

IDESIGN 프로그램을 이용한 사출성형공정의 최적화

민 병 현

동의대학교 산업공학과
(1997년 6월 2일 접수)

Optimization of Injection Molding Process using the IDESIGN Program

Byeong-Hyeon Min

Department of Industrial Engineering, Dong-eui University
San 24 Gayadong, Pusanjin-Ku, Pusan, 614-714, Korea
(Received June 2, 1997)

요 약

사출성형품의 품질특성으로 외관, 치수, 기계적 강도 등이 있으나, 조립부품으로써 사용될 경우에는 치수가 주요한 품질이 된다. 성형품은 용융수지의 특성상 사출과정 중 수축을 일으키므로 이를 고려해서 금형설계가 이루어지지만 실제 사출과정에서 공정변수를 최적화하여 관리하지 않으면 허용오차 내의 치수를 얻기가 힘들다. 본 논문에서는 주요 조립부의 치수가 허용오차 내에서 얻어지도록 설계시 적용된 수축률과 측정된 수축률의 차이를 목적함수로하여 최소화 시키며, 반복이차계획 알고리즘을 채택한 IDESIGN 프로그램을 이용해 최적 사출성형조건을 구하였다. 제약조건은 성형품의 부위별 수축률 편차 및 싱크마크 깊이가 공정변수의 부등호 제약식으로 도출되었고, 성형이 이루어지는 공정변수의 상하한 값이 최대 및 최소 경계값으로 적용되었다.

Abstract—The quality of injection molded parts can be defined as their appearance, dimension or mechanical strength. In case of the usage as assembled parts the dimensions of molded parts will be the target of quality management. Shrinkage allowance is given in the stage of mold design because the molded parts shrink due to the characteristics of molten resin during the injection molding. The optimization of processing conditions should be done to obtain an accurate dimension of molded parts within an allowable error range. In the present paper, the difference between designed and measured shrinkages at the specific position is minimized as an objective function, the IDESIGN program is used to derive optimal conditions in injection molding. The shrinkage variation according to the positions of molded parts and the depth of sink-mark are chosen as constraint conditions of inequality equations of processing variables. And the maximum and minimum values of processing variables within processing windows are applied for the boundary conditions.

Keywords: injection molding, optimization, shrinkage, recursive quadratic programming

1. 서 론

제조업체에서 각종 제조공정을 구현, 운영함에 있어서 개개의 제조공정들은 최종 품질 상태에 직접 영향을 끼치므로 이들을 어떻게 조정하는가의 문제는 생산기술에서 주요한 분야이다. 즉 저렴한 가격으로 고품위의 제품을 생산하는 공정을 설계함은 공학자에게 있어서 경제적이고 기술적인 도전이다. 이러한 도전을 체계적이고 효율적인 방법으로 구현하기 위해서는 공정, 품질 및 비용의 최적화를 이룩하여야 한다. 이를 위해서는 원자재의 변화에 둔감한 제품 성능을 구현하고, 공정 및 작업 변화에 강건한 공정설계를 이루며, 생산성을 향상시킬 수 있는 새로운 공정을 적용하는 등 크게 위의 3가지 요인들이 만족되어야 한다. 많은 제조공정 중 특히 사출공정은 고분자재료인 수지의 용융, 금형내로 용융수지의 충전 및 후충진 그리고 금형형상 대로 성형을 위한 고분자재료의 냉각공정 등 복잡한 물리적, 유변학적 공정들을 포함하지만 용융-유동-냉

각-취출 등 사이클 단위의 연속공정을 통하여 저렴한 비용과 높은 생산성으로 복잡한 플라스틱 성형품을 생산하는 제조분야로 잘 알려져 있다. 높은 정도의 품질을 지닌 사출성형품을 얻기 위해서는 많은 관련 인자들을 조정할 필요가 있으며 특히 수지재료 자체의 경량화 및 엔지니어링 플라스틱 등 고온, 고압에 견디는 발전된 재료의 물성때문에 금속, 비금속 부품류를 많이 대체하고있는 실정에서는 더욱더 성형품의 품질과 관련된 인자들을 체계적으로 분석함이 필요하다. Ishikawa의 Fish Bone[1] 개념을 적용하여 사출 성형품의 품질에 영향을 끼치는 특성을 분석한 Fig. 1을 살펴보면 제품의 형상대로 설계, 가공된 금형, 사출기 성능, 수지 재료의 유변학적 특성, 공정변수 등의 4가지 그룹에 의해 크게 영향을 받으며 각 그룹별 관련된 인자들을 모두 포함하면 20 내지 30가지로 나열된다 [2]. 금형, 사출기 성능 및 수지재료의 특성은 사출성형 공장에 공급하는 각 공급사에 의해 기본적인 요구사항이 만족된다고 할때 사출성형품의 품질은 공정변수에 크게 의존하며 사출속

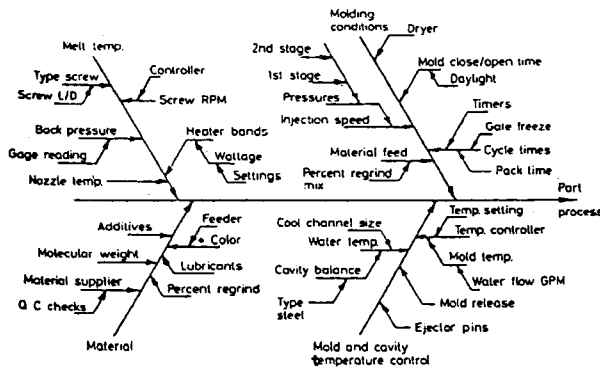


Fig. 1. Fish-bone diagram on injection molding process.

