

<기술논문>

## 알터네이터 풀리의 제조를 위한 사출성형공정에 관한 연구

### A Study on the Injection Molding Process for Manufacturing of Alternator Pulley

민병현\*, 김영호\*\*  
Byeong-Hyeon Min, Young-Ho Kim

#### ABSTRACT

So far, an alternator pulley has been formed by cold forging and casting with a metal due to the necessity of its high strength. Various advantages such as the light weight, the low cost, and the high productivity can be obtained by the injection molding process using engineering plastics. Engineering plastics have an excellent performance in the characteristics of a strength vs. weight, a good forming ability and a productivity. The object of this study is to develop an alternator pulley, which has been made with a metal, using the injection molding process based on Taguchi methods. A sink mark is considered as a characteristic parameter to improve the quality. The FEM Simulation CAE tool, Moldflow, is used for the analysis of injection molding process.

주요기술용어 : Alternator pulley(알터네이터 풀리), Injection molding(사출성형), Taguchi methods(다구찌 방법), Sink mark(싱크마크), FEM Simulation(FEM 시뮬레이션), MOLDFLOW(몰드플로)

#### 1. 서론

현재 우리 생활 주위에서 사용되고 있는 가전제품, 자동차, 생활용품 등을 생산하는데 있어서 여러 가지 다양한 재료와 생산기술이 적용되고 있으며, 자동차 부품의 재료를 본다면 강, 주철, 소결 재료, 동, 알루미늄 등의 금속재료로부터 플라스틱, 고무, 유리, 섬유 등의 비금속 재료에 이르기까지 매우 다양하다. 이들 중에서 플라스틱은 성형자유도가 높고 경제적인 뿐만 아니라, 금속재료에 비해 밀도가 낮아 최근 자동차의 연비

향상 등을 위해 저 중량 설계는 필수적이므로 계속적으로 플라스틱의 사용량은 증가되어 왔다. 근년에 들어 개발된 다양한 종류의 엔지니어링 플라스틱은 자동차의 기능부품 등에 사용되어 기존의 금속재료를 많이 대체하고 있다.<sup>1)</sup>

일반적으로 알터네이터 풀리(alternator pulley)는 고속회전시 회전 불균형과 같은 과부하에 의해 생기는 풀리의 변형을 방지하기 위한 강성이 요구되기 때문에 용접이음매가 없는 단단 드로잉공정에 의한 정밀한 제조공정이 요구되어 왔으며, 제조공정은 크게 원자재 용해 및 슬라브주조, 열/냉간 압연에 의한 박판강재 가공, 블랭킹, 단단 드로잉 공정 및 절단 가공 등의 조합으로 구

\* 회원, 동의대학교 기계·산업시스템공학과

\*\* 회원, 부산대학교 기계공학과

성되어 있다.<sup>2,3)</sup> 한편, 엔지니어링 플라스틱(engineering plastic)은 구조용 및 기계 부품 재료로 사용되는 재료로서, 다양한 특성과 가공 방법을 갖고 있기 때문에 공업분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 이러한 플라스틱을 재료로 하는 성형 기술로는 일반적으로 사출성형법, 압출성형법, 중공성형법, 압축성형법, 발포성형법, 분말성형법 등이 있으며, 이 중에서 사출성형은 가열 용융된 수지재료를 금형 내부에 삽입하고 금형에서 냉각시킨 후 꺼내는 방법으로 치수안정성이 우수하고 미려한 외관 면을 구현할 뿐 아니라 복잡한 형상을 쉽게 만들 수 있는 플라스틱 성형에서 가장 일반적인 방법이다.<sup>4)</sup> 하지만, 사출성형은 성형조건이나 제품의 기하학적인 형상 등에 따라 싱크마크(sink mark), 웰드라인(weld line), 휨(warp) 등 금속에서 볼 수 없었던 여러 가지 성형불량을 야기할 수 있는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 자동차용 얼터네이터 풀리를 개발하는데 있어서 자동차 부품의 경량화, 경비 절감 및 공정 단축에 기여할 수 있는 사출성형 공정을 채택하며, 엔지니어링 플라스틱을 사용하여 성형품의 싱크마크를 최소로 줄이는 사출성형 조건을 다구찌 방법(Taguchi method)을 이용하여 얻고자 한다. 사출성형에서의 싱크마크에 관한 연구는 Naka 등<sup>5)</sup>과 M. J. Liou 등<sup>6)</sup> 많은 연구자들에 의해 이루어져 왔고, Taguchi<sup>7)</sup>에 의해 실험계획법이 정립되면서 Qin Zou,<sup>8)</sup> Y. S. Zu, S. T. Lin,<sup>9)</sup> S. H. Dillman,<sup>10)</sup> Silvia. E. Barbosa<sup>11)</sup> 등에 의하여 사출공정에서도 다구찌 방법이 적용되어 왔다.

