

15CTAP-
C098246

음의
포아송비를
가진
격자구조체를
적용한
기준
강성
30%
이상
향상
능동형
복합부재
제작
원천기술
개발
최종보고서

2017

국
토
교
통
부

국토교통과학기술진흥원

Infrastructure R&D Report

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

R&D /
15CTAP-C098246

음의 포아송비를 가진 격자구조체를 적용한 기존 강성 30% 이상 향상 능동형 복합부재 제작 원천기술 개발 최종보고서

2017. 7. 21.

주관연구기관 / 한국건설기술연구원

국토교통부

(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘음의 포아송비를 가진 격자구조체를 적용한 기존 강성 30% 이상 향상 능동형 복합부재 원천기술 개발’ (연구개발 기간 : 2015. 6. ~ 2017. 6.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2017. 7. 21.

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원 (대표자) 이 태 식 (인)

주관연구기관책임자: 문 재 흠

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	15CTAP-C09824 6	해당 단계 연구 기간	2015.06. 24. ~ 2017.06.23.	단계구분	1/1 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	음의 포아송비를 가진 격자구조체를 적용한 기존 강성 30% 이상 향상 능동형 복합부재 제작 원천기술 개발			
연구책임자	문 재 흡	해당단계 참여 연구원 수	총: 10 명 내부: 10 명 외부: - 명	해당단계 연구개발비	정부:400,000천원 기업: - 천원 정부 외: - 천원 계:400,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 10 명 내부: 10 명 외부: - 명	총 연구개발비	정부:400,000천원 기업: - 천원 정부 외: - 천원 계:400,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국건설기술연구원/구조융합연구소			참여기업명 -	
국제공동연구	상대국명: -			상대국 연구기관명: -	
위탁연구	연구기관명: -			연구책임자: -	

요약

보고서 면수 104 페이지

본 연구과제는 음의 포아송비 거동특성을 가지는 건설산업 분야 적용 가능 격자구조체를 개발함과 동시에, 기존 구조부재에 탑재하는 방식으로 부재의 강성을 30% 이상 향상시킬 수 있는 원천기술을 개발하기 위한 목적으로 2015년 6월부터 2017년 6월(총2년)까지 한국건설기술연구원이 수행한 국토교통기술촉진연구사업으로 주요 연구개발 성과는 다음과 같음

■ 건설산업용 음의 포아송비 격자구조체 개발

- 건설산업에의 적용이 가능한 음의 포아송비 거동 격자구조체 원천 설계기술 확보 및 시작품 개발
- 압축하중 조건 대응 기존 강성 30% 이상 향상 복합부재 제작 원천기술 확보
- 인장하중 조건 하의 복합부재 단면 감소 저감 기술 확보
- 충격하중 조건 하의 부재 파괴 손상을 기존 대비 30% 이상 저감 기술 확보

연구의 목적 및 내용	○ 음의 포아송비 거동 격자구조체 적용 강성 30% 이상 향상 구조부재 시제품 개발 - 건설산업용 Auxetic 격자구조 및 이를 적용한 고강성 합성부재 시제품 - 동일 중량 또는 부피 하에서 대응 하중별 (압축, 인장, 충격) 기존 대비 30% 이상 강성 증대 구조부재 개발 목표 ○ 구조물용 Auxetic 격자구조체 시제품 개발 - 구조물용 격자구조체 구성변수 및 목표성능 제시, 기본설계 수행 - 전산해석을 통한 성능 예측 - 격자구조체 시제품 제작 및 성능 검증 ○ Auxetic 격자구조체 적용 기존 강성 30% 이상 향상 복합부재 시제품 개발 - 대응 하중별 (압축, 인장, 충격) 복합부재 구성방안 설정 및 기본설계 수행 - 시험평가용 시제품 제작 - 실험 및 전산해석을 통한 성능 평가 - 최종 시제품 제작					
연구개발성과	○ 구조물용 Auxetic 격자구조체 시제품 ○ Auxetic 격자구조체 적용 기존 강성 30% 이상 향상 복합부재 시제품					
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 구조물의 대형화 및 고기능성 부여 추세에 대응할 수 있는 고강성, 고성능 구조부재 제시 ○ 대형 구조물(초고층 빌딩, 대형 기초, 초대형 돔 구조물 등)에의 적용을 통한 해당 구조부재 치수 최소화 기대 ○ 구조물 내충격, 방호성능 극대화를 위한 방호용 자재로 적용 가능 ○ 부재 강성화를 통한 부재치수 최소화에 따른 공사비 절감 가능 ○ 음의 포아송비 거동 기술의 건설산업 분야 접목을 통한 해당 기술 세계적 선도 및 해외 시장 개척에 기여 ○ 새로운 개념의 구조부재 제작 기술에 따른 건설분야 설계 및 시공 관련 원천적 패러다임 변화 주도 및 미래 건설 신시장 창출에 기여					
핵심어 (5개 이내)	음의 포아송비	격자구조	강성	능동형	복합부재	

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	○ Development of trial products of structural members with over 30% enhancement of stiffness using auxetic grating structure. – Trial product of auxetic grating structure and high-stiffness hybrid member thereof – Target is to develop structural members with over 30% enhancement of stiffness under same weight or volume conditions comparing to typical structural members ○ Development of trial products of auxetic grating structures – Decision of variable formation and target performance of auxetic structure, and basic design thereof – Computational simulations – Trial products of auxetic grating structures and performance assessments thereof ○ Development of trial products of structural members with over 30% enhancement of stiffness using auxetic grating structure – Decision of hybrid members coping with load type (compression, tension, impact) and basic design thereof – Manufacturing test specimens – Performance evaluations – Manufacturing trial products				
Results	○ Trial products of auxetic gratings for building structures ○ Trial products of structural members with over 30% enhancement of stiffness using auxetic grating structure				
Expected Contribution	○ Suggestion of high-stiff and high-performance structural members corresponding with large size and functional structures ○ Expectation of minimizing thickness of structural members for large scale structures (ex. High-rise building, large-size foundation & Dome Structures, etc.) ○ Applicable for impact resistant materials for structures ○ Reduce construction cost by minimize the size of structural members by increasing rigidity ○ Lead the auxetic technology in world construction field and contribute the development of a new international construction market ○ Contribute to a creation of future construction market with changing the fundamental paradigm of design and field works by a novel-concept technology				
Keywords	Auxetic	Grating Structure	Stiffness	Active	Hybrid member

< TABLE OF CONTENTS >

Chapter 1. Summary of R&D	1
Chapter 2. Technology State-of-the-art in Korea and Overseas	13
Chapter 3. Contents and Results of Research	24
Chapter 4. Level of Achievement and Contribution to Related Domains	90
Chapter 5. Utilization Plan of Research Achievements	97
Chapter 6. Foreign Scientific Data Acquired throughout Research	99
Chapter 7. Security Level of Research Results	100
Chapter 8. Inventory of Research Facilities and Equipment Registered in National Science and Technology Information System	100
Chapter 9. Safety Measures in Laboratory Executed during the Accomplishment of the Research Project	100
Chapter 10. Representative Research Achievements	101
Chapter 11. References	102

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	13
3. 연구 수행 내용 및 성과	24
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	90
5. 연구개발성과의 활용 계획	97
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	99
7. 연구개발성과의 보안등급	100
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	100
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	100
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	101
11. 참고 문헌	102

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

가. 연구배경

- 최근 들어, 인프라 구조물 및 민간 시설물의 대형화 및 초고층화 요구에 따라 고려 대상 하중의 크기가 증가되고 있으며, 이에 요구되는 강도 및 강성을 충족하기 위한 구조부재의 치수증가 문제가 발생하고 있음.
- 또한, 정적 하중의 크기뿐만 아니라, 지진, 항공기, 차량 등에 의한 충격 및 인화성 물질의 폭발 등과 같은 하중에 대하여 구조물의 안전성을 추가적으로 확보하기 위한 대책을 마련할 필요성이 증대되고 있음.



(a) 고주탑 교량
(Great Belt Br.)



(b) 초대형 돔 구조물
(밀레니엄 돔)



(c) 구조물 방호 중요성 증가
(항공기/폭발물에 의한 피해 사례)

그림 1 구조물의 대형화 및 방호·방폭의 중요성 증대

ISSUE 1. 인프라 구조물 및 시설물의 대형화, 초고층화 대응 기술 필요

- ◆ 고강도, 고강성 구조부재 수요 증가 (부재 치수(두께) 증가 문제 해결)

ISSUE 2. 시설물의 충돌, 폭발에 대한 안전성 확보 기술 필요성 대두

- ◆ 초고층 빌딩 등 인구 밀집 시설물의 대형 사고 대비 안전성 확보 방안 강구 필요

- 이러한 구조물의 대형화에 대한 대응 및 안전성 증대를 위하여 다각적인 연구개발이 이루어지고 있으며, 구조물을 구성하고 있는 건설재료 및 자재의 성능 향상을 통한 대응책 마련에 대한 연구 또한 활발히 이루어지고 있는 실정임.
- 그러나, 전통적인 건설용 재료 및 자재인 콘크리트, 철근, 철강제품의 고성능화 및 고기능화를 위한 개발 연구는 지속적으로 이루어지고는 있으나, 재료 자체가 가지고 있는 역학적 성능상의 한계 때문에, 구조물 차원에서의 성능 향상에 있어서 제약사항으로 작용하고 있음.

ISSUE 3. 전통적 건설재료 및 자재의 성능 향상 한계성

- ◆ 초고강도 콘크리트, 고강도 Metal 등 재료개발 연구 지속 진행 중이나, 재료 자체의 물성 최대치 극복에 한계점 존재

- 이에 따라, 기존의 구조물 설계 방식을 탈피한 새로운 개념의 고기능-고성능 구조부재의 개발 및 적용이 시대적으로 요구되고 있는 실정임.
- 즉, 구조물 및 구조부재용 재료 자체의 성능 향상이라는 관점에서의 접근이 아닌, 재료의 조합 또는 자재의 복합에 의한 고기능-고성능 구조부재의 개발이 요구되고 있음.

나. 음의 포아송비 개요

- 포아송비란, 재료고유의 특성중에 하나로서, 재료에 어떤 힘이 작용하면, 그 작용한 방향으로 재료의 변형이 발생함.
- 만약 재료에 인장력이 작용한다면, 인장력의 작용방향으로 재료는 늘어나며, 이때의 가로 방향 변형도와 세로 방향 변형도 사이의 비율을 포아송비로 나타냄. 즉 하중의 진행방향에 대해서는 변형도가 감소하고, 수직방향에 대해서는 늘어나게 되며, 포아송비는 양의 값을 갖게 됨.

$$\nu = \left| \frac{\text{Lateral strain}}{\text{Axial strain}} \right| = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} \quad \text{수식 1}$$

- 일반적으로, 알루미늄 0.35, 구조용 강 등의 재료는 0.25에서 0.35, 콘크리트의 경우는 0.1에서 0.2사이, 고무재료는 0.48 에서 0.5 사이, 8 코르크는 거의 0에 가까운 포아송비를 가짐.
- 최근의 소재분야 연구동향에 있어서, 재료의 고유물성으로 알고 있는 포아송비에 변화를 줌으로써, 역학적 거동을 획기적으로 변화시키고자 하는 연구가 수행되어지고 있음.
- 일례로 1987년 Lakes 교수가 음의 포아송비에 대한 연구를 소개한 이후로, 국내외적으로 음의 포아송비 물질의 제조방법 및 활용방안에 대한 활발한 연구가 진행되고 있음.

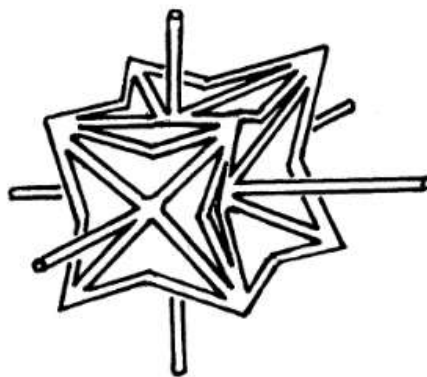


그림 2 이상화된 요각구조 단위모양
(Lakes, 1987)

- 음의 포아송비(Auxetic)를 가지는 재료는 압축력 작용 시 압축력의 직각방향으로는 수축을, 인장력 작용 시 인장력의 직각방향으로는 팽창을 하게 되며, 그 개념 및 재료 사례는 다음 그림과 같음.

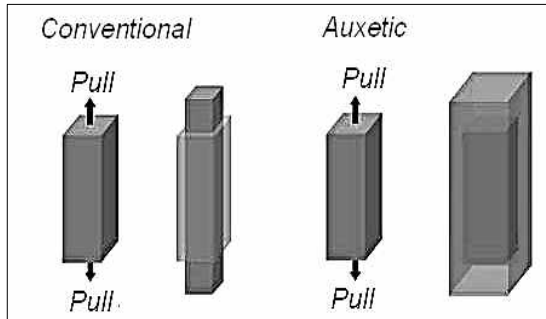


그림 3 양/음의 포아송비 개념
(Grima, 2009)



그림 4 Auxetic 재료
(<http://purplephoton.com>)

- 이러한 음의 포아송비를 가지는 재료와 관련된 연구는 최근 들어 국외 일부 선도국을 중심으로 합성재료 및 소재분야에서 활성화되기 시작한 단계로, 특히 격자구조를 적용한 개발연구가 집중적으로 수행되고 있음.
- 음의 포아송비 거동으로부터 얻어질 수 있는 장점으로서는 작용 하중에 대하여 강성 및 저항성을 능동적으로 증대시켜 대응할 수 있다는 부분으로, 이러한 장점을 활용한 다양한 제품이 개발되어지고 있음.

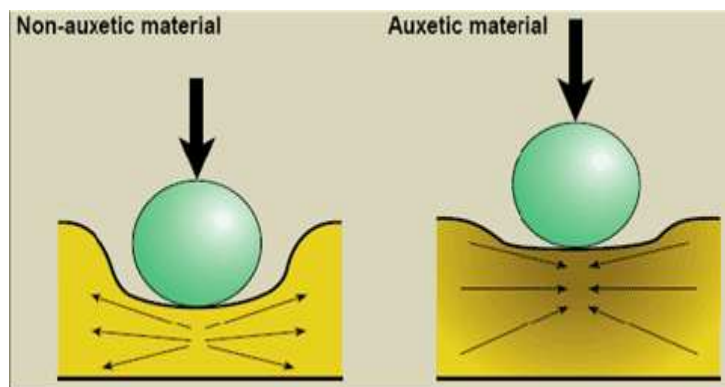
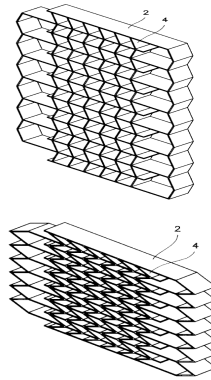


그림 5 외부 충격시의 Auxetic 재료의 거동 예
(Alderson, 1999)

- 국내외 타 산업분야 연구개발 동향에 있어서 대표적 사례는 다음과 같으며, 합판, 종이 박스, Airless Tire, 항공기 몸체, 완충재, 방탄복, 방탄섬유, 의료산업 분야(인공 혈관, 근육, 인대, 확장근 등), 고분자 및 기초소재 분야 등 다양한 분야에서 적용기술을 개발 중임.



(a) 비공기압 타이어
(한국타이어, 2012)



(b) 고분자 셀구조
(특허 10-0201870)



(c) 방폭 커튼
(Auxetix Ltd. 2010)

그림 6 음의 포아송비 적용 기술개발 사례

- 건설분야에 있어서 최근 들어서 미국, 독일(PROvendis GmbH 등) 등 일부 선발국가의 기업체 및 대학 연구소 등에서 연구 개발을 수행하고 있는 것으로 파악되고 있으나, 개발내용 및 관련 정보는 거의 공개된 것이 없는 단계임.
- 즉, 건설분야에 있어서 Auxetic 구조부재의 개발은 국외 기술 선도국에 있어서도 최근 들어서야 연구개발이 시작되고 있는 태동기로서, 향후 미래형 첨단 건설시장의 판도에 있어서 중요한 역할을 할 수 있는 분야로 판단됨.

2. 연구개발의 필요성

- 초고층 빌딩, 초대형 돔 구조물, 초장대 교량 등 전 세계적으로 건축물 및 시설물의 대형화 추세에 따라 구조부재의 고강도화 및 고강성화가 필수적인 요구사항으로 대두되고 있음.
- 이를 위한 다양한 건설재료 및 자재개발 연구가 수행되고 있으나, 재료 자체가 가지는 재료물성의 한계는 극복할 수 없음.
- 재료물성의 한계를 극복하기 위하여, 고강도강, 탄소나노튜브(CNT) 또는 그래핀과 같은 새로운 재료의 개발 또는 콘크리트에의 적용을 통한 문제 극복 연구 또한 진행되고 있으나, 새로이 투입되는 재료가 대부분 고가인 관계로 건설재료로서의 활용이 제약되고 있는 실정임.
- 본 연구에서 개발하고자 하는 복합부재는 기존의 건설용 재료 및 자재를 사용하여 음의 포아송비 격자체를 개발, 동일 중량 또는 치수 대비 부재강성을 획기적으로 증대시키고자 하는 것으로서, 해당 기술의 개발 시, 건설산업에 미치는 파급력은 매우 클 것으로 기대됨.
- 또한, 구조부재 강성의 증대에 따라, 다양한 신형식 구조물의 설계 또한 가능해지리라 예상되며, 이를 통한 건설분야 신개념, 신시장 창출에 기여할 수 있으리라 판단됨.
- 다만, 해당 기술개발의 성공에 따른 국가 기반산업에의 파급력이 매우 클 수 있음에도, 음의 포아송비 거동이라는 신소재 분야 이외에서는 잘 알려지지 않은 기술의 건설분야에의 접목이라는 모험과 도전이 필요한 시점임.
- 이에, 국내차원의 기술 확보 개념이 아닌, 국내 건설산업의 세계적 경쟁력 및 신시장 창출에 기여할 수 있는 해당 원천기술의 확보 차원에서, 정부의 적극적 지원 및 주도하에 해당 연구개발을 추진할 필요성이 있음.

3. 연구개발 범위

가. 연구 목표

(1) 최종목표

- 본 연구에서는 건설분야에 있어서 국내외 포함 선행 연구사례가 거의 전무한 음의 포아송비 거동 적용 고성능, 고기능성 구조부재를 위한 원천기술을 개발하고자 함.
- 즉, 압축, 인장 및 외부 충격 대응 부재에 적용이 가능한 건설구조물용 음의 포아송비 (Auxetic) 거동 격자구조체 설계 및 제작 원천기술의 개발을 기반으로 하여,
- 개발된 Auxetic 격자구조체를 적용한 고강성 복합부재 제작 원천기술 확보가 본 과업의 범위로서, 최종적인 복합부재 성능목표는 기존 대비 (동일 중량 또는 부피 대비) 30% 이상 고강성화를 달성하는데에 있음.

최종목표 : 음의 포아송비 (AUXETIC) 거동 격자구조체 및 이를 적용한 기존 강성 30% 이상 향상 능동형 복합부재 원천기술 개발

◆ 최종성과물 : 음의 포아송비 격자구조체 적용강성 30% 이상 향상 구조부재 시작품

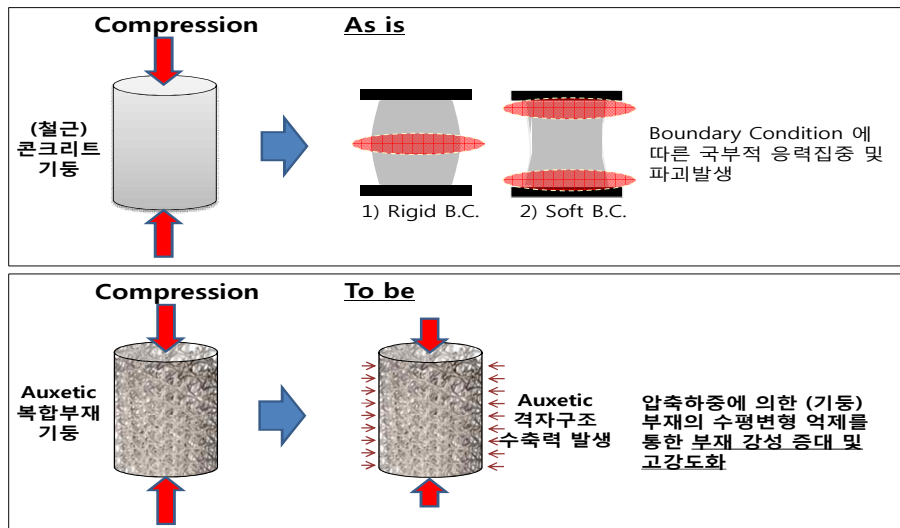


그림 7 압축 하중 대응형 Auxetic 복합부재 개념도

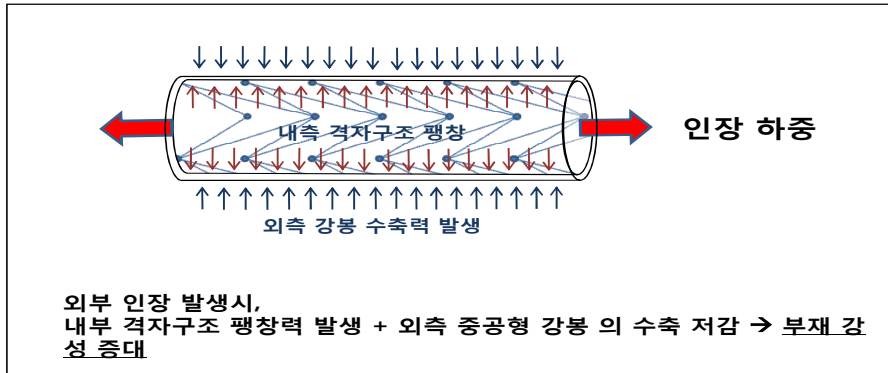


그림 8 인장 하중 대응형 Auxetic 복합부재 개념도

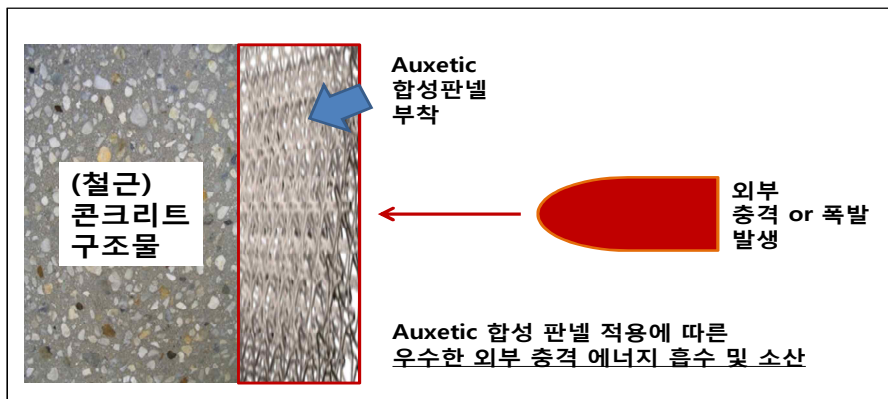


그림 9 충격 하중 대응형 Auxetic 복합부재 개념도

○ 최종 목표 핵심 성과물은 다음과 같음

표 1 최종 핵심 성과물

연번	핵심성과물	성과유형	해당과제
1	구조물용 Auxetic 격자구조체	재료·자재	음의 포아송비를 가진 격자구조체를 적용한 기존 강성 30% 이상 향상 능동형 복합부재 제작 원천기술 개발
2	Auxetic 격자구조체 적용 기존 강성 30% 이상 향상 능동형 복합부재	재료·자재	음의 포아송비를 가진 격자구조체를 적용한 기존 강성 30% 이상 향상 능동형 복합부재 제작 원천기술 개발

○ 즉, 핵심 성과물은 구조물 분야에 적용이 가능한 Auxetic 격자구조물의 시작품과, 이를 적용한 고강성 능동형 복합부재 시작품으로서, 해당 원천기술의 개발 및 기술적 검증을 본 연구의 최종 목표로 하고 있음.

(2) 최종목표의 성격 및 설정근거

○ 본 연구에서는 건설분야에 있어서 국내외 포함 선행 연구사례가 거의 전무한 음의 포

아송비 거동 적용 고성능, 고기능성 구조부재를 위한 원천기술을 개발하고자 함.

- 이를 위하여, 우선적으로 구조물 및 구조부재에 적용 가능한 음의 포아송비 거동 격자 구조체 설계기술의 확보를 기반으로 하여, 시작품 제작 및 역학적 성능평가를 과업에 포함하였음.
- 최종성과물 달성을 위한 핵심성과물인 Auxetic 격자구조체는 소재분야에서 개발되고 있는 매우 복잡한 격자구조를 탈피, 건설구조물에의 실제 적용 및 현장시공이 가능한 형상 설계를 목표로 하였음.
 - 소재분야에서 개발되고 있는 음의 포아송비 거동 격자구조 사례와, 본 연구에서 개발하고자 격자구조 개념은 다음과 같음.

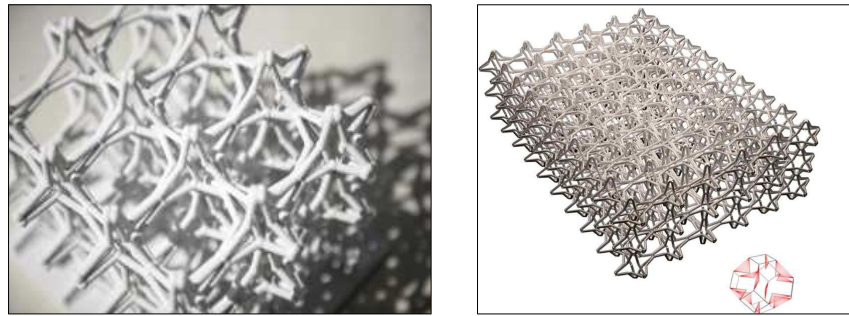


그림 10 소재분야 Auxetic 격자구조 예 (Friis et al., 1988)

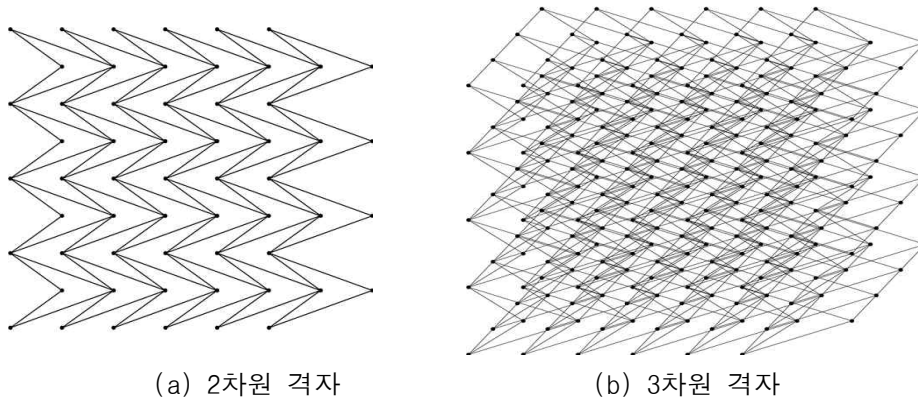


그림 11 본 연구 Auxetic 격자구조 개발 방향 (시공성 감안, 격자구조 단순화)

- 또한, 이러한 음의 포아송비 거동 격자구조체 자체 또는 격자구조체와 기존의 구조부재의 합성을 통한 고강성 구조부재의 제작과 관련된 원천기술을 확보하는 단계까지 본 연구의 과업 범위로 설정하였음.
- 기존 강성 30% 이상 향상이라는 목표치의 설정은, 현재 해당 기술의 기반이 전무한 현실을 감안함과 동시에, 본 연구개발 기술의 미래 상업적 가치를 고려, 하한 목표치로서 제시한 값임.
- 즉, 본 연구의 최종성과물은 기초원천 기술 확보차원의 연구성격, 2년의 최대 연구기간 및 투입가능 연구비 한도를 고려하여, 음의 포아송비 거동 구조물용 격자구조체와 이를 적용한 고강성 합성부재 시작품까지 개발 완료 하는 것으로 설정하였음.
- 본 연구의 연구개발 단계는 다음과 같음.

구분		표기	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 기술시험 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

- Auxetic 격자구조체의 설계, 시작품 제작, 성능평가 및 이를 적용한 고강성 복합 부재 시작품 설계, 시작품 제작 및 성능평가 단계까지 수행하는 것으로 구성하였으며, 이에 TRL 1에서 4단계 까지로 연구개발 내용이 구성됨.

○ 각 최종 핵심성과물별 연구개발 단계에 따른 세부내용은 다음과 같음.

- 핵심성과명 : 구조물용 Auxetic 격자구조체

기간	단계별 주요 연구활동	세부추진내용
1단계 (' 15.06~ ' 15.11)	■ 설계 기초이론 정립	- 음의 포아송비 거동 기초이론 정립
	■ 목표성능 설정	- 구조물용 격자구조체 구성변수 설정
2단계 (' 15.06~ ' 16.05)	■ 격자구조체 설계	- Auxetic 격자구조체 기본설계 수행
	■ 특허 출원	- 구조물용 Auxetic 격자구조체 특허 출원
3단계 (' 15.10~ ' 16.06)	■ 성능 평가(전산해석 및 실험)	- 전산해석을 통한 사전 검토 및 시험평가 수행
	■ 1차 시작품 제작	- 복합부재 제작을 위한 1차 시작품 제작
4단계 (' 17.01~ ' 17.03)	■ 최종 시작품 제작	- 성능 보완 반영된 최종 시작품 제작
	■ 시작품 성능 평가(전산해석 및 실험)	- 시작품 핵심성능 검증(해석 및 실험 검증)

- 핵심성과명 : Auxetic 격자구조체 적용 기존 강성 30% 이상 향상 능동형 복합부재

기간	단계별 주요 연구활동	세부추진내용
2단계 (' 16.01~ ' 17.03)	■ 복합부재 기본설계	- 대응 하중 종류별(압축, 인장, 충격) 복합부재 기본 설계
	■ 성능 검증 (전산해석)	- 전산해석을 통한 요구성능(강성 30% 이상 향상) 확보 방안 도출
	■ 특허 출원	- 복합부재 개념특허 출원
3단계 (' 16.10~ ' 17.03)	■ 시험체 제작 (1차 시작품)	- 성능 검증을 위한 시험체 제작
	■ 성능 검증 (실험)	- 시험평가 수행
4단계 (' 17.04~ ' 17.06)	■ 최종 시작품 제작	- 성능 보완 반영된 최종 시작품 제작
	■ 시작품 성능 평가 (전산해석 및 실험)	- 시작품 핵심성능 평가 (해석 및 실험 검증)

○ 각 최종 핵심성과물별 세부 설명은 다음과 같음.

－ 핵심성과명 : 구조물용 Auxetic 격자구조체

정의	실제 구조물에 적용이 가능한 음의 포아송비(Auxetic) 거동 격자구조체	
목적	구조물에서의 실제 적용성을 감안, 단순화된 구조의 Auxetic 격자구조체 개발	
성능목표	(기존기술 수준) - 기존기술 없음 (개발기술 수준) - 신규 원천기술 개발 단계로, 부재에 적용 시 부재 강성 30% 이상 향상 목표	
성과달성 책임자 (소속기관)	문재흠 (한국건설기술연구원)	
소요기간	' 15.06 ~ ' 17.03 (1년10개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	시작품, 성능평가 보고서	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건
	논문	학술지(국내) : 1건, 학술지(국외) : 1건, 학술회의 : 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	시작품 2건

－ 핵심성과명 : Auxetic 격자구조체 적용 기존 강성 30% 이상 향상 능동형 복합부재

정의	동일 중량 또는 부피 대비 강성 30% 이상 향상 하중 능동형 복합부재	
목적	대형 구조물용 기둥, 기초, 대형 돔 구조물용 트러스부재 및 방호구조물용 하중 대응형 고강성 복합부재 개발	
성능목표	(기존기술 수준) - 기존기술 없음 (개발기술 수준) - 동일 중량 또는 부피 대비 하중 방향 강성 30% 이상 증대	
성과달성 책임자 (소속기관)	문재흠 (한국건설기술연구원)	
소요기간	' 16.01 ~ ' 17.06 (1년06개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	시작품, 성능평가 보고서	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건
	논문	학술지(국내) : 1건, SCI(E) : 1건, 학술회의 : 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	시작품 2건

(3) 연차별 연구수행 개요

○ 연구기간은 총 2년으로 각 연차별 주요 연구수행 내용은 다음과 같음

표 2 연차별 연구목표 및 주요연구내용

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	■ Auxetic 격자구조체 개발 - 격자구조체 기본설계 - 성능 검토(전산해석) - 1차 시작품 제작	- 음의 포아송비 거동 기초이론 정립 - 구조물용 격자구조체 구성변수 설정 및 기본 설계 수행 - 전산해석을 통한 기본 성능 예측 - 격자구조체 최적 구성방안 도출 - 실험 검증을 위한 격자구조체 시작품 제작
	■ 능동형 고강성 복합부재 설계 - 복합부재 기본설계 - 성능 검토(전산해석)	- 복합부재 종류(압축, 인장, 내충격 부재)별 기본설계 수행 - 복합부재 구성방안 검토
2차년도	■ Auxetic 격자구조체 시작품 제작 - 1차 시작품 시험평가 - 최종 시작품 제작 - 최종 시작품 성능 검증(실험 및 전산해석)	- 하중 종류(압축, 인장, 충격)별 성능 평가 - 성능 평가 결과 반영 보완 최종 시작품 제작 - 최종 시작품 성능 평가 - 요구성능 (강성 30% 이상 향상 확보) 확보 검증
	■ 능동형 고강성 복합부재 시작품 제작 - 1차 시작품 제작 - 성능 시험평가 - 최종 시작품 제작 및 성능 검증	- 실험 검증을 위한 복합부재 시작품 제작 - 하중 종류(압축, 인장, 충격)별 성능 평가 - 성능 보완 최종 시작품 제작 - 시험평가 및 전산해석을 통한 성능 검증

○ 연도별 주요 추진 일정 및 성과물은 다음과 같음.

표 3 연도별 주요 추진일정

구분	연구과제명 (연구수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	소요 연구비 (백만원)	1차년도				2차년도			
		핵심성과	단위성과	질적 성과지표				1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
주관	KICT						400	200				200			
		A	A-1	A-1-①	격자구조 설계변수 선정	보고서	15	15							
					격자구조 목표성능 제시	보고서	15	15							
		A	A-1	A-1-②	격자구조 설계도 작성	설계도면, 보고서	40	40							
		A	A-2	A-2-①	격자구조 전산해석 평가	보고서	30			30					
		A	A-2	A-2-②	격자구조체 시험평가 (일축압축, 일축인장)	보고서	40		40						
		A	A-3	A-3-①	격자구조체 1차 시작품 제작	시작품	30				30				
		A	A-3	A-3-②	격자구조체 최종 시작품 제작	시작품	30							30	
		B	B-1	B-1-①	복합부재 기본설계	설계도면, 보고서	30			30					
		B	B-1	B-1-②	복합부재 최종설계	설계도면, 보고서	30							30	
		B	B-2	B-2-①	복합부재 전산해석 평가	보고서	30					30			
		B	B-2	B-2-②	복합부재 시험평가 (일축압축, 일축인장, 비상체 충격파괴 시험)	보고서	50						50		
		B	B-3	B-3-①	복합부재 1차 시작품 제작	시작품	30						30		
		B	B-3	B-3-②	복합부재 최종 시작품 제작	공인성적서, 시작품	30								30
계							400	200				200			

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내외 관련 기술 개발 현황

- Auxetic 적용 합성재료 및 합성부재의 개발과 관련된 연구개발은 국내에서는 매우 미미한 상태로, 일부 고분자재료, 의료 분야 및 비공기압 타이어 연구개발 분야에서 기초적인 연구를 수행하고 있음.
- 국내의 경우, 최재봉, 최귀원 (1996)이 Auxetic 특성을 가지는 물질을 인공관절에 적용하는 연구를 수행한 바 있으며, 강대승 외 4인 (2015)은 최근에 다공질 금속중인 WBK(Wire-woven bulk kagome)에 Auxetic 특성을 적용, 유한요소 해석과 압축실험을 통한 기계적 특성 및 포아송비 측정에 대한 연구를 수행한 바 있음.
- 또한, 김광원 및 김두만 (2011)은 허니컴(Honeycomb) 구조의 비공기압 타이어에 Auxetic 구조를 적용한 연구를 수행한 바 있음.
- 고분자 분야에서는 다음과 같은 셀 구조물에 대한 특허 등록 사례가 있으며, 해당 특허는 포아송비가 -50에서 -70 사이의 값을 가지는 격자 구조체에 대한 내용으로, 인공 장기 및 일반구조재료 등 산업용으로 광범위하게 적용할 수 있는 기술임.

