

공동주택 바닥완충재의 장기성능평가 및 장기성능기준 표준안 제시 최종보고서

2016.05.20.

주관연구기관 / 성균관대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

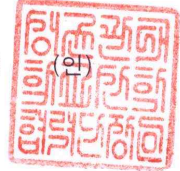
제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘공동주택 바닥완충재의 장기성능평가 및 장기성능기준 표준안 제시에 관한 연구’(연구개발 기간 : 2013.04. ~ 2016.03.) 과제의 최종보고서 12부를 제출합니다.

2016. 05. 20.

주관연구기관명 : 성균관대학교 산학협력단 (대표자)	유 지 범 (인)
공동연구기관명 :	(대표자) (인)
참여기관명 :	(대표자) (인)



주관연구기관책임자: 김 진 구
공동연구기관책임자:
참여기관책임자:

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	15CTAP-C06642 1-03	해당 단계 연구 기간	2015.04.01. ~ 2016.03.31.	단계구분	3/3
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	공동주택 바닥완충재의 장기성능평가 및 장기성능기준 표준안 제시			
	세부과제명				
연구책임자	김 진 구	해당단계 참여 연구원 수	총: 11명 내부: 11명 외부: 0명	해당단계 연구개발비	정부:100,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:100,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 21명 내부: 21명 외부: 0명	총 연구개발비	정부:270,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:270,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	성균관대학교 산학협력단			참여기업명: -	
국제공동연구	상대국명: -			상대국 연구기관명: -	
위탁연구	연구기관명: -			연구책임자: -	
- 장기 하중 재하에 의한 완충재의 구조성능, 잔류변형률 측정, 층간소음 영향 요소, 측정 및 평가식의 제안 - 층간소음억제 바닥온돌층의 장기변형 측정 및 평가법 제안 - 층간소음억제 바닥온돌층 환경에 의한 변형 측정 및 평가법 - KS F 2873 기준 잔류변형률 측정안 제안 - KS M ISO 4898 기준 동탄성계수 측정개선안 제안 - 해석 프로그램을 활용한 동적해석 수행과 소음 평가				보고서 면수 : 113	

연구의 목적 및 내용	• 우리나라의 공동주택 거주 인구는 1995년 26.9%에서 2005년 42.3%로 급증하였음. • 전 인구의 40% 이상이 공동주택(연립주택과 공동주택 거주자 1,000만 가구 이상)에 살고 있는 우리나라에서 공동주택의 층간소음 문제는 향후에도 끊임없이 발생할 것으로 판단됨. • 층간소음 문제를 해결하기 위해서는 현재 사용되고 있는 바닥완충재의 성능, 특히 내구성능에 대한 체계적인 검증과 표준성능평가법의 제안이 필요함. • 이 연구의 주요 내용은 다음과 같음 • 장기하중을 받는 바닥완충재의 구조성능에 대한 사전조사 및 문제점 파악 • 장기하중이 비탄성재료의 구조안전성에 미치는 영향 조사 • 장기하중을 받는 바닥완충재의 구조안전성 변화 평가 • 약 3년간 장기하중을 받는 공동주택 완충재의 성능(밀도, 동탄성계수, 잔류변형률, 응력-변형률 등)의 평가 • 장기하중에 받는 바닥완충재의 밀도 및 동탄성계수 평가 • 바닥완충재의 밀도 및 동탄성계수가 층간소음에 미치는 영향 평가 • 장기하중을 받는 공동주택 완충재의 층간소음억제 성능의 평가 • 약 3년간 환경상태가 변화하는 공동주택 완충재의 충격음 완충 효과의 평가 • 바닥충격음 완충재의 내구성 평가 • 내구성을 고려한 바닥충격음 완충재의 성능기준 제안				
연구개발성과	• 바닥완충재 장기변형 경향을 고려한 예측식 작성 및 ISO 20392와의 비교 • 바닥완충재의 환경변화(침수, 모르타르, 기포콘크리트)에 의한 영향 • 바닥완충재의 동탄성계수 변화를 고려한 측정 개선안 제안 • 바닥완충재의 단기 및 장기 잔류변형률을 반영한 측정 개선안 제안 • 하중 재하 시간에 따른 바닥완충재의 층간소음 저감 효과				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• 공동주택 바닥완충재의 안정된 성능 평가에 활용 • 완충재의 장기성능과 층간소음과의 상호 연계를 통한 층간소음 변화 예측 • 완충재의 장기처짐과 관련된 평가식의 제시 및 이를 통한 상시하중, 집중하중, 완충재의 종류, 건물의 사용기간에 따른 바닥 침하량 측정 가능 • 장기하중을 받는 바닥완충재의 동탄성계수 변화량의 측정 및 평가식의 제안. 제안된 평가식을 활용하여 공동주택의 층간소음변화 측정 가능 • 장기하중을 받는 바닥완충재의 손실계수의 변화량 측정 및 이를 통한 공동주택 바닥완충재의 성능변화 예측 가능 • 침수 및 모르타르 침투에 의한 바닥완충재의 성능변화 평가 및 이를 통한 주변 환경의 영향에 따른 층간소음 변화량 측정 가능 • 환경변화에 따른 바닥완충재의 성능 평가항목 및 성능기준 표준안의 제시 • 장기성능을 고려한 바닥완충재 최적 형상 개발				
핵심어 (5개 이내)	완충재	동탄성계수	손실계수	잔류변형률	층간소음

< SUMMARY >

Purpose & Contents	Korean public housing resident population was growing from 26.9% in 1995 to 42.3% in 2005, currently has about 60% of the population live in public housing. High-density residential area has several great advantages of the living things are relatively scarce in the House of Commons in the country, but has also caused many problems. • Korean public housing resident population was growing from 26.9% in 1995 to 42.3% in 2005, currently has about 60% of the population live in public housing. • As a generalization of public housing apartments, interlayer noise began to rise in social problems. Due to the nature of the apartment house that the number of households living across the walls and floor of a layer, the fallout caused by the interlayer noise was constantly increasing. • In particular, the floor impact sound caused by being directly impacted on the concrete surface, such as playing sound or drag to move things has characteristic that is easily transmitted to adjacent neighborhood. Interlayer noise act are acting as not only impediments to improving the quality of life but also discouragement of economic activity of people. • Investigate the structural performance problems of the resilient materials in floating floor systems. • Investigate the influencing factors on the structural stability of the resilient materials subjected to long term loads • Evaluate the long- term performance (density, dynamic stiffness, residual strain, and stress-strain curves et al) of the resilient materials in floating floor systems. • Evaluate the relationships between density and dynamic stiffness of the resilient materials in floating floor systems. • Evaluate the relationships between long-term dynamic stiffness of the resilient materials and the floor impact sound. • Propose a performance criteria of the resilient materials and the floor impact sound considering long- term performance.				
Results	• Comparison with resilient materials prediction and ISO 20932 considering the long-term tends • Effect of the environment in resilient materials • Suggestion of improved standard of dynamic stiffness • Suggestion of improved standard of compressibility of resilient materials • Interlayer noise reduction according to loading period				
Expected Contribution	• Stable performance evaluation of resilient materials • Evaluate the long- term performance (density, dynamic stiffness, residual strain, and stress-strain curves et al) of the resilient materials in floating floor systems. • Presenting evaluation items and criteria standard of resilient materials according to environment changes • Development of proper bottom shapes of resilient materials considering the long-term performance				
Keywords	Resilient Material	Dynamic Stiffness	Loss Factor	Residual Deformation Ratio	Noise Between floors

< CONTENTS >

1. Research Project Overview	7
2. Technology Development Status	14
3. Study details and results	17
4. Goal attainment and contributions	96
5. Future Plan of R & D results	100
6. International Scientific and Technical Information	103
7. Security Level of R & D	100
8. Research facilities and equipment status	101
9. Safeguards Implementation Performance	104
10. Representative Research Results	106
11. Other details	107
12. References	108

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	7
2. 국내외 기술 개발 현황	14
3. 연구 수행 내용 및 성과	17
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	96
5. 연구개발성과의 활용 계획	100
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	103
7. 연구개발성과의 보안등급	104
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	105
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	106
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	110
11. 기타 사항	111
12. 참고 문헌	112

제1장 연구개발과제 개요

1.1 연구개발의 목적 및 필요성

우리나라의 공동주택 거주 인구는 1995년 26.9%에서 2005년 42.3%로 급증하였으며 현재는 전 인구의 약 60%가 공동주택에 거주하고 있다. 인구밀도가 높고 주거지가 상대적으로 부족한 우리나라에서 공동주택의 거주는 여러 가지 좋은 장점을 갖고 있지만, 또한 많은 문제점을 유발하고 있다. 이와 같은 문제점의 하나로 층간소음을 들 수 있다. 과거 단독주택 위주의 생활에서 오늘날 아파트 등의 공동주택이 일반화되면서 층간소음은 사회적 문제로 대두되기 시작하였다. 다수의 세대가 한 겹의 벽과 바닥을 사이에 두고 생활하는 공동주택의 특성상, 이웃간의 세대 특히, 상하 세대 간에 발생하는 층간소음으로 인한 다툼이 끊임없이 증가하여 서울시에서 발생한 층간소음으로 인한 환경분쟁신청 현황을 살펴보면 전체 분쟁 중에서 층간소음에 대한 분쟁이 12%(2008년), 18%(2009년), 28%(2010년), 35%(2011년) 으로 매년 증가하였다. 특히, 층간소음 중에서도 아이들이 뛰는 소리와 물건을 끌어 옮기거나 떨어지는 등과 같이 콘크리트 면에 직접 충격이 가해짐으로써 발생하는 바닥충격음은 인접세대에 쉽게 전달되는 특성을 가지고 있다. 층간소음은 국민경제활동을 위축시켜 경제발전의 저해요소로 작용함은 물론 국민의 삶의 질 개선의 저해요소로 작용하고 있다.

그 동안 여러 연구자들^{1,2,3)}이 층간소음을 억제하기 위하여 많은 연구를 진행했지만 층간소음을 효과적으로 억제할 수 있는 방법은 아직 발표되고 있지 않다. 이는 층간소음이 슬래브의 두께, 설비시설, 주거환경, 공간배치, 실내 주거 면적의 크기, 완충재 등과 같이 다양한 요소에 의해 영향을 받을 수 있기 때문이다. 이들 영향 요소 중에서 층간소음을 가장 효과적으로 억제할 수 있는 방법 중의 하나는 슬래브 바닥판의 두께라 할 수 있다. 즉, 바닥판의 두께가 증가하면 상하층간의 층간소음을 감소시킬 수 있기 때문이다. 따라서 정부에서도 2004년 3월 30일 “표준바닥구조”를 제시하여 바닥판의 두께가 벽식과 보-기둥식은 210mm와 150mm로 무량판은 180mm로 규정하였다. 또한 최근에 논의된 새 법정바닥구조에 의하면 벽식과 보-기둥식은 현행대로 210mm와 150mm로, 소음에 취약한 무량판은 180mm에서 210mm로 두꺼워질 예정이다. 그러나 바닥판의 두께를 두껍게 하는 것은 건설 공사비의 증대와 밀접한 관계가 있으며, 특히 고정하중의 증가로 기초의 두께가 두꺼워져 전체 공사비가 상승할 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 중공슬래브 등과 같은 여러 공법이 제안되었지만^{4,5,6)}, 층간소음문제를 발생시키는 복합적인 요인에 의해 바닥판의 두께 증가만으로 층간소음을 억제하는 것은 경제적, 기술적으로 한계가 있다. 따라서 층간소음을 효과적으로 해결할 수 있는 방법중의 하나로 콘크리트 슬래브와 기포층 (온돌층)사이의 완충재를 넣는 뜬바닥구조가 널리 사용되고 있다. 뜬바닥구조는 [그림 1.1.1.(a)]과 같이 슬래브의 위에 완충재, 기포콘크리트, 마감모르타르 순서로 구성되어 있다. 또한 원칙적으로 바닥판과 벽면이 만나는 지점도 분리하여 상부에서 발생하는 충격음의 상당량이 완충재에 의하여 소멸되도록 하였다.

완충재가 층간소음에 미치는 영향에 대해서는 기존 여러 연구에 의하여 다양한 측면으로 연구되었다. 주택도시연구원의 “완충층을 포함한 온돌구성층의 구조해석기법 개발”에서는 다양한 종류의 완충재 단기하중에 대한 구조성능을 검토하고 평가법을 제시하였다⁷⁾. 이상섭 등⁸⁾은 층간소음을 억제하기 위한 경량합성바닥 시스템을 이용하여 층간소음억제에 유리한 시스템을 발표하였다. 이상우⁹⁾는 초고층 공동주택의 층간소음을 경량충격음, 중량충격음, 층수 및 평수에 따른 영향 등으로 구분하여 층간소음을 평가하였다. 장재희¹⁰⁾는 다양한 종류의 완충재에 대하여 바닥충격음과 관련된 요소별 저감효과를 정리하고, 각 요소들에 의해 변화되는 바닥충격음 차음성능을 실측치를 근거로 비교 평가하였다.

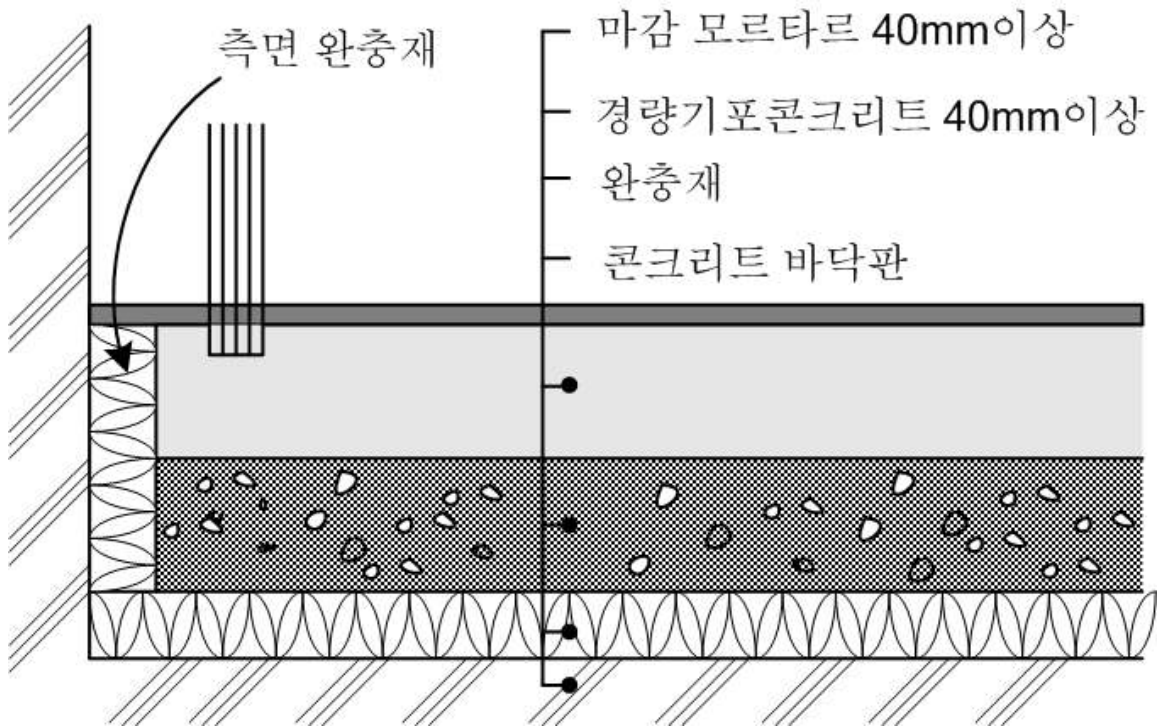
이와 같이 다양한 방법에 의하여 바닥완충층의 성능이 평가되었지만 완충재의 성능이 다양

하기 때문에 명확하게 이들 성능을 평가하였다고 하기는 어렵다. 특히, 최근에는 완충재의 밀도, 바닥판의 형상(과형, 엠보형, 평탄형 등)이 다양하여 상부하중에 의한 처짐이 크게 발생하여 마감모르타르에 균열이 발생하거나 바닥이 침하하는 사례가 발생하고 있다. 그러나 현행 규정상 이러한 완충재의 강성에 대한 명확한 제한이 없다.

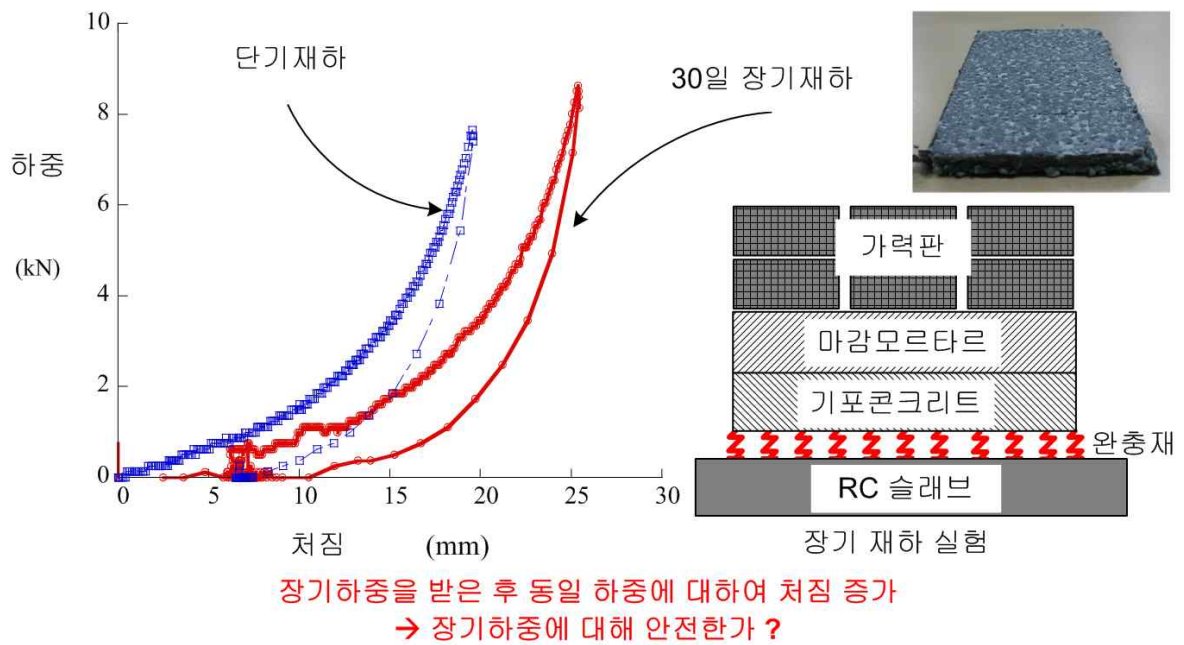
- 이 연구에서는 약 3년간의 장기하중을 가하여 완충재의 구조성능을 평가함을 목표로 하고 있으며, 장기하중이 가해질 경우 예측되는 연구결과는 다음과 같다.
- ① **완충재의 구조성능 변화** : 장기간 동안 하중이 가해질 경우에 완충재의 구조성능은 단기하중 가력시의 구조성능과 차이가 발생할 것임. 이는 재료에 잔류변형이 증가하고 이로 인하여 부재의 밀도와 동탄성계수 등이 증가하기 때문임.
- ② **완충재의 충격억제 효과의 변화** : 완충재의 재료적 성질에 따라서 장기하중을 받는 완충재는 제품간에 상이한 밀도와 동탄성계수의 변화를 나타냄. 이로 인하여 장기하중을 받는 완충재의 충격억제 효과는 단기하중을 받는 완충재의 충격억제 효과와 상이할 것으로 판단됨.
- ③ **환경상태변화에 따른 완충재의 구조성능의 변화** : 단기하중을 받는 완충재와는 다르게 장기하중을 받는 완충재는 재료 물성과 형상에 따라서 장기하중 저항 능력이 다르게 나타날 것임. 또한 누수, 고온, 불순물혼입과 같은 환경상태가 변화함에 따라서 완충재의 성능은 시공전과는 달라질 것으로 판단됨.

이 연구의 목표를 정리하면 다음과 같다.

- 이 연구개발의 최종목표는 공동주택의 층간소음억제와 사용성 개선을 위한 바닥완충재의 장기구조성능과 환경변화에 대한 성능기준의 제시이며, 연구개발의 성격은 실험과 해석을 통한 관찰과 이를 근거로 한 성능 표준안의 제시임.
- 현재 사용되고 있는 바닥완충재의 거의 전부는 탄성영역이 극히 작은 재료임. 그 이유는 층간소음을 흡수하기 위해서는 탄성영역보다는 비탄성영역이 큰 재료가 효과적이기 때문임. 탄성영역이 작은 재료는 단기하중과 장기하중간의 구조적 거동에 큰 차이를 나타낼 수 있음.
- 그림 [1.1.1(b)]는 단기하중과 장기하중을 받는 바닥완충재의 하중-처짐 곡선을 나타냄. 그림에서 확연히 알 수 있는 것과 같이 장기하중이 가해질 경우에 동일한 하중에 대해서도 추가 변형이 발생함을 알 수 있음.
- 장기하중을 받는 바닥완충재의 구조안전성 평가
- 장기하중을 받는 바닥완충재의 층간소음 억제효과 평가
- 장기하중을 받는 바닥완충재의 성능 평가항목 및 성능기준의 제시
- 환경상태가 변화하는 바닥완충재의 성능 평가항목 및 성능기준 표준안의 제시



(a) 표준바닥구조의 구성



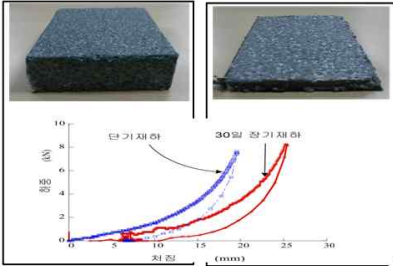
(b) 단기하중과 장기하중 가력 후의 완충재의 처짐 차이

[그림 1.1.1] 표준바닥구조의 구성과 단기하중과 장기하중 가력 후의 완충재의 처짐 차이

연구 필요성

바닥완충재 : 비탄성재료

장기하중에 의한 추가 변형을 급증



단기하중에 기본적인 성능기준

시간경과 후
충간소음 증가
가능성

시간경과 후
바닥판 침하
가능성

아파트 등 공동주택 충간소음 유허
규정은 비율 단위(%)
파악노 등 약기 소리
26건(2.0)
가구 옮거나
뛰는 소리
27건(2.0)
청소기 등
가전제품
30건(2.0)
방음벽, 아이들
뛰는 소리
962건
(72.3%)
센터 가 5025건 중 1330건을
분석한 결과



장기하중에 기본적인 성능기준

현행성능기준은 ?

- 장기 하중에 의한 완충재의 내구성 변화와 완충효과에 대한 평가는 가능한가 ?
- 환경(고온, 온도의 차, 침수, 불순물 혼입 등)의 변화에 의한 구조 및 완충효과 평가는 가능한가 ?

연구 방법 및 평가 항목

장기 내구성 평가

- 약 3년간의 장기 재하 실험
- 장기 환경 변화 영향 실험
- 완충재 밀도의 장기 변화 실험
- 완충재 동탄성계수의 장기 변화 실험
- 장기 하중과 완충재 변형의 복원력 실험
- 시간별 완충재 구조성능 변화 실험

기대 효과 및 평가 항목

- 장기 하중에 의한 내구성 (응력-변형률 관계, 밀도, 잔류변형률 등) 변화 평가
- 장기 하중과 환경(고온, 온도의 차, 침수, 불순물 혼입 등)의 변화에 의한 구조 및 완충 효과의 변화 평가
- 장기 하중에 의한 완충 효과 (동탄성계수, 차음 효과, 진동 억제 효과 등)의 변화 평가
- 장기 하중에 의한 복원력 평가

최종 목표

평가 항목의 선정

- 장기하중과 동탄성계수의 관계
- 장기하중과 밀도변화의 관계
- 환경변화와 재료 성능의 관계
- 장기하중과 잔류변형, 흡수량, 손실계수

성능기준 표준안 제시

- 장기하중에 대한 동탄성계수의 성능기준
- 재료의 밀도와 구조내구성 성능 기준
- 침수, 고온, 온도의 변화, 불순물에 대한 성능기준
- 잔류변형률, 흡수량, 손실계수에 대한 성능기준

장기 하중을 받는 바닥완충재의 성능평가 및 성능기준 표준안 제시

전체 3년간 연구 내용과 연구 목표

1.2 연구개발의 특징

1.2.1 바닥완충재의 중요성 증가

- 근년 건설기술의 발달과 함께 주거용 공동주택이 점점 증가하고 있음.
- 특히 인구밀도가 높은 우리나라에서 국토를 효율적으로 활용하기 위해서는 공동주택의 건설은 더욱 증대할 것으로 전망됨.
- 산업의 발전과 함께 주거용 건물에 대한 거주자의 요구조건도 바뀌고 있음. 과거 고도성장기에서 누렸던 신규 구조물에 대한 수요의 양적 성장은 더 이상 기대하기 어려워지고 있으며, 건설수요 역시 고급화, 다양화되는 추세가 가속화되고 있음.
- 공동주택은 구조성능 면에서 큰 문제가 없음에도 거주자는 보다 고급화되고 개선된 주거환경을 요구하고 있음.
- 공동주택의 경우 층간소음 및 진동억제는 주거환경 개선을 위한 필수 항목이라 할 수 있음.
- 층간소음을 억제하기 위해서는 바닥판의 두께를 증대하는 방법을 생각할 수 있으나 이러한 방법은 자중을 증대시켜 하부구조단면이 증가하며 공사비도 증대하게 됨.
- 최근 자중을 유지하며 효율적으로 층간진동이나 소음을 억제할 수 있는 여러 방법들이 제안되고 있으며, 그 중의 하나는 마감모르타르 아래에 설치되는 완충재의 성능을 향상시켜 바닥판의 소음과 진동을 억제하는 방법임.
- 바닥판의 두께를 증대시키지 않고 완충재의 성능만을 개선함으로써 효율적으로 층간소음을 억제할 수 있지만, 변화된 완충재에 대한 장기거동평가에 대한 연구가 매우 부족함.
- 특히 흡음성과 진동성능을 개선하기 위해서는 연질의 완충재를 사용하여야 하는데, 연질화된 완충재는 상부 마감모르타르의 처짐을 촉진하며, 장기하중을 받았을 때 발생할 수 있는 동탄성계수의 변화와 층간소음억제 효과에 대한 연구는 매우 부족함.

1.2.2 공동주택 완충재의 성능 기준

- 건축물 에너지 절약설계기준 4.3.2의 ②항에서는 완충재는 차음재 규정과 단열재 규정을 동시에 만족해야 하며, 단열재의 밀도는 발포폴리스틸렌 보온재 2호 이상, 기타 재료는 상부 하중을 버틸 수 있는 지의 입증 자료를 첨부해야함.
- KS 규격에 의하면 발포폴리스틸렌 보온재 2호의 밀도는 25kg/m^3 임(KS M 3808).
- 그 밖에 단열재의 설치 위치와 열관류율의 기준치를 만족해야 함.
- 해당 지자체는 단열재 시험성적서를 확인하고 적합여부를 결정함.
- 동탄성계수와 손실계수는 KS F 2873에서 정하고 있는 시험방법에 따라 측정함. 동탄성계수는 40MN/m^3 이하가 되어야 하며, 손실계수는 0.1내지 0.3의 범위 내에 있어야 함. 동탄성계수는 공인시험기관으로 인정받은 시험기관에서 실시하여야 함.
- 흡수량은 KS M ISO 4898에서 정하는 시험방법에 의하여 측정해야 함. 흡수량은 0.4%V/V 이하이거나 현장 적용 시 물이 침투되지 않는다는 것이 보장 되어야 함.
- 가열 후 치수안전성은 KS M ISO 4898에서 정하는 시험방법에 의하여 측정해야 함. 치수안전성은 5% 이하가 되어야 함.

1.2.3 바닥충격음의 성능 기준의 강화

- 정부는 주택법 21조를 기반으로 주택성능등급표시제도를 운영하고 있음. 1000가구 이상의 아파트의 입주자 모집공고에는 층간소음의 종류인 경량충격음과 중량충격음은 물론 화장실 소음과 경계 소음에 대해 한국감정원과 한국토지주택공사(LH공사) 등으로부터

성능검사를 받도록 하고 있음.

- 공동주택의 입주자 등은 층간소음 방지규정 제4조에서 규정한 각 호의 소음으로 인하여 인접세대에 피해를 주어서는 안되며 층간소음은 아래 각 호의 기준을 넘지 않도록 하고 있음.
- 경량충격음과 중량충격음은 각각 58dB 이하와 50dB 이하를 만족하여야 함.
- 2012년에는 아파트 층간소음을 줄이기 위해 아파트 바닥 건설기준이 강화되는 공청회가 개최되고 있음.
- 국토해양부는 한국건설기술연구원, 한국토지주택공사(LH)와 함께 ‘공동주택 바닥충격음 제도의 합리적인 개선방안 마련을 위한 공청회’를 열고 제도개선안을 발표했음.
- 개선안에 따르면 기존 바닥보다 더 두꺼워진 ‘법정 바닥’ 기준이 생김.
- 새 법정바닥구조는 벽식과 기둥식은 현행대로 210mm와 150mm로, 소음에 취약했던 무량판은 180mm에서 210mm로 더 두꺼워질 예정임.
- 또한 바닥충격음이 일정기준(경량충격음 58dB, 중량충격음 50dB)을 동시에 만족하도록 하며, 바닥충격음 측정 방식도 변경됨.
- 기존에는 시험동에서 소음 정도를 측정했지만, 이러한 경우 실제 아파트의 충격음과 편차가 발생한다는 문제가 있으므로, 향후에는 아파트 공사 현장에서 소음을 측정하고 예외적인 경우에만 시험동에서 측정할 수 있도록 하고 있음.

1.2.4 공동주택 완충재의 성능과 바닥충격음 성능 관계

- 층간소음은 바닥판의 두께에 큰 영향을 받는 것은 사실이지만, 또한 기포콘크리트와 바닥판 사이에 놓여지는 바닥완충재의 재질과 성능에 따라서 측정되는 층간소음의 크기가 달라질 수 있음.
- 특히, 층간소음을 해결하는 가장 효율적인 방법 중의 하나는 바닥을 두껍게 공사하는 것이지만 바닥 두께를 늘리면 공사비가 많이 들기 때문에 건설경기가 극도로 침체된 요즘 바닥판의 두께를 증가시켜 층간소음을 억제시키는 것은 쉽지않음.
- 층간소음은 완충재의 성능, 특히 재료의 동탄성계수와 밀접한 관계가 있음.
- 완충재의 밀도가 증가할 경우에 상부 하중에 대한 저항 능력 및 내구성이 증가하지만, 완충효과는 감소함(완충재를 포함한 온돌구성층의 구조해석기법 개발(2005년 주택도시연구원).
- 반대로, 밀도가 감소할 경우에 상부 하중에 대한 저항 능력 및 내구성이 저하하지만, 완충효과는 증가함(2005년 주택도시연구원).
- 연구 결과에 의하면 A재료의 밀도가 29.7kg/m^3 에서 24.0kg/m^3 으로 감소함에 따라서 동탄성계수가 80.1MN/m^3 에서 66.4MN/m^3 으로 감소함.
- 또한 B재료의 경우에도 밀도가 71.6kg/m^3 에서 46.9kg/m^3 으로 감소함에 따라서 동탄성계수가 22.7MN/m^3 에서 6.5MN/m^3 으로 급격하게 감소함.
- 이와 같이 밀도가 증가한 바닥완충재의 완충효과(경량충격음과 중량충격음억제 효과)는 밀도가 낮은 완충재에 비하여 크게 감소하여 요구 데시벨을 초과함.

1.2.5 완충재의 밀도 감소에 따른 침하 문제점 발생

- 기준에서 요구하는 58dB(경량충격음)과 50dB(중량충격음)이하의 충분한 완충효과를 내기 위해서는 바닥완충재의 밀도를 낮게 하는 것이 가장 효과적인 방법의 하나임.
- 밀도나 두께가 감소할 경우에 상부 하중에 대한 저항 능력 및 내구성이 저하하지만, 완충효과는 증가함에 따라서 현재 사용되고 완충재의 밀도는 2009년 이전에 비하여 매우 낮음.

- 이와 같이 밀도가 낮은 재료는 층간소음을 억제하는 효과는 우수하지만 상부 하중을 저항할 수 있는 능력은 현저하게 감소함.
- [그림 1.2.5]은 건설된 지 2년이 경과한 공동주택에서 발생한 침하 사진으로 밀도가 낮은 완충재를 사용하였을 경우에 입주한 지 얼마 되지 않아 바닥 전체에서 침하가 발생함.
- 바닥재는 손으로 누르면 즉시 처짐이 발생하며 이러한 바닥에 책상이나 냉장고, 피아노 등을 놓았을 경우에 바닥에 침하가 발생하고 있음.



[그림 1.2.5] 내구성능이 열악한 바닥완충재를 사용한 공동주택의
바닥 마감재 침하(2012년 A아파트)

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1.1 국내 기술 및 산업 동향

✓ 국내 바닥완충재 산업 현황

현재 바닥완충재 차단구조는 국토해양부장관이 정해 고시하는 ‘표준바닥구조’와 한국건설기술연구소와 대한주택공사 등 인정기관으로부터 성능인정을 받은 ‘인정바닥구조’로 나눌 수 있음. 이 인정바닥구조는 ‘층간 소음 저감재’라고 볼 수 있음.

현재 건설업체들은 공동주택 신축에서 ‘표준바닥구조’와 ‘인정바닥구조’ 중 하나를 선택하여 적용해야함. 하지만 건설업체에서는 정부가 ‘표준바닥구조’에서 정한 중량충격음 50dB, 경량충격음 50dB를 충족시키는 것이 쉽지 않다. 이러한 이유로 최근 ‘인정바닥구조’를 기초로 한 바닥완충재의 개발에 많은 집중이 쏟아지고 있음.

그러나 슬래브 두께를 늘리는 사안 이외에 바닥충격재가 적극적으로 적용되고 있지는 않음. 현재까지 개발된 1등급 바닥완충재가 신축 공동주택에 실제로 적용위해서는 많은 장애물이 있음. 또한, 현재 각 건설업체들이 개발한 바닥완충재가 현장에서 성능의 발현 여부와 경제성 등에 의문이 제기되고 있는 실정임.

✓ 국내 바닥완충재 관련 개발 업체

업체명	제품명	개요
영보화학	모자이크	비흡수성 재질로 내구성 및 내약품성, 시공성이 우수하다.
KCC	숲	향균성을 바탕으로 다양한 전용 바닥재를 생산한다.
한솔홈데코	참마루	비접착시공이 가능하며 PE폼 사용으로 접착시공 마루보다 완충성능이 우수하다.
SK케미칼	Flosys	4겹의 적층구조를 가지며 특수 슬래브를 함께사용한다.

✓ 국내연구 인프라 현황

장비명	개요	보유 기관
층간소음 측정기	표준 중량, 경량 충격원에 대한 성능 측정	한국건설생활환경시험연구원 LH공사 한국건설기술연구원
소음계	건설현장, 공동주택의 환경적 소음 측정 가능	강원대학교 산학협력단

1.2 국외 기술 및 산업 동향

√ 바닥충격음 관련 규정

유럽에서는 아래와 같이 바닥 충격음에 대한 규정이 있으며 이에 대한 연구가 진행됨.

국가명	바닥충격음 요구 성능 (dB)	국가명	바닥충격음 요구 성능 (dB)
덴마크	58	이탈리아	63
노르웨이	53	스페인	65
스웨덴	58	포르투갈	60
핀란드	53	폴란드	58
아이슬란드	58	슬로바키아	58
독일	53	에스토니아	53
영국	64~57	라트비아	58
프랑스	60~53	러시아	60
오스트리아	50~43	네덜란드	61~54

일본에서도 다음과 같은 바닥 충격음에 대한 규정이 있으며 이에 대한 연구가 진행됨.

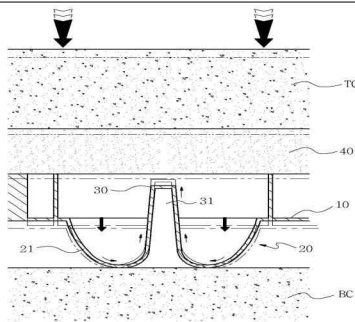
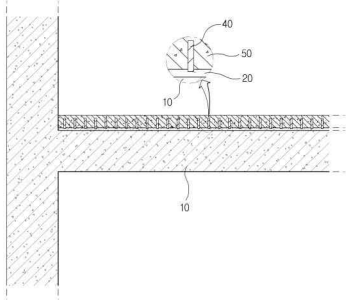
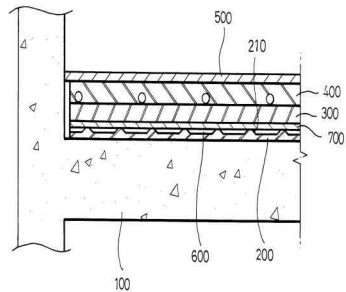
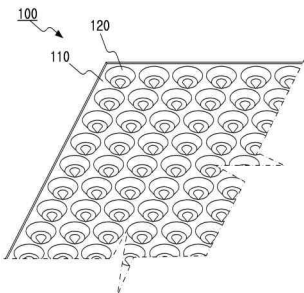
성능등급(rank)		5	4	3	2	1
성능	중 량	LH-50	LH-55	LH-60	LH-65	rank2 미만
수준	경 량	LH-45	LH-50	LH-55	LH-60	rank2 미만

√ 바닥충격음 완화 방법

바닥충격음저감을 위하여 현재 국내에서 일반적으로 사용하는 방법은 콘크리트 바닥슬래브 위에 충격음 저감을 목적으로 완충재를 사용하여 완충재상부에 설치되는 기포콘크리트와 모르터를 바닥슬래브로부터 분리시키는 공법임. 그러나 국외에서는 대부분 뜬바닥 구조에 의하여 층간소음을 억제함. 독일의 뜬바닥 구조는 규정에 의해 100% 시공되며 이중 50%가 난방 코일을 시공하고 있음. 뜬바닥 시공시 입상용절연재가 실 전체를 둘러싸서 완전한 뜬바닥이 가능하며, 경량 기포콘크리트는 사용되지 않으며 EPS 단열재가 시공되고 있음. 단열재 사이의 틈새는 코울타르가 함침된 목재칩을 넣어서 재료의 틈새를 없애고, 완충재를 안정화시키고 있음. 마감 몰탈은 건물탈로 시공하여 물 침투를 최소화 하고 작업성을 높이고 있음.

1.3 특허 동향

√ 국내 바닥완충재 관련 특허

특허명	사진 설명	출원인	개요
층간 소음 방지용 바닥 패널		유인섭	본체의 하부에 다수의 지지부가 구비된 층간 소음방지용 바닥패널에 있어서, 상기 지지부의 상부에 수직의 받침봉을 구비하되 받침봉의 말단이 상부 콘크리트의 저면과 근접하게 구비하여 소음방지 효과가 지속 되도록 하는 층간소음방지용 바닥 패널이다.
건축물의 바닥 충격음 방지 구조		주식회사 에이브이티	공동주택 건축물의 바닥에 어린이 등이 뛰어 충격이 가해질 경우, 슬라브 층위에 설치된 댐핑층을 포함하는 구조층의 일체화에 따른 휨강성 증가와 댐핑층의 소성변형으로 인해 충격에너지를 흡수하여 소멸시킴에 따라 바닥 충격음이 슬라브층과 벽체를 통하여 아래층으로 전달을 방지한다.
건축물의 층간 바닥 충격음 차단구조		주식회사 대호기술	건축물의 바닥슬라브와 기포콘크리트 사이에서 경량 및 중량 진동을 효과적으로 절연시킴과 동시에 음압을 흡수하여, 상층 바닥의 충격에 의한 소음이 바닥슬라브를 통해 하층으로 전달되는 현상이 방지되도록 하는 것이다.
완충 보드		곽학순	전체적으로 판 형상을 갖는 합성수지 재질로 몸체가 형성되되, 내부가 비어있고, 하부를 향하여 아래로 갈수록 직경이 작아지는 다단 구조의 하향 돌출부가 소정 간격으로 형성되는 것을 특징으로 한 완충보드이다.

- 지금까지의 출원된 특허들은 즉시 하중과 음 환경에 대한 연구가 대부분이었으며 장기간 동안 하중을 가한 후에 발생하는 완충재의 성능평가에 대한 본 연구의 목적과는 차이가 있음. 본 연구에서는 약 3년간의 장기하중을 가하여 완충재의 구조 성능을 평가함을 목표로 하고 있어 기존에 개발된 특허들과는 차별성을 가질 것임. 또한, 환경상태변화를 연구하여 비교함으로써 개발을 기초로 한 기존의 출원된 특허들에서는 다루지 않았던 연구가 진행될 것임.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

3.1 층간소음 억제를 위한 바닥 완충재의 응력-변형률 곡선 평가 실험

- 건설기술의 발달과 함께 초고층화된 주거용 공동주택이 점점 증가하고 있음. 특히 인구 밀도가 높은 우리나라에서 국토를 효율적으로 활용하기 위해서는 초고층 주거용 건물의 건설은 더욱 증대할 것으로 전망됨. 산업의 발전과 함께 주거용 건물에 대한 거주자의 요구조건도 바뀌고 있음. 과거 고도 성장기에서 누렸던 신규 구조물에 대한 수요의 양적 성장은 더 이상 기대하기 어려워지고 있으며, 건설수요 역시 고급화, 다양화되는 추세가 가속화되고 있음.
- 공동주택은 구조성능 면에서 큰 문제가 없음에도 거주자는 보다 고급화되고 개선된 주거환경을 요구하고 있음. 공동주택의 경우 층간소음 및 진동억제는 주거환경 개선을 위한 필수 항목이라 할 수 있음.
- 층간소음을 억제하기 위해서는 바닥판의 두께를 증대하는 방법을 생각할 수 있으나 이러한 방법은 자중을 증대시켜 하부구조단면이 증가하며 공사비도 증대하게 됨. 최근 자중을 유지하며 효율적으로 층간진동이나 소음을 억제할 수 있는 여러 방법들이 제안되고 있음. 그 중의 하나는 마감모르타르 아래에 설치되는 완충재의 성능을 향상시켜 바닥판의 소음과 진동을 억제하는 방법임.
- 이 방법은 바닥판의 두께를 증대시키지 않고 완충재의 성능만을 개선함으로써 효율적으로 층간소음을 억제할 수 있는 방법임. 그러나 층간소음 억제를 위한 바닥완충재의 성능 개선이 층간소음과 진동을 억제할 수 있다는 것은 확인되었지만, 변화된 완충재 물성, 특히, 장기하중을 받은 후의 물성이 층간소음에 어떠한 영향을 줄 것인가에 대한 연구는 매우 미흡한 실정임.
- 이 연구에서는 주거용 건물 바닥판의 주요한 요소 중의 하나인 흡음층의 장기하중에 대한 구조적 평가를 평가하였음.

3.1.1 실험 목적

- 실험을 통하여 표준바닥구조에 적용되는 바닥완충재의 특성을 파악하여 표준안 제시에 필요한 정보를 수집하기 위해 실시하였음.
- 바닥완충재를 생산하는 회사는 중소기업이 대부분이며, 지속적으로 제품을 생산하는 회사보다는 단발적으로 제품을 생산하거나 회사마다 생산되는 제품의 종류가 다양함.
- 이와 같이 다양하게 생산되고 있는 공동주택 바닥완충재의 성능을 어느 등급 이상으로 유지하기 위해서는 장기 내구성능 검증에 대한 표준안을 제시할 필요가 있음.
- 온돌구성층에서 완충재는 발포 폴리 스티렌 보온재(EPS보드)가 가장 대표적이었으며, 페타이어 칩이나 EVA계열의 재료도 사용된 예가 있었음.
- 2000년 초반에 바닥 충격음에 대한 법적 규제치의 설정에 따라 완충재의 설치가 의무화되면서 많은 완충재가 제안되어 사용되고 있지만 이러한 완충재 전체를 실험하기는 어려움.
- 이 연구에서는 현재 우리나라의 공동주택에 널리 쓰이는 바닥완충재들을 실험대상으로 하였음.

3.1.2 실험변수

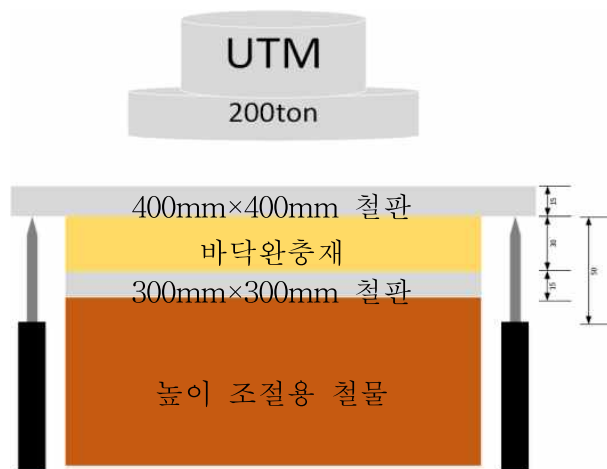
[표 3.1.2] 응력-변형률 실험체의 특성

실험체 번호	시료명	바닥형상	밀도(kg/m ³)	초기두께(mm)
1	EPS(1종)	평판형	13.20	28.94
2	EPS(1종)	골판형	12.08	29.80
3	PO	평판형	23.96	30.98
4	EPS(1종)	평판형	24.70	29.33
5	EPS(2종)	골판형	25.53	31.85
6	EPS(2종)	골판형	15.40	30.89
7	EPS(1종)	평판형	24.12	29.30
8	EVA	엠보형	59.26	30.15

- 바닥완충재의 응력-변형률 측정 실험에서는 [표 3.1.2]와 같이 8가지 종류의 바닥완충재를 변수로 하였음.
- 바닥완충재의 종류는 EPS계통 6종과 PO계통 1종, EVA계통 1종임.
- EPS 6종은 각각 밀도와 바닥형상이 다름.
- 실험체에는 초기 두께의 50%까지 가력함.
- 300mm×300mm 실험체에 균등하게 하중을 가력하기 위해 하단에 실험체와 동일한 크기의 300mm×300mm 철판을 설치함.
- 만능시험기의 가력을 상부에서 균형적으로 전달시키기 위해 400mm×400mm의 철판을 설치하였으며 각 모서리 부근에 LVDT를 설치, 총 4개의 LVDT를 설치함.

3.1.3 실험방법 및 측정

- 2,000kN용량의 만능시험기(UTM)를 이용하여 300mm×300mm 크기 완충재의 응력-변형률 실험을 실시하였음. 완충재와 동일한 크기의 정사각형 철판을 하단에 두고, 만능시험기의 가력이 균등하게 분포하도록 상단에 400mm×400mm 크기의 정사각형 철판을 설치하였음.
- 상단에 설치한 철판 4곳의 모서리에 LVDT를 설치하여 총 4개의 LVDT의 변형량을 데이터로거를 통하여 변형량 변화에 대한 데이터를 획득하였음. 4곳에 설치된 LVDT에서 획득한 데이터의 산술평균을 값을 가지고 최종적인 응력-변형률 결과를 얻었음. 실험 Setting에 대한 개념도는 다음과 같음.
- 반복하중을 가하기 위해 5%,10%,15%,20%,25%,30%,35%,40%,50%의 변형률이 되는 시점에서 각각 하중을 제거한 뒤, 탄성회복을 기다린 후 다시 하중을 가하였음.



