



# THEME 05

## 로터스 금속

현 승 균 | 인하대학교 신소재공학부, 교수 | e-mail : skhyun@inha.ac.kr

Hideo Nakajima | Osaka University, Professor | e-mail : nakajima@sanken.osaka-u.ac.jp

로터스 금속은 종래의 등방성 기공구조의 다공질 금속에서 발현할 수 없는 새롭고 우수한 기계적 특성을 갖고 있어서 새로운 산업적 응용이 기대된다. 이 글에서는 로터스 금속의 제조법, 기계적 특성, 응용에 관해 소개하고자 한다.

자연계를 둘러보면 목재, 뼈, 잎과 줄기 같은 다양한 종류의 다공질 재료가 존재한다는 것을 알 수 있다. 또한 식료, 의료, 건축물 같은 인공재료의 경우에도 그 대부분 다공질 구조이고 이것은 영양분과 수분의 보급로 이외의 경량화, 통기성, 보온성 등의 기능성을 이용하고 있다. 인간의 골격을 구성하고 있는 대퇴골, 경골 등은 그 외각에 치밀골, 중심부에 다공질의 해면체로 구성되어 있고 높은 경량성이 요구되는 새의 뼈의 구조를 보면 다공질의 밀도가 현격이 낮아진다.

한편 산업용 부품소재의 대부분은 주조법 또는 분말야금법을 통해서 제조하고 있으며 이 때 발생하

는 가스 기포 등의 주조결함이나 소결결함 등은 제품 성능을 저해하는 유해한 결함으로 인식되어 왔다. 따라서 일반 제조 공정에 있어서 결함이 없는 치밀한 재료를 제조하는 것이 고성능제품의 필수 조건이다.

종래의 제품에서도 다공성과 거대한 표면적을 이용한 다공질 필터와 전극재료 등을 널리 이용하고 있으나 구조적으로 기계적 강도가 현저하게 떨어지는 문제점을 갖고 있다. 그렇지만 강도가 저하하지 않는 다공질 재료의 제조가 가능하면 경량구조재료와 수송기재료에서의 광범위한 이용을 기대할 수 있다.

본 연구는 주조결함을 유용하게 이용하는 역발상적인 시도에서 시작하는 동기가 되었다. 그 결과 그림 1과 같이 기공배열구조를 정밀하게 제어한 다공질 금속인 일명 로터스 금속(Lotus metal)의 제조법을 확립해 종래 다공질 금속보다 우수한 강도특성을 얻는데 성공하였다. 이 글에서는 그 제조법과 강도 및 산업응용 등에 대해서 소개하고자 한다.

### 제조법

원주상의 방향성 기공을 갖는 로터스

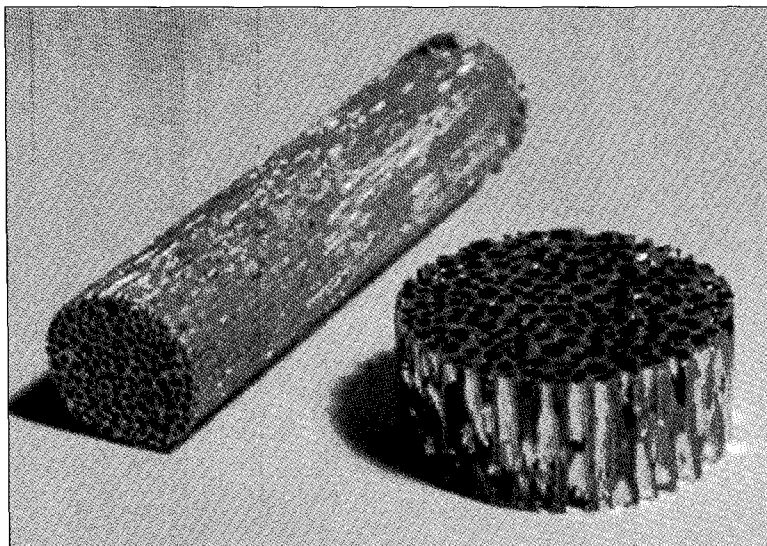


그림 1 로터스 금속

금속의 제조 원리는 용융금속의 높은 가스 용해도와 고체금속의 낮은 가스 용도의 차이를 이용하여 응고할 때 고용되지 않는 가스원자가 기포를 형성시키는 것이다. 수소 용해도는 모든 금속에 있어서 온도 상승에 따라 증가하지만 용점에 있어서 용해도의 불연속적 증가를 나타내며 응고할 때 고액계면에서 다량의 가스를 방출하고 기공 생성을 야기한다. 특히, 고·액상에 있어서 수소 용해도 차이가 큰 마그네슘, 니켈, 철, 동 등은 기포를 생성하기 쉽다. 또한 기공의 배열구조를 제어하기 위해 그림 2와 같이 일방향응고법을 이용하여 기공에 방향성을 부여한다. 외관상 기공구조가 연근을 닮아서 로터스 금속이라는 명칭으로 널리 알려져 있다. 이와 같은 제조방법에 의해 로터스 금속은 기공 방향, 기공 크기, 기공률을 자유롭게 제어할 수 있고 우수한 기계적 성질이 기존의 발포금속, 소결금속과 전혀 다른 특성을 가지고 있다. 이러한 기공구조는 용해온도, 응고속도, 분위기 가스압, 불활성 가스와의 혼합체적비 등의 제어를 통해서 조절할 수 있다.

