

# 신속 시작법용 액적 생성 장치에서의 액적 생성에 대한 연구

김선민\* · 박종선\* · 이우일†

(2000년 10월 13일 접수, 2001년 5월 18일 심사완료)

## A Study on the Drop Formation of the Liquid Jet Device for Rapid Prototyping

Sun Min Kim, Jong Sun Park and Woo Il Lee

**Key Words :** Rapid Prototyping(신속 시작법), Liquid Jet Device(액적 생성 장치), Drop-on-Demand Jet(DOD 액적), 3D Printing(3 차원 인쇄), Piezo-Plate(압전판)

### Abstract

Rapid prototyping(RP) is a novel technology to create 3D products directly from CAD system. This study proposes a new RP method which uses the PZT ceramic plate to make a Drop-On-Demand liquid jet from the nozzle. The characteristic of drop formation in the new system is investigated both numerically and experimentally. The optimal drop for 3-D Printing can be obtained by the proper amplitude and frequency of the applied voltage. Also the process of the drop formation is analyzed using the pressure wave theory and verified by numerical simulation. First, the pressure wave generated by the deformation of the Piezo-plate at the nozzle is analyzed by solving the 2D axisymmetric wave equation via Finite Element Method. Finally, the drop formation process is simulated using a commercial software, *FLOW 3D*<sup>®</sup> considering the pressure at the nozzle obtained by solving the wave equation as the boundary condition.

### 기호설명

- $c$  : 음속(m/s)
- $F$  : 힘 행렬
- $f$  : 압전판에 가해진 펄스의 주파수
- $K$  : 관성항 행렬
- $M$  : 질량 행렬
- $n$  : 수직 방향
- $p$  : 압력(Pa)
- $t$  : 시간(s)
- $v$  : 유체의 속도(m/s)

$V$  : 압전판에 가해진 펄스의 전압

### 하첨자

- $high$  : 압전판에 가해진 전압이 high 인 시간
- $low$  : 압전판에 가해진 전압이 low 인 시간
- $piezo$  : 압전판
- $nozzle$  : 노즐부

### 그리스문자

- $\rho$  : 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- $\Delta t$  : 시간 간격(s)
- $Y$  : 표면 장력 계수(N/m)

\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : wilee@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7116 FAX : (02)886-0631

## 1. 서론

오늘날 생산되는 제품은 모델이 다양하고 형상이 훨씬 복잡해지고 있으며, 생산단계에서는 개발 시간 단축이 중요한 문제로 대두되었다. 이러한 산업 현실속에서 시작품(Prototype)을 제작하는 것은 제품 개발 초기단계에서 제품을 제작, 검증할 수 있는 환경을 제공한다. 그러나 이에 는 적지 않은 시간과 비용이 소요되기 때문에 시작품 제작의 경제성과 효율성이 문제가 된다. 최근에 이러한 한계를 극복하기 위하여 신속시작(Rapid prototyping, 이하 RP) 작업이 활용되고 있다. RP 는 CAD/CAM 통합환경하의 자동 설계, 생산 체제에 손쉽게 적용될 수 있는 특징을 가지고 있다. 1987년 3D system사에서 Stereo-lithography Apparatus (SLA)를 선보인 이래로 수많은 RP 장비들이 개발되었으며(SLS, LOM, FDM 등), 몇몇의 장비들은 상용화 되어 점차 그 시장이 확대되어 가고 있다. 현재까지 개발되어진 RP 시스템은 사용하는 재료와 성형방식에는 차이가 있지만, 3 차원의 형상을 2 차원의 평면 데이터로 변환하여 각층을 적층하여 원하는 모델을 만드는 기본 원리는 동일하다.<sup>(1),(2)</sup>

본 연구에서 고려된 RP 시스템은 잉크젯 프린터에 응용되는 액적 생성 시스템을 사용한다. 이는 크게 연속 제트 방식(Continuous jet system)과 불연속성을 띄는 액적 방식(Drop-On-Demand jet, 이하 DOD 액적)으로 구분되는데 본 연구에서는 후자를 사용하였다. 1930 년대에 Schröter<sup>(3)</sup> 등이 연속 제트를 이용한 기기를 개발하였고, 스웨덴의 Elmqvist<sup>(4)</sup>는 전기적 신호를 통하여 각각의 액적이 생성되는 시간을 제어하는 DOD 액적의 원리를 개발하였으며, E.L.Kyser 등,<sup>(5)</sup> Zoltan<sup>(6)</sup>에 의하여 좀더 발전되었다. 본 연구에서는 압전판(Piezo-plate)을 액추에이터로 사용하여 압전판에 가해주는 전압의 크기와 펄스의 주파수에 따른 액적의 분사 특성을 관찰 하였다. 또한 압전판의 변위에 따른 관내에서의 압력과의 전달을 유한 요소법을 통하여 해석하였으며, 상용 수치해석 프로그램인 Flow Science,INC 의 FLOW-3D<sup>®</sup>를 통하여 액적 형성을 해석하였다.