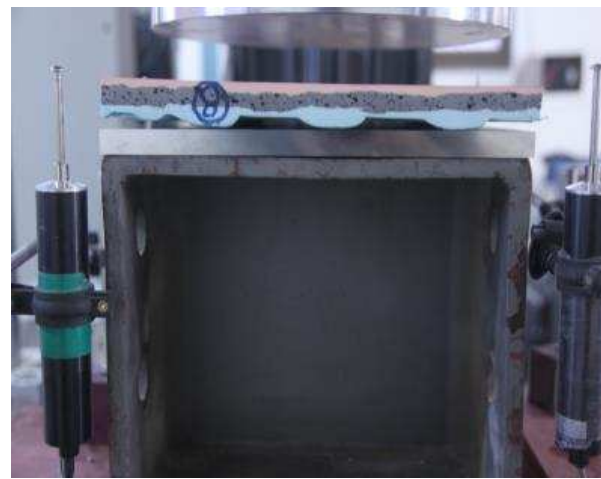
[그림 3.1.3.a] 응력-변형률 실험 개념도



[그림 3.1.3.b] 상단 400mm×400mm 철판
Setting 후 가력 전

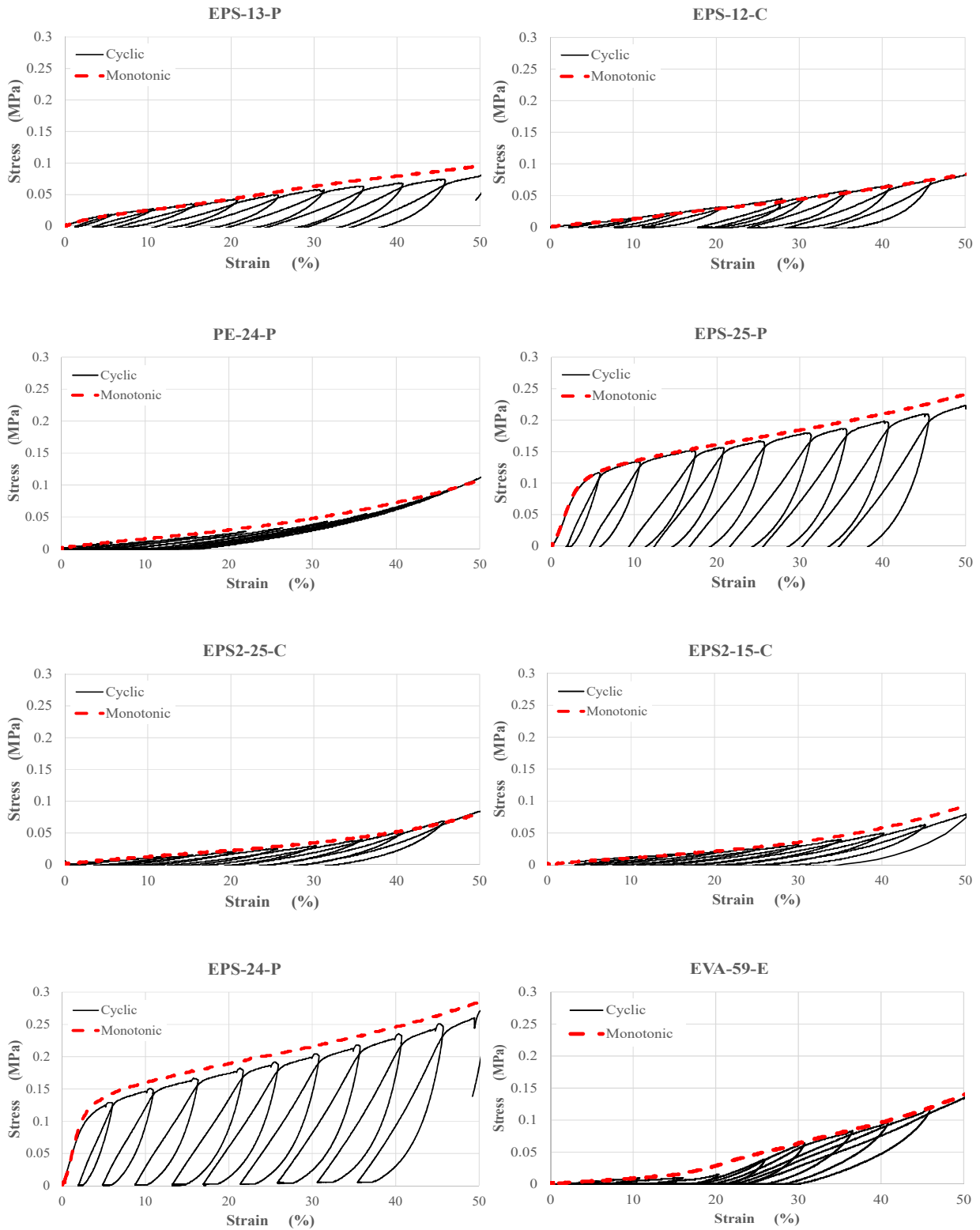


[그림 3.1.3.c] 만능시험기를 사용하여 실험체
가력



[그림 3.1.3.d] 만능시험기를 사용하여 가력
후 실험체

3.1.4 실험결과



[그림 3.1.4] 반복하중 모델에 따른 바닥완충재의 응력-변형률 곡선과 단조하중 모델의 응력-변형률 곡선 비교

[표 3.1.4] 응력-변형률 실험을 통해 계산한 완충재의 탄성계수

실험체 변형률(%)	1	2	3	4	5	6	7	8
5	0.3562	0.1371	0.1644	2.2466	0.1095	0.1368	2.4657	0.0548
10	0.2603	0.137	0.1095	1.3287	0.1095	0.1232	1.4657	0.0822
15	0.2282	0.1552	0.1187	0.9771	0.1004	0.1095	1.0776	0.0639
20	0.2055	0.1507	0.1164	0.774	0.1027	0.0958	0.8698	0.0685
25	0.1972	0.1534	0.1205	0.6684	0.0986	0.1040	0.7452	0.1315
30	0.1917	0.1507	0.1278	0.5890	0.0958	0.1004	0.6666	0.2009
35	0.1800	0.1604	0.1448	0.5323	0.1056	0.1134	0.6066	0.2192
40	0.1678	0.1609	0.1643	0.4931	0.1232	0.1232	0.5787	0.2294
45	0.1643	0.1613	0.1917	0.4657	0.1460	0.1369	0.5540	0.2465
50	0.1589	0.1644	0.2219	0.4465	0.1671	0.1589	0.5397	0.2657

- [그림 3.1.4] 나타낸 그래프 각각의 제목은 재질-밀도-바닥형상 순으로 간략히 나타내었음. [표 3.1.4] 실험체의 특성에서 정확한 명칭을 알 수 있음.
- 완충재의 탄성계수는 재질에 따라서 달라지며, 응력초기부터 최대응력에 도달할 때까지 일정하지 않고 응력의 크기에 따라서 변화함.
- EPS-25-P, EPS-24-P, EVA-59-E의 경우에는 응력-변형률 곡선을 두 단계로 구분할 수 있으며, 변형률 약 0.04 또는 0.17을 전후로 하여 곡선의 기울기가 크게 달라짐을 알 수 있음.
- 그러나 나머지 실험체는 거의 일정한 기울기를 나타냄.
- 반복하중 모델로 실험을 실시한 바닥완충재의 응력-변형률 곡선을 보면 근소한 차이는 있지만 곡선의 변형률 0.05의 구간별 반복하중에서도 단조하중 모델의 거동과 유사하게 나타남.
- 바닥완충재에 하중 재하와 제거를 반복하여도 탄성계수에 대한 물성이 변화하지 않는 것으로 판단됨.
- 즉, 건물의 생애주기동안 변화하는 하중 조건 속에서도 완충재의 물성은 변하지 않음을 알 수 있음.

3.2 바닥완충재의 장기변형 실험

3.2.1 실험목적

- 현재 일반적으로 사용되고 있는 바닥완충재의 시간에 따른 장기 거동을 하중의 크기에 따라 평가하였음.
- 공동주택 거주자가 증가함에 따라서 층간소음이 주거환경에 미치는 영향이 점점 커지고 있으며, 층간소음은 화장실 물소리, 바닥충격음소리, 피아노 소리, 오디오 소리, 대화소리, TV 소리 등을 포함하며, 과거 단독주택 위주의 생활에서, 오늘날 아파트 등의 공동주택이 일반화되면서 문제가 대두되기 시작했음.
- 특히 층간소음 중에서도 콘크리트 면에 직접 충격이 가해짐으로써 발생하는 바닥충격음(고체전달음)은 인접세대에 쉽게 전달되는 특성을 가지고 있으며, 다른 소음공해와 마찬가지로 정신적, 육체적 건강에 좋지 못한 영향을 끼치며, 이로 인해 이웃 주민간에 많은 문제와 민원 제기 등 사회적인 문제로까지 대두되기도 함.
- 층간소음 억제를 위한 바닥완충재의 밀도와 층간소음의 관계 및 장기 내구성능의 관계를 연계할 수 있는 바닥완충재 장기성능 검증 표준안의 제시가 필요함.
- 이를 통하여 공동주택에 장기간의 상시하중이 제하된 이후에도 바닥완충재로 인하여 발생할 수 있는 층간소음과 바닥침하의 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단됨.
- 공동주택 바닥구조용 완충재의 구조 성능이 시간이 경과함에 따라서 저하할 것으로 판단됨.
- 특히 장기간 하중이 제하되거나 고온(온수)에 노출되었을 경우에 바닥구조용 완충재의 충격완화 성능은 급격하게 감소할 것으로 판단됨.
- 기존 연구에 의하면 재하 후의 바닥완충재를 재하하지 않은 바닥완충재와 비교하면 하중이 가해진 이후에 시간이 경과한 후에 바닥완충재의 두께는 하중 제하 이전의 완충재 두께의 약 30%까지 감소하였음.
- 이와 같은 재하 후의 바닥완충재의 두께는 제품에 따라서 하중을 제거한 이후에도 원래의 두께로 회복되지 않고, 잔류변형률이 발생하여 두께가 줄어든 상태를 유지할 수 있음.
- 이와 같이 두께가 줄어든 상태일 경우에 바닥완충재의 밀도가 증가할 수 있으며, 이로 인하여 층간소음 억제 효과는 초기에 비하여 급격하게 감소할 것으로 판단됨.

3.2.2 실험변수

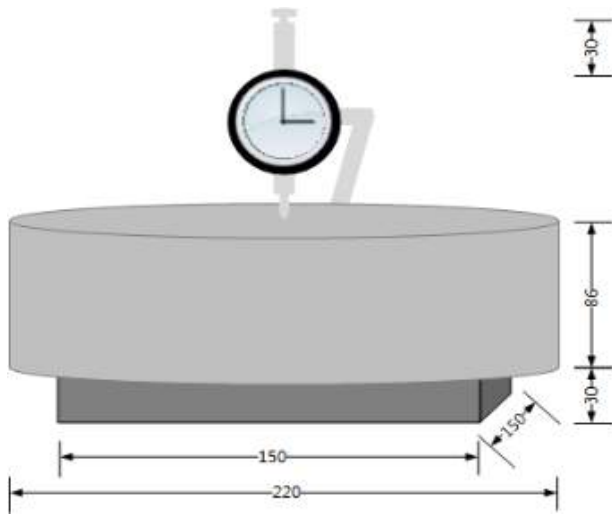
- 층간소음 억제를 위한 바닥완충재의 장기변형 측정 실험에서는 [표 2.4.1]과 같이 응력-변형률실험과 동일한 8가지 종류의 바닥완충재를 변수로 하였음.
- 바닥완충재의 종류는 EPS계통 6종과 PO계통 1종, EVA계통 1종임.
- EPS 6종은 각각 밀도와 바닥형상이 다름.
- 실험체에는 40N, 80N, 250N, 500N 4종류의 하중을 가력함.
- 150mm×150mm 실험체 전면이 하중을 고르게 받을 수 있도록 직경 220mm의 철판을 하중판을 사용하여 가력함.

[표 3.2.2] 장기변형 측정 실험체의 특성

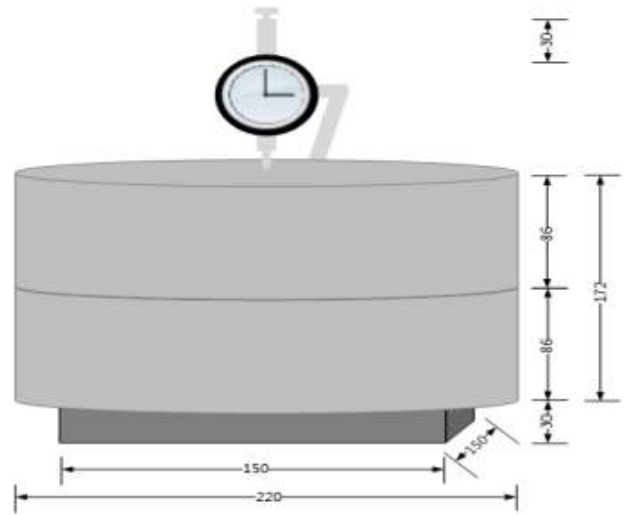
실험체 번호	시료명	바닥형상	밀도 (kg/m ³)	초기두께 (mm)	단면적 (cm ²)	실험체 무게 (g)
1	EPS(1종)	평판형	13.20	28.94	225	8.6
2	EPS(1종)	굴판형	12.08	29.80	225	8.1
3	PO	평판형	23.96	30.98	225	16.7
4	EPS(1종)	평판형	24.70	29.33	225	16.3
5	EPS(2종)	굴판형	25.53	31.85	225	18.3
6	EPS(2종)	굴판형	15.40	30.89	225	10.7
7	EPS(1종)	평판형	24.12	29.30	225	15.9
8	EVA	엠보형	59.26	30.15	225	40.2

3.2.3 실험방법 및 측정

- 8종류의 실험체를 150mm×150mm으로 절단한 후에 직경 220mm의 철제 가력판을 이용하여 가력함.
- 실험체는 하중의 크기에 따라서 동일한 무게와 크기의 철제 가력판을 이용하여 40N, 80N, 250N과 500N을 하중 조건을 조성하였음.
- 실험체의 처짐은 철제 가력판을 실험체 위에 설치한 후, 다이얼게이지를 설치하여 측정하였음.
- 다이얼게이지 설치 이후에는 시간의 흐름에 따라 변형을 측정하였음.
- 실험체 8종은 모두 동시에 가력판을 설치하고, 2분 후 동시에 다이얼게이지를 설치하여 설치 시 발생하는 움직임에 의해 발생하는 오차를 최소화하였음.
- 바닥완충재 상부에 기포콘크리트와 마감모르타르가 놓여 하중이 분산됨. 이 연구에서는 이 효과를 평가하기 위하여 2차년도에 하중의 크기를 40N(실험체가 받는 응력 0.0018MPa)과 80N(실험체가 받는 응력 0.0036MPa)로 낮추어 수행함.
- 40N과 80N의 하중의 크기는 기포콘크리트와 마감모르타르의 자중 및 바닥판 등분포하중의 효과를 구현한 것으로 이 경우는 바닥판 전체에 일정한 하중이 등분포되게 작용하는 것을 구현한 것으로 분산하중의 영향을 반영한 것임.
- 1차년도에서는 하중의 크기를 250N과 500N의 집중하중에 대한 영향을 평가하였으며 이 경우에는 상부 마감모르타르에 의한 분산하중의 영향이 고려되어야 함.
- 그러나 2차년도에 추가로 수행한 실험의 경우는 40N과 80N의 상시 등분포하중에 대한 영향을 평가한 것으로 이 경우는 바닥판 전체에 일정한 하중이 등분포되게 작용한 것으로 분산하중의 영향을 반영한 것임.



[그림 3.2.3.a] 250N 장기변형 실험 개념도



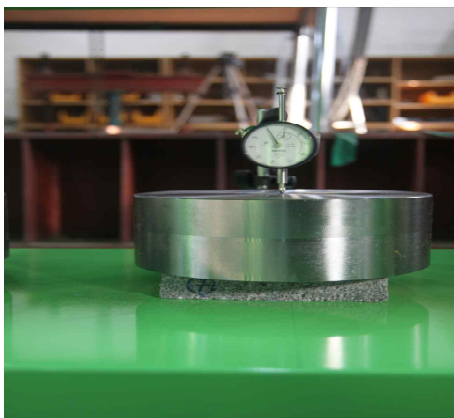
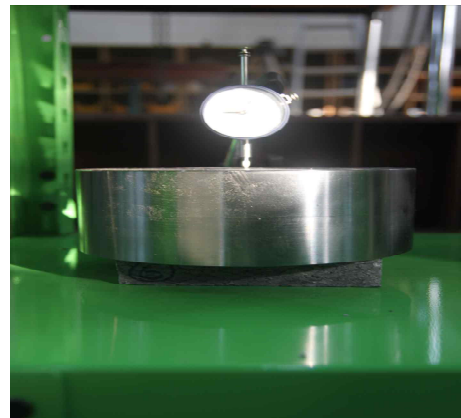
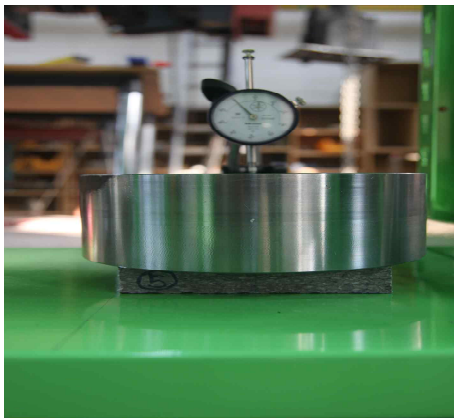
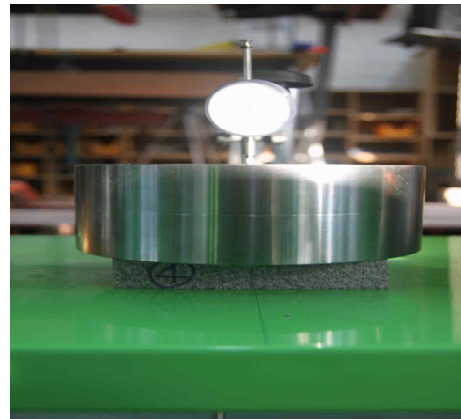
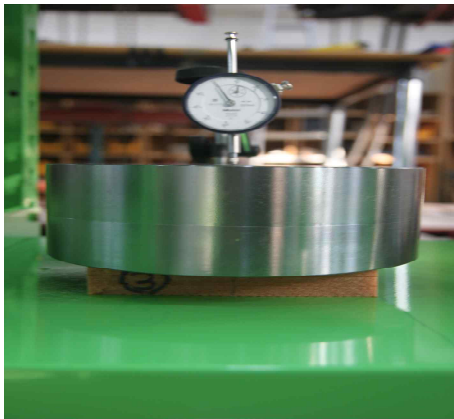
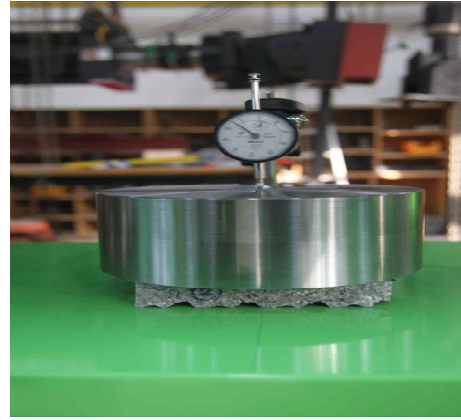
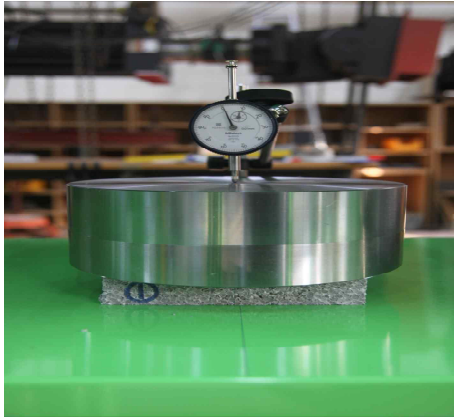
[그림 3.2.3.b] 500N 장기변형 실험 개념도



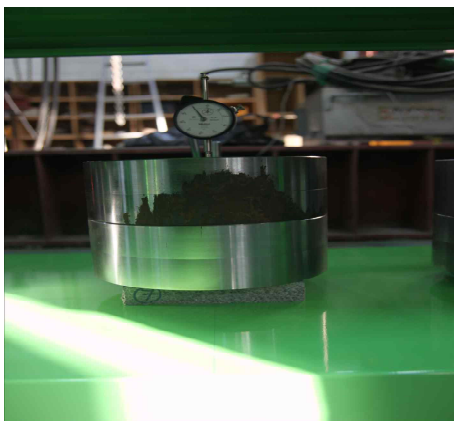
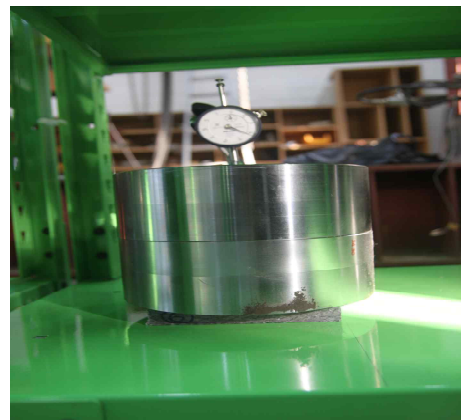
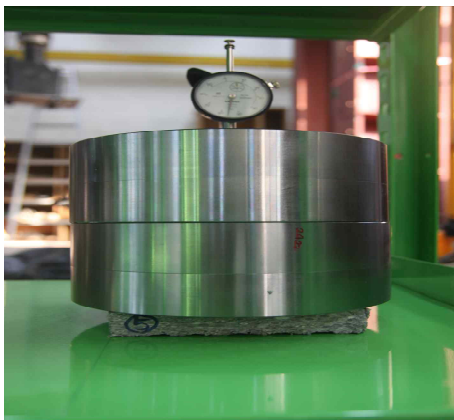
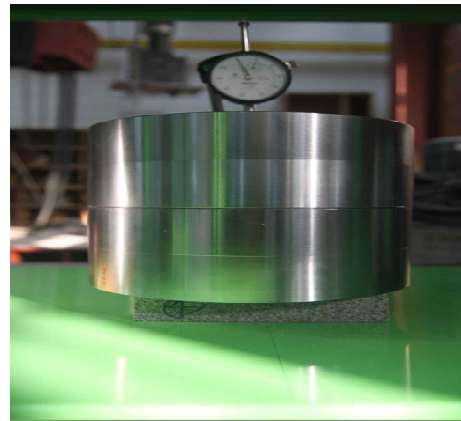
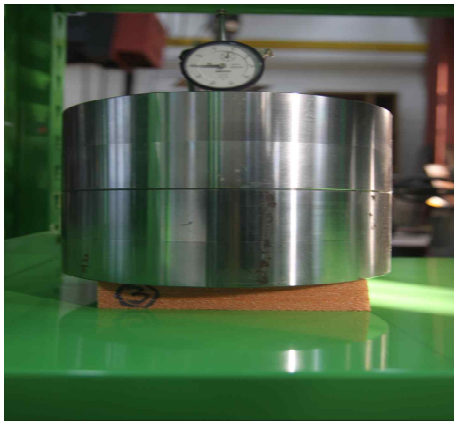
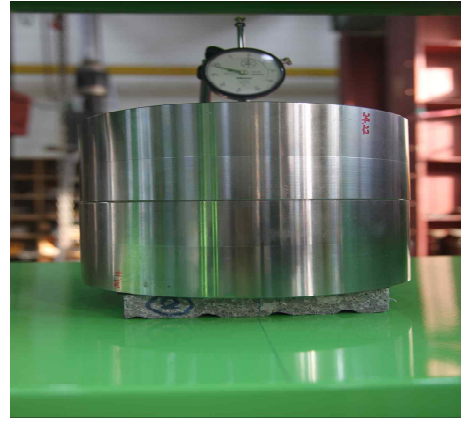
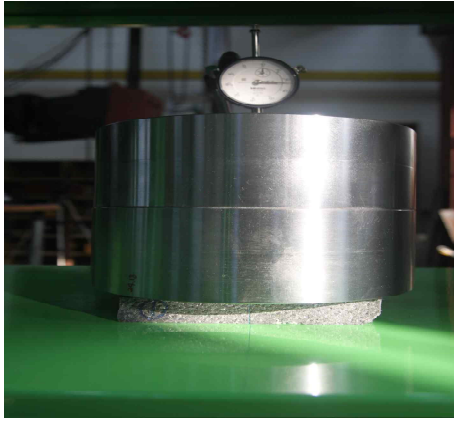
[그림 3.2.3.c] 장기변형 Setting 중 사진



[그림 3.2.3.d] 장기변형 Setting 완료 사진



[그림 3.2.3.e] 장기변형 250N 가력 실험체 각각의 Setting 사진



[그림 3.2.3.f] 장기변형 500N 가력 실험체 각각의 Setting 사진

3.2.4 실험결과

가. 250N 가력 실험체 장기변형 측정 결과

[표 3.2.4.a] 250N 재하 시 발생한 단기변형 측정 값

실험체 시간	1번 (EPS -13- 평판형)	2번 (EPS -12- 골판형)	3번 (PO -24- 평판형)	4번 (EPS -25- 평판형)	5번 (EPS -25- 골판형)	6번 (EPS -15- 골판형)	7번 (EPS -24- 평판형)	8번 (EVA -59- 엠보형)
1분	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00
10분	0.00	0.13	0.00	0.00	0.23	0.35	0.00	0.00
30분	0.00	0.34	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.04
1시간	0.00	0.41	0.00	0.00	1.21	1.23	0.00	0.07
3시간	0.00	0.62	0.00	0.00	2.23	2.32	0.00	0.22
5시간	0.00	0.68	0.00	0.00	2.52	2.83	0.00	0.28
10시간	0.00	0.77	0.14	0.00	2.91	3.46	0.00	0.36
20시간	0.00	0.86	0.41	0.00	3.23	4.14	0.00	0.48
24시간	0.00	0.88	0.49	0.00	3.28	4.24	0.00	0.51
48시간	0.00	0.96	0.76	0.00	3.46	4.63	0.00	0.61
5일	0.01	1.07	1.70	0.00	3.68	5.03	0.00	0.77
11일	0.02	1.19	2.91	0.00	3.90	5.35	0.00	0.89
14일	0.04	1.22	3.20	0.00	3.95	5.41	0.00	0.92
19일	0.10	1.29	4.06	0.00	4.06	5.53	0.00	0.99
31일	0.16	1.38	5.81	0.00	4.21	5.75	0.00	1.11
50일	0.28	1.51	8.13	0.00	4.45	6.03	0.00	1.27
90일	0.53	1.73	13.80	0.00	4.86	6.54	0.00	1.58
100일	0.61	1.86	15.44	0.00	5.01	6.70	0.00	1.65
110일	0.69	1.94	16.68	0.00	5.14	6.84	0.00	1.73
120일	0.74	2.00	17.63	0.00	5.22	6.94	0.00	1.80
150일	1.02	2.26	20.45	0.00	5.65	7.38	0.00	1.95
160일	1.14	2.37	21.21	0.00	5.83	7.55	0.00	2.00
180일	1.29	2.50	21.71	0.00	6.07	7.78	0.00	2.04
190일	1.36	2.56	21.89	0.00	6.17	7.88	0.00	2.09
200일	1.43	2.63	22.04	0.00	6.30	8.00	0.00	2.10
220일	1.50	2.69	22.15	0.00	6.41	8.10	0.00	2.20
240일	1.55	2.76	22.20	0.00	6.48	8.16	0.00	2.23
250일	1.57	2.77	22.22	0.00	6.53	8.21	0.00	2.25
270일	1.60	2.79	22.23	0.00	6.56	8.25	0.00	2.30
280일	1.60	2.80	22.23	0.00	6.59	8.27	0.00	2.63
290일	1.61	2.80	22.23	0.00	6.61	8.27	0.00	2.51
300일	1.61	2.80	22.20	0.00	6.61	8.27	0.00	2.46
310일	1.61	2.81	22.22	0.00	6.62	8.27	0.00	2.60
320일	1.61	2.81	22.23	0.00	6.62	8.26	0.00	2.62
330일	1.61	2.81	22.26	0.00	6.63	8.27	0.00	2.58
340일	1.61	2.81	22.22	0.00	6.63	8.27	0.00	2.60
350일	1.61	2.81	21.21	0.00	6.63	8.27	0.00	2.59
360일	1.61	2.81	21.23	0.00	6.63	8.27	0.00	2.58
370일	1.61	2.81	21.23	0.00	6.62	9.26	0.00	2.63
380일	1.62	2.81	21.20	0.00	6.63	9.28	0.00	2.56
390일	1.61	2.81	21.23	0.00	6.63	9.28	0.00	2.56

400일	1.61	2.81	21.22	0.00	6.63	9.28	0.00	2.56
410일	1.62	2.81	21.21	0.00	6.64	9.29	0.00	2.49
420일	1.61	2.81	21.21	0.00	6.64	9.29	0.00	2.49
430일	1.61	2.82	21.23	0.00	6.65	9.29	0.00	2.47
440일	1.62	2.82	21.23	0.00	6.65	9.30	0.00	2.43
450일	1.62	2.82	21.23	0.00	6.67	9.31	0.00	2.35
460일	1.62	2.82	21.21	0.00	6.67	9.31	0.00	2.35
470일	1.63	2.83	21.23	0.00	6.68	9.32	0.00	2.35
480일	1.64	2.83	21.24	0.00	6.69	9.33	0.00	2.31
490일	1.64	2.83	21.24	0.00	6.71	9.34	0.00	2.29
500일	1.65	2.84	21.25	0.00	6.73	9.36	0.00	2.27
510일	1.67	2.86	21.26	0.00	6.76	9.38	0.00	2.24
520일	1.69	2.88	21.28	0.00	6.80	9.41	0.00	2.20
530일	1.70	2.88	21.30	0.00	7.63	9.78	0.00	2.19
540일	1.73	2.91	21.34	0.00	6.86	9.46	0.00	2.23

(단위 : mm)

- [표 3.2.4.a]에 250N 하중 재하 시 발생한 장기처짐 값을 정리하였음.
- [표 3.2.4.a]에 실험체명을 실험체번호(재질-밀도-바닥형상) 순으로 표현하였음.
- 기본적인 실험결과로 실험체 바닥형상이 평판형보다 골판형에서 처짐이 더 발생함. 또한, 밀도가 높을수록 처짐 발생이 덜함.
- 24kg/m³ 이상의 밀도를 갖는 EPS 재질의 실험체(D4-250, D7-250)에서는 장기 처짐이 발생하지 않았음.
- PO 재질의 실험체의 경우 재하 초기부터 처짐이 급속하게 발생하여 다른 재질의 실험체와 상이한 거동을 보였으며 하중을 재하한 90일이 지난 시점에서 처짐이 13mm 이상으로 초기두께의 약 50%의 두께감소가 발생하였음. 또한, 초기두께 대비 약 66%의 두께가 감소한 시점인 160일 이후부터는 처짐량이 수렴하는 경향을 보임. 이는 부피감소에 따른 밀도의 증가와 더불어 완충작용이 거의 다한 것으로 판단이 됨.
- 그 밖의 실험체에서도 장기 처짐이 발생하였으며, 250N의 하중이 작용하는 실험체에서는 재질에 따라 최소 1.73mm에서 최대 9.46mm의 처짐이 발생하였음.
- EPS 2종 재질인 D5-250과 D6-250의 경우 1일 이내의 단기 처짐의 경우 급격히 늘어난 반면, 이후에는 상대적으로 서서히 증가함. 이는 EPS 1종과 확연히 다른 장기처짐 경향을 보임.
- D2-250과 D6-250의 실험체를 비교하였을 때, EPS 1종과 2종의 재질 차이가 있음을 알 수 있음. 반면 그 외의 조건들은 거의 비슷함. 두 실험체의 장기변형값을 보면 EPS 2종의 D6-250이 D2-250에 비해 약 3배 더 많은 처짐량을 보임.
- D8-250실험체는 유일한 EVA재질을 가지고 있고 밀도가 다른 실험체에 비해 큼. 또한, 엠보형태의 바닥형상을 가지고 있는데 처짐이 나타는 경향은 엠보형 부분에는 처짐이 발생하지만 그 위에 플레이트 부분에서는 처짐이 거의 발생하지 않음. 밀도가 크고 강성이 큰 영향으로 판단됨.

나. 500N 가력 실험체 장기변형 측정 결과

[표 3.2.4.b] 500N 실험체 장기변형 측정 값

실험체 시간	1번 (EPS -13- 평판형)	2번 (EPS -12- 골판형)	3번 (PO -24- 평판형)	4번 (EPS -25- 평판형)	5번 (EPS -25- 골판형)	6번 (EPS -15- 골판형)	7번 (EPS -24- 평판형)	8번 (EVA -59- 엠보형)
1분	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
10분	0.25	0.40	0.02	0.00	0.61	0.48	0.00	0.22
30분	0.60	1.03	0.20	0.00	1.66	1.45	0.00	0.48
1시간	0.81	1.32	0.28	0.00	2.21	2.49	0.00	0.60
3시간	1.34	2.00	0.59	0.00	3.50	4.49	0.00	0.74
5시간	1.48	2.19	0.70	0.00	3.86	5.10	0.00	0.77
10시간	1.63	2.40	0.98	0.00	4.30	5.96	0.00	0.81
20시간	1.83	2.59	1.51	0.00	4.59	6.64	0.00	0.86
24시간	1.88	2.64	1.63	0.00	4.66	6.72	0.00	0.88
48시간	2.04	2.81	2.37	0.00	4.85	7.06	0.00	0.91
5일	2.25	3.03	4.03	0.00	5.11	7.35	0.00	0.98
11일	2.42	3.22	6.58	0.00	5.38	7.59	0.00	1.02
14일	2.48	3.26	7.17	0.00	5.42	7.65	0.00	1.02
19일	2.56	3.36	8.66	0.00	5.51	7.75	0.00	1.05
31일	2.70	3.50	11.64	0.00	5.72	7.90	0.00	1.10
50일	2.88	3.68	15.70	0.00	5.94	8.10	0.00	1.14
90일	3.23	4.07	20.69	0.00	6.32	8.46	0.00	1.27
100일	3.32	4.17	21.34	0.00	6.43	8.57	0.00	1.29
110일	3.42	4.28	21.58	0.00	6.52	8.67	0.00	1.31
120일	3.47	4.33	21.65	0.00	6.59	8.73	0.00	1.33
150일	3.75	4.65	22.00	0.00	6.89	9.04	0.00	1.52
160일	3.86	4.78	22.07	0.00	7.00	9.16	0.00	1.63
180일	4.01	4.94	22.19	0.00	7.16	9.31	0.00	1.72
190일	4.08	5.00	22.23	0.00	7.23	9.37	0.00	1.82
200일	4.15	5.08	22.29	0.00	7.31	9.46	0.00	1.86
220일	4.22	5.17	22.33	0.00	7.38	9.52	0.00	2.04
240일	4.26	5.22	22.35	0.00	7.42	9.57	0.00	2.10
250일	4.29	5.25	22.36	0.00	7.46	9.60	0.00	2.12
270일	4.31	5.28	22.37	0.00	7.48	9.63	0.00	2.19
280일	4.33	5.31	22.39	0.00	7.50	9.66	0.00	2.76
290일	4.34	5.31	22.39	0.00	7.51	9.67	0.00	2.44
300일	4.34	5.31	22.39	0.00	7.51	9.67	0.00	2.38
310일	4.34	5.32	22.40	0.00	7.51	9.68	0.00	2.54
320일	4.34	5.32	22.41	0.00	7.51	9.68	0.00	2.55
330일	4.34	5.32	22.41	0.00	7.51	9.69	0.00	2.51
340일	4.34	5.31	22.41	0.00	7.51	9.69	0.00	2.53
350일	4.34	5.31	22.41	0.00	7.51	9.69	0.00	2.51
360일	4.34	5.37	22.41	0.00	7.51	9.69	0.00	2.52
370일	4.34	5.31	22.41	0.00	7.50	9.69	0.00	2.56
380일	4.35	5.32	22.41	0.00	7.52	9.69	0.00	2.48
390일	4.34	5.31	22.41	0.00	7.52	9.69	0.00	2.50

400일	4.35	5.31	22.41	0.00	7.51	9.69	0.00	2.49
410일	4.35	5.31	22.41	0.00	7.52	9.69	0.00	2.40
420일	4.35	5.31	22.40	0.00	7.52	9.70	0.00	2.40
430일	4.35	5.31	27.40	0.00	7.53	9.70	0.00	2.39
440일	4.34	5.31	22.40	0.00	7.53	9.70	0.00	2.36
450일	4.35	5.31	22.39	0.00	7.54	9.71	0.00	2.26
460일	4.35	5.31	22.39	0.00	7.54	9.71	0.00	2.26
470일	4.35	5.31	22.39	0.00	7.55	9.71	0.00	2.27
480일	4.36	5.32	22.39	0.00	7.56	9.72	0.00	2.22
490일	4.36	5.32	22.38	0.00	7.57	9.72	0.00	2.21
500일	4.37	5.34	22.38	0.00	7.58	9.74	0.00	2.19
510일	4.39	5.35	22.38	0.00	7.60	9.75	0.00	2.16
520일	4.41	5.37	22.39	0.00	7.62	9.77	0.00	2.14
530일	4.42	5.38	22.39	0.00	7.63	9.78	0.00	2.19
540일	4.45	5.40	22.39	0.00	7.66	9.81	0.00	2.19

(단위 : mm)

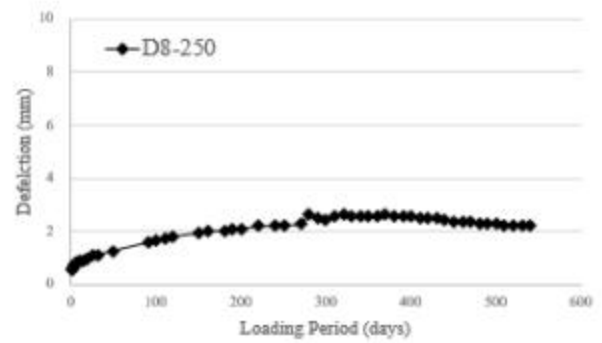
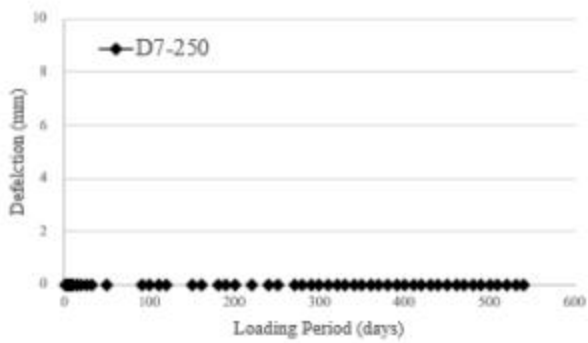
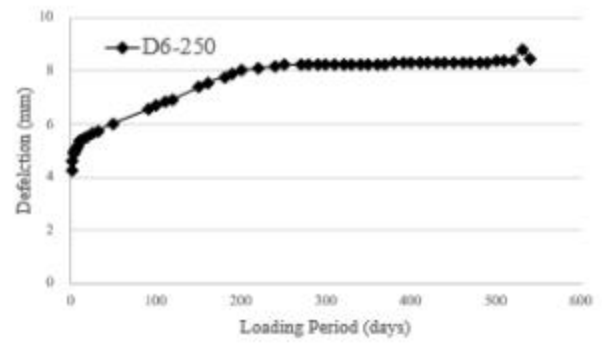
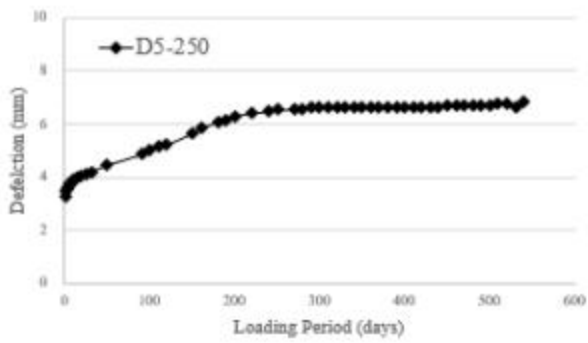
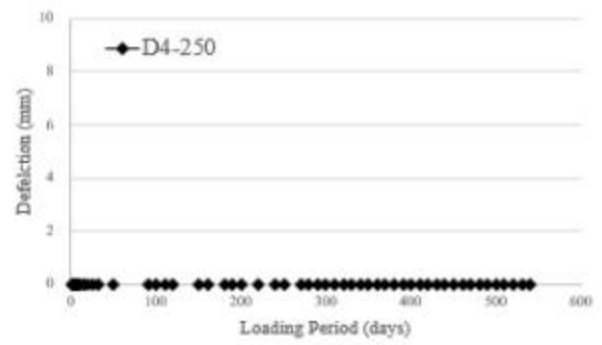
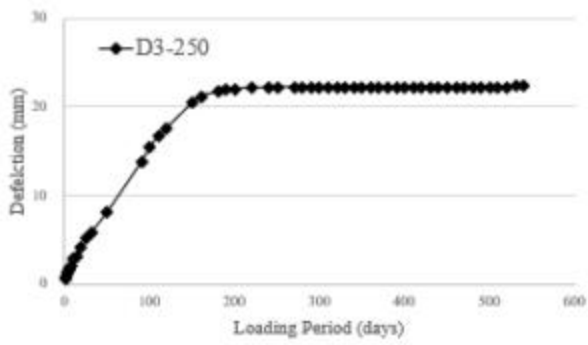
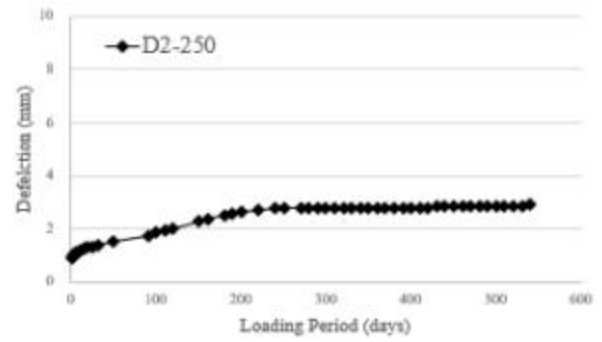
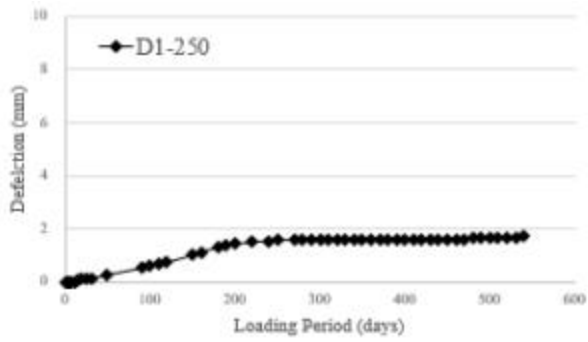
- [표 3.2.4.b]에 250N 하중 재하 시 발생한 장기처짐 값을 정리하였음.
- [표 3.2.4.b]에 실험체명을 실험체번호(재질-밀도-바닥형상) 순으로 표현하였음.
- DM8 실험체를 제외한 나머지 7종의 실험체에서 500N에서의 처짐 값이 250N에서의 처짐 값보다 크게 나타남. DM8 실험체의 경우 처짐값이 비슷하게 나타남.
- 250N 하중재하의 경우와 마찬가지로 기본적인 실험결과로 실험체 바닥형상이 평판형보다 골판형에서 처짐이 더 발생함. 또한, 밀도가 높을수록 처짐 발생이 덜함. 추가로 250N을 재하한 경우와 비슷한 실험결과 양상을 띄며 상대적으로 처짐량이 증가함.
- 24kg/m³ 이상의 밀도를 갖는 EPS 재질의 실험체(D4-500, D7-500)에서는 거의 장기 처짐이 발생하지 않았음.
- PO 재질의 실험체의 경우 재하 초기부터 처짐이 급속하게 발생하여 다른 재질의 실험체와 상이한 거동을 보였으며, 하중을 재하한 90일이 지난 시점에서 처짐이 21mm 이상으로 초기두께의 약 70%의 두께감소가 발생하였음. 540일 경 처짐은 22.39mm로 다른 실험체에 비해 굉장히 큰 처짐을 나타냄.
- PO 재질의 실험체의 경우 540일 경의 처짐 값이 250N, 500N 하중재하 조건과 상관없이 비슷하게 발생하였음.
- 그 밖의 실험체에서 장기 처짐이 발생하였으며, 최소 2.19mm에서 9.81mm의 처짐이 발생하였음.
- 실험체 D1-500과 D2-500의 경우 D1-250과 D2-250에 비해 540일에서 각각 3배, 2배의 처짐량 증가를 보였음. D5-500의 경우, 약 20%의 처짐량 증가를 보였으며 나머지 실험체들은 거의 변화가 없었음.
- 아래의 [그림 3.2.4.a]에서 [그림 3.2.4.c]까지 처짐량의 변화를 그래프로 나타내었음.

