技術資料

발포금속의 현재와 미래

김세광 · 홍태환 · 조순형* · 김영직

Current and Future Applications of Metallic Foams

Shae-Kwang Kim, Tae-Whan Hong, Soon-Hyung Cho* and Young-Jig Kim

1. 서 론

에너지 및 지구환경 문제에 부합하여 최근 몇 년 사이 기계적 · 열적 특성 및 음향 특성의 시너지 효과를 기대할 수 있는 초경량 내열구조재료로 신소재인 발포금속이 주목받게 되었다[1-5]. 발포금속은 고체와 기체가 cell상으로 복합된 재료로써 제조공정에 따라 기공의 형태, 크기, 분포 및 기공율을 10~90% 정도까지 제어할 수 있으며, 2차 가공시 기존공정의 적용이 가능한 장점을 가지고 있어 목적에 부합하는 발포금속 설계가 가능하다는 특징이 있다.

발포금속은 수십년 전 이미 개발되었으나, 제조기술의 진보에 의하여 고성능의 발포금속을 상대적으로 저가에 제조하는 것이 가능한 것과[2-5] 기계적, 열적, 에너지 흡수 특성에 대한 기초적 지식의 보다 깊은 이해와 더불어 이들의 요구특성에 부합하는 발포금속에 대한 설계[6-8]가 가능하게 되어 최근 다시 주목받고 있다.

발포금속은 형태에 따라 open cell type[7](이하 OC)과 closed cell type[1](이하 CC)으로 구분할 수 있으며, 요구특성에 의해서는 초경량성과 높은 비탄성율 및 비강도, 압축하중에 대한 저항 특성을 이용하는 경량 구조용과 진동, 소음 및 전자파 등의 energy 흡수용 및 열확산성, 넓은 표면적에 따른 우수한 열적 특성을 이용하는 열전달 매개용으로 구분할 수 있다. CC 발포금속은 비탄성율 및 비강도가 우수하여 초경량구조재로 적용을 목적으로, 기공의 고른 분산과 크기 및 두께의 제어에 대한 연구가 진행 중에 있으며, OC 발포금속은 open cell이라는 형태의 특성으로부터 열의 매개체 및 filter로써의 적용을 목적으로 하고 있다.

한편, 발포금속을 제조하는 방법은 크게 주조법과 분말법으로 대별될 수 있다. 주조법에는 TiH_2 또는 ZrH_2 등의 금속 hydrides 및 Ar 가스등을 직접 용탕에 혼입 · 교반하는 GEM(Gas Expansion Methods), 수용성의 preform을 이용하는 용탕침투법, 정밀주조법, 금속/가스 공정응고법 등이 있으며, 분말법은 수산화금속 및 금속산화물의 slurry를 이용하는 hollow sphere 법, TiH_2, ZrH_2 등의 금속 hydrides를 금속분말과 혼합하여 가열하는 소결법 및 HIPing 공정중 고압 Ar 가스를 혼입한 후, 열처리시 가스확장을 통한 발포금속을 제조하는 방법으로 구분할 수 있다. 발포금속의 실용화를 위해서는 다기능화 설계와 저가의 제조공정 개발이 중요하며, 요구특성을 구현할 수 있는 발포금속의 설계와 제조공정에 대한 충분한 이해가 필요함을 알 수 있다.

본 기술자료에서는 소재 및 제조공정에 따라 재료설계의 신 개념인 tailoring이 가능한 발포금속에 대하여 기본 개념과 특성 및 제조공정에 관한 연구결과들을 설명함으로써 발포금속에 대한 이해를 높이고 나아가 연구 및 적용 의욕을 증진시키고자 한다.

2. 제조공정

2.1 주조법

2.1.1 Gas Expansion Method

1948년에 Sosnik[9]에 의해 알루미늄에 수은을 증발시키는 방법으로 발포알루미늄을 제조한 이래, 1951년 Elliot[10]에 의해 진보된 방식인 발포 매개체

성균관대학교 금속재료공학부(School of Metall. and Mater. Eng., SKK Univ.)
*범원 엔지니어링(Bum Won Engineering)

