

## 論文

## 원공 크기 및 원공 위치에 따른 샌드위치 복합재 기둥의 좌굴 거동

이상진\*, 윤성호\*\*+

**Buckling Behavior of Sandwich Composite Columns by Varying Hole Size and Hole Position**

Sang-Jin Lee\*, Sung-Ho Yoon\*\*+

**ABSTRACT**

The study investigated the buckling behavior of sandwich composite columns with different hole sizes and hole positions when they were applied to a compressive load. The columns consisted of 1.7mm thick faces of glass fabric/epoxy and 23mm, 37mm, 48mm, and 61mm thick cores of urethane-foam. Different hole sizes with the diameter of 25mm and 38mm were considered in this experiment. To evaluate the effect of hole position on the buckling behavior, we considered three types of hole position: 25mm diameter hole located at the center, 25mm diameter hole at 1/4 position from the center to the end of the column, and 25mm diameter hole at 1/2 position from the center to the end of the column. According to the results, buckling and maximum loads of the column having 25mm diameter hole were lower by 10% compared to those of the column without hole, whereas the loads for the column having 38mm diameter hole were 30% less than those of the column without hole. Hole position appeared to have no effect on buckling and maximum loads. Major failure modes were observed as follows: the core shear failure for the thin columns having 23mm and 37mm thick cores, and the face-core debonding for the thick columns having 48mm and 61mm thick cores.

**초 록**

본 연구에서는 압축하중을 받는 원공을 가진 샌드위치 복합재 기둥의 좌굴 거동을 조사하였다. 샌드위치 복합재 기둥은 유리섬유직물/에폭시 면재와 우레탄 폼 심재로 구성되어 있다. 이때 면재 두께는 1.7mm, 심재 두께는 23mm, 37mm, 48mm, 61mm, 그리고 원공 직경은 25mm와 38mm를 고려하였다. 원공 위치가 샌드위치 복합재 기둥의 좌굴 거동에 미치는 영향을 조사하기 위해 직경 25mm인 원공이 시편중앙부에 있는 경우, 시편중앙부를 기준으로 중앙부와 끝단 사이의 1/4 지점에 있는 경우, 시편중앙부를 기준으로 중앙부와 끝단 사이의 1/2 지점에 있는 경우를 고려하였다. 시편중앙부에 직경 25mm인 원공이 있는 경우의 좌굴하중과 최대하중은 원공이 없는 경우보다 10% 정도 낮게 나타나며, 시편중앙부에 직경 38mm인 원공이 있는 경우의 좌굴하중과 최대하중은 원공이 없는 경우보다 30% 정도 낮게 나타났다. 그러나 원공 위치가 좌굴하중과 최대하중에 미치는 영향은 크지 않았다. 주요 파괴 모드는 심재 두께가 23mm와 37mm와 같이 얇은 경우는 심재 전단파괴가 지배적이고 심재 두께가 48mm와 61mm와 같이 두꺼운 경우는 면재-심재 분리가 지배적으로 관찰되었다.

**Key Words** : 좌굴 거동(buckling behavior), 샌드위치 복합재 기둥(sandwich composite column), 파괴 모드(failure mode), 심재 전단파괴(core shear failure), 면재-심재 분리(face-core debonding)

접수: 2011년 12월 05일, 수정: 2012년 2월 21일, 게재승인: 2012년 2월 24일

\* 한국신발피혁연구소 신발연구부

\*\*+ 금오공과대학교 기계공학과, 교신저자(E-mail:shyoon@kumoh.ac.kr)

