

## 알루미늄 합금으로 된 경사진 이중외팔보의 충돌에 대한 실험 및 해석

고등\* · 조재웅\*\*† · 전성식\*\*

### Experiment and Analysis on Impact of Tapered Double Cantilever Beam with Aluminum Alloy

Teng Gao\*, J. U. Cho\*\*†, Seong S. Cheon\*\*

**ABSTRACT:** This study is investigated by experiments and analyses at rates of 2.5 m/s, 7.5 m/s and 12.5 m/s on the impact of tapered double cantilever beam specimens with aluminium alloy. It aims to examine the mechanical property of aluminum alloy by evaluating energy release rate and equivalent stress happened at the bonded part of specimen. Because bonding force remains after the separation of specimen, the energy release rate at the bonded part becomes highest. As crack propagates and the high stress happens at the end of the bonded part, the maximum equivalent stress becomes higher at the last stage, regardless of impact rate. These results of experiments and analyses are the data necessary to develop the safe design of composite material to prevent crack propagation due to impact.

**초 록:** 본 연구에서는 알루미늄 합금으로 된 경사진 이중외팔보의 충돌에 대해서 각각의 충격속도 2.5 m/s, 7.5 m/s, 12.5 m/s 별로 실험과 시뮬레이션 해석을 하였다. 접착부분에 발생하는 에너지 해방율과 응력을 평가하여 알루미늄 합금의 기계적 특성을 고찰하였다. 실험상에서는 접착 부분에서 에너지 해방율의 값이 높은 것으로 나타났다. 이는 실험에서 시험편이 분리된 후에도 접착력이 유지되는 특성 때문인 것으로 사료된다. 충격속도와 상관없이 균열이 진전하다가 접착된 부분의 끝에서 높은 응력을 발생하기 때문에 최대 등가응력은 마지막 단계에서는 올라간다. 본 연구에서의 실험 및 해석결과들은 충돌에 의한 균열 진전을 방지할 수 있는 복합재료에 대한 안전 설계의 개발에 필요한 자료로 사료된다.

**Key Words:** 경사진 이중외팔보(tapered double cantilever beam), 에너지 해방율(energy release rate), 균열(crack), 등가 응력(equivalent stress), 알루미늄 합금(aluminum alloy)

## 1. 서 론

오늘날 에너지 위기로 인해 자동차 제조회사들은 차량의 연비를 높이기 위해서 엔진의 개발뿐 아니라 차체의 경량화에 대한 연구를 더욱 늘리고 있다. 이로 인해 근래에 들어서 알루미늄 합금을 이용하여 차체를 생산하는 업체가 많아지고 있다. 또한 비행기, 우주선, 기차, 생산기계 등에

도 알루미늄 합금을 많이 쓰이고 있으며 알루미늄 합금, 알루미늄 폼, 플라스틱을 이용하여 조합된 복합재료도 많이 쓰이고 있다. 복합재료(Composite Materials)란, 2종 이상의 재료를 조합(Combination)·성형(Forming)하여 단일 재료가 나타낼 수 없는 성질을 갖도록 한 재료이다. 즉, 성분이나 형태가 다른 두 종류 이상의 소재를 거시적으로 조합한 재료이다. 철강재에 비하여 가벼우면서 내구성은 물론 에

Received 4 December 2013, received in revised form 18 March 2014, accepted 20 March 2014

\*공주대학교 기계공학과 대학원

\*\*†공주대학교 기계자동차공학부, Corresponding author (E-mail: jucho@kongju.ac.kr)

\*\*공주대학교 기계자동차공학부

너지 절감과 안전성을 극대화시킬 수 있는 소재로서 복합재료가 각광받고 있으며, 다양한 분야에서 사용되어지고 있다. 알루미늄 합금과 같은 경우에는 구조물에 기존의 용접이나 볼트, 너트에 의한 체결 방식을 사용하게 되면 가공과정이나 시간이 증가할 뿐만 아니라 무게도 증가하고 볼트, 너트에 의한 압력에 의하여 알루미늄 합금의 파손 및 변형과 같은 문제점이 발생한다[1,2]. 따라서 최근에는 에폭시 접착제와 같은 특수 접착제를 이용하여 알루미늄 합금을 접합하는 접착 구조물의 사용이 증가되고 있으며, 접착 접합의 우수성에 기존의 금속재료의 체결방식에도 사용이 되고 있다[3,4]. 그리고 접착제는 다른 얇은 널판지 재료들을 붙이게 할 수 있으며 접착제를 사용하면 소음과 진동의 감소에 좋은 특성도 있다. 이에 제조자들은 공학적인 성분과 구조물들의 접합에 있어서 종래의 접합 기술에 비하여 접착제의 이점에 대하여 고려하고 있으나, 접착제인 연결부의 인성은 충격 하중의 조건하에서는 상당히 감소될 수 있다[5-7].

