

## 論文

## 후판 단일 접침 접착 조인트의 파손강도에 관한 연구

박재현\*, 최진호\*\*, 권진회\*\*

## A Study on Failure Strength of Single Lap Adhesive Joint with Thick Adherend

Jae-Hyun Park\*, Jin-Ho Choi\*\* and Jin-Hwe Kweon\*\*

## ABSTRACT

The joints are often the weakest areas in composite structures. In this paper, the thick aluminum-aluminum joint specimens and thick composite-aluminum single lap adhesive joint specimens were manufactured and the tensile tests were performed. The fracture mode of each specimen was investigated and the modified damage zone theory based on the yield strain was proposed and compared with experimental failure load of each mode. The failure loads of the thick aluminum-aluminum joint and composite-aluminum joint were predicted by the same failure criterion and they could be predicted to within 19.3% using the damage zone ratio method for all 14 cases investigated.

## 초 록

복합재료 구조물에서 조인트 부위는 매우 취약한 부분이다. 본 논문에서는 후판 알루미늄-알루미늄 조인트 및 복합재-알루미늄 조인트를 접착제로 접합하여 제작한 다음, 인장 실험을 수행하여 파손형태를 고찰하였다. 또한, 항복 변형률에 기초한 수정 파손영역 이론을 제안하였으며, 파괴모드별 파손하중과 상호 비교하였다. 후판 알루미늄-알루미늄 조인트와 복합재-알루미늄 조인트의 파손강도를 동일한 파손기준값을 적용하여 예측하였으며, 제작된 14종류의 시편에서는 최대 19.3% 오차범위 내에서 파손강도를 예측할 수 있었다.

**Key Words** : Adhesive joint(접착 조인트), Damage zone theory(파손영역이론), Cohesive failure(접착 파손)

## 1. 서 론

복합재료는 기존의 등방성 재료에 비해 비강성 및 비강도가 높고 감쇠 및 충격 특성이 우수하므로 항공기, 우주선, 로봇 팔 및 공작 기계 등 다양한 분야에 활용되고 있다[1]. 복합재료를 통

해 기존 구조물의 부분적인 대체와 보강이 증가함에 따라 동중 또는 이종 재료의 부품을 연결하는 체결부의 설계가 중요한 연구 분야로 대두되고 있다[2]. 접합 방법으로는 크게 기계적 체결 방법(Mechanical Joining Method)과 접착에 의한 체결 방법(Adhesive Joining Method)으로 나눌 수 있다. 기계적 체결 방법은 피접합물(Adherend)에 원공을 가공하고 볼트나 핀으로 체결하는 방법이다. 이 방법은 원공으로 인해 응력집중현상(Stress Concentration)을 일으키고, 복합재료의 경우 연속된 섬유가 끊어지기 때문에 강도가 저하된다. 하지만 보수나 부속품의 대체

† 2009년 10월 28일 접수 ~ 2010년 1월 13일 심사완료

\* 정희원, 경상대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 정희원, 경상대학교 항공기부품기술연구소  
교신저자, E-mail : choi@gnu.ac.kr

경남 진주시 가좌동 900번지

를 위해 피접합물의 분해 및 조립이 용이하고, 접합 상태를 쉽게 확인할 수 있는 장점이 있다. 반면, 접착에 의한 체결 방법은 원공이 존재하지 않으므로 기계적 체결 방법에 비해 넓은 면적으로 하중을 분산시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 보수나 교환이 어렵고 주위 환경의 영향이나 작업자의 숙련도에 의해 체결력에 영향을 받을 수가 있으며, 재료의 표면 처리가 필요하다는 단점을 가지고 있다.

접착 조인트에 대한 기존의 연구결과를 살펴보면 Hart-Smith[3]는 이중 겹침 조인트에 관한 이론식을 정립하였다. Choi[4] 등은 단일 겹침 조인트와 이중 겹침(Double-Lap) 조인트의 기계적 특성을 연구 비교하였고, Sheppard[5] 등은 복합재료 단일 겹침과, 알루미늄 단일 겹침 접합에 대해 특정 파손 기준에 의해 파손 강도를 예측할 수 있는 파손영역(Damage Zone) 이론을 제안하였다. Owens[6,7] 등은 복합재료와 알루미늄이 접합된 이중 재료 단일 겹침 접합의 강성에 관한 이론 및 실험 연구를 수행하였으며, 김[8,9] 등은 복합재료 단일 겹침(Single-Lap) 조인트의 파손 예측에 대한 연구를 수행하였다. Ban[10] 등은 기존의 파손 영역이론을 근거로 하여 파손 영역비(Damage Zone Ratio)를 제안하고 이를 이용하여 접착 체결부의 파손강도를 예측하였다.