## 1. 서론

샌드위치 복합재는 철도, 버스, 선박 등의 구조물로 다양하게 사용되고 있다[1-5]. 샌드위치 복합재를 구조물에 적용할 경우 굽힘과 압축 등의 다양한 하중을 받게 된다. Han 등[6]은 널리 사용되는 하니콤 심재를 대상으로 심재의 길이, 높이, 셀 두께에 따른 굽힘 및 좌굴 거동에 대해 조사하였다. 이들에 따르면, 심재 밀도가 높아지고 셀 두께가 증가할수록 좌굴하중은 증가하고, 심재 두께가 커지고 심재 길이가 짧아질수록 굽힘응력은 크게 감소한다고 하였다. Roberts 등[7]은 압축하중을 받는 경우의 VARTM 공법으로 제작된 샌드위치 판넬의 좌굴하중을 평가하였다. 이때 심재는 발사 폼 또는 PVC 폼을 적용하였으며 고려한 판넬 크기는 154cm×77cm와 102cm×77cm이다. 이들에 따르면, 발사 폼 샌드위치 판넬의 좌굴하중은 PVC 폼 샌드위치 판넬의 경우보다 1.4~5배 더 높게 나타나며, PVC 폼 샌드위치 판넬은 판넬 크기에 무관하게 심재 전단파괴가 관찰되고 심재와 면재 사이의 접착성능은 발사 폼 샌드위치 판넬에 비해 우수하다고 하였다. Fleck 등[8]은 유리섬유직물/에폭시 면재와 PVC 폼 심재로 구성된 샌드위치 판넬의 양단에 압축하중을 가하여 심재 밀도 및 판넬 길이/폭 비에 따른 좌굴하중과 파괴모드를 실험적으로 조사하였다. 이때 판넬의 길이는 19~440mm, 폭은 15~36mm, 심재 밀도는 37Mg/m<sup>3</sup>, 93Mg/m<sup>3</sup>, 186Mg/m<sup>3</sup>인 경우를 고려하였다. 이들에 따르면 심재 밀도가 37Mg/m<sup>3</sup>인 경우 판넬 치수에 무관하게 심재의 전단파괴가 지배적으로 발생하며 심재 밀도가 93Mg/m<sup>3</sup>인 경우 판넬 길이가 386mm보다 작을 때는 심재 전단파괴, 판넬 길이가 386mm이면 오일러 좌굴거동을 보인다고 하였다. 또한 심재 밀도가 186Mg/m<sup>3</sup>을 갖는 길이 47.5mm, 폭 36.3mm 미만의 샌드위치 판넬은 면재 파괴를 보이며, 심재 밀도가 186Mg/m<sup>3</sup>을 갖는 길이 306mm, 폭 20mm 이상의 샌드위치 판넬은 오일러 좌굴거동을 보인다고 하였다. Mamalis 등[9]은 4종의 PMI 폼, 2종의 PVC 폼, 폴리우레탄 폼, 그리고 유리섬유/아크릴 수지를 3층 적층한 면재와 5층 적층한 면재의 조합으로 구성된 총 8종의 샌드위치 판넬에 대한 압축특성 및 파괴 모드를 평가하였다. 이때 고려한 판넬은 길이가 140mm, 폭이 70mm, 두께가 40mm로서 파괴모드는 면재와 심재의 물성에 따라 심재 전단파괴를 포함한 좌굴모드, 층간분리, 압축모드 등 3가지로 구분하였다. 이들에 따르면 파괴 모드에 영향을 미치는 가장 큰 인자는 심재 강도이며 압축모드에서 가장 높은 임계하중이 나타난다고 하였다.

샌드위치 판넬을 기계적으로 체결시키기 위해서는 인서트 조인트를 적용하거나[10], 각 부재에 볼트나 리벳 등의 장착을 위한 원공들이 가공되어야 한다. 이런 경우 외부에서 가해지는 작용하중으로 인해 원공 부위에는 응력집중이 유발되고 구조물의 성능이 저하된다.

본 연구에서는 원공이 있는 유리섬유직물 면재/우레탄 폼 심재로 구성된 샌드위치 복합재 기둥의 좌굴 거동을 조사하

였다. 이때 샌드위치 복합재 기둥은 얇은 유리섬유직물 면재가 두꺼운 심재의 양면에 부착되어 있으며 원공은 시편 두께 방향을 따라 관통되어 있는 경우를 고려하였다. 좌굴 거동에 영향을 미치는 인자는 심재 두께, 원공 크기, 원공 위치 등으로 심재 두께는 23mm, 37mm, 48mm, 61mm의 경우를, 원공 크기는 25mm와 38mm의 경우를, 원공 위치는 직경 25mm인 원공이 시편중앙부에 있는 경우, 시편중앙부를 기준으로 중앙부와 끝단 사이의 1/4 지점에 있는 경우, 시편중앙부를 기준으로 중앙부와 끝단 사이의 1/2 지점에 있는 경우를 고려하였다.

## 2. 시편형상 및 시험방법

### 2.1 시편형상

Fig. 1에는 본 연구에서 고려한 샌드위치 복합재 기둥의 형상이 나타나 있다. 여기에서 보면 원공이 없는 경우, 시편중앙부에 직경 25mm인 원공이 있는 경우, 시편중앙부에 직경 38mm인 원공이 있는 경우, 시편중앙부를 기준으로 중앙부와 끝단 사이의 1/4 지점에 직경 25mm인 원공이 있는 경우, 시편중앙부를 기준으로 중앙부와 끝단 사이의 1/2 지점에 직경 25mm 원공이 있는 경우를 고려하였다. 이때 원공이 있는 부재의 경우 원공 직경( $\phi$ )과 부재 폭( $b$ )의 비에 따른 응력집중계수( $K_t$ )는  $\phi/b = 0.3$ 인 경우 3.3,  $\phi/b = 0.5$ 인 경우 4.3이다[12].

