

|||||||  
論 文  
|||||||

# 정밀금형 알루미늄 합금주조공정시 주물/금형 접촉면에서의 Inverse 열전달해석에 관한 연구

문수동 · 강신일\*

## Inverse Heat Transfer Analysis at the Mold/Casting Interface in the Aluminum Alloy Casting Process with Precision Metal Mold

Su-Dong Moon, Shin-ill Kang\*

### Abstract

Precision metal mold casting process is a casting method manufacturing mechanical elements with high precision, having heavy/light alloys as casting materials and using permanent mold. To improve dimensional accuracy and the final mechanical properties of the castings, the solidification speed and the cooling rate of the casting should be controlled with the optimum mold cooling system, and moreover, to obtain more accurate control of the whole process interfacial heat transfer characteristic at the mold/casting interface must be studied in advance. In the present study, aluminum alloy casting system with metal mold equipped with electrical heating elements and water cooling system was designed and the temperature histories at points inside the metal mold were measured during the casting process. The heat transfer phenomena at the mold/casting interface was characterized by the heat flux between solidifying casting metal and metal mold, and the heat flux history was obtained using inverse heat conduction method. The effect of mold cooling condition upon the heat flux profile was examined, and the analysis shows that the heat flux value has its maximum at the beginning of the process. (Received January 16, 1998)

### 1. 서 론

정밀금형주조란 중, 경합금을 원료로 해서 정밀도가 높은 기계부품을 영구주형인 금형을 이용, 가공하는 주조방법으로 저압 및 고압 다이캐스팅이 그 대표적인 예이고 자동차, 항공기, 정밀기계 부품 등의 고정밀화, 경량화 추세에 따라 이에 대한 관심이 높아져 있다. 정밀금형주조공정의 설계시 고려하여야 할 여러 가지 사항 중 치수정밀도와 관련된 것으로는 응고시 발생하는 주조물의 수축, 금형의 열변형, 주조물내의 잔류응력으로 인한 휨변형 등을 들 수 있고, 제품의 경량화와 관련된 것으로는 주조조직의 균일화 및 미세화를 통한 기계적 물성치의 향상을 들 수 있겠다[1-3].

주물의 냉각시 금형과 주물내의 온도이력은 주물의 결정구조나 물성치를 결정하는데 매우 중요한 인자이며 이 온도이력을 정확히 예측, 제어하기 위해서는 주

물/금형 접촉면에서의 열전달 특성을 정확히 이해하여야 한다. 따라서 주물의 응고과정의 모델링을 위해서는 주물/금형간의 열전달 특성에 대한 정확한 이해가 선행되어야 한다. 금형과 주물의 경계면은 금형의 면과 응고중인 주물의 면이 서로 접촉하고 있으며 그 경계는 응고과정에서 열전달흐름의 저항역할을 하는데 이를 열접촉저항이라 한다. 불규칙적인 금형의 표면과 응고면은 불규칙한 접촉을 하게 되며 이것은 그 경계면에서의 불연속적인 온도 분포를 유발한다(Fig. 1). 비록 접촉면의 상태가 양호하다고 해도 응고중인 주물 표면과 금형 내면 사이에는 미세한 간격이 존재하게 된다. 이를 air gap이라 하는데 air gap의 두께는 시간에 따라 조금씩 변하게 된다. Sully[4]의 연구에 의하면 주조공정의 초기에는 주물이 주형에 밀착함으로써 열전달량은 점차 증가하여 최대치에 달하고, 응고가 진행됨에 따라 고상의 주물이 수축하여 접촉면에서 air

연세대학교 대학원 기계공학과 (Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.)  
\*연세대학교 기계전자공학부(School of Electrical and Mechanical Eng. Yonsei Univ.)

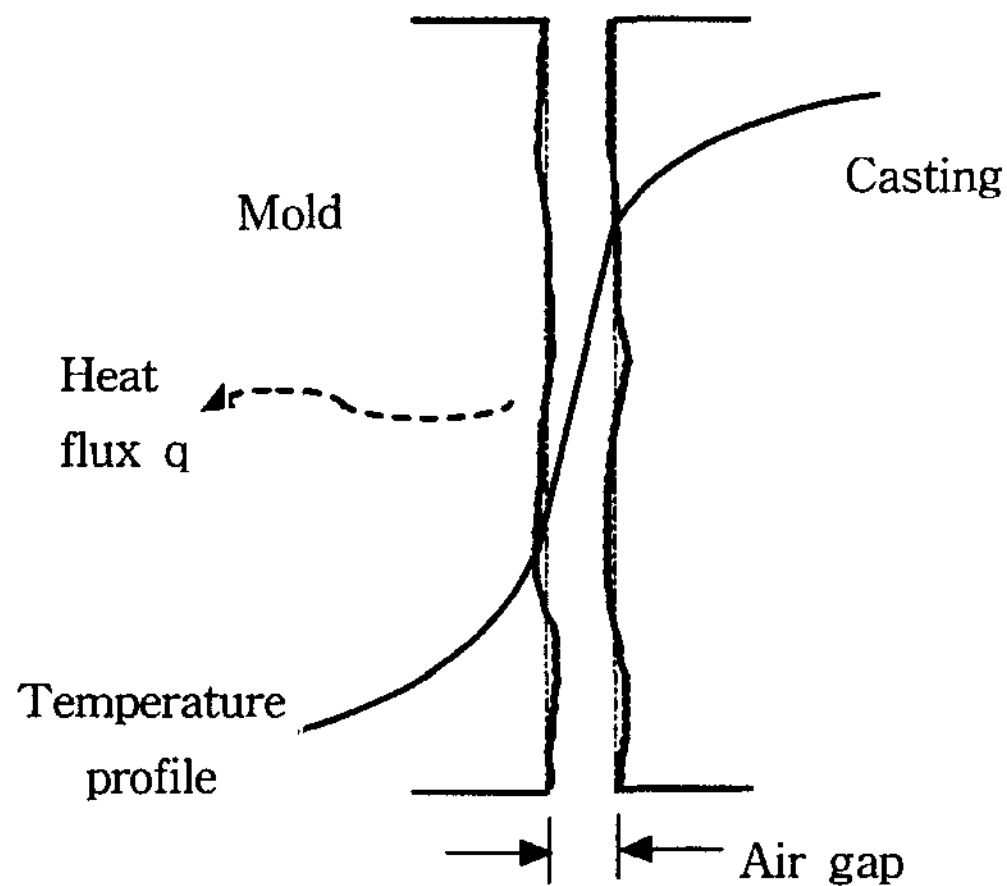


Fig. 1. Nature of the Thermal contact between the mold and the casting.

gap이 확장됨으로써 열전달은 점차 감소되어 어느 시간 이후 일정한 값을 유지하는 것으로 알려져 있다.

그 동안 주물과 chill과의 열전달 특성에 관한 연구 [5-8]가 많이 수행되어 왔으나 실제 금형과 주물사이에서의 열전달에 관한 연구는 극히 미진하였고 chill과 주물사이의 열전달 경향으로는 냉각과 가열이 가능한 실제 금형과 주물사이의 열전달 특성을 유추하는 것은 많은 무리가 따른다. 따라서 본 연구에서는 실제 금형 주조공정에서와 같은 냉각과 가열이 가능한 금형을 제작하고 사각 평판형 주형의 알루미늄 합금 중력주조실험을 통하여 두께 방향으로 1차원적인 주물과 금형 내의 온도이력을 측정하고 이를 토대로 inverse method를 이용하여 시간에 따른 금형과 주물사이에서 전달되는 heat flux의 변화를 추정하고자 한다. 본 연구에서는 주물/금형 간의 열전달 현상을 금형과 주물접촉면에서 전달되는 heat flux로 특성화하였다. 주물/금형 간의 heat flux를 정확히 구할 수 있다면 정확한 응고속도를 예측할 수 있고, 이를 이용하여 주물 내에 원하는 결정 구조 및 물성치를 얻을 수 있으리라 판단된다.

