

산업용 잉크젯 프린트 장치의 압전 헤드에 대한 액적분사 특성해석

*윤신용, **백수현, **김 용, **이화진, **김나영
 *(주)디지아이 기술연구소, ** 동국대학교 전기공학과

Droplet Characteristics Analysis for Piezoelectric head of Industrial Inkjet Print System

*Yoon, Shin-Yong, *Baek, Soo-Hyun, **Kim Yong, **Lee, Wha-Jin, **Kim Na-Yong
 * (Co.) DGI Technology Research Institute, **Donggu k University Technology Department of Electricity

Abstract - 본 논문에서는 FEM (Finite Element Method)을 이
 용한 압전세라믹의 특성해석을 통하여 잉크젯 프린트헤드를 설
 계, 제작하였다. 압전세라믹의 물질특성과 잉크유체 특성을 고려
 한 굽힘 모드방식의 구동원리와 이론정립을 하였다. 압전방정식
 은 압전구조에 의한 공진주파수로 압전 파라미터를 구할 수 있
 고, 실험을 통하여 이러한 측정값을 얻을 수 있었다. 제작된 압
 전세라믹 프린트헤드의 잉크드롭 실험결과를 통하여 이에 대한 특
 성을 알 수 있었다. 이때 잉크유체의 음파와 압전 공진주파수 범
 위 내에서 압전세라믹 응력(변형)의 이득을 발생시킬 수 있음을 제
 작한 128노즐의 압전세라믹 잉크젯 프린트헤드로부터 알 수
 있었다.

1. 서 론

컴퓨터에 의한 디지털 기술로 정보화 및 고도화는 더욱 빠르게
 발전하고 있으며 이에 따라 프린트기는 정보기기의 기본필수
 품이 되었다. 1995년대 이후 선진국을 중심으로 잉크젯 기술은
 산업용 응용기기로 까지 발전하기 시작하여 현재는 다양한 분야
 로 응용이 확대되고 있다. 그 동안 수작업으로 그리던 이미지를
 현재는 잉크젯 프린팅 시스템에 의해 이미지 파일이 있으면 곧
 바로 그림 출력이 가능하다. 응용분야는 옥내/외 광고시장(옥외
 간판, 현수막, 지하철광고, 인테리어 등), 디지털 섬유 텍스타일,
 LCD, 태양전지 셀, 연료전지, 3차원 모형 프린팅 시스템(RPS),
 바이오, OLED RFID, FPCB, 디바이스, 센서소자, 전자페이퍼 등
 에 다양하게 적용되고 있다.

압전특성은 재료내의 전기적인 쌍극자(electric dipole)들이 외부
 로부터의 전계나 응력에 의해 내부에 쌍극자 모우먼트를 발생시
 킴으로서 나타나게 된다. 잉크분사 헤드는 열 분사방식과 압전
 분사방식으로 분류할 수 있으며 본 연구에서 압전 분사방식을
 이용한다. 이를 위하여 본 논문에서는 압전세라믹 프린트헤드의
 물질특성, 구동원리, 압전 변형(응력)이 발생하는 과정, 잉크의
 유체압력을 고려하여 설계이론을 도출하고 유한요소법(FEM)
 의 해석에 의해 이를 해석하며 제작된 128노즐의 압전헤드 실험결
 과를 통하여 이를 확인 할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 잉크젯 프린트헤드의 구조

그림 1은 설계한 압전세라믹 잉크젯 프린트헤드의 형상을 나타
 낸 것이다. 내부는 압전재료인 PZT(티탄산지르콘산납)와 챔버인
 유리각각에 의해 잉크경로(channel)를 만들고 이를 에폭시로 접
 착한 후 일정온도로 세라믹하여 제작한다. 이후 압전에 전극부착
 과 챔버의 에폭시 접착으로 프린트헤드를 제작한다. 잉크는 왼쪽
 부분의 주 홈으로 입력되어 128개의 각 잉크채널로 공급된 후
 압전소자의 응력만큼 아래로 잉크 드롭을 형성하게 된다. 기판
 윗면에는 전극이 부착되어 있어 Signal Pin에 입력된 신호가
 ASIC을 통하여 전극에 전기를 입력한다. ASIC 주변에는 전극제
 어를 위한 패턴회로가 구성되어 있다. 펄스전압 인가에 의해 압
 전세라믹은 굽힘(Bending)동작을 발생하며 잉크압력에 의해 압
 전 노즐 밑면을 통하여 잉크드롭을 분사하는 구조이다.

