

PIM을 이용한 PZT 프리폼의 제조에 대한 연구

Fabrication Studies for PZT Preform Using PIM

신 호 용*, 김 종 호*, 장 종 수*, 임 종 인*

(Ho-Yong Shin*, Jong-Ho Kim*, Jong-Soo Jang*, Jong-In Im*)

*한국세라믹기술원 기업지원본부 시뮬레이션

(접수일자: 2009년 9월 23일; 수정일자: 2009년 10월 16일; 채택일자: 2009년 11월 5일)

본 논문에서는 분말사출성형공정 (PIM)을 이용하여 1-3형 압전복합체용 PZT 프리폼 (preform)의 제조에 대한 연구를 수행하였다. PZT 분말을 이용해 제조한 피드스탁 (feedstock)의 점도 및 PVT 특성을 측정하였다. 또한 상용 프로그램인 3D-Timon 프로그램을 이용하여 PIM 제조공정 중 사출 성형체의 충전패턴 온도, 압력분포 및 성형 결함 등을 분석하고, 규형 시스템 및 제조공정을 최적화하였다. 최적화된 PIM 제조공정 조건을 사용하여 PZT rod가 균일하게 분포된 1-3형 압전복합체용 PZT 프리폼을 제조할 수 있었다.

핵심용어: 분말사출 성형, PZT 프리폼, 1-3형 압전복합체, 피드스탁

투고분야: 음향측정 및 센서분야 (14.3)

In this paper, a fabrication process for PZT preform of 1-3 type piezo-composite were studied using powder injection molding (PIM). The viscosity and the Pressure-Volume-Temperature (PVT) characteristics of the fabricated PZT feedstock were analyzed. The filling patterns, pressure, temperature distributions, and forming defects of the preform were analyzed with 3D TIMON commercial packages during PIM process. Also the fabrication conditions and the delivery system of the preform were optimized during the entire PIM process. Based on the simulated results, the preform having uniform distributions of the PZT rod was fabricated with the PIM process.

Keywords: PIM Process, PZT Preform, 1-3 Type Composite, Feedstock

ASK subject classification: Acoustical Measurements and Sensors (14.3)

I. 서론

압전복합체는 PZT로 대표되는 압전세라믹에 비해 낮은 음향임피던스를 가지고 있어 인체 혹은 분과 음향 결합성이 우수하고, 광대역화가 가능하여 초음파를 송신 및 수신하는 초음파센서의 핵심 재료로 많이 사용되고 있다.

압전복합체는 1980년대 Newnham교수가 발표한 이후, 국내 및 국외에서 다양한 압전복합체의 설계, 제조 및 압전특성에 대한 연구가 많이 보고되어 왔다. 압전복합체는 압전소자와 폴리머의 연결방식에 따라 0-3형, 1-3형, 2-2형, 2-3형, 3-3형 등 다양한 형상으로 분류된다 [1]. 특히 1-3형 복합체는 그림 1에 나타낸 것과 같이

압전세라믹 rod와 폴리머로 구성되고, 다른 형상의 복합체에 비하여 압전특성이 우수하다고 알려져 있다. 또한 압전재료의 직경 및 부피비를 변화시켜 요구되는 압전특성을 보다 쉽게 구현하는 것이 가능하여 다양한 초음파센

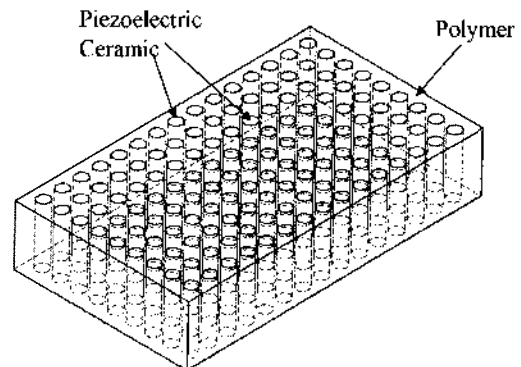


그림 1. 1-3형 압전복합체의 기본 구조.

Fig. 1. Basic structure of the 1-3 type piezoelectric composite.

서에 가장 많이 응용되고 있다 [2-4].

일반적으로 1-3형 압전복합체는 압전체를 압축 또는 압출성형으로 제조한 압전소자를 정렬을 시킨 후, 풀리머를 충전시키는 배열-충진 (arrange and fill) 기술을 이용하거나 소결된 압전체를 부분 가공하여 제조하는 가공-충진 (dice and fill) 방법을 사용하여 제조된다 [5]. 배열-충진 기술의 경우, 소형 압전소자의 제조가 힘들고, 압전소자의 수작업 배열을 통한 균일하고 우수한 특성을 지닌 압전복합체의 제조 및 대량생산이 어렵다. 또한 가공-충진 기술의 경우, 가공기술의 정도에 따라 고성능 및 초소형의 다양한 복합체 제조가 가능하지만 가공비용이 많이 소요되고, 대형 복합체 제조 및 양산이 어려운 단점이 있다.

최근 풀리머 제조에 보편적으로 사용되는 사출성형 (injection molding) 기술을 활용하여 복잡한 형상의 세라믹 또는 금속 제조에 적용하고 있는 추세이다 [6]. 분말사출성형 (Powder Injection Molding: PIM)을 이용하여 압전복합체용 PZT 프리폼을 제조하고자 할 경우, 그림 2에 나타낸 바와 같이 압전분말 및 다양한 바인더의 혼합체인 피드스탁 (feedstock)을 제조하고, 충전 (filling), 보압 (packing) 및 냉각 (cooling) 등의 사출 성형공정을 거쳐 제작하여야 한다. 특히 PIM은 고밀도의 세라믹 분말과 저밀도의 고분자 바인더 (binder)의 혼합체인 피드스탁을 사용하므로 고분자 시죽에 비해 유동성이 떨어지고, 밀도 차로 인하여 PIM공정을 제어하는데 많은 어려움이 따른다. 이로 인해 세라믹 사출체에 싱크마크 (sinkmark), 균열, 잔류응력 등의 다양한 성형 결함이 발생의 쉽다 [7]. 최근 이러한 제조공정의 어려움을 극복하기 위해 유한요

소법 (Finite Element Method: FEM)을 이용하여 PIM 제조공정을 해석하고, 금형 시스템 및 다양한 공정변수의 제어에 활용하고 있다. 이러한 PIM 시뮬레이션기법을 활용할 경우, 런너 (runner)와 게이트 (gate), 냉각장치 (cooling system) 등으로 구성된 금형 시스템의 최적화가 가능하고, 최종 사출성형체의 형상 및 발생 결함 등의 분석을 통해 사출조건을 최적화 함으로써 제품의 품질향상도, 개발 시간 단축 및 개발 비용을 절감할 수 있다. 그리고 PIM기술을 적용할 경우, 균일하고 우수한 성능을 보유한 압전복합체 제조를 위한 다양한 형상의 PZT 프리폼을 저렴한 비용으로 제조할 수 있다 [5].

