
구조용 경량 알루미늄 발포금속의 기계적 특성 연구 분석

마정범^{1*}, 이정익²

¹한양대학교 기계공학부, ²인하공업전문대학 기계공학부 기계설계과

Mechanical Characteristics Analysis of Structural Light-weight Aluminum Foam

Jeong Beom Ma^{1*}, Jeong Ick Lee²

¹School of Mechanical Engineering, Hanyang University

²Dept. of Mechanical Design, Division of Mechanical Engineering INHA Technical College

요약 대표적인 경량금속 중의 하나인 알루미늄 폼재의 연구동향을 기계적인 측면에서 고찰하여 보았다. 특히 기공(pore)을 가진 알루미늄재료는 난연성, 감쇠특성, 에너지흡수 성능 등 여러 측면에서 기존의 폴리머 폼재보다 우수한 기계적 성능을 가지고 있고, 더욱이 재활용이 가능하다는 면에서 환경보호에 관심이 집중되고 있는 현 시점에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 폼재의 일반적 특성, 에너지 흡수 및 소음흡수 특성에 대해 살펴보고 폼재가 적용된 사례들에 대한 분석을 통해 향후 폼재와 외곽 구조재의 접합문제 등에 대한 제언을 하였다.

• **주제어** : 알루미늄 폼재, 소리 및 에너지 흡수, 댐핑 특성, 경량구조, 크래쉬박스, 빌딩

Abstract Aluminum foam is one of the representative light-weight materials. In this study we analyzed the mechanical properties of the aluminum foam structures. Aluminum materials with pores have novel mechanical characteristics such as flame retardancy, damping, and energy absorption which are superior to those of polymer foam. Furthermore its reusable properties draw considerable interests. General properties, energy and acoustic absorption will be investigated and future research issues such as binding techniques of foam materials with other structures will be discussed through foam application examples.

• **Key Words** : Aluminum Foams, Sound and Energy Absorption, Damping Property, Light-weight Construction, Crash-box, Binding

1. 서론

금속 폼재는 과학적인 측면에서 또, 산업용 응용제품의 측면에서 점차 관심을 받고 있는 연구 분야 중 하나이다. 폼재의 제조 방법은 여러 가지가 있으나, 본 논문에서는 배합조건 혹은 공정기술 보다는 금속 폼재 특히 알루미늄 폼재의 자동차 적용 사례를 중심으로 고찰해 보고자 한다.

폼재는 자동차설계에 있어 응용제품으로 경량구조물,

충격에너지 흡수재, 음향감쇠용 격자 구조물, 단열재에 이르기까지 다양하게 적용될 수 있다. 특히 대형화물차용 리프트암, 승용차 혹은 열차용 크래쉬박스 그리고 자동차용 브라켓 등이 그 예라 할 수 있다[1]. 자동차에 적용될 수 있는 다른 구조물을 살펴보면 필러류, 프레임류, 후방배면보호장치, 측방배면보호장치, 플로어 판넬 등이 있다[2]. 또한 잠재적인 시장으로 선박건조용 판재, 항공기 구조용 판넬, 토목공사용 거푸집 등으로 응용이 가능

*교신저자 : 마정범(jbma218@hotmail.com)

접수일 2011년 6월 15일 수정일 2011년 8월 26일 게재확정일 2011년 9월 12일

하다. 특히, 알루미늄 폼제는 친환경 소재로 재활용이 가능하다는 점에서 기존에 유사한 기능을 가진 폴리머 폼제의 대체재로 관심을 높여지고 있다.

본 논문에서는 폼제의 특성에 대하여 파악해 보고 자동차에 응용하기 위해 적용을 검토한 바 있는 내용을 분석해 보았다. 이러한 분석결과를 바탕으로 향후 경량화 금속재료로서의 알루미늄 폼제가 지향해야 할 연구주제에 대하여 논하였다.

