

〈논 문〉

경계요소법을 이용한 사출성형금형 냉각시스템의 최적설계

박 성 진* · 권 태 현*

(1996년 7월 15일 접수)

Optimum Design of Injection Molding Cooling System via Boundary Element Method

Seong Jin Park and Tai Hun Kwon

Key Words : Injection Molding(사출성형), Cooling System Design(냉각시스템 설계), Optimization(최적화), Boundary Element Method(BEM : 경계요소법)

Abstract

The cooling stage is the very critical and most time consuming stage of the injection molding process, thus it clearly affects both the productivity and the part quality. Even though there are several commercialized package programs available in the injection molding industry to analyze the cooling performance of the injection molding cooling stage, optimization of the cooling system has not yet been accomplished in the literature due to the difficulty in the sensitivity analysis. However, it would be greatly desirable for the mold cooling system designers to have a computer aided design system for the optimal mold cooling system design and for the determination of best processing conditions of the cooling stage. With this in mind, the present study has successfully developed an integrated computer aided design system for the injection molding cooling system. The CAD system utilizes the sensitivity analysis via a Boundary Element Method, which we recently developed, and the well-known CONMIN algorithm as an optimization technique to minimize a weighted combination (objective function) of the temperature non-uniformity over the part surface and the cooling time related to the productivity with side constraints for the design reality. In the proposed objective function, the weighting parameter between the temperature non-uniformity and the cooling time can be adjusted according to user's interest. In this cooling system optimization, various design variables are considered as follows: (i) (design variables related to processing conditions) inlet coolant bulk temperature and volumetric flow rate of each cooling channel, and (ii) (design variables related to mold cooling system design) radius and location of each cooling channel. For this optimum design problem, three different strategies are suggested based upon the nature of design variables. Three sample problems were successfully solved to demonstrate the efficiency and the usefulness of the CAD system.

*회원, 포항공과대학교 기계공학과

1. 서론

사출성형공정(injection molding process)은 복잡한 형상의 고분자제품을 정밀하고 경제적으로 생산할 수 있는 가장 효율적인 생산기술들중 하나로 인식되어 오고 있어 사출성형품의 수요가 매년 증가하고 있는 추세이다. Fig. 1은 사출금형의 대략도이다. 금형의 cavity는 몇 개의 냉각수로틀(cooling channels)로 둘러싸여 있고, 금형 외부표면은 공기 또는 사출기와 접촉하고 있다. 얇은 사출성형품인 경우 cavity의 전체 표면(S_p^+ 와 S_p^-) 대신 중간면(Γ)으로만 표현할 수 있다. 일반적으로 사출성형공정은 사출온도(injection temperature)에서 고분자재료를 cavity에 채우는 충전과정(filling stage)으로 시작된다. Cavity가 다 충전된 후, 고분자재료의 수축(shrinkage)을 보상하기 위해 높은 압력으로 고분자재료를 부가적으로 채워주는 보압과정(post-filling stage/packing stage)이 이어진다. 뒤이어 제품이 큰 변형 없이 탈형(eject)될 수 있도록 주어진 탈형조건에 이르는 시간까지 냉각과정(cooling stage)이 이루어진다. 제품이 탈형된 후, 금형이 닫히고 다음 사출공정이 반복된다.

사출성형공정 세 과정들 중에서, 냉각과정은 생산성과 최종제품의 품질에 큰 영향을 미치므로 매우 중요하다. 사출성형공정 주기의 75% 이상이 큰 변형없이 탈형될 수 있도록 고분자를 충분히 냉각시키는 데 소요된다는 사실은 잘 알려져 있다. 효율적인 냉각수로설계는 냉각시간(cooling time)을 단축하여 사출성형공정의 생산성을 향상시킬 수 있다. 한편, 최종제품의 심각한 휨(warpage)과 열잔류응력(thermal residual stress) 등은 불균일한 냉각으로 야기된다. 휨과 sink mark는 때때로 품질에 치명적이다. 따라서, 사출성형금형의 냉각시스템설계(cooling system design) 및 냉각과정의 공정조건(processing condition)을 결정할 때 적어도 다음의 두 가지 중요한 개념들을 고려해야 한다: (a) 냉각시간의 최소화 및 (b) 균일한 냉각의 수행. 이러한 목표를 위해, 설계자는 빠르고, 균일한 냉각을 위한 최적설계시스템(optimal design system)을 필요로 한다. 이와 비슷한 고분자재료에 관한 생산공정들의 steepest descent, CONMIN⁽¹⁾ 등의 최적화 알고리즘을 이용하여 최적화문제를 다룬 앞선 연구들이 몇몇 있다. 예를 들면, 사출성형의 이차원 열시스템설계(thermal system design)에

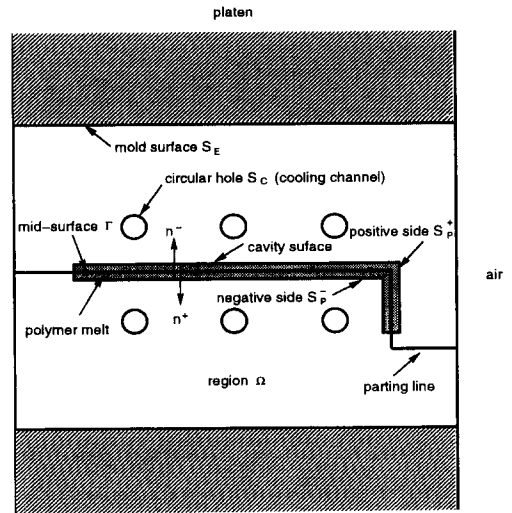


Fig. 1 Schematic diagram for an injection molding

대한 Barone과 Caulk,⁽²⁾ 압축금형(compression mold)의 삼차원 열시스템 설계에 대해 Forcucci와 Kwon,⁽³⁾ 압축금형의 삼차원 냉각수로 및 열선(heating line) 설계에 대해 Matsumoto와 동료들⁽⁴⁾ 등의 연구들이 문헌에 보고된 바 있다. 그러나, 아직 사출성형 냉각시스템의 삼차원 최적설계 시스템 개발은 문헌에 보고된 바 없다.