실제로 수소 분위기에서 철, 니켈, 동, 마그네슘, 알루미늄, 티타늄 등의 다양한 금속과 그 합금을 다공질화할 수 있고 질소 분위기에서 철계 합금이 가능하다. 또한, 산소 분위기에서 응고할 때 용점 이하에서 금속 산화물을 형성하지 않는 은, 금에 있어서도 다공질 금속을 제조할 수 있다.

그림 3과 같이 열전도도가 높은 동과 마그네슘을 제조하는데 있어서 저면의 냉각부로부터의 방열성이 충분하기 때문에 비교적 일정 응고속도를 유지하고 균일한 기공 크기, 기공률을 갖는 로터스 금속을 제조할 수 있으나 스테인리스강과 같이 낮은 열전도도의 금속에서는 냉각부에서 가까운 부분에서 응고속도가 빠르지만 주피 내부로 갈수록 불충분한 방열로 인하여 응고

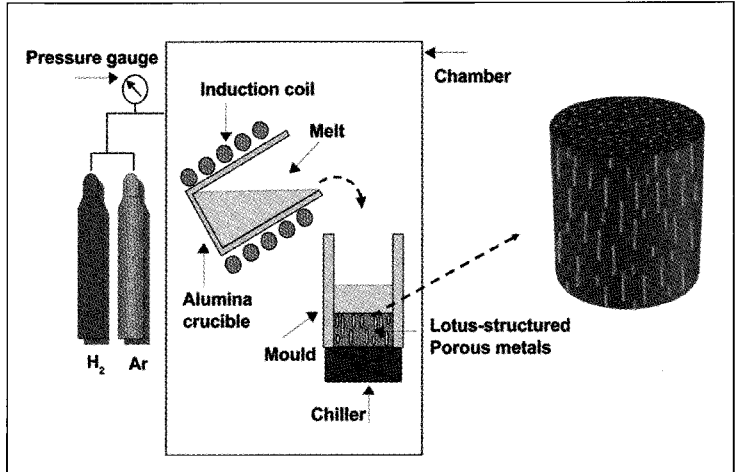


그림 2 로터스 금속의 제조장치 모식도

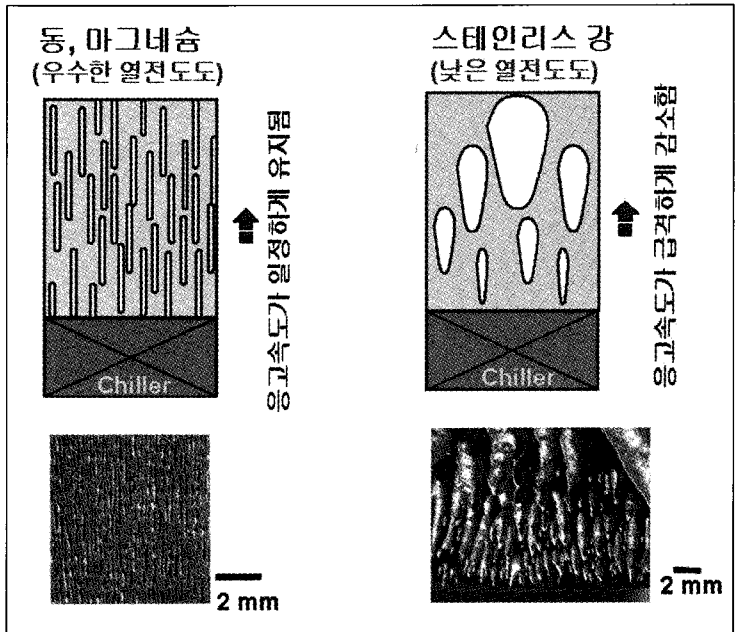


그림 3 열전도도의 차이에 따른 일 방향 기공의 성장 과정

속도가 급격하게 저하되고 기공의 조대화가 일어나서 균일한 기공분포 및 기공률을 갖는 로터스 금속의 제조가 불가능하다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 응고속도를 일정하게 유지할 수 있는 존멜팅(Zone melting) 법을 이용한 제조 공정을 개발하였다. 이 방법은 금속 봉체를 고주파 코일에서 부분적으로 용해시키면서 일정속도로 이동하면서 일방향 응고시켜 응고속도를 일정하게 유지할 수 있다. 이 때 용융상태에서 흡수한 가스가 응고 시 과포화가스가 되어 기공이 형

