

## 論文

## 일방향 복합재료 Single Lap 접합 조인트의 파손 모드 및 강도

## I. 실험

김광수<sup>\*,+</sup>, 유재석<sup>\*</sup>, 안재모<sup>\*</sup>, 장영순<sup>\*</sup>

## Failure Mode and Strength of Unidirectional Composite Single Lap Bonded Joints

## I. Experiments

Kwang-Soo Kim<sup>\*,+</sup>, Jae-Seok Yoo<sup>\*</sup>, Jae-Mo An<sup>\*</sup>, Young-Soon Jang<sup>\*</sup>

## ABSTRACT

Failure process, mode and strength of unidirectional composite single lap bonded joints were investigated experimentally with respect to bonding methods, those are, co-curing with and without adhesive and secondary bonding. The co-cured joint specimens without adhesive had the largest failure strength. Progressive failures along the adhesive layer occurred in the secondary bonded specimens. In the co-cured specimens with adhesive film which had better material strength and adhesion performance, delamination failure occurred and the joint strengths were less than those of secondary bonded specimens. Delamination failure did not occur in the secondary bonded specimens because of earlier crack growth and progressive failure in the adhesive layer. Therefore, failure strength of composite bonded joints were not always proportionate to material strength and adhesion performance of the adhesive due to the weakness of delamination in composite materials. The effects of surface roughness, bondline thickness and fillets were also studied on secondary bonded specimens.

## 초 록

본 연구에서는 몇 가지 접합 방법에 따라 일방향 복합재료 단일 겹치기 접합 조인트의 파손 과정, 모드 및 강도를 실험적으로 평가하였다. 접합 방법으로는 접착제 없는 동시성형, 접착제를 사용한 동시성형 및 이차 접합의 세 가지를 고려하였다. 또한 이차 접합 조인트에서 몇 가지 파라미터의 영향도 살펴보았다. 접착제 없는 동시 성형 시편은 가장 우수한 조인트 강도를 나타내었다. 이차접합 조인트에서는 접착제 층의 점진적인 파손이 발생하였다. 접착제의 재료 및 접합 강도가 상대적으로 강한 필름 접착제의 동시성형 조인트는 갑작스런 층간분리 파손이 발생하였으며 이차 접합 조인트보다 더 낮은 파손 강도를 나타내었다. 이차 접합 조인트에서 층간분리 파손이 발생하지 않은 것은 접착제 층에서의 균열 진전 및 점진적 파손이 층간분리 파손을 방지한 것으로 보인다. 따라서 복합재료 접합 조인트의 파손 강도는 접착제의 재료 강도 또는 접착 성능과 항상 비례하지 않으며 이것은 복합재료가 층간 분리 파손에 약하기 때문이다.

**Key Words:** 복합재료 접합 조인트(composite bonded joint), 이차 접합(secondary bonding), 동시 성형(co-curing), 접착제(adhesive), 단일 겹치기(single lap)

## 1. 서 론

복합재료 구조물을 조립하는 방법은 크게 기계적 체결

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

\* 한국항공우주연구원 구조그룹

(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. 동시 성형 방법은 별도의 표면 준비 작업이 필요하지 않고 복합재료 성형 조건과 동일한 조건에서 접착제가 성형되므로 접합 조건에 대한 파라미터가 다양하지 않다. 하지만 이차 접합 방법은 복합재료 부재의 표면처리 조건, 제조 압력 및 필렛 등에 따라 접합 조인트의 거동 및 강도가 달라질 수 있다.

복합재료 구조물의 접합 방법을 선정할 때 이와 같은 다양한 파라미터의 영향을 미리 알고 있는 것은 매우 중요하다. 이전의 연구 결과[1-7]를 살펴보면 다양한 파라미터가 접착조인트의 특성 및 강도에 미치는 영향을 평가하였다. 하지만, 접합 방법에 따른 복합재료 접합 조인트의 파손 특성 차이를 조사한 문헌은 거의 없었다. 또한 접착제의 접착 성능과 복합재료 접합 조인트 강도와와의 관계에 대한 이해 또한 부족한 실정이다. 일반적으로 금속 부재에서의 접합조인트 강도는 접착제의 접착 성능과 비례할 것으로 예상되지만 층간분리 파손에 취약한 복합재료에서는 다른 특성이 나타날 것으로 예상된다.

본 연구에서는 복합재료에서 사용 가능한 세 가지 접합 방법, 즉, 접착 필름을 이용한 동시 성형, 접착 필름을 사용하지 않은 동시성형 및 이차 접합 등이 접합조인트의 파손 모드 및 강도에 미치는 영향을 조사하고자 한다. 그리고 이차 접합 조인트의 강도가 여러 가지 파라미터를 조절하므로 동시성형 조인트의 강도와 비슷하거나 우수해 질 수 있는지를 알아보려 한다. 이러한 목적을 위해 접합 방법 및 접합 파라미터가 다른 단일접치기(single lap) 접합 조인트에 대해 인장시험을 수행하였다. 또한 접착제의 물성치와 접합 조인트의 파손특성 사이의 상호관계를 조사하기 위해 접착제 인장 시험도 수행하였다.