사출성형 냉각시스템 해석 프로그램은 Moldflow와 C-Mold 등을 비롯한 여러 상용 Package들로 상품화되어 있어 널리 이용되고 있지만, 사출성형 냉각시스템 최적설계는 아직도 세계적으로 이룩되지 못했던 복잡한 문제이다. 이러한 최적설계를 위해서는 사출성형 냉각시스템 해석과 함께 효율적인 설계 민감도해석이 기본적으로 요구되는데, 본 연구의 선행 연구에서 냉각시스템 해석 프로그램 개선 및 효율적인 설계 민감도해석을 위한 수치해석 기법과 설계 민감도해석 프로그램을 성공적으로 개발한 바 있다.^(5,6)

본 연구에서는 최종목표인 사출성형금형 냉각시스템의 삼차원 최적설계를 위한 CAD 시스템(computer aided design system)을 성공적으로 개발하였다. 개발된 CAD 시스템은 CAD 시스템 개발의 선행 연구 수행결과 개발된 사출성형금형 냉각시스템 해석 프로그램⁽⁵⁾ 및 그에 상응하는 설계 민감도해석(design sensitivity analysis) 프로그램⁽⁶⁾과 함께 잘 알려진 CONMIN 최적화 알고리즘⁽¹⁾을 도입하여 완성되었다. 이 최적화 CAD 시스템에서는

설계의 실제성을 위한 제한변역을 두고 사출성형품의 품질에 관련된 제품표면에서의 온도불균일도(temperature non-uniformity)와 생산성에 관련된 냉각시간의 가중조합(weighted combination)을 최소화하기 위한 사출성형 냉각시스템의 효율적인 최적화를 수행하였다. 또한, 다음과 같은 다양한 설계변수들(design variables)이 고려되었다. (i) (공정조건과 관련된 설계변수들) 각 냉각수로의 냉각수 입구온도와 입구유량, 그리고 (ii) (금형 냉각시스템 설계와 관련된 설계변수들) 각 냉각수로의 반경과 위치. 그리고, 금형설계와 사출성형공정 및 설계변수들의 특성을 바탕으로 사출성형 냉각시스템 최적화를 위하여 세 가지의 다른 최적화방법들을 제안하였다. 본 논문에서는 CAD 시스템을 위한 문제정의 및 물리적 모델링, CAD 시스템의 각 구성요소들 및 개발된 CAD 시스템의 전체 구조와 예제를 통한 개발된 CAD 시스템의 효율성과 유용성에 대해 기술한다.

2. 문제 정의

설계변수 : 주어진 사출성형품에 대하여 품질(온도의 균일성)과 생산성을 증가시키기 위해, 우리는 금형 냉각시스템 설계와 사출성형공정중 냉각과정에 대한 공정조건을 조절할 수 있다. 그러므로, 다음과 같은 설계변수들을 생각할 수 있다.

- 공정조건과 관련된 설계변수들
 - 각 냉각수로의 냉각수 입구온도
 - 각 냉각수로의 냉각수 입구유량
- 금형 냉각시스템 설계와 관련된 설계변수들
 - 각 냉각수로의 반경
 - 각 냉각수로의 위치

최적설계문제 : 사출성형공정중 냉각과정에서 주기-평균(cycle-averaged) 전도열전달의 최적설계 문제는 다음과 같이 정의된다 :

주어진 제품형상과 냉각수로들에 대하여, 제한변역들(즉, 모든 설계변수들의 실제적인 변역들)을 가지고 제품표면의 온도분포의 불균일성과 생산성과 관련된 냉각시간의 가중조합을 최소화하기 위하여 모든 설계변수들의 최적값들(optimal values)을 구한다.

3. 물리적 모델링

사출성형 냉각과정 전체 해석을 위해서 금형영역과 고분자재료영역에 대해 각각 물리적 모델링이 필요하다.

금형해석(mold analysis) : 금형영역에 대한 주기-평균 접근법은 과도적(transient)인 고분자재료의 온도분포와 냉각수에 의한 열제거효과를 잘 예측할 수 있다고 알려져 있다.^(7,8) 이 접근법에 바탕을 둔 주기-평균 온도분포는 정상상태 열전도에 의해 표현될 수 있다. 그러므로 사출금형 냉각시스템에 대한 열전달의 지배미분방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla^2 T = 0 \tag{1}$$

여기서, T 는 금형 내부에서의 온도분포를 나타낸다.

의미있는 주기-평균 온도분포를 구하기 위해서, 주기-평균 접근법에 일치되는 경계조건들을 도입하는 것은 중요하다. 우선, cavity 표면에서 우리는 다음과 같은 주기-평균 열유속(heat flux)을 줄 수 있다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \bar{q} \tag{2}$$

여기서, k 는 금형재료의 열전도율(thermal conductivity), \hat{n} 는 제품표면에서 외부로의 단위수직벡터(unit normal vector) 그리고 \bar{q} 는 다음과 같이 주어지는 주기-평균 열유속이다.

$$\bar{q} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} q \, dt \tag{3}$$

여기서, t , t_c 와 q 는 각각 시간변수, 냉각시간과 순간열유속이다. 냉각시간과 순간열유속은 제품해석(part analysis)으로부터 계산될 수 있다. 다음으로, 냉각수로 표면에서는 다음과 같은 혼합경계조건(mixed boundary condition)을 적용할 수 있다 :

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_b) \tag{4}$$

여기서, h 와 T_b 은 각각 열전달계수(heat transfer coefficient)와 냉각수온도이다. 열전달계수와 냉각수온도는 Dittus-Boetler 관계식 그리고 로그평균차(log-mean-difference) 개념을 이용하여 계산할 수 있다.⁽⁹⁾ 마지막으로, 금형 외부표면에서, 금형

외부표면을 통한 열손실이 대부분 사출성형에서 매우 작기(전형적으로 5% 미만)때문에 금형 외부표면은 본 연구에서 무한 단열구(infinite adiabatic sphere)로써 처리하였다. (물론, Park과 Kwon⁽⁶⁾이 제시한 것처럼 금형 외부표면에서 보다 엄밀한 처리를 도입할 수도 있다.)

제품해석(part analysis) : 고분자 제품의 열전달 해석을 위하여, 일반적으로 얇기 때문에 국부적인 일차원 과도해석이 적합하다.^(7,8) 고분자 제품이 일정한 열특성치를 가진다고 가정하면, 고분자 제품에서 열전달을 위한 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5)$$

여기서, z 와 α 는 각각 제품의 두께방향으로 국부 좌표와 열확산계수(thermal diffusivity)를 나타낸다. 이 문제의 초기조건으로써, 본 연구에서는 균일한 사출온도를 사용하였다. 이 제품해석은 금형-제품의 경계온도(interfacial temperature)가 경계조건으로 사용되기 때문에 제품해석은 경계온도를 통해 금형해석과 연계되어 있다. 식 (5)는 급수해(analytic series solution)를 이용하여 구할 수 있다. 이 제품해석은 $t=t_c$ 까지 계속된다. 본 연구에서, 냉각시간은 모든 고분자 제품안에서 최고온도가 취출온도에 이를 때까지 필요한 시간으로 계산된다.⁽⁵⁾

