

고분자 폴리머 잉크를 이용한 고속 연속 전기 방사 프린팅

장 대 해* · 권 계 시*†

* 순천향대학교 기계공학과

High Speed and Continuous Electrospinning Printing Using Polymer Ink

Da-Hai Zhang* and Kye-Si Kwon*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Soonchunhyang Univ.

(Received September 18, 2014 ; Revised February 2, 2015 ; Accepted February 2, 2015)

Key Words: Electrospinning(전기방사), Electrohydrodynamic(EHD) Jet Printing(전기수력학 프린팅), Continuous Jet Printing(연속젯 프린팅)

초록: 최근 전기방사를 이용한 프린팅이 미세 패터닝 분야에 응용이 되고 있다. 전기방사를 이용한 패터닝은 연속 프린팅 방식으로 기존의 요구적출형 방식에 비해 패터닝 속도가 빠르다는 장점이 있다. 안정적인 연속 프린팅을 위해서는 고분자의 폴리머를 프린팅하려고 하는 잉크에 혼합하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 PEO 를 이러한 첨가 폴리머로 사용하였다. 이러한 폴리머의 첨가에 대한 잉크의 점도 및 Taylor cone 형성에 대해 미치는 영향을 조사하였다. 마지막으로 전기방사 프린팅의 예로서 실버 페이스트 잉크를 유리 기판 위에 패터닝하였다.

Abstract: Electrospinning has recently been used for micropatterning. The electrospinning method as a patterning tool has the advantage of a rapid patterning speed because it is based on a continuous printing mode rather than a drop-on-demand mode. To obtain stable continuous printing, a high molecular weight polymer must be mixed with functional materials for patterning. In this paper, polyethylene oxide (PEO) was used. The effect of polymer on viscosity and formation of a Taylor cone jet from the electrospinning nozzle was investigated. Finally, the electrospinning patterning results of a silver paste ink on a glass substrate were investigated.

1. 서 론

잉크젯 기술이 발달함에 따라 사무실용 프린터부터 제조 공정의 도구로서 응용 범위가 점차 넓어지고 있다. 이러한 잉크젯이 제조 공정으로서 응용 범위를 넓혀감에 따라서 다양한 잉크가 사용되고 미세 선폭의 패터닝이 필요하게 되었다. 그러나 기존의 잉크젯 기술로는 실용적인 선폭은 40 μ m 전후가 되기 때문에 새로운 방식의 프린팅 방법의 개발이 요구되고 있다. 또한 기존의 잉크젯에서 토출 가능한 잉크의 범위는 약 1-20cP 정도이기 때문에 높은 점도의 잉크를 이용하여 프린팅하는데 문제가 있다. 이러한 기존의 한계를 극복하기 위하여 전기수력학적 잉크젯 방법이 잉크

젯 프린팅에 응용되기 시작하였다.^(1~4)

일반적으로 전기 수력 학적(Electrohydrodynamic, EHD) 인쇄라고 하면 요구적출형(Drop-on-demand mode)의 인쇄 방식을 말하며, 이는 노즐과 기판상에 인가된 전기장에 의해 형성된 Taylor cone 끝단에서 잉크 액적내에 축적되어 있는 전하에 의하여 초미세 잉크 액적이 젯(jet) 형태로 토출되는 방식이다. 이러한 요구적출형 인쇄 방식의 장점은 토출되는 액적의 제팅을 효과적으로 제어 함으로서 복잡한 형태의 인쇄 패턴을 형성시키는데 용이하다는 것이다. 본 연구실에서는 이러한 전기수력학적 잉크젯 프린팅을 이용한 요구적출형 기반의 프린팅 연구를 수행하였다.^(5~8)

그러나 요구 적출형 프린팅 모드인 경우 안정적인 토출 주파수가 제한적이다. 현재로서는 약 2kHz 정도가 한계이기 때문에 빠른 인쇄 속도를

† Corresponding Author, kskwon@sch.ac.kr

얻기가 어렵다는 단점이 있어 양산 장비에 적용하는 것이 어렵다고 할 수 있다. 따라서 요구적출형 프린팅 방식은 초미세 정밀 패턴 구현 및 다른 인쇄방식으로 형성된 인쇄패턴의 인쇄 불량을 수리 (repair)하기 위한 방법으로 연구가 진행되고 있다. 또한 요구적출형 잉크젯 방식인 경우 잉크의 점도가 비교적 낮은 잉크만이 사용 가능하여 재료의 함량(solid loading)을 높이는데도 문제점이 있으며 다양한 소재를 적용하여 잉크를 제조하는 데도 잉크내의 분산 등의 여러 가지 문제점이 있다고 할 수 있다.

