강유역은 한반도 면적의 약 23% 이상을 차지하고 있고 유역의 지세는 상당히 복잡함. 특히 동해안과 평행하게 남동으로 향하는 태백산맥과 남서로 향하는 소백산맥 등 높은 산맥이 두 개의 방향으로 펼쳐져 있어 같은 유역 내에서 매우 상이한 지리적, 기후학적 특성을 보여주고 있음. <그림 3-133>은 고도에 따른 한강유역 및 기상청 산하의 18개 관측소에 대해 도시하였음. <표 3-35>는 관측소별 위도, 경도, 고도 값을 나타내었음.



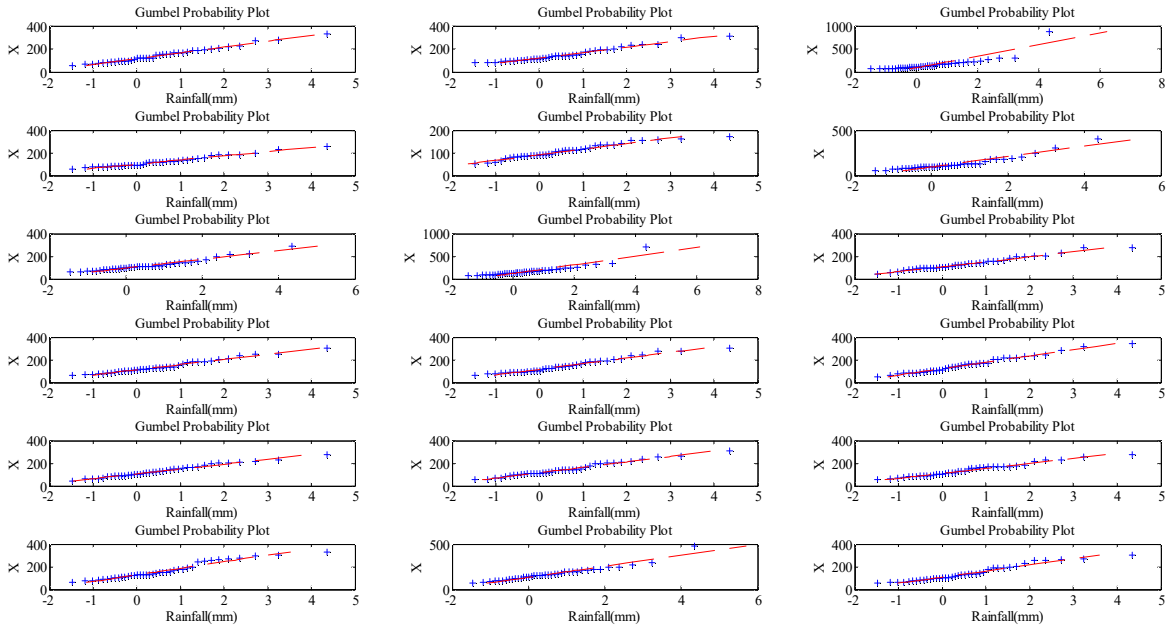
<그림 3-133> 한강유역내 18개 기상청 관측소

<표 3-35> 기상청 18개 관측소의 지형학적 정보

Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (El.m)	Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (El.m)
Suwon	37.2723	126.985	34	Wonju	37.3376	127.946	149
Sokcho	38.2509	128.564	18	Icheon	37.2640	127.484	78
Gangneung	37.7515	128.891	26	Yangpyeong	37.4886	127.494	48
Yeongju	36.8719	128.517	211	Inje	38.0599	128.167	200
Mungyeong	36.6273	128.148	171	Chuncheon	37.9026	127.735	78
Boeun	36.4876	127.734	175	Hongcheon	37.6836	127.880	141
Cheongju	36.6392	127.440	57	Seoul	37.5714	126.965	86
Daegwallyeong	37.6771	128.718	773	Ganghwa	37.7074	126.446	47
Jecheon	37.1593	128.194	264	Incheon	37.4776	126.624	68

(4) 적합도 검정 및 분포형 설정

· 본 연구에서는 앞서 언급하였듯이 Gumbel 분포를 대상으로 연구를 진행하였으며 연구를 진행하기에 앞서 가정된 Gumbel 분포의 적합성을 평가하였음. <그림 3-134>은 Gumbel 확률지(Gumbel plotting position)에 지점별로 도시한 그림으로서 유사한 거동을 보임을 확인할 수 있으며 극치값 또한 잘 표현해주고 있음을 확인할 수 있음. 이와 더불어 18개 기상관측소에 대해서 χ^2검정,KS검정,CVM검정,PPCC검정을 수행하였음. 적합성 결과 18개 지점 모두 유의수준 5%에서 적합성을 통과하는 것을 확인할 수 있었으며, 한강유역내 18개 관측소의 기본적인 통계치는 <표 3-36>에 나타내었음.



<그림 3-134> Gumbel 분포 확률분포형 산정 결과

<표 3-36> 연구대상 유역내 관측소의 기본적인 통계치

	Mean (mm)	Stan. Dev. (mm)	Skewness	Kurtosis	Minimum (mm)	Maximum (mm)	Period (year)
Suwon	145.5	63.1	1.0	3.6	58.5	333.2	1973~ 2011 (39)
Sokcho	148.7	58.8	1.1	3.6	79.2	314.2	
Gangneung	164.0	132.4	4.1	22.0	66.8	870.5	
Yeongju	121.4	45.8	1.1	3.9	58.9	259.5	
Mungyeong	106.0	30.8	0.3	2.4	50.8	173.3	
Boeun	126.5	69.2	2.3	8.9	50.8	407.5	
Cheongju	118.8	48.2	1.7	6.2	61.5	293.0	
Daegwallyeong	177.8	111.5	3.0	14.7	72.7	712.5	
Jecheon	133.6	55.1	0.9	3.4	40.5	276.5	
Wonju	138.9	57.2	1.0	3.4	65.8	305.0	
Icheon	144.9	61.8	0.9	3.0	65.0	304.0	
Yangpyeong	154.3	70.7	0.9	3.2	52.0	346.0	
Inje	131.4	54.1	0.7	2.8	43.5	275.8	
Chuncheon	144.0	60.1	0.8	3.1	53.5	308.5	
Hongcheon	137.4	54.4	0.7	2.8	55.0	276.0	
Seoul	161.1	71.6	0.8	2.6	61.2	332.8	
Ganghwa	169.6	74.2	2.0	9.1	68.5	481.0	
Incheon	139.8	66.5	0.8	2.6	54.3	302.5	

(5) 지역특성과 Gumbel 분포 매개변수의 관계 평가

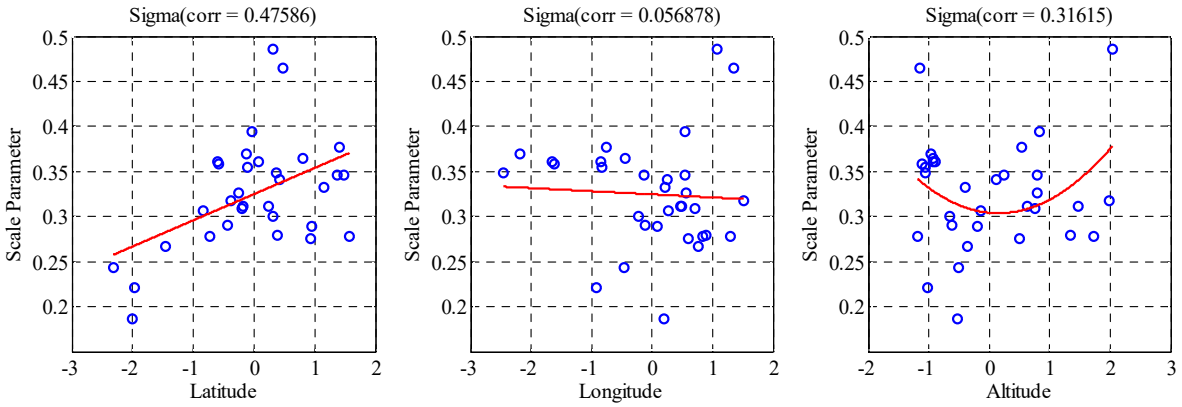
· 앞서 언급하였듯이 본 연구에서 Gumbel 분포의 매개변수 μ,σ에 외부인자로 관측소별 지형학적 인자인 위도, 경도, 고도를 입력 자료로 모형을 구성하였음. 하지만 서로 다른 단위와 특성을 가진 자료들은 일정 범위의 척도로 구분되는 정규화(normalization)과정이 필요함. 국내에서 보편적으로 사용하고 있는 정규화 방법은 Z-score 방법이며, 자료의 극치값(최대, 최소값)을 이용하는 Rescaling 방법 등이 있음. 따라서 본 연구에서는 위도, 경도, 고도의 경우 Z-score 방법을 이용하였으며, 강우량의 경우는 매개변수 추정시 음(-)의 값의 문제로 연도별 최대강우량을 평균최대강우량으로 나누어 정규화 작업을 수행하였음.

$$RF\_scaling_{(s,t)} = RFmax_{(s,t)} / mean(RFmax) \quad s=1,...n, t=1,...n_t \tag{113}$$

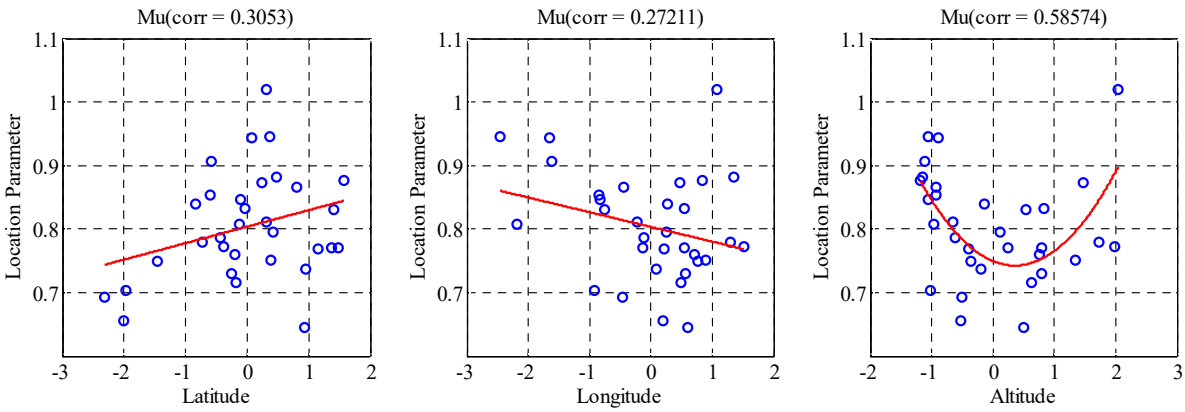
$$Z_{(s)} = \frac{x_{(s)} - \mu_{(s)}}{\sigma_{(s)}} \quad s=1,...,n \tag{114}$$

· 여기서 RFmax는 s개의 강우관측지점의 t년의 연최대치자료를 의미하며, 식 (114)은 s개의 강우관측지점의 지역특성(위도,경도,고도) 자료를 정규화한 식을 의미함. <그림 3-135, 136>은 한강유역 기상청산하 18개 관측소 및 국토교통부 산하 14개 관측소를 대상으로 Gumbel 분포 매개변수와의 관계를 평가하여 도시하였음. 분석결과 경도의 경우 Gumbel 분포 매개변수 μ,σ와 상관관계가 떨어지는 반면 위도의 경우 μ,σ와 0.47,0.30으로 선형적인 상관성을 보이고 있어 확률강수량 추정시 양(+)의 영향을 미칠 것으로 사료됨. 하지만 고도의 경우 낮은 고도에서는 증·감의 형태를 보이지만 특정 높이 이상에서

는 증가하는 비선형 관계가 도출되었음. 이는 특정 높이 이상에서는 강수량에 대한 고도의 영향이 가중된다고 사료되며 이러한 내용은 기존 Yoo et al. (2004)의 연구에서도 언급된 바 있음.

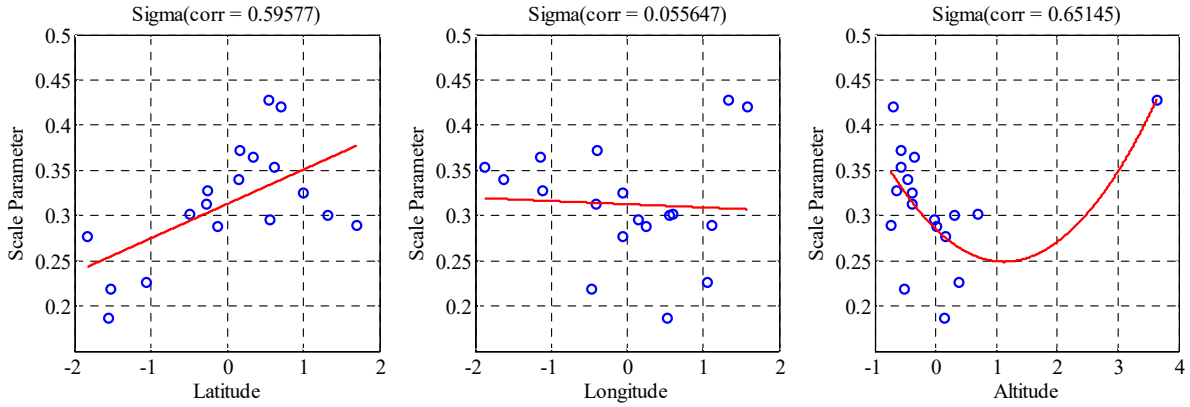


<그림 3-135> 지형특성인자와 Scale 매개변수와의 관계(기상청&국토교통부)

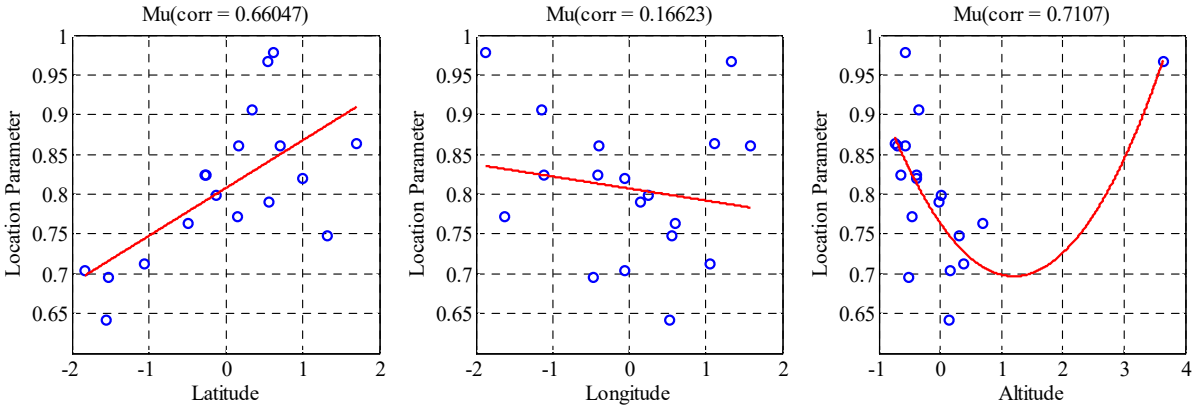


<그림 3-136> 지형특성인자와 Location 매개변수와의 관계(기상청&국토교통부)

· 하지만 국가수자원관리종합시스템(WAMIS)에서 제공되고 있는 국토교통부 산하 14개 지점의 강수량은 결측치가 많고 자료의 연한이 짧음으로 인해 통계적으로 유의한 결과를 도출하기 어려움. 이러한 점에서 본 연구에서는 기상청 산하 18개 관측소 자료만을 이용하여 지역빈도해석을 수행하였으며, 기상청 산하 18개 관측소를 대상으로 Gumbel 분포의 매개변수와 지형인자간의 상관성을 재평가하여 <그림 3-137, 138>에 나타내었음. 그림에서 나타나듯이 기상청 자료만을 사용한 경우 지형인자간의 상관성이 상대적으로 높게 추정되고 있음을 확인할 수 있음.



<그림 3-137> 지형특성인자와 Scale 매개변수와의 관계(기상청)

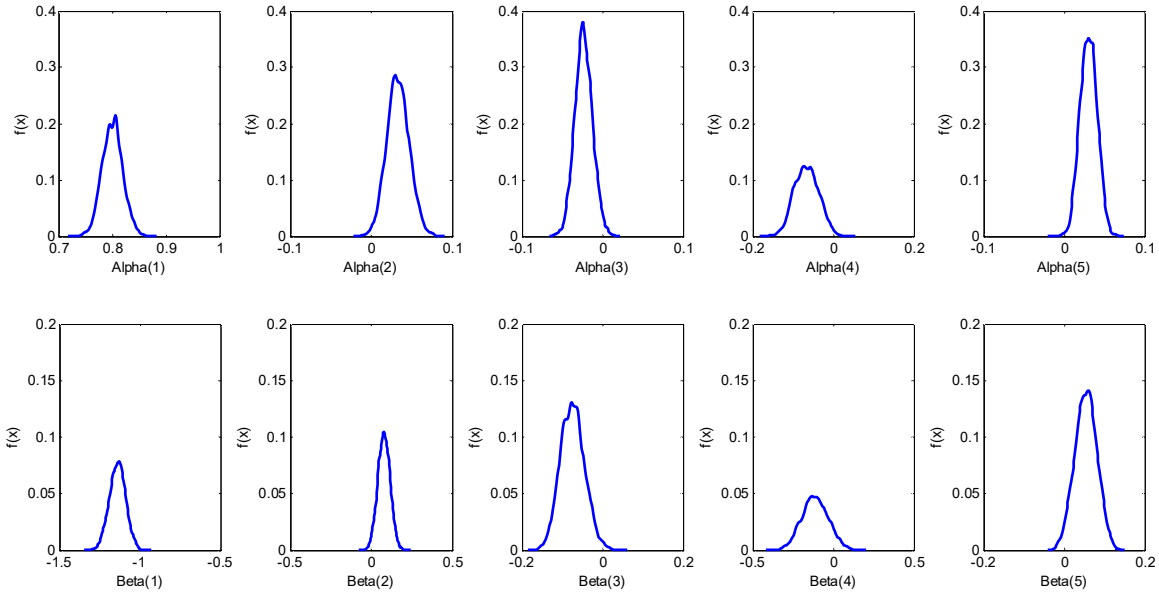


<그림 3-138> 지형특성인자와 Location 매개변수와의 관계(기상청)

(6) 계층적 Bayesian 기법을 이용한 매개변수 추정 및 불확실성 평가

· 기존 L-모멘트 방법에서는 매개변수 추정시 외부 인자를 고려할 수 없는 단점이 존재하였지만 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 계층적 Bayesian 기법을 도입하여 매개변수 추정시 외부 인자에 지역특성이 고려 될 수 있도록 모형을 구축하였음. 즉, Gumbel 분포 매개변수 μ,σ 추정에 있어서 지역특성(위도, 경도, 고도)을 고려하기 위해서 GLM 형태의 연결함수를 도입하였음. 즉, GLM 모형을 통하여 지역특성을 고려한 Gumbel 분포의 매개변수를 추정하였으며, 매개변수의 수렴(convergence)을 위해서 3개의 Chain을 독립적으로 시행하여 표본이 효과적으로 혼합(mixing) 되도록 하였음.

· 각 매개변수별로 5,000번 모의를 수행하였으며 최종적으로 Case 4의 GLM 매개변수 별 사후분포를 도출하였음. <그림 3-139>에서 파란 실선은 각 매개변수들의 불확실성 범위를 나타냄. <그림 3-139>에서 볼 수 있듯이 각 매개변수별 사후분포는 정규분포로 가정한 사전분포 형태를 동일하게 따르는 것을 볼 수 있음. 계층적 Bayesian 기법은 매개변수의 Pooling 과정을 통해 지점간의 정보를 서로 공유하며, 추정되는 매개변수의 불확실성을 저감시킬 수 있는 장점이 있음. <표 3-37>은 도출된 사후분포로부터 최종적으로 매개변수의 불확실성 범위를 나타내며, 매개변수별 2.5%, 50%, 97.5%의 Quantile을 추출하여 매개변수의 신뢰구간을 정량적으로 산정하였음. 매개변수들의 사후분포를 보면 양(+)과 음(-)의 값이 교차하는 구간이 상대적으로 적은 것을 확인할 수 있으며 이는 매개변수들이 통계적인 유의성을 가지고 있음을 의미함.



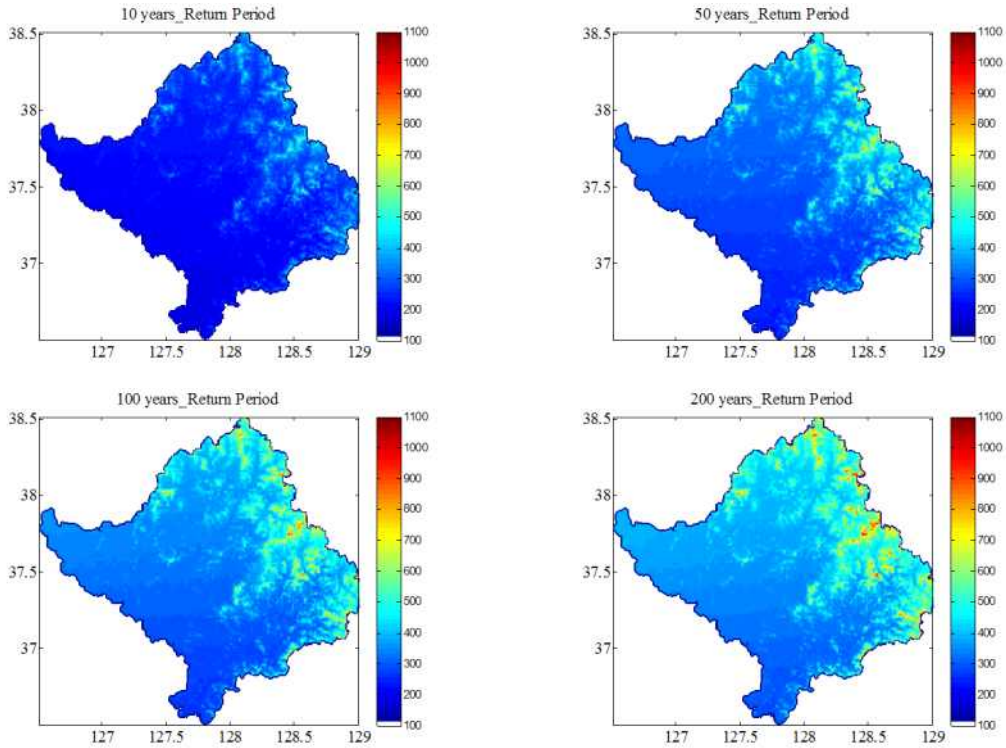
<그림 3-139> 각 매개변수들의 사후분포 산정 결과

<표 3-37> 불확실성 분포로부터 도출된 기본 통계치 및 불확실성 정량화

Parameters	Mean	Std	2.5%	Median	97.5%
α_1	0.80	0.02	0.76	0.80	0.84
α_2	0.03	0.01	0.01	0.03	0.06
α_3	−0.02	0.01	−0.05	−0.02	0.00
α_4	−0.07	0.03	−0.13	−0.07	0.00
α_4	0.03	0.01	0.01	0.03	0.05
β_1	−1.13	0.05	−1.24	−1.13	−1.03
β_2	0.08	0.04	0.01	0.08	0.15
β_3	−0.08	0.03	−0.14	−0.08	−0.02
β_4	−0.10	0.08	−0.26	−0.11	0.06
β_4	0.05	0.03	0.00	0.05	0.11

(7) 확률강수량 산정

· 지형특성(위도, 경도, 고도)을 고려한 한강유역내의 확률강수량 변화를 알아보기 위해 계층적 Bayesian 기법에 적용하여 지역빈도해석을 수행하였음. 한강유역은 강원도지방에서 고도가 증가하는 산악지형을 가지고 있으며, 복잡한 지형특성을 고려한 확률강수량을 추정하기 위해 4가지 Case의 모형을 고려하였음. 앞서 다양한 Case를 분석한 결과 한강유역은 특정 고도 이상이 되었을 때 강수량이 증가하는 산지효과가 나타나고 있으며, 또한 극치강수량의 특성은 경도보다는 위도와 높은 상관성을 가지고 있음을 확인할 수 있었음. 이러한 지형특성을 고려하여 빈도별 지역빈도해석을 수행한 결과를 <그림 3-140>에 도시하였음. <그림 3-140>에서 보듯이 고도가 높은 지역에서 빈도별 확률강수량이 커지는 효과를 볼 수 있으며 이는 지리적/지형적 특성을 반영한 결과라 할 수 있음.



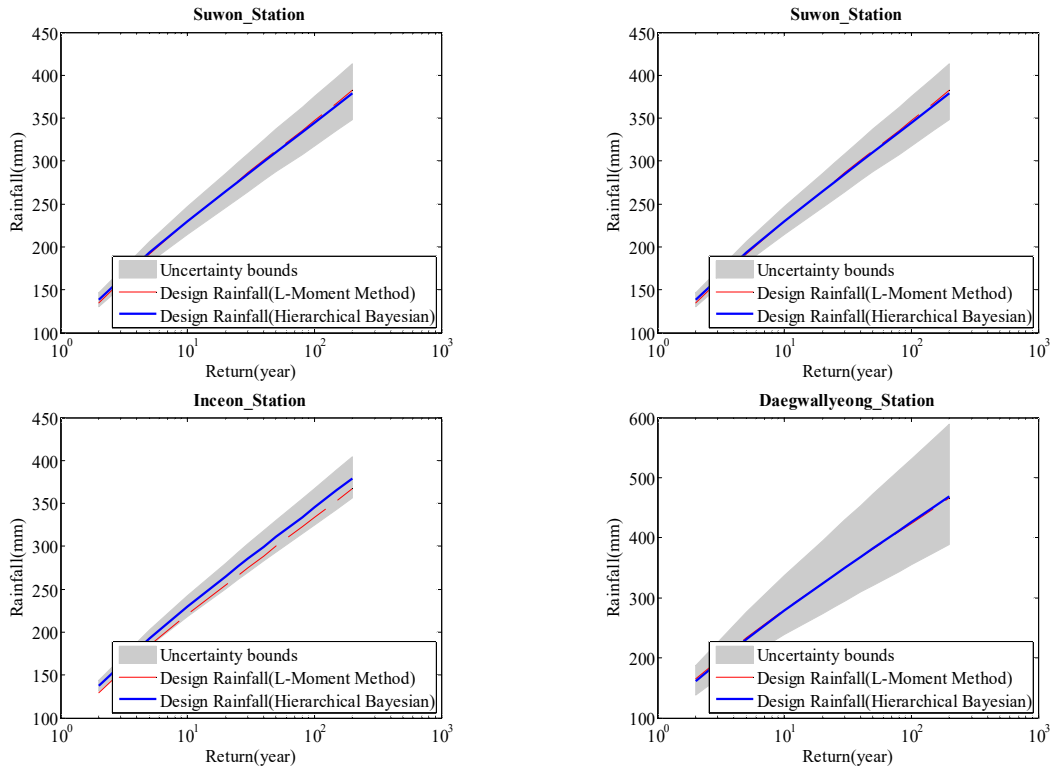
<그림 3-140> 각각 다른 4개의 빈도별 확률강우량 산정 결과

· <표 3-38>에서는 기존 L-모멘트 기반의 확률강수량과 본 연구에서 제안하고 있는 계층적 Bayesian 기반의 확률강수량을 비교하여 나타내었음. 표에서 보듯이 대부분의 강수지점에서 L-모멘트를 통해 산정된 확률강수량은 Bayesian 방법을 통해 추정된 확률강수량의 불확실성 구간 안에 위치하고 있음을 확인할 수 있음. <그림 3-141>은 한강 유역 주요 강수지점의 빈도별 확률강수량과 불확실성 추정결과를 L-모멘트 방법과 비교하여 나타낸 결과로서 Bayesian 모형의 불확실성 구간 안에 L-모멘트를 통해 추정된 확률강수량이 위치하고 있음을 확인할 수 있음. 이와 같이 본 연구에서 제안한 지리적/지형적 특성을 고려한 계층적 Bayesian 기반 지역빈도해석 기법은 기존 지역빈도해석 결과와 강수지점 기준으로 거의 유사한 양상을 보이고 있으며 공간적인 보간과 더불어 불확실성까지 정량화 할 수 있는 장점이 있음.

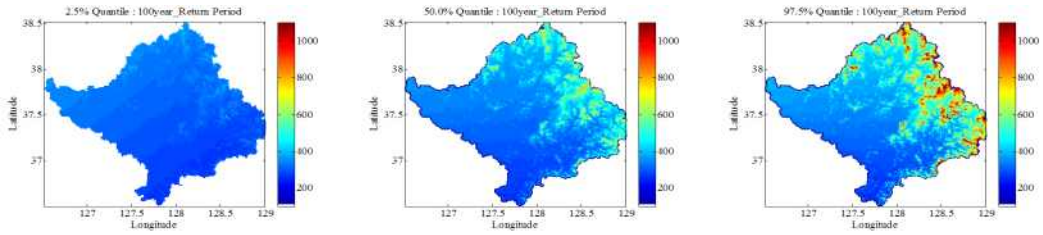
· 이와 더불어 매개변수 추정시 지리적/지형적 특성을 외부 인자로 고려할 수 있어 미계측 유역에 대한 확률강수량 추정시 신뢰성 있는 분석이 가능할 것으로 판단됨. 마지막으로 <그림 3-142>에서는 계층적 Bayesian 기법으로 추정된 매개변수의 사후분포와 DEM자료를 활용하여 100년 빈도의 확률강우량과 불확실성을 공간적으로 도시하였음. <그림 3-142>에서 확률강수량의 불확실성을 검토해보면 고도가 높은 지역일수록 낮은 지역에 비해 불확실성이 상대적으로 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있음. 이와 같이 Bayesian 기반의 공간적 지역빈도해석 기법은 확률강수량에 대한 불확실성을 정량적으로 제공해주는 장점이 있으며, 이를 통해 댐과 같은 수공구조물의 상대적인 안정성 및 위험도를 검토할 수 있는 자료로 활용이 가능함. 즉, 댐 유역에 적용되는 PMP등에 대해서 확률강수량의 불확실성을 감안하여 산정 결과의 적절성 등을 평가할 수 있는 토대를 제공할 수 있음.

<표 3-38> 지점별 불확실성 구간 정량화 산정 결과

Sta.	Return Period	HBRFA (2.5%)	HBRFA (50%)	HBRFA (97.5%)	L-Moment	Sta.	Return Period	HBRFA (2.5%)	HBRFA (50%)	HBRFA (97.5%)	L-Moment
Suwon	10	214.9	230.0	247.6	229.5	Wonju	10	202.3	213.9	226.9	219.0
	30	264.7	285.3	309.5	286.4		30	249.0	264.8	282.9	273.4
	50	287.3	310.5	337.9	312.3		50	270.2	288.0	308.5	298.1
	100	317.9	344.6	376.2	347.3		100	298.7	319.5	342.9	331.5
	200	348.4	378.6	414.5	382.2		200	327.2	350.7	377.4	364.8
Sokcho	10	202.7	226.8	257.0	234.4	Icheon	10	210.0	221.5	234.4	228.4
	30	246.7	280.0	322.2	292.5		30	258.7	274.5	292.0	285.1
	50	266.6	304.1	352.0	319.0		50	280.7	298.6	318.4	310.9
	100	293.7	336.8	392.3	354.8		100	310.8	331.2	353.8	345.8
	200	320.5	369.3	432.6	390.4		200	340.6	363.6	389.3	380.5
Gangneung	10	225.8	239.9	255.3	258.6	Yangpyeong	10	220.9	233.5	247.8	243.3
	30	279.2	298.3	319.6	322.7		30	272.9	290.1	309.8	303.6
	50	303.3	324.8	349.1	351.9		50	296.6	315.9	338.2	331.1
	100	335.9	360.8	389.0	391.4		100	328.6	350.8	376.4	368.2
	200	368.5	396.6	428.6	430.7		200	360.4	385.6	414.5	405.2
Yeongju	10	174.3	185.5	198.7	191.5	Inje	10	186.7	208.4	232.5	207.2
	30	212.2	227.6	245.8	239.0		30	228.2	257.2	290.1	258.5
	50	229.5	246.8	267.2	260.6		50	247.1	279.6	316.4	281.9
	100	252.7	272.8	296.4	289.8		100	272.4	309.7	352.0	313.5
	200	276.0	298.6	325.3	318.9		200	297.8	339.6	387.8	345.0
Mungyeong	10	160.2	171.5	184.5	167.1	Chuncheon	10	215.5	227.8	241.7	227.0
	30	193.9	209.1	226.8	208.5		30	265.6	282.5	301.5	283.4
	50	209.1	226.2	246.3	227.4		50	288.3	307.4	328.8	309.0
	100	229.5	249.3	272.5	252.9		100	319.1	341.0	365.8	343.6
	200	250.1	272.3	298.6	278.3		200	349.8	374.5	402.5	378.2
Boeun	10	146.7	160.1	176.1	199.5	Hongcheon	10	208.0	220.4	234.0	216.7
	30	176.5	194.1	216.1	249.0		30	256.4	273.3	291.9	270.4
	50	189.9	209.7	234.3	271.5		50	278.3	297.4	318.4	294.9
	100	208.0	230.8	258.9	301.9		100	308.0	330.0	354.1	327.9
	200	226.1	251.7	283.4	332.2		200	337.6	362.4	389.7	360.9
Cheongju	10	170.6	186.6	205.3	187.2	Seoul	10	219.1	232.5	247.3	254.0
	30	206.4	227.9	253.5	233.7		30	270.2	288.4	309.1	317.0
	50	222.6	246.7	275.6	254.8		50	293.4	313.9	337.4	345.7
	100	244.6	272.2	305.5	283.4		100	324.7	348.5	375.3	384.4
	200	266.2	297.6	335.3	311.9		200	356.1	382.9	413.4	423.0
Daegwallyeong	10	237.2	278.5	334.3	280.2	Ganghwa	10	228.5	246.9	267.9	267.4
	30	293.3	349.3	427.2	349.8		30	282.2	307.3	335.9	333.8
	50	318.4	381.6	469.2	381.4		50	306.5	334.7	366.9	364.0
	100	352.7	425.2	526.7	424.2		100	339.3	371.7	408.9	404.8
	200	386.6	468.5	583.7	466.8		200	365.6	389.3	415.7	445.4
Jecheon	10	182.0	197.8	217.1	210.6	Incheon	10	218.2	229.6	242.0	220.3
	30	222.6	244.1	270.3	262.9		30	269.5	285.2	302.0	275.0
	50	241.1	265.4	294.8	286.6		50	292.9	310.4	329.5	299.9
	100	265.9	293.9	327.8	318.8		100	324.3	344.6	366.4	333.5
	200	290.7	322.2	360.5	350.8		200	355.7	378.6	403.2	367.0



<그림 3-141> L-모멘트법과 HBRFA의 확률강우량 산정결과 및 불확실성 정량화



<그림 3-142> Quantile별(2.5,50,97.5%) 100년 빈도 확률강우량 산정 결과

다. 결론 및 제언

· 우리나라는 강수의 계절적 불균형과 지형 특성이 복잡하여 강수 패턴을 예측하는데 매우 어려운 조건을 지니고 있음. 특히, 강수지점들간의 지리적·지형적 이질성으로 인해 확률강수량 산정시 신뢰성이 결여되는 단점이 존재함. 그러나 기존 연구에서는 효과적인 매개변수 추정에만 초점이 맞추어져 있으며, 매개변수 추정시 외부인자를 고려할 수 없는 단점이 존재하였음. 이를 극복하고자 본 연구에서는 매개변수 추정시 외부인자를 고려할 수 있고 추정된 매개변수의 불확실성을 정량화 할 수 있도록 하였음.

· 즉, 매개변수 추정시 다수의 강수지점의 자료를 활용하는 동시에 대상 유역내의 지리적·지형적 특성을 통합적으로 고려한 계층적 Bayesian 모형을 개발하는데 목적이 있으며, 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같이 요약할 수 있음.

· 첫째, 지리적·지형적 특성에 따른 확률강수량 효과를 알아보기 위해서 Gumbel 분포 매개변수와 관측소별 지형인자간의 관계를 평가하였음. 그 결과 고도의 경우 특정 높이

이상에서는 강우량이 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며 이러한 점을 고려하며 확률강수량을 추정한 결과 고도가 높은 태백산맥지역에서 확률강수량의 증가 특성을 확인할 수 있었음.

- 둘째, 본 연구에서는 Gumbel 분포의 매개변수 추정시 지역적 및 기후학적인 특성을 고려하여 지역 매개변수를 취득하였음. 지점간의 정보를 공유함으로써 지역 매개변수를 취득할 수 있었고, 매개변수의 불확실성을 정량적으로 제시 할 수 있는 장점을 확인 할 수 있었음.
- 마지막으로, 한강유역에 대해서 지리적·지형적 특성을 효과적으로 고려할 수 있었으며, 계층적 Bayesian 모형을 적용하여 확률강수량을 추정한 결과 기존 지점빈도해석 방법과 유사한 결과를 갖는 것을 확인할 수 있었음. 더불어 빈도별 확률강수량의 불확실성 구간을 사후분포로부터 정량적으로 제시할 수 있는 장점을 확인할 수 있었음.
- 본 연구결과를 통해서 자료의 연한이 짧고, 지역적으로 상이한 국내에 대해 효과적인 확률강수량을 산정이 가능하였으며 불확실성을 고려한 지역빈도해석을 수행하였음. 따라서 지역특성을 고려하여 미계측 유역에 대한 확률강수량 추정시 신뢰성을 개선시킬 수 있으며, 유역단위 수자원계획시 활용이 증대될 것으로 기대됨.

2. 수문학적 해석모듈 GUI 개선

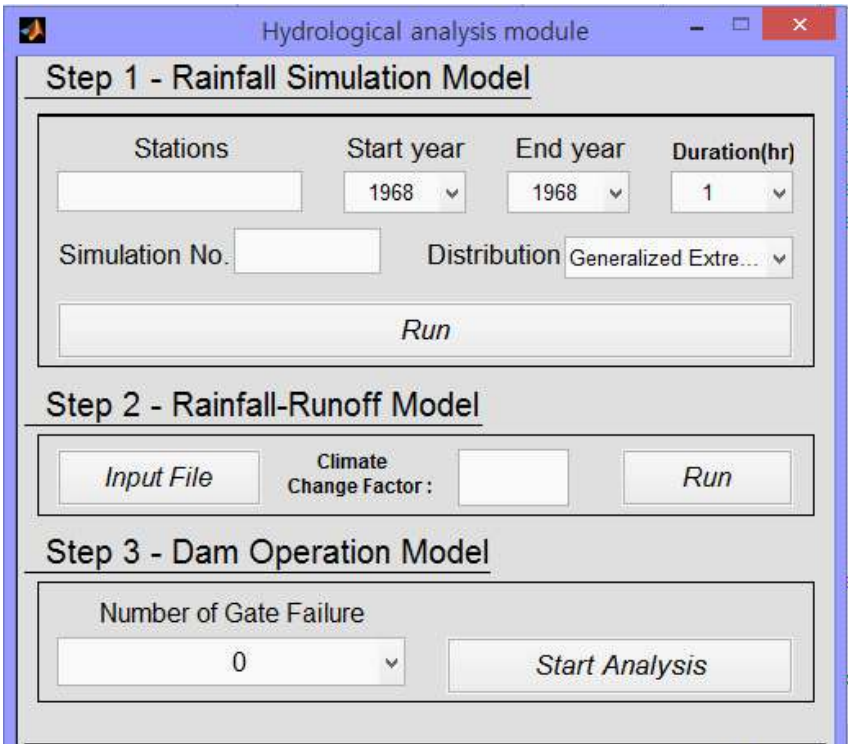
· 3차년도 연구에서는 1,2차년도에 연구된 수문학적 댐 위험도 해석기법을 기반으로 사용자가 댐 위험도 분석 수행이 가능케 하기 위해 해석모듈 GUI를 개발하였다. 그러나 기 개발된 수문학적 해석모듈의 GUI의 사용성을 개선하기 위해 본 연구에서는 사용자가 편의성 도모를 위해 GUI를 개선하였으며 본장에 상세히 수록하였음.

가. 수문학적 해석모듈 GUI 기능개선

· 본 연구에서 개발된 수문학적 해석모듈은 기 개발된 수문학적 해석모듈의 편의성을 증대하기 위해 수행되었음. 첫째로, 기존 수문학적 해석모듈에서는 확률강우량 산정, 강우-유출 분석, 댐 운영 모의 즉, 3단계로 구분되어 수행 되는 반면 본 연구에서는 통합 GUI를 제공함으로써 사용자의 혼동을 줄였음.

