

## 技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.7.643

## 전단하중을 받는 알루미늄 하니콤 샌드위치의 체결방식의 체결부의 파손에 미치는 영향 연구

박용빈\*, 권진회\*\*, 최진호\*\*\*, 조현일\*\*\*\*

### Effect of joining methods on the failure of aluminum honeycomb sandwich joints under shear loading

Yong-Bin Park\*, Jin-Hwe Kweon\*\*, Jin-Ho Choi\*\*\* and Hyun-Il Cho\*\*\*\*

#### ABSTRACT

An experimental study on the failure of aluminum sandwich joints under shear loading was conducted. A total of 60 specimens including three different insert types and two different potting types were fabricated and tested. The test results showed that the through-clearance type of joint fails at the highest load among insert type joints. The failure load of the potted joints with the dimple washer increased by 10% compared to the simple potted joints. As expected, the shear failure load became higher in accordance with the face thickness increase. It was also found that the upper face in contact with the loading tool is more dominant over the failure load.

#### 초 록

본 논문에서는 전단하중을 받는 다양한 알루미늄 샌드위치 체결부의 파손 특성에 대한 시험 연구를 수행하였다. 3종류의 인서트 형식 체결부와 2종류의 포팅 형식 체결부에 대해 총 60개의 시편을 제작하여 시험을 수행하였다. 시험 결과, 인서트 형식 체결부의 경우 쓰루 클리어런스(through-clearance) 인서트를 사용한 경우의 파손하중이 가장 높게 나타났다. 포팅 형식 체결부의 경우 딩플 와셔(dimple washer)가 있을 때 전단하중이 약 10% 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 예상대로 면재의 두께가 증가할수록 전단파손하중도 증가하고, 특히 하중치구와 접촉하고 있는 상부 면재의 효과가 지배적인 것을 확인하였다.

**Key Words** : Al sandwich structure(알루미늄 샌드위치 구조물), Honeycomb core(하니콤 코어), Shear test(전단 시험), Insert(인서트), Joint(체결부)

#### 1. 서 론

세계적으로 에너지 소비가 적은 고효율 수송 기계에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데, 항공기 중량절감을 위한 노력도 지속적으로 이루어지고 있다. 중량절감을 위해 다양한 형태와 재질의 구조에 대한 연구가 진행되고 있으며 그 중 샌드위치 구조는 최소한의 중량 증가로 굽힘 강성을 높일 수 있는 효율적인 형태로 항공우주 산업을

† 2011년 3월 30일 접수 ~ 2011년 6월 8일 심사완료

\* 정회원, 경상대학교 대학원 항공우주공학과

\*\* 정회원, 경상대학교 항공우주시스템공학과,  
항공기부품기술연구소

교신저자, E-mail : jhkweon@gnu.ac.kr

경남 진주시 가좌동 900

\*\*\* 정회원, 경상대학교 기계공학부, 항공기부품기술연구소

\*\*\*\* 한국항공우주산업(주)

비롯하여 다양한 분야에 적용되고 있다[1].

샌드위치 구조물은 면내하중을 지지하는 면재(face)와 횡하중(transverse load) 즉, 면외 하중을 지지하는 코어(core)로 구성된 복합 구조물이다. 항공기의 구조상으로 면재는 I-보의 플랜지와 같은 역할을 담당하고, 코어는 웹의 역할을 담당하게 된다. 일반적으로 면재에는 대부분 금속이나 섬유강화 복합재료와 같은 강성이 큰 재료를, 코어에는 PVC 폼(foam), 발사 혹은 노멕스(Nomex)나 알루미늄 하니콤(honeycomb)과 같이 면재를 지지할 수 있을 정도의 가벼운 재료를 사용한다. 하지만 가볍지만 부드럽고 약한 재료로 만들어지는 샌드위치 코어로 인해 볼트나 리벳과 같은 체결재에 대한 지지능력도 약해진다. 따라서 샌드위치 구조물을 다른 구조와 체결하기 위해서는 별도의 보강이 필요하게 된다.

샌드위치에 대한 연구는 좌굴 연구에서부터 파손모드 및 피로, 환경 효과 등 다양한 주제에 대해 진행되어 왔다[2~6]. 다른 복합재 구조물의 경우에도 체결부는 구조설계의 핵심기술이지만, 샌드위치의 경우 그 구성 특성상 재료의 불연속이 심하여 체결부의 파손이 특히 중요한 관심사이다. 하지만 샌드위치 평판 단품 혹은 구성 재료에 대한 연구가 많이 이루어진 반면 상대적으로 샌드위치 체결부에 대한 연구는 제한적으로 이루어졌다. 공개된 자료를 바탕으로 샌드위치 체결부에 관한 논문들을 요약하면 다음과 같다.