## 2. DOD 액적 생성장치의 제작 및 실험

### 2.1 DOD 액적 시스템

본 연구에서는 앞에서 설명한 것과 같이 압전판을 액추에이터로 사용하는 분사장치를 개발하였다. 제작된 DOD 시스템은 Fig. 1과 같이 노즐부분,

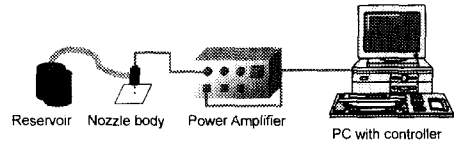


Fig. 1 Schematic picture of DOD system

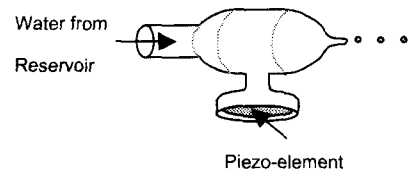


Fig. 2 Schematic picture of nozzle body

전기적 신호에 따라 작동되는 압전판, 그리고 계속하여 유체를 공급하는 저장통(reservoir) 등으로 구성되어 있다.

DOD 시스템에서 사용되는 노즐부의 직경은 보통 30~100  $\mu\text{m}$  이며 액적 생성률은 보통 2~10kHz 정도이다. 본 실험에서는 Fig. 2 와 같이, 노즐몸체(Nozzle body)의 한 쪽에 압전판을 설치하여 유체에 압력을 가하고 이를 통해 노즐부에서 액적이 생성되어 분사가 이루어진다. 이 방식은 장치가 간단하고, 크기가 작은 특성으로 인하여 글자를 인쇄하는데 큰 장점을 나타낸다.<sup>(3)</sup> 제작에 사용된 압전판<sup>(7)</sup>은 벨기에의 Sonitron<sup>®</sup>사에서 제작된 Piezo-element SD-2720-4,6 이며 노즐몸체는 유리로 제작하였다.

또한, 저장통에 담긴 유체의 자유표면의 높이를 일정하게 유지시켜, 유체에 가해지는 정압력이 일정하게 유지될 수 있도록 하였다.

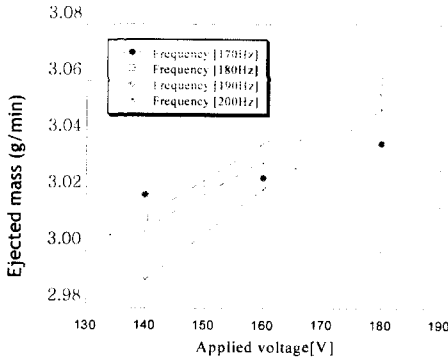
### 2.2 분사 실험

제작된 DOD 시스템을 통하여 유체의 분사 실험을 수행하였다. DOD 시스템에 대한 분사 실험은 Shield 등,<sup>(8)</sup> Bogy 와 Talke<sup>(9)</sup>에 의하여 연구 되었다. Shield 등<sup>(8)</sup>은 에틸렌 글리콜과 물에 대하여 분사 실험을 수행하였으며, 압전판에 가해주는 전압의 크기와 펄스의 주파수를 변화 시키며 분사의 모습을 고속 카메라 장치를 통하여 촬영하였다. 이를 통하여 적절한 액적이 생성되는 전압의 크기와 펄스의 주파수를 최적화 하는 실험을 수행하였다. Bogy 와 Talke<sup>(9)</sup>는 노즐 부분에서 관노의 길이와 액적 생성까지의 지연시간, 최적 펄스 주파수의 관계를 규명하였으며, 생성되는 액적의 속도도 실험을 통하여 측정하였다.

본 연구에서는 제작된 DOD 시스템을 압전판에 가해주는 전압의 크기와 펄스의 주파수를 변화 시켜 분사 실험을 수행하였다. 생성되는 액적을

**Table 1** Experimental conditions and materials

유 체	물
노즐 직경	0.31mm
전압( $V_{piezo}$ )	140V, 160V, 180V
펄스 형태	구형파
주파수( $f$ )	170Hz, 180Hz, 190Hz, 200Hz

