

공정 모니터링 시스템을 이용한 최적 사출 조건 설정

강종근¹· 조영기¹· 장형건¹· 이병옥[#]

Optimum Injection Molding Condition Search With Process Monitoring System

J. K. Kang, Y. K. Cho, H. K. Chang, B. O. Rhee

(Received November 16, 2006)

Abstract

Optimum injection molding condition for a box mold was searched by the Response Surface Analysis(RSA) with the aid of process monitoring system(PMS). Process variables on the control panel of the injection molding machine such as barrel temperatures, screw speed profile, holding pressures, etc. cannot guarantee the uniformity of the material variables directly related with the state of the product in the mold cavity. In order to make sure the state of the resin in the cavity, pressures and temperatures in the cavity, runner and nozzle were monitored in the experiment with the PMS. To accomplish the consistency of the molding process, dependent variables such as the switchover point and holding time were searched with the PMS. With a proper objective function about deflection of the box-type product, the optimum injection molding condition was obtained.

Key Words : Injection Molding, Response Surface Method, Process Monitoring System, Optimal Condition, Injection Molding Condition

1. 서 론

사출 성형 제품의 품질에 대한 중요성이 증가하고 있다. 그에 따라 최적의 사출 조건을 찾으려는 노력도 많이 하고 있는 상황이다. 최적 사출 조건을 찾는 방법 중에서 현재 가장 많이 사용하는 방법은 실험 계획법을 이용한 방법으로 공정 조건과 제품 품질과의 관계를 실험 계획법으로 찾아서 최적 조건을 찾는 방법이다. 그러나, 실험 계획법을 적용하여 실험을 진행할 때 공정변수 설정에 문제가 있다는 것을 지적할 수 있다.

공정과 관련된 수많은 변수들이 공정변수로 분류될 수 있고, 또 많은 실험에서 이와 같이 다양한 공정변수의 설정이 무분별하게 이루어지고 있

다. 공정변수를 사출성형기 제어반에서 설정할 수 있는 기계변수와 실제 수지의 변화와 직접적인 관련을 가진 재료변수로 나누어 볼 수 있다. 기계변수는 스크루 회전 속도부터 시작해서 냉각 시간까지 사출기에서 설정이 가능한 모든 변수라고 할 수 있고, 재료변수는 재료와 관련된 변수라고 정의할 수 있다(Fig. 1)[1]. 금형 내부의 수지의 상태와 직접적인 관련을 가지는 재료변수로는 수지 온도, 수지 압력, 수지 선단속도 등을 들 수 있다. 제품의 품질이 균일하기 위해서는 재료변수가 균일하여야 할 것이다. 하지만 재료변수는 사출성형기에서 쉽게 설정될 수 없으며 측정도 어렵다. 따라서, 균일하고 정확한 재료변수의 확인을 위해서는 금형 내부의 압력과 온도 등을 측정하여 이를

1. 아주대학교 기계공학과
교신저자: 아주대학교 기계공학과,
E-mail: rhex@ajou.ac.kr

기준으로 상태를 판단하여야 할 필요성이 있다.

사출성형 실험에서 제어변수로서 조절하는 것은 재료변수가 아니라 기계변수이다. 기계변수 또한 모든 기계변수를 독립적으로 조절할 수 있는 것은 아니다. Table 1에서 분류한 것과 같이 기계변수는 독립변수, 종속변수 그리고 제한변수로 분류할 수 있다. 공정최적화 실험을 위한 제어변수로는 기계변수 중 독립변수로 분류된 것만이 채택될 수 있으며, 종속변수와 제한변수로 분류된 것은 상황에 따라 맞추어 주어야 한다. 이와 같이 종속변수와 제한변수를 정확하게 찾기 위해서도 사출성형기와 금형 내부의 압력과 온도를 정확하게 측정할 필요가 있다.

Table 1 Classification of process variables

Machine variables		Material variables
Independent variables	Nozzle temperature	Resin temperature
	Injection velocity	
	Coolant temperature	
	Hold pressure	Melt front speed
Cooling time		
Dependent variables	Switch-over time	Resin pressure
	Hold pressure time	
Constraint variables	Injection pressure	Resin pressure
	Hold pressure velocity	

본 연구에서는 사각 상자형상 제품을 대상으로 사출성형기와 금형 내부 상태를 정확하게 측정하여 주는 공정모니터링 시스템을 적용하여 공정최적화 실험을 진행하였다. 기계변수 중에서 제품 품질에 영향이 크다고 알려진 노즐 온도, 사출 속도, 보압 크기를 제어변수로 사용하였고, 관리 지수로는 사각 상자형상 제품에서 중요하게 여겨지는 중량과 벽면 휨변형을 선택하였다[2~4]. 최적화를 위한 방법으로는 실험계획법 중 반응표면분석법을 선택하였다.

