

論文

파손영역비를 이용한 복합재 접착 체결부의 파손강도 예측

이영환*, 반창수**, 최진호***, 권진희**

Failure Load Prediction of the Composite Adhesive Joint Using the Damage Zone Ratio

Young-Hwan Lee*, Chang-Su Ban**, Jin-Ho Choi***, Jin-Hwe Kweon**

ABSTRACT

The composite joint has become an important research area because the structural efficiency of a structure with a joint is determined by its joints rather than by its basic structure since the joints are often the weakest areas in composite structures. In this paper, the strengths of adhesive joints consisting of metal and composites were predicted and tested by the maximum strain theory and damage zone theory. Nonlinear finite element analyses of adhesive joints considering the material nonlinearity of the adhesive layer were performed. From the tests and analyses, the strengths of the adhesive joints could be predicted to within 22.2% using the damage zone ratio.

초 록

복합재료 체결부는 전체 복합재 구조물의 성능을 결정하는 중요한 부분이므로, 체결부에 대한 해석과 강도평가는 매우 중요하다. 본 논문에서는 복합재 접착 체결부의 강도를 실험적으로 평가하고 분석하였으며, 구조해석으로 평가한 체결부의 강도와 상호 비교하였다. 접착 체결부의 강도예측을 위하여 최대 변형률 이론과 파손영역 이론을 사용하였으며, 비선형 유한요소 해석을 통해 제안된 파손영역비를 기준으로 접착 체결부의 파손강도를 예측할 결과, 최대 22.2% 범위 내에서 파손강도를 예측할 수 있었다.

Key Words : 접착 체결부(Adhesive joint), 파손 영역(Damage zone), 최대 변형률(Maximum Strain)

1. 서 론

복합재료는 기존의 등방성 재료에 비해 비강성 및 비강도가 높고 우수한 감쇠특성과 충격 특성으로 인해 항공기, 우주선, 로봇 팔, 공작 기계 등 다양한 분야에 활용되고 있다[1]. 복합재료를 적용한 기존 구조물의 부분적인 대체와 보강이 증가함에 따라 동종 또는 이종재료의 부품을 연결하는 체결부의 설계가 중요한 연구 분야로 대두되고 있다.[2,3]

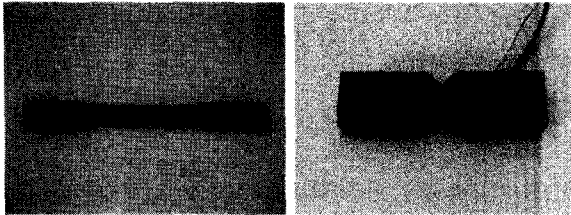
복합재료의 접합 방법으로는 크게 기계적 체결 법(Mechanical

Joining Method)과 접착 체결법(Adhesive Joining Method)으로 나눌 수 있다. 기계적 체결법은 피접합물(Adherend)에 원공을 가공하고 볼트나 핀으로 체결하는 방법으로, 체결을 위해 추가적인 원공의 가공이 필요하다. 따라서 연속된 섬유가 끊어질 수 있고 응력 집중 (Stress Concentration)이 발생할 수 있으나, 분해 조립이 쉽고, 표면 처리가 필요 없는 장점을 가지고 있다. 반면, 접착 체결법은 원공이 존재하지 않으므로 추가적인 원공의 가공이 필요 없고, 이로 인해 넓은 면적으로 하중을 분산시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 보수나 교환이 어렵고 주위 환경의 영향

* 한양대학교 기계공학과 대학원

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

** 경상대학교 기계항공공학부 항공기부품기술연구소



(a) Tensile test (b) Shear test

Fig. 1 Photograph of the adhesive specimen.

Table 1 Material properties of the adhesive (FM73M)

Property	Symbol	Value
Elastic modulus	E	4.2GPa
Poisson's ratio	ν	0.45
Shear modulus	G	1.5GPa
Tensile strength	σ	58.8MPa
Shear strength	τ	32.9MPa

이나 작업자의 숙련도에 의해 접착강도가 크게 변화되며, 재료의 표면 처리가 필요한 단점을 가지고 있다.

