

경량 복합패널의 분포압 강도 성능 평가

강수민¹, 황문영¹, 김성태², 조영준², 이병연^{3*}

¹충북대학교 건축공학과, ²(주)엑시아머티리얼스, ³충북대학교 건축학과

Evaluation on Transverse Load Performance of Lightweight Composite Panels

Kang Su-Min¹, Hwang Moon-Young¹, Kim Sung-Tae², Cho Young-Jun²,

Lee Byung-yun^{3*}

¹Department of Architectural Engineering, Chungbuk National University

²Axia Materials CO., LTD.

³Department of Architecture, Chungbuk National University

요약 최근 10년 동안 국내에서는 각종 재난이 증가하고 있다. 이에 따라 재해, 재난 환경에 적합한 임시거주공간 혹은 피난시설의 필요성이 증대되고 있다. 본 연구에서는 기존 피난시설을 구성하는 소재들보다 가벼운 경량 복합패널을 이용하여 구조주거를 제작하고자 하였다. 이를 위해 경량 복합패널에 대한 구조적 성능을 검증하고자 하였으며, 패널에 대한 성능 시험 방법 중 ASTM E72 기준에 따른 분포압 강도 실험을 진행하였다. 실험 결과, 각 실험체가 등분포하중을 받을 때, 스펠에 따른 허용하중을 알아내었다. 모든 실험체는 스킨과 코어의 접합부에서의 탈락으로 인해 실험이 중단되었으며, 이를 추가로 분석하여 접합부가 탈락될 때의 전단 응력을 계산하였다. 코어가 150mm인 실험체의 경계면에서의 전단응력은 평균 0.0170MPa, 코어가 200mm인 실험체의 경계면에서의 전단응력은 평균 0.0156MPa이다. 이를 보았을 때 같은 두께의 패널에서 유사한 값이 나왔다고 할 수 있다. 이 값을 통해 패널의 분포압 강도 성능을 합리적으로 예측할 수 있는 근거를 제시하였다. 또한 결과 값으로 나타난 허용하중을 근거로 패널의 성능을 평가하였으나, 패널의 스킨과 코어의 접합방법을 개선하여 경계면에서의 조기박리를 방지한다면 경량 복합패널의 분포압 강도 성능을 보다 개선시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract Over the last 10 years, the number of disasters has been increasing in Korea. As a result, the need for temporary residences or shelters for disaster conditions is increasing. In this study, post-disaster refugees housing was developed using lightweight composite panels that are lighter than the materials that make up the existing shelter. To accomplish this, the structural performance of the lightweight composite panel was validated. Among the performance tests on the panels, the transverse load test was conducted according to the ASTM E 72 criteria. As a result of the experiment, when each specimen was subjected to a uniformly distributed load, the allowable load was determined according to the span. All the experiments were ended due to a loss of adhesive at the junction of the skin and core. Further analysis was conducted to calculate the shear stress when the junction was dropped. The mean shear stress at the adhesive surface of a specimen, 150 mm and 200 mm in thickness, was 0.0170MPa and 0.0156MPa, respectively. This suggests that similar values were obtained from panels of equal thickness. In addition, this stress provides a criterion of judgment that could be used to inspect the structural performance of the panels. The performance of the panel was evaluated based on the allowable load, but it may be possible to increase the strength of the lightweight composite panel by improving the joining method to avoid separation from the junction.

Keywords : Flexural Performance, Lightweight composite panel, Post-disaster Refugees Housing, Structural Performance, Transverse Load Test

본 연구는 2017년 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(17CTAP-C129718-01)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Byung-Yun Lee(Chungbuk National Univ.)

Tel: +82-43-261-2433 email: ecoville@chungbuk.ac.kr

Received November 15, 2017

Revised (1st December 26, 2017, 2nd January 4, 2018)

Accepted January 5, 2018

Published January 31, 2018

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

1.1.1 연구배경

사회재난은 화재, 건축물 붕괴, 선박사고, 감염병 등에 의해 대규모 인적, 물적, 사회적 피해가 발생하는 것을 의미한다. Fig. 1은 최근 10년 간 국내에서 발생한 사회재난 현황을 보여주고 있다[1]. 2013년부터 발생건수가 이전보다 증가한 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 2에 나타나 있는 국내 지진 발생 현황을 보면 2016년 규모 2.0 이상 국내 지진발생횟수는 총 254회로 예년 평균 지진발생횟수인 47.6회 보다 5배 이상 발생빈도가 높게 나타났다 2016년에 발생한 국내 지진 중 가장 큰 규모의 지진은 9월 12일 경북 경주시 남남서쪽 8.7km 지역에서 발생한 규모 5.8의 지진으로 1978년 기상청의 계기지진 관측 이래 역대 최대 규모의 지진으로 기록되었으며 부상자 23명 및 9,368건의 재산피해를 발생시켰다[2].

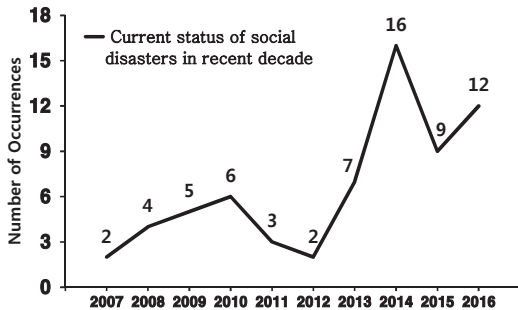


Fig. 1. Social disaster status(2007-2016)[1]

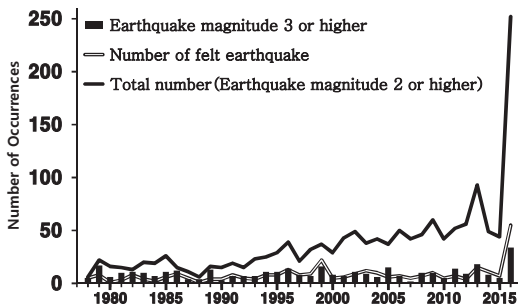


Fig. 2. Earthquake occurrence trend in Korea(1978-2016)[2]

위에서 확인한 것처럼 국내에서는 최근 10년 동안 재

해, 재난사태가 증가추세를 보이고 있다. 이에 따라 재해, 재난환경에 적합한 임시거주공간 혹은 피난시설의 필요성이 증대되고 있다. 하지만 일반적으로 많이 이용하는 기존의 컨테이너를 그대로 사용하는 방법은 외기와 맞닿는 부분에서의 열손실이 많이 발생하여 건축물의 단열효과가 떨어지며, 누수, 결로가 발생하므로 거주자의 거주성이 현저히 떨어진다. 또한 제작하는 과정에서 바닥을 평탄화하기 위한 시공, 양생 등의 공사로 공기가 늘어나게 되므로 비효율적이라고 할 수 있다. 그리고 제작에 사용되는 샌드위치 패널 내/외피재에 주로 사용하는 금속 도금강판은 무게, 비용 문제로 주로 0.5mm 이하의 얇은 박막 형태로 사용하기 때문에 굽힘 하중 등에 매우 취약하며 구조적 검증이 되지 않아서 구조체 역할이 아닌 주로 표면을 보호하는 기능만을 가지고 있다.

