

요구 적출형 잉크젯 프린트 헤드에서의 압력파 위상 정합

김명기*, 황준영*, 이상호*, 강경태*, 강희석#

Phase Matching of Pressure Wave in a Drop-On-Demand Inkjet Print Head

Myong-Ki Kim*, Jun-Young Hwang*, Sang-Ho Lee*, Kyung-Tae Kang* and Heui-Seok Kang#

ABSTRACT

Inkjet printing technology with a drop-on-demand (DOD) inkjet head technology has been recognized as one of versatile and low cost manufacturing tools in the electronics industry. Concerned with control of driving signal, however, general strategy to optimize jetting stability has not been understood well, because of the inherent complex multi-physics nature in inkjet phenomena. Motivated by this, present study investigates the effect of driving waveforms of piezoelectric head on jetting characteristics of DOD inkjet system focused on jetting stability with phase matching of pressure waves in the print head. The results show that velocities and volumes of the ink jetted droplets were linear relations with the driving signal's maximum voltage, while periodic behaviors are observed with the driving signal's pulse widths.

Key Words : Inkjet (잉크젯), Driving conditions (구동조건), Jetting characteristic (분사특성), Meniscus oscillation (메니스커스 진동), Pressure wave (압력파)

기호설명

V_p : Maximum voltage of pulse amplitude(V)

t_p : FWHM pulse width(μ s)

1. 서론

산업용 잉크젯 프린팅 기술은 가장 유력한 차세대 미세 패턴 형성 기술 중 하나일 뿐 아니라 기술의 적용 가능 분야가 광범위하여 다양한 종류의 잉크에 대해 분사특성 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻⁴ 잉크젯 프린팅은 기관과의

직접적인 접촉을 하지 않기 때문에 패턴의 전사 중 기관과 접촉을 하게 되는 다른 프린팅 방식들에 비해 접촉 오염의 문제점이 적으며, 비평면 기관에도 인쇄가 가능하다. 또한, 완전히 디지털화된 생산공정으로서 컴퓨터에 저장된 설계도면에 대한 데이터가 직접 잉크젯 프린터로 전송되어 패턴을 구현하게 되므로, 다른 인쇄기술들에서와 같이 마스터 플레이트 등을 요구하지 않아 대면적 패턴 형성이 가능하며, 인쇄 기술 중에서 재료의 사용 효율이 가장 높다는 장점이 있다.

이러한 장점들로 인하여, 잉크젯 기술의 산업용 제조 기술로서의 적용 가능성이 제안된 이래,

접수일: 2007년 12월 14일; 게재승인일: 2008년 5월 28일

* 한국생산기술연구원 마이크로시스템 팀

교신저자: 한국생산기술연구원 마이크로시스템 팀

E-mail: hskang@kittech.re.kr Tel. (041) 589-8456

다양한 미래 첨단 산업 분야로부터 차세대 생산기술로서 커다란 주목을 받고 있다. 특히, 압전방식의 잉크젯 프린팅을 중대형 TFT-LCD TV, 모니터 패널과 PDP 의 형광체나 격벽재, 전극배선 패턴, 플렉시블 디스플레이나 전자회로 등의 산업에 응용하기 위해 ‘고 기능성 잉크-소재’ 와 ‘잉크젯 프린터-하드웨어’ 에 대한 연구개발이 국내 연구소와 기업에 의해 활발히 이루어 지고 있다.

그러나, 잉크젯 프린팅 기술이 첨단 산업 분야의 제조공정 기술로서 성공적으로 자리매김하기 위해서는, 아직도 해결되어야 할 문제가 여전히 남아있다. 그 중에서도, 반도체 공정 등 다른 미세 패턴 형성에 비하여 신뢰성 및 반복성이 떨어지는 문제는 잉크젯 기술의 상용화에 있어서 가장 큰 걸림돌 중 하나로 인식되고 있다.

잉크젯 기술의 신뢰성 및 반복성과 관련된 문제는 대부분 잉크젯 헤드에서 액적을 형성하는 단계에서 비롯된다. 액적 형성은 잉크의 물성, 프린터 헤드의 기능과 형상 및 구동신호 등 잉크젯 시스템의 중요한 제어 인자가 상호간에 밀접하게 관련되어 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위해서는 주어진 하드웨어와 잉크에 최적화된 구동 제어 신호를 설계할 수 있는 기술이 요구된다.

지금까지 많은 연구자들이 프린터 헤드 내 잉크의 운동에너지와 노즐 표면에서의 표면장력에너지를 비인 Weber 수(We)를 이용하여 잉크의 분사 특성을 설명하려고 시도하였으며, Weber 수는 잉크의 분사 특성에 가장 지배적인 영향을 미치는 인자로서 널리 인식되고 있다.⁵⁻⁸ 그러나, 단순히 Weber 수 만으로는 잉크젯 분사 특성을 충분히 설명하기에 부족한 것이 사실이며, 잉크의 비균질, 비뉴턴 유동 특성이나 계면에서의 유체역학적 불안정성에 영향을 미치는 다양한 인자들에 대한 연구가 수행되고 있다.^{9,14}

본 연구에서는, 주어진 시스템에서 안정적인 잉크젯 제어 인자를 결정하는데 필요한 전략 수립을 위하여, 프린터 헤드의 PZT 구동신호 형태가 잉크의 분사 특성에 미치는 영향에 대하여 알아보고자 하였으며, 그 첫 단계로서, 간단한 사다리꼴 유니폴라 펄스를 사용하여 펄스전압과 펄스폭의 영향을 분석하기 위한 일련의 실험을 수행하였다. 이 두 가지 인자에 대하여 액적 분사 안정성 맵을 구축하였고, 액적 분사속도와 분사안정성의 관계를 분석하였으며, 결과를 해석하는 과정에서 압력과

액면 진동의 위상정합의 중요성에 대하여 논의하였다.

2. 실험장치

Fig. 1 은 실험장치의 구성을 보여준다. 실험 장치는 잉크젯 분사 시스템과 기판 이송 시스템 및 액적 모니터링 시스템으로 구성된다. 잉크젯 시스템은 압전체를 이용한 단일 노즐의 프린트 헤드와 프린트 헤드로 공급되는 펄스의 전압, 폭(길이), 주파수를 조절하는 펄스 제어기로 구성된다.

