

## 세포상 고체 (다공체)

원문 출처 - MRS Bulletin ([http://www.mrs.org/publications/bulletin/2003/apr/apr03\\_intro.pdf](http://www.mrs.org/publications/bulletin/2003/apr/apr03_intro.pdf))

김 지 순

울산대학교 첨단소재공학부 교수

이 자료는 필자가 한국과학기술정보연구원의 의뢰를 받아 '한민족 과학기술자 네트워크(KOSEN, <http://www.kosen21.org>)'의 Expert Review에 게재한 것을 다시 편집한 것이다.

### 1. 서 론

세포상 고체(다공체)는 우리 생활 주변은 물론 자연에 코르크, 목재, 스펀지, 뼈, 산호 등 여러 가지 형태로 존재하고 있다. 세포상 고체를 포함한 다공체는 골격을 구성하고 있는 물질과 기공의 두 가지 상으로 되어 있는 복합재료로 볼 수 있으며, 기공의 크기와 형태, 기공도, 기공구조 등에 따라 다양한 물성을 나타내게 된다. '일반 다공체'가 비교적 미세하고 고립된 구형의 기공을 가지며, 기공도도 낮은 데 비해, 세포상 고체는 기공도가 매우 높으며(보통 70% 이상의 기공도), 상호 연결된 기공구조를 갖고 있다. 특히, 발포금속(metal Foam)의 경우는 다면체의 Cell로 구성되어 있으며, 인접 Cell을 분리하는 얇은 막에 의해 고립되어 있거나, 빈 공간이 서로 연결되어 있는 개방 구조를 하고 있다.

이 분석자료는 다음과 같은 7편의 Review 논문 형태의 article로 구성되어 있다.

1. "Cellular Solids," -L.J. Gibson
2. "Foam Structure: From Soap Froth to Solid Foams," -A.M. Kraynik
3. "Scale Effects in Cellular Metals," -P.R. Onck
4. "In situ X-ray Tomography Measurements of Deformation in Cellular Solids," -E. Maire 외
5. "Aluminum Foams: On the Road to Real Applications," -J. Banhart
6. "Cellular Ceramics: Intriguing Structures, Novel properties, and Innovative Applications," -D.J. Green 외

7. "Scaffolds for Tissue Engineering," J.M. Karp 외의 제목들에서 알 수 있는 것처럼 다공체 구조와 물성에 대한 최근 연구 동향은 물론, 금속(주로 알루미늄)과 세라믹스의 다양한 다공체 제조 기술과 활용 예들이 비교적 자세히 소개되어 있다. 특히, 최근 크게 관심을 모으고 있는 생체 조직공학(Tissue Engineering)에 응용되는 다공체의 제조 기술과 활용도 소개되어 있다.

다공체에 대한 연구가 국내에서도 최근 활성화 되고 있는 시점에서 다공체 전반에 대한 해외 최신 연구 동향을 한 눈에 파악할 수 있을 뿐 아니라, 많은 분량의 유용한 참고자료와 문헌들이 각 article에 제시되어 있다는 점에서 이 분야에 관심이 있는 연구자들에게 크게 도움이 될 자료라고 생각된다.

### 2. 발포 다공체의 구조

재료과학의 일반적 목적은 재료의 구조와 물성간의 관계를 밝혀내는 것에 있다고 할 수 있다. 다공체의 물성도 다공체의 기공구조에 따라 달라지게 된다. 고상 발포 다공체의 구조는 액상 발포 다공체에 대한 형태학과 기하학을 이용하여 설명할 수 있다. 일반적으로 발포 다공체는 다양한 크기와 형태의 기공 Cell을 포함하며, 액상의 발포 다공체에서는 전체 단면적을 줄이고자 하는 표면장력과 기공 내 가스 압력으로 Plateau's Law를 따라 Cell의 형태가 만들어진다. Plateau's Law를 완전히 만족하는 규칙화된 발포 다공체 Cell을 Kelvin Cell 이라고 하는데, 실제의 발포 다공체는 불규칙, 무작위, 다분산 Cell로

이루어진 것이 보통이다.

