

論 文

# 용탕단조시 가압력에 따른 계면열전달계수의 변화

김진수\*, 안재영\*, 한요섭\*\*, 이호인\*\*, 홍준표\*

## Effect of Pressure on Interfacial Heat Transfer Coefficient in the Squeeze Casting Process

Jin-Soo Kim\*, Jae-Young Ahn\*, Yo-Sub Han\*\*, Ho-In Lee\*\* and Chun-Pyo Hong\*

### Abstract

Research in heat transfer and solidification commonly involves experimentation and mathematical modeling with associated numerical analysis and computation. Inverse problems in heat transfer are part of this paradigm. During the solidification of metal casting, an interfacial heat transfer resistance exists at the boundary between the casting and the mold, and this heat transfer resistance usually varies with time. In the case of the squeeze casting the contact heat transfer resistance is decreased by pressure and ideal contact is almost accomplished. In the present work, heat transfer coefficient, which is inverse value of the heat transfer resistance, was used for convenience. A numerical technique, Non-Linear Estimation has been adopted for calculation of the casting/mold interfacial heat transfer coefficient during the squeeze casting process. In this method, the measured temperature data from experiment were used. The computational results were applied to the analysis of heat transfer and solidification.

(Received February 17, 1994)

### 1. 서 론

주조품의 조직은 응고중 냉각속도와 밀접한 관계를 가지고 있어 지금까지 많은 연구자들에 의해 주조공정중의 열전달 및 응고현상에 관한 연구가 이루어져 왔다. 열전달 및 응고현상의 연구 방법을 구분하면 실험적 해석방법과 수치해석방법으로 나눌 수 있다. 실험적 해석방법은 이상적인 경계조건인 경우에만 적합하여 실제현상을 잘 반영하지 못하는 단점이 있고, 많은 시간과 비용이 들어 경제적이지 못하다. 따라서 보다 복잡한 경계조건을 가지는 열전달 및 응고해석을 위해서는 수치해석법의 적용이 요구되고 있다[1].

금형주조에서는 주물과 금형간의 접촉하는 계면의 상태가 주물의 냉각 및 응고현상에 지대한

영향을 미친다. 금형내 표면은 매끄럽지 않고, 이형제가 피복되어 있기 때문에 주물과 금형이 이상적으로 완전히 밀착되어 있지 않다고 볼 수 있다. 따라서 주물/금형 계면에는 열저항이 존재하며 주물로부터 금형으로의 열전달은 계면열전달계수(interfacial heat transfer coefficient)의 주된 영향을 받는다고 할 수있다[2].

용탕단조법은 고품질의 주조품을 생산할 수 있는 주조공정의 하나로써, 그 기본원리는 주형안에 주입된 액상 또는 반용융 상태의 용탕에 프레스 등을 이용한 기계적 고압력을 가하여 원하는 형상으로 성형시키고 응고완료까지 가압을 유지하는 것이다[3]. 따라서 가압력에 따라 주물/금형간 접촉형태가 변할 것으로 예상된다. 기존의 연구결과에[1] 따르면 가압력이 증가할수록 주

\*연세대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Eng., Yonsei University)

\*\*한국과학기술연구원 금속부(Korea Institute of Science and Technology)

물/금형간 계면의 접촉이 이상적으로 밀착되어 계면열저항이 급속히 감소되고 계면열전달계수가 증가된다고 하였다. 그러나 용탕단조법에서의 계면열전달계수를 구하기 위한 실험결과는 아직 충분하지 않고 고압하에서 이루어지는 연구이므로 실험 및 적절한 수치해석에 어려움을 겪고 있다.

기존의 수치해석법과 실험적 해석법은 서로 분리되어 각각의 영역에서만 발전하여 왔으나 보다 효율적인 연구를 위해서는 실험적 해석법과 수치해석법이 결합되어야 할 필요성이 대두되고 있다 [4]. 현재 시도되고 있는 실험과 수치해석의 비교법은 실험결과와 수치해석결과를 비교하여 그 차이점을 발견하고 이미 알고 있는 공정변수를 변화시켜가며 재계산하여 실험현상에 수치해석 결과를 접근시켜가는 것이다. 그러나 고압응고시 가압력에 따른 열전달 및 응고거동의 변화를 해석하기 위해서는 실험과정과 수치해석과정에서 유기적인 결합을 통한 미지의 모델과 공정 변수 예측 즉, 정량적인 평가가 선행되어야 한다고 생각한다[5].

본 연구에서는 고압응고가공법의 하나인 용탕 단조시 온도측정실험을 실시하여 온도분포결과를 분석하였고 이를 토대로 가압력에 따른 열전달 및 응고현상의 변화를 고찰하였다. 또한 역문제(inverse problem)방법에 의해, 측정된 온도분포결과를 이용한 수치해석을 실시하여 가압력에 따른 주물/금형 계면열전달계수를 구하였다. 더불어 계산된 계면열전달계수를 열전달 및 응고해석에 사용하여 보다 정량적인 열전달 및 응고해석을 수행하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험장치 및 시료준비

본 실험에서는 주조용 알루미늄합금인 AC4CH (Al-7Si-0.35Mg-0.2Cu)를 시료로 사용하였고 금형은 직경 50mm, 높이 약 100mm인 원통형 시편을 제작할수 있도록 SKD61강으로 가공하였다. 가압방식은 플런저 가압식을 채택하였으며 사용한 프레스는 50ton급 수직형이다. 온도측정 실험시 금형의 측면을 단열처리하였는데 이는 온도측정결과를 이용하여 수치해석적으로 열전달

계수를 구할때 금형측면과 대기 사이의 경계조건을 단열로 처리하여 계산을 용이하게 하기 위한 목적이다. 열전대의 접촉위치와 온도측정장치에 대한 모식도는 Fig. 1과 같다. 온도측정장치는 IBM-PC, DT2825 A/D Converter와 DT707A Interface Board로 구성되었고 측정기전력의 범위를 0~+0.1V로 설정한 후 총 7채널에서 0.01초 간격으로 300초간 열전대로부터 나오는 기전력을 측정하였다. 측정된 기전력분포에서 실험시 발생한 잡음을 제거하고 냉접점 보상을 하였으며, 온도전환을 실시하는 프로그램을 사용하여 기전력을 온도로 변화하였다. 본 연구에서는 위와 같은 일련의 과정을 위해 필터링 및 평균화 프로그램과 냉접점 보상을 고려한 온도전환 프로그램을 자체적으로 개발하여 사용하였다.

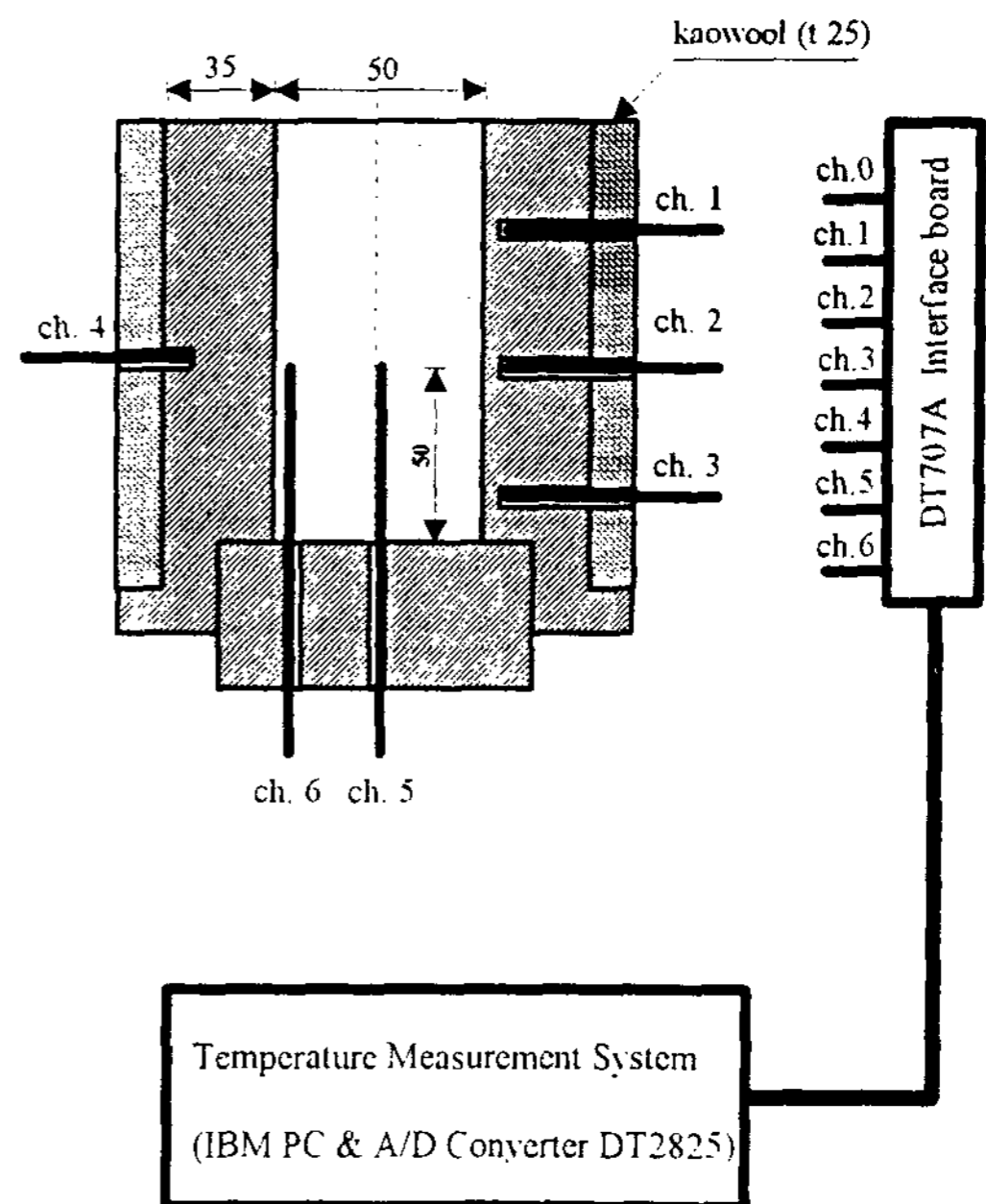


Fig. 1 Schematic configuration of temperature measurement system.