4. 경계요소법을 이용한 열전달해석

경계적분방정식(boundary integral equation) : 사출 금형 형상에서처럼 매우 가까이 있는 제품의 양쪽 표면(S_0^+ 와 S_0^-)의 처리를 위해 수정된 경계요소수식화의 사용이 필요하다. 이 수정된 경계요소수식화에서는, 두 개의 가까이 있는 실제 표면대신 중간면(Γ)이 고려된다. 중간면(Γ) 위에서의 점 \vec{x} 에 대하여 경계적분방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.^(5,8,10)

$$\begin{aligned} & a^+ T^+(\vec{x}) + a^- T^-(\vec{x}) \\ &= \int_r \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial T^+}{\partial n^+} + \frac{\partial T^-}{\partial n^-} \right) \right. \\ & \quad \left. - \frac{\partial}{\partial n^+} \left(\frac{1}{r} \right) (T^+ - T^-) \right] dS(\vec{\xi}) \\ & \quad + \int_{s-r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial n} - \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) T \right] dS(\vec{\xi}) \quad (6) \end{aligned}$$

여기서, $\vec{\xi}$ 는 경계면 위에서의 점을 나타내며, $r = |\vec{\xi} - \vec{x}|$, α 는 경계면에 의해 형성되는 solid angle을 표시하며, S 는 정의역(Ω)의 전체 경계면들을 나타낸다. Fig. 1은 식 (6)에서 사용된 부호들을 보여준다. 식 (6)에서 $S-\Gamma$ 는 cavity 표면을 제외한 나머지 경계면을 나타낸다. 중간면의 각 요소에 미지수가 두 개 있으므로(표면 양쪽에서의 온도, T^+ 와 T^-), 식 (6) 이외에 추가적으로 요구되는 식을 유도하기 위하여, Rezayat와 Burton이 제안한 것과 같이 중간면 요소에서 수직방향으로 식 (6)의 미분을 취해 구할 수 있다⁽¹⁰⁾. 냉각수로, sprue와 runner의 중심축 위에 있는 점 \vec{x} 에 대하여, 식 (6)의 왼쪽이 0이 된다. 냉각수로 표면에서의 적분에 대해, 본 연구에서는 line-sink 근사법에 바탕을 둔 특별한 수식화를 사용하였다. (경계적분방정식들에 대한 상세한 설명에 대해서 Park과 Kwon⁽⁵⁾을 참조.)

해법(solution procedure) : 금형해석을 위한 이산화된 경계요소식은 다음의 일차 연립방정식으로 바뀔 수 있다 :

$$[A_{ij}]\{T_j\} = \{f_i\} \quad (7)$$

여기서, $[A_{ij}]$ 와 $\{f_i\}$ 는 경계조건을 반영한다. 이 문제를 위해, 혼합경계조건의 도움으로 $\partial T/\partial n$ 을 소거하여 온도(T)가 모든 요소들에서의 미지수로 취하여 진다.

5. 설계 민감도해석

설계 민감도해석을 위한 경계적분방정식 : 정의역 내부에서의 요소화(discretization)가 필요없고 설계변수들이 경계에서만 정의되어 있는 경우에는 경계요소법(boundary element method ; BEM)이 설계 민감도해석을 위한 좋은 방법 중의 하나이다. 사출금형 냉각시스템 설계에서 모든 설계변수들은 경계에서만 정의되어 있다. 그러므로, 경계요소법은 이런 종류의 열전달문제의 설계 민감도해석에 효율적으로 적용될 수 있다. 본 연구에서는 직접미분접근법(direct differentiation approach; DDA)을 사용하였다.

모든 설계변수들에 대한 냉각시간과 제품표면에서 온도분포의 민감도값들(sensitivity values)은 최적설계에 중요한 정보를 제공한다. 이런 설계민감도값들을 결정하기 위하여, 4장의 금형해석을 위한

적분방정식들을 모든 설계변수들에 대하여 음함수 미분(implicit derivative)을 하면, 모든 설계변수에 대하여 설계 민감도를 위한 경계적분방정식들을 유도할 수 있다. 공정조건과 관련된 설계변수는 금형의 형상을 바꾸지 않기 때문에, 이들 설계변수에 대해서는 식 (6)의 T 와 $\partial T/\partial n$ 를 $\partial T/\partial X$ 와 $\partial(\partial T/\partial n)/\partial X$ 로 바꾸면 설계 민감도를 위한 경계적분방정식이 된다. 여기서, X 는 설계변수이다. 한편, 금형설계와 관련된 설계변수는 금형의 형상을 바꾸기 때문에, 공정조건과 관련된 설계변수의 경우에 대한 식에 추가되는 항들이 나타난다. 예를 들어, j 번째 냉각수로의 위치중 x -좌표가 설계변수인 경우 r 이 설계변수 x 에 대한 함수이므로 다음의 항들이 추가되어야만 한다.

$$\int_{l_j} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{r} \right) \frac{\partial T}{\partial n} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) \right) T \right] dS(\xi) \quad (8)$$

여기서, l_j 는 j 번째 냉각수로의 표면을 나타낸다. (다른 설계변수들에 대한 설계민감도를 위한 경계적분방정식들에 대한 자세한 설명은 Park과 Kwon^(6,11)을 참조.)

이 설계 민감도식들을 풀기 위하여, 적절한 민감도경계조건들을 적용하는 것이 중요하다. 먼저, cavity의 표면에서는 냉각시간과 주기-평균 열유속에 대한 식들을 각 설계변수에 대하여 음함수미분함으로서 각 설계변수에 대하여 냉각시간의 민감도를 결정한 다음, 주기-평균 열유속의 민감도를 민감도 경계조건로서 부여할 수 있다. 다음으로, 냉각수로의 표면에서는 열전달계수와 냉각수온도 모두에 대한 민감도값들을 계산하여야 한다. 우리는 Dittus-Boelter 관계식과 로그평균차 개념에 대한 식을 모든 설계변수들에 대하여 음함수미분함으로써 이들 민감도값들을 구하였다.

해법: 이산화된 설계 민감도해석을 위한 경계요소수식은 다음과 같은 선형연립방정식으로 만들 수 있다:

$$[A_{ij}]\{T_{j,x}\} = \{f_{i,x}\} - [A_{ij,x}]\{T_j\} \\ \equiv \{f'_{i,x}\} \quad (9)$$

여기서, $T_{j,x}$ (각 요소에서의 미지수)는 설계변수 X 에 대한 온도의 민감도이다. 식 (9)의 행렬, $[A_{ij}]$ 은 열전달해석에서 식 (7)의 것과 정확히 같다는 것을 이용하여 모든 설계변수들에 대해 일단 $\{f'_{i,x}\}$ 를 계산하기만 하면, 설계 민감도해석의 결

과, $\{T_{j,x}\}$ 는 모든 설계변수들에 대해 동시에 결정할 수 있어 계산시간을 상당히 줄일 수 있다. 소거법(elimination method)을 사용할 경우, 열전달해석시 형성된 $[A_{ij}]$ 의 LU-factorization을 설계민감도해석시 반복하여 사용할 수 있으므로, multiple forcing 행렬을 가지고 모든 설계변수들에 대해, $T_{j,x}$ 를 동시에 매우 효율적으로 계산할 수 있다. 한편, 반복방법(iterative method)은 LU-factorization보다는 계산시간은 많이 소요되지만, 컴퓨터 memory를 작게 사용하기 때문에 많은 요소들을 다루어야 할 경우에 대해서 보다 더 유용할 수 있다.

