

## 경사진 CFRP로 접합된 시험편에서의 Mode 1 형 파괴역학적 거동에 관한 연구

이정호\* · 조재웅\*\*† · 전성식\*\*\*

### An Investigation on the Behavior of Fracture Mechanics as the Type of Mode I at Specimen Bonded with Tapered Carbon Fiber Reinforced Plastic

Jung-Ho Lee\*, Jae-Ung Cho\*\*†, Seong Sik Cheon\*\*\*

**ABSTRACT:** This paper aims at estimating the fracture behavior at the bonded part of composite material. CFRP is manufactured as the type of TDCB. The static analysis of Mode 1 due to the configuration factor of  $m$  is carried out. Four kinds of specimens have the configuration factor( $m$ ) of 2, 2.5, 3 and 3.5. As the study result, the displacements at specimens are shown to be similar each other in these four cases. At  $m$  of 3.5, the reaction force becomes highest as 412 N and is shown to be improved as much as 14% by comparing  $m$  of 2. The data on deflection of the bonded interface and reaction force are thought to be contributed to the structural design of CFRP and the safe design.

**초 록:** 본 논문에서는 복합재료 접합부의 파손거동 예측을 하는 데에 있다. CFRP를 TDCB 형태로 가공하고, 형상계수에 따른 Mode 1 정적해석을 수행하였다. 시험편은 2, 2.5, 3, 3.5의 형상계수( $m$ )들을 가진다. 연구결과로서 시험편의 접합면이 탈락이 일어나기까지의 변위는 거의 비슷하게 나왔으나 이때의 반력은 형상계수  $m = 3.5$ 에서 가장 높게 나타났으며 이 반력은 412 N으로  $m = 2$ 와 비교하면 약 14% 개선된 반력을 보여주고 있다. 접착계면의 탈락과 반력에 관한 데이터는 CFRP구조설계와 그 안전설계에 이바지 할 수 있을 것으로 사료된다.

**Key Words:** 탄소섬유보강플라스틱(Carbon fiber reinforced plastic), 경사진 이중 외팔보(TDCB), 파괴 거동(Fracture behaviour), 접착계면(Adhesive interface), 등가응력(Equivalent stress)

## 1. 서 론

산업의 발전함에 따라 금속제품의 물성개선이 뒤따르며 산업 환경 전반에 큰 영향을 끼쳤다. 그러나 현대에 이르러서는 금속기리의 물성을 이용한 합금에서 벗어나 각종 복합재료를 적용하게 되면서 금속의 자리를 대체하기 시작했다. 금속을 대체하기 위한 복합재료가 요구받는 사항으

로는 금속에 버금가는 강도와, 경량성이 요구 되었으나, 오늘날 이를 모두 만족하는 CFRP의 적용으로 금속의 사용처를 대신하고 있다[1-6]. 그러나 CARP 복합재료의 단점으로, 기존의 기계식 접합방식을 사용하게 되면 볼트와 너트, 리벳의 접합응력으로 CFRP의 파손과 크랙이 발생할 수 있는 단점을 지니고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해, 기존의 기계식 접합방식에서 특수 접착제를 이용한 화학적

Received 19 January 2016, received in revised form 29 April 2016, accepted 29 April 2016

\*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju National University

\*\*†Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University, Corresponding author (E-mail: jucho@kongju.ac.kr)

\*\*\*Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

접합방식이 적용되고 있다. 그러나 접합부의 접합면에 있어, 다양한 하중에 노출되기 때문에 정확한 예측을 할 수 없음이 문제점으로 지적되어 왔다[7-12]. CFRP복합재료는 오래전부터 연구되어 데이터화 되어있는 금속재료들과는 달리 기계적 물성치의 향상에 대한 연구만 진행되어왔을 뿐, 접합면의 파손에 관한 데이터가 부족한 실정이다. 또한 파괴에 있어 1회에 걸친 하중보다, 긴 시간 여러 회에 걸친 하중에 의한 파괴가 더 빈번히 일어나는데, CFRP는 이러한 파손 메커니즘이 금속에 비해 복잡하며 다양하여 연구에 어려움이 많았다. 이와 같이 앞으로 더욱 다채로운 활용이 기대되는 CFRP의 파괴 역학적인 거동을 파악함으로써, 기존의 문제를 해결하고 효율적인 이용에 기여해야 한다. 본 연구는 접합된 CFRP 시편 중에서 형상계수  $m$ 을 지닌 경사진 이중 외팔보(TDCB)시험편에 관한 것으로 시험편의 복합재료 층간 분리를 비롯한 접착면의 파괴특성을 이해하고 파괴인성 값을 측정하기 위해 사용되었다. 이러한 TDCB 시험편을 영국공업규격과 ISO 국제규격에 의해 CATIA를 통해 모델링 하여 ANSYS를 이용하여 해석을 수행 및 결과를 검토하였다.