이러한 요구적출형 프린팅 모드의 문제점을 개선하고자 본 연구에서는 고속 정밀 인쇄패턴 구현이 가능한 연속 프린팅 인쇄 방식이 가능한 연구를 수행하였다. 이러한 방식을 도입하여 인쇄속도를 획기적으로 개선시키면서 초미세 패터닝을 가능하게 하기 위해서는 잉크의 물성이 매우 중요하게 작용하였다. 이러한 연속젯 방식의 원리는 전기 방사법에 근거하고 이 방법은 충분한 점도를 지닌 고분자용액이나 용융체가 정전기력을 부여 받을 때 섬유가 되는 현상이다.^(9,10) 이러한 초극세 섬유를 제조하는 방법은 19세기 말에 개발이 되었고 섬유의 굵기는 수마이크로 이하를 만들 수 있었다. 전기 방사법은 최근에 프린팅에 응용이 되어 다양한 소재 및 재료의 패터닝에 적용되기 시작했다.⁽¹¹⁾

그러나 아직까지 프린팅을 위한 전기 방사는 태동기이고 많은 연구가 필요한 영역이다. 본 연구는 이러한 전기방사를 프린팅에 적용하기 위한 기초 연구를 수행하는 것을 목표로 하였다.

프린팅을 위한 원리는 폴리머 잉크가 기관으로 지속적으로 연신되어 연속적인 초미세 잉크 흐름을 형성시키는 것이다. 이를 위해 잉크내 적정 고분자 첨가물을 배합하여 고분자끼리의 체인(chain)을 형성 시키기 위한 최적의 잉크를 개발하여야 한다.

또한 전기 방사의 프린팅 특성은 주로 고분자 폴리머의 특성 및 점성과 관련이 있기 때문에 본 논문에서는 고분자의 분자량과 농도에 따른 점도의 변화가 전기방사를 이용하는 프린팅에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구를 수행하였다. 전기방사를 이용하여 프린팅에 적용하는 경우 프린팅 속도가 느려지면 불규칙한 프린팅 결과가 얻어지게 된다. 따라서 전기 방사 프린팅 방법은 고속 프린팅에 적합하며, 프린팅 속도에 따른 패턴의 형상에 대한 연구는 이미 소개된 바 있다.⁽¹²⁾ 본

연구에서는 프린팅 속도를 500mm/s로 고정하였을 때 폴리머 농도에 따른 점성과 패턴 형상에 대한 연구를 수행하였다.

마지막으로 응용의 예로서 금속 잉크에 폴리머를 배합한 용액의 프린팅을 수행하였다.

2. 실험 방법 및 하드웨어

2.1 프린팅 시스템 개발

잉크젯 공정의 경우 노즐에서 토출되는 잉크 액적의 사이즈가 노즐의 내경의 크기에 의해 결정되지만, 전기 수력학적 잉크젯 방식은 잉크젯 공정과는 달리 잉크가 토출되는 노즐 끝단에 전기장을 인가하여 발생하는 전기장에 의한 Taylor cone형태가 형성이 되기 때문에 노즐 크기보다 매우 작은 초미세 잉크 액적을 형성 시킬 수 있는 인쇄 기술이다.

본 연구실에는 전기수력학적 잉크젯 시스템을 개발하였는데 인가되는 전압, 압력공급장치, 노즐 크기, 기관과 노즐의 간격 및 잉크의 종류에 따라서 다음과 같은 2 가지 모드의 프린팅이 가능하도록 구성하였다.

