



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2010年 2月

博士學位論文

금속분말 사출성형 공정 최적화에
관한 연구

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

李 鍾 範

금속분말 사출성형 공정 최적화에
관한 연구

A Study on the Optimization
for Metal Injection Molding Process

2010 年 2 月 日

朝鮮大學校 大學院

機 械 工 學 科

李 鍾 範

금속분말 사출성형 공정 최적화에 관한 연구

指導教授 崔 秉 起

이 論文을 工學博士學位 論文으로 提出함.

2009 年 10 月 日

朝鮮大學校 大學院

機 械 工 學 科

李 鍾 範

李鍾範의 博士學位 論文을 認准함

委員長 : 朝鮮大學校 工學博士 梁仁榮 印

委員 : 朝鮮大學校 工學博士 鄭在康 印

委員 : 朝鮮大學校 工學博士 車龍勳 印

委員 : 木浦大學校 工學博士 金一洙 印

委員 : 朝鮮大學校 工學博士 崔秉起 印

2009 年 12 月 日

朝鮮大學校 大學院

목 차

Nomenclatures	i
List of Figures	iii
List of Tables	vi
List of Photographs	viii
ABSTRACT	ix
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 동향	3
1.3 연구 목적	6
제 2 장 이론적 배경	8
2.1 금속분말 사출성형의 개요	8
2.2 금속분말 사출성형 프로세스	16
제 3 장 실험	24
3.1 금속분말 및 바인더	24
3.2 금형설계 및 제작	27
3.3 사출성형 및 탈지·소결	32
3.4 반응표면분석	36
제 4 장 결과 및 고찰	40

4.1 사출 유동해석	40
4.2 주요인자의 상관관계	47
4.3 회귀분석 및 반응표면분석	78
4.4 최적 탈지조건 도출	103
4.5 공정능력 분석	113
4.6 치수 정밀도 분석	119
제 5 장 결 론	122
참고문헌	124

Nomenclatures

α	:	Significance level(1-reliability), $\alpha=0.1$ for screening and $\alpha=0.05$ for regression and optimization
A	:	Melting temperature of metal powder and binder
Adj MS	:	Adjusted Means Squares
Adj SS	:	Adjusted Sums of Squares
B	:	Mold temperature
C	:	Injection time
CGI	:	Capability Growth Index
Coef	:	Coefficient
Con	:	Concentricity
D	:	Packing time
DF	:	Degrees of Freedom
Dia.	:	Diameter
DOE	:	Design Of Experiment
DPMO	:	Defect Per Million Opportunity
E	:	Packing pressure
F	:	Sum of square for average of pure error
K	:	Numer of factors
LSL	:	Lower Spec Limit
Max	:	Maximum

Min	:	Minimum
min	:	Consumed minutes of debinding or sintering
N	:	Number of the total samples
N*	:	Number of the missed total samples
P	:	Probability value of the test statistic
PPM	:	Parts Per Million
Q1	:	First quartile deviation
Q3	:	Third quartile deviation
RMS	:	Root Mean Square
SE Mean	:	Standard Error of the Mean
Seq SS	:	Sequential Sums of Squares
StDev	:	Standard Deviation
T	:	Test statistic of coefficients
USL	:	Upper Spec Limit
Y _{c1}	:	Regressed full equation using the coded coefficient
Y _{c2}	:	Regressed core equation using the coded coefficient
Y _{u1}	:	Regressed full equation using the uncoded coefficient
Y _{u2}	:	Regressed core equation using the uncoded coefficient

List of Figures

Fig. 2-1	Outline of MIM process	15
Fig. 2-2	Inter relation of MIM processes	17
Fig. 2-3	A Schematic diagram of screw type injection molding machine	18
Fig. 2-4	Six debinding technologies for solvent extraction and thermal debinding	21
Fig. 3-1	Design of experiment for mixing	25
Fig. 3-2	Drawing of green part for the flange	28
Fig. 3-3	Full 3D shape of the mold	28
Fig. 3-4	Assembly for the flange	29
Fig. 3-5	Cavity plate for the flange	29
Fig. 3-6	Cavity for the flange	30
Fig. 3-7	Core for the flange	30
Fig. 4-1	Solid model of 2-cavity flange for MIM	41
Fig. 4-2	4-node tetrahedral mesh	41
Fig. 4-3	Mesh generated model of flange for MIM	42
Fig. 4-4	Flow rate simulation result (0.247 seconds)	45
Fig. 4-5	Temperature simulation of initial injection (0.3344 seconds)	45
Fig. 4-6	Temperature simulation at solid stage (3.290 seconds)	45
Fig. 4-7	Density simulation result (13.29 seconds)	46
Fig. 4-8	Pressure variation on the nodes of part	46
Fig. 4-9	Normal probability plot of the standardized effects of flow front temperature for screening	52
Fig. 4-10	Main effects plot for flow front temperature	53
Fig. 4-11	Interaction plot for flow front temperature	53

Fig. 4-12 Normal probability plot of the standardized effects of part weight for screening	58
Fig. 4-13 Main effects plot for part weight	59
Fig. 4-14 Interaction plot for part weight	59
Fig. 4-15 Normal probability plot of the standardized effects of filling time for screening	64
Fig. 4-16 Main effects plot for filling time	65
Fig. 4-17 Interaction plot for filling time	65
Fig. 4-18 Normal probability plot of the standardized effects of cycle time for screening	69
Fig. 4-19 Main effects plot for cycle time	70
Fig. 4-20 Interaction plot for cycle time	70
Fig. 4-21 Normal probability plot of the standardized effects of volumetric shrinkage for screening	75
Fig. 4-22 Main effects plot for volumetric shrinkage	76
Fig. 4-23 Interaction plot for volumetric shrinkage	76
Fig. 4-24 Contour plot of flow front temperature between melt temperature and injection time	81
Fig. 4-25 Contour plot of flow front temperature between mold temperature and injection time	82
Fig. 4-26 Contour plot of flow front temperature between injection time and packing pressure	82
Fig. 4-27 Contour plot of part weight between mold temperature and packing pressure	85
Fig. 4-28 Contour plot of filling time between mold temperature and injection time	89
Fig. 4-29 Contour plot of filling time between mold temperature and packing pressure	89

Fig. 4-30 Contour plot of filling time between injection time and packing pressure	90
Fig. 4-31 Contour plot of cycle time between mold temperature and injection time	93
Fig. 4-32 Contour plot of volumetric shrinkage between melt temperature and injection time	97
Fig. 4-33 Contour plot of volumetric shrinkage between mold temperature and injection time	98
Fig. 4-34 Results of the response optimization	102
Fig. 4-35 Relation between debinding time and weight at 45°C	105
Fig. 4-36 Relation between debinding time and debinded weight at 45°C	105
Fig. 4-37 Relation between debinding time and weight at 50°C	107
Fig. 4-38 Relation between debinding time and debinded weight at 50°C	107
Fig. 4-39 Relation between debinding time and weight at 55°C	109
Fig. 4-40 Relation between debinding time and debinded weight at 55°C	109
Fig. 4-41 Relation between debinding time and debinded weight	110
Fig. 4-42 Relation between debinding time and debinded weight rate	110
Fig. 4-43 Comparison of conventional method with secondary thermal debinding process	111
Fig. 4-44 Marginal plot of gravity versus number	114
Fig. 4-45 Time series plot	115
Fig. 4-46 I chart of gravity	115
Fig. 4-47 Probability plot	116
Fig. 4-48 Histogram of gravity	116
Fig. 4-49 Process capability	117
Fig. 4-50 Process capability sixpack	117

List of Tables

Table 2-1	Advantages and disadvantages of MIM	12
Table 3-1	Mixing conditions by DOE	25
Table 3-2	Specification of dispersion kneader	26
Table 3-3	The used testers for the experiment	31
Table 3-4	Specification of injection molding machine	33
Table 3-5	Data sheet of sintering schedule	34
Table 3-6	Specification of the furnace for debinding and sintering	35
Table 3-7	The basic concept of DOE for screening	38
Table 3-8	Design of experiment for screening	39
Table 4-1	Characteristic of flange model	42
Table 4-2	Criteria of injection molding	42
Table 4-3	Estimated effects and coefficients of flow front temperature for screening	51
Table 4-4	Analysis of variance of flow front temperature for screening	52
Table 4-5	Estimated effects and coefficients of part weight for screening	57
Table 4-6	Analysis of variance of part weight for screening	58
Table 4-7	Estimated effects and coefficients of filling time for screening	63
Table 4-8	Analysis of variance of filling time for screening	64
Table 4-9	Estimated effects and coefficients for cycle time for screening	68
Table 4-10	Analysis of variance of cycle time for screening	69
Table 4-11	Estimated effects and coefficients of volumetric shrinkage for screening	74
Table 4-12	Analysis of variance of volumetric shrinkage for screening	75
Table 4-13	All effect of factors on responses	77

Table 4-14	Estimated regression coefficients for flow front temperature	80
Table 4-15	Analysis of variance for flow front temperature	81
Table 4-16	Estimated regression coefficients for part weight	85
Table 4-17	Analysis of variance for part weight	85
Table 4-18	Estimated regression coefficients for filling time	88
Table 4-19	Analysis of variance for filling time	88
Table 4-20	Estimated regression coefficients for cycle time	92
Table 4-21	Analysis of variance for cycle time	93
Table 4-22	Estimated regression coefficients for volumetric shrinkage	97
Table 4-23	Analysis of variance for volumetric shrinkage	97
Table 4-24	Result of the main and interaction effects for responses	98
Table 4-25	Central composite design and responses for response optimizer	101
Table 4-26	Setting of the response values for optimizer	102
Table 4-27	Result of solvent extraction at 45°C	104
Table 4-28	Result of solvent extraction at 50°C	106
Table 4-29	Result of solvent extraction at 55°C	108
Table 4-30	Applied schedule for thermal debinding	112
Table 4-31	Descriptive statistics	118
Table 4-32	Capability analysis result	118
Table 4-33	Measured data	120
Table 4-34	Average measured data	121
Table 4-35	Scorecard through measurement	121

List of Photographs

Photo. 3-1 Mixing and pellet	26
Photo. 3-2 Manufactured mold	31
Photo. 3-3 Injection molding machine	33
Photo. 3-4 Solvent extraction using N-hexan	34
Photo. 3-5 Debinding and sintering furnace	35
Photo. 4-1 Cracks on the green part during the solvent extraction at 55°C	103

ABSTRACT

A Study on the Optimization for Metal Injection Molding Process

Lee, Jong-Bum

Advisor : Prof. Choi, Byung-Ky, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

The objective of this paper is study the optimization for metal injection molding process by using the design of experiments(DOE) and numerical analysis. In order to determine optimal process parameters, experiment and computerized analysis have been performed for various process conditions.

The summarized results are as follows ;

- 1) It took about 0.247 seconds to be filled up to gate, about 3.29 seconds until display maximum density showing almost solid green body, and about 13.2 seconds until it becomes solid on the whole perfectly by computerized analysis.
- 2) Screening was achieved by test statistic analysis, main effect and interaction analysis with the factors(melt temperature, mold temperature, injection time, and packing pressure) from performed 43 various experiment conditions.

- 3) Proper coded and uncoded regression equations and optimization for responses (flow front temperature, part weight, filling time, cycle time, and volumetric shrinkage) achieved from studying and verifying interrelation of the factors.
- 4) About 70% of whole binder extracted within about 10 minutes and temperature of solvent is higher, the debinding rate is fast. 50°C was the most suitable condition for solvent extraction because of crack occurrence on green body at 55°C.
- 5) It took about 14.5 hours to perform secondary thermal debinding, which was only about 35% of the entire time taken compared with single thermal debinding process, even if it considers solvent extraction time required. Therefore, the applied method greatly reduces the debinding time.
- 6) The excellent process capability showed that the PPM total and Z.Bench were 9,946.8 and 2.33 showing good quality rate of around 99.01% and sigma level of 3.83. As a result, the process and optimization have been improved, and the proposed approach could be successfully reflected on the metal injection molding.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

분말사출성형(PIM ; Powder Injection Molding)이란 금속 또는 세라믹스 분말과 유기재료로 만들어진 결합제를 혼합한 후 사출 성형법을 이용하여 성형하고 결합제를 제거, 최종적인 소결을 거쳐 금속 제품 또는 세라믹스 제품을 제조하는 최신 분말성형기술을 말한다¹⁾. 이는 난가공성 소재의 대량생산 기술로 복잡한 3차원 성형 부품의 양산이 가능한 방법으로 분말야금기술과 정밀한 플라스틱 부품의 대량 생산 기술인 사출성형 기술이 접목된 신공정이다. 이러한 분말사출성형법은 사용 재료에 따라 금속분말 사출성형(MIM ; Metal Injection Molding), 세라믹 분말사출성형(CIM ; Ceramic Injection Molding) 등으로 분류되어 질 수 있다²⁾.

MIM은 1970년대 후반이래 새로운 금속분말의 성형기술로 크게 각광을 받으며 연구되어 오고 있으며³⁾, 사출성형의 우수한 성형공정을 지니면서 금속에도 적용될 수 있는 기술이다. MIM은 분말유동의 제한이나 압축력전달의 어려움 때문에 통상적인 분말야금 공정에 의해서는 얻을 수 없는 복잡한 형상의 부품을 플라스틱 사출성형에서와 같은 성형원리를 이용하여 분말성형체를 얻을 수 있게 하는 새로운 성형방법이 개발된 것이다. 이러한 새로운 공정은 분말과 바인더의 혼합부터 시작된다. 이 혼합체는 과립형 모양으로 잘게 부수어지고, 이를 원하는 모양으로 사출성형한 후 사출성형체에서 바인더를 제거시키고 소결을 실시한다. 최종적인 제품을 완성시키기 위해 필요에 따라 이 소결체를 더 조밀하게 하거나 열처리 또는 기계가공을 거친다. 이러한 소결체는 매우 복잡한 모양과 사출성형에 의한 높은 정밀도를 갖는다⁴⁾.

금속분말 사출성형의 특징은 삼차원 복잡 형상의 작은 금속부품을 높은 정밀도로 대량생산 할 수 있다는 것이다^{5~7)}. 분말제조기술, 성형기술 및 소결기술의 발전에 따라 저가격의 실현이 가능해져, 최근 많은 나라에서 고급시계

밴드, 식품, OA사무기기, sewing machine, AV기기, 전기기기 등의 복잡형상 부품 등으로 그 용도가 점차 확대되고 있다^{8~11)}.

또한, 금속분말 사출성형을 위한 금형제작 및 사출 시 게이트의 위치 및 크기, 런너의 배열, 냉각회로의 구성 등의 금형설계 조건과 사출압, 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.

따라서 본 연구는 실험계획법과 수치해석 기법을 통하여 각각의 반응값들에 영향을 미치는 여러 인자를 도출하고 이들 인자들 간의 상호관계를 체계적으로 정립하여 최적의 공정변수를 경제적으로 찾아내고자 하는 방법론을 제안하고, 금속분말 사출성형 공정에서 중요하게 대두되고 있는 수축률을 고려한 최적설계 및 탈지와 소결공정 등의 프로세스 최적화를 도출하고자 한다.

1.2 연구 동향

MIM은 세라믹분말 사출성형과 유사하므로 그 유래를 함께 살펴보면 1920년대의 세라믹 방전 플러그 제조까지 거슬러 올라간다. 그 후 세계 2차 대전 동안 기체 확산으로 우라늄을 농축하는 튜브가 유기물 고분자와 니켈분말을 사용하여 성형된 것이 보고되었다. 그리고 1950년 후반에는 비록 작은 생산량이지만 카바이드와 세라믹 부품들이 에폭시, 왁스, 셀룰로이드의 바인더를 이용하여 성형되었다. 실질적인 MIM은 1970년대 초기에 미국의 Parmatech사에서 처음 사용되기 시작하였고, 1979년 두개의 디자인상이 금속부품에 주어졌을 때 드디어 관심분야가 MIM으로 집중되기 시작하였다. 이를 계기로 1980년대 이후 현재까지 많은 MIM 회사들이 정밀하고 복잡한 모양의 부품을 제조하기 위하여 노력하고 있으며 그 시장도 점점 확대되고 있다^{12, 13}).

1987년을 전후하여 MIM에 관한 기술문헌이 본격적으로 발표되기 시작하여, 그 증가가 1993년경까지 계속되었고, 그후 감소되다가 다시 증가하여 1998년 최대값을 나타내었으며, Pennsylvania State University와 Rensselaer Polytechnic Institute가 가장 많은 기술정보를 발표한 것으로 나타났다.

한편, 금속분말 사출성형 관련 세계적인 특허동향을 연도별 출원 추이로 살펴보면 1985년 17건으로 시작하여 1987년까지는 완만한 증가를 나타내다가 1988년 65건으로 급격한 증가를 나타낸 후 1989년에 일시적인 감소 현상을 나타내었다. 그 후 1990년부터 다시 증가되기 시작하여 1992년 105건으로 최대값을 나타낸 후 다시 감소되었다. 감소되는 과정에서 1996년의 급격한 감소를 제외하면 비교적 완만한 감소를 나타내었으며, 그 중에서도 1997년과 1999년에는 90건이 넘는 특허가 출원되었다. 따라서 세계적인 금속분말 사출성형 관련 특허동향을 종합하여 분석해 보면, 세계적으로 금속분말사출성형은 1992년을 전후하여 기술이 완성 단계에 이르렀으며, 1997년과 1999년경에 새로운 용도가 개발되었을 것으로 사료된다.

MIM 관련 한국특허의 연도별 출원추이를 살펴보면, 1985년과 1986년에는 출원이 없다가 1987년 1건이 출원된 이후 1988년 3건, 1989년 4건으로 늘어난 후 1990

년 1건으로 줄어들었으며, 1991년에 다시 4건으로 늘어나 1997년까지 매년 2~6건씩 출원되었다. 그 후 1997년에 13건으로 최대값을 나타내었으며, 1998년은 5건으로 줄어들었다가 2000년에는 9건까지 지속적으로 늘어났다. 따라서 세계적 현황과 비교하여 보면, 국내는 세계적인 추세보다 약 5년이 늦은 1990년대 초반부터 1997년까지 금속분말사출성형기술이 확립되었고, 2000년을 전후하여 새로운 기술 및 용도가 개발되었을 것으로 사료된다¹⁴⁾.

그러나 국내 특허출원의 경우 출원인들의 국적을 살펴보면, 우리나라가 37건으로 전체의 37%를 차지하고 있으며, 그 다음이 일본(19건), 미국(9건), 독일(4건)의 순서를 보이고 있다. 이와 같은 결과를 연도별로 살펴보면, 1991년까지는 외국인 출원이 많았으나 1992년과 1993년에는 외국인과 내국인의 출원건수가 동일하다가 1993년부터 1996년까지는 내국인 출원이 많았다. 그 이후에는 많고 적음이 교대로 나타났다. 따라서 국내의 MIM 기술은 1991년까지는 외국기술을 도입하는 시기였고, 그 이후로부터 국내 기술 개발이 이루어져 2000년 초반에야 비로소 몇몇 연구자들의 기술이 안정화 되었다고 할 수 있으나 이미 상당부분을 일본을 비롯한 외국의 원천기술이 국내를 상당부분 잠식하고 있다고 판단된다.

그러나 국내의 금속분말 사출성형 기술에 대한 연구는 일부 대학이나 실험실에서 관련 기초연구를 하는 단계를 벗어나는 상태이나, 기술의 장점인 우수한 제품의 특성을 유지할 뿐만 아니라 생산 단가도 줄일 수 있기 때문에 여전히 성장 가능성의 잠재력을 가지고 있으며, 응용 가능한 분야에 대하여 MIM 공정기술의 확보, 공급되는 분말 재료의 단가, 그리고 공정기술의 표준화와 같은 문제점을 보완한다면 현재보다 더 큰 발전을 이룰 수 있을 것이다.

또한, 금속분말 사출성형 기술이 현시점에서는 고가의 원료 분말로 인해 그 적용 대상이 복잡한 형상의 소형부품에 한정되어 있고, 탈 바인더 및 소결 등 생산공정면에서도 해결해야 될 여지가 남아있지만 최근 본격적인 실용화가 진전됨에 따라 가까운 장래에 원료분말가격의 저하, 적용재료의 확대, 성형기술의 개선 등이 이루어질 전망이다.

이상과 같이 금속분말 사출성형에 대한 국내의 연구동향 및 특허동향을 종합해

보면, 국내의 기술수준 및 연구단계가 기술 선진국에 비하여 매우 낮은 실정이나 MIM 특징을 살린 독자적인 용도개발도 모색되고 있어, 향후 금속부품의 새로운 성형가공기술로서 더욱 시장규모가 확대될 것으로 기대되고 있으며^{15~18)}, 특히 최근 나노기술에 관한 연구개발이 활발하게 진행되고 있어 극미세 분말제조가 가능해져 MIM의 용도는 더욱 더 확대될 것으로 예상 된다^{19, 20)}.

1.3 연구 목적

정보통신기술은 전기통신, 방송, 컴퓨팅, 통신망 등 사회 기반을 형성하는 기술분야로서 통신 분야에서는 위성·이동통신기술, 영상통신기술, 멀티미디어 기술 등에 큰 발전을 나타내고 있고, 공간이용 분야에서는 초고층빌딩, 물류시설 및 건설기술 등에서 많은 발전을 이루고 있으며 또한, 운수 및 교통 분야에서는 각종 교통수단의 고속화 및 고도화를 지속적으로 추구하고 있다.

특히, FTTH(Fiber To The Home)의 본격화로 어느 기지(CO)에서 가입자 밀집 지역까지 하나의 광섬유를 포설하여 그 신호는 N개의 ONU(Optical Network Unit)으로 분할되고, 이 N개의 ONU는 다시 N'개의 ONU'로 연속적으로 분배되는 네트워크 구조가 이루어지고 있다. 따라서 이에 소요될 광통신 부품들의 수요가 크게 증가될 것으로 전망되고 있으며, 2020년에 요구되는 데이터 전송 용량은 현재의 100배 이상으로 광통신 용량이 기하급수적으로 증가하는 추세가 전망되므로 현재의 광통신 관련 제품의 수요급증이 예상되고 있다. 또한, 광통신 부품시장은 기술개발속도가 가속화되어 고속성장이 예상되며 시장경쟁이 매우 치열해질 것으로 전망되는 바, 기술적 선점과 새로운 프로세스를 이용한 고부가가치화는 절대적으로 필요하다.

광통신을 위한 필수적인 부품들 중 본 연구에서 고찰하고자 하는 플랜지는 아답터의 핵심부품으로서 패치코드를 직접 연결할 수 있는 기능을 수행하고 그 종류에는 각각의 아답터에 따라 몇 가지로 분류될 수 있으며, 낮은 삽입손실과 반사손실, 고 정밀도 및 신뢰도 등을 갖추어야 하므로 정밀도가 매우 높아야 한다. 따라서 최근에 소형화 추세에 맞추어 주목을 받으며 성장하고 있는 현장조립형 패치코드는 제작비용이 높아 모듈가격 상승의 원인이 되고 있으므로 이에 대한 새로운 제조방법 등의 개발이 절실히 필요하다 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 플랜지를 금속분말 사출성형 기법을 적용하여 제조할 수 있는 방안을 고찰하고자 하며, 또한 본 연구에서는 2가지 부품을 별도의 기계 가공 후 도금 및 조립공정을 통하여 LC 타입 현장조립형 플랜지 제품을 양산하고

있는 기존방식을 MIM에 의한 성형 및 탈지·소결공정을 적용한 제작기술과 이에 대한 프로세스를 정립하고 공정의 최소화 및 적용 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

일반적으로 사출성형과 관련된 인자 간에는 교호작용이 존재한다. 예를 들어 런너시스템의 설계와 냉각회로의 구성이 상호간에 영향을 미친다면, 이를 효과적으로 고려할 수 있도록 실험계획을 수립해야 한다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 교호작용을 고려하기 위한 실험계획을 수립하고, 수치해석을 병행하여 최적의 사출금형설계 및 성형조건을 보다 경제적으로 도출하기 위한 연구를 진행하였다.

제 1장은 연구배경 및 동향과 연구목적으로서 MIM의 용도 및 종류, 국내·외 현황, 공정개선 및 프로세스 정립을 위한 목적과 방법에 대하여 기술하였다.

제 2장은 MIM의 간단한 학술적 자료 및 전반적인 프로세스의 기초 이론을 기술하였다.

제 3장에서는 실험으로서 금속분말 및 바인더의 혼련, 금형설계 및 제작, 사출성형 및 탈지·소결 등의 방법 및 시험평가를 위한 실험방법 등에 관하여 기술하였다.

제 4장은 본 연구의 결과 및 고찰로서 실험계획법과 반응표면분석 등을 통한 수치해석으로 금속분말 사출성형 공정의 최적화 및 제품의 공정능력 평가 등 종합적인 분석을 하였다.

제 5장에서는 본 논문의 결론을 기술하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 금속분말 사출성형의 개요

2.1.1 기본개념

사출성형은 생산성이 우수하며 플라스틱 성형에 널리 이용되는 기술로서 미국에 만 만여 개의 공장이 사출성형을 하고 있으며 그 결과 매년 6천여 대 이상의 사출성형기가 판매되고 있다^{21, 22)}. 사출성형에 의해서 만들어진 복잡한 형태의 플라스틱 제품은 저렴한 가격으로 산업제품분야와 소모품 제조분야에 널리 쓰이고 있다. 플라스틱 사출성형은 매우 간단한 공정으로서, 유동이 가능한 온도까지 열가소성 수지를 가열한 후에 원하는 모양의 틀에 채워 넣고 냉각시키는 것이다. 이 공정은 금속주조와 유사하나 훨씬 정밀하고 깨끗한 표면의 제품을 얻을 수 있는 장점이 있다. 수지의 강도를 개선하는 방법으로 금속이나 세라믹 분말을 혼합시키는 방법이 있으며, 이 방법은 고강도나 전기 전도성이 요구되는 응용분야에 사용되고 있다. 이러한 충전된 사출성형체는 수지와 기계적, 열적, 자기적, 전기적 특성을 가지고 있는 충전재가 혼합된 구조를 갖는 복합재료이다. 최근에는 이러한 공정이 고상분말의 양을 최대화 하고 소결 도중에 수지 바인더를 추출하는 방법으로 발전해오고 있다. 결과적으로 이 새로운 분말성형공정은 복잡한 형태, 저렴한 가격과 높은 성능을 제공하는 공정으로 발전되고 있다.

분말사출성형은 성형재료가 금속인 경우에는 금속사출성형, 세라믹의 경우에는 세라믹사출성형으로 분류되는 기술로서, 각종 금속 분말재료나 세라믹 분말재료를 적절한 바인더 시스템과 혼합하여 분말과 바인더 시스템의 분말혼합체를 제조한 후에 이 분말 혼합체를 사출성형 공정을 통해 원하는 형상의 제품, 즉 사출 성형체를 만들고, 다시 그 안에 포함되어있는 바인더를 제거한 후 최종적인 소결 공정을 통해 완성된 금속이나 세라믹 성형제품을 만드는 제조공법을 말한다^{23, 24)}.

금속분말 사출성형은 절삭가공, 정밀주조, 다이캐스팅, 분말야금 등과 같은 기존

기술로는 제조가 곤란하거나 가격이 문제가 되는 고기능 복잡형상의 정밀부품을 저렴한 생산단가로 양산할 수 있는 첨단가공 기술로서 주목을 받아오고 있다²⁵⁾.

2.1.2 MIM의 특성

MIM이 경쟁할 수 있는 대체공정기술은 작은 부품을 정밀주조하고 이어서 불연속적인 기계가공을 해야 하는 것과 전통적인 분말야금으로 제조하고 차후 보다 복잡한 형태로 기계 가공하는 부품의 생산분야이다. 이 사출성형기술로서는 표면을 양호하게, 치수를 보다 정밀하게 그리고 얇은 단면이 있는 것을 포함하여 아주 복잡한 형상의 물건을 플라스틱 사출과 유사하게 적용할 수 있다. 즉, MIM 기술은 분말야금에서 새로운 영역의 부품들을 만들 수 있는 기술이다. 가장 큰 장점은 높은 성능의 복잡한 기계부품을 경제적으로 만들 수 있다는 것이다. 즉 MIM 제품은 수지와 분말의 조화를 통하여 값싸게 거의 최대 밀도를 가지는 복잡한 형태를 제조할 수 있기 때문에 우수한 성능을 필요로 하는 부품에 적합하다.

또한, MIM 공정의 적용으로 얻을 수 있는 형상의 복잡성, 저렴한 가격과 높은 성능뿐만 아니라 부수적인 특성들에도 주목할 만한 가치가 있다. MIM 공정은 최종 제품의 치수를 예측할 수 있기 때문에 최종 제품의 후속가공작업을 줄일 수 있으며, 스크랩이 적어 경제적으로 절약할 수 있다. 기계설비나 금형설계는 이미 기존 열가소성수지 제품의 사출성형에 적용되었던 컴퓨터 프로그램에 의하여 설계되어질 수 있고 주요 설비 가격은 다른 성형기술의 것과 비교하면 상대적으로 저렴하다. 더 나아가 최종제품의 표면 상태는 매우 좋으며 높은 자동화율에 의한 작업량의 감소 때문에 제품 공정시간이 짧아진다.

금속분말의 재료적인 측면에서는 여러 가지의 합금이 모두 가능하나 가장 쉽게 적용되고 있는 것이 분말야금에서 통상적으로 사용하고 있는 재료인 니켈합금강과 스테인리스강이다. 50% 니켈합금은 자성재료에 응용되며 300계열의 스테인리스강은 물론 400계열의 스테인리스강도 사용 가능하다. 고속도공구강 등 여러 가지 다른 합금조성의 사출성형기술을 개발한 사례도 있다. 이뿐만 아니라, 텅스텐 합금, 금속간 화합물, 코발트 합금 등도 응용되고 있으며 세라믹이나 금속 기지에 세라믹 파이버로 강화한 복합재료 등에도 응용할 수 있다²⁶⁾.

사출성형 방법에 의해서는 모든 모양의 제품을 제작할 수 있으나 모양이 간단

하고 축 방향으로 대칭이 되는 제품제조에서는 전통적인 분말야금 공정에 가격에 비하여 경쟁력이 낮다. MIM에 사용될 수 있는 분말은 사용분말 중에서 그 일부로 국한되어 있으며, 또한 장비의 크기와 복잡성에 제한이 따른다. 큰 제품은 더 큰 성형 및 소결기기가 요구되며, 공정제어에도 많은 어려움이 따른다. 따라서 MIM은 높은 가치의 복잡하고 작은 모양의 제품제조에 적용된다. Table 2-1은 MIM의 대표적인 장점과 단점을 나타내고 있다.

바인더의 제거 시간은 제품 두께에 관련되기 때문에 MIM에서의 제품의 두께는 아직도 해결해야할 과제로 남아 있다²⁷⁾. MIM 공정과 재료의 특성에 따라 제품의 크기, 성형체 밀도, 치수공차와 표면상태, 그리고 최종 후처리 및 기타사항으로서 다음과 같은 특성을 갖는다.

① 제품의 크기

MIM의 크기 제한은 체적으로 테니스볼 크기보다 작은 것이 좋고 골프공 크기보다 작은 것들에서 경제성이 있다. 큰 물건을 사출성형할 때에는 그 제조가격에서 분말가격이 차지하는 비중이 높아진다. 단면의 두께는 최대 12mm, 최소 0.5mm이며 바인더 제거 편의를 위하여 6mm 단면 이내가 선호된다. 제품의 무게로는 0.003g에서 17kg까지 가능하나 1~20g 범위의 것이 가장 경제성이 양호하다.

② 성형체 밀도

MIM으로 소결된 부품은 전형적으로 94% 이상의 밀도를 가지며 열간등압성형을 실시하지 않으면 거의 완전한 치밀화는 어렵다. 그러나 내재된 기공은 완전히 밀폐된 기공이므로 레진의 함침 없이 도금되거나 착색 처리될 수 있으며 열처리 또는 침탄처리 시 분위기 가스가 내부기공에 침투되지 않는다.

③ 치수공차와 표면상태

치수공차는 $\pm 0.3\%$ 이며 부품이 작을수록 보다 정밀하게 치수를 맞출 수 있다. 따라서 소형의 부품에서는 $\pm 0.1\%$ 까지도 줄일 수 있다. 표면의 끝매집 상태는

32RMS로서 대부분의 정밀구조보다는 양호하다. 이 표면상태는 주로 소결조건에 따라 다르며 분말입도나 몰드의 끝매집과는 비교적 무관하다.

④ 후처리 및 기타사항

복잡한 부품일수록 경제성이 있으며 부품에 마디나 외부나사 또는 내부나사도 만들어 넣을 수 있다. 그러나 복잡한 내부나사는 제품을 나중에 탭핑하는 것이 경제적이다. 제품의 생산량은 한 개의 금형에 여러 부품을 넣고 자동조정방식을 사용함으로써 크게 증대시킬 수 있으며 생산숫자가 늘어날수록 경제성이 높아지고 부품단가가 저하된다. MIM에서는 게이트, 분리선, 노크아웃 또는 방출핀 마크 등이 존재한다. 이러한 부분이 중요한 부위에 놓이지 않도록 금형을 설계하여야 하며 수요자와 상호 의견교환이 잘 이뤄져야 한다.

Table 2-1 Advantages and disadvantages of MIM

Advantages	Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> ○ No incline of part's density ○ Low tolerance ○ Available of complex shape structures ○ Excellence surface roughness using fine powder ○ Fine structured and sintered parts ○ Economical efficiency for mass production of complex shape 	<ul style="list-style-type: none"> ○ High cost of powder ○ Low fluidity ○ Long debinding time ○ Explosiveness and spontaneous combustion ○ Toxicity

2.1.3 MIM의 공정

MIM 공정은 분말과 바인더의 혼합부터 시작된다. 이 혼합체를 알갱이 모양으로 잘게 부수어지고, 이를 원하는 모양으로 사출성형한 후 사출 성형체에서 바인더를 제거시키고 소결을 실시한다. 최종적인 제품을 완성시키기 위해서는 이 소결체를 더 조밀하게 하거나, 열처리 또는 기계가공을 거친다. 이러한 소결체는 매우 복잡한 모양과 사출성형에 의한 높은 정밀도를 갖는다²⁸⁾.

Fig. 2-1은 MIM의 주요공정을 도식화한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 MIM 방법에서는 다음과 같은 공정으로 진행된다.

- ① 공정에 적합한 분말의 선택
- ② 분말과 적절한 바인더와의 혼합
- ③ 혼합체를 균일한 과립형의 장입재료로 제작
- ④ 사출금형에 사출하여 성형체 제작
- ⑤ 성형체에서 바인더 제거
- ⑥ 소결에 의한 성형체 조밀화
- ⑦ 소결이 끝난 다음 열처리 또는 밀도를 높이는 후속 가공과정

실제로 MIM은 이러한 기초 공정에서 많은 변수를 가지고 실행되어진다. 비록 직경이 작은 분말일수록 비싸지만 MIM 공정에서는 소결밀도를 증가시키기 위하여 통상 직경이 작은 분말을 사용한다. MIM에 사용되는 원료분말은 전형적으로 직경 20 μ m 이하의 미세한 분말이며 이보다 굵은 분말을 사용하기 위한 노력이 계속되고 있으며 철계 합금의 원료분말은 공통적으로 카보닐철이 사용되고 합금원소들은 원소분말 첨가로 합금화 된다^{29, 30)}. 바인더는 대개 열가소성수지 재료를 사용하나 물과 여러 가지 무기물의 사용도 가능하다. 금속분말은 열가소성 바인더와 다른 첨가제들과 함께 정밀하게 혼합되어 장입용 펠렛으로 만들어지는데 이때 열가소성 바인더의 함량은 40vol.%까지 이르게 된다. 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 메틸셀룰로오스 등의 바인더가 사용되고 있는데 이 바인더는 그 제거방법과 공정이 각 국가의 특허로 되어 있는 것이 많은 편이다³¹⁾. 사출성형 단계는 통상적

인 플라스틱 재료의 성형과 유사하며 가열하여 사출하는 단계를 거친다. 혼합된 금속분말과 바인더는 적당한 크기의 조립된 형태로 사출성형기에 장입되며 약 260°C 이하의 온도와 70MPa 이하의 압력 하에서 금형의 빈 공간으로 채워져서 정밀한 형태를 갖게 사출성형 되는 것이다. 플라스틱의 사출성형과 마찬가지로 여러 개의 사출금형을 만들어 넣어 양산이 가능하고 이로서 생산비의 절감이 가능해진다.

금형에서 꺼낸 성형체는 매우 낮은 강도를 지니며 성형체에서 바인더를 제거하는 공정이 매우 까다롭고 시간이 많이 소요된다^{32, 33}. 즉, 성형 후 성형체에서 바인더 제거는 시간이 많이 소요되는 단계이며, 내부응력과 연관되므로 많은 문제점이 나타날 수 있다. 제품의 변형과 결함을 최소화하기 위한 바인더의 제거방법으로는 열적 및 용해분해와 모세관 현상을 이용한 추출 방법 등 여러 가지가 사용되고 있다³⁴. 바인더가 제거되어 생기는 기공들은 소결과정에서 생기는 수축에 의해서 제거된다. 물론 바인더가 제거될 때 그 형체의 손상이 없어야 하는 것은 바인더 선정의 기본문제라 할 수 있다. 소결로는 배치식의 소결로가 주로 쓰였으나 차츰 전통적인 분말야금의 경우와 유사한 연속 소결로를 사용하는 쪽으로 발전하고 있으며 소결 후에는 약 20%에 달하는 높은 치수의 수축이 뒤따르게 된다. 소결 수축률은 분말이 균일하게 충전된다면 예측할 수 있으며, 또한 등방적으로 수축이 일정하게 일어나기 때문에 사출성형체는 성형체의 밀도와 최종단계의 치수를 고려하여 적당한 크기로 확대하여 제조한다. 이렇게 얻어진 소결체는 많은 다른 제조방법에 의해서 얻어진 부품보다도 조직이 미세하고 균일하고 더욱 등방적인 특성을 갖으며, 소결체는 다른 가공품과 유사하게 열처리, 도금, 기계가공 등의 후처리를 할 수 있다³⁵.

위와 같이 MIM은 다른 기술과 마찬가지로 장점과 단점을 동시에 가지고 있는데 분말과 바인더의 혼합, 혼합체의 조립, 사출성형, 성형체에서의 바인더 제거, 성형체의 소결, 소결체의 후처리 및 검사에 이르기까지 제반 공정상에서 종래의 분말야금 방식으로 불가능하였던 것을 가능하게 하는 이점이 있는 반면에 각 공정 특성상 아직도 불가능한 여러 가지의 제한 요소들이 단점으로 되어 있다.