2. 실험장치

주물의 재료로는 Al-Si-Cu계의 319.0(ASTM규격; KS, JIS:AC2B) 알루미늄 합금을 사용하였다. 이 재료는 주조성이 좋아 일반적으로 널리 쓰이는 알루미늄 합금으로 자동차 실린더 헤드, 크랭크 케이스, 클러치 하우스 등을 주조하는데 많이 사용된다. 실험을 위해 얇은

Table 1. Thermal properties of mold material

Mold Material : H13 (ASTM Standard)

Density	: 7760 kg/m <sup>3</sup>	
Specific heat	: 0.104 kcal/kg·K	
Thermal conductivity	: using average value as 0.00681 kcal/ms·K	
Temperature °C	W/m·K	kcal/ms·K
215°C	28.6	0.00684
350°C	28.4	0.00679
475°C	28.4	0.00679
605°C	28.7	0.00681

평판 형상의 주물을 주조하는 금형을 설계하고 제작하였다. 금형의 재료로는 특수강인 H13 (ASTM규격; JIS:SKD61, KS:STD61)을 사용하였는데 H13은 열간 금형용 합금공구강재로 다이캐스팅용 다이로 많이 쓰이는 재료로서 열적 성질도 Table 1에 함께 나타내었다.

금형의 형태는 Fig. 2에서와 같은 형상으로 100×50×5 mm의 수직으로 세워진 평판을 중력주조방식으로 제작할 수 있도록 설계되었다. 용탕의 유동성을 좋게 하고 주입시 용융금속이 미리 응고하지 못하도록 금형을 예열하는데 열원으로는 1 kw의 전기저항 코일을 삽입한 지름 12 mm의 관을 금형에 10개를 꽂아 300~400°C까지 가열하도록 하였다. 같은 이유로 알루미늄합금 주물 재료도 21전기로서 700°C이상으로 과용융시킨 용탕을 만든 후 금형에 주입하게 된다. 이후 자연 냉각의 과정을 거치거나 냉각수로 금형을 냉각시키게 되는데 냉각을 위한 냉각수 관은 지름이 12 mm로 열선 바깥쪽에 10개를 가공하였으며 각 관마다

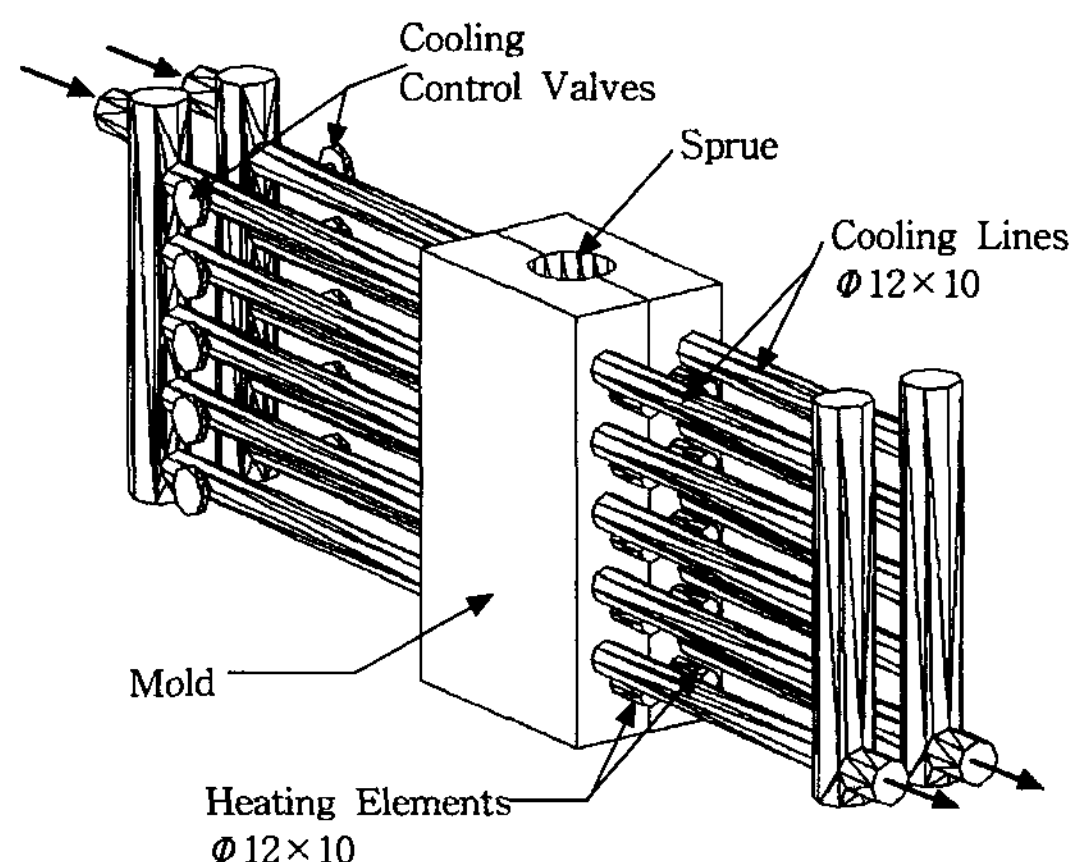


Fig. 2. A schematic illustration of experimental apparatus.

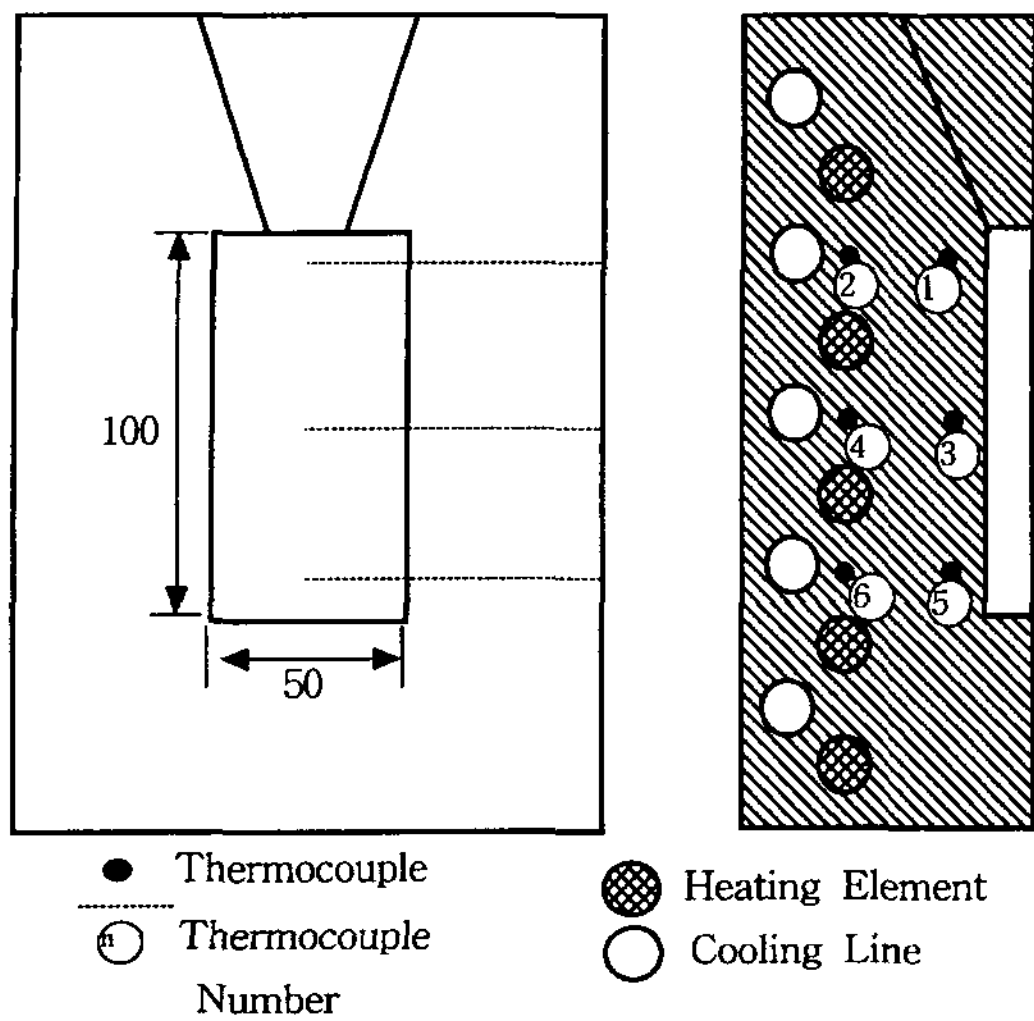


Fig. 3. A schematic illustration of the locations of thermocouple, heating element, and cooling line.

밸브를 달아 유량을 조절할 수 있게 설계되었다.

