18CTAP-C132730-02

콘크리트 시간변형 예측 향상을 위한 다중모델 평균화 기법 및 소프트웨어 개발 최종보고서

2019

국토교통부 한국과학기술원

보안 과제( ), 일반 과제(✓) / 공개(✓), 비공개( ) 발간등록번호(11-B350021-000054-01)

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 18CTAP-C132730-02

콘크리트 시간변형 예측 향상을 위한 다중모델 평균화 기법 및 소프트웨어 개발 최종보고서

2019. 3. 29.

주관연구기관 / 한국과학기술원

국토교통부

(전문기관) 한국과학기술원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'콘크리트 시간변형 예측 향상을 위한 다중모델 평균화 기법 및 소프트웨어 개발'(연구개발 기간 : 2017.06.30 ~ 2018.12.31) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2019. 03. 29

주관연구기관명 : 한국과학기술원 신성철 (인)

주관연구기관책임자: 김재홍

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C132730-02	해당 단계 연구 기간	2018.01.01 ~2018.12.31	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	창의도전연구(기초원천)			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	콘크리트 시간변형 예측 향상을 위한 다중모델 평균화 기법 및 소프트웨어 개발			
연구책임자	김재홍	해당단계 참여연구원 수	총: 9명 내부: 9명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:122,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 122,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 11명 내부: 11명 외부: 명	총 연구비	정부:238,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:238,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국과학기술원 / 건설및환경공학과			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	

9대 성과 등록・기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설・장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록・기탁 번호	2	1	1			2					

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설・장비 현황

구입기관	연구시설・장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약

- **다중모델 평균화기법 기반 콘크리트 시간변형 예측향상 기술 개발**
  - 콘크리트 배합비 및 재료 특성을 고려한 적용 범위 도출
  - 도출된 배합조건에 대한 콘크리트 시간변형 실험 수행
  - 콘크리트 시간변형(크리프 및 건조수축) 예측 모델 분석 및 후보군 도출
  - 데이터를 통한 예측 모델식 변수 추정 기법 개발
  - 인식론적 불확실성을 고려한 다중모델 평균화 기법 개발 및 검증
- **다중모델 평균화기법 기반 콘크리트 시간변형 예측 GUI 프로그램 개발:**
  - 개발 알고리즘 GUI 모듈화
  - 모듈화된 알고리즘을 통합을 통한 사용자 편의성 높은 GUI기반 플랫폼 개발
  - 개발된 GUI 시스템의 활용 매뉴얼 및 실험데이터 기반 활용예제 작성

보고서 면수: 36

〈 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	□ 연구 목적 **객관적이고 신뢰성 높은 예측은 선제적 관리에서 매우 중요한 요소**임. 대부분 공학적 문제는 **예측을 위해 활용 가능한 다양한 예측 모델이 존재**하며, 그 결과 **모델 불확실성이 존재함**. 모델 불확실성은 예측에 큰 영향을 미치기 때문에 **예측 모델을 선택함에 있어 신중함이 요구**됨. 콘크리트 시간변형 문제에도 다수의 활용 가능한 예측모델이 존재하고, **선택된 예측모델에 따라 그 예측결과가 달라질 수 있음**. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자 **콘크리트 구조물의 시간변형(크리프와 건조수축)의 예측 신뢰성 향상하고 사용자 주관성을 최소화할 수 있는 객관적인 예측 기법과 프로그램을 개발하고 이를 검증하여 후속 연구를 위한 전략적 기초연구를 수행하고자 함** □ 연구 내용 • **다중모델 평균화기법 기반 콘크리트 시간변형 예측향상 기술 개발:** 콘크리트 시간변형 예측에 사용자의 주관성을 최소화하고, 각 예측 모델의 개별 정보를 개발기법을 통하여 예측 신뢰성을 향상하는 기법 개발 및 검증하고자 함 - 콘크리트 배합비 및 재료 특성을 고려한 적용 범위 도출(배합조건 최소 3가지 이상) - 도출된 배합조건에 대한 콘크리트 시간변형 실험 계획 - 콘크리트 시간변형(크리프 및 건조수축) 예측 모델 분석 및 후보군 도출 - 데이터를 통한 예측 모델식 변수 추정 기법 개발 - 인식론적 불확실성을 고려한 다중모델 평균화 기법 개발 및 검증 • **다중모델 평균화기법 기반 콘크리트 시간변형 예측 통합 GUI 프로그램 개발:** 각각의 개발 기법을 하나의 소프트웨어로 통합하고 사용자 편의적으로 활용할 수 있도록 그래픽 유저인터페이스(GUI)형태의 소프트웨어를 개발하고자 함 - 개발 알고리즘 GUI 모듈화 - 모듈화된 알고리즘을 통합을 통한 사용자 편의성 높은 GUI기반 플랫폼 개발 - 개발된 GUI 시스템의 활용 매뉴얼 및 실험데이터 기반 활용예제 작성
연구개발성과	• 다중모델 평균화기법 기반 콘크리트 시간변형 예측향상 기술 개발 - 특허 출원·등록 1건, SCI급 논문 2건 • 다중모델 평균화기법 기반 콘크리트 시간변형 예측 통합 GUI 프로그램 개발 - 프로그램(소프트웨어) 등록 2건, 활용 매뉴얼 1건
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	□ 활용계획 • 콘크리트의 장기변형이 중요하게 검토되어야 하는 초고층 빌딩(압축 부재)과 댐과 같은 매스콘크리트 구조물에 적용이 될 것으로 판단되며, 해외 시장 진출에 기술경쟁력 확보에 활용 가능함 • 유관기관과의 협력 및 기술 교류를 통해 기술 이전 및 관련분야 교육/산업 홍보를 수행하고, 최종적으로 후속과제 공동 연구기관 구성에 활용하고자 함 • 원천기술 확보를 위해 관련 성과물을 토대로 지적재산권 확보하여 기술소유권을 선점하고 추후 해외 시장에서의 로열티 확보를 위한 기반을 구축하고자 함 □ 기대효과 • 선제적 예방 · 관리 패러다임 전환의 교두보 마련에 기여 • 과거 기술 선진국을 모방하고 쫓아가는 추격형 위치에서 새로운 길을 창조하고 앞서가는 선도형 위치로의 국가 경쟁력 및 위상 향상 • 미 개발 원천기술 확보를 통한 기술적 소유권 선점 및 관련 기술 수출 및 산업화 • 노동집약형 산업이 아닌 원천 핵심 기술을 통한 고부가가치 창출이 가능한 산업 경제구조로의 전환에 기여 가능 • 개발된 기법을 기반으로 유사한 조건의 의사결정 문제에 적용이 가능하므로 연구결과의 활용성 및 파급효과가 매우 클 것으로 기대됨: 다양한 피로균열 예측 모델이 존재하는 강재 피로균열 예측에도 적용 가능

핵심어 (5개 이내)	콘크리트 시간변형	모델 불확실성	모델평균화	예측

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	☐ Purpose For proactive structural management, it is essential to make an objective and reliable prognosis. In most engineering applications, plausible prediction models are available and this results in model uncertainty. Model uncertainty significantly affects the prediction in prognosis so that it should be carefully considered. For time-dependent deformations of concrete, there are numerous prediction models. Unfortunately, different predictions can be made depending on the selected prediction model. This research proposes a new novel method to address this difficulty and make an objective and reliable prognosis for time-dependent deformations of concrete. The developed method can minimize the subjective judgement for model selection and improve the prediction based on a statistical method. The outcomes of this research will be used to propose a further research for practical use ☐ Expected Contribution • Prediction improvement method for time-dependent deformations of concrete using multi-model averaging method - Choice of target concrete composition under compounding ratio and material properties - Design of time-dependent deformation tests based on target concrete composition - Analysis of plausible prediction models for time-dependent deformation - Bayesian inference method for parameter estimation of prediction models using experimental data of time-dependent deformation tests - Multi-model averaging method - Performance evaluation and validation of development method through time-dependent deformation tests • Development of integrated GUI program for time-dependent deformation prognosis based on multi-model averaging method - Development of individual GUI module - Development of user-friendly GUI-based platform using individual GUI module - User manual of the developed GUI system - Construction of example of the developed GUI system using experiment database
Results	• Prediction improvement method for time-dependent deformations of concrete using multi-model averaging method - Patent application/registration 1EA, SCI Journal paper 2EA • Integrated GUI program for time-dependent deformation prognosis based on multi-model averaging method - Software registration 1EA, Database of experiments, User manual 1EA
Expected Contribution	☐ Application plan • Improvement of competitiveness in oversea construction markets (mass concrete structures or high-rise buildings) • Utilization for a following-up study as a joint research with potential industries in demand • Acquisition of Intellectual property right on the original technology ☐ Expected Contribution • Contribution to making bridgeheads for proactive maintenance paradigm • Enhancement of national competitiveness by taking a leading role in prognosis • Contribution to changing industrial structure from labor-intensive to a higher value-added business • High Applicability to the problem of decision-making with similar conditions

Keywords	Time-dependent deformation	Model uncertainty	Model averaging	Prognosis

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1
2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 9
3. 연구수행내용 및 성과 ····· 11
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 27
5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 30
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 30
7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 30
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 30
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 30
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 33
11. 기타 사항 ····· 33
12. 참고 문헌 ····· 34

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

객관적이고 신뢰성 높은 예측은 선제적 관리에서 매우 중요한 요소임. 대부분 공학적 문제는 **예측을 위해 활용 가능한 다양한 예측 모델이 존재**하며, 그 결과 **모델 불확실성이 존재함**. 모델 불확실성은 예측에 큰 영향을 미치기 때문에 **예측 모델을 선택함에 있어 신중함이 요구**됨. 콘크리트 시간변형 문제에도 다수의 활용 가능한 예측모델이 존재하고, **선택된 예측모델에 따라 그 예측결과가 달라질 수 있음**. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자 **콘크리트 구조물의 시간변형(크리프와 건조수축)의 예측 신뢰성 향상하고 사용자 주관성을 최소화할 수 있는 객관적인 예측 기법과 프로그램을 개발하고 이를 검증하여 후속 연구를 위한 전략적 기초연구를 수행하고자 함**

2. 연구개발의 필요성

□ 생애주기별 콘크리트 구조물의 시간변형 검토의 중요성

- 크리프와 건조수축은 콘크리트 구조물의 대표적인 시간변형이며, 매스콘크리트 구조물(댐)과 초고층 빌딩 구조물 등의 설계·시공·유지관리 단계에서 면밀한 사전검토가 필요함
- 일반적으로 콘크리트 구조물의 시간변형은 구조물의 성능 및 내구성에 악영향을 미치기 때문에 이에 대한 시기적절하고 선제적인 대응이 요구됨

생애주기별 콘크리트 구조물 시간변형 검토의 중요성	
설계·시공	• 프리스트레스 구조물의 경우, 시간변형은 프리스트레싱 손실을 초래하기 때문에 설계 시 시간변형에 따른 손실량을 예측하고 사전 검토하여 설계 시 고려하는 것이 중요함 • 댐 및 원자력 발전소와 같은 매스콘크리트 구조물은 단기적 시간변형에 의한 영향 검토가 중요함
	• 적층식 공법과 같이 기 타설된 콘크리트 부재의 경우, 시간변형 요소를 사전에 예측하여 시공 방법 및 순서에 반영이 필요 • 편심하중이 작용하는 압축 부재(초고층 구조물의 기둥)의 경우, 시간변형에 의해 처짐이 증가하기 때문에 좌굴 발생 여부 등 검토가 중요함
유지관리	• 장기적으로 콘크리트의 시간변형은 콘크리트 구조물의 내구성(균열)과 밀접하기 때문에 시간변형 예측(Prognosis)를 기반으로 유지보수 의사결정에 활용 • 교량과 같은 휨 구조물은 시간변형에 따라 장기 처짐이 증가하기 때문에 유지관리 시 처짐 진행 정도를 사전에 예측하고 대응책을 마련하는 것이 중요함

□ 관련 산업동향 및 향후 시장 전망: 지속적인 콘크리트 구조물 건설 시장 증가세

- 토지 이용의 효율성, 건축기술의 발전 등 다양한 요인들에 의하여 초고층 구조물에 대한 관심 및 수요가 전 세계적으로 증대되고 있음
- '고층빌딩·도시거주평의회(CTBUH)' 자료에 의하면 2017년 완공되는 높이 200m 이상의 초고층 구조물은 약 240개가 준공될 예정이며, 2012년 이후 5년 연속 증가세를 보이고 있음
- 2015년 KISTI 분석자료에 의하면 세계 시멘트 시장은 2013년 기준 3,736백만 톤이었으며 향후, 연평균 2.81% 성장으로 2020년 기준 4,370백만 톤 규모가 될 것으로 전망됨
- 이 중 중국과 인도가 세계 시장의 57.8%와 6.5%를 차지하며 가장 큰 시장을 형성하고 있음. 경제발전 단계에 매우 높은 시멘트 수요 증가율을 보인다는 점을 고려했을 때, 중국과 인도 건설 시장에서는 지속적인 콘크리트 구조물이 건설이 증가할 것으로 판단됨
- 따라서 콘크리트 구조물 설계, 시공 및 유지관리에 필요한 원천 기술 개발은 잠재적인 해외시장 확보에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단됨

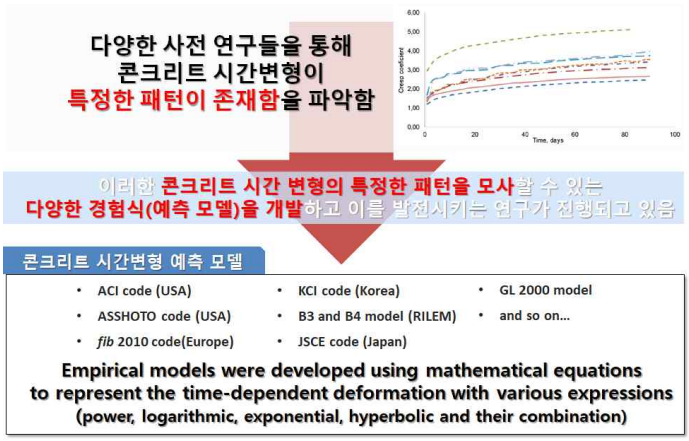
□ 정부 상위 정책과의 부합성: 안전산업 발전 전략 및 사전적 예방·관리 패러다임

- 국토교통부 등 관계부처는 「건설현장 재해 예방 종합대책」(2014.1.3)에서 설계 및 시공 단계 안전 강화 추진 전략 및 방안을 발표함
- 정부는 「국가 안전 대진단과 안전산업발전 방안」(2014.8.26)을 발표하였으며, 추후 「안전혁신 마스터플랜 기본방향 및 향후추진계획」(2014.9.23.)을 발표함. 이는 안전 R&D 투자 확대, 관련 산업화 및 해외진출 지원 등을 안전사업 육성을 위한 5대 과제로 발표하여 안전산업 역량을 강화하려는 의지를 보임

- 국토교통부는 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」(2017.1.17)을 사후 보수·보강이 아닌 시설물 성능 예측(Prognosis)을 통해 최적의 유지보수 시기를 결정하는 사전 예방적 유지관리체계로 전환하고자 전면 개정함
- 2014년 이후 최근 정부의 안전관련 상위 정책은 사후복구 관리의 개념에서 사전예방관리의 패러다임으로 변화되고 있으며, 본 연구과제는 사전예방을 위한 핵심 기술인 예측(prognosis)에 관한 원천기술 개발임(정부의 창의적·도전적 기초연구 활성화 방안에 부합)
- 개발하고자 하는 기술은 콘크리트 구조물의 설계, 시공 및 유지관리 중 콘크리트 시간변형에 의해 발생할 수 있는 결함 및 재해를 선제적으로 대응하고, 최적의 의사결정에 활용하는 원천기술임

□ **콘크리트 구조물의 시간변형 예측 방법의 신뢰성 및 객관성 확보 필요**

- 콘크리트 구조물의 시간변형 예측은 다양한 전문기관(ACI 등)에서 제안하는 모델식을 기반으로 하고 있음
- 일반적으로 배합비 및 재료 특성 등을 반영하기 위해 단기 크리프 및 건조수축 실험을 통해 예측 모델식의 변수를 추정하고(회귀분석), 추정된 변수를 통해 시간변형에 대한 예측을 수행함
- 하지만 여러 모델식 중 주관적인 기준을 통해 하나의 모델식을 사용하며, 선택된 모델식에 따라 시간변형 예측 결과가 상이한 경우가 많음
  - 단일 모델을 통한 예측은 일반적으로 여러 모델들을 회귀분석을 통해 변수를 추정함. 일반적으로 모델 선택 문제를 수행하기 위해서는 일반적으로 모델의 예측 적합도와 모델의 복잡성을 동시에 고려할 수 있는 모델 선택 기준지표(model selection criteria)를 활용함. 이러한 지표로는 대표적으로 AIC(Akiake's information criteria) 및 BIC(Bayesian information criteria) 등 다수 개발되어 사용되어짐. 이들 지표는 문제의 특수성에 따라 선택되어야 하며, 문제에 따라 선택되어지는 모델이 달라질 수 있으므로 관련 사전 배경 지식(통계 및 정보공학) 및 경험이 요구되므로 실무에서 쉽게 활용하기에 어려움이 존재함
- 대부분의 국내·외 연구는 모델식을 개선하거나 새로운 형태를 제안하는 경우가 대부분이며, 근본적으로 사용자의 주관성에 의해 발생하는 예측에 대한 모델 불확실성(인식론적 불확실성)을 효과적으로 고려하지 못하고 있음
- 따라서 객관적이고 신뢰성 높은 콘크리트 시간변형을 예측할 수 있는 접근방법에 대한 연구개발이 국내·외적으로 필요함



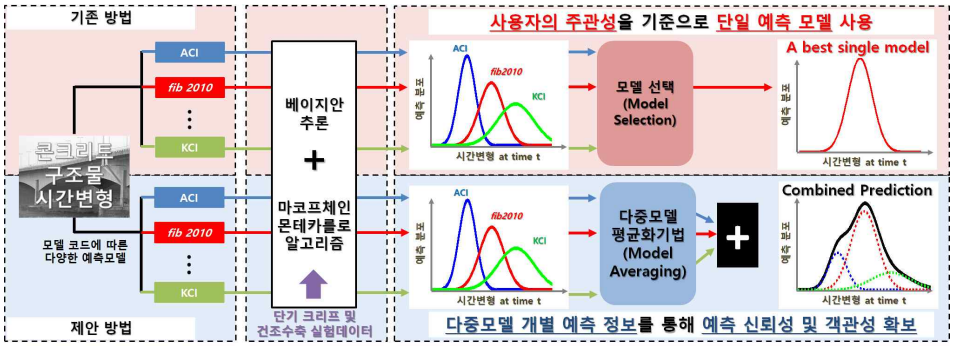
다양한 예측 모델들로 인한 모델 불확실성

□ **콘크리트 시간변형 예측에 대한 기존방법 및 제안 방법의 비교**

- 일반적으로 콘크리트 시간변형을 예측하는 모델식은 ACI, *fib 2010*, KCI, JCI, AASHTO, B3 및 GL 모델 등 다수 존재하고 있으며, 각기 다른 모델 형태를 기반으로 시간변형을 모사하고 있음
- 기존 방법론은 다양한 모델식들 중 하나의 예측모델을 선택하고, 이를 통해 시간변형을 예측하게 됨. 이는 하나의 특정 모델형태를 이용하게 되므로 모사하고자하는 시간변형 형태가 적절하지 못할 경우, 예측 결과의 신뢰성은 크게 결여될 수 있음. 또한 사용자에 따라 선택되는 모델이 달라질 수 있다는 점에서 객

