

탄소섬유/에폭시 복합재료-알루미늄 양면접치기 동시경화 조인트의 최적설계

박상욱*, 김학성*, 이대길**

Optimal design of the co-cured aluminum/composite double lap joint

Sang Wook Park, Hak Sung Kim and Dai Gil Lee

Abstract

The co-cured joint has been widely used in joining process of composite structures due to its simple and easy manufacturing process. In this paper, the effect of stacking sequence of the carbon epoxy prepreg, bonding length and thickness of the aluminum plate on the static tensile load capability of the co-cured aluminum-composite double lap joint were experimentally investigated. From experimental results, the optimum EA ratios with respect to stacking sequence and bonding length of the co-cured joint were obtained, which may be useful for the joining of hybrid structures.

Keywords: Co-cured joint (동시경화 조인트), Optimum design (최적설계)

1. 서론

섬유로 보강된 복합재료 (Fiber reinforced composites)는 높은 비강도 (S/ρ), 비강성 (E/ρ) 및 우수한 진동 감쇠 특성으로 인하여, 높은 강성과 강도가 요구되는 비행기, 우주선의 소재로 널리 사용되어 왔으며, 최근에는 자동차와 스포츠, 레저 용품 등의 소재로도 각광을 받고 있다. 그 중에서 복합재료/금속 하이브리드 구조물은 금속의 높은 파괴인성과 복합재료의 높은 비강도 및 비강성을 이용할 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 복합재료/금속 하이브리드 구조물을 제조하는 방법에는 복합재료 성형후 금속재료와 접착제 접합을 하는 방법과, 금속재료와 복합재료를 동시 경화시켜 제조하는 방법이 있다. 이

중 동시 경화법은 복합재료의 경화 중 잉여 수지 (Resin)에 의해 금속재료와의 접합이 이루어지기 때문에 금속재료와 복합재료를 재접합 해야하는 후공정이 필요하지 않아 제조공정을 줄일 수 있다.

동시경화 금속/복합재료 조인트의 강도 및 파괴 특성은 재료간의 물성 차, 표면처리 방법, 접합부의 기하학적 조건, 경화 조건 등에 따라 달라진다. 따라서 동시경화 조인트의 설계시에는 접착계면의 표면 처리 및 경화 공정, 접합부의 기하학적 조건의 최적 설계를 통해 계면 접착 강도를 증가시켜야 한다.

본 연구에서는 복합재료/알루미늄 양면접치기 동시경화 조인트의 접착강도를 복합재료의 적층 두께, 적층각, 알루미늄 플레이트의 두께 및 접착 길이를 변화시켜가며 측정하였다. 실험 결과로부터 복합재료/알루미늄 강성×단면적 비 (EA ratio,

$\frac{E_{comp}A_{comp}}{E_{Al}A_{Al}}$)에 따른 계면 강도의 변화를 고찰하였고, 적층각 및 접착길이에 따른 최적 EA ratio가 존재함을 실험적으로 확인하였다.

* 한국과학기술원 기계공학과

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

2. 시편 제작 및 실험방법

2.1 시편 제작

동시 경화 조인트의 기하학적 조건에 따른 접합 강도를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 동시경화 알루미늄/복합재료 양면 겹치기 조인트를 제작하였다. Table 1에 본 연구에서 사용한 복합재료와 알루미늄의 물성을 나타내었다. 먼저 알루미늄 플레이트의 접합면에 접합강도 향상 및 이물질 제거를 위해 80 메쉬 (Mesh) 사포로 고르게 표면처리를 한 후 탄소 섬유 에폭시 복합재료 (USN150, SK chemical, Suwon)를 적층하였다 [1]. 적층된 동시경화 조인트를 진공백으로 밀봉한 후 오토클레이브(Autoclave)에서 6 기압의 압력을 가한 후, Fig. 2와 같은 경화 사이클로 경화시켰다. 경화 도중 복합재료에서 흘러 나오는 잉여 수지 (Resin)는 복합재료와 알루미늄 재료를 접합시켜주는 접착제 역할을 하게 된다. 기하학적 형상이 접착강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 복합재료의 적층각, 적층두께, 접착 길이를 변화 시켰으며 알루미늄 플레이트의 두께도 변화시켜 시편을 제작하였다.

