틱소몰딩 공정을 이용한 AZ91D Mg합금의 기계적 성질 증대

신동수*, 정성종⁺

(Manuscript received: Dec, 31, 2011 / Revised: Mar, 14, 2012 / Accepted: Mar, 15, 2012)

Improvement in Mechanical Properties of AZ91D Mg-Alloy through Thixomolding Process

Dong-Soo Shin*, Sung-Chong Chung⁺

Abstract

Thixomolding of Mg-alloy is a semi-solid injection molding process utilizing thixotropic phenomenon. Using this process, higher strength, thinner wall section and tighter tolerance without porosity are obtained. It has been applied for production of near-net-shape magnesium component. To design optimal thixomolding process of Mg-alloy part, molding conditions such as slurry temperature, mold temperature and injection time should be determined properly. Selection of these parameters has been dependent upon engineers' experience and intuitiveness. In this paper, to improve mechanical properties of the thixomolded product, optimal selection of process variables such as injection velocity, barrel temperature and die temperature in the process has been studied through microstructural analysis and Taguchi method. Performance of the process is verified through experiments.

Key Words : AZ91D, Mechanical property(기계적성질), Mg-alloy(마그네슘합금), Microstructure(미세조직), Semi-solid Injection(반응고주조), Thixotropy(틱소트로피)

1. 서론

최근 Mg 합금의 반응고 성형법의 우수성이 주목받고 있다. 반응고 주조 공정은 복잡하고 정밀성을 요구하는 제품을 제작하는데 유리하며, 특히 Mg 합금의 반응고 주조공정은 Mg 합금의 전자파 차폐, 비강도 우수성, 고담핑 특성 때문에 IT제품을 비롯하여 자동차, 항공기, 선박 등 산업 전반에 걸쳐 차세대 응용 분야로 각광 받고 있다⁽¹⁻⁴⁾.

틱소몰딩 공정은 다이캐스팅 공법에서의 액상주조와는 달리 액상과 고상이 혼재하는 슬러지(slurry) 형태로 사출이 이루어

지기 때문에 미세조직의 배열이 우수하고, 기공과 변형의 발생이 적어 강도가 우수하며, 미세성형이 가능하다^(5,6). 또한, 다이캐스팅이 705℃ 이상에서 이루어지는데 비하여 틱소몰딩 공정은 560~610℃에서 반응고 주조의 형태로 성형이 이루어지기 때문에 다이캐스팅에 비하여 미세조직이 균일하고, 금형의 수명도 우수하다⁽⁵⁻⁶⁾. 특히, 틱소몰딩 공정은 다이캐스팅 작업 시에 Mg의 급격한 산화반응으로 인한 폭발을 방지하기 위해 사용되는 SF₆ 가스(지구 온난화의 주범)를 사용하지 않고 배럴 내에서 반응고 상태로 사출되는 친환경 청정 공정이다.

그리고, 정밀주조 공정에서 다이캐스팅의 수율은 40%정도

* 한양대학교 산업과학연구소

+ 교신저자, 한양대학교 기계공학부 (schung@hanyang.ac.kr)

주소: 133-791 서울시 성동구 행당동 17

이나, 텍소몰딩의 수율은 80%를 상회한다⁽⁷⁾. 그러나, 텍소몰딩 공정에서는 액상과 고상의 공존 상태 제어가 어렵기 때문에 주조품의 기능적 요구에 따른 공정제어 변수 최적화가 절실히 요구된다⁽⁸⁻⁹⁾. Czerwinski 등⁽⁵⁾은 AZ91D 합금의 반응고 주조공정을 통해 주조된 미세조직 초기 고상의 크기에 따른 기계적 특성에 대해 연구하였고, Zhang 등⁽⁸⁾은 공정변수의 변화가 AZ91D합금의 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 국내에서도 AZ91D의 반응고 주조공정에서 평면도 중대를 위한 공정변수의 최적설계⁽⁷⁾와 게이트시스템의 강건설계⁽⁹⁾에 대한 연구가 있었으나, 이들의 연구는 CAE 소프트웨어를 이용한 텍소몰딩 공정변수의 최적선택과 용탕 주입부의 형상 최적설계에 대한 연구였다.

