

발포금속의 제조 및 응용

경상대학교 나노 신소재 공학부, i-Cube Center, ERI
 허보영 · 박수한 · 송영환 · 서창환 · 정민재

1. 서 언

인류의 역사와 함께 발전한 주물 공업은 일반주조, 금형주조, 정밀주조, 반응고 주조, Reo, Thixo주조, 발포주조 등의 발전을 거듭하여 왔으며, 최근에는 발포금속주조가 개발되고 있다. 발포금속주조는 기존의 구조재료에서 요구되는 고강도 재료의 개념을 벗어나 고기능성을 요구하는 기능성재료이다. 사회가 발전하며 삶의 풍요로움과 안전을 지향하는 현대사회에서는 기능성을 필요로 하는 재료가 요구되고 있다. 또한, 경제력의 향상과 산업의 발달로 인하여 각종 생활 가전기기와 산업기계, 자동차, 철도, 항공기 등의 사용이 과거에 비해 폭발적으로 증가하였다. 따라서 소음과 진동 및 전자파 등이 다량 발생하게 되고, 이를 차단해 줄 수 있는 우수한 흡·차음 전자파 차폐재의 개발이 어느 때보다 필요한 실정이다.

발포금속은 기존의 재료에 비하여 초경량이며 에너지 흡수 능력이 뛰어나고 열이나 전기의 전도성이 작고 액상이나 공기 등의 투과성이 양호한 뛰어난 기능적 특성을 가지고 있다.

Bubble에 대한 연구는 예부터 많이 연구되어왔으나 학문적으로 연구되어진 것은 1887년 Kelvin에 의해서 과학적으로 연구되어 bubble이 100%에 가깝게 되는 형태를 만들고자하는 연구가 진행되어 테트라카이데 카헤드론(14면체)형의 99.7%의 입체 bubble을 만들 수 있다고 보고하였다.

다공질 금속을 만드는 방법은 분말야금법의 일환으로 많이 제조되어지고 연구되어졌으나, 용융금속에서 직접 bubble을 제조하여 발포금속을 만들고자하는 시도는 1948년에 Sosnik에 의해 알루미늄에 수을 증발시키는 방법으로 발포 알루미늄을 제조한 이래, 1951년 Elliot에 의해 진보된 방식인 발포 매개체를 용탕에 혼입하는 방법으로 발포금속을 제조하기 시작하였다. 2005년 일본 교토에서 개최된 MetalFoam2005 운영위원회에서는 분말야금법과 같은 소결방식을 택하는 것은 porous금속에는 포함될 수 있으나 발포금속의 범주에서는 제외하기로 하고, 금속을 용해하고 bubble을 형성한 후 응고에 의해서 기포가 형성된 방식을 발포금속으로 정의하기로 결정하였다.

발포금속의 종류는 우선 크기에 따라 nano-,micro-,macro-porous금속으로 구분할 수 있으며 그 모양은 Fig. 1과 같다.

또한 pore간의 연결여하에 따라 폐기공형, 개기공형 이라 분류하며 그 종류는 Fig. 2와 같다.

이들은 초경량성과 높은 비탄성을 및 비강도, 압축하중에 대한 저항 특성을 이용하는 구조용재와 energy 흡수용 및 열 확산성, 넓은 표면적에 따른 우수한 열적 특성을 이용하는 열전달 매개용으로 사

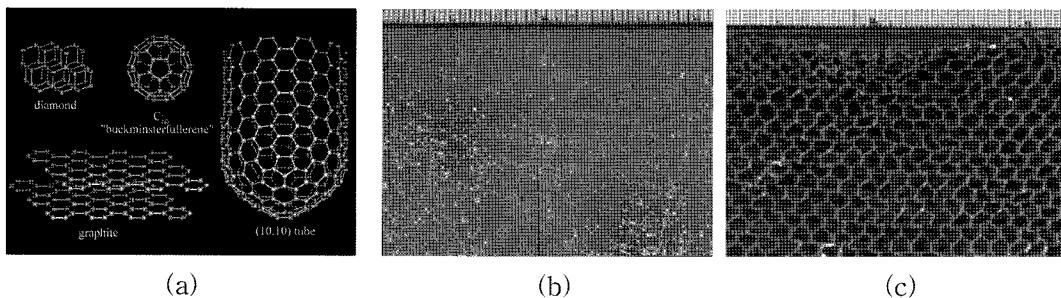
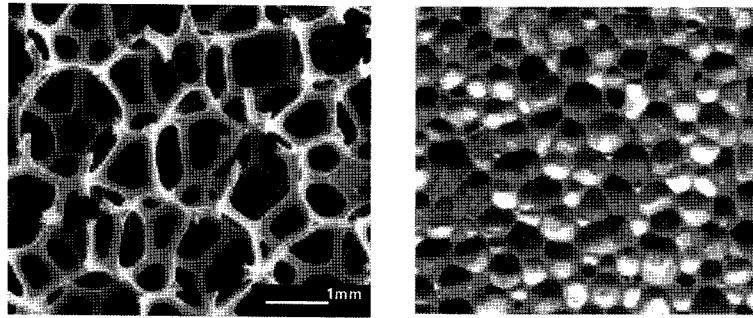


