

## 논문

## 주조 공정 시 열변형 예측과 제어를 통한 금형의 최적 설계에 관한 연구

최봉학<sup>†</sup> ·곽시영 · 김정태 · 최정길 · 이동일 \*

한국생산기술연구원, 디지털설계센터  
\*삼성정공(주)

### The Optimum Design of Casting Process through Prediction and control of Thermal Deformation

Bong-Hak Choi, Si-Young Kwahk, Jeong-Kil Choi, and Dong-Il Lee\*

Korea Institute of Industrial Technology, Center for e-Design, Incheon 406-800, Korea  
\*SAM SUNG PRECISION CORP., Incheon 404-170, Korea

#### Abstract

The design of the Metal mold casting should consider several variables such as the material properties and shape of the mold. In particular, the thermal stress generated by the thermal expansion and contraction depending on the thermal gradient of the mold causes partial plastic deformation on the mold, which causes damage or fracture of the cast. Consequently, the thermal deformation along with thermal stress leads to thermal deformation of the cast itself. In this study, the temperature analysis of the cast and mold is simulated by FDM to control the thermal deformation and stress as a result of the thermal gradient of mold. Using the results from FDM simulation, the thermal deformation and stress are analyzed by FEM and, the optimal mold design with minimum thermal deformation of the cast is suggested.

**Key words :** FDM, FEM, AC4CH, GCD50, Thermal stress, Thermal deformation, Cast Mold Design.

(Received July 20, 2005; Accepted September 12, 2005)

#### 1. 서 론

주조에 의한 제품의 생산 방식은 높은 생산성, 우수한 가격 경쟁력 및 복잡한 형상 제작의 용이함으로 인하여 오래 전부터 현대에 이르기까지 단품 생산의 주요한 위치를 차지하고 있다. 컴퓨터의 발달과 역학의 이론적 정립에 힘입어 현재 많은 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램들이 주조 공정 및 제품의 해석을 목적으로 개발, 판매되고 있다.

주조 해석에 관한 한 거의 모든 해석 프로그램은 유한 차분법(Finite difference method, FDM) 및 유한 요소법(Finite Element Method, FEM)을 이용하여 주물의 금형 주입 과정에 따른 점성 유체의 흐름과 시간에 따른 온도장의 해석에 주력하고 있다. 그러나 주조품의 제작 시 초기 단계에 나타나는 주된 문제점의 하나는 불균일한 냉각속도에 따른 열응력에 의하여 발생하는 제품의 뒤틀림 및 터짐 현상이다. 따라서 이 문제를 올바르게 예측하기 위해서는 유체 속도장(Fluid Velocity Field), 온도장(Temperature Field)의 자료 이외에 열변형 및 열응력의 해석이 반드시 필요하다[1].

최근에는 부품의 경량화와 품질 고급화를 추구하는 경향으로 인하여 금형 주조가 급격히 증가하고 있으며 주조 단품에 대

한 컴퓨터 시뮬레이션뿐만 아니라 금형 설계를 위한 주조공정에서의 금형 거동에 대한 예측이 요구되고 있다.

전통적으로 단조나 압출과 같은 공정에서의 금형 해석은 많은 연구가 수행 되어 왔으나 주조 금형에 대한 해석은 거의 이루어지지 못하였다. 초기 주조 금형의 해석은 민[2,3] 등에 의해 정방형 금형 2차원 열전달 및 열응력 해석이 수행되었고, Kajiwara[4]는 주조 물의 온도 및 열변형 해석을 수행하였고, 박[5]은 박관주조공정에서 주조 물의 열응력 해석을 역시 2차원 모델을 사용하여 수행하였다. 3차원 금형 설계에 대한 수치 해석적인 접근은 금형의 냉각수 설계에서 시작되었으며 실제 많은 공정변수를 고려한 3차원의 복잡한 형상의 제품과 금형을 모두 고려한 해석은 그 해석의 복잡성으로 인하여 많은 연구가 필요하다.

주조 공정 시 주물은 시간이 변함에 따라 고온에서 저온으로 냉각되면서 온도 저하와 더불어 수축하게 된다. 또한, 이러한 수축 과정에 있어서 금형과 제품에 대한 형상의 복잡함은 예측하기 힘든 구조적 구속력에 의해 자유로운 수축을 방해함으로써 언고자하는 주물과는 달리 원하지 않는 기하학적 변형이 발생하게 된다. 이와 같은 금형 및 제품의 기하학적 변형은 생산하고자 하는 주물의 치수에 많은 에러를 발생하며,

<sup>†</sup>E-mail : alexchoi@kitech.re.kr

이러한 에러를 수정하거나 최소화 하여 생산하고자 하는 주물의 정확한 치수 정도를 확보하는 일은 기계 가공비의 절약 및 인건비 절약 등, 생산성의 향상에 있어 매우 중요하다. 주조 공정 후 발생하는 주물의 치수불량은 모형의 치수 불량과 주형의 치수 불량 및 응고 냉각 중의 주물 및 주형의 변형으로 구별할 수 있다. 주조 공정 시 발생하는 이러한 제품의 변형 해석에 있어, 간단한 형상의 주물에 한정하여 변위 측정, 응력 측정 등의 연구가 이루어져 왔으나, 통상적으로 복잡한 형상을 가지는 주물의 변형을 예측하는 것은 매우 어렵다.