### 2.2 용탕단조실험 및 온도측정

시료는 전기저항로에서 용해하였고 금형은 kaowool로 측면을 단열처리한 후 펀치와 함께 전기저항식 오븐에 넣고 약 250°C로 예열하였다. 하부금형(base)의 ch. 5, ch. 6 지점에는 주물의 온도측정용 K-type sheath 열전대를 삽입하

고 zirconia flour와 colloidal silica의 혼합액을 사용하여 고정시킨후 약 250°C로 예열하였다. 오븐에서 예열한 금형에는 외경 5mm의 이구애자(two-holes ceramic tube)에 끼워진 K-type 열전대를 삽입한 후 고정하였다.

각 온도측정점에 열전대를 설치한 후 주조시편의 제거가 용이하도록 흑연분말이 30% 혼합된 다이캐스팅용 이형제를 표면에 두께 0.05mm-0.1mm로 도포하였다. 용탕온도가 약 720°C일 때 온도측정 프로그램을 실행시킨 후, ch. 0 열전대로 먼저 용탕온도를 측정하고 금형에 주탕한 후 약 5초후부터 가압을 시작하여 60초간 가압하였다. 온도측정은 총 7채널로 0.01초 간격으로 실시하였으며 가압이 끝난 후에도 프레스의 램을 제거하지 않고 300초까지 지속하였다. 1회 실험에 약 500g의 용탕을 주입하였으며 주탕전에 슬래크를 제거한 후 사용하였다. 가압력을 실험변수로 하여 50MPa, 150MPa 가압시 온도측정을 실시하였으며 동일한 실험조건하에서 중력주조(0.1MPa)를 실시하였다. 실험순서는 Fig. 2에 나타내었다.

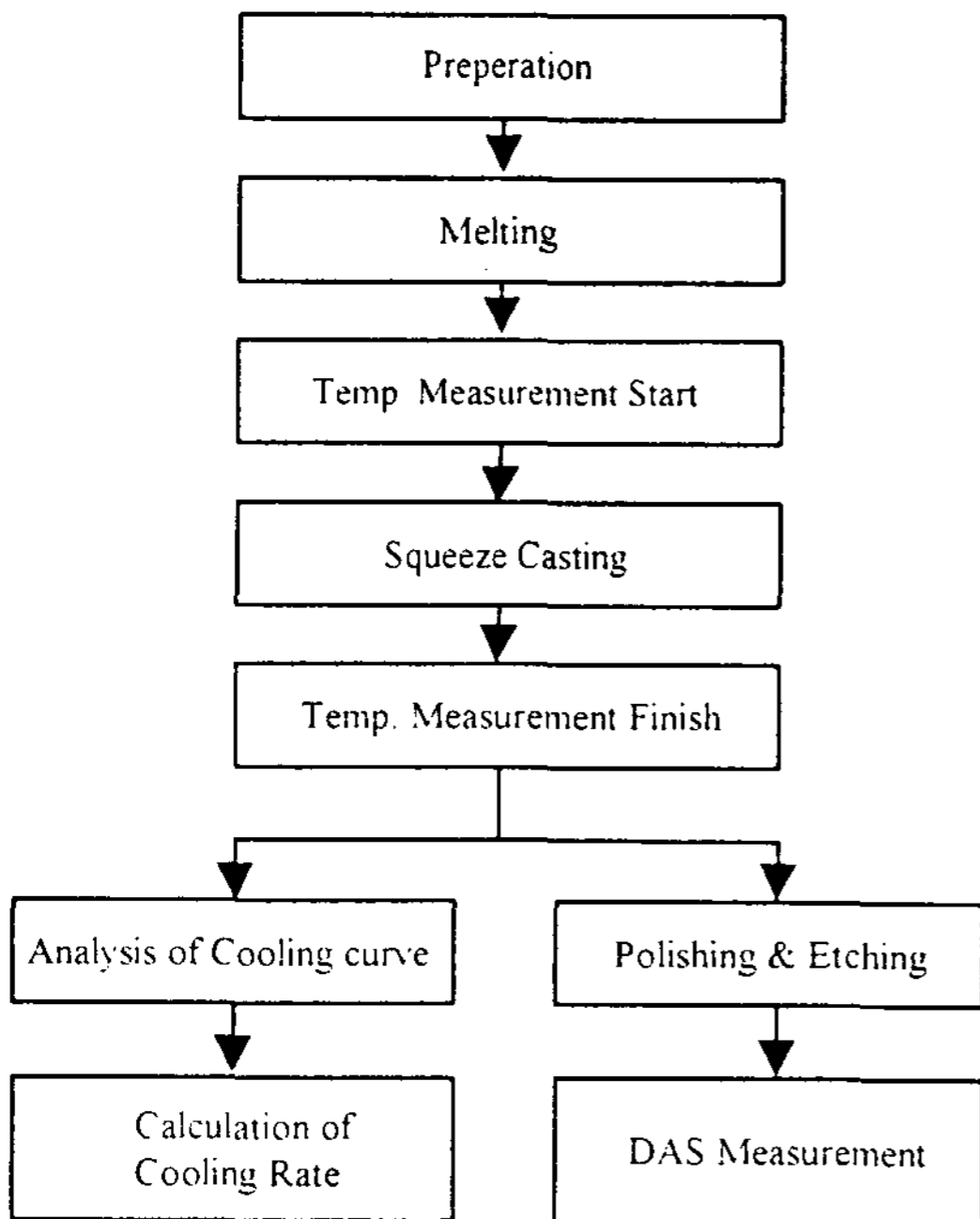


Fig. 2. Flow chart of experimental procedure.

### 3. 수치해석방법

#### 3.1 열전달현상에서의 역문제방법에 의한 해석

열전달 및 응고해석분야는 실험적 해석과 수치해석에 의한 수학적 모델해석방법으로 구분할 수 있다. 이 두 방법은 각각 발전하여 학술연구 및 생산에 유용하고 효율적인 방법으로 정착되어 왔으나, 최근 두 가지의 해석방법을 결합하여 실제 생산에 적용하려는 노력이 시도되고 있다.

현재 시도되고 있는 비교법은 실험결과와 수치해석결과를 비교하여 차이점이 발생하면 기지의 수치해석변수를 변화시켜가며 재계산하여 수치해석결과를 실험결과에 접근시키는 방향으로 해석해 왔다. 즉 수치계산을 통하여 정상적인 현상을 확인하는 것만이 가능하였다.

본 연구에서 도입한 역문제방법은 위에서 언급한 문제점을 고려한 새로운 해석방법의 하나로서 Fig. 3에 나타난 것과 같이 실험과정 및 수치해석과정중의 상호반응을 통하여 미지의 모델이나 공정변수를 정량적으로 평가하는 것을 목표로 한다[4]. 대부분의 역문제해석에는 실험 측정치와 실험과 일치하는 수치해석값을 모두 필요로 한다. 먼저 실험을 실시한 후 실험을 통하여 구한 데이터를 토대로 수치해석하고, 이 결과를 실제