관성을 확보가 어려움

- 본 연구에서는 앞서 언급한 사용자의 주관적 선택으로 인한 인식론적 불확실성을 고려할 수 있는 객관적인 예측방법을 개발하고자 함. 이를 위해 계량경제학 및 기상학에서 개발된 통계적 후처리 기법(다중모델 평균화기법)의 개념을 도입하고자 함. 해당 기법은 단일 모델 기반 예측이 아닌 다중모델의 개별 예측 정보를 통계적으로 가중 선형 결합하여 예측의 정확도 및 신뢰성을 향상시킬 수 있음
- 따라서 하나의 특정 모델이 아닌 다중모델을 통계적으로 활용하므로 모델 불확실성을 효과적으로 고려할 수 있으며, 근원적으로 인식론적 불확실성(모델 불확실성)을 최소화하여 콘크리트 구조물의 시간변형 예측 신뢰성 및 정확성을 크게 향상시킬 수 있음. 나아가 실용성 및 객관성 확보가 가능함
- 기존 방법과 제안 방법의 차별성을 요약하면 다음과 같음: 기존 방법은 최종적으로 선택된 예측모델을 실제시간변형을 완벽하게 표현할 수 있는 모델(true model)이라는 전제 하에 접근하는 방법임. 하지만 모든 콘크리트 시간변형에 대한 예측은 현재에도 많은 연구가 진행되고 있으며, 관련 모델 코드가 개정되고 있다는 점에서 완벽한 예측 모델(true model)이 존재하지 않음. 제안 방법은 정확하고 완벽한 예측모델이 존재하지 않다면, 현존하는 각 예측 모델들의 장점들을 상호 보완(complementary)하여 최적의 예측을 도출하는 방법론임
- 제안된 개발 기술은 기존 연구에서 고려되지 않았던 접근방법(모델 불확실성 반영)임. 따라서 새로운 원천기술 개발을 통한 기술적 이니셔티브 확보와 새로운 시장 진출에서 기술경쟁력으로 활용될 수 있을 것으로 판단됨



기존/제안 방법의 차이점을 비교한 도식: 모델 불확실성을 고려하여 예측의 신뢰성 및 객관성을 확보하고, 이를 통해 신뢰성 높은 예측을 선제적 의사결정에 활용

3. 연구개발 범위

구분	내용
최종 목표	**콘크리트 구조물의 시간변형(크리프와 건조수축)의 예측 신뢰성 및 객관성을 확보할 수 있는 새로운 예측 기법을 개발하고 이를 검증하여 후속 연구를 위한 전략적 기초연구를 수행하고자 함**
세부 목표	• **[공법·기법] 다중모델 평균화기법 기반 콘크리트 시간변형 예측향상 기술 개발 (TRL 4)** - 크리프 및 건조수축 예측 모델식 분석 및 예측모델 구축 - 베이지안 추론 기반 예측모델 변수 및 불확실성 추정 기법 개발 - 콘크리트 크리프 및 건조수축 실험 수행 - 인식론적 불확실성을 고려한 다중모델 평균화 기법 개발 - 개발 핵심 요소 기술별 검증 및 고도화 • **[소프트웨어] 다중모델 평균화기법 기반 콘크리트 시간변형 예측 통합 GUI 프로그램 개발 (TRL 5)** - MATLAB기반 GUI 프로그램 설계 - MATLAB기반 GUI 프로그램 개발 및 독립실행형 응용프로그램 배포

가. 1차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(한국과학기술원): **다중모델 평균화 기법 기반 예측향상 요소 기술 개발**
  1) 콘크리트 시간변형 예측을 위한 다중모델 평균화 기법 핵심 요소기술 개발
  2) 핵심요소기술 별 모듈 요구사항 도출 및 GUI기반 통합 프로그램 프레임워크 설계

② 개발 내용 및 범위(그림을 이용하여 시스템 구성도, 구조 등을 구체적으로 표현)

- 주관연구기관(한국과학기술원)

1) 콘크리트 시간변형 예측을 위한 다중모델 평균화 기법 핵심 요소기술 개발

가) 배합비 및 재료 특성을 고려한 콘크리트 배합 적용범위 도출

- 모든 종류의 콘크리트 배합조건에 대해 개발 기법을 적용하는 것은 불가능하기 때문에 1차년도 연구를 통해 본 기술개발 적용 범위를 최소 3가지 이상 도출하고자 함
- 콘크리트 물성 및 시간변형에 미치는 영향에 관한 연구자료 수집 및 정리
- 시멘트 종류, 물/시멘트 비, 결합재(플라이애쉬, 고로슬래그 등)을 배합 조건을 구분하는 지표로 선정할 예정이며, 현장 활용성 등을 고려하여 최소 2가지 이상의 배합조건을 도출하고자 함
- 콘크리트 관련 저명 학술대회(ACI/RILEM conference, 캐나다)를 참석하여 다양한 연구자들의 발표 및 토의를 통해 연구동향을 파악하여, 향후 활용성이 높아 보이는 배합조건을 최소 1가지 이상 도출하고자 함

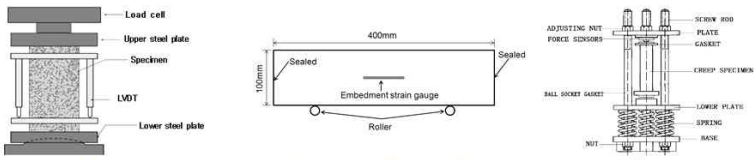
콘크리트 배합조건 적용 범위 도출 방법

나) 도출된 배합조건에 대한 콘크리트 시간변형 실험 계획

- 도출된 배합조건을 토대로 콘크리트 시간변형 실험을 계획하여 콘크리트 양생조건(양생온도 및 시기, 기간) 및 시편 형상 및 크리프 하중 재하 시기 등을 선정함
- 단기 역학적 특성(압축강도 및 탄성계수 등) 및 장기 시간변형(건조수축 및 크리프) 실험을 계획 및 관련된 재료(시멘트, 변형률게이지 등)를 구매
- 항온 항습실과 크리프 시험기 등 장기적인 활용이 필요한 연구 장비에 활용 일정 수립

콘크리트 시간변형 검증 실험 계획(안)

시험 항목		공시체 수		비고
		각주	원주	
압축강도 및 탄성계수		12	15	- 증기양생: 재령 3일, 7일, 28일 각 3개씩 - 표준양생: 재령 28일 3개
수축	자기수축	2	-	- 재령 6시간부터 시작
	건조수축	6	2	- 재령 1일부터 시작 - 2개의 각주공시체는 마주보는 두 면을 밀봉
크리프		12	15	- 증기양생: 재령 3일, 7일, 28일 각 3개씩 - 표준양생: 재령 28일 3개



압축강도 및 탄성계수 실험구성(안) **건조수축 실험구성(안)** **크리프 실험구성(안)**

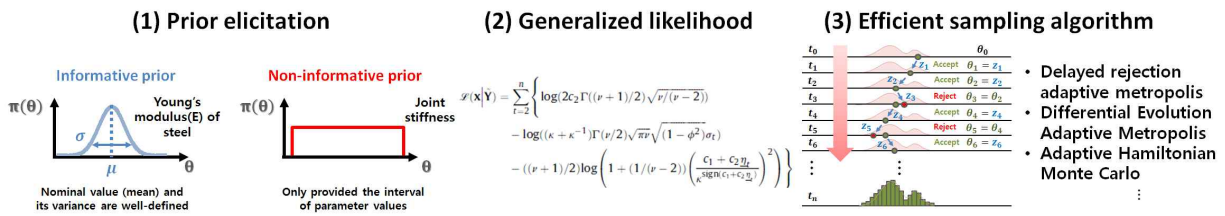
콘크리트 시간변형 실험 계획 수립(안)

다) 콘크리트 시간변형(크리프 및 건조수축) 예측모델 분석 및 후보군 도출

- 문헌조사를 통해 콘크리트 시간변형에 미치는 영향에 관한 연구자료 수집 및 정리
- ACI, *fib2010*, KCI, JCI, GL, B3(B4) 모델 등 콘크리트 시간변형에 영향을 미치는 주요 입력 변수(시멘트 종류, 시편 형상 및 양생 조건 등)와 추정 변수(예측 형상 결정인자) 도출
- 상기 예측 모델식 별 건조수축 및 basic/total 크리프 예측할 수 있는 소스코드를 MATLAB 상에서 개발 및 검증

라) 콘크리트 시간변형 실험 데이터를 통한 예측 모델식 변수 추정 기법 개발

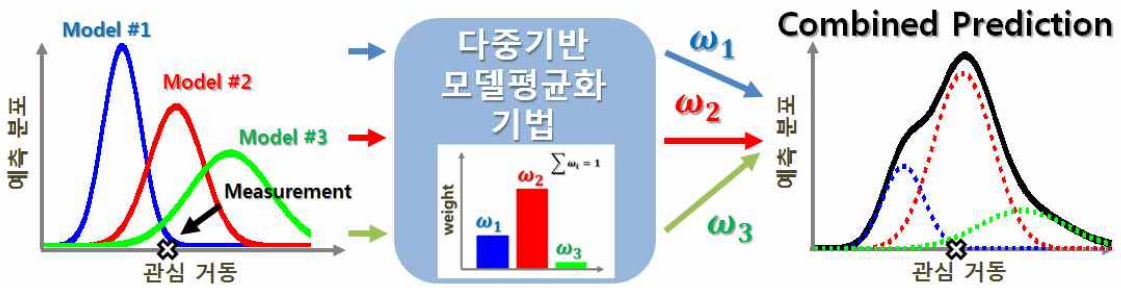
- 기존 연구들은 대부분 회귀분석(최소자승법을 통한 최적화 기법)을 활용한 연구가 수행되었음. 해당 방법론은 추정 변수의 불확실성을 추정할 수 없으며, 추정 변수들 간의 상관성(correlation)이 존재하는 경우, 추정 변수(point estimate)의 적절성을 보장할 수 없음
- 콘크리트 시간변형 예측모델은 이러한 상관성이 존재하는 경우가 많기 때문에, 변수 추정에 이러한 상관성을 고려할 수 있는 기법의 적용이 중요함
- 베이지안 추론(Bayesian inference) 기법은 상기 언급한 문제에 효과적으로 접목시킬 수 있는 방법론이며 본 연구과제에서는 변수 추정에 활용하고자 함
- 이를 위해 (1) 사전분포 도출(prior elicitation), (2) 다양한 잔차(residual) 특성을 반영할 수 있는 우도함수의 구성(generalized likelihood) 및 (3) 사후분포 추론을 위한 효율적인 샘플링 기법(efficient sampling algorithm)에 관한 연구를 수행하고, 이를 수치예제를 통해 검증하고자 함. 최종적으로 베이지안 추론 기법의 활용 가이드라인을 제시하고자 함



예측 모델식 변수 추정을 위한 베이지안 추론 기법

마) 인식론적 불확실성을 고려한 다중모델 평균화 기법 개발

- 베이지안 추론기법을 통해 추정된 모델 변수와 그 불확실성이 결정되면 개별 모델 별로 콘크리트 시간변형을 예측(out-of-sample)할 수 있음. 하지만 이러한 예측은 모델 별로 상이할 수 있으며 모델 불확실성을 고려하는 것이 매우 중요해짐
- 다중모델 평균화기법은 하나의 모델이 아니라 활용 가능한 모든 모델의 개별 예측 정보를 활용하여 통계적으로 최적의 예측 및 예측 분포를 추정하는 기법임. 계량경제학 및 기상학에서는 많은 연구와 적용이 이루어졌으나, 토목 분야(특히 구조분야)에서 적용된 사례는 국내·외적으로 없음
- 계량경제학 및 기상학의 문헌조사를 통해 다양한 다중모델 평균화 기법을 수집하고 분석함
- 각 기법들의 가정조건 및 비교연구를 통해 콘크리트 시간변형 예측에 적합한 다중모델 평균화 기법을 개발함
- 대부분의 다중모델 평균화 기법은 점 추정(point estimate)기반 예측을 기반으로 하고 있으나, 본 연구에서는 분포 추정(density estimate) 기반 예측을 수행할 수 있는 기법을 개발하고자 함



개발하고자 하는 다중모델 평균화기법 개요

바) 콘크리트 크리프 및 건조수축 실험 수행(1/2)

- 최소 1가지 이상 도출된 배합조건에 따른 콘크리트 시편 제작
- 수립된 콘크리트 시간변형 실험 계획에 따라 단기 역학적 특성(압축강도 및 탄성계수 등) 및 장기 시간변형(건조수축 및 크리프) 실험 수행
- 실험의 불확실성을 고려하기 위해 동일한 조건에서 최소 2개 이상의 시편 활용

콘크리트 크리프 및 건조수축 실험 수행 예시

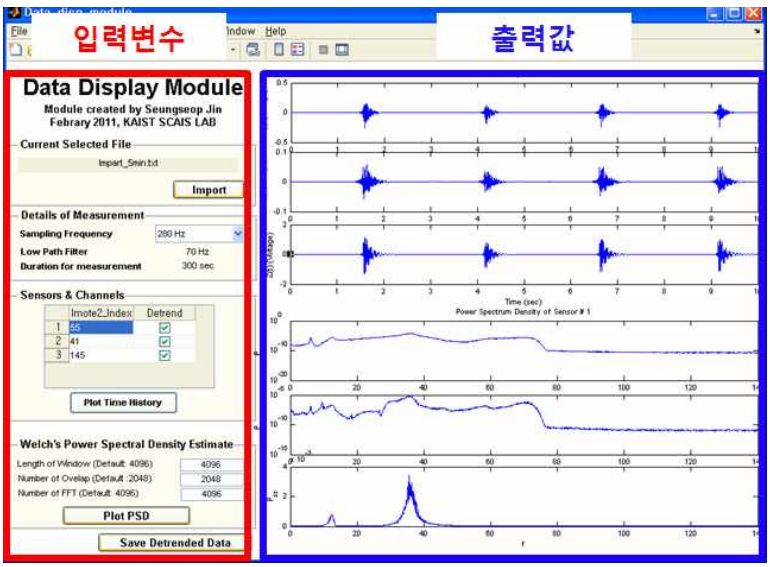
2) 핵심요소기술 별 모듈 요구사항 도출 및 GUI기반 통합 프로그램 프레임워크 설계

가) 핵심 요소기술 별 모듈 요구사항 도출 및 프레임워크 설계

- ‘크리프 및 건조수축 예측 모듈 개발’ 모듈 요구사항 분석
- ‘실험데이터를 통한 예측모델 변수 추정기법’ 모듈 요구사항 분석
- ‘다중모델 평균화 기법’ 모듈 요구사항 분석

나) GUI기반 통합 프로그램 프레임워크 설계

- 통합프로그램 구현을 위한 모듈 별 인터페이스 설계: 모듈 별 프로세스 정의
- GUI기반 통합 프로그램 프레임워크 설계 및 개발 수행
-



핵심요소 기술별 모듈 요구사항 및 프레임워크 설계 예시

나. 2차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(한국과학기술원): **다중모델 평균화 기법 기반 예측향상 요소 기술 검증 및 통합 프로그램 개발**

1) 콘크리트 시간변형 예측을 위한 다중모델 평균화 기법 핵심 요소기술 검증 및 보완

2) 콘크리트 시간변형 예측을 위한 GUI 기반 통합 프로그램 및 활용 매뉴얼 개발

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(한국과학기술원)

1) 콘크리트 시간변형 예측을 위한 다중모델 평균화 기법 핵심 요소기술 검증 및 보완

가) 콘크리트 크리프 및 건조수축 실험 수행(2/2)

- 1차년도에 미 수행된 배합 조건 2가지에 대한 실험 수행(매스 콘크리트 배합비)
- 상기 배합조건에 대한 단기 역학적 특성(압축강도 및 탄성계수 등) 및 장기 시간변형(건조수축 및 크리프) 실험 수행
- 실험의 불확실성을 고려하기 위해 동일한 조건에서 최소 2개 이상의 시편 활용
- 전문가 자문을 통한 실험 방법 및 결과에 대한 신뢰성 검증 수행

매스 콘크리트 배합조건에 대한 시간변형 실험

나) 콘크리트 시간변형 예측을 위한 다중모델 평균화 기법 핵심 요소기술 고도화

- 예측 모델 별 모델 변수 경계치 도출을 위한 Monte Carlo filtering 기법 활용
  - 1차년도(2017년): 모델 변수의 경계치(upper and lower bounds)를 현 연구진의 주관적인 경험을 통해 산정함
  - 2차년도(2018년): 주관적인 경험을 바탕으로 산정된 모델 변수 경계치는 과도하게 넓은 모델 탐색 공간을 생성할 수 있으므로 이를 유의한 모델 변수공간으로 한정하여 모델 변수 추정 효율성을 증대시키고자 함
- 베이지안 추론 기반 불확실성 정량화 알고리즘 고도화
- 다중모델평균화 기법 알고리즘 고도화

핵심요소기술 고도화 방안

- **다양한 잔차(residual) 특성을 반영하는 우도함수(likelihood function) 활용**
- **다중모델 평균화 기법 고도화를 위한 리샘플링(resampling) 알고리즘 검토**

⋮

예측성능 향상을 위한 핵심 요소기술 고도화

다) 실험데이터를 통한 개발 기법 성능 평가 및 검증

- 객관적인 검증을 위해 외부 자문위원을 활용하여 아래와 같은 절차를 통해 비교연구 수행
- 외부 자문위원은 아래와 같이 두 그룹으로 구분하여 섭외를 하여 표와 같이 활용하고자 함
  - 전문가 그룹: 콘크리트 시간변형 관련 전공자 최소 6명 이상 활용
  - 비전문가 그룹: 콘크리트 시간변형 관련 비 전공자 최소 2명 이상 활용
- 개발 기법을 배합조건 4가지에 대한 실험데이터를 통해 성능 평가를 아래와 같이 수행
  - 차년도 상반기(2018.05 예정): 보통강도 콘크리트, 고강도 콘크리트 실험 결과 분석 및 검증(자문위원 활용)
  - 차년도 하반기(2018.10 예정): 매스 콘크리트 #1(플라이애쉬), 매스 콘크리트 #2(고로슬래그) 실험 결과 분석 및 검증(자문위원 활용)

