

.....  
**論 文**  
 .....

## 주형재료로서 덩어리 활석의 이용

하만진\*, 이진형\*, 이상수\*\*, 은희준\*\*\*

### Application of Bulk Talc to Molding Material

Man-Jin Ha\*, Zin-Hyoung Lee\*, Sang-Soo Lee\*\* and Hee-Joon Eun\*\*\*

#### Abstract

The possibility of using bulk talc as molding material was reviewed and tested with the measurement of thermal properties and computer simulations. The measured thermal conductivity and heat diffusivity( $k\rho c$ ) of talc were  $2.4\text{W/m}^\circ\text{C}$  and  $6.6 \times 10^6 \text{J}^2/\text{m}^4\text{C}^2\text{s}$  respectively. Thermal properties of talc could be ranked between those of sand mold and iron mold.

Talc transforms into cristobalite and enstatite at  $910^\circ\text{C}$ . During the transformation volume and structure change, cracks appear on the surface and distortion occurs. Therefore talc can be used for molding material below  $910^\circ\text{C}$  if carefully treated.

Computer simulation was carried out to test whether talc insert could promote directional solidification in sand mold and iron mold. In sand mold, it was possible to achieve directional solidification of thin plate casting with the length to thickness ratio of 15, if both iron insert and talc insert were used. In iron mold, it was possible to achieve directional solidification only with talc insert.

(Received January 9, 1994)

#### 1. 서 론

산업의 발달과 더불어 결함이 없으면서 복잡한 모양의 주물이 요구되고 있다. 이 요구에 부응하기 위해서는 주조합금의 선택, 주물의 형상설계 등과 함께 주형재료의 선택이 중요하다. 그러나 선택 가능한 주형재료는 금속재료 및 사형 등으로 그다지 많지 않다. 특히 금속 주형재료와 사형의 열적물성(열전도도( $k$ ), 열확산계수( $k/\rho Cp$ ) 및 냉각능( $k\rho Cp$ )) 등이 판이하게 달라 둘의 중간 정도의 열적물성을 가진 재료가 절실히 요구되고 있다. 이러한 재료는 세라믹재료에서 찾을 수 있으나 세라믹재료는 가공이 어려워 주형재료로 사용이 어렵다. 이에 반해 활석은 세라믹재료

중에서 가공성이 매우 뛰어나며, 청동기 시대에 주형재료로 사용된 예가 있다. 청동기 시대에 실납법, 도범(陶范)과 더불어 석범(石范)이 사용되었으며, 석범은 가공이 간편한 활석을 조각하여 만든 것이었다. 이런 활석주형은 우리나라와 중국 요동지방에서 발견되고 있다. 그러나 현대 주형재료로서는 덩어리 활석은 사용되지 않고 주물사에 활석가루를 섞어 쓰는 정도이다.

본 연구에서는 이러한 덩어리 활석을 현대의 주형재료로 사용하기 위하여 열적물성을 조사 또는 측정하였고, 주조실험을 통하여 주형재료로 사용 가능성을 조사하였다. 그리고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 활석이 지향성 응고를 위한 주형인서트(insert)로 사용 가능한지에 대하여 조

\*한국과학기술원 재료공학과(Dept. of Metallurgical Eng., KAIST)

\*\*국립박물관 보존과학실(Lab. of Conservational Sci, National Museum)

\*\*\*한국표준연구원 역학연구부(Dept. of Mechanical Research, Korea Research Institute of Standards and Science)

사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 활석의 열전도도 측정

활석의 열전도도는 두께가  $L_a$ (3mm)와  $L_b$ (4mm)인 두께의 활석 시편을 Fig. 1과 같이 구리봉 사이에 위치시켜 접촉 열저항을 소거할 수 있게 하여 측정하였다. 구리봉 내에 일정 간격으로 설치된 열전대를 이용하여 정상 상태에서의 구리봉의 온도를 측정하여 구리봉과 활석 시편의 접촉부에서 구리봉의 온도인  $T_{a1}$ ,  $T_{a2}$ ,  $T_{b1}$ ,  $T_{b2}$ 를 구하였다. 그리고 구리의 열전도도( $k_{cu}$ )를 이용하여 활석의 열전도도를 측정하였다.

