

## 알루미늄 폼으로 된 Mode III 형의 접합된 DCB 시험편에 대한 파괴 연구

이정호\* · 조재웅\*\*† · 전성식\*\*\*

### A Fracture Study on the Bonded DCB Specimen of the Mode III Type with Aluminum Foam

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

**ABSTRACT:** In this study, the static analysis and experiment were carried out on DCB specimens manufactured with aluminum foam in order to investigate the fracture toughness at the adhesive joint of the structure bonded with adhesive. In case of static analysis, all specimen models were shown to have the maximum reaction force when the forced displacement proceeded as much as 5 mm. The maximum reaction forces became 0.25 kN, 0.28 kN and 0.5 kN respectively in cases of specimen thicknesses of 35 mm, 45 mm and 55 mm. Two specimens in case of static experiment were selected to verify these analysis results. The maximum reaction forces were shown when the forced displacement proceeded as much as 5 to 6 mm. The maximum reaction forces became 0.22 kN and 0.3 kN respectively in cases of specimen thicknesses of 35 mm and 45 mm. By comparing the derived results, it could be shown that there was not much difference between the data of analyses and experiments. Therefore, It is inferred that the study data can be secured with only analysis by no extra experimental procedure. It is thought that the mechanical properties at the structure bonded of DCB with the type of mode III can be analyzed systematically.

**초 록:** 본 연구에서는 접착제로 체결된 구조물의 접착 조인트에서의 파괴인성을 조사하기 위하여 알루미늄 폼으로 제작한 Mode III 형 DCB 시험편들에 대하여 정적 해석 및 실험을 수행하였다. 정적 해석에서의 경우, 각 시험편 모델들은 강제 변위가 약 5 mm 진행되었을 때 최대 반력을 보였으며, 이 때 각 시험편 모델들의 최대 반력은 두께가 35 mm인 모델이 약 0.25 kN, 두께가 45 mm인 모델이 약 0.28 kN, 두께가 55 mm인 모델이 약 0.5 kN으로 나타났다. 이 해석 결과들을 입증하기 위하여 정적 실험의 경우에서 두 개의 시험편들을 택하였다. 정적 실험에서의 경우, 각 시험편들은 강제 변위가 약 5~6 mm 진행되었을 때 최대 반력을 보였으며, 각 시험편들의 최대 반력은 두께가 35 mm인 시험편이 약 0.22 kN, 두께가 45 mm인 시험편이 약 0.3 kN으로 나타났다. 도출된 결과값들을 비교하였을 때 해석과 실험의 데이터들 간에 큰 차이가 없음을 알 수 있었고, 따라서 별도의 실험과정 없이 해석을 통해서도 그 연구 데이터들을 확보할 수 있을 것으로 판단되며, Mode III 형 DCB 접합구조물에서의 기계적 특성들을 체계적으로 분석할 수 있을 것으로 사료된다.

**Key Words:** 알루미늄 폼(Aluminum foam), Mode III 형(Type of mode III), 강제 변위(Forced displacement), 정적 실험(Static experiment), 정적 해석(Static analysis)

Received 25 June 2015, received in revised form 13 August 2015, accepted 17 August 2015

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

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

\*\*\*Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju University

### 1. 서 론

현대 사회에서 소재의 경량화 문제가 새롭게 대두되면서 접착제만을 사용한 체결 방식이 많이 사용되고 있다. 알루미늄 폼은 이러한 체결 방식에 적합한 초경량 금속 소재로서 충격 흡수재, 흡음 및 방음재, 열 교환기용 특수 필터 등 굉장히 다양한 분야에서 사용이 가능한 매우 유용한 소재이다. 알루미늄 폼에는 개방형과 폐쇄형이 있으며, 이들은 각각 열전달 분야와 충격 흡수재로 쓰이고 있다. 본 연구에서는 충격 흡수재로 주로 쓰이는 폐쇄형 알루미늄 폼을 이용하여 알루미늄 폼 접합구조물의 특성을 연구하고자 하였다[1-3]. 그러나, 접착제만으로 체결한 구조물의 경우 안전성을 위하여 접착 조인트 부분의 파괴인성 자료가 필수적이다. 특히, 다공성 재료인 알루미늄 폼의 접착계면 파괴 특성은 비 다공성 재료와 다를 가능성을 배제할 수가 없기 때문에 알루미늄 폼 접합면의 파괴인성 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다[4,5]. 이에 대하여 본 연구에서는 (주)폼텍(Foam tech.)에서 제작된 폐쇄형 알루미늄 폼을 영국 공업규격(British standard ; BS 7991)과 ISO 국제규격(ISO 11343)에 의거하여 두께를 변수로 설정한 DCB Mode III 타입 Single-lap 접합 방식으로 재설계하였으며, 각 두께에 따른 시험편들에 대하여 ANSYS 유한요소해석 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 정적 파괴 해석을 수행하였다[6]. 또한, 이를 검증하기 위해 인장시험기를 이용한 정적 파괴 실험을 수행하였으며, 도출된 결과들을 상호 비교하여 다공성 소재인 알루미늄 폼 DCB 접합구조물의 전단 강도를 평가하고, 그 기계적 특성들을 분석하고자 하였다.