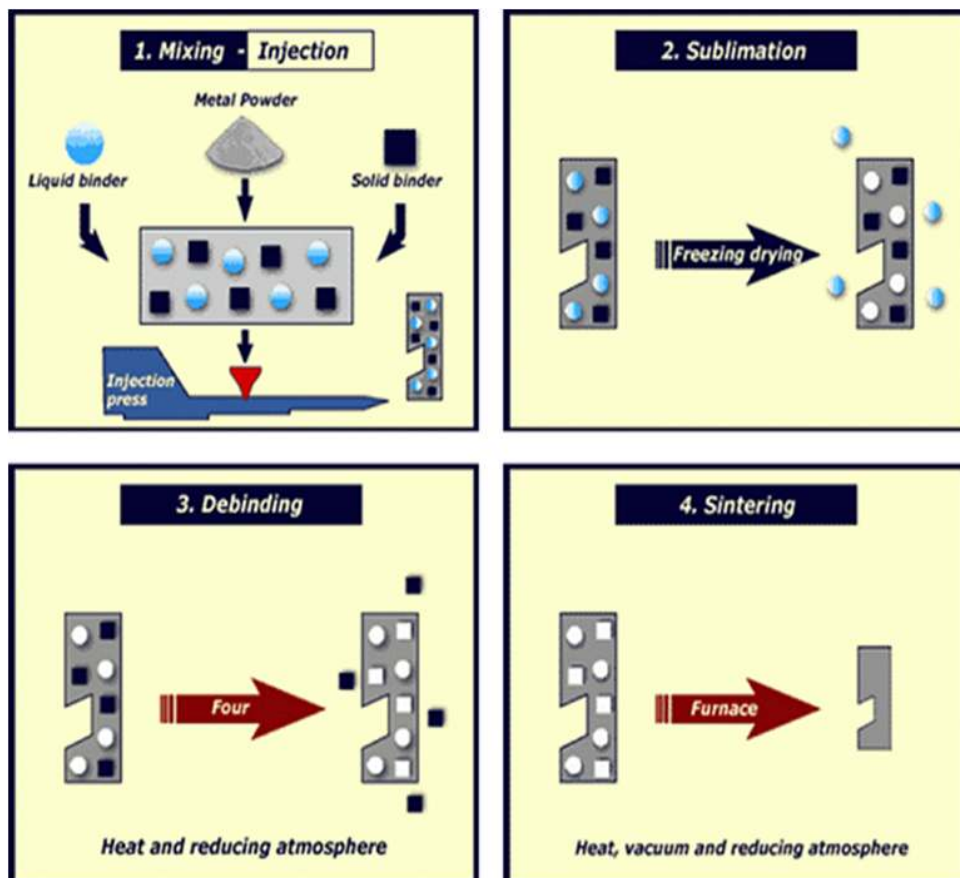


Fig. 2-1 Outline of MIM process

2.2 금속분말 사출성형 프로세스

2.2.1 혼련

MIM에서의 혼련공정은 성형의 전단계로서 장입재료를 균질한 상태로 만드는 것이다. 즉 혼련의 목적은 입자에 바인더를 피복시키고 바인더와 분말의 조성이 균일한 장입 재료를 만드는 것이다³⁶⁾. 특히 여러 가지 성분의 바인더 입자들 사이에 얇게 분산시켜 주어야만 한다. 따라서 건식분말혼합에 사용되는 일반적인 혼합기는 MIM의 장입재료를 만드는데 사용되지 않는다. 왜냐하면, 바인더가 입자들 사이에 분자크기 정도로 얇게 분산될 수 있도록 큰 전단응력이 필요하기 때문이다.

장입재료를 전형적인 플라스틱이기 때문에 혼합체의 점성은 변형률에 따라 변화한다. 그러므로 혼합은 모든 영역에서 균일하게 전단변형이 일어나야 한다. 이러한 이유로 MIM의 장입재료의 혼련은 높은 전단변형을 일으키는 혼합기가 사용된다. 여기에는 이중 플래너터리 혼합기, 단일 스크류 혼합기, 플러저 혼합기, 이중 스크류 혼합기 등이 있다. 이 각각의 혼합기들은 균질화에 필요한 높은 전단변형응력을 가지고 있으며, 점도가 1~1000Pa·s인 혼합체의 혼합에 적당하다³⁷⁾. 여러 가지 혼합기 중에서 이중 스크류 혼합기가 가장 우수한 혼합성을 갖는데 이는 고온에서 짧은 시간에 높은 전단응력을 얻을 수 있기 때문이다. 그러나 이 혼합기는 고가이므로 일반적으로 이중 플래너터리 혼합기가 주로 사용되고 있다³⁸⁾. 그러나 이 혼합기는 마이크론 입도 보다 작은 분말을 균질하게 혼합하는 데는 어려움이 있다.

2.2.2 펠릿

균질하게 혼합된 MIM의 장입재료는 보관 및 운반과 사출성형기 안에 자동적으로 장입될 수 있도록, 식혀서 작은 과립형으로 만들어야 하며 이러한 과정을 펠릿 제작이라고 한다. 어떤 경우에는 혼합과 성형을 동시에 하여 펠릿 형태로 만드는 단계를 제외할 수도 있다. 그러나 대부분의 경우에는 혼합과정이 성형기계와 분리되어 있으므로, 성형과정을 위하여 균일한 펠릿 형태로 준비를 하는 단계가 필요하다.

이와 같이 준비된 펠릿을 금속사출성형으로 사출 후 제품부를 제외한 스크랩은 탕구나 탕도 내의 재료와 불량품 등에서 회수가 가능하여 신규로 제조된 펠릿과 혼합하여 재활용할 수 있는 등 경제적인 면에서 매우 중요하다^{39, 40}.

Fig. 2-2는 혼합으로부터 바인더 제거 공정 과정에서 스크랩의 재활용이 이루어지는 단계를 계통도로써 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 바와 같이 대개 재활용된 재료와 새로운 재료는 펠릿 형태로 만드는 단계부터 시작된다. 이와 같이 새로운 재료는 재활용 재료와 혼합되어 사출성형기에 들어갈 새로운 펠릿으로 만들어진다.

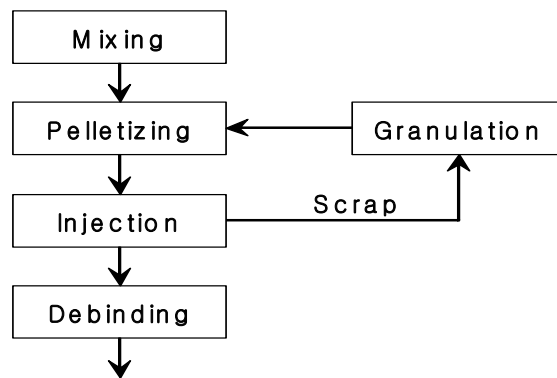


Fig. 2-2 Inter relation of MIM processes

2.2.3 사출성형

사출성형기는 장입재료를 충분히 녹일 수 있는 가열장치와 성형체 모양을 이루도록 재료를 금형 내로 밀어 넣는 사출장치로 구성되어 있다. 이 공정의 목적은 기공이나 다른 결함이 존재하지 않고, 원하는 모양에 분말이 균일하게 분산된 성형체를 얻는 것이다. Fig. 2-3은 사출성형기를 개략적으로 나타낸 것이다.

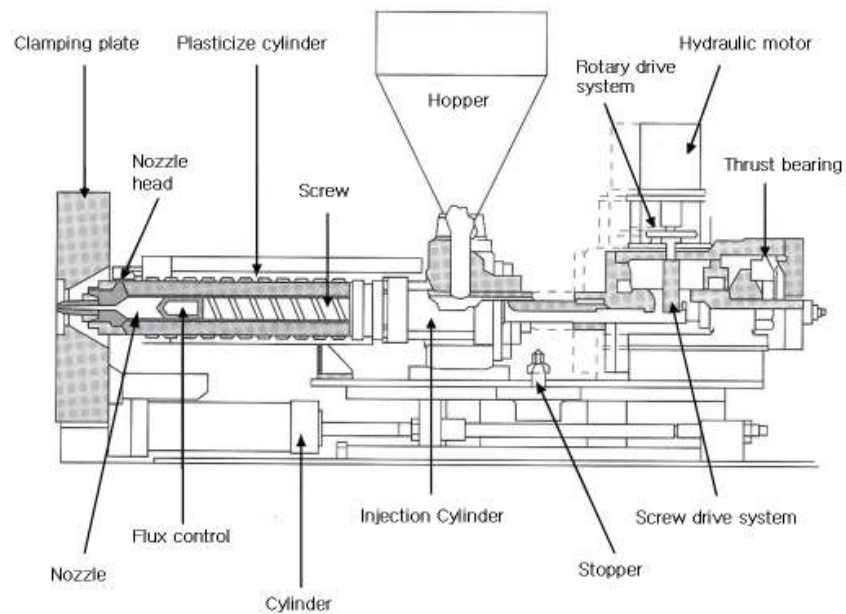


Fig. 2-3 A Schematic diagram of screw type injection molding machine

사출성형 공정에 있어서 온도와 압력은 장입재료를 금형 안으로 사출시키는 변수가 된다. 사출성형은 사출성형기의 배럴 안에 있는 장입재료의 용융으로부터 시작되어 왕복운동을 하는 스크루는 장입재료를 채우고 균질화 시키며 혼합체에 압력을 가한다. 사실상 성형단계는 용융된 장입재료를 금형 안으로 사출하기 위해서 배럴 안에 있는 스크루가 앞으로 전진함으로써 일어난다. 즉, 노즐에서 나온 유체는 제품 모양에 채워지기 전에 탕구, 탕도와 게이트를 통과하며, 금형은 장입재료보다 차갑기 때문에 성형 시 장입재료는 연속적으로 온도가 떨어져 점도가 증가

하게 된다. 따라서 증가된 점도를 보상하기 위하여 금형에 장입재료가 다 채워질 때까지 계속적으로 압력은 증가되어야 한다.

성형이 이루어진 후에 장입재료의 열은 금형을 통하여 제거된다. 끝으로 냉각이 완료된 성형체를 취출하기 위하여 금형을 열었을 때 성형체의 모양을 유지하기 위한 온도는 혼합체의 임계유동온도보다 낮아야만 한다. 비록 개념적으로 간단하게 나타낼 수 있으나 실제에 있어서는 많은 변수와 오류들이 존재한다^{41~43}). 고체상의 함유량이 높으면 점도는 증가하여 성형 시 높은 압력이 필요하게 되는데, 이 압력은 점성을 변화시키고 분말과 바인더를 분리시킨다. 또한 점성은 온도와 변형률에 민감하기 때문에 금형의 기하학적인 형태나 공정변수에 따른 유동률은 연속적으로 변화한다. 성형조건이 완전하지 못하다면 장입재료는 금형 안에서 밀도 구배를 나타내게 되며, 이는 차후 소결과정에서 치수변형을 야기시킨다. 따라서, 소결 시 균일한 치수변화를 얻기 위해서는 성형 시 균일한 입자충전이 매우 중요하다^{44~46}). 불완전한 성형은 성형체 표면에 기포를 야기시키나, 이러한 결함은 성형시 사출압력을 조절함으로써 제거될 수 있다. 그러나 사출압력이 과다하면 성형체가 금형에 고착되는 현상을 일으킬 수 있어 성형체를 취출하는데 문제가 발생할 수도 있다⁴⁷).

성형변수는 입자특성, 바인더 종류, 장입재료의 특성, 금형의 구조, 사출기의 조절조건 등에 크게 의존하며, 일반적으로 성형이 이루어지는 시간 범위는 약 5~60 초 정도로서 가장 보편적인 시간은 약 20초 정도이다. 또한 금형 내에 채워지는 정도는 약 $1.5\text{cm}^3/\text{s}$ 이고 이때의 압력은 60MPa 정도이며 온도는 약 200°C 정도이다. 성형성은 주어진 모양에 장입재료가 채워지는 속도와 용이함의 척도로서 정의되며, 압력과 온도가 지나치게 높으면 금형 분리면의 틈을 넓히거나 그 틈으로 장입재료가 누출되고, 성형체가 금형벽에 고착되는 현상을 초래할 수도 있다. 성형성 연구의 목적은 양질의 성형이 이루어지게 되는 조건을 알아내는 것으로서 성형성을 측정하는데 널리 사용되는 방법은 주물에서 유동성을 측정하는 데 사용하는 바와 같은 나선형 몰드를 사용하여 나선형의 유동 통로를 따라 채워지는 정도를 측정하는 것이다.

2.2.4 탈지

사출 성형체 내에 존재하는 바인더를 제거하기 위하여, 바인더 제거공정을 거치게 된다. 소결하기 전에 바인더 제거 공정이 적절하지 못하면 최종제품에 결함이 존재하게 된다. 입자들 간의 부서짐 없이 바인더를 제거하는 과정은 여러 작은 단계로 구성된 매우 섬세한 과정이다. 다시 말해, 사출성형으로 제조된 성형체에서 유기재료 바인더를 성형체의 균열 또는 변형등의 결함이 없이 제거하는 것은 매우 어려운 기술의 하나이다. 바인더를 제거하는 가장 일반적인 방법이 성형체를 서서히 가열하여 바인더의 열분해를 통하여 기화 증발시키는 것이다. 그러나 대부분의 바인더들이 낮은 온도에서 서서히 증발하다가 어느 온도에 이르면 급격하게 증발하는 특성을 가지므로 그 온도는 바인더에 따라 큰 차이를 갖는다^{48, 49}. 열분해 제거법에서 그 기본요건은 바인더를 가열할 때 가열온도에 따른 기화 제거량의 관계가 직선적으로 증가되는 것이며 이러한 이상적인 관계를 갖도록 여러 가지 바인더를 혼합 사용하는 것이 중요하다⁵⁰.

바인더 제거공정 기술은 Fig. 2-4에 나타낸 바와 같이 용매추출 및 열분해 공정으로 구성된 6가지의 기술이 있다. 용매추출법은 바인더의 일부를 분해시킬 수 있는 유체 속에 성형체를 담금으로써 용매탈지가 이루어지고, 이후 열분해 탈지 시 탈지가 용이할 수 있도록 기공의 구조를 형성시키는 역할을 한다. 이때, 용매를 가압하게 되면 액체와 증기의 구별 없이 불가능하게 되는 임계조건을 초과하는 것이 가능하게 된다. 또 다른 방법의 용매추출법은 분해 및 증발 또는 워 재료를 사용한 액상추출법과 같은 열동원에 의해서 제거시키는 것이다. 액상추출법은 바인더가 성형체에서 흘러나와 워 재료의 기공 속으로 흘러 들어가게 하는 방법으로 충분히 낮은 점도를 가지는 온도에서 실행된다. 바인더는 열적분해과정 후에 일어나는 확산이나 침투에 의해 혹은 중합분해 과정에 의해 기체상태로 제거 될 수 있다. 확산과 침투 사이의 차이는 기체의 평균 이동거리에 의존하며, 일반적으로 확산은 매우 낮은 압력일 때, 그리고 침투는 기공의 크기가 크고 높은 압력일 때 많이 적용된다. 사실상 바인더 제거공정을 신속하게 하기 위해서는 이 여섯 가

지의 기술이 조합되어 사용될 수 있다.

성형체의 기공구조, 바인더의 화학성분, 바인더 제거 조건과 공정 사이클 사이의 복잡한 작용은 바인더의 제거율과 바인더 제거 후 성형체의 상태를 결정한다. 바인더 제거 과정시 여러 종류의 성분을 갖는 바인더는 여러 단계의 과정을 거쳐 점차적으로 제거되어지며, 처음에 제거되는 바인더 성분이 충분히 제거되는 동안 두 번째 제거되는 바인더 성분이 분말 입자들을 제 위치에 고착시킴으로써 성형체를 유지시킨다.

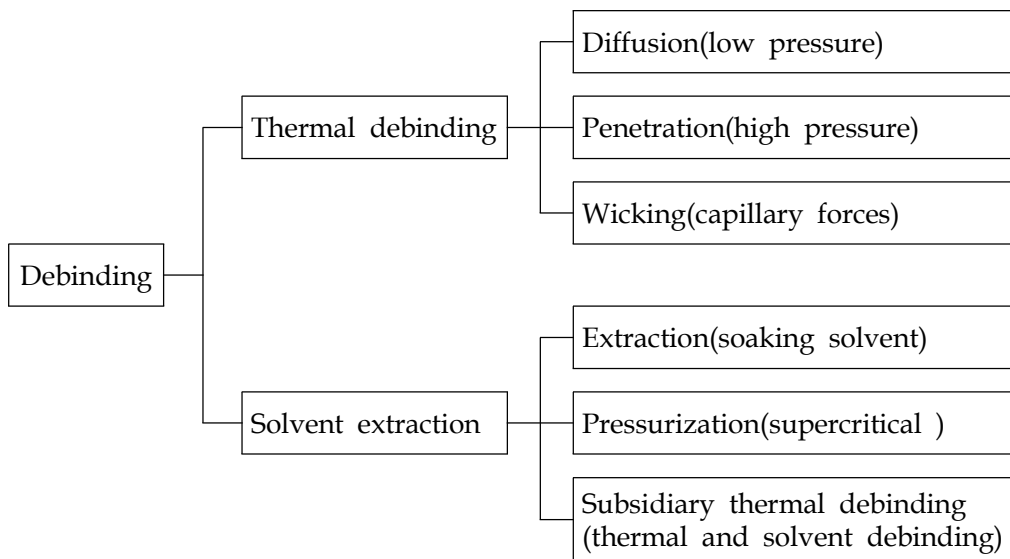


Fig. 2-4 Six debinding technologies for solvent extraction and thermal debinding

2.2.5 소결

사출 성형체의 소결공정은 그 성형체의 합금조성과 원료분말의 입도 및 입도분포 그리고 성형체를 제조하기까지의 여러 가지 공정 파라미터 등에 의하여 적절하게 조정되어야 하며, 복잡한 형상의 부품을 정밀도 높게 그리고 완전 치밀화에 가깝게 소결해 내기 위해서는 매우 세밀한 소결조건의 조정이 필요하게 된다⁵¹⁾. 또한, 소결은 MIM 공정에서의 최종단계이지만 혼합이나 성형 또는 바인더 제거 과정에서 생기는 성형체의 결함들을 회복시킬 수는 없는 단계이다. 재료의 고유특성과 외부의 변수들은 소결공정에 여러 가지 영향을 주며, 특히 조밀화율에 큰 영향을 끼치게 된다. 여기에는 초기밀도, 재료, 입도 크기, 소결분위기, 온도, 시간, 승온속도 등이 포함된다. 소결 분위기는 성형체의 거동과 성질에 많은 영향을 미친다⁵³⁾.

소결로는 원하는 온도와 분위기에서 연속적으로 성형체를 소결시키는 역할을 한다. MIM 공정에서는 조밀화를 더 쉽게 발생시키기 위하여 전형적인 분말야금에 비하여 높은 온도에서 소결을 행한다. 세라믹 재료의 소결은 통상적인 분말야금공정에서 적용되는 소결과정을 거치며, 조밀화는 입자간의 강한 결합을 형성시키고 강도를 개선시키며 이 밖에도 여러가지 성질들을 향상시킨다.

소결공정에서 14~20%의 큰 소결수축이 일어나므로 제품자체의 균일한 소결 치밀화와 배치 전체의 재현성 높은 소결조건을 유지하기 위하여 가열속도와 소결온도 구역에서의 온도분포를 엄밀하게 조절하는 것이 매우 중요한 과제이다.

일반적으로 사출성형체의 탄소함량을 조절하는데 어려움이 있는데 이와 같은 이유는 보통 바인더를 가열 제거하는 과정에서 탄소의 석출이 일어날 수 있기 때문이다. 따라서, 자성재료나 내식성 스테인리스강에서는 탄소함량을 낮게 관리할 필요가 있는데 이때의 탄소석출은 그 재료의 성능을 저하시키므로 바인더 제거에 신중을 기하여야 한다. 또한 탄소함량이 높은 합금강에서는 분위기 가스에 의한 소결중 탈탄을 최소화하는 것도 중요한 문제이다.

소결기술에서 또 다른 중요한 과제는 입도가 큰 원료분말을 사용하여 분말가격

을 절감하는 경우 일지라도 소결 치밀화를 95% 이상 유지하는 것이다. 이를 위해서는 소결축진을 위한 합금원소로서 C, P, B, Ni, Mo 등 기지금속에 적정한 용해도를 갖는 금속을 첨가하여 일시적으로 또는 소결전 단계에서 액상이 발생하게 하여 완전 치밀화를 도모하는 것이 유력한 대책이 될 것으로 보인다. 실제로 공구강 또는 고속도공구강 등에서는 흑연을 사용하여 액상소결을 유도함으로써 원료 분말 입도를 -100mesh까지로 증대시킬 수 있음을 확인한 연구가 있다. 이를 위한 또 다른 방법은 고온소결과 가압소결을 병행하는 것이다. 굵은 분말을 사용하는 경우에도 진공소결로에서 바인더 제거부터 시작하여 고온소결을 하면 소결체의 밀도가 현저히 상승하여 내부기공이 대부분 고립되고 표면과 완전히 차단된다. 이 소결체를 그 소결온도에서 1,500기압의 가압분위기로 바꾸어주면 매우 짧은 시간에 완전 치밀화가 이루어지게 된다.

이러한 합금강 제품뿐만 아니라 고속도공구강, 스텔라이트, 니켈 또는 코발트 합금과 초내열합금, 티타늄합금 및 내화금속과 그 합금들에 이르기까지도 소결하는 기술이 개발되었으며 더 나아가서는 현재 고온특성이 크게 기대되는 Ni_3Al 등 금속간 화합물의 소결제조기술도 개발가능하게 되어 사출성형의 응용범위가 크게 확대될 전망이다^{54~57)}.

제 3 장 실험

3.1 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^{58, 59}.

본 연구의 금속분말 사출성형을 위한 금속분말은 약 3 μ m 입자 크기의 STS316을 사용하였으며, 바인더로서는 PE, PW, SA 디부틸부탈레이트 등을 사용하였다. 그리고, 금속분말과 바인더의 최적 혼합조건을 도출하기 위해 Table 3-1과 같이 실험계획을 수립하였다. 인자는 금속분말 및 바인더의 함량비와 혼련시간 2가지로 설정하고 수준은 각 인자의 상한값 및 하한값 2가지로 설정하였으며, 중심점을 1가지 추가하여 수립하였다. 따라서 2인자 \times 2수준 \times 1회반복+중심점으로서 총 5종류의 실험계획을 수립하였다. 이를 보다 자세히 살펴보면 먼저 금속분말과 바인더의 함량비 62:38과 혼련시간 80min을 중심으로 설정한 후 금속분말 및 바인더의 함량의 상한값과 하한값은 이 중심점을 기준으로 $\pm 4\%$ 로하고, 혼련시간의 상한값과 하한값은 중심점을 기준으로 ± 30 min으로 적용하였다.

Photo. 3-1은 금속분말과 바인더의 혼련과정을 나타내는 사진으로서 Fig. 3-1 및 Table 3-1과 같은 실험계획에 의하여 일정 비율의 금속분말과 바인더를 혼합기에 넣고 열을 가하여 바인더를 녹인 후 일정시간 동안 혼련한 다음 냉각 후 분쇄하여 펠렛을 만드는 과정을 나타내고 있다. Table 3-2는 혼련을 위한 혼합기의 제원을 나타내고 있다.

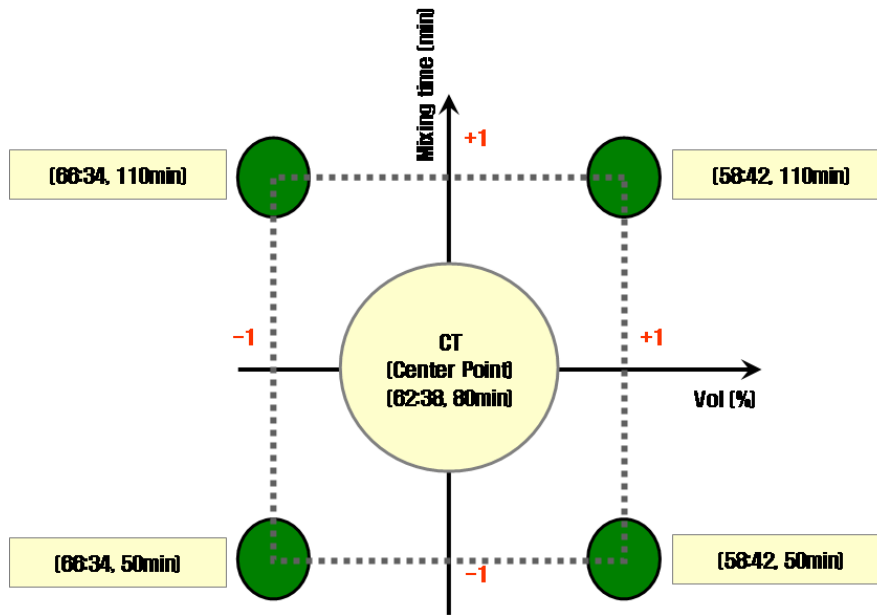


Fig. 3-1 Design of experiment for mixing

Table 3-1 Mixing conditions by DOE

No.	Metal powder (Vol. %)	Binder (Vol. %)	Mixing time (min)	Remarks
1	66	34	50	
2	66	34	110	
3	62	38	80	center point
4	58	42	50	
5	58	42	110	

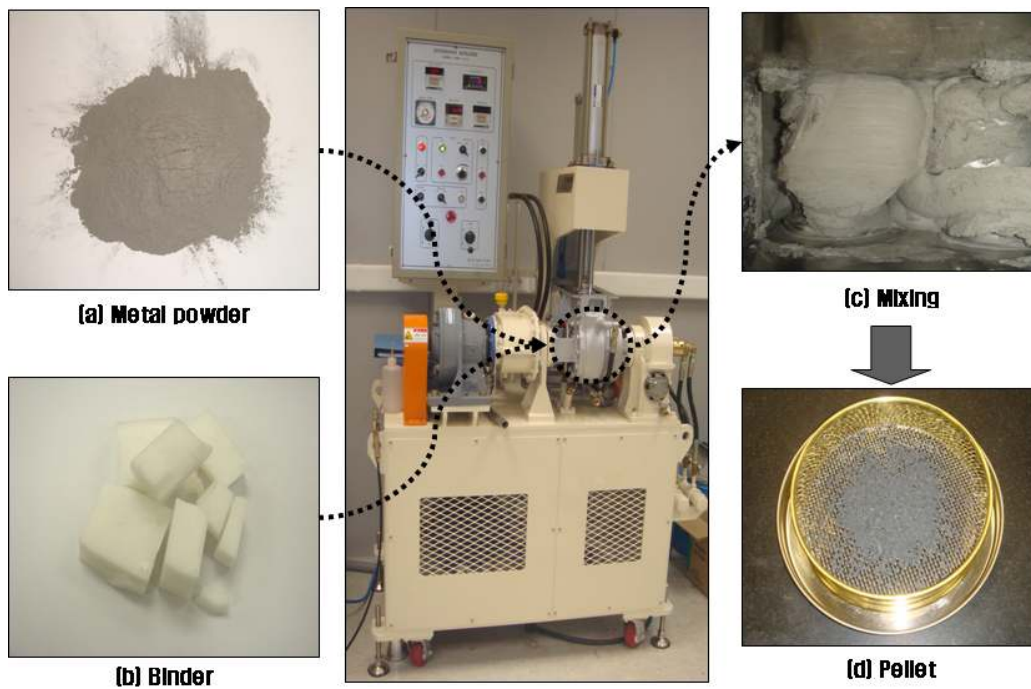


Photo. 3-1 Mixing and pellet

Table 3-2 Specification of dispersion kneader

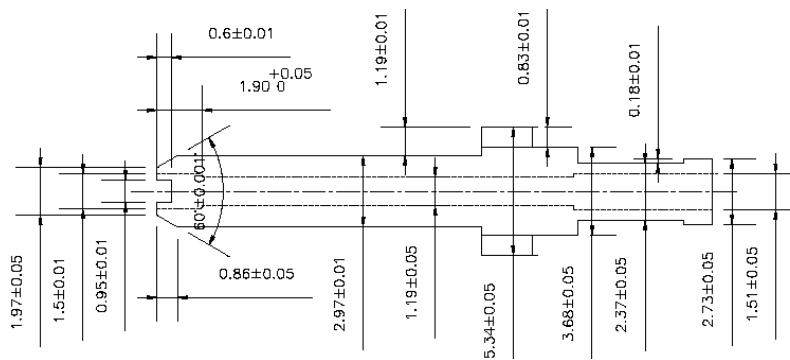
Specifications	Standard	Remark
Model	FSM1×5	Fine Machinery Industry
Capacity per one lot	1 L	
Capacity of mixing	Max 4 L/hr	
Heating type	Cartridge type	
Compressing	4~5 kg/cm ²	
RPM	10~40 rpm	
Power	4~5 hp	

3.2 금형설계 및 제작

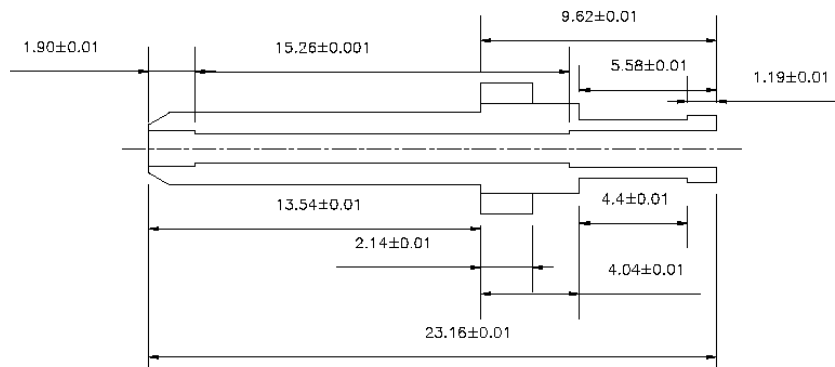
금속분말 사출성형을 위한 금형설계를 위해서는 최종제품의 치수 및 형상을 먼저 설계 후 사출 성형체를 설계하였으며, 이 후 냉각 및 기계적 메카니즘을 고려한 금형설계를 수행한다. 이 때, 최종제품 설계 후 사출된 성형체에 대한 설계는 바인더를 제거하는 탈지공정 및 소결공정 중에 제품의 수축이 필수적으로 발생되므로 수축률에 대한 고찰이 반드시 수반되어 한다^{60, 61}). 따라서 본 연구에서는 사출된 성형체의 소결에 의한 체적 수축률을 18.7%로 선정 하였으며, 이 수축률을 고려하여 사출 성형체의 형상 및 치수를 최종적으로 결정하여 설계하였다. Fig. 3-2는 소결에 의한 수축률을 고려하여 설계한 사출 성형체의 형상 및 치수들을 각각 나타내고 있다.

금형설계 및 제작 시 대표적으로 중요한 부품으로서는 상코어와 하코어의 구조적 설계와 각 부품의 형상 및 각 원판들과의 위치결정 등을 들 수 있다. 본 연구에서 제작된 금형은 상원판, 하원판을 비롯하여 상코어, 하코어, 센터핀, 밀핀, 이젝터 핀, 슬라이더 등 19가지 부품으로 구성되어 있으며, 본 연구에서 고찰하고자 하는 부품은 고정밀도가 요구되므로 각각의 캐비티 별로 위치공차 및 내경기준, 외경의 동심도 관리에 신중을 기하였다^{62, 63}). 사용된 소프트웨어에는 UGS사의 NX4.0, SolidWorks2005 및 AutoDesk사의 AutoCAD2005이다.

Fig. 3-3은 설계된 금형의 3차원 형상 및 조립도를 각각 나타내고 있으며, Photo. 3-2는 제작된 금형의 대표적인 사진으로서 전체적인 조립형상 및 상측과 하측의 모습을 나타내고 있으며, 세부 도면은 Fig. 3-4~7에 나타내었으며, Table 3-3은 본 연구에 사용한 시험기기의 전반적인 제원을 나타내고 있다.



(a) Front view



(b) Section view

Fig. 3-2 Drawing of green part for the flange

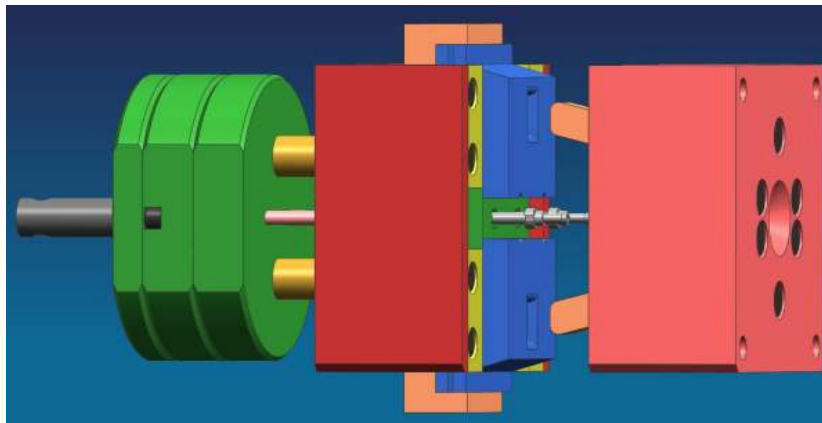


Fig. 3-3 Full 3D shape of the mold

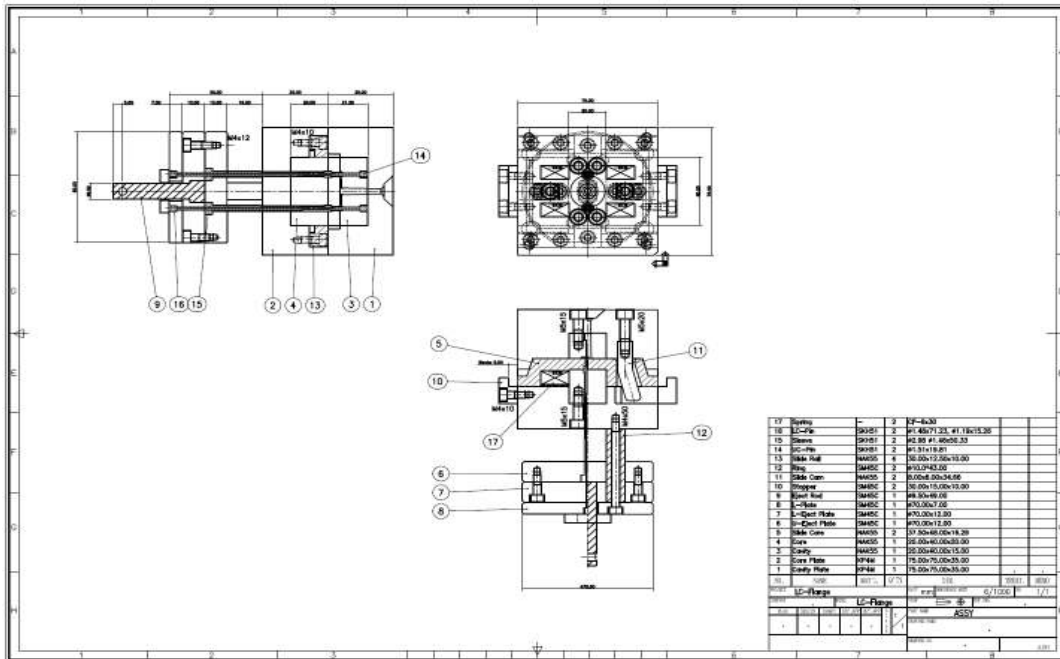


Fig. 3-4 Assembly for the flange

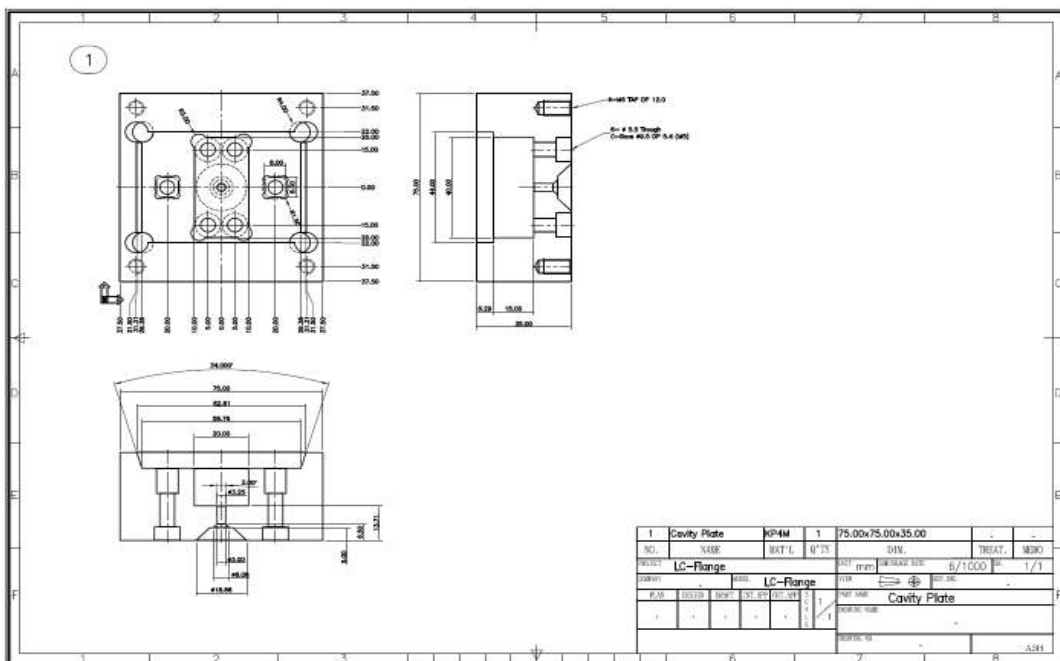


Fig. 3-5 Cavity plate for the flange

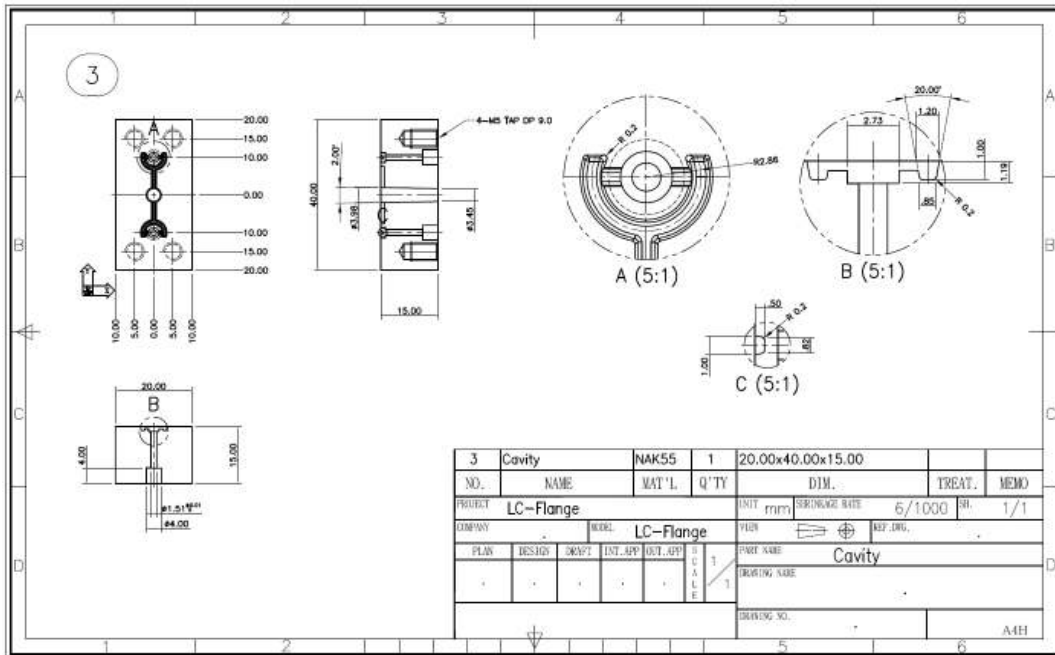


Fig. 3-6 Cavity for the flange

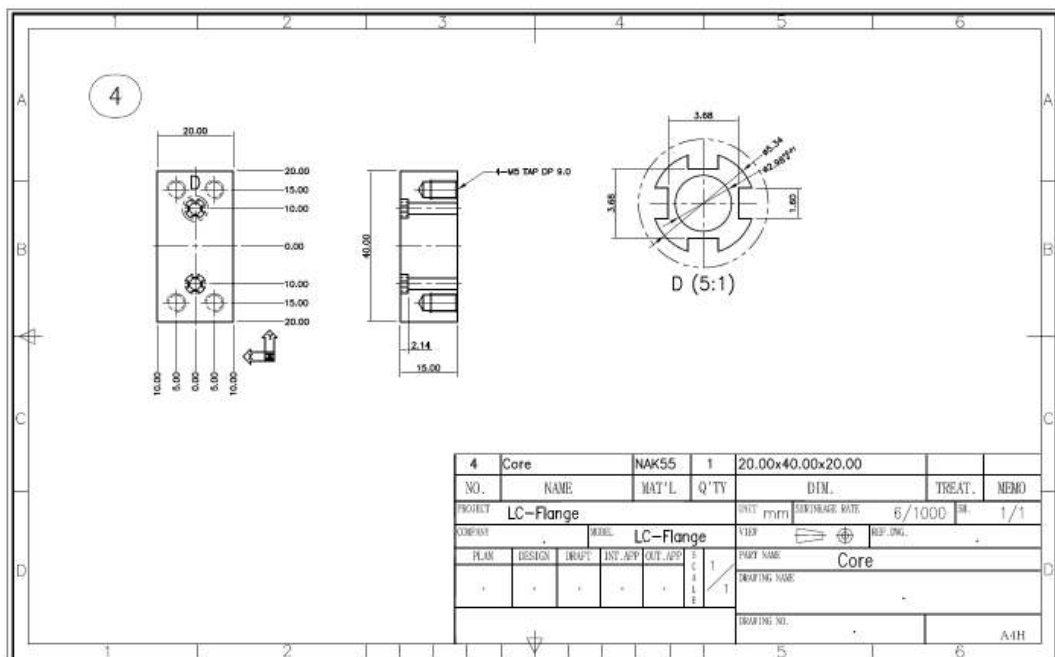


Fig. 3-7 Core for the flange



Photo. 3-2 Manufactured mold

Table 3-3 The used testers for the experiment

Tester	Model	Standard	Maker
Fatigue testing M/C	EHF-ED10-40L	±10Ton	Shimadzu, Japan
Universal testing M/C	UH-F50A	50Ton	Shimadzu, Japan
Vacuum furnace	500×400×1000 (w×h×l)	Max. 1200°C, 10 ⁻³ Torr	Duckyoung, Korea
Age hardening furnace	1900×1200×1350 (w×h×l)	Max. 550°C	Kongdan precision
Optical microscope	BHC-U	×100~2,000	Olympus, Japan
Polisher	C-POS2	160W	Jeil, Korea
VIM	VIM30	30kg	ULVAC, Japan
ICP	Dosimat		METROHM
Rockwell hardness tester	HR-521	No. 810-2020	Akashi, Japan
C/S Analyzer	C/S Determinator		LECO
Vacuum furnace	W500×H400×L1000	10 ⁻³ Torr Max. 1200°C	DY Co. Ltd. Korea
Salt bath furnace	W1900×H1200×L1350	SiC heater Max. 550°C	GD precision, Korea
SEM	JSM-6460LV	Max.×300,000	JEOL, Japan

3.3 사출성형 및 탈지·소결

유동해석을 통하여 도출된 최적조건을 적용한 실사출 시 사용된 사출기는 플린저 방식으로서 플라스틱, 세라믹분말, 금속분말 등 다양한 재료의 적용은 물론 이중사출도 가능하며, 특히 소형제품 및 연구개발에 적합하도록 특화된 장비이다. Photo. 3-3과 Table 3-4는 각각 사출기의 형상 및 제원을 나타내고 있다.

