

전기방사법을 이용한 정렬된 나노화이버를 포함한 3차원 구조물 제작 Fabrication of 3D Structures containing aligned nanofibers via Electrospinning

*박석희¹, #양동열¹

*S. H. Park¹, #D. Y. Yang(dyyang@kaist.ac.kr)¹

¹ 한국과학기술원 기계항공시스템학부

Key words : Electrospinning, Aligned Nanofibers, Polycaprolactone

1. 서론

전기방사 공정(electrospinning)은 Formulas 에 의해 1930년 대에 정전기적 힘을 이용한 섬유 생산 방법으로서 시도되었으며, 이 후 전기장에 의해 형상화 하는 고분자 용액에 대해 상세한 연구가 이루어져 다양한 고분자 나노 섬유의 제작 및 응용이 이루어지고 있다. 전기방사 공정은 고분자 용액에 고전압을 인가하여 정전기적 힘에 의해 고분자 액적이 섬유 형태의 변화를 유도하는 것을 기본 원리로 하고 있다. 마이크로 스케일의 미세 금속 노즐을 통해 휘발성 유기용매에 용해된 고분자 용액을 미량으로 토출하여 노즐 끝에 액적을 형성시킨다. 이 때 금속 노즐을 통해 고전압이 인가되면 끝에 형성된 고분자 액적의 표면에 전하가 분산되어 척력에 의해 테일러 콘(Taylor cone)으로 형태가 변화하게 된다. 액적의 변화가 정진기력에 의해 심화됨에 따라 길이 방향으로 더욱 늘어지게 되고 가늘어져 접지된 수집기(collector)에 나노섬유의 형태로 포집된다. 노즐에서 수집기로 이동하는 동안 고분자 용액의 용매는 증발하게 되고 최종적으로 고체 상태의 나노섬유가 포집된다.

전기방사 공정은 기존의 섬유 부직포 제작 공정에 비하여 간단한 장비로 수 nm 에서 수 μm 의 다양한 스케일의 나노 섬유를 포집할 수 있으며, 유기용매의 선택에 따라 광범위한 고분자 소재의 응용이 가능하다. 전기방사 나노 섬유는 기존 마이크로 스케일의 섬유에 비해 부피 대비 표면적 및 제조된 막의 공극률이 높음에 따라 호흡성, 방풍성을 지니고 이를 이용하여 고효율성, 초기능성 분리소재로 응용되고 있다. 또한 최근에는 유기용매와 기능성 고분자의 조합에 따라 탄소 나노섬유 및 전도성 나노섬유 소재로의 응용이 이루어지고 있으며, 생분해성 고분자를 활용한 조직공학용 구조물로의 연구 및 응용이 이루어지고 있다.¹

조직공학용 생분해성 지지체는 생체 조직의 재생을 유도하기 위한 매개체로서 해부학적 또는 조직학적으로 인공 조직을 제작하는 것을 시작으로 연구되어 현재는 내/외부 구조물을 자유 형상으로 구현할 수 있는 3차원 형상 조형 공정인 쾌속조형(Rapid Prototyping, RP) 기술을 통한 적용 연구가 시도되고 있다. Giordano 등은 가루 형태의 PLA 와 PLGA 에 원하는 단면으로 유기 용매를 분사하여 적층하는 방식인 3DP(three dimensional printing) 방법으로 제작하였으며, Landers 등은 실리콘 계열의 반응성 있는 올리고머를 공기압을 이용하여 분사하고 가교하는 방식으로 제작하였다. Hutmacher 등은 FDM 방식을 이용하여 PCL 필라.멘트를 고온으로 녹인 후 노즐에 분사하여 지지체를 제작하였으며, Gianluca 등은 선택적으로 레이저를 조사하여 소결하는 방식으로 제작한 바 있다.² 쾌속조형 공정으로 제작된 지지체의 경우 3차원 자유 형상 구현에 큰 이점을 가지고 있지만 세포 배양 시 부착특성 및 세포 활성화 관점에서 개선되어야 할 여지를 두고 있다. 세포 배양에서의 세포 부착 특성 및 증식 특성을 보완하기 위하여 Park 등은 3차원 구조물 사이에 콜라겐/PCL 전기방사 나노섬유를 삽입한 하이브리드 구조물을 제안하여 조직공학용 지지체로서의 가능성을 높인 바 있다.³

