

유한요소법과 최적설계 기법을 이용한 고무 사출 금형 히터 배치

김명훈⁺, 한정영⁺, 최은호⁺⁺, 배원병⁺⁺⁺, 강성수⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2010. 9. 7, 심사완료일 2010. 10. 26)

The Arrangement of Heaters for Rubber Injection Molds using FEM and Optimal Design Method

Myung-Hun Kim⁺, Jeong-Young Han⁺, Eun-Ho Choi⁺⁺, Won-Byong Bae⁺⁺⁺, Sung-Soo Kang⁺⁺⁺⁺

Abstract

Temperature control of a rubber injection mold is important for the dimensional accuracy of product. The main objective of this paper is to optimize the arrangement of heaters by FEM and optimal design method. Firstly, 3-dimensional transient heat transfer analysis was carried out for a square specimen mold. Results of FE analysis are a good agreement with the experimental results, showing about 1.22~7.22% error in temperature distribution. Secondly, we suggested the optimal method about an arrangement of heaters of rubber injection mold by using the optimal design technique. Distances between heater's center and the contact surface of mold, distances between heater's center and symmetric surface were considered as design variables. And the variances between the temperatures of cavity surfaces and their average temperature were used as the objective functions. Applying the optimal solution, the temperature variation was improved about 52.9~88.1% compared to the existing mold. As a result of sensitivity analysis for design variables, design variables parallel to the direction of the split plane in mold affect the largest on the surface temperature variation in mold cavity.

Key Words : Rubber Injection(고무 사출), FEM(유한요소법), Heat Transfer(열전달), Design Variable(설계 변수), Objective Function(목적 함수), Optimal Design(최적 설계)

1. 서론

최근 고무 제품의 생산성 향상과 품질의 고급화에 대한 수요가 점차 확대됨에 따라 고무 사출 성형이 도입되고 있다. 사출 성형 가공은 세계적으로 많은 산업 분야에 적용되고 있지만, 일반적으로 사출 성형 가공에 의해 생산된 제품은 성형 후 변

형, 제품 표면의 불량, 기포 등 많은 문제점을 가지고 있다. 특히, 치수정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 제품의 변형은 제품 자체 형상에 의한 변형과 금형 온도, 수지 온도, 사출 압력 등의 성형 조건에 의한 변형으로 주로 발생한다⁽¹⁻³⁾.

고무 사출 성형 공정 중 가황 공정은 고무에 함유된 황에 열을 가해서 고무 분자를 결합시켜 제품의 최종 형상을 만드는

+ 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
++ 부산대학교 대학원 기계설계공학과
+++ 부산대학교 기계공학부
++++ 교신저자, 전주대학교 기계자동차공학과 (sskang@jj.ac.kr)
주소: 560-759 전북 전주시 완산구 효자동 3가 1200번지

주요 공정으로써 제품의 품질에 큰 영향을 미치는데, 이러한 가황 공정에서 금형을 가열하는 방법에는 전기 히터를 사용하는 카트리지 히터 방식이 많이 사용되고 있다⁽⁴⁻⁶⁾.

사출 금형의 캐비티(Cavity) 내부 표면의 온도 편차는 제품의 품질에 큰 영향을 주므로 성형 시 사출 금형의 온도 유지에 대한 연구가 진행되어 왔다^(7,8). 최근에는 설계 시간과 비용 절감의 이유로 유한요소법을 적용하여 효과적으로 금형을 가열하는 방법에 대한 연구가 진행되어 왔다^(9,10).

