

## 두께에 따른 알루미늄 폼의 파괴 특성에 관한 연구<sup>§</sup>

고 등\* · 조재웅<sup>\*†</sup>

\* 공주대학교 대학원 기계공학과, \*\* 공주대학교 기계자동차공학부

### A Study on Fracture Characteristic of Aluminum Foam by Thickness

Teng Gao\* and Jae Ung Cho<sup>\*†</sup>

\* Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju University Nat'l Univ.,

\*\* Div. of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju Nat'l Univ.

(Received March 29, 2015 ; Revised May 6, 2015 ; Accepted May 7, 2015)

**Key Words:** Aluminum Foam(알루미늄 폼), Closed Cell(폐쇄형), Foam Metal(발포금속), Finite Element Analysis(유한요소해석), Thickness(두께)

**초록:** 발포금속은 우수한 물리적 특성과 역학적 성능 때문에 많은 첨단기술 분야에 널리 사용되고 있다. 폐쇄형 알루미늄 폼은 발포금속 중에 하나이며, 우수한 충격에너지 흡수하는 성능 때문에 자동차와 항공기에 많이 쓰이고 있다. 본 연구에서는 폐쇄형 알루미늄 폼의 충격 실험을 통해 두께에 따른 기계적 특성을 분석하였으며, 검증으로 시뮬레이션 해석을 하였다. 시뮬레이션 해석 방법으로는 ANSYS 를 이용하여 실험과 똑 같은 경계조건으로 유한요소해석을 진행하였다. 실험과 해석의 결과들을 비교해보면 10mm, 20mm, 30mm 인 경우에 20mm 인 경우는 제일 효율적인 것으로 사료된다. 20mm 의 경우가 시험편의 두께에 비하여 세가지 모델들의 경우에 있어 충격 에너지의 흡수가 가장 큰 것으로 나타났다. 본 연구의 결과들을 이용하면, 알루미늄 폼으로 된 기계 구조물의 개발에 필요한 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

**Abstract:** Because foam metal has the excellent physical characteristics and mechanical performance, they are applied extensively into a lot of advanced technology areas. The aluminum foam with closed cell is one of the foam metals. It is applied widely into automobile and airplane because of the excellent absorption performance of impact energy. In this study, the mechanical characteristics by thickness was analyzed through the impact experiment of closed-cell aluminum foam, and the simulation analysis was performed for the verification. As the simulation analysis method, a finite-element analysis was carried under the same boundary conditions as the experiment by using ANSYS. By comparing with the results of experiment and simulation, it was thought that the case of thickness of 20mm was the most efficient of among the cases of thicknesses of 10mm, 20mm and 30mm. At the case of thickness of 20mm, the absorption energy by comparing with the specimen thickness is shown to become the most among three models. By using the result of this study, it is thought that it can apply the material necessary to develop the mechanical structure with aluminum foam.

### 1. 서론

발포금속은 구조와 기능을 일체화하는 신소재이다. 발포금속의 우수한 물리적 특성과 역학적 성

능 때문에 항공우주, 국방, 차폐 보호, 충격에너지 흡수 등 첨단기술 분야에 널리 사용되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 알루미늄 폼은 내부에 많은 공기 셀 격자를 형성하고 있는 금속소재로, 알루미늄이나 알루미늄 합금을 용해 후 증점제와 발포제를 첨가하여 스펀지형상으로 발포시켜 제조한 초경량 금속이다. 기공의 형태에 따라서 개방형(Opened-cell)과 폐쇄형(Closed-cell)으로 나누어지는데 폐쇄형의 공기 셀 격자가 서로 독립하고 폐쇄하는 반면에 개방형의

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2015. 4. 2-3., 서귀포KAL호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, jucho@kongju.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

