

반응고 주조공정에서 평면도 증대를 위한 게이트시스템의 강건설계

송인호*, 정성중⁺

(논문접수일 2008. 6. 11, 심사완료일 2008. 8. 22)

Robust Design of the Gate System for Flatness Improvement in Semi-Solid Casting Processes

In-Ho Song*, Sung-Chong Chung⁺

Abstract

Semi-solid casting(SSC) of magnesium alloys is increasingly being used to produce high quality components. This process is similar to the injection molding of plastics and is called thixomolding. Using this process, higher strength, thinner wall sections and tighter tolerances without porosity are obtained. The high strength and low weight characteristics of magnesium alloys render the high-precision fabrication of thin-walled components with large surface areas. They are widely used for the IT, auto and consumer electronics industries. However, warpage of the thin-walled sections degrade quality of the parts produced in the SCC process. To produce thin-walled magnesium alloy parts, the geometry of gating system on the quality of the finished products should be clearly studied. In this paper, to minimize warpage of the thin-walled sections, Taguchi method is applied to the optimal design of the gate geometry in the thixomolding process. Width, height, length and angle of the gating system are selected for the robust design parameters. Effectiveness of the robust design is verified through the CAE software.

Key Words : Gate System(게이트시스템), Mg Alloy(Mg합금), Robust Design(강건설계), Semi-Solid Casting(반응고주조), Taguchi Method(다꾸지법), Thixomolding(틱소몰딩), Warpage(휨)

1. 서론

마그네슘 합금은 최고의 경량재료(비중 1.74g/cm^3 : 철의

1/4.5, 아연의 1/4, 알루미늄의 2/3)로써 비강도가 높고 방열성, 진동흡수성, 치수안정성이 우수할 뿐만 아니라 전자파 차폐성(EMI)이 양호하여 휴대폰, 디지털 카메라, 노트북을

* 한양대학교 기계공학과

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

주소: 133-791 서울시 성동구 행당1동 17번지

비롯하여 자동차, 항공기, 선박 등 산업 전반에 있어서 친환경적이고 고성능 경량 부품 소재로 각광 받고 있다^(1,2).

최근 환경문제와 IT기기의 전자파 문제가 대두 되면서 휴대폰과 노트북의 케이스 소재로 마그네슘의 활용이 증가하고 있다⁽³⁾. 마그네슘 합금 반응고 주조 공정은 다이캐스팅 공정에서의 액상주조와 달리 액상과 고상이 혼재하는 슬러리(slurry) 형태로 사출이 이루어지기 때문에 기공과 변형의 발생이 적고 표면조도와 강도가 우수하며, 미세성형(두께와 폭 각각 0.3mm이하)이 가능하다. 또한 다이캐스팅은 배럴(barrel) 온도가 약 700°C 이상에서 성형이 이루어지는 반면에 반응고 주조공정은 약 560°C~600°C에서 성형이 이루어지므로 금형의 수명면에서도 다이캐스팅에 비하여 유리하다⁽⁴⁾. 따라서, 휴대폰 케이스류 등 얇고 넓은 면을 가진 제품 생산 시 반응고 주조공정은 아주 적절한 공정이다. 그러나, 국내 대부분의 생산 업체는 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 공정에서 생산된 제품에 대한 연구이다. Hu 등⁽⁶⁾은 휴대폰 케이스의 게이트(gate)와 러너(runner)시스템 최적화에 관하여 연구하였다. 그러나, 게이트의 형태를 정형화된 파라미터로 정의하지 않고 출구부분이 분리된 게이트와 분리되지 않은 게이트로만 구분하여 연구하였다. Kwon 등⁽⁷⁾은 반응고 주조공정에 대하여 연구하였지만 이는 두께가 얇은 IT 제품을 대상으로 하지 않고 자동차용 부품을 대상으로 연구하였다. 이와 같이 다이캐스팅 공정에 대한 연구는 다각도로 연구되어 왔으나, 그 수율이 40%정도인 반면에, 반응고 주조공정의 수율이 80%를 상회하기 때문에 IT 기기 부품과 같은 두께가 얇은 제품의 생산을 위한 반응고 주조 공정에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 반응고 주조공정에서 두께가 얇은 제품의 평면도 증대를 위한 게이트 시스템의 강건설계를 목적으로 한다. 이를 위하여 다구찌 실험계획법⁽⁸⁾과 상용 CAE 시스템인 AnyCasting⁽⁹⁾을 이용한다. 주조공정에 있어서 적절하지 못한 공정 조건과 게이트 시스템의 기하학적 설계는 사출 시 유동의 난류를 유발시켜 공기빼기가 원활하지 못해 기공을 발생시키고 냉각이 불균일하게 이루어지기 때문에 제품의 변형을 초래한다. 휴대폰 케이스처럼 두께가 얇은 제품들은 그 품질을 결정하는 요소 중에서 휨(warpage)의 최소화가 가장 중요하다^(5,10). 이에 다구찌 실험계획법과 CAE시스템을 이용하여 최소의 시뮬레이션 횟수로 게이트 입구부의 폭

