

## 금속사출 유동선단온도에 영향을 미치는 주요 인자들의 상호관계 및 반응표면분석

김명호\*, 윤희석<sup>+</sup>

(Manuscript received: Jul, 10, 2012 / Revised: Dec, 7, 2012 / Accepted: Jan, 10, 2013)

### Interaction Factors and Response Surface Analysis on the Factors Influencing the Flow Front Temperature at Metal Injection Mold

Myoung-Ho Kim\*, Hi-Seak Yoon<sup>+</sup>

#### Abstract

The objective of this study is to optimize the Metal Injection Molding(MIM) process with design of experiments(DOE) and numerical analysis. To derive the optimal process condition, experiment or numerical analysis was performed under various process conditions. To analyze the interaction among influential factors contributing to the temperature at flow front and response surface in MIM, both central point and axial point were added to the full factorial design with 2 levels and 5 factors and then their impacts on response variable in 43 experimental conditions were analyzed and the significance was evaluated. As a result, sprue, runner, and gate were completely filled in about 0.247 seconds after injection, the front part of the green body was filled in about 0.3344 seconds, the green body except gate, etc changed to almost solid state in about 3.29 seconds, the Packinging pressure was completed in about 6.29 seconds, and the green body inside and outside and sprue, etc became solid in 13.2 seconds. The impact of individual or reciprocal action of factors on the temperature at flow front was analyzed through regular probability, test statistics, main effect, and interaction effect. As a result, of a total of 31 combinations of factors, 9 unit factors and reciprocal actions were significant, and the screening was also possible. A proper regression equation was drawn with regression analysis and response surface design on the response variable of temperature at flow front, and the applicability could be verified.

**Key Words** : Factor(인자), Response surface analysis(반응표면분석), Melting temperature(용융온도), Mold temperature(금형온도), Injection time(사출시간), Packing time(보압시간), Packing pressure(보압력)

\* 한국생산기술연구원  
주소: 500-480 광주광역시 북구 오룡동 1110-9  
+ 전남대학교 기계시스템공학부

✉ Corresponding Author E-mail: mhtoyoo@kitech.re.kr

## 1. 서론

금속분말 사출성형을 위한 금형제작 및 사출 시 게이트의 위치 및 크기, 런너의 배열, 냉각회로의 구성 등의 금형설계 조건과 사출압력, 사출온도, 금형온도, 냉각시간 등의 성형조건을 모두 고려하여야 한다. 이러한 여러 가지 인자들은 각각 독립적인 요소로서만이 아니라 여러 인자들 간의 상호 복합적인 작용으로 제품의 품질 및 생산성에 영향을 미치게 된다. 따라서 제품의 품질을 결정짓는 여러 가지 인자들에 대한 영향을 분석하여 최적의 공정조건을 도출하기에는 많은 시간과 노력이 필수적으로 수반 되어야 한다.

사출성형 분야에 있어서 최적 공정변수를 도출하기 위한 방안으로서 널리 활용되는 다구찌 방법은 신호인자의 효과를 유지하면서 잡음인자의 종합적 영향을 최소화할 수 있도록 설계 변수를 설정해주는 방법으로, 강건 설계의 중요한 도구로서 사용된다. 그러나 이 방법은 일반적으로 인자에 따른 주 효과에 대해서는 분석이 가능하나 인자간의 교호작용이 고려되지 못하는 단점이 있다<sup>(1)</sup>.

반면에 kn 요인실험법이란, 인자의 수가 n이고 각 인자의 수준 수가 k인 실험계획법으로서 모든 인자 간 수준의 조합에서 실험이 이루어진다. 따라서 실험이 반복되지 않아도 kn번의 실험횟수가 실시되며, 요인 실험법에 의한 실험을 요인실험이라고 하고, 요인실험에서는 인자의 효과와 교호작용을 포함하는 모든 요인효과를 추정할 수 있다는 특징이 있다. 또한, 기본적인 실험계획에 플드 설계, 축점 추가, 축점 블록에 중심점 추가 등 여러 가지 여부에 따라 실험을 계획할 수 있다<sup>(2)</sup>.

그러나 실제 공정의 개발이나 제조현장에서 있어서는 잠재적인 입력변수가 많다. 따라서 스크리닝 설계는 주요 입력변수나 공정품질에 영향을 주는 공정조건을 확인함으로써 입력변수를 줄이는데 사용된다. 스크리닝으로 많이 사용되는 실험계획법은 2수준 완전설계, 일부 실시법, Plackette-Burman법 등이 있으며, 이러한 실험 계획법들은 1차 모델(선형)로 적합 시키는데 유용하고 만일 실험배치에 중심점을 추가시킨다면 2차 모델(곡면)의 정보를 제공할 수 있다<sup>(3,4)</sup>.