공기 셀 격자가 서로 연결된다.<sup>(4-6)</sup> 이러한 신소재는 가벼운 구조와 우수한 충격에너지 흡수하는 성능 때문에 널리 사용되고 있으며, 미래자동차와 다른 교통 기계에 사용될 수 있어 최근에 알루미늄 폼에 대한 역학적 연구는 많이 진행해왔다.<sup>(7-12)</sup> 본 연구에서 사용된 알루미늄 폼은 한국의 주식회사 폼텍(Foam tech.)에서 제작된 폐포형(Closed-cell) 재료이다. 용해된 알루미늄에 1.5wt%Ca 를 넣어 점성(Viscosity)을 증가 시킨 뒤 1.5wt%TiH<sub>2</sub> 발포제(Foaming agent)를 넣어 발포(Foam)시킨 뒤 사각형 모양으로 굳혀 연구에 쓰일 알루미늄 폼을 제작하였다. 기공의 셀 크기는 평균 3mm 이며 밀도는 약 128kg/m<sup>3</sup> 이다. 알루미늄 폼은 무질서 구조이기 때문에 발포 구멍의 평균 크기로 정의된다. 또한 충격에너지가 커짐에 따라 최적의 시험편의 두께는 커져야 된다. 본 연구에서는 먼저 실험을 통하여 시험편의 변형 모습을 관찰하고 시간-하중, 시간-에너지의 관계를 분석하였다. 본 연구에서는 실험재료와 동일한 물성을 지닌 유한요소모델(Finite element model)을 가지고 ANSYS 를 통하여 충격해석을 수행함으로써 하중, 에너지 및 변형량이 실험 데이터와 비슷한지를 검증하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 실험 조건

본 연구에서는 충격에너지가 8J 로 유지하고 시험편의 10mm, 20mm, 30mm 인 두께가 3 가지 경우에 따라서 연구를 진행하였다. Fig. 1 에서 보면 30mm 인 경우의 실제 사용된 시험편이 나왔는데 시험편의 넓이는 가로, 세로 100 mm 이며, 각 시험편의 두께가 10mm, 20mm, 30mm 로 이루어져 있다.

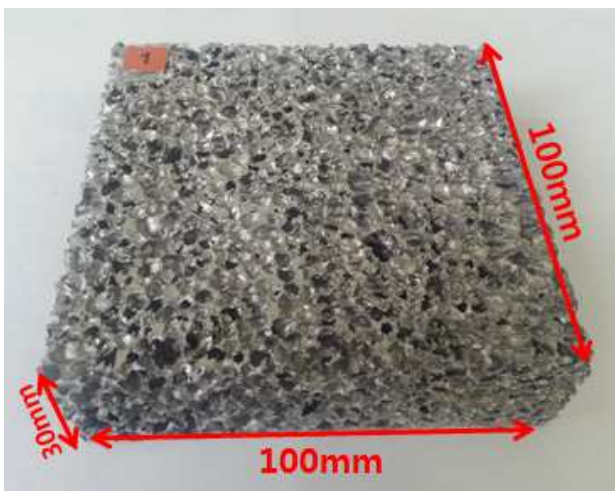


Fig. 1 Configuration of specimen

Fig. 2 는 실험장비의 사진이며, 알루미늄 폼의 충격 특성 실험을 수행하기 위하여 INSTRON 사의 Dynatup 9250HV 를 사용하였다. Dynatup 9250 HV 는 최대 20m/s 의 속도를 낼 수 있으며, 4.6J 에서부터 945J 까지 충격에너지를 발생 시킬 수 있다. 또한 실험 사용된 스트라이커의 직경은 12.5 mm 이다. 이 장치를 이용하여 먼저 알루미늄 폼의 시험편(Specimen)을 충격시험기에 고정시킨 후, 스트라이커(Striker)가 시험편에 8J 의 충격에너지를 가하는 실험을 하였다.

### 2.2 해석 조건

본 연구에서 수행된 3 개의 case 에 대하여 검증을 하기 위하여 시뮬레이션을 하고 실험과 해석으로서 비교하였다. 실험과 동일한 조건하에 해석이