· 또한 확률강우량 산정시 앞서 언급한 지역빈도해석 모형을 추가시킨 것으로 인해 신뢰성 있는 확률강우량을 산정 할 수 있도록 개발하였음. 본 연구에서 최종적으로 개발된 수문학적 해석모듈 GUI는 다음 <그림 3-143>과 같으며, 프로그램 사용방법, 사용결과의 일련의 과정은 아래와 같음.

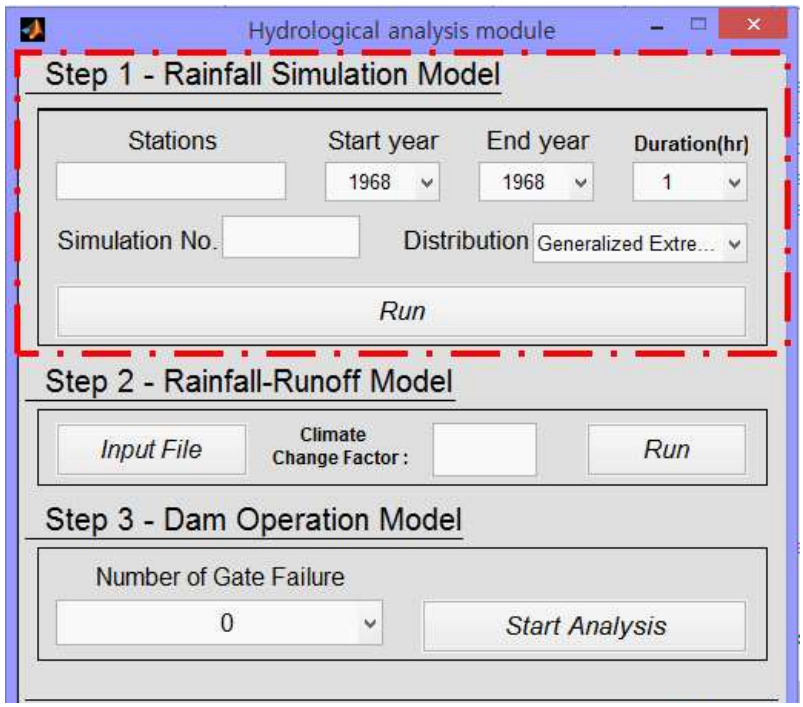
나. 프로그램 실행방법



<그림 3-143> 수문학적 해석모듈 메인화면

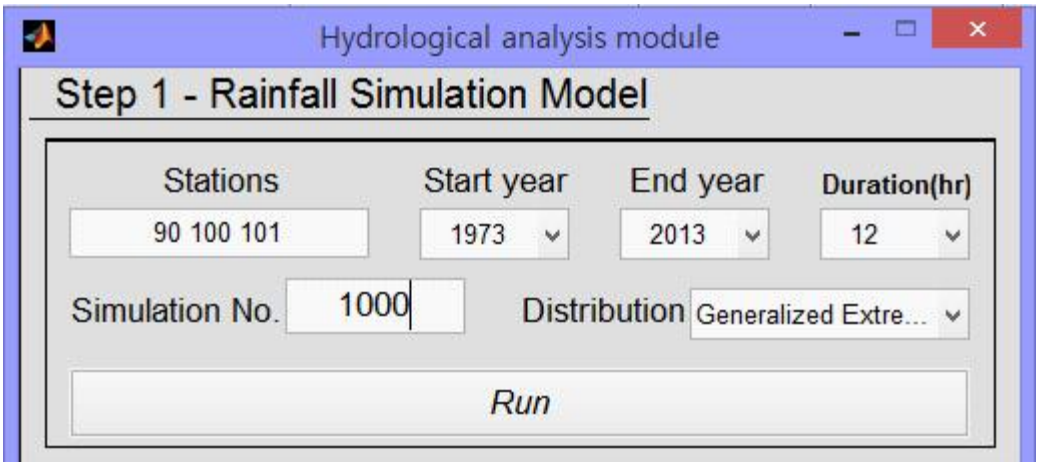
· <그림 3-143>에서 볼 수 있듯이 확률강우량 산정에서 댐 운영모의까지 하나의 GUI 내에서 수문학적 해석을 수행할 수 있도록 개발하였으며, 실행방법은 아래와 같음.

(1) Step 1 - Rainfall Simulation Model

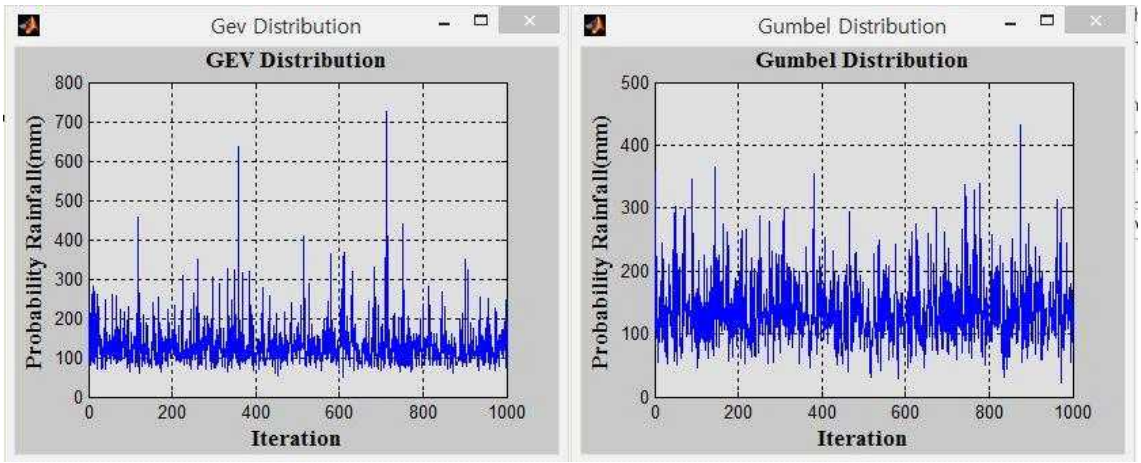


<그림 3-144> Step 1 - Rainfall Simulation Model

ㄱ. 기상청 관측소 번호를 Stations에 입력한다.
ㄴ. 분석 시작 년도 및 종류 년도를 선택한다. (1968 ~ 2013)
ㄷ. 지속시간을 선택한다. (1~120 hr)
ㄹ. 확률강우량 모의 횟수를 입력한다. (ex, 1,000)
ㅁ. 적정 확률분포형을 선택한다.(GEV 또는 Gumbel)
ㅂ. *Run* 버튼을 누르면 Step 1 부분이 실행된다.

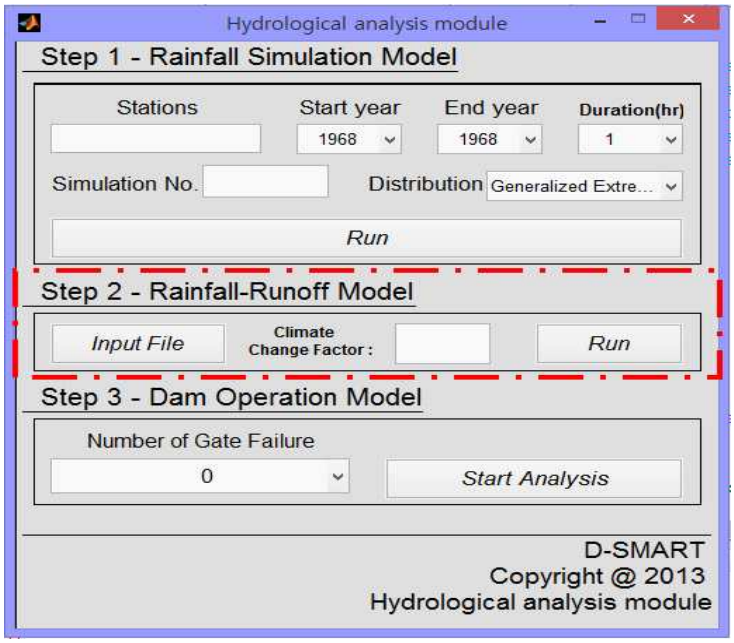


<그림 3-145> Step 1 - 입력 예시



<그림 3-146> Step 1 - 확률강우량 산정 결과 그림 예시

(2) Step 2 - Rainfall-Runoff Model

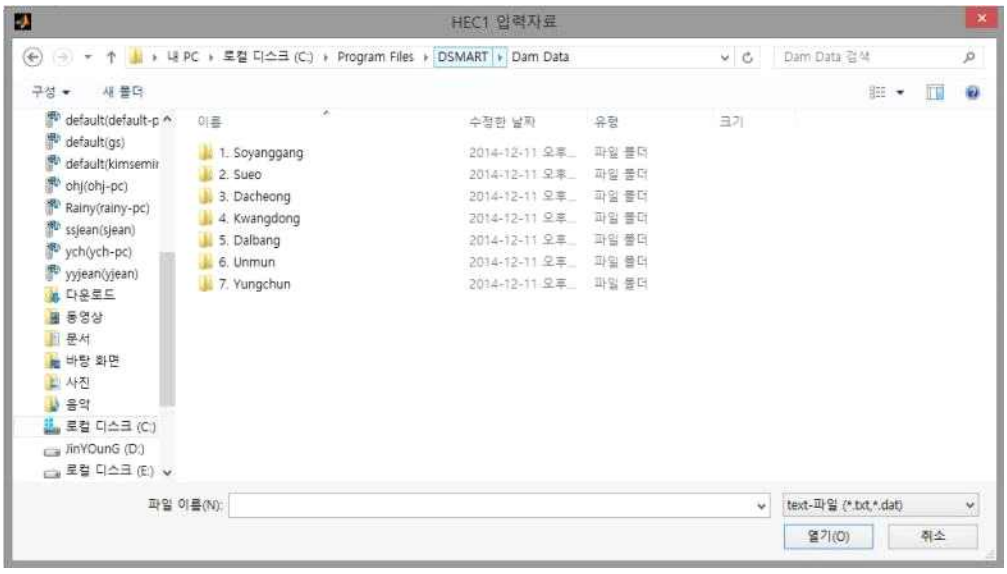


<그림 3-147> Step 2 - Rainfall-Runoff Model

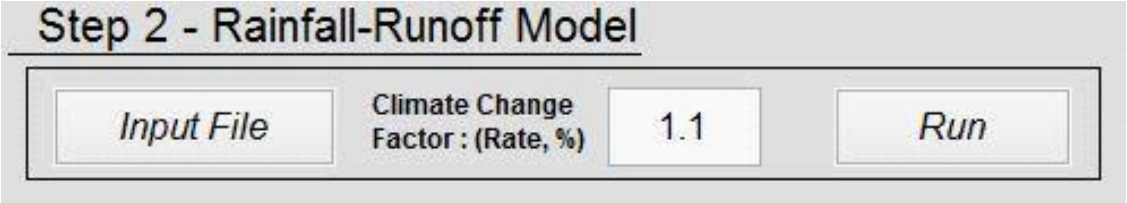
ㄱ. Input File 버튼을 누르고 분석 대상댐 폴더내의 댐이름_HEC1.dat 파일을 선택한다.(<그림 3-147>)

ㄴ. 사용자는 기후변화의 영향을 고려하고 싶으면 "Climate Change Factor"에 값을 입력한다.

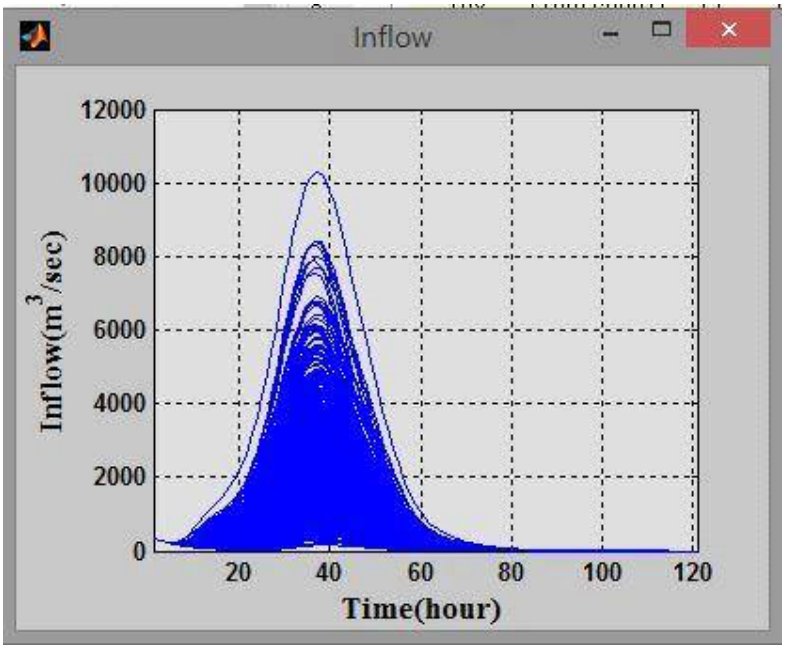
ㄷ. Run 버튼을 누르면 Step 2 부분이 실행된다.



<그림 3-148> 댐별 자료

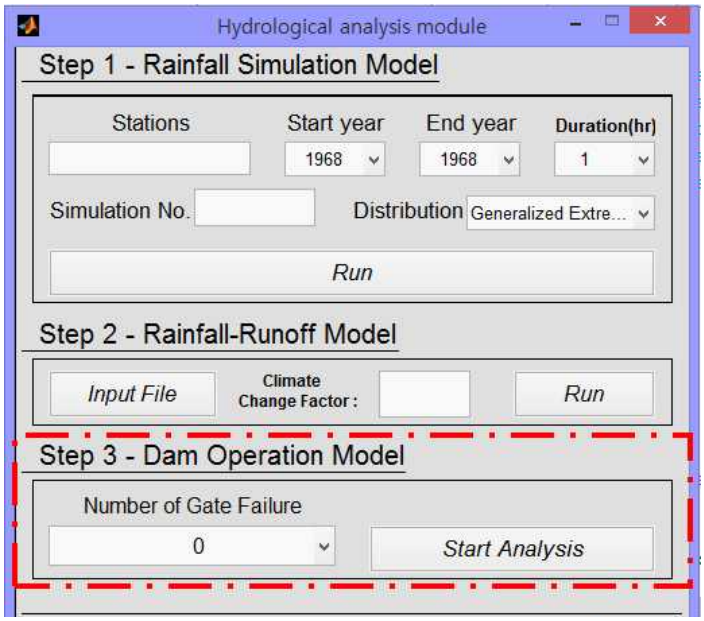


<그림 3-149> Step 2 - 입력 예시



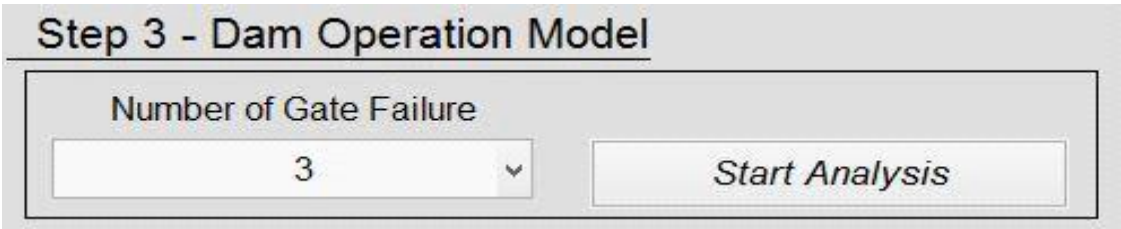
<그림 3-150> Step 2 - 확률홍수량 산정 결과 그림 예시

(3) Step 3 - Dam Operation Model

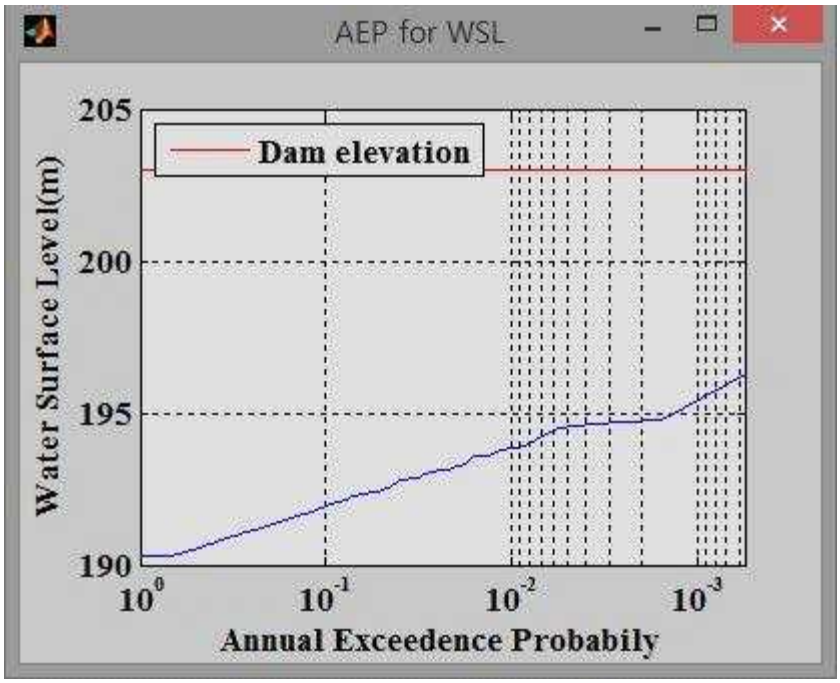


<그림 3-151> Step 3 - Dam Operation Model

ㄱ. Number of Gate Failure 개수를 선택한다.
ㄴ. Start Analysis 버튼을 누르면 Step 3 부분이 실행된다.



<그림 3-152> Step 3 입력 예시



<그림 3-153> Step 3 댐 운영 모의 결과 그림 예시

· 현재 사용자가 보다 쉽게 댐 위험도 해석을 수행할 수 있도록 매뉴얼을 개발 중에 있으며, 지속적인 수정 및 보완작업을 마친 후에 범용적으로 활용 가능 여부를 판단할 예정에 있음.

3. 실증댐 적용 사례

· 본 연구에서는 필댐을 위주로 선택하여 댐 위험도 분석을 수행하였음. 이러한 이유는 콘크리트 댐의 경우 파괴시 그 양상이 필댐 보다 복잡하고, 정형화 된 해석 기법의 부재로 인해 본 연구 분석에서는 배제하였음. 또한 필댐의 경우 가장 큰 댐 위험인자의 경우 월류이므로, 수문학적 월류확률을 기존 연구보다 정확하고 신뢰성 있는 분석을 수행하고자 하였음.

가. 광동댐

· 광동댐은 한강 지류인 골지천 유역에 속하며, 강원도 삼척시 하장면 광동리에 위치하고 있다. 유역은 북쪽으로 두타산(EL.1,352.7m), 명주목재(EL.1,028.0m), 총옥산(EL.1,403.7m), 남쪽으로는 덕항산(EL.1,070.7m), 매봉산(EL.1,303.1m), 금대봉(EL.1,418.1m), 대덕산(EL.1,307.1m), 가덕산(EL.1,078.2m) 등 높은 산들에 의해 둘러싸여 있다. 광동댐 유역 수문특성 인자는 <표 3-39>와 같음.

<표 3-39> 광동댐 유역 수문특성인자

댐명	유역면적 (km^2)	최고고도 (EL.m)	최저고도 (EL.m)	유로연장 (km)	하천경사 (m/m)	평균폭 A/L(km)	형상계수 A/L^2
광동댐	125.0	1,403.9	650.0	25.6	0.0294	4.9	0.190

· 광동댐의 건설당시 태백권은 도시별 상수도시설 확충과 동시에 자체수원 확보가 곤란한 도시에 대한 광역상수도 시설의 수원설비로 계획되었음. 댐의 여수로 규모는 200년 빈도의 1.2배에 해당하는 홍수를 방류시킬 수 있는 규모로 설계되었으나, 「한강권역 댐 안정성 평가 및 비상대처 계획수립(2001, 국토교통부)」에서 댐 여유고가 부족하여 별도의 치수대책이 필요한 것으로 검토되었음.

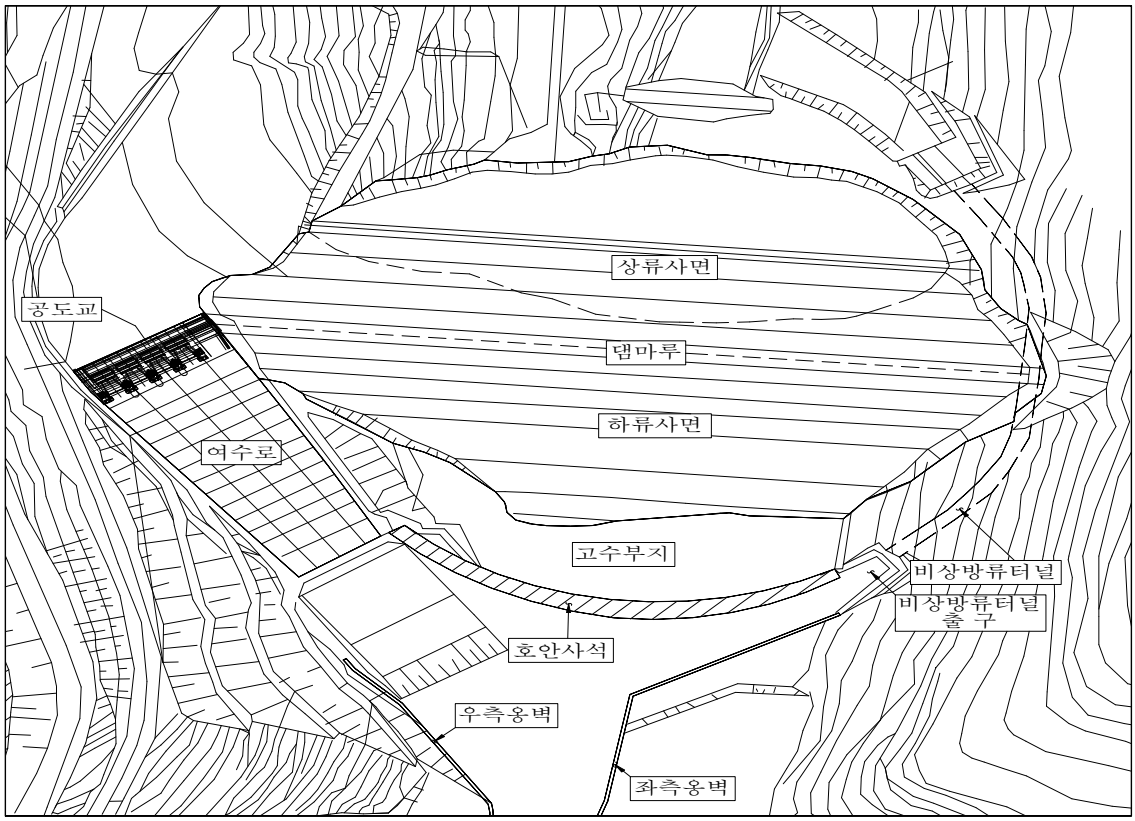
· 최근 연평균 강수량 증가와 하절기 집중호우, 이상호우가 빈번히 발생되어 설계홍수량 기준이 강화되었으며, 댐 수문학적 안전성 확보를 위한 치수능력증대사업이 추진되고 있음. 광동댐의 경우에도 가능최대홍수량에 대한 수문학적 안전성을 확보하기 위해서 「광동댐 치수능력 증대사업 기본 및 실시설계(2004, 국토교통부)」를 통해 구조적/비구조적 방안을 검토·제시하였음. 이 중 기존 여수로 웨어부 일부에 Radial Gate 4련을 설치하는 방안을 채택 하였으며, 2007년 12월에 Gate 설치 공사가 완료되어 현재 운용 중에 있다. 광동댐 치수능력증대사업을 요약하면 다음 <표 3-40>과 같으며, 주요 제원은 <표 3-41>과 같음.

<표 3-40> 광동댐 치수능력증대사업 추진 경과

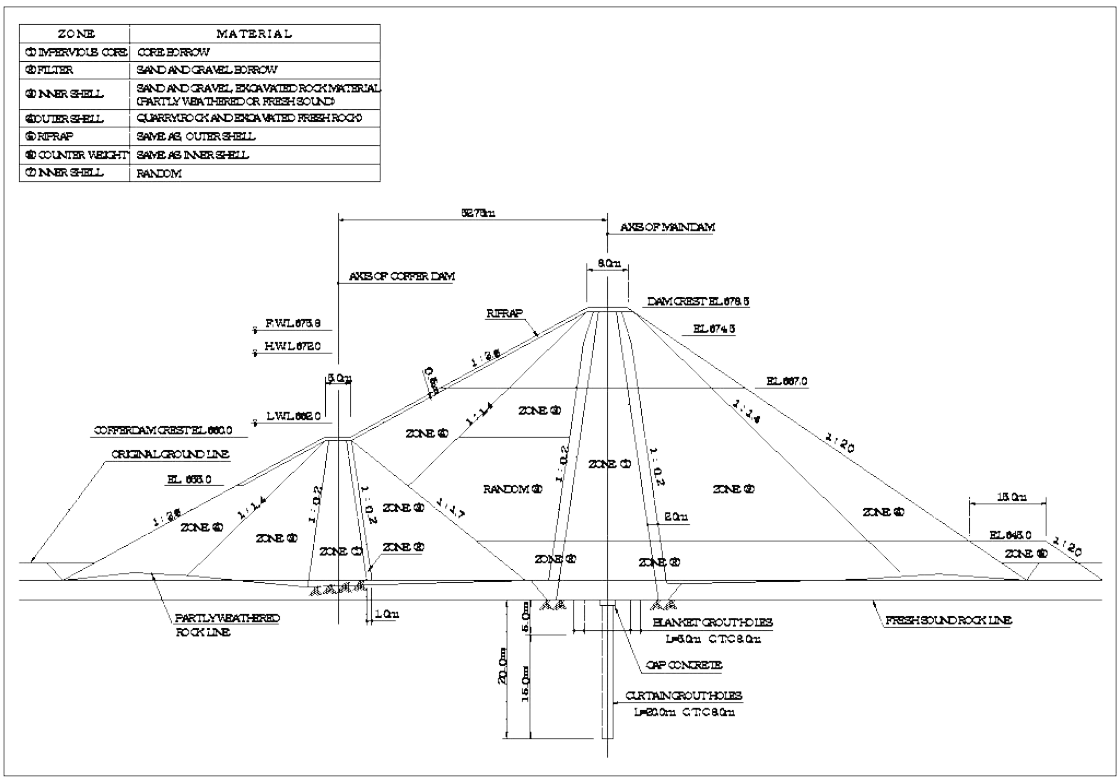
추진 시기	추진 내역
2001. 12	한강권역 댐 안정성 평가 및 비상대처 계획수립 → 광동·달방댐의 댐여유고 부족, 별도의 치수대책필요
2002. 08	태풍 “루사”로 인한 댐하류 홍수피해 발생
2003. 05	광동·달방댐 치수능력 증대사업 기본 및 실시설계 착수
2004. 07	광동·달방댐 치수능력 증대사업 기본 및 실시설계 완료
2007. 12	기존 여수로 웨어부 일부에 Radial Gate 4련 설치 완료

<표 3-41> 광동댐 주요제원

구 분		제 원	
		치수능력 증대 전	치수능력 증대 후
유 역	수 계	한강 지류 골지천	좌 동
	유역면적	125.0 × 106㎢	〃
댐	위 치	강원도 삼척시 하장면 광동리	〃
	형 식	중앙차수벽형 사력댐	〃
	댐마루표고	EL.678.5m	〃
	댐높이/길이	39.5m/292.0m	〃
	댐마루폭	8.0m	〃
저수지	만수면적	1.04㎢	〃
	최고수위	EL.676.6m	EL.676.5m
	계획홍수위	EL.675.3m	좌 동
	상시만수위	EL.672.0m	〃
	저수위	EL.662.0m	〃
	총저수용량	11,000천㎥	13,130천㎥
	유효저수량	8백만㎥	〃
여수로	형 식	자연월류식	자연월류식 + 수문조절식
	계획방류량	700㎥/s	2,140㎥/s
	웨어마루 표고	자연월류식 EL.672.0m	자연월류식 웨어부 EL.672.0m + 수문부 EL.666.7m



<그림 3-154> 광동댐 평면도



<그림 3-155> 댐체 표준단면도

(1) 수문관측소 현황

· 광동댐 기본 및 실시설계에서는 황지관측소와 임계관측소의 일 최대 강우량 자료에 대해 관측소별 Thiessen 가중치를 적용하고 지점빈도 해석을 실시하여 확률강우량을 산정하였음. 2차 정밀안전진단에서는 황지, 하장 강우관측소는 시자료가 확보되지 않아 임계관측소의 시자료에 대해 지점빈도해석 및 지역빈도해석을 수행하고 면적감소계수(Areal Reduction Factor, ARF)를 적용하여 면적확률강우량을 산정하였음. 모든 지점빈도 해석의 경우에 대해 적정 분포형으로는 Gumbel 분포형을 채택하였고, 2차 정밀안전진단 지역빈도해석은 GLO 분포를 채택하였음.

· 그러나 댐 유역의 확률강우량 산정시 각 유역별 임계지속시간이 다르므로 시강우자료를 이용하여 확률강우량을 산정함. 그러나 광동댐의 경우 인근 관측소의 30년 이상 시강우자료가 확보된 관측소는 대관령, 강릉, 태백관측소이므로 본 연구에서는 이들 관측소를 선택하여 분석을 수행하였음.

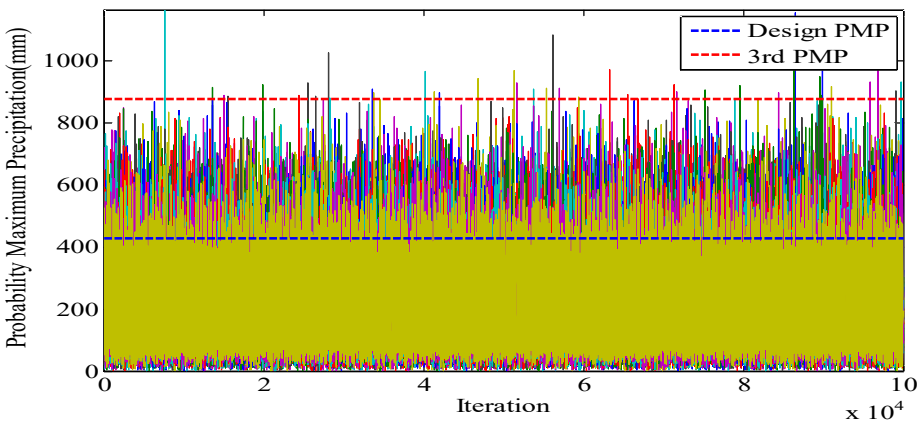
(2) 극치강우량 모의 발생 및 강우 모의 결과

· 본 절에서는 앞서 언급하였듯이 대관령, 강릉, 태백관측소의 시강우자료를 이용하여 확률강우량을 산정하였음. 광동댐 유역의 경우 임계지속시간은 24시간 이므로 24시간 연최대 강우량 자료를 활용하였으며, 간단한 산정절차는 다음과 같음.

(가) 광동댐 유역 인근 관측소인 대관령, 강릉, 태백 관측소의 강우자료를 수집하여 자료의 결측 및 오류를 조사하고(Screening of the data), 관측소의 연최대강우량을 총 27년으로 설정하여 추출하였음.

(나) 앞서 추출한 강우량을 활용하여 Gumbel 분포 기반으로 확률강우량을 산정하였음.

· <그림 3-156>은 광동댐 유역의 기상관측소에서 연최대강우량을 총 27개년도로 100,000번 모의수행한 결과임. 그림에서 파란 실선은 PMP(428mm), 빨간 실선은 3차 정밀 안전진단시 사용한 PMP(878mm)임. 모의 결과 산정된 확률강우량은 기존 사용된 PMP와 비슷한 결과를 보여주고 있어 본 연구에서는 모의된 확률강우량을 활용하여 확률홍수량 산정에 입력값으로 활용하였음.

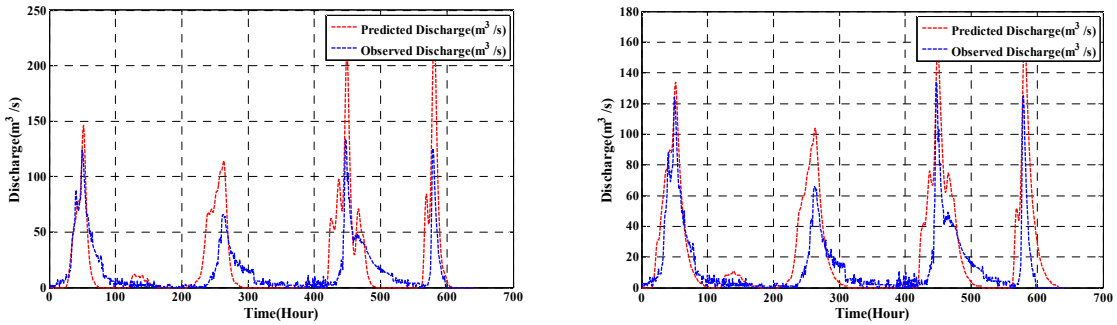


<그림 3-156> 광동댐 유역 12시간 최대 확률강우량 모의 결과

(3) 강우-유출 모의 결과

· 앞서 언급하였듯이 강우-유출 모형의 정확성은 주로 모델의 매개변수에 의존하게 된다고 언급한바 있음. 그러나 강우-유출 사상 매개변수 검정시 각 사상별로 검정에 따른 매개변수가 다르게 추정되는 문제점이 발생함. 이는 유역의 초기함수조건이나 강우의 발생형태 등의 상이함으로 초래되는 결과임. 본 연구에서는 2차년도에 개발한 Bayesian HEC-1 모형을 이용하였으며, 추가로 Bayesian MCMC 기법을 도입하여 보다 개선된 강우-유출 매개변수를 산정하였음.

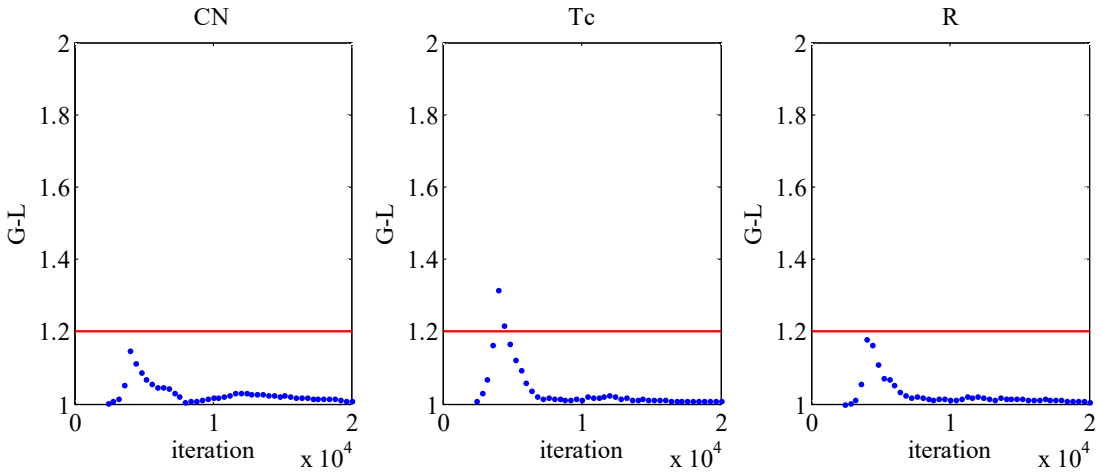
· 이는 기존 HEC-1 모형에서는 첨두유량의 발생시간은 유사한 거동을 보이나 모의된 유출수문곡선의 첨두유량이 관측수문곡선의 첨두유량을 재현함에 있어서 그 성능이 저하되어 있음을 확인할 수 있음. 즉, 모의된 유출수문곡선의 첨두유량이 관측수문곡선의 첨두유량을 재현함에 있어 기존 HEC-1 모형의 최적화 기법은 실제 강우-유출 사상에 적용하는데 무리가 따를 것으로 사료됨.



<그림 3-157> 기존 HEC-1 모형(좌) 및 Bayesian MCMC 모형(우)

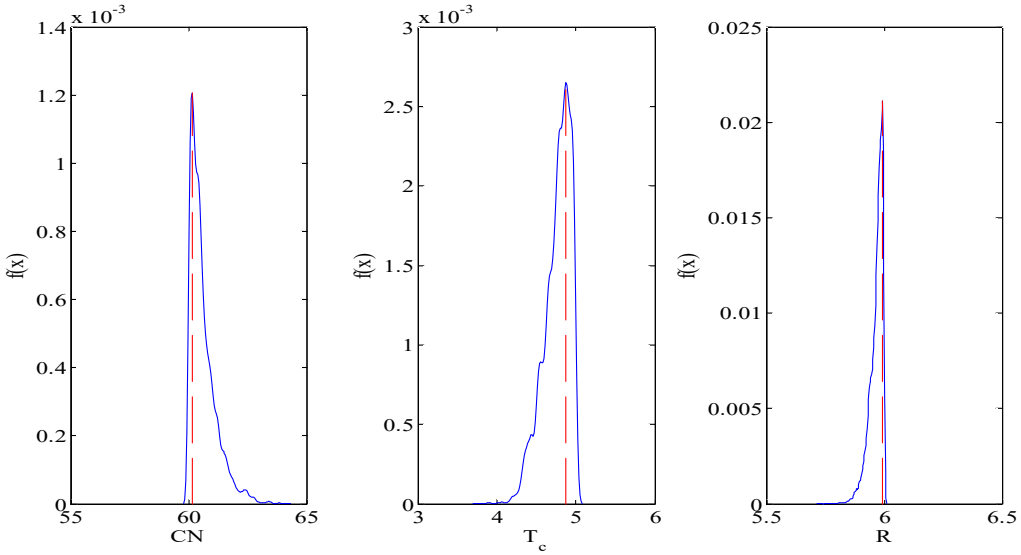
· <그림 3-158>에서 볼 수 있듯이 기존 HEC-1 모형의 경우 첨두유량 재현효과시 관측값보다 100m^3/s 차이가 나는 것을 확인 할 수 있음. 이러한 결과로 새로운 강우-유출 분석 기법을 적용하고자 함.

· 이러한 이유로 본 연구에서는 강우-유출 매개변수 추정시 Bayesian MCMC를 통해 각 매개변수(CN, T_c, R)의 범위 및 수렴정도를 파악하고, Bayesian HEC-1 모형을 활용하여 확률홍수량을 산정하였음. 먼저 Gelman-Rubin 통계량을 기반으로 Bayesian MCMC 기법을 평가하였음. 그 결과 각 매개변수 모두 일정범위에서 1.2 이하의 값, 즉 각 매개변수 모두 수렴이 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 <그림 3-158>에 도시하였음.



<그림 3-158> 광동댐 유역 Bayesian MCMC 매개변수 수렴 결과

· 앞서 산정한 매개변수 결과를 통해 본 연구에서 개발한 Bayesian HEC-1 모형에 적용하였음. 본 연구에서는 총 10,000번 Bayesian MCMC 모의를 수행하였으며, 그 중 수렴이 이루어진 5,000번 이후의 표본을 이용하여 매개변수 사후분포를 추정하였으며, 각 사상별로 매개변수의 사후분포를 핵밀도 함수로 표현한 결과는 <그림 3-159>와 같음.



