

## 복합재 적층판의 전단좌굴시험을 위한 치구 설계 및 검증

박성준\* · 고명균\* · 김동관\* · 김상국\*\* · 문창오\*\* · 권진회\*\*\*† · 최진호\*\*\*\*

### Design and Verification of Shear Buckling Test Fixture for Composite Laminate

Sung-Jun Park\*, Myung-Gyun Ko\*, Dong-Gwan Kim\*, Sang-Kuk Kim\*\*,  
Chang-Oh Moon, Jin-Hwe Kweon\*\*\*†, Jin-Ho Choi\*\*\*\*

**ABSTRACT:** Final goal of this research is to establish the database for correlation factors which connects the test and analysis results of shear buckling allowables for composite plate. To accomplish the goal, extensive test and analysis works are required. In this paper, as the first step, a frame-type fixture for shear buckling test was designed and validated through the test and analysis. Final configuration of the fixture were determined via parametric study on the effect of specimen size, cross-sectional dimensions, and number of fastening bolts on the shear buckling load. Results of the study showed the designed frame-type fixture successfully induces the shear buckling of composite plate. However, there were deviations between the test results and analysis results for ideal case under pure shear load, which were mainly caused by the difference in plate sizes for both cases. The difference were larger in the plates with larger hole and simply supported boundary condition. It is concluded from the results that while the designed fixture can be used for the clamped plates with acceptable accuracy, it shows larger difference in the simply supported plates.

**초 록:** 본 연구의 궁극적 목표는 현장의 구조설계자들이 복합재 평판의 전단좌굴 설계허용치를 설정할 때 사용할 수 있는 환산계수(이론값과 실험값의 차이를 보정하는 계수)를 제공하는 것이다. 이를 위해서는 광범위한 시험과 해석이 필요하며, 본 연구에서는 일단계로, 복합재 평판의 전단좌굴시험을 위해 단축인장하중을 받는 프레임 형태의 치구를 설계하고, 시험과 해석을 수행하여 그 타당성을 검토하였다. 치구의 최종 형상은 시편의 크기, 치구의 치수, 체결볼트의 수 등의 변수들이 전단좌굴하중에 미치는 영향에 대한 인자연구를 통해 결정하였다. 시험 및 해석 결과, 설계된 프레임이 의도한대로 전단좌굴을 효과적으로 유도하는 것을 확인하였다. 그러나 시험에서는 시편이 치구에 고정되어야 하므로 시편의 크기가 달라지게 되어, 시험값과 해석값의 차이가 존재하였다. 특히 원공이 커질수록, 또한 단순지지 경계조건일 경우에는 그 차이가 더 크게 나타났다. 본 연구의 결과 고정지지 전단좌굴의 경우 설계된 프레임 형태 치구를 그대로 사용할 수 있을 것으로 보이지만, 단순지지 경계일 경우 경계조건 설정방법의 수정이 필요할 것으로 판단된다.

**Key Words:** 복합재 평판(Composite plate), 전단좌굴(Shear buckling), 프레임형태의 치구(Frame-type fixture), 유한요소해석(Finite element analysis)

Received 5 June 2014, received in revised form 20 August 2014, accepted 27 August 2014

\*Department of Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

\*\*Structure Design Department Research & Development Division, Korea Aerospace Industries

\*\*\*†Department of Aerospace Engineering-Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang National University,  
Corresponding author (E-mail : jhkweon@gnu.ac.kr)

\*\*\*\*School of Mechanical Engineering, Research Center for Aircraft Parts Technology

## 1. 서 론

복합재료의 기계적 특성이 개선되고, 제작기술이 발달하면서 항공기의 주 구조물에게까지 적용이 확대되고 있다. 또한 항공기는 중량절감이나 기능적인 이유로 원공을 가진 평판 구조물을 사용하는 경우가 많다. 원공을 가지는 평판은 압축이나 전단하중을 받을 경우, 정적 파손이 일어나기 전에 좌굴이 발생하기 쉽다. 따라서 좌굴은 항공기 구조 설계의 가장 중요한 기준 중 하나이며, 오래전부터 많은 해석적, 실험적 연구가 이루어져 왔다.

원공이 존재하는 복합재 적층판의 좌굴거동은 점진적 파손을 고려한 비선형 유한요소해석[1]을 통하여 해석할 수 있고, 원공의 영향을 고려하기 위해서 기존의 판 이론에 사용된 변위 함수에 가중함수를 추가하여 좌굴 계수를 예측할 수도 있다[2]. 또한, 압축하중을 받는 원공 평판의 경우 원공의 위치에 따라서는 큰 변화가 관찰되지 않았다[3]. 전단좌굴시험의 경우 액자형 프레임 치구를 이용해, 시험하는 동안 가해지는 인장하중을 측정할 수 있는 방법을 제안하고[4], 일방향 유리 보강섬유 복합재에 대한 좌굴거동과 적층순서에 따른 좌굴거동을 명시하는 연구도 진행되었다[5]. 액자형 프레임을 이용한 전단시험에 대해서는 섬유에 따른 전단물성치 측정방법에 대한 연구<sup>[6]</sup>나 액자형 프레임 치구에 단방향 인장하중과 양방향 인장하중을 가했을 때의 장단점을 명시하고 에너지 관점에서 접근하여 두 값을 비교하는 연구도 진행되었다[7]. 전단시험의 방법에 대해서는 액자형 프레임 치구와 일방향 인장을 통해 유리강화섬유의 물성치를 비교하는 연구[8]와 스트레인 게이지를 부착하여 액자형 프레임 시험을 수행하고 결과에 따른 전단 자유물체도를 그리는 방법을 명시하는 연구[9]가 진행되었다. 액자형 프레임 사용 시 구속조건 구현에 따라 다른 결과를 보이며 일방향 편향 인장시험과 비교해 개선된 구속조건 구현 방법을 제시[10]하거나, 자연섬유평직(natural fiber woven fabric)에 대한 일방향 편향 인장시험과 액자형 프레임 치구 시험의 전단거동 비교에 대해 연구도 수행하였다[11].