2. 사출 조건

2.1 제어변수로서의 사출조건

2.1.1 노즐 온도

노즐 온도는 수지의 온도에 영향을 주고 이는 다시 수지 점도에 영향을 준다. 따라서 노즐 온도

는 수지의 유동성에 직접적으로 영향을 주는 인자로서 제어변수로 채택하였다.

2.1.2 사출 속도

사출속도는 가능한 빠른 것이 바람직하다고 알려져 있다. 이는 균일한 냉각으로 인한 제품 내부의 잔류응력을 최소화하고자 함이지만, 지나치게 높은 사출속도는 제품 내 배향을 증가하고 게이트 등과 같은 제한적인 유로에서 지나치게 높은 전단응력을 발생하여 수지 분자의 열화를 유발할 수 있으므로 적절한 사출속도의 선정이 중요하다. 불균일한 냉각속도 분포와 배향에 의한 잔류응력은 제품 변형에 직접적으로 영향을 주는 요소이기도 하다.

2.1.3 보압 크기

보압은 제품 수축에 가장 큰 영향을 미치는 인자로서 알려져 있다. 보압을 크게 하여 생산한 제품이 그렇지 않은 제품에 비해 수축이 적게 나오지만, 지나친 보압은 게이트 주변과 게이트에서 멀리 떨어진 부위의 잔류응력을 증가시켜 제품 변형의 원인이 되기도 한다.

2.2 종속변수로서의 사출조건

2.2.1 보압절환 시점

보압절환 시점은 사출성형기가 속도 제어에서 압력 제어로 변환되는 시점이다. 일반적으로 스크루의 위치를 기준으로 정해진다. 원칙적으로 보압절환은 용융수지가 금형 충진을 완료하였을 때 이루어져야 한다. 따라서 금형 충진이 완료되는 시점을 찾아야 한다는 점에서 독립적으로 제어가 가능한 변수로 볼 수 없다.

충진 완료 시점은 정확하게 알기 어렵기 때문에 기계변수를 통한 정확한 설정도 어렵다. 예를 들어 수지 온도가 기준보다 높아진 경우, 수지의 팽창으로 배럴 내부의 수지 체적은 기준보다 커져 있는 상태로서 설정된 스크루 위치에서 보압절환이 이루어진다면 이미 금형을 다 채운 후에 들어오는 수지로 인하여 금형 내부 압력이 급격하게 증가하여 기준을 초과하는 현상이 발생할 것이다. 이렇게 기준을 초과한 압력 발생은 금형 내부에 과보압을 유발하고 이는 제품에 영향을 주어 내부 잔류응력을 증가하는 원인이 될 것이다. 이러한 현상은 금형 내부 압력 측정을 통해서 이미 알려진 현상으로서 제품에 악영향을 주고

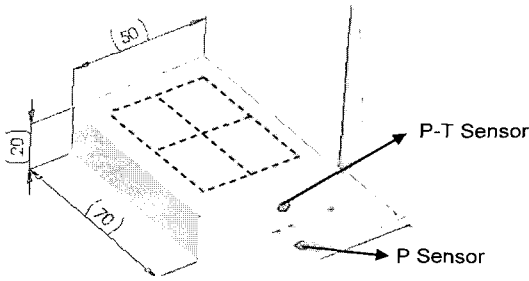


Fig. 1 Test specimen and sensor locations

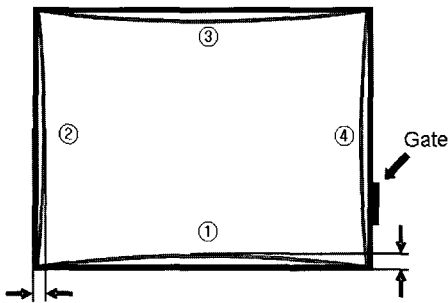


Fig. 2 Definition of deflections

있다. 이런 점에서 보압절환 시점은 적정한 수준을 찾아서 설정하여야 하는 중속변수로서의 의미가 강한 변수이다.

