

반응고 주조공정에서 평면도 증대를 위한 공정변수의 최적설계

김현구*, 정성종⁺

(논문접수일 2008. 4. 28, 심사완료일 2008. 8. 9)

Optimal Design of Process Parameters for Flatness Improvement in Semi-Solid Casting Processes

Hyungoo Kim*, Sung-Chong Chung⁺

Abstract

Mg alloy is widely used for the IT, auto and consumer electronics industries. Semi-solid casting(SSC) of magnesium alloys is used to produce high quality components. SSC process is analogous with the injection molding of plastics. The high strength and low weight characteristics of magnesium alloys render the high-precision fabrication of thin-walled components with large surface areas. To produce thin-walled magnesium alloy parts, SSC process parameters on the quality of the finished product should be clearly studied. In this paper, to select optimal process parameters, Taguchi method is applied to the optimal design of the process parameters in the SSC process. The die temperature, injection velocity and barrel temperature of the SSC process are selected for the process parameters. The effectiveness of the optimal design is verified through the CAE software.

Key Words : CAE simulation(CAE 시뮬레이션), Rheocasting(레오캐스팅), Semi-solid casting(반응고주조), Taguchi method(다구찌법), Thixomolding(틱소몰딩), Warpage(휨)

1. 서론

마그네슘 합금은 비강도가 높고 방열성, 진동흡수성, 치수 안정성 뿐만 아니라 전자파 차폐성이 우수하여, IT 제품을

비롯하여 자동차, 항공기, 선박 등 산업 전반에 걸쳐서 고성능 경량 부품 소재, 친환경적인 소재로 각광 받고 있다^(1,2). 최근 IT기기의 전자파가 인체에 유해하다는 문제가 대두되면서 휴대폰과 노트북의 케이스 소재로 마그네슘의 활용이

* 한양대학교 기계공학과

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

주소: 133-791 서울시 성동구 행당동 17

증가하고 있다⁽³⁾. 마그네슘 합금 반응고 주조 공정은 액상 주조를 하는 다이캐스팅 공정과 달리 액상과 고상이 혼재하는 슬러리(slurry) 형태로 사출이 이루어지기 때문에 기포발생과 휨의 발생이 적고 표면거칠기와 강도가 우수하며, 0.3mm 이하 두께의 미세성형이 가능하다. 또한 반응고 주조공정은 배럴(barrel)온도가 560°C~600°C에서 이루어지기 때문에 약700°C로 성형이 이루어지는 다이캐스팅 공정에 비해 금형의 수명 면에서도 유리하다⁽⁴⁾. 따라서 휴대폰케이스류 생산시 반응고 주조공정은 아주 적절한 공정이라 할 수 있다. 그러나 국내 대부분의 생산 업체들은 반응고 주조공정이 다이캐스팅 공정에 비해 비용이 많이 들고 IT제품 생산을 위한 반응고 주조 공정에 관한 연구가 미진하여 일반적으로 다이캐스팅 공정을 이용하여 제품을 생산하고 있다.

Wu 등⁽⁵⁾은 다구찌법을 이용하여 두께가 얇은 IT제품의 평면도(flatness) 증대를 위한 연구를 수행하였다. 하지만 이는 다이캐스팅 공정으로 생산된 제품에 대한 연구이다. Syrcos⁽⁶⁾는 넓은 면적을 가지는 제품의 공정변수 최적화에 관하여 연구하였다. 하지만 이는 다이캐스팅 공정에서 생산된 제품에 관한 연구이고 두께가 얇지 않은 제품에 관한 연구이다. Kwon 등⁽⁷⁾은 반응고 주조공정에 대하여 연구하였지만 이는 두께가 얇은 IT 제품을 대상으로 하지 않고 자동차용 부품을 대상으로 연구하였다.

이처럼 다이캐스팅 공정에 대한 연구는 여러 방향으로 연구되어 왔지만 그 수율이 40%정도에 그치고 있는 반면에, 반응고 주조공정의 경우는 수율이 80%를 상회하고 있다. 따라서 IT기기 부품과 같이 두께가 얇은 제품의 생산을 위한 반응고 주조 공정에 관한 연구가 필요하다.

