

기능성 경사 복합재를 이용한 사출금형의 냉각회로 모델링§

신 기 훈*

*서울과학기술대학교 기계공학과

Modeling of Cooling Channels of Injection Mould using Functionally Graded Material

Ki-Hoon Shin*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received June 21, 2011; Revised August 21, 2011; Accepted August 22, 2011)

Key Words : Conformal Cooling Channel(형상적응형 냉각회로), Layered Manufacturing Technology(적층조형술), Functionally Graded Materials(기능성 경사 복합재)

초록: 일반적으로 사출금형의 사출주기는 플라스틱 제품의 냉각 시간에 크게 좌우되는 데, 냉각회로를 적용하여 조절할 수 있다. 금형의 냉각회로는 전통적으로 기계가공을 통하여, 직선형상만을 생성할 수 있었지만, 최근 적층조형 방법의 개발로 코어 형상을 따라가는 형상적응형 냉각회로를 생성할 수 있게 되었다. 한편 금형의 다이 재질로 열저항력이 크고, 치수변화가 적은 H13 스틸이 널리 사용되고 있지만, 열전도율이 낮기 때문에 냉각효율은 높지 않다. 이러한 점에서 열전달 효율을 극대화 시킬 수 있는 방법으로 H13 스틸과 구리(Cu)를 기능적으로 혼합한 기능성 경사 복합재(FGM)를 적층조형을 이용하여 냉각회로에 적용하는 방안이 검토되고 있다. 이러한 시도로서 본 논문에서는 H13 스틸과 Cu 간의 FGM 을 이용한 형상적응형 냉각회로의 모델링 방법을 제안하고자 한다.

Abstract: The cycle time in injection moulding greatly depends on the cooling time of the plastic part that is controlled by cooling channels. Cooling channels are required to facilitate the heat transfer rate from the die to the coolant without reducing the strength of the die. Employing layered manufacturing techniques (LMT), a die embedding conformal cooling channels can be fabricated directly while conventional cooling channels are usually made of straight drilled hole. Meanwhile, H13 tool steel is widely used as the die material because of its high thermal resistance and dimensional stability. However, H13 with a low thermal conductivity is not efficient for certain part geometries. In this context, the use of functionally graded materials (FGMs) between H13 and copper may circumvent a tradeoff between the strength and the heat transfer rate. This paper presents a method for modeling of conformal cooling channels made of FGMs.

1. 서 론

일반적으로 사출금형의 사출주기는 플라스틱 제품의 냉각 시간에 크게 좌우되는 데, 금형 코어에 냉각회로를 적용하여 냉각시간을 단축시킴으로써, 제품의 생산성을 향상시킬 수 있다. 냉각회로는 금형의 강도를 약화시키지 않으면서, 금형과 냉각수 간의 열전달 효율을 극대화 시킬 수 있도록 설

계되는 것이 바람직하다. 금형의 냉각회로는 전통적으로 기계가공을 통하여, 직선형상만을 만들 수 있었지만, 최근 DMD(Direct Metal Deposition),⁽¹⁾ SDM(Shape Deposition Manufacturing),⁽²⁾ 3DP(3-Dimensional Printing)⁽³⁾ 등의 금속 분말기반 적층조형 방법의 개발로 형상적응형 냉각회로(conformal cooling channel)를 생성할 수 있게 되었다. Fig. 1 은 미시간 대학의 DMD 머신의 개략도와 적층조형된 Ni-Cu FGM 을 보여주고 있다.

한편 금형의 코어 재질로 열저항력이 크고, 치수변화가 적은 H13 스틸이 널리 사용되고 있지만, 열전도율이 낮기 때문에 냉각효율은 그다지 높지 않다. 열전달 효율을 극대화 시키기 위해 냉각회로에 구리(Cu)의 사용이 검토될 수 있다. 하지만,

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계 학술대회(2011.6.30-7.1, 라마다프라자 제주호텔)발표논문임

† Corresponding Author, shinkh@seoultech.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

