



THEME 02

독일의 다공질 금속 개발 동향

Günter Stephani | 독일 Fraunhofer 생산 및 첨단재료 연구소, 부소장 | e-mail : Guenter.Stephani@ifam-dd.fraunhofer.de
번역 : 강기주 | 전남대학교 기계시스템공학부 교수 | e-mail : kjkang@jnu.ac.kr

이 글에서는 독일 특히 드레스덴의 Fraunhofer IFAM 연구소에서 개발하였거나, 진행 중인 여러 가지 다공질 금속의 현황과 응용에 대하여 소개한다.

다공질 금속재료는 모재 금속과 전혀 다른 물성을 갖는다. 다공질 구조에 기인한 무게의 대폭 감소와 재료 절감 외에도 소음 및 에너지 흡수 능력, 낮은 전도율, 우수한 진동감쇄 능력, 필터 및 촉매지지체로서의 성능이 다공질 금속의 응용을 촉진하고 있다. 따라서 여러 가지 다공질금속의 제조법이 개발되었다. 일반적으로 다공질 금속의 제조는 크게 용융금속 내에 기포를 발생시키는 액상법과 고체상태의 금속을 처리하는 고상법(solid state method)으로 분류할 수 있다. 그러나 고상법 중 일부, 즉, 액상 소결이나 단일셀의 브레이징 공정 중에는 제한적이지만 액상금속이 생긴다. 일반적으로 고상법에서는 최종 다공질금속 구조가 형성되는 과정에 소결단계가 포함되므로 이 단계에서 분발 야금학적 방법들이 중요한 역할을 한다. 다공질 구조는 다수의 단일 셀들을 조합하여 형성할 수도 있고 덩어리 금속으로부터 떼어내어 형성할 수도 있다. 셀 자체의 성형은 주형을 이용하거나 주형 없이 이루어지기도 한다.

다공질 금속 예

다공질재료의 물리적 특성은 기본적으로 그 셀 구조와 셀 크기, 기공률(porosity)에 의존한다. 다공질 재료의 구조는 다양하며, 그 셀 크기나 기공률이 광범위하게 분포하므로 매우 다방면의 응용이 시도되

고 있다. 그림 1은 금속섬유 구조(metal fiber structure), 네트워크 구조(network-like structure) 및 MHS(Metal Hollow Sphere) 구조의 형상과 셀 크기의 분포를 보여주고 있다. 섬유 구조와 네트워크 구조는 열린 다공성(open cell porosity)을 갖는데 반하여 MHS 구조는 대체로 닫힌 다공성을 가지며 이 세 가지 구조는 셀 크기가 10^{-2} ~ 10^1 mm, 기공률은 50~96% 범위에 있음을 알 수 있다.

금속섬유구조

도가니용융추출법(crucible melt extraction)을 사용하여 짧은 $50\mu\text{m}$ 정도의 직경을 갖는 금속섬유를 뽑아낸다. 거의 대부분의 금속 및 합금에 적용 가능한 방법이다. 이 섬유에 적절한 물질을 코팅(deposition)하고 소결하여 높은 기공률을 갖는 다공질 금속을 제조한다.