본 논문에서는 PIM을 이용하여 1-3형 압전복합체를 개발하기 위한 PZT rod가 균일하게 분포된 PZT프리폼 제조에 대한 연구를 수행하고자 하였다. 이를 위하여 PZT 분말을 이용해 제조한 피드스탁의 점도 및 압력과 온도변화에 따른 부피변화 특성인 PVT (Pressure-Volume Temperature) 특성을 분석한다. 또한 유한요소법으로 PIM 제조공정 중 사출 성형체의 충전패턴 및 온도, 압력 분포 및 성형 결함 등을 분석하고, 금형 시스템 및 제조공정을 최적화하고자 하였다. 또한 최적화된 PIM 제조공정 조건을 사용하여 PZT rod가 균일하게 분포된 1-3형 압전복합체용 PZT 프리폼을 제조하고자 하였다.

II. PIM공정의 유한요소해석 이론

압전복합체용 사출 성형체의 PIM 제조공정 해석을 위

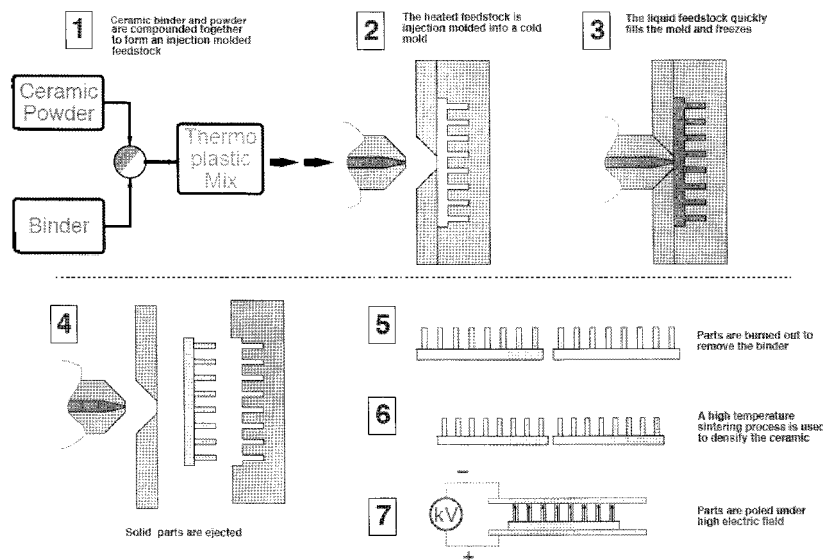


그림 2. PIM을 이용한 1-3형 압전복합체의 제조공정.
Fig. 2. Fabrication process of the 1-3 type piezo-composite with the PIM.

해서는 충전, 보압, 냉각 공정, 런너와 게이트를 포함한 금형 시스템 및 사출체의 형상 등을 함께 고려하여야 한다. 충전공정의 경우, 피드스탁의 충전시간, 충전패턴, 유동선단의 속도 및 온도 등을 해석하는 것이 필요하다. 역류가 발생하지 않도록 하는 보압공정의 경우, 균일한 수축을 위한 보압시간 및 압력을 선정하여야 한다. 또한 냉각공정의 경우, 적열 (Hot spot)이 발생하지 않고, 변형을 최소화 할 수 있도록 균일한 냉각조건에 대한 해석이 필요하다. 이와 같은 PIM 전체공정의 해석을 통해 사출 성형체 내부의 힘 및 변형을 최소화하고, 균일한 온도분포를 갖도록 할 경우, 제조하고 하는 사출 성형체를 PIM공정을 통해 제조할 수 있다.

사출 성형체의 두께 방향의 유동을 및 평면의 속도 구배를 무시할 경우, 충전공정에 대한 2차원 유동 지배방정식인 Hele-shaw유동은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. [8]

$$Q = \frac{H^3}{12\mu} \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)^2} \quad \text{Shell} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\pi \times \gamma^4}{8\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad \text{Bcam}$$

여기서 Q는 유량이며, $\frac{H^3}{12\mu}$, $\frac{\pi \times \gamma^4}{8\mu}$ 은 유동 컨덕턴스 (flow conductance)이고, H는 두께, μ 는 점도, γ 는 beam의 반경이다

또한 피드스탁의 온도는, 표면의 미소한 영향을 무시하고, 수지의 유동 중 열전달, 금형 표면의 열전도 및 전단 열을 고려하여 정의하면, 다음의 식 (2) 및 (3)과 같이 나타내어 진다.

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \mu \dot{\gamma}^2 \quad (2)$$

$$\dot{\gamma}^2 = \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

여기서 C_p 는 비열이며 μ 는 점도이고 γ 는 전단율이다. 3차원의 충전해석을 고려할 경우, 포텐셜 유동을 표시하는 유동 컨덕턴스 (C_f)는 점도 (η)와 위치에 의하여 결정되고, 유동률의 각 구성 요소는 각각의 압력기울기에 비례한다.

$$C_f = \int_0^H \frac{z}{\eta} dx \quad (4)$$

만약 x, y, z 방향의 충전율이 같아 동일한 상태가 된

다면, 금형 두께 방향의 유동방정식 표현이 가능하게 된다. 예를 들어 thin-wall 두께 (H)의 유동에 대한 식(4)의 C_f 에 대한 계산결과는 Hele-Shaw 유동과 같은 값이 된다.

