

알긴산나트륨/PEO, 알긴산나트륨/PVA 나노섬유의 제조 및 특성분석

박고은 · 박수아[†] · 김근형* · 김완두

한국기계연구원 나노기계연구본부 자연모사바이오기계연구팀, *조선대학교 기계공학과
(2007년 12월 10일 접수, 2008년 3월 7일 채택)

Preparation and Characterization of Sodium Alginate/PEO and Sodium Alginate/PVA Nanofiber

KoEun Park, SuA Park[†], GeunHyung Kim*, and WanDoo Kim

Nano-Mechanical Systems Research Division, KIMM
171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Chosun University,
375 Seosokdong, Gwang-ju 501-759, Korea

(Received December 10, 2007; Accepted March 7, 2008)

초록 : 알긴산은 α -(1→4)-L-guluronic acid(G)와 β -(1→4)-D-mannuronic acid(M)로 구성되어 있으며, 생체친화성, 무독성, 생분해성, 친수성 및 상대적으로 낮은 가격으로 인해 창상피복재나 조직공학용 지지체 및 약물 운반체 등 생의학 분야에 널리 이용하기에 적합한 물질이다. 그러나 이러한 특성을 가지는 알긴산 자체는 물에 녹지 않기 때문에 수용성인 알긴산나트륨의 형태로 많이 사용되고 있으나, 그 수용액은 매우 점도와 전도도가 높기 때문에 전기방사에 어려움이 있다. 따라서 전기방사가 가능한 수용성 고분자인 poly(ethylene oxide) (PEO)와 poly(vinyl alcohol) (PVA)을 혼합하였다. 본 연구에서는 천연 재료인 알긴산과 생체적합성이 뛰어난 수용성 고분자를 혼합하여 전기방사를 통해 나노섬유로 제조하였으며, 제조된 나노섬유는 SEM 분석 및 평균 직경 분석, XRD 분석 등을 통하여 최적 조건을 수립하였다.

Abstract : Alginate obtained from marine brown algae, is a copolymer with repeating units of α -(1→4)-L-guluronic acid(G) and β -(1→4)-D-mannuronic acid(M). It has good properties such as biocompatibility, non-toxicity, and hydrophilicity. However, alginate alone cannot be electrospun due to high viscosity and conductivity. To solve this problem, electrospinning of sodium alginate(SA) was performed by blending with poly(ethylene oxide) (PEO) and poly(vinyl alcohol) (PVA) in this study. Characteristics of SA/PEO nanofibers and SA/PVA nanofibers were estimated by SEM and XRD analyses. Optimal nanofiber webs are obtained from 2/2 wt% of SA/PEO and 2/7 wt% of SA/PVA. SA/PEO and SA/PVA nanofiber webs may have potentials for tissue engineering scaffold and wound dressing.

Keywords : sodium alginate, PEO, PVA, nanofiber, electrospinning.

서 론

조직공학은 생체 조직의 대용품을 만들어 이식함으로써 생체조직을 직접 이식하기보다는 손상된 조직의 개선 및 회복에 그 목적이 있다. 생체기능을 대신할 수 있는 조직을 재생시키기 위해 지지체는 생체조직공학에서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 지지체의 특성은 생체적합성이 우수해야 하며, 독성이 없어야 한다. 또한, 큰 표면적의 부피와 다공성을 가져야 하며, 생분해성을 고려해야 한다. 일반적으로 3차원 구조의 지지체는 천연 및 합성고분자, 세라믹, 금속 및 복합재료로 만들어 지는데, 특히, 천연재료는 조직의 형태를 유지하고 세포의 증식 및 분화를 위한 세포외기질(ECM, extracellular matrix)을 모방하여 세포의 성장환경을 제공할 수 있는 우수한 특성

을 가지고 있다.^{1,2}

그 중에서 천연 재료인 알긴산은 해양 식물 중 가장 많이 분포되어 있는 갈조류에서 얻어지는 다당류로서, 셀룰로오스처럼 갈조류의 세포벽을 보강하는 역할을 한다. 이러한 알긴산은 생체친화성, 무독성, 생분해성, 친수성 및 상대적으로 낮은 가격으로 인해 창상피복재나 조직공학용 지지체 및 약물 운반체 등 생의학 분야에 널리 이용하기에 적합한 물질이다.³⁻⁸ 알긴산은 α -(1→4)-L-guluronic acid(G)와 β -(1→4)-D-mannuronic acid(M)로 구성되어 있으며, 이들의 구성 비율은 해조의 종류에 따라 다르다.³⁻⁶ 일반적으로 M/G 비율이 낮을수록 단단하고 부서지기 쉬운 겔을 형성하고 높은 경우에는 보다 탄성적인 겔을 형성한다. 또한 알긴산은 지중의 200-300배 이상의 수분을 흡수하는 높은 흡습능력을 가지고 있어 창상피복재로 사용 시 상처부위에서 발생하는 삼출액을 효과적으로 흡수하며, 상처부위에 습윤한 환경을 유지하여 상처의 치유를 돕는 기능을 한다.³⁻⁸

