

|||||
論 文
|||||

鑄造金型の 温度分布에 관한 研究

閔壽弘*, 金鈺三**, 具本權***

A Study on the Temperature Distribution of Metal Casting Mould

Soo-Hong Min*, Ok-Sam Kim**, Bon-Kwan Koo***

Abstract

The process of solidification of metal is accompanied by liquid-solid change and known as Stefan's heat conduction problem on the moving boundary. In this study the temperature distribution in ingot and metallic mould during casting was analyzed by the two dimensional heat conduction theory.

The transient temperature distribution was numerically calculated using a finite element method on the nodal point of mesh screen representing ingot and mould cross section. The theory was applied on the casting of aluminum(purity :99%) in flat ingot mould of GC25. The analysis will make it possible to calculate an optimum mould shape of which temperature gradient becomes minimum.

2. 實驗 및 모델解析

1. 序論

鑄造金型の 設計는 鑄物의 品質, 鑄型의 材質 및 形狀등 綜合的的要因과 다양한 變數들을 考慮하여야 하며 金型내 温度勾配에 의한 熱應力 舉動은 金型의 수명에 중요한 影響¹⁾을 미치게 되므로 이에 대한 明確한 糾明이 先決되어져야 한다.

또한 온도구배에 따른 金型내부의 熱膨脹 및 熱收縮 등으로 발생하는 열응력이 殘留應力으로 鑄造金型내에 존재하게 되면 局部的인 塑性變形^{2) 3)}을 유발하여 예기치 않았던 金型損傷 및 破壞를 일으키는 요인이 된다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 事故를 미연에 防止하고 金型의 壽命을 診斷하기 위하여 金型鑄造시 鑄型 및 鑄造金屬내의 温度分布를 有限要素法에 의하여 시뮬레이션하였고 이를 實驗結果와 比較 및 考察하였다.

알루미늄 塊를 溶解시키는 電氣爐(180×130×320mm³)는 수평개방로이며 ingot의 온도를 730±5℃로 유지하기 위해 自動温度 調節裝置를 사용하였다. 金型의 하단부에는 金型의 初期温度를 100±3℃로 일정하게 하기 위하여 isothermal bath를 設置하였다. 金型의 温度測定을 위하여 金型의 長邊側과 短邊側 및 모서리부에서 鑄物과 의 境界面으로부터 1mm, 9mm 및 18mm 위치에 직경 0.3mm의 C-A 熱電對를 설치한 후 weld condensor로 點接合하고 알루미늄 본드로 위치가 변하지 않도록 고정하였다. 金型의 온도분포를 측정하기 위한 實驗장치의 概要圖를 Fig. 1에 나타내었다. 鑄物이 주입되는 순간부터 3분까지는 매 10초 간격으로 측정하고 3분후 부터 1290초까지 1분 간격으로 10 channel의 digital thermometer로 温度變化를 기록하였다. 그리고 鑄物의 수축으로 인한 air gap의 측정은 냉각 완료후