2. 해석모델 및 구속 조건

2.1 해석모델

본 연구에서는 다음의 Fig. 1의 형상대로 모델링 한다. Fig. 1에 도시된 해석모델과 같이, 해석모델의 가로 전체 길이는 200 mm, 시편의 목의 길이는 50 mm, 두께는 25 mm로 동일하며 형상계수  $m$ 에 따른 각 시편의 세부도면은 다음의 Fig. 2에 나타낸 바와 같다.

Fig. 1의 도면에서 형상계수  $m$ 은  $m = 3a^2/h^3 + 1/h$ 로 나타낼 수 있으며 이같은 형상계수는 재료의 부피에 따른 접착 조인트의 파괴 인성치를 알아보기 위한 요인이다. Fig. 2에서는 이같은 형상계수  $m$ 의 값을 실험과 해석을 위해 적절한 변형을 유지하는 조건을 기준으로 수정되었다.

2.2 해석조건

Fig. 3은 해석조건을 나타낸 것으로, 상부 구멍에 고정을 위한 Fixed support와 하부에는 Displacement는 30 mm/min

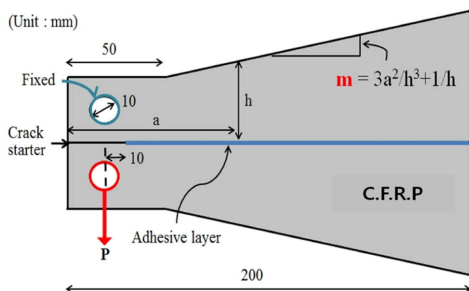


Fig. 1. Analysis model

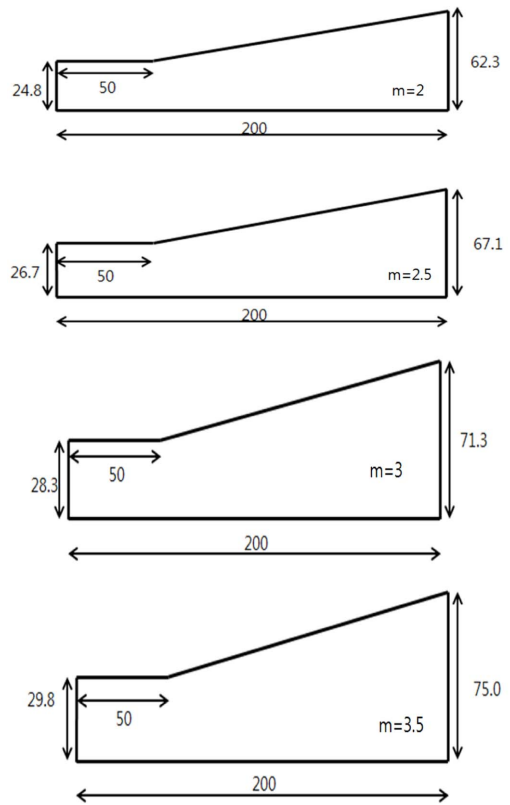


Fig. 2. Dimensions of specimens

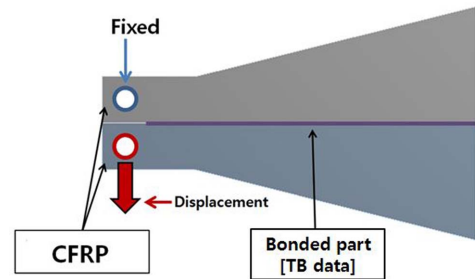


Fig. 3. Analysis condition

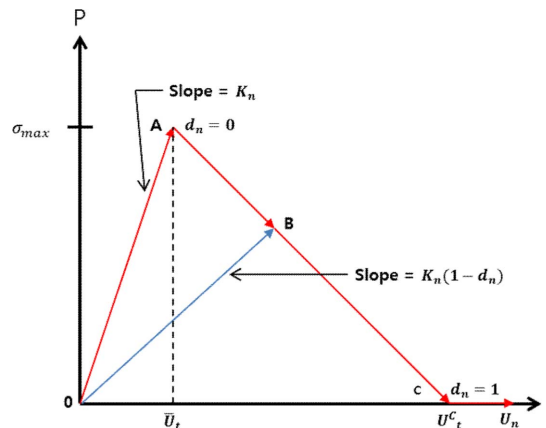


Fig. 4. Contact stress of material with bilinear cohesive zone

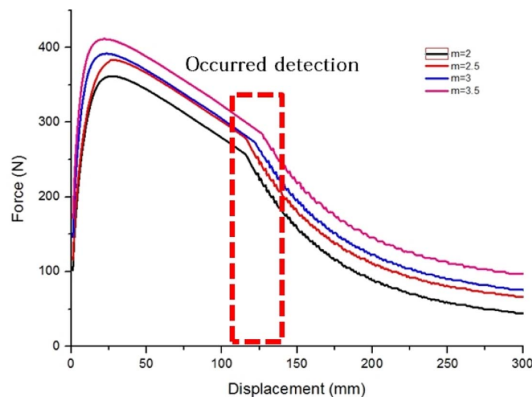
**Table 1.** Property of material

Material	Unidirectional carbon
