16CTAP-C1
14626-01

3D 프린팅 기술로 축조된 콘크리트 구조물 접합면 파괴에너지 평가 및 일체성 50% 개선을 위한 브릿징 (Bridging) 재료의 활용방안 연구

최 종 보 고 서

2018

국토교통과학기술진흥원

국 토 교 통 부

국토교통기술촉진연구사업 R&D Report

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )

국토교통기술촉진연구사업 제2차연도 최종보고서

R&D /
16CTAP-C114626-01

3D 프린팅기술로 축조된 콘크리트 구조물 접합면 파괴에너지 평가 및 일체성 50% 개선을 위한 브릿징 (Bridging) 재료의 활용방안 연구 최종보고서

2018. 07. 20.

주관연구기관 / 한국해양대학교산학협력단

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'3D 프린팅기술로 축조된 콘크리트구조물 접합면 파괴에너지 평가 및 일체성 50% 개선을 위한 브릿징(Bridging) 재료의 활용방안 연구'(연구개발 기간 : 2016. 06. 01 ~ 2018. 05. 31) 과제의 최종보고서 7부를 제출합니다.

2018. 07. 20.

주관연구기관명 : 한국해양대학교 산학협력단 (대표자) 경 갑 수 (인)

주관연구기관책임자: 이재하

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>16CTAP-C114626-01</td><td>해당 단계
연구 기간</td><td>2016.06.24.~2018.06.23</td><td>단계구분</td><td>(1단계) /
(1단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">창의도전 연구분야</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">창조형모험</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">3D 프린팅기술로 축조된 콘크리트구조물 접합면 파괴에너지 평가 및 일체성 50% 개선을 위한 브릿징(Bridging) 재료의 활용방안 연구</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">이재하</td><td>해당단계
참여
연구원 수</td><td>총: 12 명
내부: 12 명
외부: 명</td><td>해당단계
연구개발비</td><td>정부:100,000천원
기업: 천원
정부 외: 천원
계:100,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여
연구원 수</td><td>총: 12 명
내부: 12 명
외부: 명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부:100,000천원
기업: 천원
정부 외: 천원
계:100,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속 부서명</td><td colspan="3">한국해양대학교 산학합력단</td><td colspan="2">참여기업명</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명:</td><td colspan="2">연구책임자:</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약
• 본 연구에서는 초결 이전 생성되는 콘크리트 접합면의 성능평가를 위하여 저속 CMOD 실험을 수행하여 파괴에너지의 변화를 평가
• 접합면의 물성치 개선을 위한 브릿징 재료의 효과를 검토
• 레이어 적층소요시간이 증가함에 따라 파괴에너지의 감소를 실험으로 확인
• 50% 일체성 개선을 위한 브릿징 재료는 골재와 강섬유를 적용하였을 경우 도달 할 수 있음
• MCFT 이론을 바탕으로 전단성능 예측모델을 개발하고 해석을 수행하여 3D 프린팅 기술에 의한 적층시간이 증가함에 따라 콘크리트 보의 전단강도 감소를 확인
• 보의 경간 대 깊이 비(a/d)와 초결시간에 대한 적층 소요시간 비율에 따른 전단 감소 계수를 제안
• 3D 프린팅을 이용한 콘크리트 구조물 축조시 구조물의 크기에 따른 노즐의 최소 속도를 제안</td><td colspan="2">보고서 면수 58</td></tr>
</table>

〈 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	○ 3D 프린팅 콘크리트 레이어 접합면 재료물성치 평가(CMOD기반 초저속 제어시험 장비구축) ○ 3D 프린팅 콘크리트 접합면 강성저감 확인 및 브릿징(Bridging) 재료를 활용한 파괴에너지 개선방법 제안 ○ 일체성 개선을 위한 콘크리트용 3D 프린팅 시공 최적화 모델 제시 (노출시간 등) ○ 3D 프린팅으로 생성되는 접합면의 콘크리트 파괴에너지(Fracture energy, CMOD 기반 초저속 제어) 측정시험 수행(ACI 446 기반) ○ 접합부 일체성 개선을 위한 연구 수행 (레이어 노출소요시간, 자중, 콘크리트 유동성 등에 따른 인장강도 및 파괴에너지 측정) ○ 측정된 재료적 특성(접합부 부착강도 및 파괴에너지)에 따른 3D 프린팅 콘크리트 구조물의 구조성능 평가 (전단강도 성능 감소를 실험적으로 규명 후 모델 검증) ○ 브릿징(Bridging)재료의 활용을 통한 성능개선 효과 실험적 규명 및 실험데이터 활용 ○ 적층기술 / 시공방법 최적화 및 재료성능 개선을 위한 브릿징(Bridging)재료의 효과적 활용방안 제시				
연구개발성과	○ 기존 3D 콘크리트 재료성능 50% 향상				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 본 연구를 통해 3D 프린팅 기술을 촉진시킴으로써 건설산업의 구조적 문제(인적재해, 비효율성)에 대한 긍정적 영향 기대(막대한 관리감독 비용 최소화 및 산업재해 저감 효과 달성) ○ 세계적으로 경쟁이 치열해 지고 있는 3D 프린팅 기술 분야의 연구개발 성과로서 타 분야(기계공학)와의 융합연구 협력 촉진, 기술력 향상과 확산 및 타국과의 경쟁력 확보 기대				
핵심어 (5개 이내)	3D 프린트	콘크리트	파괴에너지	브릿징 재료	접합면

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	○ Evaluation of material properties of layered concrete built by 3D printing technology (CMOD-control test set up) ○ Evaluation of structural degradation of layered concrete built by 3D printing technology ○ Optimization of building methodology for Improvement of structural integrity of layered concrete built by 3D printing technology ○ Evaluation of fracture energy of layered concrete built by 3D printing technology based on ACI 446 test method. ○ Study on improvement of structural integrity of layered concrete built by 3D printing technology (Measuring fracture energy and tensile properties under several parameters such as exposure time, self-weight) ○ Evaluation of structural capacities of layered concrete built by 3D printing technology under several different conditions. (ex. performing tests for checking degradation of shear capacity and model verification) ○ Evaluation of effect of using bridging materials for improving structural capacities of layered concrete built by 3D printing technology ○ Propose effective practical uses of bridging materials for optimization of array of layers and stacking order for layered concrete built by 3D printing technology,
Results	○ 50% improvements on structural capacities and material stiffness respectively
Expected Contribution	○ Lead revolutionary changes in construction industry ○ Joint research with other industrial areas and industry-academic cooperation, improvement of technology and raise competitiveness to other developed countries

Keywords	3D print	Concrete	Fracture Energy	Bridging Material	Contact Surface

〈 CONTENTS 〉

Chapter 1 Overview of Research ·····9
1. Objective ·····9
2. Research Significance ·····10
3. Research Methodology ·····11
가. Evaluation of Material Properties of Layers Formed by 3D Printing Concrete Structure ·····12
나. Structural Evaluation of Layers Formed by 3D Printing Concrete Structure ·····12
다. A Proposal of Method for 3D Printing Technology ·····13
Chapter 2 Status of Technology Development in Domestic and Foreign ·····14
1. Status of Technology Development in Domestic ·····14
2. Status of Technology Development in Foreign ·····14
3. Competence of Technology Development ·····14
Chapter 3 Contents and Results of Research ·····16
1. Plan of Experiment for Fracture Energy of Layers Formed by 3D Printing Concrete Structure ·····16
가. Specimen and Boundary Conditions ·····16
나. Set-up for Fracture Energy Test ·····17
다. Plan of Experiment Depending on Dead Load and Elapsed Time ·····17
라. Application of Bridging Materials ·····20
2. Results of Experiments ·····20
가. Results of Split Tensile Test (ASTM C496) ·····20
나. Results of Fracture Energy Depending on Dead Load ·····22
다. Results of Fracture Energy Depending with Bridgin Materials ·····27
3. Evaluation of Shear Strength for 3D Printing Concrete Structure ·····29
가. Development of Numerical Model ·····29
나. Verification of Numerical Model ·····32
다. Results of Numerical Model ·····35
4. A Proposal of Method for 3D Printing Concrete Structure ·····37
가. A Proposal of Fracture Energy and Shear Strength Reduction Factor for RC Beam with Layers ·····37
나. A Proposal of Nozzle Velocity for 3D Printing Concrete Structure ·····39
5. Conclusions ·····39
가. Evaluation of Material Properties of Layers Formed by 3D Printing ·····39
나. Structural Evaluation of 3D Printing Concrete Structures ·····40
다. A Proposal of Method for 3D Printing Concrete Structure ·····41
Chapter 4 Achievement of Objectives and Contribution on Related Field ·····42

1. Achievement of Objectives ····42
가. Performance Checklist ····42
나. Quantitative research Achievement ····43
2. contribution of Research ····44
Chapter 5 Utilization Plan on Research Results ····45
Chapter 6 Science and Technology Information Gathered in Foreign During The Research ····46
1. Calculation of Fracture Energy ····46
Chapter 7 Security Level of Research Achievement ····49
Chapter 8 Research Facilities and Equipment Registered in national science and technology information system ····50
Chapter 9 Performance Results of Safety Action ····51
1. Safety Management Policy ····51
2. Additional Performance ····52
Chapter 10 Representative Research Performance ····54
Chapter 11 Other Conditions ····55
Chapter 12 Reference ····57

〈 목 차 〉

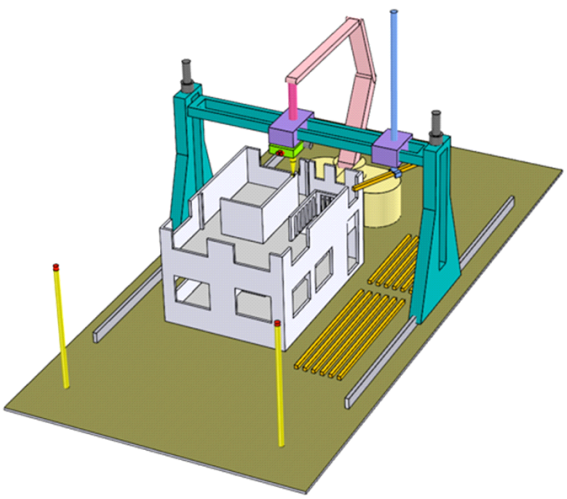
제1장 연구개발과제의 개요 ····· 9
1. 연구개발 목적 ····· 9
2. 연구개발의 필요성 ····· 10
3. 연구개발 범위 ····· 11
가. 레이어 접합면 재료물성치 평가 ····· 12
나. 3D 프린팅 구조물 구조성능 평가 ····· 12
다. 3D 프린팅 적층 기술 및 시공방법 제안 ····· 13
제2장 국내외 기술 개발 현황 ····· 14
1. 국내 현황 ····· 14
2. 국외 현황 ····· 14
3. 기술개발 성숙도 ····· 14
제3장 연구 수행 내용 및 성과 ····· 16
1. 3D 프린팅 축조 구조물 접합면 파괴에너지 평가 실험 계획 ····· 16
가. 파괴에너지 측정 시험체 형상 및 실험 조건 ····· 16
나. 파괴에너지 측정을 위한 실험계획 및 장비 ····· 17
다. 상재하중 및 적층시간 변수에 따른 실험계획 및 장비 ····· 17
라. 브릿징(Bridging)재료의 적용 ····· 20
2. 3D 프린팅 축조 구조물 접합면 구조성능평가 실험 결과 ····· 20
가. 쪼갬인장시험 결과 (ASTM C496) ····· 20
나. 상재하중 적용에 따른 파괴에너지 측정 실험 결과 ····· 22
다. 브릿징 재료를 적용한 파괴에너지 측정 실험 결과 ····· 27
3. 3D 프린팅 축조구조물 전단강도 저감 예측 및 분석 ····· 29
가. 전단강도 예측모델 개발 ····· 29
나. 전단강도 예측모델 검증 ····· 32
다. 전단강도 저감 해석결과 및 분석 ····· 35
4. 3D 프린팅 콘크리트 구조물의 구조성능 개선을 위한 제안사항 ····· 37
가. 접합면을 갖는 콘크리트와 RC 보에 대한 파괴에너지 예측식 및 전단 감소 계수의 제안 ····· 37
나. 3D 프린팅 콘크리트 구조물 노즐 속도 제안 ····· 39
5. 결론 ····· 39
가. 3D 프린트로 축조된 레이어 접합면 재료물성치 평가 결론 ····· 39
나. 3D 프린트로 축조된 구조물 구조성능 평가 결론 ····· 40
다. 3D 프린트 적층 기술 및 시공방법 제안 ····· 41
제4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 42
1. 목표 달성도 ····· 42
가. 성과점검기준표 ····· 42
나. 정량적 연구성과 목표 및 달성도 ····· 43
2. 관련 분야 기여도 ····· 44
제5장 연구개발성과의 활용 계획 ····· 45

제6장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 46
1. 파괴에너지 측정 ····· 46
제7장 연구개발성과의 보안등급 ····· 49
제8장 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 50
제9장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 51
1. 기술적 위험 요소 분석, 안전 관리 대책 ····· 51
2. 추가 이행 ····· 52
제10장 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 54
제11장 기타 사항 ····· 55
제12장 참고 문헌 ····· 57

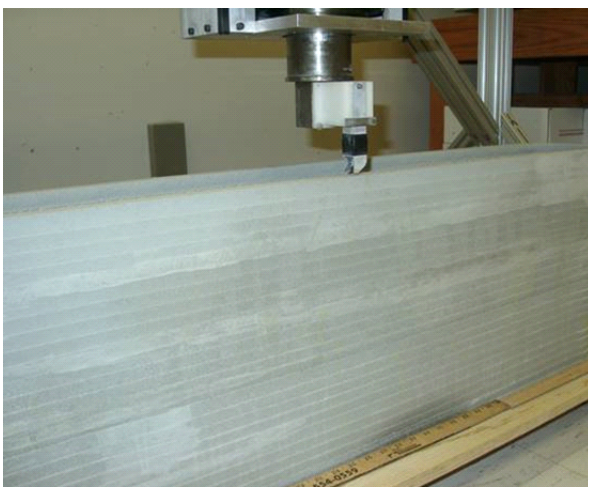
제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 최근 3D (three dimensional) 프린팅 기술이 전세계적으로 주목받으면서 공학 부문에서도 많이 응용되고 있다. 3D 프린팅은 3차원 입체 형상을 생산하는 방식으로서 절삭가공과는 다른 적층가공 방법이며 폴리머, 금속, 종이, 식재료 등의 순으로 그 활용범위가 넓어지고 있는 추세이다.
- 특히 건설분야에서는 3D 프린팅 기술을 이용하여 축조된 구조물이 늘어나고 있다(Fig. 1-1). 건설산업에서는 타 산업에 비해 규모가 크며, 공장에서 생성되는 구조물 요소의 비율이 매우 낮은 점(자동화가 아닌 다양한 부품 및 자재의 조합의 형태), 건설을 위한 자동화 장비를 들이는 데 필요한 막대한 자금이 요구되는 점 등으로 인하여 3D 프린팅 기술의 적용이 용이하지 않은 면이 있다. 반면, 현재의 건설 시공 방식의 낮은 노동 효율성 및 높은 사고율(인명피해 등), 건설현장을 관리 및 감독하기 위한 많은 노동력 등의 단점을 3D 프린팅 기술로써 적절히 해소가 가능한 것으로 기대되고 있다(Khoshnevis, 2004).
- 또한 3D 프린팅 기술로써 기존 건설 방식과 비교했을 때 CO2 및 건설 폐기물의 양을 각각 75% 및 86% 가량을 줄일 수 있다는 연구도 있다(Rahimi et al, 2009). 그러나 콘크리트 재료를 사용한 3D 프린팅 기술은 집의 축조나 심미적 구조물의 축조 등 중소형 구조물에 적용되어져 왔기 때문에 대규모의 토목 구조물의 적용에는 더 많은 연구가 필요한 실정이다.
- 특히 3D 프린팅 콘크리트 구조물은 Fig. 1-1(b)와 같이 적층면에서 발생하는 이질접합면에 의해 강성이 저감될 것으로 판단됨에 따라 3D 프린팅 콘크리트 레이어 접합면 재료물성치에 대한 평가가 필요하며, 구조성능을 향상시킬 수 있는 브릿징 재료를 활용한 파괴에너지 개선방법 또한 필요하다. 그리고 최종적으로 이러한 결과들을 고려하여 3D 프린팅 콘크리트 구조물의 접합면 일체성 개선을 위한 시공 최적화 모델이 필요하다.



(a) 3D 프린팅 공법을 이용한 구조물 시공(예)



(b) 적층에 의한 레이어 접합면 생성

Fig. 1-1 3D 프린팅 기술을 활용한 콘크리트 구조물

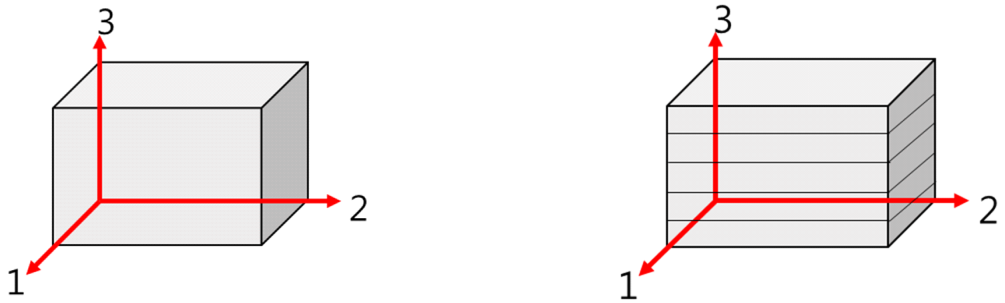
2. 연구개발의 필요성

- 콘크리트 구조물을 축조하기 위한 3D 프린팅 기술은 노즐에서 뿜어져 나오는 레이어를 차례로 쌓아올리는 형태로 적용이 된다. Kwon (2002)의 연구에서 각 층을 쌓아올리는 방식으로서의 3D 프린팅 기술에 대한 자세한 정보를 찾을 수 있으며, 현재 이 방법을 사용했던 많은 구조물들이 존재한다.
- 예를 들어, Fig. 1-2(b)와 같이 자전거 전용 3D 프린팅 교량이 아인트호벤 기술 대학과 BAM 회사에 의하여 네덜란드에 건설되어 공용 중에 있다. 그 외 아랍에미리트(UAE)의 두바이에 위치한 사무소와 필리핀의 루이스 그랜드 호텔과 같은 건축물도 3D 프린팅 기술을 이용하여 콘크리트를 적층하는 방식이 적용된 건축물들이다.
- 이러한 3D 프린트 기술을 활용한 콘크리트 구조물은 노즐을 통해 적합한 형태로 분사되는 적층식이며 하부 레이어와 상부 레이어 간의 적층시 발생하는 외부 노출시간에 따라 상부와 하부 레이어 간의 이질접합부가 생성된다. 따라서 기본적으로 3D 프린팅 기술로 축조된 콘크리트 구조물은 Fig. 1-3과 같이 보통 균질로 가정하는 일반적인 콘크리트 구조물과는 달리 이질접합부에 의해 다양한 접합면이 평행하게 되어 있는 직교 이방성(Orthotropic)의 구조물로 분류될 수 있다. 이러한 접합면의 재료물성치는 일반 콘크리트에 비하여 저감된 재료물성치를 나타낼 것으로 예상되며 이에 따른 구조성능도 다를 것이라 예상된다.
- 3D 프린팅 콘크리트 레어어의 접합부 재료물성치는 전술한 바와 같이 기존 레이어 내부 콘크리트의 물성치와 차이가 있을 것으로 예상된다. 건설구조물의 건전성은 구조물의 강도와 더불어 내구성을 만족시킬 때 얻어지는데 콘크리트 구조물의 내구성은 결국 균열여부에 달려 있다. 이러한 균열의 진전은 콘크리트의 파괴에너지와도 밀접한 관련이 있으며 인장강도와도 관련이 된다.
- 따라서 본 연구에서는 Fig. 1-4와 같이 ACI 446에서 제시하고 있는 초저속 CMOD Control Closed loop 실험(약 1개 시편 파괴에너지 시험에 약 3시간 소요)을 통해 적층식 콘크리트 구조물의 인장강도와 내부 파괴에너지(G_F 및 G_f)의 변화를 평가하였다.