2 가지 모드의 전기수력학적 제팅을 프린팅에 응용하기 위하여 XY 의 평면 프린팅을 위한 2 축

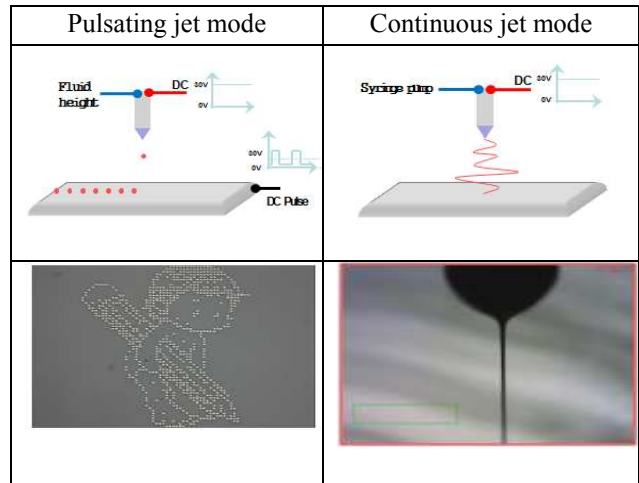


Fig. 1 Printing modes for electrohydrodynamic jet

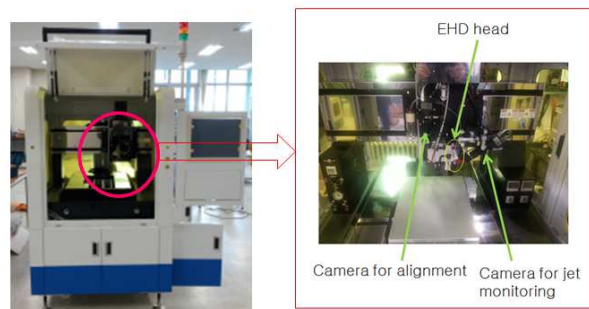


Fig. 2 Printing system for electrohydrodynamic jet

의 리니어 모터를 사용하여 스테이지를 구성하였고, 헤드의 높이를 자동으로 제어하려고 Z 축의 스테이지를 추가로 구성하였다. 정밀한 위치 제어와 패터닝을 위한 패턴 카메라와 프린팅 과정을 관찰하기 위한 카메라가 구성되어 있다.

스테이지 제어를 위한 모션 컨트롤러는 NI-7390, 고전압 Amp 로는 TREK 사의 고전압 앰프(모델명: 2220)을 사용하였고, 펄스의 형상을 만들기 위하여 Agilent 사의 임의 파형 발생기(모델명: 33220 A)를 사용하였다. 또한 제팅을 위한 고전압 펄스를 발생하기 위한 트리거 신호는 카운터 보드 측정하기 위한 카메라는 USB 카메라(모델명: UI-1640SE-C-HQ)를 사용하였고 적절한 제팅 모니터링을 위해 6 배율의 렌즈를 사용하였다.

요구 적출형 프린팅을 위해서는 유체의 압력제어가 사용되었지만 연속제팅 방법 프린팅을 위해서는 시린지 펌프(Chemyx, Nanojet, USA)를 사용한 연속 제팅 방법이 사용되었다. 또한 요구적출형의 펄스 전압 대신에 연속 제팅을 위하여 DC 전압이 사용되었다. 개발된 시스템의 주요 사양은 Table 1 과 같다.

2.2 소프트웨어 개발

제어 및 프린팅을 위한 소프트웨어는 LabVIEW를 사용하여 개발하였다.

다양한 패턴을 프린팅하기 위하여 카드 내장형 프린팅 소프트웨어를 Fig. 3 과 같이 개발하여 별도의

Table 1 Specification of printing system

●	Printable area: 230x270 mm
●	Nozzle diameter: 8~200 μ m
●	스테이지 정밀도: 3 μ m 이하 (엔코더 분해능: 1 μ m)
●	최대 프린팅 속도: 600mm/s
●	헤드 선택: 잉크젯헤드 및 전기수력학적 헤드 선택 가능

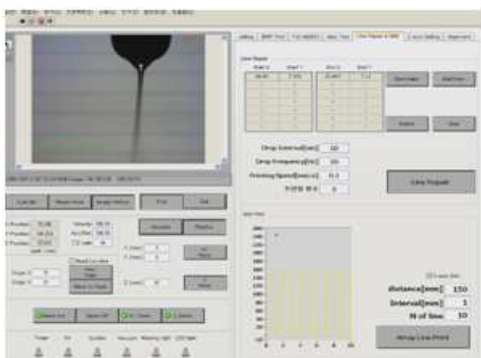


Fig. 3 Built-in CAD software

CAD 프로그램 없이도 자체적으로 정밀한 패턴을 그릴 수 있도록 하였고 입력된 프린팅 좌표의 정보를 이용하여 프린팅이 되도록 하였다.⁽⁷⁾

카드를 사용한 벡터 프린팅 방법은 주로 노즐이 1 개 있는 프린팅에 적합하나 노즐이 여러 개가 있거나 복잡한 패턴닝이 필요할 때는 카드의 도면을 비트맵 이미지로 프린팅해야 될 필요가 있다. 이러한 프린팅을 위한 알고리즘은 본 연구실에서 발표된 논문을 참조할 수 있다.⁽⁷⁾