본 연구에서는 알루미늄 합금으로 된 경사진 이중외팔보를 모델링하였고, 각각의 충격속도들을 2.5 m/s, 7.5 m/s, 12.5 m/s 별로 실험을 진행하였으며, 실험에서 나온 여러 가지 데이터를 분석하여 접착 구조물의 접착 면에서 발생하는 에너지 해방율을 CBT로 구하였다. 그리고 시뮬레이션의 모델링하였고 실제 실험조건과 똑같이 유한요소해석을 하였다. 실험결과와 시뮬레이션결과를 서로 비교하면서 알루미늄 합금의 충격에 대한 기계적 특성을 알고자 하는 것이다. 이와 같은 연구를 통하여 접착제로 접합된 알루미늄 합금 재질을 자동차용 범퍼 또는 항공기용 연료탱크 같은 실제 복합재료 구조물에 적용시키고 재질의 기계적인 특성 및 충격 하중이 파괴 에너지에 미치는 영향을 규명한다. 그리고 파괴인성을 해석하여 안전설계 및 복합재료의 개발에 필요한 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 실험과 시뮬레이션 검증 방법

### 2.1 실험장치 및 실험모델

본 연구에서 사용된 시험편은 Fig. 1에서와 같은 치수에 의하여 제작하였다. 모델의 기울기는  $m$ 으로 표시하고 모델의 핀홀의 중심부터 모델의 끝부분까지의 길이를  $a$ 로 표시한다. 본 연구에서  $m=2$ 와  $a=300$ 으로 하고 식 (1)으로 하여 모델의 높이( $h$ )를 구하면 51.47 mm가 된다. 그리고 핀홀의 직경은 8 mm이고, TDCB 시험편 모델의 길이는 310 mm이고 두께는 10 mm이다. Fig. 1에 의하여 제작한 실제 모델은 Fig. 2와 같다. Fig. 2에 보면 실제 모델의 상단부와 하단부는 적색 접착제로 붙였다. 접착제는 XD4600로 사용하였고 30분동안 2°C씩 올리며 180°C에서 오븐경화하였다. 접착라인의 두께는 Ballotini(미세한 유리구슬)를 이용하여 0.4 mm로 유지하였다.

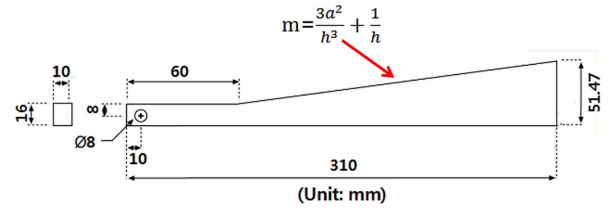


Fig. 1. Dimension of specimen

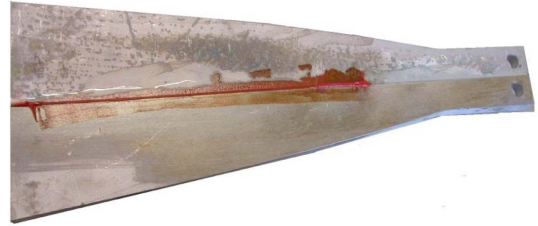


Fig. 2. Experimental specimen



Fig. 3. Setup of aluminum alloy at impact tester

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

충격실험을 수행하기 위하여 최대 충격 속도 25 m/s에 달하는 VHS 8800 High Strain Rate Systems를 사용하였으며, 충격실험 장치의 구조에 맞게 Fig. 3과 같이 TDCB를 셋팅하였다. TDCB 모델의 하단부의 하중블록을 고정시켜 놓고 있으며, TDCB 모델의 상단부의 하중블록을 잡아당긴다.