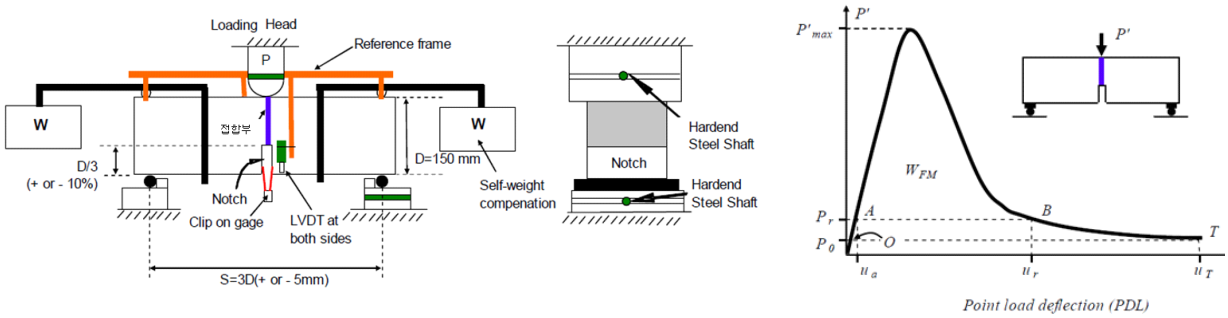
(a) Rudenko (2014) (b) Salet, TUK/e (2017)

Fig. 1-2. 3D 프린팅 콘크리트 구조물 시공사례



(a) 균질 구조물 (b) 직교이방성 구조물

Fig. 1-3 균질 구조물과 이방성 구조물



(a) Test setup (b) load-displacement graph



(c) Test setup (d) Test setup

Fig. 1-4 ACI 446 파괴에너지 측정을 위한 실험셋업

3. 연구개발 범위

가. 레이어 접합면 재료물성치 평가

- 선행연구 사례조사 : 관련 선행연구 (3D 프린팅 하우스, 파괴에너지 측정법 등)
- 선행연구 사례조사를 통한 주요변수 선정 : 강도, 슬럼프, 자중, 타설시간
- 인장강도, 파괴에너지 실험 수행: 인장강도 측정(ASTM C496), 파괴에너지 측정 (ACI 446)
- 실험결과 분석: ACI bilinear softening curve(미국콘크리트학회 이중선형곡선 해석(G_F, G_f) 및 실험결과 분석), ACI 446, Elices et al. (1992), Bazant, Z. P. and Planas, J. (1997), RILEM (1990) 및 Lee and Lopez (2014)에서 제시된 데이터 분석방법을 통하여 최종적인 응력-균열폭 관계(Stress-crack opening curves)를 결정, 하중-CMOD 그래프(A)를 이용하여 지수함수 형태의 응력-균열폭 관계(B)를 나타낼 수 있으며 최종적으로 Fig. 1-5와 같은 이중선형(Bilinear)의 형태로 단순화 하여 표현하였다.
- 접합면 형성을 위해 Fig. 1-6에 나타난 바와 같이 몰드 중심에 강판(steel plate)를 삽입하

여 접합면을 형성하고 상부에 사하중을 재하 하여 시편을 양생한다.

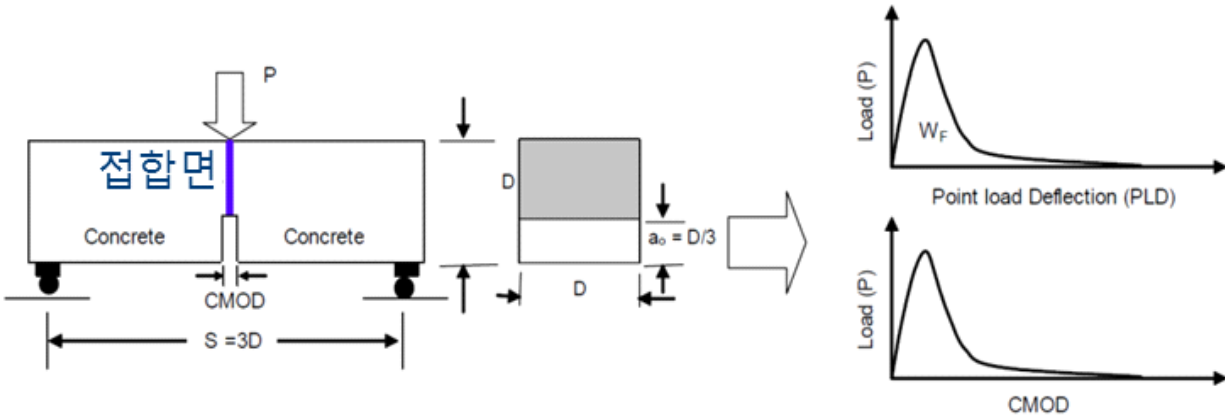


Fig. 1-5 파괴에너지 측정법 개념도

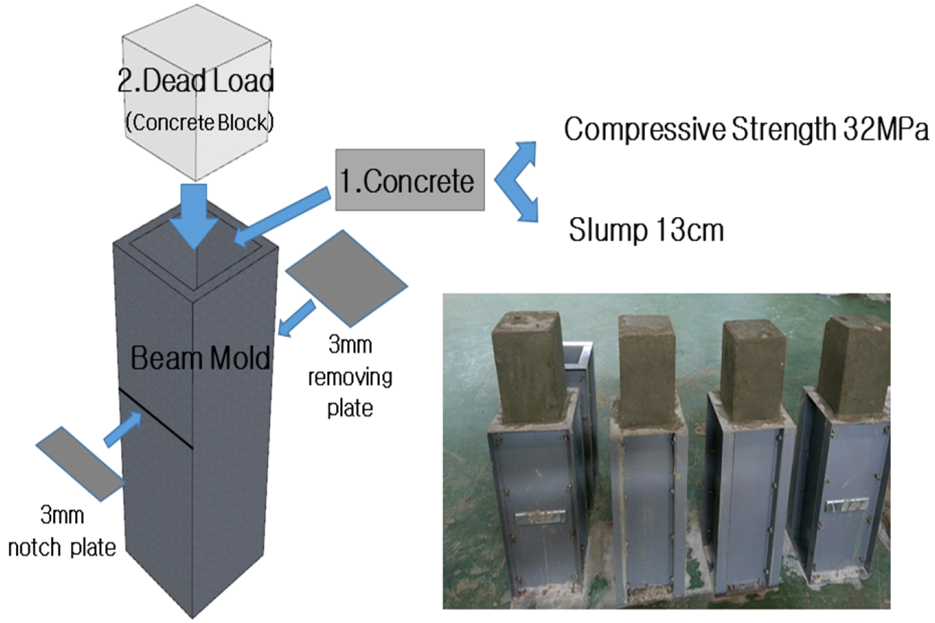


Fig. 1-6 파괴에너지 측정 시험체 양생

나. 3D 프린팅 구조물 구조성능 평가

- 선행연구 사례조사 : 콘크리트 내 균열 발생 시 전단강성 감소와 관련된 선행연구 조사, 접합면과 구조물 구조성능과 관련된 선행연구 결과를 취합하고 이를 중점적으로 분석하였다.
- 구조성능 평가 모델 개발 및 검증: 관련 선행 실험결과를 취합하여 개발된 구조성능평가용 모델 검증을 수행 하였다.
- 3D 프린트로 축조된 구조요소의 성능감소 평가: 전단벽, 보, 기둥 요소의 성능감소 영향을 해석적(Vector2 활용)으로 평가 하였다(Fig. 1-7).

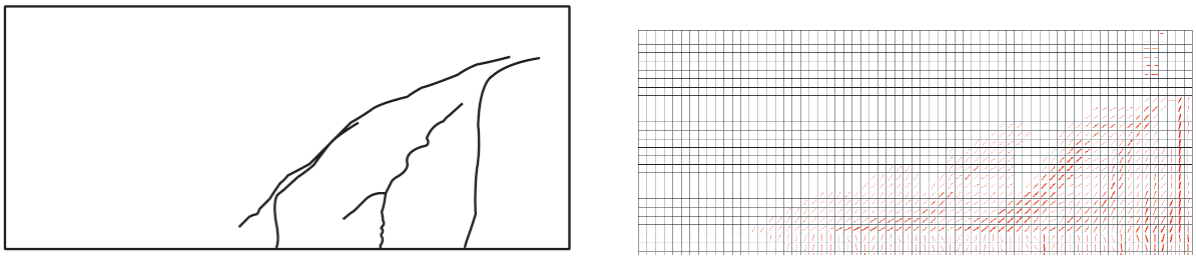


Fig. 1-7 전단파괴 실험 및 해석모델 (Vector2)

다. 3D프린팅 적층 기술 및 시공방법 제안

- 선행연구 사례조사 : 3D 프린팅 하우스, 기계 및 폴리머 분야 3D 프린팅 적층기술 취합 및 건설분야 적용기술 선별하였다.
- 3D프린팅 개선기술 개발(골재, 강섬유, 화학혼화재 등): 레이어 사이 골재(강섬유, 화학혼화재 등)가 포함된 구조물의 성능 평가, 전단강도의 증가를 실험적, 해석적으로 평가 및 규명하였다.
- 3D프린팅 개선기술 개발(화학 혼화재): 레이어 사이 접합면 부착강도 및 파괴에너지 향상을 위한 혼화재, 강섬유 등을 검토 하였다.
- 3D프린팅 적층 및 배열방법 제시: 노출시간에 따른 접합면 강성저하를 물리적으로 확인하여 3D 프린팅 적층방법을 제시하여 일체형 콘크리트 적층기술을 실현하기 위하여 배열방법, 허용노출시간 등을 고려한 시공 프로세스 설계방법을 제시하였다(Fig. 1-8).

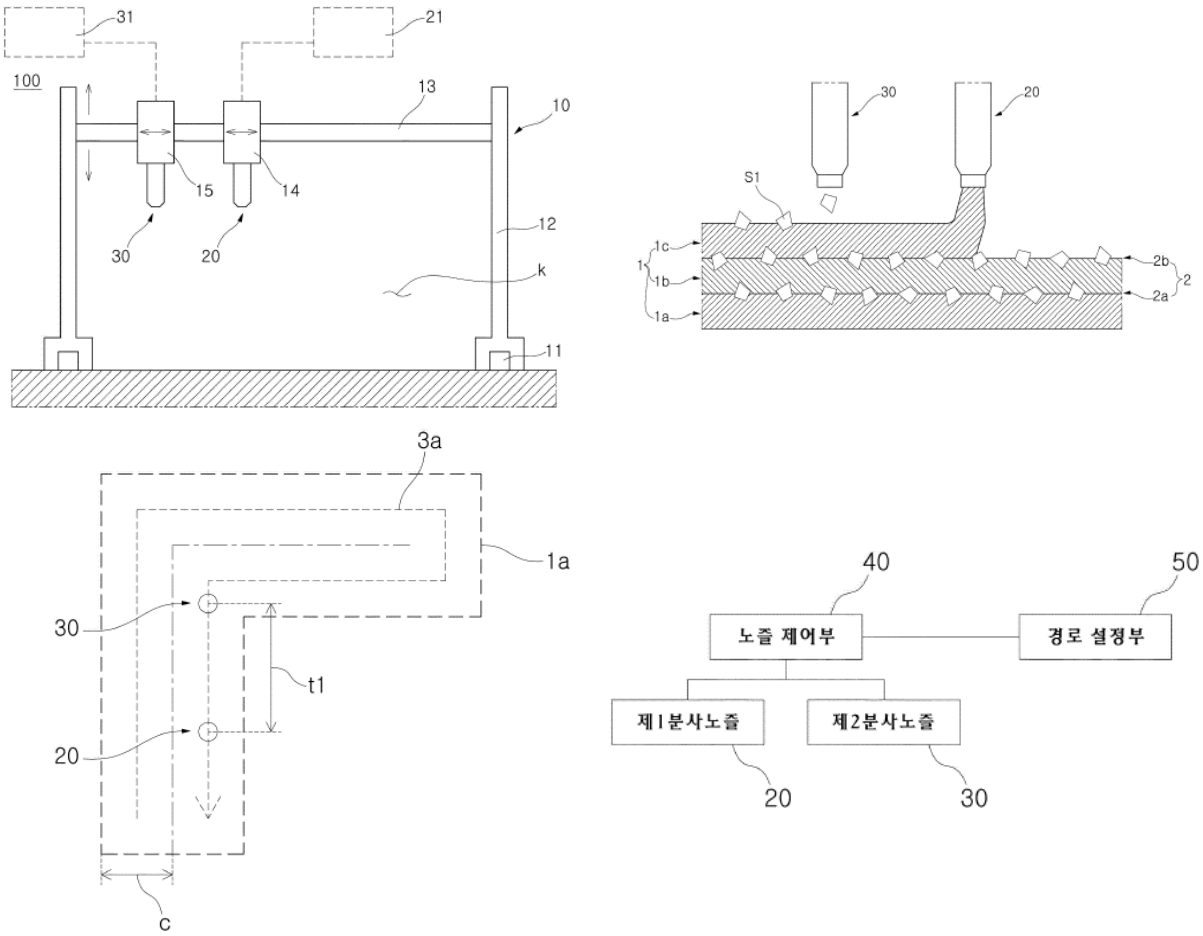


Fig. 1-8 배열방법, 허용노출시간을 제어하는 노즐 개념도

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 현황

- 국내는 기계공학, 의학, 통신분야 등에서 이미 3D 프린팅 기술을 접목한 연구가 진행되어 왔다.(www.ntis.go.kr 참조) 그러나 건설 분야 콘크리트 적층기술과 관련된 3D프린팅 기술은 아직 시작단계로서 연구가 미미한 것으로 파악된다.
- 최근 3D 프린트를 이용하여 고도의 정밀도를 요구하는 항공기 부품등의 개발을 위한 연구를 진행(Kim et al. 2017)하는 등 기계 재료 분야에서는 많은 연구가 진행 중에 있다.
- 3D 프린트 노즐의 속도 제어가 가능한 정량압출장치를 구현하고 가속과 감속에 따른 압출량의 변화를 연구하는 등(Kim et al. 2017) 3D 프린트 장비에 대한 연구가 대다수이며 이를 이용한 구조물의 구조성능을 평가하는 연구는 미미하다.
- 3D 프린트 적층가공 산업은 세계적으로 기계공학을 중심으로 매우 빠르게 발전하고 있으나 우리나라에서는 아직 기술개발 빛 정책수립 초기단계이며 건설분야는 초보적인 수준이다. (한국기계연구원 2013)

2. 국외 현황

- 3D 프린트 적층가공 산업은 폴리머, 금속, 종이, 식재료 등의 순으로 그 활용범위가 매우 넓어지고 있으며 경영 컨설팅 업체 맥킨지는 2013년 혁신을 유발할 것으로 예상되는 12개 기술 중 하나로 3D 프린팅 기술을 선정하였다.
- 수치해석에 사용가능한 3D 프린트로 적층된 콘크리트의 특성을 포함하는 재료모델을 개발하였다(Wolfs et al. 2018). 이처럼 해외에서는 다양한 실험 결과 등을 활용하여 심층적인 연구가 진행중에 있으나 국내는 기본 기본적인 연구만 진행되고 있다.
- 3D 프린팅 기술을 건설분야에 접목시키고자 선진국에서 진행되어온 연구와 비교할 때에 향후 국가 경쟁력에 영향을 줄 수 있는 3D 프린팅 기술의 선점이 매우 중요한 시점이다.

3. 기술개발 성숙도

- 3D 프린트로 축조된 레이어 접합면 재료물성치 평가 : 3D프린트의 적층방법으로 인하여 발생하게 되는 레이어간 접합면의 재료적 성능감소가 발생한다는 아이디어를 물리적 관찰을 통해 확인하고 이를 해결하기 위한 브릿징(Bridging 재료)재료의 개선효과를 실험을 통해 확인하는 연구에 해당되므로 본 연구는 실험적 증명단계인 TRL 3에 해당된다.
- 3D 프린트로 축조된 구조물 구조성능 평가 : 첫 번째 최종 성과물(레이어 접합면 재료물성치 평가)은 TRL 3단계이며 3단계에서 확인한 순수 아이디어를 구조물에 적용하여 응용하는 연구의 단계이므로 재료·자재 유형의 TRL 3에 해당된다.
- 3D 프린트 적층기술 및 시공방법 제안 : 첫 번째와 두 번째 성과물(실험을 통한 재료물성치 평가, 구조성능 평가)을 기초로 하여 최종 시공방법(3D 프린팅의 축조방법)을 제안하게 되므로 공법기법유형에 해당된다. 3D프린트의 적층방법으로 인하여 발생하게 되는 레이어 접합면 성능감소 아이디어에서 가능성이 확인되지 않은 브릿징 재료를 활용한 새로운 3D 프린트 적층기술을 제안하기 위한 연구이므로 TRL 2에 해당된다.

Table 2-1. 연구단계

구 분		연구 착수	연구 종료	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	☑	☐	TRL 1 이론적 연구단계
	TRL 2	☐	☑	TRL 2 기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	☑	TRL 3 실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☐	TRL 4 실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☐	TRL 5 유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	TRL 6 유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7 실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9 현장적용/사업화 단계

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 3D 프린팅 축조 구조물 접합면 파괴에너지 평가 실험 계획

가. 파괴에너지 측정 시험체 형상 및 실험 조건

- 사용된 콘크리트는 기본적으로 3D 프린트 시공에 사용가능한 배합연구를 수행하였던 Zeina et al. (2015) 에서 제시한 배합설계를 따랐으며 본 연구에 활용된 콘크리트(1종 포틀랜드 시멘트)는 슬럼프는 130 mm로 측정(목표: 100 mm)되었으며 28일 평균압축강도 31.85 MPa, 공기량 4 %, 최대골재치수는 25 mm이다. 동일한 배치의 콘크리트를 사용하여 총 8종류의 환경조건에 의한 실험을 수행하고 환경조건에 따른 파괴에너지의 변화를 관찰하였다. 파괴에너지의 최종 형태인 이중선형 연화곡선(응력-균열 폭)의 최대부착응력을 추정하기 위해서는 콘크리트의 쪼갬인장강도도 필요하다. 환경조건은 자중의 영향과 적층에 소요된 시간으로 분류하였으며 기타 조건은 모두 동일하다.
- 파괴에너지를 추정하기 위한 3점 휨 시험 그리고 인장강도를 추정하기 위한 쪼갬인장시험과 압축강도 시험을 수행하였다. 쪼갬인장시험과 압축강도시험은 모두 10cm 지름의 일반적인 공시체를 활용하였으며 3점 휨 시험은 150mm의 정사각형 단면에 450mm의 지간을 가지는 시험체를 활용하였다. 균열이 중앙에 발생하도록 유도하기 위하여 보 높이의 1/3에 해당되는 notch를 Fig. 3-1과 같이 고려하여 실험을 수행하였다.
- 이러한 3점 휨 시험은 콘크리트 파괴에너지를 측정하기 위한 실험방법(RILEM, ACI, ASTM)이다. 일반적으로 재료의 인장 특성을 확인하기 위해서는 직접인장실험을 수행하여야 하나 콘크리트의 특성상 인장시험 중 의도치 않은 휨인장이 발생할 염려가 있으므로 보다 안정적인 실험을 위해 3점 휨 시험을 수행하도록 하고 있다. ACI 446 위원회와 RILEM에서는 이 3점 휨 시험을 통한 콘크리트의 파괴에너지 추정 방법에 있어 많은 논의 과정을 거쳐 의견이 모아지고 있다.

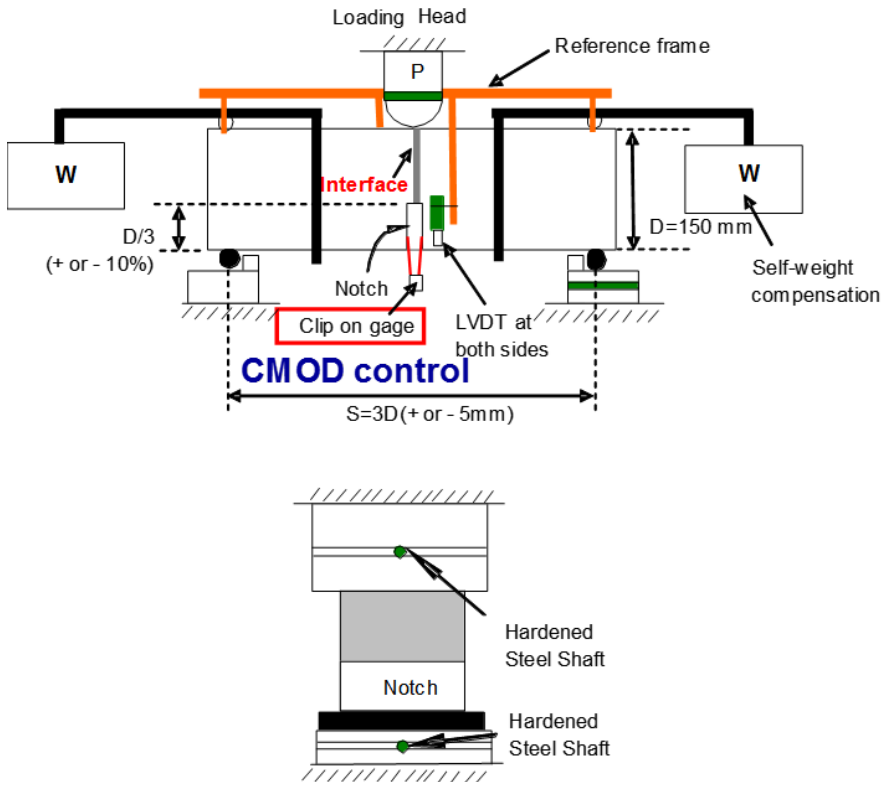


Fig. 3-1 실험 셋업

나. 파괴에너지 측정을 위한 실험계획 및 장비

- 본 연구에서는 초 저속 CMOD 제어 시험이 수행될 수 있도록 고 정밀 clip-on-gage(Epsilon 3541-005M-100M-ST)를 사용하였다. 이 측정 장치는 1.5 μm의 해상도(Resolution)와 총 10 mm 동안 최대 0.064 % 비선형성을 가지고 있는 고정밀의 측정 장치이다. 사용된 장비의 로드셀(Load cell)은 기존 1000 kN의 로드셀을 Instron에서 제작한 최대 50 kN의 소형 로드셀로 교체하여 하중이 최대하중의 20 %(5~10 kN) 범위에서 측정될 수 있도록 하여 하중 측정의 정밀성을 높였다.
- 사용된 가력장치는 JKS사의 고성능 유압장치로 본 연구를 위하여 정밀한 제어가 가능하도록 1 GPM(4 LPM)의 소형 Servo valve로 교체하였으며 CMOD의 신호를 외부 신호로 입력받아 처리하기 위하여 장비 컨트롤러에 연결할 수 있도록 추가적인 내부 알고리듬 설계를 수행하여 실험을 수행하였다.
- 이와 같이 CMOD 제어 실험은 특수한 실험 셋업의 준비 과정과 실제 실험 수행을 위한 조정과정이 길어 많은 시간과 인력이 소요되며 정밀한 실험 결과를 위해 다양한 실험을 통한 장비의 보정(Calibration) 과정이 필요하다. 한편 대부분의 유압장비에 포함(Built-in 기능)되어 있는 간단한 Stroke 제어로도 최종 파괴에너지의 측정의 신뢰성이 있다는 연구결과(Lee and Lopez 2014)도 있으므로 장비에 기본적으로 내장되어 있는 Stroke 제어로 실험을 수행할 경우 이러한 장비 구축 및 실험을 효율적으로 수행할 수 있다고 판단된다. 다만 본 연구에서는 효율성 보다는 보다 신뢰성 있는 실험결과를 위해 모든 실험을 stroke 제어가 아닌 ACI 446 위원회에서 제시하는 저속 CMOD제어를 통해 수행하였다.