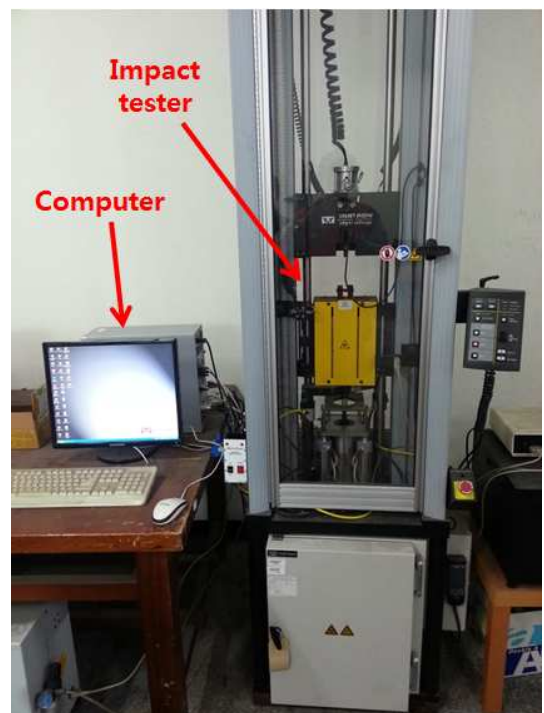


Fig. 2 Setup of aluminum foam at impact tester

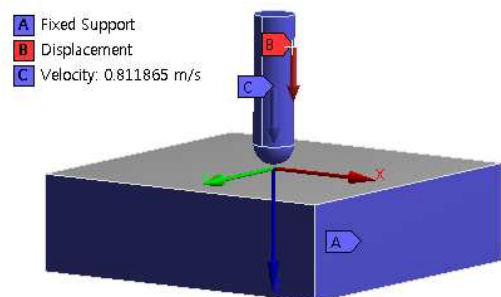


Fig. 3 Analysis condition of specimen

수행되어야 하기 때문에 실험과 동일한 크기의 모델을 CATIA V5 를 이용하여 3D 모델링하였다. 본 연구에서 육면체 요소로 분할하였으며, 각 모델의 절점 및 요소 수는 Table 1 에 나타내었다. Fig. 3 과 같이 알루미늄 폼을 Fixed support 로 구속하였으며, Strike 실험과 동일한 8J 충격에너지와 0.811865m/s 의 속도를 부여하였다. 또한 해석에서 스트라이커에 X 축과 Y 축 방향으로 움직일 수 없는 변위를 부여하지 않으면 스트라이커가 시험편에서 받는 반력 때문에 위아래로 가지 않고 다른 방향으로 가기 때문에 스트라이커에 X 축과 Y 축 상에서는 움직일 수 없는 변위를 부여하였다. 그리고 스트라이커는 강체로 되어 있어 변형이 되지 않는다고 가정하고, 실제로 충격 실험하는 시험장치에서의 스트라이커의 질량 및 그 충격에너지에 맞추었다. Table 2 는 본 연구에서 사용된 알루미늄 폼의 물성치를 나타낸 것이다.

### 3. 실험결과 및 해석결과 비교

#### 3.1 시험편의 두께가 10mm 인 경우의 실험과 해석 결과

Fig. 4 와 Fig. 5 는 Striker 에 0.811865m/s 의 속도를 주어 8J 의 충격 에너지를 10mm 인 두께의 알루미늄 폼에 가하였을 때, 실험 시험편의 모양과 해석결과이다.

**Table 1** Nodes and elements of specimen

	10mm	20mm	30mm
Nodes	4498	3339	8190
Elements	3212	2460	6692

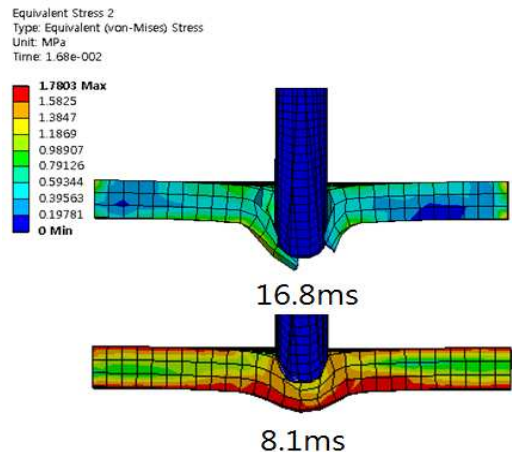
**Table 2** Property of aluminum foam

Material	Al - Foam
Density(kg/m <sup>3</sup> )	400
Young's Modulus (GPa)	2.374
Poisson's Ratio	0.29
Bulk Modulus (GPa)	1.88
Shear Modulus (GPa)	0.92
Yield Strength(MPa)	1.8

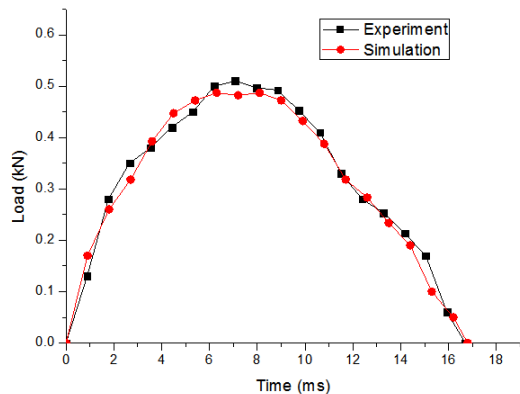
Fig. 4 는 실제 실험한 시험편의 앞, 뒷면의 사진으로서 스트라이커가 시험편을 관통하는 것을 확인하였다. Fig. 5 에서 보면 스트라이커가 10mm 인 두께의 알루미늄 폼을 뚫고 나가는 것을 볼 수 있다. 또한 8.1ms 에서 최대등가응력을 받는 것을 확인하였으며, 16.8ms 에서 스트라이커가 시험편을 관통하고 시험편에 발생된 큰 응력이 대부분 사라지는 것을 확인하였다.



