

# 연결체결부를 갖는 철도차량 바닥재의 구조특성

## Structural characteristics of railway vehicle floors with joints

신범식\*  
Shin, Bum-Sik

최연선\*\*  
Choi, Yeon-Son

---

### ABSTRACT

The floor structure of railway vehicles consists of plywood, rubber, and wood keystone plate which affects on the comfort of passengers. Its structural characteristics has been investigated experimentally and numerically for samples of beam and plate structure, and the real floor structure in this paper. The material properties of etch part measured directly by experiments. The deformation and stress distribution of the sample beams for 6 different joints were sought experimentally and calculated using a commercial software. The numerical calculation shows that the effect of friction and clearance between joints is crucial. The DMU/EMU plates were also experimented and compared for different loading conditions. The structural characteristics of the whole floor structure were calculated numerically. The results show that the method of joint between plywoods is an important factor to decide the strength of the floor structure of railway vehicles.

---

### 1. 서 론

철도차량에서 승객의 안락함과 편안함을 유지하는 부분은 객차이다. 객차의 구성에서 기초가 되는 부분은 바닥재이며, 바닥재는 철판, 합판, 고무 등이 적층되어 있다. 바닥구조는 부품 다수의 조립으로 구성되어 있어 조립구조물의 전체에 대한 신뢰성을 평가하기가 쉽지 않다. 따라서 이러한 다양한 설계 요소 선택의 객관적인 기준을 마련할 필요가 있다.

복합재에 대한 구조특성의 파악을 위하여 박순철[1]은 비파괴 시험방법을 적용하여 목재의 강도 특성평가를 하였으며, 최성근[2]은 충격에 따른 적층복합판의 층간 전단응력을 해석하였다. 이해무[3]는 복합재료에 대한 평가 기준안을 제시하였고, 김영수[4]는 복합재의 강성비에 따른 좌굴현상에 대한 연구를 하였다.

본 연구에서는 기존 연구를 바탕으로 객관적 기준마련을 위한 구조특성을 파악하기 위하여 단품시험모델을 바탕으로 단순지지보 구조의 실험을 통하여 연결구조에 따른 차이와 모델 특성을 파악하였고, 실험에서 파악된 결과를 토대로 전산해석모델을 구성하여 실험결과와 비교하여 전산해석에서 고려해야할 해석 요소를 도출하였다. 단순지지보 실험을 통한 특이점을 바탕으로 평판모델을 구성하여 실험하였고, 이를 통하여 바닥재의 평판 특성을 파악하였다. 마지막으로 단품모델과 평판모델의 실험 및 전산해석결과를 바탕으로 철도차량 한량의 바닥 전체를 해석하여 차량에서의 치짐 및 응력을 계산하였다.

---

\* 성균관대학교, 기계공학부

E-mail : tah198@skku.edu

TEL : (031)290-7501 FAX : (031)290-5889

\*\* 성균관대학교, 기계공학부, 정회원

E-mail : yschoi@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7440 FAX : (031)290-5849

## 2. 단품모델

바닥재의 구조특성 연구를 위하여 그림 1과 같은 연결부를 갖는 6개 단순모델을 기준으로 실험 및 전산해석을 하였다. 실험은 각 시편에 대한 물성, 마찰계수와 연결구조별 처짐량 실험을 하였다. 또한 실험결과를 바탕으로 연결형식별 전산해석 모델을 구성하여 실험 결과와 비교하여 평판해석에 필요한 설계요소를 구하였다.

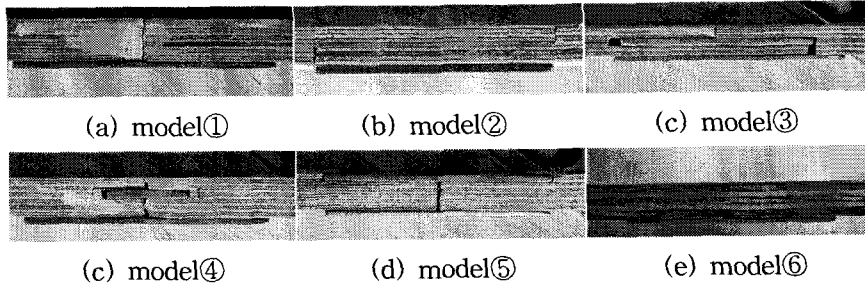


그림 1 연결부 단품 시편

### 2.1 단순지지보 실험

바닥재 단순모델에 대한 물성시험을 단순지지보 실험을 통하여 측정하였다. 실험은 그림 2와 같이 연결부 단품모델을 구성하는 합판의 3가지 시편을 대상으로 하였다. 실험은 시편의 양단을 단순지지로 구성 후 시편의 중앙부에 추를 올리고, 하단에 다이얼게이지(dial gauge)를 이용하여 처짐을 측정하였다. 측정 결과 도표 1과 같이 종류별 탄성계수를 구하였다.

