

3차원 잉크젯 쾌속 조형법을 위한 세라믹 상변화 잉크의 음속측정

신동윤^{1*}

Measurement of the intrinsic speed of sound in a hot melt ceramic slurry for 3D rapid prototyping with inkjet technology

Dong-Youn Shin^{1*}

요 약 3차원 쾌속 조형법은 컴퓨터에 저장되어있는 객체 데이터를 이용하여 시제품을 제작하는 기술로써, 기존의 나무나 클레이, 혹은 주조 제작방식과는 달리 원하는 위치에 요구되는 재료를 직접 적층함으로써 원형제품을 제작함을 특징으로 한다. 스테레오리소그래피, 용융 점착법, 선택적 레이저 소결법, 판상 제작법 등의 다양한 3차원 쾌속 조형법이 개발되었으나, 그 중에서 잉크젯을 통한 3차원 쾌속 조형법은 잉크화된 조형재료를 통해 구조적으로 기능이 가능한 원형제품의 제작이 가능하다는 특징이 있다. 그러나, 기능성 원형제품의 제작을 위해서는 잉크의 고농도화가 요구되며, 이로 인해 잉크 점도가 상승되어 젯팅 신뢰성이 저하되는 문제점이 있었다. 본 논문에서는 3차원 쾌속 조형법을 위한 최적 젯팅조건을 도출하기 위해 슬러리 타입 세라믹 상변화 잉크의 음파 전달속도 측정과 음파 전달속도가 젯팅에 미치는 영향을 고찰하도록 한다.

Abstract 3D rapid prototyping is the manufacturing technology to fabricate a prototype with the data stored in a computer, which differs from conventional casting technology in terms of an additive process. Various 3D rapid prototyping techniques such as stereolithography, fused deposition modeling, selective laser sintering, laminated object manufacturing have been developed but among them, 3D inkjet printing has a unique feature that materials could be jetted to directly form the body of a prototype, which could be a finished product functionally and structurally. However, this needs ink with a high solid content, which tends to increase the dynamic viscosity of ink. The increase of ink viscosity tends to restrict the jettable range of ink and hence the jetting conditions should be optimized. The intrinsic speed of sound in a hot melt ink with ceramic nanoparticles dispersed is one of key components to determine the jettable range of ink. In this paper, the way to measure the intrinsic speed of sound in a hot melt ceramic ink is proposed and its influence on the jetting condition is discussed.

Key Words : inkjet, speed of sound, ceramic nanoparticles, rapid prototyping

1. 서론

3차원 쾌속 조형법은 기존의 제작방법으로는 길게는 수 주의 제작기간이 소요되는 나무나 클레이 등을 이용한 원형제작, 혹은 주조를 통한 원형제작을 대신하여, 단기간에 개발자들이 설계중인 모델을 직접 3차원의 형태로 구체화하는 제작방식을 의미한다.

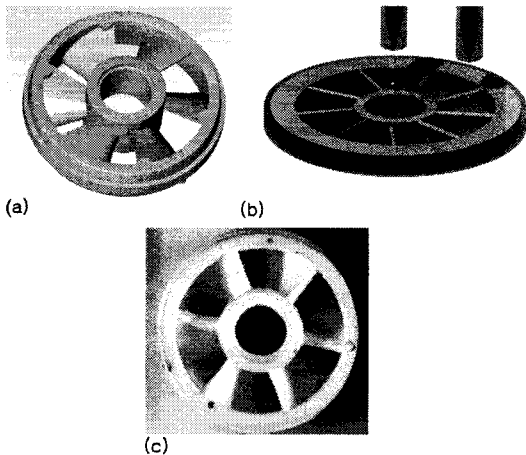
이러한 3차원 쾌속 조형법은 빛에 민감하게 반응하는 액상의 화학물질을 레이저 혹은 자외선 등에 노출시켜 고체화시키는 스테레오리소그래피(stereolithography)[1,2], 용융점 이상으로 재료를 가열하여 액화시킨 후에 원하는 부위에 점착 후 고체화되도록 유도하는 용융 점착법(fused deposition modeling, FDM) [3], 기판 상에 파우더 베드를 형성한 후 레이저로 부분적으로 가열하여 파우더