Fig. 1. Classification of pore size of (a) Nano porous metal: grade $10^{-9}m$, (b) Micro porous metal: grade $10^{-6}m$, (c) Macro porous metal: grade $10^{-3}m$.



(a) Open cell

(b) Closed cell

Fig. 2. Classification of pore type for metal foam.

용되고 있으며, 폐기공 발포금속(closed cell)은 비탄성을 및 비강도가 우수하여 초경량 구조재의 적용을 목적으로 기공의 고른 분산과 크기 및 두께 제어에 대한 연구가 진행 중에 있으며, 개기공 발포금속(open cell)은 형태의 특성으로부터 열의 개체 및 filter재로 활용된다.

발포금속에서 균질 기공의 분포와 크기의 조절과 연속 주조 방식이 원가절감, 용접 그리고 제조장치의 진보를 통하여 다양한 분야에 적용되고 있다. 그러나 실용화를 위해서는 요구특성을 만족하고 동시에 가격 경쟁력을 가진 제조기술의 보유 및 개발과 독특한 특성을 활용한 새로운 적용 분야의 개척이 필요하다고 생각되며, 이를 위해 Cambridge, MIT, Aachen, HMI 등 구미 우수 대학과, 미 국방성 등의 연구기관, ERG, 新鋼 wire 등 산업체를 중심으로 제품이 생산되고 있으며 응용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

그리고 일부 자동차 생산 업체를 중심으로 발포금속을 적용한 초경량, 에너지 절감형의 자동차 부품 소재, 항공기 방열판 등에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

국내에서 완제품 생산은 실내장식용 복합패널로서 공업기술원과 (주)한소 프라임이 생산하였고, 유닉슨(주), 금강(주)에서 Batch식, 금성 산업에서 Pot식이 일부 생산 및 연구가 진행되었으나 현재는 (주)폼텍 에서 발포패널을 주로 생산하고 있고 (주)드림메탈과 (주)아크로 폼텍에서 소량 생산되고, (주)동일알루미늄에서 폐 scrap을 이용한 발포 Al 제도가 연구되어왔다. 생산기술연구원에서는 분말 가열 흡음패널이 개발되었으나 강도와 내열성 및 생산성 향상에 대한 연구가 진행 중이다. 이들 제품의 성능은 동양강판의 흡음패널과 거의 동일하며, KIMM에서 필터용의 발포금속이 연구개발 되고 있다.

(주)폼텍의 복합패널은 10여 가지의 실용특허로 건축마감재로서 오히려 선진국수준을 능가한 상태이다. 한편, 발포금속 기능성 개발은, 이들이 가지고 있는 우수한 특성 때문에 군수용으로부터 민수·산업용까지 전 분야에 적용이 가능한 소재이므로 지속적으로 수요처를 확장하고 있고 제품의 균질성, 안정성, 기능성 향상을 위해 지속적이고 체계적인 연구가 진행되고 있다.

2. 제조 방법

현재 선진국가의 생산방법 및 현황은 주조법, 분말법, 코팅법을 기본으로 하여 크게 분류할 수 있으며 이들에서 분류된 방식들을 계열화하면 Fig. 3과 같다.

주조법은 금속을 용해한 후 점탄성을 부여하기 위해 용탕의 온도를 액상선보다 50~100이상 유지한 다음, 점도 및 표면장력을 증감시키는 합금이나 세라믹 분말을 첨가한 다음, 고온 분해과정에서 가스를 발생시키는 발포제를 고속으로 분산시킨 후, 원하는 형상의 금형에 주입하여 가스가 분해·성장 할 수 있는 온도에서 일정시간 유지하여 발포시킨다. 금속 발포 후 냉각 속도를 조절하여 응고시키고, 기능성을 부여하기 위하여 압축이나 코팅을 하거나 기능성 재료를 접합하여 제조한다.