Burchardt[7]는 복합재 면재와 PVC 폼 코어로 제작된 샌드위치 구조물에 인서트(insert)를 체결하여 굽힘 피로하중에 의한 균열전파 시험 및 해석을 수행하였다. Mcgarva 등[8]은 유리/폴리아미드(glass/polyamide) 복합재 면재와 폼 코어를 사용하여 샌드위치 구조물을 제작하고 인서트를 체결할 때의 삽입 하중과 온도의 영향이 풀아웃(pull-out) 강도에 미치는 영향을 연구하였다. Demelio 등[9]은 체결재를 적용한 샌드위치 복합재 평판에 대한 정적 시험 및 피로 시험을 수행하여 면재와 코어의 높이가 피로강도에 영향을 미치는 것을 확인하였다. Bunyawaniachakul 등[10]은 샌드위치 인서트 체결부에 풀아웃 하중을 가하여 파손 현상을 분석하였다. 또한 코어의 전단좌굴에 의한 비선형성을 확인하기 위해 3점 굽힘시험을 수행하고 시험 결과를 바탕으로 한 유한요소모델링 기법을 제시하였다. Kim 등[11]은 인서트의 형상에 따른 하중전달 특성을 연구하고 정·동적 풀아웃 시험을 수행하여 파손 현상을 규명하였다. 최지영 등과 Song 등[12, 13]도 복합재 하니콤 샌드위치 구조물에 인서트를 체결하고

풀아웃 및 전단 시험을 수행하여 코어의 높이 및 밀도, 면재의 두께, 인서트의 유격 등이 체결부 강도에 미치는 영향을 연구하였다. Feldhusen 등[14]은 샌드위치 구조물에 적용 가능한 실용적이고 다양한 체결부 형상을 제안하였다. Heimbs 등[15]은 샌드위치 인서트 체결부에 대해 풀아웃 및 전단 시험을 수행하고 또한 "L"자 샌드위치 구조물에 대해 전단과 굽힘 시험을 실시하여 각각의 구조물에 대한 파손 거동을 분석하였다. 김광수 등[16]은 풀아웃 및 전단 하중에 대한 강도 향상을 위해 새로운 형상의 인서트를 제안하였으며 기존의 인서트와의 비교로 성능 향상을 확인하였다. 박용빈 등[17]은 복합재 면재를 사용한 다양한 샌드위치 구조물에 대해 풀아웃 시험을 수행하고 각각의 체결부에 발생하는 파손 현상을 체계적으로 분석하였다. 이상에서 살펴본 바와 같이 샌드위치 체결부의 강도는 사용된 재료뿐만 아니라 하중의 형태(굽힘, 풀아웃 혹은 조합하중 등)에 따라 그 결과는 크게 달라지므로 관련 인자에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 현재 제한된 연구 결과들이 보고되고 있으나, 재료 및 적용 분야의 다양성에 비추어 지속적인 연구가 필요한 실정이다. 특히, 국내 연구는 아직 시작 단계이며 항공우주용 샌드위치 구조의 독자 설계를 위해서는 광범위한 연구가 필요한 상황이다.

샌드위치 체결부 강도에 영향을 미치는 변수는, 구성 재료, 코어의 밀도와 높이, 인서트의 유격 등으로 매우 다양하다[12,13]. 하지만 본 연구는 현재 국내에서 개발하고 있는 항공기의 설계에 사용된 형상 및 재료를 사용한 체결부에 대한 검증을 주목적으로 하고 있으므로, 체결 방식에 대한 영향을 집중적으로 분석하였다. 따라서 알루미늄 면재와 코어로 제작된 항공기용 하니콤 샌드위치 구조에 대해 다양한 인서트 및 포팅 체결 방법을 적용하고, 전단시험을 수행하여 강도 특성 및 체결부의 파손 양상을 규명하였다. 또한 현장에서 사용되는 간단한 수치적 방법을 사용한 설계허용치와 시험 결과를 비교, 분석한다.

## II. 시 험

### 2.1 시편

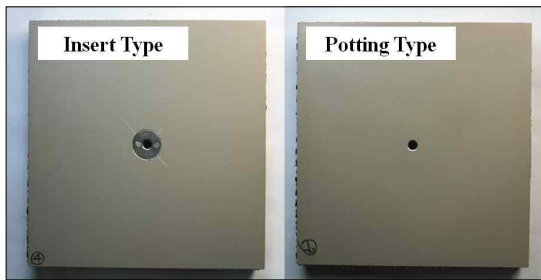
본 연구에서는 항공기용 알루미늄 면재와 하니콤 코어를 사용하여 샌드위치 체결부 전단 시험을 위한 시편을 제작하였다. 5종류의 체결방법 각각에 대해, 면재의 두께를 달리하여 총 60개의 시편을 제작하여 시험을 수행하였다. 시편의 크

**Table 1. Specimen details**

Specimen ID	Insert			Face sheet		Core			Compound Type	
	Type	Outside Dia. (mm)	Height (mm)	Type	Thick. (mm)	Type	Detail	Height (mm)		
BI1	NAS 1832C3-3	14.22	9.53	Al2024-T3	0.305	AMS4348	3.1-1/8-07N5052	12.7	Magnobond 6398	
BI2	NAS 1832C3-3	14.22	9.53		0.406					
BI3	NAS 1834A3-524	14.22	13.31		0.305					
BI4	NAS 1834A3-532	14.22	13.51		0.406					
BI5	NAS 1836C3-15P	11.46	11.81		0.305					
BI6	NAS 1836C3-15P	11.46	11.81		0.406					
BI7	NAS 1836C3-15P	11.46	11.81		0.406/0.305					
BP1	N/A (Potting)	N/A	N/A		0.305					Magnobond 92-1A/B
BP2	N/A (Potting)	N/A	N/A		0.406					
BP3	N/A (Potting)	N/A	N/A		0.305					