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: psa@kimm.re.kr

그러나 이러한 특성을 가지는 알긴산 자체는 물에 녹지 않기 때문에 수용성인 알긴산나트륨(sodium alginate, SA)의 형태로 가공되어지고 있다.⁴ 알긴산나트륨은 칼슘 이온과 만나 치환반응을 일으켜 불용성인 알긴산칼슘 형태로 전환되므로 가공 후 수분에 의해 재용해되는 것을 방지할 수 있다.⁴⁻⁶ 그리고, 알긴산나트륨은 고분자 전해질로서 매우 높은 전도도와 점도를 갖기 때문에 단독으로 전기방사가 어렵다. 그래서 알긴산나트륨에 각각 전기방사가 용이한 수용성 고분자인 poly(ethylene oxide) (PEO)와 poly(vinyl alcohol) (PVA)를 혼합하여 방사하였다. PEO는 대표적인 수용성 고분자로서 무독성 및 높은 생체친화성으로 인해 여러 생의학 분야에서 많이 연구되고 있는 물질이며,⁹ PVA 역시 수용성 고분자로 높은 생체친화성, 무독성 및 유기용매에 대한 높은 안정성을 가지며, 열저항성이 높다.¹⁰⁻¹⁵ 또한, 높은 점도를 가진 알긴산나트륨은 농도가 높아질수록 전기방사 시 균일한 균일한 나노섬유를 얻기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 나노섬유의 비드를 제거할 수 있는 계면활성제인 Triton X-100만을 소량 사용하였다. 따라서 본 논문에서는 천연 재료인 알긴산에 각각 생체적합성이 뛰어난 수용성 고분자인 PEO와 PVA를 혼합하여 제조한 용액을 전기방사를 통하여 나노섬유로 제조하여 그들의 특성을 분석해보고자 하였다.

실 험

시약 및 재료. 알긴산나트륨은 Sigma사의 제품을 사용하였다. 분자량이 9000000인 PEO는 Sigma-Aldrich사에서 구입하였다. PVA는 가수화도가 높을수록 상온에서 물에 쉽게 용해되지 않는 특성을 지닌다.^{13,14} 따라서 온도의 상승 없이 PVA를 용해시키기 위하여 가수화 정도가 88 mole%이며 분자량이 78000인 PVA를 Poly-sciences Inc.사에서 구입하여 사용하였다. Triton X-100은 Sigma사에서 구입하였다.

알긴산나트륨/PEO, 알긴산나트륨/PVA 용액의 제조 및 전기방사. 알긴산나트륨과 고분자 혼합용액의 최적 농도 조건을 찾기 위하여 다음과 같은 방법으로 그들의 혼합용액을 제조하였다. 알긴산나트륨과 PEO 혼합용액은 알긴산나트륨 1, 2, 3 wt%(w/w)과 PEO 1, 2 wt%를 각각 잘 섞어서 용해하였으며, 알긴산나트륨과 PVA 혼합용액은 PVA 6, 7, 8 wt% 용액을 먼저 제조한 후 알긴산나트륨 1, 2, 3 wt%를 첨가하여 용해하였다. 혼합 비율 표기는 알긴산나트륨 1 wt%와 PEO 1 wt%를 혼합한 경우 S1P1으로, 동량의 알긴산나트륨과 PVA 6 wt%를 혼합한 경우는 S1Pv6으로 나타내었다. 용매는 모두 증류수를 사용하였다.

또한 알긴산나트륨과 혼합됨으로 인해 용액의 점도가 매우 높아져 전기방사 시 섬유가 형성되는데 어려움이 있기 때문에 위 용액들 중 최적 조건이라 여겨지는 용액들에 계면활성제로서 Triton X-100을 소량 첨가하여 방사특성을 개선하고자 하였다. 기존의 연구들에서는 비드형 섬유(beaded fiber)가 나타나는 현상을 개선하기 위해 증류수와 DMSO의 혼합용매(co-solvent)를 사용하였으나, 본 연구에서는 바이오소재로의 활용에 대한 안전성을 높이기 위해 용매로서 증류수만을 사용하였고, 알긴산나트륨을 이용해 PEO와 PVA 각각의 혼합용액을 제조하였다.

전기방사 장치는 전압 범위가 0-40 kV, 집적판으로는 알루미늄 호

일을 사용하였다. 용액의 유출량을 일정하게 하기 위해 실린지 펌프(model 100, KD Scientific)를 사용하였으며 24G의 바늘을 사용하여 전기방사 하였다. 방사 후 얻어진 나노섬유들은 차후의 분석실험을 위해 테시케이터에 보관하였다.

알긴산나트륨/PEO, 알긴산나트륨/PVA 나노섬유의 특성분석. 각 용액에 대한 점도는 점도계(LVDVE 230, Brookfield viscometer)를 사용하여 측정하였으며, 전도도는 전도계(Orion 4 Star Benchtop pH/Conductivity meter, Thermo Scientific)를 사용하여 측정하였다. 용액의 점도와 전도도는 주위 온도나 습도의 영향을 많이 받으므로, 각 시료는 일정한 조건에서 점도 측정을 실행하였다. SEM 분석을 통해 전기방사로 얻어진 나노섬유의 형태학적 특성을 분석하였고, 제조된 부직포의 평균 섬유직경은 이미지 분석 프로그램(Scope Eye II, TDI)에 의해 측정하였다. 또한 XRD 분석을 통하여 혼합 시 그들의 결정구조 변화를 확인하여 보았다. 단, 알긴산나트륨은 단독으로 방사되지 않기 때문에 필름 형태로 제조하여 XRD 분석을 수행하였다.