금속/가스 공정 응고법은 Ukraine에서 개발된 발포금속 제조공정으로, 수소 분압 하에서 금속을 용해

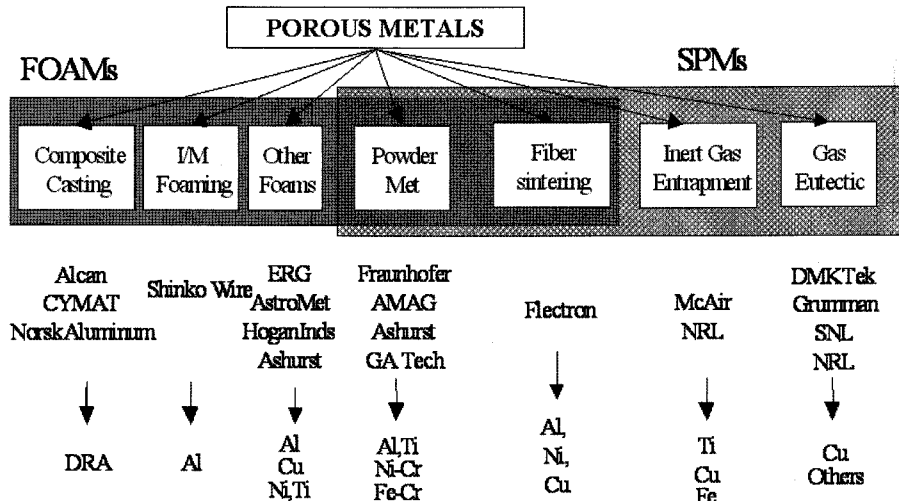


Fig. 3. Fabrication method and classification of metal foam.

하여 방향성 응고시켜 금속과 가스가 공정조직의 복합체가 되도록 제조하는 기술이다. 이 방법으로 제조된 금속은 특히 층상 공정조직을 나타내며, 용탕 내에서 불균일하게 생성된 수소가 확산에 의해 기포로 성장한다. 생성된 기공의 크기는 용탕중의 수소 농도에 의해 결정되며 100 μm~1 cm의 상당히 넓은 범위의 pore 크기를 가지는 발포금속의 제조가 가능하다.

분말법은 금속분말과 금속수소화합물(TiH₂, ZrH₂)분말을 혼합한 예비 성형체를 압연이나 압출에 의해 반가공체를 만들고, 이를 금속수소화합물의 분해온도까지 가열하면 반가공체 내에 분산되어 있던 금속수소화합물에서 분해된 수소가스의 팽창에 의해 발포금속을 제조하는 방법이다.

3. 발포 금속의 특성

3.1. 기계적 특성

발포금속의 기계적 특성은 기공의 종류, 형상, 크기, 균일성, 표면적 및 발포금속의 고체 금속비 체적 분율 등에 의해 좌우되며, 특히 밀도에 비례하여 증가하므로 충격 에너지 흡수성은 제조방법의 변화와 고체금속이나 fiber보드 등과의 적층구조에 의하여 에너지 흡수성 및 기타 제성질이 다양하게 나타난다.

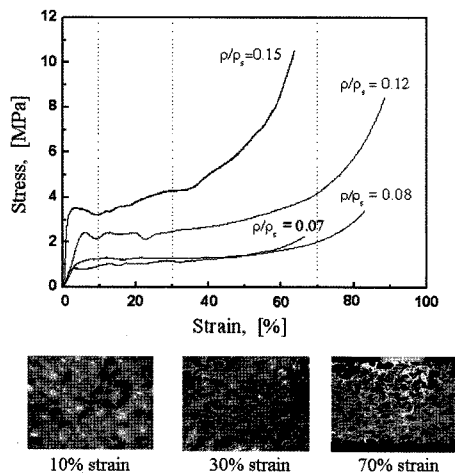


Fig. 4. Compressive stress-strain curve of Al foam with relative density.