다. 40N, 80N 가력 실험체 장기변형 측정 결과

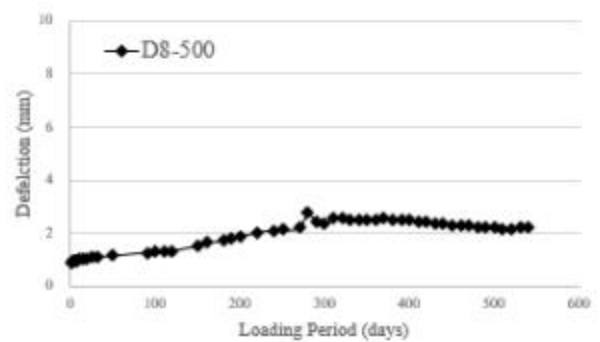
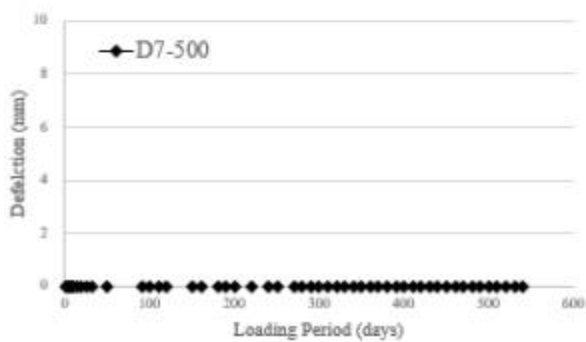
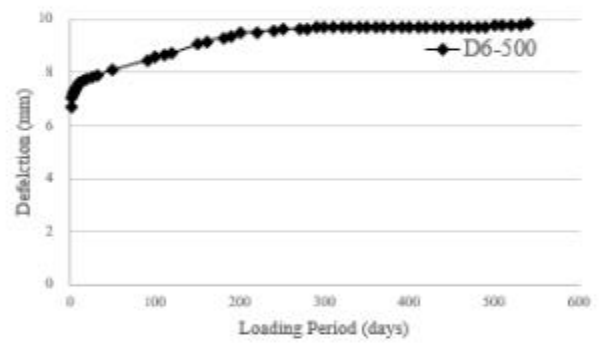
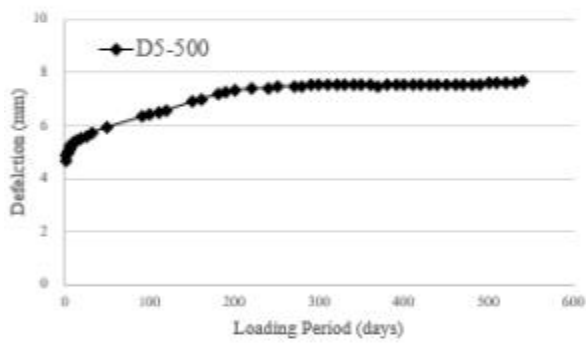
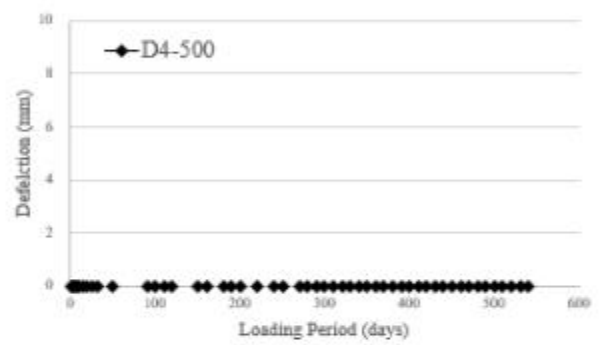
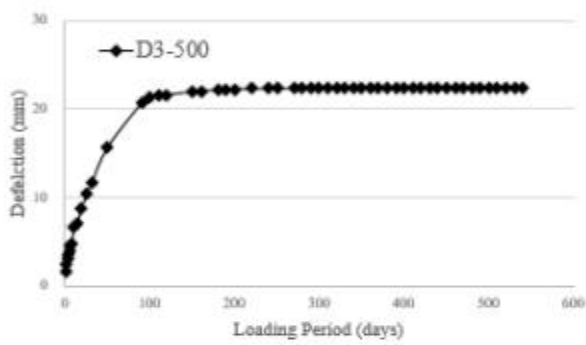
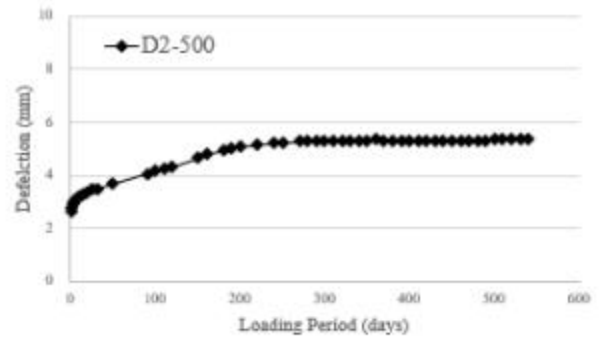
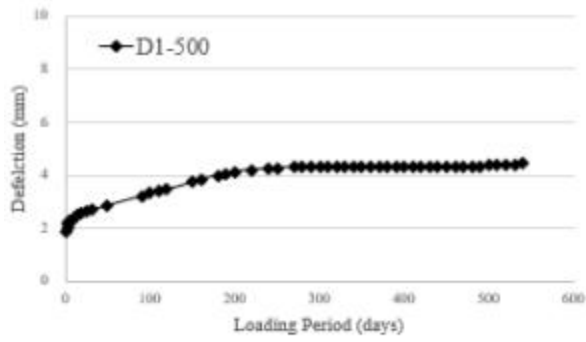
[표 3.2.4.c] 하중가력기간에 따른 바닥완충재의 처짐 증가량 (mm)

실험체명	40N (190일 기준)	80N (190일 기준)	250N (500일 기준)	500N (500일 기준)
DM1	0	0	1.65	4.37
DM2	0	0.35	2.84	5.34
DM3	1.72	11.90	21.25	22.38
DM4	0	0	0	0
DM5	0.39	1.21	6.73	7.58
DM6	0	1.49	9.36	9.74
DM7	0	0	0	0
DM8	1.79	2.51	2.27	2.19

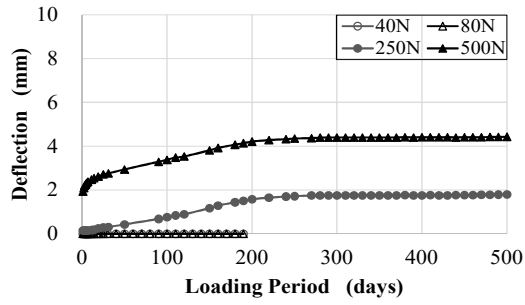
- [표 3.2.4.c]에 하중가력기간에 따른 바닥완충재의 처짐 증가량을 나타냄.
- 40N과 80N의 하중조건에서는 250N과 500N보다 상대적으로 하중이 작고 그에 따라 나타나나는 처짐의 양이 매우 작아서 변화량만을 표현함.
- 40N에서는 8종의 실험체중 DM3, DM5, DM8을 제외한 5종의 실험체에서 변형이 발생하지 않음.
- 변형이 발생한 DM3, DM5, DM8 실험체에서도 처짐의 값이 굉장히 작게 나타남.
- 80N 조건에서도 40N조건과 마찬가지로 처짐이 250N과 500N에 비해 작게 나타남.
- 80N에서는 DM1, DM4, DM7 3개의 실험체에서 처짐이 나타나지 않음.
- DM3-80N 실험체의 경우 40N 하중조건 일때에 비해서 처짐이 크게 증가하였는데 그 이유는 DM3의 재질은 PO재질이 일정 하중이 넘어서게 되면 큰 폭으로 처짐이 발생되는 것이라 판단됨.
- DM3를 제외한 나머지 7종의 실험체에서는 40N에 비해 처짐이 약 1.5mm 이내로 증가하는 경향을 나타냄.
- DM8 실험체의 경우 4개의 하중조건에서 처짐이 큰 차이를 나타내지 않고 있는데 그 이유는 엠보형태의 바닥은 강성이 약해 변형에 취약하여 어느 하중조건에서도 쉽게 처짐이 나타나기 때문이라 판단됨.
- [그림 3.2.4.c]에 4개의 하중 조건에서의 처짐을 한 그래프에 나타냄.
- [그림 3.2.4.c]에서 알 수 있듯이 250N과 500N에서는 처짐이 일정하게 수렴하는 구간이 나타나지만 40N과 80N에서는 실험 일수가 짧았기 때문에 처짐이 꾸준히 증가하는 경향을 나타냄.



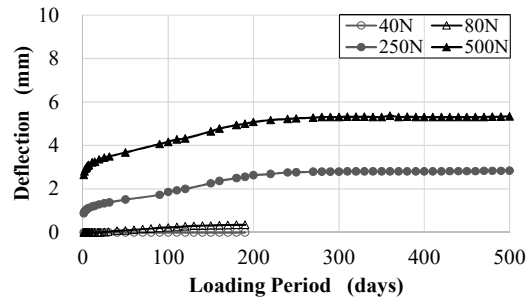
[그림 3.2.4.a] 250N의 하중 재하에 따른 바닥완충재의 장기 처짐



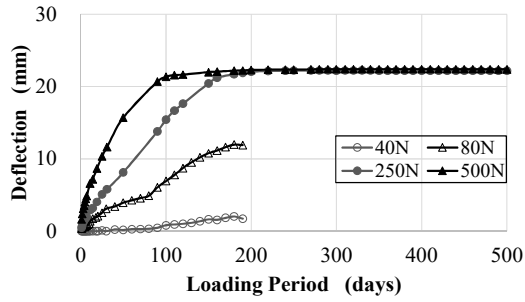
[그림 3.2.4.b] 500N의 하중 재하에 따른 바닥완충재의 장기 처짐



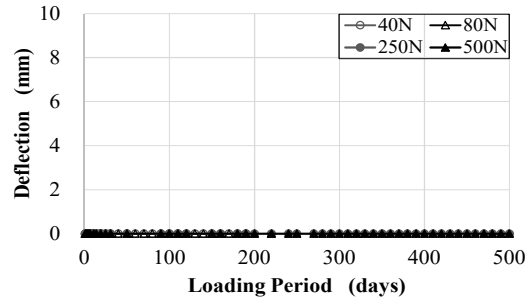
a) DM1



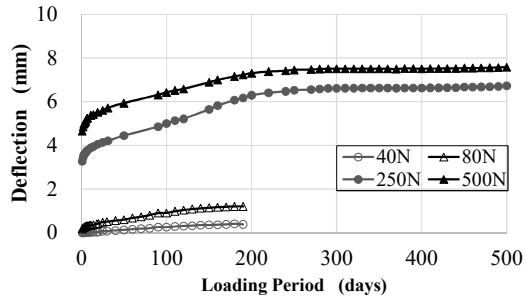
b) DM2



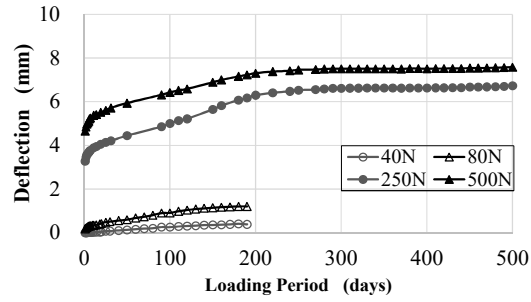
c) DM3



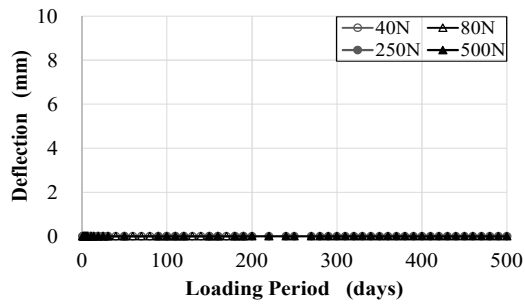
d) DM4



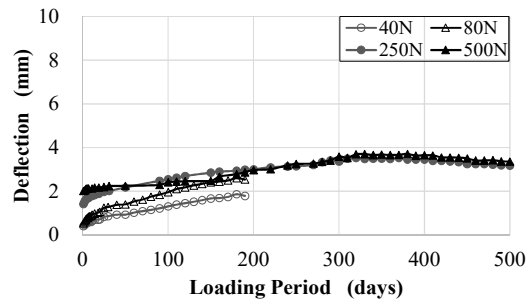
e) DM5



f) DM6



g) DM7



h) DM8

[그림 3.2.4.c] 하중가력기간에 따른 바닥완충재의 장기 처짐 변화

3.2.5 실험분석

가. ISO 20392에 의한 분석

- ISO 20392는 하중이 작용하는 단열재의 두께변형을 예측하는 국제표준으로 하중의 크기와 일정한 측정조건에서의 두께 변화를 계산하는 방법을 제시하고 있음.
- 최소 90일 이상의 측정된 결과를 바탕으로 10년 후의 두께를 예측하는 방법이며, 정사각형의 시료 한 변의 길이가 50mm, 100mm, 150mm, 200mm, 300mm 중 선택을 하며, 하중 조건은 ISO 844를 참고하여 실험의 의도에 맞게 설정함.
- 측정일수는 1분부터 최소 90일까지 측정한 데이터를 사용하거나 7일부터 540일까지의 측정 데이터를 활용하여 log 스케일의 선형 회귀식을 작성하여 분석을 실시할 수 있음.
- 현재 본 연구에서 수집된 데이터는 1분부터 540일까지의 데이터로 완충재의 처짐 수렴시점 데이터를 활용하여 회귀식 작성이 가능함. 그러나 더 많은 데이터를 적용하여 보다 명확한 구조 거동을 적용하고 정확한 장기 구조 성능 평가를 하고자 ISO 20392의 제시된 조건에 맞추어 7일부터 540일까지의 데이터를 활용하여 회귀식을 작성하였음.
- ISO 20392에 의한 장기처짐 평가에서는 8종 완충재의 장기처짐 수렴시점 전후의 처짐 측정값을 사용하였음.
- 수렴시점은 각 완충재의 장기 처짐 그래프에서 하중재하 시간에 따른 처짐의 값이 크게 변하지 않고 유지되는 구간을 수렴 시점으로 정함.
- 처짐이 발생하지 않은 D4-250N, D4-500N, D7-250N, D7-500N은 분석에서 제외하고 정리하였음.

[표 3.2.5.a] 실험체별 장기처짐 수렴 시점

구분 실험체	처짐 수렴 시점 (일)	
	250N	500N
D1	200	200
D2	200	200
D3	160	100
D4	-	-
D5	200	200
D6	200	200
D7	-	-
D8	200	200

[표 3.2.5.b] ISO 20392에 따른 바닥완충재의 장기처짐 추세식

Material	Trend Equation	Determination Coefficient (r^2)
DM1-250N	$y(t) = 0.23 \times 10^{-4} t^{1.31}$	0.98
DM2-250N	$y(t) = 0.03 + 0.22t^{0.28}$	0.95
DM3-250N	$y(t) = 0.04t^{0.75}$	0.99
DM4-250N	–	–
DM5-250N	$y(t) = 1.48t^{0.16}$	0.93
DM6-250N	$y(t) = 0.12 + 2.27t^{0.14}$	0.95
DM7-250N	–	–
DM8-250N	$y(t) = 0.15t^{0.31}$	0.99
DM1-500N	$y(t) = 0.09 + 0.76t^{0.19}$	0.96
DM2-500N	$y(t) = 0.09 + 1.20t^{0.16}$	0.95
DM3-500N	$y(t) = 0.60t^{0.44}$	0.96
DM4-500N	–	–
DM5-500N	$y(t) = 2.86t^{0.11}$	0.96
DM6-500N	$y(t) = 4.88t^{0.08}$	0.95
DM7-500N	–	–
DM8-500N	$y(t) = 0.05 + 0.29t^{0.20}$	0.90

- [표 3.2.5.b]는 실험체별 처짐 수렴시점을 바탕으로 ISO 20392에 따라 7일부터 실험체별 처짐 수렴시점까지의 데이터를 활용한 완충재의 장기처짐 추세식을 나타냄.
- 모든 실험체에 대한 ISO 20392 예측식의 결정계수는 0.90이상으로 높게 나타났으며, 이러한 결과는 완충재의 장기처짐에 대한 예측의 적절함을 보여줌.

나. 선형회귀 분석

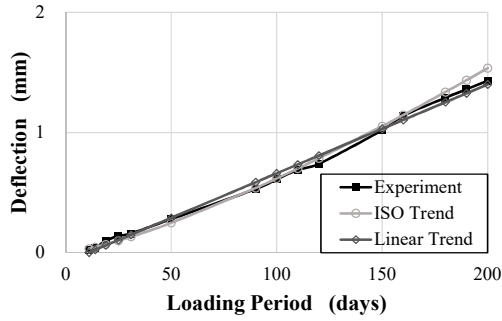
- 장기 하중을 받는 바닥완충재의 처짐이 선형적으로 증가하는 특성을 바탕으로 간편한 처짐 선형추세식을 작성함.
- ISO 20392에 의한 완충재의 처짐 평가와 동일하게 7일부터 처짐 수렴시점까지 데이터를 활용하였으며, 실험체별로 선형추세식을 정리함.

[표 3.2.5.c] 선형회귀 분석에 따른 바닥완충재의 장기처짐 추세식

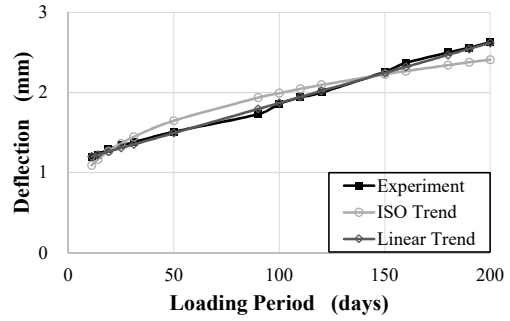
Material	Trend Equation	Determination Coefficient (r^2)
DM1-250N	$y(t) = 0.0074t - 0.0794$	0.99
DM2-250N	$y(t) = 0.0075t + 1.12$	0.99
DM3-250N	$y(t) = 0.1278t + 1.8326$	0.97
DM4-250N	–	–
DM5-250N	$y(t) = 0.0125t + 3.791$	0.99
DM6-250N	$y(t) = 0.0139t + 5.2826$	0.99
DM7-250N	–	–
DM8-250N	$y(t) = 0.0066t + 0.909$	0.97
DM1-500N	$y(t) = 0.009t + 2.3962$	0.99
DM2-500N	$y(t) = 0.0098t + 3.1722$	0.99
DM3-500N	$y(t) = 0.1661t + 5.7075$	0.96
DM4-500N	–	–
DM5-500N	$y(t) = 0.0101t + 5.357$	0.99
DM6-500N	$y(t) = 0.0097t + 7.5704$	0.99
DM7-500N	–	–
DM8-500N	$y(t) = 0.0042t + 0.9374$	0.95

- 선형추세식의 기울기는 장기처짐의 변화 정도를 나타내며, 이는 완충재의 재질과 관계가 있는 것으로 판단됨.
- 선형추세식의 기울이는 PE-EPS2-EPS 순으로 크게 나타남.
- 선형추세식의 기울기는 밀도와는 낮은 관계성을 보이며, 이러한 결과는 완충재의 밀도보다는 재질이 처짐에 영향을 크게 미치는 것으로 판단됨.
- 모든 실험체의 추세식 결정계수는 0.95이상으로 높게 나타났으며, 이는 실제 처짐의 경향이 거의 선형적인 경향으로 나타난다는 것을 보여줌.

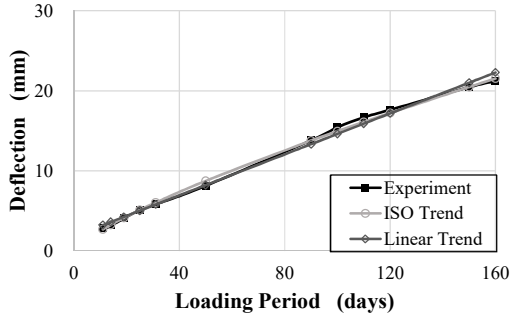
다. 예측식과 실제 처짐 간의 비교 평가



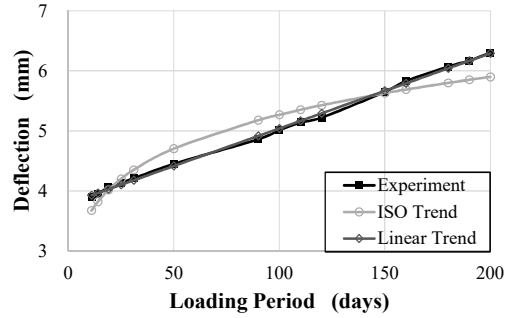
a) DM1



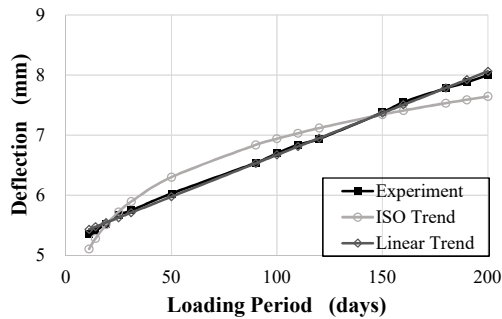
b) DM2



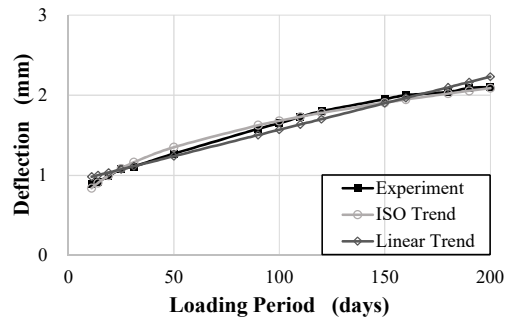
c) DM3



d) DM5



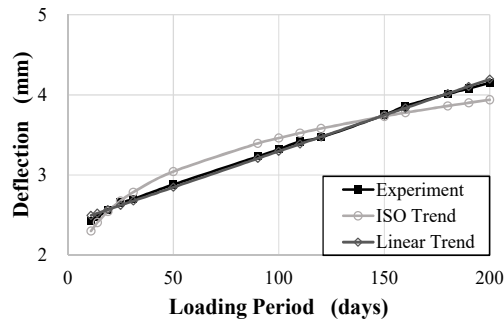
e) DM6



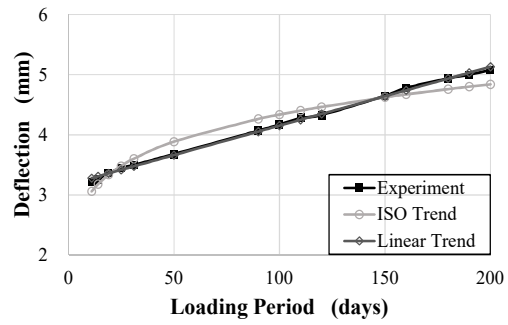
f) DM8

[그림 3.2.5.a] 하중가력기간에 따른 바닥완충재의 장기처짐 변화 (250N 하중 재하)

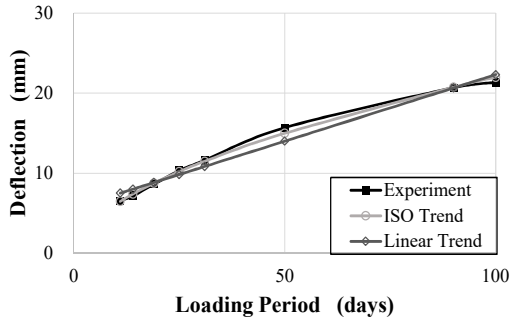
- [그림 3.2.5.a]는 250N의 하중을 받는 완충재에 대하여 7일부터 각 실험체의 처짐 수렴시점까지의 실험값과 ISO 20392 및 선형회귀분석에 의한 처짐과의 비료를 나타냄.
- 장기하중을 받는 3번을 제외한 7종 완충재에 대하여 실제 처짐과 ISO 20392에 따른 처짐의 최대값을 비교하면 0.11mm~0.40mm의 차이를 보이고 DM3-250의 경우 0.61mm의 차이를 보임.
- 장기하중을 받은 3번을 제외한 7종 완충재에 대하여 실제 처짐과 선형회귀 분석에 따른 처짐의 최대값을 비교하면 0.06~0.13mm의 차이를 보이고 DM3-250의 경우 1.07mm의 차이를 보임.
- 처짐 실험을 결과를 바탕으로 DM3-250 실험체는 처짐이 선형적으로 증가하지 않고 곡선 형태로 증가하지만 그 외 나머지 실험체에서는 처짐이 선형적으로 증가함.



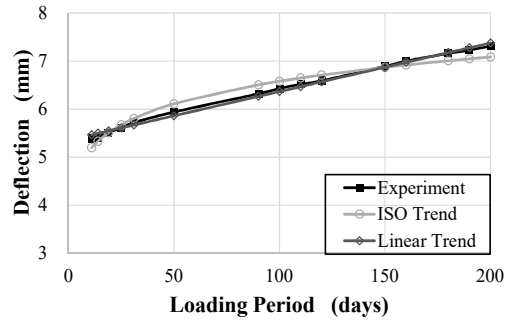
a) DM1



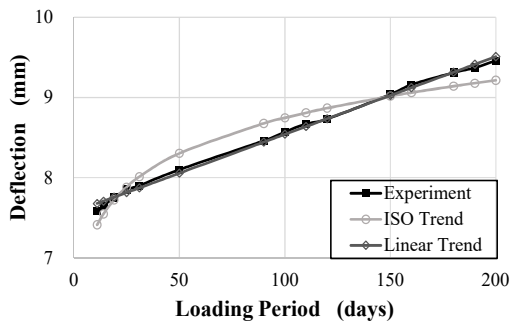
b) DM2



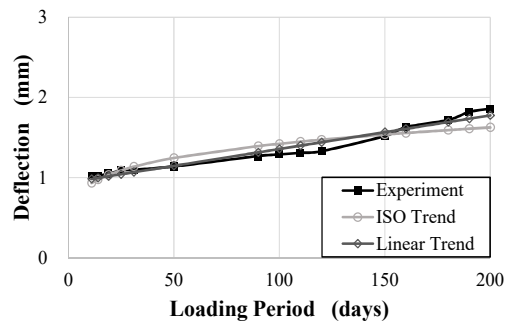
c) DM3



d) DM5



e) DM6



f) DM8

[그림 3.2.5.b] 하중가력기간에 따른 바닥완충재의 장기처짐 변화 (500N 하중 재하)

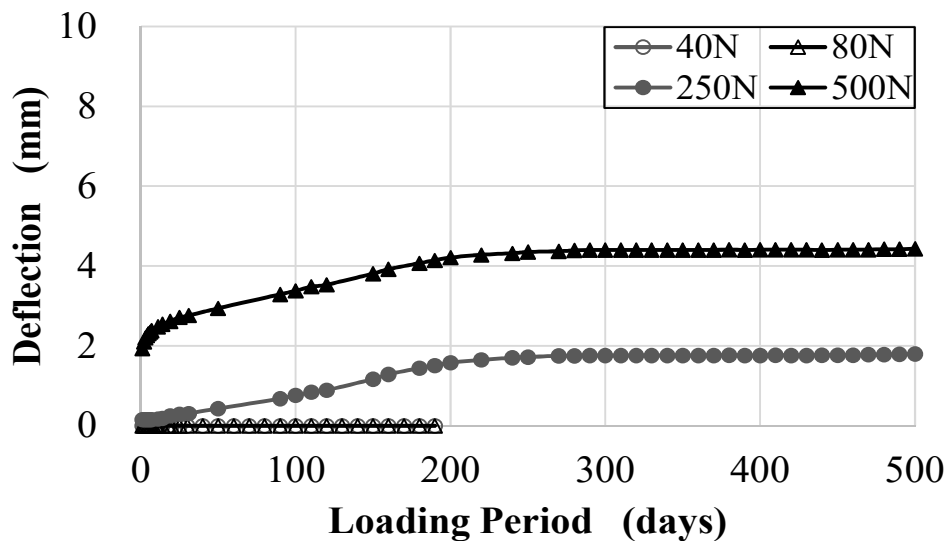
- [그림 3.2.5b]는 500N의 하중을 받는 완충재에 대하여 7일부터 각 실험체의 처짐 수렴시점까지의 실험값과 ISO 20392 및 선형회귀분석에 의한 처짐과의 비료를 나타냄.
- 장기하중을 받는 3번을 제외한 7종 완충재에 대하여 실제 처짐과 ISO 20392에 따른 처짐의 최대값을 비교하면 0.21mm~0.25mm의 차이를 보이고 DM3-500의 경우 0.70mm의 차이를 보임.
- 장기하중을 받은 3번을 제외한 7종 완충재에 대하여 실제 처짐과 선형회귀 분석에 따른 처짐의 최대값을 비교하면 0.06~0.11mm의 차이를 보이고 DM3-500의 경우 1.69mm의 차이를 보임.
- 선형회귀 분석이 ISO 20392에 따른 처짐보다 실제 오차가 적음.
- 이는 처짐 증가경향과 관련이 있는 것으로 판단됨.
- DM3-250, DM3-500의 경우는 처짐 증가형태가 선형이 아닌 로그형태의 곡선을 나타내기 때문에 다른 실험체들에 비해 오차가 크게 나타남.

3.2.6 장기변형 표준안 제시

가. 장기하중을 받는 바닥완충재의 장기변형 성능기준 검토/분석

- 바닥완충재의 장기 변형을 측정하는 기준은 ISO 20392(540일 실험값을 활용한 추세식 작성을 통한 예측 방법)만 있으며 긴 시간동안의 실험이 수행되어야 하기 때문에 실제 바닥완충재가 시공되는 현장에서 사용하기에는 비효율적임.
- 장기 변형을 직접적으로 측정, 예측하는 기준이외에 변형에 대한 기준은 KS F 2873 잔류변형률 측정이 있으나, 장기 하중이 가해진 상태가 아닌 11분간의 단기 하중 상태에 근거한 측정 기준임.
- 바닥완충재에 30일 간 하중을 가력해 본 결과, 바닥완충재가 초기의 두께를 유지하지 못하고 큰 변형이 나타나는 것으로 확인되었고, 하중을 제거한 이후에도 원래의 두께를 회복하지 못하는 것 또한 실험으로 나타남.
- 바닥완충재는 시공된 이후 마감층, 가구 등에 의해 장기간 하중을 받게 되므로 시간이 지남에 따라 변형이 나타나고 이러한 변형이 공동주택 거주자들에게 피해를 줄 수 있음.
- 바닥완충재의 장기 변형 표준안 제시를 통해 장기 변형을 예측하고 예측을 통해 변형으로 인해 생길 수 있는 문제(바닥 처짐, 균열 등)에 대처할 수 있을 것으로 판단됨.

나. 장기변형 결과도출



a) DM1

- 8종 바닥완충재의 실험 결과 4,7번 실험체를 제외한 6종의 실험체에서 변형 경향이 유사하게 나타남. 4,7번 실험체는 강성이 커서 변형이 거의 나타나지 않음.
- 바닥완충재의 장기 변형 실험 결과 하중 상태에 따라 변형에 다르게 나타남.
- 40N, 80N의 하중(상시하중)에서는 변형이 크게 나타지지 않고 초기 두께를 유지하지만 250N, 500N 하중(집중하중)에서는 변형이 초기에 크게 증가하다가 특정 시점 이후로 변형이 수렴하는 수렴구간이 나타남.
- 집중하중이 작용하는 구간에서 바닥완충재에 큰 변형이 발생될 수 있고 변형이 발생하는 구간에서 공동주택 바닥판에 균열, 처짐과 같은 사용성에 문제가 발생할 것으로 판단됨.
- 장기 변형 실험결과를 바탕으로 단기 하중 상태와 장기 하중 상태에서의 바닥완충재의 거동 특성을 파악할 수 있었고 이 거동 특성을 활용하여 장기 변형을 예측할 수 있는 추세식 작성을 수행함.

다. 시험표준안 제시

- 재질, 밀도, 바닥형상을 고려한 바닥완충재의 장기 변형을 선형적 증가 구간과 수렴 구간으로 나타나는 것을 활용한 선형 회귀식 제안
- 수렴 구간 이전을 선형으로 변형을 예측하고 수렴 구간 이후는 변형이 변하지 않고 유지되며 이러한 특성은 540일 간의 장기 변형 실험 결과를 통해 확인
- 약 7일 간의 실험 결과를 이용하여 장기 변형 측정 가능

<장기 변형 시험표준안 제시>

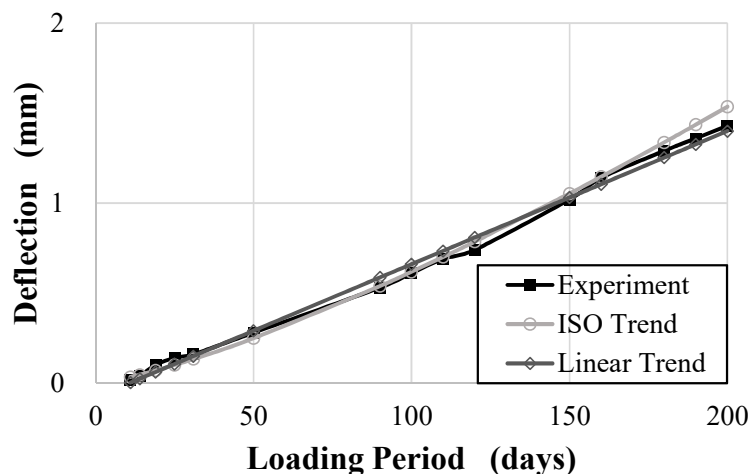
바닥완충재 성능	기존 KS 기준	장기 변형 시험 표준안
장기 변형	- KS F 2873 잔류변형률 측정 시험만 존재 - 하중이 가해진 상태의 바닥완충재의 장기변형 미고려	- 재료, 밀도, 바닥형상을 고려한 바닥완충재의 장기 변형 특징을 활용한 선형 예측식 작성 - 변형 증가 구간 + 수렴 구간 - $Y = At + B$ (선형 회귀식)

<장기 변형 예측식>

장기 변형 예측식	변형 증가 구간(mm)	변형 수렴 구간(mm)
바닥완충재	$Y = At + B$ $A =$ 변형 증가량 $B =$ 선형식의 절편 $X <$ 수렴 시점(일)	$Y = C$ $C =$ 수렴 시점의 변형값

<장기 변형 예측식 활용 예>

장기 변형 예측식	변형 증가 구간(mm)	변형 수렴 구간(mm)
DM1- 250N (EPS1종)	$Y = 0.0074t - 0.0794$ $A = 0.0074$ $B = -0.0794$ $X < 200(\text{일})$	$Y = 1.43$ $C = 1.43$



3.3 바닥완충재의 기포콘크리트 및 모르타르 타설에 의한 장기변형 실험

3.3.1 실험목적

- 실제 공동주택 바닥구조와 같이 바닥완충재 상부에 기포콘크리트 및 마감몰탈을 타설하였을 때, 침수와 모르타르 침투로 인한 바닥온돌층에 포함된 바닥완충재의 장기처짐에 미치는 영향을 알아보고자 함.
- 공동주택에 사용되는 층간소음 억제 바닥온돌층은 장기간 작용하는 하중에 의하여 구조 성능이 변화할 가능성이 높음.
- 특히, 하중의크기, 작용위치, 마감모르타르와 기포콘크리트의 재료 특성에 의하여 뜬바닥 구조의 구조 성능이 변화함.

3.3.2 실험변수

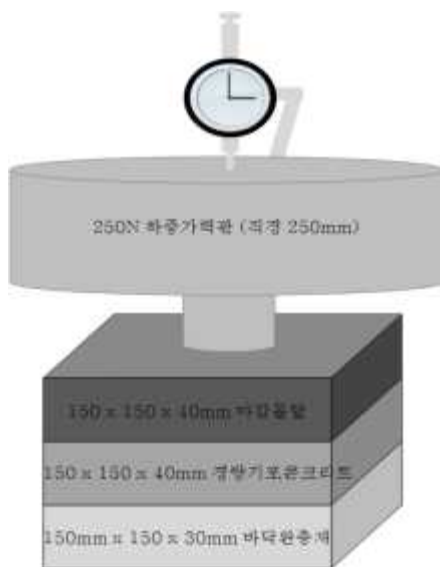
[표 3.3.2] 장기변형 측정 실험체의 특성

실험체 번호	시료명	바닥형상	밀도 (kg/m ³)	초기두께 (mm)	단면적 (cm ²)	실험체 무게 (g)
1	EPS(1종)	평판형	13.20	28.94	225	8.6
2	EPS(1종)	골판형	12.08	29.80	225	8.1
3	PO	평판형	23.96	30.98	225	16.7
4	EPS(1종)	평판형	24.70	29.33	225	16.3
5	EPS(2종)	골판형	25.53	31.85	225	18.3
6	EPS(2종)	골판형	15.40	30.89	225	10.7
7	EPS(1종)	평판형	24.12	29.30	225	15.9
8	EVA	엠보형	59.26	30.15	225	40.2

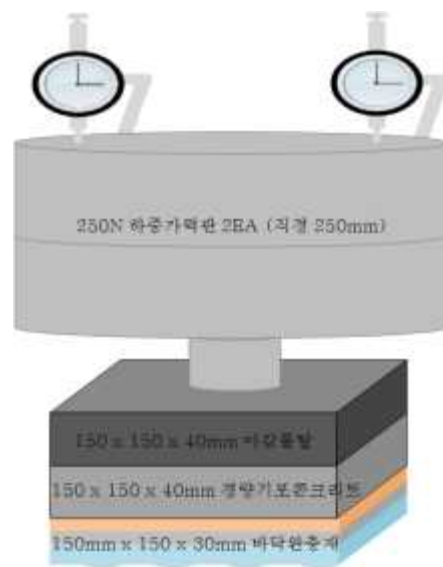
- 층간소음 억제를 위한 바닥완충재의 장기변형 측정 실험에서는 [표 3.3.2]과 같이 8가지 종류의 바닥완충재를 변수로 하였음.
- 바닥완충재의 종류는 EPS계통 6종과 PO계통 1종, EVA계통 1종임.
- EPS 6종은 각각 밀도와 바닥형상이 다름.
- 실험체에는 250N, 500N 2종류의 하중을 가력함.
- 150mm×150mm 실험체 전면이 하중을 고르게 받을 수 있도록 직경 220mm의 철판을 하중판을 사용하여 가력함.

3.3.3 실험방법 및 측정

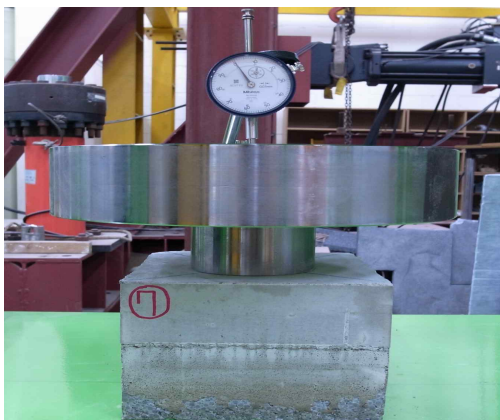
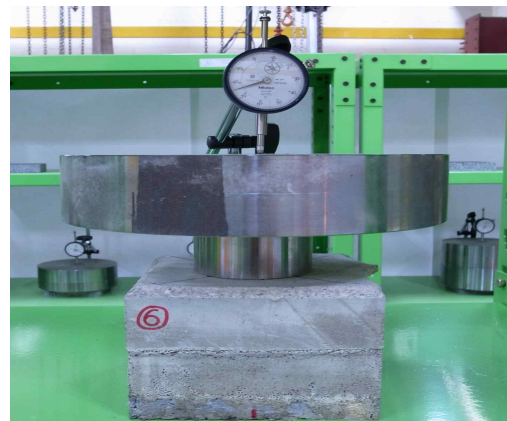
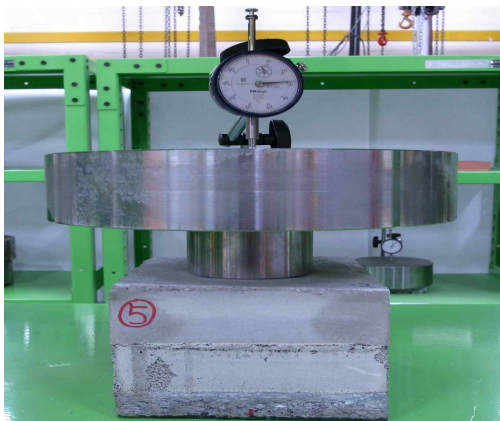
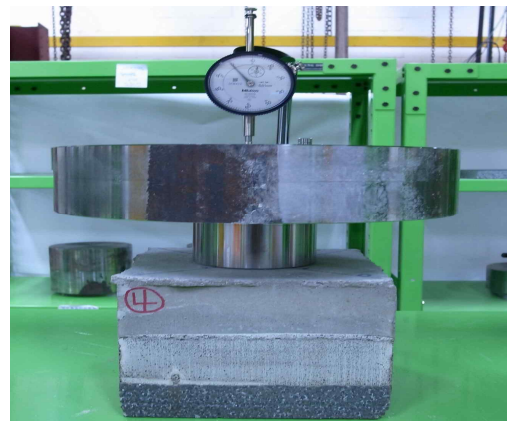
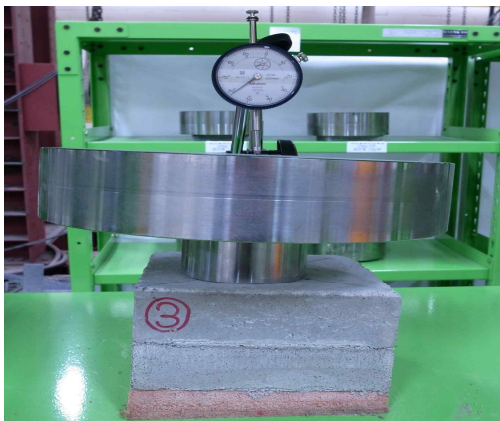
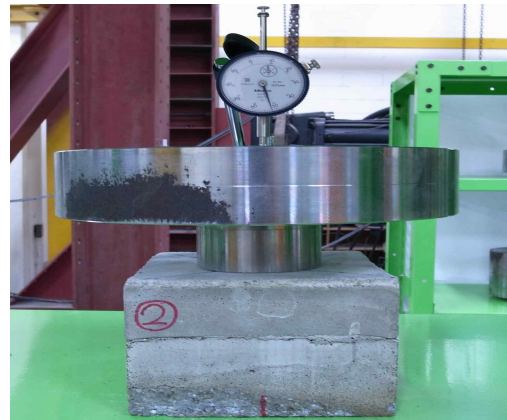
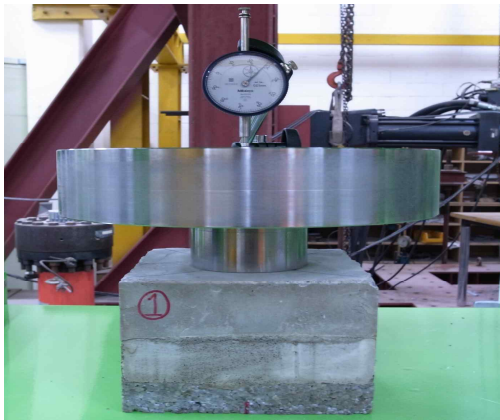
- 바닥완충재-경량기포콘크리트-마감물탈-하중판 순의 표준바닥구조와 동일한 조건을 구성함.
- 8종류의 실험체를 150mm×150mm으로 절단한 후에 직경 250mm의 철제 가력판을 이용하여 가력함.
- 실험체는 하중의 크기에 따라서 동일한 무게와 크기의 철제 가력판을 이용하여 250N과 500N을 하중 조건을 구성하였음.
- 지점하중판을 설계하여 완충재 전면에 하중이 작용하도록 하중 조건을 구성함.
- 실험체의 처짐은 철제 가력판을 실험체 위에 설치한 후, 다이얼게이지를 설치하여 측정하였음. 500N 재하의 경우, 하중판 2개를 적재하면서 실험체의 높이가 높아져 마그네틱 베이스 팔이 하중판 중앙부에 닿지 않아 양 끝에 다이얼게이지 2개를 설치하여 평균값을 내었음.
- 다이얼게이지 설치 이후에는 시간의 흐름에 따라 변형을 측정하였음.
- 16개 실험체 모두 동시에 가력판을 설치하고, 2분 후 동시에 다이얼게이지를 설치 시 발생하는 움직임에 의해 발생하는 오차를 최소화하였음.



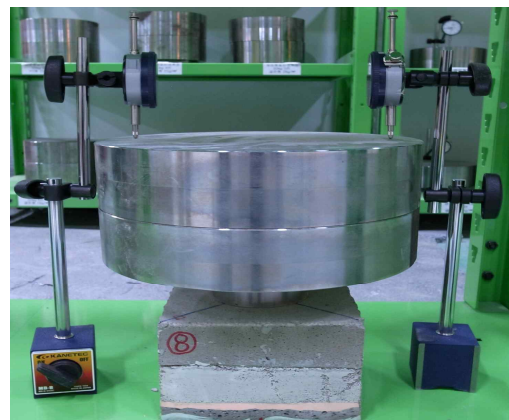
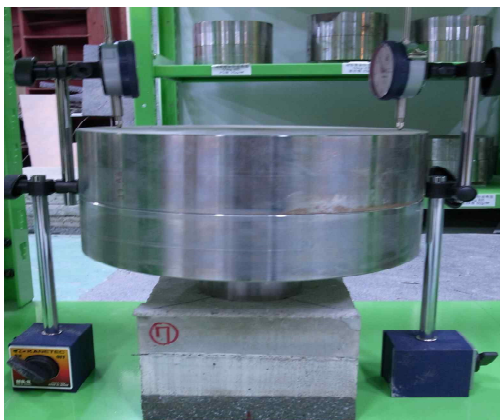
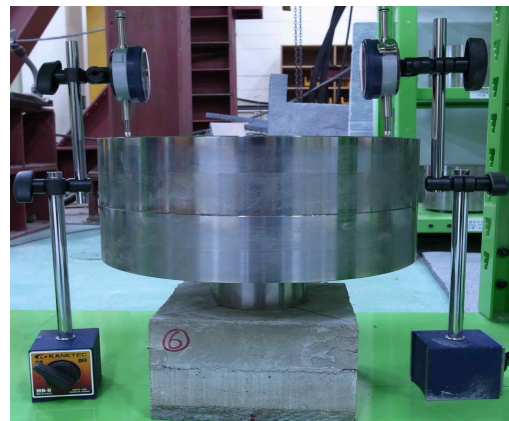
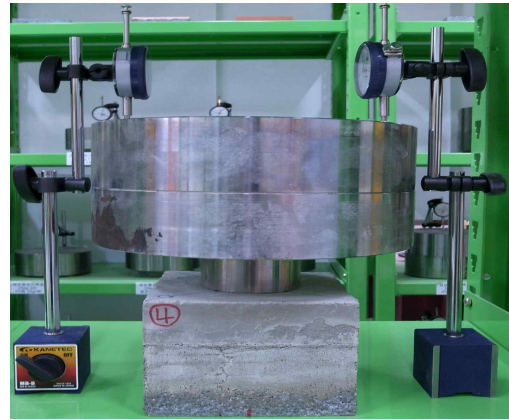
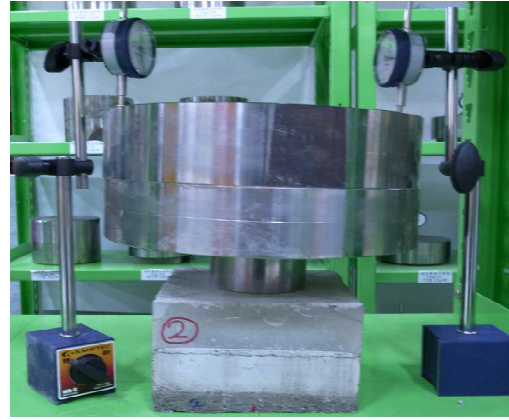
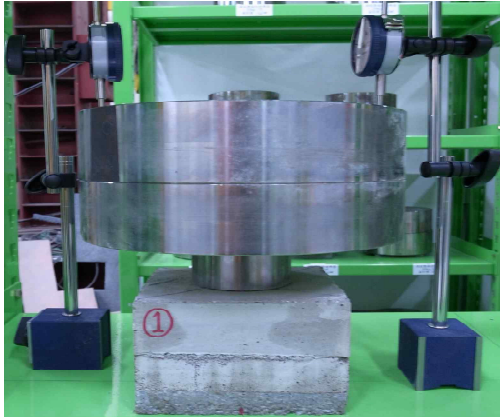
[그림 3.3.3.a] DM1 (EPS1,
평판형, 13kg/m³)의 250N 가력
바닥온돌층 장기처짐 실험 모델



[그림 3.3.3.b] DM1 (EVA,
엠보형, 59kg/m³)의 250N 가력
바닥온돌층 장기처짐 실험 모델

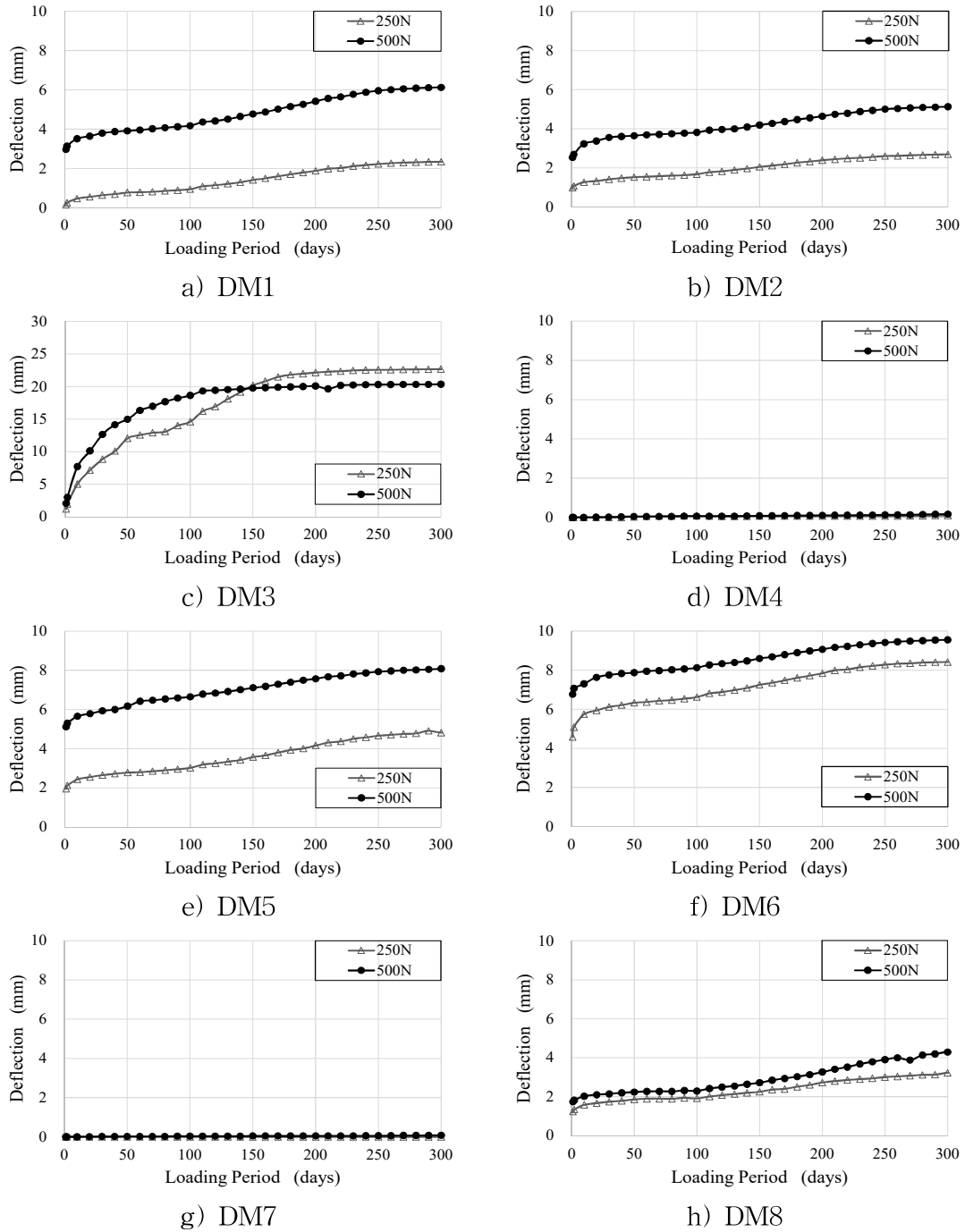


[그림 3.3.3.c] 바닥온돌층 장기변형 250N 가력 실험체 각각 Setting 사진



[그림 3.3.3.d] 바닥온돌층 장기변형 500N 가력 실험체 각각 Setting 사진

3.3.4 실험결과



[그림 3.3.4] 하중가력기간에 따른 바닥온돌층의 장기처짐 변화

- 완충재 상부에 기포콘크리트가 타설될 경우에 시멘트페이스트 등이 바닥완충재에 침투할 수 있으며, 이로 인하여 변화하는 바닥완충재의 장기처짐을 평가함.
- [그림 3.3.4]는 8종 8종 완충재의 기포콘크리트 및 마감모르타르 타설에 의한 바닥완충재의 장기처짐을 나타냄.
- 바닥온돌층 장기처짐 실험은 300일간 진행하였음.