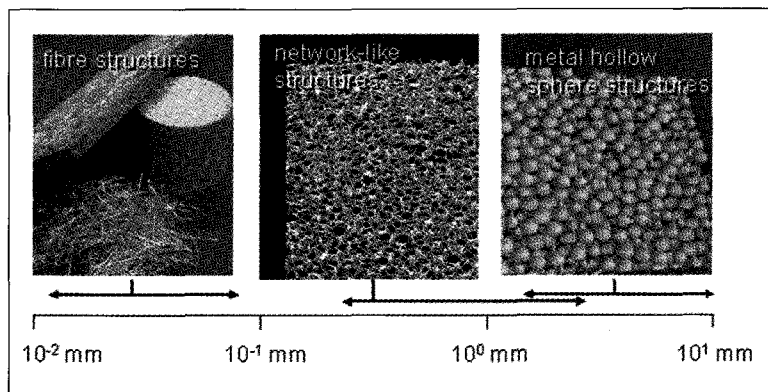


그림 1 여러 가지 다공질 금속의 구조 및 셀 크기 범위

네트워크 구조

이 열린 다공성 물질은 폴리우레탄 스폰지를 본(template)으로 사용하여 복제법(replication)에 의하여 제조된다. 복제법은 다음과 같은 2 또는 3 단계로 구성된다. 먼저, 3차원 망상조직을 갖는 폴리우레탄 스폰지를 밀폐된 용기에 넣고 금속을 포함한 증기 또는 액체를 통과시켜 스폰지 표면에 금속(이나 금속분말을 포함한 혼합물)을 코팅한다. 다음 단계에서 공기 중에서 열을 가하여 스폰지를 태워 제거하고, 코팅된 금속분말을 소결한다. 이 방법으로 0.4~5.0mm 정도의 셀 크기와 75~95%의 기공률을 얻을 수 있다.

MHS

MHS는 아래와 같은 3단계 공정을 통하여 제조된다.

- 스티로폼 구(sphere)에 금속분말/바인더 혼합물을 코팅한다.
- 다수의 코팅된 스티로폼 구를 밀폐된 틀에 넣어 일정한 형태를 갖게 한다.
- 열을 가하여 스티로폼과 바인더를 태워 제거하고 소결한다.

MHS의 특징 중의 하나는 광범위한 재료로 제조할 수 있다는 것이다. 0.5~10mm의 넓은 범위 내에서 정확히 원하는 셀 크기를 갖는 다공질 물질을 얻을 수 있다. 셀 벽 두께는 약 $20\mu\text{m}$ ~ $1,000\mu\text{m}$ 범위에서 조절이 가능하다. 소결 공정을 조절하여 셀의 벽을 완벽한 비투과성 또는 투과성으로 만들 수 있다.

특성

다공질 금속은 엄격한 조건 때문에 특별한 여러 가지 특성을 동시에 만족시켜야 하는 경우에 중요한 이점을 제공할 수 있다. 다공질 구조 덕분에 매우 가벼우면서도(최고 95%의 기공률) 무게 대비 강도와 강성도가 높다. 동시에 낮은 열전도율(모재의 1~5%)과 합성수지 매트릭 재료와 유사한 수준의 소음흡수 능력을 갖는다. 열린 셀 구조를 갖는 경우 높은 비표면적의 투과성을 갖는다. 이상의 비범한 특성에 기초하여 여러 가지 공학적인 용도로 응용되고 있다.

응용 사례

스털링 엔진

동력 또는 전기의 생산을 위하여 여러 회사에서 스텔링 엔진을 개발하고 있다. 독일 포츠담에 위치한 Enerlyt Technik GmbH도 그런 회사 중의 하나이다. 스텔링 사이클에서는 일정량의 기체를 가열하고 냉각하는 과정을 반복한다. 임시 열 저장기(heat accumulator) 역할을 하는 소위 축열기(regenerator)가 존재하여 높은 열 효율을 갖게 한다. 축열기는 왕복하는 최고 800°C 에 달하는 유체에 견뎌야 하는데 아직까지 철망을 적층하고 접합하여 제조된다.

스털링 엔진의 효율은 축열기의 열전달 능력과 압력손실에 의해 결정되므로 축열기의 설계 및 제작에 고도의 기술과 재료가 동원된다. Enerlyt Technik GmbH에서는 SolidWorkss 소프트웨어를 이용하여 축열기의 동작과정을 시뮬레이션하였다. 먼저 금속섬유 구조를 구성하는 섬유 한 가닥을 대상으로 주변의 유동과 열전달을 시뮬레이션한 다음 수개의 섬유를 포함하는 부피요소를 만들었다. 이것으로부터 섬유 한 가닥과 인접한 다른 섬유 주변의 유동 그리고 주어진 기공률에서 섬유 배치의 영향을 조사하였다. 이 부피요소들을 조합하여 스텔링 엔진의 축열기를 모사하였다. 초기 최적 성능은 $50\mu\text{m}$ 의 가는 섬유로 구성되고 약 90%의 기공률을 갖는 금속섬유구조에서 얻어졌다. 직경과 길이가 각각 80mm인 축열기에 대하여 유동저항으로 인한 동력손실이 오직 20W에 불과한데 열전달량은 19.6kW를 얻었다. 그러나 최근의 시뮬레이션한 결과 더 굵은 섬유로 구성되고 기공률이 더 낮은 금속섬유구조로 만들어진 축열기는 더 낮은 동력손실을 나타내었다. 섬유배열 방향을 유동방향에 평행하게 하면 더 낮은 동력손실을 얻을 수도 있을 것으로 기대된다. 다른 스텔링 엔진에 대하여 금속섬유구조 축열기의 성능을 실험으로 조사한 연구에서도 전체 효율이 이론기대치에 육박하는 것으로 보고된 바 있다. 현대 실증 실험이 진행 중이며 올해 이내에 완료될 것이다.

