

판상제품의 세라믹 사출 시 공정변수 영향 분석

김진호¹, 홍석무^{2*}, 황지훈², 이종찬³, 김낙수⁴

¹삼성전자 첨단 기술 연구소, ²삼성전자 글로벌 기술센터, ³금오공과대학교 기계공학과, ⁴서강대학교 기계공학과

Analysis of the Effect on the Process Parameters for the Thin Ceramic Plate in the Ceramic Injection Molding

Jinho Kim¹, Seokmoo Hong^{2*}, Jihoon Hwang², Jongchan Lee³ and Naksoo Kim⁴

¹Samsung electronics Co. Ltd., Advanced Technology Training Institute

²Samsung electronics Co. Ltd., Global Technology Center

³Department of Mechanical Engineering, Kumoh University

⁴Department of Mechanical Engineering, Sogang University

요약 세라믹 사출공정(CIM)은 산업 분야 전반에 걸쳐 널리 사용되고 있는 공정 중 하나로, 점차 의료용 전자기기의 부품 등으로 확대 적용되고 있다. 본 연구에서는 FEM 해석을 통해 CIM의 공정변수가 제품의 품질에 미치는 영향을 분석했다. 단순평판 형상의 해석결과를 기초로 구멍이 있는 형상, 모서리부가 둥근 형상 및 측벽 구조가 있는 형상 등과 비교 분석했다. 구멍이 있는 형상의 경우, 구멍 주변에 밀도분포가 고르지 못하며 용접선(weld-line)과 같은 결함이 발생할 수 있음을 예측할 수 있었다. 반면 제품의 모서리부 반경이 크면 성형성 및 유동성이 좋아지는 것을 확인했다. 따라서 CIM 공정변수 뿐만 아니라 제품의 형상변수도 고려해야 한다. 해석결과 온도, 초기분율, 속도 등의 공정변수는 제품의 품질 향상을 위한 중요한 설계 변수가 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

Abstract Ceramic Injection Molding (CIM) is one of wide used processes in industry field and the applications are gradually being expanded to parts of medical and electric devices. In this study, the CIM process were analyzed with FEM and process parameters were studied and analyzed the effect on product quality. The shape of simple flat plate was compared to the shapes with the hole, with the round corner portion or with the side wall portion. If there are holes then the hole around the uneven density distribution and the defects such as weld lines could be occurred. The Large radius of the corners of the product give good formability and fluidity. Not only the shape parameters of product but also the process parameters during CIM are studied. The simulation results showed that the process parameters of temperature, initial fractions and velocity are important design parameters to improve the quality of products.

Key Words : CIM(Ceramic Injection Molding), Flow stress, PIM(Powder Injection Molding), Volume fraction

1. 서론

분말사출성형(Powder Injection Molding)은 복잡한 형상과 높은 강도가 필요한 금속부품에 주로 사용되는 공정이다. 프레스, 주조, 단조, 기계가공 등 일반적인 가공방법으로 원하는 형상 및 품질 또는 균질성을 얻지 못할 때 주로 사용되며, 분말사출 후 소결을 통해 강도가

높아지게 된다[1]. 분말사출은 복잡한 형상의 정형가공이 가능하고 소결 후 제품 강도가 보장되기 때문에 다양한 제품과 형상에 응용되고 있는 추세이다. 그 중에서도 세라믹 분말을 사용하는 세라믹 사출공정(Ceramic Injection Molding)으로 성형된 제품은 경량구조 재료가면서 내열성과 내마모성이 우수하다. 특히, 심미적인 재질감으로 인해 인공관절 및 인공치아 등의 의료용 재료

*Corresponding Author : Seokmoo Hong(Samsung electronics)
Tel: +82-31-200-2437 email: seokmoo.hong@samsung.com