$$k_{tak} = \frac{k_{cu}(T_{a2} - T_{b1})(L_b - L_a)}{L_{cu}\{(T_{b1} - T_{b2}) - (T_{a1} - T_{a2})\}} \quad (1)$$

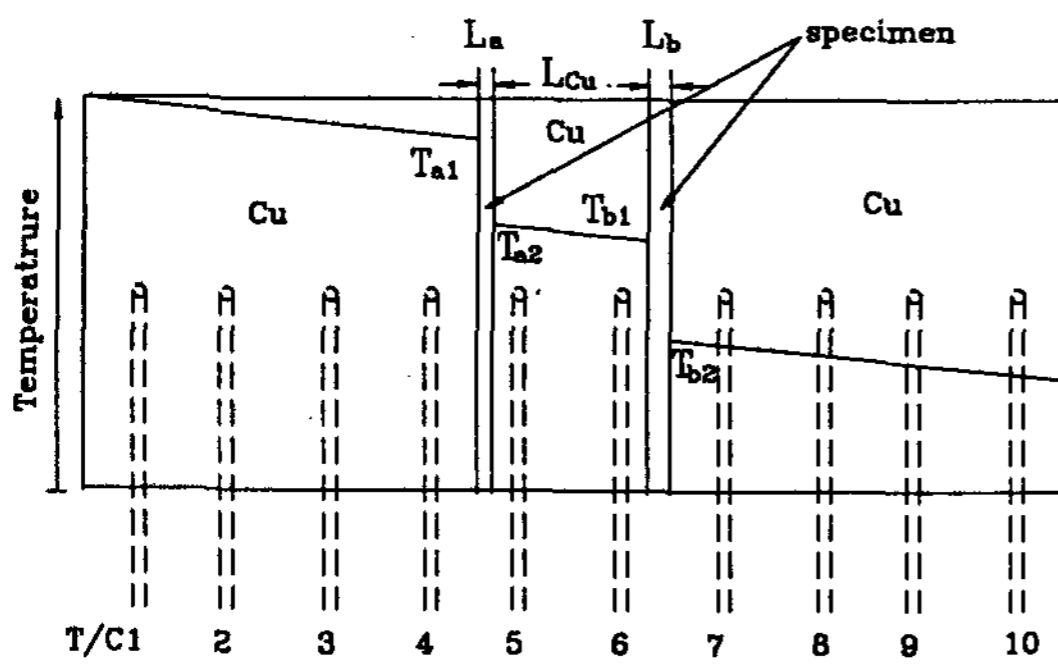


Fig. 1. Schematic of the thermal conductivity measurement apparatus.

### 2.2 주조실험

활석을 가공하여 50mm×50mm×50mm인 정육면체 모양의 한면에  $\phi 20$ mm의 구멍을 뚫어 활석 주형을 제작하였다. 이를 Table 1과 같은 조건으로 열처리한 후 AC8A 알루미늄 합금을 주

Table 1. Heat treating conditions of talc molds.

	annealing temp.	holding time	cooling condition	preheating temp. before casting
1	1000°C	3hours	cooling in glass felt	350°C
2	750°C	1hour	cooling in glass felt	350°C
3				350°C

조하여 냉각곡선을 그려 활석의 냉각능을 측정하였다.

### 2.3 열처리 실험

활석을 가공하여 크기가 15mm×10mm×40mm인 직육면체 모양으로 만들고 표면을 연마하여 활석 시편을 제작하였다. 열처리는 가열속도 160°C/h로 일정하게 가열하여 1000°C 및 1200°C로 유지한다. 그리고 유지시간을 0, 1, 2 및 3시간으로 변화시키며 열처리한 후 공랭, 서냉 또는 노냉을 하였다.

### 2.4 유동도 측정

Fig. 2와 같이 두께가 다른 여러 채널이 가공된 활석 주형을 제작하고 AC8A 알루미늄 합금을 주조하여 활석몰드의 유동도를 측정하였다. 이때 주입온도는 750°C였으며 활석 주형의 예열온도는 30°C와 330°C로 하였다.