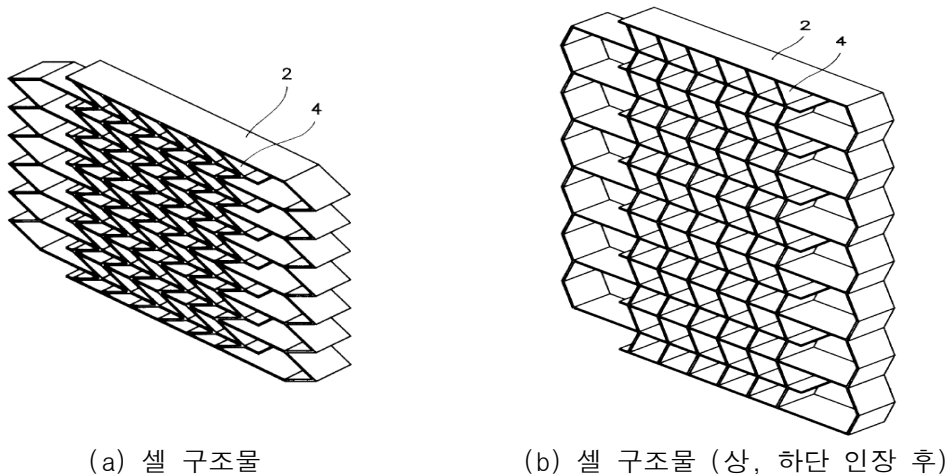
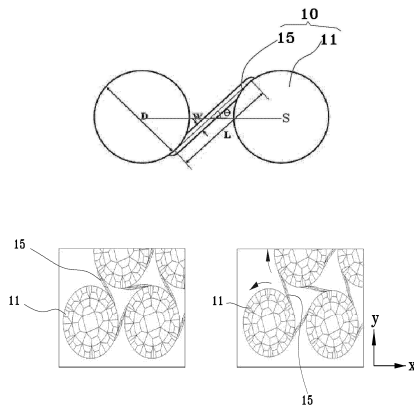


그림 12 고분자 분야 셀 구조물 특허 등록 사례 (특허 10-0201870)

- 의료 분야에 있어서, 혈관과 같이 높은 팽창압에 대응하기 위한 인공 혈관 개발 분야에서 다음과 같은 특허가 등록된 바 있음.

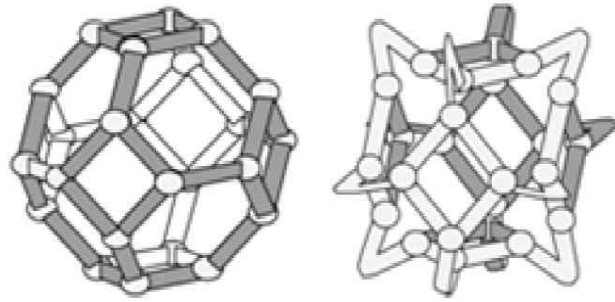


(a) 음의 포아송비를 갖는 질점 회전 구조체

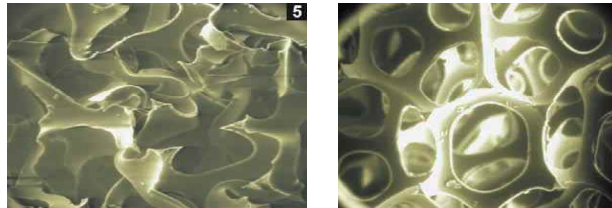
(b) 구조체 튜브의 제작

그림 13 인공혈관용 Auxetic 튜브 특허 등록 사례 (특허 10-0990023)

- 그러나, 건설 분야에 있어서는 음의 포아송비에 대한 구체적인 연구 사례가 전무한 상황으로서, 유사 기술개발 현황을 파악하는 것이 거의 불가능 하였음.
- 다만, Auxetic 거동을 일으킬 수 있는 발포 알루미늄 패널 등은 건축용 자재로 사용되어지고는 있으나, 주로 흡음재 또는 방음재로서 사용되어지고 있으며 Auxetic 거동에 대한 연구는 거의 수행되어지지 않았음. 최근 들어서야 이러한 발포 알루미늄 패널의 우수한 충격 흡수능력이 확인되어 방호·방폭용 패널로의 적용에 대한 연구 및 실제 적용이 수행되어진 바 있으나 (아프간 파병기지), Auxetic 거동에 대한 심층적인 연구는 부족한 상황임.
- 즉, 건설분야에 있어서는 해당 연구 및 개발이 전무한 상태로 해당 연구 인프라 및 관련 시장이 형성되어 있지 않은 상황임.
- 따라서, 본 연구의 대상인 Auxetic 구조부재의 개발은 건설 분야에 있어서는 원천기술 개발 대상으로서, 성공적인 개발이 이루어질 경우, 건설시장에 미치는 파급력은 매우 클 것으로 판단됨.
- 국외의 경우에 있어서도, Auxetic 재료는 고분자 및 기초소재 개발 분야에 있어서 미국, 독일 등 일부 선도국을 중심으로 연구개발이 활성화 초기단계에 이르고 있음.
- Auxetic 재료에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 대표적 분야로는 의료산업 분야 (인공 혈관, 근육, 인대, 확장근 등) 와 다양한 산업용 Filter 분야 및 섬유, 고분자 분야를 들 수 있음.
- 특히, 고분자 분야에 있어서는 다양한 미세조직 구조의 개발 관련 연구가 진행 중이며, 이러한 연구 개발 결과를 가지고 타 산업분야에의 응용 및 적용이 이루어지고 있는 상황임.
- 고분자 소재분야에 있어서 Lakes and Witt (2002)는 3차원 나노 및 마이크로 Cell 형태의 Auxetic 복합재료 모델을 제시하였으며, Grima 등 (2006) 은 폴리우레탄을 이용한 발포 고분자재료를 구성함에 있어서 Auxetic 기능을 부여하는 연구를 수행한 바 있음



(a) 3차원 cell 구조 (Lakes and Witt, 2002)



(b) 폴리우레탄 폼 SEM 이미지 (좌측: 일반, 우측: Auxetic)

그림 14 Auxetic 격자구조 적용 사례 (Grima et al., 2006)

- Frils 등 (1988)은 이의 개념을 확장하여, mm 단위 이상에서 적용이 가능한 격자구조 모델을 개발, 제시하였음

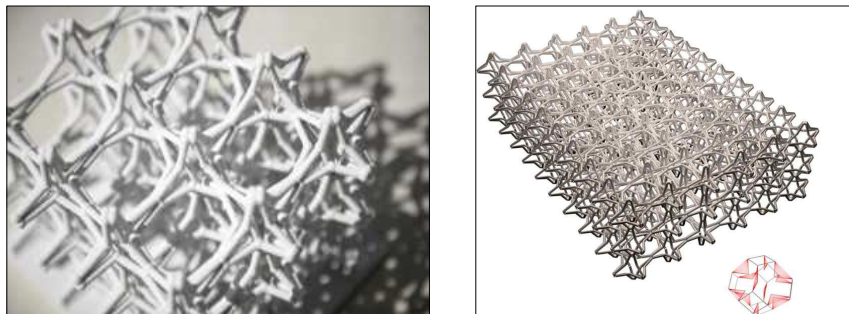


그림 15 Auxetic 격자구조 예 (Friis et al., 1988)

- Grima 와 Evans (2000, 2005)는 다음과 같이 회전사각 절점연결 구조의 기하학적 형상을 가지는 Auxetic 격자구조에 대해 Auxetic 거동을 확인, 수식으로 증명한 바 있으며, 이 밖에도 다양한 화살표형상을 조합한 Connected-stars 구조를 제시한 바 있음

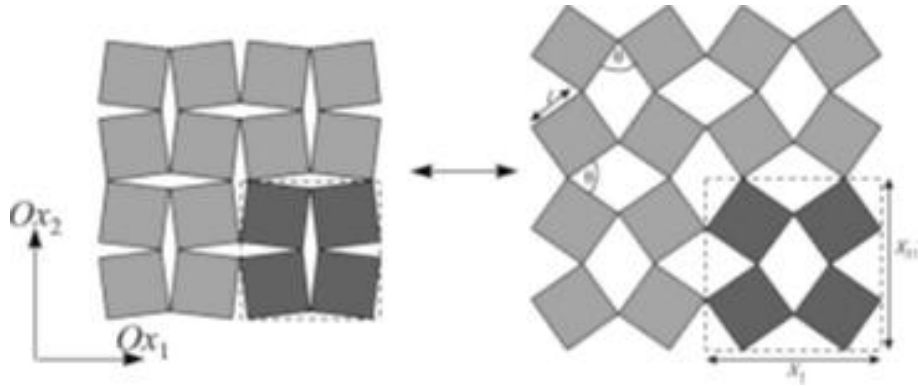


그림 16 회전사각 구조의 기하학적 형상 (Grima and Evans, 2000)

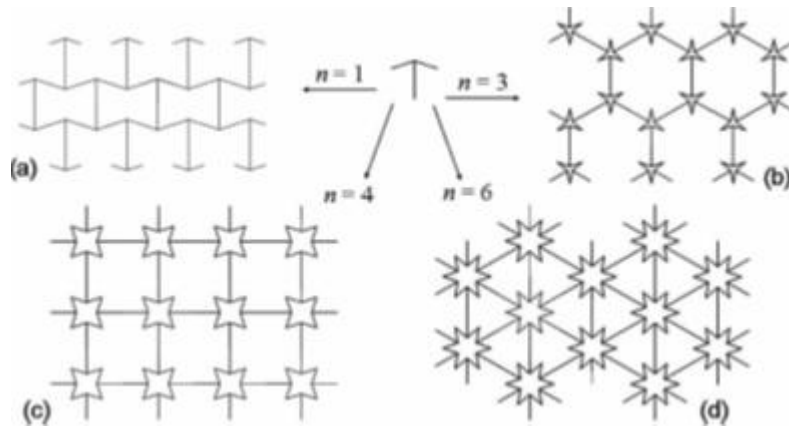


그림 17 화살표 형상 조합 Connected-Starts 구조 (Grima et al., 2005)

- 이 밖에 Doyoyo와 Hu (2006)는 음의 포아송비 특성을 가지는 3차원 lattice 구조에 대하여 작용하중에 대한 소성파괴를 포함하는 구조의 거동에 대한 연구를 수행, 구조의 소성파괴는 국부적인 소성화로 인해 발생하고, 전단파괴는 전체의 소성화로 인하여 발생한다고 제시함.
- Henderson 등 (2007)은 음의 포아송비를 가지는 Cellular foams 형상 구조에 대해 충격성능에 대한 연구를 수행하였는데, 이 연구에서는 일반적인 개방 구조와 요각 구조의 두께에 따른 충격방지성능을 분석함. 다양한 두께의 사용으로 인해 음의 포아송비 효과가 나타났으며, 일반적인 형상보다는 요각형상의 구조가 충격방지성능이 우수한 것으로 조사되었음.
- Lira 외 2인 (2009)은 다음 그림과 같이 다요각 별집형상(Multi re-entrant honeycombs) 구조에 대해 횡 전단 특성에 대해 연구, 다요각 별집형상 구조에 대해 횡전단에 대한 식을 유도, 실험과, 수치해석을 통하여 검증한 바 있음.

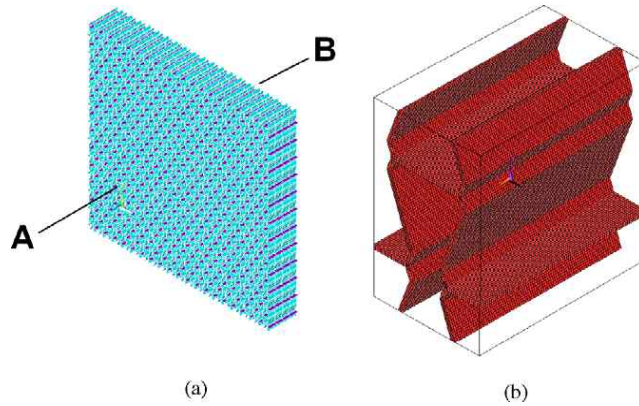


그림 18 다요각 벌집형상 예 (Lira et al., 2009)

- Schwerdtfeger 등(2011)은 최적화 기법을 활용하여 음의 포아송비 구조설계에 대한 연구를 수행, 공학적 경험에 근거하여 설계되었던 기존의 음의 포아송비 구조에 SIMP(Solid Isotropic Material with Penalization) 최적화 기법을 활용하여 구조성능의 향상이 가능함을 확인함.
- Kaminakis 외 2인 (2015)은 음의 포아송비 구조에 대한 위상최적화 및 재료균질화 기법을 적용하여 구조설계 및 검증에 대한 연구를 수행, 다양한 활용분야에서 요구되는 구조적 성능에 적합한 음의 포아송비 구조설계가 자동으로 수행이 가능함을 보임.
- Qiao 와 Chen (2015)은 이중화살형상 구조에 대하여 충격하중의 거동에 대한 연구를 수행, 이중화살구조 형상의 단위구조에 대해 포아송비 식을 유도하였으며, FE 해석을 통해 검증함.
- Li 등(2015)은 음의 포아송비 효과를 가지는 3차원 요각 구조물에 대해 대변형 보 (Large Deflection beam) 모델과 티모센코 보(Timoshenko beam)모델 을 이용하여 단위 구조물에 대한 처짐, 포아송비,탄성계수 등에 대해 수학적 이론 해를 유도하였으며, FE 해석을 통하여 검증함.
- 이러한 Auxetic 재료에 대한 관심은 특히, 섬유 및 고분자 합성 분야에서 인발 하중 작용시의 Auxetic 거동 (부피 팽창)에 의한 인발 저항력 증가 특성에 있으며, 다음 그래프는 에폭시 레진에 함침된 일반 PP (폴리프로필렌) 섬유 및 Auxetic 특성이 부여된 PP 섬유의 인발 저항성능 실험 결과를 보여주고 있음.

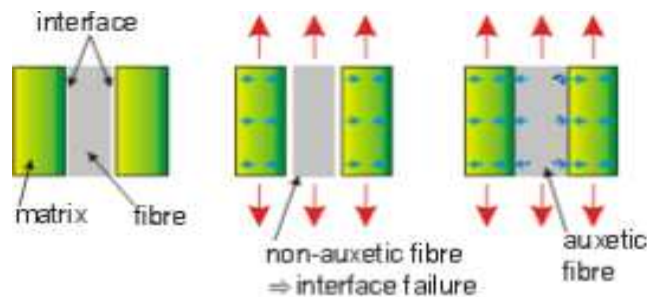


그림 19 Auxetic 섬유의 인발 하중 거동 예

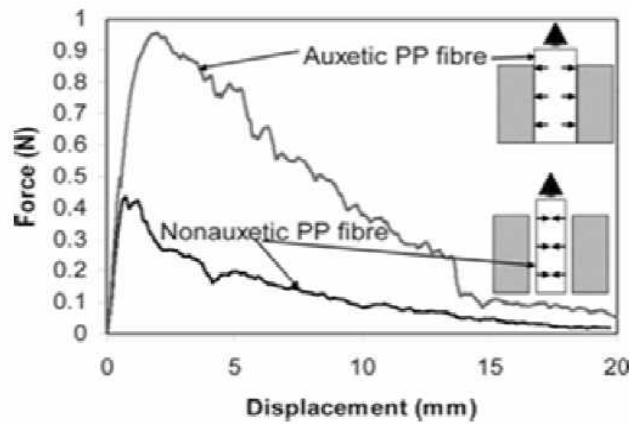


그림 20 Auxetic PP 섬유의 인발 저항성 증가 예
(Alderson and Alderson, 2007)

- 또한, 섬유 분야에 있어서 Auxetic 격자구조의 대표적 적용 사례로는 방폭커튼 및 방탄복 분야를 들 수 있다. Auxetic 거동을 가지는 섬유 조직구조는 특히 외부의 충격하중에 대해 높은 에너지 분산성과 흡수능력을 가지는 특성 때문에 방호·방폭 산업분야에서 많은 관심과 심도 깊은 연구 개발 활동이 이루어지고 있음.



그림 21 Auxetic blast curtain 방폭시험 예

(<http://store.exeter.ac.uk/product-catalogue/college-of-engineering-mathematics-and-physical-sciences/continuing-professional-development/mechanics-and-materials/advanced-materials-engineering-ecmm127>)

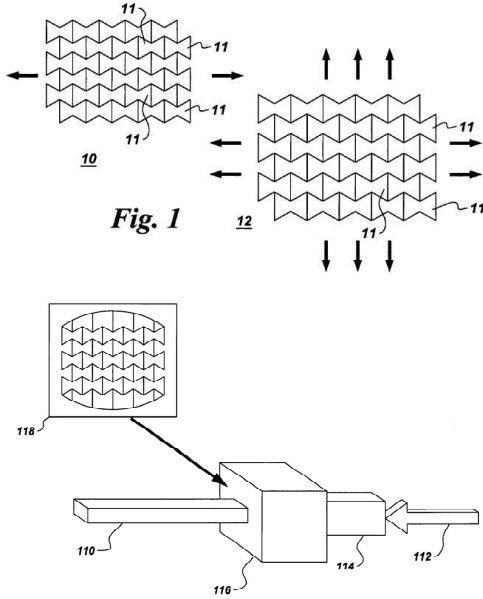
- 이러한 방폭커튼의 경우, 미국 등 주요 선도국에서는 주요 시설물에의 적용을 통해 건축물 및 시설물 내의 인명 보호를 위한 보강 공법으로 적용되고 있음.
- 건설분야는 최근 들어서 미국, 독일 등 일부 선도국의 기업체 및 대학 연구소 등에서 연구 개발을 수행하고는 있으나, 개발된 내용 및 제품에 대한 정보는 거의 공개된 것이 없는 단계임.
- 특히, 독일의 PROvendis GmbH 사에서는 음의 포아송비를 가지는 구조부재에 대한 제품 개발 및 상품화 연구를 수행하였다고 홍보하였으나, 상세한 내용은 공개하지 않고 있음. (최근 해당 홍보내용 삭제)
- 즉, 건설분야에 있어서 Auxetic 구조부재의 개발은 국외 기술 선도국에 있어서도 최근 들어서야 연구개발이 시작되고 있는 태동기로서, 향후 미래형 첨단 건설시장의 판도에 있어서 중요한 역할을 할 수 있는 분야로 판단됨.

2. 국내외 관련 기술 특허 동향

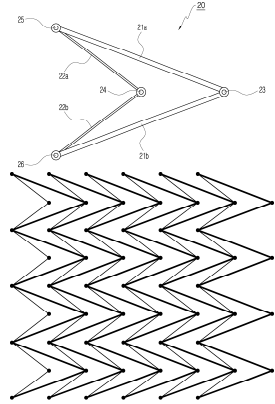
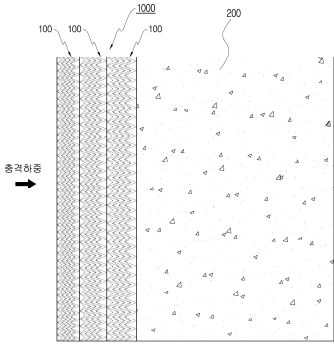
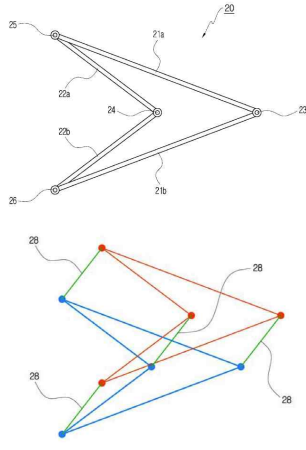
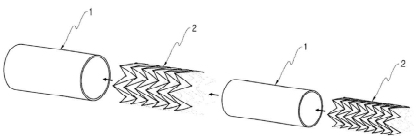
○ Auxetic 거동 재료 또는 자재와 관련된 국내외 타 개발자 특허 현황은 다음과 같음.

특허명 (특허번호)	출원대상 국가	특허권자	특허내용요약	활용 또는 회피방안
셀 구조물 (10-0201870)	대한민국	한국화학 연구소	인공장기 및 일반구조재료 등에 적용 가능한 음의 포아송비 거동 셀구조물 형식	- 재료관점 차원에서 매우 큰 변위가 발 생하는 거동체에 적 용 가능한 기술임 - 관련사항 없음
음의 프와송비를 갖는 절점 회전 구조체 튜브 및 그 제조방법 (10-0990023)	대한민국	서강대학교 산학협력단	다수의 절점과 소섬유로 구성된 절점회 전 구조체를 이용, 실린더형 튜브를 형 성함으로써, 인공혈관, 스텐트 등의 분 야로의 적용성을 향상시킨 음의 포아송 비 거동 절점회전 구조체 튜브	- 소섬유로 연결된 절 점회전 구조체 방식 으로 건설용 구조부 재 적용 불가 - 관련사항 없음
Auxetic materials (US6878320 B1)	미국	Kim Lesley Alderson et al.	Auxetic 거동을 가지는 폴리머 재료의 섬유로의 생산 공정, 방식에 대한 특허	- 관련사항 없음
Energy Absorbing Articles (US7160621 B2)	미국	Tansen Dhananjay Chaudhari et al.	셀 크기 1mm 이상의 Auxetic 격자구조 체 적용에 의한 자전거 외부 충격 흡수 장치 개념수립 관련 특허	- 제시된 격자구조 형 태는 건설분야에도 접목이 가능할 수 있 으며, 실제적 추가검 토가 필요함. - 관련사항 있음
Reversibly expandable energy absorbing assembly and methods for operating the same (US7350851 B2)	미국	William Barvosa-Cart er et al.	다양한 격자구조 형식의 에너지 흡수재 적용 관련 특허로서, 주로 자동차 등의 내장재에 적용하여 충격 흡수력을 증대 시키는 것과 관련됨	- 건설 구조물에서의 적 용과는 직접적 관련 성 없음
Morphing cellular structure (US7582349 B1)	미국	Guillermo A. Herrera et al.	다양한 셀구조에 있어서 개별 셀에 독 자적 신호를 부여, 다양한 방식으로 셀 전체구조가 변화하는 방식에 대한 개념 특허	- 관련사항 없음
Deformable variable-stiffne ss cellular structures (US7678440 B1)	미국	Geoffrey P. McKnight et al.	고분자계통의 Auxetic 격자구조체 특허	- 관련사항 없음
Processing for fabricating a composite (US7754137 B2)	미국	Christopher Sutcliffe et al.	Auxetic 복합섬유 제조공정 관련 특허	- 관련사항 없음
Composite material for turbine support structure (US7824763)	미국	Narayana Namburi et al.	터빈의 지지구조물용 복합재료로, 온도 에 팽창하는 재료와 수축하는 재료를 병합하여, 지지성능을 증가시키는 방법 론적 특허	- 관련사항 없음
Cover skin for a variable shape aerodynamic area (US7896294)	미국	Kay W. Dittrich	항공기 날개 등 동역학적 거동을 가지 는 구조부재에 적용 가능한 Auxetic 시 스템 특허	- 관련사항 없음

○ 상기 특허 중, 건설분야에 접목 관련성이 높은 유사선행특허에 대한 검토 결과는 다음과 같음

제안기술	분 야	구조물용 Auxetic 격자구조 개발
	과제차별화방안	◎ 건설분야 대형 구조물에 적용 가능한 Auxetic 격자구조 설계 및 제작
	연구내용(안)	A : Auxetic 격자구조 설계 B : Auxetic 격자구조 제작 C : Auxetic 격자구조 성능 평가
유 사 선행 특 허		
출원번호	10/881948	
출 원 일	2004.06.28	
출 원 인	Tansen Dhananjay Chaudhari et al.	
등록(공개)번호	US7160621 B2	
대표도면		
요 약	Auxetic 거동을 가지는 격자구조체를 탑재한 외부 충격 에너지 흡수장치 개념 특허	
구성요소 (성능지표)	a :음의 포아송비 거동 격자구조체를 적용한 에너지 흡수장치를 자전거 등에 부착, 외부 충격하중 발생시, 발생된 에너지를 최대한 흡수하여 운전자에 전달되는 에너지를 최소화 하는 개념 기술임	
구성요소 비교(≒ : 유사)	A ≒ a	
유사도분석	본 제안기술의 구성요소 A는 선행기술 US7160621 B2와 유사함	
대응전략	① 상기 주요선행특허는 본 제안기술 A와 유사한 점이 있음 ② 그러나, 본 제안기술 B 및 C에 대한 언급은 없으며, Auxetic 거동을 가지는 격자구조체가 다양한 점을 고려할 때, 본 연구과제에서는 다른 형식의 격자구조 모델을 독자적으로 개발함으로써 대응할 수 있다고 판단됨	

○ 한편, 본 연구진이 보유하고 있는 관련 국내특허는 다음과 같음.

특허명 (특허번호)	출원대 상국가	특허 권자	대표도면	특허내용
상이한 강성의 내외측봉으로 이루어져 충격 대응 합성보강재를 이루는 격자구조체, 이를 이용한 충격 대응 합성보강재 및 이러한 충격 대응 합성보강재의 제작방법 (10-1459647)	대한 민국	KICT		- Auxetic 격자구조를 구성함에 있어서, 강성을 달리해서 Auxetic 거동을 강화시키는 방식에 대한 개념특허임
격자구조체를 이용한 충격 대응 합성보강재의 적층 구조를 가지는 충격보호 구조물 (10-1459648)	대한 민국	KICT		- Auxetic 격자구조의 크기를 달리함으로써, 충격하중에 대한 에너지 소산능력을 증대시키는 방식에 대한 개념특허임
충격 대응 합성보강재, 이를 위한 격자구조체 및 합성보강재의 제작방법 (10-1394989)	대한 민국	KICT		- 구조물용 Auxetic 격자구조의 제시 및 적용 관련 개념특허임
고 인장강성을 가지는 합성인장부재, 이를 위한 격자구조판 및 합성인장부재의 제작방법 (10-1394990)	대한 민국	KICT		- Auxetic 격자구조체를 적용한 고 인장강성 합성부재 제작 개념특허임

○ 본 연구에서는 연구진이 보유하고 있는 특허기술을 기반으로 하여, 실제 구조물에 적용 가능한 Auxetic 격자구조체 시작품 및 합성부재를 개발하고자 함.

3. 국내외 시장분석 및 산업동향

- 건설산업 분야에서 Auxetic 격자구조체의 실제 적용과 관련된 시장은 형성되지 않은 상황이며, 세계시장을 선도하는 업체 또한 존재하지 않음.
- 즉, Auxetic 거동 재료와 관련된 기술개발 및 연구는 신소재 및 고분자재료 분야에서조차 태동기 수준으로서, 다양한 사용처에 대한 연구개발 시도가 이루어지고 있음.
- 본 연구개발을 통해, 건설분야에 적용 가능한 Auxetic 거동 복합부재 원천기술을 국내에서 확보할 경우, 건설산업, 특히 초대형 구조물에 대한 신개념 설계 및 시공기술을 독자적으로 확보함과 동시에, 이를 통해 새로운 건설시장을 개척하는 데 크게 기여할 수 있을 것으로 판단됨.

4. 종합결론

○ 상기의 동향 분석으로부터 다음과 같은 종합결론을 내림.

내부 환경 분석	【 강 점(S) 】 - 건설분야에 있어서 최초로 시도되는 연구개발로서, 연구개발의 성공 시, 원천기술의 확보 가능 - 사전검토 연구를 수행한 경험이 있는 연구진으로 구성, 본과제 수행 시, 신속한 연구개발 추진가능 - 연구수행에 필요한 인프라 충족	【 약 점(W) 】 - 고분자 및 신소재 분야 등 타 산업분야 연구수준 대비 확보된 기술력 부족 - 건설산업 분야의 해당 전문인력 및 관련기술 이해도 부족 - 건설산업 특성 상, 시공성을 고려한 단순화된 기술개발 필요
	【 기 회(O) 】 - 건설산업 분야 해당 기술력 확보를 통한 세계적 기술 선도 가능 - 원천기술 확보를 통한 해외 대형 구조물 건설 시장 주도 가능 - 신개념 구조물 설계 등 미래 지향적 건설 신시장 개척 가능	【 위 험(T) 】 - 실 구조물 적용 단계 수준 도달을 위해 장기간의 추가적 연구개발 기간 필요 가능성 - 국외 관련 연구 수행 기관 정보수집의 한계에 따른 동향파악 한계

시사점 및 종합결론

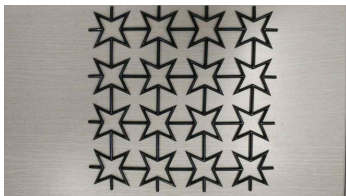
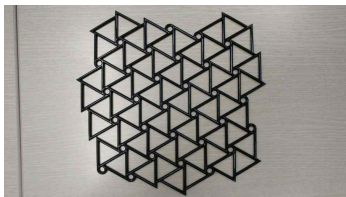
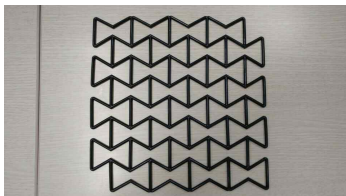
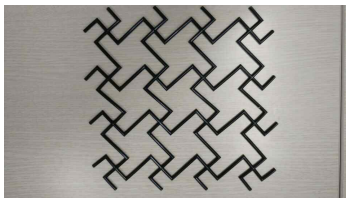
- 본 Auxetic 격자구조체 적용 고강성 구조부재 개발은 건설산업 분야에서 새로이 시도되는 연구로서, 해당 연구의 성공적 수행을 통한 원천기술 확보 시 초대형 구조물 또는 방호구조물 등에의 직접 적용 가능성 등, 기술적 파급력은 매우 클 것으로 기대됨.
- 그러나 해당 기술에 대한 건설분야의 이해도 부족 및, 신소재 등 재료분야에서 개발, 적용하고 있는 복잡한 구조의 Auxetic 형상은 건설산업 분야에의 적용에 걸림돌로 작용할 수 있음.
- 이에, 본 연구를 수행함에 있어서, 건설현장에서 쉽게 적용할 수 있고, 그 성능이 충분히 입증되어 실제 현장 적용이 가능한 수준의 기술개발이 이루어져야 한다고 판단됨.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. Auxetic 격자구조체 선정

가. Auxetic 격자구조 형식 선정

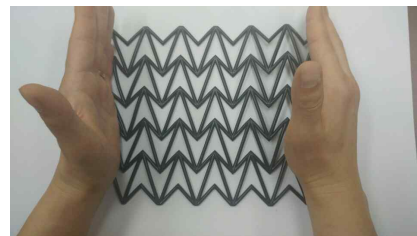
- 본 연구에서 개발하고자 하는 Auxetic 격자구조체는 시공성 등을 고려, 구조물 및 건축물에 적용할 수 있는, 최대한 단순화된 형태를 가지는 것을 목표로 하였음.
- 그러나, 상기에서 살펴본 바와 같이, 신소재 분야에서 개발된 Auxetic 격자구조는 그 형상이 매우 복잡하기 때문에 건축물 및 시설물에의 적용이 어렵다는 문제점이 있음.
- 이에, 본 연구에서는 Auxetic 격자구조 형식 중, 2차원 구조를 가지면서 구조물에의 적용 및 구조적 거동에 상대적으로 유리한 격자구조체를 선정, 다음과 같이 기본적인 거동을 사전조사하기 위하여 예비 샘플을 3D 프린터로 제작, 그 거동을 확인하였음.
- 샘플은 격자체의 변형을 크게 유도하기 위하여 1차는 ABS 재질로, 2차는 고무재질로 제작하여 변형 성상 및 특성검토에 활용하였음.



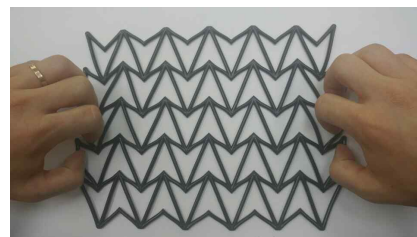
(a) Auxetic 격자구조체 후보군



(변형 전)



(압축거동)



(인장거동)

(b) 이중화살촉 모양 격자구조체의 거동 예

그림 22 구조물용 Auxetic 격자구조체 후보군 선정

- 상기 후보군을 기반으로 건설산업 분야에의 적용을 고려할 시, 상대적으로 제작이 용이하며, 하중재하 조건 하에서 자체형상의 유지 및 강성부여에 유리함과 동시에 상대적으로 하중 집중부위 등 취약부위 발생이 적은 격자구조를 선정할 필요성이 있음.

- 검토결과, 그림 22의 (a)에서 상단 2 타입의 경우는 격자 자체의 강성유지의 한계가 있으며, 하단 2 타입의 경우는 실제 제작 및 응력 발생 시 특정 지점에 응력이 과도하게 집중되는 것으로 파악되었으며, 상대적으로 (b)에서 제시된 이중화살촉 격자구조가 건설분야에 적합한 형상을 가진다고 판단되었음.
- 또한, 본 연구진이 기 보유하고 있는 Auxetic 격자구조체 관련 특허는 이중화살촉 모양을 기본으로 하고 있으며, 해당 특허는 개념특허로서 실제 적용 및 성능에 대해서는 추가적인 연구가 필요한 실정과 과업기간이 단기간임을 고려, 새로운 형태의 격자구조 모델을 개발하기 보다는 기존의 모델 중 구조물への 적용이 상대적으로 유리한 화살촉 모양의 격자구조를 선정, 이의 실제 적용을 위한 원천기술을 개발하고자 하였음.

나. Auxetic 격자구조체 매립 복합체 거동 사전 예측

- 본 연구에서 최종적으로 개발하고자 하는 Auxetic 격자구조체 탑재 복합체의 거동에 대한 기본 개념은 다음과 같음.

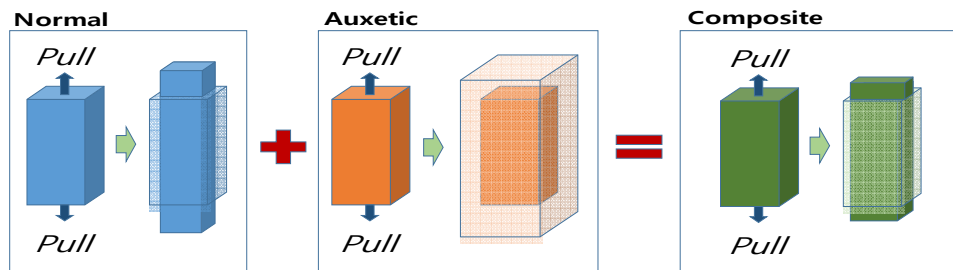


그림 23 Auxetic 격자구조체 탑재 복합체 거동 기본 개념

- 상기 개념도에 나타난 바와 같이, 콘크리트와 같은 구조체에 Auxetic 격자체를 매립함으로써, 복합체의 강성을 증대시키는 기술을 개발하고자 함.
- 이를 위하여 우선적으로 콘크리트와 Auxetic 특성을 가지는 재료가 합쳐진 복합체의 거동 특성을 검토하고자 사전 유한요소해석을 수행하였음.
- 해석은 기본적으로 일반콘크리트를 대상으로 하여 콘크리트 외층을 Auxetic 거동을 가진 Layer가 감싼 조건을 고려하였으며, Auxetic Layer의 탄성계수, 포아송비 수치 및 두께가 복합체의 압축거동 시 강성증대에 미치는 효과를 확인하고자 함.
- 다음 표는 본 해석에 적용된 적용 변수를 보이고 있으며, 100mm 직경의 콘크리트 외층에 5, 10mm Auxetic Layer의 탄성계수를 콘크리트 대비 1,2,3,4,5,6배 변화시키면서 해석을 수행함.

표 4 사전 유한요소해석을 위한 변수 설정

Materials	Elastic Modulus [GPa]	Poisson' s ratio	Diameter [mm]	Outer layer thickness [mm]
Concrete	30	0.16	100	-
Outer layer	30,60,90, 120,150,180	-0.1, -0.2, -0.3, -0.4, -0.5	-	5, 10

- 다음 그림은 해석 수행 사례이며, 상기 변수에 대한 해석수행 결과는 다음 표에 정리, 각 변수별 강성증대 효과가 30% 이상 되는 경우를 확인하였음.
- 이 때, 중요한 고려사항은 합성체의 강성증가에 있어서 Layer 자체의 강성에 의한 증가효과와 Auxetic 거동에 의한 강성증가 효과를 구분하여 확인하여야 한다는 점임.
- 이에, 본 검토에서는 합성체 외측의 Layer에 의한 강성증대율에서 Auxetic 거동에 의한 기여율을 확인하였으며, 표에 수치값을 제시하였음.

