

論文

복합재 하이브리드 조인트의 파손강도에 관한 연구

이영환*, 박재현**, 안정희**, 최진호***, 권진희**

A Study on Failure Strength of the Hybrid Composite Joint

Young-Hwan Lee*, Jae-Hyun Park**, Jeoung-Hee Ahn**, Jin-Ho Choi*** and Jin-Hwe Kwcon**

Abstract

With the wide application of fiber-reinforced composite material in aero-structures and mechanical parts, the design of composite joint have become a very important research area because they are often the weakest areas in composite structures. In this paper, the failure strengths of the hybrid composite joints which were composed of a combination of an adhesive joint and a mechanical joint were evaluated and predicted. The 10 hybrid joint specimens which have different w/d , e/d and adherend thickness were manufactured and tested. The damage zone theory and the failure area index method were used for the failure prediction of the adhesive joint and the mechanical joint, respectively and the hybrid joints were assumed to be failures if either of the two failure criteria was satisfied. From the results of experiments and analyses, the failure strengths of the hybrid joints could be predicted to within 25.5%.

초 록

복합재료가 항공기 구조물 및 기계 부품 등에 폭 넓게 적용됨에 따라, 복합재료 구조물에서 가장 취약한 복합재료 체결부의 설계는 매우 중요한 연구분야로 대두되고 있다. 본 논문에서는 접착 체결구조와 기계적 체결구조의 조합으로 되어 있는 하이브리드 조인트의 파손강도를 평가하고 예측하였다. 피착체의 두께, w/d , e/d 가 서로 다른 10가지 하이브리드 조인트 시험편을 제작하여 평가하였다. 접착 체결구조와 기계적 체결구조의 파손 판정을 위해 파손영역법과 파괴면적지수법이 각각 적용되었으며, 두 체결부위 중 어느 한쪽이 먼저 파손기준에 도달할 경우, 하이브리드 조인트가 파손되었다고 가정하였다. 이상의 실험과 해석결과로부터, 하이브리드 조인트 시험편의 파손강도는 25.5% 오차 범위 내에서 예측할 수 있었다.

Key Words : 하이브리드 조인트(Hybrid Joint), 파손영역이론(Damage Zone Theory), 파괴면적지수(Failure Area Index), 파손강도(Failure strength)

1. 서 론

복합재료는 기존의 등방성 재료에 비해 비강성 및 비강도가 높고 감쇠 및 충격 특성이 우수하므로 항공기, 우주선, 로켓 팔 및 공작 기계 등 다양한 분야에 활용되고 있다[1,2]. 복합재료를 통해 기존 구조물의 부분적인 대체와 보강이 증가함에 따라 동종 또는 이종 재료의 부품을 연결하는 체결부의 설

계가 중요한 연구 분야로 대두되고 있다. 체결 방법으로는 크게 기계적 체결(Mechanical Joining Method)법과 접착에 의한 접착 체결(Adhesive Joining Method)법으로 나눌 수 있다. 기계적 체결법은 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 보수

* 한양대학교 기계공학부 대학원

*** 경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구소, 교신저자(E-mail:choi@gnu.ac.kr)

** 경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구소

나 부속품의 대체를 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 체결부의 강도 평가 및 예측을 위하여 많은 연구들이 진행되어 왔다. James[3,4] 등은 복합재료와 알루미늄이 접착된 단일 겹치기 이음(Single Lap Joint)의 강성에 관한 이론 및 실험 연구를 수행하였다. Choi[5] 등은 단일 겹치기 이음과 이중 겹치기 이음(Double Lap Joint)의 기계적 특성을 연구 비교하였고, Hart-Smith[6]는 이중 겹치기 이음에 관한 이론식을 정립하였다. Groth[7]는 접착 조인트 끝부분의 응력 특이성으로부터 일반화된 응력 집중 요소에 바탕을 둔 파손 기준을 제안하였다. Sheppard[8] 등은 복합재료와 알루미늄의 단일 겹치기 이음에 대한 파손 강도를 예측할 수 있는 파손 기준 및 파손영역 이론(Damage Zone)을 제안하였다. Ban[9] 등은 기존의 파손영역이론을 근거로 하여 파손영역비(Damage Zone Ratio)를 제안하고 이를 이용하여 접착 체결부의 파손강도를 예측하였다.