도, 보압, 보압시간, 냉각시간, 수지온도 등 다수의 공정 변수에 의해 영향을 받는것으로 알려져있다[3,4]. 따라서 이들 공정 변수와 사출성형품의 품질과의 관계를 모델링 과정을 통해 정립한 후 유도된 모델을 품질요구조건에 부합하도록 최적화할 필요가 있다[5-7].

이를 위해 우선적으로 최적화 할 목적함수와 제약조건식이 도출되어야 하며 목적함수가 될 성형품의 품질특성은 정량적으로 수식화 할 수 있는 인자를 선택하여 최적화 할 목적함수로 규정하였다. 본 논문에서는 가전제품 등의 하우징류를 대상으로 조립성, 외관결함 여부를 판단할 수 있는 인자들을 기준으로 정하였는데 먼저 주요한 조립부의 치수가 허용오차 내에서 관리되도록 균형설계시 적용된 수축률과 성형 후 측정된 제품의 수축률 차이를 목적함수로 하여 최소화시키며, 성형품의 각 부위별 수축률 편차 및 보스나 리브가 부착된 부위에서 나타나는 싱크 깊이 등을 공정변수의 부등호제약식으로 도출하고, 성형을 가능하게하는 각 공정변수의 상하한 값을 공정변수의 최소 및 최대 경계값으로 적용하였다. 공정변수와 품질특성간의 모델식 유도과 관련된 데이터 수집을 위해 품질특성으로 정의한 수축률 특성을 잘 나타낼 수 있는 시작급형을 설계, 제작하였으며 실험계획법하에서 준비된 실험조건별로 시시출을 수행하여 그때 얻어진 사출성형품을 3차원측정기를 이용하여 치수를 측정하고 리브나 보스가 부착된 부위의 반대쪽에 생성된 싱크깊이를 다이얼게이지를 이용하여 측정하였다. 사출속도, 보압, 보압시간 및 냉각시간의 4가지 공정변수를 변화시켜 사출성형품의 품질로 규정한 수축률에 유의한 공정변수가 통계분석을 통하여 사출속도, 보압인 것으로 밝혀져 두 공정변수에 대한 조립부에서의 설계수축률과 측정수축률의 차, 24곳 지정부위별 수축률 편차 및 리브나 보스가 부착된 부위의 싱크깊이가 회귀분석을 통하여 2차 비선형식으로 구해졌다. 목적함수식과 부등호제약조건식을 만족하는 공정변수를 해석적으로 풀기위하여 반복이차계획(Recursive Quadratic Programming)법 알고리즘을 채택한 프로그램인 Interactive DESIGN(IDESIGN) 소프트웨어에 사용자 프로그램을 인터페이스시켜 목적함수를 최소화시키고 또한 제약조건을 만족하는 최적 사출성형조건을 구하였다.

2. IDESIGN 프로그램에 의한 사출성형공정 최적화

목적함수와 제약조건식이 선형인 선형계획 문제의 해석은 잘 알려진 심플렉스법, 교체심플렉스법 등이 사용되고 많이 이용되는 소프트웨어로 LINDO 등을 들 수 있다[8]. 하지만 실제 제조공정에서는 목적함수와 제약조건식이 비선형인 경우가 많으며 비선형 최적화의 경우 최속강하법, 공액경사도법, 뉴턴법 등으로 탐색 방향을 계산한 후, 등간격탐색, 황금분할탐색, 다항식 보간법 등의 간단한 알고리즘을 이용하여 이동거리를 계산하는 과정을 취하며 이용되는 소프트웨어로 IDESIGN[9] 등이 있는데 이는 구조설계, 진동, 인체공학 분야 등에 많이 적용되었고 일반 제조공정에는 적용한 예가 없으나 본 논문에서 사출성형공정의 최적화에 적용하였다. IDESIGN 소프트웨어를 사용하는 방법은 Fig. 2에서와 같이 사용자에게 정의된 문제의 목적함수식 및 제약조건식들과 관련된 데이터 파일을 IDESIGN 프로그램에 인터페이스시켜 최적해와 관련된 결과 그래프를 얻을 수 있으며, PC를 통해 원하는 결과를 얻을 수 있도록 출력 파일을 수정하였다. IDESIGN 프로그램은 목적함수, 등호 또는 부등호 제약식, 설계변수의 경계식들로 구성되는 일반적인 비선형 제약최적화 문제를 풀 수 있도록 구성되어 있다. 일반화되어있는 Constrained Steepest Descent(CSD), Sequential Linear Programming(SLP), Method of Feasible Directions(MFD), Gradient Projection Method(GPM), Generalized Reduced Gradient Method(GRGM) 등의 여러 가지 알고리즘 중에 IDESIGN 프로그램이 적용하고있는 알고리즘으로는 RQP, Hybrid Algorithm, Cost Function Bounding Algorithm, Linearization Method, Conjugate Gradient Method(for unconstrained problems) 등이 있으나[10] 본 논문의 사출성형공정의 최적화를 위해 IDESIGN을 실행시킬때 사용된 알고리즘은 RQP법이 채택되었다. CSD법 등 기존의 알고리즘에서는

