

생체조직공학용 담체(担体)의 적층조형기술

발행인 _ 이성수 _ 건국대학교 기계설계학과 _ sslcc@konkuk.ac.kr / 저자 _ Toshiki Nino and Yasuyuki Sakai

1. 서론

질병이나 사고, 유전적인 요인, 또 나이를 먹거나 오랜 기간에 걸친 생활 습관에 의하여 자연치유력만으로는 회복될 수 없을 정도의 손상이나 기능저하를 일으킨 장기의 회복에 대한 치료법으로는 지금까지, 인공 장기, 타인의 장기, 외국에서는 사체의 장기를 이식하는 이외에 선택 여지가 없었다. Contact Lens는 수정체 렌즈로서의 기능을 보조하는 인공장기이지만 보조해야 하는 기능이 단순하기 때문에 인공물로도 충분한 기능을 발휘할 수 있으므로 널리 이용되어, 가장 성공한 인공장기의 예라고 할 수 있다. 그러나 한편, 그러한 Contact Lens에서도 생체의 모든 기능을 대체할 수 있는 것은 아니어서 수개월간 장착한 상태로 지낼 수는 없다. 또, 체내에 집어넣는 형태의 인공장기로는 많은 경우, 혈전의 생성이나 이물에 대한 거절 반응 등, 재료를 중심으로 여러 가지 연구가 필요하다. 다른 사람의 장기를 이식하기 위해서는 Donor(장기제공자) 부족 문제를 해결하는 것이 거의 불가능함과 동시에 사체로부터의 장기도 포함하여 논리상의 문제도 있다.

이것에 대하여 최근 각광을 받고 있는 조직공학에서는 집에서 세포를 배양하여(피부 등에서는 다른 사

람의 동종세포의 배양이나 최근에는 다른 사람으로부터의 ES 세포 등도 주목되고 있지만) 장기나 조직을 재구축하는 것으로 적합성이나 Donor 부족 문제를 한번에 해결할 수 있는 치료법으로 기대되고 있다. 장기나 조직의 재구축을 실현하기 위한 기술은 그 근원이 되는 전구세포(前驅細胞)에 관한 것과 세포 증식을 안내하여 재구축되는 조직에 형상부여를 하기 위한 담체(말바탕)에 관한 것과, 증식·분화(分化) 인자에 관한 것의 3요소로 구성된다(그림 1). 지금까지, 피부 등의 평면적인 것에서는 이미 실용화가 이루어져 있고, 입체적인 것에서도 비교적 대대속도가 느리고 재생능력이 강한 뼈에서는 생체 흡수성의 재료로 구성되는 인공뼈를 포함하면, 임상에 아주 가까운 레벨까지 기술이 개발되어 있다.

입체적인 조직의 재생에는 많은 경우, 3차원적인 형상을 갖는 담체(担体)가 필요하지만, 최근에 담체의 제작에 자유 형상 조형법(Solid Freedom Fabrication, 이후 SFF)을 이용하려는 연구가 많은 연구가 이루어지고 있다. 또한, SFF는 Rapid Prototyping으로 불리는 일이 많지만, 이것은 SFF의 시작(試作)이라고 하는 하나의 용도에 한정된 측면을 고려한 것에 대하여 본 원고에서는 용도는 시작을 목적으로 하고 있지 않

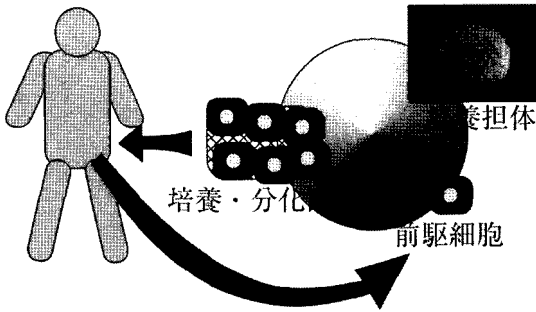


그림 1. 조직공학의 3요소

기 때문에 일부러 이렇게 부르지는 않고, SFF라고 부르기 한다. 담체의 제조에 이 SFF를 이용하는 장점이 몇 가지 있다. 우선 처음으로 조직의 형태는 자유 형상으로, 지금까지의 세기 가공에서는 가공 가능하다는 것이 보증되어 있지 않다. 두 번째로 형상은 개인에 따라 다르기 때문에 담체는 Tailor Made 하는 것이 바람직하지만, 형상 데이터는 X선 CT 등으로 Digitize 된 데이터인 경우가 많고, 이러한 데이터로부터의 조형은 SFF에 적합하다. 세 번째로 조직에는 내부에도 3차원 구조를 갖는 것이 있어서, 이러한 내부구조는 절삭 가공 등의 제거가공이나 변형가공에서는 조형할 수 없기 때문이다.