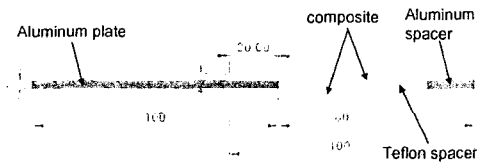


Fig. 1 Configuration of co-cured aluminum/composite double lap joint

	Aluminum 6061	USN150
$E_1(E)$	72 GPa	131 GPa
E_2		10.8 GPa
G_{12}	27 GPa	5.65 GPa
S	170 MPa	70 MPa
$\nu_{12}(\nu)$	0.3	0.28
ν_{23}		0.59
α_1	23 mS/°C	0.9 mS/°C

Table. 1 Material property

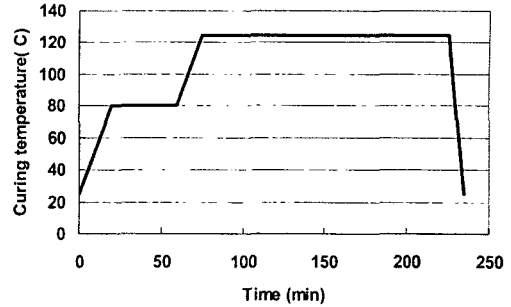


Fig. 2 Curing Cycle of composite material

2.2 동시경화 조인트의 정적 강도 실험

인장 재료 시험기 (Instron 5583 Machine)를 이용하여 동시 경화 조인트의 정적 강도 (Lap shear strength)를 측정하였다. 실험 속도는 0.5 mm/min으로 하였으며, 측정된 하중으로부터 전단 강도는 다음과 같이 계산하였다.

$$\text{Lap shear strength} = \frac{\text{Load}}{2 \times \text{width} \times \text{bonding length}}$$

2.3 SEM을 이용한 동시경화 조인트의 계면 관찰

알루미늄/복합재료 동시경화 조인트는 계면의 잉여 레진에 의하여 접착이 이루어지므로 계면 레진층은 접착 강도에 매우 중요한 인자가 된다. 본 연구에서는 SEM (Scanning electron microscope)을 이용하여 복합재료 적층 두께에 따른 계면의 레진층의 두께 변화를 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

복합재료의 적층 각도, 적층 두께가 조인트 강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 정적 실험을 수행하였다. 먼저 알루미늄 플레이트의 두께와 조인트의 접합 길이를 3 mm, 20 mm로 각각 고정시킨 후 복합재료 적층각도 ($[\pm 0]_{ns}$, $[\pm 15]_{ns}$, $[\pm 30]_{ns}$)와 각 적층각에 따른 두께를 변화 시켜가면서 실험을 수행하였다. Fig. 3에 그 결과를 나타내었다.

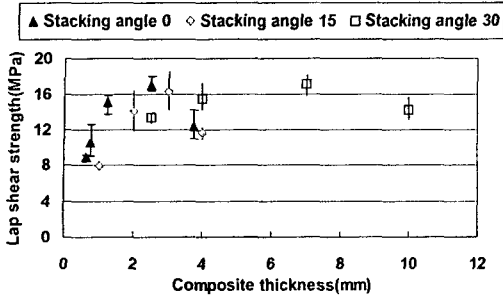


Fig. 3 Lap shear strength with respect to composite thickness and stacking angle

적층 각도가 [0]_{ns}일 경우 복합재료 두께가 2.5 mm 정도에서 최대 강도 17.0 MPa를 얻을 수 있었으며, 그 이상의 두께에서는 강도가 감소하였다. 적층각도가 [±15]_{ns}일 경우에는 복합재료 두께가 2.9 mm일 경우에서 최대강도 16.2 MPa를 얻을 수 있었고, [±30]_{ns}일 경우에는 복합재료 두께가 10.1 mm일 경우 최대 강도 16.9 MPa를 얻을 수 있었다. 이상의 결과에서 각 적층각에 따라 최대 접착 강도를 얻을 수 있는 최적의 적층 두께가 존재함을 확인하였다. 한편 각 적층각에 따른 복합재료 플레이트의 강성은 고전 적층판 이론을 통하여 계산할 수 있으며 Table 2에 나타내었다. 계산된 강성 값과 실험결과를 이용하여 강성×단면적 비 (EA ratio, $\frac{E_{comp}A_{comp}}{E_{Al}A_{Al}}$)에 따른 접착 강도 그래프를 Fig. 4에 도시하였다. 적층 각도, 적층 두께에 관계없이 알루미늄/복합재료의 EA ratio가 3인 부분에서 최대 강도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