복합재료 기계적 체결부의 강도평가 및 예측에 관한 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Hart-Smith[10]는 조인트 강도에 예측에 응력집중계수를 이용하였고, Whitney[11,12] 등은 평균응력과 파손기준에 근거한 특성길이(Characteristic Length)를 제안하였으며, Chang[13,14]은 인장과 압축 특성길이의 조합으로 정의되는 특성곡선을 제안하여 기계적 조인트의 파손강도를 예측하였다. Sun[15,16] 등은 조인트에 대한 3차원 모델을 이용하여 점진적 파손 해석방법으로 조인트의 파손강도를 예측하였다. Choi[17,18,19,20] 등은 파손이 일어날 수 있는 특정면적에 대하여 파손지수의 평균값을 계산한 파괴면적지수법(FAI, Failure Area Index)을 제안하였다.

이상의 두 가지 체결법을 혼합한 하이브리드 조인트는 신뢰성과 파손 강도가 매우 우수한 체결법으로 알려져 있다. 그러나 이에 대한 파손강도 평가 및 예측에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 기계적 체결구조와 접착 체결구조를 혼합한 형태인 하이브리드 조인트를 제작하여 파손 강도를 평가하고 이를 해석적인 결과와 상호 비교하였다. 하이브리드 조인트는 접착제로 접합한 접착구조물에 원공을 가공하여 핀으로 결합시킨 구조로 되어 있으며, 원공 직경에 대한 시편 폭의 비(w/d), 원공 직경에 대한 끝단 거리의 비(e/d), 피착제의 접착길이(l), 두께(t) 등이 서로 다른 10 종류의 시험편을 제작하여 파손강도를 평가하였다. 하이브리드 조인트의 파손 강도를 예측하기 위하여, 접착 체결구조에는 파손 영역 이론을 적용하였으며, 기계적 체결구조에는 파괴면적지수법을 사용하여 파손여부를 평가하였다.

2. 하이브리드 조인트 시험편 제작

본 논문에서 사용된 접착제는 Cytec사의 FM73M으로 참고논문 [9]의 시험편과 물성 데이터를 사용하였다. Fig. 1은 실험으로부터 구한 인장응력-인장변형을 선도와 전단응력-전단변형을 선도이다.

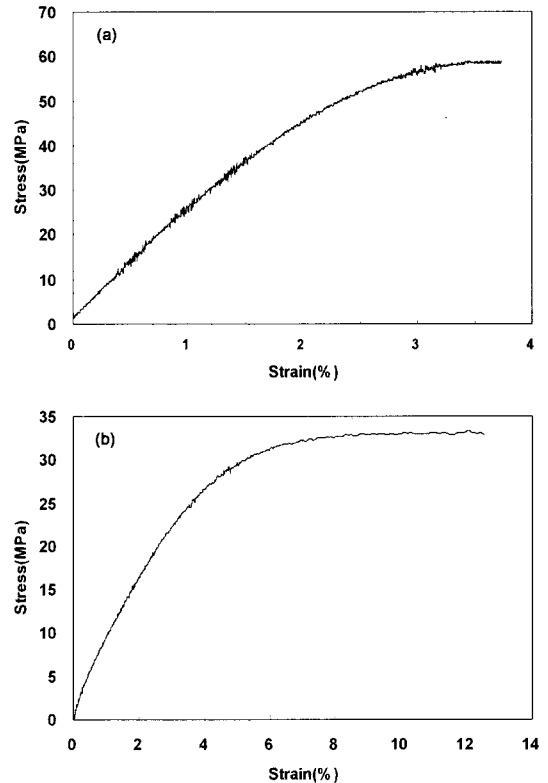


Fig. 1 Stress-strain curve: (a)Tension, (b)Shear.