프린트 헤드는 MicroFab 에서 제작된 MJ-AT-01 모델이며 압전 구동기의 압축을 통해 액적을 토출한다.

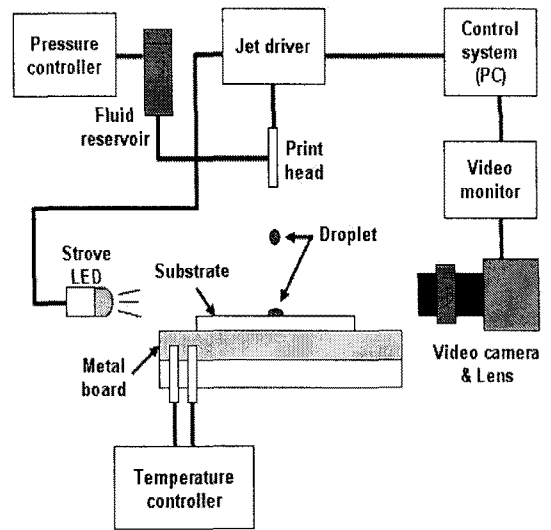


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

Fig. 2 는 노즐의 전체적인 형상과 압전 구동기, 모세관의 치수를 보여준다. 유리로 제작된 모세관을 PZT 튜브가 감싸고 있는 형태로 구성되어 있으며 금속 외피로 보호 받고 있다. 모세관의 전체 길이는 약 26 mm 이며 노즐 끝 단의 오리피스부터 잉크가 공급되는 입구까지 내경이 일정한 구간이다. Fig. 2 에서 d_0 는 오리피스의 직경이며 d_1, d_2, d_3 는 모세관의 내경과 외경, 압전 구동기의 외경으로 각각 490 μm , 750 μm , 1330 μm 이다. 실험에 사용한 노즐의 오리피스 직경은 50 μm 로 단일 액적 분사 시 평균 60 pl 정도가 분사된다.

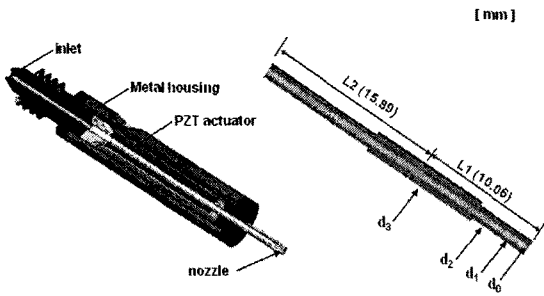


Fig. 2 Structure and dimension of MJ-AT-01 single nozzle inkjet print head

Fig. 3 은 펄스 제어기에 의하여 잉크젯 프린트 헤드에 인가되는 펄스의 형태를 보여준다. 펄스는 시간축에 대하여 전압 상승기, t_{rise} , 전압 유지기, t_{dwell} 및 전압 강하기, t_{fall} 로 구분된다. 전압 상승기, t_{rise} 는 전압이 0 에서 최대 진폭 크기인 V_p 까지 상승하는데 걸리는 시간이며, 압전체는 반경방향의 바깥쪽으로 팽창변형을 하게 된다. 이때 모세관 내에는 잉크가 유입되고 팽창파를 생성하게 된다. 전압 유지기, t_{dwell} 은 펄스 전압 V_p 가 지속되는 시간이다. 이 기간에 압전체는 아무런 변형을 일으키지 않지만 이전에 생겨난 팽창파는 양방향으로 분배되어 모세관 안에서 전파와 반사의 과정을 거치게 된다. 전압 강하기, t_{fall} 는 전압이 V_p 에서 0 으로 떨어지는데 걸리는 시간이다. 압전체는 반경방향의 안쪽으로 압축변형을 일으키며 동시에 모세관내에 압축파를 생성한다. 압축파가 노즐 끝 단에 도달하였을 때 잉크액적이 분사 된다.¹³

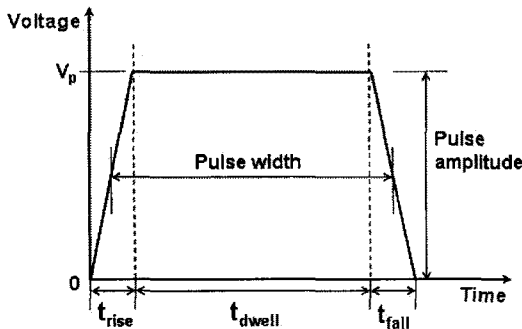


Fig. 3 Voltage pattern of a trapezoidal driving pulse

t_{rise} 와 t_{fall} 는 시간과 관련된 변수를 줄이기 위해 $5\mu s$ 로 동일하게 설정하였으며 분사 주파수 역시 이 실험에서는 1 kHz 로 고정하였다. Fig. 3 의 사다리꼴 펄스 형상으로부터 펄스폭, t_p 는 펄스의 FWHM 로서 다음과 같이 정의하였다.

$$t_p = (t_{rise} + t_{fall}) / 2 + t_{dwell} \quad (1)$$

모니터링 시스템은 구동 펄스와 동기화된 LED 와 CCD 카메라로 구성되어 있다. Fig. 4 는 촬영된 잉크 액적의 모습을 보여준다. 펄스 크기 및 펄스 폭은 각각 38 V 와 42 μs 이고 액적이 노즐로부터 분사된 시점으로부터 167 μs 경과된 사진이며 잉크젯 프린팅 헤드에서 적절한 구동조건에 따른 잉크 액적의 토출 모습을 보여준다. 이 사진에서 측정된 액적의 속도와 부피는 각각 약 2 m/s 와 약 60 pl 이다.