[표 3.3.4] 300일간 하중을 받은 바닥온돌층의 처짐 증가량 (mm)

실험체명	250N	500N
DM1	2.35	6.13
DM2	2.69	5.12
DM3	22.67	20.34
DM4	0.10	0.17
DM5	4.82	8.08
DM6	8.42	9.55
DM7	0	0.08
DM8	2.33	3.39

3.3.5 실험분석

[표 3.3.5] 하중가력기간 300일 시점에서

완충재로만 구성된 실험체에 대한 바닥온돌층의 장기처짐 변화량 (mm)

실험체명	바닥온돌층 - 완충재로만 구성된 실험체 (mm)	
	250N	500N
DM1	+0.59	+1.73
DM2	+0.11	-0.18
DM3	+0.34	-0.32
DM4	-	-
DM5	-1.39	+3.66
DM6	+0.15	-0.12
DM7	-	-
DM8	-0.43	-

- [표 3.3.5]는 완충재로만 구성된 실험체와 바닥온돌층으로 구성된 실험체의 장기처짐 차이값을 나타냄.
- 250N의 하중에서는 DM5와 DM8의 경우일 때 바닥온돌층의 처짐이 완충재로만 구성된 실험체보다 적게 발생하였고 반대로 DM1, DM2, DM3, DM6의 경우 오히려 바닥온돌층의 처짐이 더 많이 발생함.
- 500N의 하중에서는 DM2, DM3, DM6의 경우일 때 바닥온돌층의 처짐이 완충재로만 구성된 실험체보다 적게 발생하였으며, DM1, DM5의 경우에는 바닥온돌층의 처짐이 더 많이 발생함.
- 처짐이 적게 발생한 실험체의 경우 바닥완충재 옆면 혹은 바닥면에 시멘트페이스트가 침투 및 경화에 의해 바닥완충재에 강성을 더하여 처짐 발생이 감소된 것으로 판단됨.
- 처짐이 증가한 실험체의 경우 시멘트페이스트의 영향보다 기포콘크리트 타설시 물의 침투로 인한 처짐 발생이 증가로 판단됨.

3.4 바닥완충재의 침수에 의한 장기변형 실험

3.4.1 실험목적

- 공동주택은 콘크리트 타설 시 침수 및 옥상층 누수 등으로 인하여 바닥완충층의 주변 환경이 변화될 가능성이 높음.
- 장기간의 하중이 가해지는 상황에서 침수 등과 같은 주변 환경이 변화할 경우에 마감모르타르, 기포콘크리트, 완충재의 재료특성 변화에 의하여 뜬바닥 구조의 구조 성능 및 층간소음억제 성능이 변화함.
- 따라서 침수시킨 바닥완충재에 하중을 가력하였을 때, 장기변형에 대해 평가하고자 함.

3.4.2 실험변수

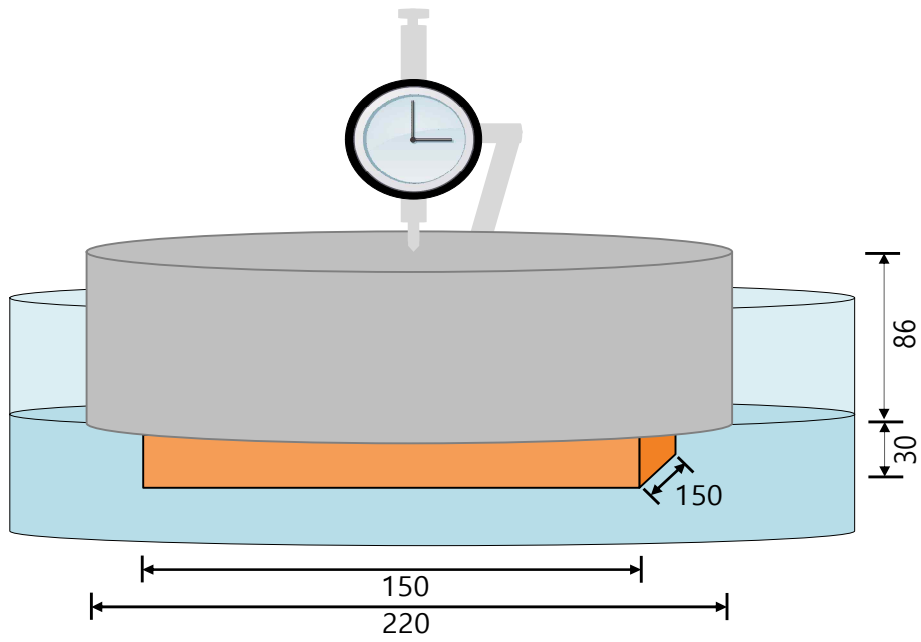
[표 3.4.2] 장기변형 측정 실험체의 특성

실험체 번호	시료명	바닥형상	밀도 (kg/m ³)	초기두께 (mm)	단면적 (㎠)	실험체 무게 (g)
1	EPS(1종)	평판형	13.20	28.94	225	8.6
3	PO	평판형	23.96	30.98	225	16.7
4	EPS(1종)	평판형	24.70	29.33	225	16.3
6	EPS(2종)	골판형	15.40	30.89	225	10.7
8	EVA	엠보형	59.26	30.15	225	40.2

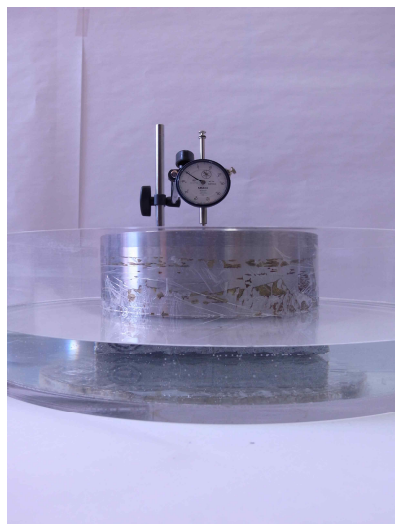
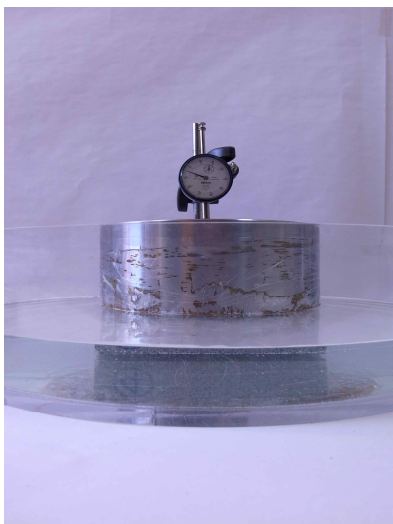
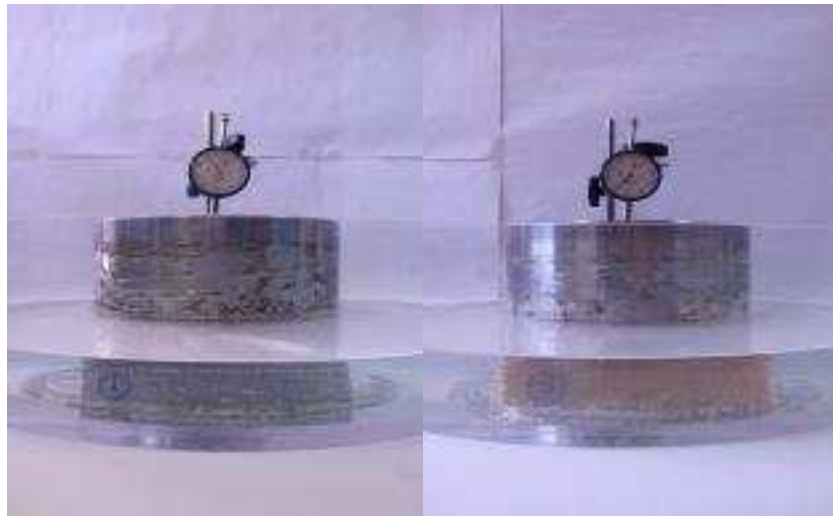
- [표 3.4.2]에 실험에 사용된 바닥완충재의 초기상태의 물리적 특성을 정리하였음.
- 바닥완충재의 장기 구조 성능을 평가하기 위하여 본 실험에 사용된 바닥완충재는 1종 EPS(Expanded Polystyrene), 2종 EPS(Expanded Polystyrene), PO(Polyethylene), EVA(Ethylene-vinyl acetate)로 총 4가지 종류의 재질을 선정하여 사용하였음.
- EPS 3종은 각각 밀도와 바닥형상이 다름.
- 실험체에는 80N,250N 2종류의 하중을 가력함.
- 150mm×150mm 실험체 전면이 하중을 고르게 받을 수 있도록 직경 220mm의 철판을 하중판을 사용하여 가력함.

3.4.3 실험방법 및 측정

- 5종류의 실험체를 150mm×150mm으로 절단한 후에 수조에 담긴 물에 침수시키자마자 직경 250mm의 철판 가력판을 이용하여 가력함.
- 실험체는 하중의 크기에 따라서 동일한 무게와 크기의 철판 가력판을 이용하여 250N의 하중 조건을 구성하였음.
- 실험체의 처짐은 철판 가력판을 실험체 위에 설치한 후, 다이얼게이지를 설치하여 측정하였음.
- 다이얼게이지 설치 이후에는 시간의 흐름에 따라 변형을 측정하였음.
- 250N 실험체 5종은 모두 동시에 가력판을 설치하고, 2분 후 동시에 다이얼게이지를 설치 시 발생하는 움직임에 의해 발생하는 오차를 최소화하였음.

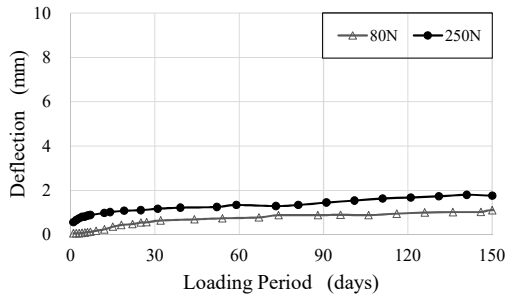


[그림 3.4.3.a] 장기변형 250N 가력 침수 실험체 모형

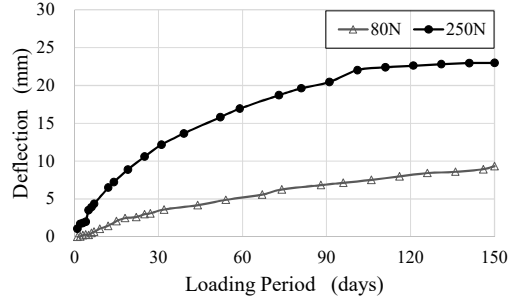


[그림 3.4.3.b] 완충재 침수 후, 장기변형 250N 가력 실험체 각각 Setting 사진

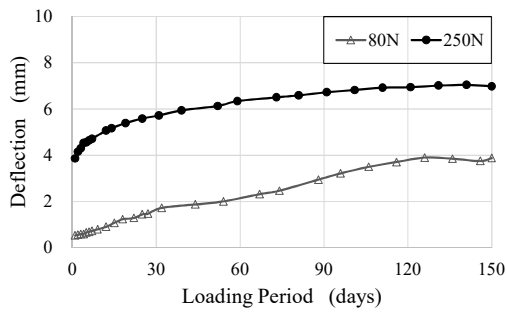
3.4.4 실험결과



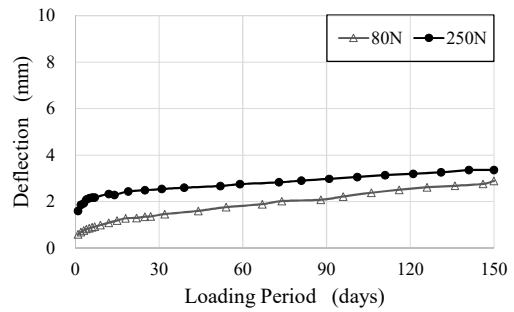
a) DM1



b) DM3



c) DM6



d) DM8

[그림 3.4.4] 침수 시, 150일간 하중을 받은 바닥완충재의 장기처짐 변화

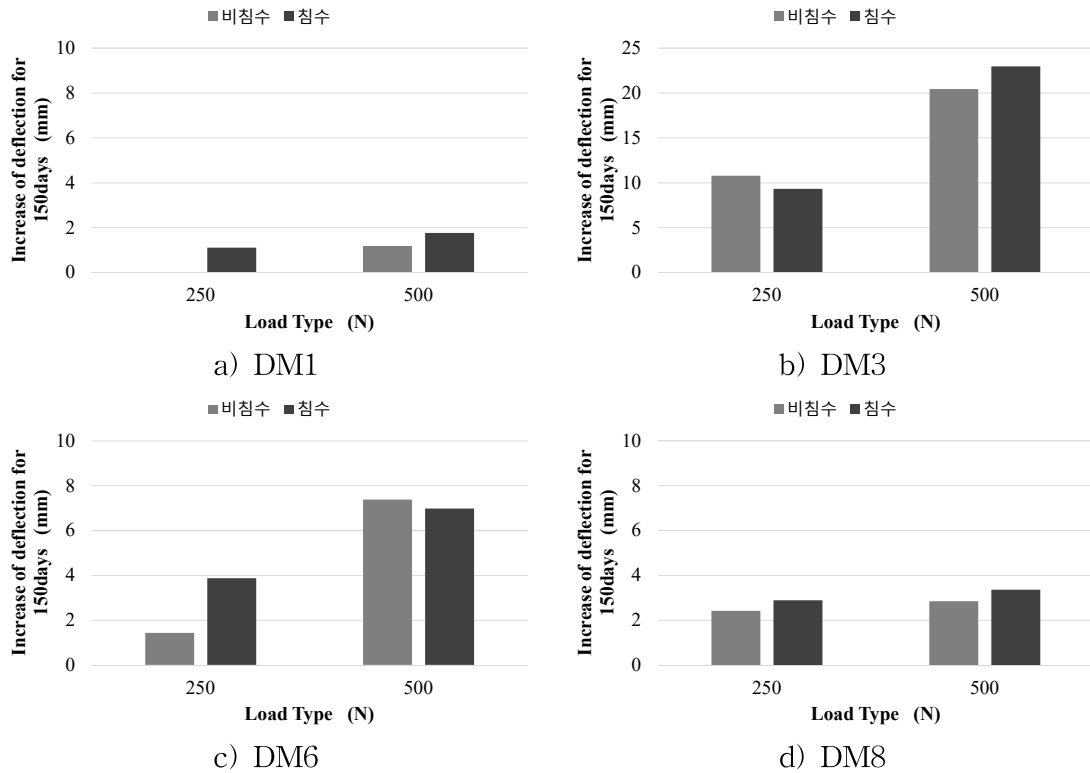
- [그림 2.4.4]는 150일간 80N과 250N의 하중 재하에 따른 바닥완충재의 침수 시 장기처짐 변화를 나타냄.
- DM3-80N, DM3-250N 실험체의 경우 처짐이 발생하지 않아 결과값에서 제외함.
- 3번 실험체를 제외한 나머지 실험체들에서는 처짐 증가 후, 실험체별로 특정 시점부터 처짐이 더 이상 증가하지 않고 일정한 경향을 보임.

[표 3.4.4] 침수 시, 150일간 하중을 받은 바닥완충재의 처짐 증가량 (mm)

실험체명	80N	250N
DM1	1.77	1.11
DM3	9.33	22.97
DM6	3.88	6.98
DM8	2.89	3.36

3.4.5 실험분석

- 바닥온돌층 구성을 위한 완충재 상부에 기포콘크리트 및 마감모르타르 타설 시, 완충재에 물이 침투하게 됨.
- 또한, 기포콘크리트 내의 온돌파이프 누수와 같은 환경의 변화에 따라 완충재가 침수상황에 노출될 수 있음.



[그림 3.4.5] 침수 유무에 따른 바닥완충재의 장기처짐 변화

[표 3.4.5] 하중가력기간 150일 시점에서
비침수 완충재에 대한 침수 완충재의 장기처짐 변화량

실험체명	침수 완충재 - 비침수 완충재 (mm)	
	80N	250N
DM1	+1.17	+0.06
DM3	-1.45	+2.52
DM4	-	-
DM6	+2.44	-0.40
DM8	+0.47	+0.51

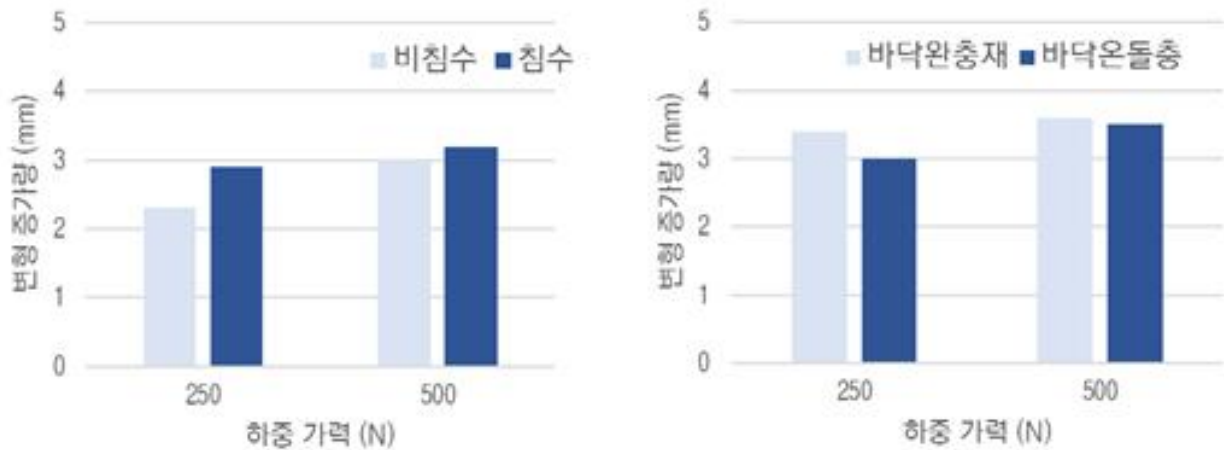
- [그림 3.4.5]는 침수 유무에 따른 바닥완충재의 장기 처짐 차이를 나타냄.
- 침수 실험기간인 150일을 기준으로 재하하중 80N과 250N에서 침수와 비침수 시 장기처짐을 비교하였으며, 전체적으로 침수된 상황에서 바닥완충재의 처짐이 더 많이 발생.
- 하지만, 실험체에 따라서는 침수시의 처짐이 더 작게 나오는 경우도 존재함.
- 침수의 영향이 처짐에 미치는 경향이 일정하지는 않지만 침수 실험체와 비침수 실험체와의 처짐이 최소 0.06mm부터 최대 2.52mm까지 차이가 나는 것으로 볼 때, 각 완충재의 특성에 따라 처짐에 영향을 줄 수 있는 것으로 확인됨.

3.4.6 환경요인에 의한 장기변형 표준안 제시

가. 장기하중을 받는 바닥완충재의 환경요인에 의한 장기변형 성능기준 검토/분석

- 바닥완충재는 바닥판에 시공될 때 콘크리트 슬래브 위에 놓이게 되고 상부에 기포 콘크리트와 마감 모르타르가 타설됨.
- 기포 콘크리트와 마감 모르타르가 타설될 경우 바닥완충재 외/내부로 물이나 모르타르와 같은 유동성 물질들이 침투할 수 있음.
- 현행 KS 기준에서는 바닥완충재만을 가지고 실험하여 성능을 측정하기 때문에 실제 환경에서의 요인들에 대한 영향을 반영하지 못함.

나. 장기변형 결과도출



- 바닥완충재만 있을 경우와 바닥완충재에 환경요인(침수, 바닥온돌층 시공)이 추가 되었을 경우를 비교 했을 때 변형 결과가 다르게 나타남.
- 침수에 의해서는 바닥완충재의 변형이 증가하는 경향이 나타나는데 이는 바닥완충재의 침수율과 관련이 있고 물이 침투되었을 경우 변형 저항 능력이 떨어지는 결과를 나타냄.
- 기포 콘크리트와 마감 모르타르가 타설 되었을 경우, 바닥완충재의 변형이 감소하는 경향이 나타나는데 이는 바닥완충재 외/내부에 모르타르가 침투한 이후 경화되어 바닥완충재의 강성이 커져 변형 저항 능력이 커지는 것으로 판단됨.

다. 시험표준안 제시

- 침수에 의한 영향은 바닥완충재의 재질, 밀도, 바닥형상과 무관하게 변형을 증가시키고 바닥온돌층 환경에 의한 영향은 바닥완충재의 변형을 감소시키는 경향을 나타냄.
- 환경에 의한 변형의 영향은 크지 않지만 증가와 감소의 경향이 나타남.
- 보다 다양한 조건에서의 추가 실험 및 검토를 통해 정밀한 판단이 필요.

<환경에 의한 바닥완충재의 변형>

환경 요인	기존 KS 기준	표준안 제시
침수 (물)	바닥완충재의 환경 요인에 의한 변형 영향 미반영	바닥완충재의 재질, 밀도, 바닥형상과 무관하게 침수에 의해 변형 증가
바닥온돌층 (기포 콘크리트, 마감모르타르)		바닥온돌층 시공에 의해 변형 감소

3.5 바닥완충재의 동탄성계수 및 손실계수 실험

3.5.1 실험목적

- 현재 일반적으로 사용되고 있는 바닥완충재의 시간에 따른 동탄성계수와 손실계수의 변화를 하중의 크기에 따라 평가하였음.
- 동적 특성에 따라 강도의 변화를 예측할 수 있는 동탄성계수와 에너지를 흡수할 수 있는 능력을 의미하는 손실계수는 바닥완충재의 장기성능을 평가에서 핵심이 되는 영향 요소 중 하나이므로 장기변형 실험과 동일한 크기의 실험체를 기준으로 동일한 하중판을 이용하여 동시에 진행하여 장기변형과의 비교가 가능하도록 데이터를 분석하였음.
- 장기변형과 동일하게 약 500일 간의 장기변형에 대한 최종적인 평가를 목적으로 함.
- 충격음억제 효과는 바닥완충재의 동탄성계수와 밀접한 관계가 있어, 동탄성계수가 증가하면 충격음억제효과는 일반적으로 감소하며 동탄성계수를 낮추어야 하는데 특별한 고려 없이 재료의 밀도만을 낮추어 동탄성계수를 낮출 경우에 바닥완충재의 구조성능이 낮아짐.
- 시간이 경과함에 따라서 변화하는 바닥완충재의 구조성능과 열이나 수분에 의하여 발생하는 완충재의 장기 구조성능 변화를 검토하고 평가 기준을 정함으로써 바닥완충재가 시간이 경과한 이후에 침하함으로써 발생하는 경제적인 손실을 방지할 수 있기 때문임.
- 이 연구에서는 하중 가력 전의 동탄성계수와 하중 가력후의 동탄성계수를 비교하였음.

3.5.2 실험변수

[표 3.5.2] 장기변형 측정 실험체의 특성

실험체 번호	시료명	바닥형상	밀도 (kg/m³)	초기동탄성계수 (MN/m³)	초기손실계수
1	EPS(1종)	평판형	13.20	10.30399	0.04844
2	EPS(1종)	골판형	12.08	4.59541	0.02936
3	PO	평판형	23.96	9.95054	0.09859
4	EPS(1종)	평판형	24.70	29.25955	0.08008
5	EPS(2종)	골판형	25.53	3.31816	0.02786
6	EPS(2종)	골판형	15.40	3.39959	0.02249
7	EPS(1종)	평판형	24.12	42.79966	0.07258
8	EVA	엠보형	59.26	5.18463	0.15122

- 바닥완충재의 동탄성계수 및 손실계수 장기 측정 실험에서는 [표 3.5.2]과 같이 장기변형 실험체와 동일한 8가지 종류의 바닥완충재를 변수로 하였음.
- 바닥완충재의 종류는 EPS계통 6종과 PO계통 1종, EVA계통 1종임.
- EPS 6종은 각각 밀도와 바닥형상이 다름.
- 실험체에는 250N, 500N 2종류의 하중을 가력함.
- 150mm×150mm 실험체 전면이 하중을 고르게 받을 수 있도록 직경 220mm의 철판을 하중판을 사용하여 가력함.
- 장기변형 실험체에서 다이얼게이지를 설치하지 않은 조건임.

3.5.3 실험방법 및 측정

가. 동탄성계수 측정 방법

- 실험체의 동탄성계수는 FFT(Fast Fourier Transform)분석기를 이용하여 측정된 데이터를 활용함. FFT의 측정 순서는 다음과 같음.
 - ① 하중을 가력한 후 시간의 흐름에 따라 실험체에서 하중판을 제거함.
 - ② FFT분석기가 소음(dB)-진동수(Hz) 스펙트럼 작성을 위하여 가속도계를 설치할 수 있도록 200mm×200mm크기의 8kg의 철판을 실험체 상단에 설치함.
 - ③ FFT 분석기와 가속도계, 임팩트해머를 연결함.
 - ④ 임팩트해머를 이용하여 실험체 상단의 철판에 충격을 줌. 충격을 줄 때, 한 지점에 순간 충격이 가해질 수 있도록 조정함.
 - ⑤ 가속도계를 통해 FFT분석기에서 소음(dB)-진동수(Hz) 스펙트럼이 작성되며, 소음이 최대값인 진동수를 찾음.
 - ⑥ FFT분석기의 스펙트럼으로부터 찾은 진동수를 다음 식에 대입하여 동탄성계수를 계산함.

$$\text{동탄성계수} = \frac{(2\pi \times f_0)^2 \times \text{상단철판의 중량}}{\text{상단철판의 단면적}}$$

나. 손실계수 측정 방법

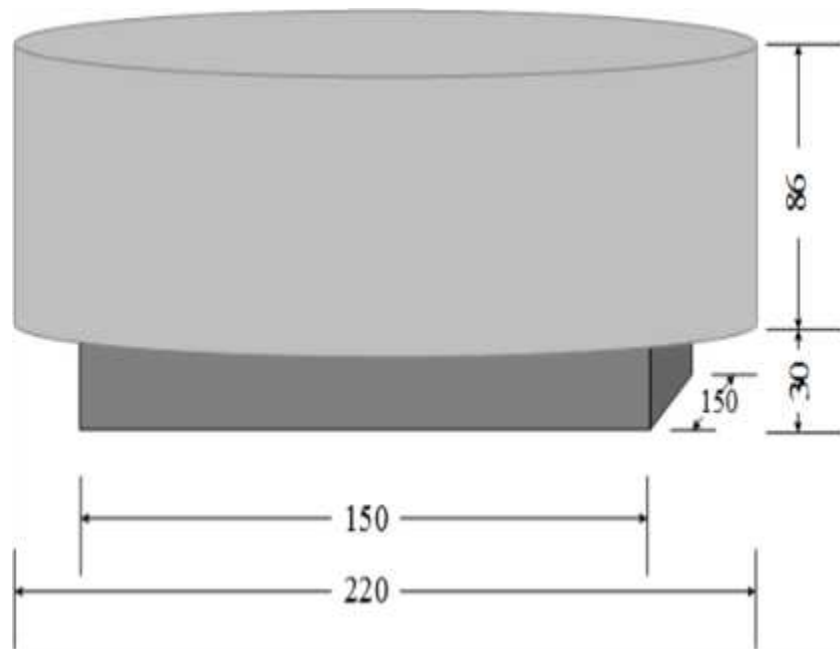
- 동탄성계수 측정을 위한 순서와 동일하며, FFT분석기의 스펙트럼으로부터 소음의 최대값을 갖는 진동수(f_0)로부터 $\pm 3\text{dB}$ 의 차이가 생기는 진동수를 찾은 후 다음의 식에 대입하여 손실계수를 계산함.

$$\text{손실계수} = \frac{f_2 - f_1}{f_0}$$

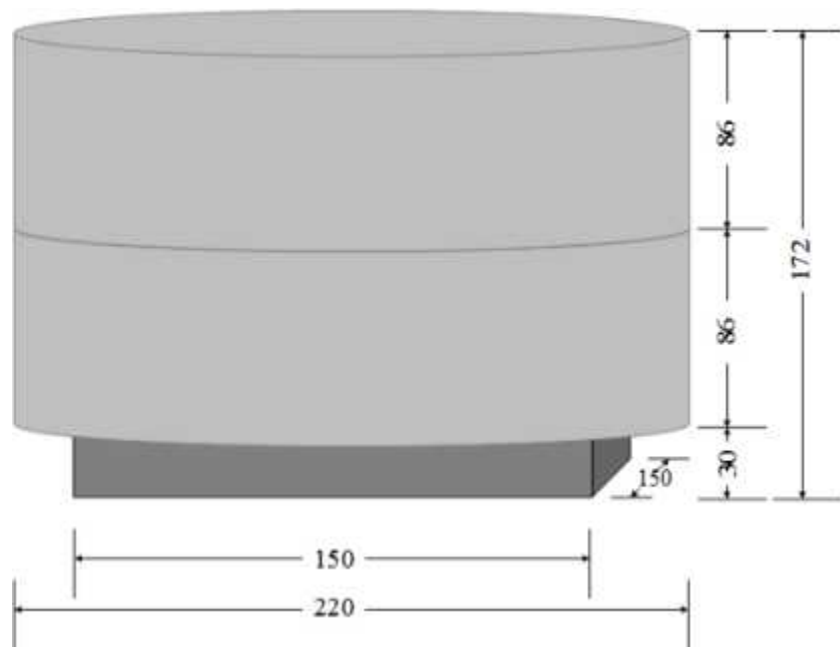
f_0 : 소음의 최대값을 갖는 진동수 , f_1 : f_0 로부터 -3dB 을 갖는 진동수,
 f_2 : f_0 로부터 $+3\text{dB}$ 을 갖는 진동수

[표 3.5.3] FFT분석을 위한 가속도계가 설치되는 하중판의 정보

가속도계 설치를 위한 하중판 정보		
가로길이(mm)	세로길이(mm)	중량(kg)
200	200	8



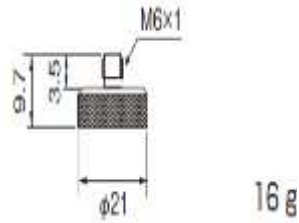
[그림 3.5.3.a] 250N 동탄성계수 측정 실험 개념도



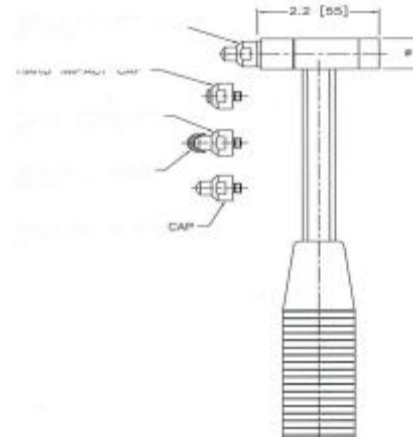
[그림 3.5.3.b] 500N 동탄성계수 측정 실험 개념도



[그림 3.5.3.c] FFT 분석기



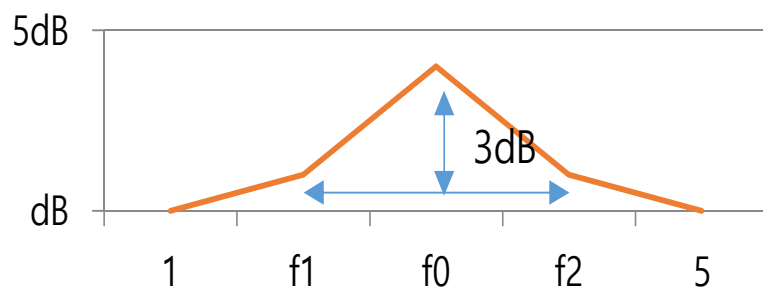
[그림 2.5.3.d]
가속도계



[그림 3.5.3.e] 임팩트해머



[그림 3.5.3.f] 동탄성계수, 손실계수 계산을 위한 FFT분석기 실험



[그림 3.5.3.g] 손실계수 계산을 위한 f_0 , f_1 , f_2 위치

3.5.4 실험결과

가. 동탄성계수 측정 결과

(1) 250N 가력 실험체 동탄성계수 측정 결과

- 250N을 가력한 후, 시간의 흐름에 따라 하중판을 제거하고 FFT분석기를 이용하여 계산된 동탄성계수의 값은 다음과 같음.

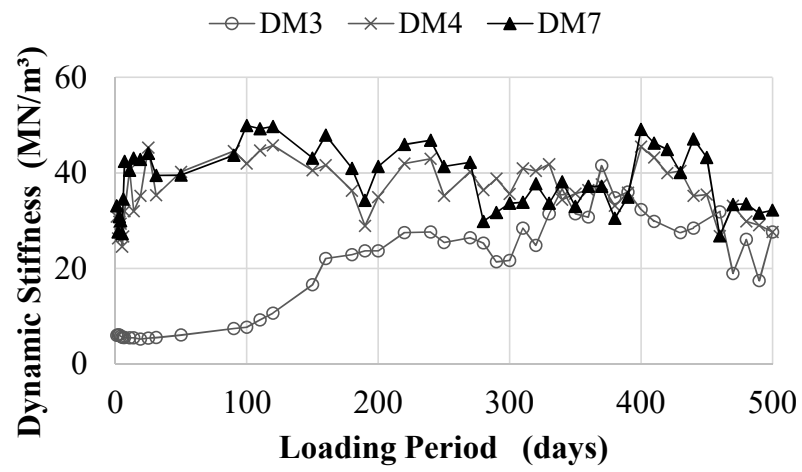
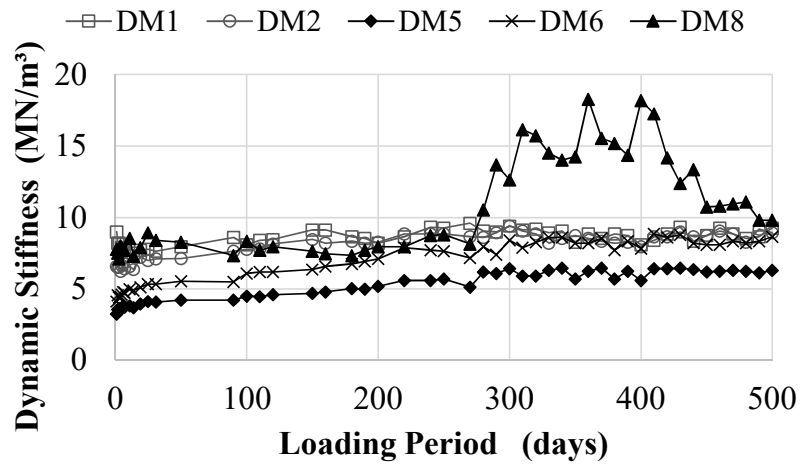
[표 3.5.4.a] 250N 재하 시 동탄성계수의 변화

실험체 시간	1번 (EPS 평판형)	2번 (EPS 골판형)	3번 (PO 평판형)	4번 (EPS 평판형)	5번 (EPS 골판형)	6번 (EPS 골판형)	7번 (EPS 평판형)	8번 (EVA 엠보형)
30분	8.993	5.649	7.344	24.760	2.850	3.158	30.719	7.959
1시간	9.194	5.809	6.988	28.543	2.925	3.197	35.179	7.526
3시간	9.194	6.357	6.469	29.139	3.158	3.481	38.138	7.344
5시간	7.896	6.526	6.413	30.351	3.158	3.565	32.975	7.526
10시간	8.598	6.929	6.245	34.785	3.277	3.821	39.662	7.047
24시간	8.993	6.583	6.025	30.842	3.237	4.131	33.103	7.772
48시간	8.212	6.526	6.080	26.332	3.565	4.547	27.601	7.526
5일	7.896	6.640	5.649	24.540	3.237	4.131	33.103	7.772
11일	7.345	6.583	5.492	40.647	3.692	4.595	27.252	7.834
14일	7.526	6.357	5.492	31.962	3.821	4.984	40.506	8.533
19일	7.710	7.225	5.235	35.179	3.692	4.885	43.090	7.284
31일	7.649	7.106	5.544	35.311	3.952	5.134	42.799	7.896
50일	7.959	7.129	6.080	40.223	4.086	5.337	39.438	8.404
90일	8.598	7.649	7.405	44.561	4.222	5.544	39.522	8.275
100일	8.085	7.772	7.710	41.932	4.222	5.492	43.676	7.345
110일	8.404	7.815	9.262	44.709	4.500	6.080	49.902	8.339
120일	8.468	8.148	10.663	45.755	4.453	6.190	50.217	7.710
150일	9.127	8.468	16.616	40.506	4.595	6.190	50.690	7.959
160일	9.127	8.212	22.074	41.644	4.691	6.357	43.090	7.649
180일	8.663	8.339	22.917	36.241	4.787	6.583	47.883	7.465
190일	8.533	8.212	23.667	28.900	5.034	6.755	40.931	7.345
200일	8.2120	8.275	23.667	34.916	4.984	6.929	34.263	7.710
220일	8.663	8.860	27.484	41.932	5.184	7.106	41.358	7.959
240일	9.329	8.860	27.605	42.945	5.597	7.896	45.906	7.959
250일	9.262	8.860	25.428	35.179	5.597	7.710	46.813	8.729
270일	9.603	8.663	26.446	40.223	5.702	7.649	41.358	8.794
280일	9.060	8.598	25.317	36.376	6.190	7.959	29.863	10.519
290일	8.994	8.927	21.350	38.827	6.080	7.405	31.712	13.680
300일	9.398	9.398	21.659	35.576	6.413	8.404	33.616	12.633
310일	9.127	9.060	28.424	40.931	5.917	7.897	33.874	16.167
320일	9.195	8.861	24.872	40.365	5.917	8.276	37.728	15.723

330일	8.927	8.212	31.462	41.788	6.301	8.598	33.616	14.514
340일	9.060	8.533	36.644	34.394	6.470	8.598	38.138	14.011
350일	8.276	8.729	31.462	35.709	5.703	8.212	32.975	14.262
360일	8.861	8.533	30.719	36.376	6.246	8.212	37.184	18.287
370일	8.533	8.340	41.502	37.591	6.470	8.533	37.184	15.548
380일	8.861	8.212	34.786	33.103	5.703	7.711	30.474	15.199
390일	8.729	8.276	35.975	35.842	6.246	8.340	34.917	14.346
400일	8.085	7.959	32.341	45.456	5.597	7.834	49.121	18.192
410일	8.404	8.664	29.863	43.237	6.413	8.861	46.208	17.257
420일	8.861	8.664	-	39.942	6.413	8.598	44.858	14.178
430일	9.330	8.994	27.485	40.365	6.470	8.795	40.083	12.397
440일	8.340	8.664	28.424	35.180	6.357	8.212	47.118	13.354
450일	8.729	8.729	-	35.444	6.190	8.085	43.237	10.736
460일	9.262	9.060	31.837	26.791	6.246	8.085	26.791	10.809
470일	8.861	8.861	18.958	33.103	6.301	8.340	33.359	10.956
480일	8.533	8.276	26.105	29.863	6.246	8.212	33.488	11.103
490일	8.664	9.195	17.442	29.020	6.135	8.340	31.587	9.811
500일	9.262	8.927	-	27.601	6.301	8.664	32.215	9.811

(동탄성계수 단위 : MN/m³)

- [표 3.5.4.a]에 250N을 재하 하였을 때 동탄성계수의 변화를 나타내었음.
- DM1-250 실험체의 경우 단기하중 재하 시와 장기하중 재하 시의 동탄성계수의 변화폭이 거의 없음.
- DM3-250 실험체의 경우에도 하중을 재하한 100일 이후부터 동탄성계수가 급격히 증가하기 시작하고 400일 이후로 동탄성계수가 점차 감소하는 경향 나타남.
- DM4-250와 DM7-250 실험체의 경우 약 250일 까지 초기에 비해 약 30%이상 동탄성계수가 증가하다가 250일 이후로 동탄성 계수가 점차 감소하여 초기 동탄성계수와 비슷한 수치로 돌아가는 경향이 나타남.
- DM5-250와 DM6-250 실험체의 경우에도 초기에 비해 약 50%이상 동탄성계수가 증가하였음.
- 8종의 바닥완충재에 대한 250N의 장기하중 재하 실험을 통해 DM4, DM7, DM8 실험체의 경우 동탄성계수 시간이 지남에 따라 점차 증가하다가 특정 일수 이후에 다시 감소하는 결과가 나타남.
- DM-1, DM-2, DM-3, DM-5, DM-6 실험체의 경우 시간이 지남에 따라 동탄성계수가 점차 증가하는 경향을 나타냄.
- 8종의 실험체 중에서 DM4-250과 DM7250 실험체의 동탄성계수는 하중가력시간에 따라 큰 폭으로 변동하였지만 500일이 지난 시점의 동탄성계수는 초기의 동탄성계수와 큰 차이가 없음.
- 8종 바닥완충재 모두 500일이 지난 이후에는 동탄성계수가 초기값보다 증가하는 결과가 나타남.
- 각 실험체별 시간에 따른 동탄성계수의 변화와 경향을 아래의 [그림 3.5.4.a]과 같이 그래프로 나타내어 보았음.



[그림 3.5.4.a] 동탄성계수의 변화 (250N 하중 재하)

(2) 500N 가력 실험체 동탄성계수 측정 결과

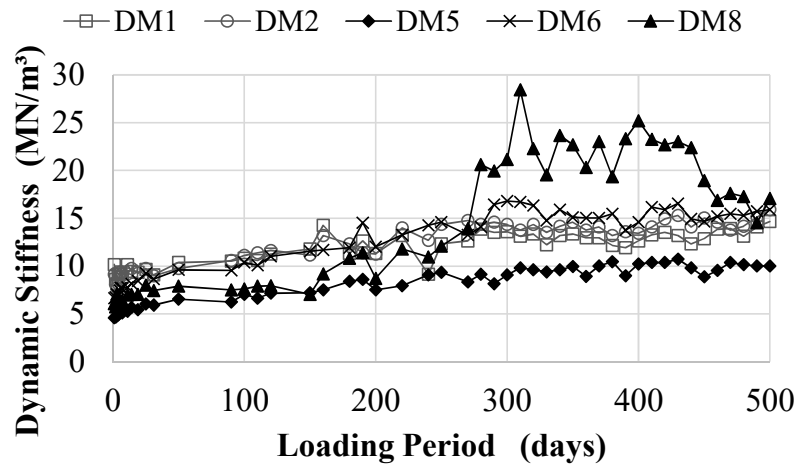
- 500N을 가력한 후, 시간의 흐름에 따라 하중판을 제거하고 FFT분석기를 이용하여 계산된 동탄성계수의 값은 다음과 같음.