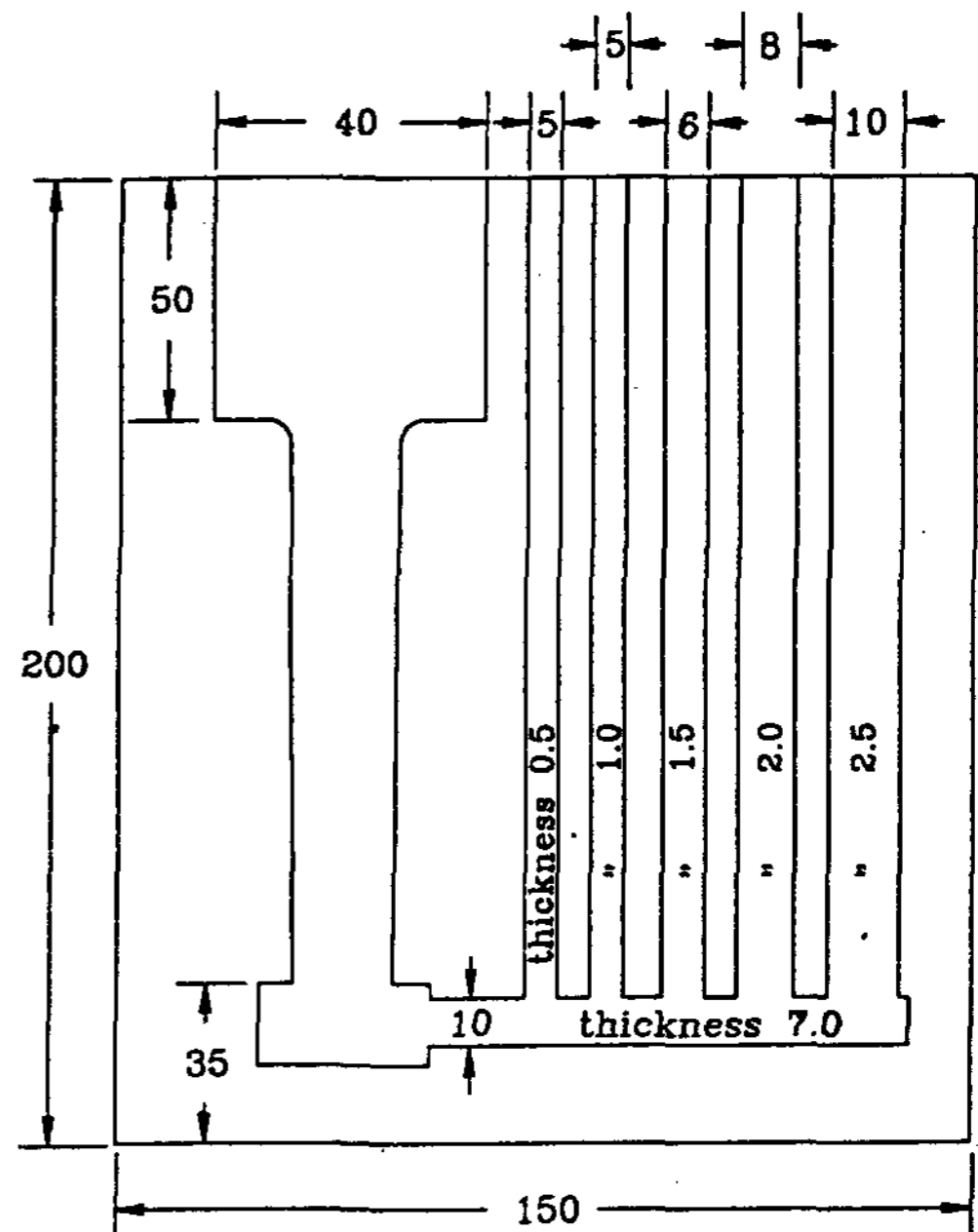


Fig. 2 Talc mold for fluidity measurement(unit : mm).