개발기법 성능 검증을 위한 외부 자문위원(테스터) 활용 계획

	전문가 그룹(기존방법)	비전문가 그룹(제안방법)
전문성	콘크리트 시간변형 관련 전공자	콘크리트 시간변형 관련 비전공자
배합범위	4가지 배합범위(보통강도, 고강도, 매스 콘크리트)에 대해 수행	
실험데이터	• 장기시간변형 실험을 통해 계측된 데이터를 보정 구간(Calibration period)와 평가 구간(Evaluation period)으로 구분 • 두 그룹 모두에게 보정 구간의 실험데이터를 제공하고 해당 데이터를 활용하여 평가 구간에 대한 예측을 수행	
예측기법	[기존 방법-사용자 주관성 기반 모델 활용] • 전문가 자체 기법 및 지식을 토대로 장기시간변형 예측 수행	[제안 기법-다중모델평균화 기법] • 다중모델 평균화기법 및 활용매뉴얼 제공 • 이를 토대로 장기 시간변형 예측 수행
분석내용	• 평가구간 내 시간변형 예측 정확성 분석 • 사용자 주관성에 의한 예측 변동성 분석	• 평가구간 내 시간변형 예측 정확성 분석 • 제안 기법을 통한 예측 객관성 분석

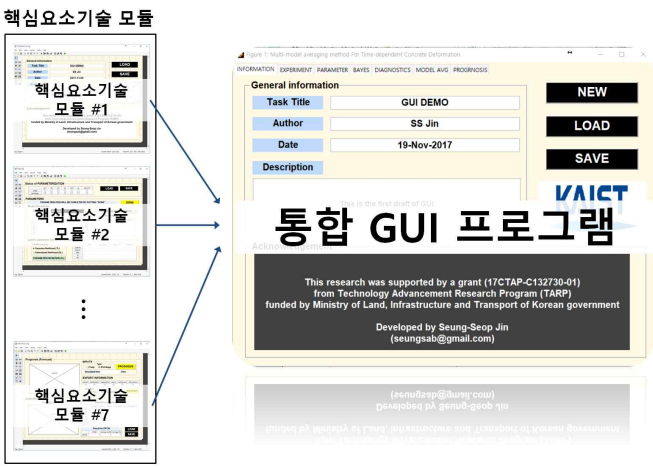
라) 개발 기법의 추후 연구를 위한 고도화 방향 도출

- 개발 기법의 객관적인 검증을 위한 국내·외 전문가 pool 도출 및 자문 섭외
- 전문가 자문을 통한 개발 기법의 활용 및 고도화 방안 도출
- 콘크리트 구조물 내구성 평가 방법과의 연계 방안 도출

2) 콘크리트 시간변형 예측을 위한 GUI 기반 통합 프로그램 및 활용 매뉴얼 개발

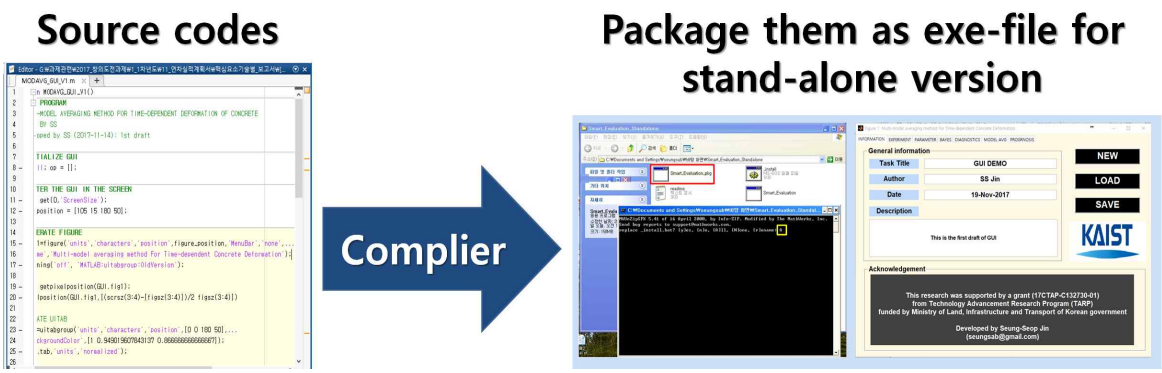
가) 콘크리트 시간변형 예측 통합 GUI기반 통합 프로그램 개발

- 1차년도에 개발된 각각의 핵심요소기술 모듈을 활용하여 MATLAB GUI기반 통합 프로그램 개발
- 실험 데이터를 활용한 개발 프로그램 안정성 및 신뢰성 검토



나) 실험데이터를 통한 GUI기반 통합 프로그램 검증 및 보완

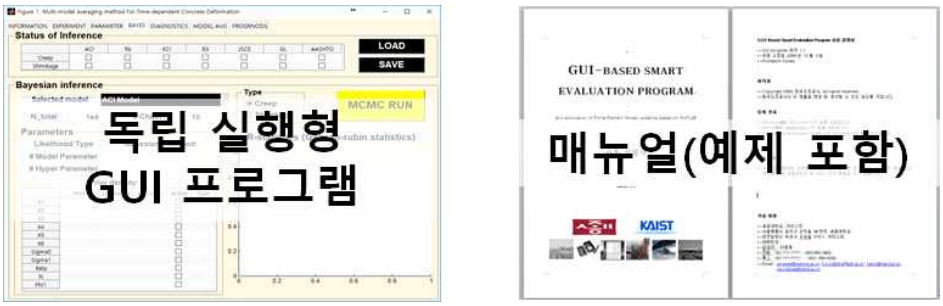
- 실험데이터를 활용한 개발 프로그램 검증 및 보완
- 외부인원을 활용한 사용자 편의성 검토 및 개선
- MATALB complier를 이용한 독립 실행형 응용프로그램(stand-alone application) 개발



Complier를 이용한 독립 실행형 응용프로그램

다) 활용 매뉴얼 및 관련예제 작성

- 개발 프로그램에 대한 활용 매뉴얼 작성
- 실험데이터를 활용한 예제 작성



핵심요소기술 2의 최종 성과물 예시: 독립 실행형 프로그램 및 활용 매뉴얼

제2장. 국내외 기술 개발 현황

국내 현황

- 권승희 (2005)는 다축압 상태에 놓인 콘크리트의 크리프 실험을 위한 정교한 장치를 개발하였으며, 이를 통해 포아송 비에 의한 구조체의 장기거동 해석을 수행함
- 정원섭 등(2010)은 고강도 콘크리트 크리프 특성에 관한 연구를 통해 실험 결과와 크리프 예측식을 비교함. ACI-209 및 CEB/FIP-90을 예측식으로 사용하였으며, 콘크리트 재령이 증가할수록 ACI 예측식이 실험데이터와 유사한 경향을 나타냄을 확인함
- 김재연(2015)은 양생 조건에 따른 콘크리트 장기거동 특성을 연구하였으며, 장기 변형(시간변형) 예측을 위해 ACI, fib 그리고 B3 모델을 활용하였음. 실험 데이터와의 비교를 통해 예측식을 그대로 사용하면 상당한 예측 오차가 발생하는 것을 보였음. 실험데이터를 통해 보정된 fib 모델식만 실험 데이터와 상당히 유사한 경향을 보임. 이는 장기거동 예측 정확도 향상을 위해 양생 조건 등을 반영할 수 있도록 예측 모델식에 대한 보정이 필요한 것을 나타냄
- 송은성(2016)은 콘크리트의 시간 의존적 변형 예측을 위한 여러 모델식들이 제안된 바 있지만, 콘크리트 재료 자체의 불확실성, 지역적인 재료 특성 및 환경 조건의 영향 등으로 그 정확성이 결여될 수 있음을 언급함. 따라서 장기거동 예측향상을 위해 실제 사용하는 재료와 동일한 환경에서 실내 실험을 수

행하고 이로부터 장기거동 모델을 보정하여 예측의 정확도를 향상하는 연구를 수행함

- 문재성 등(2016)은 저열 시멘트 콘크리트의 건조수축 및 크리프 거동 실험을 통해 시간 변형에 대한 KCI와 ACI 모델은 잘 일치하는 것을 확인함. 하지만 저열 시멘트에 대한 보정계수의 제안이 필요함을 언급함
- 윤지원 등(2009)은 단기 강수 확률 예측 시, 단일수치해석 모델이 가지고 있는 불확실성으로 인한 오차를 극복하고자 감마분포를 기저분포로 사용한 베이지안 모델 평균 기법을 사용함. 모델 평균 기법을 통해 단기 강수 예측 정확도가 향상됨을 확인함
- 문수진 등(2015)은 베이지안 모델 평균기법을 이용한 기후변화 극치수문사상의 앙상블 전망(예측)을 수행함. 관측소 별로 가중치가 높은 모델만을 선별한 최적의 모델 조합을 통해 강우자료의 정확성과 신뢰성을 확보할 수 있음을 보임
- 김가영(2016)은 기후변화 영향을 고려한 한반도의 미래 태풍 풍속 추정을 위해 앙상블 평균 기법을 적용하였음. 모델 각각으로부터 기후인자를 추출하여 분포를 추정한 결과, 다른 예측 형태를 보였으며, 이를 극복하고자 기후인자들을 앙상블 평균 기법을 사용하여 예측 정확성 향상시킴

□ 국외 현황

- Z.P. Bazant(2001)은 물리학적 매커니즘, 모델식, 구성방정식 그리고 확률론적 접근 방법 등을 이용하여 콘크리트 크리프 및 수축현상을 설명하였으며, 콘크리트 장기거동을 예측하는 새로운 모델식을 제안함
- M. Mazloom(2008)은 고강도 콘크리트 크리프와 건조수축 실험을 실시하여 고강도 콘크리트의 장기거동을 예측하는 식을 제안하고, 이를 실험결과를 이용하여 검증함
- Z.P. Bazant(2015)는 콘크리트 시간변형에 대한 데이터베이스를 구축하였으며, 각 데이터베이스를 통해 실험 및 기록에 대한 방법을 제안하였음. 실험 데이터를 통해 탄성계수와 같은 예측모델의 변수를 확률 분포로 표현하여 콘크리트 물성 및 조건 등의 불확실성을 반영하는 방법을 소개함
- S.G. Hall 등(2007)은 인플레이션 예측 문제에 각 예측모델의 예측 분포를 가중 평균하는 방법(density forecast method)을 제안함. 제안된 방법은 Kullback-Leibler information criterion을 통해 가중 평균의 가중치를 구하는 방법을 증명함
- E.J. Ward(2008)은 생태학(ecology) 관련 다양한 예측 모델 중 최적의 모델을 선택하는 모델 선택 기준(model selection criteria)에 대한 비교 연구를 수행함. 모델 선택 기준에 따라 최적 모델 선택이 달라지는 것을 보임
- B.E. Hansen(2008)은 Mallows Model Averaging (MMA)이라는 최소자승 기반 모델 평균 기법을 제안함
- C.G.H. Diks 등(2010)은 수문학 예측 분야에 점 추정 기반(point forecast method) 모델 평균 기법들을 적용하여, 비교 연구를 수행함. 이를 통해 개별 모델 평균 기법들의 상대적인 성능을 비교함
- J. Geweke(2011)은 S.G. Hall 등(2007)의 제안방법을 기반으로 optimal prediction pools 기법을 제안함. 제안된 방법은 예측모델들을 전부 사용하기보다는 최적의 예측 모델 pool을 구성하는 방법론임. 최적 예측 모델 pool은 모든 예측 모델을 사용할 때보다 그 예측 능력이 더욱 향상될 수 있음을 보임
- X. Zhang 등(2015)은 Kullback-Leibler distance와 MMA기법을 혼합한 KLMA라는 기법을 제안하였으며, 이를 홍콩 부동산 시장 가격 전망에 적용하여 KLMA의 예측 우수성을 보임

□ 국내·외 연구현황을 통한 소결 및 시사점

- 국내·외 콘크리트 시간 변형 예측을 위한 연구는 모델식을 기반으로 실험 데이터와 비교를 수행하는 연구가 많이 진행되어 왔음. 모델식 예측 능력을 향상하기 위해 실험데이터로부터 모델식의 변수를 추정하고, 이를 토대로 장기 예측을 수행하고 있음
- 하지만 실험 조건 및 데이터에 따라 최적 예측모델이 달라지는 문제점이 존재하며, 이러한 문제점을 해결하기 위해 좀 더 정교한 모델식을 제안하고 발전하는 연구가 주로 이루어지고 있음
- 계량 경제학과 기상학에서는 동일한 관심 거동을 나타내는 다양한 모델이 존재할 경우, 모델 자체의 불확실성을 반영할 수 있는 많은 연구들이 진행되었음
- 해당 연구들은 단일 모델의 불확실성을 다중 모델의 개별 예측 정보를 활용하여 해결하는 연구가 많이

진행되고 있음. 대부분의 연구 결과는 다중 모델의 개별 예측 정보를 활용할 경우, 그 예측 신뢰성 및 정확도가 향상됨을 확인함

- 건설 분야(구조)에서는 이러한 접근 방법론(다중모델 평균화 기법)에 대한 도입이 아직 이루어지지 않은 상태이며, 콘크리트 시간변형 예측에 필연적으로 발생하는 모델 선택 문제(모델 불확실성)을 다중모델 평균화 기법을 통해 효과적으로 해결할 수 있을 것으로 기대됨. 또한 장기예측의 객관성, 신뢰성 및 정확성의 확보가 가능할 것으로 판단됨

제3장. 연구수행내용 및 성과

1. 1차년도

□ 핵심요소기술 1 :다중모델 평균화기법 기반 콘크리트 시간변형 예측향상 기술 개발

단위 기술	연구수행 내용 및 결과
콘크리트 배합 적용범위 도출 및 실험계획 및 수행	

- 다양한 문헌조사 및 전문가 자문을 통하여 보통강도 콘크리트, 고강도 콘크리트, 매스콘크리트 #1(고로슬래그), 매스콘크리트 #2(플라이 애쉬)를 도출함
- 콘크리트 장기변형 실험 수행 계획 수립

콘크리트 장기변형 실험 수행 계획

배합	시작일	종료일
보통강도, 고강도	2017.09	2018.03
고로슬래그, 플라이 애쉬 사용	2018.04	2018.10

실험체 형상, 양생조건, 실험 시작

실험 종류	시편 치수 및 형상	양생 조건	실험 시작일
압축강도	150x300mm (원주형)	재령 7일까지 표준양생 실험 시작일까지 기중양생 (온도 20도, 습도 55~60%)	재령 28일
크리프			
건조수축	100x100x400mm (각주형)	재령 7일까지 표준양생	재령 7일

실험 별 실험 방법

실험종류	실험 방법
압축강도 및 탄성계수	KS F 2405 (콘크리트 압축강도 시험 방법)
크리프	KS F 2453 (콘크리트의 압축 크리프 시험 방법)
건조수축	KS F 2424 (모르타르 및 콘크리트의 길이 변화 시험 방법)

실험 별 시편 개수

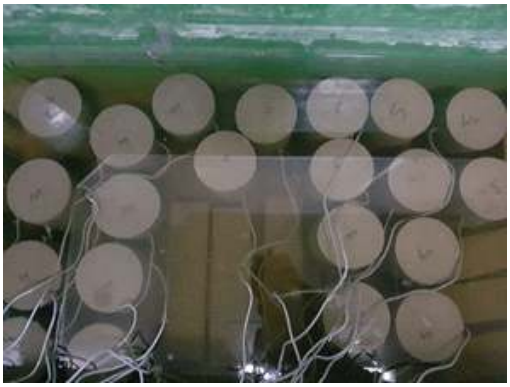
배합	크리프				건조수축
	압축강도	기본크리프	총크리프	크리프를 제외한 기타 변형	
보통강도	3	3	3	3	3
고강도	3	3	3	3	3

- 4가지 배합 중 2가지 배합(보통강도 및 고강도)에 대한 콘크리트 시간변형 장기 실험을 수행

콘크리트 배합표

배합종류	물-결합재비	잔골재율(%)	단위중량(kg/m^3)				
			물	시멘트	잔골재	굵은골재	혼화제
보통강도	0.3	40.7	170	566	639	933	3.9
고강도	0.5	44.7	182	364	761	943	2.4

- 실험체 양생, 압축강도 및 탄성계수 실험, 크리프 및 건조수축 실험 수행 중



(a) 표준 양생

(b) 기준 양생

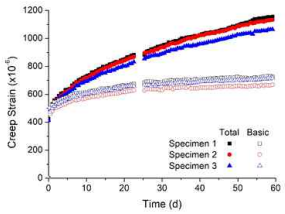
실험체 양생

(a) 실험 세팅

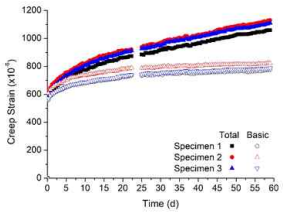
(b) 실험 수행

압축강도 및 탄성계수 실험

(a) 크리프 실험



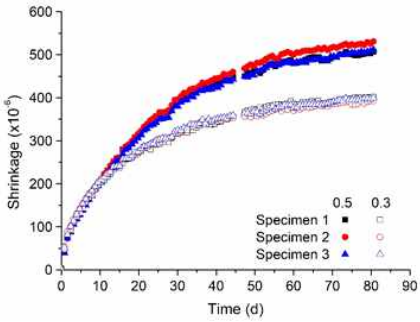
(b) 실험데이터(고강도 배합)



(c) 실험데이터(보통강도 배합)

크리프 실험 및 실험 데이터

(a) 건조수축 실험

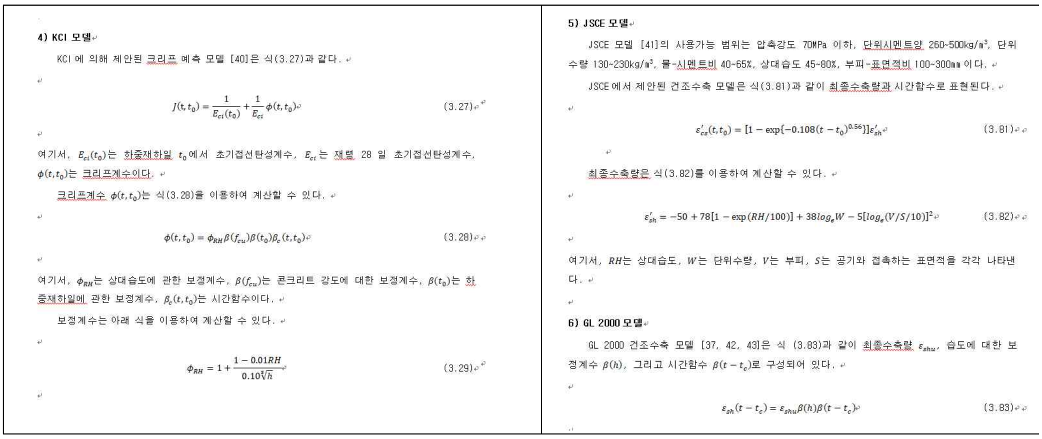


(b) 실험데이터

건조수축 실험 및 실험 데이터

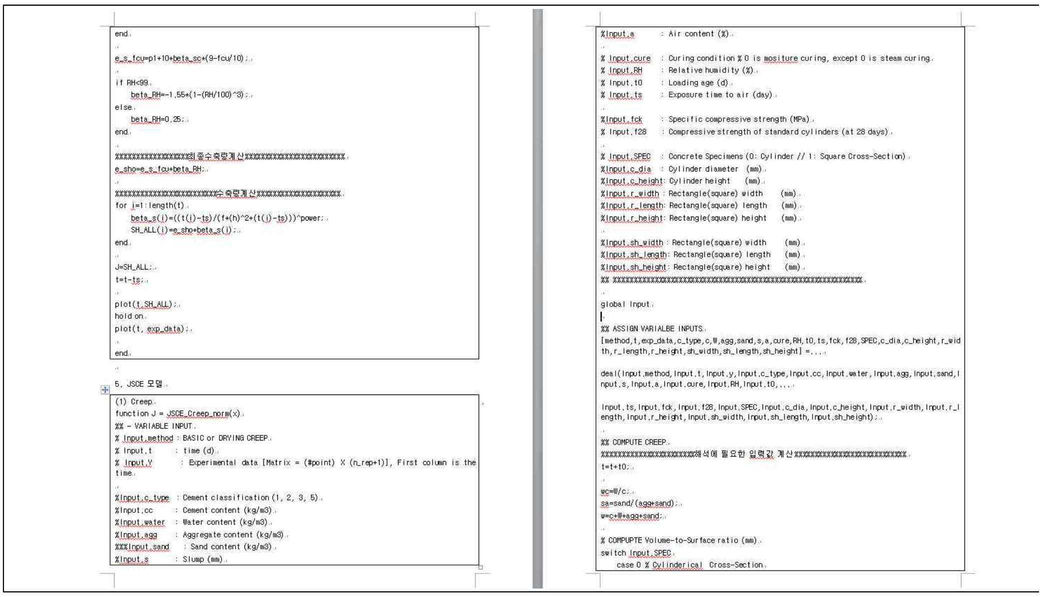
콘크리트 시간변형 예측모델 분석 및 구축	• 콘크리트 시간변형 예측 모델 7개 선정 완료: ACI 모델, AASHTO 모델, *fib* 2010 모델, KCI 모델, JSCE 모델, GL 2000모델, B3모델