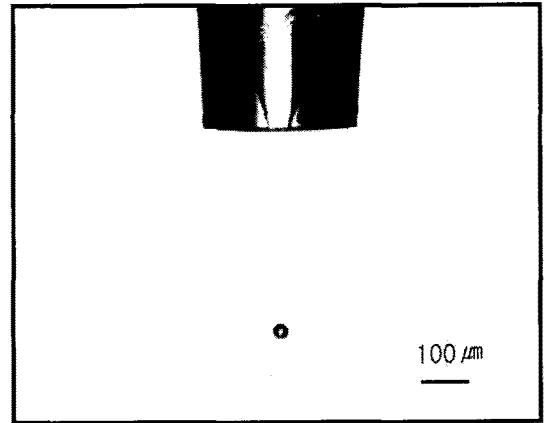


Fig. 4 Captured image of an inkjet droplet

본 실험에 사용된 잉크는 오렌지색 고분자 발광 물질인 MEH-PPV 를 용매에 1 퍼센트의 중량비(wt%)로 용해하여 제작하였다. 용매는 1,2-디메틸 벤젠에 시클로헥실 벤젠을 6:4 wt%의 비율로 혼합하여 사용하였으며 Table 1 에 제작된 잉크의 물성을 나타내었다. 잉크젯 프린터에 사용되는 잉크의 유체역학적 물성은 주어진 신호에 따른 잉크 액적의 발생과 액적의 크기, 속도에 큰 영향을 미친다. 특히, 헤드 내 잉크의 운동에너지와 노즐 표면에서의 표면장력에너지의 비인 Weber 수 (We) 와 유체의 점성 소산과 표면장력에너지의 비인

Ohnezorge 수 (Oh) 에 영향을 미치는 점도와 표면 장력의 중요성이 잘 알려져 있으며,^{11,14} 이를 고려한 적절한 용매 선정이 중요하다.

Table 1 Fluid dynamic property of the light emitting polymer ink measured at 21° C

EL material	Temperature [° C]	Viscosity [cP]	Density [g/ml]	Surface tension [dyne/cm]
MEH-PPV solution	21	2.1	0.91	38

*Viscosity has been measured at the shear rate of 750 s⁻¹

3. 실험결과

요구 적출형 잉크젯의 분사 특성은 크게 3 가지 영역으로 구분할 수 있다.⁸ 첫째는 액적이 형성되지 않는 무 분사영역이고, 둘째는 요구신호에 응답하여 우수한 반복성을 지니며 단일 액적이 안정적으로 분사되는 안정분사영역이며, 마지막으로 주 액적 이외에 위성액적이 발생하는 위성액적생성영역이다. 이처럼 구분되는 분사 안정성은 인쇄 패턴의 품질에 직접적으로 영향을 미치므로 실제의 잉크젯 공정에서 사용될 수 있는 조건은 안정분사영역으로 한정된다.

먼저, 다양한 구동펄스의 전압과 폭에 대한 잉크젯 분사특성 실험을 통하여 분사안정성 맵을 구축하였으며, 이를 Fig. 5 에 나타내었다. Fig. 5 에서 볼 수 있듯이, 안정분사영역은 펄스 전압에 대하여 매우 좁은 영역에 한정되어 있을 뿐만 아니라, 펄스 폭에 대하여 비선형적으로 변화하며, 그 변화폭도 상당히 큼을 알 수 있다. 이러한 결과는 시스템의 분사 안정성에 대한 정보가 부족한 상태에서는 안정적인 분사에 성공하기 어려움을 의미하며, 최적화된 구동펄스 설계의 중요성을 강조하고 있다.

분사안정성 맵의 특징을 좀더 자세히 살펴보면, 펄스폭이 일정한 상태에서 펄스전압이 증가하면 무 분사영역에서 안정분사영역을 거쳐 위성액적생성영역으로 발전하는 것을 알 수 있다. 펄스전압이 증가하면 노즐 벽면의 변형량 및 프린터 헤드 내에 발생하는 압력파의 크기를 증가시키므로, 결과

적으로 분사과정에서 잉크의 운동에너지가 증가한다. 따라서 이러한 결과는 운동에너지 증가에 따른 액적 분사 특성에 대한 기존의 연구결과를 이용하여 설명할 수 있다.⁸

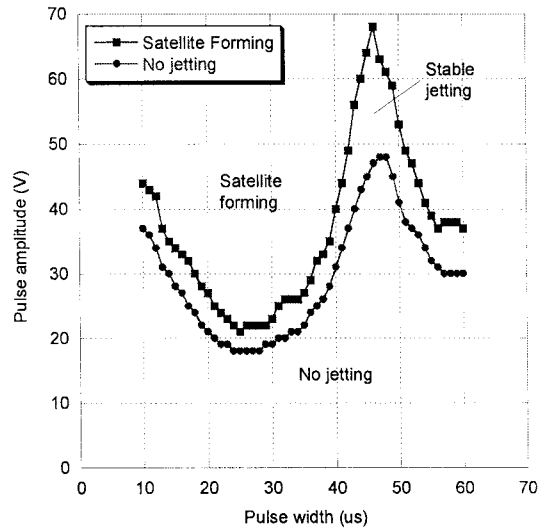


Fig. 5 Jetting characteristic map of MEH-PPV solution as a function of pulse width and amplitude of the driving signal

한편, 비록 펄스전압에 따른 분사안정성 특성의 변화 경향은 모든 펄스폭에 대하여 동일하게 나타나는 현상임을 확인할 수 있으나, 각 영역의 경계에 해당하는 펄스전압의 크기는 펄스폭이 변화함에 따라 매우 크게 변화함을 알 수 있다. 특히, 펄스폭이 약 24 μs 인 경우는 펄스전압이 가장 낮은 값에서 분사안정성이 변화하며, 펄스폭이 약 46 μs 인 경우는 분사안정성이 변화하는 펄스전압이 가장 높은 값을 갖는다. 구체적으로, 펄스폭이 약 24 μs 인 경우는 펄스전압이 약 18 V 인 경우에 안정적인 분사가 시작되어 약 22 V 인 경우에 위성액적이 발생하기 시작함을 알 수 있다. 그러나 펄스폭이 약 46 μs 인 경우는 펄스전압이 약 48 V 인 경우에 안정적인 분사가 시작되어 약 68 V 인 경우에 위성액적이 발생하기 시작한다. 즉, 펄스폭의 변화에 따라 안정분사영역의 펄스전압이 약 3 배 정도 변화하는 것이다. 뿐만 아니라, 펄스폭이 약 24 μs 인 경우의 안정분사영역은 약 4 V 차이의 좁은 범위에 불과한데 비하여, 펄스폭

이 약 46 μs 인 경우는 그 5 배인 약 20 V 정도의 범위에 걸쳐 안정분사영역이 존재한다.