과 높이, 게이트 입구부와 출구부 사이의 거리, 각도로 정의되는 게이트 시스템의 강건설계를 수행한다. 이와 같은 게이트 시스템의 강건설계를 통하여 얇은 성형품의 품질 향상을 도모 하고 게이트 및 러너부분의 부피를 최소화하여 재활용되는 재료의 양을 줄임으로서 원가 절감과 사이클 시간 단축의 효과를 얻을 수 있다.

2. 반응고 주조공정

반응고 주조공정은 1970년대 미국 MIT의 Fleming⁽¹¹⁾에 의해 발명되었고, 1989년부터 미국에서 알루미늄 합금을 이용한 반응고 주조가 실용화 되었다. 일본에서도 1994년부터 여러 기업들에 의해 실용화가 이루어졌으며 JSW(Japan Steel Works, LTD.)와 Sodick Plustech 에서 반응고 주조기계를 양산 판매하고 있다.

반응고 성형 주조는 주조금속을 고체액체 공존 영역으로 유지하여 고상입자와 액상의 혼합 슬러리를 만들고 이것을 고압주조법을 이용하여 금형 내에 압입 성형, 응고시켜 필요한 금속 제품을 제조하는 공정이다. 일반적으로 액상 상태에서 교반, 냉각하면서 고체액체 공존 영역에 도달시켜 성형하는 방법을 레오캐스팅(rheocasting) 공정, 고체 상태에서 가열하여 고체액체 공존 상태에 도달시켜 성형하는 방법을 텍소몰딩(thixomolding) 공정이라고 한다. 모두 액상 중에 입자상의 초정을 분산시킴으로써 발현하는 텍소트로피성을 이용하여 성형한다⁽¹²⁾.

이 두 가지 마그네슘 성형 프로세스는 아래와 같은 공통된 특성을 가진다.

- 고상입자와 액상입자가 혼재하기 때문에 응고 시 수축량이 적다.
- 점성유동이기 때문에 금형 내 충전 중에 가스의 유입이 작아 기공 발생이 적다.
- 충전되는 용탕의 온도가 액상주조 보다 낮아 주조품의 표면에 크랙 발생이 적다.
- 주조품의 표면조도가 우수하고 치수정밀도가 향상된다.
- 반응고 금속의 고점도성을 이용하면 이종 재료의 주조가 가능하다.

이런 특성들 때문에 반응고 성형주조를 이용하면 응고 조직의 균일화, 내부 결함의 감소, 미려한 표면과 높은 정밀도를 갖는 제품을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 텍소몰딩 공정

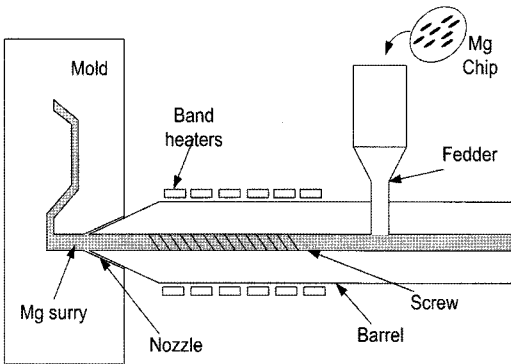


Fig. 1 Schematic diagram of thixomolding process

에 대하여 연구한다. 틱소몰딩(thixomolding) 공정은 액상 상태에서 교반하지 않고 입상의 초정을 생성시킨 후 주형에 주입하여 빌렛(billet)을 제조한다. 그 빌렛을 소정의 크기로 절단하고, 이것을 재가열하여 고체액체 공존 상태로 하여 소정의 고상률에 도달한 시점에서 성형하는 방법이다. Fig. 1은 틱소몰딩 공정의 개략도이다.