본 연구에서는 제품 및 금형의 온도구배에 의한 열변형 및 열응력을 예측 및 제어하기 위하여 금형 주조 시 금형 및 주조금속내의 온도분포를 유한차분법에 의하여 해석하였고 해석한 온도 분포를 이용하여 유한요소법에 의하여 열변형/열응력을 해석함으로써, 궁극적으로 제품의 열변형을 최소화하는 최적의 금형 설계를 수행하였다.

## 2. 수치 해석 방법

### 2.1 유한 차분법에 의한 열전달 해석

내부에 열원을 갖는 과도 열전도 해석을 위한 식은 다음과 같다.

$$\nabla(k\nabla T) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서  $k$ ,  $\rho$ ,  $C_p$ 는 각각 열전도도(thermal conductivity), 밀도(density) 및 비열(specific heat)이고  $\dot{q}$ 는 해석영역 내에서의 열발생율(the rate of heat generation)이다. 대류열전달계수  $h(T)$ 를 갖는 제품의 자유표면에서의 대류경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$-k\nabla T = h(T)(T_\infty - T_s) \quad (2)$$

열처리나 주조공정에서의 내부 열발생율  $\dot{q}$ 는 상변태 시 엔탈피의 변화에 기인한다. 그러므로  $\dot{q}$ 는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\dot{q} = \sum_i \Delta H_i \frac{\Delta F_i(T)}{\Delta t} \quad (3)$$

여기서  $\Delta H_i$ 는 어떤 상(i)가 생기면서 발생하는 잠열이 된다. 위의 열전도 미분방정식을 다음과 같은 과정을 거쳐 차분화한다. 미소 시간  $\Delta t$ 에서 임의의 유한 차분 요소 (i)의 열변화량  $Q_a$ 는 다음과 같이 표현되며

$$Q_a = \frac{\rho C}{\Delta t} V_i (T_i^{t+\Delta t} - T_i^t) \quad (4)$$

현재 고려하고 있는 요소(i)와 이웃하는 주위 요소 (j)사이의 경계를 통하여 전달되는 열량  $Q_b$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$Q_b = \sum_{i,j(\neq 1)} B_{ij} \cdot A_{ij} (T_j^t - T_i^t) \quad (5)$$

$A_{ij}$ 와  $B_{ij}$ 는 각각 요소  $i, j$  사이의 경계면의 면적과 경계조건이며 이들은 주위 요소의 재질과 기하학적 형상에 의해 결정된다[6].

### 2.2 유한요소법에 의한 열응력 해석

열탄소성 응력 해석에 있어 전변형을 증분(total thermo-elastic-plastic strain increment)은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_o \quad (6)$$

여기서  $\varepsilon_e$ ,  $\varepsilon_p$ 와  $\varepsilon_o$ 는 각각 탄성변형을, 소성변형을 및 초기변형을 나타낸다. 해석 영역을 유한요소로 이산화한 후, 유한요소 내의 한 점에 대한 변위는 형상함수(shape function,  $[N_i]$ )를 이용하여 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\{\Delta u\}^e = [N_i] \{\Delta u\}_i^e \quad (7)$$

또한 변형률벡터 및 응력벡터는 변형을-변위행렬[B]와 탄소성 행렬 $[D_{ep}]$ 을 이용하여 식 (8)과 식 (9)로 각각 나타낼 수 있다.

$$\{\varepsilon\} = [B] \{\Delta u\} \quad (8)$$

$$\{\sigma\} = [D_{ep}] \{\varepsilon - \varepsilon_p - \varepsilon_o\} \quad (9)$$

유한요소 정식화 과정을 통하여  $i$ 번째 유한요소에 대한 평형방정식은 식 (10)과 같이 주어진다.

$$[K]_i^e \{\Delta u\}_i^e = \{\Delta F_o\}_i^e + \{\Delta F_p\}_i^e \quad (10)$$

$$\{\Delta F_o\}_i^e = \int_{\Omega} [B]_i^{eT} [D_{ep}]_i (\{\alpha\} \Delta T) d\Omega \quad (11)$$

$$\{\Delta F_p\}_i^e = \int_{\Omega} [B]_i^{eT} [D_{ep}]_i \left( \frac{\partial [D_{ep}]_i^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} \Delta T + \frac{[D_{ep}]_i^{-1} [D_e]_i \{\sigma\}}{S} \frac{\partial f}{\partial T} \Delta T \right) d\Omega \quad (12)$$

여기서  $S$ 는 다음과 같다.

$$S = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D_e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} - \frac{\partial f}{\partial k} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_p} \right\}^T \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \quad (13)$$

식 (11)의  $\{F_o\}_i^e$ 는 열변형에 의한 등가절점력을 나타내며, 식 (12)의  $\{F_p\}_i^e$ 는 탄성계수, 포와송 비, 항복응력 등의 기계적 물성치가 온도의존적인 거동을 함에 따라 발생하는 등가 절점력을 나타낸다. 해석영역 전체의 평형방정식은 각 유한요소의 기여분을 조합함으로써 얻어진다.

