

## 이종재료의 알루미늄 이중 외팔보 복합재의 충격 거동

조재웅<sup>1\*</sup>

### Impact Behavior at Composite Material of Aluminium Double Cantilever Beam with Two Kinds of Materials

Jae-Ung Cho<sup>1\*</sup>

**요 약** 본 연구는 이종재료의 이중외팔보 시험편들을 충격하중으로 실험한 결과들에 대하여 유한요소법으로 동적 해석을 하였다. 충격 속도로서는 6.4 및 18.47 m/s를 적용하였고 그 실험 결과와 시뮬레이션 데이터로 상호 비교하였다. 크랙 에너지 해방율과 블록의 힘 및 변형을 컴퓨터로 수치 해석할 수 있었다. 본 논문에서 해석된 시험편의 수치 해석 데이터로 실험 데이터에 근접시키게 되는 검증을 함으로서 충격 실험에 대한 수치적 시뮬레이션을 하기에 타당함을 알 수 있었다.

**Abstract** This study was analyzed dynamically by finite element method about the results of experiments which the double cantilever beam specimens with two kinds of materials were applied by impact load. And they were compared with each other as the simulation data applied onto impact velocities of 6.4 and 18.47 m/s. The crack energy release rate, force and displacement of block were calculated numerically by computer. As the numerical simulation data of specimen analyzed in this study approached the experimental data, the inspection of this specimen model suggested in this paper could be reasonable for the numerical simulation.

**Key Words** : DCB(double cantilever beam) specimens, crack energy release rate, force and displacement of block

#### 1. 서론

일반적으로 기계 강도면에서 충분한 안전계수를 가지고 설계된 기계 또는 공학적 구조물에 있어서 급작스런 파손이 일어나는 경우가 많으며 특히 고장력강 등과 같은 경우 항복응력보다 훨씬 낮은 응력에서도 파괴가 잘 일어나는 것은 최근 여러 가지 대형 사고의 경우를 보아도 잘 알 수 있다. 이것은 기계 또는 공학적인 구조물의 파손이 모든 재료에 존재하고 있는 이물질 또는 결합에서부터 발생하는 크랙진전에 의한 것이다[1]. 영국 등 유럽의 경우, 복합재의 실적용 노력이 타지역에 비하여 매우 높으며 일례로 Airbus의 최신 기종에는 많은 부분이 복합 신소재로 설계되었으며 영국 등에서 이 구조의 안전성 연구가 탁월하다[2]. 우리나라에서도 1986년 10월 복합재료를 사용하여 제작한 경항공기를 시운전한 바 있으며 (KAL 항공 연구소), 선박의 주요부품이나 고압용기

의 고급소재로서 점점 더 주목을 받고 있으므로 이 부분에 대한 보다 응용력있는 연구가 요청되고 있다. 첨단소재로서 알려져 있는 복합재료들의 파괴특성을 규명하고 이들의 연구결과를 첨단소재의 설계 데이터로 제공되어야 실제적으로 공학적인 응용도를 제고할 수 있다 하겠다. 제조자들은 공학적인 성분과 구조물들의 접합에 있어서 종래의 접합 기술에 비하여 접착제의 잇점에 대하여 고려하고 있으나 접착제인 연결부의 인성은 충격 하중의 조건하에서는 상당히 감소될 수 있다[3]. 이것은 그러한 재료들이 소성과 점탄성 변형을 나타내기 때문인데 파괴 거동은 하중 속도와 온도에 의존한다[4]. 특히 자동차 산업에 있어서의 적용을 들 수 있는데, 예를 들면 접착제들이 주요한 부분들에서 크게 증가되어 사용되고 있어, 접착제로 결합된 연결부들이 충격 하중을 받을 때 생기는 내구성의 감소를 계산하는 것이 필요하다. 특히 파괴는 접착제로 결합된 연결부들을 따라 일어남으로서 크랙은 급성장한다. 이러한 접착 파괴 에너지가 크랙 선단에서의 임계 크랙 에너지 해방율(GIc) 값을 넘게 되면 크랙은 전파된다. 본 연구에서는 접착된 연결부들에 대하여

<sup>1</sup>공주대학교 기계·자동차공학부

\*교신저자: 조재웅(jucho@kongju.ac.kr)