실제 상황에 보다 근사한 불규칙, 무작위, 다분산 액상 발포 다공체의 구조를 전산모사 방법으로 설명하고자 하는 다양한 시도가 이루어지고 있으며, 이러한 시도들은 다공체의 구조와 표면 자유에너지 간의 관계를 구해내고, 그 결과를 다공체의 물성과 연관시키는 형태를 갖게 되는 것이 일반적이다. 이 자료에서는 먼저 'the Surface Evolver'라고 하는 개발프로그램을 이용하여, 액상의 분율이 0에 가까운 'soap froth (비누거품 모델)'에 대한 전산모사를 시행하였다. 결과를 요약하면, 발포 다공체의 표면 자유에너지는 다분산도가 증가함에 따라 감소하며, 각 Cell의 표면적은 Cell의 형태에 의해 크게 변화하지 않으나, Cell의 모서리 길이는 형태에 따라 민감하게 변화한다고 정리할 수 있다.

액상 발포 다공체에서 얻어진 결과들을 고상 발포 다공체로 확장, 적용할 수 있는데, 이는 평형을 이루고 있는 액상 발포 다공체의 액상을 고상으로 대체하고, 최종적으로 Cell 벽을 제거하는 과정을 거친다고 생각하면 쉽게 이해할 수 있다. 다만, 여기서 액상 또는 고상 물질의 분율이 증가하게 되면, Cell 벽과 지주(Strut), 연결부(Joints) 등에서 물질 분포 차이가 생기게 되며, 발포 다공체의 구조를 변화시키게 된다. 이때 물질분포에 미치는 주요 인자는 표면장력과 점성응력(Viscous Stress)이다.

### 3. 세포상 금속의 기계적 특성에 미치는 크기 효과

세포상 금속, 특히 발포금속의 경우, 공정상의 제한 때문에 Cell의 크기가 1-10 mm 정도인 것이 일반적이다. 발포금속으로 소형 부품을 제조하는 경우, 그 크기가 Cell 크기의 범위로 작아지게 되면, 크기가 클 때에 비해 기계적 특성이 달라지게 되는 크기 효과(Size 또는 Scale Effect)가 나타나게 된다. 이 자료에서는 일축압축(Uniaxial Compression), 전단(Shear), 압입(Indentation)시의 기계적 특성에 미치는 크기효과(Scale Effect)와 노치효과(Notch Effect)에 대해 보고하고 있다.

결론을 먼저 정리하면 다음과 같이 요약할 수 있다. 시편의 크기가 작아지면, (1) 전단과 압입, 노치를 준 경우에는 강화가 일어나며, 일축압축의 경우에

는 강도와 stiffness가 감소한다. 이러한 결과는 경계층(Boundary-layer) 효과와 구속(Constraint) 효과로 설명될 수 있다. 즉, 전단의 경우, 다공체가 강성 판재면에 접합되어 변형응력을 받음으로써 구속 효과가 강한 경계층을 형성한 반면, 일축압력의 경우에는 표면이 경계층이 됨으로써 구속이 없는 약한 경계층을 이루고 있었다. 압입의 경우는 압자의 크기를 변화시키며 행한 전산모사 해석 결과, 압자 테두리 부위에서 변형이 시작되며, 압자 크기 감소에 따라 변형이 국부화되어 시편 전체로 변형이 일어나지 않았다. 변형의 국부화는 다공체의 양면에 노치를 주고(double-edge notched) 압축한 경우, 노치의 깊이가 깊어질수록 심화되어 크기 효과가 강화의 형태로 나타남을 알 수 있었다.

### 4. 세포상 고체의 변형 측정을 위한 X선 단층촬영

세포상 고체의 구조, 특히 Cell과 Cell 모서리, 면들의 배열과 연관된 macro 구조와 하중 인가 시의 변형 거동을 연구하기 위한 X선 단층촬영 기법이 소개되었다. 또한, 여러 가지 세포상 재료(발포금속, Trabecular Bone, 발포고분자)에 대한 X선 단층촬영 연구 결과들의 Review와 발포금속의 제조 방법들도 간단히 소개되었다.