특히, Li 등은 유한요소법과 최적설계 기법을 적용하여 2차원 열전달 해석을 수행하였다⁽¹¹⁾. 주요 연구 내용으로 금형의 분할 면과 히터 사이의 거리를 설계 변수로 선정하고 금형 표면의 온도 편차를 목적함수로 지정하여 히터의 최적 위치를 선정하였다. 또한 Park 등은 자동차용 안개등 커버의 사출 압력과 힘 변형을 최소화함으로써 사출 성형 품질 향상을 위한 설계 최적화에 대해 연구하였다⁽¹²⁾. Rhee 등은 사출금형 냉각회로 자동 최적화를 위한 설계변수 감소 방안에 대해 연구하였다⁽¹³⁾. 그러나, 실제 사출 성형에 사용되는 금형은 복잡한 3차원 형상이며 가열 장치는 가열 시간에 따라 온도 센서에 의해 열유속(Heat flux)이 제어되는 방식이므로, 실제 가열시간의 변화에 따른 금형의 온도 분포를 얻기 위해 과도 열전달 해석(Transient heat transfer analysis)이 필요하다.

본 연구의 목적은 유한요소법과 최적설계 기법을 적용하여 고무 사출 금형의 히터 배치를 최적화하는 것이다. 먼저 사각 시편 모양의 금형에 대한 3차원 과도 열전달 해석을 수행하고 실험을 통해 검증하였다. 또한 최적설계 기법을 이용하여 히터의 위치를 설계변수로 선정하고 금형 캐비티(Cavity) 표면의 온도 편차를 목적함수로 정하여 히터의 최적 위치를 획득하였다.

2. 유한요소해석

본 장에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 기존의 비교적 단순한 형상인 사각 시편 금형의 3차원 과도 열전달 해석을 수행하여 정상 상태일 때의 금형 캐비티 내부의 표면 온도 분포를 얻고자 하였다⁽¹⁴⁾.

2.1 시편 금형

사각 시편 금형의 형상 및 치수를 Fig. 1에 나타내었다. 금형의 기본 구조는 이동부 및 고정부 금형으로 나누어져 있으며 각 금형의 중심에는 히터 카트리지가 삽입될 구멍이 뚫려 있다. 또한 금형 캐비티 표면에 설치된 센서의 위치를 Fig. 2에 나타내었다. 사각 시편 금형의 재질은 SS400이며, 전도도는 45.0 W/m·K이고, 비열은 434J/kg·K이다.

2.2 유한요소 모델

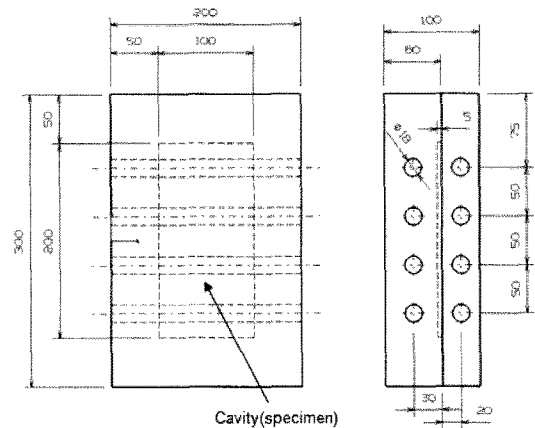


Fig. 1 Dimensions of molds for a square specimen

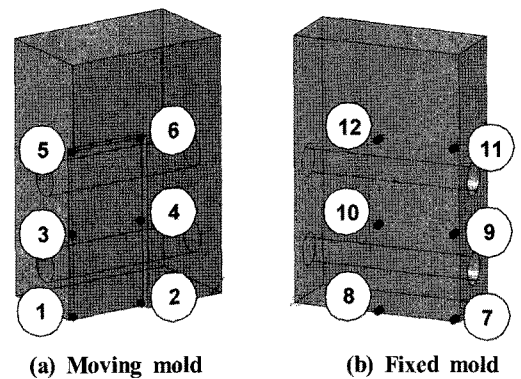


Fig. 2 Locations of temperature sensors

Table 1 Boundary conditions for FE analysis

Type	Transient analysis by control sensor
Heat Flux	55.7 kW/m ²
Convection	10 W/m ² ·K

사각 시편 금형은 대칭 형상이므로 전체 형상의 1/4을 모델링하였다. 사용된 요소는 Solid70(8 node thermal solid)이며 요소의 개수는 11,600개이다. 경계 조건은 실제 사출기를 모사하기 위해 온도 제어 센서의 온도에 따라 열유속을 제어하는 방식으로 수행하였으며, ANSYS의 APDL(ANSYS Parametric Design Language) 명령어를 사용하여 온도 경계 조건을 제어하였다.