¹한국기계연구원 나노기계연구본부 선임연구원

*교신저자: 신동윤(dongyoun.shin@gmail.com)

들을 융착시키는 선택적 레이저 소결법(selective laser sintering, SLS) [4,5,6], 각 레이어별로 일정 두께의 종이 나 필름 등을 접착한 후 윤곽을 절단함으로써 3차원 원형을 제작하는 판상 제작법(laminated object manufacturing, LOM) [7,8], 잉크가 상온에서 고체일 경우, 잉크젯 프린트 헤드가 젯팅할 수 있는 점도까지 용융하여 젯팅을 한 후, 기판 위에서 고형화시키는 상변화 방식 [9], 혹은 자외선 경화형 잉크를 젯팅한 후 UV diode array 등을 통해 젯팅된 레이어를 경화시켜 3차원 형상의 원형을 제작하는 방식 [10], 혹은 파우더 베드에 바인딩 잉크를 젯팅하여 파우더를 접합함으로써 3차원 형상의 원형을 제작하는 방식 등이 있다 [11].

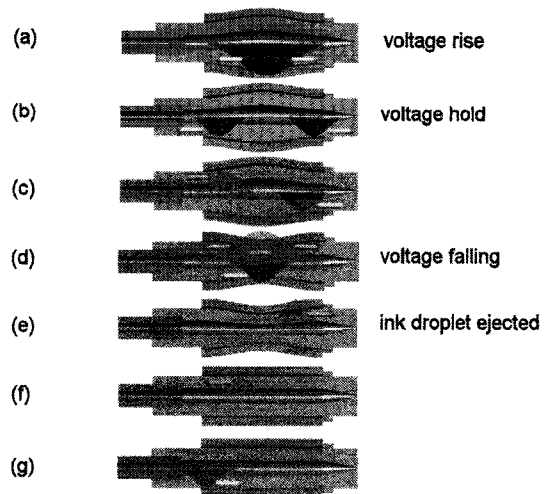
그러나, 상기의 방법들은 원형제작품의 재질이 최종 생산품과 다르기에 3차원 패속 조형법으로 생산된 제품 자체는 최종 생산품을 검증하기 위한 도구, 혹은 주조를 위한 몰드원형을 제작하기 위한 용도로 주로 사용되었다. 반면 3차원 잉크젯 프린팅을 통한 3차원 패속 조형법은 최종 생산품의 구성재질이 잉크화되어 있다면 최종 생산품을 직접 3차원 패속 조형법으로 생산할 수 있다는 특징이 있다. 특히, 그림 1과 같이, 최종 생산품이 기존의 가공방식으로는 제작이 불가능한 가공면을 가지고 있을 경우, 그리고 다품종 소량생산 제품일 경우 3차원 잉크젯 프린팅을 통한 생산이 큰 장점을 갖는다고 볼 수 있다 [13].



[그림 1] 3차원 잉크젯 프린팅을 통해 제작된 세라믹 터빈 임펠러 (a) CAD 데이터, (b) 세라믹 잉크를 잉크젯 프린터로 젯팅, (c) 최종제품 [12].

이와 같이 최종 생산품을 직접 생산하기 위해서는 잉크에 함유된 기능성 재료의 고형분 함유량을 최대한 높여야 하는데, 이 경우 잉크의 점도가 상승하는 문제점이 있다. 따라서, 젯팅이 가능한 점도 범위 내의 최대 고형분 함유량 한계치에서 젯팅을 안정적으로 수행할 수 있는 젯팅 조건을 찾아내야 하며, 이를 해석하는데 중요한 인자가 잉크의 음파전달 속도이다.

그림 2와 같이, 잉크젯 프린트 헤드 내부에서는 음파 생성과 전파, 잉크액적 형성 및 음파감쇄, 소멸이 순차적으로 발생한다. 이때, 그림 2에서 (a)와 (d) 간의 시간차는 압전소자가 잉크젯 프린트 헤드 내부 채널에 대해서 음향학적으로 대칭위치에 있을 경우, 채널 내부길이를 채널 내 음파 전달속도로 나눈 값과 대체로 일치하며, 이때 가장 효과적이며 안정적인 젯팅특성이 얻어질 수 있다.