따라서 본 연구는 실험계획법과 수치해석 기법을 통하여 각각의 유동선단 온도에 영향을 미치는 여러 인자를 도출하고 이들 인자들 간의 상호관계를 체계적으로 정립하여 최적의 공정 변수를 도출 및 회귀분석과 반응표면분석을 통하여 프로세스 최적화를 도출하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 금속분말 및 바인더

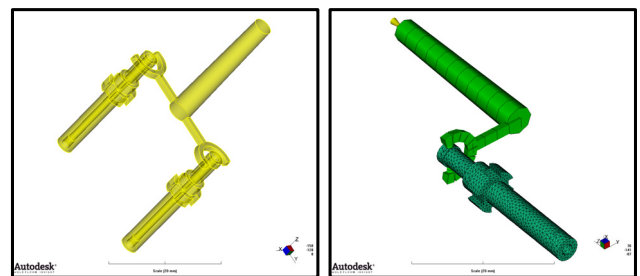
일반적으로 금속분말 사출성형 시 주재료 외에 혼합되는 바인더는 분말을 원하는 모양으로 균일하게 충전시키고 소결이

시작될 때까지 사출 성형된 모양을 유지하도록 하는 순간적인 매개물이다. 따라서 최종제품에는 바인더가 존재하지 않는 것이 보통이며 사출공정에서는 유동특성, 입자들 간의 작용, 탈결합 특성 등에 중요한 영향을 미친다. 따라서 혼합과 성형이 잘 이루어지기 위해서는 열가소성 화합물, 열경화성 화합물, 수계 화합물, 겔 화합물 및 무기 화합물 등 여러 가지 바인더가 함께 혼합되는 것이 보통이다<sup>(5,6)</sup>. 본 연구에서의 금속분말 사출성형을 위한 금속분말은 약 3 $\mu$ m 입자 크기의 STS316L을 사용하였으며, 바인더로서는 PE, PW, SA 디부틸부탈레이트 등을 사용하였다.

### 2.2 성형해석

다수 캐비티 사출금형에서의 충전 불균형은 1997년 Beaumont<sup>(7)</sup>에 의해 그 현상의 원인이 규명된 바 있으며, 그 원인은 충전단계에서 런너 내에 발생하는 불균일한 전단분포에 기인하여 발생되므로 점도 변화에 영향을 주는 수지의 물성, 런너의 배열과 같은 외부 요인과 사출속도, 수지온도, 금형온도, 사출압력과 같은 성형공정조건에 의한 요인에 의해 충전 불균형 양상이 발생하게 된다<sup>(8-12)</sup>.

본 연구에서는 금형의 기구적인 작동 및 코어의 교체 용이성 부여 외에도 금형설계에 대한 적정성 확보 및 검증은 위하여 제품의 모델링 및 유동해석을 먼저 실시하여 설계에 반영하였으며, 사용된 소프트웨어는 UGS NX 7.5, Hyper Mesh 7.1, Mold Flow 2010(MPI)이다. 금형의 설계는 Fig. 1(a)와 같이 제품의 양측에 주입구를 부여하여 유동의 균형을 고려하였으며, 제품의 언더컷 구조상 중앙 후부에 게이트를 부여하지 못하고 제품의 끝 쪽에 게이트를 위치시켰다. 또한, 사출 밸런스를 고려하여 대칭형 게이트를 선정하였으며, 해석에 사용된 메시는 Fig. 1(b)와 같이 4개의 노드를 갖는 3D Volume을 이용하였으며 총 엘리먼트의 수는 62,524개였다.



(a) Solid model of 2-cavity (b) mesh generated model  
 Fig. 1 Mold design and mesh generated model for flow analysis

### 2.3 실험계획법

본 연구에서 진행된 실험계획법은 크게 2단계로 구분되어진다. 우선 금형설계 조건의 선정 과정에서 여러 설계사양에 대해

금형을 제작하는 것은 현실적으로 어려움으로 수치해석을 통해 접근하였다. 해석으로부터 얻어진 결과를 분석하여 최적의 금형설계 변수를 도출한 뒤 이를 토대로 금형을 제작하였다. 반면에 사출성형 조건의 경우는 제작된 금형을 사용하여 반복 실험을 수행함으로써 그 결과를 측정하여 분석을 수행하고, 이를 바탕으로 안정된 제품을 얻을 수 있는 사출성형 조건을 선정하였다.

따라서 우선 1단계로서 1차 검정통계량 분석, 정규확률도 분석, 주 효과도 분석 및 상호효과도 분석을 위하여 Table 1에 나타낸 바와 같이 일반적으로 사출공정에서 제품의 품질 및 생산성에 가장 많은 영향을 미치는 5개의 인자(용융온도, 금형온도, 사출시간, 보압시간, 보압력)를 선정하여 각 인자의 수준수가 2개(상한값, 하한값)이며, 반복횟수가 1인 완전요인 실험계획을 우선 수립하여 총 32개(kn=25)의 실험계획에 축점 10개(k×n=5×2) 및 중심점 1개를 추가하여 총 43가지의 실험계획을 마련하여 최종적으로 Table 4-7과 같은 스크리닝 및 인자들의 상관관계 등을 고찰하기 위한 실험계획을 수립하였다. 여기서 인자들을 구분하기 위한 방법으로 알파벳을 이용하였으며, 용융온도는 A, 금형온도는 B, 사출시간은 C, 보압시간을 D, 보압력을 E라 칭하였다. 또한, 실험계획의 단순화 및 수치해석을 위하여 +1, 0, -1로 표기되는 코드화된 표현방법과 실제적인 값들로 표기되는 비코드화 된 표현방법을 함께 나타내고 있다.