바인더 제거공정 과정에서 발생하는 결함들은 비틀림이나 휘어짐에 의한 모양의 변화뿐만 아니라, 표면의 파임, 변색 그리고 내부 결함 등이 있다. 단순한 조성으로 된 왁스나 고분자 바인더는 좁은 온도범위에서 제거되기 때문에 성형체 파손 가능성이 매우 많이 된다. 여러 가지 조성으로 된 바인더는 여러 단계로 제거되어 각 단계에서 잔류하는 바인더가 성형체의 유지를 도와주게 된다. 일반적으로 첫 번째 조성의 바인더가 제거될 때, 부피변화가 작게 일어나면 성형체의 비틀림을 최소화할 수 있다. 이러한 이유로 실제에서는 워킹, 승화 및 용매추출법 등이 유용하게 쓰이고 있다.

이와 같이 탈지에 대한 공정변수들에 대한 정확한 이해가 필수적이라고 할 수 있으므로, 본 연구에서는 일반적으로 적용되고 있는 기존의 단일 열분해 탈지공정 전에 용매탈지를 먼저 실시하여 2단계 공정으로 탈지를 수행하였다.

용매탈지 공정에 사용한 용매는 노말헥산을 사용하였으며, 일정한 온도 유지를 위해 핫플레이트를 사용하여 40°C, 50°C, 55°C 조건에서 약 1시간 가량 실시하여 시간의 변화에 따른 중량의 변화를 관찰하였으며, 용매의 균일한 온도분포 및 열전달을 위해 교반기를 바닥면에 설치하여 지속적인 회전이 이루어질 수 있도록 하였다. Photo. 3-4는 노말헥산을 사용한 용매탈지 모습을 나타내고 있다.

Table 3-5와 6은 소결공정에 적용된 패턴과 장비의 제원을 각각 나타내고 있으며 Photo. 3-5는 탈지 및 소결로의 모습을 나타내고 있다.



Photo. 3-3 Injection molding machine

Table 3-4 Specification of injection molding machine

Term	Specification	Remarks
Model	BABYPLAST 6/10P	Germany
Piston Dia (mm)	16	
Injection Pressure(kg/cm ²)	1,030	
Clamp Force (kN)	62.5	
Opening Force (kN)	4	
Opening Stroke (mm)	30~110	
Ejection Force (kN)	7.5	
Ejection Stroke (mm)	45	



Photo. 3-4 Solvent extraction using N-hexan

Table 3-5 Data sheet of sintering schedule

Step	Sintering Pattern	Time(Hr)
1	Room Temp. → 700°C	7.0
2	700°C → 1000°C	3.0
3	1000°C → Keep	1.0
4	1000°C → 1400°C	13.0
5	1400°C → Keep	2.0
6	1400°C → 1000°C	2.0
Total		28.0

Table 3-6 Specification of the furnace for debinding and sintering

Terms	Specification	Remarks
Working Temp.(°C)	1500	
Tube Size(mm)	∅70×∅60×1200	
Heating Zone	∅70×450	
Heating Element	Kanthal Super 1700	
Uniform Zone	∅70×100	
Gas	Ar, H ₂ , N ₂	Vacuum



Photo. 3-5 Debinding and sintering furnace

3.4 반응표면분석

사출성형 분야에 있어서 최적 공정변수를 도출하기 위한 방안으로서 널리 활용되는 다구찌 방법은 신호인자의 효과를 유지하면서 잡음인자의 종합적 영향을 최소화할 수 있도록 설계변수를 설정해주는 방법으로, 강건 설계의 중요한 도구로서 사용된다. 그러나 이 방법은 일반적으로 인자에 따른 주 효과에 대해서는 분석이 가능하나 인자간의 교호작용이 고려되지 못하는 단점이 있다⁶⁴⁾.

반면에 k^n 요인실험법이란, 인자의 수가 n 이고 각 인자의 수준 수가 k 인 실험계획법으로서 모든 인자간 수준의 조합에서 실험이 이루어진다. 따라서 실험이 반복되지 않아도 k^n 번의 실험횟수가 실시되며, 요인 실험법에 의한 실험을 요인실험이라고 하고, 요인실험에서는 인자의 효과와 교호작용을 포함하는 모든 요인효과를 추정할 수 있다는 특징이 있다. 또한, 기본적인 실험계획에 폴드 설계, 축점 추가, 축점 블록에 중심점 추가 등 여러 가지 여부에 따라 실험을 계획할 수 있다⁶⁵⁾.

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 적합시키는데 유용하고 만일 실험배치에 중심점을 추가시킨다면 2차 모델(곡면)의 정보를 제공할 수 있다^{66, 67)}.

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 반복실험을 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 3-7에 나타난 바와 같이 인자의 수가 5개(용융온도, 금형온도, 사출시간, 보압시간, 보압력)이고 각 인자의 수준수가 2개(상한값, 하한값)이며, 반복횟수가 1인 완전요인 실험계획을 우선 수립하여 총 32개 ($k^n=2^5$)의 실험계획에 축점 10개($k \times n=5 \times 2$) 및 중심점 1개를 추가하여 총 43가지의 실험계획을 마련하여 최종적으로 Table 3-8과 같은 스크리닝 및 인자들의 상관관계등을 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 비코드화된 표현방법을 함께 나타내고 있다.

그리고 2단계로서, Table 3-8의 실험계획에 의하여 실험된 내용을 분석 및 스크리닝 후 회귀분석 및 최적화를 위한 실험계획은 중심합성법 즉, 인자 및 수준의 조합에 축차실험을 더하여 1회 반복하는 총 30가지의 실험계획을 수립하여 반응 최적화 분석을 수행하였다.

Table 3-7 The basic concept of DOE for screening

Coded	Factors	Unit	Lower	Center	Upper
	Melt temperature	-	-1	0	+1
	Mold temperature	-	-1	0	+1
	Injection time	-	-1	0	+1
	Packing time	-	-1	0	+1
	Packing pressure	-	-1	0	+1
Uncoded	Factors	Unit	Lower	Center	Upper
	Melt temperature	°C	170	180	190
	Mold temperature	°C	20	40	60
	Injection time	sec	0.2	0.3	0.4
	Packing time	sec	2	3	4
	Packing pressure	MPa	10	20	30

Table 3-8 Design of experiment for screening

Order		Coded Factors					Uncoded Factors					Remark
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	170	20	0.2	2	10	Full Factorial ($k^n=2^5=32$)
2	2	1	-1	-1	-1	-1	190	20	0.2	2	10	
3	3	-1	1	-1	-1	-1	170	60	0.2	2	10	
4	4	1	1	-1	-1	-1	190	60	0.2	2	10	
5	5	-1	-1	1	-1	-1	170	20	0.4	2	10	
6	6	1	-1	1	-1	-1	190	20	0.4	2	10	
7	7	-1	1	1	-1	-1	170	60	0.4	2	10	
8	8	1	1	1	-1	-1	190	60	0.4	2	10	
9	9	-1	-1	-1	1	-1	170	20	0.2	4	10	
10	10	1	-1	-1	1	-1	190	20	0.2	4	10	
11	11	-1	1	-1	1	-1	170	60	0.2	4	10	
12	12	1	1	-1	1	-1	190	60	0.2	4	10	
13	13	-1	-1	1	1	-1	170	20	0.4	4	10	
14	14	1	-1	1	1	-1	190	20	0.4	4	10	
15	15	-1	1	1	1	-1	170	60	0.4	4	10	
16	16	1	1	1	1	-1	190	60	0.4	4	10	
17	17	-1	-1	-1	-1	1	170	20	0.2	2	30	
18	18	1	-1	-1	-1	1	190	20	0.2	2	30	
19	19	-1	1	-1	-1	1	170	60	0.2	2	30	
20	20	1	1	-1	-1	1	190	60	0.2	2	30	
21	21	-1	-1	1	-1	1	170	20	0.4	2	30	
22	22	1	-1	1	-1	1	190	20	0.4	2	30	
23	23	-1	1	1	-1	1	170	60	0.4	2	30	
24	24	1	1	1	-1	1	190	60	0.4	2	30	
25	25	-1	-1	-1	1	1	170	20	0.2	4	30	
26	26	1	-1	-1	1	1	190	20	0.2	4	30	
27	27	-1	1	-1	1	1	170	60	0.2	4	30	
28	28	1	1	-1	1	1	190	60	0.2	4	30	
29	29	-1	-1	1	1	1	170	20	0.4	4	30	
30	30	1	-1	1	1	1	190	20	0.4	4	30	
31	31	-1	1	1	1	1	170	60	0.4	4	30	
32	32	1	1	1	1	1	190	60	0.4	4	30	
33	1	-1	0	0	0	0	170	40	0.3	3	20	Faced Centered ($k \times n = 5 \times 2 = 10$)
34	2	1	0	0	0	0	190	40	0.3	3	20	
35	3	0	-1	0	0	0	180	20	0.3	3	20	
36	4	0	1	0	0	0	180	60	0.3	3	20	
37	5	0	0	-1	0	0	180	40	0.2	3	20	
38	6	0	0	1	0	0	180	40	0.4	3	20	
39	7	0	0	0	-1	0	180	40	0.3	2	20	
40	8	0	0	0	1	0	180	40	0.3	4	20	
41	9	0	0	0	0	-1	180	40	0.3	3	10	
42	10	0	0	0	0	1	180	40	0.3	3	30	
43	1	0	0	0	0	0	180	40	0.3	3	20	Center Point

※ A : Melt Temperature, B : Mold Temperature, C : Injection Time, D : Packing Time, E : Packing Pressure

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 사출 유동해석

4.1.1 모델링

다수 캐비티 사출금형에서의 충전 불균형은 1997년 Beaumont⁶⁸⁾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 성형 공정조건에 의한 요인에 의해 충전 불균형 양상이 발생하게 된다^{69~73)}.

본 연구에서는 금형의 기구적인 작동 및 코어의 교체 용이성 부여 외에도 금형 설계에 대한 적정성 확보 및 검증을 위하여 제품의 모델링 및 유동해석을 먼저 실시하여 설계에 반영하였으며, 사용된 소프트웨어는 UGNX4.0⁷⁴⁾, SolidWorks 2005, Hyper Mesh7.1, Mold Flow 5.1(MPI)이다⁷⁵⁾.

플랜지의 금형설계는 제품의 양측에 주입구를 부여하여 유동의 균형을 고려하였으며, 제품의 언더컷 구조상 중앙 후부에 게이트를 부여하지 못하고 제품의 위쪽에 게이트를 위치시켰다. 또한, 사출 밸런스를 고려하여 대칭형 게이트를 선정하였으며 이와 같은 내용이 반영된 해석모델은 Fig. 4-1에 나타내었으며, 성형해석을 위한 메시 및 메시화된 모델은 Fig. 4-2 및 3에 나타내었다. 이 때 사용된 메시는 4개의 노드를 갖는 Tetrahedral을 이용하였으며 총 엘리먼트의 수는 62,524개였다. 본 연구에서 적용한 Tetrahedral 메시의 특징은 해석결과는 정밀하나 사출성형 해석시간이 많이 소요되므로 해석을 위한 소요시간 문제를 해소하고자 간소화된 모델을 정의하고 주요 고찰 부분인 제품부는 매우 작게 메시지를 하고 런너 및 게이트 등은 크게 메시하여 전체적인 갯수를 효율적으로 최소화 시켰으며, 제품에 대칭조건을 부여하여 모델링을 함으로서 해석시간을 단축시킬 수 있었다.

해석에 의하여 조건을 도출한 내용으로서는 충전시간, 사출온도 및 압력 등이며, 이들 조건은 본 연구에서 사용한 사출기의 사양 및 분말에 최적화 시켰다. 이와 같

이 정의된 모델을 Table 4-1과 같이 나타냈으며, Table 4-2는 사출유동 해석에 적용한 사출조건을 나타내고 있다.

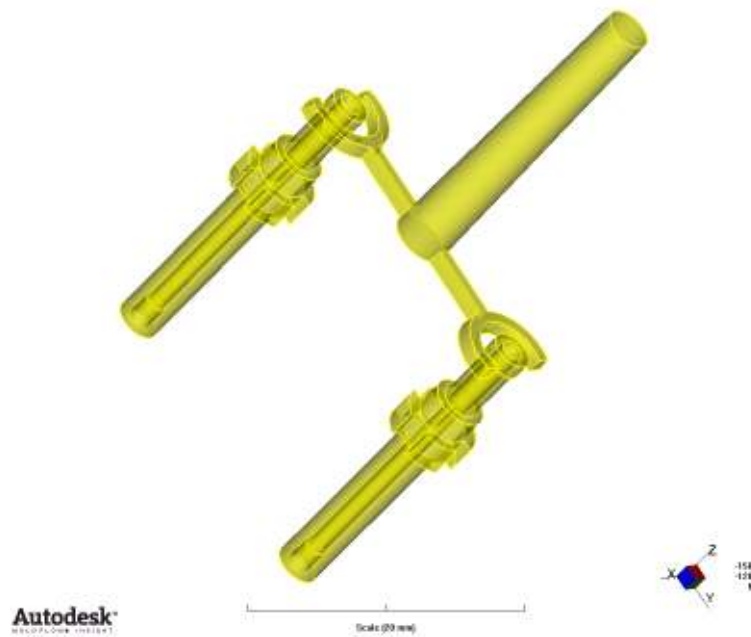


Fig. 4-1 Solid model of 2-cavity flange for MIM

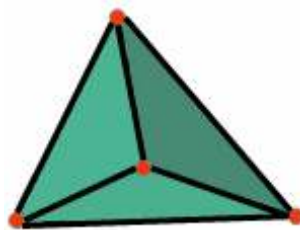


Fig. 4-2 4-node tetrahedral mesh

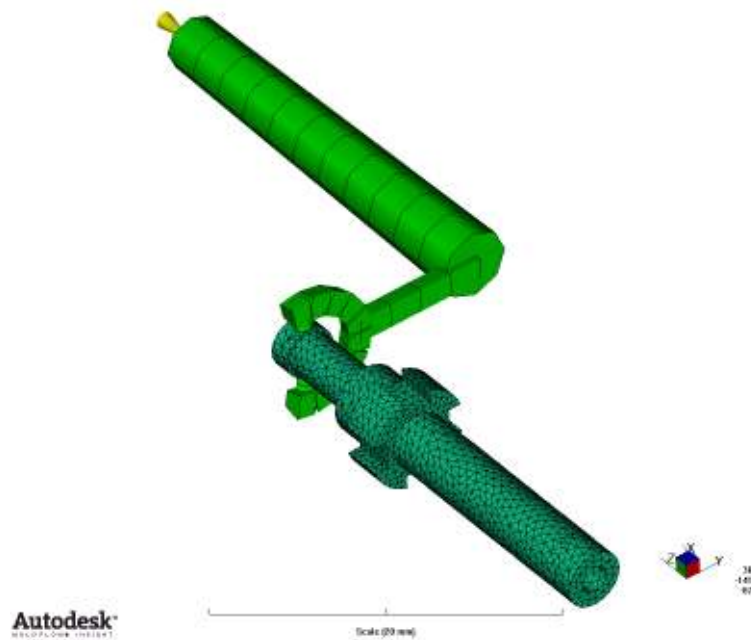


Fig. 4-3 Mesh generated model of flange for MIM

Table 4-1 Characteristic of flange model

Mesh Type	3D Tetrahedra
Total nodes	62,524
Total elements of part and sprue/runner/gates	62,493 and 31
Volume of the part and sprue/runner/gate	0.5024cm ³ and 0.4002cm ³

Table 4-2 Criteria of injection molding

Factors	Values
Mold surface and melt temperature (°C)	40 and 180
Injection time/Packing time (sec)	0.3/3
Packing pressure (MPa)	20
V/P switch-over	94% filled
Cooling time (sec)	10

4.1.2 사출시간에 따른 성형조건 해석

Fig. 4-4는 단위 시간당 금속분말 및 바인더가 혼합된 수지가 흘러가는 유량을 제품부를 제외한 스푸루, 런너, 게이트 구간까지 분석한 결과를 나타내고 있으며, 수지가 금형 내에 충전되는 시간을 기준으로 유량을 판단할 수 있다. 그림에 나타난 바와 같이 초기 사출 후 0.247초가 경과하여 게이트까지 충전이 완료되는 시점 즉, 게이트부위의 유량이 $0\text{cm}^3/\text{g}$ 이 되는 시점을 표현하고 있으며, Fig. 4-5은 이후 제품부 선단까지 사출이 완료되어 충전과 보압이 완료되기 까지를 나타내는 그림으로서 초기 사출 후 0.3344초가 경과하여 유량은 $0\text{cm}^3/\text{g}$ 으로 나타나고 있다.

Fig. 4-6은 충전 및 보압 과정 동안의 금형내부 및 사출 성형체의 온도 변화를 해석한 결과를 보여주고 있다. 이 때 사출이 시작되어 수지가 유입되면 각각의 노드에 압력변화가 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°C 로서 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. 4-7는 사출 후 13.29초가 지난 상태의 해석결과로서 제품의 내측과 외측이 이미 모두 고화가 된 상태이며 이때의 밀도는 1.67로 나타났다. 고화된 이후 시간부터 제품의 온도가 천이온도까지 내려가는 동안 제품의 수축은 계속되며 본 밀도해석 결과에서는 그러한 수축현상과 밀도의 변화거동을 동시에 확인하기는 곤란하므로 성형체에 일정한 보압이 균일하게 적용되는지 여부를 주시한 결과 제품의 내외측이 모두 균일한 밀도를 보이므로 안정된 양상으로 충전완료 후 냉각공정으로 이어졌다고 볼 수 있었다.

Fig. 4-8은 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 30MPa를 설정할 수 있었다.

위와 같은 결과를 종합하여 보면 최초의 사출 후 약 0.247초가 경과하면 스푸루, 런너 및 게이트까지 충전이 완료되며, 약 0.334초가 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.

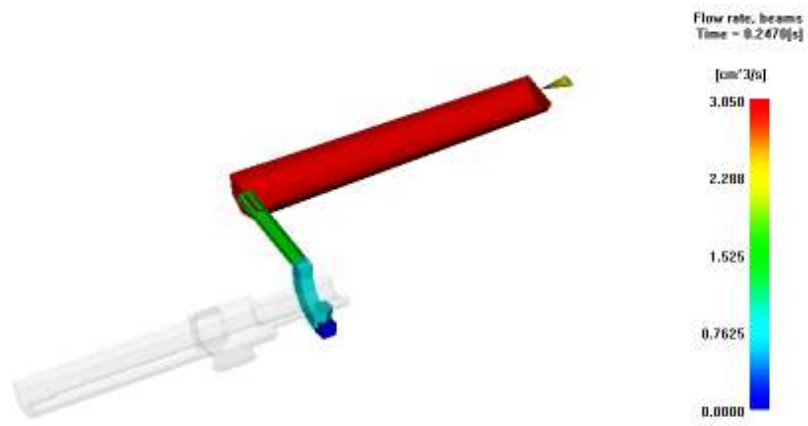


Fig. 4-4 Flow rate simulation result (0.247 seconds)

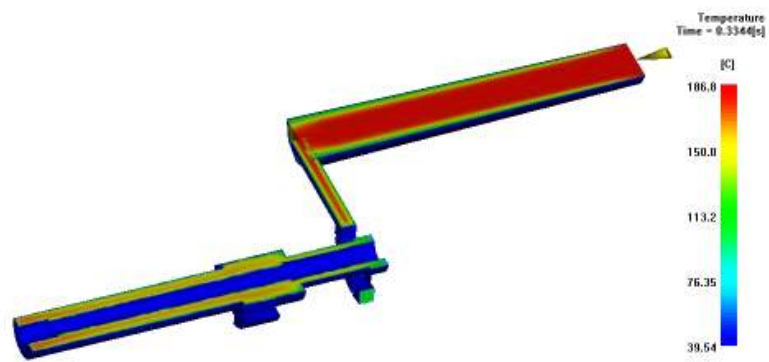


Fig. 4-5 Temperature simulation of initial injection (0.3344 seconds)

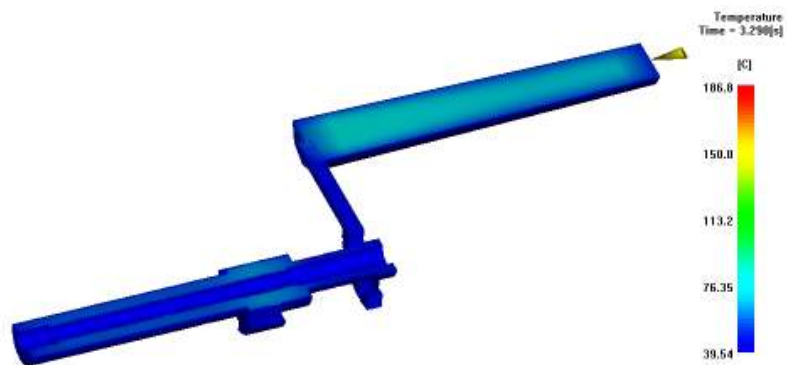


Fig. 4-6 Temperature simulation at solid stage (3.290 seconds)

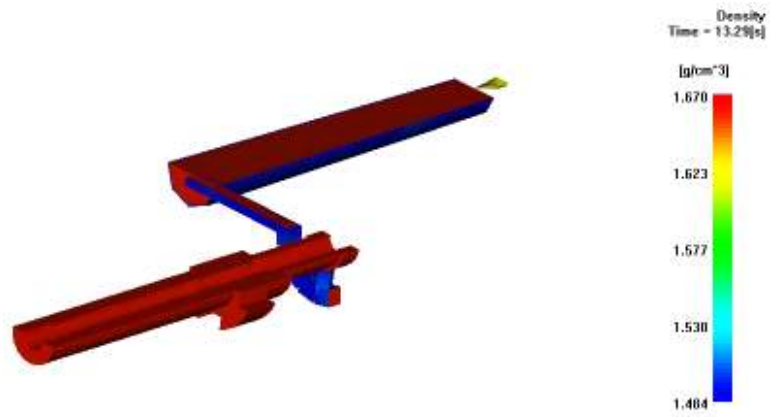


Fig. 4-7 Density simulation result (13.29 seconds)

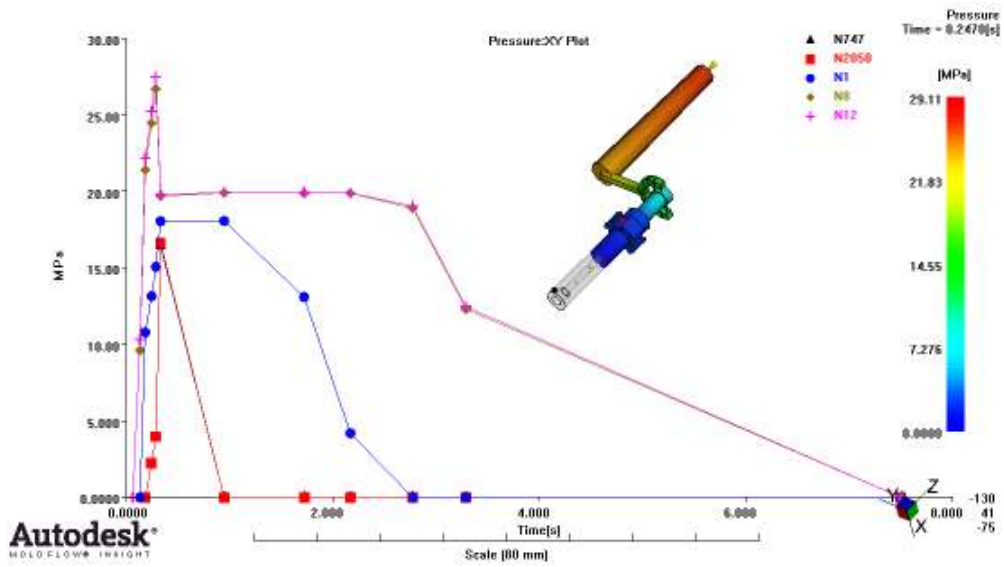


Fig. 4-8 Pressure variation on the nodes of part

4.2 주요인자의 상관관계

4.2.1 유동 선단온도에 미치는 영향

일반적으로 인자의 개별 또는 교호작용이 반응값에 미치는 영향의 정도 및 어느 인자가 반응값에 미치는 영향이 낮으므로 스크리닝을 할 수 있는지 여부를 판별할 수 있는 방법에는 크게 3가지가 있다^{76, 77)}.

첫째로, 우선 검정통계에 의하여 구해지는 계수에 대한 검정통계량 T값과 검정통계량에 대한 확률인 P값에 의한 방법이다. 따라서 T값은 상대적 크기가 클수록 유의한 인자로 판단할 수 있으며, P값은 0에 근접할수록 유의한 인자로 판단할 수 있다. 이 때 통계적 가설 검정에서 유의확률 또는 p값은 귀무가설이 맞다고 가정할 때 얻은 결과보다 극단적인 결과가 실제로 관측될 확률이며, 실험의 p값은 실험의 표본 공간에서 정의되는 난수로서 0~1 사이의 값을 가진다. 또한, 의미수준은 통계적인 가설검정에서 사용되는 기준값으로서 일반적으로 유의수준은 α 로 표시하고 90%의 신뢰도를 기준으로 한다면 0.1(1-0.9)값이 의미수준 값이 된다. 가설검정의 절차에서 의미수준 값과 의미확률 값을 비교하여 통계적인 영향의 정도를 검정하게 된다.

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 상관관계 평가를 통하여 인자를 축소하기 위한 스크리닝을 검정통계량에 대한 확률인 P값과 정규 확률도를 이용하여 평가하고, 주 효과 및 교호작용 효과를 함께 살펴보았다.

Table 4-3은 반응값 즉, 유동 선단온도에 영향을 미치는 주 인자 및 교호작용을 알아보기 위하여 제 3 장의 Table 3-8에 언급한 바와 같이 총 43가지 실험계획

에 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 P값을 기준으로 0.1 이하이면 영향의 정도가 높은 유의한 인자, 0.1 보다 크면 영향의 정도가 낮은 무의한 인자라고 판별하였다.

또한, Table 4-4는 각각의 인자들에 대한 주효과 및 교호작용에 대한 비중을 각각 나타내고 있다. 유동 선단온도에 영향을 미치는 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. 4-9는 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. 4-10은 단일 인자들 중 주 효과를 알아보기 위한 그림으로서 인자의 수준을 변경했을 경우 평균값이 변하는 정도를 나타내고 있으며, 이 때 보압시간의 인

자는 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 유동선단 온도는 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 있는데 모든 인자에 대하여 중심점이 위에 위치하므로 위로 볼록한 그래프를 예측할 수 있으며, 용융선단에 미치는 인자들의 영향으로 얻을 수 있는 결과의 그래프는 직선이 아닌 곡선의 형상이 나타날 수 있음을 암시하고 있다.

Fig. 4-11은 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 4-3에서 살펴본 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 상관관계를 분석한 결과 전체 31가지 인자들 중 9가지의 단일인자 또는 교호작용이 유의하다고 분석되었다. 이를 자세히 살펴보면, 단일인자는 전체의 60.6%의 영향도를 보이며 유동 선단온도에 가장 큰 영향을 미치며, 이는 보압시간을 제외한 4가지 단일인자(용융온도, 금형온도, 사출시간, 보압력)의 영향이라 할 수 있다. 또한 유의한 2인자 교호

작용은 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 유의미한 9가지 단일인자 또는 교호작용을 제외한 나머지 22가지는 무의하다고 판단하여 스크리닝을 수행하였다.

Table 4-3 Estimated effects and coefficients of flow front temperature for screening

Term (Coded)	Coded Result				Uncoded Result	Remarks
	Effect	Coef	T	P	Coef	
Constant		160.071	137.62	0	-1680.62	significance
A	21.582	10.791	8.35	0	9.32099	significance
B	7.482	3.741	2.89	0.016	24.5667	significance
C	-5.565	-2.782	-2.15	0.057	4369.05	significance
D	0	0	0	1	0	insignificance
E	19.324	9.662	7.47	0	55.9843	significance
A×B	-4.013	-2.006	-1.51	0.163	-0.119	insignificance
A×C	-7.513	-3.756	-2.82	0.018	-21.8812	significance
A×D	0	0	0	1	0	insignificance
A×E	-4.388	-2.194	-1.65	0.131	-0.27475	insignificance
B×C	-11.063	-5.531	-4.15	0.002	-62.1031	significance
B×D	0	0	0	1	0	insignificance
B×E	-3.487	-1.744	-1.31	0.22	-0.813	insignificance
C×D	0	0	0	1	0	insignificance
C×E	-8.688	-4.344	-3.26	0.009	-143.944	significance
D×E	0	0	0	1	0	insignificance
A×B×C	4.062	2.031	1.52	0.158	0.293437	insignificance
A×B×D	0	0	0	1	0	insignificance
A×C×D	0	0	0	1	0	insignificance
A×B×E	4.187	2.094	1.57	0.147	0.003925	insignificance
A×C×E	6.388	3.194	2.4	0.038	0.703125	significance
A×D×E	0	0	0	1	0	insignificance
B×C×D	0	0	0	1	0	insignificance
B×C×E	13.038	6.519	4.89	0.001	2.05281	significance
B×D×E	0	0	0	1	0	insignificance
C×D×E	0	0	0	1	0	insignificance
A×B×C×D	0	0	0	1	0	insignificance
A×B×C×E	-3.838	-1.919	-1.44	0.18	-0.0095937	insignificance
A×B×D×E	0	0	0	1	0	insignificance
A×C×D×E	0	0	0	1	0	insignificance
B×C×D×E	0	0	0	1	0	insignificance
A×B×C×D×E	0	0	0	1	0	insignificance

※ A : Melt Temperature, B : Mold Temperature, C : Injection Time, D : Packing Time, E : Packing Pressure

Table 4-4 Analysis of variance of flow front temperature for screening

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	-	-	-	-

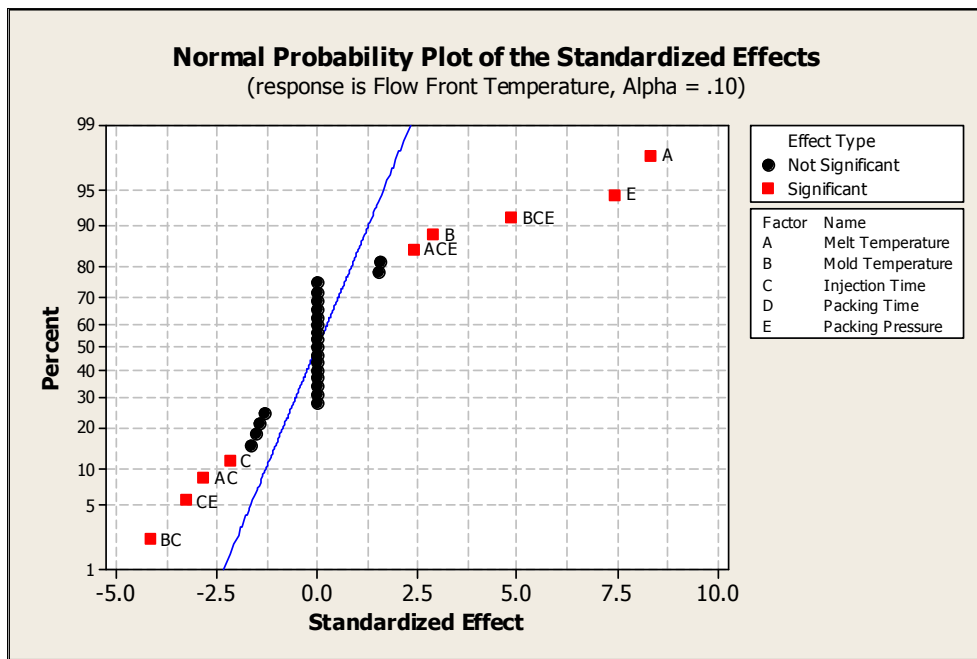


Fig. 4-9 Normal probability plot of the standardized effects of flow front temperature for screening

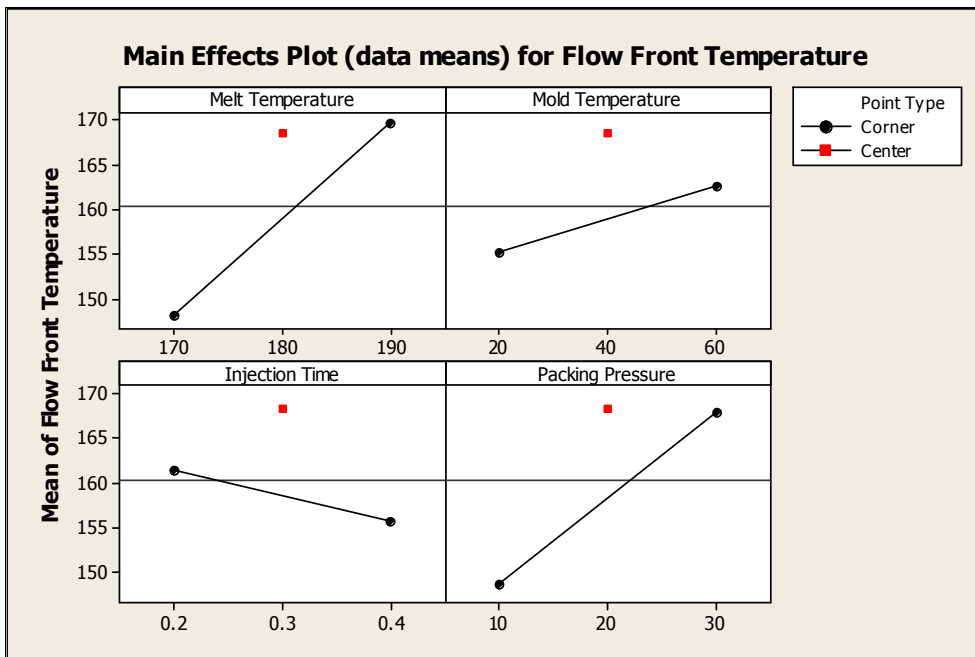


Fig. 4-10 Main effects plot for flow front temperature

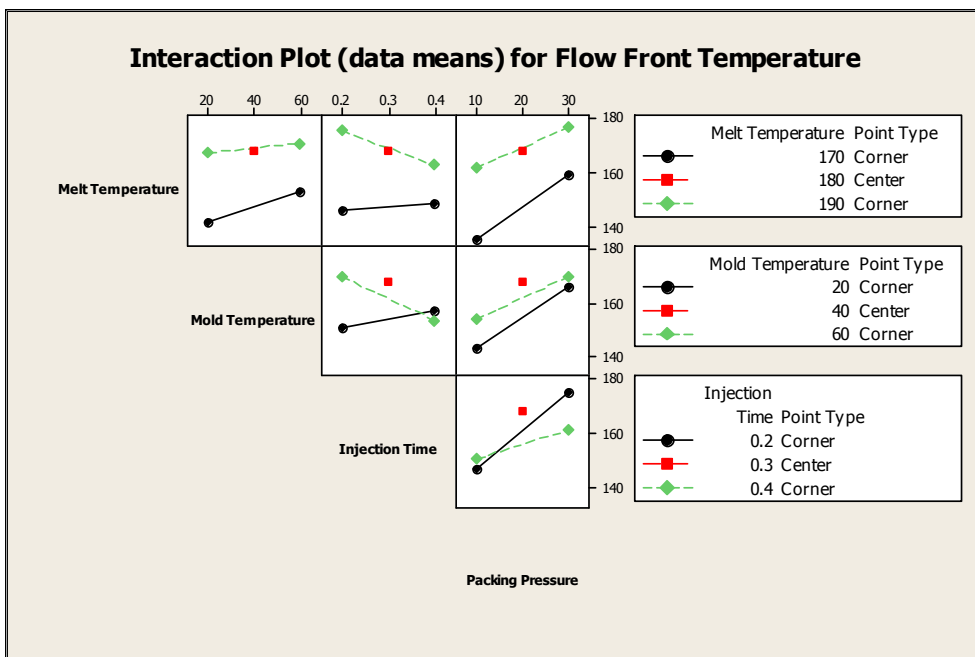


Fig. 4-11 Interaction plot for flow front temperature

4.2.2 성형체 중량에 미치는 영향

Table 4-5는 반응값 즉, 성형체 중량에 영향을 미치는 주 인자 및 상호효과를 알아보기 위하여 총 43가지 실험계획에 의하여 수행한 검정통계량 분석의 결과를 모두 나타내고 있다. 즉, 단일인자의 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 P값을 기준으로 0.1 이하에 해당하는 유의미한 인자들은 총 3가지로서는 보압력(E), 금형온도(B)×보압력(E), 용융온도(A)×사출시간(C)×보압력(E)으로 나타났다. 따라서 전체 31가지의 단일 또는 교호작용 중 단일 요인, 2인자 교호작용 및 3인자 교호작용 각각 1개씩이 성형체 중량에 주된 영향을 미치고 있다고 판단된다.