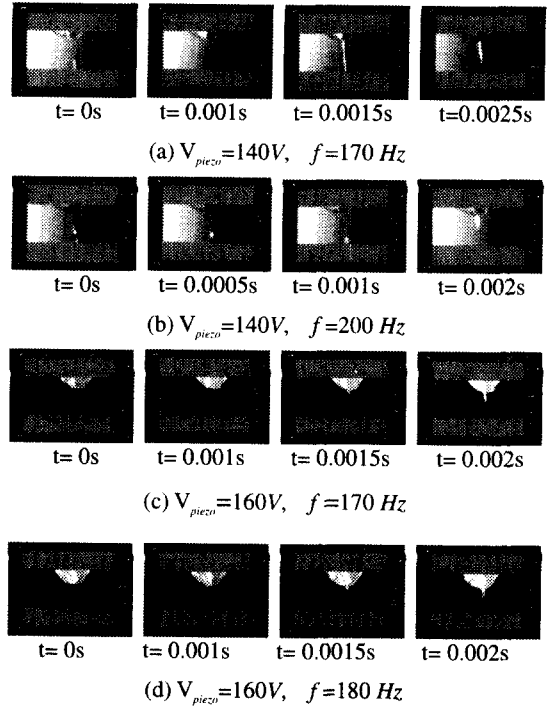


**Fig. 3** Ejected mass of water from the nozzle

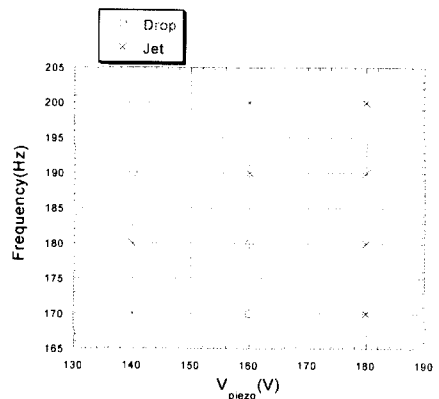
관찰하기 위해 고속 카메라 장치를 설치하여 촬영한 후 화상처리를 통하여 이를 분석하였다. 분사 실험은 물에 대하여 수행 하였으며, 실험을 수행한 조건은 Table 1 과 같다. Table 1의 전압과 펄스의 주파수는 노즐부에서 분사가 일어나는 조건이다. 이 이외의 조건에서는 분사가 잘 이루어지지 않았다.

일차적으로 수행된 실험은 각각의 실험 조건에 대하여 일정시간 동안 분사되는 유체의 질량을 측정하여 보았다. 결과는 Fig. 3과 같다. 펄스의 주파수가 일정한 경우 압전판에 가해주는 전압의 크기가 증가하면 분사되는 유체의 질량이 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 또한, 압전판에 가해주는 전압이 일정한 경우 펄스의 주파수가 170Hz 인 경우를 제외하고는 펄스의 주파수가 증가함에 따라 분사되는 유체의 질량이 감소함을 볼 수 있다. 다음으로 수행된 실험은 유체를 분사 시키며 액적의 형태를 관찰 하였다. 압전판에 가해주는 전압의 크기와 펄스의 주파수에 따라 생성되는 액적의 형태가 상이하였고, 액적이 제대로 생성되지 않는 경우도 있었다. 물에 대한 실험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)의 경우 액적의 형태가 아닌 제트의 형태를 갖는 분사가 이루어졌다.

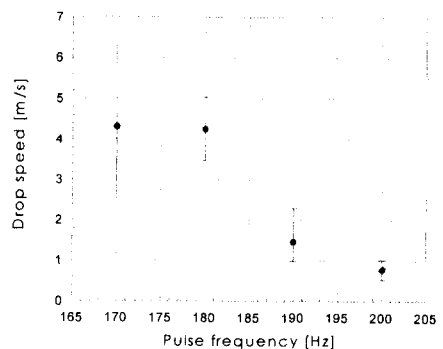
Fig. 5 는 각각의 실험조건에 따른 액적생성 결과를 나타낸 것으로서, Fig.4(a)와 같이 제트형태의 분사가 이루어진 경우와, Fig.4(b)-(d)와 같이 액적



**Fig. 4** Time sequences of water drops at different frequencies( $f$ ) and applied voltages( $V_{piezo}$ )



**Fig. 5** Conditions of drop formation



**Fig. 6** Speed of ejected water drops ( $V_{piezo}=140V$ )

형태의 분사가 이루어진 경우를 구분하였다. 또한 생성된 액적의 속도를 분사 실험에서 얻어진 분사 영상의 화상 처리를 통해 구하였다. 결과는 Fig. 6 과 같다. Fig. 6은 압전판에 가해주는 전압의 크기 ( $V_{meco}$ )를 140V로 한 경우로서, 펄스의 주파수( $f$ )가 증가함에 따라 생성되는 액적의 평균속도는 감소 하지만, 속도의 최대값과 최소값의 차는 줄어들 수 있었다. 또한 주파수가 200Hz 이상의 경우에서는 제대로 액적이 생성되지 않았다. 액적의 평균 속도가 펄스 주파수의 증가에 따라 감소하는 것은, Fig. 3에서 알 수 있듯이 일정시간 동안 분사 되는 유체의 양이 주파수의 증가에 따라 감소하는 것과 관련이 있다.

이러한 결과를 살펴볼 때, 3 차원 인쇄를 하는데 적합한 안정적인 액적의 유량과 주기 등의 기준을 만족하는 최적의 전압은 140V, 펄스의 주파수는 200Hz 임을 확인할 수 있었다.

### 3. 액적 생성의 이론적 고찰

DOD 제트에 대하여 Beasley,<sup>(10)</sup> Kyser 등<sup>(5)</sup>은 관 내의 유체를 비압축성으로 가정하여 해석하였다. Beasley<sup>(10)</sup>는 압전 소자를 액추에이터로 사용한 장치에 대하여 준정상상태 연속 방정식과 비압축성 운동량 방정식을 사용하여 액적 생성과정을 해석하였으며, Kyser 등<sup>(5)</sup>은 유효질량, 스프링, 등가 댐핑 계수와 같은 매개 변수들을 사용하여 해석을 하였다. 그러나 유체를 비압축성으로 가정하면 설명될 수 없는 몇가지 요소들, 즉, 가하여준 전압 신호와 이에 의해 생성되는 메니스커스의 운동과의 시간차, 액적이 생성될 때 노즐에서 생기는 압력파에 의한 교란 등을 고려해볼 때 유체를 압축성으로 가정한 해석이 필요하게 된다. Bogy 등<sup>(9)</sup>은 유체를 압축성 유체로 가정하여 일차원 파동 방정식을 통해 액적 생성 과정을 설명하였다.

