

# 복합재료 Single Lap 접합 조인트의 파손 예측

김광수\*·장영순\*·이영무\*

## Failure Prediction of Composite Single Lap Bonded Joints

Kwang-Soo Kim, Young-Soon Jang, Yeong-Moo Yi

### Abstract

Failure predictions of composite single-lap bonded joints were performed considering both of composite adherend failure and bondline failure. An elastic-perfectly plastic model of adhesive and a delamination failure criterion are used. The failure prediction results such as failure mode and strength have very good agreements with the test results of joint specimens with various bonding methods and parameters. The influence of variations in the effective strength (that is, adhesion performance) and plastic behavior of adhesive on the failure characteristics of composite bonded joints are investigated numerically. The numerical results show that optimal joint strength is archived when adhesive and delamination failure occur in the same time.

**Key Words:** composite bonded joints, failure prediction, adhesive failure, delamination.

### 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 균일하게 하므로 조인트 효율 및 무게 면에서 유리하다고 할 수 있다.

복합재료 접합조인트의 또 한 가지 특징은 다양한 접합 방법과 파라미터가 존재한다는 것이다. 예를 들면, 접합 방법에는 동시성형(co-curing) 및 이차 접합(secondary bonding)의 두 가지가 있다. 동시 성형 방법은 다시 접착제 필름을 사용하는 방법과 복합재료 자체의 레진(resin)을 이용하는 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 이차 접합

방법은 복합재료 부재의 표면처리 조건, 제조 압력 및 필렛 등에 따라 접합 조인트의 거동 및 강도가 달라질 수 있다.

이전의 많은 연구들[1-5]에 의해 복합재료 접합 조인트의 파손 특성 및 다양한 파라미터의 영향에 대한 이해가 증진되었으며 이것은 복합재료 접합조인트의 효과적인 사용에 기여하고 있다. 하지만, 복합재료 접합 조인트의 파손 강도에 대한 신뢰성 있는 예측에는 아직 어려움이 있다. 이것은 복합재료 접합조인트의 파손 모드가 다양하고 복잡하기 때문이다.

복합재료 접합 조인트의 파손 예측에 대한 기존 연구[6-10]를 살펴보면 주로 두 가지 종류의 파손 기준이 사용되고 있다. 응력 또는 변형률에 기초한 방법과 파괴 역학 개념을 이용한 방법이 여기에 해당한다. 이 두 가지 방법은 나름대로의 장단점을 가지고 있으나 복합재료 접합 조인트의 다양한 파손모드를 동시에 고려할 수 있는 방법은 아직 존재하지 않는다. 기존의 논문들[6-10]을 살펴보면, 대부분 시험적으로 관찰된 한 가지 파손 모드를 바탕으로 이에 적합한 파손 기준을 적

\* 한국항공우주연구원 구조그룹

용하여 조인트 강도를 예측하고 있다.

하지만, 복합재료 접합 조인트는 동일한 기하학적 형상 및 치수를 갖더라도 접착제의 성질 또는 접합 방법에 따라 그 파손 모드가 달라질 수 있다. 이런 경우, 기존의 방법 중에 한 가지를 적용하여 조인트 강도를 예측하는 것은 오류를 발생시킬 수 있다.

본 연구에서는 복합재료 접합 조인트의 대표적인 파손 모드인 접착제 파손과 복합재료 부재의 층간분리 파손을 동시에 고려하여 조인트의 파손 강도를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 제시된 방법을 이용해 복합재료 접합 조인트 시편의 파손을 예측하였으며 그 결과를 시험 결과와 비교하였다.

## 2. 파손 예측 방법

### 2.1 탄소성 재료모델을 이용한 접착제 파손기준

접착제 층의 점진적인 파손을 고려하기 위해 그림 1과 같은 “탄성-완전 소성(elastic-perfectly plastic)”의 재료 모델을 접착제 재료에 적용하였다. 이 파손 기준은 점진적 파손 해석을 위한 가장 간단한 파손 모델에 해당하며 접착제 물성치도 재료 강성 및 극한 응력(ultimate stress)의 두 개만으로 간단하게 정의되며 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다.

