

발포 알루미늄으로 된 경사진 이중외팔보 시험편의 접착면에서의 전단 실험 및 시뮬레이션 해석

손홍봉* · 전성식** · 조재웅***†

Shear Experiment and Simulation Analysis at Bonded Surface of Specimen Tapered Double Cantilever Beam with Expanded Aluminum

Hong-Peng Sun*, Seong S. Cheon**, Jae-Ung Cho***†

ABSTRACT: In this study, tapered double cantilever beam specimens are designed with the variable of angle to investigate the fracture property at the bonded surface of adjoint structure. These specimens are made with four kinds of models as the length of 200 mm and the slanted angles of bonded surfaces on specimens of 6°, 8°, 10° and 12°. By investigating experiment and analysis result of these specimens, the maximum loads are happened at 120 N, 137 N, 154 N and 171 N respectively in cases of the specimens with slanted angles of 6°, 8°, 10° and 12°. As the analysis result approach the experimental value, it is confirmed to have no much difference with the values of experiment and analysis. It is thought that the material property can be investigated effectively on shear behavior of the material composed of aluminum foam bonded with adhesive through simulation instead of experiment by applying this study method.

초 록: 본 연구에서는 발포 알루미늄으로 구성된 접착 구조물에서의 접합면에 대한 파괴 특성을 조사하기 위하여 각도를 변수로 정하고 TDCB 시험편을 설계하였다. 이 시험편들은 길이는 200 mm이고 시험편에 대한 접착면의 경사 각도는 6°, 8°, 10°와 12°인 네 가지로 모델링을 하였다. 이 시험편들의 실험 및 해석을 분석한 결과, 경사면 각도가 6°, 8°, 10°와 12°인 경우에 시험편들의 최대 하중은 각각 약 120 N, 137 N, 154 N과 171 N으로 발생하였다. 해석의 결과 값이 실험치에 가까워져 많은 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이와 같은 연구 방법을 응용하여 실험 대신 시뮬레이션을 통하여 접착제로 접착된 알루미늄 폼으로 된 재료의 전단 거동에 관한 물성치를 효율적으로 파악할 수 있다고 사료된다.

Key Words: 알루미늄 폼(Aluminum foam), 접착 계면(Bonded interface), 변위(Displacement), 다공성 심재(Porous core), 반력(Reaction force), TDCB 시험편(Tapered double cantilever beam specimen)

1. 서 론

다공성 금속인 알루미늄 폼은 내부에 많은 공기 셀 격자를 형성하고 있는 금속소재로, 알루미늄 괴(Aluminum Ingot)

를 용해 후 증점제와 발포제를 첨가하여 스폰지 형상으로 발포시켜 제조한 초경량 금속이다[1]. 경량화 및 충격에너지 흡수기능을 극대화하기 위하여 알루미늄 폼은 경량 구조용, 기타 생체 재료 등 다양한 분야에서 폭넓게 활용되고

Received 8 December 2014, received in revised form 23 December 2014, accepted 25 December 2014

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju University

**Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju University

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

있고, 밀도가 작으며, 불연성, 고비강성, 우수한 에너지 흡수율, 음향흡수성과 낮은 열전도도 등 많은 장점을 가지고 있다. 일반적으로 금속재료 내에 존재하는 기공들은 재료의 특성에 결함으로써 작용하지만 발포기술을 이용하여 이 기공들을 균일한 크기와 분포로 제어하면 충격에 안전한 경량소재로 개발할 수 있다. 또한 재활용이 가능하며 제조 공법도 간단하면서 가격도 저렴한 재료이다. 흡음성과 충격흡수의 우수성으로 알루미늄 폼은 지하철역과 대형건물의 방음판으로 사용되며, 자동차에서는 충격흡수가 뛰어난 알루미늄 폼을 이용하는 자동차 범퍼를 연구하여 조만간 상용화 할 예정이다[2-4]. 알루미늄 폼은 최근 몇 년 동안 개발된 새로운 기능성 구조재료이며 자동차산업에서 좋은 전망을 가지고 있다.

