

새로운 개념의 복합재 샌드위치 체결부 구조의 설계와 검증

곽병수* · 주현우* · 김홍일** · 동승진*** · 권진희*†

Design and Verification of a Novel Composite Sandwich Joint Structure

Byeong-Su Kwak*, Hyun-woo Ju*, Hong-Il Kim**, Seung-Jin Dong***, Jin-Hwe Kweon*†

ABSTRACT: Sandwich panels with three different joint configurations were tested to design a novel sandwich joint structure that can effectively support both the tensile and compressive loads. The sandwich core was mainly aluminum flex honeycomb but the PMI foam core was limitedly applied to the ramp area which is transition part from sandwich to solid laminate. The face of sandwich panel was made of carbon fiber composite. For configuration 1, the composite flange and the sandwich panel were cocured. For configurations 2 and 3, an aluminum flange was fastened to the solid laminate by HI-LOK pins and adhesive. The average compressive failure loads of configurations 1, 2, and 3 were 295, 226, and 291 kN, respectively, and the average tensile failure loads were 47.3 (delamination), 83.7 (bolt failure), and 291 (fixture damage) kN, respectively. Considering the compressive failure loads only, both the configurations 1 and 3 showed good performance. However, the configuration 1 showed delamination in the corner of the composite flange under tension at early stage of loading. Therefore, it was confirmed that the structure that can effectively support tension and compressive loads at the same time is the configuration 3 which used a mechanically fastened aluminum flange so that there is no risk of delamination at the corner.

초 록: 인장과 압축하중 모두를 효과적으로 지지할 수 있는 새로운 샌드위치 체결부 구조의 설계를 위해, 체결부 형상이 다른 3가지 샌드위치 판넬에 대한 인장 및 압축 시험을 수행하였다. 샌드위치 판넬의 코어는 주로 알루미늄 플렉스 허니콤이지만, 타 구조물과의 체결을 위해 두께가 얇아지면서 단순 적층판으로 변하는 램프 영역에서는 PMI 폼 코어를 사용하였고, 면재에는 탄소섬유 복합재를 사용하였다. 형상 1에서는 복합재 플랜지와 샌드위치 구조가 일체형으로 연결된다. 형상 2와 3에서는 별도로 제작된 알루미늄 플랜지가 복합재 적층판에 하이록핀과 접착제로 체결된다. 시험 결과 형상 1, 2, 3의 평균 압축파손하중은 각각 295 kN, 226 kN, 291 kN으로 나타났다. 평균 인장파손하중은 각각 47.3(층간분리), 83.7 kN(볼트파손), 291 kN(치구손상)으로 나타났다. 압축 파손하중만을 고려할 경우 플랜지와 샌드위치 판넬을 복합재 일체형으로 제작한 형상 1과 3이 우수한 특성을 보였다. 그러나 형상 1의 경우 인장하중을 받을 때 낮은 하중에서 플랜지 모서리 부분에서 층간분리가 발생하였다. 따라서 인장과 압축하중을 동시에 효과적으로 지지할 수 있는 구조는 모서리에서 층간분리의 위험이 없게 별도의 알루미늄 플랜지를 사용하여 볼트로 체결한 형상 3임을 확인하였다.

Key Words: 복합재료(Composite material), 샌드위치(Sandwich), 체결부(Joint), 파손(Failure)

Received 10 October 2017, accepted 13 December 2017

*School of Mechanical and Aerospace and Engineering, Gyeongsang National University

*†School of Mechanical and Aerospace and Engineering, Gyeongsang National University, Corresponding author (E-mail: jhkweon@gnu.ac.kr)

**Agency for Defense Development

***Hankuk Fiber Co., Ltd. Defence and Aerospace Division

1. 서 론

강성이 높은 탄소 복합재 면재와 비중이 작은 재료의 코어로 구성된 탄소 복합재 샌드위치 구조는 중량증가를 최소화하면서 굽힘강성을 증가시킬 수 있는 효율적인 구조이다. 따라서 항공기나 발사체를 비롯하여 중량절감이 중요한 구조물에서 샌드위치 구조가 광범위하게 사용되고 있다[1-8]. 그러나 샌드위치 구조의 강점에도 불구하고 단순 복합재 적층판(solid laminate) 구조에 비해 타 구조와의 체결이 어렵다는 취약점이 있다. 샌드위치 구조의 경우 중량을 줄이기 위해 강도나 강성이 떨어지더라도 가벼운 재료를 코어로 사용하기 때문에 볼트나 핀, 리벳 등과 같은 기계적 체결재를 지지하는 능력이 현저히 떨어진다. 따라서 복합재 샌드위치 구조의 설계에서는 구조의 중량 증가는 최소화하면서 체결부 강도를 증가시키는 것이 핵심 관심사이다[9-15].

샌드위치 구조물을 타 구조물과 체결하는 가장 간단한 방법은 접착 체결법이다. Choi 등[9]은 샌드위치 구조와 단순 복합재 적층판으로 제작된 단일접침 접착 체결부에 대한 인장시험을 수행하였다. 시험 결과 접착제의 두께가 두꺼워짐에 따라 파손강도가 감소하는 것을 확인하였다. 그러나 일반적으로 접착 체결을 할 경우 분해가 어렵고, 온도, 습도 등의 환경적 요인에 민감하고 피로하중에 취약한 문제점이 있다. 따라서 샌드위치 구조물과 타 구조물과의 체결에는 샌드위치에 인서트(insert)를 삽입한 뒤 이를 이용해 기계적 체결을 하는 방식이 흔히 사용된다[10-12]. 인서트 조인트의 일례로, Heimbs 등[10]은 두 가지 종류의 인서트가 적용된 샌드위치 체결부 구조에 대하여 풀아웃 하중 및 전단하중 시험을 수행하여, 각각의 하중에서의 샌드위치 조인트의 파손양상을 연구하였다. Kim 등[11]은 체결 강도를 높이기 위한 새로운 형태의 인서트를 제안하기도 하였다. 인서트의 외부 플랜지가 면재의 일부를 덮도록 되어 있어, 포팅재료의 접착력 외에 인서트의 외부 플랜지가 면재와 접촉하는 힘에 의하여 추가적인 하중을 지지할 수 있도록 하였다. 인서트와 포팅재료를 사용하는 체결부 구조는 포팅재료로 인한 샌드위치 구조의 중량증가가 동반된다. 따라서, 포팅재료로 인한 중량증가를 완화하기 위한 목적으로 Lim 등[12]은 웨이 있는 인서트를 고강도의 복합재료로 감싸 포팅재료의 사용을 최소화하는 새로운 인서트를 개발하였다. 이들은 시험을 통해 새로운 인서트를 사용할 경우 인서트와 포팅 재료의 중량을 37% 줄일 수 있고, 지지하중은 같거나 오히려 증가함을 보였다.