**Table 2. Material properties**

Face Sheet		Core			
Property	Value	Property	Value		
Elastic modulus, E (GPa)	72.4	Flatwise Compressive Strength (MPa)	1.48		
Compressive Elastic modulus, E <sub>c</sub> (GPa)	73.8	"L" Direction	Strength (MPa)	1.07	
Shear modulus, G (GPa)	27.6		Modulus (MPa)	214	
Tensile ultimate strength, F <sub>TU</sub> (B-basis, MPa)	448		"W" Direction	Strength (MPa)	0.621
Shear strength, F <sub>su</sub> (B-basis, MPa)	276			Modulus (MPa)	110
Bearing strength, F <sub>bru</sub> (e/D=2.0, B-basis, MPa)	903	Plate Shear			
Tensile yield strength, F <sub>ty</sub> (B-basis, MPa)	331				
Shear strength, F <sub>su</sub> (B-basis, MPa)	276				
Bearing strength, F <sub>bru</sub> (e/D=1.5, B-basis, MPa)	731				



**Fig. 1. Al sandwich joint specimens (top-view)**

기는 120×120 (가로×세로, 단위: mm)이며 시편의 형상과 상세한 정보는 Fig. 1과 Table 1에 제시하였다.

시편에 사용된 면재는 Al2024-T3이고 코어는 AMS 4348을 사용하였다. 코어의 높이는 12.7 mm이고 면재와 코어의 물성치는 Table 2에 제

시하였다. 면재와 코어 사이의 접착제는 3M사의 필름 접착제 AF-163-2K를 사용하였다. 총 5종류의 체결방법이 적용되었고, 크게 인서트와 포팅 체결로 구분하였다. 사용된 인서트는 블라인드(blind) 형식의 NAS 1832C3-3과 NAS 1836C3-15P, 쓰루 클리어런스(through-clearance) 형식의 NAS 1834A3-524 (532)이며 체결 방법을 Fig. 2에 나타내었다. 체결에 사용한 볼트는 4.76 mm의 지름을 가지는 NAS1143 시리즈이고, 딩플 와셔(dimple washer)가 사용된 BP3 시편에는 NAS1580을 사용하였다. 체결부의 포팅을 위한 재료는 Magnolia Plastics 사의 Magnobond 6398과 Magnobond 92-1A/B이다. Magnobond 6398은 강력한 충진제로 일반적으로 인서트 포팅 재료에 사용되며 Magnobond 92-1A/B의 경우 Magnobond 6398과 같은 강력한 접착력은 없지만 가벼우면서 보통의 압축강도를 가지고 있다. 제작사에서 제공

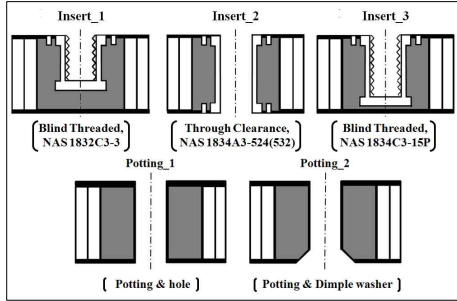


Fig. 2. Configuration of the joint types

한 Magnobond 6398의 물성치는 접착전강강도 (lap shear strength, ASTM D1002) 32.4 MPa, 인장강도(ASTM D-638) 41.4 MPa, 인장 연신율 3.1%, 압축강성 2068 MPa, 압축강도 69.0 MPa이며, Magnobond 92-1A/B의 물성치는 압축강성 1999 MP, 압축강도 35.9 MPa, 전단강도 13.1 MPa이다.

시험을 위한 모든 시편은 한국항공에서 제작하였으며 시편 제작 후 회사 내부규정에 따른 불량 검사를 실시하였다. 또한 시험 수행 전 육안 검사를 수행하였고, 포팅 상태를 확인하기 위해 일부 시편의 단면을 잘라 검사하였다.

2.2 시험 방법

샌드위치 체결부 전단강도시험을 위한 표준규격은 만들어져있지 않으므로, 본 시험에서는 한국항공과의 협의와 문헌[12,13,15]들을 참고하여 Fig. 3에 보인 바와 같이 시험치구를 제작하였다. 시편의 고정을 위해 시편 좌우 및 상단에 가이드 블록을 설치하고, 강판으로 체결체에 전단하중을 가하였다. 시험에 사용한 재료시험기는 Instron 5582이고 분당 1.27 mm의 속도로 하중을 가하였다.