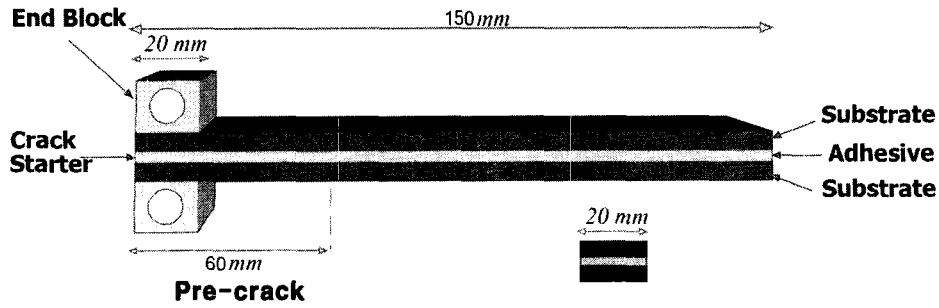


그림 1. DCB 시험편의 형상 및 치수

여러 가지 충격 속도로서 실험을 하여 그 파괴 거동을 조사 연구하였다[5,6]. 시뮬레이션 모델은 접착된 파괴 에너지의 실험 정보를 사용하였고 시뮬레이션 모델의 형상은 실험 모델의 형상과 같게 하였다. 이러한 파괴 거동은 3차원의 유한요소법으로서 해석되었다. 이 모델은 ABAQUS 6.5 패키지 프로그램[7]에 의하여 수행되었다.

180℃ 및 30분으로서 가공하였고 유리 전이온도는 91℃이다. 표 2와 같은 물성치를 가지고 있다.

표 2. 접착제의 물성치

Viscosity	2.5 X 10 <sup>6</sup> cP
Ultimate Tensile Strength	30 MPa
Modulus of Elasticity	2.5 GPa
Shear Strength	20.9 MPa
Peel Strength	7 kN/m

## 2. 본론

### 2.1 실험 모델

그림 1에서 보여 준 바와 같이 DCB 시험편들의 종류로서의 실험 데이터를 인용하였다[8]. 예비 크랙은 20 mm의 두께의 알루미늄 호일의 이중층의 60mm의 길이로 되어 있다.

실험중에는 비틀려져서 벌어진 시험편의 찢어진 가장 자리의 곡선 모양대로 크랙 길이가 진전 되지만 크랙 길이는 X 축상으로 직선적으로 갠 길이를 잡는다. 일종의 호일로 되는 크랙은 0.5 mm/min의 일정 변위의 속도로 하중을 주는 인장형의 모드로서 만들어 진다[9]. 이 시험편은 6376/HTA 로 된 폴리머 단일 방향의 흑연 섬유질의 에폭시 수지로 되어 있다. 약 63%의 섬유질을 포함하고 있으며 이 재료의 물성치는 표 1과 같이 되어 있다.

표 1. 시험편의 물성치

Mass Density	2.8
Poisson's Ratio	0.22
Yield Stress	700 MPa
Young's Modulus	138 GPa

인성을 가진 화학적 에폭시 접착제는 Betamate XD4600( Dow Automotive)으로서 경화 온도 및 시간은

상온에서 시험편의 위쪽 엔드블록 안에 있는 위쪽의 동근 핀과 아래쪽 엔드블록 안에 있는 아래쪽의 동근 핀에 6.4 m/s의 변위 속도로서의 충격을 가하여 시험편을 급작히 벌려서 실험을 행하였고 또한 동일한 조건하에서 18.4 m/s의 변위 속도로서 충격을 가하여 파괴 실험을 행하였다.

DCB 시험편의 Compliance는 굽힘과 전단의 변형들로부터 구해지며 (1) 식과 같다[10].

$$\frac{dC}{da} = \frac{8}{Eb} \left( \frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) \quad (1)$$

여기서 P는 작용하중이고 b는 시험편의 폭이다. C는 하중에 의하여 나누어진 변위로서 적층 빔의 Compliance이고 a는 크랙의 길이이다. dC/da의 값은 실험적으로 측정되고 G<sub>IC</sub> 값이 계산된다. E와 h는 각각 적층의 탄성계수와 높이이다. 방정식 (1)에서의 괄호안이 상수가 되면, dC/da는 상수가 되며 Compliance는 크랙의 증가와 함께 선형적으로 증가한다. 따라서 m이 다음과 같이 상수가 되도록, 빔을 기하학적으로 가공한다면 (2)식과 같이 된

다.

$$m = \frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \quad (2)$$

그리고 접착 파괴 에너지는 (3)식과 같이 된다.

$$G_{ic} = \frac{4P^2}{Eb^2} \left( \frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) = \frac{4P^2}{Eb^2} m \quad (3)$$

### 2.2 시뮬레이션 모델

그림 2에서는 시험편의 유한요소모델을 나타내며 그림 1과 같이 그 크기와 치수가 같다. 요소는 Reduced Linear Brick인 8절점으로 되어 있는 C3D8R이다[7]. 이 시뮬레이션 방법은 explicit법을 사용하였으며 요소와 절점의 개수는 각각 38020과 47393이다.