조직공학용 지지체로서의 전기방사 나노섬유는 최근 한

방향으로 정렬된 형태로 제작되어 세포의 분화, 증식, 부착에 대한 평가 및 응용이 이루어지고 있다. 일반적으로 세포가 정렬되어 있는 형태를 지니는 조직으로는 연골의 표면층(superficial zone of cartilage), 평활근(smooth muscle), 심근(cardiac muscle), 골격근(skeletal muscle), 인대(ligament) 등이 있다. Lee 등은 십자인대 섬유아세포(arterial Cruciate Ligament fibroblast)를 일정 방향의 형태로 생성된 전기방사 나노섬유에 배양하여 변화되는 특성을 관찰하였고⁴, Xu 등은 평활근 세포의 배양특성을 파악하였으며⁵, Wise 등은 골수 간엽 줄기세포(mesenchymal stem cell)의 연골세포로의 분화에 대한 연구를 행한 바 있다.⁶

앞서 이루어진 정렬된 전기방사 나노섬유의 세포배양에 관련한 연구의 경우 국소 영역의 2차원 패턴의 단계에 머물러 있다. 조직 공학적인 측면에서의 조직 재생 유도 단계까지 고려할 때 3차원 지지체 제작은 필수적이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 3차원 형상 조형 기술과 연계가 가능한 나노섬유 정렬 방법을 제안하고, 이를 통해 정렬된 나노섬유를 포함하는 3차원 조직공학용 지지체를 제작하였다.

2. 재료

폴리카프로락톤(polycaprolactone, PCL)은 Union Carbide사에서 개발한 결정성을 띠는 생분해성 고분자로서, 다른 고분자에 비해 월등히 낮은 T_g (-60°C), T_m ($55\sim 60^\circ\text{C}$) 값을 가지며, 다른 고분자와의 혼합이 수월해 조직공학의 다양한 분야에 많은 응용 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 폴리카프로락톤을 용융하여 마이크로 스케일의 화이버 형태로 압출 용착하여 3차원 구조물을 제작하였다. 또한 전기방사의 경우 폴리카프로락톤을 휘발성 유기용매에 10 wt%로 용해하여 사용하였다. 용매는 용액의 유전 특성을 증진시키기 위하여 methylenechlorid 와 dimethylformamide 를 4:1로 배합하여 사용하였다.

3. 고분자 용착 조형 공정

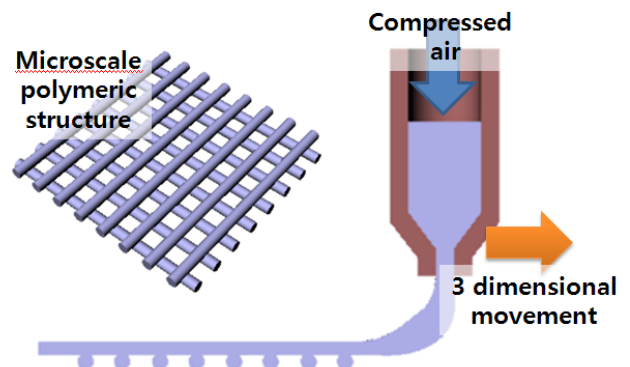


Fig. 1 Schematic diagram of the proposed process, referred to as Polymer Melts deposition.

전체적인 3 차원 구조물을 구성하기 위한 공정은 Fig. 1 과 같다. 제작공정의 주요 요소로는 고분자 재료를 용융시켜 압출할 수 있는 열적용 시린지 유닛과 마이크로 노즐, 이를 3 축으로 제어 이송할 수 있는 인텍싱 테이블, 그리고 재료를 정량으로 압출 할 수 있는 압력 디스펜서와 압축 공기 컴프레셔로 이루어져 있다. 마이크로 스케일의 직경을 갖는 노즐을 포함하는 열적용 시린지 내부에 생분해성 고분자를 넣어 용융시킨 후 일정 압력의 공압을 가하여 압출하고 이를 3 축 이송을 통해 원하는 형상을 제작한다.

3. 전기방사 공정

Li 등은 전기방사 공정에서 일정한 간격을 두고 배치된 두 개의 전도성 수집기를 배치하여 수집기 사이에 포집되는 나노섬유가 배향특성을 보임을 관찰하였다.⁷

이와 같은 원리를 이용하여 Fig. 2 와 같이 평행하게 배열된 브래스 와이어 (brass wires : 0.5mm diameter)를 겹치시켜 그 위에 전기방사하여 포집되는 나노섬유의 정렬 특성을 관찰하였다. 인가된 전압은 10 kV 이며, 노즐과 와이어 사이의 수직거리는 16 cm, 와이어 사이의 간격은 2 cm 이다. Fig. 2 에서 나타난 결과와 같이 일정 방향으로 정렬되어 있음을 관찰할 수 있다.