이처럼 펄스폭에 대하여 분사안정성이 변화하는 특성을 좀더 자세히 살펴보면, 두 가지 특징적인 경향을 확인할 수 있다. 첫째는 각 영역의 경계선이 펄스폭에 대하여 거의 주기적으로 변화한다는 점이고, 둘째는 펄스폭의 변화에 대한 안정분사 영역의 상하부 경계선의 정성적인 특성이나 모드의 위치는 상호간에 잘 일치한다는 점이다. 이는 분사 안정성이 펄스폭과 관련된 공통적인 요인에 의하여 영향을 받고 있으며, 프린터 헤드 또는 노즐의 내부에서 주기적으로 진동하는 현상과 깊은 연관이 있음을 암시한다.

압력파에 의하여 구동되는 액적 분사 과정에서 존재하거나 발생하는 고유 진동은 노즐 출구에서의 액체 표면 진동, 헤드에서 발생한 압력파가 노즐 내벽 및 액체 표면에서 반사됨으로써 발생하는 압력파 진동, 그리고 분사되는 액체의 Rayleigh 불안정성으로부터 발생하는 주기적 운동 등을 고려할 수 있을 것이다. 특히, 요구적출형 잉크젯의 경우에는 표면 진동과 압력파 진동의 영향이 지배적일 것이다.^{12, 13}

압전체에 전압이 인가되면 PZT 층의 변형으로 노즐 내부의 부피가 확장되며, 따라서 팽창파를 발생하게 된다. 이 압력파가 노즐의 출구에 도달하게 되면 노즐 안쪽으로 액면의 변형, 즉, 메니스커스가 발생한다. 액면의 변형에 의하여 표면장력이 발생하는데, 압력파가 지난 후에는 이 표면장력으로 인한 메니스커스의 진동이 시작된다. Fig. 6 은, CCD 이미지를 분석하여, 30 V 의 전압이 인가된 후의 메니스커스의 변위를 μs 단위로 측정하여 나타내었다. 이때, 메니스커스가 노즐의 안쪽으로 진행될 경우 변위는 음의 값을 가지며 바깥쪽으로 진행될 경우는 양의 값을 갖는다.

Fig. 6 에서 볼 수 있듯이, 메니스커스의 변위는 시간의 흐름에 따라 그 크기가 감소하고 있으나, 그 주기는 약 50 μs 정도의 고정된 값을 유지하고 있다. 흥미롭게도 메니스커스의 진동이 Fig. 5 에서 보이는 분사안정성의 시간에 따른 변화와 유사한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 메니스커스의 진동과 분사 안정성의 상호관계에 대하여 좀더 구체적으로 살펴볼 필요성을 제시하고 있다.

Fig. 6 의 메니스커스의 변위 데이터를 좀더 자

세히 살펴 보면, 전압을 인가한 후 약 8 μs 의 시간이 소요된 후에야 메니스커스가 변형하기 시작하는 것을 알 수 있다. 이는 액체내의 유한한 압력과 전달속도에 기인한 결과이며, PZT 중심부와 노즐 출구의 거리 약 10.06 mm 와 측정 시 발생할 수 있는 $\pm 1 \mu\text{s}$ 의 오차 범위를 고려하면, 잉크 내 압력과 전달속도, 즉, 음속이 약 1117 ~ 1437 m/s 임을 유추할 수 있다.¹³

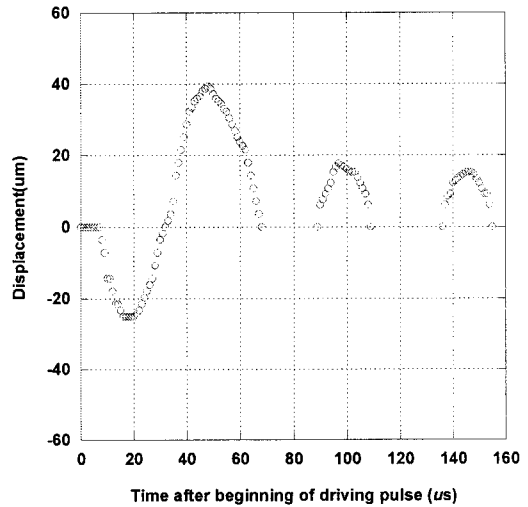


Fig. 6 Sequential displacements of meniscus after a beginning of a driving signal having V_p of 30 V without fall

한편, 단순히 전압을 인가하는 것이 아니라 Fig. 3 에 나타낸 펄스를 인가한다면, 전압상승에 의한 팽창파가 전파된 후 펄스폭, t_p 만큼의 시간이 경과하면 다시 전압 하강에 의한 압축파가 발생하여 액면에 전파될 것이다. 압축파가 액면에 도달하는 데에는 마찬가지로 약 8 μs 의 전달지연시간, t_{L1} 이 소요될 것이므로 다음과 같이 지연된 펄스폭, T_p 를 정의하는 것이 유용하다.

$$T_p = t_p + t_{L1} \quad (2)$$

노즐 출구에서 진동하고 있는 액면에 압축파가 가해질 경우, 압축파가 액면에 도달하는 순간 액면에 작용하는 표면장력 벡터나 액면의 운동속도 벡터는 압축파와 상호작용을 하게 된다. 따라

서 압축파 도달시점에서의 메니스커스 위상이 액체의 운동에너지 및 분사 특성에 미치는 영향을 클 것이다.

압축파와 액면진동의 위상정합에 대한 영향을 좀더 자세히 알아보기 위하여 동일한 강도의 압축파를 서로 다른 3개의 액면 진동 위상에 작용시켜 이때의 액면 변화 및 분사특성을 관찰하였다. 먼저 펄스전압이 30 V로 동일하고, 펄스폭이 15, 25, 45 μ s 인 3가지 경우를 각각 Case A, B, C로 선정하였다. Fig. 5의 분사안정성 맵으로부터, Case A, B, C는 각각 안정분사영역, 위성액적생성영역 및 무분사영역에 속하고 있음을 알 수 있다.