본 연구는 반응고 주조공정에서 두께가 얇은 제품의 평면도 증대를 위한 공정변수의 최적설계를 목적으로 한다. 이를 위하여 다구찌 실험계획법⁽⁸⁾과 상용 CAE 시스템인 AnyCasting⁽⁹⁾을 이용한다. 주조 공정에 있어서 사출속도, 배럴온도, 금형의 온도는 제품의 품질을 결정하는 중요 변수이다⁽¹⁰⁾. 공정의 조건을 적절히 못한 값으로 설정하면 사출 시 유동의 난류를 유발시켜 공기빼기가 원활하지 못해 기공이 발생하고 불균일한 냉각으로 인하여 제품의 변형이 초래된다. 휴대폰 케이스처럼 두께가 얇은 제품은 그 품질을 결정하는 요소 중에서 휨(warpage)의 최소화가 가장 중요하다^(5,11). 이에 다구찌 실험계획법과 CAE 시스템을 이용하여 최소의 시뮬레이션 횟수로 사출속도, 배럴온도, 금형온도의 최적화된 조건을 제안한다. 이와 같은 공정 변수의 최적설계를 통하여 시사출의 횟수를 줄여 제품 개발시간 단축의 효과를 얻을 수 있고 우수한 품질의 제품을 생산 할 수 있다.

이를 위해 연구한 내용은 다음과 같다. 2장에서는 본 연구에서 진행하는 반응고 주조공정에 대해 기술한다. 3장에서는 평면도 증대를 위해 최소의 실험횟수로 공정변수들의 최적 조합을 찾을 수 있는 다구찌 실험계획법에 대하여 기술하며, 4장에서는 평면도 증대를 위한 시뮬레이션 및 결과분석에 대하여 기술한다.

2. 반응고 주조 공정

반응고 주조공정은 1940년대, 일본에서 경험이 많은 숙련 공들의 경험적 기술로써 각 지역의 다이캐스팅 공장에서 이루어지고 있었다. 이후, 1970년대 미국 MIT의 Fleming⁽¹²⁾에 의해 학문적으로 연구되었고 1990년대 들어서 미국에서 알루미늄 합금을 이용한 반응고 성형주조가 실용화 되었다. 일본에서도 1994년부터 기업들에 의해 실용화가 되었으며 많은 연구가 진행되고 있다⁽¹³⁾.

반응고 주조공정은 주조금속을 고체액체 상태로 만들어 고상입자와 액상입자의 혼합 슬러리를 만들고 이것을 고압 주조법을 이용하여 금형 내에 압입 성형시켜 필요한 금속 제품을 제조하는 공정이다. 일반적으로 액상 상태에서 교반, 냉각하면서 고체액체 공존 영역에 도달시켜 성형하는 방법을 레오캐스트(rheocasting) 공정, 고체 상태에서 가열하여 고체액체 공존 상태로 만들어 성형하는 방법을 틱소몰딩(thixomolding) 공정이라고 한다. 이 두가지 모두는 액상 중에 입자상의 조정을 분산시킴으로써 발현하는 틱소트로피성을 이용한 것이다⁽¹³⁾.

이 두 가지 마그네슘 성형 프로세스는 다음과 같은 공통된 특징들을 가지고 있다.

- ▶ 고상입자와 액상입자가 혼재하기 때문에 응고 수축량이 줄어들어 수축 캐비티가 적다.
- ▶ 점성 유동 성형이 이루어지기 때문에 금형 내 충전 중 가스의 유입이 작아 기공 발생이 적다.
- ▶ 충전되는 용탕의 온도가 다이캐스팅 공정보다 낮아 금형의 수명을 향상시킬 수 있다.
- ▶ 반응고 금속이 고점도라는 점을 이용하여 이종 재료를 균일하게 혼합시킬 수 있다.
- ▶ 주조품의 표면조도가 좋고 치수정밀도가 향상된다.

2.1 레오캐스트 공정

레오캐스트(rheocasting) 공정은 액상 상태에서 교반, 냉각하면서 고체액체 공존 영역을 만들고 조정을 입상화시켜

소정의 고상률로 주조 성형하는 방법이다. 최근에는 교반을 동반하지 않고 액상선 온도 바로 위에서 과냉각을 이용함으로써 입상화 시키는 방법이 개발되고 있다. Fig. 1은 레오캐스트 공정의 개략도 이다.