보압공정의 압축성을 표현하는 지배방정식은 식 (5)와 같이 정의되고, 시간에 따른 압력변화는 온도 감소, 열수축과 폴리머의 유동 변화에 따라 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{A_2}{P + A_1} T + \frac{A_4}{P + A_3} + A_5 \exp(A_6 T - A_7 P) \quad (T < T_c)$$

$$V = \frac{B_2}{P + B_1} T + \frac{B_4}{P + B_3} \quad (T > T_c) \quad (5)$$

$$T_c = C_1 P + C_2$$

여기서 V는 비체적이며, $A_1 \sim A_7$, $B_1 \sim B_4$ 는 상수이고, T_c 는 임계온도이다.

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial P}{\partial V} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

여기서 P는 압력이며, V는 비체적, T는 온도, t는 시간이다.

수축 변형 (ϵ)은 고화 비체적 (V_c)과 대기압의 이하의 실내 온도에서의 비체적 (V_0) 사이 차이에 좌우되며 식 (7)과 같이 산출된다.

$$\epsilon = \frac{V_c - V_0}{3V_c} \quad (7)$$

PIM 시뮬레이션기법을 활용할 경우, 런너 (runner), 게이트 (gate) 및 냉각장치 (cooling system) 등으로 구성되는 사출 금형 시스템의 최적화가 가능하고, 최종 사출 성형체의 형상 및 발생 결함 등의 분석을 통해 사출조건을 최적화 함으로써 제품의 품질향상 도모, 개발 시간 단축 및 개발 비용을 절약할 수 있다.

III. 실험방법

3.1. 압전체 피드스탁 제조 및 물성측정

PIM에 사용되는 피드스탁은 제품의 물리, 화학적 특성을 결정하는 세라믹 분말과 분말에 유동성을 부여하는 바인더로 구성된다. 본 연구의 압전체 피드스탁은 PZT5 압전 분말과 폴리에틸렌 (Hanwha Chemical, Grade

722), 에틸렌 비닐아세테이트 (Hanwha Chemical, Grade 1156) 및 파라핀 등으로 구성된 마인더를 사용하였다. 이들 재료를 가열된 이중 교반기 (double planetary mixer)를 이용하여 세라미 분말과 저온에서 용융되는 마인더를 균일하게 혼합하고, 이중 스크류 압출기 (twin screw extruder)를 이용하여 가열 및 압출하여 그림 3에 나타난 형태와 같은 압전체 피드스탁을 제조하였다.

PZT 사출 성형체의 PIM 제조공정 해석을 위해서는 피드스탁의 온도에 따른 점도, 압력 및 온도에 따른 부피 (PVT data), 비열 (specific heat, C_p), 열전도도, 전이온도 (transition temperature), 유동정지 온도 (no-flow temperature), 열팽창계수 및 밀도 등 다양한 물성이 필요하다.

피드스탁의 온도에 따른 점도는 모세관점도계 (Yasuda社, 모델 No.140-SAS-2005)를 이용하여 측정 온도까지 가열시키고, ASTM 3835의 규정에 모세관 (직경: 1mm, 길이: 30mm)으로 일정한 유량을 흘러나오게 하여 측정하였다. 이 방법은 모세관 출구의 압력을 대기 압으로 하고, 수지의 압력을 측정하여 진단응력을 구하는 방식으로 후단 손실을 보정하여 측정하였다.

사출 성형체의 최종 형상 및 유동 변화율 예측하기 위하여 압력과 온도에 따른 부피 변화특성인 PVT데이터가 필요하다. PVT 측정은 수은이 포함된 셀 속에 피드스탁을 넣고, 간접적인 측정방식을 사용하는 미국 Gnomix社의 PVT측정기를 이용하여 10~200 MPa 구간의 압력 및 온도를 변화시켜 피드스탁의 부피변화를 측정하였다.

3.2. PIM공정의 유한요소해석

PZT 사출 성형체, 사출 금형의 구조 및 해석을 위한 유한요소 모델을 그림 4에 나타내었다. 그림 4 (a)에서 알 수 있듯이, 사출 성형체는 제거가 가능한 베이스 및 PZT rod로 구성되고, 금형 시스템은 피드스탁의 공급통

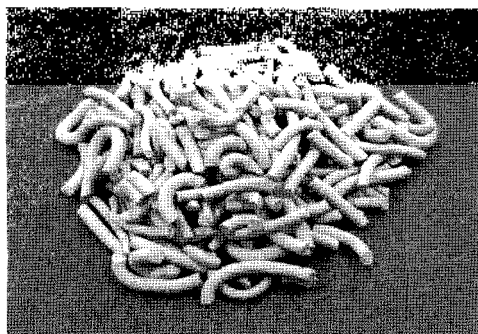


그림 3. 제조한 PZT 피드스탁의 사진.
Fig. 3. Photographs of the manufactured PZT feedstocks.

로인 게이트, 린니 및 사출 성형체의 형상인 cavity를 포함하여 구성된다. 그러므로 사출 성형체의 PIM 공정을 시뮬레이션 하기 위해서는 모든 금형 시스템을 포함하여 그림 4 (c)와 같이 모델링하였다.

본 연구에서 고려한 PZT 프리폼의 형상은 압전복합체 전체의 부피 중 압전소자의 부피분율이 30%가 되도록 고려하여 PZT rod의 직경, 높이 및 rod간 간격은 각각 1.3mm, 13mm, 0.8mm 로 선정하였다.

PZT 사출 성형체의 유한요소 모델은 Pro/Engineer S/W를 이용하여 사면체 요소 (Tetra element)로 3차원 모델을 구성하였고, 베이스의 두께가 3mm인 경우, 유한요소 모델은 약 25만개 node와 약18만개 element를 사용

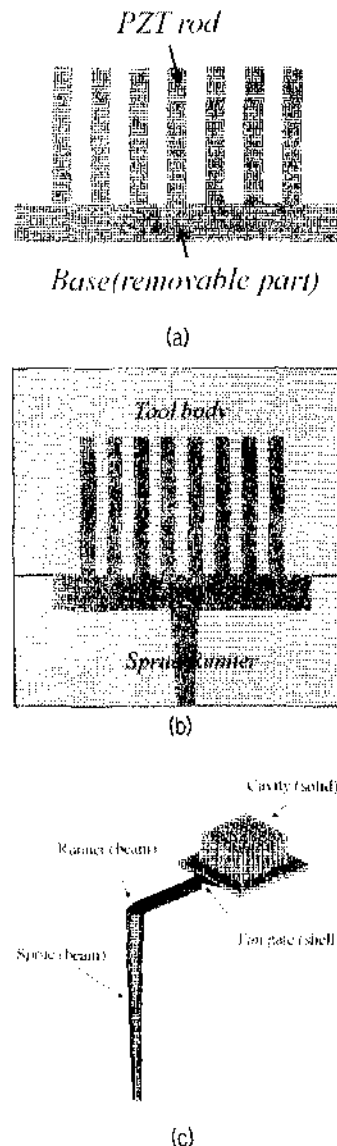


그림 4. PZT 사출 성형체의 (a) 형상 및 (b) 금형 시스템 (c) 유한요소모델.
Fig. 4. (a) configuration, (b) tool set and (c) finite element model of the PZT preform.

