

일방향 복합재료 single-lap 접합 조인트의 파괴 특성

김광수*·유재석*·장영순*·이영무*

Fracture Characteristics Unidirectional Composite Single-Lap Bonded Joints

Kwang-Soo Kim, Jae-Seok Yoo, Young-Soon Jang and Yeong-Moo Yi

Abstract

The fracture characteristics of unidirectional composite single-lap bonded joints were investigated experimentally and numerically. The effects of bonding method, surface roughness, bondline thickness and the existence of fillet on the failure characteristics and strength of bonded single-lap joints were evaluated experimentally. The failure process, failure mode and the behavior of load-displacement curve was apparently different according to bonding method. The failure load of the specimen co-cured without adhesive was definitely superior to other types of specimens but the specimens co-cured with adhesive film had a less strength than secondary bonded specimens. In the secondary bonded specimens, the lower value of surface roughness and existence of fillet improved the strength of specimens. The strain energy release rates calculated by geometric nonlinear finite element analyses and Virtual Crack Closure Technique for the secondary bonded specimens considering the three types of initial cracks - corner crack, edge crack and delamination crack - were consistent with the test results.

Key Words: Adhesive, Single-lap joint, Secondary bonding, co-curing, Composite material, Fracture.

1. 서 론

복합재료 구조물을 조립하는 방법은 크게 기계적 체결(mechanical joint) 방법과 접착제 접합(adhesive bonding)의 두 가지 종류로 나눌 수 있다. 기계 체결 조인트는 복합재료 부품에 구멍을 가공해야 되기 때문에 응력집중 및 무게 증가의 단점이 존재한다. 이에 비해 접합 조인트는 하중 전달을 상대적으로 넓은 면적에서 비교적 균열하게 하므로 조인트 효율 및 무게 면에서 유리하다고 할 수 있다.

복합재료 접합 조인트의 파손 특성 및 강도는 접합 방법(동시 성형 및 이차접합), 접합제의 성질 및 두께, 환경조건, 접합 부재의 표면 조건(조도, 청결, 표면 자유 에너지), 적층 각 및 기하

(예를 들면, 편심 정도, fillet의 유무) 등의 다양한 요소에 영향을 받는다. 따라서 효과적인 복합재료 구조물의 설계를 위해서는 복합재료 접합 조인트에 대한 파손 메커니즘 및 다양한 요소들에 대한 영향을 고려한 파손 특성의 이해가 필수적이다.

본 연구에서는 일방향 복합재료 단일 겹치기(single-lap) 접합 조인트 시편에 대한 인장 시험 및 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 복합재료 접합 조인트의 파손 메커니즘을 이해하고 접합 방법(bonding method), 접착제 종류, 표면 조도, 접착제 두께, 필렛(fillet) 등이 파손 과정, 파손 모드 및 파손 강도에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

2. 실험

2.1 시편 준비

* 한국항공우주연구원 구조그룹

복합재료 단일 겹치기(single-lap) 접합 조인트 시편의 형상 및 재원은 Fig. 1과 같으며 Table 1에 그 종류 및 접합 파라미터를 표시하였다. 시편은 크게 2가지 종류의 동시성형(co-curing) 방법과 2가지 종류의 접착제(adhesive)를 사용한 이차 접합(secondary bonding) 방법을 고려하였다. 동시성형 방법(시편ID 11,12)에는 접착제 없는 경우와 필름형 구조용 접착제인 FM73(Cytec Industries Inc. 제작)을 사용한 경우 두 가지를 이용하였다. 이차 접합으로 접합된 시편은 paste형 구조용 접착제인 Hysol EA9309NA와 EA9309.3NA의 두 가지 접착제를 사용하였다. 이차 접합 시편의 제작에서는 다양한 접합 파라미터의 영향을 조사하기 위해 제조 압력, 복합재료 부재의 표면 마모를 위한 사포의 번호, 접착 길이 모서리의 필렛(fillet) 및 인공균열 조건을 변경하였다. 복합재료 부재로는 탄소섬유/에폭시 프리프레그(HT145/RS1222, 한국화이바 제작)로 적층한 일방향 적층판 [0]_{10T}를 사용하였다.