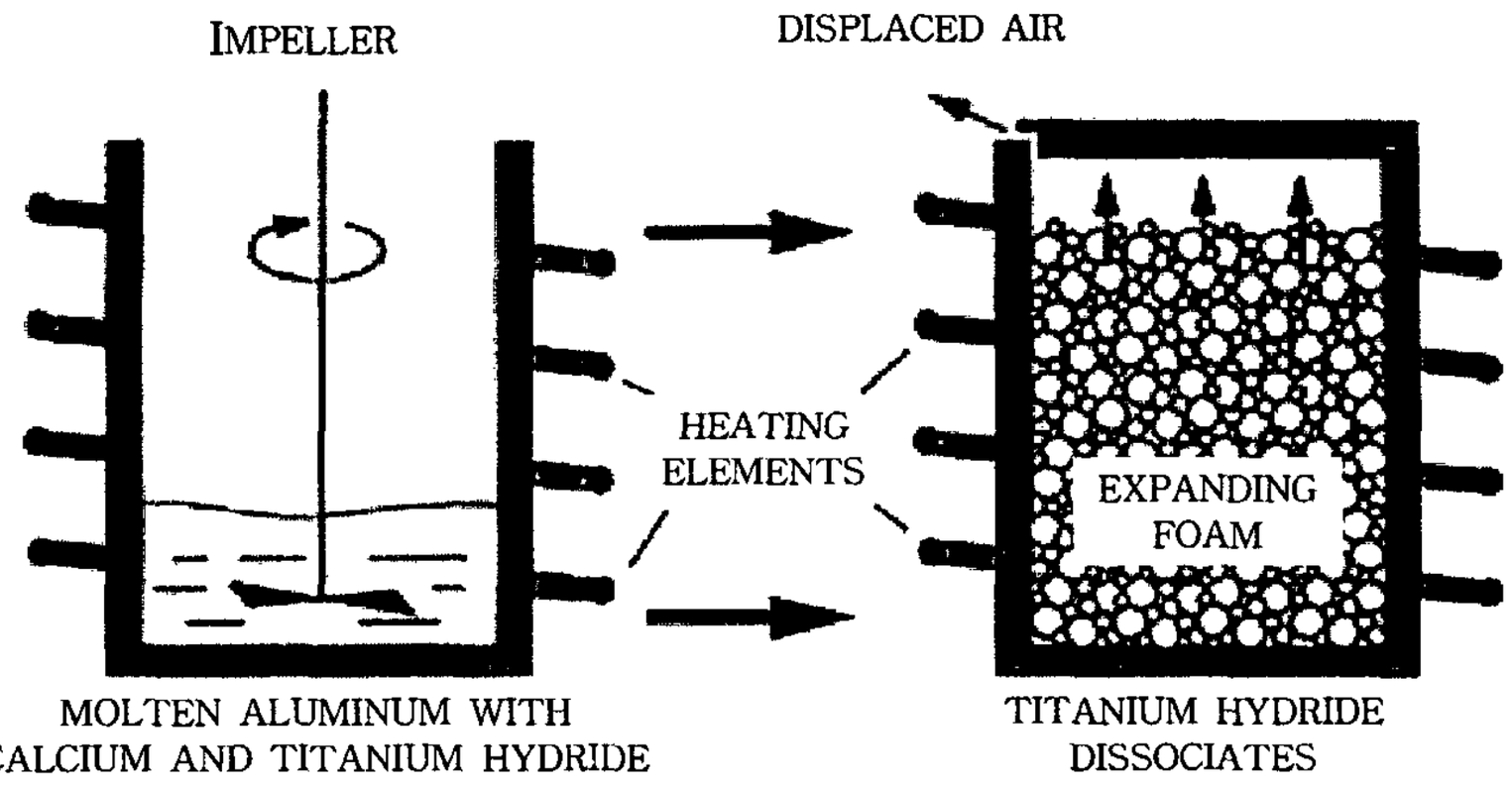

그림 1. 수소화금속을 이용한 Gas Expansion Method.

를 용탕에 혼입하는 방법으로 발포금속을 제조하기 시작하였다. 이 방법은 전술한 바와 같이 TiH_2, ZrH_2 등의 수소화금속을 이용하는 방법과 공기, 산소, 질소, 이산화탄소 및 아르곤등의 가스를 목적하는 바에 따라 직접 용탕에 주입하는 방법이 있다. 수소화금속을 이용하는 방법은 용탕에 수소화금속을 혼입하고 수소가스가 분해되기 전에 충분한 교반에 의하여 수소화금속을 균일 분산시킨 후 응고시 분해된 수소가스가 팽창하도록 하여 CC의 발포금속을 제조하는 방법이다.

이 방법에 있어서는 수소화금속 및 주입 가스의 균일 분산을 위한 유동성과 분해수소 및 주입가스가 용탕 밖으로 배출되지 않을 임계 점도를 동시에 만족시키는 것이 핵심기술이며, 이를 위하여 수소화금속을 혼입하는 경우는 금속 Ca를 증점제로 첨가하며(그림 1), 가스를 직접 이용하는 경우는 가스의 자체의 증점효과[11]와 더불어 증점을 위해 MnO_2[12] 등과의 복합화에 의한 입자강화 금속기복합재료(그림 2)를 이용한다. 한편, 수소화금속을 이용하는 경우에는 수소의 분해온도가 금속의 융점과 온도차가 적을 선택하는 것이 중요하다.

2.1.2 용탕침투법

OC 발포금속 제조가 가능한 용탕침투법은 열에 대한 저항성이 높으며 동시에 수용성인 염화나트륨 등의 구체를 적층한 예비성형체에 용융금속을 주입한 후 수용성 염화나트륨을 용출하여 발포금속을 제조하는 방법이다[14]. 구체로는 점토나 유리질 또는 속이 빈 강옥(hollow corundum) 등의 압축성 무기물질[15, 16]도 적용 될 수 있다. 대부분의 용융금속, 특히 알루미늄은 표면장력이 크기 때문에 예비성형체에 침투가 용이하지 않으며, 이에 예비성형체의 예열, 침투온도의 증가 및 진공이나 가압 성형법이 이용된다.