본 논문에서는 복합재료와 금속을 하이브리드 조인트 형태로 체결하였으며, SK Chemical사의 USN 125 Carbon/Epoxy 일방향 프리프레그와 HFG사의 Carbon/Epoxy 평직(Fabric)을 이용하여 복합재 시편을 제작하였다. 복합재 시편의 적층순서는 $[\pm 45_3/90/\pm 45_2/0_4/90/0_4/\pm 45_2/90/\pm 45_3]$ 이며, \pm 는 평직층을 의미한다. 사용된 복합재료의 물성치는 Table 1과 2에 나타나 있다. 하이브리드 조인트 시험편의 형상은 Fig. 2에 나타나 있으며, 핀의 직경은 $d=9.53\text{mm}$ 이다. 각 시험편의 치수는 Table 3에 나타나 있다. H01~H03 시험편은 원공 직경에 대한 끝단 거리의 비(e/d)를 고정된 상태에서 원공 직경에 대한 시편 폭의 비(w/d)를 변화시킨 시험편이고, H04~H07 시험편은 원공 직경에 대한 시편 폭의 비를 고정된 상태에서 원공 직경에 대한 끝단 거리의 비를 변화시킨 시험편이다. 또한, H08~H10

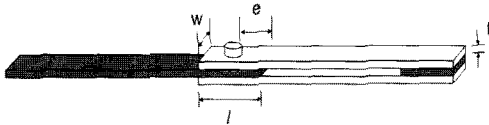


Fig. 2 Shape of the hybrid joint.

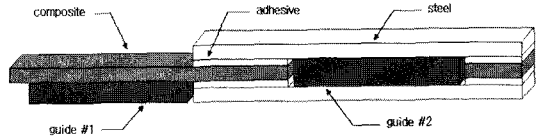


Fig. 3 Jigs for the constant adhesive thickness.

Table 1 Material properties of SK carbon/epoxy composite material

Property	Symbol	Value
Elastic modulus in fiber-direction	E_1	131.0 GPa
Elastic moduli in transverse directions	E_2, E_3	8.20 GPa
Shear moduli in 1-2 and 1-3 planes	G_{12}, G_{13}	4.50 GPa
Shear modulus in 2-3 plane	G_{23}	3.50 GPa
Poisson's ratios	ν_{12}, ν_{13}	0.281
	ν_{23}	0.470
Tensile strength in fiber-direction	X_T	2000 MPa
Compressive strength in fiber-direction	X_C	1400 MPa
Tensile strength in transverse direction	Y_T	61 MPa
Compressive strength in transverse direction	Y_C	130 MPa
Shear strengths in 1-2 and 1-3 planes	S_{12}, S_{13}	70 MPa
Shear strength in 2-3 plane	S_{23}	40 MPa

Table 2 Material properties of HFG carbon/epoxy fabric composite material

Property	Symbol	Value
Elastic modulus in fiber-direction	E_1	65.4 GPa
Elastic modulus in transverse directions	E_2	65.4 GPa
Shear modulus in 1-2 planes	G_{12}	3.59 GPa
Poisson's ratio	ν_{12}	0.058
Tensile strength in fiber-direction	X_T	959.1 MPa
Compressive strength in fiber-direction	X_C	692.9 MPa
Tensile strength in transverse direction	Y_T	959.1 MPa
Compressive strength in transverse direction	Y_C	692.9 MPa
Shear strength	S	64.9 MPa

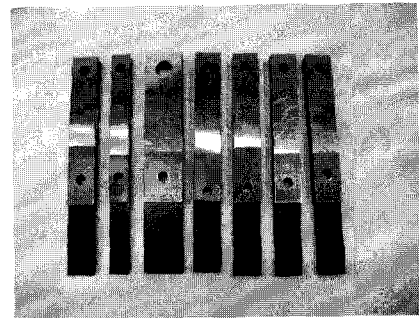


Fig. 4 Photograph of the manufactured hybrid joint specimen.

Table 3 Dimensions of hybrid joint specimens

Model	w(mm)	l(mm)	e(mm)	t(mm)	w/d	e/d
H01	19	38	13.4	6.05	2	1.4
H02	26.8	38	13.4	6.05	2.8	1.4
H03	38	38	13.4	6.05	4	1.4
H04	26.8	38	9.6	6.05	2.8	1
H05	26.8	38	19	6.05	2.8	2
H06	26.8	38	3.8	6.05	2.8	2.5
H07	26.8	38	28.6	6.05	2.8	3
H08	19	20	13.4	1.6	2	1.4
H09	26.8	20	13.4	1.6	2.8	1.4
H10	38	20	13.4	1.6	4	1.4