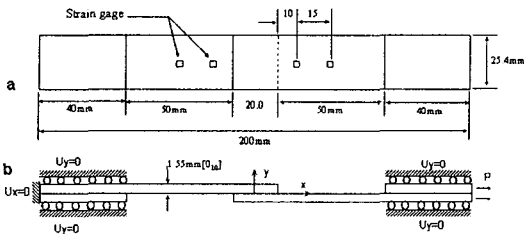


Fig. 1 Geometry and dimension of the composite single-lap joint specimens.

Table 3 Types and bonding parameters of composite single-lap joint specimens.

ID	bonding method	adhesive type	contact pressure	Mesh no. of sandpaper	corner condition of overlap length	bondline thickness
1	2ndary bonding	EA9309NA	3psi	#320	no fillet	0.04
2	*	EA9309NA			fillet (2mm long)	0.04
3	*	EA9309NA			fillet (4mm long)	0.04
4	*	EA9309NA			crack (2.5mm long)	0.09
5	*	EA9309NA			crack (5mm long)	0.10
6	*	EA9309.3NA	1psi	#220	no fillet	0.13
7	*	EA9309.3NA			#400	no fillet
8	*	EA9309.3NA	2psi	#320	no fillet	0.16
9	*	EA9309.3NA			no fillet	0.13
10	*	EA9309.3NA	4psi	#320	no fillet	0.13
11	Co-curing	None			N/A	no fillet
12	Co-curing	FM73	N/A		no fillet	0.12

2.2 시험 장치

복합재료 단일 겹치기 접합 조인트 시편은

MTS사의 UTM(Model 810, 10t톤 용량)을 이용해 인장하중으로 시험하였다. 하중은 변위 제어로 0.4mm/min의 증가율로 부가하였으며 시험 중에 하중, Stroke 변위, 부착한 스트레인 게이지로부터의 신호를 측정 및 저장하였다. 현미경으로 관찰된 영상은 캠코더를 이용해 기록하였다.

3. 수치 해석

3.1 파괴 역학 해석 이론

파괴역학을 도입하여 파손 강도를 예측하기 위하여 기하 비선형 유한요소해석 및 Virtual Crack Closure Technique(VCCT)[4]이라고 하는 수치적인 방법을 이용하였다. VCCT 기법은 유한요소모델의 해석을 통해 얻어진 균열 끝단에서의 절점력(nodal force)과 절점 변위(nodal displacement)를 이용해 변형률에너지방출률(Strain Energy Release Rate, 이하 SERR 또는 G라고 하겠음)을 다음과 같이 계산한다. 유한요소 모델은 8-절점 요소를 가지는 2차원 유한요소라고 가정하였다.

$$G_I = - \frac{Y_i(v_m - v_{m*}) + Y_j(v_l - v_{l*})}{2a}$$

$$G_{II} = - \frac{X_i(u_m - u_{m*}) + X_j(u_l - u_{l*})}{2a}$$

여기서, X_i, Y_i, X_j, Y_j 는 절점 i 및 j 에서의 x 및 y 방향의 절점력(nodal force)을 표시하며, u_m, v_m, u_l, v_l 와 $u_{m*}, v_{m*}, u_{l*}, v_{l*}$ 는 균열 위, 아래면의 절점에서의 변위를 나타낸다.

3.2 유한요소모델

인장시험을 수행한 시편에 대해 2차원 평면 변형률(plane strain)에 근거한 유한요소 메쉬(mesh)로 모델링 하여 상용 유한요소 코드인 Marc를 이용해 기하비선형 유한요소해석을 수행하였다. 요소는 reduced integration을 이용하는 8절점 평면 변형률 요소를 이용하였다. 유한요소모델에는 초기 손상이 없는 것과 시편시험에서 관찰된 몇 가지 형태의 초기 균열을 포함시킨 것을 각각 모델링 하였다. 초기 균열은 Fig. 2에서와 같이 세 가지의 형태를 유한요소모델에 포함시켜 각각의 유한요소 메쉬(mesh)를 구성하였다.

완성된 유한요소 모델은 대략 9800개의 요소와 30800개의 절점으로 구성되었다. 해석을 위한 하

중 및 경계조건은 Fig. 1에 표시한 바와 같다. 인장 하중은 앞서 시험을 통해 결정된 평균 파손 하중의 대표 값으로 14kN을 시편 끝단에 부가하였다.