그러나 많은 연구에도 불구하고 실제로 일방향 재료시험기로 전단좌굴시험을 수행할 때 어떤 방법으로 시험을 하는 것이 바람직한지, 치구의 설계는 어떻게 해야 하는지, 치구가 좌굴하중에 미치는 영향은 어느 정도인지, 단축 재료시험기로 가하는 하중이 실제로 어느 정도까지 전단하중의 형태로 가해지는지 등에 관한 구체적인 연구 결과는 국내에서 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 복합재 적층판의 전단좌굴시험을 위한 사각 프레임 형태의 치구를 설계하고, 원공을 가진 복합재 적층판에 대한 전단좌굴시험을 수행하였다. 유한요소해석을 통해 치구의 강성, 체결볼트의 수 등이 좌굴하중에 미치는 영향을 연구하였고, 이상적인 전단하중 조건에서의 좌굴하중과 실제 시험조건에

서의 전단좌굴하중의 차이를 정량적으로 분석하여, 현장 설계자들이 시험 결과와 설계 좌굴하중을 연계시킬 수 있는 기초자료를 제공하였다.

## 2. 치구 개념설계 및 검증

### 2.1 문제 설명

전단좌굴시험의 핵심은 치구가 재료시험기의 인장하중을 시편에 전단하중의 형태로 얼마나 잘 전달하는가이다. 일반적인 전단시험 치구로는 레일 형태(Rail shear), 프레임 형태(Frame shear), 보 형태(Beam shear)가 있다[12]. 본 연구에서는 Fig. 1에 보인 바와 같이 액자형 프레임을 이용하여 전단하중 조건을 구현하는 방식을 취하였다. 프레임으로 된 치구에 인장하중이 가해지게 되면 치구의 하중은 볼트를 통해 시편에 전단하중의 형태로 전달되도록 설계하였다. 실제로 설계한 치구가 이러한 기능을 제대로 수행하는지를 확인하기 위해 먼저 유한요소해석을 통해 검증하였다.

Fig. 2는 조립된 치구와 시편의 형상이다. 시편과 치구는 볼트를 통해 체결되며 네 가장자리에 있는 큰 원공은 치구를 연결하는 핀 설치용이다. 치구는 핀으로 연결되어 있으므로 서로 회전이 자유롭고 굽힘모멘트를 전달하지 않는

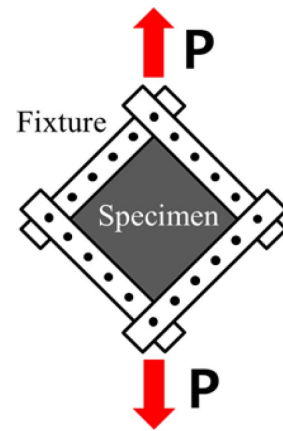


Fig. 1. Schematic diagram for shear buckling test set-up

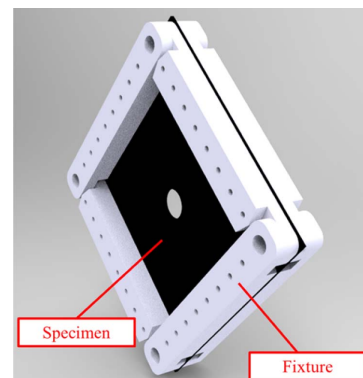


Fig. 2. Assembled specimen and fixture (CAD model)

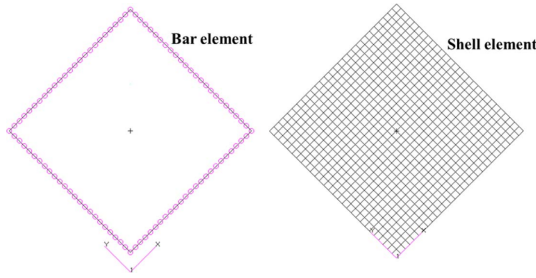


Fig. 3. Exploded finite element models for fixture and specimen

다. 따라서 만약 시편이 없다면 치구는 시험기의 인장하중을 지지할 수 없게 된다.

유한요소해석을 수행할 경우 이 점을 반드시 확인해야 한다. 치구의 단면은 고정지지조건과 단순지지조건을 구현하기 위하여 두 가지 형상으로 제작하였다. Fig. 3에서 보듯이 유한요소해석에서는 치구는 보 요소를 사용하여 모사하였으며 시편은 쉘 요소를 사용하였다.

상용 유한요소 프로그램인 MSC.NASTRAN을 이용해 선형좌굴해석을 수행하였다. 시편의 적층순서는 [45/-45/90/45/-45/0/-45]<sub>s</sub>이며 재료는 Toray T700GC-12K-31E/#2510 일방향 테이프이다. 재료의 물성치는  $E_1 = 125.5$  GPa,  $E_2 = E_3 = 8.4$  GPa,  $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.309$ ,  $\nu_{23} = 0.018$ ,  $G_{12} = G_{13} = 4.2$  GPa,  $G_{23} = 3.1$  GPa이다.

## 2.2 시편과 치구의 체결

각각 보 요소와 쉘 요소로 모델링한 치구와 시편은 볼트로 체결된다. 이를 모사하기 위해 볼트로 연결된 치구의 절점과 시편의 절점을 RBE2(강체보 요소)로 연결하였다. 치구의 절점을 독립자유도로, 시편의 절점을 종속자유도로 설정하였다. Fig. 4는 RBE2를 사용해 치구와 시편을 체결한 형상을 나타내고 있다.

