

풀아웃 하중을 받는 카본/BMI 샌드위치 복합재 체결부 파손특성 연구

이경찬*[†] · 최영호* · 이관우* · 심재훈* · 정영인*

Failure Characteristics of Carbon/BMI Sandwich Composite Joint under Pull-out Loading

Gyeong-Chan Lee*[†], Young-Ho Choi*, Kowan-Woo Lee*, Jae-Hoon Sim*, Young-In Jung*

ABSTRACT: The purpose of this paper is to investigate failure characteristics of Carbon/BMI-Nomex honeycomb sandwich on design parameters. A total of 6 types sandwich specimens were manufactured according to core height, face thickness and density, and environmental condition were applied to evaluate temperature and humidity effects of one of these specimens. The test results show that the core shear buckling loads was commonly observed in all specimens except for the joint with density of 64 kg/m³. After core shear buckling, however, the joint carried additional loads over the buckling loads and then finally failed in the upper face and lower face at the same time. In the case of specimen having high stiffness, the maximum failure load was low due to interfacial failure of the upper face and core without initial core shear buckling. The ETW1 and ETW2 conditions, which were carried out to evaluate the environmental condition of the sandwich specimen, show an initial failure mode which was significantly different from RTD condition. Also, the ETW2 condition with increased temperature under the same humidity shows that the core shear buckling load was 18% less than ETW1 condition.

초 록: 본 연구에서는 카본/BMI 면재와 노멕스 허니콤 코어를 가지는 샌드위치 포팅 체결부의 다양한 설계변수에 대한 파손특성 연구를 수행하였다. 샌드위치 시편은 코어 높이, 면재 두께 및 밀도에 따라 총 6종류가 제작되었고, 이중 1종류의 시편에 대해 온/습도 효과를 보기 위해 환경 조건이 가해졌다. 시험 결과 밀도가 64 kg/m³ 코어를 제외한 모든 시편에서 코어의 전단좌굴이 초기 파손모드로 나타났으며, 이후 하중을 지지하다 윗면재 파손과 동시에 아랫면재에 볼트가 파고드는 파손형상이 나타났다. 하지만 밀도에 의해 높은 강성을 가지는 시편의 경우 초기 전단좌굴 발생 없이 윗면재와 코어의 계면파손에 의해 낮은 최대파손하중을 나타냈다. 샌드위치 시편의 환경적 영향 평가를 위해 수행된 ETW1(82°C, Wet)과 ETW2(177°C, Wet)의 경우 RTD(24°C, Dry) 조건과 확연히 다른 초기 파손모드를 보였으며, 동일한 습도조건 하에 온도가 상승된 ETW2는 ETW1보다 전단좌굴 하중이 약 18% 감소되는 경향을 보였다.

Key Words: 카본/BMI(Carbon/BMI), 샌드위치 복합재(Sandwich Composite), 포팅체결부(Potting joint), 환경조건(Environmental condition)

1. 서 론

샌드위치 복합재(sandwich composite) 구조물은 높은 비

강도, 비강성 특성을 가진 면재(face)와 경량의 심재(core)로 구성된 복합 구조물로서, 각각 면내하중(in-plane load)과 횡전단하중(transverse shear load)을 지지하도록 설계된

Received 6 March 2017, received in revised form 27 April 2017, accepted 28 April 2017

*Researcher, Defense Agency for Technology and Quality

*[†]Researcher, Defense Agency for Technology and Quality, Corresponding author (E-mail: lgchan@dtqa.re.kr)

다. 샌드위치 복합재는 최소한의 무게 증가로 굽힘 강성을 획기적으로 증가시킬 수 있는 재료로써, 굽힘 및 압축하중을 받는 구조물에 적용될 경우 금속 구조물에 비해 50% 이상의 중량 절감을 이룰 수 있으며, 다양한 하중환경에 따라 면재와 심재를 적절히 조합하여 파괴인성 및 피로특성을 상당히 향상시킬 수 있다. 또한 우수한 피탐성능 및 구조전달 소음 저감 효과 등에 따라 오래 전부터 국방무기체계 분야에서 우수한 구조물로 주목 받아왔다.