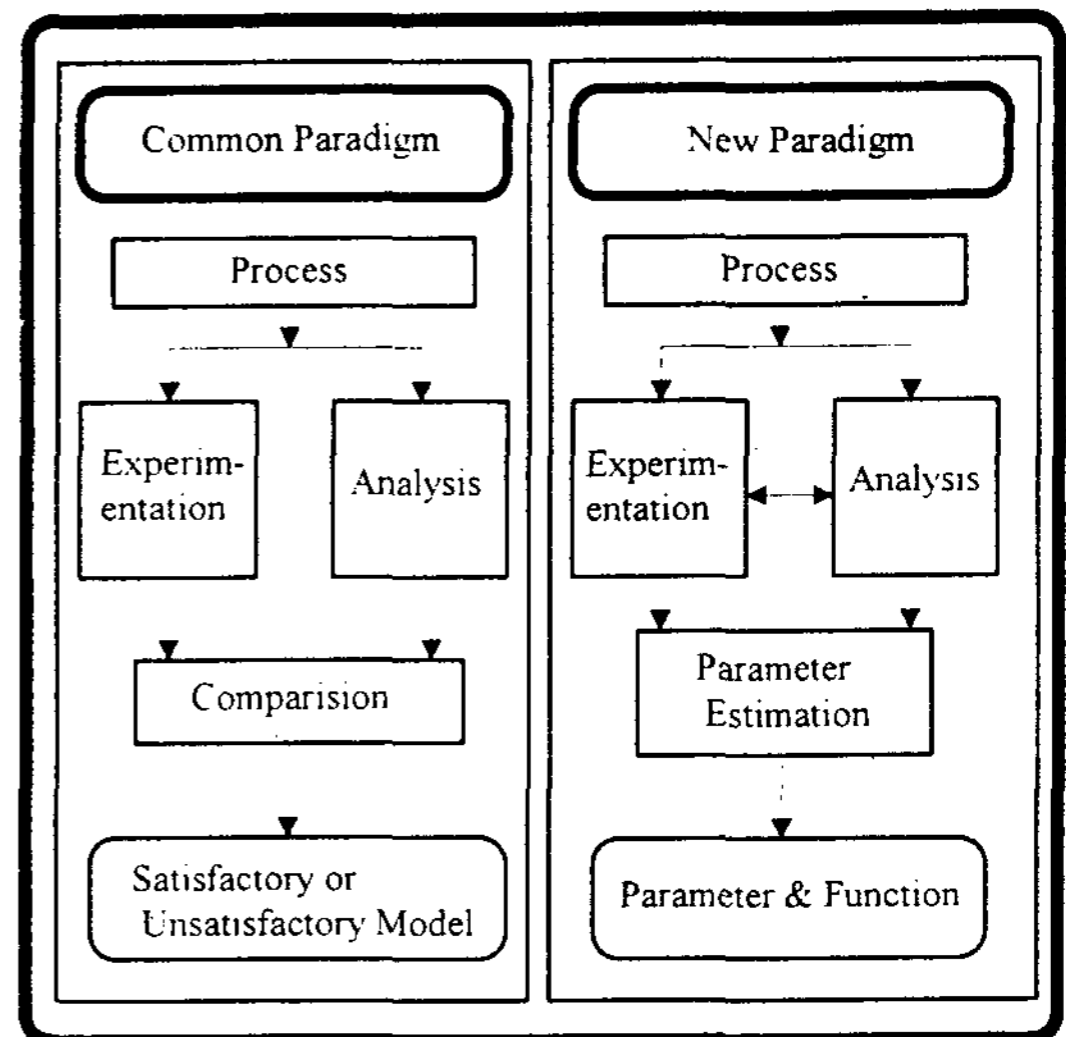


Fig. 3. New research paradigm utilizing advanced aspects of experimentation and mathematical modeling.

현상과 비교하여 차이점의 원인을 공정변수의 하나로 예측하고 기지의 데이터와 공정변수로서 예측된 공정변수의 값을 수치해석적으로 구하는 것이다. 이와 같은 방법으로 구한 공정변수값을 열전달해석 등에 사용하면 보다 정량적인 수치해석을 수행할 수 있다. 즉 역문제 방법에서는 실험과 수치해석의 차이점의 원인을, 미처 발견하지 못하였거나 정량적으로 구하지 못했던 공정변수, 또는 해석모델설정의 오류라고 간주한다. 그러므로 이러한 원인을 수치해석시 해석변수로 재도입하여 다시 계산을 하여 보다 정량적인 계산값을 구하거나, 실험에 공정변수로서 활용할 수 있게 한다[4].

**3.2 물리적 모델 및 지배방정식**

수치해석에 사용한 모델은 Fig. 4와 같다. 주물내에 위치한 ch. 5는 중심부의 온도측정점, ch. 6은 주물내 주물/금형 계면에서 5mm 떨어진 곳의 온도측정점이고, 금형에 위치한 ch. 2는 계면에서 금형쪽으로 5mm 위치한 곳의 온도를 측정한다.

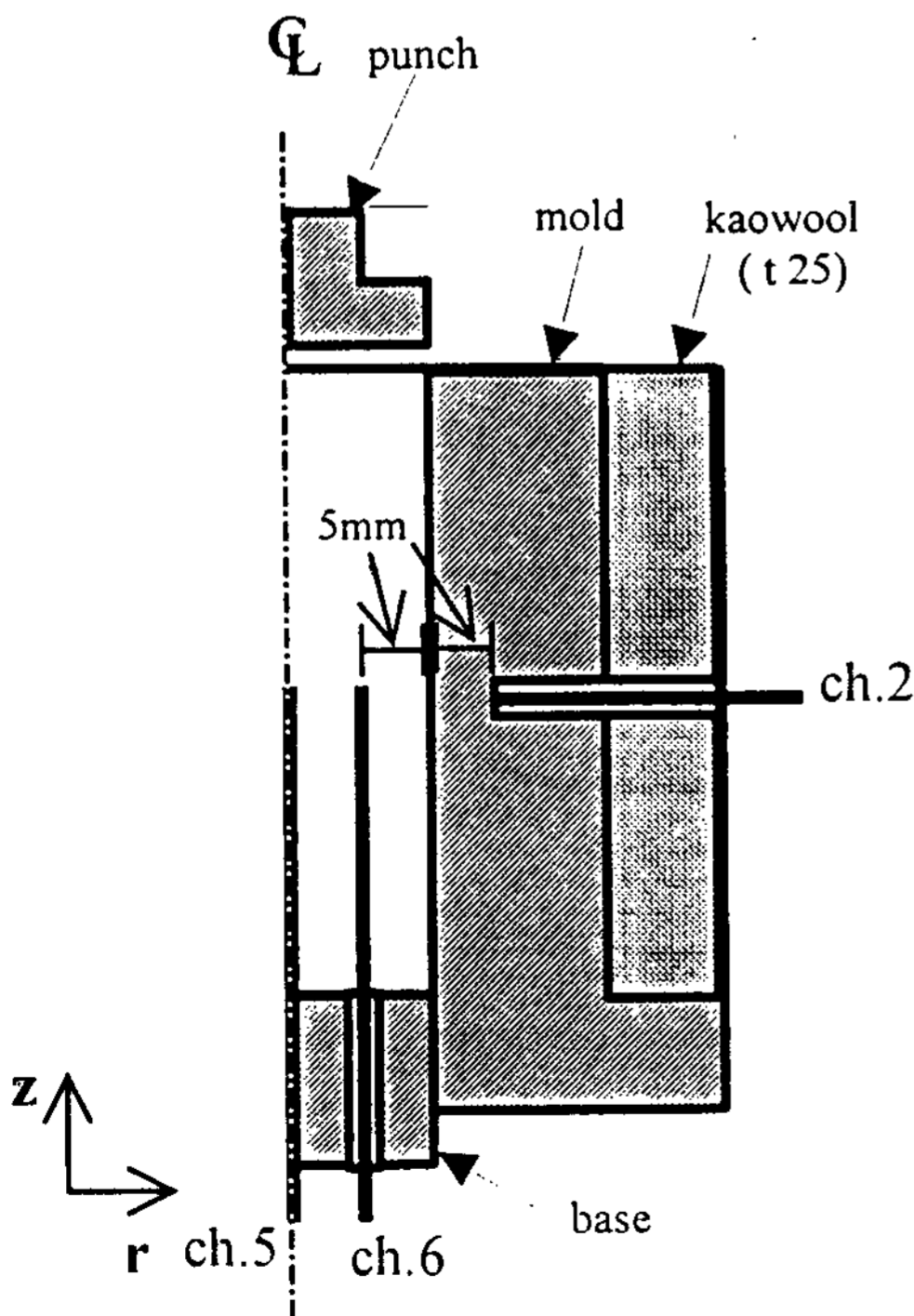


Fig. 4. Physical model for numerical analysis.

계면열전달계수의 계산에 사용한 가정은 다음과 같다. 첫째 열전달은 열전도(heat conduction)에 의해서만 일어나며 대류 및 복사열전달항은 무시하였다. 둘째 열전달은 1차원 원주좌표계에서 반지름방향으로만 일어나며 축방향의 열전달은 무시한다. 셋째 수치해석에 사용한 금형 및 주물의 물성치는 온도에 의존하지 않는다.

계면열전달계수를 비서형평가법으로 구하기 위해서는 부문장(subroutine)으로 열전달 및 응고해석을 사용하는데[4] Fig. 5에는 열저항이 있는 계면을 중심으로 주물구역과 금형구역의 온도분포를 나타내었고 지배방정식에 대한 절점 및 좌표를 표시하였다. 여기에서 r1은 ch. 6, r2는 ch. 2의 측정점을 나타낸다. 다음은 주물과 금형내 열전달 및 응고해석의 지배방정식, 경계조건, 초기조건이다.