X선 단층촬영은 장비에 따라 표준 단층촬영과 고분해능 미세 단층촬영으로 분류할 수 있다. 상용화된 표준 단층촬영 장비는 일반 X선을 사용하고, 분해능이 최대 5 um정도 까지이며, 고 분해능의 경우 입자 가속기원의 요구되고, Grenoble의 ESRF 장비는 분해능이 1-40 um이다.

변형거동을 관찰하는 방법은 ex situ법과 in situ법으로 나누는데, 전자의 경우는 시편의 초기 macro 구조를 관찰하고, 단계적으로 변형시킨 후 각 단계별로 단층촬영을 하여 비교하는 방법이다. in situ법은 하중센서가 부착된 고정 하부그립과 LVDT 변위센서가 장착된 상부그립, 스테퍼 모터로 구성된 장치 내에서 실시간으로 단층촬영을 하는 방법이다.

이 자료에서는 서로 다른 제조 방법과 구성물질의 네 가지 세포상 고체(Alporas, Norsk Hydro, IFAM, Formgrip)의 압축 전 구조를 관찰하고(그림 1), 압축 후 변형을 조사하였다. Alporas와 IFAM은 각각 Al-

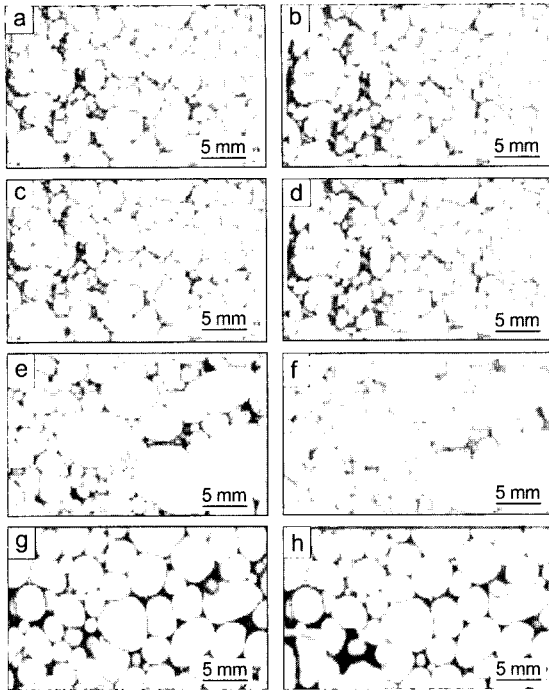


그림 1. 다양한 발포재료의 x선 단층촬영 결과: (a) IFAM, (b) Alporas, (c-d) Norsk Hydro, (e-f) Norsk Hydro, (g) Formgrip.

Ca 합금과 Al-Si 합금이었으며, Formgrip과 Norsk Hydro는 세라믹 입자강화 복합재료이었다.

X선 단층촬영과 3차원 영상처리 소프트웨어를 이용하여 각 세포상 고체들의 구조와 함께 Cell 크기와 Cell 벽 두께를 정량적으로 측정할 수 있었으며, 그 결과로부터 각 세포상 고체간 변형 거동의 차이를 명확하게 설명할 수 있었다.

### 5. 알루미늄 발포 다공체

발포금속의 제조 방법을 액상 금속으로부터의 발포 (Foaming Liquid Metals)와 금속 전구체로부터의 발포 (Foaming Metallic Precursors)로 나누어 소개하였다. 또, 경량구조물, 에너지흡수, 제진 분야의 대표적인 실용 사례들을 소개하였다. 그림 2는 제조 방법에 따라 서로 다른 다공체 구조를 예시한 것이다.