한편, 예비성형체에 용탕을 침투하는 방법에 반하여, GEM과 동일한 방법으로 구체를 용탕에 교반 · 혼입하여 구체의 균일 분산을 도모하여 발포금속을 제

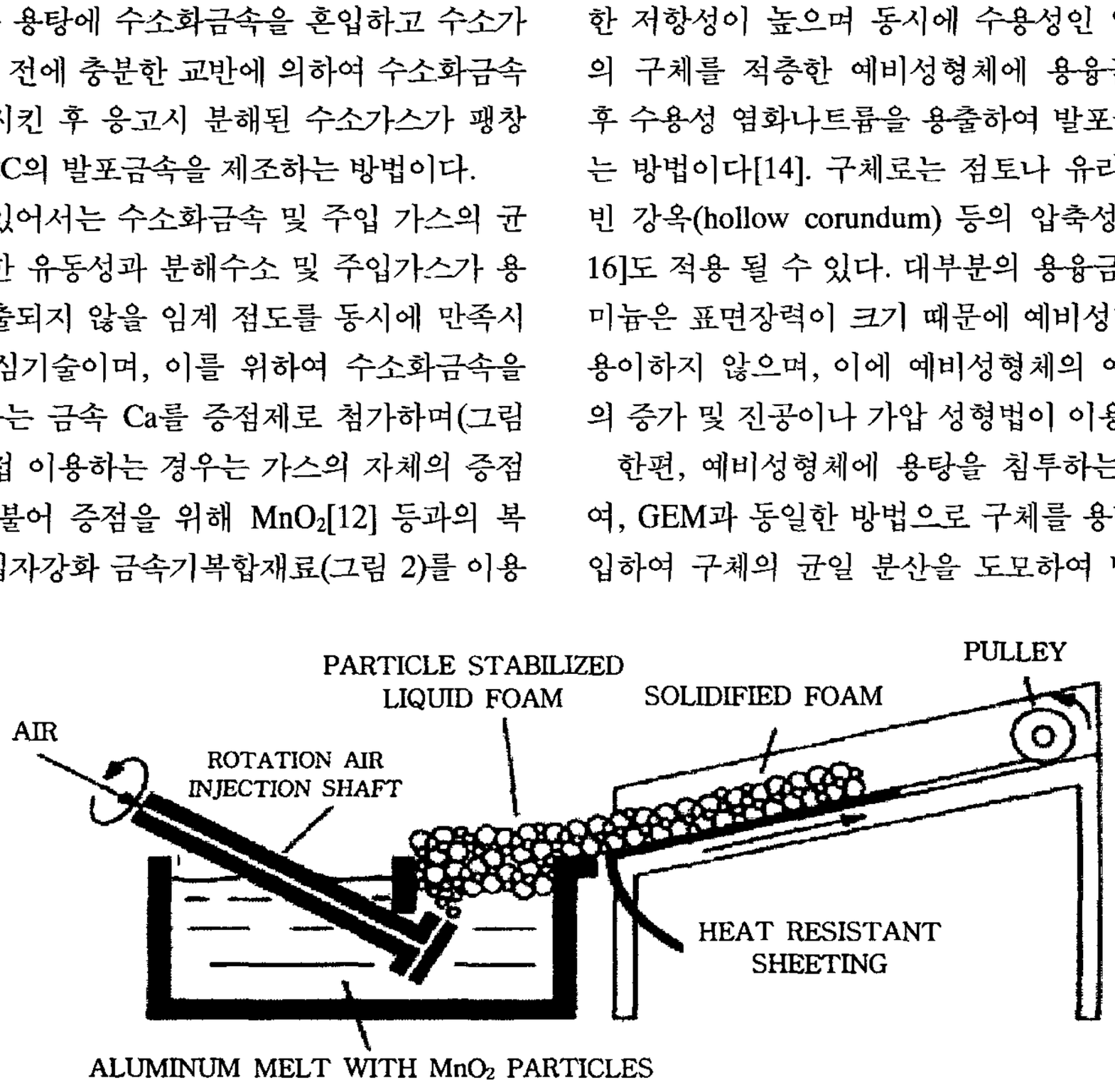

그림 2. 입자강화복합재료를 이용한 Gas Expansion Method.

조하는 방법도 있다[17].

2.1.3 정밀주조법[18]

종래의 정밀주조법을 이용하여 발포금속을 제조하는 기술로 복잡한 형상의 발포금속 제조가 가능한 장점이 있다. 이 방법은 스폰지 및 발포 플라스틱의 빈 공간에 유동성 내화물을 채운 후 스폰지 및 플라스틱을 태워 porous 주형을 만들고, 이 주형에 용융금속을 정밀주조한 후 내화물을 소거하여 스폰지 및 발포 플라스틱과 동일한 형상의 OC 발포금속을 만드는 방법이다. 주로 융점이 낮은 Al, Zn, Pb 등의 합금에 적용된다.

2.1.4 금속/가스 공정응고법(GASAR Process)

이 방법은 Ukraine에서 개발된 발포금속 제조공정으로 수소분압하에서 금속을 용해하여 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 수소농도에 의해 결정되며 100 μm~1 cm의 상당히 넓은 범위의 pore 크기를 가지는 발포금속의 제조가 가능하다.