<그림 3-159> Bayesian HEC-1 매개변수 사후분포 결과

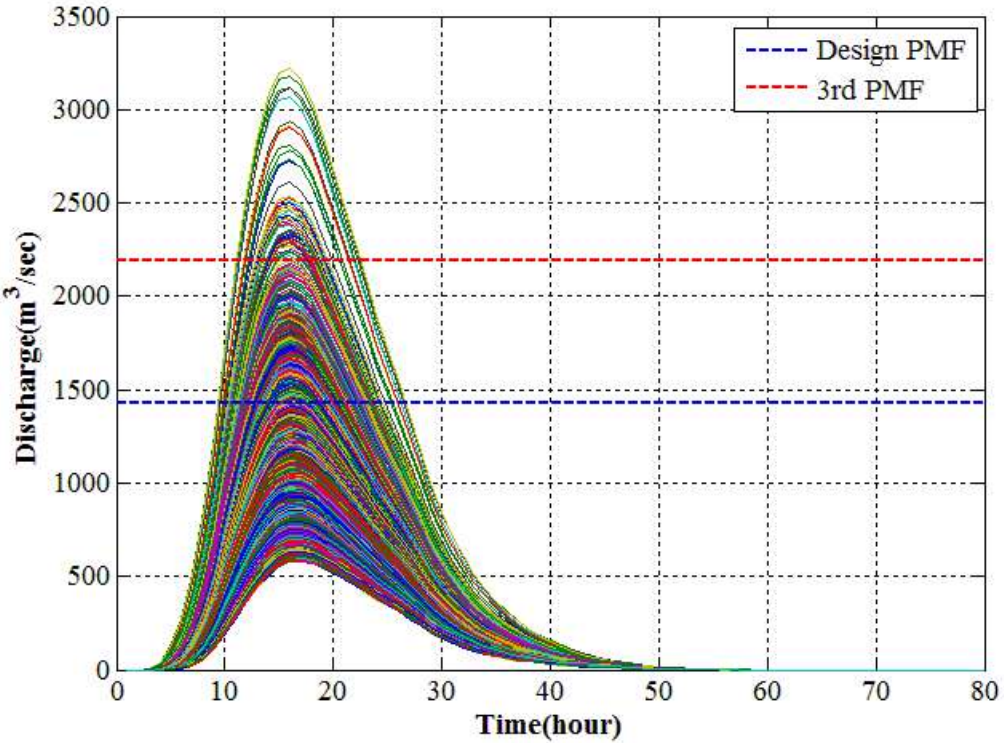
· 본 연구에서는 기존 HEC-1 모형과 Bayesian HEC-1 모형의 통계적 특성을 파악하기 위하여 앞서 평가시 이용한 기본적 통계적 평가 수단을 활용하여 모형간의 비교 분석을 수행하였음.

· 검정결과를 통계적으로 분석하여 비교하면 <표 3-42>와 같음. 전반적으로 상관계수, N-S 계수, IoA는 두 방법 모두 유사하거나 Bayesian HEC-1 방법이 다소 우수한 반면 모형의 편의 및 자료자체의 기본 특성치를 모의하는데 있어서는 상대적으로 Bayesian HEC-1 모형이 향상된 결과를 보이고 있음. Bayesian HEC-1 방법론의 가장 큰 장점은 매개변수의 불확실성을 정량화 할 수 있다는 것임.

<표 3-42> Bayesian MCMC와 BHEC-1의 검정 통계치

Efficiency Measure	Bayesian MCMC	BHEC-1
R	0.794	0.830
CoE	-0.217	-0.118
IoA	0.822	0.838
Bias	-5.744	-7.886
RMSE	26.573	25.465
mean (Obs.)	0.802	
mean (Sim.)	15.323	1983.094
std (Obs.)	21.067	
std (Sim.)	24.108	3342.503
CV1	40.556	
CV2	1.573	1.685

· 최종적으로 확률홍수량 산정한 결과는 <그림 3-160>과 같으며, 파란 점선은 설계 PMF(1,430m^3/s)이고 빨간 점선은 3차정밀안전진단시 이용한 PMF(2,190m^3/s)임.



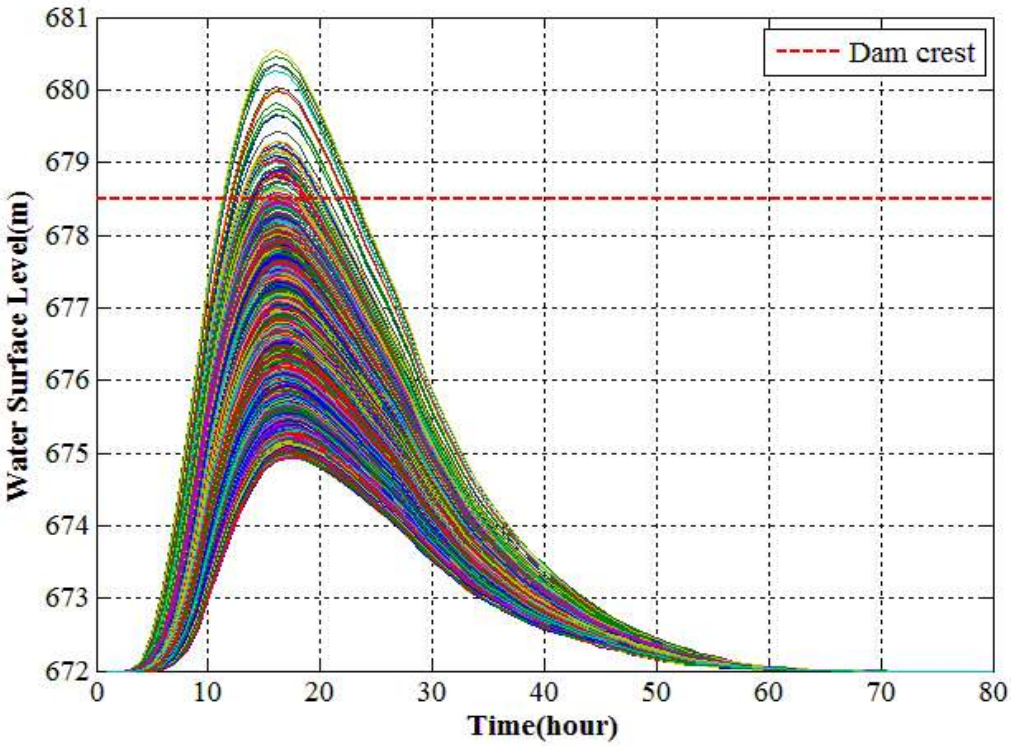
<그림 3-160> 광동댐 유역 확률홍수량 산정 결과

(4) 댐 운영 모의 결과

· 본 연구에서는 앞서 산정한 확률강우량, Bayesian HEC-1 모형과 댐 운영모의 기법에서 많이 사용되는 미육군공병단의 HEC-5 모형을 통합하여 연계모의가 가능한 프로그램을 개발하였음. 기존 연구에서는 강우-유출 분석 후 HEC-5 모형을 통해 댐 운영모의를 실시하여 댐의 월류 여부를 판단하였으며, HEC-1 모형과 동일하게 기존 HEC-5 모형은 매개변수가 가지는 불확실성을 고려하지 못하는 문제점이 있으며 결과적으로 계산된 수위의 신뢰성이 결여되는 문제점이 존재하였음.

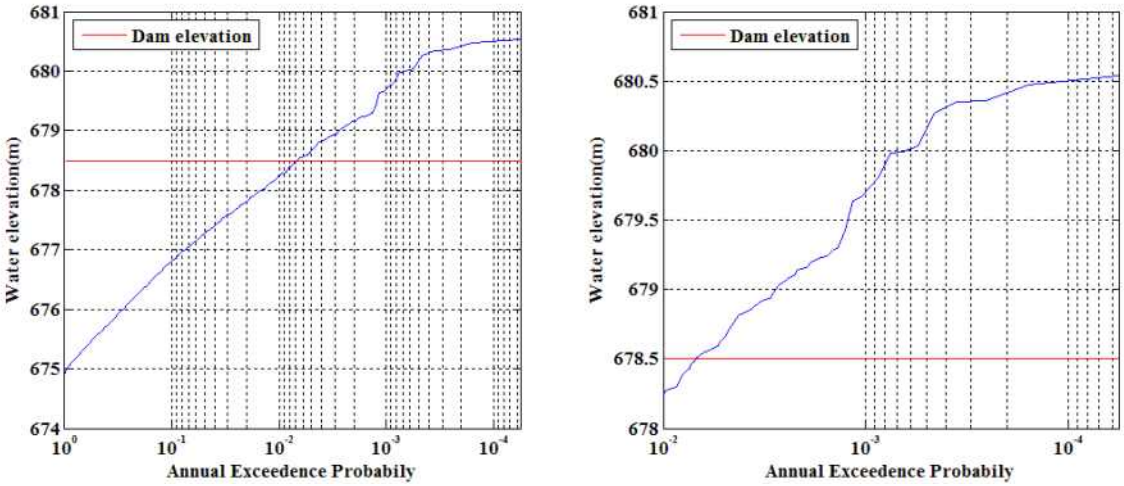
· 이러한 점에서 강우-유출 분석, Bayesian HEC-1 모형 그리고 HEC-5 모형이 통합으로 모의가 가능한 연구를 개발하여 최종적으로는 다양한 수문시나리오, 매개변수의 변동성 고려 등 종합적인 불확실성 고려가 가능하도록 불확실성의 정량화가 가능한 모형을 개발하였음.

· 광동댐 유역 댐 운영 모의 결과 시간에 따른 수위 즉, 10,000번 모의한 앙상블 결과를 <그림 3-161>에 도시하였음. 빨간 점선은 댐체 높이인 678.5m이며, 앙상블 결과 약 15시간 이후에 수위가 급격히 하강하고 있는 결과를 보여주고 있음. 산정된 앙상블 결과 댐체 높이를 초과하는 사상은 380회였으며, 이는 확률로 산정하면 3.80E-02임.



<그림 3-161> 광동댐 댐 운영 모의 결과

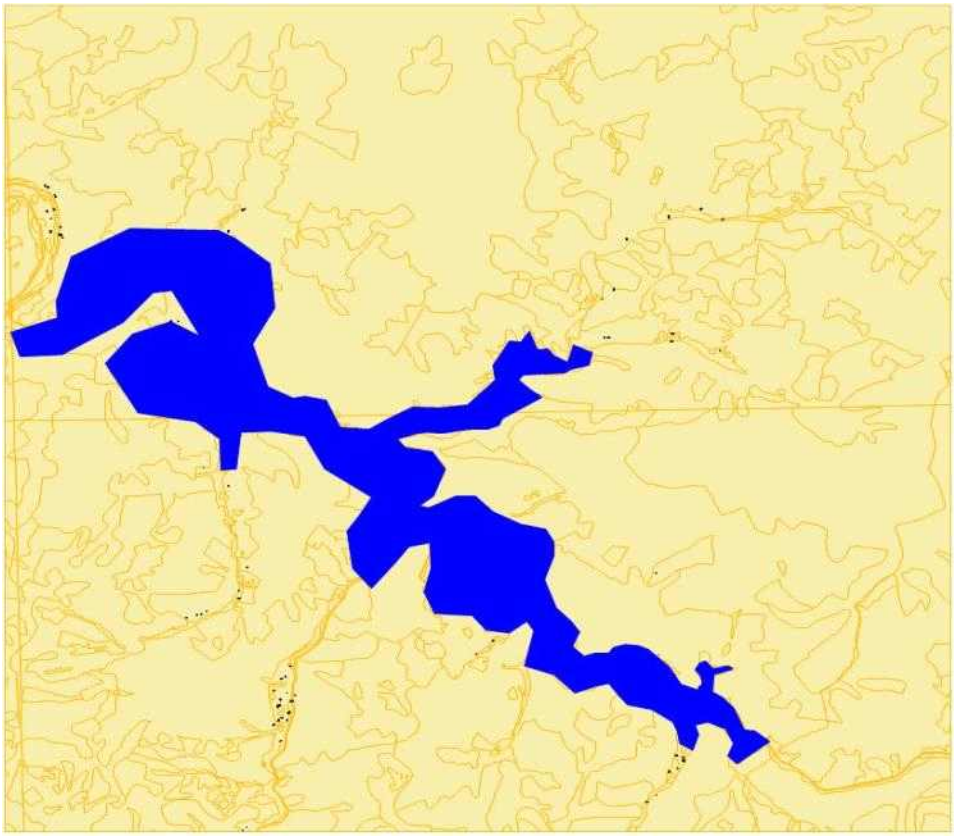
· 마지막으로 광동댐의 댐체 높이를 넘어갈 확률을 정량적으로 산정하였으며, <그림 3-162>에서 볼 수 있듯이 일부 확률로 월류 하는 것을 확인할 수 있음.



<그림 3-162> 광동댐 수위-AEP

(5) 홍수피해액 산정 결과

· 본 절에서는 앞서 언급한 다차원법을 고려한 GIS Tool을 이용하여 광동댐 유역의 홍수피해액을 산정하였음. 본 연구에서 개발한 GIS Tool은 댐 하류부의 홍수범람도가 산정되면 이에 따른 건축물도, 토지이용도 등을 활용하여 건축물, 건축내용물, 농경지 등의 피해액을 산정할 수 있음. 또한 하류부의 홍수범람도에서 붕괴지역, 급격한 수위 증가 지역, 보존지역을 각각 설정하고, 면적당 인구를 설정하면 인명피해 수까지 계산이 되도록 모형을 구축하였음. <그림 3-163>은 광동댐 유역의 GIS 자료를 구축하여 도시한 결과임.



<그림 3-163> 광동댐 유역 홍수피해액 자료 구축

· 먼저 광동댐 유역의 경우 건축물, 건축내용물, 농경지, 농작물 모두 침수심은 1.0~2.0m로 가정하여 분석하였음. 그러나 광동댐 주변 토지피복도를 살펴본 결과 비닐하우스 및 산업체는 존재하지 않으므로 분석에서 제외하였음. 광동댐 유역의 인구밀도(명/km^2)은 1,000,000m^2당 13명으로 가정하였음. <그림 3-164>는 광동댐 유역 농작물 피해 산정 결과이며, <그림 3-165>는 광동댐 유역 홍수피해액 산정 결과임.



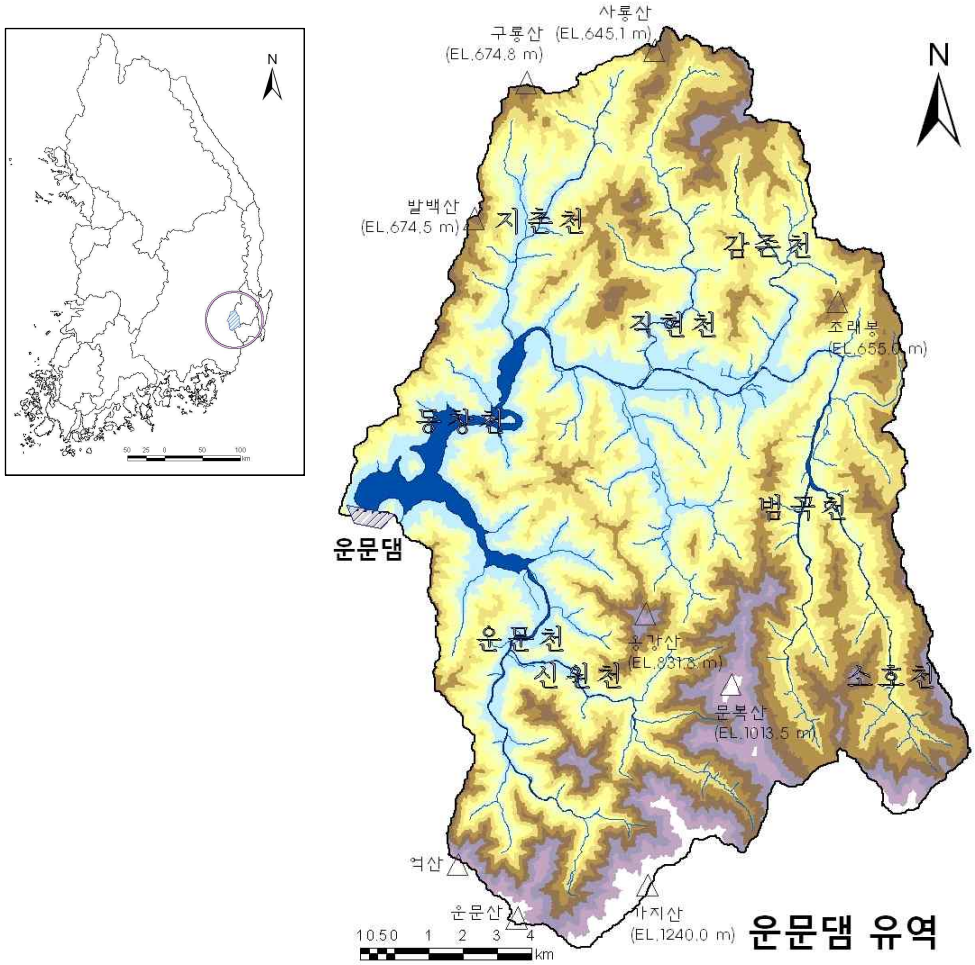
<그림 3-164> 광동댐 유역 농작물 피해 산정 결과

홍수피해액 평가결과			
전체 피해액		27,435,850,844	원
항목별 피해액			
건축물		14,526,047,025	원
건물내용물		3,010,291,086	원
농경지	매몰	1,049,963,657	원
	유실	4,042,717,211	원
농작물		4,806,831,864	원
비닐하우스		Unknown	원
산업체	유형자산	Unknown	원
	재고자산	Unknown	원
인명피해		21	명

<그림 3-165> 홍수피해액 산정결과

나. 운문댐

· 운문댐은 대구광역시, 경산시, 영천시 등에 원수 및 정수를 공급하기 위해 1995년 건설된 댐이며, 행정구역상 경상북도 청도군 운문면 대천리에 해당함. 운문댐이 위치한 동창천은 유역 동남단 고헌산(EL.1,032.8 m)에서 발원하여 북류하다가 다시 서류하며 본 유역 서남단 운문산(EL.1,188.0 m)에서 발원하여 북류하는 운문천과 본댐지점 상류 약 2 ㎞ 지점에서 합류됨. 운문댐 유역은 남북방향으로 전개되는 소분지로서 북쪽의 구룡산(EL.674.8 m), 사룡산(EL.645.1 m), 남쪽의 가지산(EL.1,240.0 m), 운문산(EL.1,188.0 m), 억산(EL.960.0 m) 등에 의해 둘러싸여 있음. 운문댐 유역의 위치 및 유역 내 주요현황은 <그림 3-166>과 같으며, 주요 제원은 <표 3-43>과 같다.



<그림 3-166> 운문댐 유역도

<표 3-43> 운문댐 주요제원

구 분	단 위	제 원	비 고
유역면적	km^2	301.3	-
댐마루표고	EL.m	155.1	-
홍수위(FWL)	EL.m	152.6	-
상시만수위(NHWL)	EL.m	150.0	-
홍수기 제한수위(RWL)	EL.m	146.8	-
저수위(LWL)	EL.m	122.0	-
웨어마루표고	EL.m	150.0 / 138.0	월류형 개수로식/측수로+배수문 수문 : B6.0m × H6.0m × 2련
댐높이	m	55.0	-
댐길이	m	407.0	-
설계홍수량	m^3/s	2,652	-
총저수용량	106m3	135.34	-
유효저수용량	106m3	126.18	-

· 다음 <그림 3-167> 운문댐 유역의 수문특성인자 분석 및 하천망을 구축한 자료이며, 여기서 추출된 유역의 수문특성인자는 <표 3-44>와 같음.



수치표고모델(DEM)



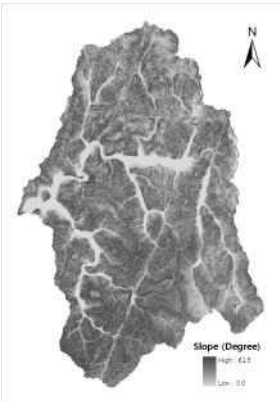
흐름방향격자



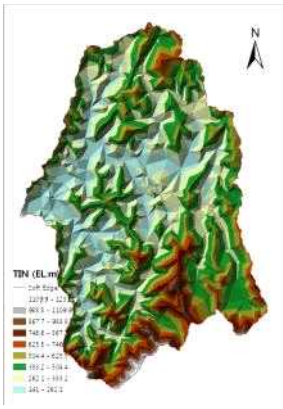
흐름누적격자



누가거리격자



유역경사격자

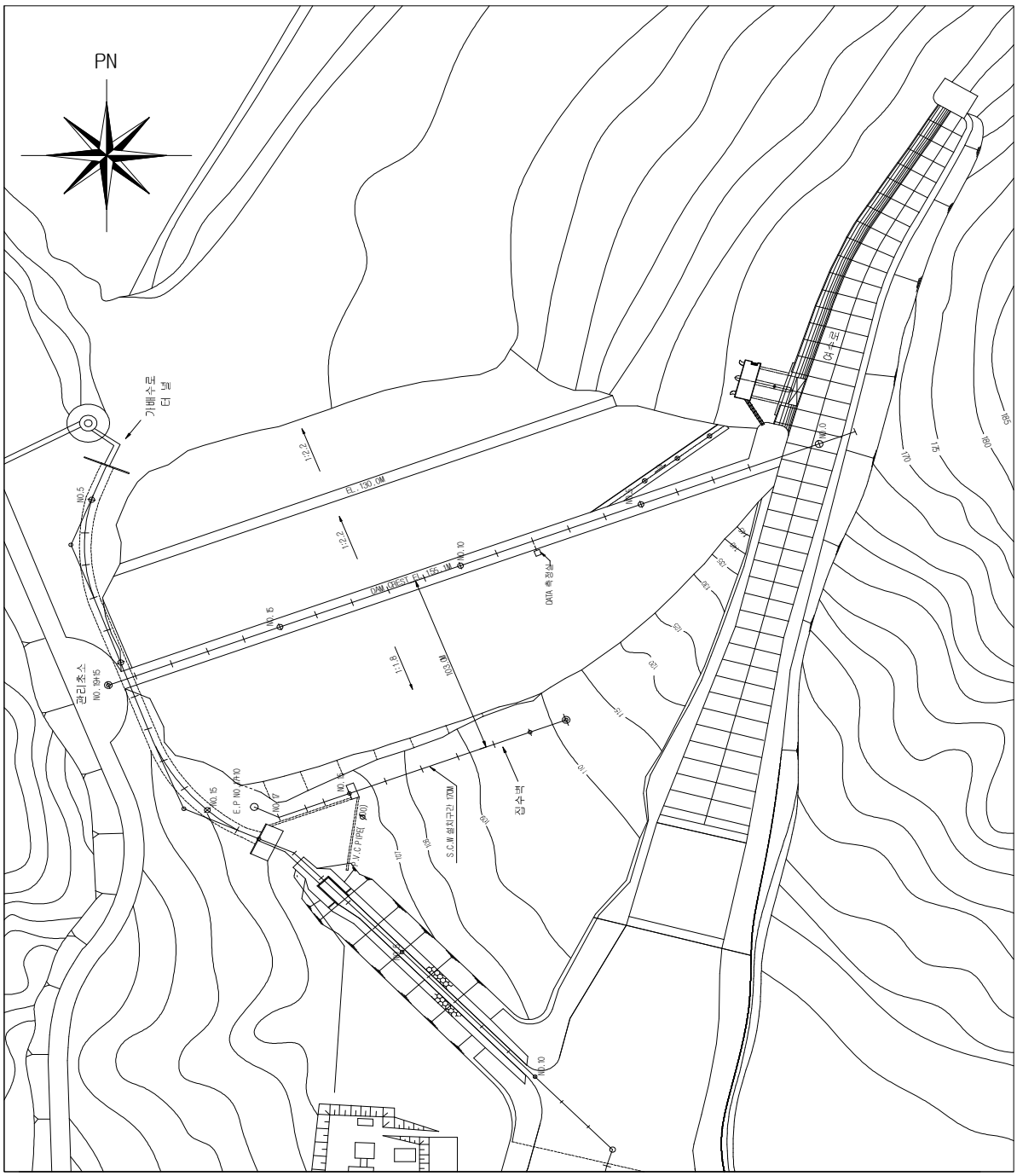


불규칙삼각망(TIN)

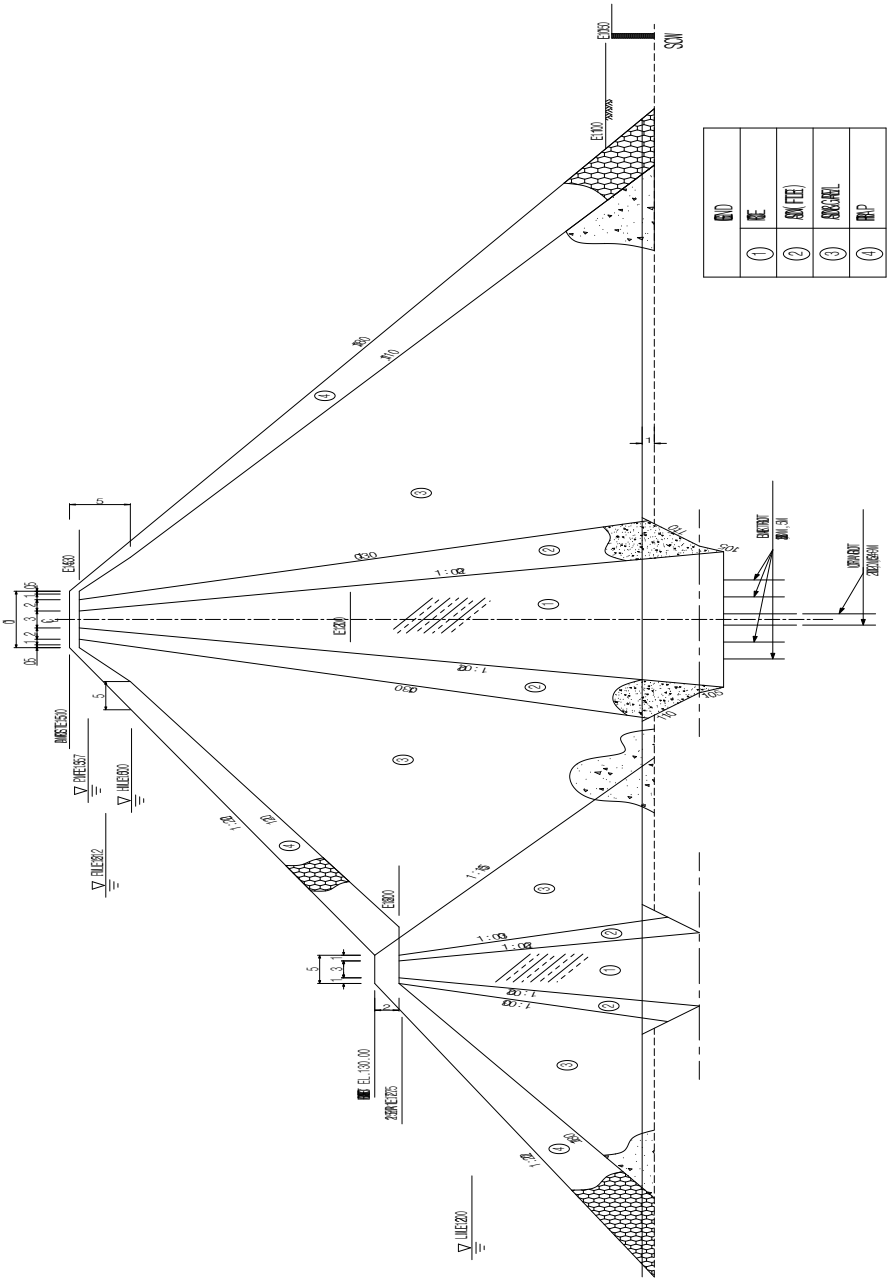
<그림 3-167> 운문댐 유역특성 분석

<표 3-44> 운문댐 유역 수문특성인자

유역면적 (km^2)	최고고도 (EL.m)	최저고도 (EL.m)	유로연장 (km)	하천경사 (m/m)	평균폭 A/L(km)	형상계수 A/L^2
301.3	1,231.1	141.0	38.1	0.029	7.9	0.207



<그림 3-168> 운문댐 유역 평면도



<그림 3-169> 운문댐 표준 단면도

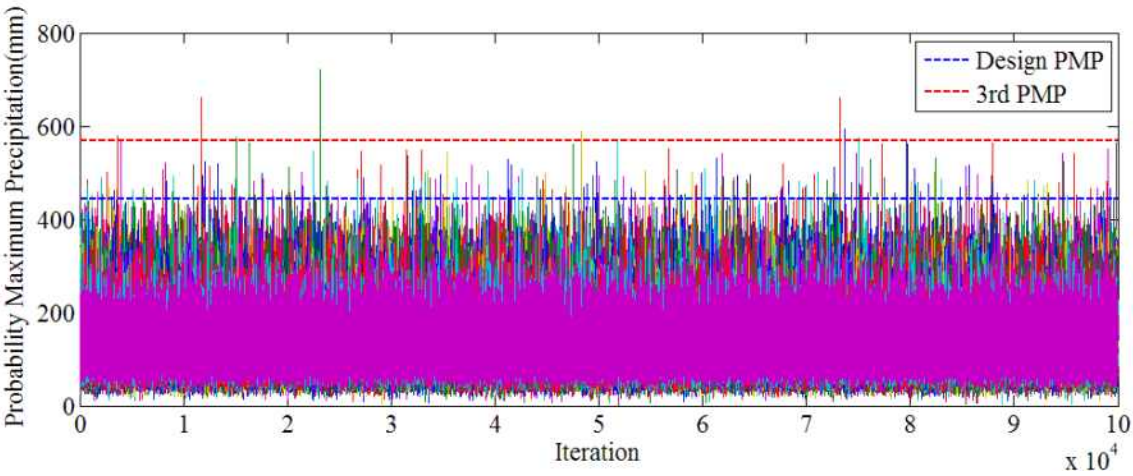
(1) 수문관측소 현황

· 운문댐 유역 인근 유량관측소 중 운문댐 유역에 영향을 미칠 수 있는 우량관측소는 기상청 관할 3개소(밀양, 영천, 울산) 및 궁근정을 비롯한 국토해양부 관할 10여 개소 등임. 상기 강우관측소 외에도 운문댐 유역 내에는 한국수자원공사가 관리하고 있는 운문, 운문댐, 대현, 산내(경주) 등 총 4개의 우량관측소가 위치하고 있음.

· 그러나 운문댐 유역내 30년이상 시강우자료가 확보되어 있는 관측소는 기상청 산하 대구, 영천 관측소 이므로 본 연구에서는 이 두 강우관측소 자료를 이용하여 확률강우량을 산정하였음.

(2) 극치강우량 모의 발생 및 강우 모의 결과

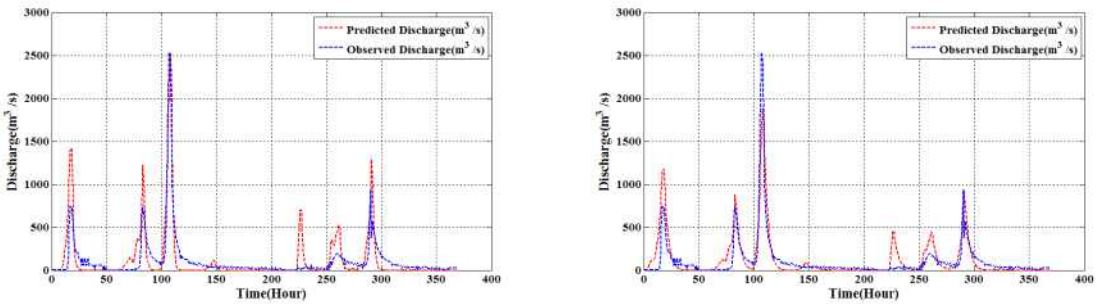
· 본 절에서는 앞서 언급하였듯이 대구, 영천관측소를 대상으로 확률강우량을 산정하였으며, 운문댐 유역의 임계지속시간은 24이며, 총 40년 24시간 연최대강우량을 이용하였음. <그림 3-170>은 운문댐 유역 확률강우량을 산정한 결과를 도시하였음.



<그림 3-170> 운문댐 유역 확률강우량 산정결과

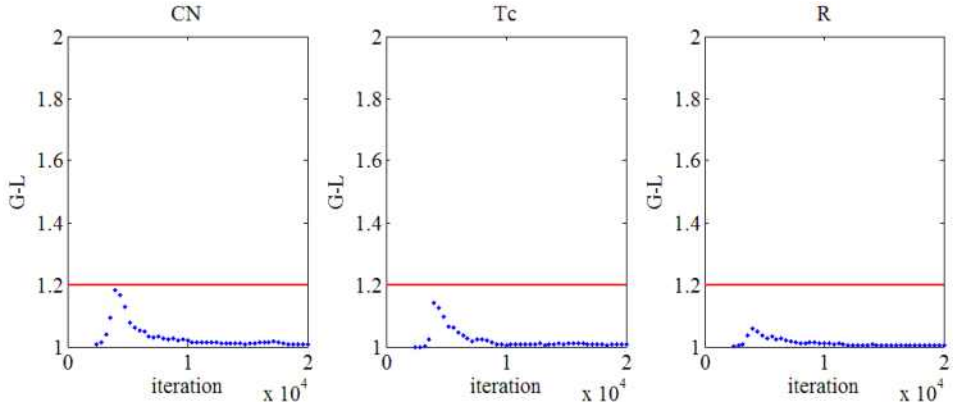
(3) 강우-유출 모의 결과

· 본 절에서는 앞서 언급하였듯이 기존 HEC-1 모형과 Bayesian MCMC로 산정한 확률홍수량 결과를 비교하였으며, 그 결과 운문댐 역시 Bayesian MCMC로 분석한 결과가 첨두유량 및 이중첨두유량을 효과적으로 재현하는 것을 확인할 수 있었음. 이는 <그림 3-171>에 도시하였음.



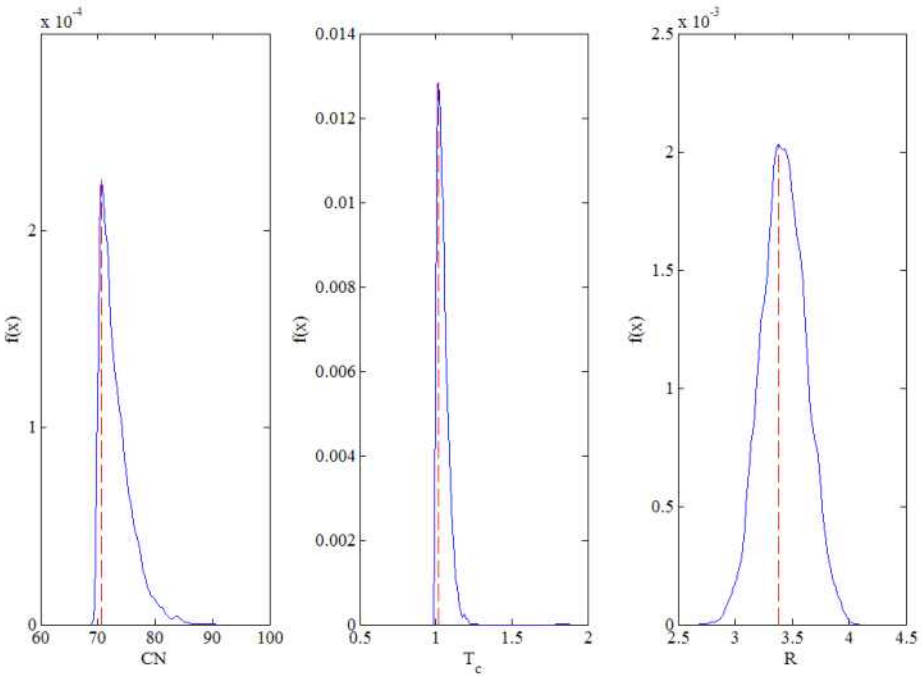
<그림 3-171> 기존 HEC-1 모형 결과(좌) 및 Bayesian MCMC 산정 결과(우)

· <그림 3-172>는 운문댐 유역의 강우-유출 매개변수별 Bayesian MCMC 수렴 결과이며, 운문댐 강우-유출 매개변수 역시 일정 모의횟수 이상에서 수렴하고 있는 결과를 확인할 수 있었음.



<그림 3-172> 운문댐 유역 Bayesian MCMC 산정 결과

· 앞서 산정한 매개변수 결과를 통해 본 연구에서 개발한 Bayesian HEC-1 모형에 적용하였음. 본 연구에서는 총 10,000번 Bayesian MCMC 모의를 수행하였으며, 그 중 수렴이 이루어진 5,000번 이후의 표본을 이용하여 매개변수 사후분포를 추정하였으며, 각 사상별로 매개변수의 사후분포를 핵밀도 함수로 표현한 결과는 <그림 3-173>과 같음.



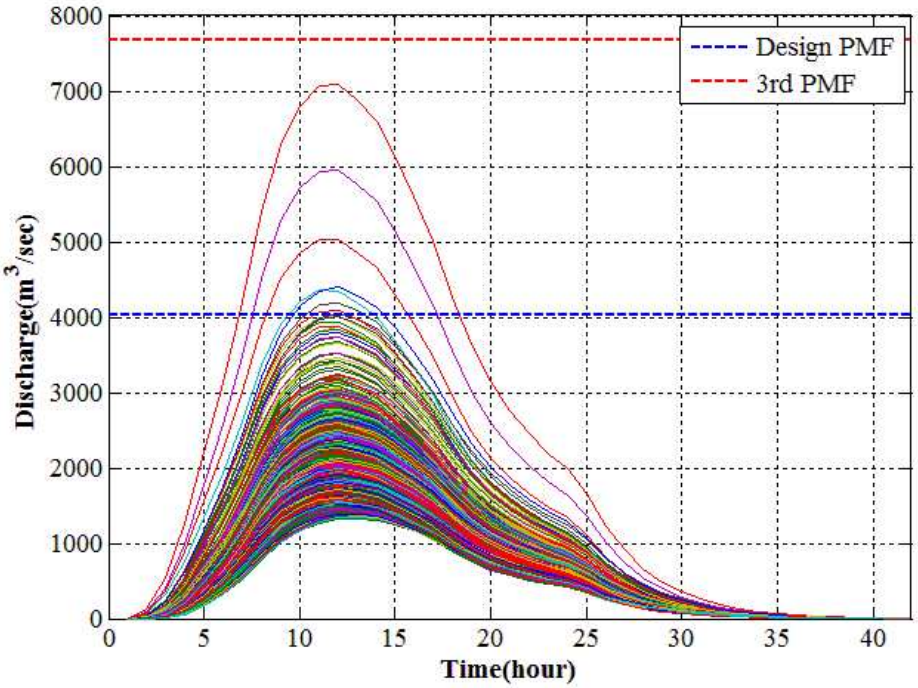
<그림 3-173> Bayesian HEC-1 매개변수별 사후분포 결과

· 운문댐 유역의 검정결과를 통계적으로 분석하여 비교하면 <표 3-45>와 같으며, 전반적으로 상관계수, N-S 계수, IoA는 두 방법 모두 유사하거나 Bayesian HEC-1 방법이 다소 우수한 반면 모형의 편의 및 자료자체의 기본 특성치를 모의하는데 있어서는 상대적으로 Bayesian HEC-1 모형이 향상된 결과를 보이고 있음.

<표 3-45> Bayesian MCMC와 BHEC-1의 검정 통계치

Efficiency Measure	Bayesian MCMC	BHEC-1
R	0.875	0.877
CoE	0.645	0.752
IoA	0.925	0.935
Bias	-6.843	-11.768
RMSE	155.212	129.511
mean (Obs.)	0.939	
mean (Sim.)	110.303	1983.094
std (Obs.)	117.146	
std (Sim.)	260.675	3342.503
CV1	318.566	
CV2	2.363	1.685

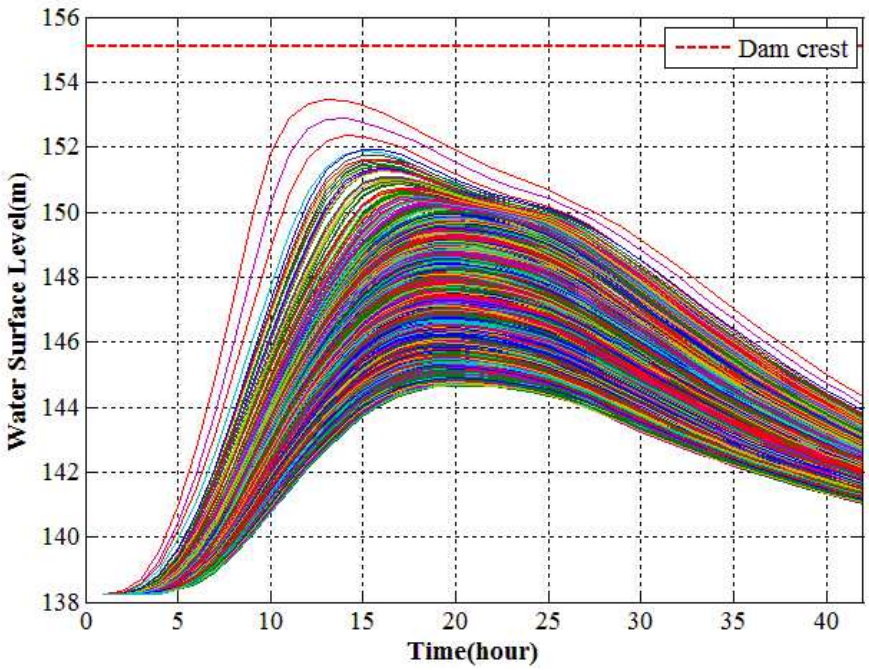
· 최종적으로 확률홍수량 산정한 결과는 <그림 3-174>와 같으며, 파란 점선은 설계 PMF(4,039m^3/s)이고 빨간 점선은 3차정밀안전진단시 이용한 PMF(7,670 m^3/s)임.