실험에서 에너지 해방율을 구하는 식은 단순보 simple beam 이론(SBT) 분석법과 수정보 이론(CBT) 분석법이 있다. 기존의 단순보 simple beam 이론(SBT) 분석법은 보의 회전 영향이나 경사를 가진 보의 실제 형상을 고려하지 않았고, 보 끝단 내부의 회전에 대한 수정계수만으로는 미국재료시험학회(ASTM) 기준에 충족되지 않기 때문에 유럽 구조물 보 전 협회(ESIS)에 의하여 제안된 수정보 이론(CBT) 분석법

을 본 연구에 적용하였다.

실험의 하중조건에서 임계파괴 에너지  $G_{IC}$ 의 계산은 하중 조건에 따라 달라진다. 하중 블록을 사용하는 경우의 에너지 해방율은 식 (2)를 사용하여  $G_{IC}$ 를 계산한다.

$$G_{IC} = \frac{4P^2 m}{E_s B^2} \left[ 1 + 0.43 \left( \frac{3}{ma} \right)^{1/3} \right] \quad (2)$$

여기서,  $B$ 는 시험편의 폭,  $P$ 는 시험기의 로드 셀로부터 측정되는 하중,  $a$ 는 균열 길이,  $m$ 는 시험편의 형상계수,  $E_s$ 는 보의 탄성계수이다.

2.2 해석조건 및 해석모델

실험 시험편과 동일한 형상으로 ANSYS Design Modeler를 이용하여 2D로 모델링을 하였다.

Fig. 4에서와 같이 TDCB 모델의 해석상, 절점 수는 6990개이고 요소는 2172개이다. 모델의 재질은 Aluminum Alloy 2014로서 그 물성치는 Table 1에 나타나 있다.

시뮬레이션 해석에서는 실제의 실험 조건과 똑같이 그 구속 조건을 적용했다. Fig. 4에서와 같이 TDCB 모델의 하단부의 하중블록의 접촉조건은 Frictionless Support로 하였고, 상단부의 하중블록에 속도를 각각 2.5 m/s, 7.5 m/s, 12.5 m/s로 가하였다. 상단부와 하단부의 접촉 부위는 하중 점으로부터 100 mm 떨어지도록 하여 예비균열을 만들었다. 시험편의 상단부와 하단부사이의 접착력은 접합면의 수직으로 작용하는 힘에 접착된 부분이 버틸 수 있는 한계를 나타내는 법선응력으로서 8 MPa를 적용하였고, 끊어지기 직전까지의 위쪽과 아래쪽 상단부와 하단부사이의 간격을 0.6 mm의 값으로 설정하였다.

실험에서 에너지 해방율을 구하는 식과 달리 시뮬레이션에서 에너지 해방율을 구하는 식은 다르다. 접착파괴에너지로서 균열선단에서의 임계 에너지 해방율( $G_c$ ) 값을 넘

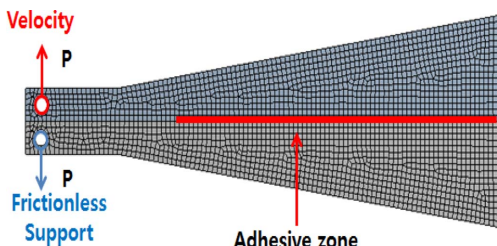


Fig. 4. Mesh of specimen

Table 1. Property of material

Density (kg/m <sup>3</sup> )	2720
Young's Modulus	72.4 GPa
Poisson's Modulus	0.33
Ultimate Tensile Strength	485 MPa
Yield Tensile Strength	415 MPa

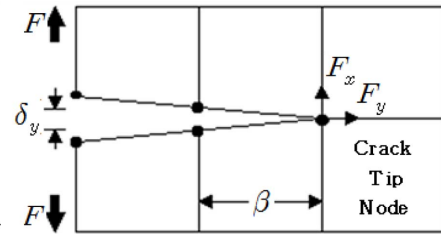


Fig. 5. Nodal force at crack tip

계 되면 균열은 전파하게 된다. 해석모델은 2차원 모델로서 에너지 해방율은 Fig. 5와 같이 균열선단에서의 절점의 하중 및 변위에 의해 얻어진다.  $\beta$ 는 균열 선단의 폭이며,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $\delta_x$ ,  $\delta_y$ 는 절점에서의 X, Y 방향에 대한 하중과 변위이다.