$$[K] \{\Delta U\} = \{\Delta F_T\} \quad (14)$$

여기서  $[K]$ 는 강성행렬,  $\{\Delta U\}$ 는 변위벡터,  $\{\Delta F_T\}$ 는 절점력

벡터이다. 식 (14)의 각 항은 다음과 같이 표현된다.

$$[K] = \sum_{i=1}^{NE} [K]_i^e \quad (15)$$

$$\{\Delta F_T\} = \sum_{i=1}^{NE} (\{F_o\}_i^e + \{F_o\}_i^e) \quad (16)$$

여기서 NE는 해석영역을 구성하는 유한요소의 개수이다. 위의 유한요소방정식은 등방경화형 소성거동을 표현하는 구성방정식에 기초하여 유도되었다.

### 2.3 해석 데이터 변환

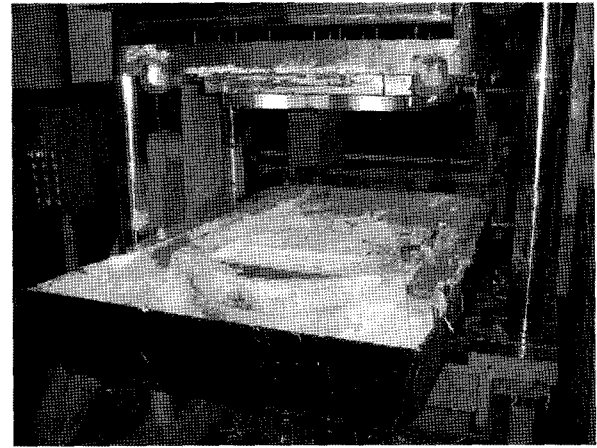
현재 CAE에서는 유한차분법과 유한요소법이 많이 사용되는데 유동 및 온도의 해석에서는 유한차분법에 의해 많은 접근이 이루어지고 있으며 응력의 해석을 위해서는 유한요소법이 주로 사용되고 있다. 주조 공정은 용융 금속의 유동에 의해 주형 내부가 충전되고 이러한 용융 금속과 주형이 상호 혹은 각각 열전달에 의해 냉각, 가열되며 수반되는 온도 변화는 열응력을 발생하게 된다. 만일 아주 복잡한 주조 공정에 대해 전산 수치해석을 수행할 때 상기 언급한 바와 같이 각각의 용도에 적합하도록 해석 방법을 선택한다면 유한 차분법에서 구한 유동 및 온도, 조직 등의 해석결과를 열응력의 해석을 위해서 유한요소법의 데이터로 변환해야 할 것이다. 2차원이고 주로 직선경계를 가지는 단순한 해석영역에서는 유한차분법과 유한요소법의 격자를 일치하게 구성하여 데이터의 교환을 행해왔으나 임의 모양에서는 서로의 격자가 달라질 수 밖에 없고 해석 절점이 불일치 하게 된다. 더욱이 컴퓨터의 발전에 힘입어 복잡한 제품을 3차원적으로 해석하게 되는 경우는 변환해야 할 해석결과와 양이 많고 복잡해지므로 시스템적인 변환과정이 필요하다. 3차원 상에서 유한차분법과 유한요소법 사이에 데이터 교환은 [7]의 논문에서 자세하게 기술되어 있다.

본 연구에서는 모델에 대한 열응력 및 열변형 문제를 해석하기 위하여 상기 해석 방법을 시스템적으로 체계화한 3차원 주조 전용 해석 프로그램(Z-CAST)을 이용하여 연구를 수행하였다.

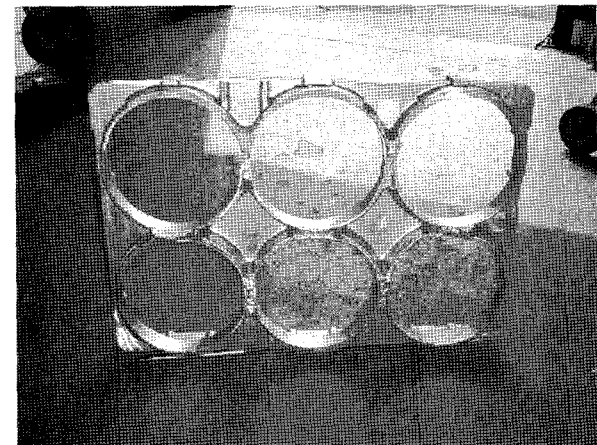
### 3. 해석 모델 설정

Fig. 1은 현재 (주)삼성정공에서 생산중인 제품과 금형을 보여주고 있으며, 주조 공정 시 열변형 및 열응력 해석을 위한 제품 및 금형의 3D CAD Model을 Fig. 2에 나타내었다. 해석 대상 제품의 재질은 AC4CH이며, 상형과 하형을 포함하여 금형의 재질은 GCD50이다. 아래의 Table 1에 계산에 사용된 AC4CH에 대한 물성치를 나타내었다[8].

