

실험계획법을 이용한 대형 사출물의 사출성형 해석과 검증에 관한 연구

이형수*, 이희관*, 양균의**

A Study on Injection Molding Analysis and Validation of Large Injection-Molded Body Using Design of Experiment

Hyoung-soo Lee*, Hi-Koan Lee*, Gyun-eui Yang**

Abstract

The large injection molded parts technology such as instrument panel, front and rear bumper are presented for a precision molding. Some lead time and cost are required to product these part from design to mass product. Recently, CAE is widely used in product design, mold design and analysis of molding conditions to reduce time and cost. The optimal molding conditions can be obtained by DOE(Design of Experiment). The optimal design applications with CAE and DOE have been used in small molded parts. However, application to the large molded body is not reported. In this paper, optimization of injection molding process is studied for quality control in mass production of automobile bumper. Mold temperature difference is chosen through robust design of injection molding process, the molding process being optimized in term of shrinkage and deflection. The optimal conditions through DOE are validated by using injection molding analysis

Key Words : 사출성형 CAE, DOE(Design of Experiment), Bumper, LMBT(Large Molded Body Technology)

1. 서론

최근 자동차에서 플라스틱이 차지하는 비율이 점점 증가하고 있다. 그 중 가장 많은 비율을 차지하는 부품이 앞뒤 범퍼 facia와 instrument panel 이다. 이 제품들은 형상이 복잡할 뿐만 아니라 크기가 커서 대형 사출물로 분류되어

있으며, 제품설계에서 금형제작 후 양산까지 많은 시간과 비용이 소요된다. 실재르 범퍼 사출금형제작에 필요한 시간은 총 중 5개월 정도 소요되며, 금형수정과 제품 품질 향상을 위한 시사출 과정은 24주 정도 소요된다.

이러한 시간과 비용을 줄이기 위해 CAE(Computer Aided Engineering)를 제품설계, 금형설계 및 성형 조건

* 이 형수, 전북대학교 자동차부품·금형 기술혁신센터(TIC) (hslee@camtic.or.kr)

주소: 561-844, 전북 전주시 덕진구 팔복동 2가 750-1

+ 전북대학교 자동차부품·금형 기술혁신센터(TIC)

++ 전북대학교 기계·항공 시스템 공학부

분석 등에 이용하는 것을 볼 수가 있다. 뿐만 아니라 더 정확한 실험분석을 하며 인자들 간의 상호복합 작용을 고려하여 최적의 사출조건을 도출하는 최적화 기법을 이용한 연구가 이루어지고 있다. (1)~(7)

그러나 이러한 연구는 제품크기가 작은 것을 대상으로 한 것이 대부분이며 bumper와 IP처럼 대형 사출물을 대상으로 한 것은 드물다. 대형 사출물은 소형물에 비해 제작비용과 시간 면에서 많은 투자가 필요하여 이를 줄일 수 있는 연구가 더 절실히 요구되고 있다.

본 논문에서는 CAE와 실험계획법을 이용하여 대형사출물의 품질과 관련된 중요 인자들의 조건을 더 나은 방향으로 제시하려 한다. 1차 실험계획을 통해 제품에 미치는 주효과(main effects)를 평가하고, 2차 실험계획에 사용될 인자들은 선택한다. 그리고 2차 실험계획은 현장에서 금형 온도차의 변동으로 인해 발생하는 문제를 다루기 기법의 강건 설계를 통해 현재에 가장 적절한 조건을 선정하였다.

2. 성형해석 입력 조건

성형해석을 위한 입력 사항은 크게 3가지로 분류할 수 있는데 수지관련, 금형관련, 사출기 관련 사항으로 분류할 수 있다. 각 조건은 사출 성형해석에 큰 영향을 미치는 요소이므로 현장에서 사용하는 값을 이용하였다.

성형해석과 시험사출에 사용된 수지는 HE-362P(Honam Petro- chemical Company)이다. 열가소성수지로 내마모, 내오일, 내약품성이 우수하며 특성은 Table1과 같다.

Table 1. Properties of plastic(HE-362P)

Item	Properties
Family name	Poly-propylene(PP)
Material structure	Crystalline
Mold temperature	50℃
Melt temperature	220.℃
Ejection Temperature	106℃
Melt density	0.78268 g/cm ³
Solid density	0.92888 g/cm ³
Specific heat	2,814 J/kg-℃
Maximum shear stress	0.25 Mpa

Table 2은 금형 원재료 성분 값을 나타낸 표로 대부분 금형에 많이 이용되고 있는 재료이다.