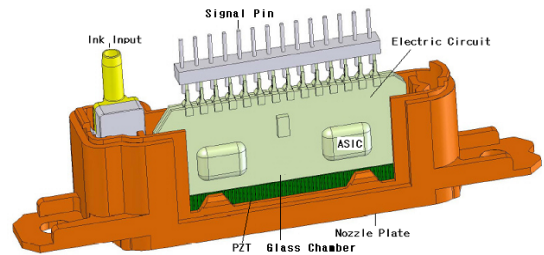
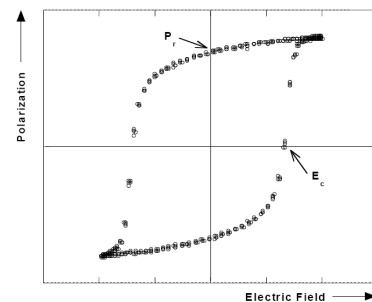


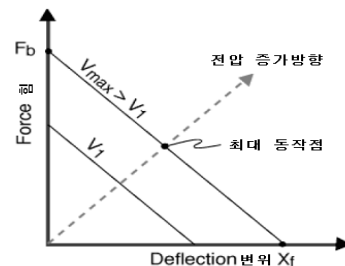
그림 1. 잉크젯 프린트헤드 구조

2.2 압전세라믹의 구동원리

그림 2(a)는 압전세라믹 프린트헤드에 전압을 인가시 전계에
 의한 분극현상을 나타낸 것으로 히스테리시스 곡선모양으로 압전
 의 전기변위가 발생하게 되며 여기서 선형구간이 전압제어 가능
 구간이다. 그림 2(b)는 전압의 가변에 의한 힘과 변위의 가변특
 성 특성을 나타낸 것이다.



(a) 전계에 의한 분극현상



(b) 전압에 의한 힘과 변위

그림 2. 전압에 의한 분극현상과 힘과 변위의 상화관계
 그림 3은 그림 1의 압전 프린트 헤드에 대한 압전 1노즐의 잉
 크 젯팅(jetting)내부 구조와 동작원리(굽힘모드)를 나타낸 것이
 다.

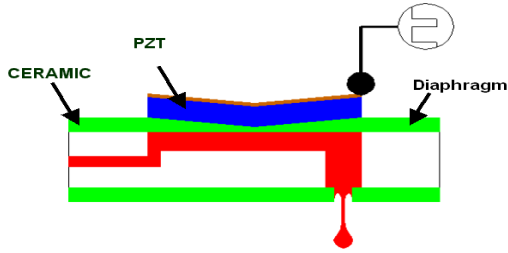


그림 3. 굽힘모드의 동작원리

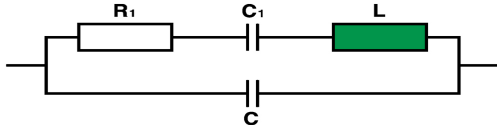


그림 4. 압전세라믹의 등가회로

그림 4는 그림 3의 압전소자에 대한 등가회로를 나타낸 것이다. 그림 5는 압전세라믹의 공진주파수에서 교류임피던스가 최소가 되며 이 범위에서 압전은 전압과 전류의 이득은 증가되어 열손실 없이 가장 큰 압전의 변형력이 발생하는 주파수범위이다. 이는 헤드의 압전길이, 두께, 형상에 결정되며, 또한 잉크의 Acoustic(음파,공진) 주파수를 고려하여야 한다.