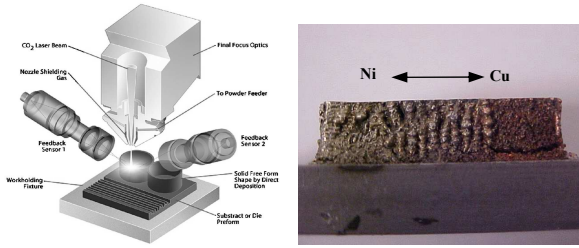


Fig. 1 Ni-Cu FGM fabricated by DMD⁽¹⁾

일반적으로 이방성 재료간의 직접적인 접합은 경계층에서의 열팽창계수 차이에 따른 열응력 발생으로 경계면 박리가 발생하기 쉽다. 이러한 관점에서, H13 스틸과 구리를 기능적으로 혼합한 기능성 경사 복합재(Functionally Graded Material, FGM)^(4,5)를 적층조형을 이용하여 냉각회로에 적용하는 방안이 검토될 수 있다. 형상적응형 냉각회로의 모델링 및 해석 분야에서 많은 연구⁽⁶⁻⁹⁾가 진행되고 있다. 특히 Ahn^(8,9) 등은 P21 툴 스틸, Monel 400, Ampcoloy 940 등의 3종 재료를 각각 몰드층, 중간층, 지지층에 적용한 열전도성 급형 코어를 설계, 해석, 제작하였다. 다시 말해, Ahn 등의 연구에서는 3 층으로 구성된 FGM 과 유사한 구조를 급형 코어 형상에 적용하였다. 본 논문에서는 H13 스틸과 구리간의 FGM 을 급형의 코어 형상보다는 냉각회로에 구체적으로 응용한 형상적응형 냉각회로의 모델링 방법을 제안하고자 한다.

2. 냉각회로의 모델링

전통적인 CAD/CAM 시스템들은 지금까지는 제품의 기하학적 형상(geometry)의 표현 및 가공정보의 생성에 초점을 맞추어 왔다. 그러므로 현재의 CAD/CAM 시스템들은 제품의 기하학적 형상뿐 아니라 형상 내부의 재질성분이나 미세결정구조(microstructure)를 모델링 할 수 있도록 그 기능이 확장되어야 한다.

2.1 복합재의 모델링

복합재는 n 개의 주성분 재료(primary material)로 구성되므로, 임의의 점 \mathbf{x} 에서 재질성분은 주성분 재료의 부피 퍼센트(volume fraction)로 표현된다. 이 부피 퍼센트는 n 차원 점 \mathbf{v} 로 표시되며, 이들의 집합(\mathbf{V})은 \mathbf{R}^n 공간의 부분집합으로 아래의 식 (1) 과 같이 표현된다.⁽¹⁰⁾

$$\mathbf{V} = \left\{ \mathbf{v} \in \mathbf{R}^n \mid \|\mathbf{v}\|_1 \equiv \sum_{i=1}^n v_i = 1 \text{ and } v_i \geq 0 \right\} \quad (1)$$

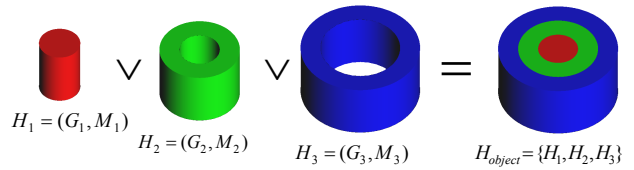


Fig. 2 Generalized heterogeneous object

위 식 (1)에서 v_i 는 i 번째 주성분 재료의 부피 퍼센트를 나타낸다. 그러므로 재질성분 함수 F 는 식 (2)와 같이 3 차원 공간의 임의의 점 $\mathbf{x}(\in \mathbf{E}^3)$ 를 n 차원 재질성분 점 $\mathbf{v}(\in \mathbf{R}^n)$ 으로 대응시키는 일대일 매핑(one to one mapping)이 된다.

$$F : \mathbf{E}^3 \rightarrow \mathbf{V} \mid \|F(\mathbf{x})\|_1 \equiv \sum_{i=1}^n f_i = 1 \text{ where } F(\mathbf{x}) \equiv \mathbf{v} = \{v_i\} \quad (2)$$

위의 기본적인 정의에 의해 복합재 형상을 나타낼 수 있는 최소 기본단위로서 h-set 을 도입한다. h-set 은 곱공간(product space) $\mathbf{T}(\equiv \mathbf{E}^3 \times \mathbf{R}^n)$ 의 부분집합 (G, M)으로 정의되며, $G(\subset \mathbf{E}^3)$ 는 형상을 표현하는 r-set 이며, $M(\subseteq \mathbf{V})$ 는 r-set G 에 재질 정보를 매핑시키는 함수 $F(G)$ 와 동일하다.