본 논문에서는 후판 알루미늄-알루미늄과 복합재-알루미늄으로 이루어진 단일 겹침 접착 조인트의 강도를 평가하고 이를 이론적인 해석결과와 비교하였다. 시편은 서로 다른 접착 길이와 접착 두께, 적층 각도를 가지도록 설계하였으며, 실험과 해석에 의해 접착 조인트의 강도를 평가하였다. 또한 수정 파손 영역법을 제시하여 접착 조인트의 강도를 예측하고, 실험 결과와 비교하였다.

## II. 접착 조인트 시편 제작

### 2.1 접착제의 물성치

본 논문에서 사용된 접착제는 에폭시 계열의 접착제로 Cytec사의 FM73M이다. 참고논문 [10]의 시험편과 물성 데이터를 사용하였다. Fig. 1은 실험으로부터 구한 인장응력-인장변형률 선도이다.

### 2.2 시편 제작

피착제(Adherend)의 두께가 얇을 경우에는 피착제 자체의 변형과 파손으로 인하여 피착제와 접착제의 영향이 동시에 나타나는 경우가 많으므로 순수 접착조인트만의 파손 특성과 강도를 평가하기에는 곤란한 경우가 종종 발생한다.

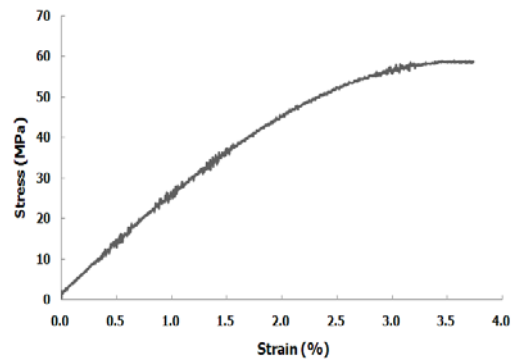


Fig. 1. Stress-strain curve of the adhesive

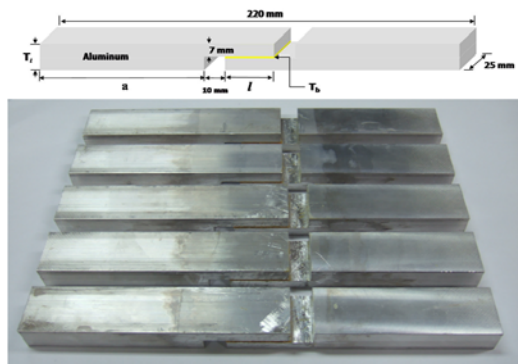


Fig. 2 .Thick Al-Al adhesive joint specimens

본 논문에서는 후판 알루미늄-알루미늄과 후판 복합재-알루미늄으로 이루어진 단일 겹침 접착 조인트 시편을 ASTM D5656-01 규격으로 제작하여 접착조인트의 강도와 파손모드를 관찰하였다.

후판 알루미늄-알루미늄 단일 겹침 접착 조인트 시편은 접착 길이(8종류)와 접착 두께(4종류)를 달리하여 총 12종류의 시편을 제작하였으며, 알루미늄 6061-T6를 사용하였다. 접착 길이가 서로 다른 시편은 그림부 길이  $a$ 를 조절하여 접착 조인트의 전체길이를 220mm로 유지하였다. 또한, 피착제의 두께는 7mm로 일정하게 하였으며, 그림부 두께  $T_i$ 는 접착두께의 변화에 따라 각각 다른 치수로 제작하였다. Fig. 2는 제작된 접착 조인트 시편을 나타낸 그림이며, Table 1은 제작된 접착 조인트의 치수를 나타낸다.

후판 복합재-알루미늄 단일 겹침 접착 조인트 시편은 접착 길이(2종류)와 적층 순서(2종류)를 달리하여 시편을 제작하였다. 복합재 시편의 제작에 사용된 재료는 SK Chemical사의 USN 125 Carbon/Epoxy 일방향 프리프레그로서, 복합재의 물성치는 Table 2에 나타나 있다. Fig. 3은 제작

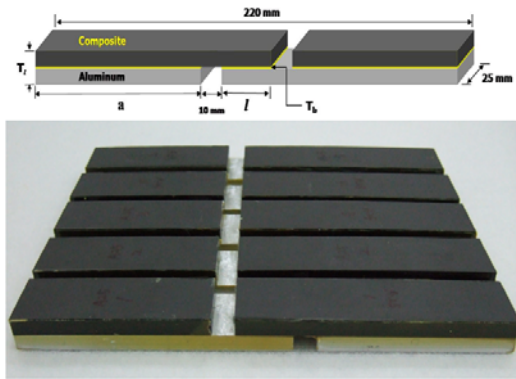


Fig. 3. Thick Comp-Al adhesive joint specimens

Table 1. Dimensions of thick Al-Al adhesive joint specimens

Model	l(mm)	T <sub>c</sub> (mm)	T <sub>f</sub> (mm)	a(mm)
A10	10	0.15	14.15	95.0
A15	15	0.15	14.15	92.5
A20	20	0.15	14.15	90.0
A25	25	0.15	14.15	87.5
A30	30	0.15	14.15	85.0
A35	35	0.15	14.15	82.5
A40	40	0.15	14.15	80.0
A50	50	0.15	14.15	75.0
A25-30	25	0.3	14.3	87.5
A25-45	25	0.45	14.45	87.5
A25-90	25	0.9	14.9	87.5