<그림 3-174> 운문댐 유역 확률홍수량 산정 결과

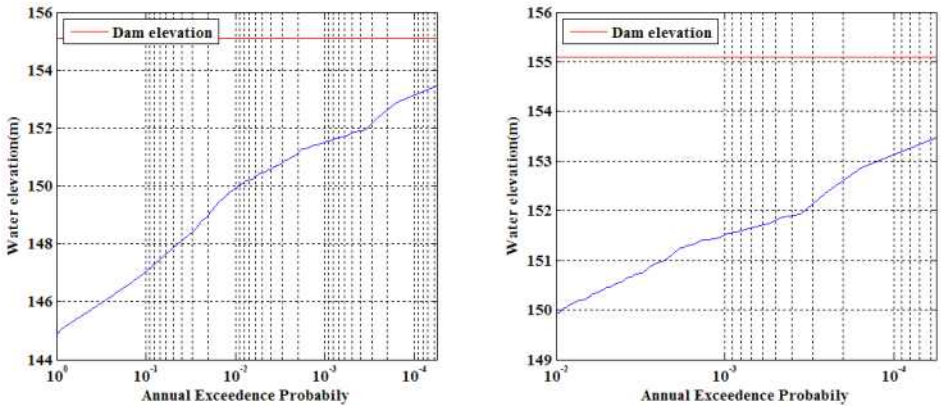
(4) 댐 운영 모의 결과

· 운문댐 유역 댐 운영 모의 결과 시간에 따른 수위 즉, 10,000번 모의한 앙상블 결과를 <그림 3-175>에 도시하였음. 빨간 점선은 댐체 높이인 155.1m이며, 앙상블 결과 약 15시간 이후에 수위가 급격히 하강하고 있는 결과를 보여주고 있음. 산정된 앙상블 결과 댐체 높이를 초과하는 사상은 0회였음.



<그림 3-175> 운문댐 댐 운영 모의 결과

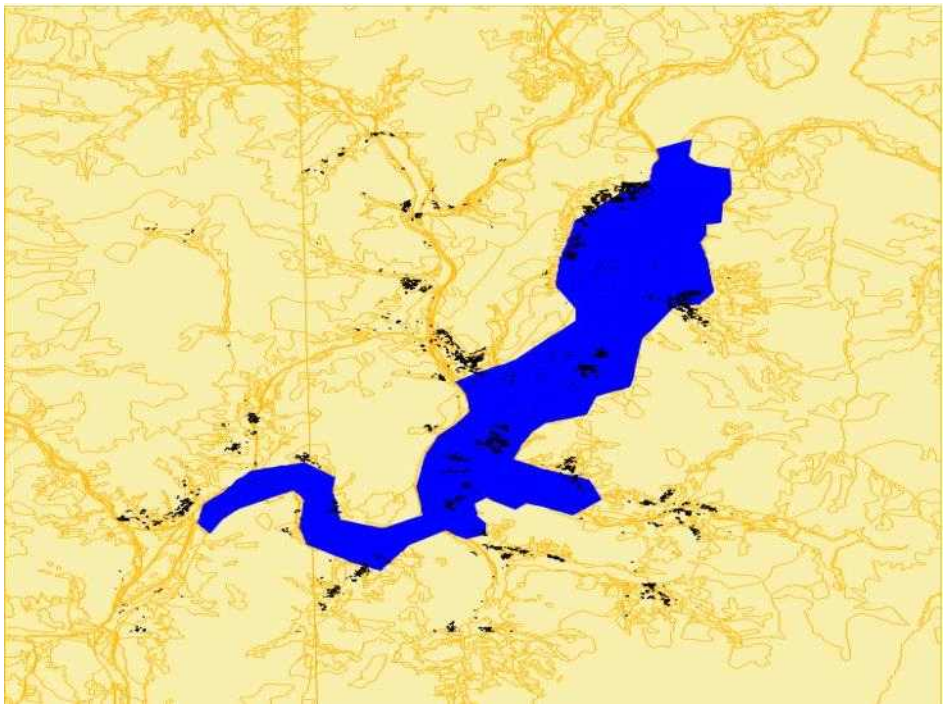
· 마지막으로 운문댐의 댐체 높이를 넘어갈 확률을 정량적으로 산정하였으며, <그림 3-176>에서 볼 수 있듯 월류 확률은 없었음.



<그림 3-176> 운문댐 수위-AEP

(5) 홍수피해액 산정 결과

· 본 절에서는 앞서 언급한 다차원법을 고려한 GIS Tool을 이용하여 운문댐 유역 홍수피해액을 산정하였음. 본 연구에서 개발한 GIS Tool은 댐 하류부의 홍수범람도가 산정되면 이에 따른 건축물도, 토지이용도 등을 활용하여 건축물, 건축내용물, 농경지 등의 피해액을 산정할 수 있음. 또한 하류부의 홍수범람도에서 붕괴지역, 급격한 수위 증가 지역, 보존지역을 각각 설정하고, 면적당 인구를 설정하면 인명피해 수까지 계산이 되도록 모형을 구축하였으며, <그림 3-177>은 운문댐 유역의 GIS 자료 구축하여 도시하였음.



<그림 3-177> 운문댐 유역 홍수피해액 자료 구축

· 먼저 운문댐 유역의 경우 건축물, 건축내용물, 농경지, 농작물 모두 침수심은 1.0~2.0m로 가정하여 분석하였으며, 광동댐 유역의 인구밀도(명/km^2)은 1,000,000 m^{2}당 25명으로 가정하였음. <그림 3-178>은 운문댐 유역 농작물 피해 산정 결과이며, <그림 3-179>는 운문댐 유역 홍수피해액 산정 결과임.



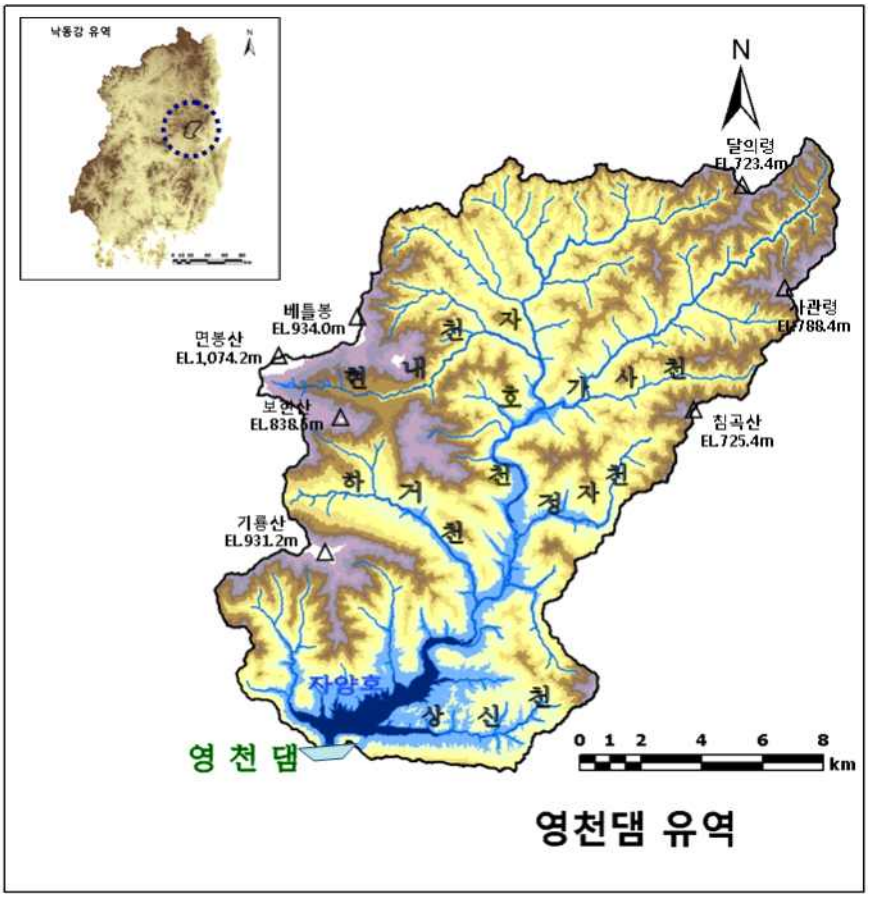
<그림 3-178> 운문댐 유역 농작물 피해 산정 결과

홍수피해액 평가결과			
전체 피해액		73,369,977,099	원
항목별 피해액			
건축물		39,071,890,161	원
건물내용물		8,097,024,779	원
농경지	매몰	1,269,337,297	원
	유실	4,887,380,346	원
농작물		3,289,473,653	원
비닐하우스		1,249,975,647	원
산업체	유형자산	13,780,368,305	원
	재고자산	1,724,526,911	원
인명피해		UnKnown	명

<그림 3-179> 홍수피해액 산정결과

다. 영천댐

· 영천댐은 금호강과 낙동강 본휴와의 합류점에서 상류 72km 지점인 자호천 합류지점으로부터 약 14km 지점에 위치하고 있으며, 행정구역상으로 경상북도 영천시 자양면 노항리(좌안)와 경곡리(우안)에 해당함. 영천댐 내에서는 지방2급 하천인 자호천 및 현내천, 가사천, 정자천, 하거천, 상신천 등이 유입하고 있음. 또한 영천댐 유역은 최원점 방향인 북동쪽의 달의령(EL.723.4m), 사관령(EL.788.4m),침곡산(EL.725.4m) 외에 서쪽의 베틀봉(EL.934.0), 면봉산(EL.1,074.2m), 보현산(EL. 838.5 m), 기룡산(EL. 931.2 m) 등에 의해 둘러싸여 있음. 영천댐 유역의 위치 및 유역 내 주요현황은 다음 <그림 3-180>과 같으며, 유역현황 및 주요 제원은 <표 3-46>과 같음.

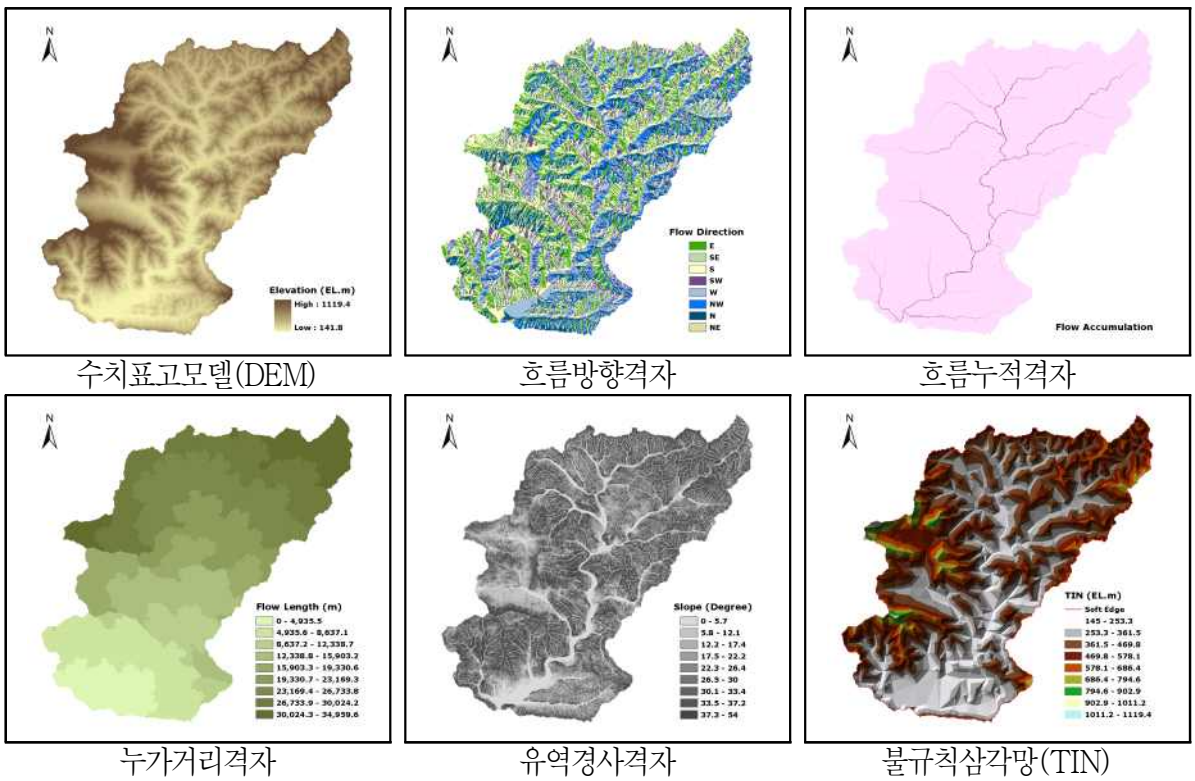


<그림 3-180> 영천댐 유역도

<표 3-46> 영천댐 주요제원

구 분	단 위	제원		비고
		현재	과거	
유역면적	㎢	235.0		
댐마루표고	EL. m	162.0		
계획홍수위	EL. m	159.3		200년 빈도
이상홍수위	EL. m	160.2	159.7	PMF : 1000년
상시만수위	EL. m	156.8		
홍수기 제한수위	EL. m	-		
저수위	EL. m	138.0		
웨어마루표고	EL. m	156.8 / 151.0	156.8	151.0:보조여수로
댐높이	m	42.0		
댐길이	m	300.0		
계획홍수량	㎥/s	1,386	1,420	200년 빈도
이상홍수량	㎥/s	3,700	1,740	PMF : 1000년
총저수용량	106 ㎥	107.8(FWL)	96.4(NHWL)	50년 퇴사 고려
유효저수용량	106 ㎥	78.5	81.4	

· 다음 <그림 3-181>은 영천댐 유역의 수문특성인자 분석 및 하천망을 구축한 자료이며, 여기서 추출된 유역의 수문특성인자는 <표 3-47>과 같음.



수치표고모델(DEM) 흐름방향격자 흐름누적격자

누가거리격자 유역경사격자 불규칙삼각망(TIN)

<그림 3-181> 영천댐 유역특성분석

<표 3-47> 영천댐 유역 수문특성인자

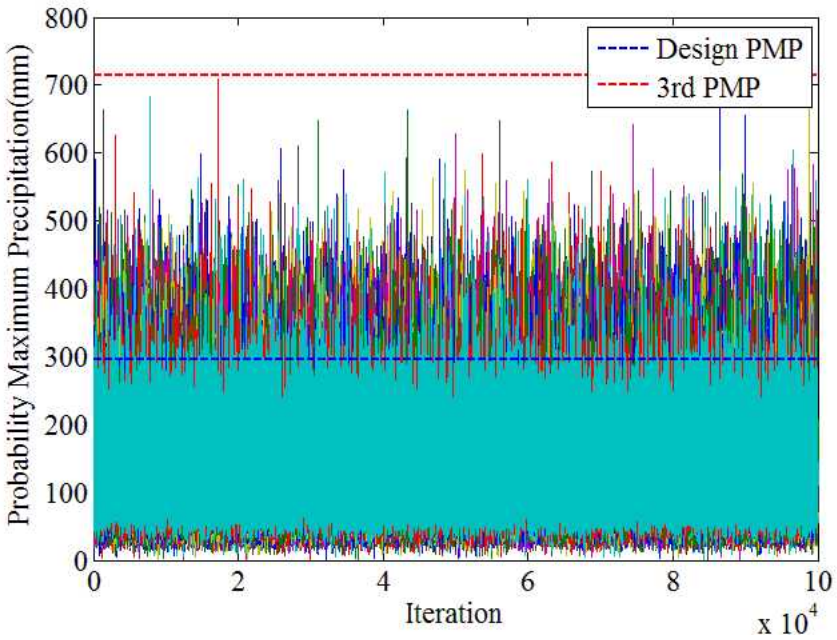
유역면적 (㎢)	최고고도 (EL. m)	최저고도 (EL. m)	유로연장 (㎞)	하천경사 (m/m)	평균폭 A/L(㎞)	형상계수 A/L^2
235.0	1,119.4	141.8	35.0	0.0171	6.7	0.192

(1) 수문관측소 현황

· 영천댐의 경우 설계보고서(1974) 및 조사연구(1982)에서는 PMP를 산출하지 않았으며, 1차 진단(1998) 시에는 「수자원관리기법개발연구조사보고서(국토부, 1988)」에 수록된 「한국가능최대강수량도」를 이용하여 유역면적 1,000km^2, 강우지속기간 24시간에 대한 PMP를 산정한 후 영천댐 유역면적에 해당하는 값으로 환산하였다. 또한, 타당성 조사(2001) 시에는 「수자원관리기법 개발 연구조사(국토교통부, 2000)」 중 「한국가능최대강수량추정」에 수록된 131개 주요 호우 중 영천댐 유역에 큰 영향을 미친 것으로 판단되는 6개 대호우 사상을 전이함으로써 PMP를 산출한 바 있음. 그러나 본 연구에서는 영천댐 유역내 기상청 산하 대구, 영천, 포항 관측소 시강우자료를 이용하여 확률강우량을 산정하였으며, 영천댐 유역내 임계지속시간은 24시간으로 산정하였음

(2) 극치강우량 모의 발생 및 강우 모의 결과

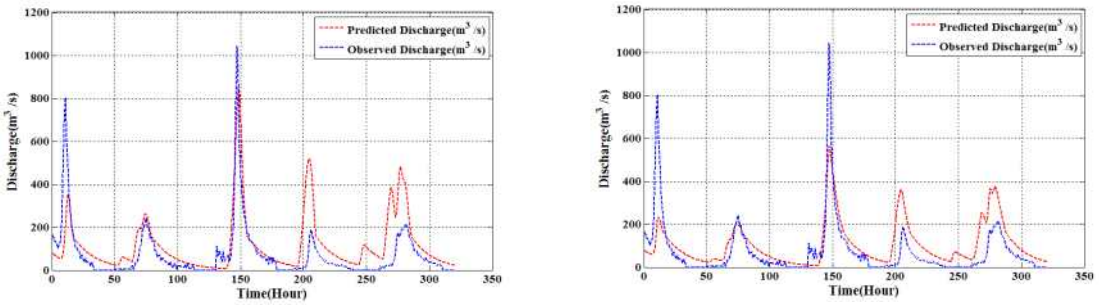
· <그림 3-182>는 영천댐 유역의 기상관측소에서 연최대강우량을 총 40개년도로 100,000번 모의수행한 결과이며, 그림에서 파란 실선은 설계 PMP(296mm), 빨간 실선은 3차 정밀안전진단시 사용한 PMP(715mm)임.



<그림 3-182> 영천댐 유역 12시간 최대 확률강우량 모의 결과

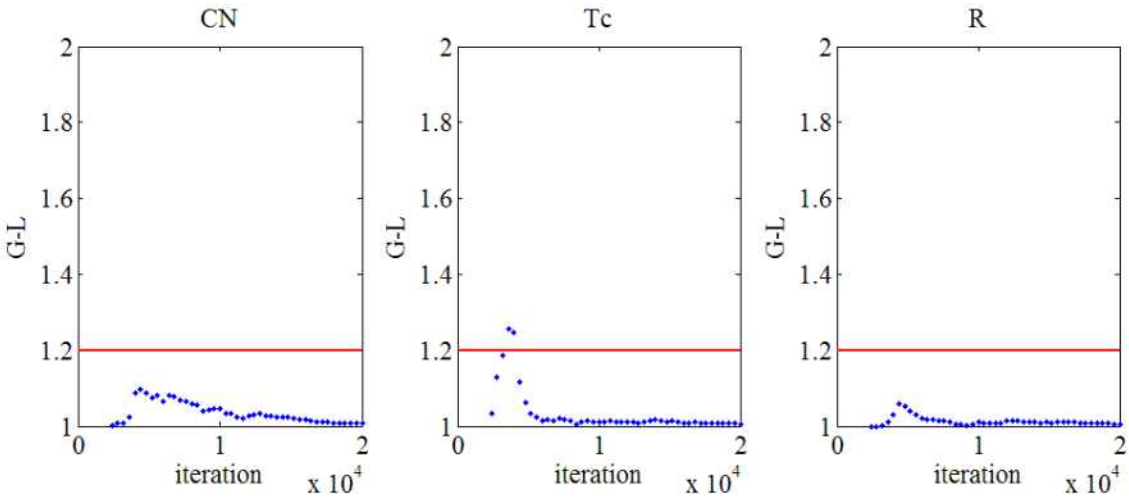
(3) 강우-유출 모의 결과

· 본 절에서는 기존 HEC-1 모형과 Bayesian MCMC로 산정한 확률홍수량 결과를 비교하였음. 그 결과 영천댐 역시 Bayesian MCMC로 분석한 결과가 첨두유량 및 이중첨두유량을 효과적으로 재현하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 <그림 3-183>에 도시하였음.



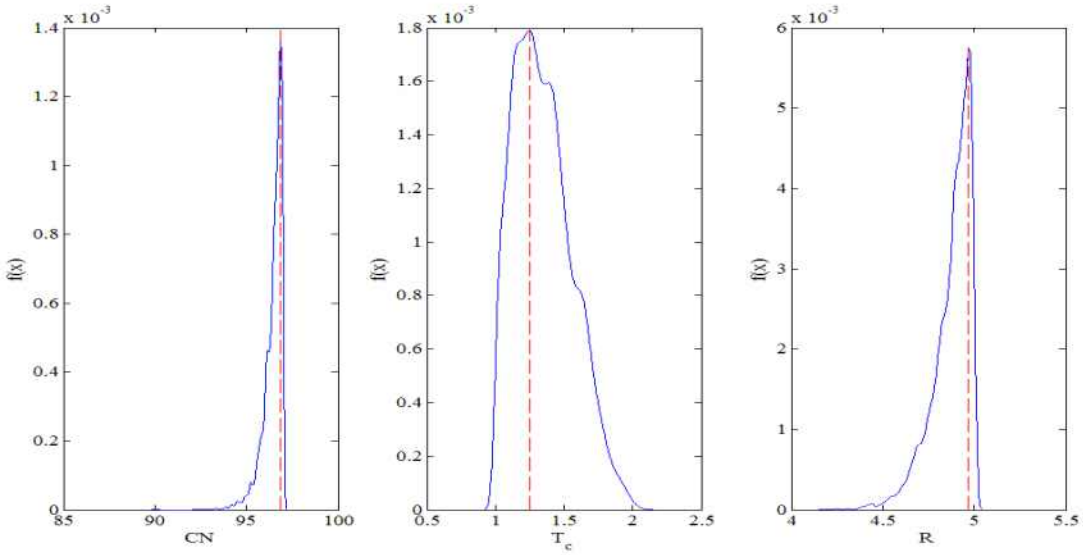
<그림 3-183> 기존 HEC-1 모형(좌) 및 Bayesian MCMC 모형(우)

· <그림 3-184>는 영천댐 유역의 강우-유출 매개변수별 Bayesian MCMC 수렴 결과이며, 영천댐 강우-유출 매개변수 역시 일정 모의횟수 이상에서 수렴하고 있는 결과를 확인할 수 있음.



<그림 3-184> 영천댐 유역 Bayesian MCMC 매개변수 수렴 결과

· 앞서 산정한 매개변수 결과를 통해 본 연구에서 개발한 Bayesian HEC-1 모형에 적용하였음. 본 연구에서는 총 10,000번 Bayesian MCMC 모의를 수행하였으며, 그 중 수렴이 이루어진 10,000번 이후의 표본을 이용하여 매개변수 사후분포를 추정하였으며, 각 사상별로 매개변수의 사후분포를 핵밀도 함수로 표현한 결과는 <그림 3-185>와 같음.



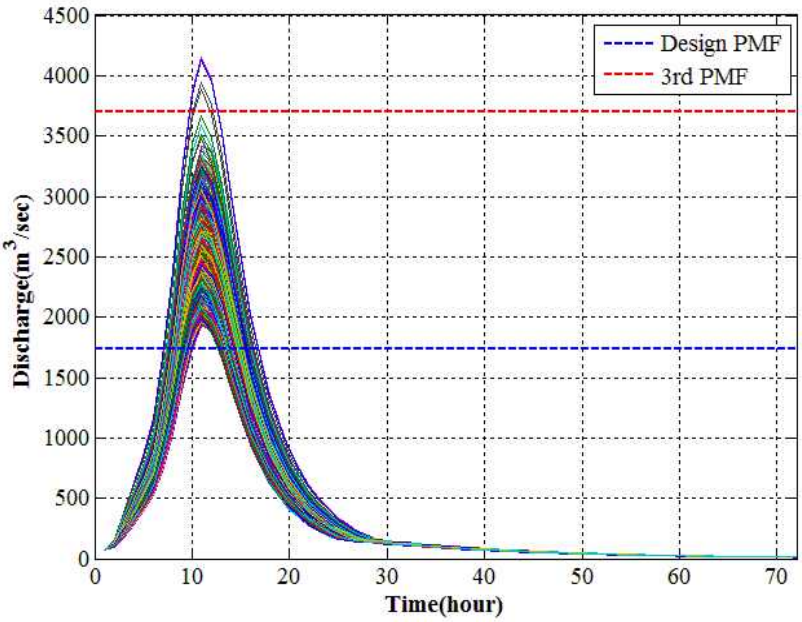
<그림 3-185> Bayesian HEC-1 매개변수 사후분포 결과

· 영천댐 유역 검정결과를 통계적으로 분석하여 비교하면 <표 3-48>과 같음. 전반적으로 상관계수, N-S 계수, IoA는 두 방법 모두 유사하거나 Bayesian HEC-1 방법이 다소 우수한 반면 모형의 편의 및 자료자체의 기본 특성치를 모의하는데 있어서는 상대적으로 Bayesian HEC-1 모형이 향상된 결과를 보이고 있음.

<표 3-48> Bayesian MCMC와 BHEC-1의 검정 통계치

Efficiency Measure	Bayesian MCMC	BHEC-1
R	0.702	0.770
CoE	0.272	0.454
IoA	0.807	0.848
Bias	-44.444	-43.756
RMSE	112.653	97.524
mean (Obs.)	0.892	
mean (Sim.)	73.813	1983.094
std (Obs.)	118.256	
std (Sim.)	132.242	3342.503
CV1	136.337	
CV2	1.792	1.685

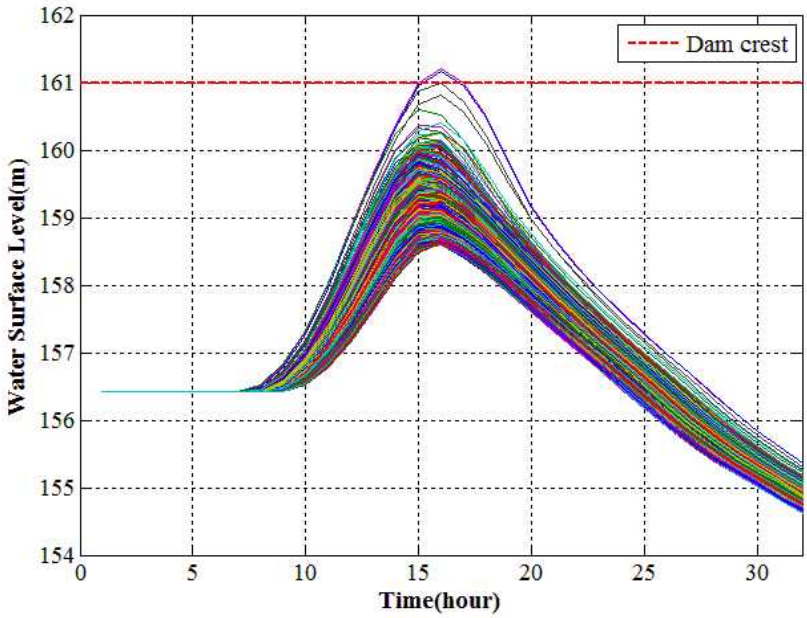
· 최종적으로 확률홍수량 산정한 결과는 <그림 3-186>과 같으며, 파란 점선은 설계 PMF(1,740 m^3/s)이고 빨간 점선은 3차정밀안전진단시 이용한 PMF(3,700 m^3/s)임.



<그림 3-186> 영천댐 유역 확률홍수량 산정 결과

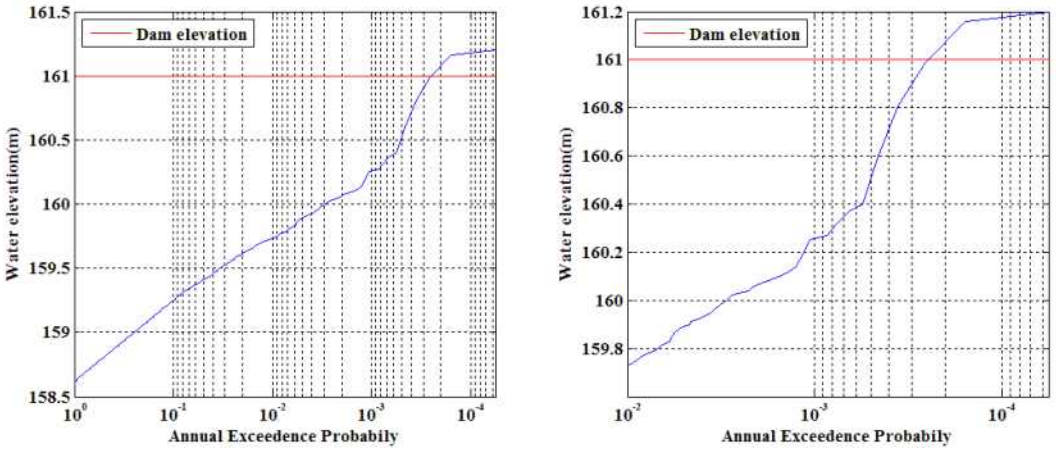
(4) 댐 운영 모의 결과

· 영천댐 유역 댐 운영 모의 결과 시간에 따른 수위 즉, 10,000번 모의한 앙상블 결과를 <그림 3-187>에 도시하였음. 빨간 점선은 댐체 높이인 162.0m이며, 앙상블 결과 약 16시간 이후에 수위가 급격히 하강하고 있는 결과를 보여주고 있으며, 산정된 앙상블 결과 댐체 높이를 초과하는 사상은 2회였음.



<그림 3-187> 영천댐 댐 운영 모의 결과

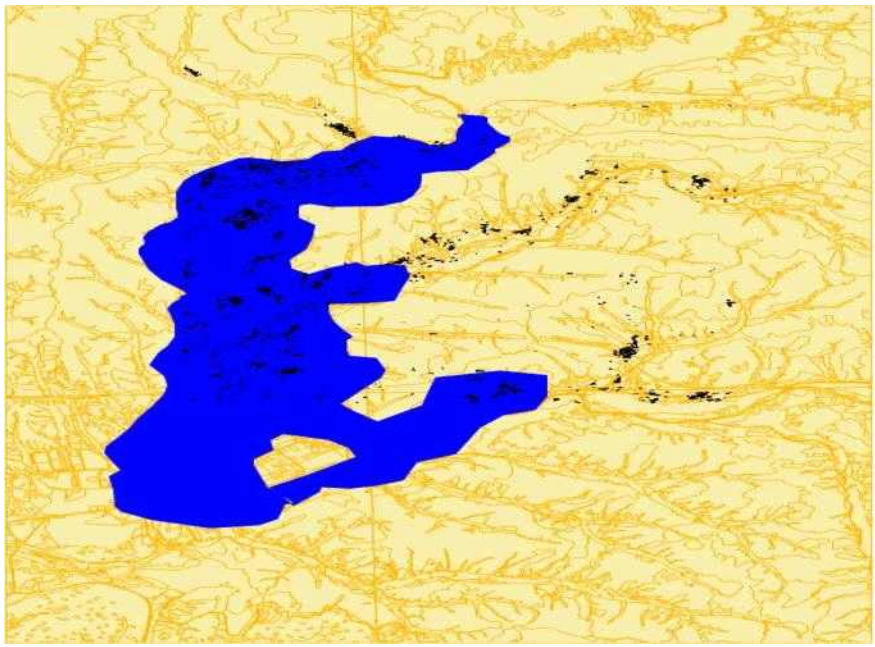
· 마지막으로 영천댐의 댐체 높이를 넘어갈 확률을 정량적으로 산정하였으며, <그림 3-188>에서 볼 수 있듯 월류 확률 2.00E-04으로 산정됨.



<그림 3-188> 영천댐 수위-AEP

(5) 홍수피해액 산정 결과

· 본 절에서는 앞서 언급한 다차원법을 고려한 GIS Tool을 이용하여 영천댐 유역 홍수피해액을 산정하였음. 본 연구에서 개발한 GIS Tool은 댐 하류부의 홍수범람도가 산정되면 이에 따른 건축물도, 토지이용도 등을 활용하여 건축물, 건축내용물, 농경지 등의 피해액을 산정할 수 있음. 또한 하류부의 홍수범람도에서 붕괴지역, 급격한 수위 증가 지역, 보존지역을 각각 설정하고, 면적당 인구를 설정하면 인명피해 수까지 계산이 되도록 모형을 구축하였음. <그림 3-189>는 영천댐 유역의 GIS 자료 구축하여 도시하였음.



<그림 3-189> 영천댐 유역 홍수피해액 자료 구축

· 먼저 영천댐 유역의 경우 건축물, 건축내용물, 농경지, 농작물 모두 침수심은 1.0~2.0m로 가정하여 분석하였음. <그림 3-190>은 영천댐 유역 농작물 피해 산정 결과이며, <그림 3-191>은 영천댐 유역 홍수피해액 산정 결과임.



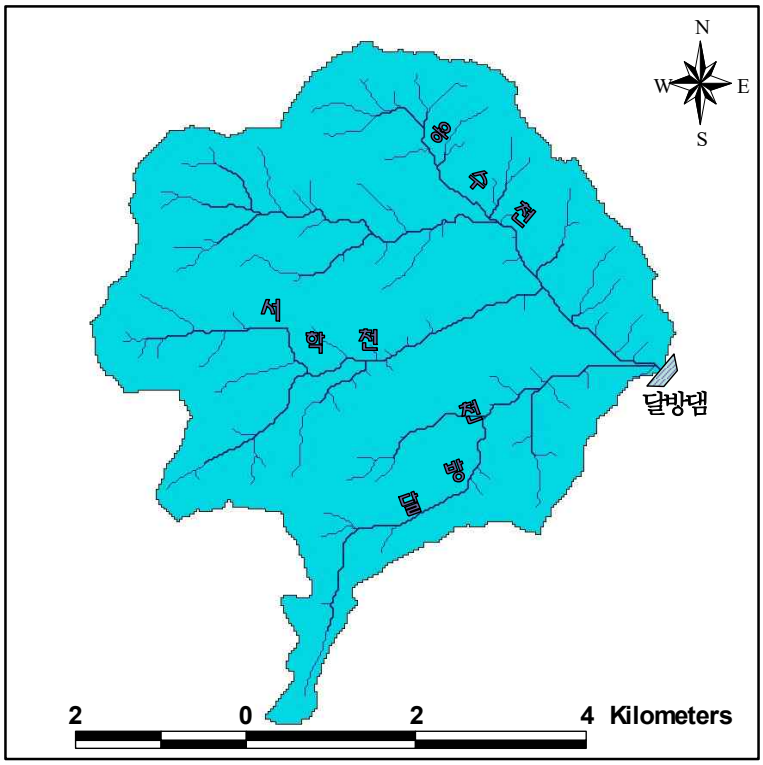
<그림 3-190> 영천댐 유역 농작물 피해 산정 결과

홍수피해액 평가결과			
전체 피해액		226,151,205,083	원
항목별 피해액			
건축물		83,466,443,723	원
건물내용물		17,297,086,482	원
농경지	매몰	2,944,645,612	원
	유실	11,337,887,184	원
농작물		8,551,506,408	원
비닐하우스		27,536,235,572	원
산업체	유형자산	66,673,614,257	원
	재고자산	8,343,785,845	원
인명피해		Unknown	명

<그림 3-191> 홍수피해액 산정결과

라. 달방댐

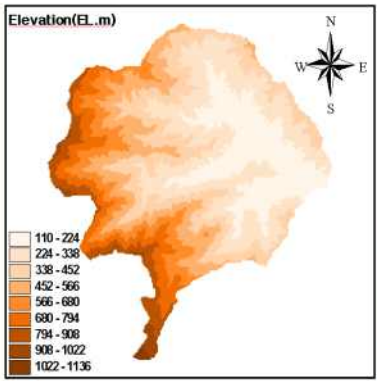
· 달방댐은 한강 동해권역 중앙부에 위치한 진천 수계에 속하며 동경 128° 59’ 00” ~ 129° 58’ 00”, 북위 37° 28’ 00” ~ 37° 32’ 00”에 위치하고 있음. 서쪽으로는 태백산맥을 분수령으로 하는 한강수계, 북쪽과 남쪽에는 각각 한강 동해권역의 지천인 주수천 수계와 삼천오십천 수계와 접하고 있음. 달방댐의 위치는 지방 2급 하천인 전천의 제1지류 신흥천의 중상류부이며, 행정구역상 강원도 동해시 삼화동에 속함. 유역은 매봉산(EL. 606.9m), 상월산(EL. 970.3m), 원통산(EL. 461.3m) 등의 산들에 의해 둘러싸여 있으며 동해권역에 위치하므로 유로연장이 짧고 급경사를 이루고 있는 특징을 가지고 있음. <그림 3-192>는 달방댐 유역도이며, <그림 3-193>은 수치표고모델(DEM), 불규칙 삼각망(TIN) 등 유역 지형분석 자료임. <표 3-49>는 달방댐 유역의 수문특성인자 임.