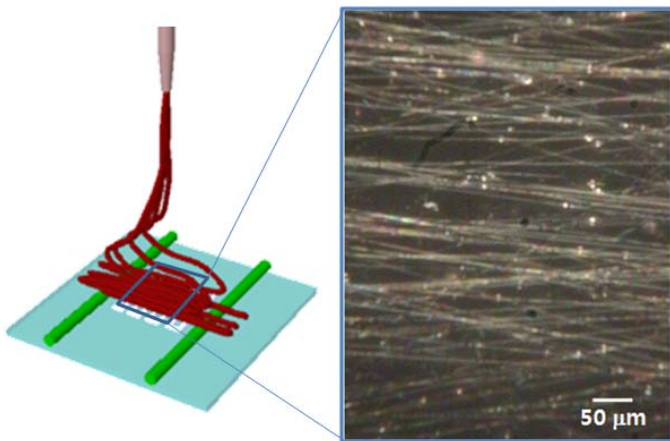


Fig. 2 Schematic diagram of the setup for the fabrication of aligned nanofibers and its result.

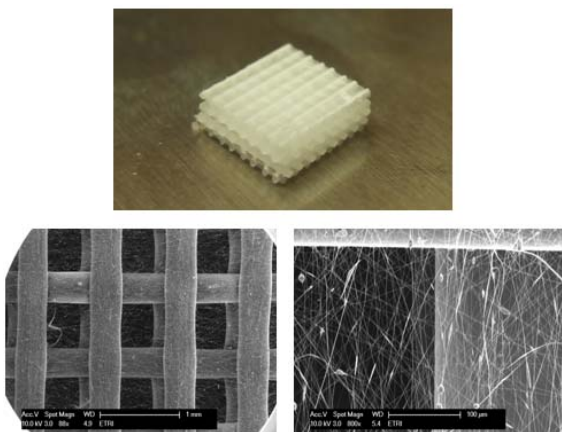


Fig. 3 3D hybrid structure containing aligned nanofibers

앞서 기술된 고분자 용착 조형공정을 통해 제작된 단위 구조물 상부면에 Fig. 2 와 같이 나노섬유를 정렬하여 증착시킨다. 이를 반복적으로 적층하여 내부에 정렬된 나노섬유를 포함한 3 차원 구조물을 제작할 수 있다. Fig 3.은 제작

된 하이브리드 3 차원 구조물과 구조물 사이에 정렬된 나노섬유의 결과를 나타내고 있다.

4. 결론

한 방향으로 정렬된 나노섬유 구조물 제작을 위해 평행 배열된 와이어 전기방사 방법을 제안하였고 이를 3 차원 용착 조형 공정과 반복 조형함으로써 배향된 나노섬유 내부 구조를 갖는 하이브리드 3 차원 구조물을 제작하였다. 이는 근육, 인대와 같은 세포가 일정 방향으로 구성되어 있는 조직의 재생을 위한 조직공학용 지지체로 활용될 수 있다.

향후 나노섬유의 배향 정도를 정량적으로 특성 평가하고 배향도를 높일 수 있는 방안을 추가적으로 적용하고자 한다. 또한 실제 조직세포 및 줄기세포를 배양하여 부착, 분화, 증식 등을 평가함으로써 3 차원 지지체로서의 기능성을 검증할 예정에 있다.

참고문헌

- Huang Z. M., Zhang Y. Z., Kotaki M., Ramakrishna S., "A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites," *Composites and Science Technology*, Vol. 63, No. 15, pp. 2223-2253, 2003.
- Leong K. F., Cheah C. M., Chua C. K., "Solid freeform fabrication of three-dimensional scaffolds for engineering replacement tissue and organs," *Biomaterials*, Vol. 24, pp. 2363-2378, 2003.
- Park S. H., Kim T. K., Kim H. C., Yang D. Y., Park T. G., "Development of dual scale scaffolds via direct polymer melt deposition and electrospinning for applications in tissue regeneration," *Acta Biomaterialia*, Vol. 4, pp. 1198-1207, 2008.
- Lee C. H., Shin H. J., Cho I. H., Kang Y. M., Kim I. A., Park K. D., Shin J. W., "Nanofiber alignment and direction of mechanical strain affect the ECM production of human ACL fibroblast," *Biomaterials*, Vol. 26, No. 11, pp. 1261-1270, 2005.
- Xu C. Y., Inaic R., Kotakib M., Ramakrishna S., "Aligned biodegradable nanofibrous structure: a potential scaffold for blood vessel engineering," *Biomaterials*, Vol. 25, No. 5, pp. 877-886, 2004.
- Wise J. K., Yarin A. L., Megaridis C. M., Cho M., "Chondrogenic differentiation of human mesenchymal stem cells on oriented nanofibrous scaffolds: Engineering the superficial zone of articular cartilage," *Tissue engineering: Part A*, Vol. 15, No. 4, pp. 913-921, 2009.
- Li D., Wang Y., Xia Y., "Electrospinning of polymeric and ceramic nanofibers as uniaxially aligned arrays," *Nano Letters*, Vol.3, No. 8, pp. 1167-1171, 2003.