그림 5는 압전세라믹의 공진주파수와 임피던스의 특성을 나타낸다.

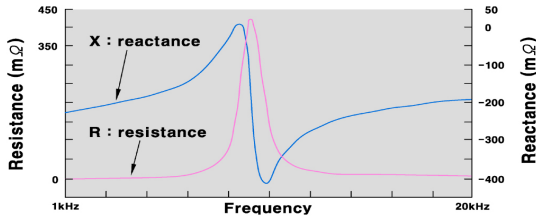


그림 5.공진주파수에 대한 임피던스

2.3 압전 방정식

전압에 의해 압전이 응력을 발생하는 관계는 다음 식으로 표현할 수 있다. 압전 동작에 대한 결과를 발생하는 관계는 선형이며 이때 계수는 상수이다.

$$D_i = d_{ij} T_j \quad (4.1)$$

$$S_j = d_{ij} E_i \quad (4.2)$$

여기서, $i = 1, 2, 3$ $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$,

D: 변위(Electric Field), T: 외력(Stress), S: 변형된 응력(Strain), E: 전계

다음은 구조방정식인 Hoke's Law이다.

압전 세라믹은 전기적인 성질이 중요하다기 때문에 전기적인 면에서 구조방정식을 고려하면 다음 식과 같다. 여기서 ϵ 는 유전율(permittivity)

$$D_i = \epsilon_{ij} E_j \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4.3)$$

탄성관계를 나타내는 식은 다음과 같다. 여기서 s : 탄성계수는 외력에 의한 흡인력을 나타낸 것이다.

$$S_i = s_{ij} T_j \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (4.4)$$

압전 재료의 전기적인 상태와 기계적인 상태를 나타내는 식은 다음과 같이 표현된다.

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (4.5)$$

$$S = s^E T + dE \quad (4.6)$$

식 4.5는 Direct Piezoelectric Effect(압전효과)를 나타내는 식이고, 식 4.6은 Converse Piezoelectric Effect(역압전효과)를 나타내는 식이다. 여기서 위 첨자로 나타낸 T와 E는 각각 Constant Stress와 Constant Field를 나타내고, D는 Dielectric Displacement를 나타내는 벡터 량이며, T와 S는 각각 Stress와 Strain을 나타내는 텐서량(tensor)이다.

여기서 압전재료는 탄성계수 s , 압전상수 d 로 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

로 나타내어지며, 유전상수는 보통 k 를 사용하여 표현되고, $K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ 의 관계를 가진다.

여기서 압전방정식의 수식계산에 의해서 다음 상수를 얻을 수 있으며 이는 제작한 크기와 공진주파수로부터 압전 파라미터를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[s] = \begin{bmatrix} 15.8 \times 10^{10} & 11.4 \times 10^{10} & 11.4 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 11.4 \times 10^{10} & 15.5 \times 10^{10} & 10.8 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 11.4 \times 10^{10} & 10.8 \times 10^{10} & 22.9 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.14 \times 10^{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.14 \times 10^{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.4 \times 10^{10} \end{bmatrix} N/m^2$$

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 77 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 77 & 0 & 0 \\ 27.5 & 27.5 & 68 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} C/m^2$$

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} 0.38 \times 10^{-8} & 0 & 0 \\ 0 & 0.38 \times 10^{-8} & 0 \\ 0 & 0 & 0.74 \times 10^{-8} \end{bmatrix} C^2/Nm^2 \quad (4.9)$$

본 논문에서 적용한 압전 세라믹 물질(PZT-5H2)에 대한 특성은 다음 표 1과 같다.