* 仁荷大學校 工科大學 機械工學科

** 仁荷大學校 大學院 機械工學科

*** 서울産業大學 金型設計科

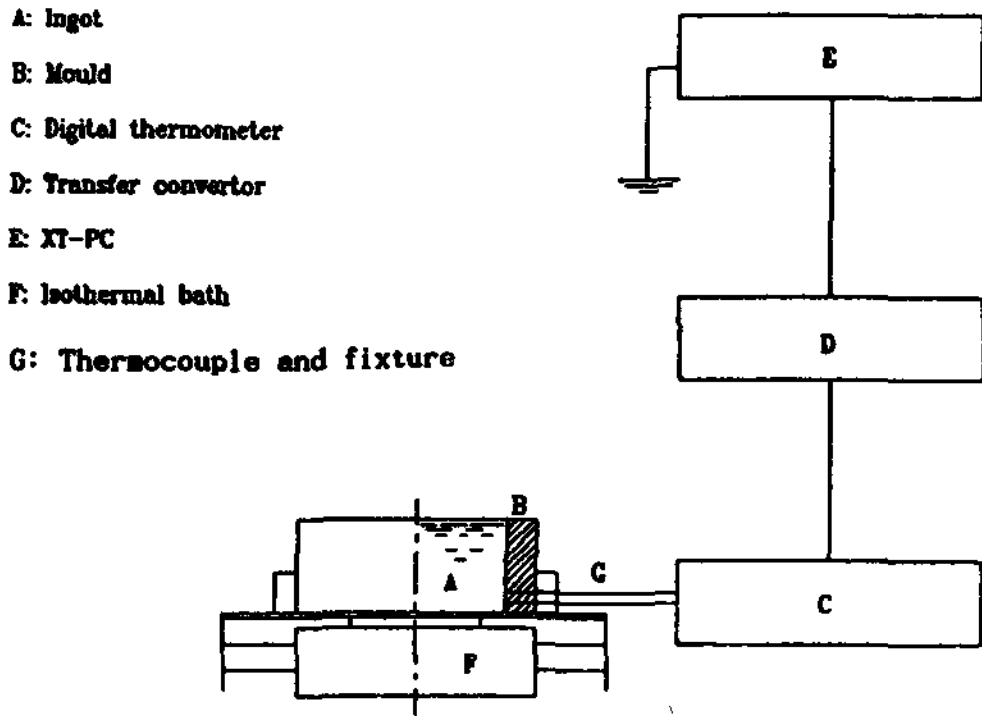


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

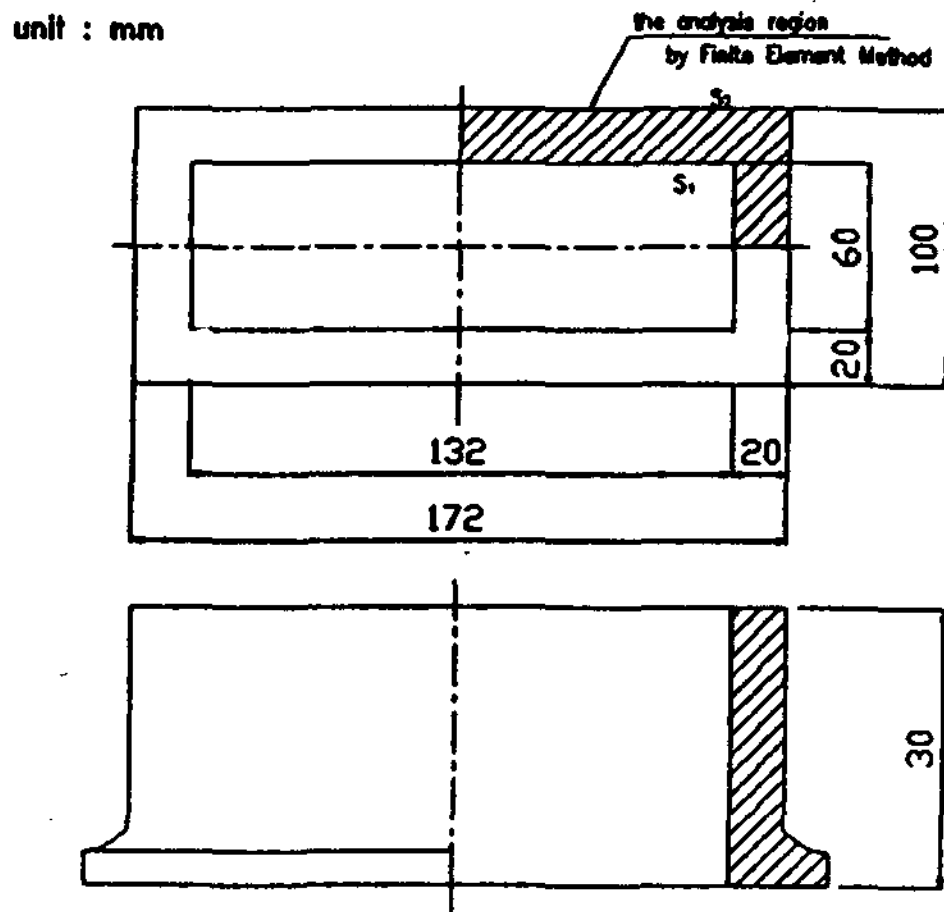


Fig. 2 The dimension of metallic mould.

粒度 $5\mu\text{m}$ 정도의 알루미나 파우더를 피펫에 담아鑄型和鑄物の 틈새로 불어넣어 파우더가 묻어있는 그 흔적을 마이크로미터로 측정하였다. 또한 주철제(GC25)鑄型에 순알루미늄을鑄造하는 경우鑄造금속의凝固에 따른鑄型내의温度分布를有限要素法에 의하여 계산하였다.

温度解析은 높이방향(Z방향)의 온도변화가 거의 없다고假定하여 X-Y 2차원 문제로 하였으며 유한요소법을 위한要素分割은 중앙횡단면에 대하여 사각형 대칭이므로 모델의 우측 1/4 단면부분만을要素分割하여 해석하였으며 온도변화가 큰鑄物-鑄型境界面을細密하게 나누었다. 해석에 사용된鑄型부분의形狀 및值數와初期條件