하였다. 또한 PIM공정의 충전, 보압, 냉각공정의 해석은 3D TIMON 프로그램 (일본, Toray사)을 이용하여 충전패턴, 온도, 압력분포 및 변형 등을 분석하였다. PIM 제조 공정 시뮬레이션은 실제 실험할 장비인 사출기 (NISSEI社, NEX-500)의 정보 및 사출 시간, 온도 및 압력 등의 경계조건을 적용하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 압전체 피드스탁의 물성

PIM 제조공정에 대한 시뮬레이션은 사출 성형체의 형상 및 금형 시스템을 고려하여 충전, 보압, 및 냉각 공정에 대한 분석을 실시하여야 한다. 충전 및 보압공정의 경우, 시간에 따른 사출성형체의 충전 패턴, 내부 압력 및 온도분포 등을 해석하는 것이 필요하다. 또한 냉각공정의 경우, 적열 (hot spot)이 발생하지 않고, 변형을 최소

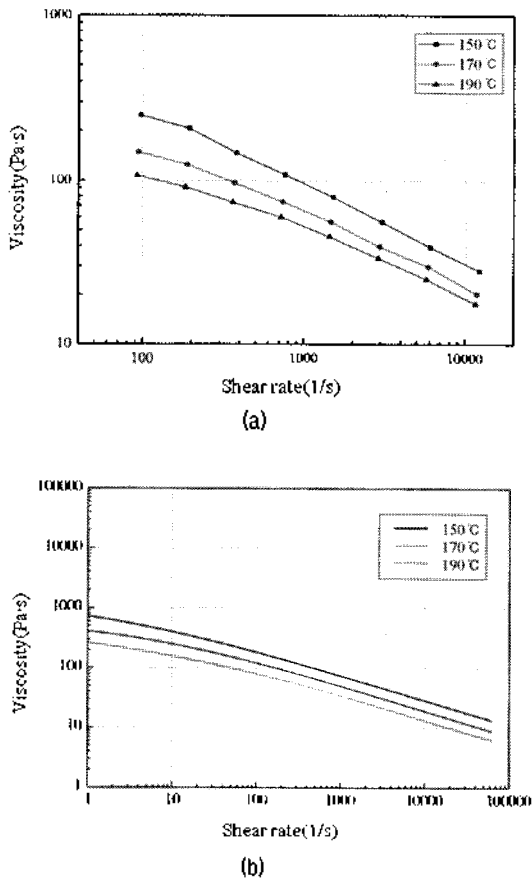


그림 5. 다양한 온도에서 전단을 변화에 따른 PZT피드스탁의 점도: (a) 측정 결과, (b) Cross-WLF 모델에 의한 curve fitting.

Fig. 5. Viscosity of the PZT feedstock with shear rate at various temperature: (a) Measured data and (b) curve fitted data with the Cross-WLF model.

화 할 수 있도록 균일한 냉각조건에 대한 해석을 실시하여야 한다. 이와 같은 PIM 제조공정을 정확하게 분석을 위해서는 피드스탁의 점도특성, PVT 특성, 전이온도 및 유동 정지 온도 등에 대한 정확한 물성이 필요하다.

본 연구에서 제조한 PZT 피드스탁의 점도특성 및 PVT 특성을 각각 그림 5와 그림 6에 나타내었다.

그림 5 (a)는 모세관 점도계를 이용하여 150°C부터 190°C까지 전단력에 따른 점도를 측정된 결과이고, 그림 5 (b)는 Cross-WLF 모델로 curve fitting한 결과이다. 그리고 그림 6은 압력에 따라, 온도를 상온부터 200°C까지 변화시키면서 피드스탁의 부피를 측정된 PVT 특성을 나타낸 결과이다.

PIM의 충전공정 해석을 위해서는 온도 및 전단율 변화에 따른 점도특성을 묘사하는 수학적 근사해가 필요하다. 일반적으로 피드스탁의 점도는 유동의 원활성을 가늠하는 유동 저항으로 정의되고, 사출성형에 많은 영향을 주는 중요한 특성이다. 미소한 전단율에서 응용된 피드스탁의 점도는 뉴턴 유체 (Newtonian fluid)이지만 전단율이 증가함에 따라 점도가 감소하는 비-뉴턴 유체 (non-newtonian fluid)가 된다. 비-뉴턴 유체인 피드스탁의 점도특성에 대한 근사해는 구하는 모델로는 1차 근사법의 3상수 모델, 2차 근사법의 6상수 모델, Cross-WLF 모델 등이 있다. Cross-WLF 모델에 의한 전단력에 따른 점도 (η)특성은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left[\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right]^{(1-n)}}$$

$$\eta_0(T, p) = D1 \exp \left[- \frac{A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right] \quad (8)$$

$$A_2 = \bar{A}_2 + D3p$$

$$T^* = D2 + D3p$$

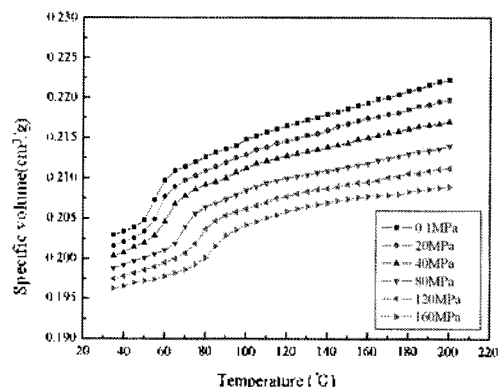


그림 6. PZT 피드스탁의 PVT 특성. Fig. 6. Measured PVT characteristics of the PZT feedstock.