본 원고에서는 SFF의 조직공학에의 응용에 대하여 관찰하는 것을 목적으로 하고 있지만 이것에 관해서는 많은 Review 기사가 게재되어 있으므로 여기에서는 비교적 새로운 연구를 중심으로 또 필자 등의 최신의 연구 성과를 같이 소개하려고 한다. 또 지금까지의 Review 기사는 주로 생물계나 재료계의 Discipline을 갖는 사람에 의하여 쓰여진 것이 많지만 여기에서는 SFF의 연구자로서의 관점에서 해설하려고 한다. 이상, 요즈음 이정도로 재생의료·조직공학이 주목되고 있는 가운데 독자 여러분에게는 이 원고가 그다지 깊이 들어가지 않는 것에 대하여 유감을 표하며, 가벼운 마음으로 읽어주시기 바란다.

또한, 여기에서 소개하는 SFF의 원리 등에 대해서는 지면 관계상, 자세하게 설명하지 못한다는 것을 참고하시기 바란다.

2. 각 조형법의 응용

2.1 광조형법

광조형법은 가장 빨리 실용화된 SFF법으로, 일본 국내에서는 현재에도 가장 많이 보급되어 있는 신속시작의 표준이다. 조형의 미세성에 있어서는 다른 SFF수법과 비교하여 우수하고, 조형속도도 장치가 실용화된 무렵과 비교하면 매우 향상되어 있어서, 담체의 조형법 하나만으로 검토하는 것도 충분한 가치가 있다. 한편, 광조형법으로 조형할 수 있는 재료는 광경화성의 것으로 한정되어 있기 때문에 조형물의 화학적·물리적인 특성에 제한이 있어서, 이것이 이 조형법의 최대의 약점이 되어 있다. 조직재구축에 있어서 담체는 세포가 증식하는 장소를 제공하고 재구축된 조직에 형상을 부여하는 역할을 담당하고 있어서, 그 목적이 종료한 후에는 생체조직에 흡수·치환되는 것이 바람직하다. 그렇지만 현재 상업적으로 이용되고 있는 광조형용의 재료에 생체흡수성은 없고, 담체에 그대로 사용하기에는 문제가 많다. 이 문제에 대하여 九州 대학의 松田(현재 가나자와工大) 등은, 생분해성을 갖는 ϵ -Caprolactone과 Trimethylene Carbolate로 이루어진 Copolymer에 Acrylate를 부가함으로서 광중합 開始劑에서의 중합이 가능한 수지를 개발하고, 수백 마이크론 오더의 모델 담체가 조형 가능한 것을 보고하고 있다. 이러한 수법에 의하여 생분해성을 갖는 광경화성 수지의 개발은 그 후에도 계속되어 최근의 예로는 담체를 만든 후에 세포를 파종하는 것이 아니라 처음부터 세포가 들어있는 재료로 주형하는 바이오프린팅에의 응용도 검토되어, 광중합 개시제의 독성이나 자외선 조사후의 세포의 생존율 등이 조사되고 있다.

2.2 압출법

광조형법이 일본 국내에서 가장 일반적인 조형 방법인 것에 대하여 전세계적으로는 FDM(Fused Deposition Modeling) 장치가 가장 많이 팔리고 있는 조형 장치이고, 담체의 조형에서도 많은 응용이 보고되어 있다. 이미 기술한 것과 같이 담체는 세포가 배양되는 위치를 안내하면서 배양되는 장소를 제공하는 역할을 담당하고 있고, 담체가 다공(多孔)이 되는 것을 요구하는 경우가 많다. FDM을 시작으로 하는 재료를 필라멘트 상에 압출하여 펼치는 방식은 필라멘트의 가는 방법을 조절함으로써 용이하게 구멍이 빈 형상이나 공공율(空孔率)을 제어할 수 있는 장점이 있어서, 담체의 조형에는 적합하다. 최근의 예로는 싱가포르 국립대학의 Hutmacher 등이 Poly Caprolactone(PCL)과 PCL을 인산삼칼슘으로 강화한 재료로부터 FDM 조형한 담체에 骨髓間葉系幹細胞를 파종하여 각각 연골 용과 골용으로 나누어 사용함으로써 골연골 결손의 수복에 유익한 효과를 얻고 있다. 광조형이나 분말소결 적층조형법과 같이 유동성이 있는 재료의 일부를 선택적으로 경화 또는 결합하는 조형법이 기본적으로 하나의 조형물을 하나의 재료로 밖에 만들 수 없는 것에 대하여 압출법으로는 노즐이나 실린더의 개수를 증가시킴으로써 재료를 선택하고, 임의의 장소에 배치할 수 있는 특징이 있어서, 여러 가지 재료로 구성된 담체의 조형이 제안되어 있다. 또, 공급되는 재료에 미리 파종하여 둌으로써 세포를 선택적으로 공급하는 것도 가능하다.