### 2. 연구 방법

#### 2.1 연구 모델

다음의 Fig. 1과 같이 본 연구에 맞게끔 DCB 모델을 설계하였다. 두께  $t$  값을 변수로 설정하여 설계하였으며, 모델의 가로길이와 세로길이는 각각 190 mm, 130 mm이고, 변

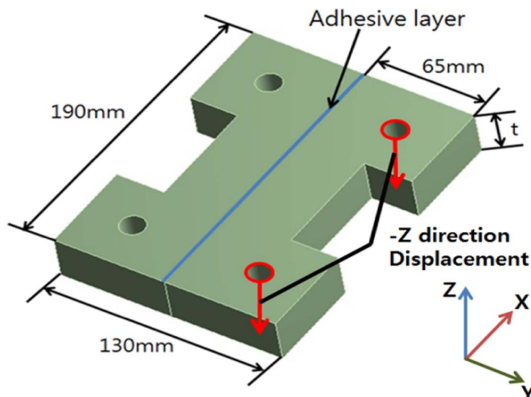


Fig. 1. Configuration of model

수인 두께  $t$  값은 10 mm 단위로 각각 35 mm, 45 mm, 55 mm로 총 3가지의 모델을 설계하였다. 추가적으로 두께  $t$  값을 위와 같이 설정한 이유는 본 연구의 목적은 알루미늄 폼 접합구조물의 접합면에 대한 특성 분석 및 데이터들의 확보로 일정한 두께의 접착제를 도포한 접합면에 대하여 알루미늄 폼 구조물의 두께를 변수로 설정하여 적용하면 각기 다른 알루미늄 폼 접합면의 파괴인성 데이터들을 얻을 수 있을 것으로 판단되었기 때문이다.

#### 2.2 시뮬레이션 해석을 위한 경계 조건

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였으며, Transient 해석 툴을 바탕으로 해석을 수행하였다. 위에 도시된 Fig. 2와 Fig. 3은 각각 DCB 시험편 모델들에 적용된 경계 조건과 Mesh를 나타낸 것이다. 각 시험편이 인장시험기에 장착되어 고정된 것으로 가정하여 시험편 모델의 한쪽 구멍들은 Fixed support 조건을 부여하여 고정하였고, 다른 한쪽 구멍들에는 하부 로드셀에 의해 강제변위가 진행되는 것을 가정하여 -Z축 방향으로 강제변위 Displacement 조건을 부여하여 3 mm/min의 강제변위로 시험편의 한쪽을 -Z축 방향으로 잡아당겨 해석을 수행하였다. 여기에서 강제변위의 경우 본 연구의 성격상 알루미늄 폼 구조물의 파단이 너무 빨라서도 혹은 너무 느려서도 안되기 때문에 적절한 강제변위 조건을 찾기 위한 사전실험