2. 폼제의 특성

2.1 일반적인 성질

금속 폼제는 매크로 또는 마이크로 구조에 있어 상당히 복잡한 형태를 이루고 있다. 마이크로 구조와 국부적인 기계적 특성은 재료의 배합조건, 폼 형성과 냉각조건, 그리고 추가적인 재료의 후열처리 조건에 따라 다르다. 예를 들면, 열처리의 적용 여부 및 조건에 따라 A16계 폼제의 압축강도는 3배까지 차이가 난다[1]. 기공의 크기, 기공 벽의 곡률과 같은 매크로 크기의 형태는 기계적 특성을 결정짓는 주요 인자이다. 이러한 특성은 내재적으로 통계적 특성을 가지고 있으며, 공정 조건에 따라 그 변화가 크기 때문에 신뢰할 수 있는 알루미늄 폼제의 특성을 나타내는 데이터베이스를 구축하는 것은 쉬운 일이 아니다. 표 1[1]에 대표적인 알루미늄 폼제의 기계적 특성을 정리하였다.

[Table 1] General properties of aluminum foam materials

특성	제조사		
	Cymat	Alporas	Alulight
밀도(gcm ⁻³)	0.069~0.54	0.18~0.24	0.3~0.7
기공 직경(mm)	3~25	2~10	2~10
셀벽 두께(μm)	50~85	-	50~100

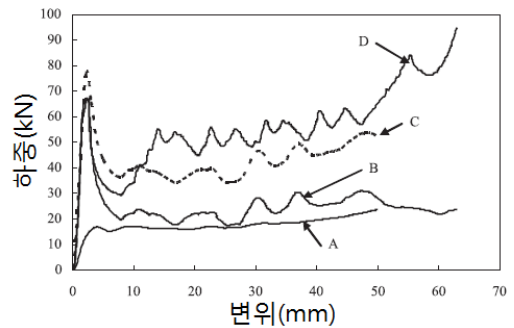
2.2 경량 구조물

폼제는 공학용 부품의 중량대비 굽힘 강성을 최적화 하는데 사용할 수 있다. 예를 들면, 일정한 중량, 폭, 길이를 가진 편평한 폼 판넬의 굽힘 강성은 대략적으로 그 두께에 비례하고, 역으로 밀도에 반 비례하는 관계가 있다. 하지만, 실질적인 최적화는 더 많은 연구를 필요로 한다. 어떠한 경우든, 경량 구조는 하중-변위 선도의 준정적이

면서 역이 가능한 탄성구간을 이용한다[1].

2.3 에너지 흡수

높은 기공률로 인해 폼제는 변형되었을 때 다량의 기계적 에너지를 흡수할 수 있고, 반면에 응력은 재료의 압축강도에 따라 제한적이다. 그러므로 폼제는 충격에너지 흡수체로 작용하고 이는 충돌 상황에서 가속도를 제한하는 역할을 한다. 이 모드는 하중-변위 선도의 평탄하고 비가역적인 구간을 활용하는 것이다. 그림 1[1]에 자동차에 응용되는 크래쉬박스에 대한 하중-변위 곡선을 나타내었다. 위에서 언급한 평탄한 비가역구간(plateau)을 확인할 수 있다. 금속 폼제는 폴리머 기반의 폼제에 비해 상대적으로 높은 좌굴강도(20MPa)를 가지므로 폼제를 적용한 응용제품을 쉽게 찾아볼 수 있다.



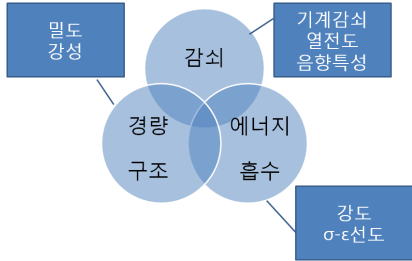
[Fig. 1] Load-displacement curves: A-pure foam, B-empty crash box, C-sum of A and B, D-foam filled crash box

2.4 음향 및 열 제어

폼제는 진동을 감쇠시키고 일정한 조건하에서 소리를 흡수하며 열전도율도 낮다. 이러한 성질은 우수한 흡음재인 폴리머 폼제보다 뛰어나지는 않지만, 폼제의 다른 특성들과 조화를 이루면 매우 유용하게 사용될 수 있다. 이를 응용한 제품으로 지지대의 미로구조와 그와 연관된 공기충진 보이드와 같은 폼의 내부 형상을 이용한 것이 있다[1].