Table 1 The basic concept of DOE for screening

	Factors	Unit	Lower	Center	Upper
Coded	Melt temperature (A)	-	-1	0	+1
	Mold temperature (B)	-	-1	0	+1
	Injection time (C)	-	-1	0	+1
	Packing time (D)	-	-1	0	+1
	Packing pressure (E)	-	-1	0	+1
Uncoded	Factors	Unit	Lower	Center	Upper
	Melt temperature (A)	°C	170	180	190
	Mold temperature (B)	°C	20	40	60
	Injection time (C)	sec	0.2	0.3	0.4
	Packing pressure (E)	MPa	10	20	30

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 성형해석

성형해석에 사용된 소프트웨어는 Autodesk社의 Moldflow AMI 2010<sup>(13,14)</sup>이며, 해석에서 사용된 원료의 물성은 Table 2와 같다.

Fig. 2는 유동해석의 결과로 얻어지는 충전 및 보압 과정 동

Table 2 Properties of material

Melt Density	1.5189g/cm <sup>3</sup>
Solid Density	1.6663g/cm <sup>3</sup>
Ejection Temperature	40°C
Melt Temperature	120 (106~140)°C
Mold Temperature	20~30°C
Max. Shear Stress	0.5Mpa
Max. Shear rate	100,0001/s

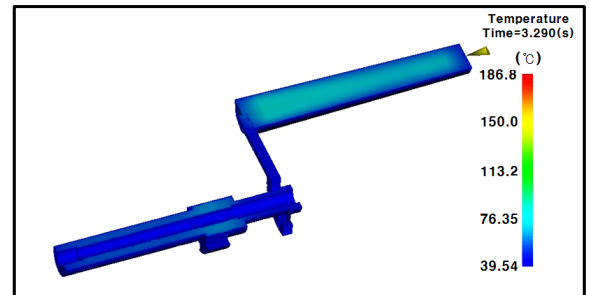


Fig. 2 Temperature simulation at solid stage (3.290 seconds)

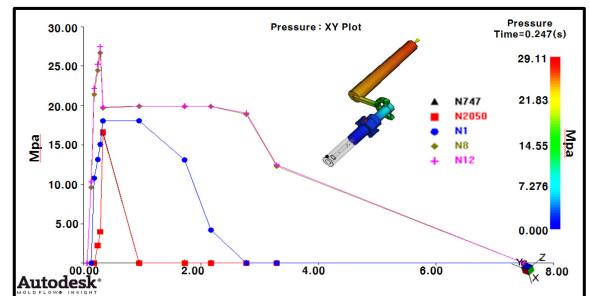


Fig. 3 Distribution of pressure by passage in time

안의 금형내부 및 사출 성형체의 온도 변화를 보여주고 있다. 사출이 시작되어 용융된 수지가 유입되면 각각의 노드에 압력 변화가 나타나며, 이 때 해당 압력에서 반응되는 체적과 온도변화를 알 수 있도록 수행한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 사출 시작 후 약 3.29초가 경과된 후에는 제품부가 거의 고화상태로 되었음을 알 수 있으며, 이 후 사출 성형체의 온도가 약 65°C 미만까지 냉각 후 취출과정을 진행하게 된다. 이와 같이 취출온도를 설정한 이유는 본 연구에서 사용한 수지의 천이온도가 65°C로서 일반적으로 충전이 완전히 끝난 후 금형 내에서 천이온도까지 냉각이 되어야 제품을 금형에서 안정적으로 취출 할 수 있는 조건이 되기 때문이다. 특히, 금속분말사출성형에서 제품의 취출은 매우 중요한 공정으로서 제품이 일반 고분자 바인더와는 달리 금속분말 성분이 사출성형체의 강도를 나타내므로 불충분한 냉각상태에서 취출하면 성형체가 부서지는 현상이 나타나게 된다.

Fig. 3은 시간이 경과함에 따라 변화되는 성형압력의 분포를

나타낸 것으로서 특정 위치에서의 압력변화를 예견할 수도 있다. 여러 가지 보압시간과 보압력 조건의 조합을 해석한 후 전체적으로 균일한 압력변화가 이루어지는 보압시간은 약 3초, 보압력은 약 20MPa를 설정할 수 있었다.

위와 같은 결과를 종합하여 보면 최초의 사출 후 약 0.247초가 경과하면 스푸루, 런너 및 게이트까지 충전이 완료되며, 약 0.3344초가 경과하면 성형체 선단까지 충전이 이루어지고, 약 3.29초가 경과하면 게이트 등을 제외한 성형체는 거의 고화상태로 변하며 약 6.29초가 경과하면 보압이 완료되어 13.2초가 경과하면 성형체 내부 및 외부는 물론 스푸루 등도 모두 고화되어 취출이 가능하다고 판단된다.

**3.2 주효과 및 교호작용**

일반적으로 인자의 개별 또는 교호작용이 반응값에 미치는 영향의 정도와 어느 인자가 반응값에 미치는 영향이 낮아 스크리닝을 할 수 있는지의 여부를 판별할 수 있는 방법에는 크게 3가지가 있다<sup>(2,15)</sup>. 첫째로, 우선 검정통계에 의하여 구해지는 계수에 대한 검정통계량 T값과 검정통계량에 대한 확률인 P값에 의한 방법이다. 둘째로, 정규 확률도 및 파레토 차트를 통하여 효과의 상대적 크기를 비교하고, 통계적인 분석을 통하여 반응값에 미치는 영향의 정도를 평가할 수 있다. 셋째로, 요인들의 그림을 통한 방법으로서 주 효과도 및 상호 효과도를 통하여 반응값들이 하나 또는 그 이상의 인자와 관련되는지를 시각화를 통하여 영향의 정도를 평가할 수 있다.