#### 5.1. 액상 금속으로부터의 발포

- 가스 주입에 의한 발포 (Foaming Melts by Gas Injection) : 알루미늄합금 용탕에 점도 조절을 위해

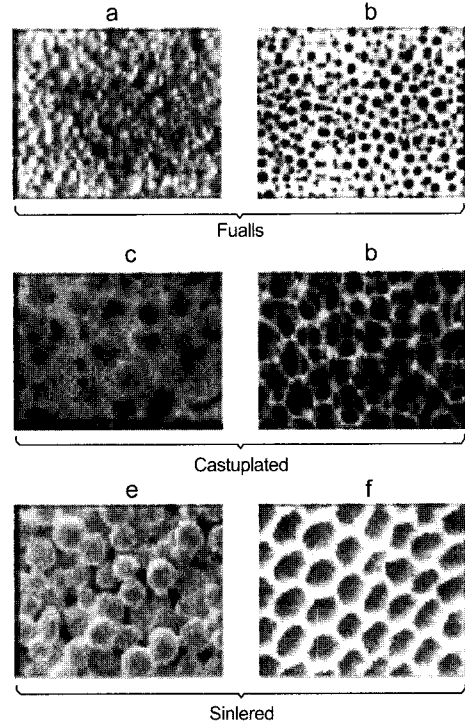


그림 2. 다양한 형태의 세포상 고체의 예: (a) 발포 알루미늄, (b) 'lotus' 구조 구리 다공체, (c) 주조 알루미늄 스펀지, (d) 개기공 니켈 구조체, (e) 소결 황동 다공체, (f) 분말야금법에 의한 배향성 다공체.

알루미나나 마그네시아, 탄화규소 등의 세라믹스 분말을 첨가하고, 임펠러나 진동 노즐을 통해 공기나 질소 아르곤 등의 기체를 투입시켜 발포시킨다. 발포된 재료는 계속하여 주조 공정에 투입하여 폐쇄형 외피를 갖는 복잡형상으로 제조하거나, 원하는 형태로 절단하여 사용한다. 세라믹스 분말의 함량이 높아 강도가 높으나, 가공이 어렵고, 나량의 저밀도 발포금속을 연속적으로 생산할 수 있다.

- 발포제법 (Foaming Melts with Blowing-Agents) : 알루미늄 용탕에 1.5 wt% 가량의 칼슘 금속을 첨가하여 칼슘-알루미늄-스피넬과 금속간화합물을 형성케 함으로써 용탕의 점도를 증가시킨다. 발포제 기능을 하는 Titanium Hydride를 용탕에 1.6 wt% 정도 다시 첨가하여 발포시킨 후 냉각한다. 기공의 구조가 매우 균일하다는 장점이 있다.

- 고체-기체 공정 응고법 (Solid-Gas Eutectic Solidification) : 액상과 고상의 기체 용해도 차이를 이용하는 방법으로 러시아에서 개발된 방법이다. 용

탕을 먼저 고압(50기압까지)의 수소나 질소 등의 기체로 채워 포화 시킨다. 용탕을 냉각하여 응고가 진행되면 액상과 고상에 대한 가스의 용해도 차이에 의해 가스가 석출되어 발포가 된다. 응고과정에서 일방향 응고를 시키게 되면 방향성의 길쭉한 기공이 형성되며, 기공의 직경은 10 um에서 10 mm, 길이는 100 um에서 300 mm, 기공도는 5-75%까지 조절할 수 있다. 'gas-reinforced'의 러시아어 동의어인 'GASAR' process로 알려져 있으며, 최근 일본에서는 다공체의 조직이 연근 모양을 닮았다 하여 'lotus-structured' 소재로 불리고 있다.

### 5.2. 금속 전구체(금속분말+발포제)로부터의 발포

- 분말야금법(Foaming Powder Compacts) : 금속분말과 발포제를 혼합한 후 압축, 압출, 압연 등의 방법으로 성형하고 가열하여 용탕을 만들면, 발포제가 분해하여 가스가 발생함으로써 다공체가 만들어진다. 성형과정에서 금속분말과 발포제가 혼합된 전구체를 가운데 두고 금속 sheet로 양면을 압연 클래딩한 후 발포 공정을 거칠 경우, 다공체 코어의 샌드위치 판넬을 제조할 수 있다. 이 공법은 독일과 오스트리아에서 'Foam-in-Al', 'Alulight'라는 이름으로 상용화되었다. 표 1에 대표적 물질치를 정리하였다.

- 반응고 주조법(Foaming Thixocast Precursor Material) : 전구체를 상대밀도 80% 정도가 되도록 정수압 압축 성형하여 반응고(semi-solid) 상태가 되도록 가열한 후 주형에서 성형하는 방법이다. 복잡한 형상을 제조할 수 있고, 후 가공이 필요 없을 뿐 아니라, 분말야금법에 비해 매우 균일한 기공구조를 얻을 수 있다.

