

〈論 文〉

경계요소법을 이용한 압축성형다이 가열선의 최적위치 설계

이부윤* · 조종래*

(1993년 1월 28일 접수)

Optimal Positioning of Heating Lines in a Compression Molding Die Using the Boundary Element Method

Boo Youn Lee and Jong Rae Cho

Key Words : Compression Molding Die(압축 성형다이), Heating Lines(가열선), Optimal Position(최적위치), Boundary Element Method(경계요소법), Shape Optimal Design(형상 최적설계), Sensitivity(민감도)

Abstract

A shape optimization problem is formulated to determine the optimal position of heating lines in a compression molding die. The objective of the problem is that the cavity surface would be maintained by a prescribed uniform temperature. A boundary integral equation for the sensitivity of the temperature in terms of hole position is derived using the method of shape design sensitivity analysis. The boundary element method is employed to analyze the temperature and sensitivity field of the die. The sensitivity calculation algorithm is incorporated in an optimization routine. To demonstrate a numerical implementation, an example problem arising in thermal design of a compression molding die is dealt with, showing that the number of heating lines chosen for the die strongly affects the ultimate uniformity of the cavity surface temperature.

1. 서 론

편평한 판넬(panel) 모양으로 복합재료(composite material)를 성형하고자 할 때 만일 강도를 높이기 위해 섬유(fiber) 길이를 길게 하는 것이 요구되면 보통 압축성형(compression molding)을 하게 된다. 열경화성 폴리머(thermoset polymer)일 경우 다이(die)에서 열을 가하여 경화(curing)시키기 위해, 다이와 소재가 접촉하는 다이 내면(cavity surface)을 고온으로 유지해야 한다. 이를 위하여

다이 내부에 전기 저항에 의한 가열선(heating line)을 넣어 다이를 가열하게 된다. 이 때 만일 다이 내면에서의 온도가 균일하지 않고 위치에 따라 변동이 심하면, 성형시에 균일하게 경화되지 않으며 경화시간도 길어지게 된다. 따라서 다이의 열 설계시에 고려해야 할 가장 중요한 요소 중의 한 가지는 제품의 질을 높이고 성형시간을 단축하기 위하여 다이 내면에서의 온도를 가능한 한 균일하게 유지하는 것으로, 다이 가열선은 이러한 목적에 맞도록 설계되어야 한다. 이와같이 압축 성형다이의 열 설계시에는 다이 경계에서의 온도가 주된 관심이 된다. 따라서 다이 내부영역의 해석이 필요없으므로 온도장 해석을 위해 경계요소법(boun-

*정회원, 한국중공업(주) 기술연구소

dary element method)을 사용하는 것이 유리하다고 할 수 있다. 그것은 경계만을 요소분할하는 경계요소법이 유한요소법에 비해 요소분할이 편리하고 자유도의 수가 적기 때문이다.

압축 성형다이의 가열선 최적설계를 다룬 문헌은 그다지 많지 않다. Barone et al,^(1,2) Caulk,⁽³⁾ Rezayat와 Burton⁽⁴⁾은 영역 내부에 원형의 구멍 경계가 있는 포텐셜(potential) 문제에 적용 가능한 특별한 경계적분방정식을 유도하고, 이를 2차원과 3차원의 압축 성형다이의 열 설계문제에 응용하여 다이 내면의 온도가 균일하게 되도록 가열선을 설계하는 예를 다루었다. Kwon과 Forcucci^(5,6)는 3차원 압축 성형다이 문제에서 다이 내면이 균일한 온도 분포를 이루도록 가열선을 최적설계하기 위한 프로그램을 개발하였다. 그들은 표준 경계적분방정식에서 특이열원(singular heat source)으로 가열선을 처리하고, 가열선 매개변수(parameter)에 관한 온도의 민감도를 계산하였다.