샌드위치 구조를 타 구조와 연결하기 위하여 많이 사용되는 또 다른 방법은, 샌드위치 코어의 두께를 점진적으로 줄여, 코어가 없는 단순 적층판으로 만든 다음 이 적층판을 타 구조물과 기계적 혹은 접착식으로 연결하는 방법이다[13-15]. Kuczma 등[13]은 샌드위치 구조의 두께가 얇아

지는 램프(ramp) 구간의 경사각과 코어의 두께를 변수로 하여 인장시험을 수행하였다. 시험 결과 초기 균열은 램프 구간의 끝 즉 코어가 없어지는 지점에서 발생하였고, 발생한 균열은 샌드위치와 단순 적층판 쪽, 양 방향 모두로 진전되었다. 코어의 두께에 따라 샌드위치의 양쪽 면재로 전달되는 하중의 크기가 달라지기 때문에, 균열의 진전은 코어의 두께에 따라 다른 양상을 나타냈다. Paris 등[14]은 두께가 변하는 샌드위치 구조의 램프 형상을 변경해가며 인장시험을 수행하고 파손거동을 연구하였다. 시험 결과 곡물의 크기에 따른 파손하중의 변화는 미미하였다.

곽병수 등[16]은 본 연구의 선행연구로서, 두께와 재료의 구성이 변하는 새로운 형상의 복합재 샌드위치 구조의 파손거동을 연구하였다. 샌드위치 구조는 두 가지 코어로 구성되어 있고 램프 영역을 지난 후 양쪽의 면재가 만나 단순 적층판으로 변하며, 샌드위치와 복합재 플랜지는 일체형 구조로 제작하였다. 인장 및 압축하중에 대해 각각 3개씩 시험을 수행하였으며, 파손하중 및 변형된 형상을 확인하였다. 시험 결과 설계된 구조는 높은 압축하중을 지지할 수 있었으나, 인장파손하중은 압축파손하중대비 1/7에 불과하였다. 따라서 압축강도는 저하시키지 않으면서 동시에 인장강도를 증가시킬 수 있는 구조를 개발하기 위해 추가적인 연구를 수행해야 할 필요를 확인하였고, 본 연구는 선행연구[16]의 연장선상에서 진행된 것이다.

이상의 연구에서 살펴본 바와 같이 복합재 샌드위치 체결부 구조에 대한 다양한 연구들이 지속적으로 수행되어 왔다. 그러나 공개된 대부분의 연구들은 크기가 작은 쿠편 수준에 집중되어 있고, 샌드위치 구조는 단일 재료의 코어로만 구성되어 있다. 반면 복합재 샌드위치 구조의 적용범위가 확대됨에 따라 실제 구조물은 대형화되고 그 형상도 복잡하며 하나의 샌드위치 구조 속에 형상과 성질이 다른 코어들이 동시에 적용되는 경우도 있다. 따라서 본 논문에서는 실제 샌드위치 구조를 타 구조물에 연결하기 위한 효과적인 설계 방법을 시험으로 연구하였다. 복합재 면재에 알루미늄 플렉스(flex) 코어와 폼(foam) 코어를 사용한 샌드위치 구조를 대상으로, 서로 다른 세 가지 형태의 체결부 구조를 제시하고 총 16개의 시편에 대한 인장, 압축 시험을 수행하여, 효과적인 체결 구조 설계방안을 제시하였다. 형상 1에 대한 시험결과는 참고문헌[16]에서 이미 발표한 것이고, 본 논문에서는 다른 형상과의 비교를 위해 참고문헌의 주요 결과를 요약하여 제시하였다.

2. 시 험

2.1 시편 제작

본 논문에서 사용된 샌드위치 구조는 일방향 탄소섬유 복합재를 면재로, 알루미늄 허니콤과 PMI 폼을 코어로 사용한다. 주 구조는 샌드위치이지만 타 구조물과의 체결을 위