그러나 샌드위치 복합재 구조물의 여러 가지 장점에도 불구하고 실제 국방무기체계 함정분야에서는 수중함 소나 돔 및 탑재장비 베이스 등의 2차 구조물에 제한적으로 적용되고 있다. 이는 샌드위치 구조 특성상 집중하중에 취약하여 별도의 보강된 체결부 없이 다른 구조물과 기계적 체결이 어렵기 때문이다. 또한, 체결부 강도에 영향을 미치는 요소들은 체결부 형상, 타입, 충전재 종류 및 접착 방식에 따라 달라지며, 더욱이 온도 및 습도와 같이 환경적 요인에도 민감하게 반응한다. 따라서 설계단계부터 보수적이며 다양한 설계강도 값들을 요구하는 함정분야에서 샌드위치 복합재 구조물의 적용을 위해서는 다양한 하중조건 및 변수에 의한 파손 메커니즘 분석과 재료강도 평가를 통해 신뢰성 있는 데이터 획득이 필수적이다.

현재까지 조사된 샌드위치 구조물에 관한 연구는 주로 샌드위치 물성치, 하중 조건에 따른 파손특성 등 기계적 특성 및 해석적 연구가 주로 진행되어 왔으며, 샌드위치 체결부 자체에 대한 특성 및 환경적 영향에 의한 연구는 제한적으로 수행되었다.

Yeh[1]는 Polymer Matrix Composite(PMC) 허니콤 샌드위치 조인트 패널에 횡전단하중을 가해 파손특성과 구조적 거동에 대해 연구하였으며, Demelio[2]는 패스너로 체결된 샌드위치 복합재 평판에 대해 정적/피로시험을 수행하였다. Heimbs[3]는 노맥스 코어와 강섬유 복합재 면재를 적용한 인서트(insert) 및 코너(corner) 타입의 샌드위치 체결부를 제작하여 풀아웃(pull-out), 전단 및 굽힘에 대해 각각 시험을 수행하였으며, LS-DYNA를 통해 수행한 해석값과 비교 분석 하였다. Bunyanichakul[4]는 인서트 체결부를 가지는 샌드위치 시편에 대해 풀아웃 시험을 수행하여 인서트 주위에서의 코어 손상 및 진전에 대해 연구하였다. Park[5]은 총 60여개의 다양한 알루미늄 허니콤 샌드위치 체결부 시편에 대해 전단하중 시험을 수행하여 강도특성 및 체결부 파손 양상을 규명하였으며, 수치적 계산을 통해 설계허용치와 시험 결과를 비교분석 하였다. Ishai[6]은 하이브리드 탄소유리 섬유 강화 플라스틱 면재와 유리기로 강화 플라스틱 폼 코어로 설계된 샌드위치를 제작하여 최대 2년동안 온·습도환경에 노출시킨 후 충격시험을 수행하였으며, 샌드위치 복합재 구조물의 환경적 영향에 따른 파손 특성과 충격에너지의 연관성에 대해 분석하였다. Katzman[7]은 다양한 환경 조건과 제안된 다층확산모델(multi-layer

diffusion model)에 대해 샌드위치 구조의 수분 발산 실험을 수행하였으며, Avilés[8]은 95% 상대습도와 바닷물에 노출된 E-glass/polyester 면재와 PVC 폼 코어로 이루어진 샌드위치 구조물의 흡습 거동에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 샌드위치 복합재 구조물의 함정분야적용을 위해 샌드위치 중심에 포팅재(potting material)를 채운 후 홀(hole)을 가공하여 기계적 체결이 가능하도록 체결부 형상을 설계하였으며, 코어 높이, 밀도, 면재 두께 및 환경 조건에 따라 풀아웃 하중 시험을 수행하였다. 이를 통해 체결부의 파손 메커니즘을 분석하고, 파손하중의 설계 허용치에 대한 데이터베이스를 구축하고자 한다.