다이 가열선의 설계 매개변수로는 가열선의 위치와 크기, 온도 등을 들 수 있으나, 여기서는 가열선의 위치 결정에 관하여만 언급하고자 한다. 근래에 들어서 경계요소법을 이용한 열전도 고체의 형상 최적설계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 형상 최적설계는 제한조건 하에서 목적함수(objective function)를 최소화하는 연속체의 경계 형상을 구하고자 하는 것이다. 다이 가열선의 위치가 변하는 것도 다이 경계의 일부인 구멍 경계의 형상이 변화하는 것으로 볼 수 있으므로, 형상 최적설계 관점에서 다이 가열선의 최적위치를 결정할 수 있다고 하겠다. 형상 최적화는 일반적으로 비선형 계획법(nonlinear programming)을 이용하여 수치적으로 최적화 과정을 수행하게 되는데, 이 때 형상에 관한 목적함수와 제한(constraint)조건함수의 민감도(sensitivity)의 계산이 반드시 필요하다. 형상 민감도의 계산을 위한 가장 단순한 방법으로는 Haftka⁽⁷⁾가 행한 유한차분(finite difference)에 의한 수치미분 방법이 있지만, 민감도의 계산시간이 과다 소요되며 설계변수의 증분(increment)을 결정하는데 임의성이 있는 등의 단점이 있다. 근래에는 열전도 평행방정식에서 출발하여 해석적으로 민감도 공식을 유도한 후, 이를 이산화(discretization)하여 온도 분포와 민감도를 계산하는 효율적이고 정확한 방법이 연구되고 있다.⁽⁸⁻¹⁴⁾ 최근에 Lee, Choi와 Kwak^(11,13)과 Lee^(12,14)는 열전도 고체

문제에서 형상 설계 민감도를 효율적으로 해석하기 위한 일반적인 공식을 경계적분방정식에 근거하여 유도한 바 있다.

본 연구에서는 압축 성형다이 가열선의 최적위치를 결정하는 문제를 다이의 형상 최적설계 문제로 정식화하고자 한다. 최적화 문제의 목적은 다이 내면의 온도를 지정된 온도로 균일하게 유지하는 것이다. 또한 Lee, Choi와 Kwak⁽¹³⁾의 형상 설계 민감도 해석을 위한 직접 미분 방법을 응용하여 가열선 위치변화에 관한 민감도 계산을 위한 경계 적분방정식을 유도하고, 경계요소법으로 온도와 온도의 민감도를 해석하고자 한다. 수치적 응용의 예로서, 넓은 평판의 성형을 위한 압축 성형다이의 가열선의 최적위치를 결정하는 문제를 다루고, 최적위치에서 가열선의 개수가 온도의 균일성에 미치는 영향을 검토한다.

2. 가열선 위치 결정을 위한 형상 최적설계 문제

Fig. 1과 같은 평평한 판질의 압축 성형공정에서 가열된 상부와 하부 다이의 사이에 열경화성 폴리머를 놓고 누르면 소재가 다이 내부에서 유동하면서 채워지게 된다. 초기에 소재를 다이의 중심에 놓고 유동이 한 방향으로만 일어난다고 가정하면 다이의 열전도 문제는 2차원이고, 좌우 중심선에 대하여 대칭이라고 할 수 있다. 소재는 다이에서 열이 전도됨에 따라 온도가 상승하게 되고 추가로 열을 발생하면서 경화된다. 이 성형과정이 반복하여 일어나므로 다이의 온도 분포는 시간에 따라 주기적으로 변화하게 되지만, 시간에 따른 변화량이 비

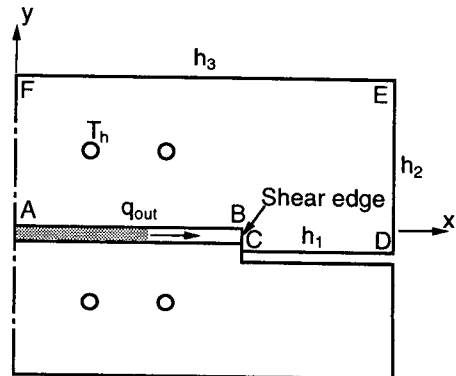


Fig. 1 A compression molding die

교적 작으므로 정상상태(steady state)로 가정할 수 있다. 본 절에서는 균일하고 신속하게 소재를 경화시키기 위해 다이 내면이 지정된 온도로 균일하게 유지되도록 가열선의 위치를 선정하는 방법을 형상 최적설계 문제로 정식화하고자 한다.

온도를 T 로, 경계에서 단위 면적당의 외향 열유량을 나타내는 열속(heat flux)을 q 로 표기하기로 한다. 가열선이 위치한 구멍은 직경이 a 인 원으로 나타내고, 온도는 T_h 로 일정하다고 가정한다. 다이 내면 AB에서 다이가 소재에 빼앗기는 열량은 균일한 열속(heat flux) q_{out} 으로 나타낸다. 그 외의 다이 표면 CD, DE, EF는 각각 절연재(insulation material)를 고려한 등가 열전달계수 h_1, h_2, h_3 에 의한 대류경계조건이 주어지고, 다이의 주위 온도는 T_∞ 이다. 이러한 상태에서 다이 내면 AB를 균일한 온도 T_c 로 유지하고자 한다. 편이상 상부와 하부 다이를 동일한 모델로 고려하기 위하여 전단면(shear edge)는 무시한다.