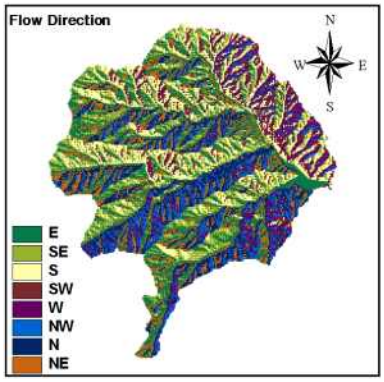
<그림 3-192> 달방댐 유역도

<표 3-49> 달방댐 유역 수문특성인자

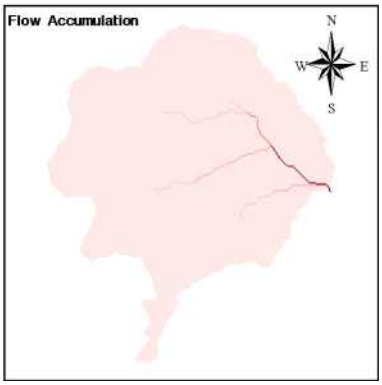
댐명	유역면적 (㎢)	최고고도 (EL.m)	최저고도 (EL.m)	유로연장 (㎞)	하천경사 (m/m)	평균폭 A/L(㎞)	형상계수 A/L^2
달방댐	29.4	1,136.0	110.0	8.6	0.1196	3.4	0.400



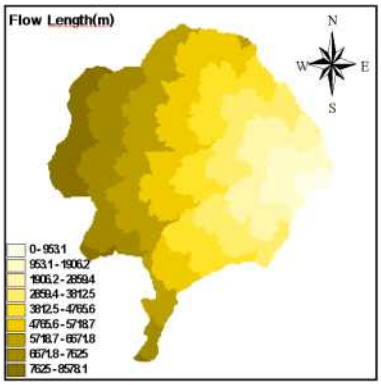
수치표고모델(DEM)



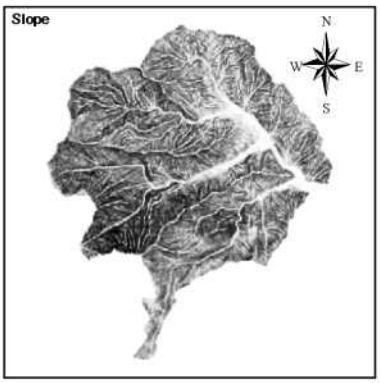
흐름방향격자



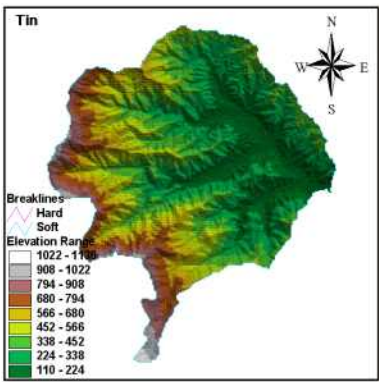
흐름누적격자



누가거리격자

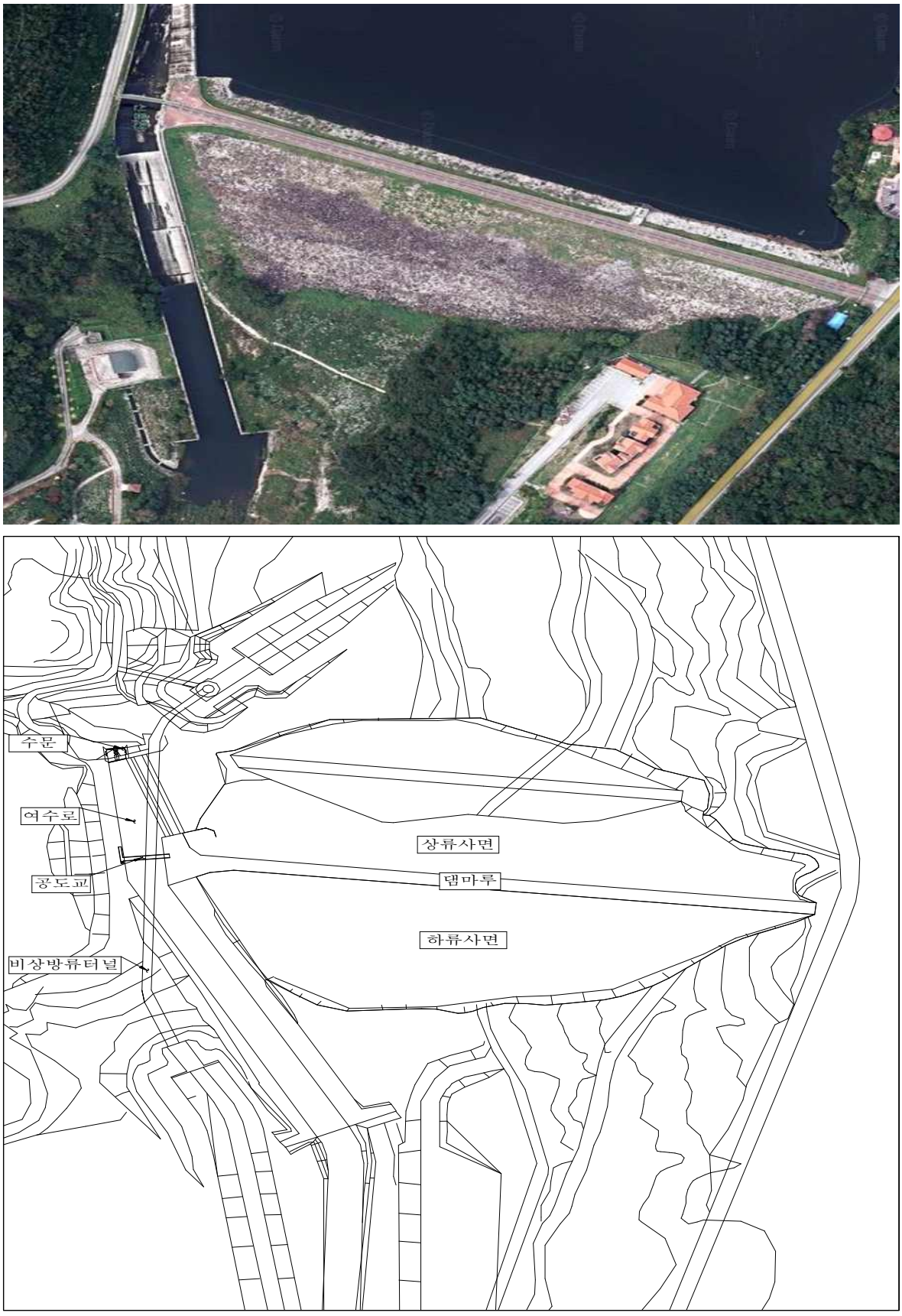


유역경사격자

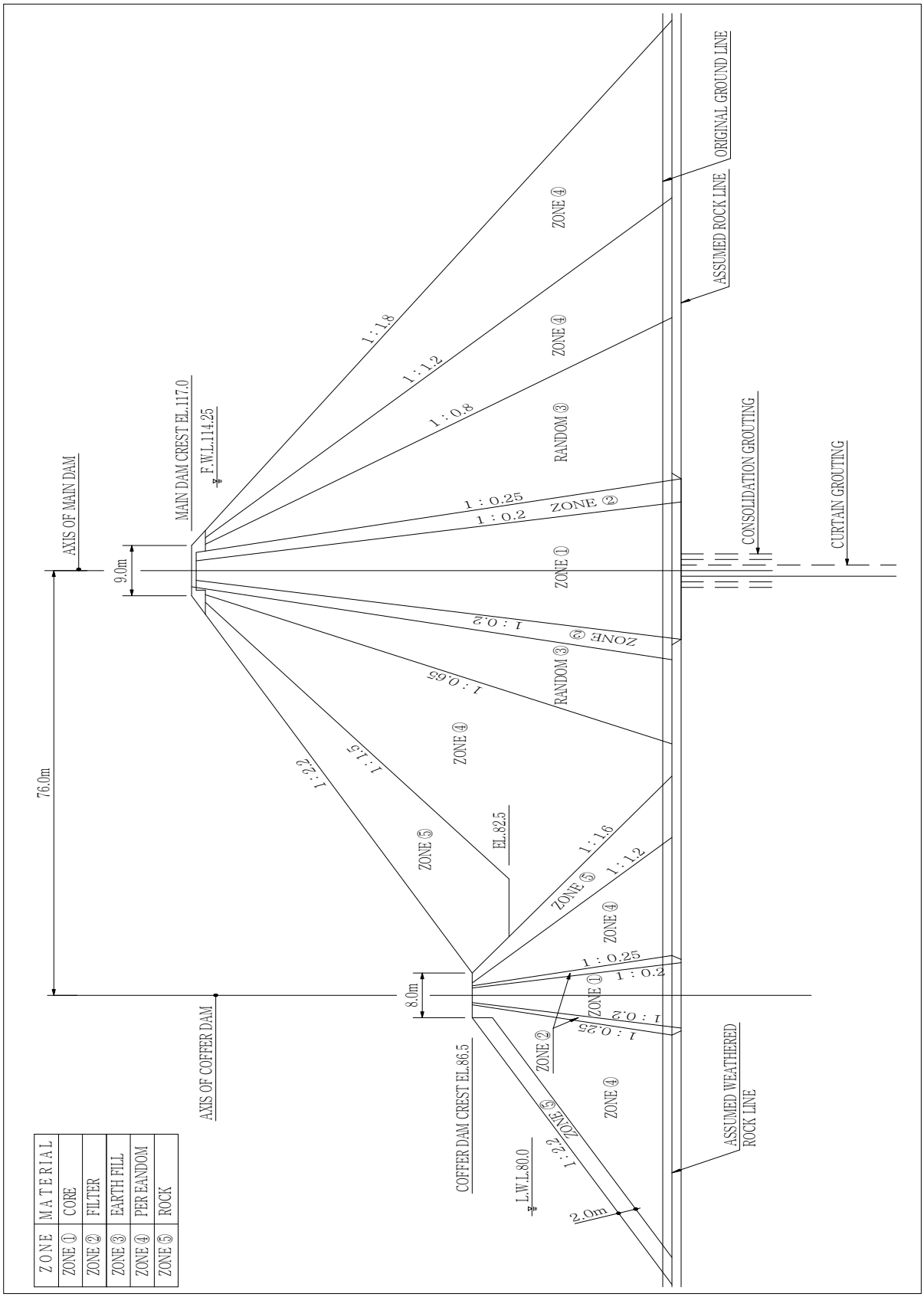


불규칙삼각망(TIN)

<그림 3-193> 유역 지형 분석자료



<그림 3-194> 달방댐 평면도



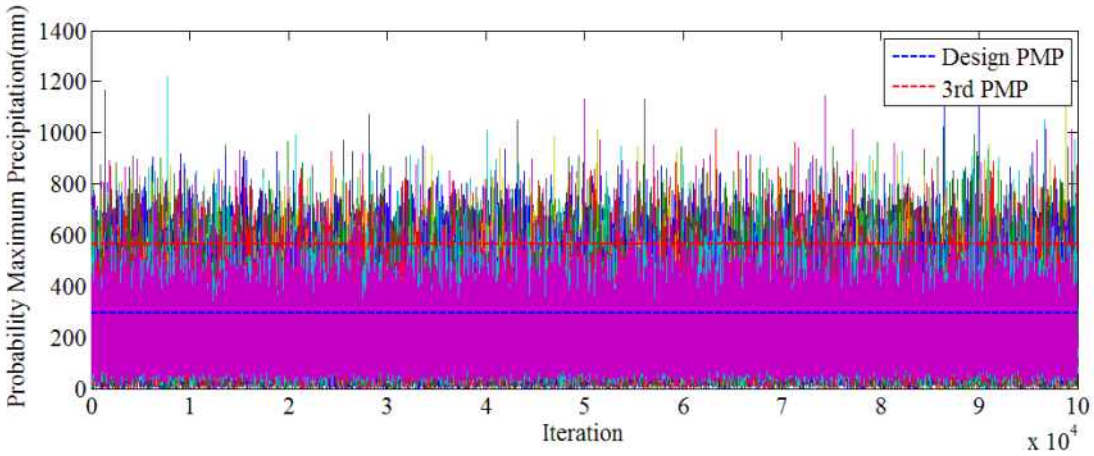
<그림 3-195> 댐체 표준단면도

(1) 수문관측소 현황

· 달방댐 유역 인근 강우관측소는 강릉관측소를 비롯한 8개의 관측소가 있음. 달방댐 유역내 달방관측소가 위치하고 있으나 충분한 시자료 확보가 어려워 빈도해석시 활용이 어려움. 달방댐 유역 인근에 위치한 8개 관측소 중 임계, 하장, 덕암, 유천, 정선, 번천 관측소는 영서지방에 위치하고 있으므로 적용하기에 적합하지 않고, 동해관측소는 90년대에 신설된 관측소로 충분한 자료를 확보할 수 없으므로, 본 연구에서는 30년 이상 시강우량자료가 충분한 기상청 산하 대관령, 강릉 관측소의 40년 24시간 최대 강우량을 이용하였음.

(2) 극치강우량 모의 발생 및 강우 모의 결과

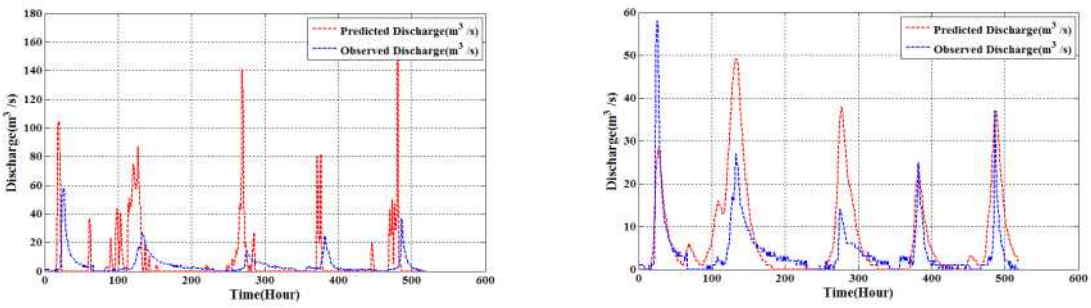
· 본 절에서는 앞서 언급하였듯이 대관령, 강릉관측소를 대상으로 확률강우량을 산정하였음. 달방댐 유역의 임계지속시간은 24이며, 총 40년 24시간 연최대강우량을 이용하였으며, <그림 3-196>은 운문댐 유역 확률강우량을 산정한 결과를 도시하였음.



<그림 3-196> 달방댐 유역 확률강우량 산정결과

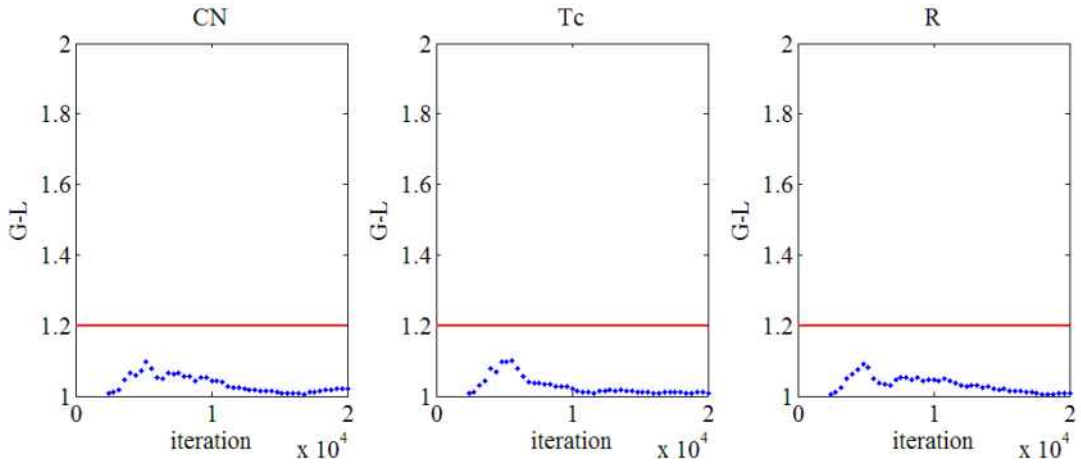
(3) 강우-유출 모의 결과

· 본 절에서는 앞서 언급하였듯이 기존 HEC-1 모형과 Bayesian MCMC로 산정한 확률홍수량 결과를 비교하였음. 그 결과 달방댐 역시 Bayesian MCMC로 분석한 결과가 첨두유량 및 이중첨두유량을 효과적으로 재현하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 <그림 3-197>에 도시하였음.



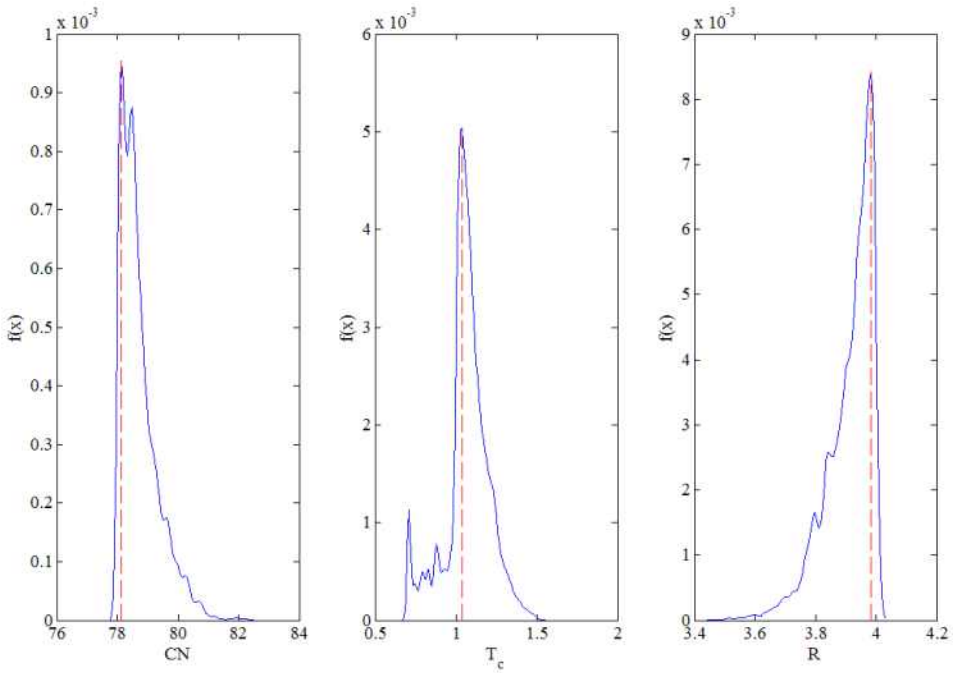
<그림 3-197> 기존 HEC-1 모형 결과(좌) 및 Bayesian MCMC 산정 결과(우)

· <그림 3-198>은 달방댐 유역의 강우-유출 매개변수별 Bayesian MCMC 수렴 결과이며, 운문댐 강우-유출 매개변수 역시 일정 모의횟수 이상에서 수렴하고 있는 결과를 확인할 수 있음.



<그림 3-198> 달방댐 유역 Bayesian MCMC 산정 결과

· 앞서 산정한 매개변수 결과를 통해 본 연구에서 개발한 Bayesian HEC-1 모형에 적용하였음. 본 연구에서는 총 10,000번 Bayesian MCMC 모의를 수행하였으며, 그 중 수렴이 이루어진 10,000번 이후의 표본을 이용하여 매개변수 사후분포를 추정하였으며, 각 사상별로 매개변수의 사후분포를 핵밀도 함수로 표현한 결과는 <그림 3-199>와 같음.



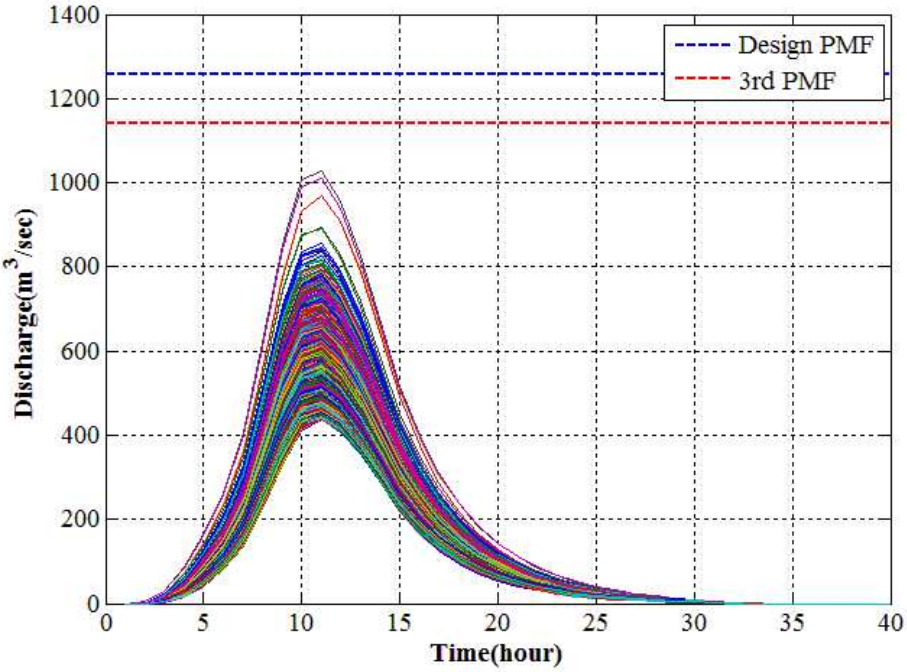
<그림 3-199> Bayesian HEC-1 매개변수별 사후분포 결과

· 달방댐 유역의 검정결과를 통계적으로 분석하여 비교하면 <표 3-50>과 같음. 전반적으로 상관계수, N-S 계수, IoA는 두 방법 모두 유사하거나 Bayesian HEC-1 방법이 다소 우수한 반면 모형의 편의 및 자료자체의 기본 특성치를 모의하는데 있어서는 상대적으로 Bayesian HEC-1 모형이 향상된 결과를 보이고 있음.

<표 3-50> Bayesian MCMC와 BHEC-1의 검정 통계치

Efficiency Measure	Bayesian MCMC	BHEC-1
R	-0.013	0.310
CoE	-8.500	-3.300
IoA	0.128	0.432
Bias	-3.315	-3.298
RMSE	22.059	14.841
mean (Obs.)	0.620	
mean (Sim.)	4.323	1983.094
std (Obs.)	7.638	
std (Sim.)	7.164	3342.503
CV1	20.530	
CV2	1.657	1.685

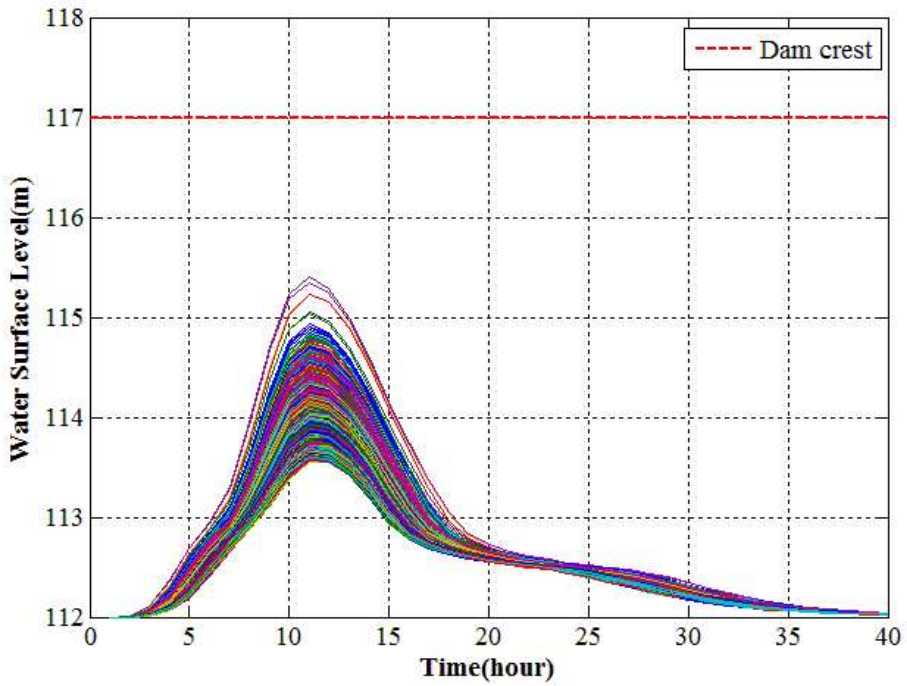
· 최종적으로 확률홍수량 산정한 결과는 <그림 3-200>과 같으며, 파란 점선은 설계 PMF (1,256m^3/s)이고 빨간 점선은 3차정밀안전진단시 이용한 PMF(1,140 m^3/s)임.



<그림 3-200> 달방댐 유역 확률홍수량 산정 결과

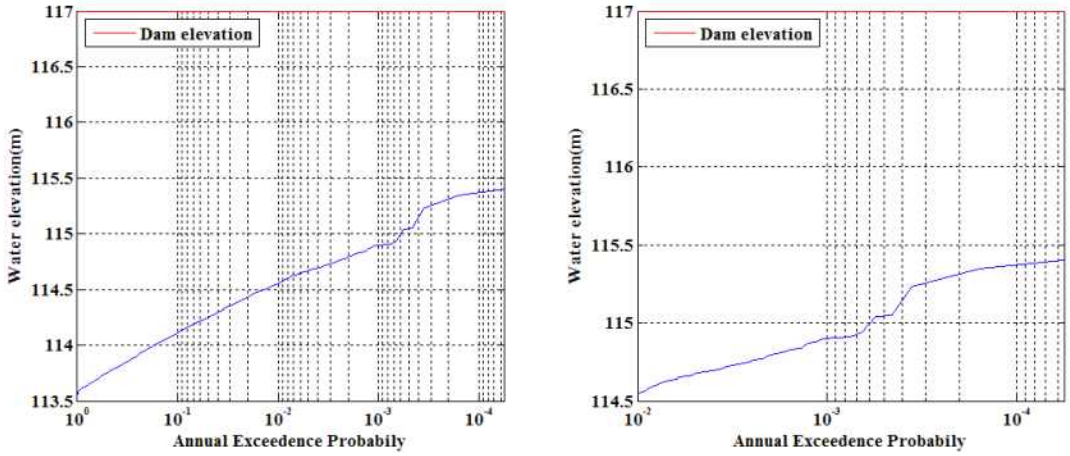
(4) 댐 운영 모의 결과

· 달방댐 유역 댐 운영 모의 결과 시간에 따른 수위 즉, 10,000번 모의한 앙상블 결과를 <그림 3-201>에 도시하였다. 빨간 점선은 댐체 높이인 117.0m이며, 앙상블 결과 약 11시간 이후에 수위가 급격히 하강하고 있는 결과를 보여주고 있음. 산정된 앙상블 결과 댐체 높이를 초과하는 사상은 0회였음.



<그림 3-201> 달방댐 댐 운영 모의 결과

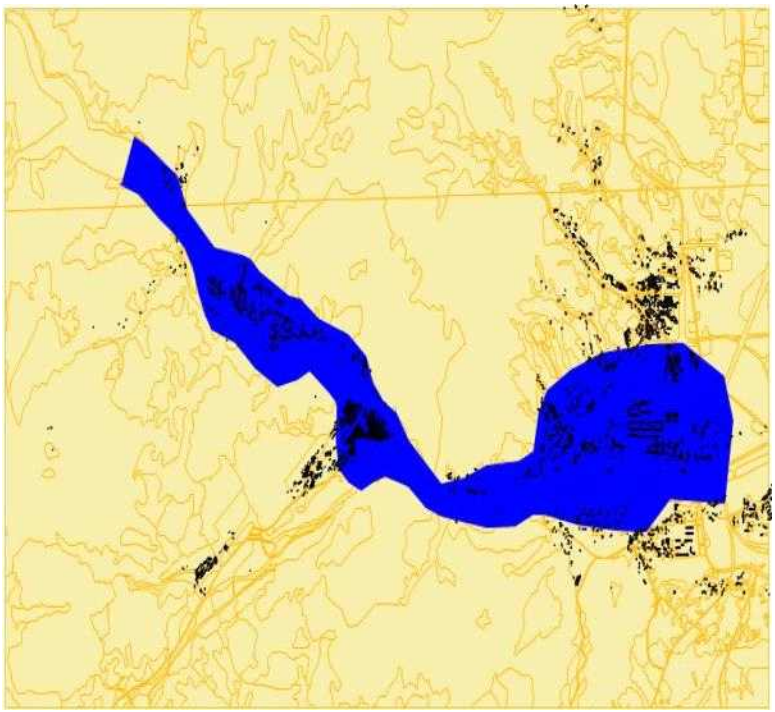
· 마지막으로 달방댐의 댐체 높이를 넘어갈 확률을 정량적으로 산정하였으며, <그림 3-202>에서 볼 수 있듯 월류 확률은 없었음.



<그림 3-202> 달방댐 수위-AEP

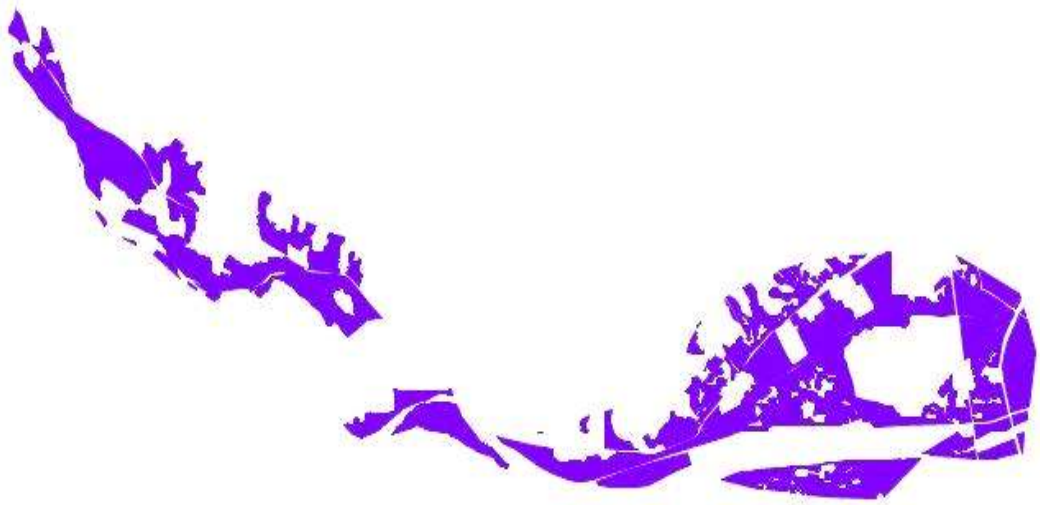
(5) 홍수피해액 산정 결과

· 본 절에서는 앞서 언급한 다차원법을 고려한 GIS Tool을 이용하여 달방댐 유역 홍수피해액을 산정하였음. 본 연구에서 개발한 GIS Tool은 댐 하류부의 홍수범람도가 산정되면 이에 따른 건축물도, 토지이용도 등을 활용하여 건축물, 건축내용물, 농경지 등의 피해액을 산정할 수 있음. 또한 하류부의 홍수범람도에서 붕괴지역, 급격한 수위 증가 지역, 보존지역을 각각 설정하고, 면적당 인구를 설정하면 인명피해 수까지 계산이 되도록 모형을 구축하였으며, <그림 3-203>은 달방댐 유역의 GIS 자료 구축하여 도시하였음.



<그림 3-203> 달방댐 유역 홍수피해액 자료 구축

· 먼저 달방댐 유역의 경우 건축물, 건축내용물, 농경지, 농작물 모두 침수심은 1.0~2.0m로 가정하여 분석하였음. 달방댐 유역의 인구밀도(명/km^2)은 1,000,000 m^2당 913명으로 가정하였음. <그림 3-204>는 달방댐 유역 농작물 피해 산정 결과이며, <그림 3-205>는 달방댐 유역 홍수피해액 산정 결과임.



<그림 3-204> 달방댐 유역 농작물 피해 산정 결과

홍수피해액 평가결과			
전체 피해액		125,444,619,749	원
항목별 피해액			
건축물		72,293,813,906	원
건물내용물		14,981,737,515	원
농경지	매몰	651,062,946	원
	유실	2,506,813,788	원
농작물		2,354,219,778	원
비닐하우스		1,624,748,181	원
산업체	유형자산	27,580,674,688	원
	재고자산	3,451,548,947	원
인명피해		874	명

<그림 3-205> 홍수피해액 산정결과

마. 수어댐

· 수어천은 광양군 진상면 옥룡면과 다압면의 경계에 위치한 EL.1,217m의 백운산에서 발원하여 약 4km를 동류한 후 유향을 바꾸어 남류하면서 성두천 및 태동천과 합류하게 됨. 그 후 유향을 동남쪽으로 바꾸어 유하하다가 비평리 부근에서 수어댐에 유입하여 되며 수어댐 직하류부에서 흐름의 방향을 다시 바꾸어 남쪽으로 유하하면서 수어천교 직하류 지점에서 옥곡천과 합류한 후 광양만에 유입함.

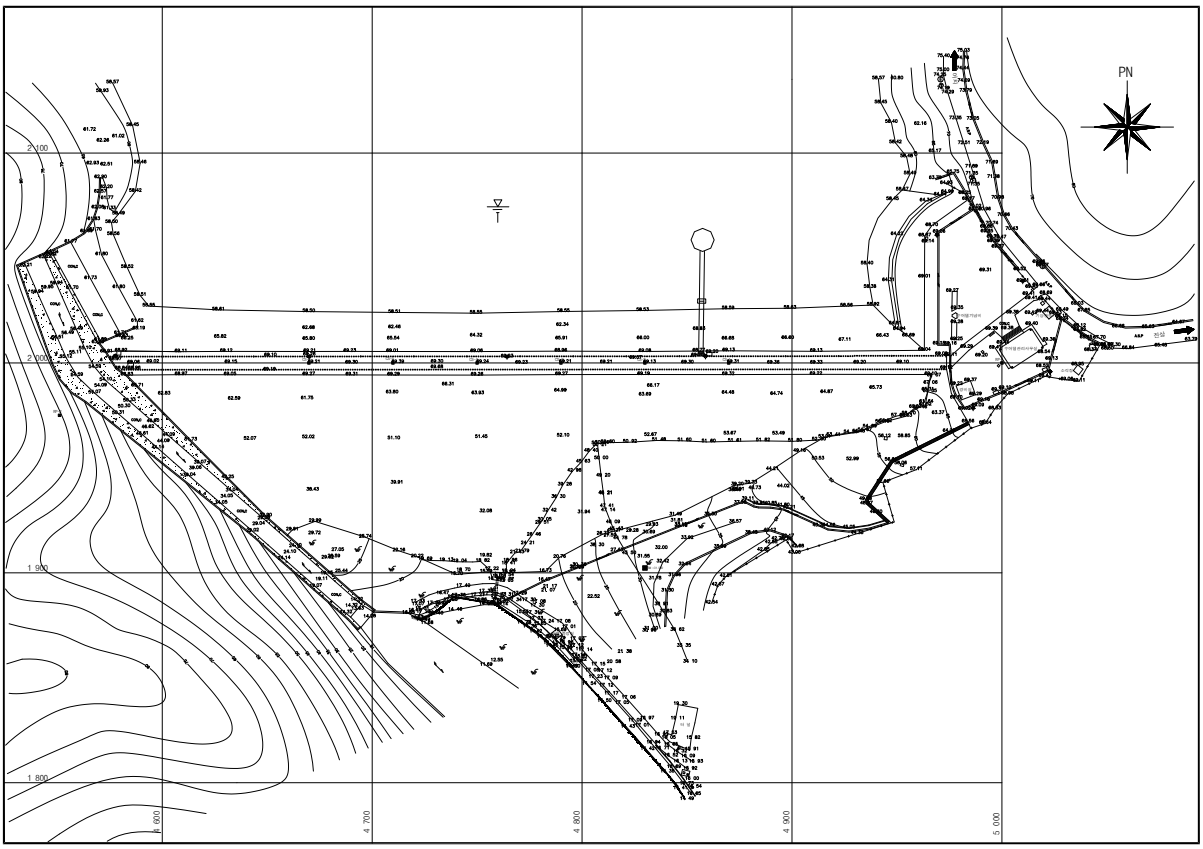
· 수어댐은 전라남도 광양시 진상면 삼거리에 있는 댐으로 1974년부터 1978년 사이에 수어천 수계의 물을 얻기 위해 중앙 차수벽형 필댐(fill dam)으로 건설되었음. 수어천의 자체유입량과 섬진강 잉여수량을 섬진강 본류에 위치한 다압 취수장에서 취수한 용수를 도수하여 저수지에 저류하였다가 여천 · 광양 공업기지 및 인접지역의 생활용수를 공급할 목적으로 건설되었으며, 건설 후 2007년 10월에는 치수능력 증대를 위하여 보조여수로가 신설되었음. 주요 제원으로는 댐마루 69.2m 높이 67m, 길이 437m이다. 유역면적 49km^2, 홍수위 66.2m, 만수위 64m, 저수위 44m, 이고 저수 총량 2,810만m^3, 유효량 2,200만m^3, 용수공급 3,000만m^{3}임.



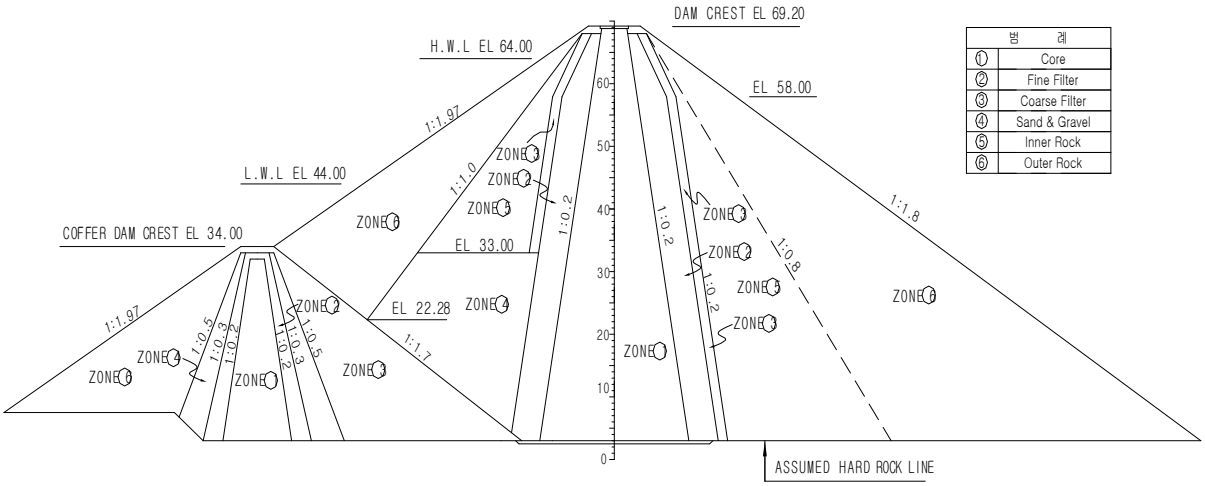
<그림 3-206> 수어댐 전경

<표 3-51> 수어댐 주요 제원

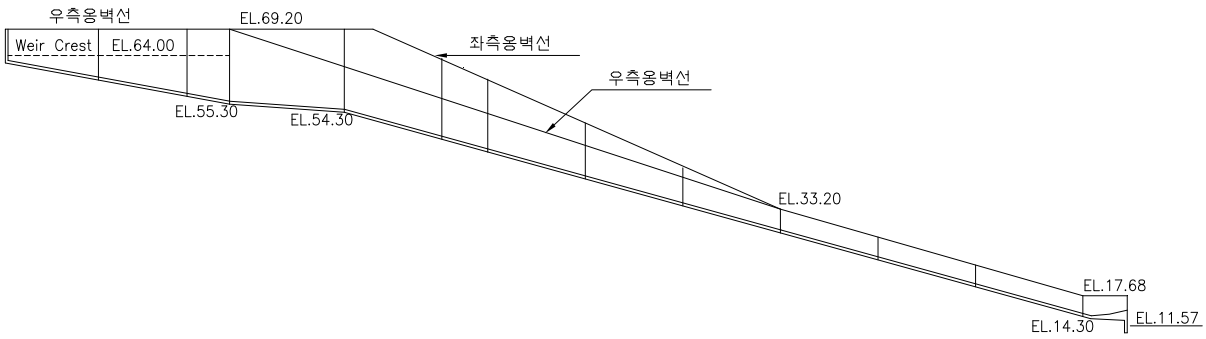
구 분		제 원	
유역 및 저수지	위 치	전남 광양시 진상면 섬거리 (수어천)	
	유 역 면 적	49.0㎢	
	총 저 수 량	27.5백만㎥(상시만수위 기준)	
	유 효 저 수 량	22.2백만㎥	
	계 획 홍 수 위	EL. 66.2m	
	상 시 만 수 위	EL. 64.0m	
	저 수 위	EL. 44.0m	
댐 체	형 식	중앙차수벽석괴댐	
	댐 제 원	높이 67.0m, 길이 437.0m, 마루폭 11.0m	
	댐마루표고	EL. 69.2m	
여 수 로		기 존	보 조 (신 설)
	형 식	월류형 측수로식	월류형 터널식
	월류웨어 폭	49.5m	48.25m(터널 703.2m)
	월 류 표 고	EL. 64.0m	EL. 64.0m
	계 획 홍 수 량 계 획 방 류 량	566.0㎥/sec(200년빈도) 328.0㎥/sec(200년빈도)	1,652㎥/sec (PMF) -
	최 대 방 류 량	653㎥/sec(PMF)	웨어 : 797㎥/sec 수문 : 77.9㎥/sec (EL. 64.0m 기준)
취 수 탑	형 식	원형 철근콘크리트조(중간격벽으로 분리)	
	치 수	D : 9m, 높이 : 37.2m	
	취 수 구	D : 600㎜ 5개소(농업용) D : 1,650㎜ 6개소(2단)(공업용수용)	
건 설 기 간		착 공 : `74. 8.20 ; 준 공 : `78. 5.31	
설 계 자		산업기지개발공사	
시 공 자		삼부토건(주)	



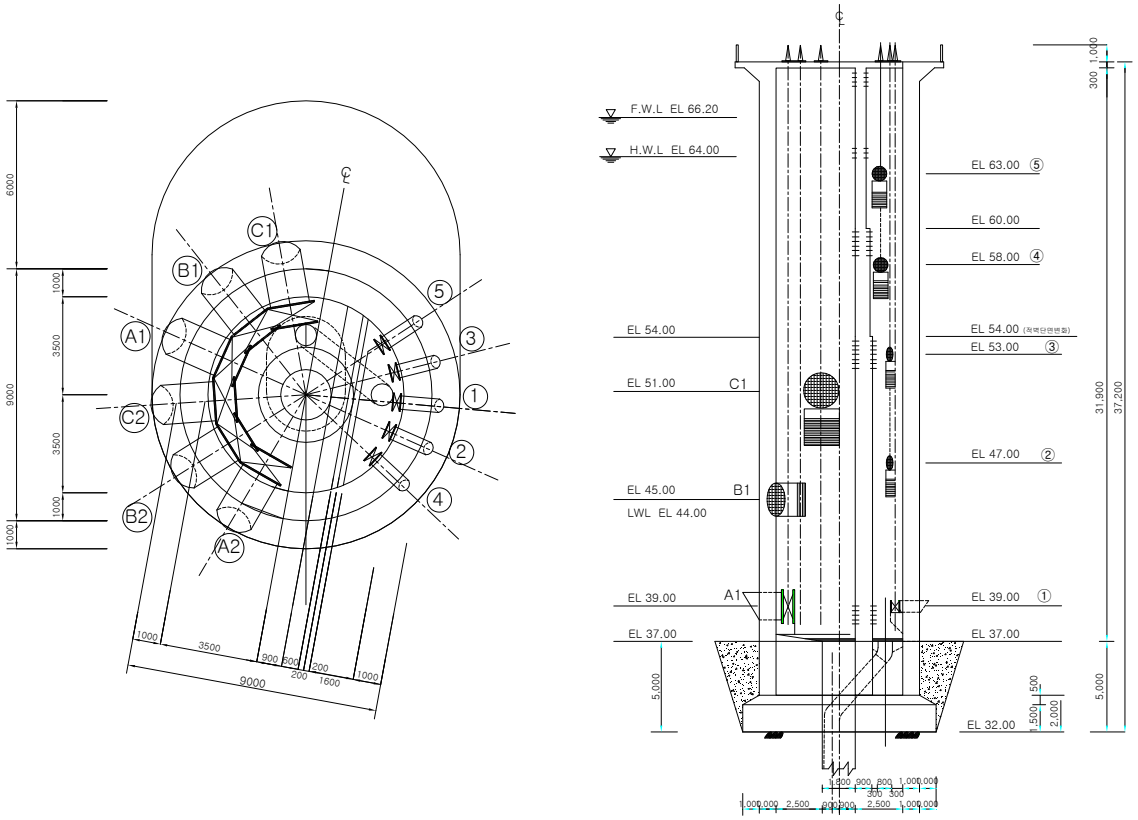
<그림 3-207> 수어댐 평면도



<그림 3-208> 댐체 표준단면도



<그림 3-209> 여수로 종단면도



<그림 3-210> 수어댐 취수탑 현황도

(1) 수문관측소 현황

· 수어댐 유역의 1차진단 에서는 하동관측소의 1916년~1997년 일강우자료 및 1980~1997년 시강우 자료를 이용하여 지속시간 24시간 및 6시간에 대한 확률강우량을 산정하였으며, 실시설계보고서에서도 역시 하동관측소를 이용하였음. 금회 위험도 해석을 위해서 수어댐 유역 인근에 위치한 강우관측소 현황 및 가용 시자료 현황을 조사하였음. 수어댐 유역은 강우 빈도해석을 위한 시자료가 확보되지 못하거나 확보된 경우라도 충분한 기간에 대한 자료가 구축되어 있지 못한 경우가 많았으므로 이러한 관측소는 분석대상 지점에서 제외하였음. 그 결과 인근 관측소 중 하동 관측소(050590)는 1980년부터 2003년까지의 시강우 자료가 있지만 자료의 년수가 짧고 폐쇄된 지점이므로 본 연구에서는 여수수위관측소를 선택하여 분석을 수행하였음.

