

복합재-알루미늄 이중재료 하이브리드 체결부 강도 특성에 관한 연구

정재우* · 김태환** · 권진회*** · 최진호***

Strength of Composite-to-Aluminum Bonding and Bolting Hybrid Joints

Jae-Woo Jung^{*}, Tae-Hwan Kim^{**}, Jin-Hwe Kweon^{***} and Jin-Ho Choi^{***}

Abstract

Composite-to-aluminum joints were tested to get the failure loads and modes for three types of joints; adhesive bonding, bolt fastening, and adhesive-bolt hybrid joining. Film type adhesive FM73 and paste type adhesive Cytec EA9394S were used for aluminum and composite bonding to make a double-lap joint. A digital microscope camcorder was used to monitor the failure initiation and propagation. It was found that the hybrid joining is an effective method to strengthen the joint when the mechanical fastening is stronger than the bonding as in the case of using the paste type adhesive. On the contrary, when the strength of the bolted joint is lower than the strength of the bonded joint as in the joint with the film type adhesive, the bolt joining contribute little to the hybrid joint strength.

Key Words: 하이브리드(Hybrid), 체결부(Joint), 이중 겹침(Double lap), 접착제(Adhesive)

1. 서 론

높은 비강성, 비강도 및 우수한 감쇠 특성을 가진 복합재료가 기계 구조물에 많이 사용됨에 따라 복합재료 구조물의 구조적 건전성이 중요한 요소가 되고 있다. 그 중에서도 부품을 연결하는 체결부 설계의 중요성은 매우 크다. 특히 섬유강화 복합재에서 기계적 체결방식을 사용할 경우 볼트나 리벳을 위한 구멍을 뚫어야 하고, 응력집중과 섬유의 단절이 발생하여 결과적으로 구조물의 강도를 저하시키게 된다. 이로 인해 복합재 구조물의 기계적 체결부에 대한 연구는 특성길이(characteristic length) 방법[1], 3차원 유한요소법[2], 실험[3] 등 다양한 방법으로 광범위하게 이루어져 왔다.

기계적 체결방식의 단점을 보완하기 위해 복합재 부품을 일체성형(co-curing) 방식이나 접착방

식(bonding)을 사용하여 제작하는 경우가 증가하고 있다. 복합재의 접착식 체결에 대하여는, 복합재 단일겹침(single-lap) 체결부에 관한 실험 연구[4], 복합재와 알루미늄의 이중재료 단일겹침 체결부의 강성에 관한 실험 연구[5], 이중겹침(double-lap) 체결부에 관한 이론식 연구[6], 단일겹침과 이중겹침 체결부의 토크 전달 특성 연구[7] 등이 이루어져 왔다.

접착에 의한 체결방법의 장점으로는 기계적 체결방법에 비해 구멍을 뚫을 필요가 없고, 넓은 면적에 하중을 분포시켜 비교적 균일한 응력분포를 가지게 하는 것이다. 그러나 환경적 요인에 의하여 체결력이 영향을 받을 수가 있고 제작공정, 접착상태 검사가 어렵다는 단점이 있다. 무엇보다도 가장 큰 문제점은 여전히 많은 엔지니어들은 접착식 체결방법의 구조적 신뢰성에 대해 확신을 갖지 못하고 있다는 것이다. 이로 인해 실제 설계 현장에서는 접착식으로 체결하되 구조적 신뢰성을 높이기 위해 기계적 체결을 추가하는 하이브리드(hybrid) 체결방식을 사용하는 경우가 있다. 하이브리드 체결에 관하여는 Gordon

* 경상대학교 항공기부품기술연구소

** 경상대학교 대학원 항공공학과

*** 경상대학교 기계항공공학부·항공기부품기술연구소

Kelly[9]와 Hart-Smith[10] 등의 연구가 있다.

본 연구에서는 다른 두 재료를 이중 겹침 형태의 순수 접착식 체결부, 볼트 체결부, 하이브리드 체결부로 제작하였을 경우 강도가 얼마나 차이나는지를 실험적으로 연구하였다. 사용한 복합재는 SK 케미칼의 USN125 탄소/에폭시이다. 알루미늄은 7075-T62를 사용한다. 접착제는 필름 형태의 고온경화용 접착제인 FM73과 페이스트(paste) 형태의 상온경화용 접착제인 Loctite사의 Hysol EA9394S를 사용하였다. 시편 제작은 ASTM D3528-96을 참고하여 결정하였다.

