

17CTAP-C
114986-02

머신러닝
기반의
영상정보
분석을 통한
철근 콘크리트
구조물의
지능형 화재
손상 평가
원천기술 개발

최
종
보
고
서

2018

국
토
교
통
부

국토교통과학기술진흥원

Infrastructure R&D Report

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D /
17CTAP-C114986-02

머신러닝 기반의 영상정보 분석을 통한 철근 콘크리트 구조물의 지능형 화재 손상 평가 원천기술 개발 최종보고서

2018. 07. 31.

주관연구기관 / 이화여자대학교 산학협력단

국토교통부

(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘머신러닝 기반의 영상정보 분석을 통한 철근 콘크리트 구조물의 지능형 화재 손상 평가 원천 기술 개발’(연구개발 기간 : 2016. 06. 22 ~ 2018. 06. 21) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018 . 07 . 31 .

주관연구기관명 : 이화여자대학교 산학협력단 (단장) 이 근 주 (인)

주관연구기관책임자: 김 희 선

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C11498 6-02	해당 단계 연구 기간	2016.06.22. ~ 2018.06.21.	단계구분	2차년도/2차년도
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	머신러닝 기반의 영상정보 분석을 통한 철근 콘크리트 구조물의 지능형 화재 손상 평가 원천기술 개발			
연구책임자	김 희 선	해당단계 참여 연구원 수	총: 15 명 내부: 2 명 외부: 13 명	해당단계 연구개발비	정부:180,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:180,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 20 명 내부: 2 명 외부: 18 명	총 연구개발비	정부:360,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:360,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	이화여자대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
본 연구에서는 화재 피해를 입은 철근 콘크리트 구조물의 영상 정보를 가지고 머신러닝 기법을 활용하여 분석함으로써 화재 피해를 입은 구조물의 성능 평가를 정확하고 신속하게 수행 가능한 소프트웨어 개발을 목표로 함. 이를 위해 건축공학의 구조성능 평가분야와 전자공학의 영상처리 및 머신러닝 분야를 융합하여 화재 피해를 입은 철근콘크리트 구조물의 균열, 폭열, 변형으로부터 잔존강도를 유추하고 영상정보를 취득하여 처리, 분석하는 기술을 개발함.					

〈 국문 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	• 본 연구에서는 화재 피해를 입은 철근 콘크리트 구조물의 영상 정보를 가지고 머신러닝 기법을 활용하여 분석함으로써 화재 피해를 입은 구조물의 성능 평가를 정확하고 신속하게 수행 가능한 소프트웨어 개발을 목표로 함. • 화재 피해를 입은 철근 콘크리트 구조부재의 영상정보를 취득하고 영상처리 기술을 통해 균열 및 변형 특성을 파악함. • 화재 피해를 입은 철근 콘크리트 구조부재의 잔존강도를 파악하여 분석된 영상 정보와의 정량적 관계를 수립함. • 머신러닝 기법을 활용한 구조물의 화재 피해 해석모형을 연구함.				
연구개발성과	• 영상정보를 이용한 철근 콘크리트 구조물의 지능형 손상 정도 평가에 관한 기법 • 재난 피해 구조물의 안전정보체계 구축에 관한 고도의 영상분석 원천기술 • 화재 피해 측정 영상 분석 소프트웨어				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• 구조물 잔존강도의 정량적 추정기법을 이용하여 신뢰도 높은 안전성 평가의 수행 가능 • 건축물의 화재 후 생명 및 재산에 대한 2차 피해의 최소화와 주거환경의 안전성 확보 • 건축·ICT 간 융복합연구의 확대 및 관련 인재 양성으로 관련분야의 글로벌 선도와 신산업 창출 기반 조성 • 향후 스마트시티 등 건축물의 전주기적 관리 및 자원의 활용에 빅 데이터 영상 정보 활용 촉진과 지능형 영상분석 기술의 가치 확산				
핵심어 (5개 이내)	머신러닝	영상분석	손상 평가	콘크리트구조	화재

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	• This study aims to develop software that allows accurate and prompt performance evaluation of fire damaged reinforced concrete structural members using images analyzed by machine learning method. • Cracks and deformations of the fire damaged structural members are characterized based on the image processing method using the acquired images of the fire damaged structural members. • Residual strengths of fire damaged structural members are evaluated and qualitative relationship between the strengths and the cracks are established. • Analytical models of fire damaged structural members are studied using machine learning technique.				
Results	• Development of the intelligent method for evaluating damage of structural members from images. • Image processing method for safety information system of structures damaged by disaster. • Image processing software.				
Expected Contribution	• This study is expected to contribute to followings; • Perform reliable safety evaluation based on the proposed qualitative relationship between the strengths and the cracks of fire damaged structural members. • Minimize cost damages and secure safety of residence after fire. • Provide global leading technique and initiate industry of integrated structural and electronics engineering fields. • Offer basic technology for life time management of buildings using image big data. • Increase research value of machine learning and intelligent image processing field.				
Keywords	Machine learning	Image analysis	Damage evaluation	Concrete structure	Fire

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	6
2. 국내외 기술 개발 현황	11
3. 연구 수행 내용 및 성과	15
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	20
5. 연구개발성과의 활용 계획	21
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	21
7. 연구개발성과의 보안등급	21
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	22
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	22
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	24
11. 기타 사항	24
12. 참고 문헌	24

〈 Contents 〉

1. Outline of Research and Development Project	6
2. Status of Technology Development Domestic and Overseas	11
3. Research Tasks and Achievements	15
4. Achievement of Project Goals and contribution to relevant fields	20
5. Application plan of R&D achievements	21
6. Overseas technology information collected during the project	21
7. Security level of R&D achievements	21
8. Status of Research Facilities and Equipment Registered in the NTIS	22
9. Implementation of Safety Measures during the Project	22
10. Representative Research Achievements of the Project	24
11. Miscellaneous Remarks	24
12. References	24

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

본 연구에서는 화재 피해를 입은 구조물의 손상정도를 신속하고 정확하게 파악하기 위한 기술로써 영상처리 기술과 머신러닝 기법, 화재 피해를 입은 구조물의 변형 및 균열 특성 파악, 잔존강도 분석 기술을 개발하고, 이를 통합한 지능형 손상 평가 소프트웨어를 개발하는 것을 목적으로 한다. 여기서 제안하는 소프트웨어에는 영상 정보의 적절한 화질과 크기를 보장할 수 있는 영상 취득 방법의 개발, 균열 파악을 위한 영상 처리 기법의 개발, 파악된 균열 패턴을 분석하여 학습할 수 있는 머신러닝 기법의 개발이 포함된다.

이를 위하여 건축공학의 구조성능 평가 분야와 전자공학의 영상처리 및 머신러닝 분야가 융합하여 각각 화재 피해를 입은 구조물의 변형 및 균열 특성 파악, 잔존강도 분석 기술의 개발, 영상처리 기술과 머신러닝 기법을 개발하고, 분야 간의 연구방법과 성과를 융합함으로써 지능형 손상 평가 소프트웨어 개발을 완성할 수 있도록 한다.

세부 목표로는 첫째, 철근콘크리트 구조부재의 화재실험을 통해 균열 및 변형 특성을 파악하고, 잔존강도 파악하기 위한 가력실험으로부터 구조물의 외관변형정도와 잔존강도 사이의 정량적 연관성을 파악한다. 둘째, 화해를 입은 구조물 외관 영상과 수립한 통계모델을 이용하여 머신러닝 기반의 구조물 손상 분석 알고리즘을 개발하는 것을 세부 목표로 한다.

① 화재 피해를 입은 철근 콘크리트 부재의 구조성능 평가 분야

화재 피해를 입은 콘크리트 부재의 구조성능을 평가하기 위해서, 먼저 화재 실험을 통해 다양한 구조물에 발생하는 균열 및 변형특성을 파악하고, 다음으로는 가력 실험을 통해 구조부재의 잔존 강도를 파악하여, 두 실험 결과 사이의 연관관계를 정립하는 과정을 거치게 된다.

기존 화재 실험에서는 통상 실험 담당자가 일일이 아래 그림 1과 같이 화재 실험 후 발생하는 콘크리트의 균열을 기록하고 컴퓨터에 옮겨 그리는 일을 하게 되어 균열 기록에 시간이 많이 걸리고 결과의 신뢰성도 많이 떨어지는 문제점을 가지고 있었다. 본 연구에서는 영상처리를 통해 균열 및 변형을 자동적으로 파악할 수 있어 실험 수행에 필요한 시간을 효과적으로 단축할 수 있다. 또한, 영상으로부터 측정된 균열과 변형을 분석하여 화재로 인한 균열과 변형의 특성을 하중과 같은 역학적인 요인으로부터 발생한 균열과 구분하고, 다양한 화재 변수로부터 기인하는 균열과 변형의 특성을 파악할 수 있다. 여기서 균열과 변형의 특성은 균열의 밀도와 길이, 폭, 분산의 정도와 균열 각, 변형의 정도 등으로 나누어 나타내며, 폭렬이 발생한 경우 폭렬의 면적과 위치 역시 영상처리 시스템에서 자동적으로 계산, 변수별로 비교 분석할 수 있도록 한다. 이렇게 파악된 균열과 변형의 특성은 대표적인 패치의 크기와 그 위치를 선정하는 데에 사용될 수 있으며, 변수별 균열 및 변형 특성 파악 결과는 DB 마스터링 과정을 거쳐 체계화된 데이터로 구축되어 머신러닝 시스템에 학습된다.