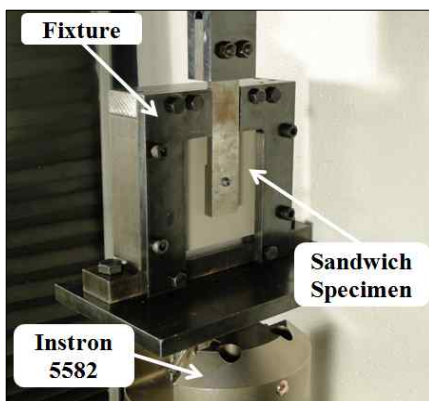


Fig. 3. Test set-up

III. 시험 결과 및 검토

3.1 파손모드

Fig. 4는 알루미늄 샌드위치 시편들 중 5가지 체결부의 대표적인 파손 단면을 나타낸 사진이다. 파손 모드는 크게 인서트 형식과 포팅 형식으로 구분할 수 있다.

Fig. 4(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 인서트 형식 시편의 경우, 인서트가 포팅재료에서 분리되는 것과 윗면재가 인서트와 어긋나는 것이 대표적인 파손모드이다. 인서트의 종류에 따라 약간의 차이를 보이지만, 이러한 두 가지 현상은 인서트 형식 체결부의 최대전단하중 즉 파손하중을 결정하는 중요한 인자이다. 체결체에 작용한 전단하중에 의해 포팅재료와 인서트의 계면에서 손상이 발생한 후 계면이 분리되고, 동시에 윗면재의 손상과 함께 인서트의 상부 플렌지가 면재 아래로 파고들면서 체결부는 하중지지능력을 상실한다. 이러한 현상은 3종류의 인서트 시편 모두에서 유사하게 나타난다.

하지만 최대 하중 이후에 발생하는 파손 양상은 인서트의 종류에 따라 약간의 차이를 보인다. 블라인드 형식 인서트 NAS 1832C3-3의 경우 한쪽 면에서만 작용하는 비대칭적인 전단하중에 의해 인서트와 파손된 포팅재료가 회전하게 되며, 회전과 함께 하부 면재의 변형이 발생한다. 스루 클리어런스 형식의 인서트 NAS 1834A3-524의 경우 비대칭적인 전단하중에 의해 회전되는 현상이 잠시 나타나지만 이후 인서트와 포팅재료가 하중을 가한 방향으로 밀리면서 상하 면재를 벌리며 파고드는 현상이 나타났다. 또 다른 블라인드 형식 인서트 NAS 1836C3-15P는 NAS 1832C3-3과 같이 비관통형 인서트이긴 하나 코어의 높이 대비 차지하는 비율이 높아 NAS 1836A3-524와 같이 인서트가 회전되는 현상은 적게 나타났다. 하지만 인서트 전체가 앞으로 밀리면서 인서트의 플렌지와 접촉되는 상부 면재에 심한 변형이 발생하였다. 이러한 최종 파손양상은, 비록 최대 지지하중에는 영향을 미치지 않지만, 최대 지지하중 이후 하중이 감소되는 형태를 좌우한다.

Fig. 4(b)는 포팅 형식 체결부의 파손모드를 보인 것이다. 두 경우 모두 윗면재의 베어링 파손과 포팅재료의 파손을 보이고 있다. 포팅재료의 파손은, 체결체에 의해 하중이 가해지는 윗면재에서 베어링 파손이 발생하고, 그에 따라 체결체가 밀리고 회전하면서, 포팅재료가 인장응력을