여기서 η 은 전도-전단율 곡선에서 벽합수 영역의 기울기이며, γ^* 는 점도곡선이 뉴턴거동을 하는 영역에서 전단율에 의해 영향을 받는 영역으로 전이점의 응력을 나타낸다. 또한 η 는 전단율율, T 는 재료의 온도를 의미한다. 또한 D_0 은 전단율이 없는 경우의 기준 점도이고, D_2, D_3, A_1 과 A_2 는 점도의 온도 민감도와 온도 변화에 따른 민감도의 이동을 표현하며 γ^* 는 점도가 거의 무한대에 이르는 온도로서 전이온도이다 [9].

일반적인 단일 폴리머의 경우, 3상수 모델이 가장 넓은 범위의 공정조건에서 폴리머 점도를 대표하는 모델 식으로 알려져 있다. 그러나 세라믹 분말과 다양한 종류의 폴리머를 혼합한 피드스탁은 일반적인 폴리머와는 다른 점도특성을 보인다. 그림 5 (a)의 PZT 피드스탁의 점도특성을 위해 언급된 3가지 모델로 각각의 상수를 구하여 curve fitting 한 결과, PZT 피드스탁의 점도는 Cross-WLF 모델의 전도 근사식으로 잘 표현됨을 알 수 있었다. 본 연구에서는 측정된 점도특성과 가장 비슷한 그림 5 (b)에 나타난 Cross-WLF 모델을 적용하여 시뮬레이션 해석을 수행하였다.

폴리머를 비롯한 대부분의 재료는 온도가 증가하거나 감소하게 되면 팽창 혹은 수축을 하게 된다. PZT 피드스탁은 3~4가지의 바인더의 혼합으로 제조되고, 온도가 감소함에 따라 수축 현상이 아주 복잡하게 일어나 예측하기 힘들다. 그러나 PIM 제조공정 중 가해진 일과 압력에 의해 빈 cavity에 충전 될 때와 보압/냉각 중 발생하는 성형류의 수축을 고려하여야 한다. 이러한 PIM 공정 해석을 위하여 PZT 피드스탁의 PVT 특성을 측정하고, 그 결과를 그림 6에 나타내었다.

PZT 피드스탁의 PVT특성에서 알 수 있듯이, 온도가 감소함에 따라 부피는 선형적으로 감소하다가, 압력에 따라 다소 차이가 나지만, 약 50°C ~ 80°C 정도에서 부피가 급격하게 감소하는 구간이 존재한다. 이 온도구간에서 용융된 비정질의 폴리머가 결정질의 폴리머로 고화되면서 많은 체적 변화가 발생하는 것으로 판단된다. 그리고 가해지는 압력이 0.1 MPa 부터 160 MPa 까지 증가함

에 따라 부피의 변화를 시작하는 온도는 약 60°C 정도에서 90°C 정도까지 증가하고, 상대적인 부피 수축 변화량은 다소 감소하는 것으로 나타났다.

이상과 같이 분석한 피드스탁의 온도-점도특성 및 PVT 특성 등을 PZT 프리폼의 PIM 제조공정 분석 및 최적화에 활용하고자 한다.

4.2. PZT 사출 성형체의 PIM 제조공정 분석

PZT 사출 성형체의 PIM 제조공정은 충전 및 보압, 냉각공정으로 이루어 지고, 사출 성형체의 형상 및 금형 시스템을 고려하여 제조공정에 대한 분석을 실시하여야 한다. PZT 피드스탁은 일반 폴리머에 비해 높은 열전도도와 점도로 인하여 미충진 현상, 플로우마크, 웰드라인(weld-line) 및 변형 등의 결함이 발생할 가능성이 높다. 따라서 이와 같은 성형 결함을 사전에 예방하고, 금형 형상 및 사출조건 설정을 통해 진전한 사출물을 제조하기 위하여 PIM 제조공정 전반에 대한 유한요소해석을 실시하였다.

PIM 제조공정 중 발생하는 충전 패턴, 압력분포, 온도분포, 사출 결합 및 변형 등을 유한요소법을 이용해 분석하고, 그 결과를 그림 7부터 그림 11까지 나타내었다. 그림 7 및 그림 8의 결과는 시간에 따른 cavity 내부의 충전 패턴을 나타낸 것이고, 충전 종료 시점에 사출 성형체 내부의 압력 및 온도분포를 그림 9에 나타내었다. 또한 PIM 제조공정 중 cavity 내부의 온도변화율 그림 10에 나타내었다. 그리고 그림 11은 사출 성형체의 성형 결합 및 변형 정도를 분석한 결과를 나타낸 것이다.

일반적으로 충전 시간은 생산성에 영향을 주기도 하지만 사출 압력과 관련이 있다. 충전 시간이 짧을 경우, 금형에 의한 전단마찰 및 에너지 손실이 증가하게 되어 높은 사출압력을 필요로 한다. 반면 충전 시간을 길게 될 경우, 전단마찰의 감소에 의해 사출 압력도 감소한다. 그러나 필요 이상으로 사출시간이 길어질 경우, 두께 방향의 고화층이 증가하게 되어 용융된 피드스탁의 유동 동로 단면적이 감소함에 따라 사출압력도 증가하게 된다 [7].

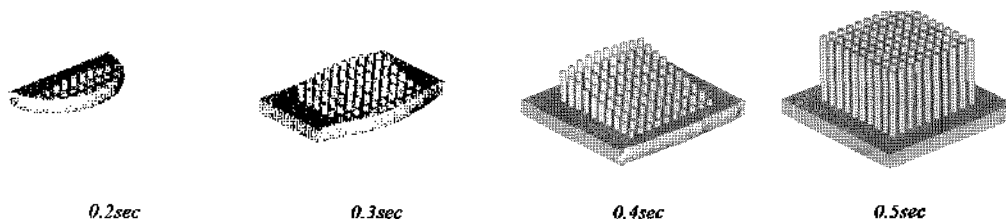


그림 7. 시간에 따른 PZT 사출 성형체의 충전 패턴 변화.
Fig. 7. Filling Pattern variations of the PZT preform with the time.