다. 상재하중 및 적층시간 변수에 따른 실험계획 및 장비

- 기존 레이어 상부에 콘크리트를 적층할 경우 하부 레이어가 상부 레이어에 자중에 의한 영향을 받을 것이다. 따라서 파괴면을 중앙으로 설정하고 굳은 콘크리트를 자중의 역할을 하도록 굳기 전 콘크리트 폼에 적층하여 양생 중 자중이 가해지도록 하였다.
- 자중이 가해진 시편은 상부 콘크리트가 적층되어진 경우이며 자중이 없는 시편은 상부 굳은 콘크리트가 적층되지 않은 경우이다. 따라서 자중 시편은 자중이 가해지지 않은 시편의 2배의 자중이 가해진 경우를 나타낸다. 시편에 가해진 자중의 무게는 시편 무게의 1/2인 약 11.1 kg로 전달되는 응력은 0.014 MPa이다.
- 적층 소요시간의 영향을 확인하기 위하여 Fig. 3-2에서와 같이 내부에 박판(notch plate, removing plate)을 먼저 두어 인위적으로 콘크리트 타설시 두 면이 접하지 않도록 하였으며 0분, 15분, 30분, 60분 시간경과에 따라 박판(removing plate)을 제거하여 적층된 콘크리트 구조물 면에 형성되는 접합면을모사하였다. 이처럼 박판을 제거하면서 형성되는 골재의 간섭이 없는 평평한 면은 3D 프린팅 노즐을 통과하여 압출 형성되는 콘크리트의 레이어와 유사할 것으로 사료된다. 그러나 notch 플레이트(notch plate)는 콘크리트가 충분히 굳을 때까지 유지시킨 이후(48시간) 제거하였다.

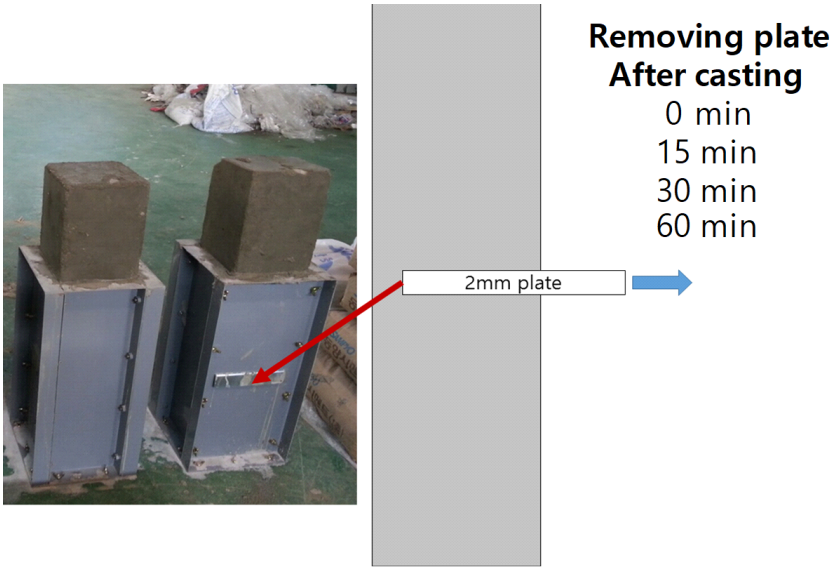


Fig. 3-2 파괴에너지 측정을 위한 시험체와 비접합면 형성 시간

- 또한 실제 3D 프린팅 기술로 콘크리트 구조물을 축조한 경우에도 단일 레이어가 형성된 이후 노출된 상태로 경화가 진행된 이후 새로운 콘크리트 레이어와 접합면을 형성할 것이므로 제작된 시편은 실제 3D 프린팅에 의한 시공 상태를 최대한 유사하게 재현한 접합면을 형성하고 있는 것으로 볼 수 있다. 다만 3D 프린팅으로 시공 시 기존 레이어가 새로운 레이어를 만나기까지 대기와의 노출에 따른 표면 경화는 내부의 경화보다 빠를 수 있어 이에 대한 차이는 있을 것으로 사료된다.

Table 3-1 Test plan for fracture energy of interfaces

Specimen	Effects of dead load (D/N)	Plate removing time (min)
D-0	O	0
D-15	O	15
D-30	O	30
D-60	O	60
N-0	X	0
N-15	X	15
N-30	X	30
N-60	X	60

- 이러한 실험조건에 따른 시험체의 종류는 다음 Table 3-1에 나타냈다. 자중의 영향을 받은 시편은 D계열로, 자중 영향을 받지 않은 시편은 N계열로 명하였으며, 적층소요시간을 고려하기 위한 박판제거시간도 0분, 15분, 30분, 60분으로 분류하여 실험을 수행하였다.
- 파괴에너지의 측정을 위해서는 Fig. 3-3과 같이 쪼갬인장시험도 동일한 재령에서 함께 진행되어야 한다. 따라서 Ø100 × 200 mm의 공시체를 ASTM C496 (2005)에 따라 수행하였으며 측정결과를 Reinhardt et al. (1986) 및 Rocco et al.(2001)의 연구내용을 참고하여 결과값을 정리하였다.
- 파괴에너지 측정 시편과 유사한 조건(상부 하중, 적층시간)으로 Table 3-2와 같이 자중의 개수(굳기 전 콘크리트 실린더에 굳은 콘크리트 실린더를 상재한 수)와 박판제거시간의 변수를 두어 총 16종류의 공시체를 제작, 시험하였다.

Table 3-2 Table of splitting tensile strength test plan

Number of dead load	Plate removing time (min)
3	0
	15
	30
	60
2	0
	15
	30
	60
1	0
	15
	30
	60
0	0
	15
	30
	60

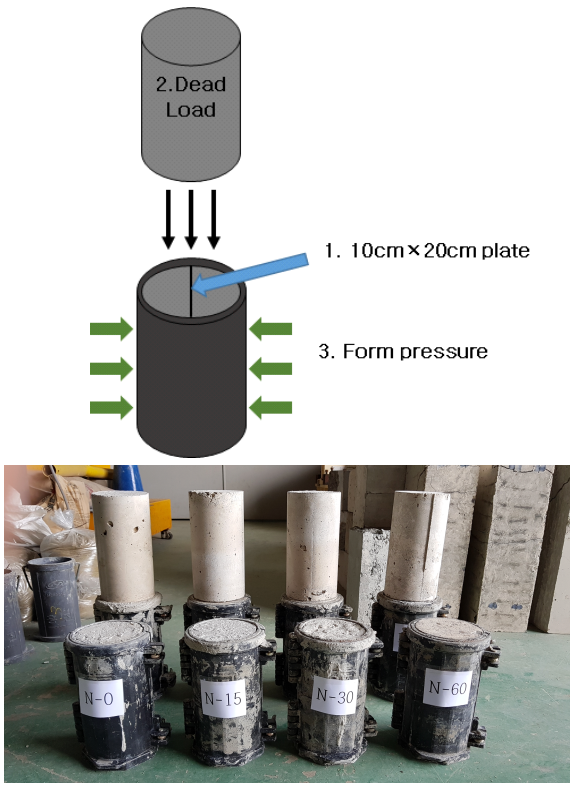


Fig. 3-3 상재하중 적용 방법과 쪼갬인장 실험 시편

- Fig. 3-3에서 보는 것과 같이, 자중의 전달경로가 파괴에너지 시험체 전달경로와는 다르게 쪼갬인장시험체에서 자중의 방향이 접합면과 수직이므로 콘크리트가 굳기 전 상재하중이 100 % 전달되었다고 보기 어렵다. 실제 자중에 의해 발생하는 콘크리트의 측압은 골재 맞물림, 틱소트로피(thixotropy)현상 등으로 정수압 보다 낮은 압력을 나타낸다. 다만 시편의 높이가 20 cm이며 3개의 시편을 상재한 경우 60 cm에 해당되는 콘크리트의 자중(응력: 0.013 MPa)이 전달되므로 굳기 전 콘크리트가 받은 자중의 효과는 상재하중으로 고려될 수 있다.

라. 브릿징(Bridging) 재료의 적용

- 3D 프린팅 콘크리트 구조물의 구조적 강성을 향상시키기 위해 Fig. 3-4와 같이 3개의 브릿징 재료가 고려되었다. 본 연구에서 사용된 브릿징 재료는 강섬유(Steel fiber)와 골재(Crushed aggregate) 그리고 경화지연제(Retarder)이다.
- 선정된 강섬유의 길이는 60mm이고 직경은 0.9mm이며 제조사 시험성적서에 의한 항복강도는 700MPa이다. 골재의 경우, 불규칙한 모양을 브릿징 재료로 활용하기 위하여 최대 크기가 직경 25mm인 분쇄된 유형의 골재(Crushed aggregate)로 선정하였다.
- 경화지연제는 분말 유형으로 주성분은 탄산칼슘과 메틸셀룰로오스로 이루어져있다. 콘크리트 레이어를 형성한 후에는 이러한 브릿징 재료를 분사할 수 있는 다른 노즐을 사용하여(특허출원번호 10-2016-00490 40) 콘크리트 레이어 위에 간단하게 적용이 가능하다. Table 3-3 4에는 각각의 실험 조건에 따른 시편의 유형과 콘크리트 레이어 접합면의 강성을 향상시키기 위한 브릿징(Bridging) 재료를 고려한 것을 나타내었다.



(a) 골재 (b) 경화지연제 (c) 강섬유

Fig. 3-4 브릿징(Bridging) 재료

Table 3-3 실험 계획

Specimen	Bridging materials	Plate removing time (min)
C-0	NA (Control Specimens)	0
C-15		15
C-30		30
C-60		60
A-30	Aggregate (8mg/mm2)*	30
A-60		60
R-30	Retarder agent (1.75g/1kg Concrete)*	30
R-60		60
S-30	Steel fiber (1%)*	30
S-60		60

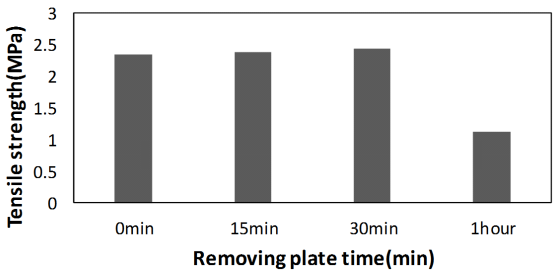
2. 3D 프린팅 축조 구조물 접합면 구조성능평가 실험 결과

가. 쪼갬인장시험 결과 (ASTM C496)

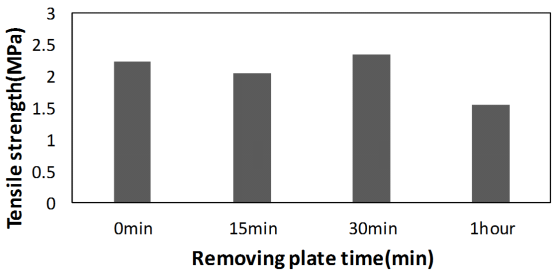
- 앞에서 제시한 실험방법들을 토대로 다양한 환경조건(자중 여부, 레이어의 적층 소요시간)에 따른 콘크리트 레이어 접합면의 이중선형 응력-균열폭 관계를 평가하였다. 최종 응력-균열폭 관계(stress-crack opening bilinear curve under the Mode I direction)를 산정하기 위해 쪼갬인장시험과 3점 파괴에너지 측정시험을 수행하였으며 그 결과는 뒤에서 나타냈다.
- 자중 고려 개수에 따른 쪼갬인장강도 시험 결과는 Fig. 3-5와 같다. 시편 전체로 보았을 때 강도는 최대 2.43 MPa에서 최소 1.13 MPa로 나타났고, 자중을 고려한 개수가 3개(0.2

MPa), 2개(0.15 MPa), 1개(0.1 MPa), 0개(0.05 MPa)일 경우의 평균 쪼갬인장강도는 각각 2.08 MPa, 2.05 MPa, 2.09 MPa, 1.64 MPa 로서, 자중의 정도에 따른 접합면 쪼갬인장강도는 뚜렷한 경향성을 보이지 않았다.

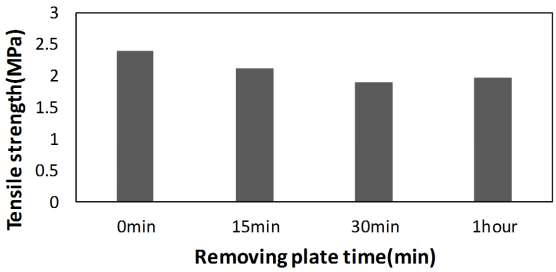
- 다만 자중을 전혀 고려하지 않았을 때 약 0.4 MPa 만큼 급격히 평균 쪼갬 인장강도가 감소함을 볼 수 있었다. 따라서 레이어가 점차 적층됨에 따라 자중이 접합면 부착성능에 영향을 주고 있다고 평가할 수 있으나 정확한 상재하중에 따른 접합면에 미치는 응력은 보다 상세한 Rheology 기반의 분석이 필요하며 본 실험에서는 상재하중의 정도(0.1MPa, 0.15Mpa, 0.2 Mpa)에 따른 경향성은 없는 것으로 나타났다.



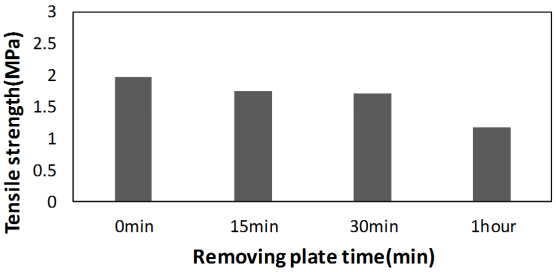
(a) 상재하중 수 - 3



(b) 상재하중 수 - 2



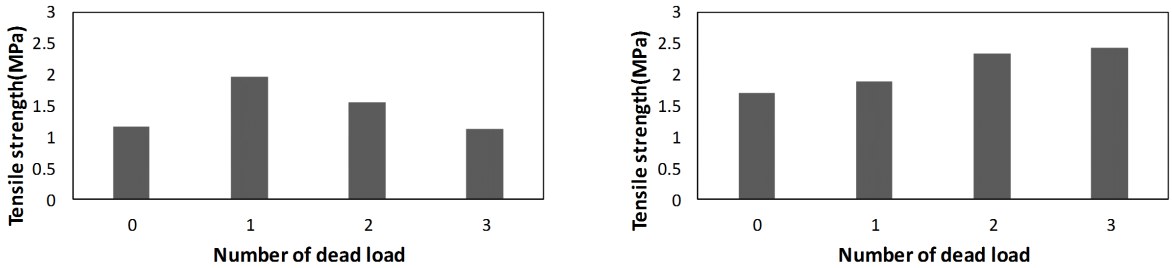
(c) 상재하중 수 - 1



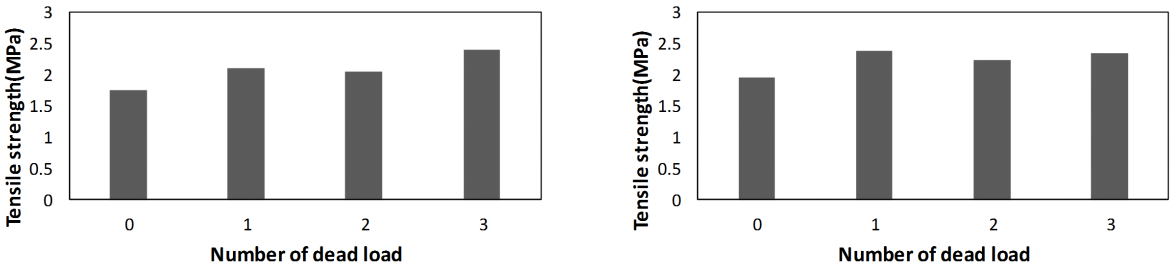
(d) 상재하중 수 - 0

Fig. 3-5 상재하중에 의한 쪼갬인장 실험 결과

- 박판 제거시간에 따라 분류한 쪼갬인장강도의 결과는 Fig. 3-6에 나타내었다. 박판 제거시간이 0분인 시편에서 평균 인장강도가 2.23 MPa이고, 박판 제거시간이 60분인 시편에서는 1.46MPa로 확인되었다.
- 모든 실험결과를 놓고 분석해 볼 때에 약 1분에 0.013MPa씩 감소함을 확인할 수 있다. 따라서 본 실험결과로 유추해 볼 때 3D 프린팅 기술로 콘크리트 구조물 축조 시 레이어가 적층되는 시간이 길어질수록 부착성능이 저하될 것임을 예측해 볼 수 있다. 이러한 부착성능의 감소는 레이어 접합면의 초기균열 발생시점에도 영향을 줄 것이며 전체적인 파괴에너지의 감소와도 연관이 있을 것으로 예상된다.



(a) 60분 (b) 30분

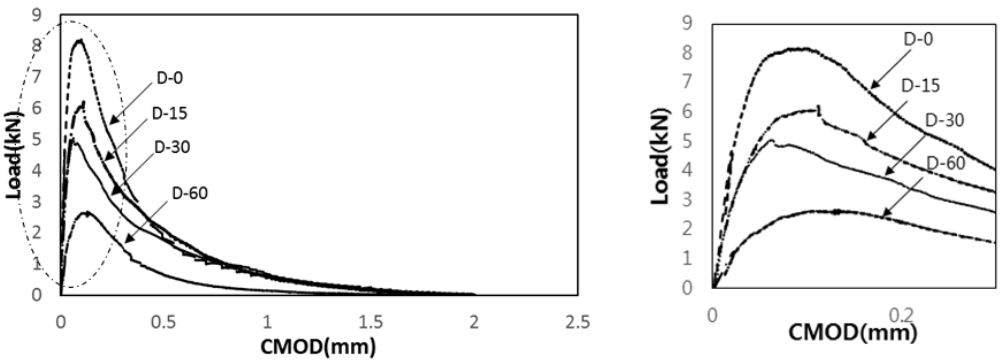


(c) 15분 (d) 0분

Fig. 3-6 비접합면 형성시간에 따른 쪼갬인장실험 결과

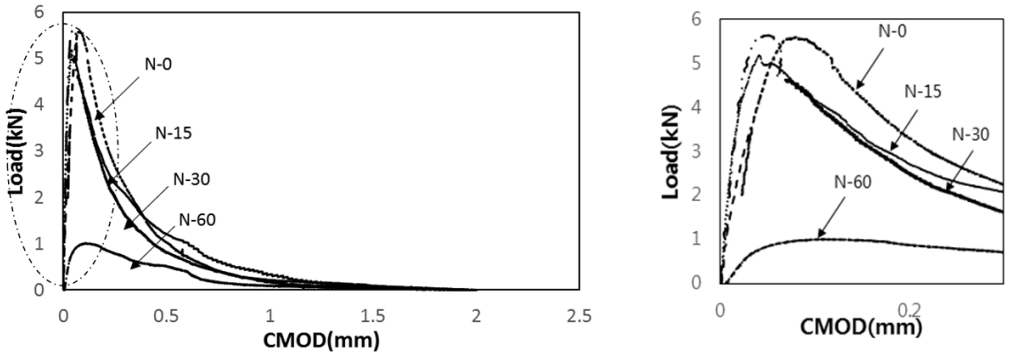
나. 상재하중 적용에 따른 파괴에너지 측정 실험 결과

- 3점 파괴에너지 측정시험 결과는 Fig. 3-7과 같이 하중-CMOD 그래프로 나타낼 수 있다. 이 하중-CMOD 결과를 ACI 446(2009), Elices et al.(1992), Bazant and Planas(1998), RILEM(1990), Planas et al.(2007), Lee and Lopez(2014)에서 제시된 데이터 분석방법을 통하여 최종적인 이중선형 응력-균열폭 관계(Stress-crack opening curves)로 나타낼 수 있다. 이러한 응력-균열폭 관계를 결정하기 위해서는 먼저 Fig. 3-7과 Fig. 3-8의 하중-CMOD 그래프를 분석하여야 한다.
- Fig. 3-9의 에너지 그래프 꼬리상수 값(Far tail constant, A)은 시험 종료시점 이후의 잔여파괴에너지를 예측하기 위하여 산정되는 값이며 파괴에너지, 꼬리상수 등의 산정에 대한 상세한 내용은 '제6장연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보'에 제시하였다.