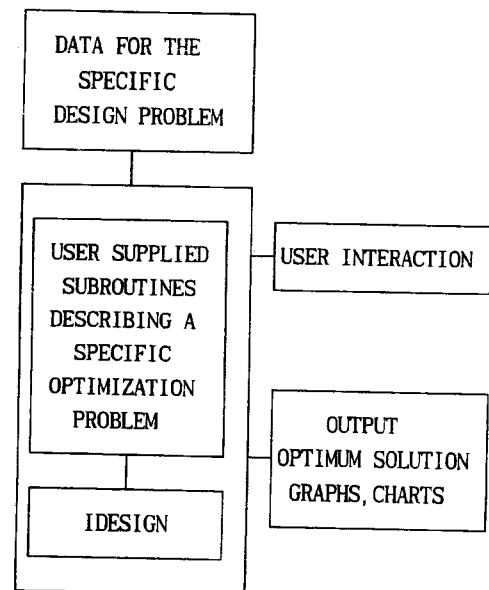


Fig. 2. Schematic diagram of IDESIGN S/W.

탐색방향을 결정하는 부문제의 정의에서 목적함수와 제약조건 함수의 선형근사만을 이용 즉, 최적설계의 문제를 현 추정치에서 선형화한 것에 바탕을 두어 알고리즘의 수렴률이 낮았으나, 목적함수와 제약조건함수의 이차 근사를 사용하면 함수의 곡률정보를 탐색방향 결정에 사용하므로 알고리즘의 수렴률을 높일 수 있다. 하지만 이는 원래의 비선형 최적화 문제를 푸는 것만큼 어렵다는 것이 판명되어 새로운 부문제를 정의하기 위해 라그랑지함수의 헷세행렬을 사용하고 반복설계점의 모든 제약조건에 경사도 대신에 일부 제약조건에 경사도만 사용하는 잠재제약방책(potential constraint strategy)을 채택하고 제약 최적화에서 사용하는 강하함수로 비제약최적화에서 사용하는 목적함수 대신 쉐니크니의 강하함수(Pshenichny's descent function)를 사용하였다. 이처럼 목적함수의 이차 근사를 사용하기 위해 부등호 제약조건을 포함한 제약최적화문제에 대해 새롭게 정의된 부문제는 다음과 같이 정의된다[11].

$$\begin{aligned} \text{목적함수: } f(x) &= c^T d + 0.5d^T H d \\ \text{등호 제약조건: } h_i(x) &= q^{OT} d - e_i = 0; i=1, p \\ \text{부등호 제약조건: } g_j(x) &= a^{OT} d - b_j \leq 0; j=1, m \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 q 및 a는 등호 및 부등호 제약조건에서 상수행렬, e 및 b는 등호 및 부등호 제약조건에서 열벡터, c는 상수행렬, d는 이동방향, H는 라그랑지함수 L의 헷세행렬 $\nabla^2 L$ 로 다음과 같이 정의된다.

$$\nabla^2 L = \nabla^2 f + \sum_{i=1}^p v_i \nabla^2 h_i + \sum_{j=1}^m u_j \nabla^2 g_j \tag{2}$$

여기서 v_i 및 u_j 는 등호 및 부등호 제약조건에 대응하는 라그랑지승수(Lagrange multiplier)이다. 비제약최적화문제에서는 목적함수가 강하함수로 사용되어 알고리즘의 진행과정이 최적점으로 향하고 있다는 것을 보여주나 제약최적화문제에서는 목적함수의 현재값에 제약조건에 위반에 관한 벌칙을 더하여 구성한 많은 강하함수가 사용되나 여기서는 쉐니크니의 강하함수 ϕ 가 다음과 같이 정의되어 사용되었다.

$$\phi(x) = f(x) + RV(x) \tag{3}$$

여기서 R은 양의 상수로 벌칙매개변수(penalty parameter)라 부르고, $V(x) \geq 0$ 은 k번째 반복회에서 최대제약위배조건과 관계되는 매개변수로 모든 제약조건 중 최대제약위배치이거나 영으로 아래의 식에서 구해진다.

$$V_k = \max \{0; |h_1|, |h_2|, \dots, |h_p|; g_1, g_2, \dots, g_m\} \tag{4}$$

또한 벌칙매개변수 R에 대한 필요조건으로 $R \geq \gamma_k$ 이 사용되며 여기서 γ_k 는 k번째 반복회에서의 모든 라그랑지승수의 합으로 아래와 같다.