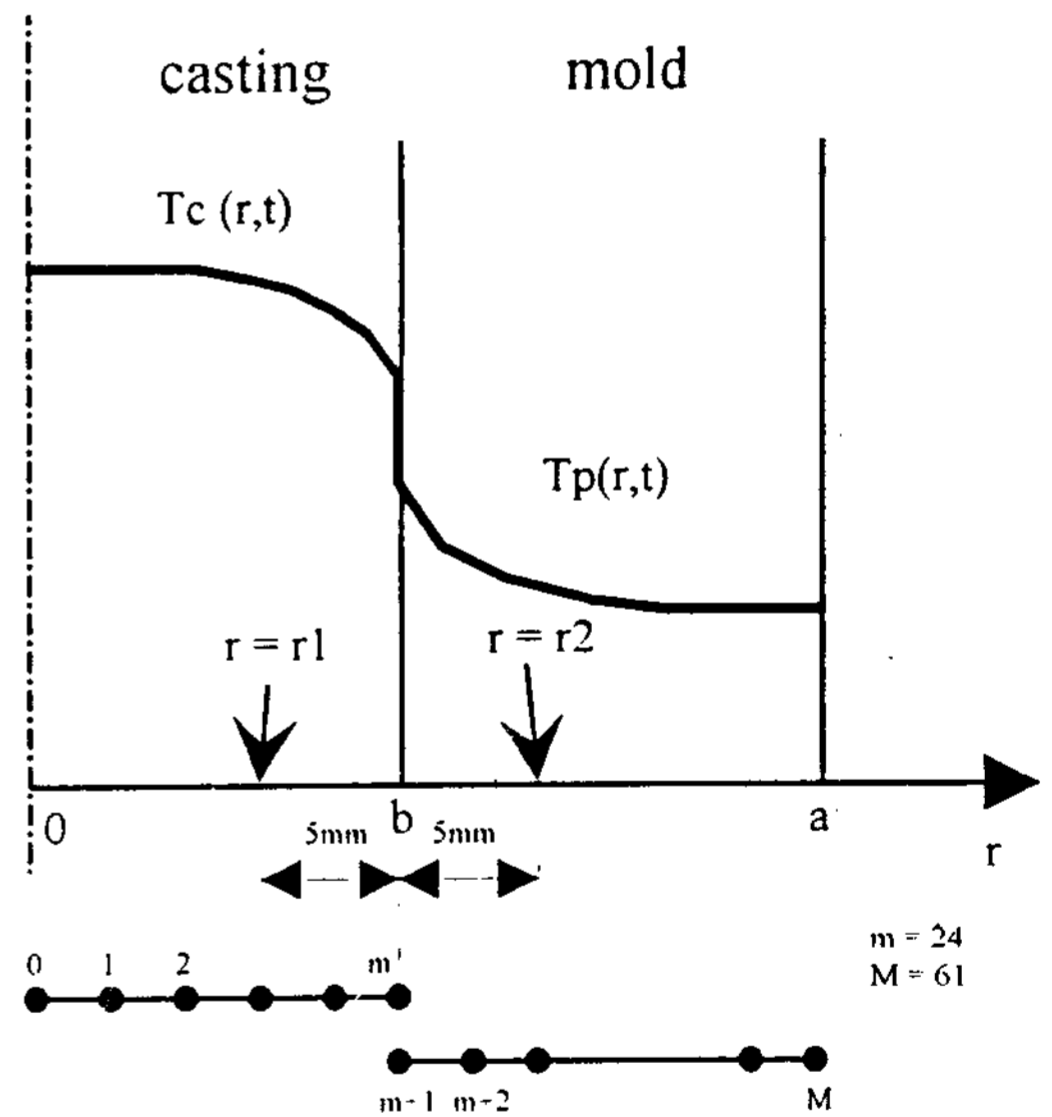


Fig. 5. Geometry and coordinates.

**3.2.1 주물내 (Casting region)**

1) 지배방정식

$$\frac{\partial T_c(r,t)}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T_c(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_c(r,t)}{\partial r} \right) + \frac{L}{C_p} \frac{\partial f_s}{\partial t}$$

in  $0 < r < b, t > 0$  (1a)

2) 경계조건

$$q_c(b,t) = -k_c \frac{\partial T_c(b,t)}{\partial r} = h_c(t)(T_c - T_p) \quad (1b)$$

at  $r=b, t>0$

$$q_c(0,t) = -k_c \frac{\partial T_c(0,t)}{\partial r} = 0 \quad (1c)$$

at  $r=0, t>0$

3) 초기조건

$$T_c(r,0) = T_{init} \quad \text{for } t=0, \text{ in } 0 \leq r \leq b \quad (1d)$$

3.2.2 금형내(Mold region)

1) 지배방정식

$$\frac{\partial T_p(r,t)}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T_p(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_p(r,t)}{\partial r} \right) \quad (2a)$$

in  $b < r < a, t > 0$

2) 경계조건

$$q_p(b,t) = -k_p \frac{\partial T_p(b,t)}{\partial r} = h_c(t)(T_c - T_p) \quad (2b)$$

at  $r=b, t>0$

$$q_p(0,t) = -k_p \frac{\partial T_p(0,t)}{\partial r} = 0 \quad (2c)$$

at  $r=a, t>0$

3) 초기조건

$$T_p(r,0) = T_\infty \quad \text{for } t=0, \text{ in } b \leq r \leq a \quad (2d)$$

이상의 지배방정식 및 경계조건을 음적해법(implicit)으로 이산화하였으며 이산화를 위한 형상과 절점을 Fig. 5에 나타내었다. 계산에 사용한 절점크기는 1.0mm( $\Delta r=1.0\text{mm}$ )이며 금형내 절점수는 25개, 금형내에서는 35개이다.

주물내 열전달해석에는 액상에서 고상으로의 상변화 과정이 수반되므로 해석모델에 응고시의 잠열발생을 고려하여야 한다[6,7]. 일반적으로 응고잠열을 취급하는 방법에는 등가비열법, 엔탈피법 및 온도회복법이 있으며 본 연구에서는 온도회복법을 사용하였다. 온도회복법은 우선 응고잠열의 방출을 고려하지 않고 온도해석을 한 후 단위시간마다 응고온도로부터 온도강하량을 구하여, 응고진행중인 경우에 해당 절점의 온도를

응고분율에 의한 계산된 잠열로 온도를 보정하는 방법이다.

3.3 계산방법(Non-Linear Estimation)

측정한 온도분포  $Y_i$ 를 입력한 후 임의의 일정한  $h_0$ 를 설정하여 대입한다. 측정온도점과 동일한 위치(ch. 2)에서 이산화된 지배방정식으로 열전달 및 응고해석을 수행하여  $(x_j, T_j)$  절점의 온도  $T_j$ 를 계산한다. 온도계산에서  $h$ 값을 적절히 변화시켜주면 계산한  $T_j$ 를 측정온도  $Y_i$ 에 근사시킬 수 있으며  $n$ 개의 열전대에 의한 온도 측정자료와  $m$ 개의 이산화된 시간이 주어질 때 다음과 같은 함수  $F(h)$ 가 정의된다[5].

$$F(h) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [T_j(h) - Y_i]^2 \quad (3)$$

이 함수가 최소값을 가질 때 차분법에 의해 계산된 온도분포는 측정된 온도분포와 가장 잘 일치하게 된다. 따라서  $F(h)$ 가 최소일 때의  $h$ 가 구하고자 하는 계면열전달계수라고 볼 수 있으며 온도분포와 계면열전달계수의 의존성으로부터 온도( $T$ )를 계면열전달계수( $h$ )에 관해 Taylor 급수를 이용하여 전개하면 다음과 같다.

$$T_j(h) \approx T_j(h_1) + T_{h,j} \Delta h_1 \quad (4)$$

여기서  $\Delta h_1 = h_{1+1} - h_1$ ,

$$T_{h,j} = \frac{\partial T_j}{\partial h} \Big|_{h_1} \approx \frac{T_j(h(1+\epsilon)) - T_j(h_1)}{\epsilon h_1} \quad (5)$$

여기서  $T_h = \frac{\partial T}{\partial h}$  : sensitivity coefficient,

$l$  : iteration

$$\frac{\partial F}{\partial h} = 0 \quad (6)$$

식 (4)의 오른쪽 항의 온도  $T$ 는 차분법에 의한 열전달해석으로 구해지며,  $\epsilon$ 은 임의로 정해놓은 상수이고 0.001 정도의 작은 값을 가진다. 식 (3)이 최소값일 때 (6)식과 같으며 (6)식과 (4)식을 식 (3)에 적용하면 다음과 같다.

$$\Delta h_1 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{h,j} [Y_i - T_j(h_1)]}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (T_{h,j})^2} \quad (7)$$

반복계산시 수렴조건은 다음과 같다.

$$\left(\frac{\Delta h_i}{h_i}\right) \leq 10^{-5} \quad (8)$$

만일 온도(T)가 계면열전달계수(h)에 대해서 선형적인 관계에 있다면 (7)식에 의해 구해진  $\Delta h_0$ 에 의해 한번에 h를 구할 수 있으나 비선형적 관계이므로 금형내 온도측정점에서 측정된 온도를

이용한 반복계산으로 계면열전달계수를 구한다[5]. 이러한 반복법은 비선형평가법(Non-Linear Estimation)의 일종이며 시간에 따라 변하는 h, 즉 h(t)를 구하는 데에도 적용할 수 있다. 이때는 시간축을 적당한 구간으로 나누고 각 구간 안에서 h를 상수로 보고 위의 방법을 적용한다. 계산방법을 Fig. 6의 순서도에 나타내었고 계산에 사용된 열물성치는 Table 1과 같다.