(a) 하중-CMOD 곡선 (상재하중) (b) 확대

Fig. 3-7 상재하중이 적용된 시험체의 실험 결과



(a) 하중-CMOD 곡선 (b) 확대

Fig. 3-8 상재하중이 없는 시험체의 실험 결과

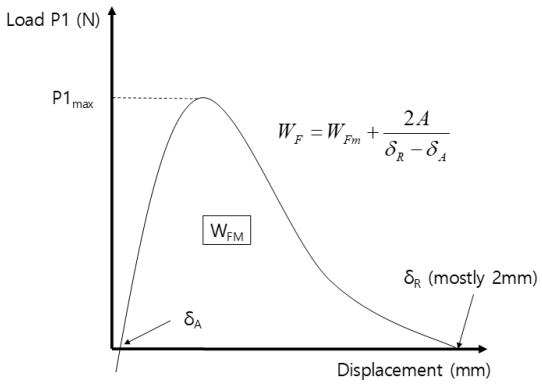


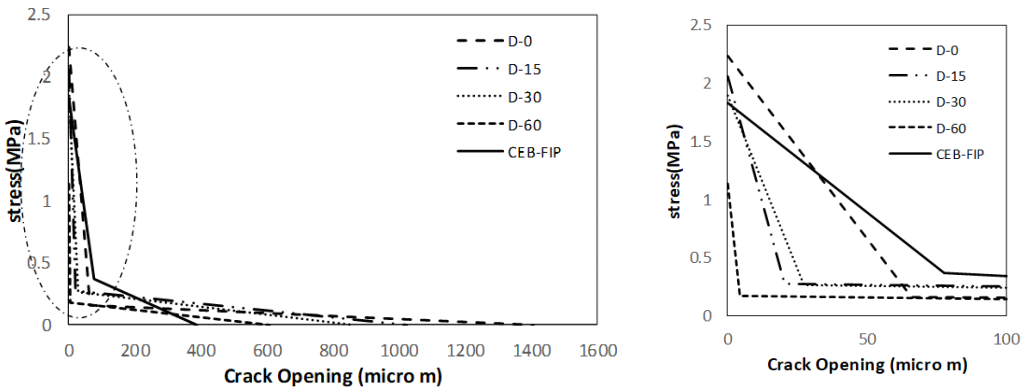
Fig. 3-9 파괴에너지의 전체 에너지 측정

- 하중-CMOD 그래프에서는 D계열 시편과 N계열 시편 모두 박판제거시간이 감소함에 따라 최대 하중이 감소하는 것으로 나타났다. 특히 최대하중이 8.22 kN이었으나, 박판제거시간이 60분인 시편에서는 최대하중이 자중을 고려하지 않았을 때 2.69 kN, 자중을 고려하였을 때 1.02 kN으로 측정되어 접합면 형성 소요시간이 1시간일 경우 하중-CMOD 에서의 최대하중은 최대 88 % 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 최대하중은 notch 인근의 골재 등의 분포에 따라 영향을 받기도 하여 최대하중이 높다고 반드시 파괴에너지가 높게 측정되는 것은 아니나 일반적인 경향으로 평가해 보았을 때 파괴에너지의 감소를 최대하중을 통해 예측해 볼 수 있다.
- 파괴에너지 측정실험을 통해 도출된 하중-CMOD 곡선의 면적이 줄어들면 최종 산정되는 파괴에너지도 감소할 것이므로 하중-CMOD 그래프의 면적을 계산한 이후 최종파괴에너지를 계산하여 비교하였다. 그러나 최종 파괴에너지는 전술한 바와 같이 하중-CMOD 곡선의 면적에 꼬리상수(A) 값에 의한 추가 에너지가 더해져 산정되므로 두 값의 증감율이 항상 동일하지는 않는다.
- 하중-CMOD 곡선 면적의 감소에 따른 파괴에너지의 감소량은 Table 3-4의 값을 통해 확인할 수 있다. D-0 시편에서 가장 큰 곡선 면적을 확인할 수 있었으며, 그에 따른 파괴에너지도 D-0 시편이 최대값인 것을 확인하였다. Table 3-4에서 보는 바와 같이 박판 제거시간에 따른 곡선 면적이 최대 70 %가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 그에 따른 파괴에너지도 최대 73 %가 감소하였다. 한 편, 자중이 고려되지 않은 시편(N계열)이 자중 고려된 시편(D계열)에 비해 곡선면적과 파괴에너지가 최대 39 % 및 40 %가 감소하는 것을 확인하였으므로, 자중의 정도에 따라 최종 파괴에너지에 영향을 줄 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다. 그러나 이러한 경향은 전술한 바와 같이 쪼갬인장시험 결과에서는 나타나지 않았다.

Table 3-4 하중-CMOD 곡선에 의한 파괴에너지

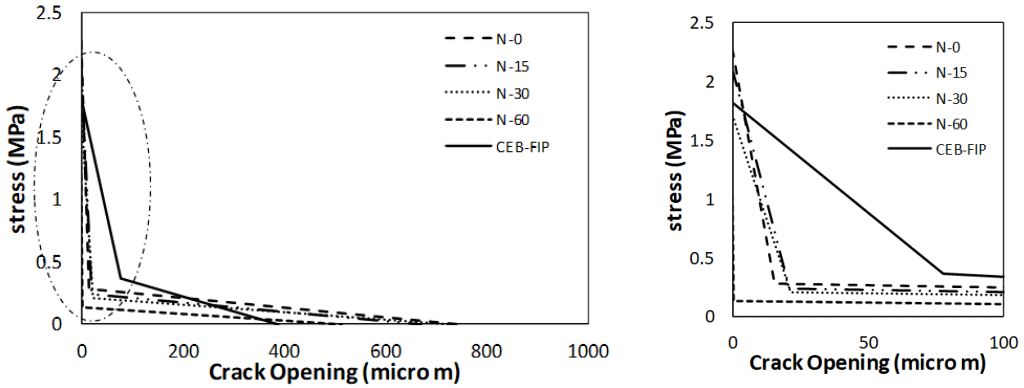
Specimen	Area of curve (N·m)	Fracture energy (N/m)
D-0	182,817	185.6
D-15	160,135	162.2
D-30	151,125	138.6
D-60	65,786	56.2
N-0	134,880	123.7
N-15	109,465	103.4
N-30	108,070	93.9
N-60	40,090	33.9

- 전술한 쪼갬인장시험과 파괴에너지 측정실험 결과를 이용하여 최종적인 이중선형(Bilinear)의 형태로 단순화한 곡선을 Fig. 3-10 와 Fig. 3-11에 나타내었다. 여기서 y축 최대값은 쪼갬인장강도 시험의 결과 값이며, x축 인자는 콘크리트의 균열 폭(Crack Opening)을 나타낸다.



(a) 상재하중 작용에 의한 이중선형곡선 (b) 그래프 확대

Fig. 3-10 이중선형곡선 (상재하중)



(a) 상재하중이 없는 시험체의 이중선형곡선 (b) 그래프 확대

Fig. 3-11 이중선형곡선 (일반)

- Fig. 3-12는 꺾인점(kink point)이후 최대 균열폭(wc)을 비교하여 나타낸 것이다. D-0과 N-0 시편에서 1408 μm, 746 μm를 보여 각 계열에서 적층소요시간이 0분인 경우 최대값을 보였다. 적층소요시간이 60분인 D-60, N-60 시편에서는 608 μm, 571 μm를 보여 박판 제거시간이 0분인 계열에 비해 자중을 고려한 시편과 고려하지 않은 시편에서 최대 균열폭(wc)이 각각 57 % 및 23 % 감소하였음을 확인하였다.

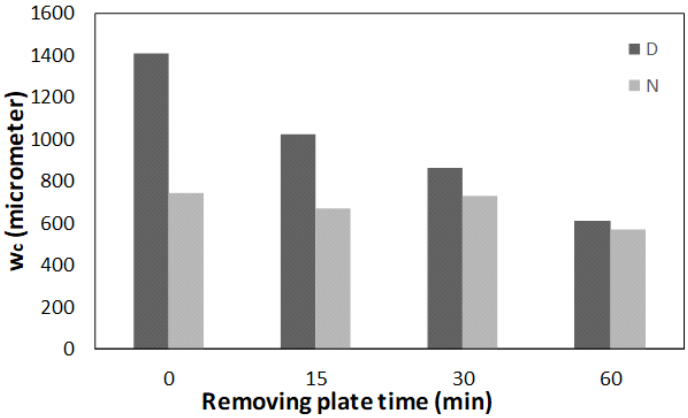


Fig. 3-12 w_c 결과

- Fig. 3-13은 꼬리상수(A)를 도출한 결과를 나타낸 것이다. 꼬리상수의 차이가 최종 파괴에너지에 영향을 주기 때문에 각 환경조건에 따른 꼬리상수의 차이를 비교하였다. D-0, N-0 계열에서 각각 654.4 N-mm2, 506.9 N-mm2을 나타내어 최대값을 보였고 D-60, N-60 시편에서는 185 N-mm2, 108 N-mm2을 나타내어 최소값을 보였다. 자중을 고려한 시편과 고려하지 않은 시편에서 적층소요시간이 60분 발생함에 따라 각각 71.7 % 및 78.7 %의 큰 폭으로 감소함을 확인하였다. 또한 자중을 고려한 시편에서의 최대 균열폭(wc)과 꼬리상수(A) 값이 자중을 고려하지 않은 시편보다 대체적으로 더 큰 값을 나타냄을 확인할 수 있다.
- 결론적으로 파괴에너지의 크기를 결정하는 하중-CMOD 곡선의 면적 그리고 이를 이용하여 산정되는 최대 균열폭(wc)과 꼬리상수(A) 값은 레이어의 적층에 소요된 시간이 길어질수록 크기가 감소하며, 레이어의 상재하중이 가해짐에 따라 증가하는 것을 확인하였다.

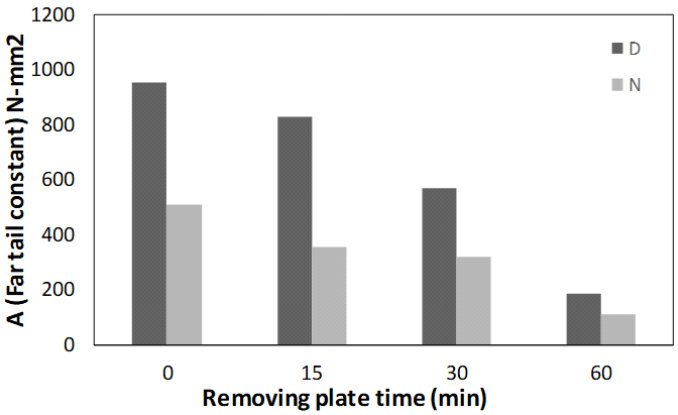
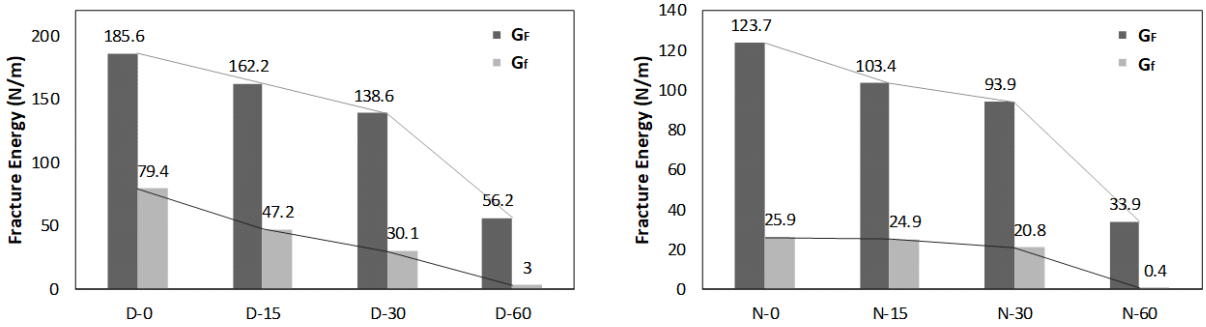


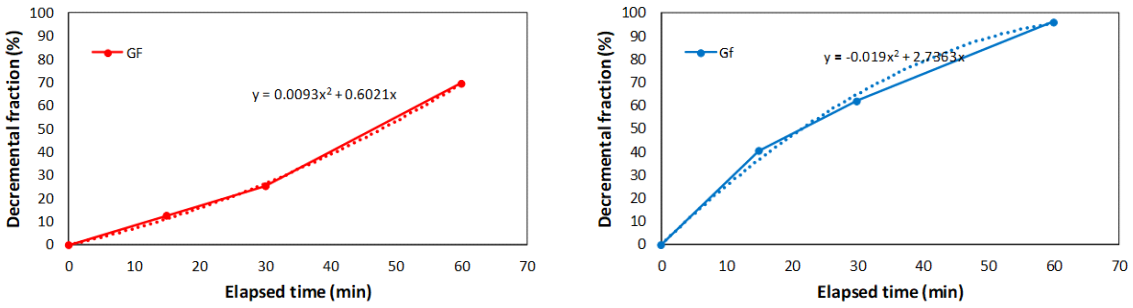
Fig. 3-13 꼬리상수 결과 (Far tail constant, A)



(a) 실험 결과(상재하중) (b) 실험 결과(일반)

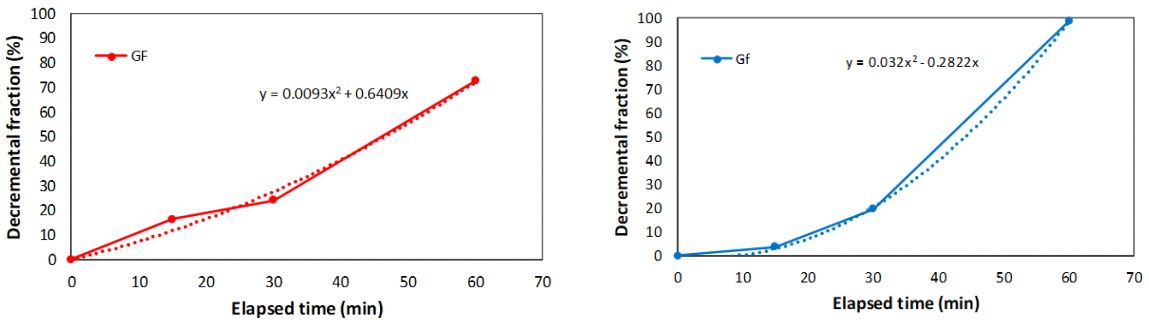
Fig. 3-14 진파괴에너지(G_F)와 크기효과 파괴에너지(G_f) 비교

- 이러한 측정결과를 바탕으로 이중선형(Bilinear) 형태의 단순화된 곡선의 면적으로 포함되는 G_F와 G_f의 결과를 Fig. 3-14에 비교하여 나타내었다.
- 분석결과 Fig. 3-14에서 보는 바와 같이 적층소요시간이 60분인 D-60과 N-60 시편에서는 G_F와 G_f의 감소량이 현저히 큰 수치를 보인다.
- Fig. 3-14에서와 같이 진파괴에너지 G_F는 D계열 최대값인 D-0시편과 최소값인 D-60 시편이 각각 185.6 N/m 및 56.2N/m로 측정되었으며 N계열에서는 최대값인 N-0 시편과 최소값인 N-60 시편이 각각 123.7 N/m, 33.9 N/m으로 측정되었다. 이러한 측정값을 기준으로 1시간의 접합면 형성 소요시간 조건에서 진파괴에너지 G_F가 각각 69.7 % 및 72.6 % 감소함을 확인하였다(Fig. 3-15, Fig. 3-16).



(a) 진파괴에너지 (G_F) (b) 크기효과 파괴에너지 (G_f)

Fig. 3-15 상재하중 작용하의 비접합면 형성시간에 따른 파괴에너지 감소율



(a) 진파괴에너지 (G_F) (b) 크기효과 파괴에너지 (G_f)

Fig. 3-16 비접합면 형성시간에 따른 파괴에너지 감소율

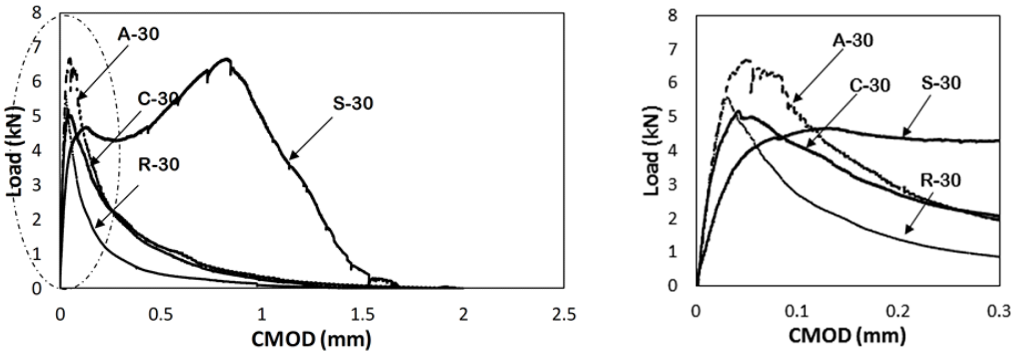
- 마찬가지로, 크기효과 파괴에너지 G_f도 D계열 최대값인 D-0시편과 최소값인 D-60 시편이 각각 79.4 N/m, 3.0 N/m이고, N계열에서 최대값인 N-0 시편과 최소값인 N-60 시편이 각각 25.9 N/m, 0.4 N/m으로 측정되어 1시간의 접합면 형성 소요시간 조건에서 크기효과 파괴에너지 G_f가 각각 96.2 % 및 98.5 % 감소함을 확인하였다(Fig. 3-15, Fig. 3-16). 이러한

결과는 예상한 것과 같이 레이어 적층 시 접합부 적층 소요시간이 길어질수록 경화로 인한 일체성이 저감되기 때문일 것으로 판단된다.

- 즉 접합부 생성 소요시간이 콘크리트 초결 시간에 유사할수록 일체성 감소의 정도는 현저히 차이가 날 것으로 보인다. 본 연구에서 측정된 초결과 종결 시간은 1시간 40분 및 3시간 40분으로서, 실험조건 중 가장 오랜 시간으로 제시된 1시간은 초결 시간에 미치지 못하지만 이미 일체성 저감에 큰 영향을 끼치고 있음을 확인할 수 있었다.
- 본 연구에서는 적층소요시간에 따라 레이어 접합면이 저감되는 성능을 확인하였다. 특히 접합면이 다수 형성되어 있는 3D 프린팅 기술로 축조된 콘크리트 구조물의 경우 본 연구결과를 활용하면 감소되는 구조 성능의 저감 정도를 예측하는데 관련 내용이 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

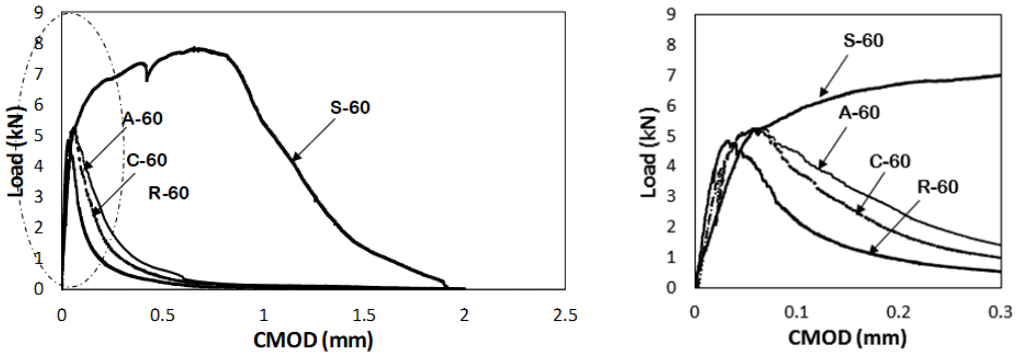
다. 브릿징 재료를 적용한 파괴에너지 측정 실험 결과

- 적층 소요시간이 증가함에 따라 파괴에너지가 감소하였으므로, 앞에서 언급한 바와 같이 골재, 경화지연제, 강섬유와 같은 브릿징 재료를 통한 접합면 파괴에너지 개선을 고려해볼 수 있다. 실험을 통해 얻어진 load-CMOD 그래프를 Fig. 3-17과 Fig. 3-18에 나타내었다.



(a) Elapsed time to meet a new layer (b) Enlarged graph

Fig. 3-17 하중-CMOD 곡선 비교 (30min)



(b) Elapsed time to meet a new layer (b) Enlarged graph

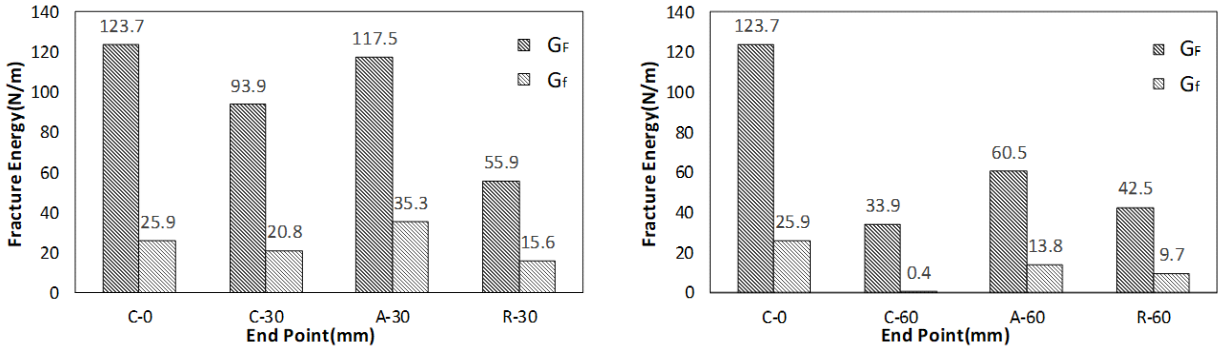
Fig. 3-18 하중-CMOD 곡선 비교 (60min)

- 실험결과 S계열의 시편에서는 파괴에너지가 현저히 증가(653.8%)하였다. 한편, 강섬유로 보강된 콘크리트의 응력-균열 폭 관계를 확인하는 절차는 RILEM TC 162-TDF와 같은 실험적 기준을 따른다. S-30과 S-60 시편에서의 파괴에너지 값은 각각 328.0N/m, 286.7N/m 으로 측정되었다. 따라서 강섬유를 접합면에 적용시켜주면 접합면 소요시간 증대에 따른 파괴에너지 저감을 충분히 예방할 것으로 예측되며, 접합면의 재료적 특성을 충분히 개선 가능할 것으로 판단된다.