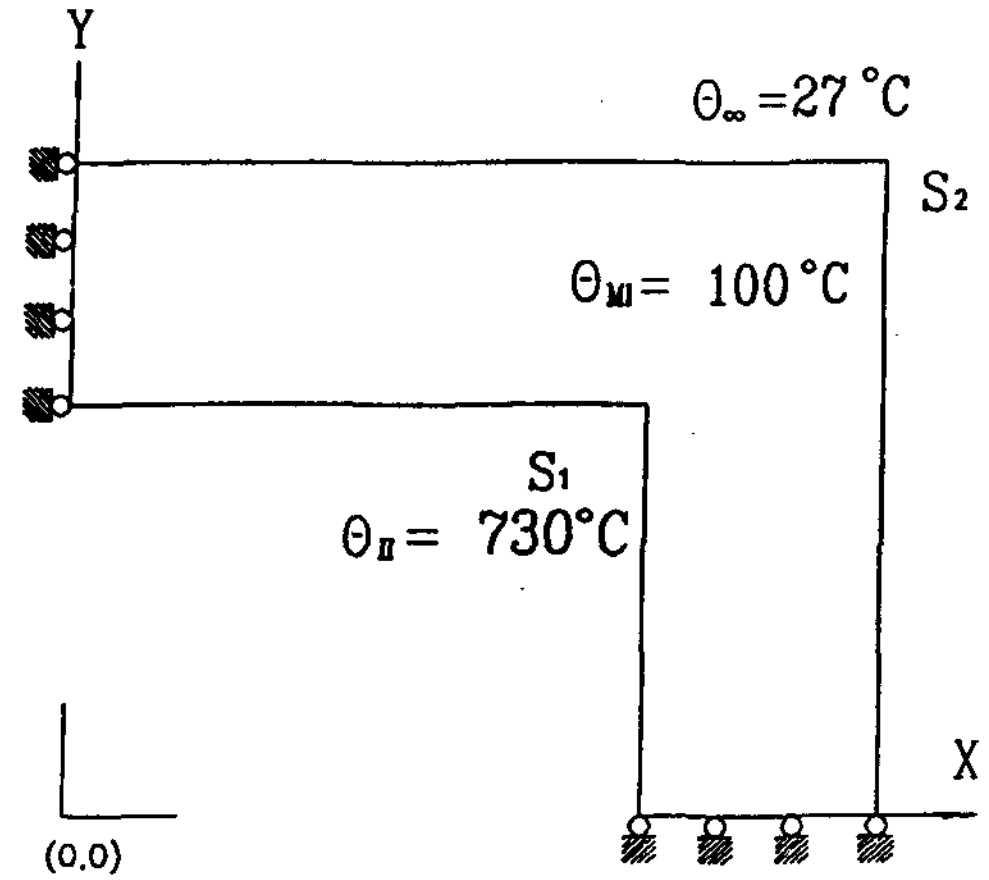


Fig. 3 The initial and boundary condition of mould.

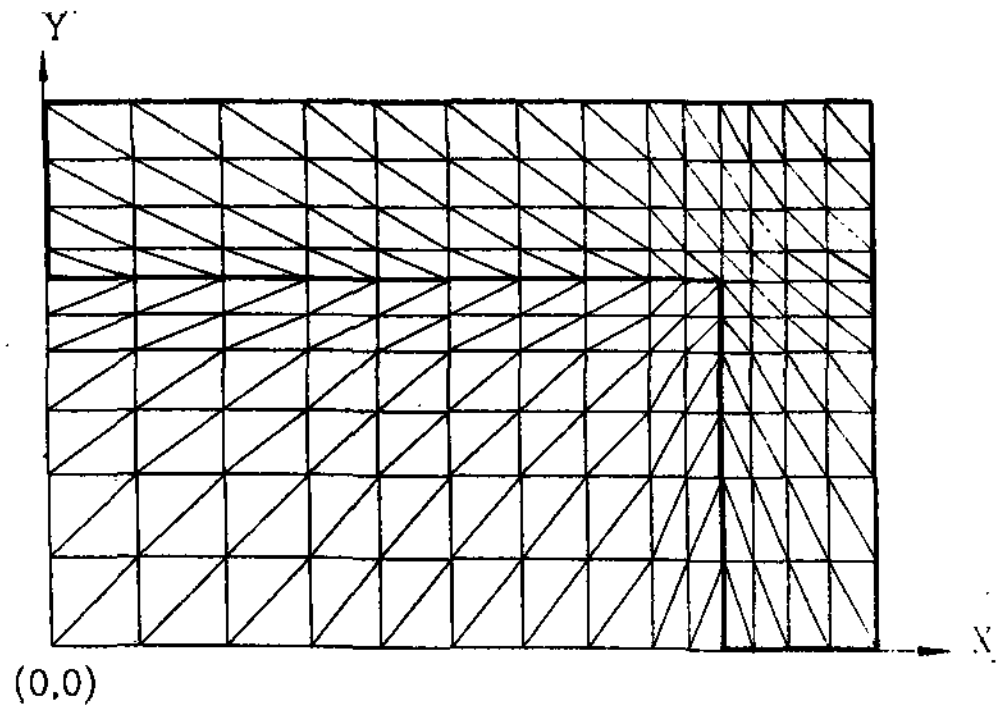


Fig. 4 Mesh screen used for temperature analysis in ingot and mould(120 elements, 77 nodal points in ingot and 160 elements, 105 nodal points in mould).

및境界條件은 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타내었다. Fig. 4는温度解析에 사용된 요소분할을 도시하였다.

3. 有限要素法을 이용한 温度解析

鑄物이 응고하는 동안鑄造금속 및金型내의 온도분포 해석^{4) 5)}을 위하여支配方程式, 構成方程式, 適合方程式, 境界條件, 初期條件 등을 이용하여 해를 구한다. 여기서는温度分布의解析을 위하여 weighted residual⁶⁾법중 Galerkin method⁷⁾를 이용하였다.

冷却過程의 온도분포 해석을 위해 다음과 같은 假定을 設定한다.

1) 초기 鑄物의 온도는 730°C이며 鑄型의 온도는 100°C로 일정하다.

2) 냉각시 鑄型 주위의 온도는 27°C로 일정하다.

3) 鑄型 및 鑄物은 等方性體이다.