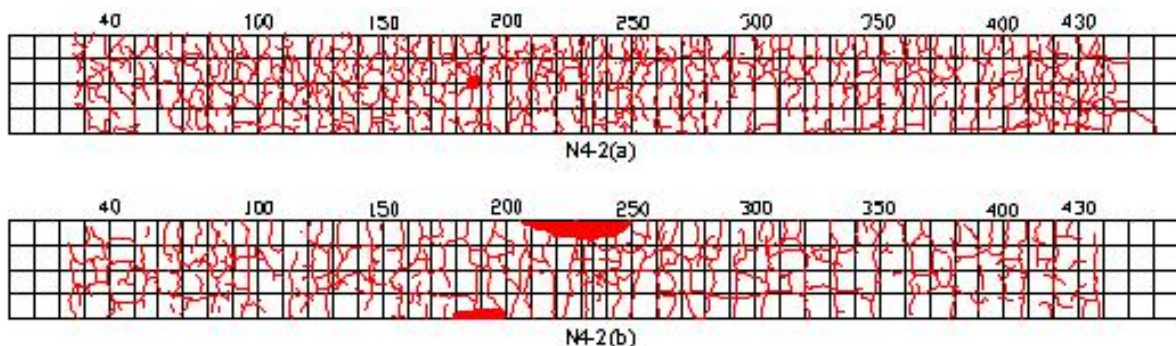


그림 1 화재 피해를 입은 콘크리트 보 부재에서 발생한 균열의 형상

또한 영상정보로부터 파악된 균열과 변형 특성은 결과적으로 구조물의 손상정도를 나타낼 수 있어야 하므로, 가력실험을 통해 화재 피해를 입은 구조물의 잔존강도를 측정하고, 다양한 변수로부터 파악된 균열 및 변형 특성과 잔존강도와의 연관관계를 제시하고자 한다. 기존에도 내화성능에 영향을 미

치는 변수와 이로 인한 구조물의 내력변화를 연구한 실험들이 있으나, 이를 균열 및 변형 특성과 연관 지어 분석한 연구가 없어 실제 화재 현장에서 구조물의 안전성을 파악하는데 적용하기에는 어려움이 있어 왔다. 화재 시 발생한 균열로 인하여 부재 내부로 열이 유입되는 속도가 증가하게 되고, 이는 콘크리트 재료의 강도 저하에 직접적인 영향을 미치게 되므로 균열의 크기나 밀도는 화재 피해를 입은 콘크리트 구조물의 잔존강도를 파악하는데 주요한 요인이 된다. 또한, 영상정보로부터 파악된 구조부재의 변형 정도로부터 좌굴의 발생 유무를 파악하고 사용성을 평가할 수 있어 화재 현장에서 구조부재의 안전성을 파악하는 데 유용하게 사용되는 정보가 될 것으로 기대된다.

따라서, 앞서 가열실험을 통해 얻은 다양한 데이터(균열, 변형)는 화재 피해를 입은 콘크리트 구조물의 잔존강도와 직·간접적으로 연관관계를 맺고 있으며 이 관계를 정립하여 제시할 수 있을 것으로 예측하고 있다. 본 연구에서 얻은 결과는 화재 현장에서 취득되는 영상정보로부터 분석된 균열 및 변형 특성과 연관지어 구조물의 손상정도를 유추해 내는데 사용된다.



그림 2 화재 피해를 입은 콘크리트 보 부재의 가력 실험

② 화재 피해를 입은 철근 콘크리트 부재의 영상처리 및 머신러닝 적용 분야

화재 피해를 입은 콘크리트 부재의 영상처리 및 머신러닝 적용 분야의 연구로는 먼저 화재 구조물 외관의 영상정보를 취득하고 처리하여 균열 및 폭열정보 등 구조물 손상도 분석에 사용가능한 영상의 패턴 정보를 얻는다. 다음으로 머신 러닝 기법을 이용하여 균열패턴을 분석하고, 그 결과로 영상에서 지역단위의 손상 영역검출 및 안전도 추정을 수행한다. 그림 3은 본 세부 연구의 구성 및 체계이다.

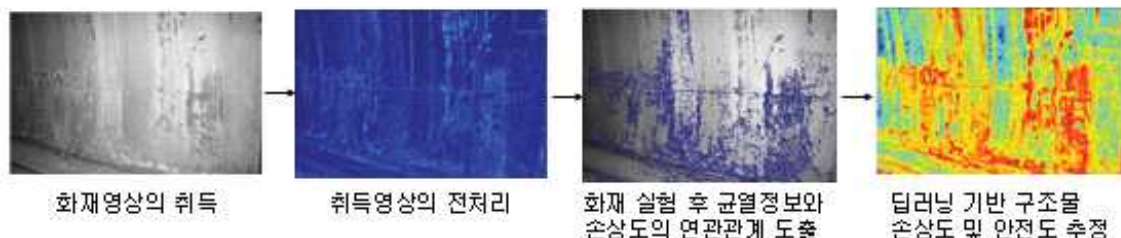


그림 3 화재영상 취득, 전처리, 딥러닝 기반의 구조물 손상도 및 안전도 추정

영상의 취득은 화재 현장에서 별도의 복잡한 절차나 전문적인 장비의 활용 없이도 가능하도록 범용 HD(High Definition)급 카메라를 사용할 수 있다. 영상은 현장에서 취득 각도 및 조명 변화 등 다양한 환경에서 취득될 수 있으므로 콘크리트 부재의 모의화재 실험 단계에서 이를 충분히 고려한다. 추후 영상 데이터의 결과를 분석하고 머신러닝 기반의 알고리즘을 개발하기 위해서는 체계적인 영상 DB의 구축이 필요하므로 취득 환경 및 다양한 조건을 메타데이터로 함께 포함한다. 이외에도 360도 카메라나 초고해상도 카메라 등을 이용하여 취득한 영상을 DB에 함께 구축함으로써 연구 결과물의 성능 향상을 극대화할 수 있으며 추후 유사연구 분야에도 활용이 가능하다.

다양한 조건 및 환경에서 취득한 영상 데이터를 활용함에도 불구하고 구조물 외관의 균열 혹은 폭열 현상 등의 분석에 유용한 정보가 국지적으로 과도하거나 부족한 조명으로 드러나지 않는 경우가 많다. 따라서 취득 영상을 전처리하는 단계가 필요하다. 제안 연구에서는 전처리 기법으로 영상의 정규화, 콘트라스트 향상, 에지 검출 필터 적용, 히스토그램 등 영상 내 균열정보를 구성하는 에지, 코너 등의 low-level 특징 정보를 구분하는 기법 등이 활용 가능하다. 예컨대 그림 4의 전처리 단계에서

는 영상 내 에지검출필터를 적용한 것으로 원래 영상에서는 과다한 조명으로 잘 관찰되지 않던 균열 정보가 효과적으로 보임을 알 수 있다.

제안 과제에서는 최근 딥러닝 분야에서 활발히 연구 중이며 영상 내 객체인식 등에서 우수한 성능을 제공하는 Convolutional Neural Network (CNN) 기술을 이용하여 영상분석결과로 구조물의 잔존강도를 추론한다. CNN은 여러 계층의 신경망이 영상 내 적용되는 다수의 필터 형태로 구성되는 비선형 신경망 구조이다. 그림 4에서 보듯이 CNN은 영상을 입력으로 받아 각 층에서 최적화된 필터 셋을 이용하여 컨볼루션 연산을 수행하고 그 결과로 계층 별 영상 데이터의 대표 패턴의 특징 정보 맵(feature map)을 생성한다. 경우에 따라 특징 정보 맵의 크기를 풀링을 이용해 사이즈를 줄여 다양한 해상도에서 분석을 진행한다. 각 층별 특징 정보는 영상의 특성을 분석하는데 활용된다. CNN은 다른 머신러닝 기법과 마찬가지로 학습 단계와 검증단계의 최적화가 필요하다. 즉, 학습단계에서는 실험으로부터 취득한 화재 영상데이터의 균열정보와 데이터로부터 추론하고자 하는 잔존강도 사이의 연관 모델을 수립하는 과정이 필요하며, 이 때 CNN모델은 각 계층 별 신경망 구조의 최적 구조 및 파라미터를 실험을 통해 취득한 데이터 모델을 통하여 도출한다. 화재 구조물의 외관정보와 잔존강도 사이 정량 모델이 앞서 가열 실험을 통하여 구축이 된 후, 그 결과를 이용하여 최적화를 수행할 수 있다. 영상 학습의 결과물로 CNN은 그림 4에서 보듯이 계층별로 영상 데이터의 대표적인 패턴의 특징 정보를 출력하는 필터 셋을 제공한다. 검증 단계에서는 최적화한 필터 셋을 입력 영상에 적용함으로써 최종적으로 구조물의 손상영역을 검출하고 해당영역의 잔존강도를 추론하여 성능을 평가할 수 있다.

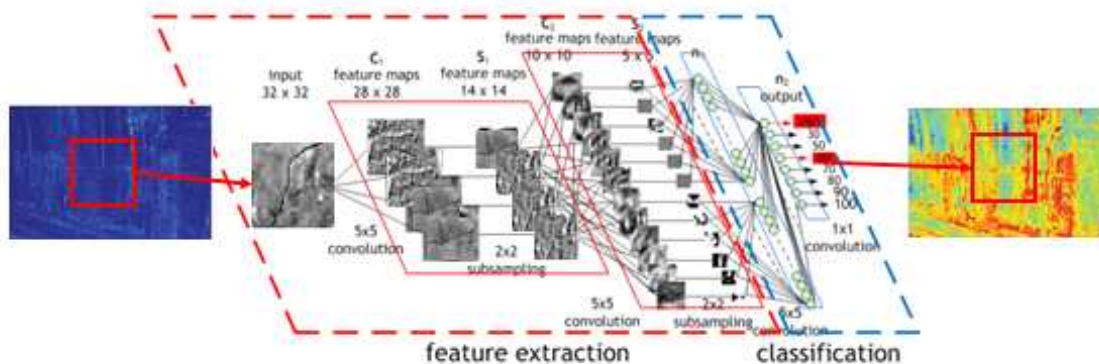


그림 4 Convolutional Neural Network 모델을 이용한 제안과제의 화재 손상영역 검출 및 잔존강도 추론 연구

CNN은 데이터 기반의 분석 방식이므로 데이터의 통계적 특성과 풀고자 하는 문제에 따라 설계를 다르게 해야 한다. 특히, 균열정보를 잔존강도와 연관하여 추정하는 문제는 현재까지 거의 전무하며 창의적이고 도전적인 연구이므로 해당 특성을 설계요소에서 신중하게 고려해야 한다. 연구추진 중 해결해야 할 문제와 가능한 해결방식을 다음과 같이 생각해볼 수 있다.