2. 시험

2.1 시편 제작

제작된 하이브리드 체결부 시편의 형상은 Fig. 1에 보인 바와 같다. 복합재 모재의 적층순서는 $[\pm 45/90/0]_{25}$ 이다. 성형 후 복합재 평균 단층의 두께는 0.112 mm이다. 일방향 복합재 USN125의 재료상수는 $E_1=131$ GPa, $E_2=8.2$ GPa, $G_{12}=4.5$ GPa, $\nu_{12}=0.281$, $X_T=2000$ MPa, $X_C=1400$ MPa, $Y_T=61$ MPa, $Y_C=130$ MPa, $S=70$ MPa이다.

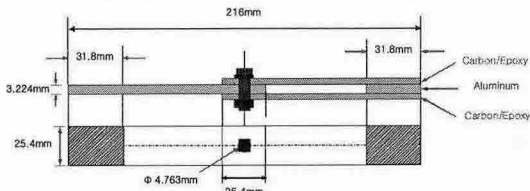


Fig. 1 Hybrid joint specimen

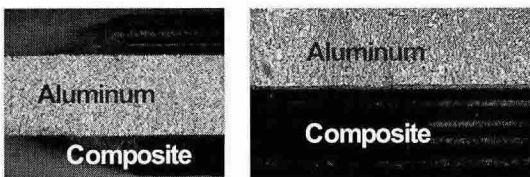


Fig. 2 Microscopic view of bonded specimen after water-jet fabrication

알루미늄 7075-T62는 표면에 크롬산 양극산화 피막처리를 하였고 재료상수는 다음과 같다. $E=71.0$ GPa, $\nu=0.33$, $X=551.6$ MPa, $S=275.8$ MPa. 제작사가 제공한 필름 접착제 FM73의 물성치는 다음과 같다. $E=2.9$ GPa, $\nu=0.40$, $S=46.1$ MPa. 여기서 S는 알루미늄과 알루미늄의 단일겹침 체결부의 전단강도이다. 페이스트 형태 접착

제 EA9394S의 재료상수는 다음과 같다. $E=4.2$ GPa, $\nu=0.45$, $S=29$ MPa.

모든 시편은 워터젯(water jet)으로 가공하였으며 가공된 시편의 단면은 Fig. 2에 보인 바와 같다.

2.2 체결부 시험

시험에 사용한 재료시험기는 Instron 5582이고 상온에서 ASTM D3528-96 규격에 따라 분당 1.27 mm의 속도로 하중을 가하였다. 시험 중 발생하는 체결부의 파손양상을 관찰하기 위해 Fig. 3에 보인 바와 같이 디지털 현미경 캠코더(digital microscope camcorder)를 설치하였다.

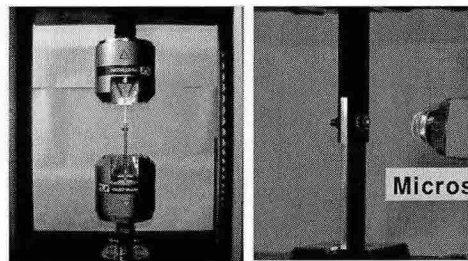


Fig. 3 Test set-up

3. 결과 및 검토

3.1 접착제 체결부

Table. 1은 필름 접착제 FM73으로 접착된 이중 겹침 체결부의 강도시험 결과를 나타낸 것이다. 표에서 P_{max} , A , A_B 는 각각 최대지지하중, 복합재 적층판 하나의 단면적, 한쪽 접착면의 면적을 의미한다. 최종 파손하중에서 체결부 강도는 평균 453 MPa로 나타났다. 이 값은 기계적 체결방식과 하이브리드 체결방식을 사용한 체결부에 대한 시험 결과와의 비교를 위해 사용될 것이다.

Table. 2는 상온경화 페이스트 형태 접착제 EA9394S를 사용한 복합재-알루미늄 체결부의 강도시험 결과를 정리한 것이다. 접착제 자체의 평균 전단강도는 4.74 MPa로서 접착제 제작사에서 제공한 알루미늄-알루미늄 접착 체결부 전단강도 29 MPa의 16%에 불과한 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 Table. 1에 제시된 최대 지지하중을 구하기 위한 각 체결부의 하중-변위선도를 나타낸 것인데 접착상태에 따라 접착강도는 큰 변화가 없으나 변위는 민감하게 달라지는 것을 알 수

있다.