$$r_k = \sum_{i=1}^p |v_i^k| + \sum_{j=1}^m |u_j^k| \tag{5}$$

한편, 이동거리를 결정하는 데는 부정확선탐색이 사용되어 시행 이동거리 순열 t_j 가 다음과 같이 정의되며, k번째 반복회에

서 수용할 수 있는 이동거리를 $\alpha_k = t_j$ 로 정한다.

$$t_j = \left(\frac{1}{2}\right)^j; j=0, 1, 2, \dots \tag{6}$$

이때 j는 다음의 강하조건을 만족하는 최소의 정수이다.

$$\phi_{k+1, j} \leq \phi_k - t_j \beta_k \tag{7}$$

여기서 상수 β_k 는 $\beta_k = \gamma / \|d^{(k)}\|^2$ 에 의해 결정되며 γ 는 0과 1 사이의 특정상수이다.

위의 내용이 IDESIGN 프로그램 안에서 단계별로 수행되는 과정을 살펴보면 아래와 같다.

단계 1: 반복횟수 k=0에서 설계변수($x^{(0)}$), 허용 제약조건위배량(ϵ_1) 및 허용 수렴매개변수(ϵ_2)들의 초기치를 추정하고, Pshenichny 강하함수의 벌칙매개변수 R, 이동거리의 결정과 관련한 상수 γ , 그리고 헷세행렬의 초기치를 $H^{(0)}=I$ 로 지정한다.

단계 2: $x^{(0)}$ 에서 목적함수, 제약조건함수의 함수값 및 경사도값, 최대제약위배조건인 V_k 를 계산하고 라그랑지함수의 헷세행렬을 수정한다.

단계 3: 함수의 곡률정보를 이용하도록 이차계획 부문제를 정의한 후 탐색방향 $d^{(k)}$, 라그랑지승수 $v^{(k)}$, $u^{(k)}$ 를 계산한다.

단계 4: 아래의 수렴기준을 검토한 후 만족하면 멈추고 아니면 계속한다.

$$V_k \leq \epsilon_1, \|d^{(k)}\| \leq \epsilon_2$$

단계 5: 벌칙매개변수 R에 관한 필요조건을 조사하기 위하여 라그랑지승수의 합 γ_k 를 계산하고 $R = \max\{R_k, \gamma_k\}$ 로 둔다.

단계 6: $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha_k d^{(k)}$, 여기서 α_k 는 이동거리로 위에서 언급된 부정확선탐색에 의해 구해진다.

단계 7: 현재의 벌칙매개변수와 반복횟수를 $R = R_{k+1}$, $k = k+1$ 로 수정하고 단계 2로 간다.

사용자에 의해 구성될 프로그램은 목적함수 및 제약함수식을 표현하는 서브루틴, 목적함수 및 제약함수의 경사도를 표현하는 서브루틴 그리고 IDESIGN 구동을 위한 데이터 파일 등이다.

3. 데이터 수집 및 모델링

공정변수와 품질특성간의 공정모델링을 위해 필요한 데이터를 얻기 위해 실험계획법 및 통계적 분석법이 Fig. 3에 보여주는 바와 같이 수행되었으며 사용된 실험장치는 Fig. 4에서와 같이 사출기, 금형 및 측정 시스템으로 크게 구성되어 있다. 금형은 성형품의 두께가 3 mm, 가로 길이가 160 mm, 세로 길이가 200 mm, 높이가 60 mm이고 중앙 상단에 120×120 mm의 구멍을 갖도록 설계, 가공되었다. 공정변수인 사출속도, 보압, 보압시간 및 냉각시간은 사출기에 의해 설정되고 품질특성인 수축률을 얻기 위해 성형 후 성형품의 특정 부위의 길이를 3차원 측정기로 측정 하였으며, 부위별 수축률 편차를 구하기 위해 Fig. 5에서와 같이 성형품의 높이가 하단에서 5 mm(loop 1), 45 mm(loop 2) 및 60 mm(loop 3)인 곳에서 가로 및 세로 방향, 정

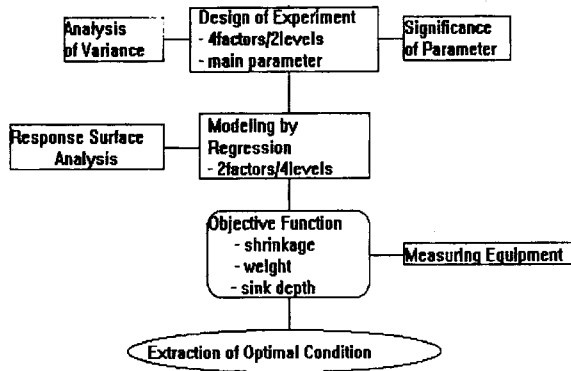


Fig. 3. Procedure for the optimization of injection molding process.