접착 체결법의 강도 평가 및 예측을 위하여 많은 연구들이 진행되어 왔다. James[4,5] 등은 복합재료와 알루미늄이 접착된 단일 겹치기 이음(Single Lap Joint)의 강성에 관한 이론 및 실험 연구를 수행하였다. Choi[6] 등은 단일 겹치기 이음과 이중 겹치기 이음(Double Lap Joint)의 기계적 특성을 연구 비교하였고, Hart-Smith[7]는 이중 겹치기 이음에 관한 이론식을 정립하였다. Groth[8]는 접착 체결부 끝부분의 응력 특이성으로부터 일반화된 응력 집중 요소에 바탕을 둔 파손 기준을 제안하였다. Sheppard[9] 등은 복합재료와 알루미늄의 단일겹치기 이음에 대한 파손 강도를 예측할 수 있는 파손 기준 및 파손영역 이론(Damage Zone) 을 제안하였다.

본 논문에서는 복합재료와 강의 이종재료를 이중 겹치기 이음의 형태로 접착하여 파손강도를 평가하였으며, 최대 변형률(Maximum Strain) 이론과 파손영역(Damage Zone) 이론을 적용하여 접착강도를 예측하였다. 또한 수정 파손영역 이론을 제시하여 접착 체결부의 강도를 예측하고 결과를 상호 비교하였다.

2. 접착제의 물성치

접착 체결부 시험편의 제작에 사용된 접착제의 물성을 평가하기 위하여 Fig. 1 (a)와 같은 인장시험편을 제작하여 인장시험을 수행하였다. 접착에 사용한 접착제는 에폭시 계열의 접착제로 Cytec사의 FM73M이다. 인장시험 결과로부터 구한 응력-변형률 선도는 Fig. 2와 같다. 접착 체결부에서 접착제는 주로 전단하중을 받는 상태이므로 접착제의 전단물성을 평가

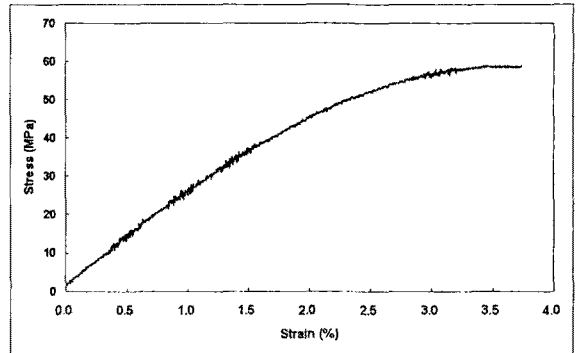


Fig. 2 Stress-strain curve.

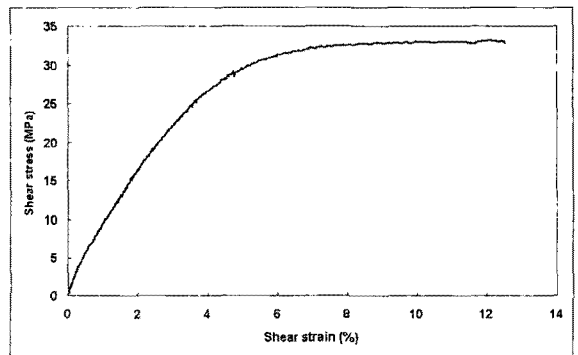


Fig. 3 Shear stress-strain curve.

하였다. Fig. 1 (b)는 제작된 전단 시험편의 모습이고, Fig. 3은 전단시험으로부터 구한 전단응력-변형률 선도이다. 그림에서 보는바와 같이 선형 탄성구간은 Fig. 2의 인장시험 결과와 유사하나 소성 구간이 긴 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 접착제의 전단물성을 체결부 해석에 사용하였으며, 실험으로 구한 FM73M의 기계적 물성치는 Table 1에 나타내었다.

3. 시편 제작 및 실험

3.1 시편제작

본 논문에서는 복합재료와 강의 이종재료를 이중 겹치기 이음의 형태로 접착하여 시편을 제작하고 실험을 수행하였다. Fig. 4는 이중 겹치기 이음의 형상을 나타낸 그림이며, 시험편의 치수는 Table 2에 나타나 있다.