Table 2. Material properties of SK carbon/epoxy composite material

Property	Symbol	Value
Elastic modulus in fiber-direction	E <sub>1</sub>	131.0 GPa
Elastic moduli in transverse directions	E <sub>2</sub> , E <sub>3</sub>	8.20 GPa
Shear moduli in 1-2 and 1-3 planes	G <sub>12</sub> , G <sub>13</sub>	4.50 GPa
Shear modulus in 2-3 plane	G <sub>23</sub>	3.50 GPa
Poisson's ratios	ν <sub>12</sub> , ν <sub>13</sub>	0.281
	ν <sub>23</sub>	0.470
Tensile strength in fiber-direction	X <sub>T</sub>	2000 MPa
Compressive strength in fiber-direction	X <sub>C</sub>	1400 MPa
Tensile strength in transverse direction	Y <sub>T</sub>	61 MPa
Compressive strength in transverse direction	Y <sub>C</sub>	130 MPa
Shear strengths in 1-2 and 1-3 planes	S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub>	70 MPa
Shear strength in 2-3 plane	S <sub>23</sub>	40 MPa

Table 3. Dimensions of thick Comp-Al adhesive joint specimens

Model	l(mm)	T <sub>c</sub> (mm)	T <sub>f</sub> (mm)	a(mm)
A25-A	25	0.3	14.3	87.5
A25-B				

된 접착 조인트 시편을 나타낸 그림이다. Table 3은 제작된 접착 조인트의 치수를 나타낸 것으로, 적층 순서가 서로 다른 2종류의 시편을 제작하였다. A25-A모델의 적층순서는 [0/{45/0/-45/90}<sub>3s</sub>/{45/0/-45/0}<sub>s</sub>/{45/0/-45/90}<sub>3s</sub>/0]이며, A25-B의 적층순서는 [{45/-45}<sub>26s</sub>/90<sub>6</sub>]이다.

일반적으로 접착제의 접착력은 접합되는 재료의 표면 상태에 따라 크게 변화한다. 본 논문에서는 40 mesh의 사포를 사용하여 접착면의 오염을 제거하고 표면을 일정하게 조절하였다. 또한, ASTM D2651-90 규격의 P-2 Etch법에 따라 연마된 알루미늄 접착면을 황산 27%+황산철 135g 용액으로 약 12분간 부식시켰다. 표면처리된 접착 시험편은 접착제를 도포한 다음, Autoclave 내부에서 3기압의 압력으로 120℃에서 120분 동안 경화시켰다.

접착 조인트의 끝 부분에 필렛이 존재하면 접착강도는 향상되지만 필렛의 형상을 일정하게 유지하기가 곤란하므로, 필렛을 제거하여 접착형상을 일정하게 유지하였다.

### III. 접착 조인트 실험

#### 3.1 후판 알루미늄-알루미늄 접착 조인트 실험

제작된 접착 조인트 시편을 이용하여 접착 조인트의 인장 강도를 평가하였다. 실험에 사용한 재료 시험기는 Instron 5582이며, 상온 조건에서 1mm/min의 인장 변위 제어를 통해 접합부의 강도 실험을 수행하였다.

Fig. 4는 후판 알루미늄-알루미늄 접착 조인트의 실험 후 파손된 접착단면을 나타낸 사진으로, 알루미늄의 양 표면에 접착제가 부착되어 있으므로

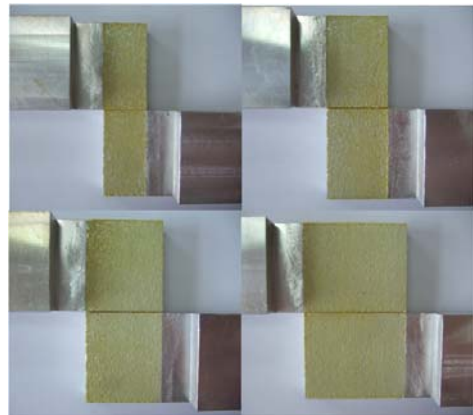


Fig. 4. Fractured surface of Al-Al adhesive joint

Cohesive Failure가 발생되었다고 볼 수 있다. 하중의 최대값을 각 조인트 시편의 파손 강도로 선정하였으며, 각 모델 당 5개의 시편을 제작하여 산술평균값을 각 시편의 파손하중으로 결정하였다.