다공성 표면연소기

여러 가지 연료에 사용되는 다공성 표면연소기 (porous surface burner)는 매우 특별한 이점을 가진다. 즉, 콤팩트하나 고출력이며 거의 완벽한 완전연소가 가능하다(그림 2(a)). 이런 특성은 다공질을 갖는 금속 표면 근처의 안정된 연소 덕분이다. 종래에는 이런 구조물들은 주로 특수한 세라믹로 제조되었다. 보조동력 장치(APU)와 같이 갑작스러운 작동이 필요한 경우에는 기계적 진동 때문에 종종 세라믹연소기가 파손되곤 한다. 따라서 금속제 연소기가 바람직하다.

긴 수명을 위하여 특수 고온내열금속이 첨가로서 사용된다. 바로 유명한 철-크롬-알루미늄(Fe-Cr-Al) 합금으로 알루미늄 함유량을 통상의 7%보다 훨씬 높은 15%까지 높인 것이 사용된다. 이 합금 첨가는 오직 용융추출법으로만 제조될 수 있다. 그림 2(b)는 1,000°C에서 최대 1,000시간까지 실시된 연소실험의 결과로서 초기에는 두 합금이 모두 전형적인 포물선형태의 시간-산화질량 증가 경향을 나타내나 5%의 알루미늄을 함유한 합금은 약 600시간이 경과한 후 내부의 알루미늄이 모두 고갈되어 급격한 산화가 나타나나 15%의 알루미늄을 함유한 합금은 약 2,500시간까지도 안정적인 내구성을 나타내었다.

이상의 Fraunhofer IFAM 연구소에서 실시된 예비 연구 결과는 다공성 표면연소기로서 금속첨유조적이 매우 유망한 것으로 알 수 있었다. 향후에는 낮은 압력손실과 균일한 연소가스의 분포 및 최대 고온내구성, 양호한 열전달 특성을 위한 상세연구에 집중할 예정이다.

생체재료: 골이식재료

골다공증으로 인한 골절과 같은 대규모 손상을 대체하는 인공 뼈의 이식은 시급한 의학적 과제이다. 최근에는 이와 같은 대규모 손상 부위는 자기생성 골조직이나 금속제 임플란트로 대체되고 있다. 그러나 전자는 수술과정을 복잡하게 하여 위험성을 높이며, 후자는 주변 뼈와 금속 임플란트 사이에 강성(stiffness) 차이로 인한 응력집중과 이로 인하여 주변 뼈와의 결합을 헐겁게 하는 문제가 있다. 네트워크 구조의 발포금속은 천연 뼈와 유사한 구조를 가진다(그림 3). 따라서 내부에 뼈 세포와 혈관이 자랄 수 있다.