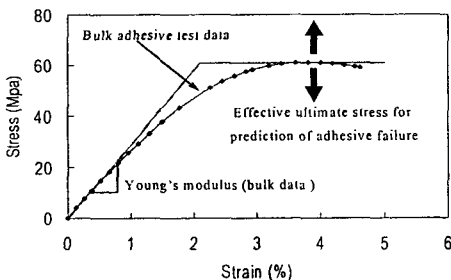


Fig. 1 Elastic-perfectly plastic material model for adhesives.

본 방법의 적용을 위해 접착제의 재료 강성은 벌크(bulk) 접착제 시편의 인장 시험 값[1]을 그대로 이용하였다. 이에 비해 접착제의 극한 응력(ultimate stress)은 벌크(bulk) 재료 시편의 물성치

를 그대로 이용하지 않았다. 대신 접합 조인트의 기준 시편에 대해 시험 파손 하중과 예측된 파손 하중을 일치시키도록 극한응력의 보정된 값(앞으로 “유효극한응력”이라고 하겠음)을 이용하였다.

### 2.2 복합재료 층간분리 파손기준

복합재료 접합 조인트에서 층간분리 파손의 특징은 층간 분리의 시작 하중이 바로 접합 조인트의 파손 하중이라는 것이다[1]. 본 연구에서는 다음과 같은 2차 함수 형태의 층간 분리 기준(quadratic delamination criteria)을 이용해 층간 분리 시작 하중을 예측하였다.

$$\sqrt{\frac{\sigma_{yy}^2}{Y_T} + \frac{\sigma_{zy}^2}{S_{zy}}} = 1 \quad (1)$$

위 식에서  $\sigma_{yy}$ 와  $\sigma_{zy}$ 는 층간 응력(interlaminar stress)을,  $Y_T$ 와  $S_{zy}$ 는 층간분리 허용응력(delamination stress allowable)을 나타낸다. 이 방법은 기본적으로 응력에 기초한 파손 기준에 해당한다. 응력에 기초한 다른 파손 기준이 그러하듯이 이 방법을 적용하기 위해서는 임계 길이와 층간분리 허용응력의 두 종류의 파라미터 값을 정의해야 한다. 본 연구에서 층간분리 허용응력은 복합재료 자체의 물성 값을 그대로 사용하였다. 임계 길이는 복합재료 층간 분리 파손이 발생한 기준 시편의 시험 결과를 이용해 결정하였다.

## 3. 수치 해석

시험 시편의 기하 및 유한요소모델은 Fig. 2와 같다. 자세한 시편의 제작/시험 과정 및 결과는 참고문헌[1]에 기재되어 있다.

복합재료 부재는 탄소섬유/에폭시 프리프레그(HT145/ RS1222, 한국화이버 제작)로 제작된 일방향 적층판  $[0]_{10T}$ 에 해당한다. 사용된 복합재료 물성치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_{11} &= 119 \text{ GPa} & E_{22} &= 9.28 \text{ GPa} & G_{12} &= 4.64 \text{ GPa} \\ \nu_{12} &= 0.34 & Y_T &= 34.1 \text{ MPa} & S_{xy} &= 88.9 \text{ MPa} \end{aligned}$$

유한요소해석은 상용 코드인 MSC/MARC를 이용해 비선형해석으로 수행하였다. 해석을 위해 8절점 평면 변형률 요소(8 node plane strain element)를 이용하였다. 파손 예측은 Table 1에 표시된 바와 같이 총 5가지 시편에 대해 수행하였다. 재료 모델은 복합재료는 선형 탄성으로 가정하였으며, 접착제는 탄성-완전 소성 모델로 고려하였다.