3. 실험계획법

실험계획법(design of experiments; DOE)은 해결하고자 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 시뮬레이션이나 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. 본 연구에서 4인자 3수준인 경우 반복실험이 없는 경우에도 81번의 실험이 수행되어야 한다. 이는 시간과 비용적인 면에서 비효율적이며, 인자 사이에 교호작용이 있는 경우에는 이에 대한 고려가 불가하다. 이러한 단점을 보완하기 위해 다구찌의 실험계획법에 의한 직교배열표를 이용함이 유리하다.

3.1 다구찌 기법

효과적인 실험의 수행 및 데이터의 분석을 위한 실험계획

법 중 하나인 다구찌 방법은 환경 조건이나 기계적 오차 등의 제어가 어려운 잡음 인자들에 비해 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 변동을 초래하여 결과에 대한 신뢰성을 저하시킨다. 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 특성값의 측정 횟수이며, y_i 는 i 번째 특성 값이다. 그리고, 어떤 인자의 수준별 SN비 평균은 식 (2)와 같이 된다.

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

여기서 M_{Ai} 는 A 인자의 i 수준의 SN비의 평균이고, n_A 는 직교배열표 상에서 A 인자의 해당 수준 출현수이다. 식 (1)로부터 얻어진 SN비와 식 (2)를 이용하면 주어진 인자에서 오차에 대하여 강건한 수준을 판별할 수 있다.

3.2 분산분석

분산분석(analysis of variance; ANOVA)은 설계인자들의 최적 조건을 선정하여 강건설계에 응용하기 위해 식 (1), (2)로부터 얻어진 SN비를 통계적으로 분석하여 접근하는 방법이다. 특성치의 산포를 제곱합(sum of squares)으로 나타내고, 이 제곱합을 실험과 관련된 인자 마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 가지는 요인을 찾아내는 방법이다⁽⁸⁾. 각 요인의 제곱합을 그 요인의 자유도(degree of freedom)로 나누면 그 요인의 제곱 평균(mean square)이 되며, 오차분산과 비교 할 수 있다. 이때 얻어진 값들의 확률적 유의수준은 F-검증을 이용하여 평가한다. 분산분석표에서 SS는 제곱합, DOF는 자유도, V는 제곱평균, P는 기여도(percentage of contribution), F₀는 제곱평균의 비로서 F-검증에 사용된다. 다음은 분산분석에 관련된 식들

을 나타내고, 이를 이용하면 특성치의 산포를 요인별로 분해하여 강건설계에 응용할 수 있다.

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

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

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

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

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

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

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

여기서,

SS_{total} : 전체 실험에 대한 SN비의 총제곱합

η_i : i 번째 실험의 SN비

N : 총 실험 횟수

CT : 수정항

SS_A : A인자의 SN비 제곱합

L_A : A 인자의 수준수

T_{Ai} : A 인자가 i 수준인 경우 SN비의 합

m_A : A 인자의 반복 횟수

T_{SN} : SN비의 총합

DOF_A : A 인자의 자유도 수

V_A : A인자의 제곱평균

V_{error} : 오차분산

V_{total} : 전체 제곱평균의 합

$F_{o,A}$: A 인자의 평균 제곱비

P_A : A 인자의 공정에 대한 기여도

이다.

4. 게이트시스템의 강건설계

4.1 설계조건

본 논문에서는 휴대폰 배터리 케이스의 평면도 증대를 위한 게이트시스템의 강건설계를 위한 반응고 주조 시뮬레이션 수행을 위해 AnyCasting⁽⁹⁾ CAE 시스템을 이용한다. 재료로는 전자파 차폐성(EMI), 비강도, 경량성이 우수하여 IT 제품에 많이 이용되는 마그네슘 합금 AZ91D(ASTM 규격, Mg, Al 9%, Zn 1%)를 사용한다.