형상 최적화 문제의 설계변수(design variable) $\{b_i\}$ 는 각 가열선 구멍 중심의 x, y 좌표로서 다음과 같이 나타내며, 이후에 설계변수를 표기할 때 필요에 따라서 b_i 혹은 x_i, y_i 로 표현하기로 한다.

$$\{b_1, \dots, b_{2m}\} = \{x_1, y_1, \dots, x_m, y_m\} \quad (1)$$

여기서 m 은 가열선의 개수를 나타낸다. 경계 AB에서의 온도 T 와 지정된 온도 T_c 의 차를 최소화하기 위해 목적함수를 다음과 같이 적분 형태로 정의한다.

$$\Phi = \int_{\Gamma_{AB}} \left(\frac{T}{T_c} - 1 \right)^2 ds \quad (2)$$

위 식에서 Γ 는 경계를, ds 는 경계를 따른 적분을 나타낸다. 인접한 가열선이 서로 간섭(interference)을 일으키지 않도록 하기 위해 유지되어야 할 최소 간격은 다음과 같은 제한조건으로 나타낼 수 있다.

$$-(x_i - x_j)^2 - (y_i - y_j)^2 + (a + \delta)^2 \leq 0, \quad i, j = 1, \dots, m \text{ and } i \neq j \quad (3)$$

여기서 δ 는 구멍 경계사이의 최소간격을 나타낸다. 가열선과 다이 표면사이의 최소간격 유지를 위해 다음과 같이 설계변수의 상한(upper bound) 및 하한(lower bound)을 부여한다.

$$\begin{aligned} x_i &\leq x_i \leq x_u \\ y_i &\leq y_i \leq y_u, \quad i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (4)$$

경계 AB의 온도는 식(1)의 설계변수에 따라 변화하므로, 제한조건식(3), (4)하에서 식(2)의 목적함수를 최소화하기 위해서 비선형계획법에 의해 수치적으로 최적해를 구해야 한다. 최적화 과정을 수행하려면 매 반복과정(iteration)마다 목적함수 Φ 의 형상에 관한 민감도의 계산이 반드시 필요하게 된다.

3. 가열선 위치에 관한 민감도 해석

본 절에서는 가열선의 위치변화에 관한 목적함수 Φ 의 민감도 해석에 관하여 기술하고자 한다. 다이의 온도 분포 해석에 사용하고자 하는 경계요소법의 근간인 2차원 정상상태 열전도 문제의 경계적분방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁵⁾

$$c(\xi_0) T(\xi_0) + \int_{\Gamma} \{G(\xi_0, \xi) q(\xi) - F(\xi_0, \xi) T(\xi)\} ds = 0, \quad \xi_0 \in \Gamma \quad (5)$$

여기서 $c(\xi_0)$ 는 ξ_0 의 위치에 따라 결정되는 상수이며, $G(\xi_0, \xi)$ 와 $F(\xi_0, \xi)$ 는 ξ_0 가 단위 근원점(unit source point)일 때 ξ 에서 발생하는 온도와 열속을 각각 나타내는 기초해(fundamental solution)로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G(\xi_0, \xi) &= \frac{1}{2\pi k} \ln\left(\frac{1}{r}\right) \\ F(\xi_0, \xi) &= \frac{n_i r_i}{2\pi r^2} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 k 와 n_i 는 각각 열전도 상수와 경계의 외향 단위 수직벡터를 나타내고, r 은 ξ 와 ξ_0 사이의 거리로서 다음의 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} r^2 &= r_i r_i \\ r_i &= \xi_i - \xi_{0i} \end{aligned} \quad (7)$$

경계 적분방정식(5)를 경계요소로 이산화하여 다음과 같은 행렬식을 구성하고,

$$[G]\{q\} - [F]\{T\} = 0 \quad (8)$$

다이에 가해지는 경계조건을 사용하면 경계에서 미지의 T, q 를 계산할 수 있다.