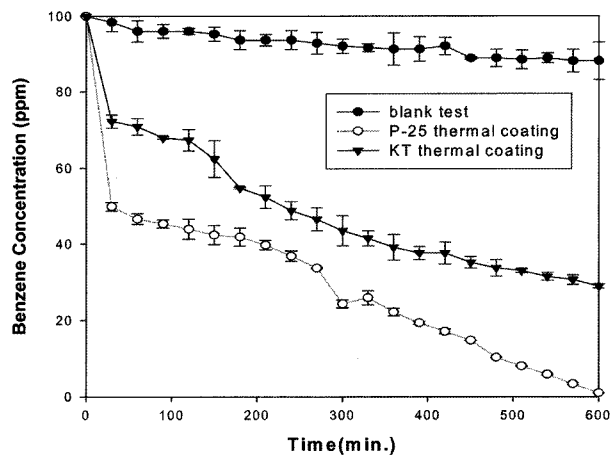


Fig. 5. Comparison of decomposition of benzene in air using different coating foam layer for photocatalyst.

일례로서 압축시험을 하였을 때에 응력, 변형을 곡선은 Fig. 4와 같이 응력과 항복강도는 대단히 적으나 변형률이 크다.

3.2. 광촉매 특성 평가

광촉매로서 활용하기위한 TiO_2 피막의 제조 공정은 일반적으로 광촉매를 유리질 기판위에 코팅하여 사용하고 있으며, 특히 미립 TiO_2 을 유기질 결합제가 포함된 용액에 분산 시키거나, TiO_2 유기 전구체를 출발 물질로 친수성 특성을 나타내는 입자 크기인 20 nm이하의 분말 제조에 노력해 왔다. 졸 겔 공정 이외에 화학기상 증착법, 직류 반응 마그네트론 스퍼터링, RF 반응 마그네트론 스퍼터링, 전기 화학 증착 등이 있다. Fig. 5는 A4 크기의 발포알루미늄 광전자 촉매 시스템의 벤젠 효율을 측정한 그래프이다. 일반재료에 비해 코팅 후의 촉매흡음효과가 현저하지는 않았으나 상당한 제어능이 존재함을 알 수 있다.

3.3. 전자파 차폐 및 단열 특성

본 시험은 ASTM(American Society of Testing and Materials)의 “전자파 차폐효과에 대한 표준 시험방법(ASTM D 4935-89)”에 의해 행하여졌다. Al foam과 Si steel 및 bulk Al의 측정 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 측정된 주파수 범위 내에서 최소 91 dB 이상의 차폐효과를 가지며, 측정상의 오차는 신호발생기, 스펙트럼분석기, RF 스위치, 계단감쇠기, 측정반복도에 기인하며, 총 오차는 ± 3 dB이다.

실제 고속전철 송배전소 벽체차폐와 케이블방송국의 조정실 등에 시공되었다.

Fig. 7은 발포알루미늄의 화염테스트 시험을 보여주고 있다. 가스 토치를 10-30 cm 떨어진 곳에서 발포알루미늄을 가열하고 가스토치의 불꽃이 도달하는 부분으로부터 6곳에 온도 센스를 부착하여 온도변화를 측정하였다.

시험부 표면 가스토치의 온도가 1200°C이지만 발포알루미늄의 온도는 400°C가 넘지 않음을 확인할 수 있다.

4. 산업적 활용성

소음 진동을 제어할 수 있는 건축 및 자동차 운송기기 등 토목 산업, 방음 패널 제품, 방음벽조정, 고속도로 방음벽, 강당, 야외 전시장, 흡음벽, 공공 목적에의 활용 등에 방음, 차음 기술이 요구되고, 향후 전자 산업발전에 따라 발포금속 패널은 전자파 차폐제 개발 및 품질향상과 다층, 적층 sealing 공정 개발 등이 필요하다. 따라서 다공질 성형체 제조 문제가 해결되어야하며, 기능성 향상과 균질화, 원가

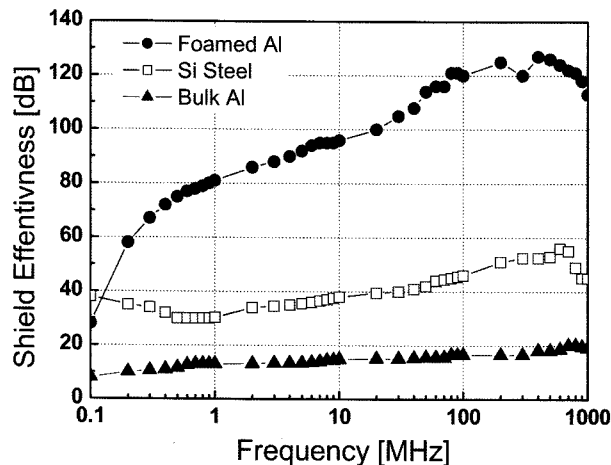


Fig. 6. Variation of magnetic field shielding effectiveness with frequency.