## 2. 접합 조인트 시험

### 2.1 시편 준비

복합재료 단일 접치기 접합 조인트 시편의 형상 및 제원은 Fig. 1과 같다. 단일 접치기는 접합조인트 형태 중에

가장 일반적으로 많이 사용되는 종류라고 할 수 있으며 접착조인트의 파손성능 평가를 위해서도 많이 사용되고 있다[3-6]. 본 시험에서 사용된 단일 접치기 접합 조인트의 형상은 ASTM D1002-94의 규격 시편 형상을 약간 수정한 것이다. 복합재료 접합부재(adherend)는 탄소섬유/에폭시 프리프레그(HT145/RS 1222, 한국화이바)로 적층한 일방향 적층판 [0]<sub>10T</sub>를 사용하였다. 접착 방법의 영향을 평가하기 위해 다음과 같이 3가지 접합방법으로 시편을 각각 제작하였다.

1. 접착제 없는 동시 성형
2. 접착 필름(FM 73, Cytec Industries Inc.)을 사용한 동시 성형
3. paste 접착제(Hysol EA9309NA와 EA9309.3NA)를 이용한 이차 접합

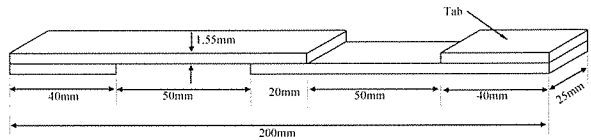


Fig. 1 Geometry and dimensions of the composite single-lap joint specimens.

동시성형 시편은 금형을 이용해 Fig. 1의 모양(탭 제외)으로 적층한 후 오토클레이브에서 성형(126℃, 40psi, 2시간)하고 이후에 탭을 이차 접합하였다. 접착 필름을 사용한 동시 성형 시편은 접착 부분에 FM73 접착 필름을 삽입하여 적층한 후 복합재료와 함께 성형하였다. FM73 필름 접착제는 성형 조건이 본 시편에서 사용한 복합재료와 동일하므로 접착조인트의 동시성형이 가능하며 이러한 방법은 접합 조인트의 한 가지 형태로 고려할 수 있다.

이차접합 시편을 위해서는 먼저 복합재료 접합부재(adherend)를 오토클레이브에서 성형하여 제작하였다. 접합 공정은 복합재료 부재의 표면 처리(사포질 및 청결 작업) → 접착제 혼합 및 도포 → 접착 압력 부가(시편 위에 중량을 갖춘 블록 사용) → 접착제 상온 성형의 순서로 수행하였다. 이차 접합 시편에서는 다양한 파라미터의 영향을 조사하기 위해 다음과 같이 접합 파라미터의 값을 변경하며 시편을 제작하였다.

1. 접착 압력을 1, 2, 3, 4psi의 네 가지로 조정하여 접착제 두께를 변화시켰다.
2. mesh 번호(220, 320, 400번)가 다른 사포를 이용해 표면 조도를 변화시켰다.
3. 접착 길이 끝단에 접착제 필렛(fillet)이 없는 경우와 필렛의 크기가 다른 경우(Fig. 2(b) 참조)를 제작하였다.

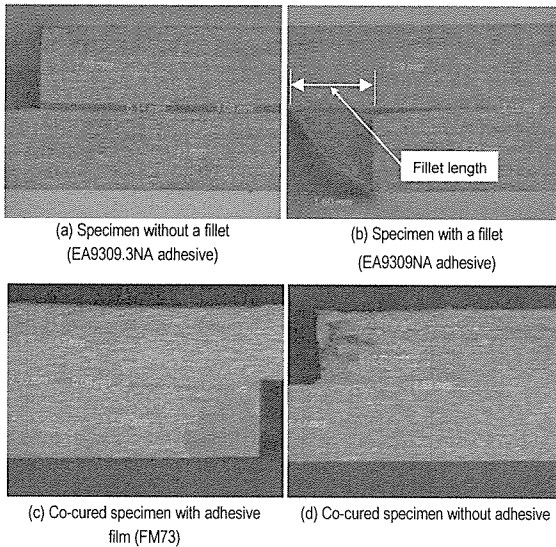


Fig. 2 Photographs of overlap length end corner regions of joint specimens.