본 연구에서 다루는 압축 성형다이의 구멍 형상 변화에 따른 형상 민감도의 해석방법은 최근에 제시된 Lee, Choi와 Kwak⁽¹³⁾의 경계 적분방정식에 근거한 직접미분방법을 응용하고자 한다. 가열선 구멍의 위치가 변하는 것은 다이의 구멍이 변형되

는 것으로 생각할 수 있으므로 형상의 변화를 설계 속도 (design velocity) 벡터 $V = \{V_1, V_2\}$ 로 나타내고 전미분(material derivative) 개념⁽¹⁶⁾을 사용할 수 있다. 식(5)에서 출발하여 Lee, Choi와 Kwak이 일반적인 형태로 유도한, 민감도 해석을 위한 경계적분방정식은 다음과 같다.

$$c^0 \dot{T}^0 + \int_{\Gamma} (G \dot{q} - F \dot{T}) ds = \int_{\Gamma} \{ \overline{H} (k T_{,i} V_j e_{ji}) - F_j (\overline{T}_{,j} V_i) - G (q V_{j,s} s_j) \} ds, \xi_0 \in \Gamma \quad (9)$$

이 식에서 편의상 변수 ξ_0 와 ξ 를 생략하였으며 상첨자 0는 ξ_0 점에서의 값을 표시하고, $(*)$ 는 점 ξ 와 ξ_0 에서의 값의 차이, 즉 $(*) - (*)^0$ 를 의미한다. 그리고 s_j 는 경계를 따른 단위 접선 벡터를, 하첨자 $(,s)$ 는 경계의 접선방향 미분을 나타낸다. 커널(kernel) 함수 H 와 e_{ij} 는 다음과 정의된다.

$$H(\xi_0, \xi) = -\frac{S_i r_i}{2\pi k r^2} \quad (10)$$

$$[e_{ji}] = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

경계적분방정식 (9)의 미지 변수인 \dot{T} 와 \dot{q} 는 각각 T 와 q 의 전미분 항을 나타내며, 다음과 같이 설계변수로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{T} &= \frac{\partial T}{\partial x_i} \delta x_i + \frac{\partial T}{\partial y_i} \delta y_i \\ \dot{q} &= \frac{\partial q}{\partial x_i} \delta x_i + \frac{\partial q}{\partial y_i} \delta y_i \end{aligned} \quad (12)$$

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 i 번째 구멍경계인 Γ_i 에서의 설계속도 역시

$$\begin{aligned} V_1 &= \delta x_i \\ V_2 &= \delta y_i \end{aligned} \quad (13)$$

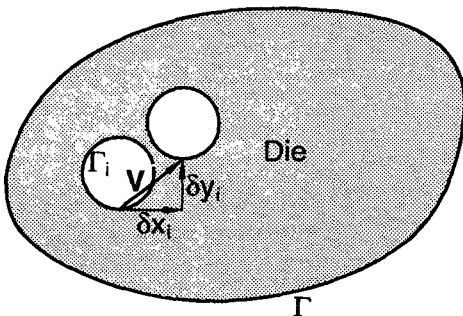


Fig. 2 Design velocity on the hole boundary

와 같이 설계변수인 x_i, y_i 의 변분 항으로 표현된다. 따라서 식(12), (13)을 (9)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 경계적분방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} c^0 \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right)^0 + \int_{\Gamma} \left\{ G \left(\frac{\partial q}{\partial x_i} \right) - F \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \right\} ds \\ = \int_{\Gamma} \left(H \alpha^* - F \frac{\beta^*}{k} \right) ds + \int_{\Gamma_i} \left(H \alpha - F \frac{\beta}{k} \right) ds \\ c^0 \left(\frac{\partial T}{\partial y_i} \right)^0 + \int_{\Gamma} \left\{ G \left(\frac{\partial q}{\partial y_i} \right) - F \left(\frac{\partial T}{\partial y_i} \right) \right\} ds \\ = \int_{\Gamma} \left(H \beta^* + F \frac{\alpha^*}{k} \right) ds + \int_{\Gamma_i} \left(H \beta - F \frac{\alpha}{k} \right) ds, \end{aligned} \quad \xi_0 \in \Gamma, i=1, \dots, m \quad (14)$$

여기서 α 와 β 는 다음과 같은 간단한 표현식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \alpha &= q n_y - k T_{,s} s_y \\ \beta &= -q n_x + k T_{,s} s_x \end{aligned} \quad (15)$$

α^* 와 β^* 는 ξ_0 점의 위치에 따라 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \alpha^* &= \alpha \\ \beta^* &= \beta, \quad \xi_0 \in \Gamma_i \\ \alpha^* &= 0 \\ \beta^* &= 0, \quad \xi_0 \notin \Gamma_i \end{aligned} \quad (16)$$