세포 적합성 평가. 나노섬유의 생체적합성을 평가하기 위해 5 wt%(w/v) 염화칼슘 수용액에서 불용화시킨 S2P2 나노섬유를 사용하였다. 우선 S2P2 나노섬유를 물에 불용화 시키기 위하여 3시간 동안 염화칼슘 수용액에 침지하였다. 그 후 반응 잔여물을 제거하기 위하여 증류수로 세척한 후 건조하였다. 세포 실험에는 인간섬유아세포(human dermal fibroblast)를 사용하였으며, 접종 농도는 시편 당 6.4×10^4 cells을 접종하였다. 세포부착을 관찰하기 위해 4%(v/v) 글루타르알데히드 용액을 고정하여, 각각 3일과 5일 동안 배양한 결과를 SEM을 통하여 관찰하였다.

결과 및 토론

알긴산나트륨/PEO, 알긴산나트륨/PVA 용액의 특성분석. Figures 1, 2는 알긴산나트륨과 PEO, PVA의 조성에 따른 점도와 전도도 그래프이다. Figure 1에 의하면 알긴산나트륨의 함량이 증가할수록 점도와 전도도 모두 증가하는 경향을 보였다. 그러나 PEO의 함량이 증가할수록 점도는 증가하는 경향을 보이나 전도도는 감소하는 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이는 일반적으로 점도가 낮은 용액일수록 전도도 측정 시 더 큰 영향을 미치는 경향이 있기 때문에, 알긴산나트륨의 점도에 비해 상대적으로 점도가 매우 낮은 PEO 함량이 용액 내에 증가하였다 하더라도 그 변화가 뚜렷하게 나타난 것이라 보여진다. 이것은 Figure 2의 알긴산나트륨과 PVA의 조성에 따른 점도와 전도도 그래프에서도 확인할 수 있었다. PVA 역시 용액 내에서 함량이 증가할수록 점도는 증가하지만, 알긴산나트륨에 비해 상대적으로 점도가 낮기 때문에 PVA의 전도도가 용액 내에서 더 큰 영향을 미치게 되어 PVA 함량이 증가할수록 용액의 전도도는 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 알긴산나트륨의 함량이 용액 내에서 증가할수록 용액의 점도와 전도도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

알긴산나트륨/PEO, 알긴산나트륨/PVA 나노섬유의 특성분석. 각 조성별로 준비된 용액들은 방사거리 25 cm, 방사전압 17-20 kV, 방사속도 0.2-1.0 mL/h의 조건 하에서 24G 바늘을 사용하여 전기방사하였다. 가장 안정적으로 섬유를 형성하는 용액 조건을 확인하기 위하여 이렇게 준비된 시료의 SEM 촬영 사진을 Figures 3, 4에 나타내었다. Figures 3, 4의 이미지 배율은 각각 1000배와 30000배이다.

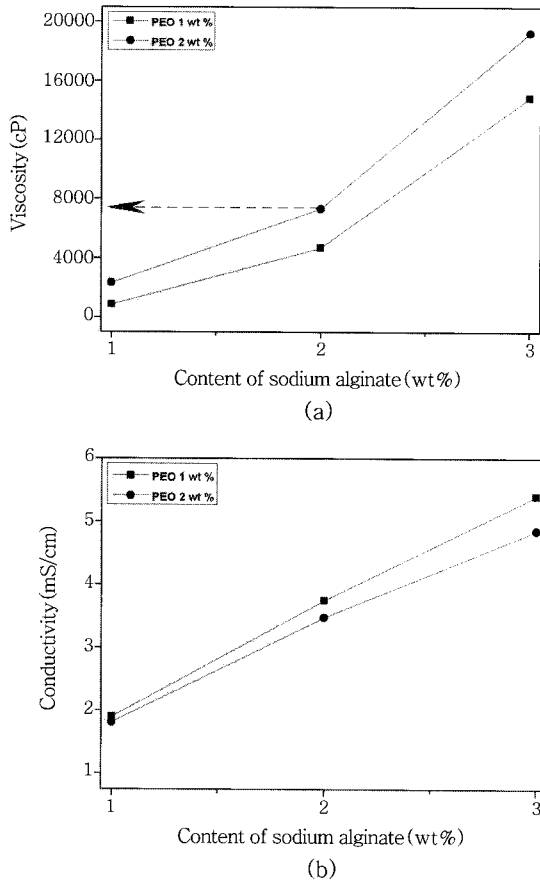


Figure 1. Changes in solution (a)viscosity and (b)conductivity according to blend ratio of SA/PEO.

Figure 3(a)–(c)는 PEO 함량이 1 wt%일 때 알긴산나트륨의 함량에 따른 전기방사 결과를 나타내었다. 그림에서 보여 지는 바와 같이 용액 내의 알긴산나트륨 함량이 증가함에 따라 비드형 섬유 (beaded fiber)상에서 점차 섬유상으로 변하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Figure 3(a)와 (b)의 경우 용액 내에 총 고분자 함량이 섬유를 형성할 만큼 충분하지 않기 때문이다. Figure 3(c)의 경우 Figure 3(a), (b)에 비하여 섬유상에 보다 가깝기는 하지만 아직 완전한 섬유상을 형성하지 못했음을 확인할 수 있었다. Figure 3(d)–(f)는 PEO의 함량이 2 wt%일 때 알긴산나트륨의 함량에 따른 결과를 나타내었다. SEM 사진으로부터 PEO의 함량이 증가함에 따라 알긴산나트륨의 함량에 관계없이 모두 완전한 섬유상을 형성한 것을 볼 수 있었다.