#### 3.1 압력파의 생성과 전파

DOD 제트장치에서 유체는 액추에이터로부터 생성된 에너지를 노즐에 전달 하는 역할을 한다. 유체를 비압축성으로 가정하게 되면 액추에이터와 노즐 사이의 에너지 전달을 적절히 설명할 수 없다. 이는 유체의 압축성으로 인하여 압력파의 형태로 에너지를 저장하기 때문이다. 따라서 유체내의 압력파의 생성과 전달에 대한 고려가 필요하게 된다. 대부분의 DOD 제트 시스템은 압전 세라믹을 액추에이터로 사용한다. 압전판은 전압을 가해줌에 따라 보통 0.2%정도의 두께 변화와 0.1%

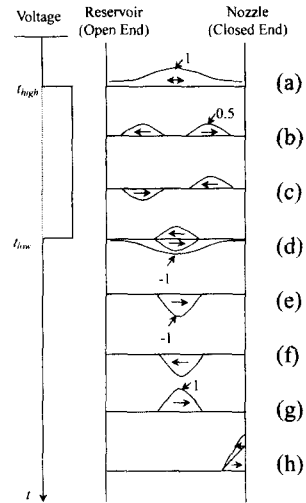


Fig. 7 Propagation, reflection and superposition of the pressure pulse generated by the piezo plate

정도의 길이와 폭 방향으로의 변화가 생긴다.<sup>(13)</sup> 이러한 크기의 변화는 유체에 일을 하게 된다. 결국 압전판은 가해주는 전압펄스의 주파수에 따라 변형을 일으키며 주기적으로 액체에 압력을 가하고, 이렇게 생성된 압력파는 전파, 반사, 중첩의 과정을 겪게 된다.<sup>(13)</sup>

음향학적으로 노즐몸체의 한 쪽 끝은 노즐부와 연결되어 닫힌 벽의 역할을 하며, 다른 한 쪽 끝은 저장통과 연결되어 열린 관의 역할을 한다. 이러한 단면의 변화로 압력파는 변형이 생기며 이를 음향학적 관점에서 살펴보면 Fig. 7과 같다. Fig. 7은 초기에 압전판의 변위에 의하여 생성된 압력파의 전파를 나타낸 것이다. 시간  $t_{high}$ 에 압전판에 가하여지는 전압펄스에 의해 생성된 압력파는 관의 양쪽으로 분리되어 전파된다(Fig. 7(a),(b)). 이러한 압력파가 각각 노즐부, 저장통 부분과 만나게 되면 반사가 이루어진다. 노즐부와 만난 압력파는 위상의 변화 없이 그대로 반사가 일어나며, 저장통 부분과 만난 압력파는 위상이 180° 바뀌게 된다(Fig. 7(c),(f),(g)). 초기에 이러한 반사파가 중간 부분에서 만난 시점( $t_{low}$ )에 전압펄스가 low 상태로 되면 음의 압력이 발생되며, 이렇게 되면 음의 압력파는 크기가 2 배가 되고, 양의 압력파는 소멸된다(Fig. 7(d),(e)). 크기가 2 배가 된 음의 압력파는 전파가 이루어지며, 그림의 마지막 시점에서 볼 수 있듯이 노즐부에서 최대의 압력을 갖게 된다. 이러한 압력파의 전파, 반사, 중첩에 따라 노즐부에서 적절한 크기의 압력에 도달하였을 때 액적이 생성되어 분사가 이루어 진다(Fig. 7(h)).

3.2 액적의 생성

앞 절에서 서술한 것과 같은 과정을 통하여 유체는 액추에이터로부터 노즐부로 압력파를 전달한다. 노즐부의 압력파는 유체를 메니스커스 부분으로 전달하고, 압력파는 반대의 부호를 갖고 반사되며 이에 의하여 부가적인 유체를 메니스커스 부분으로 전달하게 된다. 이러한 반사는 짧은 간격을 두고 연속적으로 이어지며, 전후의 압력파의 다른 부분과 서로 중첩된다. 앞 방향(노즐부 출구 부분)과 뒤 방향(노즐부 안쪽 부분)으로 전달되는 압력파가 모두 같은 방향으로 유체를 전달하기 때문에, 유체는 어떤 속도를 갖게 된다. 이에 따라 유체는 Fig. 8의 4 단계를 거치며 액적의 생성이 이루어진다. 이러한 액적생성의 과정은 실험을 통해서도 확인할 수 있으며, 이를 Fig. 8에 함께 나타내었다. Fig. 8의 각 상태에서의 노즐부의 압력(p), 속도(v), 그리고 유체의 상태는 다음과 같다.

- Phase 1:  $p > 0, v > 0$ 이며 유체는 노즐 밖으로 가속된다.
- Phase 2:  $p < 0, v > 0$ 이며 유체는 감속이 된다.
- Phase 3:  $p < 0, v < 0$ 이며 이 상태에서 액적이 생성되어 떨어져 나가게 된다.
- Phase 4:  $v > 0$ 이며 이 상태에서 표면 장력에 의하여 유체가 다시 채워지며 압력은 평형 상태가 된다.