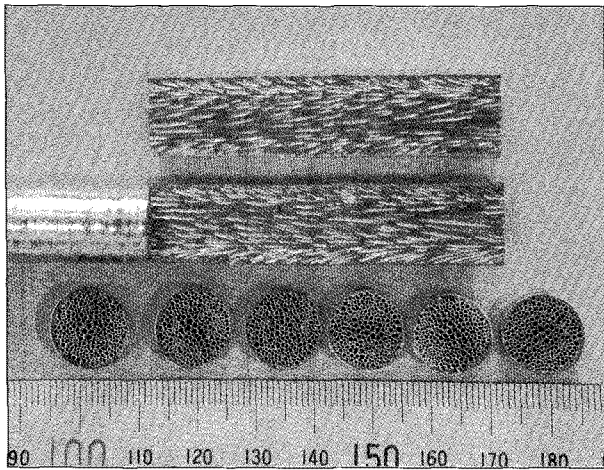


그림 4 로터스 스테인리스강

성하는 것을 이용한다. 기공크기 및 기공률은 용고 속도에 의존하며 이 용고 속도는 붕의 이동 속도와 관계한다. 이와 같은 방법으로 제조한 로터스 스테인리스강의 단면사진을 그림 4에 나타냈다. 용고속도를 일정하게 유지를 통하여 균질한 기공분포를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

### 기계적 특성 및 응용

로터스 동의 다양한 기공률에 따른 인장강도와 항복강도 특성을 그림 5에 나타낸다. 인장방향이 기공과 평행한 경우 인장강도와 항복강도는 기공율의 증가와 함께 직선적으로 감소하고 측정치는 기공률 100%에서 0 MPa를 나타내는 점을 통과하는 직선상에 놓인다. 이것은 시험편 중에서 응력집중이 거의 일어나지 않고 비강도 측면에서 보면 기공률에 관계없이 일정하며 치밀체 금속과 동일하다는 것을 알 수 있다.

반면에 인장 방향이 기공 방향과 수직인 경우 인장강도는 기공률의 증가와 함께 급격하게 저하한다. 이것은 기공주변의 응력집중을 고려하면 인장강도의 저하를 설명할 수 있다. 항복강도는 기공률이 약 5% 이하에서는 기공률의 증가와 함께 높아지지만 그 이상의 기공률에서 저하해서 약 30% 이상의 기공률에서 급격하게 저하한다. 낮은 기공률에서 높은 항복강도는 응력집중이 작용하는 기공 주변의 국부적인 소성

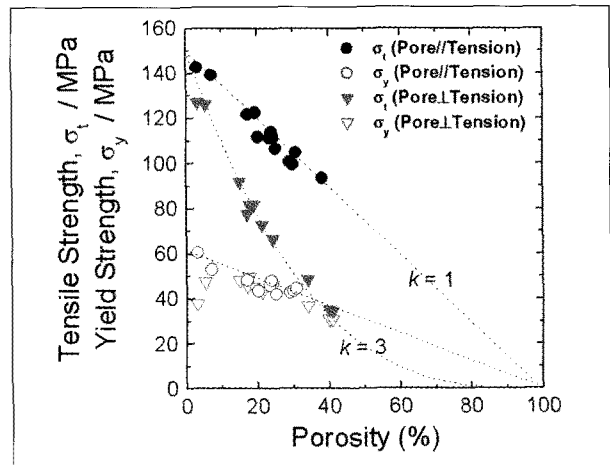


그림 5 로터스 동의 인장강도 특성

변형영역에서 효과적으로 전위의 이동을 방해하기 때문이다.

현재까지 제조된 로터스 금속의 특징을 살펴보면 기공크기가 직경 수십  $\mu\text{m}$ 부터 수 mm 정도이고 기공방향을 자유롭게 제어가능하며 기공률이 최대 65% 정도에 기공크기가 비교적 균질하다. 이것을 산업분야에 적용할 수 있는 예를 그림 6에 나타낸다.

종래의 발포금속과 소결금속에 비하여 강도가 뛰어나고 흡음성, 제진성 및 에너지 흡수성이 뛰어난 것 등을 들 수 있다. 또한 로터스 금속을 사용한 인공뼈와 인공치근을 개발 중에 있다. 현재 티타늄과 스테인리스강의 인공치근과 인공뼈의 무게가 원래 뼈의 3~5배이지만 주위의 원래 뼈에 뿌리내려 결합되지 않는 경우가 있어 시간이 경과하면 고정부가 느슨해져서 통증 및 감염의 원인이 된다. 이것을 로터스 금속으로 대체하면 골조직이 기공 내부로 성장해 들어가므로 튼튼하게 고정 될 수 있을 뿐만 아니라 인공치근의 경우 섬유세포에 의해 완충작용이 기대되는 천연치아에 유사하게 만들어낼 수 있다.