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1.57
Young's Modulus (GPa)	1.32E+5
Young's Modulus (GPa)	8980
Young's Modulus (GPa)	8980
Poisson's Ratio	0.3
Poisson's Ratio	0.74
Poisson's Ratio	0.3
Shear Modulus (GPa)	50769
Shear Modulus (GPa)	2580.5
Shear Modulus (GPa)	50769

의 속도로 이동한다. 또한 Fig. 3의 접착계면의 적용된 해석 조건은 Fig. 4의 CZM(Cohesive Zone Method)를 통해 설정되었다. 별도의 접합계면의 접착력을 설정하여 접착제의 접착력을 초과할 때 서로 떨어지도록 하였다. 본 해석에서는 3 M의 발포 우레탄 접착제를 사용하였으며 이때 접착 강도는 최대 5 MPa로 설정되었다. Table 1은 해석을 위한 물성치로, CFRP의 심재인 Unidirectional carbon을 나타내었다.

### 3. 해석결과

다음의 Fig. 5는 형상계수  $m$ 에 따른 변위당 반력에 관한 것으로, 힘이 큰 쪽으로 감소하는 부위에서 접착계면의 분리가 일어남을 유추할 수 있다. 이와 같이, 변위에 따른 반력이 크면 클수록, 접합된 CFRP가 변형될 시의 필요한 힘이 커진다는 의미가 되므로 변형에 더 잘 버틸 수 있다는 결론을 낼 수 있다. 변위당 힘의 값은 형상계수  $m$  값이 커질수록, 높아지는 경향을 보이고 있다.  $m = 3.5$ 일 때 가장 높은 값을 보이고 있는데, 이때의 값은 420 N으로  $m=2$ 일 때의 값인 360 N보다 약 14% 개선된 값을 보이고 있다. 형상계수  $m$ 이 증가 할수록, 변위에 따른 반력의 값이 높아지는