본 연구에서는 이재민의 심심안정과 빠른 일상 복귀를 도모하고자 기존의 임시거주시설보다 안전하고 거주성이 뛰어난 구조주거를 제작하고자 하였으며, 이를 위해 무게가 가벼워서 시공성이 뛰어나며, 단열효과가 좋은 경량 복합패널을 이용하고자 하였다. 이에 따라 본 연구에서는 초기 연구로서 경량 복합패널의 구조적 성능을 확인하고자 하였다.

단열재와 복합적으로 결합된 패널을 구조체로 사용하기 위해 패널의 구조 성능을 확인하기 위한 연구는 국외에서는 구조용 단열패널(SIPs, Structural Insulated Panels)의 구조 성능에 관한 연구[3]와 관련 문헌[4]이 있으며, 국내에서는 조립식 목구조 주택의 에너지 절약형 설계, 시공을 위해 전단벽체로 구성된 구조용 단열패널의 면내 전단, 압축력을 받는 정적가력에 관한 연구[5]와 구조용 단열패널에 대한 정적가력과 반복가력 성능 평가에 관한 연구[6]가 있다. 선행 논문에서는 목재 판질과 단열재를 결합한 패널에 대한 구조 성능을 다루고 있으나, 본 연구에서는 섬유강화 복합소재와 단열재를 결합한 경량 복합패널에 대한 구조 성능을 알아보려고 한다.

1.1.2 경량 복합패널 구성

경량 복합패널은 Fig. 3과 같이 내부 코어가 EPS(Expanded Polystyrene)로 구성되며 이를 고강성의 섬유강화 복합소재 스킨이 위 아래로 덮고 있는 형태로 구성된다. 코어와 스킨의 사이는 PU. Glue(Polyurethane Glue)를 이용하여 부착된다. 접합에 사용된 제품은 1억형 Glue이며, Ashland Isogrip 3030D[5]제품을 사용하

였다. 이 제품은 신뢰할 만한 내구성을 제공하며 신속한 부착이 가능한 100% 폴리에스테르 접착제이다[7]. 접착제는 롤 코터, 압출기 또는 스프레이 코팅 시스템을 사용하여 도포한다.

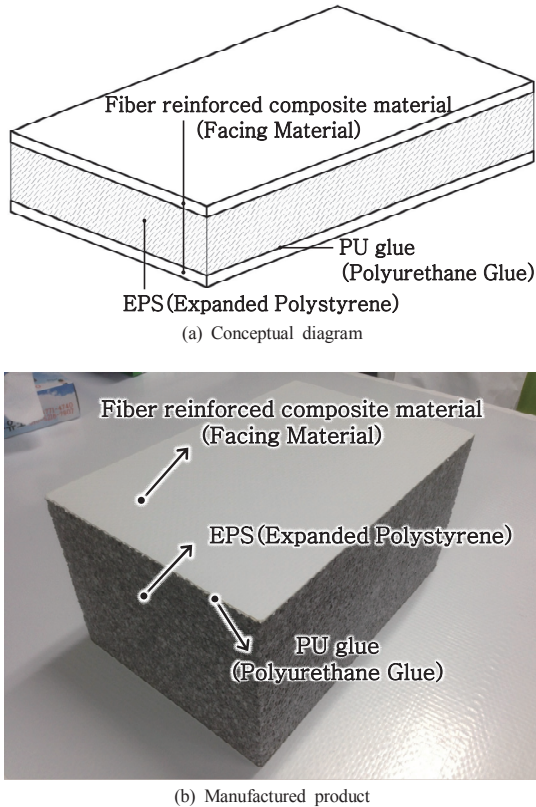


Fig. 3. Panel configuration

섬유강화 복합소재 제조에 사용되는 고분자 소재의 용융점도는 $20\text{mPa} \cdot \text{s}(\text{cps})$ 로 이는 통상의 열가소성 소재 대비 1/5,000 수준으로 낮으며, 이를 파우더로 만들어 탄소섬유, 아라미드섬유, 유리섬유 등의 섬유강화재에 분산도포한 후 열과 압력으로 함침시켜 복합소재를 제조하고 있다. 본 연구에서 사용하는 섬유강화 복합소재는 기존의 복합소재와는 달리 섬유를 직조하는 방식으로 제조된다.

초고유동 소재를 함침하기 때문에 광폭의 섬유강화재에도 섬유 필라멘트 내부까지 함침이 잘되어 우수한 물성을 얻을 수 있다. 또한 생산 공정 중이나 최종제품에서 VOC(Volatile organic compound, 휘발성 유기 화합물) 등의 유해 물질 발생이 전혀 없는 소재이다. 따라서 본

연구에서 사용하는 경량 복합소재는 제조과정에서 친환 경적일 뿐만 아니라 경량 소재를 사용하여 시공성이 우수할 것으로 예상된다. 또한 코어부의 EPS 사용으로 뛰어난 단열성이 기대되며 외부 섬유강화 복합소재의 사용으로 구조적 성능 확보도 수월할 것으로 기대된다.

Fig. 4는 경량 복합패널을 이용해 시공을 할 때에 벽체와 벽체간의 접합 또는 벽체와 지붕이 접합될 때의 상세도이다. Fig. 4와 같이 비스듬한 면을 이용하여 접합되지만 본 연구에서는 단일 패널의 성능을 파악하기 위해 이를 반영하지는 않았다.