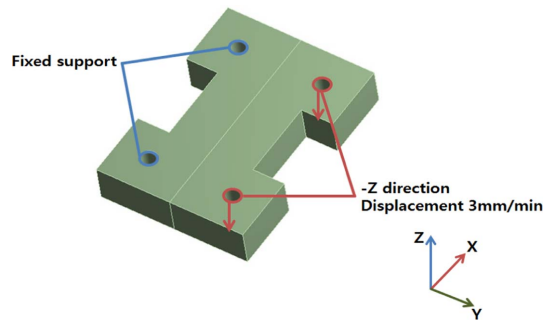


Fig. 2. Boundary conditions for simulation analysis

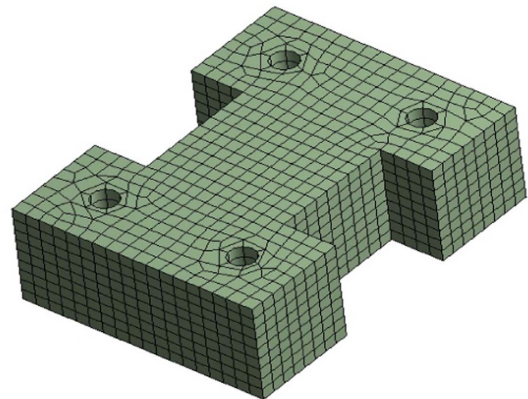


Fig. 3. Mesh of model for simulation analysis

**Table 1.** Numbers of nodes and elements of specimen models

Thickness of specimen model	Nodes	Elements
35 mm	10962	2070
45 mm	13061	2526
55 mm	16841	3352

**Table 2.** Material property

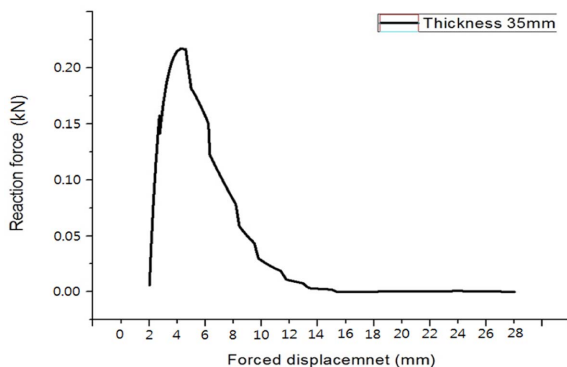
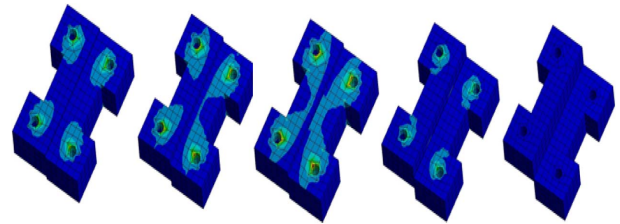
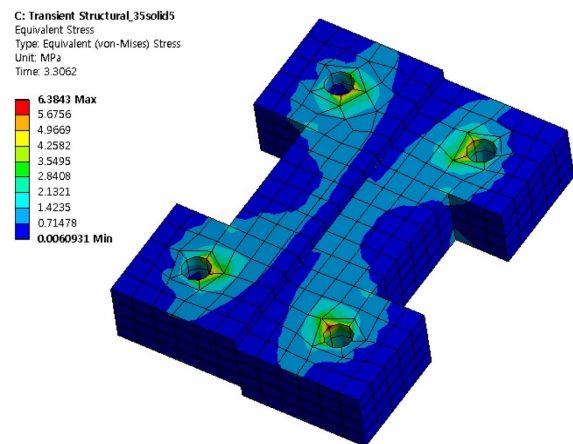
Property	Al-SAF40
Density (kg/m <sup>3</sup> )	400
Young's modulus (GPa)	2.374
Poisson's ratio	0.29
Yield strength (GPa)	1.8
Shear strength (GPa)	0.92

을 수행하였고, 여러 차례의 사전실험을 바탕으로 가장 적절한 것으로 판단된 3 mm/min을 강제변위 조건으로 설정하였다. 각 시험편 모델들의 절점 및 요소의 수는 다음의 Table 1에 표기하였고, 본 연구에서 사용된 모델은 알루미늄 폼으로서 Al-SAF40을 사용하였으며, 시뮬레이션 해석에서 적용된 시험편 모델의 물성치는 다음의 Table 2와 같다. 또한 시험편의 접합면에 도포한 접착제는 에어로졸 타입 접착제로 접착 강도는 0.4 MPa이다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 $t = 35$ mm인 시험편의 해석 결과

해석 결과 강제변위로 3 mm/min을 부여하여 시험편 모델을 -Z축으로 잡아당겼을 때 두께  $t$ 가 35 mm인 DCB 시험편 모델의 반력 데이터는 다음의 Fig. 4와 같다. 강제변위가 약 5 mm 진행되었을 때 최대 반력이 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이 때 최대 반력은 약 0.25 kN으로 나타났다. 최대 반력이 발생된 이후 시험편 모델의 접착계면에서의 접