Table. 1 Test results of bonded joints with film type adhesive

Result \ Specimen	FA-1	FA-2	FA-3	FA-4	Average
Strength, $P_{max}/2A$ (MPa)	464	441	477	428	453
Adhesive Strength, $P_{max}/2A_B$ (MPa)	32.7	31.1	33.7	30.2	31.9

Table. 2 Test results of bonded joints with paste type adhesive

Result/Specimen	PA-1	PA-2	PA-3	PA-4	PA-5	Average
Strength, $P_{max}/2A$ (MPa)	69.1	59.8	81.7	59.6	65.5	67.1
Adhesive Strength, $P_{max}/2A_B$ (MPa)	4.87	4.22	5.76	4.21	4.62	4.74

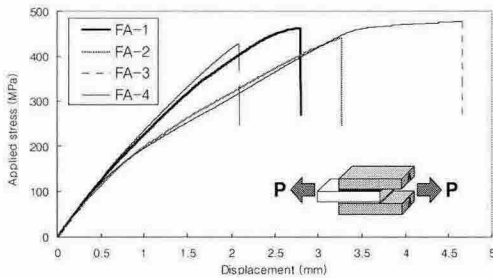


Fig. 4 Load-displacement curves for bonded joints with film type adhesive

3.2 볼트 체결부

Table. 3은 볼트 체결부의 강도시험 결과를 나타낸 것이다. 여기서 d 와 t 는 각각 구멍의 직경과 적층판 하나의 두께이다. A 는 앞에서와 동일하게 복합재 적층판 하나의 단면적을 의미한다. 볼트 체결부의 강도 162 MPa은 필름 접착제 체결부 강도의 36%, 페이스트 접착제 체결부 강도의 2.4배 정도이다.

Table. 3 Test results of bolted joints

Result \ specimen	BT-1	BT-2	BT-3	BT-4	Average
Strength, $P_{max}/2A$ (MPa)	167	172	156	154	162
Bearing Strength, $P_{max}/2dt$ (MPa)	891	917	832	821	865

Fig. 5은 볼트 체결부 시편의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 베어링 파손의 전형적인 형태를 보이고 있다.

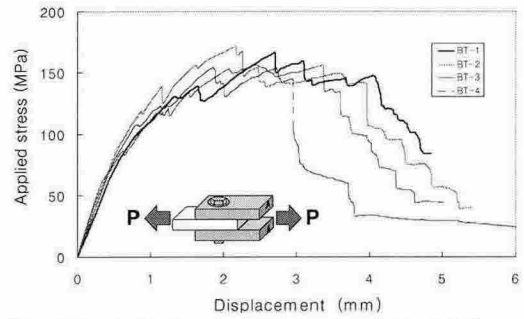


Fig. 5 Load-displacement curves for bolted joints

3.2 하이브리드 체결부

필름 접착제와 볼트를 동시에 사용한 하이브리드 체결부에 대한 결과는 Table. 4에, 하중-변위 곡선은 Fig. 6에 제시하였다. 필름 접착제를 사용한 경우 체결부 강도는 접착제만을 사용한 체결부의 강도 평균값보다 약 3% 낮게 나타났다.

Table. 4 Test results of hybrid joints with film type adhesive

Result/specimen	FH-1	FH-2	FH-3	FH-4	FH-5	FH-6	Aver.
Strength, $P_{max}/2A$ (MPa)	449	451	453	446	414	428	440

Table. 5 Test results of hybrid joints with paste type adhesive

Results/specimen	PH-1	PH-2	PH-3	PH-4	PH-5	Aver.
Strength, $P_{max}/2A$ (MPa)	202	164	206	187	200	192

하이브리드 체결부는 하중-변위 곡선 Fig. 6과 Fig. 5를 비교해 볼 때 인장 변위 1 mm 미만에서 2 mm 까지 베어링 파손이 일어난다. 하지만 Fig. 4에서 필름 접착제 체결부는 인장 변위 2 mm 정도에서도 대체로 구조적 건전성을 유지하고 있다. 따라서 복합재 적층판이 베어링에 의해 먼저 파손되고 이후에 접착제가 하중을 지지하다가 최종 파손이 발생하게 된다. 필름 접착제 하이브리드 체결부의 파손양상은 Fig. 7에 제시하였다.