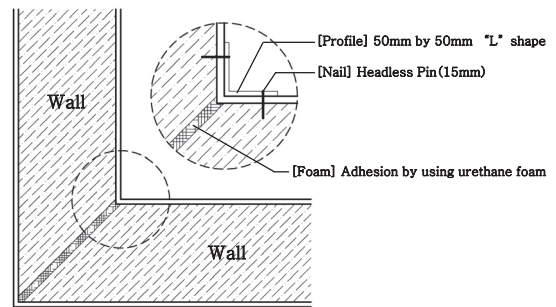


Fig. 4. Panel connection detail

1.1.3 재료 물성

경량 복합패널에 사용된 재료에 대한 물성은 Table 1에 나타나 있다[8]. 스킨재의 경량 복합패널 실험체 제작에 적용된 코어는 EPS(Expanded Polystyrene)로서 밀도는 $25\text{kg}/\text{m}^3$ 이며 두께는 150mm, 200mm 두 종류로 사용하였다. 스킨재는 공칭두께 0.8mm인 섬유강화 복합소재를 사용하였다.

1.2 연구 방법 및 범위

본 연구에서는 경량 복합패널을 이용한 구호주거 설계를 위해 패널의 구조성능을 검증하고자 한다. 따라서 경량 복합패널을 직접 제작하고, 구조체로서의 구조적 거동특성 및 성능을 파악하기 위해 실험을 진행하였다. 구호주거가 제작되었을 때의 풍하중에 대한 경량 복합패널의 저항성능과 경량 복합패널의 지붕구조 사용의 적합성 등을 평가하기 위해 분포압강도 실험을 진행하였다.

Table 1. Material properties for structural components[8]

	Tensile Strength MPa	Elastic Modulus MPa	Shear Strength MPa	Shear Modulus MPa	Poisson's Ratio	Compressive Strength MPa	Density kN/m ³ (kg/m ³)
Test Method	ISO 527		ASTM D3518				
Composites Skin (0.8mm)	320	20x10 ³	100	8.54x10 ³	0.17	-	16.70 (1700)
Expanded Polystyrene (EPS)	0.137	2.34	0.20	3.3	-	0.124	0.245 (25)

2. 실험계획

2.1 실험방법

경량 복합패널 실험을 위해 검토된 국내외 표준 실험 규격은 ASTM E72[9]와 KS F 2273[10]이다. 상기 표준 실험규격을 참고하여 패널에 대한 분포압강도 실험을 진행하였다.

2.2 분포압강도 실험체 및 가력방법

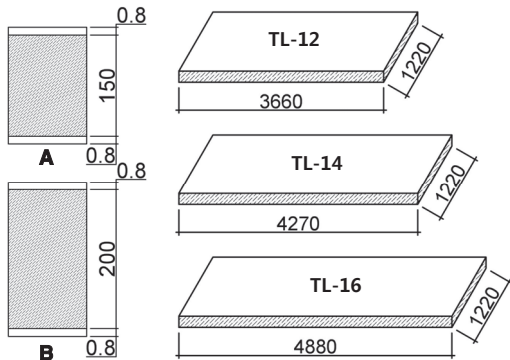


Fig. 5. Transverse load specimen

분포압강도 실험체는 Fig. 5와 같이 실험 규격에 따라 1220mm의 폭을 유지하면서 패널의 길이를 변화시켰다. 실험체 코어의 폭은 150mm와 200mm 두 가지로 실험하였다.

분포압강도 실험체의 규격은 Table 2와 같다. 이 때 스패는 실험 시 지점간의 거리이며 실제 실험체 길이에서 1ft(304.8mm)를 제외한 값이다.

분포압강도 실험방법은 주로 ASTM E72[9]에 따라 수행하였으며 기준에서 제시한 분포압강도 실험 중 등분포하중을 가력할 수 있는 장치를 이용하여 실험을 진행하였다(Fig. 6 참조).

Table 2. Properties of transverse load specimen

Specimen	Span	Width	Skin	Core	Amount
TL-12-150	3350mm	1220mm	0.8mm	150mm	3 each
TL-12-200				200mm	
TL-14-150	3960mm			150mm	
TL-14-200				200mm	
TL-16-150	4570mm			150mm	
TL-16-200				200mm	

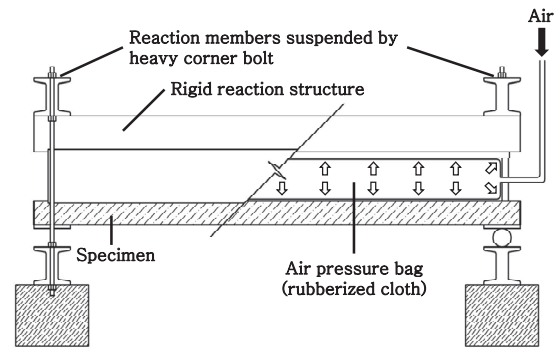


Fig. 6. Transverse load setup[9]

등분포하중 실험 장치의 개념은 Fig. 6에 나타나있다. Fig. 6에서 보이는 것처럼 실험체는 하부에 위치시키며 상부에는 강체 구조물을 단단하게 고정한다. 이 강체 구조물과 실험체 사이에 공기 튜브를 위치시킨 뒤, 공기를 공기 튜브에 주입하여 실험체에 전체적으로 균일한 압력을 가하는 방식이다.

3. 실험결과 분석

3.1 실험결과 예측

본 연구에서 진행하는 실험을 간단히 도식하면 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 패널 중앙에서 발생하는 중앙부 처짐(δ)은 식 (1)과 같다.

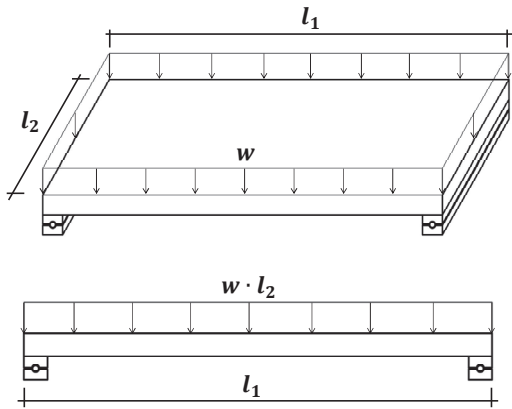


Fig. 7. Transverse load diagram

$$\delta = \frac{5 \times w l_2 \times l_1^4}{384 \times E_1 \times I_e} = \frac{5 \times P \times l_1^3}{384 \times E_1 \times I_e} \quad (1)$$

여기서, w = 단위면적당 등분포하중,

l_1 = 실험체 길이,

l_2 = 실험체 폭,

E_1 = 스킨재의 탄성계수,

I_e = 실험체의 유효 단면2차모멘트

$w l_2 l_1 = P$ (가해지는 하중)

식 (1)로부터 하중과 중앙의 처짐 관계를 나타내면 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{384 \times E_1 \times I_e}{5 \times l_1^3} \delta \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 I_e (유효 단면2차모멘트)의 값은 다음 Fig. 9와 같이 환산단면을 통해 구하게 된다.