**Fig. 4** Experimental picture in case of thickness of 10mm



**Fig. 5** Contour of equivalent stress at 10mm of thickness of specimen for simulation



**Fig. 6** Graph of load due to time for simulation and experiment in case of 10mm of thickness of specimen

Fig. 6 은 시험편의 두께가 10mm 인 경우에서의 실험과 해석의 시간에 대한 하중 결과를 비교한 그래프이다. 그래프를 보면 두 결과 비슷하게 나온 것을 확인하였으며, 하중이 모두 커지고 0.5kN 즈음 유지하다가 급격히 떨어지는 형상을 보인다. 또한 실험에서 7.1ms 에서 최대하중은 0.51kN 으로 나타났으며, 해석에서 8.1ms 에서 최대하중은 0.487kN 으로 나타났다. 전체적으로 실험결과의 값들이 시뮬레이션 해석결과의 값보다 높은 것으로 나타났다. 이는 실험에서 시험편과 스트라이커 사이에 마찰력이 있기 때문이다.

Fig. 7 은 시험편의 두께가 10mm 인 경우에서의 실험과 해석의 시간에 따른 에너지 결과를 비교한 그래프이다. 그래프를 보면 대체적으로 비슷한 양상으로 증가하고 있다. 실험에서는 16.7ms 의 시간 동안에 약 4.4J 의 에너지가 발생했고, 해석에서는 16.8ms 의 시간 동안에 약 4.15J 의 에너지가 발생한 것을 확인할 수 있다. 또한 스트라이커에 8J 의 충격에너지를 부여하지만 시험편의 두께가 10mm 인 경우에 시험편은 4.4J 의 충격에너지만 흡수한 것을 알 수 있었다. 앞에 서술했던 것과 같은 이유로 전체적으로 실험결과의 값이 시뮬레이션 해석결과의 값보다 높은 것으로 나타났다.

3.2 시험편의 두께가 20mm 인 경우의 실험과 해석 결과

Fig. 8 과 Fig. 9 는 스트라이커에 0.811865m/s 의 속도를 주어 8J 의 충격 에너지를 20mm 인 두께의 알루미늄 폼에 가하였을 때 실험 시험편의 모양과 해석결과이다. 실험과 해석 모두 스트라이커는 알루미늄 폼을 관통하고 나가는 것을 볼 수 있다.

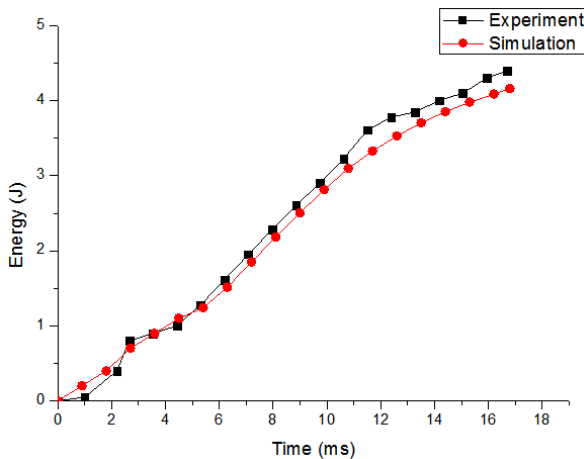


Fig. 7 Graph of energy due to time for simulation and experiment in case of 10mm of thickness of specimen

Fig. 9 에서 보면 시뮬레이션 해석에 16.52ms 일 때 최대 등가응력을 발생하였고, 시험편의 하부면의 알루미늄 폼은 압축이 되며 소성변형을 발생하였다. 또한 22.5ms 에서 스트라이커가 20mm 인 두께