한편, Case A, B, C의 지연된 펄스폭, T_p 은 각각 23, 33, 53 μ s 로서, 액면 진동을 sine 함수에 근사하였을 경우, Fig. 6에 표시된 바와 같이 압축파 도달시점의 진동 위상이 각각 90° , 180° , 270° 에 해당한다. 즉, Case A는 압축파의 도달시점이 메니스커스의 변형 상사점으로서 액면 속도가 0 이고 작용하는 표면장력이 최대인 시점에 해당하고, Case B는 액면 속도가 최대인 시점에 압축파가 도달하는 경우이며, 마지막으로 Case C는 메니스커스의 운동 방향이 분사방향과 반대로 작용하는 시점에 압축파가 도달하는 경우이다.

각 Case에 대하여 시간에 따른 메니스커스 변형 및 액적 형성과정의 이미지를 포착하여 Fig. 7에 나타내었으며, 압축파 도달 전후의 액면 위치 변화를 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 압축파가 액면에 도달하면 노즐 출구방향으로 액면의 가속이 발생한다. 그러나 그 가속의 정도와 액면의 최종 속도와 분사특성은 압축파 도달시점의 액면의 위상에 따라 많은 차이가 있다.

먼저, Case A의 경우, 팽창파의 영향으로 노즐 내부로 변형되었던 액면이 표면장력에 의하여 분사방향으로 가속되는 시점에 압축파가 도달한다. 따라서 압축파는 표면장력에 더해져 액면을 더욱 힘차게 가속하는 역할을 한다. 이후, 액면이 노즐 외부로 변형되면서 표면장력이 액면의 운동방향과 반대로 작용하게 되고, 이로 인하여 30 μ s 지점 이후에는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 액면의 속도가 확연히 감소된다. 결과적으로, Case A는 Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 안정적인 단일 액적 분사 특성을 갖는다.

Case B의 경우, 액면이 노즐 면을 지나며, 액면

의 속도가 최대값을 갖는 시점에 압축파가 도달한다. 이미 액면은 노즐면을 지나고 있으므로 액면 선단에서는 노즐 변면과의 마찰 손실이 없다. 따라서, Case A보다 압축파에 의한 가속이 더 효율적으로 작용한다. 또한, 압축파 도달시의 액면이 노즐 오리피스에 위치하여 압력파에 노출된 액면의 면적이 작으므로, Fig. 7(b)와 Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 분사되는 액주의 직경이 작고 길이가 길며, 그 속도가 빠르다. 이처럼 더 작은 액면 선단의 원주와 더 빠른 액면의 속도로 인하여, 표면장력으로 인한 속도 감소현상은 상대적으로 작다. 이러한 결과로 인하여, Case B의 경우는 Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 위성액적이 형성되는 불안정한 분사 특성을 보인다.

한편, Case C의 경우, 액면에서의 표면장력이 분사방향과 반대로 작용하며, 액면 속도 역시 분사방향과 반대인 상태에서 압축파가 액면에 도달하게 된다. 이 경우, Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 압축파와 메니스커스의 표면장력은 서로 상쇄되므로, 압축파에 의한 액면의 가속효과는 상대적으로 미미하다. 그 결과, Fig. 7(c)에서 볼 수 있듯이, 앞의 경우와 동일한 크기의 압력파를 가하였음에도 불구하고 액적이 발생하지 않는다.

Fig. 7과 Fig. 8의 결과로부터, PZT 층에 동일한 펄스전압을 적용하여 압축파를 발생시키더라도 압축파가 진동하고 있는 노즐 액면에 도달하였을 때의 메니스커스의 위상에 따라 액면의 운동 및 분사 특성에 미치는 영향이 크게 변화함을 알 수 있으며, 분사 특성을 결정짓는 주요 인자 중 하나로서, 메니스커스의 진동과 압력파의 위상정합의 중요성을 강조하고 있다.

잉크젯의 분사 특성 및 유체의 불안정성에 관한 이전의 연구 결과로부터, 액체의 유체역학적 물성과 노즐의 기하학적 형상이 주어진 분사 시스템에서는 Weber 수 또는 분사 속도에 의하여 분사 특성이 결정됨이 알려져 있다.⁵⁻⁸ 또한, 실험에서 사용한 PZT 소자를 이용한 프린터 헤드의 경우, 잉크 분사 속도는 PZT 소자의 구동 펄스전압의 함수임이 알려져 있다.¹⁵ 그렇다면, 펄스폭에 의하여 변화하는 분사 특성 역시 메니스커스의 진동과 압력파의 위상차에 의한 분사 속도에 근거하여 설명할 수 있는 것일까? 이에 대한 구체적인 해답을 얻기 위하여 Fig. 5에 보인 안정분사영역의 상하 경계에 해당하는 구동 펄스의 조건에 대