Table 2. Properties of mold(HP-4A)

Item	Properties
Mold density	7.82 g/cm ³
Mold specific heat	518.8 J/kg-℃
Mold thermal conductivity	41.87 W/m-℃
Elastic modulus(E)	200,000 MPa
Poisson's ratio(v)	0.33

Table 3은 현장에서 사용하는 사출기의 사양을 나타낸 것이다. 사출기는 최대 형체력(Clamp force)과 형체기구 구조를 기준으로 분류하는데, 실험에 사용한 사출기는 최대 형체력이 3,500ton이며, 2 Plate식의 형체기구를 사용한다.

Table 3. Specification of injection molding machine

Item	Properties
Machine name	Mistubishi 3500 ton
Injection capacity	21,000cm ³
Maximum injection stroke	875mm
Maximum injection rate	1,600cm ³ /s
Machine screw diameter	175mm
Maximum clamp force	3,500ton
Maximum injection pressure	160MPa

3. 1차 실험계획 및 성형해석

3.1 특성치 선정

성형해석이 완료된 후 결과를 분석하기 위해서는 분석에 필요한 평가값을 선정해야 한다. 본 논문에서는 금형 제작이후 제품품질 안정화 단계에서 수행할 수 있는 생산성 향상 측면을 고려하였다. 생산성과 관련된 성형해석 결과값은 사출시간(F_i , fill time), 최대 사출압(P_{max} , maximum injection pressure), 형체력(C_f , clamp force) 등이 있다. 사출시간은 사이클 타임과 밀접한 관련이 있는 부분이어서 특성치로 선정하였다. 그리고 최대 사출압과 최대 형체력은 사출기에 관련된 전형적인 생산성 평가 항목으로 낮게 유지하면서 최적의 사출을 수행한다면 성형성과 생산성 측면을 모두 끌어 올릴 수 있는 요소들이므로 특성치로 선정하였다.

온도에 관련된 요인들을 평가하기 위한 특성치는 온도에

영향을 많이 받아 제품의 치수정밀도나 변형에 영향을 주는 부분을 평가하기 위해 제품의 수축률(Sr, shrinkage)을 선정하였다. 수축률은 수지, 금형, 냉각수, 러너 온도의 영향을 평가하는 중요 기준이 된다. 이상의 4개의 특성치를 기준으로 영향력 있는 인자를 선정하여 주효과(main effect)를 평가하였다.

3.2 인자 선정

본 논문은 효율적인 사출공정을 위한 방안을 수립하는데 있다. 이를 위해 제품의 품질과 생산성에 영향을 주는 생산과정에서의 인자들을 선정하여 그 인자의 주효과를 비교하였다. Table 4는 1차 실험계획에 선정된 인자로, 앞에서 제시한 특성치에 영향을 미치면서 사출성형에서 조절이 가능한 대부분의 요인들이다. 각 인자의 수준은 2수준으로 하였으며, 현재 사용되고 있는 조건을 기반으로 범위를 선정하였다.

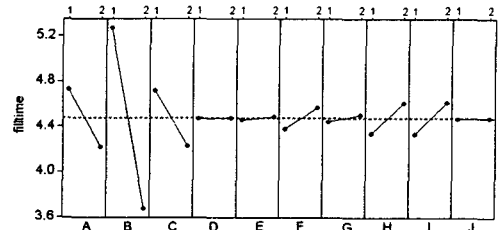
Table 4. Factors and their levels for the preliminary DOE

Factor	1 Level	2 Level
A	180/170/75/40/30/10	190/180/85/40/30/10
B	50/60/57/45/35/25	70/80/77/65/55/25
C	94	98
D	7/4/4	9/6/6
E	37/30/25	47/40/35
F	40	80
G	200	240
H	30/27	25/22
I	200	230
J	25	35