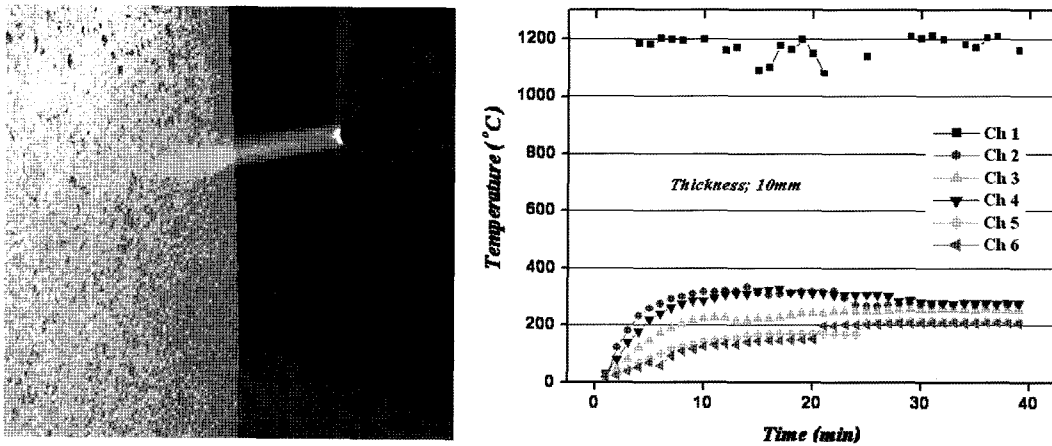


Fig. 7. Test and Result of flame of Al foam panel Condition: Using Propane torch Firing distance : 15 cm
 Ch1 : contacted with the fire, Ch2 : back side of the panel, Ch3 : right hand upper side, Ch4: right hand bottom side, Ch5 : left hand bottom side, Ch6: left hand upper side

절감이 중요하다. 이를 위해서 제조 원가가 저렴한 주조형 발포금속 기술과 연속주조 기술이 확보되었다.

발포금속은 경량 구조용 재료로 사용이 가능하며, 특히 사용온도가 200°C이상의 내열성을 요구하는 항공기재료의 core등에도 이용 가능하며, 높은 중량비 탄성율과 압축저항이 높은 발포금속의 특징으로 적층구조의 설계에 의해 경량구조재료로 활용이 기대된다.

Open cell 발포금속은 뛰어난 열전달 특성으로 전자부품의 heat sink나 방열패널에서 냉각팬을 대체하여 진동에 의한 운동에너지와 열에너지의 변환에 의한 냉각방식에 적용 가능하며, 산업설비의 열교환기나 공조기 이외에도 발포 니켈처럼 넓은 표면적에 의해 태양 에너지의 90%를 흡수하는 효율 좋은 태양 집열판 소재로도 사용된다. 발화억제 및 지연 특성을 이용한 화염 방지제 및 폭발적 압력에 대한 damping 효과로 사용되어 관 또는 배기부에서 유해 가스의 배출 또는 발화시 이를 억제할 수 있다.

침투성은 에너지 흡수성과 관련하여 소음 및 진동 에너지 흡수성을 나타내는 동시에 액체와 액체를 분리하는 filter로 동 및 stainless강이 있으며, 부식성이 강한 유체의 여과 및 생체재료로의 적용에 있어서는 발포Au가, 발포구리는 열교환 기능과 bio-filter의 두 기능을 이용하여 순환기에 사용되며, 삼투압과 역 삼투압에 기초를 한 담수화 설비 및 탈수소화 설비에도 이용이 가능하고, 화학 공업에 있어서 흡수장치, 넓은 표면적에 의해 촉매로 사용되며, 전기화학 공업에서 50~60% 밀도의 발포니켈은 알칼리 전지 및 연료전지의 전극으로 사용되리라 보며, 또한, 연소장치 산업에 있어서 가솔린 엔진 배기부와 낮은 온도에서 연소되는 연소기에 사용이 가능하므로 발포금속의 핵심기술 개발은 기능성 향상과 고부가가치 창출에 큰 도움을 주리라 본다.