[그림 2] 잉크젯 프린트 헤드에서의 압력과 생성, 전파, 감쇄 및 소멸 (a) 음의 압력과 생성, (b) 압력과 전파, (c) 압력과 반사, (d) 압력과 중첩, (e) 잉크액적 생성, (f) 잔여 압력과 전파 및 감쇄, (g) 잔여 압력과 반사 및 감쇄 [14].

따라서, 고형분 증가에 따라 높아진 점도의 잉크를 젯팅하기에 최적인 전압 상승과 하강시점을 찾기 위해 잉크의 음파 전달속도를 구하는 것이 중요하며, 본 논문에서는 3차원 잉크젯 프린팅을 위해 알루미늄 나노입자가 분산된 왁스 잉크의 음파 전달속도를 구하는 방법론과 음파 전달속도가 최적 구동조건에 미치는 영향에 대해 논하도록 하겠다.

2. 수식 전개

2.1 실린더형 압전소자

축대칭 실린더형 압전소자에서 축방향 스트레인을 무시할 수 있다고 가정하였을 때, 반경방향 및 원주방향 스트레스, σ_r 과 σ_θ 에 관련된 지배방정식을 식 (1)에서 (4) 와 같이 정의할 수 있다. 여기서 r_1 및 r_2 는 실린더형 압전소자의 내경 및 외경, 그리고 V 와 E 는 전압 및 전기장, $c_{11}^E, c_{13}^E, c_{33}^E$ 및 e_{31}^E, e_{33}^E 는 압전소자의 강성계수 및 상수, ρ_p 및 ν 는 압전소자의 밀도 및 반경방향 변위를 의미한다.

$$\sigma_r = c_{33}^E \frac{\partial u}{\partial r} + c_{13}^E \frac{u}{r} - e_{33}^E E_r \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = c_{13}^E \frac{\partial u}{\partial r} + c_{11}^E \frac{u}{r} - e_{31}^E E_r \quad (2)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \rho_p \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3)$$

$$E_r = -V / (r_2 - r_1) \quad (4)$$

식 (5)는 상기 식들에 대한 엄밀해이다 [15]. 여기서, C_1, C_2 는 경계조건에 의해 결정되는 미지상수이며, ω 는 각주파수, J 와 Y 는 베셀 제1 및 제2함수, 그리고 S_1 는 룬멜 함수이다.

$$u = C_1 J_{\sqrt{\beta_1}}(\sqrt{\alpha_1} \cdot r) + C_2 Y_{\sqrt{\beta_1}}(\sqrt{\alpha_1} \cdot r) - \frac{\gamma_1}{\sqrt{\alpha_1}} S_1(0, \sqrt{\beta_1}, \sqrt{\alpha_1} \cdot r) \quad (5)$$

$$\alpha_1 = \frac{\rho_p \omega^2}{c_{33}^E} \quad (6)$$

$$\beta_1 = \frac{c_{11}^E}{c_{33}^E} \quad (7)$$

$$\gamma_1 = \frac{(e_{31}^E - e_{33}^E)}{c_{33}^E} E_r \quad (8)$$

2.2 잉크유동

잉크젯 프린트 헤드 내부의 잉크유동은 음파의 생성 및 전파, 감쇄를 고려하기 위해 제한적 압축성 유체로 가

정된다. 실린더형 압전소자 내의 반경방향 압력은 축방향 압력변화에 비해 미세하므로 축방향 압력변화만 고려되었으며, 압력파의 파장이 장파장일 경우 축방향 유동의 2차 미분항은 무시될 수 있다.

상기 가정들을 통해 식 (9)와 (10)이 유도되었다. 여기서, V_r, V_z 는 잉크의 반경 및 축방향 유속이며, P 는 압력, ρ_f 와 c_f 는 잉크의 밀도 및 음파 전달속도이다.

$$\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r) + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{\rho_f c_f^2} \frac{\partial \bar{P}(z, t)}{\partial t} = \frac{i\omega}{\rho_f c_f^2} P(z) \quad (10)$$

상기 식들을 Navier-Stokes의 축방향 운동량 지배방정식과 연립하여 풀면 식 (11)이 얻어지며, 엄밀해는 식 (11)에 경계조건을 대입하여 얻는다 [16].