2.2 텍소몰딩 공정

텍소몰딩(thixomolding) 공정은 액상 상태에서 교반하지 않고 입상의 초정을 생성시킨 후 주형에 주입하여 빌렛(billet)을 제조한다. 그 빌렛을 소정의 크기로 절단하고, 이것을 재가열하여 고체 액체 공존 상태로 하여 소정의 고상률에 도달한 시점에서 성형하는 방법이다. Fig. 2는 텍소몰딩 공정의 개략도 이다. 본 논문에서는 텍소몰딩 공정에 대하여 연구한다.

3. 다구찌 실험계획법

3.1 실험계획법

실험계획법(Design of Experiments; DOE)은 해결하고

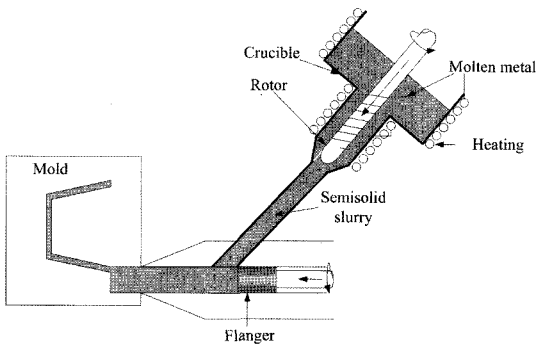


Fig. 1 Rheocasting process

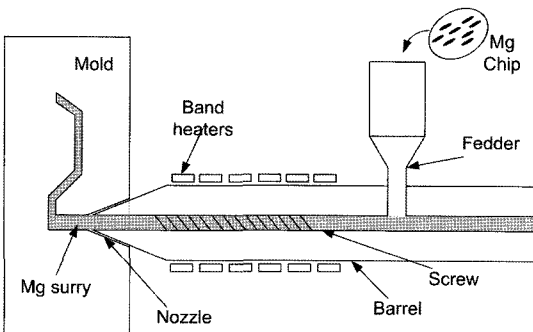


Fig. 2 Thixomolding process

자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 계획하고 수행할 것이며, 데이터를 어떻게 취하고, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하여 최소의 실험횟수로 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이다.

일반적으로 주조품의 품질에 영향을 주는 인자들의 영향을 정확히 고려하려면 각 인자들의 공정범위를 최소값부터 최대값까지 연속적으로 변화시키면서 시물레이션이나 실제 실험 데이터를 획득하여야 하나, 이러한 방법은 시간과 비용적인 면에서 비효율적이다. 한편 입력 인자를 몇 개의 수준으로 정의하여 실험을 수행하는 경우에도 (수준수)인자수 만큼의 실험이 수행되어야 한다. 예를 들어 공정변수가 3인자 3수준인 경우 반복실험이 없는 경우에도 27번의 실험이 수행되어야 한다. 이는 시간과 비용적인 면에서 비효율적이며, 인자 사이에 교호작용이 있는 경우에는 이에 대한 고려가 불가하다. 이러한 단점을 보완하기 위해 다구찌의 실험계획법에 의한 직교배열표가 이용된다.

3.2 다구찌 기법

효과적인 실험의 수행 및 데이터의 분석을 위한 실험계획법 중 하나인 다구찌 방법은 제어가 불가능한 환경 조건이나 기계적 오차 등의 잡음 인자들 때문에 제어가 어려운 주요 요인들이 데이터에 미치는 영향의 정도를 통계적으로 정확하게 평가하기 위해 제시되었다. 산포의 크기를 신호 대 잡음비(Signal to noise ratio; SN 비)로 변환하여 산포를 작게 하는 인자를 찾아가는 파라미터의 설계에 이용된다.

잡음은 제품 특성치의 변형을 초래하여 결과에 대한 신뢰성을 떨어뜨린다. 이 때 신호의 힘을 증가시켜 시스템이 안정화 되도록 도입하는 것이 SN비이며, SN비는 특성치에 따라 망목(nominal-is-best), 망소(smaller-the-better), 망대(larger-the-better) 특성으로 나누어진다. 본 연구에서는 휴대폰 케이스의 평면도를 증대시키기 위해 힘을 최소화하는 것이 목적이므로 식 (1)에 주어진 망소특성의 SN비를 이용한다.

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

위 식에서 n_s 은 특성값 측정 횟수, y_i 는 i 번째 특성값 이다. 그리고, A 인자의 수준별 SN비 평균은 식 (2)와 같이 된다.