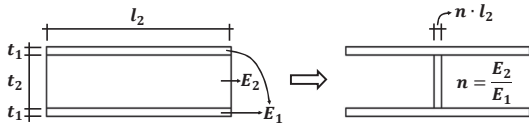


Fig. 8. Converted section for I_e

환산단면은 Fig. 8에서처럼 두 가지의 재료로 된 단면을 같은 탄성적 성질을 가지는 하나의 재료로 된 것으로 치환한 단면을 말한다. 여기에서는 스킨재의 성질을 가지는 단면으로 치환하기 위해 Fig. 8과 같은 방법으로 환산단면을 계산했다. 이렇게 구한 환산단면으로 I_e 값을 다음 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$I_e = \frac{l_2 \times (2t_1 + t_2)^3}{12} - \frac{\left(1 - \frac{1}{n}\right) l_1 \times t_2^3}{12} \quad (3)$$

여기서, n = 내부 EPS와 스킨재의 탄성계수비(E_2/E_1),

E_1 = 스킨재의 탄성계수,

E_2 = 내부 EPS의 탄성계수

다음으로 파괴하중을 산정하기 위해 휨응력 식을 이용했다. 휨응력 식을 이용하여 최대 응력이 작용할 때의 최대 모멘트를 구해보면 식 (4)와 같다.

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} \times z}{I_e} \quad (4)$$

여기서, σ_{\max} = 실험체 단면에서의 최대 휨응력,

M_{\max} = 실험체에서 발생하는 최대 휨모멘트,

I_e = 실험체의 유효 단면2차모멘트,

z = 중립축에서 단면 연단까지의 거리

여기에서 실험체의 최대 휨모멘트 M_{\max} 는 실험체 중앙에서 발생하게 되며 그 크기는 식 (5)와 같이 구할 수 있다. 여기에서 $w l_2 l_1 = P$ (가해지는 하중)인데 휨모멘트가 최대일 때의 하중이므로 여기에서의 P 는 P_{\max} (파괴하중)라고 할 수 있다.

$$M_{\max} = \frac{w l_2 l_1^2}{8} = \frac{P_{\max} \times l_1}{8} \quad (5)$$

따라서 식 (4)와 (5)를 통해 P_{\max} 에 대해 다시 정리하게 되면 실험체의 파괴하중 P_{\max} 는 식 (6)과 같다.

$$P_{\max} = \frac{\sigma_{\max} \times 8 \times I_e}{z \times l_1} \quad (6)$$

식 (6)에서 σ_{\max} 는 스킨재의 인장강도(Table 1 참조)를 사용하였다. 따라서 식 (6)으로 예측된 최대강도는 스킨재의 인장파괴를 최종파괴 모드로 가정했을 때 예상되는 강도이다. 또한 앞에서의 식 (1)에서 P 를 P_{\max} 로 바꾸면 그 때의 처짐 δ 는 δ_{\max} 이므로 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\delta_{\max} = \frac{5 \times P_{\max} \times l_1^3}{384 \times E_1 \times I_e} \quad (7)$$

식 (7)을 이용하면 파괴하중이 작용할 때의 중앙에서의 변위를 계산할 수 있다. 식 (6)과 식 (7)을 이용해서 예상한 파괴하중과 그 때의 예상 중앙변위를 계산하였으며 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Expected breaking load and displacement

Specimen	Expected breaking Load(kN)	Expected Maximum Displacement(mm)
TL-12-150	112.11	247.17
TL-14-150	94.87	345.22
TL-16-150	82.22	459.61
TL-12-200	149.67	185.87
TL-14-200	126.64	259.60
TL-16-200	109.76	345.62

따라서 본 실험을 통해 예상되는 하중-변위 관계는 식 (7)을 통해 구할 수 있으며 예상되는 최대강도는 Table 3에 정리된 바와 같다.

3.2 실험 수행 및 결과분석

3.2.1 가력 방법

분포압강도 실험 세팅은 Fig. 9와 같다. 앞의 Fig. 6의 개념으로 실험체를 구성하였으며, 변위를 측정하기 위해 중앙에 LVDT를 설치하였다. 양 단의 지지점을 롤러로 구성하여 실험을 진행하였다.

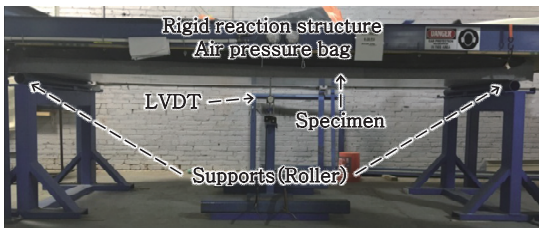


Fig. 9. Transverse load setup

가력방법은 하중을 8단계로 구분하여 하중을 균일한 속도로 적용하였다. 8단계로 구분하기 위해 초기 실험체를 이용하여 파괴하중을 구한 뒤 그 값을 8단계로 나누어 하중 가력을 계획하였다. 다음 가력 단계시에는 하중을 제거한 후, 다시 재하하는 방법으로 실험체 파괴가 발생할 때까지 실험하였다. 하중은 적용 후 5분 동안 유지한 뒤 변위를 측정하였다. 기록된 변위는 실험체의 중앙에서 측정된 값이다.

3.2.2 실험 결과

Fig. 10은 TL-12-150의 하중-변위 그래프이다. TL-12-150은 스킨은 0.8mm, 코어가 150mm, 폭은 1220mm이며 길이가 3660mm인 실험체이다. Fig. 10에

서 볼 수 있듯이 실험 전 실험체의 강성은 식 (2)에 의해 453.61N/mm로 예상되었다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 실험결과 실험체 강성은 평균 396.95N/mm로 매우 유사하였으며 예상 값 대비 88%의 강성을 발휘하였다. 실험에 대한 최대하중과 최대변위는 Table 4에 나타나있다. 예상한 파괴하중은 112.11kN이지만 실험 결과 예상 강도보다 매우 낮은 평균 16.47kN에서 실험체 길이방향 중앙부에서 코어와 스킨의 경계면이 탈락되면서 실험이 종료되었다(Table 4 참조).