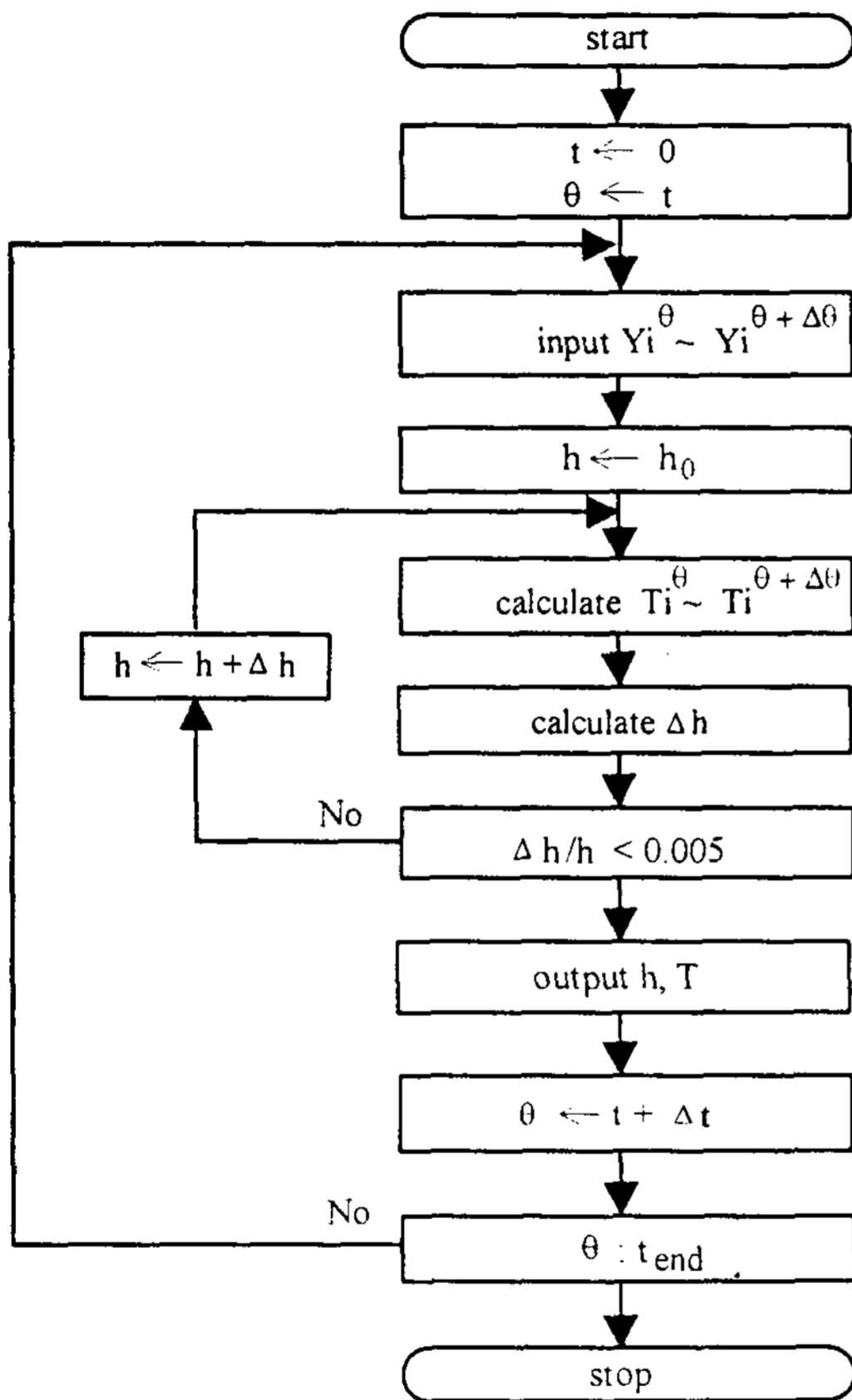


Fig. 6. Flow chart for numerical calculation.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 냉각속도 고찰 및 조직관찰

##### 4.1.1 온도분포분석을 통한 냉각속도 고찰

주탕의 온도와 금형온도를 각각 720°C와 250°C로 고정하고 중력(0.1MPa)주조와 가압력을 50MPa, 150MPa로 변화시키면서 온도측정을 실시하여 Fig. 7과 같은 온도분포곡선을 얻었다. 온도분포를 고찰한 결과 가압력이 증가할수록 냉각속도는 급격히 증가함을 알 수 있었으며 가압시점에서 단열압축효과에 의한 액상합금의 온도 상승현상도 관찰되어서 50MPa에서 약3°C, 150MPa 가압시 약 8°C의 온도상승이 있었다. 순간적인 온도상승에 이른 수 초간의 냉각곡선 유지 현상은 가압직후 응고가 시작되어 응고잠열의 방출이 일어나기 때문이라고 생각되며, AC4CH합금의 평형상태 액상선인 615°C보다 높은 온도에서 응고가 시작되는 것으로 예측된다. 응고구간 내 냉각속도는 응고개시점의 온도와 시작, 응고 완료점의 온도와 시각을 구해 온도차를 시간차로 나누어 계산하였다.

주물 중심부(ch. 6)의 온도분포를 고찰해보면 다음과 같은 공통적인 냉각곡선 형태를 관찰할 수 있었다. 중력주조인 경우 최초에 용탕이 열전

Table 1. Thermal properties of materials for numerical analysis[14]

Material	AC4CH(A356)	SKD61(H13)
Purpose	Casting	Mold
Density at 20°C (kg/m³)	2685	7800
Liquidus Temp.(°C)	615[888K]	-
Solidus Temp.(°C)	555[828K]	-
Specific Heat at 100°C (J/kg·K)	963	544
Latent Heat of Fusion(kJ/kg)	389	-
Thermal Conductivity at 25°C (W/m·K)	159(T6, permanent mold)	26.6

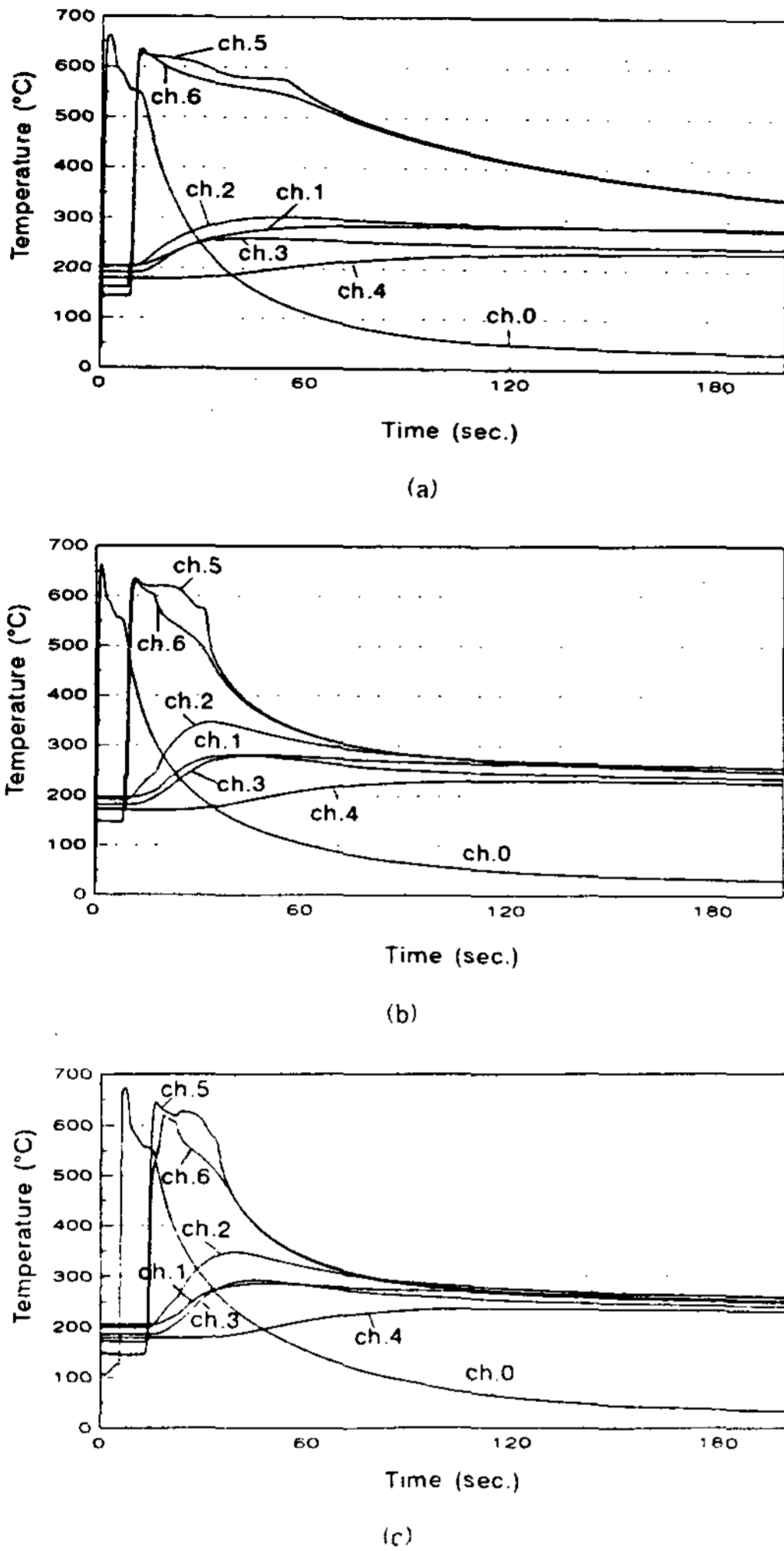


Fig. 7. Experimental temperature profiles of AC4CH alloy at the specific locations; (a) gravity casting, (b) under 50MPa pressure, and (c) under 150MPa pressure.