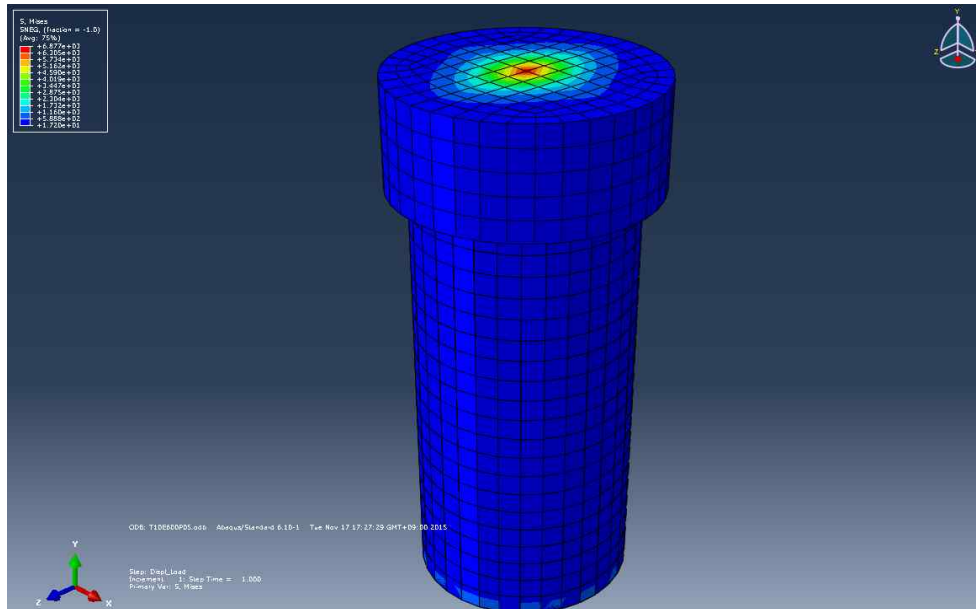


그림 24 Auxetic 외측 Layer의 강성증대 효과 검토 시뮬레이션 예

표 5 사전 유한요소해석 결과

t (mm)	E_{out}/E_c	r_{out}	K (load/displ)	Increase of Stiffness	Contribution of negative poisson's ratio
5	1	0.16	2708991	0.15	0.00
5	1	-0.1	2738578	0.16	0.08
5	1	-0.2	2765875	0.17	0.16
5	1	-0.3	2805191	0.19	0.27
5	1	-0.4	2861007	0.21	0.43
5	1	-0.5	2941431	0.25	0.66
5	2	0.16	3116750	0.32	0.00
5	2	-0.1	3174741	0.35	0.08
5	2	-0.2	3225252	0.37	0.14
5	2	-0.3	3296736	0.40	0.24
5	2	-0.4	3396552	0.44	0.37
5	2	-0.5	3537605	0.50	0.55
5	3	0.16	3507197	0.49	0.00

5	3	-0.1	3590436	0.52	0.07
5	3	-0.2	3660585	0.55	0.13
5	3	-0.3	3758700	0.60	0.22
5	3	-0.4	3894027	0.65	0.34
5	3	-0.5	4082495	0.73	0.50
5	4	0.16	3884934	0.65	0.00
5	4	-0.1	3990664	0.69	0.07
5	4	-0.2	4077853	0.73	0.13
5	4	-0.3	4198791	0.78	0.21
5	4	-0.4	4363940	0.85	0.31
5	4	-0.5	4590928	0.95	0.46
5	5	0.16	4252553	0.80	0.00
5	5	-0.1	4378591	0.86	0.07
5	5	-0.2	4480442	0.90	0.12
5	5	-0.3	4620587	0.96	0.19
5	5	-0.4	4810269	1.04	0.29
5	5	-0.5	5068125	1.15	0.43
5	6	0.16	4610208	0.96	0.00
5	6	-0.1	4754545	1.02	0.06
5	6	-0.2	4869225	1.07	0.11
5	6	-0.3	5025903	1.13	0.18
5	6	-0.4	5236348	1.22	0.28
5	6	-0.5	5519688	1.34	0.40
10	1	0.16	3089506	0.31	0.00
10	1	-0.1	3152399	0.34	0.09
10	1	-0.2	3203483	0.36	0.16
10	1	-0.3	3274823	0.39	0.25
10	1	-0.4	3373620	0.43	0.39
10	1	-0.5	3512497	0.49	0.58
10	2	0.16	3813071	0.62	0.00
10	2	-0.1	3927144	0.67	0.08
10	2	-0.2	4014753	0.70	0.14
10	2	-0.3	4134427	0.75	0.22
10	2	-0.4	4296532	0.82	0.33
10	2	-0.5	4518536	0.92	0.48
10	3	0.16	4490237	0.91	0.00
10	3	-0.1	4645333	0.97	0.07
10	3	-0.2	4760600	1.02	0.13
10	3	-0.3	4915852	1.09	0.20
10	3	-0.4	5122474	1.17	0.30
10	3	-0.5	5399054	1.29	0.43
10	4	0.16	5131980	1.18	0.00
10	4	-0.1	5320867	1.26	0.07

10	4	-0.2	5457636	1.32	0.12
10	4	-0.3	5639621	1.39	0.18
10	4	-0.4	5878752	1.50	0.27
10	4	-0.5	6193777	1.63	0.38
10	5	0.16	5745094	1.44	0.00
10	5	-0.1	5962094	1.53	0.06
10	5	-0.2	6116136	1.60	0.11
10	5	-0.3	6319177	1.68	0.17
10	5	-0.4	6583133	1.79	0.25
10	5	-0.5	6926667	1.94	0.35
10	6	0.16	6334165	1.69	0.00
10	6	-0.1	6574958	1.79	0.06
10	6	-0.2	6743099	1.86	0.10
10	6	-0.3	6963104	1.96	0.16
10	6	-0.4	7246747	2.08	0.23
10	6	-0.5	7612093	2.23	0.32

- 그림 25 및 26은 외측 보강재의 두께 5, 10mm 적용시의 강성(하중/변위) 증가율을 나타낸 그래프로서, 보강재의 두께가 증가함에 따라 강성증가 효과가 커짐을 확인할 수 있음. 이는 보강재의 존재에 의한 복합체의 전체 단면적 증가, 보강재의 탄성계수 효과 및 포아송비 효과가 합쳐져서 발생한 것으로서, 음의 포아송비 효과만에 의한 강성증가 효과를 별도로 구분할 필요가 있음.

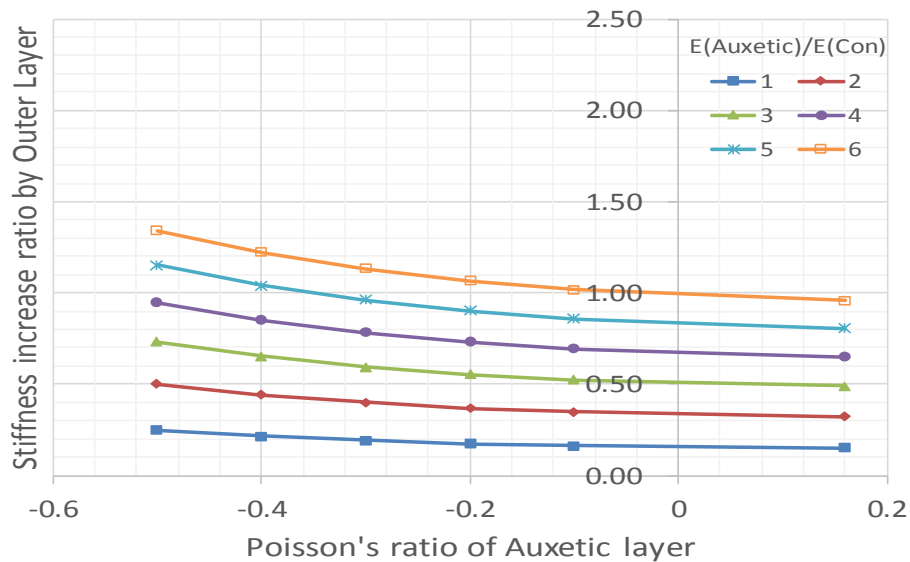


그림 25 콘크리트 대비 복합체 강성증가비 (Layer thickness: 5mm)

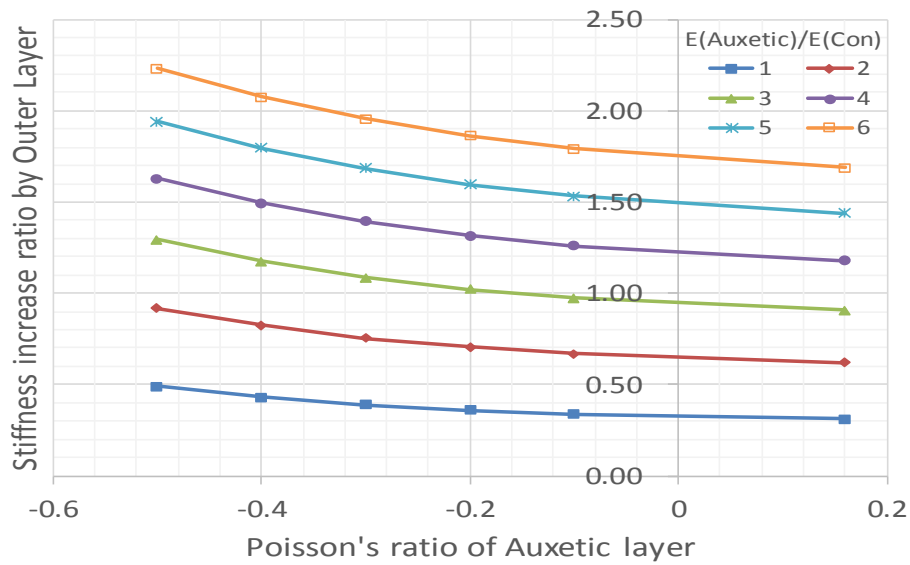


그림 26 콘크리트 대비 복합체 강성증가비 (Layer thickness: 10mm)

- 그림 27 및 28은 그림 25 및 26에서 구한 각 보강재 두께별 해석결과에서 음의 포아송비에 의한 강성증가치를 별도로 나타낸 결과임. 비록 본 해석은 보강재의 음의 포아송비 수치를 -0.5까지 검토하였으나, 음의 포아송비 수준이 높아질수록 강성증가 효과가 포물선 형태로 증가함을 확인하였음. 또한, 보강재의 두께가 증가할수록, 탄성계수가 증가할수록 복합체의 강성증대에 보강재의 음의 포아송비 효과 또한 증가함을 확인하였음.

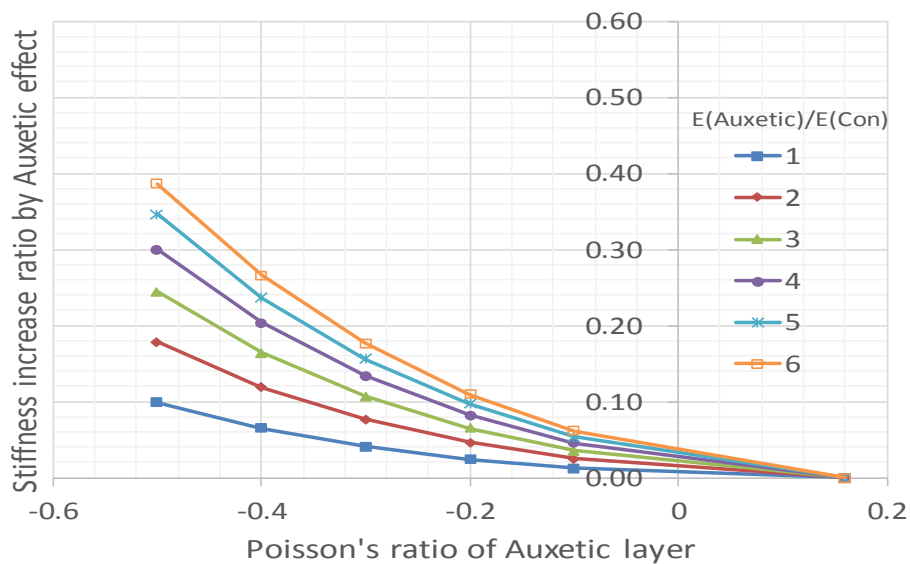


그림 27 외측 Layer Auxetic 효과만에 의한 복합체 강성증가비
(Layer thickness: 5mm)

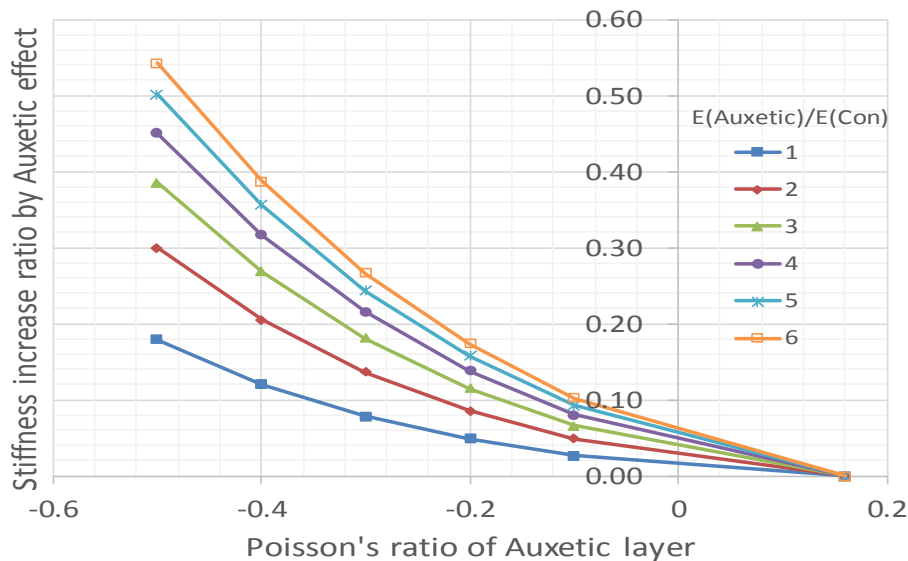


그림 28 외측 Layer Auxetic 효과만에 의한 복합체 강성증가비
(Layer thickness: 10mm)

- 이와 같이 본 사전해석 수행 검토결과, 콘크리트에 Auxetic 거동을 가지는 보강재가 포함된 복합체에 있어서 보강재의 음의 포아송비 효과가 유의미한 수준으로 영향을 가질 수 있음을 확인하였으며, 음의 포아송비 수준이 높아질수록 그 효과가 급격히 증가함을 확인함.
- 다만, 보강재의 두께 및 탄성계수가 커짐에 따라 이에 의한 복합체의 강성증대 효과 정도가 음의 포아송비에 의한 강성증대 효과보다 상대적으로 매우 클 수 있음도 확인하였음. 즉, 두께 5mm 보강재의 경우 탄성계수가 콘크리트와 동일한 경우 보강재의 포아송비가 -0.5에 있어서 총 강성 증가 효과는 약 25%이었으며, 이 중 15%는 단면적의 증가에 의한 효과이며, 10%는 음의 포아송비에 의한 효과임. 이에 반해, 보강재의 탄성계수가 콘크리트의 6배인 경우에 있어서는 총 134%의 강성증가 효과가 있는 반면에 음의 포아송비에 의한 효과는 약 39% 수준으로 총 강성증가 효과에 음의 포아송비 효과가 미치는 영향이 상대적으로 감소함을 확인함.
- 즉, 콘크리트 복합체의 구성에 있어서 음의 포아송비 거동을 가지는 보강재의 구성 시, Auxetic 효과를 극대화 하기 위해서는 보강재 자체가 가지는 다양한 역학적 특성에 따른 영향을 함께 고려할 필요가 있음을 확인함.

다. 이중화살촉 구조 Auxetic 단위 cell 거동 예측모델 구성 및 예측평가

- 본 연구에서 선정한 화살촉 형태의 Auxetic 격자구조체의 거동과 관련해서 격자구조체 전체의 포아송비 예측모델은 앞서 소개한 바와 같이 Qiao 와 Chen (2015)이 제시한 바 있음.
- 이에 기반하여 본 연구에서는 화살촉 1 cell의 포아송비 거동을 예측하는 탄성학적 이론식을 다음과 같이 유도하였음.

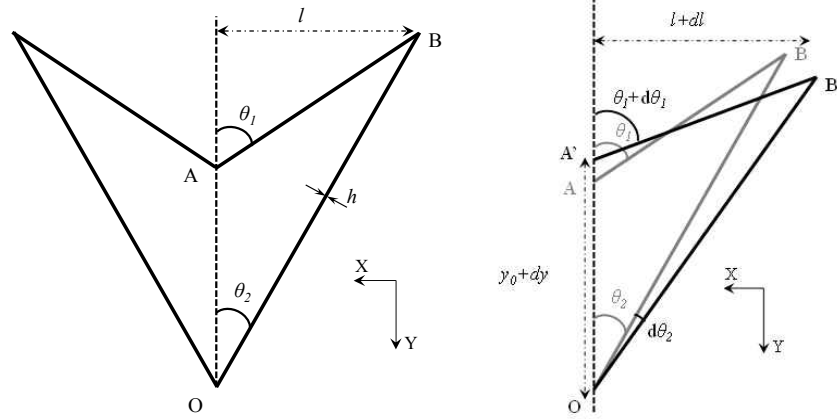


그림 29 이중화살촉 형태 Auxetic 격자체의 거동 기본모델

– 변형 전의 기하학적 조건에서,

$$x_0 = (\overline{OB})_x = l_2 \sin(\theta_2) = l_1 \sin(\theta_1)$$

$$y_0 = \overline{OA} = l_2 \cos(\theta_2) - l_1 \cos(\theta_1)$$

– 변형 후의 기하학적 조건에서,

$$x_0 + dx = (\overline{OB'})_x = l_1 \sin(\theta_1 + d\theta_1) = l_2 \sin(\theta_2 + d\theta_2)$$

$$y_0 + dy = \overline{OA'} = l_2 \cos(\theta_2 + d\theta_2) - l_1 \cos(\theta_1 + d\theta_1)$$

$$dx = (\overline{OB'})_x - x_0 = l_1 \sin(\theta_1 + d\theta_1) - l_1 \sin(\theta_1)$$

$$= l_1 \sin(\theta_1) \cos(d\theta_1) + l_1 \cos(\theta_1) \sin(d\theta_1) - l_1 \sin(\theta_1)$$

– 각도의 변화값이 매우 작다는 가정 하에,

$$\sin(d\theta) \approx d\theta$$

$$dx = (\overline{OB'})_x - x_0 = l_1 \sin(\theta_1 + d\theta_1) - l_1 \sin(\theta_1)$$

$$\cos(d\theta) \approx 1 \text{ or } 1 - \frac{(d\theta)^2}{2}$$

$$\tan(d\theta) \approx d\theta = l_1 \sin(\theta_1) + l_1 \cos(\theta_1) d\theta_1 - l_1 \sin(\theta_1) = l_1 d\theta_1 \cos(\theta_1)$$

$$dy = \overline{OA'} - y_0 = l_2 \cos(\theta_2 + d\theta_2) - l_1 \cos(\theta_1 + d\theta_1) - l_2 \cos(\theta_2) + l_1 \cos(\theta_1)$$

$$\begin{aligned}
&= l_2 \cos(\theta_2) \cos(d\theta_2) - l_2 \sin(\theta_2) \sin(d\theta_2) - l_1 \cos(\theta_1) \cos(d\theta_1) \\
&\quad + l_1 \sin(\theta_1) \sin(d\theta_1) - l_2 \cos(\theta_2) + l_1 \cos(\theta_1) \\
&= l_2 \cos(\theta_2) - l_2 \sin(\theta_2) d\theta_2 - l_1 \cos(\theta_1) + l_1 \sin(\theta_1) d\theta_1 - l_2 \cos(\theta_2) + l_1 \cos(\theta_1) \\
&= -l_2 \sin(\theta_2) d\theta_2 + l_1 \sin(\theta_1) d\theta_1 \\
&= -l_2 d\theta_2 \sin(\theta_2) + l_1 d\theta_1 \sin(\theta_1)
\end{aligned}$$

- x축 및 y축의 변형율은 다음과 같이 유도됨

$$\begin{aligned}
\epsilon_x &= \frac{dx}{x_0} = \frac{l_1 d\theta_1 \cos(\theta_1)}{x_0} \\
\epsilon_y &= \frac{dy}{y_0} = \frac{-l_2 d\theta_2 \sin(\theta_2) + l_1 d\theta_1 \sin(\theta_1)}{y_0} \\
l_1 &= \frac{\sin(\theta_2) l_2}{\sin(\theta_1)} \\
\epsilon_y &= \frac{-l_2 d\theta_2 \sin(\theta_2) + \frac{\sin(\theta_2) l_2}{\sin(\theta_1)} d\theta_1 \sin(\theta_1)}{y_0} \\
&= \frac{-l_2 d\theta_2 \sin(\theta_2) + l_2 d\theta_1 \sin(\theta_2)}{y_0} \\
&= \frac{l_2 \sin(\theta_2) (d\theta_1 - d\theta_2)}{y_0} = \frac{l_2 \sin(\theta_2) (d\theta_1 - d\theta_2)}{l_2 \cos(\theta_2) - l_1 \cos(\theta_1)} = \frac{l_2 \sin(\theta_2) (d\theta_1 - d\theta_2)}{l_2 \cos(\theta_2) - \frac{\sin(\theta_2) l_2}{\sin(\theta_1)} \cos(\theta_1)} \\
&= \frac{l_2 \sin(\theta_2) (d\theta_1 - d\theta_2) \sin(\theta_1)}{l_2 \cos(\theta_2) \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_2) \cos(\theta_1)} = \frac{l_2 (d\theta_1 - d\theta_2) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2)}{l_2 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) - l_2 \cos(\theta_1) \sin(\theta_2)} \\
&= \frac{(d\theta_1 - d\theta_2) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \\
d_y &= -l_2 d\theta_2 \sin(\theta_2) + \frac{\sin(\theta_2) l_2}{\sin(\theta_1)} d\theta_1 \sin(\theta_1) \\
&= -l_2 d\theta_2 \sin(\theta_2) + \sin(\theta_2) l_2 d\theta_1 = (d\theta_1 - d\theta_2) l_2 \sin(\theta_2) \\
x_0 &= (\overline{OB})_x = l_2 \sin(\theta_2) = l_1 \sin(\theta_1) = (d\theta_1 - d\theta_2) x_0 \\
(d\theta_1 - d\theta_2) &= \frac{dy}{x_0}
\end{aligned}$$

- 정리하면,

$$\begin{aligned}
\epsilon_y &= \frac{dy}{x_0} \frac{\sin(\theta_1) \sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \\
\epsilon_x &= \frac{dx}{x_0} \\
&\leq,
\end{aligned}$$

$$\nu_{yx} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} = -\frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\sin\theta_1 \sin\theta_2} \quad \text{으로 구성됨.}$$

- 유한요소 해석의 경우, x방향 및 y방향 변위량을 취하였으며, 이를 적용할 경우 다음과 같이 모델식이 구하여짐.

$$d_x = U_x^B \quad (\text{유한요소해석 결과치 적용})$$

$$d_y = U_y^A \quad (\text{유한요소해석 결과치 적용})$$

$$\epsilon_x = \frac{dx}{x_0} = \frac{U_x^B}{l}$$

$$\epsilon_y = \frac{dy}{x_0} \frac{\sin(\theta_1)\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} = \frac{U_y^A}{l} \frac{\sin(\theta_1)\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1 - \theta_2)}$$

- 최종적으로 유한요소 해석에 의한 포아송비의 계산은 다음 식으로 구하여짐.

$$\nu_{yx} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}$$

- 이중화살촉 형태의 단위 cell 격자에 있어서 Auxetic 거동에 미치는 중요 변수는 상기 유도식에서 예상할 수 있는 바와 같이 격자의 구성각도와 셀의 크기임.
- 이에, 본 연구에서는 단위 Cell의 각도를 변화시킴에 따른 거동변화를 상기 개발된 이론식과 유한요소해석 결과와 비교, 검토하여 수행하였음.

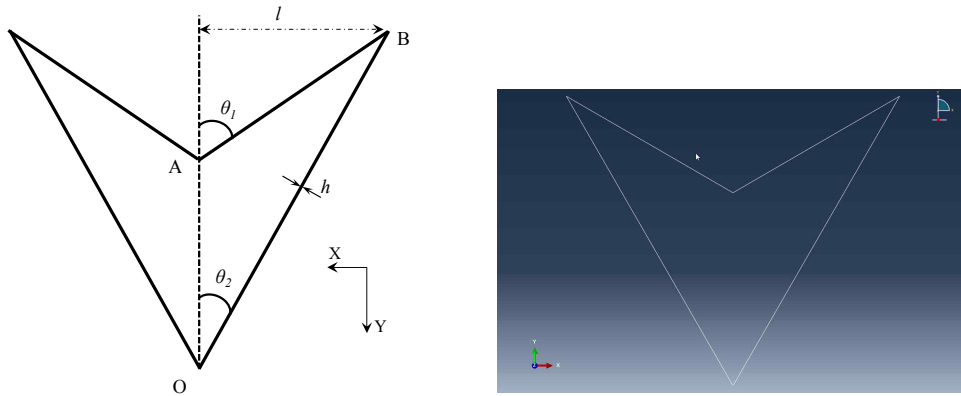


그림 30 화살촉 형태 Auxetic 단위 Cell 모델

- 기본해석에서는 $l=0.03\text{m}$, $h=0.001\text{m}$ 로 가정하였으며, 부재의 재료는 강으로, 탄성계수 $E=200\text{GPa}$, 포아송비는 0.3을 적용하였음.
- θ_1 , θ_2 는 다양한 조합이 가능하며, 다음 그래프는 θ_2 를 30° 로 고정하고 θ_1 을 변화시켰을 경우의 포아송비 모델식 및 유한요소 해석 결과치를 보여주고 있음.

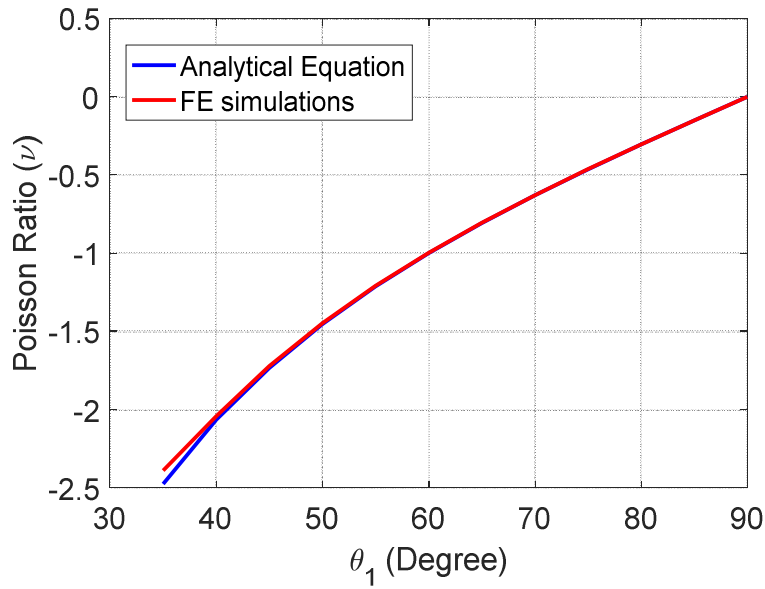


그림 31 Θ_2 30° 고정인 경우 Θ_1 과 포아송비의 관계

- 상기 그래프에서 보이는 바와 같이 이론해와 유한요소해석 결과가 잘 일치함을 확인하였으며, 포아송비 수치 또한 음의 값을 가짐을 정량적으로 확인함.

표 6 각도에 따른 이론해와 수치해석해의 비교 ($\Theta_2 = 30^\circ$)

Θ_1 (Degree)	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	-4.75877	-	-
25	-3.71440	-	-
30	-3.00000	-	-
35	-2.47362	-2.38870	3.43341
40	-2.06418	-2.04108	1.11904
45	-1.73205	-1.72088	0.64510
50	-1.45336	-1.44657	0.46747
55	-1.21280	-1.20817	0.38113
60	-1.00000	-0.99669	0.33071
65	-0.80767	-0.80523	0.30179
70	-0.63042	-0.62862	0.28418
75	-0.46410	-0.46281	0.27807
80	-0.30541	-0.30453	0.28804
85	-0.15153	-0.15101	0.34942
90	~0.00000	~0.00022	-

표 7 각도에 따른 이론해와 수치해석해의 비교 ($\Theta_2 = 10^\circ$)

$\Theta_1(\text{Degree})$	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	-15.5817187387632	-15.5219982236578	0.383272963057593
25	-12.1621031103302	-12.1242260933386	0.311434762952029
30	-9.82294825561955	-9.79483413824860	0.286208545941017
35	-8.09942982635982	-8.07709925274847	0.275705501375939
40	-6.75877048314364	-6.74044451749235	0.271143482338889
45	-5.67128181961771	-5.65598893261526	0.269654859145707
50	-4.75877048314363	-4.74593741184380	0.269671995009774
55	-3.97107428140800	-3.96035848656465	0.269846245221727
60	-3.27431608520652	-3.26547922683659	0.269884096097178
65	-2.64456214404295	-2.63741449478194	0.270277228202532
70	-2.06417777247591	-2.05857416642014	0.271469159802648
75	-1.51961538361587	-1.51546854571409	0.272887333630129
80	-1.00000000000000	-0.997220913049221	0.277908695078011
85	-0.496172866877224	-0.494699205740941	0.297005587096599
90	-3.47265856372870e-16	0.000222689632809555	64126555698811.2

표 8 각도에 따른 이론해와 수치해석해의 비교 ($\Theta_2 = 15^\circ$)

$\Theta_1(\text{Degree})$	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	-10.2537253220529	-10.1282709199191	1.22350071016629
25	-8.00340878452475	-7.96176260997255	0.520355459447768
30	-6.46410161513776	-6.44006437030121	0.371857471736680
35	-5.32992092188979	-5.31309874363610	0.315617783082081
40	-4.44768495766433	-4.43488422842369	0.287806563695110
45	-3.73205080756888	-3.72191349030852	0.271628597332977
50	-3.13156245616592	-3.12336627474269	0.261728180036324
55	-2.61321010844136	-2.60654171613872	0.255180105155189
60	-2.15470053837925	-2.14928717793653	0.251234932478939
65	-1.74028387219291	-1.73597071498988	0.247842163681151
70	-1.35835540672421	-1.35500468162579	0.246675139793481
75	-1	-0.997527833058109	0.247216694189090
80	-0.658061250749209	-0.656388696441290	0.254163925624674
85	-0.326512137365046	-0.325585740949754	0.283724955148081
90	-2.28522203787226e-16	0.000222754668354885	97476159718167.7

표 9 각도에 따른 이론해와 수치해석해의 비교 ($\Theta_2 = 20^\circ$)

$\Theta_1(\text{Degree})$	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	0	0	-
25	-5.89198433996418	-5.78256090407445	1.85715761577193
30	-4.75877048314363	-4.72576186794737	0.693637470291635
35	-3.92380440016309	-3.90611084146811	0.450928662352468
40	-3.27431608520652	-3.26257646135815	0.358536669730943
45	-2.74747741945462	-2.73889369938598	0.312421860426133
50	-2.30540728933228	-2.29882450706841	0.285536629225176
55	-1.92380440016309	-1.91863871574540	0.268514014067683
60	-1.58625682771455	-1.58218183640083	0.256893539716740
65	-1.28116976129962	-1.27797304797087	0.249515202849236
70	-1.00000000000000	-0.997543986001440	0.245601399856010
75	-0.736184355765611	-0.734378000078398	0.245367301419310
80	-0.484454397937119	-0.483224669103481	0.253837892456652
85	-0.240373127495739	-0.239667778107547	0.293439368843458
90	-1.68234471373237e-16	0.000222776238643905	132420090143020

표 10 각도에 따른 이론해와 수치해석해의 비교 ($\Theta_2 = 25^\circ$)

$\Theta_1(\text{Degree})$	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	0	0	-
25	0	0	-
30	-3.71439494350563	-3.61771808537446	2.60276194646998
35	-3.06267328397040	-3.03524882796608	0.895441774604289
40	-2.55572382686041	-2.54182680011842	0.543760894504025
45	-2.14450692050956	-2.13571843664418	0.409813732999658
50	-1.79945496605670	-1.79326574577790	0.343949717861685
55	-1.50159991148368	-1.49700410962136	0.306060344515258
60	-1.23813164783521	-1.23464281983620	0.281781667168803
65	-1	-0.997329873056664	0.267012694333602
70	-0.780536686243357	-0.778520535638198	0.258303118955554
75	-0.574618897513490	-0.573146062412881	0.256315117198971
80	-0.378134430401859	-0.377128727530037	0.265964374297560
85	-0.187620044397476	-0.187025868028551	0.316691306002455
90	-1.31313176797569e-16	0.000222777866101887	169653854651198

표 11 각도에 따른 이론해와 수치해석해의 비교 ($\Theta_2 = 35^\circ$)

$\Theta_1(\text{Degree})$	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	0	0	-
25	0	0	-
30	0	0	-
35	0	0	-
40	-1.70200051779118	-1.62848724540473	4.31922738083833
45	-1.42814800674211	-1.40875641062390	1.35781417798918
50	-1.19835846572388	-1.18932957719513	0.753438039367442
55	-1.00000000000000	-0.994706197191352	0.529380280864833
60	-0.824541636135188	-0.821070338149442	0.420997295178062
65	-0.665956352522645	-0.663551851428828	0.361059862963680
70	-0.519803364580738	-0.518099875217348	0.327718033291950
75	-0.382671105078667	-0.381472757359356	0.313153437353156
80	-0.251821026033650	-0.251013939126695	0.320500205906912
85	-0.124946760427080	-0.124457103960379	0.391892086699437
90	-8.74488442582702e-17	0.000222755226285623	254726323915532

표 12 각도에 따른 이론해와 수치해석해의 비교 ($\Theta_2 = 40^\circ$)

$\Theta_1(\text{Degree})$	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	0	0	-
25	0	0	-
30	0	0	-
35	0	0	-
40	0	0	-
45	-1.19175359259421	-1.12940248143198	5.23187943797181
50	-1.00000000000000	-0.983954826460751	1.60451735392495
55	-0.834474849222969	-0.827246603774306	0.866202912573534
60	-0.688059257491971	-0.683969325265174	0.594415696360998
65	-0.555723826860412	-0.553137544158089	0.465389925232200
70	-0.433762834284103	-0.432037207081114	0.397827353244173
75	-0.319329412712508	-0.318162232357314	0.365509817989794
80	-0.210138312730603	-0.209367364165741	0.366876727448662
85	-0.104264929068286	-0.103797385076586	0.448419229627541
90	-7.29738611271429e-17	0.000222729304175829	305217924248025

표 13 각도에 따른 이론해와 수치해석해의 비교 ($\Theta_2 = 45^\circ$)

$\Theta_1(\text{Degree})$	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	0	0	-
25	0	0	-
30	0	0	-
35	0	0	-
40	0	0	-
45	0	0	-
50	-0.839099631177280	-0.787550196815091	6.14342235973381
55	-0.700207538209710	-0.687233979788101	1.85281616001737
60	-0.577350269189626	-0.571689817681789	0.980418960535317
65	-0.466307658154999	-0.463214122177788	0.663410931197265
70	-0.363970234266203	-0.362087344993464	0.517319576018312
75	-0.267949192431123	-0.266748224052702	0.448207500654969
80	-0.176326980708465	-0.175563673825647	0.432892844731308
85	-0.0874886635259240	-0.0870331727420951	0.520628348258938
90	-6.12323399573677e-17	0.000222686666463520	363674925078193

표 14 각도에 따른 이론해와 수치해석해의 비교 ($\Theta_2 = 50^\circ$)

$\Theta_1(\text{Degree})$	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	0	0	-
25	0	0	-
30	0	0	-
35	0	0	-
40	0	0	-
45	0	0	-
50	0	0	-
55	-0.587543887059319	-0.546253446205157	7.02763517136087
60	-0.484454397937118	-0.474292354819892	2.09762635255198
65	-0.391278583973000	-0.386987616784527	1.09665270838582
70	-0.305407289332279	-0.303151227491868	0.738705957327651
75	-0.224836068543205	-0.223524931486778	0.583152456330576
80	-0.147955904479076	-0.147168833587034	0.531963151327704
85	-0.0734117052967960	-0.0729572255869999	0.619083439021893
90	-5.13800338743490e-17	0.000222620570132840	433282256444818

표 15 각도에 따른 이론해와 수치해석해의 비교 ($\Theta_2 = 55^\circ$)

$\Theta_1(\text{Degree})$	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	0	0	-
25	0	0	-
30	0	0	-
35	0	0	-
40	0	0	-
45	0	0	-
50	0	0	-
55	0	0	-
60	-0.404265010673981	-0.372481070588378	7.86215458830178
65	-0.326512137365047	-0.318888424366208	2.33489421262016
70	-0.254854701717149	-0.251753487373369	1.21685584879742
75	-0.187620044397476	-0.186063099321333	0.829839413557016
80	-0.123465481081825	-0.122613430124737	0.690112693542225
85	-0.0612602217087449	-0.0607951916465262	0.759106071195040
90	-4.28753460203685e-17	0.000222516182881536	518983993215751

표 16 각도에 따른 이론해와 수치해석해의 비교 ($\Theta_2 = 60^\circ$)

$\Theta_1(\text{Degree})$	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	0	0	-
25	0	0	-
30	0	0	-
35	0	0	-
40	0	0	-
45	0	0	-
50	0	0	-
55	0	0	-
60	0	0	-
65	-0.269222851960973	-0.245991747385805	8.62894973660513
70	-0.210138312730603	-0.204746065427765	2.56604673025575
75	-0.154700538379252	-0.152608180829643	1.35252118158704
80	-0.101802429777426	-0.100815944762883	0.969019125280149
85	-0.0505116034377328	-0.0500213633149723	0.970549516142103
90	-3.53525079574969e-17	0.000222342910135597	628931080088992

표 17 각도에 따른 이론해와 수치해석해의 비교 ($\Theta_2 = 65^\circ$)

$\Theta_1(\text{Degree})$	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	0	0	-
25	0	0	-
30	0	0	-
35	0	0	-
40	0	0	-
45	0	0	-
50	0	0	-
55	0	0	-
60	0	0	-
65	0	0	-
70	-0.169722107578799	-0.153904565705966	9.31967090114629
75	-0.124946760427080	-0.121443780879900	2.80357772799075
80	-0.0822226214437060	-0.0809526236924312	1.54458436008908
85	-0.0407966338038843	-0.0402557615918668	1.32577656925685
90	-2.85531090488709e-17	0.000222041307501059	777643188071205

표 18 각도에 따른 이론해와 수치해석해의 비교 ($\Theta_2 = 70^\circ$)

$\Theta_1(\text{Degree})$	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	0	0	-
25	0	0	-
30	0	0	-
35	0	0	-
40	0	0	-
45	0	0	-
50	0	0	-
55	0	0	-
60	0	0	-
65	0	0	-
70	0	0	-
75	-0.0975255303405955	-0.0878290034850865	9.94255229542986
80	-0.0641777724759122	-0.0621863372152571	3.10299841179834
85	-0.0318432693591675	-0.0311998383891560	2.02061843196465
90	-2.22867491189509e-17	0.000221474631468181	993750278634756

표 19 각도에 따른 이론해와 수치해석해의 비교 ($\Theta_2 = 75^\circ$)

$\Theta_1(\text{Degree})$	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	0	0	-
25	0	0	-
30	0	0	-
35	0	0	-
40	0	0	-
45	0	0	-
50	0	0	-
55	0	0	-
60	0	0	-
65	0	0	-
70	0	0	-
75	0	0	-
80	-0.0472466720846514	-0.0422513734323432	10.5728053043782
85	-0.0234425167386495	-0.0225543370590424	3.78875565925413
90	-1.64071560422446e-17	0.000220238182154018	1.34233002713555e+15

표 20 각도에 따른 이론해와 수치해석해의 비교 ($\Theta_2 = 80^\circ$)

$\Theta_1(\text{Degree})$	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	0	0	-
25	0	0	-
30	0	0	-
35	0	0	-
40	0	0	-
45	0	0	-
50	0	0	-
55	0	0	-
60	0	0	-
65	0	0	-
70	0	0	-
75	0	0	-
80	0	0	-
85	-0.0154266118857450	-0.0136179580993548	11.7242450888488
90	-1.07969136263969e-17	0.000216761306178140	2.00762286037187e+15

- 다음 그림은 상기 이론해와 유한요소해석 결과를 그래프로 나타낸 것으로서, 이론해와 유한요소해석 결과가 잘 일치함을 보여줌. 또한, 이중화살촉의 두 각도가 감소할수록 음의 포아송비 수치가 더욱 커짐을 확인할 수 있었음.