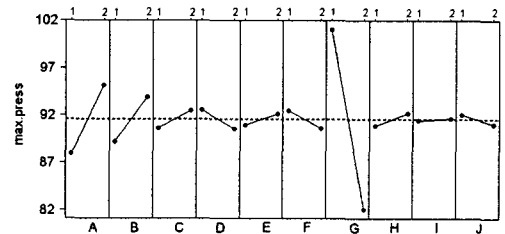
A: Injection position(mm) F: Mold surface temperature(°C)
 B: Injection velocity(mm/s) G: Melt temperature(°C)
 C: V/P change(%) H: Coolant temperature(°C)
 D: Packing time(sec) I: Hotrunner temperature(°C)
 E: Packing pressure(%) J: Cooling temperature(°C)

3.3 1차 성형해석의 주효과 분석

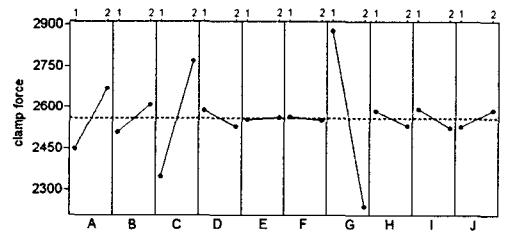
부분 요인법은 반복횟수를 m, 부분화 정도를 q라 했을 때 실험횟수는 $N_{fractional} = m(n)^{k-q}$ 이며⁽⁵⁾, 분석도 IV 이상의 실험을 위해 총 32회의 실험을 실시하였다. 실험 계획된 조건배치로 성형해석을 실시하였고, 그 중 3번째 실험에서 미성형(short shot)이 발생한 것 이외에는 모든 조건에서 무리 없이 성형해석이 수행되었다.



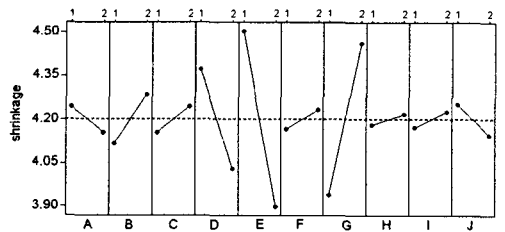
a) Main effects of fill time(Ft)



b) Main effects of maximum pressure(P_max)



c) Main effects of clamp force(Cf)



d) Main effects of part shrinkage(Sr)

Fig.1 Main effects plots of the preliminary DOE

Fig.1은 10개 인자의 주효과를 특성치에 따라 도시화 한 것이다. 그림 중앙에 빨간 점선은 총평균을 의미한다. a)에 충전시간의 주효과를 보면 사출 위치와 사출 속도, 그리고 V/P 절환에 많은 영향을 받는 것을 알 수가 있다. 그리고 사출 개시위치가 커 수지 개량치가 많은 쪽이 사출시간이 짧으면서, V/P 절환 타임이 늦어 사출속도(V)에 의해 수지가 충전되는 영역이 더 길 때 사출시간이 짧다.

Fig.1의 b)는 최대 사출압의 주효과로 수지 온도가 높을 때 최대 사출압이 낮은 것을 볼 수 있고, 이 영향은 c)에 형체력에도 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 사출위치와 사출속도도 최대 사출압에 미치는 영향력이 큰 것을 그림을 통해 알 수가 있는데 계량치가 적고 사출속도가 느릴수록 낮은 압력을 유지하며 이 경향은 사출시간과는 상반되는 것이다. 이 두 인자는 형체력에도 영향력이 큰 것을 볼 수 있으며, 더불어 V/P절환 위치가 형체력에 큰 영향을 주며 사출 시간과는 전혀 다른 경향을 보이는 것을 알 수가 있다.

수축률에 관련된 인자들의 주효과는 역시 보압시간, 보압압력, 수지온도가 가장 큰 것으로 나타났다. 특히 보압압력이 높을수록 강력하게 압축하여 수지 수축량을 보충해주며 수지가 충분히 고화할 때 까지 보압을 해주는 것이 수축률을 최소화하는 역할을 하는 것으로 보인다. 수지 온도의 경우 수지 온도를 높게 하는 것이 앞에 최대 사출압과 형체력을 줄이는데 도움은 되지만 그림 d)에서는 그것이 수축률에는 악영향을 미치는 것을 알 수가 있다.

전체적으로 주효과의 영향을 평가하면 수지온도가 특성치에 가장 큰 영향을 주고 사출위치, 사출속도, V/P 절환, 보압시간, 보압압력이 각각의 특성치에 영향력이 있는 것으로 판단된다. 그 이외에 인자는 특성치에 따라 약간에 경향 차이를 보일뿐 전 특성치에 대해서 영향력이 적은 것으로 나타났다.