이제 일반적인 복합재 형상을 표현하는 수학적인 모델로서 h-set 들의 합집합인 h-object 를 아래의 식 (3)과 Fig. 2 와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} H_{object} &= H_1 \vee H_2 \vee \dots \vee H_i \vee \dots \vee H_a \quad (3) \\ &= \{H_1, \dots, H_a\} = \{(G_1, M_1), \dots, (G_a, M_a)\} \\ G_i \cap G_j &= \Phi \quad i \neq j, 1 \leq i, j \leq a \end{aligned}$$

2.2 냉각회로의 모델링

냉각회로 단면에서의 재질성분 모델링을 위한 방법으로 본 논문에서는 다음과 같은 블렌딩(blending) 기법을 사용한다. 다수의 분리 독립된 경계 엔티티들로 부터의 최단 직교거리들로 표현되는 블렌딩 좌표들을 매개변수로 하는 재질성분 함수를 정의하여 기본적인 FGM 모델을 생성한다. 경계 엔티티로 둘러 쌓인 중간영역을 블렌딩하는 방법에는 여러 가지 방법이 가능하나, 본 논문에서는 역거리 가중법(inverse distance weighting)을 이용하여 재질성분의 블렌딩에 사용되는 매개변수들을 계산하였다. 만약 복합재 내부에 p 개의 분리 독립된 경계 엔티티가 존재한다고 가정하면, 각각의 경계 엔티티에 p 개의 사

용자 정의 재질을 부여하여 중간영역의 재질성분을 부드럽게 블렌딩 할 수 있다.

역거리 가중법을 이용하면, 사용자 정의 재질 부피퍼센트 v 는 아래 식(4)와 같이 i 번째 경계 엔티티(∂B_i)에 부여된 i 번째 재질(\mathbf{m}_i)과 블렌딩 좌표(u_i)의 일차적 결합으로 표시할 수 있다.

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^p \mathbf{m}_i u_i(\mathbf{x}) \quad (4)$$

$$\text{where } u_i(\mathbf{x}) = \frac{\prod_{j=1, j \neq i}^p d_j^{\mu_j}(\mathbf{x})}{\sum_{k=1}^p \prod_{j=1, j \neq k}^p d_j^{\mu_j}(\mathbf{x})} \text{ and } \sum_{i=1}^p u_i(\mathbf{x}) = 1$$

블렌딩 좌표 u_i 는 각각의 경계 엔티티들로부터의 역거리를 표준화하여 계산되므로, i 번째 재질(\mathbf{m}_i)이 부여된 i 번째 경계 엔티티(∂B_i)로부터의 거리 $d_i(\mathbf{x})$ 에 반비례 하는 특성을 가진다. 또한 u_i 는 Fig. 3 에서와 같이 $u_i(\partial B_i) = \delta_{ij}$ 조건을 만족하며 그 합이 1 이 되는 연속함수이다. 위 식 (4)에서 지수 μ_i 는 가중함수의 특성을 좌우하는 계수이다.