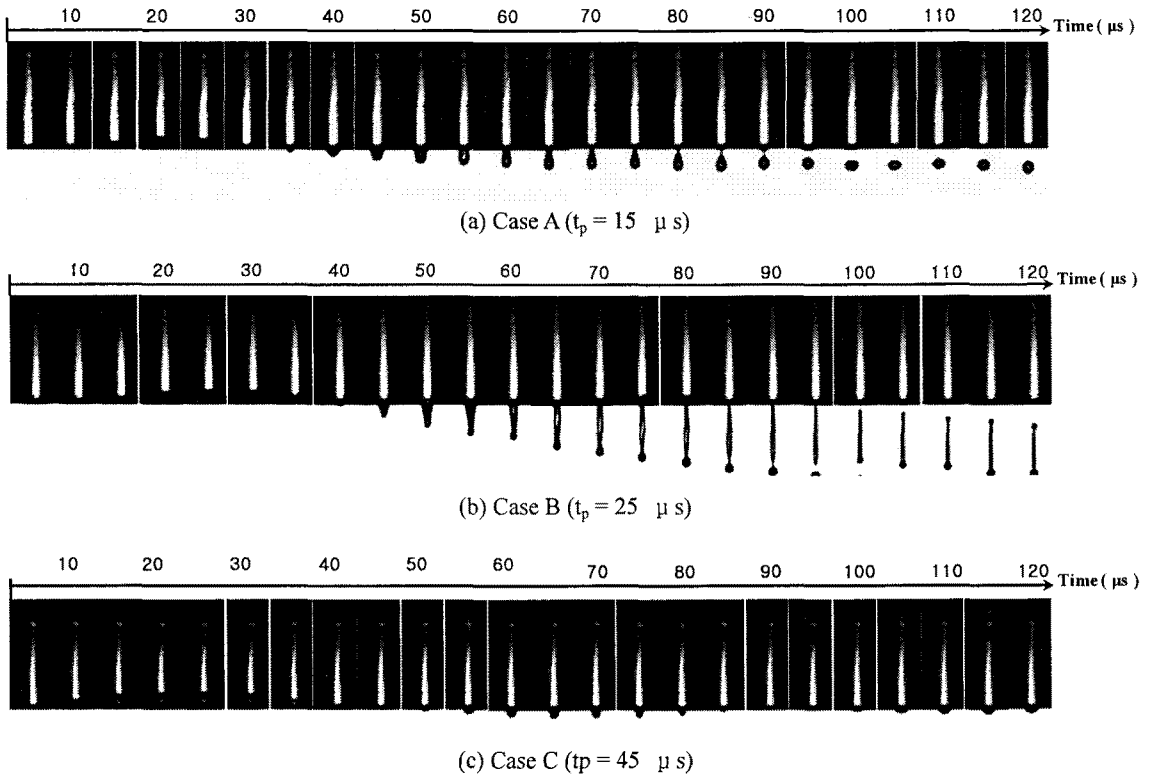


Fig. 7 Sequential aspects of droplet formation for various driving signals having the same amplitude, V_p , of 30 V and different pulse widths, t_{pw}

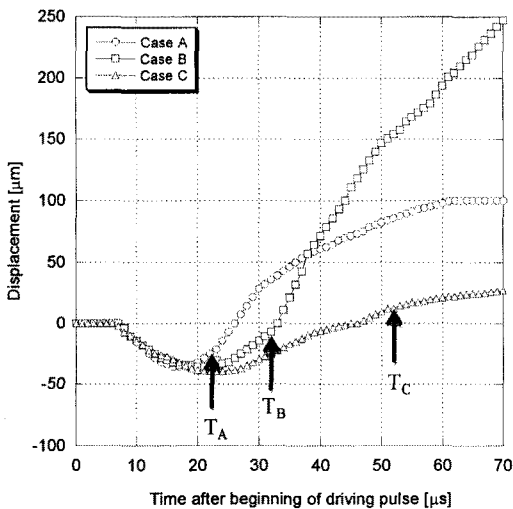


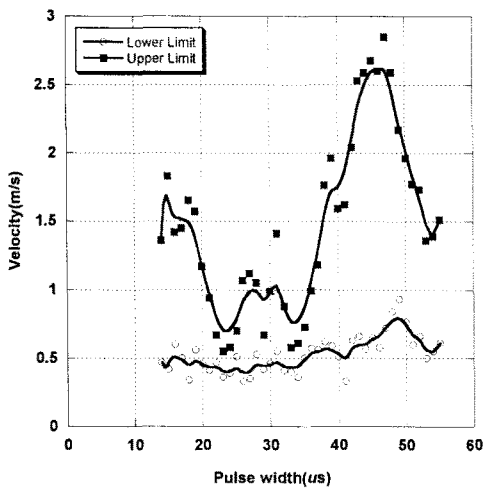
Fig. 8 Sequential displacements of menisci after beginning of driving pulses having various pulse widths

하여 액적의 분사속도와 체적을 측정하여 Fig. 9에 나타내었다.

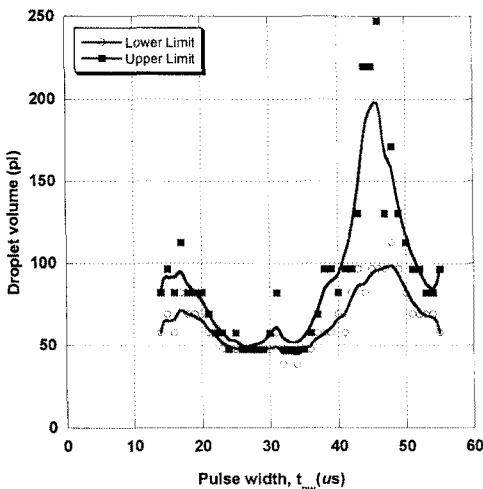
Fig. 9에서 Lower Limit은 안정분사영역의 하부 경계, 즉, 무분사영역과의 경계를 의미하며, Upper Limit은 안정분사영역의 상부 경계, 즉, 위성액적 발생영역과의 경계를 의미한다. Fig. 9(a)로부터, 안정분사영역 하부 경계의 액적 분사 속도가 약 0.5 m/s로서 일부 영역을 제외하고 거의 일정한 값을 갖음을 알 수 있다. 이러한 결과는 하부 경계의 구동 전압이 펄스폭에 따라서 크게 변화함을 고려할 때 매우 흥미로운 결과이다.

펄스폭이 10 μ s에서 25 μ s로 변화하면 구동 전압이 약 37 V에서 18 V로 1/2 이하로 감소함에도 불구하고 액적 분사속도는 거의 변화가 없다. 동일한 펄스폭에 대하여 수 V의 구동전압 증가가 분사속도 변화에 미치는 영향이 매우 큰 것과는 상반되는 결과이다. 이는 구동 펄스로부터 발생된 압력과 메니스커스의 진동이 액체 분사 속도에 미

치는 작용이 동일하며, 이 두가지 인자의 균형을 통하여 액적 분사 속도가 결정되고, 이러한 액적 분사 속도에 의하여 분사 개시 조건이 결정됨을 입증하는 결과이다. 즉, 액면의 속도가 낮은 상태에서는 요구적출형 분사를 성공시키기 위해서 상대적으로 강한 압력파의 액면에 도달이 요구되었다면, 액면의 속도가 큰 상태에서는 상대적으로 약한 압력파로서 동일한 액적 분사 속도 및 분사 안정성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 9 Jetting velocities (a) and volumes (b) of droplets along the boundaries of stable jetting region

한편, 하부 경계에서 액적 분사 속도가 펄스폭이나 펄스전압과 상관없이 동일한 값을 갖는 것과는 달리, 상부 경계에서의 액적 분사 속도 및 상하부 경계에서의 액적 크기는 펄스전압의 크기에 연동하여 변화하는 모습을 볼 수 있다. 이러한 결과 역시, 분사 특성을 액적의 운동에너지 또는 액적 분사속도로써 설명한 기존의 연구결과만으로는 설명할 수 없는 매우 흥미로운 결과이다.