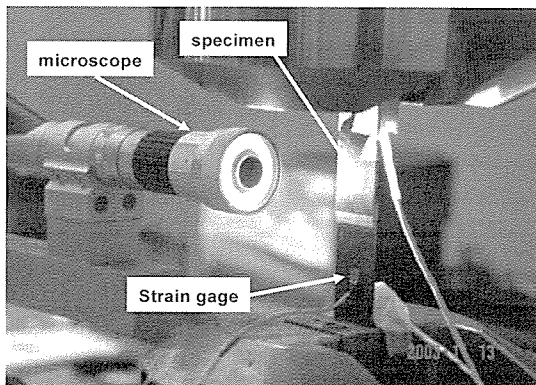


Fig. 3 Tensile test set-up of single-lap joint specimens.

이차 접합 시편의 접합을 위해서는 두 가지 paste 형태의 구조용 접착제, 즉, Hysol EA9309NA와 EA9309.3NA를 사용하였다. 두 접착제는 비슷한 기계적 물성치를 가지지만 EA9309.3NA는 접착제 두께를 제어하기 위해 0.13mm의 glass bead가 포함되어 있는 차이점을 갖는다.

제작된 시편은 시험 중에 현미경으로 균열 발생 여부 및 파손 진전 양상을 관찰하기 위하여 시편 중앙의 접합부분 옆면을 연마(polishing)하였다. 모든 종류의 시편은 4~5 개씩을 제작하여 시험하였다. 제작된 시편에서 연마된 옆면의 대표적인 사진을 Fig. 2에 표시하였다.

## 2.2 시험 장치

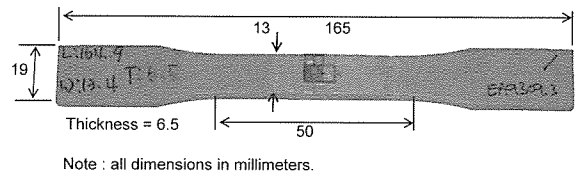


Fig. 4 Bulk adhesive tensile test specimen.

복합재료 단일 겹치기 접합 조인트 시편은 MTS사의 UTM(Model 810, 10톤 용량)을 이용해 인장하중으로 시험하였다. Fig. 3은 시험 장치의 모습을 나타내고 있다. 하중은 변위 제어로 0.4mm/min의 증가율로 부가하였다. 시험 중에 현미경으로 균열 발생 여부를 관찰하였으며 현미경의 영상은 캠코더를 이용해 기록하였다.

## 3. 접착제 인장 물성 시험

### 3.1 시편 준비

접합 조인트에 사용된 접착제의 재료 물성을 알아보기 위해 ASTM D638-02에 의거 Fig. 4와 같이 인장 시편을 제작하였다. 시편은 EA9309NA, EA9309.3NA 및 FM73의 세 가지 접착제에 대해 각각 제작하였다. 또한 접합 조인트 시편에서와 동일한 조건에서 접착제를 준비 및 성형하였다. Paste 형태의 접착제인 EA9309NA 및 EA9309.3NA 접착제는 금형 안에서 상온으로 성형하였다. FM73 접착제는 접착제 필름을 원하는 두께로 적층하고 적절한 압력과 온도 조건에서 성형하였다. 성형된 접착제는 Fig. 4와 같이 가공한 후 시편 중앙의 양쪽 면에 스트레인 게이지를 부착하였다.

### 3.2 시험 절차

접착제 시편의 인장 시험은 MTS사의 UTM(model 810)을 이용해 상온에서 시험하였다. 하중 부가 속도는 3.5%/min의 변형률 증가율이 되도록 하였다. 시험 중에 하중과 변형률을 측정하고 저장하였다. 시험 이후 측정된 결과를 이용해 인장 강성, 극한 응력 및 포아송 비를 결정하였다.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 접착제 물성

벌크(bulk) 접착제 시편에 대한 인장 시험 결과는 Table 1에 요약하였으며 대표적인 응력-변형률 곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 재료 강성은 세 가지 접착제가 대체적으로 비슷

Table 1 Summary of tensile test data for bulk adhesive

	EA9309NA	EA9309.3NA	FM73
Modules (GPa)	2.45	2.62	2.87
Poisson's ratio	0.38	0.38	0.40
Ulti. stress (MPa)	34.5	36.3	60.4

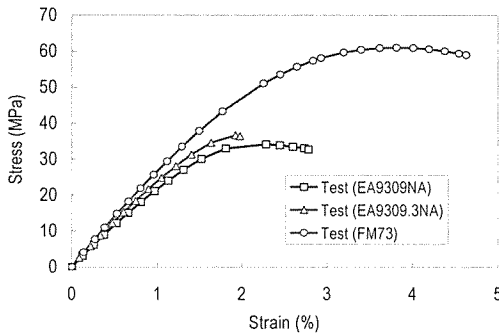


Fig. 5 Stress vs. strain curves of bulk adhesive tensile test specimens at room temperature.