Received April 14, 2014

Revised May 7, 2014

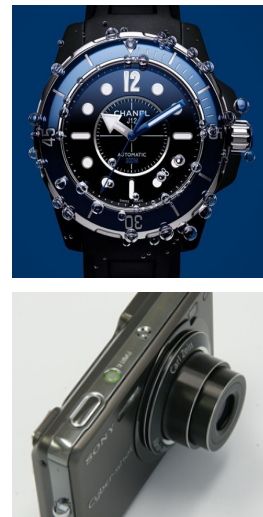
Accepted May 8, 2014

에서부터 압전제, 광학재료 및 전자제품의 케이스까지 여러 분야에 점차 확장 적용되고 있다. 하지만 CIM은 유동성을 고려한 금형의 설계, 사출공정 조건, 사출 후 탈지, 소결 시 발생하는 수축량 정밀예측 등 고려해야할 공정변수가 많기 때문에 개발과정부터 어려움이 많다. 특히 최종 제품의 치수를 정밀하게 제어하기 위해 금형 설계 시 수축량을 정확히 파악해야 하는데 분말의 종류, 성형밀도, 소결 온도에 따라 각기 다른 특성을 보이기 때문에 예측이 쉽지 않다[2].

CIM공정은 대략 150°C~200°C의 온도범위에서 금형에 세라믹 분말 및 고분자 바인더의 혼합물을 주입하여 사출하는데, 사출 시 유동방향에 따라 용접선(weld line)이나 미 충전 등 일반적인 사출결함을 동반하게 된다. 또한 높은 압력이 가해지고 세라믹 혼합재료 체적 분율과 온도 변화에 민감한 높은 점성을 가지고 있기 때문에 사출 시 주입온도, 사출압력 및 게이트의 위치와 같은 공정조건이 제품의 품질에 크게 영향을 미치게 된다. CIM의 공정설계는 일반적으로 많은 시행착오를 거쳐 확립되는데, 소결 시 굽힘 및 비틀림의 문제를 예측, 개선하는 것은 매우 어렵다. 따라서 소재의 거동과 취약 부를 예측할 수 있는 CIM 수치해석기법을 정립하는 것이 중요하다. 해석을 활용한 공정조건 최적화는 제품결함 발생을 감소시키고 생산효율을 향상시킬 수 있다. 세라믹 분말을 이용한 정형가공법은 복잡한 형상의 제품을 생산할 수 있지만, 원료로 사용되는 고 순도 세라믹 분말의 단가와 혼합물 제조가 난해하기 때문에 경제성을 고려하기 힘들다. 또한 분말야금으로 제조된 부품은 복잡한 3차원 형상을 만들기에는 기술적으로 어려움이 있다[3].

CIM 사출해석을 위해서 다양한 선행 연구가 시도되어왔다. Kwak 등은 3D-Timon 을 사용하여 분말사출성형 해석을 수행하였으며, 용접선(weld line) 결함 등을 예상했다[2,3]. Hwang 등은 유한요소해석으로 세라믹 혼합물의 거동을 모사하기 위해 변형률, 변형률 속도, 온도, 체적 분율을 포함하는 유동응력 모델을 제안하고 물성실험 및 해석을 통해 물성을 역 공학 도출했다[4]. Lee 등은 유한요소해석으로 CIM공정을 모델링하여 사출 시 압력 구배에 의해 부분적으로 상대밀도 차이가 발생할 수 있음을 보였다[5]. 본 연구에서는 실제 세라믹 사출 금형을 제작하고, 세라믹 사출 공정에서 중요한 인자로 알려진 사출 온도, 사출 속도, 초기 분율, 금형마찰 등에 대한 영향을 파악하였다. 또한 3차원 형상을 고민할 때 필요한

형상 인자 두께, 홀, 모서리 형상, 측벽의 유무 등 다양한 제품의 형상변수를 설정하고 Hwang[4]과 Kim[6] 등이 제안한 유동응력 모델을 활용하여 세라믹 사출 해석을 진행하였다. 평판 사출의 경우 각 공정변수를 독립적으로 변수 연구하여 제품품질에 영향을 미치는 영향에 따라 기여도를 평가했고, 이를 기반으로 단순평판, 구멍을 가진 형상, 둥근 모서리 부 또는 측벽 부 형상 등 제품의 관 설계 시 결함이 발생하지 않는 최적 공정변수의 범위에 대해 연구했다.