대에 접촉된 시점에서 온도가 급격히 상승한 후 서서히 냉각되며 액상온도와 공정온도 사이에서  $\alpha$ -수지상(dendrite) 성장을 한다. 이 구간을 지난 후 공정온도인 약 576°C에서 온도가 약 10초간 유지되며, 이 온도에서 Al-Si공정조직이 관찰되고  $\alpha$ -수지상의 조대화가 진행된다. 공정조직의 형성이 완료된 후 냉각속도는 더욱 증가하여 약 559°C에서 Al-Si-Mg<sub>2</sub>Si이 나타나고 고상선인 555°C 부근에서 Al-Si-Al(FeMg)Si가 형성되며 응고가 완료된다. 가압한 경우에는 가압시 순간

적으로 액상 Al의 온도가 상승하고 동시에  $\alpha$ -수지상성장이 시작된다. 이후의 거동은 중력주조시와 같으며, 다만 응고개시온도와 응고완료온도의 상승, 냉각속도의 급속한 증가, Al-Si공정 형성구간의 단축 등이 다른 점이다. 이러한 냉각곡선 형태를 갖는 원인은 본 연구에서 사용한 AC4CH합금에는 Al, Si 외에 0.3% Mg이 포함되기 때문이다. Mg을 첨가하면 기존의 Al-Si합금의 고상선인 약 576°C와 달리 555°C로 고상선이 강해진다. AC4CH합금의 전형적인 냉각곡선 형태는 Fig. 8에 나타내었다[8].

온도분포분석을 통하여 가압력에 따른 냉각속도의 변화를 관찰한 후 다음과 같은 결과를 얻었다. 가압력이 증가함에 따라 단열압축효과가 커지며 응고점상승이 증가하였다. 가압력이 증가할수록 냉각속도가 증가하여 응고완료시간이 단축되었다. 냉각속도의 증가와 가압에 의한 물리적인 압축에 의하여 응고조직은 미세화 되고 치밀해진 것으로 생각된다.

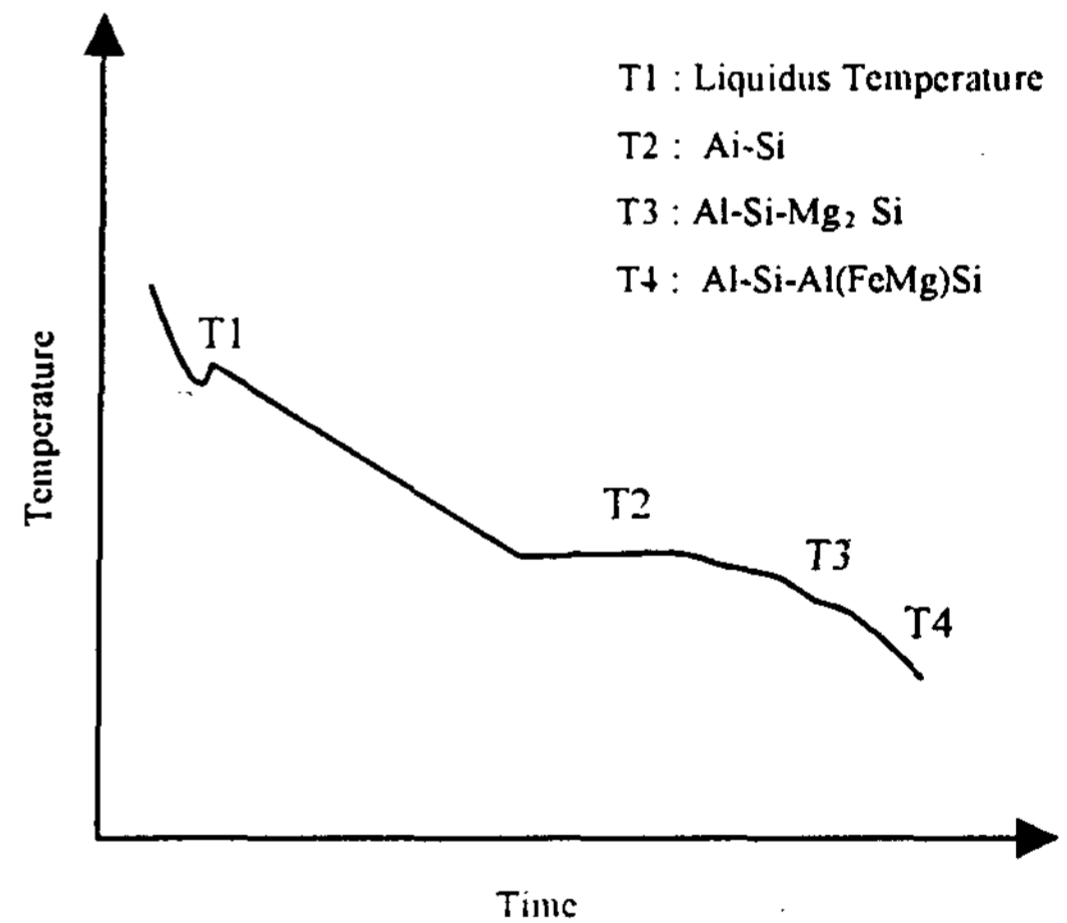
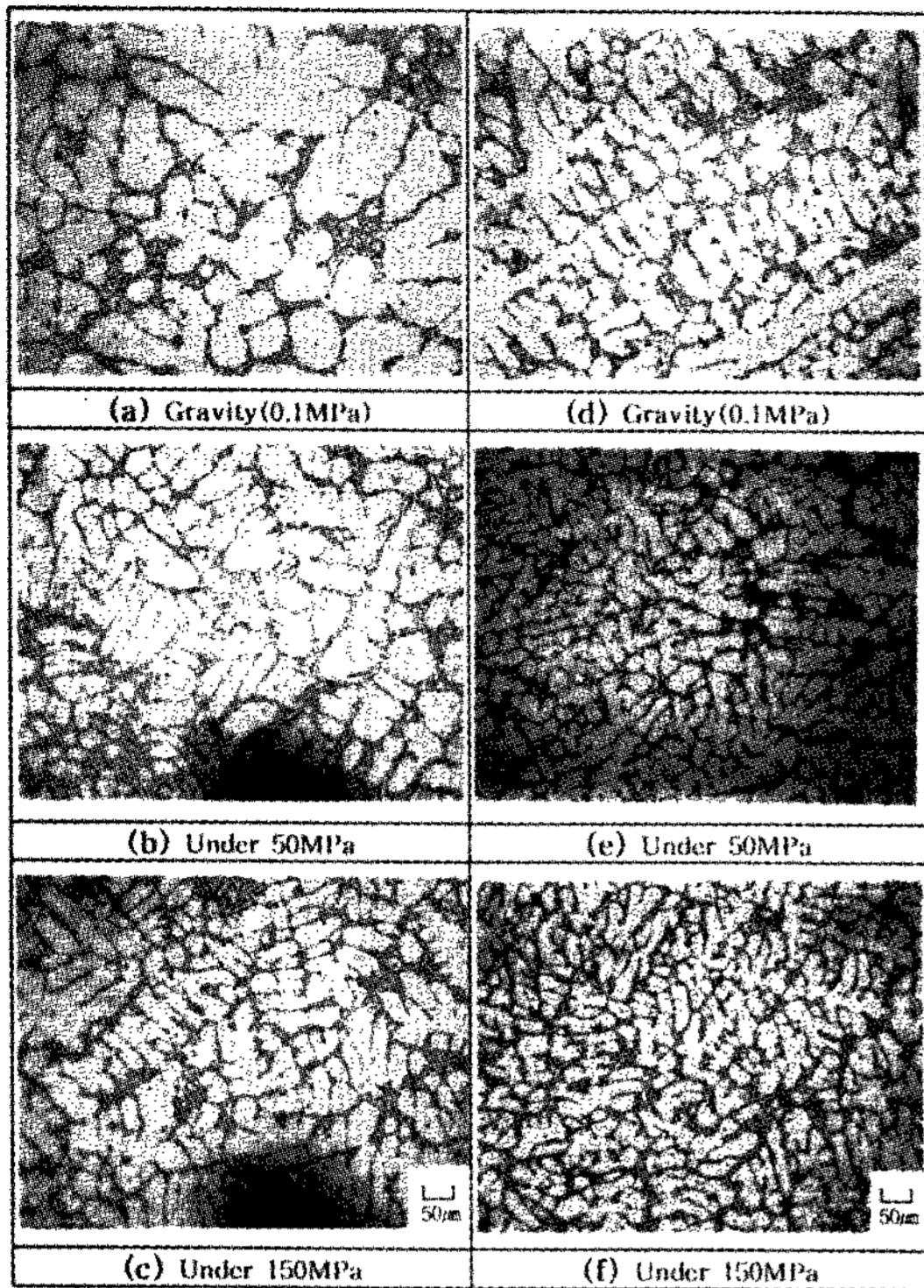


Fig. 8. Typical cooling curve for the AC4CH alloy.