따라서 균열선단에서의 단위 두께 당 임계 에너지 해방율은 식 (3)에 의하여 얻을 수 있다.

$$G_c = (F_x \delta_x + F_y \delta_y) / 2\beta \quad (3)$$

3. 연구 결과

3.1 충격속도 2.5 m/s의 충격해석과 실험결과 비교 및 검증

충격속도 2.5 m/s를 TDCB 시험편 상단부의 하중블록에 가해지도록 하였을 때, 실험과 해석 결과를 비교해 보았다.

Fig. 6은 2.5 m/s의 충격속도에 있어서의 하중-변위에 대한 그래프이다. 하중은 Fig. 4에서 볼 수 있는 거와 같이 P로 나타내며, 변위는 하중 P에 따라 핀이 위로 올라가는 거리이다. 그래프를 보면 전체적으로 변위가 증가함에 따라 하중이 증가하다가 감소하는데 하중이 감소하는 이유는 시간이 흐름에 따라 시험편의 접착면적이 작아지기 때문이다.

Fig. 7은 균열 길이에 대한 에너지 해방율의 그래프로서 2.5 m/s의 충격 속도에 대한 해석과 실험 결과를 비교한 것이다. 전체적으로 실험결과의 값이 시뮬레이션 해석결과의 값보다 높은 것으로 나타났다. 이는 실험에서 시험편이 분리된 후에도 접착력이 유지되는 특성 때문이나 해석과 실

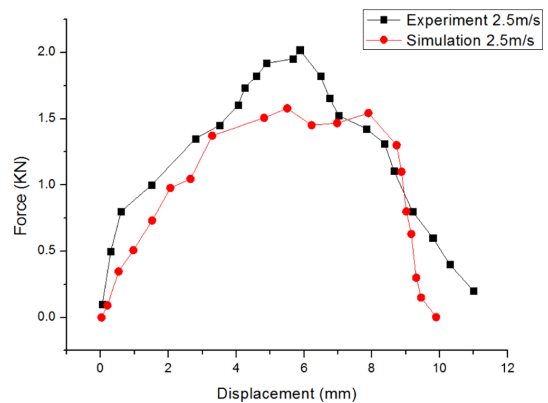


Fig. 6. Load according to displacement with experiment and simulation in case of 2.5 m/s rate

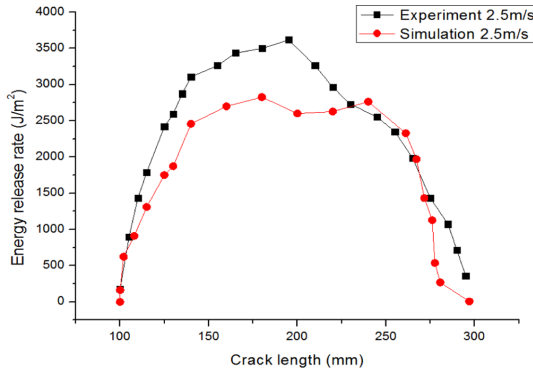


Fig. 7. Energy release rate according to crack length with experiment and simulation in case of 2.5 m/s rate

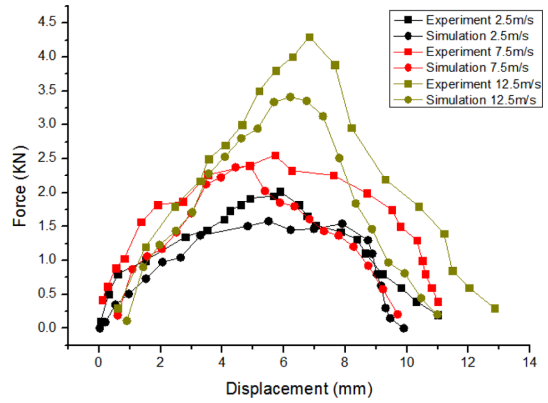


Fig. 9. Force according to displacement with experiment and simulation in case of 2.5 m/s, 7.5 m/s and 12.5 m/s rates

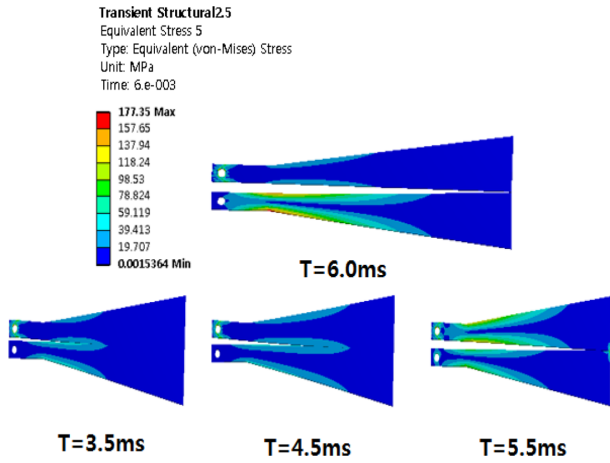


Fig. 8. Contour of equivalent stress at impact analysis

험 결과가 유사하게 나온 것을 알 수 있었다.