구동전압이 증가하여 압력파의 강도가 증가하면, 팽창파에 의한 액면의 변형이 증가한다. 이처럼 액면의 초기 변형 및 액면의 속도가 증가하면, 점성의 효과로 인하여 팽창파와 압축파 사이의 액면 운동의 감쇄가 비교적 빠르게 진행될 것이다. 따라서 압축파 도달시에는 액면의 운동과 압력파의 강도 사이의 불균형이 발생하여, 분사속도가 압력파 강도의 영향에 상대적으로 더 크게 영향을 받게 되는 것으로 보인다.

그러나, 이러한 해석은 압력파의 강도가 증가할 때 압력파 도달 시점의 액면운동의 위상에 따라 액적 분사속도가 변화하는 이유를 설명할 수는 있으나, 위성액적이 발생하기 시작하는 액적 분사 속도가 펄스폭에 따라 변화하는 이유를 설명할 수 없다. 액면의 운동과 압력파의 위상정합적 측면에서 살펴 보면, 상대적으로 강한 압력파가 액면의 속도가 작은 상태에 도달하는 것보다, 상대적으로 약한 압력파가 액면의 운동 속도가 큰 상태에 도달하는 것이 불안정성을 증폭시키며, 그 결과, 후자의 경우에 더 낮은 액적 분사 속도에도 불구하고 위성액적이 생성됨을 알 수 있다.

이러한 원인으로는 두 가지를 생각해 볼 수 있는데, 그 첫째는 압력파 도달 시점에서 액면의 속도가 클 수록 유체역학적인 불안정성이 더욱 발생하기 쉽다는 점이고, 둘째는 먼저 발생한 팽창파와 후에 발생한 압축파의 상호작용이다.¹⁶ 펄스 초기에 PZT 층에서 발생한 팽창파는 노즐 출구 측과 그 반대측으로 진행된다. 노즐 출구 측으로 전파된 팽창파는 액면을 변형시키고 자유반사하는 반면, 반대측으로 전파된 팽창파는 잉크 유입구 벽면에서 고정반사하여 압축파로 전환되어 다시 노즐 측으로 진행된다. Fig. 2 에서 살펴본 헤드의 길이와 Fig. 6 에서 살펴본 음향파 전달속도를 고려할 때, PZT 층에서 압력파가 생성되어 잉크 유입구 측으로 진행하였다가 반사되어 다시 원래의 PZT 층까지 전파되기까지는 약 27 μ s 의 시간이

소요됨을 짐작할 수 있다.

한편, 팽창파가 생성된 후 펄스폭 만큼의 시간이 경과하면 PZT 층이 다시 수축하며 압축파가 발생한다. 이때, 펄스폭이 27 μ s 에 근접하면, 먼저 발생한 팽창파의 반사파와 간섭하여 하나의 커다란 파로 합쳐져서 진행하거나 또는 연이은 2 개의 파가 나란히 진행하게 된다. 두 개의 파가 하나로 합쳐질 경우, 각각의 압력과 강도가 상대적으로 낮더라도 2 개의 압력파가 서로 더해져서 더 큰 액면운동을 유발할 수 있으며, 두 개의 파가 짧은 시간 간격을 차이로 액면에 도달하게 되면, 액면 운동의 불안정성을 촉진하여, 더 낮은 액적 분사속도에서 위성액적이 발생할 수 있으며, 분사되는 액적의 크기도 작아질 것이다. Fig. 9 에서 펄스폭이 20 ~ 35 μ s 범위에서 액적의 크기 및 Upper Limit 의 액적 분사속도가 낮은 것은 이러한 현상에 기인한 것으로 설명할 수 있을 것이다. 특히, 두 개의 압력파가 합쳐질 것으로 예측되는 펄스폭 27 μ s 조건에서 다시 분사 액적의 크기 및 위성액적 발생 분사속도가 증가하여 W 형태의 특성 곡성을 보이는 것은 두 개의 연이은 파가 안정성에 미치는 영향을 강조하는 결과라 할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 이러한 해석에 대한 보다 구체적인 근거자료를 확보하지 못하였다. 향후, 이 부분에 대한 구체적인 실험데이터 및 해석 자료를 토대로 보다 심층적인 분석이 필요할 것이다.

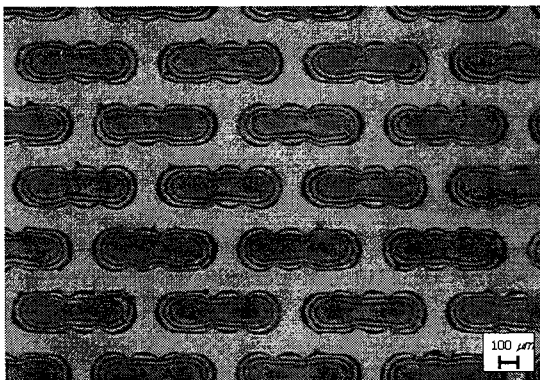


Fig. 10 Sub-pixel patterning of light emitting polymer ink on glass substrate

지금까지 살펴본 결과를 활용하여 안정분사영역 조건의 요구적출형 잉크젯을 이용하여 마이크로 패턴을 인쇄하여 Fig. 10 에 나타내었다. 인쇄 시

의 펄스폭은 40 μ s, 펄스전압은 35 V 이며, 이때의 액적 분사속도 및 크기는 각각 1.3 m/s, 75 pl 이다.

요구적출형 방식으로 헤드에서 분사된 액적은 스테이지의 이동과 동기 되어 규칙적인 패턴을 구현하게 된다. 격벽이 없는 실리콘 웨이퍼 위에 반복적인 패턴을 형성하였다. 형성된 패턴의 폭과 길이의 평균은 각각 683 μ m 와 242 μ m 이며 표준편차는 폭과 길이에 대하여 모두 약 6 μ m 이다.

4. 결론

본 연구에서는 요구적출형 잉크젯 프린터에서 압전 소자에 인가되는 펄스의 전압과 폭이 분사특성에 미치는 영향을 OLED 잉크 분사 실험을 통해 알아보았다. 구동 펄스의 조건에 대한 분사안정성 실험을 수행하였으며, 그 결과, 다음의 몇 가지 사실을 확인하였다. 첫째, 잉크젯의 분사특성은 분사안정성에 따라 분사가 이루어지지 않는 무분사영역, 단일 액적이 안정적으로 분사되는 안정분사영역, 주액적 이외에 하나 이상의 위성액적이 발생하는 위성액적생성영역 등 3 가지 분사영역으로 나눌 수 있다. 이때, 모든 안정분사영역 조건에서 펄스전압이 감소하면 무분사영역으로 조건이 변하고, 반대로 펄스전압이 증가하면 위성액적생성영역으로 조건이 변하는 공통된 특성을 갖는다.