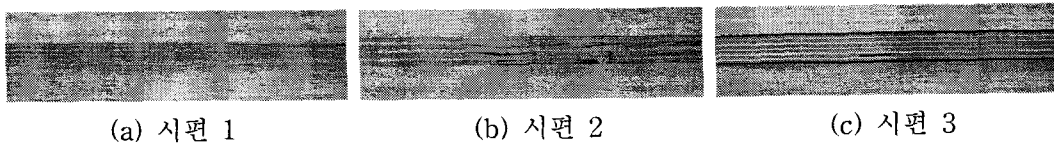


그림 2 재질별 단품 시편

도표 1 탄성계수  
(단위 : GPa)

종류	탄성계수 $E$
시편 1	8.2
시편 2	8.9
시편 3	13.3

시험편의 이음부 구조는 합판과 합판을 볼트와 너트를 이용하여 연결되어있고, 연결구조상 변형 발생 시 부품사이에 마찰력이 작용하게 된다. 따라서 시험편에 작용하는 마찰력 검토하기 위해 합판위에 또 다른 합판을 놓고 기울기를 변화시키면서 합판이 움직이는 순간의 각도를 측정하여 계산 결과, 본 연구에 사용된 합판의 정지마찰계수  $\mu$ 는 0.47 임을 알았다.

### 2.2 단품 시험

바닥재의 강도를 평가하기 위해 고무와 중추평판(Keystone plate)를 제외하고 6가지의 단품시편에 대하여 처짐실험을 하였다. 실험모델은 이음부의 구조를 반영하면서 간단하게 처짐실험을 할 수 있도록 길이 600 mm, 너비 40 mm의 크기로 제작하였다. 실험에서 단순지지는 환봉지지대로 구성하였고, 수평계를 이용하여 시험편의 수평을 확인한 후 원형추를 이용하여 중앙에 집중하중을 가하고, 다이얼게이지

지(dial gauge)를 이용하여 처짐을 측정하였다. 하중은 1 Kg부터 20 Kg까지 1 Kg 씩로 증가시켰다. 다만 model ②와 model ③은 하중을 충분히 견디지 못함에 따라 각각 12 Kg과 9 Kg에서 실험을 중단하였다. 각 모델의 처짐 실험결과는 그림 3과 같다. 모든 모델이 선형 거동을 하며, model ⑤의 강성이 가장 크고, model ② 와 model ③의 강성이 작다는 것을 알 수 있다. 또한 강성이 다르고 구조가 동일한 model ①과 model ⑥의 측정결과가 유사하므로 단품시편의 경우 강성은 처짐량에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

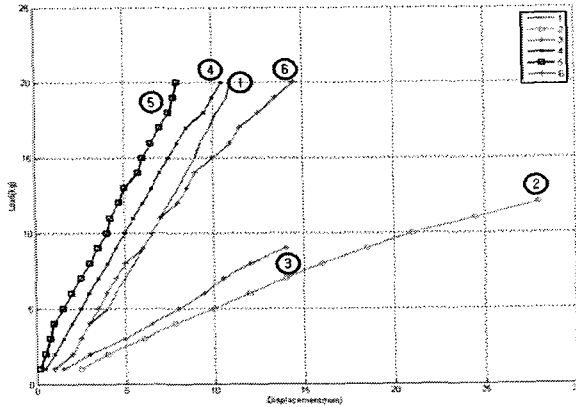


그림 3 처짐 실험 결과

### 2.3 단품 전산해석

단품시편 실험결과를 바탕으로 전산해석모델을 상용프로그램인 SAMCEF를 사용하여 생성하였다. 그림 4는 단품 해석모델이다. 모델의 구조는 model ①, ④, ⑤, ⑥과 같은 합판의 맞대기 연결구조와 model ②, ③ 과 같은 겹침 연결구조가 있다. 각 모델은 연결부중앙에 하중을 증가시켜가며 해석하였고, 하중은 실험조건을 바탕으로 부여하였다.