주조 공정 시 제품 및 금형의 열 변형 거동을 파악하기 위하여 해석 대상물의 요소수와 해석 시간의 단축 및 경계조건과 같은 인자들을 고려하였으며, 최적의 해석을 수행하기 위하여 모델의 범위는 Fig. 3과 같이 대칭 특성을 고려하여 모델링 하였다. 모델은 사면체 요소(tetra element)를 사용하여 해석을 수행하였고 제품은 9981개, 상형은 13622개, 하형은



(a)



(b)

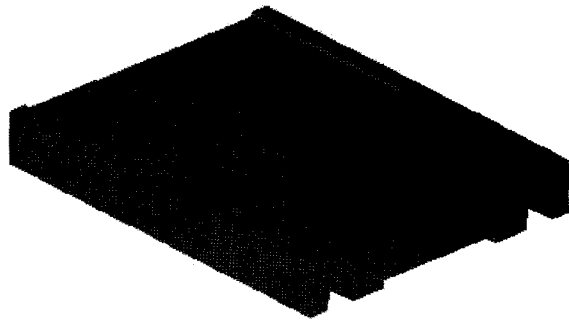
Fig. 1. Cast of AC4CH aluminum alloy and mold system ; (a) Cast, (b) Mold system

Table 1. Material properties of AC4CH; (a) Thermal properties, (b) Mechanical properties

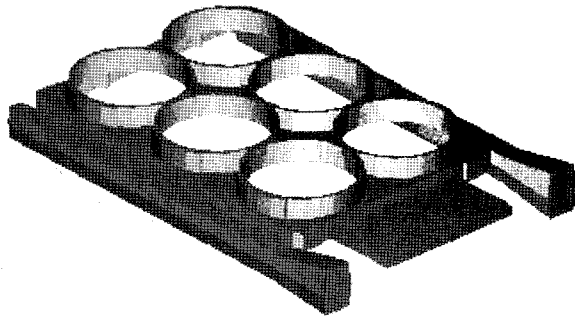
| (a)       |                              |                       |  |
|-----------|------------------------------|-----------------------|--|
| Temp (°C) | Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Specific Heat (cal/g) | Heat Conductivity (cal/cm <sup>g</sup> ) |
| 25        | 2663                         | 0.207                 | 0.361                                    |
| 100       | 2651                         | 0.214                 | 0.363                                    |
| 200       | 2647                         | 0.225                 | 0.368                                    |
| 300       | 2598                         | 0.238                 | 0.365                                    |
| 400       | 2585                         | 0.252                 | 0.375                                    |

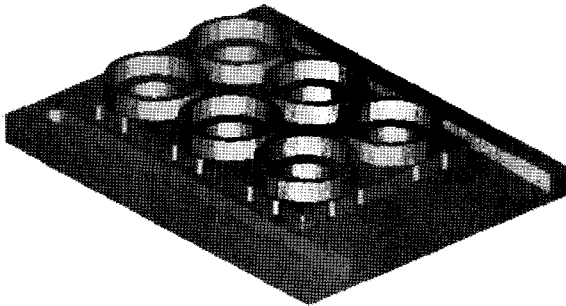
| (b)       |                    |               |  |                   |
|-----------|--------------------|---------------|--|-------------------|
| Temp (°C) | Young Modulus (Pa) | Poisson Ratio | Expansion Coefficient (K <sup>-1</sup> ) | Yield Stress (Pa) |
| 25        | 72.5109            | 0.33          | 21.010-6                                 | 185106            |
| 100       | 72.0109            | 0.33          | 21.510-6                                 | 183106            |
| 200       | 65.5109            | 0.34          | 22.510-6                                 | 141106            |
| 300       | 48.0109            | 0.35          | 23.510-6                                 | 51106             |
| 400       | 26109              | 0.38          | 24.010-6                                 | 26106             |



(a) upper mold

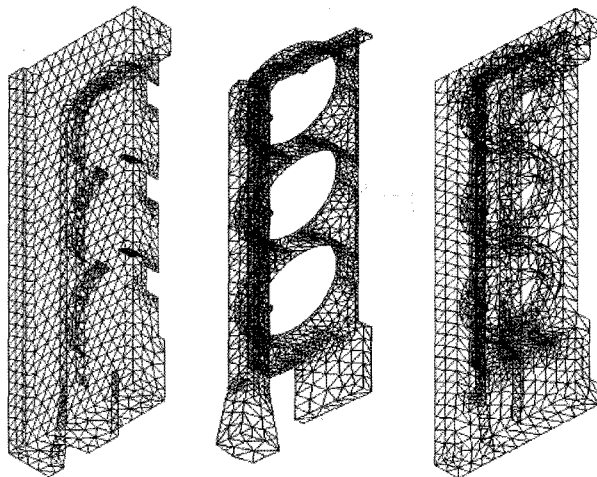


(b) cast



(c) bottom mold

Fig. 2. CAD model of cast and mold system.