1 단계의 마지막 시점에선 노즐부의 압력이 음으로 바뀌게 되며 유체의 일부가 오리피스 앞 부분으로 나오게 된다. 이 때에는 표면장력에 의한 힘이 큰 영향을 미친다. 2 단계에서는 유체의 속도가 양의 크기를 갖지만 감속이 되고 여분의 유체가 노즐 밖으로 돌출되며, 오리피스 부분과 연결된 액적생성이 이루어지려 한다. 3 단계에서는 유체의 속도가 음의 값을 갖고 메니스커스가 안쪽으로 들어가면서 유체는 오리피스 부분으로부터 떨어져 나가면서 4 단계에서와 같이 하나의 액적을 생성하게 된다.

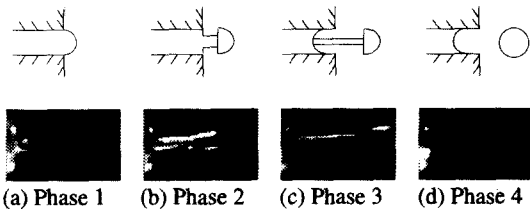


Fig. 8 4 phases of drop formation at the nozzle (upper :schematic diagram, lower : picture)

4. 액적 생성의 해석

액적 생성시의 유동을 해석하기 위해서는 표면장력을 포함한 유동 방정식을 풀어야 한다. 또한 전형적인 이동 경계문제로서, 액적과 공기의 경계면은 해석의 결과로서 결정되어야 한다. 이러한 해석의 어려움 때문에 기존의 연구 결과들은 여러 가정을 통하여 단순한 해석을 수행해왔다. Adams와 Roy<sup>(11)</sup>는 액적 생성을 일차원 가정을 통해 이동 격자계를 사용하여 유한 차분법으로 해석을 수행하였다. Fromm<sup>(12)</sup>은 유체 부분은 고정 격자계, 유체와 공기 부분은 이동 격자계를 사용하여 유선 함수를 통해 압력의 변화를 입구 조건으로 사용하여 해석하였다. Shield 등<sup>(8)</sup>은 먼저 비점성, 압축성 유체 가정을 통하여 노즐부에서의 압력 변화를 구하고, 점성 운동량 적분식을 이용하여 노즐부에서의 유체속도를 계산하였다. 그리고, 구하여진 속도를 경계조건으로 사용하여 표면장력을 포함한 비점성, 비압축성 유체에 대하여 일차원 식을 통하여 액적 형상을 구하였다.

본 연구에서는 노즐부의 압력을 계산하기위해 비점성, 압축성 유체의 선형화된 파동 방정식을 2차원 축 대칭인 형상에 적용하였고, 여기에서 구하여진 노즐부에서의 압력 변화를 경계 조건으로 사용하여 Flow Science,INC의 FLOW-3D<sup>®</sup>를 통하여 액적 형성을 해석하였다.

4.1 DOD 제트 장치에서의 압력파 해석

DOD 제트장치에서 압전판의 변위에 따라 관내에 압력이 생성되고, 이 압력파는 4장에서 설명한 바와 같이 전파가 이루어진다. 지배 방정식은 다음과 같이 정의 된다.

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \tag{1}$$

여기서 c는 주어진 유체 내에서의 음속을 나타낸다.<sup>(13)</sup> 주어진 지배 방정식을 Galerkin 유한 요소법을 사용하여 계산하였다. 이산화된 지배 방정식을 벡터 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{p}}{dt^2} + \mathbf{Kp} = \mathbf{F} \tag{2}$$

시간에 대한 차분은 암시적 방법을 사용하여 계산하였다. 초기 조건은 다음과 같다.

$$\mathbf{p}_{t=0} = \mathbf{p}_0 \quad \left. \frac{d\mathbf{p}}{dt} \right|_{t=0} = \mathbf{q}_0 \tag{3}$$

경계 조건은 벽의 경우는 자유단으로 생각할 수 있으므로  $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$  으로 주었으며 essential 조건이 필요한 부분은  $p = p_{piezo}$  로 주어졌다.

계산에 사용된 축대칭 형상의 노즐몸체의 격자계와 경계 조건은 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 ① 부분은 압전판에 의하여 압력파가 가해지는 부분으로 식 (4)와 같이 경계 조건을 주었다.

$$p = \begin{cases} p_{piezo} & \text{at } t = t_{high} \\ -p_{piezo} & \text{at } t = t_{low} \end{cases} \quad (4)$$

계산에서 사용된 초기 조건은 다음과 같다.