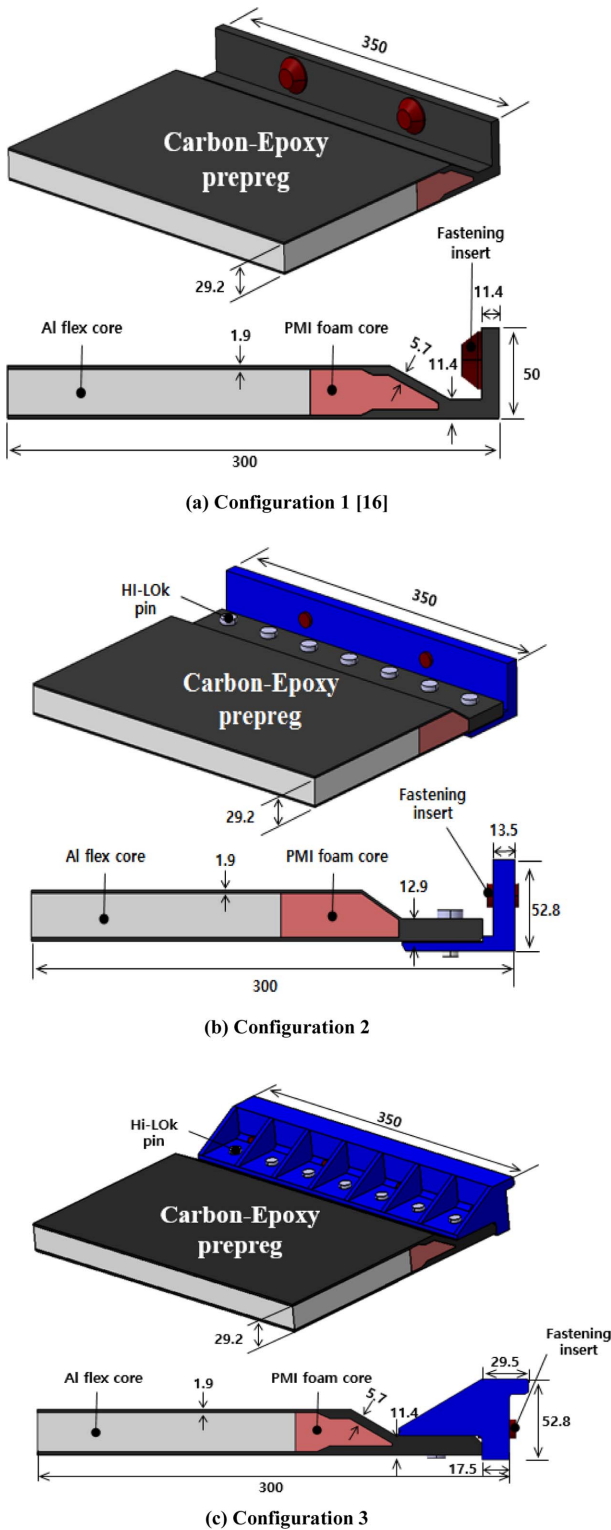


Fig. 1. Specimen configurations (unit: mm)

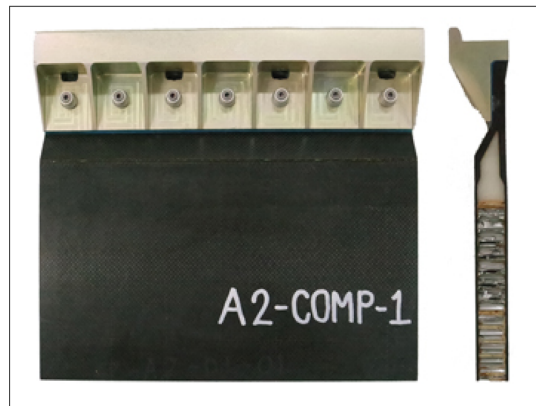
해 램프 영역을 거쳐 샌드위치 양쪽의 면재가 만나 단순 적층판을 이루는 복잡한 형상을 갖는다. 시편은 총 3가지의 형상이며, 샌드위치 판넬의 기본 형상에는 차이가 없으나 타 구조와 체결하기 위한 체결영역에서 서로 다른 형상을



(a) Configuration 1 [16]



(b) Configuration 2



(c) Configuration 3

Fig. 2. Specimens for test

갖는다.

Fig. 1(a)에 형상 1에 대한 치수와 재료를 자세히 설명하였다[16]. 그림과 같이 샌드위치 구조는 폭 350 mm, 길이 300 mm이며 샌드위치 판넬의 두께는 29.2 mm이다. 폼 코어가 적용된 램프 영역에서 판넬의 두께가 감소하며 양쪽의 면재가 만나 두께 11.4 mm의 단순 적층판으로 변한다. 타 구조물과 볼트로 체결되는 상황을 모사하기 위하여 플랜

지에 두 개의 인서트를 설치하였고, 인서트와 볼트를 통해 하중을 가한다. 형상 1의 시편 사진은 Fig. 2(a)에 보였다.

Fig. 1(b)는 형상 2에 대한 자세한 치수 및 재료를 나타낸다. 형상 2는 형상 1과 달리 시편의 플랜지와 판넬의 단순 적층판 부분이 분리되어 있으며, 알루미늄 플랜지와 복합재 적층판을 7개의 고전단핀(HI-LOK)과 접착제로 조립한 하이브리드 체결방식이다. 플랜지의 재료는 알루미늄 7000 계열이다. 형상 1의 경우 폼 코어가 적용된 영역에서 판넬의 두께가 감소함과 동시에 면재의 두께는 단계적으로 증가하나, 형상 2의 경우 램프 영역에서 면재의 두께 변화는 없다. 형상 2의 시편 사진은 Fig. 2(b)에 보였다.

Fig. 1(c)에 보인 형상 3은 시편의 플랜지와 웨이 7개의 고전단 핀과 접착제를 통해 하이브리드 방식으로 체결되었다는 측면에서는 형상 2와 동일하다. 그러나 알루미늄 플랜지가 복합재 적층판의 안쪽에 설치된다는 측면에서 형상 2와는 반대이고, 알루미늄 플랜지 곡률부의 강성 보강을 위해 림을 추가한 것이 다른 점이다. 형상 3의 시편 사진은 Fig. 2(c)에 보였다.

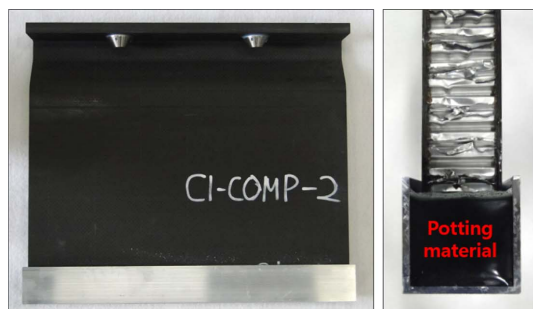
압축시편의 경우 하중을 받을 때 관심 영역이 아닌 시편의 하단부에서 면재의 국부적 파손이 발생할 가능성이 있다. 이를 방지하기 위해 Fig. 3(a)에서와 같이 시편 하단부를 접착제 EA9396과 알루미늄 프레임 사용하여 보강하였다. EA9396의 경화 조건은 상온(25°C)에서 3~5일 또는 66°C에서 1시간 보관이다. 사전 점검에서 66°C에서 경화를 시작할 경우 접착제 내부 기공의 팽창으로 인하여 접착제가 채널 밖으로 넘쳐나는 현상이 발생하였다. 따라서 본 논

문에서는 먼저 상온에서 하루 동안 경화시킨 후 66°C에서 1시간 동안 추가로 경화하는 공정을 사용하였다.