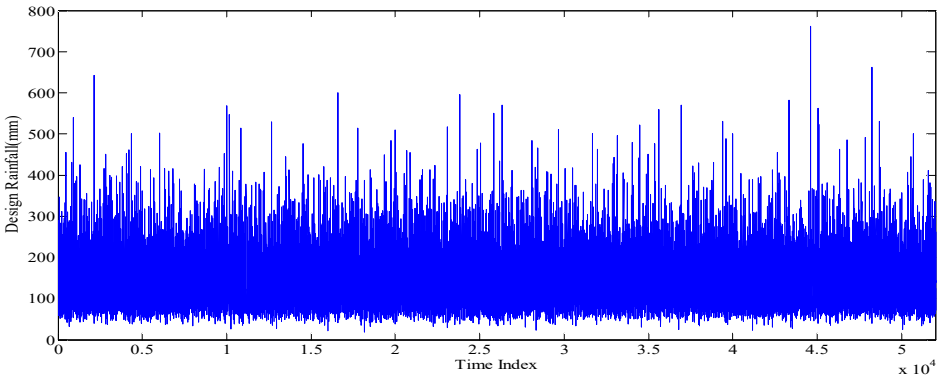
(2) 극치강우량 모의 발생 및 강우 모의 결과

· 본 절에서는 앞서 언급하였듯이 여수 관측소의 시강우자료를 이용하여 확률강우량을 산정하였음. 수어댐 유역의 경우 임계지속시간은 24시간 이므로 24시간 연최대 강우량 자료를 활용하였으며. 확률강우량의 간단한 산정절차는 다음과 같음.

(가) 수어댐 유역의 인근 관측소인 여수 관측소의 강우자료를 수집하여 자료의 결측 및 오류를 조사하고, 관측소의 연최대강우량을 총 52년으로 설정하여 추출하였음.

(나) 극치수문량을 잘 표현한다고 알려진 GEV, Gumbel 분포를 이용하여 확률강우량을 산정하였음.

· <그림 3-211>은 수어댐 유역의 기상관측소에서 연최대 강우량을 총 52개 년도로 10,000번 모의한 결과를 보여줌.

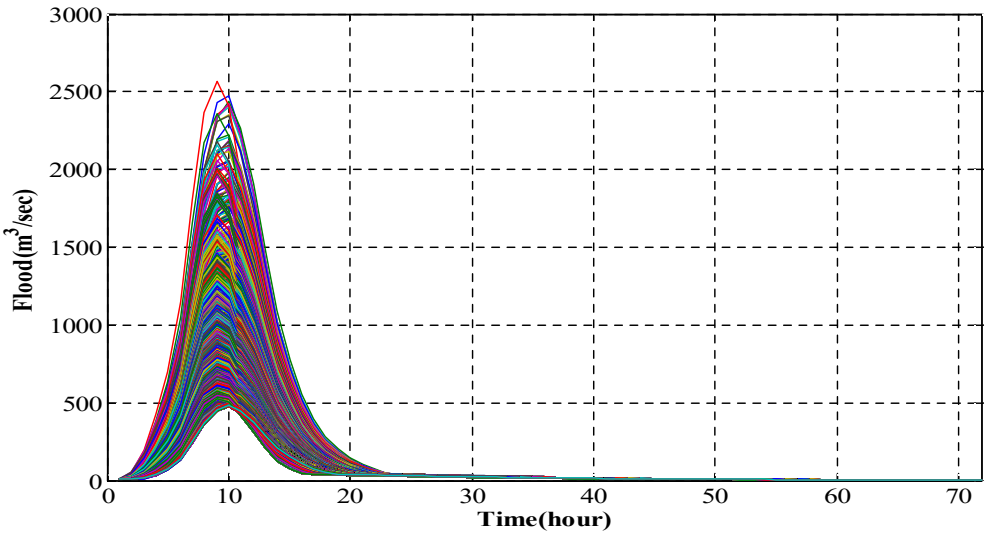


<그림 3-211> 수어댐 유역 12시간 최대 확률강우량 모의 결과

(3) 강우-유출 모의 결과

· 본 연구에서는 기존 HEC-1을 이용한 강우-유출 분석의 문제점을 개선시키기 위해 Bayesian HEC-1 모형을 적용하기 위해서 사전분포를 정의하는 것이 필요함. 따라서 본 연구에서는 수어댐 유역을 최적화 대상으로 하였으며, 수어댐 유역은 단일 유역으로 간주하여 3개의 매개변수를 추정하였음. 각 매개변수들은 충분히 수렴할 수 있도록 10,000번 모의를 수행하여 최종적으로 매개변수별 사후분포 결과를 도출하여 검증하였음.

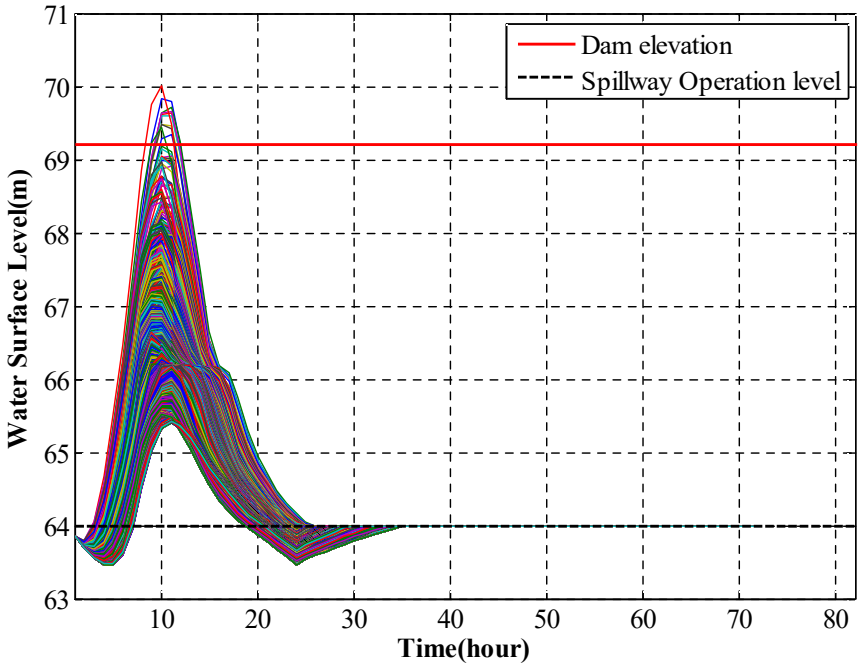
· <그림 3-212>는 모의 확률강수량을 입력 자료로 하여 본 연구에서 적용한 Bayesian HEC-1 모형의 홍수량 산정결과를 보여주고 있으며, 이와 같은 결과는 HEC-1 매개변수들의 불확실성을 고려한 결과를 보여주고 있음.



<그림 3-212> 매개변수의 불확실성을 고려한 HEC-1 모의 결과 앙상블

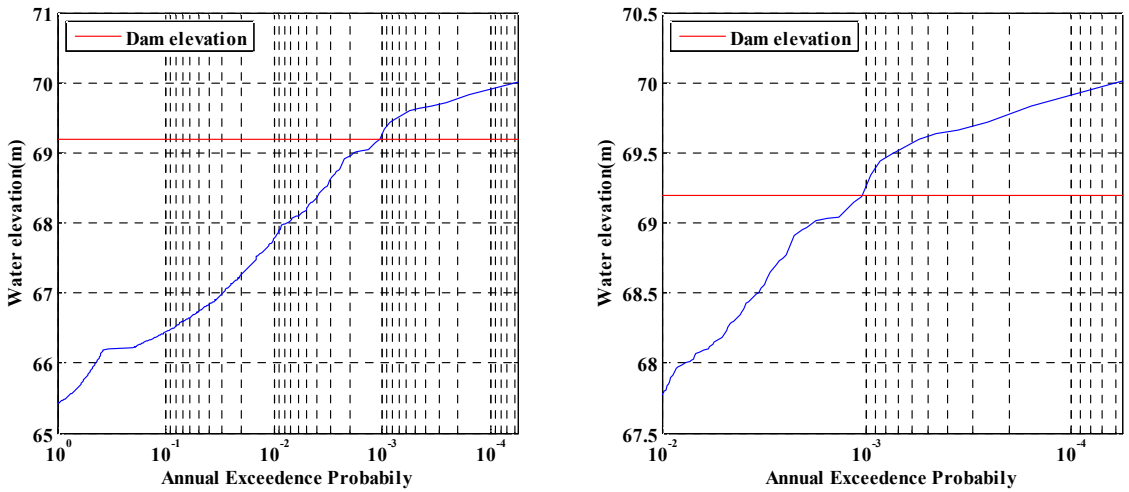
(4) 댐 운영 모의 결과

· 앞서 언급했듯이 HEC-5 모의 결과를 수어댐의 정상운영 상태 일 때에 따라서 시간에 따른 수위와 이를 10,000번 모의한 앙상블 자료를 <그림 3-213>에 나타내었음. <그림 3-213>은 수어댐이 정상운영 상태 일 때를 도출한 결과이며, 댐의 정상고인 69.2m 까지 일부 초과수위를, 10시간 이후에는 수위가 급격히 하강하고 있으므로 특정 홍수량에 안전함을 보여주고 있음. <그림 3-213>은 10,000개의 앙상블에 대한 HEC-5 모의결과를 보여주고 있으며 수어댐이 정상운영 상태일 때에는 일부 댐 최고수위를 넘는 것을 확인할 수 있었음.



<그림 3-213> 수어댐 정상운영 상태 일 때

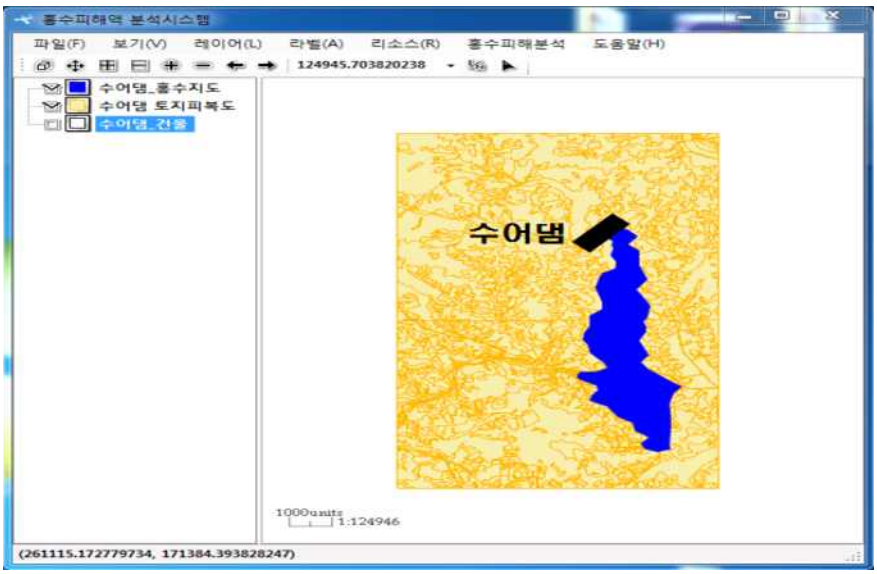
· 본 절에서는 수어댐이 정상운영 상태일 경우 수위를 넘어갈 확률을 정량적으로 산정하였다. <그림 3-214>는 수어댐이 정상운영 상태일 때의 확률을 보여주고 있으며, 그림에서 볼 수 있듯이 정상운영 상태일 경우에 일부 낮은 확률로 월류를 하는 것으로 나타났음.



<그림 3-214> 정상운영 상태일 때 수위-AEP

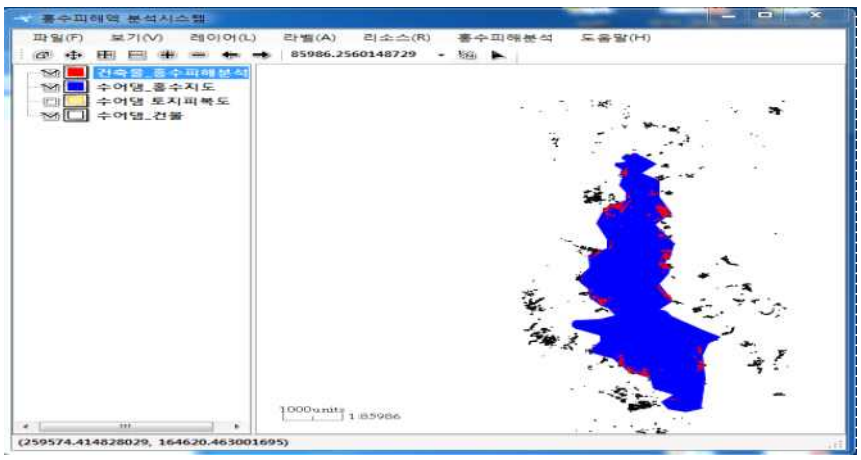
(5) 홍수피해액 산정 결과

· 본 절에서는 앞서 언급한 다차원법을 고려한 GIS Tool을 이용하여 수어댐 유역 홍수피해액을 산정하였음. 본 연구에서 개발한 GIS Tool은 댐 하류부의 홍수범람도가 산정되면 이에 따른 건축물도, 토지이용도 등을 활용하여 건축물, 건축내용물, 농경지 등의 피해액을 산정할 수 있음. 또한 하류부의 홍수범람도에서 붕괴지역, 급격한 수위 증가 지역, 보존지역을 각각 설정하고, 면적당 인구를 설정하면 인명피해 수까지 계산이 되도록 모형을 구축하였으며, <그림 3-215>는 수어댐 유역의 GIS 자료 구축하여 도시하였음.



<그림 3-215> 수어댐 유역 홍수피해액 자료 구축

· 먼저 수어댐 유역의 경우 건축물, 건축내용물, 농경지, 농작물 모두 침수심은 1.0~2.0m로 가정하여 분석하였음. 수어댐 유역의 인구밀도(명/km^2)는 1,000,000 m^2당 161명으로 가정하였음. <그림 3-216>은 수어댐 유역 농작물 피해 산정 결과이며, <그림 3-217>은 수어댐 유역 홍수피해액 산정 결과임.



<그림 3-216> 수어댐 유역 건물피해액 산정 결과



<그림 3-217> 수어댐 홍수피해액 산정결과

4. Bayesian Network 기반 위험도 해석 기법 기술 개발 및 적용

가. Bayesian Network 기반 댐 위험도 해석 모델

· 우리나라에서는 토목 구조물에 대해서 안정성 평가를 주기적으로 수행하고 있으며 특히 댐 및 저수지와 같은 대형 수공구조물에 대해서는 주기적 안정성 평가가 법적으로 규정되어 있음

· 우리나라의 댐 및 저수지 안정성 평가는 주기적으로 갱신된 수문자료를 이용한 수문학적 안정성 평가와 함께 모니터링에 입각한 구조물의 상태평가에 주안점을 두고 있음. 이러한 댐 및 저수지 안정성 평가는 현재 구조물이 가지는 위험도에 초점을 두고 있으며 미래에 발생 가능한 다양한 형태의 인자들을 고려하는데 어려움이 존재. 특히, 최근 급격히 증가하는 기상변동성을 고려한다면 과거자료 기반의 단순화된 안정성평가는 지양될 필요가 있음

· 선진국에서는 최근 이상기후 및 기상변동성 증가로 기인하는 자연재해에 적극적으로 대응하기 위해서 위험도 기반의 평가시스템을 이용하여 위험도 관리를 수행하고 있으며, 자연재해 발생 및 피해와 연관된 불확실성을 고려할 수 있는 해석기법에 대한 수요가 급격히 증가하고 있음.

· 수공구조물에 관련된 위험 요소들은 일반적으로 매우 드문 사상들로서 매우 낮은 발생확률을 가지고 있으며, 더욱이 발생빈도나 피해양상은 시간에 따라 변동하는 특징을 가짐. 이와 함께 피해양상이 매우 복잡하며 다양한 원인들과 연관성을 가지는 특징 때문에 주로 경험적인 방법론에 입각한 해석이 주를 이루고 있음

· 이러한 점에서 본 연구에서는 Bayesian Network을 활용한 댐 및 저수지 위험도 평가 기법을 개발하고자 함. Bayesian Network는 Bayesian 통계모델, Graph 이론(graph theory)과 연계된 결정이론(decision theory)이 통합된 확률모형으로서 원인과 결과에 대한 정량적인 해석이 가능하며 다양한 인과관계를 효과적으로 분석할 수 있는 장점을 제공.

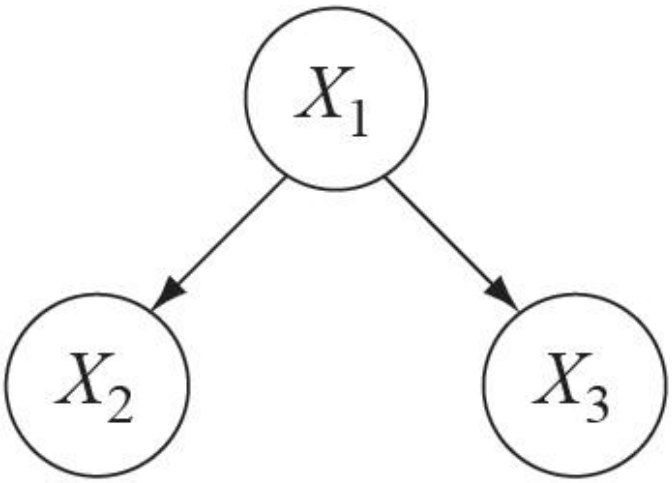
· 특히, Bayesian Network는 자연재해와 같은 불확실성이 큰 원인들로부터 기인하는 위험도를 지속적으로 평가하는데 유리하며 위험도 해석과정 및 위험도 저감을 위한 대책 수립 시 상호의존성(interdependancy)을 이해하는데 다양한 정보를 제공. 이러한 장점 외에도 위험도 저감 및 최적대안 수립을 위한 계획수립 시 유용하게 활용될 수 있음

· 수공구조물에 대한 위험도 분석을 위해서는 구조물 자체적인 문제뿐만 아니라 기상조건, 환경적인 요인 등 내부/외부 요인들에 대한 충분한 검토가 필수적으로 요구되며 고려된 요소들 간의 상호작용을 평가할 수 있는 Network 기반의 해석체계 구축이 필요. 다시 말해서 대부분의 위험도 해석과정에서 요구되는 매개변수들의 불확실성이 매우 크다는 점과 각 매개변수들의 불확실성이 전체 해석결과에 영향을 준다는 점을 고려해야 함

· 수문기상학적 극치사상 등과 관련된 댐 구조물에 대한 위험도 분석은 다양한 학문 분야가 연관되어 있기 때문에 일반적으로 해석 모델을 구성하거나 불확실성을 해석할 때 난해한 문제점이 있음. 이러한 점에서 위험도 해석을 위한 체계구축 뿐만 아니라 이를 실행할 수 있는 객관적인 해석 개발이 이루어져야 하며 최종적으로 의사 결정론자 등을 포함한 전문가 그룹의 의견을 적극적으로 반영할 수 있는 형태로 모형 개발이 이루어지는 것이 바람직

· 특히, 구조물에 신뢰성을 저해시키는 복합적인 위험요소들을 동시에 고려할 수 있어야 하며 이러한 점에서 본 연구에서는 Bayesian Network 기반의 댐 위험도 해석 모형이 적합성을 가질 것으로 판단됨

· Bayesian Network는 사건들의 발생 특성을 확률적으로 표현하는 대표적인 수단으로, 위험 인자들 간의 의존관계를 나타내는 그래프와 각 인자들의 조건부 확률로 구성. 여기서 3개의 Node로 구성되는 Bayesian Network의 조건부 확률은 다음과 같이 계산 가능함



<그림 3-218> Bayesian Network 개념도

$$p(x_1,x_2,x_3) = p(x_1)p(x_2 \mid x_1)p(x_3 \mid x_1) \quad (115)$$

$$p(\mathrm{x}) = p(x_1)p(x_1,...,x_n) = \prod_{i=1}^{n} p(x_i \mid p_a) \quad (116)$$

· Bayesian Network는 각 노드마다 조건부 확률을 갖는 하나의 Directed Acyclic Graph(DAG)로 정의가 가능함. 이때 각각의 노드는 위험인자로서 사건의 발생을 의미하고 Node를 이어주는 선을 Edge라고 명명하며 이벤트 간의 상호 의존관계를 설정하는 역할을 수행
· 위의 식에서 보이듯이 Bayesian Network는 상위 Node(parent node)에 조건부로 하위 Node(children node)의 확률을 추정하게 되는 개념으로 파괴 인자간의 상호 의존성을 보다 현실적으로 고려할 수 있는 장점이 있음
· Bayesian Network는 조건부 확률 계산에 Bayesian 이론을 이용하며. Bayesian 방법은 확률을 발생 빈도나 어떤 시스템의 물리적 속성이라고 여기는 것과는 다른 해석적 접근방법임
· Bayesian 확률은 사전확률(prior probability)을 기준으로 자료의 증가에 의해서 정보가 갱신되며 최종적으로 사후확률(posterior probability)을 추정하는 과정
· Bayes 정리(Bayes's rule)는 두 확률 변수의 조건부 확률을 나타내는 정리로, 새로운 사후근거가 제시될 때 신뢰값(belief)을 어떻게 갱신 또는 정정할 것인가를 설명하고 있음. 주어진 확률변수 θ와 y가 있을 때, 두 확률변수들의 결합확률분포(joint probability distribution)는 사전분포(prior distribution) $p(\theta)$와 우도(likelihood) $p(y|\theta)$의 곱으로 표현할 수 있음.

$$p(\theta, y) = p(\theta)p(y|\theta) \tag{117}$$

· 수리적으로 계산이 불가능하거나 복잡한 적분, 추정 등의 문제에 사용되는 Monte Carlo 기법은 최근에 수리 수문학 분야에서 위험도 및 불확실성을 평가하는 수단으로 널리 이용되고 있음. MCS기법은 관심이 있는 값을 확률변수의 기대값으로 포현하고 이를 모의를 통하여 추출된 동일한 분포를 따르며 서로 독립(Independent and identical Distributed: iid)인 표본들의 표본평균을 이용하여 추정하는 방법이라고 앞서 설명한 바 있음

· 이에 반해 Markov Chain Monte Carlo(MCMC) 기법은 주어진 다변량 확률분포가 복잡하여 이를 따르는 iid 난수를 얻을 수 없는 경우에 사용가능한 기법으로서 iid 난수 대신 Markov Chain 난수를 추출하여 사용

· Markov Chain을 통해 난수를 발생시킨다고 해서 정확하게 관심이 되는 확률분포를 따르지 않지만 이를 일정 시간동안 반복 후에 얻어지는 난수들은 추출을 원하는 분포에 수렴하게 됨. 따라서 MCMC기법은 복잡한 다변량 확률분포 및 매개변수의 추정을 요하는 문제에서 주로 사용되며 또한 Bayesian 통계 기법에서 사후분포의 추론의 이용될 수 있음

· 최근에 Bayesian MCMC 기법을 응용하여 극치강수량 예측모형(권현한과 문영일, 2007) 및 Bayesian MCMC 기법을 통한 강우-유출 모형 매개변수의 최적화 및 불확실성 분석(권현한 등, 2008) 등 다양한 수리수문학적 문제에 하나의 대안으로서 적용되고 있으나 댐 및 저수지 위험도 해석을 위한 수단으로 활용된 사례는 매우 제한적임

· MCMC기법의 대표적인 방법으로 메트로폴리스 해스팅스법 (Metropolis-Hastings Sampling)이 방법과 깁스표본법(Gibs Sampling)이 있다. 메트로폴리스 해스팅스 방법은 직접적으로 표본을 얻기 어려운 확률 분포로부터 표본의 수열을 생성하는데 사용하는 기각 표본 추출 알고리즘. 이 수열은 주어진 분포에 근사하는 MCMC를 모의실험하거나 예측치와 같은 적분을 계산하는데 사용될 수 있음.

· 깁스표본법은 메트로폴리스 해스팅스 방법의 특별한 경우이며, 일반적인 적용에는 제약이 있지만 보통 더욱 빠르고 사용하기 쉬운 장점이 있음. 깁스표본법은 원하는 다변량 확률분포에서 iid 표본을 추출하는 것이 복잡하거나 난해한 경우 이용 가능한 방법으로서 3개의 변수를 갖는 다변량 확률분포를 이용하여 설명하면 다음과 같음. 3개의 변수를 갖는 다변량 확률밀도함수를 $f(x,y,z)$라고 하자. 깁스표본법은 확률밀도함수로부터 직접 표본을 추출할 수는 없으나 각각의 변수들의 대해서 다른 두 변수들이 주어졌을 때의 조건부 분포가 알려져 있고 이로부터의 표본추출이 가능한 경우에 사용할 수 있음. 알고리즘을 간단히 정리하면 다음과 같음

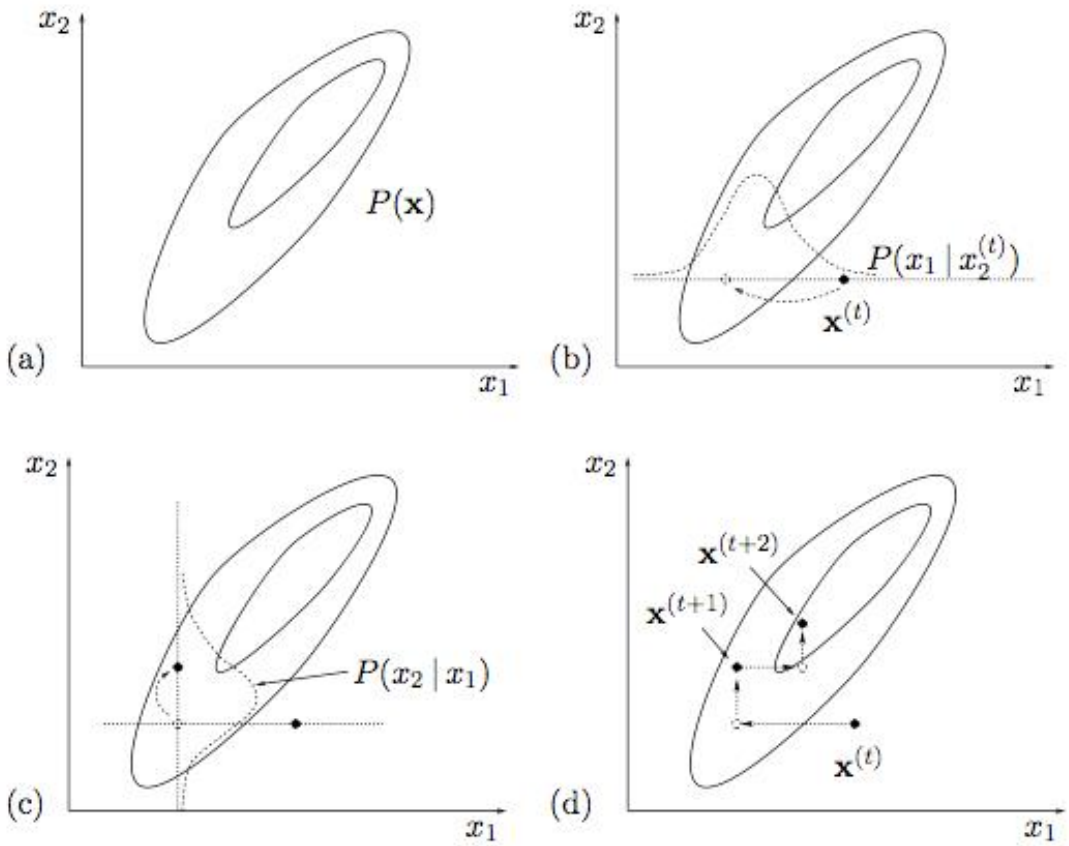
- 세변수에 대한 초기 값$(x^{(0)},y^{(0)},z^{(0)})$을 부여
- i번째 난수 벡터 $(x^{(i)},y^{(i)},z^{(i)})$가 주어졌을 때 $i+1$번째 난수 벡터를 다음과 같은 조건부 분포에서 추출

  ① $x^{i+1} \sim f(x|y^{(i)},z^{(i)})$

  ② $y^{i+1} \sim f(y|x^{(i+1)},z^{(i)})$

  ③ $z^{i+1} \sim f(z|x^{(i+1)},y^{(i+1)})$ (118)
- 위의 과정을 충분히 반복한 후 초기의 일정부분 난수를 제거한 이후의 난수들을 이용

· 위의 알고리즘에서 보듯이 깁스표본법은 조건부 분포들에서 조건으로 주어지는 변수들의 값은 정확하게 바로 직전의 단계에서 주어진 값들이 사용되게 되며 따라서 조건부 분포에서 추출된 난수들이 안정 상태에 도달하는 것이 주어진 다변량 확률분포를 정확히 따르는 난수가 되는 척도가 되며 깁스표본법을 구현하는데 가장 중요한 부분이 됨. 이러한 다수의 초기 무작위 표본추출과정을 거치게 됨으로서 상대적으로 매개변수들의 공간의 보다 폭넓은 탐색과정이 가능해지며, 이는 결국은 전역 최적해의 공간을 찾을 수 있는 더 큰 기회를 부여하게 됨

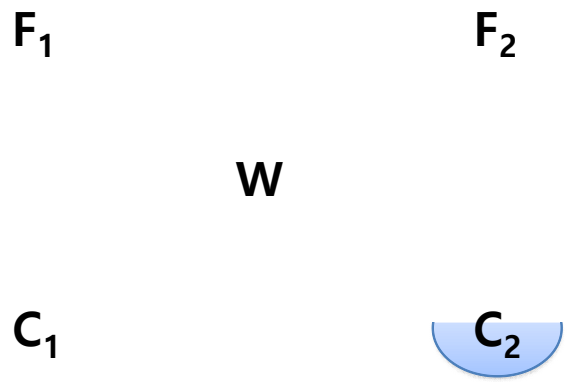


<그림 3-219> Gibbs Sampling 방법을 이용한 Bayesian MCMC 개념도

· 댐 위험도 모형을 적용하기에 앞서 모의자료를 대상으로 적용 절차를 설명 하면 다음과 같음. 만약 두 개의 지류가 합쳐지는 하천에서 홍수가 발생한다고 할 때 첫 번째 지류의 A라는 수위관측소와 두 번째 지류의 B라는 수위관측소가 있다고 가정함. 각각의 수위관측소에서 계획홍수위를 넘어설 경우 C라는 지자체와 D라는 지자체에 경고가 전달 가정함. 이들 지자체에 경고가 전달되면 상위 관리기관 예를 들어 홍수통제소에 홍수위험을 경고하는 연락이 전달된다고 가정. 그러나 계획홍수위를 초과하는 수위에서 이들 지자체들이 항상 상위기관에 홍수상황을 보고한다는 보장이 없으며 이들 지자체들은 주기적으로 상위기관과 연락을 취하고 있지만 서로간의 정보를 공유하지는 않는다고 가정

· 위에서 언급된 A관측소에 홍수 사상을 F1(flood1), B관측소에 홍수 사상을 F2(flood2), 2개

의 지류에서 홍수 경보 사상을 W(warning), 홍수 경보가 발생했을 때 지자체 C가 상위기관에 연락을 취하는 사상을 C1(call1), 마지막으로 지자체 D가 상위기관에 연락을 취하는 사상을 C2(call2)라고 명명함. 이들 사상들의 여사상(complement)를 $F_1^c, F_2^c, W^c, C_1^c, C_2^c$라고 하며 이를 DAGs로 표현하면 다음 <그림 3-220>과 같으며 BN에 대한 조건부 확률은 다음과 같이 정의



<그림 3-220> 홍수경보 방송을 이용한
Bayesian Network 개념도

<표 3-52> 유역 A, B의 홍수 발생 확률

Steam A		Stream B	
F_1^c	F_1	F_2^c	F_2
0.999	0.001	0.998	0.002

<표 3-53> 홍수에 따른 경고 시스템 작동 확률

Condition		W^c	W
F_1^c	F_2^c	0.999	0.001
F_1^c	F_2	0.71	0.29
F_1	F_2^c	0.06	0.94
F_1	F_2	0.05	0.95

<표 3-54> 홍수 경보에 따른 지자체 A와 B의 홍수 사상 전달 확률

Condition	District A		District B	
	C_1^c	C_1	C_2^c	C_2
W^c	0.95	0.05	0.99	0.01
W	0.10	0.90	0.30	0.70

· 위에 표에서는 각 Node에서의 조건부 확률을 제시하였다. 예를 들어 첫 번째 표에서 관측

소 A에서 홍수가 발생할 확률 F_1은 0.001이며 관측소 B에서 홍수가 발생할 확률 F_2는 0.002로 가정함. 두 번째 표에서는 홍수가 발생했을 때 경고가 발생할 확률을 나타내며 예를 들어 A지점에서 홍수가 발생하고 B지점에서 홍수가 발생하지 않는 경우에 경고가 발생할 조건부 확률 $p(W \mid F_1, F_2^c)$는 0.94이며 반대로 $p(W \mid F_1^c, F_2)$인 경우에는 0.29로 상대적으로 작은 확률로 가정함

· 위의 Bayesian Network에서 제시한 DAGs에서 $p(C_1, C_2 \mid F_1)$, 즉 A 관측소에서 홍수가 발생했을 때 지자체 C와 D가 상위기관에 홍수상황을 전달할 확률을 계산하여 모형의 적합성을 평가함. 본 예제에서는 조건부확률을 통해 정확한 확률을 계산해보고 본 연구에서 제안하는 Bayesian 기법을 통해서 수치적으로 추정한 방법과 비교 검토하는 과정을 수행하였다. 여기서 F^*를 F_2 또는 ,F_2^c W^*를 W 또는 W^c이라고 하면,

$$p(C_1, C_2 \mid F_1) = p(C_1, C_2, F_1)/p(F_1) = 1/p(F_1) \sum_{F^* W^*} p(F_1, F^*, W^*, C_1, C_2) \tag{119}$$
$$= 1/p(F_1) \begin{Bmatrix} p(F_1, F_2) p(W \mid F_1, F_2) p(C_1, C_2 \mid W) \\ + p(F_1, F_2^c) p(W \mid F_1, F_2^c) p(C_1, C_2 \mid W) \\ + p(F_1, F_2^c) p(W^c \mid F_1, F_2^c) p(C_1, C_2 \mid W^c) \\ + p(F_1, F_2) p(W^c \mid F_1, F_2) p(C_1, C_2 \mid W^c) \end{Bmatrix}$$

· 앞에서 가정하였듯이 지자체 C와 지자체 D는 서로 홍수경보에 대한 정보를 공유하지 않기 때문에 독립으로 가정할 수 있으며 따라서 W^*(W^c 또는 W) 조건에서 $p(C_1, C_2 \mid W^*) = p(C_1, W^*) \times p(C_2, W^*)$으로 계산이 가능함

$$p(C_1, C_2 \mid F_1) = \frac{1}{0.001} \begin{pmatrix} 0.001 \cdot 0.002 \cdot 0.95 \cdot 0.90 \cdot 0.70 \\ + 0.001 \cdot 0.998 \cdot 0.94 \cdot 0.90 \cdot 0.70 \\ + 0.001 \cdot 0.998 \cdot 0.06 \cdot 0.05 \cdot 0.01 \\ + 0.001 \cdot 0.002 \cdot 0.05 \cdot 0.05 \cdot 0.01 \end{pmatrix} \tag{120}$$
$$= 0.5922$$

· 따라서 관측소 A에서 홍수가 발생했을 때 지자체 C와 D가 홍수통제소에 홍수상황을 전달할 확률은 0.5922이가 된다. 위에서 계산된 확률은 수치적으로 근사해 추정이 가능. 즉, 앞서 정의된 $p(C_1, C_2 \mid F_1)$은 다음 식과 같이 정리가 가능

$$p(C_1, C_2 \mid F_1) = p(C_1 \mid C_2, F_1) p(C_2 \mid F_1) \tag{121}$$

· Bayesian Network 모형에서 조건부 확률을 추정하기 위해서 확률 Vector p를 속성으로 하는 M-state Categorical 변량이 도입

$$r \sim categorical(p[\ ]) \tag{122}$$

· 여기서 $p[r]$은 $r = 1,2,...,\dim(p)$을 가지는 Vector로서 $\sum_i p[i] = 1$. 위에서 제시한 예제를

Bayesian을 모형을 위한 형태로 나타내면 다음과 식과 같음

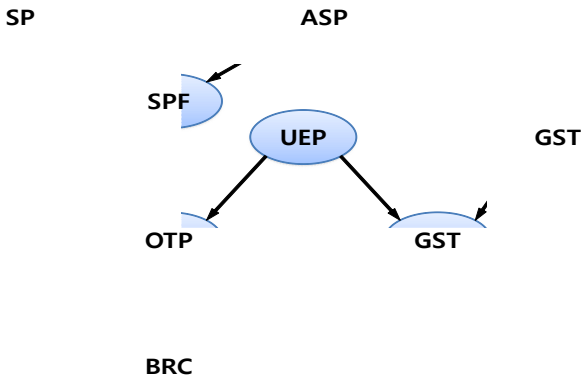
$$
\begin{aligned}
&r_{F1} \sim categorical(p[F_1^c, F_1]) \\
&r_{F2} \sim categorical(p[F_2^c, F_2]) \\
&r_W \sim categorical(p[r_{F_1}, r_{F_2}]) \\
&r_{C_1} \sim categorical(p[r_W]) \\
&r_{C_2} \sim categorical(p[r_W])
\end{aligned} \tag{123}
$$

· r_{F_1}와 r_{F_2}의 경우 홍수가 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우로 구분되며 따라서 r_F가 1과 2의 값을 가지는 1-state Categorical 변량이며 r_W는 두 번째 표에서 제시된 바와 같이 2-state Categorical 변량으로 설정이 가능. 여기서 1은 두 번째 표에서 제시한 순서대로 제시된 Event가 발생하지 않는 상태를 반대로 2는 제시된 Event가 반드시 발생하는 상황을 나타냄. 예를 들어 3-state Categorical 변량의 경우에는 3×3 확률행렬로 정의되기 때문에 r은 1, 2, 3의 값을 가지게 됨

· 앞서 계산된 확률 $p(C_1, C_2 \mid F_1)$는 Bayesian Network에서 $p(C_1 \mid C_2, F_1)$과 $p(C_2 \mid F_1)$으로 독립적으로 추정이 가능. 먼저 $p(C_2 \mid F_1)$의 경우 A관측소에 홍수가 반드시 발생한다는 조건을 가정으로 추정이 가능. 위의 식의 $r_{F_1} = 2$로 할당함으로서 가능하며 반드시 발생할 것으로 가정하여 확률 $p(F_1) = 1$이 부여되는 Node를 Hard Evidence라고 명명함. Bayesian Network 모형에서 $p(C_2 \mid F_1)$를 추정하기 위해서 20,000번 모의 결과 기댓값 $\mathrm{E}(C_2 \mid F_1) = 2 \cdot p(C_2 \mid F_1) + 1 \cdot (1 - p(C_2 \mid F_1)) = 1.661$로 추정되었으며 따라서, $p(C_2 \mid F_1) = 1.661 - 1 = 0.661$로 나타낼 수 있음. 동일하게 $p(C_1 \mid C_2, F_1)$의 경우에서 $r_{C_1} = r_{F_1} = 2$의 Hard Evidence를 할당함으로 계산이 가능하며, 20,000번 모의 후 추정된 기댓값 $\mathrm{E}(C_1 \mid C_2, F_2) = 2 \cdot p(C_1 \mid C_2, F_2) + 1 \cdot (1 - C_1 \mid C_2, F_2) = 1.899$로 나타낼 수 있으며 최종적으로 $p(C_1 \mid C_2, F_1) = 1.899 - 1 = 0.899$로 추정이 가능. 최종결과는 다음 식과 같이 정리가 가능하며 앞서 계산된 결과와 동일하게 추정됨을 확인할 수 있음

$$
\begin{aligned}
&\mathrm{E}(C_2 \mid F_1) = 2 \cdot p(C_2 \mid F_1) + 1 \cdot (1 - p(C_2 \mid F_1)) = 1.661 \\
&\mathrm{E}(C_1 \mid C_2, F_2) = 2 \cdot p(C_1 \mid C_2, F_2) + 1 \cdot (1 - C_1 \mid C_2, F_2) = 1.899 \\
&p(C_1, C_2 \mid F_1) = p(C_1 \mid C_2, F_1) p(C_2 \mid F_1) = 0.899 \times 0.661 = 0.5942
\end{aligned} \tag{124}
$$

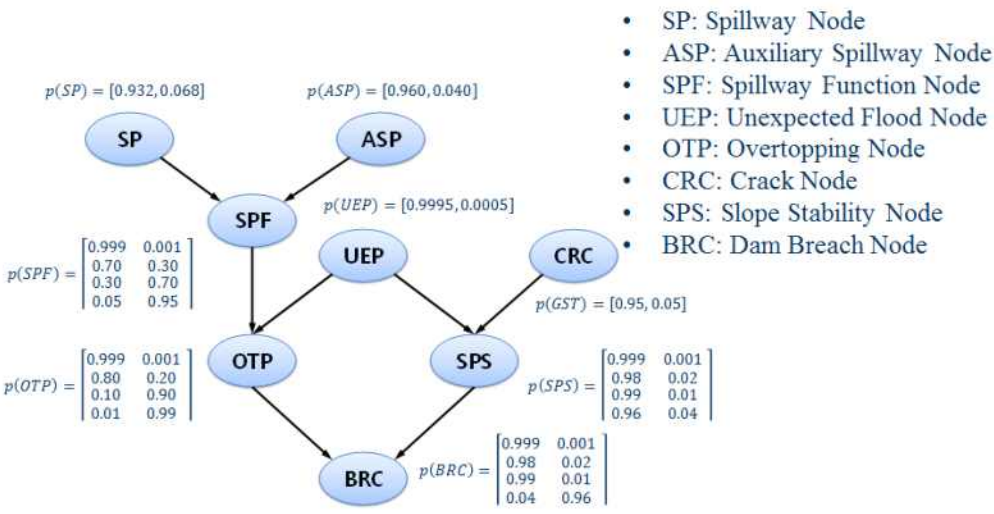
· 앞서 제시된 예제와 같이 댐 위험도 해석 모형으로 발전시켜 간단히 모형을 구성하여 댐 위험도 해석 모형으로 Bayesian Network방법의 적합성을 평가하였음. 다음에 제시되는 예제는 정확한 파괴확률을 추정하기 보다는 Bayesian Network 모형의 적용성을 평가하기 위함이므로 부여되는 조건부 확률은 임의적으로 가정하여 해석을 실시함



<그림 3-221> Bayesian network 기반의 댐
위험도 해석 구성도

· <그림 3-222>와 같이 Node별 조건부 확률을 부여하였으며 Bayesian Network 모형을 통해서 각 Node 간의 조건부 확률을 추정할 수 있으며 최종적으로 댐 붕괴 확률을 다양한 관점에 시나리오 분석이 가능한 모형으로 구축이 가능함.