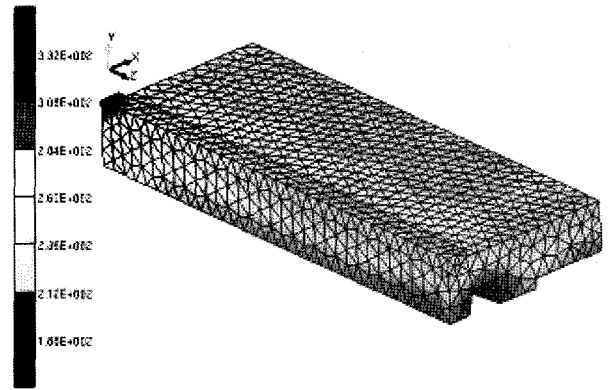


(a) Upper mold

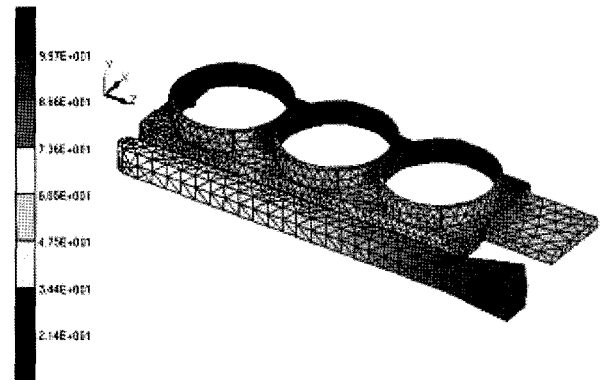
(b) Cast

(c) Bottom mold

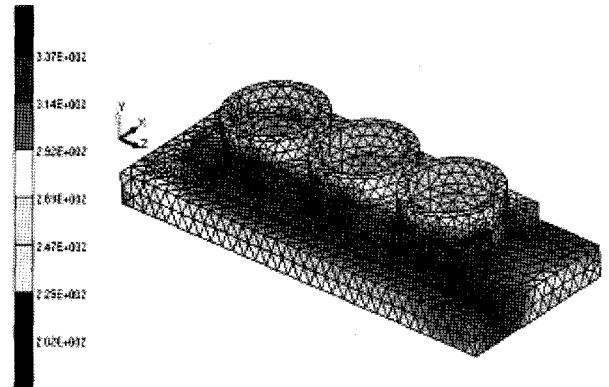
Fig. 3. Mesh used for FEM analysis.



(a) upper mold



(b) cast



(c) bottom mold

Fig. 4. Temperature analysis results of cast and mold.

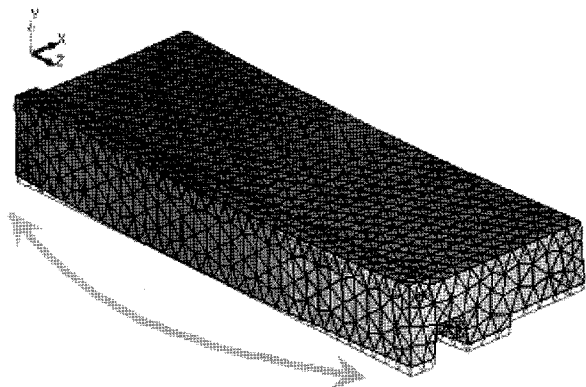
17198개의 요소수로 구성되어 있다.

#### 4. 해석 결과

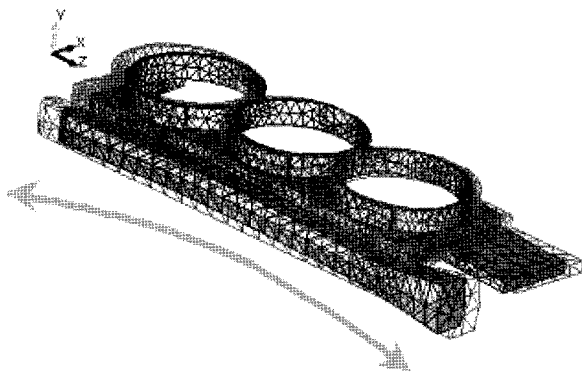
주조 시 현재 업체에서 문제가 되고 있는 상형과 하형 간의 발생하는 이격현상과 주조 공정 시 발생하는 제품의 변형을 최소화 시키기 위하여, 기존 방안에 대한 금형 및 제품의 온도 해석을 수행하였다. 주조 공정 시 냉각 과정에서 금형 내부와 외부는 용탕에 의한 열적 구배 현상으로 인하여 열변형이 발생하게 되는데 이 열적 거동을 정확하게 분석하기 위하

여, 용탕의 온도, 주입온도, 주입시간 및 형 해체 시간을 고려한 금형 및 제품의 온도해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이러한 온도 분포 결과는 최소의 변형이 발생하는 금형의 설계의 기초가 된다.