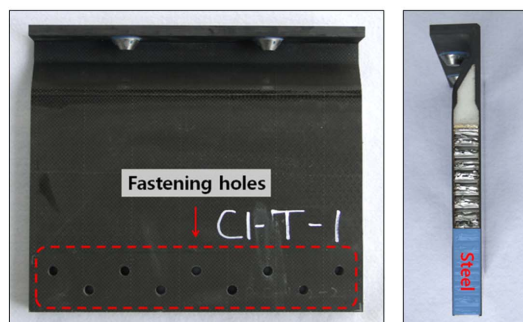
인장시편의 경우는 하중을 가할 때 볼트 홀 주변의 면재에서 베어링이나 전단파손이 발생할 가능성이 높다. 따라서 이를 방지하기 위하여 Fig. 3(b)에서와 같이 시편 하단 50 mm 구간에서 허니콤 코어를 제거하고 강(steel)을 삽입하여 접착한 후에 9개의 홀을 가공하였다[16].

2.2 시험 방법

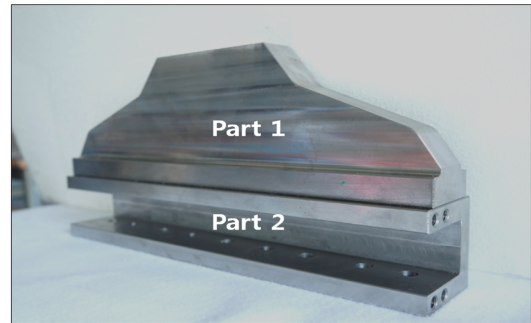
시험에 사용된 치구는 Fig. 4에 보였다. Fig. 4(a)에 보인 바와 같이 상부 치구는 시험기의 하중을 치구로 전달하는 부분(part 1)과, 시편의 플랜지를 잡아주는 부분(part 2)으로 구성된다. Part 1과 2는 12개의 볼트를 통해 체결된다. 형상 3의 경우 형상 1, 2의 경우보다 높은 인장파손하중을 나타



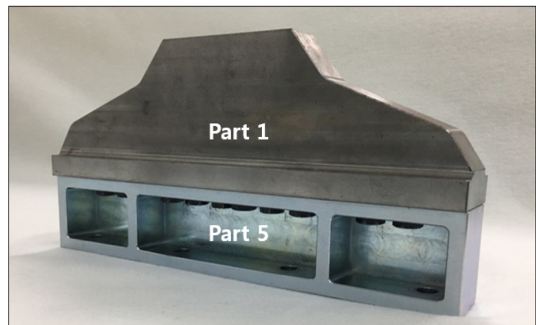
(a) Compression



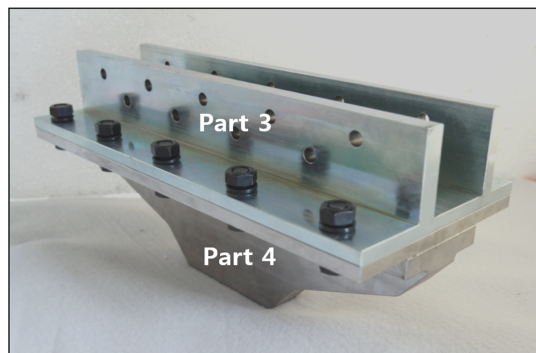
(b) Tension



(a) Upper fixtures for configurations 1 and 2



(b) Reinforced upper fixtures for configuration 3



(c) Lower fixtures for all configurations

Fig. 3. Specimen reinforcement for loading [16]

Fig. 4. Test fixtures

낼 것으로 예상되어, Fig. 4(b)와 같이 기존의 파트 2 치구를 변형에 강하도록 수정한 파트 5로 대체하였다.

Fig. 4(c)에 나타난 하부 치구도 비슷한 개념으로 설계하



(a) Compression



(b) Tension

Fig. 5. Typical test set-up (configuration 2)

였지만, 시편의 상하부 형상이 다르기 때문에 시편을 고정하는 부분, 즉 파트 3의 형상이 다르다. 파트 3과 4는 10개의 볼트와 너트를 통해 체결된다. 치구의 재료는 항복응력 834 MPa 이상, 인장강도 980 MPa 이상인 SCM 440 강이다.

압축하중은 Fig. 4(a)와 4(c)에 나타난 파트 2, 3과 시험기에 장착된 하중판을 이용하여 가한다. 시편과 파트 2 치구는 시편의 플랜지에 장착된 인서트와 2개의 볼트를 이용하여 Fig. 5(a)와 같이 체결한다. 시편의 하부는 Fig. 3(a)와 같이 포팅 재료를 사용하여 시편을 프레임 속에 고정된 뒤 다시 볼트를 사용하여 프레임을 파트 3 치구에 고정하는 형태가 된다. 인장시험에서는 Fig. 4에 보인 상부 치구와 하부 치구 모두(파트 1, 2, 3, 4, 혹은 5)를 사용한다. 형상 1, 2 시편의 상부와 파트 2 치구는 압축시험과 동일하게 2개의 볼트로 체결하였다. 형상 3의 경우 높은 인장하중을 지지할 것으로 예상되어 시편의 상부와 치구의 체결에 4개의 볼트를 이용하였다. 시편 하부의 경우에는 압축 시험과 달리 Fig. 5(b)와 같이 시편과 파트 3 치구를 관통하는 9개의 볼트를 이용하여 시편과 치구를 체결하였다.

본 논문에서 진행된 압축 및 인장 시험은 구조물에 대한 시험이므로 시험을 위한 표준규격이 제시되어 있지 않다. 따라서 치구의 설계와 시험방법에 대한 자세한 사항은 샌드위치에 대한 압축시험 규격인 ASTM C364[17]를 참고하였다. 하중의 속도는 분당 0.5 mm이다. 시험에 사용된 장비는 Zwick SP1200이고 최대하중은 120톤이다.