## 2.3 경계조건

본 연구에서 고려한 경계조건은 고정지지와 단순지지 2가지 경우이다. 고정지지 조건에서는 Fig. 5에 보인 바와

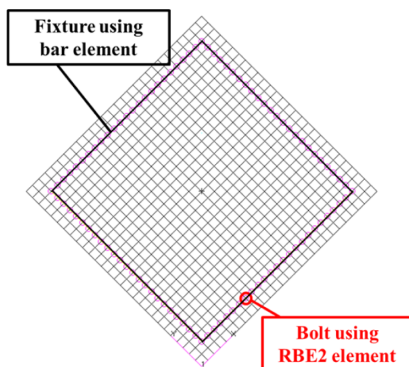


Fig. 4. Assembled finite element model

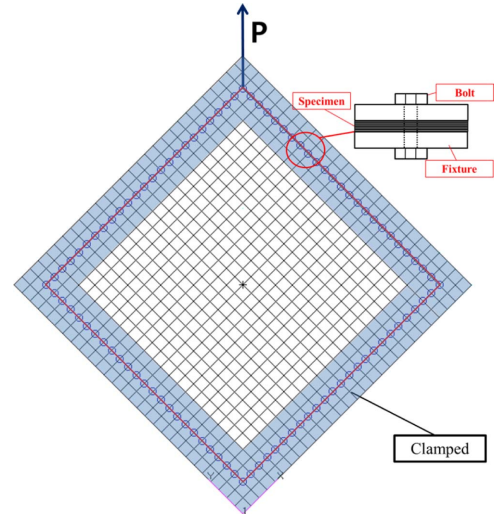


Fig. 5. Finite element model for clamped boundary condition

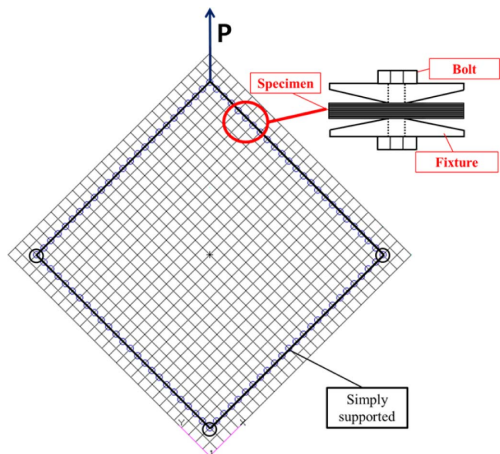


Fig. 6. Finite element model for simply supported boundary condition

같이 치구에 의해 구속되는 영역(회색 영역)에 해당하는 모든 절점에서의 회전자유도와 두께방향 변위가 구속된다. 또한 볼트가 체결된 절점에서는 면내변위도 구속된다. Fig. 6에 보인 단순지지 조건에서는 볼트가 있는 절점만 두께방향 변위를 구속하고 회전은 구속하지 않는다. 그러나 그림에 보인 바와 같이 시험에서의 단순지지 경계조건에서는 볼트의 크기와 치구의 단면 형상으로 인해 부분적으로 회전을 구속하게 된다. 이는 완전한 단순지지조건의 구현이 이루어지지 못함을 의미하고, 해석과 시험 결과의 차이가 발생하는 원인이 된다.

## 2.4 치구 검증

인장하중으로 전단하중 조건을 구현하는 프레임 형태 치구의 타당성을 검증하기 위해서 유한요소해석을 통해 이상적인 순수 전단하중 평판에 대한 결과와 비교하였다. Fig. 7에 보인 바와 같이 이상적 조건에서는 구조물의 경계에 균



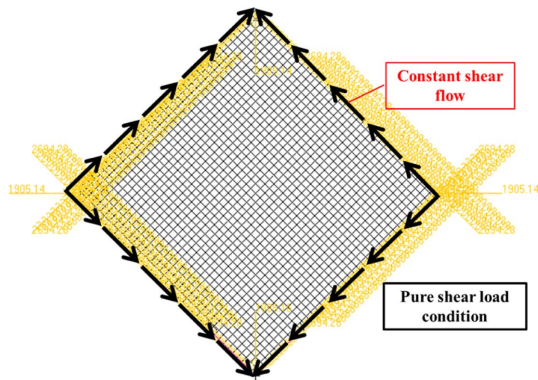


Fig. 7. Free body diagram under pure shear load

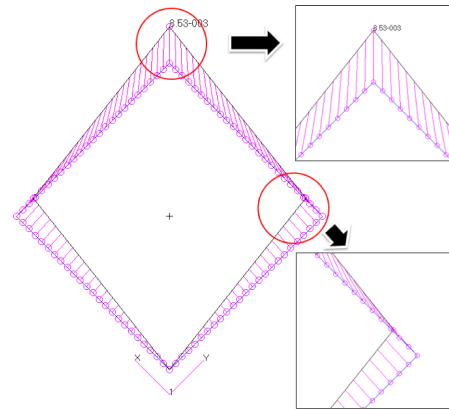
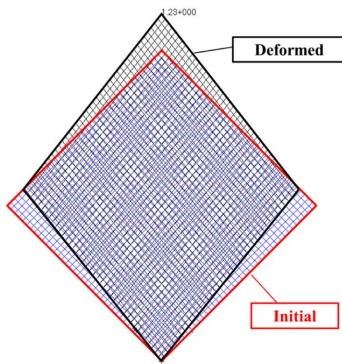
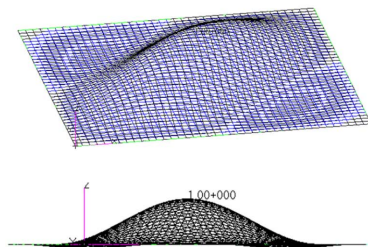


Fig. 9. Deformation of frame under tested condition (clamped)



(a) Static deformation

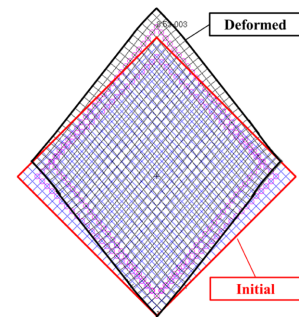


(b) Buckling mode shape

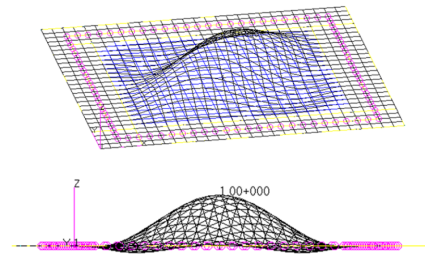
Fig. 8. Static deformation and buckling mode shape under pure shear load (clamped)

일한 전단분포하중을 가하여 전단좌굴하중을 구한다. 반면에 시험조건에서는 치구의 설치를 위해 시편이 커지게 되고, 프레임을 통해 하중이 가해지므로 완전한 순수전단하중 상태가 구현되지는 못한다. 이상적 조건의 시편(정사각형)의 한 변의 길이는 152.4 mm이며 시험조건의 한 변의 길이는 212.4 mm이다.

Fig. 8(a)에 고정지지 경계에서 이상적 전단하중 조건에 대한 해석 결과를 보였다. 이상적 조건의 경우 하중이 가해졌을 때 구조물은 완전한 마름모꼴로 변형되고, Fig. 7과 같이 시편의 가장자리를 따라 균일한 전단분포하중이 흐르



(a) Static deformation



(b) Buckling mode shape

Fig. 10. Static deformation and buckling mode shape under tested condition (clamped)

게 된다. Fig. 8(b)에는 이상적인 전단하중 조건에서의 좌굴모드를 보였다.