복합재료 접합면의 파단이 접착 구조물에 존재하는 이물질 또는 결함에 의해 발생된 균열과 관련이 있다. 따라서 복합재료를 이용한 접착 구조물의 충격피로와 접합면에 대한 파괴 인성을 연구하는 것은 중요하다고 볼 수 있기 때문에 본 연구에서는 기존의 금속재료보다 경량성, 충격 흡수성 그리고 내열성이 우수한 특성을 지닌 복합재료의 한 종류인 알루미늄 폼으로 구성된 접착 구조물에 대한 접착면의 인장특성을 알아보았다. 현재, 유럽 공동체(EU)는 금속 폼이 자동차에서의 애플리케이션을 계획에 집어넣었다. 최근 우리나라도 이러한 연구 분야의 중요성에 점차적으로 깨닫고 관련 연구의 보고서도 생겼다[5,6].

본 연구에서는 한국의 주식회사 폼텍(Foam tech.)에서 제작한 폐포형 구조인 알루미늄 폼을 MTS사의 100kN Landmarks 를 사용하여 경사진 이중외팔보(TDCB) Mode II 형태의 인장 하중에 대한 전단 파괴 거동 실험을 진행하였다[7-8]. 또한 유한 요소해석상용 프로그램인 ANSYS를 이용해 2차원 모델링 후 하중이 가해지는 해석을 진행하여, 실험결과와 해석결과를 비교 분석해 보았다. 따라서 접착제로 접합된 접합면이 기술어진 경우의 알루미늄 폼 재질로 된 실제 복합재 구조물에 적용시켜 파괴거동을 분석하여 그 기계적인 특성을 파악할 수 있다.

2. 실험 및 해석 설정

2.1 시험편 파손강도의 기본이론

시험편의 등가응력은 Von Mises 응력으로서 3차원의 응력 상태에서 단축으로 상당시킨 응력이다. 이 값이 항복응력에 이르렀을 때 파손이 일어난다. 주 응력이 벡터로서 크기와 방향을 가진다면 등가응력은 스칼라로서 크기만 가진다. 복잡한 3차원 모델에서는 주응력이 아니라 등가응력만을 가지고 항복이나 파단을 판단한다. 변형률 에너지설은 재료내의 단위체적에 대한 변형률 에너지가 단순인장의 경우 항복점의 단위체적에 대한 변형률 에너지와 같아질 때 파손이 발생한다는 이론으로서, 전단변형 에너지설

에 의한 파손조건은 식 (1)과 같다. 이러한 등가 응력이 이 재료의 항복응력보다 클 때는 파손이 일어난다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 이 등가 응력이 접착 계면의 접착응력보다 클 때에 접착이 떨어져 파괴된다고 간주하였다.

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{2} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \} \quad (1)$$

여기서, σ_e : 상당 등가 응력

σ_1 : 1축(x 축) 방향의 응력

σ_2 : 2축(y 축) 방향의 응력

σ_3 : 3축(z 축) 방향의 응력

2.2 시험편의 설계 및 실험 준비

Fig. 1은 알루미늄 폼으로 TDCB 시험편이 미끄러짐 모드(mode II)를 설계도면이다. 시험편 경사진 접착면의 각도를 변수로 정하고 6°에서 12°까지 2° 간격으로 4가지의 모델을 모델링을 하였다. 그리고 모델의 길이와 두께는 각각 200 mm와 25 mm로 지정하였다. 균열을 구현하기 위해서 알루미늄 폼의 경사진 접합면에 강력 스프레이 접착제를 사용하였다[9].

Fig. 2는 시험편의 모양을 보여주는 사진이다. 실험에서 사용된 알루미늄 폼 시험편 접착면은 보통 평평하거나 매끄러운 표면이 아니고 직경이 3 mm~5 mm의 불규칙적인 기공으로 된 거친 면이다. 이러한 거친 면에 접착제를 분무하면 대다수의 접착제가 기공에 침투하게 된다. 접착제의 용량이 실험결과에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 본 연구에서는 시험편 샘플을 제작하였을 때 스프레이 접착제로 시험편 접착면에 동일한 시간으로, 즉 1초간 분무하였다. 또한 시험편 모두 동일하게 15분 정도 말린 뒤 시험편을 서로 붙이고 약 2 kg의 하중을 4시간 동안 접착면에 수직으로 가하여 시험편이 어느 정도의 접착 강성을 지니도록 하였다. 또한 본 시험에서 사용된 접착제의 종류는 3M™ Super