시험편은 금속과 복합재의 강성차이를 최소화시키기 위하여 금속 피착제의 두께를 감소시키고 원공 직경에 대한 시편 폭의 비를 변화시킨 시험편이다. 하이브리드 조인트는 접착 체결구조와 기계적 체결구조가 혼합된 형태이므로, 먼저 접착제를 사용하여 복합재 시편과 금속시편을 접착하여야 한다. 일반적으로 접착제의 접착력은 접합되는 재료의 표면 상태에 따라 크게 변화한다. 따라서 본 논문에서는 시편의 표면처리를 위해 100 mesh의 사포를 사용하여 복합재와 금속의 접착면을 연마하였다. 또한 연마된 금속의 접착면을 질산 10%+에탄올 90%의 용액으로 약 5분간 부식시켰다[9]. 접착층의 두께를 일정하게 유지하기 위하여 Fig. 3과 같은 금속 블록을 사용하였으며, 접착 조인트의 끝부분에 형성되는 필렛을 제거하여 접착형상을 일정하게 유지하였다. 접착이 완료된 시편은 원공을 가공한 후, 핀으로 체결하여 하이브리드 조인트 시험편을 완성

하였다. 원공 가공에 쓰인 공구는 텅스텐 카바이드 드릴 (Tungsten Carbide Drill)이며, 사용 횟수를 1회로 제한하여 가공 조건에 대한 영향을 최소화하였다. 또한, 핀과 원공의 공차를 중간 끼워맞춤 영역에서 쥘새가 생기도록 일정하게 가공(Finger Tight)하였으며, 고정력(Clamping Force)은 가하지 않았다. Fig. 4는 제작된 하이브리드 조인트 시험편의 모습을 나타낸 사진이다.

3. 하이브리드 조인트의 강도평가

하이브리드 조인트 시험편의 파손강도를 평가하기 위하여 인장시험을 수행하였다. 실험에 사용한 재료 시험기는 Instron 5582이고, 상온 조건에서 분당 1mm/min의 변형속도 하에서 조인트의 인장시험을 수행하였다. Fig. 5는 하이브리드 조인트 시험편의 인장시험 모습을 나타낸 사진이다.



Fig. 5 Experimental set-up of the hybrid joint.

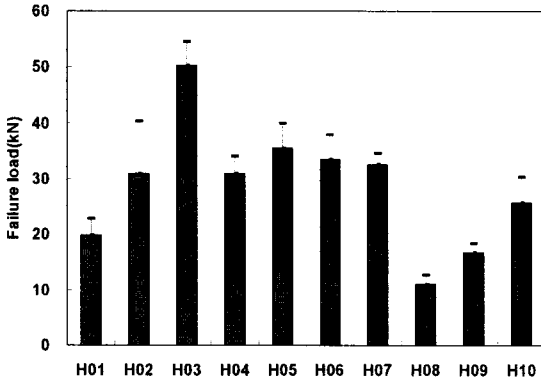


Fig. 6 Failure loads of the hybrid joints.

하중의 최대값을 각 조인트 시편의 파손 강도로 선정하였으며, 각 모델 당 7개의 시편을 제작하여 산술평균값을 각 시편의 파손 하중으로 결정하였다. Fig. 6은 실험으로 구한 하이브리드 조인트 시편의 파손강도를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 H02모델에서 가장 큰 실험오차가 발생하였으며, 산술평균값을 기준으로 29.5%의 오차 범위를 가짐을 볼 수 있다.

4. 유한요소해석

하이브리드 조인트의 파손 강도를 예측하기 위하여 유한요소해석을 수행하고 실험으로 구한 파손강도의 산술평균값과 비교하였다. 해석에 사용한 프로그램은 상용 소프트웨어인 ANSYS V10.0이며, 3D Structural Solid 요소와 3D Layered Structural Solid 요소를 사용하였다. 또한 계산 시간을 줄이기 위해 대칭성을 이용하여 시편의 1/4 모델만 생성하였다. 하이

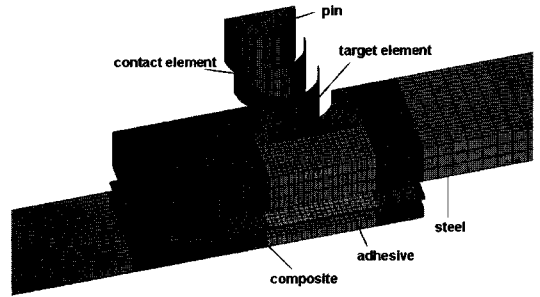


Fig. 7 3-D finite element model of the hybrid joint.