- 데이터 취득 및 계층구조 설계: 기존의 머신러닝 기법과 구분하여 CNN은 가용 데이터 셋의 크기가 클수록 보다 깊은 층 구조를 가질 수 있으며 이에 따라 보다 높은 성능을 제공한다. 데이터 셋이 충분하지 않은 경우 소수의 데이터가 전체 모집단을 대표하도록 학습이 진행되는 과적합 문제가 발생한다. 현재 공공에 접근이 가능한 화재 영상 데이터가 많지 않고, 고비용의 화재실험을 충분히 많은 횟수로 시행할 수 없으므로 과적합 발생은 제안연구에서 반드시 풀어야 할 문제이다. 제안연구에서는 전담학습(transfer learning)기법을 적용하여 이러한 문제를 해결 할 수 있다. 전담학습이란 비교적 용이하게 취득할 수 있는 영상 셋에서 학습을 먼저 진행하여 준적합 파라미터 셋을 결정하고, 소수의 결정 데이터(화재 실험 후 취득 데이터)로 전체 혹은 부분 신경망 네트워크를 최적화하는 기법을 의미한다. 따라서 제안연구에서는 CNN을 쉽게 취득이 가능한 자연영상의 균열 정보 혹은 합성한 정보로부터 사전 학습(pre-training)을 하여 준적합 구조 및 파라미터를 도출하고 모의화재실험을 통하여 구축한 화재영상 DB를 이용하여 성능을 최적화하도록 한다.

- 구조 공학적 전문지식의 적용: 영상정보로부터 측정된 균열은 하중과 같은 역학적 요인과 화재와 같은 비역학적 요인에 의해 복합적으로 발생했을 수 있으며, 발생한 시기 역시 화재가 발생하기 전이나 중으로 다양할 수 있다. 따라서 구조성능에 영향을 미칠 수 있는 균열의 특성(균열의 크기나 밀집

도가 높은 정도)과 요인을 분석하여 최종적으로 제시되는 구조물의 손상정도와 연관지어 안전도에 심각한 문제가 발생한 부재나 위치를 제시할 수 있어야 한다. 이러한 구조 공학적인 전문지식을 머신러닝 학습과정 중에 고려하여 알고리즘을 설계한다.

2. 연구개발의 필요성

통계적으로 화재발생건수는 지난 29년간 5배 이상 증가하였으며, 화재건당 피해액 역시 5.1배 증가하였다. 또한, 최근 10여간 발생한 화재의 경제적 손실은 연간 평균 17.5% 증가하고 있어, 화재로 인한 경제적 피해는 지속적으로 증가하는 추세이며(그림 5 참조), 특히 인구 밀집도가 높은 도심지역에서는 화재 전파로 인한 직접적 피해 뿐 아니라, 화재 발생 주변 공간의 거주자 또는 사용자도 건물의 안전성이 확인되는 일정 기간 동안 건물 사용에 제약을 받게 되어 경제적 피해가 더욱 크게 나타나기도 한다. 따라서 이러한 피해를 줄이기 위해서는 신속한 대응과 복구가 요구되며, **화재 피해를 입은 구조물의 신속하고 정확한 손상정도 파악을 바탕으로 건물의 사용가능 시기를 앞당기는 것이 매우 중요하다.**



그림 5 화재건수 및 재산피해 현황

화재 피해를 입은 건축물의 진단 및 평가 방법으로는 일반적으로 육안검사, 파괴검사, 비파괴검사 등이 있으며, 아래 표 1과 같은 특징을 지닌다. 먼저 육안검사는 진단하는 사람의 주관적 의견에 의하여 평가 결과가 크게 영향을 받을 수 있다는 단점이 있으며, 파괴 검사는 구조물의 일부분을 떼어 내어 강도 시험을 실시하는 관계로 기존 구조물에 2차적인 피해를 입히거나 신속성이 떨어져 피해자(사용자)에게 피해 및 복구비용이 가중되는 등의 결과를 초래할 수 있다. 이러한 파괴 검사의 단점을 보완하기 위해 비파괴 검사가 실시되고 있는데, 대표적인 비파괴 검사법인 초음파 측정법은 초음파 발신기와 수신기를 구조물 표면에 부착해야하기 때문에, 화재로 폭열이 일어나거나 표면 균열이 많이 발생한 콘크리트 구조물의 경우에는 적용할 수 없다는 한계가 있다. 최근 비부착식 비파괴 검사방법 및 기술에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있기는 하나, 장비 개발 및 구입비용이 경제적이지 않은 경우 확산과 배포에 어려움을 겪게 된다는 문제점이 있어, **개발되는 기술의 경제성과 사용의 용이성도 매우 중요한 요소**가 된다.

표 1 화재 피해를 입은 건축물의 진단 및 평가 방법

1차 조사(외관조사)		- 열화 및 그을음상태 조사 - 폭열, 균열, 콘크리트 탈락, 박리, 변형, 변위 - 표면성능저하상태	
2차 조사	현장시험	- 반발경도 - 초음파 - 철근배근	- 중성화 - 코어채취
	실내시험	- 코어시험 - 시차열분석 - X-Ray 회절분석 - SEM 분석	- EDS 분석 - 철근 인장 시험 - 철근의 미세구조 분석

표 2는 국내외 화재 안전성 평가 기준을 분석하여 비교한 표이다. 일본의 경우, 화재 피해 등급과 상황에 대해서 자세히 언급하고 있으며 육안으로 검사할 수 있는 박리, 균열, 변색 등뿐만 아니라 수열온도로 등급을 나누고 간단하게 내화특성에 대해서도 언급하고 있다. 미국의 경우, 외관조사에 따른 박리, 균열, 변색, 폭열 등으로부터 화재 피해 등급을 나누고 일본과 달리 부재마다 등급을 다르게 나누는 것이 특징이다. Eurocode는 화재 피해를 입은 재료의 특성 변화에 대해 자세히 설명하고 있으나 피해등급 및 진단평가에 대한 사항은 누락되어 있다. 현재 국내에서는 화재 피해를 입은 건축물의 진단·평가에 대해 주변국인 일본에서 제시하고 있는 ‘건축물의 화재진단 및 보수보강방법’을 따르고 있어, 화재 피해를 입은 건축 구조물의 신속하고 정확한 진단 방법이 될 수 있는 기술의 개발이 아직 미흡한 실정이며, 이러한 기술 개발을 바탕으로 국내 실정에 맞는 화재 피해 구조물 손상정도 평가 지침이 수립되어야 할 필요가 있다.

표 2 국내외 화재 안전성 평가 기준 비교

구 분	한 국	일 본	미 국	Eurocode
화재 피해 등급	×	○	○	×
외관조사(등급)	×	○	○	×
수열온도(등급)	×	○	×	×
내화특성	×	○	○	○

기존의 영상 분석은 영상의 특징(feature)을 전문가의 지식에 기반을 두어 설계하는데 초점을 맞추었다면, 최근 머신러닝 분야에서 획기적인 성능향상을 보이는 딥러닝은 비선형의 다층신경망을 이용해 영상 내 유용한 특징들을 데이터에서 직접 취득하는 방식으로 변화하고 있다. 딥러닝 방식은 사람이 미처 파악하지 못한 유용한 특징들을 데이터 내에서 직접 찾아낼 수 있을 뿐 아니라 각 층의 신경망에서 학습한 특징 정보가 서로 다른 해석 방식을 제공하기 때문에 영상 분석에서 보다 상위개념의 추론을 용이하게 해준다. 비근한 예로는 영상 내 얼굴 인식에 관한 연구로 그림 6에서 보듯이 미국 페이스북 사에서 최근 딥러닝을 이용하여 다양한 각도 및 조명에서 사람 얼굴을 인식할 수 있는 기술인 Deepface를 2014년에 개발하였다. Deepface는 지난 20년여 지속되어온 기존 방식의 성능을 획기적으로 개선시켜 인간과 유사한 97.25%의 정확도로 얼굴을 인식할 수 있다. 또한 최근에는 알파고와 같이 바둑 등의 게임에도 딥러닝 기술이 적용되어 사람의 추론을 뛰어넘는 결과를 보이고 있다.



그림 6 페이스북의 딥러닝을 이용한 얼굴인식 기술 (deepface, 2014)

그러나 딥러닝 알고리즘은 응용 목적과 데이터의 특성에 따라 구체적인 기술이 상이하게 적용되며 그에 따른 성능 차이가 비교적 클 수 있어 학습 데이터의 양이 많지 않은 경우 높은 성능을 제공하기 어려울 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 딥러닝 기법을 과제에 단순 적용하기 보다는 **건축-인공지능 융합 문제의 특성을 고려**하고 구조공학 분야의 지식을 활용하는 **통섭적인 문제 해결 접근 방식**을 취해야 한다. 일례로 건축물 영상의 전달학습 기법을 개발하고, 영상 내 균열 정보를 파악하기 위하여 하중 등의 역학적 요인과 화재 등의 비역학적 요인에 의한 균열 특성을 구분하여 학습시킴으로써 구조물에 보다 치명적인 손상 요인을 유추할 수 있도록 하는 알고리즘을 설계할 수 있다. 이와 같은 새로운 접근방식은 **머신러닝 연구 분야 내 획기적인 전기를 마련하는 선도적인 시도**가 될 수 있다.