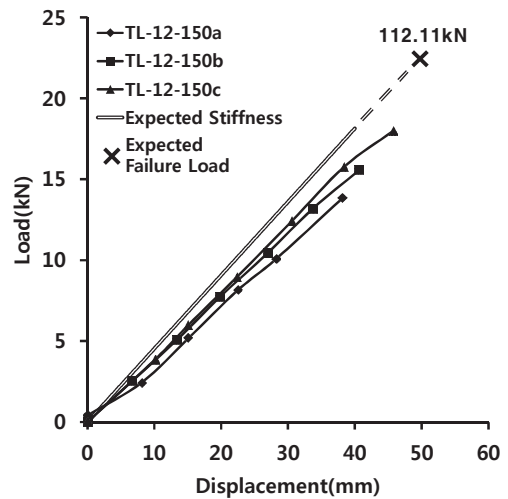


Fig. 10. Load-displacement of TL-12-150 specimen

Table 4. Test result of TL-12-150 specimen

Specimen	Maximum Load(kN)	Maximum Displacement(mm)
TL-12-150a	15.86	38.13
TL-12-150b	15.57	40.64
TL-12-150c	17.99	45.75
Average	16.47	41.50

Fig. 11은 TL-14-150의 하중-변위 그래프이다. TL-14-150은 스킨은 0.8mm, 코어가 150mm, 폭은 1220mm이며 길이가 4270mm인 실험체이다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 실험 전 실험체의 강성은 식 (2)에 의해 274.80N/mm로 예상되었다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 실험결과 실험체 강성은 평균 244.95N/mm로 매우 유사하였으며 예상 값 대비 89%의 강성을 발휘하였다. 실험에 대한 최대하중과 최대변위는 Table 5에 나타나있다.

예상한 파괴하중은 94.87kN이지만 실험 결과 예상 강도보다 매우 낮은 평균 12.28kN에서 실험체 길이방향 중앙부에서 코어와 스킨의 경계면이 탈락되면서 실험이 종료되었다(Table 5 참조).

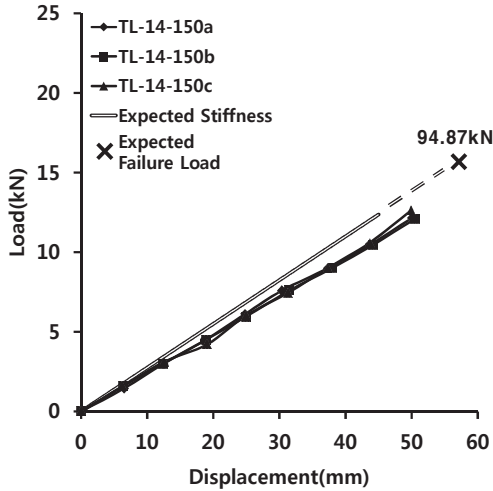


Fig. 11. Load-displacement of TL-14-150 specimen

Table 5. Test result of TL-14-150 specimen

Specimen	Maximum Load(kN)	Maximum Displacement(mm)
TL-14-150a	12.14	50.01
TL-14-150b	12.09	50.50
TL-14-150c	12.62	49.91
Average	12.28	50.13

Fig. 12는 TL-16-150의 하중-변위 그래프이다. TL-16-150은 스킨은 0.8mm, 코어가 150mm, 폭은 1220mm이며 길이가 4880mm인 실험체이다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이 실험 전 실험체의 강성은 식 (2)에 의해 178.89N/mm로 예상되었다. Fig. 12에 나타난 바와 같이 실험결과 실험체 강성은 평균 181.08N/mm로 매우 유사하였으며 예상 값 대비 101%의 강성을 발휘하였다. 실험에 대한 최대하중과 최대변위는 Table 6에 나타나있다. 예상한 파괴하중은 82.22kN이지만 실험 결과 예상 강도보다 매우 낮은 평균 8.97kN에서 실험체 길이방향 중앙부에서 코어와 스킨의 경계면이 탈락되면서 실험이 종료되었다(Table 6 참조).

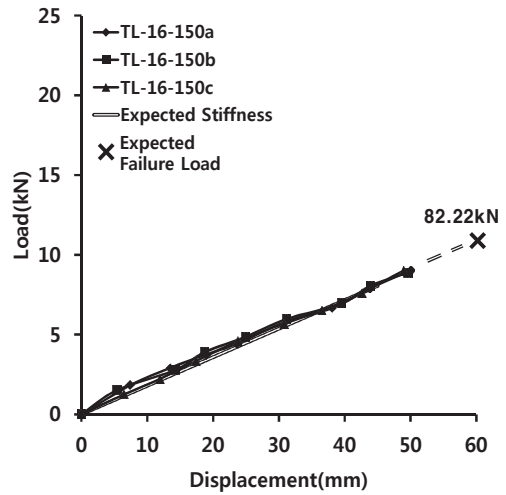


Fig. 12. Load-displacement of TL-16-150 specimen

Table 6. Test result of TL-16-150 specimen

Specimen	Maximum Load(kN)	Maximum Displacement(mm)
TL-16-150a	9.01	50.04
TL-16-150b	8.88	49.63
TL-16-150c	9.01	48.95
Average	8.97	49.54

Fig. 13은 TL-12-200의 하중-변위 그래프이다. TL-12-200은 스킨은 0.8mm, 코어가 200mm, 폭은 1220mm이며 길이가 3660mm인 실험체로 TL-12-150 실험체에서 코어의 두께만 변화시킨 실험체이다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이 실험 전 실험체의 강성은 식 (2)에 의해 805.25N/mm로 예상되었다. Fig. 13에 나타난 바와 같이 실험결과 실험체 강성은 평균 606.05N/mm로 유사한 값을 보였으며 예상 값 대비 75%의 강성을 발휘하였다. 실험 결과 TL-12-150의 강성은 396.95N/mm로 TL-12-200 실험체는 TL-12-150 실험체에 비해 153%의 강성을 보였다. 실험에 대한 최대하중과 최대변위는 Table 7에 나타나있다. 예상한 파괴하중은 149.67kN이지만 실험 결과 예상 강도보다 매우 낮은 평균 18.63kN에서 실험체 길이방향 중앙부에서 코어와 스킨의 경계면이 탈락되면서 실험이 종료되었다(Table 7 참조). 이는 TL-12-150 실험체가 파괴된 16.47kN 보다 2.16kN 큰 값이다.

