

論文

일방향 복합재료 Single Lap 접합 조인트의 파손 모드 및 파손 강도

II. 파손 예측

김광수^{*,+}, 이영무^{*}, 김천곤^{**}

Failure Mode and Strength of Unidirectional Composite Single Lap Bonded Joints

II. Failure Prediction

Kwang-Soo Kim^{*,+}, Young-Moo Yi^{*}, Chun-Gon Kim^{**}

ABSTRACT

A methodology is presented for the failure prediction of composite single-lap bonded joints considering both of composite adherend failure and bondline failure. An elastic-perfectly plastic model of adhesive and a delamination failure criterion are used in the methodology. The failure predictions have been performed using finite element method and the proposed methodology. 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.

초 록

본 논문에서는 복합재료 접합 조인트의 다양한 파손 모드를 고려하여 파손 강도를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 제시된 방법에서는 접착제의 탄성-완전 소성 재료 모델과 층간분리 파손 식을 이용해 접착제 파손 하중과 복합재료 부재의 층간분리 파손 하중을 동시에 계산하였다. 제시된 방법을 유한요소해석에 도입하여 복합재료 Single-Lap 접합조인트의 파손 예측을 수행하였으며 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) 및 소성 거동이 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 조인트의 강도를 최대로 향상시킬 수 있음을 보였다.

Key Words: 복합재료 접합 조인트(composite bonded joint), 파손 예측(failure prediction), 접착제 파손(adhesive failure), 층간분리(delamination), 단일 겹치기(single-lap)

1. 서 론

복합재료 구조물을 조립하는 방법은 크게 기계적 체결

*+ 한국항공우주연구원 구조그룹 교신저자(E-mail:kskim@kari.re.kr)

* 한국항공우주연구원 우주발사체사업단 기술실

** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

(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, 제조압력 및 필렛 등에 따라 접합 조인트의 거동 및 강도가 달라질 수 있다.

이전의 많은 연구들[1-8]에 의해 복합재료 접합조인트의 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[5-8]를 살펴보면 주로 두 가지 종류의 파손 기준이 사용되고 있다. 응력 또는 변형률에 기초한 방법[5,6]과 파괴 역학 개념을 이용한 방법[6-8]이 여기에 해당한다. 응력 또는 변형률에 기초한 방법은 주로 접합 조인트 내에 작용하는 최대 응력(또는 변형률) 및 관련된 파손 판정식을 이용한다. 하지만 접합 조인트 내에는 특이성이 존재하므로 응력 및 변형률의 최대 값을 이용하는 것은 부적절하다. 이것은 특이점에서는 매우 큰 응력이 작용할 뿐만 아니라 최대 응력 값도 해석 모델의 메쉬(mesh) 조밀도에 따라 달라지기 때문이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 특이점에서 임의의 거리(대개 “임계 길이” 또는 “critical distance”라고 함)만큼 떨어진 곳에서의 결과 값 또는 특정영역의 평균값을 대개 이용하여 임계거리는 기준 시편의 시험 결과를 통해 결정하게 된다.

파괴 역학에 기초한 방법은 접합 조인트에 초기 균열이 존재한다고 가정하고 이 균열의 진전 여부를 판단하므로 접합 조인트의 파손을 예측한다. 이 방법을 적용하기 위해서는 시험적으로 결정된 파괴 인성(fracture toughness) 허용 값을 알고 있어야 한다. 파괴 인성 값은 접합 조인트의 파손 모드(예를 들면, 계면 파손, 접착제 파손 및 복합재료 부재의 층간분리 등)뿐만 아니라 파괴 모드의 혼합율(mode mix)에 따라서도 달라지므로 이를 결정하는 시험은 복잡하고 많은 노력이 필요하다. 또한 이 방법은 초기 균열이 없는 형상에는 적용하기 어려운 단점이 있다.

이와 같이 두 방법은 나름대로의 장단점을 가지고 있으

나 복합재료 접합 조인트의 다양한 파손모드를 동시에 고려할 수 있는 방법은 아직 존재하지 않는다. 기존의 논문들[5-8]을 살펴보면, 대부분 시험적으로 관찰된 한 가지 파손 모드를 바탕으로 이에 적합한 파손 기준을 적용하여 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.

예를 들면, 이전의 접합 조인트 시험[1]에서 접합 방법에 따라 접착제 층의 파손 및 복합재료 부재 파손(특히, 층간 분리 파손)의 두 가지 주요한 파손 모드가 발생하였으며 파손모드에 따라 조인트강도도 크게 달라졌다. 이런 경우, 한 가지 파손 기준으로 접합 조인트의 최종 파손 강도를 예측하기 보다는 발생 가능한 파손 모드에 대해 여러 가지 파손 기준을 동시에 적용하므로 임계(critical) 파손 모드와 하중을 결정하는 것이 필요하다.