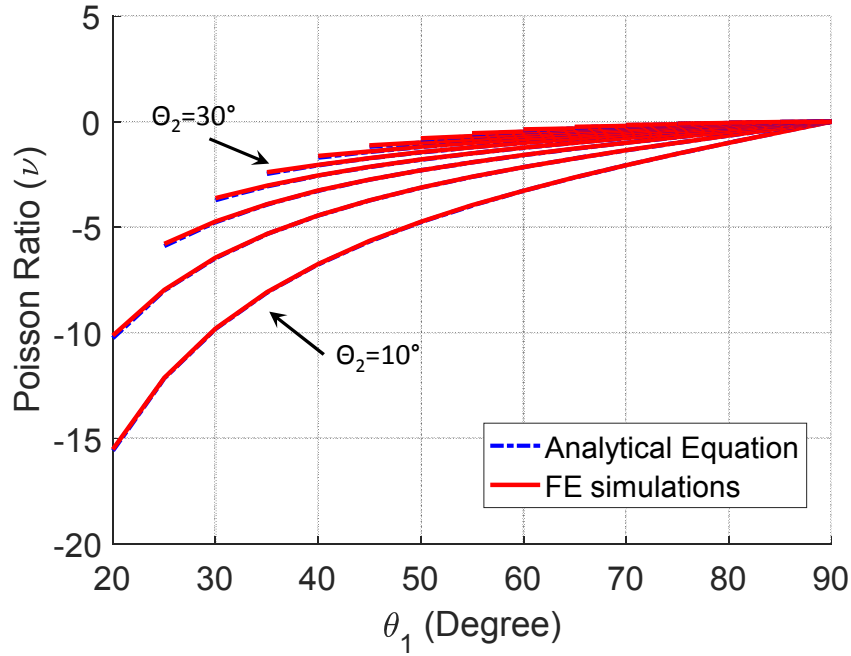


그림 32 θ_1 , θ_2 변화에 따른 포아송비 거동 예측

- 한편 단위 격자 Cell의 형상각도에 의한 탄성계수 변화는 다음 이론식과 유한요소해석을 통하여 검토하였으며, 탄성계수 이론식은 다음과 같음.

$$E_y = \frac{3E_s I}{bl^3} \alpha(\theta_1, \theta_2)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \alpha(\theta_1, \theta_2) = & \frac{-4 * (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)}{\sin\theta_1 * \sin\theta_2} \\ & - \frac{(\cos\theta_1 * \cos\theta_2 - 1)^2 (\cos\theta_1 * \cos\theta_2 - 3)}{\sin\theta_1 * \sin\theta_2 * (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)} \\ & + \frac{(\cos\theta_1 \cos\theta_2 - 3) * (\cos\theta_1 * \cos\theta_2 - 1)}{(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)} \end{aligned}$$

- 유한요소해석 결과에 의한 탄성계수는 기존에 개발된 다음 식을 활용하여 구하였음.

$$E_y = \frac{\sigma_\infty}{\epsilon_y}$$

$$\text{여기서, } \sigma_\infty = \frac{2 * M_A * \sin\theta_1 * \cos\theta_2}{bl^2 * \sin(\theta_1 - \theta_2)}$$

- 이론식 및 유한요소해석 결과 중 $\theta_2 = 30^\circ$ 의 경우 예를 다음 표에 나타내었으며, 정규화된 탄성계수는 다음 식을 사용하여 계산하였음.

$$\bar{E} = \frac{E_y}{E_s} * \left(\frac{l}{h}\right)^3$$

표 21 각도에 따른 정규화된 탄성계수의 이론해와 수치해석해의 비교($\Theta_2 = 30^\circ$)

Θ_1 (Degree)	Analytical Method	FE Simulation	Error(%)
20	0	0	-
25	0	0	-
30	0	0	-
35	2.31533531314415	1.35240829713444	41.5890955639632
40	1.33481989967782	1.02856649130712	22.9434254347435
45	1.05600708321273	0.931163957915516	11.8221863547924
50	0.944582991950552	0.899128531163822	4.81211933457184
55	0.895077768927334	0.891282481257038	0.424017644281890
60	0.873103444662681	0.892245442011539	-2.19240886814427
65	0.864389842081849	0.894670603237772	-3.50313708950961
70	0.862112739580496	0.894457851359769	-3.75184245566454
75	0.862705901886680	0.889135132937241	-3.06352732637651
80	0.864206022277089	0.877237623549551	-1.50792761639464
85	0.865512528900542	0.857990045831321	0.869136242172792
90	0.866025403784439	0.831200968038223	4.02117947049091

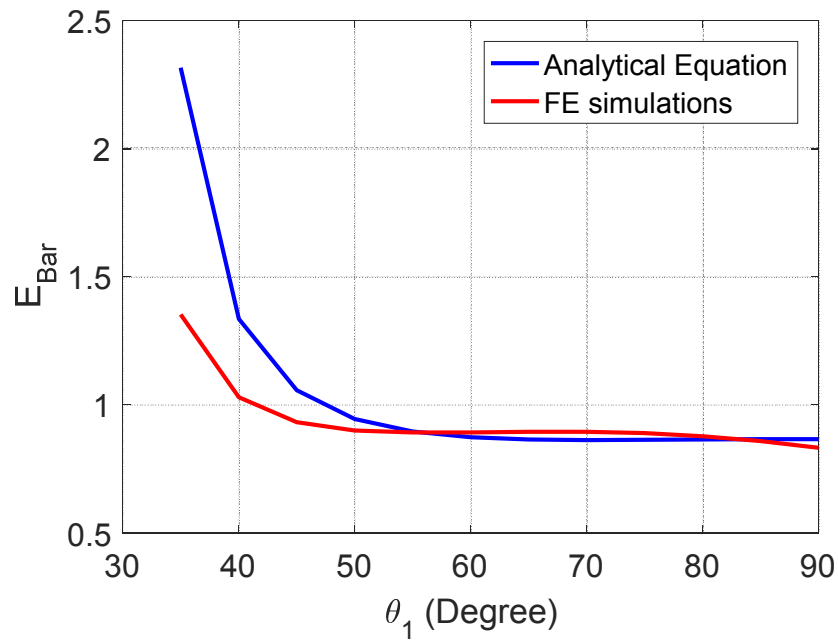


그림 33 $\Theta_2(30^\circ)$ 인 경우의 정규화된 탄성계수

- 상기 그래프와 같이, θ_1 이 55° 이하인 경우, 이론치와 유한요소해석 결과 간에 오차가 크게 발생함을 확인할 수 있었음.
- 다음 표는 다양한 θ_1 , θ_2 의 경우에 있어서의 탄성계수의 이론치와 유한요소해석 결과를 보여주고 있음.

표 22 각도에 따른 정규화된 탄성계수의 이론해와 수치해석해의 비교($\Theta_2 = 10^\circ$)

Θ_1 (Deg)	Elastic Modulus(N/m ²)		Normalized Elastic Modulus		Error (%)
	Analytical	FE Simulation	Analytical	FE Simulation	
20	3383956.46	2360326.18	1.3052	0.9104	30.250
25	3488867.41	2559153.56	1.3457	0.9871	26.648
30	3718968.07	2846407.76	1.4345	1.0979	23.462
35	3971849.59	3179012.61	1.5320	1.2262	19.961
40	4217880.39	3538314.43	1.6269	1.3648	16.112
45	4446006.88	3910822.66	1.7149	1.5085	12.037
50	4651294.69	4283746.12	1.79407	1.6523	7.9021
55	4831193.41	4644021.13	1.8635	1.7913	3.8742
60	4984223.59	4978393.30	1.9225	1.9202	0.1170
65	5109466.23	5273872.12	1.9708	2.0342	-3.2177
70	5206351.99	5518422.20	2.0082	2.1285	-5.9940
75	5274571.80	5701536.62	2.0345	2.1992	-8.0948
80	5314039.57	5814993.75	2.0497	2.2430	-9.4270
85	5324877.83	5853181.57	2.0539	2.2577	-9.9214
90	5307413.43	5813598.16	2.0471	2.2424	-9.5373

표 23 각도에 따른 정규화된 탄성계수의 이론해와 수치해석해의 비교($\Theta_2 = 20^\circ$)

Θ_1 (Deg)	Elastic Modulus(N/m ²)		Normalized Elastic Modulus		Error (%)
	Analytical	FE Simulation	Analytical	FE Simulation	
20	0	0	0	0	-
25	5341619.82	3068682.00	2.0603	1.1836	42.5515
30	3465085.67	2514951.58	1.3365	0.9701	27.4202
35	3019419.96	2439328.57	1.1646	0.9409	19.2120
40	2899195.59	2496535.29	1.1183	0.9629	13.8887
45	2889910.34	2604618.55	1.1147	1.0046	9.8720
50	2923151.41	2731750.87	1.1275	1.0537	6.5477
55	2971209.29	2860769.63	1.1460	1.1034	3.7170
60	3021153.79	2980158.72	1.1653	1.1495	1.3569
65	3066388.50	3081230.29	1.1827	1.1885	-0.4840
70	3103371.50	3157165.53	1.1970	1.2178	-1.7334
75	3130178.20	3202725.47	1.2074	1.2353	-2.3177
80	3145813.36	3214269.61	1.2134	1.2398	-2.1761
85	3149859.33	3189753.87	1.2150	1.2303	-1.2665
90	3142287.06	3128760.34	1.2120	1.2068	0.4305

표 24 각도에 따른 정규화된 탄성계수의 이론해와 수치해석해의 비교($\Theta_2 = 30^\circ$)

Θ_1 (Deg)	Elastic Modulus(N/m ²)		Normalized Elastic Modulus		Error (%)
	Analytical	FE Simulation	Analytical	FE Simulation	
20	0	0	0	0	-
25	0	0	0	0	-
30	0	0	0	0	-
35	6002721.18	3506243.73	2.3153	1.3524	41.5891
40	3460644.18	2666653.87	1.3348	1.0286	22.9434
45	2737796.14	2414128.78	1.0560	0.9312	11.8222
50	2448918.87	2331073.97	0.9446	0.8991	4.81212
55	2320572.00	2310732.36	0.8951	0.8913	0.42402
60	2263601.52	2313228.92	0.8731	0.8922	-2.1924
65	2241010.70	2319516.38	0.8644	0.8947	-3.5031
70	2235107.10	2318964.80	0.8621	0.8945	-3.7518
75	2236644.93	2305165.16	0.8627	0.8891	-3.0635
80	2240534.13	2274319.76	0.8642	0.8772	-1.5079
85	2243921.37	2224418.64	0.8655	0.8580	0.86914
90	2245251.05	2154965.47	0.8660	0.8312	4.02118

표 25 각도에 따른 정규화된 탄성계수의 이론해와 수치해석해의 비교($\Theta_2 = 40^\circ$)

Θ_1 (Deg)	Elastic Modulus(N/m ²)		Normalized Elastic Modulus		Error (%)
	Analytical	FE Simulation	Analytical	FE Simulation	
20	0	0	0	0	-
25	0	0	0	0	-
30	0	0	0	0	-
35	0	0	0	0	-
40	0	0	0	0	-
45	5692836.18	3553969.27	2.1958	1.3708	37.5712
50	3071111.09	2573837.63	1.1846	0.9928	16.1919
55	2293876.60	2213180.39	0.8848	0.8537	3.51790
60	1964350.82	2040075.01	0.7577	0.7869	-3.8549
65	1805405.77	1938276.28	0.6964	0.7476	-7.3596
70	1726040.30	1865277.58	0.6658	0.7195	-8.0669
75	1688181.10	1802002.23	0.6512	0.6951	-6.7422
80	1673469.26	1738869.24	0.6455	0.6707	-3.9080
85	1672239.22	1670905.19	0.6450	0.6445	0.0798
90	1679142.22	1595746.41	0.6477	0.6155	4.9666

표 26 각도에 따른 정규화된 탄성계수의 이론해와 수치해석해의 비교($\Theta_2 = 50^\circ$)

Θ_1 (Deg)	Elastic Modulus(N/m ²)		Normalized Elastic Modulus		Error (%)
	Analytical	FE Simulation	Analytical	FE Simulation	
20	0	0	0	0	-
25	0	0	0	0	-
30	0	0	0	0	-
35	0	0	0	0	-
40	0	0	0	0	-
45	0	0	0	0	-
50	0	0	0	0	-
55	4551056.83	3121542.33	1.7554	1.2040	31.4106
60	2349075.02	2172440.50	0.9061	0.8379	7.5193
65	1699991.55	1793043.25	0.6557	0.6916	-5.4737
70	1430877.74	1591315.60	0.5519	0.6138	-11.2125
75	1308660.13	1459557.13	0.5048	0.5630	-11.5306
80	1256668.23	1358887.71	0.4847	0.5241	-8.1342
85	1242793.93	1272377.85	0.4794	0.4908	-2.3804
90	1251580.77	1191899.50	0.4828	0.4597	4.7685

표 27 각도에 따른 정규화된 탄성계수의 이론해와 수치해석해의 비교($\Theta_2 = 60^\circ$)

Θ_1 (Deg)	Elastic Modulus(N/m ²)		Normalized Elastic Modulus		Error (%)
	Analytical	FE Simulation	Analytical	FE Simulation	
20	0	0	0	0	-
25	0	0	0	0	-
30	0	0	0	0	-
35	0	0	0	0	-
40	0	0	0	0	-
45	0	0	0	0	-
50	0	0	0	0	-
55	0	0	0	0	-
60	0	0	0	0	-
65	2958130.25	2273168.20	1.1410	0.8768	23.1552
70	1486920.94	1532263.01	0.5735	0.5910	-3.0494
75	1079454.41	1226619.85	0.4164	0.4731	-13.6333
80	933397.68	1058012.23	0.3600	0.4081	-13.3506
85	889412.61	944835.80	0.3431	0.3644	-6.2314
90	895220.83	857876.10	0.3453	0.3309	4.1716

표 28 각도에 따른 정규화된 탄성계수의 이론해와 수치해석해의 비교($\Theta_2 = 70^\circ$)

Θ_1 (Deg)	Elastic Modulus(N/m ²)		Normalized Elastic Modulus		Error (%)
	Analytical	FE Simulation	Analytical	FE Simulation	
20	0	0	0	0	-
25	0	0	0	0	-
30	0	0	0	0	-
35	0	0	0	0	-
40	0	0	0	0	-
45	0	0	0	0	-
50	0	0	0	0	-
55	0	0	0	0	-
60	0	0	0	0	-
65	0	0	0	0	-
70	0	0	0	0	-
75	1408078.03	1251546.19	0.5431	0.4827	11.1167
80	726999.41	830284.89	0.2804	0.3203	-14.2071
85	586198.82	655447.51	0.2261	0.2528	-11.8132
90	578764.65	557692.29	0.2232	0.2151	3.6409

표 29 각도에 따른 정규화된 탄성계수의 이론해와 수치해석해의 비교($\Theta_2 = 80^\circ$)

Θ_1 (Deg)	Elastic Modulus(N/m ²)		Normalized Elastic Modulus		Error (%)
	Analytical	FE Simulation	Analytical	FE Simulation	
20	0	0	0	0	-
25	0	0	0	0	-
30	0	0	0	0	-
35	0	0	0	0	-
40	0	0	0	0	-
45	0	0	0	0	-
50	0	0	0	0	-
55	0	0	0	0	-
60	0	0	0	0	-
65	0	0	0	0	-
70	0	0	0	0	-
75	0	0	0	0	-
80	0	0	0	0	-
85	366515.65	399466.66	0.1414	0.1541	-8.9903
90	284402.85	273210.33	0.1097	0.1054	3.9354

- 다음은 다양한 조합의 θ_1 , θ_2 에 대한 탄성계수 이론해와 유한요소해석 결과를 나타낸 그래프임.

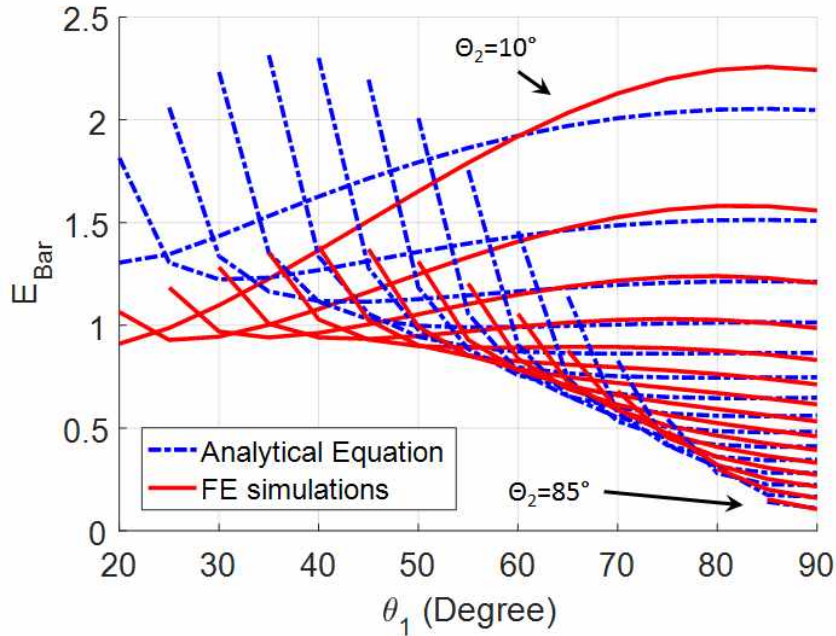


그림 34 다양한 각도에 대한 정규화된 탄성계수

- 상기 그림에서 보이는 바와 같이, θ_1 , θ_2 의 값이 작아질수록 이론치와 유한요소 해석 결과의 차이가 더욱 커짐을 확인함. 이러한 경향은 이중화살촉 형상의 단위 cell의 기하학적 형상에 기반한 거동에 있어서 탄성론상의 선형거동 이론식과는 달리, 실제 거동에 있어서는 비선형거동이 발생할 수 있음을 나타내었다고 판단됨.
- 즉, 이중화살촉 구조의 경우 실제 거동에 있어서는 각도의 변화, 즉 날카로운 형태의 이중화살촉 형상이 될수록 단위 cell을 구성하는 element에 축력의 전달 뿐 만 아니라 셋빔비(l/h)의 영향에 의한 좌굴변형이 커질 수 있기 때문인 것으로 판단되었음.
- 이상의 결과로부터, 화살촉 형태의 Auxetic 격자체 형상을 선정함에 있어서 음의 포아송비 효과 극대화를 위해서는 각도의 최소화가 필요한 반면, 탄성영역 내에서의 unit cell 거동을 기대하기 위해서는 각도 설정에 제한을 두고자 하였음.
- 이에, 본 연구에서 적용된 변수인 재료 자체의 탄성계수 200GPa, 재료 자체의 포아송비 0.3, $l=0.03m$, $h=b=0.001m$ 의 경우에 있어서 음의 포아송비 효과를 높이면 선형 거동을 유지할 수 있는 형상은 $\theta_1=60^\circ$, $\theta_2=30^\circ$ 수준이며, 해당 형상조건에서의 unit cell의 포아송비는 -1, 탄성계수는 약 23GPa 수준임을 확인함.
- 다만, 앞에서 기술한 바와 같이 이중화살촉 격자 단위 cell의 최적형상을 정하는데 있어서는 각도 뿐 만 아니라 l 및 h 에 따라 변화하기 때문에 다각적인 고려가 또한 필요함을 확인하였음.

2. Auxetic 격자구조체 시제품 제작

가. 이중화살촉 구조 단위 cell 기본 설계도 작성

- 상기의 사전검토 연구를 기반으로, 실제 건설산업에의 적용성을 감안한 격자체 설계를 수행하였으며, $\theta_1=60^\circ$, $\theta_2=30^\circ$ 의 단위격자구조를 기본 형상으로 선정하였음.
- 또한, 실제 구조물에서의 적용 가능성을 고려하기 위하여, 1차적으로는 5mm 두께를 가지면서, 단위격자체의 크기가 55, 105mm 2종류인 격자체 1식과, 2차적으로는 2mm 두께를 가지면서 단위격자체 크기가 52, 102mm 2종류인 격자체를 설계하였음.
- 다음 그림은 각 격자구조체의 설계 기본형상을 보여주고 있음

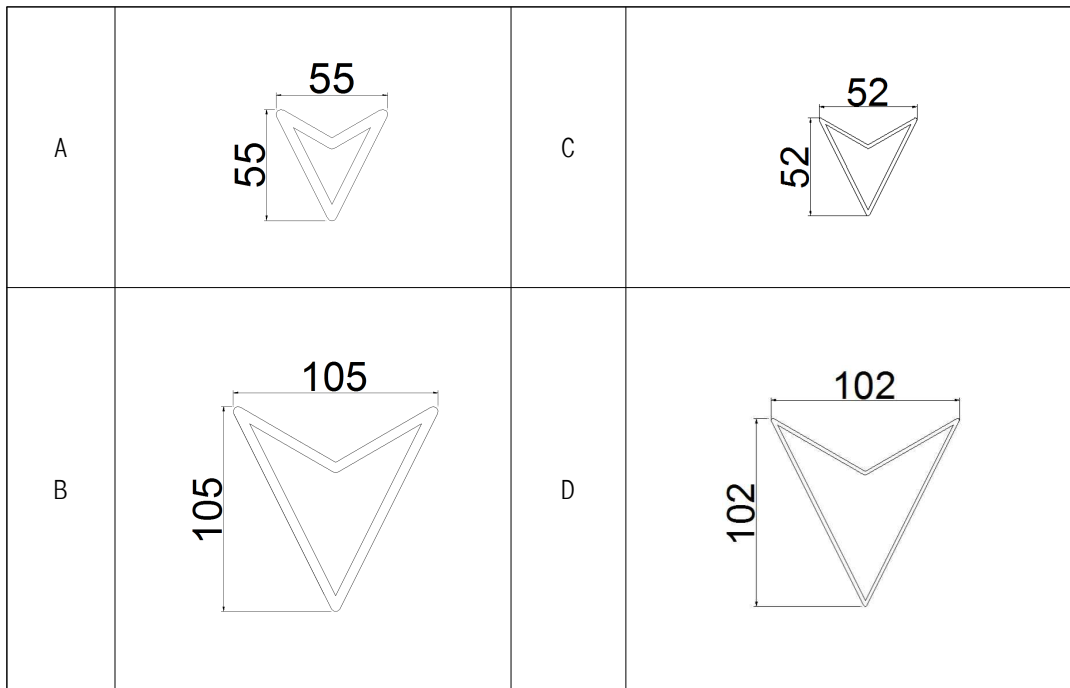


그림 35 단위 격자체 기본형상 설계 (A,B: t=5mm, C,D: t=2mm, 단위 mm)

나. 압축하중 대응 Auxetic 격자구조체 기본 설계도 작성

- 다음 그림은 상기 단위 cell을 적용하여 콘크리트에 Auxetic 격자체를 매립한 복합체의 압축거동 시험을 수행하기 위한 Auxetic Mesh의 기본 설계도임.
- Auxetic Mesh의 사이즈는 압축실험 방식 및 규모를 고려하여 콘크리트 시험체의 크기를 525x395x160mm로 결정하였으며, 콘크리트 시험체 내부매립을 고려하여 치수를 산출함.

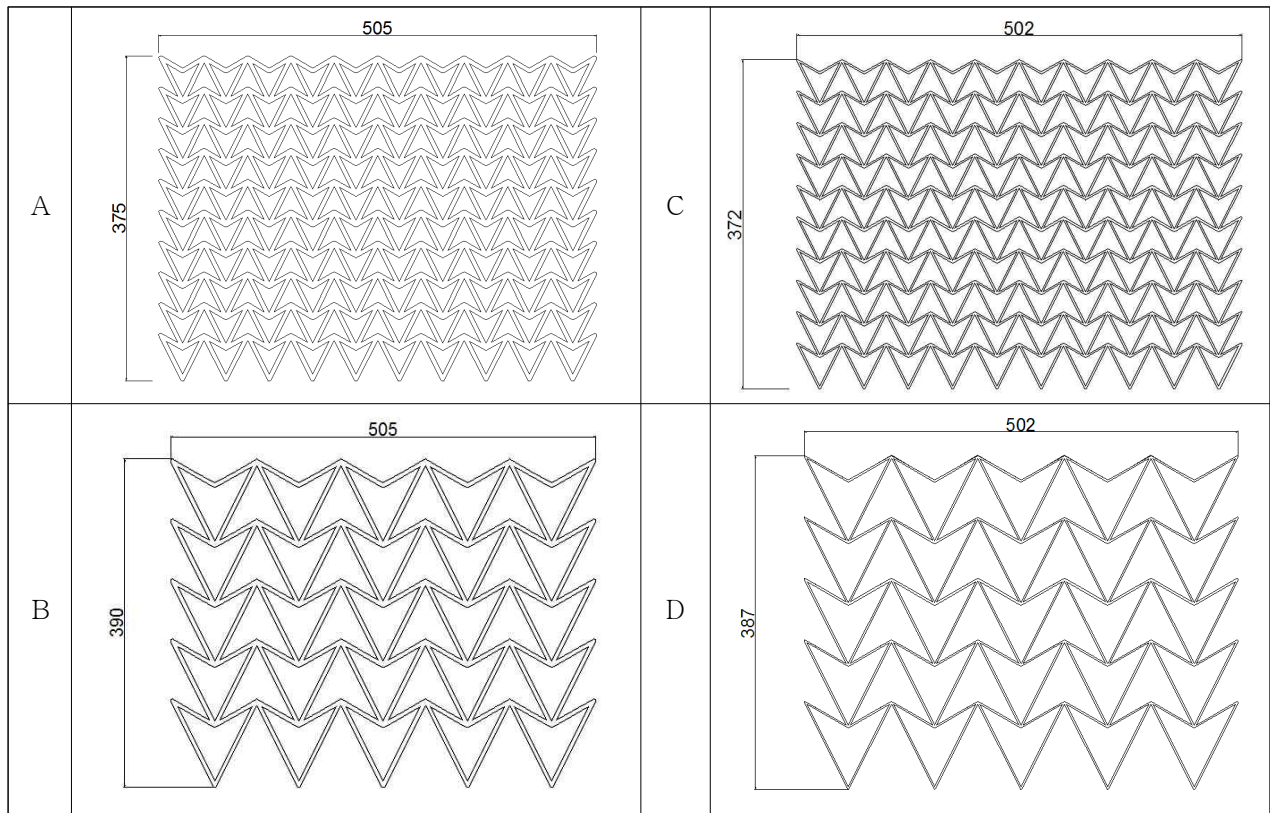


그림 36 격자구조체 설계도 (A,B: $t=5\text{mm}$, C,D: $t=2\text{mm}$, 단위 mm)

다. 압축하중 대응 Auxetic 격자체 제작

- 격자체의 제작은 두께 2 및 5mm의 SS400 강판을 가지고 레이저 절삭 가공방식으로 제작하였으며, Auxetic 격자체의 철근량과 동일한 수준의 일반 격자체를 제작하여 압축하중에 의한 복합체 거동 시 음의 포아송비 효과에 의한 강성변화를 비교하고자 하였음.
- 다음 사진은 실제 제작된 압축시험용 격자체를 보여주고 있음.

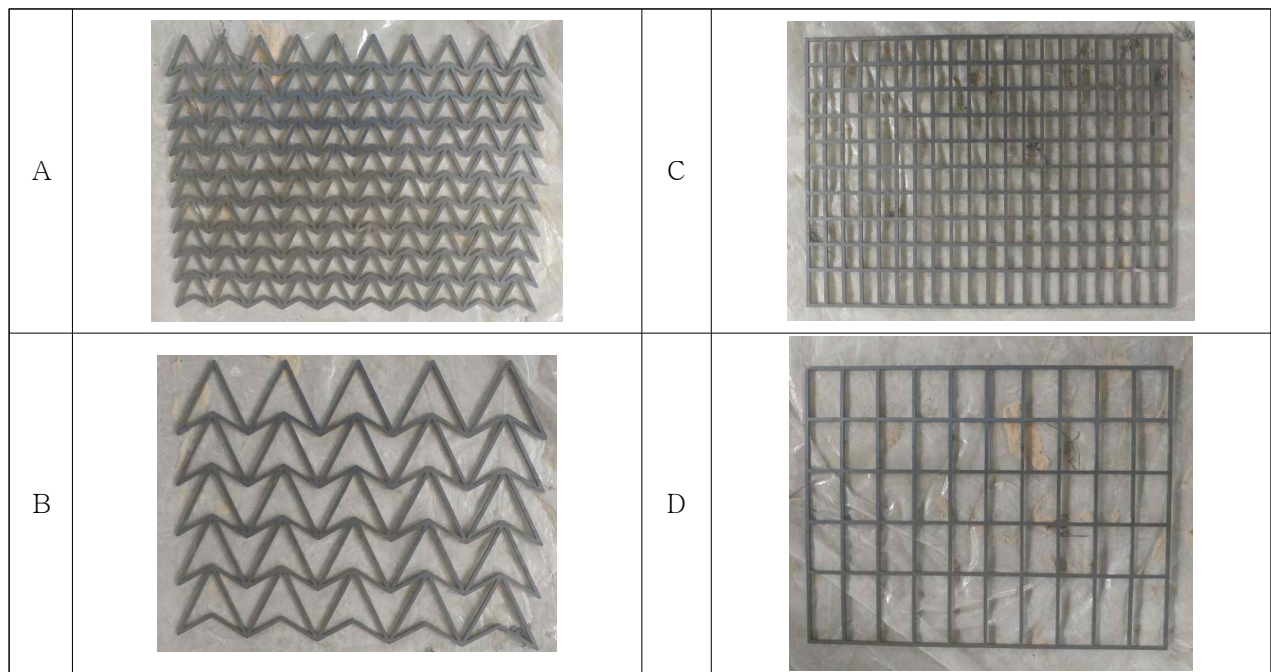


그림 37 Auxetic 격자체 및 동일 철근량 수준 일반격자체 제작 ($t=5\text{mm}$)
 (A: 단위 cell 55x55mm, B: 105x105mm, C,D: A,B 대응 일반격자)

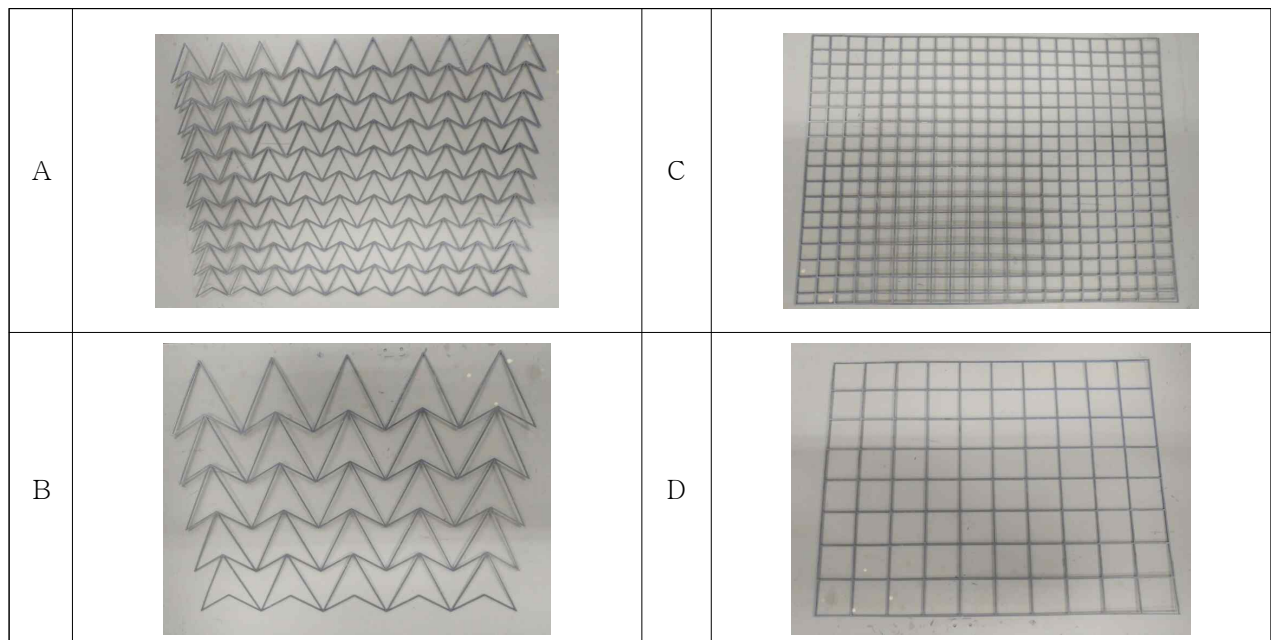


그림 38 Auxetic 격자체 및 동일 철근량 수준 일반격자체 제작 ($t=2\text{mm}$)
 (A: 단위 cell 52x52mm, B: 102x102mm, C,D: A,B 대응 일반격자)

라. 인장하중 대응 Auxetic 격자체 제작

- 인장하중 대응 Auxetic 격자체의 경우, 압축하중 대응 격자체와 동일한 방식으로 $\theta_1=60^\circ$, $\theta_2=30^\circ$ 를 적용하였음. 다만, 직접인장 시험을 수행하기 위한 인장시험기의 한계 등을 고려, 단위 cell의 크기를 18x18mm 사이즈로 축소하였으며, 격자의 두께는 2mm를 적용하였음.
- 또한 Auxetic 격자체만의 인장거동 특성을 검토하기 위하여 격자체의 각도를 $\theta_1=60^\circ$ 로 고정하고, $\theta_2=22.5^\circ$, 30° , 37.5° 로 변화시킨 세가지 종류의 직접인장 시험용 격자체를 제작하였음.
- 다음 그림 및 사진은 각 변수별 인장하중 대응 Auxetic 격자체의 기본설계도 및 실제 제작된 격자체 사진을 보여주고 있음.