Fig. 9와 10은 실제 시험조건을 고려한 해석 결과를 보인 것이다. Fig. 9에 보인 바와 같이 프레임에서는 눈에 띄는 정도의 변형은 보이지 않고, 마름모 형태로 변형이 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 시편을 확대하여 보면 다른 결과를 볼 수 있다. Fig. 10(a)에서 프레임을 통해 하중이 가해질 경우 시편이 완전한 마름모 형태로 변형되지 않고, 가장자리가 직선을 유지하지 못하는 것을 알 수 있다. 이는 시편의 가장자리에 순수 전단하중 외의 수직하중이 가해졌을

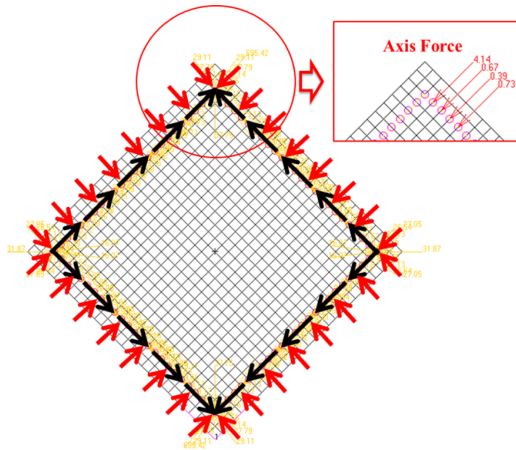


Fig. 11. Free body diagram under tested condition (clamped)

을 의미한다. 이를 확인하기 위해 Fig. 11에서와 같이 프레임이 시편에 가하는 하중을 따로 분리하여 살펴보았다. 그림으로부터 현재의 프레임 형태 치구를 사용할 경우 시편에 부분적으로 수직하중이 가해지는 현상을 피할 수 없음을 확인하였다. 시편의 중앙으로 갈수록 순수 전단하중 상태에 가깝고, 상하 모서리에 가까울수록 수직하중이 크게 발생하였다. 정량적으로 살펴보면, 시험 조건과 이상적 조건의 좌굴하중을 비교했을 때 시험조건이 이상적 조건보다 22.3% 만큼 좌굴하중이 더 높게 나타나는데 순수 전단하중을 가하지 못하는 것이 그 원인 중 하나로 판단된다. 또한 경계조건을 구현하기 위하여, 이상적 조건 시편의 크기가 152.4 mm인 반면 실제 시험 조건에서는 212.4 mm이 된다. 이상적 조건의 해석은 치구 고정부에 대한 유한요소모형을 생략하고 전단하중이 가해지는 부분에 대해서 유한요소모형을 형성한 결과이므로(치수: 152.4 mm × 152.4 mm) 치구고정부의 변형에 의한 좌굴하중 저하가 고려되지 않았다고 볼 수 있다.

### 3. 치구 상세설계

#### 3.1 시편 치수 결정

치구의 상세설계를 위해서는 먼저 시편의 치수를 결정해야 한다. 전단좌굴시험을 위한 시편의 크기는 시험의 목적에 따라 달라질 수 있지만, 다른 한편으로는 재료시험기의 용량도 고려해야 한다. 본 시험의 경우 10톤 용량의 재료시험기를 사용하므로 이를 고려하여 시편의 폭과 두께를 결정하였다. Fig. 12에 고정지지 경계조건에서 시편의 폭에 따른 재료시험기의 인장하중(Applied load, 시편의 전단좌굴을 일으키는 시험기의 인장하중)을 나타내었다. 시편의 폭이 커질수록 요구되는 하중이 낮아지는 것을 알 수 있지만, 시편의 크기가 작을수록 시험에서 경계조건이 미치는 영향은 커지게 된다. 따라서 본 연구에서는 요구하중과

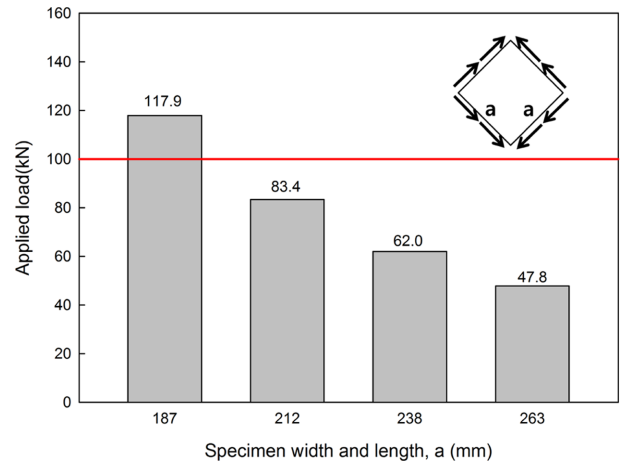


Fig. 12. Applied load and specimen size

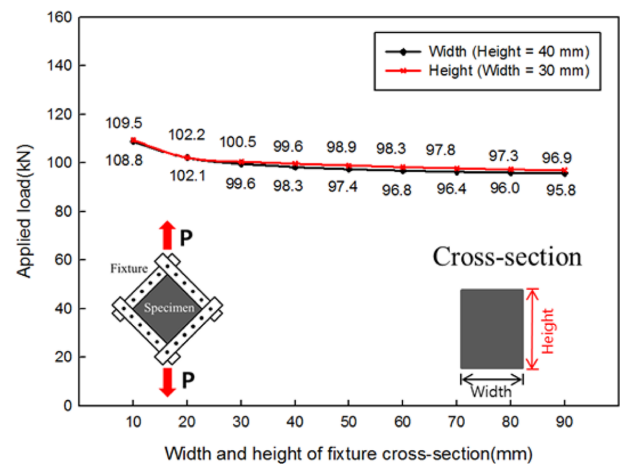


Fig. 13. Applied load and cross-sectional area

시험의 용이성 등을 고려하여 시편의 폭을 212 mm로 결정하였다.

#### 3.2 치구 단면 치수 결정

전단좌굴시험에서 경계조건은 치구에 의해 결정된다. 따라서 치구의 강성이 충분치 않을 경우 실제 원하는 구속조건을 구현하지 못할 수 있고, 이로 인해 원했던 것과 다른 경계조건이 될 수도 있다. 그렇다고 치구를 과도하게 설계할 경우 무게가 증가하고, 치구의 설치가 어려워진다. 따라서 치구가 충분한 강성을 가지도록 하면서 동시에 무게를 줄일 수 있는 치수의 결정이 중요하다. 본 연구에서는 고정지지 조건에서 크기(폭, 길이 동일) 212.4 mm의 시편에 대해 치구의 단면 치수를 변화시켜 가며 좌굴을 발생시키는 인장하중의 변화를 살펴보았다. Fig. 13은 치구 단면 크기에 따른 재료시험기 인장하중의 변화를 나타낸 것이다. 단면이 커질수록 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 좌굴하중 값의 변화와 무게를 고려하여 치구의 폭은