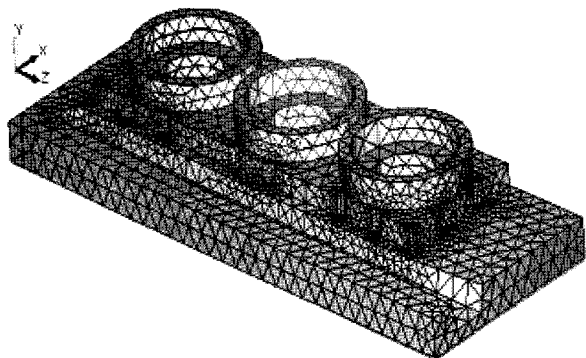
현재 주조 현장에서 발생하는 금형과 제품의 변형량은 Y축 변위 방향을 기준으로 하여 상형일 경우 위쪽 방향으로 약 3~4 mm, 하형일 경우 아래쪽 방향으로 약 0~0.5 mm 정도의 값을 보였으며, 제품은 2~3.5 mm 정도의 변형량을 나타내었다. Fig. 5에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 열변형 해석 결과를 보여주고 있으며, 이러한 변형 경향은 실제 주조 현장에서의 경향과 일치하였다. 응력 해석 결과는 Fig. 6에 나타내었으며



(a) upper mold



(b) cast



(c) bottom mold

Fig. 5. Deformation analysis results of cast and mold.

최대응력이 각각 상형은 185 Mpa, 제품은 58 Mpa, 하형은 111 Mpa이었다. 상하형 재질인 GCD50의 극한 하중이 약 500 Mpa이고 제품인 AC4CH의 극한 하중이 약 300 Mpa인 점을 감안 할 때 주조 공정 중의 응력에 의한 문제는 없을 것으로 예상되었고 실제 제조 공정에서도 금형 및 제품에 대한 크랙과 같은 불량은 발생하지 않았다.

기존 방안에 대한 온도 해석 결과 및 열변형 결과를 바탕으로 열변형을 유발하는 금형의 온도 분포 결과와 금형의 기하학적인 형상에 따른 열변형을 분석하였고, 금형의 특정 부위의 온도 분포를 변화시킴으로써, 금형 및 제품의 변형에 가장 큰 영향을 주는 상형에 대하여 온도의 불균형을 해소하는 3가지 모델을 Fig. 7과 같이 제안하였고 이에 대한 온도해석 및 열변형 해석을 수행하여 검증하였다.

정확하고 객관적인 해석을 위하여 동일한 경계조건을 부여하였으며, 각 모델의 동일한 좌표에 대하여 가장 변형이 큰 지점을 선택하여 변형 해석 결과의 측정점으로 설정하였다. Table 2는 금형의 기하학적 형상에 따른 상형의 변형 해석 결과를 보여준다. Table 2에서 보여주는 바와 같이 y축 변위에 대한 결과 값을 비교해보면, 각 변위 측정 point에서 개선 방안 1, 개선 방안 2, 개선 방안 3모두가 기존 방안에 비하여 변형이 작음을 알 수 있고 특히 개선방안 1의 경우가 금형의 변형량이 최소임을 알 수 있었다.

제품의 변형은 y축의 변형이 가장 크므로 제품의 변형량 측정 point를 Fig. 8과 같이 설정하였으며 기존 방안 및 각 개선 방안에 대한 변형 해석을 수행한 결과를 Table 3에 표시하였다. Table 3의 결과를 보면 개선방안 3의 경우가 제품의 변형량을 최소화 한다는 것을 알 수 있다.

실제 주조 현장에서 발생하는 금형의 이격 현상에 따른 측정 변형량과 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 얻은 개선방안 1과 개선방안 3에 대한 금형의 변형량 차이는 불과 0.35 mm 정도로 매우 작은 값인데 반하여 제품의 변형량은 개선방안 1에 비해 개선방안 3이 모든 측정점에서 허용오차 범위 1 mm 내의 값을 얻을 수 있었다.

개선방안 1과 개선방안 3을 비교하면, 서로 다른 금형의 두께로 인하여 제품의 온도 구배가 달라짐을 알 수 있었으며, 제품의 불균일한 온도 분포로 인하여 개선방안 3이 제품의 변형량을 최소화 함으로써 변형 허용 범위 1 mm 내의 변형량을 얻을 수 있었다.

그 결과, 개선방안 1이 금형의 변형 측면에서는 제일 유리하나 궁극적으로 제품의 최소 변형량, 즉 제품의 변형이 변형 허용 범위인 1 mm 이내의 값을 갖도록 하는 것이 금형 최적 설계의 목적이므로 개선방안 3이 제품의 측면에서 우수한 금형 형상임을 본 해석을 통하여 알 수 있다.

## 5. 고찰 및 결론

제품의 변형을 최소화하기 위하여 금형의 형상을 고려하여 금형 및 제품의 온도 분포와 응력 및 변형 해석을 위한 요소 및 유한 차분 해석 코드를 이용하여 수행하였다.