페이스트 접착제를 사용한 하이브리드 체결부의 강도시험 결과는 Table. 5에 제시하였다. 하이브리드 체결부의 평균 강도는 접착제 체결부와 볼트 체결부 강도를 합친 값 229 MPa의 84%에 달하는 것을 알 수 있다. 이것은 필름 접착제를 사

용한 경우는 달리 볼트 체결이 접착제 체결과 함께 할 때 체결 강도의 상승효과가 일어난다는 것이다.

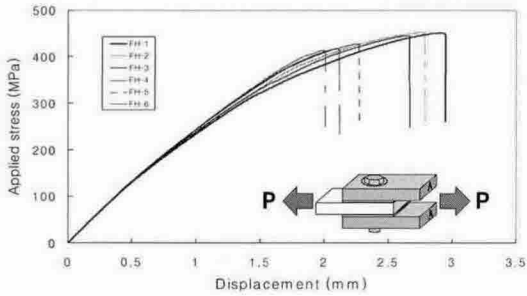
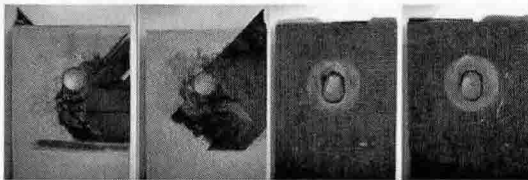


Fig. 6 Load-displacement curves for hybrid joints with film type adhesive



(a) Al (top) (b) Al (bottom) (c) Laminate (top) (d) Laminate (bottom)
Fig. 7 Typical failure modes of hybrid joints with film type adhesive

4. 결론

본 논문에서는 체결 방법과 접착제 강도에 따라 이종재료 이중접침 체결부의 강도가 어떻게 변하는지를 시험으로 연구하였다. 접착층의 강도가 복합재 적층판의 볼트 체결부 강도보다 클 경우 볼트 체결을 추가하는 것이 체결부 강도를 높이는 데 큰 도움이 되지 않는 것을 확인하였다. 그러나 접착층의 강도가 상대적으로 약할 경우 볼트 체결에 의해 하이브리드 체결부의 강도가 크게 증가함을 알 수 있었다. 파손은 복합재 적층판의 층간분리 혹은 접착제의 파손으로 나타났고, 알루미늄 소재의 파손은 발생하지 않았다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI 04-01-03)의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- 1) J. H. Kweon, H.S. Ahn, and J.H. Choi, "A New Method to Determine the Characteristic Lengths of Composite Joints without Testing", Composite structures, Vol. 66, 2004, pp. 305-315
- 2) P. P. Camanho and F. L. Matthews, "A Progressive Damage Model for Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates", J. of Composite Materials, Vol. 33, 1999, pp. 2248-2280
- 3) H. S. Wang, C. L. Hung and F. C. Chang, "Bearing Failure of Bolted Composite Joints. Part I : Experimental Characterization", J. of Composite Materials, Vol. 30, No. 12, 1996, pp. 1284-1313
- 4) 김광수, 유재석, 안재모, 장영순, "일방향 복합재료 single lap 접합 조인트의 파손모드 및 파손 강도, I. 실험," 복합재료학회지, 제17권, 제6호, 2004, pp. 14-21
- 5) J. F. P. Owens, P. Lee-Sullivan, "Stiffness Behaviour due to Fracture in Adhesively Bonded Composite-to-Aluminum Joints II. Experimental", Int. J. of Adhesion & Adhesives, Vol. 20, 2000, pp. 47-58
- 6) L. J. Hart-Smith, "Adhesive-Bonding Double-Lap Joints" NASA CR-112235, 1973
- 7) J. H. Choi and D. G. Lee, "The Torque Transmission Capabilities of the Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joint and the Double Lap Joint", J. of Adhesion, Vol. 44, 1994, pp. 197-212
- 8) G. Kelly, "Load Transfer in Hybrid(Bonded/Bolted) Composite Single-lap Joint", Composite Structures, 2004, pp. 1-9
- 9) L. J. Hart-Smith, "Bonded-Bolted Composite Joints", J. of Aircraft, Vol. 22, No. 11, 1985, pp. 993-1000