Fig. 8은 해석 결과 중 충격속도 2.5 m/s일 때 경과 시간동안 최대 등가응력이 발생하였을 때의 등가응력을 등고선으로 나타내어 보여주는 그림들이다. 3.5 ms 전에 하중이 커지다가 3.5 ms부터 4.5 ms의 시간까지 하중이 1.5 kN 쯤에 유지하다가 4.5 ms 이후에 떨어졌다. 또한 3.5 ms부터 4.5 ms 시간까지 최대 등가응력이 발생되었고 5.5 ms일 때의 사진을 보면 균열이 모델의 뒤 부분까지 진전하여 모델의 뒤 부분에서 높은 응력이 발생하는 것으로 판단된다. 충격속도 7.5 m/s와 충격속도 12.5 m/s일 때의 실험과 해석에서는 충격속도 2.5 m/s, 7.5 m/s 및 충격속도 12.5 m/s들의 세 가지 경우, 공히 유사하게 나왔다.

### 3.2 2.5 m/s, 7.5 m/s 및 12.5 m/s의 충격 속도들에 대한 실험 및 해석결과들의 비교

Fig. 9는 2.5 m/s, 7.5 m/s 및 12.5 m/s의 각각의 충격속도들에 대한 변위에 따른 하중을 비교한 그래프이며, 충격속도가 빠를수록 편에 가해지는 최대하중도 증가하는 것으로 나타났다. 충격속도가 2.5 m/s인 경우에는 하중이 1.5 kN를 유지하다가 감소하였다.

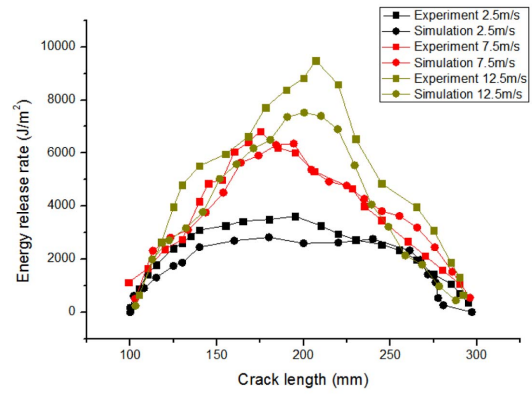


Fig. 10. Energy release rate according to crack length with experiment and simulation in case of 2.5 m/s, 7.5 m/s and 12.5 m/s rates

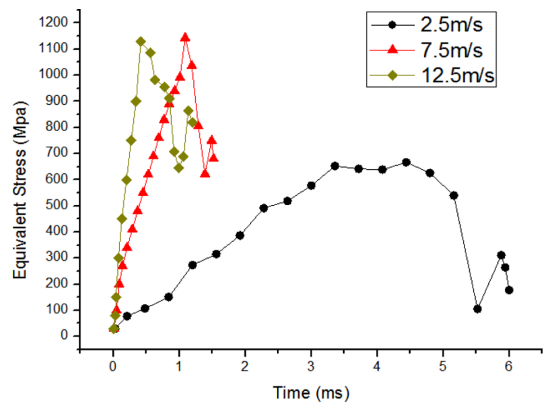


Fig. 11. Graph of equivalent stress due to time at impact analysis in case of 2.5 m/s, 7.5 m/s and 12.5 m/s rates