인장시험은 압축시험에 비해 좌굴이나 시편 정렬에 대한 민감도가 상대적으로 낮으므로, 분당 1 mm 속도로 하중을 가하였다. 압축하중인 경우 하중이 시편의 플랜지 면에 접촉분포하중의 형태로 가해지지만, 인장의 경우 체결 볼트를 통해 집중하중의 형태로 가해지게 된다. 시험 하중은 시편의 플랜지와 치구를 체결하는 볼트의 중심을 지나 가도록 설정하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 압축시험

총 3가지 형상의 샌드위치 구조에 대한 압축 파손하중 및

Table 1. Compressive failure loads and failure modes

Specimen ID	Failure load (kN)	Avg. failure load (kN)	Primary failure mode
Configuration 1-1	277	295	Face failure along material discontinuity line
Configuration 1-2	284		Face failure along material discontinuity line
Configuration 1-3	324		Face/core debonding
Configuration 2-1	226	226	Face failure along material discontinuity line
Configuration 2-2	225		Face failure along material discontinuity line
Configuration 3-1	262	291	Foam core failure
Configuration 3-2	320		Face/core debonding

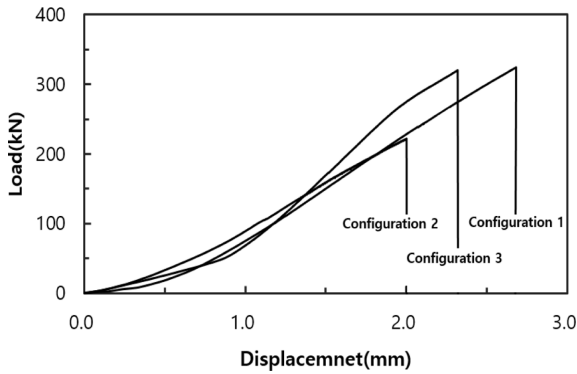


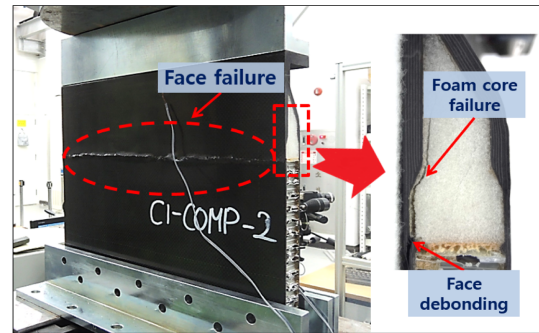
Fig. 6. Typical load-displacement curves under compression

파손모드를 요약하여 Table 1에 나타내었다. 압축하중에 대한 형상 1, 2, 3의 평균파손하중은 각각 295, 226, 291 kN으로 나타났다. 각 형상에 대한 전형적인 하중-변위 곡선은 Fig. 6에 제시하였다. 형상에 따라 정도의 차이는 있지만, 하중이 가해지는 초기에는 치구들의 접촉이 진행되는 과정에서 부분적으로 비선형성이 나타나지만 변위가 1 mm를 지나면서 하중-변위 곡선은 선형에 가까워진다. 하중-변위 곡선에서 국부적 파손으로 인한 피크는 발견되지 않고, 하중이 최대값에 도달한 후 급격한 지지하중 저하와 함께 최종파손이 발생하는 것을 알 수 있다.

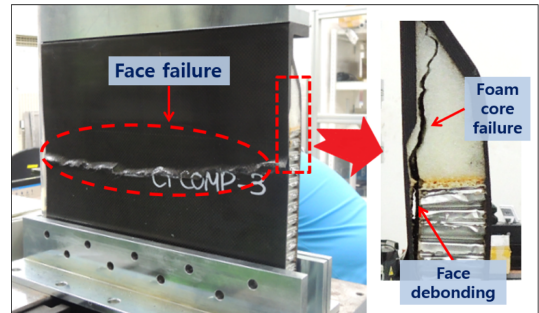
형상 1에 대한 시험 결과는 저자들의 선행연구[16]에서 자세히 설명하였고 본 논문에서는 독자들의 이해를 돕기 위해 그 결과를 요약해서 제시한다. 파손하중은 하중-변위 곡선상의 최대하중으로 정의한다. 형상 1의 3개 시편의 시험 결과 파손하중은 각 277, 284, 324 kN으로 나타났다.

총 3개 시편에 대한 시험을 수행한 결과 두 개(1, 2번) 시편에서는 Fig. 7(a)와 같이 복합재 면재의 압축파손과 폼 코어의 파손이 동시에 발생하였다. 면재의 파손은 알루미늄 허니콤 코어와 PMI 폼 코어가 만나는 재료불연속선을 따라 발생하였고, 꺾임이 없이 수직으로 서있는 면재(사진의 좌측 면재)에서만 발생하였다. 이러한 파손은 두 코어가 만나는 위치에서 면재가 국부적으로 휘어지는 제작상의 문제점에 기인한 것으로 판단된다. 반면에 허니콤 코어와 폼 코어가 만나는 지점에서 면재의 결함이 적었던 3번 시편은 다른 형태의 파손모드를 나타냈다. 이 경우에는 Fig. 7(b)에서와 같이 샌드위치 본체에서 허니콤 코어와 면재 사이의 디본딩이 발생할 때까지 재료불연속 지점에서의 면재 파손이 발생하지 않았고, 따라서 파손하중이 가장 높게 나타났다.