기존 연구의 또 한가지 중요한 단점은 대부분의 연구가 접착제의 재료 비선형에 대한 고려를 포함하지 않는다는 것이다. 접합 조인트에서는 국부적으로 높은 응력이 발생하며 이로 인해 대개의 경우, 최종적인 파손 이전에 이미 소성영역이 발생하게 되며 이로 인해 접착제 층 및 인근 접착부재의 응력 및 변형률 분포도 영향을 받게 된다.

본 연구에서는 접착제의 재료 비선형을 고려하면서 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. 또한 접착제 강도 및 소성 거동이 복합재료 접합 조인트의 파손 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 접합 조인트 파손 예측 방법

이전의 시험 결과[1]에 의하면 복합재료 접합조인트의 파손 모드는 크게 보면 2가지로 구분할 수 있다. 한 가지는 접착제 층의 파손이며 다른 한 가지는 복합재료 부재의 층간분리 파손이었다. 첫 번째 파손 모드의 특징은 접착제 층의 균열 진전 및 소성 파손으로 인해 조인트의 점진적인 파손이 발생하는 것이다. 두 번째 파손 모드는 초기 균열 없이 복합재료 부재의 층간 분리로 갑작스럽게 파손되는 것이다. 이 두 가지 파손 모드는 복합재료 접합 조인트에서 발생하는 가장 흔한 파손 모드라고 할 수 있다.

본 방법에서는 접착제 파손 및 층간분리의 두 가지 주요한 파손 모드에 대해 각각 별도의 파손 기준을 적용하므로

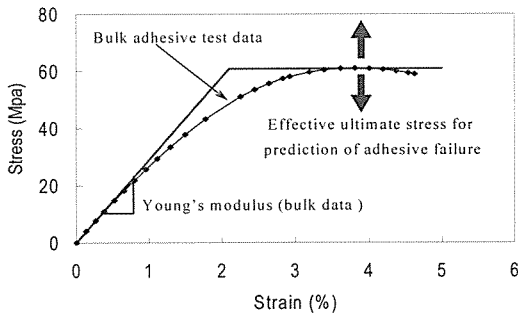


Fig. 1 Elastic-perfectly plastic material model for adhesives.

접합조인트의 주된 파손 모드와 파손 하중을 동시에 예측하고자 하였다. 각 파손 모드에 대한 파손 기준을 자세히 설명하면 다음과 같다.

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.

이 방법을 적용하게 되면 접합 조인트에 작용하는 하중이 증가함에 따라 응력이 집중되는 부분에서 시작된 소성 영역이 점차 접착제 층을 따라 확대된다. 결국에 전체 접착제 층에서 소성이 발생하게 되면 더 이상의 추가적인 하중 지지가 없는 상태에 도달하게 되며 이때의 하중이 접합 조인트의 파손 하중이 되는 것이다. 이러한 파손 개념은 이미 이전 연구[9]에서 적용된 바 있으며 실제 접착제의 점진적인 파손 특성과 물리적으로 일치하는 개념이다.

하지만, 본 방법이 이전 연구[9]의 방법과 다른 것은 이전 연구에서는 벌크 접착제 시편으로부터 획득된 물성치를 그대로 사용하였지만, 본 연구에는 “유효극한응력(effective ultimate stress)” 개념을 이용하였다. 즉, 접착제의 재료 강성은 벌크 접착제 시편의 인장 시험 값[1]을 그대로 이용하였지만 접착제의 극한 응력(ultimate stress)은 벌크(bulk) 재료 시편의 물성치를 그대로 이용하지 않았다. 대신 접합 조인트의 기준 시편에 대해 시험 파손 하중과 예측된 파손 하중을 일치시키도록 극한응력의 보정된 값(앞으로 “유효 극한응력”이라고 하겠음)을 이용하였다.

유효극한응력(effective ultimate stress)을 이용하는 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 첫째는 얇은 접착제 층의 극한 강도는 접착 부재와의 상호 작용으로 벌크 재료의 물성

치와 같지 않기 때문이다. 두 번째는 접착제의 유효극한응력을 조절하므로 접착부재의 표면 처리 변화에 따른 조인트 강도 변화를 어느 정도는 고려할 수 있도록 하기 위해서이다. 즉, 접착제 층의 파손은 표면처리 조건에 따라 접착제 내부 파손(cohesive failure of adhesive), 계면 파손(interfacial failure) 및 이들의 혼합 파손으로 나눌 수 있다. 이때 이들 파손 모드의 변화에 의해서도 파손 강도는 다소 달라질 수 있기 때문이다. 따라서 만일 접합 조인트의 파손 모드 및 강도를 변화시킬 정도로 접합 부재의 표면 처리 조건이 달라지면 유효극한응력은 다시 구해야 할 것이다. 하지만 부적절한 표면 조건에 따른 계면 파손은 본 논문에서는 고려하지 않는다.