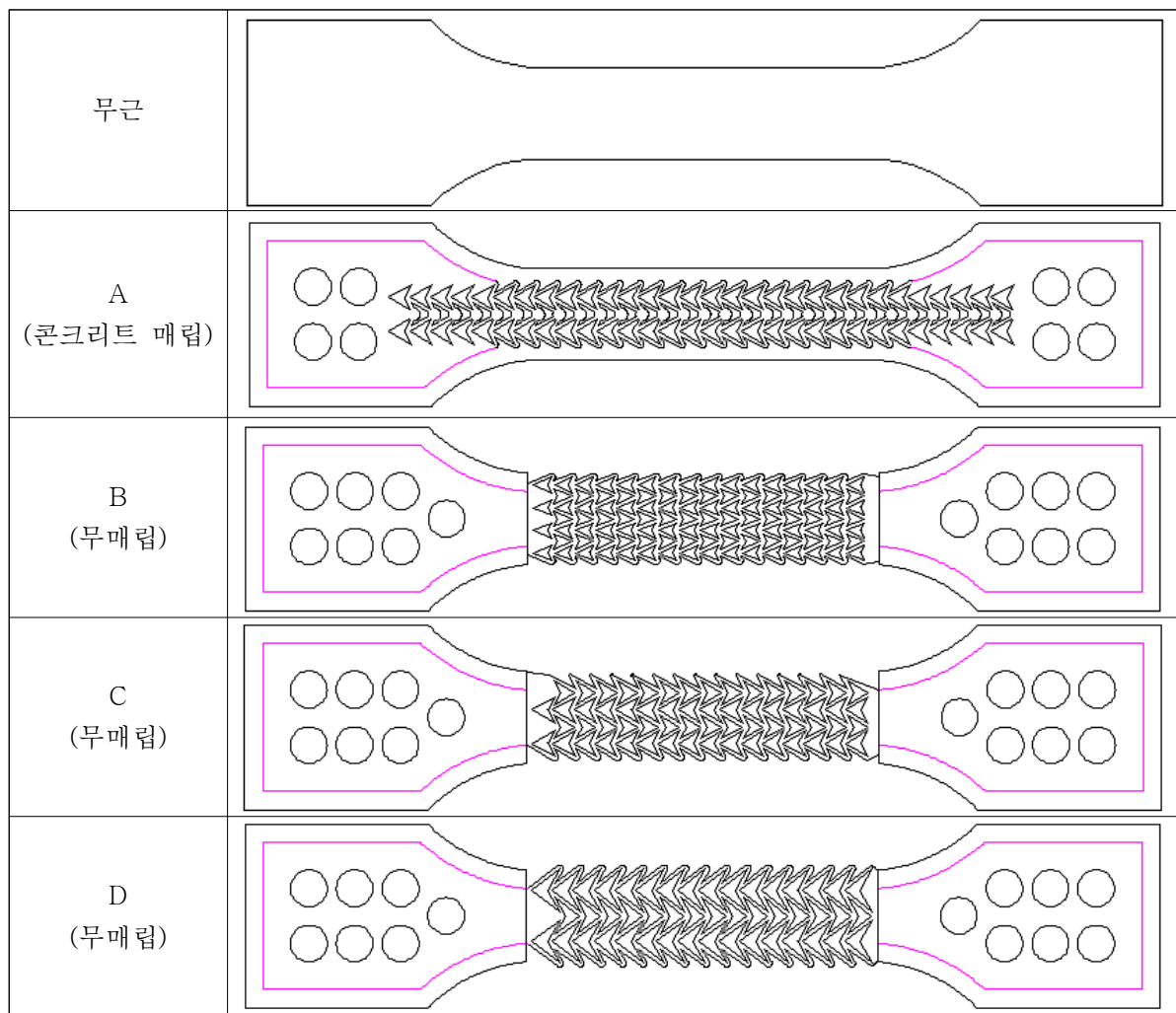
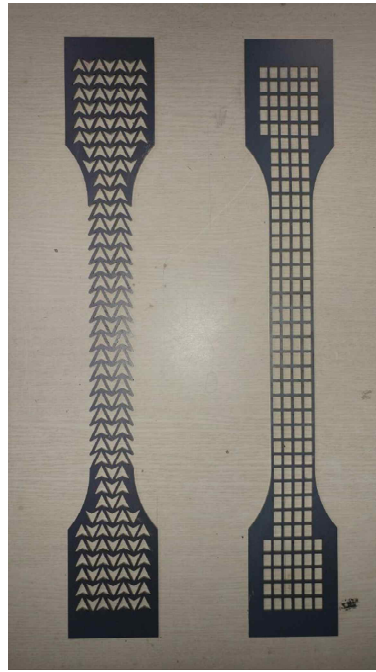


그림 39 직접인장 시험용 Auxetic 격자체 제작 설계도 (총길이 500mm, 양 단 헤드 폭 100mm)
($\theta_1=60^\circ$, θ_2 : A= 30° , B= 22.5° , C= 30° , D= 37.5°)



(a) $\theta_2=30^\circ$ (b) 일반격자

그림 40 직접인장 시험용 Auxetic 격자체 제작
($\theta_1=60^\circ$, 콘크리트 매립용)



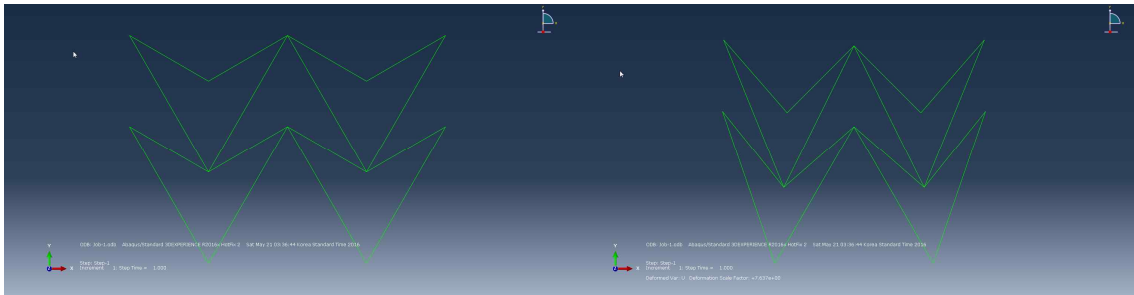
(a) $\theta_2=22.5^\circ$ (b) $\theta_2=30^\circ$ (c) $\theta_2=37.5^\circ$

그림 41 직접인장 시험용 Auxetic 격자체 제작
($\theta_1=60^\circ$, 콘크리트 무매립용)

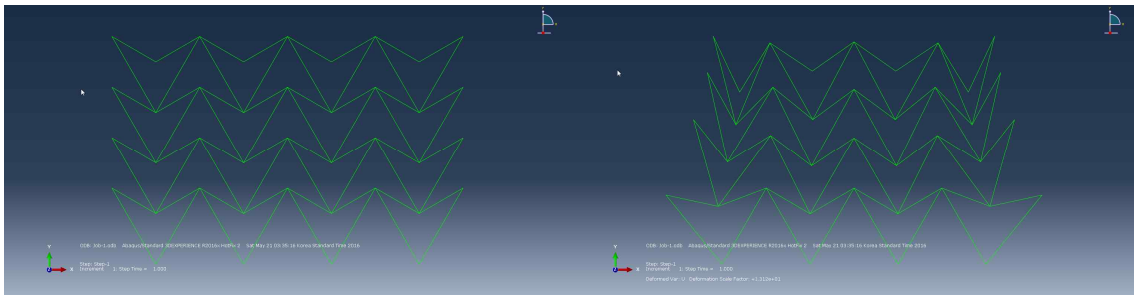
3. 격자구조체 성능평가

가. 유한요소해석 평가

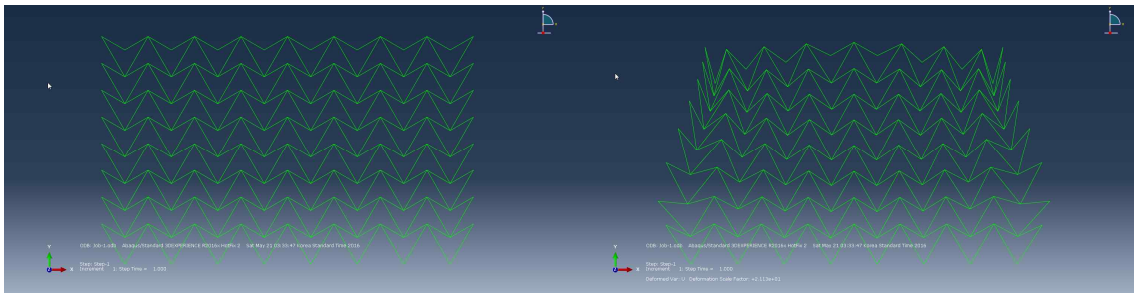
- 2절에서는 이중화살촉 단위 cell의 역학적 거동에 대한 이론식 개발 및 유한요소 해석 결과와의 비교검토, 격자구조체의 설계 및 제작 과정을 보였음.
- 본 절에서는 이중화살촉 단위 cell이 다중 연결되어 구성된 격자구조체의 거동예측을 유한요소 해석을 통하여 수행하였음.
- 1차적으로 수행한 해석연구는 단위 격자 cell에 있어서 $\theta_1=60^\circ$, $\theta_2=30^\circ$ 를 적용한 $N_x \times N_y$ 개의 격자구조체에 대하여 unit cell 해석과 동일한 방식으로 모델링을 수행하였으며, 격자체 하단부는 고정된 상태에서 수직방향 단위 압축하중 작용시의 x 및 y 방향의 최대 변형량을 구하였음.



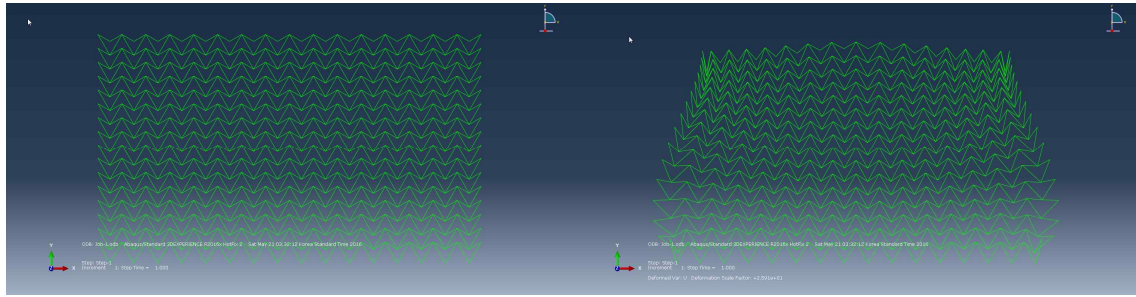
< $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$, 2×2 모델>



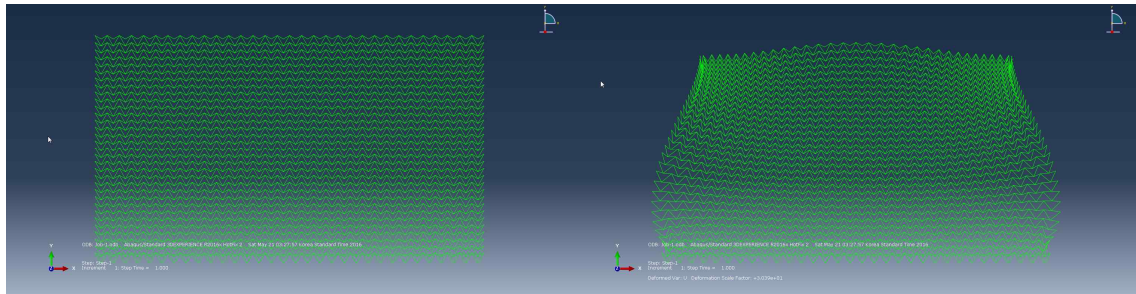
< $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$, 4×4 모델>



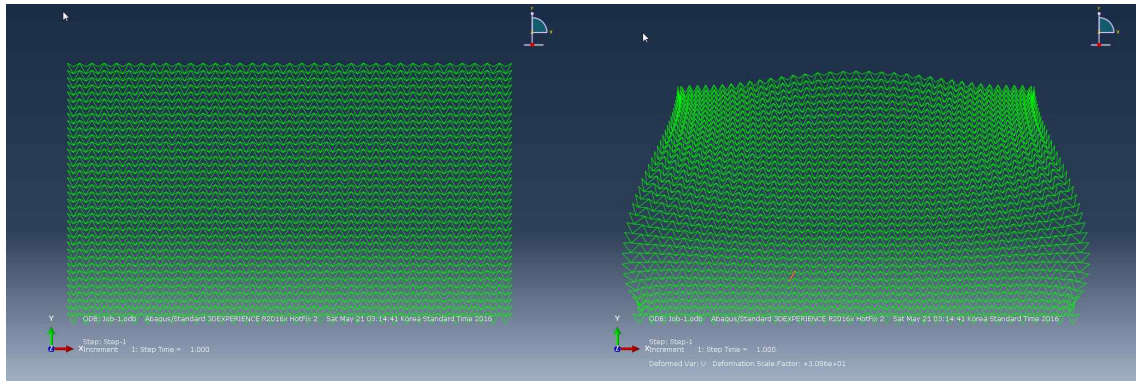
< $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$, 8×8 모델>



< $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$, 16 × 16 모델>



< $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$, 32 × 32 모델>



< $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$, 36 × 36 모델>

그림 42 Mesh 별 변위거동 유한요소 해석 예 (Bottom Fixed condition)

표 30 Mesh 사이즈별 각 방향에 대한 최대 변형량

Nx × Ny	Maximum Deformation	
	X-direction (m)	Y-direction (m)
2 × 2	0.0014	0.0016
4 × 4	0.0018	0.0016
8 × 8	0.0023	0.0020
16 × 16	0.0037	0.0029
32 × 32	0.0063	0.0045
36 × 36	0.0070	0.0049

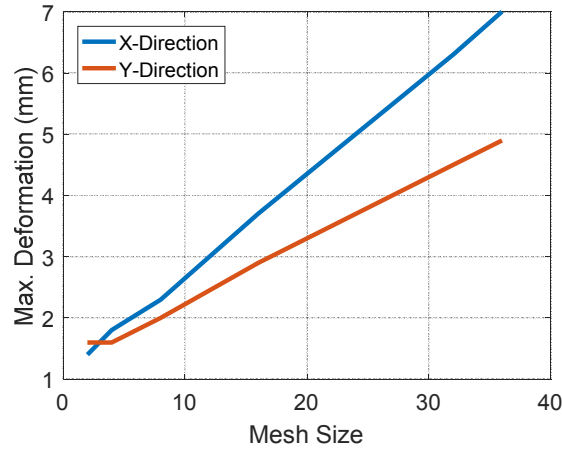


그림 43 다양한 각도에 대한 정규화된 탄성계수

- 앞서 기술한 바와 같이 상기 해석은 하단은 고정단으로, 상단은 자유단으로 적용한 경우이며, 해석 결과에서 보이는 바와 같이, 하중 직교방향인 수평방향의 변위가 더 크게 축소되는 Auxetic 거동을 가짐을 확인할 수 있음.
- 한편으로는 해석을 수행함에 있어서 격자체의 하단부를 고정함에 따라 부위별로 단위 cell 구성요소의 비선형성이 크게 발생함 또한 확인하였음.
- 다음 그림은 상기 해석연구의 경우와는 다르게 $l=8\text{mm}$, $h=b=3\text{mm}$ 로 구성하여 비선형 거동 영향을 감소시켜 보다 작은 각도값의 적용이 가능하도록 하였음. 즉, $\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=15^\circ$ 를 적용하였으며, 재료 자체의 탄성계수는 앞선 경우와 동일하게 200GPa, 재료 자체의 포아송비는 0.3을 적용하였음. 또한, Auxetic 격자체에 포함되는 단위 cell의 개수가 전체 mesh의 거동에 미치는 영향을 검토하기 위하여 unit cell의 개수를 4x4, 6x6, 8x8, 10x10, 15x15, 20x20, 30x30, 40x40으로 변화시키면서 축방향 변위하중에 대한 mesh 전체의 평균 탄성계수 및 평균 포아송비 수치를 분석하였음.

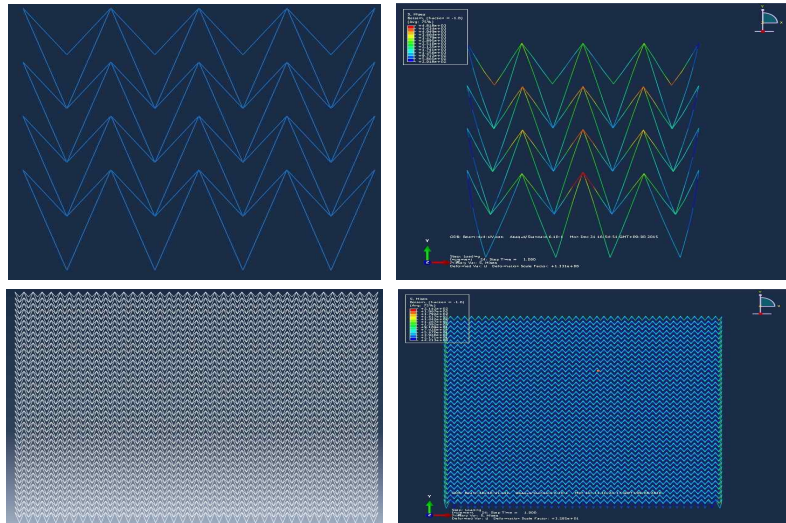


그림 44 Mesh 별 변위거동 유한요소 해석 예 (Free boundary condition)
(upper: 4x4, lower: 40x40 unit cells)

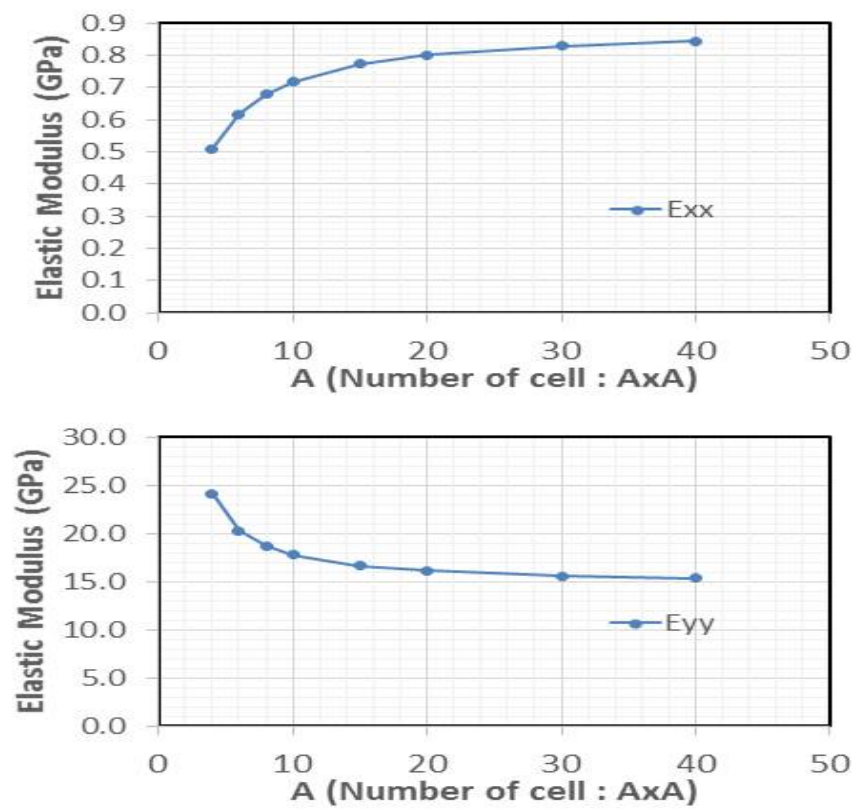


그림 45 단위 cell 수량에 따른 격자체 탄성계수의 변화

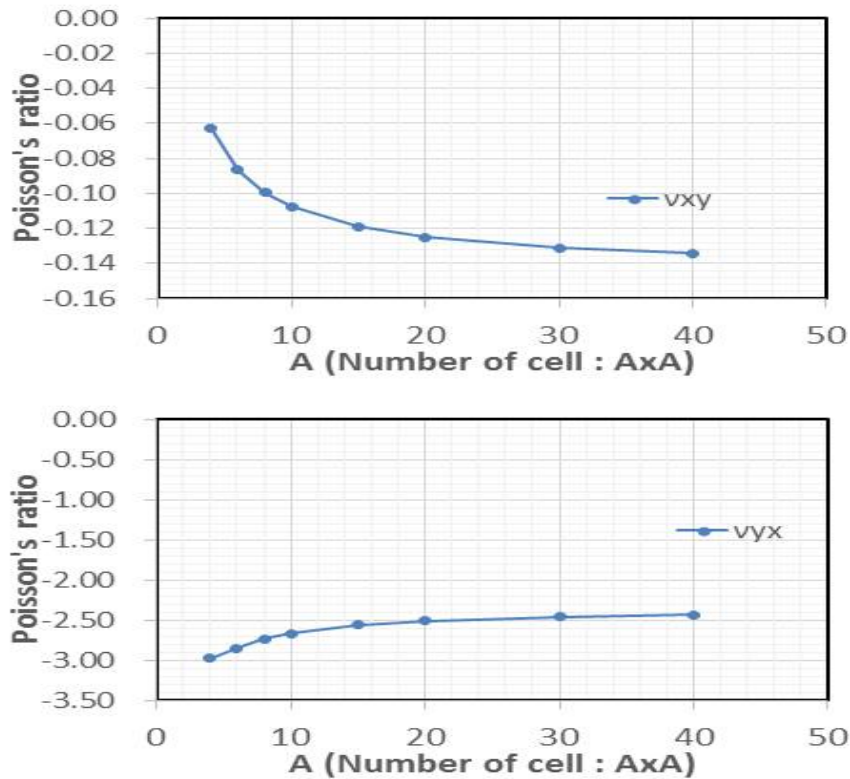


그림 46 단위 cell 수량에 따른 격자체 탄성계수의 변화

- 상기 그래프에서 보인 바와 같이 탄성계수의 경우에 있어서는 하중 직교방향인 x축 방향의 경우 4x4 mesh의 경우 0.5GPa를 보였으며, mesh를 구성하는 cell의 개수가 많아질수록 증가하는 경향을 가져, 최종적으로는 0.9GPa에 수렴하였음.
- 이러한 경향과는 반대로 하중방향인 y축 방향의 경우에는 4x4 mesh의 경우 약 24GPa의 탄성계수값을 보였으나, cell의 개수가 증가할수록 mesh 전체의 탄성계수는 감소하여 최종적으로는 15GPa에 수렴할 것으로 예측되었음.
- 한편 포아송비의 경우에 있어서는 이중화살구조 형태상 하중작용 방향인 y축 방향을 고려할 때 y축방향의 발생변형률보다 x축방향의 발생변형률이 클 수 밖에 없기 때문에 ν_{yx} 값이 ν_{xy} 보다 큰 값을 가짐을 확인함. 또한 탄성계수의 경우와 마찬가지로 mesh를 구성하는 cell의 개수가 증가함에 따라 일정값으로 수렴, ν_{yx} 의 경우 -2.4에 도달하였음.
- 이중화살축 단위 cell 포아송비 이론식에 $\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=15^\circ$ 를 적용할 경우 unit cell의 포아송비는 -6.41을 가짐에 비해, 동일한 unit cell로 구성된 mesh시스템 전체의 평균 포아송비는 이의 37% 수준으로 수치의 감소가 크게 발생함을 확인함.
- 이러한 unit cell과 동일 unit cell로 구성된 mesh간의 역학적 물성의 차이는 각 cell간의 추가적인 구속력 작용에 의한 영향과, 단부상에 작용한 외력이 mesh에 전파, 분포되면서 발생하는 영향에 따른 것으로 판단되었음.

4. Auxetic 격자체 보강 콘크리트 복합체 제작 및 성능평가

- 2절에서 보인 Auxetic 격자체를 기반으로 압축, 인장 및 충격하중 대응 격자체 매립 콘크리트 복합체를 제작하였음. 다음은 각 하중조건별로 본 연구에서 수행한 결과를 정리한 내용임.

가. 압축하중 대응 Auxetic 격자체 보강 콘크리트 복합체 제작 및 성능평가

- 압축하중 조건의 경우, 2차원 개념의 격자구조체 자체의 성능을 별도로 시험평가 하는 것은 현실적으로 매우 어려운 실험조건임을 고려, 격자구조체 단독 실험보다는 곧바로 콘크리트에 탑재된 복합체에 대한 거동평가를 수행하는 것이 타당하다고 판단, 다음과 같은 개념의 복합체를 제작하였음.

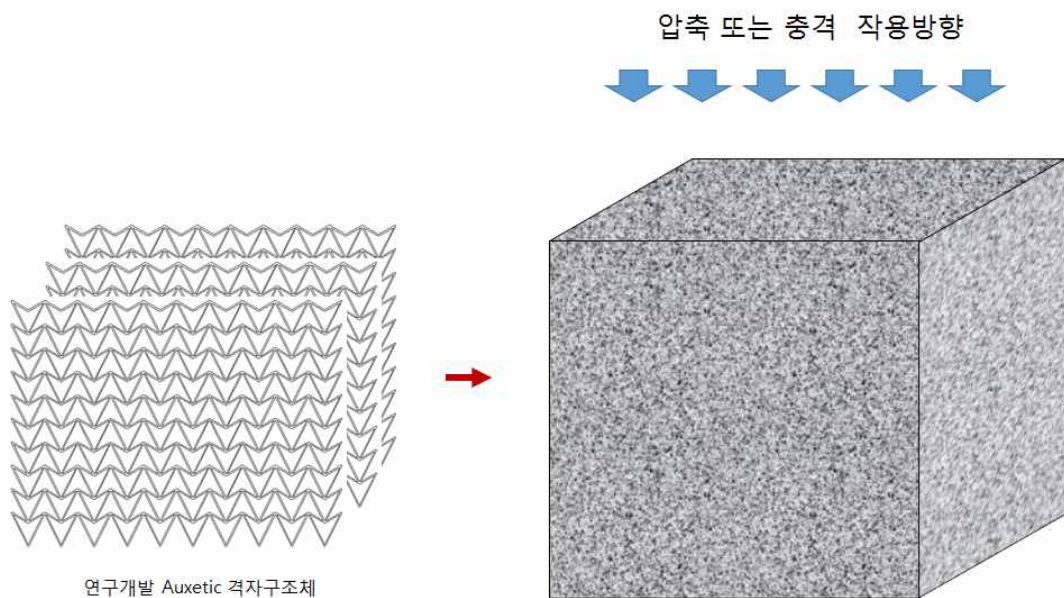


그림 47 압축 및 충격 하중 대응형 Auxetic 격자구조체 적용 복합부재 개념도

- 한편, 시험체 제작에 사용된 콘크리트는 보통강도 40MPa급으로서, 기본적으로 사용된 배합표는 다음 표와 같음.

표 31 콘크리트 배합표

(단위 kg/m³)

f_{ck} (MPa)	W/C (%)	s/a (%)	배합수	시멘트	잔골재	굵은골재	SP
40	50	40	180	360	738	1108	1.8

- 압축시험체 제작은 무보강, 2열배근, 3열배근을 기본으로 하고, 격자체 두께 2mm의 경우는 8열 배근 까지 수행하였음. 또한, 동일 보강량을 가진 일반격자체를 적용한 시험체도 비교평가를 위하여 제작하였으며, 이와 관련된 복합체 제작 도면은 다음과 같음.

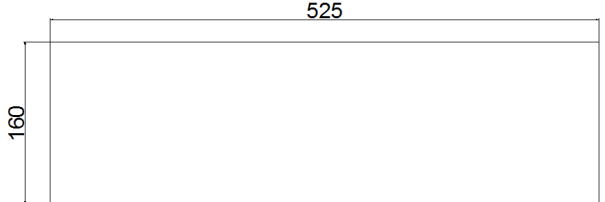
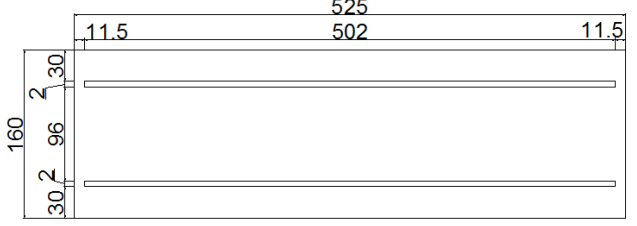
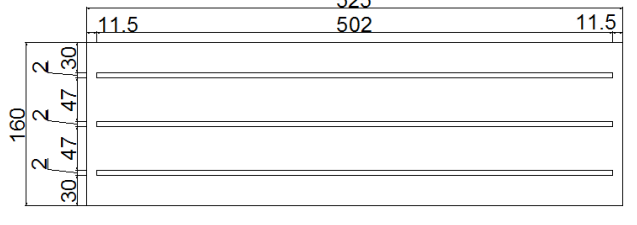
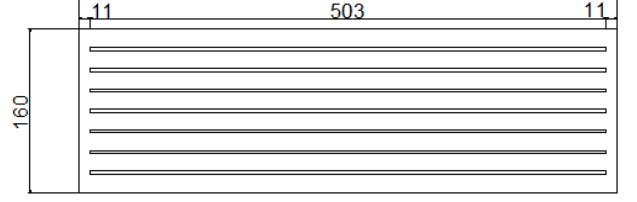
무근	
2열 배근	
3열 배근	
8열 배근	

그림 48 시험체 평면도 상세 (t=2mm, 단위: mm)

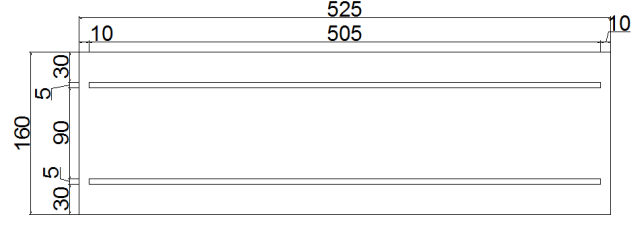
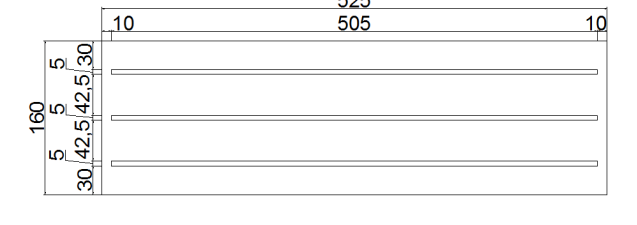
2열 배근	
3열 배근	

그림 49 시험체 평면도 상세 (t=5mm, 단위: mm)

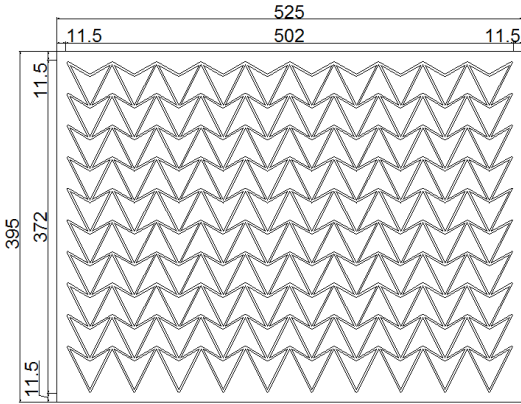
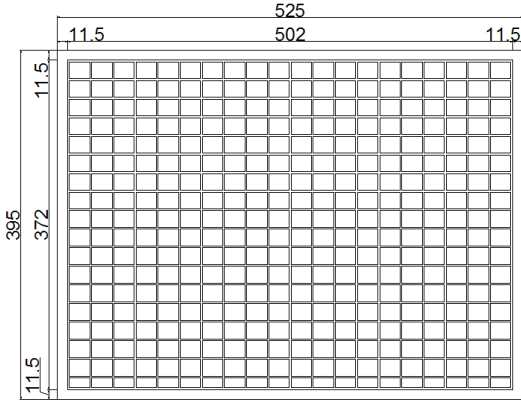
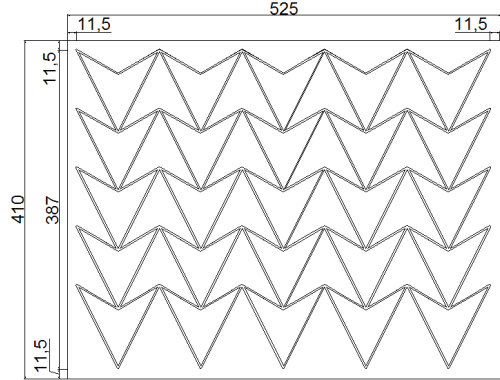
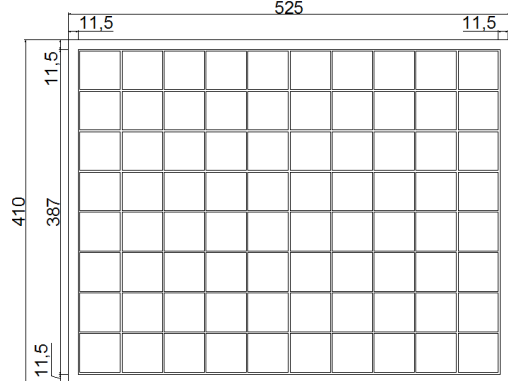
A	
B	
C	
D	

그림 50 시험체 평면도 상세 (t=2mm 격자구조체, 단위: mm)

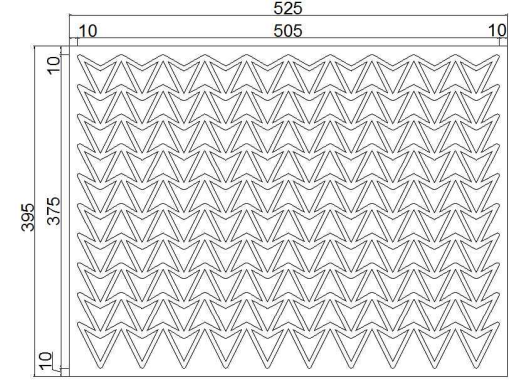
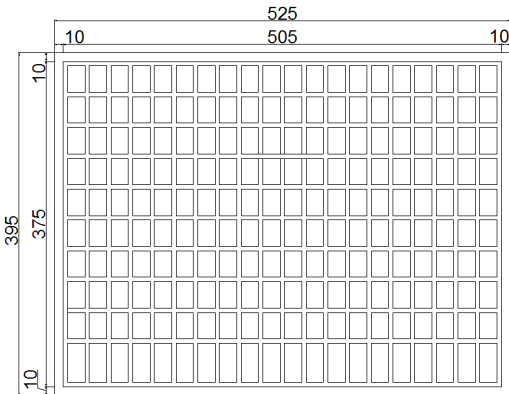
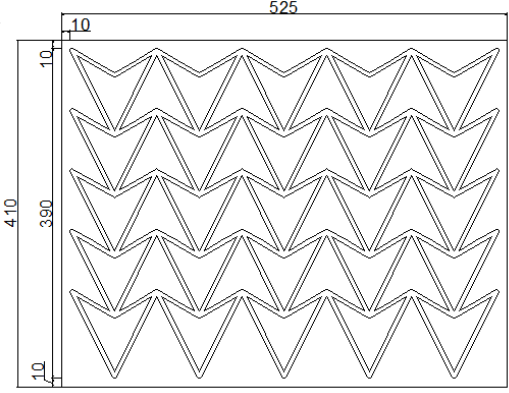
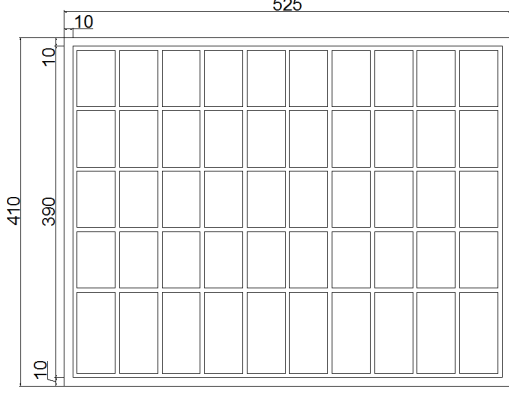
A	
B	
C	
D	

그림 51 시험체 평면도 상세 (t=5mm 격자구조체, 단위: mm)

- 다음은 압축하중 시험평가용 시험체 제작 전경으로 각 변수별로 동일 시험체를 3개씩 제작하였으며, 제작 후 재령 28일이 지난 시점에서 실험을 수행하였음.



(거푸집 작업)



(제작 및 양생)



(콘크리트 타설)



(시험체 완성)

그림 52 Auxetic 격자구조체 매립 압축시험체 제작 전경

- 압축하중 하의 복합부재 강성거동 시험평가는 일축압축시험방법을 적용하였음. 재하실험 300Ton UTM으로 하중재하를 수행하였으며, 내부구좌에 의한 편심제어 및 변위제어 방식을 선정하였음. 재하속도는 1mm/min의 변위제어 방식으로 으로 수행, 시험체가 파괴에 이르기 전에 실험을 종료하였음.
- 한편, 하중방향 및 하중 직교방향에 대한 변위와 변형률 측정은 LVDT 및 3축게이지를 사용하여 측정하였으며, 다음 그림은 시험 수행 시 양측면에 적용된 LVDT 및 3축게이지 설치 전경임.



그림 53 압축시험 수행 전경 (전면, 배면)

- 다음 표는 각 조건 및 변수별 복합체의 압축하중에 대한 탄성계수의 변화를 정리한 결과를 보여주고 있음.

표 32 각 복합체별 변수 정보 및 탄성계수 측정 결과

No.	specimens	unit cell	배열	철판 두께	격자 형상	보강량	E(GPa)	강성증 가율(일 반보강 대비)
-	Reference (무근)	-	-	-	-	-	28.2	-
1	N-52-2-2	52*52 (mm)	2	2mm	Normal	0.37%	28.3	-0.7%
2	A-52-2-2	52*52 (mm)	2	2mm	Auxetic		28.1	
3	N-52-2-3	52*52 (mm)	3	2mm	Normal	0.56%	25.69	5.3%
4	A-52-2-3	52*52 (mm)	3	2mm	Auxetic		27.06	
5	N-52-2-8	52*52 (mm)	8	2mm	Normal	1.5%	32.34	7.8%
6	A-52-2-8	52*52 (mm)	8	2mm	Auxetic		34.87	
7	N-102-2-2	102*102 (mm)	2	2mm	Normal	0.2%	28.6	-0.7%
8	A-102-2-2	102*102 (mm)	2	2mm	Auxetic		28.4	
9	N-102-2-3	102*102 (mm)	3	2mm	Normal	0.3%	28.1	1.4%
10	A-102-2-3	102*102 (mm)	3	2mm	Auxetic		28.5	
11	N-55-5-2	55*55 (mm)	2	5mm	Normal	2.1%	31.52	30.2%
12	A-55-5-2	55*55 (mm)	2	5mm	Auxetic		41.05	
13	N-55-5-3	55*55 (mm)	3	5mm	Normal	3.2%	42.03	15.9%
14	A-55-5-3	55*55 (mm)	3	5mm	Auxetic		48.73	
15	N-105-5-2	105*105 (mm)	2	5mm	Normal	1.2%	28.63	3.9%
16	A-105-5-2	105*105 (mm)	2	5mm	Auxetic		29.21	
17	N-105-5-3	105*105 (mm)	3	5mm	Normal	1.8%	29.76	16.2%
18	A-105-5-3	105*105 (mm)	3	5mm	Auxetic		34.58	

A^①-52^②-2^③-3^④

①. 격자형상 - A : Auxetic, N : Normal

②. unit cell 크기 - 52 : 52*52(mm), 105 : 105*105(mm)

③. 강판두께 - 2 : 2mm, 3mm, 5 : 5mm

④. 강판배열 수 - 2 : 2열, 3 : 3열, 7 : 7열, 8 : 8열

- 격자두께 $t=2\text{mm}$ 의 경우에 있어서는 콘크리트 시험체 파괴 대비 보강량이 0.3% 미만인 경우에는 Auxetic 격자체 뿐 만 아니라 일반격자의 경우에 있어서는 유의미한 강성 증가 효과를 확인할 수 없었음.
- 한편, 표 33의 5,6번의 경우와 같이 격자체를 8열로 매립하여 보강량을 1.5%까지 증가시킨 경우에 있어서는 동일 보강량 일반격자체 대비 Auxetic 격자체를 매립한 경우에 있어서 약 7.8%의 추가적인 강성 증가효과가 있음을 확인함.