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

여기서 M_{A_i} 는 A 인자가 i 수준인 경우 SN비 평균이고, n_A 는 직교배열표 상에서 A 인자의 해당 수준 출현수이다. 식 (1)로부터 얻어진 SN비와 식 (2)를 이용하면 해당 인자의 어느 수준이 오차에 대해 강건한 가를 판별할 수 있다.

3.3 분산분석

분산분석(analysis of variance; ANOVA)은 설계인자들의 최적 조건을 선정하여 공정설계에 응용하기 위해 식 (1), (2)로부터 얻어진 SN비를 이용하는 통계적 분석법이다. 특성치의 산포를 제곱합(sum of squares)으로 나타내고, 이 제곱합을 실험과 관련된 인자 마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석 방법이다⁽⁸⁾. 각 요인의 제곱합을 그 요인의 자유도(degree of freedom)로 나누면 그 요인의 제곱평균(mean square)이 되며, 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_o 는 제곱평균의 비로서 F-검증에 사용된다. 아래 식들은 이런 분산분석에 관련된 식들이며⁽⁸⁾, 이들을 이용하면 특성치의 산포를 요인별로 분해하여 공정설계에 응용할 수 있다.

$$SS_{total} = \sum_{i=1}^N \eta_i^2 - CT \quad (3)$$

$$SS_A = \frac{1}{m_A} \sum_{i=1}^{L_A} T_{A_i}^2 - CT \quad (4)$$

$$CT = \frac{T_{SN}^2}{N} \quad (5)$$

$$DOF_A = L_A - 1 \quad (6)$$

$$V_A = \frac{SS_A}{DOF_A} \quad (7)$$

$$F_{o,A} = \frac{V_A}{V_{error}} \quad (8)$$

$$P_A (\%) = \frac{V_A}{V_{total}} \times 100 \quad (9)$$

여기서,

- SS_{total} : 전체 실험에 대한 SN비의 총제곱합
- η_i : i 번째 실험의 SN비
- N : 총 실험 횟수
- CT : 수정항
- SS_A : A 인자의 SN비 제곱합

- L_A : A 인자의 수준수
- T_{A_i} : A 인자가 i 수준인 경우 SN비의 합
- m_A : A 인자의 반복 횟수
- T_{SN} : SN비의 총합
- DOF_A : 각 인자의 자유도 수
- V_A : A 인자의 제곱평균
- V_{error} : 오차분산
- V_{total} : 전체 실험에 대한 제곱평균의 합
- $F_{o,A}$: A 인자의 평균 제곱비
- P_A : A 인자의 공정에 대한 기여도

4. CAE 해석 및 결과

본 논문에서는 휴대폰 배터리커버를 반응고 주조 사물례이션 하기 위해 전자파 차폐성, 비강도, 경량성이 우수한 마그네슘 합금 AZ91D(ASTM 규격, Mg 90%, Al 9%, Zn 1%)을 사용한다.

Fig. 3은 공정변수 최적설계를 위해 사용한 휴대폰 배터리 케이스의 CAD 모델이다. 스프루, 런너, 게이트, 오버플로우 등을 포함하고 있으며, 공정설계의 목적은 게이트와 오버플로우 사이에 존재하는 배터리커버의 평면도 증대를 위해 사출 후 캐비티 부분의 변형을 최소화하는 것이다. 최적 공정설계를 위해서 인자로는 두께가 얇은 제품을 주조하는데 유동과 냉각에 영향을 주는 사출속도(게이트 부분), 배럴 온도, 금형온도를 선정한다. Table 1은 실제 생산현장에서 사용하는 조건과 사전 실험을 통해서 선정한 인자별 수준을

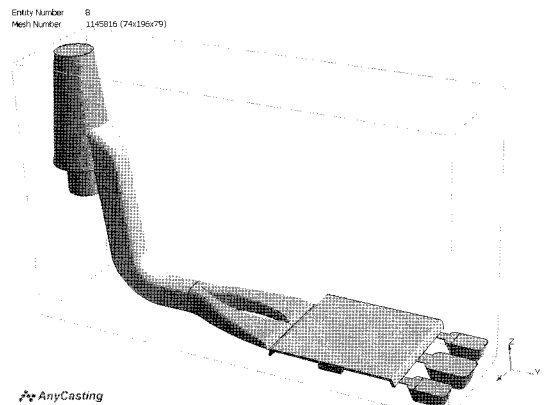


Fig. 3 CAD model for optimization of process parameters

보인다^(3,6,14).