접착제에 대해 탄소성 재료 모델을 사용하는 또 다른 중요한 이유는 복합재료 부재의 정확한 파손 예측을 위해서이기도 하다. 즉, 접착제에서 소성이 발생하면 응력 분포에서 특이성이 사라지고 인접한 복합재료 부재에서도 응력 분포가 변하게 된다. 접착제의 선형 탄성 모델을 이용할 경우 이러한 효과를 고려하지 못하게 되어 결과적으로 복합재료 부재의 파손을 잘못 예측할 수 있다.

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.

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

위 식에서 σ_{yy} 와 σ_{xy} 는 층간 응력(interlaminar stress)을, Y_T 와 S_{xy} 는 층간분리 허용응력(delamination stress allowable)을 나타낸다. Brewer 및 Lagace[10]에 의해 제안된 위의 파손 기준은 복합재료 내부의 층간 응력을 이용하여 층간 분리를 예측하는 식으로 많이 사용되고 있는 방법이다. 따라서 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. 만일 다른 형태의 복합재료 부재 파손도 고려할 필요가 있으면 응력에 근거한 다른 파손 기준(예를 들면, Tsai-Wu, 최대 응력 기준 등)을 적용하면 된다.

3. 수치 해석

본 연구에서 제시한 방법을 이용해 복합재료 single-lap 접합 조인트의 임계(critical) 파손 모드 및 파손 하중을 예측해 보았다. 예측 결과를 이전의 시편 시험 결과[1]와 비교하였다. 또한 해석을 통해 복합재료 접합 조인트의 파손 특성에 대한 이해를 도모하고자 한다.

시험 시편의 기하 및 유한요소모델은 Fig. 2와 같다. 자세한 시편의 제작/시험 과정 및 결과는 참고문헌[1]에 기재되어 있다. Fig. 2의 유한요소모델은 접착제가 포함된 시편에 해당하며 접착제 없이 동시 성형된 시편은 접착제가 포함되지 않도록 유한요소모델을 구성하였다.

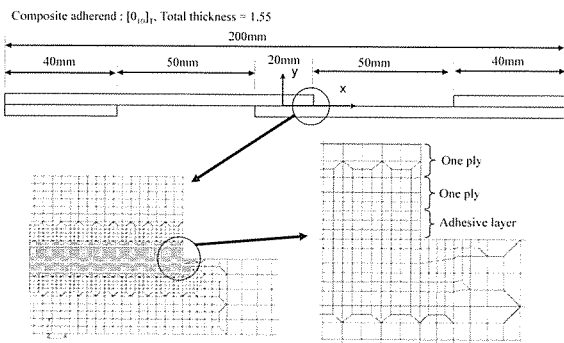


Fig. 2 Geometry and FE-model of composite single lap joint with adhesive.

복합재료 부재는 탄소섬유/에폭시 프리프레그(HT145/RS1222, 한국화이바 제작)로 제작된 일방향 적층판 $[0]_{101}$ 에 해당한다. 사용된 복합재료 물성치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_{11} &= 119 \text{ GPa} & E_{22} &= 9.28 \text{ GPa} & G_{12} &= 4.64 \text{ GPa} \\ \nu_{12} &= 0.34 & Y_1 &= 34.1 \text{ MPa} & S_{xy} &= 88.9 \text{ MPa} \end{aligned}$$

해석에 필요한 다른 복합재료 물성치는 $E_{33}=E_{22}$, $G_{13}=G_{12}$, $\nu_{13}=\nu_{12}$, $\nu_{23}=0.59$, $G_{23}=E_{22}/2(1+\nu_{23})=2.92 \text{ GPa}$ 라는 가정으로 구하였다. 접착제 물성치는 벌크 접착제 시편의 인장시험[1]을 통해 결정된 다음의 값들을 사용하였다.

- EA9309NA 접착제 : $E=2.45 \text{ GPa}$, $\nu=0.3$
- EA9309.3NA 접착제 : $E=2.62 \text{ GPa}$, $\nu=0.38$
- FM73 접착제 : $E=2.87 \text{ GPa}$, $\nu=0.40$

유한요소해석은 상용 코드인 MSC/MARC를 이용해 비선형 해석으로 수행하였다. 해석을 위해 reduced integration을 이용하는 8절점 평면 변형률 요소(8-node plane strain element)를 이용하였다. 해석 모델의 하중 및 경계 조건은

Fig. 3과 같다. 시험 및 예측 결과의 비교는 Table 1에 표시된 바와 같이 총 5가지 시편에 대해 수행하였다. 재료 모델은 복합재료는 선형 탄성으로 가정하였으며, 접착제는 탄성-완전 소성 모델로 고려하였다.