금형 내의 온도변화 측정을 위한 열전대는 K-TYPE (chromel-alumel)을 사용하는데 이는 0~1370°C대의 온도를 측정할 수 있다. 열전대를 금형의 측면에 12개의 홈을 내어 좌우대칭으로 삽입하여 금형 내의 온도 이력변화를 측정할 수 있도록 하였다. 이를 위해 금형의 정해진 위치에 2.5 mm지름의 원형 홈을 내고 노이즈 제거 및 정밀한 데이터를 얻기 위해 지름 2.5 mm 파이프를 씌운 열전대를 삽입하였다(Fig. 3). 금형 내의 온도를 측정하는 열전대는 냉각수관과 캐비티사이에서 일차원 열전달을 하는 선상에 위치하는데 하나는 냉각수관 가까이에 위치하여 열전달 해석의 온도 경계조건의 데이터를 구하게 되고, 다른 하나는 캐비티벽면 가까이에 위치하여 inverse heat conduction 문제의 측정 온도자료를 구하게 된다. 금형과 주물내의 열전대의 일차원적인 위치를 Table 2에 나타내었다.

모든 열전대는 multiplexer에 연결되어 있고 열전대에서 나오는 연속된 아날로그 전압신호는 multiplexer와 12 bit analog-to-digital converter로 구성되어 있는

Table 2. Thermocouple position in the mold

Thermocouple Positions from the Interface (mm)	Mold	
	17	4.5
Thermocouple Number	1, 3, 5	2, 4, 6
	9, 11, 13	10, 12, 14

데이터 획득장치를 통해서 A/D변환후, 분할된 전압신호가 되어 시간간격에 따른 디지털데이터로 저장되고 이 데이터는 다시 온도 데이터로 변환된다. 이 과정에서 두 가지 코드를 작성하여 사용하였는데 하나는 데이터획득용 코드이고 다른 하나는 전압-온도 변환 코드이다. 첫번째 코드는 열전대 채널번호와 그 채널번호의 열전대에서의 데이터를 sampling하여 저장하고 어느 특정 채널을 선택하면 그 채널에서 받아들여지는 정보를 그래픽으로 모니터할 수 있게 되어 있다. 첫번째 코드에서 구한 데이터는 두 번째 코드를 통해 전압-온도 변환식을 거쳐 온도이력 데이터로 저장된다.

### 3. Inverse Heat Conduction Problem

Direct heat conduction 문제가 주어진 경계조건 하에서 해석영역의 온도이력을 구하는 것이라면 inverse heat conduction 문제에서는 해석영역 내부의 측정된 온도이력을 통해 미지의 경계조건을 구하게 된다[9-11].

Direct heat conduction 문제에서의 금형내 일차원 열전도 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

초기조건과 경계조건은

$$\begin{aligned} T(x, 0) &= T_{init}(x) \\ T(0, t) &= U(t) \\ q(d, t) &= q(t) \end{aligned} \quad (2)$$

으로 주어지며 이를 통하여 금형 내부의 온도이력  $T(x, t)$  ( $0 \leq x \leq d, 0 \leq t \leq t_f$ ,  $t_f$ 는 최종시간)를 계산하게 된다.

본 연구에서는 Fig. 4에서 보여지는 바와 같이 주물/금형 경계면( $x=0$ )에서의 경계조건  $q(t)$ 를 얻기 위하여 inverse heat conduction 문제를 해석하는데 초기온도  $T_{init}(x)$ 가 주어지고,  $x=d$ 에서의 온도조건  $U(t)$ 와 금형 내부의 sensor 위치( $0 < x_s < d$ )에서의 온도이력  $\hat{T}(x_s, t)$ 은 실험을 통하여 열전대에서 검출된 온도이력으로 주어지게 되어 주물/금형 경계면( $x=0$ )에서의  $q(t)$ 를 구하게된다. 열전대의 위치가 해석시의 한 유한요소 노드 위치와 일치하도록 mesh를 설정하는데 주물/금형 경계면이 첫번째 노드가 되며  $x=d$ 에 위치한 열전대는 최종노드가 되며  $x=x_s$ 에 위치한 열전대는 노드의 간

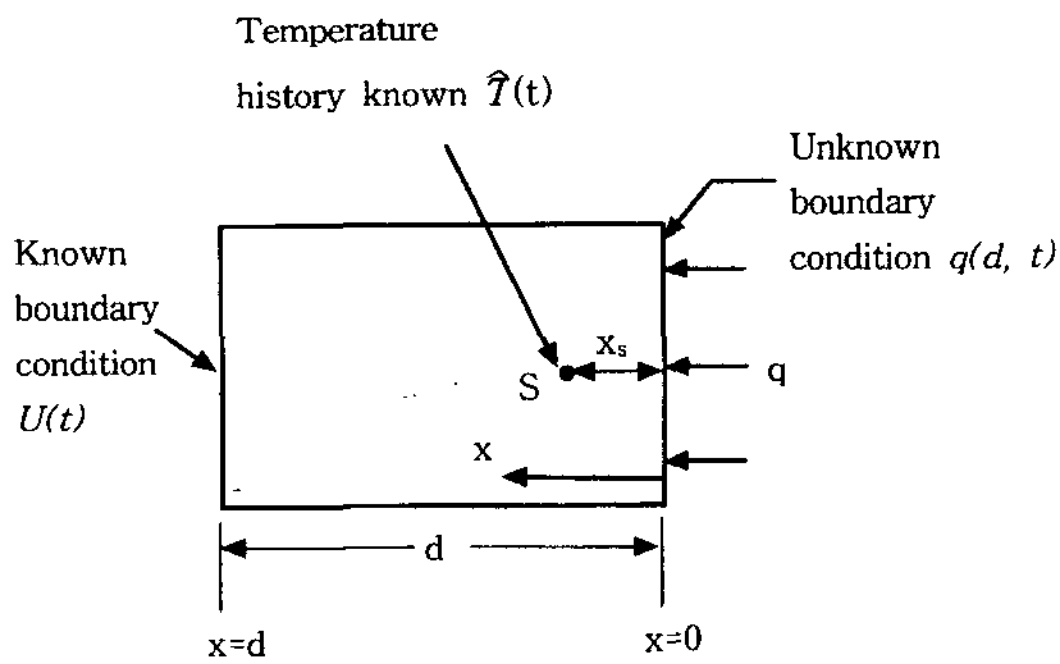


Fig. 4. A schematic diagram of an inverse heat conduction problem.

격을 조절하여 첫번째 노드와 마지막 노드 사이의 한 노드의 위치와 일치하게 된다.

Inverse heat conduction 문제는 다음의 최소자승법 형태의 목적함수를 최소화하는 문제로 변환할 수 있다.

$$J(q(t)) = \frac{1}{2} \left| T(x_s, t; q(t)) - \hat{T}(x_s, t) \right|^2 \quad (3)$$

이 방법은 추정온도와 측정온도의 차의 제곱의 합이 최소가 되도록 하는 최적의 미지 경계조건 q(t)의 값을 찾는 것으로 식 (3)에서  $\hat{T}(x_s, t)$ 는 시간 t에서 센서위치  $x_s$ 점에서 측정된 온도이고  $T(x_s, t; q(t))$ 는 같은 시각, 같은 위치에서 계산된 온도로서 미지의 변수 q(t)의 함수로써 주어진다.

본 연구에서는 inverse method로서 whole time domain method[9]를 사용하는데 여기에서 q(t)는 아래와 같이 변수화하여 표현할 수 있다.

$$q(t) = \sum_{i=1}^N p_i \Phi_i(t) \quad (4)$$

여기에서  $p_i$ 는 i번째 파라미터이며,  $\Phi_i(t)$ 는 형상함수이다.

식 (3)에 식 (4)을 적용하고 시간에 대해 분할한 형태는 다음과 같다.

$$J(p) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M [T(x_s, t_i; p_1, p_2, \dots, p_N) - \hat{T}(x_s, t_i)]^2 \quad (5)$$

여기에서 M은 총공정시간에서 sampling time 간격  $\Delta t$ 마다 얻은 데이터의 개수를 의미하며 N은 사용한 파라미터 p의 개수이다.

파라미터 벡터  $p^{k+1} = \{p_1^{k+1}, p_2^{k+1}, \dots, p_N^{k+1}\}$ 를 계산하

기 위하여 반복과정을 생각하면, k+1번째 반복시의 목적 함수는 다음의 벡터 형태로 표현할 수 있다.

$$J(p^{k+1}) = \frac{1}{2} (T(p^{k+1}) - \hat{T})^T (T(p^{k+1}) - \hat{T}) \quad (6)$$

여기에서 T는 반복과정시 해석에 의해 얻어진 온도벡터이며,  $\hat{T}$ 는 측정된 온도이력의 값으로 이루어진 벡터로서

$$(T)_i = T(x_s, t_i; p^k), \quad (\hat{T})_i = \hat{T}(x_s, t_i) \quad (7)$$

로 정의된다.