형상 2의 압축 거동도 형상 1의 거동과 유사하다. 3개 시편에 대한 시험을 수행하였으나 3번 시편에서는 초기에 면재와 코어의 디본딩이 발생하여 의미 있는 결과를 얻지 못하였다. 1번과 2번 시편의 파손하중은 각각 226, 225 kN으로 나타났다. Fig. 8에 보인 파손의 양상도 형상 1의 시편 1, 2와 유사하다. 파손은 종류가 다른 두 코어가 만나는 재료 불연속 지점에서 수직으로 서 있는 면재가 압축파손을 일



(a) Failure at material discontinuity



(b) Face debonding

Fig. 7. Failure of configuration 1 under compression [16]

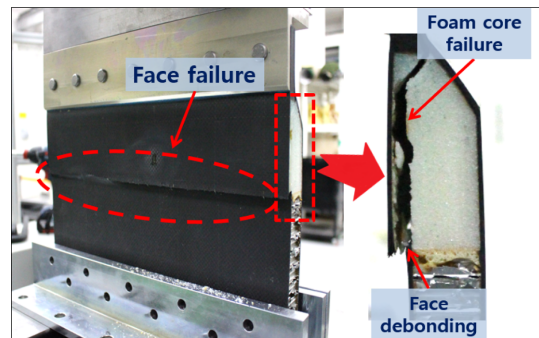
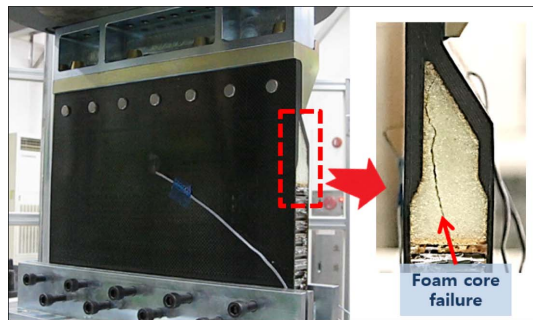
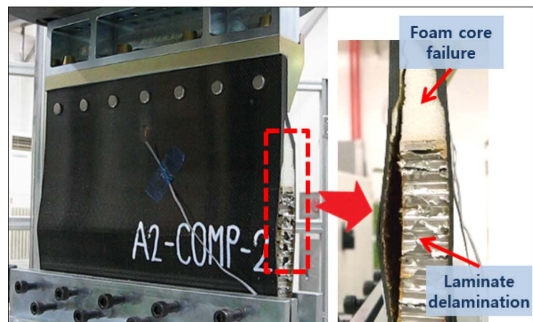


Fig. 8. Failure of configuration 2 under compression

키면서 구조적 기능을 상실하는 형태로 나타났다. 그러나 파손하중은 형상 1의 값보다 낮게 나타나는데, 이것은 면재의 두께 차이 때문으로 판단된다. Fig. 1(a)와 1(b)를 비교해보면, 형상 1에서는 샌드위치에서 단순 적층판으로 변하는 램프 영역에서 면재의 두께가 점진적으로 증가하는 반면, 형상 2에서는 면재의 두께가 일정하다가 갑자기 두꺼운 적층판이 된다. 이러한 형상의 차이가 형상 2의 수직 면재에 상대적으로 더 큰 응력을 부가하여 더 낮은 하중에서 파손이 발생한 것으로 판단된다. 형상 3의 하중-변위 곡선도 형상 1, 2와 유사한 형태를 보인다. 그러나, 형상 1과 2에서 나타났던 재료불연속 지점에서의 면재 압축파손은 나타나지 않았다. 파손양상은 두 시편에서 서로 다르게 나타났는데, Fig. 9에 보인 바와 같이 1번 시편의 경우 폼 코어의 전단파손이 주된 파손모드이고, 2번 시편의 경우 코어



(a) Foam core failure



(b) Face debonding

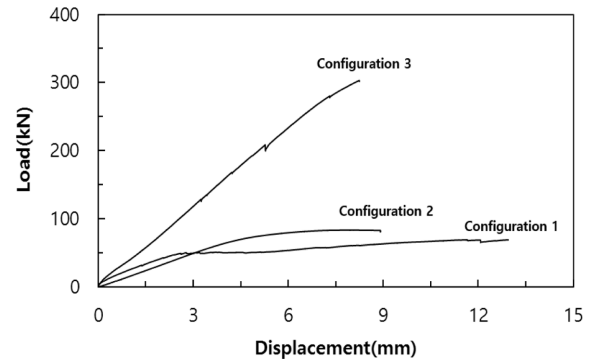
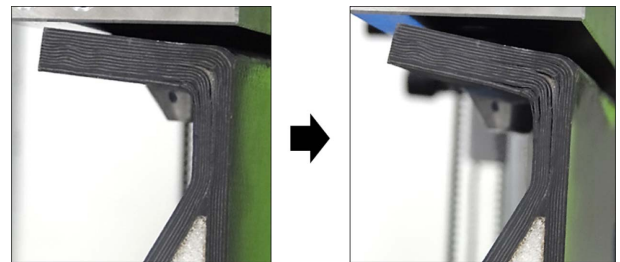
Fig. 9. Compressive failure (Configuration 3)

와 면재의 디본딩이 주된 파손모드이다. 파손하중은 각각 262 kN, 320 kN이다. 형상 3의 2번 시편의 파손모드와 형상 1의 3번 시편의 파손모드가 유사한데 파손하중도 비슷한 것을 알 수 있다.

3.2 인장시험

각 형상에 인장하중을 가하였을 때의 파손하중 및 파손모드는 Table 2에 나타내었다. 형상 1, 2, 3의 평균파손하중은 각각 47.3, 83.7, 291 kN으로 나타났다. Fig. 10에 각 형상에 대한 대표적인 하중-변위 곡선을 보였다.

앞에서도 밝힌 바와 같이 형상 1에 대한 결과는 저자들의 선행연구[16]에서 보고한 내용을 요약한 것이다. Fig. 10과 11에 보인 바와 같이 약 47 kN 정도의 하중이 가해질 때

**Fig. 10.** Typical load-displacement curves under tension**Fig. 11.** Failure development at the corner of flange (configuration 1) [16]

플랜지와 웹이 만나는 곡률부에서 육안으로 확인이 가능한 큰 층간분리 파손이 발생하고, 이때부터 지지하중은 거의 증가하지 않는다. 이러한 파손모드는 곡률부 인장시험의 전형적인 형태이다[18]. 압축하중의 경우와 마찬가지로 파손하중은 하중-변위 곡선 상의 최대값으로 정의하였고, 평균 파손하중은 69.1 kN, 균열 시작점의 평균하중은 47.3 kN이다. Fig. 11에 보인 바와 같이 총 3개 시편에 대한 인장시험 결과 모든 시편에서 동일한 파손모드 즉 복합재 플랜지 곡률부에서의 층간분리 파손이 나타났다.