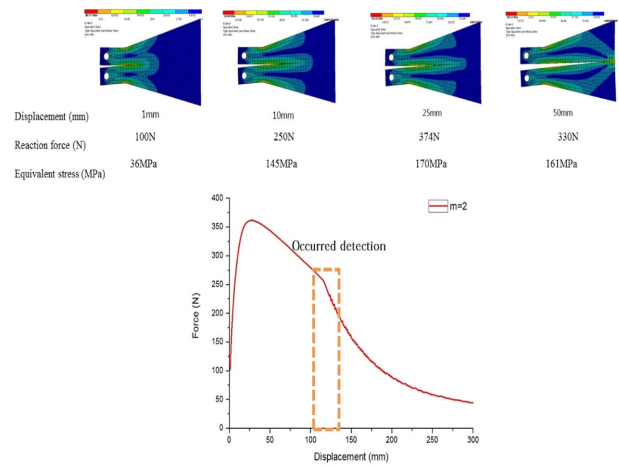
**Fig. 5.** Reaction force due to displacement according to shape factor( $m$ )

결과와 함께, 같은 두께임에도 접착계면의 완전분리가 일어나기까지의 변화가 서로 다를 수 관찰할 수 있었다. 이 같은 결과에서 형상계수  $m$ 이 증가할수록, 접착계면에서 완전 분리가 일어나기까지의 변위가 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 변위 125 mm에서 접착계면의 탈락이 발생하면서 반력이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다.

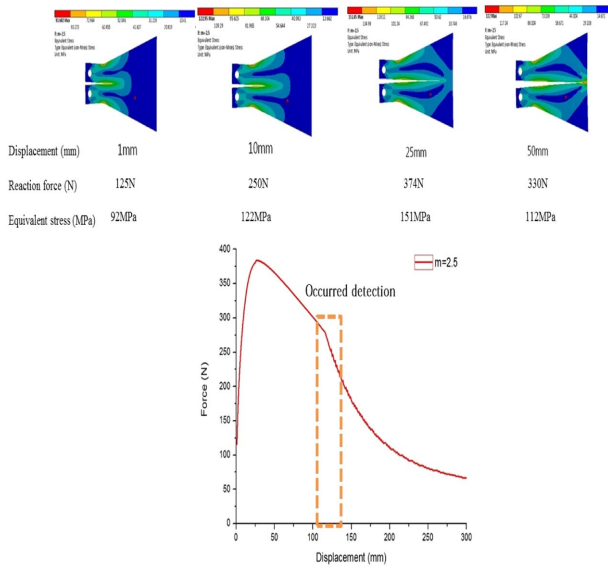
#### 3.1 $m = 2$ 의 결과

Fig. 6은 형상계수  $m = 2$  변위에 따른 반력값과 응력을 나타낸 것으로, 응력값은 변위에 따라 변화되는 형상을 나타내었다. 사전크랙에 의해 초기 1 mm의 크랙에서 80 MPa의 등가응력이 발생하며 접착계면의 분리가 일어나기 시작하는 10 mm에서는 149 MPa, 계면에서 분리가 일어나며 변위당 반력이 제일 높은 25 mm에서 163 MPa가 발생한다. 이후 50 mm까지 진행되며 다시 감소하는 양상을 보이고 있다. 또한 주목해야 할 사항으로, 시편의 목 부위에서 시작된 응력분포는 점차 시편 전반으로 넓어지는 양상을 보이게 되는데, 이는 접착계면의 분리가 이루어지는 50 mm에 이르러서도 잔류응력으로 남아있음을 볼 수 있다. 이러한 잔류응력은 시편에 지속되어 파손을 일으킬 수 있으며, 응력분포에 있어 접착계면과 시편의 목 부위에서 발생한 응력은 점차 분포되어 자칫 접착계면의 파괴를 일으킬 수 있다고 사료된다.