4.1.2 조직관찰 및 냉각속도 고찰

제조한 시편의 미세조직을 관찰하여 냉각속도를 계산하였다. 미세조직은 시편의 밑면에서 50mm 상부, 즉 열전대로 주물온도를 측정된 위치를 원호형상으로 채취하여 중심부(ch. 5)와 주물/금형 계면 부근(ch. 6)의 수평면과 수직면을 광학현미경을 사용하여 200배로 관찰하였다. 응고중 냉각속도를 구하기 위해서 Fig. 9에서 2차



**Fig. 9.** Microstructures of AC4CH alloy;  
 (a)–(c) : at the center of casting,  
 (d)–(f) : near the cast/mold interface.

수지상(2nd. Dendrite Arm Spacing : 2nd. DAS)의 간격을 측정하였다. 중력주조인 경우 중심부에서는 36.67µm, 계면부근에서는 29.00µm, 50MPa 가압시 중심부는 20.20µm, 계면부근은 18.11µm, 150MPa 가압시 중심은 20.72µm, 계면부근은 16.94µm이었다. 시편 중심부에서의

DAS가 계면부근의 DAS보다 약 22~26% 조대함을 관찰할 수 있었는데 이는 주물/금형 계면과 중심부의 응고중 냉각속도 차이가 크기 때문이다. 또한 가압력이 증가할수록 미세한 조직을 얻게 되는데 이러한 원인은 가압에 의해 수지상이 깨어져서 핵생성처로 작용하고, 주물/금형간 틈(gap)이 감소하여 열저항이 줄어들어 냉각속도가 급격히 증가하기 때문이라고 생각된다. 측정된 2차수지상간격을 (9)식에 대입하여 냉각속도로 환산하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다[9,10] 온도분포결과로부터 계산한 결과와 비교하여 보면 가압력의 증가에 따라 냉각속도가 증가하는 경향이 나타나며 주물 중심부보다 계면부근의 냉각속도가 큰 것을 알 수 있었다. 이와 같은 비교를 통하여 온도분포곡선에서 구한 냉각속도와 조직관찰을 통해 구한 냉각속도가 근사하게 일치함을 알 수 있었다.

$$R = 7.28 \times 10^4 / d^3 \quad (9)$$

R : 냉각속도[°C/sec], d : DAS[µm]

미세조직에서는 가압력이 증가함에 따라 수지상정의 미세화, 공정조직의 미세화, 미세기공의 억제등 양호한 조직특성을 관찰할 수 있었으며, 이는 가압에 따른 응고중 냉각속도의 증가, 과냉도의 증가, 가스용해도의 증가 등에 기인한 것으로 생각된다.

**4.2 가압력에 따른 열전달 및 응고현상의 변화**

**4.2.1 수치해석에 의한 주물/금형 계면열전달 계수의 계산**

금형내 측정된 온도분포결과를 이용한 비선형

**Table 2.** Comparisons of cooling rate in the squeeze casting

Pressure	Cooling Rate at Center(ch.5)		Cooling Rate near Cast/Mold Interface(ch.6)	
	by Measured Temperature (°C/sec)	by Measured 2nd. DAS (°C/sec)	by Measured Temperature (°C/sec)	by Measured 2nd. DAS (°C/sec)
Gravity (0.1MPa)	1.64	1.48	1.98	2.98
50MPa	6.56	7.15	12.62	12.26
15MPa	10.74	12.35	14.74	14.98



평가법에 의해 주물/금형간 계면열전달계수를 구하여 Fig. 10에 중력주조시와 50MPa 가압시의 계면열전달계수분포를 비교하여 나타내었다. 중력주조시 계면열전달계수는 포물선형으로 서서히 증가하다가 응고완료후 감소하였고 최대값은 약  $1200\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ 이다. 50MPa 가압을 하는 경우 가압직후 계면열전달계수가 최대 약  $4500\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ 까지 급격히 증가하다가 응고가 완료된 후 급격히 감소하는 거동을 보였다[11,12]. 가압력의 증가에 따라 계면열전달계수의 최대값이 증가함을 알수 있는데 이러한 현상은 가압시 주물/금형간 접촉이 이상적으로 밀착되기 때문에 발생한다고 생각된다. 또한 응고후 계면열전달계수가 감소하는 원인은 응고후 계면에서 발생한 미세한 에어갭 등으로 인한 열저항이 커지기 때문이라고 사료된다. 이상과 같은 결과에서 계면열전달계수는 응고가 진행됨에 따라 변하고, 가압력에 따른 접촉상태에 따라 변화한다는 사실을 알 수 있었다[13].

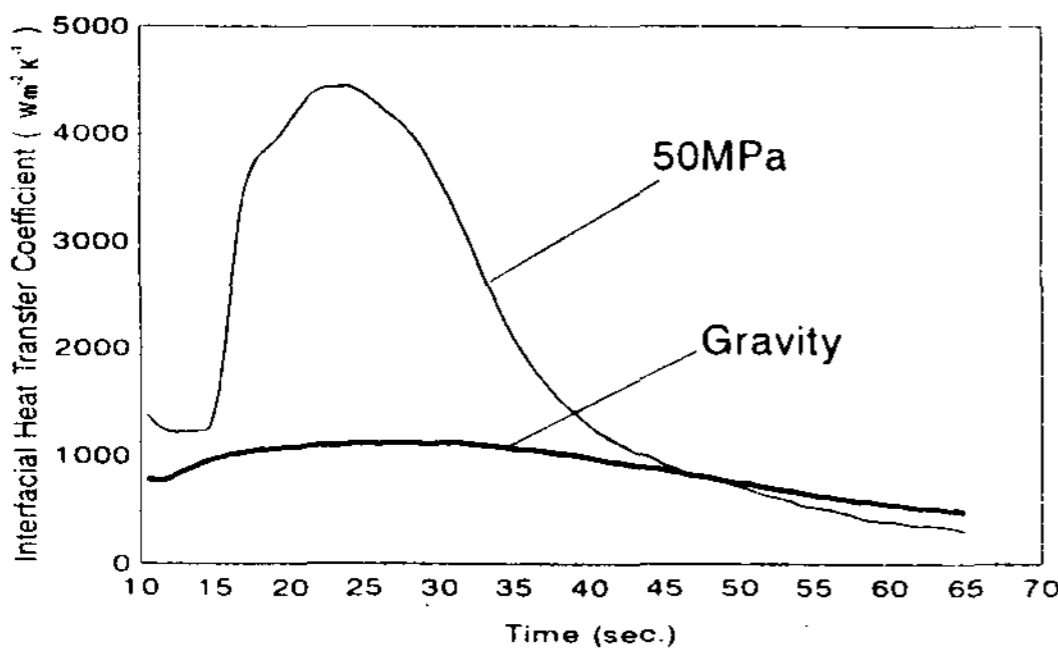


Fig. 10. Interfacial heat transfer coefficient curves versus time; gravity and under 50MPa pressure.

4.2.2 열전달 및 응고해석

비선형평가법으로 계산한 계면열전달계수를 사용하여 2차원 원주좌표계에서 열전달 및 응고해석을 실시하였다. 중력주조시 상부의 경계조건은 공기의 열전달계수인  $418\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ( $0.01\text{cal}/\text{cm}^2\text{s}^\circ\text{C}$ )를 사용하였고 측면과 하부는 계산한 계면열전달계수를 사용하였다. 50MPa 가압시에는 고압에 의해 시편의 상하부가 각각 펀치와 하부금형에 응고전반에 걸쳐 밀착되어 있으므로 계면열전달 계수가 변하지 않는다고 볼수 있다. 따라서

상하부의 열전달계수는  $3340\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ( $0.08\text{cal}/\text{cm}^2\text{s}^\circ\text{C}$ )로 고정시켜 계산하였고 금형측면에서는 계산한 계면열전달계수를 사용하였다.