Fig. 5는 접착 길이에 대한 파손강도 실험 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 접착 길이가 증가할수록 파손하중은 증가하지만, 파손강도는 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 접착 길이 증가에 따른 접착면적의 증가 비율이 면적 증가에 따른 하중의 비율보다 크기 때문이다[11].

Fig. 6은 접착 두께에 따른 파손강도의 변화를 실험한 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 접착 두께가 특정값(0.45mm)을 초과하면 파손강도는 오히려 저하되는 것을 볼 수 있다. 이는 접착 두께가 특정 값을 초과하면 접착제의 내부결함이 증가하여 접착강도를 저하시킨 것으로 판단된다[11].

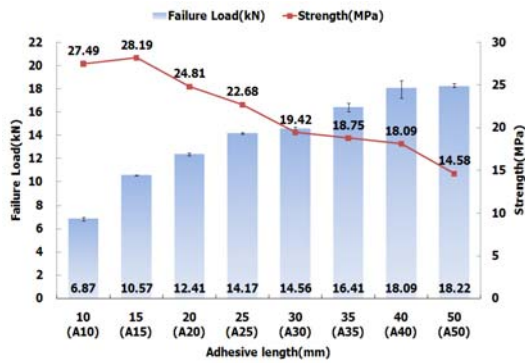


Fig. 5. Experimental failure loads of Al-Al adhesive joints with different adhesive lengths

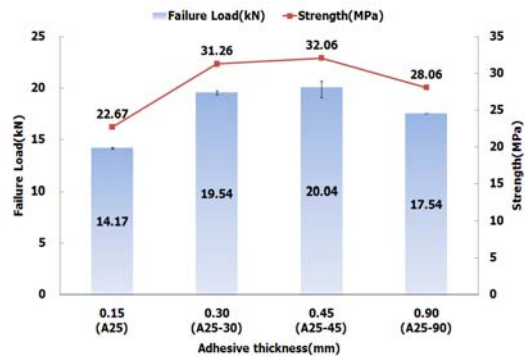


Fig. 6. Experimental failure loads of Al-Al adhesive joints with different adhesive thicknesses

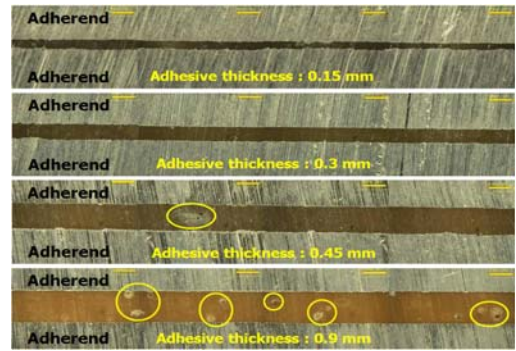


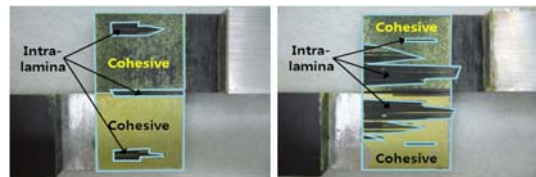
Fig. 7. Cross section of the adhesive joint

Fig. 7은 절단된 접착 조인트의 단면을 나타낸 그림으로, 접착 두께가 0.9mm인 시편에서 내부 기공의 개수와 크기가 증가되었음을 볼 수 있다.

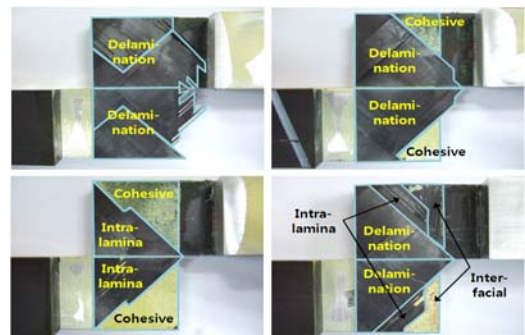
### 3.2 후판 복합재-알루미늄 접착 조인트 실험

후판 복합재-알루미늄 접착 조인트의 실험방법은 앞 절에서 설명한 알루미늄-알루미늄 접착 조인트 실험과 동일한 방법으로 수행하였다. 하중의 최대값을 각 조인트 시편의 파손강도로 선정하였으며, 각 모델 당 10개의 시편을 제작하였다.