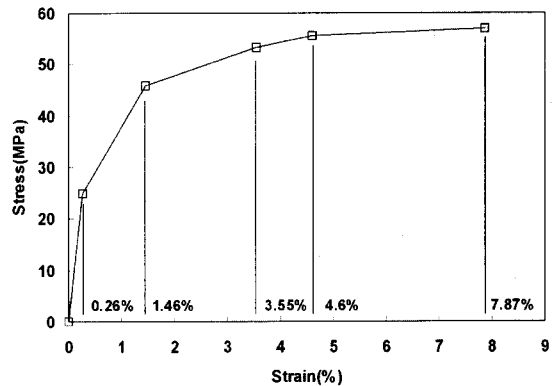


Fig. 8 Multi-linear stress-strain curve.

브리드 조인트에 하중이 가해질 때 핀과 원공의 접촉상태가 변화하게 되므로 접촉요소를 정의하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 7은 하이브리드 조인트의 해석에 사용한 3차원 유한요소모델을 나타낸다. 하이브리드 조인트에서 접착체 결부의 접착제는 주로 전단 하중을 받으므로 접착체의 전단 특성을 사용해야한다. 따라서 본 논문에서는 전단실험으로 구한 접착체의 전단응력-전단변형률 선도에서 아래와 같은 Von-Mises의 파괴조건식을 적용시키고, 비선형성을 고려하여 Fig. 8과 같은 Multi-linear 응력-변형률 선도로 변환시켜 하이브리드 조인트의 유한요소해석에 적용하였다. Fig. 8의 응력-변형률 선도는 Fig. 1 (a)의 그래프와 유사한 경향을 보이나, 최대 변형률 값이 증가된 것을 볼 수 있다.

$$\sigma_Y = \sqrt{3} \tau_Y \tag{1}$$

$$\epsilon_Y = \frac{\sqrt{3} \tau_Y}{2G(1+\nu)} \tag{2}$$

σ_Y : 인장항복강도

τ_Y : 전단항복강도

ϵ_Y : 인장항복변형률

ν : Poisson's ratio

5. 파손강도 예측

하이브리드 조인트는 편으로 결합된 기계적 체결구조와 접착제로 접착된 접착 체결구조가 혼합된 형태이므로, 강도 예측을 위해서는 두 가지 결합 형태에 대하여 각각의 파손 기준이 적용되어야 한다.

5.1 기계적 체결구조에 대한 파손 기준

기계적 체결구조에 대한 파손강도 예측법에는 여러 가지가 있으나[10-20], 본 논문에서는 파괴면적지수법을 적용하여 기계적 체결구조의 파손 강도를 예측하였다[17-20]. 파괴면적지수법은 복합재료의 파손이 일어날 수 있는 특정면적에 대하여 파손지수의 평균적인 크기를 평가하는 방법으로 복합재료의 파손이 일어날 수 있는 특정 면적은 사용된 파손 판정식의 파손지수가 1 이상인 부분으로 한정되며, 파괴면적지수가 일정한 값에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정한다. 파괴면적지수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$FAI_j = \frac{\int FdA}{H_A} \approx \frac{\sum_{i=1}^m F_i \cdot A_i}{H_A} \tag{3}$$

FAI_j : 층별 파괴면적지수

F_i : 파손지수

H_A : 원공의 내부면적

전체 적층판에 대한 파괴면적지수는 다음과 같다.

$$FAI = \sum_{j=1}^m FAI_j \tag{4}$$

m : 전체 적층수

파괴면적지수법으로 기계적 체결구조의 파손강도를 예측하기 위해서는 파손 판정의 기준이 되는 파괴면적지수값을 선정하여야 하며, 동일한 적층순서를 가지는 체결구조에 대해서는 동일한 값을 적용할 수 있다. 본 논문에서 사용한 복합재료는 참고논문 [17]과 소재의 종류 및 적층순서가 동일하므로 동일한 값을 적용할 수 있다. 본 논문에서는 Yamada-Sun 파손식을 적용한 참고문헌 [17]의 계산 결과를 사용하였으며, 파손 판정의 기준이 되는 파괴면적지수값은 0.1303이었다.