[Fig. 1] Examples by ceramic injection molding (Camera lens-ring(Sony) and bezel of watch(Chanel))

2. 유한요소해석 모델링

2.1 강 소성 유동응력 모델

세라믹 분말의 체적 분율과 점도의 영향을 포함하는 강 소성 유동응력 모델은 식 (1)과 같다[4].

$$\sigma_f = k\eta\epsilon^n \dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

여기서, σ_f 는 유동응력, k 는 강도계수, n 은 가공경화 지수, m 은 변형률 속도 민감 지수, ϵ 는 변형률 그리고 $\dot{\epsilon}$ 는 변형률 속도를 의미한다. 한편, 2상(two-phase)으로 존재하는 혼합물의 거동을 정확히 모사하기 위해 온도에 따른 점성관계식에 체적 분율을 함께 고려하기 위해서

체적 분율과 점성관계식을 식 (2)와 같이 표현했다.

$$\eta = \eta_b \left(1 - \frac{f_n}{f_{cr}} \right)^{-b} \quad (2)$$

$$\eta_b = \eta_0 \exp \left[\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (3)$$

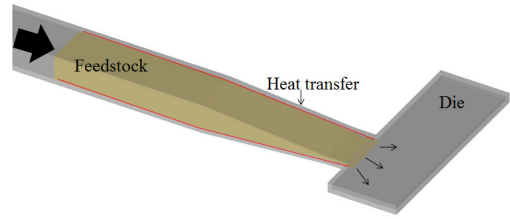
또한, 가공경화지수 n 과 변형률 속도 민감 지수 m 을 온도의 함수로 변형하여 세라믹 혼합체의 최종 모델 식은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\sigma_f = k\eta(A_0 + \bar{\epsilon})^n \frac{T}{T_0} \left(B_0 + \dot{\bar{\epsilon}} \right)^m \frac{T}{T_0} \quad (4)$$

여기서, T 는 온도, T_0 는 상온을 의미한다. η_0 는 상온에서의 점도(viscosity), Q 는 활성화에너지(active energy), R 은 이상기체상수이다. f_n 는 체적분율(volume fraction)이며 f_{cr} 는 임계체적분율(critical volume fraction)을 의미한다. 재료상수 K, A_0, B_0, n, m, b 는 다양한 속도, 온도 조건하에서 원기둥 압축시험을 수행한 후 하중-변위 곡선을 얻어 Table 1과 같이 역 공학 기법으로 도출한 값을 사용했다[4]. η_0, R, f_{cr} 그리고 T_0 는 각각 0.002, 8.31432J/K-mol, 1.0, 그리고 20℃로 입력했다. 강 소성 유동응력 모델과 체적분율 업데이트 알고리즘을 반영하기 위해, 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM3D에 서브루틴을 적용했다[7].

[Table 1] Material parameters of feedstock

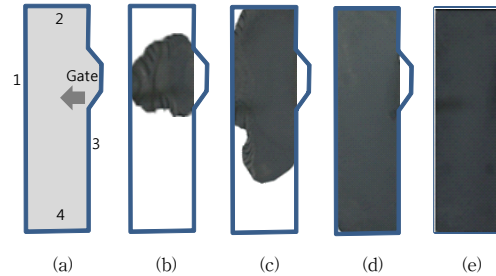
Material parameters	Value
K [MPa]	0.02642
A_0	0.0001
n	0.8836
B_0 [s ⁻¹]	0.5865
m	2.4246
b	13.344
Q [J/mol]	16125