본 연구에 적용된 샌드위치 복합재 기둥은 길이가 400mm, 폭은 75mm로 되어 있다. 면재는 S-glass로 된 직물 형태의 경위사를 결합사로 스티칭하는 마리모 기계를 이용하여 직조된 직물 1층을 에폭시에 함침시켜 3~4°C/min으로 125°C까지 상승시킨 후, 90분간 경화시키고 다시 4°C/min으로 상온까지 냉각시켜 제작하였다. 이때 면재의 두께는 1.7mm, 인장강성은 26.7GPa, 인장강도는 371MPa이다. 또한 심재는 우레탄 폼을 적용하였으며 심재 두께는 각각 23mm, 37mm, 48mm, 61mm의 4 종류를 고려하였다. 심재 밀도는 심재 두께를 달리한 샌드위치 복합재 기둥에서 채취한 76mm×76mm 크기의 심재에 대해 ASTM C271에 근거하여 측정하였다. 이때 측정된 밀도는 45kg/m<sup>3</sup>이다. 심재 압축특성은 50mm×50mm×25mm 크기의 심재를 샌드위치 복합재 기둥에서 직접 채취하고 ASTM D1621에 근거하여 평가하였다. 우레탄 폼 심재의 압축특성은 발포 상태에 따라 민감하게 변하기 때문에 심재 압축시편은 기둥의 길이 방향, 폭 방향, 두께 방향을 따라 채취하였다. 이때 샌드위치 복합재 기둥의 두께 방향, 폭 방향, 길이 방향을 따른 심재의 압축강성은 각각 7.1MPa, 4.3MPa, 4.5MPa, 압축강도는 각각 0.32MPa, 0.22MPa, 0.21MPa로서 심재의 폭 방향과 길이 방향의 물성은 발포 방향인 두께 방향 물성의 60% 정도로 나타났다.

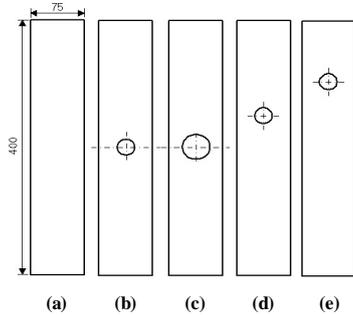


Fig. 1 Test specimens: (a) without hole, (b) with  $\phi 25\text{mm}$  hole at the center, (c) with  $\phi 38\text{mm}$  hole at the center, (d) with  $\phi 25\text{mm}$  hole at 1/4 location between the center and the edge, (e) with  $\phi 25\text{mm}$  hole at 1/2 location between the center and the edge.

### 2.2 시험방법

압축하중을 받는 샌드위치 복합재 기둥의 좌굴 거동을 조사하기 위해 재료시험기(Zwick/Z100, Zwick, Germany), A/D변환기(PCI-MIO-16E-1, National Instruments, USA), Labview 기반 자료수집장치를 이용하여 하중, 변위, 변형률 신호를 수집하였다. Fig. 2에는 시험 취부 및 장치 구성이 나타나 있다. 여기에서 보면 로드셀과 크로스헤드에 각각 연결된 상단 및 하단 시험치구는 시험 끝단을 지지하는 부분과 면재와 심재에 하중을 가하는 스틸 패드로 구성되어 있으며 면재와 심재에 균일한 하중이 작용되도록 고무 패드를 삽입하였다. 스틸 패드는 중앙부에 V-노치가 형성되어 있으며 환봉 핀을 적용하여 시험의 끝단이 자유롭게 회전되는 단순지지조건이 적용되도록 하였다.

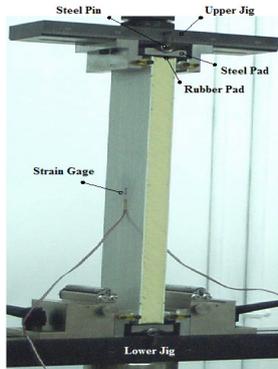


Fig. 2 Overview of test set-up.

압축하중을 받는 샌드위치 복합재 기둥의 좌굴 거동을 조사하기 위해서는 작용하중에 따른 시험중양부의 변형률이 필요하다. 변형률을 측정하기 위해 시험중양부의 양쪽면에 길이 방향으로 스트레인게이지를 부착하였다. 특히 시험중양부에 원공이 있는 경우에는 시험중양부에서 50mm 떨어진 위치의 양쪽면에 스트레인게이지를 부착하였다. 하중은 1mm/min의 변위제어 상태로 시험의 길이 방향을 따라 작용시켰다.