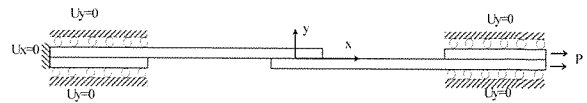


Fig. 3 Load and boundary condition for FE-model.

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 검토

4.1 파손 기준 파라미터 결정

접합 조인트의 Critical 파손 모드 및 파손 강도를 예측하기 위해서는 먼저 해석 및 시험 결과 사이의 비교를 통해 파손 기준 파라미터를 결정해야 한다. 즉, 접착제 파손 예측을 위해서는 접착제 재료의 “유효극한응력”이 필요하며, 층간 분리 파손 예측을 위해서는 “특성 길이”를 결정해야 한다.

접착제의 “유효극한응력”은 접착제 종류별로 기준 시편의 시험 결과를 이용해 결정하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 즉, EA9309NA 및 EA9309.3NA의 유효극한응력은 조인트 시편(#1,2)의 시험 파손 하중을 이용해 결정하였다. 하지만 FM73 접착제 필름으로 동시 성형된 시편(#4)에서는 층간분리의 최종 파손이 발생하였으므로 접착제의 유효극한응력을 계산할 수 없었다. 그래서 금속 부재 접합조인트의 시험 파손 하중(제작사 제공 사양[11] 참고)을 이용해 FM73 접착제의 “유효극한응력”을 계산하였다.

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.

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[11]

층간분리 파손 기준의 적용을 위한 “특성 길이”는 층간 분리가 발생한 두 가지 시편, 즉, FM 73 접착제를 이용한 동시 접합 시편(#4)과 접착제 없이 동시 성형된 시편(#5)의 시험 결과를 이용해 결정하였다. 이를 위해 시편의 시험 파손 하중 조건에서 접착제 층과 복합재료 부재 사이의 계면 응력을 계산하고 계산된 응력을 층간분리 파손 식에 대입하여 이 식을 만족하는 지점으로 임계 길이를 결정하였다. 두 가지 동시 성형 시편에서 이 지점의 위치는 일치하였으며 특성 길이는 0.432mm이었다.

4.2 파손 예측 및 시험 결과 비교

Fig. 4는 EA9309.3NA 접착제를 이용해 이차 접합된 시편(#1)의 파손 예측 및 시험 결과를 비교하고 있다. Fig. 4(a)는 하중-변위 선도를 나타내며 Fig. 4(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. 따라서 본 이차 접합 시편은 주된 파손 모드가 접착제 파손이며 파손 하중은 약 13.8kN으로 예측되었다. 이러한 결과는 시험 결과와 매우 잘 일치하는 것이다.

Fig. 5에는 하중이 증가함에 따라 접착제 층과 복합재료 부재 사이의 계면 응력 분포의 해석 결과를 보여주고 있다. 그림에서 $x=0$ 은 접합길이의 중간 지점을 나타내며 $x=10$ 은 접합 길이의 끝단을 의미한다. 해석 결과에 의하면 작용 하중이 작을 때는 계면 응력분포가 특이성을 가지는 것을 알 수 있다. 하지만, 하중이 커짐에 따라 응력분포의 특이성이 사라지고 있다. 특히 전단 응력의 분포가 비교적 일정해 지고 있다. 이것은 하중이 증가함에 따라 소성 영역이 접착제 층을 따라 증가하고 있음을 나타낸다.

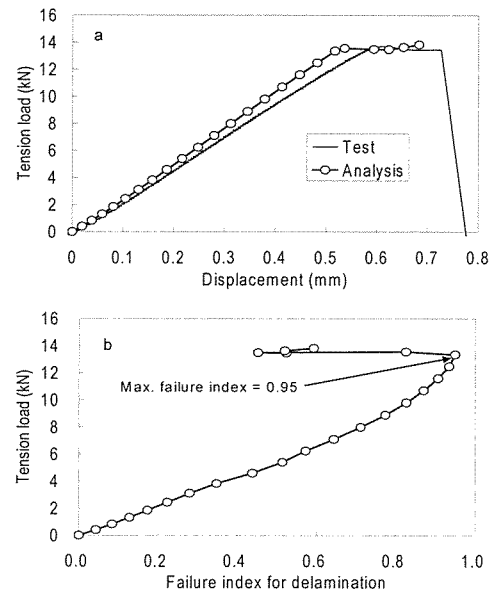


Fig. 4 (a) Load-displacement curve, (b) Delamination failure index of specimen #1 with EA9309.3NA adhesive.