목표 온도 150℃까지 가열한 후 2초 단위로 실제 사출기의 온도제어센서의 위치에서 온도를 계산하여 기준온도 150℃보다 높을 경우 하중을 해제하고 낮을 경우 다시 하중을 부가하는 방법으로 온도 제어를 하여 1,800초 까지 유지하였다. Table 1에는 경계 조건을 나타내고 있으며, Fig. 3은 사각 시편 금형 전체의 1/4 유한요소모델로 상부와 후부, 좌우 측면부에 대한 자연 대류 열전달 경계 조건과 히터 카트리지가 삽입 구멍 및 후부에 대한 대칭 조건을 나타내고 있다.

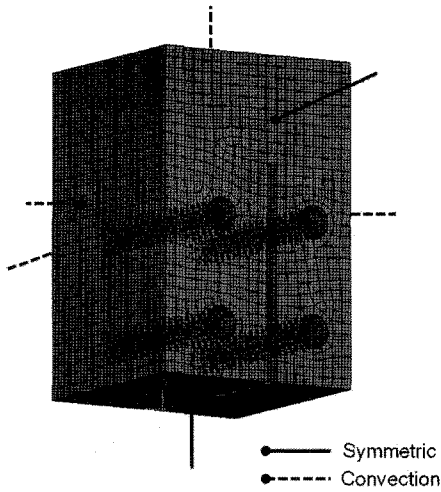


Fig. 3 FE model and boundary conditions

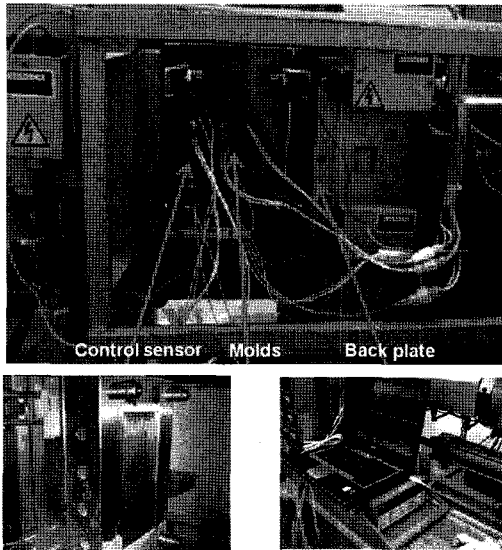


Fig. 4 Equipment and molds for rubber injection

Table 2 Experimental conditions for injection

	Conditions	Note
Curing Temp.	150°C	Setting Temp.
Screw Temp.	80°C	
Injection Time	8 sec	Pressure 40 kg/cm ²
Curing Time	180 sec	

3. 실험

3.1 실험 장치

사각 시편 금형의 사출 실험에 사용된 고무사출기와 금형 및 데이터 수집 장치를 Fig. 4에 나타내었다.

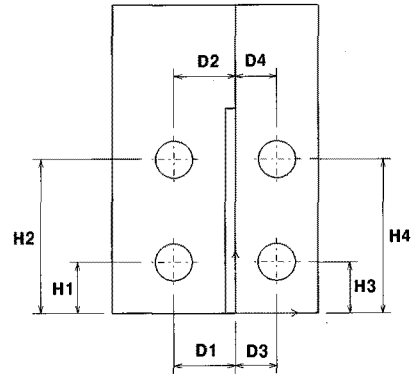


Fig. 5 Design variables

Table 3 Side constraint of design variables [mm]