본 논문에서 냉각수 온도, 핫 런너 온도, 냉각 시간이 특성치에 주는 주효과에 영향력이 작아 2차 실험계획에서 제거하기로 하였다. 그러나 냉각시간은 사이클 타임에 중요한 영향을 미치는 요소이므로 성형해석을 통해 최적의 시간을 선정하였다. 수지 냉각으로 게이트가 제품 취출 온도에 도달하면 더 이상의 냉각이 필요하지 않으므로 보압이후 그 시간까지를 냉각시간으로 정하면 될 것이다. 냉각시간은 해석결과 25초가 적당하였으며, 시사출에서 적용하였다.

4. 2차 실험계획 및 성형 해석

4.1 특성치와 인자 선정

1차 실험계획에서 주효과의 영향도를 평가하여 2차 실험계획의 인자들을 선정했다. 2차 실험계획은 다구찌 기법(taguchi's method)을 이용하여 설계하였고 인자는 총 8개이고 그 중 1개의 인자는 에러(error)로 선정하였다. 8개의 인자로 다구찌 기법에서 가장 많이 쓰고 있는 직교배열표 $L_{18}(2 \times 3^7)$ 를 사용했고⁽⁸⁾, 이 경우 실험 회수는 18회 이며 2수준 인자1개와 3수준 인자 7개로 결정된다.

Table 5는 각 인자들의 수준수와 각 수준에 따른 값들을 보여주고 있다. 잡음인자는 현재 생산에서 주위 환경요소에 영향을 많이 받는 요소인 금형온도차로 선정했다. 현재 생산 공정중에 오전과 오후에 금형의 온도를 변경해주고 있고 그 온도는 고정측과 가동측이 각각 다르다. 두 금형 부분의 온도차를 5~8℃로 유지하는데 이 부분의 영향을 최소화시키려 했다. 온도 분포에 따라 수축률이 불균일하여 제품 변형이 발생하는데 금형 온도차의 변화가 그것에 영향을 미치기 때문이다. 잡음 인자인 금형 온도차를 5℃와 8℃의 2수준으로 설정하여 총36회의 성형해석을 실시하였다. 이를 평가하기 위한 특성치로는 제품에 미치는 온도와 압력에 영향을 평가할 수 있고 금형온도차의 영향을 평가할 수 있는 수축률(S_r)과 성형성을 평가할 수 있는 최대 사출압(P_{max})으로 선정하였다.

이 특성치는 다구찌 기법의 Signal-To-Noise 비를 사용해 품질 특성을 분석하였다. 두 특성치 모두 작을 수록 좋은 계수치 망소 특성을 가지므로 SN비 공식은

$$SN = -10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right) \quad (1)$$

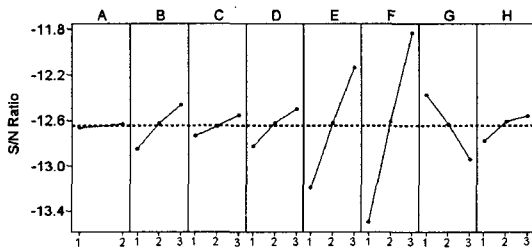
을 사용하였다.⁽⁹⁾

Table 5. Factors and levels in the principal DOE

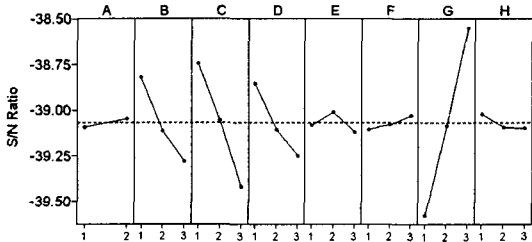
	Description	Level	Values
A	Mold Temp.(℃)	1	40
		2	80
B	Injection Position(mm)	1	180/170/75/40/30/10
		2	185/175/80/40/30/10
		3	190/180/85/40/30/10
C	Injection Velocity(mm/s)	1	50/60/57/45/35/25
		2	60/70/67/55/45/25
		3	70/80/77/65/55/25
D	V/P Change(%)	1	94
		2	96
		3	98
E	Packing Time(sec)	1	7/4/4
		2	8/5/5
		3	9/6/6
F	Packing Pressure(%)	1	37/30/25
		2	42/35/30
		3	47/40/35
G	Melt Temp.(℃)	1	210
		2	220
		3	230