6. 최적화

최소화되어야 할 목적함수의 선택, 설계의 실제성을 위한 제한조건, 열전달해석 및 설계 민감도해석은 최적설계법을 사용하기 위한 필수조건들이다. 이들 중에서, 열전달해석 및 설계 민감도해석은 각각 4장과 5장에서 설명하였다. 이 장에서는 최소화되어야 할 목적함수의 선택, 설계의 실제성을 위한 제한조건, 최적화 알고리즘, 최적화방법에 관해 설명하겠다.

목적함수(objective function): 제품의 표면에서 온도균일성과 함께 생산성과 관련된 냉각시간의 조합을 최소화하는 목적을 위하여, 표준화(normalization)된 목적함수는 다음과 같이 선택할 수 있다.

$$F(\vec{X}) = \alpha \frac{F_1(\vec{X})}{\bar{F}_1} + (1-\alpha) \frac{F_2(\vec{X})}{\bar{F}_2} \quad (10)$$

여기서,

$$F_1(\vec{X}) = \frac{\int_r (T - \bar{T})^2 dS}{\bar{T}^2 \int_r dS}, \quad F_2(\vec{X}) = T_c$$

식 (10)에서, \vec{X} 는 설계변수벡터(본 연구에서는 2장에 기술된 모든 설계변수들), \bar{T} 는 제품표면에서의 평균온도, \bar{F}_1 는 표준화를 위한 기준값, \bar{F}_2 는 예상되는 냉각시간이다. 사용자는 관심에 따라 가중변수 α 는 조절할 수 있다. 가중변수의 효과는 다음 장에서 설명할 것이다.

제한변역(constraints): 적절한 제한변역은 이러한 최적화문제에 대해 설계 실제성을 보장하기 위하여 모든 설계변수들에 대하여 부여하여야 한다.

본 연구의 문제에서, 각 냉각수로의 반경과 위치에 대한 변역(interval)을 금형설계의 관점에서 설계 실제성을 보장하기 위하여 부여하여야 한다. 또한, 실질적인 공정조건을 위하여 각 냉각수로의 냉각수 입구온도 및 입구유량에 대해서도 변역을 부여하여야 한다. 설계변수 X_i 와 관련된 제한변역은 다음과 같이 표현된다 :

$$A_i \leq X_i \leq B_i \quad i=1, \dots, n \quad (11)$$

이는 다음과 같이 새로운 slack variable Y_i 를 이용하여 다음과 같은 등식으로 수정할 수 있다.

$$G_i(X_i, Y_i) = X_i - A_i - (B_i - A_i) \sin^2 Y_i = 0 \quad i=1, \dots, n \quad (12)$$

여기서, n 은 설계변수의 개수이다.⁽¹²⁾

최적화 알고리즘(optimization algorithm) : 제한조건을 가진 최소화문제를 풀기 위해서는, Haaroff와 Buys가 발전시킨 CONMIN 알고리즘⁽¹⁾을 사용하였다. 이는 본 문제와 매우 유사한 압축금형의 열시스템의 최적설계를 Barone과 Caulk⁽²⁾ 그리고 Forcucci와 Kwon⁽³⁾이 성공적으로 수행한 경험이 있기 때문이다. CONMIN 알고리즘은 등식 제한조건의 처리하기 위하여 Lagrangian multiplier Method(ALM)를 이용하여 제한조건없는 최소화문제로 수정하고, 이를 해결하기 위하여 Davidon-Fletcher-Powell 방법⁽¹³⁾을 사용한 것이다.⁽¹⁴⁾

최적화방법 : 이 최적설계문제를 위해, 설계변수의 특성을 바탕으로 다음과 같이 세가지 서로 다른 최적화방법을 생각할 수 있다.

- (1) (Strategy A) 모든 설계변수들에 대해 한번에 최적화.
- (2) (Strategy B) 우선 금형 냉각시스템 설계와 관련된 설계변수들에 대해 최적화한 후 공정조건에 관련된 설계변수들에 대해 최적화.
- (3) (Strategy C) 우선 공정조건에 관련된 설계변수들에 대해 최적화한 후 금형 냉각시스템설계와 관련된 설계변수들에 대해 최적화.

Strategy A는 주어진 컴퓨터의 용량에 비해 다루기에 설계변수들이 과다한 경우에는 적용하기 힘들다. 이런 경우, 컴퓨터의 용량의 효율성때문에 Strategy B나 Strategy C를 사용할 수 있을 것이다. 실제 사출금형을 제작 후 금형의 구조를 바꿀 수 없기때문에 Strategy B와 같은 상황이 일어날 수도 있고, 사출성형공정을 하다가 금형설계를 바

꾸는 경우도 있는데, 이는 Strategy C와 비슷하다 할 수 있다. 본 연구에서는 상기의 방법 중에서 어느 것이 개발된 최적설계 CAD 시스템에 적합한가를 조사하고자 한다.

7. 최적설계 CAD 시스템의 전체 구조

Fig. 2는 개발된 최적설계 CAD 시스템의 전체 구조를 나타낸다. 개발된 최적설계 CAD 시스템은 input data를 준비하는 PRE-PROCESSOR와 최적설계 결과를 출력하는 POST-PROCESSOR의 입출력 user interface module들과 최적설계를 위한 THERMAL ANALYSIS, SENSITIVITY ANALYSIS 및 OPTIMIZATION의 core module들이 서로 interactive하게 구성되어 있다. THERMAL ANALYSIS module에서는 금형 냉각해석 후에 현 설계에서의 목적함수를 계산하고, SENSITIVITY ANALYSIS module에서는 향상된 설계

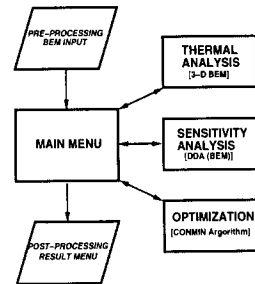


Fig. 2 Diagram for overall structure

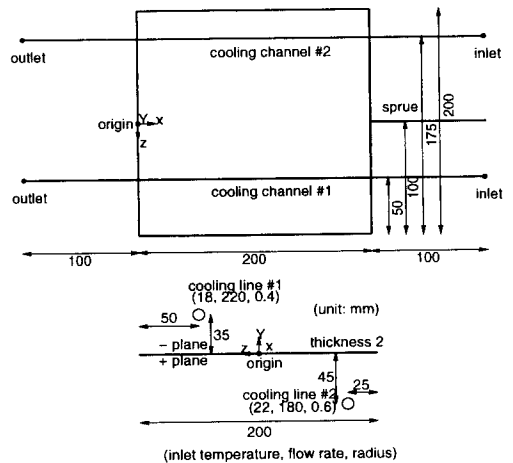


Fig. 3 Flat plate with two cooling channels : initial design

를 위한 민감도해석 결과를 구하며, OPTIMIZATION module은 위 두 module들의 결과를 이용하여 새로운 최적설계를 구현하는 기능을 한다.