Design variables	Lower bounds	Initial values	Upper bounds
H1	9	25	41
H2	43	75	107
H3	9	25	41
H4	43	75	107
D1	20	30	40
D2	20	30	40
D3	15	20	25
D4	15	20	25

3.2 실험 방법

온도 측정은 1/4 대칭인 시편 형상을 고려하여 각 고정 측 및 이동 측 금형에 각각 6개씩 12개의 온도 센서를 캐비티 표면에서 1mm 깊이에 설치하여 히터 가열에 따른 캐비티 표면의 온도를 측정하였다. 온도 센서는 K 타입 열전대를 이용하였고 데이터 수집 장치로 Agilent사의 34970A를 이용하여 1초 간격으로 측정하였다. 사출 실험 조건은 Table 2에 나타내었다.

4. 최적 설계

유한요소법과 최적화 기법을 이용하여 히터 배치에 관한 최적 해를 구하였다. 최적화 프로그램으로 상용유한요소 해석 툴인 ANSYS를 사용하였다⁽¹⁵⁾.

4.1 설계 변수

사각 시편 금형의 각 히터 배치의 설계 변수를 Fig. 5에 나타내었으며 설계 변수의 초기 값과 상하한 값을 Table 3에 나타내었다. 설계 변수의 초기 값은 설계변경 전의 값을 입력하였으며 설계 변수의 상하한 값은 히터의 위치가 금형 내에서 최대한 자유롭게 이동이 가능하도록 설정하였다.

4.2 상태 변수 및 목적 함수

상태 변수는 금형 캐비티 표면 절점들의 평균온도로 설정하였으며 목적 함수는 캐비티 표면 절점의 온도의 분산 값으로 정하였다. 이에 따른 히터 배치의 최적 설계를 정식화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find} && b_k \in R^n \\
 &\text{Minimize} && f(b_k) = \sum_i^n (T_i - \bar{T})^2 / n \quad (1) \\
 &\text{Subject to} && b_{k,L} \leq b_k \leq b_{k,U} \\
 &&& k = 1, A, 8
 \end{aligned}$$

여기서, b_k 는 n 개의 설계 변수, f 는 목적함수, T_i 와 \bar{T} 는 금형 캐비티 표면 절점의 온도와 평균 온도를 의미하며, $b_{k,L}$ 과 $b_{k,U}$ 는 각각 설계변수의 하한 및 상한 값을 나타내고, n 은 표면 절점의 전체 절점 수를 나타낸다.

4.3 최적 설계 방법

설계 변수인 히터들의 수평 및 수직 위치를 계속 변화시켜가면서 유한요소해석을 수행하여 목적함수인 금형 캐비티 표면의 평균온도가 최소가 되는 히터의 위치를 탐색하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 유한요소해석 및 실험

사각 시편 금형의 유한요소해석과 실험 결과금형 캐비티 내부의 표면 온도를 Table 4와 Fig. 6에 나타내었다. 유한요소해석과 실험에 의한 12개의 센서의 온도 값은 유사한 경향을 보

Table 4 Results of FEA and experiment [°C]

Sensor	FEA	Experiment	Error(%)
1	151.4	158.3	4.34
2	151.5	156.2	3.03
3	150.1	155.2	3.30
4	150.0	153.4	2.19
5	146.1	139.8	4.49
6	145.9	139.1	4.89
7	153.0	157.2	2.70
8	151.8	156.1	2.74
9	151.4	154.2	1.84
10	150.4	152.2	1.22
11	146.3	136.4	7.22
12	146.0	137.2	6.38
Max. Diff.	7.1	21.9	-

이고, 약 1.22~7.22%의 오차를 보이며 대체로 잘 일치하였다. 그러나 센서 5, 6, 11, 12에서는 비교적 큰 온도 차이를 보였는데, 이곳들은 두 개의 금형이 만나는 부위이며 금형 사이의 열 접촉 저항을 고려하지 않아서 발생한 것으로 간주된다.