Figure 4는 각기 다른 알긴산나트륨과 PVA 함량에 따라 제조된 용액의 전기방사 결과 얻어진 나노섬유의 SEM 관찰을 나타내었다. Figure 4(a)–(c)는 PVA 함량이 6 wt%일 때 알긴산나트륨 함량에 따른 섬유형태 변화를 나타내었다. 그림에서 보여 지는 바와 같이 알긴산나트륨의 함량에 관계없이 PVA 함량이 6 wt%일 경우 비드형 섬유가 얻어지는 것을 확인할 수 있었다. 이 역시 마찬가지로 섬유를 형성하기에는 용액 내에 고분자의 함량이 충분하지 못하기 때문이라 사료되어진다. Figure 4(d)–(f)는 PVA 함량이 7 wt%일 때 알긴산나트륨 함량에 따른 SEM 관찰을 나타내었다. 역시 알긴산나트륨 함량에 관계없이 안정적으로 고른 형태의 섬유가 형성됨

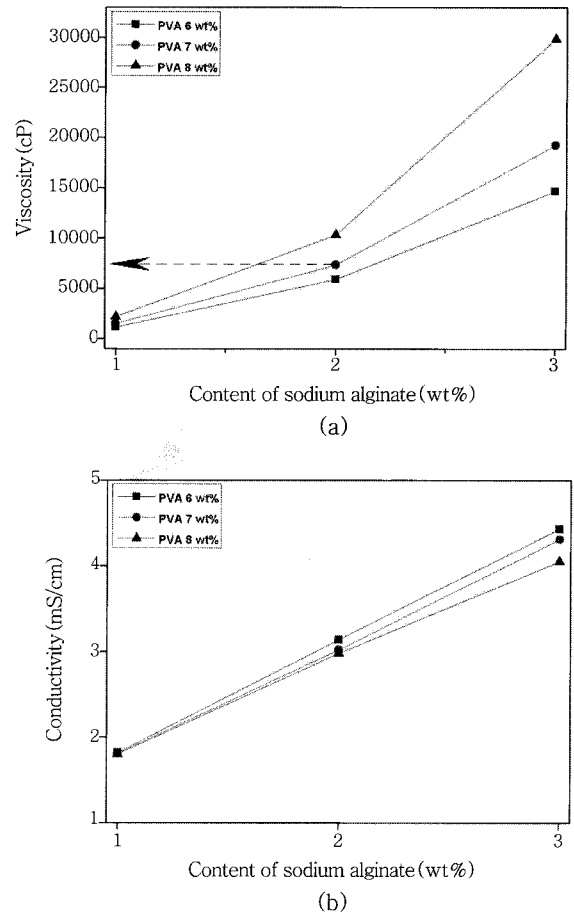


Figure 2. Changes in solution (a)viscosity and (b)conductivity according to blend ratio of SA/PVA.

을 관찰할 수 있었다. 그러나 고분자의 양이 8 wt% (Figure 4(g)–(i))로 증가하게 되면 섬유의 직경이 굵어지는 것을 확인할 수 있으며, 그들의 분포 또한 고르지 못한 것을 확인할 수 있었다. Figure 4(c)에서는 고분자의 함량이 적음에도 불구하고 섬유를 얻을 수 있었으나, 그들의 생산량이 매우 적고 방사 거동 또한 불안정하였다. 이는 고점도, 고전도도를 가지는 알긴산나트륨의 함량이 용액 내에 많기 때문에 일어나는 것이라 사료되어진다. 위의 결과들로부터 전기방사가 가능한 고분자인 PEO와 PVA 함량이 용액 내에 충분하지 못한 경우, 섬유를 형성하기 어렵다는 것을 확인하였다. 이는 섬유 형성에 있어 PEO와 PVA가 중요한 역할을 하고 있음을 시사한다. 이러한 결과를 토대로, 전기방사 시 방사 거동의 안정성과 형성되는 섬유상의 완전성을 고려하여 S2P2 [Figure 3(e)]와 S2Pv7 [Figure 4(e)]을 다음 실험을 진행하기 위한 최적의 조건으로 선정하였다.