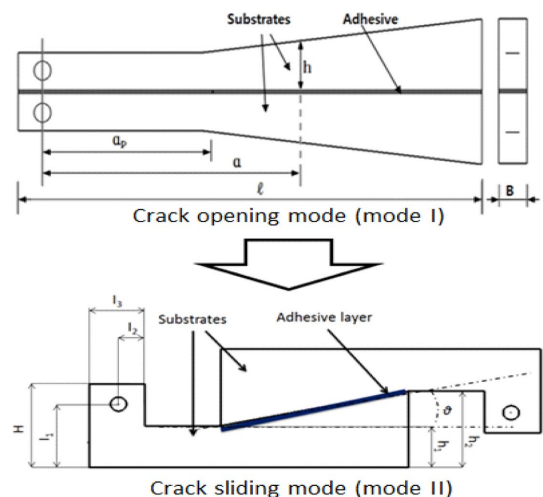


Fig. 1. TDCB Specimen

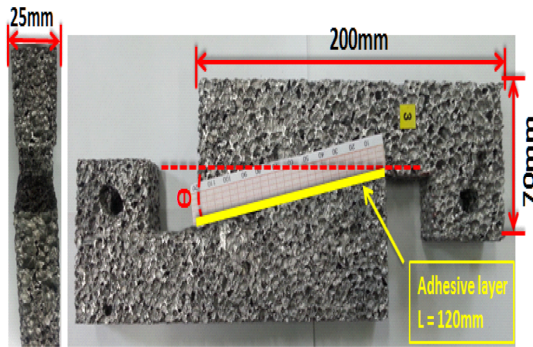


Fig. 2. Experiment specimen

Table 1. Property of adhesive

Property	Value
Density (kg/m^3)	726
Young's modulus (MPa)	1000
Poisson's ratio	0.38

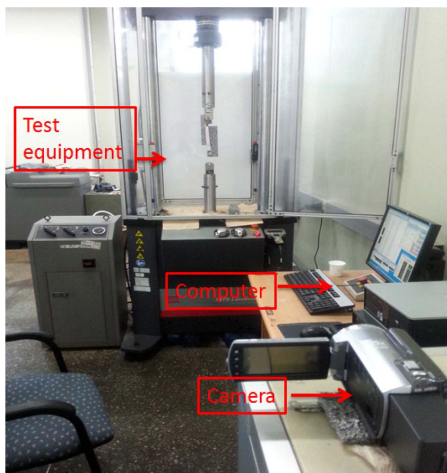


Fig. 3. Experimental setup

77 다목적의 스프레이 접착제이다. 접착제의 물성치는 Table 1과 같다[10,11].

Fig. 3은 MTS 사의 Landmark 시험기로서 시험편에 가할 수 있는 최대 힘은 10kN이다. 시험편의 한쪽 보(Beam)는 상부의 로드 셀을 고정하였고 다른 한쪽 보(Beam)는 하부의 로드 셀에 강제 변위를 주었다. 이러한 변위제어 방법을 이용하여 TDCB 시험편의 위쪽을 고정된 상태에서 아래쪽 방향으로 0.1 mm/s의 실험속도로 하중을 가했다. 실험 결과의 데이터는 컴퓨터를 이용하여 출력하였으며, 캠코더를 이용하여 각각 시험편의 실험장면을 촬영하였다.

2.3 해석 설정

먼저 알루미늄 폼(aluminum foam) 사이의 접착 계면의 접

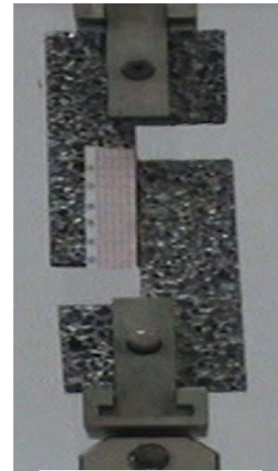


Fig. 4. Test of adhesive strength at bonded interface

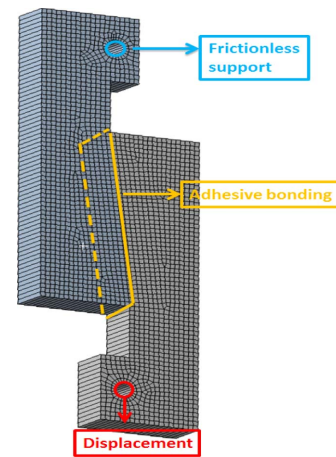


Fig. 5. Analysis condition

착응력인 최대 등가응력(Maximum equivalent stress)을 ANSYS 해석 프로그램에서 정의하기 위하여 초기 실험을 Fig. 4와 같이 셋팅하여 수행하였다. 측정된 결과, 접착제가 가해진 접착계면에서는 약 0.04 MPa의 응력보다 크면 그 접착 계면이 떨어져 파단이 일어난다. 이는 접착 계면이 이 응력까지는 접착을 유지할 수 있다고 사료된다. 따라서 이 접착계면에서의 접착응력을 프로그램에 입력하였다.