2.3 입자퇴적법(粒子堆積法)

입자퇴적법을 이용한 담체의 조형 예는 그다지 많지 않다. 입자퇴적법의 주 용도가 소실모형이지만, 담체의 조형에 있어서도 왁스나 수지로 만들어진 모델을 소실형으로 이용하여, 재료를 주형함으로써 담체를 얻을 수 있다. 담체내의 유로는 조형장치에 의하여 조형하고, 앞에 기술한 것과 같은 담체중의 빈 구멍을

생성하는 것은 Porogen Leaching법, Freeze Drying법 등의 Option이 있다.

2.4 분말고착적층법

분말고착 적층법은 분말재료에 바인더를 잉크젯 등에 의하여 선택적으로 분사하여 각층의 형상을 얻는 적층조형법으로 미국 Z Corp사의 3D Printer로서 잘 알려져 있다. 이화학연구소의 安齋 등은 인산 삼칼슘 분말에 바인더를 잉크젯으로 선택적으로 공급함으로써 인공뼈의 조형을 하고 있다. 본 방법에서는 SFF의 공통의 장점에 잉크젯에 의한 방법을 부가하여 세포를 공급하여 선택적으로 파종하는 것도 가능하다.

2.5 분말소결 적층 조형법

분말소결 적층 조형법은 광조형법과 마찬가지로 수지를 조형하는 것이 가능한 SFF이지만, 광조형이 광경화성이라고 하는 특수한 성질을 필요로 하는 것에 비하여 영가소성이라고 하는 대부분의 수지가 갖고 있는 보통의 성질을 이용하고 있으므로, 재료의 물성에 어느 정도 자유도가 있다는 특징이 있다. 미시간 대학의 Das 등은 뼈의 *in vivo*에서의 재생용 담체의 분말소결 적층 조형을 목표로 하고 있다. *in vivo*에서의 재생을 목표로 하고 있으므로 뼈의 재구축이 진행될 때까지 강도를 유지하지 않으면 안된다. 또 어떤 일정기간은 분해하지 않고 강도를 유지할 필요가 있으므로, 재료에는 강도가 얻어지고, 분해에 비교적 장기간을 갖는 PCL을 선택하여, 실제로 돼지 하악두(下顎頭)의 재구축 시험을 하여, PCL과 분말 소결 적층 조형법의 유효성을 나타내고 있다.

3. 고대사 속도 조직 재구축을 위한 담체

3.1 배경

앞에서는 SFF의 담체내의 응용 예를 조형법 별로 소개하였다. 이미 기술한 것과 같이, 3차원적인 장기 가

운데 뼈나 연골 등 대사속도가 작은 것의 재생이 실용화에 다가가고 있는 한편, 그 외의 많은 장기 재생을 실용화하기 위해서는 해결하여야 문제가 많이 있다.

肝臟 등 대사가 빠른 내장기의 세포는 미세하게 분지한 모세혈관이 세포의 바로 옆에 있고, 여기에 흐르는 혈액으로부터 효소의 공급을 받지 못하면 괴사를 일으켜 버린다. 그러한 장기의 세포를 평면상의 培養에서 증식한 경우, 조직의 두께가 두꺼워짐에 따라 배지층 세포에의 효소 공급이 적어지게 되기 때문에 배양할 수 있는 두께는 한계가 있고, 간장의 세포에는 두께 200 μm 이상으로 배양하는 것은 불가능하다고 하고 있다. Vacanti 등은 IC 프로세스를 이용하여 모세혈관 레벨의 미세한 2차원 유로를 갖는 시트를 제작하여 그것을 적층하여 3차원적인 담체를 제작하여 간장을 완전하게 재구축하는 것을 목표로 하고 있다. 한편, 酒井(본원고의 공저자) 등은 2차원 그물눈(網目) 구조를 갖는 독립된 시트를 겹치는 것이 아니고, 3차원적인 그물눈 구조의 유로를 가능한 범위의 미세함으로 제작하여, 그러한 유로에서도 배양 가능한 세포 밀도까지 *in vivo*로 배양하여, 그 후에는 *in vivo*의 혈관 재생능력에 기대하여 배양의 가능성을 찾고 있다.