Fig. 8 Experimental picture in case of thickness of 20mm

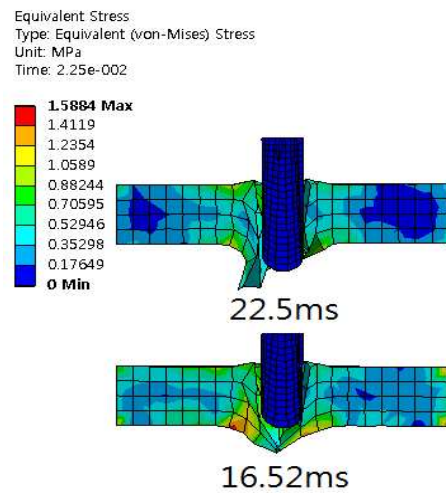


Fig. 9 Contour of equivalent stress at 20mm of thickness of specimen for simulation

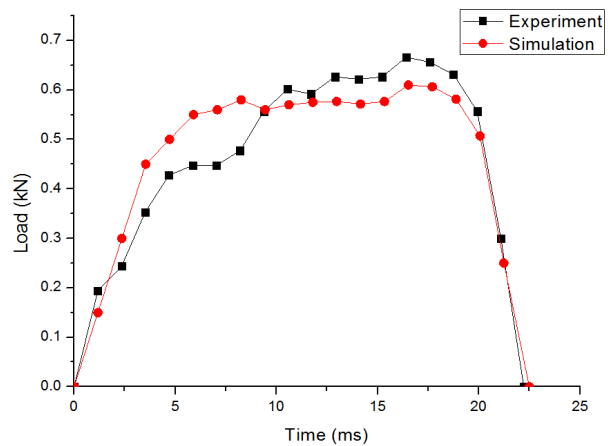


Fig. 10 Graph of load due to time for simulation and experiment in case of 20mm of thickness of specimen

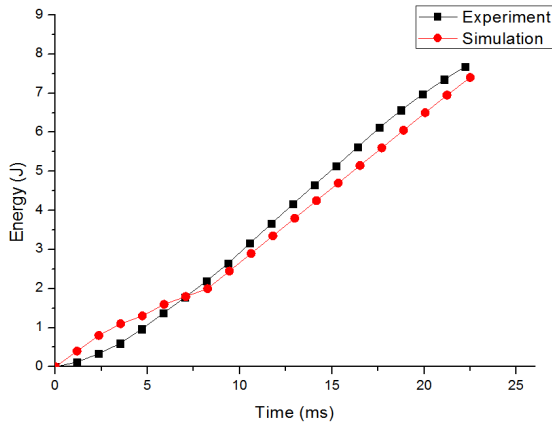


Fig. 11 Graph of energy due to time for simulation and experiment in case of 20mm of thickness of specimen

의 알루미늄 폼을 뚫고 나가는 것을 볼 수 있으며, 큰 응력이 대부분 사라지는 것을 확인하였다.

시험편의 두께가 20mm 인 경우에서의 알루미늄 폼에 가해진 하중과 알루미늄 폼이 흡수한 충격 에너지를 실험과 해석을 비교하여 Fig. 10, 11 과 같이 그래프로 나타냈다. Fig. 10 은 알루미늄 폼에 가해지는 하중을 비교한 것이고 Fig. 11 은 알루미늄 폼이 흡수한 에너지를 비교한 것이다. Fig. 10 에서 보면 두 결과가 비슷하게 나온 것을 확인하였으며, 하중이 모두 커지고 0.6kN 유지되다가 약 20ms 에서 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 또한 실험에서는 16.4ms 에서 최대하중은 0.66kN 으로 나타났으며, 해석에서 16.52ms 에서 최대하중은 0.61kN 으로 나타났다. Fig. 11 에서 보면 실험에서는 22.2ms 의 시간 동안에 약 7.67J 의 에너지가 발생했고, 해석에서는 22.5ms 의 시간 동안에 약 7.4J 의 에너지가 발생한 것을 확인 할 수 있다. 또한 스트라이커에 8J 의 충격에너지를 부여하지만 시험편의 두께가 20mm 인 경우에서의 시험편은 7.67J 의 충격에너지만 흡수한 것을 알 수 있었다.