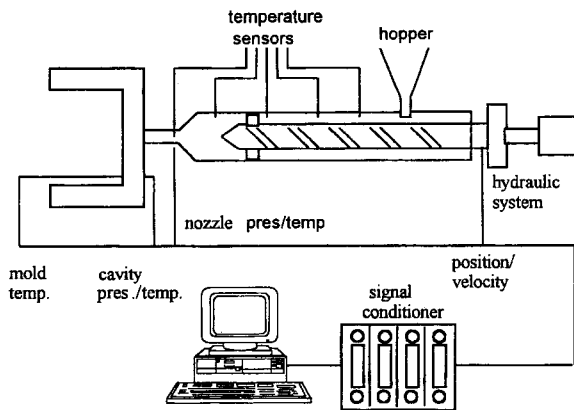


Fig. 4. Schematic diagram of an experimental system.

면, 측면부에서 높이 방향 등 성형품의 24 곳(3개의 각 loop에서 x 방향으로 3 부위 9 곳, y 방향으로 3 부위 9 곳 및 정면, 측면부에서 높이방향 각 3 부위 6 곳) 부위에서 3차원 측정기로 길이를 측정하였다. 또한 외관 결함인 싱크깊이는 다이얼 게이지를 이용하여 보스나 리브가 부착된 부위에서 측정되었다.

실험조건은 품질특성 인자에 대한 공정변수 인자의 영향이 복합적으로 교호작용을 일으키면서 작용하므로 1차 실험에서는 사출속도, 보압, 보압시간, 냉각시간 등 4개의 공정 변수에 대해 다구찌 방법에 의한 실험계획법을 Table 1에서와 같이 사용하였으며[12], 수준별 조건을 살펴보면 사출속도는 수준 0에서 10/70/20%=27/40/27 mm/s, 수준 1에서 10/70/20%=53/80/53 mm/s의 속도분포를 가지며, 보압은 수준 0에서 40/30/20/10%=40/30/20/10 bar, 수준 1에서 40/30/20/10%=80/70/60/50 bar의 보압분포를 가지며, 보압시간은 수준 0에서 4초, 수준 1에서 12초의 시간을 가지며, 냉각시간은 수준 0에서 10초, 수준 1에서 30초의 시간을 가졌다. 한편, 독립변수인 공정조건과 종속변수인 품질 인자 사이의 관계를 도출하기 위해 모델링이 필요하며, 고려할 수 있는 모델로는 물리적 현상에 근거한 수학적 모델, 실험 데이터로부터 설정된 실험적 모델, 현장에서의 운용 경험에 근거한 경험적 모델 등을 들 수 있는데, 본 논문에서는 실험적 모델을 사용하며 적용 방법은 회귀모델, 신경회로망모델 중 통계적 방법인 회귀모델을 채택 하였다. 회귀모델을 도출하기 위해서는 많은 실험 횟수가 필요하므로 선정된

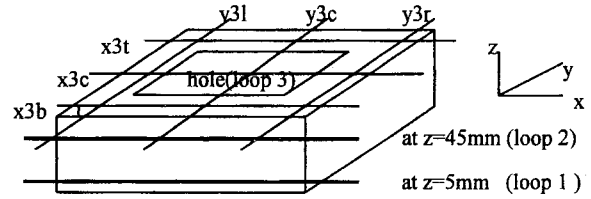


Fig. 5. Positions for shrinkage measurement of specimen-box.

Table 1. Experimental conditions by orthogonal array

| factors | Vi | Hp | Ht | Ct |
|---------|----|----|----|----|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 4 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 6 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 7 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 8 | 1 | 1 | 0 | 1 |

독립변수들에 대한 분산분석 및 영향도 분석을 통해 보다 유의한 인자를 선별하고, 선별된 인자인 사출속도와 보압에 대한 수준을 늘려 중심합성계획법에 의한 2차 실험을 수행하였으며 사용된 실험계획표가 Table 2에서와 같이 주어진다. 사출속도는 전체 이송 스트로크의 구간별 분포가 수준 -1.5에서 10/70/20%=20/30/20 mm/s, -1에서 10/70/20%=27/40/27 mm/s, 0에서 10/70/20%=40/60/40 mm/s, +1에서 10/70/20%=53/80/53 mm/s, +1.5에서 10/70/20%=60/90/60 mm/s의 속도분포를 가지며, 보압은 수준 -1.5에서 40/30/20/10%=40/30/20/10 bar, 수준 -1에서 40/30/20/10%=47/37/27/17 bar, 수준 0에서 40/30/20/10%=60/50/40/30 bar, 수준 +1에서 40/30/20/10%=73/63/53/43 bar, 수준 +1.5에서 40/30/20/10%=80/70/60/50 bar의 보압분포를 가지며 실험은 각 조건에서 5회 반복 수행되었다. 이와 같이 비선형성을 고려하면서도 실험 횟수를 줄여 공정조건과 품질특성 사이의 관계식을 유도하였다. 위의 과정을 거쳐 유도된 회귀모델식으로는 주요 조립부인 x1(시편박스 하단 loop 1의 윗 부분에서 x 방향으로 측정된 곳) 부위의 금형설계시 적용된 수축률과 사출성형품으로부터 측정된 수축률의 차를 공정변수인 사출속도와 보압의 함수로 정량화한 목적함수식이