파라미터의 선형화 과정은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T(p^{k+1}) = T(p^k) + X \Big|_{p=p^k} \Delta p^k \quad \Delta p^k = p^{k+1} - p^k \quad (8)$$

여기에서 민감도 계수 행렬(Sensitivity Coefficient Matrix) X는 다음과 같이 정의된다.

$$(X \Big|_{p=p^k})_{ij} = \frac{\partial T(x_s, t_i; p)}{\partial p_j} \Big|_{p=p^k} \quad i = 1, \dots, M \quad j = 1, \dots, N \quad (9)$$

영차정규화 기법을 도입하고 식 (8)을 식 (6)에 대입하고 정리한 후에 식 (6)이 최소가 되게 하는  $\Delta p^k$ 를 구하기 위해 식 (6)을  $\Delta p^k$ 에 대하여 미분하면 다음을 얻을 수 있다.

$$[X^T(p^k)X(p^k) + \alpha_0 I] \Delta p^k = X^T(p^k) (\hat{T} - T(p^k)) \quad (10)$$

위 식을 계산하여  $\Delta p^k$ 를 얻을 수 있으며, 파라미터 벡터는  $p^{k+1} = p^k + \Delta p^k$  식을 이용하여 새로운 값으로 대체된다.

본 연구에서 얻게된 heat flux가 타당한 것인지를 알아보기 위하여 T. S. P. Kumar와 K. N. Prabhu[5]가 발표한 논문의 데이터를 가지고 해석을 수행하여 그들의 결과와 비교하였다. T. S. P. Kumar와 K. N. Prabhu는 사형 주형에 금속 chill을 두어 chill과 알루미늄 합금 주물사이에서의 heat flux를 일차원적으로 구하는 것이었는데 T. S. P. Kumar와 K. N. Prabhu이 사용한 chill의 열적 특성 및 열전대의 위치를 나타내면

Table 3. Thermal properties of chill material

Chill Material	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Thermal Conductivity (W/m·K)	Specific Heat (J/Kg·K)
Copper	8960	363	423

Table 4. Location of the thermocouple in the chill

Chill Dimension (mm)	Thermocouple Positions from the Interface (mm)	
	Thermocouple 1	Thermocouple 2
50 × 50 × 50	2	38

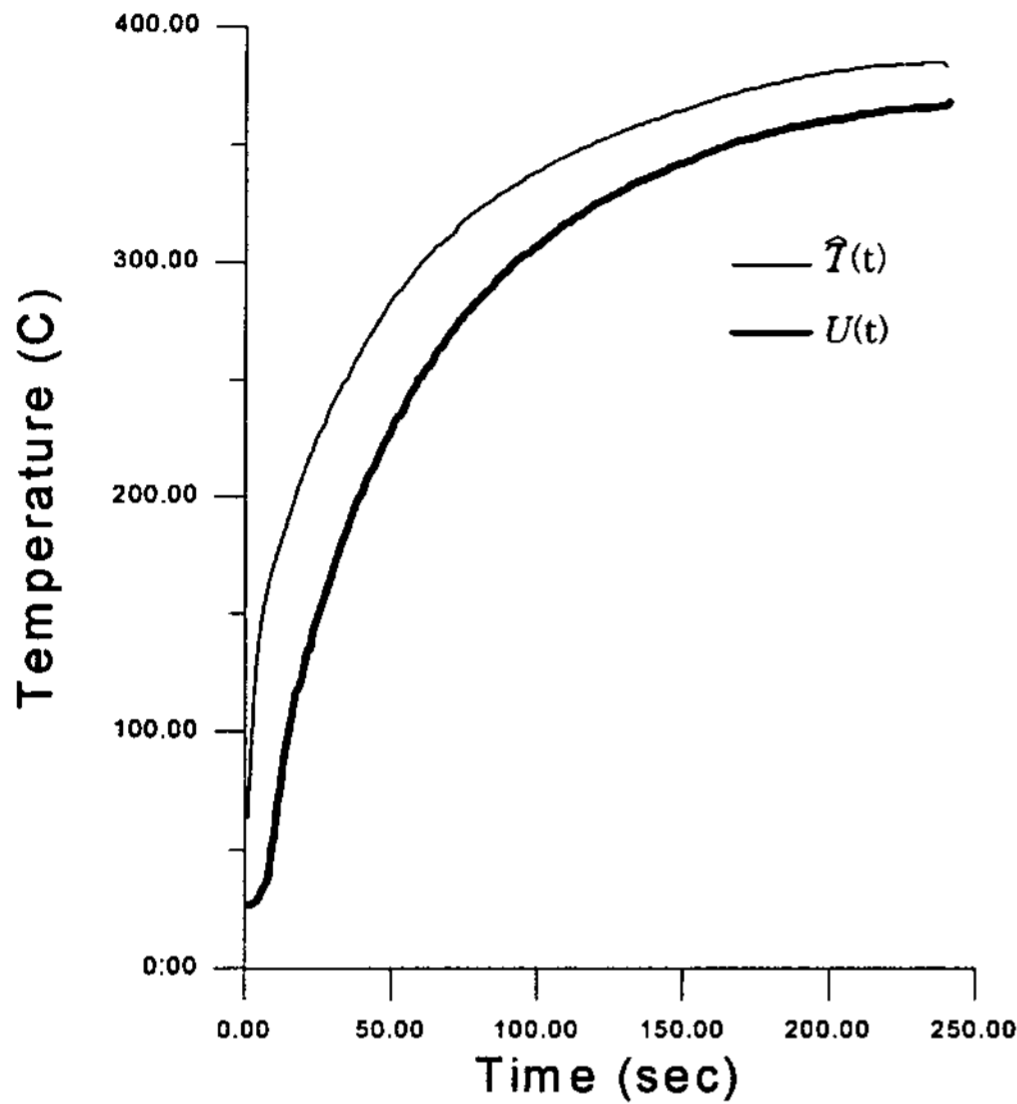


Fig. 5. Temperature history curve inside of the chill.

Table 3, Table 4와 같다. Table의 조건으로 그들의 실험에서 얻어진 온도 데이터는 Fig. 5와 같다. 이상의 데이터를 가지고 본 연구에서 제작한 inverse heat conduction problem 해석을 이용하여 얻은 캐비티 벽면에서의 heat flux와 T. S. P. Kumar와 K. N. Prabhu

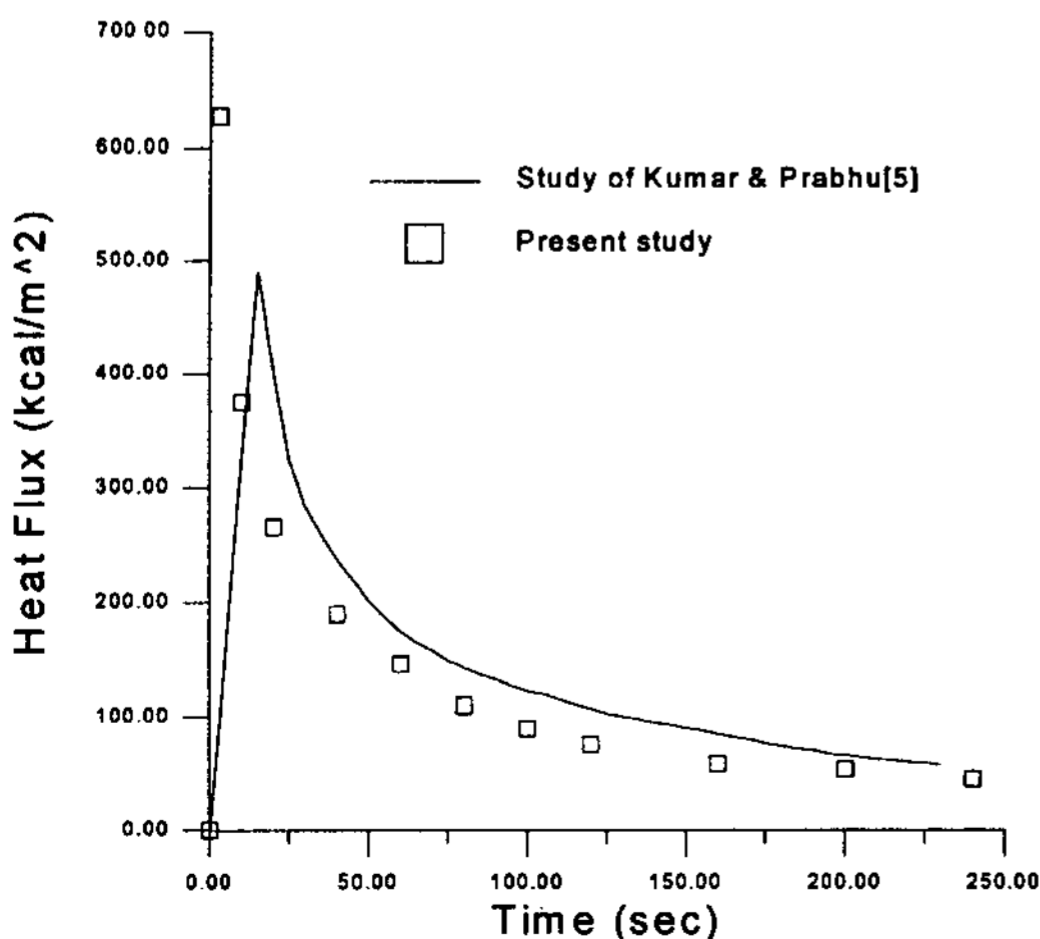


Fig. 6. Estimated curve of the heat flux on the wall of the copper chill.