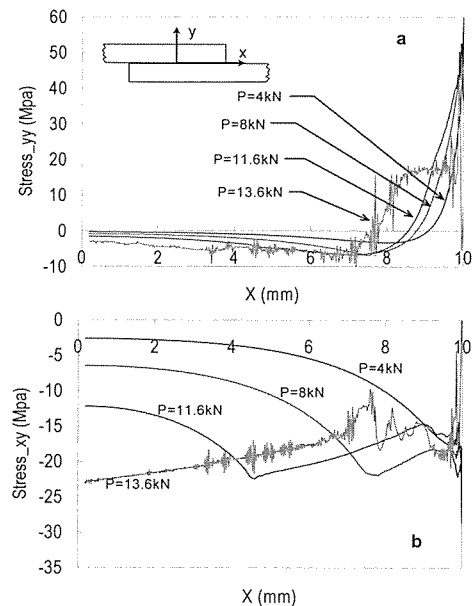


Fig. 5 (a) Interfacial normal stress, (b) Interfacial shear stress of specimen #1 with EA9309.3NA adhesive.

Fig. 6은 접착제 없는 동시 성형 시편의 파손 예측 결과를 보여 주고 있다. 이 시편의 파손 하중은 앞서 Fig. 4의 이차 접합 시편보다 더 크지만 하중-변위 곡선의 비선형

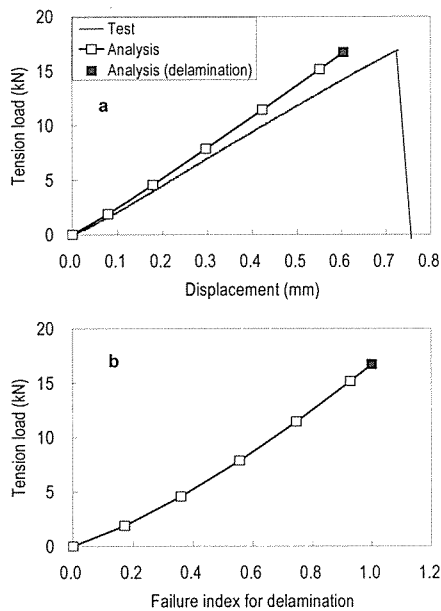


Fig. 6 (a) Load-displacement curve, (b) Delamination failure index of co-cured specimen #5 without adhesive.

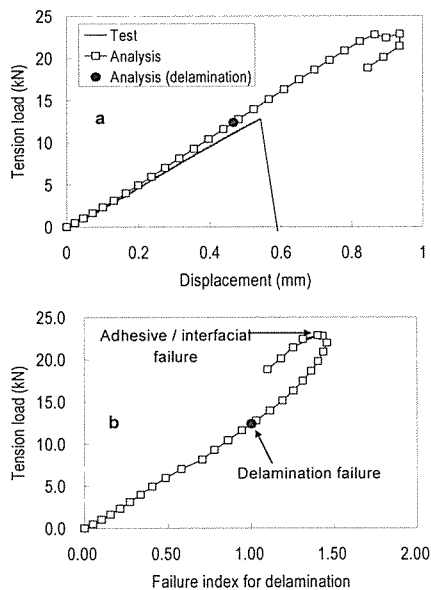


Fig. 7 (a) Load-displacement curve, (b) Delamination failure index of co-cured specimen #4 with FM73 adhesive.

거동은 나타나고 있지 않다. 이것은 본 시편은 접착제에 의한 소성 거동이 존재하지 않기 때문이다. 시편의 하중-변위 곡선 및 층간분리 예측 하중은 시험 결과와 매우 잘 일치하였다.

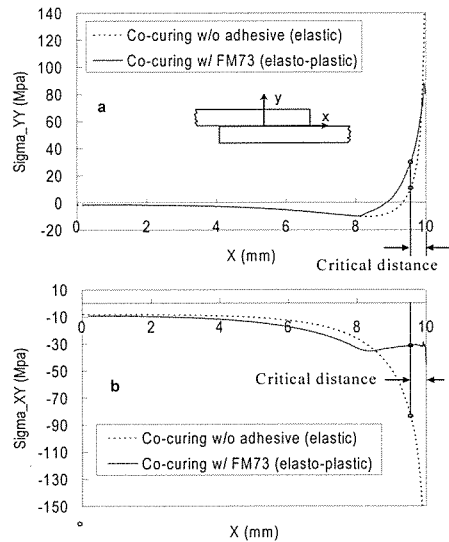


Fig. 8 (a) Interfacial normal stress, (b) Interfacial shear stress of co-cured joint specimens.