$$p_{t=0} = 0 \quad \left. \frac{dp}{dt} \right|_{t=0} = 0 \quad (5)$$

여기서 문제가 되는 것은 경계 조건으로서, 압전재료에 의해 생성되는 압력 펄스의 크기( $P_{piezo}$ )이다. 압전판의 변위와 전압( $V_{piezo}$ )에 따라 관노 내의 유체가 받는 압력의 크기( $P_{piezo}$ )는 측정하기 매우 어렵다. 따라서, Adams 와 Roy,<sup>(11)</sup> Fromm,<sup>(12)</sup> Bogy 등<sup>(14)</sup>은  $p_{piezo} / \rho V_0^2$  라는 무차원 수 ( $V_0 = \sqrt{\sigma / \rho a}$ )를 정의하여 이 무차원 수의 값을 임의의 구형파 형태로 주어 계산하였으며, Shield 등<sup>(8)</sup>은 가해주는 전압의 크기에 따라 생성되는 압력의 크기가 알려져 있는 ( $P_{piezo} = f(V)$ ) 규격화되어있는 크기의 특정 압전 소자인 PZT-5H 에 대하여 해석을 수행하였다. 본 연구에서는  $P_{piezo}$  를 식 (4)와 같이 구형파 형태로 주었으며, 그 크기는 기존의 연구 결과를 참조하여 임의의 값으로 주었다. 그 값의 적합성을 Fig. 15 등의 계산결과에서 찾아볼 수 있었다. 계산에서 사용한 변수들은 Table 2 와 같다.

전술한 경계조건과 초기조건에 대하여 압력파 해석을 수행하였다. Fig. 10은 노즐부(Fig. 9의 ⑤ nozzle)에서의 압력( $P_{nozzle}$ )을 시간에 따라 나타낸 것으로서,  $P_{piezo}$  가 500Pa 이고, 압전판에 가해주는 전압 펄스의 주파수를 각각 170, 180, 190, 200Hz 로 하였을 때의 결과를 나타낸 것이다.  $P_{piezo}$  가 800, 1000 Pa 일 경우는 500Pa 경우와 시간에 따른 변화는 같으며, 크기는 500Pa 일 경우에 비례한다. 결과를 보면 압력은 주파수 및 시간에 따라 주기성을 나타낸다. 주파수의 증가에 따라 주기는 증가하며, 이와 같이 주기성을 나타내는 것은 Fig. 7 과 3.1절에 의하여 설명 될 수 있다. Fig. 10(a)의 경우는 초기 생성된 압력파와 후에 가하여진 압력파의 보강간섭이 잘 이루어지지 못하여 주기성이 형성되지 못 하였다.

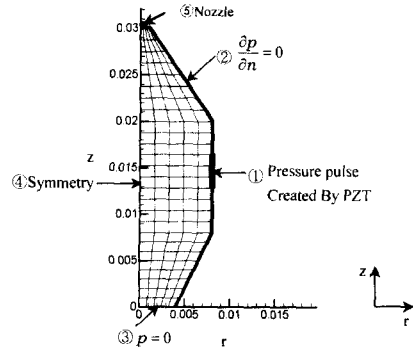


Fig. 9 Mesh of nozzle body and boundary conditions used in the analysis of pressure pulse (Unit : m)

Table 2 Parameters for numerical calculation of pressure pulse

c (wave speed)	1400 m/s
Pressure value( $P_{piezo}$ )	500,1000 Pa
Pulse frequency( $f$ )	170, 180, 190, 200 Hz
Final time	0.1 s

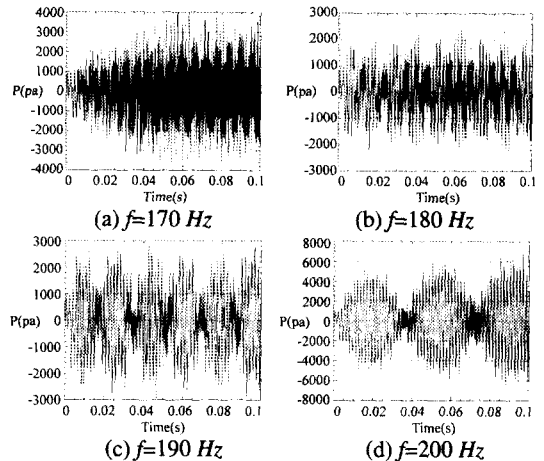


Fig. 10 The history of pressure at the nozzle  $P_{nozzle}$  ( $P_{piezo} = 500 Pa$ )

#### 4.2 Flow 3D®를 이용한 액적 생성의 해석

본 절에서는 4.1절에서 구하여진 노즐부에서의 압력의 변화( $P_{nozzle}$ )를 경계조건으로 하여 Flow 3D®를 통해 액적 생성에 대하여 해석을 하였다. Flow 3D®는 고정 격자계를 기반으로 유한차분법으로 유동장을 계산 하고, 자유 표면의 시간에 따른 위치를 구하는 방법은 VOF 방법을 기반으로 한

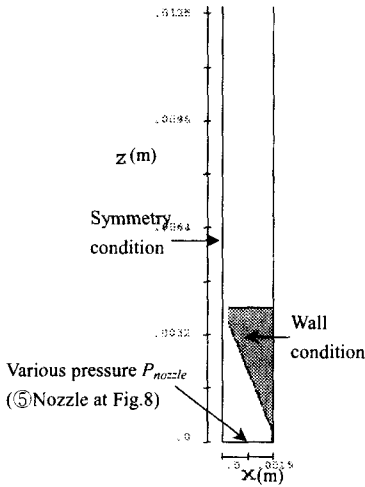


Fig. 11 Geometry and boundary conditions used in the calculation of drop formation via Flow 3D®

Table 3 Material Properties of water

밀도( $\rho$ )	998 kg/m <sup>3</sup>
점도( $\mu$ )	1.00×10 <sup>-3</sup> kg/(m·s)
표면 장력계수( $\gamma$ )	7.28×10 <sup>-2</sup> N/m

donor-acceptor 기법을 사용하여 계산을 하게 된다. 주어진 형상과 경계조건은 Fig. 11과 같다. 검은색으로 표시된 부분은 노즐 벽면을 나타내며, 아래면 ( $z=0$ )은 앞 절에서 구하여진 시간에 따른 압력 경계 조건이 주어졌다. 계산에 사용된 유체는 물이며, 사용된 물성치는 Table 3 과 같다.