다구찌 기법을 효과적으로 실험조건 선정에 적용하기 위해 직교배열표를 이용한다. 직교배열표는 실험의 재현성과 최적가공조건 선정시 안정성을 보장하고 실험 인자별 교호작용을 희생시켜 실험의 크기를 최소화하면서 많은 인자와 그 수준을 포함시킬 수 있는 장점을 가진다. Table 2는 3인자 3수준에 오차항을 포함한 $L_9(3^4)$ 직교배열표 이다. Table 2에서 Error는 경계조건, 계산오차, 메시생성, 평면도 측정 등에 따라 발생하는 오차 등을 감안한 것으로, 분산분석에서 특성치에 유의한 영향을 주는 인자들의 검출을 강건하게 한다.

반응고구조 CAE 시스템인 AnyCasting을 이용하여 Table 2에 주어진 조건 별 수치실험을 수행한다. Fig. 4는 시물레이션을 수행하면서 주조 과정에서 충전 패턴을 보인 것이다. Fig. 4의 (c)와 (d)를 보면 캐비티 부분의 충전이 이루어 질 때 불균일한 패턴으로 충전되는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 충전이 비균일적으로 일어나면 냉각과정에서 발생하는 열응력의 차에 따른 변형 때문에 바테리커버에 휨이 발생한다. 이 휨에 따른 평면도오차를 측정하기 위해 시물레이션

수행 후, 각 모서리를 영점 기준으로 설정한 후에 Fig. 5와 같이 9군데를 측정하여 Z축 변형량을 측정한다. 측정 시 흰색으로 표시된 부분이 변형이 가장 많이 발생한 부분이며 위쪽과 아래쪽을 기준으로 가운데 부분이 볼록하게 변형이 되는 것을 확인 할 수 있다. Table 3는 각 실험조건에서 수치

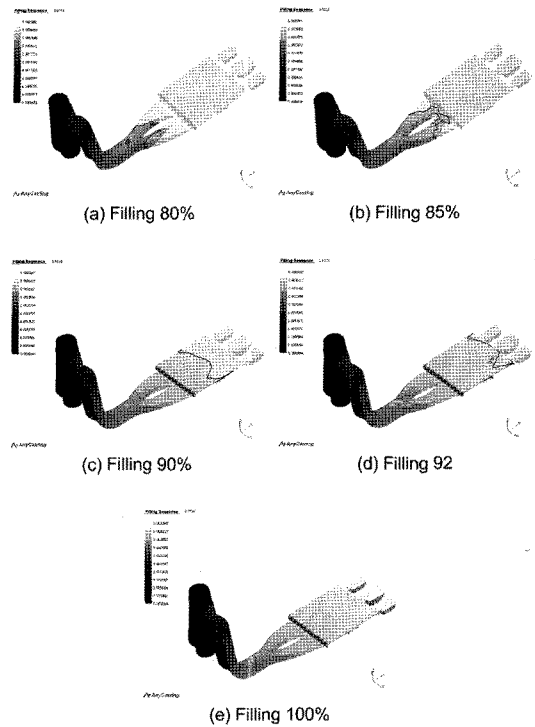


Fig. 4 Filling procedure

Table 1 Levels and process parameters

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

A : Injection velocity, B : Barrel temperature
C : Mold temperature

Table 2 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

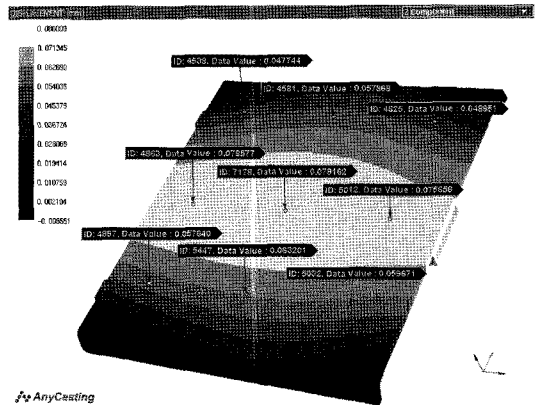


Fig. 5. Result of warpage analysis

Table 3 SN ratios of the flatness in the experimental design process(μm)