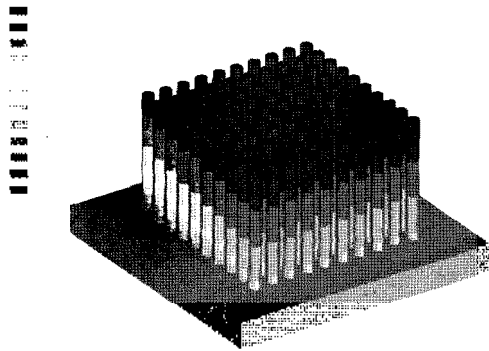


그림 8. 충전과정 동안 PZT 사출 성형체의 유동 패턴 예측
 Fig. 8. Predicted filling pattern of the PZT preform during the filling process.

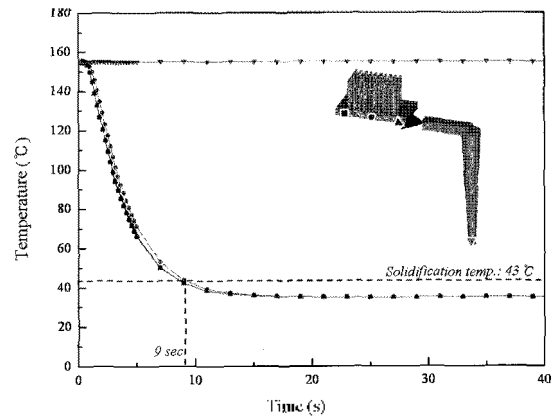
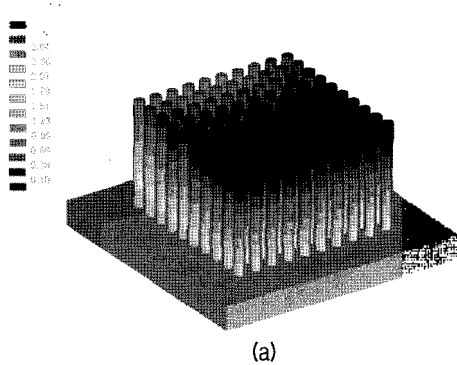
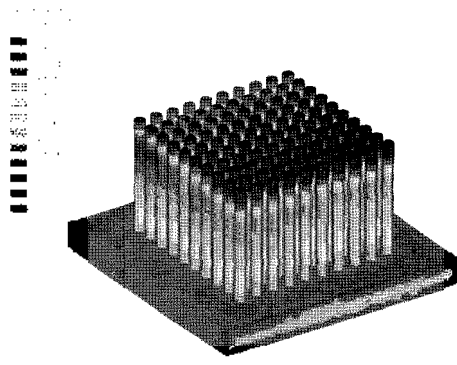


그림 10. 냉각과정 중 위치별 온도변화 예측.
 Fig. 10. Predicted temperature variations with the time at various position of the PZT preform during the cooling process.



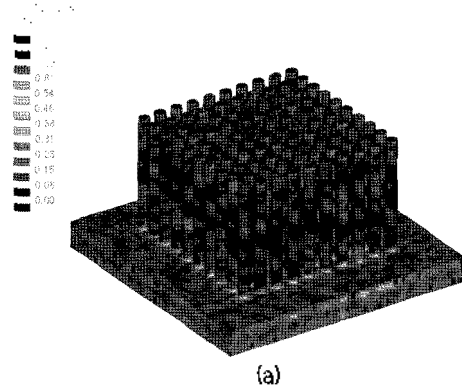
(a)



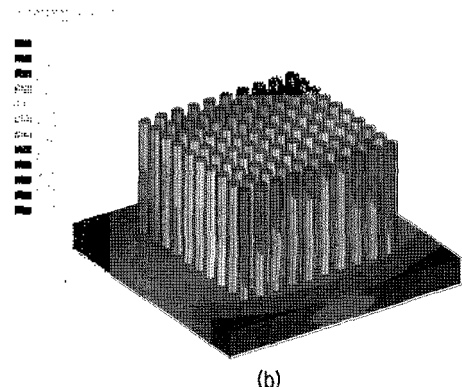
(b)

그림 9. 충전 완료 후 PZT 사출 성형체의 (a) 압력 및 (b) 온도분포 예측 결과.
 Fig. 9. Predicted (a) pressure and (b) temperature distributions of the PZT preform at the end of the filling process.

그림 7은 충전조건을 충전완료 시간은 0.5초, 충전온도는 155°C로 설정하고 해석하여 도출한 PZT 사출 성형체의 시간에 따른 충전패턴의 결과이다. 게이트와 인접한 베이스가 먼저 충전 되고, 게이트 반대 위치에 위치한 rod가 가장 늦게 충전 된다. PZT 사출 성형체의 충전은 약 0.14초부터 0.5초 사이에 모두 진행되는 것으로 나타났다. 사출 성형체의 위치 별 충전 시간을 나타낸 그림 8에



(a)



(b)

그림 11. PZT 사출 성형체의 (a) 싱크마크 결함과 (b) 변형 형상 예측.
 Fig. 11. Predicted (a) sink-mark defect and (b) deformed shape of the preform.

서 알 수 있듯이, 초기에는 다소 경사지게 rod가 충전 되지만, 약 0.25초 경과 후에는 PZT rod가 모두 균일하게 충전 되는 것으로 분석되었다. 이와 같이 균일한 충진이 이루어지게 되면, 국부적으로 유동선단의 속도 차이가 발생하지 않아 성형 결함의 발생 가능성은 아주 낮은 것으로 판단된다.

일반적으로 PIM공정에서 과도한 압력차이와 압력 집중현상은 사출성형체의 변형 및 뒤틀림을 일으키는 주요 원인이 되고, 성형 결함 등에 의한 소결체에 파손 및 변형 등 치명적인 결함을 발생시킬 수 있다. 충전 완료 후 PZT 사출 성형체 내부의 압력차 및 온도분포를 나타낸 그림 9의 결과에서 알 수 있듯이, cavity 내부의 압력 차이는 약 2.9 MPa 정도이고, 온도 차이는 약 6°C 미만의 양호한 분포를 보이고 있다.