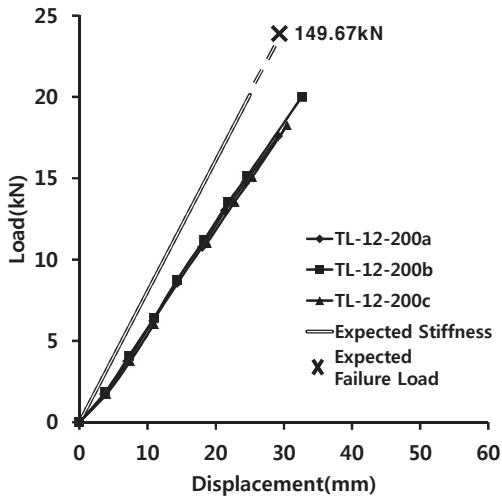


Fig. 13. Load-displacement of TL-12-200 specimen

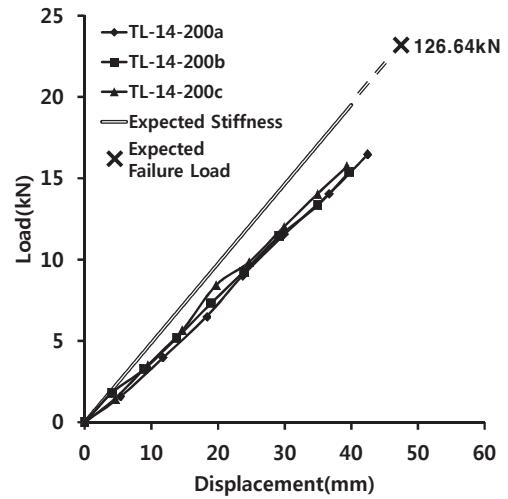


Fig. 14. Load-displacement of TL-14-200 specimen

Table 7. Test result of TL-12-200 specimen

Specimen	Maximum Load(kN)	Maximum Displacement(mm)
TL-12-200a	17.60	29.13
TL-12-200b	20.03	32.64
TL-12-200c	18.25	30.43
Average	18.63	30.73

Table 8. Test result of TL-14-200 specimen

Specimen	Maximum Load(kN)	Maximum Displacement(mm)
TL-14-200a	16.46	42.44
TL-14-200b	15.39	39.70
TL-14-200c	15.74	39.40
Average	15.86	40.51

Fig. 14는 TL-14-200의 하중-변위 그래프이다. TL-14-200은 스킨은 0.8mm, 코어가 200mm, 폭은 1220mm이며 길이가 4270mm인 실험체로 TL-14-150 실험체에서 코어의 두께만 변화시킨 실험체이다. Fig. 14에서 볼 수 있듯이 실험 전 실험체의 강성은 식 (2)에 의해 487.84N/mm로 예상되었다. Fig. 14에 나타난 바와 같이 실험결과 실험체 강성은 평균 391.59N/mm로 유사한 값을 보였으며 예상 값 대비 80%의 강성을 발휘하였다. 실험 결과 TL-14-150의 강성은 244.95N/mm로 TL-14-200 실험체는 TL-14-150 실험체에 비해 160%의 강성을 보였다. 실험에 대한 최대하중과 최대변위는 Table 8에 나타나있다. 예상한 파괴하중은 126.64kN이지만 실험 결과 예상 강도보다 매우 낮은 평균 15.86kN에서 실험체 길이방향 중앙부에서 코어와 스킨의 경계면이 탈락되면서 실험이 종료되었다(Table 8 참조). 이는 TL-14-150 실험체가 파괴된 12.28kN 보다 3.58kN 큰 값이다.

Fig. 15는 TL-16-200의 하중-변위 그래프이다. TL-16-200은 스킨은 0.8mm, 코어가 200mm, 폭은 1220mm이며 길이가 4880mm인 실험체로 TL-16-150 실험체에서 코어의 두께만 변화시킨 실험체이다. Fig. 15에서 볼 수 있듯이 실험 전 실험체의 강성은 식 (2)에 의해 317.56N/mm로 예상되었다. Fig. 15에 나타난 바와 같이 실험결과 실험체 강성은 평균 248.02N/mm로 유사한 값을 보였으며 예상 값 대비 78%의 강성을 발휘하였다. 실험 결과 TL-16-150의 강성은 181.08N/mm로 TL-16-200 실험체는 TL-16-150 실험체에 비해 137%의 강성을 보였다. 실험에 대한 최대하중과 최대변위는 Table 9에 나타나있다. 예상한 파괴하중은 109.76kN이지만 실험 결과 예상 강도보다 매우 낮은 평균 11.65kN에서 실험체 길이방향 중앙부에서 코어와 스킨의 경계면이 탈락되면서 실험이 종료되었다(Table 9 참조). 이는 TL-16-150 실험체가 파괴된 8.97kN 보다 2.68kN 큰 값이다.

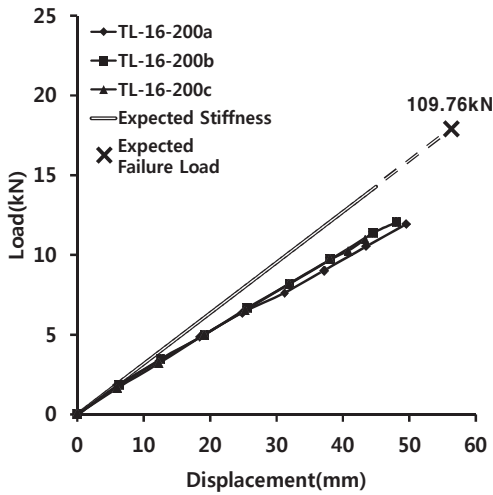


Fig. 15. Load-displacement of TL-16-200 specimen

Table 9. Test result of TL-16-200 specimen

Specimen	Maximum Load(kN)	Maximum Displacement(mm)
TL-16-200a	11.92	49.48
TL-16-200b	12.06	48.06
TL-16-200c	10.96	43.33
Average	11.65	46.96

Table 10. Test result of transverse load

	Maximum Load(kN/m ²)	Allowable Load(kN/m ²)	Span(mm)
TL-12-150	4.03	1.34	3350
TL-14-150	2.54	0.85	3960
TL-16-150	1.61	0.54	4570
TL-12-200	4.56	1.52	3350
TL-14-200	3.28	1.09	3960
TL-16-200	2.09	0.70	4570

Table 10은 경량 복합패널에 대한 분포압강도 실험 종합 결과를 나타낸다. 종합한 최대하중 값은 실험체 별로 측정된 최대하중의 평균값을 하중이 가해지는 면적으로 나눈 값이다. 허용하중 값은 미국 합판 및 공학 목재 협회 실험결과를 바탕으로 산정할 때 최대하중의 1/3 값으로 나타낼 수 있다[11]. 스패 값은 실험에서 지점 간의 거리를 나타낸다.