- 인고트법(Foaming Ingots Containing Blowing Agents) : 발포제인 Titanium Hydride를 금속 용탕에서 혼합하여 빠른 속도로 냉각시켜 인고트를 만든 후, 재가열하여 발포시키는 방법이다. 발포제를 금속 용탕과 함께 동시 사출성형하는 방법도 있다. FORMGRIP 공정도 이 공정의 일종이다.

### 5.3. 실용 사례와 기대 활용 분야

발포금속은 자동차 산업 분야의 경량구조물, 에너지흡수, 제진 분야에 활용이 가능할 것으로 크게 기대되고 있다. 향후에는 조선, 항공우주, 토목공학 분야에도 적용이 예상된다. 발포금속의 큰 장점인 다기

능성이 구현될 경우, 발포금속은 더욱 매력적인 소재가 될 것이다. 예를 들면, 자동차 산업분야에서 경량화 기능은 물론, 사고 시 충격에너지 흡수와 차량 운행 중의 소음 진동 흡수 기능을 동시에 충족시킬 수 있는 소재로 발포금속은 가장 경쟁력 있는 소재이다.

이 밖에도 발포금속은 인공위성의 열교환기, 로켓엔진 연료분사기, 수소저장 장치, 연료전지, 전자총, 입자발생장치 등에 활용될 수 있다.

## 6. 세포상 세라믹스

세포상 세라믹스는 낮은 열전도도, 높은 투과성, 고온 안정성, 우수한 열충격 저항성, 낮은 유전상수 등 매우 특별한 기능을 지니고 있다. 세포상 세라믹스는 셀 배열의 차원에 따라 벌집구조체(honeycomb)와 발포 세라믹스로 분류할 수 있으며, 그 제조 방법은 다음과 같이 정리, 요약할 수 있다.

### 6.1. 코팅(또는 Replica)법

개방형 고분자 다공체(고분자 스펀지)에 세라믹 슬러리를 침투시켜 코팅한 후 여분의 슬러리는 기계적인 압착 등의 방법으로 제거한다. 건조 과정을 거친 후 세라믹으로 코팅된 고분자 스펀지를 가열, 열분해시켜 다공체 세라믹스를 얻는다. 다공체의 기공 크기는 고분자 다공체의 기공크기와 거의 같으며, 개방형의 다공체를 얻을 수 있다. 열분해 과정이 정밀하게 제어되지 못했을 경우, 다공체 내에 균열 등 결함이 발생하게 되며 기계적 특성에 악영향을 주게 된다. 이런 결함을 줄이기 위해 최근에는 1차적으로 제조된 세라믹스 다공체를 다시 코팅하는 방법이 사용되기도 한다. 열가소성 고분자 다공체를 열분해하여 얻은 개방형 탄소 다공체를 화학증착법을 사용하여 치밀한 세라믹스로 코팅하는 방법도 활용되고 있다.

### 6.2. 액상 직접 발포법

액상 세라믹스(슬러리, 졸-겔, preceramic 고분자 등)를 기계적인 방법이나 가스 주입, 액체 내에서 가스를 in situ 발생시키는 방법들이다. 이들 공정에서 Cell의 크기와 형태는 배액(drainage), 성장(coarsening), 막 파괴(film rupture)의 세 단계 과정에서 결정된다. 마지막 단계인 막 파괴가 일어나면 다공체가 형성될 수 없으므로, 이를 피하기 위하여 겔화나 가교가 일

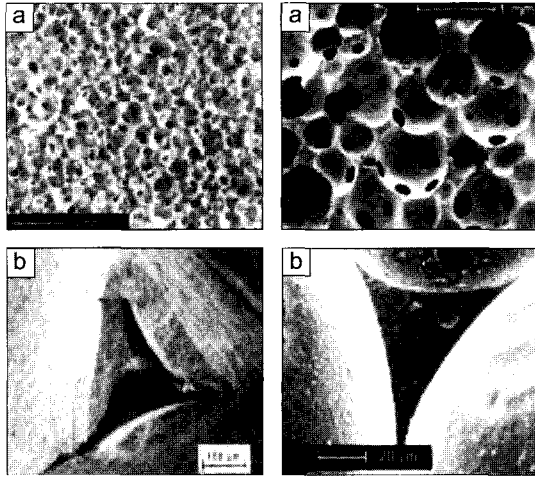


그림 3. Replica 법 (좌측열의 a, b)과 액상직접발포법 (우측열 a, b)에 의한 다공체 구조.