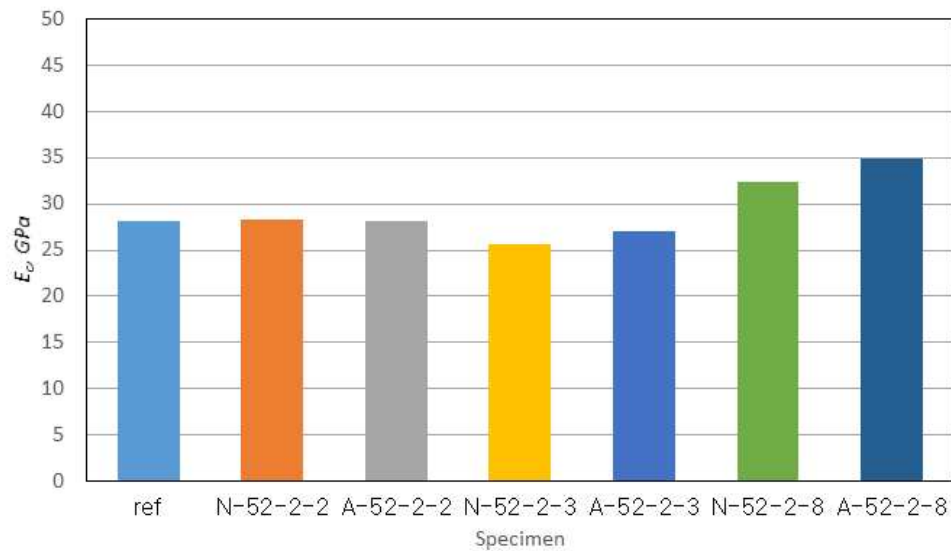


그림 54 각 복합체별 압축하중에 대한 탄성계수 분석 결과
($t=2\text{mm}$, unit cell $52 \times 52\text{mm}$)

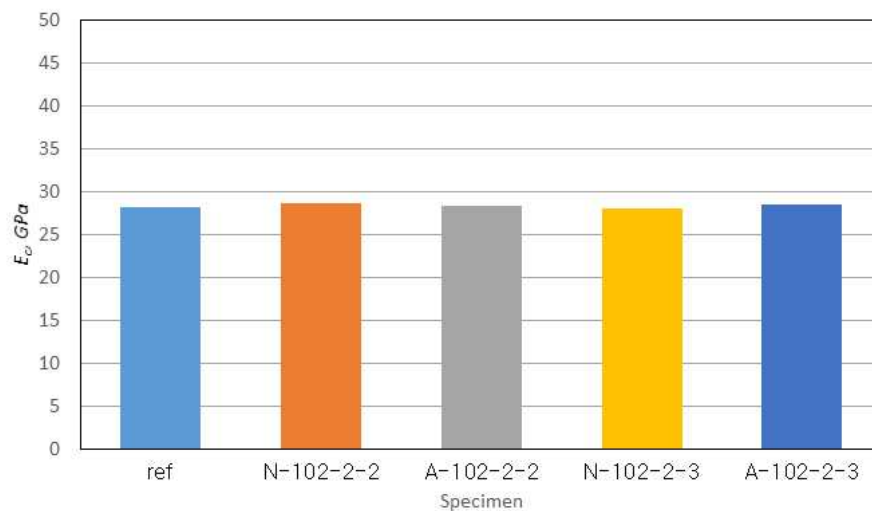


그림 55 각 복합체별 압축하중에 대한 탄성계수 분석 결과
($t=2\text{mm}$, unit cell $102 \times 102\text{mm}$)

- 다음 그래프는 $t=2\text{mm}$ 의 단위 cell $52\times 52\text{mm}$ 규격의 격자체를 8열 배열한 시험체에 있어서 하중작용 직교방향으로 발생한 변형률을 측정된 결과임.

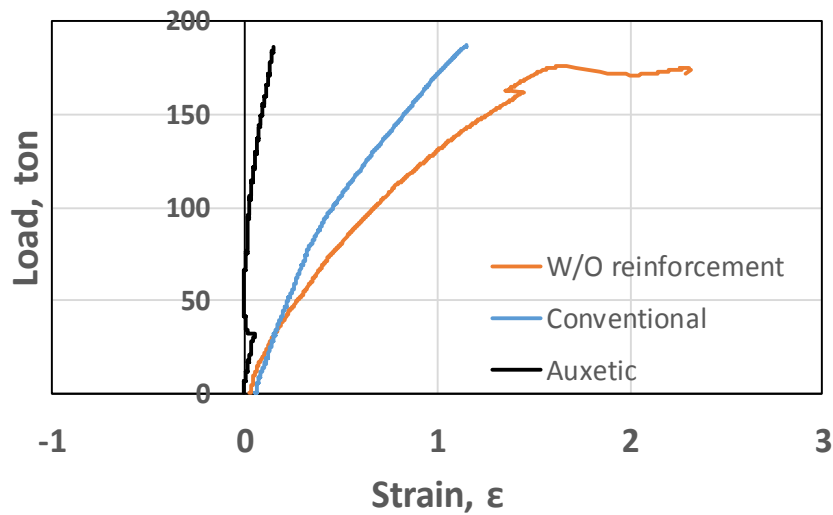


그림 56 압축하중 직교방향 변형률 발생 거동 측정 결과
($t=2\text{mm}$, $52\times 52\text{mm}$ unit cell, 8 array)

- 그래프에 나타난 바와 같이, 무근 콘크리트의 압축하중 증가에 따른 하중 직교방향의 변형률 증가량보다 일반격자를 보강한 경우 감소함을 보였으며, Auxetic 격자를 매립한 경우에 있어서는 일반격자 보다도 더욱 크게 감소하였음을 확인하였음.
- 즉, 압축하중에 의해 복합체에 발생하는 변형에 있어서 비록 하중 작용방향으로의 Auxetic 효과에 의한 강성 증가 효과는 비록 약 7.8% 수준이었으나, 이에 반해 하중 직교방향으로는 콘크리트의 변형을 구속하는데 Auxetic 격자체가 유의미한 수준으로 효과를 가졌다고 판단됨.

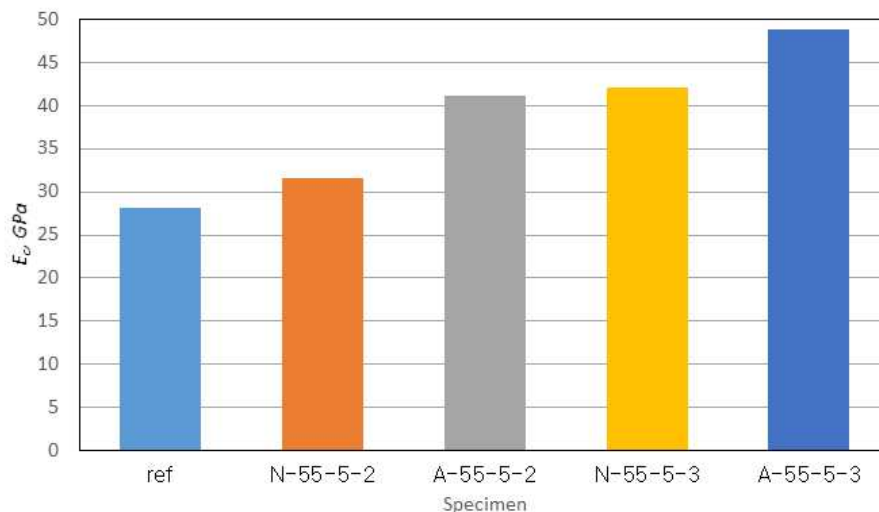


그림 57 각 복합체별 압축하중에 대한 탄성계수 분석 결과
($t=5\text{mm}$, unit cell $55\times 55\text{mm}$)

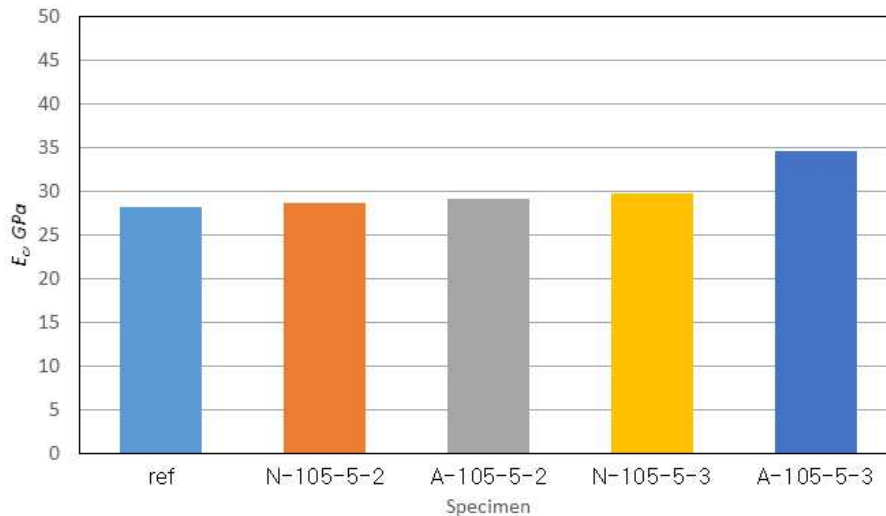


그림 58 각 복합체별 압축하중에 대한 탄성계수 분석 결과
($t=5\text{mm}$, unit cell $105\times105\text{mm}$)

- $t=5\text{mm}$ 격자체의 경우는 모두 1% 이상의 보강량이 부여되어 무근 콘크리트 대비 하중작용 방향으로의 강성 증가 효과를 보다 명확히 분석할 수 있었음.
- 단위 cell $55\times55\text{mm}$ 의 경우에 있어서 2열 보강의 경우에 있어서는 본 연구의 목표인 기존 일반 격자체 매립 대비 강성 30% 이상 향상 조건을 충족하였음.
- 한편, 3열 보강의 경우에 있어서는 보강량의 증가로 2열 보강보다 높은 강성을 보였으나, Auxetic 효과에 의한 기존 일반보강 대비 강성 증가율은 약 15.9%로 2열 보강보다 감소됨을 확인할 수 있었음.
- 즉, 단위 cell $55\times55\text{mm}$ 2열 배근이 상기 실험결과 중에서는 가장 좋은 Auxetic 강성 증가 효과를 가짐을 확인할 수 있었으며, 해당 매립 보강량은 표 33에 보이는 바와 같이 약 2.1%이었음.
- 이에, 콘크리트 복합체에 있어서 Auxetic 격자체의 보강량과 격자체의 두께가 가지는 영향성을 검토하기 위하여 추가적인 격자체를 제작하여 보강 실험을 수행하였음.
- 다음 그림은 추가검토를 위해 설계 및 제작된 격자체로서 단위 cell 사이즈는 $t=2\text{mm}$ 격자체와 동일한 $52\times52\text{mm}$ 를 유지하여 7열 매립보강을 하여 콘크리트 복합체를 제작하였음. 이 때 적용된 콘크리트 보강량은 약 2%로서, $t=5\text{mm}$ 에 2열 배근을 한 경우의 보강량 약 2.1%와 거의 동등 수준을 유지하도록 하였음.

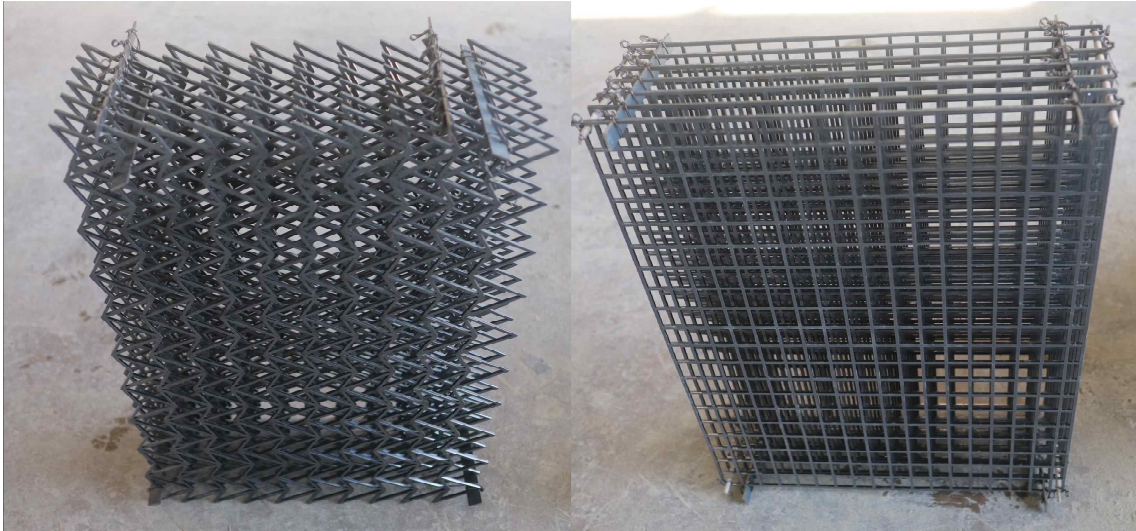


그림 59 $t=3\text{mm}$, 단위 cell $52\times 52\text{mm}$, 7열 매립 격자체 조립 전경

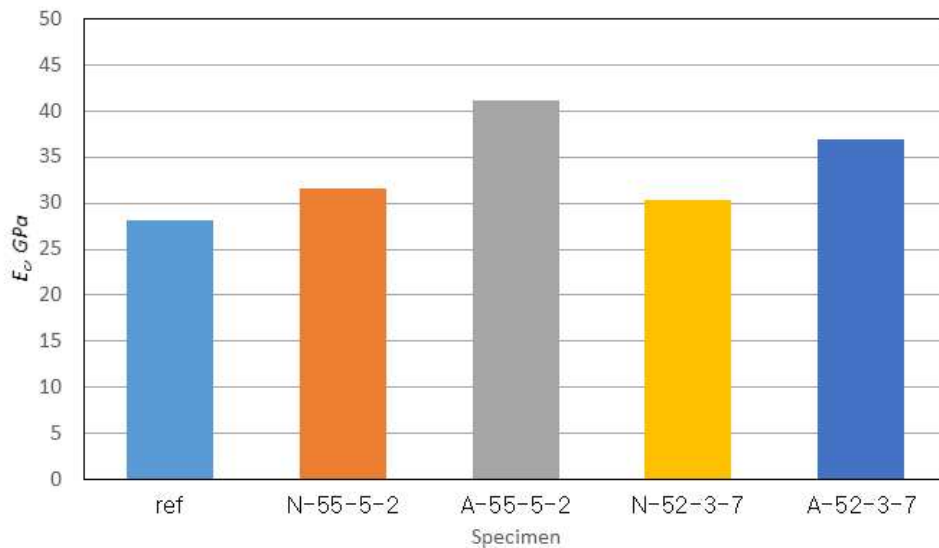


그림 60 보강량 약 2% 수준 복합체의 압축하중에 대한 탄성계수 비교

- 상기 그래프에서 보이는 바와 같이 비록 총 보강량은 유사한 경우에 있어서 보강체의 두께가 5mm에 2열 매립을 한 경우가 두께 3mm에 7열 매립을 한 경우보다 Auxetic 효과가 뛰어남을 확인함. 즉, 앞서 밝힌 바와 같이 두께 5mm, 2열 매립의 경우 일반 격자보다 Auxetic 효과에 의해 약 30% 수준의 강성 증가 효과를 가진 반면, 두께 3mm, 7열 매립의 경우는 일반 격자보다 약 22% 수준의 강성 증가 효과를 보여주었음.
- 이러한 연구결과로부터 압축하중 조건에서의 기존 강성 30% 이상 향상 복합부재의 형식은 두께 5mm를 가지며, 단위 cell의 크기 $55\times 55\text{mm}$ 를 가지는 Auxetic 격자체를 90mm 간격으로 배치함으로써 구현할 수 있음을 확인함 (그림 49, 2열매근도 참조).
- 다만, 본 연구는 압축강도 40MPa 수준의 콘크리트를 기준으로 한 복합체를 대상으로 한 결과로서 콘크리트의 강도수준에 따라 적용 방식의 변화가 필요하다고 판단됨.

나. 인장하중 대응 Auxetic 격자체 보강 콘크리트 복합체 제작 및 성능평가

- 인장하중 대응 Auxetic 격자체는 그림 40 및 41에서 보인 바와 같이 제작되었으며, 인장하중 하의 강성거동 측정은 직접인장시험방법을 적용하였으며, 시험체는 모르타르 매립 방식과 무 매립방식 2가지로 이원화 하여 수행하였음.
- 모르타르 무 매립 방식은 다음 그림과 같이 제작된 격자체를 2열로 배열한 후, 격자체 부위가 노출된 방식으로 직접인장시험기 결속부위만 고강도 콘크리트로 제작하였음. 또한, 모르타르 무 매립 방식에서는 이중화살촉 형상 격자체의 각도를 앞서 밝힌 바와 같이 $\theta_1=60^\circ$ 로 고정하고, $\theta_2=22.5^\circ, 30^\circ, 37.5^\circ$ 로 변화시킨 세가지 종류를 제작하였음.



그림 61 직접인장 시험용 모르타르 무 매립방식 Auxetic 격자 시험체 제작 전경

- 직접인장 시험은 다음 그림과 같이 1mm/min의 변위제어 방식으로 수행하였으며, 각 변수별 3개의 시험체에 대하여 인장하중 증가에 따른 격자체 발생변위를 이미지 분석을 통하여 구하였음.



그림 62 Auxetic 격자 시험체
직접인장 시험 예

- 다음 그림에서 보이는 바와 같이, $\theta_2=22.5^\circ$, 30° , 37.5° 순으로 낮은 하중에서 더 큰 변위발생을 보여주었음. 본 연구에서는 격자체별 상호비교를 위하여 격자 구성면적을 최대한 유사하도록 제작하였으며, 이에 적용된 격자체 면적은 $\theta_2=22.5^\circ$, 30° , 37.5° 각각 $4,570.5\text{mm}^2$, $4,180.6\text{mm}^2$, $4,532.9\text{mm}^2$ 이었음.
- 다음의 시험결과 사진 및 그래프에 나타난 바와 같이 $\theta_2=22.5^\circ$, 30° , 37.5° 순으로 격자체의 강성이 낮아짐을 확인하였음. 즉, 유사한 격자체 면적을 가질 경우에도 격자체의 형상에 따라 전체 격자시스템이 가지게 되는 하중응답 강성의 발현에 차이가 있음을 확인하였음.
- 다만, 본 실험에서는 격자체 전체 구성면적을 유사하게 적용하기 위하여 각 경우에 있어서의 단위격자체의 크기가 변화하게 되었으며, 이로 인하여 $\theta_2=22.5^\circ$ 의 경우가 다른 격자체와 비교했을 때 상대적으로 조밀한 격자상태를 가짐으로써 보다 높은 강성거동을 가졌음을 분석결과를 이해하는데 고려할 필요가 있음을 확인함.
- 또한, 인장하중이 증가함에 따라 하중방향으로의 길이 증가 뿐 만 아니라, 이중화살촉 구조형상의 변화로 인해 하중 직교방향으로도 폭이 증가하는 음의 포아송비 거동이 발생하는 것을 육안으로 확인할 수 있었음.

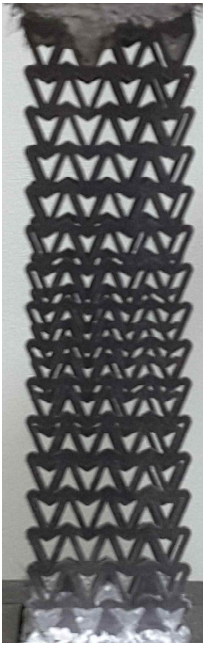
실험 전	3.4kN	8.5kN	10.9kN	15.2kN
				
288mm	288mm	294mm	300mm	311.2mm

그림 63 Auxetic 격자 시험체 직접인장 시험 ($\theta_2=22.5^\circ$)

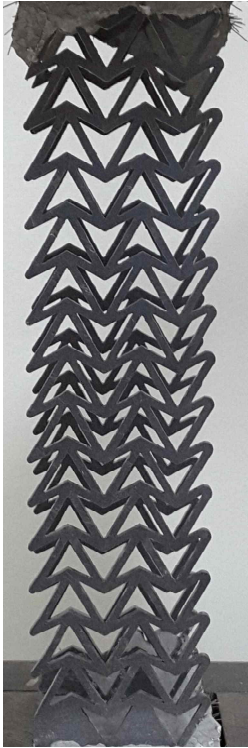
실험 전	4.9kN	5.5kN	5.6kN
			
288.4mm	297.5mm	304.5mm	316.75mm

그림 69 Auxetic 격자 시험체 직접인장 시험 ($\theta_2=30.0^\circ$)

실험 전	0.5kN	2.3kN	2.4kN
			
277.4mm	283.1mm	298.3mm	321.1mm

그림 74 Auxetic 격자 시험체 직접인장 시험 ($\theta_2=37.5^\circ$)

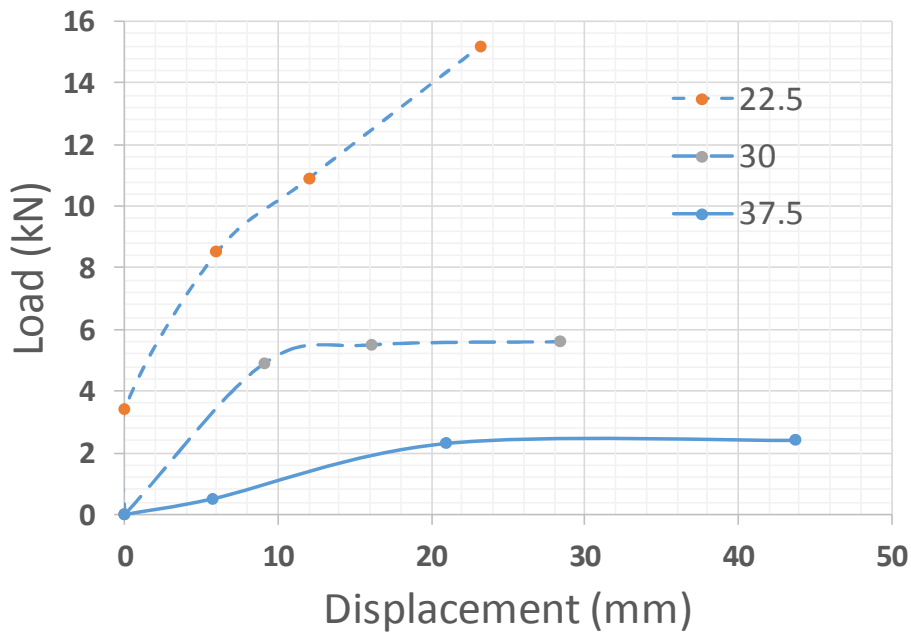


그림 75 Auxetic 격자 시험체 직접인장 시험 결과 (하중-격자체 변위)

- 모르타르 매립 방식의 시험체는 압축하중 대응 복합체의 경우와 마찬가지로 $\theta_1=60^\circ$, $\theta_2=30^\circ$ 인 경우에 있어서 1열 및 2열로 격자체를 배열하고, 격자부위에 다음 표와 같은 재령 28일 기준 압축강도 40MPa 모르타르 배합으로 충전하여 복합체를 구성하였음. 또한, 이중화살촉 격자체의 단면적과 동일한 값을 가지는 일반 격자체를 제작하여 동일한 방식으로 시험체를 제작하여 상대비교를 수행할 수 있도록 하였음.

표 33 모르타르 배합표

Compressive strength	W/C	Unit weight (kg/m ³)			
		Water	Cement	Gravel	Sand
40MPa	48.5	281	580	-	1421

- 계측은 LVDT 및 표면 변형률게이지를 부착하여 인장하중 방향 및 하중 직교방향 거동을 측정하였음.



그림 76 격자체 매립 직접인장 시험 전경

표 34 격자구조체 매립 복합체의 직접인장 시험 결과

(단위: kN/strain)

No.	specimens	배 열	철판 두께	격자 형상	load/strain (load direction)	load/strain (perpendicular to load direction)
1	R-0	0	2mm	Ref	15.0	-50.0
2	A-1-60	1	2mm	Auxetic	16.7	-100.0
3	A-2-60	2	2mm	Auxetic	16.7	-181.8
4	N-1	1	2mm	Normal	15.4	-38.5
5	N-2	2	2mm	Normal	16.4	-55.6

A^①-1^②-60^③

①. 격자형상 - A : Auxetic, N : Normal, R : Reference(무보강)
 ②. 강판배열 수 - 0 : 무보강 1 : 1열, 2 : 2열
 ③. Auxetic angle - 60 : 60°

- 상기 표에 정리한 바와 같이, 격자체 무보강 시험체의 경우 인장하중 방향에서의 강성치 15 kN/strain에 비해, 격자체를 보강할 경우 Auxetic 격자체의 경우는 1열, 2열 매립 모두 16 kN/strain 으로 약 11.3%, 일반 격자체는 1열 2.6%, 2열 9.3% 증가됨을 확인함.
- 인장하중 직교방향의 강성에 있어서는 무보강 시험체 대비 일반격자 보강 시험체의 경우는 강성의 증가에 큰 기여를 하지 못함을 확인하였으며, 이에 반해 Auxetic 격자체로 보강한 경우, 큰 폭의 강성증가 효과가 있음이 확인됨.
- 다음 그래프는 일반 및 Auxetic 격자를 1열 및 2열로 매립한 복합체의 인장하중 방향의 응력 대비 하중 방향 및 하중 직교방향에서의 변형률 관계를 보여주고 있음.

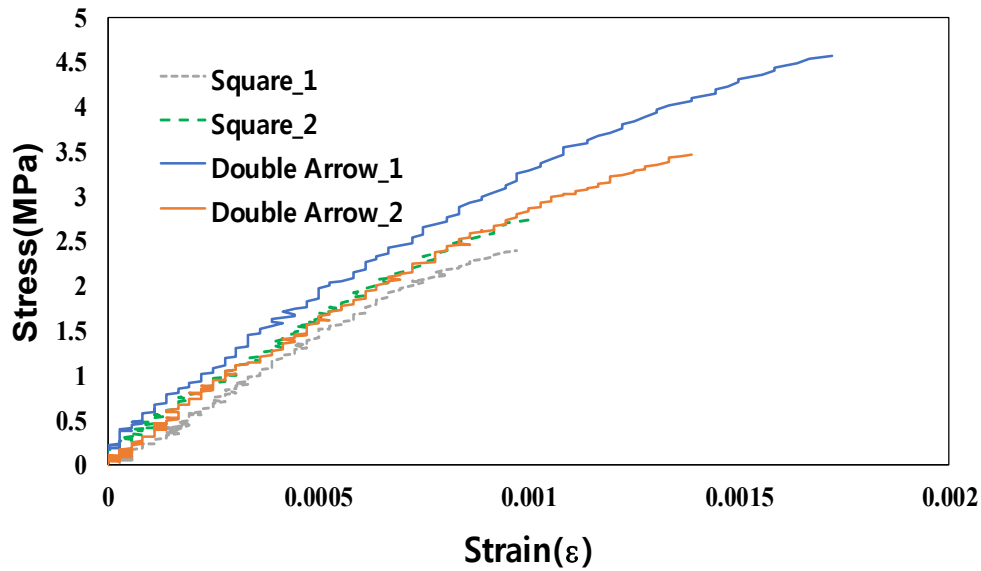


그림 77 응력-변형률 선도 (인장하중 방향)

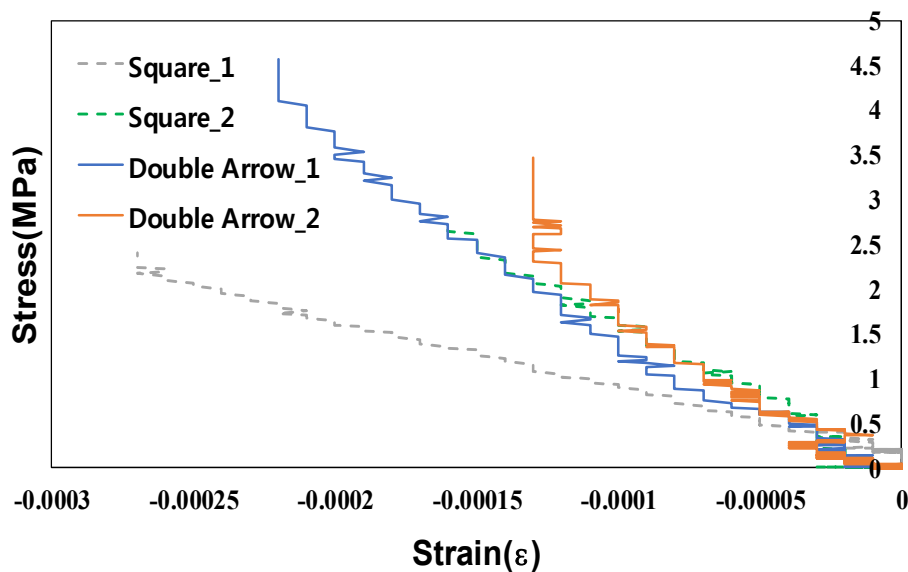


그림 78 응력-변형률 선도 (인장하중 직교방향)

- 상기 그래프에 나타난 바와 같이, 인장하중 방향에 있어서 일반 및 음의 포아송비 격자체를 1열로 매립한 경우의 탄성계수를 구한 결과, 음의 포아송비 격자체가 약 8%의 높은 값을 가짐이 확인됨.
- 그러나, 2열 매립의 경우에 있어서는 일반격자와 음의 포아송비 격자 두 종류 모두 거의 동일한 거동을 보였으며, 그 수치는 1열 매립 시험체와 큰 차이점을 보이지 않았음. 이러한 시험결과를 볼 때 약간의 거동상의 차이점이 비록 확인되기는 하였으나, 본 연구에서 수행된 측정구간에서 인장하중 작용방향에 있어서는 격자체의 매립으로 인한 영향보다는 모르타르 부분의 균열 파괴거동이 인장하중 작용 방향으로의 복합체 거동을 지배하였다고 판단됨.
- 이에 반해, 인장하중의 직교방향에 있어서는 일반 격자체를 매립한 경우보다 음의 포아

송비 격자체를 매립한 경우 동일 응력 대비 변위의 감소가 확실히 감소함을 확인할 수 있었음. 즉, 1열 매립의 경우 일반격자체 복합체의 탄성계수 대비 1열 매립 음의 포아송비 격자체는 약 260%의 강성 증가가 확인되었으며, 2열 매립의 경우는 일반 격자체 대비 약 327%의 강성 증가가 확인되었음.

- 이와 같은 결과를 볼 때, 해당 실험조건에 있어서는 Auxetic 격자체 매립 복합체의 하중 작용방향 강성 증가에 Auxetic 효과는 거의 없으나, 하중 직교방향의 복합체의 단면축소 부분에 있어서는 매우 큰 유의미한 영향을 주었음을 확인하였음.
- 비록, 본 연구에서는 인장강도가 거의 무시되는 시멘트계 매질을 대상으로 Auxetic 효과에 의한 인장 강성 효과를 도전하여 그 한계점을 확인하였으나, 인장하중 직교방향에 있어서의 단면축소량을 일반 보강방식의 경우보다 획기적으로 향상시킬 수 있다는 점을 실험적으로 확인한 데에 중요한 의의가 있다고 판단됨.
- 후속 연구 수행의 관점에서 콘크리트와 같은 인장강도가 거의 없는 재료의 강성 증가 방식이 아닌, Auxetic 격자체로 구성된 인장부재에 대한 연구를 추가적으로 수행하였음.
- 해당 연구는 다음 그림에서 보이는 바와 같이, 일반 강봉과 동일한 단면적을 가지면서 단편의 형태를 Auxetic 격자로 구성토록 하였음.

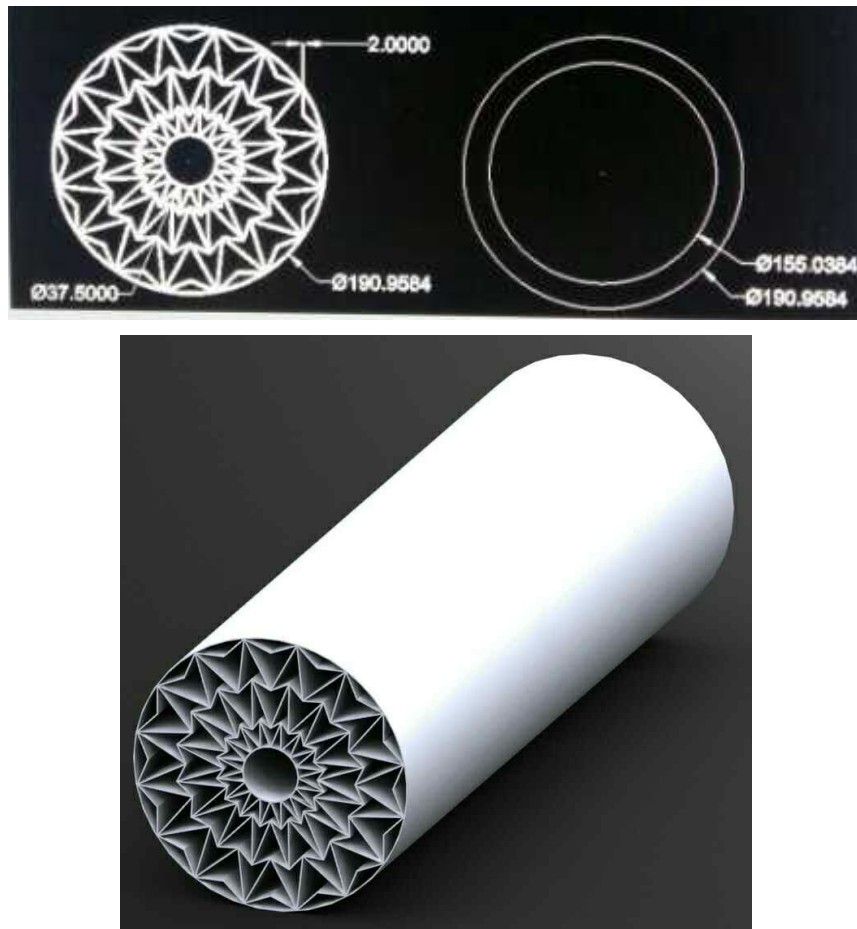


그림 79 Auxetic 격자단면 보유 인장부재 개념도

- 다음 그림은 상기 Auxetic 인장부재 및 동일한 단면적을 가진 원형 pipe에 대한 동일 인

장변위 하중 하의 변형율에너지 및 발생변위를 유한요소해석으로 검토한 예임.