Table 11의 실험 결과를 보면 코어가 150mm인 실험체는 스패가 각각 3350mm, 3960mm, 4570mm일 때에

허용하중은 1.34kN/m², 0.85kN/m², 0.54kN/m²으로 판단되었다. 그리고 코어가 200mm인 실험체는 스패가 각각 3350mm, 3960mm, 4570mm일 때에 허용하중이 1.52kN/m², 1.09kN/m², 0.70kN/m²으로 판단되었다.

실험 결과, 패널이 파괴된 하중은 계산을 통해 예상했던 파괴하중에는 크게 못 미치는 것을 알 수 있다. 6가지의 실험체 모두 예상파괴하중(스킨재의 인장파괴로 예측된 파괴하중)에 도달하기 이전에 실험체 길이방향 중앙부에서 코어와 스킨의 경계면이 조기에 탈락되면서 실험이 종료되었다.

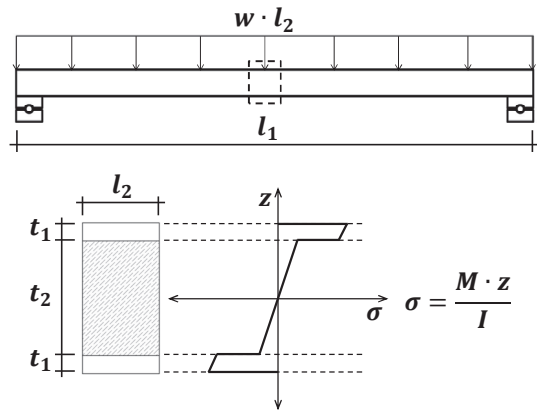


Fig. 16. Bending stress diagram

이에 따라 본 연구에서는 코어와 스킨 경계면에 대한 추가 분석을 진행하였다. 앞에서 실험체의 최대하중을 알아보기 위해 계산하였던 식 (4)를 역으로 분석하여 코어와 스킨이 탈락될 때의 응력을 알아보았다. 우선 실험체가 파괴된 하중을 P_{max} 라고 했을 때 식 (4)를 이용하여 그 때의 중앙에서 발생하는 휨 응력은 Fig. 16과 같이 응력도로 표현할 수 있다.

결국 스킨과 코어가 탈락한 것은 휨 응력에 의한 전단 파괴라고 할 수 있다. 스킨에 작용하는 평균 휨 응력을 σ_{aver} 라고 하면 Fig. 17과 같이 나타낼 수 있으며, 이 때 스킨 단면에는 압축력 P_c 가 작용하게 된다. P_c 는 식 (8)과 같다.

$$P_c = \sigma_{aver} \times A_{skin} \tag{8}$$

여기서, P_c = 압축력,

σ_{aver} = 스킨에 작용하는 평균휨응력,

A_{skin} = 스킨 단면적

Fig. 17에서처럼 P_c 로 인하여 스킨과 코어의 접합면에 전단응력 τ 가 발생하며, 전단응력이 패널 절반에 발생하고 있기 때문에 이 값을 패널 절반의 길이로 나누어 주게 되면 τ_{aver} 를 구할 수 있다.

$$\tau_{aver} = \frac{P_c}{l_2 \times (l_1/2)} \quad (9)$$

여기서, τ_{aver} = 평균 전단응력,

P_c = 압축력

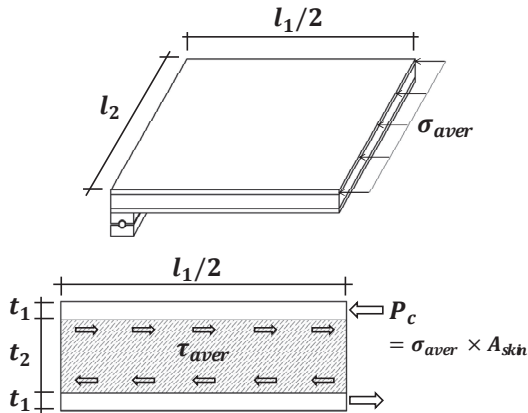


Fig. 17. Shear stress diagram

따라서 식 (9)를 통해 구한 τ_{aver} 가 스킨과 코어의 접합면이 탈락될 때 작용한 전단응력이라고 할 수 있다. 식 (9)에 의해 코어와 스킨이 탈락되는 경계면에서의 평균 전단응력을 계산하였으며 Table 11에 나타내었다.

Table 11. Shear stress at maximum load

Specimen	Stress at boundary (MPa)	Average(MPa)
TL-12-150	0.0223	0.0170
TL-14-150	0.0166	
TL-16-150	0.0121	
TL-12-200	0.0189	0.0156
TL-14-200	0.0161	
TL-16-200	0.0118	

Table 11에서 코어의 두께가 150mm일 때에 코어와 스킨의 경계면에서의 평균 전단응력이 최대 0.0223MPa, 최소 0.0121MPa인 것을 확인할 수 있다. 그리고 코어의 두께가 200mm일 때에는 코어와 스킨의 경계면에서의

평균 전단응력이 최대 0.0189MPa, 최소 0.0118MPa인 것을 확인할 수 있다. 또한 이 값들에 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 그리고 이를 통해 코어의 두께가 150mm일 때에는 경계면에서 평균 0.0170MPa의 전단응력을 받을 때에 코어와 스킨이 탈락되었고, 두께가 200mm일 때에는 경계면에서 평균 0.0156MPa의 전단응력을 받을 때에 코어와 스킨이 탈락되었다고 할 수 있다.