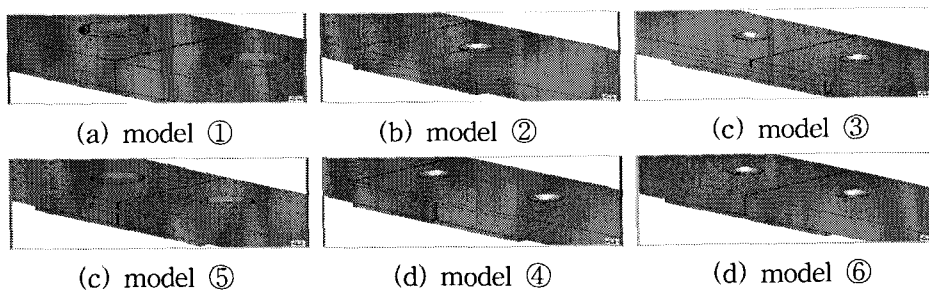


그림 4. 단품해석 모델

#### 2.3.1 마찰조건

철도차량의 바닥재는 두 개의 합판이 볼트로 체결되는 구조로 이루어져 있다. 볼트 이음부에서 약간의 미끄러짐이 발생하면 응력분포가 변할 수 있으므로, 이러한 미끄러짐 효과를 고려해야 하는지 여부를 검토하였다. 먼저 미끄러짐이 발생하는 모델과 완전히 고정된 모델을 비교하였다. 전산해석에 사용된 바닥재는 model ①이다. 볼트 이음부에 완전 고정 모델과 접촉 조건을 부여하고, 마찰계수를 0으로 설정하여 미끄러짐이 발생하도록 한 모델, 그리고 접촉조건을 부여하고 마찰계수를 실험에서 구한 0.47로 설정한 모델을 바탕으로 전산해석 하였다. 결과는 그림 5와 같이 접촉 조건과 마찰계수에 따라 해석 결과가 달라지며 마찰계수를 고려한 모델도 실제 실험과는 차이가 발생함을 알 수 있다.

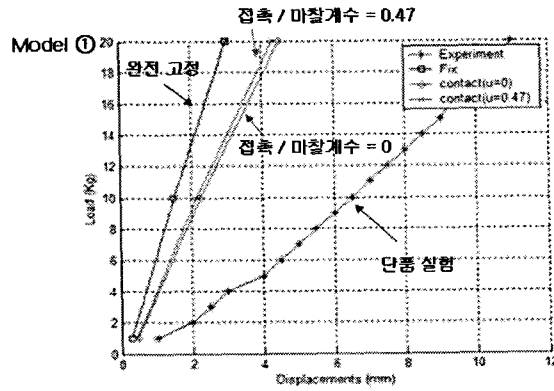


그림 5 전산 해석 결과

### 2.3.2 맞대기 간극

전산해석 모델의 정확성을 위하여 오차의 원인을 분석한 결과, 해석 모델에서 고려하지 않았던 요소 중 합판 이음부에 간극이 있음을 확인하였다. 간극의 경우 초기 해석 이전 모델의 경우 0.3 mm에서 실험 이후 0.7 mm로 간극이 늘어남을 확인할 수 있었다. 간극 변화의 원인을 찾기 위해 모델을 분해하여 검토하였다. 검토 결과 볼트와 판재의 구멍 너비의 차이가 있는 바, 맞대기 간극을 고려하여 해석해야 한다. 간극의 영향을 알아보기 위해 간극을 0 mm ~ 0.9 mm로 0.3 mm 단위로 변화시키면서 전산해석을 하였고, 이 결과 0.6 mm 간극을 주어 해석해야함을 알았다. 따라서 간극과 마찰계수를 고려한 전산 해석을 수행한 결과 간극을 고려하지 않은 모델보다 실험값에 근접한 결과를 얻을 수 있었고, 각 모델의 비교에서 model ⑤의 처짐량이 상대적으로 작고 model ②의 처짐이 가장 컸다.