필자 등은 분말 소결 적층 조형법의 응용에 대한 연구를 하고 있어서, 조형물에 빈구멍(空孔)이 남는 것이 공업적인 試作이나 소량생산에 있어서 문제가 되는 점에 주목하여 그 결과, 생기는 문제의 해결에 대하여 연구를 하고 있다. 한편, 담체에 있어서는 가령 다공질이 되는 것이 요구되고 있는 것에 착안하여 이 담체의 분말 소결 적층 조형 기술을 확립하는 것을 목표로 하고 있다.

3.2 담체 조형의 요건과 문제점

담체에 다공성이 요구되고 있는 것은 이미 기술하였지만, 간장 등의 재구축에는 통상 90% 이상의 공공율(空孔率)이 필요하다고 한다. 한편, 보통의 방법으로 분말 소결 적층 조형을 한 경우, 조형물의 공공율

은 조형 장치 안에서 적층하는 것이 소결하지 않은 분말(이후 케이크)의 공공율 보다 낮고, 케이크의 공공율은 이미 60%이므로, 담체로서 요구되는 공공율을 달성하는 것은 어떠한 공리가 필요하다.

또, 이미 기술한 것과 같이 담체에는 배양되어 있는 세포에 효소를 공급하기 위한 유로가 배치되어 있지 않으면 안된다. 酒井 등은 간장의 재구축을 목표로 하여 정사면체를 쌓아 겹친 것과 같은 분기와 합류를 반복하는 3차원 그물눈 구조의 유로를 제안하여, 정사면체의 각 변의 길이와 유로 지름에 대해서는 각각 1080 μm 와 510 μm 이라면, 세포밀도가 생체간의 1/10 정도까지 배양이 가능하다고 하고 있다. 한편, 분말소결적층 조형법에 있어서는 레이저에 의한 소결프로세스가 종료 하였을 때의 조형물은 미소결 수지 분말에 묻혀 있어서 조형물 주위의 미소결 수지를 제거하지 않으면 안되지만(이후 브레이크 작업), 본연구의 담체와 같이 미세하고 복잡하게 구부러진 유로로부터 미

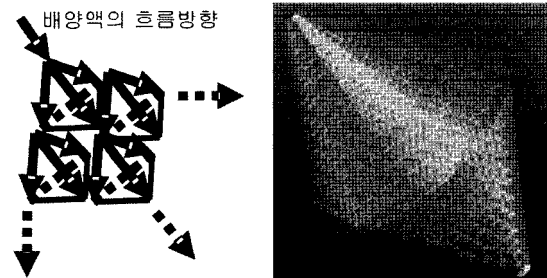


그림 2. 유로 네트워크의 개념도

소결 분말을 제거하는 것은 실질적으로 불가능하다.

나아가 기초 재료에는 Poly 유산, Polyglycol 산, Polycaprolactone 등의 생체흡수성 Polymer가 바람직하지만, 이들 Polymer에는 상업적인 조형의 실적이 없고, 조형 Parameter가 확립되어 있지 않다. 분말소결적층 조형법은 열가소성이 많은 재료로부터 조형하는 것이 원리적으로는 가능하지만 실제로 고성능의 조형물을

얻기 위해서는 여러 가지의 재료 개발이 필요하다. 분말 소결 적층 조형이나 광조형 등 유동성이 있는 재료를 선택적으로 고형화 하여 입체형상을 얻는 형식의 적층조형 수법에는 대부분의 재료에 있어서 固化시에 재료의 수축이 생기기 때문에 조형물을 Curl 시키려고 하는 응력이 발생하여, Curl이 적층 두께 이상이 되면 Recorder나 Roller와 간섭하여 조형 그 자체가 파탄이 난다. 시판의 분말소결적층조형용 분말에는 이러한 상황에 빠지지 않도록 열적인 특성이 상세하게 제어되어 있다.