8. 결과 및 토의

경계요소로서 제품표면에서는 삼각형요소가 냉각수로에서는 직선요소가 사용되었다. 본 연구의 열

Table 1 Optimal values of design variables for several weighting parameters

a	T _{i,j}		Q _{i,j}		a _j		y _j		z _j	
	j=1	j=2	j=1	j=2	j=1	j=2	j=1	j=2	j=1	j=2
0.00	23.7	24.9	172	160	0.483	0.486	5.10	-5.15	0.0137	-0.0501
0.25	22.4	23.5	184	172	0.489	0.491	4.67	-4.71	0.0398	-0.0973
0.50	19.7	19.8	204	201	0.498	0.499	4.30	-4.25	0.0287	-0.0371
0.75	14.5	15.3	230	227	0.510	0.511	3.66	-3.72	0.0399	-0.0349
1.00	13.3	14.0	246	237	0.517	0.518	3.09	-3.12	0.0678	-0.0200

(unit : °C, cc/sec, cm, cm, cm)

Table 2 Optimal values of design variables for all the strategies

j	Strategy	T _{i,j}	Q _{i,j}	a _j	x _j	z _j
1	A	23.9	117.6	0.308	15.13	2.53
	B	22.4	118.2	0.316	15.11	2.64
	C	25.6	116.2	0.294	15.14	2.34
2	A	23.9	117.6	0.308	15.13	-2.53
	B	22.4	118.2	0.316	15.11	-2.64
	C	25.6	116.2	0.294	15.14	-2.34
3	A	22.1	116.8	0.331	10.00	2.79
	B	21.6	117.7	0.340	10.00	2.91
	C	23.4	114.5	0.312	10.00	2.62
4	A	22.1	116.8	0.331	10.00	-2.79
	B	21.6	117.7	0.340	10.00	-2.91
	C	23.4	114.5	0.312	10.00	-2.62
5	A	23.9	117.6	0.308	4.87	2.53
	B	22.4	118.2	0.316	4.89	2.64
	C	25.6	116.2	0.294	4.86	2.34
6	A	23.9	117.6	0.308	4.87	-2.53
	B	22.4	118.2	0.316	4.89	-2.64
	C	25.6	116.2	0.294	4.86	-2.34

(unit : °C, cc/sec, cm, cm, cm)

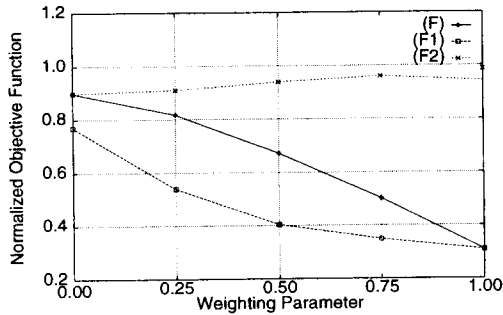


Fig. 4 Normalized objective functions versus weighting parameter at optimal design

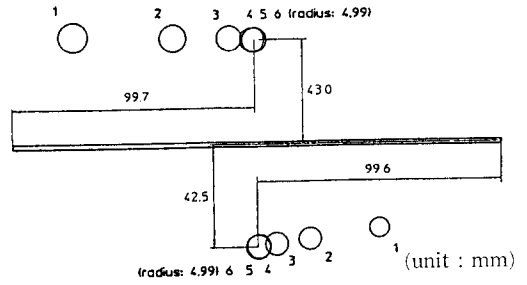
전달해석과 설계 민감도해석에서 온도, 얼음속 및 그들의 민감도값들이 각 요소마다 일정하다고 가정하였다. 본 연구에서 사용한 컴퓨터는 SUNSPARC 10 (22.9 MFLOPS / 102 mips) 기종을 사용하였다. 세가지 대표적인 금형에 대해 본 논문에서 제안한 최적화방법을 적용하였다.

두개의 냉각수로를 가진 평판 : Fig. 3은 두개의 냉각수로를 가진 초기설계시의 제품형상을 보여준다. 이러한 간단한 금형에는 식 (10)에서 나타난 목적함수의 가중변수(α)의 역할과 효과를 조사하기 위해 선택되었다. 계산에 사용된 경계요소의 수는 제품, sprue 및 냉각수로에서 각각 588, 5, 30개이다. 사용된 금형재료는 HR 700으로 열전도계수가 $105 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이다. 사용된 고분자재료와 냉각수는 polyethylene과 물이다. 이 금형 예에서 사용된 공정조건은 다음과 같다.

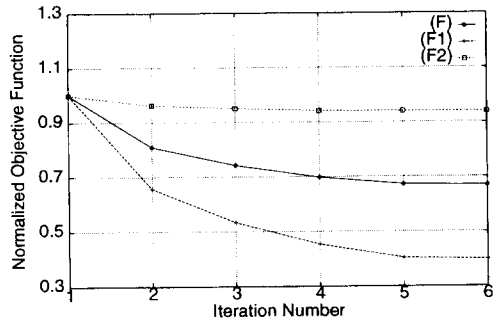
(1) 고분자재료의 사출온도와 취출온도는 각각 250°C 와 110°C 이다.

(2) 1번 냉각수로의 입구온도와 입구유량은 각각 18°C 와 220 cc/sec 이고, 2번 냉각수로의 입구온도와 입구유량은 각각 22°C 와 180 cc/sec 이다.

제안된 방법의 검증으로서 최적화결과가 대칭형으로 되는지 알아보기 위해, 1번 냉각수로와 2번 냉각수로의 반경, 위치 및 공정조건 등을 고의적으로 다르게 하였다. 이 금형 예의 설계변수들은 각 냉각수로의 냉각수의 입구온도, 입구유량, 반경, y-좌표, z-좌표 등이다. 각 냉각수로의 x 좌표의 효과는 무시한다. Strategy A를 이 금형에 적용하였다. 이 예의 최적화과정에서, 초기설계에서의 F_1 의 값과 냉각시간의 값들을 \bar{F}_1 와 \bar{F}_2 로 각각 사용하였다. 초기설계에서의 냉각시간은 6.47 sec이다. 최적화과정은 최적설계를 얻기위하여 최소화과



(a) Path from initial design to optimal design



(b) Normalized objective versus iteration

Fig. 5 Results of optimization at $\alpha=0.5$

정을 5번의 반복계산을 수행하였고, 약 40시간의 계산시간이 소요되었다. Table 1은 몇몇 가중변수에 대한 각 설계변수들의 최적치를 보여준다. (Table 1과 Table 2에서, j , $T_{i,j}$, $Q_{i,j}$, a_j , x_j , y_j 와 z_j 는 각각 냉각수로의 번호, j 번째 냉각수로의 냉각수 입구온도, 냉각수 입구유량, 반경, x-좌표, y-좌표와 z-좌표를 나타낸다.) 위의 결과로부터, 예상된 바와 같이 다음의 성질을 발견하였다

(a) α 가 증가하면서, 냉각수 입구온도는 증가한다.