### 3.3 시험편의 두께가 30mm 인 경우의 실험과 해석 결과

Fig. 12 와 Fig. 13 은 스트라이커에 0.811865m/s 의 속도를 주어 8J 의 충격 에너지를 30mm 인 두께의 알루미늄 폼에 가하였을 때, 실험 시험편과 해석결과이다. 시험편의 두께가 10mm, 20mm 의 경우와 달리 스트라이커가 30mm 인 두께의 알루미늄 폼을 뚫지 못하고 9.3mm 만 뚫린 것을 볼 수 있다. Fig. 13 에서 보면 9.6ms 일 때 최대 증가 응력을 발생하였다. 또한 15.2ms 일 때 스트라이



Fig. 12 Experimental picture in case of thickness of 30mm

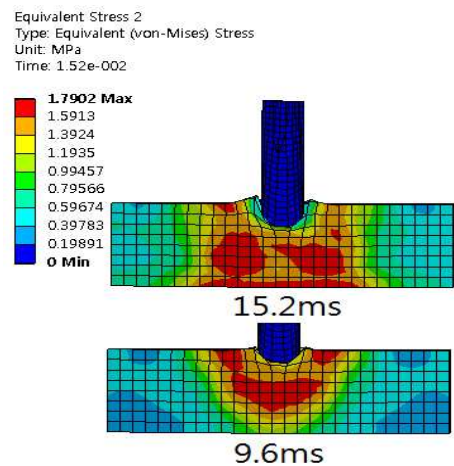


Fig. 13 Contour of equivalent stress at 30mm of thickness of specimen for simulation

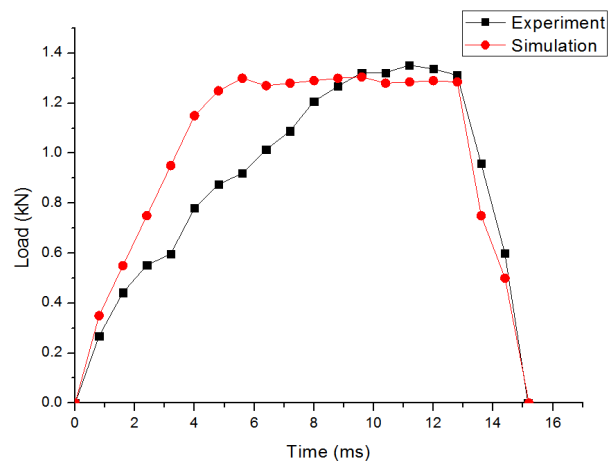


Fig. 14 Graph of load due to time for simulation and experiment in case of 30mm of thickness of specimen

커가 멈추었으며, 상부의 알루미늄 폼은 소성변형을 발생하였고 하부 알루미늄 폼은 소성변형을 발생하지 않지만 증가응력은 크게 보인다.

시험편의 두께가 30mm 인 경우에서의 알루미늄 폼에 가해진 하중과 알루미늄 폼이 흡수한 충격

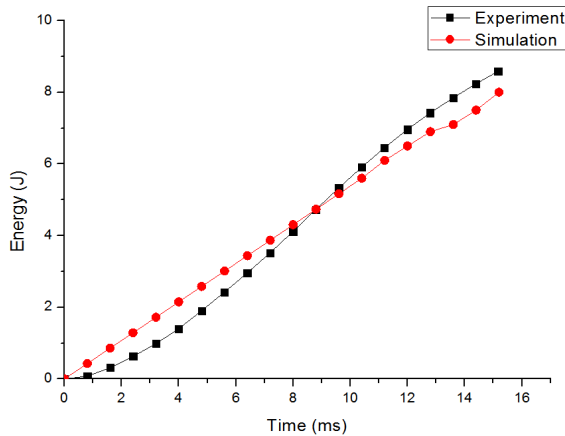


Fig. 15 Graph of energy due to time for simulation and experiment in case of 30mm of thickness of specimen

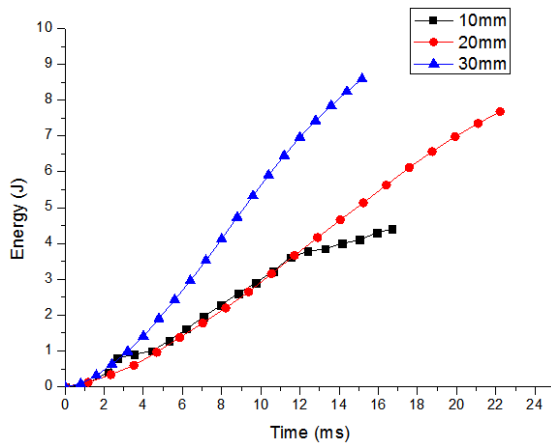


Fig. 16 Graph of energy due to time at experiment on specimen thicknesses of 10mm, 20mm and 30mm