또한 Figures 3, 4의 결과로부터 특정 점도 영역에서 가장 원활한 방사가 수행된다는 것을 또한 확인할 수 있었다. 최적조건으로 선정된 S2P2 및 S2Pv7 용액의 점도는 Figure 1(a), 2(a)의 화살표 점선에서 보여 지는 바와 같이 모두 7000 cP 부근으로 알긴산나트륨과 고분자 혼합용액의 경우 위의 점도 영역에서 가장 효과적으로 나노섬유를 생산해 낼 수 있음을 확인하였다. Figures 3, 4의 30000 배율의 이미지로부터 완전한 섬유상을 형성하게 되는 최적의 조건을 찾았지만, 1000 배율의 이미지에서는 함유된 알긴산나트륨과 고분자의

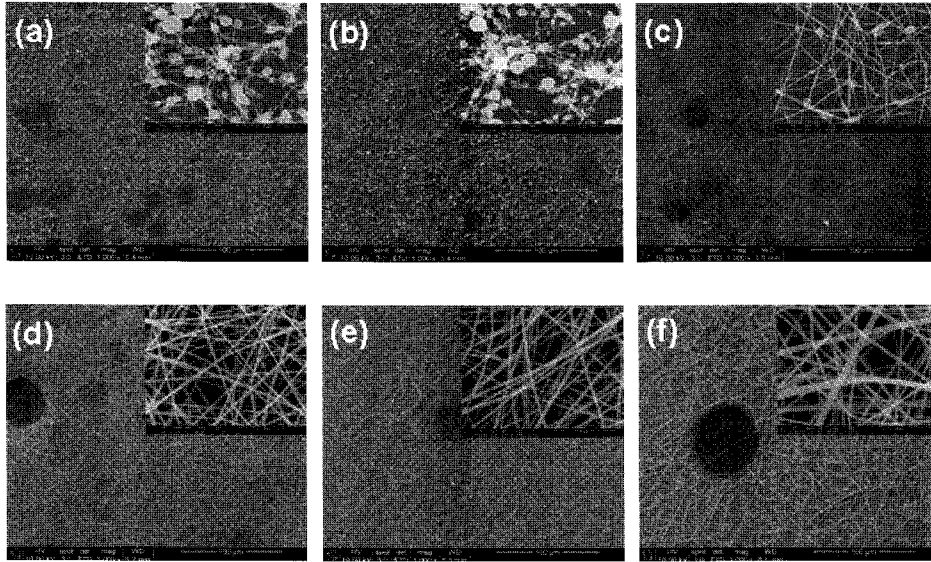


Figure 3. Morphology changes of blend nanofibers according to blend ratio of SA/PEO. (a) S1P1, (b) S2P1, (c) S3P1, (d) S1P2, (e) S2P2, and (f) S3P2.

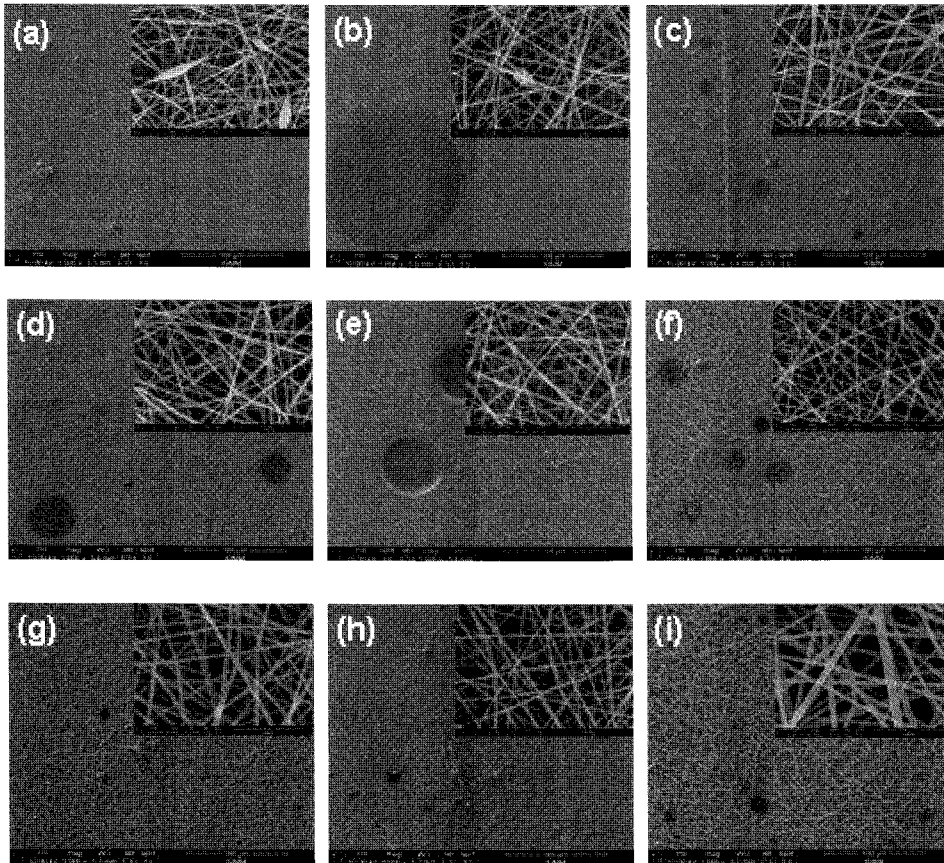


Figure 4. Morphology changes of blend nanofibers according to blend ratio of SA/PVA. (a) S1Pv6, (b) S2Pv6, (c) S3Pv6, (d) S1Pv7, (e) S2Pv7, (f) S3Pv7, (g) S1Pv8, (h) S2Pv8, and (i) S3Pv8.