이제 경계적분방정식 (14)에서는 임의의 i 번째 가열선의 구멍 중심 좌표에 관한 T, q 의 민감도가 미지 변수가 된다. 다이에 가해지는 경계조건은 가열선 위치에 관계없이 일정하다고 볼 수 있으므로, 민감도의 경계조건은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{가열선 구멍경계: } \frac{\partial T}{\partial b_i} &= 0 \\ \text{다이 내면과 대칭면: } \frac{\partial q}{\partial b_i} &= 0 \\ \text{그 외의 다이경계: } \frac{\partial q}{\partial b_i} &= h \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\partial T}{\partial b_i} \right), \\ & i=1, \dots, 2m \end{aligned} \quad (17)$$

이제 새롭게 유도된 경계적분방정식 (14)를 경계요소로 이산화하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[G] \left\{ \frac{\partial q}{\partial b_i} \right\} - [F] \left\{ \frac{\partial T}{\partial b_i} \right\} = \{Z_i\}, i=1, \dots, 2m \quad (18)$$

이 식에서 좌변의 행렬 $[G], [F]$ 는 식(8)과 동일한 것을 알 수 있다. 따라서 민감도 해석시에는 온도 분포 해석시에 이미 구성된 $[G], [F]$ 를 그대로

사용하고 우변의 $\{Z_i\}$ 만 추가로 구성하면 된다. 식 (14)에서 볼 수 있듯이 $\{Z_i\}$ 는 온도 분포 해석시에 이미 구한 값들을 경계를 따라 적분하여 만들어진 다.

이제 목적함수 Φ 의 형상 민감도 표현식을 구하기 위해 식(2)에 전미분을 취하면 다음과 같이 된다.

$$\Phi' = \int_{\Gamma_{AB}} \frac{2}{T_c} \left(\frac{T}{T_c} - 1 \right) \dot{T} ds \quad (19)$$

여기서 목적함수의 전미분 항 Φ' 은 변분을 의미하므로 다음과 같이 설계변수로 나타낼 수 있다.

$$\Phi' = \delta\Phi = \frac{\partial\Phi}{\partial x_i} \delta x_i + \frac{\partial\Phi}{\partial y_i} \delta y_i \quad (20)$$

식(12)를 사용하면 목적함수의 가열선 구멍위치에 관한 민감도는 결국 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial\Phi}{\partial b_i} = \int_{\Gamma_{AB}} \frac{2}{T_c} \left(\frac{T}{T_c} - 1 \right) \frac{\partial T}{\partial b_i} ds, \quad i=1, \dots, 2m \quad (21)$$

4. 수치예제

본 절에서는 최적위치를 결정하기 위한 예제 문제에 대하여 실제적인 수치계산의 결과를 기술한다. 앞에서 설명된 민감도 해석방법을 최적화 프로그램인 IDESIGN⁽¹⁷⁾과 연결하여 수치적인 최적화 과정을 수행하도록 하였다. 모든 수치계산은 SILICON GRAPHICS의 INDIGO workstation에서 수행하였다.

예제 문제의 압축 성형다이의 폭과 높이는 각각 1.0 m와 0.4 m로, 다이 내면 AB의 폭은 0.6 m로 정하였다. 다이의 재질은 열전도 상수가 50 W/m°C인 것으로 정하였다. 가열선의 온도 T_h 와 다이 주위의 온도 T_∞ 는 각각 170°C와 20°C로, 다이 내면 AB에서 유지하고자 하는 온도 T_c 는 150°C로 정하였다. 소재로 방출되는 열량 q_{out} 은 7 kW/m²이고, 대류 열전달계수 h_1, h_2, h_3 는 각각 6, 2, 4 W/m²°C인 것으로 가정하였다. 가열선의 직경 a 는 0.04 m인 것으로 하였다.

먼저 가열선의 개수가 총 4개, 즉 좌우 대칭 모델에서 각각 2개인 경우에 최적화를 수행하였다. 두 가열선 중심의 초기 위치는 x, y 좌표를 각각 (0.2, 0.2)와 (0.4, 0.2)로 정하였다. 경계요소법을 사용하기 위하여 Fig. 3과 같이 총 43개의 2차

요소(quadratic element)로 모델링하였으며, 모서리(corner) 점은 2중 결점을 사용하였다. 매번의 최적화 반복과정을 수행할 때 전 가열선의 위치가 x, y 양 방향으로 동시에 변화된다. 19회의 반복과정 후에 Fig. 4와 같은 최적위치로 수렴하였다. 최적해를 구하는데 소요된 CPU 시간은 47.8초(second)이다. 최적위치에서 두 가열선 중심의 좌표는 (0.1510, 0.0975)와 (0.4672, 0.0933)이다.