Fig. 12는 해석 결과 중  $f=170, 200$  Hz 일 경우이다. 최종 계산 시간인 0.037 초 까지는 평균 7 회의 전압펄스가 압전판에 가하여지게 된다. 3.2절 및 Fig. 8에서 설명된 것과 같이, 액적의 생성이 네 단계를 통하여 이루어짐을 알 수 있다. 이의 비교를 위하여 해석을 통하여 얻어진 결과를 토대로 각 경우에 있어서 액적이 생성되는 시기를 구하였다.

Fig. 13에서 주파수가 200Hz 인 경우가 다른 주파수일 때와 비교하여 가장 많은 액적이 생성됨을 알 수 있다. 이를 Fig. 10과 비교해 보면 노즐 부분에서의 압력( $P_{nozzle}$ )이 약 2500~3000 Pa 정도에 도달한 이후에 액적이 생성됨을 알 수 있다.

### 4.3 실험과 수치해석 비교

먼저 압전판에 가하여 준 전압( $V_{piezo}$ )이 140V 인 경우 실험을 통하여 구하여진 액적의 속도와  $P_{piezo}=500Pa$  로 하였을 때 해석을 통해 구하여진 액적의 속도를 비교하면 Fig. 14와 같다. 170Hz 일 경우를 제외하고, 실험 및 해석 결과 모두 펄스의

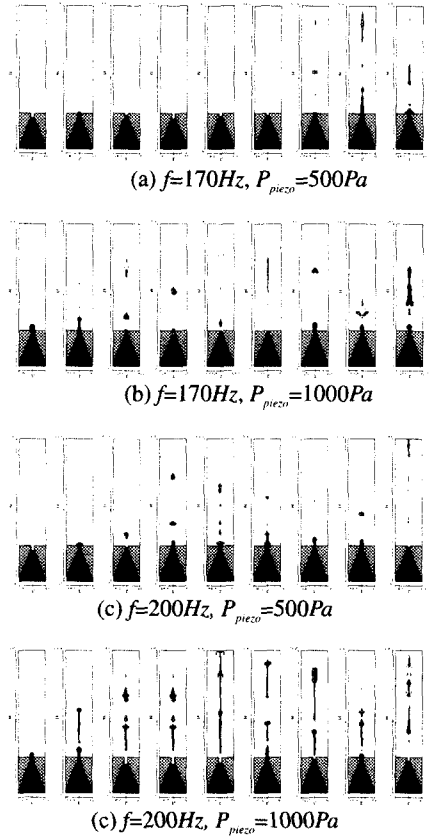


Fig. 12 Results of numerical calculation of drop formation using Flow 3D® (for every 0.004s, up to 0.036s)

주파수가 증가함에 따라 속도가 감소하는 것을 볼 수 있으나 오차가 크다는 것을 알 수 있다. 또한 속도의 최대값과 최소값의 차가 감소한다는 사실로부터 펄스의 주파수가 200Hz 인 경우에 액적 생성의 제어가 용이함을 알 수 있다.

다음으로 액적의 생성물을 비교해보면 Fig. 15와 같다. 압전판에 가하여 준 전압이 140V 인 경우의 실험 결과와  $P_{piezo}$  의 값에 따른 해석결과를 비교한 것인데, 실험 결과는 전압 펄스의 주파수와 액적 생성물이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 전압펄스의 주파수가 증가함에 따라 액적 생성물이 증가하지만 해석과 실험사이에는 오차가 있다.  $P_{piezo}$  는  $V_{piezo}$  에 따라 변화하는 값으로서 실험적으로 구하기 어렵기 때문에, 적절한 값을 가정하여 해석하였기 때문이다. 또한 액적 생성이라는 이동 경계 문제의 비선형성도 오차의 큰 원인 중에 하나라고 볼 수 있다. 그러나 본 해석의 중요한 요소인  $P_{piezo}$  의 값의 크기 및 형태를 유추하여 볼 수 있었다.