어나도록 첨가제를 사용한다.

코팅법에 비해 직접 발포법의 장점은 여러 가지이다. 개방형뿐만 아니라 폐쇄형 다공체도 제조할 수 있으며, 넓은 범위의 Cell 크기, 체적밀도를 갖는 다공체 제조가 가능하다. 지주의 결함도 적기 때문에 기계적 특성도 우수하고, 기공도의 구배를 갖는 다공체도 제조할 수 있다.

유리 다공체는 유리 분말과 수산화물, 탄산염, 황산염, 탄화물 등의 첨가제를 혼합하여 제조한다. 혼합분말을 가열하면 유리는 유동체가 되고, 첨가제는 열분해되어 기체가 발생하게 되므로 다공체가 형성된다.

그림 3에 Replica 법과 액상 직접발포법으로 제조된 다공체의 구조를 비교하여 나타내었다.

### 6.3. 세포상 세라믹스의 기계적 특성

개방형 세라믹스의 파괴인성(T)은 Cell 크기(L)와 이온밀도에 대한 다공체 밀도( $\rho/\rho_s$ ), 세라믹스의 파괴강도( $\sigma_{fs}$ )에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$T=C \sigma_{fs} (L)^{1/2} (\rho/\rho_s)^{3/2}$$

대부분의 세라믹스에 적용되는 선형적 탄성 거동의 경우, 이 식으로부터 인장강도( $\sigma_{ft}$ )가 유도될 수 있으며 다음과 같다.

$$\sigma_{ft}=C \sigma_{fs} (L/a)^{1/2} (\rho/\rho_s)^{3/2}$$

최근에 나노압입과 음향현미경을 이용한 인체골의

탄성 특성을 측정한 연구결과가 발표되었으며, Cell 크기와 투과성, 열충격 저항성간의 관계에 대한 연구 결과들도 보고되었다.

### 6.4. 세포상 세라믹스의 활용

- 용융금속 필터 : 용융금속 내 불순물을 걸러내는 것은 물론 주조 시 용탕의 흐름을 충상으로 만들어 준다. 충분한 기계적 강도, 높은 열충격 저항성, 경량, 화학적 안정성, 고 투과성 및 여과성, 표면적, 긴 수명 등이 요구되는 주요 물성이며, 세포상 세라믹스는 거의 모든 물성을 만족시키고 있다.

- 선혼합 연소버너 : 다공체 내에서 화염을 안정화시킬 수 있어 균일한 온도, 출력밀도 증가, 연속 출력 범위 확장, 연료대비 공기양 범위의 확대 등 우수한 효과를 얻을 수 있다.

- 디젤엔진 배출입자 트랩

- 축로재

- 기타: bioreactor, SOFC 연료전지 전극, 우주항공 분야의 경량 지지체, 고강성 경량 샌드위치 구조물, 열교환기, 발열체, 단열재, 고온 소음 컴퍼넌트, 초전도체, 생체재료 등.

## 7. 조직공학용 다공성 지지체 (Scaffold)

질병이나 사고로 인해 손상된 장기 또는 조직을 수복하기 위한 방안으로 최근 크게 기대를 모으고 있는 조직공학(Tissue Engineering)에는 적절한 구조를 갖는 지지체가 필수적이다. 이 자료에서는 두 가지 조직-경조직인 골과 연조직인 신경조직에 대한 지지체를 다루고 있다.

지지체는 세포의 침투가 가능하고, 3차원의 조직 형성이 가능한 물리적, 화학적, 기계적 특성 조건을 모두 만족시켜야 한다. 또한, 이에 더하여, 조직 재생을 위한 임시 통로 역할을 하였다가, 치유 과정 또는 완료 후 별도의 제거 과정 없이 무독성으로 분해될 수 있다면 더욱 이상적일 것이다.