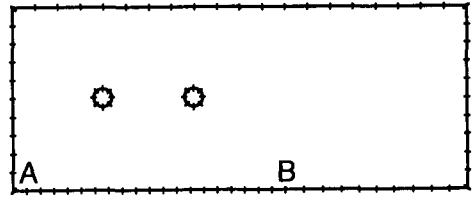


Fig. 3 A quadratic boundary element model of the die for two heating lines

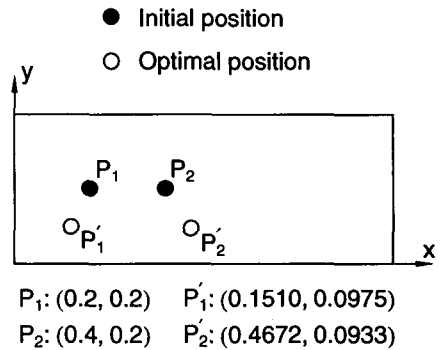


Fig. 4 Initial and Optimal Position for two heating lines

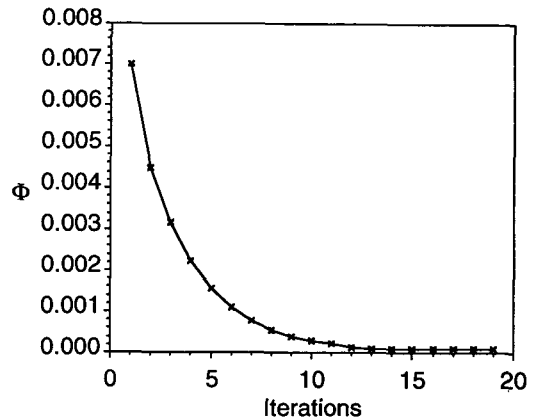


Fig. 5 History of objective function value during iterations

Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 반복과정 동안의 목적함수의 값은 초기 위치의 0.7004×10^{-2} 에서 최적 위치의 0.8308×10^{-4} 으로 단조(monotonically) 감소하였다. 초기와 최적위치일 경우의 다이의 등온선은 Fig. 6과 같다. 초기와 최적위치일 때의 다이내면 AB에서의 온도 분포를 Fig. 7에 보였다. 다이내면의 온도는 초기위치일 때 131~136°C사이이며 최적위치일 때는 목표 온도인 150°C에 평균적으로는 도달하였으나, 부분적으로는 147~152°C 사이의 다소 큰 편차가 나타남을 알 수 있다.

가열선이 총 4개일 경우의 최적위치에서 나타난 온도 편차를 해결하기 위하여, 다이에 총 6개, 즉

대칭 모델에 각각 3개의 가열선이 있는 경우에 대하여 다시 최적화를 행하였다. 세 가열선 중심의 초기위치는 각각 (0.15, 0.2), (0.3, 0.2), (0.45, 0.2)로 정하였으며, 총 47개의 2차 요소로 분할한 경계요소 모델을 사용하였다. 최적위치로 수렴하는데 소요된 반복과정의 회수는 21이며, CPU 시간은 66.7초이다. Fig. 8과 같은 최적위치로 수렴하였으며, 가열선 중심의 최적 위치는 (0.1233, 0.1227), (0.3044, 0.1415), (0.4899, 0.1183)이다. 목적함수의 값은 초기위치의 0.3244×10^{-2} 에서 최적위치의 0.4120×10^{-5} 으로 감소하였다. 초기와 최적위치에서의 다이의 등온선은 Fig. 9와 같다.