두께가 얇은 주조품의 품질은 게이트, 러너 등 게이트시스템의 설계 조건에 크게 영향을 받는다⁽¹³⁾. Fig. 2는 게이트시스템의 강건설계 적용을 위한 휴대폰 배터리 케이스의 금형 설계를 위한 CAD모델이다. 게이트시스템의 강건설계 목적은 게이트와 오버플로우 사이에 존재하는 배터리케이스의 평면도 증대를 위해 사출 후 캐비티 부분의 변형을 최소화하는 것이다. 게이트 시스템은 현재 생산 현장에서 사용되는 모델에서 전체적인 형상은 유지하며, 설계 파라미터를 게이트 입구부의 폭과 높이, 게이트의 총 길이, 출구부의 각도 등의 4가지 인자로 정의하고, 각 설계인자를 3수준의 파라미터로 정의하여 Table 1에 인자별 수준을 보인다.

다구찌 기법을 효과적으로 실험조건에 적용하기 위해 직교배열표를 이용한다. 직교배열표는 실험의재현성과 최적설

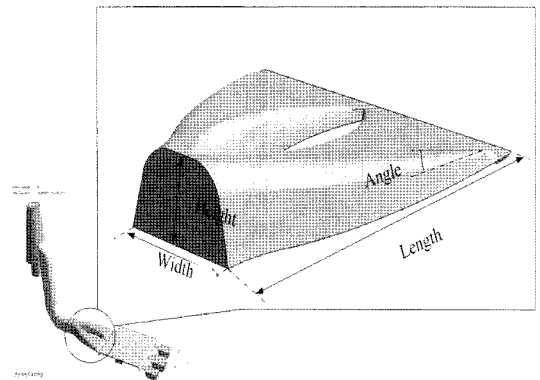


Fig. 2 Definition of design parameters for robust design

Table 1 Design parameters and levels (mm)

Level	Width(A)	Height(B)	Length(C)	Angle(°)(D)
0	13.128	8	40	9
1	12.472	7.6	39	8.55
2	11.816	7.2	38	8.1

제조조건 선정시 안정성을 보장하고 실험 인자별 교호작용을 희생시켜 실험의 크기를 최소화하면서 많은 인자와 그 수준을 포함시킬 수 있는 장점을 가진다. Table 2는 4인자 3수준을 조합한 $L_9(3^4)$ 직교배열표이다.

4.2 CAE 해석 및 결과

반응고 주조 CAE시스템인 AnyCasting⁹⁾을 이용하여 Table 2에 주어진 조건 별 9회의 수치실험을 수행한다. 공정 변수들의 조건은 현장에서 적용되고 있는 조합을 적용한다. Fig. 3은 주조과정 시뮬레이션에서 충전패턴을 보인 것이다. 이를 통해 캐비티 부분에 충진이 이루어질 때 불균일한 패턴으로 충전되는 것을 확인할 수 있다. 불균일한 충전은 냉각과정에서 열응력의 차를 발생시켜 배터리 케이스의 휨을 유발한다. 이 휨에 따른 평면도오차를 측정하기 위해 시뮬레이션 수행 후, 각 모서리를 영점 기준으로 설정한 후 Fig. 4와 같이 9개의 노드에서 Z축 변형량을 측정한다. 측정 노드는 각 실험별로 동일한 지점에 위치시킨다. 측정 시 흰색으로 표시된 부분이 변형이 가장 많이 발생한 부분이며, 위쪽과 아래쪽을 기준으로 가운데 부분이 불룩하게 변형이 발생하는 것을 확인할 수 있다. Table 3은 각 실험조건에서 측정된 휨값과 그의 SN비 등을 보인 것이다. 각 실험 별로 9개의 측정 결과값과 식 (1)을 이용하여 SN비의 평균을 구하고, 식 (2)를 이용하여 각 인자의 수준별 SN비의 평균을 구하여 Fig. 5에 보인다. 망소특성에 대한 SN비 식 (1)에 따라 각 인자별로 SN비가 최대가 되는 수준이 평면도 오차를 최소로 하는 해당 인자의 최적 조건이 된다.