위와 같은 가정하에서 鑄物의 응고에 따른 溫度解析은 Stefan 조건을 고려한 非定常 熱傳導方程式⁸⁾을 2차원 직교좌표계에 적용하므로써 다음과 같은 계의 支配方程式과 境界條件 및 初期條件⁹⁾이 설정된다.

a) 支配方程式

$$\rho c \theta = \text{div}(k \text{ grad } \theta) \quad (3-1)$$

$$c = c(\theta), k = k(\theta) \quad (3-2)$$

b) 境界條件

$$\text{grad}(k\theta_1) \cdot \hat{n} + h_1(\theta_1 - \theta_M) = 0 \text{ on } S_1, t > 0$$

$$\text{grad}(k\theta_M) \cdot \hat{n} + h_M(\theta_M - \theta_\infty) = 0 \text{ on } S_2, t > 0 \quad (3-3)$$

$$n = n_x \hat{i} + n_y \hat{j} \quad (3-4)$$

c) 初期條件

$$\theta = \theta_i \text{ in ingot, } t = 0$$

$$\theta = \theta_M \text{ in ingot, } t = 0 \quad (3-5)$$

여기서 k, ρ, c 는 鑄型의 物理的 성질인 熱傳導, 密度 및 比熱을 나타낸 것이고, 식 (3-3)과 (3-4)에서 사용한 θ_1, θ_M 및 θ_∞ 는 鑄物의 온도, 鑄型의 온도 및 鑄型주위의 온도를 의미한다. θ_i 및 θ_M 의 鑄物의 初期溫度 및 鑄型의 초기온도를, h_1 와 h_M 은 鑄物과 鑄型의 境界面에서의 熱傳達係數 및 鑄型과 周圍의 大氣面 사이에서 발생하는 열전달계수를 말한다. 또한 h_1 와 h_M 鑄物 또는 鑄型의 재질, 크기, 형상 및 離型劑 使用有無, 種類, 두께 및 粒度 등 다양한 變化 要因이 있지만 본 연구에서는 $h_1 = 0.03 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ 및 $h_M = 0.005 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ 를 이용하였다.

상기한 열전도방정식을 Galerkin의 weighted residual method를 이용하여 X-Y 2차원 문제로 취급하여 有限要素法을 행한다.

식 (3-1)의 지배방정식을 Galerkin법에 적용하면

$$\int [\nabla^2(k\theta) - \rho c \dot{\theta}] dV = 0 \quad (3-6)$$

이 되며 여기서 $\dot{\theta}$ 는 非定常項 $\partial\theta/\partial t$ 이다.

식 (3-6)을 적분하기 위하여 Gauss-Green's

theorem을 이용하며 2,3차원 적분문제의 해를 구하는데 이용되는 部分積分法은

$$\int u(\nabla \cdot \hat{V}) d\Omega = \int_{\Sigma} u(\hat{V} \cdot n) d\Sigma - \int \hat{V} \cdot \nabla u d\Omega \quad (3-7)$$

여기서

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \quad (3-8)$$

$$\hat{n} = n_x \hat{i} + n_y \hat{j} + n_z \hat{k} \quad (3-9)$$

Ω : system domain of 2-D or 3-D

Σ : boundary of system

u : scalar quality

이다. 따라서 식 (3-6)의 지배방정식은 식 (3-7)을 이용하여 다음과 같이 적분된다.

$$\int_V (k_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + k_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y}) dV - \int_V N_i \rho c \theta dV - \int_S (k_x \frac{\partial \theta}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \theta}{\partial y} n_y) N_i dS = 0 \quad (3-10)$$

여기서 熱傳導度 k 는 溫度만의 函數이며, 材料는 等方性體로 가정하였으므로

$$k = k_x = k_y \quad (3-11)$$

$$k = k(\theta) \quad (3-12)$$

로 쓸 수 있다. 한편 이때의 溫度函數는 각 要素의 節點의 온도로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\theta(x, y, t) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y) \theta_i(t) \quad n=3 \quad (3-13)$$

또는

$$\theta = [N] \{\theta\} \quad (3-14)$$

이다. 식 (3-3)의 境界조건을 식 (3-10)에 적용하면 결과식은 다음과 같다.

$$\int_V k \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} \right) dV = \int_V \rho c N_i \theta dV - \int_S h(\theta - \theta_\infty) N_i dS = 0 \quad (3-15)$$

식 (3-13)의 온도함수를 식 (3-15)의 항 $\partial\theta/\partial x, \partial\theta/\partial y$ 에 대입하면

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial x} \theta_i \quad (3-16)$$

이며 이때 非定常項 θ 는

$$\theta = \frac{\partial \theta}{\partial t} = \sum_{i=1}^n N_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \sum_{i=1}^n N_i \dot{\theta}_i \quad (3-17)$$

이 된다.