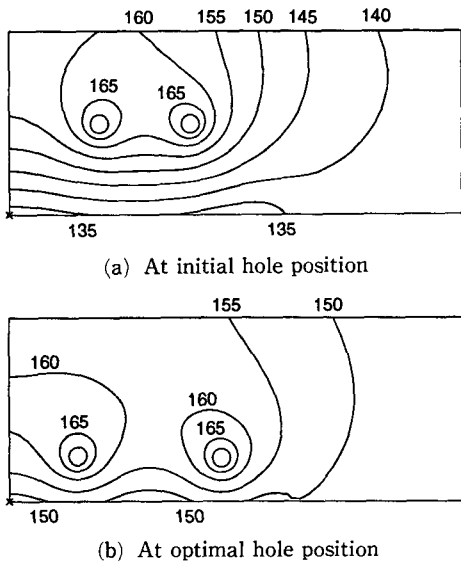


Fig. 6 Temperature contour for two heating lines

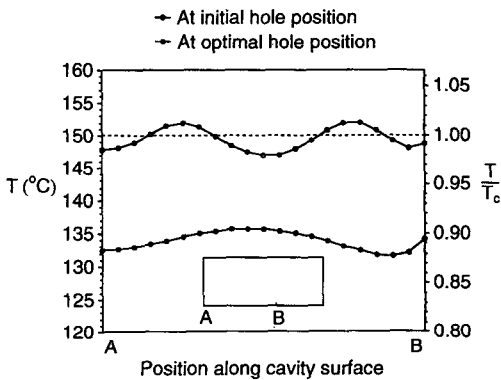


Fig. 7 Temperature distribution along the cavity surface for two heating lines

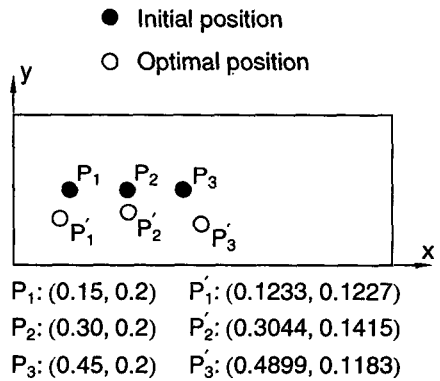


Fig. 8 Initial and Optimal position for three heating lines

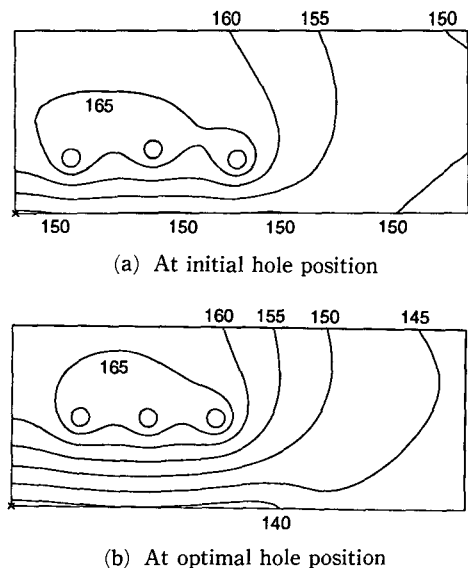


Fig. 9 Temperature contour for three heating lines

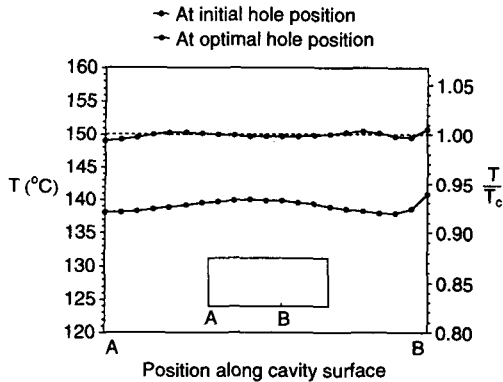


Fig. 10 Temperature distribution along the cavity surface for three heating lines

초기와 최적 위치일 때의 다이 내면 AB에서의 온도 분포는 Fig. 10과 같다. 다이 내면의 온도는 초기위치일 때 138~141°C 사이이며 최적위치일 때는 온도가 전체적으로 목표치인 150°C에 도달하였음을 알 수 있다. 또한 가열선이 2개일 경우에 나타났던 147~152°C 사이의 편차가 가열선이 3개일 경우에는 149~151°C로 크게 줄어서 균일한 온도 분포를 얻을 수 있었음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 압축 성형다이의 열 설계를 위하여 효율적으로 다이 가열선의 최적위치를 결정하기 위한 방법을 제시하였다. 열 설계시에 필수적으로 요구되는 사항인 다이와 소재 접촉면의 균일한 온도 유지를 위하여 형상 최적설계 문제를 정식화하였다. 최적화 문제의 목적함수는 다이 경계에서의 온도에 의해서만 정의되므로, 다이의 온도 분포 해석을 위하여 경계만을 요소 분할해도 되고 요소재 분할이 편리한 경계요소법을 사용함으로써 유한요소법을 사용할 경우에 발생하는 제반 문제점을 해결할 수 있다. 최적화 과정을 수행하는데에 필요한 민감도를 정확하게 예측하기 위하여 형상 설계 민감도 해석 방법을 사용하여 민감도 해석을 위한 경계적분방정식을 유도하였다. 이 경계적분방정식의 미지 변수는 가열선의 위치에 관한 온도와 열속의 민감도로서 경계요소법을 이용하여 편리하게 계산 되도록 하였다.