### 7.1. 골-조직공학 (Bone-Tissue Engineering)

대체골 이식의 경우, 자가이식이 가장 이상적이지만, 이식할 수 있는 양이 제한적일 뿐 아니라 환자에게 추가의 외상을 가한다는 문제가 있어서 다공성 지지체를 이용한 골-조직공학이 활발히 연구되고 있다.

다공성 지지체를 제조할 수 있는 천연재료로는 전분을 기초로 한 고분자, 키토산, 콜라겐, 코랄 등이 있으며, 코랄의 경우가 대표적이다. 합성재료로는 Ca-인산염과 같은 무기재료와 poly(phosphazenes)을 비롯한 다양한 유기재료를 들 수 있으며, 이들의 복합재료도 사용되고 있다. 봉합사, 이식재료로도 사용되는 Poly(alpha-hydroxy acids)는 가장 흔히 사용되는 고분자 지지체 재료이다. 이외에도 PGA(poly(glycolic acid)), PLA(poly(lactic acid)), PLGA(poly(lactico-glycolic acid)) 등이 많이 사용되는 고분자 지지체 재료이다.

골-조직공학을 위한 지지체로서의 물성으로는 기공 크기, 형상, 기공벽의 두께, 기공의 연결성, 기공-기공벽 계면의 면적, 기공도, 표면 형태, 분해속도, 표면 화학, 기계적 안정성 등을 들 수 있다. 또한, 병리학 적 조건에 대해 적절히 설계될 수 있어야 할 뿐 아니라, stress shield 효과나, 염증 유발, 독성 등이 없어야 한다. 골조직의 내방성장이 잘 일어날 수 있는 구조를 가져야 하고, 내방성장된 조직이 안정적으로 자라날 수 있도록 영양이 공급될 수 있는 혈관형성이 용이해야 한다.

지지체를 제조하는 방법에는 solvent-casting, membrane lamination, freeze-drying, phase separation, gas-foam processing, fiber bonding, rapid prototyping, solvent casting/particulate leaching, phase inversion/particulate leaching 등 다양한 방법이 있다. 이 자료에서는 마지막 세 가지 방법에 대한 설명이 다음과 같이 간단히 주어졌다.

- **Rapid Prototyping**: 지지체의 micro, macro 구조를 정밀하게 제어하여 제조할 수 있는 방법으로, 복잡한 3차원 형상을 CAD 기법을 활용하여, 손상된 부위의 형상을 재현할 수 있다. sheet lamination, adhesion bonding, laser sintering, photopolymerization, droplet deposition 등의 방법이 개발되어 사용되고 있다.

- **Solvent Casting/Particulate Leaching**: 휘발성 용매에 생분해성 고분자를 용해한 용액을 porogen이라고 불리는 미세한 결정성 분자가 채워진 틀에 붓는다. 용매를 휘발시키고, porogen을 물로 씻어내면 고분자로 이루어진 다공체가 남는다. 상호연결도(interconnectivity)가 그리 좋은 편은 아니지만, 습도를 높인 조건에서 공정을 행할 경우, porogen 입자

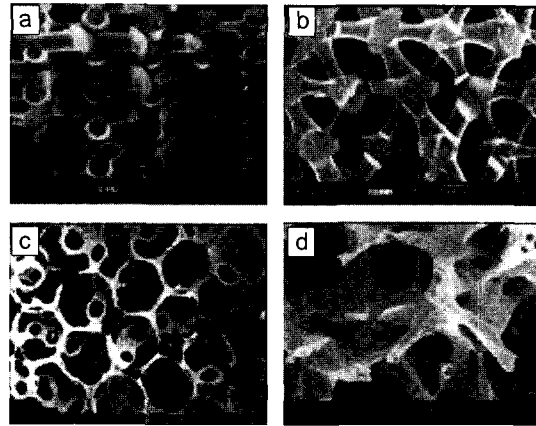


그림 4. 다양한 방법으로 제조된 조직공학용 다공체들의 구조: (a-b) Rapid prototyping, (c) solvent casting/particulate leaching, (d) phase inversion/particulate leaching.

들의 용접이 이루어짐으로써 연결도를 증가시킬 수 있다. 최근에는 파리핀 구를 이용하여 높은 연결도의 3차원 구조를 형성하는 방법이 개발되었으나, 용매 제거에 장시간이 요구되어, 3주 이상의 제작 기간을 요하는 단점이 있다.