본 논문에서는 기존의 연구결과에 바탕을 두고 플라스틱 얼터네이터 풀리를 개발하기 위한 기초 연구로서 얼터네이터 풀리의 사출성형 공정에 대한 해석이 CAE 툴인 Moldflow를 통해 행해졌다. 플라스틱 사출성형에는 여러 가지 공정변수가 복합적으로 결과에 영향을 끼치므로 충전시간, 용융수지온도, 보압, 보압시간, 금형온도, 냉각시간 등의 6가지 공정변수를 입력인자로 선정하여 해석을 수행하였다. 성형품의 싱크

마크를 최소화하는데 가장 유의한 3개 인자를 분산분석을 통하여 선별한 후, 선별된 3개 공정변수에 대하여 반응표면분석법을 적용하여 2차원 회귀모델식을 도출하였으며, 또한 회귀모델식에 최속강하법을 적용하여 최적의 사출성형 조건을 찾았다.

## 2. 적용제품의 개요

Fig. 1은 기존의 제조공정에 의하여 제조된 자동차용 얼터네이터 풀리의 한 예로, 벨트에 의해 크랭크샤프트 풀리로 부터 동력을 전달받는 기능으로 대부분이 워터 펌프 풀리와 함께 3개가 동시에 1개의 벨트에 의해 구동되고 있어, 강성 및 내구성 등 여러 성질을 만족시키기 위해 금속에 의해 성형되어 왔다. 이에 비해 단일 공정에 의해 이루어지는 플라스틱 사출공정에 의한 제품 성형은 공정단축, 비용절감, 제품경량화 등 상당한 효과를 가져올 수 있어 유리섬유가 43% 강화된 엔지니어링 플라스틱인 Dupont사의 풀리아미드 66(PA66: Zytel 70G43)을 이용하여 Fig. 2에서와 같이 얼터네이터 풀리를 제조하였다. 얼터네이터 풀리 성형품의 두께 편차는 리브 주변의 1.0mm에서 기어 부분의 5mm까지 분포하며, 이러한 큰 두께편차 때문에 Fig. 3에서와 같이 사출금형 설계 시 팬 게이트 시스템이 채택되었다. 이는 성형품의 두께가 두꺼워 짧은 시간 내에 충



Fig. 1 Alternator pulley made of metal

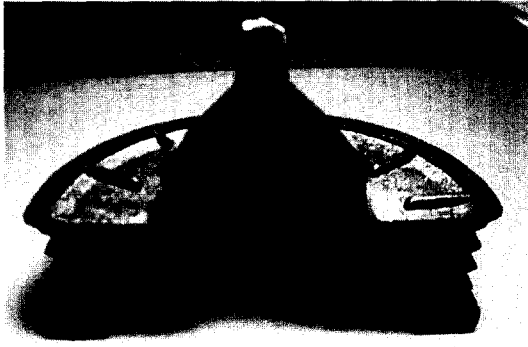


Fig. 2 Alternator pulley made of engineering plastic (PA66 with 43% glass fiber)

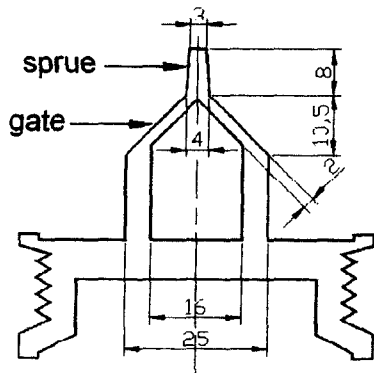


Fig. 3 Schematic diagram of fan gate system

Table 1 Material properties and processing conditions of PA66 with glass fiber of 43%