수치적인 응용의 예로서, 열경화성 폴리머의 압축성형다이의 열 설계시에 발생하는 가열선 위치

결정문제를 예제로 선정하여 수치계산을 하였다. 민감도 해석 방법을 최적화 프로그램과 연결하여, 가열선 구멍의 개수가 총 4개와 6개인 두 경우에 대하여 최적위치를 구하였다. 두 경우의 최적 해를 통하여, 다이와 소재의 접촉면의 온도를 균일하게 하는데에는 가열선의 개수가 큰 영향을 미친다는 것을 보였다.

본 연구에서 제안된 다이의 열 설계방법은 다이 내의 냉각관의 최적설계시에도 동일한 방식으로 적용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Barone, M. R. and Caulk, D. A., 1982, "Optimal Arrangement of Holes in a Two-Dimensional Heat Conductor by a Special Boundary Integral Method," *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 18, pp. 675~685.
- (2) Barone, M. R., Caulk, D. A. and Panter, M. K., 1986, "Experimental Verification of an Optimal Thermal Design in a Compression Mold," *Polymer Composites*, Vol. 7, pp. 141~151.
- (3) Caulk, D. A., 1984, "Special Boundary Integral Equations for Potential Problems in Regions with Circular Holes," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 51, pp. 713~716.
- (4) Rezayat, M. and Burton, T. E., 1987, "A Special Boundary Integral Formulation to Simulate a Manufacturing Process," *IUTAM Symposium on Advanced Boundary Element Methods*.
- (5) Kwon, T. H. and Forcucci, S. J., 1988, "Mold Heating System Design," *Soc. Plastics Engrs-Technical Papers*, Vol. 34, pp. 1585~1587.
- (6) Forcucci, S. J. and Kwon, T. H., 1989, "A Computer Aided Design System for Three-Dimensional Compression Mold Heating," *ASME J. Eng. Industry*, Vol. 111, pp. 361~368.
- (7) Haftka, R. T., 1981, "Techniques for Thermal Sensitivity Analysis," *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 17, pp. 71~80.
- (8) Meric, R. A., 1988, "Shape Design Sensitivity Analysis for Nonlinear Anisotropic Heat Conducting Solids and Shape Optimization by the BEM," *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 26, pp. 109

- ~120.
- (9) Park, C. W. and Yoo, Y.M., 1988, "Shape Design Sensitivity Analysis of a Two-Dimensional Heat Transfer System Using the Boundary Element Method," *Comp. Struct.*, Vol. 28, pp. 543~550.
- (10) Chandra, A. and Chan, C. L., 1992, "A Boundary Element Method Formulation for Design Sensitivities in Steady-State Conduction-Convection Problems," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 59, pp. 182~190.
- (11) Lee, B. Y., Choi, J.H. and Kwak, B. M., 1992, "Shape Optimization of Two-Dimensional Thermal Conducting Solid Using Boundary Integral Equation Formulation," *KSME J.*, Vol. 6, pp. 114~121.
- (12) 이부윤, 1993, "경계적분방정식을 이용한 축대칭 열전도 고체의 형상 설계 민감도 해석," *대한기계학회논문집*, 제17권, 제1호, pp. 141~152.
- (13) Lee, B. Y., Choi, J. H. and Kwak, B.M., 1993, "Direct Differentiation Method for Shape Design Sensitivity Analysis of Thermal Conducting Solids," *Design Sensitivity Analysis*, Post-conference book of ICES '92 in Hong Kong, Atlanta Technology Publications, Atlanta, Georgia, In press.
- (14) Lee, B. Y., 1993, "Shape Sensitivity Formulation for Axisymmetric Thermal Conducting Solids," *Proc. Instn Mech. Engrs, Part C J. Mech. Eng. Sci.*, Accepted for publication.
- (15) Banerjee, P. K. and Butterfield. R., 1981, *Boundary Element Methods in Engineering Science*, McGraw-Hill, New York.
- (16) Haug, E. J., Choi, K. K. and Komkov, V., 1986, *Design Sensitivity Analysis of Structural Systems*, Academic Press, New York.
- (17) Arora, J. S., 1984, "An Algorithm for Optimum Structural Design Without Line Search," in E. Atred(ed.) *New Directions in Optimum Structural Design*, Wiley, New York, pp. 429~441.