2.2.2 보압시간

보압시간은 보압절환 시점부터 게이트가 고화되어 더 이상 압력이 제품으로 전달 될 수 없는 시점까지의 시간으로 정의된다. 게이트가 고화된 후에는 보압에 의해 들어가던 수지가 더 이상 들어갈 수 없다. 냉각되면서 부피가 줄어드는 양만큼 수지를 보충해주는 것이 보압의 의미임을 생각해 보면, 게이트가 고화될 때까지 보압시간을 설정하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 게이트가 고화되는 시간은 수지에서 급형으로의 열전달 과정에서 결정이 되는 것이므로, 제어되는 변수가 아니다.

3. 실험

3.1 실험 준비

실험에 사용한 제품은 Fig. 1에 보이는 사각 박스 모양의 제품이며 사용한 수지는 talc가 20% 섞인 Polypropylene(MT62CP, GS-Caltex)이다. Arburg사

의 25톤 유압식 사출기를 사용하였고, 센서의 위치는 일반적인 센서 설치 기준에 따라 게이트 전후 위치와 노즐에 설치하였다. 설치된 센서는 Table 2과 같다.

Table 2 Sensors in the experiment

Location	Kistler Sensor Type
Nozzle (PT)	4083A
Runner (P)	6157B
Cavity (PT)	6190A

실험의 제어 변수로 노즐 온도와 사출 속도, 보압 크기를 선정하였고, 제품 중량과 Fig. 2에서 보이는 상자의 아래쪽 벽면 휨변형을 관리 치수로 선정하였다.

공정최적화를 위한 방법으로서 반응 표면분석법을 실험에 사용하였다[5~6]. 실험 조건은 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Test Conditions

Order	HP [bar]	IV [ccm/s]	NT [°C]
1	200	24.8	215
2	600	24.8	215
3	200	44.8	215
4	200	44.8	215
5	600	34.8	200
6	200	34.8	200
7	600	34.8	230
8	200	34.8	230
9	400	24.8	200
10	400	44.8	200
11	400	24.8	230
12	400	44.8	230
13	400	34.8	215
14	400	34.8	215
15	400	34.8	215

HP: Hold pressure, IV: Injection velocity
NT: Nozzle temperature

3.2 실험

기계변수를 설정한 상태에서 급형 내부 수지 상태의 안정여부를 판단하는 방법으로서 노즐과 캐비티의 최고 온도를 이용하였다. Fig. 3에 나타난 것처럼 실험 조건을 설정하고 사출을 시작하면, 앞의 실험 조건에 따라 노즐의 온도와 캐비티의