[표 3.5.4.b] 500N 재하 시 동탄성계수의 변화

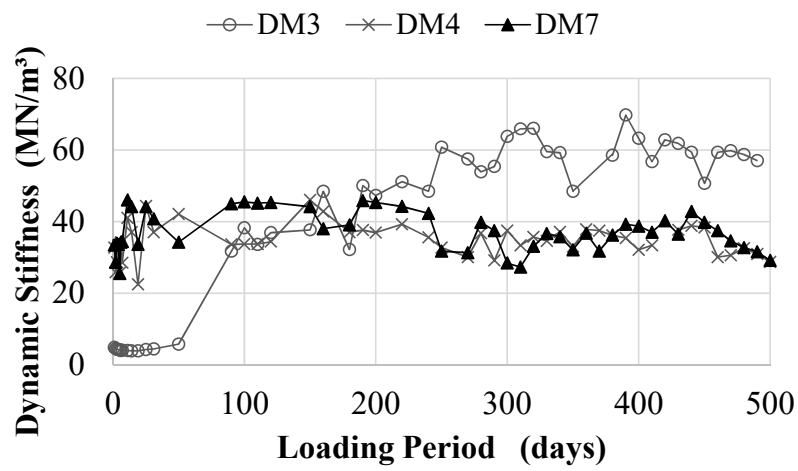
실험체 시간	1번 (EPS 평판형)	2번 (EPS 골판형)	3번 (PO 평판형)	4번 (EPS 평판형)	5번 (EPS 골판형)	6번 (EPS 골판형)	7번 (EPS 평판형)	8번 (EVA 엠보형)
30분	8.404	5.286	6.930	30.596	2.850	3.041	29.985	6.930
1시간	8.340	5.863	6.470	32.215	3.041	2.888	37.591	6.640
3시간	9.127	7.466	6.135	22.811	3.524	4.132	27.835	6.470
5시간	8.340	8.085	5.703	24.102	3.822	4.643	32.594	6.246
10시간	9.330	8.340	5.389	25.653	4.222	5.703	31.462	6.357
24시간	10.162	9.127	4.837	32.721	4.595	6.640	33.488	6.080
48시간	8.598	8.085	4.548	25.879	4.643	6.755	28.662	5.756
5일	8.148	7.711	4.407	28.662	4.788	7.047	34.004	7.047
11일	9.127	8.148	4.268	33.359	4.886	6.871	33.616	6.470
14일	9.195	8.795	4.177	25.653	5.493	7.466	25.541	6.246
19일	9.398	9.398	3.953	34.134	5.597	7.711	34.263	6.026
31일	8.861	9.195	4.042	28.543	5.084	7.649	34.394	6.413
50일	10.162	9.195	3.997	41.073	5.286	7.772	46.057	6.988
90일	9.466	9.741	3.909	37.049	5.650	8.148	44.118	7.047
100일	9.330	9.262	3.909	22.494	5.441	8.469	33.616	7.047
110일	9.672	9.741	4.268	44.413	6.026	9.262	44.118	8.022
120일	9.060	8.994	4.454	37.049	5.917	8.664	40.789	7.466
150일	10.375	9.741	5.809	42.076	6.526	9.603	34.263	7.897
160일	10.519	10.591	31.712	33.616	6.246	9.535	45.007	7.527
180일	10.809	11.103	38.275	33.745	7.047	10.375	45.456	7.588
190일	10.591	11.401	33.616	33.745	6.640	10.091	45.157	7.897
200일	11.252	11.628	36.913	34.394	7.165	11.029	45.306	7.959
220일	11.779	11.177	37.728	46.057	7.225	11.552	44.118	7.047
240일	14.262	13.192	48.500	42.800	7.527	11.703	38.001	9.195
250일	11.326	12.319	32.215	37.049	8.404	11.932	39.104	10.809
270일	12.633	11.401	50.060	37.591	8.598	14.514	45.906	11.401
280일	11.326	11.252	47.271	36.913	7.527	12.009	45.306	8.729
290일	13.192	14.011	51.166	39.244	7.959	13.273	44.265	11.779
300일	9.127	12.712	48.500	35.576	9.060	14.262	42.365	10.956
310일	12.319	14.346	60.797	32.721	9.330	14.599	31.712	12.086
320일	12.633	14.769	57.551	30.107	8.340	13.273	31.338	13.928
330일	13.845	14.346	53.903	36.779	9.127	14.094	39.802	20.637

340일	13.517	14.599	55.381	29.140	8.148	16.436	37.455	19.937
350일	13.598	14.346	63.778	37.455	9.060	16.798	28.424	21.145
360일	13.111	13.763	65.924	33.359	9.811	16.707	27.369	28.424
370일	13.354	14.346	66.105	35.709	9.603	16.346	33.103	22.284
380일	12.241	13.517	59.591	34.655	9.398	14.769	36.644	19.542
390일	13.192	14.178	59.248	37.184	9.603	15.900	35.842	23.668
400일	13.354	14.599	48.500	32.975	9.951	15.113	32.089	22.705
410일	12.951	13.763	-	37.864	8.927	15.027	36.779	20.336
420일	12.951	14.094	-	37.455	10.021	15.027	31.837	23.024
430일	12.164	13.192	58.566	36.108	10.447	15.460	36.242	19.346
440일	11.932	13.598	69.766	35.444	8.994	13.763	39.244	23.345
450일	12.633	13.435	63.246	32.089	10.233	14.599	38.689	25.205
460일	13.273	14.094	56.711	33.359	10.375	16.167	37.049	23.237
470일	13.517	14.941	62.894		10.375	15.900	40.224	22.705
480일	13.192	15.286	61.841	37.728	10.736	16.526	36.510	23.024
490일	12.319	14.094	59.419	38.827	9.811	14.941	42.800	22.389
500일	12.871	15.027	50.690	38.413	8.861	14.684	39.802	18.958

- [표 3.5.4.b]에 500N을 재하 하였을 때 동탄성계수의 변화를 나타내었음.
- 500N 가력 실험에서는 250N 가력 실험의 경우보다 동탄성계수의 변화량이 다소 크게 나타났음. 밀도를 제외한 다른 조건이 동일한 5번, 6번 실험체를 살펴보면 처음 30분에서는 0.5N/m^3 이하의 동탄성계수를 차이를 보였지만, 시간의 흐름에 따라 약 25N/m^3 이상으로 동탄성계수의 차이가 커진 것을 알 수 있음.
- DM1-500실험체의 경우 단기하중 재하 시와 장기하중 재하 시의 동탄성계수의 변화폭이 다른 실험체들에 비해 크지 않음.
- DM2-500과 DM8-500 실험체의 경우 각각 DM2-250과 DM8-250 실험체와 다르게 동탄성계수가 증가하는 경향을 보이고 있음. 즉, DM2와 DM8은 하중크기의 영향을 받는 것으로 판단됨.
- DM3-500 실험체의 경우에도 DM3-250 실험체에 비해 더 빨리 동탄성계수가 급격히 증가하기 시작하며 동탄성계수의 변화폭이 다른 실험체들에 비해 굉장히 크게 나타남.
- DM4-500과 DM7-500 실험체의 경우에도 초기에 비해 약 30%이상 동탄성계수가 증가하였음.
- DM5-250과 DM6-250 실험체의 경우에도 초기에 비해 약 55%이상 동탄성계수가 증가하였음.
- 각 실험체별 시간에 따른 동탄성계수의 변화와 경향을 [그림 3.5.4.b]과 같이 그래프로 나타내어 보았음.
- 250N 가력 실험에서와 마찬가지로 시간이 지남에 따라 동탄성계수가 증가하는 경향을 나타내고 있고 증가폭은 250N 하중 상태일 때보다 500N에서 더 크게 나타남.
- [그림 2.5.4.c]는 500일 시점에서 250N과 500N 하중에서의 동탄성계수 변화를 나타냄.

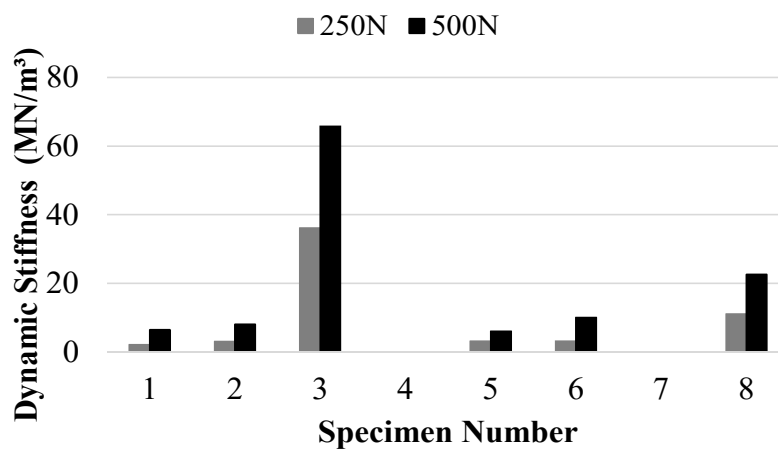


a) DM1, DM2, DM5, DM6, DM8



b) DM3, DM4, DM7

그림 [3.5.4.b] 동탄성계수의 변화 (500N 하중 재하)



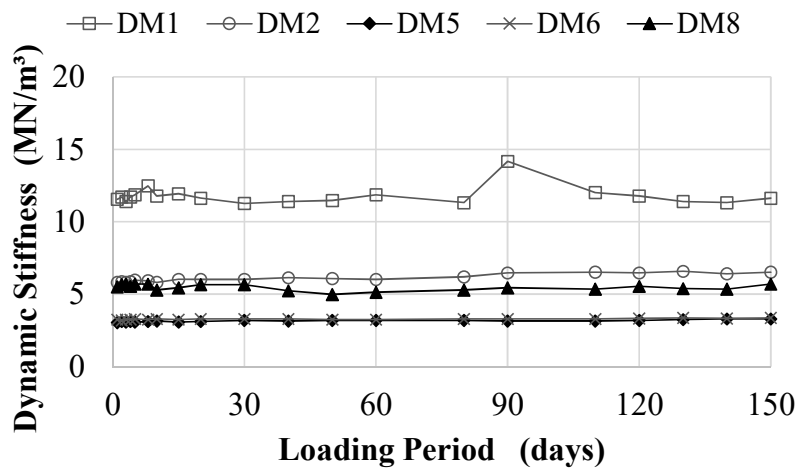
[그림 3.5.4.c] 500일 시점에서 하중 크기에 따른 실험체별 동탄성계수 비교

(3) 40N, 80N 가력 실험체 동탄성계수 측정 결과

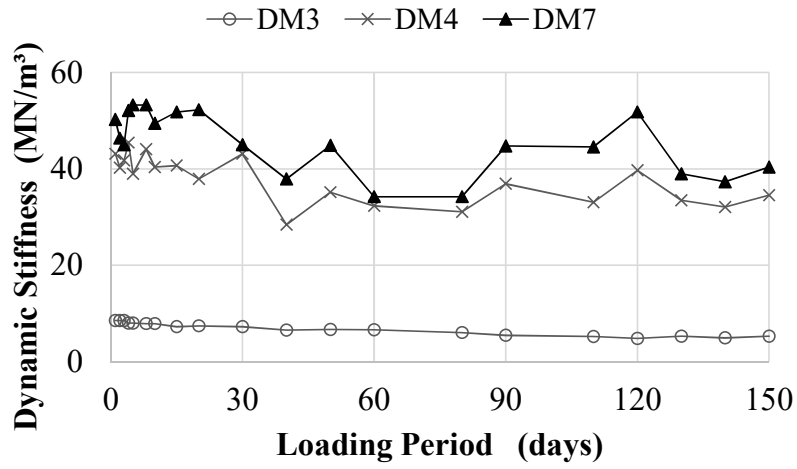
- [그림 3.5.4.d]와 [그림 3.5.4.e]는 각각 146일간의 40N과 80N의 하중재하에 따른 바닥완충재의 동탄성계수 변화를 보여주고 있음.
- 하중 40N, 80N 재하 모두 완충재의 동탄성계수는 대체적으로 증가하였으며, 증가폭은 약 1MN/m^3 내외로 작았음.
- 예외적으로 DM3, DM4, DM7은 감소하였으며, 250N과 500N 하중 재하일 때의 결과로 미루어보아 감소 후 증가 추세가 될 것으로 예측됨.
- 그러나 DM4와 DM7은 감소와 증가를 반복하며 일정치 않은 경향을 나타낼 것으로 보임.
- 150일간의 실험체별 동탄성계수 변화를 [표 3.5.4.c]에 나타내었다.

[표 3.5.4.c] 재하하중에 따른 바닥완충재의 동탄성계수 변화량 비교
(MN/m^3)

실험체명	40N (150일 기준)	80N (150일 기준)
DM1	0.07	0.46
DM2	0.72	0.99
DM3	-3.25	-2.18
DM4	-8.57	-4.59
DM5	0.24	0.33
DM6	0.12	0.30
DM7	-9.85	-13.79
DM8	0.21	1.19

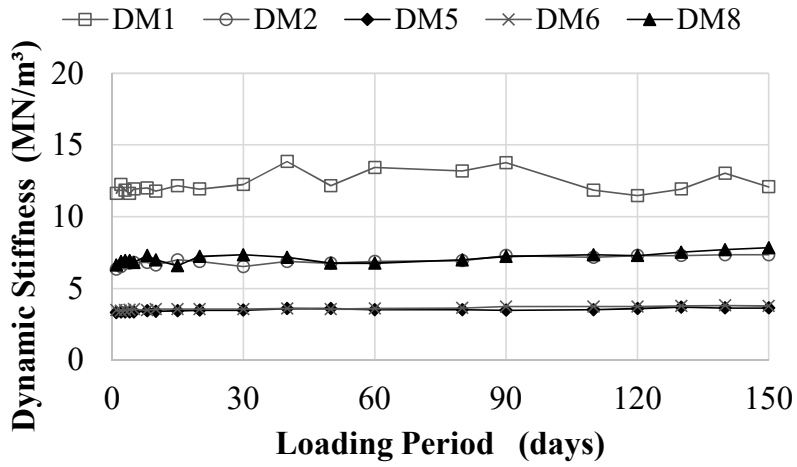


a) DM1, DM2, DM5, DM6, DM8

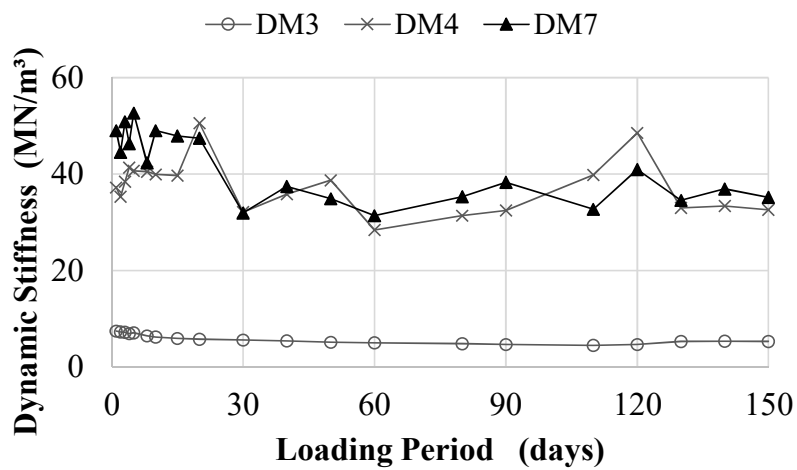


b) DM3, DM4, DM7

[그림 3.5.4.d] 동탄성계수의 변화 (40N 하중 재하)



a) DM1, DM2, DM5, DM6, DM8



b) DM3, DM4, DM7

[그림 3.5.4.e] 동탄성계수의 변화 (80N 하중 재하)

나. 손실계수 측정 결과

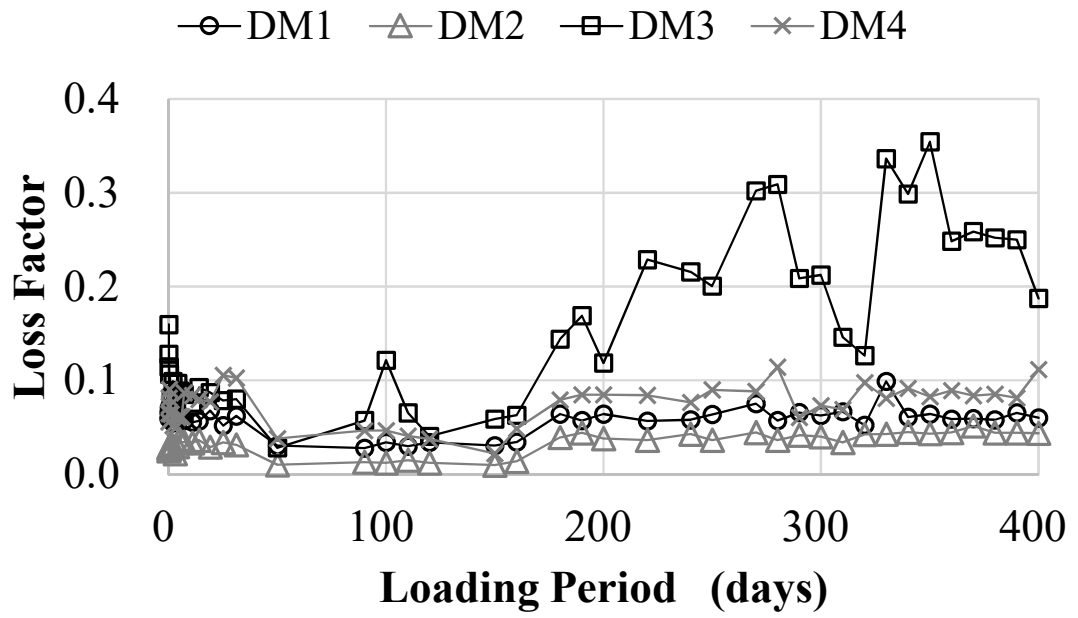
(1) 250N 가력 실험체 손실계수 측정 결과

[표 3.5.4.d] 250N 재하 시 손실계수의 변화

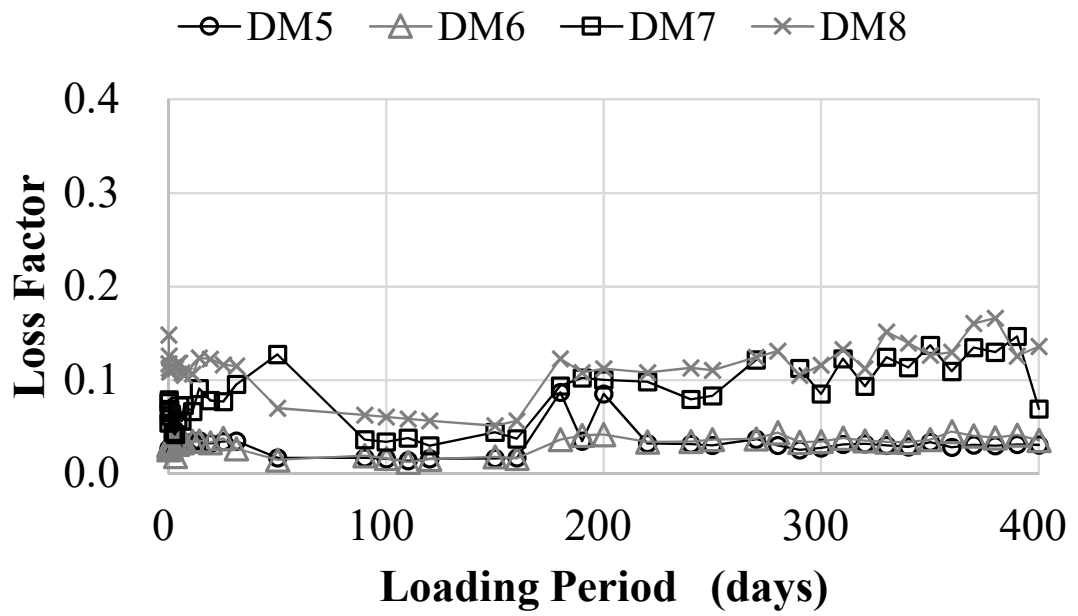
실험체 시간	1번 (EPS 평판형)	2번 (EPS 골판형)	3번 (PO 평판형)	4번 (EPS 평판형)	5번 (EPS 골판형)	6번 (EPS 골판형)	7번 (EPS 평판형)	8번 (EVA 엠보형)
30분	0.059	0.025	0.128	0.056	0.027	0.026	0.054	0.148
1시간	0.066	0.028	0.160	0.064	0.023	0.029	0.076	0.117
3시간	0.060	0.029	0.114	0.081	0.023	0.030	0.079	0.113
5시간	0.071	0.029	0.114	0.073	0.025	0.031	0.066	0.126
10시간	0.062	0.027	0.107	0.090	0.026	0.032	0.069	0.109
24시간	0.067	0.032	0.081	0.064	0.026	0.027	0.062	0.110
48시간	0.055	0.030	0.099	0.052	0.029	0.031	0.044	0.113
3일	0.068	0.022	0.085	0.049	0.031	0.018	0.042	0.113
4일	0.063	0.029	0.097	0.060	0.036	0.032	0.057	0.118
5일	0.059	0.038	0.089	0.062	0.035	0.035	0.072	0.118
6일	0.061	0.034	0.087	0.061	0.032	0.033	0.056	0.108
7일	0.057	0.034	0.085	0.087	0.033	0.034	0.073	0.105
11일	0.055	0.034	0.076	0.084	0.034	0.035	0.066	0.106
14일	0.057	0.036	0.092	0.080	0.035	0.035	0.091	0.123
19일	0.068	0.029	0.087	0.077	0.032	0.033	0.078	0.123
25일	0.052	0.034	0.079	0.106	0.034	0.038	0.077	0.116
31일	0.062	0.031	0.080	0.103	0.035	0.026	0.095	0.115
50일	0.031	0.010	0.028	0.038	0.016	0.014	0.127	0.070
90일	0.028	0.013	0.057	0.046	0.017	0.019	0.036	0.063
100일	0.034	0.012	0.121	0.047	0.016	0.016	0.034	0.061
110일	0.030	0.015	0.066	0.041	0.014	0.012	0.038	0.059
120일	0.034	0.012	0.040	0.037	0.016	0.015	0.030	0.057
150일	0.030	0.010	0.059	0.022	0.016	0.018	0.044	0.051
160일	0.034	0.014	0.063	0.049	0.017	0.016	0.037	0.056
180일	0.064	0.039	0.144	0.079	0.087	0.036	0.094	0.123
190일	0.057	0.044	0.169	0.085	0.035	0.041	0.102	0.108

200일	0.064	0.038	0.119	0.085	0.085	0.042	0.100	0.112
220일	0.057	0.036	0.229	0.084	0.032	0.034	0.098	0.108
240일	0.058	0.043	0.216	0.076	0.031	0.034	0.080	0.113
250일	0.064	0.036	0.200	0.090	0.030	0.036	0.083	0.110
270일	0.075	0.044	0.302	0.088	0.037	0.037	0.121	0.125
280일	0.057	0.036	0.309	0.114	0.030	0.044	0.305	0.131
290일	0.066	0.042	0.209	0.061	0.025	0.034	0.112	0.105
300일	0.062	0.040	0.212	0.073	0.028	0.034	0.085	0.116
310일	0.067	0.034	0.146	0.069	0.031	0.038	0.123	0.133
320일	0.052	0.043	0.127	0.098	0.032	0.035	0.093	0.112
330일	0.099	0.043	0.337	0.081	0.030	0.034	0.125	0.152
340일	0.061	0.045	0.299	0.092	0.028	0.033	0.113	0.139
350일	0.064	0.043	0.354	0.082	0.033	0.036	0.137	0.126
360일	0.059	0.044	0.248	0.089	0.028	0.045	0.109	0.130
370일	0.059	0.051	0.259	0.084	0.031	0.041	0.135	0.161
380일	0.058	0.044	0.252	0.086	0.030	0.038	0.130	0.166
390일	0.065	0.044	0.250	0.081	0.031	0.041	0.147	0.126
400일	0.060	0.044	0.188	0.112	0.031	0.036	0.069	0.136

- [표 3.5.4.d]에 250N 재하 시 손실계수를 가력시간에 따라 정리하였음.
- [그림 3.5.4.f]에 250N 재하 시 손실계수를 가력시간에 따라 그래프로 정리하였음.
- 250N 재하의 경우, 완충재의 손실계수는 증가와 감소를 반복하였지만 DM1과 DM5를 제외하고 전체적으로 증가함.
- 하중가력 시간에 따라 증가와 감소를 반복하며 변화하는 손실계수의 대략적인 변화량을 알아보기 위해 50일 간격의 최대값, 최소값, 평균값을 구하여 [그림 3.5.4.g]에 나타냄.
- DM1의 손실계수는 감소와 증가의 반복으로 변화가 거의 없고 DM2는 약 0.02 증가함.
- DM3의 손실계수 증가폭은 약 0.17로 가장 크게 나타났으며, DM4는 약 0.03~0.06 증가.
- DM5의 손실계수는 감소와 증가의 반복으로 변화가 거의 없었다. DM6은 손실계수가 약 0.02 증가함.
- DM7은 100일과 300일 사이에 최대 0.16의 손실계수 차이를 보이지만 전체 400일간은 약 0.02 증가함.
- DM8 또한 100일과 400일 사이에 최대 0.10의 손실계수 차이를 보이지만 전체 400일간은 약 0.04 증가함.

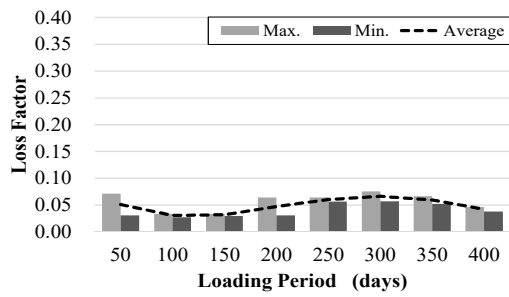


a) DM1, DM2, DM5, DM6, DM8

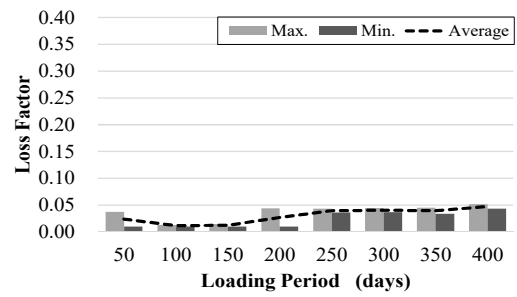


b) DM3, DM4, DM7

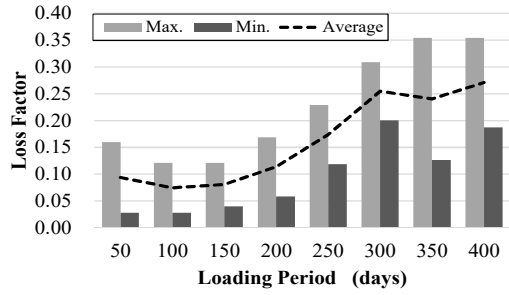
[그림 3.5.4.f] 250N 하중가력기간에 따른 손실계수의 변화



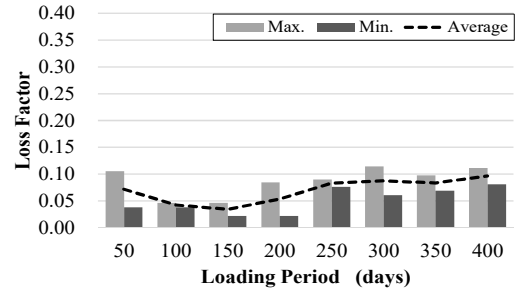
a) DM1



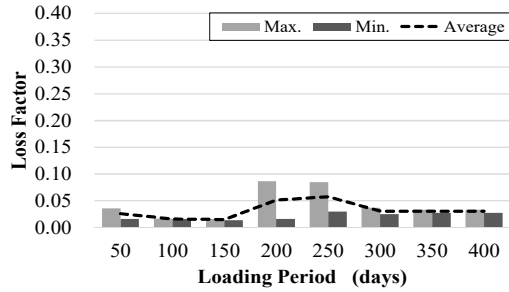
b) DM2



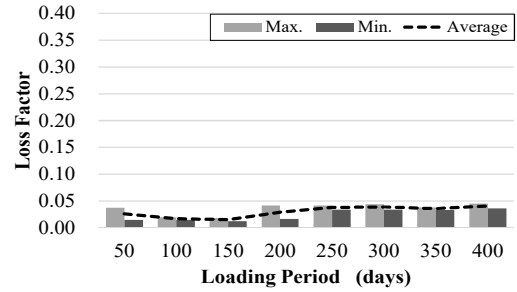
c) DM3



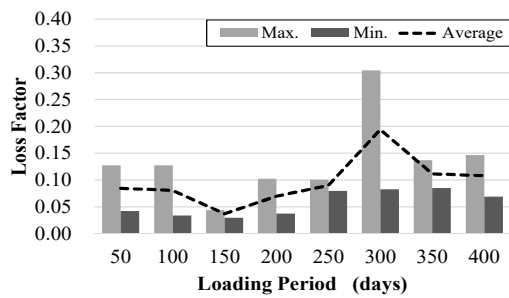
d) DM4



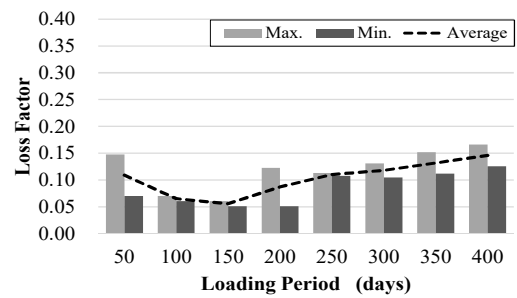
e) DM5



f) DM6



g) DM7



h) DM8

[그림 3.5.4.g] 50일간격의 손실계수 최대, 최소, 평균값 (250N 하중 재하)

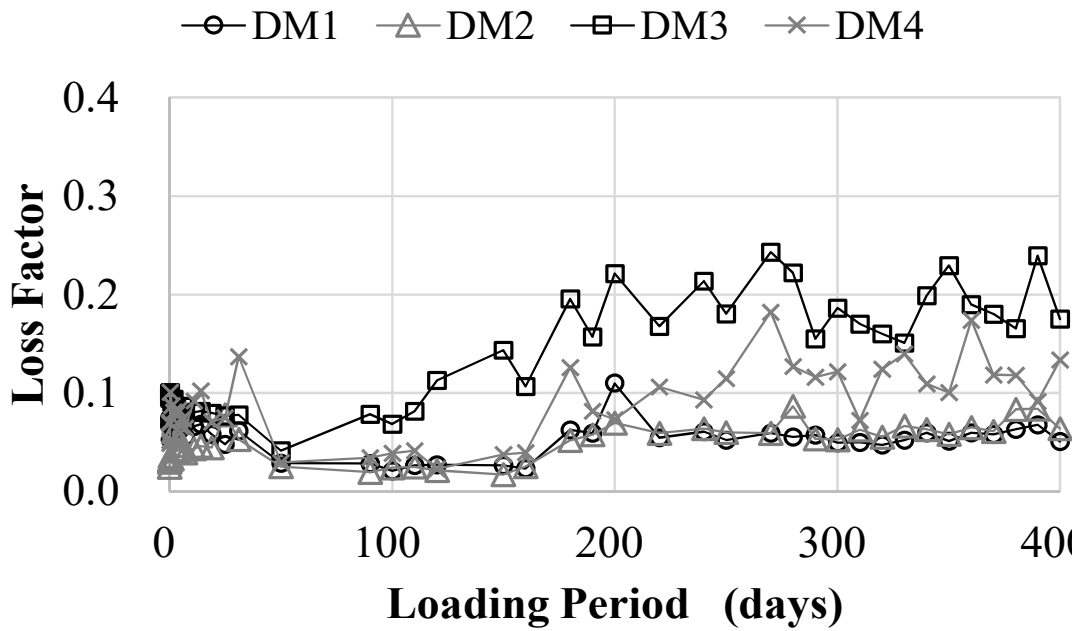
(2) 500N 가력 실험체 손실계수 측정 결과

[표 3.5.4.e] 500N 재하 시 손실계수의 변화

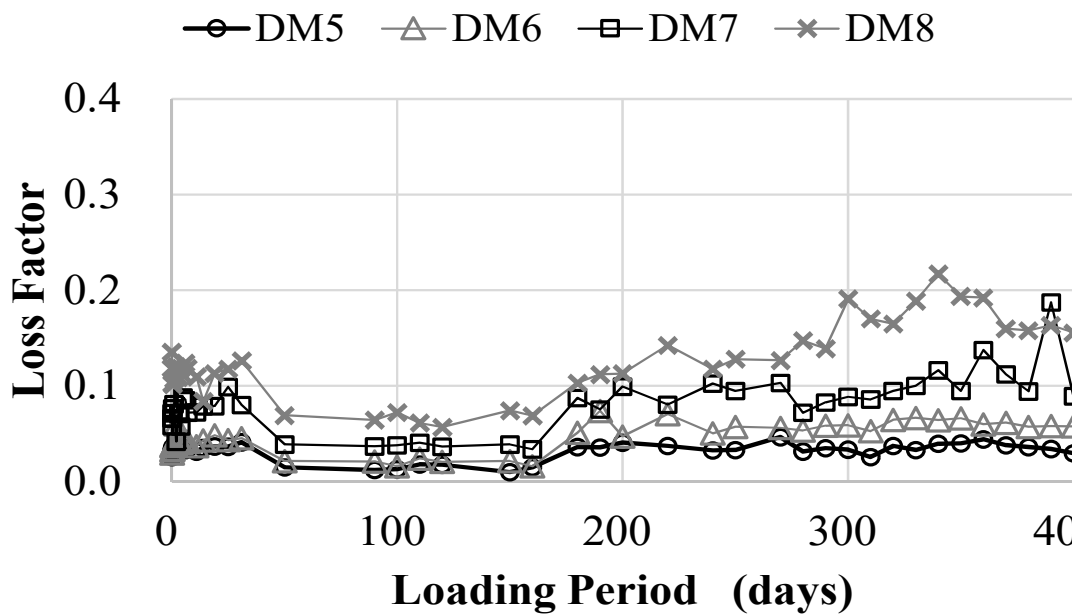
실험체 시간	1번 (EPS 평판형)	2번 (EPS 골판형)	3번 (PO 평판형)	4번 (EPS 평판형)	5번 (EPS 골판형)	6번 (EPS 골판형)	7번 (EPS 평판형)	8번 (EVA 엠보형)
30분	0.075	0.024	0.100	0.069	0.027	0.029	0.058	0.118
1시간	0.067	0.030	0.096	0.070	0.025	0.033	0.066	0.135
3시간	0.072	0.033	0.099	0.049	0.032	0.037	0.072	0.118
5시간	0.069	0.032	0.095	0.052	0.034	0.038	0.066	0.102
10시간	0.053	0.036	0.100	0.101	0.036	0.033	0.076	0.101
24시간	0.068	0.033	0.091	0.087	0.034	0.041	0.081	0.107
48시간	0.076	0.061	0.094	0.081	0.041	0.060	0.041	0.120
3일	0.063	0.041	0.086	0.079	0.034	0.043	0.070	0.109
4일	0.076	0.043	0.081	0.083	0.034	0.040	0.057	0.118
5일	0.064	0.042	0.079	0.066	0.033	0.044	0.088	0.111
6일	0.078	0.047	0.087	0.074	0.033	0.042	0.085	0.124
7일	0.056	0.039	0.080	0.064	0.034	0.041	0.072	0.118
11일	0.066	0.043	0.081	0.092	0.031	0.037	0.072	0.109
14일	0.069	0.046	0.081	0.102	0.035	0.043	0.079	0.084
19일	0.058	0.045	0.080	0.071	0.037	0.048	0.079	0.113
25일	0.048	0.078	0.077	0.075	0.036	0.043	0.099	0.118
31일	0.062	0.053	0.078	0.137	0.041	0.045	0.080	0.126
50일	0.029	0.025	0.041	0.029	0.015	0.021	0.039	0.069
90일	0.028	0.020	0.078	0.034	0.012	0.021	0.037	0.064
100일	0.021	0.024	0.068	0.039	0.013	0.016	0.038	0.072
110일	0.027	0.025	0.082	0.042	0.018	0.024	0.040	0.061
120일	0.027	0.022	0.113	0.023	0.017	0.021	0.036	0.057
150일	0.026	0.017	0.144	0.038	0.010	0.021	0.039	0.074
160일	0.024	0.025	0.107	0.040	0.015	0.016	0.033	0.069
180일	0.063	0.052	0.196	0.126	0.036	0.051	0.087	0.103
190일	0.059	0.058	0.157	0.082	0.035	0.074	0.075	0.112
200일	0.110	0.070	0.221	0.073	0.040	0.047	0.099	0.113

220일	0.055	0.059	0.168	0.106	0.037	0.070	0.080	0.142
240일	0.061	0.064	0.214	0.093	0.033	0.050	0.102	0.117
250일	0.052	0.060	0.180	0.115	0.033	0.057	0.095	0.128
270일	0.059	0.059	0.243	0.182	0.046	0.056	0.103	0.126
280일	0.055	0.087	0.222	0.127	0.031	0.053	0.072	0.147
290일	0.057	0.053	0.155	0.116	0.035	0.058	0.083	0.139
300일	0.050	0.053	0.186	0.122	0.033	0.059	0.089	0.191
310일	0.050	0.063	–	0.072	0.026	0.053	0.086	0.170
320일	0.047	0.055	–	0.124	0.037	0.064	0.095	0.165
330일	0.052	0.066	0.151	0.140	0.033	0.066	0.100	0.188
340일	0.060	0.063	0.199	0.109	0.039	0.064	0.116	0.217
350일	0.051	0.058	0.230	0.101	0.040	0.066	0.095	0.193
360일	0.059	0.065	–	0.174	0.044	0.060	0.137	0.192
370일	0.058	0.061	–	0.119	0.038	0.061	0.112	0.160
380일	0.063	0.084	0.165	0.118	0.036	0.057	0.094	0.158
390일	0.068	0.084	0.240	0.091	0.034	0.058	0.187	0.163
400일	0.051	0.064	0.175	0.134	0.029	0.057	0.089	0.155

- [표 3.5.4.e]에 500N 재하 시 손실계수를 가력시간에 따라 정리하였음.
- [그림 3.5.4.h]에 500N 재하 시 손실계수를 가력시간에 따라 그래프로 정리하였음.
- 250N 재하의 경우, 완충재의 손실계수는 증가와 감소를 반복하였지만 DM1과 DM5를 제외하고 전체적으로 증가함.
- 하중가력 시간에 따라 증가와 감소를 반복하며 변화하는 손실계수의 대략적인 변화량을 알아보기 위해 50일 간격의 최대값, 최소값, 평균값을 구하여 [그림 3.5.4.i]에 나타냄.
- DM1의 손실계수는 100일과 250일 사이에서 최대 0.05의 차이가 나지만 전체 400일간은 변화가 거의 없었고 DM2는 약 0.02 증가함.
- 500N 하중 재하에서도 마찬가지로 DM3의 손실계수가 약 0.14로 가장 많이 증가함.
- DM4는 약 0.06~0.09 증가하였으며 DM5와 DM6은 0.01~0.03 증가함.
- DM7은 0.07~0.10의 손실계수 증가가 발생하였다. DM8은 0.08~0.13의 손실계수가 증가함.

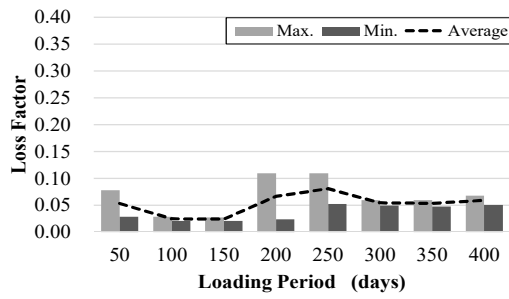


a) DM1, DM2, DM5, DM6, DM8

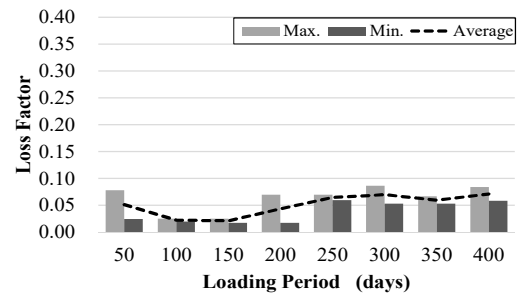


b) DM3, DM4, DM7

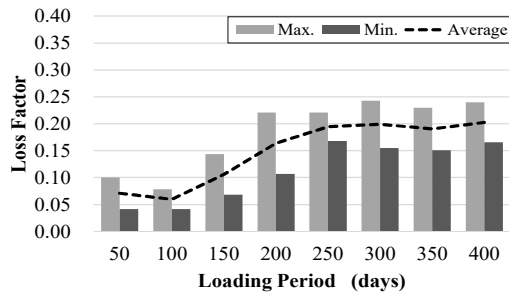
[그림 3.5.4.h] 500N 하중가력기간에 따른 손실계수의 변화



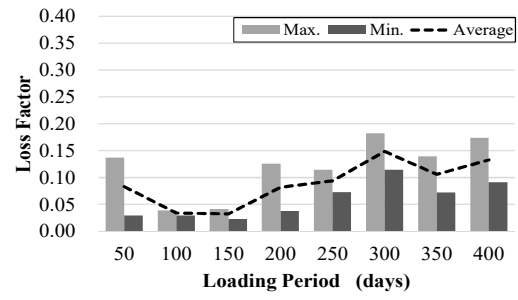
a) DM1



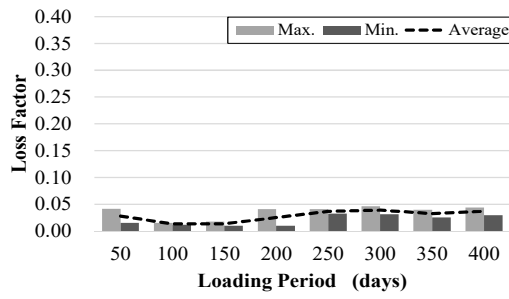
b) DM2



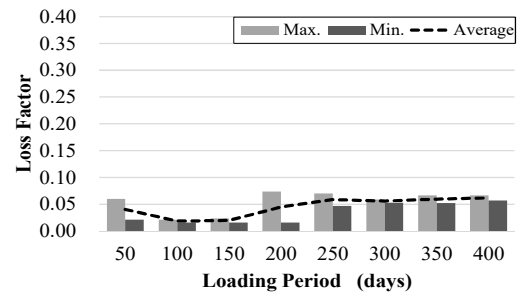
c) DM3



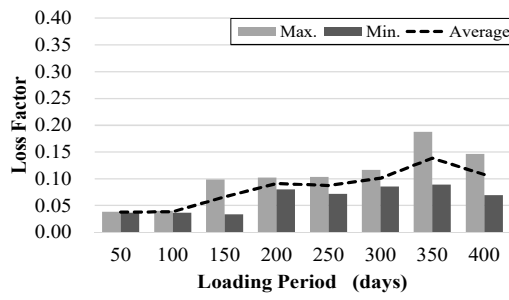
d) DM4



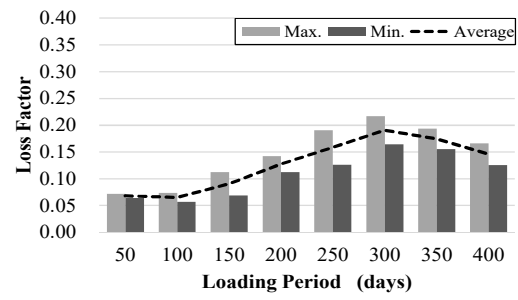
e) DM5



f) DM6



g) DM7

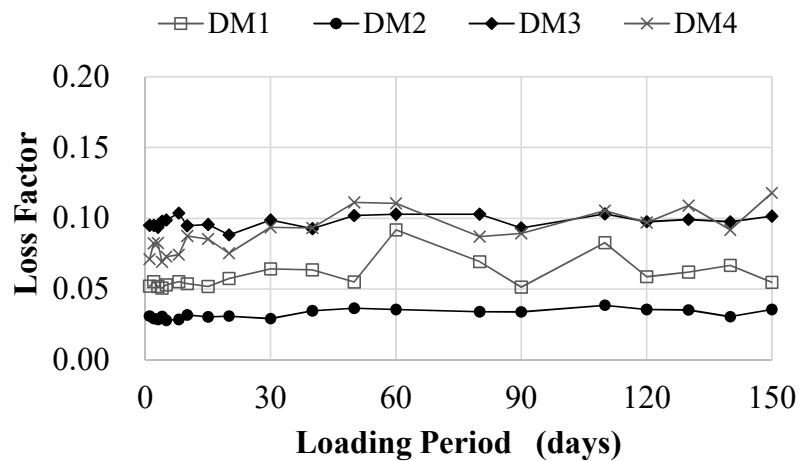


h) DM8

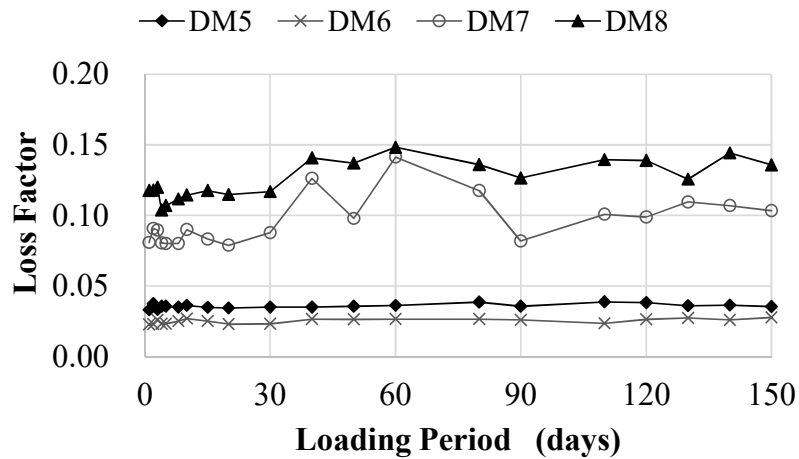
[그림 3.5.4.i] 50일간격의 손실계수 최대, 최소, 평균값 (500N 하중 재하)

(3) 40N, 80N 가력 실험체 손실계수 측정 결과

- [그림 3.5.4.j]와 [그림 3.5.4.k]는 각각 40N과 80N의 하중재하에 따른 바닥완충재의 손실계수 변화를 보여줌.
- 40N과 80N 재하의 경우 모두 150일 후의 완충재의 손실계수를 하중가력 초기와 비교하였을 때, 각 실험체별로 증가와 감소를 반복하였지만 전체적으로 큰 변화는 없었음.
- 40N 하중 재하의 경우 DM1, DM2, DM3, DM5, DM6은 150일간 손실계수 증가는 없었으며, DM4, DM,7, DM8의 경우 대략 0.02의 증가폭이 있었으나 손실계수 변화 경향의 특성상 0.02 이상의 크기로 증가와 감소가 반복적으로 이루어지므로 하중가력 150일 기준으로는 손실계수가 전체적으로 변하지 않은 것으로 판단됨.
- 80N 하중 재하의 경우도 마찬가지로 DM1, DM2, DM3, DM5, DM6은 150일간 손실계수 증가는 없었으며, DM4, DM,7, DM8도 증가와 감소가 반복적으로 이루어지며 손실계수가 전체적으로 변하지 않았음.

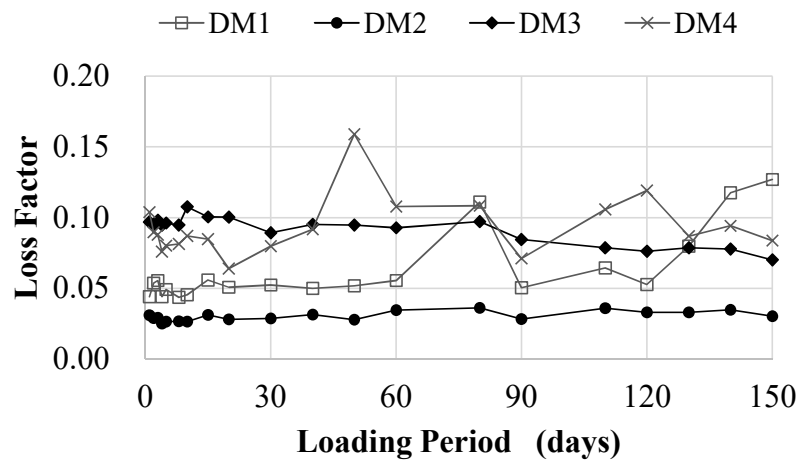


a) DM1, DM2, DM3, DM4

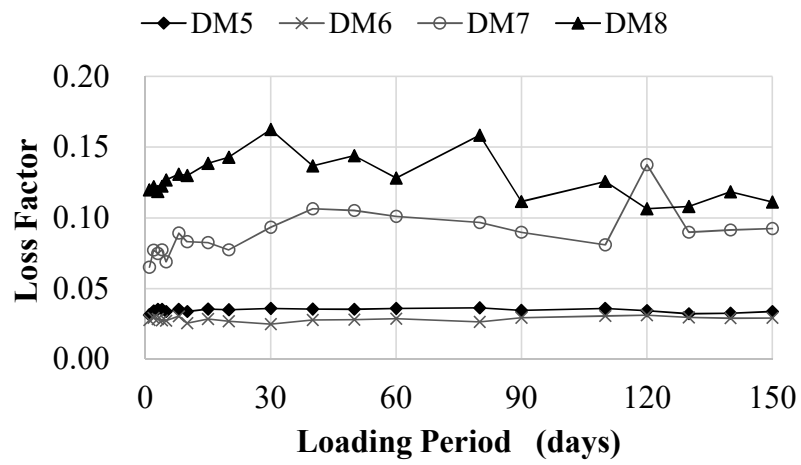


b) DM5, DM6, DM7, DM8

[그림 3.5.4.j] 40N 하중가력기간에 따른 손실계수의 변화



a) DM1, DM2, DM3, DM4



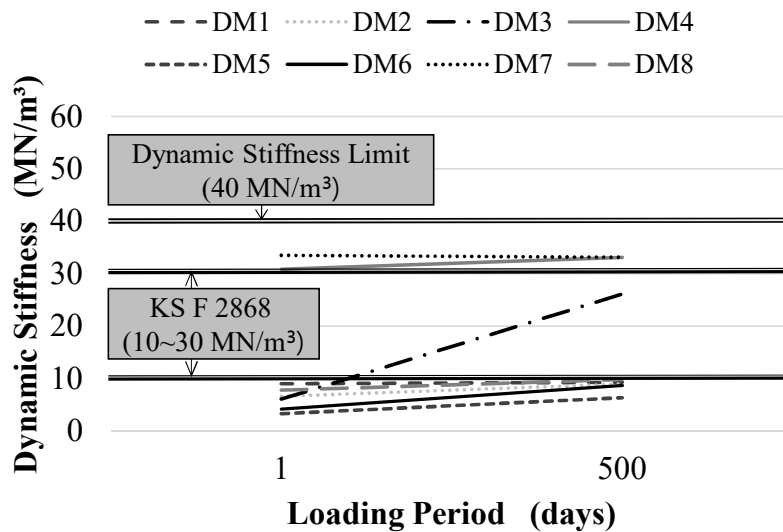
b) DM5, DM6, DM7, DM8

[그림 3.5.4.k] 80N 하중가력기간에 따른 손실계수의 변화

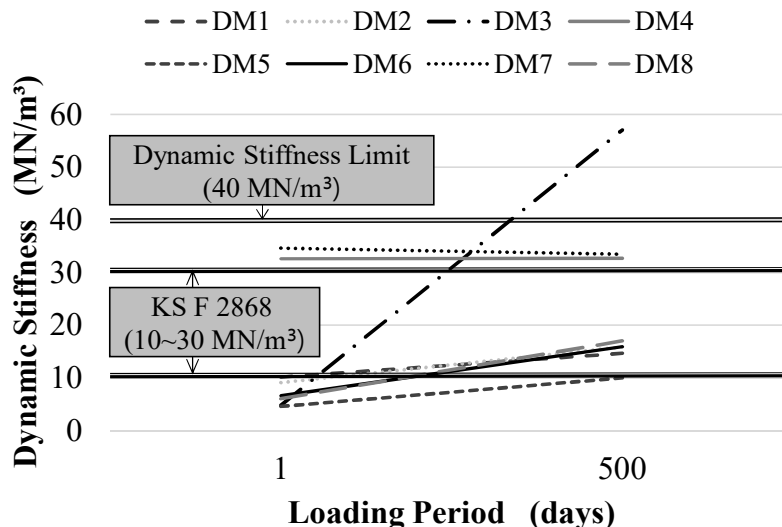
3.5.5 실험분석

가. 동탄성계수 실험분석

- KS F 2868 및 공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준과의 비교를 통해 동탄성계수 실험 분석을 실시함.
- 동탄성계수는 값이 작으면 바닥충격음을 차단하는 효과가 크지만, 뜬바닥 구조 위를 걸을 때 흔들림이 발생하여 보행감이 나쁘게 되고 값이 크면 바닥충격음 차단 성능이 낮아지게 됨.
- KS F 2868에서 동탄성계수는 $10 \sim 30 \text{ MN/m}^3$ 이 적절하다고 판단하였으며, “공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준”의 제28조 2항에서는 동탄성계수가 40 MN/m^3 이하이어야 한다고 명시함.
- [그림 3.5.5.a]와 [그림 3.5.5.b]는 공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준 제한 값인 40 MN/m^3 이하의 동탄성계수와 250N과 500N의 하중을 400일간 받은 8종 바닥완충재의 동탄성계수 변화에 대해 나타냄.