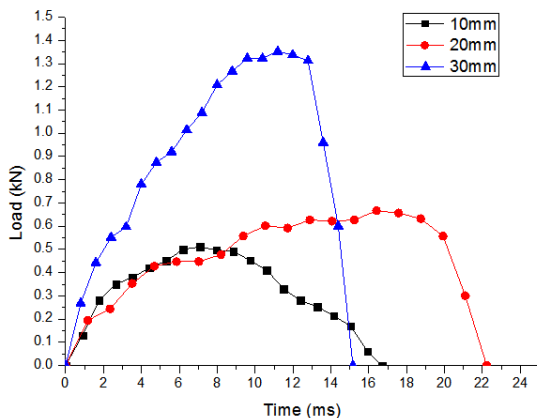


Fig. 17 Graph of load due to time at experiment on specimen thicknesses of 10mm, 20mm and 30mm

에너지를 실험과 해석을 비교하여 Fig. 14, 15 와 같이 그래프로 나타냈다. Fig. 14 는 알루미늄 폼에

가해지는 Load 를 비교한 것이고 Fig. 15 는 알루미늄 폼이 흡수한 Energy 를 비교한 것이다. Fig. 14 에서 보면 두 결과 비슷하게 나온 것을 확인하였으며, 하중이 모두 커지고 1.3kN 유지되다가 약 13ms 에서 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 또한 실험에서 11.16ms 에서 최대하중은 1.35kN 으로 나타났으며, 해석에서 12ms 에서 최대하중은 1.29kN 으로 나타났다. Fig. 15 에서 보면 실험에서는 15.2ms 의 시간 동안에 약 8.58J 의 에너지가 발생했고, 해석에서는 15.2ms 의 시간 동안에 8J 의 에너지가 발생한 것을 확인 할 수 있다. 또한 스트라이커에 의하여 8J 의 충격에너지가 가해지지만 시험편의 두께가 30mm 인 경우에서의 시험편은 충격에너지를 전부 흡수한 것을 알 수 있었다.

Fig. 16 과 Fig. 17 은 각 두께 별로 시간에 따른 알루미늄 폼이 흡수한 충격에너지와 하중을 비교한 실험결과이다. 알루미늄 폼의 두께가 커지면 클수록 알루미늄 폼이 흡수하는 충격 에너지가 증가한다. 또한 알루미늄 폼의 두께가 증가하면 최대 하중도 증가한다. 또한 20mm 인 경우와 30mm 인 경우에는 최대 하중의 차이가 크지만 Fig. 16 에서 보면 20mm 인 경우와 30mm 인 경우에 마지막 파단 직전에 흡수한 충격에너지가 크게 나타나고 이 두 경우가 0.9J 의 차이만 있기 때문에 시험편의 두께가 다소 작은 20mm 인 경우가 제일 효율적인 것이라고 사료된다. 즉, 20mm 의 경우가 시험편의 두께에 비하여 세가지 모델들의 경우에 있어 충격 에너지의 흡수가 가장 큰 것으로 나타났다. 본 연구에서 나온 실험결과와 시뮬레이션결과가 매우 비슷하게 나온 것을 확인하였다. 해석시에 알루미늄 폼의 전체 무게를 일정하게 유지한다는 전제하에 평균 기공크기를 크게 하면 그에 반비례하여 알루미늄 폼의 밀도가 작아질 것이고, 알루미늄 폼의 기공을 작게 하면 알루미늄 폼의 밀도가 커질 것이다. 이러한 수치모델 시뮬레이션의 해석 결과는 실제로 관련 알루미늄 폼의 구조물을 개발할 때 상당히 유효한 기계적 변형 및 강도예측 정보를 제공할 수 있다고 사료된다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 많은 분야에서 충격흡수 심재로 사용되고 있는 폐쇄형 알루미늄 폼의 충격 해석을 통해 기계적 특성을 분석하였다. 알루미늄 폼의 10mm, 20mm, 30mm 인 두께가 3 가지 경우에 따라서 충격 실험과 시뮬레이션 해석을 하였으며, 다

음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 실험결과는 시험편의 두께가 10mm 와 20mm 인 경우에 스트라이커가 시험편을 관통하였고, 두께가 30mm 경우에 스트라이커가 알루미늄 폼을 9.3mm 로 뚫은 것을 확인하였다.