하지만 FM73 접착제가 가장 크게 나타났다. 재료 인장 강도는 FM73 접착제가 EA9309NA와 EA9309.3NA에 비해 꽤 크게 나타났다.

## 4.2 접합 방법의 영향

접합 조인트의 시험 결과에서 조인트 시편의 파손 과정, 모드 및 강도는 접합 방법에 따라 분명하게 다른 양상이 나타났으며 이를 정리하면 다음과 같다.

### 4.2.1 파손 과정 및 모드

EA9309NA 및 EA9309.3NA 접착제로 이차 접합된 시편은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 초기 균열 발생, 균열 성장 및 최종 파손이 순서적으로 나타났다. 모든 이차 접합 시편에서 초기 균열은 접합길이(overlap length) 끝단 부근에서 발생하였으며 주로 접착제와 복합재 부재의 계면(interface)을 따라 균열이 성장하였다. 균열은 전체 접합길이(20mm) 중에 약 1~3mm 정도 진전하다가 최종 파손이 발생하였다.

이차 접합 시편의 파손 모드는 주로 계면 파손(interfacial failure)과 접착제 파손(adhesive cohesive failure)으로 나타났다. Fig 7에 이차 접합 시편의 대표적인 파손면의 사진을 기재하였다. 사진에서 알 수 있듯이 이차 접합 시편에서는 접착제 층과 인접한 복합재료 부재의 표면에서 탄소 섬유가 접착제와 함께 분리되는 파손도 거의 모든 시편에서 발견되었으며 분리되는 섬유의 양은 표면 조도가 클수록 더 많은 경향이 나타났다.

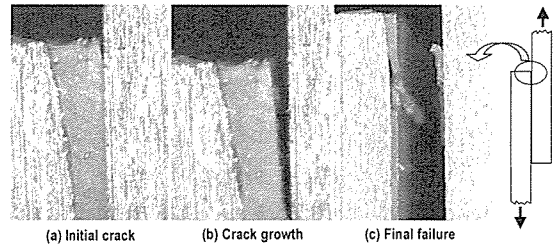
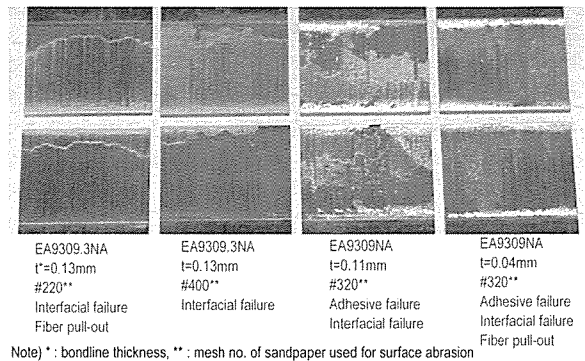


Fig. 6 Typical failure process of secondary bonded specimens (magnification of 200 times).



Note) \*: bondline thickness, \*\*: mesh no. of sandpaper used for surface abrasion

Fig. 7 Typical de-bonded surfaces of secondary bonded specimens.

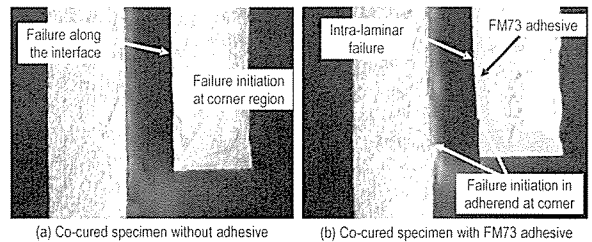


Fig. 8 Failed states of co-cured specimens with and without adhesive film.

이차 접합 시편에서 점진적인 파손이 발생하데 비해 동시 성형으로 접합된 시편은 갑작스런 최종 파손(catastrophic failure)이 발생하였다. 즉, 시편의 최종 파손 직전까지 균열이 발생하지 않다가 초기 균열이 발생하는 동시에 최종 파손이 발생하였다.

Fig. 8은 두 가지 종류의 동시 성형 시편의 파손 직후의 모습을 나타내고 있다. 접착제 없이 동시 성형된 시편은 두개의 복합재 부재의 경계면이 파손되었다. FM73의 필름형 접착제를 사용해 동시 성형으로 접합된 모든 시편에서는 100% 층내 분리(intra-ply delamination) 파손이 나타났다. 층내 분리 파손은 Fig. 8(b)에서 나타난 바와 같이 접착제 층과 인접한 복합재료의 첫 번째 층 내부에서 발생하였다.