[그림 3.5.5.a] 동탄성계수에 대한 성능 기준과 동탄성계수의 변화 (250N 하중)

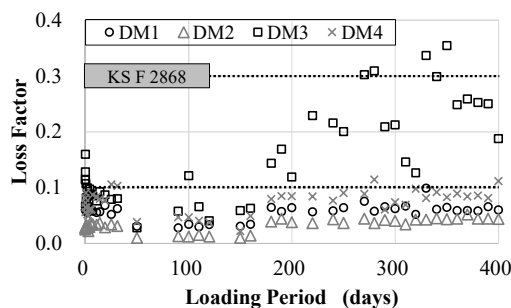


[그림 3.5.5.b] 동탄성계수에 대한 성능 기준과 동탄성계수의 변화 (500N 하중)

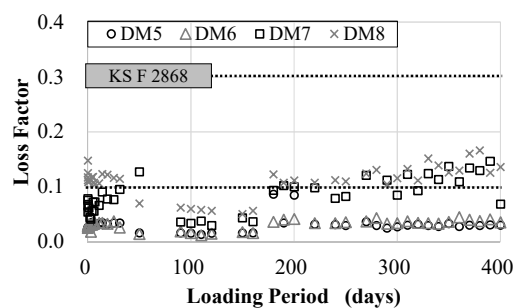
- 250N과 500N의 하중 재하 조건에서 동탄성계수는 하중가력기간 500일을 기준으로 DM3-500N을 제외하고 40MN/m^3 이하의 범위를 만족함.
- 하지만 KS F 2868에서 명시하는 $10\sim 30\text{MN/m}^3$ 범위의 동탄성계수를 만족하는 완충재는 하중가력기간 500일을 기준으로 DM3-250N, DM1-500N, DM6-500N, DM8-500N 단 4개의 실험체만이 기준을 만족하는 결과를 나타냄.
- 250N 하중 재하의 경우, DM3, DM4, DM7을 제외한 나머지 실험체는 10MN/m^3 이하의 동탄성계수로 측정되었고 DM3은 26MN/m^3 , DM4와 DM7은 $30\sim 40\text{MN/m}^3$ 범위의 동탄성계수를 나타냄(하중가력기간 500일 기준).
- 500N 하중 재하의 경우, DM5는 10MN/m^3 이하의 동탄성계수를 가졌으며, DM1, DM6, DM8은 $14\sim 17\text{MN/m}^3$ 범위의 동탄성계수를 나타내었고 DM3의 동탄성계수는 약 60MN/m^3 이었으며, DM4와 DM7은 $30\sim 40\text{MN/m}^3$ 범위의 동탄성계수를 나타냄(하중가력기간 500일 기준).
- 초기 10MN/m^3 이하의 동탄성계수를 가진 바닥완충재는 장기처짐의 증가에 따라 동탄성계수 또한 증가의 경향을 보였으며, 이에 따라 KS F 2868에서 제안하는 동탄성계수의 범위인 $10\sim 30\text{MN/m}^3$ 의 범위에 포함이 되는 경우도 발생함.
- 바닥충격음차단 성능 측면에서 10MN/m^3 이하의 동탄성계수를 가진 바닥완충재는 높은 성능을 발휘하지만 장기간 하중이 가해졌을 때의 구조적 안전성(장기처짐, 잔류변형률 등)과 보행감 측면에서는 구체적인 연구가 필요할 것으로 판단됨.

가. 손실계수 실험분석

- KS F 2868 및 공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준과의 비교를 통해 손실계수 실험 분석을 실시함.
- KS F 2868에서 손실계수는 0.1~0.3 사이이면 적절하다고 제시하였으며, “공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준”의 제28조 2항에서도 손실계수는 0.1내지 0.3의 범위 내이어야 한다고 명시함.
- 이 연구에서는 장기하중을 받은 바닥완충재의 손실계수가 0.1~0.3의 범위를 만족하는지에 대해 알아보고자 함.
- [그림 3.5.5.c]와 [그림 3.5.5.d]는 KS 제안값인 0.1에서 0.3 사이의 손실계수와 250N과 500N의 하중을 400일간 받은 8종 바닥완충재의 손실계수 변화에 대해 나타내고 있음.
- [그림 3.5.5.e]와 [그림 3.5.5.f]는 손실계수와 동탄성계수와의 상관관계를 나타냄.

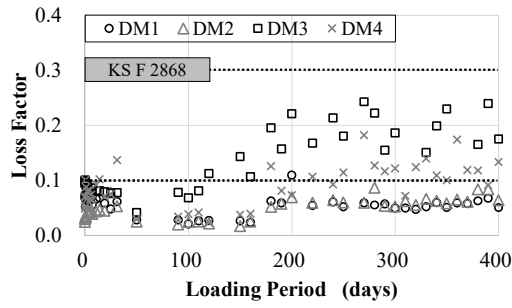


a) DM1, DM2, DM3, DM4

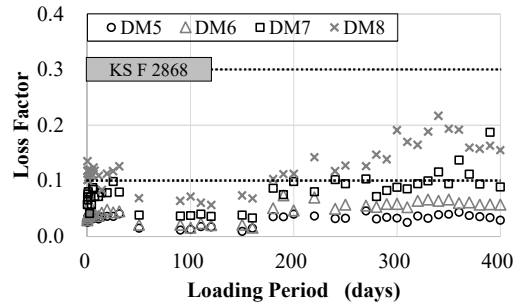


b) DM5, DM6, DM7, DM8

[그림 3.5.5.c] 손실계수에 대한 성능 기준과 실험체별 손실계수의 변화 (250N 하중)

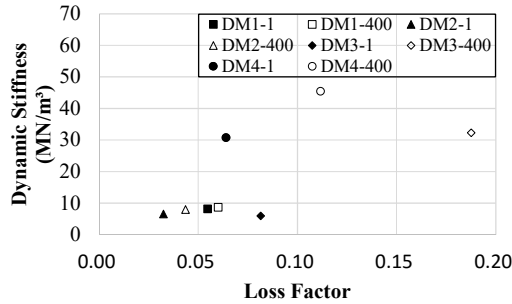


a) DM1, DM2, DM3, DM4

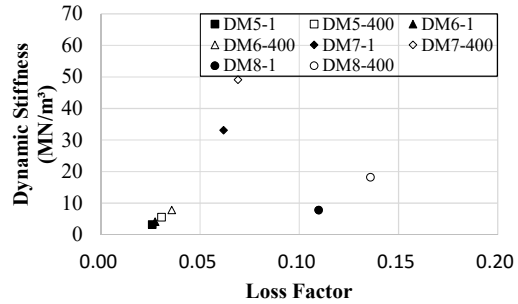


b) DM5, DM6, DM7, DM8

[그림 3.5.5.d] 손실계수에 대한 성능 기준과 실험체별 손실계수의 변화 (500N 하중)

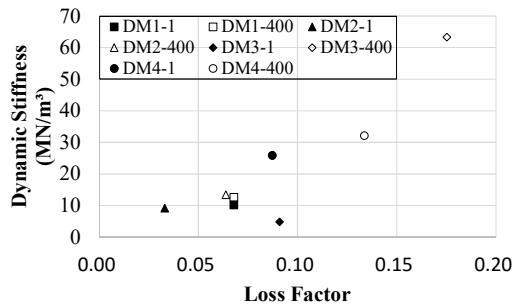


a) DM1, DM2, DM3, DM4

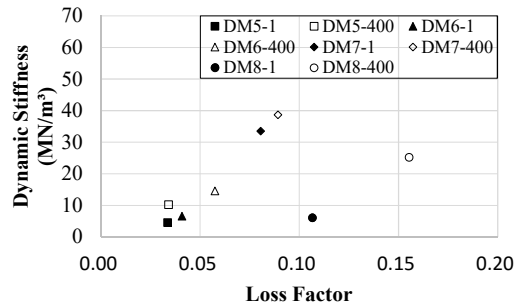


b) DM5, DM6, DM7, DM8

[그림 3.5.5.e] 손실계수와 동탄성계수의 상관관계 (250N 하중)



a) DM1, DM2, DM3, DM4



b) DM5, DM6, DM7, DM8

[그림 3.5.5.f] 손실계수와 동탄성계수의 상관관계 (500N 하중)

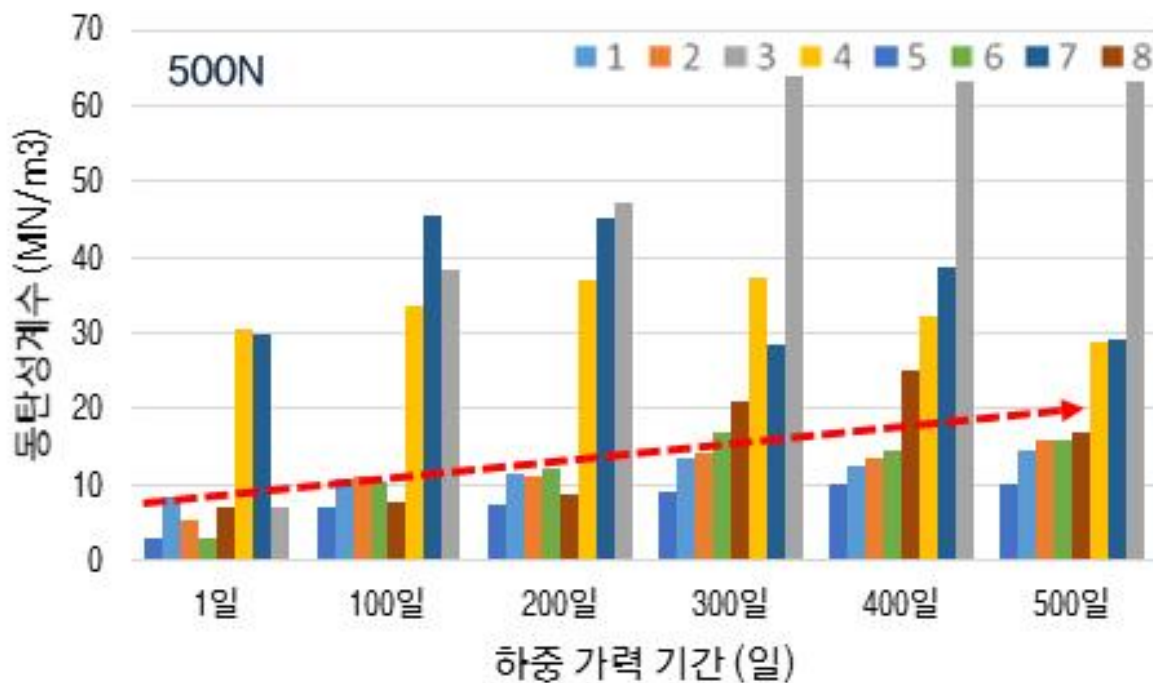
- 250N과 500N의 하중 재하 조건 모두에서의 손실계수는 0.3 이내에 있음.
- 손실계수 0.1 이상의 범위를 만족시키는 실험체는 두 하중 조건 모두에서 DM3와 DM8만 만족함.
- 400일간 장기하중을 받는 8종 실험체 중, DM3와 DM8 실험체만 KS제안값인 0.1~0.3의 범위에서 손실계수가 변화함.
- DM4는 0.05~0.13, DM7은 0.05~0.18의 범위를 나타냄.
- DM1, DM2, DM5, DM6은 0.1미만의 범위에서 손실계수가 변화함.
- KS에서 제안하는 손실계수 0.1~0.3의 기준에 미치지 못하는 이유는 낮은 동탄성계수와 관련성이 있는 것으로 판단됨.

3.5.6 장기하중을 받은 바닥완충재의 동탄성계수 표준안 제시

가. 장기하중을 받는 바닥완충재의 동탄성계수 성능기준 검토/분석

- KS F 2868에서 동탄성계수는 $10 \sim 30 \text{ MN/m}^3$ 이 적절하다고 판단하였으며, “공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준”의 제28조 2항에서는 동탄성계수가 40 MN/m^3 이하이어야 한다고 명시함.
- 위의 기준에서 제시하는 동탄성계수는 바닥완충재가 시공되기 전의 초기 상태의 바닥완충재의 동탄성계수를 의미함.
- 바닥완충재의 초기 성능이 공동주택 바닥판 시공 이후에 장기 하중에 의해 발생하는 동탄성계수 성능 변화에 대한 요인을 반영하지 못함.
- 장기 하중 상태의 바닥완충재 동탄성계수 실험 결과, 동탄성계수는 시간이 지남에 따라 점점 증가하는 경향이 나타났으며 이는 초기 상태의 성능을 유지하지 못한다고 판단됨.
- 동탄성계수는 바닥완충재의 소음 저감 능력에 직접적인 연관이 있으며 동탄성계수의 증가는 바닥완충재의 소음 저감 능력을 저하시키는 요인이 됨.
- 바닥완충재의 초기 성능이 장기간 유지될 수 있기 위해서는 초기 동탄성계수 제한과 함께 장기간 시간이 흐른 뒤의 동탄성계수 제한도 필요할 것으로 판단됨.

나. 장기변형 결과도출



- 하중이 가해진 상태의 바닥완충재의 동탄성계수는 시간이 지남에 따라 점점 증가하는 것으로 나타남.
- 초기 동탄성계수와 500일이 지난후의 동탄성계수를 비교했을 때 8종의 바닥완충재에서 최소 약 2배에서 최대 10배 가까이 증가함.
- DM3 실험체를 제외하고 나머지 7종의 실험체에서는 기준에서 제시하는 동탄성계수 범위에는 만족하는 결과를 나타냈지만 초기 동탄성계수를 유지하지 못하고 점점 증가함.
- DM3 실험체의 경우 초기 동탄성계수는 10 MN/m^3 이하로 나타났지만 500일이 지난 후의 동탄성계수는 60 MN/m^3 을 초과하여 기준을 초과하는 결과가 나타남.

다. 동탄성계수 측정 개선안 제시

- 동탄성계수의 초기값 제한과 함께 장기 동탄성계수를 제한하여 초기 바닥완충재의 성능이 장기간 발휘될 수 있도록 함.

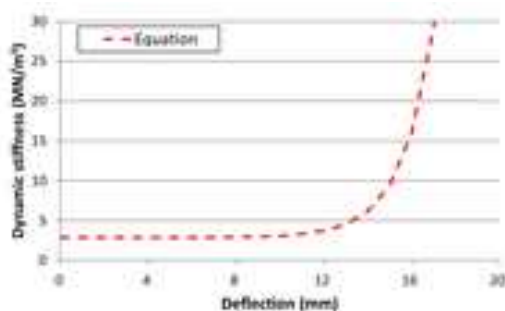
<동탄성계수 측정 개선안 제시>

바닥완충재 성능	기존 KS 기준
동탄성계수	- 하중을 가력하지 않은 상태에서의 동탄성계수 측정 - KS F 2868 : 10~30MN/m³ - KS M 4898 : 동탄성계수 기준 없음 - “공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준”의 제28조 2항 : 초기 40MN/m³ 이하

바닥완충재 성능	측정 개선안 제시
동탄성계수	- 하중 가력된 이후의 동탄성계수 추가 평가 - KS F 2868 : 시공 전 10~30MN/m³ + 시공 후 30MN/m³이하 - KS M 4898 : 시공 전 10~30MN/m³ + 시공 후 30MN/m³이하 - “공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준”의 제28조 2항 : 시공 전/후 40MN/m³ 이하 (시공 후 : 공동주택 수명 기간 동안의 시간)

- 하중의 크기 및 가력시간에 따라서 변화하는 동탄성계수 측정
- 동탄성계수 실험 결과를 활용한 장기 동탄성계수 예측식 제안.
- 동탄성계수의 예측을 통해 직접 실험을 하지 않고도 장기 동탄성계수를 예측할 수 있는 방법을 제시함.
- 변형을 변수로 한 동탄성계수 예측식을 통해 특정 시점에서의 동탄성계수를 예측하고 예측한 동탄성계수가 기준에 적합한지 비교 및 평가 가능.

<동탄성계수 예측식>



$$DS = DS_{20} + \frac{3}{P} e^{\left(\frac{\Delta c_1}{2} - c_2 \frac{P}{E}\right)}$$

Where, DS=Dynamic Stiffness (MN/m³)

DS₂₀=Dynamic Stiffness 30 min. after loading (MN/m³)

P=Applied load (N)

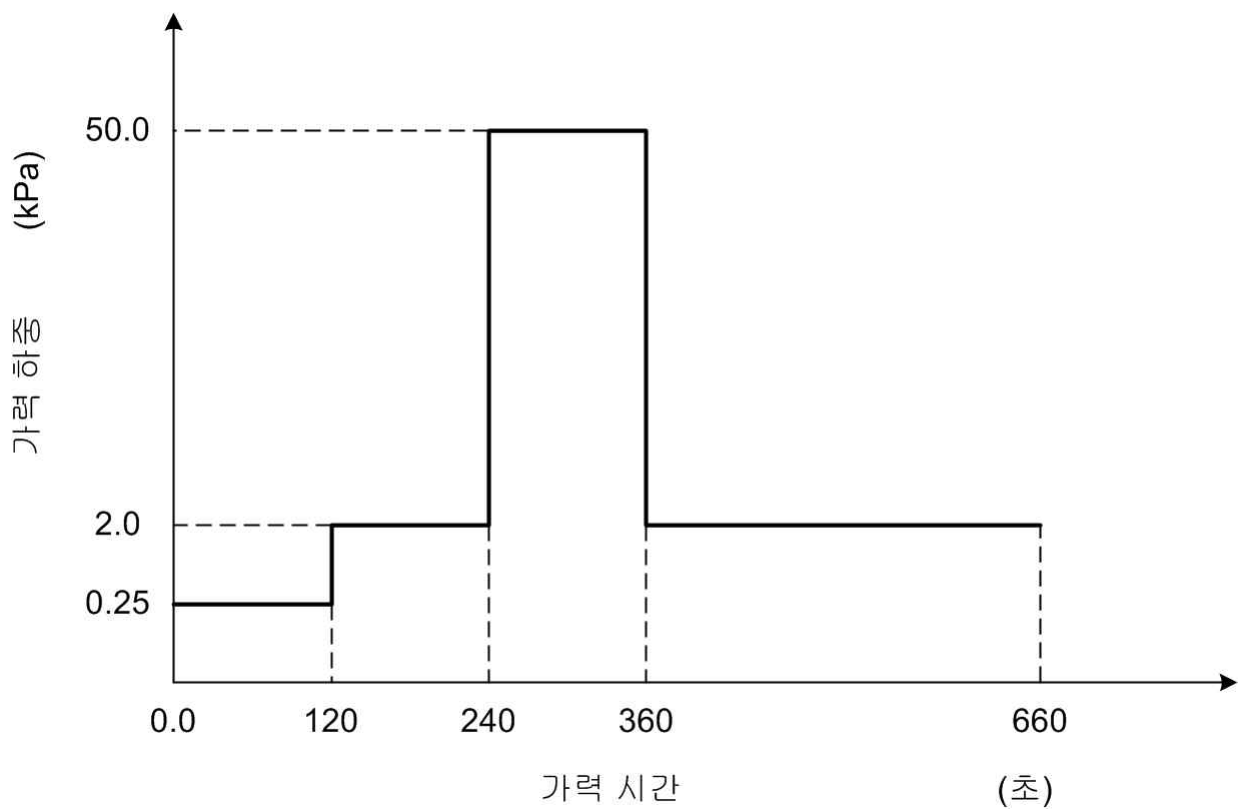
E=Elastic modulus (MPa)

	EPK10	EPK20	PR	KVA
C ₁	1.4	1.2	1.8	1.5
C ₂	0.00038	0.00040	0.0012	0.00038

3.6 바닥완충재의 잔류변형률 실험

3.6.1 실험목적

- KS F 2873 기준 잔류변형률 측정에서는 바닥완충재를 11분간 가력한 후에 이 값에 근거하여 바닥완충재의 잔류변형률을 평가하고 있음.
- 실제 구조물에 사용되는 바닥완충재는 건물의 수명과 함께 30년 가까운 장기간 하중이 가해짐. 따라서 11분간의 단기간 가력 후의 잔류변형률 평가는 실제 구조물에 사용되는 완충재의 잔류변형률과 차이가 발생할 수 있음.
- 따라서 본 연구에서는 장기간 하중이 가해졌을 때의 바닥완충재의 잔류변형률이 현재 KS 기준인 KS F 2873에 따라 측정한 잔류변형률과 얼마나 차이가 발생하는지를 평가하고자 함.
- KS F 2873에 의한 하중가력은 [그림 3.6.1]과 같이 4단계로 나누어 가력함.



[그림 3.6.1] 잔류변형률 하중가력 시간

3.6.2 실험변수

[표 3.6.2] 완충재의 장기 잔류변형률 실험체의 특성

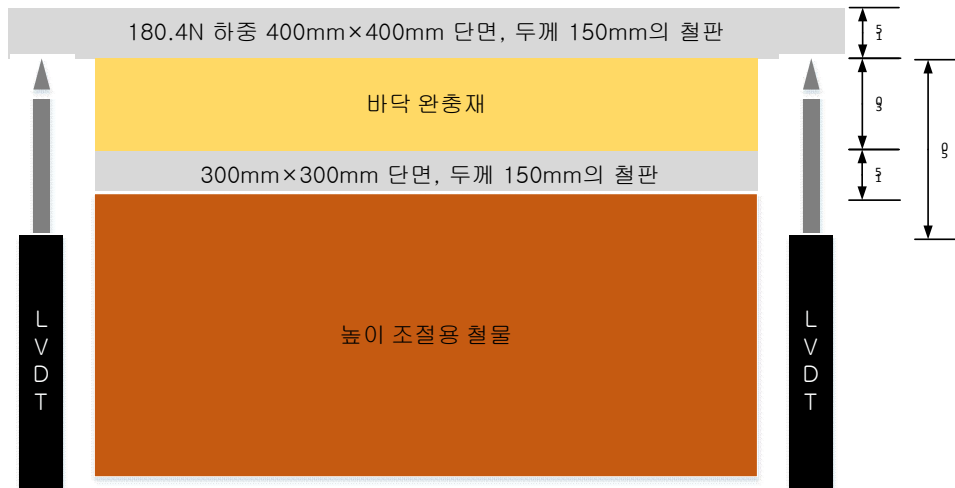
실험체 번호	시료명	바닥형상	밀도 (kg/m³)	초기 두께 (mm)	초기동탄성계수 (N/m²)
1	EPS(1종)	평판형	13.20	28.94	10.30399
2	EPS(1종)	골판형	12.08	29.80	4.59541
3	PO	평판형	23.96	30.98	9.95054
4	EPS(1종)	평판형	24.70	29.33	29.25955
5	EPS(2종)	골판형	25.53	31.85	3.31816
6	EPS(2종)	골판형	15.40	30.89	3.39959
7	EPS(1종)	평판형	24.12	29.30	42.79966
8	EVA	엠보형	59.26	30.15	5.18463

- 바닥완충재의 잔류변형률 측정 실험에서는 [표 3.6.2]와 같이 장기변형, 동탄성계수 및 손실계수 측정 실험체와 동일한 8가지 종류의 바닥완충재를 변수로 하였음.
- 바닥완충재의 종류는 EPS계통 6종과 PO계통 1종, EVA계통 1종임.
- EPS 6종은 각각 밀도와 바닥형상이 다름.
- 150mm×150mm 실험체 전면이 하중을 고르게 받을 수 있도록 함.
- 실험체는 하중의 크기에 따라서 동일한 무게와 크기의 철판 가력판을 이용하여 250N과 500N을 하중 조건을 조성하였음.

3.6.3 실험방법 및 측정

가. KS기준 잔류변형률 측정방법에 따른 실험

- 앞서 제시한 KS기준에 의한 잔류변형률 실험방법에 따른 0.25kPa, 2.0kPa, 50.0kPa을 기준으로 하중을 변화시켰으며, 하중 가력 시간과 하중 제거 후 대기시간을 고려하여 실험을 실시 함.
- KS기준에 따른 잔류변형률 측정 실험순서는 다음과 같음.
 - ① KS F 2873에서 제시된 완충재의 크기인 300mm×300mm크기로 바닥완충재 절단
 - ② 300mm×300mm 단면에 0.25kPa의 하중에 해당하는 23N 하중을 2분간 가력 한 후 바닥완충재의 두께 측정 - d_L
 - ③ 300mm×300mm 단면에 2kPa의 하중에 해당하는 180.4N 하중 가력을 위해 180.4N으로 제작한 400mm×400mm 단면, 150mm 두께의 철판을 이용하여 2분간 가력 하며, 신뢰도 높은 데이터 산출을 위해 LVDT를 4곳의 모서리에 설치.
 - ④ 300mm×300mm 단면에 50kPa의 하중에 해당하는 4405N 하중 가력을 위해 만능시험기(UTM시험기)를 이용하여 400mm×400mm 단면, 150mm 두께의 철판 위에 철판의 하중 180.4N을 제외한 4224.6N을 2분간 가력 함.
 - ⑤ 300mm×300mm 단면에 UTM시R3BU7험기를 이용하여 가력한 4224.6N을 제거한 후, 400mm×400mm 단면, 150mm 두께의 철판을 적재 상태의 철판만을 이용하여 5분간 180.4N을 가력 한 후 LVDT를 이용하여 바닥완충재의 두께 측정. - d_B
 - ⑥ d_L 과 d_B 의 차이($d_L - d_B$)를 계산하여 바닥완충재의 잔류변형률 측정.



[그림 3.6.3.a] KS기준에 의한 잔류변형률 실험 개념도

나. 장기 잔류변형률 실험 방법 및 측정

- 잔류변형률 측정을 위한 가력 시간은 30분, 10시간, 24시간, 10일, 20일, 30일, 365일을 기준으로 하였음.
- 잔류변형률 측정 실험 순서는 다음과 같음.
 - ① 하중을 가력한 후 시간의 흐름에 따라 실험체에서 하중판을 제거함.
 - ② 실험체에서 하중판을 제거한 직후 완충재 양면에 1mm 두께의 철판을 밀착시키고 디지털 버니어 캘리퍼스를 이용하여 두께를 측정함.
 - ③ 이후에는 30분, 10시간, 24시간을 기준으로 디지털 버니어 캘리퍼스를 이용하여 동일하게 두께를 측정.



[그림 3.6.3.b] 하중 제거 후 실험체에 1mm 두께 철판을 밀착



[그림 3.6.3.c] 디지털 버니어 캘리퍼스를 이용하여 두께 측정

3.6.4 실험결과

가. KS기준 잔류변형률 측정방법에 따른 실험결과

- KS F 2873 기준 잔류변형률 측정에 따라 잔류변형률을 측정하였음.
- 실험을 3회 실시하여 평균값을 구하였음.

[표 3.6.4.a] 실험체별 잔류변형률 (%)

실험체 구분	1번 (EPS 평판형)	2번 (EPS 골판형)	3번 (PO 평판형)	4번 (EPS 평판형)	5번 (EPS 골판형)	6번 (EPS 골판형)	7번 (EPS 평판형)	8번 (EVA 엠보형)
잔류 변형률	21.1	29.6	2.2	1.0	16.4	19.7	1.6	7.9

나. 장기 잔류변형률 실험결과

(1) 잔류변형률 측정 데이터

[표 3.6.4.b] 250N 가력 시 실험체의 장기 잔류변형 변화 (%)

가력시간	시간	1번	2번	3번	4번	5번	6번	7번	8번
30분	직후	1.62	7.28	1.36	0.65	4.68	2.88	0.51	2.42
	30분	0.41	5.30	0.52	0.00	1.79	2.23	0.51	0.80
	10시간	0.31	4.53	0.00	0.00	0.97	2.30	0.51	0.13
	24시간	0.00	4.13	0.00	0.00	0.85	2.23	0.51	0.00
10시간	직후	2.94	12.05	3.45	0.55	13.38	17.90	1.16	9.72
	30분	1.87	10.20	1.61	0.00	9.26	14.89	1.06	4.81
	10시간	1.49	7.58	1.16	0.00	3.86	8.64	0.89	3.25
	24시간	1.17	7.55	0.68	0.00	2.98	7.67	0.72	1.69
24시간	직후	3.70	13.09	4.91	0.10	15.10	19.39	1.06	11.11
	30분	1.38	11.31	2.45	0.03	11.55	16.83	0.99	7.23
	10시간	1.35	9.33	1.68	0.00	5.46	11.72	0.96	3.88
	24시간	1.73	9.09	1.68	0.00	4.30	10.00	0.78	3.35
5일	직후	4.42	13.32	9.07	0.68	3.21	24.54	0.78	14.30
	10시간	2.66	11.24	6.10	0.55	7.00	14.83	0.78	7.23
	24시간	2.38	9.73	5.26	0.44	4.90	12.30	0.78	6.27
10일	직후	5.04	14.23	15.33	0.85	26.29	24.83	1.54	13.86
	30분	4.32	13.09	14.30	0.85	14.47	22.82	1.40	10.45
	10시간	3.42	12.05	13.14	0.58	9.01	18.39	1.31	8.99
	24시간	2.94	11.34	11.72	0.58	7.38	15.90	1.23	7.66
20일	직후	6.05	16.88	26.99	0.78	16.61	30.20	1.43	16.12
	10시간	4.63	14.36	25.27	0.55	10.02	24.41	1.06	10.91
	24시간	4.22	14.23	22.79	0.38	9.89	23.60	1.06	10.68
30일	직후	9.61	18.83	73.27	0.85	25.59	36.71	1.74	18.94
	30분	8.12	18.49	72.35	0.85	23.14	34.48	1.47	17.88
	10시간	7.29	18.22	70.34	0.72	18.78	31.18	0.99	14.93
	24시간	7.08	16.31	67.88	0.34	17.14	30.17	0.78	14.30

- [표 3.6.4.a]는 초기 잔류 변형률에 대한 결과를 나타냄.
- [표 3.6.4.b]은 250N 가력 시 실험체의 장기 잔류변형률을 정리하여 나타냄.
- 30분, 10시간, 24시간, 10일, 20일, 30일의 가력시간을 기준으로 각각 직후, 30분, 10시간, 24시간 순으로 잔류변형률을 실험하였음.

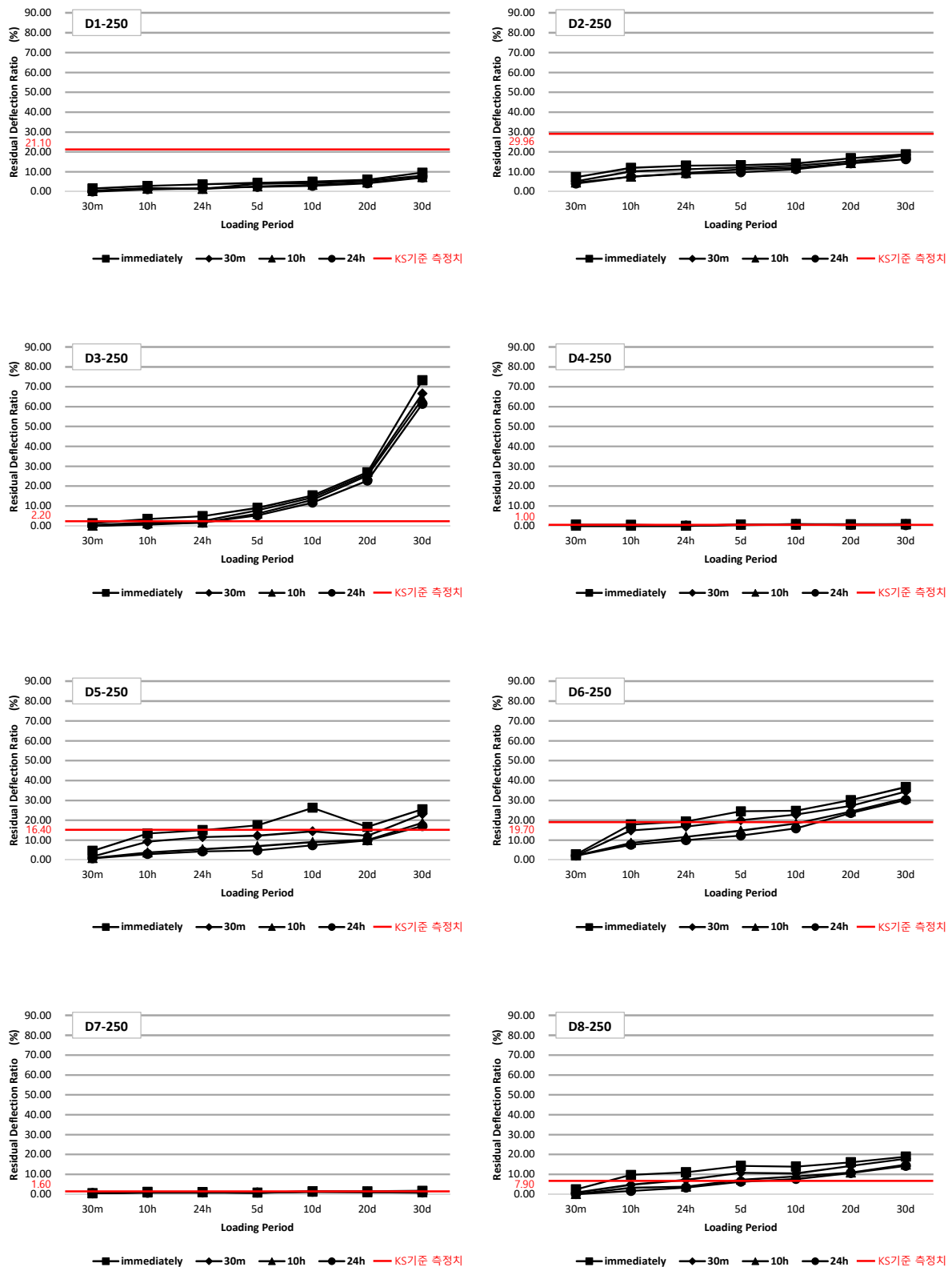
[표 3.6.4.c] 500N 가력 시 실험체의 장기 잔류변형 변화 (%)

가력시간	시간	1번	2번	3번	4번	5번	6번	7번	8번
30분	직후	6.67	17.65	2.19	0.14	17.65	14.02	0.75	10.68
	30분	3.21	12.18	0.94	0.00	8.92	10.07	0.75	5.31
	10시간	3.01	11.81	0.00	0.00	8.35	7.61	0.51	3.88
	24시간	2.66	11.68	0.00	0.00	7.25	6.18	0.99	3.68
10시간	직후	14.31	24.16	6.88	0.48	32.62	34.38	0.99	15.06
	30분	11.47	21.41	3.16	0.00	26.53	29.75	0.72	9.02
	10시간	8.57	18.19	2.26	0.00	15.54	20.10	0.44	5.74
	24시간	8.22	17.42	0.87	0.00	14.22	17.71	0.44	5.14
24시간	직후	15.96	28.59	7.62	0.00	34.22	39.01	1.23	16.78
	30분	14.27	26.51	5.94	0.00	29.89	36.10	1.09	10.45
	10시간	11.61	23.26	4.36	0.00	19.43	27.81	0.89	6.90
	24시간	10.71	22.48	3.97	0.00	17.58	24.67	0.82	6.73
5일	직후	17.76	30.30	18.72	0.72	37.24	40.43	1.02	21.86
	10시간	13.48	26.17	15.30	0.00	23.67	29.39	1.02	9.95
	24시간	13.13	25.13	13.78	0.00	20.97	28.36	0.92	8.86
10일	직후	19.00	31.68	30.76	0.65	37.61	42.05	1.19	18.31
	30분	17.21	30.00	29.08	0.65	33.44	38.62	1.06	14.10
	10시간	15.51	28.09	27.44	0.58	27.28	34.54	1.06	12.04
	24시간	14.65	27.01	26.11	0.48	24.11	31.34	0.89	10.08
20일	직후	20.87	32.62	56.13	0.27	39.47	45.32	1.06	19.04
	10시간	17.48	29.53	48.52	0.27	29.92	38.56	1.06	14.76
	24시간	17.31	29.06	48.19	0.27	29.26	37.39	1.06	14.33
30일	직후	24.43	39.87	84.38	0.61	44.77	47.65	0.89	25.51
	30분	22.91	37.11	83.83	0.41	42.39	45.58	0.89	24.11
	10시간	21.25	35.91	81.28	0.00	37.68	42.64	0.51	20.80
	24시간	21.11	35.34	78.18	0.00	36.48	41.96	0.34	20.33

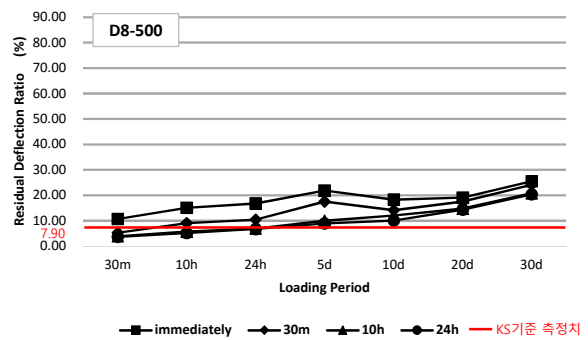
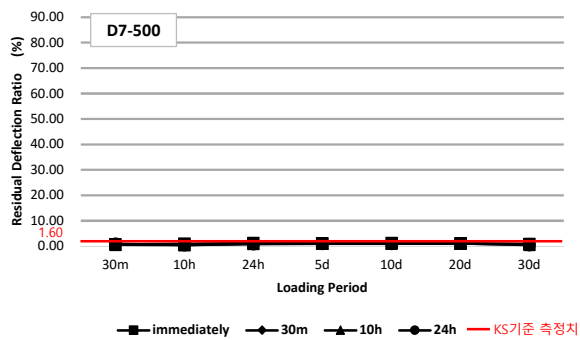
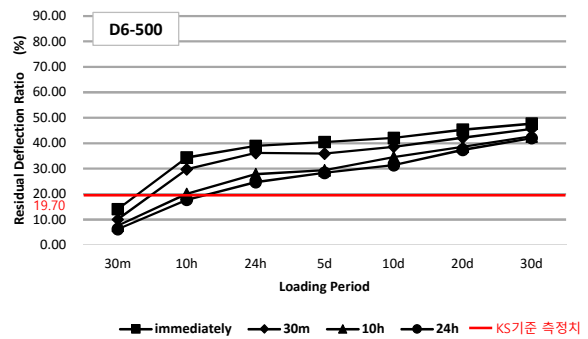
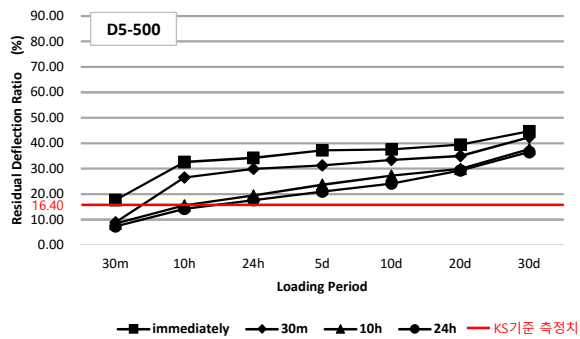
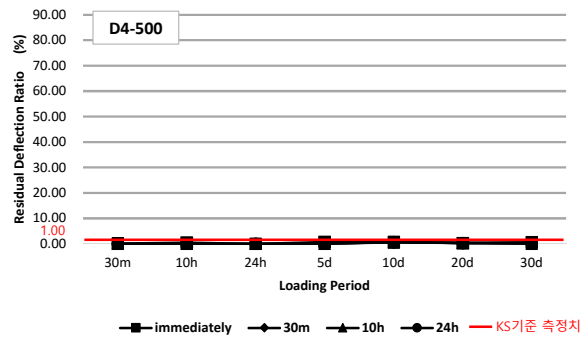
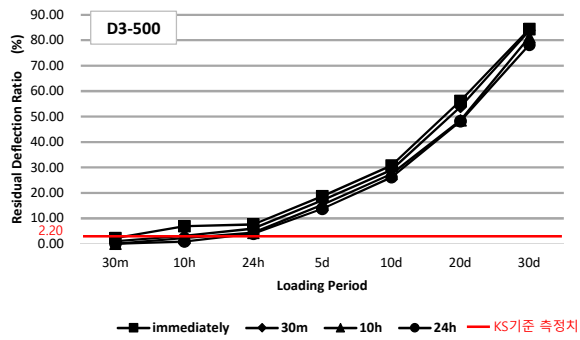
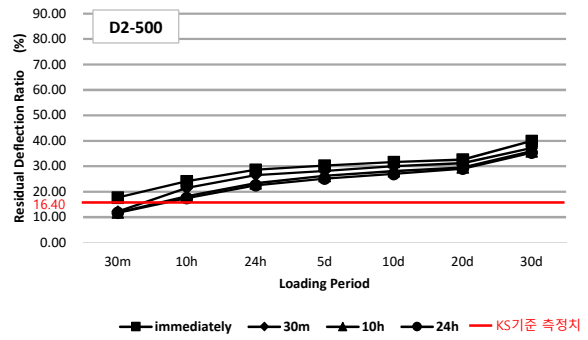
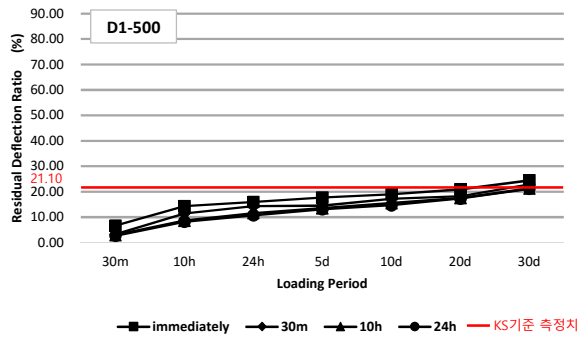
- [표 3.6.4.c]는 500N 가력 시 실험체의 장기 잔류변형률을 정리하여 나타냄.
- 30분, 10시간, 24시간, 10일, 20일, 30일의 가력시간을 기준으로 각각 직후, 30분, 10시간, 24시간 순으로 잔류변형률을 실험하였음.

(2) KS기준에 따른 잔류변형률 측정결과와 장기 잔류변형률 측정결과 비교

- [그림 3.6.4.d]과 [그림 3.6.4.e]은 KS기준에 따른 잔류변형률과 장기 잔류변형률을 그래프로 비교하여 나타냄.



[그림 3.6.4.d] 250N 가력 시 잔류변형률 비교



[그림 3.6.4.e] 500N 가력 시 잔류변형률 비교

- [그림 3.6.4.d]와 [그림 3.6.4.e]에서 알 수 있듯이 밀도가 높고 평탄형 실험체의 경우에는 가력한 후에도 침하가 크지 않았으며 하중을 제거한 이후에도 실험체 변형의 큰 회복이 보이지 않았음.
- 모든 실험체는 하중의 가력시간이 증가함에 따라서 잔류변형률의 값이 증가하고 있음을 알 수 있음.
- 재질별로 보았을 때, EPS가 PO에 비해 잔류변형률이 낮은 것으로 판단이 됨. 그리고 EVA재질은 밀도가 약 60kg/m³임에도 불구하고 밀도가 약 5배 낮은 실험체 1번(EPS1종)과 유사한 잔류변형률의 변화를 가짐. 이는 실험체 1번은 평탄형이고 EVA재질인 실험체 8번은 엠보형이기 때문으로 판단됨. 따라서 잔류변형률은 바닥형상이 밀도에 비해 더 많은 영향을 받는 것으로 판단됨.
- PO재질인 3번 실험체의 잔류변형률 변화를 보았을 때, 30일 시점에서 하중과 실험 시점에 따라 잔류변형률이 약 60~80%를 나타냄.
- 잔류변형률은 KS F 2873에 정하고 있는 시험방법에 따라 측정한 값이 시료초기 두께가 30mm 미만은 2mm 이하(잔류변형률 약 7% 이하), 30mm 이상은 3mm 이하(잔류변형률 약 10% 이하)가 되어야함. [그림 3.6.4.d]와 [그림 3.6.4.e]를 보면 실험체 4번과 7번을 제외하고 30일을 기준으로 나머지 모두 KS기준을 초과하는 것을 알 수 있음.
- 우선, 실험체 3,4,7,8번에 대한 단기 잔류변형률 측정치를 제외하고 나머지에 대해서는 재실험을 해야할 것으로 보임. KS기준치를 벗어나는 결과를 보임. 하지만 장기변형이 거의 일어나지 않은 4번과 7번 실험체를 제외하고 3번과 8번 실험체를 보면 장기 잔류변형률의 결과와 상이함을 알 수 있음.
- 따라서, KS F 2873 기준의 11분간의 단기간 가력 후의 잔류변형률 측정이 아닌 최소한 30일 이상의 장기하중 가력을 한 뒤, 잔류변형률을 측정해야 함.