본 논문에서는 다이캐스팅에 비해 미려하고 미세한 주조가 가능하며 제품의 기계적 특성이 우수한 텍소몰딩 공정에 대한 실험적 연구를 진행한다. 주조 공정에서 사출속도, 배럴온도, 금형온도는 제품의 특성을 결정하는 중요변수이다⁽⁵⁻⁹⁾. 부적절한 공정 조건을 적용하면 사출 시 난류유동 때문에 기공이 생성되며, 불균일한 냉각으로 인한 제품의 변형과 고상 비율의 차이에 따른 기계적 특성에 변화가 야기된다⁽⁵⁻⁹⁾. 그러므로, 응용분야에 적합한 우수한 공정 조건 조합을 얻기 위해 실험계획법⁽⁷⁻⁹⁾을 적용하고, 휴대폰 배터리케이스를 시험제작하여 인장강도, 경도, 연신율로 대표되는 기계적 특성을 평가하고 공정변수의 최적화를 수행한다.

2. 텍소몰딩 공정

고압 다이캐스팅과 플라스틱 사출성형법을 접목한 반응고 주조법은 사출기 호퍼에 투입되는 가늘게 절단된 칩을 가열하여 액상선과 고상선 사이의 고체 액체 공존 영역에서 온도를 유지하면서 고상입자와 액상의 혼합슬러리를 만들고, 소정의 고상률에 도달한 시점에서 이를 고압으로 금형 내에 압입 성형 응고하여 제품을 성형하는 주조공정이다. 특히 고체상태에서 가열하여 고체 액체 공존 상태를 만들고 액상 중에 입자상의 초정 Mg를 분산시킴으로써 발현하는 텍스트로피성을 이용한 주조법을 텍소몰딩이라 한다^(5,7-9).

텍소몰딩 공정을 이용하면 응고 조직의 균일화와 내부 결함의 감소에 의해 안정된 품질의 주조 제품을 얻을 수 있으며, 주로 사용되는 마그네슘 합금에는 AZ91D, AM50, AM60 등이 있다. 본 연구에서는 Table 1과 같은 화학적 조성과 Fig. 1과

Table 1 The Chemical composition of AZ91D Mg alloy

Elements	Al	Zn	Mn	Fe and Ni	Mg
Composition (%)	8.5	0.75	0.3	below 0.001	Balance

같은 상태도를 갖는 AZ91D합금을 이용하여 JSW 사의 텍소몰딩기계(Fig. 2 참조)에서 휴대폰 배터리케이스를 제작하는 반응고 주조공정에서 공정제어 변수가 기계적 성질의 변화에 미치는 영향을 연구한다.

3. 실험계획법

실험계획법(Design of Experiments; DOE)은 통계적 방법에 기초하여 실험을 계획, 분석하여 최소의 실험횟수로 최대의 정보를 얻도록 계획한다. 본 연구에서는 기존의 CAE를 활용한 연구에서 사용한 직교배열표를 이용한 다구찌 실험계획법을 응용한다^(7,9).

Fig. 1 Phase diagram of Mg alloy AZ91D

Fig. 2 Thixomolding machine (JSW, JLM220-MG)

3.1 다구찌 기법

다구찌 방법은 산포의 크기를 신호 대 잡음비(Signal to noise ratio; SN 비)로 변환하여 산포를 작게 하는 인자를 찾아가는 파라미터의 설계에 이용된다. 잡음은 제품 특성치의 변화를 초래하여 결과에 대한 신뢰성을 떨어뜨린다. 이 때 신호의 힘을 증가시켜 시스템이 안정화 되도록 도입하는 것이 SN비이며, 특성치에 따라 망목, 망소, 망대 특성으로 나누어진다. 본 연구에서는 배터리케이스 제작 시 요구되는 인장강도와 경도를 최대화하기 위해 식 (1)로 표현되는 망대특성의 SN비를 활용한다.

$$SN = -10 \log \left[\frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (1)$$

여기서 n_s 는 특성치 측정 횟수, y_i 는 i 번째 특성치 이다. 그리고, A 인자의 수준별 SN비 평균은 식 (2)와 같다.

$$M_{A_i} = \frac{1}{n_A} \sum_{j=1}^{n_A} [(SN)_{A_i}]_j \quad (2)$$

여기서 M_{A_i} 는 A 인자가 i 수준인 경우 SN비 평균이고, n_A 는 직교배열표 상에서 A 인자의 해당 수준 출현 수이다. 이 평균 SN비를 이용하면 해당 인자의 각 수준 중에서 오차에 가장 강한 최적조건을 판별할 수 있다.