접착제를 사용하는 이차 접합 및 동시 성형 시편의 이와 같은 파손 특성의 차이를 앞서 접착제 물성 시험 결과와 연관하여 생각해 보면 다음과 같다. 즉, 이차 접합 조인트는 접착제의 재료 강도가 약하므로 접착제파손이 먼저 발생하였다. 재료강도가 더 큰 FM73의 동시 성형 시편은 접착제 파손보다 복합재료의 층간 분리 파손이 더 취약하였다.

#### 4.2.2 하중-변위 곡선

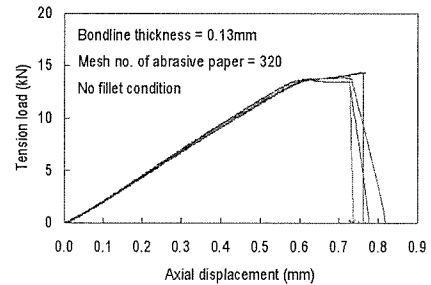
접합 조인트 시편의 하중-변위 곡선도 접합 방법에 따라 다른 특성이 나타났다. Fig. 9에 동시성형 및 이차 접합으로 접합된 시편의 대표적인 하중-변위 곡선을 비교하여 표시하였다. 동시성형 시편은 하중-변위 곡선이 파손이 발생하기 전까지 선형적인 거동을 나타내었다. 이에 비해 이차 접합 시편에서는 높은 하중에서 비선형적인 거동이 발생하였다. 이와 같이 비선형성은 이차 접합 시편에서만 관찰된 것이므로 접착제의 소성 변형 및 균열 진전에 따른 것으로 보인다. 비선형성은 두꺼운 접착제 층을 갖는 경우에 더 심하게 나타났다.

#### 4.2.3 파손 강도

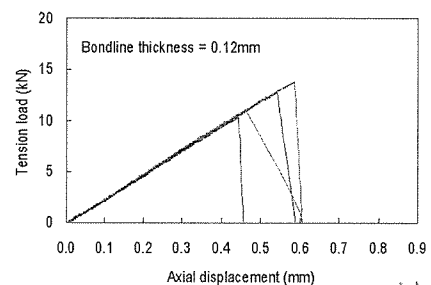
접합 방법 및 접착제 종류에 따른 접합 조인트 시편의 파손 시험 강도를 Fig. 10에 나타내었다. 파손 강도는 파손 하중을 접착면적으로 나눈 값(즉, 평균 파손 응력)으로 표시한 것이다. 접착제를 사용하지 않고 동시 성형으로 접합된 시편이 가장 우수한 파손 강도를 보였다. 이에 비해 FM73의 필름형 접착제를 사용하여 동시 성형된 시편이 가장 낮은 파손 강도를 보였다.

Fig. 11에는 FM73 접착제와 EA9309.3NA의 두 가지 접착제에 대해 접착제의 재료 강도와 금속 및 복합재 부재에서의 접합 조인트 강도를 함께 표시하였다. 여기서 금속 부재의 접합 조인트 강도는 제작사에서 제공하는 사양서 [8]을 인용한 것이다. 두 시편의 접착제 층의 두께는 각각 0.12mm 및 0.13mm로 비슷하였다. 그림을 보면 FM73 접착제가 재료 강도 및 금속 부재의 접합 조인트 강도가 EA9309.3NA 접착제보다 많이 좋은 것을 알 수 있다. 이것은 필름 접착제가 paste 접착제 보다 접착 성능이 우수하다는 일반적인 사실과도 일치하는 것이다.

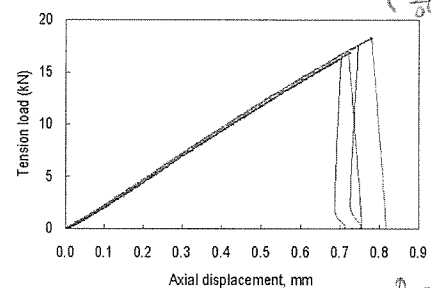
하지만 특이한 사실은 FM73 접착제의 경우 복합재료의 접합 조인트 강도가 금속부재의 접합 조인트 강도보다 많이 작았다는 것이다. 이러한 차이의 원인은 복합재료의 층간분리에 대한 취약성에서 찾을 수 있다. 즉, FM73 접착제는 접착제의 재료 강도 및 접합 강도가 우수하지만 복합재료의 층간분리 파손으로 조인트 강도가 저하되었다고 볼 수 있다.



(a) Secondary bonded specimen with EA9309.3NA adhesive



(b) Co-cured specimen with FM73 adhesive film



(c) Co-cured specimen without adhesive

Fig. 9 Typical load-displacement curves of joint specimens.