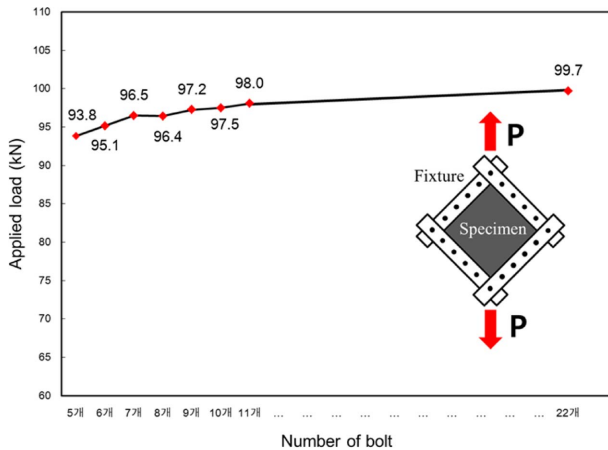


Fig. 14. Applied load and number of bolts

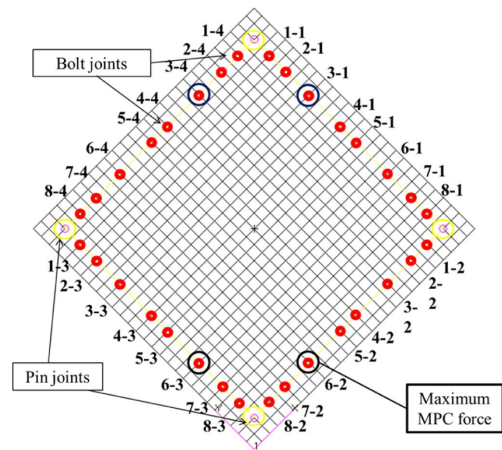


Fig. 15. Bolt location and ID

30 mm, 높이는 40 mm로 결정하였다.

### 3.3 볼트 수 결정

치구의 치수 이외에도 시편과 치구를 체결하는 볼트의 수 또한 좌굴하중에 영향을 미친다. 재료시험기가 가하는 인장하중은 볼트를 통해 시편에 전달되므로 동일조건 하에서 볼트 수가 많을수록 더 이상적인 전단하중조건을 구현할 수 있다. Fig. 14는 고정지지조건에서 크기 212.4 mm의 시편에 대해 볼트 수에 따른 하중 값의 변화를 나타낸 그래프이다. 볼트 수가 증가할수록 좌굴하중이 증가하면서 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 실제로는 시편 및 볼트의 크기로 인해 볼트의 수를 무한정 늘릴 수는 없으므로 시험에서 목표로 하는 정확도를 고려하여 볼트의 수를 정해야 한다. 본 연구에서는 한 번에 볼트 8개를 사용하여 시편과 치구를 체결하였다.

### 3.4 볼트 지름 결정

볼트의 수와 함께 볼트의 크기도 결정해야 한다. 볼트의 지름을 결정하기 위해서는 각 볼트에 걸리는 하중을 구하여야 한다. 본 연구에서는 유한요소해석을 통해 각 볼트에 걸리는 하중을 구하였다. Fig. 15는 각 볼트의 번호를 표시한 것이고 Table 1은 각 볼트에 가해지는 하중을 나타낸 것이다. 해석은 앞서 볼트 수 결정에 사용된 시편(고정지지조건, 크기 212.4 mm)에 대한 결과이며 볼트에 가해지는 하중은 면내 하중의 합력으로 계산된 것이다. 해석 결과 볼트에 가해지는 하중은 좌우대칭을 이루는 것을 알 수 있다. 또한 중앙의 볼트가 위아래의 볼트보다 큰 하중을 지탱하고, 3-1,4번과 6-2,3번 볼트가 8.79 kN으로 가장 큰 하중을 지지함을 알 수 있다. 볼트의 지름은 볼트에 가해지는 가장 큰 하중을 기준으로 결정하였다. Table 2는 ISO 898-1의 볼트의 강도 등급에 따른 보증하중을 나타내는 것이다. M5의 경우 보증하중이 13.8 kN인데, 볼트에 걸리는 최대하중을 지지하기 위해서는 최소 M5의 볼트를 사용해야 함을 알 수 있다.

Table 1. Bolt reaction forces

ID	Load (kN)	ID	Load (kN)	ID	Load (kN)	ID	Load (kN)
1-1	5.82	1-2	5.46	1-3	5.46	1-4	5.82
2-1	6.98	2-2	6.72	2-3	6.72	2-4	6.98
3-1	8.79	3-2	8.61	3-3	8.61	3-4	8.79
4-1	8.39	4-2	8.34	4-3	8.34	4-4	8.39
5-1	8.34	5-2	8.39	5-3	8.39	5-4	8.34
6-1	8.61	6-2	8.79	6-3	8.79	6-4	8.61
7-1	6.72	7-2	6.98	7-3	6.98	7-4	6.72
8-1	5.46	8-2	5.82	8-3	5.82	8-4	5.46

Table 2. Bolt proofing load[13]

ID	Area mm <sup>2</sup>	Strength level (kN)				
		6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
M3	5.03	2.21	2.92	3.27	4.18	4.88
M3.5	6.78	2.98	3.94	4.41	5.63	6.58
M4	8.78	3.86	5.10	5.71	7.29	8.52
M5	14.2	6.25	8.23	9.23	11.8	13.8
M6	20.1	8.84	11.6	13.1	16.7	19.5
M7	28.9	12.7	16.8	18.8	24.0	28.0
M8	36.6	16.1	21.2	23.8	30.4	35.5
M10	58	25.5	33.7	37.7	48.1	56.3
M12	84.3	37.1	48.9	54.8	70.0	81.8

## 4. 전단좌굴시험

### 4.1 시편 제작 및 시험 방법

설계된 치구를 사용하여 복합재 평판의 전단좌굴시험을 성공적으로 수행할 수 있는지를 확인하기 위한 검증시험을 수행하였다. 시편은 앞에서 언급한 Toray사의 일방향 복



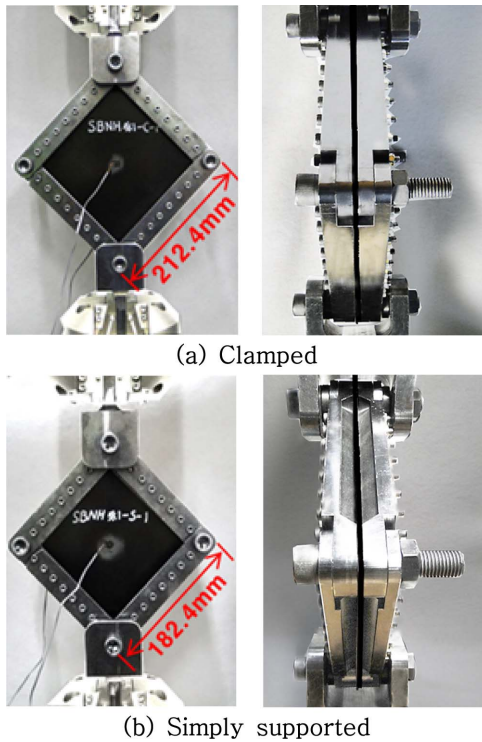


Fig. 16. Test set-up for plate without hole

합재 프리프레그 T700GC-12K-31E/#2510를 사용하였다. 고정지지 조건과 단순지지 조건을 구현하기 위해 고정지지 시험용 시편은  $212.4 \times 212.4 \text{ mm}^2$ , 단순지지 시험용 시편은  $182.4 \times 182.4 \text{ mm}^2$  로 제작하였다. 적층순서는  $[45/-45/90/45/-45/0/45/-45]_s$ 이다.