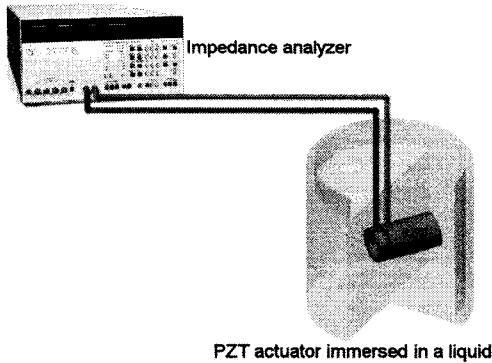
$$\begin{aligned} & \frac{-\pi}{\rho_f i \omega} \left[\eta_1^2 - \frac{2r_1 \cdot J_1 \left(\sqrt{\frac{i\omega}{\nu_f}} r_1 \right)}{\sqrt{\frac{i\omega}{\nu_f}} \cdot J_0 \left(\sqrt{\frac{i\omega}{\nu_f}} r_1 \right)} \right] \frac{\partial^2 P(z)}{\partial z^2} \\ & + \left(2\pi r_1 i \alpha k_1 + \frac{i \alpha r_1^2}{\rho_f c_f^2} \right) P(z) + 2\pi r_1 i \omega j_1 = 0 \quad (11) \end{aligned}$$

3. 실험 및 결과

3.1 측정 신뢰성 검증

그림 3과 같이, 실린더형 압전소자를 잉크에 담근 후 진동시켜 임피던스와 위상각을 측정하여 공진주파수를 찾음으로써 잉크의 고유 음파 전달속도를 측정하게 되는 데, 이때 실린더형 압전소자의 길이를 l , 내경을 r_1 이라고 할 때 유효 압전소자의 길이 l_e 는 식 (12)와 같이 수정된다 [17,18].

$$\begin{aligned} l_e &= l + \Delta l_{left_end} + \Delta l_{right_end} \\ &= l + 2 \times 0.61 \times r_1 \quad (12) \end{aligned}$$



PZT actuator immersed in a liquid

[그림 3] 임피던스와 위상각 측정을 통한 잉크의 음파 전달속도 측정법.

실린더형 압전소자의 내경, 외경 및 길이는 각각 1.07 mm, 1.5 mm, 7.41 mm이며, 재질은 PZT 5H로써, 요구되는 물성데이터는 Morgan Matroc사에서 제공된 물성표를 참조하였다 [19]. 임피던스 분석기, HP 4192A LF (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)로 압전소자에 5 V 사인파를 주파수별로 보낸 후 임피던스와 위상각을 측정하도록 하였다.

이때 급격히 임피던스와 위상각이 변화하는 주파수가 공진모드 주파수 f 가 되며, f 를 각주파수 ω 로 변환한 후 식 (11)에 대입하고, 추정 음파 전달속도를 대입하여 주어진 각주파수에서의 압력파를 계산하도록 한다. 만약 일련의 추정 음파 전달속도에서 최대 압력파를 발생시키는 값이 있다면 그 값이 잉크의 음파 전달속도가 되는 것이다.

우선 측정방법의 신뢰성 검증을 위해 상온 25°C에서 음파 전달속도가 알려진 액체들에 대해 임피던스 측정법을 통해 계산된 음파 전달속도와 비교를 하도록 하였으며, 고온에서 측정할 경우 압전소자의 물성치가 온도에 의해 변화함으로써 측정값에 영향을 주는지를 검증하기 위해 나프탈렌을 고온 100°C에 용융시켜 측정하여 비교하도록 하였다. 그 결과, 표 1과 같이, 임피던스 측정법으로 측정한 경우, 상온 25°C와 고온 100°C에서 모두 2% 내외의 측정오차를 보임을 알 수 있었다.