**Fig. 4.** Graph of reaction force due to forced displacement at static analysis (Thickness of specimen is 35 mm)**Fig. 5.** Change of the equivalent stress according to the progress of forced displacement (Thickness of specimen is 35 mm)**Fig. 6.** Stress of the bonded interface at the maximum reaction force (Thickness of specimen is 35 mm)

착력은 급격하게 줄어드는 것으로 나타났으며, 강제변위가 약 12 mm 진행된 이후에는 시험편의 접착계면의 분리가 거의 완벽하게 이루어져 강제변위에 대한 반력이 0에 가깝게 나타났다. Fig. 5는 두께가 35 mm인 시험편의 해석 결과로 강제변위가 진행됨에 따라 시험편 모델에 나타나는 응력 분포를 나타낸 것이다. 강제변위가 진행되면서 시험편 모델에 나타나는 응력이 점차 사라지는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 6은 최대 반력이 약 0.25 kN일 때의 응력을 나타낸 것으로 접착계면에서의 응력은 약 0.00609 MPa로 나타났다.

#### 3.2 $t = 45$ mm인 시험편의 해석 결과

시뮬레이션 해석 결과 두께  $t$ 가 45 mm인 DCB 시험편 모델의 반력 데이터는 Fig. 7과 같다. 이는 두께가 35 mm인 시험편 모델과 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났는데 마찬가지로 강제변위가 약 5 mm 진행되었을 때 최대 반력이 나타났으며, 이 때 최대 반력은 약 0.28 kN으로 나타났다. 최대 반력이 발생된 이후에는 시험편 모델의 접착계면 접착력은 점차 감소하다가 강제변위가 약 12 mm 진행되었을 때 접착계면의 분리가 이루어져 반력이 0에 가깝게 나타났다. 다음에 도시된 Fig. 8은 두께가 45 mm인 시험편의 해석 결과로 강제변위가 진행됨에 따라 시험편 모델에 나타나는 응력 분포를 나타낸 것이다. 이 역시 마찬가지로 강제변

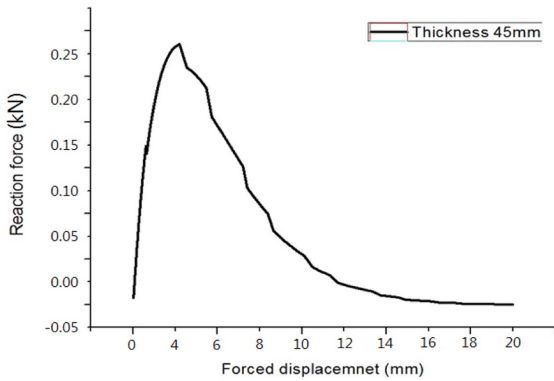


Fig. 7. Graph of reaction force due to forced displacement at static analysis (Thickness of specimen is 45 mm)

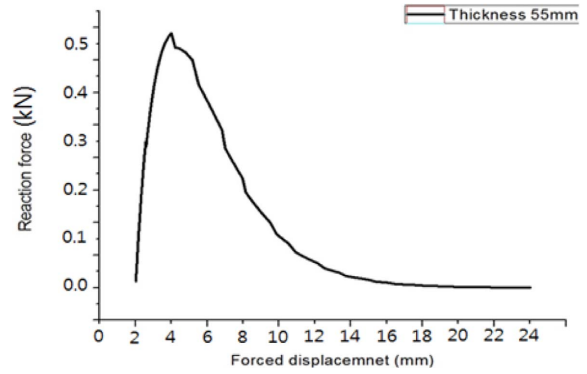


Fig. 10. Graph of reaction force due to forced displacement at static experiment (Thickness of specimen is 55 mm)

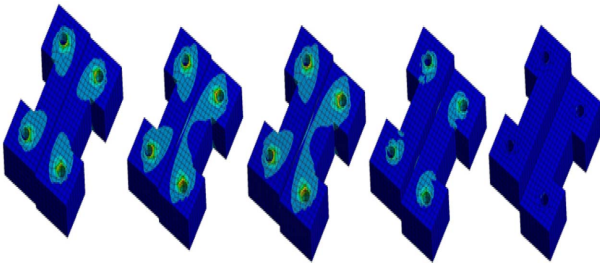


Fig. 8. Change of the equivalent stress according to the progress of forced displacement (Thickness of specimen is 45 mm)