Table 2. Experimental conditions by central composite array

| factors | Vi | Hp | Ht(sec) | Ct(sec) |
|---------|------|------|---------|---------|
| 1 | -1 | 1 | 8 | 20 |
| 2 | -1 | -1 | 8 | 20 |
| 3 | 1 | 1 | 8 | 20 |
| 4 | 1 | -1 | 8 | 20 |
| 5 | 0 | 0 | 8 | 20 |
| 6 | 0 | 0 | 8 | 20 |
| 7 | 0 | 0 | 8 | 20 |
| 8 | -1.5 | 0 | 8 | 20 |
| 9 | 1.5 | 0 | 8 | 20 |
| 10 | 0 | -1.5 | 8 | 20 |
| 11 | 0 | 1.5 | 8 | 20 |

식 (8)에 주어지며,

$$\begin{aligned} \text{minf} = & 0.164278 - 0.125470V_i + 0.347105H_p + 0.071732V_i^2 \\ & + 0.320012H_p^2 - 0.288790V_iH_p \end{aligned} \quad (8)$$

제약조건인 성형품의 부위별 수축률 편차에 대한 부등호 제약식이 식 (9)에서 변형된 식 (10)으로 주어지고,

$$\begin{aligned} g_1 = & -0.012380V_i + 0.068142H_p + 0.022786V_i^2 \\ & + 0.065764H_p^2 - 0.043350V_iH_p \leq 0.102541 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} g_1 = & -0.102541 - 0.012380V_i + 0.068142H_p + 0.022786V_i^2 \\ & + 0.065764H_p^2 - 0.043350V_iH_p \leq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

리브나 보스가 부착된 반대쪽 부위에서의 싱크깊이에 대한 부등호 제약식이 식 (11)에서 변형된 식 (12)로 주어진다.

$$g_2 = 0.154860H_p + 0.062150H_p^2 \leq 0.1 \quad (11)$$

$$g_2 = -0.1 + 0.154860H_p + 0.062150H_p^2 \leq 0 \quad (12)$$

또한 성형이 이루어지는 최소 및 최대 구역내에서 도출된 가공정변수의 상하한 값을 최소 및 최대 경계값으로 한 식(13)과 (14)가 주어진다.

$$-1.5 \leq V_i \leq 1.5 \quad (13)$$

$$-1.5 \leq H_p \leq 1.5 \quad (14)$$

목적함수식과 첫번째 제약함수식은 수축률에 대한 값으로 단위를 %를 가지며, 두번째 싱크깊이(μm)에 대한 제약함수식은 다른 식들과 보조를 맞추기 위해 정규화 하였다. 공정변수인 사출속도(V_i) 및 보압(H_p)도 정규화 되었으며, 실제 크기는 사출속도가 30 mm/sec (-1.5)에서 90 mm/sec (1.5), 보압이 40 bar(-1.5)에서 80 bar(1.5)의 크기를 갖는다. 유도된 회귀모델식의 타당성은 총변동중 회귀모델식에 의한 변동 비율인 결정계수 값으로부터 판정하였으며 그 결과는 목적함수식이 0.859, 첫 번째 제약식이 0.827, 두 번째 제약식이 0.974의 값을 가졌다. 이는 결정계수 값이 0.81을 넘으면 물리적으로 타당성이 있다는 점에서 목적함수식 및 제약조건식 모두 결과로써 타당성이 입증되었음을 알 수 있다.

4. 결과 및 고찰

반복횟수에 따른 목적함수, 수렴매개변수 및 최대제약위배 값의 분포가 Fig. 6에 나타나는데 10회 반복 이후 목적함수 값은 0.1347로 거의 변하지 않고 있으며, 최대제약위배 값도 10회 이후 거의 제로 값에 수렴하나, 수렴매개변수 값은 변동이 매우 심하여 36회 반복 이후 허용 수렴매개변수 값의 범위를 만족하여 프로그램이 멈추었다. 목적함수 값은 주요 조립부 위치에서 금형설계시 적용된 수축률과 측정된 수축률의 편차로 금형가공 오차를 거의 무시할때 목적함수가 제로가 됨은 설계치수 대로 성형품의 치수가 얻어져 조립시 허용공차 내에

유변학, 제 9권, 제 2호, 1997

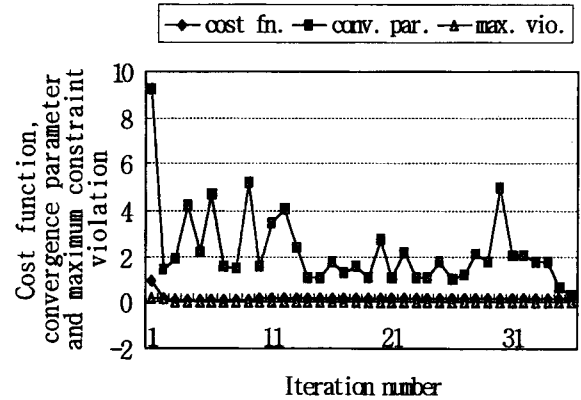


Fig. 6. Histories of cost function, convergence parameter and maximum constraint violation.