- 시간변형 예측 모델 별 내용 분석 및 정리 완료



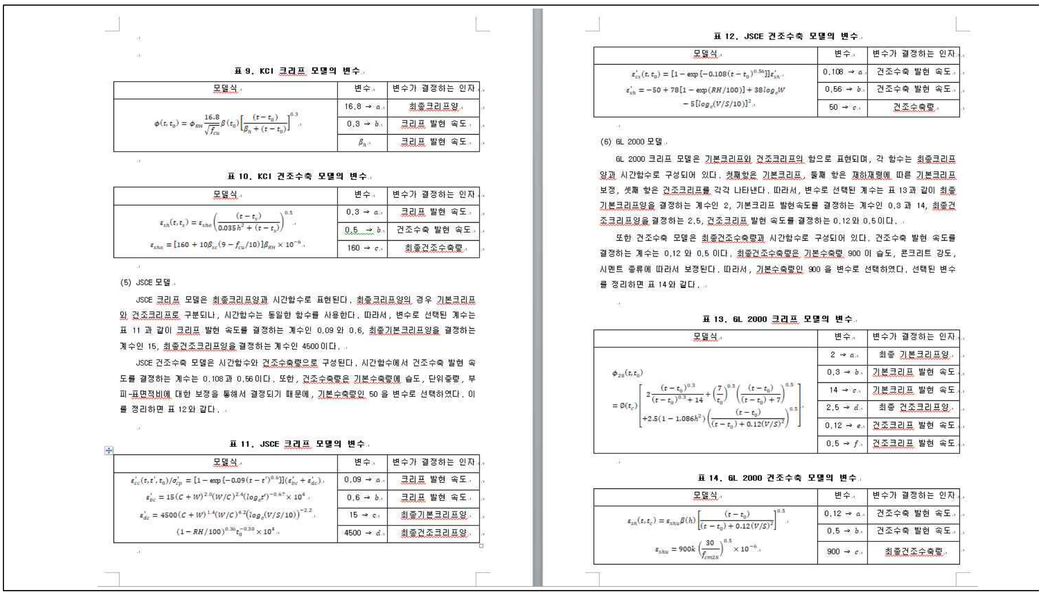
시간예측 모델 별 정리된 내용

- 예측 모델 별 MATLAB 소스 코드 개발 완료



시간예측 모델 별 소스 코드

- 콘크리트 시간변형 예측 모델 별 변수 선정 완료



시간예측 모델 별 변수 선정

- 예측 모델 별 변수 선정에 대한 전문가 자문 완료

표 17. 모델 변수 선정 전문가 자문의견

전문가	전문가 자문의견
1.	- 콘크리트의 대표적 시간변형 특성인 크리프와 건조수축에 대한 국내외 주요 모델식에 대한 선정 및 관련 계수의 다중모델 변수화는 과제의 목표달성을 위해 적절히 수행된 것으로 사료됨. - 연구 초기단계이므로 향후 본 과제 목표달성을 위한 다중모델 평균화 기법에 대한 구체적이고 합리적인 개발이 수행되어야 할 것으로 보임(ex. 각 모델간의 경중률은 어떻게 적용할 것인지 등). - 각 모델식간의 크리프와 건조수축 모델의 변수 선정시 모델별로 변수의 개수가 다른데, 이러한 사항에 대한 고려가 필요할 것으로 판단됨.
2.	- 예측 결과에 영향을 미치는 주요 변수의 선정이 예측 결과에 미치는 영향이 매우 클 수 있기 때문에 변수 선정이 매우 중요함. - 주된 영향변수인 시멘트 종류, 시편의 형상 및 치수, 양생조건을 고려하여 변수를 선정하였고, 모델에서 가장 큰 영향을 미치는 변수이기 때문에 선정 결과는 타당하다고 판단됨.
3.	- 선정된 모델식은 현재 콘크리트 시간변형을 대표하는 모델식(미국, 유럽, 한국, 일본 등)으로 적절하게 잘 선정된 것으로 판단됨. - 콘크리트의 시간변형을 예측하는 모델식(ACI, AASHTO, fib 2010, KCI, JSCE, GL 2000, B3 모델)에 대한 변수 선정은 적절하게 수행된 것으로 판단됨. - 차년도 다중모델 평균화 기법 개발과 함께 추가적이 검토가 필요할 것으로 판단됨.
4.	- 현재 검토된 모델들은 크리프와 건조수축을 예측할 수 있는 대표적인 모델들로 판단됨. - 각 모델들은 모델이 개발될 때 크리프와 건조수축에 미치는 영향 인자들을 고려하여 개발이 되었기 때문 정확한 예측을 위해서는 고려할 수 있는 인자들을 모두 고려할 필요가 있음. - 현재 선정된 변수들은 크리프와 건조수축에 크게 영향을 미치는 인자들로 판단되며, 선정되지 않은 변수들에 대해서는 민감도 해석 등을 통해 검토할 필요가 있음.

전문가 자문 의견

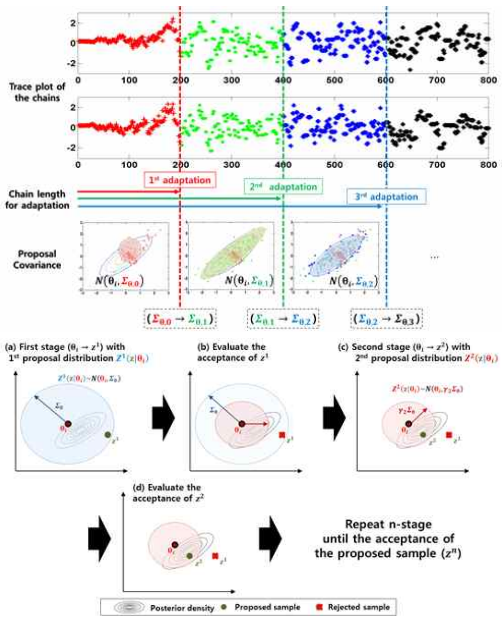
[효율적인 샘플링 알고리즘]

- 베이지안 추론을 위한 효율적인 MCMC 알고리즘 분석: DRAM, AHMC, DREAM
  - Delayed rejection adaptive Metropolis (DRAM) algorithm: Adaptive random walk
  - Adaptive Hamiltonian Monte Carlo (AHMC) Algorithm: Hamiltonian dynamics
  - Differential evolution adaptive Metropolis (DREAM) algorithm: Evolutionary strategy

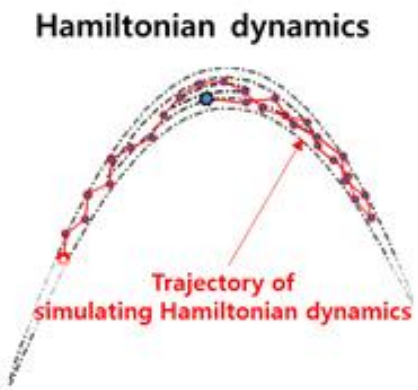
베이지안 추론 기반 불확실성 추정 기법 선정

AM 메커니즘

DR 메커니즘



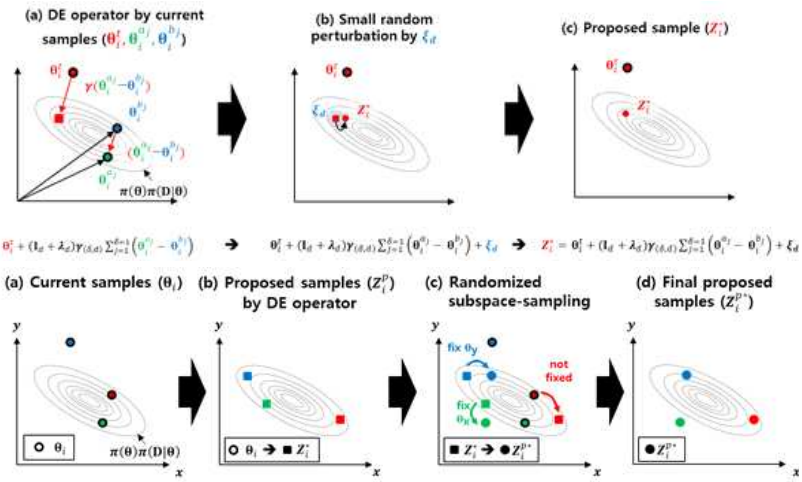
DRAM 알고리즘 개요



AHMC 알고리즘 개요

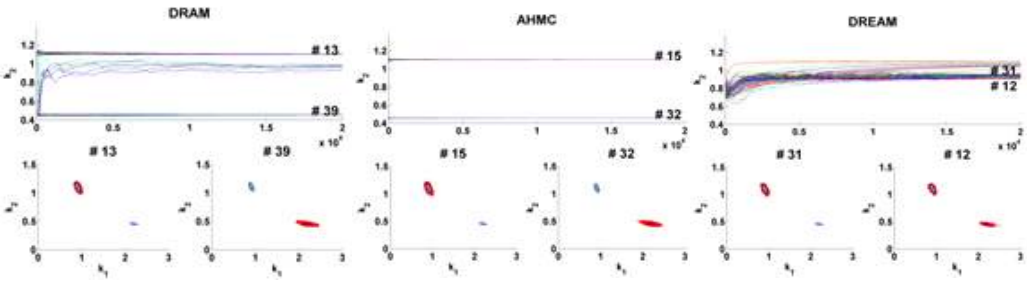
Differential Evolution 연산

Randomized subspace sampling



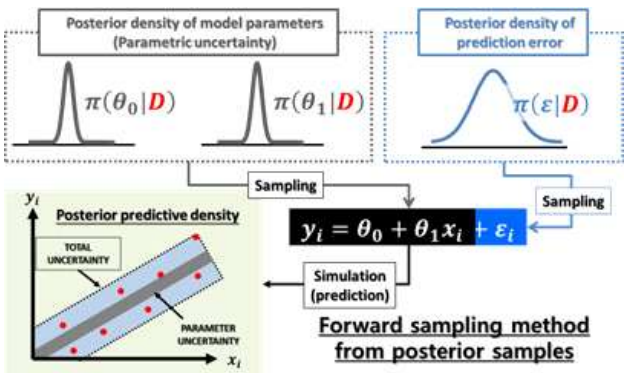
DREAM 알고리즘 개요

- 효율적인 샘플링 알고리즘 선정을 위한 비교연구 수행: DREAM 알고리즘 선정



상기 3가지 알고리즘에 대한 비교연구 결과

- 불확실성 전파를 통한 사후 예측 분포 산정 방법 선정: Forward sampling method

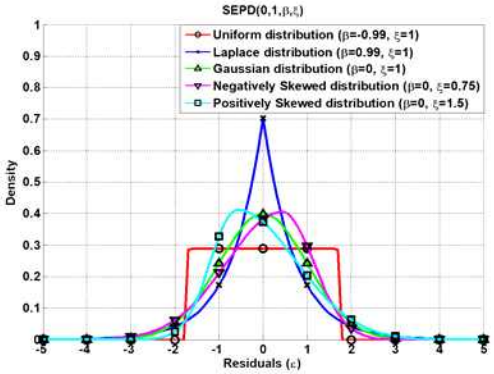


Forward sampling 방법

[베이지안 추론]

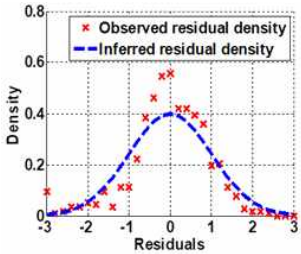
- 다양한 잔차 특성을 반영할 수 있는 우도함수 개발 완료: Skew exponential power density (SEPD)

$$\mathrm{SEPD}(a_i|0,1,\beta,\xi) = \frac{2\sigma_\xi}{\xi+\xi^{-1}}\omega_\beta \exp\left\{-c_\beta\left|\xi^{-sign(A)}sign(A)\right|^{2/(1+\beta)}\right\}$$

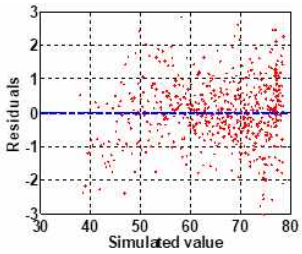


Generalized 우도 함수를 위한 SEPD 분포

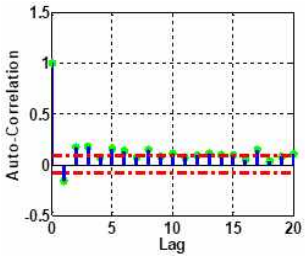
- 정량화된 불확실성의 통계적 유효성 진단 방법 제시



잔차 분포 진단

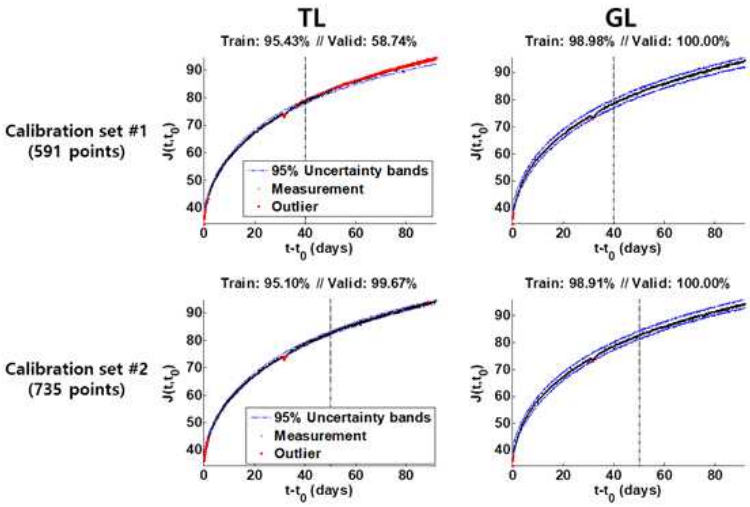


분산성 진단



상관성 진단

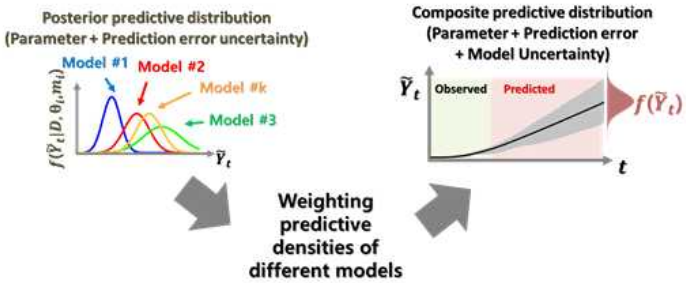
- Generalized 우도 함수 성능 검증 완료



TL과 GL의 예측 성능 검증

다중모델 평균화 기법 개발

- 다중모델 평균화 기법 방식 선정: 분포 기반(density-based) 모델 평균화 기법

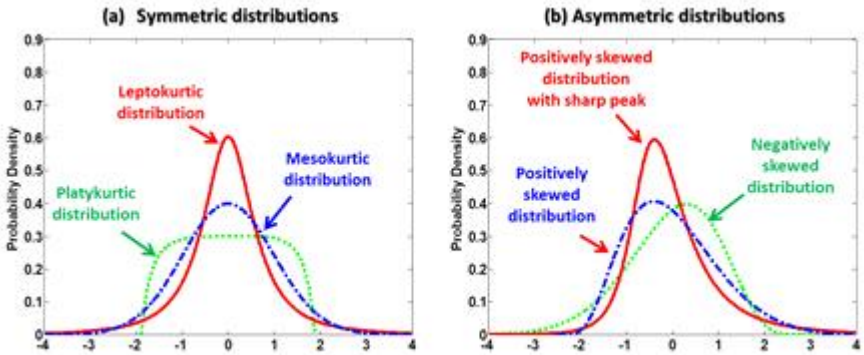


분포 기반 다중모델 평균화 기법

- 다중모델 평균화 기법 수행 절차 수립 완료
  - 모델 별 베이지안 추론 기반 불확실성(사후 분포) 정량화

- 정량화된 사후 분포로부터 사후 예측 분포 forward 샘플링(모델 별 사후 예측 샘플 생성)
- 사후 예측 분포 샘플로부터 확률밀도 함수 추정(Parametric distribution approximation)
- 최적 가중치 산정을 위한 최적화 알고리즘

• 사후 예측 분포도출 방법 선정: Johnson system

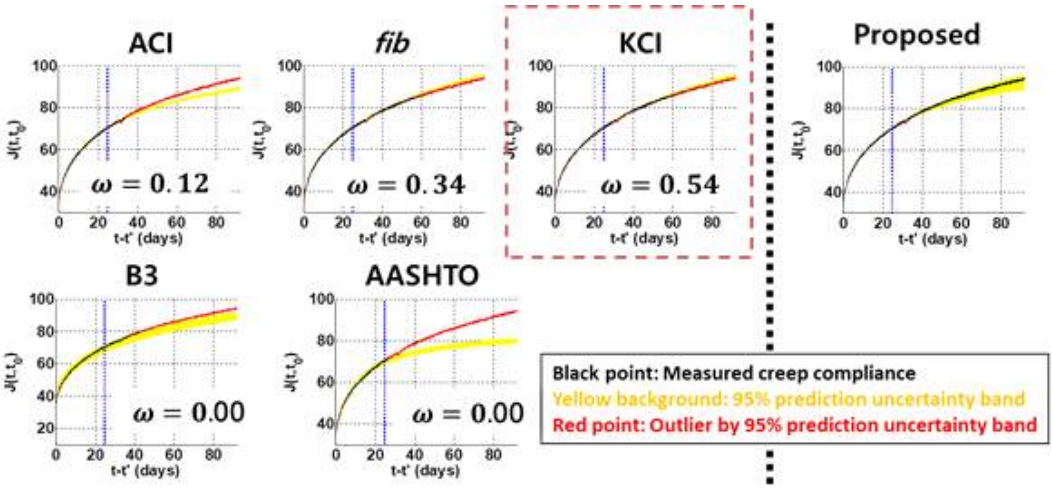


Johnson system의 다양한 분포 형상

• 예측 모델 별 최적 가중치 산정을 위한 방법론 개발: Firefly 알고리즘을 활용한 최대화 문제 규정

$$\omega^* = \mathrm{argmax} \sum_{t=1}^{T} \ln\left[p\left(Y_{cal}(t)\right)\right]$$