[Fig. 2] Simple geometry used for Ceramic Injection

2.2 테스트 모델 및 사출해석조건 결정

적용한 서브루틴 검증에 위해 단순 직사각 평판 형상의 세라믹 사출해석을 수행했다. Fig. 2는 사출해석을 위한 가로 60mm, 세로 20mm의 형상 모델링이며, 금형은 소결 후 수축되는 것을 감안하여 최종제품의 두께 1.0t, 0.8t, 0.5t가 되도록 설계했다. 금형온도는 50℃로 유지하고 초기 소재의 온도는 140℃로 고정했으며 사출압력은 280MPa로 적용했다. 위와 같은 조건은 사전에 가장 좋은 품질을 갖도록 다양한 사출 해석 및 실험을 통해 결정하였다. 초기 체적 분율은 실제 사용되는 혼합 재와 동일하게 0.5로 설정했다. 사출속도는 3mm/s이고 마찰계수는 일반적으로 cold molding에서 사용하는 값을 참고하여 0.7로 적용했다[4,5].



[Fig. 3] Experimental results of the actual CIM process

3. 결과 및 고찰

3.1 실험결과와의 비교분석

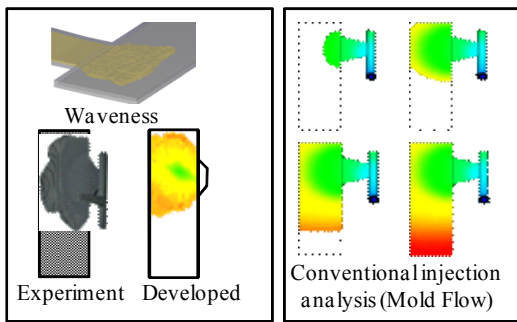
적용한 업데이트 알고리즘 서브루틴의 검증에 위해 단순 직사각 평판형상의 세라믹 사출공정 시 각 단계별로 금형을 총 17회 열어 형상을 검토하였다. Fig. 3은 사출압력에 따른 단계별 형상으로 대표적인 5회의 형상이다. 특히, 각 금형 벽면 라인에 소재가 도달하는 순간 형상을 추출했다. 그림에서 게이트의 위치는 (a)이고, 소재

가 게이트에서 흘러나온 후 접촉하는 순서대로 금형벽면을 (1)~(4)까지 표현했다. 그림 (b)~(e)는 소재가 각 벽면에 닿는 순간, 또는 닿은 후의 거동이 어떻게 진행되는지를 자세히 보여주고 있다. (1)의 벽면에 닿을 때까지 주름이 잡힌 거동이 관찰 되는데, 이는 일반 플라스틱 소재의 사출이나 금속 다이캐스팅 거동과 차이점이 있다. CIM이나 MIM의 경우, 일반 플라스틱 사출처럼 완전한 유체가 아니기 때문에 흐름성이 좋지 않을 뿐더러 금형과의 마찰로 인해 이와 같은 현상이 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 CIM공정해석 시 마찰의 영향을 고려해야 정확한 해석결과를 얻을 것으로 생각된다. 일반적인 플라스틱 사출이라면 게이트를 중심으로 방사형으로 진행되는 반면, CIM에서는 (c)와 같이 사출 도중에 겹침이나 weld line이 발생할 수 있다. (d)에서는 넓은 부분의 형상이 채워지고 게이트에서 가까운 쪽 모서리들이 채워진다. 좁은 공간의 모서리를 채우기 위해서 좀 더 많은 압력이 필요하게 되고, 이 때 이미 채워진 부분의 밀도와 최종적으로 채워지는 부분의 밀도차이가 발생할 수 있으며, 이는 소결 시 고온 고압의 환경에서 크랙(crack)이나 불균