전통적으로 폴리머 폼이 흡음재로 사용되어 왔으나, 친환경 관련 재활용이 가능한 소재에 대한 관심이 높아지면서 소음과 진동 저항용 판넬을 자동차 플로어, 칸막이벽, 엔진마운트 브라켓 등에 사용하고자 하는 검토를 하고 있다. 소음 저감을 위한 가장 중요한 주파수 영역은

400~4,000Hz이다. 폴리머 폼재와 달리 금속 폼재는 열저항성이 뛰어나고 자기 지지형 구조를 가지고 있는 것이 장점이다[2]. 그림 2에 자동차산업 분야에서 응용이 가능한 금속 폼재의 예를 표현하였다. 각 요구성능 간의 교차구간은 두 가지 기능을 동시에 만족하는 영역이고, 세 기능을 모두 만족하는 가운데 영역이 궁극적으로 추구해야 할 폼재의 성능이라 하겠다.



[Fig. 2] Examples of application of foam materials for automotive industry

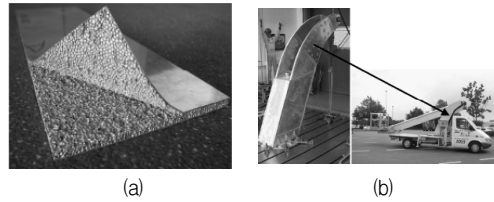
3. 응용제품 예시

3.1 알루미늄 폼 샌드위치 기술

알루미늄 폼 샌드위치 판넬 기술은 1994년 독일에서 개발되었으며, 이 기술은 폼재를 조밀한 재료와 함께 사용한 예이다. 이 샌드위치 판넬은 3차원 형태를 이루고 있으며, 낮은 중량에 비해 매우 강성이 높다. 이러한 장점으로 인해 자동차에 전통적으로 쓰이는 얇은 판재를 대체할 수 있을 것으로 생각되며, 이를 통해 상당한 중량감소를 이끌어낼 수 있을 것이다. 또한 알루미늄 폼 샌드위치 구조는 자동차 골격구조(프레임)의 많은 부분을 줄여 조립설비를 절감할 수 있다. 더욱이 샌드위치 판넬이 가벼운 동시에 진동감쇠기 역할을 하기 때문에 성능을 향상시키면서 비용을 절감할 수 있다. 알루미늄 폼 샌드위치 부품은 여러 가지 용접 혹은 접합기술에 따라 알루미늄 부품과 결합이 가능하고 그 접합체를 자동차의 차체에 적용할 수 있다. 최근에 화물차에 장착된 수리용 플랫폼을 지지하는 리프팅암이 개발된 바 있다. 개발의 목적은 차량 총 중량을 일정 수준으로 유지하면서 작업 높이를 20m에서 25m로 증가시키는 것이었다. 그림 3에 대표적인 3차원 샌드위치 판넬과 리프팅암의 적용 사례를 나타내었다[1].

또한 자동차 구조에는 A필러, B필러, C필러와 같은

많은 박판 기둥형 빔이 있으며 이러한 필러 내부에 알루미늄 폼이 적용되고 있다. 금속 폼이 충전된 빔은 높은 비강도와 충진이 되지 않은 빔과 비교하여 충돌에 대한 높은 에너지흡수를 제공하기 위해 고안되었다. 폼재의 충전으로 2축 굽힘 저항이 향상되고, 변형이 진행되는 동안 좀 더 많은 에너지가 단계적으로 소실된다. 빔 내부의 폼 충전은 빔 전체에 적용할 수도 있고, 높은 강도가 필요로 하는 영역에 선택적으로 적용할 수도 있다.