3. 연구개발 범위

콘크리트 구조물의 균열 및 변형 특성으로부터 구조적 결함, 내구성 저하 등 건축물의 구조적 손상을 판단할 수 있다. 특히, 화재 피해를 입은 구조물은 변형 및 균열 발생이 뚜렷하여 이를 구조적 손상도 판단에 매우 유용하게 활용할 수 있다. 다만, 화재 피해를 입은 건축물의 구조적 손상도를 신속하고 정확하게 파악하기 위해서는 머신러닝 기법을 활용하여 영상정보를 처리, 평가하는 것이 효과적이다. 따라서 화재 피해를 입은 구조물의 손상정도를 신속하고 정확하게 파악하기 위한 기술로써 영상처리 기술과 머신러닝 기법, 화재 피해를 입은 구조물의 변형 및 균열 특성 파악, 잔존강도 분석 기술을 개발하고, 이를 통합한 지능형 손상 평가 소프트웨어를 개발한다. 본 연구는 기초연구로서 연구 착수일 기준으로 연구개발 성숙도가 이론적 연구단계였음을 감안하며, 실험적 증명단계의 범위까지 연구를 수행하고자 범위를 한정한다.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

○ 기술의 시장성

그림 7에서 나타난 바와 같이 세계적으로 재난 사고 발생률이 매년 증가하면서 안전방재 관련 시장 또한 급속히 커져가고 있어, 2011년 기준으로 전 세계 안전시장이 306조 규모로 2021년까지 연평균 8%씩 성장할 전망이며, 아시아 등의 신흥개발 국가에서도 관련 시장규모가 점차 커지고 있다. 특히, 안전 인프라 구축에 적극적인 중동의 안전 시장이 연 10% 이상 성장할 것으로 전망된다. 2012년 글로벌 소방산업은 2012년 기준으로 51조원에 이르며 2025년까지 120조원까지 성장할 것으로 예측되며, 이는 개발도상국의 도시화 가속과 초고층 건물의 증가에 따른 화재안전 중요성이 강조되기 때문인 것으로 유추할 수 있다. 개발도상국의 도시화 가속 등으로 인해 화재 안전의 중요성이 강조되고 있기 때문에 본 연구를 통해 개발될 화재 피해를 입은 건축물의 진단·평가 기법은 국내의 독자적인 기술을 해외에 전파, 신산업, 중동, ASEAN 등 안전수요가 증가하는 신흥시장을 중심으로 활발한 기술 이전이 가능할 것으로 판단된다.

국내 국민안전처는 최근 7차 무역투자진흥회의에서 신종 안전산업을 육성해 내수를 자극하는 포석으로 삼겠다는 계획을 밝혔다. 미국 시장 조사기관 프리도니아와 산업통상자원부는 아시아·태평양 지역 안전산업은 2021년까지 연평균 9%씩 급성장할 것으로 관측하였으며, 국내 안전산업 규모는 35조 6000억원인 것으로 추산되어, 시장성이 높은 분야인 것으로 파악된다.

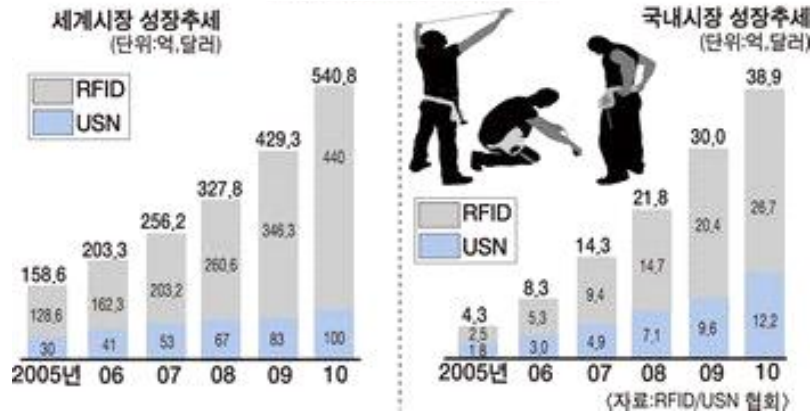


그림 7 안전산업분야 성장 추이

정부가 올해부터 안전진단을 대폭 확대기로 한 것과 맞물려 유지·보수 시장 또한 커질 것으로 전망된다. 그림 8에서 보듯이 해외의 경우 전체 공사비의 40%까지 유지관리 비용을 적용하고 있으며, 국내의 경우도 신규 시공에 비하여 기존 시설의 유지관리가 늘어남에 따라 비용절감과 안전관리를 위하여 시공초기부터 이러한 유지관리 체계의 도입이 필요해 졌다. 이에, 국내 유지관리 시장이 선진국과 같은 40% 정도의 유지관리 비용이 적용될 경우 약 27조원까지 관련 시장이 증대될 것으로 예상됨에 따라, 유지관리에 필수적인 신속하고 정확한 손상정도 평가기술의 역할이 매우 중요해 질 것으로 보인다.

그림 8 건설시장의 유지관리 비율
(자료: 한국건설기술연구원 2008)

머신러닝 기술은 인공지능 산업분야에 핵심 기술로 다양한 산업 분야에 접목이 되어 빠른 속도로 확장하는 추세이다. 글로벌 시장조사업체인 가트너는 2016년에 “주목해야 할 올해의 기술”로 머신러닝을 꼽았고, 기술의 성숙도 및 시장성을 보이는 가트너 하이프 사이클(Hype cycle) 상에서 기대감이 최고점에 위치하고 있다. 구글, 페이스북 및 IBM 등 선진 SW 기업들은 머신러닝 기술을 스마트 카, 핀테크, 헬스케어 등 고부가가치 융합분야에 적용하여 새로운 가치를 창출하고 있으며, 해외 인공지능 관련 스타트업에 대한 투자액 역시 미국 실리콘밸리를 중심으로 빠르게 증가하고 있다. (그림 9 참조) 미국조사기관인 CBInsight에 의하면 투자액은 2010년 1490만 달러에서 2014년 3억 달러로 증가하였다. 시장조사기관 IDC에 따르면 머신러닝의 응용분야 중 하나인 음성인식 시장규모는 2015년 약 840억 달러(한화 약 97조원)에서 오는 2017년에는 1130억 달러(약 131조원)로 늘어날 것이란 전망이다. 또한 영상처리 시장은 2015년 약 800억 달러, 2017년 1100억 달러를 형성할 것으로 전망된다. 맥킨지는 2025년 머신러닝을 포함해 인공지능을 통한 지식노동 자동화의 파급효과가 연간 5조 2,000억 달러에서 6조 7,000억 달러에 달할 것으로 추산했다. 국내의 인공지능 시장 규모 역시 가파르게 증가하여 미래창조부 예상으로 관련 시장 규모가 2013년 3.6조 규모에서 17년 6.4조 규모로 증가할 것으로 예상되고 있다. 관련 특허 출원도 그림 10에서 보듯이 미국의 경우 2010년 이후 가파른 속도로 증가하여 누적 25,000여건 출원되었다. 특허 출원 내용을 보면 거의 모든 산업분야에서 머신러닝이 융복합 기술로 사용되고 있음을 볼 수 있다. 특히 건축·인프라 관리와 같이 방대한 양의 데이

터를 수집 관리하고 객관적이고 신뢰성 있는 규정에 의하여 유지 보수를 계획하는 데에 효과적으로 적용할 수 있어 건축물의 빅 데이터 및 외부 변화를 분석하여 에너지 사용량을 줄이는 건물 에너지 관리시스템, 드론을 이용한 공정 촬영 및 시설물 관리 및 안전관리, 스마트 단지 내 영상을 이용한 안전관리 등 건설·건축 분야에서도 활용 범위가 늘어나고 있다.

Artificial Intelligence, Real Money

Total venture capital money for pure AI startups, by year

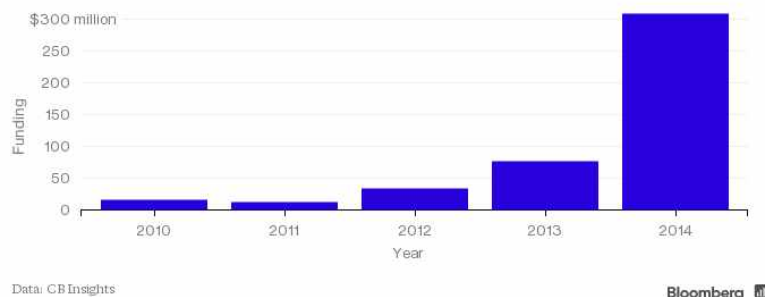


그림 9 해외 인공지능 관련 벤처 투자액

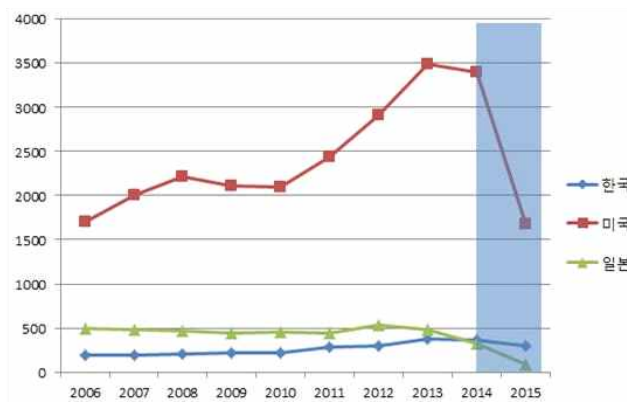


그림 10 한미일 인공지능관련 특허출원 통계 (15년 특허는 특허문헌 미공개로 비 유효기간임)

○ 국내 연구 현황

① 화재에 따른 콘크리트 구조물의 균열 및 변형 특성 기반 잔존강도 평가기법 연구 분야

국내에서는 화재와 관련하여, 철근 콘크리트 구조부재를 고온에 노출시킨 후 잔존강도를 평가하는 실험연구를 주로 진행하여 왔다. 특히, 내화설계와 관련하여 다양한 인자(콘크리트 강도, 부재의 크기, 화재 노출시간, 하중 가력 여부 등)가 화재 피해를 입은 구조물의 내부 온도분포와 잔존강도에 미치는 영향에 대한 연구결과가 많이 발표된 바 있다. 또한, 고강도 콘크리트에서 발생하는 폭렬현상을 방지하기 위한 기법으로 섬유혼입 콘크리트 등의 개발에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러나 내화설계를 목적으로 한 부재의 잔존강도 파악, 고온 하에서의 폭렬을 방지할 수 있는 고강도 콘크리트 재료 개발 등의 연구에 집중되고 있어 이미 지어진 건축물이 화재에 노출되었을 경우 수행할 만한 진단 지침이나 구조성능 평가에 관한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 이에, 최근 건설현장 등에서 화재피해가 심각하게 대두됨에 따라 국내기준 마련을 위한 연구가 진행되고 있다.