2. 시 험

2.1 샌드위치 시편 자원 및 제작

샌드위치 시편에 사용된 면재는 Cycom사의 carbon/bismaleimide(BMI) 프리프레그(prepreg)인 5250-4/T650-35 3K70PW이고, 코어는 M.C. Gill사의 노맥스 허니콤 코어인 Gillcore HD322이다. 면재와 코어의 접착에는 Cytec Engineered Materials사의 Metbond 2550 G를 사용하였으며, 샌드위치 시편 중심에는 다른 구조물과의 체결을 위한 코어 보강용 포팅재로 Magnolia Plastics사의 Magnobond 6398을 사용하였다. 시편은 코어 높이, 코어 밀도, 면재 두께에 대해 형상 인자를 달리하여 총 6종류의 시편을 제작하였으며, 환경조건용 시편 SPOP5를 제외한 각각 종류별로 5개씩, 총 40개의 샌드위치 포팅 타입 시편이 제작되었다. 시편의 크기는 120×120(가로×세로, 단위: mm)이며, 상세한 시편 정보 및 형상은 Table 1과 Fig. 1에 각각 나타내었다.

2.2 시험 셋업(Test set-up)

시험에 사용된 재료시험기는 Instron 5582이고 분당 1.27 mm의 속도로 시험시편에 하중을 가하였다. 풀아웃(Pull-out) 시험에 사용된 치구는 샌드위치 시편에 정확한 하중 전달을 위해 윗면재와 치구가 충분히 접촉할 수 있도록 자체 제작하였으며 형상은 Fig. 2와 같다. 시편은 각 종류별 5개씩 총 40개의 샌드위치 시편을 제작하여 수행되었으며, 실

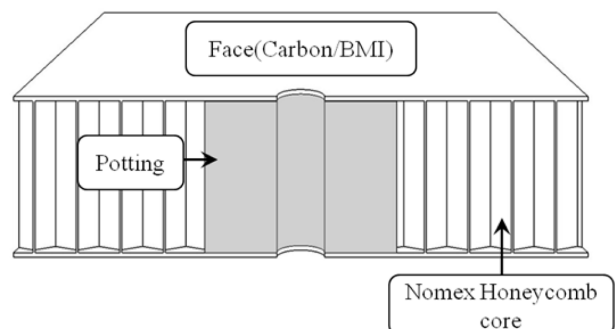


Fig. 1. Configuration of the sandwich potting joint specimen

Table 1. Specimen details

Specimen ID	Fastener		Face sheet		Core		
	Type	Dia. (mm)	Stacking sequence	No. of Plies	Type	Height (mm)	Density (kg/m ³)
SPOP1	NAS6403	4.76	[45/0/45]	3	Nomex honeycomb	9.53	32
SPOP2			[45/0/45]	3		15	32
SPOP3			[45/0/45]	3		25.4	32
SPOP4			[45/0]	2		25.4	64
SPOP5			[45/0/45]	3		25.4	64
SPOP6			[45/0/0/45]	4		25.4	64

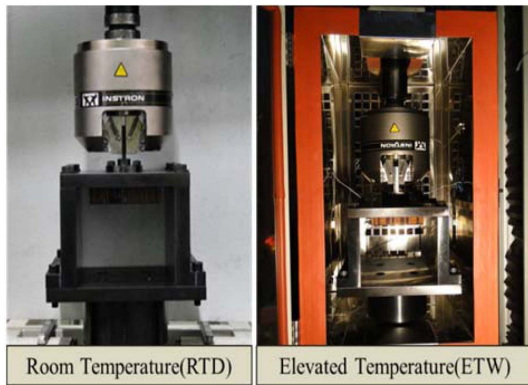


Fig. 2. Experimental set-up in various environmental condition

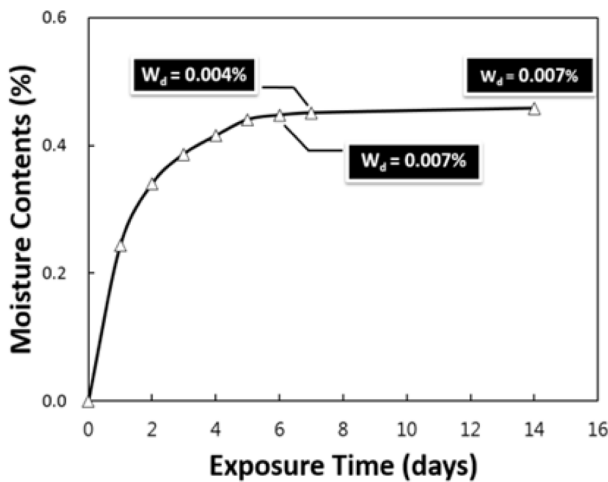


Fig. 3. A typical moisture content history of the face traveler

험 후 결과 분석에 적용된 하중은 재료시험기의 액츄에이터(actuator)에서 제공된 변위이다.