Fig. 7은 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 나고 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 이차접합 시편의 파손 하중보다도 더 낮은 것으로 예측되었다. 이와 같은 예측 결과는 시험 결과와 매우 잘 일치하는 것이다.

Fig. 8은 접착제 없는 동시 성형 시편 및 FM73 접착제를 사용한 동시 성형 시편에 대해 각 시편의 층간분리 파손이 발생한 시점(즉, 파손 하중)에서의 계면 응력 분포를 나타내고 있다. 그림의 결과를 통해, 두 시편은 동일하게 층간 분리 파손이 발생하였지만 “임계 길이(0.432mm)”에서의 peel 응력과 전단 응력의 비율은 많이 다른 것을 알 수 있다.

이와 같이 두 시편의 응력 분포가 많이 다르게 나타나는 것은 접착제의 소성 거동 때문이다. 즉, 접착제 없는 동시 성형 시편은 응력 분포에서 특이성을 가지고 있는 반면 FM73 접착제를 사용한 동시 성형 시편에서는 접착제의 소성거동으로 응력의 특이성이 사라진 것을 알 수 있다. 이로 인해 특이점에서의 최대 응력은 peel 응력 및 전단 응력이 모두 접착제 없는 시편에서 훨씬 더 크게 나타났다. 하지만, “임계 길이”에서는 전단응력은 접착제 없는 동시 성형 시편이 크지만 peel 응력은 그 반대였다.

Fig. 9는 EA9309NA 접착제를 사용하며 필렛이 있는 이차 접합 시편의 파손 예측 결과를 나타내고 있다. 시편은 접착제 파손이 발생하는 것으로 예측되었으며 파손 모드 및 파손

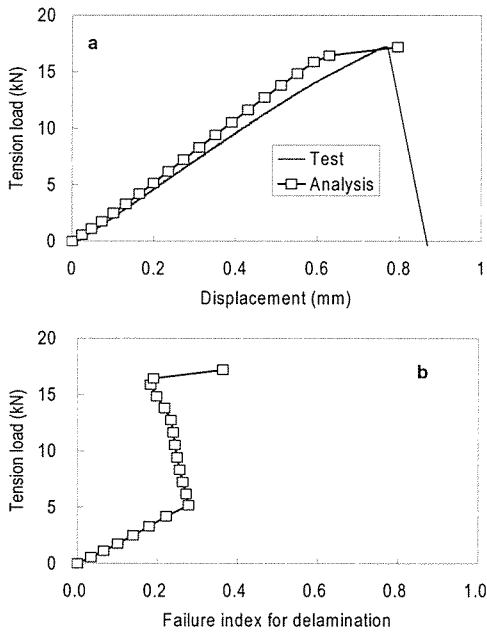


Fig. 9 (a) Load-displacement curve, (b) Delamination failure index of specimen #3 with EA9309NA adhesive and fillets.

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%

하중이 시험과 잘 일치하였다. Fig. 9의 결과를 Fig. 4의 필렛이 없는 이차 접합 조인트의 파손 결과와 비교하면 필렛의 영향을 알 수 있다. 즉, 필렛에 의해 접합조인트의 접착제 파손 하중이 상당히 증가되었다. 또한 필렛이 복합재료 층간 분리 파손을 방지하거나 지연시키는 효과도 있었다. 따라서 본 예측 방법이 필렛이 접합조인트의 파손 특성에 미치는 영향을 잘 평가하고 있는 것을 알 수 있다.

모든 시편에 대한 시험 및 해석 결과를 Table 3에 요약하였다. Table 3에서 볼 수 있는 바와 같이 복합재료 접합 조인트는 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 임계(critical) 파손 모드와 파손 하중을 매우 정확하게 예측할 수 있었다.

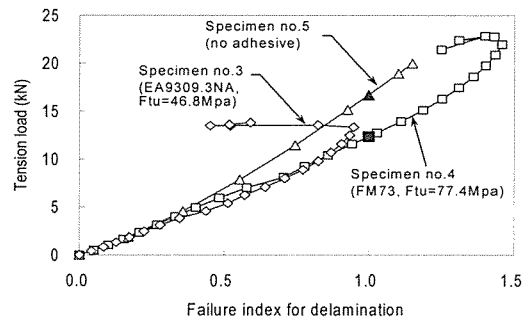


Fig. 10 Comparison of delamination failure index of typical co-cured and secondary bonded joint specimens.