3.2 분산분석

분산분석(analysis of variance; ANOVA)은 설계인자들의 최적조건을 선정하여 공정설계에 응용하기 위해 식 (1)로부터 얻어진 SN비를 이용하는 통계적 분석법이다. 특성치의 산포를 제곱합으로 나타내고, 이 제곱합을 실험과 관련된 인자들의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다^(7,9-10). 각 요인의 제곱합을 그 요인의 자유도로 나누면 그의 제곱평균이 얻어지며, 오차의 분산과 비교할 수 있다. 이때 얻어진 값들의 확률적 유의수준은 F-검증을 이용하여 평가한다. 분산분석표에서 SS는 제곱합, DOF는 자유도, V는 제곱평균, P는 기여도(percentage of contribution), F_o는 제곱평균의 비로서 F-검정에 사용된다^(7,9).

4. 실험설계 및 시험사출

4.1 실험의 설계

본 연구에서는 휴대폰 배터리케이스를 대상으로 텍소몰딩 공정을 적용하기 위해 전자파 차폐성, 비강도, 경량성이 우수한 마그네슘 합금 AZ91D를 사용하고, 일본 JSW사의 JLM220-MG 텍소몰딩 사출기를 사용한다.

Fig. 3 CAD model of battery case

Table 2 Levels and process parameters

Level	A (m/s)	B (°C)	C (°C)
0	48	600	200
1	55	590	220
2	62	580	240

Table 3 Orthogonal array of process parameters

No.	A	B	C	Error
1	0	0	0	0
2	0	1	1	1
3	0	2	2	2
4	1	0	1	2
5	1	1	2	0
6	1	2	0	1
7	2	0	2	1
8	2	1	0	2
9	2	2	1	0

Fig. 3은 공정변수 최적설계를 위해 적용된 휴대폰 배터리케이스의 CAD 모델⁽¹¹⁾이다. 공정설계의 목적은 게이트와 오버플로우 사이에 존재하는 배터리케이스의 인장강도, 경도, 연신율을 미세조직과 연계하여 공정변수의 최적조건을 결정하는데 있다. 공정변수 인자로는 두께가 얇은 제품을 주조하는데 유동과 냉각에 영향을 주는 사출속도(게이트 부분), 배럴온도, 금형온도를 선정한다. Table 2는 실제 현장에서 사용하는 조건과 사전 연구^(7,9)를 통해 선정한 공정변수의 인자별 수준이다.

다구찌 기법을 효과적으로 실험조건 선정에 적용하기 위해 Table 3의 3인자 3수준에 오차항을 포함한 $L_9(3^4)$ 직교배열표이다. Table 3에서 Error는 경계조건, 계산오차, 작업자의 차이, 기계적 특성 측정 등에서 발생하는 오차를 감안한 것으로, 분산분석에서 특성치에 유의한 영향을 주는 인자들의 검출을 강건하게 한다^(7,9).

Fig. 4 CAD models of cavity and core

Fig. 5 Manufactured cavity and core

Fig. 6 Ten molded specimens for data measurement

4.2 금형 설계 및 제작

Fig. 4는 금형 제작을 위한 캐비티와 코어 부의 CAD파일이며, Fig. 5는 실험을 위해 제작된 금형이다.

4.3 시험사출

신뢰성 있는 공정데이터 수집을 위해 시험 사출은 Table 3의 각 조건마다 40번 실시하고, 그 중 처음 30개는 버리고, 마지막 10회의 실험에서 얻어진 주조품 만을 각 공정의 데이터 수집에 사용한다(Fig. 6 참조).

Fig. 7 Mounted specimens for microstructure analysis

Fig. 8 Microstructures according to molding conditions

5. 기계적 특성 평가

본 연구에서는 기계적 특성 평가를 위해 인장강도, 경도, 연신율을 측정하고 미세조직에 따른 특성을 관찰한다.