함량에 관계없이 많은 용액 방울들이 웹 상에 존재하는 것을 발견할 수 있었다. 이는 다음과 같은 기전에 의해 발생할 것이라 사료되어진다. 알긴산나트륨이 용액 내에 함유되게 되면 전체 용액의 점도가 매

우 높아지게 되므로(Figures 1, 2), 바늘 끝의 용액에 모인 양전하가 용액의 표면장력을 이기지 못하여 jet을 형성하기 어렵게 된다. 따라서 바늘 끝에 모인 용액이 jet을 형성하여 빠른 시간 안에 소비되지

못하고 방울의 형태로 바늘 끝에 모여 있게 되며, 이렇게 바늘 끝에 모인 용액 방울에 집적되는 양전하의 양이 많아짐에 따라 고전도도인 알긴산나트륨의 영향을 받아 집적판까지 이동할 수 있는 상태가 되기 때문이라 여겨진다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 전반적으로 용액의 표면장력을 줄여줄 필요성이 있다고 판단하여 계면활성제인 Triton X-100을 용액 내에 첨가하였다.

Figures 5, 6은 S2P2와 S2Pv7 용액에 Triton X-100을 각각 0, 0.3, 0.5, 0.7 wt%(w/w) 첨가시켜 제조한 용액을 전기방사한 후 SEM으로 관찰한 결과를 나타내었다. Triton X-100을 첨가한 시료의 경우 Triton X-100을 첨가하지 않은 시료에 비하여 비드의 양이 확연하게 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 그러나 Triton X-100의 함량이 너무 많게 되면 충분한 양의 용액이 모이기 전에 적은 양의 양전하로도 용액의 표면장력을 이겨내고 용액이 집적판까지 이동하게 되어[Figures 5(d), 6(d)], 생산된 나노섬유 웹의 표면이 고르지 못하게 된다. Triton X-100을 소량 첨가하여 전기방사한 시료의 SEM 촬영 결과, S2P2의 경우 0.3 wt%, S2Pv7의 경우 0.5 wt%의 Triton X-100이 함유된 용액으로부터 가장 이상적인 형태의 나노섬유 웹을 얻을 수 있었다.

Figure 7은 Triton X-100이 각각 0.3, 0.5 wt% 함유된 S2P2, S2Pv7 나노섬유 웹에 대한 직경분포와 평균직경을 나타낸 그래프이며, 그림에서 보여 지는 바와 같이 제조된 나노섬유의 평균직경은 각각 190, 150 nm로 S2Pv7 웹에서 약간 더 작은 사이즈의 섬유가 생성되는 것을 확인하였다. 이렇듯 알긴산나트륨과 PEO, PVA와의 혼합 용액으로부터 얻어진 나노섬유의 평균직경은 세포외기질 구조의 크기인 50-300 nm의 범위² 안에 드는 것으로, 전기방사를 통하여 제조된 알긴산나트륨과 고분자 혼합 나노섬유들로부터 세포외기질의 구조적 재현을 성공적으로 수행하였다는 것을 확인하였다. 이는 추후 생의학 분야에 응용하기에 적합할 것이라 판단되어진다.

Figure 8은 S2P2, S2Pv7 나노섬유 웹에 대한 XRD 분석 결과를 나타내었다. PVA와 혼합된 경우 별다른 특이 사항을 찾을 수 없었

나, PEO와 혼합된 경우에는 결정 피크 하나가 사라지는 것을 확인하였다. 이는 큰 점도 차로 인하여 알긴산나트륨과 PEO 간의 상용성이 좋지 않을 것이라는 예상과 달리, 알긴산나트륨과의 혼합이 PEO에 영향을 미치게 되며 PEO와 알긴산나트륨이 많은 점도 차이를 보임에도 불구하고 서로 잘 혼합되어 있음을 나타내었다. 그러나 강도면에서는 하나의 결정피크가 사라진 것으로 보아 그들의 강도는 순수한 PEO 나노섬유보다 약할 것이라 예상된다.

Figure 9는 S2P2 나노섬유에 대한 세포의 초기 세포 부착에 관한 SEM 사진이다. 세포 배양 3일째 Figure 9(a)로부터 세포의 부착이 효과적으로 이루어졌으며, 세포 배양 5일째 Figure 9(b)에서 세포가 주변으로 넓게 퍼져나가 부착됨을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 알긴산나트륨을 기반으로 하는 나노섬유는 창상피복재 및 조직공학용 지지체로서 사용하기에 적합하다고 사료되어진다.

이렇게 제조된 알긴산을 기반으로 하는 나노섬유 웹은 알긴산 고유의 생체친화적, 생분해적 특성으로 인해 여러 조직공학 분야에 널리 응용 가능할 것이라 기대된다. 이 나노섬유 웹의 조직공학적 응용을 위하여 추후에 여러 물리적, 기계적 특성에 대한 실험 역시 실행할 예정이다.