[표 3.6.4.d] 250N 가력 시 실험체의 장기 잔류변형 변화 (%)

가력시간	시간	1번	2번	3번	4번	5번	6번	7번	8번
365일	직후	10.26	22.07	78.36	1.25	30.56	40.65	2.86	24.87
	30분	9.90	21.65	77.54	1.10	24.58	38.12	2.84	24.54
	10시간	9.80	21.48	77.50	1.01	24.02	38.01	2.78	24.50
	24시간	9.65	20.96	77.47	0.97	23.35	37.54	2.65	24.35

[표 3.6.4.e] 500N 가력 시 실험체의 장기 잔류변형 변화 (%)

가력시간	시간	1번	2번	3번	4번	5번	6번	7번	8번
365일	직후	27.52	43.57	90.21	3.00	48.63	51.34	3.70	32.75
	30분	27.10	43.12	89.35	2.23	41.22	49.64	3.67	32.43
	10시간	27.01	42.93	89.30	2.20	40.56	49.05	3.60	32.40
	24시간	26.77	42.41	89.24	2.17	40.21	48.47	3.50	32.19

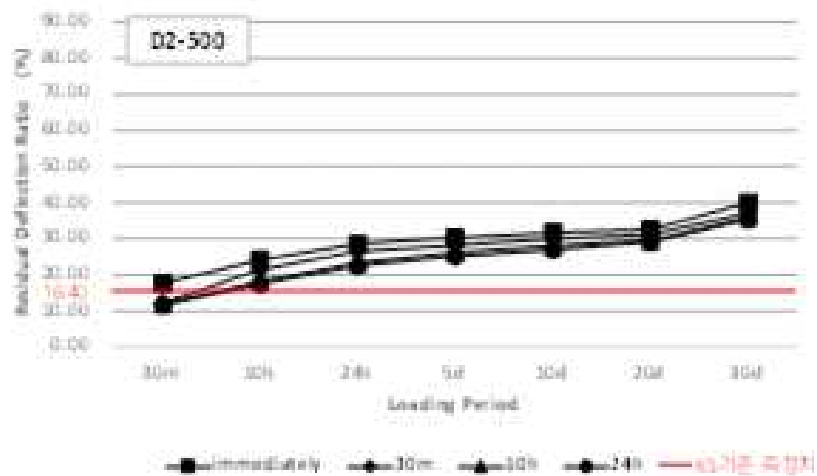
- [표 3.6.4.d]와 [표 3.6.4.e]는 365일의 8종 바닥완충재의 잔류변형 변화(%)를 나타냄.
- 365일의 잔류변형률은 30일 보다 증가하였으며 잔류변형의 회복이 매우 미약함.

3.6.5 잔류변형률 측정 개선안 제시

가. 장기하중을 받는 바닥완충재의 잔류변형률 성능기준 검토/분석

- KS F 2873 기준 잔류변형률 측정은 11분간의 단기 하중 가력을 통한 잔류변형률을 측정하는 방법임.
- 11분간의 하중 가력은 바닥완충재에 변형을 일으켜 잔류변형률이 나타나긴 하지만 잔류변형률 값이 작고 회복률이 크게 나타남.
- 장기 하중 가력을 통한 잔류변형률 실험 결과, 11분 단기 하중 가력에 비해 잔류변형률이 크게 증가하였으며 회복률이 낮아 변형이 유지되는 특징이 나타남.

나. 장기변형 결과도출



- 잔류변형률은 하중 가력 기간이 길어짐에 따라 점점 증가하는 경향이 나타남.
- KS F 2873에 의한 잔류변형률 기준에는 만족하는 결과가 나오지만 시간이 지날수록 기준 값을 초과하는 잔류변형이 생김.
- 하중 가력 30일이 지난 이후 모든 완충재에서 KS F 2873 잔류변형률 제한값을 초과하는 잔류변형이 나타남.

다. 시험표준안 제시

- 11분 간의 단기 하중 가력이 아닌 약 30일 간의 잔류변형률 측정 필요
- 장기 잔류변형률 값 제한을 통해 바닥완충재의 변형을 감소시키고 내구성 및 안정성을 증대시킬 수 있음.

<동탄성계수 측정 개선안 제시>

바닥완충재 성능	기존 KS 기준	측정 개선안 제시
잔류변형률	- KS F 2873 잔류변형률 기준 - 11분간의 단기 하중 가력 - 잔류변형률이 작고 회복률이 큼 - 장기 하중 상태의 바닥완충재의 변형 반영 불가능	- 11분 --> 30일 하중 가력 시간 증가 - 손실된 잔류변형률 평가 가능

3.7 바닥완충재의 장기 특성을 활용한 바닥판의 동적해석

3.7.1 해석목적

- 실제 건축물에서 장기하중을 가력을 통해 물성이 변화하는 바닥완충재의 성능을 분석하고자 함.
- 바닥완충재에 대한 장기 성능 실험의 한계인 실제 구조물에서의 소음평가를 구현하기 위함.
- 다양한 형태의 평면을 가진 건축물에서 효율적으로 동적응답평가 및 소음평가를 하고자 함.
- 실생활에서 층간소음의 원인이 되는 다양한 동적하중 가력을 통해 방진층의 성능평가를 하고자 함.

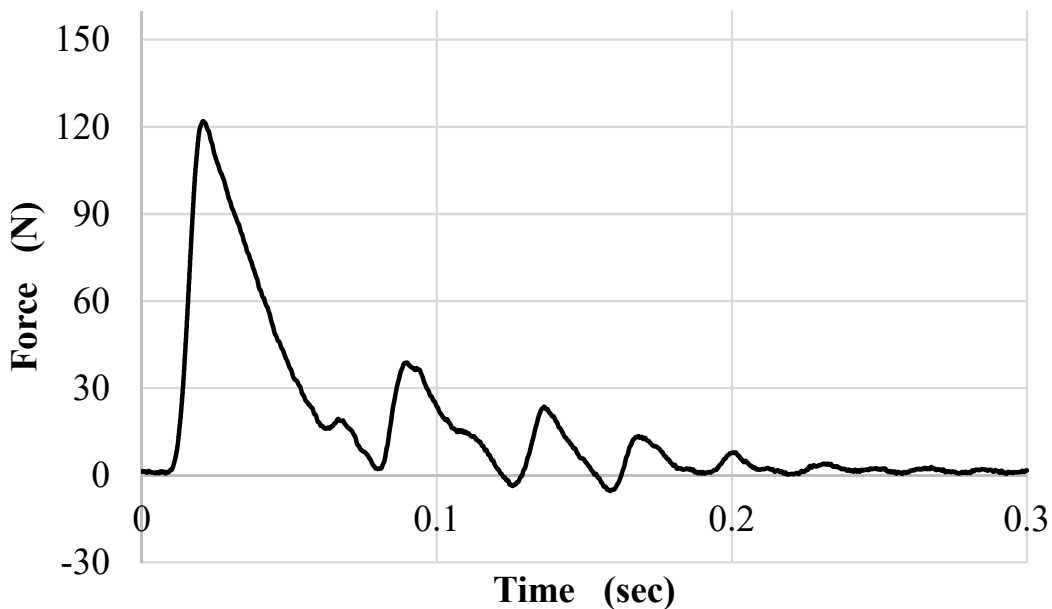
3.7.2 해석모형 및 변수

가. 해석모형

- 중량충격음 법적 기준인 50dB 이하로 소음을 줄이기 위해 주거용 건축물에는 바닥슬래브와 기포콘크리트 사이에 강성이 약한 바닥완충재를 설치하는 것이 일반적임¹¹⁾.
- 이러한 경우, 바닥완충재 상부의 구조물과 하부의 구조물의 진동 거동이 다르게 나타나게 되고 따라서 바닥완충재 상하부의 거동을 표현하기 위해 바닥판 시스템을 바닥슬래브, 바닥완충재, 마감층으로 구분하여 적층하여 구성함¹²⁾.

나. 하중모형

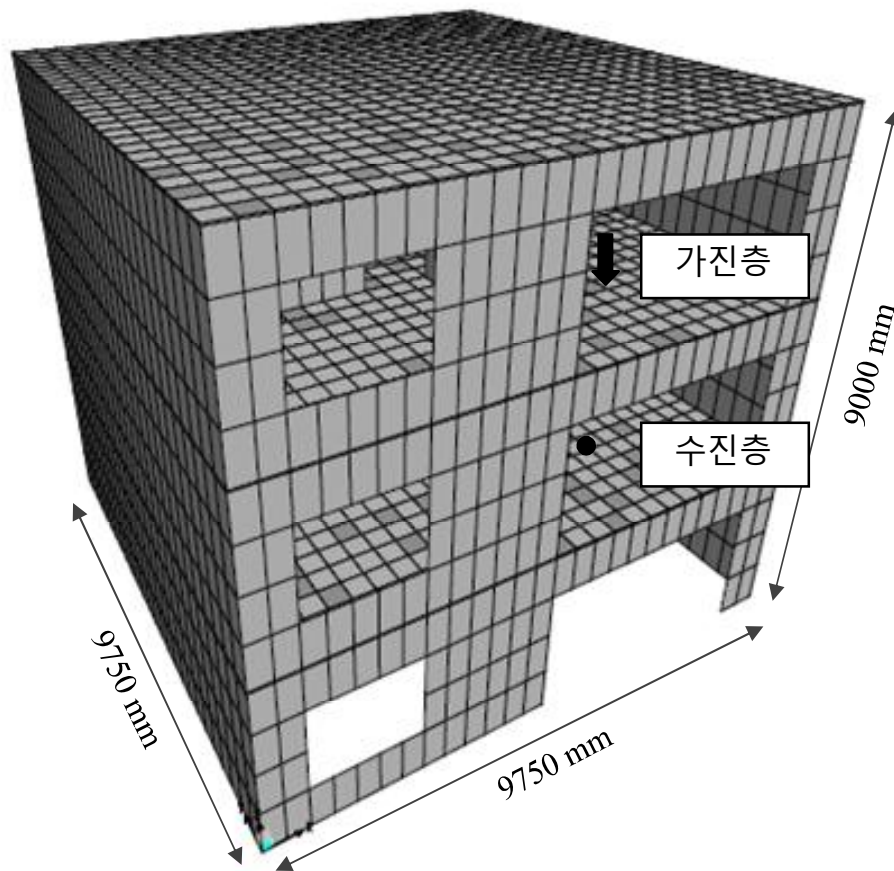
- 건축물 바닥판에 작용할 수 있는 대표적인 하중으로 공을 떨어뜨렸을 경우임.
- 농구공을 1m 위치에서 로드셀에 떨어뜨려 계측한 것임.
- [그림 3.7.2.a]는 중량충격하중에 대한 시간에 따른 힘의 관계를 나타내며 Kim(2005)¹⁴⁾의 연구에서 사용한 동적하중임.



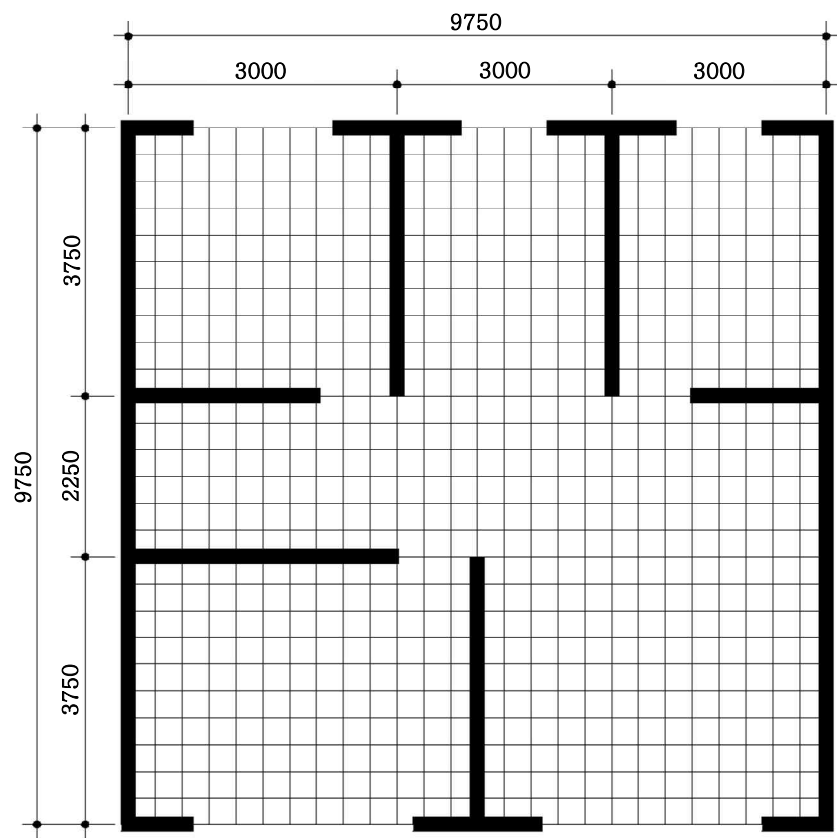
[그림 3.7.2.a] 중량충격하중(Kim(2005))

다. 건축물 모형

- 예제모형은 9750mm X 9750mm 평면에 높이 3m의 3층 전단벽식 구조물로 설정하였으며, 예제 구조물의 물성치는 [그림 3.7.2.b], [그림 3.7.2.c], [표 3.7.2.a]에 나타냄.
- 바닥완충재의 물성치는 실험을 통해 얻은 바닥완충재의 두께, 탄성계수, 중량, 동탄성계수, 그리고 손실계수의 변화를 해석에 적용.
- DM4와 DM7은 250N과 500N의 하중 조건에서 처짐의 변화가 없었으며, 동탄성계수는 증가와 감소의 반복적인 경향으로 인한 수치의 변화는 있었지만 500일간의 전체 경향은 변화가 없었기 때문에 해석에 적용하지 않음.
- Kim(2005)¹⁴⁾은 진동하중을 받는 바닥판구조물의 해석을 위해서는 하중의 진동수 성분에 따라 적절한 요소분할이 필요하다는 결론을 내었으며, 본 연구에서는 Kim(2005)¹⁴⁾과 동일한 중량충격하중을 사용하였기 때문에 Kim(2005)¹⁴⁾이 제안하는 최소 간격 37.5cm로 요소 분할함.
- 또한, 바닥판구조물 해석을 위해서는 전단변형이 고려된 판요소를 적용하는 것이 구조물의 정확한 응답을 얻는데 필수적이라는 결론을 내렸으며, 본 연구에서도 바닥판구조물에 판요소를 적용시킴.



[그림 3.7.2.b] 입체해석모형



[그림 3.7.2.c] 예제구조물 평면

[표 3.7.2.a] 예제구조물의 물성치

구조부재	두께(mm)	중량(kN/m ³)	탄성계수(MPa)	감쇠비(%)
마감층	80	15	5.32×10^3	5
바닥완충재	실험값			
슬래브	180	24	2.40×10^4	3
벽체	150	24	2.40×10^4	3

라. 해석변수

- 바닥완충재의 물성치는 실험을 통해 얻은 바닥완충재의 두께, 탄성계수, 중량, 동탄성계수, 그리고 손실계수의 변화를 해석에 적용.
- 바닥완충재의 두께, 탄성계수, 중량, 동탄성계수를 [표 3.7.2.b], [표 3.7.2.c], [표 2.7.2.d]에 나타냄.

[표 3.7.2.b] 바닥완충재의 두께 변화 (mm)

구조부재	7일	500일
DM1-250N	29	27
DM2-250N	29	25
DM3-250N	29	10
DM5-250N	28	25
DM6-250N	25	23
DM8-250N	28	27
DM1-500N	27	25
DM2-500N	27	25
DM3-500N	28	10
DM5-500N	27	24
DM6-500N	24	21
DM8-500N	28	27

[표 3.7.2.c] 바닥완충재의 변형률 탄성계수 및 중량

구조부재	탄성계수(MPa)	중량(kg/m ³)
DM1	0.2145	13.20
DM2	0.1531	12.08
DM3	0.1471	23.96
DM5	0.1729	25.53
DM6	0.1425	15.40
DM8	0.0199	59.26

[표 3.7.2.d] 바닥완충재의 동탄성계수 변화 (MN/m³)

구조부재	7일	500일
DM1-250N	7.9	8.9
DM2-250N	6.4	9.2
DM3-250N	5.5	32.0
DM5-250N	3.7	6.3
DM6-250N	7.6	8.7
DM8-250N	7.7	9.8
DM1-500N	8.9	14.7
DM2-500N	9.0	15.9
DM3-500N	4.0	32.0
DM5-500N	6.3	10.0
DM6-500N	7.6	15.9
DM8-500N	6.4	17

3.7.3 바닥완충재의 진동 및 소음 저감 평가 및 검증 방법

가. 평가방법

- 실험을 통해 측정된 바닥완충재의 주요 물성치(두께, 탄성계수, 동탄성계수와 중량)의 변화에 따른 예제 구조물의 진동 및 소음 저감 효과에 대해 분석함.
- 예제 모형의 해석을 통해 측정된 구조물의 진동값을 (식 3.7.3)의 VAL(Vibration Acceleration Level)식에 대입하여 층간소음 저감량을 도출하였으며, 이를 Kim(2009)¹³⁾이 제안한 ‘바닥완충재의 동탄성계수와 중량충격음레벨의 상관관계식’에 계산된 층간소음 저감량과 비교함.

$$SPL = VAL + 10\log\sigma + 10\log(S/A) - 20\log f_m + 36 \quad (\text{식 3.7.3})$$

$$VAL = 20\log(A_r/10^{-5})$$

여기서, SPL : 실내음압레벨(dB), σ : 음향방사율

VAL : 구조체의 진동가속도레벨(dB, ref. 10^{-5}m/s^2)

A_r : 구조체의 진동가속도 진폭의 실효치값($A_{\max}/\sqrt{2}$)

S : 진동하는 구조체의 면적, A : 실내 총흡음력(m^2),

f_m : 중심주파수(Hz)

[표 3.7.3.a] A특성 청감보정량 (1/1 Octave Band)

중심주파수	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
DM1-250N	-39.4	-26.2	-16.1	-8.6	-3.2	0	+1.2	+1.0	-1.1

- 일반적으로 바닥충격 가진점으로부터 발생된 진동이 아래층의 천정과 벽체로 전달되어 사람에게 들리는 실질적인 소음으로 변환되기 위해서는 (식 3.7.3)에 의한 결과에 A특성 청감보정[표 3.7.3.a]이 필요.
- A특성 청감보정은 저음역대의 신호를 많이 보정하는 특징이 있으며, 이는 인간의 주관

적 반응과 잘 맞아 각종 소음 평가기법의 기초척도가 됨.

- 본 연구는 바닥완충재를 통한 층간소음의 실질적인 수치가 아닌 저감량을 알아보는 것에 주목적을 두고 있으므로 (식 3.7.3)의 음향방사율과 실내 총흡음력은 바닥완충재의 물성치가 변해도 일정한 값을 가지기 때문에 계산에 고려하지 않음.
- 동일한 중심주파수 영역에 대해 진동가속도레벨을 평가하기 때문에 바닥충격음레벨 산정에 있어 동일한 양만큼 감소가 되고, 바닥완충재 물성의 변화에 따라 음향방사율, 실내 총흡음력, 중심주파수에 의한 바닥충격음레벨의 영향은 동일하게 줄어들거나 늘어나기 때문에 바닥충격음레벨의 변화에는 영향을 주지 않음.
- 따라서 층간소음의 저감량은 변화된 진동가속도레벨의 차이로 판단이 가능함.
- Kim 등(2003)의 표준충격원에 의한 부위별(천정, 벽체, 바닥) 진동량 측정 실험 결과에 의하면 수음실의 바닥충격음은 천장면 뿐만 아니라 벽면을 통해 전달되는 에너지도 전체 바닥충격음 결정에 상당한 영향을 미친다는 결론을 낸.
- 본 연구에서는 가진층 바닥과 수진층 벽체가 만나는 네 모서리의 최대 가속도를 산출한 후 각각의 모서리에서 발생하는 최대 가속도의 평균을 통해 진동가속도레벨을 구함.

나. 해석모형의 검증

- 예제모형의 동적해석을 통해 수진층의 4면의 벽체와 가진층의 바닥이 만나는 지점의 진동량을 도출하고, 이를 (식 3.7.3)의 VAL(Vibration Acceleration Level)식에 적용시켜 진동가속도레벨(dB)을 산정함.
- 장기하중을 받는 바닥완충재의 주요 물성이 변화함에 따라 해석을 통해 얻은 진동가속도레벨이 변화하였으며, 이러한 변화를 Kim 등(2009)¹³⁾에 의해 발표된 “바닥완충재의 동탄성계수와 중량충격음레벨의 상관관계식[그림 3.7.3]”에 의해 도출된 변화와 비교하여 해석모형의 적절성을 검증함.
- 본 연구에서는 단일층의 완충재에 대한 동탄성계수를 측정하였기 때문에 Kim 등(2009)¹³⁾의 연구에서 사용한 51개의 바닥완충재 중, 단일층인 16개의 바닥완충재에 대해서만 고려하였음.
- 두께의 영향을 배제한 동탄성계수의 영향만을 고려하기 위해 20mm의 완충재만을 선별하여 최종적으로 13개[표 3.7.3.b]의 실험데이터와 비교.

[표 3.7.3.b] 단일층구조의 바닥완충재의 주요 물성치와 중량충격음레벨(Kim 등 (2009)¹³⁾)

완충재 유형	재질	두께 (mm)	동탄성계수 (MN/m ³)	중량충격음레벨 단일수치(dB)
1	Polyster	20	2.0	48
2	Soft EPS 1	20	4.7	49
3	Soft EPS II	20	8.8	49
4	EVA(uneven) I	20	5.4	49
5	EVA(uneven) II	20	6.3	49
6	EVA(uneven) III	20	10.1	50
7	EPP	20	28.6	51
8	EPP(uneven)	20	9.8	48
9	EPE I	20	23.0	50
10	EPE II	20	23.0	50
11	Soft EPS III	20	18.8	51
12	EPS I	20	63.0	52
13	EPO	20	10.1	49

3.7.4 해석결과

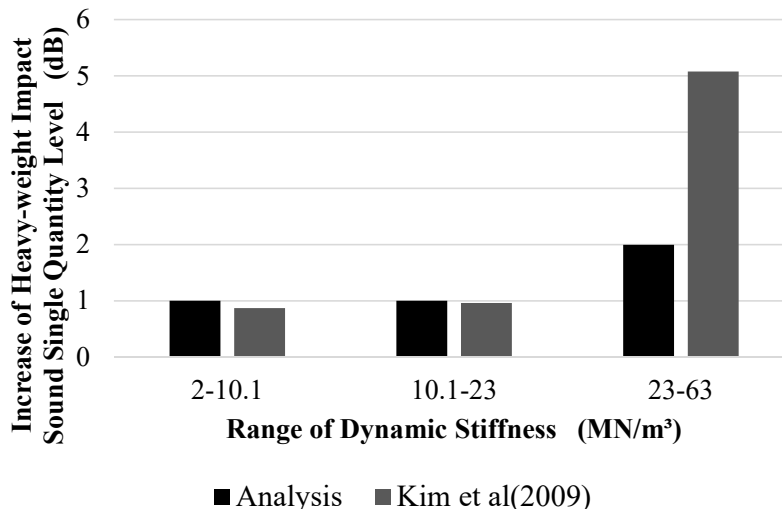
- Kim 등(2009)¹³⁾의 실제 소음 측정실험 결과와 비교하기 위해 실제 실험에서 사용된 바닥완충재의 동탄성계수를 해석모델에 적용하여 진동가속도레벨을 산정.
- 바닥완충재의 동탄성계수가 각각 2MN/m³, 10.1MN/m³, 23MN/m³, 63MN/m³일 때, 해석모델의 수음실 부위별 최대 가속도와 그 평균치를 도출하였으며, 그 결과를 [표 2.7.4]에 나타냄.
- 해석을 통해 얻은 수음실의 가속도 평균치를 VAL(진동가속도레벨)식에 적용하여 수음실의 진동가속도레벨을 도출함.

[표 3.7.4.a] 해석모델의 수음실 부위별 최대 가속도와 평균치 (mm/sec²)

동탄성계수 (MN/m ³)	부위1(좌)	부위2(우)	부위3(상)	부위4(하)	평균
2.0	2.624	1.324	1.599	1.539	1.772
10.1	2.818	1.490	1.798	1.696	1.951
23.0	2.911	1.746	2.056	1.904	2.154
63.0	4.865	2.936	3.362	4.288	3.863

[표 3.7.4.b] 해석모델의 수음실 부위별 진동가속도레벨과 평균치 (dB)

동탄성계수 (MN/m ³)	부위1(좌)	부위2(우)	부위3(상)	부위4(하)	평균
2.0	65.37	59.43	61.07	60.74	61.65
10.1	65.99	60.45	62.08	61.58	62.53
23.0	66.27	61.83	63.25	62.58	63.48
63.0	70.73	66.34	67.52	69.64	68.56



[그림 3.7.4] 동탄성계수의 범위에 따른 중량충격음레벨 증가량 비교

- [그림 3.7.4]는 해석모형의 진동해석을 통해 산출한 진동가속도레벨의 증가량과 Kim 등 (2009)에 의해 측정된 동탄성계수별 중량충격음레벨의 증가량을 비교한 것임.
- 동탄성계수가 2MN/m^3 에서 10.1MN/m^3 로 증가하였을 때, 해석과 실험값의 증가량은 약 1dB로 유사하였으며, 마찬가지로 동탄성계수가 10.1MN/m^3 에서 23MN/m^3 로 증가하였을 때도 해석과 실험값의 증가량은 약 1dB로 거의 동일하게 나타남.
- 하지만 동탄성계수가 23MN/m^3 에서 63MN/m^3 으로 증가하였을 때, 해석은 소음량이 2dB 증가한 반면, 실험값에서는 5dB 증가함.
- 본 연구에서 사용한 해석방법은 동탄성계수가 23MN/m^3 까지 증가되었을 때는 실험값과 오차가 거의 없으며, 그 이후의 동탄성계수 범위에서는 63MN/m^3 까지 최대 3dB의 오차가 나타날 수 있다고 판단함.

3.7.5 해석분석

가. 500일간 진동 및 소음 평가

- 7일부터 500일간 250N과 500N 두 종류의 장기하중을 가하였을 때, 변화하는 바닥완충재의 성능과 이에 따라 변화하는 구조물 내의 소음에 대한 영향평가를 수행함.
- 초기 7일간은 바닥완충재의 초기 급격한 처짐으로 인해 동탄성계수 측정값이 증가와 감소가 반복되며 편차가 심하여, 7일 이후 안정적으로 증가하는 동탄성계수 구간(7일~500일)을 대상으로 소음변화량을 알아봄.
- [표 3.7.5.a]는 실험을 통해 측정한 바닥완충재의 두께와 동탄성계수의 변화를 해석모델에 적용하여 수음실의 네 지점에서 진동가속도레벨의 평균을 도출한 것임.
- 모든 실험체에서 진동가속도레벨은 250N 하중재하에서 0.49dB~4.71dB 증가하였으며, 500N 하중재하에서는 1.1dB~5.77dB 증가함.
- 바닥완충재의 성능 변화에 따라 진동가속도레벨의 증가량은 상이함.
- 특히, 동탄성계수와 처짐의 증가가 가장 많은 DM3의 경우 진동가속도레벨이 가장 크게 증가하였으며, 반대로 동탄성계수와 처짐의 증가가 가장 작은 DM1의 경우 가장 낮은 진동가속도레벨을 보임

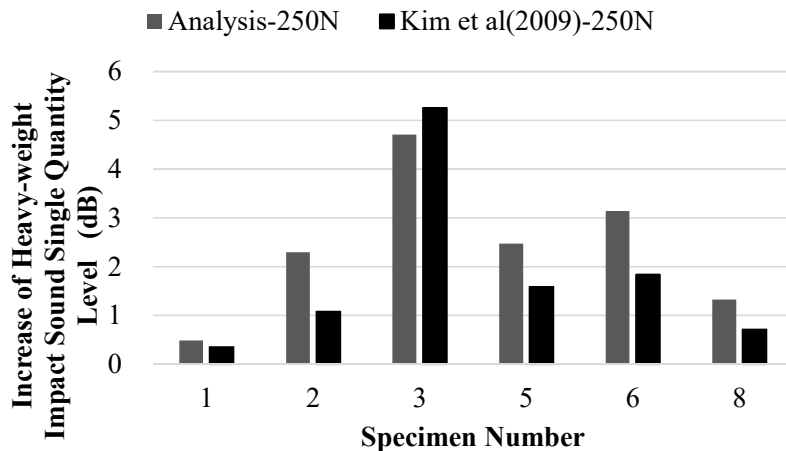
[표 3.7.5.a] 수음실 천정과 벽체에 접하는 네 면의 진동가속도레벨 평균치의
변화량(dB)

완충재	250N			500N		
	7일	500일	변화량	7일	500일	변화량
DM1	68.72	69.21	+0.49	69.21	70.32	+1.1
DM2	66.42	68.72	+2.30	68.51	70.35	+1.84
DM3	66.44	71.15	+4.71	65.38	71.15	+5.77
DM5	64.08	66.55	+2.47	65.45	67.85	+2.40
DM6	64.79	67.93	+3.14	67.14	70.30	+3.16
DM8	66.94	68.26	+1.32	66.04	70.34	+4.30

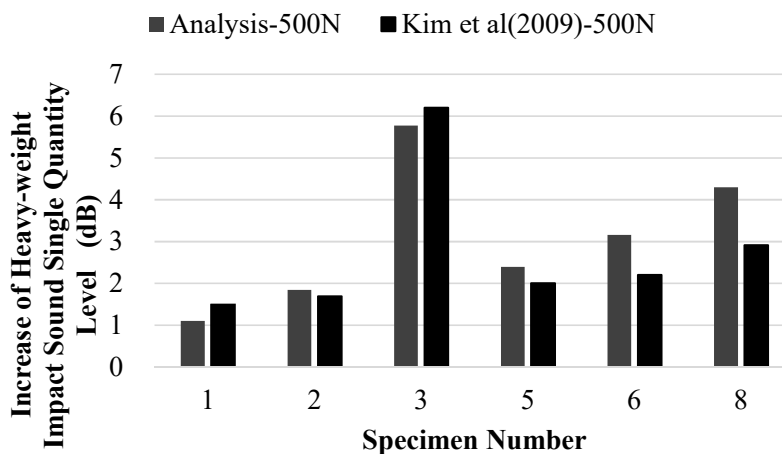
[표 3.7.5.b] Kim 등(2009)¹³⁾의 제안식에 따른 중량충격음레벨 변화 (dB)

완충재	250N			500N		
	7일	500일	변화량	7일	500일	변화량
DM1	47.92	48.27	+0.36	48.27	49.77	+1.50
DM2	47.29	48.37	+1.08	48.31	50.01	+1.70
DM3	46.84	52.09	+5.25	45.89	52.09	+6.20
DM5	45.66	47.24	+1.59	47.24	48.62	+1.38
DM6	47.80	48.21	+0.40	47.80	50.01	+2.20
DM8	47.84	48.56	+0.72	47.29	50.20	+2.91

- [표 3.7.5.b]는 Kim 등(2009)¹³⁾이 제안한 그림 5.4의 “바닥완충재의 동탄성계수와 중량충격음레벨의 상관관계식”에 실험에서 7일과 500일 시점에서 측정한 동탄성계수를 적용하여 계산된 중량충격음레벨과 변화량을 나타냄.
- 마찬가지로 동탄성계수의 증가가 가장 큰 DM3의 중량충격음레벨의 증가가 가장 컸으며 또한, 로그식의 형태를 나타내는 제안식의 특성상 동탄성계수가 10MN/m³이상의 범위에서 변화한 실험체보다 10MN/m³이하의 범위에서 변화한 실험체의 동탄성계수 변화가 크게 나타남.



a) 250N



b) 500N

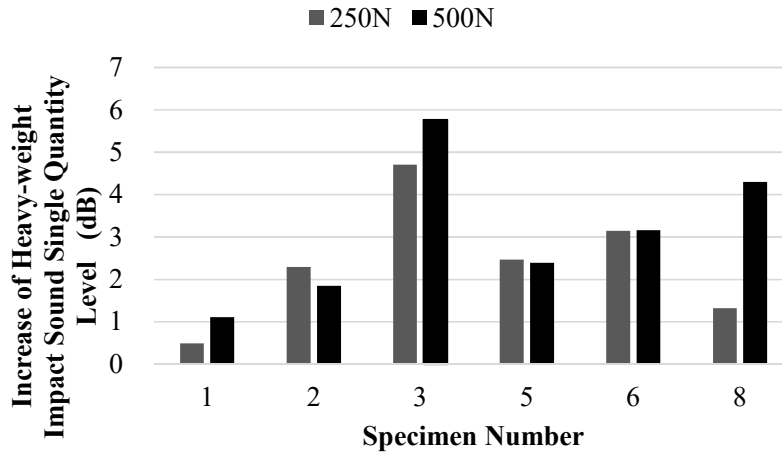
[그림 3.7.5.a] 수음실의 층간소음 증가량에 대한 실험값과 해석값 비교

- [그림 3.7.5.a]는 [표 3.7.5.a]와 [표 3.7.5.b] 각각의 변화량을 직접 비교한 것이며, 각각의 변화량은 동일한 중량충격하중에 대한 수음실의 층간소음 증가량을 나타냄.
- 수음실의 중량충격음에 대한 실험값과 해석값을 비교해 보았을 때, 실험값에 비해 해석값이 전체적으로 컸으며, 250N과 500N의 두 하중 조건에서 모두 최대 1.4dB 이내의 범위에서 크게 나타남.

[표 3.7.5.c] 실험값에 대한 해석값의 오차 (dB)

완충재	250N	500N
DM1	+0.13	-0.39
DM2	+1.21	+0.14
DM3	-0.54	-0.44
DM5	+0.88	+0.39
DM6	+1.30	+0.96
DM8	+0.61	+1.38

- 실험체별로 재하하중에 따른 실험값과 해석값의 차이는 다르게 나타났으며, 그 결과값을 [표 3.7.5.c]에 나타냄.
- 250N 하중재하에서는 DM1이 0.13dB의 오차로 실험값과 거의 유사하게 나타났으며, DM2와 DM6의 경우 각각 1.21dB, 1.30dB의 오차를 보이며 해석값이 실험값에 비해 적게 나타남.
- 500N의 하중재하에서는 DM2가 0.14dB로 오차가 가장 작았으며, DM8이 1.38dB로 가장 크게 나타남.
- DM3을 제외한 모든 실험체들은 23MN/m^3 이하의 범위에서 증가함.
- 즉, 동탄성계수만을 변수로 두었을 때는 해석값과 실험값 사이의 오차는 거의 없어야 하지만 [표 2.7.5.c]의 실험값과 해석값의 비교 결과를 보면 최대 1.38dB 이내의 오차가 발생함을 알 수 있음.
- 이러한 결과는 500일간 장기하중을 받은 바닥완충재의 두께로 인해 소음이 더 증가되는 효과가 발생된 것으로 판단됨.
- DM3의 경우, 오히려 실험값이 해석값보다 크게 나타났으며, 이는 500일간 장기하중을 받은 DM3의 동탄성계수가 최대 32MN/m^3 까지 증가된 영향 때문인 것으로 판단됨.



[그림 3.7.5.b] 수음실 중량충격음레벨 증가량
(벽체와 천정 접합면)

[표 3.7.5.d] 바닥완충재의 중량충격음레벨 증가량 (dB)

실험체	7일	500일	증가량
DM1-250N	68.72	69.21	0.49
DM2-250N	66.42	68.72	2.30
DM3-250N	66.44	71.15	4.71
DM5-250N	64.08	66.55	2.47
DM6-250N	64.79	67.93	3.14
DM8-250N	66.94	68.26	1.32
DM1-500N	69.21	70.32	1.11
DM2-500N	68.51	70.35	1.84
DM3-500N	65.38	71.15	5.77
DM5-500N	65.45	67.85	2.40
DM6-500N	67.14	70.30	3.16
DM8-500N	66.04	70.34	4.30

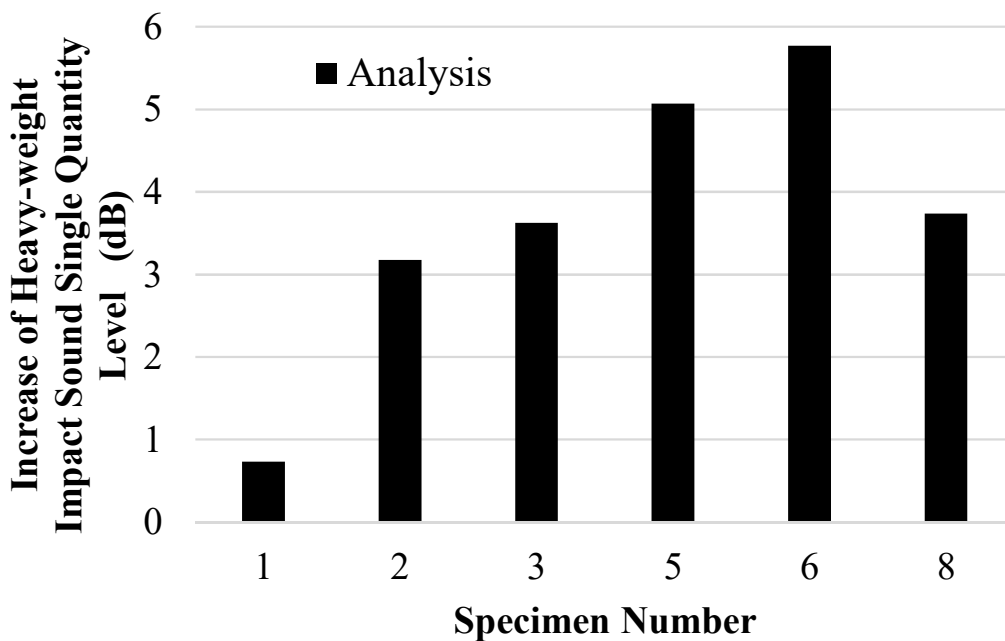
- [표 3.7.5.d]와 [그림 3.7.5.b]은 재하하중 크기에 따른 해석모형 수음실의 중량충격음레벨 증가량을 비교한 것임.
- 재하하중이 500N일 때가 250N일 때보다 최대 3dB 더 크게 발생하는 것으로 나타났으며 이러한 결과는 동탄성계수의 증가량과 두께 감소량의 차이에 의해 발생한 것으로 판단됨.
- 500N의 하중재하 경우에는 $1\text{MN/m}^3 \sim 26.5\text{MN/m}^3$ 의 동탄성계수 증가와 1mm~19mm의 처짐 감소가 발생하였으며, 250N의 하중재하 경우에는 $3.7\text{MN/m}^3 \sim 28\text{MN/m}^3$ 의 동탄성계수 증가와 1mm~18mm의 처짐 감소가 발생함.
- 두 하중조건에서 처짐의 감소는 비슷하였으며, 동탄성계수의 증가량이 500N의 하중재하일 때, 250N 하중재하에 비해 실험체별로 동탄성계수가 $1\text{MN/m}^3 \sim 8.5\text{MN/m}^3$ 더 크게 발생함.
- 따라서 재하하중이 500N일 때, 250N일 때보다 중량충격음레벨이 더 크게 나온 것은 동탄성계수 증가의 영향이 큰 것으로 판단됨.

나. 10년 후 진동 및 소음 예측 평가

- 250N의 하중을 받은 바닥완충재를 설치한 예제구조물에 대하여 3650일(10년) 후의 소음 증가량을 예측함.
- 앞선 연구 결과에서 소음의 증가는 동탄성계수의 영향을 크게 받기 때문에 10년 후의 소음증가 예측에서는 동탄성계수의 변화만을 고려하였고 동탄성계수만을 변수로 둔 Kim 등(2009)⁶⁾이 제안한 “바닥완충재의 동탄성계수와 중량충격음레벨의 상관관계” 결과와 직접적인 비교를 위해 10년 후의 소음증가 예측에서도 동탄성계수만을 변수로 둔.
- 10년 후의 동탄성계수는 500일간의 동탄성계수 측정값을 바탕으로 작성한 추세식을 통해 예측함.
- [표 3.7.5.e]에 하중 250N일 때의 하중가력기간에 따른 동탄성계수의 추세식을 나타냄.
- [그림 3.7.5.c]에 10년 후 예측한 동탄성계수 변화에 따라 10년 후의 소음증가량을 예측하여 나타냄.

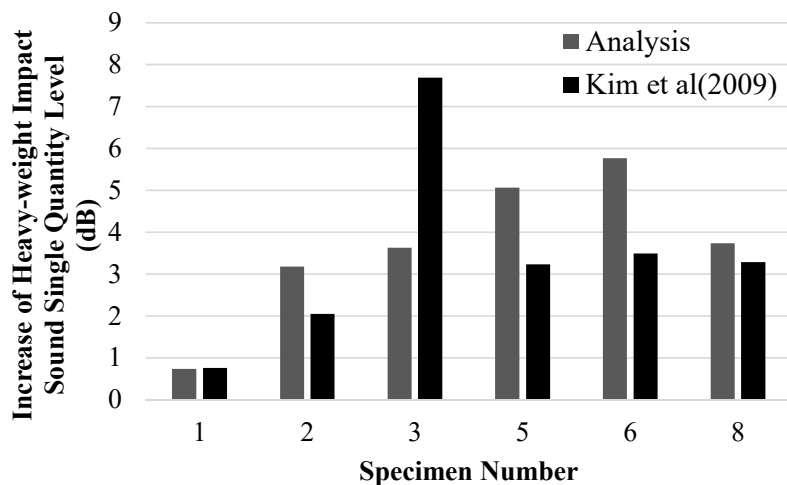
[표 3.7.5.e] 바닥완충재 실험체별 동탄성계수 추세식

실험체	추세식	결정계수
DM1-250N	$y = 0.31\ln(x) + 7.67$	0.23
DM2-250N	$y = 0.89\ln(x) + 5.44$	0.74
DM3-250N	$y = 9.96\ln(x) - 9.22$	0.62
DM5-250N	$y = 1.09\ln(x) + 2.02$	0.82
DM6-250N	$y = 1.56\ln(x) + 2.36$	0.84
DM8-250N	$y = 2.37\ln(x) + 3.67$	0.38



[그림 3.7.5.c] 3650일(10년) 후의 소음 증가량

- 소음은 최대 6dB 증가하였으며, DM1을 제외한 나머지 실험체들은 3dB 이상 증가하였고 DM1은 1dB 이하로 증가하여 층간소음 저감성능 면에서 가장 뛰어나게 나타남.
- 층간소음 증가 측면에서 효과가 좋은 순으로 바닥완충재와 재질특성을 나열하면, DM1(EPS1-평판형-13.20kg/m³)-DM2(EPS1-골판형-12.08kg/m³)-DM8(EVA-엠보형-29.26kg/m³)-DM5(EPS2-골판형-25.53)-DM6(EPS2-골판형-15.40kg/m³) 순으로 소음이 적게 증가하며, 층간소음에 대한 영향을 적게 받는 것으로 나타남.
- DM3의 경우 10년 후의 동탄성계수는 72MN/m³으로 동탄성계수가 클 때에는 진동량 평가로 인한 소음 증가 예측에 무리가 있는 것으로 판단됨.
- 10년 후의 층간소음 증가량에 대한 해석결과로 보아 DM1의 재료특성(EPS1-평판형-13.20kg/m³)을 반영한 바닥완충재를 사용하는 것이 층간소음 저감 측면에서 높은 효과를 기대하리라 판단됨.
- 반대로 EPS2 재질을 사용하는 것은 층간소음 저감 측면에서 좋지 않을 것으로 보이며, EPS2 재질을 사용할 때, EPS1 보다 약 2~3dB 더 증가되는 것으로 나타났다([그림 3.7.5.c] - DM2, DM5, DM6 참조).



[그림 3.7.5.d] 3650일(10년) 후의 소음 증가량
- 해석값과 실험값(Kim 등(2009))의 비교

- 10년 후의 소음증가량에 대해 해석값과 실험값(Kim 등(2009)¹³⁾)을 비교한 내용을 그림 5.8에 나타냄.
- 전체적으로 해석값이 실험값에 비해 크게 나타났으며, 해석값이 최대 3dB 더 크게 나타나는 것으로 나타났다. DM3의 경우 실험값에 비해 해석값이 작게 나타났으며, 이러한 결과는 동탄성계수가 클 때, 해석값과 실험값의 오차가 크게 나타났기 때문이다.
- 해석 결과에 의하면 DM1-DM2-DM8-DM5-DM6의 순으로 소음 저감 효과가 크게 나타났으며, 실험식에 대입한 결과에 의해서는 DM1-DM2-DM5-DM8-DM6의 순으로 소음 저감 효과가 크게 나타남.
- 이를 통해 해석에 의한 소음 증가 예측이 실험식에 의한 예측과 상당히 유사함을 알 수 있음.
- 다만 이 번 연구는 연구의 제약 조건에 의하여 모든 완충재에 대한 성능평가가 이루어지지 않았으며 추 후 연구가 필요함. 이 연구의 적용 범위에 대한 내용을 요약하면 다음과 같음.
 - 현재 시판되고 있는 바닥완충재의 종류는 매우 다양함. 이 연구에서는 현재 가장 널

리 사용되고 있는 바닥완충재 8종을 선별하여 실험에 수행함.

- 실험체는 재질, 밀도, 바닥형상을 변수로 하여 현재 사용되는 바닥완충재의 특성을 반영하도록 하였음.
- 제안된 평가방법은 하중의 크기, 작용시간, 바닥완충재의 특성을 반영한 방법으로 가능하면 일반화된 방법이 될 수 있도록 하였음.
- 다만, 이 연구에서는 연구여건의 한계로 완충재에 대한 장기 물성 면형에 국한하였고, 이러한 완충재를 사용한 공동주택의 층간소음의 변화를 재질, 밀도, 바닥형상, 하중의 크기, 하중의 가력 시간에 따라서 직접 평가하지는 못하였음.
- 향후 거주기간이 경과한 공동주택에 사용된 바닥완충재의 층간소음을 직접 평가하고 이를 제안된 해석기법에 반영할 필요가 있을 것으로 사료됨.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

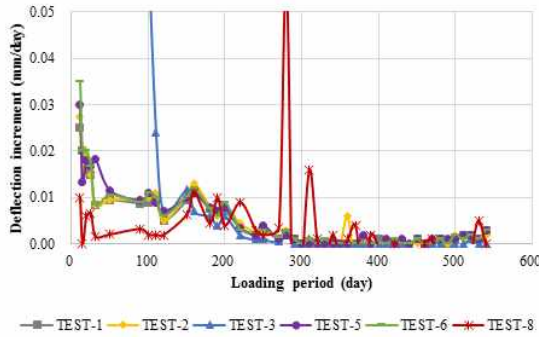
4.1 연구개발 최종목표 달성도

연번	핵심성과명	질적성과	실적	실험방법	달성도(%)
1	장기 하중 재하에 의한 완충재의 구조성능, 잔류변형률 추정, 층간소음 영향 요소 추정 및 평가식의 제안	장기간의 하중에 의한영향을 반영한 평가법 제시	-40개의 실험체 실험 실시 -논문 5편 게재	500일 간의 장기변형 관찰 및 추정	100
2	층간소음억제 바닥온돌층의 장기변형 추정 및 평가법 제안	공동주택 층간소음억제 바닥온돌층의 장기하중에 의한 변형 추정 및 장기치짐 평가식의 제안	-16개의 실험체 실험 실시, -논문 1편 게재	300일 간의 장기변형 관찰 및 추정	100
3	층간소음억제 바닥온돌층의 환경에 의한 변형 추정 및 평가법	환경 변화에 의하여 변화하는 층간소음억제 바닥온돌층의 변형 추정 및 환경 변화에 의한 층간소음 영향 요소의 변화에 대한 평가법의 제안	-10개의 실험체 실험 실시 -논문 1편 게재	150일 간의 침수에 의한 장기변형 관찰 및 추정	100
4	KS F 2873 기준 잔류변형률 측정안 제안	장기간 하중이 가해졌을 때의 바닥완충재의 잔류변형률 측정치에 근거한 KS F 2873 기준 잔류변형률 측정안 제안	-40개의 실험체 실험 실시 (1번 실험체와 동일)	1년간의 장기하중 실험 실시	100
5	KS M ISO 4898 기준 동탄성계수 측정개선안 제안	장기간 하중이 가해졌을 때의 동탄성계수 측정치에 근거한 KS M ISO 4898 기준 동탄성계수 측정안 제안	-32개의 실험체 실험 실시 -논문 2편 게재	500일 간의 장기변형 관찰 및 추정	100
6	해석 프로그램을 활용한 동적해석 수행과 소음 평가	중량충격음에 대한 바닥완충재의 동적 거동 및 건물 내부에서의 소음평가	-공동주택 모델 소음평가	실험 데이터 및 해석 프로그램을 활용한 동적 해석	100

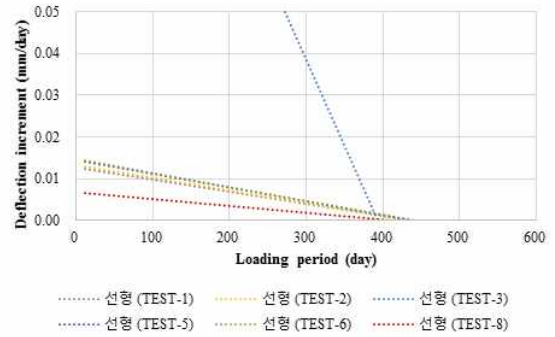
4.2 연구개발 성과의 효과분석

- 공동주택 바닥완충재의 안정된 성능 평가에 활용

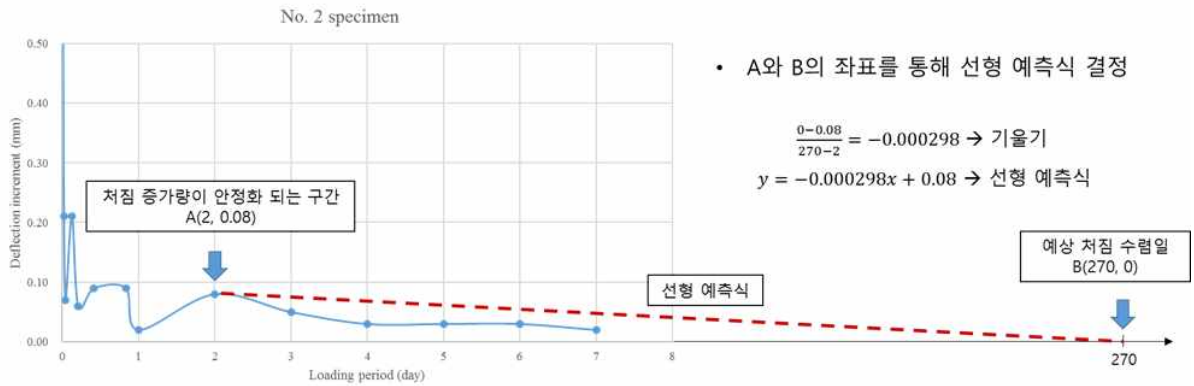
- 장기하중을 받는 바닥완충재의 성능을 평가하고 성능기준 표준안을 제시함.