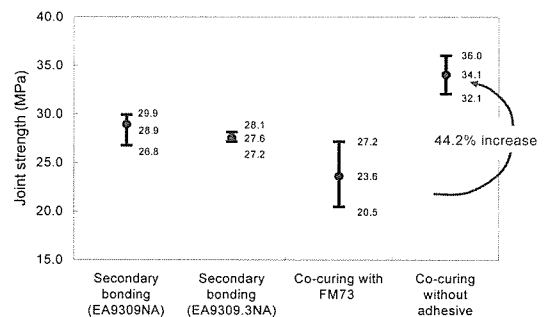


Fig. 10 Experimental failure strength of joint specimens with respect to bonding method and adhesives used.

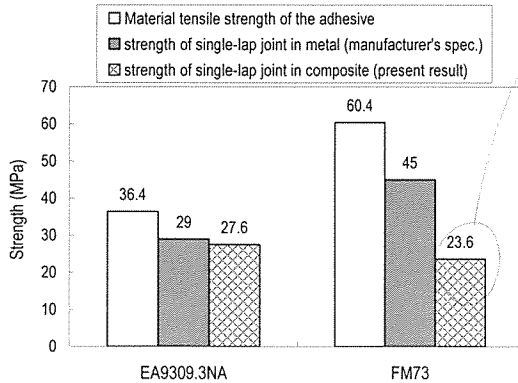


Fig. 11 Comparison of adhesive material tensile strength and single-lap joint strengths in metal and composite.

Table 2 Summary of failure modes and strengths of joint specimens

Bonding method	Joint strength		Critical failure mode	Ultimate joint strength
	Adhesive failure	Delami.		
Co-curing (no adhesive)		High	Delami.	High
Co-curing (FM73)	High	Low	Delami.	Low
Secondary bonding (EA9309.3NA)	Low	Middle	Adhesive / interfacial failure	Middle

이에 비해 EA9309.3NA의 경우 금속 부재의 접합 조인트 강도와 복합재료 접합 조인트 강도 사이에 큰 차이가 발생하지 않았다. 이것은 이 시편에서는 층간분리 파손이 발생하지 않았기 때문이다. 결과적으로 EA9309.3NA 접착제는 재료 강도 및 접합 강도 면에서는 FM73 접착제보다 약하지만 층간분리 파손이 발생하지 않으므로 복합재료 접합 조인트 강도는 더 강하였다고 볼 수 있다.

따라서 접착제의 강도 또는 접착 성능이 우수하다고 복합재료 접합 조인트의 강도가 향상된다고 볼 수 없다. Table 2에는 접착 방법(또는 접착제 성질)이 복합재료 접합 조인트의 파손 모드별 조인트 강도에 미치는 영향을 요약해 보았다. 즉, 조인트에서 접착제가 파손되는 하중은 접착제의 강도 및 접착 성능에 비례할 것이다. 하지만, 층간분리가 발생하는 하중은 접착제의 강도 및 성능과 비례하지 않는다. FM73 접착제와 EA9309.3NA 접착제의 경우가 여기에 해당한다.

이차 접합 조인트의 파손 강도가 FM73 필름 접착제를 이용한 동시성형 조인트의 파손 강도보다 크지만 층간분리 파손이 발생하지 않은 이유는 접착제 층에서 발생한 균열 진전 및 점진적 파손이 층간분리 파손을 방지한 것으로 보인다.

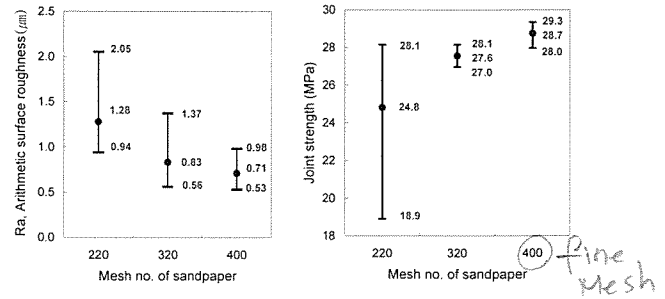


Fig. 12 Measured average surface roughness and strength of specimens with EA9309.3NA with respect to mesh number of abrasive sandpaper for the composite adherend.

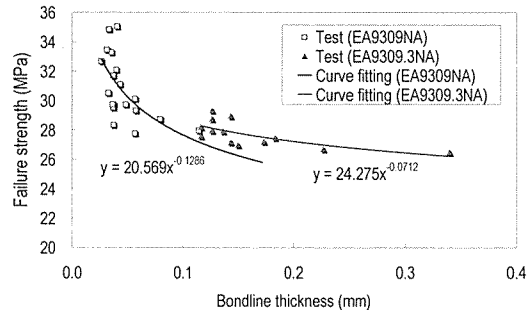


Fig. 13 Effects of bondline thickness on the failure strength of secondary bonded specimens.