• 개발 기법 검증 수행 완료



*구체적인 내용은 별첨보고서 1 참조

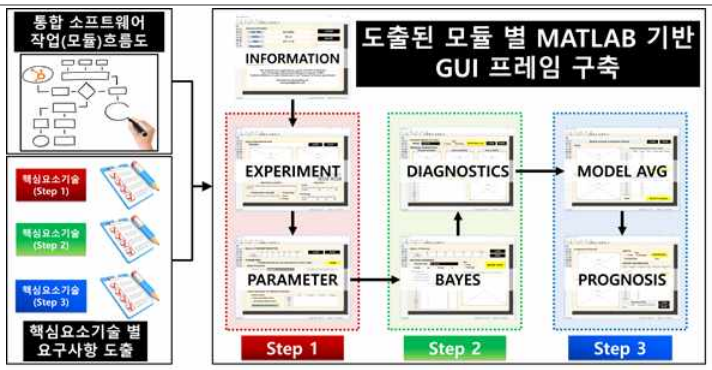
□ 핵심요소기술 2: 다중모델 평균화기법 기반 콘크리트 시간변형 예측 통합 GUI 프로그램 개발

단위 기술	연구수행 내용 및 결과
핵심요소기술 별 모듈 정의 및 개발	• [핵심요소기술 1]의 단계 별 요소기술 정의 완료

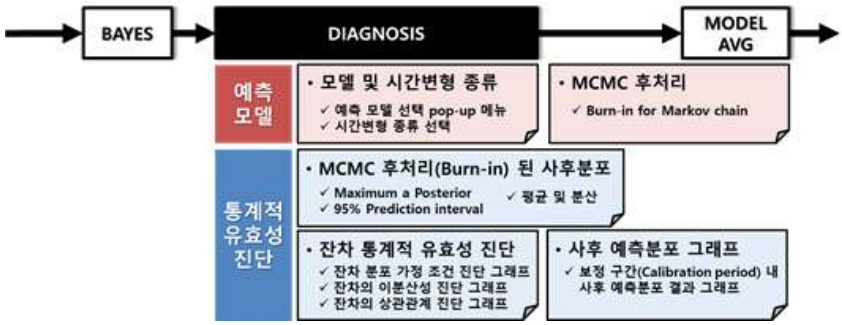
표1. [핵심요소기술 1]의 단계 별 요소기술 정의

단계	단계 별 작업 내용	모듈
Step 1	① 콘크리트 배합 결정 및 단기 시간변형 실험 수행	[EXPERIMENT]
	② 시간변형 예측 모델 구축 및 변수 정의	[PARAMETER]
Step 2	③ 베이지안 추론(사전 분포 및 우도 함수 정의) ④ 모델 변수 및 예측오차의 사후분포 추정 샘플링 알고리즘	[BAYES]
	⑤ 정량화된 불확실성(사후분포)의 통계적 유효성 진단	[DIAGNOSIS]
Step 3	⑥ 예측 모델 별 사후 예측분포 산출 ⑦ 다중모델 평균화 기법 수행을 모델 별 최적 가중치 산정	[MODEL AVG]
	⑧ 산정된 가중치를 토대로 시간변형 예측 수행 및 추출	[PROGNOSIS]

• 핵심요소기술 별 모듈 및 흐름도 개발 완료

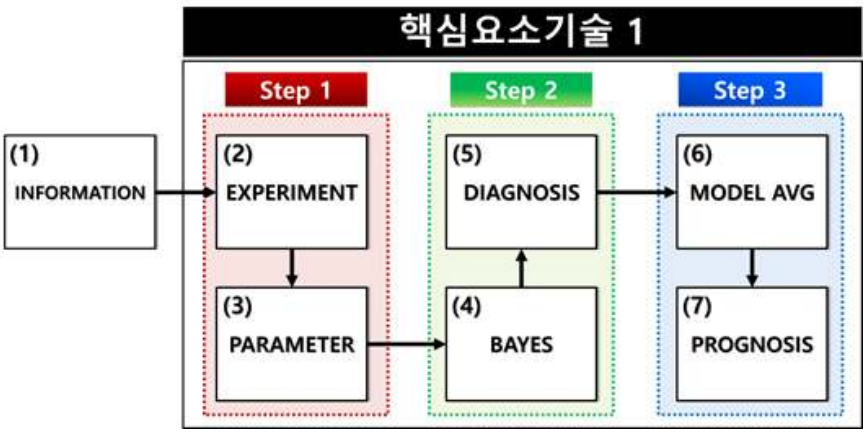


• 상기 도출된 모듈의 요구사항 분석

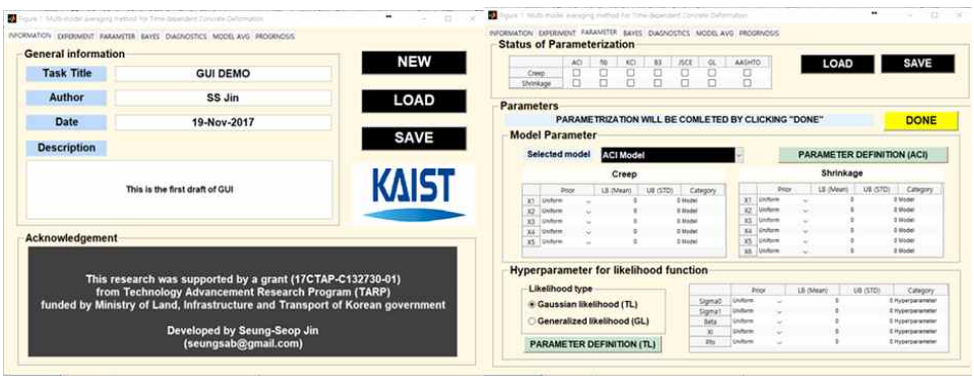


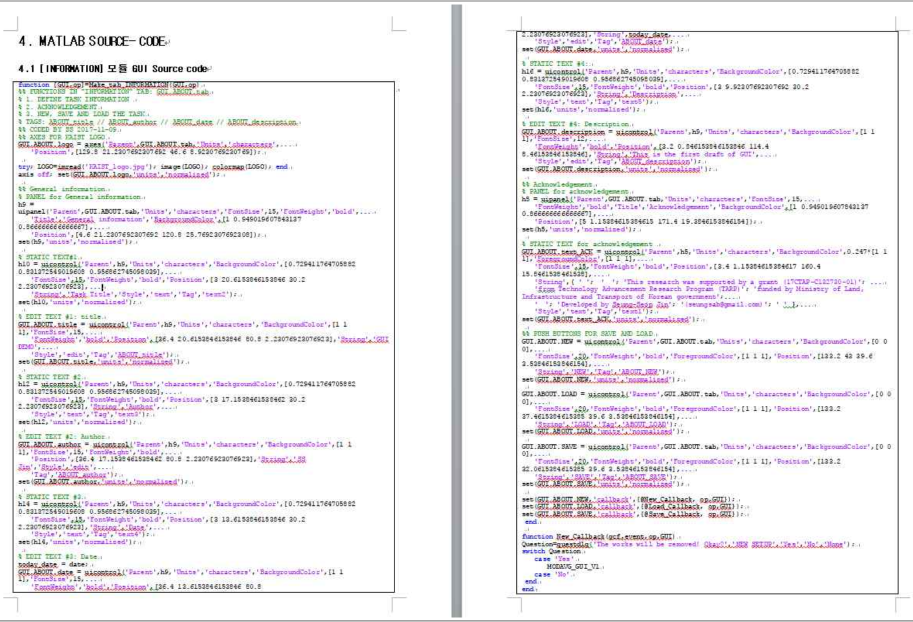
핵심요소기술 별 GUI 프레임워크 개발

• 통합 GUI 프로그램 작업 흐름도 도출



• 통합 GUI 프로그램 프레임워크 개발 및 MATLAB 소스코드 작성 완료





4. MATLAB SOURCE- CODE

4.1 [INFORMATION] 모듈 GUI Source code

```
function [GUI,op]=Make_tab_INFORMATION(GUI,op)
%% FUNCTIONS IN "INFORMATION" TAB: GUI.ABOUT.tab
% 1. DEFINE TASK INFORMATION
% 2. ACKNOWLEDGEMENT
% 3. NEW, SAVE AND LOAD THE TASK.
% TAGS: ABOUT_title // ABOUT_author // ABOUT_date // ABOUT_description
%% CODED BY SS 2017-11-09
%% AXES FOR KAIST LOGO
GUI.ABOUT.logo = axes('Parent',GUI.ABOUT.tab,'Units','characters',...
    'Position',[129.8 21.2307692307692 46.6 8.92307692307692]);

try; LOGO=imread('KAIST_logo.jpg'); image(LOGO); colormap(LOGO); end
axis off; set(GUI.ABOUT.logo,'units','normalized');

%% General information
% PANEL for General information
h9 =
uipanel('Parent',GUI.ABOUT.tab,'Units','characters','FontSize',15,'FontWeight','bold',...
    'Title','General information','BackgroundColor',[1 0.949019607843137
0.866666666666667],...
    'Position',[4.6 21.2307692307692 120.8 25.7692307692308]);
set(h9,'units','normalized');

% STATIC TEXT#1
h10 = uicontrol('Parent',h9,'Units','characters','BackgroundColor',[0.729411764705882
0.831372549019608 0.956862745098039],...
    'FontSize',15,'FontWeight','bold','Position',[3 20.6153846153846 30.2
2.23076923076923],...
    'String','Task Title','Style','text','Tag','text2');
set(h10,'units','normalized');

% EDIT TEXT #1: title
GUI.ABOUT.title = uicontrol('Parent',h9,'Units','characters','BackgroundColor',[1 1
1],'FontSize',15,...
    'FontWeight','bold','Position',[36.4 20.6153846153846 80.8 2.23076923076923],'String','GUI
DEMO',...
    'Style','edit','Tag','ABOUT_title');
set(GUI.ABOUT.title,'units','normalized');

% STATIC TEXT #2
h12 = uicontrol('Parent',h9,'Units','characters','BackgroundColor',[0.729411764705882
0.831372549019608 0.956862745098039],...
    'FontSize',15,'FontWeight','bold','Position',[3 17.1538461538462 30.2
2.23076923076923],'String','Author',...
    'Style','text','Tag','text3');
set(h12,'units','normalized');

% EDIT TEXT #2: Author
GUI.ABOUT.author = uicontrol('Parent',h9,'Units','characters','BackgroundColor',[1 1
1],'FontSize',15,'FontWeight','bold',...
    'Position',[36.4 17.1538461538462 80.8 2.23076923076923],'String','SS
Jin','Style','edit',...
    'Tag','ABOUT_author');
set(GUI.ABOUT.author,'units','normalized');

% STATIC TEXT #3
h14 = uicontrol('Parent',h9,'Units','characters','BackgroundColor',[0.729411764705882
0.831372549019608 0.956862745098039],...
    'FontSize',15,'FontWeight','bold','Position',[3 13.6153846153846 30.2
2.23076923076923],'String','Date',...
    'Style','text','Tag','text4');
set(h14,'units','normalized');

% EDIT TEXT #3: Date
today_date = date;
GUI.ABOUT.date = uicontrol('Parent',h9,'Units','characters','BackgroundColor',[1 1
1],'FontSize',15,...
    'FontWeight','bold','Position',[36.4 13.6153846153846 80.8
2.23076923076923],'String',today_date,...
    'Style','edit','Tag','ABOUT_date');
set(GUI.ABOUT.date,'units','normalized');

% STATIC TEXT #4
h16 = uicontrol('Parent',h9,'Units','characters','BackgroundColor',[0.729411764705882
0.831372549019608 0.956862745098039],...
    'FontSize',15,'FontWeight','bold','Position',[3 9.92307692307692 30.2
2.23076923076923],'String','Description',...
    'Style','text','Tag','text5');
set(h16,'units','normalized');

% EDIT TEXT #4: Description
GUI.ABOUT.description = uicontrol('Parent',h9,'Units','characters','BackgroundColor',[1 1
1],'FontSize',12,...
    'FontWeight','bold','Position',[3.2 0.846153846153846 114.4
8.46153846153846],'String','This is the first draft of GUI',...
    'Style','edit','Tag','ABOUT_description');
set(GUI.ABOUT.description,'units','normalized');

%% Acknowledgement
% PANEL for acknowledgement
h5 = uipanel('Parent',GUI.ABOUT.tab,'Units','characters','FontSize',15,...
    'FontWeight','bold','Title','Acknowledgement','BackgroundColor',[1 0.949019607843137
0.866666666666667],...
    'Position',[5 1.15384615384615 171.4 19.3846153846154]);
set(h5,'units','normalized');

% STATIC TEXT for acknowledgement
GUI.ABOUT.text_ACK = uicontrol('Parent',h5,'Units','characters','BackgroundColor',0.247*[1 1
1],'ForegroundColor',[1 1 1],...
    'FontSize',15,'FontWeight','bold','Position',[3.4 1.15384615384617 160.4
15.8461538461538],...
    'String',{ ' '; ' '; 'This research was supported by a grant (17CTAP-C122730-01)'; ...
    'from Technology Advancement Research Program (TARP)'; 'funded by Ministry of Land,
Infrastructure and Transport of Korean government';...
    ' '; 'Developed by Seung-Seop Jin'; '(seungsab@gmail.com)'; ' '},...
    'Style','text','Tag','text1');
set(GUI.ABOUT.text_ACK,'units','normalized');

%% PUSH BUTTONS FOR SAVE AND LOAD
GUI.ABOUT.NEW = uicontrol('Parent',GUI.ABOUT.tab,'Units','characters','BackgroundColor',[0 0
0],...
    'FontSize',20,'FontWeight','bold','ForegroundColor',[1 1 1],'Position',[133.2 43 39.6
3.53846153846154],...
    'String','NEW','Tag','ABOUT_NEW');
set(GUI.ABOUT.NEW,'units','normalized');

GUI.ABOUT.LOAD = uicontrol('Parent',GUI.ABOUT.tab,'Units','characters','BackgroundColor',[0 0
0],...
    'FontSize',20,'FontWeight','bold','ForegroundColor',[1 1 1],'Position',[133.2
37.4615384615385 39.6 3.53846153846154],...
    'String','LOAD','Tag','ABOUT_LOAD');
set(GUI.ABOUT.LOAD,'units','normalized');

GUI.ABOUT.SAVE = uicontrol('Parent',GUI.ABOUT.tab,'Units','characters','BackgroundColor',[0 0
0],...
    'FontSize',20,'FontWeight','bold','ForegroundColor',[1 1 1],'Position',[133.2
32.0615384615385 39.6 3.53846153846154],...
    'String','SAVE','Tag','ABOUT_SAVE');
set(GUI.ABOUT.SAVE,'units','normalized');

set(GUI.ABOUT.NEW,'callback',{@New_Callback, op,GUI});
set(GUI.ABOUT.LOAD,'callback',{@Load_Callback, op,GUI});
set(GUI.ABOUT.SAVE,'callback',{@Save_Callback, op,GUI});
end

function New_Callback(gcf,event,op,GUI)
Question=questdlg('The works will be removed! Okay?','NEW SETUP','Yes','No','None');
switch Question
   case 'Yes'
      MODAVG_GUI_V1
   case 'No'
 end
end
```

*구체적인 내용은 별첨보고서 2 참조

2. 2차년도

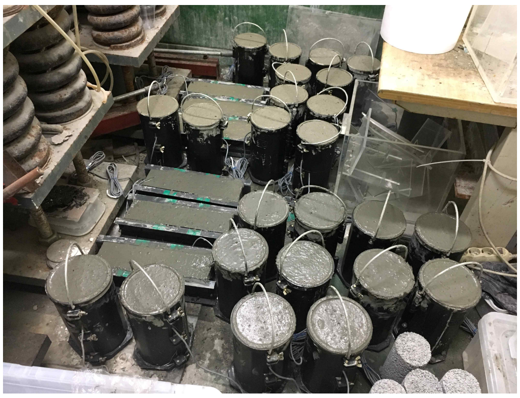
□ 핵심요소기술 1:다중모델 평균화기법 기반 콘크리트 시간변형 예측향상 기술 개발

<table>
<tr><th>단위 기술</th><th>연구수행 내용 및 결과</th></tr>
<tr><td>실험 데이터를
통한 검증 결과</td><td>

• **콘크리트 장기변형 실험 수행**

콘크리트 장기변형 실험 수행 계획

배합	시작일	종료일
고로슬래그, 플라이애쉬 사용	2018.05	2018.12


(a) 타설 완료

(b) 양생

실험체 제작 및 양생

(a) 상,하면 연마

(b) 실험 수행

압축강도 및 탄성계수 실험

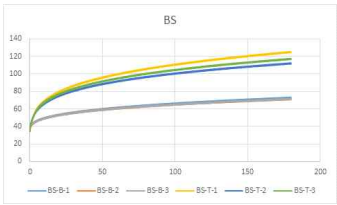
</td></tr>
</table>

- 데이터 신뢰성 확보

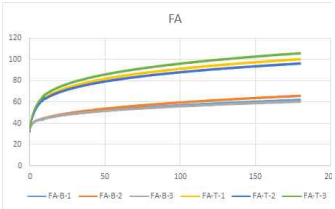
1차년도 데이터의 불안정성을 해결하고, 데이터의 신뢰성 확보을 확보하기 위하여 AVR(average voltage reulator), 무정전전원장치 사용, 항온항습실을 개선

<AVR> <자동습도유지장치> <무정전전원장치>

(a) 크리프 실험



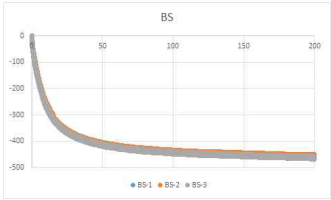
(b) 실험데이터(고로슬래그)



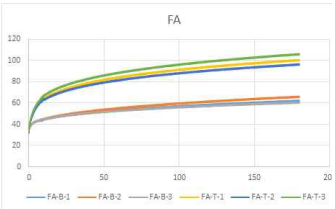
(c) 실험데이터(플라이애쉬)

크리프 실험 및 실험 데이터

(a) 건조수축 실험



(b) 실험데이터(고로슬래그)



(c) 실험데이터(플라이애쉬)

건조수축 실험 및 실험 데이터

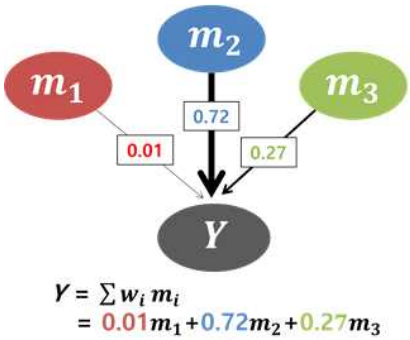
- **다중모델 평균과 기법 선정:** Mallows model averaging
  - 모델의 적합도와 모델의 복잡도를 동시에 고려
  - 최적해 해석: Globalized Nelder-Mead method

<모델 적합도> <모델 복잡도>

$$C_n(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{t=1}^{n}\left(y(t) - \sum_{i=1}^{m}\omega_i \hat{y}_{MAP}^{(i)}(t)\right)^2 + 2\sum_{i=1}^{m}\omega_i k_i s^2$$

$$s^2 = \frac{1}{n-k_m}\sum_{t=1}^{n}\left(y(t) - \hat{y}_{MAP}^{m}(t)\right)^2$$

$$\hat{\omega} = \arg\min_{\omega\in\mathcal{H}} C_n(\omega)$$



다중모델 평균화 기법의 작업 순서는 다음과 같다.