식 (3)~(9)를 이용하여 분산분석을 수행하고, 각 설계변수 별로 평면도오차에 미치는 영향에 대한 기여도를 Table 4에

보인다. 이에 따르면 게이트 시스템의 폭(A)는 37.61%, 길이(C)는 38.18%, 각도(D)는 15.19%, Error로 풀링된 높이(B)는 9.02%의 비율로 배터리 케이스의 평면도 오차에 영향을 미치며, 특히 게이트 입구부의 폭과 길이가 다른 두 가지 파라미터보다 큰 영향을 미치는 것을 Table 4를 통하여 알 수 있다. 휴대폰 배터리 케이스의 평면도 증대를 위한 게

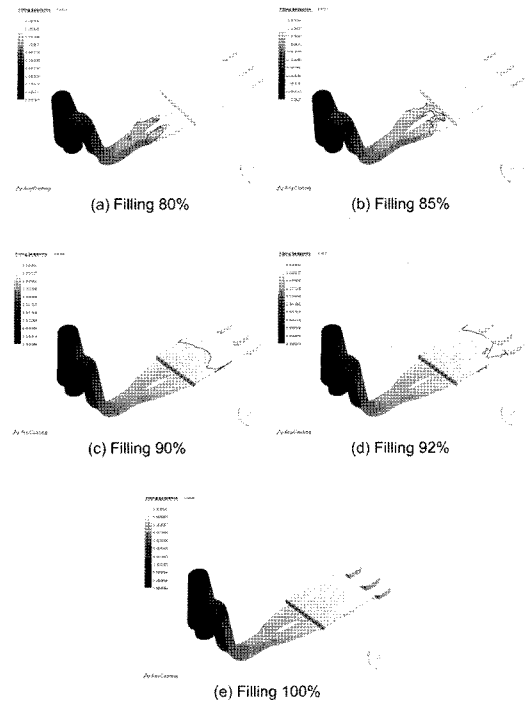


Fig. 3 Filling procedures of the semi-solid casting process

Table 2 Orthogonal array of design parameters

No.	A	B	C	D
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

A : Width, B : Height, C : Length, D : Angle

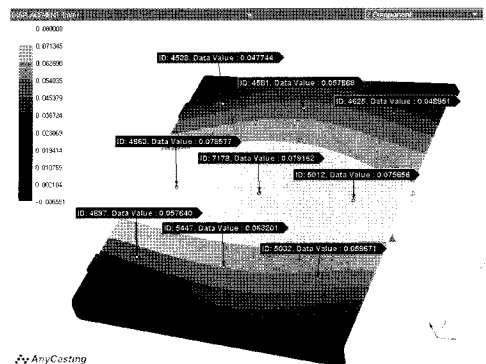


Fig. 4 Result of warpage analysis

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

	A	B	C	D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Avg.	SN
1	0	0	0	0	47.744	57.868	48.951	78.577	79.162	75.656	57.640	63.201	59.671	63.163	-36.147
2	0	1	1	1	50.923	55.802	51.126	82.043	83.218	76.130	61.906	62.604	65.809	65.507	-36.462
3	0	2	2	2	49.971	57.850	51.173	80.183	81.367	75.259	61.050	62.794	58.956	64.289	-36.292
4	1	0	1	2	50.908	60.786	51.111	85.003	83.174	80.092	63.863	66.546	61.765	67.028	-36.667
5	1	1	2	0	50.881	55.286	52.061	81.650	83.645	74.801	60.818	62.258	57.715	64.346	-36.314
6	1	2	0	1	50.980	60.865	51.184	85.186	83.371	78.263	63.048	65.790	60.954	66.627	-36.614
7	2	0	2	1	50.842	57.709	51.044	83.862	82.023	77.959	61.730	63.374	59.629	63.352	-36.450
8	2	1	0	2	49.958	58.841	50.163	83.134	81.313	76.214	60.994	63.718	59.899	64.915	-36.388
9	2	2	1	0	50.944	60.827	51.148	85.096	83.276	78.179	62.959	65.676	60.863	66.552	-36.605