Fig. 8은 A25-A모델과 A25-B모델에 대한 파손강도 실험 후의 접착단면을 나타낸 사진으로, 앞 절의 후판 알루미늄-알루미늄 접착 조인트 파손 모드와는 달리 Cohesive, Delamination,



[a] A25-A



[b] A25-B

Fig. 8. Fractured surfaces of Comp-Al adhesive joints

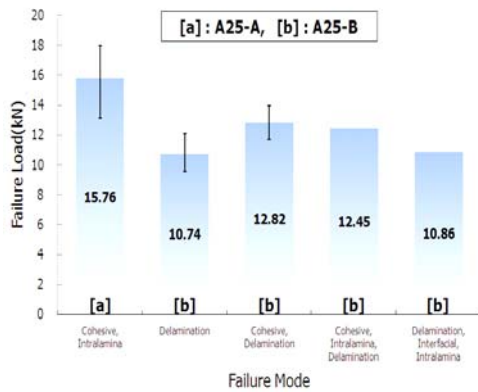


Fig. 9. Experimental failure loads of Comp-Al adhesive joints

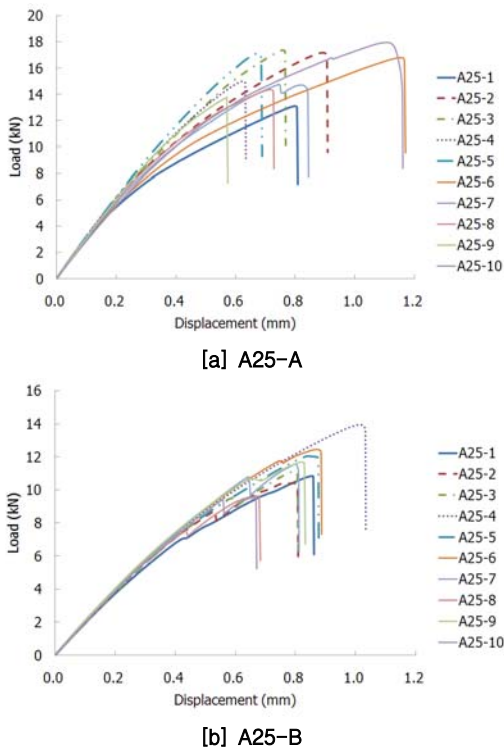


Fig. 10. Typical load-displacement curves of Comp-Al adhesive joints

Intralamina, Interfacial Failure가 복합적으로 발생하였음을 볼 수 있다.

Fig. 9는 A25-A모델과 A25-B모델의 실험결과를 파손모드(Failure Mode)별로 정리한 결과이다. Fig. 9로부터, Cohesive Failure 비율이 높을수록 파손하중과 파손강도가 높음을 볼 수 있다.

Fig. 10은 각 모델에 대한 하중-변위 곡선을

나타낸 그림으로, 복합재-알루미늄 조인트는 갑작스런 하중 강하 후 다시 재 상승하는 현상을 볼 수 있으며, 조인트의 최대하중을 파손 하중으로 간주하였다.

#### IV. 유한 요소 해석

접착 조인트의 파손강도를 예측하기 위하여 유한요소해석을 수행하고 실험결과와 상호 비교하였다. 유한요소해석에 사용한 프로그램은 상용 소프트웨어인 ANSYS V10.0이고, 해석에 사용한 요소는 3-D Structural Solid 요소와 3-D Layered Structural Solid 요소이다.

Fig. 11은 접착 조인트 해석에 사용한 3차원 유한요소모델을 나타내었다. 접착제의 두께는 모재 두께에 비하여 매우 얇지만 두께 방향으로 응력변화가 크게 발생할 수 있으므로, 여러 층으로 모델링해야 한다. 접착제의 두께는 모재 두께에 비해 매우 얇지만 응력변화가 심하게 일어나는 부분이므로 여러 층으로 모델링해야 한다. 참고 논문 [12]에서는 접착제를 여러 층으로 나누어 응력 해석을 수행하였으며, 접착제를 한 층으로 모델링 한 응력해석과 현저한 차이가 있음을 보여주었다. 그러나 접착 계면을 기준으로 계산된 파손영역과 접착 중앙부를 기준으로 계산된 파손영역은 거의 같은 값을 가지며, 파손예측의 정확도에도 큰 영향이 없음을 보여주었다. 따라서 본 논문에서는 참고문헌 [12]의 결과를 이용하여 접착제를 한 층으로 모델링하였다. 피착제로 사용한 알루미늄 재료는 선형 탄성재료로 가정하였으며, 물성치는 Table 4에 나타나 있다. 접착제로 사용한 FM73M은 재료 비선형성이 큰 재료이므로 Fig. 12와 같은 Multi-Linear 곡선으로 근사화하여 비선형 해석을 수행하였다.