### 2.5 컴퓨터 계산

활석은 사형과 금형 사이의 중간 정도의 냉각능을 갖는 주형재료이다. 이를 반복하여 사용이

가능한 주형 인서트로 활용하여 평판 주물의 지향성 응고를 향상시킬 수 있는지를 알아보기 위하여 응고과정을 수치해석적으로 계산하였다. 계산에 사용한 주형은 사형과 금형이며, 인서트로 는 주철과 활석을 사용하였다. 사형과 금형에서 주물의 길이는 150mm이고 두께는 10mm로서 길이와 두께의 비가 15가 되게 하였다. 인서트는 주물의 아랫부분과 윗부분에 고정되게 되는데 두께는 10mm이며 길이는 최적의 길이를 선택하도록 하였다. 계산에 사용한 주물재료는 AC8A 알루미늄 합금으로서 액상온도는 560°C, 고상온도는 550°C로 하여 계산하였다. 그리고 주입온도는 750°C이며, 금형에서는 350°C의 예열온도에서 사형은 상온에서 주조한 것으로 하였다.

내부 수축결함이 발생할지의 여부는 각 노드가 한계고상률에 도달했을 때 그 위치에서 압탕쪽으로의 온도구배[1]를 조사하여 결정하였다. 이때 한계 고상률은 잔류액체가 결정들 사이로 흐르는데 저항이 커서 실질적으로 잔류액체의 이동이 불가능해지는 고상률을 의미하며 이것은 합금의 응고형태에 따라 다르다[2]. 엄밀한 의미에서 급탕이 불가능해지는 시점은 한 위치에서의 고상률만이 문제가 아니고 압탕에서 급탕이 되어야 할 곳까지 전체거리에 걸친 잔류액체의 흐름의 저항에서 오는 압력강하에 의하여 결정되고, 어느 위치에서 압탕쪽으로의 고상률 구배 또한 중요한 변수이다. 본 연구에서는 한계 고상률을 0.9로 하여 계산하였다. 잠열방출은 온도하강 정도와 비례한다고 가정하였기 때문에 온도구배는 고상률 구배와 일치한다. 내부 수축결함이 생기지 않는 한계 온도구배는 응고되는 형상 및 다른 여러 가지 인자에 의해 결정되는데 본 연구에서는 한계 온도구배를 구하지 않고 인서트를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 온도구배를 계산하여 정성적으로 비교하였다.

계산은 유한차분법중 양적해법을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 활석의 물성

활석(Talc)의 중요한 물리적, 화학적 물성은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Physicochemical properties of talc.

name of compound	Hydrated Magnesium silicate
composition	$Mg_6Si_6O_{20}(OH)_4$ $6MgO \cdot 8SiO_2 \cdot 2H_2O$
structure	monoclinic, layer
color	shallow white
hardness	Mohr's standard 1~2.5
density	2580~2820kg/m <sup>3</sup>
reactivity with acid	stable in acid
melting temperature	1470°C~1490°C
refractoriness	SK 17~18
the degree of swelling	stable in water or organic matter

#### 3.2 활석의 열적 성질

상온과 130°C 사이에서 측정된 활석의 열전도도는 2.3~2.5W/m°C로서 사형의 3.8배, 주철의 1/13이었다. 그리고 Y. S. Touloukian 등[3]이 상온에서 측정한 활석의 배열을 이용하여 계산한 활석의 열확산계수( $k/\rho C_p$ ) 및 냉각능( $k\rho C_p$ )은 다른 주형재료와 비교하여 Fig. 3 및 4에 나타내었다. 활석의 냉각능은 사형의 5배, 주철의 1/28에 해당하며 열확산계수는 사형의 2.8배, 주철의 1/5.8에 해당하였다.