복합재 제작에 사용된 재료는 SK Chemical의 USN125 Carbon/Epoxy 일방향 프리프래그와 HFG의 평직(Fabric)이고, $[\pm 45_3/90/\pm 45_2/0_4/90/0_4/\pm 45_2/90/\pm 45_3]$ 의 순서로 적층하였다. 일반적으로 접착제의 접착력은 접합되는 재료의 표면 상태에 따라 크게 변화된다. 본 논문에서는 시편의 표면 처리를 위해

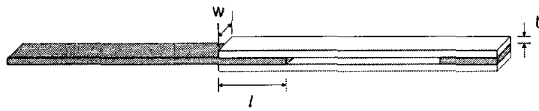


Fig. 4 Shape of the adhesive joint specimen.

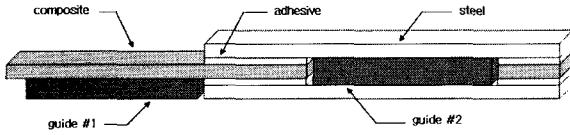


Fig. 5 Guide block for the constant adhesive thickness.

Table 2 Dimensions of the adhesive joint specimens

Model	w(mm)	l(mm)	t(mm)
A01	26.8	38	6.05
A02	38	38	6.05
A03	19	38	6.05
A04	26.8	20	1.6
A05	38	20	1.6
A06	19	20	1.6

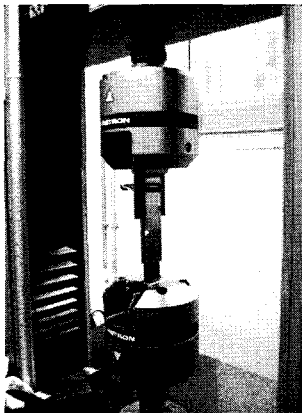


Fig. 6 Experimental set-up of the adhesive joint.

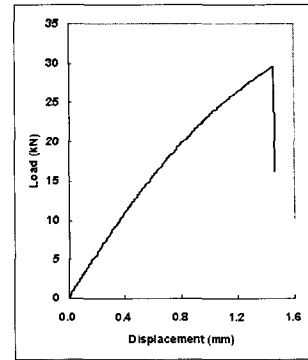


Fig. 7 Load-displacement curve of the adhesive joint.

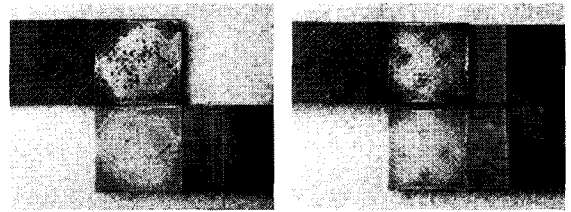


Fig. 8 Photograph of the fractured adhesive joint.

3.2 시험

제작된 접착 체결부 시편을 이용하여 접착 체결부의 인장 강도를 평가하였다. 인장시험에 사용한 재료시험기는 Instron 5582이며, 변위속도를 1mm/min으로 고정하였다.

Fig. 6은 재료시험기에 장착된 접착 체결부의 인장 시험 모습이다. 접착 체결부의 하중-변위 곡선은 Fig. 7과 같으며, 각 모델 당 7개의 시편을 제작하여 인장시험을 수행하였다. Fig. 8은 인장시험후의 파손된 접착단면을 나타낸 사진으로, 금속과 복합재의 양 표면에서 접착제가 부착되어 있으므로 Cohesive Failure가 발생되었다고 볼 수 있다.

4. 파손 강도 예측

4.1 유한요소해석

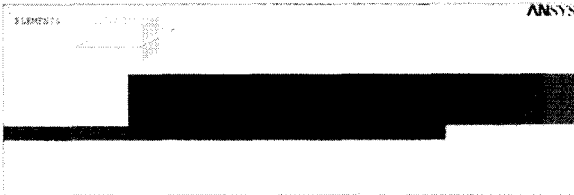
접착 체결부의 강도를 예측하고 실험결과와 비교하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석에 사용한 프로그램은 상용 소프트웨어인 ANSYS 10.0이며, Fig. 9는 해석에 사용한 2차원 및 3차원 유한요소모델을 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이, 해석 시간을 줄이기 위해 2차원과 3차원 유한요소모델의 대칭성을 이용하여 각각 전체 형상의 1/2 모델과 1/4모델만 생성하였다.