4.3 복합재료 접합조인트 파손특성

Fig. 10에 세 가지 접합 방법, 즉, 접착제 없는 동시 성형, 접착제를 이용한 동시성형 및 이차 접합의 대표적인 시편에 대해 층간분리 파손 지수 결과를 함께 표시하였다. 또한 Fig. 11에는 접착제 유효극한응력의 변화에 따른 접합 조인트의 파손 예측 결과를 비교하였다. 이 두 가지 결과 그림을 통해 접합 방법 및 접착제 강도가 복합재료 접합 조인트의 파손 거동에 미치는 영향을 평가해 보고 조인트 강도 향상을 위한 방안을 검토해 보았다.

먼저, 세 가지 접합 방법 중에 접착제 없는 동시 성형 방법이 조인트 강도 면에서 가장 우수한 것을 알 수 있다. 이것은 접착제가 약한 경우 발생하는 접착제 파손 모드를 배제할 수 있을 뿐만 아니라 층간분리 파손 하중도 가장 우수하기 때문이다. 접착제를 사용하지 않은 동시 성형 조인트가 접착제를 이용하는 접합 조인트보다 더 높은 층간분리 파손 강도를 갖는 이유는 Fig. 11을 통해 이해할 수 있다.

Fig. 11은 접착제 포함 유무 및 접착제의 소성 거동의 고려 여부에 따른 층간분리 파손 예측 결과를 보여주고 있다. 그림을 통해, 접착제를 탄성 재료로 가정할 경우에는 접착제가 있는 경우와 없는 경우의 층간분리 하중 차이가 상대적으로 크지 않으며 오히려 접착제의 소성 거동이 복합재료 층간분리 하중을 저하시키는 주 원인이 되는 것을 알 수 있다. 결과적으로 접착제의 성질 및 성능과 관계없이 가능한 접착제를 사용하지 않고 동시 성형하는 것이 가장 좋은 접합 방법이라고 할 수 있다.

별도의 접착제를 사용하는 경우, 접합 방법은 동시 성형과 이차 접합으로 나눌 수 있는데 이러한 분류는 사실 접착제의 접합 및 성형 공정에 따른 것이다. 본 해석에서는 주어진 접합 및 성형 공정을 통해 나타나는 접착제의 강도 및 접착 성능을 유효극한응력을 통해 대표하도록 하는 개념이다. 따라서 접착제를 이용한 동시 성형 및 이차 접합은 해석상에서는 접착제의 유효극한응력의 차이로 대표될 수 있다.

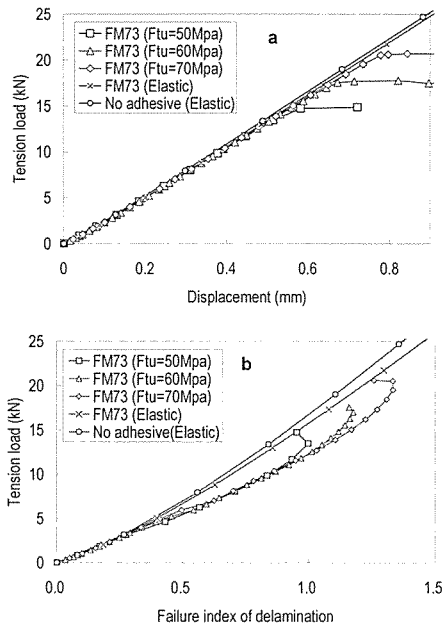


Fig. 11 (a) Load-displacement curve, (b) Delamination failure index with respect to variation of adhesive effective ultimate stress (Ftu).

Fig. 11의 결과를 통해 접착제를 사용하는 경우 접착제의 유효극한응력 변화에 따라 접합 조인트의 파손 모드 및 강도가 달라짐을 알 수 있는데 그 경향을 Fig. 12에 요약하여 도식적으로 나타내었다. 즉, 접착제의 강도가 약한 경우 접착제 파손이 먼저 발생하며 이때 접착제 파손 강도는 접착제의 유효강도와 비교하는 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.

이와 같이 접착제의 강도는 크지만 복합재료 조인트 강도가 작아지는 예가 앞서 시험 결과(Fig. 10 참조)에서 나타난 바와 같은 FM73 접착 필름을 사용한 접합조인트의 경우라고 할 수 있다.

따라서 복합재료 접합 조인트의 파손 강도 향상을 위한 최적의 경우는 접착제 파손과 층간분리 파손이 거의 동시에 발생하는 경우라고 할 수 있다. 그 이유는 Fig. 10 또는 Fig. 11에서 찾을 수 있다. 즉, 접착제 층의 일부 영역에서 발생한 소성 거동은 복합재료 층간분리 파손 하중을 감소시키는 역할을 하지만 접착제 층의 전체적인 소성 거동은 복합재료 층간분리 파손 하중을 향상시키기 때문이다.