유한요소해석에 의한 금형의 온도 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 금형의 외부는 대류에 의해 온도 분포가 낮게 나왔으며 금형 캐비티 내부 표면의 온도 편차를 보이고 있다.

5.2 최적 설계

최적설계 기법을 이용하여 얻어진 설계변수의 최적 해를

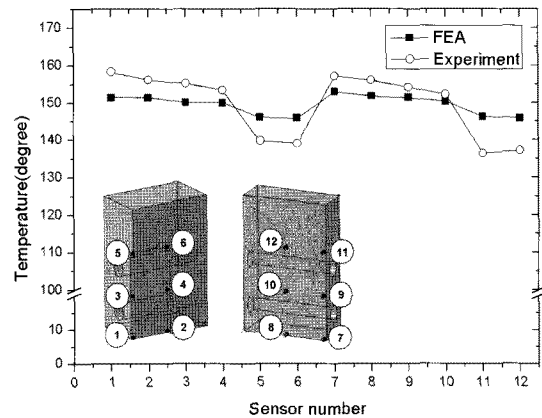
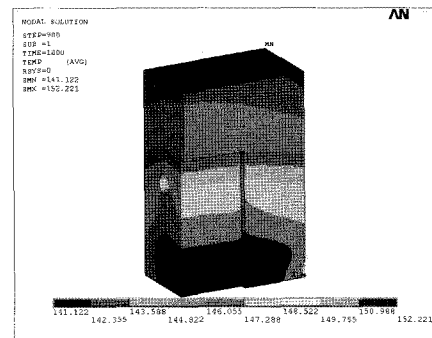
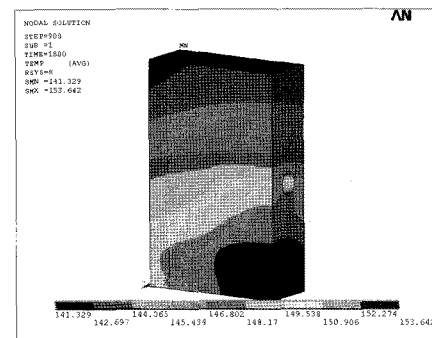


Fig. 6 Temperature distributions at the sensors



(a) Moving mold

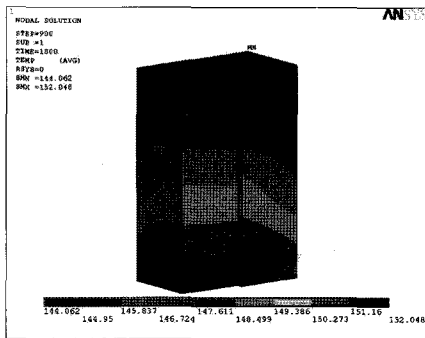


(b) Fixed mold

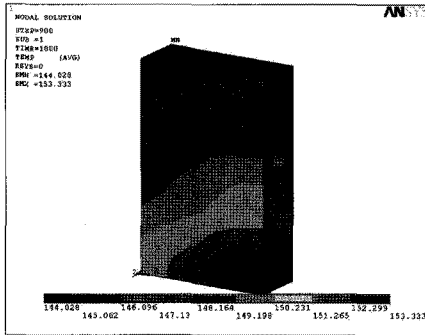
Fig. 7 Temperature distributions of present molds

Table 5 Results of optimization

Design variables	Initial	Optimum
H1	25	23.0
H2	75	99.4
H3	25	19.2
H4	75	88.2
D1	30	35.5
D2	30	34.1
D3	20	16.0
D4	20	20.8