또한, Table 4-6은 각각의 인자들에 대한 주효과 및 교호작용에 대한 비중을 각각 나타내고 있다. 성형체 중량에 미치는 영향의 정도를 Seq SS 값으로 살펴보면, 단일 인자는 0.00134으로서 전체의 약 13.2%, 2인자 교호작용은 0.00416으로서 약 40.8%, 3인자 교호작용은 0.00198로서 전체의 약 19.5%, 4인자 및 5인자 교호작용은 약 3.3% 및 0.003%를 차지하고 있다. 이와 같은 의미는 성형체 중량에 미치는 영향은 2인자 교호작용이 가장 크며, 3인자 교호작용, 단일 인자의 영향 순으로 됨을 알 수 있으며, 4인자 및 5인자 교호작용은 거의 영향이 없음을 알 수 있다.

Fig. 4-12는 각각의 인자들의 영향의 정도를 나타내는 정규 확률도로서 선 근처에 있지 않은 점들은 중요한 효과라는 의미이며 효과들은 적합된 선으로부터 그렇지 않은 효과들보다 떨어져 있고 큰 절대값을 가진다. 반면에 중요하지 않은 효과들은 절대값이 작고, 효과들의 평균이 0 근처에 집중되어 있음을 알 수 있다. 따라서 E, BE, ACE는 중요한 단일인자 또는 교호작용이며 나머지 항은 중요하지 않은 값이라 판단되며, Table 4-5와 6의 결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 4-13은 단일인자들 중 주 효과를 알아보기 위한 그림으로서 인자의 수준을

변경했을 경우 평균값이 변하는 정도를 나타내고 있다. 이 때 단일인자 중 보압력(E)을 제외한 용융온도(A), 금형온도(B), 사출시간(C)은 검정통계량 분석 및 정규확률도 등을 통하여 성형체 중량에 미치는 영향이 낮은 무의한 인자로 분석되었으나 주효과도에 나타난 이유는 유의한 2인자 교호작용과 3인자 교호작용 중에 포함이 되어있기 때문에 그 교호작용의 영향을 분석하기 위하여 불가피하게 추가된 인자들이며, 보압시간(D)는 무의한 인자로서 교호작용에도 포함되어 있지 않으므로 추가하지 않았다. 그림에 나타난 바와 같이 용융온도, 금형온도, 사출시간, 보압력을 증가시키면 성형체 중량은 감소하는 음(-)의 효과를 나타냄을 알 수 있다. 또한 보압력의 기울기가 다른 요인에 비하여 기울기가 크므로 가장 큰 영향을 미치는 즉, 주 효과를 나타내는 인자임을 알 수 있다. 그리고 중심점에 대한 위치로서 각각의 인자들의 변화에 따른 용융온도의 응답의 변화를 예측할 수 있는데 모든 인자에 대하여 중심점이 아래위에 위치하므로 아래로 볼록한 그래프를 예측할 수 있으며, 성형체 중량에 미치는 인자들의 영향으로 얻을 수 있는 결과의 그래프는 직선이 아닌 곡선의 형상이 나타날 수 있음을 예측할 수 있다.

Fig. 4-14는 인자들의 상호효과 즉, 교호작용을 나타내고 있는 그림으로서 X축 인자의 낮은 수준이 Y축인자와 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 금형온도(B)와 보압력(E)의 교호작용이 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

결과적으로 성형체 중량에 미치는 인자들의 영향 및 상관관계를 분석한 결과 전체 31가지 인자들 중 3가지의 단일인자 또는 교호작용이 유의하다고 분석되었으며, 2인자 교호작용의 영향이 가장 높게 분석되었다. 이를 자세히 살펴보면, 2인자 교호작용은 전체의 약 40.86%의 영향도를 보이며 성형체 중량에 가장 큰 영향을 미치며, 이는 금형온도(B)×보압력(E)의 교호작용 1가지가 거의 대부분의 영향을 미친다고 할 수 있다. 또한 유의한 단일인자 및 3인자 교호작용은 보압력(E)과 용융온도(A)×사출시간(C)×보압력(E) 각각 1가지로 분석되었으며, 그 밖의 단일인자 또는 교호작용들은 성형체 중량에 거의 영향을 미치지 않은 무의한 인자들로

분석되었다. 따라서 유의한 3가지 인자들을 제외한 나머지 28가지 인자들은 무의미하다고 판단하여 스크리닝을 수행하였다.

Table 4-5 Estimated effects and coefficients of part weight for screening

Term (Coded)	Coded Result				Uncoded Result	Remarks
	Effect	Coef	T	P	Coef	
Constant		0.77745	340.24	0	3.25526	significance
A	-0.00632	-0.00316	-1.24	0.242	-0.0130015	insignificance
B	-0.00366	-0.00183	-0.72	0.488	-0.0387858	insignificance
C	-0.00066	-0.00033	-0.13	0.898	-7.06739	insignificance
D	0.0002	0.0001	0.04	0.969	-0.022806	insignificance
E	-0.0102	-0.0051	-2.01	0.072	-0.079067	significance
A×B	0.00478	0.00239	0.91	0.383	0.000200375	insignificance
A×C	0.00804	0.00402	1.54	0.156	0.037625	insignificance
A×D	-0.00021	-0.00011	-0.04	0.968	0.00012	insignificance
A×E	0.00641	0.00321	1.22	0.249	0.000408	insignificance
B×C	0.00638	0.00319	1.22	0.251	0.113181	insignificance
B×D	0.00015	0.00008	0.03	0.978	0.0010687	insignificance
B×E	0.0174	0.0087	3.32	0.008	0.00113737	significance
C×D	-0.00016	-0.00008	-0.03	0.976	0.06769	insignificance
C×E	0.00691	0.00346	1.32	0.216	0.228787	insignificance
D×E	-0.00021	-0.00011	-0.04	0.968	0.00076	insignificance
A×B×C	-0.00908	-0.00454	-1.73	0.114	-5.97E-04	insignificance
A×B×D	-0.00015	-0.00008	-0.03	0.978	-5.63E-06	insignificance
A×C×D	-0.0012	-0.0006	-0.23	0.823	-5.74E-06	insignificance
A×B×E	0.00016	0.00008	0.03	0.976	-0.0003562	insignificance
A×C×E	-0.01046	-0.00523	-2	0.074	-0.00120875	significance
A×D×E	0.00021	0.00011	0.04	0.968	-4.00E-06	insignificance
B×C×D	-0.0002	-0.0001	-0.04	0.97	-0.00285	insignificance
B×C×E	-0.0074	-0.0037	-1.41	0.188	-0.003395	insignificance
B×D×E	-0.00015	-0.00008	-0.03	0.978	-3.56E-05	insignificance
C×D×E	0.00016	0.00008	0.03	0.976	-0.002256	insignificance
A×B×C×D	0.0002	0.0001	0.04	0.97	0.000015	insignificance
A×B×C×E	0.0065	0.00325	1.24	0.243	1.78E-05	insignificance
A×B×D×E	0.00015	0.00008	0.03	0.978	1.88E-07	insignificance
A×C×D×E	-0.00016	-0.00008	-0.03	0.976	0.000011875	insignificance
B×C×D×E	0.0002	0.0001	0.04	0.97	0.000095	insignificance
A×B×C×D×E	-0.0002	-0.0001	-0.04	0.97	-5.00E-07	insignificance

※ A : Melt Temperature, B : Mold Temperature, C : Injection Time, D :
Packing Time, E : Packing Pressure

Table 4-6 Analysis of variance of part weight for screening

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	5	0.0013415	0.00134148	0.0002683	1.22	0.366
2-Way Interactions	10	0.0041588	0.00415876	0.00041588	1.9	0.164
3-Way Interactions	10	0.0019856	0.00198562	0.00019856	0.91	0.561
4-Way Interactions	5	0.000339	0.00033903	0.00006781	0.31	0.896
5-Way Interactions	1	0.0000003	0.00000032	0.00000032	0	0.97
Curvature	1	0.0001715	0.00017148	0.00017148	0.78	0.397
Residual Error	10	0.0021929	0.00219291	0.00021929		
Total	42	0.0101896				

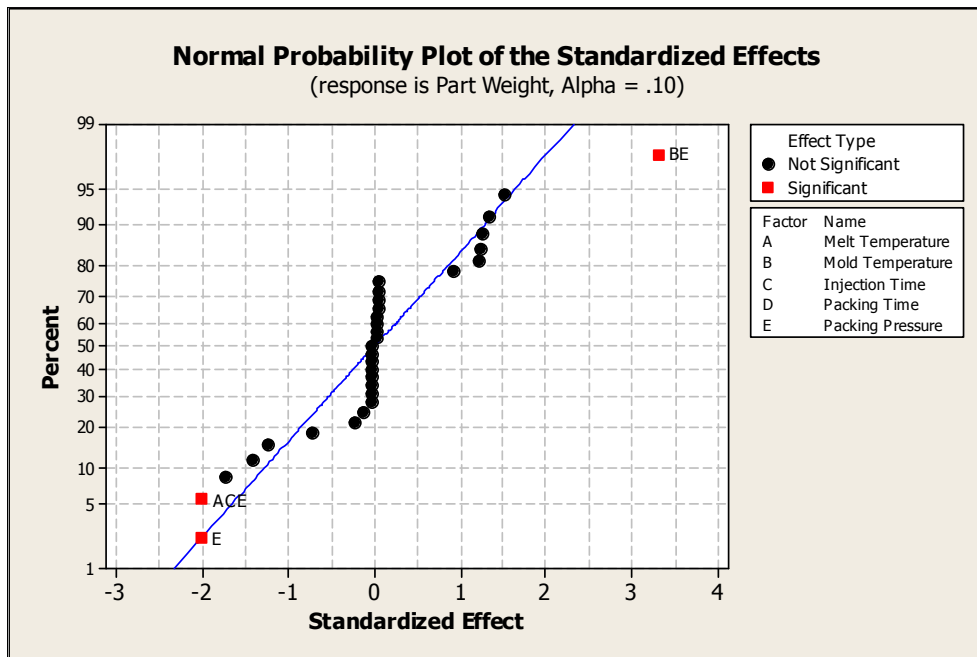


Fig. 4-12 Normal probability plot of the standardized effects of part weight for screening

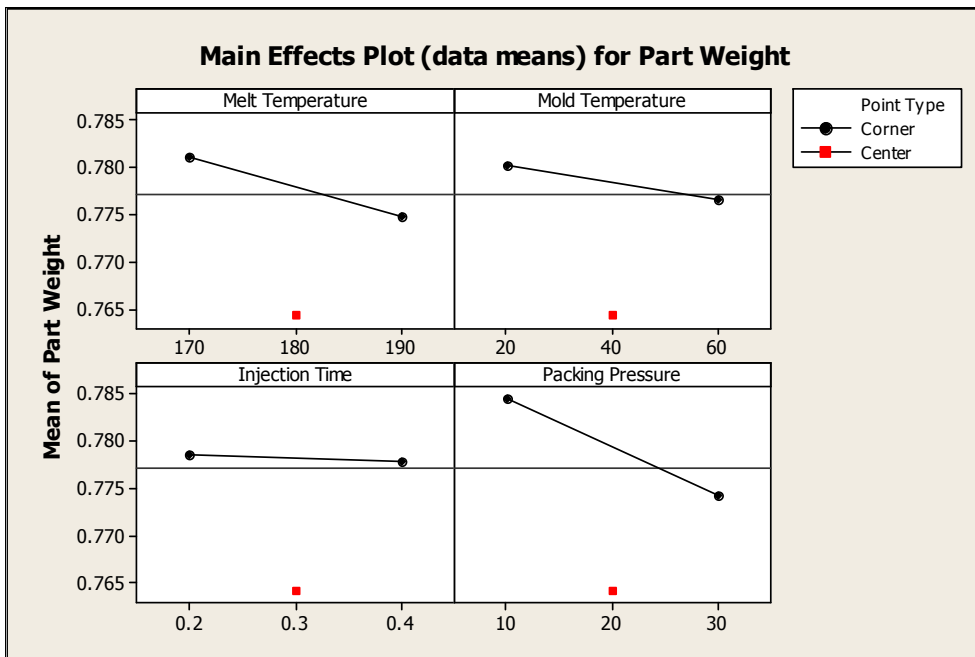


Fig. 4-13 Main effects plot for part weight

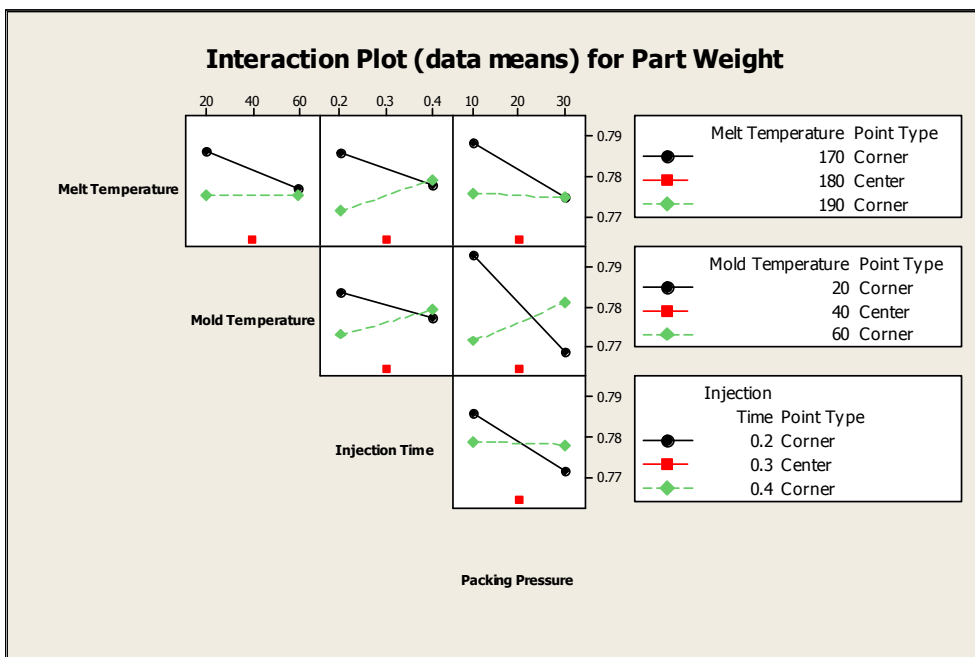


Fig. 4-14 Interaction plot for part weight

4.2.3 충전시간에 미치는 영향

Table 4-7은 반응값 즉, 충전시간에 영향을 미치는 주 인자 및 상호효과를 알아보기 위하여 수행한 검정통계량 분석 결과를 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 해당되는 인자가 반응값에 미치는 영향의 정도로서 P값을 기준으로 0.1 이하이면 영향의 정도가 높은 유의한 인자이며, 0.1 보다 크면 영향의 정도가 낮은 무의 인자라고 판별한 결과 충전시간에 미치는 유의한 인자들은 보압력(E), 금형온도(B)×사출시간(C), 금형온도(B)×사출시간(C)×보압력(E) 총 3가지로 분석할 수 있었다.

또한, Table 4-8은 각각의 인자들에 대한 주효과 및 교호작용에 대한 비중을 각각 나타내고 있다. 충전시간에 미치는 영향의 정도를 Seq SS 값으로 살펴보면, 단일 인자는 1.874로서 전체 4.36788의 약 42.9%, 2인자 교호작용은 0.882로서 전체의 약 20.2%, 3인자 교호작용은 0.601로서 전체의 약 13.8%, 4인자 및 5인자 교호작용은 약 1.8% 및 0.002%를 차지하고 있다. 이와 같은 의미는 충전시간에 미치는 영향은 단일 인자의 영향이 가장 크고, 2인자 교호작용 및 3인자 교호작용 순으로 됨을 알 수 있으며, 4인자 및 5인자 교호작용은 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. Table 4-7과 8의 결과를 통하여 충전시간에 가장 큰 영향을 미치는 단일 인자들 중 보압력(E)이 지배적이며, 2인자 교호작용들 중에는 금형온도(B)×사출시간(C)의 영향이, 3인자 교호작용 중에는 금형온도(B)×사출시간(C)×보압력(E)의 영향이 지배적이라고 판단된다. 이와 같이 판단할 수 있는 근거는 단일인자의 영향도가 전체의 약 42.9%를 나타내고 있으나 그 단일 인자들 중 보압력(E) 1가지만 P값이 0.1보다 낮은 유의한 인자로 분석되었기 때문이며, 2인자 및 3인자 교호작용도 동일한 분석에 의하여 판단할 수 있기 때문이다.

Fig. 4-15는 각각의 인자들의 영향의 정도를 나타내는 정규 확률도로서 선 근처에 있지 않은 점들은 중요한 효과라는 의미이며 그 효과들은 적합된 선으로부터 그렇지 않은 효과들보다 떨어져 있고 큰 절대값을 가진다. 반면에 중요하지 않은 효과들은 절대값이 작고, 모든 효과들의 평균이 0 근처에 집중되어 있음을 알 수 있다. 따라서 E, BC, BCE는 중요한 단일인자 또는 교호작용이며 단일인자 또는

교호작용들은 중요하지 않은 항이라 판단되며, Table 4-7과 8의 결과에서 P값이 0.1보다 낮게 분석된 결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 4-16은 단일 인자들의 주 효과를 알아보기 위한 그림으로서 인자의 수준을 변경했을 경우 평균값이 변하는 정도를 나타내고 있다. 이 때 단일인자 중 금형온도(B) 및 사출시간(C)은 검정통계량 분석 및 정규확률도 등을 통하여 충전시간에 미치는 영향이 낮은 무의미 인자로 분석되었으나 주효과도에 나타난 이유는 유의미 2인자 교호작용과 3인자 교호작용 중에 해당인자가 포함이 되어있기 때문에 그 교호작용의 영향을 분석하기 위하여 불가피하게 추가된 인자들이며, 용융온도(A)와 보압시간(D)는 무의한 인자로서 교호작용에도 포함되어 있지 않으므로 추가하지 않았다. 그림에 나타난 바와 같이 용융온도, 금형온도, 보압력을 증가시키면 충전시간이 감소하는 음(-)의 효과를 나타내며, 사출시간의 증가에 따라 충전시간이 증가하는 양(+의 효과를 나타냄을 알 수 있다. 또한 보압력의 기울기가 다른 요인에 비하여 매우 크므로 가장 큰 영향을 미치는 즉, 주 효과를 나타내는 가장 큰 인자임을 알 수 있다. 그리고 중심점에 대한 결과로서 각각의 인자들의 변화에 따른 용융온도의 응답의 변화를 예측할 수 있는데 모든 인자에 대하여 중심점이 아래에 위치하므로 아래로 볼록한 그래프를 예측할 수 있으며, 충전시간에 미치는 인자들의 영향으로 얻을 수 있는 결과의 그래프는 직선이 아닌 곡선의 형상이 나타날 수 있음을 암시하고 있다.

Fig. 4-17은 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 이 밖에 다른 교호작용들은 기울기 차이가 거의 없으므로 무시할 수 있을 정도로 매우 작다고 판단할 수 있다. 이와 같은 결과는 Table 4-7에서도 나타난 바와 같이 금형온도(B)와 사출시간(C)의 P값이 0.1보다 낮은 유의한 인자로

표현되어 잘 일치함을 알 수 있었다.

결과적으로 충전시간에 미치는 인자들의 영향 및 상관관계를 분석한 결과 전체 31가지 인자들 중 3가지의 단일인자 또는 교호작용이 유의하다고 분석되었으며, 이 중에서 단일인자의 영향이 가장 높게 분석되었다. 이를 자세히 살펴보면, 단일인자는 전체의 약 42.9%의 영향도를 보이며 충전시간에 가장 큰 영향을 미치며, 이는 보압력(E) 1가지가 거의 대부분의 영향을 미친다고 할 수 있다. 또한 유의한 2인자 교호작용 및 3인자 교호작용은 금형온도(B)×사출시간(C) 및 금형온도(B)×사출시간(C)×보압력(E) 각각 1가지로 분석되었으며, 그 밖의 교호작용들은 충전시간에 거의 영향을 미치지 않은 무의한 인자들로 분석되었다. 따라서 유의한 3가지 단일인자 또는 교호작용을 제외한 나머지 28가지 항들은 무의하다고 판단하여 스크리닝을 수행하였다.

Table 4-7 Estimated effects and coefficients of filling time for screening

Term (Coded)	Coded Result				Uncoded Result	Remarks
	Effect	Coef	T	P	Coef	
Constant		0.4911	10.57	0	36.4852	significance
A	-0.1246	-0.0623	-1.21	0.255	-0.183061	insignificance
B	-0.0986	-0.0493	-0.95	0.362	-0.58773	insignificance
C	0.0692	0.0346	0.67	0.518	-91.443	insignificance
D	0.0011	0.0006	0.01	0.991	-0.2084	insignificance
E	-0.4364	-0.2182	-4.23	0.002	-1.22023	significance
A×B	0.0874	0.0437	0.82	0.431	0.00294937	insignificance
A×C	0.0992	0.0496	0.93	0.374	0.464912	insignificance
A×D	-0.0012	-0.0006	-0.01	0.991	0.0010969	insignificance
A×E	0.1288	0.0644	1.21	0.254	0.0061147	insignificance
B×C	0.2153	0.1076	2.02	0.071	1.55997	significance
B×D	-0.0012	-0.0006	-0.01	0.991	3.47E-03	insignificance
B×E	0.0984	0.0492	0.92	0.377	1.96E-02	insignificance
C×D	0.0012	0.0006	0.01	0.991	1.042	insignificance
C×E	0.142	0.071	1.33	0.212	3.0887	insignificance
D×E	-0.0012	-0.0006	-0.01	0.991	6.95E-03	insignificance
A×B×C	-0.0994	-0.0497	-0.93	0.372	-0.0077456	insignificance
A×B×D	0.0012	0.0006	0.01	0.991	-0.00001828	insignificance
A×C×D	-0.0869	-0.0435	-0.82	0.433	-9.84E-05	insignificance
A×B×E	-0.0012	-0.0006	-0.01	0.991	-0.005484	insignificance
A×C×E	-0.1	-0.05	-0.94	0.370	-0.0155212	insignificance
A×D×E	0.0012	0.0006	0.01	0.991	-0.00003656	insignificance
B×C×D	-0.0012	-0.0006	-0.01	0.991	-0.01737	insignificance
B×C×E	-0.2184	-0.1092	-2.05	0.067	-0.05207	significance
B×D×E	0.0012	0.0006	0.01	0.991	-0.0001158	insignificance
C×D×E	-0.0012	-0.0006	-0.01	0.991	-0.03473	insignificance
A×B×C×D	0.0012	0.0006	0.01	0.991	0.00009141	insignificance
A×B×C×E	0.0997	0.0499	0.94	0.371	0.000258437	insignificance
A×B×D×E	-0.0012	-0.0006	-0.01	0.991	6.09E-07	insignificance
A×C×D×E	0.0012	0.0006	0.01	0.991	0.0001828	insignificance
B×C×D×E	0.0012	0.0006	0.01	0.991	0.0005789	insignificance
A×B×C×D×E	-0.0012	-0.0006	-0.01	0.991	-3.05E-06	insignificance

※ A : Melt Temperature, B : Mold Temperature, C : Injection Time, D : Packing Time, E : Packing Pressure

Table 4-8 Analysis of variance of filling time for screening

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	5	1.87422	1.87422	0.374843	4.13	0.027
2-Way Interactions	10	0.88206	0.88206	0.088206	0.97	0.517
3-Way Interactions	10	0.6012	0.6012	0.06012	0.66	0.736
4-Way Interactions	5	0.0796	0.0796	0.01592	0.18	0.966
5-Way Interactions	1	0.00001	0.00001	0.000012	0	0.991
Curvature	1	0.02397	0.02397	0.023972	0.26	0.618
Residual Error	10	0.90682	0.90682	0.090682		
Total	42	4.36788				

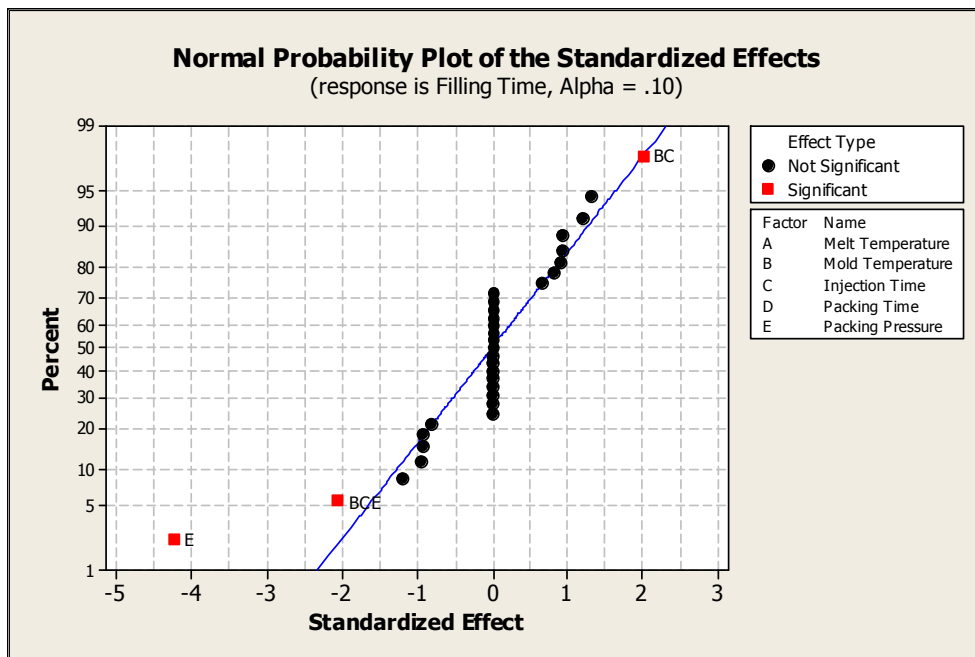


Fig. 4-15 Normal probability plot of the standardized effects of filling time for screening

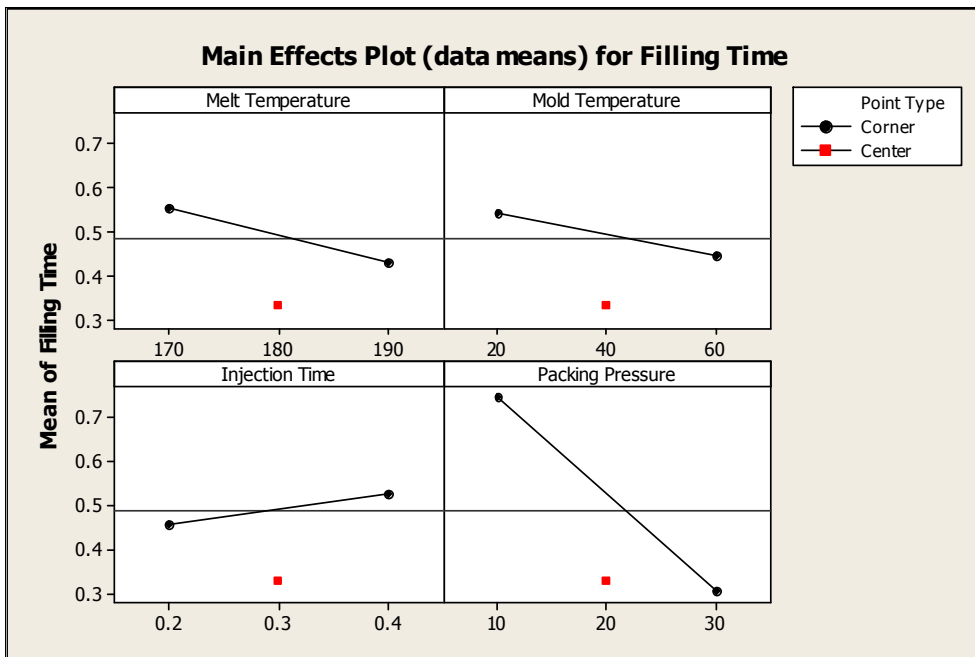


Fig. 4-16 Main effects plot for filling time

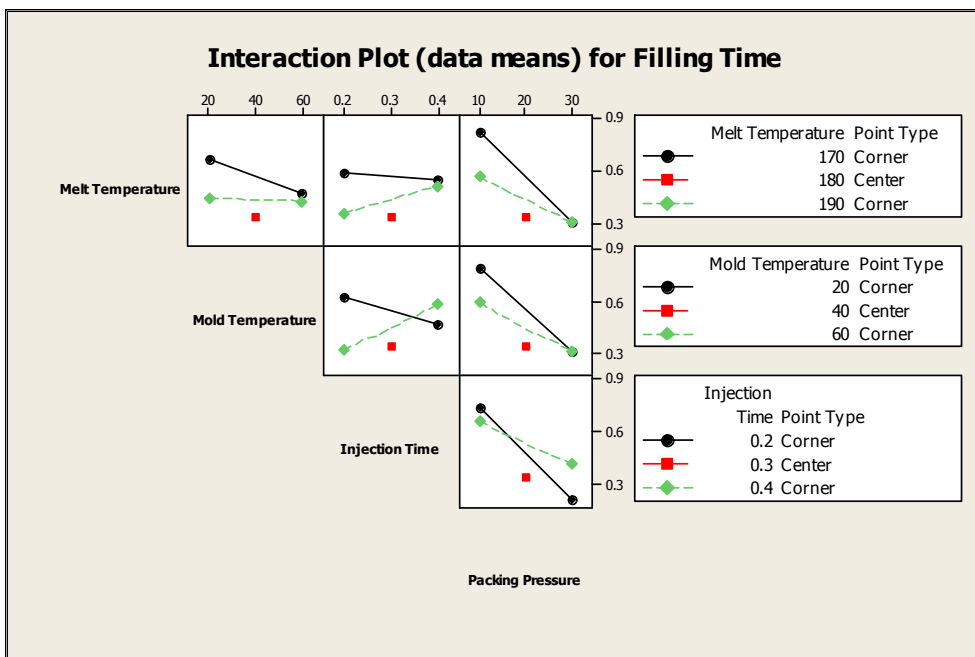


Fig. 4-17 Interaction plot for filling time

4.2.4 사이클 타임에 미치는 영향

Table 4-9는 반응값 즉, 사이클 타임에 영향을 미치는 주 인자 및 상호효과를 알아보기 위하여 수행한 검정통계량 분석 결과를 모두 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 해당되는 단일인자 또는 교호작용이 결과에 미치는 영향의 정도를 P값이 0.1 이하에 해당하는 유의한 인자들은 총 4가지로서 단일인자 중 금형온도(B), 사출시간(C) 및 보압시간(D) 3가지와 2인자 교호작용 중 금형온도(B)×사출시간(C) 1가지로 분석되었다. 그 밖의 단일인자 또는 교호작용은 모두 P값이 0.1보다 크게 나타나 사이클 타임에 미치는 영향이 낮은 무의한 인자들임을 알 수 있었다.

또한, Table 4-10은 각각의 인자들에 대한 주효과 및 교호작용에 대한 비중을 각각 나타내고 있다. 사이클 타임에 미치는 영향의 정도를 Seq SS 값으로 살펴보면, 단일 인자는 34.3232로서 전체와 같은 값으로서 100%를 차지하고 있는데, 이와 같은 의미는 사이클 타임에 미치는 영향은 단일 인자 3가지가 사이클 타임에 미치는 영향의 전부를 나타내고 있다고 할 수 있다. 따라서 2인자 교호작용 중 금형온도(B)×사출시간(C)이 사이클 타임에 영향을 주지만 단일인자들의 영향에 비하면 매우 작은 영향을 미치고 있다고 판단되며, 결과적으로 사이클 타임에 대한 반응값은 단일인자들만의 함수라고 할 수 있다.

Fig. 4-18은 각각의 인자들의 영향의 정도를 나타내는 정규 확률도로서 선 근처에 있지 않은 점들은 중요한 효과라는 의미이며 효과들은 적합된 선으로부터 그렇지 않은 효과들보다 떨어져 있고 큰 절대값을 가진다. 반면에 중요하지 않은 효과들은 절대값이 작고, 모든 효과들의 평균이 0 근처에 집중되어 있음을 알 수 있다. 따라서 금형온도(B), 사출시간(C) 및 보압시간(D)은 중요한 단일 인자이고 2인자 교호작용 중 BC의 영향이 조금 있으며, 나머지 단일인자 또는 교호작용들은 중요하지 않은 항이라 판단되며, Table 4-9와 10의 결과와 잘 부합하고 있다.

Fig. 4-19는 주 효과를 알아보기 위한 그림으로서 인자의 수준을 변경했을 경우 평균값이 변하는 정도를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 용융온도(A) 및 금형온도(B) 변화에 따른 사이클 타임은 거의 일정한 값을 나타내고 있으며, 사출

시간(C)은 약간의 양(+)의 효과를 나타내나 큰 영향이 없고, 보압시간(D)이 증가할 수록 사이클 타임은 크게 증가하는 양(+)의 효과를 나타냄을 알 수 있다. 또한 중심점에 대한 결과로서 보압시간에 따른 직선상의 정중앙에 위치함으로서 보압력(E)에 정비례하는 추이를 갖는다고 판단된다.

Fig. 4-20은 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 서로 교차하거나 기울기 차이가 큰 교호작용이 없는 것으로 보아 인자들 간의 교호작용은 미미하다고 판단할 수 있으며, 이와 같은 결과는 Table 4-10에서 고찰한 단일 인자들만의 함수라고 판단한 근거와 잘 일치하고 있다.

결과적으로 사이클 타임에 미치는 인자들의 영향 및 상관관계를 분석한 결과 전체 31가지 단일인자 또는 교호작용들 중 단일인자 3가지만이 유의하다고 분석되었으며, 그 단일인자들 중 보압시간(D)의 영향이 가장 높으며, 사출시간(C) 및 금형온도(B) 순으로 나타났다. 그 밖의 단일인자 및 교호작용들은 사이클 타임에 거의 영향을 미치지 않은 무의한 인자들로 분석되었다. 따라서 유의한 3가지 단일인자를 제외한 나머지 28가지 단일인자 또는 교호작용은 무의하다고 판단하여 스크리닝을 수행하였다.