3. 결과 및 토의

3.1 폴리머 효과

연속 프린팅을 유지하기 위해서 잉크 내부 고분자 폴리머의 체인(chain)형성 및 유지가 필수적인 요소가 된다. 이를 유지하지 못하게 되면 노즐 끝단에서 잉크가 끊어지거나 스프레이가 되어 균일한 인쇄패턴을 형성할 수 없게 된다. 이러한 잉크 내 접착력을 유지시켜 주기 위해 잉크내에 고분자 첨가물을 포함시키게 되는데 이로 인해 잉크의 점도가 전반적으로 증가되게 된다.

본 연구에서는 고속/연속 제팅을 위한 고분자 첨가제로서 PEO(poly ethylene oxide, Aldrich)를 사용하였다. 고분자 분자량의 효과를 알기 위하여 400,000 g/mol과 600,000 g/mol의 두종류의PEO를 사용하였고 용매로는 클로로포름(Choroform, Aldrich)을 사용하여 PEO를 녹인 후에 실험을 하였다.

일반적으로 electrospinning에 있어서 섬유상의 모양과 직경에 가장 큰 영향을 미치는 변수로서 전기장과 함께 용액의 농도에 따른 점도의 변화로 알려져 있다. 따라서 이러한 점도와 토출(방사)의 관계를 이해를 하기 위하여 PEO의 분자량과 농도에 따른 전기 방사 프린팅 결과를 비교하였다. 폴리머 양에 따라서 점성과 방사 프린팅 특성을 이해하는 것은 향후 다양한 재료와 혼합할때의 방사 프린팅 특성을 예측하기 위한 중요한 정보이다. 따라서 본 연구에서는 폴리머의 양 또는 분자량에 따른 점성의 변화와 프린팅 선폭의 변화를 실험적으로 고찰하는 것을 목표로 한다.

이러한 전기 방사 프린팅의 한가지 응용 예로서 상용화된 전도성 잉크에 폴리머 혼합하여 프린팅을 수행하였다. 이를 위하여 스크린 프린팅용으로 사용하는 고점도 은 페이스트 잉크(ANP, Silver paste DGP-MS, Korea)를 구입하여 폴리머 용액등에 혼합하였다. 이러한 전도성 잉크와 폴리머의 혼합 배율 최적화는 중요하여 프린팅후의 선폭 뿐만 아니라 전도성 등의 특성에 영향을 미치기 된다. 이러한 최적화 연구는

향후에 추가로 진행하려고 한다.

고분자 분자량의 증가와 함께 폴리머 체인(chain)의 형성에 따른 용액의 점성 효과를 이해하기 위하여 점도계(Brookfield, LVDV- III U, USA)를 사용하여 점도를 측정하였다.

Table 2에서는 실험을 위한 몇 가지 용액에 따른 점성을 비교하였다. 또한 이러한 용액을 연속 제팅을 시키면서 메니스커스를 비교하였다. 프린팅 시스템에 설치된 카메라를 사용하여 메니스커스를 실시간으로 측정할 수 있었으며 이를 통하여 용액이 연신되는 특성 및 안정성 등을 모니터링할 수 있으며 프린팅에 최적의 조건을 Fig. 4와 같이 비견으로 확인할 수 있었다.

분자량의 효과를 알아보기 위하여 2가지의 분자량이 다른 폴리머(400,000, 600,000)를 같은 농도로(3wt%) 용액을 만든 후에 점도를 측정하였다. 분자량의 증가에 따라서 점성은 약 2배 정도 증가하였다(7,600→14,937cP) 따라서 분자량과 점성은 서로 비례하여 증가함을 알 수 있었다. 한편으로는 농도의 효과를 위하여 400,000 분자량의 폴리머의 양을 3배 증가시켰을 때는(1wt%→3wt%) 점성이 약 70배 증가하였다(118.5→7,640cP). 따라서 용액의 체인(chain) 형성은 폴리머의 양에 따라서 급격히 증가하는 것을 볼 수 있었다.