현재 화재 피해를 입은 건축 구조물에 대해서는, 일본건축학회에서 제시하고 있는 ‘건축물의 화재진단방법’을 바탕으로 한 육안검사, 파괴검사 및 비파괴검사 등을 실시하여 구조물의 손상정도를 평가하고 있는 추세이다. 그러나 이러한 검사는 객관성 결여, 진단·평가에 소요되는 시간 및 비용 증가로 인한 효율성 문제 등을 안고 있다. 따라서 국내 실정에 맞는 관련 지침 및 실제 현장에서 화재 피해를 입은 철근 콘크리트 구조물의 효율적인 진단 방법에 관한 연구가 매우 필요한 실정이다.

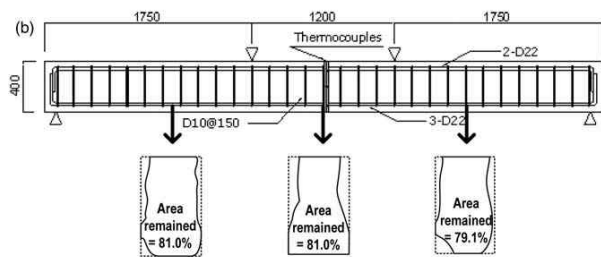


그림 11 화재실험 후 고강도 콘크리트 보의 단면



그림 12 고강도 콘크리트 보의 폭열현상

② 화재 피해를 입은 콘크리트 부재의 영상처리 및 머신러닝 적용 연구 분야

최근 영상 분석기술은 딥러닝 등의 머신러닝 기술을 기반으로 영상을 통해 취득한 객체의 패턴 및 동작의 인식과 예측을 통해 인체의 얼굴, 자세 그리고 장면의 의미를 파악하여 안전, 재난 대책, 국방 등의 영역으로 확산되는 추세이다.

국내에서는 국민맞춤형 정부3.0에서 빅 데이터 분석을 통한 재난재해 대응 시스템 구축의 요소기술 중 하나로 영상 정보를 활용하여 국지적 재난을 인지하는 영상정보 분석 알고리즘 및 시스템을 개발 중으로 딥러닝과 같은 고도화된 학습 알고리즘의 적용이 시도되고 있다. 그러나 기존 연구 중 머신러닝 기반의 영상정보 분석을 이용하여 구조물의 안전성을 평가하는 연구는 거의 전무하다.

○ 국외 연구 현황

① 화재에 따른 콘크리트 구조물의 균열 및 변형 특성 기반 잔존강도 평가기법 연구 분야

화재로 인한 콘크리트 재료의 강도 및 강성의 저하, 부재의 거동에 대한 예측기법은 캐나다, 스웨덴, 오스트레일리아 등에서 활발히 연구되고 있다. 특히, 일본에는 화재 피해를 입은 철근콘크리트 및 강구조 부재에 대한 진단과 보수·보강에 대한 기준이 제시되어 있으며, 주거 밀집 지역에서의 화재 전파 양상을 기반으로 한 피난대책에 대해서도 연구된 바 있다.

② 화재 피해를 입은 콘크리트 부재의 영상처리 및 머신러닝 적용 연구 분야

미국 IBM사의 스마트 시티(smarter city) 프로젝트에서는 건물 내·외부의 이미지 감지기를 활용하여 화재, 재난, 교통, 범죄와 같은 공공안전부문의 빅 데이터 영상정보를 수집하고 분석하여 도시의 기반 시설 및 안전 관리 등에 활용 중이다. 또한, 아래 그림 13, 14와 같이 딥러닝 기법을 도로 교통 분야에 적용하여 균열 및 도로 표면 상태를 탐지하는 연구 등이 진행되고 있다.



그림 13 딥러닝 기법을 이용한 균열 탐지

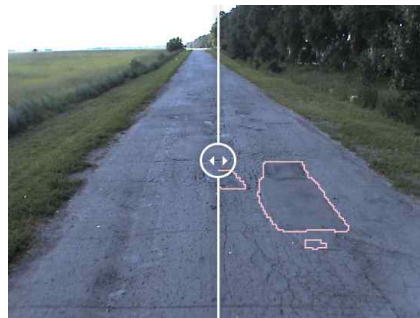


그림 14 딥러닝 기법을 이용한 도로표면탐지

○ 종합 결론

앞서 조사한 관련 시장동향과 국내외 연구동향을 요약하면 다음과 같다.

- 세계적으로 재난 사고 발생률과 이로 인한 피해가 급증하면서 안전방재 관련 시장 또한 급속히 성장하고 있다.

- 화재피해를 입은 구조물의 구조성능을 평가하고자 하는 연구는 국내외적으로 수행되어 왔으나, 실제 화재 현장에서 화재 피해를 입은 구조물의 효과적인 진단을 목적으로 수행된 연구는 미흡한 실정이다. 또한 화재 피해를 입은 구조물에 대한 기존의 진단기법들은 객관성이 결여되거나 시간적, 경제적 비용이 높다는 단점을 가지고 있다.
- 해외에서 영상정보를 도시의 기반시설 및 안전 관리 등에 활용하고자 하는 노력이 진행되고 있음에도 불구하고 아직 국내의 기존 연구 중 머신러닝 기반의 영상정보 분석을 이용하여 구조물의 안전성을 평가하는 연구는 거의 전무한 실정이다.
- 본 연구를 통해 구축되는 다양한 영상정보와 분석결과, 기존의 국내외 관련 연구결과를 종합하여 국내 실정에 맞는 지능형 손상 평가 원천기술을 확보하게 될 가능성이 높다.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

[주관연구기관 이화여대]

○ 1차년도

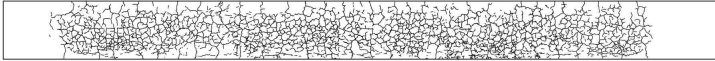
① 연구 수행 내용

- 화재 피해를 입은 철근 콘크리트 부재의 구조성능 평가 분야



그림 15 화재 피해를 입은 철근 콘크리트 부재의 구조성능 평가분야의 1차년도 연구개요

1차년도에는 화재 피해를 입은 구조물의 구조 안전성 분석 사례 및 국내외 화재 피해를 입은 구조물의 진단 및 평가에 관련된 기술을 조사하고 이를 토대로 화재 실험의 변수 및 방법과 같은 상세사항을 계획하고, 가열실험을 수행하여 아래 표와 같이 철근콘크리트 부재에서 육안으로 파악할 수 있는 균열 및 변형 등의 특성과 온도 분포 특성을 파악하였다. 변수에 따라서 화재 시간이 길수록, 하중 재하가 클수록 내부온도 분포와 처짐값이 증가하는 것이 뚜렷하게 나타났다. 이에, 가장 명확한 차이가 발생하는 화재 시간 및 하중 변수를 우선 선정하여 균열도를 수동으로 작성하고 변수별 내부 온도분포와 균열 양의 차이를 분석하여 유의미한 경향성을 확인하였다.

실험체	가열 실험 후 실험체 균열도	최종 처짐 (mm)	최고 온도 (°C)
P1-60		19.4	225.3
P1-120		28.2	582
P2-60		18.7	282.9
P2-120		79.4	603.3
P3-60		37.3	312.1

개발목표	개발내용
국내외 화재피해를 입은 건축물 진단 및 평가 기술 자료 수집·분석	- 화재피해를 입은 구조물의 안전성 분석 사례 및 진단 평가에 관련된 기술 조사 - 기존 화재 피해를 입은 일반강도, 고강도 콘크리트 구조부재의 화재 실험을 통해 부재의 균열 밀도 및 변형 특성 파악
화재 손상에 따른 균열 밀도 및 변형 특성을 파악하기 위한 가열 실험	- 다양한 변수에 따른 콘크리트 부재의 가열실험 - 철근 콘크리트 구조부재의 화재 실험을 통한 변수별 균열 밀도 및 변형 특성 파악 - 화재에 노출된 구조부재의 거동 및 안전성 평가를 위한 해석적 연구