가 얻은 heat flux를 비교하면 Fig. 6과 같다.

Fig. 6을 보면 전반적으로 그 수치는 비슷한 경향을 보이면서 본 연구에서 구한 heat flux의 이력은 T. S. P. Kumar와 K. N. Prabhu가 얻은 heat flux 이력이 10초정도 왼쪽으로 이동한 곡선으로 보인다. 이와 같은 차이가 발생한 이유는 본 연구에서는 보다 정확한 q를 구하기 위하여 초기의 heat flux의 변화를 추정할 수 있도록 초기 시각의 파라미터 간격을 좁게 두고 반복 수행하여 실제 열전달환경과 같이 q<sub>max</sub>가 초기에 위치하게 되었으나 T. S. P. Kumar와 K. N. Prabhu는 이를 따라 잡지 못하여 차이가 발생하게 한 것으로 주조시 초기의 열전달 경향으로 볼 때 본 연구의 결과가 그들의 결과보다 더 개선된 결과를 제시한다고 볼 수 있다.

#### 4. 실험 및 해석 결과

##### 4.1 실험방법

주물/금형 벽면간의 열전달량을 구하기 위해 여러 가지 조건에서의 주조실험을 수행하였다. 주조품의 형상이 5 mm두께의 평판이며 가압을 하지 않는 중력 주조방식이므로 주입시 용탕의 온도가 충분히 높지 않거나 금형의 온도가 낮으면 유동성이 나빠 완전히 충전되지 않아 원하는 형상을 얻을 수 없다. 따라서 알루미늄합금의 용탕은 주입 및 충전 전에 응고점 이하로 온도가 떨어지지 않도록 충분히 과용융시켜야 하는데 본 실험에서는 750°C이상으로 과용융시켜 주입하였다. 금형 역시 충전 과정중에 용탕의 온도를 응고점 이하로 떨어뜨리지 않도록 예열하는데 350°C 이상이면 완전히 충전된 주조품을 얻을 수 있었다. 용탕의 온도와 금형의 예열온도를 매 실험마다 동일하도록 제어하면 해석의 초기조건이 동일하게 되어 보다 정확한 수치해석결과를 기대할 수 있으나 본 연구에서는 용탕온도 및 금형온도의 정밀한 제어장치가 갖추어지지 않은 상태로 실험이 수행되었다. 충진이 완

Table 5. Various cooling conditions in experiments

Case No.	Cooling condition	Cooling type
Case 1	Natural cooling	Air cooling
Case 2	Forced cooling	Water cooling starts in 30 seconds after filling
Case 3	Forced cooling	Water cooling starts right after filling

료되면 여러 가지 조건으로 금형을 냉각 시키는데 각 냉각 조건은 Table 5에 나타내었다. 주조실험시 열전대에서 나오는 온도정보는 주입시부터 240초동안 1초간격으로 받아들여진다.

#### 4.2 금형내 온도이력

Fig. 7, 8, 9는 각 냉각조건에 따른 주조실험에서의 온도이력을 나타낸 것이다. 본 실험에서는 용탕의 유동성을 높이기위하여 금형을 예열하고 용탕을 과용융 하였으나 모든 실험에서 동일온도로 예열 및 과용융을 하도록 제어 할 수 없었기에 각 실험 마다 초기온도의 차이가 있고 이는 heat flux 수치의 차이에도 영향을 주었다.

Fig. 7에 자연냉각으로 금형을 식힌 경우의 240초간의 온도변화를 나타내었다. TC 1, 2는 캐비티의 상부에서 측정된 온도곡선으로 TC 1은 캐비티면 가까이에서, TC 2는 냉각수관 가까이에서 측정된 온도곡선이다. 같은 방식으로 TC 3, 4는 캐비티의 중간 부위에서, TC 5, 6은 캐비티의 하부에서 측정된 온도 곡선을 나타낸다. 금형내 초기온도는 균일한 가열이 어렵고 외부와의 단열이 되어 있지 않아 외부와 열전달량이 많은 상부가 가장 낮고 열전달량이 적은 하부가 가장 높아 상부와 하부의 온도차이는 20도 정도였다. 캐비티의 용량이 작아 충전이 순간에 이루어 졌기에 용탕의 초기온도는 캐비티의 상, 중, 하에서 동일하였다. 이런 상황에서 주조 초기의 수십 초 동안의 캐비티면 부근에서의 온도 변화를 살펴보면 주입이 시작하자마자 급

격한 온도 상승을 보여 용탕에서 열을 가장 많이 받아들이는 캐비티 중간 부근(TC 3)에서 가장 높은 온도로 상승하고 하부에서의 온도가 비교적 낮게 상승한다. 이후 급격히 온도가 하강한 뒤 100여초 후에는 완만한 기울기로 냉각됨을 보인다. 냉각수 부위에서의 온도변화는 주입 후 완만하게 온도상승을 보이다 40초 이후 서서히 냉각됨을 보여주며 상중하에서 비슷한 경향을 보인다. 200초 이후에는 캐비티면 부근과 냉각수 부근에서의 온도차이가 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 8은 주입후 30초 뒤에 냉각수를 주입하여 강제 냉각시킨 경우로 캐비티면 부근에서는 주입전 초기온도 상태는 공냉시와 같으나 강제냉각의 결과로 공냉시보다 최고점이 30도 정도 낮고 약 40초 이후 강제 냉각의 영향으로 온도가 급격히 하강하여 100초 내에 300도 이하로 내려감을 보인다. 냉각수 부근에서의 온도는 냉각수를 주입한 즉시 하강하고 이중 가운데 부위의 온도가 더 빨리 하강함을 보여 가운데 부위에서의 냉각효율이 가장 좋음을 알 수 있다. 냉각수에 의한 강제냉각이 지속되어 200초 이후에도 10도 정도의 냉각수 부근의 온도와 캐비티 부근의 온도차이가 지속됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 주입 직후 냉각수를 주입한 경우로 캐비티면 부근에서는 초기에는 냉각수로 나가는 열전달량보다 용탕에서 오는 열전달량이 많아 온도가 상승하여 15초 부근에서 최고온도가 되고 이후부터는 냉각에 의한 영향으로 온도가 급격히 하강하며 이후의 경향은 30초 뒤 수냉한 온도경향과 비슷하다. 냉각수 부근