5.2 접착 체결구조에 대한 파손기준

접착 체결구조의 파손을 평가하는 방법에는 여러 가지가 있으나[5-9], 본 논문에서는 파손영역이론[9]을 이용하여 하이브리드 조인트의 접착 체결구조에 대한 파손 여부를 평가하였다. 파손영역이론은 동일한 접착조건을 가진 접착 체결구조에 하중이 부가될 때 접착제의 파손영역의 크기를 통해 파손을 평가하는 방법이다. 파손영역의 크기는 선정된 파손기준 이상인 부분으로

한정되며, 전체 면적에 대한 파손영역의 비를 나타내는 파손영역비가 일정한 값에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정한다[9]. 본 논문에서 사용한 접착제는 참고논문 [9]와 동일하므로, 동일한 파손 기준을 적용하였으며, 접착부위의 변형률이 7.87% 이상인 영역을 파손영역으로 정의하였다. 파손 판정의 기준이 되는 파손영역비는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D.R = \frac{\sum A_i}{l \cdot w} \tag{5}$$

$D.R$: 파손영역비

A_i : 파손영역

l : 접착 길이

w : 접착 폭

파손 판정의 기준이 되는 파손영역비는 참고논문 [9]의 값을 사용하였으며, 파손영역비가 0.2134 이상이면 접착 체결구조에 파손이 발생되었다고 판정하였다.

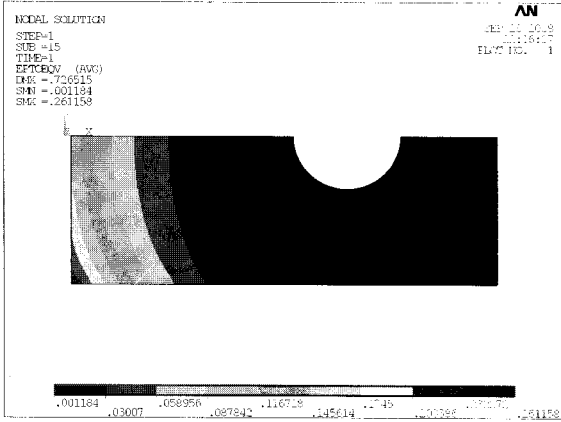
5.3 하이브리드 조인트의 파손강도 예측

하이브리드 조인트는 기계적 체결구조와 접착 체결구조가 결합된 형태이므로, 강도를 예측하기 위해서는 두 가지 형태의 파손 기준을 각각 적용하여야 한다.

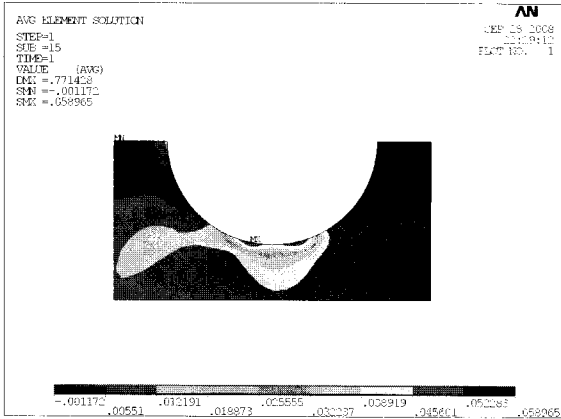
본 논문에서는 이상에서 기술한 바와 같이 파손영역법과 파괴면적지수법을 각각 사용하였으며, 두 체결부위 중 어느 한쪽이 먼저 파손기준에 도달할 경우, 하이브리드 조인트가 파손되었다고 가정하였다. Fig. 9는 H02 모델에 실험 파손하중 $P=31kN$ 을 가하였을 때, 접착제의 변형률과 원공 주위의 Yamada-Sun 파손지수를 나타낸 그림으로, 원공 주위에는 거의 파손이 발생되지 않았음을 볼 수 있다.

Table 4는 하이브리드 조인트의 두 체결부위 중 어느 한쪽이 먼저 파손 기준에 도달하여 하이브리드 조인트가 파손되었다고 판정하였을 때의 파손 지수를 나타낸 표로서, 하이브리드 조인트의 접착 체결구조에서 먼저 파손이 일어남을 볼 수 있다.