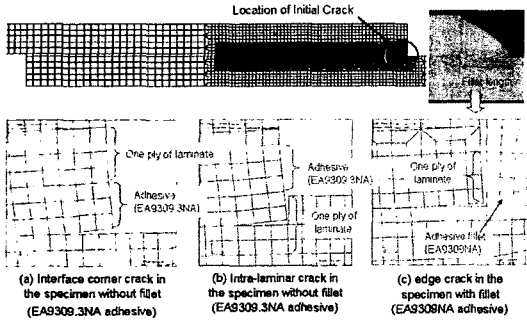


Fig. 2 Three types of initial cracks in the finite element meshes of damaged specimens.

4. 결과 및 검토

3.1 파손 과정 및 파손 모드

시험 결과에서 단일 겹치기 조인트 시편은 접합 방법에 따라 분명하게 다른 파손 과정 및 파손 모드가 나타났다. EA9309NA 및 EA9309.3NA 접착제로 이차 접합된 시편은 초기 균열 발생, 균열 성장 및 최종 파손이 순서적으로 나타났다.



Fig. 3 Typical patterns of crack initiation in the secondary bonded specimens.

Fig. 3은 이차접합 시편의 파손 과정을 나타내고 있다. 모든 이차 접합 시편에서 초기 균열은 그림에서 보는 바와 같이 접합길이(overlap length) 끝단 부근에서 발생하였으며 초기 균열의 정확한 위치는 끝단의 상태에 따라 약간씩 다르게 나타났다. 이차 접합 시편의 파손 모드는 주로 접착제와 복합재 부재의 계면 파손으로 나타났다. 또한 탄소 섬유의 일부가 접착제와 함께 분리되는 것이 발견되었으며 분리되는 양은 표면 조도가

큰 경우 더 많았다.

동시 성형으로 접합된 시편은 최종 파손 직전까지 균열이 발생하지 않다가 초기 균열이 발생하는 동시에 최종 파손이 발생하였다. FM73의 필름형 접착제를 사용해 동시 성형으로 접합된 모든 시편에서는 100% 층간 분리의 파손 모드가 나타났다. 층간 분리는 접착제 층과 인접한 복합재료 첫 번째 층 내부에서 발생하였다.

3.2 하중 변위 곡선

단일 겹치기 시편의 하중-변위 곡선에서의 거동 특성도 접합 방법에 따라 다른 특성이 나타났다. 두 가지 종류의 동시성형 시편은 모두 하중-변위 곡선이 파손이 발생하기 전까지 선형적인 거동을 나타내었다. 이에 비해 이차 접합 시편에서는 높은 하중에서 비선형적인 거동이 발생하였다. 비선형 거동은 접착제 층의 두께가 두꺼운 경우에 더 심하였다. 이것은 두꺼운 접착제 층을 갖는 경우, 초기 균열이 일찍 더 낮은 하중에서 발생하였으며 더 길게 성장하였기 때문이다.

3.3 접합 방법에 따른 조인트 파손 강도

접합 방법에 따른 단일 겹치기 시편의 파손 시험 강도를 Fig. 4에 나타내었다. 파손 강도는 파손하중을 접착면적으로 나눈 값(즉, 평균 응력)으로 표시한 것이다. 접착제를 사용하지 않고 동시 성형으로 접합된 시편이 가장 우수한 파손 강도를 보였다. 이에 비해 FM73의 필름형 접착제와 함께 동시 성형된 시편이 가장 낮은 파손 강도를 보였다.

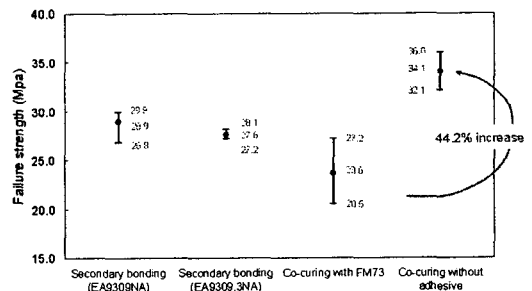


Fig. 4 Experimental failure strength of single-lap joint specimens with respect to bonding method.