식 (3-16), 식 (3-17)을 식 (3-15)에 대입하면 다음 식이 얻어진다.

$$\int_v k \left(\left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \right] \{ \theta \} \frac{\partial N_i}{\partial x} + \left[\frac{\partial N_i}{\partial y} \right] \{ \theta \} \frac{\partial N_i}{\partial y} \right) dV + \int_s h [N] \{ \theta \} N dS - \int_v \rho c [N] \{ \theta \} N dV + \int_s h \theta_\infty N_i dS \quad (3-18)$$

여기서

$$[N] = [N_1, N_2, N_3] \quad (3-19)$$

$$\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] = \left[\frac{\partial N}{\partial x} \quad \frac{\partial N}{\partial x} \quad \frac{\partial N}{\partial x} \right] \quad (3-20)$$

$$\left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] = \left[\frac{\partial N}{\partial y} \quad \frac{\partial N}{\partial y} \quad \frac{\partial N}{\partial y} \right] \quad (3-21)$$

$$\{ \theta \} = [\theta_1 \theta_2 \theta_3] \quad (3-22)$$

이다. 또한 여기서 식 (3-17)을 未知温度 θ 에 대하여 離散化(discretization)하여 정리하면 모델 全領域에 대한 剛性方程式이 얻어진다.

$$[K] \{ \theta \} + [K_3] \{ \theta \} = \{ P \} \quad (3-23)$$

단,

$$[K] = \int_v [B]^T [D] [B] dV + h \int_s [N]^T [N] dS \quad (3-24)$$

$$[K_3] = \int_v \rho c [N]^T [N] dV \quad (3-25)$$

$$\{ P \} = \int_s h \theta [N] dS \quad (3-26)$$

$$[N] = [N_1 \ N_2 \ N_3] \quad (3-27)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \quad (3-29)$$

한편 식(3-23)에서 적용한 $\{ \theta \}$ 의 최종적인 剛性方程式은

$$[K] \{ \theta \}_{t+\Delta t} = \{ P \}_{t+\Delta t} \quad (3-30)$$

으로 표시된다. 여기서 Δt 는 時間增分이고 $[K]$ 및 $\{ P \}$ 는

$$[K] = [K] + [K_3] / \Delta t \quad (3-31)$$

$$\{ P \}_{t+\Delta t} = \{ P \}_{t+\Delta t} + [K_3] \{ \theta \}_t / \Delta t \quad (3-32)$$

이고 위의 剛性方程式(3-30)에 初期條件式(3-5)를 이용하여 微小時間 증분 Δt 에 대한 非定常 温度分布를 구하였다.

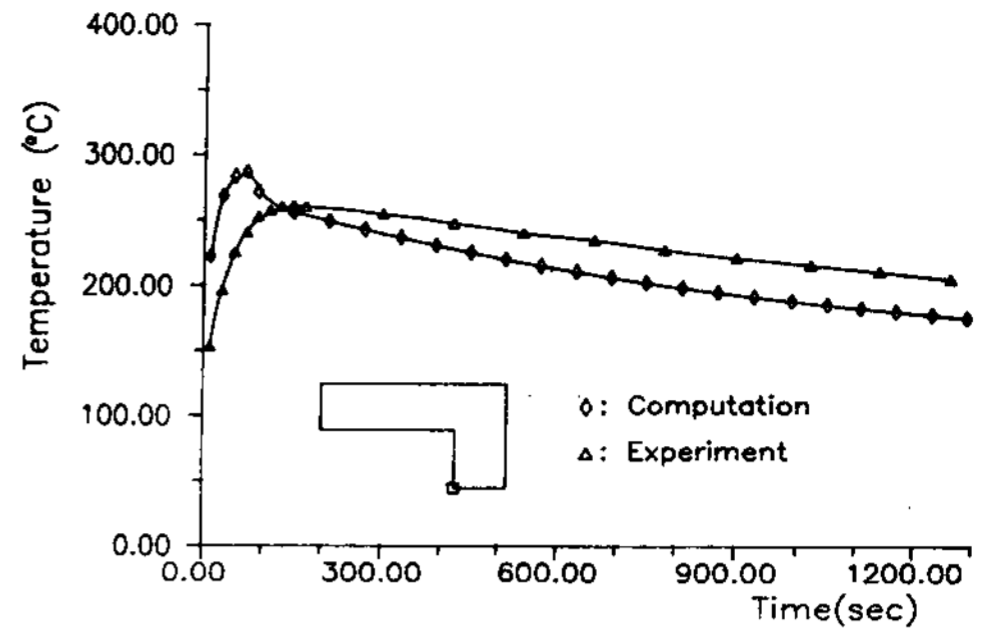


Fig. 5. Comparison of temperature variation of mould between experiment and computation at the narrow face.

4. 實驗 및 解析 結果의 考察

本章에서는 實驗을 통하여 얻어진 測定結果와 有限要素解析을 행하여 얻어진 주형의 温度分布 결과에 대하여 比較 및 考察을 함으로써 本研究 結果의 妥當性을 檢討하였다.

Fig. 5는 鑄物의 冷却에 따른 鑄型의 短邊側에서의 時間 經過에 따른 實驗과 解析의 温度變化를 나타낸 것이다.

주형의 안쪽면에서의 직접적인 熱傳達로 인하여 급격히 온도가 上昇하며 바깥쪽으로 갈수록 最高温度에 도달하는 시간이 길어진다. 특히 短邊의 안쪽에서의 실험의 경우 150초때 260°C, 해석의 경우 80초때 290°C로 最高温度를 나타내며 약 30°C 정도의 차이를 보이는데 그 이유는 주형의장 변부 및 모서리부에서 주물의 凝固종료시 수축으로 인하여 0.8mm 정도의 air gap이 생성되는데 해석의 경우 이 air gap을 고려하지 않았기 때문으로 思料된다.