이상의 용도를 위하여 스테인리스강과 티타늄제의 열린 셀의 발포금속이 개발되었다. 이 발포금속의 강성이 천연 뼈와 유사하여 응력집중이 발생하지 않는다. 최근 이 물질을 이용하여 양의 척추뼈 대체실험을

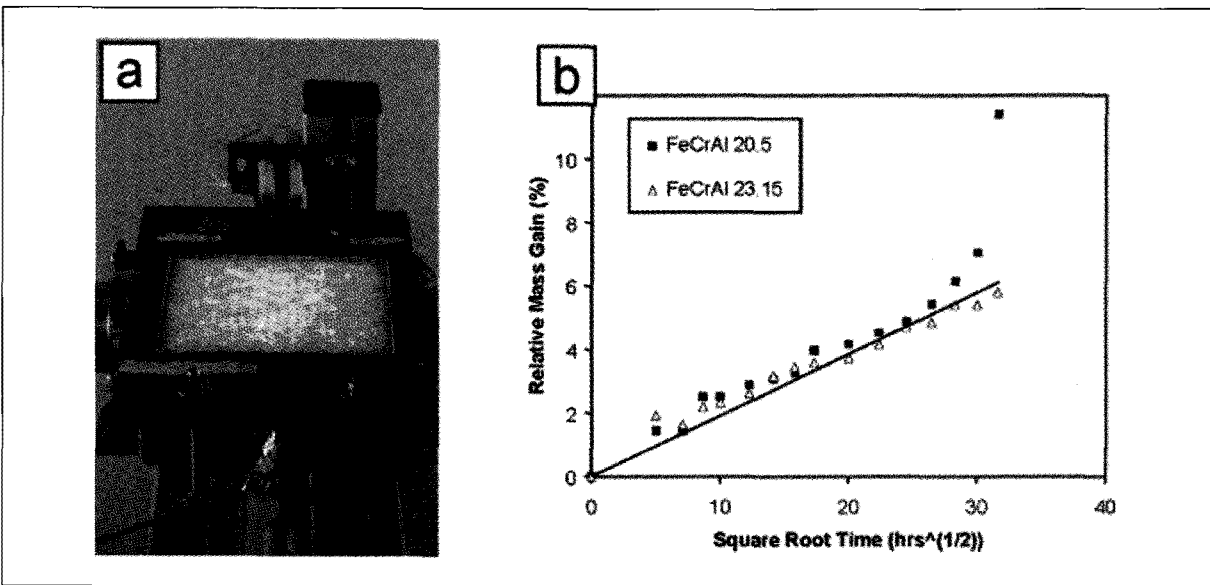


그림 2 (a) Fraunhofer IFAM 연구소의 금속첨유구조 버너플레이트, (b) 1,000°C 대기 중 산화에 의한 시간에 따른 금속첨유구조의 상대질량 증가율(두 가지 합금 첨유)

하여 성공적인 결과를 얻었다. 이 인공뼈의 단면을 조사한 결과 내부에 새로운 뼈 조직이 왕성하게 자라고 있음이 확인되었다.

열차단

몰리브덴은 고온강도가 높기 때문에 각종 가마의 고온판, 가열장치 지지, 열차단 판의 소재로 사용된다. 지난 5년 사이에 몰리브덴의 원가가 7배 이상 폭등하여 재료비가 각종 산업용 가마 제조업체의 중요 이슈가 되었다. 따라서 Fraunhofer IFAM-DD 및 IKTS 연구소는 H.C.Starck Hermsdorf GmbH와 협력하여 모재의 1~5%에 불과한 열전도율을 갖는 열차단용 경량 발포 몰리브덴을 개발하였다(그림 4). 최대 기공률이 95%에 달하며 셀 크기가 0.8~1.2mm의 네트워크 구조를 갖는다.

초기 실험에서 이 신 재료의 열차단 능력이 공업용 진공로 내에서 측정되었다. 발포 몰리브덴은 몰리브덴 박판과 적층한 형태로 사용되었으며 종래의 단일 몰리브덴판과 비교하여 저온부에서의 온도가 2% 정도밖에 차이 나지 않았으나 전체 열차단체의 무게는 1/4로 감소하였다. 유사한 방법으로 몰리브덴 MHS도 고온용 열차단용 재료로서 응용될 수 있다. 열전도율이 0.5 내지 $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 범위에 있다. 추가로 MHS의 열전도율을 유한요소법을 이용하여 시뮬레이션한 결과 실험결과와 일치함을 확인하였다.