샌드위치 시편 SPOP1~SPOP6은 기본적으로 상온 조건(RTD, Room Temp. Dry : 24°C)에서 풀아웃 시험이 수행되었으며, 선별된 SPOP5에 대해서는 환경적 영향을 평가하기 위해 일정기간 환경챔버에서 흡습 과정을 거친 후, 2가지 온도조건(ETW, Elevated Temp. Wet : 82°C/177°C)에서 추가 시험을 수행하였다.

SPOP5 시편은 동일한 크기 및 적층순서를 가진 흡습을 측정용 트래블러(traveler)와 함께 24°C, 상대습도 45% 조건으로 3일간 오븐에서 건조된 후 최초시편질량(W_b)을 정의했다. 이 후 환경챔버에서 70°C, 상대습도 85%로 보관되었으며, ASTM D5229에 따라 최초 7일간 1일 1회(24시간 간격) 시편질량(W_i)을 측정하여 이전시편질량(W_{i-1})과 흡습 변화량(1)을 측정하였다. 규정에 따라 수분에 대한 포화여부는 구조물의 무게변화를 기준으로 판단되었으며, 면재의 흡습에 대한 영향성을 고려하기 위해 트래블러의 흡습 변화량이 0.01% 이내로 2번 연속 지속된다면 흡습 평형상태로 간주하고 샌드위치 시편이 포화되었다고 가정한다.

$$\text{Weight Gain}(\%) = \frac{w_i - w_{i-1}}{w_b} = \frac{w_d}{w_b} < 0.01(\%) \quad (1)$$

W_i = 현재시편질량

W_{i-1} = 이전시편질량

W_b = 최초시편질량

3. 시험결과 및 검토

3.1 파손특성 분석

본 연구에 사용된 6종류의 샌드위치 시편의 풀아웃 하중에 대한 포팅 체결부의 파손 형상은 코어의 밀도에 따라 크게 2가지 형태를 보이고 있다. Fig. 4(a)는 RTD조건에서 코어 밀도가 32 kg/m³를 가지는 샌드위치 체결부의 전형적인 하중-변위 곡선을 보여주고 있으며, 3 지점으로 구분되는 일반적인 파손형상이 나타났다[9]. 하중변위 곡선에서 1, 2, 3 지점은 각각 코어의 전단좌굴, 전단파손, 아랫면재 파손과 더불어 윗면재 파손이 발생하는 것을 의미하며, 각 지점의 파손 모드는 Fig. 4(b)를 통해 정확하게 확인 할 수 있다.

코어의 전단좌굴은 항상 첫번째 파손모드로 관찰되며 이를 확인하기 위해 추가 시편으로 동일한 시험을 수행하여 이 위치에서 하중을 제거하고 시편을 절단하여 단면을 검사하는 방법으로 확인하였다. 그러나 코어의 전단좌굴이 발생한 후에도 지지되고 있는 하중의 뚜렷한 감소가 나타나지 않았다. 2 지점에서는 코어의 전단좌굴이 점진적으로