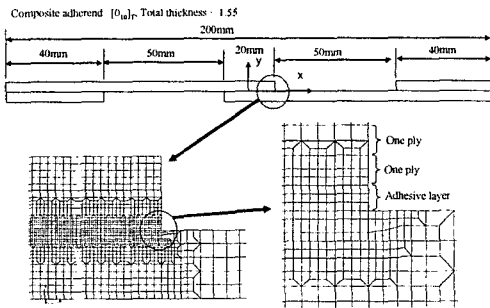


Fig. 2 Geometry and FE-model of composite single lap joint with adhesive.

Table 1 Types of joint specimens for comparison between failure predictions and test results.

#	Bonding method	Adhesive	Fillet	Failure mode(test)
1	*SB	EA9309.3NA	None	Adhesive & interfacial failure
2	SB	EA9309NA	None	"
3	SB	EA9309NA	Fillet	"
4	**CC	FM73	None	100% delamination
5	CC	None	None	100% delamination

주) \* SB : Secondary bonding, \*\* CC : Co-curing

#### 4. 결과 및 토의

접착제의 “유효극한응력”은 접착제 종류별로 기준 시편의 시험 결과를 이용해 결정하였으며 그 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Effective ultimate stress results of adhesives.

Adhesive	Bulk adhesive ultimate stress [1] (MPa)	Effective ultimate stress (MPa)	Reference specimen
EA9309.3NA	36.3	46.8	Specimen #1
EA9309NA	34.5	45.5	Specimen #3
FM73	60.4	77.4	Bonded joint in metal[13]

Table 2의 결과를 보면 접착제의 “유효극한응력”은 벌크 접착제의 물성치보다 약 30%정도 일정하게 크게 나타났다. 따라서 얇은 접착제 층의 유효극한응력은 기본적으로 접착제 벌크 재료의 물성치에 기초하지만 얇은 접착제 층 내에서 부재와의 상호 작용을 반영한 값이라는 설명이 가능하다.

모든 접합 조인트 시편에 대한 시험 및 해석 결과를 Table 3에 요약하였다. Table 3에서 볼 수 있는 바와 같이 복합재료 접합조인트는 접합 방법, 접착제 강도 및 필렛 등에 따라 파손 모드 및 파손 강도가 많이 달라지는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 제안한 파손 예측 방법은 이러한 다양한 효과를 고려하여 모든 시편의 Critical 파손 모드와 파손 하중을 매우 정확하게 예측할 수 있다.

Table 3 Summary of failure prediction results.

No	Specimen		Test result		Failure prediction		Error
	Adhesive	Fillet	Failure load (kN)	Failure mode	Failure load (kN)	Failure mode	
1	EA9309.3NA	None	14.0	Bondline	13.8	Same as test	-1.4%
2	EA9309NA	None	14.7	Bondline	14.7	"	0.0%
3	EA9309NA	fillet	17.7	Bondline	17.4	"	-1.6%
4	FM73	None	12.0	Delamination	12.4	"	3.0%
5	None	None	17.3	Delamination	16.8	"	-2.9%

Fig. 3은 대표적인 결과로서 EA9309.3NA 접착제를 이용해 이차 접합된 시편(#1)의 파손 예측 및 시험 결과를 비교하고 있다. Fig. 3(a)는 하중-변위 선도를 나타내며 Fig. 3(b)는 하중 증가에 따른 층간 분리 파손 지수의 값을 표시하였다. 파손 지수의 값이 1에 도달하면 층간분리에 의해 조인트가 파손됨을 의미한다. 하중-변위 선도를 보면 하중이 증가함에 따라 변위가 계속 증가하다가 더 이상의 하중 증가 없이 변위만 증가하는 현상이 시험 및 해석에서 동일하게 나타나고 있다. 이러한 현상은 해석적으로는 접착제 층이 전체적으로 완전 소성영역으로 변하면서 나타나는 현상으로 접착제 파손의 발생을 의미한다.