5.1 미세 조직 평가

미세조직 관찰을 위해 시편을 15mm×15mm 크기로 잘라 포마이카와 경화제를 이용하여 Fig. 7과 같이 마운팅된 시편을 제작한다. 마운팅된 시편은 #500, #1200, #2400의 사포 순으로 연마 한 후, 1~3 μ m 다이아몬드 분말로 미세연마 한다. 연마된 시편은 Nital 3%(질산 3%+에탄올 97%) 용액에 수 초간 에칭 한 후 Nikon사의 EPIPHOT 300U 현미경으로 조직을 관찰한다.

조직검사를 통해 25~55 μ m의 크기를 갖는 α -Mg 고상의 형성

Fig. 9 Solid volume analysis through image processing

Fig. 10 Solid fraction according to barrel temperature

율은 4~52% 사이에 분포하며 배럴온도에 지배적임을 알 수 있다.

Fig. 8은 각 실험조건에서 조직을 200배 확대 관측한 것이다. 이들은 Fig. 1의 상태도가 의미하는 바와 같이 α -Mg과 금속간 혼합물로 구성되는데^(1~5), 고상조직의 형태는 슬러리 형태의 반응 용융 합금이 텍소몰딩기의 배럴부를 통과할 때 스크류의 회전에 따라서 수상조직(dendritic structure)이 구상조직(globular structure)으로 바뀌게 되며, 그 크기는 사출속도에 지배 받음을 알 수 있다. 고상의 분포를 수치화하기 위해 현미경 촬영 후, 미디안 필터링 처리와 영상의 이진화⁽¹¹⁾ 후에 Fig. 9와 같이 고상을 나타내는 검은색 픽셀의 수를 백분율로 계산한다. Fig.10은 Table 3의 9가지 실험조건에서 배럴온도 증가에 따른 α -Mg 고상율을 보인 것이다.

Table 4 Tensile strength (TS), yield strength (YS) and elongation (EL) of thixomolded AZ91D Mg alloy

Exp. No.	A	B	C	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%) (gauge length 20mm)
1	0	0	0	274.32	177	5.55
2	0	1	1	262.03	170	4.67
3	0	2	2	232.73	153	3.89
4	1	0	1	267.56	174	5.42
5	1	1	2	246.68	165	4.73
6	1	2	0	240.40	163	4.10
7	2	0	2	281.58	181	6.17
8	2	1	0	254.04	168	5.05
9	2	2	1	235.36	157	4.06

Fig. 11 TS, YS and EL of thixomolded AZ91D Mg alloy

Table 5 SN ratios of tensile strength

No.	A	B	C	SN
1	0	0	0	24.383
2	0	1	1	24.183
3	0	2	2	23.668
4	1	0	1	24.274
5	1	1	2	23.921
6	1	2	0	23.809
7	2	0	2	24.496
8	2	1	0	24.049
9	2	2	1	23.717

5.2 인장 시험 및 평가

4.3절에서 제작된 휴대폰 배터리케이스에서 표점거리 20mm의 인장시험 시편을 제작한 후 SHIMADZU사의 만능시험기 AG-10TE를 이용하여 인장강도와 항복강도, 연신율을 구한다. 인장시험 속도의 영향을 줄이기 위해 크로스헤드(cross-head) 속도는 0.1mm/min로 한다. Table 4는 실험조건에 따른 인장

Table 6 Pooled ANOVA results of tensile strength

Factor	SS	DOF	V	F0	P (%)
B	0.639	2	0.319	27.691	96.51
A+C +Error	0.069	6	0.012		3.49
Total	2.470	8	0.331		100

Table 7 The SN ratio of elongation

NO	A	B	C	SN
1	0	0	0	7.444
2	0	1	1	6.693
3	0	2	2	5.903
4	1	0	1	7.337
5	1	1	2	6.747
6	1	2	0	6.128
7	2	0	2	7.899
8	2	1	0	7.034
9	2	2	1	6.082

Fig. 12 Factor response graph of tensile strength

강도, 항복강도, 연신율을 보인다. Fig. 11은 이들을 도시한 것으로 실험조건 별로 뚜렷한 경향을 보인다.