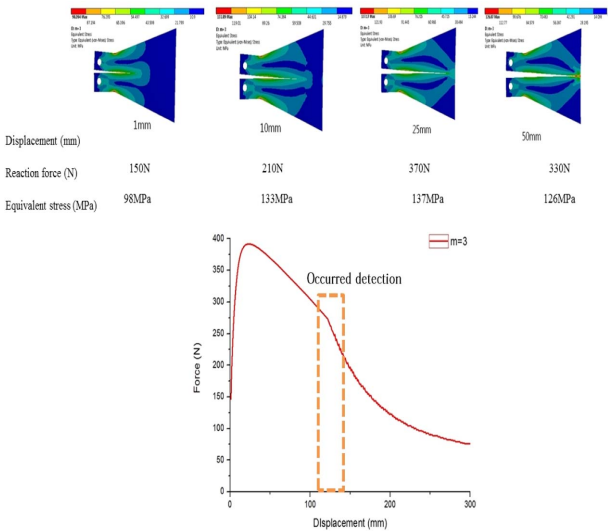
Fig. 7은 형상계수  $m = 2.5$ 의 변위의 따른 반력과 등가응력으로 Fig. 5의 전체 형상계수  $m$ 에 따른 반력그래프에서  $m = 2.5$ 의 경우를 제외하면 형상계수가 증가할수록 접합부의 접합계면에서의 탈락이 늦어지는 경향을 보이고 있지만  $m = 2.5$ 의 경우 접합계면의 떨어지면서 형성되는 반력의 생성시기가  $m = 3$ 과  $m = 3.5$ 의 경우보다 뒤에서 발생됨을 볼 수 있었다. 이를 통해 형상계수  $m = 2.5$ 에서 접합계면의 이탈에 작용하는 저항력이 다른 형상계수에 비해 높은



**Fig. 6.** Reaction force due to displacement according to shape factor ( $m = 2$ ) and stress contours of displacements (1, 10, 25, 50 mm)



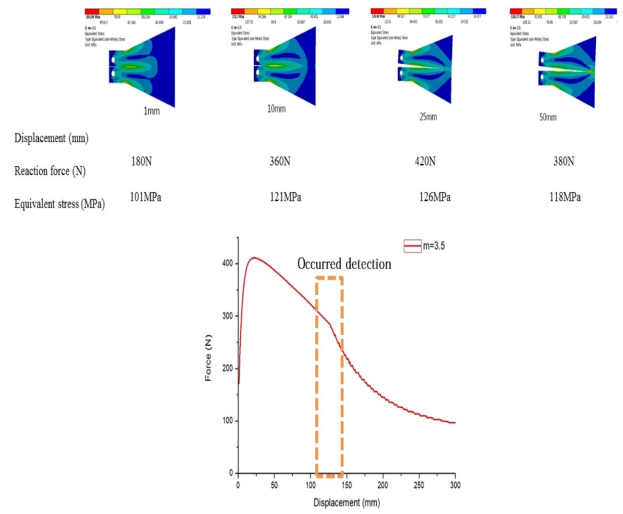
**Fig. 7.** Reaction force due to displacement according to shape factor ( $m = 2.5$ ) and stress contours of displacements (1, 10, 25, 50 mm)



**Fig. 8.** Reaction force due to displacement according to shape factor ( $m = 3$ ) and stress contours of displacements (1, 10, 25, 50 mm)

것을 확인할 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 형상계수  $m = 3$ 과  $m = 3.5$ 의 해석결과이다. 형상계수  $m = 2$ 부터  $m = 3.5$ 까지의 결과를 토대로 보았을 때, Fig. 5의 결과에서 형상계수가 증가함에 따라 변위에 따른 반력은 증가하고 있음을 볼 수 있는데, 이를 통해 구조물에 가해지는 힘을 형상계수가 증가함에 따라 저항력이 높아져 구조적인 안정성을 보장할 수 있음을 보이고 있다. 또한 형상계수는 시편의 등가응력에도 영향을 미치고 있음을 볼 수 있다. 시편의 최대 반력을 보이는 25 mm의 등가응력은 형상계수가 증가함에 따라 163.45 MPa,



**Fig. 9.** Reaction force due to displacement according to shape factor ( $m = 3.5$ ) and stress contours of displacements (1, 10, 25, 50 mm)

151.85 MPa, 131.17 MPa, 126.68 MPa로 감소하는 경향을 보이고 있음을 볼 수 있었다. 이를 통해 형상계수가 증가할수록 접합부의 접합계면의 분리가 어려워지며, 이때의 등가응력은 줄어들어 형상계수가 높은 형태로 CFRP 구조물의 접합 구조물에 이용된다면 구조적 안정성이 높아질 수 있다고 사료된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 접합된 경사진 CFRP Mode 1 시험편의 역학적 거동 특성에 관하여 시뮬레이션 해석과 실험결과를 통해 결과를 도출하였다.