	A	B	C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Avg.	SN
1	0	0	0	55.4	69.0	56.7	95.1	95.0	90.1	71.2	73.3	70.8	75.2	-37.6
2	0	1	1	52.2	62.9	52.4	87.0	85.0	79.5	64.0	68.8	62.7	68.3	-36.8
3	0	2	2	53.0	63.9	55.2	89.0	87.2	81.1	67.8	69.4	63.7	70.0	-37.0
4	1	0	1	50.0	57.7	57.2	73.8	85.8	78.3	65.8	60.6	57.5	65.2	-36.4
5	1	1	2	51.2	57.9	56.6	72.7	78.1	80.0	65.3	59.8	54.7	64.0	-36.2
6	1	2	0	54.8	57.5	56.1	87.8	90.6	88.7	67.7	71.8	70.2	71.7	-37.2
7	2	0	2	52.5	61.4	52.0	85.4	85.5	76.5	67.3	66.9	65.3	68.2	-36.8
8	2	1	0	49.6	55.2	50.8	82.4	85.3	88.3	70.4	70.5	62.0	68.3	-36.8
9	2	2	1	57.4	68.2	58.6	94.4	94.4	87.9	72.3	73.1	68.0	74.9	-37.6

Table 4 ANOVA results for the flatness

Factors	SS	DOF	V	Fo	P(%)
A	0.51	2	0.25	1.92	26.32
B	0.67	2	0.34	2.62	35.79
C	0.43	2	0.23	1.77	24.21
Error	0.24	2	0.13		13.68
Total	1.84	8	0.95		100

5. 결론

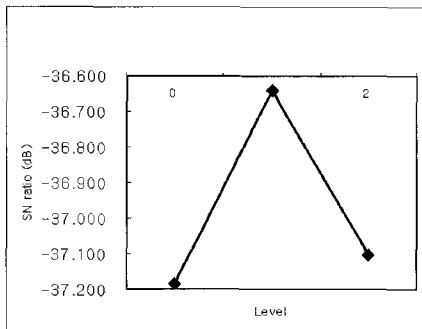
본 연구에서는 마그네슘합금(AZ91D)의 반응고 주조공정에서 부품의 평면도 증대를 위한 공정변수의 최적설계에 대하여 연구하였다. $L_9(3^4)$ 직교배열표를 이용하여 사출속도, 배럴온도, 금형온도가 평면도오차에 미치는 영향을 CAE 시스템인 AnyCasting을 통해 실험계획법에 따라서 수치시뮬한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

실험된 힘값과 그의 SN비 등을 보인 것이다. 각 수치실험별로 9개의 측정 결과값과 식 (1)을 이용하여 SN비를 구하고, 식 (2)를 이용하여 각 인자의 수준별 SN비의 평균을 구하여 Fig. 6에 보인다. 망소특성에 대한 SN비 식 (1)에 따라 각각의 인자별로 SN비가 최대가 되는 수준이 평면도 오차를 최소로 하는 해당 인자의 최적 조건이 된다.

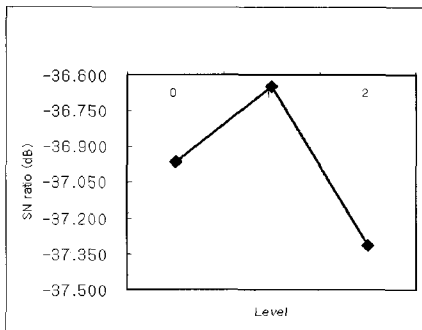
그리고 식 (3)~(9)를 이용하여 분산분석을 수행하고, 각 공정변수별로 평면도오차에 미치는 영향에 대한 기여도 P를 Table 4에 보인다. 이에 따르면 배럴온도는 35.79%, 사출속도는 26.32%, 금형온도는 24.21%, 오차항 Error는 13.68% 비율의 비율로 배터리커버의 평면도 오차에 영향을 미치며, 특히, Table 1에서 채택한 배럴온도, 사출속도, 금형온도는 CAE 시뮬레이션과 평면도 측정 등에서 발생하는 오차들인 Error의 기여도에 비하여 그 값이 충분히 크므로, 배럴온도, 사출속도, 금형온도 모두가 마그네슘 합금의 반응고 주조를 통하여 제작하는 휴대폰 배터리커버의 평면도에 지배적인 영향을 주는 공정변수가 됨을 확인할 수 있다.