· <그림 3-222>에서 SP는 주여수로의 상태를 나타내는 노드로서 여수로 게이트의 파괴확률로 가정할 수 있으며 ASP는 보조 여수로의 상태를 나타내는 노드로서 동일하게 게이트의 문제 발생여부를 확률로 부여. SPF는 주여수로 게이트, 보조여수로 게이트 문제 발생여부에 따라 결정되는 Node로서 전체 여수로의 상태를 평가하기 위한 Node이며 2state 형태의 조건부 확률로 정의됨. UEP는 댐의 이상홍수의 발생을 나타내는 Node이며 댐의 월류여부를 판단하는 OTP노드에 연결됨. 따라서 OTP는 여수로의 상태와 이상홍수의 발생여부에 결정되는 Node로서 댐 파괴 BRC Node로 최종적으로 연결됨. CRC Node는 댐체의 크랙 여부를 나타내는 Node로서 앞서 정의된 UEP Node와 연계되어 사면안정상태를 나타내는 SPS Node로 연결됨. 최종적으로 SPS Node는 OTP Node와 함께 댐의 파괴를 결정하는 BRC Node로 연결됨.

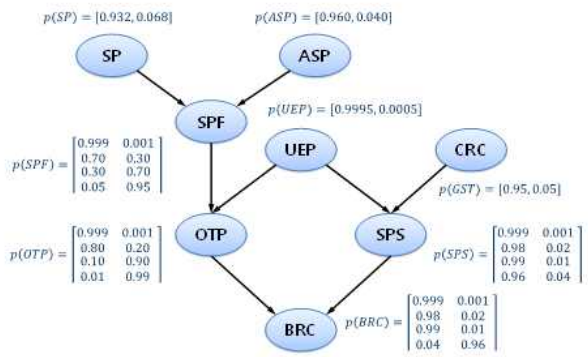


<그림 3-222> Bayesian Network 기반의 댐 위험도 해석 모형 예시

· 앞서 언급되었듯이 Bayesian Network는 다양한 통계적 추론을 통하여 시나리오분석이 가

능하며 각 파괴인자가 가지는 민감도를 효과적으로 파악할 수 있는 장점이 있음. Bayesian Network에서 각 Node간의 조건부 확률은 Bayesian MCMC기법을 통하여 10,000번 이상 모의를 통하여 추정하였으며 다음 그림과 같이 추정이 가능함.

· 아래 그림에서 f아래 첨자는 문제가 발생한 경우를 s는 문제가 없는 상태를 나타내며 다양한 하중 상태에 따른 조건부 확률을 효과적으로 추정이 가능하였음. 기존 ETA또는 FTA는 단순히 하나의 원인으로 결과만으로 계속 조건부로 가정하여 추정하는 반면 Bayesian Network는 다양한 하중 조합의 조건부 확률에 근거하여 파괴상태를 보다 현실적으로 근사시킬 수 있는 장점이 있음.



$$p(BRC|SP_f, ASP_s) = 0.008$$
$$p(OTP|SP_f, ASP_s) = 0.63$$
$$p(BRC|SP_s, ASP_f) = 0.004$$
$$p(OTP|SP_s, ASP_f) = 0.27$$
$$p(BRC|UEP_f, SP_s, ASP_s) = 0.005$$
$$p(OTP|UEP_f, SP_s, ASP_s) = 0.199$$
$$p(BRC|UEP_f, SP_s, ASP_f) = 0.01$$
$$p(OTP|UEP_f, SP_s, ASP_f) = 0.437$$
$$p(BRC|UEP_f, CRC_f, SP_s, ASP_s) = 0.011$$
$$p(OTP|UEP_f, CRC_f, SP_s, ASP_s) = 0.205$$
$$p(BRC|UEP_f, CRC_f, SP_s, ASP_f) = 0.022$$
$$p(OTP|UEP_f, CRC_f, SP_s, ASP_f) = 0.44$$

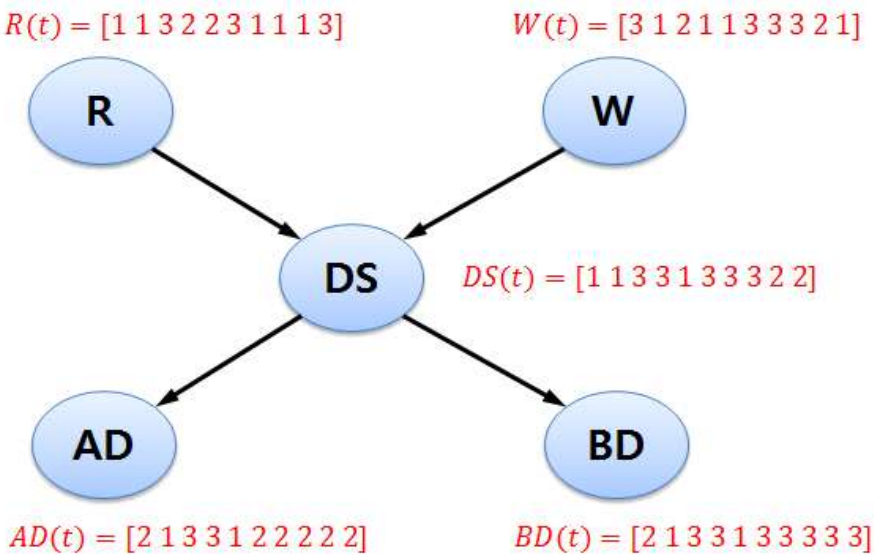
<그림 3-223> Bayesian Network 기반의 댐 파괴확률

· 앞서 나타낸 Bayesian Network에서 가장 중요한 부분은 각 Node에 부여되는 조건부 확률을 정확하게 부여하는 것이 핵심이며 2차 년도에는 각 Node에 부여되는 확률을 추정할 수 있는 방법론에 초점을 맞추어 연구를 진행할 예정임.

· 취약성 평가를 포함하여 위험도 분석시 가장 고민스러운 부분은 기존 정성적인 정보를 정량적인 확률로 변환하는 가정임. 예를 들어 특정 취약성 인자 및 피해 결과에 대해서 등급을 1에서 5등급으로 부여할 때 이러한 정성적 정보를 정량적 정보로 변환할 수 있는 Bayesian Network 모형을 구축하여 모의자료에 대해서 연구를 진행하였음.

· 모의실험은 다음과 같음. 우선 R Node는 강우의 등급을, W Node는 바람에 대한 등급을 DS Node는 자연재해의 발생여부를 마지막으로 AD와 BD Node는 A 지자체와 B 지자체의 자연재해 취약성을 나타나는 Node라고 가정하며 모든 Node에 대해서 1에서 3등급까지 임의로 등급을 부여한 후 각 Node별 조건부확률을 역으로 추정할 수 있는 알고리즘을 개발하여 적용하였음.

· 첫 번째 모의실험으로 각 등급 발생 확률은 p=[0.33 0.34 0.33]로 가정하고 각 Node별로 등급을 1,000개 모의발생 시켰으며 추정되는 조건부 확률이 0.33 주변에서 수렴된다면 모형의 적합성이 있다고 평가할 수 있음. 아래 표에서 보듯이 각 Node별 조건부 확률이 0.33로 수렴되고 있음을 확인할 수 있으며 불확실성 범위로 제시가 되므로 보다 신뢰성 있는 위험도 해석을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단됨.



<그림 3-224> 정성적 자료로부터 Bayesian Network Node별 조건부 확률 추정 개념도

<표 3-55> 정성적 자료로부터 Bayesian Network Node별 조건부 확률 추정 결과

Node	2.50%	Median	97.50%	Node	2.50%	Median	97.50%
AD[1,1]	0.29	0.34	0.39	DS[1,3,3]	0.30	0.39	0.48
AD[1,2]	0.29	0.34	0.39	DS[2,1,1]	0.22	0.30	0.39
AD[1,3]	0.27	0.32	0.37	DS[2,1,2]	0.22	0.30	0.39
AD[2,1]	0.26	0.31	0.36	DS[2,1,3]	0.25	0.32	0.41
AD[2,2]	0.29	0.34	0.39	DS[2,2,1]	0.25	0.32	0.41
AD[2,3]	0.30	0.35	0.40	DS[2,2,2]	0.29	0.37	0.46
AD[3,1]	0.30	0.35	0.40	DS[2,2,3]	0.22	0.30	0.38
AD[3,2]	0.28	0.33	0.38	DS[2,3,1]	0.21	0.28	0.36
AD[3,3]	0.28	0.33	0.38	DS[2,3,2]	0.32	0.40	0.49
BD[1,1]	0.28	0.33	0.38	DS[2,3,3]	0.24	0.31	0.40
BD[1,2]	0.30	0.35	0.41	DS[3,1,1]	0.25	0.34	0.44
BD[1,3]	0.27	0.32	0.37	DS[3,1,2]	0.19	0.27	0.36
BD[2,1]	0.26	0.31	0.36	DS[3,1,3]	0.30	0.39	0.49
BD[2,2]	0.28	0.33	0.38	DS[3,2,1]	0.24	0.32	0.41
BD[2,3]	0.31	0.36	0.41	DS[3,2,2]	0.22	0.30	0.39
BD[3,1]	0.26	0.31	0.36	DS[3,2,3]	0.29	0.38	0.47
BD[3,2]	0.31	0.35	0.41	DS[3,3,1]	0.26	0.34	0.44
BD[3,3]	0.29	0.34	0.39	DS[3,3,2]	0.25	0.32	0.41
DS[1,1,1]	0.25	0.34	0.43	DS[3,3,3]	0.20	0.28	0.37
DS[1,1,2]	0.22	0.30	0.39	R[1]	0.31	0.34	0.37
DS[1,1,3]	0.27	0.36	0.45	R[2]	0.32	0.34	0.37
DS[1,2,1]	0.20	0.27	0.35	R[3]	0.29	0.31	0.34
DS[1,2,2]	0.30	0.38	0.46	W[1]	0.28	0.30	0.33
DS[1,2,3]	0.27	0.35	0.43	W[2]	0.33	0.36	0.39
DS[1,3,1]	0.19	0.27	0.36	W[3]	0.31	0.34	0.37
DS[1,3,2]	0.25	0.34	0.43				

· 두 번째 모의실험으로 각 등급 발생 확률은 p=[0.22 0.68 0.1]로 가정함. 즉 2등급이 부여될 확률을 크게 하여 각 Node별로 등급을 1,000개 모의발생 시켰으며 추정되는 조건부 확률이 2등급을 포함하는 하는 경우 다른 조합의 경우보다 확률이 크게 추정되고 있으며 DS[2,2,2]의 경우는 정확히 0.68로 추정이 되고 있음을 확인할 수 있음. 즉 주어진 등급 발생 확률을 반영하여 효과적으로 확률 Matrix가 추정되고 있으며 댐 위험도 분석에 기초자료로서 활용이 가능할 것으로 판단됨.

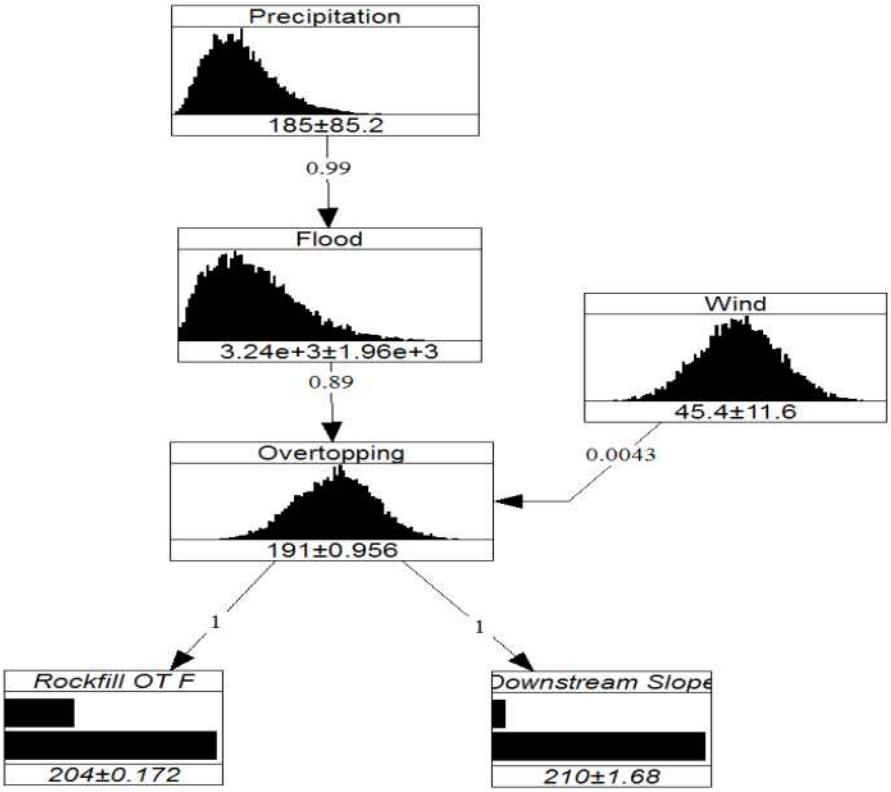
<표 3-56> 정성적 자료로부터 Bayesian Network Node별 조건부 확률 추정 결과

Node	2.50%	Median	97.50%	Node	2.50%	Median	97.50%
AD[1,1]	0.16	0.21	0.26	DS[1,3,2]	0.09	0.21	0.37
AD[1,2]	0.62	0.68	0.74	DS[2,1,1]	0.12	0.18	0.25
AD[1,3]	0.07	0.11	0.15	DS[2,1,2]	0.71	0.79	0.85
AD[2,1]	0.20	0.23	0.26	DS[2,1,3]	0.01	0.03	0.07
AD[2,2]	0.64	0.68	0.71	DS[2,2,1]	0.18	0.22	0.26
AD[2,3]	0.07	0.09	0.12	DS[2,2,2]	0.64	0.68	0.72
AD[3,1]	0.15	0.22	0.31	DS[2,2,3]	0.08	0.10	0.13
AD[3,2]	0.52	0.62	0.71	DS[2,3,1]	0.14	0.22	0.33
AD[3,3]	0.09	0.15	0.23	DS[2,3,2]	0.53	0.65	0.75
BD[1,1]	0.18	0.23	0.29	DS[2,3,3]	0.06	0.12	0.21
BD[1,2]	0.61	0.67	0.73	DS[3,1,1]	0.08	0.21	0.40
BD[1,3]	0.06	0.09	0.14	DS[3,1,2]	0.45	0.66	0.83
BD[2,1]	0.23	0.26	0.30	DS[3,1,3]	0.03	0.12	0.29
BD[2,2]	0.61	0.64	0.68	DS[3,2,1]	0.20	0.30	0.42
BD[2,3]	0.07	0.09	0.12	DS[3,2,2]	0.47	0.59	0.71
BD[3,1]	0.16	0.23	0.32	DS[3,2,3]	0.04	0.10	0.19
BD[3,2]	0.59	0.69	0.77	DS[3,3,1]	0.14	0.39	0.70
BD[3,3]	0.03	0.08	0.14	DS[3,3,2]	0.14	0.39	0.70
DS[1,1,1]	0.23	0.35	0.49	DS[3,3,3]	0.03	0.18	0.48
DS[1,1,2]	0.39	0.53	0.66	R[1]	0.20	0.22	0.25
DS[1,1,3]	0.04	0.11	0.22	R[2]	0.66	0.69	0.72
DS[1,2,1]	0.14	0.20	0.27	R[3]	0.07	0.09	0.11
DS[1,2,2]	0.59	0.67	0.74	W[1]	0.18	0.21	0.23
DS[1,2,3]	0.08	0.13	0.19	W[2]	0.66	0.69	0.72
DS[1,3,1]	0.19	0.33	0.50	W[3]	0.09	0.11	0.13
DS[1,3,3]	0.29	0.45	0.62				

· 따라서 정성적인 위험도 등급이 다양한 자료로부터 구축된다면 정량적 위험도 해석을 위한 각 Node별 조건부 확률 Matrix구축이 가능하며 다양한 취약성 평가 문제 적용이 가능할 것으로 판단됨

나. Bayesian Network 기반 댐 위험도 해석 모델

· 본 연구에서는 Open Source기반의 Bayesian Network 모형을 활용하여 댐 및 저수지 위험도 분석 절차를 수립하였음. 본 모형의 입력인자는 노드별로 파괴인자의 확률분포형으로 입력되며, 각 노드별 의존도를 산정하여 모형을 구성하게 됨. 이때 각 노드별 의존도는 Copula 함수를 통해 도출되는 Copula 계수 C가 입력됨. 댐 및 저수지 위험도 해석 프로그램으로 구축한 수문학적 댐 위험도 해석 모형은 <그림 3-225>와 같음.



<그림 3-225> 댐 위험도 해석을 위한 Bayesian Network 모형 개념

(1) Copula 함수를 활용한 각 노드별 조건부 확률 산정

· 본 연구에서는 앞서 언급하였듯이 Bayesian Network 모형의 노드간의 의존도를 산정하기 위해 Copula 함수를 이용하였음. 일반적으로 Bayesian Network 모형 구축시 각 노드들은 조건부확률(joint probability table)을 이용하여 노드간의 노드와 변량을 이어주는 가중치의 곱으로 확률이 계산괴어 지는데, 본 모형 상에서는 각 노드간의 의존도 즉, 가중치를 산정하여 입력하면 각 노드간의 확률계산이 가능하게 됨. 이러한 이유로 본 연구에서는 Copula 함수를 도입하여 각 노드간의 의존도를 산정하였으며, Copula 함수의 상세한 내용은 아래와 같음.

· 두 개 이상의 변량간의 관계성을 파악하는데 있어 일반적으로 상관계수를 활용하지만 변량간의 분포를 다루는 경우에는 Copula 함수를 사용하여 그 의존성 구조를 파악하는 것이 타당하다고 알려진 바 있음. 즉, Copula 함수는 수자원 분야에서 다양한 연구가 수행되고 있음.

· Copula 함수는 임의의 확률변수 X, Y에 대한 결합누가분포확률 $F_{X,Y}(x,y)$의 주변 누가분포함수 $F_X(x)$, $F_Y(y)$가 존재하고 서로 독립적인 경우 Copula 함수 C가 존재하게 됨. 여기서, 주변 누가분포함수 $F_X(x),F_Y(y)$는 확률변수 X, Y의 확률분포함수로부터 결정되며, 주변 누가분포함수 $F_X(x),F_Y(y)$의 결합 누가분포함수는 Copula 함수를 통해 식 125와 같이 정의됨. 예를 들어, <그림 3-225>에서 Overtopping에 영향을 미치는 변량은 Earthquake(x)와 Rainfall rate(y)임. 두 변량을 통해 산정된 Copula 계수 C는 Overtopping에 영향을 미치는 가중치(weighting factor)로 간주됨.

$$F_{X,Y}(x,y) = C[F_X(x), F_Y(y)] \quad (125)$$

· 이변량 Copula 함수의 Copula 계수를 산정하는 확률분포형은 <표 3-57>과 같음.

<표 3-57> Copula함수 분포 (Nelsen, 2006)

Name	Bivariate Copula Function $C_\theta(u,v)$
Gaussian	$C^G(u_1,...,u_n;\sum) = \frac{\partial}{\partial u} C^G(u_1,...,u_n;\sum) = \frac{1}{\lvert\sum\rvert^{\frac{1}{2}}} exp(-\frac{1}{2} y^T(\sum^{-1} - I)y)$
Gumbel	$\exp(-((-\log(u))^\theta + (-\log(v))^\theta)^{1/\theta})$
Student-t	$C(u;v,\sum) = \frac{\Gamma((v+d)/2)[\Gamma(v/2)]^{d-1}}{[\Gamma((v+1)/2]^{\frac{1}{2}}} [\prod_{i=1}^{d}(1+y_i^2/v)^{(v+1)/2}](1+y^T\sum^{-1} y/v)^{-(v+d)/2}$
Frank	$-\frac{1}{\theta} ln(1+\frac{(e^{-\theta u}-1)(e^{-\theta v}-1}{e^{-\theta}-1})$
Clayton	$[\max(u^{-\theta}+v^{-\theta}-1,0)]^{-1/\theta}$

(2) Bayesian Network 모형 적용

· 본 연구에서는 BN을 구축하고 불확실성을 고려한 댐 위험도 해석을 수행하였으며, 본 연구에서 수행한 방법은 다음과 같이 요약할 수 있음.

(가) 실증댐에 영향을 미치는 파괴인자를 도출하고 이를 활용하여 댐 위험도 해석을 위한 BN을 구축하였음. 앞서 언급하였듯이 Open Source기반의 댐 및 저수지 위험도 모형을 활용하였으며, 각 노드에 사용된 변량에 맞는 확률분포형을 부여하여 댐 위험도 해석 BN을 구축하였음.

(나) 구축된 BN의 노드간 연결시 Copula 함수를 활용하여 노드별 가중치를 부여하였다. 즉, 노드간 가중치를 부여하여 댐 파괴에 미치는 영향력을 확인 할 수 있었으며, 임계값(threshold)을 부여하여 댐 파괴에 영향을 미치고 있는 요인들을 파악하였음.

(다) 임계값 부여함으로써 산정된 변량별 불확실성을 정량화 하였으며, 최종적으로 이러한 결과를 기반으로 댐 보수·보강시 우선순위를 지원할 수 있을 것으로 사료됨.

(3) 수문학적 파괴인자 모의

· 위험도 해석을 위해서는 각 노드의 변량은 확률분포형으로 입력됨. 즉, 각 자료 특성에 맞는 확률분포형을 가정하고, 각 매개변수를 부여하면 <그림 3-225>와 같은 모습으로 확인 할 수 있음. 먼저 강우량의 경우 극치분포에 널리 이용되는 GEV 분포를 대표 확률분포형으로 선택하여 강우량을 모의발생 하였으며, GEV 분포의 확률밀도

함수와 누가확률밀도 함수는 다음 식 126, 127과 같음. 여기서 μ는 위치매개변수(location parameter), σ는 규모매개변수(scale parameter), ξ는 형상매개변수(shape parameter)이다. GEV 분포의 매개변수 추정시 최우도법(maximum likelihood, ML)을 활용하였음.

$$f(x;,\mu,\sigma,\xi) = \frac{1}{\sigma}\left[1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{(-1/\xi)-1} \quad (126)$$

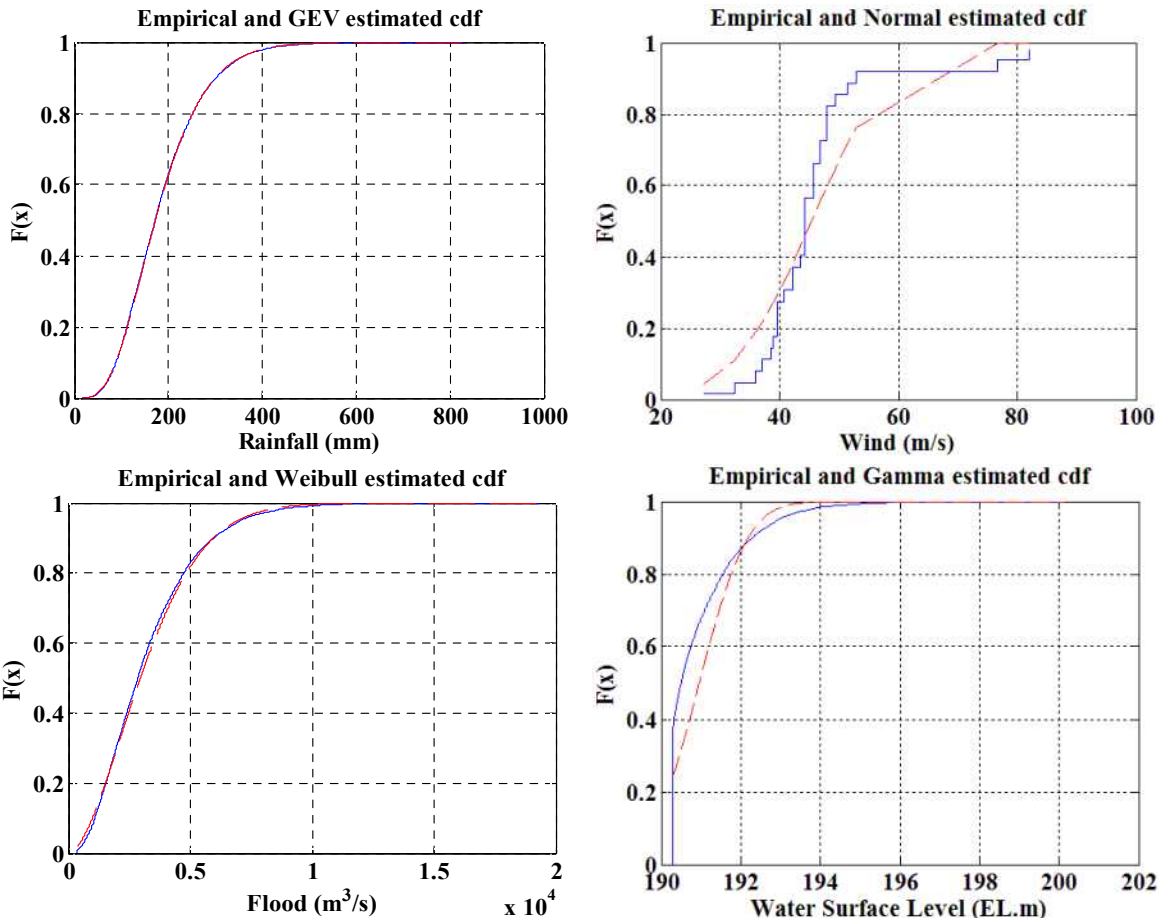
$$F(x;,\mu,\sigma,\xi) = \exp\left[-\left[1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-1/\xi}\right]\right] \quad (127)$$

· Bayesian Network 노드 중 확률홍수량의 경우 앞서 개발한 Bayesian HEC-1 모형을 활용하였음. 앞서 언급하였듯이 Bayesian HEC-1은 기존 HEC-1 모형이 지니고 있는 단점을 극복하기 위해 Bayesian 기법을 도입함으로써 불확실성이 고려된 매개변수 산정 및 홍수빈도곡선을 산정할 수 있는 모형임. 따라서 앞서 GEV 분포로 도출된 확률강우량은 Bayesian HEC-1 모형의 입력자료로 활용되며, Bayesian HEC-1을 통해 도출된 확률홍수량은 Bayesian Network 노드 변량으로 입력됨.

· 각 하중에 대해서 확률분포형을 가정하였으며 각 확률분포형 확률지에 도시한 결과는 <그림 3-226>과 같음. 강우, 홍수량, 댐 위험 수위, 풍속의 경우 모두 육안으로 살펴보았을 때 가정된 분포와 유사성을 확인할 수 있음. 따라서 이들 확률분포를 기준으로 각 변량에 대해서 Bayesian Network 노드를 구성하였으며, <표 3-58>은 수문학적 변량의 기본 통계치를 산정한 결과임.

<표 3-58> 변량들의 통계치 및 Quantile 값

Variable	Mean	Standard deviation	5th percentile	50th percentile	95th percentile
Rainfall	185.581	85.5805	70.4772	172.605	344.995
Wind	45.3484	11.719	26.0724	45.3484	64.6244
flood	3262.54	1968.52	641.654	2950.6	6956.77
initial WSL	190.958	0.9429	189.407	190.958	192.509



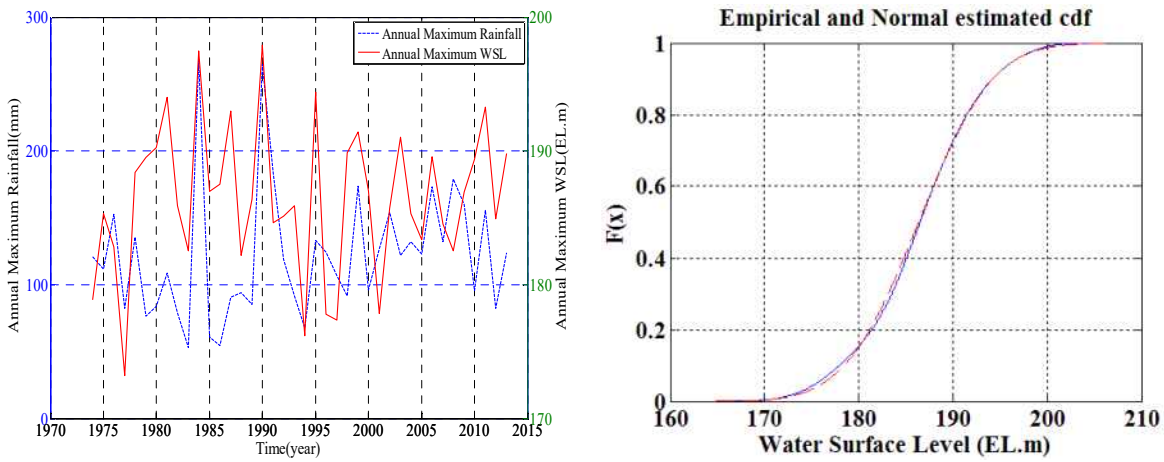
<그림 3-226> 수문학적 파괴인자의 각 확률분포형 도시 결과

(4) Copula 함수를 활용한 댐 초기수위 모의

· 기존 댐 운영모의 분석시 초기수위는 상시만수위 혹은 홍수기 제한수위로 가정하여 댐 위험도 분석을 수행하였음. 즉, PMF(probability maximum flood)를 댐의 유입량으로 가정하고, 댐 초기수위는 고정하여 댐 운영룰에 의해 산정하는 것임. 그러나 이러한 보수적인 가정에 의한 연구는 최근 변동하는 기산변동성 및 기후변화의 영향을 고려하지 못하며, 특히 실제 상황을 고려하지 못한다는 단점이 존재함.

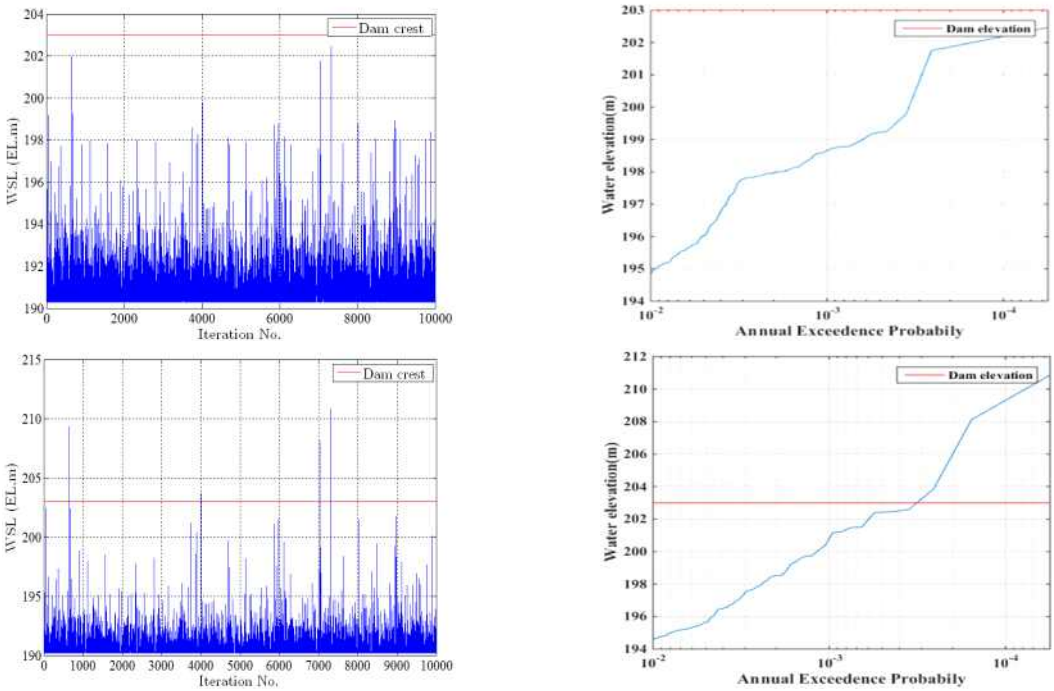
· 즉, 댐 수위는 강우량 및 댐 운영룰 등에 의해 수시로 변동하는 값이지만 기존 연구에서는 댐 초기수위의 변동성을 고려하지 않아 현실성이 다소 결여되어 있음. 댐 위험도 해석 및 월류확률을 추정하는데 있어서 초기수위의 민감도는 매우 크다 할 수 있음. 이에 본 연구에서는 Copula 함수를 이용하여 사전강수특성에 따른 초기수위를 결정하였으며, HEC-5 모형을 활용하여 댐 월류 확률을 산정하였음. Copula 함수에 대한 자세한 설명은 앞서 언급하였으므로 생략하도록 하겠음.

· 본 연구에서의 댐 초기수위는 전날 강우 특성에 따라 민감하다는 가정 하에 연구를 진행하였음. 즉, 연구 대상 댐의 연 최대 수위를 추출하고, 강우량의 경우 그 전날의 값을 추출하였음. 이러한 이유로 앞서 언급하였듯이 댐 초기수위는 항상 변동하는 값이며, 전날 강우 특성에 따라 얼마든지 변할 수 있는 값임. 따라서 위와 같은 방법으로 추출된 값과 Copula 함수를 이용하여 초기수위를 모의한 결과를 <그림 3-227>에 도시하였음.



<그림 3-228> Copula 함수를 활용한 댐 초기수위 모의 결과

· 그 결과 댐의 정상운영 상태일 때 기존에 이용되고 있는 홍수기제한수위로 고정한 위험도 해석과 Copula 함수를 통해 산정된 댐 초기수위의 변동성을 고려하여 비교하였음. 홍수기제한수위로 가정한 댐 운영 모의시 월류사상은 발생하지 않았지만, 초기수위 변동성을 고려한 결과 댐 월류 확률이 4.00E-04로 증가하고 있는 것을 확인 할 수 있었음. 즉, 동일 유입량일지라도 댐 초기수위에 따라 댐 월류 확률이 상이한 결과를 도출하고 있으므로, 댐 위험도 해석시 초기수위의 변동성을 보다 효과적으로 고려한 해석이 필요한 것으로 사료됨. 초기수위 변화에 따른 댐 월류 확률을 산정한 결과는 <그림 3-228>에 도시하였음.