결과적으로 이 값을 이용한다면 실험체의 변수를 다르게 하더라도 파괴하중을 합리적으로 예측할 수 있다고 판단된다. 결국 예상했던 파괴하중과 실제 파괴하중이 크게 차이가 났던 이유는 코어와 스킨의 접합부에서의 탈락 때문이라고 할 수 있다. 따라서 예측값으로 확인한 패널의 성능을 보았을 때 경량 복합패널에 대해 코어와 스킨의 접합방법(PU. Glue)을 개선하여 경계면에서 받을 수 있는 응력을 증가시킬 수 있다면 경계면에서의 조기파괴를 방지하여 경량복합패널의 분포압강도에 대한 구조적 성능을 보다 개선시킬 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 현 상태에서 경량 복합패널을 사용할 경우, 접합부 조기 파괴에 대한 성능 제한을 고려하여 부재 길이 또는 부재 지지점간의 거리를 결정해야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 기존의 임시거주시설보다 안전하고 거주성이 뛰어난 구조주거를 제작하기 위해 시공성, 단열성이 우수한 경량 복합패널을 이용하고자 이에 대한 구조적 성능을 검증하였다. 특히 풍하중에 대해, 그리고 지붕 구조체로써 패널이 발휘할 수 있는 구조적 성능의 기초자료를 마련하기 위해 분포압강도 실험을 진행하였으며 주요 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 실험 결과 스펜이 늘어남에 따라 허용하중은 감소했고 코어 두께가 늘어날수록 허용하중은 증가했다. 코어가 150mm일 때에는 TL-12-150 실험체가 평균 최대하중 4.03kN/m², 허용하중은 1.34kN/m²으로 가장 높은 성능을 발휘하였다. 그리고 코어가 200mm일 때에는 TL-12-200 실험체가 평균 최대하중 4.56kN/m², 허용하중은 1.52kN/m²으로 가장 높은 성능을 발휘하였다.
- 2) 모든 실험체는 가장 큰 하중과 응력을 받는 실험체

길이방향 중앙부의 코어와 스킨 경계면에서의 조기 탈락에 의해 중단되었으며 이로 인해 실험결과로 측정된 최대하중은 재료 물성을 통해 계산한 파괴하중에 크게 못 미치는 값이다.

- 3) 코어가 150mm인 실험체의 최대하중에 대한 경계면의 평균 전단응력은 큰 차이 없이 평균 0.0170MPa의 응력에서 경계면의 탈락이 발생하였으며, 코어가 200mm인 실험체의 최대하중에 대한 경계면의 평균 전단응력은 큰 차이 없이 평균 0.0156MPa의 응력에서 경계면의 탈락이 발생했다. 이 값을 통해 실험체의 길이에 따른 파괴하중을 예측이 가능하다.
- 4) 코어와 스킨의 접합방법을 개선하여 접합면의 조기박리를 방지할 수 있다면 경량 복합패널의 분포압강도 성능이 증가할 것으로 판단된다.

위와 같이 경량 복합패널의 분포압강도에 대한 실험 결과를 토대로 두 가지의 코어에 대한 스펠에 따른 허용하중을 얻을 수 있었다. 또한 코어와 스킨 접합면에 대한 성능을 통해 파괴하중을 유추할 수 있는 자료를 얻을 수 있었다.

References

- [1] Ministry of the Interior and Safety, Disaster Yearbook(2016), pp. 18, Ministry of the Interior and Safety, 2017.
- [2] Korea Meteorological Administration, Earthquakes Occurring in Korea, 2017, http://www.kma.go.kr/weather/earthquake_volcano/domes/tictrend.jsp, (accessed Oct. 2017).
- [3] B. Yeh, T. Williamson, E. Keith, Development of Structural Insulated Panel Standards, ASCE, Structures Congress 2008, 2008.
- [4] U.S. Department of Housing and Urban Development, Prescriptive Method for Structural Insulated Panels(SIPs) Used in wall systems in residential construction, pp. 1-40, Office of Policy Development and Research, 2007.
- [5] H. Nah, H. Lee, C. Lee, S. Hwang, H. Jo, S. Choi, "Evaluation on Structural Performance of Structural Insulated Panels in Wall Application", *J. Korean Soc. Adv. Comp. Strus.*, vol. 3, no. 2, pp. 19-27, 2012. DOI: <https://doi.org/10.11004/kosacs.2012.3.2.019>
- [6] H. Nah, H. Lee, S. Choi, "Performance Evaluation on Static Loading and Cyclic Loading for Structural Insulated Panels", *J. Korean Soc. Adv. Comp. Strus.*, vol. 4, no. 1, pp. 33-39, 2013. DOI: <https://doi.org/10.11004/kosacs.2013.4.1.033>

- [7] Ashland Inc., Technical Datasheet Ashland Specialty Ingredients ISOGRIPTM SP 3030D Adhesive, Ashland Inc. 2010.
- [8] Axia Materials Co., Ltd., Structural Properties of LitePan® Panel, pp. 10-12, Axia Materials Co., Ltd., 2015.
- [9] ASTM International, Test Methods of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction, ASTM E72, ASTM Books of Standards, 2017.
- [10] Korea Agency for Technology and Standards, KS F 2273 Methods of performance test for building construction panels, pp. 23-26, 2009.
- [11] APA-The Engineered Wood Association, Tacoma, Washington, ANSI/APA PRS-610.1 Draft 4 , Standard for Performance-Rated Structural Insulated Panels in Wall Applications, pp. 2-19, 2008.

강 수 민(Su-Min Kang)

[정회원]



- 2000년 2월 : 서울대학교 건축학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 서울대학교 건축학과 (공학박사)
- 2004년 4월 ~ 2014년 2월 : 대림산업 기술연구원 차장
- 2014년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 건축공학과 조교수

<관심분야>

건축구조, 내진설계

황 문 영(Moon-Young Hwang)

[정회원]



- 2014년 2월 : 충북대학교 건축공학과
- 2017년 2월 ~ 현재 : 충북대학교 건축공학과 석사과정

<관심분야>

건축구조

김 성 태(Sung-Tae Kim)

[정회원]



- 1900년 2월 : 서울대학교 섬유고분자공학과
- 1992년 2월 : 서울대학교 섬유고분자공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 섬유고분자공학과 (공학박사)
- 2008년 5월 ~ 현재 : (주)엑시아머티리얼스 이사

<관심분야>
복합재료, 건축

조 영 준(Young-Jun Cho)

[정회원]

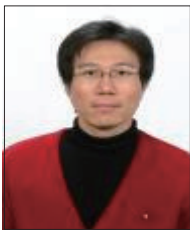


- 1997년 2월 : 서울대학교 섬유고분자공학과
- 1999년 2월 : 서울대학교 섬유고분자공학과 (공학석사)
- 2006년 2월 : 서울대학교 재료공학부 (공학박사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : (주)엑시아머티리얼스 책임연구원

<관심분야>
복합재료, 건축소재

이 병 연(Byungyun Lee)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 공과대학 건축학과 (공학석사)
- 2009년 8월 : 서울대학교 공과대학 건축학과 (공학박사)
- 2004년 11월 ~ 2007년 8월 : 정립건축 팀장
- 2010년 9월 ~ 현재 : 충북대학교 건축학과 교수

<관심분야>
친환경건축, 지속가능도시