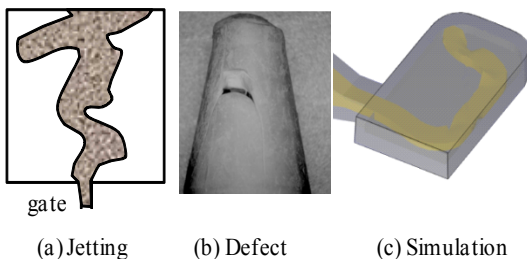
일 수축 변형을 유발하는 인자가 된다. Fig. 4(a)는 실제 사출과 해석결과를 비교한 것이다. Fig. 4(b)는 일반 플라스틱 사출 해석 시 사용되는 상용사출해석 프로그램 Mold flow의 결과인데, 본 연구의 해석기법으로는 실제 사출 시 주름이 발생하는 현상을 동일하게 모사할 수 있는 반면 사출해석 프로그램으로 주름이나 물리적 겹침 등을 표현할 수 없음을 확인할 수 있다. 일반적으로 CIM 공정에서 주름, 제팅(jetting) 등의 문제로 인해 결함 발생할 수 있는데, Fig. 5는 이러한 거동도 잘 표현되고 있음을 알 수 있다. 게이트의 중앙에 위치하면서 직경이 작은 경우나 소재의 점성이 할 때 제팅 현상이 발생되며, 제팅이 발생하면 공기 갇힘(Air pocket)이 생길 수 있다. 따라서 실제 테스트 금형설계에서도 게이트의 위치를 정중앙에 위치시키지 않도록 설계했다. 게이트의 위치 및 크기, 형상 등은 제품의 결함과 관련하여 매우 중요한 공정설계 변수가 된다.

3.2 제품 형상에 따른 영향도 분석

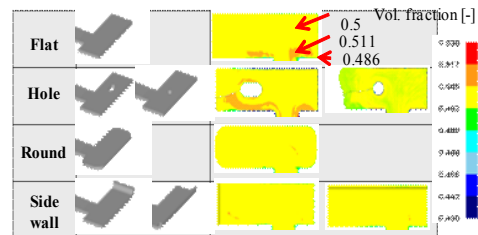
제품 형상이 사출 시 발생하는 체적분율 분포에 미치는 영향을 파악하기 위해 형상에 대한 영향 도를 분석했다. 해석에 사용된 모델 형상은 Fig. 6과 같으며, 기본 평편한 소재를 기준으로 단순형상에 내부 관통 구멍, 둥근 코너, 측벽이 있는 모델로 구성했다. 일반적으로 단순 판상형상에서는 전체적으로 체적분율 분포가 고르지만, 게이트 입구에서 다른 부분에 비해 상대적으로 불균일한 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 중간 관통 구멍이 있는 모델은 예상했던 바와 같이 게이트 및 구멍 주변과, 특히 양 갈래로 진행 후 합류하는 부분의 체적 분율이 눈에 띄게 불균일함을 볼 수 있다. 이러한 부위에서 사출 후 냉각 시 weld line이 발생하며, 취약부로 판단할 수 있다. 공정 중 생성된 air pocket이나 weld line은 성형이 완료될 때까지 유지되고, 체적 분율의 편차가 상대적으로



[Fig. 4] Validation of mold filling and comparison of injection behavior between (a) developed method and (b) conventional injection analysis

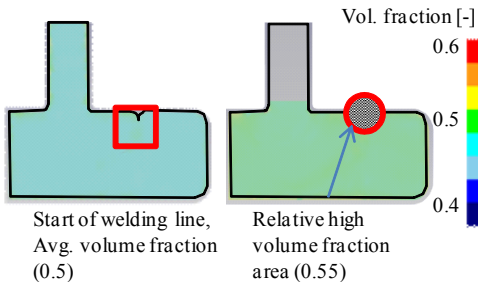


[Fig. 5] Trapped air pocket due to jetting: (a) schematic diagram (b) defect due to jetting (c) simulation result



[Fig. 6] Simulation results of different shapes geometries (volume fraction)