결론

생체적합성이 뛰어난 천연물질인 알긴산은 조직공학 분야에 응용하기에 매우 적합한 특성을 가지고 있다. 그리하여 본 논문에서는 알긴산을 기반으로 하는 나노섬유를 제조하고자 하였다. 알긴산은 점도와 전도도가 매우 높아 전기방사하기에 어렵기 때문에 대표적인 친수성 고분자인 PEO, PVA와 혼합하여 전기방사를 수행하였다. 그 결과 알긴산나트륨 2 wt%와 PEO 2 wt%를 혼합한 S2P2, 알긴산나트륨 2 wt%와 PVA 7 wt%를 혼합한 S2Pv7에서 가장 우수한 나노섬유를 얻었으나, 그들의 웹 표면은 고르지 못하였다. 이를 해결하기 위하여 계면활성제인 Triton X-100을 용액 내에 소량 첨가하였으며,

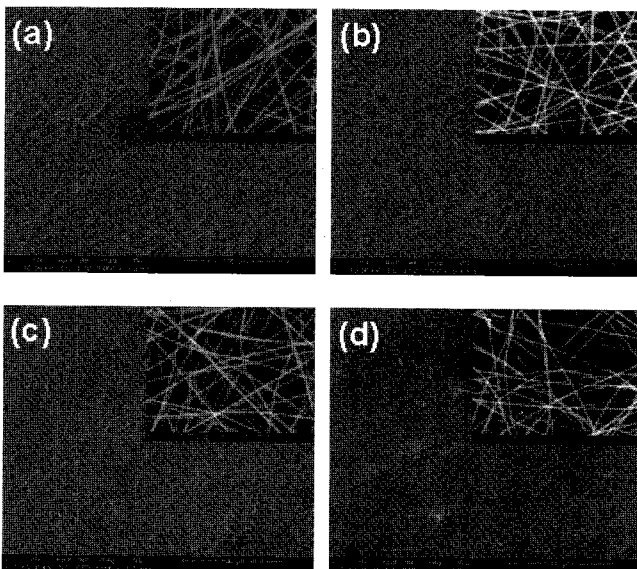


Figure 5. Morphology changes of S2P2 nanofiber according to content of Triton X-100. (a) 0, (b) 0.3, (c) 0.5, and (d) 0.7 wt%.

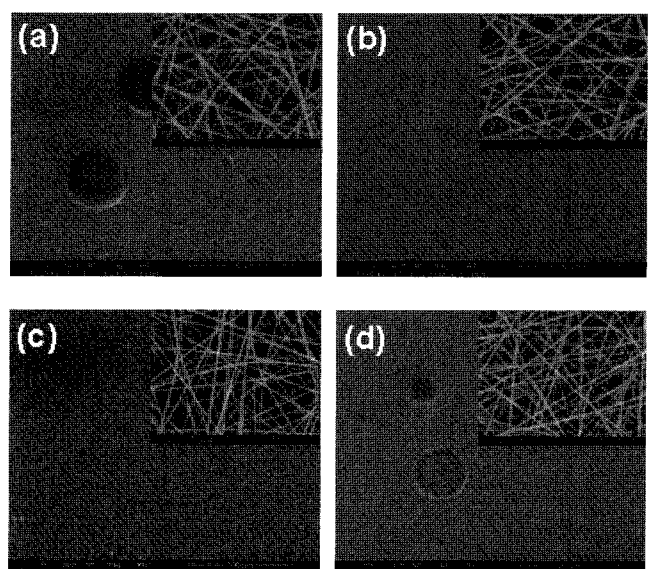


Figure 6. Morphology changes of S2Pv7 nanofiber according to content of Triton X-100. (a) 0, (b) 0.3, (c) 0.5, and (d) 0.7 wt%.

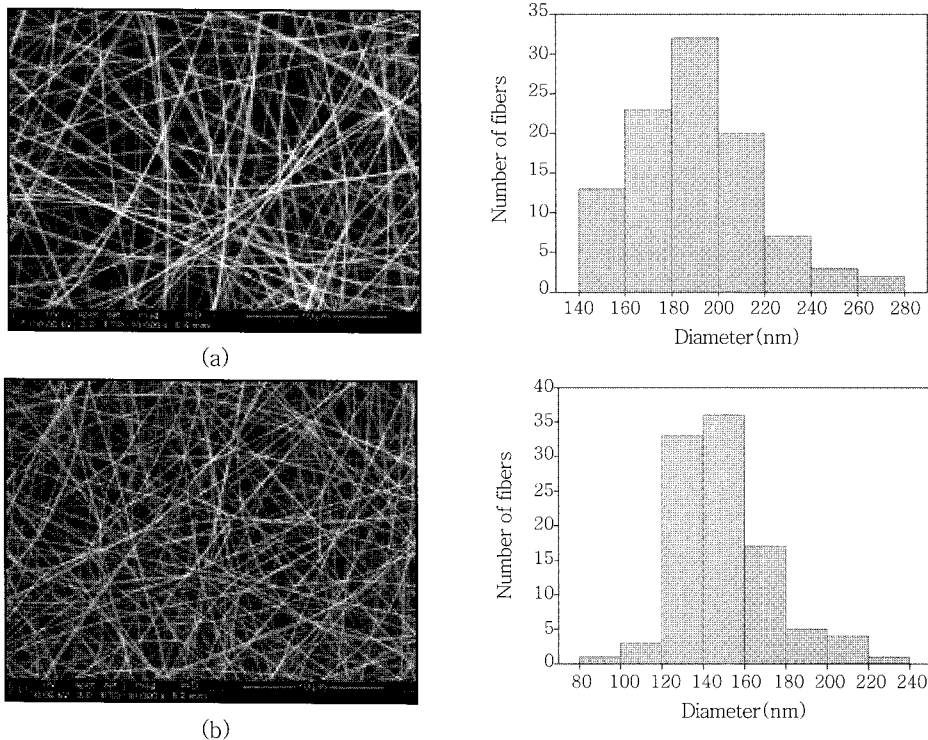


Figure 7. SEM micrographs (x10000) and diameter distribution of (a) S2P2 and (b) S2Pv7 nanofibers with Triton X-100.