피착제로 사용한 강 재료는 선형 탄성재료로 가정하였으며, 강의 물성치는 Table 3에 나타나 있다. 실험에 사용한 FM73M

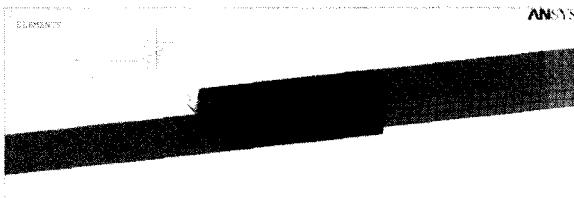
100mesh의 사포를 사용하여 복합재료의 접착면과 금속의 접착면을 시편 축방향과 ±45° 방향으로 연마하였다[10]. 또한 연마된 금속의 접착면을 질산 10% + 에탄올 90%의 용액으로 약 5분간 부식시킨 후 아세톤으로 깨끗이 세척하였다. 접착층의 두께를 균일하게 유지하기 위하여 Fig. 5와 같은 연마된 금속 블록을 사용하였으며, 접착제의 두께는 0.15mm로 고정하였다[10]. 접착 시험편은 Autoclave 내부에서 약 3기압의 압력으로 120℃에서 120분 동안 경화시켰다. 접착 체결부의 끝 부분에 필렛이 존재하면 접착강도는 향상될 수 있으나, 균일한 형상으로 가공하기가 곤란하다. 따라서 접착 후 필렛 부분을 완전히 제거하여 기하학적 형상을 일정하게 유지하였다.

Table 3 Material properties of steel

Property	Value
Elastic modulus (GPa)	200
Poisson's ratio	0.3
Tensile strength (MPa)	345



(a) 2-D



(b) 3-D

Fig. 9 Finite element model for the analysis of the adhesive joint.

접착제는 재료의 비선형성이 매우 크므로 비선형 유한요소해석을 수행하였으며, 접착제의 전단물성을 접착 체결부 해석에 사용하였다. 접착제의 전단물성을 유한요소해석에 적용하기 위하여 Fig. 3의 전단응력-변형률 곡선을 아래와 같은 Von-Mises 파괴조건식에 적용시켜 Fig. 10과 같은 인장응력-변형률 곡선으로 변환하여 사용하였다.

$$\sigma_Y = \sqrt{3} \cdot \tau_Y \quad (1)$$

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

σ_Y : Tensile yielding stress

τ_Y : Shear yielding stress

ϵ_Y : Tensile yielding strain

ν : Poisson's ratio

G : Shear modulus

4.2 파손 강도 예측법

본 논문에서는 접착 체결부의 파손하중을 최대 변형률 이론과 파손영역 이론을 이용하여 예측하고 실험값과 비교하였다.

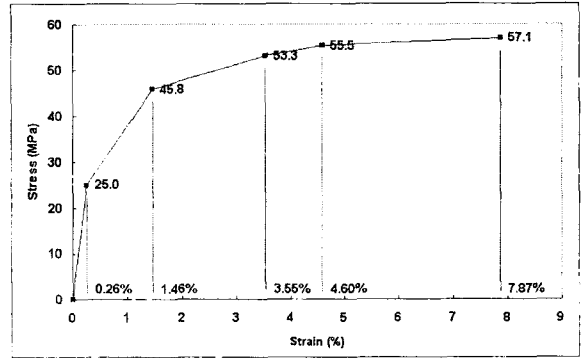


Fig. 10 Multi-linear curve of adhesive materials

첫 번째로 최대 변형률 이론은 계산된 변형률이 접착제의 최대 변형률에 도달하면 파손이 일어난다는 이론이다. Fig. 11은 접착 체결부 한쪽 끝단의 변형률이 접착제의 최대 변형률(7.87%)에 도달하였을 때의 변형률 분포를 나타낸 그림으로, 체결부의 한쪽 끝단에서 변형률이 집중되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12는 최대 변형률 이론을 적용하여 접착 체결부의 파손 강도를 예측한 결과로, 최대 53.0% 오차 범위 내에서 파손 강도를 예측할 수 있었다.