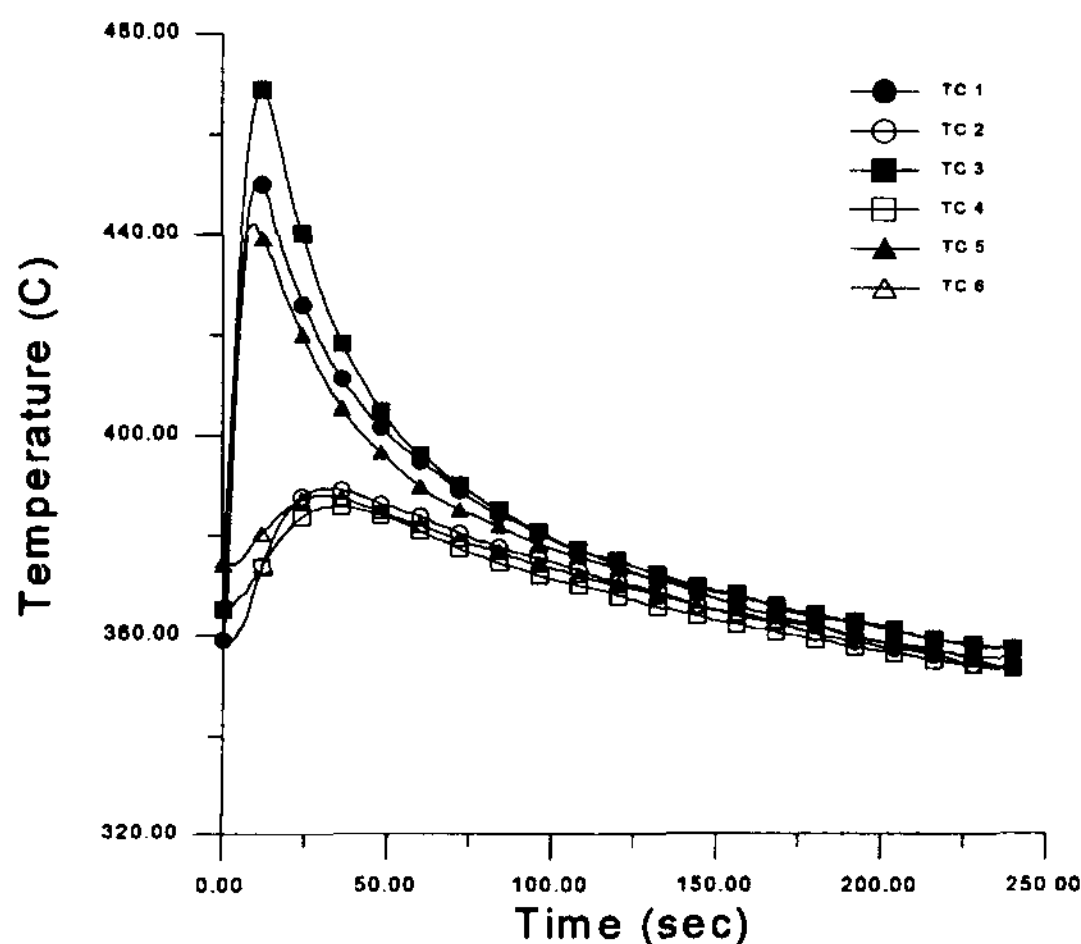


Fig. 7. Measured temperature histories in the mold (air cooling).

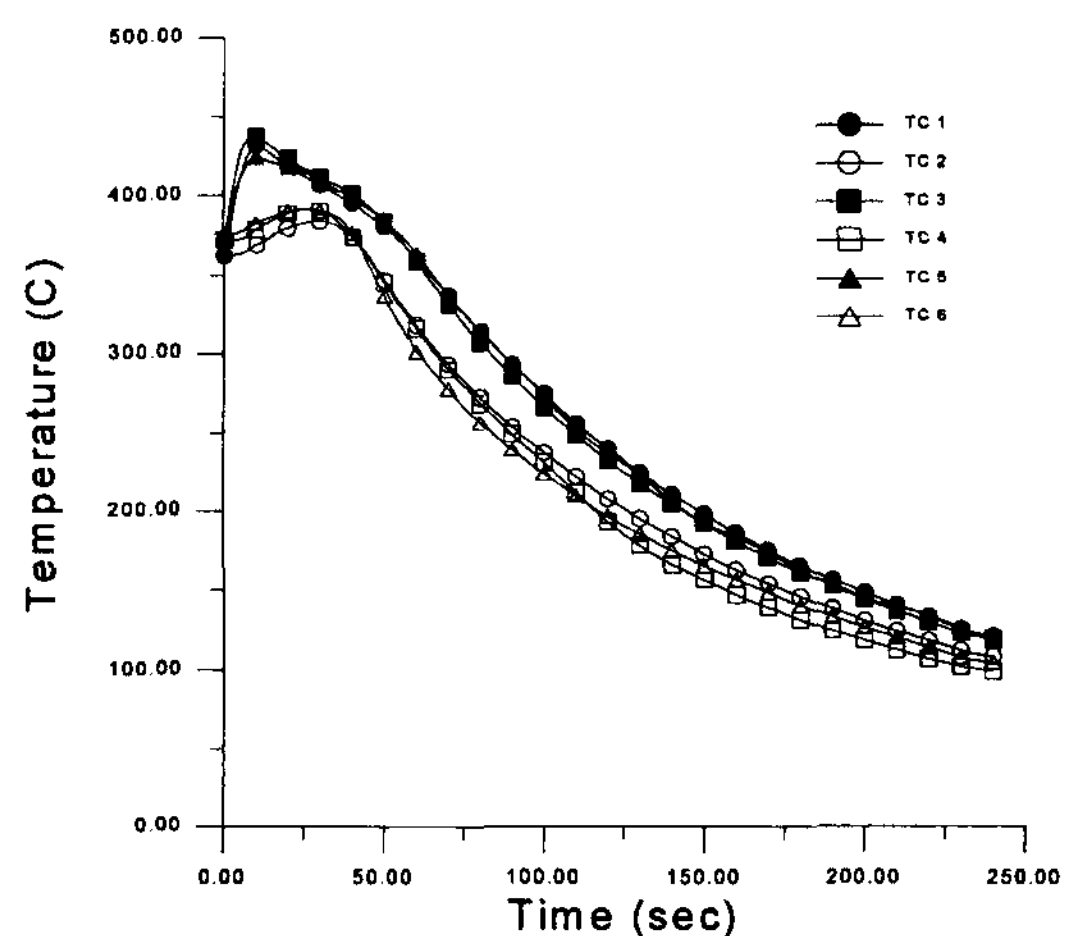


Fig. 8. Measured temperature histories in the mold (Water cooling starts in 30 seconds after filling).

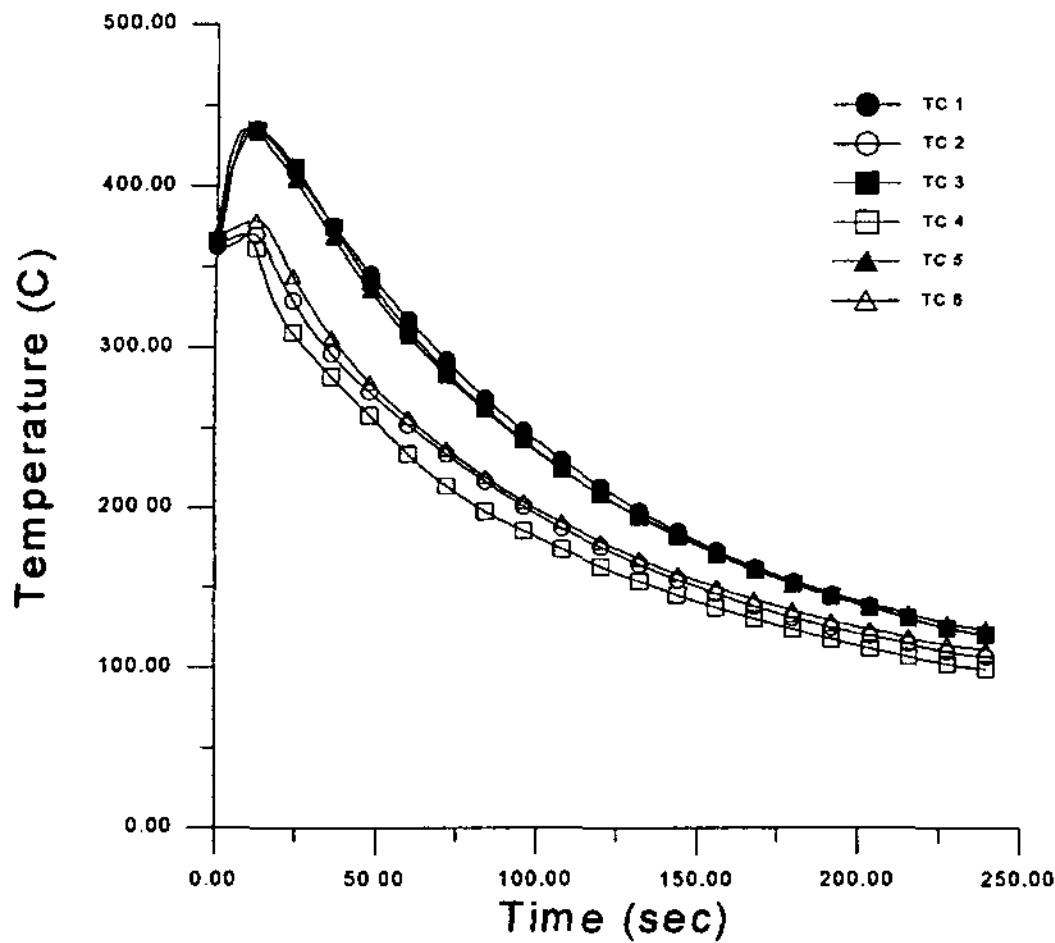


Fig. 9. Measured temperature histories in the mold (water cooling starts right after filling).