[Fig. 3] (a) Sandwich panel, (b) vehicle lifting arm

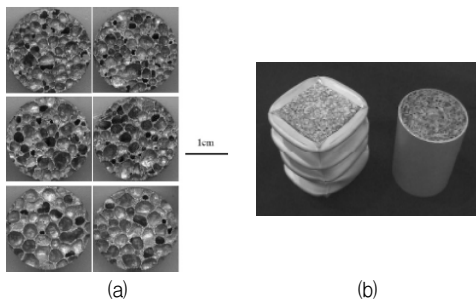
3.2 폼 충전 튜브와 단면형상

크래쉬박스는 알루미늄 폼의 또 다른 응용제품이다. 충돌 사고 발생 시 승원을 보호하고 차량의 피해를 최소화하면서 수리비용을 줄이기 위해 안전 규정을 강화하는 가운데 자동차 제조사들은 이러한 요구 조건을 만족시키기 위해 크래쉬박스를 사용하기 위한 아이디어를 모색하고 있다.

크래쉬박스는 15km/h의 충돌에너지를 모두 흡수하여 가격이 상대적으로 높은 선단 부품과 자동차 프레임을 보호할 수 있다. 크래쉬박스는 충격용 빔 혹은 범퍼와 전방 프레임 사이에 위치하여 전방 충돌 시 주변 부품을 보호하는 기능을 한다. 전통적인 크래쉬박스는 금속 강재 튜브로 제작되어 충격력의 크기에 따라 국부적인 영역에 소성변형을 발생시켜 충격운동에너지를 흡수하는 부품이다. 크래쉬박스의 변형은 기본적으로 두 가지 형태로 광범위하게 발생한다. 그 첫 번째는 아코디언처럼 변형하는 콘서티나 형과 다이아몬드 형이 그것이다. 이 중 콘서티나 형이 에너지 흡수 관점에서 선호되는 변형의 형태이나, 경우에 따라서는 이 두 가지의 혼합된 형태도 있다. 그림 4에 셀 크기별 폼재의 형상 예시와 충전된 크래쉬박스의 압축실험 후의 형상을 나타내었다[1,3].

크래쉬박스의 한 형태는 중공형 튜브 형태를 가지고 있으며, 충돌 시 소성변형을 통해 에너지를 흡수한다. 튜브의 파손모드는 튜브의 길이 방향을 따라 일정한 간격

을 가지고 영구변형을 만든다. 알루미늄 폼 코어를 튜브의 중심에 충전함으로써 크래쉬박스의 에너지 흡수 특성이 강화된다. 외부의 튜브는 길이방향으로 접혀지면서, 그 접혀지는 수는 증가한다. 그 결과 충전된 튜브의 에너지 흡수는 중공형 튜브보다 높게 된다. 폼 충전 튜브의 높은 찌그러짐 저항은 튜브 재료가 폼 충전재 내부로 침투하는데 기인한다. 이러한 변형 형태가 변형 저항을 발생시켜 변형강도와 에너지 흡수를 향상시키는 것이다. 에너지는 또한 폼 코어에 의해 흡수되고, 충전 튜브에 의한 전체 에너지 흡수는 튜브와 폼재 각각의 에너지 흡수의 합보다 크게 된다. 이 연구는 이탈리아 피아트사와 노르웨이과학기술대학의 연구로 수행되었으며, 축방향 에너지 흡수를 증가시키고 동시에 편심된 충돌에너지 흡수도 향상시켰다[1].