서 조립이 원활하게 이루어짐을 의미한다. 따라서 목적함수 값이 0.1347이란 의미는 금형설계시 주어지는 즉, 수지의 수축률 데이터를 근거로 본 과제에서 사용된 ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene) 수지의 경우 0.4%에서 0.6% 범위내의 수축률이 금형설계시 주어지지만 얻어진 목적함수 결과를 이용한다면 0.1347%를 더한 수축률이 적용되어야 얻고자 하는 치수를 조립부에서 얻을 수 있음을 알 수 있다. 물론 이 결과는 두 가지 제약조건을 만족하는 범위 내에서 최적값이므로 금형설계시 0.1347%의 값이 기존 주어진 설계치에 더해진다면 각 부위별 수축률 편차도 줄이고 리브나 보스부의 싱크깊이도 줄일 수 있는 결과임을 알 수 있다. Fig. 7은 반복횟수에 따른 공정변수인 사출속도와 보압의 변화를 보여주는데 사출속도는 11번 정도의 반복 후 60 mm/sec의 사출속도로 정규화된 값인 0.2616의 일정한 값을 유지하나, 보압은 계속해서 값이 작아져 최종적으로 60 bar의 보압으로 정규화된 값인 -0.0004의 값을 가짐을 볼 수 있다. 이러한 공정조건은 주어진 제약조건하에서 목적함수를 최소화시키는 값으로 본 연구를 통하여 명확한 공정조건을 제시하고 있다. 물론 여기서 채택된 사출속도나 보압

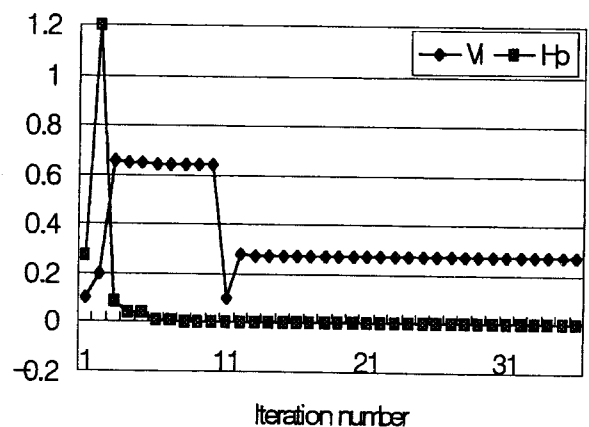


Fig. 7. Histories of design variables(V_i : injection speed, H_p : holding pressure).

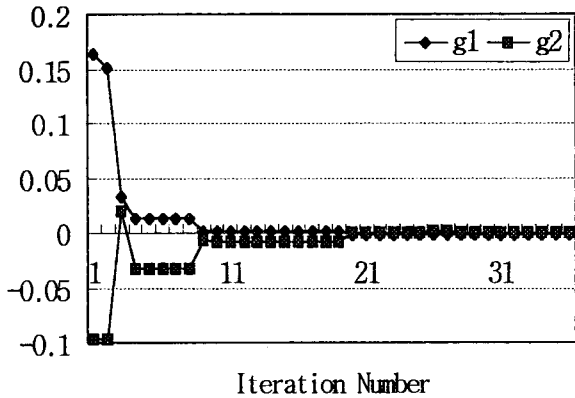


Fig. 8. Histories of constraint functions (g1: inequality constraint equation on shrinkage deviation according to the positions, g2: inequality constraint equation on sink depth).

이외의 여타 다른 공정조건들이 고려될 수 있으나 앞서 데이터 수집과정에서 설명된 바와 같이 통계분석을 통하여 유의한 인자만을 우선적으로 선별했기에 본 결과의 타당성에는 큰 무리가 없다고 사료된다. 한편 제약조건의 상황을 살펴보면 일반적으로 부등호 제약조건은 활성화(active), 입실론활성화(ϵ active), 위배(violation) 또는 만족(inactive)의 상태중 하나가 되는데 즉 부등호 제약조건의 제약조건 값이 제로값을 가지면 활성화제약조건, 음의 값을 가지면 만족 또는 비활성화, 양의 값을 가지면 위배제약조건이라 부르는데 Fig. 8에 반복횟수에 따른 제약조건 값의 분포를 살펴보면 부위별 수축률 편차가 작아야 하는 제약조건 g1은 초기에 양의 값을 가져 위배제약조건을 보여주다가 거의 제로 값으로 근접하고, 싱크깊이가 작아야 하는 제약조건 g2는 초기부터 음의 값을 가져 최종적으로 제로에 가까운 음의 값을 보여주고 있어 본 연구에서 채택된 제약조건들은 활성화제약조건 상태임을 알 수 있고 이는 Fig. 6의 최대제약위배 값의 그림에서도 확인될 수 있다. 공정변수에 따른 목적함수의 민감도 결과인 Fig. 9는 목적함수의 공정변수에 대한 경사도를 정규화한 값을 보여주는데 보압이 목적함수 값에 사출속도 보다 더 큰 영향을 끼침을 볼 수 있다. 즉, 보압에서의 작은 변화에도 목적함수는 크게 민감함을 의미한다. 이는 수축률의 값은 사출속도보다는 보압의 변화에 더 민감함을 알 수 있으며 어떤 특성을 목적함수로 채택하느냐에 따라 주요한 공정변수를 알 수 있어 이처럼 민감도에 대한 정보는 실제 제조공정 설계에 대단히 유용하며 최적공정조건을 유도하는데 있어서 주요한 제약식과 공정변수를 보여 준다.