Table 3-5 Obtained fracture energies depending on different bridging materials

Specimen	Bridging materials	Plate removing time (min)	Size effect fracture energy (N/m)	True Fracture energy (N/m)
C-0	NA (Control Specimens)	0	25.9	123.7
C-15		15	24.9	103.4
C-30		30	20.8	93.9
C-60		60	0.4	33.9
A-30	Aggregate ($8mg/mm^2$)	30	35.3	117.5
A-60		60	13.8	60.5
R-30	Retarder agent (1.75g/1kg Concrete)	30	15.6	55.9
R-60		60	9.7	42.5
S-30	Steel fiber (1%)	30	-	328.0
S-60		60	-	286.7

- A 계열과 R 계열의 최종적인 진 파괴에너지(G_F)와 크기 효과 파괴에너지(G_f) 값을 Fig. 3-19에 비교하여 나타내고 Table 3-5에 최종값을 정리하여 나타내었다. 브릿징 재료가 사용되었을 경우 A-30 시편의 파괴에너지가 본 실험연구의 표준인 C-0(123.7 N/m)의 95.0%로 개선되며 C-30 시편(93.9 N/m)에 비해 약 25%더 증가한 것으로 보아 골재를 브릿징 재료로 고려하였을 경우 30분 이하의 적층 소요시간 이내의 환경조건에서는 파괴에너지의 감소를 충분히 방지시켜 줄 것으로 예상된다. 또한 골재의 맞물림 효과로 인하여 접합면에서의 전단-슬립(Shear-slip, Mode II fracture)거동에 대한 저항에 매우 효과적일 것으로 예상된다.
- 한편 경화 지연제(R-30)는 표준시편(Control)인 C-0 (93.9N/m)에 비해 보다 크게 감소된 파괴에너지(55.9N/m)가 관찰되었고, C-30과의 비교에서도 40%가 감소된 것으로 보아 파괴에너지 저감의 방지에 효과적이지 못한 것으로 관찰되었다.
- 즉, C-0 시편의 파괴에너지 값을 100%로 가정하였을 때, 강섬유(S), 골재(A) 및 경화 지연제(R)를 사용하였을 시에 파괴에너지의 값은 적층 소요시간이 30분일 때 각각 328%, 95% 및 45.2%, 60분일 때 각각 286.7%, 48.9% 및 34.4%의 수준으로 나타났다. 이것은 새로운 레이어를 만나는 데 걸리는 시간이 30분 미만일 시에는 강섬유 및 골재와 같은 브릿징 재료를 사용하여 개선된 구조적 강성을 가지는 접합부를 형성시켜줄 수 있음을 의미한다. 그러나 적층 소요시간이 60분을 초과할 시에는 강섬유가 사용된 시편에서만 본래의 파괴에너지 수준 이상을 유지하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 다음 장에서 제시하는 전단강도 감소 예측모델(Vector 2)의 접합면 파괴에너지 값으로 사용된다.
- 따라서 본 연구에서 제시하는 50% 일체성 개선을 위한 브릿징 재료는 골재와 강섬유를 적용하였을 경우 도달 할 수 있는 것으로 나타났다. (Control: 33.9%, Aggregate: 60.5%, Steel fiber: 286.7%)



(a) C-0, C-30, A-30 and R-30 (b) C-0, C-60, A-60 and R-60

Fig. 3-19 Comparison of G_F and G_f

3. 3D 프린팅 축조구조물 전단강도 저감 예측 및 분석

가. 전단강도 예측모델 개발

- 콘크리트 레이어 간 접합면의 파괴에너지를 측정한 결과 다중 접합면을 갖는 다양한 RC 보의 전단 강도의 저감이 예측되었다. 이러한 접합면을 가지는 RC 보 또한 Fig. 3-20과 같이 3D 프린팅에 기반한 RC 보로 간주될 수 있으며, 본 연구에서 선택되어진 기본 재료 모델은 Table 3-6에 제시하였다.

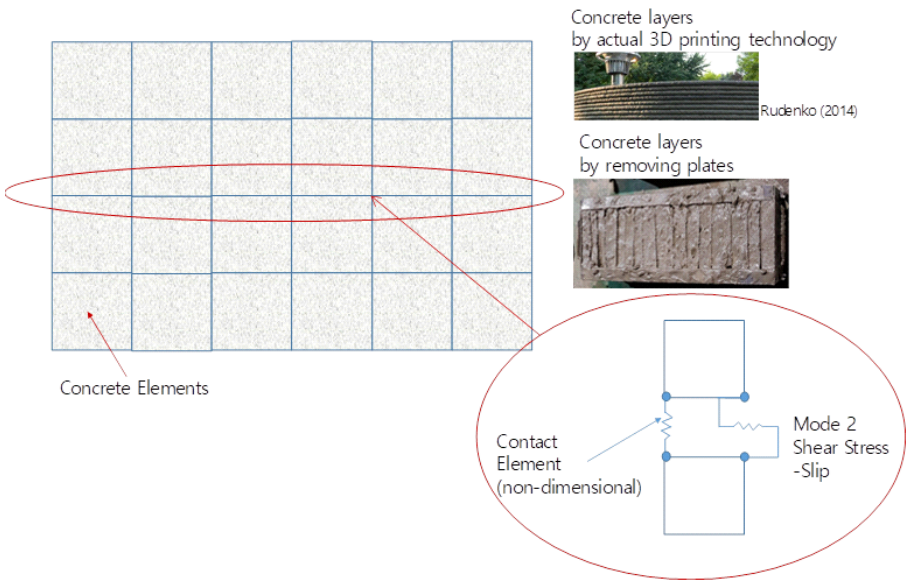


Fig. 3-20 Modeling of interface between two concrete layers

Table 3-6 Selected material Models for estimating shear strength

Material	Selected Models	Notes
Concrete	Hognestad	Prepeak
	Modified Park and Kent	Post-peak
	Vecchio 1992-A	Softening Compression
	Strain based custom input	Softening Tension
	Kupfer / Richardt	Confined strength
	Variable Kupfer	Dilation
	Mohr-Coulomb (stress)	Cracking Criterion
	DSFM / MCFT	Crack stress calculation
	Agg./ 2.5 maximum crack width	Crack width check
	Walraven	Crack slip
Steel Rebar	Bauschinger effect	Hysteretic
	Tassios (crack slip)	Dowel action
	Refined Dhakal-Maekawa	Buckling
Interface between layers	Bilinear Shear Stress-Slip Behavior	Contact material properties

- 콘크리트의 pre-peak 응답에 대해서는 콘크리트의 압축 거동에 대한 Hognestad 곡선이 사용되었고, post-peak 응답에 대해서는 Modified Park and Kent 모델이 사용되었다. 전단강도를 정확하게 예측하기 위하여 콘크리트의 균열이 전단강도에 미치는 영향을 콘크리트 슬래브 실험을 통해 제시한 Modified Compression Field Theory (MCFT) 이론을 고려하였다.
- 또한 콘크리트의 압축연화에 대해서는 Vecchio의 1992-A 모델을 선정하였다. 이 모델은 Vecchio와 다른 연구자들로부터 수행된 광범위한 패널 테스트의 결과를 기반으로 개발된 것이다. 이 모델을 사용함으로써 주인장 변형률이 현저할 시에 발생하는 연화 효과를 과대평가하는 것을 방지할 수 있다. 콘크리트의 인장 거동을 모델링하기 위해 최종적으로 측정된 응력-균열 폭의 관계인 이중선형곡선이 사용되었다.
- 철근의 경우 경화 효과가 있는 탄소성 거동이 고려되었고, 트러스 요소가 콘크리트와 절점을 공유하는 형태로 모델링을 하였다. 즉 본 연구에서, smeared reinforcement는 고려되지 않았으나 bar elements for the rebar는 개별적으로 고려되었다.
- 콘크리트 레이어 사이의 접합면을 모델링하기 위해서 접촉 요소가 사용되었다. 접촉 요소는 무차원이며 동일한 위치에 2개의 절점이 필요하다. 접선 방향의 거동일 경우 전단 슬립과 같은 Mode II 파괴거동이 입력 변수로 사용되었다. 본 연구에서는 Mode I 파괴 시험에서 적층 소요시간에 따른 파괴에너지가 감소됨을 확인하였으므로 파괴에너지 측정시험에서 얻은 Mode I 파괴에너지(보통 응력-균열 폭)의 감소를 기반으로 Mode II 파괴에너지의 감소를 예측하였다. MCFT 이론에 근거한 콘크리트의 재료모델은 Wong et al. (2013)에 상세하게 명시되어 있다.
- 콘크리트와 철근 요소의 치수는 10mm 로 선정하였다. Bazant (1986)에 의하면, 응집성 균열의 모델링을 위해 최대 골재 치수보다 2~3배 정도가 더 큰 요소를 권장한다. 현 연구에서, 최대 골재 치수는 20mm 이므로, Bazant (1986)에서 권장하는 바에 따라 50mm가 적절

한 요소의 치수가 될 수 있다. 그러나 50mm의 요소 치수가 사용된 경우, 요소수의 감소와 함께 균열 형성과 이에 따른 보의 소성 거동을 정확하게 예측할 수 없으므로 종횡비가 약 1.0인 평면 응력 요소를 사용하여 10mm의 요소 치수가 모델에 사용되었다. 또한 효율적인 해석 시간을 위하여 대칭모델이 사용되었다.

- 하중은 1.0kN 단위로 증가하는 단조하중으로 절점에 적용되도록 고려가 되었으다. 수렴의 기준은 변위 기반(Displacement based analysis)의 가중평균방법(weighted average method)가 사용되었다. 수렴 한계치는 1.00001로 설정하였다.

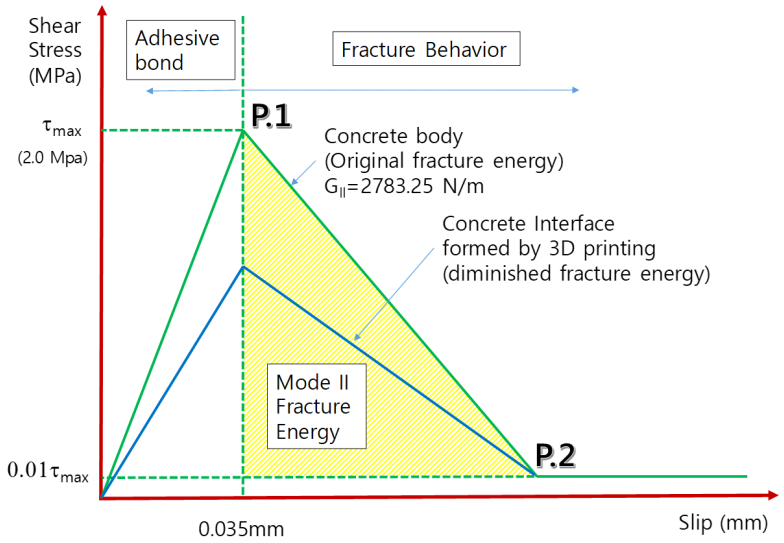


Fig. 3-21 접합면 요소에 대한 전단응력-슬립 관계

- 두 접합면 사이의 전단응력-슬립 관계(Fig. 3-21)를 Vector 2 프로그램의 접합면 접촉요소의 입력값으로 사용되었다. 접촉 물성치의 저감이 없을 경우 일반적인 전단응력-슬립 곡선이 사용되었으며 Fig. 33-21에서 보이는 P.1의 최대 전단응력은 fib Model Code 2010의 식으로부터 추정하였으며 사용된 식은 아래와 같다.

$$\tau_u = \tau_c + \mu(\rho \cdot k \cdot f_y + \sigma_n) + \alpha \cdot \rho \cdot \sqrt{f_y \cdot f_{cc}} \quad (1)$$

τ_u : 콘크리트 레이어 사이의 극한 전단강도

μ : 마찰 계수

f_y : 철근의 항복강도

ρ : 철근비

k : 상호작용 계수(Interaction factor)

α : 상호작용 계수(Interaction factor)

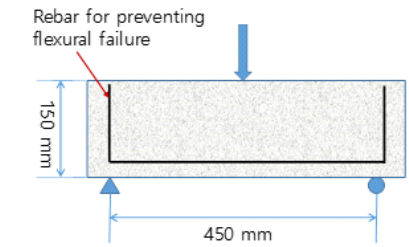
f_{cc} : 1축 응력 하에서의 콘크리트 압축강도

- 위 식에서 첫 번째 항은 점착력과 관련이 있고, 두 번째 항은 마찰거동과 관련이 있으며 세 번재 항은 다월 작용과 관련이 있다.
- 전단 응력은 접합면의 인장 응력에 가해지는 압축 응력뿐만 아니라 다월 작용으로부터 발생하는 마찰 효과를 추가적으로 고려해야 하나 본 연구에서는 스터럽이 없는 보와 계면에서 작용하는 응력에 대한 해석이 수행되므로 마찰 효과는 무시하였다. 따라서 부착 응력만이 고려되었으며 부착 응력은 최대 전단응력이다.
- 일반적으로 보통콘크리트의 최대 전단응력은 fib Model Code 2010에서의 거친 계면 조건에서 2.0 MPa로 평가되며 3D 프린팅 기술에 의해 형성된 접합면은 콘크리트의 초결 시간 이전에 접합면이 형성되기 때문에 샌드 블라스팅(Sand blasting)의 조건보다 더 좋거나 유

사한 조건으로 여겨질 수 있으므로 본 연구의 최대 전단응력은 2.0 MPa로 가정하였다.

나. 전단강도 예측모델 검증

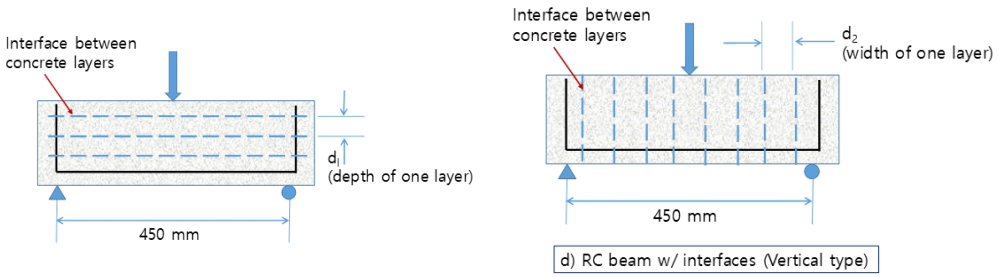
- 다수의 접합면에 의한 RC 보의 전단 강도 저감을 예측하기 위하여 개발된 모델의 검증을 수행하였다. 모델 검증을 위하여 Fig. 3-22와 같이 시편을 제작하였다. 시편의 크기는 550×150×150 mm이고 휨파괴를 방지하기 위해 철근(2-D10)으로 보강하였다. 여러 개의 박판을 사용하여 다수의 접합면이 있는 RC 보를 제작하고 일반 RC보도 함께 제작하여 전단강도의 차이를 검토하였다.
- 먼저 Fig. 3-22(b)와 같이 간접적인 방법으로 접합면을 형성하기 위하여 수평방향 및 가로방향 박판을 설치한 상태에서 콘크리트를 타설한 후 60분 후에 박판을 제거하여 새로운 레이어와 이전 레이어 사이의 접합면을 생성하였다. 수평 접합면 유형의 간격(d_1)은 30mm로 선정하였고, 수직 접합면 유형의 간격(d_2)은 35mm 이다. 초결 시간이 100분이므로 박판을 제거한 시간(접합면 형성 소요시간)은 초결의 60%에 해당된다.
- 이렇게 만들어진 시편의 전단강도 실험 결과를 Fig. 3-23에 나타내었다. 본 연구의 표준 RC 보(N 계열)의 최대 하중은 78.9kN(전단강도:39.5kN)으로 측정되었고, 적층된 RC 보는 예상했던 것과 같이 표준 RC 보(N 계열)에 비해 낮은 하중을 보였다.



(a) 일반적인 RC beam



(b) 모델검증 시편



(c) 수평접합면 (Horizontal Type)　　(d) 수직접합면 (Vertical Type)

Fig. 3-22 모델검증을 위한 실험

- 다수의 접합면에 의한 RC 보의 전단 강도 저감을 예측하기 위하여 개발된 모델의 검증을 수행하였다. 모델 검증을 위하여 Fig. 3-22와 같이 시편을 제작하였다. 시편의 크기는 550×150×150 mm이고 휨파괴를 방지하기 위해 철근(2-D10)으로 보강하였다. 여러 개의 박판을 사용하여 다수의 접합면이 있는 RC 보를 제작하고 일반 RC보도 함께 제작하여 전단

강도의 차이를 검토하였다.

- 먼저 Fig. 3-22(b)와 같이 간접적인 방법으로 접합면을 형성하기 위하여 수평방향 및 가로방향 박판을 설치한 상태에서 콘크리트를 타설한 후 60분 후에 박판을 제거하여 새로운 레이어와 이전 레이어 사이의 접합면을 생성하였다. 수평 접합면 유형의 간격(d_1)은 30mm로 선정하였고, 수직 접합면 유형의 간격(d_2)은 35mm 이다. 초결 시간이 100분이므로 박판을 제거한 시간(접합면 형성 소요시간)은 초결의 60%에 해당된다.
- 이렇게 만들어진 시편의 전단강도 실험 결과를 Fig. 3-23에 나타내었다. 본 연구의 표준 RC 보(N 계열)의 최대 하중은 78.9kN(전단강도:39.5kN)으로 측정되었고, 적층된 RC 보는 예상했던 것과 같이 표준 RC 보(N 계열)에 비해 낮은 하중을 보였다.

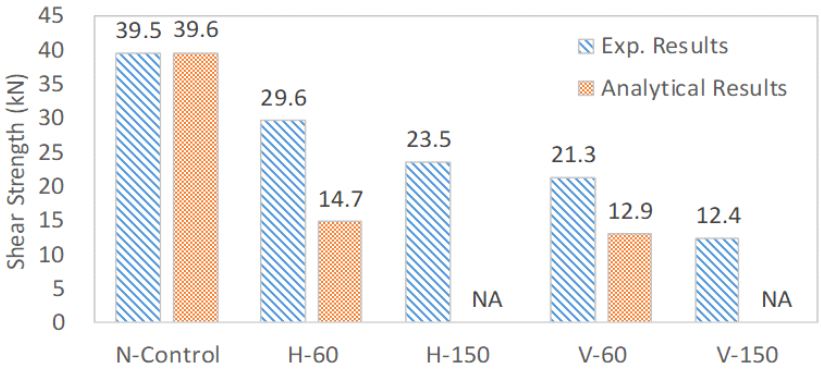


Fig. 3-23 Obtained results of shear strength

- 적층 소요시간이 60분 및 150분인 수평으로 적층된 계열은 각각 59.2kN 및 46.9kN의 최대 하중을 보였으며 N-Control 시편에 비해 각각 25.0%와 40.6%씩 감소하는 경향을 보였다. 마찬가지로, 수직으로 적층된 계열은 각각 42.6kN 및 24.7kN의 최대 하중을 보였고 N-Control 시편에 비해 각각 46.0%와 68.7%씩 감소하는 경향을 보였다. 수평접합면의 면적과 수직접합면의 면적이 동일하다는 조건에서 전단강도의 감소는 접합면 형성 방향에 따라 영향을 받는 것으로 확인된다.
- 또한 수직 접합면이 동일한 접합면 면적 조건에서 더 많은 전단감도 감소량을 보이는데 이는 수평 접합면은 수직 접합면보다 계면에서의 중첩하중(각 층의 자체 중량)이 효과적으로 적용되었기 때문으로 유추해 볼 수 있다. 자중으로 인한 접합면 파괴에너지 및 관련 물성치의 개선효과는 2.5장에서 확인한 바 있다.
- 따라서 수평으로 적층된 시편이 수직으로 적층된 계열보다 전단강도가 높게 나타난 것으로 사료된다. 이러한 실험결과를 검토하고 개발된 전단강도 감소 예측모델을 실험조건과 동일하게 고려하여 모델 검증을 수행하였다.
- 앞서 설명한 바와 같이, 레이어 접합면의 물성치는 Vector 2 프로그램을 이용한 Mode II의 파괴 거동으로써 설계되었다. Fig. 3-23에 도시된 바와 같이, 파괴에너지의 감소되었을 때 전단강도의 감소가 예측되었는데, 측정된 파괴에너지가 Mode I이므로 Mode II에서의 파괴에너지의 감소율은 Mode I에서의 파괴에너지의 감소율과 동일하다고 가정하였다.
- 정상적인 접합경계 조건(100%)의 Bond slip 거동 곡선에서 나온 파괴에너지로부터, 실험적 파괴에너지를 사용하여 접합면에서의 파괴에너지 감소율이 추정되었다. 예를 들어, Fig. 3-23에서 보듯이 접합면의 측정된 파괴에너지는 보통 콘크리트의 72.6%에 이르기 때문에 적층된 접합면에서 72.6%가 고려되었다. 그 결과를 Fig. 3-23에 나타내었고, H-150 및 V-150은 적층 소요시간이 150분인 시편의 파괴에너지가 측정되지 않았기 때문에 검증에서 고려되지 않았다.
- 접합면이 없는 일반 RC 보의 경우 실험 결과와 해석 결과가 매우 유사하게 예측됨(0.25%)

을 확인할 수 있으나 H-60 및 V-60와 같은 레이어를 이루는 콘크리트 보의 경우, 접합면에 의한 전단강도의 감소치를 정확하게 추정할 수 없었다. 주로 해석결과가 실제 전단강도 감소분을 크게 예측하는 것으로 확인된다.