[Fig. 4] (a) Foams at different cell diameters, (b) Crash-box filled with foam materials after compression test

실험결과를 보면, 알루미늄 폼 충전 강제 튜브의 경우 그림 1의 하중-변위 곡선에서 보는 바와 같이 중공형 강제 튜브에 비해 2배의 에너지흡수 성능을 나타낸다[2]. 하중-변위 곡선을 자세히 살펴보면 초기 최대하중 값은 강제 튜브의 소성강도에 의해 결정되며, 폼재는 초기 최대하중에 기여하는 바가 없다할 수 있다. 이는 강제 튜브와 폼재가 야금학적으로 결합되지 않은 것을 의미하며, 그로 인해 튜브와 폼재의 상호작용이 초기에는 발생하지 않음을 알 수 있다. 즉, 제조공정 상에 튜브 재료와 내부에 충전되는 폼재의 접합기술이 중요한 설계 변수가 될 수 있음을 알 수 있다.

초기 최대하중 값 이후 구간에서는 폼 충전 튜브의 하중 값이 튜브만 있는 경우와 순수 폼재의 하중 값을 더한 값보다 크게 나타났다. 이는 폼 충전 튜브의 변형이 구성

재료의 거동 뿐 아니라, 튜브와 폼재 사이의 상호작용에 의한 것으로 판단된다. 이러한 상호작용으로 튜브 강재의 내측 찌그러짐을 유발하고 폼재와 함께 물리적으로 맞물리기 때문이다.

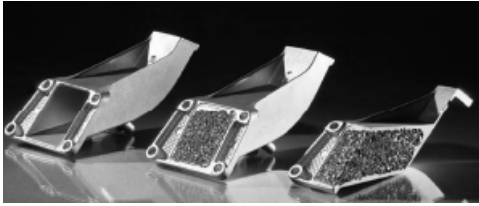
또한, 중공형 크래쉬박스는 최대 하중값 이후 일정한 크래쉬 저항값을 가지나, 폼재 충전 크래쉬박스의 경우 크래쉬 저항값이 점차 증가되었다. 이는 폼재의 치밀화 거동과 강제 기공의 점진적인 변형 경화에 기인한 것이다. 표 2에 중공형과 충전형 크래쉬 박스의 항목별 압축 실험 결과를 정리하였다. 결과를 보면 충전재로 보강한 크래쉬박스가 중공형 보다 전 항목에서 높은 충돌 성능을 나타냄을 알 수 있다[2, 4-6]

[Table 2] Experimental results of crash-box

항목	중공	충진
총흡수에너지(kJ)	1.6	3.5
평균충돌하중(kJ)	25.04	55.58
비흡수에너지(kJ/kg)	17.42	13.26
충격력효율	0.37	0.83
변형모드	다이아몬드	콘서티나
접힘수	< 6	6

3.3 주물부품의 코어재료의 응용

이 응용 부품은 조밀한 외부 스킨을 가지고 있어 주물재 외부 표면과 경량 내부 폼재로 이루어진 복합재를 형성하는 저압 다이캐스팅에 코어재료를 사용하는 것이다. 이러한 복합재료는 약간의 중량 증가에도 불구하고 중공 부품에 비해 높은 강성과 개선된 감쇠특성을 제공한다. 독일의 BMW사는 오스트리아의 LKR사와 합작으로 위에서 언급한 복합재료를 근간으로 한 엔진마운트 브라켓을 설계하였다. 이 제품은 주물을 하는 동안 용융에 의한 심재의 침투가 거의 없는 것이 특징이다. 중량이 큰 자동차 엔진을 지지하고, 기계 진동을 열에너지로 변환하여 내부적으로 소멸시킨다. 이 복합재의 파괴 인성은 보장되고, 사고 상황에서의 안전도를 높게 된다[1,2,3]. 그림 5에 폼재가 충전된 엔진마운트용 브라켓을 나타내었다.