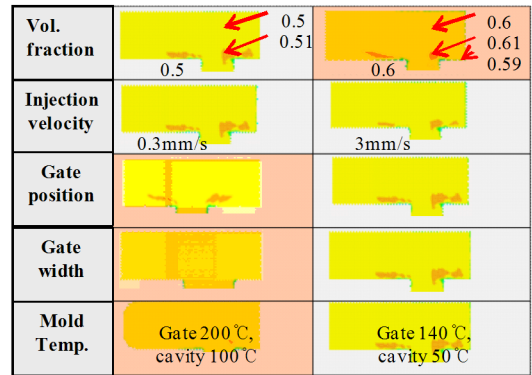
큰 영역으로 남으며 외관상으로도 불량인 제품을 유발한다[Fig. 7]. 이에 비해 둥근 모서리와, 측벽 모델은 비교적 안정적인 체적 분율과 고른 압력분포를 갖는다. 하지만 제품의 둥근 모서리의 반경이 두께에 비해 상대적으로 작을 경우, 유동성이 떨어져 사출해석이 불가능한 경우도 있었다.



[Fig. 7] Distribution of volume fraction and welding line

3.3 공정변수에 따른 영향도 분석

공정변수에 따른 영향도를 분석하기 위해 Fig. 8같이 체적분율, 사출속도, 게이트 위치, 게이트 폭 및 금형 온도 조건에 따른 해석을 수행했다. 체적 분율은 초기 분율이 높을수록 좋은 결과를 보이므로 사출 시 가능한 높은 체적 분율을 사용하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 하지만 체적 분율이 커지면 유동성 저하의 원인이 되기 때문에 체적 분율과 유동성의 상관관계를 파악하여 적절한 초기 체적 분율을 결정하는 것이 좋을 것이다. 사출속도는 0.3mm/s, 3mm/s로 설정했으나, 해석상에서는 체적 분율이 크게 변화하지 않았다. 단, 유한요소해석 프로그램 특성상 속도가 많이 빨라졌을 경우, 해의 수렴성에 문제가 발생한다. 실제 실험에서 사용한 사출속도는 앞에서 언급한 바와 같이 3mm/s이다. 일반적인 플라스틱 사출과 마찬가지로 세라믹 사출 시 최적의 게이트 위치 및 크기를 결정해야 할 필요가 있다. 게이트의 위치는 대칭이 되도록 중앙에 위치하는 것이 좋지만, 제팅 현상을 방지하기 위해 정중앙을 피해 최적 게이트 위치를 결정해야 한다. 게이트의 폭은 넓을수록 체적분율 분포가 고르게 나타났으며, 금형 온도는 기존 온도(50℃)보다 높은 경우(캐비티 100℃, 게이트 200℃) 더 좋은 결과가 나타난다.



[Fig. 8] Analysis of effects of CIM process parameters

4. 결론

본 연구에서는 세라믹 사출 시 제품성형 및 결합에 미치는 주요 인자를 파악하기 위해, CIM 해석 프로그램을 활용하여 형상과 공정변수에 대한 영향도를 분석하였다.

- (1) CIM해석 프로그램은 실제 실험과 비교했을 때 사출 중 형상에 있어서 양호한 일치치를 보이고 있다. 특히, 주름 등의 거동 확인이 가능했다.
- (2) 다양한 사출 공정 조건에 따라 해석을 수행했으며 이를 비교 분석한 결과, 온도, 초기 체적분율, 마찰 등이 중요한 공정 변수로 파악되었다. 또한 게이트의 위치, 크기 등의 결정에 따라 체적분율 분포에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 제품의 형상에 따라 품질이 좌우 되는데, 단순한 평판, 구멍을 가진 형상, 둥근 코너 부 또는 측벽 부 형상에 대한 해석을 수행하고 결과를 비교 평가하였다. 구멍이 있을 경우, 구멍 주위 밀도분포가 고르지 못하고, weld line등의 결합이 발생할 수 있으며 모서리 부분의 반경이 커질수록 성형성이 향상됨을 확인할 수 있었다.