시험에 사용된 재료시험기는 Instron 5582이고 분당 2 mm의 속도로 하중을 가하였다. 고정지지 및 단순지지 경계 조건에 대한 시험 셋업은 Fig. 16과 같다. 전단좌굴발생 지점을 정확히 측정하기 위해 시편의 중앙 앞뒷면에 스트레인 게이지를 부착하였다.

#### 4.2 시험 결과

Fig. 17과 18은 고정지지 경계조건에서 전단하중을 받는  $D/W = 0.1$  ( $D$ : 원공 직경,  $W$ : 시편 폭)인 시편의 하중-변위 곡선과 변형 및 파손 과정을 나타낸 것이다. 시험 장치를 설치한 후 ①과 같은 초기상태의 시편에 전단하중을 가하여 좌굴하중을 넘어서면 ②와 같이 전단좌굴이 발생한 뒤, 곡선의 기울기가 변하며, 계속적으로 하중을 가하면 ③과 같이 최종파손이 발생한다. 좌굴하중은 Fig. 19와 같이 스트레인 게이지를 부착하고 변형률곡선의 다른 두 기울기를 연장하여 만나는 지점을 좌굴하중으로 정의하였다. 시험 결과 고정지지조건에서 원공의 직경 대 시편 폭의 비,  $D/W$ 가 0.10, 0.35, 0.60일 때, 좌굴하중은 각각 58.2, 39.9, 35.2 kN으로 원공이 커질수록 전단좌굴하중이 감소하였다. 이는 적층판에 원공이 생겨 하중을 지지할 수 있는 시편의 유효

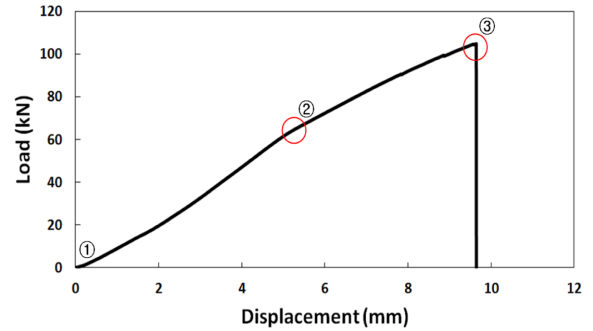


Fig. 17. Typical load-displacement curve under clamped boundary condition ( $D/W = 0.1$ )

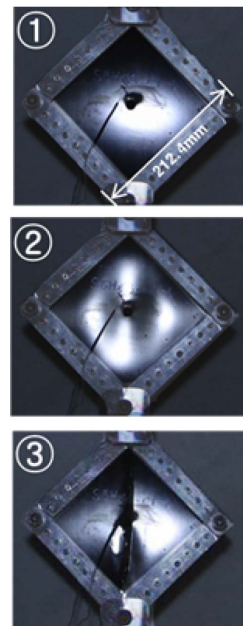


Fig. 18. Buckling and failure development

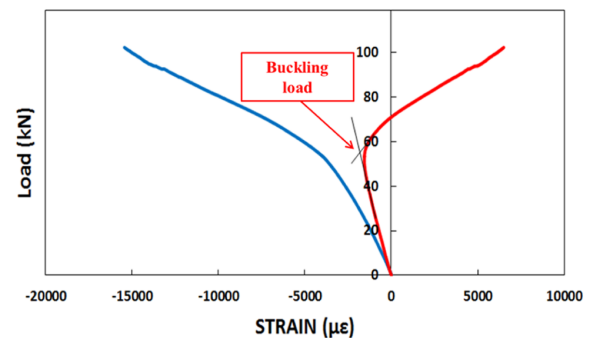


Fig. 19. Typical load-strain curve under clamped boundary condition ( $D/W = 0.1$ )

단면적이 줄어들었기 때문이다. 단순지지 조건에서는 고정지지 조건과 마찬가지로 경향으로 적층판의 원공이 커질수록 좌굴하중이 감소하였다.  $D/W$ 가 0.10, 0.35, 0.60일 때, 좌굴하중은 각각 55.7, 35.7, 29.00 kN으로 나타났다.

#### 4.3 결과 비교

본 연구의 목적은 전단좌굴시험을 위한 치구를 설계하고, 설계된 치구를 사용하여 시험에 의한 좌굴하중 값을 획득한 후, 좌굴하중이 이상적인 순수 전단하중 하에서의 좌굴하중과 얼마나 다른지를 확인하여 구조 설계에 반영하는 것이다.

Fig. 20에 고정지지 경계조건에서 원공의 직경 대 시편 폭의 비( $D/W$ )를 달리하면서 수행한 해석과 시험의 결과를 비교, 분석하였다.  $D/W$ 가 0.1일 때 이상적인 전단좌굴하중(FEM(Pure shear))은 49.3 kN, 시험조건을 모사한 해석 결과(FEM(Tested condition))는 62.2 kN, 실제 시험 결과(Test)는 58.2 kN으로 나타났다. 시험 결과와 시험조건을 모사한 해석의 좌굴하중 차이는 6.8%로서 통상적인 좌굴문제의 오차가 20% 내외임을 고려할 때 비교적 잘 일치하고 있다. 반면 시험 결과와 이상적인 전단하중 조건에서의 좌굴하중과의 차이는 15.4%로 상대적으로 더 크게 나타난다. 이는 이상적인 전단하중 조건에서의 해석을 위한 시편과 실제 시험을 위한 시편의 크기가 다르기 때문이다. Fig. 21에 보인 바와 같이 이상적인 평판의 크기는 공칭치수에 의해 결정되지만, 시험을 위해서는 치구 설치를 위해 시편이 더 커야 하고, 치구에 물려있는 부분으로 인해 좌굴하중이 더 증가하게 되는 것이다.  $D/W = 0.35$ 일 때에는 시험결과와 시험조건을 모사한 해석의 좌굴하중 차이는 7.2%, 시험결과

와 순수 이상적인 전단좌굴하중 조건과의 차이는 28.6%로서  $D/W = 0.1$ 인 경우보다 약간 증가하였다.