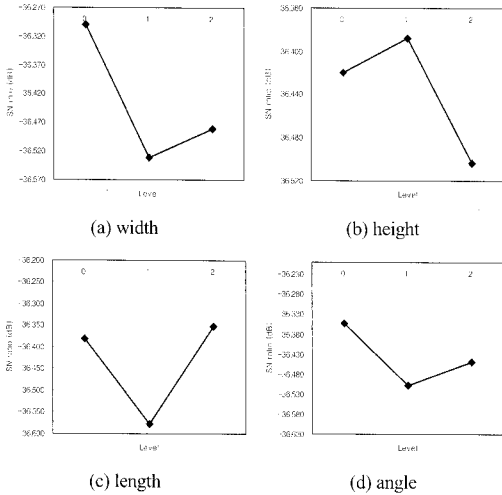


Fig. 5 Factor response graphs of design parameters

Table 4 ANOVA results of design parameters

Frs.	SS	DOF	V	F0	P(%)
A	0.09	2	0.044	4.17	37.61
C	0.09	2	0.045	4.23	38.18
D	0.04	2	0.018	1.69	15.19
E	0.02	2	0.011		9.02
Total	0.24	8	0.118		100

이트의 최적설계 파라미터는 폭 13.128mm(0 수준), 높이 7.6mm(1 수준), 길이 38mm(2 수준), 각도 9°(0 수준)이다.

선정된 최적 파라미터로 게이트 시스템을 모델링하여 검증 시뮬레이션을 수행한 결과, SN비가 -36.027dB이고 평균

힘이 62.281N으로 9가지의 게이트 형상보다 최적으로 설계되었고 평면도가 증대되는 것을 검증하였다. 그리고 게이트와 러너 시스템을 강건 설계함으로써 종래의 설계치 대비 게이트시스템의 부피를 10% 감소하여 비용절감에도 그 효용성이 있음을 입증하였다.

5. 결론

본 연구는 마그네슘합금(AZ91D)의 반응고 주조공정에서의 평면도 증대와 재료비 절감을 위한 게이트시스템의 강건 설계에 대하여 연구하였다. 다구찌 방법과 $L_9(3^4)$ 직교배열표를 이용하여 게이트시스템의 설계 파라미터를 조합하고, AnyCasting을 통해 실험계획법에 따라서 수치실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 게이트시스템의 강건설계 결과, 평면도가 향상되고, 게이트 부의 부피를 최적화 할 수 있음을 확인하였고, 설계 파라미터 중 폭(37.61%)과 길이(38.18%)가 캐비티 부분의 평면도 오차에 크게 영향을 미침을 확인하였다.
- (2) AZ91D를 이용한 휴대폰 배터리 케이스의 반응고 주조 공정 시 게이트시스템의 형상은 입구부의 폭 13.128mm, 높이 7.6mm, 길이 38mm, 각도 9°일 때 최적설계 결과를 가짐을 검증하였다.
- (3) 최적설계된 게이트시스템의 형상은 기존에 생산 현장에서 사용되는 게이트시스템 보다 부피가 10% 작게 설계되어 생산 비용 절감에 효과적임을 알 수 있다.

향후, 본 연구의 수치실험 결과를 토대로 반응고 주조를 실제 수행하여 그 결과를 확인할 필요가 있겠다.

참고 문헌

- (1) Kainer, K. U., 2003, *Magnesium-Alloys and Technologies*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. Weinheim, Germany.
- (2) Avedesian, M. M. and Baker, H., 1999, *Magnesium and Magnesium Alloys (ASM Specialty Handbook)*, ASM International, Ohio, U.S.A.
- (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) El-Mahallawy, N. A., Taha, M. A., Pokora, E., and Klein, F., 1998, "On the Influence of Process Variables on the Thermal Conditions 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) Hu, B. H., Tong, K. K., Niu, X. P., and Pinwill, I., 2000, "Design and Optimisation of Runner and Gating Systems for the Die Casting of Thin-walled Magnesium Telecommunication Parts through Numerical Simulation," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 105, pp. 128~133.
- (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, Republic of Korea.
- (9) AnyCasting Inc., 2002, viewed 7 October 2008, <<http://www.anycasting.com>>.
- (10) 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. 418~426.
- (11) 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.
- (12) Fan, Z., 2002, "Semi-solid Metal Processing," *International Materials Reviews*, Vol. 47, No. 2, pp. 49~85.
- (13) Park, K., Ahn, J. H. and Choi, S. R., 2001, "Optimal Design for Injection Molding Processes using Design of Experiments and Finite Element Analysis," *Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference*, pp. 150~153.