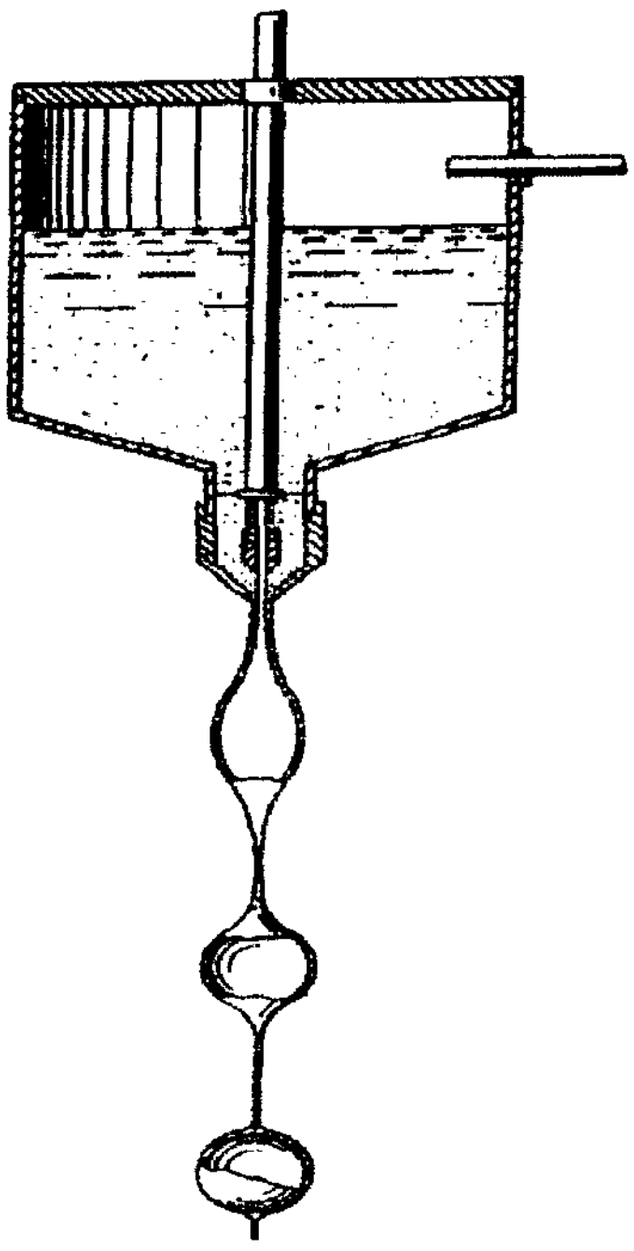

그림 3. Hollow sphere 제조시 이용되는 이중노즐 orifice.

2.2 분말법

2.2.1 Hollow sphere 법

이 방법은 ceramic hollow sphere를 만드는 방법에서 유래된 방법으로 수산화금속이나 금속산화물 등의 slurry를 그림 3과 같이 이중노즐로 되어있는 orifice에, 외쪽은 slurry가 내쪽에는 불활성가스가 통과할 수 있도록 설계하여, slurry의 점성, 가스압, orifice의 원주 및 모세관유(capillary jet)의 길이와 표면장력의 상호작용에 의해 거의 완전한 구형의 hollow sphere를 만드는 방법이다. 만들어진 hollow sphere는 적절한 가스 분압하에서 처리하여 금속 hollow sphere로 환원하고, 이를 다시 목적에 따라 소결이나 MIM(Metal Injection Molding)에 의해 발포금속을 제조한다. 이외에도 hollow sphere는 atomization에 의해서도 제조가 가능하다.