### 3. 결과 분석

#### 3.1 이론적 접근

압축하중을 받는 샌드위치 복합재 기둥의 요일러 좌굴하중은 식 (1)에 의해 구해진다[12].

$$P_e = \frac{\pi^2 D}{L^2} \tag{1}$$

이때  $D$ 는 굽힘강성으로  $E_f \frac{bt^3}{6} + E_f \frac{bt d^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12}$ ,  $L$ 은 기둥의 길이,  $b$ 는 기둥의 폭,  $d$ 는 상부 면재와 하부 면재의 중앙면 사이 거리,  $t$ 는 면재 두께,  $E_f$ 는 면재 인장강성,  $E_c$ 는 심재 인장강성이다.

양단이 단순지지된 얇은 면재를 가진 샌드위치 복합재 기둥의 좌굴하중은 식(2)에 의해 구해진다.

$$P_{cr} = \frac{P_e}{1 + (P_e/AG)} \tag{2}$$

이때  $A$ 는  $\frac{bd^2}{c}$ ,  $G$ 는 심재 전단강성,  $c$ 는 심재 두께이다.

Table 1에는 고려한 샌드위치 복합재 기둥의 조건을 식(2)에 대입하여 구한 이론값이 나타나 있다. 이때 이론값과 실험값을 비교해 보면 5% 이내로 매우 유사한 값을 가짐을 알 수 있으며 이로 미루어 볼 때 샌드위치 복합재 기둥의 끝단에 회전이 자유로운 단순지지조건이 적용됨을 알 수 있다. 심재 전단강성( $G^*$ )은 샌드위치 복합재의 성형과정에서 심재 두께에 따라 차이를 나타낼 수 있기 때문에 심재 두께에 따른 심재 전단강성을 ASTM C393에 근거하여 측정하였다.

#### 3.2 시험 결과

Fig. 3에는 압축하중을 받는 샌드위치 복합재 기둥에 대한 전형적인 하중-변형률 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 시험중양부의 양쪽면에 형성된 변형률은 선형적으로 증가하다가 분기된다. 이때 분기점의 하중을 좌굴하중(buckling load)으로 정의하였다[13]. 작용하중이 더욱 증가하게 되면 시험중양부의 양쪽면에 형성된 변형률 차이는 더욱 커지고 시험에 형성된 응력 또는 변형률이 임계값에 도달하면 파괴가 발생한다. 이때 작용하중의 최대값을 최대하중(maximum load)으로 정의하였다.

Table 1 Comparison of buckling loads obtained by theory and experiments

Core thickness (mm)	Theoretical (kN)	Experimental (kN)	$G^*$ (MPa)
23	6.3	6.0	3.37
37	8.8	8.2	3.05
48	11.1	10.7	3.04
61	11.3	11.7	2.48

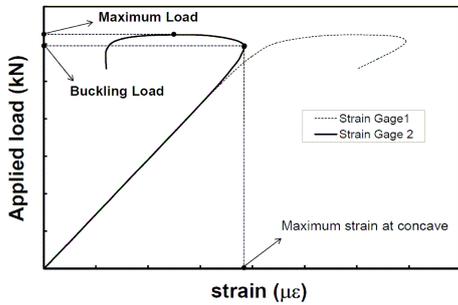


Fig. 3 Applied load versus strain curves for buckling test.

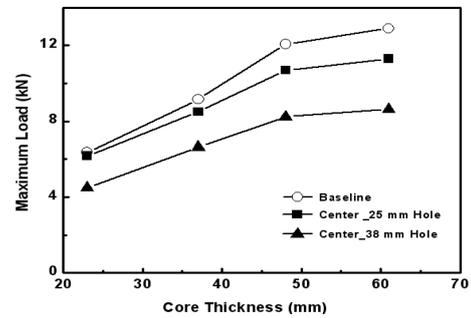


Fig. 5 Maximum loads by varying hole diameter.

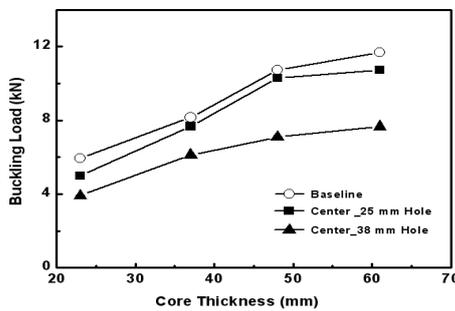


Fig. 4 Buckling loads by varying hole diameter.