- **Phase Inversion/Particulate Leaching**: 이 방법으로는 trabecular bone과 유사한 macroporosity를 갖는, 높은 연결도의 지지체를 제조할 수 있다. dimethylsulfoxide 용매에 PLGA를 용해한 용액을 glucose 결정의 porogen에 분산시킨 후 동결시킨다. 동결체는 PLGA에 대해 비용매(non-solvent)인 물을 이용하여 상전이 시켜, 응고시키게 되는데, 이 과정에서 porogen도 함께 녹아 나오게 되고, 다공체가 형성된다.

그림 4는 이들 방법에 의해 제조된 조직공학용 다공체의 구조를 관찰한 결과이다.

## 7.2. 신경-조직공학 (Nerve-Tissue Engineering)

앞의 골-조직공학에서와 마찬가지로 말초신경의 치유를 위한 방법으로 자가이식을 들 수 있다. 그러나, 척수의 경우는 자발적으로 재생이 되지 않아 과거에는 척수의 재생은 불가능한 것으로 알려져 있었다. 최근에 말초신경을 척수에 이식하여 척수를 재생시키는 데 성공한 결과가 보고되었다. 척수 재생을 위해서는 신경섬유가 재생할 수 있는 통로를 제공하고, 이 통로가 재생을 자극하는 분자들과 협력할 수 있도록 해 주어야 한다.

이 자료에는 두 가지 종류의 지지체에 대해 설명하고 있다.

- **Oriented Porous Scaffolds** : 배향 다공성 지지체는 poly(alpha-hydroxy acids) 내에서 열적 유기 고분자-용매 상분리에 의해 만들어진다. 예를 들어, dioxane에 PLA를 용해하고 액체질소로 급냉하면 용매의 결정화에 의해 다양한 다공성 구조가 형성된다. 어느 한 쪽 끝에서부터 냉각을 시킬 경우, 방향성 다공체를 제조할 수 있다.

- **Heterogeneous Porous Scaffolds** : 중합 중 상분리 방법으로 만들어진 지지체는 무작위 기공도를 갖게 된다. 이 공정에 의해 만들어진 hydrogel 지지체로는 아세톤 내에서의 PHPMA(poly(hydroxypropyl methacrylamide)), 물 안에서의 PHEMA(poly(2-hydroxyethyl methacrylate)) 등이 있다. 이들 지지체는 자연적인 척수와 유사하게 매우 연하고, 탄성 계수가 낮아 취급하기가 매우 어렵다. 구조를 유지하기 위한 방법으로, nerve guidance 내부에서 지지체를 형성하는 방법 등이 제시되었다.

## 8. 결 론

다공체는 일반 벌크 재료에서는 발현되기 어려운 다양한 물성들을 지니고 있다. 제조 방법도 매우 다

양하며, 방법에 따라 기공구조에 변화를 줌으로써 원하는 물성의 다공체를 제조할 수 있다. 특히, 다공체가 갖는 다양한 기능을 다기능화 할 수 있을 때 다공체의 활용 범위와 가능성은 더욱 확대될 것으로 기대된다. 독일과 일본 등에서는 이미 경량발포금속을 중심으로 상업화가 이루어지고 있는 것으로 알려져 있다. 실제로 자동차 산업을 비롯한 첨단 산업분야에 다공체를 활용하고자 하는 시도가 다양하게 이루어지고 있다.

국내에서도 경량발포금속에 대한 연구가 1개의 국가 지정연구실을 중심으로 장기간에 걸쳐 수행되고 있고, 다른 연구팀의 수도 증가하는 추세에 있다. 국내 학회지와 학술대회에 발표되는 다공체 관련 논문의 수도 점차 증가하고 있는 것은 고무적인 현상이라 하겠다. 그러나, 해외에 비해 세포상 다공체 산업의 기반이 거의 없다는 것은 아쉬운 일이다. 이 자료에서 엿볼 수 있는 것처럼, 기초연구가 보다 심화되고, 다기능성에 기반을 둔 고 부가가치 분야가 개발되어, 기존 주력산업에 접목할 수 있는 연구 분위기가 활성화 되기를 기대해 본다.