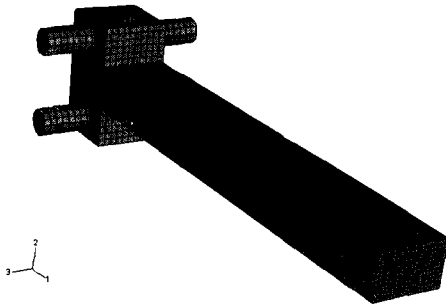
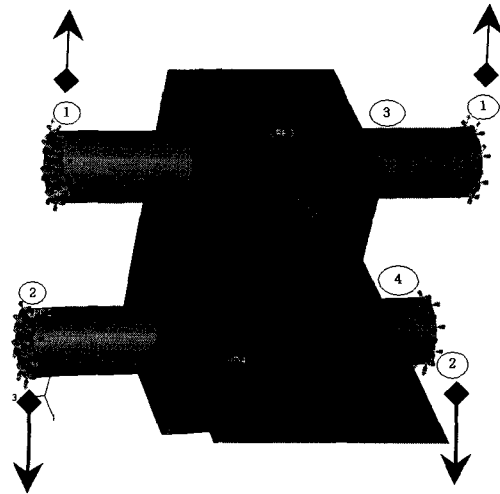


그림 2. 시험편의 유한 요소 모델

시험편의 경계 조건으로는 그림 3에서 보여진 바와 같이 ①과 ②에서처럼 시험편의 위쪽 핀과 아래쪽 핀에 6.4 m/s의 변위 속도로서의 충격을 가하여 시뮬레이션 해석을 행하였고 또한 동일한 조건하에서 18.4 m/s의 변위 속도로서 충격을 가하여 시뮬레이션 해석 결과들을 구하였다. 간섭 조건들로서는 ③과 ④에서 처럼 위쪽 핀과 위쪽 블록사이나 아래 쪽 핀과 아래쪽 블록사이에서는 단순한 접촉으로서 마찰이 없다고 가정하였다.

위와 아래의 엔드블록의 안에 들어 가 있는 핀 자체를 위 아래로 잡아 당겨서 시험편을 급작히 변위를 가하여 찢어지게 하기 때문에 핀 자체는 변위를 가하는 핀이 되고, 그 핀 자체와 접촉하고 있는 시험편의 엔드블록의 표면을 통하여 접촉력이 전달된다.



- ①: Impact onto upper pin upward
- ②: Impact onto lower pin downward
- ③: The cylindrical region as interaction (between upper pin and upper block).
- ④: The cylindrical region as interaction (between lower pin and lower block).

그림 3. 시험편의 경계 조건들

그림 1에서와 같이 예비 크랙으로 접착되지 않은 길이가 60mm인데, 위쪽과 아래쪽의 시험편 사이의 사각형 부분으로서 마찰이 없는 단지 접촉의 조건에 있다고 가정한다. 또한 접착된 길이 90mm로서는 위쪽과 아래쪽의 시험편 사이의 사각형 부분으로서 접착의 조건에 있다. 접착재의 특성은 표 2와 같이 극한 인장응력이 30 MPa 이어서 이 접착된 부분은 위쪽과 아래쪽 시험편사이의 부분(접착된 부분)이 0.001mm의 겹침에 의해 6 MPa의 압력이 되는 접착 특성이 있는 것으로 하였다.

본 연구에서의 시뮬레이션 모델은 역시 실험에서와 같은 알루미늄 재질로 가정한다. 크랙의 에너지 해방율 G는 크랙 선단에서의 절점력과 크랙 Mouth의 면상에서의 다음 절점의 변위를 사용하여 구할 수 있다. 크랙선단에서의 임계 에너지 해방율(Gc)은 (4)식에 의하여 구할 수 있다[11].

$$G_c = (F_x \cdot \delta_x + F_y \cdot \delta_y) / (2\beta) \quad (4)$$

$\beta$ 는 크랙 선단의 폭이고  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $\delta_x$  와  $\delta_y$ 는 각각 크랙 선단에서의 X 및 Y 방향에서의 절점력 및 변위이다. 여기서 이 모델에 작용되는 하중은 증가하고 G가 크랙선단에서의 임계값 Gc에 도달하면, 접착된 면을 따라서 절

점의 구속들이 순차적으로 풀리게 된다. 크랙이 좀 더 진행하게 되면  $G_c$ 는 다시 계산되어진다.