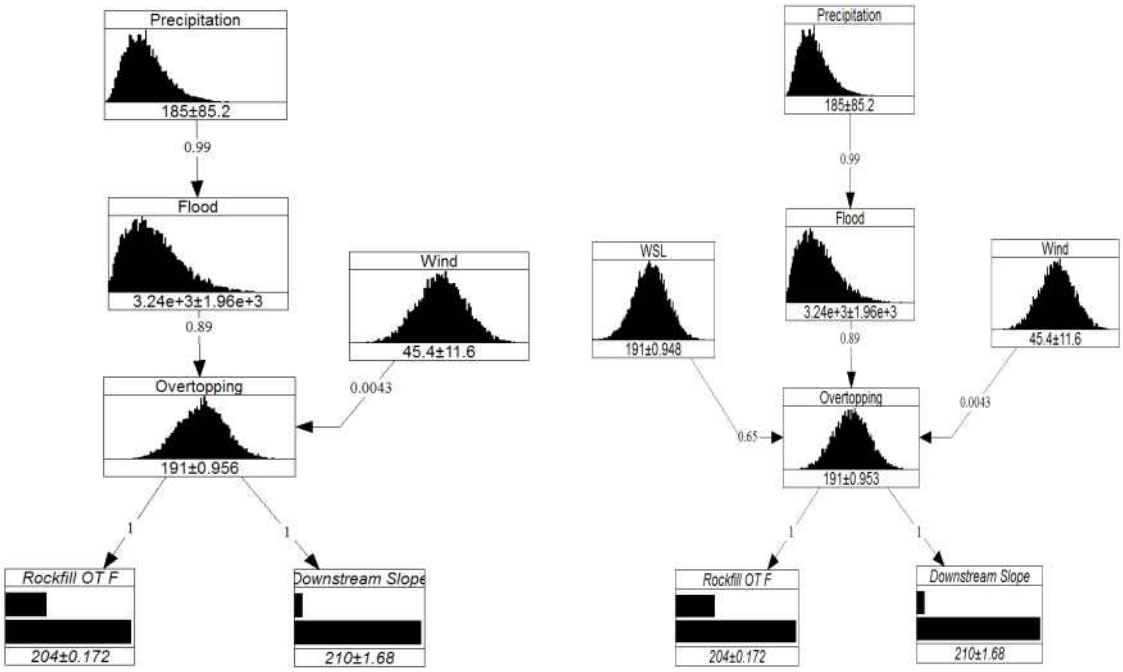


<그림 3-229> 기존 댐 운영룰 및 수위변동성을 고려한 댐 운영 모의 비교 결과

(5) Bayesian Network를 활용한 댐 위험도 해석 결과

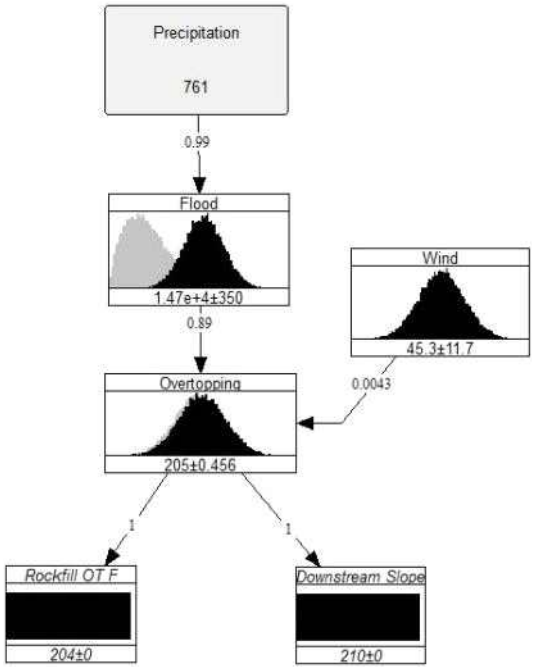
· 본 연구에서는 Bayesian Network 모형 구축시 기존 댐 위험도 해석 수행방법과 본 연구에서 제안하는 댐 위험도 해석 두 가지 모형을 비교하였음. 다시 말해서, 기존에 일반적으로 수행되고 있는 댐 위험도 해석 기법시 초기수위는 상시만수위 혹은 홍수기 제한수위로 가정하여 댐 파괴여부를 판단하였음.

· 그러나 이러한 해석 방법은 댐의 현재 상태를 효과적으로 재현하지 못하고, 실제 댐 현상에 대해 분석하기에는 무리가 따른다고 사료됨. 이러한 이유로 본 연구에서는 댐 초기수위의 변동을 고려한 Bayesian Network 모형을 구축하여 기존 연구와 비교 결과를 제시하였으며, 이렇게 도시한 결과는 <그림 3-229>에 도시하였음.



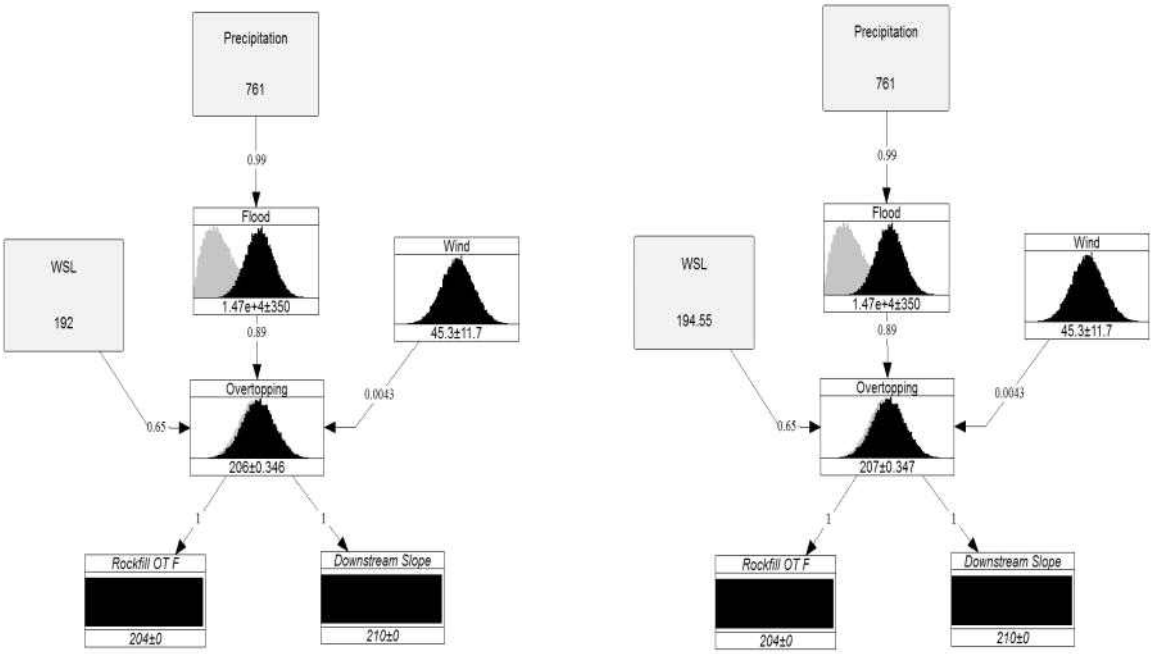
<그림 3-230> 기존 댐 위험도 해석(좌) 및 초기수위를 고려한 댐 위험도 해석 모형(우)

· 먼저 극한 강우사상이 발생하였을 때로 가정하여 댐 위험도 분석을 수행하였음. 즉, 본 연구대상 유역에서 모의 발생된 강우량 중 가장 큰 강우 761mm의 임계값을 부여하여 Bayesian Network 모델 분석을 수행하였음. 그 결과 월류 수위는 205m로 도출되었으며, 이는 연구대상 댐을 월류하는 것으로 도출되었음. 또한 강우량의 변화에 따른 홍수량의 증가로 인해 댐 월류 사상에 큰 영향을 끼치고 있으며, 이는 댐 위험도 해석시 수문학적 변량간의 의존관계를 효과적으로 산정한 결과라 사료됨.



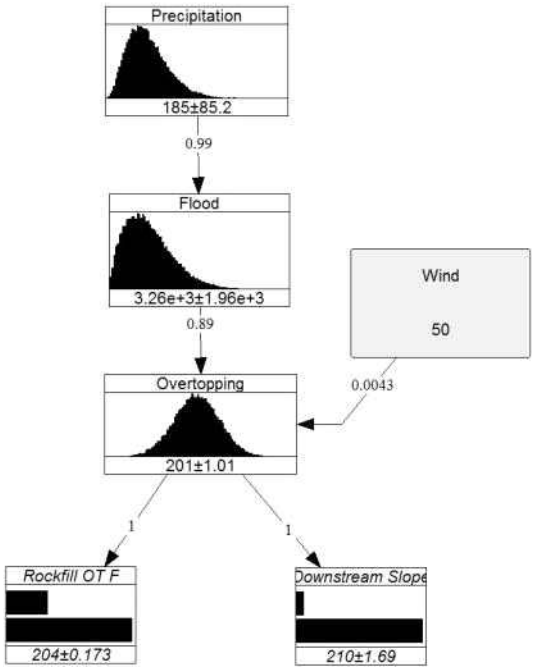
<그림 3-231> 극한강우량을 부여한
Bayesian Network 모의 결과

· 그러나 앞서 언급하였듯이 기존 댐 위험도 해석시 초기수위의 변동성을 고려하지 못하는 연구가 진행되어 왔음. 이에 본 연구에서는 <그림 3-231(우)>와 같이 도시한 Bayesian Network 모형에서 초기수위를 변동하여 결과를 도출하였음. 그 결과 강우량만을 임계값을 부여하여 산정한 결과보다 적게는 1m에서 많게는 2m 높게 월류하는 높이가 달라지는 것을 확인 할 수 있었음.



<그림 3-232> 극한 강우량 및 초기수위를 고려한 기존 댐 위험도 해석 모형과의 결과 비교

· <그림 3-232>에 도시한 결과와 같이 <그림 3-231>과 동일 조건이지만 초기수위의 변화에 따라 월류확률이 변하고 있는 것을 확인 할 수 있음. 이러한 결과는 본 연구의 목적인 초기수위 변동에 따른 댐 월류확률의 변화를 잘 묘사하고 있는 것으로 판단되며, 동시에 확률변화에 따른 불확실성 범위를 정량화 할 수 있는 장점을 확인할 수 있었음. 마지막으로 수문학적 노드 중 바람에 대한 영향은 미비하였음. 이는 <그림 3-232>에 도시하였음.



<그림 3-233> 바람을 고려한 댐
위험도 해석 모형 결과

제 4 장 연구개발목표 달성도

1. 연구개발 목표의 달성도

가. 연구개발수행 진도표

(1) 1차년도

구 분 / 개발내용	연구개발기간 1	2	3	4	5	6	7	8	진도 (%)
기존 댐 안정성 평가 방법 검토	━	━	━	━					100
구조물의 구조적·수문기상학적·수리학적 유역 불확실성 요소 도출			━	━	━	━	━		100
정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발					━	━	━		100
불확실성 요소를 고려한 위험도 평가 실행함수 개발						━	━	━	100
연구결과 종합평가								━	100

(2) 2차년도

구 분 / 개발내용	연 구 개 발 기 간 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	진도 (%)
기후변동성을 고려한 비정상성기반 극치수문변량 모의기법 개발	━	━	━	━	━	━	━	━	━	━	━		100
불확실성 분석을 위한 Bayesian 기반 강우-유출 및 댐 운영 통합 모델 개발	━	━	━	━	━	━	━	━	━	━	━		100
댐 파괴 모델 및 하류 피해 해석 기술 개발	━	━	━	━	━	━	━	━	━	━	━		100
연구결과 종합평가											━		100

(3) 3차년도

구 분 / 개발내용	연구개발기간 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	진도 (%)
홍수로 인한 위험요소를 Dynamic Bayesian Network 모형으로 구축	———	———	———	———	———								100
실증 댐 및 저수지의 홍수로 인한 위험도 해석 실시				———	———	———	———						100
모형의 적합성 실험 및 실증					———	———	———	———					100
풍파로 인한 위험요소를 Dynamic Bayesian Network 모형으로 구축	———	———	———	———	———								100
실증 댐 및 저수지의 풍파로 인한 위험도 해석 실시				———	———	———	———						100
모형의 적합성 실험 및 실증					———	———	———	———					100
홍수/풍파를 고려할 수 있는 해석 모듈 개발 및 적용							———	———	———	———			100
실증 댐 및 저수지의 풍파고 인한 위험도 해석 실시							———	———	———	———			100
모형의 적합성 실험 및 실증							———	———	———	———			100
알고리즘 개발		———	———	———	———	———	———						100
기초해석 기술개발				———	———	———	———	———					100
프로그램 개발								———	———	———	———	———	100
주요 파괴형태별 댐 붕괴 해석 모델 적용			———	———	———	———	———						100
주요 파괴모드별 댐 하류 피해 분석 모델 적용				———	———	———	———	———	———				100
위험도 저감 계획 평가를 위한 경제성 평가 모델 개발 및 적용							———	———	———	———	———	———	100
연차보고서												———	100

. . . . . 당초계획

———————실 적

나. 연구개발 목표의 달성도

(1) 1차년도

구분	세부연구목표	달성도 (%)	달성내용
1	■기존 댐 안정성 평가 방법 검토	100	■ 국내외 논문, 보고서 및 학술발표회 참가를 통하여 최근 댐 안정성 평가 방법의 경향을 파악하였으며 정성적인 방법, 정량적인 방법으로 구분하여 방법론을 조사 검토하였음 ■ 최종적으로 기존 해석 방법의 문제점을 파악하고 본 연구개발과제의 방향 설정
2	■위험도 해석 시 영향인자 발굴 및 불확실성 요소 도출	100	■ 본 연구를 통해서 제안하고자 하는 Bayesian Network기반 댐 위험도 해석 모형 구축 시 입력 인자를 결정하기 위해서 국내외 사례분석, 국내외 주요 댐의 피해이력조사 등을 실시 ■ 국내 댐 및 저수지의 형식 및 제원 등을 조사 평가하여 DB로 작성하였음 ■ 기존 댐 파괴 사례 및 치수증대 사례 등을 조사 정리하였음 ■ 최종적으로 댐 위험도 분석을 위한 주요 고려 대상 인자를 설정하였음
3	■불확실성 요소를 고려한 위험도 평가 실행함수 개발 및 댐 위험도 해석을 위한 위험도 해석 방법을 정립	100	■ 본 연구에서는 도출된 불확실성 요소를 고려한 Bayesian Network 기반 댐 위험도 해석 모형을 개발하기 위해서 주요 파괴 경로 및 원인 인자와 결과간의 상관성을 기반으로 위험도 Network 개발을 수행하였음 ■ 모의자료를 통하여 모형의 적합성을 평가하였으며 기존 해석 모형에 비해 불확실성 정량화, 인자간의 조건부 확률을 고려한 위험도 해석이 가능하였음 ■ 기존 ETA 분석에서는 불확실성 인자간의 조건부확률을 효과적으로 고려하지 못하는 단점이 존재하나 본 연구에서 개발한 Bayesian Network기반의 위험도 해석 모형은 기존 자료의 정보를 최대한 활용하면서 인자간의 상관성을 확률 매트릭스로 제시할 수 있는 장점을 가짐
4	■정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발 및 수문모형의 불확실성 분석 기법 개발	100	■ 댐 위험도 해석 시 다양한 시나리오 생성을 위해서 요구되는 극치수문변량 모의기법에 대한 연구를 수행하였음. ■ 본 연구에서는 Mixture분포 형태의 확률밀도함수를 활용하여 극치값을 효과적으로 재현할 수 있는 알고리

			즘을 개발하였으며 기존 모의기법에 비해서 15%이상 정확도를 향상할 수 있었음 ■ 수문학적 댐 위험도 분석에 있어서 강우-유출분석은 매우 중요한 부분으로서 본 연구에서는 기존 HEC-1 모형과 불확실성 분석이 가능한 Bayesian 모형의 연계운영의 가능성을 평가하기 위해서 1차적으로 Protype형태의 Bayesian HEC-1 모형을 구축하여 결과를 도출하였음

(2) 2차년도

구분	세부연구목표	달성도 (%)	달성내용
1	■기후변동성을 고려한 비정상성 기반 극치수문변량 모의기법 개발	100	■ 1차년도에 정상성 기반 극치수문변량 모의를 위해 특화된 기법을 근간으로 기후변동성이 고려 될 수 있는 비정상성 모형으로 확장이 가능하도록 논문 및 보고서를 참조하여 이론적 연구 및 조사 검토. ■ 비정상성(기후변화)를 고려한 Downscaling 모델 개발 수행 및 유역상관성을 고려할 수 있으며 강우의 Sampling 오차등을 포함하여 불확실성 분석이 가능한 형태로 모형 구축. ■ 최종적으로 모형의 적합성 평가를 위하여 국내 유역에 대해서 모형 적용 및 검증을 실시하였음. 최종적으로 다양한 강우모의기법을 프로그램화 하여 국내외 여러 지역에 적용할 수 있도록 하였음.
2	■불확실성 분석을 위한 Bayesian 기반 강우-유출 및 댐 운영 통합 개발	100	■ Bayesian Markov Chain Monte Carlo 모의방법을 통하여 강우-유출 모형의 여러 매개변수의 최적 해를 구하고, 이에 따른 매개변수의 사후분포를 추정. ■ 기존 HEC-1 모형에서 사용되는 최적화 기법은 다수의 유역을 대상으로 매개변수 최적화 수행 시에 유역이 여러 개인 경우, 매개변수가 발산되는 문제점이 있어 유역을 분리하여 매개변수 최적화를 수행하는 등의 적용상의 문제점이 있었지만 본 연구에서는 다수의 유역인 경우에도 해석이 가능한 모형을 개발하였음. ■ 최종적으로 매개변수의 최적화와 불확실성 추정이 동시에 가능한 모형을 개발하여 강우-유출 모의과정에서 나타나는 모형, 매개변수, 입력 자료 등의 불확실성을 고려한 해석이 가능하도록 개발하였음. 최종적으로 Bayesian HEC-1 & HEC-5를 프로그램으로 개발하여 국내외 여러 지역에 적용될 수 있도록 하였음.
3	■댐 파괴 모델 및 하류 피해해석 기술 개발	100	■ 본 연구에서는 소양강댐 붕괴에 따른 유출수문곡선을 유도하기 위해서 기존의 보고서 자료를 참고하여 붕괴지속시간, 붕괴부 평균폭, 붕괴부 측벽면 경사의 변화

			등 다양한 모의조건으로부터 대표적인 경우를 설정하여 발생되는 유량 수문곡선을 도출하여 이러한 조건이 붕괴파 형성에 미치는 영향에 대한 분석을 실시하였음. ■ 붕괴 시나리오의 구성은 제체 유형별 붕괴부 폭, 붕괴부 측벽면 경사 및 붕괴지속시간 관련 기준 자료를 참고하여 붕괴부를 구성하였으며, 붕괴부 평균 폭의 변화, 붕괴지속시간의 변화 들을 고려하여 대표적인 단일 시나리오를 작성. ■ 최종적으로 홍수피해액 산정을 위해 수리학적 모델인 DAMBRK 모형을 적용하여 댐 붕괴에 따른 하류부 홍수범람구역을 홍수범람도를 작성함으로써 예측한 후 이에 해당하는 직접피해액 항목인 인명 피해액, 주거지 피해액, 농경지 피해액, 농작물 피해액, 공공시설물 피해액, 기타 피해액의 6가지로 분류하여 산정.

(3) 3차년도

구분	세부연구목표	달성도 (%)	달성내용
1	■홍수 위험도 분서을 위한 Bayesian Network 모형 개발 및 적용 풍파 위험도 분서을 위한 Bayesian Network 모형 개발 및 적용	100	■국내외 논문, 보고서 및 학술발표회 참가를 통해 최근 댐 위험도 평가 경향을 파악하였으며, 댐 위험도 방법론을 조사 검토하였음. ■Bayesian Network 연구의 경우 토목분야를 제외한 농업, 통신 분야 등에서 널리 이용되고 있음. ■이에 본 연구에서는 댐 위험도 해석시 새로운 기법의 연구를 수행하기 위해 Bayesian Network 기법을 도입하여 댐 위험도 해석 모형을 개발하였음. ■Bayesian Network 기법의 파괴인자의 경우 1,2차년도에 도출된 수문학적 파괴인자를 채택하여 연구를 진행하였음. ■각 수문학적 변량간의 조건부확률(conditional probability table, CPT)는 Copula 함수를 활용하여 산정하였음. ■이러한 새로운 기법의 도입으로 각 수문학적 변량들의 상호 관계가 댐 위험도 해석에 영향을 미치는 것을 정량적으로 산정하였으며, 기존 댐 위험도 해석과의 비교를 통해 결과를 제시하였음. ■최종적으로 본 연구에서 개발한 Bayesian Network 기법 결과를 이용하면 실무자가 댐 보수·보강 시 우선순위 결정을 지원할 수 있을 것으로 판단됨.
2	■홍수/풍파를 동시에 고려한 Bayesian	100	■기존 댐 위험도 해석 시 확률강우량 산정, 강우-유출 모형, 댐 운영 모의 순으로 연구가 진행되고 있음.

	Network 모형 개발 및 적용		■그러나 기존 댐 위험도 해석시 확률홍수량을 산정한 후 월류확률을 산정하였지만, 풍파에 대한 고려는 미비한 실정이였음. ■이러한 이유로 댐 월류확률 산정시 풍파에 대한 영향을 고려한 결과, 풍파만을 고려하였을 때에는 댐 파괴확률에 영향을 끼치지 않은 것으로 산정되었지만, 홍수와 풍파를 동시에 고려한 결과 기존 댐 위험도 해석시 월류 확률보다 댐 파괴확률이 높아지는 것을 확인 할 수 있었음. ■따라서 이것과 관련한 댐 위험도 해석의 수문학적 파괴인자에 대한 적절성을 논물을 통해 입증하였으며, 이를 Bayesian Network 모형으로 확장하여 댐 위험도 해석 모형을 산정하였음.
3	■댐 주요 파괴 모드별 하류 피해 해석 및 경제성 평가 모델 적용	100	■댐 위험도 해석 후 하류부의 침수범람도를 작성하여 댐 하류부 피해액 산정 모형을 개발하였음. ■댐 하류부 피해액에는 다차원법을 도입하여 홍수피해액을 산정하였으며, 인명피해액 산정 기법을 도입하여 침수심별 인명피해를 정량적으로 산정하였음. ■최종적으로 GIS 기반 홍수피해액 산정 기법 프로그램을 개발하였으며, 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 GUI 형식으로 개발하였음.

2. 연구결과의 관련분야 기여도

· 댐 안정성을 저해하는 요인은 다수가 존재하며 이들 인자 간에는 서로 상관성을 가지고 영향을 주고 있으나 기존 댐 위험도 해석 절차에서는 이러한 점을 간과한 해석이 일반적으로 적용되고 있음. 본 연구를 통해서 제시되는 Bayesian Network 댐 위험도 해석 모형은 기존 ETA, FTA 방법에 비해 다양한 시나리오 개발이 가능하며 추정되는 위험도의 신뢰성을 개선할 수 있는 방법으로 국외에서도 적용된 사례가 매우 제한적인 최신 기법으로서 국내외 수공구조물 위험도 해석을 위한 기본 모형으로 활용이 가능할 것으로 판단됨.

· 수문시스템에 불확실성을 평가하는데 가장 기본적인 사항은 효과적으로 수문변량을 모의하는 것이며 특히 강수량의 모의 능력은 전체 시스템을 해석하는데 절대적인 영향력을 가짐. 이러한 점에서 국내외적으로 강수량을 모의하는 기법의 개발이 다수 이루어지고 있으나 현재에도 극치강수량을 모의하는데 한계를 가지고 있음. 즉, 강수의 다양한 통계적 특성을 재현하는데 한계가 존재하기 때문에 강수 모의시 극치값이 과소 추정되는 문제점이 발생하며 기존의 모형이 댐 위험도 분석을 위해 사용된다면 전체 해석결과에 신뢰성을 저하시키는 원인으로 작용 하게 됨. 1차년도에서는 불연속 확률밀도함수를 이용한 수문변량 모의기법을 개발하였으며 국내 강수자료에 대해서 적용한 결과 기존 모형에 비해 상당히 개선된 효과를 확인할 수 있었음. 댐 위험도 해석 시에 강수 모의기법으로 활용히 가능하며, 이 밖에도 수문변동성 평가를 위한 강수 모의발생 기법으로 활용성을 확장할 수 있을 것으로 판단됨.

· 다양한 강우량 모의기법을 위해 국내외 기후변화 시나리오 분석 Downscaling 기법 조사하여 첫째, Hierarchical Bayesian Model 기후변화 시나리오 불확실성 분석 및 최적 MME 시나리오 생산방법의 알고리즘 및 원형(prototype) 모형을 개발하였음. 둘째, 기후변화 시나리오를 입력자료로 활용하여 기후변화 영향을 유역단위에서 상세하게 평가할 수 있는 다변량 비정상성 Downscaling 기법을 개발하였음. 기개발된 HBM 기반의 최적 기후변화 MME 시나리오 생산기술 및 시공간적 Downscaling 기법과 연계한 국내외 댐 위험도 분석 사례는 전무한 상태임. 이러한 점에서 기존 댐 위험도 해석 결과에 신뢰성을 크게 향상 시킬 수 있을 것으로 판단됨. 이밖에도 기후변화에 따른 수문분야 취약성 평가에 다양한 목적으로 활용이 가능한 모형으로 개발이 이루어졌음.

· 또한 본 연구를 통해 개발된 극치 확률분포 기반의 다지점 강수 재현 기법은 기존 강수량 모의 기법에 비해서 극치확률 분포 매개변수의 불확실성을 고려할 수 있는 알고리즘을 개발함과 동시에 유역단위에 극치강수량 패턴을 재현할 수 있는 기법을 개발하고 프로그램으로 개발하였음. 자료의 Sampling 오차 및 매개변수의 불확실성을 고려하고 있는 등 댕 위험도 해석을 위한 수문모의기법으로서 국내외 유역에 적용이 가능할 것으로 판단됨.

· 댐 위험도 분석을 위해서 기본적으로 요구된 사항은 수문해석시 불확실성 분석이 동반되어야 한다는 점이며 이러한 점에서 본 연구에서는 Bayesian 통계기법을 기존 HEC-1 모형과 연계할 수 있는 알고리즘 및 원형 모형을 개발하여 모형의 우수성을 입증하였음. 다수의 댐 운영 모의가 가능하도록 Matlab 기반의 HEC-5 댐

모의 모형을 개발하였고 Bayesian HEC-1 모형과 연계하여 실질적인 불확실성 분석이 가능하도록 프로그램을 개발하였음.

- 이를 국내 유역에 대해서 적용하여 우수한 결과를 입증하였으며 Bayesian HEC-1 모형의 알고리즘 개선 및 GUI 형태로 확장하여 댐 위험도 해석을 위한 강우-유출 모형으로 활용하였음. 이밖에도 수공학 분야에서 보다 신뢰성 있는 수문해석 모형으로 활용성이 충분할 것으로 판단됨.
- 수문조건과 붕괴부 시나리오를 반영한 댐 붕괴에 따른 유출곡선을 유도하고 댐 하류부의 홍수파 추적을 모의하기 위해 수리학적 모델인 DAMBRK 모형을 적용하였음. 모의결과로부터 GIS 시스템을 이용하여 홍수범람도를 작성한 후 홍수취약지역의 피해예측을 위해 국내 다차원법을 활용한 자산피해를 예측하였음. 또한 미국의 LIFESim 모형의 인명피해 예측모듈과 유럽연합의 사망률함수에 따른 인명손실추정기법을 활용하여 붕괴홍수파에 의한 인명피해를 예측 한 후 그 결과를 비교검토하여 모듈의 적용가능성을 검토하였음.
- 댐 위험도 해석에 적합한 극치수문변량 재현 기법, 불확실성을 고려할 수 있는 Bayesian 강우-유출 및 댐 운영 연계 모델 개발, 최종적으로 Dynamic Bayesian Network 모델 기반 위험도 해석 모형을 구축하고자 하며 각 모듈별로 프로그램으로 개발하여 위험도 해석을 위한 원천기술로 활용하고자 함
- 파괴로 인한 사회경제적 피해가 막대할 것으로 예상되는 대형 수공구조물에 대한 위험도 해석 기술에 대한 정부, 수자원공사, 안전진단 업체 등의 수요가 커질 것으로 예상되며 댐 위험도 해석에 원천기술로 활용하고자 함

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 연구결과의 활용

· 본 연구에서는 최근 증가하는 기상변동성을 능동적으로 대처할 수 있는 위험도 해석기반의 확률론적 댐 및 저수지 평가기법을 개발하는 것임
· 이를 위해 본 연구에서는 댐 및 저수지 위험도 해석에 적합한 극치수문변량 재현기법, 불확실성을 고려할 수 있는 Bayesian 강우-유출 및 댐 운영 연계 모델 개발, 최종적으로 Dynamic Bayesian Network 모델 기반 위험도 해석 모형을 구축하고자 하며 각 모듈별로 프로그램으로 실용화하여 댐 및 저수지 실무자가 용이하게 위험도 해석에 이용할 수 있도록 하고자 함
· 또한 수자원공사 및 농어촌공사와 실용화 연구를 진행할 계획임. 실무자에게 즉, 본 연구에서 개발한 댐 위험도 해석 모형을 제공·활용하여 새로운 댐 및 저수지 위험도 해석에 대해 회의를 수행 활용할 예정이며, 이를 위하여 매뉴얼 작성 및 시현을 통해 활용방안을 보다 구체화 하도록 수행할 예정임.
· 위험도 해석을 통한 구조물 안정성 평가는 전세계적으로 보편화 되고 있으며 우리나라 건설 분야 중 철도, 교량구조, 조선, 원자력 등 다양한 분야에서도 이미 위험도 해석에 근거한 안정성 평가가 이루어지고 있는 현실임
· 따라서 파괴로 인한 사회경제적 피해가 막대할 것으로 예상되는 대형 수공구조물에 대한 위험도 해석 기술에 대한 정부, 수자원공사, 안전진단 업체 등의 수요가 커질 것으로 예상되며 새로운 연구 및 산업 활동에 충분한 계기를 제공할 것으로 판단됨
· 현재까지 위험도 평가를 위한 위험도모형 구축에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있으나 실질적인 위험도 해석에 필요한 위험요소별 파괴확률 및 파괴모드 해석기술은 연구가 미진한 실정이며 따라서 선제적인 기술선점이 가능함
· 최종적으로 수자원공사 대상 댐 및 농어촌공사 소·대규모 저수지에 대해서 본 연구에서 개발된 내용을 적용하여 모형의 신뢰성 확보 및 활용성을 확보할 예정이며, 유관기관들과 긴밀히 협조하여 연구개발의 신용성을 극대화 할 수 있는 방안을 모색하겠음.

2. 연구결과의 기대효과

가. 기술적 측면

· 국내외적으로 수공구조물에 위험도 분석은 주로 단편적인 해석에 그치고 있으며 기후변화와 같은 외력으로 인한 해석기법은 전무한 상태로서 최근 증가하는 기상변동성을 고려할 때 기술개발이 시급함

· 선진국에서에는 1970년대 후반 수자원 분야에서 기후변화로 인한 비정상성 연구가 시작되어 지금까지 30여년 연구가 진행되고 있음. 그러나 기후변화에 따른 구조물의 안전도 및 위험도 관련 연구는 매우 부족한 실정임

· 『기후변화 대비 수공구조물 안정성 평가를 위한 완전 연동 Bayesian Network 위험도 해석기법 개발』로 인해 국내외적으로 수공구조물 위험도 해석기법의 수준을 진일보 시키는 역할을 할 것으로 판단되며 기존 수공구조물에 수명 연장 등 국가 정책인 녹색기술로서도 역할이 기대됨

· 본 연구를 통해 개발된 주요 기법들은 국외수준과 비교하였을 때 국내 댐 위험도 해석 기술력을 향상 시켰다고 사료되며, 유관기관과의 협의를 통해 지속적으로 적용 및 사용이 가능하도록 기술을 개발할 것임

나. 경제·산업적 측면

(1)국가 위상 향상 측면

· 현재 우리나라는 기후변화에 대한 대응의지를 표명하고 기후변화 위기를 기회로 전환하여 국가 성장을 지향하는 '저탄소 녹색성장'을 제시하고 있으나 기후변화 대응을 위한 구체적인 전략 수립 및 연구 활동은 미흡한 실정임
· 그러나, 본 연구를 통해 한국의 자체기술 개발을 통한 기후변화에 대비한 수공구조물 안정성 검토기술 개발, 수공구조물 안전도 저감 방안 등이 개발됨으로써 기후변화 적응을 위한 수공구조물 안정성 확보 분야의 구체적인 전략 수립 및 연구개발 활동이 추진됨에 따라 국제사회에서 관련 분야의 국가 위상이 향상될 것으로 기대됨

(2)국민의 삶과 질 향상

· 지구온난화에 따라 전지구 평균 온도 상승, 이상기상 현상 발생 빈도 증가 등으로 인해 치수/이수 측면에서 국민의 삶과 질 향상에 악영향을 미칠 것으로 예상됨
· 그러나, 본 연구를 통해 기후변화에 대비한 수공구조물 위험도 해석시스템 등의 구축으로 인해 기후변화에 의해 발생 가능한 치수/이수 측면에서의 위험 관리 및 대응이 가능하게 됨으로써 안전한 사회 구현을 통한 국민의 삶과 질이 향상될 것으로 기대됨

(3)국내 기술력 향상

· 현재 수자원 분야의 국내 기술력은 선진국 대비 70% 기술수준이며, 기후변화 대비 댐 위험도 해석 모형의 연구는 미진한 실정임.
· 그러나 본 연구에서 개발한 주요 기법들로 인해 국제사회에서의 국내 기후변화 대비 댐 위험도 해석 모형 기술의 기술력 향상은 물론 일부 기술 분야에 있어서는 기술 선점을 하여 국외발표 및 회의를 통해 기술력 진일보 시킬 수 있을 것으로 기대됨.

제 6 장 참고문헌

Alla, A.A. (1996), The role of fusegates in dam safety, International Journal on Hydropower and Dams 3(6).

Altarejos-Garcia, L., Escuder-Bueno, I, Serrano-Lombillo, A., Membrillera-Ortuno, M.G., "Methodology for Estimating the Probability of Failure by Sliding in Concrete Gravity Dams in the Context of Risk Analyis", Structural Safety, Vol. 36-37, pp. 1-13, 2012

Bowles, D. (1990), Risk assessment in dam safety decision making. Risk-Based Decision Making in Water Resources, Proceedings of 4th Conference, Y.Y. Haimes and E.Z. Stakhiv, ed, ASCE, New York.

Bowles, D.S. (1988), Verde River Risk Assessment: an Interim Solution Study, paper presented at the 8th annual USCOLD Meeting, Phoenix, AZ, January.

Bureau of Reclamation Safety of Dams Program. (1989). Policy and procedures for dam safety modification decision making, Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver, CO.

Cheng, S.T., Yen, B.C. and Tang, W.H. (1982), Overtopping risk for an existing dam, civil engineering studies, Hydraulic Engineering Series No.37, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana.

Cheng, S.T., Yen, B.C. and Tang, W.T. (1986), Wind-induced overtopping risk of dams. B. C. Yen, ed, Stochastic and Risk Analysis in Hydraulic Engineering, Water Resources Publications, Littleton, CO.

Dekay, M. L. and McClelland, G. (1993). Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood, Risk Analysis 13(2).

Hsu, Y.C., Tung, Y.K. and Kuo, J.T. (2011), Evaluation of dam overtopping probability induced by flood and wind, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol.25, No.1, pp. 35-49.

Kreuzer, H. and Bury, K. (1984), A probability based evaluation of the safety and risk of existing dams, Proceedings of the International Conference on Safety

of Dams. Coimbra, April 23-28, Edited by J. Laginha Serafim, University of Coimbra, Portugal.

Kuo, J.T., Hsu, Y.C., Tung, Y.K., Yeh, K.C. and Wu, J.D. (2008), Dam overtopping risk assessment considering inspection program, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol.22, No.3, pp. 303-313.

Kwon, H.H. and Moon, Y.I (2006), Improvement of Overtopping Risk Evaluations Using Probabilistic Concepts for Existing Dams, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Springer-Verlag Vol.20 No.4, pp. 223-237

Kwon, H.H., Brown, C. and Lall, U. (2008), Climate Informed Flood Frequency Analysis and Prediction in Montana Using Hierarchical Bayesian Modeling, Geophysics Research Letter, Vol.35 No.5, pp. 1-6

Kwon, H.H., Brown, C., Xu, K. and Lall U. (2009), Seasonal and Annual Maximum Streamflow Forecasting using Climate Information: Application to the Three Gorges Dam in the Yangtze River Basin, Hydrological Sciences Journal, Vol.54 No.3, 582-595.

Kwon, H.H., Khalil, A.F. and Siegfried, T. (2008), Analysis of Extreme Summer Rainfall Using Climate Teleconnections and Typhoon Characteristics in South Korea, Journal of the American Water Resources Association, Vol.44 No.2 pp. 436-448

Kwon, H.H., Lall, U. and Khalil, A.F. (2007), Stochastic simulation model for nonstationary time series using an autoregressive wavelet decomposition: Applications to rainfall and temperature, Water resources research, Vol.43, pp. 1-15

Kwon, H.H., Lall, U. and Obeysekera, J. (2009), Simulation of Daily Rainfall Scenarios with Interannual and Multidecadal Climate Cycles for South Florida, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol.23 No.7, pp. 879-896

Lee, H.L. and Mays, L.W. (1983), Advances in risk and reliability analysis for hydraulic structures, Proceedings of Conference on Frontiers in Hydraulic

Engineering, ASCE, New York.

Mays, L. (1987), Review of advances in risk and reliability analysis for hydraulic structures, Application of frequency and risk in water resources, V.P. Singh, ed, Reidel Publishing Company.

McCann, M.W., Franzini, J.B., Kavazanjian, E. and Shah, H.C. (1985), Preliminary safety evaluation of existing dams, Report Prepared for Federal Emergency Management Agency by Department of Civil Engineering, Stanford University, November.

Melching, C.S., Wenzel, H. and Yen, B.C. (1987), Application of system reliability analysis to flood forecasting, Application of Frequency and Risk in Water Resources. V.P. Singh, ed, Reidel Publishing Company.

Prendergast, J.D. (1979), Probabilistic Concept for Gravity Dam Analysis, Special Rep, M-265, Construction Engineering Research Lab, U.S. Army Corps of Engineers, Champaign.

Serafim, J.L. (1984), Reliability assessment of concrete dams from the probability of exceptional loads and defective properties of materials and foundations, Proceedings of the International Conference on Safety of Dams, Coimbra, April 23-28, Edited by J. Laginha Serafim, University of Coimbra, Portugal.

Von Thun, J.L. (1984), Application of decision analysis techniques in dam safety evaluation and modification, Proceedings of the International Conference on Safety of Dams, Coimbra, April 23-28, Edited by J. Laginha Serafim, University of Coimbra, Portugal.

Widmann, R. (1984), Possibilities of improving the safety of large dams, Proceedings of the International Conference on Safety of Dams, Coimbra, April 23-28, Edited by J. Laginha Serafim, University of Coimbra, Portugal.

Yen, B.C., Cheng, S.T. and Melching, C.S. (1986), First order reliability analysis, Stochastic and risk analysis in hydraulic engineering, B.C. Yen, ed, International Association of Hydraulic Research.

Yen, B.C., Cheng, S.T. and Tang, W.T. (1980), Reliability of hydraulic design of culverts, Proceedings of International Conference on Water Resources Development, Taipei, China, May 12-14, International Association of Hydraulic Research.

권현한, 김병식, 김보경 (2008), 기후변화에 따른 수자원 영향 평가를 위한 Regional Climate Model 강수 계열의 특성 분석, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제28권, 5B호, pp. 525-533.

권현한, 문영일 (2007), 기상정보 및 태풍특성을 고려한 계절 강수량의 확률론적 모형 구축, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제27권, 1B호, pp. 45-52.

권현한, 문영일, 김병식, 윤석영 (2008), Bayesian Markov Chain Monte Carlo 기법을 통한 NWS-PC 강우-유출 모형 매개변수의 최적화 및 불확실성 분석, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제28권, 4B호, pp. 383-392.

권현한, 문영일, 신은우 (2002), 댐 위험도 분석을 위한 실행함수 설정방안 연구, 대한토목학회 학술대회 제3권 6호, pp. 1872-1875.

권현한, 문영일, 차영일, 전시영 (2003), 비 모수적 모의기법을 이용한 댐의 월류 확률 산정에 관한 연구, 대한토목학회 학술대회, pp.2547-2552.

권현한, 문영일, 최병규, 윤용남 (2005), 신뢰성 분석을 통한 기존 댐 재개발의 적정규모 결정의 관한 연구, 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제 38권, 2호, pp 97-110.

권현한, 박대형, 문영일 (2004), 단일사상 강우-유출 모형의 불확실성 분석을 통한 홍수 빈도곡선 유도(Ⅰ), 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제24권, 3B호, pp. 229-239.

이종석 (2002), 댐의 안전성 평가를 위한 위험도 해석기법의 적용, 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제35권, 6호, pp. 651-664.

한건연, 이종석, 김상호 (1996), 댐 및 하천제방에 대한 위험도 평가기법, 대한토목학회 학술발표회 논문집 2, pp. 195-198.

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.