그러나  $D/W = 0.6$ 일 경우에는 시험조건을 고려한 해석과 실제 시험 결과는 잘 일치하지만, 순수 전단하중조건에서의 해석과 시험 결과는 큰 차이(56%)를 보인다. Fig. 22는 고정지지조건에서 해석과 시험결과를 비교한 그림으로 (a) 순수조건(Pure shear), (b) 시험조건(Tested condition), (c) 좌굴시험 상태에서의 좌굴모드를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 (a) 순수조건에서는 원공의 위, 아래 부분에서 최대변위가 나타나는 반면 (b) 시험조건에서는 위쪽 부분만 최대변위가 나타난다. 그리고 실제 시험을 수행한 결과 위쪽 부분만 최대변위가 나타났으며 실제 시험조건 구현함에 있어 좌굴모드가 달라지는 현상을 확인하였다. 이는 시편에 원공을 뚫더라도 시편 설치를 위해 치구에 물려있는 부분의 크기는 변하지 않으며 시편에 뚫은 원공이 커질수록 치구 속에 물려있는 부분이 지탱하는 하중

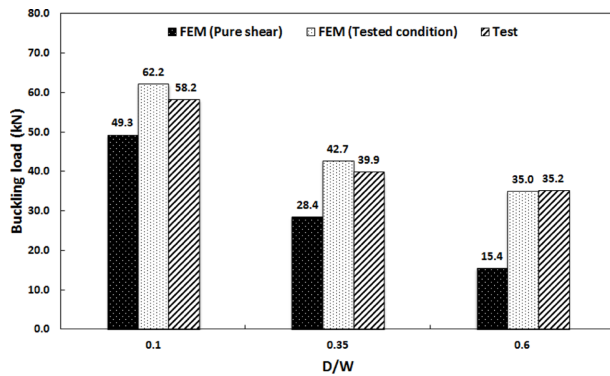


Fig. 20. Hole diameter and buckling load under clamped condition

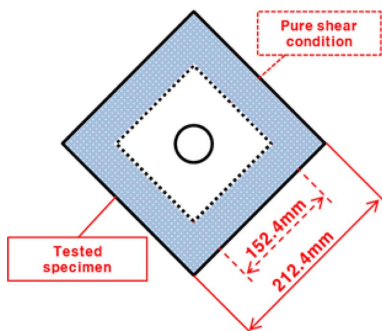
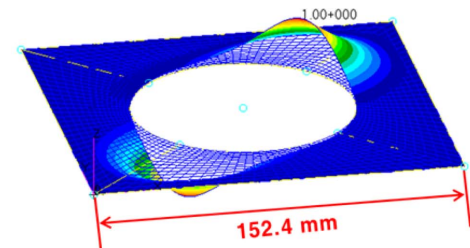
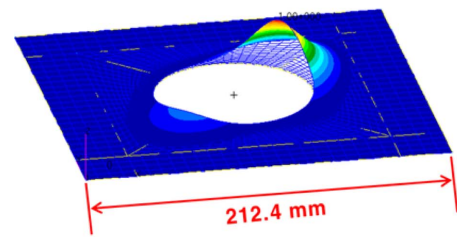


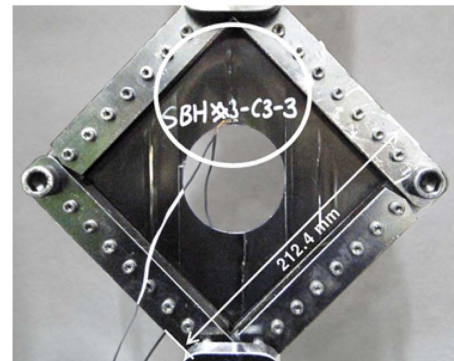
Fig. 21. Specimen sizes in tested and pure shear conditions



(a) FEM for pure shear condition



(b) FEM for tested condition



(c) Test

Fig. 22. Buckling mode shapes in clamped condition ( $D/W = 0.6$ )



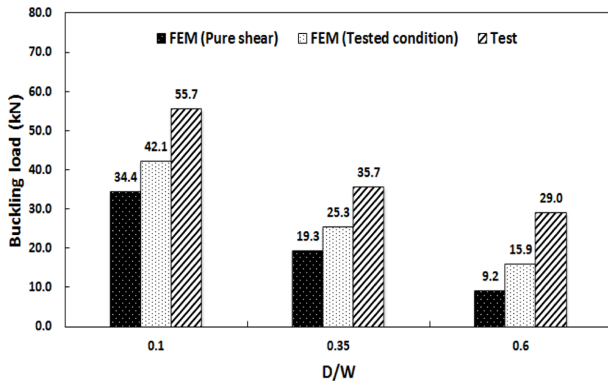
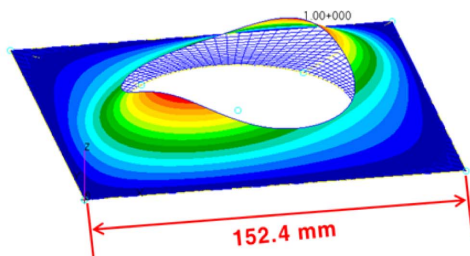
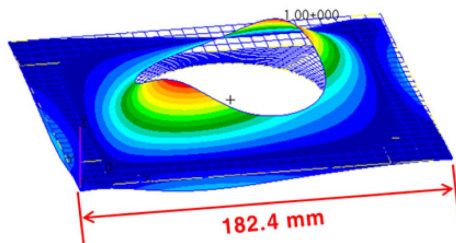


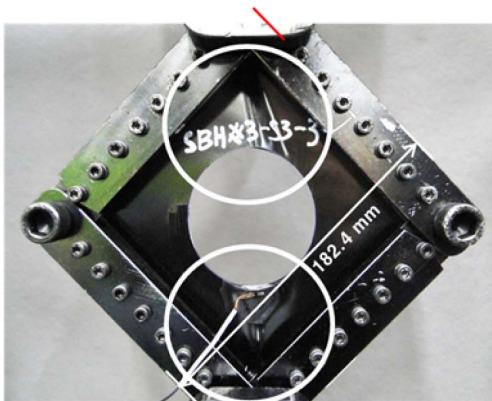
Fig. 23. Hole diameter and buckling load under simply supported condition



(a) FEM for pure shear condition



(b) FEM for tested condition



(C) Test

Fig. 24. Buckling mode shapes in simply supported condition (D/W = 0.6)

의 비중이 실제 좌굴이 일어나는 시편부분보다 커지면서 좌굴모드가 변화되어 두 결과의 차이가 커지는 것으로 보인다.