공정 모니터링 시스템을 이용한 최적 사출 조건 설정

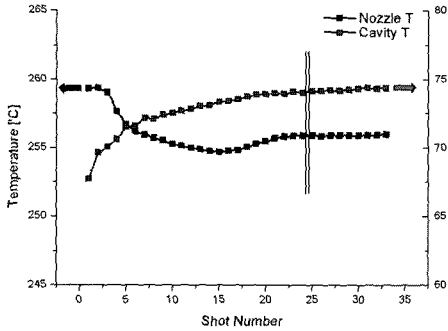


Fig. 3 Stability check with peak temperatures

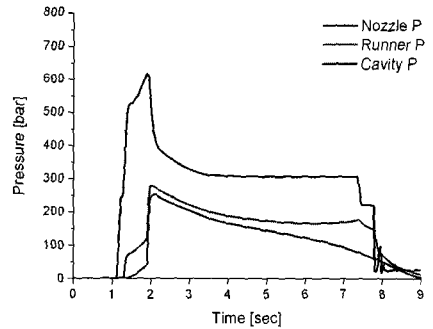


Fig. 6 Proper switch-over time

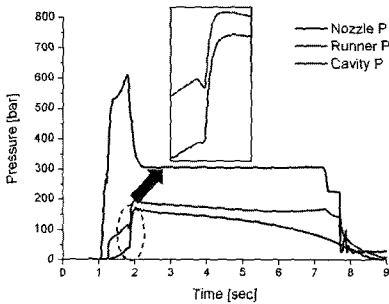


Fig. 4 Early switch-over time

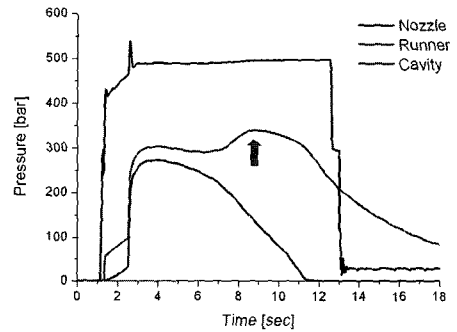


Fig. 7 Holding time setting

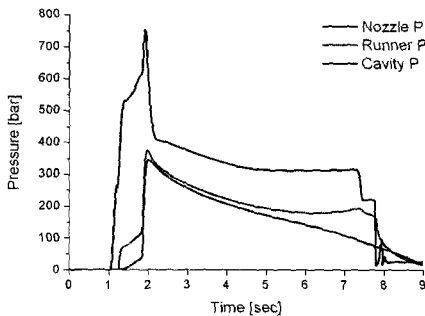


Fig. 5 Late switch-over time

온도가 변하게 된다. 각 샷에서 최고 온도를 측정하여 이전 샷과 측정온도 차이가 0.5°C 이내로 들어왔을 때부터 시편을 채취하였다.

보압 절환 위치

온도가 안정화 된 후, 보압 절환 위치를 정하였다. 보압은 스크류를 뒤에서 밀고 있는 유압 실린더에 의해서 제어되는데, 유압은 컨트롤 밸브에서 개방식 조절을 하고 있어 높은 압력이 걸려도 설정값을 유지할 수 있지만, 노즐과 캐비티의 압력은 폐쇄압력이므로 일단 높아지면 낮게 조정되지

못한다. 압력 측정에서 나타나는 런너와 캐비티의 압력 패턴을 이용해서 적절한 보압 절환 위치를 찾았다.

충진이 완료되기 이전에 보압절환이 발생하는 경우 설정된 보압에 의해 나머지 금형 공간이 채워지게 된다. 이 경우 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 금형 내부 압력이 보압절환 시점 이후 급격하게 저하되었다가 서서히 회복되는 현상이 나타나는데 이는 빠른 속도로 금형을 채우던 용융수지 선단이 갑자기 멈추었다가 서서히 움직이고 있다는 것을 보여준다. 이런 경우 용융수지 선단속도 차이로 인한 표면 불량 및 냉각속도 차이로 인한 문제가 발생할 소지가 있다.

반대로 보압절환 시점이 정상보다 늦은 경우 Fig. 5에서 보이듯이 금형 내부 압력이 급격하게 비정상적으로 치솟는 현상이 발생한다. 이는 충진이 완료된 후에도 스크류는 계속 설정된 사출속도로 밀고 있음으로써 정상적인 보압보다 대단히 높은 압력으로 수지를 밀고 있으며 이 압력은 보압으로서 작용하여 정상적인 보압보다 매우 높은 보압이 작용한 것과 같은 효과를 나타낸다. 이렇

게 발생한 과보압은 금형 내부에서 빠져나가지 못하고 남게 되면서 제품에 과보압으로 인한 잔류응력을 형성하게 되어 악영향을 주게 된다.

본 실험에서는 모니터링 시스템을 이용하여 각 실험조건마다 Fig. 6에서 보는 것과 같은 적절한 보압절환 위치를 결정하였다.

보압시간

게이트가 덜 고화되어 압력 전달이 가능한 상태에서 느리지만 유동이 발생하고 있다면 런너의 압력은 동압으로 인한 압력 저하가 발생한다. 보압이 완료되어 가면서 유동이 정지되는 시점에서는 Fig. 7에서 보이듯이 정압으로서 런너 내부 압력의 회복이 관찰된다. 게이트가 고화되어 런너에서 캐비티로 압력 전달이 중단되면 런너에서 발생하는 압력 변화가 캐비티에서는 나타나지 않게 된다. 이런 점을 근거로 보압시간을 설정하였다. 적정 보압시간보다 긴 보압시간을 준다고 해도 제품 품질에 즉각적인 영향은 없지만, 사출성형 사이클 시간을 증가시키고 불필요한 에너지를 사용함으로써 효율적이지 못한 공정이 될 것이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 힘 측정 방법

휨변형 측정 방법을 Fig. 8에 나타내었다. 제품 하단 벽면의 휨변형량을 측정하기 위한 가장 간단한 방법은 벽면 중앙지점의 힘을 측정하면 될 것이다. 하지만, 이 경우 중앙 지점이 가장 휨이 큰 지점이라는 확신이 없는 상태에서 오차를 유발할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 한 벽면에서 4 지점을 측정한 후 이를 수학적 함수로 근사하고 최대 휨변형량을 계산하는 방식으로 휨변형량을 결정하였다. 변형량 측정에는 접촉식 3차원

측정기를 이용하였으며 한 모서리당 동일 Z 좌표 상에 있는 4 점씩을 측정하였다. 측정된 포인트를 최소 자승법을 사용하여 2차 함수 곡선을 구한 후, 총 4개의 2차 함수 곡선의 교점을 시편의 꼭지점으로 가정하였고, 구해진 4개의 꼭지점을 잇는 직선을 제품의 모서리로 가정하여 휨변형량을 구하였다.