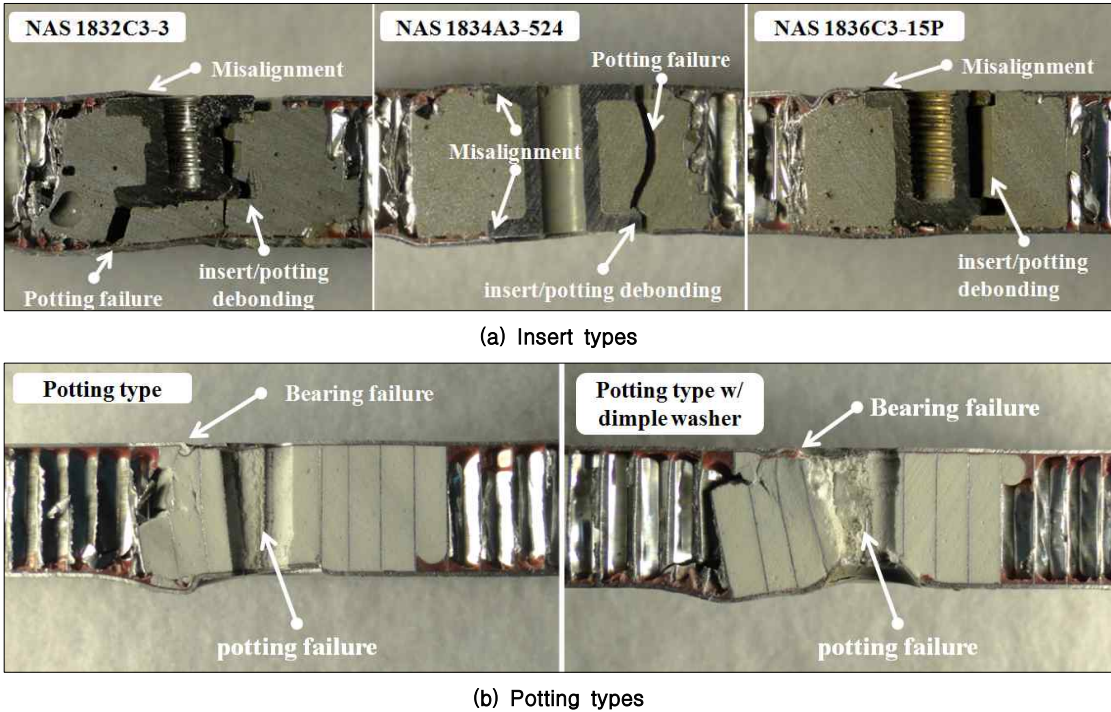


Fig. 4. Typical failure modes

받으면서 발생한 것이다. 최대 하중 이후의 파손 양상은 댄플워셔의 유·무에 따라 약간의 차이를 보인다. 댄플워셔가 장착되지 않은 포팅형식에서는 체결재가 아랫면재의 베어링 파손을 발생시키는 동시에, 비대칭으로 가해진 전단하중에 의한 체결재의 회전으로 인해 체결재가 아래로 파고드는 현상이 나타난다. 또한 파손된 포팅재료 역시 회전하게 되며 아랫면재의 변형을 유도한다. 하지만 댄플워셔가 장착된 포팅형식의 경우, 비슷한 파손 양상을 보이거나 체결재에 의한 아랫면재의 베어링 파손은 발생하지 않으며 비대칭 전단하중에 의한 체결재의 회전이 심하게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 파손하중

전단 시험에 대한 파손하중은 Fig. 5에 보인 바와 같이 하중-변위 곡선상의 최대하중으로 정의하였다. 각 시편에 대한 파손하중은 Table 3에 제시하였다. 사용된 파손하중 값은 6개의 시편에 대한 평균값이다.

Fig. 6은 형식이 다른 각 체결부에 대한 파손하중 결과를 보인 그래프이다. 인서트를 사용한 2종류의 체결부 중에서는 쓰루 클리어런스 형식인 BI3 시편이 블라인드 형식인 BI1 시편보다 22% 가량 더 높은 파손하중을 보인다. 포팅 형식의 경우

댄플 와셔를 장착했을 때(시편 BP3)가 그렇지 않은 경우(시편 BP1)에 비해 파손하중이 10% 가량 증가하는 것을 확인할 수 있다. 시편 BI3이 BI1보다 높은 파손하중을 보이는 것은 인서트가 상하 면재 모두에 의해 베어링 하중 형태로 지지될 수 있기 때문인 것은 쉽게 짐작 가능하다. 포팅 형식의 시편 BP3가 BP1보다 높은 파손하중을 보이는 것은 댄플 와셔에 의한 보강효과에 기인한 것으로 볼 수 있다. 댄플 와셔 형태의 경우 경사지게 가공된 원공 주위로 와셔가 장착되어 볼트 머리에서 포팅 영역으로 전달되는 하중이 더 넓은 면적으로 분산

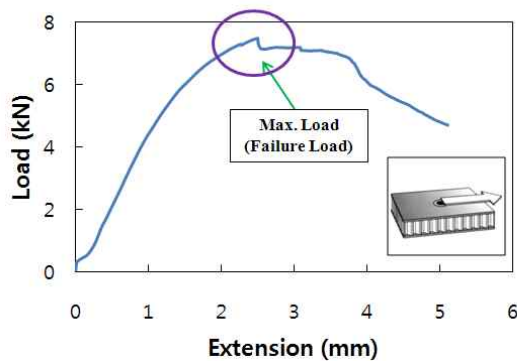


Fig. 5. Typical load-displacement curve (BP1)

Table 3. Failure loads

ID	Failure Load (kN)	ID	Failure Load (kN)
BI1	6.97	BI6	7.48
BI2	7.29	BI7	7.15
BI3	8.52	BP1	7.78
BI4	9.43	BP2	8.81
BI5	6.21	BP3	8.59