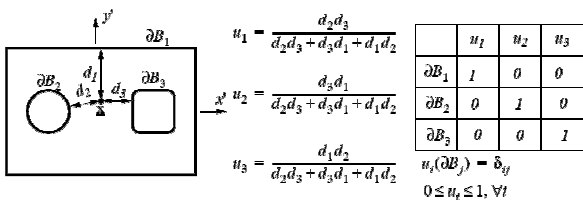


Fig. 3 Inverse distance weighting

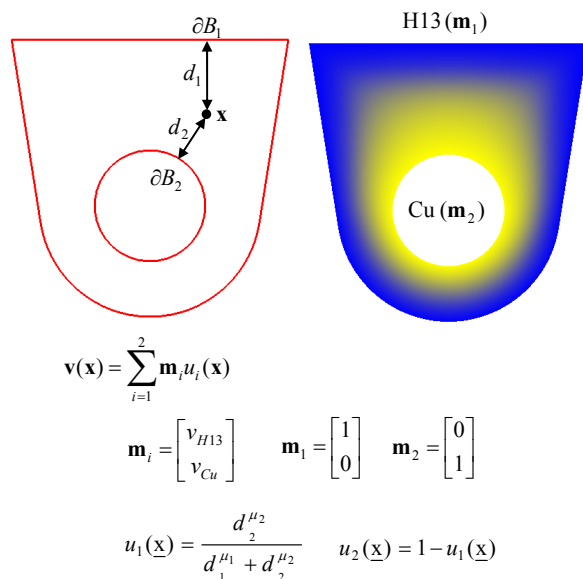


Fig. 4 Cross section of conformal cooling channels

Fig. 4 는 앞서 소개한 역거리 가중법 기반 블렌딩 방법을 이용하여 사출금형 내부에 형성된 냉각회로 단면의 재질 분포를 정의한 예를 보여주고 있다. 이 예에서는 단면의 내부 경계면에는 구리(Cu)를 외부 경계면에는 H13 스틸 재질성분을 부여하여 중간영역의 재질 분포를 부드럽게 블렌딩 하고 있다. H13 스틸은 C, Si, Mn, Cr, Mo, V, P, S, O, N, Fe 등의 11 개 구성성분으로 구성되어 있지만 본 논문에서는 이를 하나의 사용자 정의 재질로 나타낸다.

Fig. 4 에 보인 가중함수의 지수값(μ_i)을 변화시켜 가면서 냉각회로의 냉각 특성을 사출물에 맞게 최적화 할 수 있다. Fig. 4 에 보인 냉각회로 단면에서의 재질분포를 스위핑 경로를 따라 동일하게 적용하면, Fig. 5 에서와 같은 재질성분 분포를 얻을 수 있다. 특히 Fig. 5 에 보인 냉각회로는 사출금형의 코어의 형상을 따라 형성되어 균일한 냉각특성을 얻을 수 있다. 전술한 바와 같이, 이러한 형상 적응형 냉각회로의 생성은 기존의 기계가공으로는 불가능하며, DMD, SDM, 3DP 와 같은 적층조형 방법에 의해서만 가능하다

3. 메쉬모델생성 및 해석

3.1 근사화 및 메쉬모델 생성

복합재의 근사화(discretization) 과정의 첫 단계는 모델 내부에 정의된 재질성분 함수를 허용 가능한 오차 범위 내에서 계단모양의 불연속 함수로 변환하는 과정이다. 적층조형 머신들이 한번에 표현할 수 있는 재질성분비에는 한계가 있기 때문에 이러한 근사화 과정(예 0.01-1%, 0.05-5%, 0.1-10%, 0.2-20%, etc.)이 유한요소 모델의 생성에도 선행되어야 한다(즉, 근사화된 모델을 기준으로 유한요소 해석을 수행해야 한다).

냉각회로 단면의 경우, 2 개의 재질성분(H13,Cu)으로 구성되어 있기 때문에, 재질성분 함수는 아

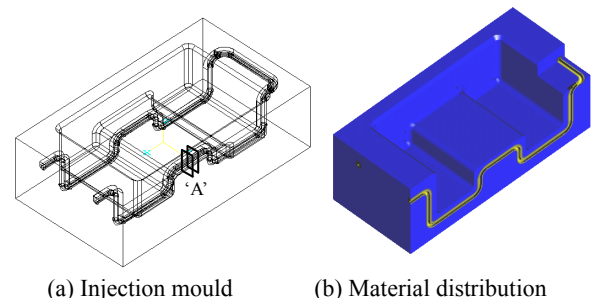


Fig. 5 Injection mould embedding conformal cooling channels

래 식 (5)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$F(\mathbf{x}) = \mathbf{v}(\mathbf{x}) = [v_{H13}, v_{Cu}]^T = [u_1(\mathbf{x}), 1 - u_1(\mathbf{x})]^T \quad (5)$$

만약 근사화 정도(resolution) $\gamma = 0.2$ (20%)로 가정하면, $v_{H13} = u_1 = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ 되는 점들을 냉각회로 단면에서 계산하여, 연결하면 iso-material 루프를 생성할 수 있다. 이를 위해, 냉각회로 단면을 작은 그리드(grid)로 나눈 후, 각 그리드 점에서의 d_1 과 d_2 를 계산하여 u_1 값을 계산한다. 각 스텝 값 v_{H13} 에 해당하는 iso-material 루프를 추출해내기 위해서 본 논문에서는 마칭스퀘어(marching square) 알고리즘을 사용하였다(Fig. 6(a)).