Table 4-9 Estimated effects and coefficients for cycle time for screening

Term (Coded)	Coded Result				Uncoded Result	Remarks
	Effect	Coef	T	P	Coef	
Constant		13.2899	188334.1	0	9.99011	significance
A	0.0001	0.0001	0.9	0.389	0.000029559	insignificance
B	-0.0019	-0.0009	-11.89	0	0.00018588	significance
C	0.195	0.0975	1243.04	0	1.01041	significance
D	2	1	12750.31	0	1	significance
E	0	0	0	1	0	insignificance
A×B	0.0002	0.0001	0.93	0.375	-7.50E-07	insignificance
A×C	0	0	0.31	0.763	-0.000125	insignificance
A×D	0	0	0	1	-3.40E-17	insignificance
A×E	0	0	0	1	-2.27E-18	insignificance
B×C	-0.0013	-0.0006	-8.04	0	-0.001	significance
B×D	0	0	0	1	-1.07E-16	insignificance
B×E	0	0	0	1	5.78E-18	insignificance
C×D	0	0	0	1	0	insignificance
C×E	0	0	0	1	0	insignificance
D×E	0	0	0	1	0	insignificance
A×B×C	0.0002	0.0001	0.93	0.375	3.75E-06	insignificance
A×B×D	0	0	0	1	5.89E-19	insignificance
A×C×D	0	0	0	1	-2.06E-20	insignificance
A×B×E	0	0	0	1	0	insignificance
A×C×E	0	0	0	1	6.35E-18	insignificance
A×D×E	0	0	0	1	1.64E-18	insignificance
B×C×D	0	0	0	1	0	insignificance
B×C×E	0	0	0	1	-4.36E-17	insignificance
B×D×E	0	0	0	1	2.64E-18	insignificance
C×D×E	0	0	0	1	0	insignificance
A×B×C×D	0	0	0	1	-1.11E-19	insignificance
A×B×C×E	0	0	0	1	2.24E-19	insignificance
A×B×D×E	0	0	0	1	-1.82E-20	insignificance
A×C×D×E	0	0	0	1	-3.64E-18	insignificance
B×C×D×E	0	0	0	1	3.80E-18	insignificance
A×B×C×D×E	0	0	0	1	-1.42E-20	insignificance

※ A : Melt Temperature, B : Mold Temperature, C : Injection Time, D : Packing Time, E : Packing Pressure

Table 4-10 Analysis of variance of cycle time for screening

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	5	34.3232	34.3232	6.86464	32823156	0
2-Way Interactions	10	0	0	0	6.56	0.003
3-Way Interactions	10	0	0	0	0.09	1
4-Way Interactions	5	0	0	0	-	-
5-Way Interactions	1	0	0	0	-	-
Curvature	1	0	0	0	0.9	0.366
Residual Error	10	0	0	0	-	-
Total	42	34.3232	-	-	-	-

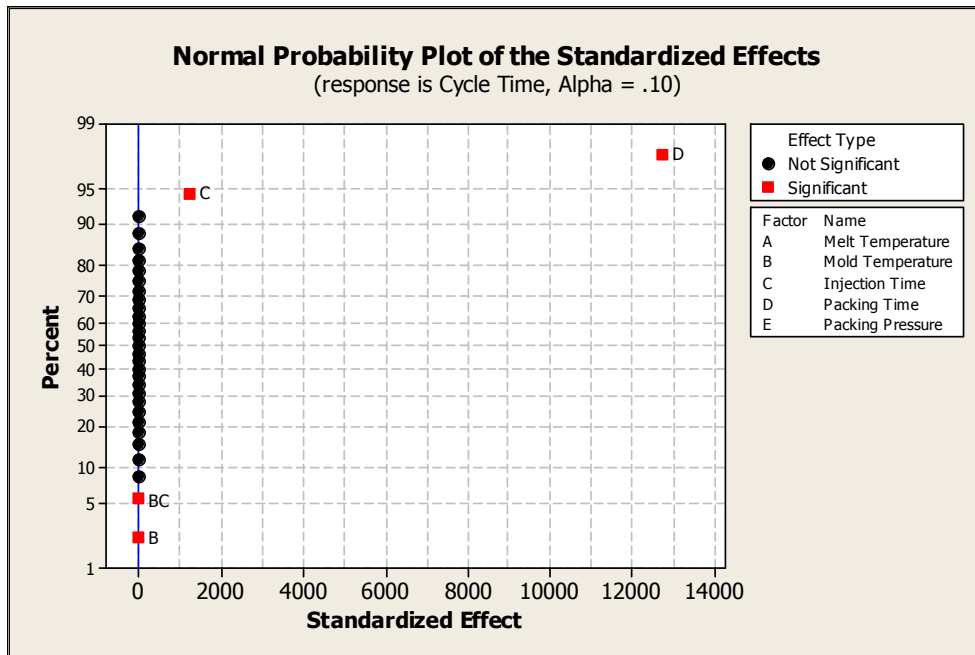


Fig. 4-18 Normal probability plot of the standardized effects of cycle time for screening

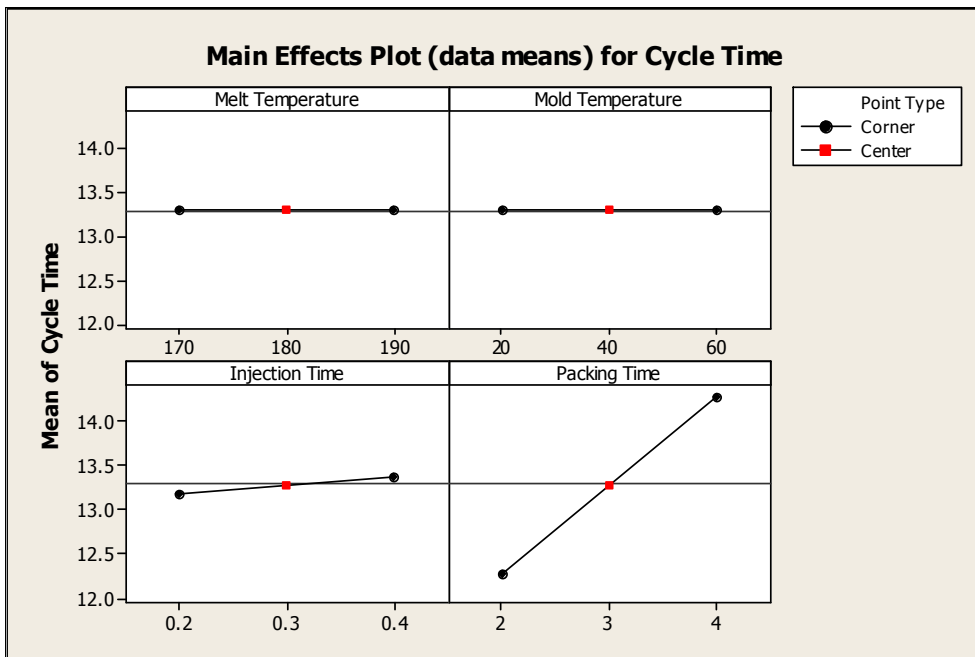


Fig. 4-19 Main effects plot for cycle time

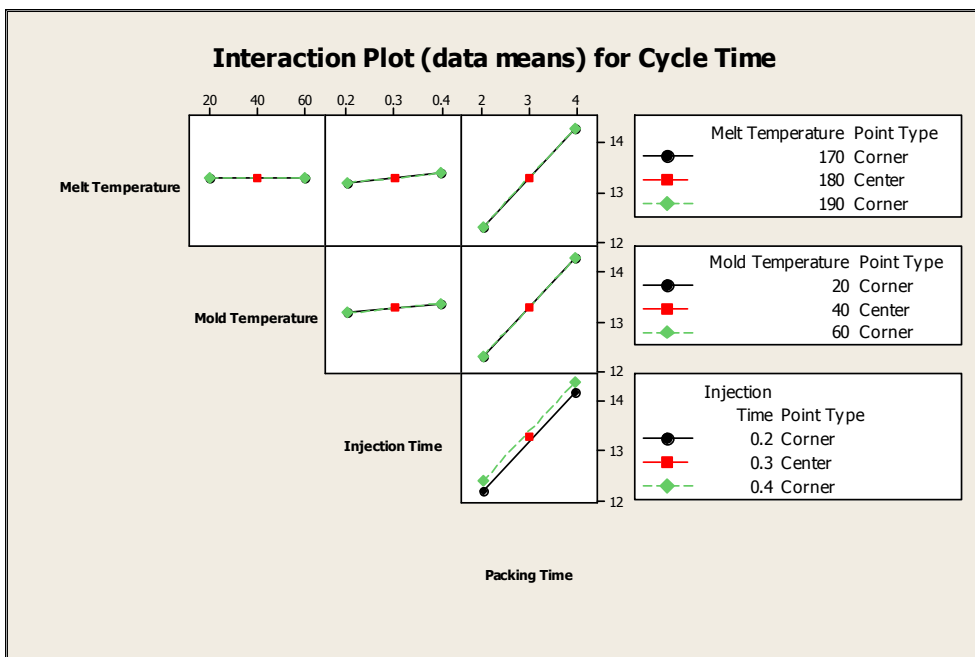


Fig. 4-20 Interaction plot for cycle time

4.2.5 성형체의 체적 수축률에 미치는 영향

Table 4-11은 반응값 즉, 사출 시 발생하는 성형체의 체적 수축률에 영향을 미치는 주 인자 및 상호효과를 알아보기 위하여 수행한 검정통계량 분석의 결과를 모두 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 해당되는 인자가 결과에 미치는 영향의 정도로서 P값을 기준으로 0.1 이하에 해당하는 유의한 인자들은 총 5가지로서 단일인자 3가지, 2인자 교호작용 2가지이며, 이를 자세히 나타내면 단일인자는 용융온도(A), 금형온도(B) 및 사출시간(C)이고, 2인자 교호작용은 용융온도(A)×사출시간(C), 금형온도(B)×사출시간(C)이다. 그 밖의 단일인자 및 교호작용은 모두 0.1 이상으로서 유의한 인자가 아님을 알 수 있다.

또한, Table 4-12는 각각의 인자들에 대한 주효과 및 교호작용에 대한 비중을 각각 나타내고 있다. 체적 수축률에 미치는 영향의 정도를 Seq SS 값으로 살펴보면, 단일 인자는 4.369로서 전체 4.37696의 99.8%를 차지하고 있다. 이와 같은 의미는 총 31가지 단일인자 또는 교호작용들 중 단일인자에 의하여 반응값인 체적 수축률이 지배받는 정도를 나타내므로 매우 중요한 인자들이라 할 수 있다. 이와 같은 방법으로 살펴보면, 2가지 인자끼리의 결합은 전체의 약 0.12%를, 3가지 요인끼리의 결합은 전체의 약 0.005%를 나타내고 있다. 따라서 단일인자는 매우 중요한 인자이며, 2인자 및 3인자 교호작용은 아주 작고, 4인자 및 5인자 교호작용은 체적 수축률에 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 4-21은 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 절대값이 작고, 모든 효과들의 평균이 0 근처에 집중되어 있음을 알 수 있다. 따라서 그림에 나타난 바와 같이 용융온도(A), 금형온도(B) 및 사출시간(C), 용융온도(A)×사출시간(C), 금형온도(B)×사출시간(C) 5가지는 유의한 단일인자 또는 교호작용이며 나머지 단일인자 또는 교호작용들은 중요하지 않은 무의한 항이라 판단할 수 있다.

Fig. 4-22는 주 효과를 알아보기 위한 그림으로서 인자의 수준을 변경했을 때

평균값이 변하는 정도를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 사출 시 성형체의 체적 수축률은 용융온도(A)와 사출시간(C)의 증가에 따라 증가하는 양(+)의 효과를 나타내고 있으며, 금형온도(B)의 증가에 따라 감소하는 음(-)의 효과를 나타내고 있다. 이 중에서 용융온도의 기울기가 매우 크게 나타나므로 단일 인자 중 가장 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며, 금형온도(B) 및 사출시간(C)은 기울기가 거의 유사하면서 용융온도의 기울기보다 매우 작으므로 체적 수축률에 미치는 영향이 그만큼 작다는 것을 알 수 있다. 또한, 중심점에 대한 결과로서 각 인자들의 변화를 나타내는 직선상의 정중앙에 위치함으로서 단일 인자에 정비례하는 추이를 갖는다고 판단된다.

Fig. 4-23은 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 서로 교차하거나 기울기 차이가 큰 교호작용이 없는 것으로 보아 인자들 간의 교호작용은 무시할 수 있을 정도라고 판단할 수 있으며, 이와 같은 결과는 Table 4-12에서 고찰한 2인자 교호작용의 Seq SS의 값이 전체의 약 0.12%로 매우 낮게 분석된 결과와 잘 일치하고 있다.

결과적으로 성형체의 체적 수축률에 미치는 인자들의 영향 및 상관관계를 분석한 결과 전체 31가지 인자들 중 5가지의 인자들이 유의하다고 분석되었으며, 이 중에서 단일인자의 영향이 가장 높게 분석되었다. 이를 보다 자세히 살펴보면, 단일인자는 전체의 약 99.8%의 영향도를 보이며 체적수축률에 가장 큰 영향을 미치며, 이들 단일인자들 중 용융온도(A)가 가장 큰 주효과를 보이고 금형온도(B) 및 사출온도(C) 순으로 나타났다. 한편, 유의한 2인자 교호작용은 용융온도(A)×사출시간(C), 금형온도(B)×사출시간(C)의 순으로 나타났으며, 그 밖의 단일인자 또는 교호작용들은 성형체의 체적 수축률에 거의 영향을 미치지 않은 무의한 인자들로 분석되었다. 따라서 유의한 5가지 인자들을 제외한 나머지 26가지 단일인자 또는

교호작용들은 무의미하다고 판단하여 스크리닝을 수행하였다.

Table 4-13은 본 절에서 고찰하고자 하였던 각각 반응값(유동 선단온도, 성형체 중량, 충전시간, 사이클 타임, 체적수축률) 5가지에 대하여 각각의 5가지 인자(용융온도, 금형온도, 사출시간, 보압시간, 보압력)들의 상관관계분석, 검정통계량분석, 정규확률도분석, 주효과 및 상호효과분석을 통하여 얻어진 전체적인 결과를 요약하여 나타내고 있다. 유동 선단의 온도에 영향을 미치는 인자는 9가지이고, 성형체 중량, 충전시간 및 사이클 타임에 미치는 인자는 각각 3가지이며, 체적수축률에 영향을 미치는 인자는 6가지로 정리되었다. 또한, 유동 선단온도 및 충전시간은 주효과가 가장 크고, 2인자 교호작용 및 3인자 교호작용 순으로 나타났으며, 사이클 타임과 체적 수축률은 주효과가 거의 전부를 차지하였으며 성형체 중량은 2인자 교호작용이 가장 크고, 3인자 교호작용 및 주효과 순으로 영향을 미치고 있는 것으로 분석되었다.

Table 4-11 Estimated effects and coefficients of volumetric shrinkage for screening

Term (Coded)	Coded Result				Uncoded Result	Remarks
	Effect	Coef	T	P	Coef	
Constant		11.1671	4876.3	0	5.34231	significance
A	0.7034	0.3517	138.18	0	0.0312868	significance
B	-0.0612	-0.0306	-12.02	0	-0.0100914	significance
C	0.1243	0.0621	24.42	0	-1.09603	significance
D	0	0	0	1	0	insignificance
E	0	0	0	1	0	insignificance
A×B	0.0065	0.0032	1.23	0.247	0.000057	insignificance
A×C	0.0107	0.0053	2.04	0.069	0.0108	significance
A×D	0	0	0	1	0	insignificance
A×E	0	0	0	1	0	insignificance
B×C	-0.0227	-0.0113	-4.32	0.002	0.018863	significance
B×D	0	0	0	1	0	insignificance
B×E	0	0	0	1	0	insignificance
C×D	0	0	0	1	0	insignificance
C×E	0	0	0	1	0	insignificance
D×E	0	0	0	1	0	insignificance
A×B×C	-0.0055	-0.0027	-1.04	0.323	-1.36E-04	insignificance
A×B×D	0	0	0	1	-2.87E-18	insignificance
A×C×D	0	0	0	1	-2.18E-19	insignificance
A×B×E	0	0	0	1	0	insignificance
A×C×E	0	0	0	1	0	insignificance
A×D×E	0	0	0	1	-6.66E-18	insignificance
B×C×D	0	0	0	1	0	insignificance
B×C×E	0	0	0	1	0	insignificance
B×D×E	0	0	0	1	-1.45E-17	insignificance
C×D×E	0	0	0	1	0	insignificance
A×B×C×D	0	0	0	1	0	insignificance
A×B×C×E	0	0	0	1	3.16E-19	insignificance
A×B×D×E	0	0	0	1	7.96E-20	insignificance
A×C×D×E	0	0	0	1	0	insignificance
B×C×D×E	0	0	0	1	0	insignificance
A×B×C×D×E	0	0	0	1	-1.32E-19	insignificance

※ A : Melt Temperature, B : Mold Temperature, C : Injection Time, D : Packing Time, E : Packing Pressure

Table 4-12 Analysis of variance of volumetric shrinkage for screening

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	5	4.36914	4.36914	0.873828	3967.1 ₂	0
2-Way Interactions	10	0.00535	0.00535	0.000535	2.43	0.089
3-Way Interactions	10	0.00024	0.00024	0.000024	0.11	0.999
4-Way Interactions	5	0	0	0	-	-
5-Way Interactions	1	0	0	0	-	-
Curvature	1	0.00003	0.00003	0.000028	0.13	0.727
Residual Error	10	0.0022	0.0022	0.00022	-	-
Total	42	4.37696	-	-	-	-

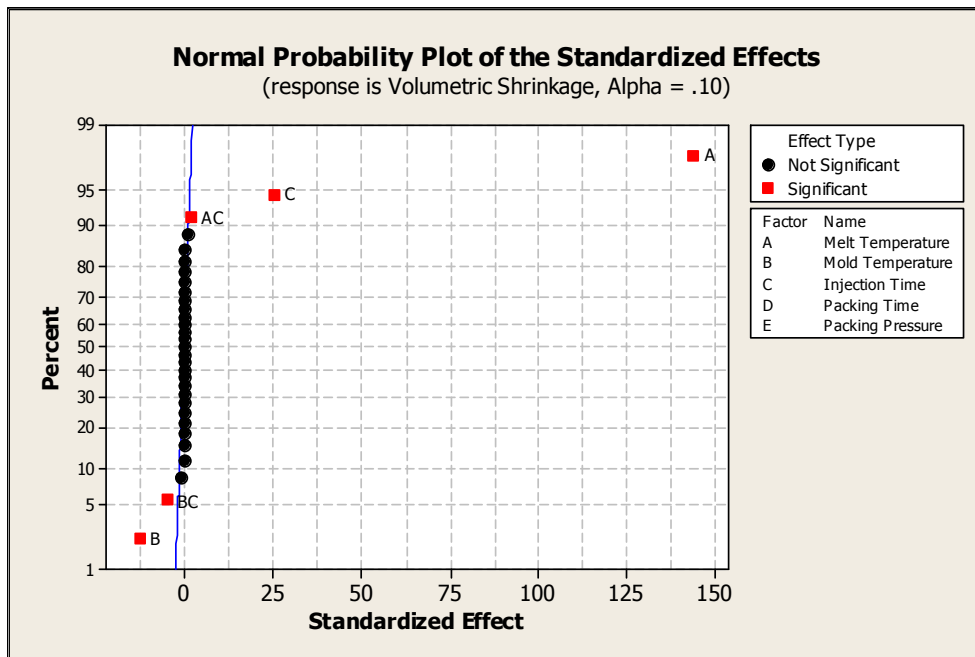


Fig. 4-21 Normal probability plot of the standardized effects of volumetric shrinkage for screening

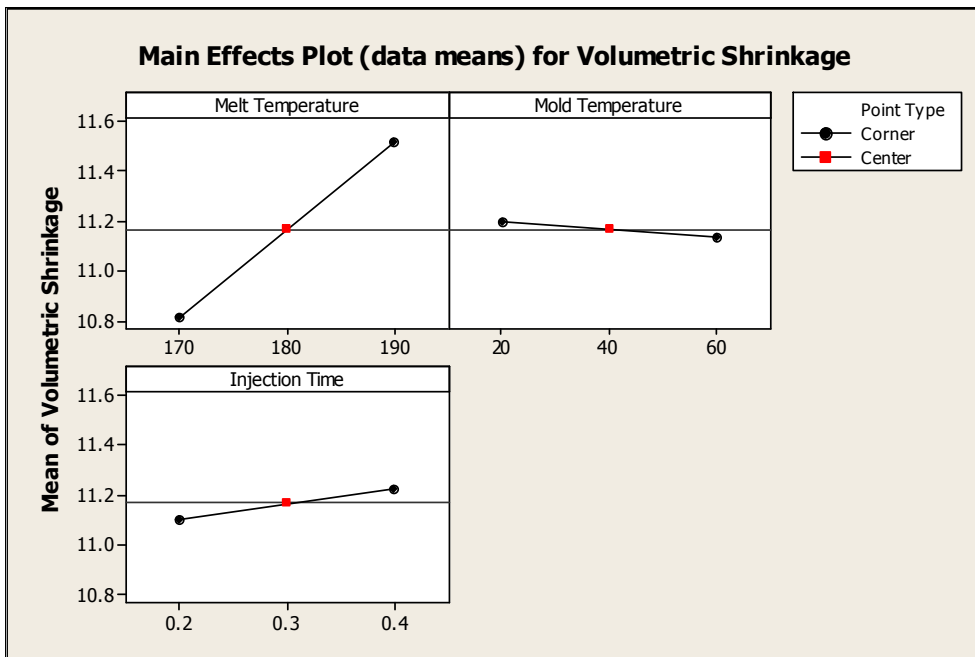


Fig. 4-22 Main effects plot for volumetric shrinkage

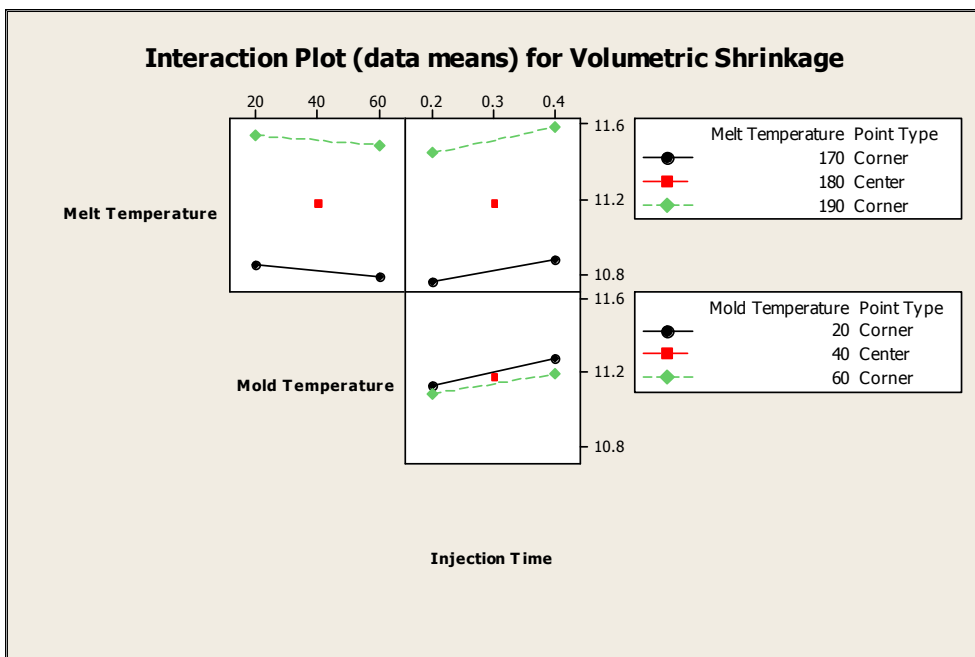


Fig. 4-23 Interaction plot for volumetric shrinkage

Table 4-13 All effect of factors on responses

No.	Responses		Effects		
			Main	2-way interaction	3-way interaction
1	Flow Front Temperature	Significant factors	$A \approx E > B \approx C$	AC, BC, CE	ACE, BCE
		Variance	60.55%	18.57%	15.06%
2	Part Weight	Significant factors	E	BE	ACE
		Variance	13.17%	40.81%	19.49%
3	Filling Time	Significant factors	E	BC	BCE
		Variance	42.91%	20.19%	13.76%
4	Cycle Time	Significant factors	$D \gg C > B$	-	-
		Variance	100.00%	-	-
5	Volumetric Shrinkage	Significant factors	$A \gg B \approx C$	AC, BC	ABC
		Variance	99.82%	0.12%	0.01%

4.3 회귀분석 및 반응표면분석

4.3.1 유동 선단온도 분석

4.2.1의 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 4-14는 회귀분석한 결과를 나타낸 표로서 2차방정식이라 가정한 후 각각의 계수 값을 나타내고 있으며, Table 4-15는 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 있다⁷⁸⁾. 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 4-14에서 도출된 코드화된 계수를 이용하여 식 4-1과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 보다 축소시키고자 한다면 제곱항을 비롯하여 영향이 거의 없는 교호작용 항을 삭제하여 최종적으로 식 4-2와 같이 요약하여 나타낼 수 있다. 또한, 이와 동일한 방법과 Table 4-14의 비코드화된 계수를 이용하여 회귀식 및 요약된 전체적인 회귀식을 식 4-3과 4-4와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{c1} = 167.498 + 9.332A + 2.282B - 4.241C + 8.203E - 0.046A^2 + 0.004B^2 - 0.996C^2 - 6.646E^2 - 0.456AB - 2.206AC - 0.644AE - 3.981BC - 0.194BE - 2.794CE \quad (4-1)$$

$$Y_{c2} = 167.498 + 9.332A - 4.241C + 8.203E - 2.206AC - 3.981BC - 0.194BE - 2.794CE \quad (4-2)$$

$$\begin{aligned}
Y_{u1} = & -259.424 + 1.982A + 1.141B + 549.99C + 5.514E - 0.00046A^2 + 0.00001B^2 - \\
& 99.627C^2 - 0.0665E^2 - 0.0023AB - 2.206AC - 0.0064AE - 1.991BC - 0.001BE - \\
& 2.793CE
\end{aligned} \tag{4-3}$$

$$Y_{u2} = -259.424 + 1.982A + 549.99C + 5.514E - 2.206AC - 1.991BC - 0.001BE - 2.793CE \tag{4-4}$$

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

이와 같이 도출된 회귀식의 이용은 실험을 수행하지 않은 조건에 대한 유동 선단온도의 결과값을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 비코드화된 조건으로서 용융온도 170℃, 금형온도 50℃, 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℃가 산출되며, 코드화된 식 4-1을 이용한 결과 149.829℃가 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℃ 및 172.849℃가 산출되어 약 14.1% 정도의 오차를 보임을 알 수 있다. 이와 같은 결과로서 유동 선단에 대하여 도출된 회귀식의 적정함을 확인할 수 있었다.

Fig. 4-24~26은 유의한 교호작용의 요인들의 값의 변화에 따라 용융 선단온도가 변화되는 내용을 파악하기 위하여 반응표면분석법 중 등고선 선도를 이용하여 나타낸 것이며, 이 중 Fig. 4-24는 용융온도와 사출시간, Fig. 4-25는 금형온도와 사출시간, Fig. 4-26은 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, 이

와 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.

Table 4-14 Estimated regression coefficients for flow front temperature

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

Table 4-15 Analysis of variance for flow front temperature

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				

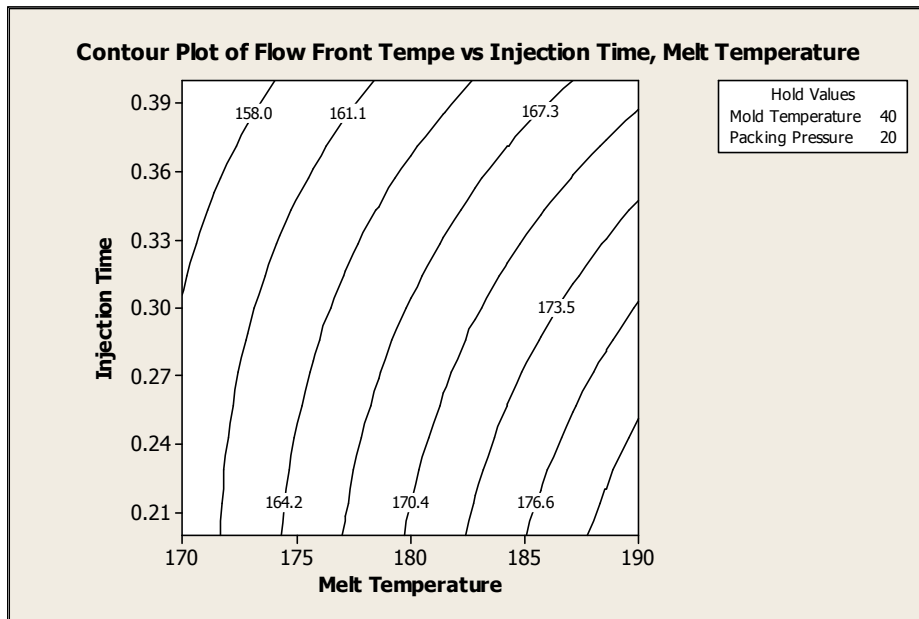


Fig. 4-24 Contour plot of flow front temperature between melt temperature and injection time

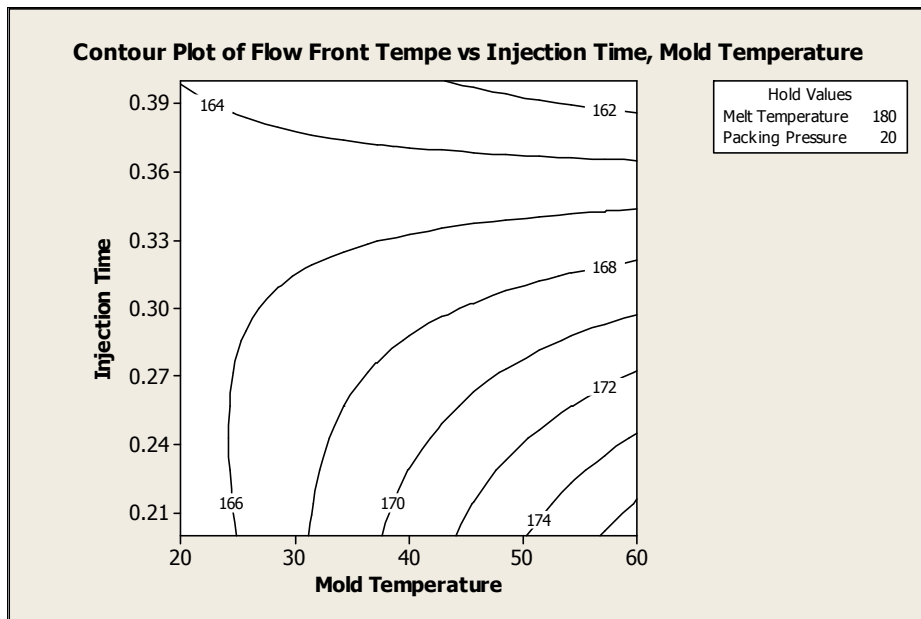


Fig. 4-25 Contour plot of flow front temperature between mold temperature and injection time

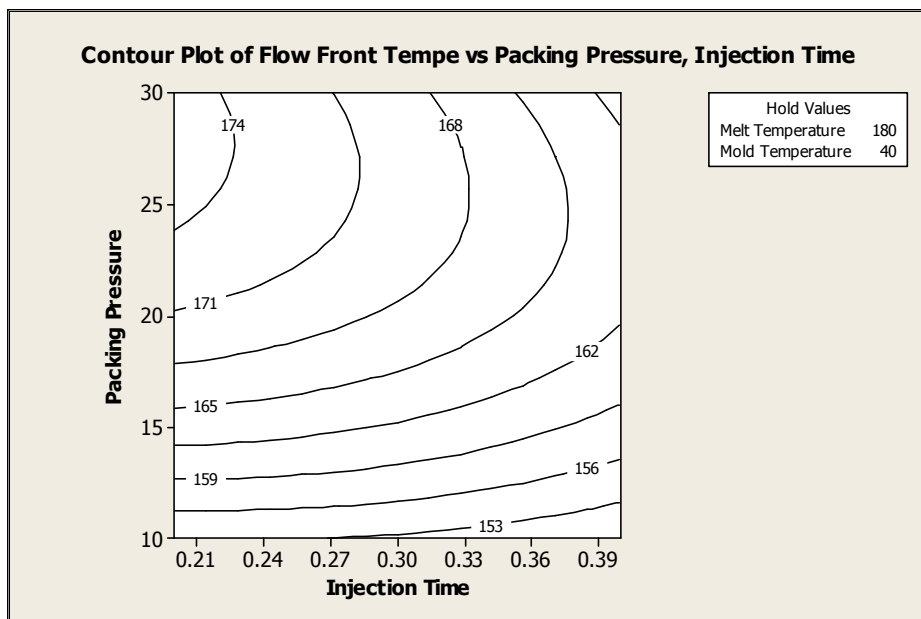


Fig. 4-26 Contour plot of flow front temperature between injection time and packing pressure

4.3.2 성형체 중량 분석

4.2.2의 성형체 중량에 영향을 미치는 요인들 중 P값이 0.1 이상인 인자들을 스크리닝한 후 유의한 주요인자 및 교호작용들만을 이용하여 회귀분석 및 반응표면 분석을 수행하였다.

Table 4-16은 회귀분석한 결과를 나타낸 표로서 2차방정식이라 가정한 후 각각의 계수 값을 나타내고 있다. 이때 스크리닝 단계에서 금형온도의 P값이 0.1보다 크게 나타나 무의한 인자로 분류하였으나 회귀분석 및 반응표면분석에 포함시킨 이유는 어느 교호작용을 살펴보기 위해서는 그 각각의 인자가 단일인자로 입력되어야만 가능하기 때문에 금형온도를 포함하는 교호작용 즉, 금형온도와 보압력과의 교호작용을 살펴보기 위하여 추가시켰기 때문이다.

Table 4-17은 선형항, 제곱항 및 교호작용의 영향을 전체적으로 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 Seq SS 합 0.01019 중 선형항 및 제곱항이 0.001 정도를 차지하여 약 8.8~9.8%의 영향을 나타내고 있으며, 교호작용은 0.0024로서 전체의 약 23.8% 정도를 차지하고 있다. 따라서 성형체 중량에 대한 코드화된 전체적인 회귀식은 Table 4-16의 코드화된 계수를 이용하여 식 4-5와 같이 나타낼 수 있으며, 이를 보다 축소시키고자 한다면 영향이 낮은 항을 삭제하여 최종적으로 식 4-6과 같이 요약하여 나타낼 수 있다. 또한, 이와 동일한 방법과 비코드화된 계수를 이용하여 전체적인 회귀식 및 요약된 회귀식을 식 4-7 및 4-8과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{c1} = 0.7697 - 0.00183B - 0.0051E - 0.004677B^2 + 0.01412E^2 + 0.0087BE \quad (4-5)$$

$$Y_{c2} = 0.7697 - 0.00183B - 0.0051E + 0.0087BE \quad (4-6)$$

$$Y_{u1} = 0.856 - 0.0.000026B - 0.0079E - 0.000012B^2 + 0.00014E^2 + 0.0000435BE \quad (4-7)$$

$$Y_{u2} = 0.856 - 0.0.000026B - 0.0079E + 0.0000435BE \quad (4-8)$$

여기서, B는 금형온도, E는 보압력이다.

이와 같이 도출된 회귀식의 이용은 실험을 수행하지 않은 조건에 대한 성형체 중량의 결과값을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 비코드화된 조건으로서 용융온도 170℃, 금형온도 50℃, 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 4-7 또는 4-8에 대입하고, 코드화된 조건은 식 4-5 또는 4-6에 대입하여 계산할 수 있다. 이와 같이 계산하면, 반응값인 성형체 중량은 비코드화된 식 4-7을 이용한 결과 0.7714g으로 계산되어, 코드화된 식 4-5에 적용한 결과와 거의 동일하며 약 0.0001% 정도의 오차만을 보임을 알 수 있다. 또한, 영향이 적은 제곱항을 삭제한 식 4-6 및 4-8에 동일한 방법으로 대입하여 계산하면 0.774g 및 0.802g이 산출되어 약 3.55% 정도로 작은 오차를 보임을 알 수 있다. 이와 같은 결과로서 성형체 중량에 대하여 도출된 회귀식의 적정함을 확인할 수 있었다.

Fig. 4-27은 유의한 교호작용이라 할 수 있는 금형온도와 보압력의 변화를 파악하기 위하여 반응표면분석법 중 등고선 선도를 이용하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 금형온도와 보압력이 함께 낮거나 높을 경우 성형체 중량은 높아짐을 알 수 있다. 또한, 금형의 온도가 20~30℃로 낮을 때 보압력이 20~30Mpa로 높은 범위일 경우와 금형의 온도가 50~60℃로 높을 때 보압력이 13~20Mpa로 낮은 범위일 경우에는 성형체의 중량이 약 0.772g 정도로 매우 낮게 나타나고 있다. 이와 같이 성형체 중량에 영향을 미치는 주요한 2가지 인자 일지라도 정비례 관계는 아니며 서로 교호작용을 통하여 반응값에 영향을 미치므로, 적절한 성형체 중량을 형성함에 있어 금형온도와 보압력의 적절한 수준조합이 필요하다고 사료된다.

Table 4-16 Estimated regression coefficients for part weight

Term		Coefficient		P
Uncoded	Coded	Uncoded	Coded	
Constant		0.769673	0.856117	0.0
Mold Temperature	B	-0.001829	-0.000026	0.403
Packing Pressure	E	-0.0051	-0.007899	0.024
Mold Temperature×Mold Temperature	B×B	-0.004677	-0.000012	0.495
Packing Pressure×Packing Pressure	E×E	0.014123	0.0001412	0.045
Mold Temperature×Packing Pressure	B×E	0.0087	0.0000435	0.0

Table 4-17 Analysis of variance for part weight

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0.004319	0.004319	0.000864	5.45	0.001
Linear	2	0.000998	0.000998	0.000499	3.15	0.055
Square	2	0.000899	0.000899	0.00045	2.83	0.072
Interaction	1	0.002422	0.002422	0.002422	15.27	0
Residual Error	37	0.00587	0.00587	0.000159		
Total	42	0.01019				

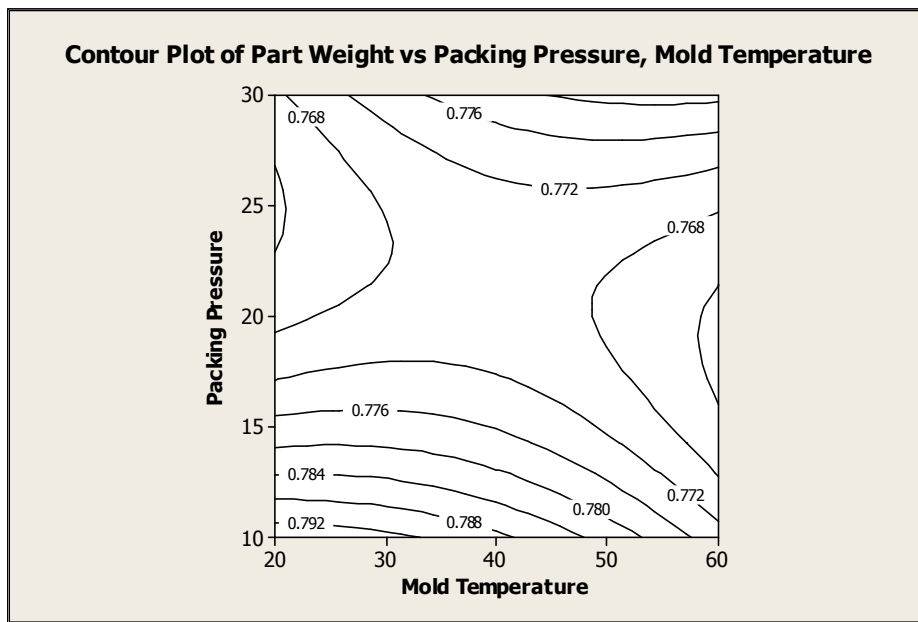


Fig. 4-27 Contour plot of part weight between mold temperature and packing pressure

4.3.3 충전시간 분석

4.2.3의 충전시간에 영향을 미치는 요인들 중 P값이 0.1 이상인 단일인자 또는 교호작용들을 스크리닝한 후 주요인자 및 교호작용들만을 이용하여 회귀분석 및 반응표면분석을 수행하였다.

Table 4-18은 회귀분석한 결과를 나타낸 표로서 2차방정식이라 가정한 후 구한 각각의 계수 값을 나타내고 있다. 이때 스크리닝 단계에서 금형온도 및 사출시간의 P값이 0.1보다 크게 나타나 무의한 인자로 분류시켰었으나 회귀분석 및 반응표면분석에 포함시킨 이유는 어느 교호작용을 살펴보기 위해서는 그 각각의 인자가 단일인자로 입력되어야만 가능하기 때문에 금형온도 또는 사출시간을 포함하는 교호작용 즉, 금형온도와 사출시간, 사출시간과 보압력과의 교호작용을 살펴보기 위하여 추가시켰기 때문이다.

Table 4-19는 선형항, 제곱항 및 교호작용의 영향을 전체적으로 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 Seq SS 합 4.3679 중 선형항이 약 1.743을 차지하며 약 39.9%로 가장 큰 영향을 나타내고 있으며, 제곱항은 0.506으로서 약 11.6%, 교호작용은 0.61로서 약 14.0% 정도를 나타내고 있다. 따라서 코드화된 전체적인 충전시간에 대한 회귀식은 Table 4-18의 코드화된 계수를 이용하여 식 4-9와 같이 나타낼 수 있으며, 이를 보다 축소시키고자 한다면 무의한 제곱항 및 무의한 교호작용의 항을 삭제하여 최종적으로 식 4-10과 같이 요약하여 나타낼 수 있다. 또한, 이와 동일한 방법과 비코드화된 계수를 이용한 전체적인 회귀식 및 요약된 회귀식은 식 4-11과 4-12와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{c1} = 0.4076 - 0.0493B + 0.0346C - 0.2182E - 0.01584B^2 - 1.6053C^2 + 0.0419E^2 + 0.1076BC + 0.0492BE + 0.071CE \quad (4-9)$$

$$Y_{c2} = 0.4076 - 0.2182E + 0.0419E^2 + 0.0492BE + 0.071CE \quad (4-10)$$

$$Y_{u1} = 1.70861 + 0.00814B + 6.4052C - 0.22091E - 0.000395B^2 - 16.0531C^2 + 0.0042E^2 +$$

$$0.5382BC + 0.000246BE + 0.071CE \quad (4-11)$$

$$Y_{u2} = 1.70861 - 0.22091E + 0.0042E^2 + 0.5382BC + 0.071CE \quad (4-12)$$

여기서, B는 금형온도, C는 사출시간, E는 보압력이다.