은 페이스트 잉크(나노신소재, Silver paste DGP-MS)와 희석 용액인 α-Terpineol(Aldrich)를 사용하여 4:1로 희석하였을 때 점도는 230cP 정도였다. 이것과 PEO 용액을 다시 첨가하였을 때(No. ④ in Table 2) 점성은 약간 증가하여 717 cP가 되었다. 이는 금속 잉크에 추가적인 폴리머 체인이 형성되어 점성이 추가로 증가된 것으로 추정된다. 그러나 금속잉크는 비뉴턴언(Non-Newtonian) 유체로 전단율(shear rate)에 따른 점도 변화가 있기 때문에 점도 데이터는 정확한 비교가 어렵기 때문에 본 연구에서는 대략적인 상대적인 비교만 고려하였다.

Fig. 4의 메니스커스의 측정 결과에서 알 수 있듯이 점성이 100-200 cP인 경우에는 토출량이 많았으며 점성이 7000cP까지는 연속 토출 상태가 양호 하였다. 점성에 따른 토출 특성은 Table 2의 Line width에서 정리하였듯이 미세 선폭이 균일 하게 얻어지는 기준으로 평가를 하였다. 한편으로는 점성이 지나치게 높아지면 토출이 불가능하였다. 특히 고분자를 사용하고 점도가 약 15000cP 정도 이상인 경우에는 노즐 막힘 등으로 섬유화하기에는 부적절하였다. 여기서 전압은 방사를 위하여 1kV-2kV범위의 고전압을 사용하였다.

Table 2 Mixture fluids for electrospinning printing

No.	Mixture fluid	Viscosity (cP)	Line width (um)
①	PEO (400,000) 0.3g+Chloroform 30g (1wt%)	118.5	23
②	α-Terpineol 10g+Silver paste 40g	230	15
③	PEO (600,000) 0.6g+Chloroform 30g (2wt%)	595.1	11.4
④	Mixture fluid ③ 3.5g + Mixture fluid ② 35g	717	9.7
⑤	PEO (400,000) 0.9g+Chloroform 30g (3wt%)	7,600	2.7
⑥	PEO (600,000)+Chloroform 30g (3wt%)	14,937	-



Fig. 4 Electrospinning with respect to viscosity

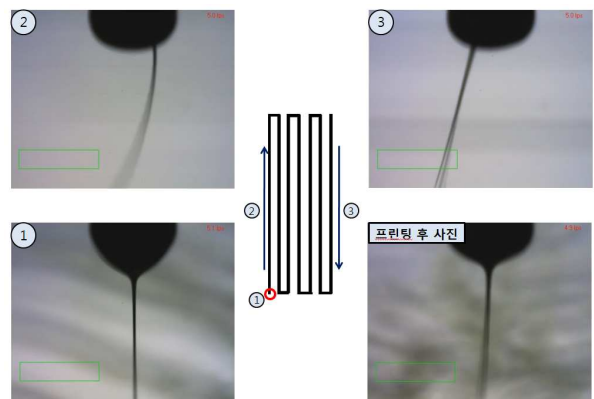


Fig. 5 Patterning using electrospinning

3.2 벡터 프린팅

향후의 응용을 위하여 금속 잉크를 폴리머에 배합된 잉크를 사용하여(717cP, Mixture fluid No. ④) 전기 방사 프린팅을 수행하였다. 프린팅을 위하여 단순 반복 직선 패턴을 수행하였다. 방사 프린팅은 잉크젯과 같이 제팅되어 직진성이 확보가 되지 않는다. 길게 연신되는 방식이기 때문에 노즐면에서 관찰된 잉크의 연신되는 방향이 직진성이 있더라도 실제 프린팅되는 기판에서는 원하는 패턴이