(2) 3 가지 경우에 실험과 해석결과가 비슷하게 나온 것을 확인하였으며, 그래서 실험 데이터 검증으로 본 연구에 나온 시뮬레이션 데이터가 실제적으로 적용될 수 있다는 것을 알 수 있다.

(3) 시험편의 두께가 10mm 인 경우의 실험결과는 4.4J 의 충격에너지를 흡수하고 최대하중은 0.51kN 으로 나타났으며, 두께가 20mm 인 경우의 실험결과는 7.68J 의 충격에너지를 흡수하고 최대하중은 0.626kN 으로 나타났으며, 두께가 30mm 인 경우의 실험결과는 8.58J 의 충격에너지를 흡수하고 최대하중은 1.35kN 로 나타났다. 전체적으로 비교해보면 알루미늄 폼의 두께가 클수록 알루미늄 폼에 가해진 하중은 커지는 현상을 확인하였다. 시험편의 두께가 20mm 의 경우가 시험편의 두께에 비하여 세가지 모델들의 경우에 있어 충격 에너지의 흡수가 가장 큰 것으로 나타나 시험편의 두께가 20mm 인 경우가 가장 효율적으로 보인다.

(4) 알루미늄 폼 기공의 셀 크기는 평균 3mm 이며 밀도는 약 128kg/m<sup>3</sup> 인 경우에 있어 8J 인 충격에너지를 시험편에 가할 때, 시험편의 두께가 20mm 의 경우가 가장 효율적인 것으로 사료된다.

(5) 본 연구의 결과들은 충격을 받는 기계 구조물에 장착된 알루미늄 폼의 개발에 필요한 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

“이 논문은 2014 년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.”

## 참고문헌

(References)

- (1) Huiwen, H., Wenjun, L. and Zhenyuan, L., 2012, "Impact Crash Analyses of an Off-road Utility Vehicle - Part II: Simulation of Frontal Pole, Pole Side, Rear Barrier and Rollover Impact Crashes," *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 17, No. 2, pp.163~172.
- (2) Jeong, K. Y., Cheon, S. S. and Munshi, M. B., 2012, "A Constitutive Model for Polyurethane Foam with Strain Rate Sensitivity," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 7, 2033~2038.
- (3) Kim, J. C. and Cheong, S. K., 2012, "Microscopic Analysis of Effect of Shot Peening on Corrosion Fatigue Behavior of Aluminum Alloy," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 11, pp. 1381~1389.
- (4) Lee, C. J., Son, Y. K., Lee, J. M., Lee, S. B. and Byun, S. D., 2012, "Delamination Limit of Aluminum Foil-Laminated Sheet During Stretch Forming," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 4, pp. 413~420.
- (5) Suh, Y. S., Park, M. S. and Song, S., 2011, "Modeling of Size-Dependent Strengthening in Particle-Reinforced Aluminum Composites with Strain Gradient Plasticity," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 7, pp. 745~751.
- (6) Nabil G., Elin, J., Vasant, M. and Prasadu, P., 2013, "Performance of an AASHTO Beam Bridge Prestressed with CFRP Tendons," *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 110~121.
- (7) Huiwen, H., Wenjun, L. and Zhenyuan, L., 2012, "Impact crash analyses of an off-road utility vehicle- Part II: Simulation of frontal pole, pole side, rear barrier and rollover impact crashes," *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 17, No. 2, pp.163~172.
- (8) Julien, M., Jose, S. C., Christoph C. and Masoud M., 2013, "Structural Strengthening with Prestressed CFRP Strips with Gradient Anchorage," *Journal of Composites for Construction*, Vol. 17, No. 5, pp. 651~661.
- (9) Robin, P. and Thomas, U., 2013, "Use of Ultrasound Excited Thermography Applied to Massive Steel Components: Emerging Crack Detection Methodology," *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 18, No. 6, pp. 455~463.
- (10) Junyuan, Z., Xuan, H., Disi, T. and Hongbin, W., 2011, "CAE analysis and design modification for rear seat safety during vehicle frontal crash," *Qiche Gongcheng/Automotive Engineering*, Vol. 33, No. 9, pp. 767~771.
- (11) Jo, S. W. and Kwak, S. Y., 2012, "Analysis of Impact Behavior of Al-Alloy Castings Considering Internal Defects," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 12, pp. 1599~1604.
- (12) Park, S. B., Han, D. H. and Kang, L. H., 2014, "Investigation of Impact Detection Characteristics of Piezoelectric Paint According to Boundary Conditions," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 38, No. 12, pp. 1335~1343.