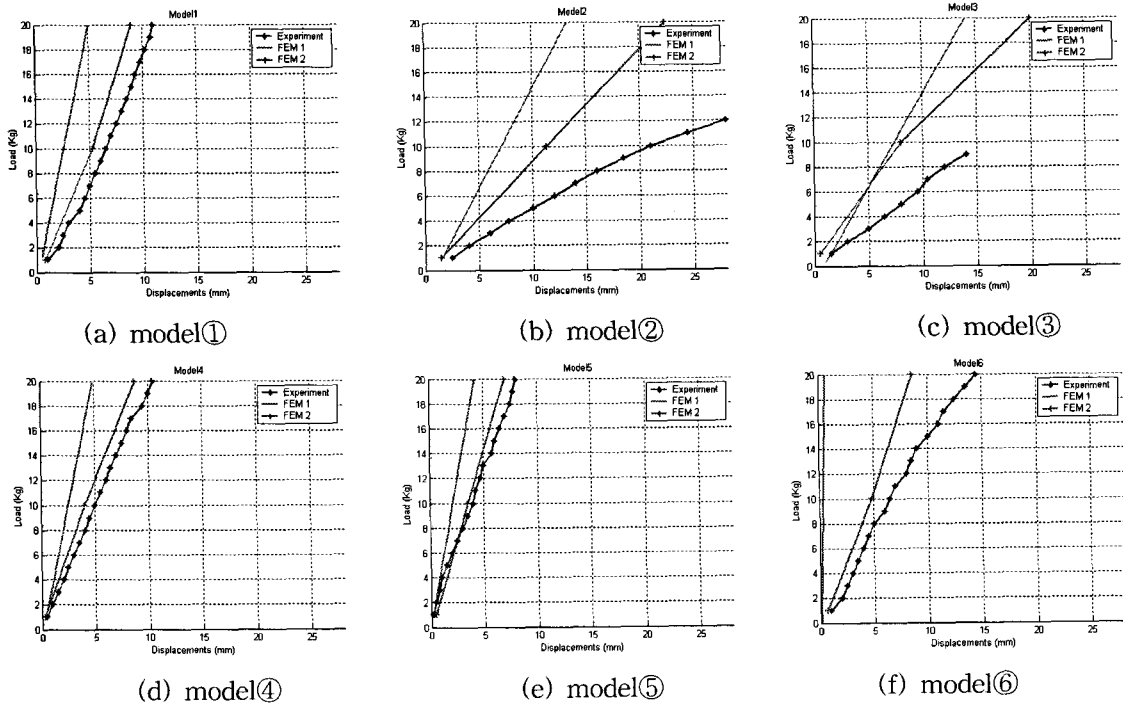
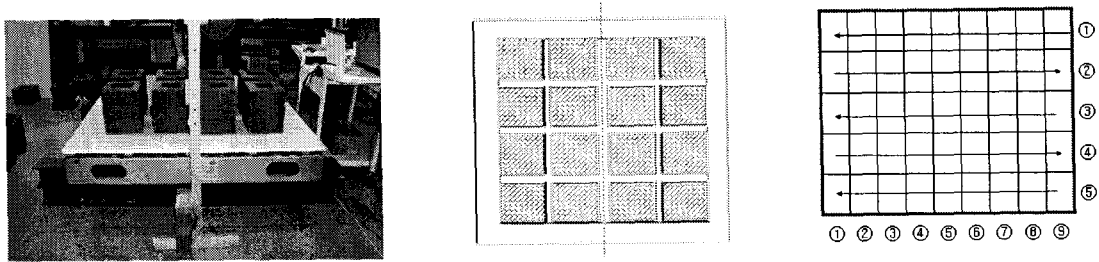


그림 6 간극과 마찰계수를 고려한 해석 결과

### 3. 평판모델 시험해석

단품해석 결과 model ⑤의 처짐이 가장 작으며, model ①, ⑥의 처짐이 다음으로 양호한 결과를 얻었다. 그러나 단품해석의 경우 단순지지에 의한 결과로서 실차량의 바닥의 상태와는 다르다. 따라서 실 차량에 사용하는 DMU(일반객차용), EMU(전동차용) 형태의 평판모델을 그림 7과 같이 구성하여 model ①, ②, ⑤, ⑥에 대하여 처짐시험을 하였다. 하중은  $1\text{ m}^2$  당  $70\text{ kg}$  의 사람 10명을 기준으로 부여하였으며, 시험편의 크기를 고려하여  $960\text{ kg}$ 의 하중을 부여하여 레이저센서로 처짐을 측정하였다. 시험결과 그림 8과 같이 모델별 처짐량이 model ⑥이 가장 양호하며, 다음으로 model ①, ⑤가 비슷하며, model ②가 가장 처짐이 크며, 단품해석 결과와는 다른 결과이다. 이는 평판구조물에서는 이음새의 구조보다 합판의 강성이 처짐에 영향이 컸다. 그리고 EMU의 경우 모델별 처짐량의 차이가 작게 나타나는데 이는 EMU의 합판과 합판지지부를 나사체결하여 DMU와 다른 결과를 얻었다. 그림 9에는 동일한 이음새 구조물의 경우 합판의 두께가 두꺼울수록 처짐이 작았다. 시험결과 합판의 처짐에 영향을 미치는 요소는 합판의 강성이 이음새의 구조보다 큼을 알 수 있었다.