1. 접합된 경사진 CFRP에 적용된 형상계수  $m$ 이 증가할수록 변위에 따른 반력이 증가함을 볼 수 있었다. 이는 접합된 두 시편의 형상계수가 증가할수록 접합부의 접합계면의 분리가 어려워짐을 의미하므로, 접합구조물의 구조 안정성이 증가함을 알 수 있었다.

2. 접합된 경사진 CFRP에 적용된 형상계수  $m$ 이 증가할수록 변위에 따른 등가응력은 점차 감소함을 알 수 있었다. 이는 접합된 두 구조물의 접합계면이 분리되기까지 시편에 잔류하는 응력의 감소로 파손의 위험성을 낮춰 접합구조물의 구조 안정성이 증가함을 알 수 있었다.

3. 본 논문의 해석결과와 실험데이터를 비교한 형상계수에 따른 접합계면의 탈락에 대한 데이터를 토대로, CFRP가 적용되는 구조물의 안전설계에 이바지 할 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로

한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0006548).

본 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2015R1D1A1A01057607).

## REFERENCES

1. Boang, S.O., Kim, K.S., Kim, S.H., Song, S.G., and Cho, J.U., "Study on Compression Test of Aluminum Foam and Honeycomb Sandwich Composites", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 12, No. 9, 2011, pp. 3802-3807.
2. Blackman, B.R.K., Hadavinia, H., Kinloch, A.J., Paraschi, M., and Williams, J.G., "The Calculation of Adhesive Fracture Energies in Mode I: Revisiting the Tapered Double Cantilever Beam (TDCB) Test", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, No. 2, 2003, pp. 233-248.
3. De Giorgi, M., Carofalo, A., Dattoma, V., Nobile, R., and Palano, F., "Aluminum Foams Structural Modelling", *Computers & Structures*, Vol. 88, Issues 1-2, 2010, pp. 25-35.
4. Shin, K.B. and Koo, D.H., "A Study on the Evaluation of the Failure for Carbody Structures Made of Laminated Fiber-reinforced Composite Materials Using Total Laminate Approach", *Korean Society for Composite Materials*, Vol. 17, No. 1, 2004, pp. 18-28.
5. Blackman, B.R.K., Dear, J.P., Kinloch, A.J., MacGillivray, H., Wang, Y., Williams, J.G., and Yayla, P., "The Failure of Fibre Composites and Adhesively Bonded Fibre Composites under High Rates of Test Part III Mixed-mode I/II and Mode II Loadings", *Journal of Materials Science*, Vol. 31, No. 17, 1996, pp. 4467-4477.
6. Hashemi, S., Kinloch, A.J., and Williams, J.G., "The Analysis of Interlaminar Fracture in Uniaxial Fibre-polymer Composites", *Proc. R. Soc. Lond.* Vol. 427, No. 1872, 1990, pp. 173-199.
7. Paul, A. and Ramamurty, U., "Strain Rate Sensitivity of a Closed-cell Aluminum Foam", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 281, Issues 1-2, 2000, pp. 1-7, April.
8. Mohamed, M., Anandan, S., Huo, Z., Birman, V., Volz, J., and Chandrashekhara, K., "Manufacturing and Characterization of Polyurethane Based Sandwich Composite Structures", *Composite Structures*, Vol. 123, 2015, pp. 169-179.
9. Marzi, S., Biel, A., and Stigh, U., "On Experimental Methods to Investigate the Effect of Layer Thickness on the Fracture behavior of Adhesively Bonded Joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 31, No. 8, 2011, pp. 840-850.
10. Jung, J.W., Kim, S.H., Park, J.K., and Lee, W.I., "Research of the Development of the Properties of PLA Composites for Automatic Interior Parts", *Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 3, 2011, pp. 1-5.
11. Kim, S.S. and Cho, J.U., "Study on Structural Analysis of TDCB Model Bonded with Aluminum Foam Composite", *Journal of Korea Society of Mechanical Technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 123-128, Feb. 2013.
12. Lee, C.J., Lee, S.K., Ko, D.C., and Kim, B.M., "Evaluation of Adhesive Properties Using Cohesive Zone Model : Mode I", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. A 33, No. 5, pp. 474-481, 2009.