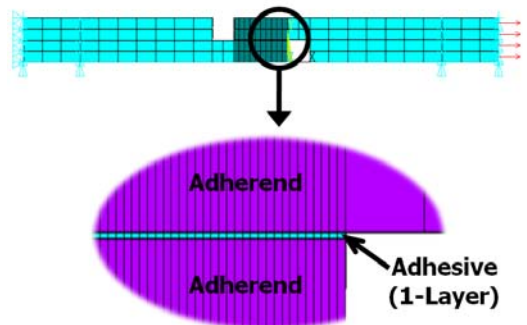
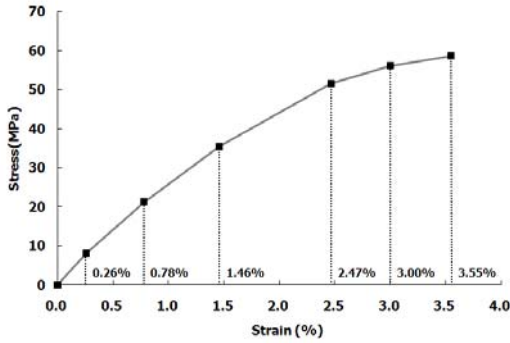


Fig. 11. 3-D finite element model of the adhesive joint

**Table 4. Material properties of aluminum 6061-T6**

Property	Symbol	Value
Elastic modulus	$E$	68.9 GPa
Poisson's ratios	$\nu$	0.3
Tensile strength	$X_T$	290 MPa



**Fig. 12. Multi linear curve**

**V. 접착 조인트의 파손강도 예측**

본 논문에서는 접착 조인트의 파손강도를 2종류의 파손영역법으로 예측하였다. 파손영역법은 접착 조인트 내에서 파손 기준에 도달하는 접착 단면의 파손영역(Damage Zone)이 특정 크기 이상이면 파손이 발생된다는 이론이다. 파손영역은 응력 또는 변형률 기준에 의하여 정의될 수 있으며, 본 논문에서는 접착체의 Von-Mises 상당 변형률(Equivalent Strain)이 최대 변형률(3.55%) 이상인 영역을 파손영역으로 선정하였다.

첫 번째는 파손영역비 방법[10]으로 식 (1)의  $D_R$ 값이 특정값 이상이면 파손이 발생된다는 이론이다. Fig. 5의 실험결과를 살펴보면 접착조인트의 파손하중은 접착 길이에 비례하여 증가하지만, 접착 길이가 일정 값을 넘어서면 파손하중의 증가에 한계가 있음을 볼 수 있다. 본 논문에서는 식 (1)과 같이 접착 길이  $l$ 의 최대값을 접착 폭  $w$ 로 제한하였다.

$$D_R = \frac{\sum A_i}{l \cdot w} \quad (\text{if } l \geq w, l = w) \quad (1)$$

$D_R$  : Damage zone ratio

$A_i$  : Damage zone

$l$  : Adhesive length

$w$  : Adhesive width

따라서, 파손영역비 방법으로 접착 조인트의 파손하중을 예측하기 위해서는  $D_R$ 값을 결정하여야 한다.  $D_R$ 값을 구하기 위한 기준모델은 임의로 선정할 수 있으며, 본 논문에서는 알루미늄-알루미늄 접착조인트인 A25모델을 기준모델로 선정하였다. A25 유한요소모델에 실험으로 구한 파손하중 값을 적용하여  $D_R$ 값을 계산하였으며, 계산된  $D_R$ 값은 0.2832이었다.

두 번째는 본 논문에서 제안한 가중 파손영역비 (Weighted Damage Zone Ratio) 방법으로, 파손면적에 가중치로 부가하는 방법이다. 가중치  $F_i$ 는 아래 식 (2)에서 보는 바와 같이, 상당 변형률을 접착체의 최대변형율로 나눈 값으로 정의하였다.

$$WD_R = \frac{\sum F_i A_i}{l \cdot w} \quad (2)$$

$$(F_i = \frac{\epsilon}{\epsilon_Y}, \text{ if } l \geq w, l = w)$$

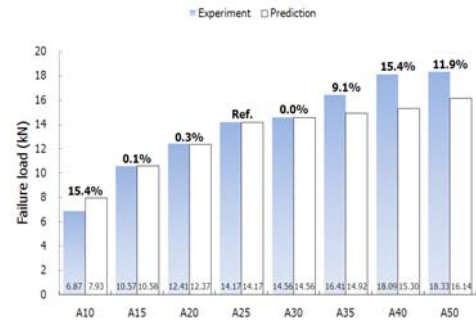
$WD_R$  : Weighted damage zone ratio

$\epsilon_Y$  : Ultimate strains (3.55%)