Fig. 10은 원공 직경에 대한 시편 폭의 비(w/d)를 변화시킨 하이브리드 조인트의 파손강도를 예측한 그래프로서, 시편의 폭이 증가할수록 예측 정밀도가 저하되며, 실험의 산술평균값을 기준으로 최대 16.1%의 오차가 발생됨을 볼 수 있다. Fig. 11은 원공 직경에 대한 끝단 거리의 비(e/d)를 변화시킨 하이브리드 조인트의 파손강도를 예측한 그래프로서, 끝단 거리가 증가할수록 예측 정밀도가 저하되며, 실험의 산술평균값을 기준으로 최대 25.5%의 오차가 발생됨을 볼 수 있다. Fig. 12는 금속 피착제의 두께를 감소시키고 원공 직경에 대한 시편 폭의 비(w/d)를 변화시킨 하이브리드 조인트의 파손강도를 예측한 그래프로서, 시편의 폭이 $w=26.8mm$ 일 때 예측 정밀도가 가장 낮은 값을 가짐을 볼 수 있었으며, 실험의 산술평균값을 기준으로 최대 11.6%의 오차가 발생됨을 볼 수 있다.



(a) Equivalent strain distribution of the adhesive



(b) Yamada-Sun failure index around a hole

Fig. 9 Equivalent strain distribution of adhesive and Yamada-Sun failure index around a hole (P= 31kN, H02 Model).

Table 4 Failure Indexes when the hybrid joints were failed

Model	Adhesive Part (Ref. D. R =0.2134)	Mechanical Part (Ref. FAI =0.1303)
H01	0.2136	0
H02	0.2133	0
H03	0.2139	0
H04	0.2136	0
H05	0.2134	0
H06	0.2136	0
H07	0.2143	0
H08	0.2135	0
H09	0.2147	0
H10	0.2143	0

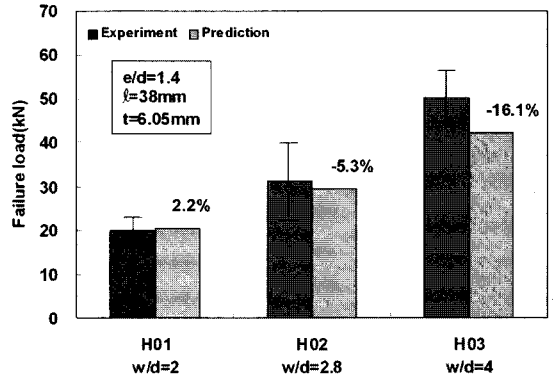


Fig. 10 Prediction loads of the hybrid joints.

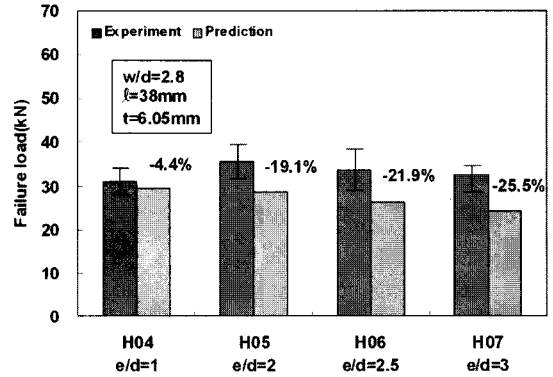


Fig. 11 Prediction loads of the hybrid joints.

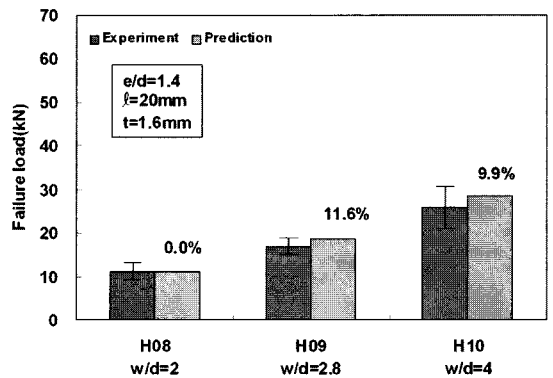


Fig. 12 Prediction loads of the hybrid joints.