Fig. 6(b)는 역거리 가중함수의 지수가 $\mu_1 = \mu_2 = 1$ 인 경우 $\gamma = 0.2$ 를 사용하여 6 개의 영역으로 근사화 한 예를 보여주고 있다. 분해된 6 개 영역의 재질 성분 $\mathbf{v} = [v_{H13}, v_{Cu}]^T$ 은 각각 $[1.0, 0.0]^T, [0.8, 0.2]^T, \dots, [0.2, 0.8]^T, [0.0, 1.0]^T$ 이 된다.

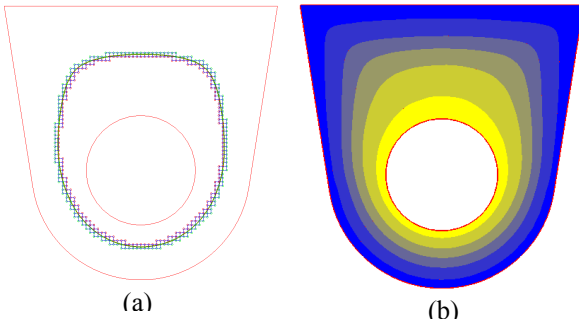


Fig. 6 Discretization of the cross section of cooling channels ($\mu_1 = \mu_2 = 1$): (a) extraction of an iso-material loop by using marching-square algorithm, (b) material distribution on the cross section discretized by the resolution of 0.2

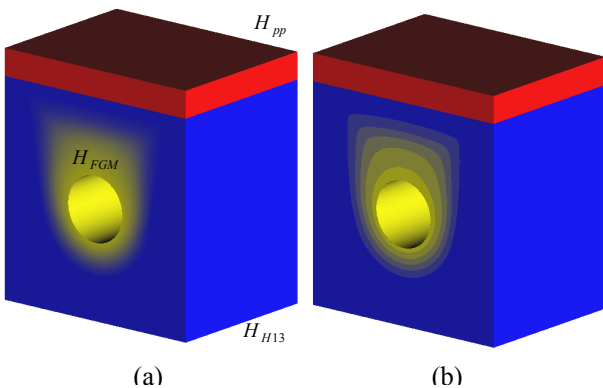


Fig. 7 Creation and discretization of a thermal analysis model : (a) heterogeneous solid model, (b) discretized heterogeneous solid model

Fig. 7(a), 7(b)는 각각 유한요소해석에 사용될 3D 복합재 솔리드 모델과 근사화된 모델을 보여주고 있다. 복합재 형상 모델러는 현재 Spatial 사의 ACIS geometric modeler 와 OpenGL 그래픽 라이브러리를 사용하여 VC++ 환경에서 구현되어 있다. 본 논문에서는 냉각회로가 사출금형의 모든 코어면에 균일하게 적용되어 있다고 가정하여, Fig. 7(a)와 같은 local 모델(Fig. 5(a)에서 ‘A’ 로 표시된 직육면체 영역)을 사용하여 열전달해석을 수행하였다. Fig. 7(a)의 복합재 모델은 프리미티브 복합재 간의 불리언 합집합 연산(Boolean union operation)을 통하여 생성할 수 있으며, 식 (3)과 Fig. 2에서 술된 방법으로 아래 식 (6)과 같이 표현되고 저장된다. H_{pp} 는 폴리프로필렌 수지 충전 영역(열전달 해석 시의 열원)을 나타내는 복합재 모델을 의미하는 데, 본 논문에서는 그 두께를 5 mm 로 가정하여 모델링 하였다.

$$H_{object} = H_{pp} \vee H_{FGM} \vee H_{H13} \quad (6)$$

일단 복합재 모델이 근사화되면, 물성치 평가규칙을 적용하여 iso-material 영역의 물성치를 평가하고 부여하게 된다. 다양한 물성치 평가규칙⁽¹¹⁾ 중 본 논문에서는 식 (7)과 같은 단순한 혼합법칙 (Voigt rule)을 사용하여 각각의 iso-material 영역에 대해서 물성치를 계산하였다. 식 (7)에서 p 는 밀도, 비열, 열전도율 등의 물성치를 의미한다. 냉각회로의 FGM 영역에 적용된 물성치는 Table 1 과 같다.