금형 및 제품의 온도해석 결과를 바탕으로 금형과 제품의

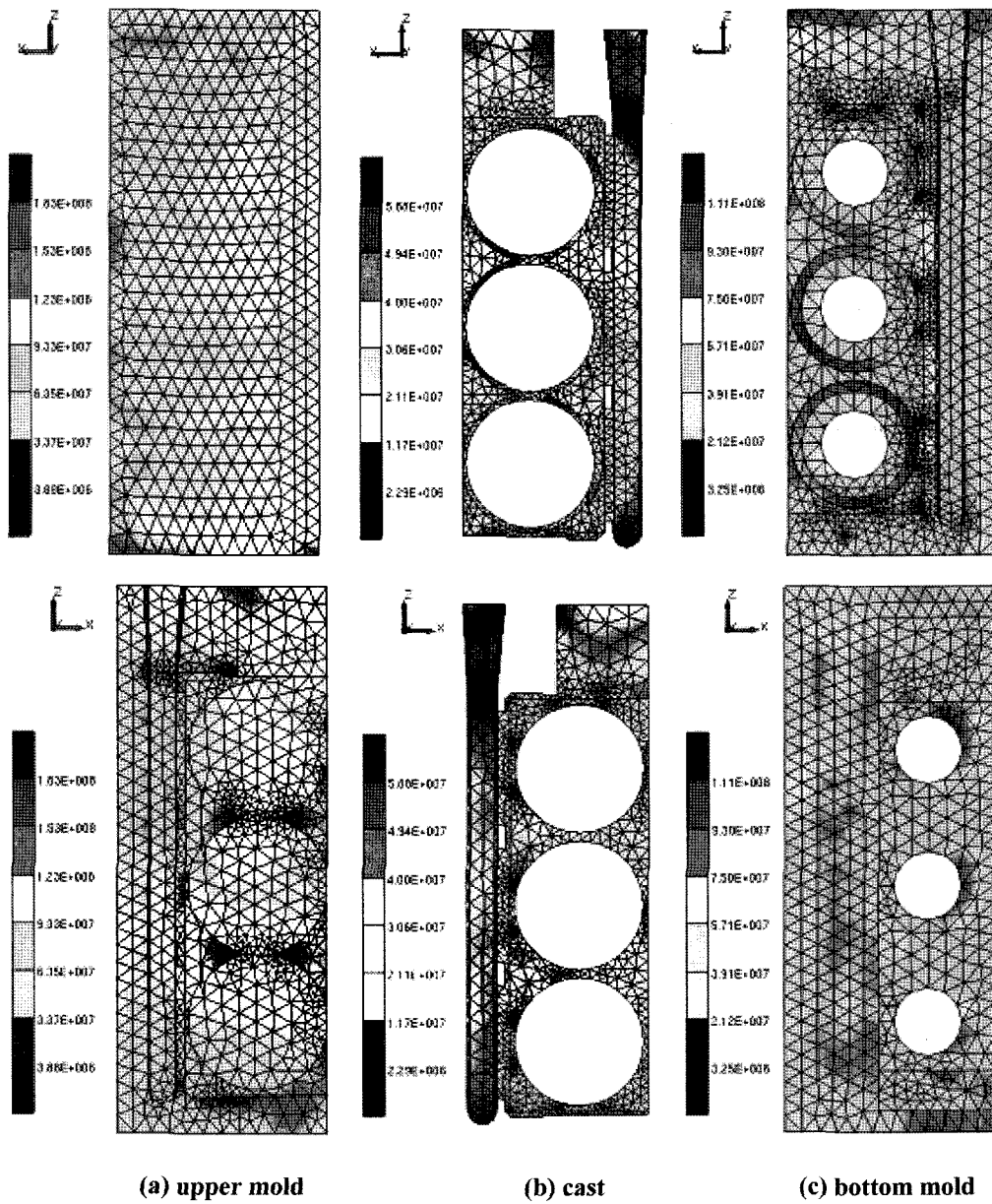


Fig. 6. Von mises stress distribution of cast and mold.

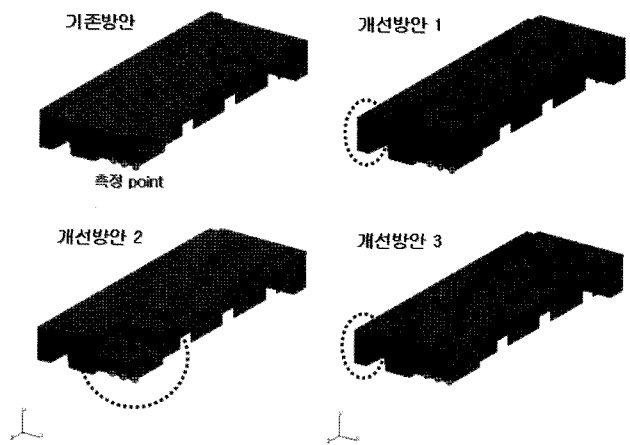


Fig. 7. Modified model of upper mold for thermal deformation analysis

Table 2. Result of deformation analysis for Bulk head upper molds

| 단위 [mm]  |                 |               |               |               |
|--|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| Deformation ( Y-axis) analysis of the upper mold |                 |               |               |               |
| Measuring Point                                  | Existing method | Improvement 1 | Improvement 2 | Improvement 3 |
| Point 1  | 3.446           | 2.830         | 3.214         | 3.186         |
| Point 2  | 3.458           | 2.846         | 3.226         | 3.174         |
| Point 3  | 3.488           | 2.882         | 3.262         | 3.198         |

열변형을 최소화 할 수 있는 금형의 형상을 복수로 설계하고 각각에 대해 열응력 및 변형 해석을 수행하는 금형의 최적 설계를 통하여 제품 및 금형 시스템의 변형을 최소화 할 수 있음을 확인하였다.