(a) Moving mold



(b) Fixed mold

Fig. 8 Temperature distributions of optimum molds

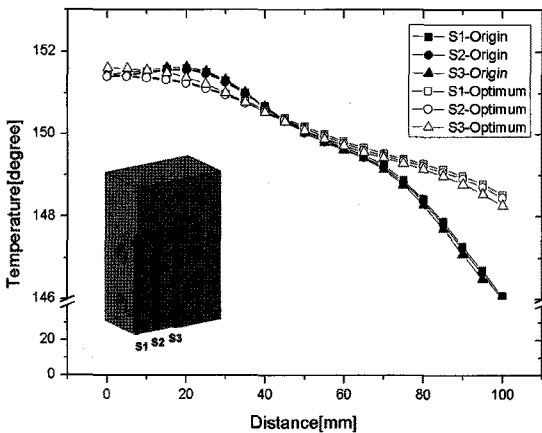


Fig. 9 Temperature distributions of moving mold

Table 5에 나타내었다. 그리고 최적 해를 적용하여 얻은 온도 분포를 Fig. 8에 나타내었다.

기존 시편 금형과 최적 해를 적용한 금형의 캐비티 내부 표면 온도를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다.

금형 캐비티 표면에서의 최대 온도 편차를 Table 6에 나타내었으며, 최적화 해석을 적용한 금형은 기존 금형보다 금형 캐비

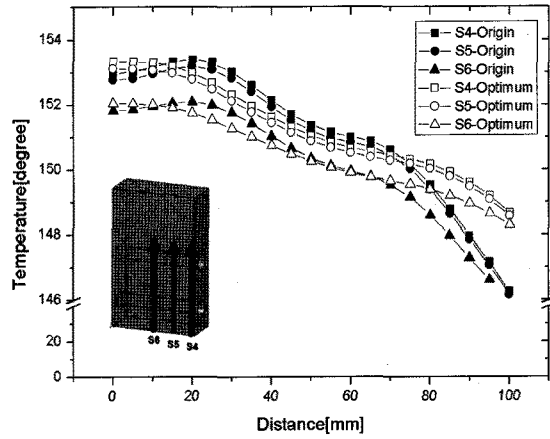


Fig. 10 Temperature distributions of fixed mold

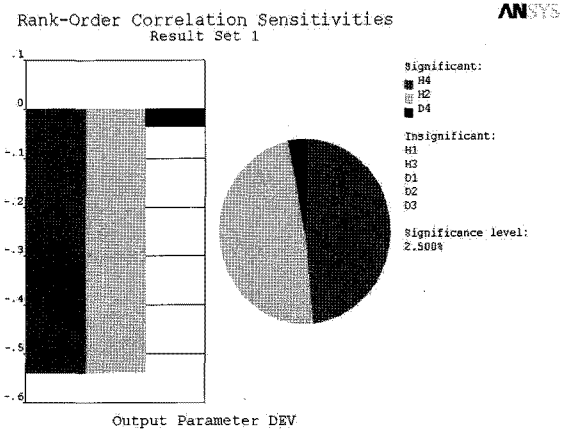


Fig. 11 Sensitivity of design variables

Table 6 Maximum temperature differences of mold cavity surfaces

Design variables	Max. Temp. Diff. (°C)		Error%(*)
	Initial	Optimum	
S1	4.89	2.89	69.2
S2	5.55	2.95	88.1
S3	5.66	3.34	69.5
S4	7.14	4.67	52.9
S5	7.02	4.45	54.6
S6	6.13	3.75	63.5

(*) : Error% = (Initial-Optimum)/Initial×100

티 표면의 최대 온도 편차가 52.9~88.1%가 개선되었다.

히터 배치의 설계변수의 민감도 분석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 민감도 주요 수준 2.5% 이상인 설계변수는 H2, H4, D4로 나타났으며 나머지 설계변수(H1, H3, D1, D2, D3)의 민감도 주요 수준 2.5% 이하로 극히 미미하였다.