Fig. 5에는 접합 방법에 따른 단일 겹치기 접합

조인트 시편의 강도와 조인트에 사용된 접착제의 재료 인장 강도를 함께 비교 표시하였다. 그림을 보면 FM73 접착제의 재료 강도는 이차 접합 조인트 시편에 사용된 EA9309.3NA 접착제보다 좋은 것을 알 수 있다. 이에 따라 금속 부재를 사용하는 단일 겹치기 조인트의 강도(제작사 사양서 인용 값임)는 사용된 접착제의 재료 강도와 비례하는 경향을 나타내고 있다. 하지만, 복합재료의 단일 겹치기 조인트 시편에서는 이러한 경향과는 다른 양상이 나타나고 있는 것이다. 즉, 접착제의 재료 강도는 더 좋지만 복합재료 단일 겹치기 조인트 시편의 강도는 더 낮게 나타내고 있는 것이다. 이러한 예상치 못한 결과는 이차 접합 조인트에서 발생한 균열이 복합재료 표면층에서 응력 집중이 완화시켰기 때문인 것으로 판단된다.

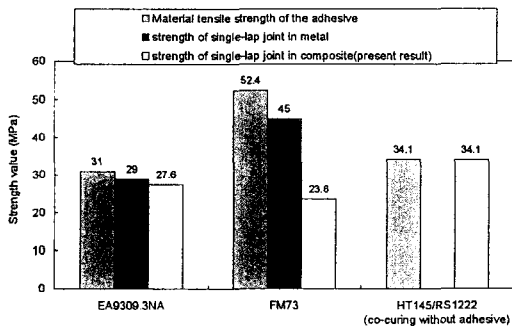


Fig. 5 Adhesive material tensile strength and single-lap joint strengths in metal and composite.

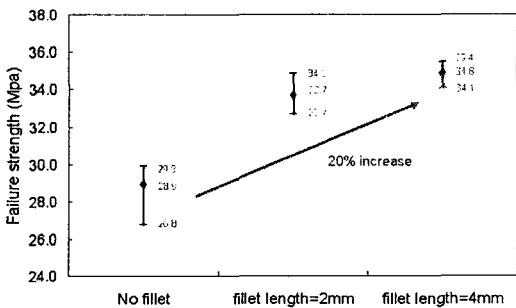


Fig. 6 Effects of existence and size of fillet on the test strength of secondary bonded specimens.

3.4 필렛(fillet)이 조인트 강도에 미치는 영향

이차 접합 조인트 시편에서 필렛(fillet)이 조인트의 시험 강도에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내

었다. 그림을 통해 필렛(fillet)이 있는 경우 단일 겹치기 조인트의 강도가 상당히 증가함을 알 수 있다. 하지만 필렛의 크기가 어느 정도 이상 커지면 그 효과는 감소하였다.

3.5 표면 조도 및 접착제 층의 두께가 조인트 강도에 미치는 영향

Fig. 7에는 복합재료의 표면 마모를 위해 사용된 사포의 mesh 번호에 따른 측정된 평균 표면 조도 및 조인트 시편의 시험 강도를 나타내었다. 사포의 번호가 증가할수록 표면 조도는 감소하며 조인트 강도는 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 mesh 번호 220~400 사이의 사포 중에 400번 사포를 사용하는 것이 조인트 강도 면에서 가장 유리함을 알 수 있다. 접착제 층의 두께의 영향에 대한 조사결과, 두께가 대략 0.1~0.2mm 사이에서는 접착제 층의 두께가 감소할수록 조인트 강도가 증가하지만 그 영향은 크지 않았다.

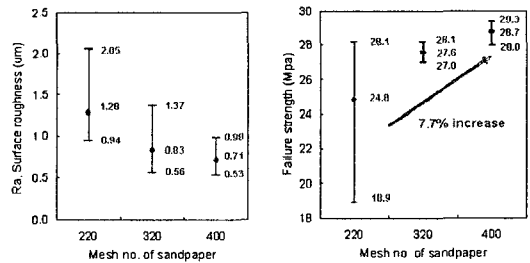


Fig. 7 Measured average surface roughness and strength of specimens with EA9309.3NA with respect to mesh number of abrasive sandpaper for the composite adherend.