둘째, 펄스폭이 증가함에 따라 안정분사영역에 해당하는 펄스전압이 감소와 증가를 반복하는 비선형적인 변화 특성을 보이며, 그 변화 정도가 안정분사영역의 펄스전압의 3 배 이상으로 매우 크다. 특히, 안정분사영역과 무분사영역의 경계와 안정분사영역과 위성액적생성영역의 경계에 해당하는 펄스전압이 펄스폭에 대하여 서로 동일한 주기와 위상의 조화함수 형태로 변화함을 확인할 수 있었다.

셋째, 안정분사영역과 무분사영역의 경계에 해당하는 펄스전압이 펄스폭에 대하여 큰 폭으로 변화하였음에도 불구하고, 액적 분사속도는 전 경계 구간에서 거의 일정하게 나타났다. 이러한 결과로부터, 펄스전압과 펄스폭이 상호간에 영향을 미치며, 이들의 상호작용에 의하여 분사특성이 결정됨을 유추할 수 있었다.

본 연구에서는, 실험결과로부터 살펴본 펄스폭과 펄스전압 상관관계의 주기적인 거동을 압전 구

동층에 의하여 생성되는 압력파와 노즐 출구의 액면 진동의 위상정합에 근거하여 설명하였다. 구동전압이 낮아 압력파의 강도가 상대적으로 작은 경우는 액면의 진동과 압력파가 상호간에 균형을 이루었으며, 펄스전압의 함수인 압력파의 강도와 펄스폭의 함수인 압력과 도달시점의 액면 속도로부터 결정되는 액적 분사속도에 의하여 분사특성이 좌우되었다. 반면에, 구동전압이 높아 압력파의 강도가 상대적으로 높은 경우는 생성된 압력파가 헤드 내에서 반사되어 진동하며 상호간에 간섭함으로써 액적 분사속도, 액적 크기 및 분사 안정성에 미치는 영향에 대하여 논의하였다. 이러한 논의를 통하여, 액적 분사 특성 및 위상액적 생성과 관련하여, 선 후발 압력파와 메니스커스의 운동의 상호작용에 대한 보다 심층적인 연구에 대한 중요성을 제시하였다. 향후, 점성과 표면장력 등 잉크의 물성과 프린터 헤드와 노즐의 기하학적 형상이 구동신호의 상호작용 및 분사 안정성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행함으로써, 보다 심층적인 분석에 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- De Gans, B.-J., Duineveld, P. C. and Schubert, U. S., "Inkjet printing of polymers: state of the art and future developments," *Advanced Materials*, Vol. 16, Issue 3, pp. 203-213, 2004.
- Ringeisen, B. R., Othon, C. M., Barron, J. A., Young, D. and Spargo, B. J., "Jet-based methods to print living cells," *Biotechnology Journal*, Vol. 1, Issue 9, pp. 930-948, 2006.
- Lee, H. H., Chou, K. S. and Huang, K. C., "Inkjet printing of nanosized silver colloids," *Nanotechnology*, Vol. 16, Issue 10, pp. 2436-2441, 2005.
- Reis, N., Ainsley, C. and Derby, B., "Ink-jet delivery of particle suspensions by piezoelectric droplet ejectors," *J. Applied Physics*, Vol. 97, Issue 9, pp. 094903_1-094903_6, 2005.
- Weber, C., "Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles," *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*, Vol. 11, Issue 2, pp. 136-154, 1931.
- Kalaaji, A., Lopez, B., Attane, P. and Soucemanadin, A., "Breakup length of forced liquid jets," *Physics of Fluids*, Vol. 15, No. 9, pp. 2469-2479, 2003.
- Koltay, P. and Zengerle, R., "Non-contact nanoliter & picoliter liquid dispensing," *Transducers & Eurosensors '07*, pp. 165-170, 2007.
- Lin, S. P. and Reitz, R. D., "Drop and Spray Formation from a Liquid Jet," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30, pp. 85-105, 1998.
- Derby, B. and Reis, N., "Inkjet Printing of Highly Loaded Particulate Suspensions," *Materials Research Society*, Vol. 28, No. 11, pp. 815-818, 2003.
- Chau, S. W., "The fluid property dependency on micro-fluidic characteristics in the deposition process for microfabrication," *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 20, Issue 1, pp. 133-138, 2004.
- Zhao, X., Evans, J. R. G., Edirisinghe, M. J. and Song, J. H., "Formulation of a ceramic ink for a wide-array drop-on-demand ink-jet printer," *Ceramics International*, Vol. 29, Issue 8, pp. 887-892, 2003.
- Bogy, D. B. and Talke, F. E., "Experimental and Theoretical Study of Wave Propagation Phenomena in Drop-on-Demand Ink Jet Device," *IBM J. Research and Development*, Vol. 28, No. 3, pp. 314-321, 1984.
- Wu, H. C., Lin, H. J. and Hwang, W. S., "A numerical study of the effect of operating parameters on drop formation in a squeeze mode inkjet device," *Institute of physics publishing, Modeling and Simul. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 13, Issue 1, pp. 17-34, 2003.
- Shin, D. Y., Grassia, P. and Derby, B., "Numerical and experimental comparisons of mass transport rate in a piezoelectric drop-on-demand inkjet print head," *International J. Mechanical Sciences*, Vol. 46, Issue 2, pp. 181-199, 2004.
- MicroFab Technologies Inc., "Drive Waveform Effects on Ink-Jet Device Performance," *MicroFab, Plano, Technote 99-03*, Sep. 30. pp. 1-4, 1999.
- Shin, D. Y., Grassia, P. and Derby, B., "Oscillatory Incompressible Fluid Flow in a Tapered Tube With a Free Surface in an Inkjet Print Head," *J. Fluids Engineering*, Vol. 127, Issue 1, pp. 98-109, 2005.