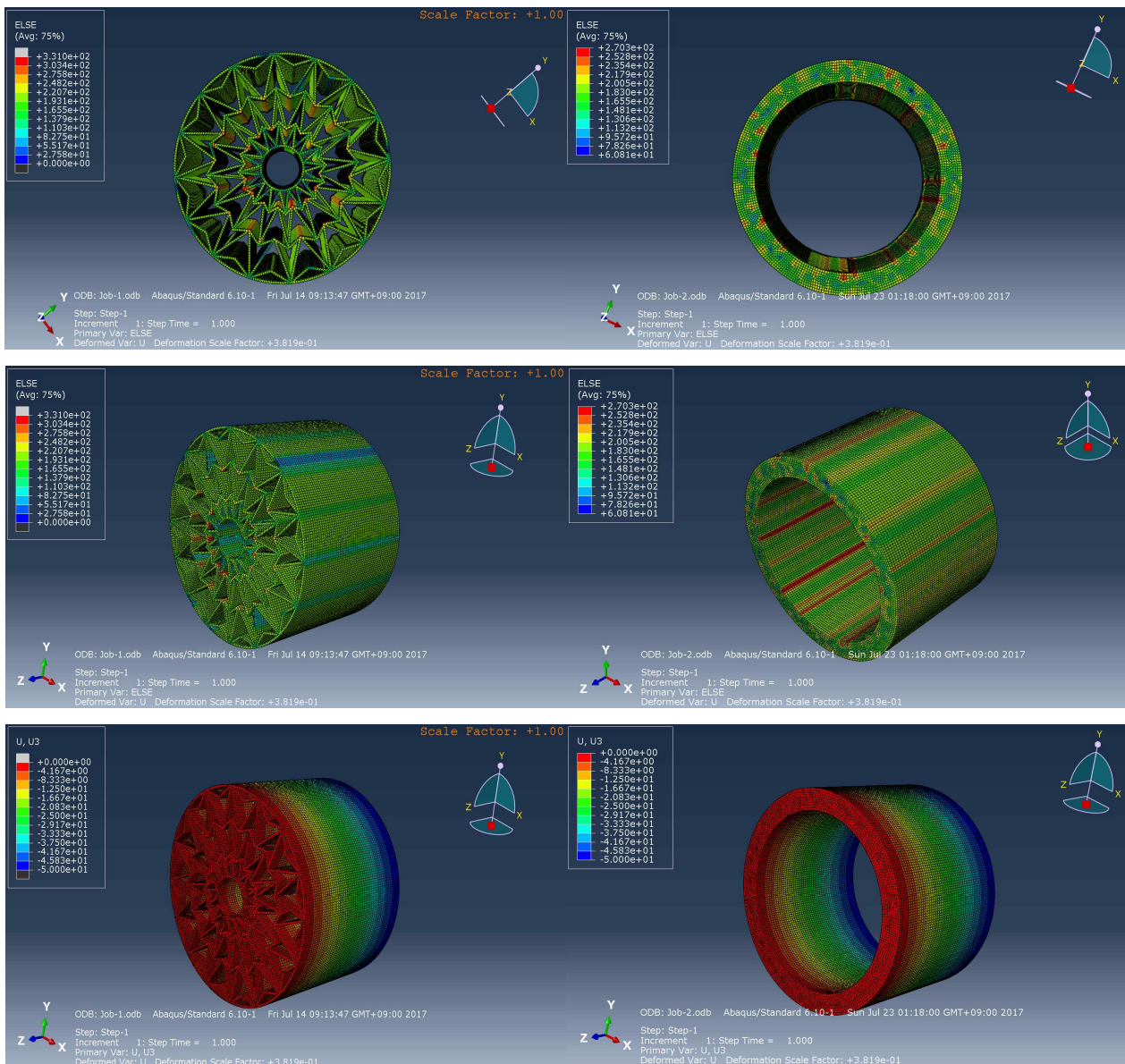
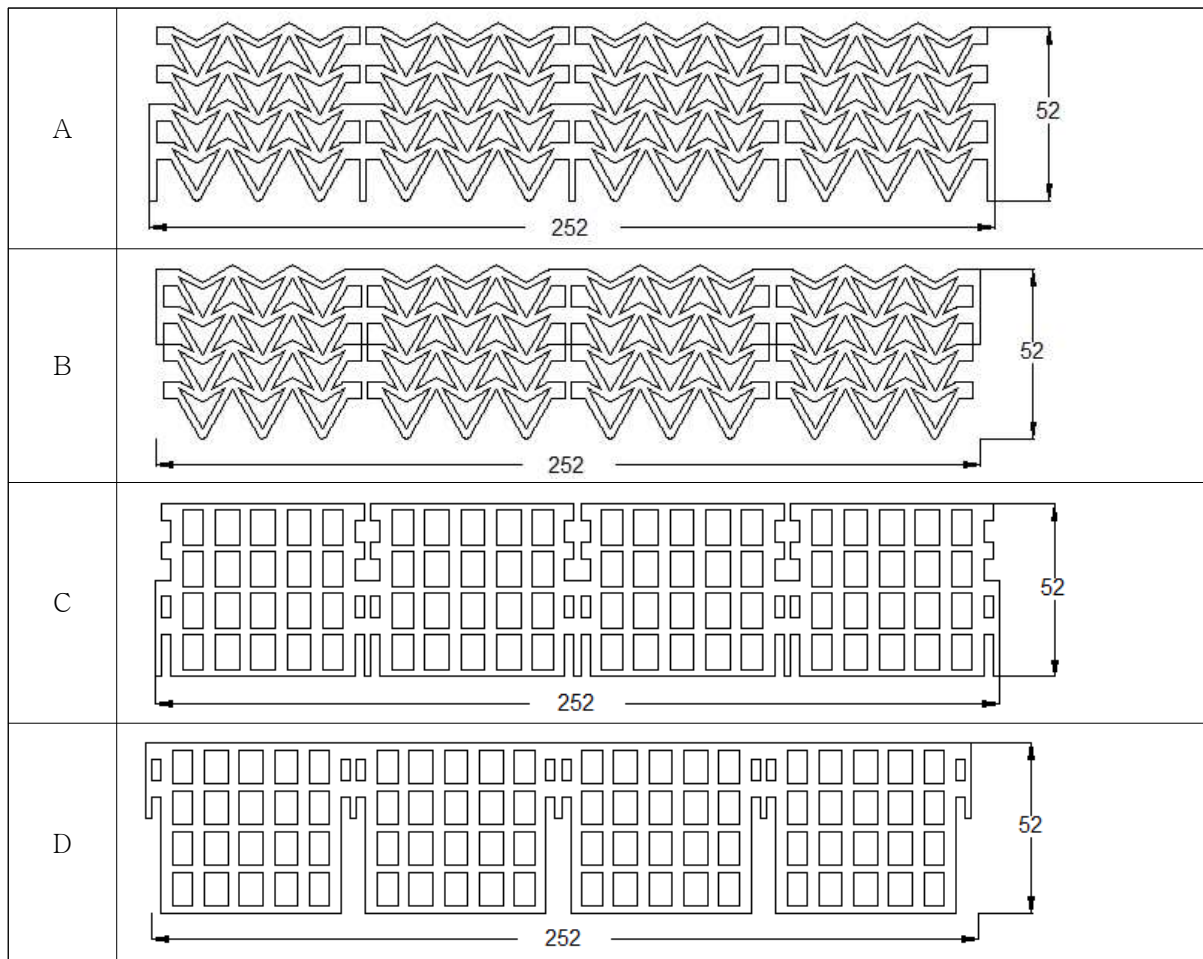


그림 80 유한요소 해석 예 (좌: Auxetic, 우: 동일단면적 Pipe)

- 해석수행 결과, 상기의 Auxetic 격자체 적용 인장부재에 있어서는 정적 인장하중이 작용하는 경우에 있어서는 동일 단면적을 가지는 원형 pipe와 큰 차별성을 가지지 않음을 확인함.
- 다만, Auxetic 기능의 탑재에 따른 재료 비선형 거동 수준의 인장하중이 작용할 경우와, 충격하중의 경우에 있어서는 원형 pipe와의 거동차이가 발생할 수 있으며, 재료의 항복 하중 이후의 거동에 대하여서는 후속 연구에서 보다 심도깊은 연구를 수행하고자 함.

다. 충격하중 대응 Auxetic 격자체 보강 콘크리트 복합체 제작 및 성능평가

- 충격하중 대응 Auxetic 격자체 매립 복합체의 제작은 기본적으로 300x300x100mm 사이즈를 가지도록 하였음.
- 이중화살촉 단위 cell의 형식은 기본적으로 $t=2\text{mm}$, 52x52mm 모델을 1/4 축소하여 적용하였음. 그 이유는 충격하중 시험 수행을 위한 장비 사양을 고려, 시험체의 두께를 100mm로 제한하였기 때문임.
- 또한, Auxetic 격자체의 보강량 변수를 고려하기 위하여 시험체 내부에 무보강, 일축방향 5열 및 11열 보강, 양축방향 5열 및 11열 보강 방식을 취하였으며, 기본적인 설계도면은 다음과 같음.



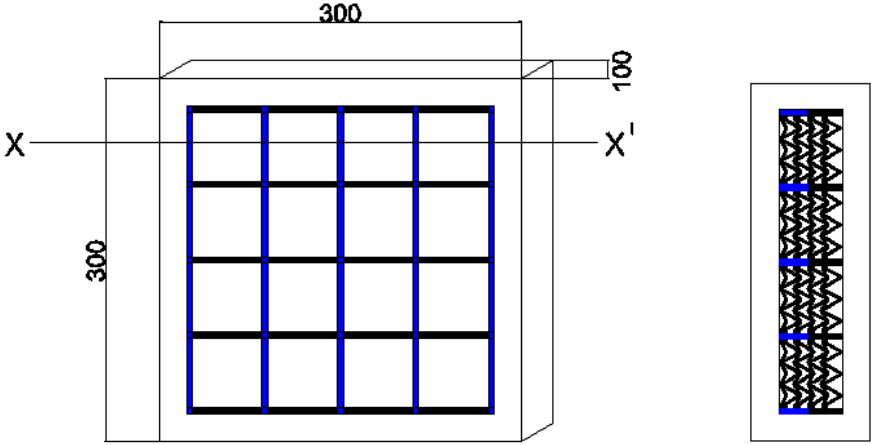
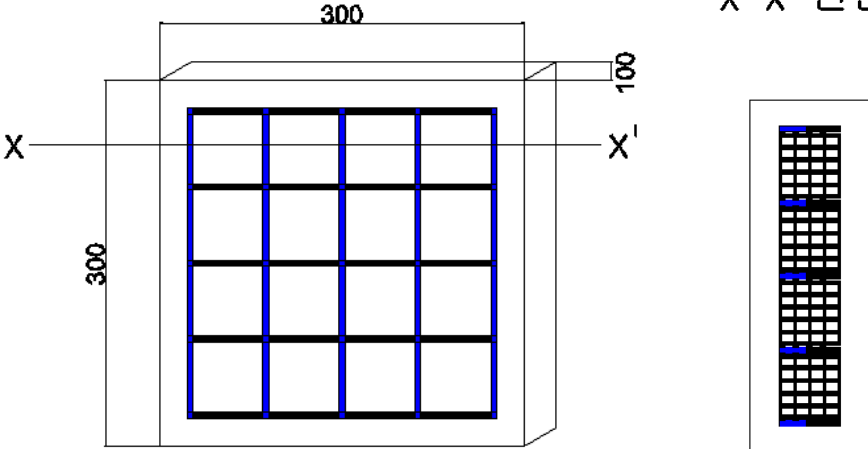
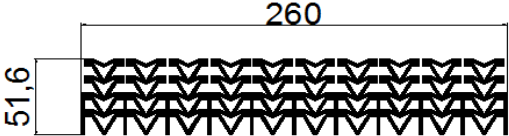
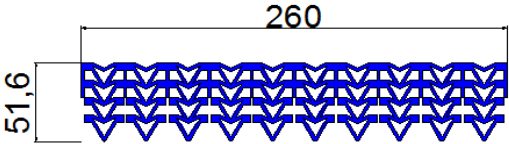
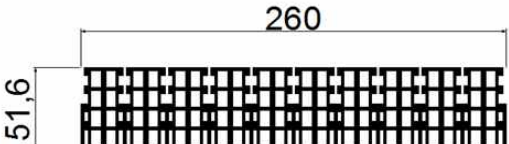
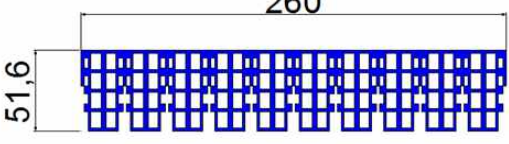
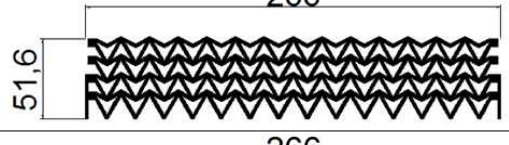
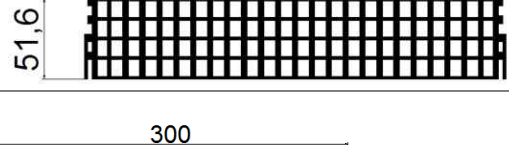
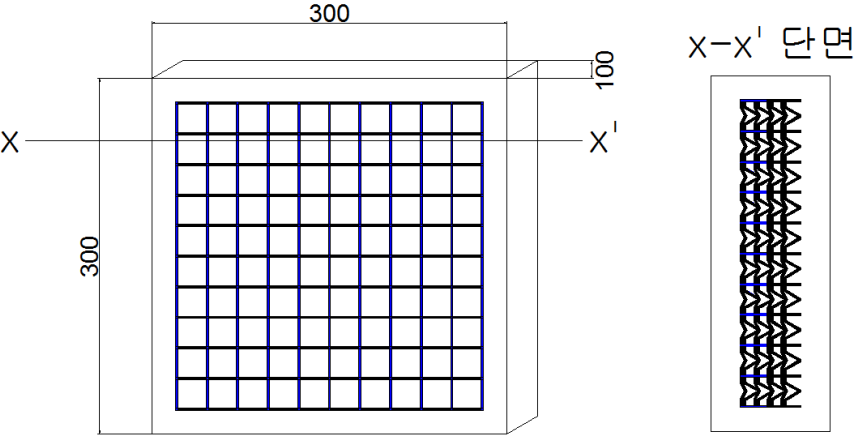
E	x-x' 단면  -A,B type 금속 격자판 사용
F	x-x' 단면  -C,D type 금속 격자판 사용

그림 81 격자체 5열, 2방향 보강 복합체 설계도 (Auxetic, Normal)

A	
---	--

B	
C	
D	
E	
F	
G	 -A,B type 금속 격자판 사용

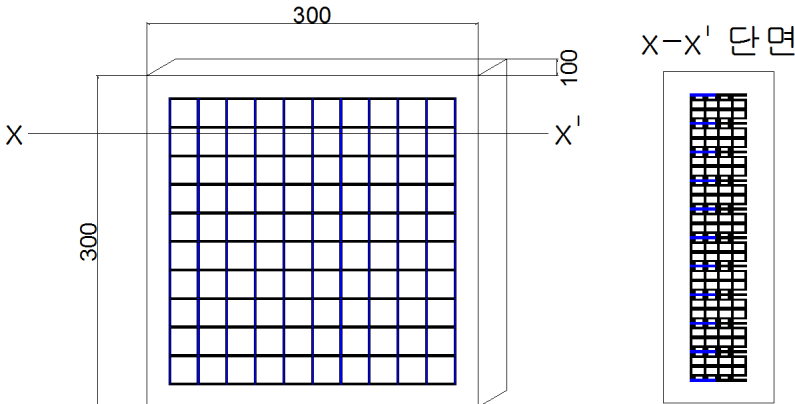
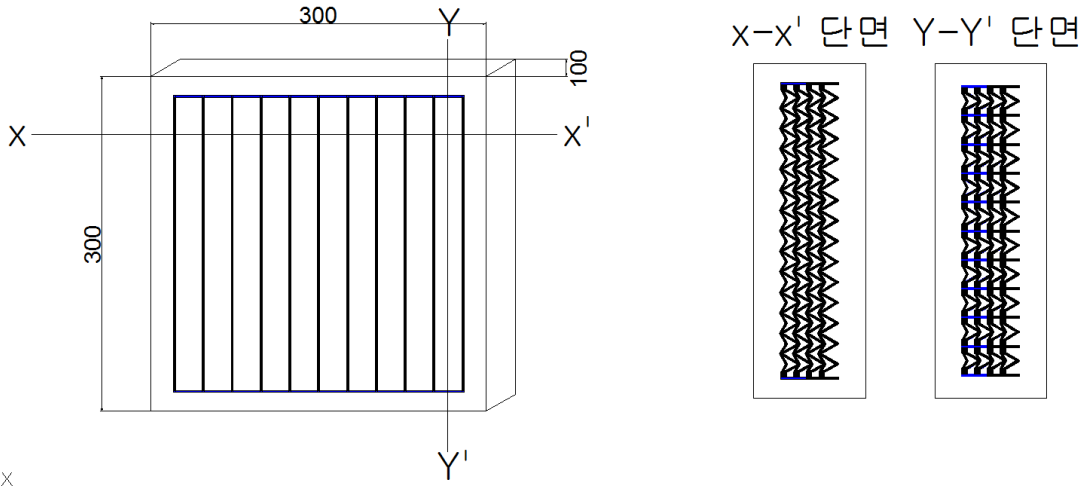
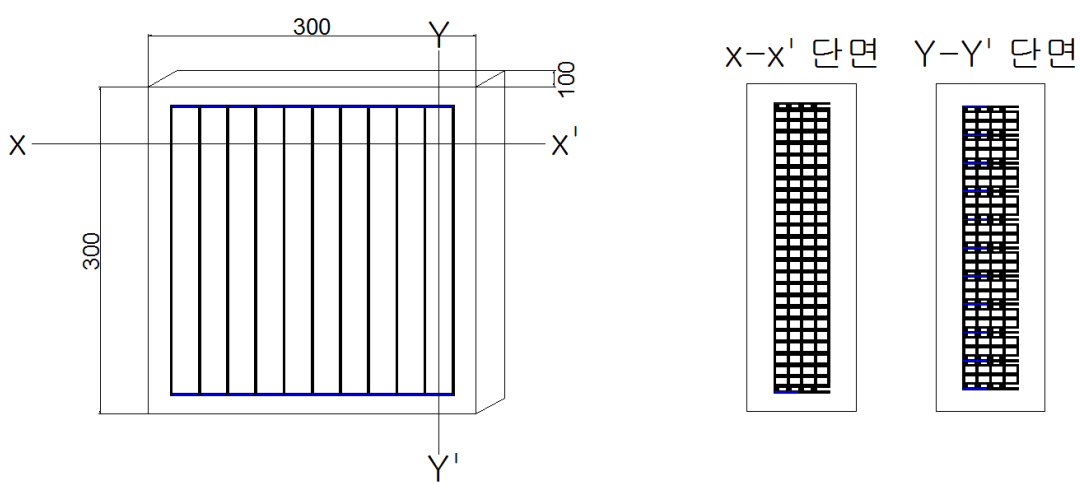
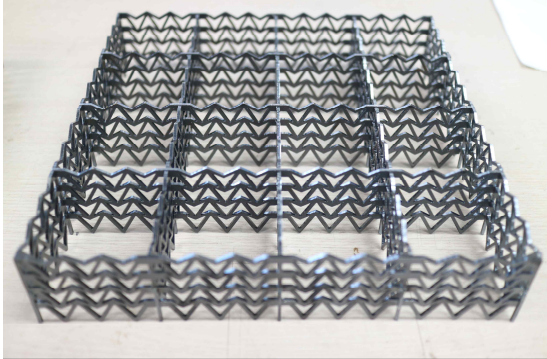
H	 -C,D type 금속 격자판 사용
I	 -B,E type 금속 격자판 사용
J	 -D,F type 금속 격자판 사용

그림 82 격자체 11열, 1, 2방향 보강 복합체 설계도 (Auxetic, Normal)

- 다음은 충격시험용 격자체 및 복합체 제작 과정을 보여주고 있음. 이 때, 격자체의 단위 cell 크기를 축소시킨 관계로 인장평가에 적용한 압축강도 40MPa 수준의 모르타르 배합을 기본적으로 적용하였음.

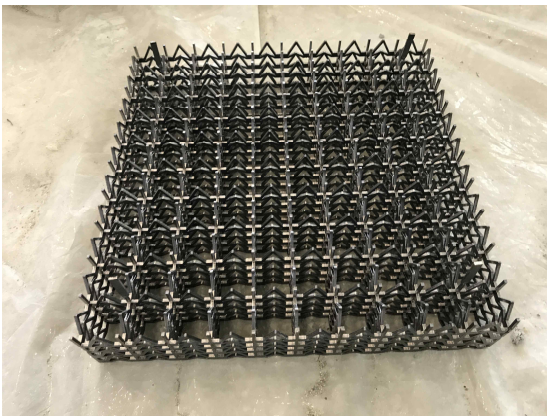
- 또한, 5열 양방향 보강의 경우에 있어서는 추가적으로 압축강도 100MPa 수준의 고강도 모르타르 배합을 적용하여 제작하였음.



(a) Auxetic 5열, 양방향



(b) 일반 5열, 양방향



(c) Auxetic 11열, 양방향



(d) 일반 11열, 양방향



(e) Auxetic 11열, 일방향



(f) 일반 11열, 일방향

그림 83 충격하중 대응 복합체 제작을 위한 격자체 조립



그림 84 충격하중 대응 복합체 제작 전경

- 고속 충격하중의 경우, 표준화된 시험방법이 제시되고 있지 않은 실정으로서, 본 연구에서는 한국건설기술연구원이 보유하고 있는 가스건 고속충격 파괴시험장치를 활용하였음. 해당 장비는 기본적으로 시험체를 진공챔버에 투입, 직경 40mm의 비상체를 질소가스압으로 발사하여 충돌파괴를 일으키는 방식임.
- 본 연구에서는 다음 그림에서 보이는 탄두를 사용하여 비상체 충돌속도가 350m/s의 조건 하에서 파괴현상을 분석하였음.
- 또한, 파괴 시의 거동 분석을 위하여 시험체 배면에 스트레인게이지 및 LVDT 등을 부착, 충격하중에 의한 순간 거동을 계측하고자 함.



(a) 본체부



(b) 탄두



(c) 배면부 Strain gauge 부착



(d) 배면 중앙 LVDT 부착

그림 85 충격파괴 시험장비 및 계측 예

- 충격시험이 완료된 시험체는 다음 그림에 보인 바와 같이 이미지 분석기법을 활용하여 발생한 균열의 개수, 총 균열길이 및 파손영역 면적 등을 산출하였음.

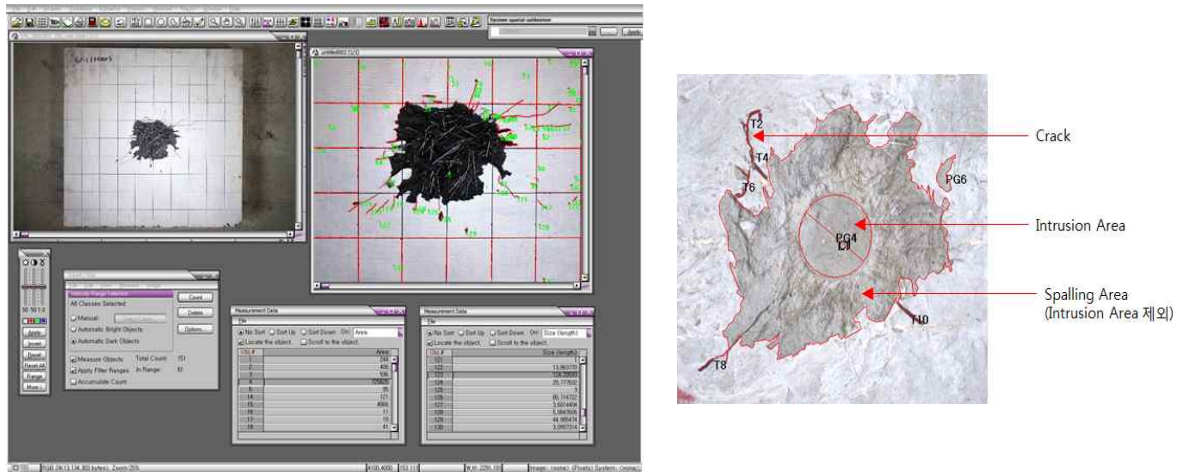


그림 86 이미지 분석 Tool을 이용한 충격파괴 분석 예시

- 다음 표 및 그림은 각 변수별 시험체의 충격파괴 시험 결과를 보이고 있음.

표 35 충격하중 시험체의 종류 및 시험 결과 (발사체 속도 350m/s)

No.	specimens	배열	압축강도 (MPa)	보강량 (%)	Total crack length(mm)	No. of cracks(EA)	Spalling Area(m ²)
1	R-0-40	11	40	x	1439.151	43	0.00044
2	R-0-100	5	100	x	1187.704	35	0.001053
3	A-5-40-2	5	40	0.0129	1486.521	43	-
4	A-11-40-1	11	40	0.0170	1262.053	59	0.000894
5	A-11-40-2	11	40	0.0288	1086.678	47	0.000886
6	A-5-100-2	5	100	0.0129	2792.444	69	0.000011
7	N-5-40-2	5	40	0.0134	1758.324	11	0.000008
8	N-11-40-1	11	40	0.0175	1254.359	47	0.000872
9	N-11-40-2	11	40	0.0296	1355.974	39	0.000616
10	N-5-100-2	5	100	0.0134	2430.565	69	0.000238

A^①-5^②-40^③-1^④

- ①. 격자형상 - R : Reference, A : Auxetic, N : Normal
 ②. 철판 배열개수 - 0 : 무보강, 5 : 5열, 11 : 11열
 ③. 압축강도 - 40 : 40MPa, 100 : 100MPa
 ④. 배근방향 수 - 1 : 1방향, 2 : 2방향

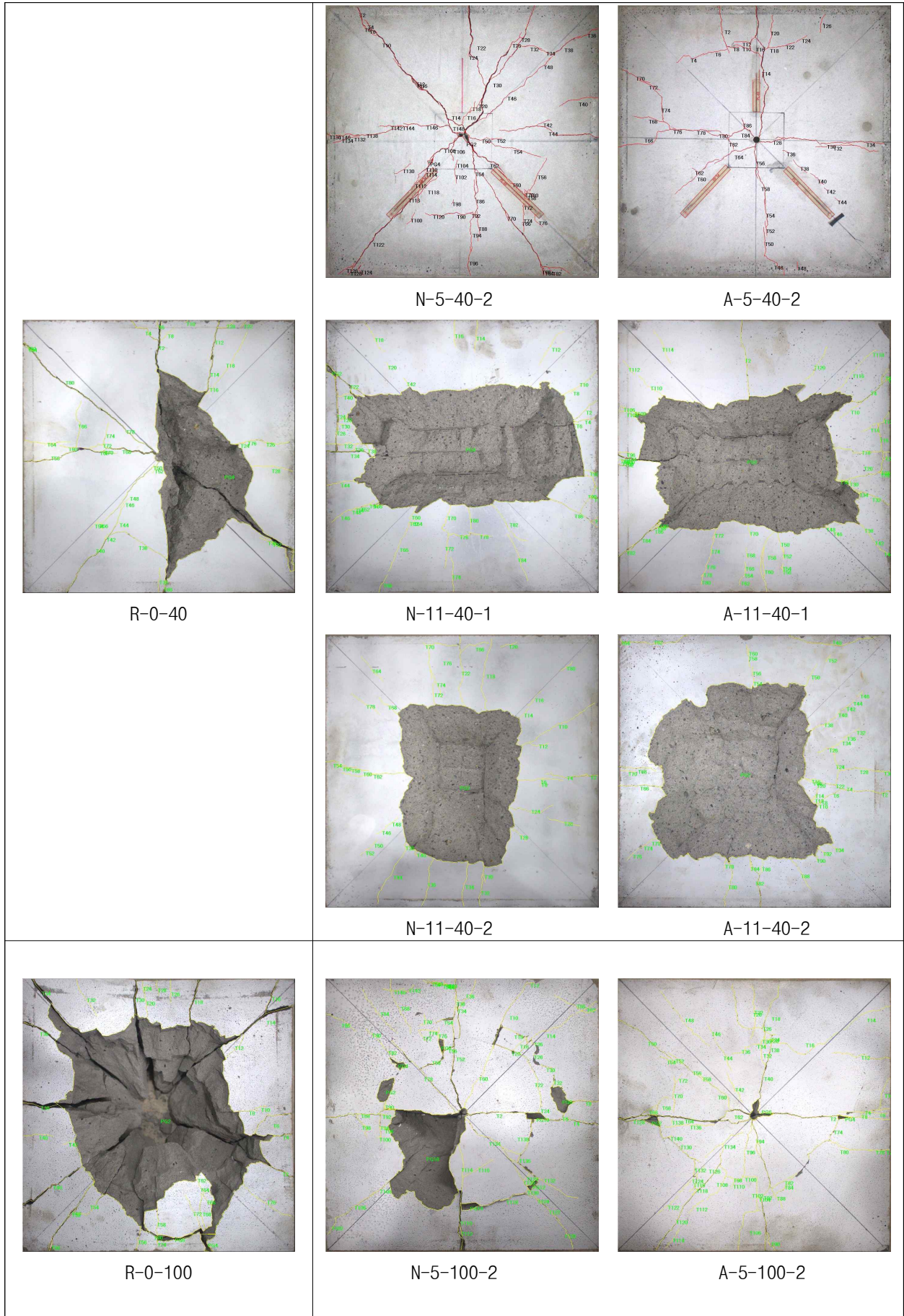


그림 87 충격하중 시험 결과 (시험체 배면)

- 상기 실험결과에서 보이는 것과 같이, 40MPa 모르타르 복합체의 경우, 5열 양방향 격자보강을 함으로써 충격파괴 저항성이 향상됨을 알 수 있으며, Auxetic 격자체의 경우가 일반격자체를 사용한 경우보다 우수한 저항성능을 가짐을 알 수 있음.
- 이에 반해, 격자체 11열 일방향 및 양방향 격자보강을 한 경우는 무보강과 비교할 경우, 단순 육안검사 만으로는 보강효과를 확실히 구분할 수 없음. 다만, 무보강의 경우에는 시험체 전체의 관통균열이 생긴 반면, 격자체 11열 보강의 경우는 관통균열 보다는 충격파괴로 인한 배면부 spalling 현상이 뚜렷이 발생하였음을 확인함.
- 이의 원인으로는 격자체 11열 보강의 경우 높은 금속재의 내부 보강량에 의하여 시험체 전면부에 발생한 충격파가 모르타르보다 높은 강성을 가진 보강재를 통해 배면부로 전달, 배면 중심부에 충격파가 무보강보다 더 크게 전달된 것으로 판단됨.
- 한편, 100MPa 모르타르에 5열 양방향으로 격자체를 보강한 복합체의 경우에 있어서도 40MPa의 경우와 마찬가지로 Auxetic 격자체를 적용한 경우가 가장 좋은 충격저항성을 가짐을 확인하였음.
- 무보강의 경우에 있어서 40MPa 모르타르와 100MPa 모르타르의 경우를 비교해 보면, 강도가 높은 100MPa 시험체가 동일 충격수준에서 더 큰 배면파괴가 발생하였음을 알 수 있음. 이는 모르타르의 취성특성으로 인해 오히려 높은 강도가 시험체 배면부의 충격파괴 거동에 불리할 수 있기 때문임.
- 한편, 순간 충격으로 인해 발생하는 배면 변위에 대하여 5열 양방향 매립의 경우 일반 격자와 Auxetic 격자를 비교해 보면 다음 그래프와 같이 Auxetic 격자를 적용한 경우 약 15% 정도 감소함을 확인하였음. 이는 Auxetic 격자를 적용함으로써 순간 충격하중에 대항하는 순간 강성이 일반격자보다 높게 발현되었기 때문으로 판단됨.

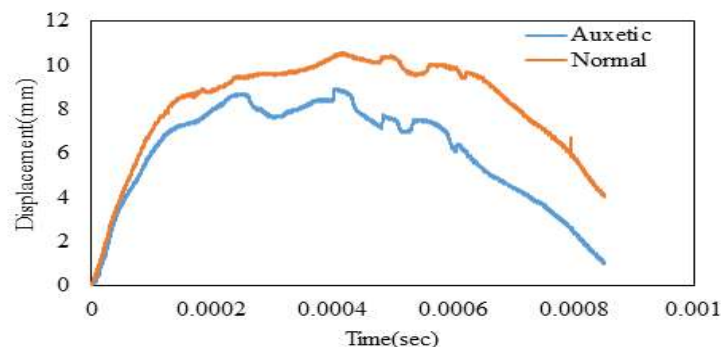


그림 88 충격하중에 의한 시험체 배면 순간변위 (5열, 2방향)

- 상기의 실험결과를 다음 그래프에 정리하였으며, 5열에 양방향 매립의 경우에 있어서 40MPa 및 100MPa 모르타르 시험체 모두 Auxetic 효과가 발생하였음을 확인할 수 있음. 즉, 40MPa 모르타르를 적용한 경우 무보강 시험체와 비교했을 때 일반격자는 비록 총 균열길이는 증가하나 균열개수가 급감하였으며, Auxetic 격자는 총 균열길이 및 균열개수는 무보강과 유사한 수치를 보였음. 그러나 육안검사 이미지에서 확인할 수 있듯이 균열폭 등을 고려할 경우 무보강의 경우가 더욱 심각한 균열파괴가 발생하였음을 확인할 수 있었으며, 시험체 배면 중심부에 spalling도 발생하였음을 알 수 있음.

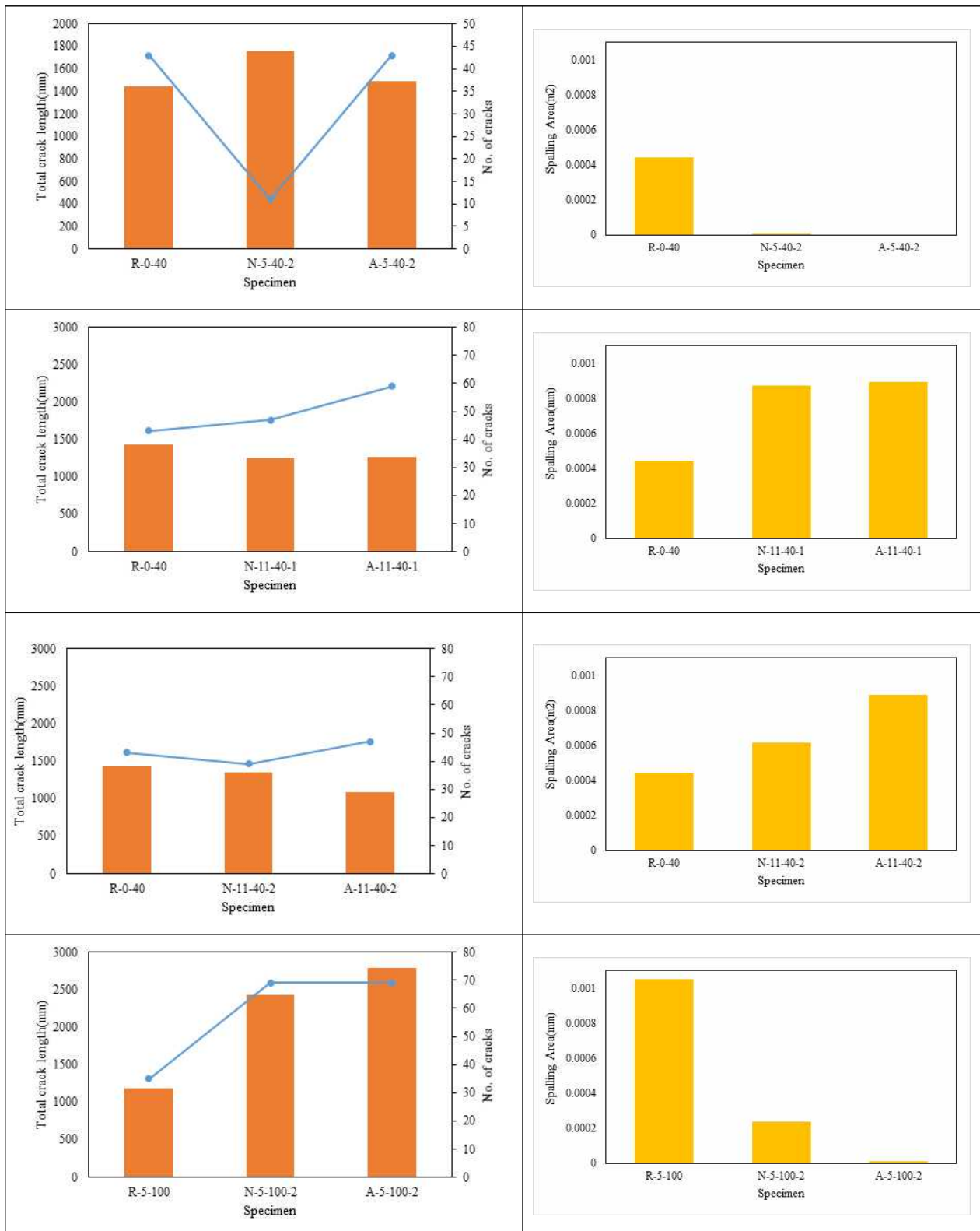


그림 89 충격하중 시험 분석 결과

- 격자체를 5열 양방향으로 보강한 100MPa 모르타르 복합체의 경우에는 보다 명확한 파괴저항성 증가 효과를 확인하였음. 즉, 무보강 시험체의 경우에는 거의 완전파괴 수

준으로 배면부에 spalling이 발생하였으나, 일반격자의 경우는 배면부 균열을 동반한 일부 spalling이 발생하였으며, Auxetic 격자체를 적용한 경우는 spalling은 거의 발생하지 않아, 충격 방호성능이 대폭 강화된 것을 확인할 수 있었음.

- 한편, 100MPa 모르타르를 적용한 경우에 있어서 일반격자와 Auxetic 격자를 적용한 결과를 비교해보면 일반격자보다 Auxetic 격자를 적용한 경우 총 균열개수는 동일하였으며 총 균열길이는 약 14.8% 증가하였으나, spalling 은 일반격자대비 약 4.6% 수준 밖에 발생하지 않았음을 확인하였음. 즉, 충격하중에 대한 파괴저항성에 있어서 총 균열길이 및 균열개수 보다는 배면부의 전체적인 파괴성상을 고려하여야 하는 점을 감안하면, 일반격자를 배근한 경우보다 Auxetic 격자를 적용하는 경우가 매우 큰 파괴저항성을 가지게 되었다고 판단할 수 있음.