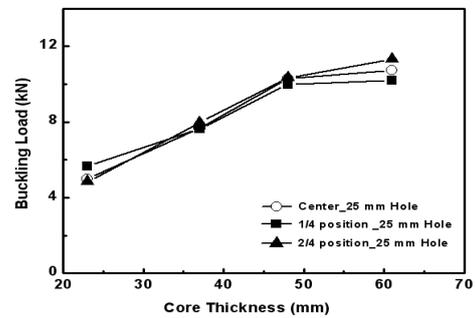


Fig. 6 Buckling loads by varying hole position.

Fig. 4에는 원공 크기와 심재 두께에 따른 샌드위치 복합재 기둥의 좌굴하중이 나타나 있다. 여기에서 보면 직경25mm인 원공이 시편중앙부에 있는 경우 심재 두께가 23mm, 37mm, 48mm, 61mm인 샌드위치 복합재 기둥의 좌굴하중은 각각 5.0kN, 7.7kN, 10.3kN, 10.7kN으로 원공이 없는 경우에 비해 16.1%, 5.8%, 4.1%, 8.0% 정도 낮다. 직경 38 mm인 원공이 시편중앙부에 있는 경우 좌굴하중은 각각 3.9kN, 6.1kN, 7.1kN, 7.7kN으로 원공이 없는 경우에 비해 34.3%, 24.9%, 34.0%, 34.4% 정도 낮게 낮다.

Fig. 5에는 원공 크기와 심재 두께에 따른 샌드위치 복합재 기둥의 최대하중이 나타나 있다. 여기에서 보면 직경 25mm인 원공이 시편중앙부에 있는 경우 심재 두께가 23mm, 37mm, 48mm, 61mm인 샌드위치 복합재 기둥의 최대하중은 원공이 없는 경우에 비해 각각 3.0%, 7.1%, 11.4%, 12.5% 정도 낮다. 직경 38mm인 원공이 시편중앙부에 있는 경우 29.4%, 27.4%, 31.7%, 33.2% 정도 낮다. 직경 38mm인 원공이 있는 경우에는 원공이 없는 경우에 비해 좌굴하중과 최대하중은 30% 정도 낮으며, 좌굴하중과 최대하중의 증가 정도는 심재 두께가 증가함에 따라 점차 둔화되고 임계값에 근접하는 양상이 나타났다.

직경 25mm인 원공을 갖는 샌드위치 복합재 기둥에 대해 원공 위치에 따른 좌굴하중과 최대하중을 비교하면 심재 두께가 23mm, 37mm, 48mm, 61mm일 때의 좌굴하중은 시편중앙부에 원공이 있는 경우 각각 5.0kN, 7.7kN, 10.3kN, 10.7kN, 1/4 지점에 원공이 있는 경우 각각 5.7kN, 7.6kN, 10.0kN, 10.2kN,

1/2 지점에 원공이 있는 경우 각각 4.9kN, 8.0kN, 10.3kN, 11.3kN으로 나타났다. 특히 좌굴하중은 Fig. 6에서와 같이 심재 두께가 61mm인 경우에는 10% 정도의 차이를 나타내지만 원공 위치에 따라서는 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 또한 Fig. 7에서와 같이 심재 두께가 23mm, 37mm, 48mm, 61mm일 때의 최대하중은 시편중앙부에 원공이 있는 경우 각각 6.2kN, 8.5kN, 10.7kN, 11.3kN, 1/4 지점에 원공이 있는 경우 각각 6.1kN, 8.4kN, 10.6kN, 11.1kN, 1/2 지점에 원공이 있는 경우 각각 5.3kN, 8.1kN, 10.5kN, 11.4kN으로 나타났다. 이로 미루어 보면 심재 두께가 23mm인 경우에는 10% 정도의 차이가 나타나지만 심재 두께 별 원공 위치에 따른 좌굴하중과 최대하중에는 큰 변화가 없었다. 특히 원공 위치에 따른 좌굴하중과 최대하중은 동일한 크기의 원공이 시편중앙부에 있는 경우, 1/4 지점에 있는 경우, 1/2 지점에 있는 경우 모두 유사하게 나타났다.

### 3.3 파괴 모드 분석

Fig. 8에는 심재 두께에 따른 샌드위치 복합재 기둥의 전형적인 하중-변형률 선도가 나타나 있다. 원공이 없는 경우는 심재 두께에 무관하게 작용하중의 초기에는 압축이 지배적으로 발생하여 양쪽면의 변형률은 서서히 증가되는 양상이 나타났다. 작용하중이 점차 증가하여 좌굴하중에 도달하면 S형 형태의 휨이 발생하여 한쪽 면재는 급격히 압축되고 다른 쪽 면재는 압축되다 인장변형이 발생된다.