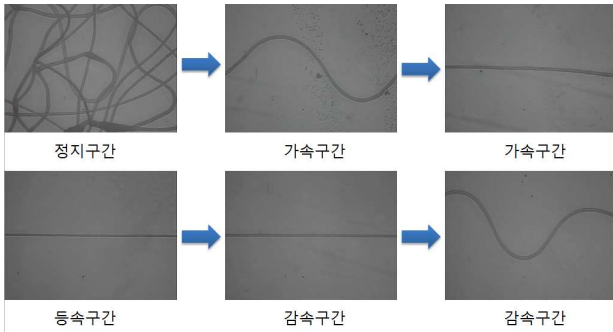


Fig. 6 Fine line at the constant speed region

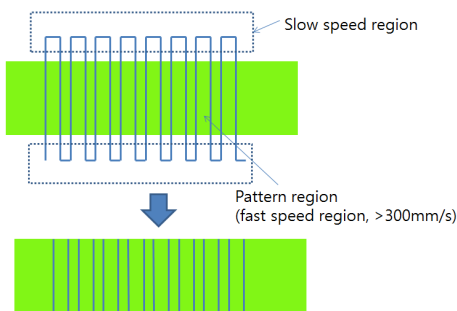


Fig. 7 Patterning method for electrospinning printing

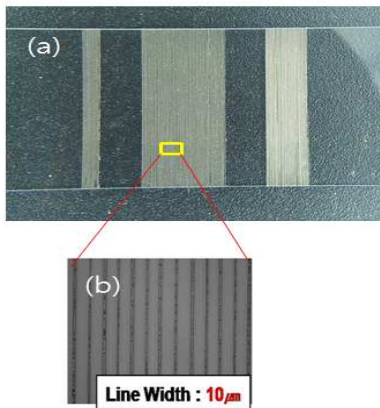


Fig. 8 Electrospinning printing on glass slide (line spacing: 50 μm) (a) Patterned slide glass (b) Magnified pattern

나오지 않는다. 오히려 빠르게 프린팅하는 구간에서 원하는 직선 패턴이 만들어 지게 된다. 본 연구의 보다 자세한 이해를 돕기 위하여 동영상 비디오를 확인할 수 있다.⁽¹³⁾

프린팅 결과를 관찰하면서 전기 방사를 이용한 인쇄가 가능한 노즐 팁과 기관간의 거리 및 패턴링 속도를 최적화 하여 안정적이고 균일한 인쇄 특성을 얻을 수 있었다. 프린팅을 위한 방사 거리는 1mm 를 사용하였고 노즐은 100μm 의 내경의 노즐을 사용하였다.

Fig. 6 은 이러한 결과가 실제 어떤 패턴이 얻어지는지를 보여주는 실험 결과이다. 정속구간에서

의 프린팅 속도는 500mm/s, 방향을 바꾸고 정지하여 다시 정속구간을 얻기 위한 가속도는 1500 mm/s²을 사용하였다.

Fig. 6 에서 알 수 있듯이 속도가 느린 가속도 및 정지 구간에서는 직선의 패턴이 얻기 어려웠고, 이때의 선폭은 대략 20μm 이상이였다. 그러나 500mm/s 의 등속 구간에서는 약 선폭이 10μm 이하가 되고 스테이지 방향에 대해 직선의 패턴을 얻을 수 있었다. Fig. 5 에서의 등속 구간에서의 메니스커스는 마치 움직이는 방향으로 휘어지는 것처럼 보이지만 오히려 실제 프린팅에서는 직선으로 패턴링되었다.

전기 방사를 실제로 응용하기 위하여는 속도가 느려지는 구간을 제외한 나머지 구간에서의 프린팅을 사용하여야 하고 등속 구간의 속도는 최소한 300mm/s 이어야 직선으로 프린팅이 가능하였다. 또한 속도가 빨라짐에 따라서 선폭이 더 작아지고 직선에 가까운 프린팅이 가능하였다.

Fig. 7은 고속 정속 구간만을 이용한 프린팅 방법의 예이다. 패턴이 필요한 곳에서 정속을 얻기 위하여 실제 기관을 지나쳐서 감속 및 운동 방향을 바꾸는 방법으로 직선 패턴을 얻을 수 있다.

Fig. 8은 이러한 패턴을 실제 글래스 슬라이드 위에 50μm 간격으로 패턴한 것이다. Fig. 7과 같이 가속 감속 구간을 유리 기관 바깥쪽에서 설정하여 유리 기관내에서는 일렬로 정렬된 선폭 10μm 이하의 패턴을 얻을 수 있었다.

향후의 연구과제로서 소결후의 전도성 측정등의 연구를 수행하여 실제 응용에 필요한 최적화 연구를 진행할 예정이다.