에서도 초기에 용탕에서 오는 heat flux의 영향으로 5도 정도의 온도상승을 보이나 이후 급격히 냉각되고 그 경향은 30초 뒤 수냉한 온도경향과 비슷하다.

#### 4.3 주물/금형 간의 Heat flux이력

주물/금형 경계면( $x=d$ )에서의 경계조건  $q(t)$ 를 얻기 위하여 일차원 inverse heat conduction 문제를 해석하였는데 초기온도  $T_{init}(x)$ ,  $x=0$ 에서의 온도조건  $U(t)$ 와 금형 내부의 sensor 위치( $0 < x_s < d$ )에서의 온도이력  $\hat{T}(x_s, t)$ 은 위의 실험을 통하여 얻은 온도 이력정보를 사용하였다. Dimensional analysis에 의하여 금형의 중앙 부위 (TC3, 4)에서의 heat flux이력 해석은 두께방향으로의 일차원적인 열전달만으로 단순화 시킬 수 있으나 금형의 상부(TC 1, 2)와 하부(TC 5, 6)에서의 해석을 일차원으로 단순화시키는 것에는 적잖은 오차를 발생할 것이다. 그러나 상하부에서의 열전달 경향을 고찰하는데에는 일차원적으로 가정한 해석도 충분한 의미를 지닌다고 보고 일차원적인 해석을 수행하였다. 파라미터는 온도변화가 심한 초기시간대에 집중 배치하여 초기 시간대의 heat flux의 변화를 정밀하게 추정하도록 하였다. 0~10초 사이의 초기시간대에 파라미터가 배치되어 있지 않다면 초기시간대에 heat flux  $q$ 의 최대치가 위치하는 실제  $q$ 의 이력과 오차가 크게 되며 파라미터가 진동하는 경향을 보이기도 한다.

Fig. 10은 공냉시의 주물/금형 간의 heat flux의 변화를 나타낸 것이다. Upper는 TC1, 2를 해석에 사용하여 얻은 heat flux이력이고 Middle은 TC3, 4를 사용하

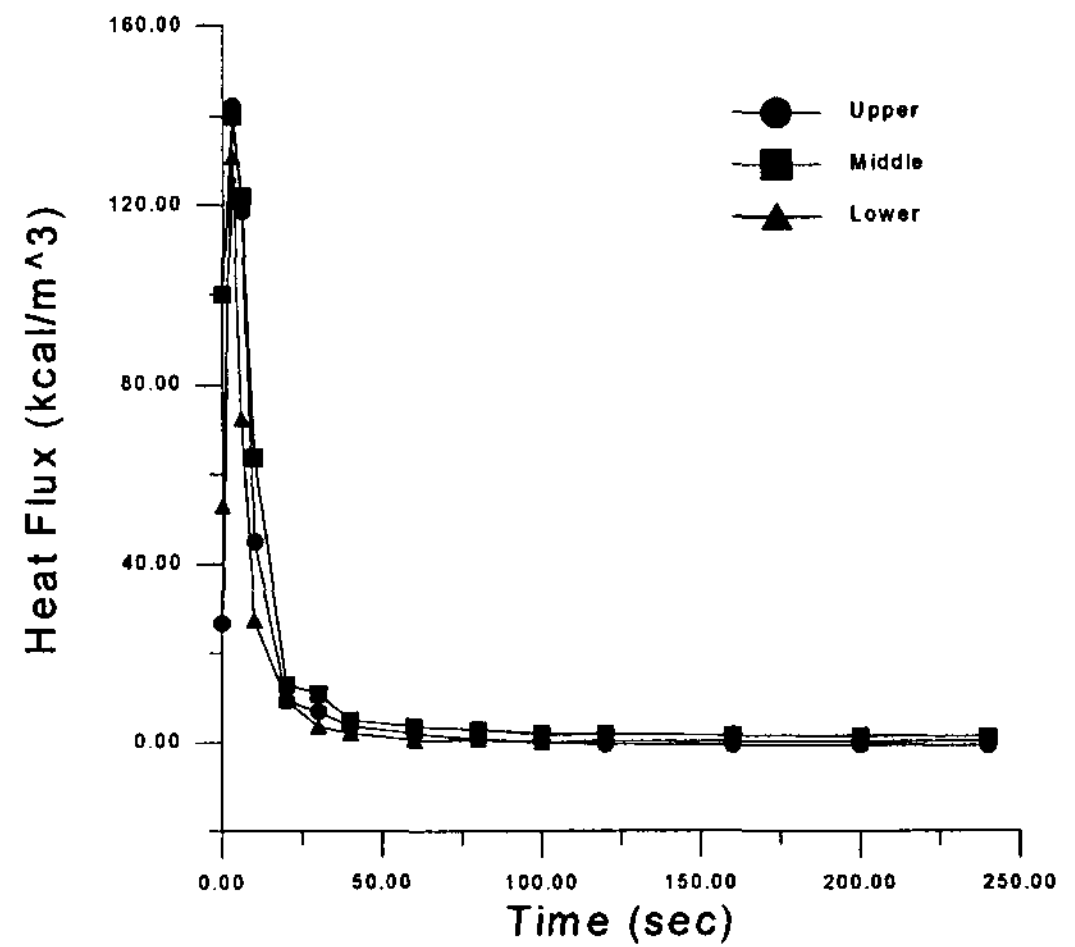


Fig. 10. Boundary heat flux obtained by the inverse method (air cooling).

였으며 Lower는 TC5, 6를 사용하여 얻은 것이다. heat flux의 최대치는 0~10초 사이에 존재하며 이후 주물의 응고하여 수축하고 이로 인한 air gap의 성장으로 열전달이 급격히 감소하여 100여초이후에는 미소한 양의 열전달만이 일어남을 알 수 있다. 즉 금형을 통한 냉각의 효과는 거의 없고 이로서 주물을 실온으로까지 낮추는 데에는 많은 시간이 소요된다.

Fig. 11은 충전후 30초 뒤 냉각수를 주입한 경우로 초기 30여초동안은 공냉과 같은 열전달 경향을 보여 0~10초 사이에서 heat flux의 최대치가 존재하고 air gap의 성장으로 인하여 열전달량이 급격히 감소하는 경향을 보여주나 이후 강제 냉각이 시작됨에 따라 다

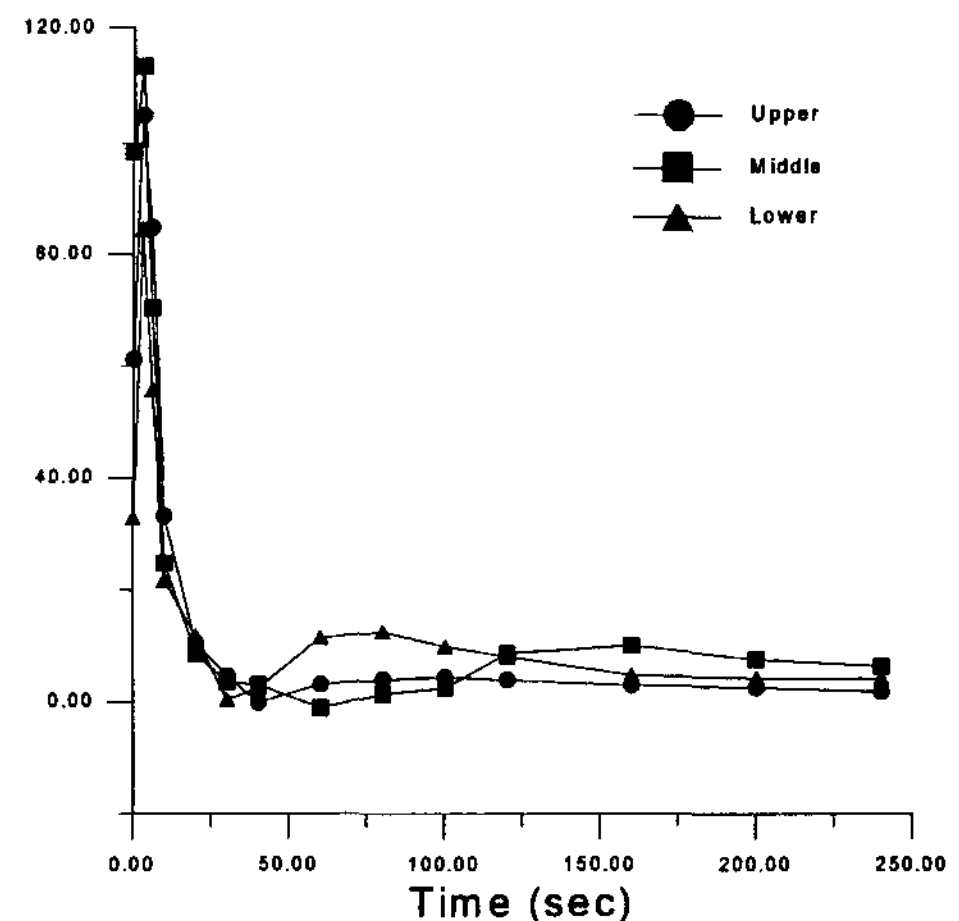


Fig. 11. Boundary heat flux obtained by the inverse method (Water cooling starts in 30 seconds after filling).