본 연구에서는 반응값에 미치는 인자들의 영향의 정도 및 주요인자의 상관관계평가를 통하여 인자를 축소하기 위한 스크리닝을 검정통계량에 대한 확률인 P값과 정규 확률도를 이용하여 평가하고, 주 효과 및 교호작용 효과를 함께 살펴보았다.

Table 3는 반응값 즉, 유동 선단온도에 영향을 미치는 주 인자 및 교호작용을 알아보기 위하여 2.3의 실험계획법에서 언급한 바와 같이 총 43가지 실험계획에 의하여 수행한 검정통계량 분석의 결과를 모두 나타내고 있다. 즉, 단일 인자의 영향 5가지, 인자들 중 2개의 인자가 결합되어 영향을 미치는 교호작용 10가지, 인자들 중 3개의 인자가 결합되어 영향을 미치는 교호작용 10가지, 인자들 중 4개의 인자가 결합되어 영향을 미치는 교호작용 5가지, 모든 인자가 결합하여 영향을 미치는 교호작용 1가지로서 총 31가지의 결과를 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 해당되는 인자가 결과에 미치는 영향의 정도로서 P 값을 기준으로 0.1 이하이면 영향의 정도가 높은 유의한 인자, 0.1 보다 크면 영향의 정도가 낮은 무의한 인자라고 판별하였다.

여기서 A는 Melt Temperature, B는 Mold Temperature, C는 Injection Time, D는 Packing Time, E는 Packing Pressure를 나타낸다.

또한, Table 4는 각각의 인자들에 대한 주효과 및 교호작용에 대한 비중을 각각 나타내고 있다. 유동 선단온도에 영향을 미치

**Table 3 Estimated effects and coefficients of flow front temperature**

Terms	Results			
	Effect	Coef	T	P
Constant		160.071	137.62	0
A	21.582	10.791	8.35	0
B	7.482	3.741	2.89	0.016
C	-5.565	-2.782	-2.15	0.057
D	0	0	0	1
E	19.324	9.662	7.47	0
A×B	-4.013	-2.006	-1.51	0.163
A×C	-7.513	-3.756	-2.82	0.018
A×D	0	0	0	1
A×E	-4.388	-2.194	-1.65	0.131
B×C	-11.063	-5.531	-4.15	0.002
B×D	0	0	0	1
B×E	-3.487	-1.744	-1.31	0.22
C×D	0	0	0	1
C×E	-8.688	-4.344	-3.26	0.009
D×E	0	0	0	1
A×B×C	4.062	2.031	1.52	0.158
A×B×D	0	0	0	1
A×C×D	0	0	0	1
A×B×E	4.187	2.094	1.57	0.147
A×C×E	6.388	3.194	2.4	0.038
A×D×E	0	0	0	1
B×C×D	0	0	0	1
B×C×E	13.038	6.519	4.89	0.001
B×D×E	0	0	0	1
C×D×E	0	0	0	1
A×B×C×D	0	0	0	1
A×B×C×E	-3.838	-1.919	-1.44	0.18
A×B×D×E	0	0	0	1
A×C×D×E	0	0	0	1
B×C×D×E	0	0	0	1
A×B×C×D×E	0	0	0	1

**Table 4 Analysis of variance of flow front temperature**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	5	7872.3	7872.26	1574.45	27.71	0
2-Way Interactions	10	2414.4	2414.42	241.44	4.25	0.016
3-Way Interactions	10	1958.5	1958.53	195.85	3.45	0.032
4-Way Interactions	5	117.8	117.81	23.56	0.41	0.828
5-Way Interactions	1	0	0	0	-	-
Curvature	1	69.4	69.39	69.39	1.22	0.295
Residual Error	10	568.2	568.21	56.82	-	-
Total	42	13000.6	-	-	-	-

는 정도를 살펴보면, 단일 인자의 Seq SS는 7,872.3으로서 전체 13,000.6의 약 60.6%의 값을 갖는다. 이와 같은 의미는 총 31가지 단일 또는 혼합인자들 중 단일인자에 의하여 반응값이 지배받는 정도를 나타내므로 단일 인자들은 매우 중요한 인자들이라 할 수 있다. 이와 같은 방법으로 살펴보면, 2가지 요인끼리의 결합은 전체의 약 18.6%를, 3가지 요인끼리의 결합은 전체의 약 15.1%를, 4가지 요인끼리의 결합은 전체의 약 0.9%를, 5가지 요인의 결합은 전체 중 약 0% 즉, 영향이 없음을 알 수 있다. 따라서 단일인자는 매우 중요한 인자이며, 2인자 및 3인자 교호작용은 약간 중요한 인자이고, 4인자 및 5인자 교호작용은 중요하지 않거나 영향이 없는 인자들이라 할 수 있다.

Fig. 4는 각각의 인자들의 영향의 정도를 나타내는 정규 확률도로서 선 근처에 있지 않은 점들은 유의한 인자라는 의미이며, 효과들은 적합된 선으로부터 그렇지 않은 효과들보다 떨어져 있고 큰 절대값을 가진다. 반면에 중요하지 않은 무의한 인자들은 값이 작고, 모든 효과들의 평균이 0 근처에 집중되어 있음을 알 수 있다. 따라서 그림에 나타난 바와 같이 A, B, C, E, AC, BC, CE, ACE, BCE 9가지는 유의한 단일인자 또는 교호작용이며 나머지 항은 중요하지 않은 무의한 단일인자 또는 교호작용이라 판단할 수 있다.