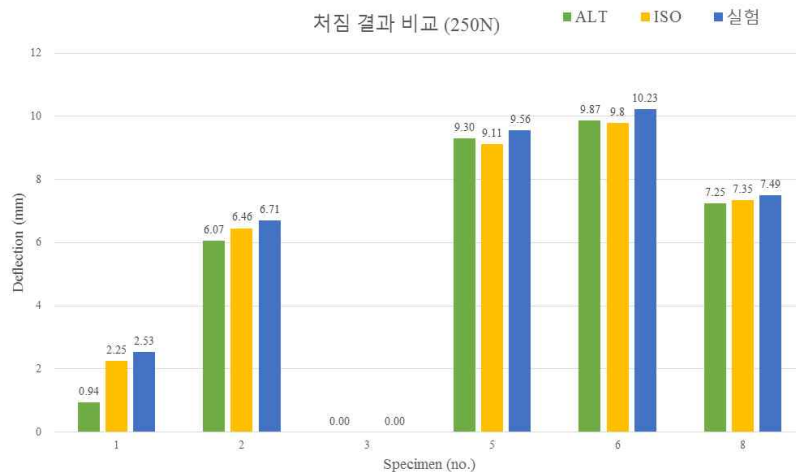
[그림 4.2.a] 처짐 증가량(250N)



[그림 4.2.b] 처짐 증가량 추세(250N)

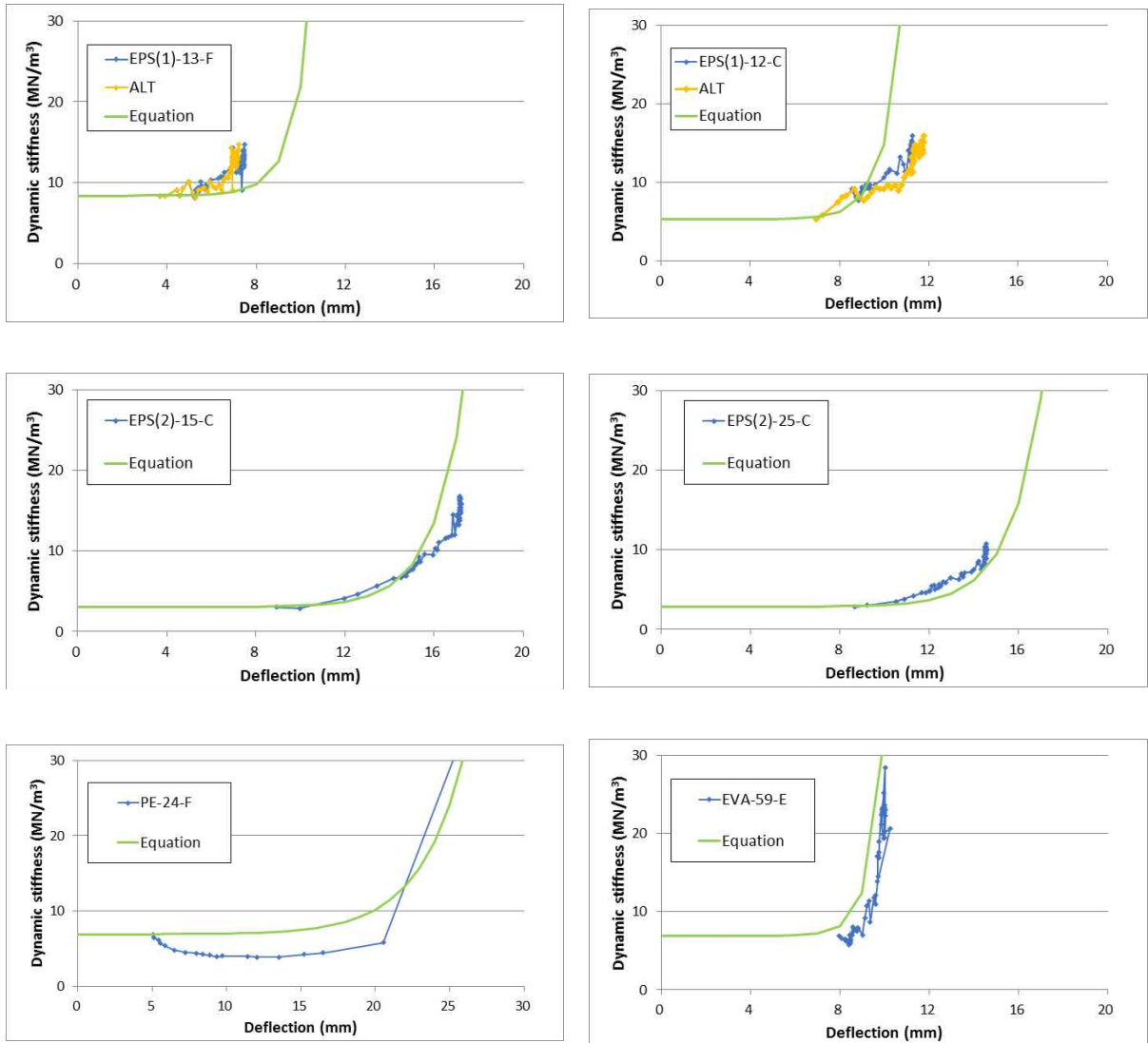


[그림 4.2.c] 증가량을 통한 장기 처짐 예측 방법



[그림 4.2.d] 실험결과와 예측식과의 처짐 비교

- [그림 4.2.a]와 [그림 4.2.b]는 540일 간의 8종 완충재의 처짐 증가량 실험값을 나타냄.
- 증가량의 경향은 초반에는 크고 시간이 지날수록 증가량이 0으로 수렴함.
- 이러한 실험 결과를 바탕으로 [그림 4.2.c]처럼 증가량을 통한 장기 처짐 예측이 가능함.
- [그림 4.2.d]는 증가량을 통한 예측과 ISO20392 예측식 그리고 실험결과의 270일 경의 처짐을 나타내고 그림에서 볼 수 있듯이 예측식이 실제 처짐과 근사하게 처짐을 예측하는 것을 알 수 있음.



[그림 4.2.e] 실험결과를 반영한 동탄성계수 장기변화 예측식

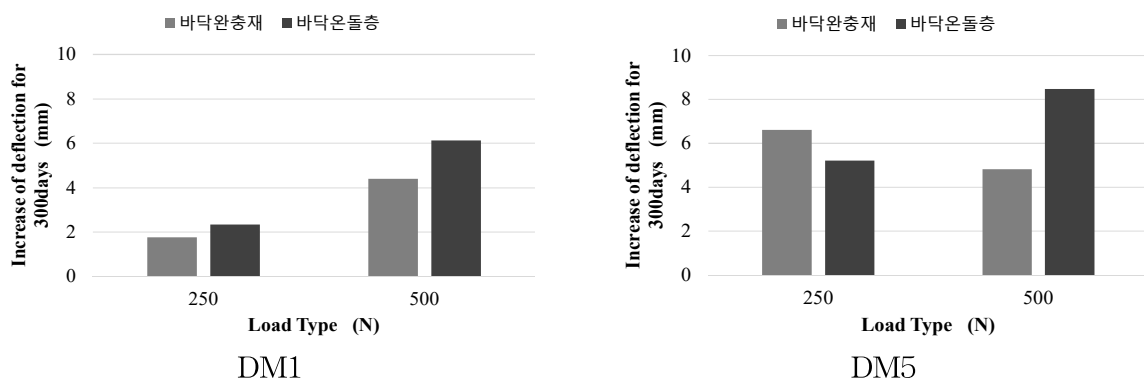
- [그림 4.2.e]는 실험결과에서 나타나는 동탄성계수의 증가경향을 바탕으로 작성한 예측식과 실험결과와의 비교를 나타냄.
- 시간이 지남에 따라 동탄성계수가 증가한다는 것을 실험을 통해 결과를 얻었고 이러한 결과를 반영할 수 있는 예측식을 작성함.
- 예측식은 변수가 바닥완충재의 처짐(mm)이고 결과값으로 동탄성계수가 표현됨.
- 동탄성계수 예측식에 실제 실험값을 대입해 본 결과 예측식이 동탄성계수의 장기 변화 경향을 잘 나타낸다는 것을 알 수 있음.
- 또한, 앞서 언급한 처짐 예측식을 이용할 수 있으므로 실제 계측된 장기 처짐 값이 없더라도 동탄성계수의 장기 성능을 예측할 수 있는 장점이 있음.
- 앞선 다른 연구에서는 장기성능에 대한 고려가 미흡하였기 때문에 단기 성능만을 판단할 수 있었지만 본 연구에서의 결과를 통해 바닥완충재의 장기성능 또한 예측할 수 있음.
- 단기 성능과 장기 성능을 둘 다 고려한 효율적인 기준 제안이 가능함.
- 바닥완충재의 장기성능 평가 및 성능기준은 공동주택의 사용성능(바닥침하, 층간소음, 진동 등)향상에 활용될 것으로 판단됨.

- 환경변화에 따른 바닥완충재의 성능 평가항목 및 성능기준 표준안의 제시

- 이 연구에서는 환경변화에 의하여 발생할 수 있는 바닥완충재의 구조안전성(응력과 변형률 관계, 밀도, 잔류변형률 등)을 평가하고 성능기준을 제시함.

실험체명	침수 완충재 - 비침수 완충재 (mm)	
	80N	250N
DM1	+1.17	+0.06
DM3	-1.45	+2.52
DM4	-	-
DM6	+2.44	-0.40
DM8	+0.47	+0.51

[그림 4.2.f] 침수에 의한 바닥완충재의 처짐 변화



[그림 4.2.g] 바닥온돌층에 의한 바닥완충재의 처짐 변화

- [그림 4.2.f]와 [그림 4.2.g]는 침수와 바닥온돌층 환경요인에 의한 바닥완충재의 처짐 변화를 나타냄.
- 침수에 의한 결과에서는 처짐이 전체적으로 크게 나타나는 경향이 나타남.
- 바닥온돌층에 의한 결과에서는 처짐이 증가하거나 감소하는 경향이 나타남.
- 이때, 처짐이 증가한 경우는 시멘트 페이스트의 물이 침투하여 완충재의 처짐 성능에 악영향을 미친 것으로 보이며 처짐이 감소한 경우는 시멘트 페이스트가 경화 될 때 바닥완충재의 주변 및 내부에서 경화하여 강성을 증가시킨 것으로 판단됨.
- 실제 현장에서는 실험실과는 달리 환경요인에 의한 영향을 필수적으로 고려되어야 함.
- 본 연구에서의 결과를 통해 침수 및 바닥온돌층과 같은 환경요인이 처짐에 영향을 미칠 수 있다는 것이 확인됨.
- 추가적인 연구를 통하여 환경요인이 바닥완충재의 구조성능에 미치는 영향을 명확히 하여 기준에 고려한다면 더욱 안정적인 성능 발현이 가능할 것으로 판단됨.
- 환경 변화의 영향을 반영한 바닥완충재의 성능기준은 향후 공동주택의 바닥완충재의 합리적인 기준 설정에 활용될 것으로 판단됨.

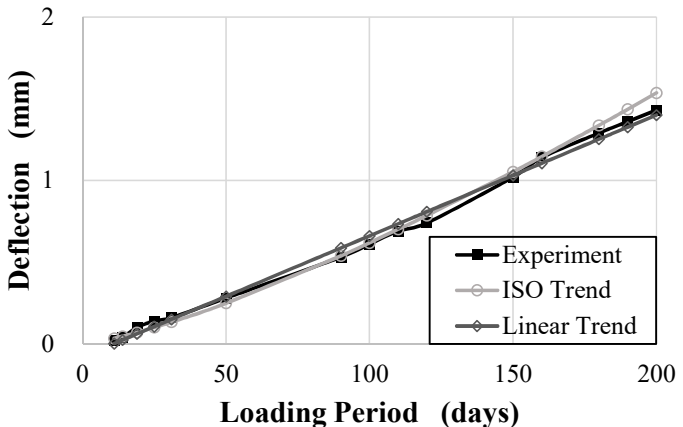
제5장. 연구개발성과의 활용계획

- 장기 성능을 반영한 평가식 및 측정 개선안 제안

- 현행 기준들은 단기 하중이 가해진 바닥완충재의 초기 성능을 바탕으로 평가함.
- 실험을 통해 도출된 결과를 바탕으로 장기 하중이 가해진 바닥완충재의 성능을 기준에 반영하여 장기성능을 받는 완충재의 물리적 특성 평가에 활용.

가. 장기 변형 예측 평가식 제안

연번	핵심성과명	기존 평가 방법	개선된 평가 방법
1	장기 하중 재하에 의한 완충재의 구조성능, 잔류변형률 측정, 층간소음 영향 요소 측정 및 평가식의 제안	- 잔류변형률에 대한 기준만 존재	- 장기 변형 측정 결과를 반영한 바닥완충재의 장기 변형 예측 가능
2	층간소음억제 바닥온돌층의 장기변형 측정 및 평가법 제안	- 바닥완충재의 변형에 관한 기준이나 예측 방법 부재	- 장기 하중 재하에 의한 완충재의 구조성능, 잔류변형률 측정, 층간소음 영향 요소 측정 가능
3	층간소음억제 바닥온돌층의 환경에 의한 변형 측정 및 평가법	- 실험실 환경에서의 측정에 근거한 기준(환경요인 부재)	- 장기하중을 받는 바닥완충재의 환경요인(시공 환경)에 의한 성능변화 평가 및 이를 활용한 환경요인에 의한 영향 평가 가능



1. 변형 증가 구간
 $Y = At + B$
 A = 변형 증가량
 B = 선형식의 절편
 $X < \text{수렴 시점(일)}$

2. 변형 수렴 구간
 $Y = C$
 C = 수렴 시점의 변형값

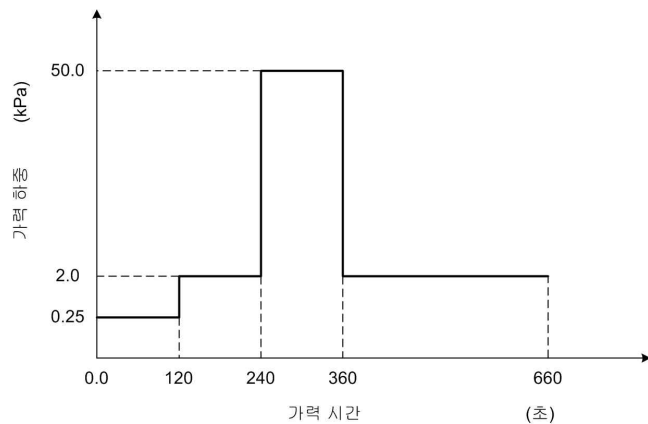
3. 환경 요인에 의한 변형
 - 침수에 의한 변형 증가
 - 모르타르 침투에 의한 변형 감소

<선형 장기 변형 예측식, 실험값, ISO 20392 기준과의 비교>

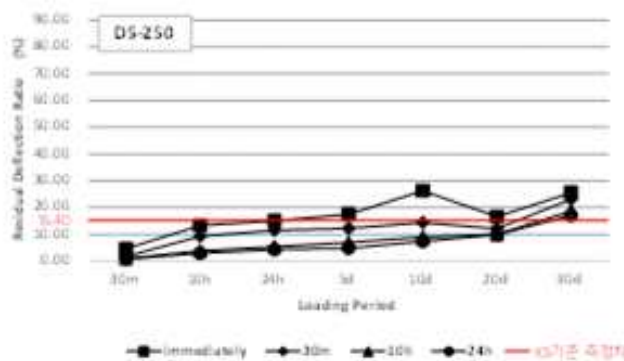
- 현 KS 기준에는 장기 변형에 관한 기준 및 제한이 없고 잔류변형률 기준만 존재.
- 장기 변형 예측식을 활용하여 바닥완충재에 하중이 가해졌을 때 변형을 정도를 파악할 수 있고 장기 변형량 제한을 통해 바닥판의 내구성 및 안정성 확보 가능함.

나. KS F 2873 기준 잔류변형률 측정 개선안 제안

연번	핵심성과명	기존 평가 방법	개선된 평가 방법
4	KS F 2873 기준 잔류변형률 측정안 제안	- 11분간의 단기 가력을 통한 잔류변형률 측정 - 초기 성능을 유지하기 때문에 잔류변형률이 작고 회복률이 큼 - 장기 하중 상태의 바닥완충재의 내구성 평가 어려움	- 장기 가력에 근거한 바닥완충재의 잔류변형률 평가 가능 - 초기 성능과 비교하여 손실된 잔류변형률 평가 가능 및 이를 활용한 KS F 2873 잔류변형률 기준의 최소 측정일수 평가 가능 - 장기 잔류변형률 측정을 통한 바닥완충재의 변형에 대한 내구성 확보 가능



<KS F2873 잔류변형률 하중가력 시간>



<30일간의 잔류변형률 실험 결과>

- 기존 하중 가력 시간 : 11분

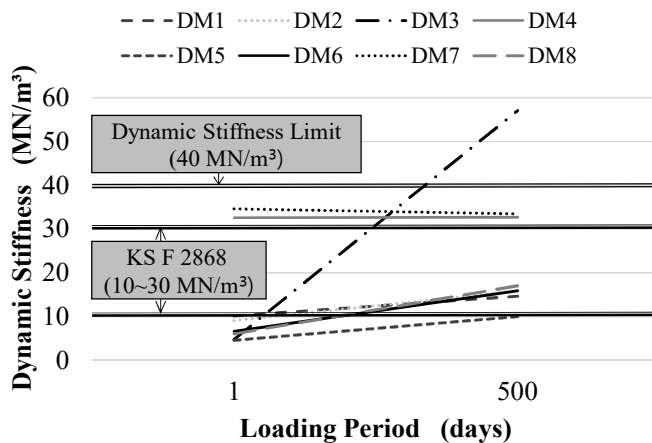
- 개선 하중 가력 시간 : 30일
(하중 가력 30일경 250N, 500N 하중에서의 모든 바닥완충재가 KS 기준값을 초과)

- 바닥완충재의 단기 잔류변형률과 장기 변형률의 비교, 분석을 통한 내구성 확보

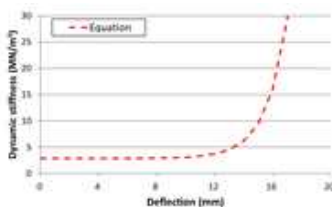
- KS F 2873 잔류변형률 기준으로는 실제 공동주택에 시공된 바닥완충재의 변형을 반영하지 못한다고 판단됨.
- 11분간의 단기 하중 가력이 아닌 최소 30일 동안 지속적인 하중을 가하여 바닥완충재의 초기와다른 손실된 잔류변형률을 측정하여 내구성 및 안정성 확보 가능.

다. KS M 4898 기준 동탄성계수 측정개선안 제안

연번	핵심성과명	기존 평가 방법	개선된 평가 방법
5	KS M ISO 4898 기준 동탄성계수 측정개선안 제안	- 시공 전 바닥완충재의 초기 동탄성계수 값을 제한 - KS F 2868 : 10~30MN/m³ - KS M 4898 : 동탄성계수 기준 없음 - “공동주택 바닥충격음 차단 구조 인정 및 관리기준”의 제28조 2항 : 초기 40MN/m³ 이하 - 시공 후 바닥완충재의 변형에 의한 동탄성계수 증가 미 고려	- 장기하중을 받는 바닥완충재의 동탄성계수의 변화 측정 및 평가법의 제안. - 이를 활용한 바닥완충재의 장기 동탄성계수평가 가능 - KS F 2868 : 시공 전 10~30MN/m³ + 시공 후 30MN/m³이하 - KS M 4898 : 시공 전 10~30MN/m³ + 시공 후 30MN/m³이하 - “공동주택 바닥충격음 차단 구조 인정 및 관리기준”의 제28조 2항 : 시공 전/후 40MN/m³ 이하 - 실험 결과를 활용한 동탄성계수 예측식 제안



<동탄성계수 변화 경향 및 동탄성계수 제한>



$$DS = DS_{30} + \frac{3}{P} e^{\left(\frac{D_1^2}{3} - C_2 \frac{P}{E}\right)}$$

Where, DS=Dynamic Stiffness (MN/m³)
 DS_{30} =Dynamic Stiffness 30 min. after loading (MN/m³)
 P =Applied load (N)
 E =Elastic modulus (MPa)

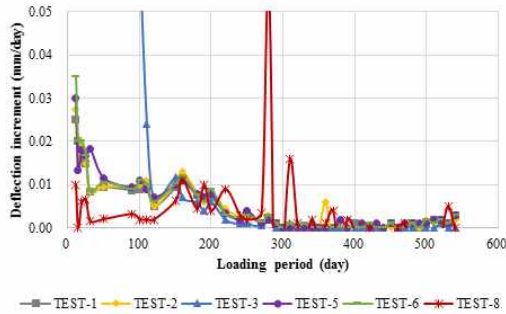
	RP(C1)	RP(C2)	PE	EVA
C1	1.8	1.2	1.0	1.5
C2	0.00036	0.00040	0.00012	0.00008

<동탄성계수 예측식>

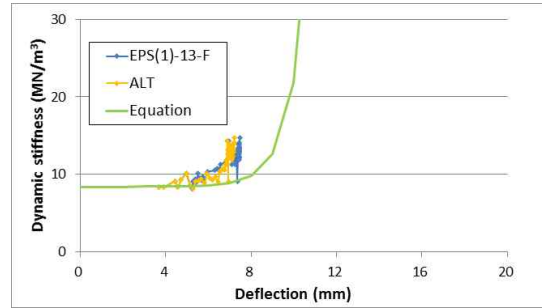
- 바닥완충재의 변형에 의한 동탄성계수 증가를 고려
- 초기 동탄성계수 제한과 함께 장기 동탄성계수 제한 적용
- 시공 후 동탄성계수 측정의 어려움을 해결하기 위한 장기 동탄성계수 예측식 제안
- 바닥완충재의 동탄성계수 변화 측정 & 예측으로 인한 공동주택 바닥판의 소음 저감 능력 손실 최소화
- 장기하중을 받는 바닥완충재의 동탄성계수 변화량의 측정 및 평가식의 제안. 제안된 평가식을 활용하여 공동주택의 층간소음변화 측정 가능

- 장기 성능을 고려한 층간소음 평가

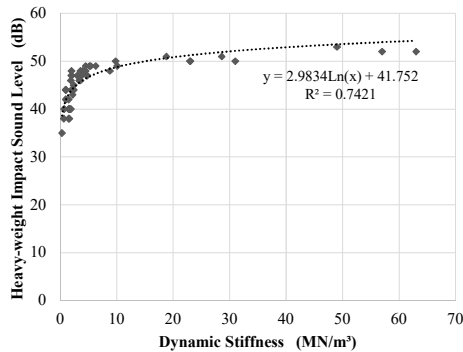
- 제안된 동탄성계수 평가식 및 침하량을 활용하여 상시하중 및 집중하중을 받는 공동주택 층간소음의 증감 측정 가능
- 층간소음은 바닥완충재의 동탄성계수와 밀접한 관련이 있으며 이러한 동탄성계수는 앞서 언급한 예측식을 통해 장기 변화를 예측할 수 있음.



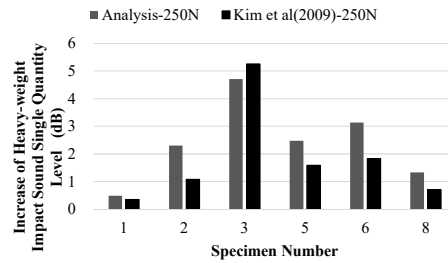
[그림 5.a] 바닥완충재의 처짐 증가량



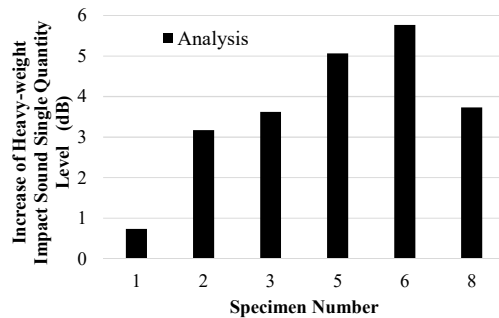
[그림 5.b] 바닥완충재의 동탄성계수 예측



[그림 5.c] 동탄성계수와 중량충격음 관계



[그림 5.d] 소음 성능 평가

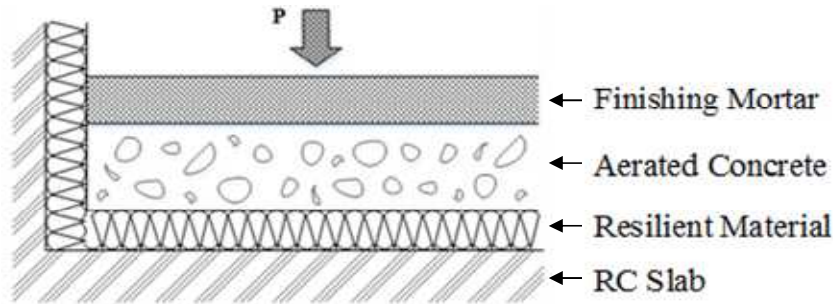


[그림 5.e] 3650일(10년) 후의 소음 증가량

- 동탄성계수와 중량충격음 레벨의 관계는 선행 연구에서 분석되고 밝혀짐.
- 선행 연구의 결과([그림 5.c])와 본 연구에서의 결과([그림 5.a], [그림 5.b])를 바탕으로 장기 소음 평가가 가능함.
- [그림 5.d]와 [그림 5.e]는 바닥완충재의 장기성능을 반영한 소음 평가 결과를 나타냄.
- 장기 소음 평가를 통해 공동주택의 소음을 예측하고 그 결과를 시공 전에 반영하여 바닥완충재의 층간소음 성능이 시간이 흐른 뒤에도 유지될 수 있도록 할 수 있음.
- 바닥완충재 시공 시 기대할 수 있는 소음 저감 효과를 시공 전에 분석 및 평가가 가능.
- 장기하중을 받은 바닥완충재를 사용한 실제 구조물의 층간소음을 직접 측정하는 것은 이 연구의 지원 범위를 벗어나 직접 비교가 어려웠음. 따라서 이 연구에서는 기존에 실시된 실험 결과를 활용하여 제안된 바닥완충재의 장기성능이 층간소음에 미치는 영향을 평가하였음.

-장기하중으로 인한 바닥 침하 방지

- 이 연구에서는 장기하중을 받는 바닥완충재의 성능향목과 성능기준을 제시함을 목적으로 하고 있음.
- 제시된 완충재의 성능기준은 장기하중을 받는 완충재가 최적 성능을 확보하게 함으로써 완충재의 내구성을 확보할 수 있도록 할 것임.



[그림 5.f] 뜯바닥구조 상세

- [그림 5.f]는 뜯바닥구조의 상세를 나타냄.
- 뜯 바닥구조에서는 바닥구조에 바닥완충재가 RC 슬래브 위에 삽입되는 구조임.
- 바닥완충재의 처짐은 바닥슬래브 전체의 침하로 이어질 수 있고 마감 모르타르와 기포 콘크리트에 큰 손상을 줄 수 있음.
- 이러한 문제는 공동주택 사용성능에 큰 영향을 미치고 이로 인한 보수, 보강 비용이 추가적으로 발생될 수 있음.
- 바닥완충재의 안정적인 성능 제시는 뜯바닥구조의 효율적인 사용을 가능케 할 수 있음.

-공동주택 바닥완충재의 안정된 성능 평가에 활용

- 최대 처짐량 제한을 통한 뜯바닥구조의 효율성 증가.
- 동탄성계수 최대 수치를 제한을 통한 층간 소음 저감 효과의 증대화.
- 완충재의 장기처짐과 관련된 평가식의 제시 및 이를 통한 상시하중, 집중하중, 완충재의 종류, 건물의 사용기간에 따른 바닥 침하량 측정 가능

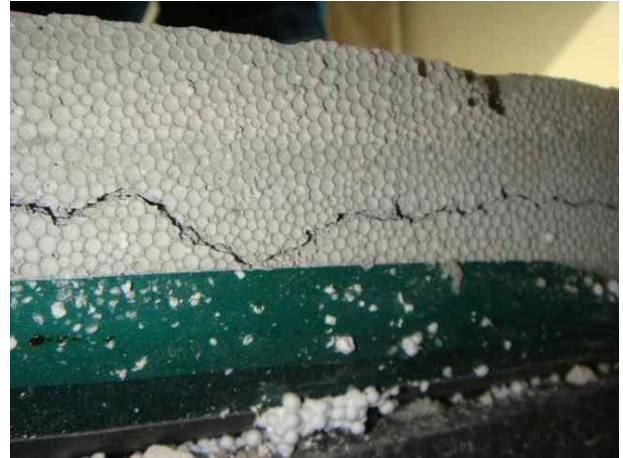
-장기성능을 고려한 바닥완충재 최적 형상 개발



[그림 5.g] 바닥완충재의 밀판 형상

- 본 연구에서는 평판형, 골판형, 엠보형 3종류 바닥 형상의 실험체가 사용됨([그림 5.g]).
- 바닥형상에 따라 장점과 단점이 존재함.
- 평판형상은 골판형과 엠보형에 비해 처짐이 적게 발생하는 장점이 있음.
- 골판형과 엠보형은 형상 사이사이의 빈 공간으로 인해 공기층이 형성될 수 있고 이러한 중공층은 소음 줄이는 측면이 유리함.
- 바닥완충재의 안정적인 내구성능과 함께 효과적인 소음 저감 능력을 발휘할 수 있는 바닥형상 개발에 도움 될 수 있음.

-내구성을 고려한 완충재의 안전성 향상에 따른 사회적 비용절감효과



[그림 5.h]바닥완충재의 성능 저하로 인한 바닥 구조 균열 및 완충재 손상 사례

- [그림 5.h]는 시공 이후 바닥 구조의 균열 및 손상 사례를 보여줌.
- 시공 중의 문제는 최소한의 비용으로 개선이 가능하지만 시공 후 사용하는 중에 일어나는 문제는 막대한 비용이 투입되어야 함.
- 바닥완충재의 성능문제로 인해 바닥구조를 보수하는 것은 바닥완충재 이외의 부분(마감 모르타르, 기포 콘크리트)도 함께 보수되어야 하므로 비용 손실이 큼.
- 초기 설계 단계부터 안정적인 성능을 바탕으로 장기간 성능이 지속될 수 있도록 함으로써 바닥완충재로 인한 사회적 비용 절감이 가능함.

-공동주택 바닥충격음 완충재의 유지관리기법의 선진화 달성

-공동주택 층간소음 억제

- 사회적인 문제로 대두한 층간소음을 억제하는 것은 구조재료와 함께 완충재와 같은 비구조 재료의 상호 관계에 의해 해결할 수 있음.
- 완충재의 장기거동평가와 성능기준의 제시는 주민이 공동주택에 입주한 후에 발생할 수 있는 완충재로 인한 층간소음을 억제할 수 있는 성능기준 표준안을 제시함으로써, 사회적문제까지 확산된 공동주택의 층간소음 문제를 해결하는데 도움이 될 것임.

-층간소음 억제를 위해 사용되는 건설비용의 절감

- 층간소음은 슬래브의 두께와 함께 바닥완충재나 기타 설비시설과도 밀접한 관련이 있는 문제로 슬래브 두께를 증대시키지 않고 다른 경제적인 방법으로 층간소음을 억제할 수 있는 방안을 찾는 것이 바람직함.
- 슬래브 두께를 증가시키는 방법은 층간소음 저감에 효과는 있지만 그 영향력이 크진 않고 공사비 증가 및 층고 감소의 단점이 있음.
- 바닥완충재의 성능, 특히 장기구조성능과 환경성능은 바닥완충재의 층간소음억제 성능을 최대화함으로써 슬래브의 두께 증대를 최소화하며 층간소음을 효과적으로 억제할 수 있는 방안의 하나가 될 것으로 기대함.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- 국외 바닥충격음 요구 성능 규정 정보 수집

국가	바닥충격음 요구 성능 (dB)	국가	바닥충격음 요구 성능 (dB)
덴마크	58	이탈리아	63
노르웨이	53	스페인	65
스웨덴	58	포르투갈	60
핀란드	53	폴란드	58
아이슬란드	58	슬로바키아	58
독일	53	에스토니아	53
영국	64~57	라트비아	58
프랑스	60~53	러시아	60
오스트리아	50~43	네덜란드	61~54

성능등급(rank)		5	4	3	2	1
성능 수준	중 량	LH-50	LH-55	LH-60	LH-65	rank2 미만
	경 량	LH-45	LH-50	LH-55	LH-60	rank2 미만

제7장. 연구개발성과의 보안등급 - 일반

8장. 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

- 해당사항 없음

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

성균관대학교는 연구원들의 안전과 연구실험실 안전에 대해서 국가연구개발사업 수행에 따른 안전조치 이행계획 등과 관련하여 안전관리 전담 인력과 협력하며 연구활동에 필요한 모든 제반사항을 적극 관리하고 있음.

1. 성균관대학교 소속 연구실 안전을 위해 안전환경관리규정을 운영

(2009.11.1제정, 2011.11.1.개정)

- 캠퍼스별, 단과대학 및 기관별, 연구·실험실별 안전관리 책임자 및 담당자 지정
- 연구·실험실 안전에 필요한 사항을 정하기 위해 「안전환경관리위원회」를 운영
- 안전관리 주관부서인 관리팀에서 매년 안전관리업무계획을 수립 운영
- 안전전담자(3명), 및 단과대학별(간접부서) 중간안전관리담자(총16명) 선임 운영

2. 성균관대학교 소속 연구실 안전을 위한 안전점검활동

가. 안전점검 종류 및 주요내용

구분	점검자	주요내용	비 고
수시 점검	경비근무자, 안전팀, 안전환경책임자	가동기기, 위험물, 개인정보, 냉난방기 전원 상태 등	연휴 전/후 (설날, 추석, 장마철 등)
일일 점검	실험/사무실 직원, 경비(보안)근무자	연구실험실정리정돈 및 발열 설비, 화학물질 등 위험요소	일일안전점검 check-list 기록 및 유지
전문 점검	안전관리자(외부전문가)	분야별 점검 (소방, 가스, 위험기계, 화학 등)	매년 실시 및 문제점 개선
종합 점검	안전환경 책임자, 외부 전문가 집중점검	연구실험실 6개 분야점검 (전기, 가스, 기계, 화학, 산업위생, 소방관리 등)	- 주기 : 년1회(정기점검) - 방법 : 전 건물 대상 (연구실험실)

- 1) 일일안전점검 : 각 연구·실험실 실시 (책임교수 관리)
- 2) 정기점검(전문가) : 매년실시 - 한국안전기술협회
- 3) 전문점검(전문가) : 매년실시
 - 소방점검 : 외부 전문업체 용역(매월 실태점검 및 종합정밀점검 실시)
 - 위험기계설비 : 전문업체 점검
- 4) 정밀안전진단 : 법령에 의거하여 시행(법규정 : 2년에 1회 실시)

** 정기안전점검 및 정밀안전진단을 실시하여 안전등급을 평가하고 관리등급별로 구분하여 차등관리 하며, 안전점검에서 발생된 문제점은 즉시 개선을 원칙으로 함.

나. 안전등급 선정기준에 따라 등급 분류(등급이 높을수록 잠재위험 요인이 큼)

등 급	상 태	비 고
1등급	문제가 없고 안전성이 유지된 상태	
2등급	경미한 결함이 발견되었으나 안전성에 영향이 없으며, 경미한 보수가 필요한 상태	
3등급	결함이 2등급보다 취약하고 전체적인 안전에 크게 영향을 미치지 않는으나 일부보수 및 보강이 필요한 상태	
4등급	결함이 심하게 발생하여 긴급보수, 보강이 필요하며 사용에 제한을 하여야 하는 상태	
5등급	심각한 결함이 발생하여 안전상 위험발생 가능성이 커서 즉시 사용금지하고 개선해야 하는 상태	

다. 관리위험등급의 지정

- 1) A형 연구실 : 미생물 및 동물을 포함한 생물을 사용하는 연구실
- 2) B형 연구실 : 화학약품 등 독성물질을 사용하는 연구실
- 3) C형 연구실 : 방사성 동위원소 물질 등을 사용하는 연구실
- 4) D형 연구실 : 고압전기설비, 대형기자재(유해위험 기계·기구 등) 사용 연구실
- 5) E형 연구실 : 고압, 폭발성, 유독가스 등을 사용하는 연구실
- 6) F형 연구실 : 위험물질 미사용 연구실(설계, 컴퓨터 등)

3. 본 연구실의 안전교육훈련

가. 개요

「연구실안전환경조성에관한법률」에 따라 안전교육은 월 1시간 이상 또는 6개월에 6시간 이상 실시하도록 규정되어 온라인교육을 의무교육으로 운영하고 있으며, 대학원 신입생은 별도로 2시간 오프라인 교육을 실시하고 있음.

나. 대상 : 학부생, 대학원생, 연구원, 소속 연구원, 외부연구기관 등

다. 안전교육 의무화

구 분	제 재 방 안
1기, 2기 안전교육 이수여부	종합시험 응시 자격에 반영
3기, 4기 안전교육 이수여부	졸업논문 본심 심사원 제출 자격에 반영

다. 온라인 교육

- 1학기 : 공통과목(6개 콘텐츠 선택) - 상반기 이수
 - 2학기 : 분야별 교육 전공과목(6개 콘텐츠 선택) - 하반기 이수
- ※ 외국인 : 영문으로 번역된 콘텐츠 온라인 교육 수강(2012. 4. open)

구 분	교 육 내 용	비 고
1학기 (공통교육)	연구실 안전환경조성에 관한법률, 연구실 안전수칙 및 사고 시 행동요령, 전기안전, 컴퓨터 안전, 소방안전, 화재 시 행동요령	필수과목
2학기 (분야별교육)	기계안전, 가스안전, 화학안전, 화학사고시 대응요령, 건설안전, 생물학안전, LMO안전, 방사선안전, 예술안전, 사고사례	6과목 이상 수강

4. 본 연구실의 연구원의 건강검진

- 건강검진은 학교보건법에 의거 본교 건강센터에서 주관하며 매년 학부생 및 대학원생을 대상으로 건강검진을 실시하고 있음.

5. 성균관대학교 소속 연구실 안전을 위한 보험가입

가. 계약업체 : 삼성화재(주), 교직원단체보험 : 삼성생명

나. 계약가입일 : 매년 4. 29 (삼성화재)

다. 보험명 및 담보내용

구 분	개요 및 담보내용	주관부 서
재산종합 Package보험	· 기본담보 : 화재, 폭발, 붕괴, 파손, 지진 등으로 인한 피해 · 재산종합위험담보(2012년) : 서울 220 억원, 수원 533 억원 · 대인대물일괄 : 30억원/사고당 · 치료비담보특약 : 5백만원/인당/사고당	학사처 관리팀
가스배상 책임보험	· 담보내용 : 목적물별 대인 - 8천만원 한도 대물 - 3억원 한도	학사처 관리팀
캠퍼스 종합	· 캠퍼스 내외부 발생 사고로 사망, 후유장애에 대한 보상 · 상해사망 및 후유장애 : 각 5천만원한도/인당 · 대물배상책임 : 2백만원 한도/사고당	학사처 관리팀
연구활동종사 자 상해보험	· 연구활동 중 연구활동 종사자의 신체상해 및 사망 대비 · 상해사망 : 1억원 한도/인당, .후유장애 : 1억원 한도/인당 · 상해의료실비 : 1천만원 한도/인당	학사처 관리팀
교직원 단체보험 (삼성생명)	· 사망, 후유장애 - 1억원/인당 · 질병사망 - 5천만원/인당 · 의료비 지원(암발생 - 3천만원, 입원및의료실비 - 5천만원)	총괄 지원팀

※ 연구활동종사자 상해보험

- 범위 : 과학기술분야 학부생 및 대학원생(연구원 포함)

본 연구실 연구원의 경우 상해보험 가입 기준에 부합함.

6. 추가 이행계획

개선 계획	개선 방법
1) 실험종사자 건강검진 실시	1. 일반건강진단 적극 홍보 2. 유해물질 취급자 특수건강검진 선정 및 이행
2) 연구실험실 안전 개선	노후된 실험실 및 실습장비 개선 공사 시행
3) 안전점검에 따른 문제점 개선	1. 위험요인이 높은 등급 실험실 환경개선시행 2. 관리자 지정 책임관리 유도
4) 특수위험 실험실에 별도의 소화설비 설치	위험성이 큰 실험실에 별도의 특수소화 설비를 설치하여 사고 확산 예방
5) 유기용매 중간 보관시설 개선	1. 위험물 중간보관소 환경개선 및 보완 2. 각 층별 시약 보관창고를 설치하여 통합관리
6) 실험실 환경안전지침 개선	연구실 환경관리에 적합하도록 보완작성
7) 고압가스 안전관리	전문가 안전시설 점검 및 문제점 개선 진행
8) 위험기계 안전관리	정기적인 안전점검 및 문제점 개선
9) 안전보호장비 시설 보완	위험성이 높은 연구실험실 공간에 비상기구함을 비치하여 초기대응 구축

7. 본 연구실 자체 안전관리 이행계획

개선 계획	개선 방법
1) 안전보호구 착용철저	1. 실험 시 안전보호구 착용 적극권장 2. 안전보호구 부족분 추가구매
2) 실험안전수칙 숙지	자체 안전수칙 추가제정 및 실험 전 적극숙지

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

No.	구분 (SCI/ 일반)	논문명	학술지명	ISBN ISSN	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
1	논문 (일반)	바닥충격음 완충 층의 처짐 영향 요 소	大韓建築學會論文集 : Journal of the architectural institute of Korea : Structure & construction / 構造系	1225-1674 1226-9107	이범식	29(12)	37	44	2013/ 12/01
2	논문 (일반)	Structural Behavior of Resilient Materials Subjected to Short-Term Load and Long-Term Load	International journal of engineering and technology	1793-8236	이정윤	6(1)	65	69	2014/ 01/01
3	논문 (일반)	공동주택 바닥완충 재의 재하시간에 따른 장기처짐 및 동탄성계수 평가	大韓建築學會論文集 : Journal of the architectural institute of Korea : Structure & construction / 構造系	1225-1674 1226-9107	김종문	30(11)	29	36	2014/ 11/01
4	논문 (일반)	Deflection of Resilient Materials for Reduction of Floor Impact Sound	The Scientific World Journal	1532-2246 1537-744x	이정윤	2014 (612608)	612608	-	2014/ 10/01
5	논문 (SCI)	Evaluation of the long-term sound reduction performance of resilient materials in floating floor systems	Journal of sound and vibration	0022-460x; 1095-8568	김진구	366	199	210	2016/ 03/31

제11장. 기타 사항 - 없음

제12장. 참고 문헌

1. 김민정, 박준모, 김옥규, 서덕석, 최정현, “공동주택의 소음하차분쟁에 대한 기술적 고찰,” 대한건축학회 학술발표대회 논문집, v.31, n.1, 2011, pp. 161-162.
2. 오진균, 손장열, “바닥충격음 인정구조의 중량충격음과 동탄성계수와의 상관성 분석 및 임피던스 예측법에 관한 연구,” 대한건축학회논문집, v.26, n.06, 2010, pp. 305-3012.
3. 이종열 이웅중 정성철, “온돌바닥 모르터의 건조수축 보상을 위한 팽창재의 품질특성에 관한 실험연구,” 한국콘크리트학회 논문집, 제13권 4호 2001, pp. 314~320.
4. 한상환, 박진아, 김준삼, 임주혁, 박영미, “중공 전이 슬래브의 뿔뿔 전단 강도,” 한국콘크리트학회 논문집, 제22권 3호 2010, pp. 367~374.
5. 정주홍, 이승창, 최창식, 최현기, “중공형상 및 재료의 영향을 고려한 도넛형 이방향 중공슬래브의 일방향 전단강도,” 한국콘크리트학회 논문집, 제24권 4호 2012, pp. 391~398.
6. 김상우, 황현복, 황현식, 이기장, 이동근, 이정윤, “철근콘크리트 이방향 중공 하프슬래브의 휨성능에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회 논문집(구조계), 제25권 8호, 2009, pp. 11~18.
7. 주택도시연구원, “완충층을 포함한 온돌구성층의 구조해석기법 개발,” 주택도시연구원, 2005. 129pp.
8. 이상섭, 홍성엽, 박금성, 허병욱, 배규웅, “층간소음 대응 유닛 모듈러 경량합성바닥 구조시스템,” 대한건축학회 학술발표대회 논문집, v.32 n.1, 2012, pp. 101-102.
9. 이상우, “초고층 공동주택의 바닥충격음 성능에 미치는 영향요인에 관한 연구,” 대한건축학회논문집, v.22 n.3, 2006. pp. 303-310.
10. 장재희, “공동주택 바닥충격음 저감재의 저감 효과에 관한 연구,” 대한건축학회논문집, v.18 n.4, 2002. pp. 205-212.
11. 김태호, “건축구조물 바닥판의 동적해석과 소음저감,” 성균관대학교 대학원 박사학위 논문
12. 김재수, “소음진동학 개정 4판,” 세진사, pp. 495-500
13. Kim, K. W., Jeong, G. C., & Sohn, J. Y. (2009). “Correlation Between Dynamic Stiffness of Resilient Materials and Lightweight Floor Impact Sound Reduction Level”, *Journal of Korea Society for Noise and Vibration Engineering*, 18(2), 886-895.
14. Kim, T. H. (2005). “Dynamic Analysis and Vibration Reduction of Floors in Building Structures”, *Thesis, Sungkyunkwan University*.

(참고기준)

- 국토교통부 (2015). “공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준”
- 국토교통부 (2014). “공동주택 층간소음기준에 관한 규칙”
- 국토교통부 (2015). “도시 및 주거환경정비법”
- KS F 2868 (2013). “거주공간 뜬바닥용 재료의 동탄성계수 측정방법”, 한국표준협회
- KS M ISO4898 (2013). “경질 발포 플라스틱-건축물단열재-규격서”, 한국표준협회
- KS F 2873 (2011). “바닥충격음 완충재의 잔류변형 측정방법”, 한국표준협회
- KS M ISO20392 (2012). “단열재-압축 크리프 측정”, 한국표준협회

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.