- 이러한 차이는 Mode I과 Mode II 파괴에너지의 저감이 하중경로 즉 생성되는 주요응력의 방향에 따라 서로 다른 거동을 보일 것이므로 이러한 결과가 나온 것으로 추정된다. Mode I에서의 콘크리트 파괴에너지는 72.6%까지 감소되었으나, Mode II 파괴에너지는 Mode I에서의 저감율 만큼 저감되지 않을 수도 있다.
- 개발된 모델은 접합면의 파괴에 대해 주로 Mode II 파괴를 사용하도록 개발되었으므로 몇 가지의 역해석(Reverse analysis)을 수행하여 Mode II 파괴에너지의 감소율을 실험결과를 토대로 예측하였다. 접합면에서 Mode II 파괴에너지의 수준을 조정하여 계산된 전단강도를 실험 데이터와 직접 비교하여 무시할만한 수준의 작은 오차(0.1%)를 보인 경우를 선정하였다.

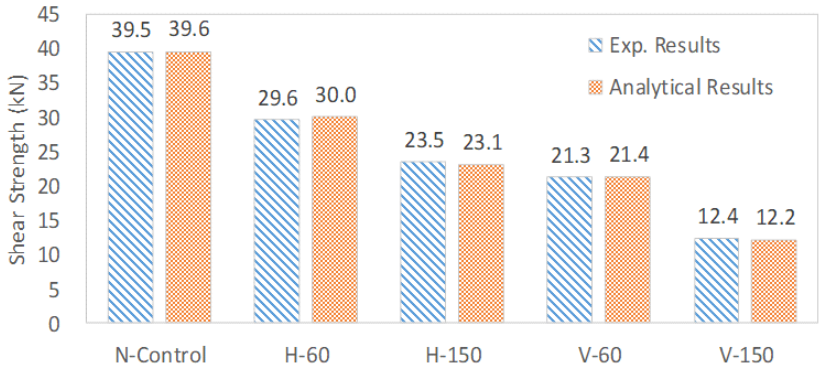
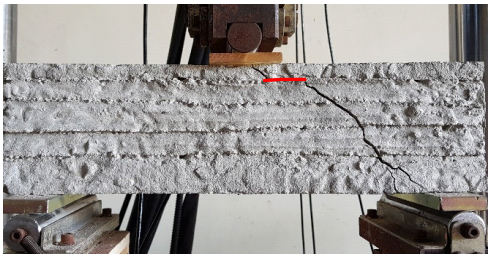
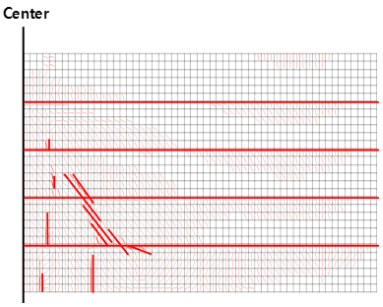


Fig. 3-24 Obtained results of shear strength

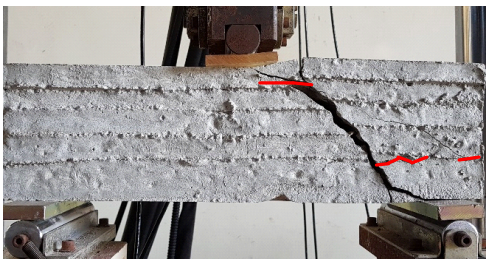
- H-60, H-150, V-60 및 V-150에 대한 Mode II 파괴에너지의 선정된 수준은 각각 본래의 Mode II 파괴에너지의 75%, 40%, 50% 및 26% 이며, 얻어진 결과는 Fig. 3-24에 나타내었다. 따라서 본 연구결과에 의하면 수평으로 적층될 경우 Mode I 파괴에너지가 72.6% 감소되었을 때 Mode II 파괴에너지는 75% 감소됨을 역해석을 통해 확인하였으므로 실험을 통한 Mode I의 감소비율을 Mode II에 그대로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 이와는 다르게 수직으로 적층될 경우에는 Mode I 파괴에너지가 72.6% 감소되었을 때 50% 감소됨을 역해석을 통해 확인하였으므로 실험을 통한 Mode I 의 감소비율에 68.9%의 비율로 Mode II 파괴에너지의 감소를 유추해 볼 수 있다. 그러나 이러한 결과는 모두 60분 미만의 경우, 즉 초결시간의 60% 이내에 해당될 경우에 활용될 수 있을 것으로 예상되며 이후 시간과의 상관관계에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 또한 Mode II 파괴에너지 시험을 통한 본 연구결과의 최종적인 검토도 필요하다. 시험에 사용된 시편의 파괴모드를 분석해 보면 a/d가 1.8이며 전단파괴를 유도하기 위해 철근(2-D10)이 사용되었기 때문에, 모든 보에서의 전단 파괴 Mode가 의도된 대로 얻어졌다.
- 실험과 해석의 균열 패턴을 비교하여 Fig. 3-24에 나타내었다. 감소된 파괴에너지를 갖는 접합면이 균열 패턴에 영향을 미치고 있고, 레이어가 있는 RC 보의 경우 균열이 경계면에 형성된다는 것을 알 수 있다. Fig. 3-24에서, 접합면에 형성된 균열은 적색 선으로 표시하였다. 그러나 적층된 콘크리트 보에서 관찰된 전반적인 균열의 형태는 일반 RC 보의 형태와 여전히 유사함을 알 수 있다. 이는 가장 약한 부분이 접합면에 위치해 있더라도, 주요 균열은 접합면이 아닌 접합면 사이의 중간 부분에 형성될 수 있음을 나타낸다.



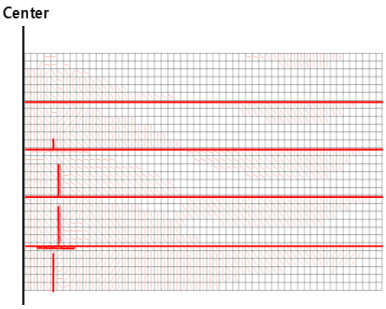
(a) H-60 (experiment)



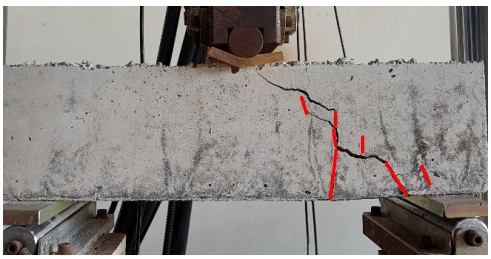
(b) H-60 (analysis, scale 20)



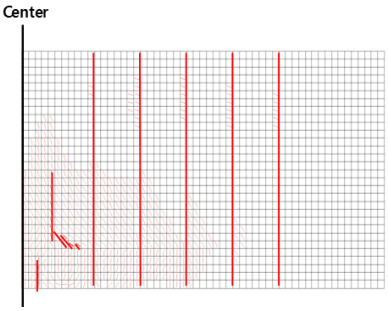
(c) H-150 (experiment)



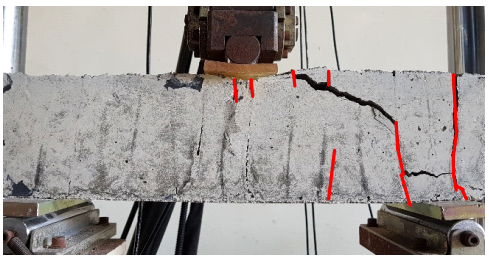
(d) H-150 (analysis, scale 20)



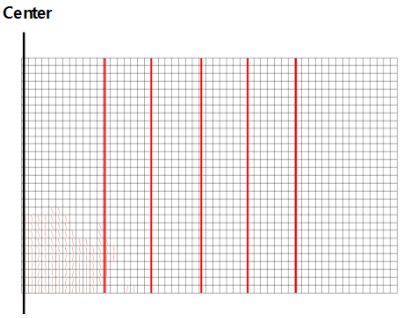
(e) V-60 (experiment)



(f) V-60 (analysis, scale 20)



(g) V-150 (experiment)



(h) V-150 (analysis, scale 20)

Fig. 3-25 Cracked patterns from experiments and analysis

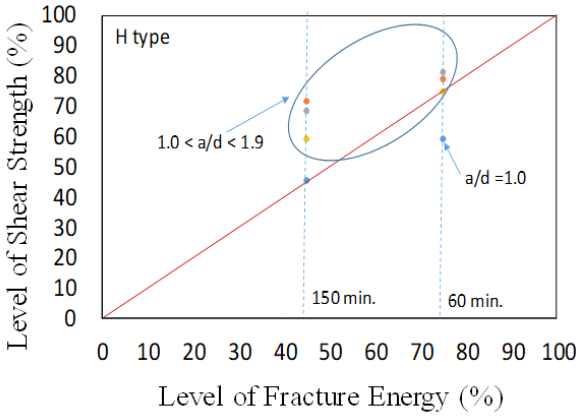
다. 전단강도 저감 해석결과 및 분석

- 일반적인 RC 보가 3D 프린팅 기술에 의해 다수의 접합면을 가지는 형태로 구성되었다고 가정하고 이러한 경우 전단강도의 감소비율을 평가하기 위해 일반적인 RC 보 전단강도 시험 연구 결과(Xie et al. (1994), Yang et al. (2007) 및 Mihaylov et al. (2010))를 분석하고 동일한 조건으로 모델링 하였다. 본 연구의 범위가 전단철근이 없는 접합면을 가진 RC 보의 전단강도 예측과 관련이 있으므로 인장 철근에 의해 다월 작용을 받는 콘크리트의 순수 전단 강도를 확인하기 위해 짧은 보, 즉 스터럽이 없는 a/d가 1.0에서 2.0 사이의 보를 검토 범위로 한정하였다.

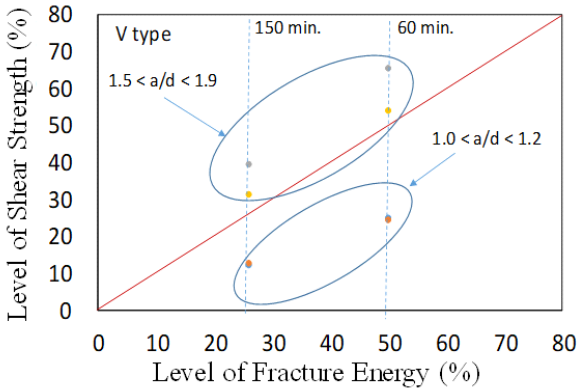
- 따라서, 스터럽을 통한 전단강도에 대한 추가적인 영향은 본 연구에서 고려되지 않았으며, 얻어진 전단강도는 스터럽 없이 작은 골재 맞물림 효과를 갖는 콘크리트의 전단 강도와 스터럽이 없는 다월 거동의 값으로만 계산되어졌다. 마지막으로, 접합면 유무에 따른 RC 보의 전단강도를 예측하고 실험 결과와 비교하였다.
- 다중 접합면이 없는 일반 RC 보의 경우 실험과 해석의 평균적인 차이는 8.67% 로서 개발된 모델은 RC 보의 전단 능력을 매우 잘 예측하였다. 모델 검증 후의 선정된 보는 3D 프린팅 기술로 축조되었고 다중 접합면이 형성된다고 가정하였다.
- 해석을 통한 예측 값을 Table 3-7에 나타냈으며 각각의 상세한 제원은 Xie et al. (1994), Yang et al. (2007) 및 Mihaylov et al. (2010)에 나타나 있다. 앞에서 측정된 Mode II의 파괴에너지 감소 수준(75%, 45%, 50%, 26%)을 수평 및 수직 접합면에 60분 및 150분의 적층 소요시간을 고려하여 보에 적용하여 보았다. 60분 및 150분의 적층 소요시간을 갖는 수평 접합면(H 유형)의 경우 평균 전단강도의 감소량이 각각 33% 및 48%로 예측되었다. 마찬가지로 60분 및 150분의 적층 소요시간을 적용한 수직 접합면(V 유형)의 경우 평균 전단강도의 감소량은 각각 65% 및 80%로 예측되었다.

Table 3-7 구조성능 저감 해석 결과

Authors	Test Specimen	a/d	Elapsed Time (Min)	Exp. V_u (kN)	Predicted V_u (kN)	Differences (%)
Xie et al. (1994)	Ordinary RC beam	1	NA	156	140	10.3
	RC beam w/interfaces (Horizontal)	1	60	NA	83	NA
	RC beam w/interfaces (Horizontal)	1	150	NA	64	NA
	RC beam w/interfaces (Vertical)	1	60	NA	35	NA
	RC beam w/interfaces (Vertical)	1	150	NA	17	NA
Yang et al. (2007)	Ordinary RC beam	1.17	NA	440	410.5	6.7
	RC beam w/interfaces (Horizontal)	1.17	60	NA	326	NA
	RC beam w/interfaces (Horizontal)	1.17	150	NA	229	NA
	RC beam w/interfaces (Vertical)	1.17	60	NA	101	NA
	RC beam w/interfaces (Vertical)	1.17	150	NA	52	NA
Mihaylov et al. (2010)	Ordinary RC beam	1.55	NA	710	646	9
	RC beam w/interfaces (Horizontal)	1.55	60	NA	527	NA
	RC beam w/interfaces (Horizontal)	1.55	150	NA	443	NA
	RC beam w/interfaces (Vertical)	1.55	60	NA	423	NA
	RC beam w/interfaces (Vertical)	1.55	150	NA	255	NA



(a) horizontal type



(b) Vertical type

Fig. 3-26 Level of fracture energy vs Level of shear strength

- 파괴에너지 감소비율과 전단강도의 감소비율에 대한 관계를 Fig. 3-26에 나타내었다. 수평 접합면 유형(Horizontal type)의 경우, 전단 강도의 감소량은 한 경우(Xie et al. (1994)에서 적층 소요시간을 60분으로 설정한 시편)를 제외하고 파괴에너지의 감소량보다 작았다. 따라서 적층 소요시간이 60분 미만인 수평 접합면 유형의 경우 전단강도의 감소량이 파괴에너지의 감소량과 동등하다고 보수적으로 결론지을 수 있었다.
- 역 분석은 적층 소요시간 60분 이내에 75% 수준의 파괴에너지가 접합면에 남아있음을 보여주었다. 따라서 일반 RC 보와 비교하였을 때 수평 접합면이 있는 RC 보는 75% 의 전단내력을 가지고 있을 것으로 예측된다. 그러나 수직 접합면 유형의 경우 Fig. 3-26(b)와 같이 전단강도의 감소량이 a/d에 따라 파괴에너지의 감소량보다 작거나 컸으며, 짧은 보(1.0<a/d<1.2)의 경우 1.5<a/d<1.9의 범위에 있는 RC 보에 비해 전단강도의 감소율이 상대적으로 더 컸다. 따라서 a/d가 1.2보다 작은 짧은 보는 3D 프린팅 적층기술로 제작되었을 경우 접합면의 물성치가 크게 저감될 것으로 예상된다. 그러나 1.5보다 큰 a/d 의 범위를 갖는 보는 파괴에너지의 감소량에 비해 전단 강도의 감소량이 적었다.

4. 3D 프린팅 콘크리트 구조물의 구조성능 개선을 위한 제안사항

가. 접합면을 갖는 콘크리트와 RC보에 대한 파괴에너지 예측식 및 전단 감소 계수의 제안

- 적층소요시간에 따른 파괴에너지 측정 실험결과를 토대로 파괴에너지를 예측할 수 있는 식을 제안하였다. 제안된 식은 Bazant and Becq-Giraudon (2002)의 연구에서 제시하는 식을 기반으로 적층시간을 추가하여 다음과 같이 제안하였으며, 해당식은 압축강도, 골재치수 및 물-시멘트비 등의 다양한 변수를 적용할 수 있다.

$$G_f = 2.5t^{-0.063}\alpha_0\left(\frac{f'_c}{0.051}\right)^{0.46}\left(1+\frac{d_a}{11.27}\right)^{0.22}\left(\frac{w}{c}\right)^{-0.30} \quad (2)$$

G_f : 파괴에너지

t : 적층소요시간 (min) (maximum 60min)

α_0 : Rounded aggregates = 1, Crushed aggregates = 1.44, Angular aggregates = 1.12

d_a : 골재치수

$\frac{w}{c}$: 물-시멘트비

- 다만 위의 식은 31.85MPa의 압축강도 조건에서 적층소요시간 60분을 기준으로 제시한 식이며, 접합면 경화과정이 일반콘크리트와 상이할 것으로 예상되므로 반드시 실험을 통한 수식의 추가적인 검증 및 보정이 필요하다.
- Fig. 3-26에 나타난 데이터의 분석을 통해 3D 프린팅 기술로 형성된 다중 접합면을 갖는 RC 보에 대한 전단 감소 계수를 다음과 같이 제안하였다(Table 3-8). 수평 및 수직 유형과 같은 접합면 유형 및 초결 시간 대비 60% 및 150%와 같은 적층 소요시간에 따른 감소 비율이 계산되었으며 본 연구에서 사용된 보의 전체 부피 대비 접합면 면적가 유사한 경우에 인장철근의 존재로 인해 다월 작용을 하는 짧은 RC 보(1.0<a/d<2.0)의 전단 강도를 추정하기 위하여 위와 같은 전단강도 감소율을 사용할 수 있다.
- 콘크리트의 최종 경화 시간(220분) 전에 접합면이 형성되어야 하며, 제안된 전단 감소 계수는 습도, 온도 및 시멘트의 특성과 같은 많은 환경 조건에 따라 달라질 것이므로 다양한 인자에 대한 상호 영향을 확인하기 위해서는 추가적인 실험적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

$$V_{c.layered} = \alpha V_c \tag{3}$$

V_c : 스터럽이 없는 RC 보의 전단강도

α : 전단 감소 계수 (Table 3-8 참조)

$V_{c.layered}$: 접합면이 있는 RC 보의 전단강도

Table 3-8 Proposed shear reduction factors for RC beam without stirrups

Interface Type	Normalized elapsed Time (Min)	Range of a/d	Shear Reduction Factor (a)
Horizontal	60	1.2 < a/d < 1.9	0.75
	150	1.0 < a/d < 1.9	0.45
Vertical	60	1.5 < a/d < 1.9	0.5
	150	1.5 < a/d < 1.9	0.26
	60	1.0 < a/d < 1.2	0.25
	150	1.0 < a/d < 1.2	0.12

*Normalized elapsed time: Elapsed time divided by initial setting time (100 min) of the concrete.

- 제시된 전단감소 계수를 화재에 의해 손상된 철근콘크리트 보의 전단감소(Seo et al. 2010)와 비교하고 이를 Table 3-9에 나타냈다. 본 연구에서는 동일한 조건(전단감소 계수)으로 비교하기 위하여 Seo et al. (2010)의 전단 실험결과를 계수로서 표현하였다.
- 기타 요건(화재)에 따른 RC보의 전단강도 감소 비율과 적층시간 지연으로 인한 3D 프린팅 구조물의 전단강도 감소 결과를 비교해본 결과, 적층소요시간이 높은 3D 프린팅 구조물의 전단감소가 화재에 의한 전단감소를 크게 초과할 수도 있는 것으로 확인된다. 따라서 3D 프린팅을 이용한 콘크리트 구조물 시공 및 설계시 적층소요시간이 길어지지 않도록 하여야 하며, 본 연구에서는 전단 강도 감소를 방지할 수 있는 3D 프린팅 노즐속도를 다음 장에 제시하였다.

Table 3-9 Shear reduction factors depending on elapsed time and fire exposure time

Interface Type	Conditions	Range of a/d	Shear Reduction Factor (a)
Horizontal	Normalized elapsed time : 60min	1.2 < a/d < 1.9	0.75
	Normalized elapsed time : 150min	1.0 < a/d < 1.9	0.45
Vertical	Normalized elapsed time : 60min	1.5 < a/d < 1.9	0.5
	Normalized elapsed time : 150min	1.5 < a/d < 1.9	0.26
Seo et al. (2010)	Fire exposure time : 60min	1.5	0.82
	Fire exposure time : 120min		0.72

나. 3D 프린팅 콘크리트 구조물 노즐 속도 제안

- 상기 기술한 실험결과를 분석하면 3D 프린팅 콘크리트 구조물 접합면의 노출시간이 60분일 경우 구조성능이 최대 65% 감소하는 것으로 예측되어 구조물의 적층시간은 60분 이내로 하는 것을 목표로 노즐 속도를 제안하였다. 따라서 노출시간을 고려하여 구조물의 크기(노즐이 한층의 레이어를 완성하는데 움직인 거리)에 따른 3D 프린팅 콘크리트 노즐의 최소 속도를 아래와 같이 제시하였다.

$$V_n = 0.85e^{0.029L_s} \quad (4)$$

V_n : 노즐의 속도 (m/min)

L_s : 구조물의 길이 (m)

- 제안된 식은 일반적인 RC 보에 적용될 수 있으며 접합면의 수와 면적이 본 연구에서 선정하여 사용한 면적과 다를 경우에 대해서 추후 실험을 통해 제안식의 개선이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시한 브릿징 재료를 활용할 경우 브릿징 재료 효과에 따라 노즐의 속도를 현저히 줄일 수 있을 것이며 감소된 속도는 강도의 저감을 최소화 하면서 보다 상세한 3D 구조물의 축조가 가능하게 할 것이다.