층간분리 파손은 곡률부의 중립면에 가까운 여러 층과 층 사이에서 시작되어 점차 확장되었다. 두 개의 볼트를 통해 인장하중을 가하였기 때문에 Fig. 12에 보인 바와 같이 볼트 주변에서 시편의 변형이 상대적으로 더 크게 발생하

Table 2. Tensile failure loads and failure modes

Specimen ID	Failure load (kN)	Avg. failure load (kN)	Primary failure mode
Configuration 1-1	71.1(45.8*)	69.1(47.3*)	Delamination of solid laminate
Configuration 1-2	69.5(48.8*)		
Configuration 1-3	66.7(47.2*)		
Configuration 2-1	83.2	83.7	Bolt failure
Configuration 2-2	84.4		
Configuration 2-3	83.4		
Configuration 3-1	303	291	Fixture yielding
Configuration 3-2	279		

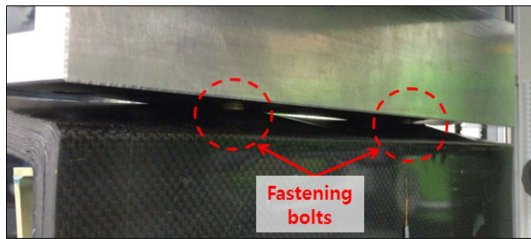
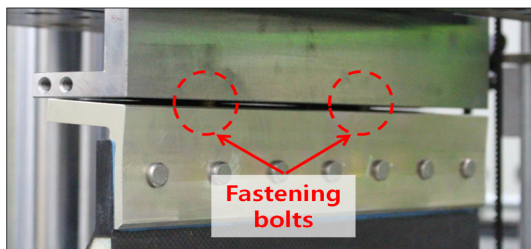


Fig. 12. Deformation of joint (configuration 1) [16]



(a) Bolts before (left) and after (right) test



(b) Deformation under tensile load

Fig. 13. Failure of configuration 2 under tension

는 것을 확인할 수 있었다.

형상 2의 경우 인장하중이 가해짐에 따라 초기에는 하중과 변위가 선형적인 관계를 보이지만, 하중이 80 kN 근처를 지나면서 그래프의 기울기는 점점 감소하며 하중이 더 이상 증가하지 않았다. 시험 결과 인장파손하중은 평균 83.7 kN으로 나타났다.

형상 1에 비하여는 파손하중이 증가하였지만 플랜지의 곡률부가 없는 구조라는 측면을 고려할 때 이 결과는 정상적이지 않다. 시험 후 시편과 치구를 분리하여 검사한 결과 Fig. 13에 보인 바와 같이 총 3개의 시편 모두에서 시편 자체에서는 심각한 파손이 발견되지 않았고, 금속 플랜지와 치구를 연결하는 볼트의 손상이 하중을 추가적으로 지지할 수 없게 만든 원인인 것을 확인하였다. 따라서 본 시험의 결과는 체결 구조의 파손하중으로 볼 수는 없을 것으로 판단된다. 치구와 금속 플랜지의 연결 볼트 수를 추가하여 시험을 하고자 하였으나 복합재와 금속 플랜지를 연결하는 하이록(HI-LOK) 핀과 주위 복합재의 미세한 손상이 발견되어 동일한 시편으로는 추가시험을 수행하지 않았다.

형상 2에 대한 인장시험 결과 금속 플랜지와 치구의 체결부를 보강할 필요가 있다고 판단하고, 형상 3의 인장시

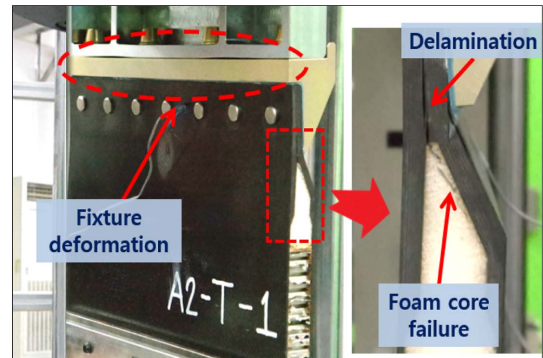


Fig. 14. Failure of configuration 3 under tension

험에서는 인장강도 1,100 MPa 이상을 나타내는 볼트 (보안상의 이유로 볼트명 미기재) 4개를 사용하여 플랜지와 치구를 체결하였다. Fig. 10에 보인 바와 같이 인장하중에 대한 형상 3의 하중-변위 곡선은 선형적으로 증가하다가 208 kN 지점에서 작은 피크가 발생한다. 이는 Fig. 14에 보인 단순 적층판 중립면 근처에서의 층간분리와 폼 코어의 파손으로 인한 것이다. 208 kN 근처에서의 작은 피크 후에도 지지하중은 계속 증가하다가 303 kN(시편 1), 279 kN(시편 2)의 하중에 도달하였을 때 더 이상 지지하중의 증가는 나타나지 않았다.

베어링(bearing), 전단파손(shear-out)과 같은 적층판의 치명적 파손이나 연결 핀의 파손이 없음에도 불구하고 하중이 증가하지 못한 이유는 치구(fixture)의 변형 때문으로 판명되었다. 하중을 제거한 후에도 치구(Fig. 4, 파트 5)가 원래의 형상으로 복원되지 않고 영구변형을 보인 것을 확인하였다. 치구를 더 강하게 제작하여 시험을 수행한다면 추가적인 하중을 지지할 수 있을 것으로 예상되나, 본 논문에서는 설계의 목적을 충분히 달성하여 추가 시험을 수행하지 않았다.