두 번째로 파손영역 이론을 적용하여 접착 체결부의 파손 강도를 예측하였다. 파손영역 이론은 접착 체결부내에서 파손 기준에 도달하는 접착 단면의 파손 영역(Damage Zone)이 특정 크기 이상이면 파손이 발생한다는 이론이다. 파손영역은 응력 또는 변형률 기준에 의하여 정의될 수 있으며, 접착제의 비선형성이 큰 경우, 변형률 기준이 효과적인 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 접착제의 상당 변형률(Equivalent Strain)이 최대 변형률(7.87%) 이상인 영역을 파손영역으로 선정하였다. 파손영역 이론으로 접착 체결부의 파손 하중을 예측하기 위해서는 파손영역의 기준값을 계산하여야 한다. 파손영역의 기준값을 구하기 위한 기준모델은 임의로 선정할 수 있다. 임의로 선정한 기준모델에 따라 각 모델의 파손강도 예측값은 변화될 수 있으나, 모델 전체의 최대 예측오차 범위는 거의 변화되지 않는다. 본 논문에서는 A01 시편을 기준모델로 선정하고, 실험 파손하중을 유한요소모델에 적용하였다.

Fig. 13은 실험 파손하중을 2차원 유한요소모델에 적용하여 접착제의 상당 변형률 분포를 나타낸 그림으로, 변형률은 거의 한쪽 면에서만 큰 값을 나타내었다. 파손 영역의 크기는 1.41 mm²로 계산되었으며, 파손영역의 크기가 이 값에 도달하면 파손이 발생한다고 가정하였다.

Fig. 14는 2차원 유한요소해석과 파손영역 이론을 적용하여 접착 체결부의 파손강도를 예측한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 파손영역 이론을 적용한 접착 체결부의 강도예측 오차는 최대 62.1%로 다소 큰 범위의 오차율을 가짐을 확인할 수 있었다.

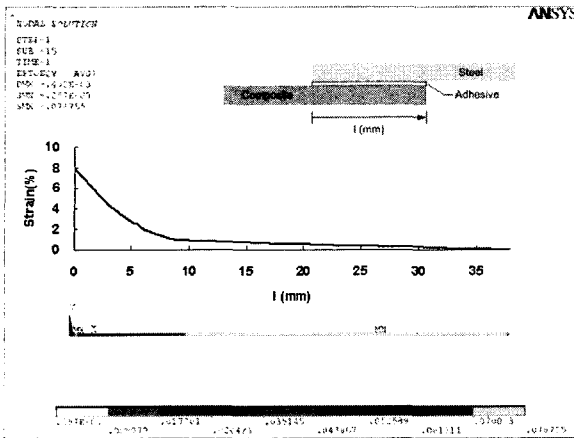


Fig. 11 Equivalent strain distribution of the adhesive joint (2-D analysis).

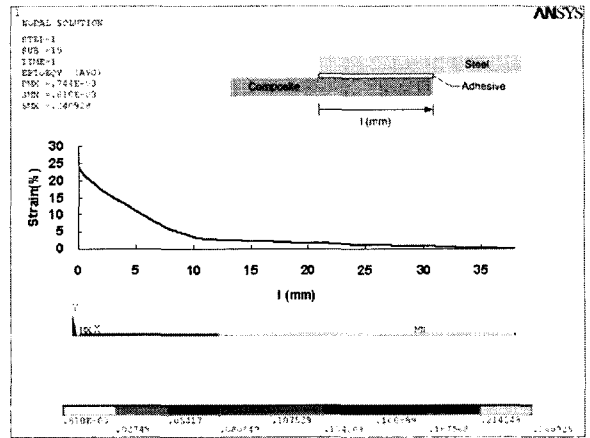


Fig. 13 Equivalent strain distribution of the adhesive joint under the experimental failure load (2-D analysis).