$$p_{mixture} = p_{H13}v_{H13} + p_{Cu}v_{Cu} \quad (7)$$

Table 1 에서 볼 수 있듯이 H13 톨 스틸과 Cu 의 열팽창계수 차이가 크므로, H13-Cu 접합층에는 필연적으로 열팽창 계수 차이에 의한 열응력이 발생하게 된다. 이를 제거하기 위한 방법으로 본 논문

Table 1 Material properties of H13 and Cu

Property	H13	Cu
Density (kg/m ³)	7000	8940
Specific heat (J/kg · K)	447	385
Thermal conductivity (W/m · K)	28	401

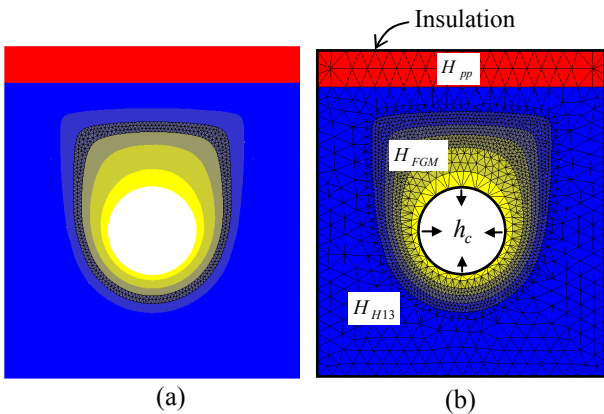


Fig. 8 Mesh generation : (a) regional mesh generation, (b) complete mesh model with boundary conditions

에서와 같은 FGM 설계가 필요한 데, 일반적으로 FGM 층의 두께가 클수록 열응력 완화 효과는 증가하게 된다.

Fig. 8 은 열전달 해석을 위한 2D 메쉬모델 생성 과정을 보여주고 있다. 먼저 iso-material 루프 경계면에 노드들을 생성한 후, 잘 알려진 DT (Delaunay Triangulation) 방법을 이용하여 각각의 iso-material 루프 내에 삼각형 메쉬를 생성한다(Fig. 8(a)). 모든 iso-material 루프에 동일한 방법을 반복적으로 적용한 후, 각각의 노드와 메쉬들을 중복됨이 없이 결합하여 완전한 메쉬 모델을 생성한다. 또한 각각의 iso-material 루프에 이미 부여된 물성치들을 해당 메쉬에 부여하여 완전한 유한요소 모델을 완성한다.

3.2 ANSYS 를 이용한 사출 주기 해석

사출금형의 냉각회로 모델에 따른 사출 주기를 평가하기 위하여 ANSYS 를 이용하여 과도 (transient) 열전달 해석을 수행하였다.

본 논문에서는 다양한 금형 코어 형상에 적용 가능한 냉각회로의 성능 평가를 목표로 하기 때문에, Fig. 8(b)와 같이 사각형 외부경계는 단열이 되어 열량의 공급 및 열전달이 일어나지 않고, 단순히 충전 완료된 폴리 프로필렌 수지(H_{pp} 층두께는 5mm 로 가정)로부터 H13-Cu FGM 층을 거쳐 원형의 냉각회로 단면에서 냉각수로 대류열전달에 일어나는 것으로 가정하였다. 또한 해석의 단순화를 위하여 폴리프로필렌의 상변화(액상→고상)는 고려하지 않고 냉각과정에 동일한 비열값을 적용하였다.

폴리 프로필렌 수지가 몰드에 충전 완료 되었을 때의 초기온도는 230 °C (503 K), H13 몰드와 냉각수(coolent)의 초기온도는 22 °C (295 K)로