- (1) AZ91D의 반응고 주조 공정에서 사출속도(26.32%), 배럴온도(35.79%), 금형온도(24.21%)가 주조품의 평면도에 지대한 영향을 주는 것을 다구찌법에 기초한 분산분석을 통하여 확인하고 검증하였다.
- (2) AZ91D 휴대폰 배터리커버의 반응고 주조 공정에서 게이트부에서 사출속도, 배럴온도, 금형온도를 각각 55 m/s, 590℃, 240℃로 선택하는 경우 평면도오차가 최소가 된다.
- (3) 본 연구에서 얻어진 최적 공정변수를 이용하여 주조 후 측정된 배터리커버의 평균 힘은 53.79μm이며, 다른 조건에서 주조한 결과에 비하여 20~30% 정도 평면도 증대가 이루어짐을 확인하였다.

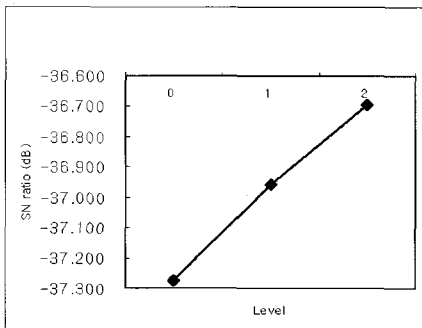
향후, 반응고 주조공정의 최적화를 위해서는 공정변수의 최적설계에 더하여 실제 주조를 통하여 개발된 결과의 확인이 필요하고, 제품의 인장강도, 표면거칠기는 물론 게이트 및 오버플로우 시스템의 형상에 대한 강건설계가 함께 이루어져야 하겠다.



(a) Injection velocity



(b) Barrel temperature



(c) Mold temperature

Fig. 6 Factor response graph

참고 문헌

- (1) Kainer, K. U., 2003, *Magnesium Alloys and Technology*, WILEYVCH GmbH & Co.KGaA, New York, USA.
- (2) Avedesian M. M. and Baker H., 1999, *Magnesium and Magnesium Alloys* (ASM Specialty Handbook), ASM International, New York, USA.
- (3) Sin, S. L. and Dube, D., 2004, "Influence of Process Parameters on Fluidity of Investment-cast AZ91D

- Magnesium Alloy," *Material Science and Engineering A*, Vol. 386, pp. 34~42.
- (4) EI-Mahallawy, N. A., Taha, M. A., Pokora, E., and Klein, F., 1998, "On the Influent of Process Variables on the Thermal Condition and Properties of High Pressure Die-cast Magnesium Alloys," *Journal of Materials Processing and Technology*, Vol. 73, pp. 125~138.
- (5) Wu, D. H. and Chang, M. S., 2004, "Use of Taguchi Method to Develop a Robust Design for the Magnesium Alloy Die Casting Process," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 379, pp. 366~371.
- (6) Syrcos, G. P., 2003, "Die Casting Process Optimization using Taguchi Method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 135, pp. 68~74.
- (7) Kwon, T. H., Moon, C. K., Kim, Y. H., and Choi, J. C., 2002, "A Study on the Design of Gating System for Semi-solid Diecasting Process," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 8, pp. 116~125.
- (8) Park, S.H., 2001, *Modern Design of Experiments*, Minyoungsa, Seoul, Korea.
- (9) AnyCasting Inc., viewed 6 October 2008, <<http://www.anycasting.com>>.
- (10) Wang, Y. C., Li, D. Y., Peng, Y. H., and Zeng, X. Q., 2007, "Numerical Simulation of Low Pressure Die Casting of Magnesium Wheel," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 32, pp. 257~264.
- (11) Tang, S. H., Tan, Y. J., Sapuan, S. M., Sulaiman, S., Ismail, N., and Samin, R., 2007, "The Use of Taguchi Method in the Design of Plastic Injection Mold for Reducing Warpage," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, pp. 418~42612.
- (12) Spencer, D. B., Meharabian, R., and Flemings, M. C., 1972, "Rheological Behavior of Sn-15%Pb in the Crystallization Range," *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 3, pp. 1925~1932.
- (13) Fan, Z., 2002, "Semi-solid Metal Processing," *International Materials Reviews*, Vol. 47, No. 2, pp. 49~85.
- (14) Han, S. H., Kang, C. G., and Sung, S. J., 2006, "A Study of Rheology Die-casting Moulding by using Mg Alloy," *Proceeding of Korean Society for Precision Engineering*, pp. 257~260.