### 2.3 해석 결과 분석

그림 4는 시험편의 위쪽 핀과 아래쪽 핀에 가하는 6.4 m/s의 충격속도로서 핀으로부터 블록으로의 하중에 따른 변위를 실험 및 시뮬레이션 데이터와 비교하여 보여 주고 있다. 변위가 증가함에 따라 하중은 증가한다. 15- 20 mm의 변위에서 하중은 100 N으로서 최소가 된다. 시뮬레이션 곡선은 5mm보다 작거나 17 mm보다 긴 범위에서 실험 데이터 곡선보다 더 커지는 경향이 있다. 이들 범위에서는 실험 데이터보다 컴퓨터 시뮬레이션의 강성을 크게 평가되었다는 것을 의미한다. 그러나 이러한 범위들을 제외하고는 이들 시뮬레이션 데이터는 실험 데이터에 접근한다. 이상과 같이 본 논문에서 제시된 시험편의 수치 해석 데이터로 실험 데이터에 근접시키게 되는 검증을 함으로서 충격 실험에 대한 수치적 시뮬레이션을 하기에 타당함을 알 수 있었다.

그림 5는 시험편의 위쪽 핀과 아래쪽 핀에 가하는 6.4 m/s의 충격 속도에서의 크랙의 길이에 대한 에너지 해방을 실험 및 시뮬레이션 데이터와 비교하여 보여 주고 있다. 80 mm의 크랙 길이까지 크랙이 증가하면서 에너지 해방율은 3000 J/m<sup>2</sup> 까지 증가한다. 이러한 에너지 해방율은 80mm의 크랙 길이 이상에서는 감소한다. 이러한 시뮬레이션 곡선은 실험 데이터에 접근함을 알 수 있다.

그림 6은 시험편의 위쪽 핀과 아래쪽 핀에 가하는 6.4 m/s의 충격 속도에서의 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 파단 직전에서의 시간에 따른 수직응력,  $\sigma_{22}$ 의 등고선들을 보이고 있다. 2.7 X 10<sup>-3</sup>초의 시간이 경과 됐을 때에 88.98 MPa의 수직응력을 나타낸다.