인장강도를 망대특성의 SN비 식 (1)을 이용하여 평가하면 Table 5가 얻어지며, 식 (2)를 이용하여 각 수준별 SN비 평균을 구하면 Fig. 12가 얻어진다. 이로부터 인자별로 SN비가 최대가 되는 수준의 조합인 사출속도 62m/s, 배럴온도 600℃, 금형온도 200℃가 인장강도를 최대로 하는 최적 반응고 주조조건이 됨을 알 수 있다.

인장강도에 대한 분산분석을 수행하고, 각 공정변수별로 인장강도에 미치는 영향에 대한 기여도를 계산한다^(7,9). 사출속도

와 금형온도의 기여도가 오차항의 기여도 보다 작으므로 이들의 항을 오차항과 교락(pooling) 시키고, 그 결과를 Table 6에 보인다. 기여도 분석결과 텍소몰딩 공정에서 배럴온도가 인장강도에 96.51%로 지배적 영향을 줄을 알 수 있다.

본 연구에서 인장강도는 230~280Mpa 사이에 분포하며, 배럴온도의 증가로 미세조직의 불균일성을 동반하는 α-Mg 고상율의 증가는 인장강도의 감소를 가져오는 기존의 연구들^(5,8)과 비슷한 경향을 가짐을 확인하였고, 본 연구에서의 결과가 앞선 연구들에서 보다 더 좋은 인장강도 경향을 보이는 것은 배럴 내에서 반응고 Mg 합금의 교반 작용을 우수하게 진행하는 사출기 때문으로 판단된다.

5.3 연신율 분석 및 평가

연신율은 인장시험편에 파단이 발생하면, 파단부의 양끝을 다시 접속시켜 연신 후의 표점거리 l 을 구한 후, 인장시험 전의 표점거리 l_0 와의 차를 인장시험 전의 표점거리로 나눈 값의 백분율로 식 (3)과 같이 구한다.

$$Elongation(\epsilon) = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (3)$$

본 연구에서는 텍소몰딩의 특성이 적합하게 적용될수록 기공율과 결함이 감소하고 그에 따라 연신율이 향상되기 때문에 클수록 좋은 것으로 판단하여 망대특성을 적용한다. 여기서 표점거리는 20mm이다. Table 4에 연신율을 구하였고, SN비를 Table 7에 나타낸다. 식 (2)를 이용하여 각 공정 변수의 수준별 SN비를 구하면 Fig. 13이 얻어지고, 이로부터 사출속도 62m/s, 배럴온도 600℃, 금형온도 200℃ 일 때 연신율을 고려한 최적 주조조건을 구할 수 있다.

그리고 연신율에 대한 분산분석을 실시하고, 각 공정변수가 연신율에 미치는 영향에 대한 기여도를 분석하면 금형온도의 기여도가 오차의 기여도 보다 작게 되므로 금형온도를 오차항

Fig. 13 Factor response graph of elongation

Table 8 Pooled ANOVA results of elongation

Factor	SS	DOF	V	F0	P (%)
A	0.181	2	0.090	3.880	4.87
B	3.479	2	1.740	74.789	93.87
C+Error	0.093	4	0.023		1.26
Total	3.753	8	1.853		100

과 교락시킨 후 분산분석을 재 실시한 결과를 Table 8에 보인다. 인장·항복 강도와 같이 배럴온도(93.87%)가 연신율에도 지배적 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한, 미세조직의 고상 율 분포에 따른 연신율의 거동을 분석하면 그 경향이 기존 연구 들^(5,8)과 잘 부합함을 확인할 수 있다.

5.4 경도 측정 및 평가

텍스몰딩된 시제품에서 시편을 채취하여 경도를 측정한다. 압입자의 정확한 측정을 위해 측정면을 1mm 크기의 다이아몬

Table 9 The result and SN ratio of hardness

NO	A	B	C	hardness (Hv)	SN
1	0	0	0	100.2	40.016
2	0	1	1	96.9	39.730
3	0	2	2	95.4	39.590
4	1	0	1	100.1	40.011
5	1	1	2	98.0	39.825
6	1	2	0	96.6	39.702
7	2	0	2	101.3	40.108
8	2	1	0	97.5	39.782
9	2	2	1	96.1	39.660