Stacking angle	[0] _{ns}	[±15] _{ns}	[±30] _{ns}
E_1 (GPa)	132	107	51.0
E_2 (GPa)	10.8	10.8	12.6
G_1 (GPa)	5.7	12.9	26.9
ν_{12}	0.28	0.85	1.21
α_1 (mS/°C)	-0.9	-0.97	-1.9

Table 2 Elastic modulus of composite laminate

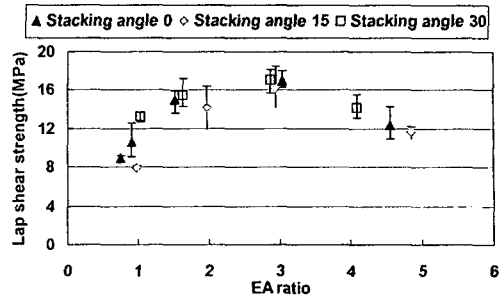


Fig. 4 Lap shear strength with respect to EA ratio and stacking angle

다음은 알루미늄 플레이트 두께를 5 mm로, 복합재료 적층각은 [0]_{ns}, 접착 두께는 20 mm로 고정시키고 복합재료 두께를 변화 시켜가며 시편을 제작하고 정적 실험을 수행하였다. Fig. 5에 알루미늄 플레이트 두께가 3 mm인 경우, 5 mm인 경우에 대해서 복합재료 두께에 따른 정적 강도를 나타내었다. 알루미늄 플레이트 두께가 3 mm일 경우엔 복합재료 두께가 2.5 mm인 지점에서 최대 강도 17.0 MPa를 얻을 수 있었으며 알루미늄 플레이트 두께가 5 mm인 경우엔 복합재료 두께가 4.1 mm인 지점에서 최대 강도 19.5 MPa를 얻을 수 있었다. 위의 결과를 이용하여 알루미늄과 복합재료의 EA ratio에 따른 접착강도를 Fig. 6에 도시하였다. 이 경우에도 역시 알루미늄, 복합재료의 EA ratio가 3인 지점에서 최대 강도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

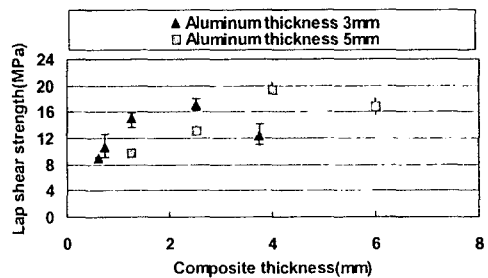


Fig. 5 Lap shear strength with respect to composite thickness and aluminum plate thickness

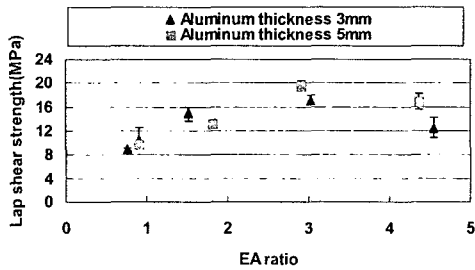


Fig. 6 Lap shear strength with respect to EA ratio of each aluminum thickness

복합재료의 적층 두께가 변화하였을 경우 계면의 레진층의 변화를 알아보기 위하여 SEM을 이용하여 계면을 촬영하였고 Fig. 7에 나타내었다. 복합재료의 두께를 변화시켜도 계면 잉여레진 두께는 거의 일정하였다. 따라서 같은 경화 조건하에서는 복합재료 적층 두께에 관계없이 계면의 레진층에는 변화가 없음을 확인하였다. 그러므로 이와 같이 최적 EA ratio가 나타나게 되는 원인은 접착층인 계면의 레진의 두께 변화 때문은 아니며 피접착체의 강성×단면적 비에 따라 같은 하중에서 계면의 레진이 받게 되는 응력의 성분과 크기가 각기 다르게 나타나기 때문이라 사료된다 [2].