Item	Value
Conductivity(W/m°C)	0.1759
Melt density(kg/m <sup>3</sup> )	1280.0
Ejection temperature(°C)	210.0
No flow temperature(°C)	233.0
Shrinkage(%)	0.4-0.5
Mold temperature(°C)	50-100
Melt temperature(°C)	270-300
Injection pressure(kg/cm <sup>2</sup> )	800-1,400

전을 하기 위하여 일반적인 측면 팬 게이트가 아

닌 360°방향으로 런너를 가지는 팬 게이트를 채택하였으며, 수지공급업체 및 성형품 제조사와 협의하여 채택하였다. 성형품의 충전 및 보압 공정 해석을 위하여 성형품 모델링이 3차원으로 행해졌으며 성형재료의 기본 물성이 Table 1에 보여진다.<sup>12)</sup>

### 3. 싱크마크 시뮬레이션

성형품의 품질을 정의하는 데는 외관, 치수, 강도 등 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 치수 및 강도와 관련된 성형품의 싱크마크를 품질인자로 규정하였다. 싱크마크란 플라스틱 성형의 가장 대표적인 성형불량으로 리브(rib)부와 웨브(web)의 반대편에 자주 발생하며 이는 성형품의 두께 편차에 따른 냉각불균형으로부터 생기는 국부적인 팽임현상을 말한다. 상용 해석 소프트웨어인 Moldflow를 사용하여 도출된 플라스틱 풀리의 싱크마크를 정량화한 싱크마크의 깊이가 mm 단위로 Fig. 4에 보여지며 본 연구에서는 이렇게 구해진 싱크마크의 깊이를 최소화할 수 있는 사출성형 조건을 다구찌 방법 및 반응표면분석법을 이용하여 구하려 한다. 싱크마크에 영향을 끼치는 인자로는 충전시간, 용융수지온도, 보압, 보압시간, 금형온도, 냉각시간 등의 6가지 공정 변수로 정하여 연구를 수행하였다.

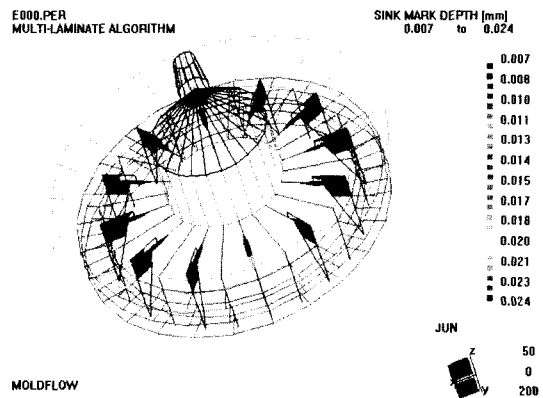


Fig. 4 Simulation result of sink mark of a molded plastic pulley

#### 4. 이론해석

##### 4.1 다구찌 방법의 필요성

사출성형 과정은 여러 가지 인자가 복합적으로 출력인자에 영향을 끼치게 되므로 최적의 성형조건을 선정하기가 매우 어렵다. 따라서 이처럼 복잡한 인자들의 작용 하에 최적의 성형조건을 선정하기 위하여 다구찌 방법을 적용하였다. 제어인자들 중 성형품의 품질 특성치에 영향을 주는 주요 인자를 선정하기 위한 실험을 수행시 성형품의 품질 특성치에 복합적인 영향을 끼치는 인자들에 몇 개의 수준만 정의하여도 (인자수)수준수 만큼의 실험횟수가 필요하지만 다구찌 방법을 적용하면 실험횟수를 줄여 시간 및 경제적 절감을 가져올 수 있을 뿐 아니라 유의인자 선정 후 반응표면분석법 등을 통하여 최적의 인자를 선정할 수 있다.

##### 4.2 입력인자 선정

입력인자로 선정된 6개 공정변수에 대하여 Moldflow에서 사용된 실제 값이 수준이 0 및 1인 경우에 대하여 Table 2에 주어진다. 이때 6개 인자간의 교호작용은 없다고 가정하였다.

##### 4.3 분산분석 수행

직교배열에 의한 실험계획표에 따라 수행된 싱크마크의 깊이 및 SN(Signal to Noise)비에 대한 결과가 Table 3에 보여진다.