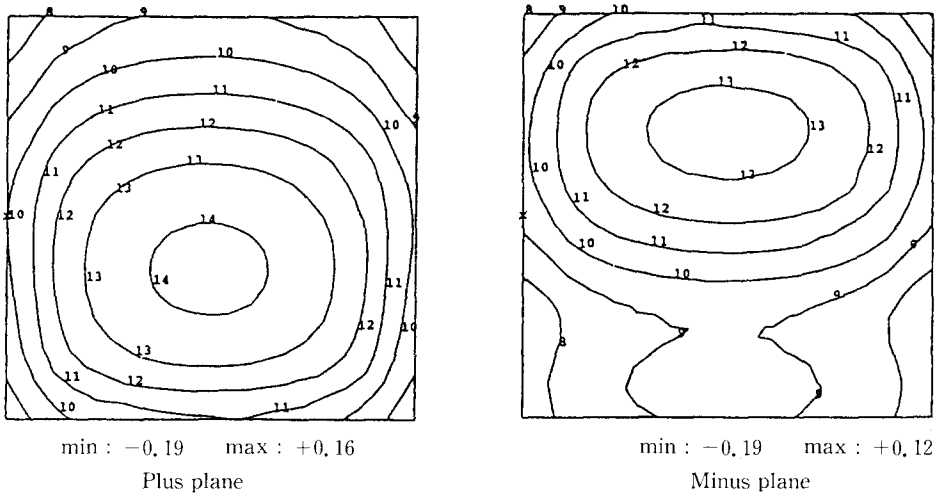
(b) α 가 증가하면서, 냉각수 입구유량은 감소한다.

(c) α 가 증가하면서, 반경은 감소한다.

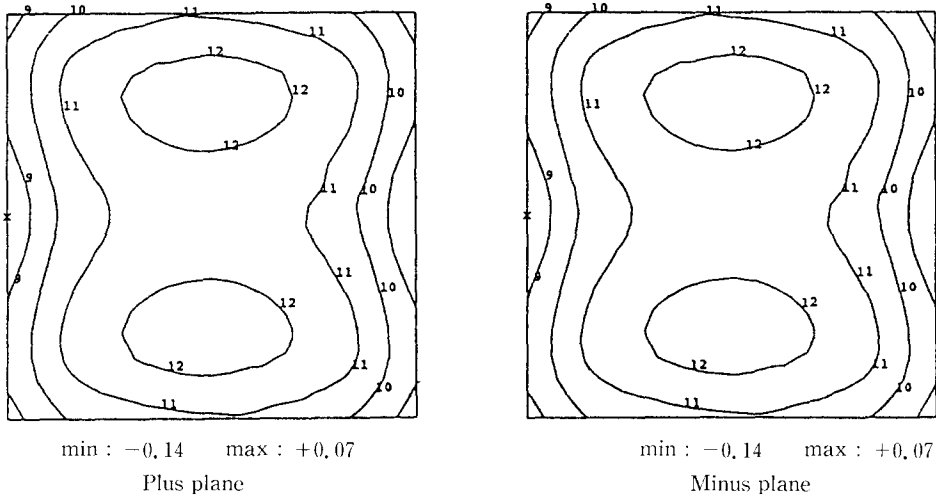
(d) α 가 증가하면서, 냉각수로와 제품과의 거리는 증가한다.

(e) 모든 α 에 대하여, z 좌표는 대칭점, 즉 제품의 중심으로 움직인다.

Fig. 4는 몇몇 가중변수에 대해 각각 해당되는 표준화된 목적함수들, F_1 , F_2 와 F 의 값들이 예상과 같이 변화되고 있음을 보여준다. Fig. 5는 $\alpha=0.5$ 인 경우에 최적화과정에서 초기설계에서 최적설계의 진행과정과 이에 상응하는 표준화된 목적함



(a) Initial design ($\bar{T}=74.97$)



(b) Optimal design ($\bar{T}=73.00$)

Fig. 6 Uniformity distribution on the part surface at $\alpha=1.0$: (a), (b) [level value=(11 level number)/20]

수들의 값들을 나타낸다. 모든 가중변수들에 대해 대칭적인 설계로 변하는 것이 나타난다. Fig. 6은 $\alpha=1.0$ 에서 초기설계와 최적설계에서의 균일성분포, $(T/\bar{T})-1$,를 나타낸다. 이것은 확실히 초기설계보다 최적설계가 제품표면에서 훨씬 균일한 온도분포를 갖는다는 것을 나타낸다. 이러한 만족할 만한 결과는 제안된 최적화방법이 매우 성공적으로 적용되고 있음을 의미한다. 더욱이, $\alpha=1.0$ 에서 몇 개의 다른 초기설계로부터 제안된 최적화방법에 의해 거의 같은 최적화결과가 나오는 것을 확인하였다.

6개의 냉각수로를 가진 평판 : Fig. 7에서와 같이 두번째 예는 6개의 냉각수로를 가진 평판모양의 형상이다. 사용된 경계요소의 수는 제품과 냉각수로에서 각각 558, 60개이다. 사용된 금형재료는 HR 700으로 열전도계수가 $105 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이다. 사용된 고분자재료와 냉각수는 polyethylene과 물이다. 이 금형 예에서 사용된 공정조건은 다음과 같다.

- (1) 고분자재료의 사출온도와 취출온도는 각각 250°C 와 110°C 이다.
- (2) 모든 냉각수로의 입구온도와 입구유량은 각각 20°C 와 150 cc/sec 이다.

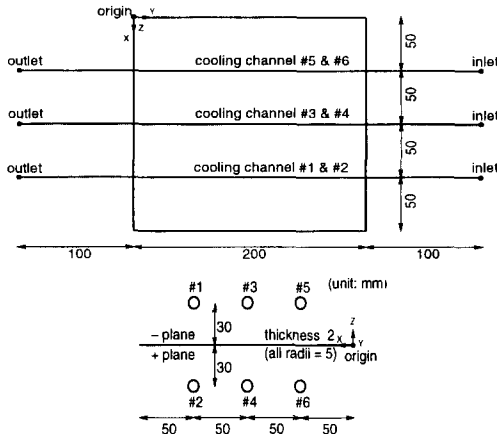


Fig. 7 Flat plate with six cooling channels: initial design

이 금형 예의 설계변수들은 각 냉각수로별로 냉각수로의 냉각수 입구온도와 입구유량, x-좌표 및 z-좌표이다. 냉각수로들의 y-좌표는 무시하였다. $\alpha=0.5$ 에서 세가지 다른 최적화방법을 모두 적용하였다. Table 2는 세가지 방법으로부터 얻어진 최적화값들이다. Strategy A로 얻어진 최적화값들은 모두 Strategy B와 Strategy C에 의해 얻어진 값들 사이에 있다. 각 방법들의 계산상의 특징들은 다음과 같다.