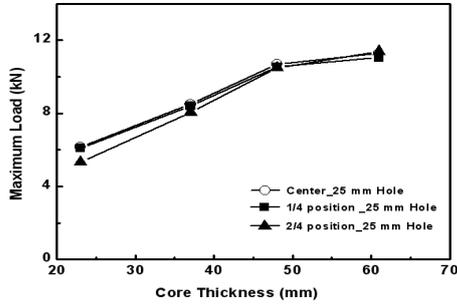


Fig. 7 Maximum loads by varying hole position.

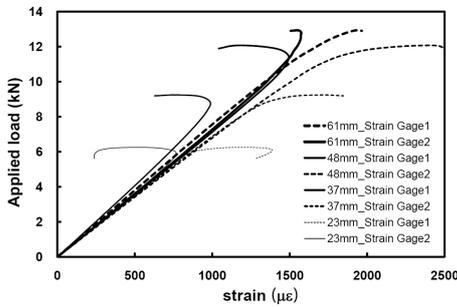
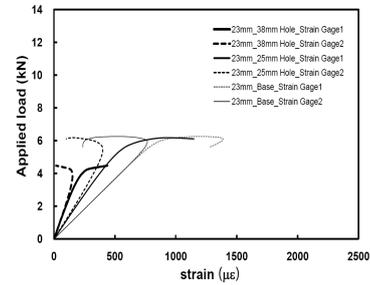


Fig. 8 Applied load versus strain curves by varying core thickness.

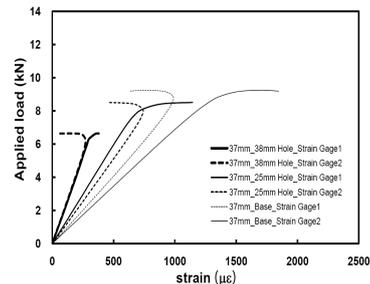
원공이 없는 샌드위치 복합재 기둥의 경우 심재 두께가 얇은 23mm와 37mm일 때 심재 전단파괴, 심재 두께가 비교적 두꺼운 48mm일 때 심재 전단파괴와 면재-심재 분리가 주요 파괴 모드로 나타났다. 그러나 심재 두께가 두꺼운 61mm일 때는 초기에 국부적인 휨이 발생하지만 그 정도는 크지 않으며 면재-심재 분리가 주요 파괴 모드로 나타났다.

Fig. 9에는 시편중앙부에 직경 25mm와 38mm인 원공이 있는 샌드위치 복합재 기둥의 심재 두께에 따른 하중-변형률 선도가 나타나 있다. 시편중앙부에 원공이 있는 경우도 마찬가지로 원공 크기에 무관하게 부재가 압축되다가 한쪽 면재는 급격히 압축되고 다른쪽 면재는 압축되다가 인장변형이 발생하면서 휨이 급격히 발생하는 양상이 나타났다. 이때 시편에 형성된 변형률은 시편중앙부를 기준으로 50mm 하단부에 스트레인게이지를 부착하여 측정하였다. 스트레인게이지의 부착 위치에 따른 압축 변형률의 차이는 크지 않으나, 원공이 있는 경우는 취약한 원공 부위로 인해 압축 변형률이 심재 두께에 무관하지만 원공 크기에는 반비례하여 감소하였다.

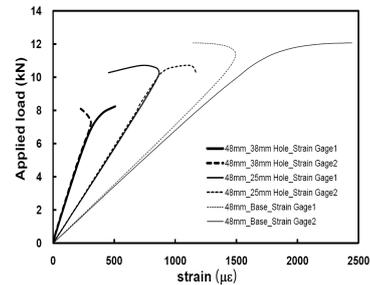
Fig. 10에는 시편중앙부에 직경 25mm인 원공이 있는 샌드위치 복합재 기둥의 파손 양상이 나타나 있다. 이때 심재 두께는 23mm를 고려하였다. 여기에서 보면 좌굴하중보다 큰 하중이 작용되면 휘어지다가 시편중앙부에 S형 형태의 변형이 발생하고 원공 부위에서는 심재 전단파괴가 나타났다. 직경 38mm인 원공이 있는 경우도 Fig. 11에서와 같이 유사한 형태의 변형과 파손이 관찰되었다. 이러한 파괴 모드는 심재 두께가



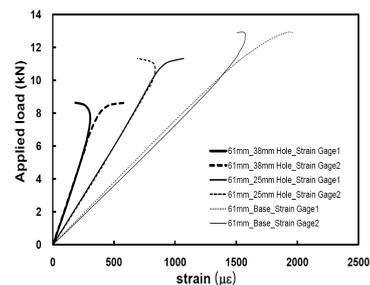
(a) 23mm thick core



(b) 37mm thick core



(c) 48mm thick core



(d) 61mm thick core

Fig. 9 Applied load versus strain curves by varying hole diameter for sandwich composite columns with different thick cores.