6개 입력인자의 유의성 분석을 위한 분산분석

Table 2 Values of parameters for the simulation

Parameters	level 0	level 1
A Mold tem.	50°C	70°C
B Melt tem.	280°C	300°C
C Inj time	0.5sec	0.8sec
D Pack pres.	10MPa	15MPa
E Pack time	5sec	7sec
F Cool time	30sec	40sec

Table 3 Table of orthogonal arrays using  $L_8(2^7)$  and simulation data of sink mark

	Mold tem (A)	Melt tem (B)	Inj time (C)	Pack pr (D)	Pack time (E)	-	Cool time (F)	depth-min	depth-max	y	MSD	Sn
1	0	0	0	0	0	0	0	0.008	0.027	0.0168	0.000	34.17
2	0	0	0	1	1	1	1	0.008	0.025	0.0158	0.000	34.81
3	0	1	1	0	0	1	1	0.008	0.028	0.0174	0.000	33.87
4	0	1	1	1	1	0	0	0.008	0.025	0.0158	0.000	34.81
5	1	0	1	0	1	0	1	0.007	0.027	0.0170	0.000	34.10
6	1	0	1	1	0	1	0	0.007	0.025	0.0160	0.000	34.72
7	1	1	0	0	1	1	0	0.008	0.027	0.0168	0.000	34.17
8	1	1	0	1	0	0	1	0.007	0.027	0.0170	0.000	34.10

Table 4 Analysis of variance of simulation data

	S	$\phi$	V	Fo	$\rho$
Mold tem (A)	0.0392	1	-	-	-
Melt tem (B)	0.09245	1	0.09245	3.98	7.25
Inj time (C)	0.0072	1	-	-	-
Pack pr (D)	0.5618	1	0.5618	24.22	56.36
Pack time (E)	0.13005	1	0.13005	5.61	11.18
Cool time (F)	0.125	1	0.125	5.39	13.08
(e)	0.0464	2	0.0232		12.14
Total	0.9557	6			100.00

결과가 Table 4에 보여지며, F- 검증을 통하여 이루어진 유의인자의 판별은 Fo값이 2보다 크면 유의성이 있다고 판단하여 보압, 보압시간, 냉각 시간 순으로 싱크마크에 유의함을 알 수 있다. 이는 싱크마크가 보압에 지배적인 영향을 받는다는 Naka 등<sup>5)</sup>의 연구와 잘 일치함을 보여준다.

##### 4.4 반응표면분석법

분산분석 결과를 바탕으로 선정된 3 인자에 대하여 수준수를 2 수준에서 5 수준으로 늘려 시뮬레이션을 수행하고 반응표면분석법을 사용하여 인자의 최적 값을 구한다. 반응표면분석(response surface analysis)이란 여러 개의 독립변수  $x_1, x_2, \dots, x_k$ 가 어떤 종속변수  $y$ 에 복합적인 영향을 주어서  $y$ 값에 변화가 있을 때, 이들 간의 함수관

계인  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ 를 나타내는 반응표면을 통계적인 방법으로 분석하는 것을 말한다.<sup>13)</sup> 반응표면분석의 주된 목적은  $y$ 를 가장 좋게 하는  $x_i$  값들의 최적조건을 찾거나, 임의의  $x_i$  값들에서 목적인자인  $y$ 를 예측하는데 있다. 여기서는 앞서 분산분석에서 구한 보압, 보압시간, 냉각시간을 변수로 싱크마크를 최소로 하는 각각의 최적값을 구한다.

독립변수  $k=3$ 인 경우에 3원 배치법에 준하는 실험계획에 의하여 2차 다항회귀모형은 식 (1)과 같다.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{33}x_3^2 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 + \epsilon \quad (1)$$

시뮬레이션은 Fig. 5에서 보여주는 독립변수  $k=3$ 인 중심합성계획법을 적용하여 수행한다.<sup>14)</sup> 중심합성계획법에 따른 싱크마크의 깊이에 대한 입력인자가 Table 5에 주어진다. ( $\alpha=1.5$ )