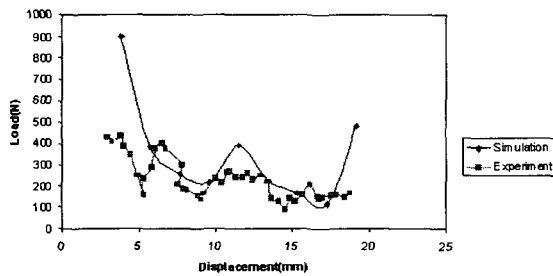


그림 4. 6.4 m/s 충격속도에서의 핀에서 블록으로 작용하는 하중에 따른 변위

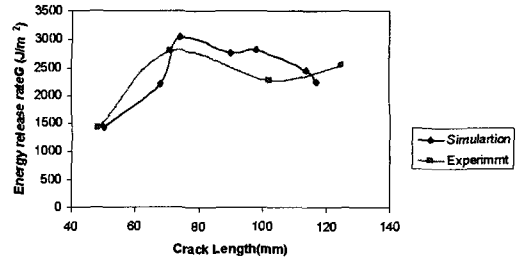


그림 5. 6.4 m/s 충격 속도에서의 크랙의 길이에 대한 에너지 해방율

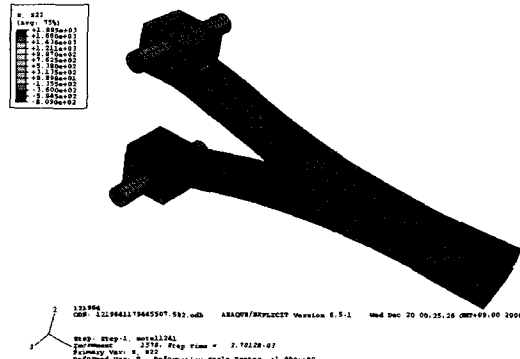


그림 6. 6.4 m/s 충격속도에 의한 2.7 X 10<sup>-3</sup>초에서의 수직응력

그림 7은 시험편의 위쪽 핀과 아래쪽 핀에 18.47 m/s의 충격 속도로 가하는 경우로서 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 구한 핀으로부터 블록으로의 하중에 따른 변위를 보여 주고 있다. 6 mm의 변위에서 최대 하중은 400N이 된다. 이 최대 하중은 6.4 m/s의 경우보다 4배 이상이 될 수 있었다. 하중은 처음에는 변위와 함께 점점 더 커지나 6mm의 변위보다 긴 범위에서는 점점 더 작아지는 경향이 있다.

그림 8은 시험편의 위쪽 핀과 아래쪽 핀에 18.47 m/s의 충격 속도로 가하는 경우로서 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 구한 크랙의 길이에 대한 에너지 해방율을 나타낸다. 60 mm의 크랙 길이까지 크랙이 증가하면서 에너지 해방율은 2500 J/m<sup>2</sup> 까지 증가한다. 이러한 에너지 해방율은 6.4 m/s의 경우에서처럼 2500내지 3000 J/m<sup>2</sup>의 범위에 있다.

그림 9는 시험편의 위쪽 핀과 아래쪽 핀에 18.47 m/s의 충격 속도로 가하는 경우로서 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 파단 직전에서의 시간에 따른 수직응력,  $\sigma_{22}$ 의 등고선들을 보이고 있다. 9.0 X 10<sup>-4</sup>초의 시간이 경과 됐을 때에 대략 65.54 MPa의 수직응력을 나타낸다. 이 경우의

크랙 선단에서의 수직응력의 값은 6.4 m/s나 18.47 m/s인 충격 속도의 경우, 공히 60 내지 90 MPa의 범위 내에 있음을 알 수 있다.