5. 결론

가. 3D 프린트로 축조된 레이어 접합면 재료물성치 평가 결론

- 상부하중에 따른 쪼갬인장강도 분석결과 상부하중이 적합면에 작용하여도 부착성능 증대 등의 뚜렷한 경향성은 없는 것으로 확인되었다.
- 3D 프린트로 콘크리특 구조물 축조시 발생되는 접합면의 비접합면 형성시간이 증가함에 따라 쪼갬인장강도는 최대 54% 감소하는 것으로 확인된다. 따라서 레이어 간의 적층에 소요되는 시간이 증가할수록 부착성능이 저하되며 이러한 인장강도의 감소는 콘크리트 구조물의 초기 균열 발생시점에 영향을 줄 것으로 판단된다.
- 파괴에너지의 크기를 구성하는 최대 균열폭(W_c)와 꼬리상수(A)값에서, 레이어의 적층 소요 시간이 증가함에 따라 균열폭이 최대 40% 감소하며 꼬리상수(A)는 최대 80%감소 하는 것으로 나타나 구조물의 전체적인 성능저하가 발생할 것으로 예상된다.
- 쪼갬인장강도는 작용하는 상부하중에 대해서는 뚜렷한 경향성이 없었으나 파괴에너지는 상재하중이 증가함에 따라 최대 균열 폭(W_c)은 최대 88% 증가하고 꼬리상수(A)는 최대

57%까지 증가하는 것으로 확인되었다.

- 자중발생에 의한 평균 진파괴에너지 G_F와 크기효과 파괴에너지 G_f는 각각 135.65 N/m와 40 N/m이며 자중을 고려하지 않은 시편의 진파괴에너지와 크기효과 파괴에너지는 각각 88.73 N/m 와 18.0 N/m로 나타나 파괴에너지의 경우 상재하중에 영향을 받음을 보였다.
- 레이어 적층에 소오되는 시간이 60분인 시편에서는 30분 이하 시편보다 하부 레이어에서 경화가 더 많이 진행되어 상부 레이어와의 일체성이 급격하게 저감(최대 73 %의 파괴에너지 감소)되는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 볼때에 초결(100분)시간 대비 2/3의 시간이 경과한 이후에는 경화에 의한 파괴에너지의 감소가 현저한 것으로 확인되었다.
- 일반콘크리트 시편(C-0)의 파괴에너지 값을 표준 비교인자(100%)로 가정하였을 때, 강섬유(S), 골재(A) 및 경화 지연제(R)를 사용하였을 시에 파괴에너지의 값은 적층 소요시간이 30분에서 각각 328%, 95% 및 45.2%, 60분에서 각각 286.7%, 48.9% 및 34.4%의 수준으로 나타났다.
- 종합적으로 강섬유 및 골재와 같은 브릿징 재료는 콘크리트 레이어 사이의 접합면에서 파괴에너지 감소를 억제함으로써 전반적인 구조적 성능 저감을 방지할 수 있었다. 골재는 적층소요시간이 경과되었음에도 최종적으로 파괴에너지를 원래 수준으로 유지하는 것으로 나타났다. 그러나 경화 지연제는 적층 소요시간이 증가함에 따른 파괴에너지의 감소를 효과적으로 유지하지 못하였다.
- 브릿징 재료에 따른 접합면의 일체성을 확인한 결과 본 연구에서 제시하는 50% 일체성 개선을 위한 브릿징 재료는 골재와 강섬유를 적용하였을 경우 도달 할 수 있는 것으로 나타났다. (Control: 33.9%, Aggregate: 60.5%, Steel fiber: 286.7%)
- 본 연구에서 적층 소요시간 및 자중의 여부에 대해 3D 프린팅 기술로 축조된 콘크리트 레이어의 물성치를 평가하였으나, 콘크리트 레이어 자체의 공극에 대한 체적 변수와 콘크리트 상·하부가 완전히 맞닿는 시간에 대한 변수까지도 추후 연구에 고려되어야 할 것으로 사료된다.

나. 3D 프린트로 축조된 구조물 구조성능 평가 결론

- MCFT 이론을 바탕으로 접합면을 접합요소(Contact element)에 파괴에너지를 입력값으로 고려하여 다중 접합면을 가지는 RC 보(3D 프린팅 기술로 축조된 RC구조물)의 전단 강도를 예측하는 해석모델을 개발하였다.
- 모델 검증을 수행한 결과 전단 강도의 차이가 실험값과 비교하여 평균 0.1% 미만의 오차가 발생하여 일반 RC 보 모델에서는 매우 유사하였다. 기존 문헌(기존 실험결과)을 참고하여 해석결과를 비교하였을 경우에도 일반 RC보에서는 평균 9% 미만의 오차를 나타내어 개발된 해석모델은 3D 프린팅 기술로 축조된 RC구조물의 전단강도를 만족스럽게 예측할 수 있는 것으로 나타났다.
- 레이어가 수평으로 적층된 경우 Mode I의 감소비율만큼 Mode II의 감소가 예측되나 수직으로 적층된 경우 Mode II가 Mode I대비 68.9% 감소되었다.
- 파괴에너지 시험 결과로부터 전단철근 없이 다수의 접합면이 있는 RC 보의 전단강도 감소량이 측정되었다. 접합면 파괴에너지가 감소되어 일반 RC 보의 거동에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 최종적으로, 초결 시간의 60% 에서 수평 접합면에 대한 전단 강도는 평균 33% 감소되었고, 수직 접합면에 대한 전단 강도는 65%로 감소되는 것으로 나타났다.
- 60분 및 150분의 적층 소요시간을 갖는 수평 접합면(H 유형)의 경우 평균 전단강도가 각각 33% 와 48% 감소되는 것으로 예측되었다. 수평접합면(V 유형)의 경우 60분 및 150분의 적층 소요시간에서 평균 전단강도는 각각 65% 와 80% 감소하는 것으로 예측되었다.
- 보의 경간 대 깊이의 비율(a/d)과 초결시간에 대한 적층 소요시간 비율에 따른 전단 감소계수를 제안하였으며 수직 접합면 유형(65% 및 80%)은 수평 접합면의 유형(33% 및 48%)

보다 전단강도가 더 감소되는 것으로 나타났다.

- 본 연구에서는, 적층식 콘크리트 구조물의 접합면에서 Mode II 파괴에너지의 감소량을 개발된 해석모델을 이용한 역분석을 통하여 추정하였다. 향후 연구에서는 접합면의 Mode II 파괴에너지를 직접 측정하여 이를 개발된 모델에 적용시킴으로써 개선된 전단감소계수 제시가 가능 할 것으로 예상된다.

다. 3D 프린트 적층 기술 및 시공방법 제안

- 본 연구의 결과를 종합적으로 분석하여 접합면을 갖는 RC보에 대한 전단 감소 계수를 제안하였다. 제안된 전단 감소 계수는 레이어 방향과 레이어 적층 시간 그리고 보의 경간대 깊이비(a/d)에 따라 다른 계수를 사용하도록 제안하였다.
- 제안된 전단 감소 계수는 습도, 온도 및 시멘트의 특성과 같은 많은 환경 조건에 따라 달라질 것으로 예상되며 다양한 인자에 대한 상호 영향을 확인하기 위한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.
- 본 연구의 결과를 분석하여 3D 프린팅을 이용한 콘크리트 구조물 축조시 구조물의 크기에 따른 노즐의 최소 속도를 제안하였다.
- 제안된 식(노즐의 최소 속도)은 일반적인 RC 보에 적용될 수 있으며 접합면의 수와 면적이 본 연구에서 선정한 제원과 다를 경우에 대한 추가적인 실험이 필요하며 실험결과를 활용하여 제안식의 개선이 필요할 것으로 판단된다. 다만 본 연구에서 제시한 브릿징 재료를 활용할 경우 일체성이 개선되므로 노즐의 속도를 현저히 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 성과점검기준표

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과	성과점검기준							양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정 방법	검증방법	가중치	
주관	1	3D 프린트로 축조된 레이어 접합면 재료물성치 평가	A-1	①	선행연구 사례조사	100	100	진행 경과	실험계획수립		특허 : 출원 1 건 등록 1 건 국외논문 : 건 국내논문 : 건 시제품 : 건 S/W : 건
				②	실험변수 선정	100	100	진행 경과	실험계획 및 해석모델 계획서		
				③	인장강도, 파괴에너지 실험 셋업	100	100	진행 경과	실험셋업		
				④	인강강도, 파괴에너지 실험 수행	100	100	진행 경과	재료적 저항성능		
				⑤	실험결과 분석	100	100	진행 경과	접합면 재료물성치 평가		
	2	3D 프린트로축조된 구조물 구조성능 평가	B-1	①	선행연구 사례조사	100	100	진행 경과	해석계획수립		특허 : 출원 건 등록 1 건 국외논문 : 1 건 국내논문 : 건 시제품 : 건 S/W : 건
				②	구조성능 평가모델 개발 및 검증	100	100	진행 경과	해석모델개발		
				③	3D 프린트로 축조된 구조요소의 성능감소 평가	100	100	진행 경과	구조성능 파악		
				④	기존 설계기준 적용 평가식 개발	100	100	진행 경과	설계기준 적용성 평가		
	3	3D 프린트 적층 기술 및 시공방법 제안	C-1	①	선행연구 사례 조사	100	100	진행 경과	최적설계계획 수립		특허 : 출원 1 건 등록 1 건 국외논문 : 건 국내논문 : 1 건 시제품 : 건 S/W : 건
				②	3D 프린팅 개선기술 개발(골재, 강섬유, 화학혼화재 등)	100	100	진행 경과	파괴에너지 개선 효과를 실험적 해석적 규명		
				③	3D 프린팅 적층방법 제시	100	100	진행 경과	3D 프린팅 최적 설계방법		
계											특허 : 출원 2 건 등록 3 건 국외논문 : 1 건 국내논문 : 1 건 시제품 : 건 S/W : 건

나. 정량적 연구성과 목표 및 달성도

구분			최종성과목표	성과	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI		2	1	50%	최소성과목표 달성
	비SCI					
	계		2	1	50%	최소성과목표 달성
국내 논문 게재	SCI					
	비SCI		2	1	50%	최소성과목표 달성
	계		2	1	50%	최소성과목표 달성
특허 출원	국내		2	2	100%	
	국외					
	계		2	2	100%	
특허 등록	국내		1	3	100%	
	국외					
	계		1	3	300%	
인력 양성	석사			2		석사졸업 1인 석사졸업 예정(8월) 1인
	박사			0		박사수료
	계			2		
기술 이전	계약 건수					
	계약액					
	징수액					
국제 표준화	기고서 제출					
	기고서 채택					
	표준안 채택					
국내 표준화	기고서 제출					
	기고서 채택					
	표준안 채택					
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문					
	연구시설·장비					
	기술요약정보					
	생명자원	생명정보				
		생물자원				
		신품종				
	소프트웨어					
	화학물					
기타	시제품					
	성과 홍보					
	일자리 창출					

2. 관련 분야 기여도

- 3D 프린팅 기술을 건설 분야에 접목시켜 건설 현장의 인력 재배치를 통한 비효율적인 건설산업 요소를 개선할 수 있을 것으로 판단된다.
- 건설 분야의 저효율 구조를 개선함과 동시에 국가 경쟁력 향상은 물론 기술력 선점에 큰 역할을 할 것으로 판단된다.
- 브릿징 재료를 활용하여 접합면의 물성치 개선은 기계공학 및 재료공학 등 타 분야와의 융합을 도모할 수 있으며 각 분야의 창의적인 결론을 도출할 수 있을 것으로 예상된다.
- 또한 관련 분야의 신성장을 기대할 수 있으며 이는 종합적으로 3D 프린팅 분야의 기술력 제고에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.
- 본 연구 결과를 활용하여 3D 프린팅 기술을 이용한 건설 산업의 구조성능 개선에 기여할 것으로 기대되며 이는 곧 국민안전증진에 영향을 줄 것으로 기대된다.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

- 본 연구의 최종성과물은 3D프린팅 장비 가동시 노즐의 움직임 등을 제어에 활용될 수 있다.
- 특히 시험체를 제작하기에 앞서 노즐의 움직임과 사출시 유압, 평면과 수직으로의 움직임 등을 상세하게 결정할 필요가 있으며 현재까지는 구조물의 단면 형상만 고려하여 이러한 축조방향, 배열, 높이 등이 결정되었으나 본 연구결과를 활용하면 구조적 강성 및 내구성까지 고려한 노즐의 움직임 설계(즉 노즐의 속도 제어를 통해)가 가능할 것으로 예상된다.
- 본 연구결과를 실제 3D 프린트 축조실험에 적용하여 실제 축조된 구조물의 구조적 일체성을 검증하고 3D 프린트의 구조와 노즐 설계 및 관련 정밀기기와 설계 알고리듬 등에 중요한 참고자료로 활용될 것이다.
- 3D 프린팅 기술로 축조된 구조물의 저감된 구조성능을 실험적으로 규명하여 구조재료의 안전성을 개선함으로써 3D 프린팅 기술의 건설분야 적용을 앞당길 것이며 이에 따른 관련 신산업 창출 즉 3D 프린팅 하우스 산업, 3D 프린팅 프리캐스트 산업, 관련 장비 및 설치 산업, 건설 원가 절감에 따른 수요촉진, 토목분야 확대 등이 예상된다.
- 3D프린트 기술을 통해 콘크리트구조물이 건설될 경우 다음과 같은 환경저감 효과가 예상된다. (CO2는 기존 건설방식 대비 75%이상 저감, 건설 폐기물은 86% 저감)
- 3D 프린팅은 기계공학과 재료공학을 중심으로 개발되어 왔으므로 3개 학문분야(건설, 기계, 재료)의 융합도 함께 도모할 수 있다.
- 본 연구 결과는 창의적 연구 주제 발굴 및 국가 신성장 동력으로 추진될 3D 프린팅 분야의 기술력 제고에 영향을 줄 것이라 판단된다.
- 3D 프린팅 기술이 활성화 되면서 건설업 산업재해(인명피해 등)를 획기적으로 줄일 것으로 기대된다.
- 본 기술은 3D 프린팅 산업의 확산(25% 이상으로 예상)을 가져와 건설현장 관리 및 감독 인력을 보다 경제적으로 배치하도록 함으로써 비효율적 건설산업요소를 개선할 것이다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 파괴에너지 측정 (ACI 446 (2009), RILEM (2007))

- 실험 결과를 이용한 파괴에너지 산정 방법은 2009년 초안 작성된 a draft ASTM test standard (ACI 446 2009) for the fracture toughness와 RILEM(2007)에서 제시된 방법을 따랐으며 아래 Fig. 6-1에 이를 요약하여 Flow-chart로 나타내고 과련 내용을 정리하여 설명하였다. 본 연구에서 측정한 파괴에너지는 측정된 실험데이터를 이용하여 다음의 과정에 따라 계산된 값이다.

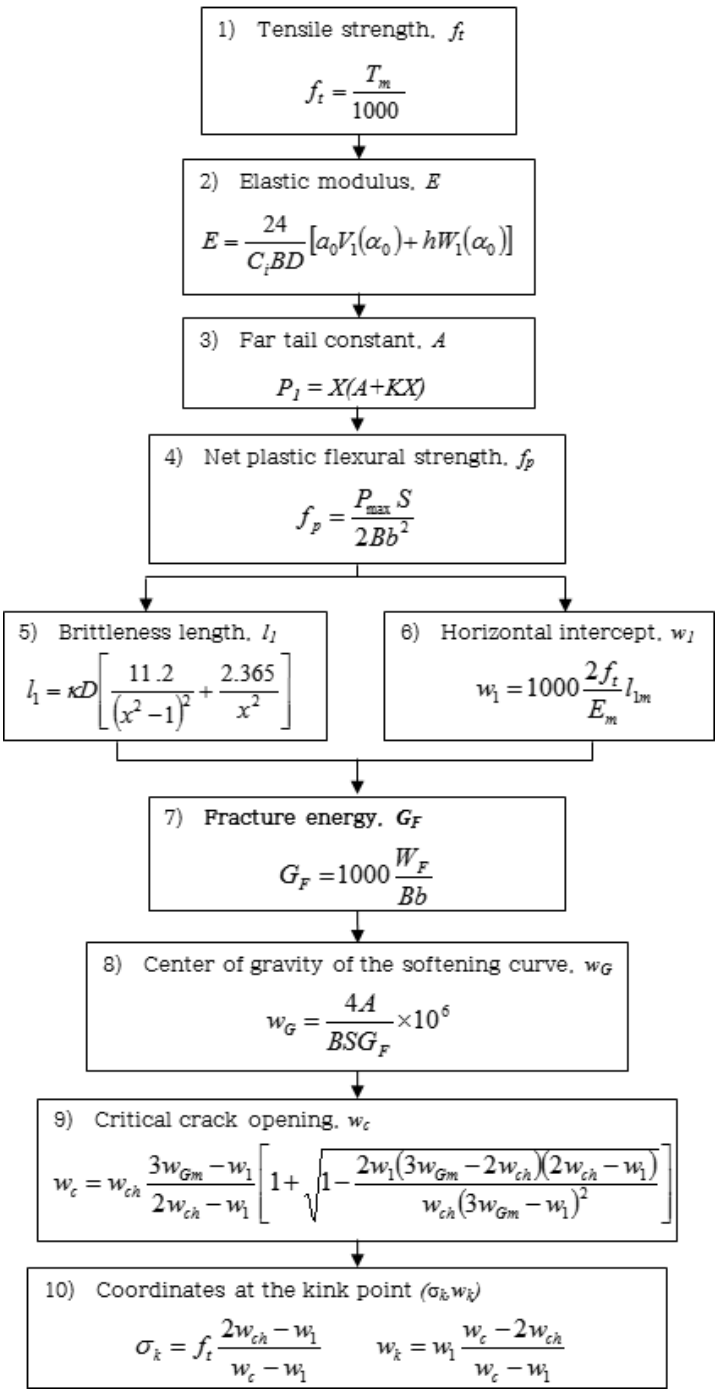


Fig. 6-1 파괴에너지 산정 과정 (Park (2018), ACI 446 (2009), RILEM (2007))

- W_F는 총 에너지, W_{FM}은 2 mm까지 측정된 에너지, A는 꼬리상수 값(Far tail constant),

δ_R은 그림과 같이 종료된 시점에서의 변위 값, δ_A는 파괴에너지 실험 중 상승구간의 커브가 하중(P1)이 0인 x축과 만나는 CMOD 값(mm)을 나타낸다.

- 실험에서 시험체의 양 끝단에 원기둥형 추가 고정하중으로 시편에 전달되므로 2 mm 변위에서도 하중은 고정하중으로부터 전달되는 일정한 상향력을 포함하고 있다. 따라서 이러한 상향력을 상쇄시키기 위해 Fig. 6-2와 같이 시험 종료 시점에서 하중이 0이 되도록 데이터의 offset이 필요하며 이 과정에서 δ_A를 확인할 수 있다.
- 실험 종료 이후의 잔여파괴에너지를 예측하기 위해서 ACI 446 (2009)에서 제시하는 아래의 식을 사용한다.

$$P_1 = X(A + KX) \tag{5}$$

- 여기서 P_1은 측정된 하중 값에서 잔류하중을 제외한 값으로 나타내며 X는 아래의 식과 같다.

$$X = (W_M - W_{MA})^{-2} - (W_{MR} - W_{MA})^{-2} \tag{6}$$

- W_M은 측정된 CMOD값(mm)이며 W_{MR}은 시험이 종료되었을 때 측정된 CMOD값(mm)이다.
- P1과 X에 대한 그래프를 나타내고 X에 대한 2차식으로 A값을 추정한다. 이때 그래프에 그려지는 영역은 전체 곡선 중 최대하중($P1_{max}$)의 5% 미만의 데이터만을 활용하며 따라서 본 연구에서는 이를 꼬리상수라고 명하였으며 미국 ACI 446기술위원회는 Far-tail constant로 명한다.
- X는 CMOD값 자승의 역수로 이는 하중 P1과 일정한 상수 A로 관계될 수 있는데 Petersson (1981)에서 최초로 하중(P)-변위(u) 그래프가 u^{-2}에 따라 점근적으로 감소함을 보인 연구결과를 토대로 구성된 식이다. Petersson(1981)은 강체의 동적 영향을 무시한 평형식(Kinematic equilibrium)으로부터 하중은 변위의 자승에 반비례함을 아래 식과 같이 제시하였다.

$$P = \frac{bs}{4u^2} G_F \overline{w} \tag{7}$$

- 여기서 P는 하중, b는 시험체의 폭, s는 지간거리, u는 변위(처짐량), G_F는 파괴에너지, $\overline{w}$는 에너지 그래프 연화곡선의 무게중심(center of gravity)의 x축 좌표를 뜻한다.