Fig. 5는 단일 인자들 중 주 효과를 알아보기 위한 그림으로서 인자의 수준을 변경했을 경우 평균값이 변하는 정도를 나타내고 있으며, 이 때 보압시간의 인자는 검정통계량 분석 및 정규확률도 등을 통하여 유동 선단온도에 미치는 영향이 매우 적게 나타났기 때문에 제외하고 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 우선 용융온도, 금형온도, 보압력을 증가시키면 유동선단온도는 증가하는 양(+)의 효과를 나타내며, 사출시간은 음(-)의 효과를 나타내는 인자임을 알 수 있다. 또한 용융온도 및 보압력이 금형온도 및 사출시간에 비하여 기울기가 크므로 보다 큰 영향을 미치는 즉, 단일인자들 중에서도 주 효과를 나타내는 인자임을 알 수 있다. 그리고 중심점에 대한 위치로서 각각의 인자들의 변화에 따른 용융온도의 응답의 변화를 예측할 수 있다.

Fig. 6은 인자들의 상호효과 즉, 교호작용을 나타내고 있는 그림으로서 X축 인자의 낮은 수준이 Y축 인자와 상호작용하여 변하는 추이와 X축 인자의 높은 수준이 Y축 인자와 상호작용하여 변하는 추이를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 낮은 수준과 높은 수준에 대한 추이가 서로 교차되는 즉, 2개의 선이 갖는 기울기의 차이가 클수록 교호작용이 크다고 판단할 수 있다. 따라서 금형온도(B)와 사출시간(C)의 기울기 차이가 가장 크므로 교호작용이 가장 크다고 판단할 수 있었으며, 이어서 용융온도(A)와 사출시간(C), 사출시간(C)과 보압력(E)의 상호작용이 큼을 알 수 있다. 이 밖에 다른 교호작용들은 기울기 차이가 거의 없으므로 무시할 수 있을 정도로 교호작용이 매우 작다고 판단할 수 있다. 이와 같은 결과는 Table 5에서 살

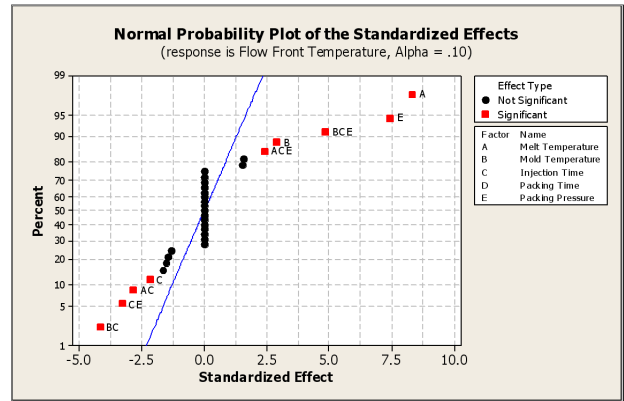


Fig. 4 Normal probability plot of the standardized effects

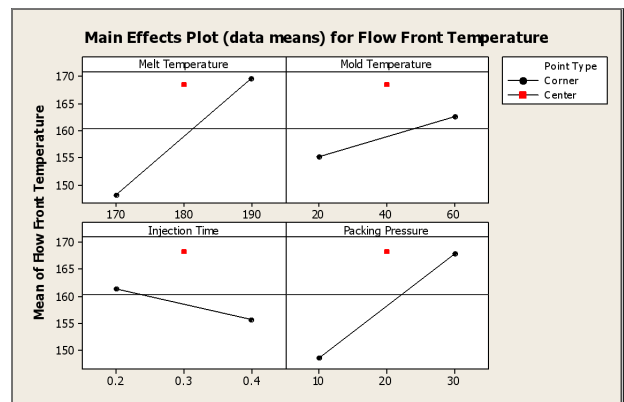


Fig. 5 Main effects plot

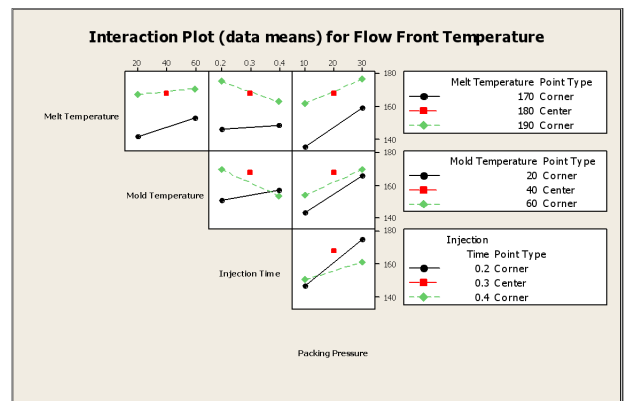


Fig. 6 Interaction plot

Table 5 All effect of factors on response

Response		Effects		
		Main	2-way interaction	3-way interaction
Flow front temp(°C)	Significant factors	A ≈ E > B ≈ C	AC, BC, CE	ACE, BCE
	Variance	60.55%	18.57%	15.06%