3.3 수용성 Filler를 원용한 高空孔率 담체의 조형 방법

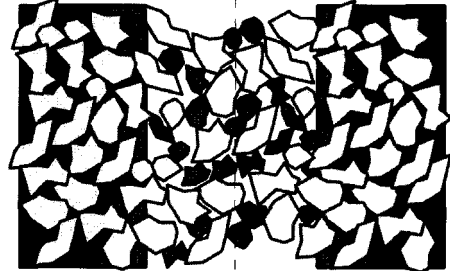
이상과 같은 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 담체의 소재가 되는 분말과 수용성의 Filler를 혼합한 것을 재료로 하여 분말소결 적층 조형을 하여, 조형 종료 후의 그 Filler를 물에 의하여 용출하는 방법을 택하기로 하였다. 수용성의 Filler를 이용하는 방법은 SFF의 하나인 3DP 법을 이용한 방법에서도 이용되었지만 분말소결적층 조형이 열로 수지를 용착하고 있는 것에 대하여 3DP법은 수지 분말의 결합에 유기 용매를 이용하여 있어서 배양시에 독성의 개념을 완전히 배제할 수 없다.

또 본 방법에는 Filler의 용출에 의하여 담체의 공극율이 향상되는 이외에도 아래에 나타내는 효과가 기대된다.

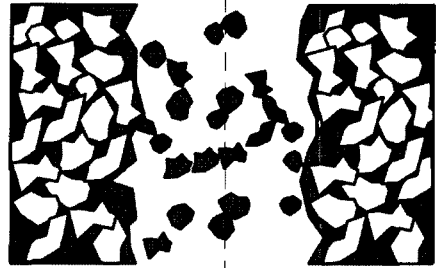
우선 수용성 Filler를 이용한 조형의 경우, 그림 3에 나타내는 것과 같이 Filler가 용출함으로써 분말의 가동성이 향상됨과 동시에 유로 내에 물 등을 흐르게 할 수 있어서 미소결분말의 배출이 촉진되는 것을 기대할 수 있다.

또, 분말소결적층 조형된 재료 중에 소결된 수지보다도 소결시의 온도변화에 의한 열팽창이나 수축이 작고, 강성도 높은 Filler가 포함되어 있으면, 수지의 수축에 의한 내부 응력이 생기더라도 변형이 적은 Filler

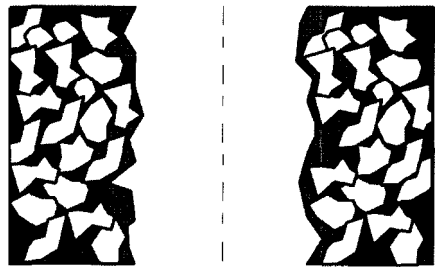
가 응력을 받기 때문에 순차 소결 되어 가는 각 층의 수축이 작아져서 결과적으로 Curl이 저감된다. 그렇기 때문에 열적인 설계가 최적화되어 있지 않은 재료에도



(a) 통상의 브레이크 작업 후



(b) Filler 용출 후(이미지)



(c) 미소결 수지의 유출

그림 3. Filler 용출에 의한 미소결수지의 배출

비교적 용이하게 파탄하는 일이 없이 조형 할 수 있다.

3.4 담체의 試作

그림 4에 시작한 담체의 기본구상도를 나타낸다. 유로 네트워크는 정사면체의 모서리를 상하 6단씩 겹쳐 쌓은 구조로 되어 있다. 유로의 지름과 모서리의 길이는 각각 1mm와 3mm로 하였다. 또, 상하에 3개씩 유로를 연결하는 분기합류부의 굵기는 2mm로 하였다.

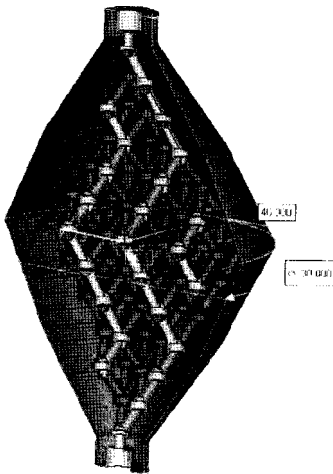


그림 4. 담체의 일부 단면도(CAD 데이터)

담체 전체는 방추형을 하고 있고, 상부와 하부에 각각 관유(灌流) 배양액의 주입구와 배출구가 설치되어 있다. 담체의 전체 높이 및 가장 두꺼운 부분의 직경은 각각 46mm와 30mm이다.