[Fig. 5] Engine mount foam-filled bracket of BMW

4. 결론

알루미늄 폼은 비교적 고가의 재료이고, 생산을 위한 공정수도 많으며, 또한 파우더나 MMC(Multi Metal Composite)와 같은 원재료의 가격도 고가이다. 그러므로, 현재 적용되고 있는 재료를 알루미늄 폼으로 단순하게 교체하는 것은 불가능하다 하겠다. 그래서 위에서 언급한 다기능성을 알루미늄 폼재의 주요 특성으로 가져가야 한다. 다기능성이란 알루미늄 폼의 서로 다른 대표적인 특성(기계적, 열적, 음향학적)을 이용하고 용이한 그물형태 생성능력과 절삭, 결합, 재활용 등의 2차 공정의 이점을 충분히 활용하여야 한다는 것이다.

또한 튜브구조에서 언급한 바와 같이 외판과 내부에 충전되는 폼재의 접합기술에 대한 연구도 진행되어야 한다. 다공질 기공 표면과 튜브 내측의 접합형태와 구조, 결합력에 따른 충돌에너지 흡수 성능의 변화에 대한 검토가 필요하며, 이는 크래쉬박스과 같은 주요한 부품의 제작 시에 검토되어야 할 사항이다.

현 시점에서의 가장 큰 문제점은 기술적인 것보다 적용 가능한 제품군의 부족에 따른 낮은 생산량이라 하겠다. 생산량이 많을수록 고정비용을 낮출 수 있을 것이고, 전체 가격을 저렴하게 할 수 있을 것이다. 또 다른 전략은 2차 알루미늄을 사용하고, 폼을 형성하기 위한 중간재로 TiH_2 대신에 $CaCO_3$ 를 사용하는 것이다[1].

REFERENCES

- [1] J. Banhart, "Aluminum Foams for Lighter Vehicles", Int. J. Vehicle Design, Vol. 37, Nos. 2/3, pp. 114-125, 2005.
- [2] G. Srinath, et al., "Characteristics of Aluminum Metal Foam for Automotive Applications", Transactions

of the Indian Institute of Metals, Vol. 63, Issue 5, pp. 765-772, 2010.

- [3] H. Yu, et al., "Research into the Effect of Cell Diameter of Aluminum Foam on its Compressive and Energy Absorption Properties", Materials Science and Engineering A, Vol. 454-455, Issue 5, pp. 542-546, 2007.
- [4] H. Kavi, "Investigation of Compression Mechanical Behaviour of Aluminum Foam Filled Metal Tubes", MS Thesis, Izmir Institute of Technology, Turkey, 2004.
- [5] K. Kremer, "Metal Foams for Improved Crash Energy Absorption in Passenger Equipment", Final Report for High-Speed Rail IREA Project 34, Fraunhofer USA, 2004.
- [6] J. Baumeister, et al., "Aluminum Foams for Transport Industry", Materials & Design, Vol. 18, Nos 4/6, pp. 217-220, 1997.

저자소개

마 정 범(Jeong Beom Ma)

[정회원]



- 1990년 2월: 한양대학교 기계공학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 한양대학교 대학원 정밀기계공학과 (공학석사)
- 2000년 12월 : 텍사스주립대학교 항공공학과 (공학석사)

- 2005년 12월 : 노스캐롤라이나주립대학교 기계공학과 (공학박사)
 - 1991년 12월 ~ 1998년 5월 : 기아자동차 중앙기술연구소
 - 2005년 10월 ~ 2007년 9월 : 삼성SDS 컨설팅본부 (수석보)
 - 2009년 3월 ~ 2011년 2월 : 대림대학 자동차과 (전임강사)
- <관심분야> : 구조재료, 구조해석, 경량화 구조, CAD/CAE

이 정 익(Jeong Ick Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한양대학교 공과대학 기계공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과 (공학석사)
- 1999년 8월 : 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과 (공학박사)

- 1993년 1월 ~ 1999년 12월 : (주)대우전자 중앙연구소 (선임연구원)
- 2000년 3월 ~ 2007년 2월 : 용인송담대 자동차기계설계전공 (교수)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 인하공전 기계공학부 기계설계과 (교수)

<관심분야> : CAD/CAM/CAE, 공장자동화, 생산자동화, 사출금형, 유비쿼터스, MEMS, BIOMECHANICS