이와 같이 도출된 회귀식의 이용은 실험을 수행하지 않은 조건에 대한 유동 선단온도의 결과값을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 비코드화된 조건으로서 용융온도 170℃, 금형온도 50℃, 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 4-11 또는 4-12에 대입하고, 코드화된 조건은 식 4-9 또는 4-10에 대입하여 계산할 수 있으며, 반응값인 충전시간은 코드화된 식 4-19 및 비코드화된 식 4-11에 대입하여 계산한 결과 모두 약 0.438sec가 산출되어 오차가 거의 없었다. 또한, 영향이 작은 인자항을 삭제한 식 4-10 및 4-12에 동일한 방법으로 대입하여 계산하면 0.640sec 및 0.842sec로 계산되어 약 24.0% 정도의 오차를 보임을 알 수 있다. 이와 같은 결과로서 유동 선단에 대하여 도출된 회귀식의 적정함을 확인할 수 있었으나 요약된 회귀식에서 오차가 크게 발생된 원인은 충전시간에 미치는 영향이 작다고 판단된 항의 값이 작을 지라도 계산되어지는 응답값 충전시간 역시 매우 작은 값으로 나타나므로 그 오차의 비율은 크게 계산되어지기 때문으로 사료된다.

Fig. 4-28~30은 유의한 교호작용의 요인들의 값의 변화에 따라 충전시간이 변화되는 내용을 파악하기 위하여 반응표면분석법 중 등고선 선도를 이용하여 나타낸 것이며, 이 중 Fig. 4-28은 금형온도와 사출시간, Fig. 4-29는 금형온도와 보압력, Fig. 4-30은 사출시간과 보압력의 변화에 따른 충전시간의 변화를 각각 나타낸 것이다. 이들 그림에 나타난 바와 같이 금형온도가 약 30~50℃ 범위일 때, 사출시간이 낮거나 높으면 충전시간은 빨라지나 반대로 보압력은 낮거나 높을 경우 충전시간이 늦어짐을 알 수 있다. 또한 사출시간 및 보압력의 관계에서는 모두 중

간 정도의 범위일 때 충전은 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 따라서 3가지 인자인 금형온도, 사출시간, 보압력이 서로 상호작용을 통하여 최종적으로 충전시간을 결정하므로 적정한 충전시간의 고찰을 위해서는 각 인자들의 적절한 수준조합이 필요하다

Table 4-18 Estimated regression coefficients for filling time

Term		Coefficient		P
Uncoded	Coded	Coded	Uncoded	
Constant		0.40759	1.70861	0
Mold Temperature	B	-0.04931	0.0081432	0.188
Injection Time	C	0.03462	6.40517	0.352
Packing Pressure	E	-0.2182	-0.220908	0
Mold Temperature×Mold Temperature	B×B	-0.15838	-0.000396	0.221
Injection Time×Injection Time	C×C	-0.16053	-16.0531	0.215
Packing Pressure×Packing Pressure	E×E	0.41987	0.0041987	0.002
Mold Temperature×Injection Time	B×C	0.10765	0.0538234	0.008
Mold Temperature×Packing Pressure	B×E	0.0492	0.000246	0.202
Injection Time×Packing Pressure	C×E	0.071	0.0709969	0.069

Table 4-19 Analysis of variance for filling time

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	2.8583	2.8583	0.31759	6.94	0.0
Linear	3	1.7423	1.7423	0.58075	12.7	0.0
Square	3	0.5064	0.5064	0.16881	3.69	0.021
Interaction	3	0.6096	0.6096	0.20319	4.44	0.01
Residual Error	33	1.5096	1.5096	0.04575		
Total	42	4.3679				

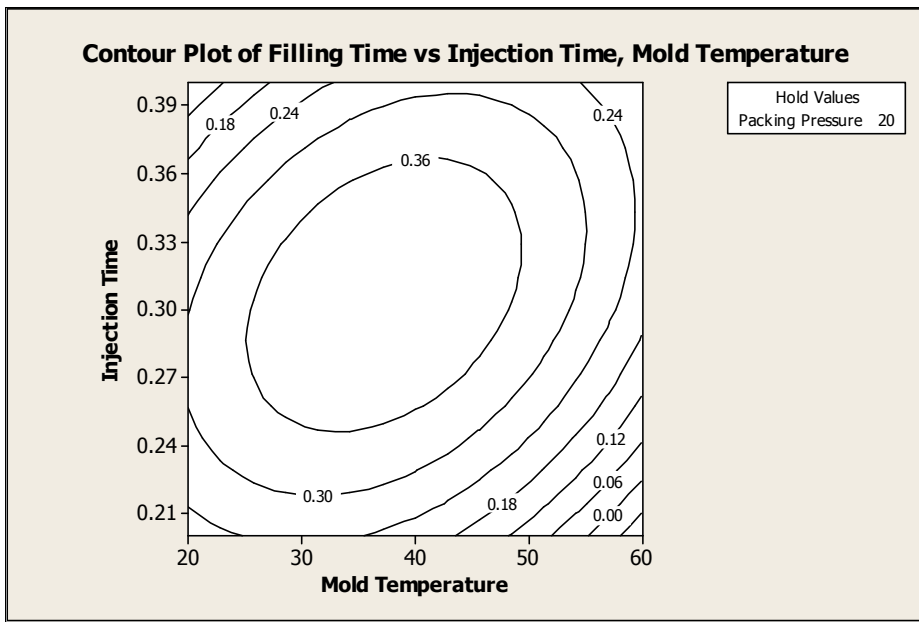


Fig. 4-28 Contour plot of filling time between mold temperature and injection time

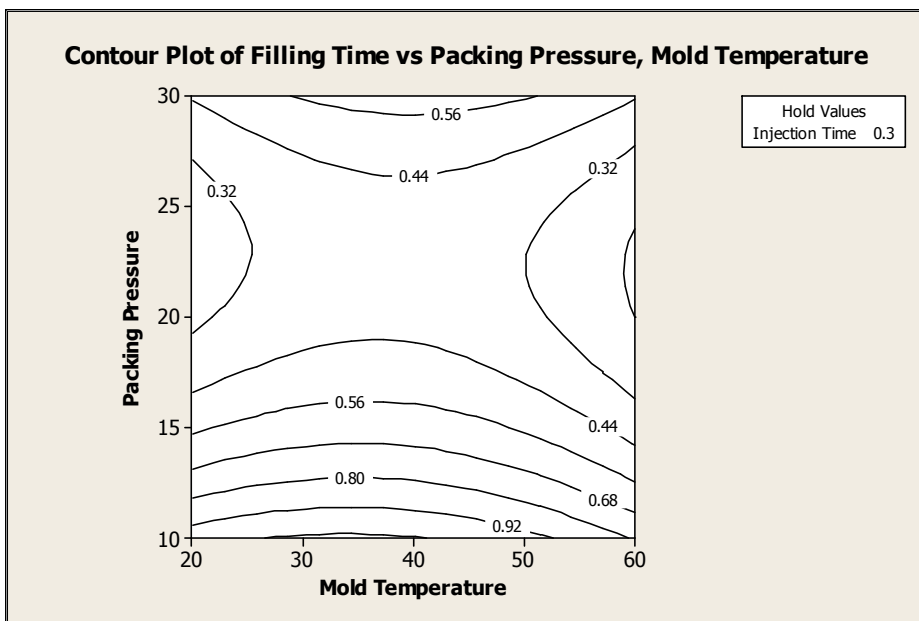


Fig. 4-29 Contour plot of filling time between mold temperature and packing pressure

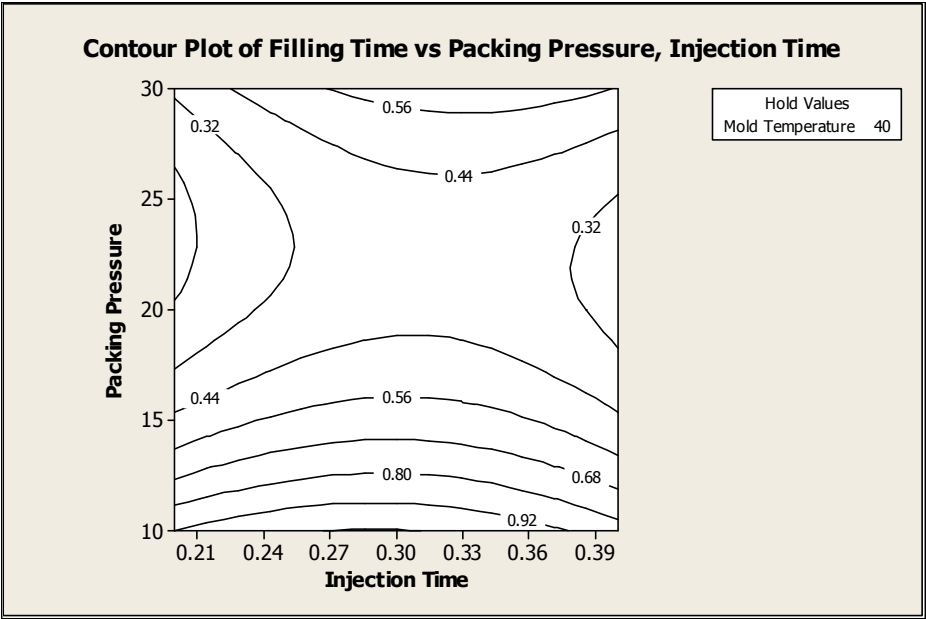


Fig. 4-30 Contour plot of filling time between injection time and packing pressure

4.3.4 사이클 타임 분석

4.2.4의 사이클 타임에 영향을 미치는 요인들 중 P값이 0.1 이상인 단일인자 또는 교호작용들을 스크리닝한 후 유의한 주요인자 및 교호작용 인자들만을 이용하여 회귀분석 및 반응표면분석을 수행하였다.

Table 4-20은 회귀분석한 결과를 나타낸 표로서 4.2.4절에서 곡선이 거의 없는 직선형인 1차 방정식이 될 것이라 판단하였으나 직선을 포함하는 2차 방정식이라고 일단 가정할 후 구한 각각의 계수 값을 나타내고 있으며, Table 4-21은 선형항, 제곱항 및 교호작용의 영향을 전체적으로 나타내고 있다. 따라서 코드화된 전체적인 회귀식은 Table 4-20의 코드화된 계수를 적용하여 식 4-13과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 보다 축소시키고자 한다면 거의 영향이 없는 제곱항 즉, 금형온도의 제곱항(B^2), 및 보압시간의 제곱항(D^2)을 삭제하여 최종적으로 식 4-14와 같이 요약하여 나타낼 수 있다. 또한, 이와 동일한 방법과 Table 4-20의 비코드화된 계수를 이용하여 전체적인 회귀식 및 요약된 회귀식을 식 4-15과 4-16과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{c1} = 10.29 - 0.0009B + 0.0975C + 0.9997D + 0.0001B^2 + 0.0004C^2 + 0.0001D^2 - 0.0006BC \quad (4-13)$$

$$Y_{c2} = 10.29 - 0.0009B + 0.0975C + 0.9997D + 0.0004C^2 - 0.0006BC \quad (4-14)$$

$$Y_{u1} = 7.00115 + 0.00003B + 0.96344C + 0.99931D + 3 \times 10^{-7}B^2 + 0.04079C^2 + 6 \times 10^{-5}D^2 - 3.3 \times 10^{-4}BC \quad (4-15)$$

$$Y_{u2} = 7.00115 + 0.00003B + 0.96344C + 0.99931D + 0.04079C^2 - 3.3 \times 10^{-4}BC \quad (4-16)$$

여기서, B는 금형온도, C는 사출시간, D는 보압시간이며, 이와 같이 도출된 회귀식의 이용은 실험을 수행하지 않은 조건에 대한 사이클 타임의 결과값을 파악

할 수 있다. 예를 들어 비코드화된 조건으로서 용융온도 170°C, 금형온도 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 4-15 또는 4-16에 대입하고, 코드화된 조건은 식 4-13 또는 4-14에 대입하여 계산할 수 있으며, 이와 같이 계산한 결과 반응값인 사이클 타임은 코드화된 식 4-13과 비코드화된 식 4-15를 이용한 결과 모두 약 10.387sec가 산출되 오차를 거의 없음을 알 수 있다. 또한, 영향이 작은 인자항을 삭제한 식 4-14 및 4-16에 동일한 방법으로 대입하여 계산하면 10.387sec 및 10.386sec로 산출되어 약 0.012% 정도의 매우 낮은 오차를 보임을 알 수 있다. 이와 같은 결과로서 유동 선단에 대하여 도출된 회귀식의 적정함을 파악할 수 있었다.

Fig. 4-31은 유의한 교호작용들의 값의 변화에 따라 용융 선단온도가 변화되는 내용을 파악하기 위하여 반응표면분석법 중 등고선 선도를 이용하여 나타낸 것으로서 금형온도와 사출시간의 변화에 따른 사이클 타임의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 금형온도 조건에 거의 무관하게 사이클 타임은 사출시간의 영향만을 받는 형태로서 직선적인 등고선 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Table 4-20 Estimated regression coefficients for cycle time

Term		Coefficient		P
Uncoded	Coded	Coded	Uncoded	
Constant		10.29	7.00115	0
Mold Temperature	B	-0.0009	0.00003	0
Injection Time	C	0.0975	0.96344	0
Packing Time	D	0.9997	0.99931	0
Mold Temperature×Mold Temperature	B×B	0.0001	0.0000003	0.232
Injection Time×Injection Time	C×C	0.0004	0.04079	0
Packing Time×Packing Time	D×D	0.0001	0.00006	0.518
Mold Temperature×Injection Time	B×C	-0.0006	-0.00033	0

Table 4-21 Analysis of variance for cycle time

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	7	34.3232	34.3232	4.903314	2.2E+08	0
Linear	3	34.3232	0.401738	0.133913	5998019	0
Square	3	0	0.000002	0.000001	30.56	0
Interaction	1	0	0.000014	0.000014	605.57	0
Residual Error	35	0	0.000001	0		
Total	42	34.3232				

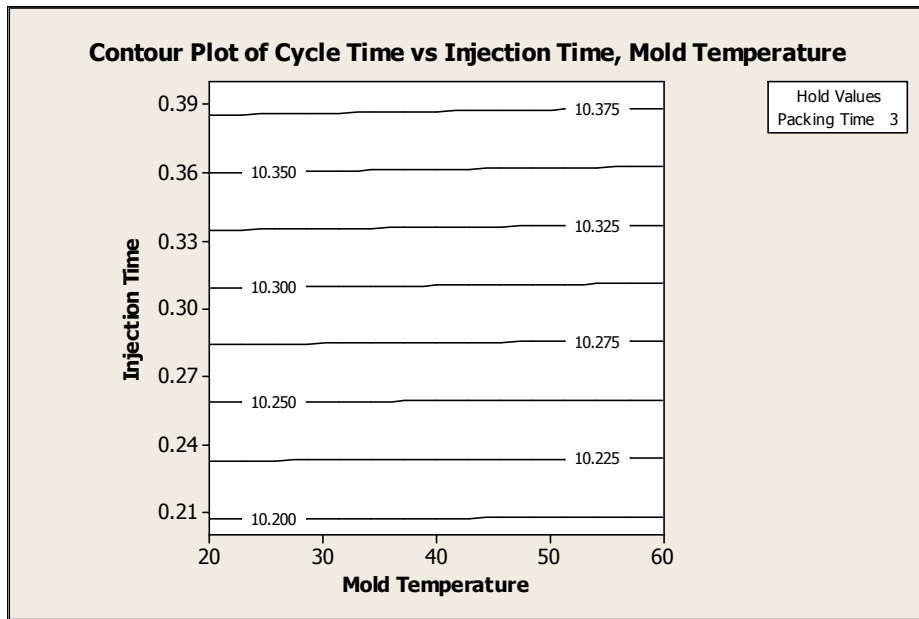


Fig. 4-31 Contour plot of cycle time between mold temperature and injection time

4.3.5 성형체의 체적 수축률 분석

4.2.5절의 사출 시 발생하는 성형체의 체적 수축률에 영향을 미치는 요인들 중 P값이 0.1 이상인 단일인자 또는 교호작용들을 스크리닝한 후 유의한 주요인자 및 교호작용들만을 이용하여 회귀분석 및 반응표면분석을 수행하였다.

Table 4-22는 회귀분석한 결과를 나타낸 표로서 4.2.5절에서 곡선이 거의 없는 직선형인 1차 방정식이 될 것이라 판단하였으나 직선을 포함하는 2차 방정식이라고 일단 가정한 후 구한 각각의 계수 값을 나타내고 있으며, Table 4-23은 선형항, 제곱항 및 교호작용의 영향을 전체적으로 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 Seq SS 합 4.37696 중 선형항이 약 4.369을 차지하며 약 99.8%로 가장 큰 영향을 나타내고 있으며, 제곱항은 0.002로서 거의 영향이 없으며, 교호작용은 0.005로서 약 0.1% 정도를 나타내고 있다. 결과적으로 체적 수축률에 대한 인자들의 영향 중 선형항과 관련된 단일인자의 영향이 거의 절대적이라 할 수 있으며, 제곱항 및 교호작용은 무시할 수 있을 정도로 미미하다고 판단된다. 따라서 코드화된 전체적인 회귀식은 식 4-17과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 보다 축소시키고자 한다면 제곱항을 비롯하여 영향이 거의 없는 용융온도의 제곱항(A²)을 삭제하여 최종적으로 식 4-18과 같이 요약하여 나타낼 수 있다. 또한, 이와 동일한 방법과 Table 4-22의 비코드화된 계수를 이용하여 전체적인 회귀식 및 요약된 회귀식을 식 4-19와 4-20과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{c1} = 11.1735 + 0.3517A - 0.0306B + 0.0621C - 0.0019A^2 + 0.0172B^2 - 0.0233C^2 + 0.0053AC - 0.0113BC \quad (4-17)$$

$$Y_{c2} = 11.1735 + 0.3517A - 0.0306B + 0.0621C + 0.0172B^2 - 0.0233C^2 + 0.0053AC - 0.0113BC \quad (4-18)$$

$$Y_{u1} = 4.45651 + 0.04A - 0.034B + 1.62C - 0.00002A^2 + 0.00069B^2 - 2.326C^2 + 0.0054AC - 0.0227BC \quad (4-19)$$

$$Y_{u1} = 4.45651 + 0.04A - 0.034B + 1.62C + 0.00069B^2 - 2.326C^2 + 0.0054AC - 0.0227BC \quad (4-20)$$

여기서, A는 용융온도, B는 금형온도, C는 사출시간이며, 이와 같이 도출된 회귀식의 이용은 실험을 수행하지 않은 조건에 대한 체적 수축률의 결과값을 파악할 수 있다. 예를 들어 비코드화된 조건으로서 용융온도 170℃, 금형온도 50℃, 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 4-19 또는 4-20에 대입하고, 코드화된 조건은 식 4-17 또는 4-18에 대입하여 계산할 수 있으며, 이와 같이 계산한 결과 반응값인 체적 수축률은 비코드화된 식 4-19를 이용한 결과 11.074%가 산출되고, 코드화된 식 4-17을 이용한 결과 11.543%가 산출되어 약 4.06% 정도의 오차만을 보임을 알 수 있다. 또한, 영향이 작은 인자항을 삭제한 식 4-18 및 4-20에 동일한 방법으로 대입하여 계산하면 11.545% 및 11.611%가 산출되어 약 0.57% 정도의 낮은 오차를 보임을 알 수 있다. 이와 같은 결과로서 유동 선단에 대하여 도출된 회귀식의 적정함을 파악할 수 있었다.

Fig. 4-32~33은 교호작용의 요인이라 할 수 있는 용융온도(A)와 사출시간(C) 및 금형온도(B)와 사출시간(C)의 변화에 따른 성형체의 체적 수축률의 변화를 반응표면분석법 중 등고선 선도를 이용하여 나타낸 것으로서, 각 조건의 변화에 따른 성형체의 체적 수축률의 변화를 동시에 파악할 수 있다.

이 중 Fig. 4-32는 용융온도와 사출시간, Fig. 4-33은 금형온도와 사출시간의 변화에 따른 체적 수축률의 변화를 각각 나타낸 것이다. 이들 그림에 나타난 바와 같이 사출시간과 용융온도와의 관계에서 사출시간은 체적수축률에 거의 영향을 미치지 않으며, 용융온도의 변화에 비례적으로 증가하는 경향을 알 수 있으나 금형온도와 사출시간의 관계가 체적 수축률에 미치는 영향을 살펴보면 일정한 금형온도일 경우 사출시간이 증가할수록 체적 수축률도 증가하는 경향을 보이며, 반대

로 일정한 사출시간일 경우 금형온도가 증가할수록 체적수축률은 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 따라서 용융온도, 금형온도, 사출시간 3가지 인자의 상호작용에 의하여 최종적으로 체적 수축률을 결정된다고 분석되므로, 적정한 체적수축률을 얻기 위해서는 각 인자들의 적절한 조건설정이 필요하리라 사료된다.

또한, 4.1절에서 관찰한 주효과 및 교호작용의 분석으로 스크리닝을 수행한 후 본 4.2절에서 주요 인자 및 주요 교호작용 인자들만을 이용하여 회귀분석 및 반응표면분석을 수행한 결과 각각의 반응값에 주된 영향을 주는 요인들을 정리하면 Table 4-24와 같이 정리될 수 있다. 표에 나타난 바와 같이 주 효과 중 보압시간은 오직 사이클 타임에만 영향을 미치는 인자이며 직선적인 관계에 있고, 사출 성형체 중량 및 충전시간의 주 효과는 보압력에 의존하는 특징이 있음을 알 수 있었다. 이와 같이 정리된 결과로서 의미 있는 사항으로서 처음 실험계획에 의하여 제공항을 고려하지 않더라도 31가지 항이 있었으나 스크리닝과 회귀식 도출 및 반응표면분석 결과 유동 선단의 온도는 주 효과 요인 4개, 제공요인 3개, 2인자 교호작용 3개로서 총 10개의 요인이 작용하는 2차 방정식의 회귀식이 도출되었다. 또한, 사출 성형체 중량은 주 효과 요인, 제공요인, 2인자 교호작용 각각 1개씩으로 총 3개로 압축되었으며, 충전시간은 주 효과 요인 1개와 2인자 교호작용 3개로서 총 4개의 요인이 작용하는 2차 방정식의 회귀식이 도출되었다. 한편, 사이클 타임과 체적 수축률의 요인은 주 효과 요인 3가지로 축약되어 거의 직선적인 회귀식이 도출되었다고 평가할 수 있다.

Table 4-22 Estimated regression coefficients for volumetric shrinkage

Term	Coefficient		P
	Uncoded	Coded	
Constant			0.0
Melt Temperature		A	0.0
Mold Temperature		B	0.0
Injection Time		C	0.0
Melt Temperature×Melt Temperature		A×A	0.532
Mold Temperature×Mold Temperature		B×B	0.0
Injection Time×Injection Time		C×C	0.0
Melt Temperature×Injection Time		A×C	0.0
Mold Temperature×Injection Time		B×C	0.0

Table 4-23 Analysis of variance for volumetric shrinkage

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	8	4.37616	4.37616	0.54702	23242.58	0.0
Linear	3	4.36914	4.36914	1.45638	61880.77	0.0
Square	3	0.002	0.002	0.00067	28.34	0.0
Interaction	2	0.00502	0.00502	0.00251	106.65	0.0
Residual Error	34	0.0008	0.0008	0.00002		
Total	42	4.37696				

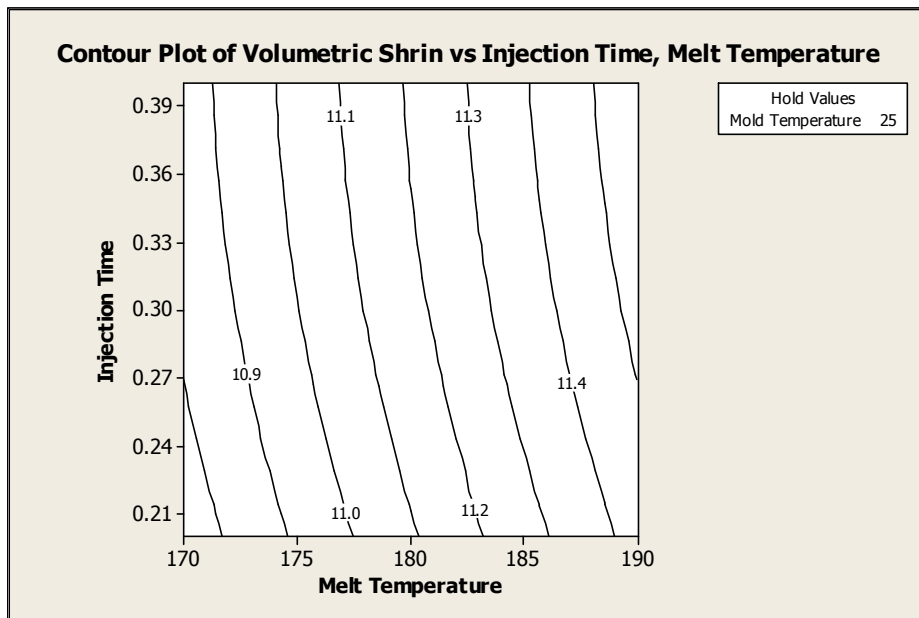


Fig. 4-32 Contour plot of volumetric shrinkage between melt temperature and injection time

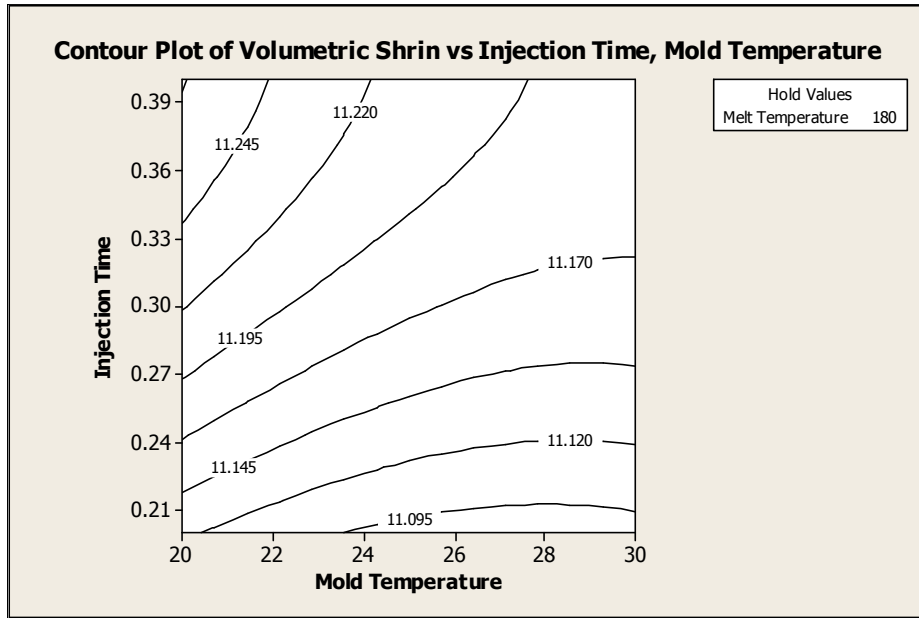


Fig. 4-33 Contour plot of volumetric shrinkage between mold temperature and injection time

Table 4-24 Result of the main and interaction effects for responses

Responses	Main effect	Quadratic	2-way interaction	over 3-way interaction
Flow front temperature	A, B, C, E	A^2, C^2, E^2	AC, BC, CE	-
Part weight	E	E^2	BE	-
Filling time	E	-	BC, BE, CE	-
Cycle time	B, C, D	-	-	-
Volumetric shrinkage	A, B, C	-	-	-

※ A : Melt Temperature, B : Mold Temperature, C : Injection Time, D : Packing Time, E : Packing Pressure

4.3.6 반응 최적화

반응 변수가 하나 또는 여러 개일 때 이들 반응 변수의 목표 값을 만족시키는 인자의 최적조합을 찾아보기 위하여 반응 최적화를 실시하였다.

먼저 반응표면설계는 중심합성법을 이용하여 요인 4개(용융온도, 금형온도, 사출 시간, 보압력), 기본 실행횟수 30개, 기저값 블록 및 전체 블록 2개, 반복실행횟수 1회로 설계하였다. 기본 실행횟수가 30개라는 의미는 입방체 점 16개, 입방체의 중심점 4개, 축점 8개 및 축의 중심점 2개로 구성되어 전체적으로 30회의 실험을 수행하였다는 것을 의미한다. 이와 같이 생성된 실험 설계로 시뮬레이션을 통하여 실험을 실시하여 데이터를 수집하였으며, 수집한 데이터를 워크시트에 입력한 후 분석을 실시하였다. Table 4-25는 반응 최적화를 위한 실험계획 및 수집된 데이터를 나타내고 있다.

반응 최적화는 실험계획에 의하여 설계된 순서에 따라 데이터가 집계되었으므로 앞서 살펴 보았던 회귀식 도출 및 반응표면분석이 추가로 가능하나 경향은 큰 차이가 없으므로 생략하고 모든 요인 및 반응값이 포함된 반응 최적화를 곧바로 도출하였다. 이 때 입력한 반응은 용융 선단온도, 성형체 중량, 충전시간, 사이클 타임 및 체적 수축률 5가지이며, 분석은 4.1절 및 4.2절에서 살펴본 바와 같이 반응값에 따라 직선 및 곡선의 결과가 함께 포함되어 있으므로 반응표면으로 적합시킬 모형 항은 선형, 제곱 및 2차 교호작용을 포함하고 있는 완전 2차형으로 선정하였다. 이때 2차 교호작용 중 앞서 정리하였던 Table 4-24에 나타난 제곱항 및 교호작용 외의 항 즉, E^2 (보압력 \times 보압력), AB(용융온도 \times 금형온도) 및 AE(용융온도 \times 보압력)는 제외하여 반응 최적화의 신뢰도를 더욱 확보하고자 하였다.

이어서 반응 최적화에서 목표로 설정하고자 하는 반응변수값 및 범위 등을 Table 4-26과 같이 설정하였다. 여기서 목표는 목표값, 최대값, 최소값 중 선택할 수 있으며, 이 때 반응 변수의 값이 목표 및 상한값과 하한값이 있으면 목표값을, 적으면 적을수록 바람직할 경우 최소값을, 반대로 크면 클수록 바람직할 경우 최대값을 선택할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 유동 선단온도, 성형체 중량 및 충전시간은 목표값을 설정하였으며, 사이클 타임과 체적 수축률은 최소값을 선택한

후 각각에 해당하는 값들을 입력하였다. 목표로 설정한 반응 변수의 값을 살펴보면, 유동 선단온도는 수지의 흐름을 고려하여 160℃, 성형체 중량은 밀도 등을 고려하여 0.77g, 충전시간은 4.1절에서 수행한 사출 유동해석 결과를 근거로 0.35sec, 체적 수축률은 11%로 설정한 후 분석하였다.

Fig. 4-34는 반응 최적화 결과를 나타낸 그림이다. 즉, Table 4-26에서 설정한 목표값을 나타내기 위하여 설정해야 할 각 인자들의 값을 최적화한 결과 X축에서 보여주는 용융온도 162.4843℃, 금형온도 81.0194℃, 사출시간 0.2219sec, 보압력 20.0419MPa로 분석되었다. 이 때 Y축은 원하던 목표값을 모두 정확히 만족시킬 수는 없으나 최대한으로 근접한 값을 보여주게 되며 용융 선단온도는 162.2504℃, 성형체 중량은 0.770g, 충전시간은 0.350sec, 사이클 타임은 12.4870sec, 체적 수축률은 10.8171%가 됨을 알 수 있다. 이와 같은 결과로서 Table 4-26의 목표값을 얻기 위한 각 인자들에게 필요한 설정값을 최적화하여 얻을 수 있었다. 또한 최적화 결과에 나타난 그림을 이용하여 사용자가 원하는 요인의 값을 입력하여 반응값들을 확인할 수 있는 방법으로는 굵은 실선을 마우스로 움직여 인자들의 값을 변경할 수도 있고 직접 원하는 인자들의 값을 입력하여 반응값들을 확인할 수도 있다. 이와 같이 인자들의 목표 값이 변경되면 자동적으로 반응값들이 바뀌게 되므로 실험이 수행된 범위 내 모든 인자값들의 조합에 따른 반응값을 알 수 있으므로 활용성이 매우 높으리라 사료된다.

Table 4-25 Central composite design and responses for response optimizer

Order	Factors								Responses				
	Coded				Uncoded				Flow Front Temp.	Part Weight	Filling Time	Cycle Time	Vol. Shrinkage
	A	B	C	E	A	B	C	E					
1	-1	-1	-1	-1	170	20	0.2	10	150.6	0.7303	0.3720	12.1928	10.7814
2	1	-1	-1	-1	190	20	0.2	10	157.3	0.7773	0.6386	12.1929	11.4621
3	-1	1	-1	-1	170	60	0.2	10	152.2	0.7716	0.4629	12.1922	10.7319
4	1	1	-1	-1	190	60	0.2	10	176.3	0.7632	0.3764	12.1923	11.4364
5	-1	-1	1	-1	170	20	0.4	10	150.6	0.7751	0.5485	12.3892	10.913
6	1	-1	1	-1	190	20	0.4	10	163.3	0.7905	0.5215	12.3891	11.626
7	-1	1	1	-1	170	60	0.4	10	137.8	0.7768	0.8148	12.3857	10.8291
8	1	1	1	-1	190	60	0.4	10	149.9	0.7728	0.7284	12.3862	11.5441
9	-1	-1	-1	1	170	20	0.2	30	164.5	0.7663	0.2103	12.1928	10.7814
10	1	-1	-1	1	190	20	0.2	30	183.2	0.7625	0.2078	12.1929	11.4621
11	-1	1	-1	1	170	60	0.2	30	166.6	0.7741	0.2081	12.1922	10.7319
12	1	1	-1	1	190	60	0.2	30	185.2	0.7826	0.2059	12.1923	11.4364
13	-1	-1	1	1	170	20	0.4	30	150.2	0.7739	0.4168	12.3892	10.913
14	1	-1	1	1	190	20	0.4	30	166.2	0.7704	0.4120	12.3891	11.626
15	-1	1	1	1	170	60	0.4	30	155.8	0.7848	0.4078	12.3857	10.8291
16	1	1	1	1	190	60	0.4	30	172.6	0.7833	0.4045	12.3862	11.5441
17	0	0	0	0	180	40	0.3	20	168.5	0.7642	0.3344	12.2895	11.1725
18	0	0	0	0	180	40	0.3	20	168.5	0.7642	0.3344	12.2895	11.1725
19	0	0	0	0	180	40	0.3	20	168.5	0.7642	0.3344	12.2895	11.1725
20	0	0	0	0	180	40	0.3	20	168.5	0.7642	0.3344	12.2895	11.1725
21	-2	0	0	0	160	40	0.3	20	150.4	0.7687	0.3475	13.2895	10.4639
22	2	0	0	0	200	40	0.3	20	184.3	0.7647	0.3271	13.2898	11.873
23	0	-2	0	0	180	0	0.3	20	180	0.7496	0.3334	13.2886	11.2685
24	0	2	0	0	180	80	0.3	20	172.4	0.795	0.3259	13.2885	11.1083
25	0	0	-2	0	180	40	0.1	20	179.9	0.7707	0.1039	13.0961	11.0031
26	0	0	2	0	180	40	0.5	20	152.5	0.7695	0.5475	13.486	11.2143
27	0	0	0	-2	180	40	0.3	0	169.3	0.6992	0.7821	13.2895	11.1725
28	0	0	0	2	180	40	0.3	40	168.6	0.7726	0.3006	13.2895	11.1725
29	0	0	0	0	180	40	0.3	20	168.5	0.7642	0.3344	12.2895	11.1725
30	0	0	0	0	180	40	0.3	20	168.5	0.7642	0.3344	12.2895	11.1725

※ A : Melt Temperature, B : Mold Temperature, C : Injection Time, D : Packing Time, E : Packing Pressure

Table 4-26 Setting of the response values for optimizer

Response	Unit	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Flow Front Temperature	°C	Target	120	160	185	1	1
Part Weight	g	Target	0.7	0.77	0.84	1	1
Filling Time	sec	Target	0.1	0.35	1	1	1
Cycle Time	sec	Minimize	8	10	14	1	1
Volumetric Shrinkage	%	Minimize	9	11	13	1	1

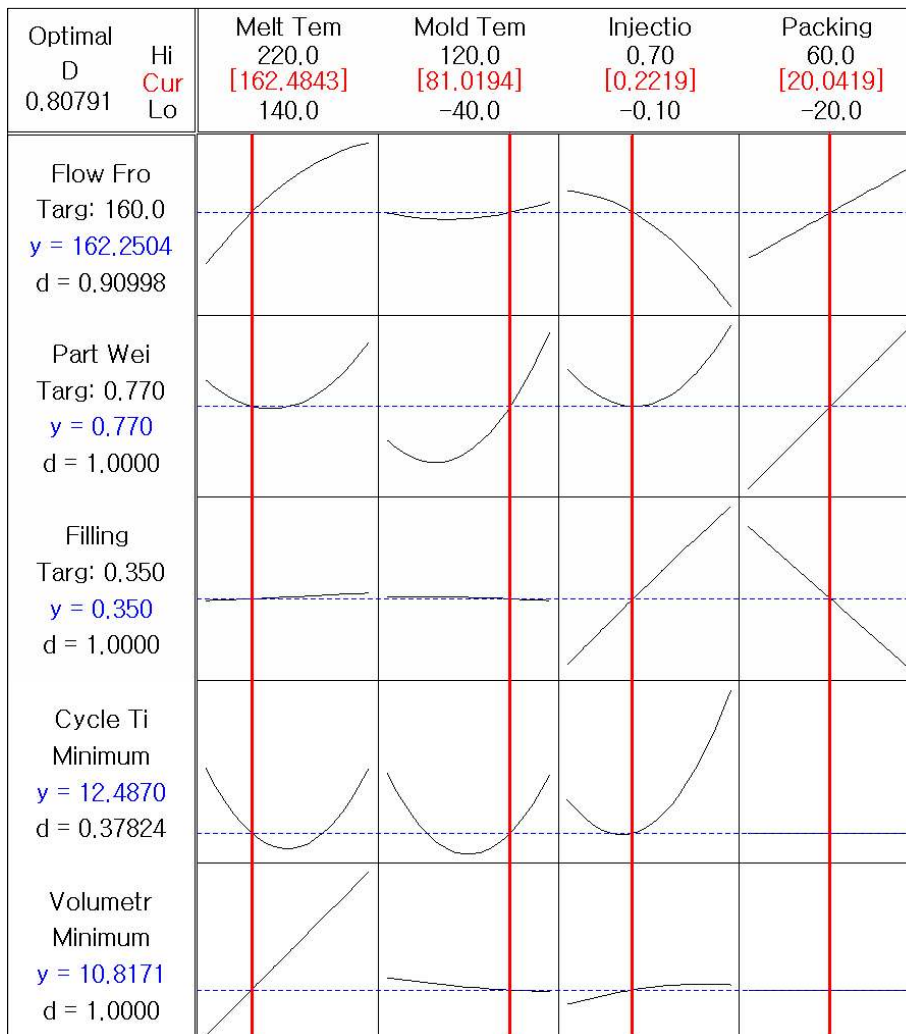


Fig. 4-34 Results of the response optimization

4.4 최적 탈지조건 도출

4.4.1 용매탈지

Table 4-27~29과 Fig. 4-35~40은 3.1절의 Table 3-1과 같이 실험 계획을 수립한 바에 따라 금속분말과 바인더의 혼합비 및 혼련시간 2가지 인자에 따른 5종류의 성형체를 45°C, 50°C, 55°C의 온도에서 각각 용매탈지 후 중량변화에 대한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 4-41과 42는 이 5종류의 용매탈지 결과를 평균하여 용매의 온도별로 나타낸 것으로 금속분말과 바인더의 혼합비 및 혼련시간과 관계없이 그 추이는 유사함을 알 수 있다. 또한 그림에 나타난 바와 같이 각 온도 및 혼련조건에 대한 시료를 전체적으로 약 1시간 동안 용매탈지를 실시한 후 전체적인 온도, 시간, 탈지율 등의 상관관계를 분석한 결과, 용매탈지는 탈지 시작 후 약 10분 이내에서 전체 탈지되는 바인더양의 약 70%가 이루어지며, 시간이 지날수록 속도는 점차 감소하여 약 30분 이후부터는 그 속도가 현저히 저하됨을 알 수 있으며, 용매온도가 높을수록 초기에 탈지되는 속도가 현저히 높아짐을 알 수 있었다.