소음흡수

Kundt 튜브와 모터사이클 엔진을 이용하여 316L 스테인리스강 MHS 소결체의 소음 흡수능력을 조사하였다. 종래의 유리섬유 충전재에 비하여 특히 1,000Hz 이하의 저주파 소음의 흡수능력이 우수하였다. 소음수준이 약 10~15dB 정도 감소하였다. 승용 디젤 엔진 (BMW 2.4 TDI)의 소음기로서의 성능조사에서도 충분히 가열된 상태에서 엔진 회전수가 1,500rpm 이하이면 유리섬유 충전재에 비해 훨씬 우수한 반면에 1,500~4,500rpm 범위에서는 거의 유사한 소음흡수 능력을 보였다.(그림 5)

기존 소음기에 비하여 최대 25%에 달하는 무게 감소와 간단한 조립공정이 이점이다. 소음감소 능력에 미치는 주요 인자는 MHS의 직경과 전체 소결체의 밀도이다.

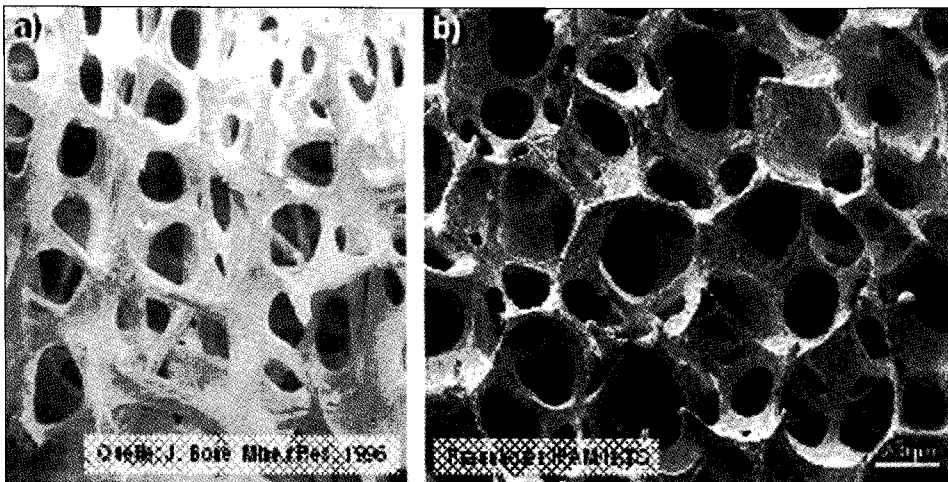


그림 3 (a) 천연 뼈와 (b) 열린 셀의 발포금속 조직

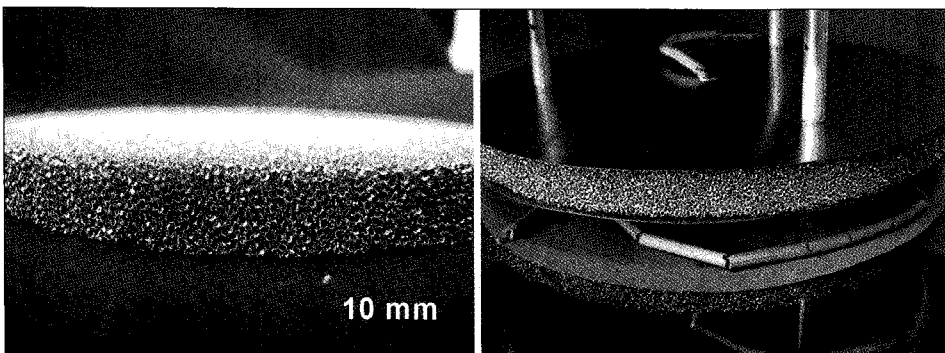


그림 4 공업용 가마의 열차단용으로 개발된 경량 발포 몰리브덴

MHS 직경이 작고 전체 밀도가 낮을수록 우수한 소음흡수 능력을 나타내었다. 앞에서 보인 것처럼 MHS 소결체의 열전도도가 낮기 때문에 소음기에 별도의 단열재를 사용할 필요가 없다.