(1) (Strategy A) 최적설계를 얻기위해 5번의 반복계산이 필요하며 65:08:21 (hr:min:sec)의 계산시간이 소요되었다. 최적설계에서 표준화된 목적함수의 값은 0.812이다. 초기설계와 최적설계에서 냉각시간은 각각 5.12 sec와 4.81 sec이다.

(2) (Strategy B) 최적설계를 얻기위해 11번의 반복계산이 필요하며 89:49:22의 계산시간이 소요되었다. (처음 최적화에서 8번, 두번째 최적화에서 3번) 최적설계에서 표준화된 목적함수의 값은 0.821이다. (첫번째 최적화 후 0.834) 첫번째 최적설계와 두번째 최적설계에서 냉각시간은 각각 4.83 sec와 4.89 sec이다.

(3) (Strategy C) 최적설계를 얻기위해 11번의 반복계산이 필요하며 89:25:56의 계산시간이 소요되었다. (처음 최적화에서 3번, 두번째 최적화에서 8번) 최적설계에서 표준화된 목적함수의 값은 0.841이다. (첫번째 최적화 후 0.974) 첫번째 최적설계와 두번째 최적설계에서 냉각시간은 각각 5.20 sec와 4.79 sec이다.

Fig. 8은 세가지 다른 방법들에서 각 반복계산에

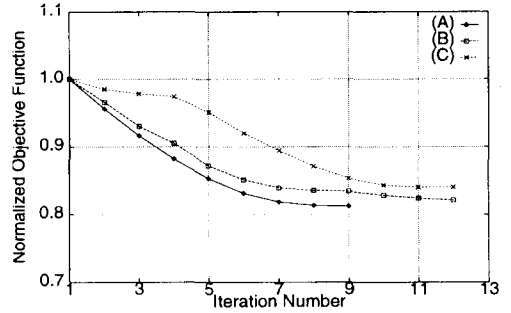


Fig. 8 Objective functions versus iteration for all the strategies

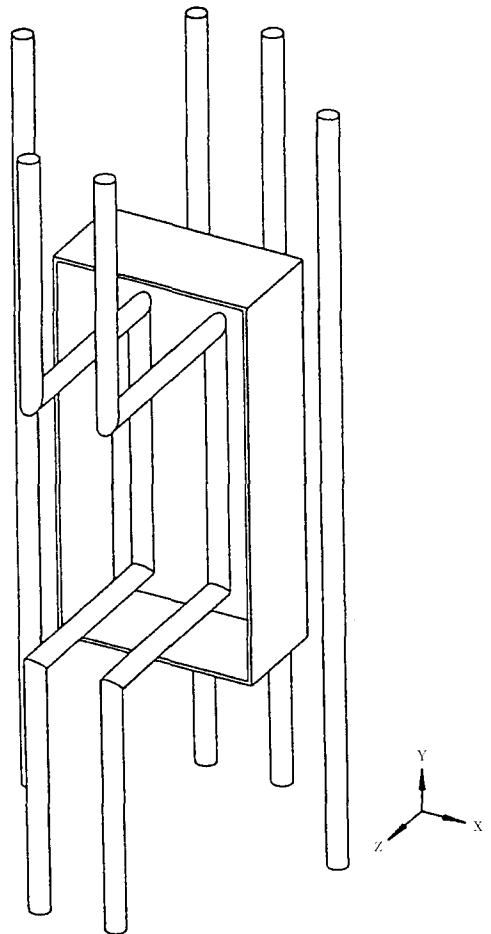


Fig. 9 Boxed shape with six cooling channels: initial design

대해 표준화된 목적함수의 값들이다. 세 방법들 중에서, Strategy A가 계산시간도 가장 적게 들고, 최적설계에서 목적함수의 값도 가장 적었다. 이 결

과로부터, Strategy A가 가장 효율적인 방법임을 결론지을 수 있다. 5장에서 제안된 방법에 의해서 민감도해석결과를 동시에 얻을 수 있기 때문에 설계변수가 가장 많음에도 불구하고, Strategy A가 가장 적은 계산시간을 소요함을 알 수 있다.

6개의 냉각수로를 가진 상자형상 : 앞선 금형 예들 보다 실질적인 금형으로서 Fig. 9에서와 같이 6개의 냉각수로를 가진 상자모양의 형상이다. 사용된 경계요소의 수는 제품과 냉각수로에서 각각 1148, 78개이다. 이 금형 예에서 사용된 공정조건

은 다음과 같다.

(1) 고분자재료의 사출온도와 취출온도는 각각 250°C와 110°C이다.

(2) 모든 냉각수로의 입구온도와 입구유량은 각각 20°C와 200 cc/sec이다.

이 금형예의 설계변수들은 각 냉각수로별로 냉각수로의 냉각수 입구온도와 입구유량, x-좌표 및 z-좌표이다. 냉각수로들의 y-좌표는 무시하였다. $\alpha = 0.5$ 에서 Strategy A는 최적화를 위해 9번의 반복계산과 계산시간은 255:46:24가 소요되었다. Fig. 10은 초기설계(점선)와 최적설계(실선)의 단면도이다. 초기설계에서 모든 냉각수로의 반경은 0.5 cm이었다. 최적설계가 결정된 후의 목적함수(F)의 값은 0.768이다($F_1=0.613$ 그리고 $F_2=0.923$). 냉각시간은 초기설계와 최적설계에서 각각 5.54 sec와 5.22 sec이다. Fig. 11은 초기설계와 최적설계에서 제품표면에서의 균일도분포를 나타낸다. 이 그림은 주어진 가중변수에 대하여 최적설계로 온도균일성과 냉각시간 모두가 향상되었음을 나타낸다. 한편 식 (10)의 가중변수(α)를 조정함에 의해 온도균일성과 생산성을 사용자의 관심에 따라 선별적으로 향상시킬 수 있다. 제안된 최적화과정은 보다 실질적인 이 금형 예에 적용되어 성공적으로 수행됨을 알 수 있다.