표 1 압전세라믹 특성

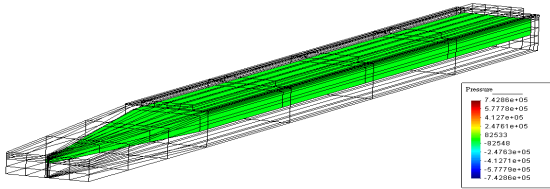
Property	Symbol	Unit	Value
Dielectric Constant (1KHz)	K_3^T		3450
Density	ρ	g/cm ³	7.87
Curie Point	T_c	°C	242
Coercive Field (Measured < 1 Hz)	E_c	kV/cm	8.8
Coupling Coefficients	k_p		
	k_{33}		0.78
	k_{31}		0.44
	k_t		0.55
	k_{15}		0.78
Piezoelectric Charge (Displacement Coefficient)	d_{31}	Coul/N x 10 ⁻¹² (or) m/V x 10 ⁻¹²	-300
	d_{33}		595
Piezoelectric Voltage Coefficient (Voltage Coefficient)	g_{33}	V·m/N x 10 ⁻³	19.9
	g_{31}		-10.2
Elastic Modulus	$\frac{Y^E}{Y^E}$	N/m ² x 10 ¹⁰	6.2
	$\frac{Y^E}{Y^E}$		5.1
Frequency Constants Radial	N_r	kHz·cm	
Resonant Thickness	N_{Tr}	KHz·cm	202
Anti-Resonant Thickness	N_{Ta}	KHz·cm	235
Stress Constants Short Circuit	S_{11}^E	x 10 ⁻¹² m ² /N	16.0
	S_{33}^E		19.8
Stress Constants Open Circuit	S_{11}^D	x 10 ⁻¹² m ² /N	13.0
	S_{33}^D		7.7
Young Constants Short Circuit	Y_{11}^E	x 10 ¹⁰ N/m ²	6.2
	Y_{33}^E		5.1
Young Constants Open Circuit	Y_{11}^D	x 10 ¹⁰ N/m ²	7.8
	Y_{33}^D		13.0

2.4 압전세라믹의 FEM 해석

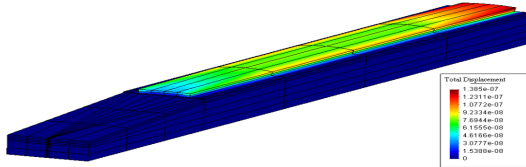
본 논문에서는 잉크젯 압전 프린트헤드의 특성해석을 위해서

유한요소법(FEM)을 사용하였으며 이러한 소프트웨어로서 ATILA를 이용하였다. 그림 3은 유한요소법(FEM)을 이용하여 압전을 해석한 구조이다. 잉크채널 사이 압전 세라믹의 전극에 전압을 인가했을 때 압전세라믹은 잉크액적을 앞 방향으로 드롭하며 변위를 발생한다.

그림 6(a)는 압전세라믹 1노즐 전극에 전압 90V를 인가한 경우 잉크채널 내의 잉크압력 10psi에서 노즐, 잉크공급 장치와 각각의 경계에서 반사하여 Acoustic(공진)하는 것에 의해 노즐에 가해지는 압력이 시간변화하고 이로부터 잉크액적이 분사되어진다. 그림 6(c)는 잉크 채널 속에 전압을 인가할 경우 압전의 변형 응력에 의해 이동변위가 상하로 움직(굴곡)여 잉크를 분사하게 된다.



(b) 잉크 채널

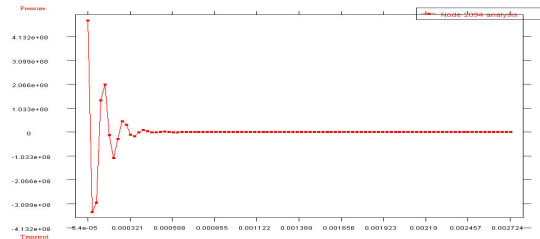


(c) 응력 변위

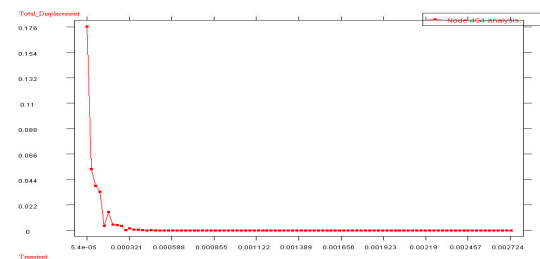
그림 6. 압전 세라믹 한 노즐의 해석구조

3. 시뮬레이션 및 실험결과

그림 7은 그림 6의 FEM의 해석결과를 나타낸 것이다.