퍼본 바와 같이 B×C, A×C 및 C×E의 P값이 0.1보다 낮은 유의미 인자로 표현되어 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

결과적으로 유동 선단온도에 미치는 인자들의 영향 및 상관 관계를 분석한 결과, 각각의 단일인자는 전체의 60.6%의 영향도를 나타내 유동 선단온도에 가장 큰 영향을 미치며, 이는 보압시간을 제외한 4가지 단일인자(용융온도, 금형온도, 사출시간, 보압력)의 영향이라 할 수 있다. 또한 유의한 2인자 교호작용은 금형온도(B)×사출시간(C)이 가장 크고, 용융온도(A)×사출시간(C), 사출시간(C)×보압력(E)의 순으로 나타났으며, 유의한 3인자 교호작용은 용융온도(A)×사출시간(C)×보압력(E) 1가지로서 그 밖의 교호작용들은 유동 선단의 온도에 거의 영향을 미치지 않은 무의한 인자들로 분석되었다. 따라서 유의한 9가지 단일인자 또는 교호작용을 제외한 나머지 22가지는 무의하다고 판단하여 스크리닝을 수행할 수 있었다.

### 3.3 회귀분석 및 반응표면분석

유동 선단온도에 영향을 미치는 요인들 중 P값이 0.1 이상인 단일인자 또는 교호작용들을 스크리닝한 후 유의한 주요인자 및 교호작용들만을 이용하여 회귀분석 및 반응표면분석을 수행하였다.

Table 6은 회귀분석한 결과를 나타낸 표로서 2차방정식이라 가정 후 각각의 계수 값을 나타내고 있으며, Table 7은 선형항, 제곱항 및 교호작용의 영향을 전체적으로 나타내고 있다. 우선 선형적인 측면 즉, 단일항을 살펴보면 이미 스크리닝을 수행하였으므로 P값은 모두 0.1보다 작은 유의한 인자들이라 할 수 있다<sup>(16)</sup>. 이 들 표를 통하여 결과를 살펴보면 Seq SS 합 13,000.6 중 선형항이 7,872.3을 차지하여 약 60.6%의 영향도를 나타낸다고 판단된다. 또한, 교호작용의 P값들 역시 0.1보다 작은 유의한 요인들로서 전체 Seq SS 중 2,034.3을 차지하여 약 15.6%를 나타내고 있다. 그러나 제곱항들은 P값이 모두 0.1보다 크게 나타나고 있으며, Seq SS 합 중 571.3을 차지하여 약 4.4%를 나타내고 있다. 따라서 코드화된 전체적인 회귀식은 Table 5에서 도출된 코드화된 계수를 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 보다 축소시키고자 한다면 제곱항을 비롯하여 영향이 거의 없는 교호작용 항을 삭제하여 최종적으로 식 (2)와 같이 요약하여 나타낼 수 있다. 또한, 이와 동일한 방법과 Table 5의 비코드화된 계수를 이용하여 회귀식 및 요약된 전체적인 회귀식을 식 (3)과 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Yc1 = 167.498 + 9.332A + 2.282B - 4.241C + 8.203E - 0.046A^2 + 0.004B^2 - 0.996C^2 - 6.646E^2 - 0.456AB - 2.206AC - 0.644AE - 3.981BC - 0.194BE - 2.794CE \quad (1)$$

$$Yc2 = 167.498 + 9.332A - 4.241C + 8.203E - 2.206AC - 3.981BC - 0.194BE - 2.794CE \quad (2)$$

$$Yu1 = -259.424 + 1.982A + 1.141B + 549.99C + 5.514E - 0.00046A^2 + 0.00001B^2 - 99.627C^2 - 0.0665E^2 - 0.0023AB - 2.206AC - 0.0064AE - 1.991BC - 0.001BE - 2.793CE \quad (3)$$

$$Yu2 = -259.424 + 1.982A + 549.99C + 5.514E - 2.206AC - 1.991BC - 0.001BE - 2.793CE \quad (4)$$

여기서, A는 용융온도, B는 금형온도, C는 사출시간, E는 보압력이다.

Table 6 Estimated regression coefficients

Term	Coefficient		P
	Uncoded	Coded	
constant	-259.424	167.498	0
A	1.98169	9.332	0
B	1.14056	2.282	0.141
C	549.99	-4.241	0.009
E	5.51443	8.203	0
A×A	-0.00046	-0.046	0.993
B×B	0.00001	0.004	0.999
C×C	-99.627	-0.996	0.856
E×E	-0.0664627	-6.646	0.233
A×B	-0.00228125	-0.456	0.771
A×C	-2.20625	-2.206	0.166
A×E	-0.0064375	-0.644	0.682
B×C	-1.99062	-3.981	0.016
B×E	-0.0010	-0.194	0.902
C×E	-2.79375	-2.794	0.083

Table 7 Analysis of variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	7364	7364	526	6.82	0
Linear	4	6037.6	6037.6	1509.41	19.56	0
Square	4	392.5	392.5	98.13	1.27	0.304
Interaction	6	933.9	933.9	155.64	2.02	0.097
Residual Error	28	2160.2	2160.2	77.15		
Total	42	9524.2				

이와 같이 도출된 회귀식의 이용은 실험을 수행하지 않은 조건에 대한 유동 선단온도의 결과값을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 비코드화된 조건으로서 용융온도 170℃, 금형