### 4.3 이차 접합 조인트 파라미터의 영향

이차 접합 조인트 시편의 파손 특성 및 강도는 표면 조도, 접착제 두께 및 필렛에 따라 변하게 되는데 이러한 영향을 실험적으로 평가하였으며, 그 결과를 아래에 기재하였다. 또한 이러한 파라미터의 조절을 통해 이차 접합 조인트 강도가 접착제 없는 동시 성형 조인트 강도만큼 우수해 질 수 있는지도 검토하였다.

#### 4.3.1 표면 조도가 조인트 강도에 미치는 영향

Fig. 12에는 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 경우(즉, 표면조도가 작은 경우)가 조인트 강도 면에서 가장 유리함을 알 수 있다. 특히 mesh 번호가 작은, 즉, 거친 사포를 사용할 경우 표면 조도의 측정값 및 조인트 파손 강도의 편차가 크게 나타났으며 이것은 신뢰성이 부족한 조인트 특성 및 강도를 유발하므로 바람직하지 않은 것이다.

\* 2차접합에서는 복합재료 층간분리는

유발하는 하중이상까지 하중은 가하였는데 1차의 적층순서가

불러한 층간분리가 생기지 않았다는 달라져도 동일?

여기서 → 하중은 더 커도 접착제층의 파손이 층간분리를 저지시켰다는 구절인데...

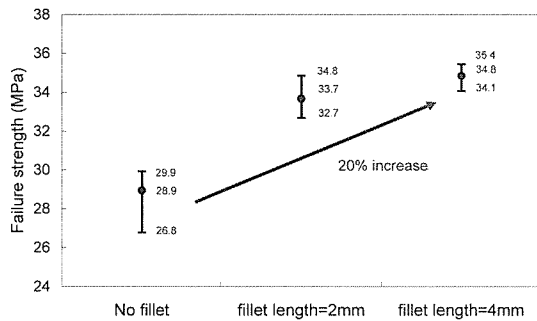


Fig. 14 Effects of fillet on the test strength of secondary bonded specimens with EA9309NA adhesive.

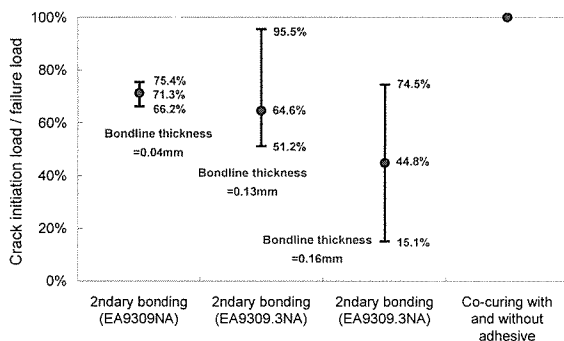


Fig. 15 Ratio of crack initiation load and failure load of secondary bonded specimens with respect to adhesives and bondline thickness.

#### 4.3.2 접착제 두께가 조인트 강도에 미치는 영향

Fig. 13에는 두 가지 접착제의 이차 접합 시편에서 접착제 두께에 대한 시편의 파손 강도 측정값의 분포를 표시하였다. 시험 결과를 통해 접착제 층의 두께가 감소할수록 이차 접합된 조인트 시편의 강도가 증가하는 경향을 알 수 있다. 하지만, 접착제 층의 두께가 얇은 경우 시편의 파손 강도 값의 편차도 증가하는 것을 알 수 있었다.

#### 4.3.3 필렛(fillet)의 영향

이차 접합 조인트 시편에서 필렛(fillet)이 조인트의 시험 강도에 미치는 영향을 Fig. 14에 나타내었다. 그림을 통해 필렛(fillet)이 있는 경우 접합 조인트의 강도가 상당히 증가함을 알 수 있다. 하지만 Fig. 14를 통해 필렛의 크기가 커질수록 조인트 강도의 증가 효과는 감소하는 것을 알 수 있다.

이상과 같은 파라미터의 영향을 종합하면, 필렛을 이용한 이차접합 조인트의 강도(평균 34.8MPa)가 접착제 없는 동시 성형 조인트 강도(34.1MPa)만큼 우수해 질 수 있음을

알 수 있다. 이에 비해 필렛이 없는 경우, 표면 조도 및 접착제 두께의 조절만으로는 이차 접합 조인트 강도가 접착제 없는 동시 성형 조인트 강도보다 작았다.

#### 4.3.4 초기 균열 발생 시점의 특성

이차 접합 조인트 시편의 시험을 통해 여러 가지 파라미터가 초기 균열의 발생 시점에 미치는 영향도 조사하였다. 초기 균열의 발생 시점은 녹화된 현미경 화면과 하중 데이터를 비교하여 결정할 수 있었다. 조사된 여러 가지 파라미터 중에 접착제 층의 두께가 초기 균열의 발생 시점에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. Fig. 15는 몇 가지 대표적인 접착제 종류와 접착제 두께에 대한 초기 균열 발생하중과 파손하중의 비를 표시한 것이다. 그림을 통해 접착제 두께가 증가함에 따라 초기 균열이 낮은 하중에서 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 현미경을 통해 두꺼운 접착제를 갖는 조인트 시편에서 균열이 더 길게 성장하는 것을 관찰하였다.