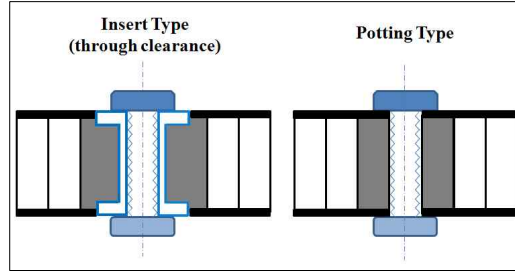


Fig. 7. Configuration of joints

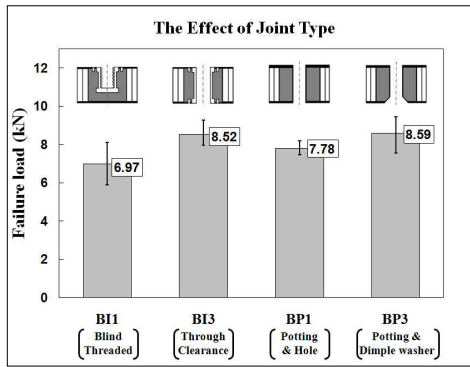


Fig. 6. Effect of joint type on failure load

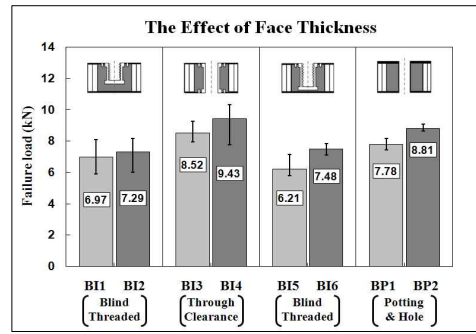


Fig. 8. Effect of face thickness on failure load

되기 때문에 판단되지만, 추가적인 해석을 통해 응력분포를 비교할 필요가 있을 것으로 보인다.

체결부 파손하중을 종합적으로 비교하면 직관적인 판단과는 달리 인서트 형식에 비해 포팅 형식 체결부의 파손하중이 크게 떨어지지 않는 것을 알 수 있다. 댄플 와셔를 사용한 시편 BP3의 경우 쓰루 클리어런스 인서트보다도 더 높은 파손하중을 보이기도 한다. 그러나 이것이, 일반적으로, 비교적 간단한 체결형식인 포팅 형식이 복잡한 인서트 체결 형식보다 파손하중 측면에서 더 우수하다는 것을 의미하는 것은 아니다. 포팅 형식의 경우 상부 외피에 접하여 하중을 가하는 치구와, 하부 외피와 접촉하는 너트가 직접 상하 면재를 구속하는 효과를 갖게 된다. 즉, 비대칭적인 전단하중에 의한 체결체의 회전을 억제시켜 하부 면재가 외부하중을 보다 효과적으로 지지하게 된다. 반면에 Fig. 7에 보인 바와 같이 인서트를 사용한 경우 하중을 가하는 상부의 형태는 동일하지만 하부의 너트 직경이 인서트보다 작기 때문에 너트에 의한 구속효과가 상대적으로 약하게 설계되어 있다. 따라서 두 체결방식에 대한 정확한 비교를 위해서는 너트의 종류와 크기, 인서트와의 상대적 관계 등의 변수에 대한 종합적인 고려가 필요할 것으로 판단된다.

본 시험에서와 같이 전단하중을 받는 인서트 체결부의 파손하중을 지배적으로 결정하는 인자는 면

재의 두께와 강도로 볼 수 있다[12, 13]. 따라서 본 연구에서는 면재의 두께에 대한 파손하중의 효과가 체결부 형태에 따라 어떻게 달라지는지 확인하기 위한 시험을 수행하였다. Fig. 8은 인서트 형식 체결부 3종류와 댄플 와셔를 적용하지 않은 포팅 형식의 체결부의 면재 두께를 각각 0.305 mm와 0.406 mm로 제작하여 시험한 결과이다. 그래프를 살펴보면 면재의 두께가 0.305 mm에서 0.406 mm로 33% 증가할 경우 체결부의 종류에 따라 파손하중이 4%에서 최대 20%까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. 파손모드에 관한 설명에서 언급했듯이 전단하중을 받는 샌드위치 시편의 경우 인서트 플렌지와 면재의 접촉에 의해 하중이 지지되다가, 하중이 증가하면 인서트가 회전하게 되고, 어느 순간 인서트 플렌지와 면재가 어긋나게 된다. 인서트 플렌지와 면재가 접촉하지 못하고 어긋나면, 이는 곧바로 체결부 전체의 하중지지능력 상실로 연결된다. 따라서 체결부의 종류 중 상대적으로 전단하중에 대해 회전이 많이 발생하는 인서트 NAS 1832C3-3(BI1)의 경우 4%의 증가를 보인 반면, 같은 블라인드 인서트라도 회전이 작은 인서트 NAS 1836C3-15P(BI5)의 경우 20%의 증가 효과를 보였다. NAS 1834A3-524(BI3)의 경우 10%, 댄플 와셔가 없는 포팅 형식(BP1)의 경우 13%의 파손하중 증가를 보였다.