설계변수 중 금형의 분할 면과 평행한 설계 변수인 H2와 H4가 캐비티 표면의 온도 편차에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 고무 사출 금형 캐비티 표면의 온도 편차를 최소화하기 위해 유한요소법과 최적설계 기법을 이용하여 사각 시편 금형의 히터 배치를 최적화하였으며 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 사각 시편 금형의 3차원 과도 열전달 해석을 수행하였으며 실제 실험으로 검증한 결과 온도 분포는 약 1.22~7.22%의 오차를 보이며 잘 일치하였다.
- (2) 유한요소법과 최적설계 기법을 적용하여 히터의 위치와 관련된 8개의 설계변수를 선정하고 금형 캐비티 표면의 온도 편차를 목적함수로 하여 최적화 해석을 수행하였으며 히터의 위치 변수에 대한 최적 해를 적용한 금형은 기존 금형보다 온도 편차가 52.9~88.1% 개선되었음을 알 수 있었다.
- (3) 히터 배치의 설계변수에 대한 민감도 분석 결과, 금형의 분할 면과 평행한 방향의 설계 변수가 금형 캐비티 표면 온도 편차에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- (1) Chang, R. Y., and Tsaur, B. D., 1995, "Experimental and theoretical studies of shrinkage, warpage, and sink marks of crystalline polymer injection molded parts," *Polymer Engineering & Science*, Vol. 35, No. 15, pp. 1222~1230.
- (2) An, C. C., and Chen, R. H., 2008, "The experimental study on the defects occurrence of SL mold in injection molding," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, No. 1-3, pp. 706~709.
- (3) Hamada, H., and Tsunasawa, H., 1996, "Correlation between flow mark and internal structure of thin PC/ABS blend injection moldings," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 60, No. 3, pp. 353~362.

- (4) Weelans, M. A., 1974, *Injection Moulding of Rubber*, Halsted Press, New York.
- (5) Johannaber, F., 1985, *Injection Moulding Machines: A Users' Guide*, Carl Hanser, Munich.
- (6) Han, J. B., 2005, *Injection mold forming technology*, Technology information, Korea.
- (7) Chen, S. C., Jong, W. R., and Chang, J. A., 2006, "Dynamic mold surface temperature control using induction heating and its effects on the surface appearance of weld line," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 101, No. 2, pp. 1174~1180.
- (8) Juang, C. F., Huang, S. T., and Duh, F. B., 2006, "Mold temperature control of a rubber injection-molding machine by TSK-type recurrent neural fuzzy network," *Neurocomputing*, Vol. 70, No. 1-3, pp. 559~567.
- (9) Bang, Y. S., Jang, J. H., Kim, H. J., Kim, N. K., and Hwang, B. Y., 2004, "Development of heat oil system for reduction of temperature deflection of up and lower heat plate of rubber injection molding machine," *Proceedings of KSMPE autumn conference*, pp. 241~245.
- (10) Chang, P. C., and Hwang, S. J., 2006, "Simulation of infrared rapid surface heating for injection molding," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 21-22, pp. 3846~3854.
- (11) Li, X. P., Zhao, G. Q., Guan, Y. J., and Ma, M. X., 2009, "Optimal design of heating channels for rapid heating cycle injection mold based on response surface and genetic algorithm," *Materials and Design*, Vol. 30, No. 10, pp.4317~4323.
- (12) Park, C. H., Ahn, H. J., Choi, D. H., and Pyo, B. G., 2010, "Two-stage design optimization of an automotive fog blank cover for enhancing its injection molding quality," *Transactions of KSME (A)*, Vol. 34, No. 8, pp. 1097~1103.
- (13) Rhee, B. O., Choi, J. H., and Tae, J. S., 2009, "Reduction of Design Variables for Automated Optimization of Injection Mold Cooling Circuit," *Journal of the KSMTE*, Vol. 18, No. 4, pp. 417~422.
- (14) Moaveni, S., 2003, *Finite Element Analysis : Theory and Application with ANSYS*, Pearson Education inc., New Jersey.
- (15) Cho, H. N., Kim, J. H., Jung, J. S., Min, D. H., Park, M. Y., and Lee, J. S., 2008, *Optimum Structural Design*, Goomi Publications Inc., Korea.