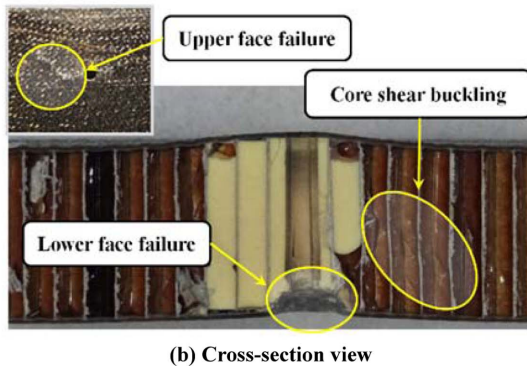
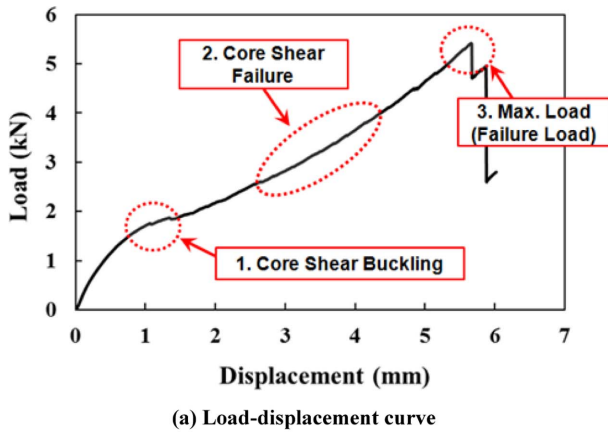


Fig. 4. 1st Failure behavior of the sandwich joint (RTD, 32 kg/m³)

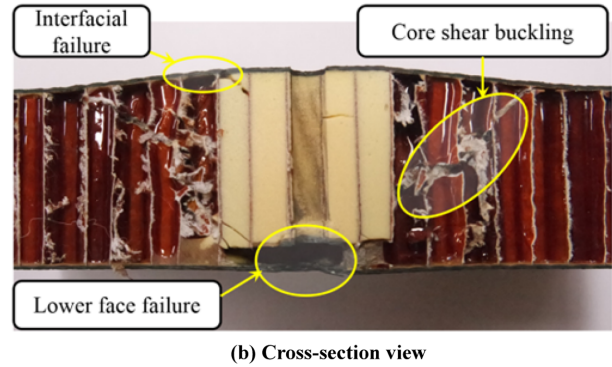
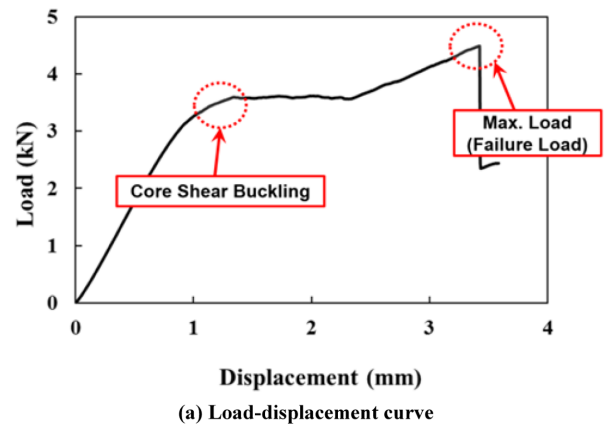


Fig. 6. 3rd Failure behavior of the sandwich joint (ETW1, 64 kg/m³)

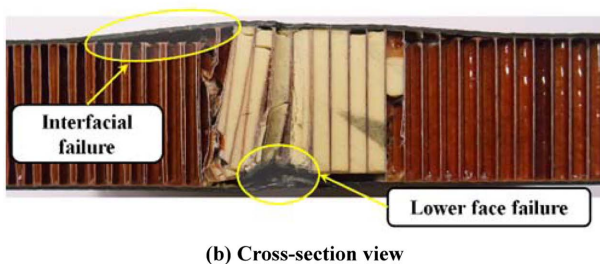
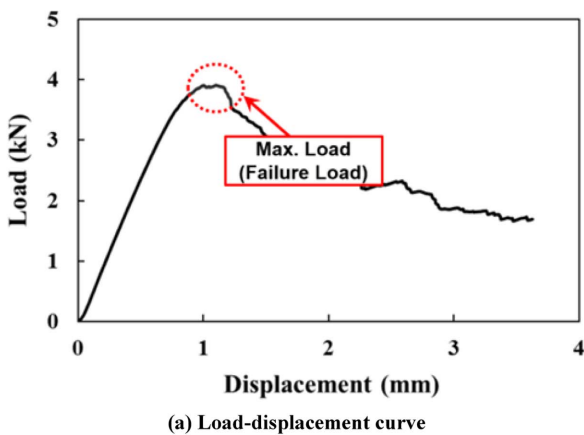


Fig. 5. 2nd Failure behavior of the sandwich joint (RTD, 64 kg/m³)