Fig. 16은 표면 처리를 위해 사용된 사포의 mesh 번호 (Fig. 12를 통해 표면 조도를 알 수 있음)에 따른 초기 균열 하중과 파손 하중과의 비를 표시하였다. 결과를 보면 표면 조도는 초기 균열의 발생시점에 미치는 영향이 크지 않은 것을 알 수 있다. 다만, mesh 번호가 큰 경우(즉, 표면 조도가 작은 경우) 초기 균열의 발생시점의 편차가 크게 나타났다.

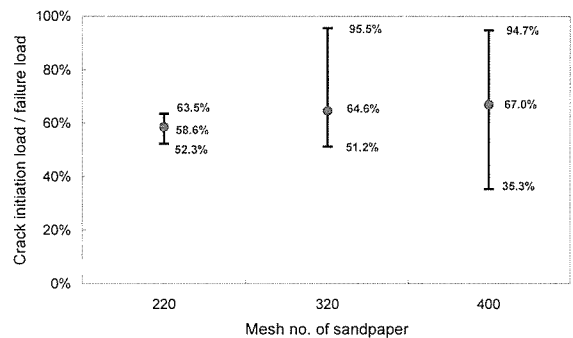


Fig. 16 Ratio of crack initiation load and failure load of specimens with respect to mesh number of abrasive sandpaper used for surface preparation.

## 5. 결 론

본 연구에서는 몇 가지 접합 방법에 따라 일방향 복합 재료 접합 조인트의 파손 과정, 모드 및 강도를 실험적으로 평가하였다. 또한 이차 접합 조인트에서 몇 가지 파라미터의 영향을 살펴보았다.

접착제 없는 동시 성형 시편은 갑작스런 층간 분리 파손이 발생하였으며 가장 우수한 조인트 강도를 나타내었다. 접착제의 재료 및 접합 성능이 약한 이차접착 조인트는 접착제 층에서 점진적인 파손이 발생하였으며 층간분리 파손은 발생하지 않았다. 접착제의 재료 및 접합 성능이 상대적으로 강한 필름 접착제의 동시성형 조인트는 접착제 파손이 발생하지 않았고 갑작스런 층간분리 파손이 발생하였으며 이차 접합 조인트보다 더 낮은 파손 강도를 나타내었다.

이차 접합 조인트의 파손 강도가 필름 접착제를 이용한 동시성형 조인트의 파손 강도보다 크지만 층간분리 파손이 발생하지 않은 것은 접착제 층에서의 균열 진전 및 점진적 파손이 층간분리 파손을 방지한 것으로 보인다. 따라서 복합재료 접합 조인트의 파손 강도는 접착제의 재료 강도 또는 접착 성능과 비례하지 않는다는 것을 알 수 있다.

이차 접합 조인트에서는 0.5~2.1 $\mu$ m의 범위에서 표면조도가 작을수록, 0.03~0.35mm의 범위에서 접착제 두께가 작을수록 파손 강도가 향상되었다. 이 두 가지 파라미터의 값을 조절하더라도 조인트 강도는 접착제 없는 동시 성형 조인트의 강도보다 작았지만 필렛을 이용하므로 이차접합 조인트 강도가 접착제 없는 동시성형 조인트 강도보다 약간 우수해질 수 있었다.

## 참고문헌

- 1) 김광수, 박제성, 장영순, 이영무, “복합재료 Single-Lap 분당 조인트의 파괴 특성에 대한 실험 및 수치해석 연구,” 한국복합재료학회지, 제16권, 제5호, 2003, pp.45-53.
- 2) 이대길, 김기수, 전의진, “토오크를 받는 접합원형 Single Lap 조인트의 파괴특성에 관한 실험적 연구,” 한국복합재료학회지, 제3권, 제1호, 1990.
- 3) 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.
- 4) Tsai, M.Y., Morton, J., “The Effect of a Spew Fillet on Adhesive Stress Distributions in Laminated Composite Single-Lap Joints,” *Composite Structures*, Vol. 32, 1995, pp. 123-131.
- 5) 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.
- 6) Tong, L., “Failure of Adhesive-Bonded Composite Single Lap Joints with Embedded Cracks,” *ALAA J.*, Vol. 36, No. 3, 1998, pp. 448-456.
- 7) 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.
- 8) Hysol EA9309.3NA-Epoxy Paste Adhesive, *Manufacturer's spec.*, Loctite Aerospace.