Fig. 6은 주물의 응고에 따른 주형의 모서리부 내측에서 실험과 수치해석에 의한 温度變化를 도시한 것이다. 주형의 內側面에서는 약 90초가 지날 때 실험의 경우 307°C로 최고온도를 나타내며 해석의 경우 약 290°C로 最高温度에 도달한다. 여기서 17°C 정도의 편차가 발생하지만 온도의 상승과 저하가 비슷한 양상으로 거동하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 7은 鑄物의 응고에 따른 鑄型의 長邊側(wide face)에서 實驗과 數值解析의 温度變化를 나타낸 것이다. 이것도 전반적인 傾向은 주형의

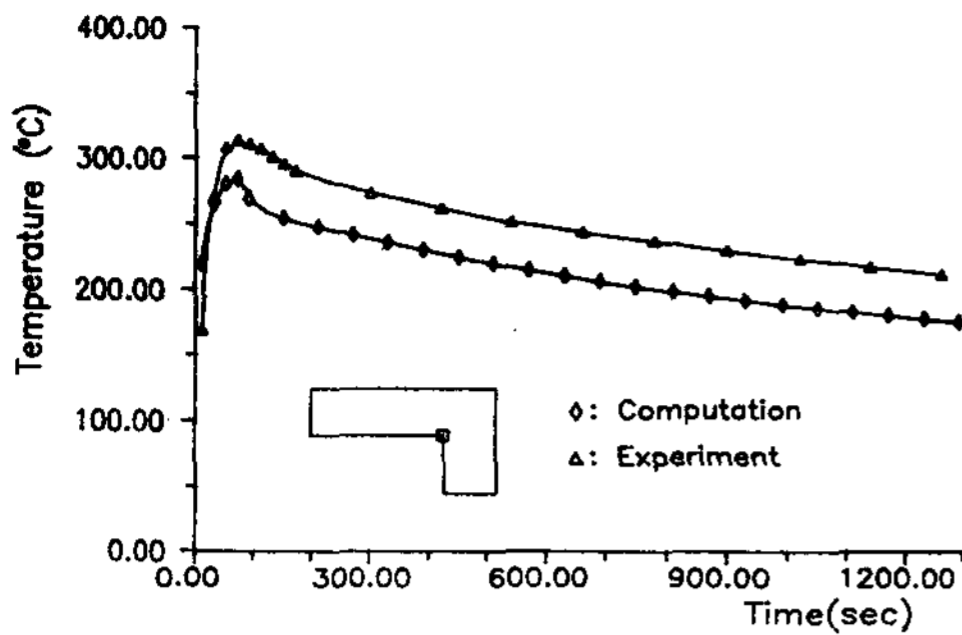


Fig. 6. Comparison of temperature variation of mould between experiment and computation at the internal corner.

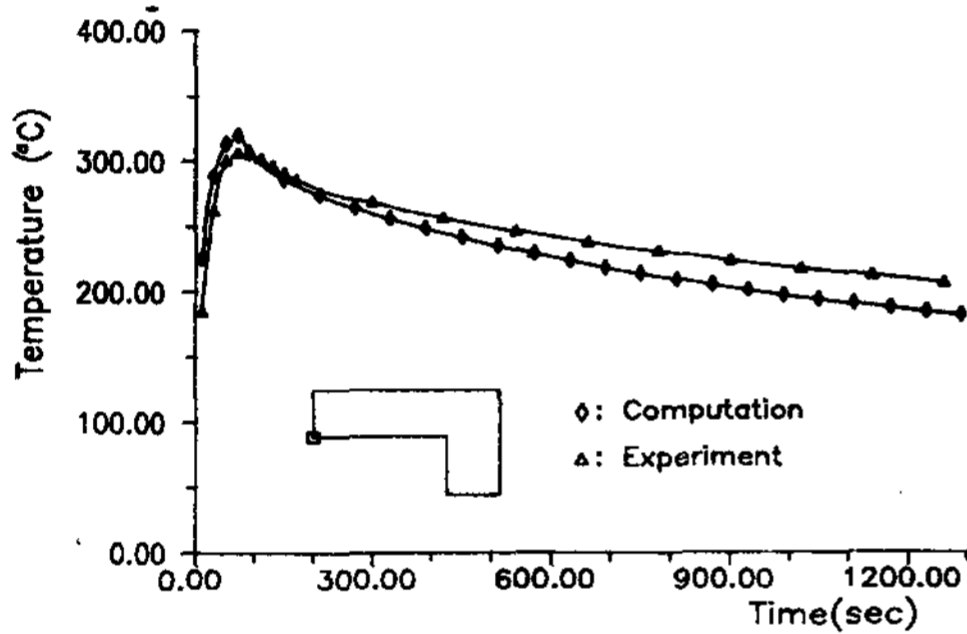


Fig. 7. Comparison of temperature variation of mould between experiment and computation at the wide face.