PZT 사출 성형체의 냉각 시간을 결정하기 위하여 충전 및 보압 공정 완료 후, 냉각공정에 대한 해석을 수행하고, 규형에서부터 가장 멀리 떨어진 고온부인 베이스 위치에서 시간에 따른 온도변화를 분석하였다. 냉각과정에서 cavity의 내부 온도분포를 분석한 그림 10의 결과에서 알 수 있듯이, 위로 공급부는 155°C 정도의 고온이 유지되지만 게이트 부는 급속하게 냉각된다. 또한 사출 성형체의 베이스 온도는 시간에 따라 동일한 냉각특성을 보이고, 약 9초 정도 시간이 경과될 때 고화 온도 (solidification temperature)인 43°C에 도달하는 것으로 분석되었다.

PZT 사출 성형체의 사출성형 결함을 알아보기 위하여 air trap 위치 및 싱크 마크, 냉각 후 변형 정도를 분석하

였다. 그 결과, 사출에 의한 air trap은 PZT rod의 끝단에서 발생하는 것으로 예측되었고, 규형 제작 시, rod의 끝단부에 이를 제거할 수 있는 에어벤트 (air-vent)를 설치하게 되면 이를 방지할 수 있다고 판단된다. 또한 그림 11 (a)의 결과에서 알 수 있듯이, 국부적인 수축이 발생하는 것을 나타내는 싱크 마크는 베이스와 rod가 만나는 지점에서 발생하지만 그 정도는 무시할 수 있는 정도로 미미한 것으로 분석되었다. 또한 사출 성형체의 변형은 게이트 근처의 온도가 상대적으로 높은 베이스 및 rod에서 약 0.3~0.4 mm 정도 수축 변형되는 것으로 분석되었다. 이 정도의 변형은 사출 성형체의 변형을 일으킬 정도가 아니고, 사출조건 중 보압공정의 압력 및 유지시간의 조절로 개선할 수 있다고 판단된다.

4.3. PZT 프리폼의 제조

본 연구의 결과로 도출된 PIM 공정조건을 적용하여 제조한 PZT 사출 성형체 및 PZT 프리폼의 사진을 그림 12에 나타내었다. 또한 x-ray 비파괴검사로 측정된 PZT 프리폼 사진을 그림 13에 나타내었고, 이를 통해 분석한 성형에 및 소결체 형상을 표 1에 나타내었다.

그림 12 (a)는 PIM 공정을 이용하여 rod가 균일하게 배열되도록 제작한 PZT 사출 성형체의 사진이다. 성형된 사출성형체를 아세톤을 이용하여 24시간 동안 용매잔지를 수행하고, 100 ~ 900°C까지 열탈지를 실시하여 바인더를 제거하였다. 이후 1200°C에서 1시간 동안 유지하는 소결공정을 거쳐 PZT 프리폼을 제작하였다. 그림 12 (b)는 사출 성형체의 바인더 제거 및 치밀화 과정을 거친 후의 입전 소결체 사진이며, 사진에서와 같이 일 수축을 하게 되지만 사출 성형체 원 형상을 그대로 유지되어 압전 소결체로 제작되었다.

PZT 프리폼의 형상을 보다 정확하게 측정하기 위하여

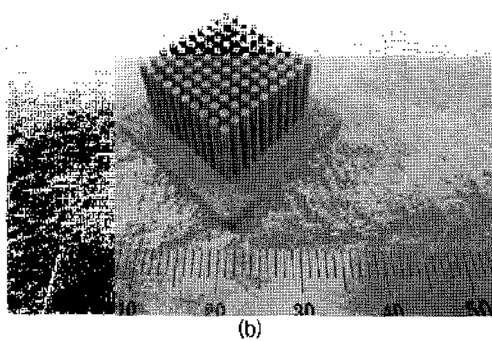
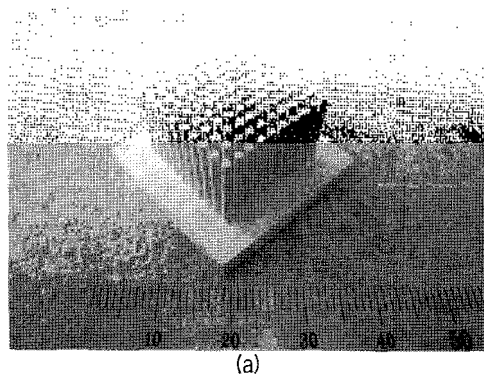


그림 12. 제조한 PZT 프리폼의 사진: (a) 사출 성형체 및 (b) 소결체.
Fig. 12. Fabricated PZT preform: (a) after the PIM and (b) after sintering.

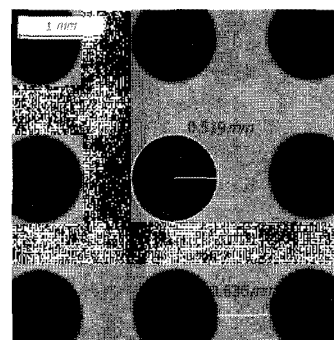
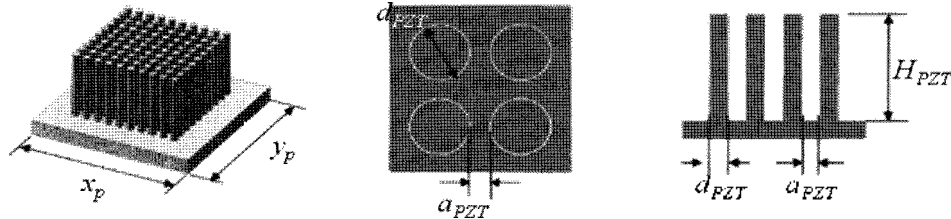


그림 13. X-ray 비파괴검사로 측정된 PZT 프리폼의 사진.
Fig. 13. Photographs of the sintered PZT preform using X-ray NDT testing.

표 1. 제조한 PZT 프리폼의 형상 측정 결과

Table 1. Geometrical measurement results of the fabricated PZT preform.

	cavity	Formed Preform with PIM	Sintered Preform
H_{PZT} (mm)	13.0	12.8	10.5
Plate size $x_p \times y_p$ (mm)	30.0×30.0	29.7×29.7	24.0×24.0
d_{PZT} (mm)	1.30	1.28	1.04
a_{PZT} (mm)	0.80	0.8	0.64



PZT 프리폼에 고분자 수지를 충전시키고, 절단하여 PZT rod의 직경 및 간격을 x-ray 비파괴 검사를 실시하였다. 그 결과, PZT rod의 반경은 약 0.52 mm 이고, rod간 간격은 약 0.64 mm 정도인 것으로 분석되었다 (그림 13 (b) 참조). 제작된 cavity, 사출성형체 및 PZT 프리폼에 대한 형상 측정 결과를 요약한 표 1에 자세하게 나타내었다. 여기에서 알 수 있듯이, 소결된 PZT 프리폼은 rod의 높이를 직경으로 나눈 값인 높이/직경 비가 약 10.1 정도 이고, rod의 직경을 간격으로 나눈 값인 직경/간격 비가 약 1.63 정도인 특성을 지니고 있다.