2.2.2 소결법

금속분말과 수소화금속(TiH_2, ZrH_2) 분말을 혼합한

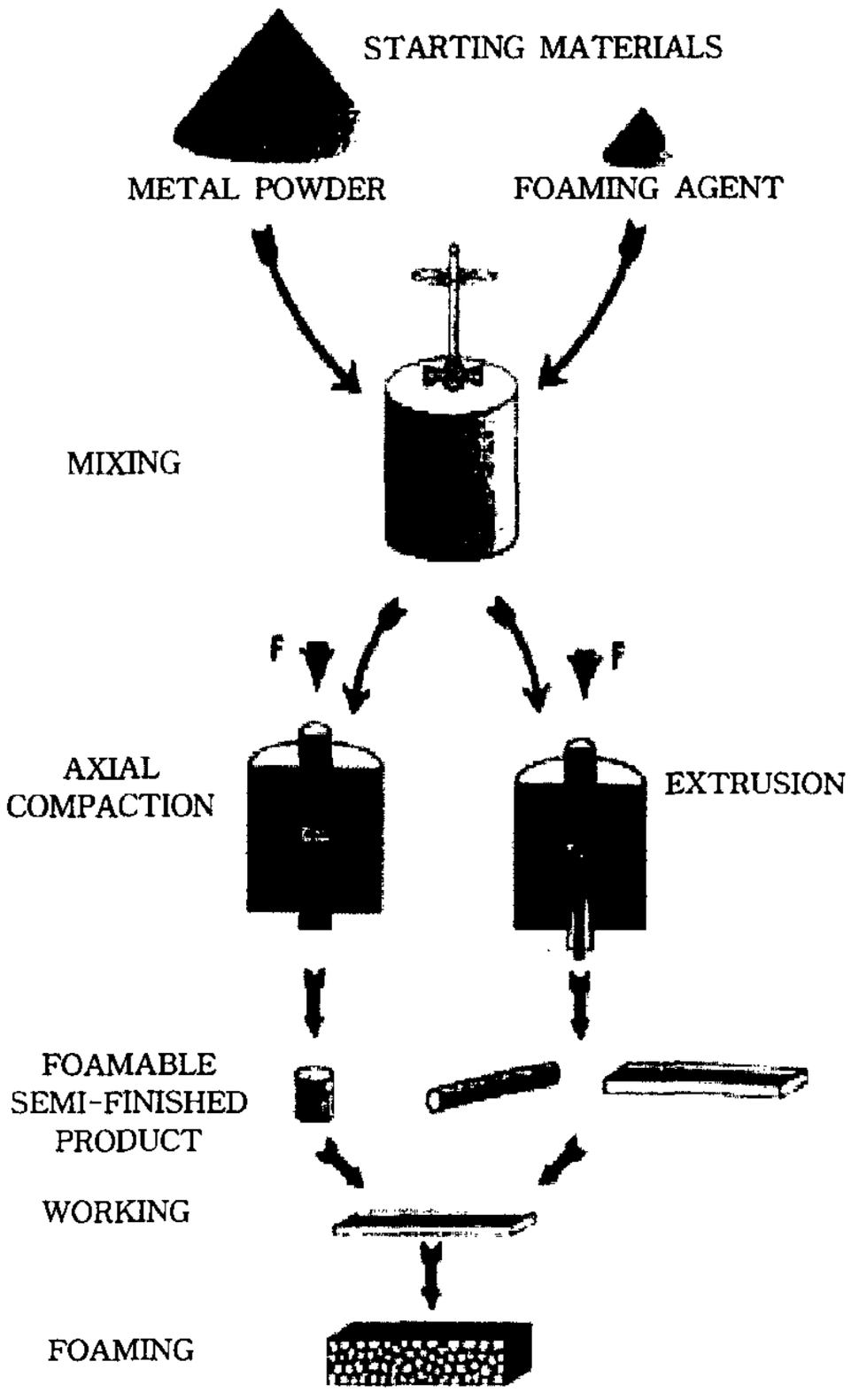

그림 4. 금속분말과 수소화금속분말을 이용한 소결법.

예비성형체를 압연이나 압출에 의해 반가공재를 만들고, 이를 수소화금속의 분해온도까지 가열하면 반가공재내에 분산되어 있던 수소화금속에서 분해된 수소가스의 팽창에 의해 발포금속을 제조하는 방법(그림 4)이다.

한편, Ti합금 발포금속 제조 시에는 수소화금속 대신 Ar 등의 불활성가스를 이용하기도 하며, 이를 일반 소결법과 분리하여 저밀도 코아법이라 부른다. 이 방법은 Ti 합금에 많이 이용되며, 금속분말이 들어 있는 can에 수기압의 Ar 가스를 주입하여 HIPing한 후, 이후의 열간압출, 열간압연 및 열간프레스 등에 의한 성형시 가스의 팽창에 의하여 판넬형 발포재(<3 mm)를 제조하는 방법이다. 이 소재는 중량비 탄성율이 높으며 발포금속의 특성상 인장보다는 압축에 대한 저항성이 높은 특징으로부터, 소재의 반 이상이 압축 및 굽힘 응력하에서 사용되는 항공기 산업에 적용이 가능하다.

3. 발포금속의 특성

3.1 기계적 특성

발포금속의 기계적 특성은 기공의 종류(OC 또는 CC), 형상, 크기, 균일성, 표면적 및 발포금속의 고체금속비 체적분율(이하 밀도) 등에 의해 좌우되며, 특히 밀도에 비례하여 증가한다. 이론적으로 발포금속은 변형시 소성변형과 파괴가 동시에 일어나며, 따라서 항복점 이후 응력의 증가 없이 변형이 진행되는 유동변형 거동을 나타낸다. 그러나 실제로는 결함의 존재와 발포금속의 형상규칙(morphological rules)에 의해 응력/변형율 선도에서 응력강하 및 이에 따른 주기적 변형대를 형성하게 되며, 발포금속이 응력하에서 국부항복과 그에 따른 0.1%이하의 탄성역을 갖는 변형강화를 수반하기 때문이다(그림 5). 한편, 발포금속의 형상규칙은[6, 19, 20] 기계적 특성에 미치는 기공 종류, 크기 및 균일성 등에 관한 형태학적 규칙으로, CC 발포금속에 있어서 균일 두께와 직선적 경계를 가진 경우에 고체금속에 근접하는 기계적 성질을 나타내며, 기공의 크기보다는 각각의 기공에 있어서 지름에 대한 두께비(국부밀도)가 기계적 성질에 보다 큰 영향을 미치는 것을 나타낸다.

OC와 CC에 있어서 밀도의 변화에 대한 Young's Modulus는 Gibson과 Ashby[1]에 의해 다음과 같이 제안되었다.