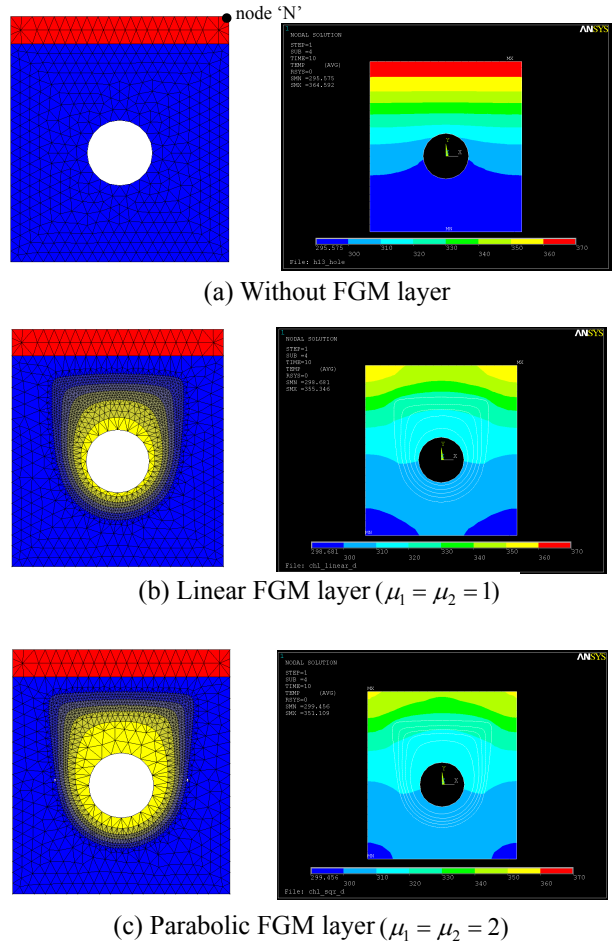


Fig. 9 Transient analysis results using ANSYS

가정하였다. 냉각회로의 표면에서 냉각수로의 대류열전달 계수는 Dittus-Boelter 식⁽¹²⁾으로부터 아래의 식 (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$h_c = 0.023 \frac{k}{D} Re^{4/5} Pr^{0.4} \quad (8)$$

위 식에 냉각회로의 단면 직경 $D=12 \times 10^{-3}$ m, 관내 난류(turbulent flow) 유동을 가정한 레이놀즈 수 $Re=1.2 \times 10^4$, 295K 에서 냉각수의 열전도 계수 $k=606 \times 10^{-3} W/m \cdot K$, 프렌탈 수 $Pr=6.62$ 를 대입하여 $h_c=4536 W/m^2 \cdot K$ 를 계산하여 경계조건으로 입력하였다.

Fig. 9 는 세 가지 경우(FGM 미적용 모델, linear FGM 적용 모델, parabolic FGM 적용 모델)에 대한 메쉬 모델과 ANSYS 해석결과(10 sec 경과 시 온도분포)를 보여주고 있다. 구체적으로 Fig. 9(a)는 H13-Cu FGM 층이 적용되지 않은 단순한 냉각회로를 보여주고 있다. Fig. 9(b)에는 1 차함수 ($\mu_1 = \mu_2 = 1$)로 성분이 변화하는 H13-Cu FGM 층이

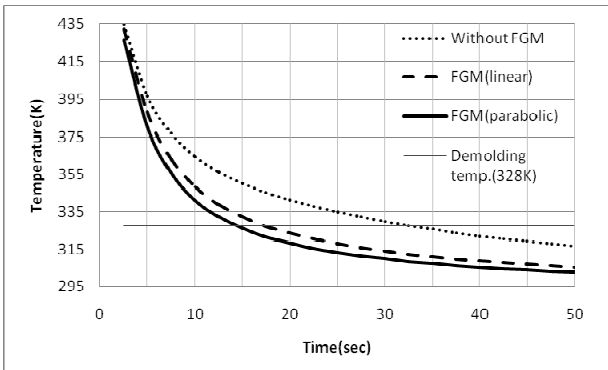


Fig. 10 Temperature vs. time

적용되어 있으며, 마지막으로 Fig. 9(c)에는 2 차함수 ($\mu_1 = \mu_2 = 2$) 로 성분이 변화하는 H13-Cu FGM 층이 적용되어 있다.