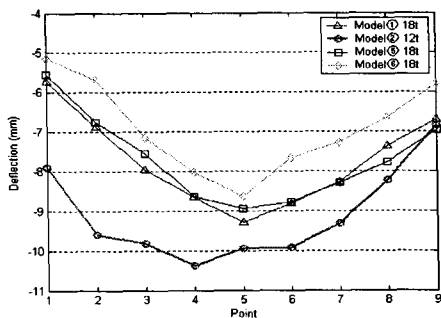


(a) 평판 시험 장치

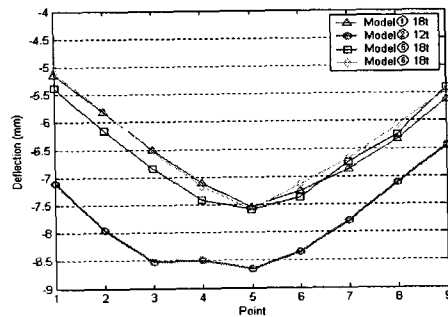
(b) 하중 배치

(c) 센서 측정 방법

그림 7 평판 시험

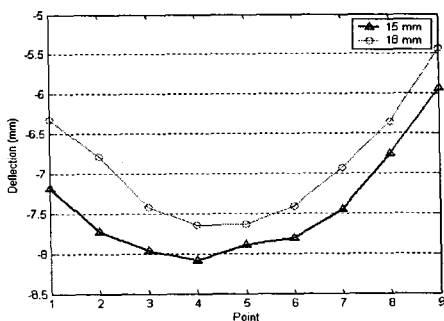


(a) DMU

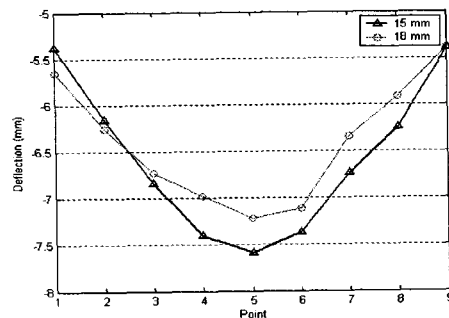


(b) EMU

그림 8 모델별 처짐



(a) DMU

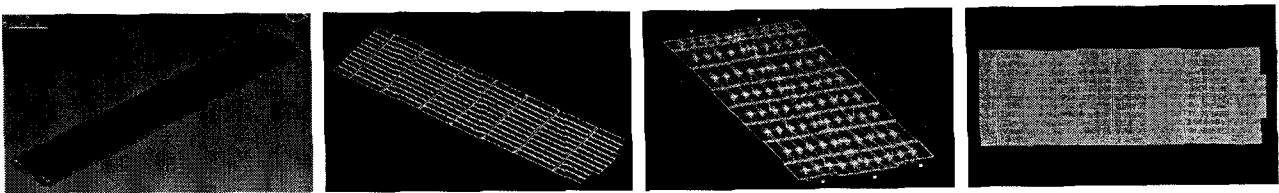


(b) EMU

그림 9 합판 두께별 처짐

#### 4. 차량바닥

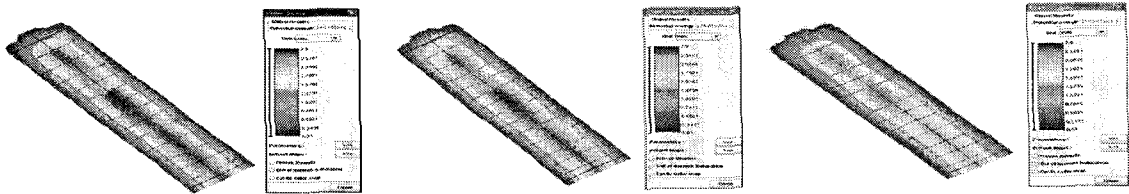
차량바닥모델은 그림 10과 (a) 같이 차량에서 대차부와 객차부의 구조물을 제외한 객차의 바닥면의 구조물을 갖고 해석모델을 구성하였다. 모델 구성 시 해석의 편의성과 해석시간의 단축하기 위하여 모델 구성을 단순화할 필요가 있으며, 형상의 대칭구조임을 고려하여 열차의 길이 방향으로 반판을 모델링하였다. 그림 10 (b)는 1/2차량의 바닥구조물 모델이다. 그림 10 (c)는 차량모델에 부여한 경계조건을 나타낸다. 그림 10 (d)는 1/2 모델의 유한요소모델을 나타내며 유한요소모델의 격자 형태는 shell의 경우 삼각형(triangle)의 Delaunay-Voronoi 방법으로 차량의 전체 크기를 고려하여 30 mm의 크기로 형성하였으며, solid의 경우 사면체(tetrahedron)의 Delaunay-Voronoi 방법으로 형성하였다. 해석 시 차량에 적용한 하중은 1 m<sup>2</sup>당 70 kg의 사람이 10명이 서있는 형태로 700 kg/m<sup>2</sup>의 면하중을 바닥재 구조물에 부여하고, 바닥 최하면의 플레이트를 6자유도 구속하여 처짐과 응력의 크기를 계산하였다.