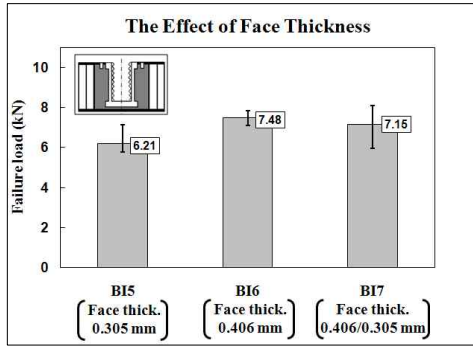


Fig. 9. Effect of face thickness on failure load (NAS 1836C3-15P)

Fig. 9는 면재의 두께가 증가함에 따라 파손하중이 가장 많이 증가한 인서트 NAS 1836C3-15P 체결부에 대해, 전단 파손하중에 대한 상부 면재와 하부 면재 두께의 영향을 자세히 보기 위한 시험 결과이다. 시편 BI5와 BI6은 상하 면재의 두께가 동일하고 각각 0.305 mm와 0.406 mm이다. 시편 BI7의 경우 상부 면재는 0.406 mm, 하부 면재는 0.305 mm으로 제작되었다. 시험 결과, 각각의 파손하중은 6.21, 7.48, 7.15 kN으로 나타났다. 상하 면재의 두께를 모두 증가시키면 파손하중이 1.27 kN 높아졌으며, 상부 면재의 두께만 증가시킬 때 파손하중은 0.94 kN 높아진 것이다. 이는 상부 면재의 두께만 증가시켜도 상하 면재의 두께를 모두 증가시킨 경우의 파손하중 증가분의 74% 수준의 증가가 있음을 의미하는 것이다. 이로 미루어 인서트의 플렌지와 맞닿아있는 상부 면재가 파손하중을 결정하는데 더 중요한 역할을 하는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 근사적 설계허용치

항공 산업의 현장에서는 설계허용치를 얻기 위해 시험을 수행하는 것이 용이하지 않을 경우, 근사적 방법을 사용하여 설계허용치를 결정하기도 한다[18]. 근사적 방법은 다음의 가정 하에서 근사적으로 파손하중을 평가하는 방법이다. 우선 면재만이 전단하중을 지지하며 코어의 효과는 무시할 수 있다고 가정한다. 또한 전단하중이 작용하는 면재의 강도는 체결재의 지름에 따른 베어링 강도를 사용하고, 반대편의 면재는 높이에 따라 0~50%까지 차등을 두어 베어링 강도를 계산한다. 가령, 코어의 높이가 6.35 mm일 때는 50%의 강도를, 9.35 mm는 25%의 강도를, 그 이상은 0%로 가정한다. 따라서 설계허용치 계산법은 면재의 두께와 체결재의 지름, 코어의 높이에 의해서 식 (1)과 같이 결정된다.

Table 4. Comparison between test results and approximated shear allowables

Specimen ID	$P_{sa(t)}$ (kN)	$P_{sa(1)}$ (kN)	$P_{sa(1)}/P_{sa(t)} \times 100$ (%)
BI1	6.97	1.31	18.8
BI2	7.29	1.75	24.0
BI3	8.52	1.31	15.4
BI4	9.43	1.75	18.6
BI5	6.21	1.31	21.1
BI6	7.48	1.75	23.4
BI7	7.15	1.75	24.5
BP1	7.78	1.31	16.8
BP2	8.81	1.75	19.9
BP3	8.59	1.31	15.3

$$P_{sa} = F_{br} \times t \times d \quad (1)$$

여기서  $F_{br}$ 은 면재의 베어링 강도를 의미하며 Table 2에서의  $F_{bru}$ 를 사용한다.  $t$ 와  $d$ 는 각각 면재의 두께와 체결재의 지름을 의미한다.

Table 4는 시험에서 얻은 파손하중  $P_{sa(t)}$ 와 식 (1)을 사용하여 얻은 근사적 설계허용치  $P_{sa(1)}$ 을 나타낸 것이다. 표에 제시된 결과를 보면 근사적으로 평가한 체결부의 파손하중은 시험 값에 비해 15.3~24.5%에 불과하다. 이러한 차이는 사용된 수식이 실제 파손이 일어나는 메커니즘을 충분히 반영하지 못하고 있기 때문이다. 가령 인서트 형식의 체결부는 체결재의 지름이 아닌 인서트의 지름으로 면재의 베어링 강도가 계산되어야 하며 인서트와 포팅재료의 접촉강도도 고려되어야 한다. 또한 인서트나 체결재 주위의 포팅영역이 면재와 분리되어 코어를 압축하는 현상을 반영하기 위해서는 면재와 포팅사이 접촉재의 전단강도가 고려되어야 할 것이다. 포팅 형식의 체결부의 경우 체결재가 윗면재와 아랫면재를 구속함으로써 회전에 의한 아랫면재의 압축파손이 발생하므로 가정에서 무시되었던 아랫면재의 효과가 고려되어야 한다. 포팅 영역의 파손을 고려하기 위해서는 포팅재료의 인장강도도 고려되어야 한다. 그러나 이러한 인자들의 효과를 모두 고려하여 설계식을 만드는 것이 현실적으로 어렵기 때문에 신뢰성 있는 설계허용치를 획득하기 위해서는 정교한 해석이나 실험적 접근법을 사용할 수밖에 없는 실정이다.

## IV. 결 론

본 연구에서는 국내에서 개발 중인 항공기의 샌드위치 구조 설계허용치를 획득하기 위해, 실

제 설계에 사용된 다양한 체결부를 제작하여 시험을 수행하였다. 인서트의 형식과 포팅 형식, 면재의 두께를 달리한 샌드위치 체결부 시편을 제작하고 이러한 변수가 체결부의 파손형상 및 파손하중에 미치는 영향을 시험으로 연구하였다.