• 화재 피해를 입은 콘크리트 부재의 영상처리 및 머신러닝 적용 분야

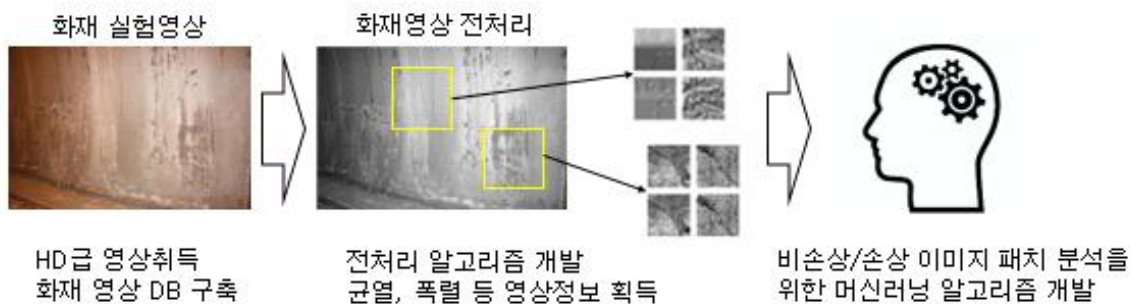


그림 16 화재 피해를 입은 철근 콘크리트 부재의 영상처리 및 머신러닝 적용 분야의 1차년도 연구개요

1차년도에는 화재실험 후 부재의 외관에 관한 영상정보를 취득하고 이를 전처리하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 영상 정보 취득에는 화재 현장에서 별도의 복잡한 절차나 전문적인 장비의 활용 없이도 가능하도록 범용 HD(High Definition)급 카메라가 사용되었으며, 취득된 영상 정보는 머신러닝 기법에 필수적이라고 할 수 있는 영상 DB로 구축되었다. 영상으로부터 균열 정보의 취득이 용이하도록 영상을 전처리하는 알고리즘을 개발하였으며, 이 알고리즘에는 화재 영상 내 손상정보로 인식할 수 있는 균열의 에지, 코너 등의 low-level 특징 정보를 구분하는 기법, 데이터 확장 기법 및 영상 정규화 기법, 그리고 학습 데이터의 분류조건 사후 확률 (class-conditional posterior probability) 취득이 포함되도록 하였다. 인공지능-건축공학

융합 선행연구를 조사하고 화재 구조물의 손상도 추론 기술에 딥러닝 기반의 알고리즘을 도입하는 원천 기술로서 영상 데이터의 분류를 효율적으로 수행하는 동종 딥러닝 네트워크로 구성된 트리 형식의 분류 알고리즘을 개발하였다.

개발목표	개발내용
화재 부재의 영상 취득 및 영상 DB 구축	- 화재 부재의 HD급 영상 취득 - 각종 메타데이터(화재 시간, 부재 종류, 화재 정도)를 포함한 영상 데이터 DB 구축
화재실험 영상정보 전처리 알고리즘 개발	영상 내 균열 특징의 전처리
데이터 기반의 학습 및 추론 알고리즘 개발	- 머신러닝 기법을 이용한 각종 패턴분석 기법 및 인공지능-건축공학 융합 선행연구 조사 - 딥러닝 기반의 머신러닝 기법 도입

② 성과

1차년도 연구개발성과 및 평가방법으로 다음과 같이 정량적 성과를 정리하였음.

- 1차년도 성과목표: 국내논문 1건, 특허출원 2건
- 1차년도 달성성과: 국내논문 1건, 특허출원 2.5건 (2.5건 중 1건 등록(2차년도)), 인력양성 4인(석사4), 국제 학술대회 3건, 보고서원문 1건

○ 2차년도

① 연구 수행 내용

- 화재 피해를 입은 콘크리트 부재의 구조성능 평가 분야



그림 17 화재 피해를 입은 철근 콘크리트 부재의 구조성능 평가분야의 2차년도 연구개요

2차년도에는 화재 피해를 입은 구조 부재의 잔존강도 평가를 위한 가력시험을 진행하고 잔존강도, 강성, 연성도 등의 결과를 분석하였다. 또한, 가열 실험에서 얻은 균열 및 변형의 특성과 내부온도 분포, 잔존강도 실험에서 얻은 구조성능 간의 연관관계를 파악하고, 이를 바탕으로 머신러닝으로부터 얻은 균열의 양과 화재 발생 시간, 화재 중 재하 하중과 발생 처짐의 정보를 통합하여 위험도를 산출할 수 있는 식을 아래와 같이 제시하였다.

$$Risk\ level = A_c A_s C + A_t T + A_l L + A_d D$$

본 연구에서 제안된 수치식의 영향인자로써는 표면균열의 pixel 개수, 화재발생시간, 화재 중 가력 하중 및 처짐을 선정하였다. 여기서, 위험도에 대한 가중치는 표면균열의 pixel 개수, 화재발생시간, 화재 중 가력 하중 및 처짐에 대해 기여도 5~50% 사이에서 부여한다. 제안된 수치식은 화재에 따른 콘크리트 보의 사용하중 저감율과 8%이내의 오차범위를 나타내며, 머신러닝 기법으로 검출된 균열의 양과 수동으로 작업된 균열도의 균열길이의 합 역시 높은 유사성을 나타내었다. 또한, 본 연구에서 개발된 기법으로는 실험체 1개당 약 1시간 이내의 영상 정보 취득 및 균열 검출 등의 작업을 포함하는 위험도 평가가 가능해 지며, 기존의 수동적인 방법을 통해 균열을 검출하는 작업은 실험체 1개당 약 2주간의 기간이 소요되어 시간적인 측면에서 훨씬 경제적인 것으로 판단된다.

개발목표	개발내용
균열 밀도 및 변형 특성에 따른 잔존강도 변화 파악을 위한 가력 실험	화재 피해를 입은 구조 부재의 가력 실험을 통한 손상도 평가 및 부재의 잔존강도 분석
화재에 노출된 구조부재의 변형 특성과 잔존강도의 연관관계 분석	- 균열 및 변형에 대해 정량적으로 결과 데이터 수치화, 분석 및 정리 - 실험을 통해 균열 및 변형특성과 위험도 간의 정량적 관계 수립 - 화재 피해를 입은 철근콘크리트 부재의 진단 및 평가 방법 개발 - 화재피해를 입은 구조물의 안전성 평가 기법의 적용성 검증

• 화재 피해를 입은 철근 콘크리트 부재의 영상처리 및 머신러닝 적용 분야

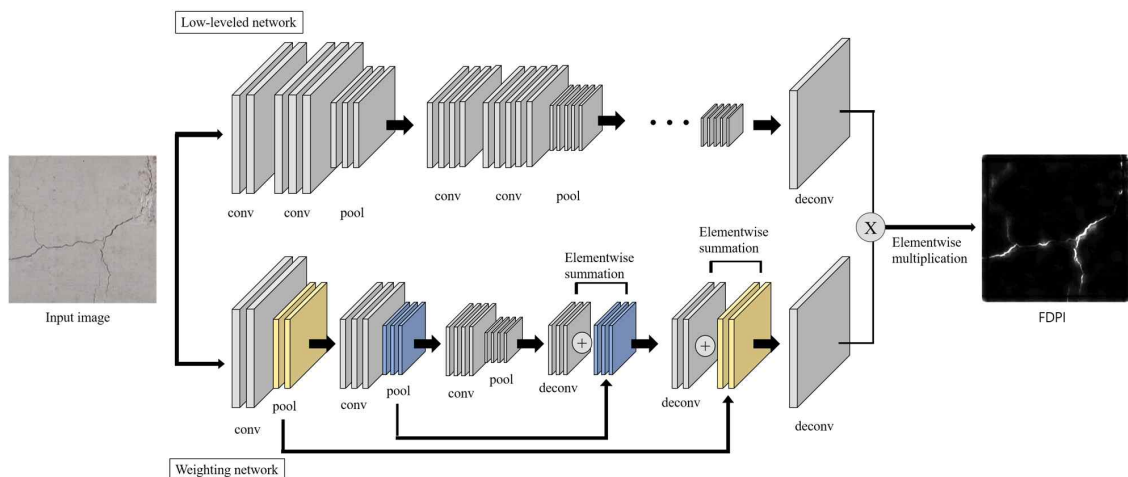
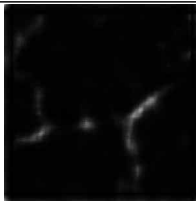
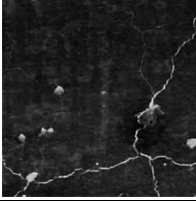
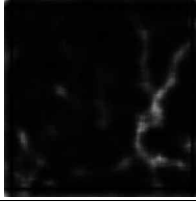
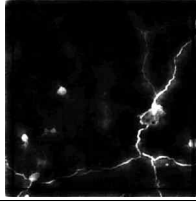
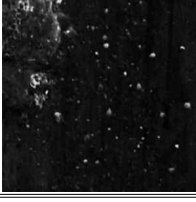
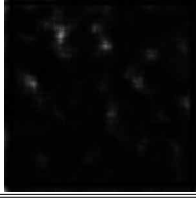


그림 18 제안하는 균열 검출 네트워크

2차년도에서는 화재 피해로 인한 균열 특성을 효율적으로 탐지하기 위한 two stream의 딥러닝 네트워크 구조를 고안하였다. 이 구조는 저층의 특징을 추출하는 네트워크(low-level 네트워크)와 콘크리트 보에서 균열의 위치를 대략적으로 탐색하는 네트워크 (weighting 네트워크)가 결합되어 해당 관심 영역에서 균열만을 찾아내도록 한다. low-level 네트워크는 에지와 같은 이미지 기본 특징을 검출하는 역할을 하며, weighting 네트워크는 주요 균열이 위치한 부

분에는 높은 가중치를, 그렇지 않은 부분에는 낮은 가중치를 부여하여 잡음을 억제한다. Weighting network의 균열/비균열 영역에 대한 가중치는 출력 맵의 화소 값에 따라 0부터 255의 정수값에 따라 부여된다. 부여 방식은 딥러닝을 통하여 학습 데이터의 균열 정보가 실제 균열 정보에 근사하도록 스스로 학습하는 방식을 취한다. 이 때 실제 균열 정보와 학습 데이터의 균열 정보간 차이를 표현하는 지표는 평균 제곱 오차 (Mean Mean-squared-error)를 사용한다.