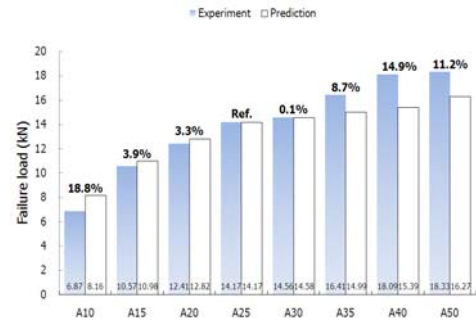
$A_i$  : Damage zone

$l$  : Adhesive length

$w$  : Adhesive width



**(a) Damage zone ratio**



**(b) Weighted damage zone ratio**

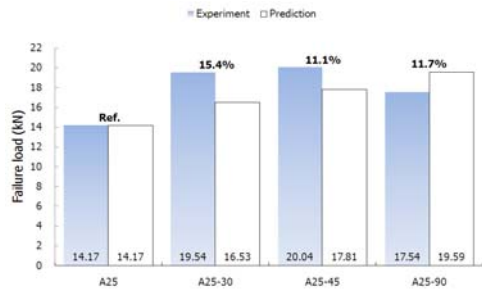
**Fig. 13. Predicted failure loads of the Al-Al adhesive joints with different adhesive lengths**

A25모형을 기준으로 계산한  $WD_R$ 값은 0.4693 이었으며,  $WD_R$ 값이 이 값에 도달하면 접착 조인트가 파괴된다고 가정하였다. Fig. 13은 접착 길이가 서로 다른 알루미늄-알루미늄 조인트의 파손강도를 파손영역비와 가중 파손영역비 방법으로 예측한 결과이다. Fig. 13에서 보는 바와 같이, 파손영역비는 15.4%, 가중 파손영역비는 18.8% 오차 범위 내에서 파손 강도를 예측할 수 있었다. Fig. 14는 접착 두께가 서로 다른 알루미늄-알루미늄 조인트의 파손강도를 예측한 결과이다. Fig. 14에서 보는 바와 같이, 파손영역비는 15.4%, 가중 파손영역비는 14.5% 오차 범위 내에서 파손 강도를 예측할 수 있음을 볼 수 있다.

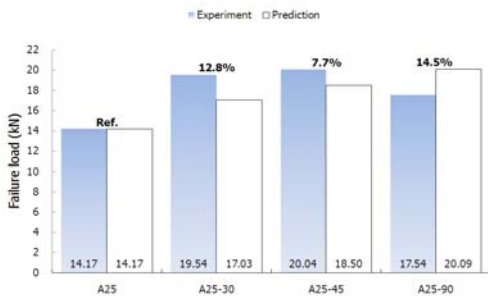
Fig. 14에서 접착제의 두께가 증가하면 파손강도 예측값이 증가되어 실험치와는 반대되는 경향을 가짐을 볼 수 있다. 이는 앞 절에서 설명한 바와 같이 접착제 내부에 발생한 기공으로 인하여 실험값이 낮게 평가된 결과[11]이며, 접착제의 내부 결함을 제거하거나 결함을 모델링하면 보다 정확한 예측이 가능하리라 판단된다.

후판 복합재-알루미늄 접착조인트는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 Cohesive, Delamination,

Intralamina, Interfacial 등 다양한 파손모드를 나타내므로 각 파손모드별 파손기준을 제안하여야 한다. 이상에서 Delamination 및 Intralamina 파손모드는 피착제인 복합재 자체의 파손모드로서, 신뢰할만한 파손예측식이 아직까지 발표되지 않고 있다. 또한, 접착계면에서 발생하는 Interfacial 파손은 접착상태에 따라 파손강도가 변화되므로 예측하기가 매우 곤란하다. 본 논문에서는 Cohesive 파손만을 판별할 수 있는 파손영역이론을 복합재-알루미늄 접착조인트에 적용하여 접착조인트의 파손모드에 따른 강도변화를 고찰하였다. 이상에서 설명한 파손영역이론은 동일한 접착제를 사용하면 동일한 값을 적용할 수 있다. 따라서, 알루미늄-알루미늄 조인트의 파손기준 ( $D_R = 0.2832$ ,  $WD_R = 0.4693$ )과 동일한 파손기준을 복합재-알루미늄 조인트에 적용하여 파손강도를 예측하였다. Fig. 15는 복합재-알루미늄 접착조인트인 A25-A 모델의 파손강도를 파손영역비와 가중 파손영역비 방법으로 예측한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 파손영역비 이론으로 최대 9.4%의 오차범위 내에서 조인트의 파손강도를 예측할 수 있었으며, Cohesive 파손과 Intralaminar 파손이 거의 동시에 발생하였음을 볼 수 있다.