6. 결론

본 논문에서는 파손영역 이론과 파괴면적지수법을 동시에

적용하여 하이브리드 조인트의 파손강도를 예측하고 실험 결과와 비교하였다. 이상에 대한 실험과 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

(1) 파손영역 이론과 파괴면적지수법을 동시에 적용하여 하이브리드 조인트의 강도를 예측한 결과, 실험 평균값을 기준으로 최대 25.5%의 오차가 발생되었다.

(2) 본 논문에서 실험한 10종류의 하이브리드 시험편은 접착 체결구조에서 먼저 파손이 발생되었음을 수치적으로 확인하였다.

후 기

본 논문은 2008년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단 (KRF-2008-005-J01001)과 2단계 BK21 사업의 지원으로 수행된 연구임.

참고문헌

- 1) Reinhart J.J. (Eds), ASM International, Composite, Vol. 1, 1987, pp. 479-495.
- 2) Lee D.G., Jeong K.S., Kim K.S. and Kwak Y.K., "Development of the Anthropomorphic Robot with Carbon Fiber Epoxy Composite materials," *Composite Structures*, Vol. 25, 1993, pp. 313-324.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Choi J.H. and Lee D.G., "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.
- 6) Hart-Smith L.J., *Designing to minimize peel stresses in adhesive bonded joints, Delamination and Debonding of Materials*, Johnson W.S. Ed., ASTM STP 876, 1985, pp. 238-266.
- 7) Groth H.L. "A method to predict fracture in an adhesively bonded joint," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 5, 1985, pp. 19-22.
- 8) Sheppard A., Kelly D. and Tong L., "A damage zone

- model for the failure analysis of adhesively bonded joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 18, 1998, pp. 385-400.
- 9) Ban C.S., Lee Y.H., Choi J.H. and Kweon J.H., "Strength prediction of adhesive joints using the modified damage zone theory," *Composite structures*, Vol. 86, 2008, pp. 96-100
- 10) Hart-Smith L.J., "Mechanically Fastened Joints for Advanced Composites, Phenomenological Considerations and Simple Analyses," *Fibrous Composite in Structural Design*, Plenum Press, 1980, pp. 543-574.
- 11) Whitney J.M. and Nuismer R.J., "Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations," *Journal of Composite Materials*, Vol. 8, 1974, pp. 253-265.
- 12) Whitney J.M. and Nuismer R.J., "Uniaxial Failure of Composite Laminated Containing Stress Concentrations," *Fracture mechanics of Composites*, ASTM STP 593, 1975, pp. 117-142.
- 13) Chang F.K. and Scott R.A., "Strength of Mechanically Fastened Composite Joints," *Journal of Composite materials*, Vol. 16, 1982, pp. 470-494.
- 14) Chang F.K. and Scott R.A., "Failure of Composite Laminates Containing Pin Loaded Holes-Method of Solution," *Journal of Composite materials*, Vol. 18, 1984, pp. 255-278.
- 15) Sun H.T., Chang F.K. and Qing X., "The response of Composite Joints with Bolt-Clamping Loads, Part I: Model Development," *Journal of Composite materials*, vol 36, 2002, pp. 47-67
- 16) Sun H.T., Chang F.K. and Qing X., "The response of Composite Joints with Bolt-Clamping Loads, Part II: Model Verification," *Journal of Composite materials*, vol 36, 2002, pp. 69-92.
- 17) 최진호, 전영준, 권진화, "기계적으로 체결된 복합재료 조인트의 강도에 관한 연구," 한국복합재료학회논문집, 제 15권, 제4호, 2002, pp. 9-16.
- 18) 전영준, 최진호, 권진화, "파괴면적지수법을 이용한 복합재료 기계적 체결부의 강도평가에 관한 연구," 한국복합재료학회논문집, 제16권, 제5호, 2003, pp. 1-6
- 19) Choi J.H. and Chun Y.J., "Failure Load Prediction of Mechanically Fastened Composite Joint," *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, No. 24, 2003, pp. 2163-2177.
- 20) Ryu C.O., Choi J.H. and Kweon J.H., "Failure load prediction of composite joints using linear analysis," *Journal of Composite Materials*, Vol. 41, No.7, 2007, pp. 865-878.