이에 비해 층간분리 파손지수 결과를 보면 조인트 시편이 접착제 파손에 도달할 때까지 복합재료의 층간분리 파손은 발생하고 있지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 시험 결과와 매우 잘 일치하는 것이다.

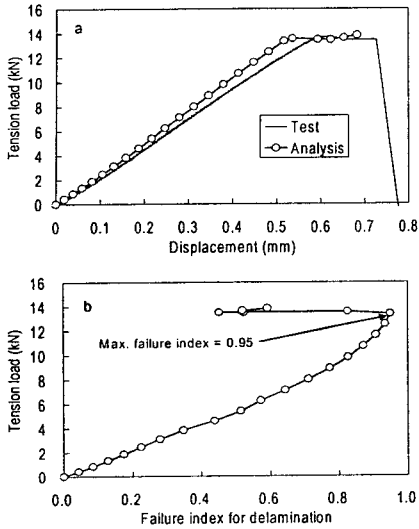


Fig. 3 (a) Load-displacement curve, (b) Delamination failure index of specimen #1 with EA9309.3NA adhesive.

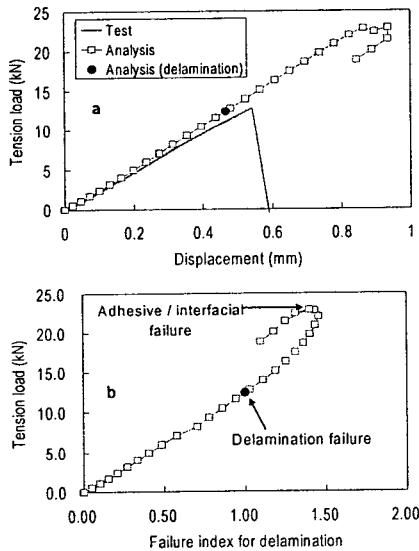


Fig. 4 (a) Load-displacement curve, (b) Delamination failure index of co-cured specimen #4 with FM73 adhesive.

Fig. 4는 FM73 접착제를 이용한 동시성형 시편의 파손 예측 결과를 표시하고 있다. 예측 결과에 의하면 접착제 파손 하중과 층간분리 파손하중이 각각 22.8kN과 12.9kN으로 많은 차이가 나

고 있다. 즉, 이 시편은 접착제 파손 하중은 매우 높지만 층간분리 파손에는 취약한 것으로 예측되었다. 따라서 이 시편의 파손하중은 12.9kN으로 앞서의 접착제 없는 동시 성형 시편은 물론 이차 접합 시편의 파손하중보다도 더 낮은 것으로 예측되었다. 이와 같은 예측 결과는 시험 결과와 매우 잘 일치하는 것이다.

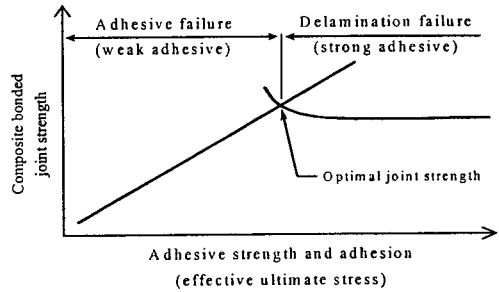


Fig. 5 Failure mode and strength of composite bonded joints w.r.t. adhesive strength.

파손 예측에 대한 수치 결과를 통해 접착제를 사용하는 경우 접착제의 유효극한응력 변화에 따라 접합 조인트의 파손 모드 및 강도가 달라짐을 알 수 있는데 그 경향을 Fig. 5에 요약하여 도식적으로 나타내었다. 즉, 접착제의 강도가 약한 경우 접착제 파손이 먼저 발생하며 이때 접착제 파손 강도는 접착제의 유효강도와 비례하는 경향을 갖는다. 접착제의 유효강도가 어느 값 이상 증가하게 되면 조인트 파손 모드는 접착제 파손에서 층간분리 파손으로 바뀌게 되는데 이 지점에서 접합조인트의 파손 강도가 가장 좋아진다. 이것은 접착제 강도가 더 많이 증가하게 되면 층간분리 파손 하중이 감소하다가 일정해지기 때문이다. 따라서 이러한 특성이 복합재료 접착조인트의 강도가 접착제의 강도 및 접착 성능과 반드시 일치하는 않는 이유라고 할 수 있다. 따라서 복합재료 접합 조인트의 파손 강도 향상을 위한 최적의 경우는 접착제 파손과 층간분리 파손이 거의 동시에 발생하는 경우라고 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 복합재료 접합 조인트의 다양한 파손 모드를 고려하여 파손 강도를 예측할 수 있