(a) Damage zone ratio



(b) Weighted damage zone ratio

Fig. 14. Predicted failure loads of the Al-Al adhesive joints with different adhesive thicknesses

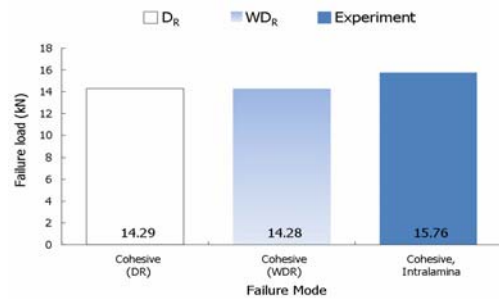


Fig. 15. Predicted failure loads of the Comp-Al adhesive joints (A25-A model)

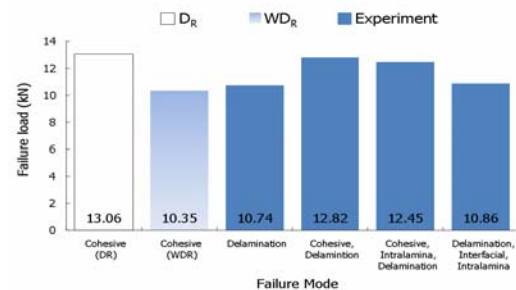


Fig. 16. Predicted failure loads of the Comp-Al adhesive joints (A25-B model)

Fig. 16은 A25-B 모델의 파손강도를 예측한 그래프로서, 가중 파손영역비 이론의 예측 정확도가 우수함을 볼 수 있으며, 최대 19.3%의 오차범위 내에서 조인트의 파손강도를 예측할 수 있었다. 또한, Cohesive 파손모드의 파손강도 값이 가장 높고 오차범위도 1.9%로 가장 우수하였으며, Delamination, Intralamina, Interfacial 파손은 Cohesive 파손이 일어나기 전에 발생되었다고 판단되어진다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 동중재질과 이종 재질로 된 후판 접착 조인트의 파손 특성을 분석하고, 파손영역이론으로 파손강도를 예측하였다.

동중 재료로 된 알루미늄-알루미늄 접착 조인트와 이종재료로 된 복합재-알루미늄 접착 조인트의 파손강도를 파손영역 이론으로 예측하였으며, 동일한 파손기준값을 적용하여 파손여부를 판단하였다. 기존의 파손 영역비 이론과 본 논문에서 제안한 가중 파손영역비 이론의 파손강도 예측 정밀도는 거의 동일한 수준으로 평가되었으며, 제작된 14종류의 시편에서는 최대 19.3% 오차범위 내에서 파손강도를 예측할 수 있었다. 따라서, 파손영역이론은 피착제의 종류와 관계없이 Cohesive Failure가 발생하는 접착 조인트의 파손강도 예측에 사용할 수 있다고 판단되어진다. 또한, 후판 복합재-알루미늄 조인트 실험에서 Cohesive Failure의 파손강도 값이 가장 높게 나타났으며, Delamination, Intralamina, Interfacial Failure의 파손기준에 대한 추가적인 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료되어진다.

## 후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업(2009-0094015)과 2단계 BK21 사업의 지원으로 수행된 연구임.

## 참고문헌

- 1) J. J. Reinhart (Eds), Composite, ASM International, Vol. 1, 1987, pp. 479-495.
- 2) P. K. Mallick, Fiber-Reinforced Composite, 1988, p. 418.
- 3) L. J. Hart-Smith, Designing to minimize peel stresses in adhesive bonded joints, Delamination and Debonding of Materials, ASTM STP 876, W. S. Johnson Ed., 1985, pp. 238-266.
- 4) J. H. Choi and D. G. Lee, "The Torque Transmission Capabilities of the Adhesively-Bonded Tubular Single Lap Joint and the Double lap Joint", The Journal of Adhesion, Vol. 44, 1994, pp. 197-212.
- 5) A. Sheppard, D. Kelly and L. Tong, "A damage zone model for the failure analysis of adhesively bonded joints", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 18, 1998, pp. 385-400.
- 6) James F. P. Owens and Pearl Lee-Sullivan, "Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminum joints I. Theoretical model", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 20, 2000, pp. 39-45.
- 7) James F. P. Owens and Pearl Lee-Sullivan, "Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminum joints II. Experimental", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 20, 2000, pp. 47-58.
- 8) 김광수, 유재석, 안재모, 장영순, "일방향 복합재료 single lap 접합 조인트의 파손모드 및 파손 강도, I. 실험", 한국복합재료학회지, 제 17권 제 6호, 2004, pp. 14-21.
- 9) 김광수, 이영무, 김천곤, "일방향 복합재료 single lap 접합 조인트의 파손모드 및 파손 강도 II. 파손예측", 한국복합재료학회지, 제 18권 제 1호, 2005, pp. 1-9.
- 10) C. S. Ban, Y. H. Lee, J. H. Choi and J. H. Kweon, "Strength prediction of adhesive joints using the modified damage zone theory", Composite structures, Vol. 86, 2008, pp. 96-100.
- 11) 이중삼, 임재규, 김연직, "단일접침 접착제 접합부의 응력분포와 강도평가", 대한용접학회지, 제 19권 제 3호, 2001, pp. 342-347.
- 12) J. H. Park, J. H. Choi and J. H. Kweon, "Evaluating the strengths of thick aluminum-aluminum joints with different adhesive lengths and thicknesses", Composite structures, 2010, in press