온도 50°C, 사출시간 0.4sec, 보압력 15MPa라 할 때 이 조건을 코드화로 바꾸어 표현하면, 용융온도는 -1, 금형온도는 +0.5, 사출시간은 +1, 보압력은 -0.5로 표현될 수 있다. 따라서 비코드화된 조건은 식 4-3 또는 4-4에 대입하고, 코드화된 조건은 식 4-1 또는 4-2에 대입하여 계산할 수 있으며, 이와 같이 계산한 결과 반응값인 유동 선단온도는 비코드화된 식 4-3을 이용한

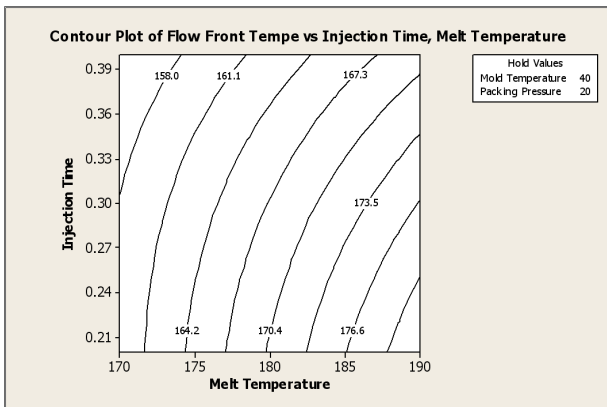
결과 149.827°C가 산출되며, 코드화된 식 4-1을 이용한 결과 149.829°C가 산출되어 약 0.0014% 정도의 오차만을 보임을 알 수 있다. 또한, 영향이 작은 인자항을 삭제한 식 4-2 및 4-4에 동일한 방법으로 대입하여 계산하면 151.489°C 및 172.849°C가 산출되어 약 14.1% 정도의 오차를 보임을 알 수 있다. 이와 같은 결과로서 유동 선단에 대하여 도출된 회귀식의 적정함을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 유의한 교호작용의 요인들의 값의 변화에 따라 용융 선단온도가 변화되는 내용을 파악하기 위하여 반응표면분석법 중 등고선 선도를 이용하여 나타낸 것이며, 이 중 Fig. 7(a)는 용융온도와 사출시간, Fig. 7(b)는 금형온도와 사출시간, Fig. 7(c)는 사출시간과 보압력의 변화에 따른 용융 선단온도의 변화를 각각 나타낸 것이다. 이들 그림에 나타난 바와 같이 우선 용융온도, 금형온도, 보압력이 높을수록 용융 선단온도는 증가하는 관계가 있음을 확인할 수 있으며, 이와 반대로 사출시간은 낮을수록 용융 선단온도가 증가하는 관계가 있음을 확인할 수 있다. 그러나 이와 같이 4가지 인자인 용융온도, 금형온도, 사출시간, 보압력이 모두 정비례 관계는 아니며 서로 상호작용을 통하여 용융 선단온도를 결정하므로, 적절한 용융 선단온도를 형성함에 있어서 서로 반대되는 관계도 있을 수 있으므로 각 인자들의 적절한 콤비네이션이 필수적이라 사료된다.

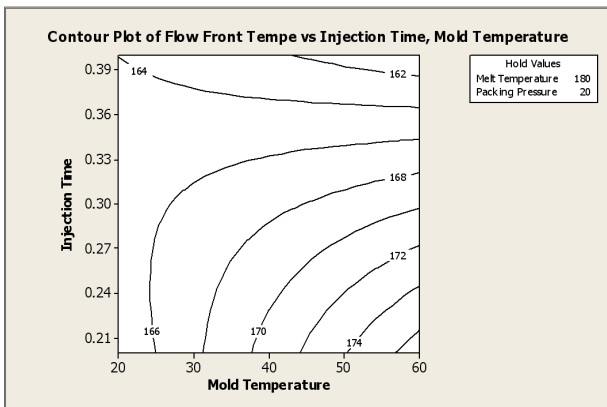
#### 4. 결론

금속분말사출성형에 있어 유동 선단온도에 영향을 미치는 인자들의 상호관계 및 반응표면분석을 실시하고자 2수준 5인자의 완전 요인 설계에 중심점 및 축점을 추가하여 43가지 실험 조건에 대하여 반응변수에 미치는 영향을 분석하고 유의성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 향후에는 실제금형을 제작하고 실험결과와 해석결과를 비교 및 검증하여 신뢰성을 확보할 계획이다.