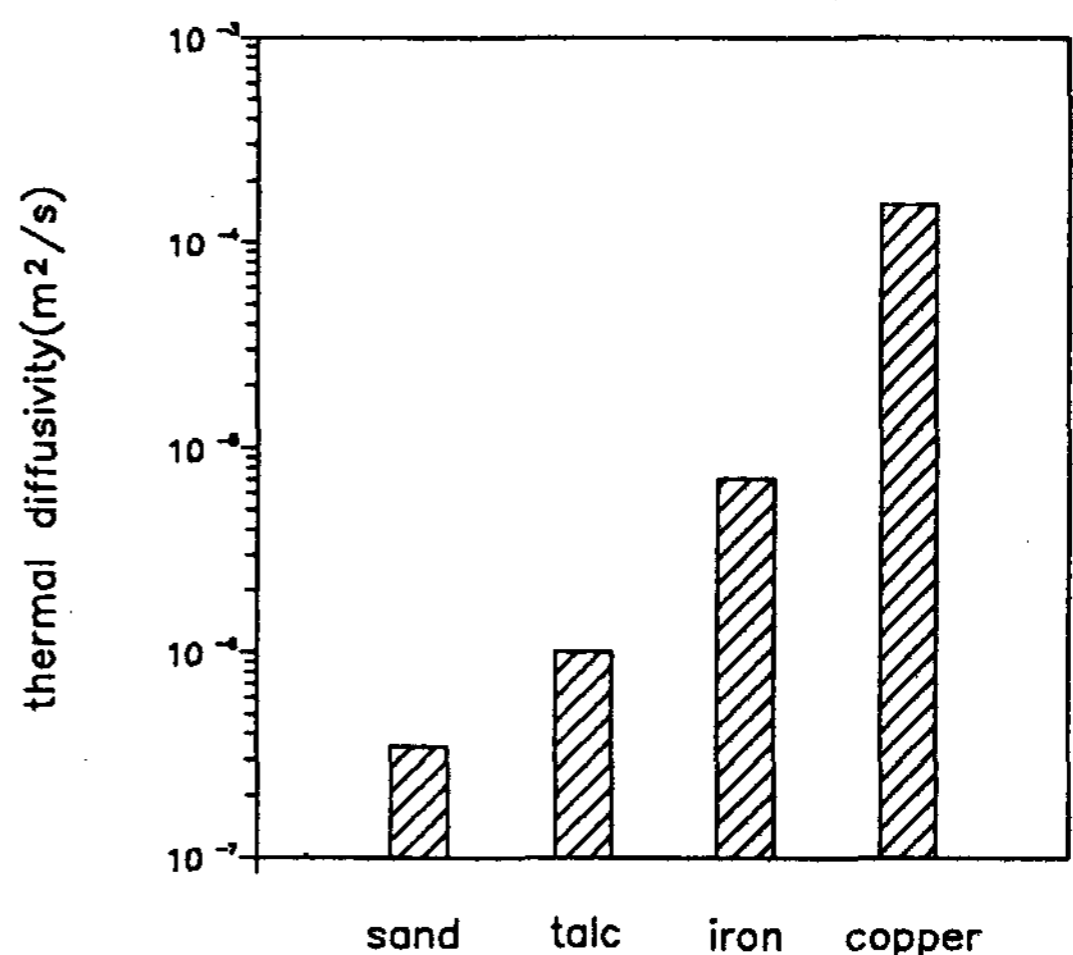


Fig. 3 Thermal diffusivity of talc compared with other mold materials.