중력주조시 주물내 온도측정점(ch. 5, ch. 6)과 금형내 온도측정점(ch. 2)에서의 측정된 온도분포결과 및 비선형평가법에 의해 계산된 계면열전달계수를 사용하여 2차원 열전달해석한 결과와 계면열전달 계수를 상수로 처리하여 계산한 결과를 서로 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 여기에서 상수로 취한 값은 계산된 계면열전달계수의 평균값으로 중력주조시  $500\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , 50MPa 가압시  $2000\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ 이다. 시간에 따라 변하는 계면열전달계수를 반영한 계산결과는 계면열전달계수를 상수로 하여 수치해석한 결과보다 측정된 온도분포결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. Fig. 12에는 50MPa 가압시의 결과를 나타내었는데 여기에서도 역문제방법을 도입한 결과가 기존의 열전달 및 응고해석보다 정량적임을 알 수 있었다. 따라서 용탕단조시 열전달 및 응고해석

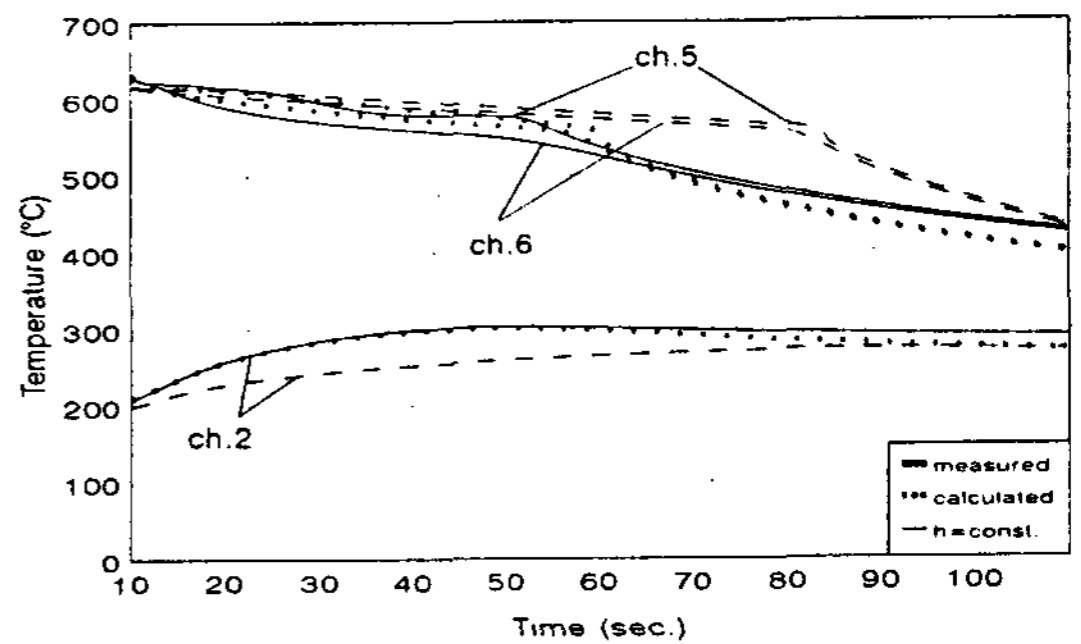


Fig. 11. Temperature curves of mold and casting; gravity casting.

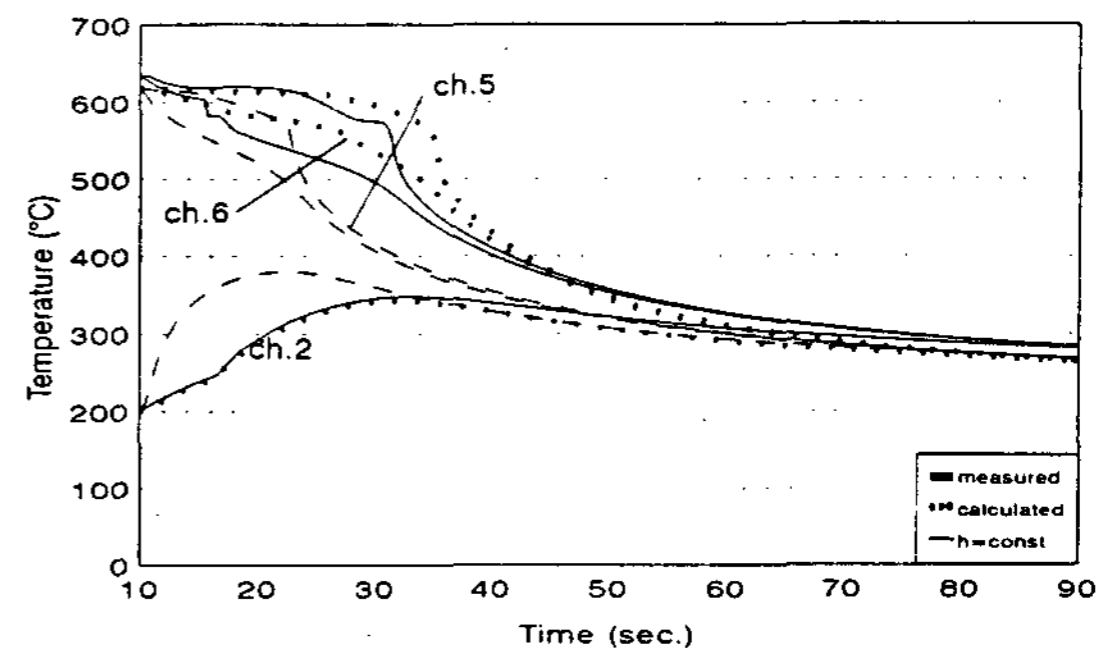


Fig. 12. Temperature curves of mold and casting; under 50MPa pressure.

을 보다 정량적으로 수행하기 위해서는, 본 연구에서 제시한 역문제방법에 의해 계면열전달계수 등 고정변수를 정량적으로 평가하는 것이 선행되어야 한다고 생각된다.

## 5. 결 론

용탕단조시 온도측정실험을 실시하였고 역문제방법에 의해 주물/금형 계면열전달계수를 정량적으로 평가한 후 이를 열전달 및 응고해석에 사용하여 보다 정량적인 수치해석을 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 용탕단조시 가압력을 변화시키며 온도측정 실험을 실시하여 온도분포결과를 해석하였고 이를 이용하여 냉각속도 등을 구한 후 가압력에 따라 냉각속도가 증가함을 확인하였다.

2) 가압력의 증가(중력, 50MPa, 150MPa)에 따라 조직미세화, 기공 및 결함제거 등으로 인한 주조품의 성질개선을 관찰하였고, 2차수지상간격(2nd, DAS)의 측정에 의해 계산한 냉각속도와 실험적으로 측정된 냉각속도를 비교하여 근사하게 일치한 결과를 보았다.

3) 주물/금형간 계면열전달계수를 구하기 위해서 측정된 온도분포결과를 이용한 비선형평가법(Non-Linear Estimation)을 도입하였다. 중력 주조의 경우 계면열전달계수는 시간에 따라 포물선형으로 증가한후 감소하였고, 용탕단조시에는 가압력이 증가할수록 열접촉이 이상적으로 밀착되어 계면열전달계수가 급격히 증가하였다.

4) 정량적으로 구한 계면열전달계수를 사용한 2차원 열전달 및 응고해석을 실시하였으며, 이러한 방법은 계면열전달계수를 상수로 하여 열전달 및 응고해석한 결과보다 실험치에 보다 근사하게 일치하였다. 따라서 역문제방법에 고정변수의 예측 및 평가는 보다 정확한 열전달 및 응고해석을

가능하게 할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- [ 1 ] Y. Nishida and H. Matsubara : British Foundrymen, 69 (1976) 274
- [ 2 ] S. Chatterjee and A. A. Das : British Foundrymen, 65 (1972) 420
- [ 3 ] V. M. Plyatskii : Extrusion Casting Primary Sources, (1965)
- [ 4 ] J. V. Beck : Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Process V, (1991) 503
- [ 5 ] J. V. Beck : Int. J. Heat Mass Transfer, 13 (1970) 703
- [ 6 ] C. P. Hong, T. Umeda and Y. Kimura : Metall. Trans., 15B(1984) 91
- [ 7 ] 김지준, 김진수, 류관호, 최정길, 이진형, 홍준표 : 한국주조공학회지, 13 (1993) 268
- [ 8 ] Jadwiga Sakwa - Gempf : Giessereiforschung, 40 (1988) 134
- [ 9 ] 김기영, 기석도, 박종락 : 한국주조공학회지, 13 (1993) 71
- [ 10 ] 神尾彰彦 : DAS測定方法, 東京工業大學, p. 9
- [ 11 ] 유승목, 한요섭, 이호인, 홍준표 : 한국주조공학회지, 10 (1990) 495
- [ 12 ] K. Ho and R.D. Pehlke : AFS Trans., 83-80 (1983) 689
- [ 13 ] J. Issac, G. P. Reddy and G. K. Sharma : AFS Trans., 85-06 (1985) 29
- [ 14 ] Smithells Metal References Book, 10th. ed., Chap. 10