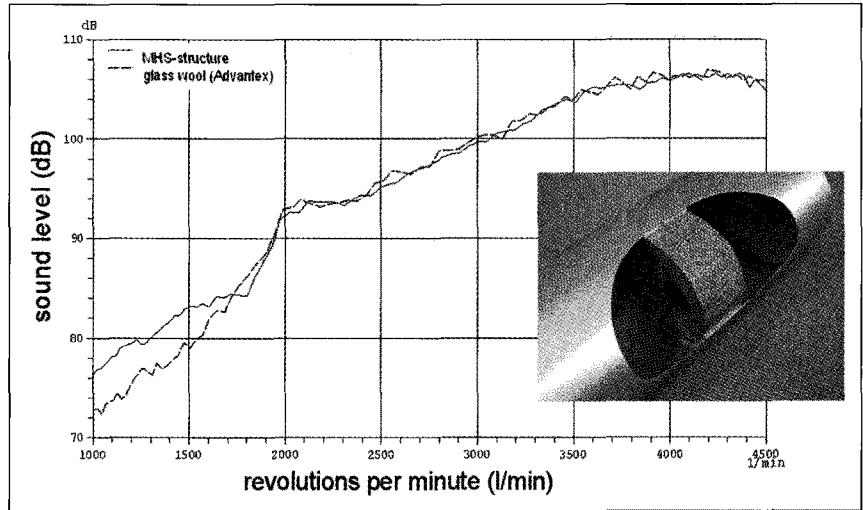


그림 5 MHS와 유리섬유를 각각 충전한 두 가지 소음기의 엔진회전수에 따른 소음흡수 능력



기계 용어해설

태코제너레이터(Tachometer Generator)
 측정하고자 하는 구동축에 발전기를 장착하고, 발전기에서 발생한 전력을 측정하여 축의 회전수를 측정하는데 쓰이는 속도계용 발전기.

테일 로드(Tail Rod)
 횡형 기관의 피스톤 중량을 지탱하기 위하여 피스톤 로드를 피스톤의 반대쪽으로 연장한 부분으로, 피스톤과 실린더벽의 마모를 감소시키고 증기의 누설을 줄이기 위하여 설치하는 것.

탄탈륨(Tantalum)
 원소기호 Ta, 강과 비슷한 광택이 나는 금속으로 비중은 16.6이며 산, 알칼리에 침식되지 않고, 전구의 코일선, 도가니, 전극, 내열강의 첨가물 등으로 쓰이는 희유 원소의 일종.

탭 볼트(Tap Bolt)
 죄려고 하는 부분이 두껍거나, 또는 관통 볼트의 머리가 숨겨져서 죄기 곤란할 때 상대방에 직접 암나사를 깎아 너트 없이 죄서 체결하는 볼트.

테이퍼 핸드 탭(Taper Hand Tap)

거친 탭. 손다듬질용 탭은 거친 탭, 중간 탭, 다듬질 탭의 3가지 탭이 한 조로 되어 있으며, 거친 탭은 암나사를 깎을 때 첫 번째로 쓰이는 탭.

텔레스코픽 실린더(Telescopic Cylinder)
 실린더 내부에 또 다른 실린더가 내장되어 있고 압력유체가 유입되면 차례로 실린더가 나오도록 만들어져서, 큰 스트로크를 얻을 수 있는 구조의 실린더.

뜨임취성(Temper Brittleness)
 니켈-크롬 강을 560℃ 이하의 온도로 뜨임처리하여 서냉하는 경우에 점성을 잃게 되어 여러게 되는 현상.

뜨임(Tempering)
 템퍼링. 강을 담금질하면 경도는 높아지지만 재질이 여러게 되므로 변태점 이하의 온도로 재가열하여, 경도는 낮추고 점성은 높이는 열처리의 일종.

형판접안 렌즈(Template Eyepiece)
 공구현미경, 만능측정현미경 등에서 나사산의 윤곽, 원호, 원 등 다수의 표준도형을 그린 유리판이 초점면상에서 회전할 수 있도록 만든 접안 렌즈.