그 밖에도 로터스 금속은 치밀한 금속에 비해 표면적이 수백 배에 달하고 방향성 기공 구조에 따른 통과 유체의 압력손실이 적기 때문에 로터스 동을 이용한 고효율 히트싱크에 적용이 유망하다. 또한 항공기 엔진의 연소기 냉각 패널에 로터스 초합금의 사용을 시도하고 있으며 레이저로 가공한 종래 제품보다 현격하

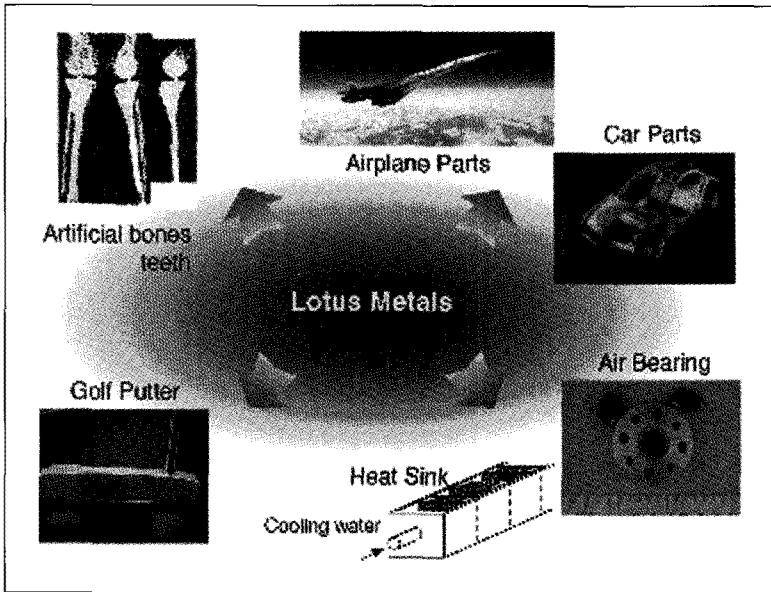


그림 6 로터스 금속의 응용분야

게 제조비용의 절감이 기대된다. 이와 같이 로터스 금속은 기초와 응용 분야에서 다양한 가능성을 숨긴 매력적인 소재이며 21세기 혁신적 재료의 하나로써 지속적인 발전이 기대된다.



기계 용어해설

점화온도(Ignition Temperature)

가연성 혼합기체가 자기 착화 하는 최저 온도, 또는 공기 중에 두어진 고체가 착화하는 최저 온도.

지압계(指壓計: Indicator)

내연기관, 공기압축기 등에서 실린더 내의 압력이 피스톤의 이동에 따라 변하는 모양을 그래프로 나타내는 기기.

경사계(傾斜計: Inclinator)

수준기의 기포가 중앙에서 정지하도록 미동조정나사를 조작하여 원주눈금을 읽고 측미경으로 최소 눈금을 읽는 각도측정기.

유도통풍(Induced Draft)

화격자 사이에서 공기를 흡출하여, 연료가 연소하는 데 필요한 바람을 보일러나 노에 보내는 방식.

주파 담금질(Induction Hardening)

고주파전류를 전자유도 전류를 발생시켜 피가열체의 표면부만을 급속히 가열한 후 분사냉각 등으로 담금질하는 방법.

유도전동기(Induction Motor)

회전자 또는 고정자의 한쪽만이 전원에 접속되어 있고, 다른 쪽은 유도하여 동력을 얻는 대표적인 교류전동기.

공업용 로봇(Industrial Robot)

자유도가 5~6 정도로 사람의 손과 비슷한 작업을 자동화할 수 있고, 특정한 일을 행하도록 프로그램 가능한 제어장치를 갖춘 기계장치.

강인주철(強韌鑄鐵: High Strength Cast Iron)

분자의 기(基)의 바탕을 펄라이트 조직으로 하고, 흑연이 미세하게 분포되어 있는 철 25, 30, 35의 것.

고장력강(High Strength Steel)

탄소량을 0.2% 이하로 하여 용접성이 좋고, 니켈, 몰리브덴, 크롬, 바나듐 등을 미량 첨가하여 항장력을 강하게 한 것.

고온절삭(High Temperature Machining)

절삭하기 어려운 재료를 아크, 고주파, 산소 아세틸렌 가스 등으로 가열하면서 절삭하는 방법.