短邊側과 類似하며 鑄型내면의 경우 注入開始 후 80초때 實驗은 305°C, 解析은 320°C로 각각 최고 온도에 도달하며 최고온도의 차이는 15°C를 나타내고 있다. 그러나 短邊側에서는 약 30°C의 편차를 보이는데 이것으로 보아 鑄物의 凝固過程時 收縮으로 인한 air gap의 생성은 주형의 長邊部에서는 발생하지 않음에 비해 短邊側에서는 0.8mm 정도의 크기로 생성하여 이것이 주형의 溫度變化에 있어서 큰 影響을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 鑄物의 注入開始後 10초가 經過한 후의 鑄型 및 鑄物의 溫度分布를 圖示한 그림으로서 한개의 선은 40°C의 差異를 나타내고 있다. 長邊側과 短邊側의 境界面은 활발한 熱移動을 말미암아 급격한 溫度變化를 보여주며 모서리부 역시 圓滑한 熱交換으로 주형의 溫度上昇이 급속도로 이

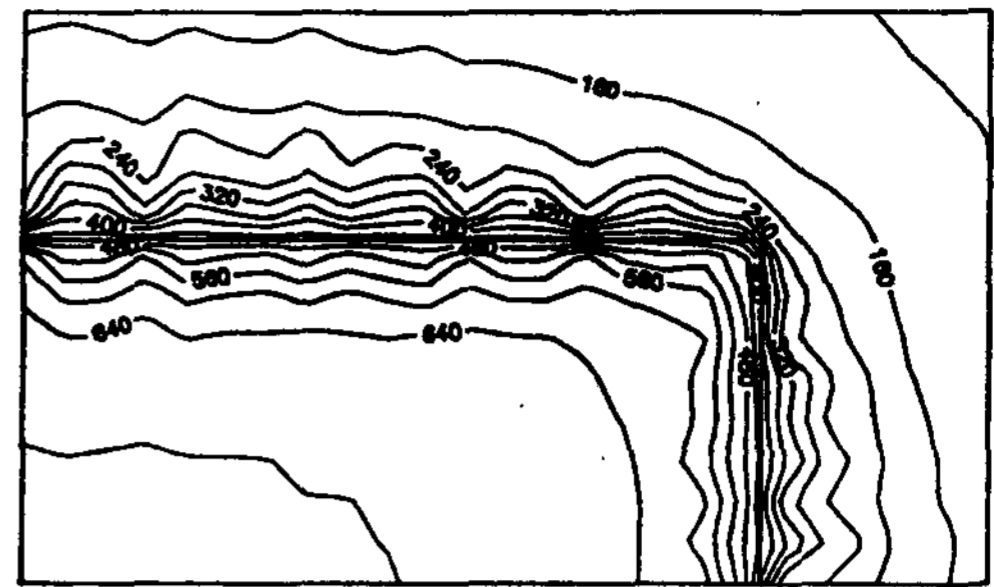


Fig. 8. Temperature contour (10 sec. after pouring)

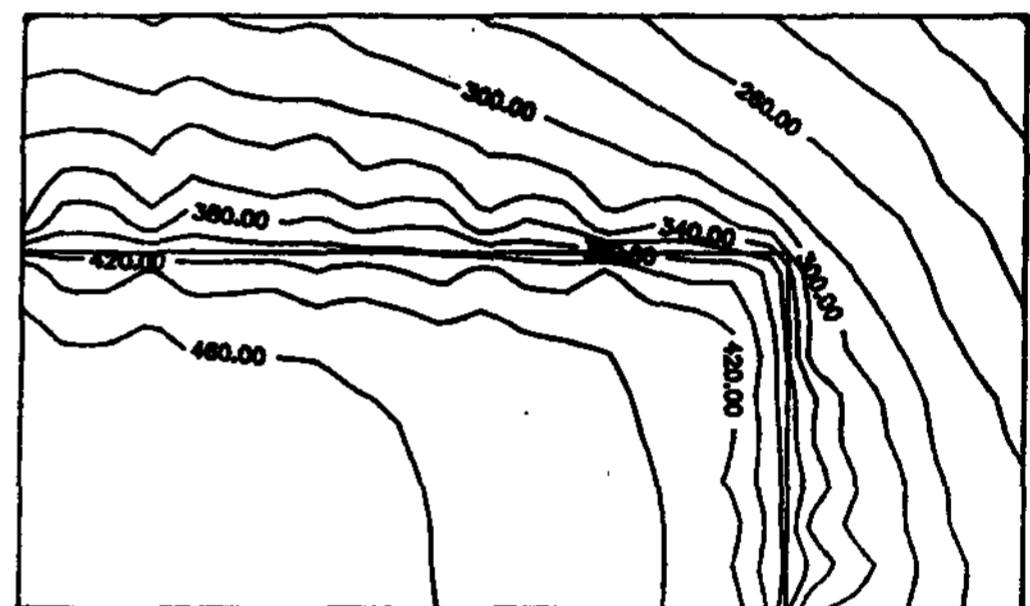


Fig. 9. Temperature contour (80 sec. after pouring)