최종적으로 네트워크의 출력은 두 네트워크에서 출력한 특징 맵의 곱셈을 사용하여 두 네트워크를 통해 얻어진 특징 맵을 결합하여, 결과적으로 네트워크에 캡처 된 모든 특징 중에서 불필요한 공극이나 노이즈를 제외하고 화재 피해 정도와 유의미한 상관관계가 있는 중요한 균열만 표시하도록 하였다 (아래 표 참고).

Patch	Input image	output of low-leveled network	output of weighting network	최종 출력
crack patch 1				
crack patch 2				
crack patch 3				

수동으로 작성한 실험체별 균열도의 균열길이와 머신러닝 기법에서 인식된 균열 부분의 pixel 수를 비교한 표는 아래와 같이 실험체 별로 매우 유사한 경향성을 나타내었으며, pixel의 개수를 합산하는 여러 가지 방식을 고안하였을 때, 따로 후처리를 하지 않고 균열 부분의 pixel수를 전부 합산하는 방식에서 가장 높은 경향성을 나타내었다.

실험체명	머신러닝 기법으로 인식된 균열 부분의 Pixel 개수	수동으로 제작된 균열도에 나타난 균열길이의 합 (mm)
P1-60	33987368	76316
P1-120	39942906	83866
P2-60	35924210	75827
P2-120	40607469	86856
P3-60	37277057	78000

개발목표	개발내용
잔존강도추론 알고리즘개발	- CNN 기반의 잔존강도추론 알고리즘개발 - 개발기술의 지능형 영상분석 SW 구현
성능평가 시스템통합 및 수정	- 잔존강도추론 실험성능평가 - 머신러닝 기반의 영상정보 분석을 통한 구조물 화재 피해 측정기술 시스템 통합 및 수정

② 성과

2차년도 연구개발성과 및 평가방법으로 다음과 같이 정량적 성과를 정리하였음.

- 2차년도 성과목표: 국내 및 국제논문 각 1건, 특허출원 1건, SW 개발 1건
- 2차년도 달성성과: 국제논문 2건, 특허등록 1건(1차년도 특허출원 2.5건 중 1건), 특허출원 1건, SW 개발 및 저작권 등록 1건, 인력양성 7인(석사1인, 학사6인), 국제 학술대회 3건, 보고서원문 1건

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

구분	핵심성과 (CTE)	단위성과	성과점검기준							실적목표	달성도 (%)
			질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	달성(계획)		
주관	화재에 따른 콘크리트 구조물의 균열 및 변형 특성 파악	1-1 화재에 따른 콘크리트 구조물 균열 및 변형 특성 파악	①	기존자료 조사	5건	21건	자료수집 및 조사	보고서	5	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> 1(1) </u> 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건	100
			②	균열·변형 측정 데이터	10건	18건	가열 실험	보고서	10		
		1-2 구조성능 연관관계 정립	①	화재 피해를 입은 구조부재 잔존강도 데이터	10건	12건	가력시험	보고서	15	특허: 출원 <u> 1(1) </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> 1(1) </u> 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건	100
			②	구조성능 연관관계 식	1건	1건	가력시험	보고서	20		
	머신러닝 기법을 활용한 영상 기반의 구조물 손상 해석모형 연구	2-1 영상 DB 구축 및 전처리 알고리즘 개발	①	영상DB구축	영상 data 300개 이상	23,000	건 수	보고서	15	특허: 출원 <u> 2.5(2) </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건	100
			②	전처리 알고리즘 개발	1종	1종 (세부 3종)	건 수	보고서	10		
		2-2 지능형 영상 추론 SW개발 및 성능평가	①	지능형 영상추론 알고리즘 및 SW 개발	1종	1종	건 수	소프트웨어	15	특허: 출원 <u> </u> 건 (출원 2.5건 중) 등록 <u> 1(0) </u> 건 논문: <u> 1(1) </u> 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> 1(1) </u> 건	100
			②	잔존강도 추론 실험	실험 data 18,000개 학습, 5,000개 테스트	88,000개의 자연 영상 데이터 학습, 20,600개 patch 테스트	건 수	보고서	10		
	계								100	특허: 출원 <u> 3.5(3) </u> 건 (출원 3.5건 중) 등록 <u> 1(0) </u> 건 논문: <u> 3(3) </u> 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> 1(1) </u> 건	100

2. 관련 분야 기여도

- 핵심연구성과(1)은 화재로 인하여 발생한 균열과 변형 정보, 기타 접근이 용이한 화재 및 설계 정보를 통합하여 구조물의 위험도를 수치적으로 추정할 수 있는 연관관계를 제시함으로써 손상을 입은 구조물에 대한 신속하고 정확한 진단 및 대응 대책 수립에 기여하며, 화재피해를 입은 건축물의 구조거동 파악 및 성능기반 내화설계의 기초자료도 활용이 가능함. 또한, 머신러닝기법의 기반이 되는 training data로 활용됨으로써 추후 관련 기술의 개선과 보완에 지속적으로 활용될 수 있을 것으로 판단됨.
- 핵심연구성과(2)는 화재로 인하여 발생한 균열과 변형 정보를 영상으로 취득하여 머신러닝 기법을 이용하여 분석하는 SW를 제작하였음. 본 결과로 균열정보를 이용하여 화재피해를 입은 건축물의 위험도를 파악하는 기법의 활용 가능성을 제시하고 SW제작을 구현함.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

본 과제의 연구개발 결과물은 화재현장에서 구조부재의 손상을 신속하고 정확하게 진단·평가하여 보수·보강 방안 등의 사후 대책 마련에 효과적으로 적용 가능하다. 현재 국내 화재 건축물의 진단·평가 방법론은 일본에서 제시하고 있는 방법론을 준용하는 상황으로 국내 실정에 맞도록 화재피해 측정 기술을 개발함으로써 독자적인 안전진단 기술을 확보할 수 있다. 또한 국토교통부, 국민안전처 등의 관련 정부기관, 소방서, 화재보험사, 건설회사, 구조기술사 사무소, 건축물 관리업체 등 관련 기관과의 협업으로 화재 발생 후 2차 피해를 최소화하는 진단기술로 활용할 수 있다. 본 연구과제에서 개발한 측정 기술은 게이지 부착 및 정보수집 등의 과정을 거치지 않고 영상정보 처리와 같은 비접촉식 과정을 통해 손상평가를 수행할 수 있는 경제적 효과가 있어 사업성 측면에서 활용성이 높다. 또한 안전진단에서 신속성이 매우 중요하므로 최소화된 인력과 시간을 투입하여 안전진단을 수행할 수 있는 시스템으로 구현이 가능하다. 더 나아가 본 과제에서 수행한 연구는 건축물 관리를 위한 지능형 영상처리의 핵심 기술로 기타 건설, 건축, 재난 대응 등 다양한 산업분야에서 기존의 소극적 재난관리에서 적극적 재난관리 분야로 활용가능성을 확대할 수 있다. 각 공공기관에서 수천대의 CCTV를 운용하며 영상 데이터를 통해 사고 및 재난 등을 모니터링하고 있지만 운용인원의 한계로 각종 이벤트에 대응하는 것은 거의 불가능하다. 개발한 분석 기술을 건설 건축 현장에 설치되어 있는 재난관리용 CCTV와 각 공공기관의 관제센터와 연관하여 적극적 건축물 안전 관리로 전환할 수 있을 것이다. 미국, 일본 등 재난발생 빈도가 높은 선진국들은 이미 첨단 영상인식 기술을 활용한 재난관리로 재난의 피해를 최소화하도록 시스템을 구축하고 있으며 본 과제의 결과물은 그 핵심기술로 사용될 수 있다. 향후 위험도에 대한 신뢰성 확보를 위해 후속과제 수주 및 활용방안을 확보해 나가도록 지속적으로 노력한다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- 화재에 따른 콘크리트 구조물의 균열 및 변형 특성 파악
 - 해외논문 10건
 - 해외논문 33건
 - 해외기준 2건

제7장. 연구개발성과의 보안등급

- 보완등급 분류 : 일반
- 결정 사유
 - 해당 연구 목표인 소프트웨어는 국내의 화재안전 분야 및 머신러닝 분야의 다양한 전문가의 참여와 현장의 의견 수렴이 필수적임.
 - 화재 피해 건축물의 진단 및 평가 기술의 기술적 최종성과품에서 연구 중 또는 연구 종료 후에 보호가 필요하다고 판단될 경우, 특허 등록 등의 지식재산권을 활용할 예정이므로 기술 유출에 의한 문제 발생 가능성은 적음.
 - 국민 안전과 직결되는 문제와 관련된 연구이므로 배포·확산이 용이해야 함. 따라서 ‘일반’등급으로 결정하였음.