4. 결 론

전기수력학 인쇄 장비의 경우 기존의 요구적출형 방식의 저속 초미세 패턴링 방법에서 탈피하여 미세 선폭 인쇄 성능(printability)을 유지하면서 인쇄 속도를 획기적으로 향상시킬 수 있는 연속 프린팅 방식의 전기수력학 인쇄 장비 및 잉크 특성에 관한 기초 연구를 수행하였다.

전기 방사 프린팅을 위하여 잉크의 특성이 중요하였는데 고분자의 함량에 따른 점성 및 전기 방사 특성에 대한 실험적 연구를 하였다. 폴리머의 첨가량이 작아서 점성이 200Cp 이하로 낮으면 연신이 제대로 되지 않아 잉크의 양이 많아지고 균일한 패턴이 어려웠고 폴리머의 첨가량이 많아서 15000cP이상이 되는 경우 노즐 막힘으로 패턴이 되지 않았다 최적의 방사 프린팅을 위한 점성은

약 500~7600 cP 정도 었다

원하는 직선의 패턴을 얻기 위하여 빠른 프린팅 속도가 요구 되어 생산성을 증대시키는 패터닝방법으로는 유리하나 복잡하고 다양한 패턴을 얻는 것은 어려움이 있었다. 따라서 요구적출형 방식의 전기수력학적 잉크젯과 연속 프린팅 방법을 사용한 방식은 장점과 단점이 있으므로 응용 분야에 따라서 적절한 방법을 선정해야 한다.

후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업(No. 2010-0021127, NRF-2013R1A2A2A01004802) 학술 연구비 지원으로 수행하였음.

참고문헌 (References)

- (1) Murata, K., 2003, "Super-fine Ink-jet Printing for Nanotechnology," Proceeding of the International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems, pp. 346~349.
- (2) Park, J.U., et al., 2007 "High Resolution Electro Hydrodynamic Jet Printing," *Nature Materials*, Vol. 6, pp. 782~789.
- (3) Li, J. and Zhang, P., 2009, "Formation and Droplet Size of EHD Dripping Induced by Superimposing and Electric Pulse to Background Voltage," *Journal of Electrostatics*, Vol. 67, pp. 562~567.
- (4) Mishra, S., Barton, K. L., Alleyne, A. G., Ferreira, P. M. and Rogers, J. A., 2010, "High-speed and Drop-on-demand Printing with a Pulsed Electrohydrodynamic Jet," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20095026.
- (5) Kwon, K. S. and Lee, D.Y., 2012, "Visualization of Electro-hydrodynamic Ink Jetting Using CCD Camera," *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 295~301.
- (6) Kwon, K. S. and Lee, D. Y., 2013, "Investigation of Pulse Voltage Shape Effects on Electrohydrodynamic Jets Using Vision Measurement Technique," *Journal of micromechanics and microengineering*, Vol. 23, 065018.
- (7) Roh, H. R., Go, J. K and Kwon, K.S., 2013 "Electrohydrodynamic Inkjet Printing System for Ultrafine Patterning," *Trans. Korean. Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 9, pp. 873~877.
- (8) Kwon, K.S., 2012, "Electrohydrodynamic (EHD) Inkjet Printing," online:
<http://www.youtube.com/watch?v=M3cRCWwwImc>.
- (9) Kim, D.O., Lee, D.H., Yoon, S.S., Lee, S.A. and Nam, J.D., 2005, "Characteristics of Electrospun Poly(methyl methacrylate) Nanofibers Embedding Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWNTs)," *Polymer (Korea)*, Vol. 30, No.1, pp. 90~94.
- (10) Choi, J.M., Jang, H.C., Hyeon, J.Y. and Sok, J.H., 2012 "Fabrication of PCL/MWCNTs Nanofiber by Electrospinning," *Korean Journal of Metals and Materials*, Vol. 50, No.10, pp. 763~768.
- (11) Min, S. Y., Kim, T.S., Kim, B.J., Cho, H.C., Noh, Y.Y., Yang, H.C., Cho, J. H. and Lee, T.W., 2013, "Large-scale Organic Nanowire Lithography and Electronics," *Nature communication*, Vol. 4, Article number: 1773, doi:10.1038/ncomms2785.
- (12) Brown, T. D., Dalton, P.D. and Hutmacher, D.W., 2011, "Direct Writing by Way of Melt Electrospinning," *Advanced Materials*, Vol. 23, pp. 5651~5657.
- (13) Kwon, K.S., 2013, "Electrospinning Printing," online:
<http://youtu.be/JPWzoAMV5-8>.