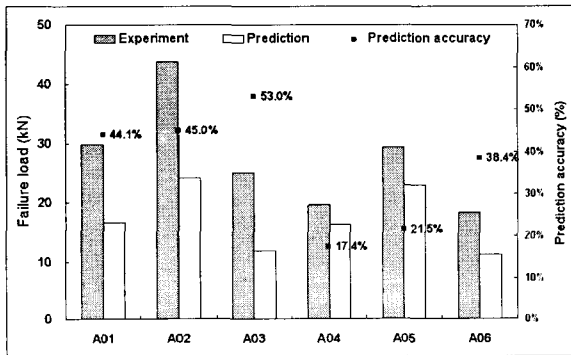


Fig. 12 Failure load predictions of the adhesive joints by the maximum strain theory.

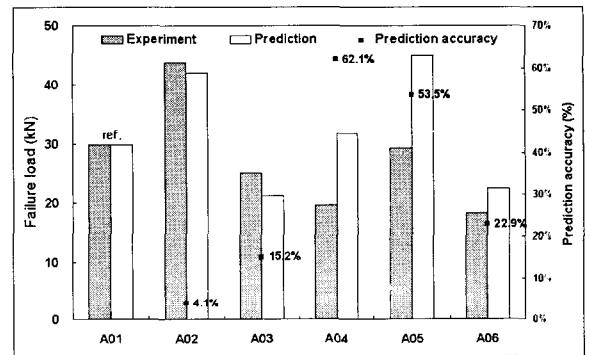


Fig. 14 Failure load predictions of the adhesive joints by the damage zone theory (2-D analysis).

Fig. 15는 실험 파손하중을 3차원 유한요소모델에 적용하여 접착제의 상당변형률 분포를 나타낸 그림이다. 파손영역은 2차원 유한요소해석과 같이 상당변형률이 최대 변형률(7.87%) 이상인 영역으로 선정하였다. 접착 길이-폭 단면의 변형률 변화는 접착 길이-두께 단면의 변형률 변화보다 크기 때문에, 접착 길이-폭 단면의 파손영역을 계산하였다. 유한요소해석으로부터 계산되어진 파손영역은 217.34 mm²이었으며, 파손영역의 크기가 이 값에 도달하면 파손이 일어난다고 가정하였다.

Fig. 16은 3차원 유한요소해석과 파손영역 이론을 적용하여 접착 체결부의 파손강도를 예측한 결과로서, 54.9% 오차범위 내에서 파손하중을 예측할 수 있었다.

이상에서 살펴본 파손영역 이론은 접착 체결부의 크기가 서로 다를 경우에도 동일한 파손영역 기준값을 사용해야 하므로 예측의 정확도가 저하될 수 있다. 본 논문에서는 파손 판정의 기준값을 전체 접착면적에 대한 파손영역의 비(D/D)로 표시하고, 이를 이용하여 접착 체결부의 파손강도를 예측하였다.

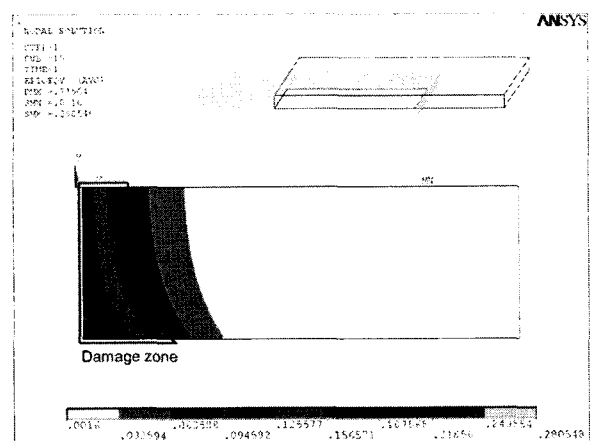


Fig. 15 Equivalent strain distribution of the adhesive joint under the experimental failure load (3-D analysis).

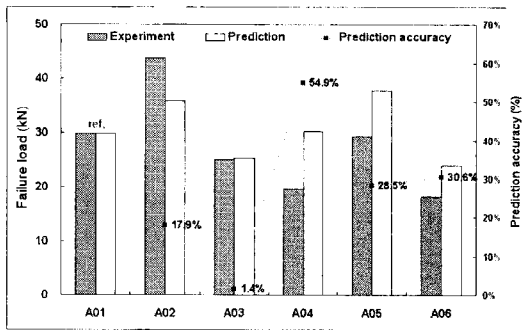


Fig. 16 Failure load predictions of the adhesive joints by the damage zone theory (3-D analysis).