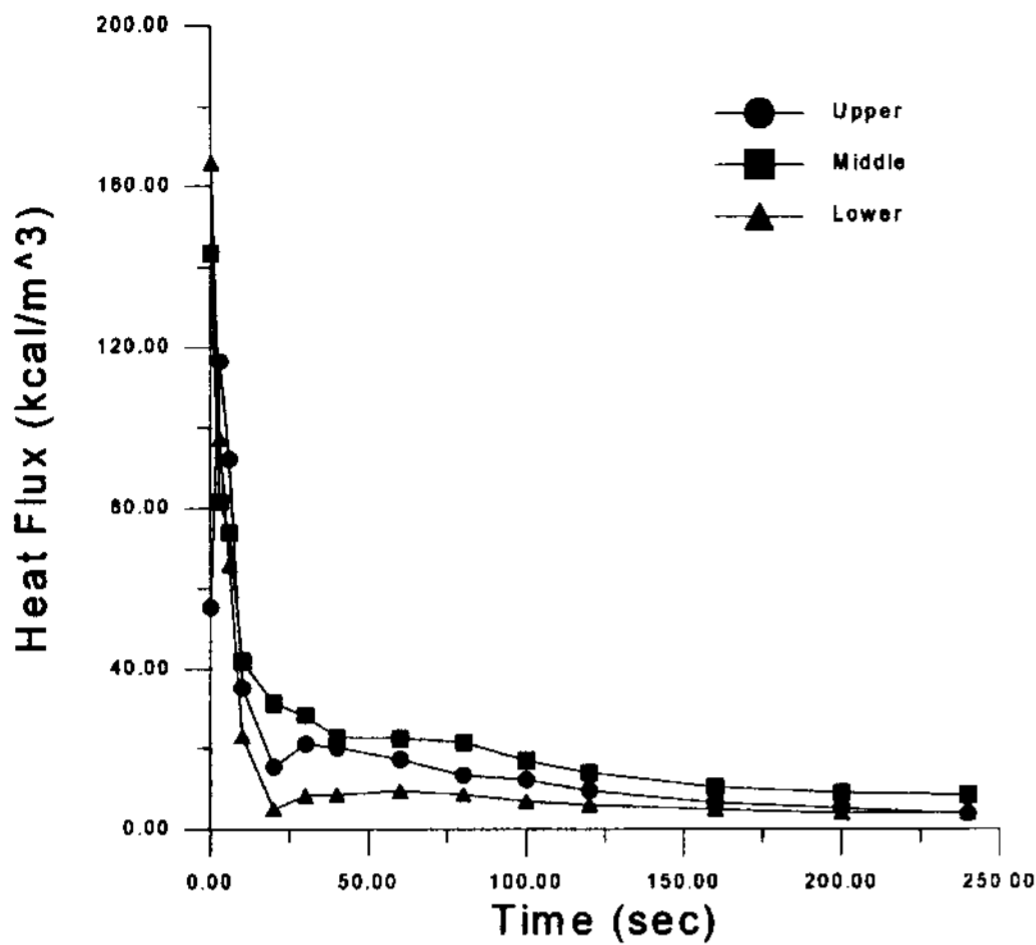


Fig. 12. Boundary heat flux obtained by the inverse method (water cooling starts right after filling).

시 heat flux의 양이 증가하는 것을 알 수 있다. Heat flux 증가량의 차이는 초기의 냉각수의 불균일한 흐름에 기인한 것으로 좀더 정밀한 냉각수제어가 이루어진다면 균일한 증가를 보이리라 예상된다. 냉각이 진행됨에 따라 heat flux의 양은 다시 감소하나 공냉의 경우와 같이 그 양이 0에 접근하지 않고 5~10사이의 값에 접근하여 강제냉각의 효과가 지속됨을 알 수 있다.

Fig. 12은 충전직후 냉각수를 주입한 경우로 초기의 열전달량이 공냉시보다 높았으며 200초이후 10~20사이의 heat flux 양을 지속함을 보여준다.

### 5. 결론 및 고찰

본 연구에서 실제 금형주조공정에서와 같은 냉각과 가열이 가능한 금형을 제작하고 사각 평판형 주형의 알루미늄 합금 중력주조실험을 통하여 두께 방향으로 1차원적인 주물과 금형 내의 온도이력을 측정하였다. 실험은 공냉 및 인위적인 수냉 조건에서 수행되었고 각 조건에서의 온도이력을 측정하였다. 이를 토대로 inverse heat conduction problem을 이용하여 시간에 따른 금형과 주물사이에 전달되는 heat flux의 변화를 추정하였다. 주물/금형 간의 열전달량은 주입후 증가하여 0~10초사이의 공정초기시간대에서 160~200 kcal/m<sup>2</sup>의 최대치를 가지며 이후 급격한 감소를 보이며 강제냉각이 가해지면 다시 증가하는 경향을 보임을 알 수 있었다. 향후에 미세한 온도측정 및 inverse method를 향상시켜 보다 정확한 heat flux를 추정한다면, 이를

적용하여 더욱 정확한 계산결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서 구해진 주물/금형 경계면에서의 heat flux 이력을 경계조건으로 사용하여 주물의 응고현상을 해석하는 연구가 진행중에 있다.

### 후 기

이 연구는 한국과학재단 핵심전문연구(961-1007-063-2)를 통해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] S. Kang : Optimum Design of Casting Processes Using an Inverse Methodology, Ph.D. Thesis, Cornell University, New York, USA, (1994).
- [2] S. Kang, C. A. Heiber, and K. K. Wang : Optimum Design of Process Conditions to Minimize Residual Stresses in Injection-Molded Parts, ANTEC Technical Papers (1995) 991.
- [3] S. Kang, and N. Zabaras : Control of the Freezing Interface Motion in Two-Dimensional Solidification Processes Using the Adjoint Method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 38 (1995) 63.
- [4] L. D. J. Sully : The Thermal Interfaces Between Castings and Chill Molds, AFS Transactions, Vol. 84 (1976) 735
- [5] T. S. P. Kumar and K. N. Prabhu : Heat Flux Transients at the Casting/Chill Interface during Solidification of Aluminum Base Alloy, Metallurgical Transactions B, Vol. 22b (1991) 717.
- [6] E. S. Tillman and J. T. Berry : Influence of Thermal Contact Resistance on the Solidification Rate of Long Freezing Range Alloys, AFS Cast Metals Research Journal (1972) 1.
- [7] Y. Nishida and H. Matsubara : Effect of Pressure on Heat Transfer at the Metal Mold Casting Interface, British Foundrymen, Vol. 69 (1976) 274.
- [8] K. Ho and R. D. Pehlke : Transient Methods for Determination of Metal-Mold Interfacial Heat Transfer, AFS Transactions, Vol. 91 (1983) 689.
- [9] G. Stolz Jr., : Numerical Solutions to an Inverse Problem of Heat Conduction for Simple Shapes, J. Heat Transfer, Vol. 82 (1960) 20.
- [10] E. M. Sparrow, A. Haji-Sheikh and T. S. Lundgren, : The Inverse Problem in Transient Heat Conduction, Trans. ASME, Series E. Vol. 86 (1964) 20.
- [11] J. V. Beck, B. Blackwell, and C. R. ST. Clair Jr. : Inverse Heat Conduction : Ill Posed Problems, A Willey-Interscience Publication.