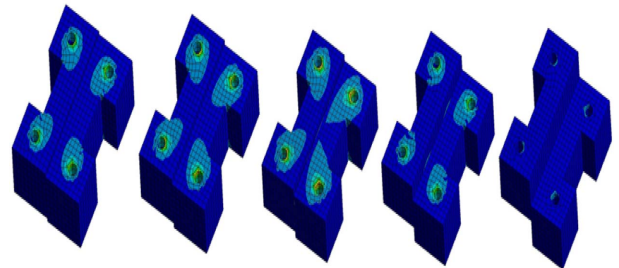


Fig. 11. Change of the equivalent stress according to the progress of forced displacement (Thickness of specimen is 55 mm)

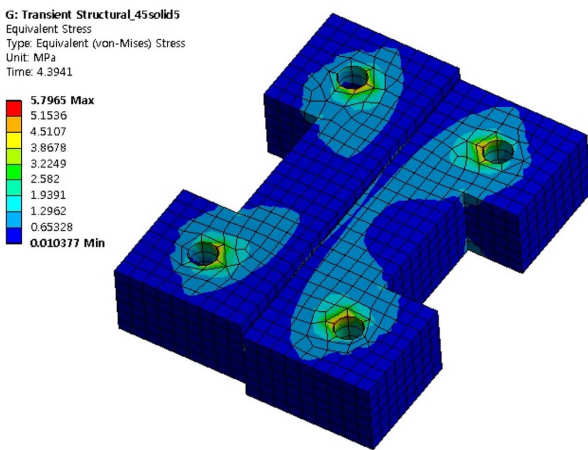


Fig. 9. Stress of the bonded interface at the maximum reaction force (Thickness of specimen is 45 mm)

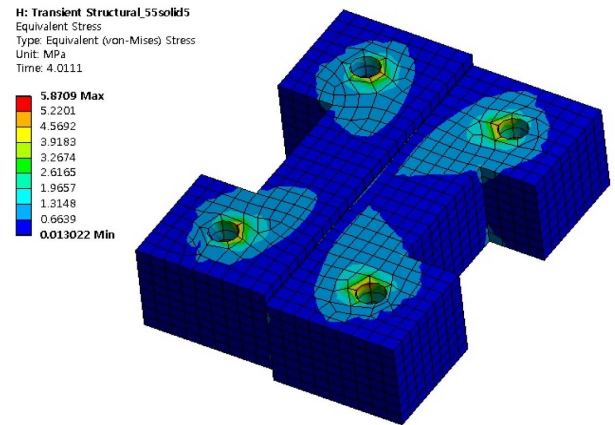


Fig. 12. Stress of the bonded interface at the maximum reaction force (Thickness of specimen is 55 mm)

위가 진행되면서 시험편 모델에 나타나는 응력이 점차 사라지는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 9는 시험편 모델이 최대 반력을 나타냈을 때 즉, 최대 반력이 약 0.28 kN일 때의 응력을 나타낸 것으로 접착계면에서의 응력은 약 0.01038 MPa로 나타났다.

3.3 t = 55 mm인 시험편의 해석 결과

시뮬레이션 해석 결과 두께 t가 55 mm인 DCB 시험편 모

델의 반력 데이터는 Fig. 10과 같이 나타났다. 해당 시험편 모델 역시 앞서 언급한 t가 35 mm, 45 mm인 시험편 모델들과 마찬가지로 비슷한 경향을 보였는데 마찬가지로 강제변위가 약 5 mm 진행되었을 때 최대 반력이 나타났으며, 이 때 최대 반력은 약 0.5 kN으로 나타났다. 최대 반력이 발생된 이후에는 시험편 모델의 접착계면 접착력은 점차 감소하다가 강제변위가 약 12 mm 진행되었을 때 접착계면의 분리가 이루어져 반력이 0에 가깝게 나타났다. Fig. 11은 두

께가 55 mm인 시험편의 해석 결과로 강제변위가 진행됨에 따라 시험편 모델에 나타나는 응력 분포를 나타낸 것이다. 강제변위가 진행되면서 시험편 모델에 나타나는 응력이 점차 사라지는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 12는 시험편 모델이 최대 반력을 나타냈을 때 즉, 최대 반력이 약 0.5 kN일 때의 응력을 나타낸 것으로 접착계면에서의 응력은 약 0.01302 MPa로 나타났다.