Fig. 14 Factor response graph of hardness

드 분말로 미세 연마한다. 각 시편은 배터리케이스의 표면을 일정 크기의 3×3 정사각형 구역으로 나누어 경도 측정 후 평균 화하고, 각 실험조건 별로 10개의 시편에 대한 평균 경도를 측정한다. 경도 측정에는 Akashi사의 HM122 비커스 경도계를

Table 10 ANOVA results of the hardness

Frs.	SS	DOF	V	F ₀	P (%)
A	0.010	2	0.005	3.440	3.71
B	0.243	2	0.121	86.639	93.49
C	0.004	2	0.002	1.590	1.72
Error	0.003	2	0.001		1.08
Total	0.260	8	0.130		100

사용한다. Table 9는 측정된 평균 경도와 망대특성의 SN비이다. 그리고 식 (2)를 이용한 인자별 분석을 통해 7번 실험조건과 일치하는 사출속도 62m/s, 배럴온도 600℃, 금형온도 240℃ 일 때 제품의 경도가 가장 양호하다는 사실을 Fig. 14를 통해 알 수 있다.

Table 10은 경도에 영향을 주는 인자에 대한 기여도를 해석하기 위한 분산분석의 결과이다. 배럴온도(93.49%)가 인장-항복강도, 연신율의 경우와 마찬가지로 경도에 지배적인 영향을 주는 인자임을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 AZ91D Mg합금의 텍소몰딩 공정에서 시제품의 기계적 특성의 증대를 위한 공정변수의 최적 선정에 대한 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) AZ91D 마그네슘합금의 텍소몰딩 공정에서 α -Mg 고상분포율은 배럴 온도에 지배적인 영향을 받는다.
- (2) 배럴온도는 Fig. 12~13에서 확인한 바와 같이 인장강도, 항복강도, 연신율, 경도 등 Mg합금의 기계적 성질에 지배적 영향을 미치므로 주의 깊게 선정해야 한다.
- (3) Fig. 10, Table 4, Fig. 11의 결과에 따라 인장강도와 연신율은 α -Mg의 고상조직율에 지배를 받는데 20% 이하의 고상율에서 각각 250Mpa과 4.5% 이상의 값을 가지며, 배럴온도 조절을 통해 고상율이 50% 이상으로 증가하면 이들의 값은 230Mpa과 4% 이하로 떨어짐을 확인하였다.

References

- (1) Kainer, K. U., 2003, *Magnesium Alloys and Technology*, WILEY-VCH, Weinheim, Germany.
- (2) Friedrich, H. E., and Mordike, B. L., 2006, *Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications*, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- (3) Kainer, K. U., 2000, *Magnesium Alloys and their Applications*, WILEY-VCH, Weinheim, Germany.
- (4) Avedesian, M. M., and Baker, H., 1999, *Magnesium and Magnesium Alloys* (ASM Specialty Handbook), ASM International, New York, USA.
- (5) Czerwinski, F., Zielinska-Lipiec, A., Pinet, P. J., and Overbeeke, J., 2001, "Correlating the Microstructure and Tensile Properties of a Thixomolded AZ91D Magnesium Alloy," *Acta Materialia*, Vol. 49, No. 7, pp. 1225~1235.
- (6) Fan, Z., 2002, "Semi-solid Metal Processing," *International Materials Reviews*, Vol. 47, No. 2, pp. 49~85.
- (7) Kim, H., and Chung, S. C., 2008, "Optimal Design of Process Parameters for Flatness Improvement in Semi-solid Casting Processes," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 6, pp. 28~34.
- (8) Zhang, Y. F., Liu, Y. B., Cao, Z. Y., Zhang, Q. Q., and Zhang, L., 2009, "Mechanical Properties of Thixomolded AZ91D Magnesium Alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 3, pp. 1375~1384.
- (9) Song, I. H., and Chung, S. C., 2009, "Robust Design of the Gate System for Flatness Improvement in Semi-Solid Casting Processes," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 18, No. 2, pp. 130~136.
- (10) Park, S. H., 2001, *Modern Design of Experiments*, Minyoungsa, Seoul, Korea.
- (11) Shin, D. S., and Chung, S. C., 2011, "2.5D Quick Turnaround Engraving System through Recognition of Boundary Curves in 2D Images," *Journal of Manufacturing Engineering & Technology*, Vol. 20, No. 4, pp. 369~375.