Fig. 5와 같이 모델의 상부 하중블록은 원심으로 자유롭게 회전할 수 있는데, 반경 방향에 움직일 수 없는 비마찰 지지(Frictionless support)로 구속을 하였으며, 다른 한 쪽의 하중블록은 아래 방향으로 약 0.1 mm/s로 이동한다고 가정하였다. 그리고 알루미늄 폼으로 된 TDCB 모델의 유한요소 모델은 4면체의 요소로 분할하였고 $\theta = 12^\circ$ 일 때의 절점(Nodes)의 수는 1186이며, 요소(Elements)의 수는 1051로 해석을 하였다. 모델의 접착된 부분은 완전히 붙어 있다는 접착(Bonded) 조건을 사용하였고 해석시 사용된 알루미늄 폼의 물성치는 Table 2와 같다. 이 물성치를 적용하여 해석을 수행하였다.

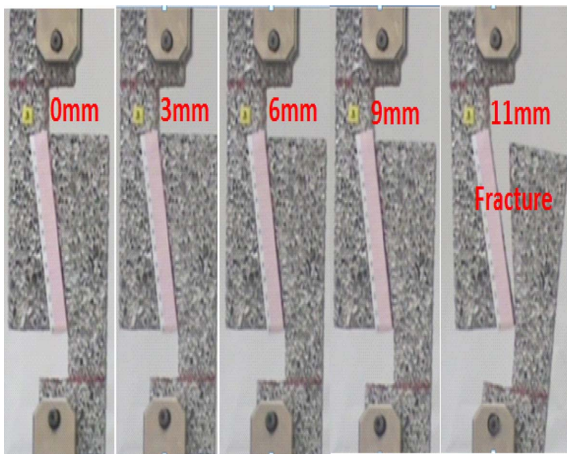
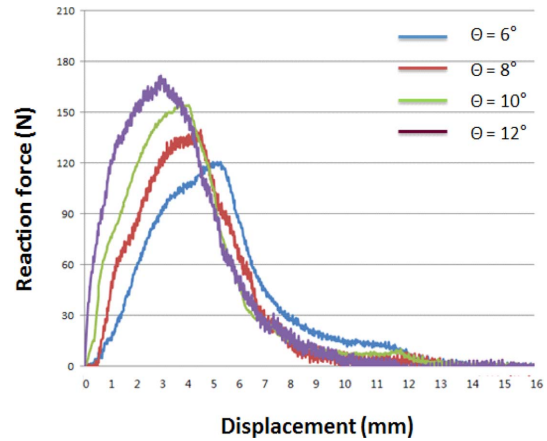
Table 2. Property of aluminum foam

Property	Value
Density (kg/m^3)	400
Young's modulus (MPa)	2,374
Poisson's ratio	0.29
Yield strength (MPa)	1.8
Shear strength (MPa)	0.92