그러나 55°C에서 탈지한 시료 중 Photo. 4-1과 같이 성형체 표면에 미세한 크랙이 발생하는 현상이 있었으므로 결과적으로 수행된 온도조건 중에서 50°C에서의 용매탈지가 가장 적절하였다고 할 수 있다.



Photo. 4-1 Crack on green part during the solvent extraction at 55°C

Table 4-27 Result of solvent extraction at 45°C

No.	Specimens	Measuring items	Time(min)											Sum
			0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
1	38%_80M 1	Weight(g)	1.7261	1.7147	1.7088	1.7050	1.7018	1.6977	1.6971	1.6954	1.6949	1.6941	1.6938	
		Change(g)	0	0.0114	0.0059	0.0038	0.0032	0.0041	0.0006	0.0017	0.0005	0.0008	0.0003	0.0323
		Change(%)	0.00	35.29	18.27	11.76	9.91	12.69	1.86	5.26	1.55	2.48	0.93	100
2	38%_110M 2	Weight	1.7214	1.7103	1.7044	1.7004	1.6972	1.6953	1.6930	1.6916	1.6901	1.6891	1.6884	
		Change(g)	0	0.0111	0.0059	0.004	0.0032	0.0019	0.0023	0.0014	0.0015	0.001	0.0007	0.033
		Change(%)	0.00	33.64	17.88	12.12	9.70	5.76	6.97	4.24	4.55	3.03	2.12	100
3	42%_50M 1	Weight(g)	1.7852	1.7738	1.7689	1.7654	1.7626	1.7621	1.7602	1.7587	1.7575	1.7568	1.7560	
		Change(g)	0	0.0114	0.0049	0.0035	0.0028	0.0005	0.0019	0.0015	0.0012	0.0007	0.0008	0.0292
		Change(%)	0.00	39.04	16.78	11.99	9.59	1.71	6.51	5.14	4.11	2.40	2.74	100
4	42%_110M 2	Weight(g)	1.7775	1.7658	1.7603	1.7572	1.7547	1.7522	1.7499	1.7482	1.7469	1.7461	1.7450	
		Change(g)	0	0.0117	0.0055	0.0031	0.0025	0.0025	0.0023	0.0017	0.0013	0.0008	0.0011	0.0325
		Change(%)	0.00	36.00	16.92	9.54	7.69	7.69	7.08	5.23	4.00	2.46	3.38	100
5	34%_50M 1	Weight(g)	1.7979	1.7848	1.7795	1.7762	1.7731	1.7716	1.7700	1.7679	1.7661	1.7654	1.7647	
		Change(g)	0	0.0131	0.0053	0.0033	0.0031	0.0015	0.0016	0.0021	0.0018	0.0007	0.0007	0.0332
		Change(%)	0.00	39.46	15.96	9.94	9.34	4.52	4.82	6.33	5.42	2.11	2.11	100
6	34%_50M 2	Weight(g)	1.7735	1.7608	1.7558	1.7523	1.7493	1.7468	1.7442	1.7420	1.7402	1.7390	1.7378	
		Change(g)	0	0.0127	0.005	0.0035	0.003	0.0025	0.0026	0.0022	0.0018	0.0012	0.0012	0.0357
		Change(%)	0.00	35.57	14.01	9.80	8.40	7.00	7.28	6.16	5.04	3.36	3.36	100
7	42%_50M 1	Weight(g)	1.6421	1.6282	1.6210	1.6163	1.6128	1.6121	1.6096	1.6074	1.6061	1.6049	1.6041	
		Change(g)	0	0.0139	0.0072	0.0047	0.0035	0.0007	0.0025	0.0022	0.0013	0.0012	0.0008	0.038
		Change(%)	0.00	36.58	18.95	12.37	9.21	1.84	6.58	5.79	3.42	3.16	2.11	100
8	42%_50M 2	Weight(g)	1.6368	1.6228	1.6159	1.6113	1.6075	1.6050	1.6024	1.6011	1.5989	1.5972	1.5964	
		Change(g)	0	0.014	0.0069	0.0046	0.0038	0.0025	0.0026	0.0013	0.0022	0.0017	0.0008	0.0404
		Change(%)	0.00	34.65	17.08	11.39	9.41	6.19	6.44	3.22	5.45	4.21	1.98	100
9	42%_110M 1	Weight(g)	1.6491	1.6354	1.6289	1.6240	1.6209	1.6180	1.6157	1.6132	1.6116	1.6108	1.6101	
		Change(g)	0	0.0137	0.0065	0.0049	0.0031	0.0029	0.0023	0.0025	0.0016	0.0008	0.0007	0.039
		Change(%)	0.00	35.13	16.67	12.56	7.95	7.44	5.90	6.41	4.10	2.05	1.79	100
10	42%_110M 2	Weight(g)	1.6450	1.6309	1.6243	1.6200	1.6165	1.6141	1.6122	1.6101	1.6087	1.6077	1.6065	
		Change(g)	0	0.0141	0.0066	0.0043	0.0035	0.0024	0.0019	0.0021	0.0014	0.001	0.0012	0.0385
		Change(%)	0.00	36.62	17.14	11.17	9.09	6.23	4.94	5.45	3.64	2.60	3.12	100

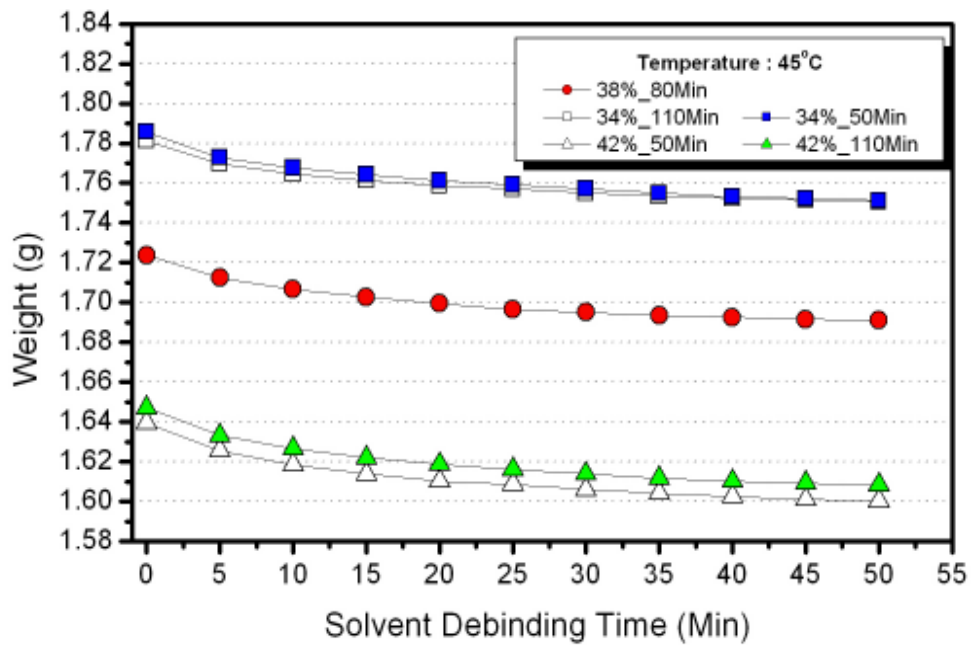


Fig. 4-35 Relation between debinding time and weight at 45°C

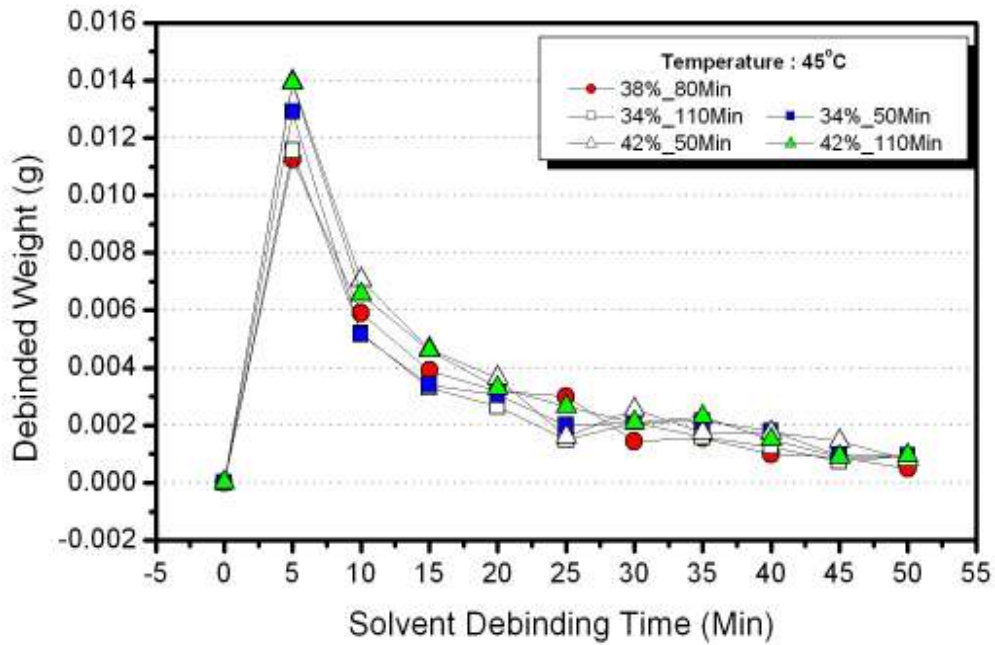


Fig. 4-36 Relation between debinding time and debinded weight at 45°C

Table 4-28 Result of solvent extraction at 50°C

No.	Specimens	Measuring items	Time(min)											Sum
			0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
1	38%_80M 1	Weight(g)	1.7182	1.7030	1.6961	1.6921	1.6891	1.6870	1.6849	1.6831	1.6812	1.6802	1.6798	-
		Change(g)	0	0.0152	0.0069	0.004	0.003	0.0021	0.0021	0.0018	0.0019	0.001	0.0004	0.0384
		Change(%)	0.00	39.58	17.97	10.42	7.81	5.47	5.47	4.69	4.95	2.60	1.04	100
2	38%_80M 2	Weight	1.7246	1.7092	1.7024	1.6985	1.6954	1.6931	1.6909	1.6890	1.6873	1.6860	1.6859	-
		Change(g)	0	0.0154	0.0068	0.0039	0.0031	0.0023	0.0022	0.0019	0.0017	0.0013	0.0001	0.0387
		Change(%)	0.00	39.79	17.57	10.08	8.01	5.94	5.68	4.91	4.39	3.36	0.26	100
3	34%_110M 1	Weight(g)	1.7805	1.7661	1.7603	1.7570	1.7542	1.7520	1.7502	1.7481	1.7465	1.7452	1.7450	-
		Change(g)	0	0.0144	0.0058	0.0033	0.0028	0.0022	0.0018	0.0021	0.0016	0.0013	0.0002	0.0355
		Change(%)	0.00	40.56	16.34	9.30	7.89	6.20	5.07	5.92	4.51	3.66	0.56	100
4	34%_110M 2	Weight(g)	1.7813	1.7677	1.7620	1.7584	1.7556	1.7534	1.7512	1.7491	1.7473	1.7461	1.7453	-
		Change(g)	0	0.0136	0.0057	0.0036	0.0028	0.0022	0.0022	0.0021	0.0018	0.0012	0.0008	0.036
		Change(%)	0.00	37.78	15.83	10.00	7.78	6.11	6.11	5.83	5.00	3.33	2.22	100
5	34%_50M 1	Weight(g)	1.7740	1.7598	1.7541	1.7507	1.7482	1.7459	1.7436	1.7422	1.7402	1.7391	1.7385	-
		Change(g)	0	0.0142	0.0057	0.0034	0.0025	0.0023	0.0023	0.0014	0.002	0.0011	0.0006	0.0355
		Change(%)	0.00	40.00	16.06	9.58	7.04	6.48	6.48	3.94	5.63	3.10	1.69	100
6	34%_50M 2	Weight(g)	1.7710	1.7554	1.7492	1.7460	1.7437	1.7414	1.7398	1.7384	1.7369	1.7358	1.7352	-
		Change(g)	0	0.0156	0.0062	0.0032	0.0023	0.0023	0.0016	0.0014	0.0015	0.0011	0.0006	0.0358
		Change(%)	0.00	43.58	17.32	8.94	6.42	6.42	4.47	3.91	4.19	3.07	1.68	100
7	42%_50M 1	Weight(g)	1.6397	1.6234	1.6149	1.6110	1.6076	1.6046	1.6027	1.6007	1.5987	1.5975	1.5970	-
		Change(g)	0	0.0163	0.0085	0.0039	0.0034	0.003	0.0019	0.002	0.002	0.0012	0.0005	0.0427
		Change(%)	0.00	38.17	19.91	9.13	7.96	7.03	4.45	4.68	4.68	2.81	1.17	100
8	42%_50M 2	Weight(g)	1.6381	1.6213	1.6132	1.6091	1.6057	1.6027	1.6009	1.5990	1.5969	1.5957	1.5949	-
		Change(g)	0	0.0168	0.0081	0.0041	0.0034	0.003	0.0018	0.0019	0.0021	0.0012	0.0008	0.0432
		Change(%)	0.00	38.89	18.75	9.49	7.87	6.94	4.17	4.40	4.86	2.78	1.85	100
9	42%_110M 1	Weight(g)	1.6487	1.6322	1.6244	1.6205	1.6174	1.6148	1.6126	1.6106	1.6088	1.6077	1.6070	-
		Change(g)	0	0.0165	0.0078	0.0039	0.0031	0.0026	0.0022	0.002	0.0018	0.0011	0.0007	0.0417
		Change(%)	0.00	39.57	18.71	9.35	7.43	6.24	5.28	4.80	4.32	2.64	1.68	100
10	42%_110M 2	Weight(g)	1.6494	1.6323	1.6247	1.6207	1.6177	1.6148	1.6128	1.6107	1.6088	1.6077	1.6068	-
		Change(g)	0	0.0171	0.0076	0.004	0.003	0.0029	0.002	0.0021	0.0019	0.0011	0.0009	0.0426
		Change(%)	0.00	40.14	17.84	9.39	7.04	6.81	4.69	4.93	4.46	2.58	2.11	100

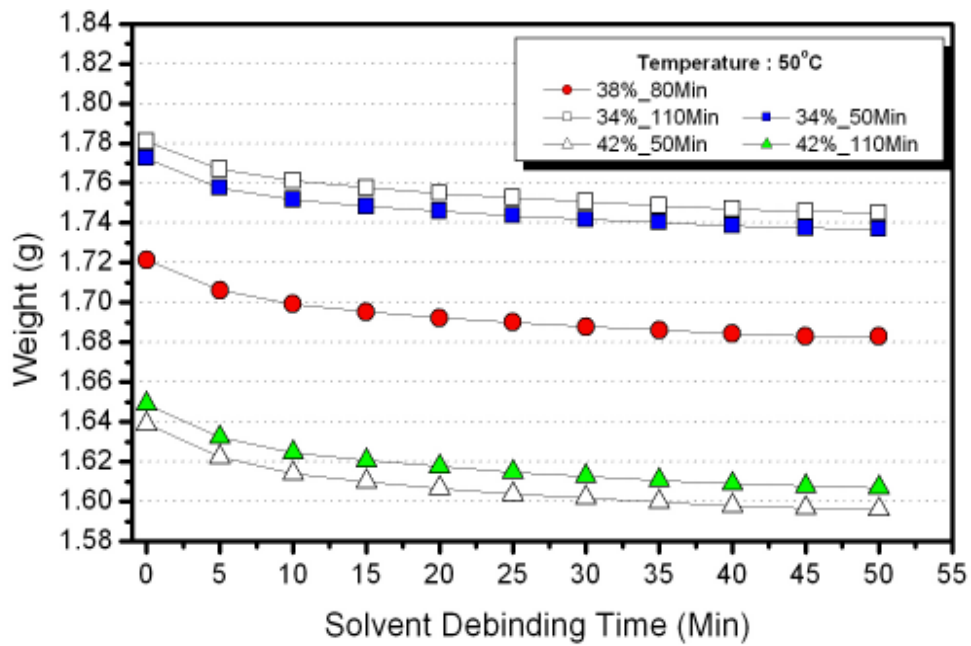


Fig. 4-37 Relation between debinding time and weight at 50°C

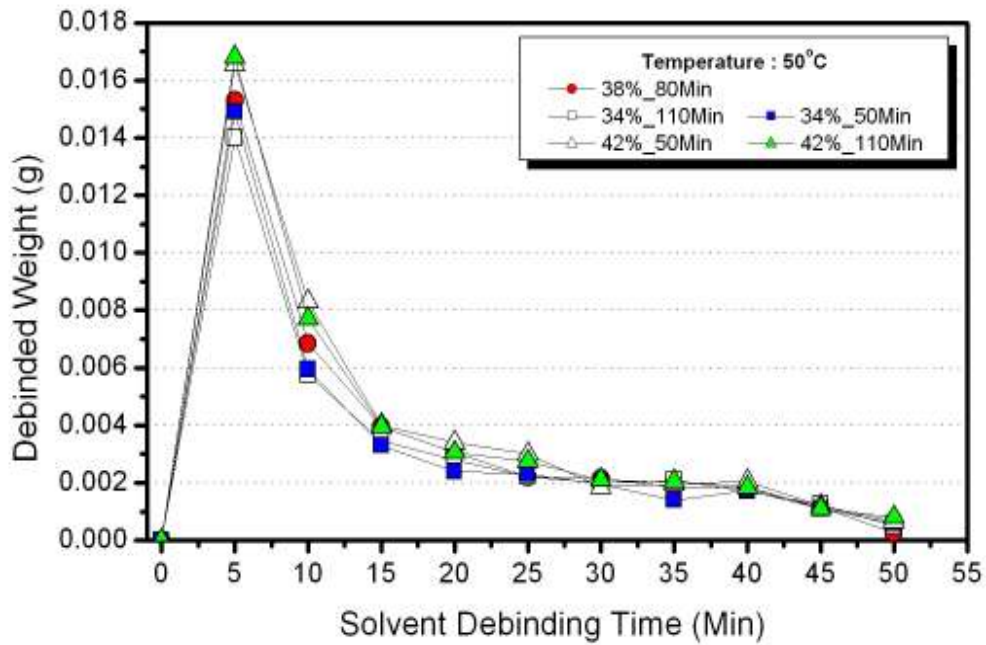


Fig. 4-38 Relation between debinding time and debinded weight at 50°C

Table 4-29 Result of solvent extraction at 55°C

No.	Specimens	Measuring items	Time(min)											Sum
			0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
1	38%_80M 1	Weight(g)	1.7240	1.7050	1.6986	1.6939	1.6903	1.6881	1.6859	1.6840	1.6821	1.6813	1.6808	-
		Change(g)	0	0.019	0.0064	0.0047	0.0036	0.0022	0.0022	0.0019	0.0019	0.0008	0.0005	0.0432
		Change(%)	0.00	43.98	14.81	10.88	8.33	5.09	5.09	4.40	4.40	1.85	1.16	100
2	38%_80M 2	Weight	1.7222	1.7031	1.6964	1.6912	1.6880	1.6857	1.6839	1.6818	1.6804	1.6796	1.6790	-
		Change(g)	0	0.0191	0.0067	0.0052	0.0032	0.0023	0.0018	0.0021	0.0014	0.0008	0.0006	0.0432
		Change(%)	0.00	44.21	15.51	12.04	7.41	5.32	4.17	4.86	3.24	1.85	1.39	100
3	34%_110M 1	Weight(g)	1.7684	1.7513	1.7457	1.7416	1.7385	1.7368	1.7350	1.7334	1.7324	1.7308	1.7301	-
		Change(g)	0	0.0171	0.0056	0.0041	0.0031	0.0017	0.0018	0.0016	0.001	0.0016	0.0007	0.0383
		Change(%)	0.00	44.65	14.62	10.70	8.09	4.44	4.70	4.18	2.61	4.18	1.83	100
4	34%_110M 2	Weight(g)	1.7688	1.7514	1.7455	1.7417	1.7383	1.7358	1.7337	1.7316	1.7297	1.7289	1.7280	-
		Change(g)	0	0.0174	0.0059	0.0038	0.0034	0.0025	0.0021	0.0021	0.0019	0.0008	0.0009	0.0408
		Change(%)	0.00	42.65	14.46	9.31	8.33	6.13	5.15	5.15	4.66	1.96	2.21	100
5	34%_50M 1	Weight(g)	1.7707	1.7524	1.7466	1.7424	1.7393	1.7369	1.7348	1.7329	1.7311	1.7300	1.7294	-
		Change(g)	0	0.0183	0.0058	0.0042	0.0031	0.0024	0.0021	0.0019	0.0018	0.0011	0.0006	0.0413
		Change(%)	0.00	44.31	14.04	10.17	7.51	5.81	5.08	4.60	4.36	2.66	1.45	100
6	34%_50M 2	Weight(g)	1.7860	1.7689	1.7635	1.7593	1.7563	1.7540	1.7524	1.7506	1.7492	1.7484	1.7477	-
		Change(g)	0	0.0171	0.0054	0.0042	0.003	0.0023	0.0016	0.0018	0.0014	0.0008	0.0007	0.0383
		Change(%)	0.00	44.65	14.10	10.97	7.83	6.01	4.18	4.70	3.66	2.09	1.83	100
7	42%_50M 1	Weight(g)	1.6314	1.6100	1.6019	1.5965	1.5926	1.5901	1.5875	1.5857	1.5833	1.5821	1.5816	-
		Change(g)	0	0.0214	0.0081	0.0054	0.0039	0.0025	0.0026	0.0018	0.0024	0.0012	0.0005	0.0498
		Change(%)	0.00	42.97	16.27	10.84	7.83	5.02	5.22	3.61	4.82	2.41	1.00	100
8	42%_50M 2	Weight(g)	1.6383	1.6178	1.6095	1.6035	1.5993	1.5967	1.5943	1.5924	1.5907	1.5900	1.5891	-
		Change(g)	0	0.0205	0.0083	0.006	0.0042	0.0026	0.0024	0.0019	0.0017	0.0007	0.0009	0.0492
		Change(%)	0.00	41.67	16.87	12.20	8.54	5.28	4.88	3.86	3.46	1.42	1.83	100
9	42%_110M 1	Weight(g)	1.6675	1.6456	1.6376	1.6321	1.6284	1.6257	1.6232	1.6214	1.6197	1.6186	1.6178	-
		Change(g)	0	0.0219	0.008	0.0055	0.0037	0.0027	0.0025	0.0018	0.0017	0.0011	0.0008	0.0497
		Change(%)	0.00	44.06	16.10	11.07	7.44	5.43	5.03	3.62	3.42	2.21	1.61	100
10	42%_110M 2	Weight(g)	1.6489	1.6278	1.6200	1.6148	1.6106	1.6080	1.6052	1.6033	1.6018	1.6007	1.6000	-
		Change(g)	0	0.0211	0.0078	0.0052	0.0042	0.0026	0.0028	0.0019	0.0015	0.0011	0.0007	0.0489
		Change(%)	0.00	43.15	15.95	10.63	8.59	5.32	5.73	3.89	3.07	2.25	1.43	100

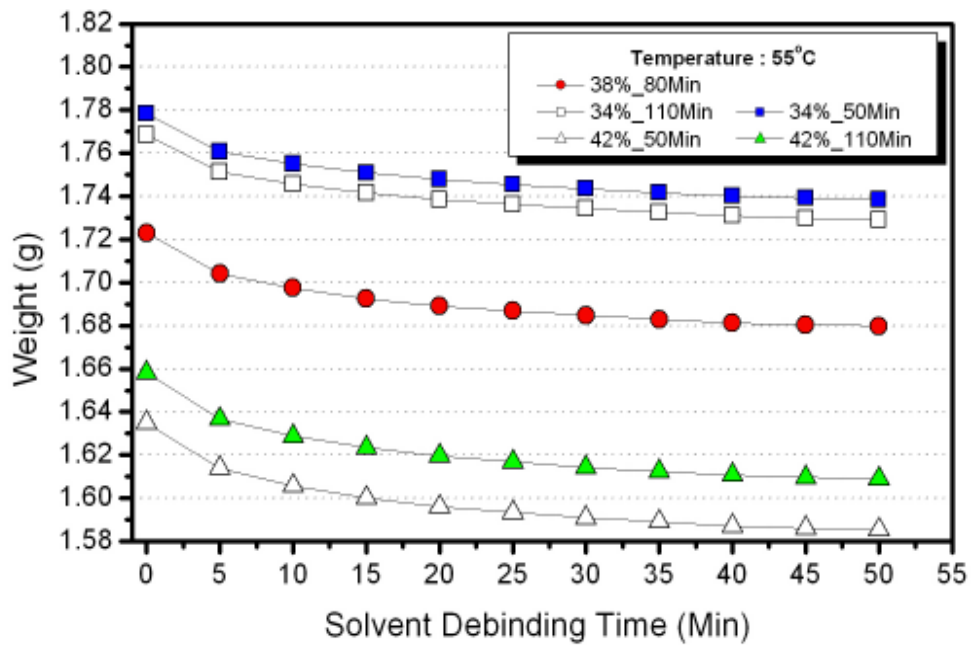


Fig. 4-39 Relation between debinding time and weight at 55°C

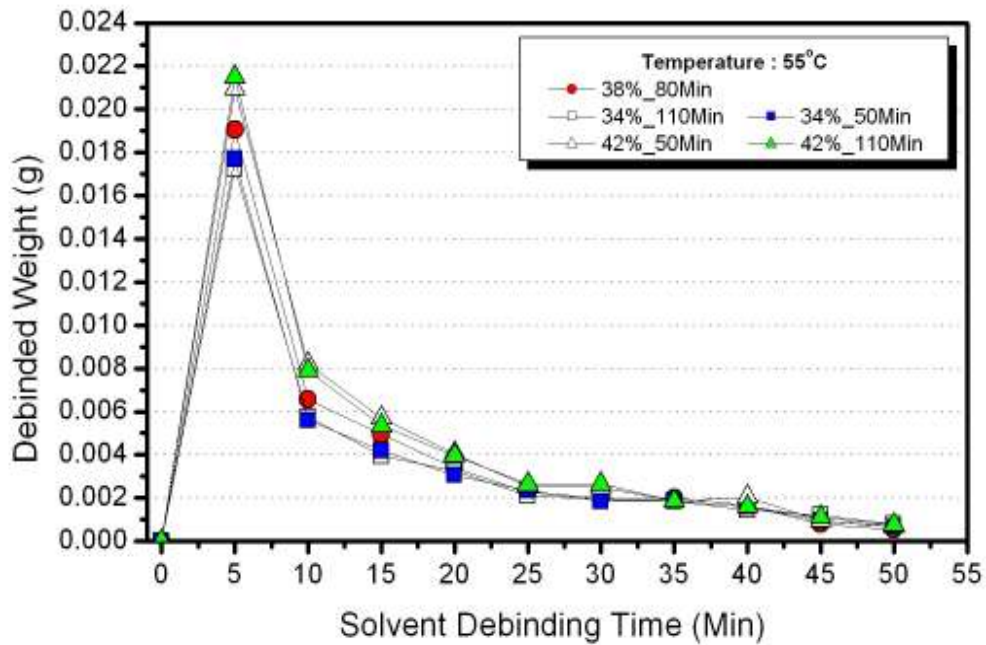


Fig. 4-40 Relation between debinding time and debinded weight at 55°C

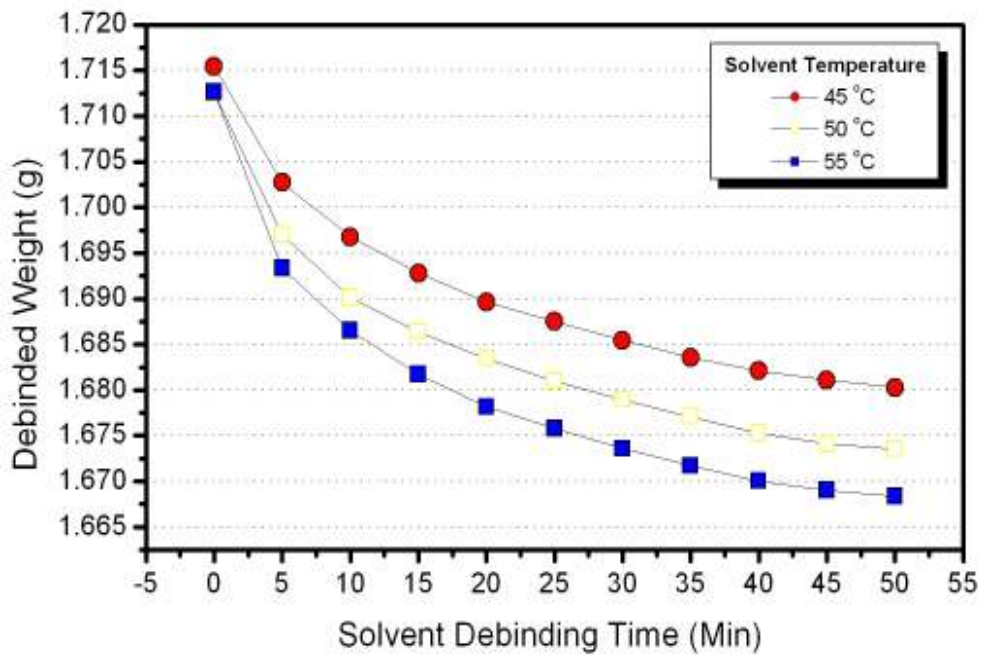


Fig. 4-41 Relation between debinding time and debinded weight

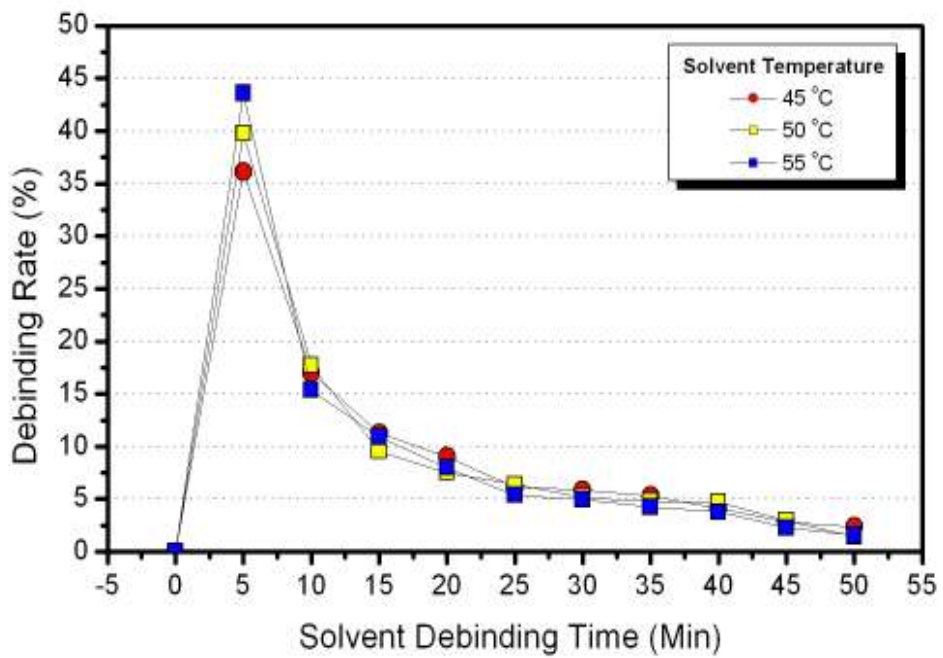


Fig. 4-42 Relation between debinding time and debinded weight rate

4.4.2 열분해 탈지

최적의 2차 열분해 탈지 실험을 위해 용매탈지된 시료를 이용하여 탈지 후 결합이 발생되지 않는 범위 내의 몇 가지 스케줄을 적용하여 실험하였으며, 도출된 스케줄과 기존의 오랜 시간이 소요되었던 단일 열분해 탈지와 비교를 해 본 결과 Fig. 4-43과 같은 선도를 얻을 수 있었으며, Table 4-30은 최종적으로 적용된 열분해 탈지공정의 스케줄을 나타내고 있다.

이와 같은 결과로서 2차 열분해 탈지는 기존 단일 열분해 탈지와 비교하여 그 소요시간이 약 32%의 수준인 약 14시간이 소요됨을 알 수 있었으며, 용매탈지에 소요된 시간을 고려하더라도 약 35% 미만인 약 15시간 정도가 소요 되었다.

이와 같은 결과로서 본 연구에서 수행한 용매탈지 및 2차 열분해 탈지의 적정함을 알 수 있었으며 탈지공정의 최적화를 통하여 기존의 탈지공정에 소요되었던 시간을 크게 단축시킬 수 있었다.

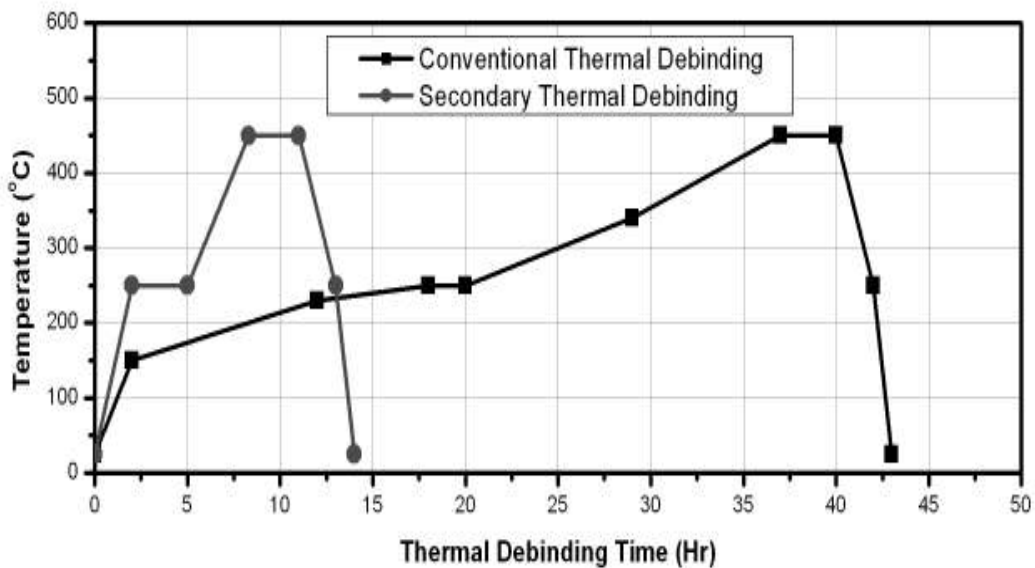


Fig. 4-43 Comparison of conventional method with secondary thermal debinding process

Table 4-30 Applied schedule for thermal debinding

Debinding Pattern	Time	Remark
Room temp. → 250°C	2 hr	vacuum
250°C → Keep	3 hr	"
250°C → 450°C	3.5 hr	"
450°C → Keep	3 hr	"
450°C → 250°C	2 hr	"
250°C → Room temp.	1 hr	"

4.5 공정능력 분석

Photo. 4-2는 사출에 의하여 얻어진 성형체와 탈지 및 소결공정이 완료된 제품의 형상을 나타내고 있다. 이와 같이 동일한 조건과 공정으로 얻어진 200개의 제품을 임의적으로 채취하여 비중을 측정된 후 공정능력을 분석하였다.

Fig. 4-44~50은 사출 성형체를 탈지 및 소결을 연속적으로 수행한 후 채취한 샘플의 비중을 측정하여 MINITAB R14를 이용하여 공정능력을 분석한 결과를 나타내고 있으며, Table 4-31은 분석결과의 통계값을 나타내고 있다. 이 때 공정능력 분석 시 하한계(LSL, Lower Spec Limit)를 7.495로 설정한 이유는 그 이상의 비중을 갖는 제품을 양품으로 간주하여 설정한 하한계 값이기 때문이며, 목표값(Target) 및 상한계 값(USL, Upper Spec Limit)은 클수록 양호한 결과이므로 목표값 및 상한계 값은 설정하지 않았다.

이들 그림 및 표에 나타난 바와 같이 비중의 최대값 및 최소값은 각각 7.709 및 7.469로 조사되었으며, 평균값은 7.6151, 표준편차는 0.0511를 보이며 정규분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 일부의 샘플에서 비중이 7.495 보다 낮게 나타났는데 이러한 원인은 제품부의 단면 변화에 따른 충전 부족 또는 이물질이나 공기의 혼입등 으로 인하여 나타난 결과로 사료된다.

Table 4-32는 Fig. 4-44~50을 통하여 얻은 통계 결과로서 전체 공정능력을 나타내는 PPM Total은 9,946.8, Z.Bench 값은 2.33으로 나타났다. 이와 같은 PPM Total이 나타내는 값의 의미는 DPMO(Defect per Million Opportunity) 숫자를 나타내는 것으로서 본 연구에서 수행한 설계, 제작, 최적조건 및 프로세스 등을 전체적으로 적용하여 백만개를 양산하였을 경우 비중 7.495에 미치지 못하는 숫자 즉, 불량 개수가 약 9,947개 정도라는 의미를 나타내고 있다. 이 값을 양품률로 환산하면 약 99.01%에 해당하며, 3.83 시그마 레벨로 분석되었다.