Fig. 10은 2.5 m/s, 7.5 m/s 및 12.5 m/s의 각각의 충격속도별로 균열 길이에 따른 절점에서의 에너지 해방율을 비교한 그래프이다. 전체적으로 Fig. 9의 그래프와 비슷하게 나왔는데, 그 이유는 절점에서의 하중과 변위가 에너지 해방율에 미치는 영향이 크기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 11은 시뮬레이션에서 각각의 속도별로 시간에 따른 최대 등가응력의 변화를 그래프를 나타낸 것이다. Fig. 11에 각 충격속도를 가해졌을 때 나온 등가응력이 항복응력이 넘으면 모델은 파손이 된다. 충격속도 2.5 m/s를 가해졌을 때 등가응력을 완만하게 올라가다가 660 MPa의 최대값을 보이고 접착부분이 거의 모두 분리된 상태가 되어 급격히 떨어진다. Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 시간이 5.5 ms 일 때 접착된 부분의 끝 부분에서 높은 응력을 발생하기 때문에 그 곡선은 660 MPa의 최대값을 보이고 급격히 떨어지다가 조금 올라가다가 떨어졌다. 충격속도 7.5 m/s 및 12.5 m/s의 곡선들을 보면 충격속도 2.5 m/s의 곡선과 같은 양상이 나왔다. 충격속도 2.5 m/s와 달리 7.5 m/s 및 12.5 m/s의 등가응력의 최대값이 1150 MPa에 되었으며 그 곡선이 2.5 m/s 경우보다 더 급격하게 올라갔다.

#### 4. 결 론

알루미늄 합금으로 된 경사진 이중외팔보 시험편에 대하여 각각의 충격 속도 2.5 m/s, 7.5 m/s와 12.5 m/s 별로 실험을 수행하여 여러 가지 충격에 대한 데이터를 분석하였다. 또한 유한 요소 모델을 가지고 수치해석적인 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 전체적으로 변위가 증가함에 따라 하중이 증가하다가 감소하는데 그 이유는 시간이 흐름에 따라 시험편의 접착면적이 작아지기 때문이다. 또한, 충격속도가 빠를수록 핀에 가해지는 최대하중이 증가한다는 것을 알 수 있었고 충격속도가 2.5 m/s의 경우에는 하중이 1.5 kN를 유지하다가 감소하였다.

2. 전체적으로 실험의 에너지 해방율의 값이 높은 것으로 나타났다. 이는 실험에서 시험편이 분리된 후에도 접착력이 유지되는 특성 때문인 것으로 사료된다.

3. 충격속도가 2.5 m/s일 때 최대 등가응력이 660 MPa에 도달하고 충격속도가 7.5 m/s와 12.5 m/s일 때 그 최대 등가응력들은 1150 MPa에 도달하였다.

4. 충격속도와 상관없이 균열이 진전하다가 접착된 부분의 끝 부분에서 높은 응력을 발생하기 때문에 최대 등가응력의 곡선이 최대값이 되었다가 떨어지다가 올라가고 다

시 올라가고 떨어지는 경향을 확인하였다.

5. 본 연구에서의 실험 및 해석결과들은 층돌에 의한 균열 진전에 대한 안전설계 및 복합재료의 개발에 필요한 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0006548).

#### 참고문헌

1. Baek, S.H., Kim, W.S., Jang, C.J., and Lee, J.J., "Mixed-Mode Fatigue Characteristics of Composite/Metal Interfaces," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 4, 2010, pp. 21-27.
2. Lee, J.K., "Elastic Analysis in Composite Including Multiple Elliptical Fibers," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 6, 2011, pp. 37-48.
3. Kim, D.Y., Kwak, J.H., Lee, J.H., Park, K.W., Jeong, K.Y., and Cheon, S.S., "A Study on the Vibration Analysis for the Composite Multi-axial Optical Structure of an Aircraft," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 2, 2011, pp. 14-21.
4. Jung, J.W., Kim, S.H., Kim, S.H., Park, J.K., and Lee, W.I., "Research on the Development of the Properties of PLA Composites for Automotive Interior Parts," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 3, 2011, pp. 1-5.
5. Michailidis, N., Stergioudi, F., Omar, H., and Tsipas, D.N., "An Image-based Reconstruction of the 3D Geometry of an Al Open-cell Foam and FEM Modeling of the Material Response," *Mechanics of Materials*, Vol. 42, No. 2, 2010, pp. 142-147.
6. Cooper, V., Ivankovic, A., Karac, A., McAuliffe, D., and Murphy, N., "Effects of Bond Gap Thickness on the Fracture of Nanotoughened Epoxy Adhesive Joints," *Polymer*, Vol. 53, No. 24, 2012, pp. 5540-5553.
7. 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.