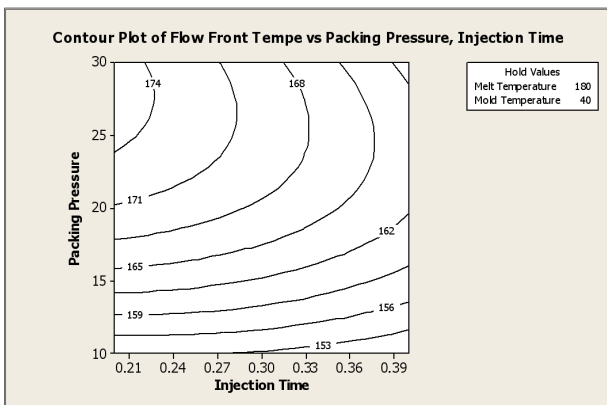
- (1) 사출 유동해석을 통하여 사출 후 약 0.247초가 경과하면 스푸루, 런너 및 게이트까지 충전이 완료되며, 약 0.3344초가 경과하면 성형체 선단까지 충전이 이루어지고, 약 3.29초가 경과하면 게이트 등을 제외한 성형체는 거의 고화상태로 변하며 약 6.29초가 경과하면 보압이 완료되어 13.2초가 경과하면 성형체 내부 및 외부는 물론 스푸루 등도 모두 고화됨을 알 수 있었다.
- (2) 인자의 개별 또는 교호작용이 유동선단온도에 미치는 영향의 정도를 정규 확률도, 검정통계, 주효과도 및 상호 효과도를 통하여 분석한 결과 전체 31가지 인자들의 조합 중 9가지의 단일인자 및 교호작용이 유의함을 알 수 있었으며 스크리닝이 가능하였다.



(a) Melt temperature versus injection time



(b) Mold temperature versus injection time



(c) Injection time versus packing pressure

Fig. 7 Contour plot of flow front temperature between conditions

- (3) 유동 선단온도에 영향을 미치는 정도를 살펴보면, 보압시간을 제외한 용융온도, 금형온도, 사출시간, 보압력 각각의 단일인자가 전체의 60.6%의 가장 큰 영향도를 나타내었고, 유의한 2인자 교호작용은 금형온도×사출시간이 가장 크고, 용융온도×사출시간, 사출시간×보압력의 순으로 나타났으며, 유의한 3인자 교호작용은 용융온도×사출시간×보압력 1가지로서 그 밖의 교호작용들은 거의 영향을 미치지 않은 무의한 인자들로 분석되었다.
- (4) 유동 선단온도의 반응 변수에 대한 회귀분석 및 반응표면분석으로 적절한 회귀식이 도출되어 적용 가능성을 검증하였으며, 용융온도, 금형온도, 보압력이 높을수록 용융 선단온도는 증가하는 관계가 있음을 확인할 수 있으며, 이와 반대로 사출시간은 낮을수록 용융 선단온도가 증가하는 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

### References

- (1) Park, K., Ahn, J. H., and Choi, S. R., 2002, "Application of Design of Experiments and Numerical Analysis to Optimal Design for Injection Molding Processes of Electrical Parts," *J. of the KSME*, Vol. 26, No. 7, pp. 1348~1356.
- (2) Lee, S. B., 2005, New Minitab Practical completion, Eretech Inc, Korea
- (3) Posco 6sigma research group, 2005, Easy to run Six Sigma DFSS techniques, Korea Management Association, Korea
- (4) Ryu, M. R., Lee, K. H., Kim, Y. H., and Park, H. S., 2004, "Application of Response Surface Method for Injection mold Design Optimization," *Proceedings of KSPE fall Conference*, pp. 223~226.
- (5) Chih, C. C., Chi, W. W., and Chih, M. Y., 2006, "Optimization of Composite MIM Feedstock Rheological Behaviour by Experimental Analysis," *2006 Powder Metallurgy World Congress*, pp. 495~496.
- (6) Muhammad, H. I., Mohd, A. O., Istikamah, S., Aidah, J., and Zahurin, H., 2006, "Effect of palm Stearin on Rheological Properties of Metal Injection Molding(MIM) Feedstock," *2006 Powder Metallurgy World Congress*, pp. 223~224.
- (7) Beaumont, J. P., and Young, J. H., 1997, "Mold Filling Imbalances in Geometrically Balanced Runner System," *Journal of Injection Molding Technology*, Vol. 1, No. 3, pp. 133~144.
- (8) Beaumont, J. P., Young, J. H., and Jawoski, M. J., 1998, "Solving Mold Filling Imbalance in Multi-Cavity Injection Molds," *Journal of Injection Molding Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 47~58.
- (9) Choi, Y. H., and Lee, Y. S., 1997, "The Effects of Discharge Condition on Mechanical properties of Injection Moldings," *J. of the KSMTE*, Vol. 6, No. 1, pp. 84~91.
- (10) Hwang, C. J., Ko, Y. B., Park, H. P., Chung S. T., and Rhee, B. O., 2006, "Computer Aided Engineering Design of Powder Injection Molding Process for Dental Scaler Tip Mold Design," *2006 Powder Metallurgy World Congress*, pp. 497~498.
- (11) Park, J. B., and Kwon, T. H., 1992, "Finite Element Analysis of Powder Injection Molding Filling Process," *Proceedings of KSME Spring Conference*, Vol. 1, pp. 434~439.
- (12) Jeon, E. C., Park, J. W., Kim, S. Y., Lee, C. J., and Ahn, K. W., 2008, "A Study on the Injection Flow with Viscoelastic Effect," *J. of the KSMPE*, Vol. 7, No. 3, pp. 25~29.
- (13) Lee, D. H., 2010, AMI training manual, Autodesk, Korea
- (14) Jung, Y. D., 2007, Moldflow MPI 6.0~6.1, Inter Vision, Korea
- (15) Montgomery, D. C., 2005, Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, U.S.A.
- (16) Rhee, B. O., Choi, J. H., and Tae, J. S., 2009, "Reduction of Design Variables for Automated Optimization of Injection Mold Cooling Circuit," *J. of the KSMTE*, Vol. 18, No. 4, pp. 417~422.