시험 결과, 전단하중이 상부 외피 쪽에서만 가해지므로, 정도의 차이는 있지만 모든 체결부에서 모멘트에 의한 회전과 이로 인한 상하 비대칭 파손이 발생하는 것을 확인하였다. 본 연구에서 적용된 2종류의 인서트 체결부 중에서는 두께방향으로 인서트가 관통한 형식인 쓰루 클리어런스 형식의 파손하중이 높았다. 인서트가 없는 포팅 형식의 경우 댄플 와셔의 보강효과로 인해 파손하중이 증가함을 확인하였다. 샌드위치 체결부에서 면재의 두께는 중요한 변수이며 특히 인서트 형식의 경우 하중을 직접 받는 상부 면재가 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한 현장에서 샌드위치 구조 설계 시 사용되기도 하는 근사적 설계허용치 산출 방법이 너무 보수적이라는 사실을 확인하고, 정교한 해석적 접근이나 실험에 의해 설계허용치를 획득할 필요가 있음을 보였다.

## 후 기

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부) 재원 한국연구재단의 대학중점연구소 지원 사업(2010-0029689)과 기초기술연구회가 지원하고 한국항공우주연구원이 주관하는 DRC 사업의 일부로 수행되었습니다. 또한 연구를 위해 협조해주신 한국항공우주산업(주)에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Vinson, J. R., *The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials*, Technomic Pub. Co., Lancaster, PA, 1999.
- 2) Karlsson, K. F. and Åström, B. T., "Manufacturing and Application of Structural Sandwich Components", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 28, 1997, pp. 97-111.
- 3) Mouritz, A. P. and Thomson, R. S., "Compression, Flexure and Shear Properties of a Sandwich Composite Containing Defects", *Composite Structures*, Vol. 44, 1999, pp. 263-278.
- 4) Avery, J. L. and Sankar, B. V.,

"Compressive Failure of Sandwich Beams with Debonded Face-Sheets", *Journal of Composite Materials*, 2000 Vol. 34, No. 14, 2000, pp. 1176-1199.

5) Berkowitz, C. K. and Johnson, W. S., "Fracture and Fatigue Tests and Analysis of Composite Sandwich Structure", *Journal of Composite Materials*, Vol. 39, No. 16, 2005, pp. 1417-1431.

6) Meyer-Piening, H.-R., "Sandwich Plates: Stresses, Deflection, Buckling and Wrinkling Loads - A Case Study", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Vol. 8, 2006, pp. 381-394.

7) Burchardt, C., "Fatigue of Sandwich Structures with Inserts", *Composite Structures*, Vol. 40, 1998, pp. 201-211.

8) Mcgarva, L. D. and Åström, B. T., "Insert Integration in Thermoplastic-Based Foam Core Sandwich Components", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Vol. 1, 1999, pp. 214-229.

9) Demelio, G., Genovese, K. and Pappalettere, C., "An Experimental Investigation of Static and Fatigue Behavior of Sandwich Composite Panels Joined by Fasteners", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 32, 2001, pp. 299-308.

10) Bunyawanichakul, P., Castanie, B. and Barrau, J. -J., "Experimental and Numerical Analysis of Inserts in Sandwich Structures", *Applied Composite Materials*, Vol. 12, 2005, pp. 177-191.

11) Kim, B. J. and Lee, D. G., "Characteristics of Joining Inserts for Composite Sandwich Panels", *Composite Structures*, Vol. 86, 2008, pp. 55-60.

12) 최지영, 송근일, 권진희, 김광수, 장영순, "복합재-하니컴 샌드위치 구조물의 인서트 강도 특성 연구", *한국복합재료학회지*, 제20권 제5호, 2007, pp. 26-33.

13) Song, K. I., Choi, J. Y., Kweon, J. H., Choi, J. H. and Kim, K. S., "An Experimental Study of the Insert Joint Strength of Composite Sandwich Structures", *Composite Structures*, Vol. 86, 2008, pp. 107-113.

14) Feldhusen, J., Warkotsch, C. and Kempf, A., "Development of A Mechanical Technology



for Joining Sandwich Elements", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Vol. 11, No. 6, 2009, pp. 471-486.

15) Heimbs, S., Pein, M., "Failure Behavior of Honeycomb Sandwich Corner Joints and Inserts", *Composite Structures*, Vol. 89, 2009, pp. 575-588.

16) 김광수, 안재모, 장영순, 이영무, "복합재 샌

드위치 구조의 인서트 조인트의 강도 향상", 한국항공우주학회지, 제38권 제1호, 2010, pp. 29-34.

17) 박용빈, 양현정, 권진희, 최진호, 조현일, "풀아웃 하중을 받는 복합재 샌드위치 체결부의 파손거동 연구", 한국복합재료학회지, 제 24권 제 1호, 2011, pp. 17-23.

18) Structural Calculations, SR-88P55900-001, Korea Aerospace Industries, Korea, 2008.