3. 실험 결과

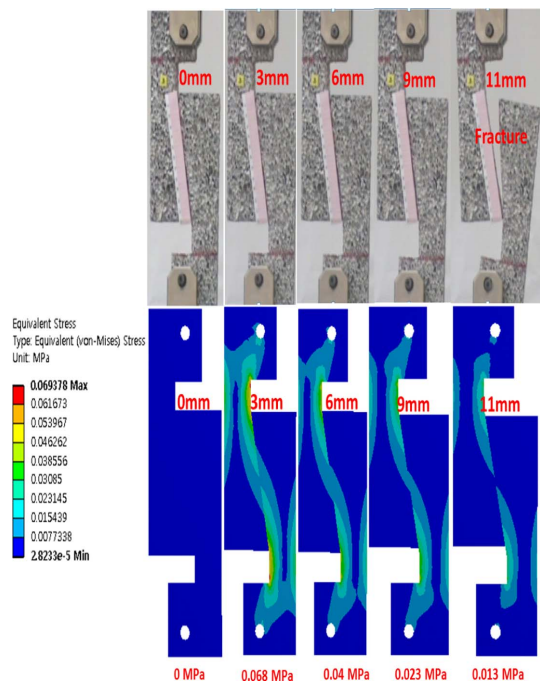
본 실험에서는 네 가지 시험편의 양상을 거의 비슷하게 보이기 때문에 대표적으로 경사면 각도 12° 인 시험편을 선택하였고 Fig. 6와 같이 정적 실험을 수행한 과정을 볼 수 있다. 이 실험 과정에 나온 거와 같이 아래쪽 시험편의 강제 변위는 약 11 mm까지 일정하게 증가하였고 11 mm 이상 변위가 되었을 때 접합면에 균열이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 네 가지 시험편들의 실험 과정을 데이터화하고 변위에 따른 반력을 나타낸 그래프이다. 네 가지 곡선을 보면 시험편의 아래쪽 보(Beam)이 일정한 변위가 진행되었을 때 블록에 측정한 반력도 일정하게 증가하였다. 그 중에 경사면 각도 12° 인 시험편의 최대 반력이 171 N으로 제일 먼저 발생되었고 이어서 10° 인 시험편이 154 N의 최대 반력이 발생하였고 8° 인 시험편이 137 N의 최대 반력이 발생하였다. 마지막으로 경사면 각도 6° 인 시험편은 120 N의 최대 반력이 발생하였다. 그리고 네 가지 시험편이 최대 반력이 발생한 후 변위에 따라 반력이 급격히 줄어드는 것을 동일하게 볼 수 있다. 전체적으로 시험편의 경사면 각도가 클수록 최대 반력에 도달하는 소요시간이 짧은 것을 알 수 있다.

**Fig. 6.** Specimen configurations during experimental process of forced displacement ($\theta = 12^\circ$)**Fig. 7.** Experimental graphs of displacement–force reactions of $\theta = 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$ and 12°

4. 실험과 해석 결과 비교

실험을 통해 얻은 데이터를 비교, 검증하기 위하여 유한 요소법을 실행하였다. 경사면 각도가 12° 인 시험편에 대해 실험 조건에 따라 강제변위가 일정하게 진행되는 실험 과정과 해석 모델에 등가응력 분포를 나타낸 해석 과정을 비교하면 Fig. 8과 같이 나왔다. 모델의 목 부분에서 약 0.069 MPa의 최대 등가응력이 나타났다. 강제변위가 3 mm 까지 증가함에 따라 해석 모델에 등가응력 분포 구역이 확대하였고 그 이후에는 등가응력이 점차 사라지는 것을 알 수 있다. 강제변위가 약 11 mm 진행되었을 때 시험편 접합