4.2 2차 실험계획 분산분석(ANOVA)

측정치 전체의 분산을 몇 개의 요인효과에 대응하는 분산과, 그 나머지의 오차 분산을 나누어서 검정이나 추정을 실시하는 것을 분산분석(ANOVA)이라 한다. 먼저 특성값 전체의 산포를 총 제곱합(total sum of squares)으로 나타낸다. 그리고 이 총 제곱합을 실험에 사용된 각 인자들의 제곱합(S, sum of squares)으로 분해하고, 각 요인의 제곱합을 그 요인들의 자유도(ϕ , degree)로 나누어 불편 분산(V, unbiased variance)을 계산한 다음, 각각의 불편분산을 오차분산(V_e)으로 나누어 분산비(F_0 , ratio of variance)를 계산하여 오차에 비하여 큰 영향을 주는 요인이 무엇인지를 찾아내는 분석 방법이다. 주로 다음 Table 6과 같이 분산분석표를 만들어서 해석한다.



a) Main effects for SN ratio of shrinkage(S_1)



b) Main effects for SN ratio of Max. pressure(P_{max})

Fig. 2 Main effects plots for SN ratio of the principal DOE

Fig. 2는 앞에서 구해진 SN비를 이용하여 SN비의 주효과를 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 수축률 SN_1 의 경우 F, E, G, B 인자 순으로 영향을 미치고, 최대 사출압 SN_2 의 경우 G, C, B, D 인자 순으로 영향을 미친다. 그리고 두 SN비의 합은 F, E, C, G 인자 순으로 영향력을 가지는 것으로 나타났다. 이런 결과는 Table 6에서 확연히 알 수 있다. 유의 수준(P-value) 5% 또는 10%으로 Table 10 a)에서 인자 B, E, F, G가 유의하고 b)에서 B, C, D, G가 유의 하며 c)에서는 C, E, F, G가 유의한 것을 알 수가 있다. 유의 인자

들을 제외한 인자들은 현재 공정조건을 그대로 유지하고 유의 인자는 SN비가 가장 큰 값을 선택하여 최적조건을 선정한다.

Table 6. ANOVA results for SN ratio in principal DOE
a) ANOVA results for SN_1 ratio in principal DOE

Factor	S	ϕ	V	F_0	P
A	0.00438	1	0.00438	0.34	0.621
B	0.44846	2	0.22423	17.16	0.055
C	0.09499	2	0.04750	3.64	0.216
D	0.32385	2	0.16192	12.39	0.075
E	3.35152	2	1.67576	128.25	0.008
F	8.35330	2	4.17665	319.65	0.003
G	0.96420	2	0.48210	36.90	0.026
e	0.15203	2	0.07601	5.82	0.147
error	0.02613	2	0.01307		
T	13.7189				

b) ANOVA results for SN_2 ratio in principal DOE

Factor	S	ϕ	V	F_0	P
A	0.01120	1	0.01120	0.51	0.549
B	0.65532	2	0.32766	14.96	0.063
C	1.36993	2	0.68497	31.28	0.031
D	0.48212	2	0.24106	11.01	0.083
E	0.03943	2	0.01972	0.90	0.526
F	0.01804	2	0.00902	0.41	0.708
G	3.18517	2	1.59258	72.72	0.014
e	0.02356	2	0.01178	0.54	0.650
error	0.04380	2	0.02190		
T	5.8286				

c) ANOVA results for SN_1+SN_2 ratio in principal DOE

Factor	S	ϕ	V	F_0	P
A	0.02957	1	0.02957	5.58	0.142
B	0.02241	2	0.01120	2.11	0.321
C	0.74336	2	0.37168	70.11	0.014
D	0.01578	2	0.00789	1.49	0.402
E	3.16497	2	1.58249	298.49	0.003
F	9.12165	2	4.56083	860.27	0.001
G	0.64507	2	0.32253	60.84	0.016
e	0.05814	2	0.02907	5.48	0.154
error	0.01060	2	0.00530		
T	13.8116				

최적조건은 a)에서는 A1, B3, C2, D2, E3, F3, G1이고, b)에서는 A1, B1, C1, D1, E2, F2, G3이고, c)에서는 A1, B2, C1, D2, E3, F3, G3이다. 선택된 최적조건을 이용하여

다시 성형해석을 하였다.