5. 연구개발 성과

가. 최종 목표

- 음의 포아송비 (AUXETIC) 거동 격자구조체 및 이를 적용한 기존 강성 30% 이상 향상 능동형 복합부재 원천기술 개발
- 최종성과물 : 음의 포아송비 격자구조체 적용 강성 30% 이상 향상 구조부재 시제품

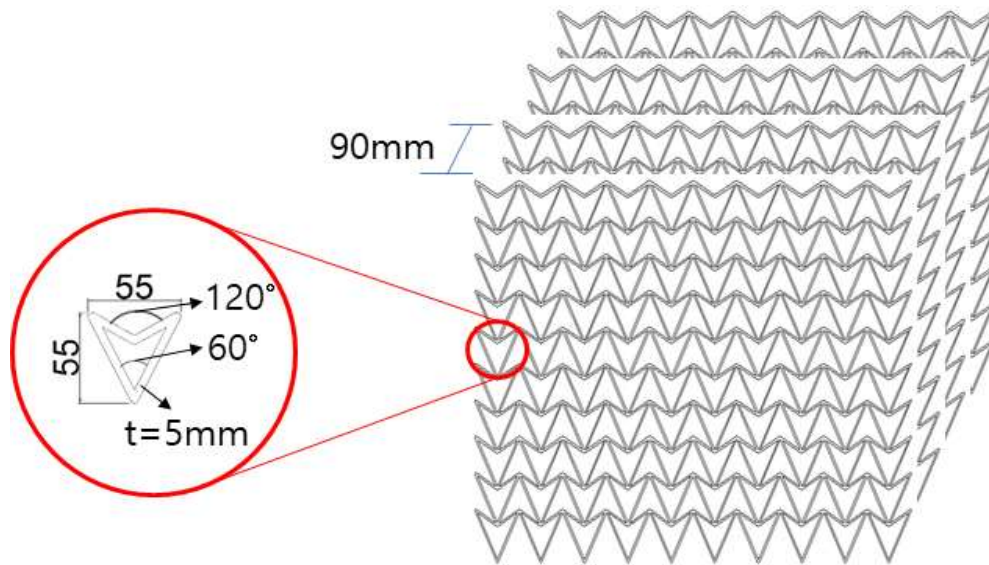
나. 정성적 연구개발 성과

- 이중화살촉 형상 Auxetic 격자구조체 성능 예측 기술 개발
- 건설산업용 Auxetic 격자구조체 제작 원천기술 개발 및 시제품 제작
- 기존 대비 부재강성 30% 이상 향상 압축하중 대응 복합부재 제작 원천기술 개발
- 기존 대비 부재강성 260% 이상 향상(하중 직교방향) 인장하중 대응 복합부재 제작 원천기술 개발
- 기존 대비 우수한 성능의(30% 이상 향상) 충격 방호성능을 가진 충격하중 대응 복합부재 제작 원천기술 개발

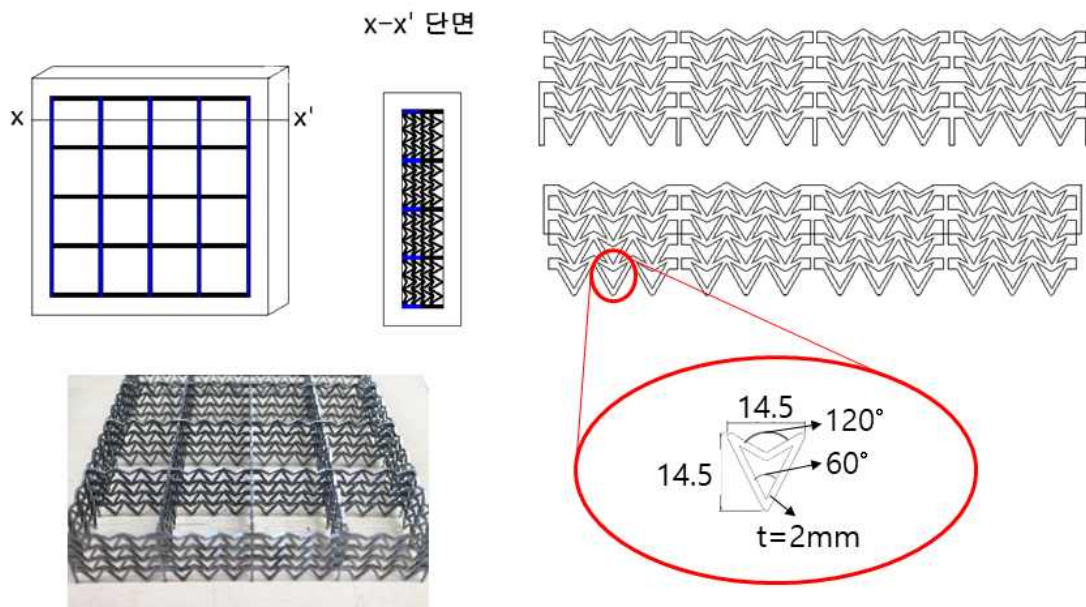
다. 정량적 연구성과

○ 논문

번호	구분	논문명	소속 기관명	게재지명	권/호 (페이지)	논문 게재일	기여율 (%)
1	논문	음의 포아송비 거동 격자체로 보강한 시멘트 복합체의 인장특성 평가	KICT	한국건설순환자원학회논문집	Vol.5 No.2 (192-197)	2017.06.19	100
2	논문	음의 포아송비 거동 격자체의 건설산업에의 적용 가능성 연구	KICT	한국구조물진단유지관리공학회 논문집	Vol.21 No.4 (116-123)	2017.06.19	100
3	논문	음의 포아송비 거동 격자체로 보강한 시멘트 복합체의 압축특성 평가	KICT	한국건설순환자원학회논문집	Vol.5 No.2 (198-203)	2017.06.21	100
4	학술 발표	구조물용 음의 포아송비 거동 격자구조체 설계	KICT	한국콘크리트학회 2016 가을 학술대회 논문집		2016.11.03	100
5	학술 발표	음의 포아송비 거동 격자구조체를 적용한 콘크리트 부재의 압축거동 실험	KICT	한국콘크리트학회 2016 가을 학술대회 논문집		2016.11.03	100
6	학술 발표	콘크리트 부재에 적용한 음의 포아송비 거동 격자구조체의 단위 cell 크기에 따른 압축거동 효과	KICT	2017 한국건설순환자원학회 봄 학술발표 논문집		2017.04.06	100
7	학술 발표	음의 포아송비 거동 격자구조체를 적용한 콘크리트	KICT	한국콘크리트학회 2017		2017.05.10	100



대표 도면 (압축하중 대응 Auxetic 격자구조체, 콘크리트 압축강도 40MPa 대응)



대표 도면 (충격하중 대응 Auxetic 격자구조체, 콘크리트 압축강도 100MPa 대응)

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 최종 목표

- 음의 포아송비 (AUXETIC) 거동 격자구조체 및 이를 적용한 기존 강성 30% 이상 향상 능동형 복합부재 원천기술 개발
- 최종성과물 : 음의 포아송비 격자구조체 적용 강성 30% 이상 향상 구조부재 시작품

나. 연차별 정성적 연구개발 목표 및 달성도

구분 (연도)	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차 연도 (2015 -2016)	Auxetic 격자구조체 개발 - 격자구조체 기본설계 - 성능 검토(전산해석) - 1차 시작품 제작	- 음의 포아송비 거동 기초이론 정립 - 구조물용 격자구조체 구성변수 설정 및 기본설계 수행 - 전산해석을 통한 기본 성능 예측 - 격자구조체 최적 구성방안 도출 - 실험 검증을 위한 격자구조체 시작품 제작	- 수행목표 달성 - 수행목표 달성 - 수행목표 달성 (프로그램등록 1건) - 달성 (최적 구성방안 도출) - 달성 (1차 시작품 제작)
	능동형 고강성 복합부재 설계 - 복합부재 기본설계 - 성능검토(전산해석)	- 복합부재 종류(압축, 인장, 내충격 부재)별 기본설계 수행 - 복합부재 구성방안 검토	- 달성 (기본설계 도출) - 달성 (국내특허 2건 출원)
2차 연도 (2016 -2017)	Auxetic 격자구조체 시작품 제작 - 1차 시작품 시험평가 - 최종 시작품 제작 - 최종 시작품 성능 검증(실험 및 전산해석)	- 하중 종류(압축, 인장, 충격)별 성능 평가 - 성능 평가 결과 반영 보완 최종 시작품 제작 - 최종 시작품 성능 평가 - 요구성능 (강성 30% 이상 향상 확보) 확보 검증	- 수행목표 달성 - 수행목표 달성 (국내논문 1편) - 수행목표 달성 - 수행목표 달성
	능동형 고강성 복합부재 시작품 제작 - 1차 시작품 제작 - 성능 시험평가 - 최종 시작품 제작 및 성능 검증	- 실험 검증을 위한 복합부재 시작품 제작 - 하중 종류(압축, 인장, 충격)별 성능 평가 - 성능 보완 최종 시작품 제작 - 시험평가 및 전산해석을 통한 성능 검증	- 수행목표 달성 - 수행목표 달성 (국내논문 2편) - 수행목표 달성 - 수행목표 달성 (공인시험성적서 발급)

○ 공인시험성적서 발급 (압축 및 인장)

시험성적서

1. 성적서번호 : CT17-064158

2. 의뢰자
 ○ 업체명 : 한국건설기술연구원
 ○ 주소 : 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283 (대호동)

3. 시험기간 : 2017년 06월 29일 ~ 2017년 06월 22일

4. 시험성적서의 용도 : 성능시험

5. 자료명 : 콘크리트

6. 시험방법
 (1) 크리프재하(압축) (2) 역관자재시(인장)

확인자명 : 조준우
 기술책임자명 : 정상화

2017년 06월 22일
 한국건설생활환경시험연구원

건설에너지사업본부 : 28115 총합복도 연구시, 원광구 오창동 33길 3 오창과학단지 내 043-719-9005
 결과문의 : 원단건설재료센터 ☎ (02)102-2769

출력일자 : 2017-06-29

시험성적서

성적서번호 : CT17-064158

7. 시험결과

1) A-52-2-3

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
E	MPa	(1)	29.89	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 6	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 164	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

2) A-52-2-3

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
E	MPa	(1)	27.30	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 4	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 077	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

3) A-52-5-2

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
E	MPa	(1)	34.87	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 4	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 72	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

4) A-52-5-2

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
E	MPa	(1)	31.52	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 2	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 078	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

5) A-52-5-2

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
E	MPa	(1)	41.35	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 2	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 072	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

6) A-52-5-3

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
E	MPa	(1)	42.03	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 2	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 111	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

7) A-52-5-3

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
E	MPa	(1)	46.73	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 2	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

출력일자 : 2017-06-29

시험성적서

성적서번호 : CT17-064158

8) A-105-5-3

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
E	MPa	(1)	29.79	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 3	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 138	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

9) A-105-5-3

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
E	MPa	(1)	34.56	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 3	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
Strain at Stress, 50MPa	-	(1)	0.000 305	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

10) A-0

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
load/strain(load direction)	-	(2)	15.0	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
load/strain(load direction)	-	(2)	32.5	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
load/strain(perpendicular to load direction)	-	(2)	-30.0	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

11) A-0

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
load/strain(perpendicular to load direction)	-	(2)	-50.6	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

12) A-1-53

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
load/strain(load direction)	-	(2)	85.7	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
load/strain(perpendicular to load direction)	-	(2)	-100.5	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
load/strain(load direction)	-	(2)	85.4	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
load/strain(perpendicular to load direction)	-	(2)	-100.9	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

13) A-2-53

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
load/strain(load direction)	-	(2)	15.6	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
load/strain(perpendicular to load direction)	-	(2)	-141.2	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
load/strain(load direction)	-	(2)	15.9	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
load/strain(perpendicular to load direction)	-	(2)	-125.8	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

14) A-2-60

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
load/strain(load direction)	-	(2)	16.7	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
load/strain(perpendicular to load direction)	-	(2)	-141.8	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

출력일자 : 2017-06-29

시험성적서

성적서번호 : CT17-064158

15) A-2

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
load/strain(load direction)	-	(2)	16.4	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
load/strain(perpendicular to load direction)	-	(2)	-55.6	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

16) A-1

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고
load/strain(load direction)	-	(2)	15.4	(20±5)℃, (65±20%) R.H.
load/strain(perpendicular to load direction)	-	(2)	-136.5	(20±5)℃, (65±20%) R.H.

• 시험자료 및 방법 : 역관자재시

출력일자 : 2017-06-29

- 본 보고서에 작성된 시험결과 수치는 시험성적서 상의 수치를 반영하였음.

다. 성과점검기준표

○ 총괄

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치	
주관	1	구조물용 Auxetic 격자구조 체	1-1 Auxetic 격자구조 설계	①	설계변수 선정	격자형상, 치수한계, 재질선정 연결방식 등 정량치 제시, 목표성능 설정	-	설계변수 및 목표성능 제시 여부	보고서	1	특허: 출원 1 건 등록: 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 SW: 1 건
				②	설계도 작성	하중종류 (압축, 인장, 충격)별 격자구조 설계도 작성	-	설계도 작성 여부	설계도면, 보고서	2	
			1-2 Auxetic 격자구조 성능	①	전산해석 평가	압축변형률 최대 0.0025, 인장변형률 최대 0.0015,구간 내 Auxetic 거동 예측	-	전산 해석 결과	보고서	1	특허: 출원 1 건 등록: 1 건 논문: 2 건 시제품: 1 건 SW: 1 건
				②	시험평가 (일 축압축, 일축 인장)	압축변형률 최대 0.0025, 인장변형률 최대 0.0015구간 내 Auxetic 거동 검증	-	시험 평가 결과	보고서	2	
			1-3 Auxetic 격자구조체 시작품	①	1차 시작품 제작	Auxetic 거동 격자구조체 1차 시작품	-	자체 시험평가 수행	사진, 보고서	2	특허: 출원 1 건 등록: 1 건 논문: 1 건 시제품: 2 건 SW: 1 건
				②	최종 시작품 제작	복합부재 탑재용 Auxetic 격자구조체 제작	-	공인 시험평가 수행	사진, 시험성적서, 보고서	2	
	2	2-1 복합부재 설계	①	기본설계	대응 하중(압축, 인장, 충 격) 종류별 복합부재 구 성 기본설계	-	설계도 작성 여부	설계도면, 보고서	2	특허: 출원 1 건 등록: 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 SW: 1 건	
			②	최종설계	최종 시작품 제작을 위한 설계도 작성	-	설계도 작성 여부	설계도면, 보고서	2		
		2-2 복합부재 성능	①	전산해석 평가	압축변형률 최대 0.0025, 인장변형률 최대 0.0015,구간 내 부재 강성 30% 이상 증가 확인	-	전산 해석 결과	보고서	1	특허: 출원 1 건 등록: 1 건 논문: 2 건 시제품: 1 건 SW: 1 건	
			②	시험평가 (일 축압축, 일축 인장, 비상체 충격파괴 시 험)	압축변형률 최대 0.0025, 인장변형률 최대 0.0015구간 내 부재 강성 30% 이상 증가 검증, Gas-gun 비상체 충격파 괴시험을 통한 방호성능 평가	-	시험 평가 결과	보고서	1		
		2-3 복합부재 시작품	①	1차 시작품 제작	부재 강성 30% 이상 증 가 검증	-	자체 시험평가 수행	사진, 보고서	1	특허: 출원 1 건 등록: 1 건 논문: 1 건 시제품: 2 건 SW: 1 건	
			②	최종 시작품 제작	목표치 (부재강성 30% 이 상 증가) 만족 최종 성과 물	-	공인 시험평가 수행	사진, 시험성적서, 보고서	3		
계										20	특허: 출원 2 건 등록: 1 건 논문: 4 건 시제품: 4 건 SW: 1 건

○ 1차년도

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치		
주관	1	구조물용 Auxetic 격자구조체	1-1	Auxetic 격자구조 설계	①	설계변수 선정	격자형상, 치수한계, 재질선정 연결방식 등 정량치 제시, 목표성능 설정	목표치 설정 완료	설계변수 및 목표성능 제시 여부	보고서	1	특허: 출원 1 건 등록: <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건
					②	설계도 작성	하중종류별 격자구조 설계도 작성	설계도 작성 완료	설계도 작성 여부	설계도면, 보고서	2	
			1-2	Auxetic 격자구조 성능	①	전산해석 평 가	압축변형률 최대 0.0025, 인장변형률 최대 0.0015,구간 내 Auxetic 거동 예측	전산 해석 수행 완료	전산 해석 결과	보고서	1	특허: 출원 <u> </u> 건 등록: <u> </u> 건 논문: <u> </u> 2 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건
					②	시험평가 (일 축압축, 일축 인장)	압축변형률 최대 0.0025, 인장변형률 최대 0.0015구간 내 Auxetic 거동 검증	일축 압축 시험 수행 (일축 인장 수행 예정)	시험 평가 결과	보고서	2	
	1-3	Auxetic 격자구조체 시작품	①	1차 시작품 제작	Auxetic 거동 격자구조체 1차 시작품	시작품 제작 및 시험 수행	자체 시험평가 수행	사진, 보고서	2	특허: 출원 <u> </u> 건 등록: <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 시제품: <u> </u> 1 건 SW: <u> </u> 건		
2	Auxetic 격자구조 체 적용 기존 강성 30% 이상 항상 능동형 복합부재	2-1	복합부재 설계	①	기본설계	대응 하중(압축, 인장, 충격) 종류별 복합부재 구성 기본 설계	대응 하중별 기본 설계 수행	설계도 작성 여부	설계도면, 보고서	2	특허: 출원 <u> </u> 건 등록: <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건	
계											10	특허: 출원 1 건 등록: <u> </u> 건 논문: <u> </u> 2 건 시제품: <u> </u> 1 건 SW: <u> </u> 건

○ 2차년도

구분	핵심성과 (CTE)	단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수
				질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치	
주관	1	구조물용 Auxetic 격자구조 체	1-3 Auxetic 격자구조체 시작품	②	최종 시작품 제작	복합부재 탑재용 Auxetic 격자구조체 제작	-	공인 시험평가 수행	사진, 시험성적서, 보고서	2	특허: 출원 <u> </u> 건 등록: <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 시제품: <u> </u> 1 건 SW: <u> </u> 건
	2		2-1 복합부재 설계	②	최종설계	최종 시작품 제작을 위한 설계도 작성	-	설계도 작성 여부	설계도면, 보고서	2	특허: 출원 1 <u> </u> 건 등록: <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 시제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건
			2-복합부재	①	전산해석 평	압축변형률 최대	-	전산	보고서	1	특허: 출원 <u> </u> 건

					가	0.0025, 인장변형률 최대 0.0015, 구간 내 부재 강성 30% 이상 증 가 확인		해석 결과				등록 건 논문: 2 건 시제품: 2 건 SW: 2 건
		2	성능		②	시험평가 (일 축압축, 일축 인장, 비상체 충격파괴 시 험) 압축변형률 최대 0.0025, 인장변형률 최대 0.0015 구간 내 부재 강성 30% 이상 증 가 검증, Gas-gun 비상체 충격파 괴시험을 통한 방호성능 평가	-	시험 평가 결과	보고서	1		
		2-3	복합부재 시작품	①	1차 시작품 제작	부재 강성 30% 이상 증 가 검증	-	자체 시험평가 수행	사진, 보고서	1	특허: 출원 1 건 등록 2 건	
				②	최종 시작품 제작	목표치 (부재강성 30% 이 상 증가) 만족 최종 성과 물	-	공인 시험평가 수행	사진, 시험성적서, 보고서	3	논문: 2 건 시제품: 2 건 SW: 2 건	
계										10	특허: 출원 1 건 등록 2 건 논문: 2 건 시제품: 3 건 SW: 2 건	

○ 핵심 연구성과 유형

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형	연구기관	해당 연차	TRL
1	구조물용 Auxetic 격자구조체	실제 구조물에 적용이 가능한 음의 포아송비 (Auxetic) 거동 격자구조체	재료·자재	한국건설기 술연구원	2	4
2	Auxetic 격자구조체 적용 기존 강성 30% 이상 향상 능동형 복합부재	동일 중량 또는 부피 대비 강성 30% 이상 향 상 하중 능동형 복합부재	재료·자재	한국건설기 술연구원	2	4

라. 정량적 연구성과 목표 및 달성도

구분		목표	달성도(%)	비고
SCI(E) 논문 게재	SCI(E)	1	0 %	미달성
국내 논문 게재	비SCI	3	100 %	달성
특허 출원	국내	2	100 %	달성
등록·기탁 대상 성과물	소프트웨어	—	1건 추가달성	목표 외 추가달성
기타	시작품	4 (격자구조체 2, 복합부재 2)	150 %	초과달성 (격자구조체: 압축,인장,충격 3 복합부재: 압축,인장,충격 3)

다. 성과 목표에 대한 자체 평가

성과 목표		자체 평가
구조물용 Auxetic 격자구조체	Auxetic 격자구조 설계	(정량적 연구성과 달성 현황) - 논문 4건 미달성 (3건 달성, 75%) · SCI(E)급 논문 1건 미달성 (0%) · 일반학술지 국내논문 3건 달성 (100%)
	Auxetic 격자구조 성능평가	- 국내특허 출원 2건 달성 (100%) - 시작품 4건 달성 (2건 초과달성, 150%) - S/W 등록 1건 (추가달성)
	Auxetic 격자구조체 시작품 제작	(자체 평가 내용) - 본 연구는 국내 건설분야에서 처음 시도한 건설산업용 음의 포아송비 거동 격자구조체 제작 및 이를 적용한 강성 향상 복합부재 제작 원천기술 확보를 위하여 수행하였음.
Auxetic 격자구조체 적용 기존 강성 30% 이상 향상 능동형 복합부재	하중 종류별 복합부재 설계	- 연구수행 결과, 음의 포아송비 거동 격자구조체의 건설산업 에의 활용이 충분히 가능함을 확인하였으며, 기존방식 보강 대비 30% 이상 강성의 향상이 가능함을 확인하였음.
	하중 종류별 복합부재 성능평가	- 이를 기반으로 다양한 후속연구의 가능성을 확보하였으며, 특히 충격하중과 같은 고변형률 환경 하의 구조부재의 방호 력 강화에 특성화 할 수 있음을 확인함.
	하중 종류별 복합부재 시작품 제작	- 비록 정량적 성과목표를 100% 달성하지는 못하였으나, 정 성적으로는 국내 건설분야의 신규 연구분야를 개척, 선도하 는데 기여하였다고 판단됨.

2. 관련 분야 기여도

가. 설계분야

구 분 소 분 류	관련분야 기여도					
	R&D 前 (2015)			R&D 後 (2017)		
	국외 기술수준	국내 기술수준	분석	국외 기술수준	국내 기술수준	분석
구조 부재 강성 증가 기술	- 구조부재의 강성증가는 전통적인 방식인 부재 내부 보강근 보강량의 증가 또는 구조부재에 강성증가를 위한 외피를 추가적으로 시공하는 방식으로 설계 - 기술수준의 확보상태로 부재 구성재료를 고강도, 고강성 재료로 대체하는 방식으로 접근 중	국외 기술수준과 대동소이한 상황임	신소재 또는 신재료의 개발 및 적용을 통한 기술극복 방식을 추진함에 따른 재료 미개발시의 위기대처 방안 전무	기존 접근방식이 아닌 새로운 방식의 구조부재 강성증가기술 개발 노력 미흡	음의 포아송비 격자구조체를 매립 보강하는 방식의 새로운 개념의 부재 강성 증가 연구 제시	기존의 고가재료의 개발 또는 적용을 통한 구조부재 성능향상 방식이 아닌, 기존 보강재료의 역학적 접근방식의 전환을 통한 신개념 구조부재 설계 및 적용 기술제시를 통한 소요기술 극복 방안 제시

나. 재료분야

구 분 소 분 류	관련분야 기여도					
	R&D 前 (2015)			R&D 後 (2017)		
	국외 기술수준	국내 기술수준	분석	국외 기술수준	국내 기술수준	분석
구조 부재 강성 증가 기술	구조부재 구성재료를 고강도, 고강성 재료로 대체하는 방식으로 접근함에 따른 경제성 확보 문제 발생 중	국외 기술수준과 대동소이한 상황임	신소재 또는 신재료의 개발 및 적용을 통한 기술극복 방식을 추진함에 따른 경제성 확보 구조재료 미개발시의 위기대처 방안 전무	기존 접근방식이 아닌 새로운 방식의 재료적 차원의 구조부재 강성증가기술 개발 노력 미흡	음의 포아송비 격자구조체를 매립 보강하는 방식의 새로운 개념의 부재 강성 증가 연구 제시	기존의 고가재료의 개발 또는 적용을 통한 구조부재 성능향상 방식이 아닌, 기존 보강재료의 역학적 접근방식의 전환을 통한 신개념 구조부재 설계 및 적용 기술제시를 통한 소요기술 극복 방안 제시

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 연구결과의 활용방안

- 본 연구의 최종성과물인 음의 포아송비 거동 격자구조체는 기존 일반적인 Mesh 보강과 비교할 경우, 동일한 중량 대비 강성 및 부피안정성을 크게 증가시킬 수 있는 기술로서, 향후 구조부재에의 적용을 통한 구조물 고성능화에 활용될 수 있다고 판단됨.
- 즉, 하중 종류(압축, 인장, 충격)별 능동형 고강성 구조부재는 다음과 같은 구조물에서의 직접 적용 및 활용이 가능하다고 판단됨.
- 압축 하중 대응형 복합부재로의 활용
 - 초대형 건축물과 같이 대단면 구조물 기초부위의 강성이 요구되는 부재, 즉 대형 Footing 기초 구조물, 기초 Pile 부재 등에의 적용을 통한 기초부재 경량화 및 시공물량 감소 기대
 - 대형 구조물용 기둥, 내력벽 등 철근콘크리트 압축부재에의 적용을 통한 부재두께 감소 및 내부공간 활용 극대화 가능
 - 대형 돔 및 대형 지붕 트러스 구조물에 있어서 압축용 강관부재에 적용을 통한 트러스 구조 고안정화 가능
- 인장 하중 대응형 복합부재로의 활용
 - 대형 돔 및 지붕 트러스 구조물에 있어서 인장용 강관부재에 적용을 통한 트러스 구조 고안정화
 - 각종 인장력 전담 구조부재의 새로운 설계기법에의 활용
- 충격 하중 대응형 복합부재로의 활용
 - 기존 구조물 방호 보강용 패널부재에 적용
(예: 국방분야(전방 초소(GP), 도로 방호벽, 건축물 방호벽 등))
 - 신규 구조물 방호용 구조부재에 적용(예: 국방시설물, 정부청사 등 민방위 소산시설 등)

주요 성과물	활용방안
- 건설산업용 이중화살촉 형상 Auxetic 격자구조체 설계 및 제조 원천기술 - Auxetic 격자구조체를 적용한 하중 종류별(압축, 인장, 충격) 복합부재 제조기술	 대형 기둥/기초  대형 트러스 지붕  방호구조물

○ 후속 연구 수행을 위한 기반기술로의 활용

- 본 연구를 통하여 건설산업 분야에의 Auxetic 적용 기반기술을 확보하였으나, 실제 실용화 및 상용화를 위해서는 실제 구조부재의 종류 및 용도별 요구성능에 대응할 수 있는 후속 연구가 필요
- 또한, 본 개발기술을 적용에 있어서 기존 구조부재 설계 및 시공방식과의 경제성 분석을 통한 상용기술로의 발전이 필요
- 이러한 후속 상용화 및 실용화 기술개발 연구에 본 연구의 성과물을 효과적으로 활용할 수 있으리라 기대

2. 기대효과

○ 기술적 측면

- 구조물의 대형화 및 고기능성 부여 추세에 대응할 수 있는 고강성, 고성능 구조부재 제시
- 대형 구조물(초고층 빌딩, 대형 기초, 초대형 돔 구조물 등)에의 적용을 통한 해당 구조부재 치수 최소화 기대
- 구조물 내충격, 방호성능 극대화를 위한 방호용 자재로 적용 가능

○ 경제적·산업적 측면

- 부재 강성 향상을 통한 부재치수 최소화에 따른 공사비 절감 가능
- 음의 포아송비 거동 기술의 건설산업 분야 접목을 통한 해당 기술 세계적 선도 및 해외 시장 개척에 기여

○ 사회적 측면

- 새로운 개념의 구조부재 제작 기술에 따른 건설분야 설계 및 시공 관련 원천적 패러다임 변화 주도 및 미래 건설 신시장 창출에 기여
-

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- Lakes (1987) 교수가 음의 포아송비에 대한 연구를 소개한 이후로, 국내외 적으로 음의 포아송비 물질의 제조방법 및 활용방안에 대한 활발한 연구가 진행되고 있음.
- Choi 와 Lakes (1995)가 일반적인 형상과 음의 포아송비를 가지는 요각형상의 단위 재료의 탄성계수에 대한 연구를 수행하였음. Grima 와 Evans (2000)는 회전가능 사각형 형상의 구조에 대해 음의 포아송비 효과를 확인하였으며, 수식으로 증명함.
- Grima 외 3인(2000)은 화살표형상을 조합하여 음의 포아송비 효과를 가지는 Connected-Starts 구조를 제시함.
- Doyoyo와 Hu (2006)는 음의 포아송비 특성을 가지는 3차원 lattice 구조에 대하여 작용하중에 대한 소성파괴를 포함하는 구조의 거동에 대한 연구를 수행함. 구조의 소성파괴는 국부적인 소성화로 인해 발생하고, 전단파괴는 전체의 소성화로 인하여 발생한다고 제시함.
- Henderson외 4인 (2007)은 음의 포아송비를 가지는 Cellular foams 형상 구조에 대해 충격성능에 대한 연구를 수행함. 이 연구에서는 일반적인 개방 구조와 요각 구조의 두께에 따른 충격방지성능을 분석함. 다양한 두께의 사용으로 인해 음의 포아송비 효과가 나타났으며, 일반적인 형상보다는 요각형상의 구조가 충격방지성능이 우수한 것으로 조사됨.
- Lira 외 2인 (2009)은 다요각 벌집형상(Multi re-entrant honeycombs) 구조에 대해 횡 전단 특성에 대해 연구함. 다요각 벌집형상 구조에 대해 횡전단에 대한 식을 유도하였으며, 실험과, 수치해석을 통하여 검증함.
- Schwerdtfeger 외 6인(2011)은 최적화 기법을 활용하여 음의 포아송비 구조설계에 대한 연구를 수행함. 이 연구에서 공학적 경험에 근거하여 설계되었던 기존의 음의 포아송비 구조에 SIMP(Solid Isotropic Material with Penalization) 최적화 기법을 활용하여 구조성능의 향상이 가능함을 나타냄.
- Kaminakis 외 2인 (2015)는 음의 포아송비 구조에 대한 위상최적화 및 재료균질화 기법을 적용하여 구조설계 및 검증에 대한 연구를 수행함. 이 연구에서는 다양한 활용 분야에서 요구되는 구조적 성능에 적합한 음의 포아송비 구조설계가 자동으로 수행이 가능함을 보임.
- Qiao 와 Chen (2015)은 이중화살형상 구조에 대하여 충격하중의 거동에 대한 연구를 수행함. 이중화살구조 형상의 단위구조에 대해 포아송비 식을 유도하였으며, FE 해석을 통해 검증함과 동시에 충격하중에 대한 거동도 연구함.
- Yang 외 4인([2015])은 음의 포아송비 효과를 가지는 3차원 요각 구조물에 대해 대변형 보 (Large Deflection beam) 모델과 티모센코 보(Timoshenko beam)모델을 이용하여 단위 구조물에 대한 처짐, 포아송비,탄성계수 등에 대해 수학적 이론 해를 유도하였으며, FE 해석을 통하여 검증함.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	○ 본 연구과제의 기술적 구성요소는 크게 재료 및 자재 개발, 시험 및 평가, 컴퓨터 시뮬레이션으로 구성되어 있음 ○ 재료 및 자재 개발 분야와 시험 및 평가 분야는 원천기술을 개발하고 이를 후속 연구의 기반 기술로 제공이 가능하므로 연구과제 보안등급의 분류 상 일반과제로 분류하는 것이 합당한 것으로 판단됨	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된

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

- 동적충격 물성시험의 경우 고압의 가스 및 압축공기를 사용하는 연구장비를 활용
- 이 경우 연구자 및 실험보조원의 안전에 각별한 주의를 요함
- 대용량의 믹서기를 가동할 경우 고속 회전에 의한 물리적 충격과 분진 발생 위험 있음
- 콘크리트 및 모르타르 혼합물의 개발 단계에서 혼화제를 중심으로 한 화학물질의 사용이 예상됨
- UTM을 비롯한 정역학적 실험장비의 가동에 신체의 손상을 유발할 위험이 상존함

○ 기술적 위험도

- 배합 및 화학물질의 활용 시 위험도는 중간 단계 수준
- 단, 고속충격 장비인 Gas-Gun 등의 장비 가동 시 위험도는 상 단계 수준

○ 안전 관리 대책

- 주관연구기관인 KICT는 1회/월 기관 종사자를 대상으로 실험실 안전관리 교육을 실시하고 있음
- 연구자 및 실험자에 대한 실험실 안전을 위하여 보호장구, 안전 보조 장치 구매를 연구실 안전관리비에 계상하고 집행함

○ 기타 안전사항

- 해당사항 없음

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향 력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	프로 그램	오그제틱 자동 모델링 프로그램	KICT	단독	대한민국		2016.05.20	단독	
2	논문	음의 포아송비 거동 격자체로 보강한 시멘트 복합체의 인장특성 평가	KICT	단독	한국건설순환 자원학회논문 집		2017.06.19	단독	비SCI
3	논문	음의 포아송비 거동 격자체의 건설산업에의 적용 가능성 연구	KICT	단독	한국구조물진 단유지관리공 학회 논문집		2017.06.19	단독	비SCI
4	논문	음의 포아송비 거동 격자체로 보강한 시멘트 복합체의 압축특성 평가	KICT	단독	한국건설순환 자원학회논문 집		2017.06.21	단독	비SCI
5	특허	격자 지지체를 이용한 보강구조를 가지는 기둥구조물	KICT		대한민국		2016.06.13	단독	출원
6	특허	음의 포아송비를 가지는 기초하부지반 매립 보강형 격자 지지체, 및 이를 이용한 기초하부지반 보강방법	KICT		대한민국		2016.07.12	단독	출원
7	학술 발표	구조물용 음의 포아송비 거동 격자구조체 설계	KICT		한국콘크리트 학회 2016가을 학술대회논문 집		2016.11.03	단독	
8	학술 발표	음의 포아송비 거동 격자구조체를 적용한 콘크리트 부재의 압축거동 실험	KICT		한국콘크리트 학회 2016가을 학술대회논문 집		2016.11.03	단독	
9	학술 발표	콘크리트 부재에 적용한 음의 포아송비 거동 격자구조체의 단위 cell 크기에 따른 압축거동 효과	KICT		2017 한국건설순환 자원학회 봄 학술발표 논문집		2017.04.06	단독	
10	학술 발표	음의 포아송비 거동 격자구조체를 적용한 콘크리트 부재의 인장거동 실험	KICT		한국콘크리트 학회 2017 봄 학술대회논문 집		2017.05.10	단독	

제12장. 참고 문헌

1. 강대승, 조성덕, 박지광, 박종우, 강기주, (2015), 와이어 직조 Kagome에 기반한 새로운 Auxetic 구조체 TT - A new auxetic structure based on wire-woven Kagome, 대한기계학회 춘추학술대회, 대한기계학회, pp. 44-45.
2. 김광원, 김두만, (2011), Auxetic Spoke로 설계된 비공기압 타이어의 접지압, 한국항공우주학회지, 39, pp. 719-724.
3. 최재봉, 최귀원 (1996), 음의 Poisson 비를 가지는 물질의 인공고관절 적용에 관한 연구, 대한기계학회 춘추학술대회, 대한기계학회, pp. 322-326.
4. Alderson, A. (1999), A triumph of lateral thought, Chemistry & Industry, pp.384-391.
5. Alderson A, Alderson KL (2007). Auxetic materials. Proc IME G.J. Aero. Eng., 221, pp. 565-575.
6. Choi, J. B. et al. (1992), Nonlinear properties of methallic cellular materials with a negative poisson' s ratio, J. Materials Science, Vol. 27, pp. 5373-5381
7. Choi, J. B. Lakes, R.S., (1995), Analysis of elastic modulus of conventional foams and of re-entrant foam materials with a negative Poisson' s ratio, Int. J. Mech. Sci. 37, pp. 51-59.
8. Doyoyo, M., Hu, J. W., (2006), Plastic failure analysis of an auxetic foam or inverted strut lattice under longitudinal and shear loads, J. Mech. Phys. Solids, 54, pp. 1479-1492.
9. Friis, E. A., Lakes, R. S., and Park, J. B., (1988), Negative Poisson' s ratio polymeric and metallic materials, Journal of Materials Science, 23, pp. 4406-4414
10. Fung, Y. C., (1968), Foundations of solid mechanics; Prentice-Hall international series in dynamics; 2nd ed.; Prentice-Hall: Englewood Cliff, New Jersey, U.S.A.
11. G. N. Graves et al. (2011), Poisson' s ratio and modern materials, Nature materials, Vol. 10, pp. 823-837
12. Grima, J. N., Evans, K. E. (2000), Auxetic behavior from rotating squares. J. Mater. Sci. Lett. 19, pp. 1563-1565.
13. Grima, J. N., Gatt, R., Alderson, A., Evans, K. E., (2005), On the potential of connected stars as auxetic systems, Mol. Simul., 31, pp. 925-935.
14. Grima JN, Gatt R, Ravirala N, Alderson A, Evans KE (2006). Negative Poisson's ratios in cellular foam materials. Mat. Sci. Eng., 423: 214-218.
15. Henderson, B., Whitty, J. P., Myler, P., Chirwa, C., (2007), Crash performance of cellular foams with reduced relative density part 1: rib thickness variation., Int. J. Crashworthiness, 12, pp. 677-688.
16. Henderson, B., Whitty, J. P. M., Myler, P., Chirwa, C., (2007), Crash performance of cellular foams with reduced relative density part 2: rib

-
- deletion. *Int. J. Crashworthiness*, 12, pp. 689–698.
17. Kaminakis, N. T., Drosopoulos, G. A., Stavroulakis, G. E., (2015), Design and verification of auxetic microstructures using topology optimization and homogenization. *Arch. Appl. Mech.* 85, pp. 1289–1306.
 18. Lakes RS, Witt R (2002). Making and characterizing negative Poisson's ratio materials. *Inter. J. Mech. Eng. Edu.*, 30: 50–58.
 19. Lakes RS, Witt R (2006). On poisson' s ratio in linearly viscoelastic solids, *J. of Elasticity*, 85, 45–63
 20. Lakes, R. S. (1987), Foam Structures with a Negative Poisson' s Ratio. *Science* (80-.). 235, pp. 1038–1040.
 21. Lira, C., Innocenti, P., Scarpa, F., (2009), Transverse elastic shear of auxetic multi re-entrant honeycombs. *Compos. Struct.* 90, pp. 314–322.
 22. Martz, E. O. et al. (1996), Re-entrant transformation methods in closed cell foams, *Cellular polymers*, Vol. 15, pp. 229–249
 23. Q. Liu (2006), Literature review: Materials with negative poisson' s ratios and potential applications to aerospace and defence, Defence science and technology organisation Australia,
 24. Qiao, J. X., Chen, C. Q., (2015), Impact resistance of uniform and functionally graded auxetic double arrowhead honeycombs. *Int. J. Impact Eng.* 83, pp. 47–58.
 25. Schwerdtfeger, J., Wein, F., Leugering, G., Singer, R. F., Korner, C., Stingl, M., Schury, F., (2011), Design of Auxetic Structures via Mathematical Optimization. *Adv. Mater.* 23, pp. 2650–2654.
 26. Y. C. Wang and R. S. Lakes (2005), Composites with inclusions of negative bulk modulus: Extreme damping and negative poisson' s ratio, *Journal of composite materials*, Vol. 39, No. 18, pp. 1645–1657
 27. Yang, L., Harrysson, O., West, H., Cormier, D., (2015) Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing. *Int. J. Solids Struct.* 69–70, pp. 475–490.
-

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.