(a) 잉크압력 특성

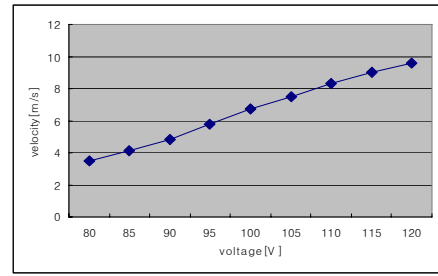


(b) 이동변위 특성

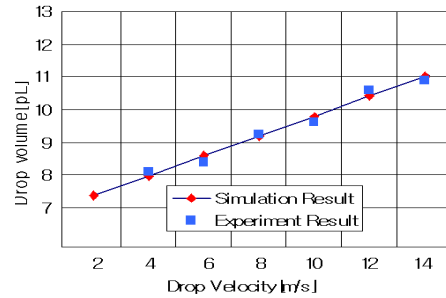
그림 7. FEM에 의한 압전 해석결과

이러한 해석을 통하여 얻은 파라미터는 다음과 같다. 노즐피치 0.667[mm], 노즐면 두께 300[μ m], 홈 길이 2[μ m], 챔버 두께 40[μ m], 챔버 깊이 160[μ m], 압전 두께 40[μ m], 압전 길이 5.6[mm], 압전 폭 412[μ m]를 얻었다.

그림 8(a)는 전압에 대한 분사속도, 그림 8(b)는 분사속도에 대한 드롭볼륨을 나타낸 것으로 그림 2에서와 같이 선형구간이야 전압제어가 가능함을 알 수 있다. 그림 8(c)는 펄스폭 대 분사속도의 관계를 나타낸 것으로 공진주파수 구간에서 분사속도가 포화됨을 알 수 있다.

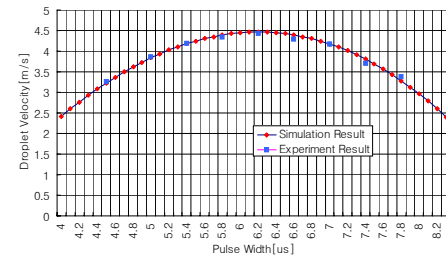


(a) 전압에 대한 분사속도



(b) 분사속도 대 액적 크기

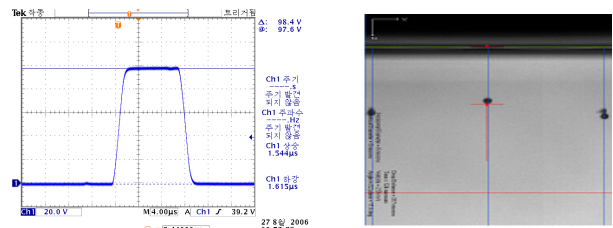
Droplet Velocity vs Pulse Width



(c) 펄스폭 대 분사속도

그림 8. 분사속도의 상호관계

그림 9는 압전 잉크젯 프린트헤드에 전압 Waveform을 가면서 잉크액적드롭의 형상을 나타낸 것으로 Satellite를 억제하였다.



(a) 전압펄스 98[V]

(b) 잉크액적 드롭

그림 9. 인가전압에 의한 잉크형상

그림 10은 전자잉크 액적분사에 의해 Polyimide 계면에 프린팅된 FPCB회로의 미세패턴을 나타낸 것이다.