Fig. 10 은 냉각이 가장 늦게 일어나는 가장자리 노드(Fig. 9 (a)에서 node 'N'으로 표시)에서 시간에 따른 온도 변화를 보여주고 있다. 몰드에서 제품의 취출온도(demolding temp., Fig. 10 에서 수평선으로 표시)를 55 °C (328 K)로 가정하여 세 경우의 사출주기를 비교하면 33 sec, 18 sec, 14 sec 로 짧아짐을 알 수 있다. 즉, H13-Cu FGM 설계를 냉각회로에 적용할 경우 사출금형의 사출주기를 줄여 생산성을 향상 시킬 수 있다. 또한 쉽게 예측할 수 있듯이, FGM 의 경우도 linear 함수 ($\mu_1 = \mu_2 = 1$) 보다 parabolic 함수 ($\mu_1 = \mu_2 = 2$) 를 적용할 경우 사출주기를 더욱 줄일 수 있다.

4. 결 론

일반적으로 사출금형의 사출주기는 플라스틱 제품의 냉각 시간에 크게 좌우되는 데, 금형 코어(캐버티)에 냉각회로를 적용하여 냉각시간을 단축 시킴으로써, 제품의 생산성을 향상시킬 수 있다. 냉각회로는 금형의 강도를 약화시키지 않으면서, 금형과 냉각수 간의 열전달 효율을 극대화 시킬 수 있도록 설계되는 것이 바람직하다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 H13 스틸과 구리를 기능적으로 혼합한 기능성 경사 복합체를 냉각회로에 적용하는 방안을 검토하였다. 구체적으로 H13 스틸과 구리간의 FGM 을 이용한 형상적응형 냉각회로의 모델링 및 ANSYS 해석을 통한 사출주기의 평가를 수행하였다. 향후 레이저 기반 적층조형 방법을 이용하여, H13-Cu FGM 의 시편제작 및 물성치(열전도 계수 등) 평가를 수행하여 모델링 및 해석 정밀도를 향상시킬 계획이다.

후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0022562).

참고문헌

- (1) Shin, K. H., Natu, H., Dutta, D. and Mazumder, J. , 2003, "A Method for the Design and Fabrication of Heterogeneous Objects," *Materials & Design*, Vol. 24, No. 5, pp. 339~353.
- (2) Fessler, J., Nickel, A., Link, G., Prinz, F. and Fussell, P., 1997, "Functional Gradient Metallic Prototypes through Shape Deposition Manufacturing," *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, Austin, TX, pp. 521~528.
- (3) Cho, W., Sachs, E. M., Patrikalakis, N. M. and Troxel, D. E., 2003, "A Dithering Algorithm for Local Composition Control with Three-Dimensional Printing," *Computer Aided Design*, Vol. 35, No. 9, pp. 851~86.
- (4) Beal, V. E., Erasenthiran, P., Hopkinson, N., Dickens, P. and Ahrens, C. H., 2006, "The Effect of Scanning Strategy on Laser Fusion of Functionally Graded H13/Cu Materials," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 30, pp. 844~852.
- (5) Shin, K. H. and Lee, J. K., 2006, "CSG-based Representation for Free-form Heterogeneous Object Modeling," *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 11, No. 4, pp. 235~234.
- (6) Tang, C., Chassapis, C. and Manoochchri, 1997, "Optimal Cooling System Design for Multi-Cavity Injection Moulding," *Finite Element in Analysis and Design*, Vol. 26, No. 3, pp. 229~251.
- (7) Li, C. L., 2001, "A Feature-Based Approach to Injection Mould Cooling System Design," *Computer-Aided Design*, Vol. 33, pp. 1073-1090.
- (8) Ahn, D. G., Kim H. W., and Lee K. Y., 2009, "Design of the Thermally Conductive Mould to Improve Cooling Characteristics of Injection Mould for a Mouse," *Transactions of the KSME A*, Vol. 33, No. 3, pp. 201-209.
- (9) Ahn, D. G. and Kim, H. W., 2010, "Study on the Manufacture of a Thermal Management Mould with Three Different Materials Using a Direct Metal Tooling Rapid Tooling Process," *Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 224, No. B3, pp. 385~402.

- (10) Shin, K. H., 2011, "Modeling of Time-variant Heterogeneous Objects in Micro-system Packages," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 5, pp. 1119~1128.
- (11) Bhashyam, S., Shin, K. H. and Dutta, D., 2000, "An Integrated CAD System for Design of Heterogeneous Objects," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 6, pp. 119~135.
- (12) Incropera, F. P. and DeWitt D. P., 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 4th Edition*, John Wiley & Sons, New York, pp. 443~449.