한편, 환경적인 면에서의 활용은 수질, 토양, 소음 등이 극소화한 환경을 요구하며, 소음과 진동을 차단해 줄 수 있는 우수한 흡음재의 개발이 어느 때보다 필요한 실정이다. 일반적으로 흡음재료로서 많이 사용되는 것으로 발포 등에 의한 다공질 재료를 사용하게 된다.

기존의 이러한 소재들은 흡음성은 우수하나, 건강과 풍압, 충격에 대한 내구성, 내열성, 강도 등에 문제점을 내포하고 있으며, 특히 사용 후 환경보호적인 측면에서 폐기물의 후처리는 많은 문제점을 내포하고 있다.

이러한 단점을 보완할 수 있는 소재가 금속계 흡음재인데, 기존의 금속계 흡음재는 인발에 의한 세션을 제작하여 사용하거나 scratching방법, cutting법 등에 의한 방법과 분말이나 세션을 고온 소결하여 제작하는 방법이 있지만 경제적으로 많은 문제점을 내포하고 있다.

반면, 금속 다공질 재료는 기존의 금속재료에 비하여 아주 가벼울 뿐만 아니라 에너지 흡수 능력이 뛰어나고 열이나 전기 등의 전도성이 작고 액상이나 공기 등의 투과성이 양호하고 우수한 흡음특성을 가지고 있다.

이런 우수한 제반 특성으로 금속 다공질 재료는 충격 흡수제나 여과장치, 엔진의 머플러, 열교환기 등에 응용되며 응용분야는 점차 확대되는 추세에 있다.

특히, 다공질 알루미늄 재료는 경량이면서 유기 고분자 재료로 제조된 다공질재와 비교하여 고온에서의 사용이 가능하며, 재활용이 가능하여 금속으로서의 전자파 차폐능, 흡음, 제진능 등을 지녀 대기, 수질, 토양, 환경문제를 줄일 수 있다.

특히, open cell의 경우는 제진과 흡음성 이외에 방열기능을 지니어 LCD 패널의 배면 방열기능으로 디스플레이 재료의 경량, 박유화를 기하는데 제공되고 있다.

5. 발포금속의 활용성 및 적용

5.1. 복합 패널의 제조 및 특성

흡·차음 및 제진 특성과 내열, 단일 특성을 복합적으로 부가시키기 위하여 발포금속과 미네랄 울의 복합패널을 Fig. 8과 같이 제조하였다. 미네랄 울의 강도 및 발포금속과의 접착을 위하여 Epoxy 수지 (YD-128(국도화학))와 경화제를 사용하였고, 수지와 경화제의 비율은 6:4로 배합하였다. Fig. 8에 제조되어진 흡·차음 및 단일 시험용 복합패널을 나타내었으며, Honeycomb 및 대리석과 조합한 복합 패널도 개발되었다.

이들 복합패널은 실제 서울지하철 당산철교 방음터널, 성내역 차음벽, 삼성타워펠리스 스포츠센터 방음벽, ASEM빌딩 엘리베이터 내장재, KIMM 공작실 차음벽, 서울지하철역 배기 덕트 등에 적용되었다.

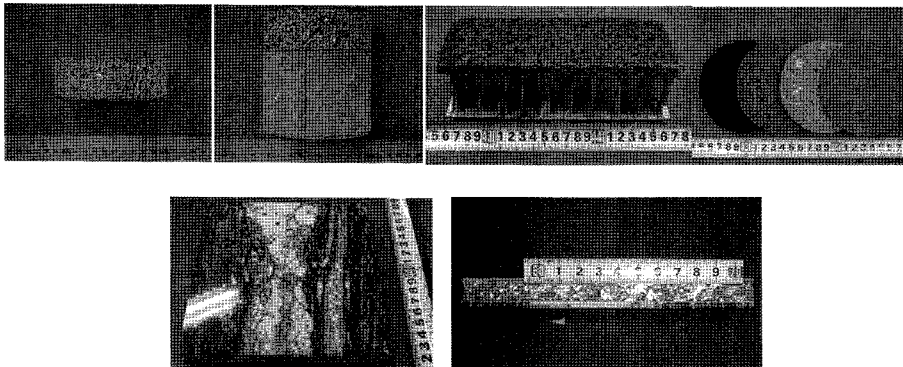


Fig. 8. Specimen of sound absorption test and application of marble Al foam composite panel.