이를 다항회귀모형에 적용하여 2차 다항회귀

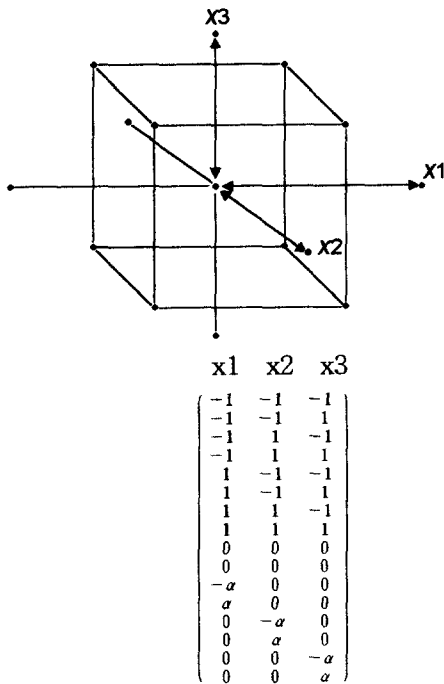


Fig. 5 Central composite design(k=3)

Table 5 Input parameters according to central composite design

	$-\alpha$	-1	0	1	$\alpha$
Pack press	10	10.83	12.5	14.17	15
Pack time	5	5.33	6	6.67	7
Cool time	30	31.67	35	38.33	40

모형을 구하면 각각의  $\beta_{ij}$  값들은 아래와 같으며, 도출된 2차 다항회귀모형의 결과는 식 (2)와 같다.

$$\beta_0 = .02290, \beta_1 = -.00044, \beta_2 = 0, \beta_3 = 0, \\ \beta_{11} = .00032, \beta_{22} = .00010, \beta_{33} = .00010, \beta_{12} = 0, \\ \beta_{13} = 0, \beta_{23} = 0$$

$$y = .02290 - .00044x_1 + .0x_2 + .0x_3 \\ + .00032x_1^2 + .00010x_2^2 + .00010x_3^2 \\ + .0x_1x_2 + .0x_1x_3 + .0x_2x_3 \quad (2)$$

2차 다항회귀모형식을 바탕으로 최속강하법을 적용하기 위해 회귀모형의 각종 제어인자에 대한 편미분으로 구성된 연립방정식을 풀면 정상점이 얻어지는데, 이는 추정 값  $y$ 가 최대, 최소 또는 최대 최소도 아닌 안부점이 될 수도 있어 최적화에 부응하는지의 여부는 다항회귀모형의 2차 미분 값인 헤시안(hessian) 항들을 고려하여 판단할 수 있다. Fig. 6, 7 및 8은 싱크마크의 깊이를 보압, 보압시간 및 냉각시간의 반응표면으로 보여주며, 이렇게 얻어진 최적공정 변수의 값은 보압( $x_1$ ), 보압시간( $x_2$ ) 및 냉각시간( $x_3$ )이 각각 13.64

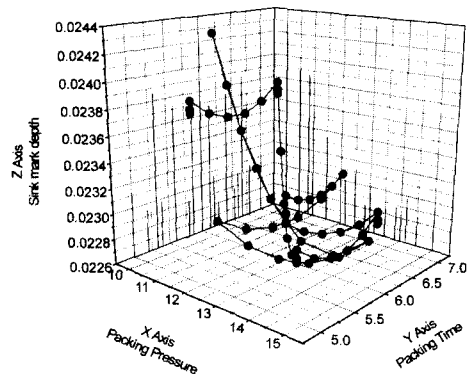


Fig. 6 Sink mark depth according to packing pressure and packing time

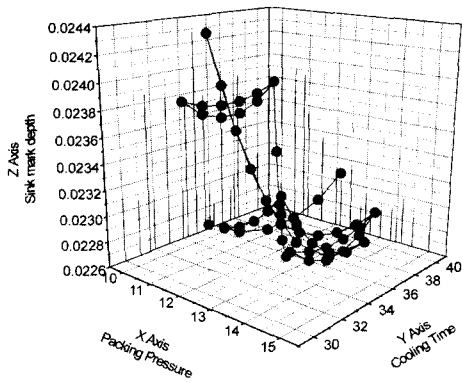


Fig. 7 Sink mark depth according to packing pressure and cooling time

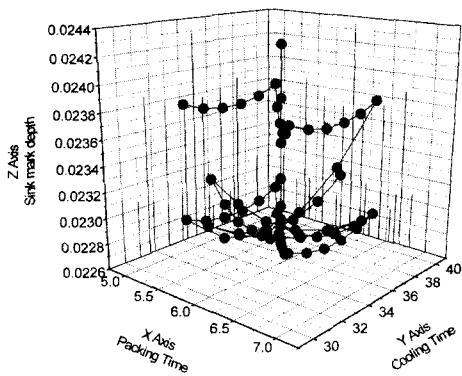


Fig. 8 Sink mark depth according to packing time and cooling time

(MPa), 6.00(sec) 및 35.00(sec)와 같다.