1. 보정데이터를 이용하여 개별 예측 모델에 대한 베이지안 추론을 수행한다.
2. 베이지안 추론을 통해 정량화된 사후분포에서 최대 사후확률 예측치(Maximum a posterior estimates, MAP)를 산출한다.

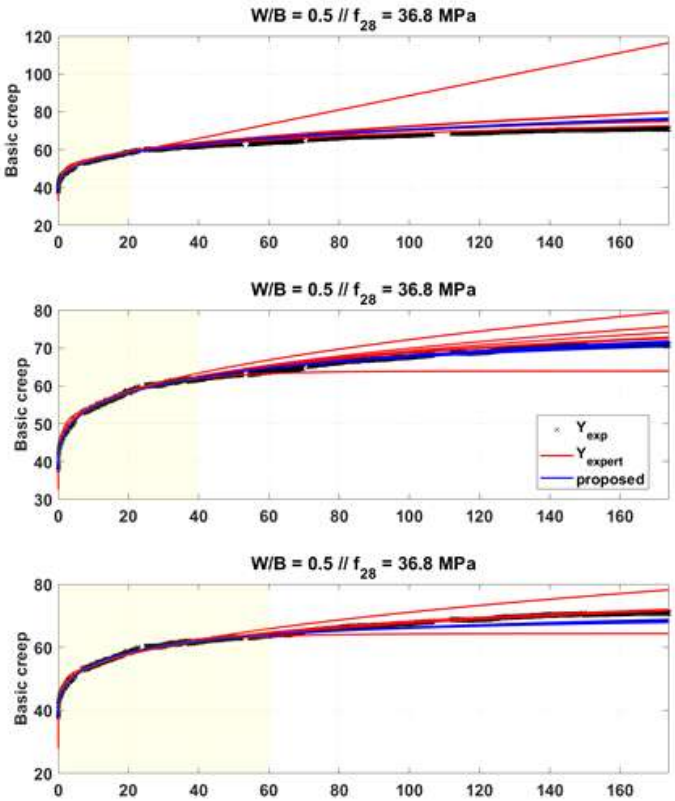
3. 예측 모델 별 산출된 MAP를 예측 기저로 사용하여 보정데이터에 대해 generalized Mallow criterion이 최소화되는 가중치 조합을 구한다 (globalized Nelder-mead method 활용).

4. 최적화 알고리즘을 통해 산출된 가중치를 각 개별 모델들의 예측에 가중선형 결합하여 최적 예측을 산출한다.

• **개발 기법 검증 수행 완료**

개발 기법 검증 개요

	전문가 그룹	비전문가 그룹
전문성	콘크리트 시간변형 관련 전공자	콘크리트 시간변형 관련 비전공자
배합 범위	4가지 배합범위(보통강도, 고강도, 매스 콘크리트)에 대해 수행	
실험 데이터	• 장기시간변형 실험을 통해 계측된 데이터를 보정 구간(Calibration period)와 평가 구간(Evaluation period)으로 구분 • 두 그룹 모두에게 보정 구간의 실험데이터를 제공하고 해당 데이터를 활용하여 평가 구간에 대한 예측을 수행	
예측 방법	[기존 방법-사용자 주관성 기반] • 전문가 자체 기법 및 지식을 토대로 장기 시간변형 예측 수행	[제안 기법-다중모델평균화 기법] • 다중모델 평균화기법 및 활용매뉴얼 제공 • 이를 토대로 장기 시간변형 예측 수행
분석 내용	• **예측 변동성 분석**: 전문가 그룹과 비전문가 그룹의 예측 결과를 변동계수(coefficient of variance)로 산정하여 예측 변동성 산출 • **예측 정확도 분석**: 예측 결과 #1과 #2를 실제 실험데이터와 비교하여 평균제곱근편차(RMSE)	



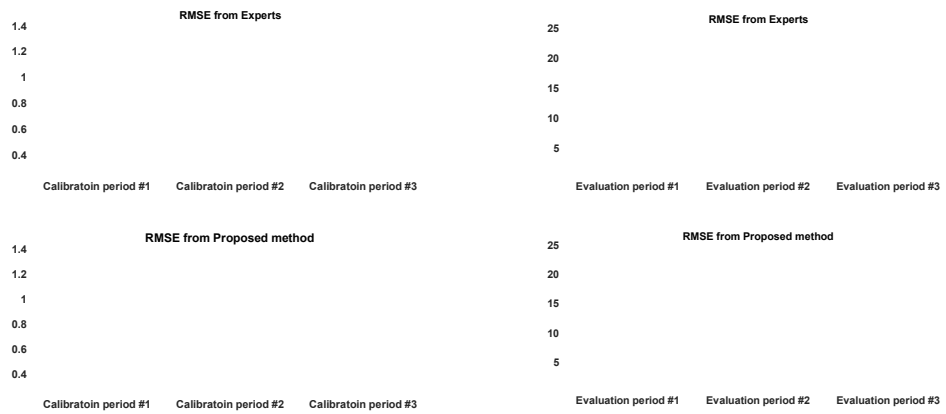
예측 결과 (보정 구간: 20, 40, 60일): 빨간색 실선(전문가 그룹), 파란색 실선 (비전문가 그룹, 다중모델평균화 기법), 노란색 배경색(보정데이터 영역)

RMSE 값(보정구간)

Calibration Period						
Normal	1	2	3	4	5	6
20	0.87	0.30	0.27	0.25	0.29	1.42
40	0.79	0.35	0.39	0.27	0.38	0.78
60	0.89	0.51	0.51	0.25	0.52	0.75
Calibration Period						
Normal	1	2	3	4	5	6
20	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
40	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
60	0.29	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30

RMSE 값 (평가구간)

Evaluation Period						
Normal	1	2	3	4	5	6
20	5.27	1.02	4.97	25.16	2.63	2.92
40	5.32	1.09	2.73	4.67	1.86	1.31
60	4.56	0.63	0.36	4.70	0.28	0.61
Evaluation Period						
Normal	1	2	3	4	5	6
20	3.14	3.08	3.11	2.93	0.33	0.35
40	0.56	0.61	0.56	0.42	0.49	0.43
60	2.13	2.28	1.77	1.80	1.90	1.94



(a) 보정구간 (b) 평가구간

RMSE 값 비교

전문가 기본크리프 RMSE 분산계수:보정구간

	05	03	FA	BS
Cal20	0.852	0.809	0.237	0.232
Cal40	0.467	0.985	0.197	0.223
Cal60	0.390	0.905	0.130	0.185

제안기법 기본크리프 RMSE 분산계수:보정구간

	05	03	FA	BS
Cal20	0.000972	0.000322	0.200	0.000567
Cal40	0.00648	0.00402	0.0337	0.000334
Cal60	0.0110	0.0103	0.00312	0.00503

전문가 기본크리프 RMSE 분산계수:평가구간

	05	03	FA	BS
Cal20	1.29	1.08	0.557	1.48
Cal40	0.630	0.873	0.870	1.79
Cal60	1.16	1.06	0.477	1.62

제안기법 기본크리프 RMSE 분산계수:평가구간

	05	03	FA	BS
Cal20	0.0500	0.207	0.619	0.302
Cal40	0.148	0.0794	0.118	0.208
Cal60	0.102	0.0531	0.0514	0.463

전문가 기본크리프 RMSE 최솟값, 평균값, 최댓값:보정구간

		05	03	FA	BS
Cal20	Min	0.25	0.15	0.13	0.14
	Average	0.57	0.36	0.20	0.16
	Max	1.42	0.82	0.28	0.23
Cal40	Min	0.27	0.17	0.14	0.14
	Average	0.49	0.49	0.19	0.16
	Max	0.79	1.46	0.26	0.23
Cal60	Min	0.25	0.17	0.15	0.14
	Average	0.57	0.57	0.19	0.16
	Max	0.89	1.59	0.23	0.21

제안기법 기본크리프 RMSE 최솟값, 평균값, 최댓값:보정구간

		05	03	FA	BS
Cal20	Min	0.25	0.14	0.18	0.14
	Average	0.25	0.14	0.22	0.14
	Max	0.25	0.14	0.28	0.14
Cal40	Min	0.31	0.19	0.18	0.14
	Average	0.31	0.19	0.19	0.14
	Max	0.31	0.20	0.20	0.14
Cal60	Min	0.29	0.17	0.18	0.14
	Average	0.30	0.17	0.18	0.14
	Max	0.30	0.18	0.18	0.14

전문가 기본크리프 RMSE 최솟값, 평균값, 최댓값:평가구간

		05	03	FA	BS
Cal20	Min	1.02	0.64	0.48	0.14
	Average	7.00	4.42	3.47	2.34
	Max	25.16	13.49	5.56	9.22
Cal40	Min	1.09	0.67	0.28	0.14
	Average	2.83	2.25	1.61	1.15
	Max	5.32	5.66	4.34	5.31
Cal60	Min	0.28	0.20	0.45	0.14
	Average	1.86	1.35	0.91	0.67
	Max	4.70	4.07	1.70	2.86

제안기법 기본크리프 RMSE 최솟값, 평균값, 최댓값:평가구간

		05	03	FA	BS
Cal20	Min	2.93	0.66	0.39	0.14
	Average	3.16	0.90	1.69	0.20
	Max	3.35	1.11	2.71	0.28
Cal40	Min	0.42	0.99	1.12	0.21
	Average	0.51	1.07	1.33	0.30
	Max	0.61	1.20	1.50	0.38
Cal60	Min	1.77	1.79	0.63	0.16
	Average	1.97	1.96	0.68	0.24
	Max	2.28	2.08	0.73	0.43

전문가들의 예측결과의 높은 RMSE 변동성은 **보정 데이터에 대한 적합도보다는 장기변형 예측에 사용되는 모델식의 형태에 큰 영향을 받음을 의미**한다. **동일한 예측 모델을 사용하더라도 사용한 실험데이터의 길이에 따라서도 예측 결과가 크게 변화되는 것을 확인**하였다. 따라서 콘크리트 장기시간 변형을 예측함에 있어 적절한 모델식과 실험데이터의 신중한 선택이 요구됨을 의미한다. 하지만 **최적의 모델식과 요구되는 실험데이터 구간은 배합비와 양생 조건 등에 따라 상이해지며, 이에 대한 사전 정보는 알 수가 없다는 한**

	<u>계점이 여전히 존재</u>한다. 이러한 측면에서 다중모델 평균화 기법은 특정 모델식 하나 만을 사용하는 것이 아니라 다양한 모델의 예측 성능을 활용하여 모델 불확실성을 고려할 수 있다는 측면에서 높고 안정적인 예측 정확도를 제공한다. 물론 제안된 방법에서도 예측 모델 pool의 구성에 따라 성능이 좌우될 수 있지만, 단일 예측 모델을 사용하는 것에 비해 예측 성능을 안정적으로 향상함을 본 연구를 통해서 검증하였다.

외부전문가 활용 결과 및 자문

- **전문가 선정 모델 및 변수**

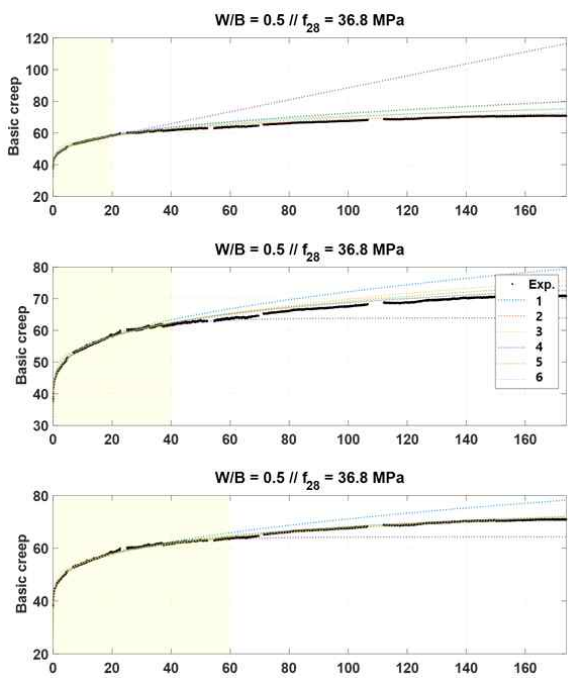
1) 전문가 1

배합	크리프
보통강도	$0.6\times\frac{10^6}{\widehat{E28}}+\widehat{q_2}\left(0.086t^{\frac{2}{9}}+1.21t^{\frac{4}{9}}\right)^{-1}\left[1+\left(\frac{\left(0.086t^{\frac{2}{9}}+1.21t^{\frac{4}{9}}\right)^{-1}}{t'^{-0.5}ln[1+(t-t')^{0.1}]}\right)^{\left(1.7t'^{0.12}+8\right)}\right]^{\frac{1}{1.7t'^{0.12}+8}}$
고강도	$+\widehat{q_3}ln[1+(t-t')^{0.1}]+\widehat{q_4}\ln(t/t')$
	$+\widehat{q_5}\left[\exp\left\{-8\left(1-(1-h)\tanh\sqrt{\frac{t-t_0}{\tau_{sh}}}\right)\right\}-\exp\left\{-8\left(1-(1-h)\tanh\sqrt{\frac{\max(t',t_0)-t_0}{\tau_{sh}}}\right)\right\}\right]^{0.5}$
고로슬래그	$0.6\times\frac{10^6}{\widehat{E28}}+\widehat{q_2}\left(0.086t^{\frac{2}{9}}+1.21t^{\frac{4}{9}}\right)^{-1}\left[1+\left(\frac{\left(0.086t^{\frac{2}{9}}+1.21t^{\frac{4}{9}}\right)^{-1}}{t'^{-0.5}ln[1+(t-t')^{0.1}]}\right)^{\left(1.7t'^{0.12}+8\right)}\right]^{\frac{1}{1.7t'^{0.12}+8}}$
플라이애쉬	$+\widehat{q_3}ln[1+(t-t')^{0.1}]+\widehat{q_4}\ln(t/t')$
	$+\widehat{q_5}\left[\exp\left\{-8\left(1-(1-h)\tanh\sqrt{\frac{t-t_0}{\tau_{sh}}}\right)\right\}-\exp\left\{-8\left(1-(1-h)\tanh\sqrt{\frac{\max(t',t_0)-t_0}{\widehat{\tau_{sh}}}}\right)\right\}\right]^{0.5}$
배합	건조수축
보통강도	$\widehat{e_{sh}}\widehat{k_h}\tanh\left(\frac{t-t_0}{\widehat{\tau_{sh}}}\right)^{\widehat{0.5}}$
고강도	
고로슬래그	
플라이애쉬	

2) 전문가 2

배합	크리프	건조수축
보통강도	$\frac{1}{\widehat{E_0}}+\frac{\widehat{\phi}\left(\frac{(t-t_0)}{\beta_H+(t-t_0)}\right)^{0.3}}{\widehat{E_{28}}}$	$\widehat{\varepsilon_{sho}}\left(\frac{(t-t_0)}{0.035h^2+(t-t_0)}\right)^{0.5}$
고강도		
고로슬래그	$\frac{1}{\widehat{E_0}}+\frac{\widehat{\phi}\left(\frac{(t-t_0)}{\widehat{\beta_H}+(t-t_0)}\right)^{\widehat{0.3}}}{\widehat{E_{28}}}$	$\widehat{\varepsilon_{sho}}\left(\frac{(t-t_0)}{\widehat{a}+(t-t_0)}\right)^{0.5}$
플라이애쉬		

- **전문가 예측 결과 비교**



전문가 예측결과와 실험 결과 비교

(a) 보정구간 (b) 평가구간

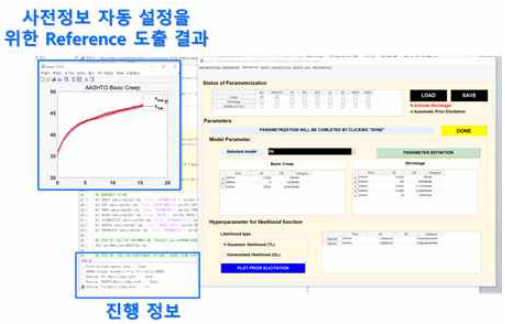
전문가 예측 결과 별 RMSE 값 비교

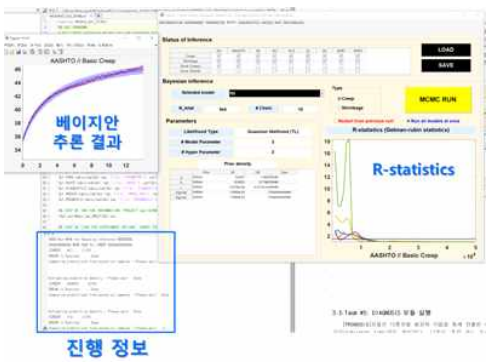
- 시간변형 예측에 활용한 **단기 실험데이터의 길이에 따라서 예측 결과가 크게 변화**하였으며, 장기간의 데이터를 사용할수록 예측 결과의 정확도가 증가하였다.
- **과적합 문제**로 인하여 실험 결과와 모델식의 보정구간 적합도는 평가구간 적합도와 대부분 일치하지 않았다.
- 장기 시간변형 예측은 **적절한 모델식 선택이 가장 중요한 요소**인 것으로 판단되며, 객관적 예측 기법인 다중모델 평균화기법 기반 콘크리트 시간변형 예측 향상 기술이 콘크리트 장기 시간변형 예측에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