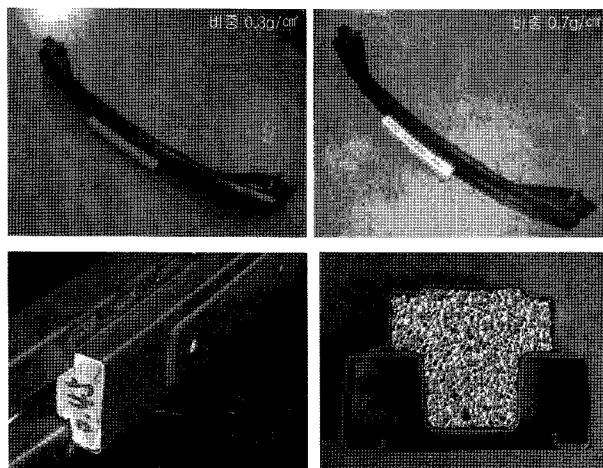


Fig. 9. Photograph of foamed aluminum bumper system.

5.2. 강성 및 충돌해석을 통한 최적의 Bumper Beam 설계

발포알루미늄 적용 범퍼 빔의 경량화 및 충격흡수능 극대화를 위한 발포 알루미늄의 비중을 선정하기 위하여 액상 발포 알루미늄의 비중을 0.2 g/cm^3 , 0.25 g/cm^3 및 0.3 g/cm^3 0.7 g/cm^3 으로 변화시켜 제작하였다. 범퍼 빔 최적 설계 및 해석을 위하여 제작된 다양한 비중의 발포알루미늄 기초물성을 평가하고 적용성 평가를 실시하였다. Fig. 9 에서는 알루미늄 발포금속을 적용해 제작한 범퍼 시스템의 사진을 보여준다.

5.3. 발포 알루미늄의 크래쉬 박스 적용

크래쉬 박스는 범퍼 빔과 Shock-absorber를 연결시켜주는 부품으로 충격흡수능 향상은 엔진룸 보호 및 승객의 안전을 위하여 매우 중요하다. 따라서 발포 알루미늄 적용 부품으로 연구 개발 중에 있으며, 현재 적용되고 있는 형상을 최대한 단순한 형상으로 선정하여 외피의 두께와 발포알루미늄의 형상을 변화시켜 최적의 충격흡수용 발포알루미늄 적용 크래쉬 박스를 개발하고 있다.

5.4. 발포금속을 이용한 Fantasy Car 제작

발포금속을 이용한 경량 고강도 차체를 가진 물에 뜨는 자동차 Fantasy Car는 20Kg 정도의 초경량으로 20대 초반의 젊은이들이 레저용으로 즐길 수 있는 1인승 스포츠카를 Concept 으로 1/8 scale로 제작한 것이다. Fig. 10은 제작과정 중 디자인 된 Fantasy Car의 R/C car 제작 사진이다.

5.5. 아파트 바닥 충격시험 시험체 제작 및 평가

이 시험은 층간 소음 저감재(발포알루미늄) 15 mm 시공 바닥구조에 대하여 경량 충격음은 KS F 2865(표준 콘크리트 바닥위 마감구조의 경량 충격음 레벨 저감량 실험실 측정방법 : 2002)를 적용하여 측정하고, 중량 충격음은 KS F 2810 (바닥충격음 차단 성능 현장 측정 방법) 제 2부(표준 중량 충격원에 의한 방법 : 2001)를 준용하여 시험하였다.

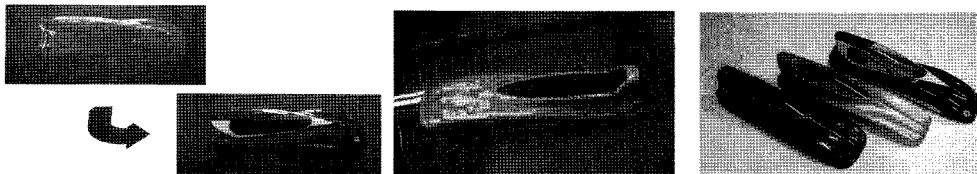


Fig. 10. Foamed Al fantasy car of 1/8 scale.