[표 1] 상대오차 비교

	에틸렌 글리콜 (25°C)	이소프로필 알코올 (25°C)	나프탈렌 (100°C)
문헌값	1650	1170	1250

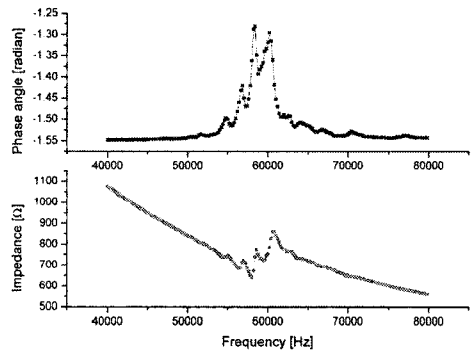
(m/s)	[20]	[20]	[21]
측정값 (m/s)	1620.1	1145	1236.8
임피던스 측정법	-1.81%	-2.14%	-1.06%

3.2 고온 슬러리의 음파 전달속도 측정

알루미나 나노입자가 왁스에 분산된 상변화 잉크에서, 알루미나 나노입자는 Sumitomo사의AES11C를 사용하였다. 사용된 AES11C의 입도분포 및 비표면적 값은 d_{10} , d_{50} 그리고 d_{90} 에서 각각 0.1 μm , 0.25 μm 그리고 1.12 μm 이며, 비표면적값은 7.5 m^2/g 이다 [22].

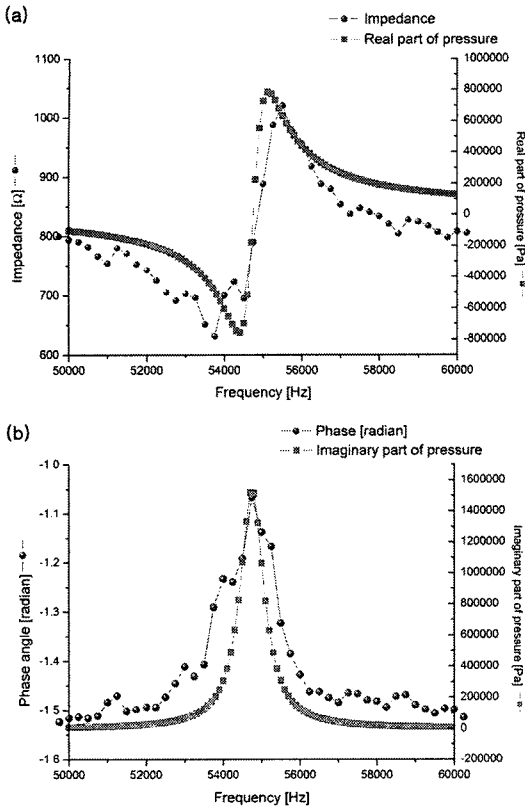
MobilWax 135 (Mobil, $M_w \approx 500$), Paraffin (Aldrich, $M_w \approx 500$), Kerosene (Fisher, $M_w \approx 150$) 혼합물에 Hypermer LP1 (Uniquma, $M_w \approx 1500$), 1-Octadecylamine (Aldrich, $M_w \approx 285$)을 이용하여 상기의 알루미나 나노입자를 분산시켰다.

Hypermer LP1과 1-Octadecylamine은 전체 잉크에서 각각 1 wt%, 0.5 wt% 만큼 첨가하였으며, 알루미나 나노입자는 0 vol%, 10 vol%, 15 vol%, 20 vol%, 25 vol%, 30 vol%, 35 vol%와 40 vol%의 부피분율로 혼입하였다 [23].



[그림 4] 100°C 20 vol% 알루미나 슬러리의 임피던스 및 위상각 측정결과.

100°C 용융온도에서 실린더형 압전소자로 20 vol% 알루미나 슬러리의 임피던스 및 위상각을 측정된 결과는 그림 4와 같다. 임피던스가 0이 되는 지점이자 위상각이 최대가 되는 지점에서 추정 음파 전달속도의 압력값이 최대인 경우가 찾고자 하는 음파 전달속도이다.



[그림 5] 100°C 40 vol% 알루미나 슬러리의 임피던스 및 위상각과 압력 계산값과의 유사성
(a) 측정 임피던스와 실수 압력 계산값,
(b) 측정 위상각 및 허수 압력 계산값.