4.2 제어변수의 민감도 분석

제어변수 3개의 휨변형량에 대한 영향도 분석을 실시하였다. 영향도 분석은 얻어진 반응표면에 대해 MINITAB에서 제공하는 Contour graph를 이용하여 특정 제어변수 2개의 비교를 함으로써 이루어졌다. 벽면의 번호는 Fig. 2에 나타난 번호를 따랐으며 제어변수 비교는 보압과 사출속도, 사출속도와 노즐온도, 노즐온도와 보압의 조합으로 실시되었다. 특정 제어변수 2개의 비교에서 나머지 제어변수는 중앙값으로 고정되었다.

각 벽면의 휨변형량에 대한 제어변수의 영향도는 각 벽면을 흐르는 용융수지의 흐름방향, 보압을 받은 정도, 냉각의 영향 등에 따라 서로 다르게 나타났으며 전체적으로 휨변형량에 대한 절대적인 영향도를 보이고 있는 제어변수는 없었다.

용융수지의 유동이 지배적이지 않은 벽면 2와 벽면 4의 경우 사출속도의 영향도가 낮게 나타났으며, 벽면 1과 벽면 3의 경우에는 사출속도의 영향도가 높게 나타났으며 노즐온도의 영향도가 가장 낮게 나타났다. 그 중에서도 게이트에 가까운 벽면인 벽면 1이 상대적으로 보압의 영향도가 크게 나타났다. 사출속도의 영향도가 높게 나타났다는 것은 유동에 의한 배향현상이 휨변형량에 영향을 주었을 것으로 추정된다.

게이트에서 가장 거리가 먼 벽면 2의 경우 3가지 제어변수의 영향도가 크게 다르지 않았다. 이는 유동이 멈추는 지점이기도 하고 보압을 가장 적게 받는 부위이기도 한 결과라고 판단된다. 게이트와 가장 가까운 벽면 4의 경우 사출속도보다는 보압과 노즐온도의 영향도가 높은 것으로 나타났다. 벽면 4의 경우 보압을 가장 오랜 시간 동안 받으며 높은 온도를 유지하는 시간이 길기 때문에 유동에 의한 배향이 발생하였다고 하더라도 충분히 이완될 수 있었을 것으로 판단된다. 영향도 분석에서 사용한 Contour graph 중 영향도가 비슷한 경우와 절대적으로 차이가 나는 경우에 대한 예를 Fig. 9에 나타내었다.