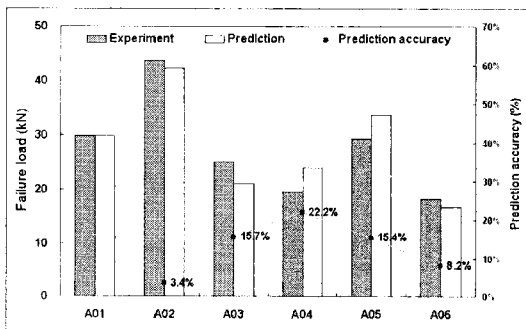


Fig. 17 Failure load predictions of the adhesive joint by the damage zone ratio method (3-D analysis).

A01 시편을 기준으로 파손영역비를 계산하면 0.2474가 되며, 파손영역비가 이 값에 도달하면 파손이 일어난다고 가정하였다.

$$DR = \frac{\sum A_i}{l \cdot w} \quad (3)$$

DR : Damage zone ratio

A_i : Damage zone of the adhesive length and width plane

l : Adhesive length

w : Adhesive width

Fig. 17은 수정된 파손영역 이론을 적용하여 접착 체결부의 파손강도를 예측한 결과를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 파손영역비를 기준으로 예측한 접착 체결부의 파손강도 값은 최대 22.2% 오차범위 내에서 실험값과 일치되고 있음을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 복합재료와 강의 이종재료로 구성된 접착

체결부의 파손강도를 최대 변형을 이론과 파손영역 이론으로 예측하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

(1) 파손영역을 전체 접착면적으로 나눈 파손영역비를 기준으로 접착 체결부의 파손강도를 예측하는 수정 파손영역 이론을 제안하였다.

(2) 제안된 파손영역비를 기준으로 하여 접착 체결부의 파손강도를 예측한 결과, 최대 22.2% 범위 내에서 파손강도를 예측할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 지정 수중운동체 특화연구센터와 경상대학교 2단계 BK21사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- 1) Reinhart J.J. (Eds), "Composite, ASM International", Vol. 1, 1987, pp. 479-495.
- 2) Mallick P.K., "Fiber-Reinforced Composite", 1988, pp. 418.
- 3) Choi J.H. and Lee D.G., "An Experimental Study of the Static Torque Capacity of the Adhesively-bonded Tubular Single Lap Joint", *J. of Adhesion*, Vol. 55, 1996, pp. 245-260.
- 4) James F.P. Owens, Pearl Lee-Sullivan, "Stiffness Behaviour Due to Fracture in Adhesively Bonded Composite-to-Aluminum Joints I. Theoretical Model", *Int. J. of Adhesion and Adhesives*, Vol. 20, 2000, pp. 39-45.
- 5) James F.P. Owens, Pearl Lee-Sullivan, "Stiffness Behaviour Due to Fracture in Adhesively Bonded Composite-to-Aluminum Joints II. Experimental", *Int. J. of Adhesion and Adhesives*, Vol. 20, 2000, pp. 47-58.
- 6) Choi J.H., Lee D.G., "The Torque Transmission Capabilities of the Adhesively-Bonded Tubular Single Lap Joint and the Double lap Joint", *J. Adhesion*, Vol. 44, 1994, pp. 197-212.
- 7) Hart-Smith L.J., "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.
- 8) Groth S.J., "A Method to Predict Fracture in an Adhesively Bonded Joint", *Int. J. of Adhesion and Adhesives*, Vol. 5, 1985, pp. 19-22.

- 9) Sheppard A., Kelly D., Tong L., "A Damage Zone Model for the Failure Analysis of Adhesively Bonded Joints", *Int. J. of Adhesion and Adhesives*, Vol. 18, 1998, pp. 385-400.
- 10) Kim K.S., Kim W.T., Lee D.G. and Jun E.J., "Optimal Tubular Adhesive-Bonded Lap Joint of the Carbon Fiber Epoxy Composite-Shaft", *Composite Structures*, Vol. 21, 1992, pp. 163-176.