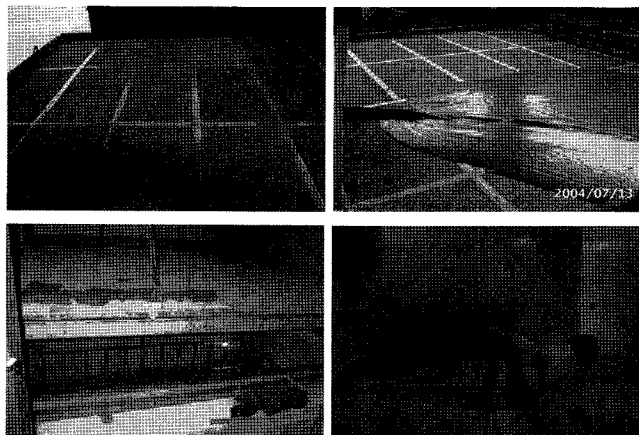


Fig. 11. Photographs of test specimen for sound absorption ratio.

Fig. 11은 층간 충격음 시험용 공동주택 바닥의 시공과정을 나타낸 것이다.

공동주택의 경우 소음 기준은 선진국 수준과 거의 유사한 60dB 이상의 소음에 대해 규제하는 법률안을 2002년도 발표하여 현재 시행중에 있으나, 이 기준에 적합한 소재를 개발하기 위해 아직 연구 개발 중에 있다. 여기에 발포알루미늄 복합 패널을 사용할 경우 경량 고강도이면서 소음 진동을 동시에 흡수할 수 있는 고기능성의 고부가가치의 소재로 활용이 가능할 것이다.

6. 결 언

위에서 언급한 바와 같이 발포금속의 개발 역사와 연구는 아직 미미 하지만 생체재료로부터 건축, 자동차 우주항공분야까지 매우다양하게 활용되고 있다. 앞으로의 연구방향도 그 기능성을 어디에 맞추느냐에 따라 다르며, 그 활용도 또한 매우다양하게 연구되리라 생각된다. 특히 기능성재료의 특징은 필요로 하는 기능성이 얼마나 향상되고, 제조공법이 수월 하느냐에 따라 그 활용도는 다르게 된다.

참고문헌

- [1] J. Banhart, M. Ashby and N. Fleck; Cellular Metals and Metal Foaming Technology. Verlag MIT Publishing, 63 (2003).
- [2] Sang Youl Kim, Soo Han Park, Yong Su Um, Bo-Young Hur, Mater. Sci. Forum, 486-487, 468, (2005).
- [3] Huang Chen, Soo Wahn Lee, Tae Ho Kim, Bo Young Hur; Mater. Sci. Forum, 486-487, 49, (2005).
- [4] Bo-Young Hur, Bu-Keoun Park, Sang Youl Kim and Hoon Bae; Mater. Sci. Forum, 486-487, 472, (2005).
- [5] K. H. Kang, S. J. Park, Y. S. Um and B. Y. Hur; Porous Metals and Metal Foaming Technology, 627, The Japan Institute, Japan, (2005).
- [6] K. C. Leong and L. W. Jin; International Journal of Heat and Mass Transfer, 49, 671, (2006).
- [7] L. M. Niebylski and C. P. Jarema; Ethyl coporation Richmond Va, Patents no. 3,790,365
- [8] 허보영, 김태봉, 대한민국 특허 281242 (2000)
- [9] 허보영, 하동인, 대한민국 특허 0294604 (2003)
- [10] 허보영, 조영철, 이정길, 이동식, 조순형, 대한민국 특허 378395(1995)
- [11] 허보영, 김태봉, 대한민국 특허 0266856 (2000)
- [12] 허보영, 김태봉, 대한민국 특허 0266857 (2000)
- [13] 허보영, 하동인, 대한민국 특허 0458507 (2004)
- [14] 허보영, 조순형, 배석천, 김기배, 대한민국 특허 0592533 (2006)
- [15] 허보영, 하동인, 대한민국 특허 0501646 (2005)
- [16] B. Y. Hur, K. B. Kim, S. C. Bae, S. H. Cho, U.S.Patent, 6, 863, 709 (2005)
- [17] B. Y. Hur, K. B. Kim, S. C. Bae, S. H. Cho, U.S.Patent, 6, 984, 356 (2006)