진행되어 코어의 전단파손으로 진전되는 것을 볼 수 있다. 3지점에서는 아랫면재에 볼트헤드가 파고들며 파손이 발생되다 최종적으로 윗면재 파손이 발생하며 지지하중이 크게 감소하면서 실질적으로 구조물의 기능을 상실하였다. 이와 달리 Fig. 5(a)는 RTD 조건에서 코어 밀도가 64 kg/m³ 인 샌드위치 시편의 전형적인 하중-변위 곡선과 파손 형상을 나타내고 있으며, 하중의 증가됨에 따라 변위 1 mm 부근에서 코어와 윗면재의 갑작스런 파손 현상에 의해 지지하중이 급격하게 감소하는 결과가 나타났으며, 이후 아랫면재에 하중이 집중되어 볼트헤드가 파고들며 샌드위치가 파손되는 특성이 나타났다(Fig. 5(b)).

환경적 영향을 평가하기 위해 흡습과정을 거친 SPOP5 시편 ETW1(82°C, wet)의 경우 Fig. 6(a)와 같이 전단좌굴 이후 지속적으로 하중을 지지하다 코어와 윗면재의 계면파손이 발생되며 최종 파손되었다(Fig. 6(b)). ETW2(177°C, wet)는 코어에 전단좌굴 이은 윗면재 파손이 최종적으로 발생하는 일반적인 파손 형상을 보였으며, 하중-변위 곡선과 파손형상은 Fig. 4와 동일하다.

3.2 파손하중 검토

풀아웃 시험에서 파손하중은 구조물이 지지할 수 있는 최대 하중으로 정의 하였으며, Fig. 4(a), Fig. 5(a), Fig. 6(a) 파

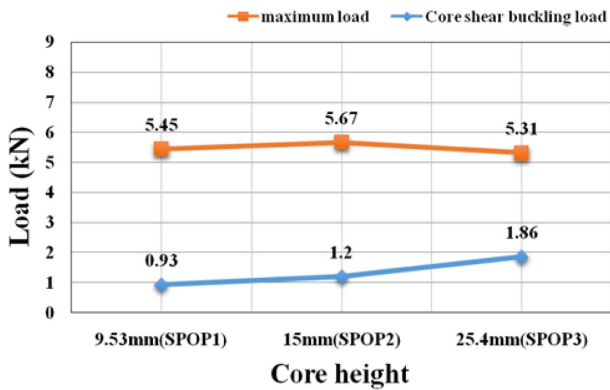


Fig. 7. Effect of core height under pull-out failure loads

손특성 분석 그래프에 Maximum load 지점을 의미한다.

Fig. 7은 코어의 높이가 다른 포팅 체결부에 대한 파손하중 결과를 나타낸 그래프이다. 대상 시편은 SPOP1(9.53 mm), SPOP2(15 mm), SPOP3(25.4 mm)이며, 코어 높이를 제외한 모든 인자는 동일하게 적용되었다. 세 시편의 파손형상은 동일하게 변위 1~2 mm 사이에서 코어의 전단좌굴에 의해 하중-변위 기울기가 감소하였으며, 이후에도 면재의 구조적 강성과 강도에 의해 하중을 지지하다 각각 5.45 kN, 5.67 kN, 5.31 kN의 최대 파손하중에 도달하였다. SPOP1과 SPOP2의 경우 코어의 높이가 약 57% 증가할 때 최대파손하중은 약 4% 정도 미세하게 증가하는데 비해 SPOP3의 경우 코어의 높이가 167%로 증가하였음에도 오히려 최대파손하중이 약 3%로 감소하는 결과를 보였다. 이는 최종적인 파손모드 자체가 아랫면재에 볼트가 파고드는 집중하중에 의해 발생하였기 때문에 전체적인 최대파손하중 데이터의 경향성이 적은 것으로 판단된다. 하지만 코어의 전단좌굴 하중에 대한 코어 높이의 효과는 다른 결과를 보인다. 코어의 높이가 9.53 mm에서 15 mm, 25.4 mm로 증가함에 따라 전단좌굴하중은 각각 약 29%, 100% 증가하였으며, 이는 코어의 높이 증가에 따라 샌드위치 단면의 굽힘 강성이 커져 전단좌굴하중에 대한 저항력이 향상 되었기 때문이다.