담체가 되는 수지분말에는 PCL(프라크셀 H5, 다이셀 화학제)을 평균 직경 50 μ m의 구상분말로 가공한 것을 이용하였다(주식회사 트라이알). Filler는 입경이 100 μ m~150 μ m인 염화 나트륨을 이용하였다. 이들의 분말을 중량비 1:4로 혼합하여 분말 소결 적층 조형하였다.

분말 소결 적층 조형에는 CO₂ 레이저(파장 10.6 μ m)를 광원으로 하는 조형장치(Semplice(시작버전), 아스펙트 제)를 이용하였다. 레이저는 분말 상으로 직경 500 μ m로 집광하여 분말의 표면은 50 $^{\circ}$ C로 제어되어 있다. 적층 두께, 레이저 파워, 주사 간격, 스캔 속도에 관해서는 가는 지름의 연직구멍을 조형하는 예비 시험을 하여 실험적으로 결정하였다. 소결 종료 후에는 담체 외부의 미소결 수지를 제거하여 2시간 흐르는 물에 씻은 후에 초음파 세정을 10분하고, 다시 흐르는 물에 10시간 씻어서 Filler의 용출을 하였다.

3.5 담체의 평가

시작한 담체의 외관과 표면의 확대 사진을 나타낸다(그림 5). 외형치수를 버니어 캘리퍼스에 의하여 계

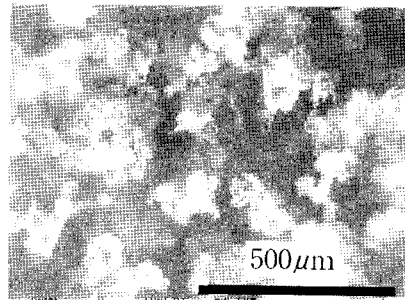
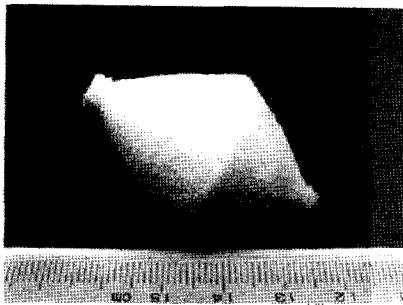


그림 5. 試作한 담체의 외관(左)과 단면 확대도(右)

측하였더니, 높이 46.0mm, 최대로 두꺼운 부분의 지름 30.0mm로 설계값 대로 나왔다. 외관에 의한 체적과 질량은 각각 13cm³와 1.7g이 되어, 이들의 값과 PCL의 참밀도로부터 계산한 공공율은 90%가 되었다. 담체의 표면에는 Filler가 용출하면서 생긴 것으로 판단되는 빈 구멍(空孔)이 존재하고 있다.

시작한 담체 내부의 유로를 마이크로 X선 CT(島津 제작소 SMX-225CT)로 관찰한 결과를 그림 6에 나타낸다. 재구축 단면상을 관찰한 결과, 유로에 막힘은 없고, 미소결 분말의 양호한 배출이 확인되었다. 또, Filler로 되어 있는 식염이 담체 안에 잔류하는 것을 완전하게 배제하는 것은 어렵지만, 대량의 식염이 배양중에 녹아 나오면 배양에 나쁜 영향이 있어서 그것이 *in vivo* 배양중에 있으면 환자에의 건강 장애 염려가 있다. 그래서 Filler의 용출 작업 종료 후에 담체를 분쇄하여 순수에 투입하였을 때의 전기 전도도의 변화로 식염 농도를 측정하여, 그 농도로부터 담체 안에 잔류되어 있는 것으로 생각되는 식염의 양을 산출하여, 0.7mg 이하라는 것을 알았다. 이것과 같은 양의 식염을 담체와 같은 체적의 물에 용해시켰을 때의 농도는 생리적 식염수 농도의 1/100이하인 50ppm(w/w)으로

배양에 대한 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

시작한 담체의 유효성을 확인하기 위하여 이 담체를 사용하여 사람의 간염유래상피세포(Hep G2)의 관유배양시험을 하였다. 11일간의 배양으로 담체 안의 세포밀도는 7.6 million cells/cm³이 되었다. 이 밀도는 생체간의 3%로 낮은 값이지만, 酒井 등이 지금까지 제작한 기계가공에 의한 담체에 대하여 20% 성능이 향상되었다. 또, 간 기능의 지표가 되는 알부민 합성량에 관해서는 배양 11일제에 세포 100만개 당 6.3μg/day가 되어, 앞에 기술한 담체의 6배에 해당하는 성능이 얻어졌다.