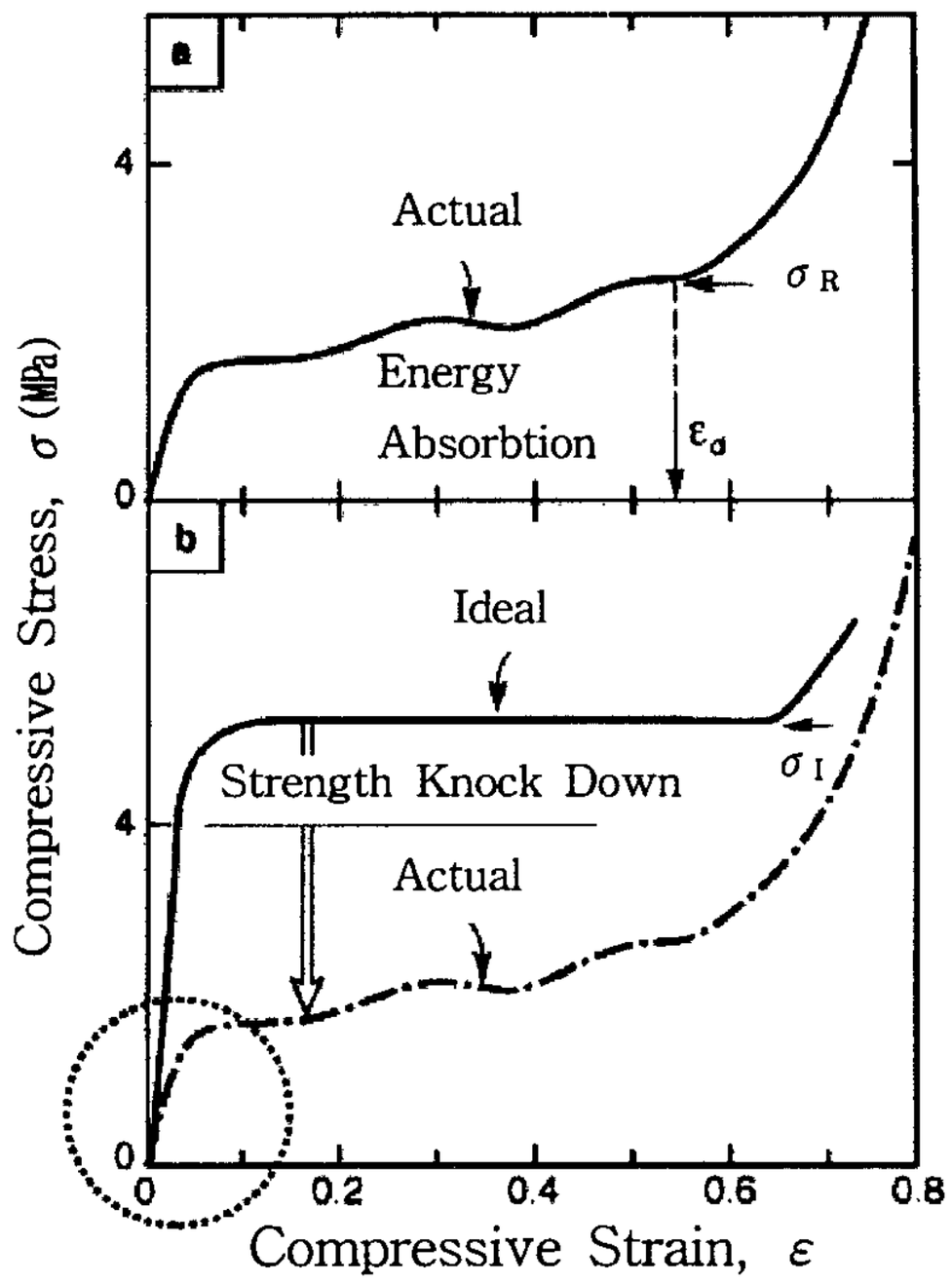

그림 5. 발포금속의 응력/변형율 선도, a) 실험결과, b) 이론계산.

$$\frac{E_f}{E_s} = C\Phi^2\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^2 + C^*(1-\Phi)\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right) \quad (1)$$

여기서 E는 탄성율, ρ는 밀도, C 및 C*는 비례상수, 첨자 f는 발포금속을 s는 고체금속을 표시하며, E_f/E_s 및 ρ_f/ρ_s는 각각 고체금속에 대한 발포금속의 탄성율과 밀도비를 나타내다. Φ는 형상계수로서 OC인 경우 1, CC인 경우 0의 값을 가진다. 주기적 tetrakaidecahedra, 조밀충진구조(close-packed-bonded spheres) 및 truss 구조의 경우가 이론적인 CC에 근접한다. 식 (1)에서 탄성율은 OC의 경우 밀도의 제곱에, CC의 경우 밀도에 비례하는 것과 CC의 경우가 보다 높은 탄성율 값을 갖는 것을 알 수 있다.

한편, Gibson과 Ashby[1]에 의해 제안된 밀도에 따른 강도비는 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_s} = 0.65\left(\Phi\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^{3/2} + (1-\Phi)\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right) \quad (2)$$

여기서 σ_f/σ_s는 상대적 압축강도를 나타낸다.

식 (1)과 (2)에서 CC의 경우 OC보다 탄성율은 5~

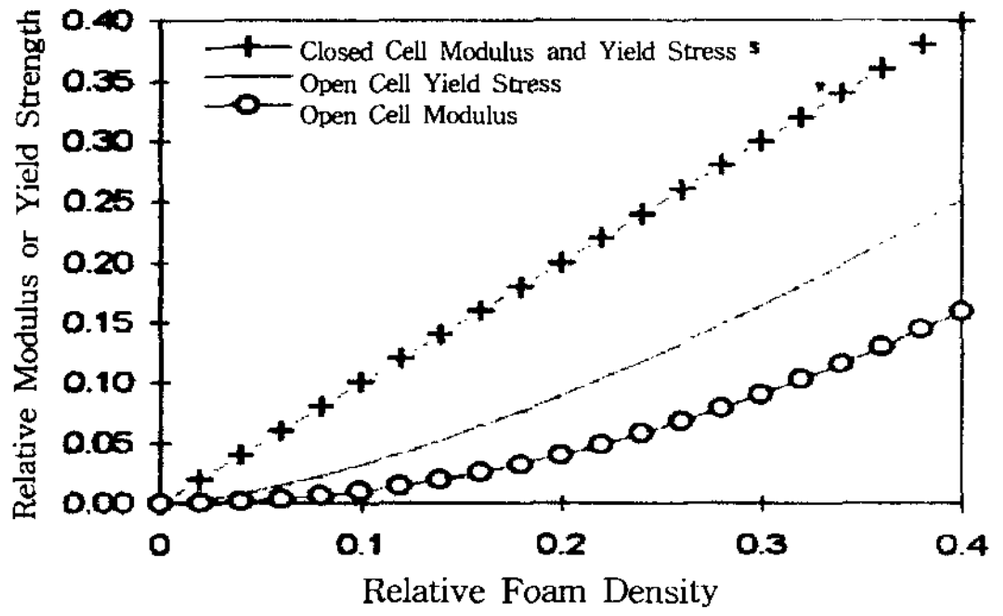

그림 6. 밀도 변화에 따른 CC와 OC의 탄성율 및 강도비 변화.