### 5. 결론

지금까지 엔지니어링 플라스틱을 사용하여 성형된 자동차용 얼터네이터 폴리를 대상으로 싱크마크의 깊이를 최소로 하는 최적의 사출성형 공정변수를 다구찌 방법과 반응표면분석법을 이용하여 구하였으며 다음의 결과를 얻었다.

1) 강성 및 내구성 때문에 금속에 의해 제조되던 얼터네이터 폴리를 유리섬유가 43% 함유된 PA66 엔지니어링 플라스틱과 사출성형공정을 적용하여 개발하였다.

2) 사출성형공정의 주요 변수인 충전시간, 용

융수지온도, 보압, 보압시간, 금형온도, 냉각시간 등의 6가지 공정변수들 중 보압, 보압시간 및 냉각시간이 얼터네이터 폴리의 싱크마크 깊이에 영향을 주는 유효한 인자로 분산분석 결과 판명되었다.

3) 싱크마크 깊이와 보압, 보압시간 및 냉각시간 사이에 얻어진 2차 회귀방정식이 반응표면분석법에 의하여 도출되었으며, 최속강하법에 의한 2차 회귀방정식의 최소화로부터 보압이 13.64 MPa, 보압시간이 6초 및 냉각시간이 35초일 경우 싱크마크 깊이가 0.0145mm로 최소화됨을 알았다.

4) 본 논문에서는 싱크마크의 최소화에 대한 최적의 공정변수를 구하였으나, 향후 연구에서는 치수 정밀도나 성형품의 외관 등 모든 품질변수를 포함할 수 있는 다목적함수의 최적화를 통하여 양호한 성형품을 얻을 수 있는 공정조건을 찾아야 한다.

### 참고 문헌

- 1) 신동명, 자동차재료, 형설출판사, pp.280-312, 1996.
- 2) 신보성, 최두선, 심국보, 송선호, 백재현, "자동차 엔진 폴리 성형공정설계에 관한 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp.630-634, 1997.
- 3) 김동진, 정덕진, 김병민, 최재찬, "자동차 냉방기용 내부 폴리의 냉간 단조 공정 설계," 한국자동차공학회논문집, 제5권 제4호, pp. 199-206, 1997.
- 4) 홍명용, 사출성형기술 I, 기전연구소, pp.71-94, 1990.
- 5) H. Naka, I. Takashi, K. Kazuei, "Prediction of Sink Marks in Injection-Molded Plastic Parts using a Localized Shrinkage Analysis near a Rib," JSME International Journal, Vol.30, No.265, 1987.
- 6) M. J. Liou, D. M. Ramachandra, K. Ishii, L. Hornberger, "Sink Mark Study in Injection Molded Parts," ANTEC '90, pp.288-291, 1997.

- 7) G. Taguchi, Introduction to Quality Engineering, American Supplier Institute, Michigan, 1987.
- 8) Q. Zou, G. Ari, R. Hess, "Using DOE Techniques on Molding Simulation to Improve Injection Molded Part Quality," ANTEC '96, pp.736-743, 1996.
- 9) Y. S. Zu, S. T. Lin, "Optimizing the Mechanical Properties of Injection Molded W-4.9% Ni-2.1% Fe in Debinding," Journal of Materials Processing Technology, Vol.71, No.2, pp.337-342, 1997.
- 10) S. H. Dillman, D. Howe, H. Robar, "Optimization of the Injection Molding Process," ANTEC '96, pp.754-758, 1996.
- 11) S. E. Barbosa, J. M. Kenny, "Effects of Processing Conditions on the Microstructure of Polypropylene and its Short Fiber Composites," ANTEC '96, pp.2246-2255, 1996.
- 12) RTP C. O., Company Data Sheet, Floppy Diskette, Ver.3.0, 1999.
- 13) 박성현, 응용실험계획법, 영지문화사, pp.175-195, 1990.
- 14) 박성현, 현대실험계획법, 민영사, pp.631-657, 1984.