성형해석결과 a)에 경우는 수축률이 3.47%로 매우 낮았으나 최대 사출압이 97.61MPa로 높았다. b)의 경우는 최대 사출압이 77.58MPa로 낮으나 수축률이 4.45%로 높고 사출시간이 6.37로 a)의 경우보다 2배 정도 걸렸다. c)의 경우는 최대 사출압과 수축률이 80.30MPa, 3.88%로 가장 적절하였으며, 현재 조건 보다 우수한 결과를 나타냈다.

7. 결 론

본 논문은 자동차 범퍼의 사출성형에 영향을 미치는 성형 조건 인자의 영향력을 성형해석을 통해 분석하였다. 이 과정에서 체계적이고 분석을 위해 두가지 실험 계획법을 이용하여 실험을 설계하였다.

첫 번째로 요인배치법의 하나인 부분요인법을 이용하여 생산성과 품질에 복합적인 영향을 주는 여러 사출성형 인자들의 영향도와 각 인자들의 교호작용을 평가하였다. 두 번째로 다구찌 방법을 이용하여 양산과정에서 제품 트러블 요인 중에 하나인 금형 온도차에 대해 영향력을 적게 하는 강건 설계를 실시하였다.

이 두가지 실험계획에 의한 성형해석을 통해 제품에 영향을 미치는 주요인자를 선정하고, 잡음인자에 대한 강건 설계를 동시에 할 수 있었다. 이것은 각 실험계획법이 가지고 있는 장·단점을 보완하는 향상된 실험계획법 조합을 제시한 것이다. 이로써 금형 온도차에 적은 영향을 받으면서 제품에 큰 영향을 미치는 인자들의 최적조건을 특성치에 따라 선정할 수 있었다.

그리고 대형 사출물인 자동차 범퍼를 사용함으로써 양산 과정에서 대형사출물에 대한 CAE와 실험계획법의 적절한 적용 예를 제시하였다. 인자의 영향도 평가와 최적설계를 통해 현재 생산되고 있는 조건보다 최적조건을 제시하였다. 이 조건은 CAE와 실험계획을 통해 산출하였고, CAE검증과 현장검증 시사출을 실시하였다. 그 결과로 성형 해석을 통해 냉각시간을 기존보다 5초 단축하여 사이클 타임을 줄였고, 사출압과 수축률이 80.30MPa, 3.88%로 현재조건보다 우수함을 알 수 있었고, 더불어 현장적용에 가능성을 제시하였다.

대형 사출물 제품개발과정에서도 CAE와 실험계획법을 적용하여 향상된 금형 설계, 공정 조건 산출을 위한 제품 트라이아웃(tryout)과 초기 생산성 안정화를 이루는데 도움이 될 것이라 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) X. Lu, L.S. Khim, 2001, "A statical experimental study of the injection molding of optical lenses," J. Materials Processing Technology, 113, pp. 189~195.
- (2) B. Nardin, K. Kuzman, Z. Kampus, 2002, "Injection moulding simulation results as an input to the injection moulding process," J. Materials Processing Technology, 130-131, pp. 310~314.
- (3) Y.K. Shen, J.J. Liu, C.T. Chang, C.Y. Chiu, 2002, "Comparison of the results for semisolid and plastic injection molding process," Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol.29, No.1, pp. 97~105.
- (4) J.H. Kim, J.G. Kim, J.I. Song, S.T. Kim, 2003, "The optimization of injection molding using Taguchi's mothod with Molflow," J. spring of KSPE.
- (5) K. Park, J.H. Ahn, 2004, "Design of experiment considering two-way interactions and its application to molding process with numerical analysis," J. Materials Processing Technology, 146, pp. 221~227.
- (6) R.S. Chen, H.H. Lee, C.Y. Yu, 1997, "Application of Taguchi's method on the optimal process design of an injection molded PC/PBT automobile bumper," Composite Structures, Vol.39, No.3-4, pp. 209~214.
- (7) H.P. Kim, Y.J. Kim, 2002, "A study of the effects of filling and packing phases on injection molding process," T. KSME, Vol.11, No.4, pp. 44~53.
- (8) 박상규, 이영광, 2003, "Minitab을 활용한 현장 실무 중심의 실험계획법," 도서출판 청호, pp. 424~442.
- (9) 유영식, 2002, "최신사출성형금형," 기전연구사, pp. 217~345.