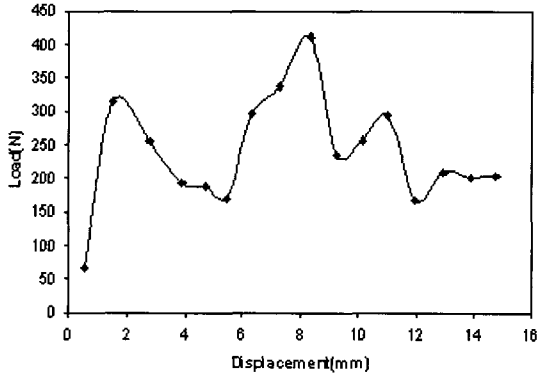


그림 7. 18.47 m/s 충격속도에서의 핀에서 블록으로 작용하는 하중에 따른 변위

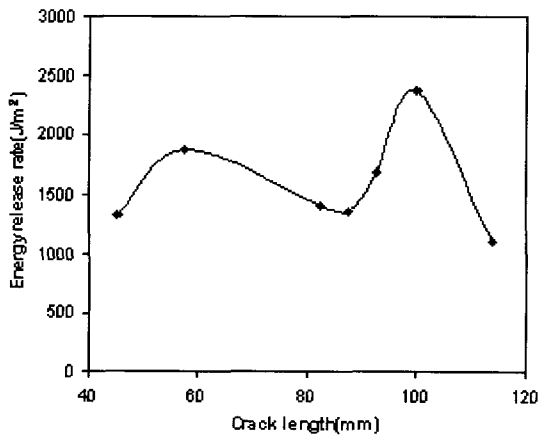


그림 8. 18.47 m/s 충격 속도에서의 크랙의 길이에 대한 에너지 해방율

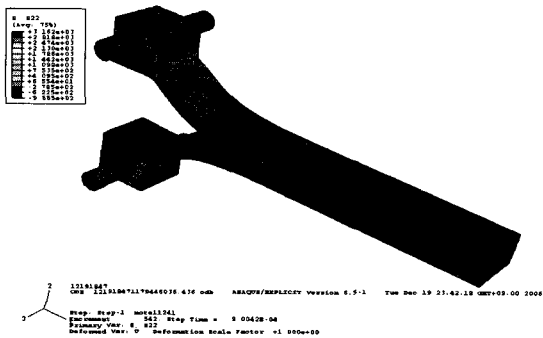


그림 9. 18.47 m/s 충격속도에 의한  $9.0 \times 10^{-4}$  초에서의 수직 응력

### 3. 결 론

동적으로 하중을 받는 이종재료의 알루미늄 이중 외팔보 복합재 시험편들에서의 비선형 소성 거동에 대한 충격 해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 크랙 에너지 해방율은 크랙 전파에 기초를 두고 있다. 이 에너지는 크랙 선단에서의 힘과 변위들을 측정함으로써 계산할 수 있다. 본 연구에서 제시된 시험편의 컴퓨터 모델을 실제 실험과 비교하여 검증한 바, 다른 충격 하중에 대하여도 수치적 시뮬레이션을 하기에는 충분할 것으로 사료된다.
2. 시험편의 위쪽 핀과 아래쪽 핀에 18.47 m/s의 충격 속도를 가하는 경우에 있어서 핀으로부터 블록에 작용되는 최대 하중의 값은 6.4 m/s의 경우보다 4배 이상인 것을 알 수 있다. 18.47 m/s의 경우에서의 충격 속도를 받는 시험편이 6.4 m/s의 경우보다 더 강성이 강함을 알 수 있다.
3. 최대의 에너지 해방율은 2500 내지 3000 J/m<sup>2</sup>의 범위에 있음을 알 수 있다.
4. 파단 직전에서의 크랙 선단에서의 수직응력,  $\sigma_{22}$ 의 값은 시험편의 위쪽 핀과 아래쪽 핀에 6.4 m/s나 18.47 m/s인 충격 속도를 가할 경우, 공히 60 내지 90 MPa의 범위 내에 있음을 알 수 있다.

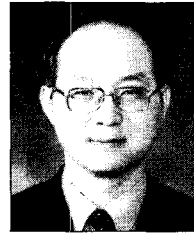
### 참고문헌

- [1] "Three-dimensional Finite Element Analysis of Fatigue Crack Closure Behavior in Surface Flaws", International Journal of Fatigue, Vol. 26, No. 11, 2004.
- [2] "Influence of reinforcement Grade and Matrix Composition on Corrosion Resistance of Cast Aluminium Matrix Composites (A3xx.x/SiCp) in a Humid Environment", Werkstoffe und Korrosion: Materials and corrosion, Vol. 54, No. 5, 2003.
- [3] P. A. Fay and G. D. Suthurst, "Redesign of Adhesively Bonded Box Beam Sections for Improved Impact Performance", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 10 No. 3, pp. 128-138, 1990.
- [4] X. J. Yang, "Constitutive Description of Temperature-dependent Nonproportional Cyclic Viscoplasticity," Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 119. No. 1, pp. 12-19, 1997.

- [5] A. S. Chen, D. P. Almond and B. Harris, "Impact Damage Growth in Composites under Fatigue Conditions Monitored by Acoustography," *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, No. 2/4, pp. 257-261, 2002.
- [6] W. S. Lee, G. L. Xie, and C. F. Lin, "The Strain Rate and Temperature Dependence of the Dynamic Impact Response of Tungsten Composite," *Materials Science & Engineering. Properties, Microstructure and Processing. A, Structural Materials*, Vol. 257, No. 2, pp. 256-267, 1998.
- [7] ABAQUS Manual, Version 6.5, Karlsson and Sorensen Inc., 2005.
- [8] I. Georgiou, A. Ivankovic, A. J. Kinloch and V. Tropsa, "Rate Dependent Fracture Behaviour of Adhesively Bonded Joints," *Fracture of Polymers, Composites and Adhesives*, pp. 317-328, 2003.
- [9] B. R. Blackman, J. P. Dear, A. J. Kinloch, H. Macgillivray, "The failure of fibre composites and adhesively bonded fibre composites under high rates of test," *Journal of Materials Science*, Vol. 30, pp. 5885-5900, 1995.
- [10] ASTM, ASTM D3433, in *Annual book of ASTM standards*, Adhesives section 15, Philadelphia, 1990.
- [11] E. F. Rybicki and M. F. Kanninen, "A Finite Element Calculation of Stress Intensity Factors by a Modified Crack Closure Integral," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 9, Issue 4, pp. 753-976, 1977.

조재응(Jae-Ung Cho)

[정회원]



- 1980년 2월 : 인하대학교 기계공학과(공학사)
- 1982년 2월 : 인하대학교 기계공학과(공학석사)
- 1986년 8월 : 인하대학교 기계공학과(공학박사)
- 1988년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

기계 및 자동차 부품 설계 및 내구성 평가, 피로 또는 충돌시 동적 해석