추후 Fig. 6과 Fig. 8에서 연구한 변수들을 반영해 실제 금형을 제작하여 해석기법을 검증한다면, CIM 제품의 구조나 공정설계에 보다 효율적으로 접근하는데 기여할 것으로 생각된다.

References

- [1] German, R. M., "Powder Injection Molding", *MPIF*, Princeton, New Jersey, 1990
- [2] T. S. Kwak and W. Seo, "Simulation of ceramic powder injection molding process to clarify the change of sintering shrinkage depending on flow direction", *J. of the Korean Ceramic Society*, Vol. 46, No. 3, pp. 229-233, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4191/KCERS.2009.46.3.229>
- [3] T. S. Kwak, H. Y. Shin and J. I. Lim, "Ceramic injection molding of the watch case composed by zirconia powder", *Proc. J. Mech. Sci. & Technol.*, pp. 288-291, 2005
- [4] J. Hwang, S. Choi, S. Hong and N. Kim, "Determination of the flow stress and thermal properties of ceramic powder feedstock in ceramic injection molding", *J. Mech. Sci. & Technol.*, Vol. 27, No. 6, pp. 1815-1824, 2013
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-013-0432-0>
- [5] M.K. Lee, H. Kim, S. Hong, S. Choi and N. Kim, "Simulation of ceramic powder injection molding based on the behavior of flow stress depended on the thermal viscosity flowage property and the volume fraction", *Advanced Materials Research*, Vol. 445, pp. 368-373, 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/scientific5/AMR.445.368>
- [6] J. Y. Lee and N. Kim, "A Study on Material Characterization of Semi-solid Materials (II)-determination of Flow Stress for Semi-solid Materials Using Backward Extrusion Experiment with Model Material and Upper Bound Analysis", *J. Kor. Soc. Tech. Plast.*, Vol. 8, No. 4, pp. 374-383, 1999,
- [7] DEFORM-2D User's Manual, Version 9.0, *Scientific Forming Technologies Corporation*, USA

김 진 호 (Jinho Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 영남대학교 기계공학과 (학사)
- 2009년 2월 : 금오공과대학교 기계공학과 (석사)
- 2011년 2월 : 금오공과대학교 기계설계공학과 (박사과정 수료)
- 1993년 12월 ~ 현재 : 삼성전자 첨단기술연구소 과장

<관심분야>
금형가공, CAM

홍 석 무 (Seokmoo Hong)

[정회원]

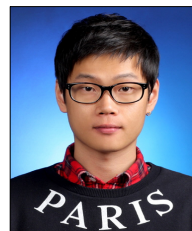


- 1999년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (학사)
- 2001년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (석사)
- 2007년 8월 : Technical University of Munich 기계공학과 (박사)
- 2007년 4월 ~ 현재 : 삼성전자 글로벌기술센터 수석 연구원

<관심분야>
금속성형, 하이드로포밍, CAE

황 지 훈 (Jihoon Hwang)

[정회원]



- 2011년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (학사)
- 2013년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 삼성전자 글로벌기술센터 연구원

<관심분야>
금속성형, 소성가공, CAE, 최적화

이 종 찬(Jongchan Lee)

[정회원]



- 1982년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (학사)
- 1986년 2월 : University of Michigan 기계공학과 (석사)
- 1991년 2월 : University of Massachusetts 기계공학과 (박사)
- 1991년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 기계설계공학과 교수

<관심분야>

정밀가공, 신재생 에너지

김 낙 수(Naksoo Kim)

[정회원]



- 1982년 2월 : 서울대학교 기계설계 (학사)
- 1984년 2월 : 서울대학교 기계설계 (석사)
- 1989년 2월 : U.C. Berkeley 기계공학과 (박사)
- 1989년 3월 ~ 1990년 2월 : The Ohio State University 연구원
- 1990년 3월 ~ 1995년 8월 : 홍익대학교 기계공학과 부교수
- 2001년 6월 ~ 현재 : 서강대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

소성가공, 공정설계 및 해석, CAE, 최적화