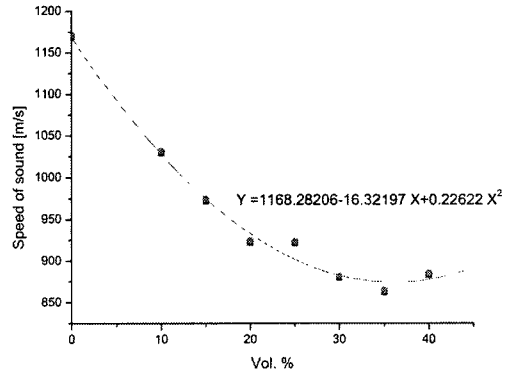
흥미로운 점은, 그림 5와 같이, 식 (11)에서 얻어진 압력의 실수값은 측정된 임피던스와, 압력의 허수값은 측정된 위상각과 유사한 형태를 취한다는 점이다.

8가지 서로 다른 부피분율의 알루미나 슬러리에서 임피던스 측정법으로 추출한 잉크의 음파 전달속도를 그림 6에 도시하였다.

일반적으로 고체의 음파 전달속도는 액체의 음파 전달속도에 비해 몇 배 높은 값을 보이며, 알루미나의 경우에도 등방성 가정하에서의 체적탄성률과 밀도가 각각 165 GPa과 3690 kg/m³일 경우, 음파 전달속도가 6687 m/s로서 일반적인 액체보다 훨씬 높은 음파 전달속도를 보인다.

이와 같이 높은 음파 전달속도를 가지는 고체 입자가 액체상에 분산되어 있을 경우 혼합물의 전체 음파 전달속도가 증가할 것으로 예상되었으나 그림 6과 같이 음파 전달속도는 알루미나 나노입자의 부피분율이 35 vol%까

지는 감소하는 현상을 보였으며, 반면 35 vol% 이상부터 증가하는 현상을 보였다.



[그림 6] 고온 100°C에서 알루미나 슬러리의 입자 부피분율에 따른 음파 전달속도 측정결과.

음파 전달속도는 측정하고자 하는 잉크의 분자레벨 조성에도 민감하게 반응을 하므로 알루미나 나노입자 농도에 따른 음파 전달속도의 감소와 증가현상은 슬러리의 화학적 조성 변화에도 일부 영향을 받았을 것이라고 추정된다.

그러나, 이와 같은 알루미나 나노입자 농도증가에 따른 음파 전달속도의 감소와 증가현상은 낮은 농도에서는 알루미나 나노입자들이 음파의 전달에 대해 감쇄 주인자로 작용을 하는 반면, 높은 농도에서는 액체에 비해 높은 음파 전달속도를 가지는 알루미나 나노입자의 고유특성이 주인자로 작용하여 전체 슬러리의 음파 전달속도가 변화하는 것으로 추정된다.

3.3 음파 전달속도 변화 따른 젯팅성 영향

3차원 잉크젯 프린터에 이용되는 잉크젯 프린트 헤드의 채널 길이를 l_c , 음파 전달속도를 c_f 라고 할 경우, 압전 소자의 위치가 음향학적으로 채널 길이에 대해 중립적 위치에 놓여있을 경우, 전압 상승과 강하 시간에 관련된 최적 구동조건은 l_c/c_f 에 비례하게 된다. 좀더 정확하게는 음파 전달속도 c_f 대신에 미세 채널내부에서의 압력 전달속도를 이용하여야 하지만, 이는 미세 채널의 치수와 재질 등에 영향을 받으므로 적용 잉크젯 프린트 헤드에 따

라 다른 값을 도출하므로, 본 논문에서는 ModelMaker 6 Pro (Sanders Design Int., Wilton, NH, USA)의 잉크젯 프린트 헤드에서 도출된 실험값을 기준으로 하였다.