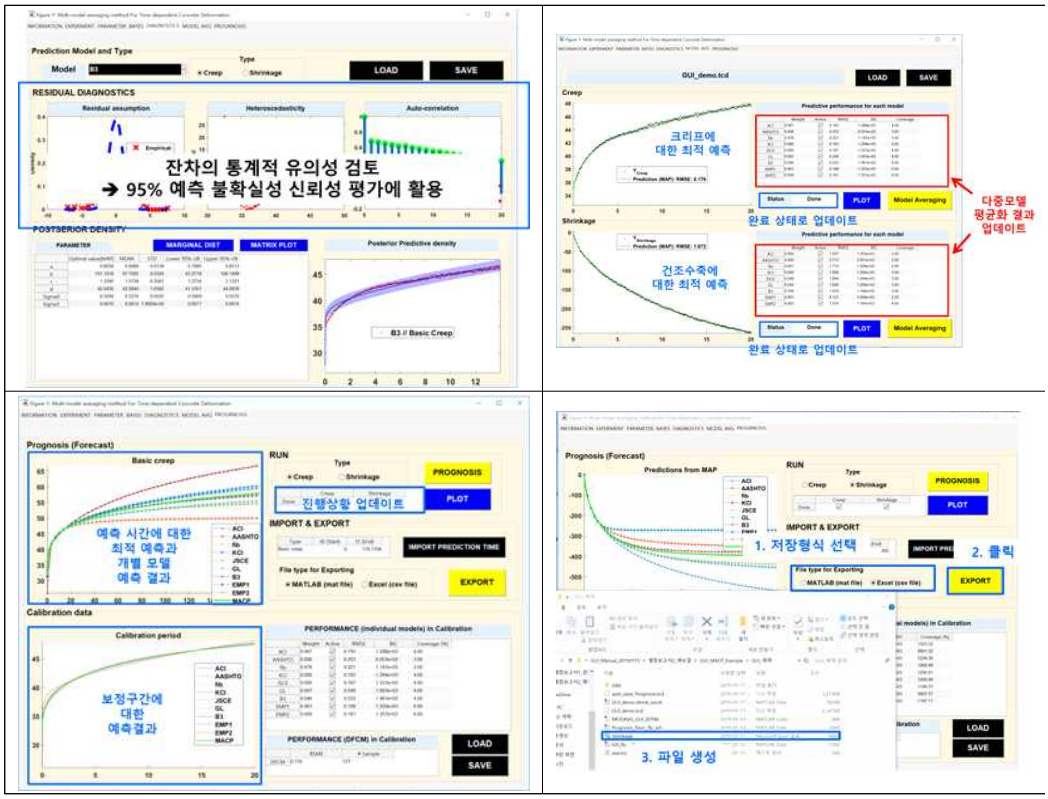
*구체적인 내용은 별첨보고서 1 참조

□ 핵심요소기술 2: 다중모델 평균화기법 기반 콘크리트 시간변형 예측 통합 GUI 프로그램 개발

단위 기술	연구수행 내용 및 결과
예측 통합 GUI 개발	• 예측 통합 GUI 개발 완료







활용 매뉴얼 작성

- 활용 매뉴얼 작성 완료

GUI-BASED

MULTI-MODEL AVERAGING FOR CONCRETE CREEP AND SHRINKAGE PREDICTION

-콘크리트 시간변형 예측을 위한 다중모델 평균화 소프트웨어-

매뉴얼 및 예제

KAIST

페이지 1 / 38

□ Multi-model averaging for Creep and Shrinkage Prediction Program 사용 설명서

- GUI program
- 최초 수정일 2017년 11월 31일
- 최종 수정일 2018년 11월 2일

GUI-Based Multi-model Averaging for Concrete creep and shrinkage Prediction Program (GUI-Based MACP Program)

□ 저작권

- Copyright 2018, 한국과학기술원, All rights reserved.
- 상기 프로그램은 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술촉진연구사업 18CTAP-C132730-02 으 최종성과물로 개발되었습니다.

□ 등록 상표

- Windows®는 Microsoft 사의 등록 상표입니다.
- MATLAB®은 Mathworks 사의 등록 상표입니다.

□ 사용자 공시

- 이 소프트웨어에 대하여 서면 허가 없이 이루어진 변경 또는 개조에 대해 한국과학기술원은 책임을 지지 않습니다.

□ 개발자

- 한국과학기술원
- 대전광역시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원
- Email : seungsab@mail.com; maikuraki@kaist.ac.kr; jae.kim@kaist.ac.kr;

2. GUI-BASED MACP 프로그램 개요

그림 4 는 콘크리트 시간변형 예측 향상을 위한 다중모델 평균화 기법의 절차를 개략적으로 3 단계로 표현하고 있다. 3 단계는 순차적으로 작업이 수행되며, 그 작업 내용은 다음과 같다. (1) 실제 배합비와 양생 조건에 의한 실제 콘크리트 시간변형 특성을 반영하기 위한 단기 실험을 수행하고, 시간변형 예측 모델(모델 변수 설정)를 구축한다; (2) 단기 실험 데이터를 통해 베이지안 추론을 수행하여 모델 변수와 예측 오차에 대한 불확실성을 정량화한다; (3) 각 예측 모델별로 도출된 사후 예측을 토대로 다중 모델 평균화 기법을 적용하여 각 모델 별로 최적 가중치를 산정하여 최적 예측을 도출한다.

GUI-based MACP 프로그램은 상기 작업 흐름도에 따라 각 작업이 진행되도록 와 설계되었으며, 단계 별 작업단계는 총 8 개로 표 2 과 같이 도출하였다. 도출된 8 개의 작업 중 비슷한 성격 및 특성을 가지는 작업들은 그룹화하여 총 7 개의 모듈로 정의된다. 도출된 7 가지 모듈의 작업 순서도를 도시화하면 다음과 같다.

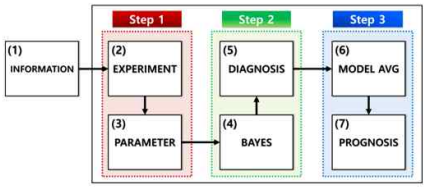


그림 4. GUI-based MACP 프로그램 작업 흐름도 도출

표2. GUI-based MACP 프로그램의 단계 별 작업단계

단계	단계 별 작업 내용	모듈
Step 1	1) 작업에 대한 일반적인 정보 입력 : 작성일 및 작성자 등	[INFORMATION]
	2) 콘크리트 배합 및 양생 조건 입력	[EXPERIMENT]
	3) 단기 시간변형 실험데이터 입력	
	4) 시간변형 예측 모델 구축 및 변수 정의(모델 변수의 사전 분포 정보 추출 포함)	[PARAMETER]
Step 2	5) 베이지안 추론을 통한 사후분포 추정	[BAYES]
	6) 베이지안 추론을 최대 사후확률 예측치 (Maximum a posteriori estimate) 산출	
	7) 정량화된 불확실성(사후분포)의 통계적 유포성 진단	[DIAGNOSIS]
Step 3	8) 다중모델 평균화 기법 수행을 모델 별 최적 가중치 산정	[MODEL AVG]
	9) 산정된 가중치를 토대로 시간변형 예측 수행 및 추출	[PROGNOSIS]

페이지 11 / 38

3. 사용 예제

[핵심요소기술 1-1]에서 수행한 배합비 4 가지 중 고로슬래그가 첨가된 배합비(매스 콘크트 배합비)를 선택하여 프로그램 사용예제로 작성하고자 한다. 사용예제를 설명하기에 앞서 상 배합비에 대한 실험체 형상, 양생 조건 및 실험 방법 등에 대한 개요는 다음과 같다.

압축강도와 크리프 실험은 ø 150 × 300㎜ 원주형 실험체를 사용하였으며, 건조수축 100×100×400 ㎜ 각주형 실험체를 사용하여 실험을 실시하였다. 탈형 후 재령 7 일까지는 표준양생(습도 100%, 온도 20℃)을 실시하였으며, 실험 시작일은 압축강도와 크리프는 재령 28 일, 건조수축은 재령 7 일이다. 이를 정리하면 아래 표와 같다.

표3. 실험체 형상, 양생조건, 실험 시작일

실험	실험체 크기 및 형상	양생 조건	실험 시작
압축강도	ø150×300㎜ (원주형)	재령 7 일까지 표준양생 실험 시작일까지 기중양생 (온도 20℃, 습도 55-60%)	재령 28 일
크리프			
건조수축	100×100×400㎜ (각주형)	재령 7 일까지 표준양생	재령 7 일

구체적인 실험은 KS 표준 실험 방법을 따라서 실시하였으며, 실험 별 표준은 아래 표와 같다.

표4. 실험체 형상, 양생조건, 실험 시작일

실험	실험 방법
압축강도 및 탄성계수	KS F 2405 (콘크리트 압축강도 시험 방법)
크리프	KS F 2453 (콘크리트의 압축 크리프 시험 방법)
건조수축	KS F 2424 (모르타르 및 콘크리트의 길이 변화 시험 방법)

실험에 사용된 콘크리트 배합과 압축강도 실험결과는 아래 표들과 같으며, 실험별 실험체 개수 실험 별 3개씩 사용하였다.

표5. 콘크리트 배합표

배합	W/B	S/a (%)	단위중량 (kg/m³)						
			W	C	BS	FA	S	G	Ad
고로슬래그	0.4	42.7	150	224	149	-	754	1008	2.0

페이지 19 / 38

*구체적인 내용은 별첨보고서 2 참조

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

□ 질적 성과 목표

단위 기술	년도	성과지표	목표	달성	달성도	가중치	평가방법	내용
다중 모델 평균화기법 기반 콘크리트 시간변형 예측 향상 요소 기술 개발	1차 년도	콘크리트 배합 적용범위 도출 (별첨보고서 1)	최소 3건	4건	133%	1.0	• 콘크리트 배합 적용 범위 도출	• 보통강도 콘크리트 배합비1건 • 고강도 콘크리트 배합비 1건 • 매스 콘크리트 배합비 2건
		콘크리트 시간변형 예측모델 분석 (별첨보고서 1)	1건	1건	100%	2.0	• 예측 모델별 변수 선정 가이드라인 제시	• ACI, fib 2010, KCI, B3, JSCE, GL 2000, AASHTO 모델 구축 • 예측 모델 별 모델 변수 도출 • 예측 모델 별 MATLAB 소스코드 개발
		모델 변수 및 불확실성 추정 기법 선정 (별첨보고서 1)	1건	1건	100%	1.0	• 후보기법 별 비교 연구 및 알고리즘 선정 결과 제시	• 다양한잔차 특성을 반영할 수 있는 우도함수 도출 및 검토 완료 • 비교연구를 통해 샘플링 알고리즘 후보군 중 DREAM 선정 • 정량화된 불확실성 적절성 진단방법 제시 완료 • 상기 요소 기법들에

								대한 MATLAB 소스코드 개발
		다중모델 평균화 기법 개발 (별첨보고서 1)	1건	1건	100%	4.0	• 개발기법의 요소 기술 제시 • 특허 출원 여부	• 분포 기반(density-based) 다중모델 평균화 기법 도출 완료 • 가중치 산정을 위한 최적화 방법론으로 Shuffled complex evolution approach 선정 • 상기 요소 기법들에 대한 MATLAB 소스코드 개발 • 기 수행한 크리프 실험데이터를 통해 제안 기법 검토를 수행하였으며, 차년도 고도화방안 도출 완료
	2차 년도	실험데이터를 통한 검증 결과 (별첨보고서 1)	최소 3건	12건	400%	3.0	• 실험데이터와 비교	• 보통강도, 고강도, 고로슬래그 첨가, 플라이애쉬 첨가 배합에 대한 기본크리프, 총크리프, 건조수축 검증 완료
		외부 전문가 활용 결과 및 자문 (별첨보고서 1)	최소 7건	20건	286%	2.0	• 외부 전문가 자문의견	• 콘크리트 배합비,모델변수 선정, 실험결과를 이용한 장기 시간변형 예측 자문 완료
다중모델평균화기법기반콘크리트시간변형예측통합GUI프로그램개발	1차 년도	핵심요소 기술 모듈 개발 (별첨보고서 2)	각 1건 (총 3건)	각 1건 (총 7건)	233%	1.0	• GUI 기반 프레임 워크 개발 여부	• 통합 소프트웨어의 작업 흐름도 정의 • 핵심요소기술 별 모듈 정의 및 요구사항 도출 • 각 핵심요소기술별 MATLAB기반 GUI 개발 완료
	2차 년도	예측 통합 GUI 프로그램 개발 (별첨보고서 2)	각 1건	각 1건	100%	4.0	• S/W 등록 여부	• 예측 통합 GUI 프로그램 개발 완료
		활용 매뉴얼 (별첨보고서 2)	1건	1건	100%	2.0	• GUI 기반 프레임 워크 개발 여부	• 활용 매뉴얼 작성 완료
계	-					20	-	

□ 양적 성과 목표

성과지표	목표	달성	달성도	가중치	내용
국내 특허 출원 건수	1	1	100%	15	다중모델 평균화기법 방법론을 토대로 특허 출원 완료
국내 특허 등록 건수	1	1	100%	20	다중모델 평균화기법 방법론을 토대로 특허 등록 완료

학술지 논문게재 건수 (SCI/비SCI)	3(최소 2건)/0	2/0 (중복사사 미고려)	100%	35	추가 논문 1편 심사중
S/W 등록 건수	1	2	200%	30	모델 변수 추정을 위한 최소자승법 기반 프로그램/ 콘크리트 크리프 예측 향상을 위한 다중모델평균화 기법 프로그램 등록 완료
보고서 원문 (기술문서)	0	2	초과 달성	-	별첨보고서 1 별첨보고서 2
계	-			100	-

2. 관련 분야 기여도

(1) 공공적 성과

○ 콘크리트 구조물의 시간변형을 정확히 예측함으로써, 콘크리트 구조물 유지관리에 기여

○ 정확한 콘크리트 시간변형 예측을 통하여 보다 정확한 구조물 설계가 가능해 짐으로써 국내 건설사의 기술력 향상에 기여

(2) 기술적 성과

○ 선제적 예방·관리를 위한 새로운 접근방법의 예측(Prognosis) 관련 원천기술 개발을 통한 기술 선도

○ 사전 예방·관리를 위한 의사결정시, 사용자의 주관성을 최소화하고 신뢰성이 높은 기술 개발

(3) 학술적 성과

○ 예측 모델의 불확실성을 고려하여 콘크리트 시간변형을 예측할 수 있음

○ 하나의 모델이 아니라 활용 가능한 모든 모델의 개별 예측 정보를 활용하여 통계적으로 최적의 예측 및 예측 분포를 추정할 수 있음

○ 점 추정(point estimate)기반 예측이 아닌, 분포 추정(density estimate) 기반 예측을 할 수 있음

(4) 경제적 성과

○ 기술적 선진국에서도 시도하지 않은 새로운 방법론 개발을 통한 해외시장 경쟁력 확보

○ 콘크리트 시간변형 예측에 필요한 다양한 장기 실험 비용 감소

3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

제5장. 연구개발성과의 활용계획

□ 예상 기술 수요처

- 콘크리트 구조물을 대상으로 설계, 시공 및 유지관리를 담당하는 유관기관에서 적극적인 수요가 있을 것으로 판단됨
- 콘크리트의 장기변형이 중요하게 검토되어야 하는 초고층 빌딩(압축 부재)과 댐과 같은 매스콘크리트 구조물에 적용이 될 것으로 판단되며, 해외 시장 진출에 기술경쟁력 확보에 활용 가능함
- 사용자의 전문지식과 경험(주관성)에 의한 인식론적 불확실성을 근본적으로 해결 가능하므로 실무활용의 효율성 및 신뢰성 향상 가능함

□ 연구성과물 활용방안 및 계획

- 개발기법 및 관련 프로그램(활용 매뉴얼)을 개발 및 배포하고, 관련 연구 기관 및 산업체의 기술 프로그램을 이용하여 현장 활용 유도하고자 함
- 개발기법은 사후대응이 아닌 사전예방·관리 패러다임에 꼭 필요한 예측(Prognosis) 관련 핵심 원천 기술임. 개발 기술을 정부가 지향하고 있는 사전예방·관리 체계를 위한 정부 정책 수립 및 주요 R&D 성과 홍보의 일환으로 활용 가능함

□ 기술 실용화 방안

- 유관기관과의 협력 및 기술 교류를 통해 기술 이전 및 관련분야 교육/산업 홍보를 수행하고, 최종적으로 후속과제 공동 연구기관 구성에 활용하고자 함

- 본 연구 과제를 통해 수행된 연구 결과물을 토대로 실용화 단계(TRL7~8단계)를 위한 공동연구 형태로 후속 연구과제 제안에 활용하고자 함

□ 미래원천기술 확보 방안

- 기술적 선진국에서도 시도하지 않은 새로운 방법론을 개발한다는 점에서 연구결과를 저명 학술대회 및 국제학술지에 투고하여 개발기술의 우수성을 홍보하고 기술적·학술적 이니셔티브 확보에 활용하고자 함
- 원천기술 확보를 위해 관련 성과물을 토대로 지적재산권 확보에 주력할 예정임. 이를 통해 기술소유권을 선점하고 추후 해외 시장에서의 로열티 확보를 위한 기반을 구축하고자 함

□ 후속 연구를 통한 추가 검증 및 활용 범위 확장

- 개발된 소프트웨어의 신뢰성 검증을 위하여 다양한 배합(초고강도 콘크리트, 섬유보강 콘크리트, 폴리머 콘크리트 등)에 대한 추가 검증을 실시하고자 함.
- 소성수축, 자기수축, 탄상화수축 등 다양한 시간변형에 적용하여 다중모델 평균화 기법의 활용성을 극대화하고자 함.
- 기존 연구 자료 및 후속 연구 자료에 대한 database를 구축하는 한편, 다양한 실험 변수(다양한 양생 조건 등)를 통한 검증을 수행하고자 함.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

해당 사항 없음

제7장. 연구개발성과의 보안등급

일반

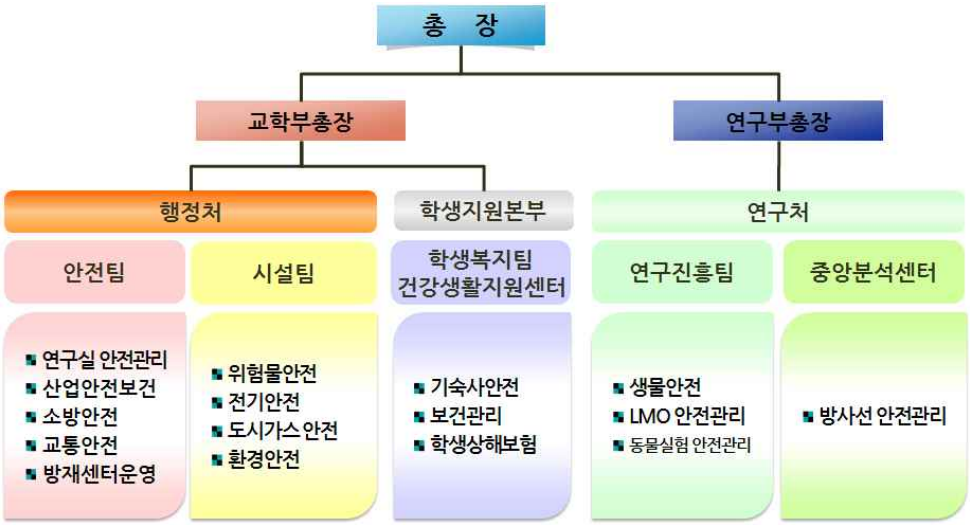
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

가. 연구실 안전 점검 체계 및 실시

1) 안전보건관리조직



2) 연구실 안전관리 위원회

기능	○ 안전관리규정의 작성 또는 변경 ○ 안전점검계획의 수립 ○ 연구실안전환경 증진에 관한 주요사항

위원회 구 성	○ 위원장 1명 ○ 위원 8명(교수, 학생, 직원)

운영 현황	1. 화재사고 발생 시 소방서 추정 피해액 1,000만원 이상, 도난사고 발생 시 재무팀 추정액 500만원 이상일 경우 2. 인명사고 발생시 4주이상의 입원 가료를 요할 경우 3. 1·2호의 경우 사고관련자 배상 및 징계 4. 기타 안전관련 주요사항 위 각 호의 사항을 정기심의 또는 서면심의를 통하여 개최함

3) 연구실 안전환경관리자

소속부서	업무형태	인원	지정일자
안전팀	전담	2명	2011.11

4) 안전점검 현황

▪ 일상점검

- 실험실에 비치된 '안전점검기록부'의 체크리스트 항목에 따라 육안으로 점검 후 기록

- 정기점검 및 정밀안전진단
  - 정기점검 : 안전팀 안전관리자에 의한 연 1회 순회 점검 실시
  - 정밀안전진단 : '연안법 규정 충족 전문가 및 전문기관'에서 연 1회 실시

나. 교육 훈련

실험실의 다양한 본야를 보다 정확하고 전문적인 사항을 알리기 위해 각 분야별 외부전문가를 초빙하여 실험실 정기 안전교육, 응급처치교육, 소방안전교육을 아래와 같이 실시하고 있다. 연구활동종사자들의 시간적, 공간적인 제약을 극복하기 위해 인터넷을 활용하여 분야별 안전교육 자료를 제공하고 있다. 연구·실험실에서 사용하고 있는 화학약품, 가스, 기계 및 기구, 레이저 등에 대한 자료뿐만 아니라 소방, 생물학적 안전에 대한 실험실 안전에 대한 전반적인 자료를 제공하고 있다.