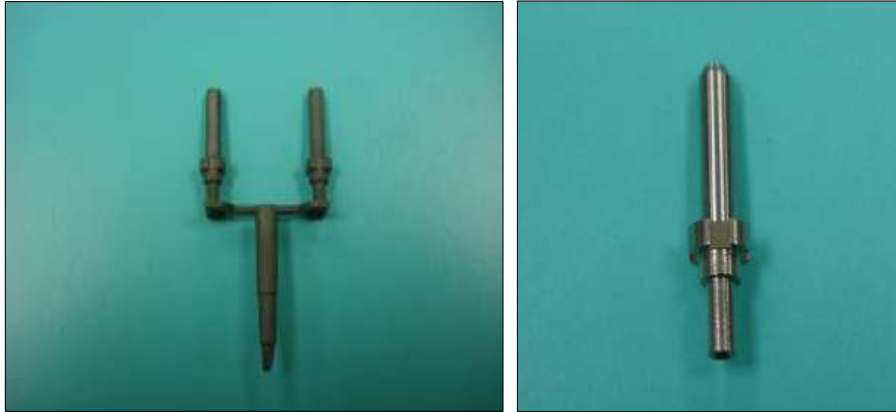


Photo. 4-2 Green part(left) and sintered part(right)

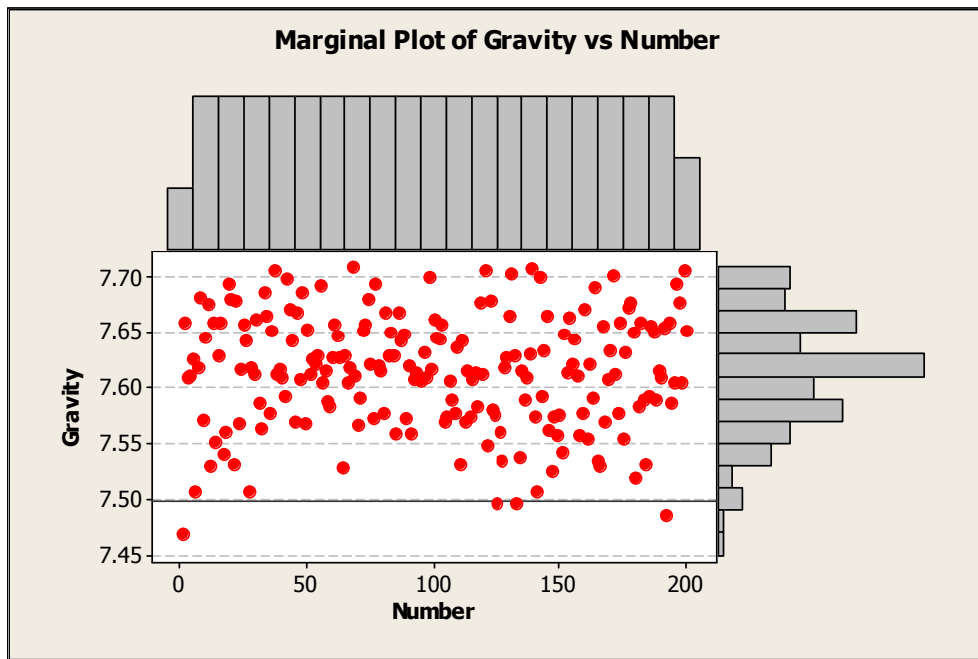


Fig. 4-44 Marginal plot of gravity versus number

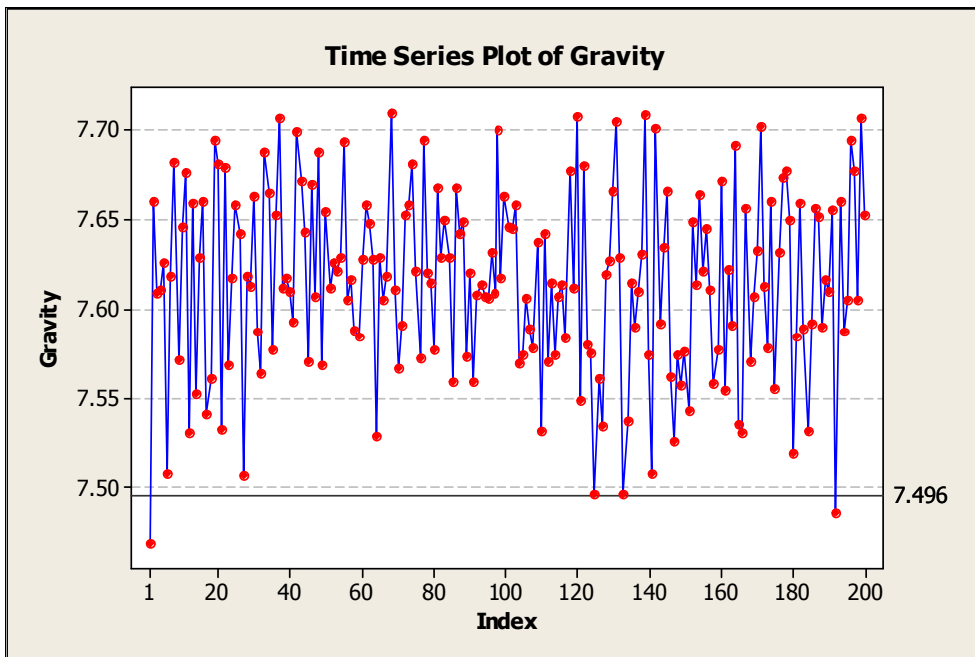


Fig. 4-45 Time series plot

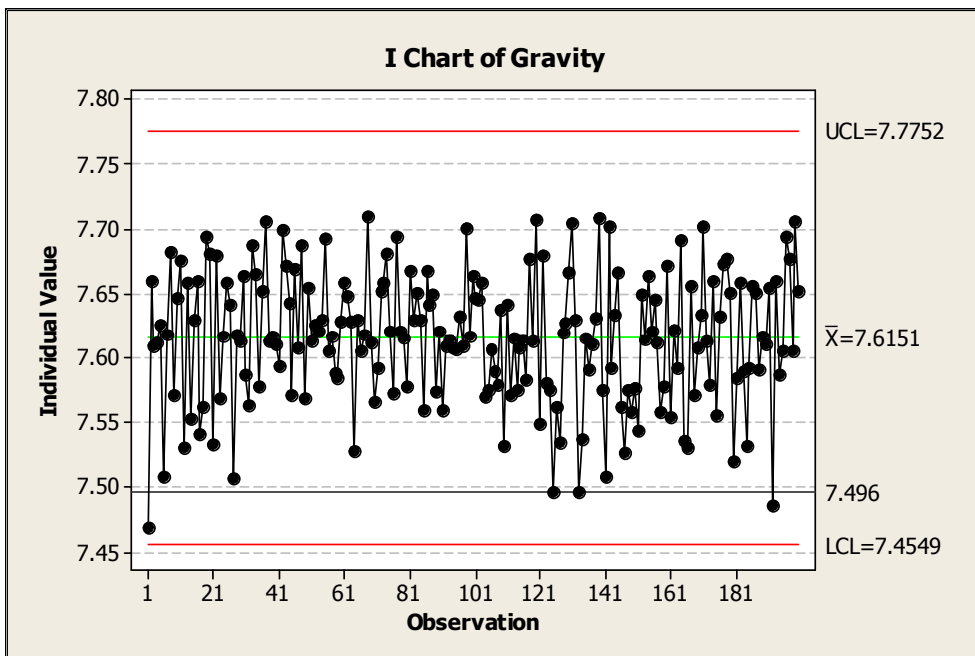


Fig. 4-46 I chart of gravity

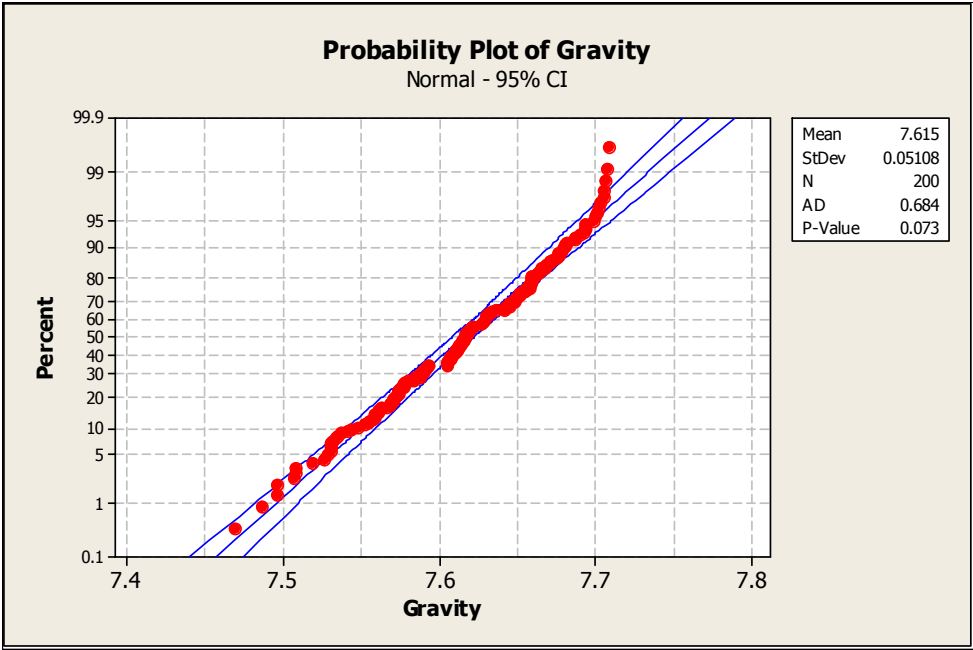


Fig. 4-47 Probability plot

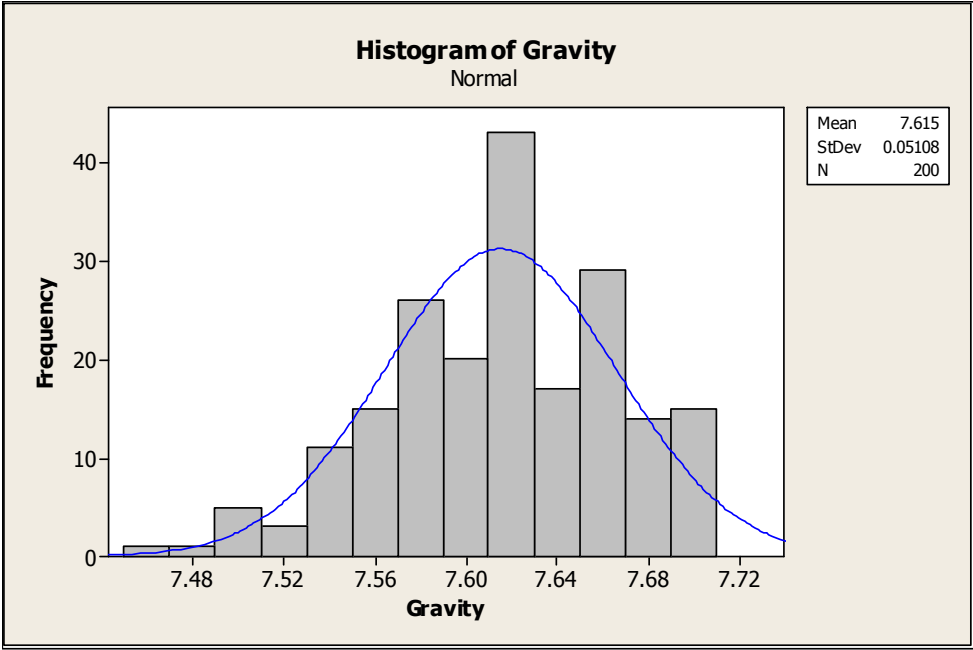


Fig. 4-48 Histogram of gravity

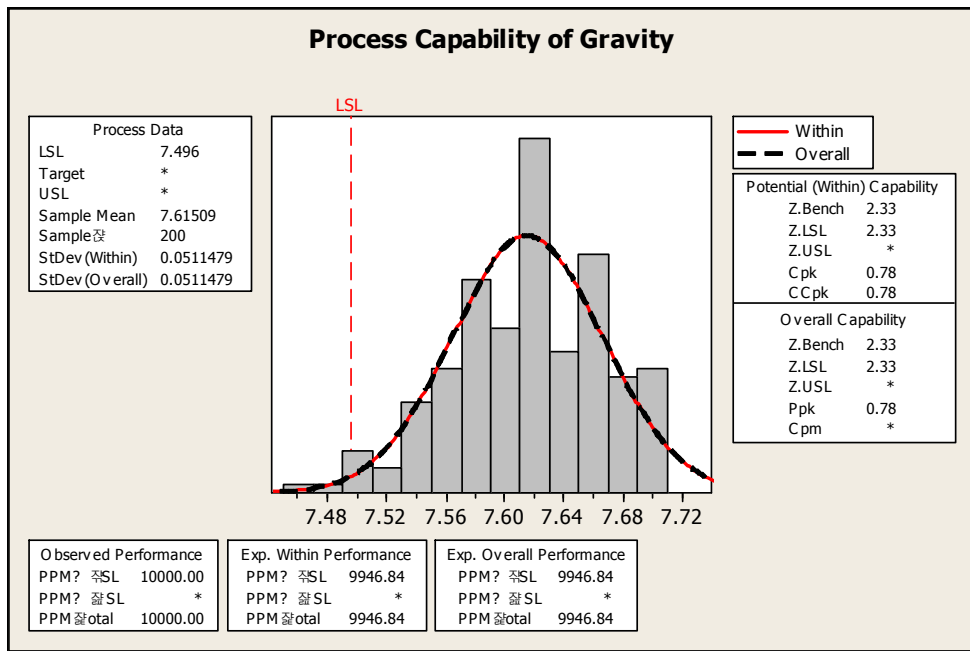


Fig. 4-49 Process capability

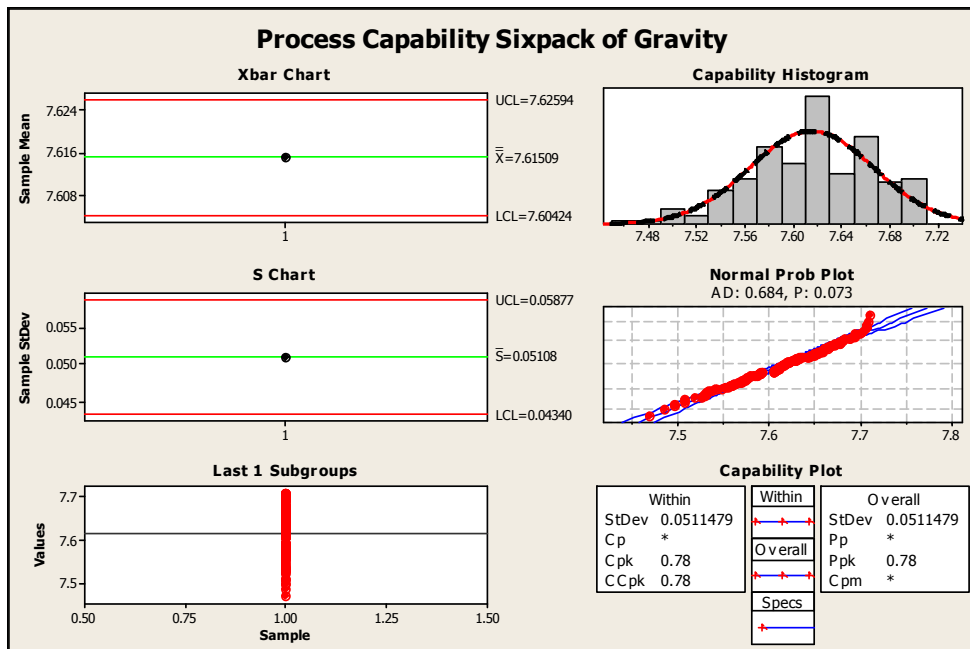


Fig. 4-50 Process capability sixpack

Table 4-31 Descriptive statistics

Item	Value	Item	Value
Total Count	200	Minimum	7.469
N	200	Q1	7.577
N*	0	Median	7.616
Mean	7.6151	Q3	7.6558
SE Mean	0.00361	Maximum	7.709
StDev	0.0511	Cp/ZBen1	2.32835

Table 4-32 Capability analysis result

Result	Value	Remarks
Z.Bench	2.33	-
DMPO	9946.8	Defect per Million Opportunity
Sigma Level	3.83	-
CGI(%)	63.833	Capability Growth Index
Yield(%)	0.9901	NORMSDIST(Sigma Level-1.5)

4.6 치수 정밀도 분석

사출 후 탈지 및 소결이 완료된 제품에 대하여 총 5회, 매 회 5개씩 임의로 제품을 샘플링하여 25개 제품에 대하여 가장 중요하다고 판단되는 동심도를 비롯하여 내·외경의 치수를 측정하여 평균, 표준편차, 중간값, 최대 및 최소값 등을 산출후 분석을 실시하였다.

Table 4-33과 4-34에 나타낸 바와 같이 제품의 전체적인 측정 결과는 동심도 17.35 μ m, 외경 2.497, 내경 0.993mm, 전장 19.503mm로 목표한 공차에 모두 만족하는 매우 양호한 치수정밀도를 나타내고 있다.

Table 4-35는 스코어 카드로서 목표값과 목표값의 범위 즉, 하한값 및 상한값을 나타내고 있으며, 실제 측정한 결과 및 만족여부를 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 동심도의 경우 목표 30 μ m 대비 27.43 μ m, 외경 및 내경의 경우 목표 3.57~3.59 mm 대비 3.575 mm, 밀도는 목표 95~98% 대비 97.63%를 각각 나타내며 모두 설정한 성능지표 이상의 값을 나타내었다. 이밖에 중요하다고 할 수 있는 항목을 조사해 본 결과 길이방향의 치수변화 0.132%, 폭방향 치수변화 0.04%, 각부 길이공차 10~16 μ m, 진원도 18.64 μ m을 보이며 매우 양호한 치수 정밀도 결과를 나타내었다.

이와 같이 전체적으로 모든 항목의 측정결과는 요구되는 수준을 모두 만족함으로써 수축률을 고려한 금형설계 및 제작, 사출과 탈지 및 소결공정 등의 프로세스가 적정하였으며, 제품의 품질 및 공정능력 확보가 충분히 달성되었다고 판단된다.

Table 4-33 Measured data

Item	Spec	Sampling					Statistics				
		# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	Mean	StDev	Median	Max	Min
Length	19.50±0.01	19.505	19.502	19.503	19.502	19.503	19.503	0.001	19.503	19.505	19.502
Out Dia.	2.50±0.01	2.499	2.498	2.498	2.498	2.498	2.498	0.000	2.498	2.499	2.498
Inner Dia.	1.00±0.01	0.992	0.993	0.992	0.993	0.994	0.993	0.001	0.993	0.994	0.992
Concen.	30 μ m미만	17.42	17.23	17.40	17.26	17.33	17.328	0.083	17.330	17.420	17.230

Item	Spec	Sampling					Statistics				
		# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	Mean	StDev	Median	Max	Min
Length	19.50±0.01	19.503	19.502	19.504	19.503	19.501	19.503	0.001	19.503	19.504	19.501
Out Dia.	2.50±0.01	2.497	2.498	2.496	2.496	2.498	2.497	0.001	2.497	2.498	2.496
Inner Dia.	1.00±0.01	0.993	0.992	0.992	0.994	0.993	0.993	0.001	0.993	0.994	0.992
Concen.	30 μ m미만	17.36	17.35	17.46	17.42	17.42	17.402	0.046	17.420	17.460	17.350

Item	Spec	Sampling					Statistics				
		# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	Mean	StDev	Median	Max	Min
Length	19.50±0.01	19.504	19.504	19.503	19.504	19.506	19.504	0.001	19.504	19.506	19.503
Out Dia.	2.50±0.01	2.496	2.497	2.499	2.498	2.498	2.498	0.001	2.498	2.499	2.496
Inner Dia.	1.00±0.01	0.992	0.993	0.994	0.992	0.992	0.993	0.001	0.992	0.994	0.992
Concen.	30 μ m미만	17.43	17.40	17.33	17.38	17.25	17.358	0.070	17.380	17.430	17.250

Item	Spec	Sampling					Statistics				
		# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	Mean	StDev	Median	Max	Min
Length	19.50±0.01	19.502	19.503	19.503	19.502	19.504	19.503	0.001	19.503	19.504	19.502
Out Dia.	2.50±0.01	2.497	2.498	2.497	2.498	2.493	2.497	0.002	2.497	2.498	2.493
Inner Dia.	1.00±0.01	0.994	0.993	0.994	0.995	0.994	0.994	0.001	0.994	0.995	0.993
Concen.	30 μ m미만	17.40	17.38	17.42	17.34	17.28	17.364	0.055	17.380	17.420	17.280

Item	Spec	Sampling					Statistics				
		# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	Mean	StDev	Median	Max	Min
Length	19.50±0.01	19.502	19.506	19.502	19.503	19.505	19.504	0.002	19.503	19.506	19.502
Out Dia.	2.50±0.01	2.495	2.497	2.496	2.497	2.495	2.496	0.001	2.496	2.497	2.495
Inner Dia.	1.00±0.01	0.994	0.993	0.995	0.993	0.994	0.994	0.001	0.994	0.995	0.993
Concen.	30 μ m미만	17.28	17.35	17.36	17.24	17.32	17.310	0.050	17.320	17.360	17.240

Table 4-34 Average measured data

Item	Spec	Mean	StDev	Median	Max	Min	Remarks
Length	19.50±0.01	19.503	0.0012	19.503	19.505	19.502	
Out Dia.	2.50±0.01	2.497	0.0011	2.497	2.498	2.496	
Inner Dia.	1.00±0.01	0.993	0.0008	0.993	0.994	0.992	
Concen.	30 μ m미만	17.35	0.0611	17.37	17.42	17.27	

Table 4-35 Scorecard through measurement

Flange		MIM System Level Scorecard				
System CFR		Con	Length	Out Dia.	Inner Dia.	Density
Unit		μ m	mm	mm	mm	%
Specification	Target	0	15.1	3.58	0.165	98
	LSL	0	0	3.57	0.165	95
	USL	30	15.2	3.59	0.167	98
Result		27.43	15.102	3.575	0.167	97.63
Check		in	in	in	in	in

제 5 장 결 론

본 연구에서는 2가지 부품을 별도의 기계가공 후 도금 및 조립공정을 통하여 플랜지 제품을 양산하고 있는 기존방식을 금속분말사출성형을 이용하여 필요한 전반적인 공정 최적화에 대한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 사출 유동해석을 통하여 최초 사출이 시작된 후 약 0.247초 경과하면 게이트까지 충전이 되며, 약 3.29초가 경과되면 사출 성형체는 고화되어 최대의 밀도를 나타내기 시작하고 약 13.2초가 경과되면 제품 내·외부 모두 완전한 고화가 형성됨을 알 수 있었다.
- 2) 2수준 5인자의 완전요인설계에 중심점 및 축점을 추가하여 43가지 실험조건에 대하여 용융온도, 금형온도, 사출시간, 보압시간 및 보압력의 인자들이 반응변수들에 미치는 영향을 분석하고 유의성을 평가한 결과 각각의 반응변수에 유의한 인자들이 도출되어 스크리닝을 수행하였으며, 주효과 및 교호작용의 영향을 분석하였다.
- 3) 인자들의 상호관계를 분석한 결과 유동 선단온도, 성형체 중량, 충전시간, 보압력의 반응변수에 대한 회귀분석 및 반응표면분석으로 적절한 회귀식이 도출되어 적용 가능성을 검증하였으며, 각 요인들의 상관관계를 정립하여 회귀식을 완성 및 반응 최적화를 달성하였다.
- 4) 노말렉산을 사용한 용매탈지는 약 10분 이내에 전체 바인더양의 약 70%가 탈지였으며, 용매온도가 높을수록 탈지되는 속도는 빠르나 55℃에서 성형체에 크랙이 관찰되었으므로 적용된 조건 중 50℃에서 약 1시간의 용매탈지가 가장 적절한 조건으로 분석되었다.

- 5) 용매탈지 후 적용한 열분해 탈지는 약 14.5 시간이 소요되었으며, 용매탈지의 시간을 고려하더라도 기존 단일 열분해 탈지시간의 약 35% 정도로서 탈지에 소요되는 시간을 크게 단축시킬 수 있었다.

- 6) 제품에 대한 전체 공정능력을 분석한 결과, PPM Total은 9,946.8, Z.Bench는 2.33으로 나타났으며 이를 양품률로 환산하면 약 99.01%에 해당되며 3.83 시그마 레벨을 보이며 양호한 공정능력을 나타내었다.

- 7) 최종 제품의 정밀도 측정결과 동심도 17.35 μ m, 외경 2.497mm, 내경 0.993mm를 각각 나타내어 설정한 성능지표 이내의 값을 보임으로서 전체적으로 금속분말 사출성형을 위한 최적설계와 각각의 공정 및 최적화가 매우 우수하게 수행되었음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) 구영덕, 길상철, 나도백, “금속분말사출성형”, 심층정보분석보고서, KISTI, pp. 1~3, 2002.
- 2) 김진천, 이 혁, 류성수, 문인형, “기계적 합금방법으로 제조한 극초미세 조직의 W-Cu 복합분말의 금속사출성형 연구”, 분말야금학회지, 제 5권, 제 2호, pp. 145~153, 1998.
- 3) 김순욱, 류성수, 백응률, “마이크로 금속분말사출성형 기술”, 분말야금학회지, 제 11권, 제 2호, pp. 179~185, 2004.
- 4) 김상철, 배영문, 이병민, “금속사출성형 특허분석”, 기술혁신학회지, 제 5권, 제 3호, pp. 382~395, 2002.
- 5) 김순욱, 손찬현, 김영도, 문인형, “금속사출성형을 위한 W-10wt.%Cu 분말의 제조에 관한 연구”, 분말야금학회지, 제 8권, 제 4호, pp. 245~252, 2001.
- 6) 김순욱, 류성수, 문인형, “불밀링한 W-20wt%Cu 복합분말로 제조된 금속사출성형 부품의 조밀화”, 분말야금학회지, 제 7권, 제 4호, pp. 228~236, 2000.
- 7) 김순욱, 양주환, 박순섭, 김영도, 문인형, “W-Cu의 마이크로 금속분말사출성형”, 분말야금학회지, 제 9권, 제 4호, pp. 267~271, 2002.
- 8) R. M. German and A. Bose, “Injection molding of metals and ceramics”, Metal Powder Industrial Federation, Princeton, NJ, 1997.
- 9) R. M. German, “The Scientific status of metal powder Injection Molding”, International Journal of powder Metallurgy, pp. 31~36, 2000.
- 10) 이재근, “수용성 바인더를 사용한 초경(Hard Metal)의 사출성형 연구”, 영남대학교 대학원 석사논문, pp. 1~3, 2002.
- 11) 이병욱, “최근의 금형 응용 사례: Powder Injection Molding 분야”, LG생산기술, pp. 40~43, 2000.

- 12) 권태현, 안상호, 윤태식, 성환진, 김진곤, 정성택, 강태곤, “고온 및 내마모 분말제품 개발”, 산업과학기술연구소, pp. 1465~1477, 1995
- 13) D. Peiris, “Ultra complex MIM Parts in Automotive Application”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, p. 517, 2006.
- 14) 구영덕, 길상철, 나도백, “금속분말사출성형”, 심층정보분석보고서, KISTI, pp. 43~83, 2002.
- 15) 문인형, “우리나라 분말야금의 현황과 장래성”, 대한금속학회, 분말야금기술(III), pp. 1~14, 1989.
- 16) J. Warren and R. M. German, “Modern developments of P/M”, p. 391, 1989.
- 17) L. F. Pease III, “Present status of PIM Injection Moulding (MIM) - An Review”, Metal Power Report, pp. 242~254, 1988.
- 18) P. A. Hauck, “Powder injection molding: current and long term outlook”, International Journal of Powder Metallurgy, pp. 29~30, 2000.
- 19) Kazuaki Nishiyabu, Kenichi Kakishita, Toshiko Osada, and Shigeo Tanaka, “Micro Metal Injection Molding Using Hybrid Micro/Nano Powder”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 36~37, 2006.
- 20) J. M. Contreras, A. J. Morales, and J. M. Torralba, “Influence of the Morphology and the Particle Size on the Processing of Bronze 90/10 Powders by Metal Injection Molding(MIM)”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 503~504, 2006.
- 21) 정민관, “멀티 타입 슬리브 분말사출금형의 최적설계 및 해석에 관한 연구”, 전남대학교 대학원 석사학위논문, pp. 1~15, 2007.
- 22) 민현규, “사출금형”, 한국산업인력관리공단, pp. 101~131, 2003.
- 23) 박주배, 권태현, “항복응력과 미끄럼 현상을 고려한 분말사출성형 충전공정의

- 논문-유한요소해석”, 대한기계학회논문집, 제 17권, 제 6호, pp. 16~23, 1993.
- 24) E. Lange and N. Mueller, “PM injection molding technique for ceramic and metal parts”, Powder Metallurgy International, pp. 416~420, 1986.
- 25) Kazuaki Nishiyabu, Satoru Matsuzaki, and Shigeo Tanaka, “Net-Shape Manufacturing of Micro Metal Components by Powder Injection Molding”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 93~94, 2006.
- 26) A. Rota, Ph. Imgrund, J. Haack, and F. Petzoldt, “New Material and Processing Issues For High Quality Parts by Micro-MIM”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 34~35, 2006.
- 27) Kazuaki Nishiyabu, Yasuhiro Kanoko, and Shigeo Tanaka, “Innovation in Micro Metal Injection Molding Process by Lost Form Technology”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 43~44, 2006.
- 28) D. A. Issitt and P.J. James, “Rheology of mixed powder plastisols”, powder Metallurgy, pp. 259~264, 1986.
- 29) Noriyuki Yasui, Hiroshi Satomi, Hiroshi Fujiwara, Kei Ameyama, Kei Ameyama, and Yoshimitsu Kankawa, “The influence of powder Size on Mechanical Properties of Smal MIM Parts”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 39~40, 2006.
- 30) D. I. Bloemacher, “Carbonyl iron Powders : Its production and new developments”, Metal Powder Report, pp. 117~119, 1990.
- 31) C. I. Chung, B. O. Rhee, M. Y. Cao, and C.X. Lin, “Requirements of binder for powder injection molding”, *ibid.*, pp. 67~78, 1989.
- 32) 김대건, 류성수, 김은표, 이정근, 김영도, 문인형, “금속 염 첨가 방법을 이용하여 사출성형된 텅스텐 중합금의 소결거동”, 분말야금학회지, 제 6권, 제 4호, pp. 294~300, 1999.

- 33) 윤태식, 안상호, “금속사출성형을 위한 혼합체의 제조 및 특성평가”, 제 4회 분말야금 심포지움, pp. 137~145, 1992.
- 34) B. K. Lograsso and R. M. German, “Thermal debinding of injection molded powder compacts”, Powder Metallurgy International, pp. 17~22, 1990.
- 35) 은광용, “금속사출성형”, 분말야금기술(II)”, 대한금속학회, pp. 49~59, 1988.
- 36) R. M. German, “Optimization of the powder-binder mixture for powder injection molding”, Compendium on metal injection molding II, Metal Powder Industrial Federation, Princeton, pp. 51~66, 1989.
- 37) M. Y. Cao, B. O. Rhee, and C. I. Chung, “Usefulness of the Viscosity Measurement of Feedstock in Powder Injection Molding”, Adv. in Powder Metallurgy, Vol. 2, p. 59, 1991.
- 38) C. Gornik, “Investigation in Influence of Screw Design on the MIM Process”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 213~214, 2006.
- 39) Li Hui Cheng and Kuen shyang Hwang, Molding Properties and Causes of Deterioration of Recycled MIM Feed Stock”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 215~216, 2006.
- 40) Toru Shimizu, Kotarou Hanada, Satoru Adachi, Masahito Katoh, Kanichi Hatsukano, and Kunio Matsuzaki, “Recycling of stainless grinding sludge 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 95~96, 2006.
- 41) L. G. Reifscheider, “Documenting Flow Segregation in Geometrically Balanced Runner”, ANTEC 2001, pp. 3356~3360, 2001.
- 42) P. Auell and M. Bailey, “Effect of Thermoplastic Elastomer Material Properties on Mold Filling Imbalances”, ANTEC 2002, pp. 3495~3499, 2002.
- 43) D. A. Hoffman and J. P. Beaumont, “Thermoset Filling Imbalances in Geometrically Balanced Runner Systems”, ANTEC 2001, pp. 842~846, 2001.

- 44) C. W. White, "Development of Filling Imbalances in Hot Runner Mold ANTEC 99, pp. 3672~3676, 1999.
- 45) B. Allen and T. Lacey, "The Affects of Shear Induced Imbalance on the Concentricity of Injection Molded Gears", ANTEC 2003, pp. 3757~3761, 2003.
- 46) H. E. Casaldi and T. Michel, "Process Window as Effected by Shear Induced Flow Imbalance in MuIti-cavity Molds", ANTEC 2001, pp. 3112~3115, 2001.
- 47) 허영무, 신광호, 윤길상, 장성호, 정우철, 김무연, "다구찌법을 이용한 미세사출 성형 인자에 대한 고찰", 한국소성가공학회, 금형가공·미세가공·플라스틱 가공 공동 심포지엄, pp. 147~152, 2005.
- 48) T. S Wei and R. M. German. "Conpendium on Metal Injection Molding", Metal Powder Industries Federation, p. 143, 1988.
- 49) 문인형, 김형준, 석명진, 이광민, "제 4회 분말야금심포지엄", 대한금속학회, p. 125, 1992.
- 50) 배중수, 이강률, 김하식, "분말사출성형법에 의한 소형복잡형상 부품제조기술 개발", 한국기계연구소 보고서, pp. 7~15, 1991.
- 51) H. J. Sung, T. K. Ha, S. Ahn, and Y. W. Chang, "Powder Injection Molding Of A 17-4 Ph Stainless Steel And The Effect Of Sintering Temperature On Its Microstructure And Mechanical Properties", Journal of Korean Powder Metallurgy Institute, p. 10, 2002.
- 52) Yuji Soda, Takashi Hurusaki and Michitaka Aihara, "Improvement in the MIM Sintering Properties of 440C Stainless Steel", 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 217~218, 2006.
- 53) C. J. Joens, "Benefits of Laminar Gas Flow During Debind and sinter of

- PIM/MIM Parts”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 820~821, 2006.
- 54) K. S. Hwang, M. W. Wu, F. C. Yen, and C. C. Sun, “Improvement in Microstructure Homogeneity of Sintered Compacts through Powder Treatments and Alloy Designs”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 824~825, 2006.
- 55) Hideshi Miura, Yoshinori Itoh, and Kenji Sato, “Fabrication of Ti-6Al-7Nb Alloy by Metal Injection Molding”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, p. 758, 2006.
- 56) A. Otsuka, K. Suzuki, and M. Achikita, “Establishment of Process of Manufacture of Ti-6Al-4V Alloy Sintering Body by MIM”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 759~760, 2006.
- 57) Kazuaki Nishiyabu, Yoshikazu Masai, Masashi Ishida, and Shigeo Tanaka, “Mechanical and Antibacterial Properties of Copper-added Austenitic Stainless Steel(304L) by MIM”, Journal of Korean Powder Metallurgy Institute, Vol. 9, No. 4, pp. 227~234, 2002.
- 58) Chih Cherng Chen, Chi Wen Wu, and Chih Ming Yen, “Optimization of Composite MIM Feedstock Rheological Behaviour by Experimental Analysis”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 495~496, 2006.
- 59) Muhammad Hussain Ismail, Mohd Afian Omar, Istikamah Subuki, Aidah Jumahat, and Zahurin Halim, “Effect of palm Stearin on Rheological Properties of Metal Injection Molding(MIM) Feedstock”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 223~224, 2006.
- 60) 임상현, “사출금형설계제도”, 보성각, pp. 22~94, 2003.
- 61) 이동길, 장경천, “Zirconia Ceramic Ferrule & Sleeve 품질 및 생산성 향상에

- 관한 기술지원” 한국생산기술연구원 기술지원 성과보고서, pp. 27~88, 2008.
- 62) 홍준호, 최영심, 조인성, 황호영, 최정길, “다상유체해석을 통한 기포결함 예측과 금형설계기술”, 한국소성가공학회지, 제 14권, 제 3호, pp. 224~232, 2005.
- 63) 김영수, “금속인서트 사출성형품의 수축현상에 관한 연구”, 한국자동차공학회 논문집, 제 7권, 제 9호, pp. 112~118, 1999.
- 64) 박근, 안중호, 최상련, “실험계획법과 수치해석을 연계한 정밀 전자부품 사출성형 공정의 최적설계”, 대한기계학회논문집 A권, 제 26권, 제 7호, pp. 1348~1356, 2002.
- 65) 이상복, “새 Minitab 실무완성”, (주)이래테크, pp. 573~587, 2005.
- 66) 창원특수강 6시그마연구회, “실행하기 쉬운 6시그마 DFSS 기법”, 한국능률협회출판(주), pp. 73~149, 2005.
- 67) 류미라, 이권희, 김영희, 박홍식, “사출금형 설계 최적화를 위한 반응표면 분석법의 적용”, 한국정밀공학회 2002년추계학술대회논문집, pp. 1~4, 2002.
- 68) J. H. Young and J. P. Beaumont, “Mold Filling Imbalances in Geometrically Balanced Runner System”, Journal of Injection Molding Technology, Vol. 1, No. 3, pp. 133~143, 1997.
- 69) J. P. Beaumont, J. H. Young, and M. J. Jawoski, “Solving Mold Filling Imbalance in Multi-Cavity Injection Molds”, Journal of Injection Molding Technology, Vol. 2, No. 2, pp. 47~58, 1998.
- 70) 최양호, 이용성, “사출 조건이 사출품의 기계적 성질에 미치는 영향”, 한국공작기계기술학회지, 제 6권, 제 1호, pp. 84~91, 1997.
- 71) C. J. Hwang, Y. B. Ko, H. P. Park, S. T. Chung and B. O. Rhee, “Computer Aided Engineering Design of Powder Injection Molding Process for Dental Scaler Tip Mold Design”, 2006 Powder Metallurgy World Congress, pp. 497~498, 2006.

- 72) 박주배, 권태현, “분말사출성형 충전공정의 유한요소해석”, 대한기계학회 춘추 학술대회 제 1권 제 1호, pp. 434~439, 1992.
- 73) 전언찬, 박정우, 김수용, 이철장, 안광우, “점탄성 효과를 가진 사출 유동에 관한연구”, 한국기계가공학회지, 제 7권, 제 3호, pp. 25~29, 2008.
- 74) 박상현, 김경수, 유가영, 이병경, Unigraphics NX4 전문가로 가는 지름길, 도서출판 북미디어, pp. 642~761, 2007.
- 75) “Advanced simulation MPI/Flow Training Theory & Concepts”, Moldflow Plastics Insight, Moldflow Pty,Ltd., Victoria, Australia, pp. 4~136, 2006.
- 76) 이상복, “새 Minitab 실무완성”, (주)이래테크, pp. 574~615, 2005.
- 77) D. C. Montgomery, “Design and Analysis of Experiments”, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, U.S.A., 2005.
- 78) 이병욱, 최재혁, 태준성, “사출금형 냉각회로 자동최적화를 위한 설계변수 감소 방안”, 한국공작기계학회지, 제 18권, 제 4호, pp. 417~422, 2009.