Fig. 8은 면재 두께의 영향에 따른 파손하중 결과를 나타내고 있으며, 대상 시편은 SPOP4(2 ply), SPOP5(3 ply), SPOP6(4 ply) 이다. 세 시편은 두께 변수 이외에 모든 조건이 동일하며, 코어의 밀도는 64 kg/m^3 이다. 세 시편 모두 변위가 약 1 mm 발생하였을 때 코어와 윗면재 사이에 계면파손이 발생하였으며, 이 때 각각 3.94 kN, 3.93 kN, 4.6 kN의 상대적으로 낮은 최대파손하중이 나타났다. 이는 코어의 전단좌굴 발생 이후 면재 파손이 발생하는 일반적인 파손형상과 달리 높은 밀도의 영향으로 코어의 전단 강도에 비해 코어와 면재 사이의 계면 강도가 낮아 발생된 것으로 판단된다. 이러한 파손형상에 의해 면재의 두께가 2 ply와 3 ply일 때의 최대파손하중은 거의 동일한 수치를 보였으

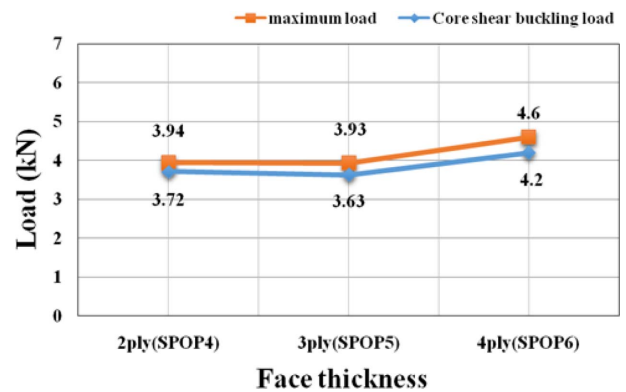


Fig. 8. Effect of face thickness under pull-out failure loads

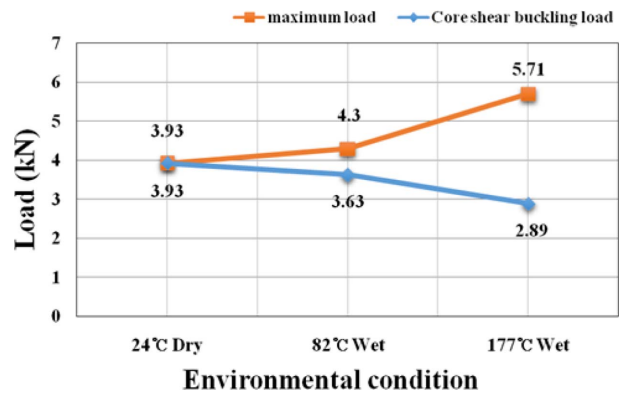


Fig. 9. Effect of environmental conditions under pull-out loads

며, 4 ply의 경우에는 약 17%의 증가를 보였다.