단순지지조건의 경우 Fig. 23에 보인 바와 같이 D/W가 0.1 일 때 이상적인 전단좌굴하중은 34.4 kN, 시험조건을 모사한 해석은 42.1 kN, 시험 결과는 55.7 kN으로 확인되었다. 시험결과와 시험조건을 모사한 해석의 좌굴하중 차이는 24.3%이며 시험결과와 순수 이상적인 전단좌굴하중 조건과의 차이는 38.1%이다. 적층판의 원공 직경 대 폭의 비 D/W가 0.35 일 때는 시험결과와 시험조건을 모사한 해석의 좌굴하중 차이는 29.0%, 시험결과와 순수 이상적인 전단좌굴하중 조건과의 차이는 45.8%이다. 적층판의 D/W가 0.6일 때는 각각 45.2%, 68.3% 차이를 보였다. Fig. 24는 단순지지조건에서 해석과 시험결과를 비교한 그림으로 (a) 순수조건(Pure shear), (b) 시험조건(Tested condition), (c) 좌굴시험 상태에서의 좌굴모드를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 원공의 위, 아래 부분에서 최대변위가 나타나지만 (b) 시험조건에서는 경계조건 밖의 영역에서도 변형이 발생된다. 이상적인 전단하중조건에서의 좌굴하중과 시험조건을 반영한 해석의 결과가 다른 것은 고정지지에서와 마찬가지로 시험 치구 장착을 위한 시편의 크기 차이가 중요한 원인이고, 그 외에도 볼트로 구속한 경계조건의 불완전성, 치구의 단면형상으로 인한 회전구속의 영향 등 복합적인 원인에 기인한 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 원공을 가진 복합재 적층판의 전단좌굴하중 설계 데이터베이스를 확보하기 위한 연구의 일환으로, 복합재 적층판의 전단좌굴시험을 위한 프레임 형태의 치구를 설계하고, 그 타당성을 검증하였다. 유한요소해석을 통해, 설계된 치구가 재료시험기의 단축하중을 시편에 전단하중의 형태로 잘 전달하는지를 검증하였다. 또한 실제 전단시험을 통해 전단좌굴시험을 수행하고 치구설계 및 해석방법의 타당성을 검토하였다. 시험 및 해석을 통해, 고정지지 경계조건의 경우 제안한 치구를 사용하여 일관성 있고 정확한 전단좌굴하중의 예측이 가능함을 확인하였다. 그러나 단순지지의 경우 볼트의 수와 지지부에서의 단면형상 등으로 인해 완전한 단순지지조건의 구현이 이루어지지 못하는 것을 알 수 있었고, 향후 수정, 보완이 필요함을 확인하였다. 형상의 측면에서는 원공의 직경 대 시편 폭의 비가 0.6 이상이 될 경우 순수 좌굴이 아닌 정적파손과 결합된 형태의 거동을 보임을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 2013년 정부(교육부) 재원 한국연구재단의 대학중점연구소 지원 사업(2009-0094104) 및 산업통상자원부,

한국산업기술진흥원, 동남지역사업평가원의 광역경제권 선도산업지원단의 광역경제권 선도산업 육성사업으로 수행된 연구결과입니다.

## 참고문헌

1. Kong, S.W., Lee, I.C., Kim, C.G., and Hong, C.S., "Buckling and Postbuckling Behavior of Composite Plate with a Hole," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences* Vol. 24, No. 3, 1996, pp. 53-63.
2. Kim, S., Kim, H.D., Lim, J.H., Hwang, D.S., and Park, J.S., "A Study of Buckling Load Coefficient Estimation for Plate with Hole," *Proc. of The Korean Society Aeronautical and Space Sciences*, 2011, pp. 106-110.
3. Lee, S.J., and Yoon, S.H., "Buckling Behavior of Sandwich Composite Columns by Varying Hole Size and Hole Position," *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 25, No. 1, 2012, pp. 19-25.
4. Jean, L., Gilles, H., Ahn, V.D., and Philippe, B., "Experimental Analysis of the Influence of Tensions on in Plane Shear Behaviour of Woven Composite Reinforcements," *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 2, 2008, pp. 506-515.
5. Jose, D.D.M., *Postbuckling Behavior of Composite Panels in Shear*, Maine University Press, 1993.
6. Jauffres, D., Fetfatsidis, K., Winchester, D., Sherwood, J., and Chen, J., "Advances in Measurement of Shear and Friction of Woven Fabrics for Forming," *Proc. of 17th International Conference on Composite Materials*, 2009, pp. 26-29.
7. Peng, X.Q., Cao, H., Chen, J., Xue, P., Lussier, D.S., and Liu, L., "Experimental and Numerical Analysis on Normalization," *Composites Science and Technology*, Vol. 64, No. 2, 2004, pp. 11-21.
8. Gilbert, L., Martin, N., and Johanne, D., "Evaluation of Bias-extension and Picture-frame Test Methods for the Measurement of Intra Ply Shear Properties of PP/glass Commingled Fabrics," *Composites Structure*, Vol. 61, No. 4, 2003, pp. 341-352.
9. Lomov, S.V., Willems, A., Verpoest, I., Zhu, Y., Barburski, M., and Stoilova T., "Picture Frame Test of Woven Composite Reinforcements with a Full-Field Strain Registration," *Textile Research Journal*, Vol. 76, No. 3, 2006, pp. 243-252.
10. Milani, A.S., Nemes, J.A., Lebrun, G., and Bureau, M.N., "A Comparative Analysis of a Modified Picture Frame Test for Characterization of Woven Fabrics," *Polymer Composites*, Vol. 31, No. 4, 2009, pp. 561-568.
11. Taha, I., Abdin, Y., and Ebeid, S., "Comparison of Picture Frame and Bias-Extension Tests for the Characterization of Shear Behaviour in Natural Fibre Woven Fabrics," *Polymer Composites*, Vol. 14, No. 2, 2013, pp. 338-344.
12. Gary, L.F., and Donald, J.B., "In-plane Shear Test of Thin Panels," *Experimental Mechanics*, Vol. 23, No. 1, 1983, pp. 81-86.
13. ISO 898-1, Bolts, Screws and Studs with Specified Property Classes - Coarse Thread and Fine Pitch Thread.