#### 4. 실험을 통한 검증

##### 4.1 실험 조건

위에 도시된 Fig. 13은 시뮬레이션 해석 결과를 검증하기 위한 Mode III 타입 DCB 시험편들의 정적 실험 방법을 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용한 인장시험기는 MTS사의 인장시험기이며, 본 연구의 실험 방법 및 목적 상 시험편들을 인장시험기의 상부 로드셀과 하부 로드셀에 직접 연결하는 것이 어렵기 때문에 위에 나타낸 것과 같이 추가적으로 지그를 제작하여 시험편과 인장시험기를 상호 연결하였다. 상부 로드셀은 고정하고, 하부 로드셀에는 -Z축 방향으로 3 mm/min의 강제변위를 부여하여 실험을 수행하였다.

##### 4.2 t = 35 mm 및 45 mm인 시험편들의 실험을 통한 검증

본 연구에서는 시뮬레이션 해석 결과를 검증하기 위하여 정적 실험을 수행하였다. 이에 대하여 상호 비교 및 검증을 위하여 두께 t가 35 mm와 45 mm인 실제 DCB 시험편들의 반력 데이터 그래프와 해석 결과의 반력 데이터 그래프를 다음의 Fig. 14 및 Fig. 15와 같이 나타냈다. 각각 정적

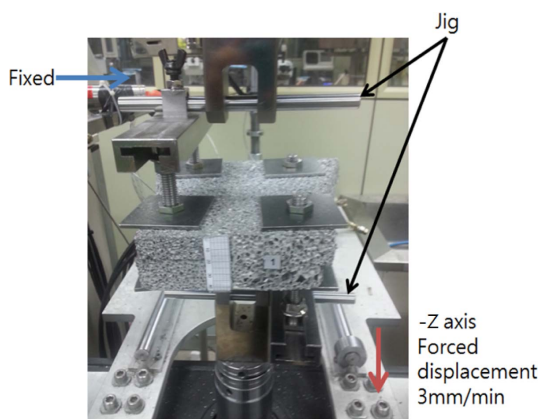


Fig. 13. Conditions for static experiment

Table 3. Experimental conditions for static experiment

Thickness of specimen model	Forced displacement
35 mm	3 mm/min
45 mm	3 mm/min
55 mm	3 mm/min

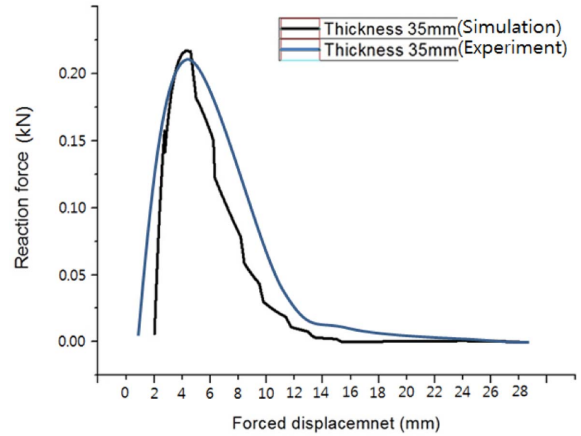


Fig. 14. Comparison between analysis and experimental data (Thickness of specimen is 35 mm)

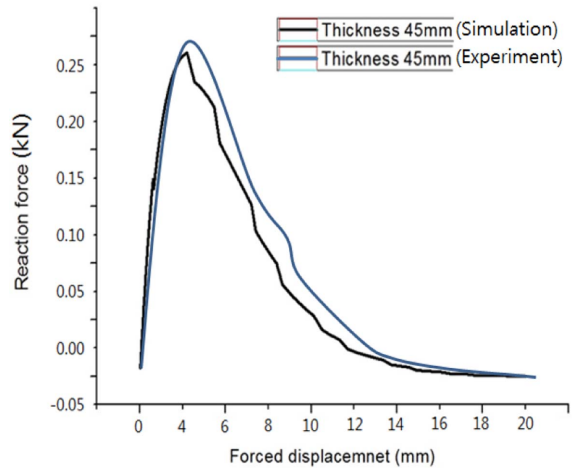


Fig. 15. Comparison between analysis and experimental data (Thickness of specimen is 45 mm)