37mm와 48mm인 경우에서도 관찰되지만 심재 두께가 61mm인 경우에는 Fig. 12에서와 같이 하중이 증가하게 되면 미소한 국부적인 휨이 발생한 후 원공 크기에 무관하게 면재-심재 분리가 지배적인 파괴 모드로 나타났다. 원공 위치가 다른 경우에서도

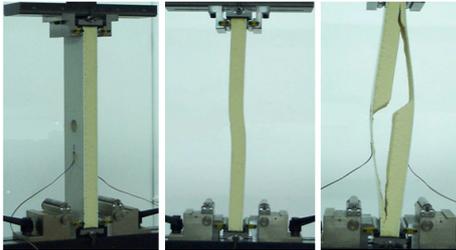


Fig. 10 Failure mode of sandwich composite column with 23mm thick core and  $\phi 25$ mm hole.

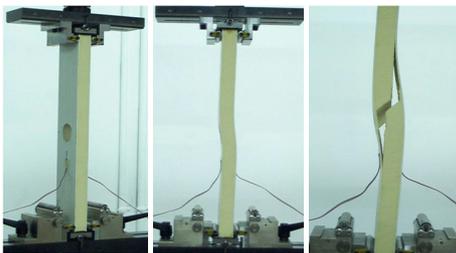


Fig. 11 Failure modes of sandwich composite column with 23mm thick core and  $\phi 38$ mm hole.

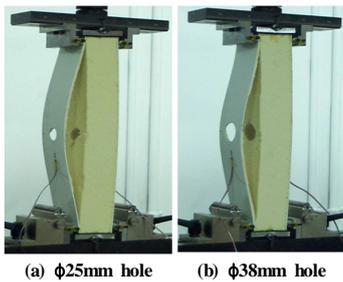


Fig. 12 Failure modes of sandwich composite column with 61mm thick core.

시편중앙부에 원공이 있는 경우와 마찬가지로 유사한 파괴 모드가 관찰되었다.

Fig. 13에는 직경 25mm인 원공이 1/4 지점에 있는 경우의 파손 양상이 나타나 있다. 이때 심재 두께는 23mm를 고려하였다. 여기에서 보면 원공이 있는 지점을 기준으로 S형으로 변형되다가 원공 부위에서 심재 전단파괴가 발생하였다. 원공이 1/2 지점인 경우도 마찬가지로 유사한 파괴 모드가 나타났다. 이러한 파괴 모드는 심재 두께가 37mm의 경우에서도 동일하게 관찰되었다.

Fig. 14에는 직경 25mm인 원공이 1/4 지점에 있는 경우와 1/2 지점에 있는 경우의 파괴 모드가 나타나 있다. 이때 심재 두께는 48mm를 고려하였다. 여기에서 보면 1/4 지점에 원공이 있는 경우는 원공 부위에서 심재 전단파괴가 나타나고, 1/2 지점에 원공이 있는 경우는 원공 부위에서 심재 전단파괴 및 면재-심재 분리가 거의 동시에 나타났다. 그러나 심재 두께가 61mm인 경우 Fig. 15에서와 같이 1/4 지점과 1/2 지점에 각각



Fig. 13 Failure modes of sandwich composite column with 23mm thick core and  $\phi 25$ mm hole at 1/4 position from the center and the end.

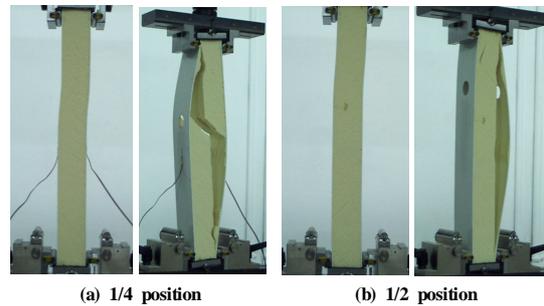


Fig. 14 Failure modes of sandwich composite column with 48mm thick core and  $\phi 25$ mm hole.