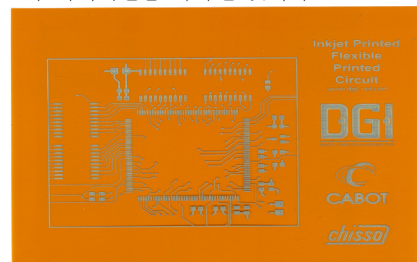


그림 10. 전자잉크 프린팅 미세패턴회로

그림 11은 압전세라믹 프린트헤드에 Impedance Analysis(HP4914) 측정기에 의한 공진주파수 특성을 나타낸 것이다.

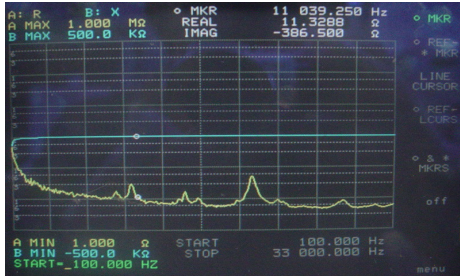


그림 11. 압전세라믹의 공진주파수

그림 12는 제작한 압전세라믹 잉크젯 프린트헤드의 구조를 나타낸 것이다.

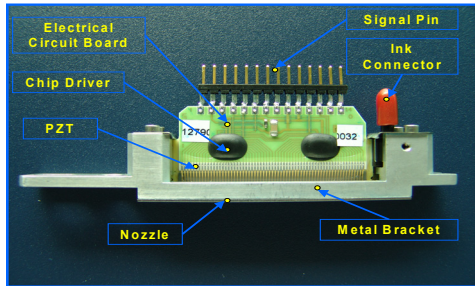


그림 12 압전세라믹 잉크젯 프린트헤드

4. 결 론

본 논문에서는 전자잉크에 의해 미세패턴회로가 가능한 FPCB 용 프린팅 시스템의 압전세라믹 헤드에 대한 액적드롭 특성을 해석하였다. 이를 위하여 잉크젯 프린트헤드에 대한 구동원리, 압전방정식에 의한 압전 파라미터 등을 유도하였으며 실험을 통하여 이를 측정하였다. 또한 FEM의 해석을 통하여 압전세라믹 프린트헤드를 설계, 해석하였으며 제작된 압전헤드의 액적드롭 실험을 통하여 이에 대한 타당성을 입증하였다. 압전헤드에 전압 펄스에 의한 잉크형성과 분사속도 등을 통하여 압전헤드의 우수한 특성을 알 수 있었다. 앞으로 제작한 잉크젯 프린트헤드에 고정밀 액적제어기법을 적용하면 LCD 및 PCB분야로 부터 다양한 분야로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 백수현, 최근수의 2명, “압전 프린트헤드의 잉크드롭 최적형성을 위한 각 노즐제어,” 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp215-217, 2006, 10, 19-21
- [2] (주)디지아이, “세라믹 소재를 이용한 디지털프린터헤드 국산 화기술개발,” 산업자원부 기술보고서, 2004.10-2006. 9
- [3] Luca Dalessandro, Daniele Rosato, “Finite Element Analysis of the Frequency Response of a Metallic Cantilever Coupled with a piezoelectric Transducer,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 54, No.5, pp1881-1889, October 2005.
- [4] Han J. M. T. A. Adriaens, Willem L. de Koning, and Reinder Banning, “Modeling Piezoelectric Actuator,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.5, No.4, pp.331-341, December 2000.
- [5] T. W. Shield, D. B. Bogy, F. E. Talke, “Drop formation by DOD Ink-jet nozzles : A comparison of experiment and numerical simulation,” pp 96-110, 1986
- [6] A. Berchtold, L. F. Feingeratebau and Getriebdelehe, “Simulation of A Drop-On-Demand Print Head with Planar Piezoelectric Transducer,” Conference of IEEE pp.52-55, 1989.
- [7] Dong Youn Shin, “Analysis of Inkjet Print Head,” Manchester Materials Science Centre, UMIST, August 2003.

본 논문은 산업자원부, ATC의 연구비로 지원된 과제입니다.