최적 구동조건값은 알루미늄 부피분율이 0 vol%, 10 vol%, 20 vol%, 30 vol%, 35 vol% 그리고 45 vol %일 때 각각 $25.93 \mu s$, $29.97 \mu s$, $32.46 \mu s$, $37.47 \mu s$, $40.06 \mu s$ 그리고 $39.96 \mu s$ 이다 [22]. 이론적으로 예측된 바와 같이, 슬러리에서 알루미늄 나노입자의 부피분율이 35 vol %까지 증가할수록 음파 전달속도는 감소하게 되어, 고정된 채널 길이 하에서의 최적 구동조건값은 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 반면, 35 vol% 이상 부피분율에서는 음파 전달속도가 다시 소폭 증가하는 경향을 보이므로, 최적 구동조건값이 감소하는 모습을 보인다.

이와 같은 최적 구동조건값의 변화는 젯팅 안정성에 영향을 미치게 된다. 특히, 잉크액적의 크기와 속도에 영향을 미치게 되며, 최적 구동조건값과 실제 구동조건값간의 편차가 클 경우에는 젯팅이 불안정해지거나 실패할 수도 있다. 따라서, 항상 최적 구동조건값에 맞추어 젯팅을 수행하는 것이 고점도 알루미늄 슬러리 잉크의 젯팅 안정성을 위해 바람직하다.

4. 결론

본 논문에서는 세라믹과 같은 기능성 재료를 직접 적층할 수 있는 3차원 잉크젯 프린팅을 이용한 패속 조형법에 있어서 최적 구동조건값을 도출하기 위한 입자 분산된 잉크의 음파 전달속도를 측정하는 방법을 논의하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 슬러리 잉크에서 실린더형 압전소자를 주기진동시키면서 주파수에 따른 임피던스 및 위상값 변화를 임피던스 분석기로 측정된 후, 수식을 통해 음파 전달속도를 도출할 수 있다.
- 2) 도출된 음파 전달속도는 문헌값과 비교하여 상온 25°C에서뿐만 아니라 압전소자의 물성치가 문헌값과 편차가 있을 것으로 예상되는 고온 100°C에서도 2% 내외의 오차범위 내에서 측정할 수 있다.
- 3) 알루미늄 나노입자가 서로 다른 부피분율로 분산된 상변화 잉크의 음파 전달속도를 측정하였으며, 일정 부피분율까지는 음파 전달속도가 순수한 상변화

잉크에 비해 감소하지만 일정 부피분율 이상에서는 음파 전달속도가 증가함을 알 수 있었으며, 이와 같은 잉크 음파 전달속도의 변화는 잉크젯 프린트 헤드의 최적 구동조건값의 변화를 야기시킨다.

- 4) 고형 입자의 높은 부피분율은 일반적으로 잉크의 점도를 상승시키며, 이로 인해 젯팅이 불안정해지거나 젯팅 실패확율이 높아진다. 하지만, 측정된 음파 전달속도를 이용하여 최적 구동조건을 도출함으로써 젯팅안정성과 신뢰성을 향상시켜 안정적인 3차원 잉크젯 프린팅작업을 수행할 수 있다.

참고문헌

- [1] J.Y.H. Fuh, Y.S. Choo, A.Y.C. Nee, L. Lu, and K.C. Lee, "Improvement of the UV curing process for the laser lithography technique," Mater. Design, Vol. 16, No. 1, pp. 23-32, 1995.
- [2] S. Maruo, and K. Ikuta, "Submicron stereolithography for the production of freely movable mechanisms by using single-photon polymerization," Sensor. Actuat. A-Phys., Vol. 100, pp. 70-76, 2002.
- [3] G.M. Lous, I.A. Cornejo, T.F. McNulty, A. Safari, and S.C. Danforth, "Fabrication of Piezoelectric Ceramic/Polymer Composite Transducers Using Fused Deposition of Ceramics," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 83, No. 1, pp. 124-128, 2000.
- [4] A.K. Ibraheem, B. Derby, and P.J. Withers, "Thermal and residual Stress Modelling of the Selective Laser Sintering Process," Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 758, pp. 47-52, 2003.
- [5] 유홍진, 김동학, 장석완, 김태완, "SLS형 패속조형기를 이용한 미세구조 몰드 제작," 한국산학기술학회논문지, Vol. 5, No. 2, pp. 186-190, 2004.
- [6] 주영철, 김태완, "패속조형기를 이용한 정밀구조물의 패속제작에 관한 연구," 한국산학기술학회논문지, Vol. 3, No. 2, pp. 136-140, 2002.
- [7] D.T. Pham, and R.S. Gault, "A comparison of rapid prototyping technologies," Int. J. Mach. Tool. Manu., Vol. 38, No. 10, pp. 1257-1287, 1998.
- [8] 엄태준, 주영철, 민상현, "패속제작을 위한 적층 및 이송장치 개발," 한국산학기술학회논문지, Vol. 3, No. 2, pp. 126-130, 2002.
- [9] K. Yamaguchi, K. Sakai, T. Yamanaka, and T. Hirayama, "Generation of three-dimensional micro structure using metal jet," Precis. Eng., Vol. 24, pp.