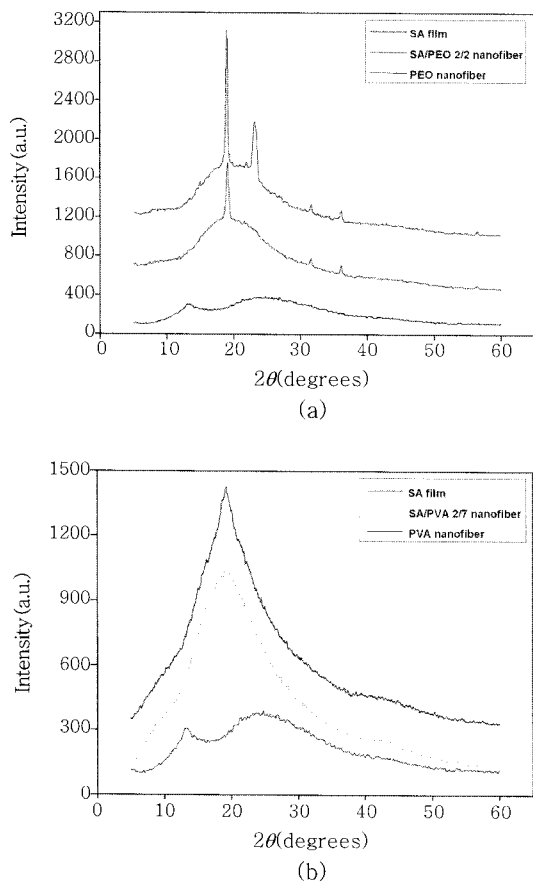


Figure 8. WAXD patterns of (a) SA/PEO and (b) SA/PVA blend nanofibers.

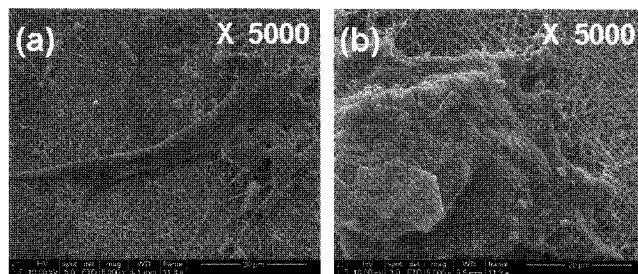


Figure 9. SEM images of cell attachment on S2P2 nanofiber (a) after 3 days and (b) after 5 days.

이렇게 얻어진 나노섬유의 결정구조를 분석하기 위해 XRD 분석을 수행한 결과, PEO의 결정피크가 변함에 따라 그들의 강도가 혼합 전보다 약해질 것이라고 예상할 수 있었다. 그러나 이렇게 제조된 나노섬유들의 평균직경이 세포외기질의 구조적 특징과 매우 유사함을 평균직경 분석을 통하여 확인하였다. 본 연구에서는 조직공학 분야에 응용하기 위한 알긴산 기반 나노섬유 웹의 제조를 성공적으로 수행하였다.

참고 문헌

1. J. J. Yoo and I. W. Lee, *Tissue Engineering : Concepts and Application*, Korea Medical Book Publisher, 1998.
2. H. Suh, *Tissue Engineering for Artificial Organs*, Yonsei Univ. Book Publisher, 1999.
3. E. Öztürk, C. Ağalar, K. Keçeci, and E. B. Denkbaş, *J. Appl. Polym. Sci.*, **101**, 1602 (2006).
4. S. M. Han, C. W. Nam, and S. W. Ko, *J. Kor. Fib. Soc.*, **37**,

- 365 (2000).
5. Y. Qin, *J. Appl. Polym. Sci.*, **91**, 1641 (2004).
 6. Y. Qin, H. Hu, and A. Luo, *J. Appl. Polym. Sci.*, **101**, 4216 (2006).
 7. M. Kitamikado, K. yanaguchi, C. H. Tseng, and B. Okabe, *Appl. Envir. Microbio.*, **56**, 2939 (1990).
 8. R. S. Doubet and R. S. Quatrano, *Appl. Envir. Microbio.*, **44**, 754 (1982).
 9. Y. Liu, J. Chen, V. Misoska, and G. G. Wallace, *Reac. & Func. Polym.*, **67**, 461 (2007).
 10. R. Dave and D. Madamwgar, *Proc. Biochem.*, **41**, 951 (2006).
 11. W. Yujian, Y. Xiaojuan, T. Wei, and L. Hongyu, *J. Micro. Meth.*, **68**, 212 (2007).
 12. O. Şanlı, N. Ay, and N. Işıklan, *Eur. J. Pham. Biopham.*, **65**, 204 (2007).
 13. Y. Q. Dong, L. Zhang, N. Shen, M. Y. Song, and H. L. Chen, *Desalination*, **193**, 202 (2006).
 14. A. Koski, K. Yim, and S. Shivkumar, *Mater. Lett.*, **58**, 493 (2004).
 15. W. K. Son, J. H. Youk, T. S. Lee, and W. H. Park, *Mater. Lett.*, **59**, 1571 (2005).