접착 길이가 동시경화 조인트의 접착 강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 알루미늄 플레이트의 두께는 3 mm로, 복합재료 적층각은 [0]_{ns}로 각각 고정 시켰으며 접착 길이 (20 mm, 30 mm, 50 mm)와 복합재료 두께를 변화 시켜가면서 정적 실험을 수행하였다. 실험 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 접합 길이가 20 mm일 경우 EA ratio가 3 일 경우 최대 강도를 갖는 반면, 접합 길이가 50 mm인 경우 EA ratio가 1.5 일 경우 최대 강도를 얻을 수 있었다.

이와 같이 접착 길이가 달라지면서 최적 EA ratio가 달라지는 이유는 접착 길이에 따라 레진층에 걸리는 전단응력과 수직 응력의 비가 달라져 파괴에 영향을 미치는 응력 성분이 달라지기 때문인 것으로 사료된다 [2].

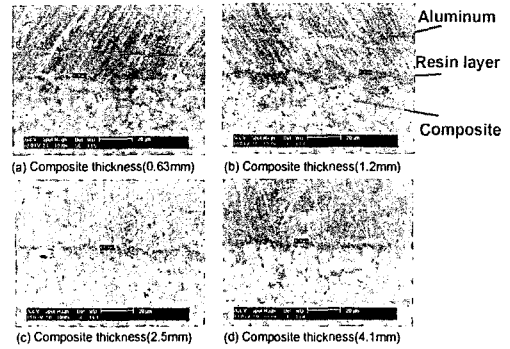


Fig. 7 SEM photograph of interface between aluminum and composite with respect to composite thickness ($\times 1000$)

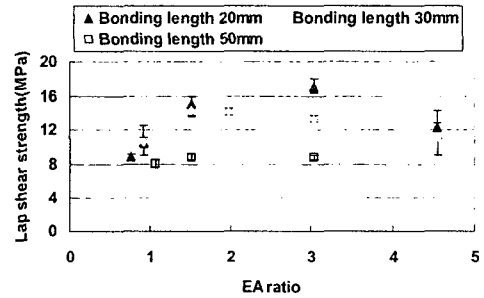


Fig. 8 Lap shear strength with respect to EA ratio of each bonding length

4. 결론

본 연구에서는 탄소섬유복합재료/알루미늄 양면접합기 조인트를 이용하여 접합부의 기하학적 조건에 따른 계면접합강도를 실험적으로 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동시경화 알루미늄/복합재료 조인트에서 복합재료의 적층각, 적층두께 및 알루미늄 플레이트 두께에 관계없이 최대 접착강도를 얻을 수 있는 최적 EA ratio가 존재함을 확인하였다.
2. 최적 EA ratio는 조인트의 접착길이에 따라 변화하며 접착길이가 길어질수록 최적 EA ratio는 감소하였다.
3. 최적 EA ratio가 나타나게 되는 원인은 접착층인 계면의 레진의 두께 변화 때문은 아니며 피접착체의 강성×단면적 비에 따라 계면 레진

층에서 응력이 각기 다르게 나타나기 때문이라 사료된다.

향후 본 연구에서 얻어진 실험적 결과를 바탕으로 최적 EA ratio에 대한 해석적인 연구를 수행 예정이며 이를 통하여 동시경화 금속/복합재료 조인트의 최적 설계 기법을 제시하고자 한다.

후기

본 연구는 NRL (국가지정연구실 사업)의 도움으로 수행되었으며 관계자분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) S. W. Lee, D. G. Lee and K. S. Jeong, "Static and Dynamic Torque Characteristics of Composite Co-cured Single Lap Joints," *Journal of Composite Materials*, 1997, Vol. 31, pp.2188-2201
- (2) D. H. Cho and D. G. Lee, "Optimum design of co-cured steel-composite tubular single lap joints under axial load," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 14, No. 7, pp. 939-963