본 연구를 통해서 유한요소법을 활용 PIM 제조공정을 최적화 하고, 도출된 성형조건으로 균일한 rod 분포를 갖는 PZT 사출 성형체 및 PZT 프리폼을 제조하였다. 이렇게 제조된 PZT 프리폼은 rod의 높이/직경 비가 약 10.1 정도인 특성을 지니고 있다.

V. 결론

본 논문에서는 분말사출성형공정 (PIM)을 이용하여 PZT rod가 균일하게 분포된 1-3형 압전복합체용 PZT 프리폼의 제조에 대한 연구를 수행하고자 하였다. 이를 위하여 PZT 분말을 이용해 제조한 피드스탁의 점도 및 PZT 특성을 분석하였다. 또한 유한요소법으로 PIM 제조공정 중 사출 성형체의 충전패턴 및 온도, 압력분포 및 성형 결함 등을 분석하고, 금형 시스템 및 제조공정을 최적화 하였다. 또한 최적화된 PIM 제조공정 조건을 사용하여 PZT rod가 균일하게 분포된 1-3형 압전복합체용 PZT 프

리폼을 제조 하였다.

본 연구에서 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) PZT 피드스탁의 점도는 Cross-WLF 모델로 잘 표현되고, 부피는 온도가 감소함에 따라 선형적으로 감소하다가, 가해지는 압력의 크기에 따라 다소 차이는 나지만 약 50°C ~ 80°C 정도에서 부피가 급격하게 감소한다.
- (2) PZT 사출 성형체의 충전은 약 0.14초부터 0.5초 사이에 진행되며, 약 0.25초 경과 후에는 유동선단의 속도 차이 없이 PZT rod가 모두 균일하게 충전되므로 성형 결함의 발생 가능성은 아주 낮은 것으로 판단된다.
- (3) PZT 사출 성형체의 충전 완료 후, 내부의 압력 및 온도 차이는 각각 약 2.9 MPa 및 약 6°C 미만의 양호한 분포를 보이며, 냉각 시간은 약 9초 정도 소요된다.
- (4) PZT 사출 성형체의 결함인 air trap은 rod의 끝 부분에서 발생하고, 사출성형체 변형도 미미한 것으로 분석되었다.

본 연구를 통해서 유한요소법을 활용 PIM 제조공정을 최적화 하고, 균일한 rod 분포를 갖는 PZT 사출 성형체 및 PZT 프리폼을 제조하였다. 또한 PZT 프리폼의 rod의 높이/직경 비가 약 10.1 정도인 특성을 지니고 있다. 향후 제조한 PZT 프리폼으로 압전특성 및 음향특성이 향상된 1-3형 압전복합체를 개발할 예정이다.

참고 문헌

1. R. E. Newnham, D. P. Skinner, L. E. Cross, *Connectivity and piezoelectric-pyro-electric composites* Mat. Res. Bull. 13, pp. 525-536, 1978.
2. W. Huebner, M.R Reidmeyer, J.W. Stevenson, L. Busse, "Fabrication of connectivity PZT /thermoplastic composite for high frequency linear arrays," *IEEE Application of ferroelectrics, Symp.*, 7-10 pp, 206-209, 1994.
3. W. Smith, "Modeling 1-3 composite piezoelectrics: Hydrostatic response," *IEEE Trans, Ultrason, Ferroelectr, Freq. Contr.*, vol. 40, no. 1, pp. 41-49, 1993
4. W. A. Smith, "The Role of Piezocomposites in Ultrasound Transducers," *Ultrasonics Symp.*, vol. 2, pp. 755-766, 1989
5. Fiore, D, Gentilman, R, Pham, H, Serwatka, W, McGuire, P, Bowen, L. L, "Recent developments in 1-3 piezocomposite transducer fabrication" *IEEE Applications of Ferroelectrics Symp.*, vol. 1, pp. 531-534, 1996.
6. R.M. German and A. Bose, *Injection Molding of Metals and Ceramics, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ*, pp. 209-210, 1997.
7. E. Lange and N. Mueller, "PM Injection Molding Technique for Ceramic and Metal Part," *Powder Metallurgy International*, vol. 18, no. 6, pp. 416-420, 1986.
8. Mavridis, H., Hrymak, A.N. and Vlachopoulos, K., "Finite Element Simulation of Fountain Flow in Injection Molding", *Polymer Engineering and Science*, vol. 26, no. 7, pp. 449-454, 1986.
9. G. Menges and P. Thienel, Pressure - specific volume - temperature behavior of thermoplastics under normal processing conditions, *Polym, Eng, Sci*, vol. 17, no. 10, pp. 758-763, 1977.

저자 약력

•신호용 (Ho-Yong Shin)

2005년 2월 : 조선대학교 기계공학과 (공학사)
 2007년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
 2005년 3월 ~ 현재 : 한국세라믹기술원

•김종호 (Jong-Ho Kim)

2008년 2월 : 경원대학교 실내건축학과 (공학사)
 2008년 11월 ~ 현재 : 한국세라믹기술원

•장종수 (Jong Soo Jang)

2005년 8월 : 명지대학교 기계공학과 (공학사)
 2009년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
 2006년 3월 ~ 현재 : 한국세라믹기술원

•임종인 (Jong-In Im)

1986년 2월 : 한양대학교 무기재료공학 (공학사)
 1989년 2월 : KAIST 재료공학 (공학석사)
 1999년 2월 : 경북대학교 센서공학 (공학박사)
 1992년 : (O)펜싱바니아 주립대 MRL (객원연구원)
 1989년 ~ 2002년 4월 : RIST (책임연구원)
 2002년 5월 ~ 현재 : 한국세라믹기술원 (책임연구원)