**Fig. 8.** Comparisons with configurations of experiment and simulation for $\theta = 12^\circ$

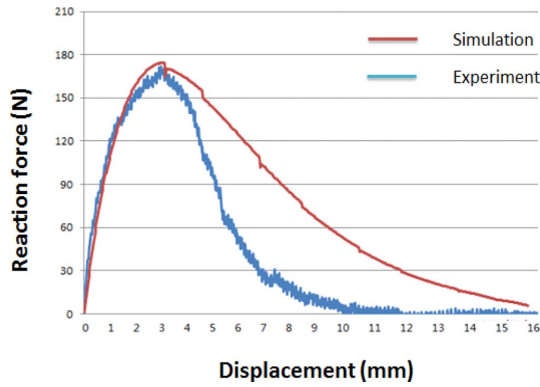


Fig. 9. Comparisons of experiment and simulation data for $\theta = 12^\circ$

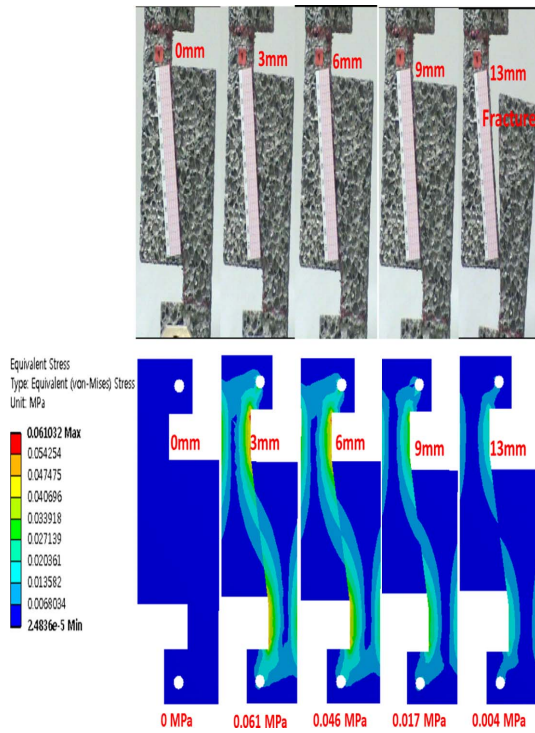


Fig. 10. Comparisons with configurations of experiment and simulation for $\theta = 10^\circ$

면이 균열이 발생하였고 해석에서는 모델에 균열이 발생하기 대신에 등가응력이 대부분 사라지고 약간 잔류하는 것을 볼 수 있다.

실험과정과 해석과정을 더욱 직관적으로 비교할 수 있으며 이 과정들에 대하여 Fig. 9과 같이 변위에 따라 반력이 변화하는 그래프를 도시하였다. 실험 데이터와 해석 데이터를 보면 최대 하중이 약 171 N으로 증가하기 전에 변위-반력 곡선이 거의 동일하게 나타났는데 이후 접촉력이 줄어드는 과정에 약간 차이를 보였다.

Fig. 10과 같이, 경사면 각도가 10° 인 시험편에 대해 강제 변위가 일정하게 진행되는 실험 과정과 해석 모델에 등가응력 분포를 나타낸 해석 과정을 비교하였다. 모델의 목 부

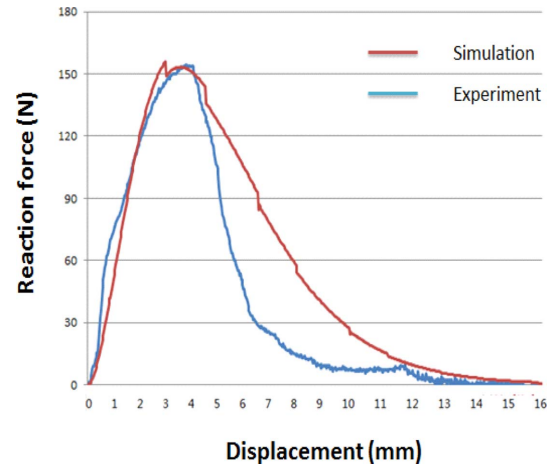


Fig. 11. Comparisons of experiment and simulation data for $\theta = 10^\circ$

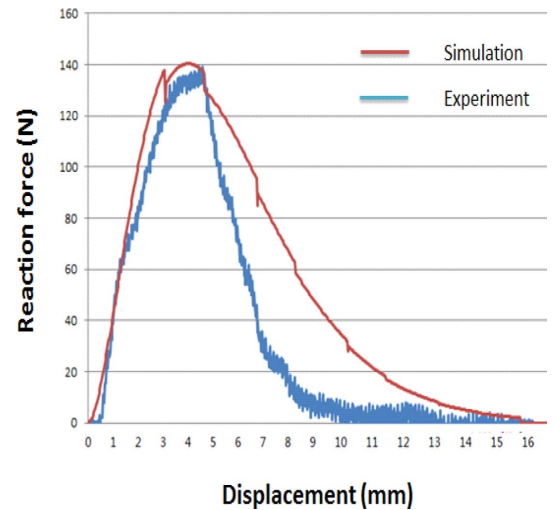


Fig. 12. Comparisons of experiment and simulation data for $\theta = 8^\circ$

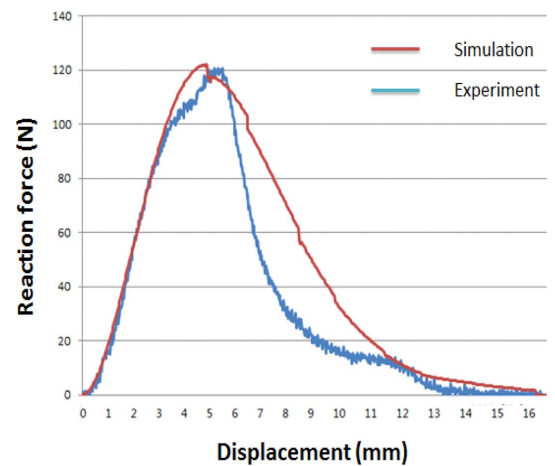


Fig. 13. Comparisons of experiment and simulation data for $\theta = 6^\circ$

분에서 약 0.061 MPa의 최대 등가응력이 나타났다. 강제변위가 약 13 mm 진행되었을 때 시험편 접합면에서 균열이 발생하였고 해석에서는 모델에 등가응력이 대부분 사라지는 것을 볼 수 있다.