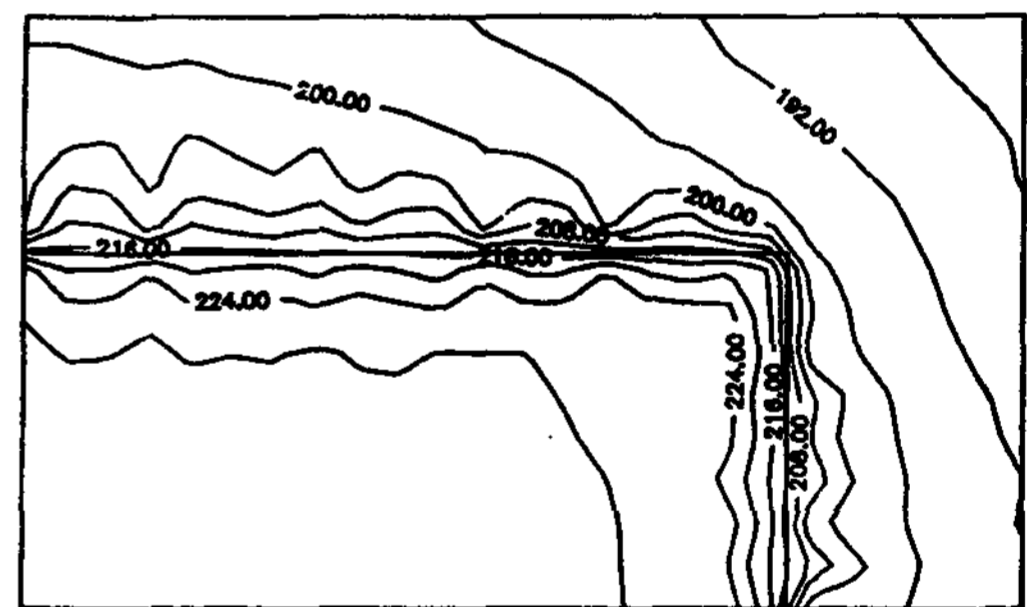


Fig. 10. Temperature contour (1290 sec. after pouring)

루어지고 있다. 또한 장변측과 단변측에서 발생하는 溫度分布의 波動傾向은 모델의 要素分割時 境界面에서 발생하는 解의 連續性에 관한 문제로 思料되므로 차후의 研究에서는 이점을 보완하여 實際와 보다 近似한 溫度分布를 解析하여야 할 것이다.

Fig. 10은 주물의 주입후 1290초가 경과한후의 鑄型 및 鑄物의 溫度分布를 나타내는 그림으로서 한개의 온도의 차이는 4°C이다. 이때에도 주형의 內側面에서는 보다 조밀한 溫度分布를 보여주고

있지만 대기와 접하는 주형의 外側面에서는 완만한 温度變化를 나타내고 있다.

5. 結論

本 研究에서는 鑄物 및 鑄造金型の 温度分布에 대하여 有限要素法을 이용하여 數値解析함과 동시에 實驗을 통하여 測定結果와 비교 및 검토하였다. 解析 및 實驗을 통하여 얻어진 주요한 結論을 要約하면 다음과 같다.

첫째, 長邊의 경우 温度分布에 있어서 解析 및 實驗 모두 冷却初期에 급격한 温度上昇을 보여 解析은 320℃, 實驗은 305℃로 각각 最高温度를 나타내었으며 短邊에서는 解析이 290℃, 實驗은 260℃이며 모서리 부에 있어서 解析은 290℃, 實驗은 307℃를 나타냈다. 둘째, 最高温度에 도달하는 시간은 數値解析의 경우 80초 정도로 鑄型の 長邊, 短邊 및 모서리부가 일정하였으나 실험의 결과에서는 80-150초 가량으로 다양하게 分布하고 있었다. 셋째, 鑄物の 注入후 시간의 경과에 따라 温度變化가 급격한 위치는 鑄型の 內面部로부터 外面部 방향으로 移動하는 것을 알 수 있으므로 追後 이것의 位置를 諸般 因子들에 대하여 定量的으로 평가한다면 鑄型の 熱應力 發生舉動의 分析 및 最適한 鑄型の 形狀設計에 도움이 될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1) M. Isotani, K. Yasuo, "Thermal Stresses

Analysis of the Die for Metal Mould Casting by F.E.M.", J. of Casting, Vol. 54, No. 8, (1982), pp. 542-548.

2) 閔壽泓 외 2명, "FLAT형 鑄造金型の 熱應力 解析에 관한 研究" 大韓機械學會 秋季學術大會抄錄集, (1990), pp. 389-391.

3) 閔壽泓 외 2명, "有限要素法을 이용한 鑄造金型的 彈塑性 熱應力 解析" 大韓機械學會 春季學術大會抄錄集, (1988), pp. 150-153.

4) E. Hinton, D.R.J. Owen, "Finite element in Plastisity", Pineridge Press Ltd. (1980).

5) S.S.Rao, "The Finite Element Method in Engineering", Pergamon Press, (1980).

6) O. J. Zienkiewicz, "The Finite Element Method", 3rd, McGraw-Hill Book Co., 1977.

7) E. Hinton, D.R.J. Owen, "An Introduction to Finite Element Computation", Pineridge press LTD., 1979.

8) T. Hiratani, "Analysis of Thermal stress in Ingot Mould", J. of Iron steel, No. 9, (1969), pp. 789-795.

9) K. Minami, A. Kanalya, "Relation between Structure of Aluminum Ingots and Heat Transfer Behavior at Mold-Metal Interface", J. of Casting, Vol. 53, No. 7, (1981), pp. 347-353.