주조 공정 시 용탕 주입 후 금형과 주물의 접촉 부위의 온

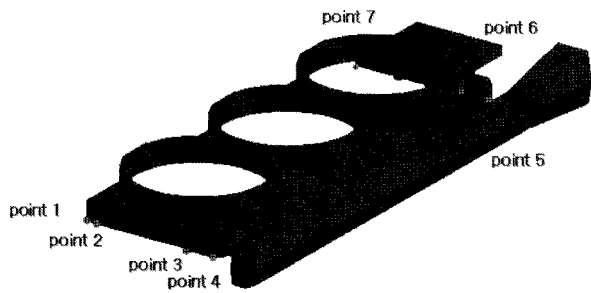


Fig. 8. Measuring point of cast for deformation analysis.

Table 3. Result of deformation analysis for Bulk head cast.

| 단위 [mm]                                    |                 |               |               |               |
|--|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| Deformation ( Y-axis) analysis of the cast |                 |               |               |               |
| Measuring Point                            | Existing Method | Improvement 1 | Improvement 2 | Improvement 3 |
| Point 1                                    | -1.212          | -1.229        | -0.1212       | 0.6612        |
| Point 2                                    | -1.205          | -1.223        | -0.1207       | 0.6632        |
| Point 3                                    | -2.028          | -2.416        | -2.028        | 0.0740        |
| Point 4                                    | -2.220          | -2.258        | -2.220        | -0.0932       |
| Point 5                                    | -1.222          | -1.237        | -1.222        | 0.3704        |
| Point 6                                    | -2.452          | -2.488        | -2.452        | -0.4296       |
| Point 7                                    | -2.128          | -2.162        | -2.128        | -0.0964       |

도가 상승하므로 금형은 주물의 반대 방향 즉, 상형은 위쪽 방향으로, 하형은 아래쪽 방향으로 각각 휘게 되는데 이는 주물과 금형의 접촉 부위와 금형의 바깥 부위와의 온도 구배 (thermal gradient) 때문이다. 시간이 지나면서 금형과 주물의 접촉 부위의 온도 차이가 작아지게 되고 이로 인하여 휘었던 부분이 점차 원래 상태의 방향으로 돌아오는 경향을 보인다. 그러나 금형 전체의 온도가 상승하므로 전체적으로는 팽창이 지속된다. 더욱 구체적으로 분석해보면 금형의 기하학적인 형상에 따라 부위별로 온도분포가 다르므로 변형되는 정도가 불균일해지고, 이런 불균일한 변형들이 전체적인 변형을 결정한다.

그러나 시간이 경과함에 따라 전체 온도 분포가 비슷해지면서, 변형은 원래 형태로 돌아오기 시작한다.

이러한 주조 공정 시의 온도/응력 해석 프로그램을 이용하여 주조 공정 설계를 수행 함으로써 현장에서의 시행착오를 줄이고 과학적 설계를 수행함으로써 궁극적으로 금형 설계 기술을 향상 시킬 수 있을 것이다.

하지만 향후 공정시간 동안의 금형과 제품의 시간적 거동의 면밀한 분석이 요구되며 금형/제품 상호 기계적 구속 및 제품의 액상응고 수축량 고려 등 지속적인 연구 개발이 계속 되어져야 할 것이다.

### 참고 문헌

- [1] S.-Y. Kwak, C.-H. Lim, J.-H. Hong, J.-K. Choi, and N. Arai, Journal of Computational Fluid Dynamics, "Thermo-fluid-stress Analysis by a Hybrid Technique of FDM and FEM," 12(4) (2004) 638-646.
- [2] S. H. Min, O. S. Kim, and B. K. Koo, J. Kor. Foundrymen's Soc., "A Study on the Temperature Distribution of Metal Casting Mould", 11(1) (1991) 79-84.
- [3] O. S. Kim, B. K. Koo, and S. H. Min, J. Kor. Foundrymen's Soc., "Analysis on the Elasto-Plastic Thermal Stress and Deformation of Metal Casting Mould by FEM(Finite Element Method)", 13(1) (1992) 81-92.
- [4] S. Kajiwara and K. Onishi, J. Iron and Steel Inst., "Temperature and Deformation of Strip Caster's Mold Roll", 86(2) (2000) 303-345.
- [5] C. M. Park, W. S. Kim, and G. J. Park, Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, "Analysis of Thermal Stress and Deformation of Casting Roll in Twin Roll Strip Casting Process", 26(9) (2002) 1943-1951.
- [6] J. K. Choi, "Prediction of Casting Defects and Control of Casting Process by Computer Simulation", Ph D Thesis, (1992) 4-9.
- [7] S.Y. Kwak and C. D. Cho, Journal of The Korea Society for Heat Treatment, 2001, "Thermal Stress Analysis Field Data Conversion between FDM and FEM", 14(4) 1-7.
- [8] J. Gilbert Kaufman, ASM International, 1999, "Properties of Aluminum Alloys", p.258.