또한 Fig. 11, Fig. 12와 Fig. 13은 경사면 각도가 10°, 8°와 6°인 시험편의 실험과 해석 데이터 결과들을 비교한 그래프들이다. 이 그래프들을 보면 실험과 해석 결과 대체적으로 비슷한 양상으로 나왔다. 경사면 각도가 10°인 시험편의 최대 하중 약 154 N, 경사면 각도가 8°인 시험편의 최대 하중 약 137 N, 그리고 경사면 각도가 6°인 시험편의 최대 하중이 약 120 N으로 발생하였다. 그러므로 전체적으로 네 가지 종류 시험편의 실험을 분석한 결과를 보면 시험편의 경사각 θ 값이 클수록 최대 하중이 높게 나타나고, θ 값이 증가함에 따라 최대 하중이 도달하는 소요시간이 짧은 것을 볼 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 두께별 알루미늄 폼으로 만들어진 TDCB 시험편에 대한 전단력 실험과 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

네 가지 종류 시험편의 실험을 분석한 결과, 경사면 각도가 6°, 8°, 10°와 12°인 시험편의 최대 하중은 각각 약 120 N, 137 N, 154 N과 171 N으로 발생하였다. 그러므로 전체적으로 시험편의 경사각 θ 값이 클수록 최대 하중이 높게 나타나고, θ 값이 증가함에 따라 최대 하중이 도달하는 소요시간이 짧은 것을 볼 수 있었다. 그리고 실험 조건에 따라 유한요소법으로 수행한 시뮬레이션 해석을 통하여 실험과 해석의 결과 값이 많은 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이와 같은 방법을 응용하여 많은 비용과 시간이 들어가는 실험 대신 시뮬레이션을 통하여 접착제로 된 알루미늄 폼으로 된 재료의 전단에 관한 물성치를 효율적으로 파악할 수 있다고 사료된다. 본 연구에서 얻어진 실험결과를 접착제로 접합된 실제 복합재 구조물에 적용함으로써 파괴거동을 분석하고 그 기계적인 특성을 파악할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션으로 해석함으로써 보다 쉽게 접착제 구조물의 기계적 특성을 파악할 수 있다. 또한 향후 TDCB 시험편의 피로시험을 통하여 파괴 및 수명 등을 측정함으로써 그 내구성 검증에 비교할 수 있다고 사료된다.

후 기

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로

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

REFERENCES

- 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.
- British Standard, BS 7991, Determination of the Mode I Adhesive Fracture Energy GIC of Structure Adhesives Using the Double Cantilever Beam (DCB) and Tapered Double Cantilever Beam (TDCB) Specimens, Imperial College of Science and Technology, 2001, pp. 3-13.
- 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.
- Kim, D.B., Kim, K.W., and Cho, H.Y., "Shape Design of Self-Piercing Rivet for joining dissimilar Sheet Metals," *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 14, 2012, pp. 93-99.
- 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.
- Cho, J.U., Hong, S.J., Lee, S.K., and Cho, C.D., "Impact Fracture behavior at the Material of Aluminum Foam?," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 539, 2012, pp. 250-258.
- Kim, S.S., Han, M.S., Cho, J.U., and Cho, C.D., "Study on the Fatigue Experiment of TDCB Aluminium Foam Specimen Bonded with Adhesive," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 10, 2013, pp. 1791-1795.
- Cho, J.U., Kinloch, A., Blackman, B., Rodriguez, S., Cho, C.D., and Lee, S.K., "Fracture Behavior of Adhesively-bonded Composite Materials under Impact Loading," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No. 1, 2010, pp. 89-95.
- 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.
- Hart-smith, L.J., "Further Developments in the Design and Analysis of Adhesive Bonded Structural Joints," McDonnell-Douglas Co. Paper 6922, 1980.
- Choi, H.K., and Cho, J.U., "Study on the Fatigue Analysis of DCB Model with Aluminum Foam," *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 14 No. 6, 2012, pp. 39-43.