구분	대상	교육방법	교육주기
신입생/신규채용자 교육	신입생/신규채용자	집합교육	봄,가을학기 / 신규채용시
정기안전교육	연구활동종사자	집합교육	월1회~2회
응급처치교육	연구활동종사자	집합교육	상,하반기(2회)
온라인안전인증평가	연구활동종사자	온라인교육	반기 1회(2,9월)
온라인안전교육	연구활동종사자	온라인교육	매월 1회

다. 보험 가입 현황

구분	보장범위	보상내용	보험료 재원	대상	주관부서
연구활동종사자 상해보험	실험실 사고	사망, 후유장해 최대 1억원 상해치료비 최대 1천만원	KAIST 전액 부담	학사과정 학생 전체 과학기술분야 석,박사 과정 학생	안전팀
학교경영자책임 배상보험	교내 발생사고	사망, 후유장해 최대 5억원 상해치료비 최대 500만원	KAIST 전액 부담	전 학생	학생복지팀 (기성회)
단체상해보험	교내·외 발생사고	사망, 후유장해 최대 2억원 상해치료비 최대 1천만원	개인부담	개별 가입자	학생복지팀 (기성회)
재산종합보험	교내 발생사고	대물 일괄 : 무한/사고당	KAIST 전액 부담	교내 전 시설	재무팀

라. 추가 이행 계획

1) 연구실 안전환경 개선 지원사업

- 개인보호구, 가스누출경보장치, 시약케비넷, 구급약품함, 세안기 등 연구실 안전과 관련된 안전장비 구입을 지원

2) 연구실 안전 통합관리

- 가스조기경보시스템 : 가스 누출 시 위치표시 및 누출가스 정보를 방재센터에서 종합관리
- 화재감지시스템 : 화재 발생 시 위치표시 및 경보작동을 통하여 방재센터에서 종합관리

3) 연구실 안전캠페인

- 교내 안전캠페인을 통하여 표어, 포스터 등 공모전을 실시하여 안전의식을 고취
- 소화기 실습체험, 심폐소생술 실습체험을 통하여 사고 발생 시 대응력을 키움

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	The Multiple-Update-Infill Sampling Method Using Minimum Energy Design For Sequential Surrogate Modeling	한국과학기술원	공동, 교신저자	Applied Sciences	1.689	2018.03.22	중복 사사	SCI
2	논문	Improvement of concrete creep prediction with probabilistic forecasting method under model uncertainty	한국과학기술원	주, 공동, 교신저자	Construction and Building Materials	3.485	2018.09.30	단독 사사	SCI
3	특허	콘크리트 크리프 예측 모델 생성 방법 및 장치	한국과학기술원	주발명자	대한민국	-	2018.06.04	단독 사사	-
4	소프트웨어	비선형 최소자승법 기반 예측 모델 변수 추정 프로그램	한국과학기술원	저작자	대한민국	-	2017.08.28	단독 사사	-

5	소프트웨어	콘크리트 크리프 예측 향상을 위한 다중모델평균화 기법	한국과학기술원	저작자	대한민국	-	2018.12.28	단독 사사	-

제11장. 기타 사항

없음

제12장. 참고 문헌

[1] A.M. Neville, Properties of concrete, 5th ed., Pearson, Harlow, England ; New York, 2011.

[2] A.C. 207, ACI 207.2R-07 Report on Thermal and Volume change Effects on Cracking of Mass Concrete, 2007.

[3] Milan Jirasek, S. Dobrusky, Accuracy of Concrete Creep Prediction Based on Extrapolation of Short-Time Data, in: Proc. 5th International Conference on Reliable Engineering Computing, Czech, 2012.

[4] KCI, New Concrete Engineering, Kimoondang, Seoul, Korea, 2011.

[5] ACI 232.2R-03 Use of Fly Ash in Concrete, American Concrete Institute, Detroit, Mich., 2003.

[6] ACI 233R-03 Slag Cement in Concrete and Mortar, in, American Concrete Institute, Detroit, Mich., 2003.

[7] ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, in, American Concrete Institute, 2009.

[8] C.A. Brebbia, W.P.d. Wilde, Wessex Institute of Technology., High performance structures and materials II, WIT Press, Southampton ; Boston, 2004.

[9] R. Siddique, Strength properties of high volume fly ash (HVFA) concrete at high temperatures, Kuwait J Sci Eng, 39 (2012) 1-14.

[10] M.J. Lee, M.G. Lee, Y.C. Wang, Y.S. Huang, W.C. Wang, Study of Steam and Microwave Curing of Concretes Containing Slag, Fly Ash, or Silica Fume, J Test Eval, 43 (2015).

[11] V.M. Malhotra, Strength and Durability Characteristics of Concrete Incorporating a Pelletized Blast-Furnace Slag, J Am Concrete I, 80 (1983) 348-349.

[12] W.K. Hatt, Notes on the effect of time element in loading reinforced concrete beams American Society for Testing Materials, 7 (1907) 421-433.

[13] E.B. Smith, The flow of concrete under sustained loads, American Concrete Institute, 13 (1917) 99-102.

[14] G. Pickett, The effect of change in moisture content on the creep of concrete under a sustained load, American Concrete Institute, 38 (1942) 333-355.

[15] Z.P. Bazant, Theory of Creep and Shrinkage in Concrete Structures: A Precis of Recent Developments, Pergamon Press, Oxford, United Kingdom, 1975.

[16] Z.P. Bazant, G.H. Li, Comprehensive Database on Concrete Creep and Shrinkage, Aci Mater J, 105 (2008) 635-637.

[17] Z.P. Bazant, S. Baweja, Justification and Refinements of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage .1. Statistics and Sensitivity, Mater Struct, 28 (1995) 415-430.

[18] B. Han, H.B. Xie, D.J. Zhang, X. Ma, Sensitivity analysis of creep models considering correlation, Mater Struct, 49 (2016) 4217-4227.

[19] ACI209R-92, Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, in, ACI Committee 209, Detroit, Mich., 2008.

[20] P. Beverly, Fédération internationale du béton. Special Activity Group 5, fib model code for concrete structures 2010, Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2013.

[21] Z.P. Bazant, S. Baweja, Justification and Refinements of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage .2. Updating and Theoretical Basis, Mater Struct, 28 (1995) 488-495.

[22] Comité euro-international du béton., CEB-FIP model code 1990 : design code, T. Telford, London, 1993.

[23] A.H. White, Destruction of cement mortars and concrete throught expansion and contraction, American Society for Testing Materials, 11 (1911) 531-555.

[24] F.R. McMillan, Shrinkage and time effects in reinforced concrete, in: Studies in Engineering,

1915, pp. 44.
[25] C.R. W., Drying Shrinkage of Large Concrete Members, Journal of American Concrete Institute, 33 (1937) 327-336.
[26] C. R.W., Drying Shrinkage of Concrete as Affected by Many Factors, American Society for Testing Materials, 38 (1938) 419-437.
[27] Z.P. Bazant, J.C. Chern, Stress-Induced Thermal and Shrinkage Strains in Concrete, J Eng Mech-Asce, 113 (1987) 1493-1511.
[28] A.M. Neville, Design of Concrete Structures for Creep, Shrinkage and Temperature Change, Concrete, 4 (1970) 451-&.
[29] E.W. Bennett, D.R. Loat, Shrinkage and Creep of Concrete as Affected by Fineness of Portland-Cement - Reply, Mag Concrete Res, 23 (1971) 136-&.
[30] R.N. Swamy, A.B. Ibrahim, Shrinkage and Creep-Properties of High Early Strength Structural Lightweight Concrete, P I Civil Eng Pt 2, 55 (1973) 635-646.
[31] ACI Committee 209--Creep and Volume Changes in Concrete., A.M. Neville, Shrinkage and creep in concrete, annotated, American Concrete Institute, Detroit,, 1967.
[32] D.B. Mcdonald, H. Roper, Accuracy of Prediction Models for Shrinkage of Concrete, Aci Mater J, 90 (1993) 265-271.
[33] A. Al-Manaseer, A. Prado, Statistical Comparisons of Creep and Shrinkage Prediction Models Using RILEM and NU-ITI Databases, Aci Mater J, 112 (2015) 125-135.
[34] W.H. Dilger, C. Wang, Creep and Shrinkage of High-Performance Concrete, American Concrete Institute, 194 (2000) 361-380.
[35] J.M. Rouse, S.L. Billington, Creep and shrinkage of high-performance fiber-reinforced cementitious composites, Aci Mater J, 104 (2007) 129-136.
[36] M. Lopez, L.F. Kahn, K.E. Kurtis, Creep and shrinkage of high-performance lightweight concrete, Aci Mater J, 101 (2004) 391-399.
[37] ACI 209.2R-08, Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete, in, American Concrete Institue, Detroit, Mich., 2008.
[38] AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATION : Customary U.S. Units 2012, Part 1: Sections 1-6 ed., AASHTO, Washington, DC, 2012.
[39] J. Walraven, A. Bigaj, The 2010 fib Model Code for Concrete Structures: a new approach to structural engineering, Struct Concrete, 12 (2011) 139-147.
[40] KCI, Standard Concrete Specification and Commentary, Kimoondang, Seoul, Korea, 2009.
[41] JGC 15, Standard Specification for Concrete Structures; Design, in, Japan Society of Civil Engineers, Japan, 2007, pp. 469.
[42] N.J. Gardner, M.J. Lockman, Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete, Aci Mater J, 98 (2001) 159-167.
[43] N.J. Gardner, Comparison of prediction provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concretes, Can J Civil Eng, 31 (2004) 767-775.
[44] Z.P. Bazant, S. Baweja, P. Acker, I. Carol, J. Catarino, J.C. Chern, C. Heut, F.H. Wittmann, D. Carreira, Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures - Model B-3, Mater Struct, 28 (1995) 357-365.
[45] J.L. Beck, L.S. Katafygiotis, Updating models and their uncertainties. I: Bayesian statistical framework, J Eng Mech-Asce, 124 (1998) 455-461.
[46] K.V. Yuen, L.S. Katafygiotis, Bayesian time-domain approach for modal updating using ambient data, Probabilist Eng Mech, 16 (2001) 219-231.
[47] J.L. Beck, S.K. Au, Bayesian updating of structural models and reliability using Markov chain Monte Carlo simulation, J Eng Mech-Asce, 128 (2002) 380-391.
[48] J.Y. Ching, Y.C. Chen, Transitional markov chain monte carlo method for Bayesian model updating, model class selection, and model averaging, J Eng Mech-Asce, 133 (2007) 816-832.
[49] J.Y. Ching, M. Muto, J.L. Beck, Structural model updating and health monitoring with incomplete modal data using Gibbs sampler, Comput-Aided Civ Inf, 21 (2006) 242-257.
[50] N. Metropolis, A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth, A.H. Teller, E. Teller, Equations of state calculations by fast computing machines, Journal of Chemical Physics, 21 (1953) 1087-1092.
[51] H. Haario, M. Laine, A. Mira, E. Saksman, DRAM: Efficient adaptive MCMC, Stat Comput, 16 (2006) 339-354.
[52] Z. Wang, S. Mohamed, N. De Freitas, Adaptive Hamiltonian and Riemann Manifold Monte Carlo, in: International Conference on Machine Learning (ICML), JMLR &CPW, 2013, pp. 1462 - 1470.
[53] J.A. Vrugt, C.J.F. ter Braak, C.G.H. Diks, B.A. Robinson, J.M. Hyman, D. Higdon, Accelerating Markov Chain Monte Carlo Simulation by Differential Evolution with Self-Adaptive Randomized Subspace Sampling, Int J Nonlin Sci Num, 10 (2009) 273-290.
[54] E. Simoen, C. Papadimitriou, G. Lombaert, On prediction error correlation in Bayesian model updating, J Sound Vib, 332 (2013) 4136-4152.
[55] O. Aguilar, M. Allmaras, W. Bangerth, L. Tenorio, Statistics of Parameter Estimates: A Concrete Example, Siam Rev, 57 (2015) 131-149.
[56] T. Smith, A. Sharma, L. Marshall, R. Mehrotra, S. Sisson, Development of a formal likelihood function for improved Bayesian inference of ephemeral catchments, Water Resour Res, 46 (2010).
[57] Q.B. Cheng, X. Chen, C.Y. Xu, C. Reinhardt-Imjela, A. Schulte, Improvement and comparison of likelihood functions for model calibration and parameter uncertainty analysis within a Markov chain Monte Carlo scheme, J Hydrol, 519 (2014) 2202-2214.
[58] B. Scharnagl, J.A. Vrugt, H. Vereecken, M. Herbst, Inverse modelling of in situ soil water dynamics: investigating the effect of different prior distributions of the soil hydraulic parameters, Hydrol Earth Syst Sc, 15 (2011) 3043-3059.
[59] G. Schoups, J.A. Vrugt, A formal likelihood function for parameter and predictive inference of hydrologic models with correlated, heteroscedastic, and non-Gaussian errors, Water Resour Res, 46 (2010).

[60] T.J. DiCiccio, A.C. Monti, Inferential aspects of the skew exponential power distribution, J Am Stat Assoc, 99 (2004) 439-450.
[61] C.G.H. Diks, J.A. Vrugt, Comparison of point forecast accuracy of model averaging methods in hydrologic applications, Stoch Env Res Risk A, 24 (2010) 809-820.
[62] J. Vrugt, C. Diks, M. Clark, Ensemble Bayesian model averaging using Markov Chain Monte Carlo sampling, Environ Fluid Mech, 8 (2008) 579-595.
[63] B.E. Hansen, Least-squares forecast averaging, J Econometrics, 146 (2008) 342-350.
[64] S.G. Hall, J. Mitchell, Combining density forecasts, Int J Forecasting, 23 (2007) 1-13.
[65] J. Geweke, G. Amisano, Optimal prediction pools, J Econometrics, 164 (2011) 130-141.
[66] A. Opschoor, D. van Dijk, M. van der Wel, Combining density forecasts using focused scoring Rules, Journal of Applied Econometrics, 0 (2017) 1-16.
[67] S. Chib, E. Greenberg, Understanding the Metropolis-Hastings Algorithm, Am Stat, 49 (1995) 327-335.
[68] H. Haario, E. Saksman, J. Tamminen, An adaptive Metropolis algorithm, Bernoulli, 7 (2001) 223-242.
[69] P.J. Green, A. Mira, Delayed rejection in reversible jump Metropolis-Hastings, Biometrika, 88 (2001) 1035-1053.
[70] A. Mira, On Metropolis-Hastings algorithms with delayed rejection, Metron, 59 (2001) 231-241.
[71] R.M. Neal, MCMC using Hamiltonian dynamics, in: Handbook of Markov Chain Monte Carlo, Chapman and Hall/CRC, 2011, pp. 113-162.
[72] C. Pasarica, A. Gelman, Adaptively Scaling the Metropolis Algorithm Using Expected Squared Jumped Distance, Stat Sinica, 20 (2010) 343-364.
[73] A. Gelman, D.B. Rubin, Inference from Iterative Simulation Using Multiple Sequences, Stat Sci, 7 (1992) 457-472.
[74] J.A. Vrugt, Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: Theory, concepts, and MATLAB implementation, Environ Modell Softw, 75 (2016) 273-316.
[75] J.M. Nichols, E.Z. Moore, K.D. Murphy, Bayesian identification of a cracked plate using a population-based Markov Chain Monte Carlo method, Comput Struct, 89 (2011) 1323-1332.
[76] Z.Z. Hu, R.C. Smith, N. Burch, M. Hays, W.S. Oates, A modeling and uncertainty quantification framework for a flexible structure with macrofiber composite actuators operating in hysteretic regimes, J Intel Mat Syst Str, 25 (2014) 204-228.
[77] D.J. Posselt, T. Vukicevic, Robust Characterization of Model Physics Uncertainty for Simulations of Deep Moist Convection, Mon Weather Rev, 138 (2010) 1513-1535.
[78] M. Thiemann, M. Trosset, H. Gupta, S. Sorooshian, Bayesian recursive parameter estimation for hydrologic models, Water Resour Res, 37 (2001) 2521-2535.
[79] ASTM, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM C39, in, ASTM International, Philadelphia, 2014.
[80] N.L. Johnson, Systems of Frequency Curves Generated by Methods of Translation, Biometrika, 36 (1949) 149-176.
[81] J. Baconshone, Fitting 5-Parameter Johnson Sb Curves by Moments, J R Stat Soc C-Appl, 34 (1985) 95-100.
[82] J.F. Slifker, S.S. Shapiro, The Johnson System - Selection and Parameter-Estimation, Technometrics, 22 (1980) 239-246.
[83] R.E. Wheeler, Quantile Estimators of Johnson Curve Parameters, Biometrika, 67 (1980) 725-728.
[84] X.S. Yang, Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation, Int J Bio-Inspir Com, 2 (2010) 78-84.
[85] H. Akaike, Information theory as an extension of the maximum likelihood principle, in: B. Petrov, F. Csaki (Eds.) Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory, Akademiai Kiado, Budapest, Hungary, 1973, pp. 267-281.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.