4. 결 론

본 논문에서는 인장과 압축하중을 효과적으로 지지할 수 있는 샌드위치 체결부 구조 설계를 위한 목적으로, 이종재료 코어와 탄소 복합재 면재로 구성된 세가지 형상의 샌드위치 구조물에 대해 인장 및 압축 시험을 수행하였다. 압축하중의 경우 허니콤 코어와 폼 코어가 만나는 재료불연속 지점에서 면재의 휘어짐이 시편의 파손하중에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 재료불연속 지점에서 면재의 국부적 파손이 발생하지 않을 경우, 면재와 코어의 디본딩이 발생할 때까지 지지하중은 증가하고, 체결부의 형상에 무관하게 파손하중이 비슷하게 나타났다. 또한 샌드위치에서 단순 적층판으로 변하는 램프 구간에서 면재의 두께를 점진적으로 변경하는 것도 파손하중을 높이는 요인임을 확인하였다. 시험 결과로부터, 압축하중만 고려한다면, 무게

와 제작성을 고려할 때 샌드위치와 플랜지를 복합재 일체형으로 제작하는 형상 1이 가장 우수한 하중지지능력을 가지는 것으로 판단된다. 그러나 인장하중을 받을 경우의 결과는 압축하중의 경우와는 다르다. 샌드위치와 플랜지를 복합재 일체형으로 제작한 형상 1의 경우 복합재 곡률부에서 굽힘모멘트를 받고, 이로 인해 낮은 하중에서 층간분리가 발생하여 하중 지지능력을 상실한다. 반면에 별도의 금속 플랜지를 제작하여 적층판에 체결할 경우 복합재 곡률부가 없으므로 층간분리에 대한 걱정을 하지 않아도 된다. 가장 개선된 형태인 형상 3의 시험 결과를 보면, 샌드위치 구조물의 1차적 파손모드는 적층판의 층간분리와 폼 코어의 전단파손이고, 압축파손하중 291 kN과 비슷한 수준의 하중을 지지함을 확인하였다. 3가지 형상에 대한 인장 및 압축시험을 종합하면, 복합재 플랜지 대신 휨에 강한 형태의 립으로 보강된 금속 플랜지를 사용한 체결이 가장 효과적인 구조로 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 및 (주)한국화이바의 지원을 받아 수행 되었습니다. 또한 2017년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2017R1A5A1015311).

REFERENCES

1. Belingardi, G., Cavatorta, M.P., and Duella, R., "Material Characterization of a Composite-Foam Sandwich for the front Structure of a High Speed Train", *Composite Structures*, Vol. 61, No. 1-2, 2003, pp. 13-25.
2. Zenkert, D., Shipsha, A., Bull, P., and Hayman, B., "Damage Tolerance Assessment of Composite Sandwich Panels with Localized Damage", *Composites Science and Technology*, Vol. 65, No. 15-16, 2005, pp. 2597-2611.
3. Kim, J.S., Lee, S.J., and Shin, K.B., "Manufacturing and Structural Safety Evaluation of a Composite Train Carbody", *Composite Structures*, Vol. 78, No. 4, 2007, pp. 468-476.
4. Leijten, J., Harald, E.N., Bergsma, O.K., and Beukers, A., "Experimental Study of the Low-velocity Impact Behaviour of Primary Sandwich Structures in Aircraft", *Composites: Part A*, Vol. 40, No. 2, 2009, pp. 164-175.
5. Thomsen, O.T., "Sandwich Materials for Wind Turbine Blades - Present and Future", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Vol. 11, No. 1, 2009, pp. 17-26.
6. Baral, N., Cartie, D.D.R., Partridge, I.K., Baley, C., and Davies, P., "Improved Impact Performance of Marine Sandwich Panels using Through Thickness Reinforcement", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 41, No. 2, 2010, pp. 117-123.
7. Zinno, A., Fusco, E., Prota, A., and Manfredi, G., "Multiscale Approach for the Design of Composite Sandwich Structures for Train Application", *Composite Structures*, Vol. 92, No. 9, 2010, pp. 2208-2219.
8. Cho, H.K., and Rhee, J., "Vibration in a Satellite Structure with a Laminate Composite Hybrid Sandwich Panel", *Composite Structures*, Vol. 93, No. 10, 2011, pp. 2566-2574.
9. Choi, B.H., Shin, S.J., Song, M.H., Choi, J.H., and Kweon, J.H., "Strength of Sandwich-to-Laminate Single-lap Bonded Joints in Elevated Temperature and Wet Condition", *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 38, No.11, 2010, pp. 1115-1122.
10. Heimbs, S., and Pein, M., "Failure Behaviour of Honeycomb Sandwich Corner Joints and Inserts", *Composite Structures*, Vol. 89, No. 4, 2009, pp. 575-588.
11. Kim, K.S., An, J.M., Jang, Y.S., and Yi, J.M., "Strength Improvement of Insert Joint for Composite Sandwich Structure", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 38, No. 1, 2010, pp. 29-34.
12. Lim, J.W., and Lee, D.G., "Development of the Hybrid Insert for Composite Sandwich Satellite Structures", *Composites: Part A*, Vol. 42, No. 8, 2011, pp. 1040-1048.
13. Kuczma, S.K., and Vizzini, A.J., "Failure of Sandwich to Laminate Tapered Composite Structures", *Journal of the American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Vol. 37, No. 2, 1999, pp. 227-231.
14. Paris, I.L., "Characterization of Composites Sandwich Ramp Failure Under Tensile Loading", *Proceedings of the 17th International Conference on Composite Materials*, Edinburgh, UK, Jul. 2009.
15. Clifford, S.M., Manager, C.I.C., and Clyne, T.W., "Characterisation of a Glass-fiber Reinforced Vinylester to Steel Joint for Use between a Naval GRP Superstructure and a Steel Hull", *Composite Structures*, Vol. 57, No. 1-4, 2002, pp. 59-66.
16. Kwak, B.S., Kim, H.I., Dong, S.J., Choi, J.H., and Kweon, J. H., "An Experimental Study on the Failure of a Novel Composite Sandwich Structure", *Composites Research*, Vol. 29, No. 4, 2016, pp. 209-215.
17. Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions, ASTM Standard C364.
18. Kim, J.H., Han, J.S., Bae, B.H., Choi, J.H., and Kweon, J.H., "Manufacturing and Structural Analysis of Thick Composite Spar using AFP Machine", *Composite Research*, Vol. 28, No. 4, 2015, pp. 212-218.