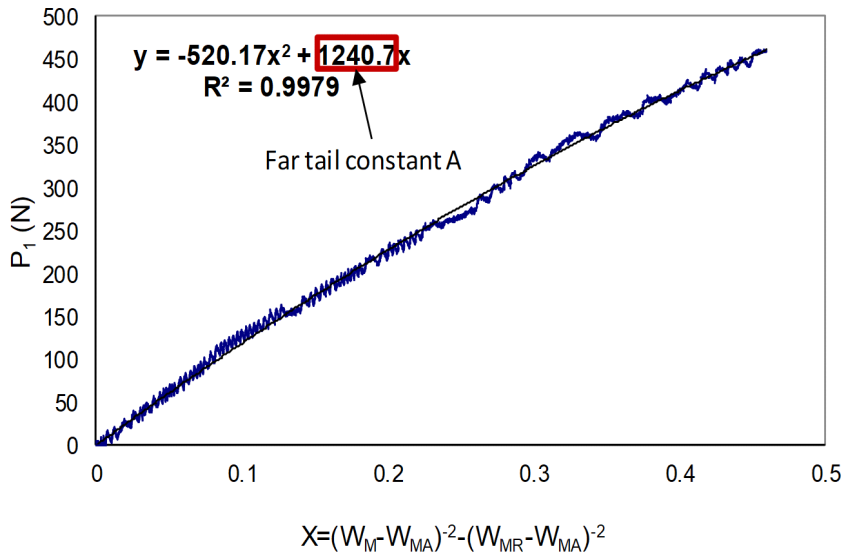


Fig. 6-2 꼬리상수의 추정 (본 연구에서 수행된 실험)

- W_{MA}는 증가하는 곡선에 속한 P1값 중 0인 값에 대한 CMOD값(mm)을 나타내며 이를 이

용하여 P_1과 X값을 그래프에 도시하면 Fig. 6-2와 같이 나타낼 수 있다.

- 이후 추정된 A값을 Fig. 6-2에 제시된 식에 대입하여 측정된 에너지(W_{FM})에 추정된 잔여 에너지가 더해진 총 에너지(Total Energy, W_F)를 측정
- 기본적인 이론은 Hillerborg (1979)의 이론을 발전시킨 Planas et al. (1999)와 Guinea et al. (1994) 에 의해서 제시되었다.
- 3점 휨 시험과 쪼갬인장시험을 통해 측정된 값은 최종적으로 공학적인 목적으로 활용되기 유용한 2중 선형 연화 응력-균열폭의 관계로 Fig. 6-3과 같이 결정된다.
- Fig. 6-3의 그래프에서 f_t는 쪼갬인장시험을 통해 추정할 수 있으며 이후 꺾인점(Kink point)과 응력이 사라지는 순간의 균열폭(w_c)은 전술한 3점 휨시험을 통해 결정되고 이것을 토대로 진파괴에너지 G_F와 크기효과 파괴에너지 G_f의 크기를 결정할 수 있다.
- 진파괴에너지 G_F는 응력-균열폭의 관계로 이루어진 이중선형곡선의 단면적으로 결정되며, 크기효과 파괴에너지 G_f는 이중선형곡선의 초기 부분에 대한 선형 근사치의 값을 나타내는 값이고 측정된 쪼갬인장강도 (f_t)와 수평 절편(w_1)의 단면적으로서 결정된다. Gerstle(2010)에 의하면 본 연구에서 사용된 크기의 시편과 전술한 실험과정에 따를 경우 크기효과가 포함되지 않은 순수한 실험결과를 얻을 수 있다고 설명한다.

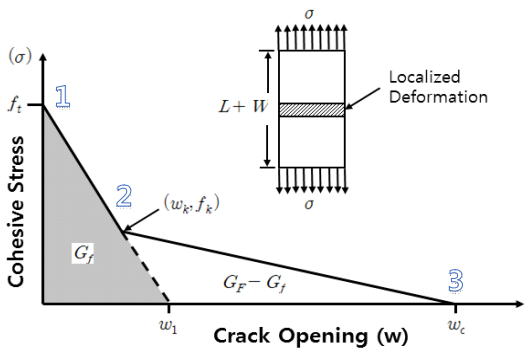


Fig. 6-3 Bilinear approximation of the softening curve (Coronado and Lopez, 2008)

제7장. 연구개발성과의 보안등급

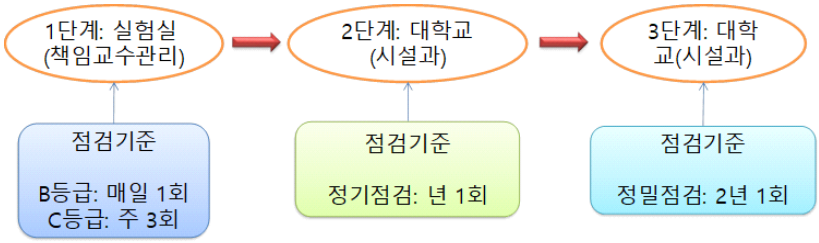
보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	연구내용이 대부분 일반적인 내용을 포함하여 특별히 보안등급으로 분류되지 않음	

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
해당없음								

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 기술적 위험 요소 분석, 안전 관리 대책



- 토목 구조실험실은 이화학 실험을 수행하지 않으며 본 연구에서도 수행계획이 없어 A나 B등급에 해당되는 재료는 없으나 소규모의 인화성 시약이 있는경우(B등급) 특별 관리(매일 1회)를 실시
- 대학교 전담부서인 시설과에서는 매년 1회의 정기점검을 실시하고 있으며 실험실의 안전등급을 A등급에서 E등급으로 분류하고 개선 조치하도록 한다.
- 정밀안전진단은 전담부서인 시설과에서 2년 1회 수행하고 있으며 본 연구실은 해당사항이 없다.
- 관리위험등급의 지정은 다음과 같다.
- A 등급 : 가연성가스, 인화성 시약, 유해화학물질, 다량의 폐액배출, 독극물, 생물 및 동물, 방사성 동위원소,위험성이 높은 기계장비가 설치된 실험실
- B 등급 : 일반시약, 소규모 인화성 시약, 불연성가스, 소량의 폐수발생실험실
- C 등급 : 이화학실험을 수행하지 않는 전기, 설계, 컴퓨터 관련 실험실

※ 토목구조실험실은 A등급에 속하는 장비 및 재료가 없으며 대부분의 재료 및 장비는 C등급

- 실험실 안전교육 훈련
- 개요 : 실험 수행시 발생할 수 있는 사고를 예방하고 실험실의 위험요소들을 조기에 발견하여 연구종사자의 건강을 보호하고 연구성과를 극대화하기 위하여 대학교의 시설 담당부서 및 산학협력단과 협의하여 다음의 교육을 실시할 계획
- 교육대상 : 소속 연구활동종사자(연구책임자, 연구보조원), 대학생(대학원생 포함)
- 교육내용 : 실험실 화재, 실험장비 안전사고, 화학약품 폭발사고 등에 대한 대응 훈련 및 안전조치
- 보험 가입 현황

보 험 명	보 상 내 용	대 상	주관부서
연구실안전공제 (교육시설재난공제회)	사망시 1억원 일반상해 치료비 최대 1000만원 후유장애 14등급으로 차등지급 최대 1억	대학생 대학원생 연구원	시설과
플러스교육기관보험 (LIG손해보험)	보상한도: 1인당 1억 대인사고: 5억 대물: 2000만원 학생치료비 지원 : 200만원 학생사망 및 후유장애: 1000만원	학부생, 대학원생	학생복지과
공무원교직원단체보험 (LIG손해보험)	생명상해: 5000만원, 1억원 입원의료비: 최대 1000만원/1회	교직원	총무과

2. 추가 이행

- 실험실에 별도의 소화설비 설치 : 실험장비 안전사고 등을 대비한 별도의 소화설비 설치
- 실험실 비상연락책 설치 : 실험실 안전사고 발생을 대비한 비상연락책 설치
- 자체 안전관리규정 작성 및 준수 : 실험 수행전 안전관리규정 항목 재확인 후 실험 수행
- 위험 장비 특별관리 : 전기 톱, 드릴, 못 등이 수행원에 상해를 입히지 않도록 적절한 사전조치 및 특별 관리 실시
- 과제 참여기간 동안 연구과제 참여인원은 물론 소속인원 모두 아래와 같이 반기당 6시간 이상의 안전교육을 수행하였음
- 안전교육 내용 : 실험실 화재, 실험장비 안전사고, 화학약품 폭발사고 등에 대한 대응 훈련 및 안전조치

안 전 교 육 일 지

결재	작성자	연구실 책임자
	김경진	이재하

2017년 12월 14일 목요일

건 물 명	공과대학 2호관	실 번 호	610호
소 속	건설공학 학부(과)	실 명	콘크리트구조연구실

교육구분	① 정기(수업 전, 후) ②신규 ③특별교육		
교육장소	610호	실험실습 과목명	철근콘크리트실험
교육일시	2017년 12월 14일 (13 : 00 ~ 16 : 00)		

교육인원	대상자	참석자	불참자	불참사유
	24명	24명	명	

교육내용

<세부교육내용>
실험실 내 안전사고 유의
실험실 전기 안전 (콘센트 사용 안내, 미사용 실험기기 전원관리)
소화기 위치 인지
실험장비 숙지
실험실 환경미화
비상시 대피도 숙지

참석자 확인

참석자	서명	참석자	서명
이재하	이재하	전현욱	전현욱
김경진	김경진	정동근	정동근
박상민	박상민	한상길	한상길
박현지	박현지	정승주	Jeong
강준	강준	신예원	신예원
문명기	문명기	권남오	권남오
이주형	이주형	라현주	라현주
이준형	이준형	박상우	박상우
이학주	이학주	남훈	남훈
임고은	임고은	오윤지	오윤지
김영민	김영민	이민아	이민아
정수인	정수인	조재현	조재현

【참고사항】

○ 정기교육 총 교육 시간
· 정밀안전대상실험실 : 반기 6시간 이상 , 정밀안전대상 외 실험실 : 반기3시간 이상

○ 신규·특별교육 : **신규 연구활동종사자(대학생·대학원생 등) : 2시간**
중대 연구실사고 발생 및 연구내용 변경 등의 경우 : 2시간

○ 교육실시 후 1주일 이내 작성(3년간 보존)

○ **참석자 확인은 자필 서명**으로 하고 필요 시 별도 첨부 가능

○ 가급적 교육사진, 기타 증빙자료 등을 일지 뒷장에 첨부

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부 (단독사사 또는 중복사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Evaluation of Shear Strength of RC Beams with Multiple Interfaces Formed before Initial Setting Using 3D Printing Technology	한국해양대학교	주저자	Materials	2.654	2017.11.24	단독	SCI(E)/2회인용
2	논문	적층 소요시간에 따른 초결 전 형성된 콘크리트 접합면의 파괴에너지 평가	한국해양대학교	주저자	한국콘크리트학회	0.44	2017.10.31	단독	
3	특허 등록	3차원 콘크리트 프린트 시스템을 이용한 콘크리트 구조물 제조방법	한국해양대학교 산학협력단	주발명자	대한민국		2018.02.07	단독	
4	특허 등록	3차원 콘크리트 프린트 시스템 및 그를 이용한 콘크리트 구조물 제조방법	한국해양대학교 산학협력단	주발명자	대한민국		2018.05.03	단독	
5	특허 등록	3차원 콘크리트 프린트 시스템	한국해양대학교 산학협력단	주발명자	대한민국		2018.05.03	단독	

제11장. 기타 사항

- 본 연구의 실험에 사용된 다양한 실험시편의 양생과정을 Fig. 11-1에 나타냈다. 상재하중이 균일하게 시험체에 전달되도록 하기 위하여 시험체와 동일한 형태의 사하중을 재하하였다.



Fig. 11-1 양생중인 실험시편

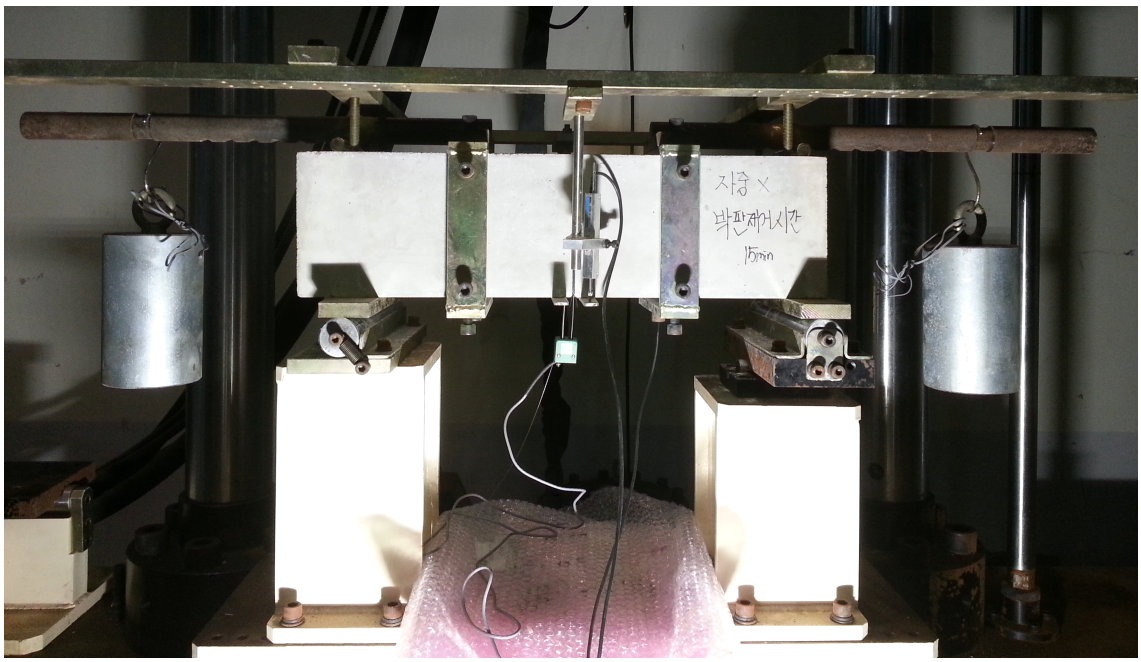
- 쪼갬인장실험 과정을 Fig. 11-1에 나타냈다. 쪼갬인장실험은 응력집중으로 인한 국부파괴를 방지하기 위하여 시험체 상단과 하단에 강판을 이용하여 하중이 단면에 균일하게 작용하도록 하였다.



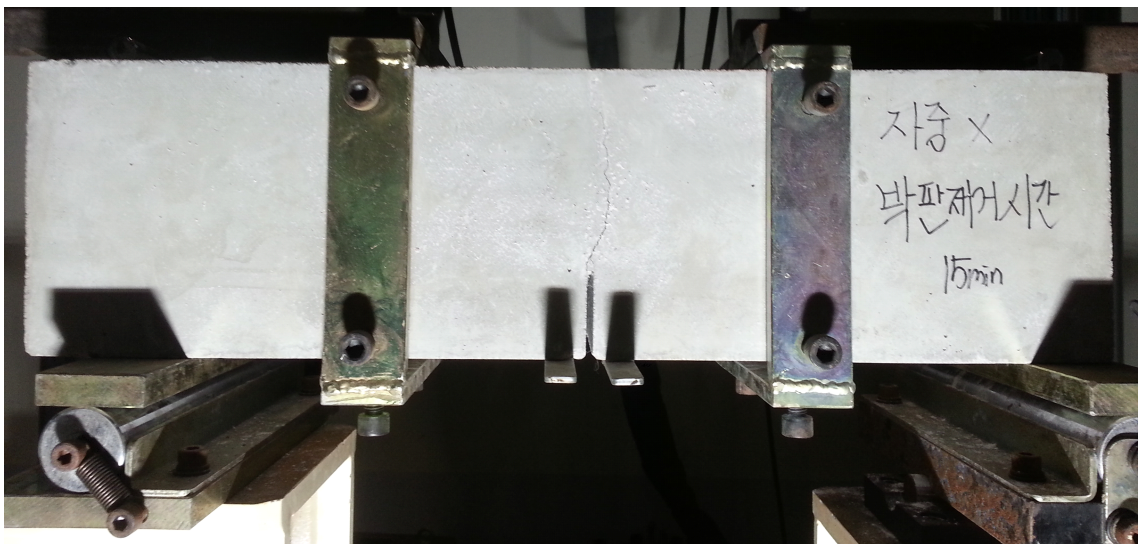
(a) 실험 셋업 (b) 실험 후 발생한 균열

Fig. 11-2 쪼갬인장실험

- 파괴에너지 측정 실험과정과 실험으로 발생한 균열을 Fig. 11-3에 나타냈다. 파괴에너지 측정 실험은 동적인 영향을 고려하지 않기 위하여 초저속 CMOD 실험을 수행하였으며 1 시험체의 파괴에너지 측정에 실험 시간만 3~4시간이 소요되는 매우 정밀한 실험이다.



(a) 실험 셋업



(b) 실험후 발생한 균열

Fig. 11-3 파괴에너지 측정 실험

제12장. 참고 문헌

Kim, M., Lee, G., Lee, W., Hwang, J., Cho, J., Kim, H., Jung, S. & Park, H. 2017, *Combustion Performance Test for 3D0printed Kerosene-air Combustor*, Korean Society for Fluid Machinery, Winter conference, 12, pp.113-114.

Kim, J., Lee, D. & Kim, J. 2017, Performance Evaluation of Concrete 3D Printing Extrusion Device for Various Printing Speed, Korean Society of Civil Engineers Conference, 10, pp.1307-1308

Wolfs, R.J.M., Bos, F.P. & Salet, T.A.M. 2018, Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete, Numerical modelling and experimental testing, Journal of Cement and Concrete Research, 106, pp.103-116

Khoshnevis, B., 2004. *Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies*. Automation in Construction 13.1, 5(19).

Kwon, H., 2002. *Experimentation and Analysis of Contour Crafting (CC) Process Using Uncured Ceramic Materials*. Ph.D. Thesis, University of Southern California, Los Angeles, CA, USA.

ACI Committee 446, 2009. *Fracture Toughness Testing of Concrete, American Concrete Institute* (in progress).

ASTM C496/C496M, 2005. *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, Annual Book of ASTM Standards*. 4(2).

Elices, M., Guinea, G. & Planas, J., 1992. *Measurement of the fracture energy using 3-point bend tests. 1. Influence of experimental procedures.* Journal of Materials and Structures, 25(148), pp.212-218.

Bazant, Z.P. & Planas, J., 1997. *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials.* CRC Press: Boca Raton.

RILEM Draft Recommendation., 1990. *Determination of Fracture Parameter (K^s_{ic} and $CTOD_c$) of Plain concrete using three point bent tests*, Journal of Materials and Structures, 23, 457-460.

RILEM Technical Committee 200-HTC., 2007. *Recommendation of RILEM TC 200-HTC: Mechanical concrete properties at high temperatures-modelling and applications*. Journal of Materials and Structures, 40(9), pp.855-864.

Lee, J. & Lopez, M., 2014. *An experimental study on fracture energy of plain concrete*.

International Journal of Concrete Structures and Materials, 8(2), pp. 129-139.

Reinhardt, H.W., Comelissen, H.A.W. & Hordijk, D.A., 1986. *Tensile tests and failiure ananalysis of concrete.* ASCE Journal of Structural Engineering, 112(11), pp. 2462-2477.

Rocco, C., Guinea, G.V., Planas, J. & Elices, M., 2001. *Review of the splitting-test standards from a fracture mechanics point of view.* Journal of Cement and Concrete Research, 31(1), pp.73-82.

Vecchio, F.J., 1992. *Finite Element Modeling of Concrete Expansion and Confinement.* ASCE Journal of Structural Engineering, 118(9), pp.2390-2406.

Vecchio, F.J. & Collins, M.P., 1993. *Compression Response of Cracked Reinforced Concrete*. ASCE Journal of Structural Engineering, 119(12), pp.3590-3610.

Vecchio, F.J., 2000. *Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete: Formulation.* ASCE Journal of Structural Engineering, 126(9), pp.1070-1077.

Vecchio, F.J. & Collins, M.P., 1986. *The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subject to Shear*. ACI Journal, 83(2), pp.219-231.

Wong, P., Vecchio, F. & Trommels, H., 2013. *Vector2 & Formworks User's Manual. Department of Civil Engineering*, University of Toronto, Toronto, ON, Canada, pp.54-58, 162-173.

Bazant, Z.P., 1986. *Mechanics of distributed cracking.* Appl. Mech. Rev, 39, pp.675-705.

Xie, Y., Ahmad, S.H., Yu, T., Hino, S. & Chung, W., 1994. *Shear ductility of reinforced concrete beams of normal and high-strength concrete*. Structural Journal, 91(2), pp.140-149.

Yang, Z., 2007. *PAML 4: Phylogenetic analysis by maximum likelihood.* Molecular biology and evolution, 24(8), pp.1586-1591.

Mihaylov, B.I., Bentz, E.C. & Collins, M.P., 2010. *Behavior of large deep beams subjected to monotonic and reserved cyclic shear*. ACI Structural Journal, 107(6), pp. 726-734.

Petersson, P.E., 1981. *Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and Similar Materials.* Rep. TVBM-1006, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.

Planas, J., Guinea, G.V. & Elices, M., 1999. *Size effect and inverse analysis in concrete fracture*. International Journal of Fracture, 95(1-4), pp. 367-378.

Guinea, G., Planas, J. & Elices, M., 1994. *A general bilinear fitting for the softening curve of concrete*. Journal of Materials and Structures, 2(2), 99-105.

Park, S., 2018, *Evaluation of Fracture Energy and Structural Performance of Concrete with Accumulated Layers Formed by 3D Printing Technology*, Korea Maritime and Ocean University Master's Thesis

Bazant, Z.P.. & Becq-Giraudon, E. 2002, Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard, Journal of Cement and Concrete research, 32, pp. 529-556

Seo, S., Yoon, S., Kim, Y. & Choi, K. 2010, *Variation of Structural Capacity of RC Deep Beams with Different Shear Span-to-Depth Ratios Damaged by Fires*, Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 26(11), 3-12.

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.