10배, 강도는 3~5배 정도 높은 것을 알 수 있으며, 이는 CC 발포금속이 높은 비탄성율 및 비강도를 요하는 초경량구조재에 적용이 모색되는 이유이다.

3.2 에너지 흡수성

발포금속의 단위 체적당 충격 에너지 흡수성은 일반적인 응력/변형율 선도로부터 구할 수 있으며, 발포금속의 밀도에 따라 비례하여 증가하는 경향이 있다[21]. 따라서 에너지 흡수성은 응력/변형율 선도에서 이론적으로 고려된 유동응력을 향상함으로 얻을 수 있다. 그러나 일반적으로는 적용에 요구되는 응력이 먼저 고려되며, 발포금속 자체의 변형거동에 따르는 에너지 흡수성은 건전한 발포금속을 제조하여 국부항복에 의해 응력강하 및 주기적 변형대를 형성하는 초기 항복현상을 방지함으로 높일 수 있다[22]. 충격 에너지 흡수성은 제조방법의 변화와 그에 따른 형태학적 개선에 의해 향상될 가능성은 미미하며, 고체금속과의 적층구조에 의하여 에너지 흡수성 및 기타 제성질의 향상하는 것이 바람직하다.

한편, 에너지 흡수성은 발포금속의 침투성(permeability)과 연관하여 진동 및 소음 에너지 흡수성을 나타내다. 발포금속의 침투성은 OC에 한하여 기공의 크기 및 내부 표면 거칠기에 의존하며, 충격 에너지 흡수성과는 다르게 형태학적 요소에 크게 좌우된다. 소음은 발포금속내에서 진동을 야기하며, 이 후 열에너지로 소멸한다[23]. 적층구조에 의해 발포금속의 두께와 공기 층의 두께를 변화함으로 광범위한 주파수역에 대해 흡음효과를 얻을 수 있으며, 기공의 크기와 형태를 변화하여 흡수 주파수 대역을 조절할 수도 있다.

3.3 열전달 특성

발포금속의 열전도도는 polymer나 ceramic에 비하여 상당히 크며, 열확산도는 고체금속과 거의 유사한 값을 가진다[1]. 또한 OC 발포금속은 형태학적 특징으로부터 체적비 표면적이 넓고 열 및 유체 전달에 적합한 구조를 가지고 있다. 이런 이유로 OC 발포금속은 열전달(열교환) 매개체로 적용되고 있다.

OC 발포금속의 열전달 능력은 표면적이 증가(기공 지름이 감소)할수록 복사면적의 증가에 의해, 밀도가 증가할수록 열전도 면적의 증가에 의해 증가하지만, 표면적과 밀도의 증가에 의해 기공을 통과하는 열 및 유체에 큰 힘이 요구되며, 적용을 고려하여 적정한 체적비 표면적을 구하는 것이 중요하다.

한편, 발포금속의 열전달 모델은 cylinder형의 모델과 비교할 때, 유효열전도도 및 밀도와 형상에 따른 국부 열전달계수 등을 고려해야 할뿐만 아니라 압력강하와 연관된 복잡한 과정이며, 아직 일반적인 식에 의한 예측은 불가능하다.

4. 발포금속의 적용

4.1 경량 구조용 발포금속

발포금속의 기계적, 물리적 제특성은 경량성 구조용 재료로 발포금속의 사용을 가능하게 하며, 특히 사용온도가 200°C 이상이 곳에 더욱 유용한 특성을 나타낸다.

항공기 재료의 core 등에도 이용되며, 높은 중량비 탄성율과 인장보다는 압축저항이 높은 발포금속의 특징과 아울러 적층구조의 설계에 의해 응력의 균일 분산을 도모하여 국부응력에 대한 저항을 높이므로, 소재의 반 이상이 압축 및 굽힘 하에서 사용되는 항공기 산업의 경량구조재료로 적합하기 때문이다.

4.2 에너지 흡수용 발포금속

충격 에너지 흡수용으로 자동차의 bump에서 항공기기의 clamping fixture까지 다양한 기기에 적용이 고려된다. 발포알루미늄은 자체가 에너지 흡수재이므로 고속 절삭 및 연삭기기의 에너지 흡수재에 적합하며, 5~10% 밀도의 발포구리는 충격흡수 지지대로 사용되는 고무보다 우수한 성능을 나타낸다.

소음 및 진동 에너지 흡수성은 일반적인 건축내장재 이외에도 심한 소음을 야기하는 고압 유체 및 가스

이송관에 사용되어 유체의 흐름을 방해하지 않으며 소음을 억제하는 곳에 이용된다. 발전설비 증기압의 감압재로도 적용이 가능하다.

4.3 열전달 매개용 발포금속

열전달 특성은 전자부품의 heat sink나 산업설비의 열교환기나 공조기 이외에도 발포니켈처럼 넓은 표면적에 의해 태양 에너지의 90%를 흡수하는 효율 좋은 태양 집열판 소재로 사용된다.

한편, 발포금속은 금속의 발화억제 및 지연 특성을 이용한 화염방지재로 사용되어 관 또는 배기부에서 유해 가스의 배출 또는 발화시 이를 억제할 수 있다. 한편, 발포금속은 발화억제 및 지연 특성 이외에 폭발적 압력에 대한 damping 효과와 더불어 폭발을 방지하는 곳에 적용이 가능하다.