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

- 기술적 위험 요소 분석, 안전 관리 대책
- 실험실 안전점검
 - 전문기관에 의해 수행되는 외부용역을 통해 연구실 안전점검을 실시하여 연구실의 재해예방과 안전성을 확보
 - 연구실 및 실험실의 일상점검을 실시하여 안전성을 확보



○ 안전교육 및 훈련

- 정기교육: 매월 1시간 이상 이수
- 신규교육: 대학생, 대학원생 등 신규로 연구개발활동에 참여하는 연구활동종사자 - 2시간 이상
- 연구실 및 실험실 내에 안전수칙자료를 비치하여 비상시 행동요령, 안전수칙 등을 숙지



○ 사고발생시 조치

- 각 실험실에 배부된 비상시 행동요령을 전화기 옆과 출입구에 부착하고, 긴급 상황 발생 시는 구내번호 4119로 전화함
- 항상 가장 가까운 소화기, 화재경보기, 가장 가까운 비상구 위치를 확인
- 전문기관에 의해 수행되는 외부용역을 통해 연구실 안전점검 및 구조실험실 관련 장비의 정밀 안전진단을 실시하여 연구·실험실의 재해예방과 안전성 확보



○ 정밀 안전 진단

- 유해위험물질 및 시설장비를 취급하는 등 유해 또는 위험한 작업을 필요로 하는 연구실은 2년에 한 번씩 정밀안전진단을 실시



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	Combining random forest with multi-block local binary pattern feature selection for multiclass head pose estimation	이화여대	주저자	Plos One	3.23	2017.07.17	단독	SCI(E)
2	논문	Effect of loading and beam sizes on the thermal and structural behaviors of reinforced concrete beams exposed to fire	이화여대	주저자	International Journal of Concrete Structures and Materials	2.36	2018 게재 예정	단독	SCI(E)
3	특허	화재 피해를 입은 구조물의 손상 정도를 평가하는 방법	이화여대	주저자	대한민국		2017.10.25	단독	출원 및 등록
4	특허	랜덤한 트리 CNN에 기반한 영상 분석 방법 및 포레스트 CNN에 기반한 영상 분석 방법	이화여대	주저자	대한민국		2017.01.20	중복	출원
5	특허	화재 피해를 입은 구조물의 잔존 강도 평가 방법	이화여대	주저자	대한민국		2017.05.15	단독	출원

제11장. 기타 사항

제12장. 참고 문헌

1. Ashour, S. A. (2000). Effect of compressive strength and tensile reinforcement ratio on flexural behavior of high-strength concrete beams. *Engineering Structures*, 22(5), 413-423.
 2. Cheng, F.P., Kodur, V.K.R., Wang, T.C. (2004) Stress-strain curves for high strength concrete at elevated temperatures, *Journal of Material in Civil Engineering*, 16(1), 84-90.
 3. Cheng, F. P., Kodur, V. K. R., & Wang, T. C. (2004). Stress-strain curves for high strength concrete at elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(1), 84-90.
 4. Choi, E.G. (2008) Performance Assessment of High Strength Concrete Members Subjected to Fire. Ph.D. thesis, Ewha Womans University.
 5. Choi, E.G. Shin, Y.S. (2011) The Structural Behavior and Simplified Thermal Analysis of Normal-Strength and High-Strength Concrete Beams Under Fire, *Engineering Structures*, 33(4), 1123-1132.
 6. Choi, J., Haj-Ali, R., & Kim, H. S. (2012). Integrated fire dynamic and thermomechanical modeling of a bridge under fire. *Structural Engineering and Mechanics*, 42(6), 815-829
 7. Choi, J., Kim, H., & Haj-ali, R. (2010). Integrated fire dynamics and thermomechanical modeling framework for steel-concrete composite structures. *steel and composite structures*, 10(2), 129-149.
 8. Crozier, D.A., Sanjayan, J.G. (2000) Test of Load-bearing Slender Reinforced Concrete Walls in Fire, *ACI Structural Journal*, 97(2), 243-253.
 9. European Committee. (1995). Eurocode2: Design of concrete structures-Part 1-2: General rules-Structural fire design. EN 1992-1-2.
 10. Georgali, B., and Tsakiridis, P. E. (2005). Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. *Cement and Concrete composites*, 27(2), 255-259.
 11. Guise, S. E. (1997). Use of colour image analysis for assessment of fire damaged concrete (Doctoral dissertation, Aston University).
 12. Hager, I. (2014). Colour change in heated concrete. *Fire Technology*, 50(4), 945-958.
 13. Harmathy, T. Z. (1970). Thermal properties of concrete at elevated temperatures, *Journal of Materials*, 5(1), 47-74
 14. Harmathy, T. Z. (1993). Fire safety design and concrete.
 15. Hsu, J. H., Lin, C. S., & Huang, C. B. (2006). Modeling the effective elastic modulus of RC beams exposed to fire. *Journal of Marine Science and Technology*, 14(2), 102-108
 16. ISO 834. (1999). Fire resistance tests - elements of building construction. International Organization for Standardization
 17. Jau, W. C., & Huang, K. L. (2008). A study of reinforced concrete corner columns after fire. *Cement and Concrete Composites*, 30(7), 622-638.
 18. Kang, J., Yoon, H., Kim, W., Kodur, V., Shin, Y., & Kim, H. (2016). Effect of wall thickness on thermal behaviors of RC walls under fire conditions. *International Journal*
-

of Concrete Structures and Materials, 10(3), 19-31

19. Kang, J.Y., Kim, H.S., Shin, Y.S. (2014) Analytical Studies on Temperature Distributions of One Side Heated Load Bearing RC Walls, Proceeding of International Conference of Asian Concrete Federation.
20. Kang, J.Y., Yoon, H.A., Kim, W.S., Kodur, W., Shin, Y.S., Kim, H.S. (2016) Effect of Wall Thickness on Thermal Behaviors of RC Walls Under Fire Conditions, International Journal of Concrete Structures and Materials, 10(3), S19-S31.
21. Kim, K. Y., Yun, T. S., and Park, K. P. (2013). Evaluation of pore structures and cracking in cement paste exposed to elevated temperatures by X-ray computed tomography. Cement and Concrete Research, 50, 34-40.
22. Kodur, V. K. R., & Sultan, M. A. (2003). Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete. Journal of materials in civil engineering, 15(2), 101-107.
23. Kodur, V.K.R., Phan, L. (2007) Critical Factors Governing The Fire Performance of High Strength Concrete Systems, Fire Safety Journal, 42, 482-488.
24. Lamont, S., Usmani, A. S., & Drysdale, D. D. (2001). Heat transfer analysis of the composite slab in the Cardington frame fire tests. Fire Safety Journal, 36(8), 815-839.
25. Lee, Y.K., Min, H.W., Kang, J.Y., Kim, H.S., Shin, Y.S. (2015) Deformation Characteristics of Fire Damaged and Rehabilitated Normal Strength Concrete Beams, International Scholarly and Scientific Research & Innovation, (7).
26. Ngo, T., Fragomeni, S., Mendis, P., Ta, B. (2013) Testing of Normal- and High-Strength Concrete Walls Subjected to Both Standard and Hydrocarbon Fire, ACI Structural Journal, 110(3), 503-510.
27. Rashid, M.A., & Mansur, M. A. (2005). Reinforced high-strength concrete beams in flexure. Structural Journal, 102(3), 462-471
28. Ryu, E., Shin, Y., and Kim, H. (2018). Effect of loading and beam sizes on the structural behaviors of reinforced concrete beams under and after fire. International Journal of Concrete Structures and Materials. (in press)
29. Ryu, E.M., An, A.Y., Kang, J.Y., Shin, Y.S., Kim, H.S. (2015) Investigation of Rehabilitation Effects on Fire Damaged High Strength Concrete Beams, International Scholarly and Scientific Research & Innovation, 9(7).
30. Shin, Y. S., Park, J. E., Mun, J. Y., & Kim, H. S. (2011). Experimental Studies on the Effect of Various Design Parameters on Thermal Behaviors of High Strength Concrete Columns under High Temperatures. Journal of the Korea Concrete Institute, 23(3), 377-384.
31. Short, N. R., Purkiss, J. A., and Guise, S. E. (2001). Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis. Construction and building materials, 15(1), 9-15.
32. T. J. Sullivan¹, G. M. Calvi, and M. J. N. Priestley (2004). Initial Stiffness versus Secant Stiffness in Displacement Based Design. 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2888
33. Toumi, B., & Resheidat, M. (2010). Influence of high temperatures on surface cracking of concrete studied by image scanning technique. Jordan Journal of Civil Engineering, 4(2), 155-163.
34. Wu, B., Xiong, W., & Wen, B. (2014). Thermal fields of cracked concrete members in
35. Xu, Y., Wong, Y. L., Poon, C. S., and Anson, M. (2003). Influence of PFA on cracking of concrete and cement paste after exposure to high temperatures. Cement and Concrete Research, 33(12), 2009-2016.
36. 김현정, 최은규, 신영수(2008) 화재피해를 입은 고강도 RC 기둥의 P-M 상관곡선에 관한 연구, 한국콘크리트

학회봄학술대회논문집,20(1),257-260.

37. 김희선,박지은,문지영,신영수,권영진(2010)철근비와콘크리트강도에따른고강도콘크리트기둥의열적거동과약,한국콘크리트학회가을학술대회논문집,22(2),257-258.
 38. 문지영,박민혜,김희선,신영수(2010)화해를입은고강도콘크리트기둥의구조거동과약,대한건축학회학술발표대회논문집,31(1),41-42.
 39. 박현준,권영웅(1999)콘크리트의피복두께와내화성,콘크리트학회지,11(4),25-31.
 40. 신미경,김희선,신영수(2003)고온하에서의일반강도및고강도콘크리트보의구조거동,한국구조물진단학회가을학술발표대회논문집,157-160.
 41. 안주희,신영수,이차돈,홍성걸(2003)화재피해를입은일반강도RC보의보수성능,한국콘크리트학회봄학술대회논문집,15(1),1013-1016.
 42. 여인환(2013)화재피해를입은철근콘크리트기둥의잔존강도추정및내화성능요인분석,한국방재학회논문집,13(6),83-89.
 43. 이소진,신영수,이차돈,홍성걸(2002)화재피해를입은일반강도철근콘크리트휨부재의구조거동,한국콘크리트학회가을학술대회논문집,14(2),307-312.
 44. 이승환(2003)화해를입은실물크기일반강도철근콘크리트기둥의구조거동,중앙대학교박사학위 청구논문
 45. 이차돈,김현(2011)고온에노출된철근콘크리트내력벽축변위모델,대한건축학회논문집구조계,27(11),3-10.
-

9. 뒷면지

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.

210mm×297mm[백상지(80g/㎡) 또는 중질지(80g/㎡)]