Fig. 9는 포팅 체결부를 가지는 샌드위치 시편의 환경조건에 대한 파손하중 결과를 나타낸 그래프이다. 환경조건에 대한 비교는 시편 SPOP5를 대상으로 수행되었으며, 시험 결과 최대파손하중은 RTD 조건보다 ETW1, ETW2 조건이 각각 10%, 45% 더 높게 나타났다. 이러한 결과는 RTD 조건에서 코어와 윗면재의 계면파손에 의해 윗면재가 하중을 지지하는 능력을 상실하여 아랫면재에 하중이 집중되어 일찍 파손이 발생하였기 때문이다. ETW1과 ETW2의 경우 더 높은 온도인 ETW2가 약 33% 높은 하중을 지지했으며, 이는 높은 온도에 의한 열화 효과로 코어의 전단 좌굴이 발생하여 잠시나마 효과적으로 풀아웃 하중을 지지했지만 이후 ETW1의 경우 코어와 윗면재의 계면파손으로 풀아웃 하중이 아랫면재에 집중되어 더 낮은 하중에서 파손이 발생하였기 때문이다. 전단좌굴의 경우 RTD 조건에서는 계면파손 현상으로 인해 전단좌굴에 의한 파손은 미비하게 발생하였으며, ETW2보다 ETW1이 전단좌굴하중은 약 18% 낮아지는 결과를 보였다. 이는 전단 좌굴하중이 코어의 강성에 지배적으로 영향을 받으며, 온도 증가에 따라 코어의 열화 효과에 의해 강성이 저하되어 지지하중이 더 감소된 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 풀아웃 하중을 받는 카본/BMI 샌드위치 포팅 체결부의 다양한 설계변수에 대한 파손특성을 연구하였다. 초기 샌드위치 파손에 영향을 미친 전형적인 파손 모드는 코어의 전단좌굴이며, 이후 하중을 지지하며 좌굴이 진전되다 최종적으로 윗면재 파손과 동시에 아랫면재에 볼트헤드가 파고드는 파손형상을 보였다. 예외적으로 코어 밀도가 64 kg/cm^3 인 샌드위치는 코어의 전단강도에 비해 코어와 면재 사이의 계면강도가 낮아 초기에 윗면재와 코어 사이의 계면파손이 발생되었고 이로 인해 하중이 아랫면재에 집중되어 낮은 최대파손하중을 보였다. 하지만 이러한 밀도를 가지는 샌드위치에 대해 ETW1(82°C, wet)과 ETW2(177°C, wet)의 환경적 조건에서 시험을 수행한 결과 온 초기에 코어의 전단좌굴 파손이 발생되었으며, 이로 인해 RTD 조건 보다 오히려 더 높은 최대파손하중을 나타냈다. 하지만 온도 조건만 서로 다른 ETW1과 ETW2의 전단좌굴 하중 결과를 통해 온도 증가에 따라 전단좌굴 하중이 감소하는 것을 알 수 있으며, 이는 온도가 코어의 강성에 주요한 영향을 미친다는 것으로 판단할 수 있다.

REFERENCES

1. (International Journal) Yeh, H.Y., and Nguyen, S.V., "Failure Analyses of Polymer Matrix Composite (PMC) Honeycomb Sandwich Joint Panels," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 23, No.9, 2004, pp. 923-939.
2. (International Journal) Demelio, G., Genovese, K., and Pappal-
ettere, C., "An Experimental Investigation of Static and Fatigue Behaviour of Sandwich Composite Panels Joined by Fasteners," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 32, No. 4, 2001, pp. 299-308.
3. (International Journal) Heimbs, S., and Pein, M., "Failure Behaviour of Honeycomb Sandwich Corner Joints and Inserts," *Composites Structures*, Vol. 89, No. 4, 2008, pp.575-588.
4. (International Journal) Bunyawanchakul, P., Castanie, B., and Barrau, J.J., "Experimental and Numerical Analysis of Inserts in Sandwich Structures," *Applied Composite Materials*, Vol. 12, No. 3-4, 2005, pp. 177-191.
5. (Korean Journal) Park, Y.B., Kweon, J.H., Choi, J.H., and Cho, H.I., "Effect of Joining Methods on the Failure of Aluminum Honeycomb Sandwich Joints under Shear Loading," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 39, No. 7, 2011, pp. 643-651.
6. (International Journal) Ishai, O., Hiel, C., and Luft, M., "Long-term Hygrothermal Effects on Damage Tolerance of Hybrid Composite Sandwich Panels," *Composite*, Vol. 26, No. 1, 1995, pp. 47-55.
7. (International Journal) Katzman, H.A., Castaneda, R.M., and Lee, H.S., "Moisture Diffusion in Composite Sandwich Structures," *Composite: Part A*, Vol.39, No.5, 2008, pp.887-892.
8. (International Journal) Avilés, F., and Aguilar-Montero, M., "Moisture Absorption in Foam-cored Composite Sandwich Structures," *Polymer Composites*, Vol. 31, No. 4, 2009, pp. 714-722.
9. (Korean Journal) Park, Y.B., Yang, H.J., Kweon, J.H., Choi, J.H., and Cho, H.I., "Failure of Composite Sandwich Joints under Pull-out Loading," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 14, No. 1, 2011, pp. 17-23.