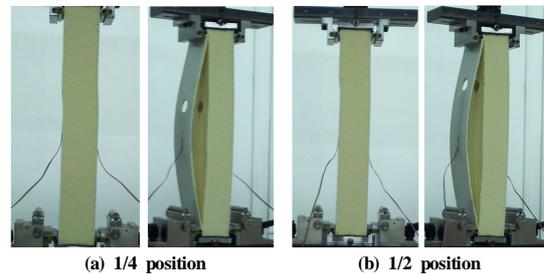


Fig. 15 Failure modes of sandwich composite column with 61mm thick core and  $\phi 25$ mm hole.

원공이 있는 경우에는 두 가지 모두 국부적인 휨이 지배적으로 발생한 후 면재-심재의 분리가 동반되는 파괴 모드로 나타났다. 따라서 심재 두께에 따른 샌드위치 복합재 기둥의 파괴 모드는 심재 두께가 얇은 경우 S형 형태의 휨이 발생한 후 심재 전단파괴가 나타나지만 심재 두께가 두꺼운 경우에는 하중 초기 심재 전단변형이 형성되고 하중이 더욱 증가되면 양쪽 면재 및 심재가 압축되다가 파괴 직전 이르면 면재-심재 분리가 관찰되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 압축하중을 받는 원공이 있는 샌드위치 복합재 기둥의 좌굴 거동을 조사하였다. 좌굴하중과 최대하중은 시

편중양부에 직경 25mm인 원공을 가진 경우 원공이 없는 경우에 비해 10% 정도 낮게 나타나지만 직경 38mm인 원공을 가진 경우는 30% 정도 낮게 나타났다. 그러나 원공 위치에 따라서는 원공이 없는 경우에 비해 큰 변화가 관찰되지 않았다. 파괴 모드를 살펴 보면 심재 두께가 얇은 경우 휨과 심재 전단 파괴가 지배적이지만, 심재 두께가 두꺼운 경우 국부적인 휨이 발생하면서 면재-심재 분리가 지배적으로 나타났다. 이러한 파괴 모드는 원공이 있는 경우에서도 동일하게 관찰되었다.

### 참고문헌

- 1) Lee, J.Y., Shin, K.B., and Lee, S.J., "A Study on failure evaluation of korean low floor bus structures made of hybrid sandwich composite," *Trans. of KSAE*, Vol. 15, No. 6, pp. 50-61, 2007.
- 2) Ning, H., Janowski, G.M., Vaidya, U. K., and Husman, G., "Thermoplastic sandwich structure design and manufacturing for the body panel of mass transit vehicle," *Journal of Composite Structure*, Vol. 80, pp. 82-91, 2007.
- 3) Ning, H., Janowski, G.M., Vaidya, U.K., and Husman, G., "Design, manufacture and analysis of a thermoplastic composite frame structure for mass transit," *Journal of Composite Structure*, Vol. 80, pp. 105-116, 2007.
- 4) Bitzer, T., "Honeycomb marine application," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 13, pp. 355-360, 1994.
- 5) Zvanik, M., "A Case study of structural core application in marine vessels," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 14, pp. 402-415, 1995.
- 6) Han, G.J., Ahn, S.C., Shim, J.J., and Kim, J.Y., "The study of bending and buckling behavior of sandwich structure according to design parameter variation," *Proceedings of KSPE Spring Conference*, Vol. 1. No. 1, pp. 841-844, 2001.
- 7) Roberts, J.C., Boyle, M.P., Wienhold, P.D., and White, G.J., "Buckling, collapse and failure analysis of FRP sandwich panels," *Composites Part B*, Vol. 33, pp. 315-324, 2002.
- 8) Flecks, N.A., and Sridhar, I., "End Compression of sandwich columns," *Composites Part A*, Vol. 33, pp. 353-359, 2002.
- 9) Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Ioannidis, M B., and Papapostolou, D.P., "On the crushing response of composite sandwich panels subjected to edgewise compression: experimental," *Journal of Composite Structures*, Vol. 71, pp. 246-257, 2005.
- 10) 최지영, 송근일, 권진희, 최진호, 김광수, 장영순, "복합재-하니콤 샌드위치 구조물의 인서트 조인트 강도 특성 연구," 한국복합재료학회지, 제20권 제5호, 2007, pp.26-33.
- 11) B.K. Hadi, and F.L.Mathew, "Buckling of anisotropic sandwich panels containing holes: Part I - overall buckling," *Composite Structures*, Vol. 52, 2001, pp. 205-216.
- 12) Allen, H.G., "Analysis and design of structural sandwich panels," Pergamon Press, Oxford, 1969.
- 13) Yeh, W.N., and Wu, Y.E., "Enhancement of buckling characteristics for sandwich structure with fiber reinforced composite skins and core made of aluminum honeycomb and polyurethane foam," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 15, pp. 63-74, 1991.