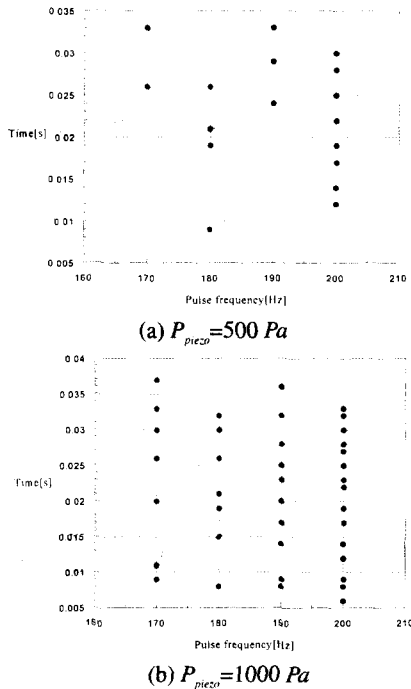


Fig. 13 The time of drop formation by calculation using Flow 3D®

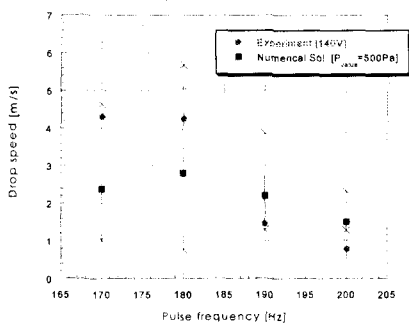


Fig. 14 Comparison of drop speed of numerical and experimental result ( $V_{piezo}=140V, P_{piezo}=500Pa$ )

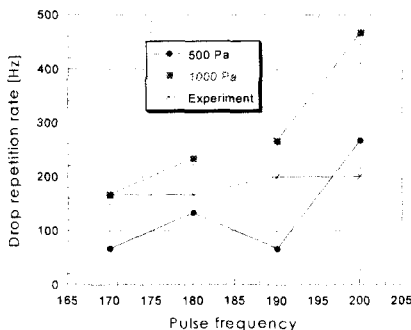


Fig. 15 Comparison of drop repetition rate of numerical and experimental result ( $V_{piezo}=140V$ )

## 5. 결론

본 연구에서는 RP 시스템에 필요한 액적 생성 장치를 DOD 액적의 개념을 바탕으로 제작하여 실험을 통해 액적 생성의 특성을 살펴보았다. 생성되는 액적은 액추에이터로 사용되는 압전판에 가하여 주는 전압의 크기와 전압 펄스의 주파수에 따라 영향을 받음을 알 수 있다. 또한 액적 생성의 주파수가 전압 펄스의 주파수와 거의 일치한다는 것을 확인했다. 이로부터 3 차원 인쇄에 적절한 액적을 얻기 위해서는 최적화된 전압과 전압펄스의 주파수가 존재함을 확인하였다. 또한 액적 생성의 과정을 압전재료에 의한 압력파의 생성과 이의 전파를 통하여 설명하고, 해석을 통하여 이를 확인하였다. 상용 소프트웨어인 Flow 3D®를 이용하여, 생성되는 액적의 모양, 주기, 그리고 속도를 압력펄스의 크기와 주파수에 따라 해석하였으며 이는 실험결과와 비교했을 때 상대적으로 오차가 있음을 확인했다.

## 후기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업과 교육부 2000년 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Kochan, D., 1993, *Solid Freeform Manufacturing*, Elsevier, pp. 15~23.
- (2) Yan, Xue and Gu, P., 1996, "A Review of Rapid Prototyping Technologies and Systems," *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 4, pp. 307~318.
- (3) Heinzl, J. and Hertz, C. H., 1985, "Ink-Jet Printing," *Advances in Electron and Electron Physics*, Vol. 65, pp. 91~171.
- (4) Elmquist, R., 1951, "Measuring instrument of the recording type," U.S. Patent 2,566,443.
- (5) Kyser, E. L. et al., 1981, "Design of an Impulse Ink Jet," *J. Appl. Photographic Engineering*, Vol. 7, pp. 73~79.
- (6) Zoltan, 1972, "Pulsed Droplet Ejecting System," U.S. Patent 3,683,212.
- (7) Bugdayci, N., Bogoy, D. B. and Talke, F. E., 1983, "Axisymmetric Motion Radially Polarized Piezoelectric Cylinder Used in Ink Jet Printing," *IBM J. Res. Dev.*, Vol. 27, pp. 171~180.
- (8) Shield, T. W., Bogoy, D. B. and Talke, F. E., 1987, "Drop Formation by DOD Ink-Jet Nozzles - A Comparison of Experiment and Numerical-Simulation," *IBM J. Res. Dev.*, Vol. 31, pp. 96~110.



- (9) Bogy, D. B. and Talke, F. E., 1984, "Experimental and Theoretical Study of Wave Propagation Phenomena in Drop-on-Demand Ink Jet Devices," *IBM J. Res. Dev.*, Vol. 28, pp. 314~321.
- (10) Beasley, J. D., 1976, "Model for Fluid Ejection and Refill in an Impulse Drive Jet," *Society of Photographic Scientists and Engineers*, Vol. 21, pp. 78~82.
- (11) Adams, R. L. and Roy, J., 1986, "A One-Dimensional Numerical Model of Drop-On-Demand Ink Jet," *J. Appl. Mech.*, Vol. 53, pp. 193~197.
- (12) Fromm, J. E., 1984, "Numerical Calculation of the Fluid Dynamics of Drop-On-Demand Jets," *IBM J. Res. Dev.*, Vol. 28, pp. 322~333.
- (13) Kinsler, L. E. and Frey, A. R., 1980, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons. Inc., pp. 98~107.
- (14) Bogy, D. B., Shield T. W. and Talke, F. E., 1986, "A Numerical Comparison of One-Dimensional Fluid Jet Model Applied to Drop-On-Demand Printing," *J. Comput. Phys.*, Vol. 67, pp. 327~347.