는 방법을 제시하였다. 제시된 방법은 접착제의 탄성-완전 소성 재료 모델을 이용해 접착제 층의 파손 하중을 예측하며 계면응력 및 층간분리 파손 식을 이용하여 층간분리 파손 하중을 계산한다. 제시된 방법을 이용해 이전의 복합재료 Single-Lap 접합조인트의 파손 시험결과와 비교하였다. 이를 통해 본 방법이 다양한 접합 방법에 따른 실제적인 파손모드 및 파손 하중을 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다. 또한 접착제의 유효강도(또는 접착 성능)의 변화 및 소성거동이 복합재료 접합 조인트의 파손 특성에 미치는 영향을 수치적으로 평가하였다. 이를 통해, 복합재료 접합조인트의 파손 강도는 접착제의 접착 성능과 항상 비례하지 않으며 층간분리 파손과 접착제 파손이 동시에 발생하도록 하는 것이 접합 조인트 강도를 최대로 향상시킬 수 있음을 보였다.

#### 참고문헌

- (1) 김광수, 유재석, 안재모, 장영순, "일방향 복합 재료 Single Lap 조인트의 파손 모드 및 강도, I. 실험," 한국복합재료학회지, 제 □권, 제 □호, 2004, pp.□~□, 논문 제출 및 심사중.
- (2) Kim, J.K., Kim, H.S, and Lee, D.G. "Investigation of Optimal Surface Treatments for Carbon/Epoxy Composite Adhesive Joints," J. Adhesion Sci. Technol., Vol.17, No.3, 2003, pp.329-352.
- (3) Kairouz, K.C., Matthews, F.L., "Strength and Failure Modes of Bonded Single Lap Joints between Cross-Ply Adherends," Composites, Vol.24, No.6, 1993, pp.475-484.
- (4) Tong, L., "Failure of Adhesive-Bonded Composite Single Lap Joints with Embedded Cracks," AIAA J., Vol.36, No.3, 1998, pp.448-456.
- (5) Huang, H., Yang, C.C., Tomblin, J.S., Harter, P., "Stress and Failure Analysis of Adhesive-Bonded Composite Joints Using ASTM D3165 Specimen," Proceedings of American Society for Composites, No.15, 2000, pp. 599-608.
- (6) Huang, H., Yang, C.C., Tomblin, J.S., Harter, P., "Stress and Failure Analysis of Adhesive-Bonded Composite Joints Using ASTM D3165 Specimen," Proceedings of American Society for Composites, No.15, 2000, pp. 599-608.
- (7) Tong, L., "Failure of Adhesive-Bonded Composite Single Lap Joints with Embedded Cracks," AIAA J., Vol.36, No.3, 1998, pp.448-456.
- (8) Qin, M., Dzenis, Y., "Analysis of Single-Lap Adhesive Composite Joints with Delaminated Adherends," Composites, Part B 34, 2003, pp.167-173.
- (9) Kairouz, K.C., Matthews, F.L., "Strength and Failure Modes of Bonded Single Lap Joints between Cross-Ply Adherends," Composites, Vol.24, No.6, 1993, pp.475-484.
- (10) Kayupov, M., Dzenis, Y.A., "Stress concentrations caused by bond cracks in single-lap adhesive composite joints", Composite Structures 54, pp.215-220, 2001.