(a) 전체 바닥 구조물      (b) 1/2 바닥 구조물      (c) 경계조건      (d) 유한요소모델

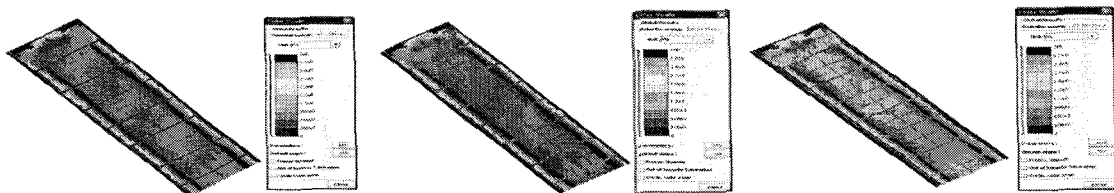
그림 10 차량 바닥 해석 모델

차량모델의 처짐해석 결과 처짐량은 그림 11에서 약 3 mm의 최고 처짐이 발생하였고, 모델에 따라서는 model ①, ⑤의 경우 처짐의 크기가 유사한 반면에 상대적으로 model ⑥의 경우 처짐이 작음을 확인할 수 있다. 이는 합판 강성의 효과가 상대적으로 나타난 경우로, 연결부 구조의 형태 보다 차량 바닥재의 강성이 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 그림 12는 처짐에 따른 발생 응력이다.



(a) model①      (b) model⑤      (c) model⑥

그림 11 차량 바닥 처짐 해석 결과



(a) model①      (b) model⑤      (c) model⑥

그림 12 차량바닥 응력해석 결과

## 5. 결론

본 연구에서는 연결체결부를 갖는 합판의 다양한 설계변수에 대한 시험 및 전산해석을 통하여 설계 주안점을 파악하였다. 연결체결부의 해석 및 설계에 있어 이음부 사이의 마찰계수와 간극은 연결부의 성능을 예측하는데 중요하며, 이음부의 간극은 하중에 대한 이음부의 처짐에 높은 상관관계가 있어 부품 사이 간극에 대하여 설계 및 조립 시 유의하여야 한다. 그리고 합판의 처짐에 설계변수의 영향도를 평가한 결과 합판의 강성, 합판 두께, 간극, 이음부 형식 순서로 파악되었으며, 시편에 대한 평가 결과 양면 알루미늄 표면을 갖는 model ⑥과 연결부의 강도가 높은 model ⑤의 처짐량이 가장 작음을 확인하였다. 연구결과를 통하여 바닥재 설계 시 필요한 기본 설계 방향을 제시하였으며, 제품 적용 시 검토하여야 함을 알았다.

### 참고문헌

1. 박준철, 홍순일 (2003), “비파괴 시험방법을 이용한 낙엽송재 원목의 휨강도 특성 평가,” 임산에너지, 22(2), pp. 60-68.
2. 최성근, 김문생, 박승범(1996), “충격에 의한 적층복합판의 층간전단응력에 관한 연구,” 대한기계학회 추계학술대회논문집(A), pp. 140-147.
3. 이해무 (1993), “복합재료의 강도평가기술 및 내충격성 측정 기반기술 개발”, 연구보고서, 한국표준과학연구원.
4. 김영수, S. V. HOA (1994), “STIFFNESS RATIO EFFECTS ON THE BIAXIAL BUCKLING OF LAMINATED COMPOSITE PLATES,” 대한기계학회 추계학술대회논문집(I), pp. 419-423.