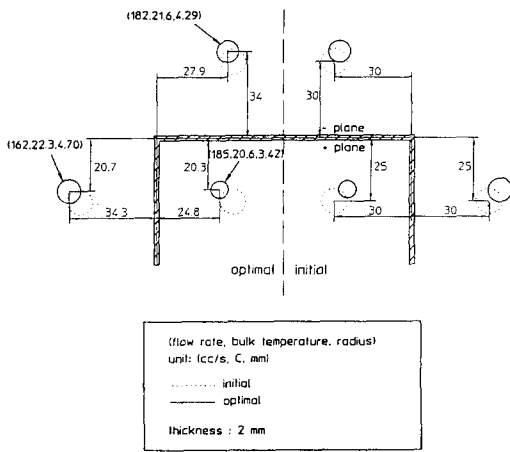


Fig. 10 Initial design and optimal design

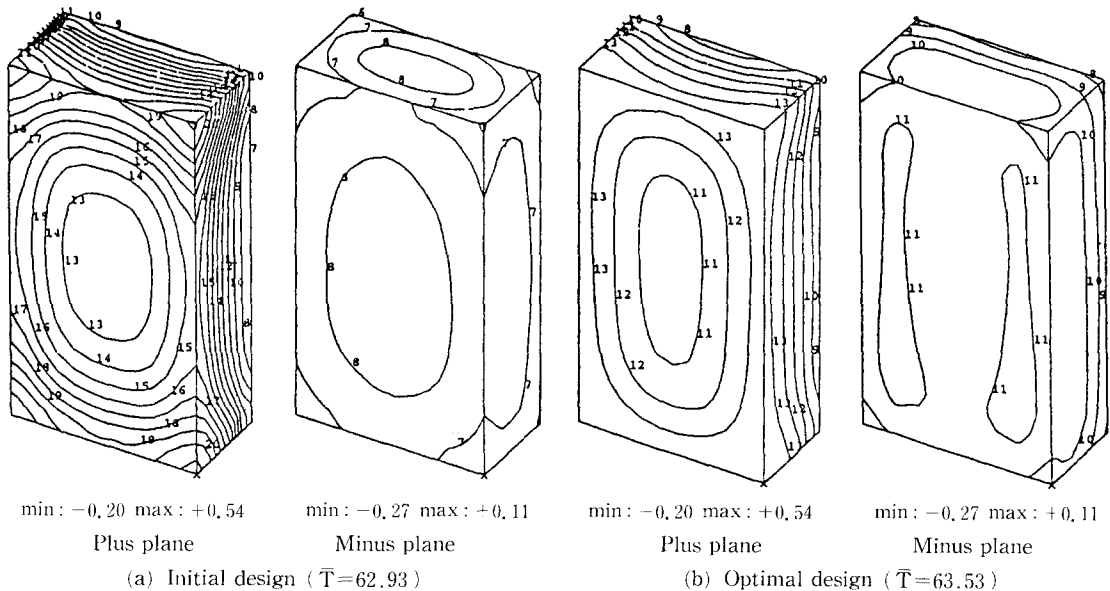


Fig. 11 Uniformity distribution on the part surface: (a, b) [level value=(11-level number)/20]

9. 결 론

본 연구를 통해 얇은 캐비티를 가진 사출성형금형 냉각시스템 최적설계를 위한 CAD 시스템 개발이 성공적으로 완성되었다. 이 개발된 CAD 시스템은 경계요소법을 이용한 열전달해석 프로그램 및 이에 상응하는 설계 민감도해석 프로그램과 CONMIN 최적화 알고리즘 등을 통합하여 완성되었으며 사출성형 냉각시스템 최적설계문제에 성공적으로 적용되었다.

이 냉각시스템 최적설계를 위해, 최소화할 목적함수를 제품표면의 온도불균일성과 생산성에 관련된 냉각시간의 가중조합으로 선택하였다. 제안된 목적함수에 있어서 온도불균일성과 냉각시간의 가중변수를 사용자의 관심에 따라 조절할 수 있도록 개발하였다. 설계변수벡터의 최적화방향은 일반적으로 두 목적함수들, 즉 제품의 품질과 관련된 목적함수와 생산성과 관련된 목적함수에 대해 서로 반대 방향이다. 본 논문에서는 예제를 통해 최적설계에 대한 가중변수의 효과를 조사하였다. 또한, 본 최적설계 CAD 시스템에서는 금형설계, 사출성형공정 및 설계변수의 성질에 따라 세가지 다른 최적화방법을 제안하였다. 이들 제안된 세가지 최적화과정들에 대해 예제 금형을 통해 사용되는 컴퓨터가 허용하는 한 최적설계 결과와 계산시간에 있어 Stratege A가 최선이라고 결론 내릴 수 있었다.

본 연구에서 개발된 최적설계 CAD 시스템은 산업체 현장에서의 사출성형금형 냉각시스템 최적설계 및 사출성형 공정조건의 최적화에 큰 도움을 줄 수 있으리라 사료된다.

후 기

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(기계공학: 95-E-19)에 의하여 연구되었다.

참고문헌

- (1) Haarhoff, P. C. and Buys, J. D., 1970, "A New Method for the Optimization of a Nonlinear Function Subject to Nonlinear Constraints," *The Computer Journal*, 13, pp. 178~184.
- (2) Barone, M. R. and Caulk, C. A., 1985, "Optimal Thermal Design of Injection Molds for Filled Thermosets," *Polymer Eng. & Sci.*, 25, pp. 608~617.
- (3) Forcucci, S. J. and Kwon, T. H., 1989, "A Computer Aided Design System for Three-Dimensional Compression Mold Heating," *Journal of Engineering for Industry*, 111, pp. 361~368.
- (4) Matsumoto, T., Tanaka, M. and Miyagawa, M., 1993, in Proceedings, "Boundary Element System for Mold Cooling/Heating Design," in Proceedings, 15th International Conference on Boundary Elements in Engineering, Brebbia, C. A. et al., eds., Computational Mechanics Publications, Boston.
- (5) Park, S. J. and Kwon, T. H., 1996, "Thermal and Design Sensitivity Analyses for Cooling System of Injection Mold : Part I. Thermal Analysis," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, (Accepted).
- (6) Park, S. J. and Kwon, T. H., 1996, "Thermal and Design Sensitivity Analyses for Cooling System of Injection Mold : Part II. Design Sensitivity Analysis," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, (Accepted).
- (7) Kwon, T. H., 1989, "Mold Cooling System Design Using Boundary Element Method," *Journal of Engineering for Industry*, 110, pp. 348~394.
- (8) Himasekhar, K., Lottey, J. and Wang, K. K., 1992, "CAE of Mold Cooling in Injection Molding Using a Three-dimensional Numerical Simulation," *Journal of Engineering for Industry*, 144, pp. 213~221.
- (9) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1985, *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (10) Rezayat, M. and Burton, T., 1990, "A Boundary-Integral Formulation for Complex Three-Dimensional Geometries," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 29, pp. 263~273.
- (11) Park, S. J. and Kwon, T. H., 1996, "Sensitivity Analysis Formulation for Three-Dimensional

- Conduction Heat Transfer with Complex Geometries Using a Boundary Element Method," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 39, pp. 2837~2862.
- (12) Fox, R. L., 1971, *Optimization Methods for Engineering Design*, Addison-Wesley, Menlo Park.
- (13) Fletcher, R. and Powell, M. J., 1963, "A Rapidly Convergent Descent Method for Minimization," *The Computer Journal*, 6, pp. 163~168.
- (14) Kuester, J. L. and Mize, J. H., 1973, *Optimization Techniques with Fortran*, McGraw-Hill Book Company, New York.