4. 결론

본 원고에서는 3차원 담체의 SFF에 의한 조형 기술에 대하여 알아보았다. 실용에 가까운 예로서 뼈나 연골에 관한 것을 몇 가지 나타낼 수 있었지만, 실제의 생체조직은 高次조직을 갖고 있어서, 예를 들면, SFF의 연구자가 미세 구조를 완전하게 재현한 담체를 제공하였다고 하더라도 단순히 줄기세포를 파종하는 것만으로 고차조직의 완전 재구축이 실현되는 것은 아니다. 한편, 조직을 직접 3차원 프린트 하는 것을 목

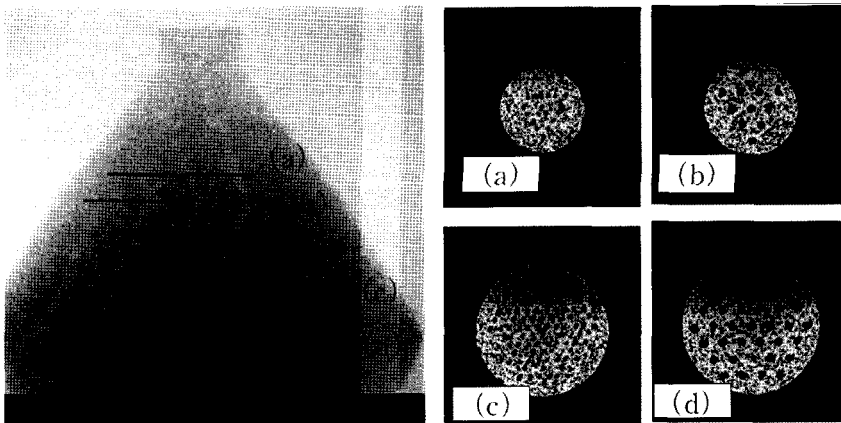


그림 6. 시작 Scaffold의 micro-CT 관찰, X 선 투과상(左), 단면재구축상(右)

표로 한 바이오프린팅은 담체만의 조형과 비교하면 훨씬 어려운 기술로 실현에는 시간이 걸린다. 이후 바이오프린팅을 포함한 조직 재생 기술은 근본이 되는 전구체세포, 배양·분화인자·담체의 3요소를 기술적으로 Control 하면서 실용 레벨을 만족하는 기능을 실현할 수 있는 조직으로부터 서서히 진행되어 갈 것으로 생각된다.

본 원고에서는 여러 가지 SFF법의 인공조직, 담체 또 바이오프린팅에의 응용을 소개하였지만, 각 조형법에는 각각의 장점·단점을 갖고 있어서, 재구축하는 조직이나 배양방법과의 매칭도 영향이 있으므로, 한마디로 어떤 조형법이 가장 좋다고 하는 결론은 내릴 수 없다.

필자 등이 하고 있는 분말 소결 적응 조형법에 의한 간장 재구축 담체에 있어서는 조형의 微細성에 재료 선택의 자유도, 높은 공공율, 독성의 저감 등을 우

선하고 있어서, 이후에 얻어지는 세포 밀도는 실용화의 가능성을 나타내기에는 아직은 미치지 못하는 값이다. 현재 필자 등은 담체 조형의 미세성의 향상, 배양 조건 개선 등의 연구에 더하여 유로설계의 최적화 등 다방면으로 Approach를 시도하고 있다. 그 도전의 성패를 알기 위해서는 앞으로의 연구 성과를 기다리지 않으면 안된다.



<<일본정밀공학회지, Vol.73, No.5, 2007>>

본 기사는 건국대학교의 이성수 편집위원이 “일본정밀공학회지” 2007년 5월호 pp.528-532를 번역한 것으로 일본정밀공학회지의 연락처는 다음과 같다.

주소 : 102-0073 東京都千代田區 九段 北 1-5-9

(九段誠和Building 2F)

TEL : +81-3-5226-5191

FAX : +81-3-5226-5192

URL : <http://www.jspe.or.jp/>