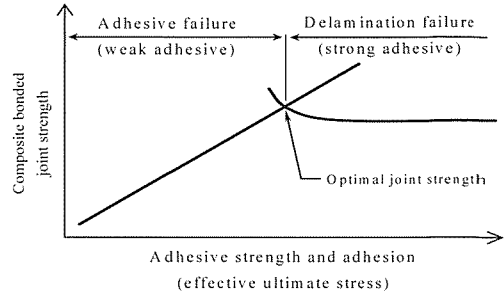


Fig. 12 Failure mode and strength of composite bonded joints w.r.t. adhesive strength.

이상의 검토 결과를 통해 복합재료 접합 조인트의 강도 향상을 위한 몇 가지 방안을 생각해 볼 수 있다. 첫째, 접착제는 유효 강도가 너무 낮은 것은 피해야 하지만 그렇다고 너무 높은 것을 사용하는 것도 좋지 않다. 오히려 접착제 파손과 층간분리 파손이 혼합되어 발생하도록 적절한 유효극한응력을 갖는 접착제를 선정하는 것이 효과적일 것이다. 이를 위해서 본 논문에서 제시된 파손 예측 방법 및 기준 시편에 대한 시험 결과가 접착제 선정에 도움이 될 것이다.

그러나 사실 이와 같이 두 가지 파손 모드가 거의 동시에 발생하는 접착제를 찾는 것은 쉬운 일이 아니다. 왜냐 하면 이를 위해서는 다양한 접착제 성질을 갖는 많은 종류의 접착제가 제공되어야 하기 때문이다. 그래서 두 번째 방안으로 접착제의 유효극한응력이 다소 큰 접착제를 사용하고 이 접착제의 유효극한응력을 감소시키는 방안을 고려할 수 있다. 예를 들면, 접착제 층에 인공적인 결함을 삽입하므로 소성이 접착제 층 전체에서 일찍 일어나도록 한다면 복합재료 접합 조인트의 파손 강도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

지금까지 결과를 통해 본 연구에서 제시된 방법의 장점을 다음과 같이 정리할 수 있다. 첫 번째 장점은 복합재료 접합 조인트의 여러 가지 파손 모드를 동시에 고려하여 실제적인 조인트 강도를 예측할 수 있다는 것이다. 두 번째로는 접착제의 소성 거동의 영향을 고려할 수 있다는 것이다. 이전의 많은 파손 예측 방법들[5-8]은 접착제의 탄성 거동에 기반을 두는 경우가 대부분이었다. 그런데 본 결과에 의하면 접착제의 소성 거동에 대한 고려가 필수적인 것임을 알 수 있다. 이것은 접착제 파손이 점진적 파손으로 발생한다는 것과 접착제의 소성 거동이 복합재료 층간분리 파손 특성에도 매우 중요한 영향을 미치기 때문이다.

5. 결 론

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

for Initiation of Delamination,” *J. Composite Materials*, Vol. 22, 1988, pp. 1141-1155.

- 11) FM73 toughened epoxy film, data sheet, manufacturer's data sheet, Cytec Engineering Materials Inc.

참고문헌

- 1) 김광수, 유재석, 안재모, 장영순, “일방향 복합재료 Single Lap 조인트의 파손 모드 및 강도, I. 실험,” 한국 복합재료학회지, 제 17권, 제 6호, 2004, pp. 14-21.
- 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) Tsai, M.Y., Morton, J., “The Effect of a Spew Fillet on Adhesive Stress Distributions in Laminated Composite Single-Lap Joints,” *Composite Structures*, 32, 1995, pp. 123-131.
- 4) 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.
- 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) Tong, L., “Failure of Adhesive-Bonded Composite Single Lap Joints with Embedded Cracks,” *AIAA J.*, Vol. 36, No. 3, 1998, pp. 448-456.
- 7) Qin, M., Dzenis, Y., “Analysis of Single-Lap Adhesive Composite Joints with Delaminated Adherends,” *Composites*, Part B 34, 2003, pp. 167-173.
- 8) Kayupov, M., Dzenis, Y.A., “Stress concentrations caused by bond cracks in single-lap adhesive composite joints,” *Composite Structures* 54, 2001, pp. 215-220.
- 9) Crocombe, A.D., Richardson, G., “A Unified Approach for Predicting the Strength of Cracked and Non-Cracked Adhesive Joints,” *J. Adhesion*, Vol. 49, 1995, pp. 211-244.
- 10) Brewer, J.C., Lagace, P.A., “Quadratic Stress Criterion