실험에서의 경우로서 강제변위가 약 6 mm와 5 mm가 진행되었을 때 최대 반력이 나타난 것을 확인할 수 있었다. 두께 t가 35 mm인 경우는 최대 반력이 약 0.22 kN으로서 시뮬레이션 해석에서의 최대 반력이 나타나는 강제변위인 5 mm 이 때 최대 반력인 약 0.25 kN과 비교하였을 때 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 두께 t가 45 mm인 경우는 정적 실험에서의 경우 시뮬레이션 해석에서의 마찬가지로 강제변위가 약 5 mm 진행되었을 때 최대 반력이 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이 때 최대 반력은 약 0.3 kN으로 시뮬레이션 해석에서의 최대 반력인 약 0.28 kN과 비교하였을 때 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 35 mm 및 45 mm의 두께의 시험편들의 경우, 공히 최대 반력이 발생한 이후에는 시뮬레이션 해석과 유사하게 시험편의 접착계면 접착력이 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 강제변위가 약 12 mm 진행된 이후에는 시험편의 접착계면의 분리가 거의 완벽하게 이루어져 반력이 0에 가깝게 나타났다. 그러나 그래

프를 살펴보았을 때 최대 반력이 발생한 이후에는 해석과 실험 데이터 간에 약간의 차이가 발생하는 것을 볼 수 있는데 실험을 수행할 때 시험편의 접착면에 도포된 접착제가 사라지지 않고 남아 강제변위의 진행을 방해하는 접착관성 때문이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 폼으로 제작한 Mode III 타입 DCB 시험편들의 두께에 대한 정적 해석과 검증을 위한 정적 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 시뮬레이션 해석에서는 두께에 따른 즉,  $t$ 가 35 mm, 45 mm, 55 mm인 시험편 모델들 모두 강제변위가 약 5 mm 진행되었을 때 반력이 최대인 것으로 나타났으며, 정적 실험에서는 강제변위가 약 5~6 mm 진행되었을 때 최대 반력이 나타났다. 이에 따라 시뮬레이션 해석과 정적 실험에서의 최대 반력이 나타나는 지점이 거의 동일한 것을 알 수 있다.

2. 시뮬레이션 해석에서 시험편 모델들의 최대 반력은 각각 두께가 35 mm일 때 약 0.25 kN, 45 mm일 때 약 0.28 kN, 55 mm일 때 약 0.5 kN으로 나타났으며, 실험에서 시험편들의 최대 반력은 각각 두께가 35 mm일 때 약 0.22 kN, 45 mm일 때 약 0.3 kN으로 나타났다. 즉, 해석과 실험 모두 두께가 증가함에 따라 시험편 모델 및 시험편에서 나타나는 최대 반력이 증가하는 경향을 보였다.

3. 연구 결과 시뮬레이션 해석 결과와 시험편들의 실험 결과가 유사하게 도출되었다. 따라서 축적된 데이터들을 토대로 별도의 실험 과정 없이도 다른 변수들에 대한 데이터들을 간단하게 확보할 수 있을 것으로 판단되며, Mode III 타입의 DCB 접합구조물의 기계적 특성들을 분석할 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

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

## REFERENCES

1. Sun, H.P., Cheon, S.S., and Cho, J.U., "Shear Experiment and Simulation Analysis at Bonded Surface of Specimen Tapered Double Cantilever Beam with Expanded Aluminum", *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 27, No. 6, 2014, pp. 248-253.
2. Gao, T., Cho, J.U., and Cheon, S.S., "Experiment and Analysis on Impact of Tapered Double Cantilever Beam with Aluminum Alloy", *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 27, No. 2, 2014, pp. 72-76.
3. Choi, H.K., Hong, S.J., Kim, S.H., and Cho, J.U., "Study on Fatigue Analysis of DCB Specimen Bonded", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 13, No. 7, 2012, pp. 2865-2871.
4. Bang, H.J., Lee, S.K., Cho, C.D., Cho, J.U., and Choi, H.K., "Fracture Behavior of Adhesive-Bonded Aluminum Foam with Double Cantilever Beam", *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 38, No. 5, 2014, pp. 521-526.
5. Choi, H.K. and Cho, J.U., "Experimental Study on Fracture Behavior of Double Cantilever Beam Specimen with Aluminum Foam", *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 14, No. 5, 2012, pp. 37-41.
6. Seo, Y.H. and Cho, Y.H., "Design, Fabrication, Static Test and Uncertainty Analysis of a Resonant Microaccelerometer Using Laterally-driven Electrostatic Microactuator", *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 25, No. 3, 2001, pp. 520-528.