5. 결 론

비선형 목적함수식과 비선형 부등호제약조건식으로 구성된 사출성형공정의 최적화를 위해 상용화된 IDESIGN 프로그램을 이용하였다. 적용된 알고리즘은 비선형제약최적화에 강력한 RQP법을 프로그램 실행시 사용하였으며 프로그램에 인터페이스시켜 사용할 목적함수 및 제약조건식들은 실험에 의한

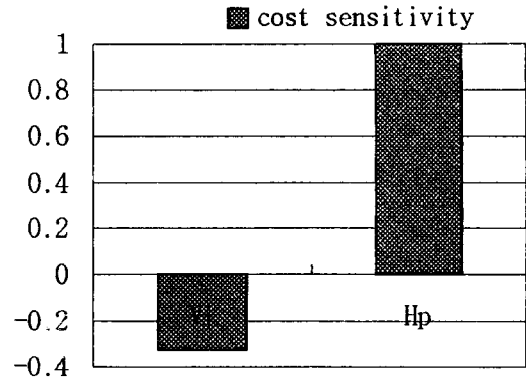


Fig. 9. Cost function sensitivity according to processing variables(V_i : injection speed, H_p : holding pressure).

회귀모델식에 의해 유도되었다. 성형품 조립부의 치수가 설계시 고려한 대로 얻어지고 또한 부위별 수축률 편차를 최소화하고 리브나 보스가 부착된 부위의 싱크깊이를 최소화하는 최적공정조건으로는 사출속도가 0.2716 (65.4 mm/s), 보압이 -0.00004 (59.9 bar)로 얻어졌고, 목적함수에 대한 민감도는 보압이 사출속도에 비해 더 민감함을 보여 준다. 본 연구에서는 목적함수가 하나인 경우의 프로그램을 이용하였으므로 나머지 목적함수 식들은 제약조건식으로 사용하였으며 실제 만족해야 할 목적함수가 많은 실제 사출성형공정에서의 최적성형조건을 구하기 위해서는 다목적 제약최적화에 대한 연구가 필요하다고 사료된다. 또한 본 연구에서는 물론 통계적 분석법을 적용하여 유의한 공정변수를 두개로 줄였으나 Ishikawa의 Fish Bone을 사용 분석한 그림에서 보여지는 다수의 공정변수를 동시에 고려하는 경우에 대한 모델식 도출과정도 향후 연구될 수 있는 부분으로 여겨진다.

후 기

이 논문은 '동의대학교 학술연구조성비'의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

기 호

- a : $n \times m$ matrix of given constants at inequality constraint
- b : m dimensional vector of given constants at inequality constraint
- c : $n \times n$ matrix of given constants at cost function
- d : n dimensional vector of search directions
- e : p dimensional vector of given constants at equality constraint
- f : cost function
- g : inequality constraint equation
- h : equality constraint equation
- H : $n \times n$ Hessian matrix of given constants
- I : identity matrix

k : number of iteration
 L : Lagrange function
 q : $n \times p$ matrix of given constants at equality constraint
 r : sum of all the Lagrange multipliers
 R : penalty parameter
 t : trial step size
 u_i : Lagrange multiplier for equality constraint
 v_i : Lagrange multiplier for inequality constraint
 x : n dimensional vector of design variables

그리스문자

α : step size in search direction
 β : constant
 γ : specified constant between 0 and 1
 ε_1 : permissible small number for constraint violation
 ε_2 : permissible small number for convergence parameter
 ϕ : Pshenichny's descent function

참고문헌

1. Ishikawa, K, "Guide to quality control", Asian Productivity Organization, Tokyo, 1982.
2. 홍명웅, "사출성형기술 I", 기전연구소, 1990.
3. I. Pandelidis and Q. Zou, Polymer Engineering and Science, **30**, 873 (1990).
4. I. Pandelidis and Q. Zou, Polymer Engineering and Science, **30**, 883 (1990).
5. W. Michaeli and M. Lauterbach, Advances in Polymer Technology, **9**, 337 (1989).
6. O. Kosh, Plastverarbeiter, **40**, 124 (1989).
7. C.C. Cheng, "A study of the effects of injection molding process conditions on part weight and optimization by empirical model-building techniques", MS Thesis, University of Lowell, 1989.
8. L. Schrage "User's manual for LINDO", the Scientific Press, New York, 1981.
9. J.S. Arora, "Introduction to optimum design", McGraw Hill, New York, 1989.
10. J.S. Arora and P.B. Hander, Computational Mechanics, **1**, 221 (1987).
11. D.G. Luenberg "Linear and nonlinear programming", Addison-Wesley, New York, 1984.
12. G. Taguchi "Introduction to quality engineering", American Supplier Institute, New York, 1987.