2-8, 2000.

[10] W. Voit, K.V. Rao, and W. Zapka, "Direct-Write Process for UV-Curable Epoxy Materials by Inkjet Technology," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 758, pp. 93-99, 2003.

[11] H.J. Lee, and E. Sachs, "A visual simulation technique for 3D printing," *Adv. Eng. Softw.*, Vol. 31, pp. 97-106, 2000.

[12] C. Ainsley, N. Reis, and B. Derby, "Freeform fabrication by controlled droplet deposition of powder filled melts," *J. Mater. Sci.*, Vol. 37, pp. 3155-3161, 2002.

[13] B. Derby, and N. Reis, "Inkjet Printing of Highly Loaded Particulate Suspensions," *MRS Bull.*, Vol. 28, No. 11, pp. 815-818, 2003.

[14] D.B. Bogy, and F.E. Talke, "Experimental and Theoretical Study of Wave Propagation Phenomena in Drop-on-Demand Ink Jet Devices," *IBM J. Res. Develop.*, Vol. 28, No. 3, pp. 314-321, 1984.

[15] N. Bugdayci, D.B. Bogy, and F.E. Talke, "Axisymmetric Motion of Radially Polarized Piezoelectric Cylinders Used in Ink Jet Printing," *IBM J. Res. Develop.*, Vol. 27, No. 2, pp. 171-180, 1983.

[16] D.Y. Shin, P. Grassia, and B. Derby, "Oscillatory limited compressible fluid flow induced by the radial motion of a thick-walled piezoelectric tube," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 114, No. 3, pp. 1314-1321, 2003.

[17] A.D. Pierce, "Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications," the Acoustical Society of America, 1989.

[18] T.D. Rossing, and N.H. Fletcher, "The Physics of Musical Instruments," Springer, 1998.

[19] Properties of Piezoelectric Ceramics. Technical Publication TP-226. Morgan Matroc Inc., <http://www.morganelectroceramics.com/pdfs/tp226.pdf>

[20] B.V. Antohe, and D.B. Wallace, "The Determination of the Speed of Sound in Liquids Using Acoustic Resonance in Piezoelectric Tubes," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 10, No. 11, pp. 994-998, 1999.

[21] Pugh SJ, Lambert RF. Fluid Transients in Pipes and Tunnel: Speed of Propagation of Pressure Waves. Engineering Sciences Data Unit (ESDU) Data item 83046, 2001.

[22] N. Reis, "Solid Freeform Fabrication of ceramics by controlled droplet deposition of particulate suspensions," PhD thesis, University of Oxford, UK, 2002.

[23] N. Reis, C. Ainsley, and B. Derby, "Viscosity and Acoustic Behavior of Ceramic Suspensions Optimized for Phase-Change Ink-Jet Printing," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 88, No. 4, pp. 802-808, 2005.

신 동 윤(Dong-Youn Shin)

[정회원]



- 1997년 2월: 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1999년 12월: 맨체스터 공과대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2003년 12월: 맨체스터 공과대학교 재료과학과 (이학박사)
- 2005년 1월 ~ 2006년 2월: LG 화학기술연구원 CRD연구소 과장
- 2006년 3월 ~ 현재: 한국기계연구원 나노기계연구본부 선임연구원

<관심분야>

잉크젯, 직접 패턴법, 디스플레이 및 인쇄전자소자