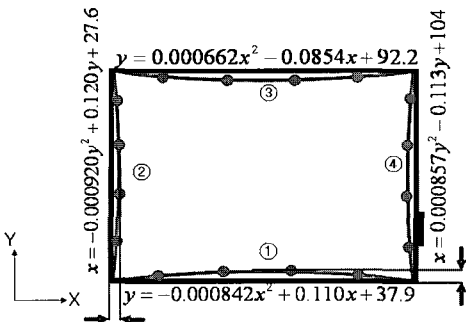


Fig. 8 Measurements of deflection

D2 vs Nozzle Temperature, Injection Velocity

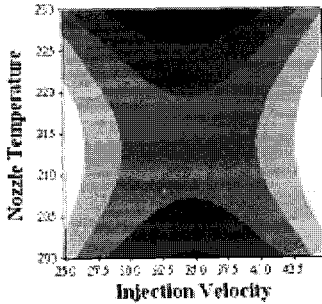


Fig. 9(a) Contour graph with similar influences

D4 vs Injection velocity, Hold Pressure

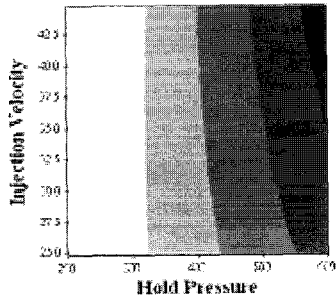


Fig. 9(b) Contour graph with a dominant factor

4.3 최적 공정조건 도출

상용 통계 프로그램인 MINITAB을 사용하여 3개의 제어 변수로 이루어진 4개의 횡변형량에 대한 반응표면을 생성하였다. 최적 공정조건 도출을 위한 목적함수는 4개의 횡변형량의 합으로 구성된 목적함수를 설정하여 사용하였다. 게이트가 위치한 벽면과 마주보는 벽면은 옆 벽면에 비해 길이가 짧고 배향에 의한 힘이 상대적으로 적게 나타날 수 있는 조건을 가지고 있다. 제품품질에 대한 횡변형량의 영향은 옆 벽면이 상대적으로 클 것으로 판단하였다. 따라서, 본 연구의 최적화를 위한 목적함수는 옆 벽면의 횡변형량의 가중치를 80%로 높은 상태로 만들었으며 양 옆 벽면의 횡변형량에 동일한 가중치를 부여하여 설정하였다. 그러나, 본 연구와 달리 원하는 목적과 상황에 따라 목적함수는 얼마든지 다른 형태로 설정이 가능하다. 본 연구에서 설정된 목적함수는 다음과 같다.

$$D = 0.4 D_1 + 0.1 D_2 + 0.4 D_3 + 0.1 D_4$$

특정 횡변형량 중 하나를 최적화의 목적함수로

설정된 경우에는 MINITAB을 이용한 최적조건 도출이 가능하다. 그러나, 본 연구에서와 같이 복수의 횡변형량을 이용하여 가중치를 가진 목적함수를 설정하는 경우에는 별도의 최적설계용 도구를 사용하여야 한다. 본 연구에서는 최적화를 위해서 상용화된 최적화 전용 프로그램인 VisualDOC (VR&D)을 이용하였다. 최적화를 실행한 결과 얻어진 최적 공정조건은 다음과 같았다.

Table 4 Optimum injection condition for the objective function

Hold pressure	200bar
Injection Velocity	24.8ccm/s
Nozzle Temperature	208 °C

5. 결론

본 연구에서는 사각 상자형상의 제품에 대한 최적 공정조건 도출을 위한 공정최적화를 진행하였다. 정확한 공정조건 확인을 위해 공정모니터링 시스템을 적용하였으며, 복합적인 목적함수를 설정을 함으로써 전문 최적설계 도구를 이용하여 최적 공정조건 도출을 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험에서 사용한 사각상자 형상 제품의 벽면 횡변형량의 합을 최소로 하는 최적 공정조건을 반응표면분석법을 적용하여 도출할 수 있었으며 최적 공정조건은 사출속도가 24.8ccm/s, 보압 200bar, 노즐온도 208°C로 도출되었다.

(2) 정확한 공정조건에 대한 확인을 위해 공정모니터링 시스템을 사용하여 실험을 진행한 결과 균일한 공정조건을 유지하면서 실험을 진행할 수 있었다.

(3) 공정모니터링 시스템을 통해 다양한 공정변수 중 정확한 탐색을 필요로 하는 종속변수를 쉽게 설정할 수 있었다.

(4) 제어변수의 각 벽면의 횡변형량에 대한 영향도 분석 결과, 모든 횡변형량에 대해 절대적으로 높은 영향도를 가지는 제어변수는 없었고 각 벽면의 흐름과 보압 영향 여부에 따라 다른 영향도를 나타내었다. 게이트에 가까울수록 보압의 영향이 크게 나타났고, 유동이 지배적인 옆 벽면에서는 사출속도가 높은 영향도를 나타냈으며, 노즐온도의 영향도는 모든 벽면에서 가장 낮게 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] Robert G. Launsby, Michael R. Groleau, Tom Wilmering, Rodney J. Groleau, 1999, DOE & Decoupled Molding Part I: Process Centering And Validation From The Plastic's Point Of View, ANTEC.
- [2] M. McMeans, B. Bogdanski, P. Bogdanski, 2001, Warpage Index for Mold Designers and CAE Analysis, ANTEC.
- [3] Ryan Seyler, Andrew Schenck, 2003, Warpage Index Based On Cooling And Orientational Effects, ANTEC.
- [4] Alex Bakharev, Rong Zheng, Zhiliang Fan, Franco Costa, Xiaoshi Jin, Peter Kennedy, 2005, Corner Effect in Warpage Simulation, ANTEC
- [5] 박성현, 1999, 현대실험계획법, pp. 311~313.
- [6] 이레테크, 2005, 새 Minitap 실무완성.