3.6 초기 균열 발생 시점의 특성

이차 접합 조인트 시편의 시험을 통해 여러 가지 파라미터가 초기 균열의 발생 시점에 미치는 영향도 조사하였다. 조사된 여러 가지 파라미터 중에 접착제 층의 두께가 초기 균열의 발생 시점에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 접착제 두께가 증가함에 따라 초기 균열이 낮은 하중에서 발생하였다. 또한 두꺼운 접착제를 갖는 조인트 시편에서 균열이 더 길게 성장하였다.

3.7 유한요소해석 및 SERR 계산 결과

실험을 통해 관찰된 세 가지 초기 균열 유형

(Fig. 2,3 참조)에 대해 유한요소해석을 수행하고 그 결과 및 VCCT 기법을 이용해 SERR를 계산하였다. 초기 균열의 길이는 모두 0.05mm로 가정하였으며 계산 결과는 Fig. 8에 표시한 바와 같다. 층간분리 초기 균열을 제외한 세 가지 경우는 접착제의 성질이 비슷하고 파손 모드가 계면 파손으로 동일하므로 파괴 인성 값이 동일하다는 가정 하에 상대적인 비교만이 가능하다. 그림의 결과를 보면 모서리(corner) 균열이 가장자리(edge)의 균열 보다 더 균열 진전의 가능성이 크며 또한 같은 모서리 균열에서도 접착제 층의 두께가 두꺼운(EA9309.3NA 접착제) 경우에서 균열 진전이 더 잘 될 것임을 예상할 수 있다. 이러한 결과는 시험의 결과와 일치하는 결과이다. 그리고 계면 균열과 층간분리 균열은 파괴 인성 및 선도가 틀려지므로 정확한 분석이 어렵지만 층간 분리 균열이 계면 균열 보다 SERR 값이 더 크게 계산되었다.

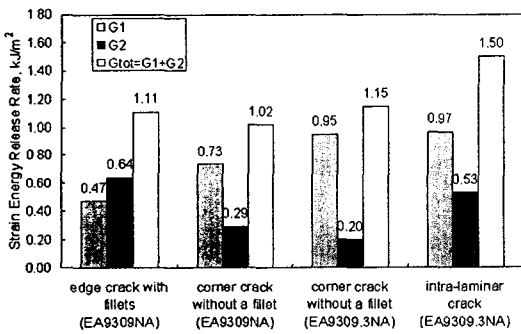


Fig. 8 Calculated strain energy release rates of secondary bonded specimens loaded in 14.0kN of tension (initial crack length = 0.05mm).

4. 결 론

일방향 복합재료 단일 겹치기 접합조인트의 파손 과정 및 파손 모드는 접합 방법에 따라 다른 특성을 보였다. 이차 접합 시편은 점진적인 파손 과정을 보였다. 조인트 시편의 파손 강도는 접착제 없이 동시성형 접합된 시편이 가장 우수하였으며 접착제 필름을 사용해 동시성형 접합된 시편은 이차 접합 시편보다 낮은 파손 강도를 보였다. 이를 통해 접착제의 재료 강도 및 금속 부재

에서의 접합 강도가 우수할지라도 복합재료 접합 조인트에서는 더 나쁜 파손 강도를 보일 수 있음을 확인하였다. 이차 접합 조인트 시편에서 접착제 층의 두께가 균열의 발생 시점에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 표면 조도 및 필렛(fillet)은 조인트의 파손 강도에 상당한 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 유한요소해석 및 파괴 역학 기법을 이용하여 초기 균열 종류에 따른 균열 성장을 예측하였으며 시험결과와 일치하였다.

참고문헌

- (1) 김광수, 박재성, 장영순, 이영무, "복합재료 Single-Lap 본딩 조인트의 파괴 특성에 대한 실험 및 수치해석 연구," 한국복합재료학회지 제16권 제5호, 2003, pp.45-53.
- (2) Parker, B.M., Waghorne, R.M., "Surface Pretreatment of Carbon Fibre-reinforced Composites for Adhesive Bonding", Composites, vol.22, no.3, 1982, pp.280-288.
- (3) Kim, J.K., Lee, D.G. "Characteristics of Plasma Surface Treated Composite Adhesive Joints at High Environment Temperature," Composite Structures, 57, 2002, pp.37-46.
- (4) Rybicki, E.F., Kanninen, M.F., "A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 9, 1977, pp. 931-938