4.4 여과용 발포금속

발포금속의 침투성은 에너지 흡수성과 연관하여 소음 및 진동 에너지 흡수성을 나타내는 동시에 액체나 기체의 흐름 중에서 고체 입자를 여과하거나 액체와 액체를 분리하는 filter로 사용이 가능하다. 특히 발포금속은 열에 강하므로 고온 filter로 그 특징이 더욱 크다고 할 수 있다. 가장 널리 이용이 되는 발포 filter로는 동 및 stainless 강이 있으며, 부식성이 강한 유체의 여과에 있어서는 발포 Au가 사용된다.

생체재료로도 적용이 가능하며, 발포구리는 열교환능과 bio-filter의 두 기능을 이용하여 순환기에 사용되며, 압축 발포금속은 신장에 있어서 삼투막 등에 이용될 수 있다. 삼투압과 역삼투압에 기초를 한 담수화 설비 및 탈수소화 설비에도 이용이 가능하다.

4.5 기타 응용

화학 공업에 있어서 발포금속은 경량성 및 강도와 화학적 안정성이 요구되는 흡수장치에 사용되며, 넓은 표면적에 의해 촉매로도 특징이 있다. 전기화학 공업에 있어서 50~60% 밀도의 발포니켈은 알카리 전지 및 연료전지의 전극으로 사용된다.

항공기나 산업용 터빈에 있어서도 마모재로 사용이 가능하며, 고체윤활 복합재료가 혼합된 Ni-Cr 발포금속은 가스 터빈엔진의 유용한 접촉재로 사용이 가능하다. 또한, 연소장치 산업에 있어서 가솔린 엔진 배기부와 낮은 온도에서 연소되는 연소기에 사용이 가능하다.

5. 맺음말

발포금속은 경량성, 에너지 흡수성 및 열전달 효과가 우수한 신개념의 금속재료로써, 제조기술의 진보를 통하여 다양한 분야에 적용 가능성이 기대되고 있다. 그러나, 실용화를 위해서는 요구특성을 만족하고 동시에 가격 경쟁력을 가진 제조기술의 보완 및 개발과 독특한 특성을 활용한 새로운 적용 분야의 개척이 필요하다고 생각되며, 이를 위해, Harvard, MIT, Aachen 등 구미 유수 대학과 NASA, 미국방성 등의 연구기관, ERG, 新鋼 wire 등 산업체를 중심으로 제조 및 특성평가에 관한 기초연구와 활용 방안이 활발히 모색 중에 있다. 최근, 국내에서는 발포금속 제조에 관한 연구가 집필자 등에 의해 일부 수행되고 있으며, 발포금속이 가지고 있는 우수한 특성 때문에 군수용으로부터 민수 · 산업용까지 전 분야에 적용이 가능한 소재이므로, 보다 지속적이고 체계적인 연구가 필요하다고 생각된다.

끝으로, 본 기술자료를 통하여, 국내에서도 발포금속에 대한 이해와 연구의욕이 증진되어 우수한 연구성과가 발표될 것을 기대하며, 가까운 미래에 발포금속의 고유특성을 활용한 다양한 item 들이 실용화 될 것을 믿어 의심치 않는다.

참 고 문 헌

[1] L. J. Gibson and M. F. Ashby, Cellular Solids, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2nd ed., (1997).
[2] S. Akiyama, K. Imagawa, A. Kitahara, S. Nagata, K. Morimoto, T. Nishikawa and M. Itoh, US Patent No. 4, 712, 277 (1987).
[3] J. Baumeister and J. Schrader, German Patent DE 4, 101, 630 (1991).
[4] I. Jin, L. Kenny and H. Snag, US Patent No. 4, 973, 358 (1990).
[5] M. W. Kearns, P. A. Blenkinsop, A. C. Barber and T. W. Farthing, Int. J. Powd. Met., 24(1988) 59.
[6] Y. Sugimura, J. Meyer, M. Y. He, H. Bart-Smith, J. L. Grenestedt and A. E. Evans, Acta Mater., 45(1997) 5345.
[7] T. J. Lu, H. A. Stone and M. F. Ashby, Acta Mater., (1998) to be published.
[8] G. J. Davies and S. Zhen, J. Matre. Sci., 18 (1983) 1899.
[9] A. Sosnik, US Patent No. 2, 434, 775 (1948).
[10] J. C. Elliot, US Patent No. 2, 751, 289 (1956).
[11] L. M. Niebylski, C. P. Charema and T. E. Lee, US

Patent No. 3, 743, 353 (1974).
[12] L. G. Graper, US Patent No. 3, 379, 517 (1968).
[13] S. E. Speed, US Patent No. 3, 981, 720 (1976).
[14] H. A. Kuchek, US Patent No. 3, 236, 706 (1966).
[15] W. Thiele, Mat. Mater., 6 (1972) 349.
[16] W. Thiele, German Patent DE 3,933,321 (1971)
[17] J. R. Kreigh and J. K. Gibson, US Patent No. 3, 055, 763 (1962)
[18] Jpn. Ind. Tech. Bull. 8 (1980) 19.
[19] J. L. Grenestedt, J. Mech. Phys. solids, 46 (1998) 29.
[20] A. M. Kraynik and D. A. Reinelt, J. Colloid Interface Sci., 181 (1996) 511.
[21] P. H. Thornton and C. C. Magee, Metall. Trans., 6A (1975) 1253.
[22] S. K. Maiti, L. J. Gibson and M. F. Ashby, Acta Met., 32 (1981) 1963.
[23] J. Pizzirusso, Mach. Des., 53 (1981) 135.