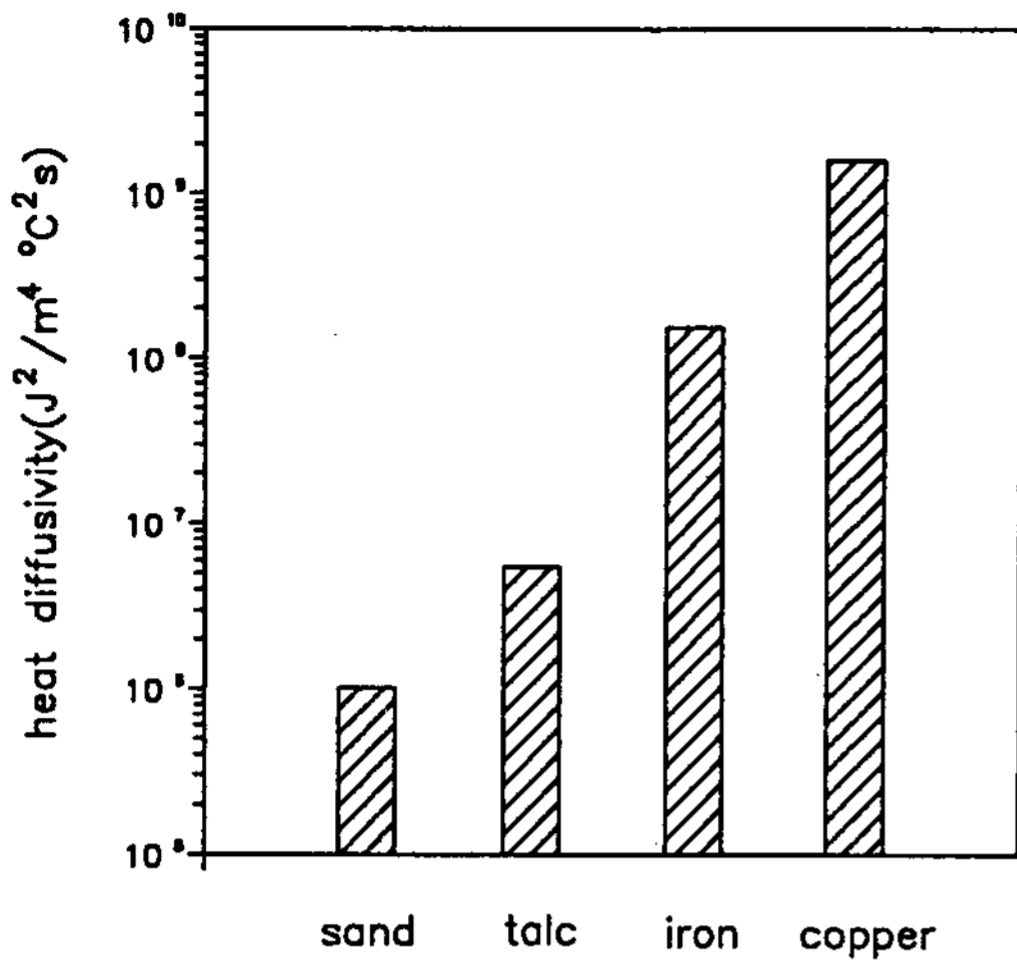


Fig. 4 Heat diffusivity of talc compared with other mold materials.

AC8A합금을 이용한 주조실험에서 측정된 Fig. 5의 냉각곡선에서 측정된 응고시간을 해석적 해에 대입하여 냉각능을 계산하였다. 해석적 해로는 실린더에 관한 식 (2)를 이용하였다[4].

$$\frac{V}{A} = \frac{T_M - T_0}{\rho_s \Delta H} \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{K_m \rho_m c_m} \sqrt{t_f} + \frac{2K_m t_f}{2r} \right) \quad (2)$$

$$K_m \rho_m c_m = \left( \frac{V}{A} = \frac{\rho_s \Delta H}{T_M - T_0} \sqrt{\frac{\pi}{4t_f}} - K_m \frac{\sqrt{\pi t_f}}{2r} \right) \quad (3)$$

- V : Volume of casting
- A : Contact area between casting and mold
- t<sub>f</sub> : Solidification time
- r : Radius of casting
- T<sub>m</sub> : Melting temperature of casting
- ρ<sub>s</sub> : Density of casting
- ΔH : Heat of fusion
- T<sub>0</sub> : Initial temperature of mold
- K<sub>m</sub> : Thermal conductivity of mold
- ρ<sub>m</sub> : Density of mold
- C<sub>m</sub> : Specific heat of mold

측정된 활석 주형의 냉각능은 열처리를 하지 않은 주형에 있어서는 6.6 × 10<sup>6</sup> J<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>°C<sup>2</sup>s으로 나타났다으며, 이는 측정된 열전도도를 이용하여 계산한 값인 5.6 × 10<sup>6</sup> J<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>°C<sup>2</sup>s와 거의 같았다. Fig. 5에서 보면 열처리를 한 주형일수록 응고시간이 길어지는 것을 볼 수 있는데 이는 열처리시에 활석의 탈수 및 변태에 의한 것이라 여겨진다. Fig. 5의 (b), (c)의 냉각곡선으로 계산한 열

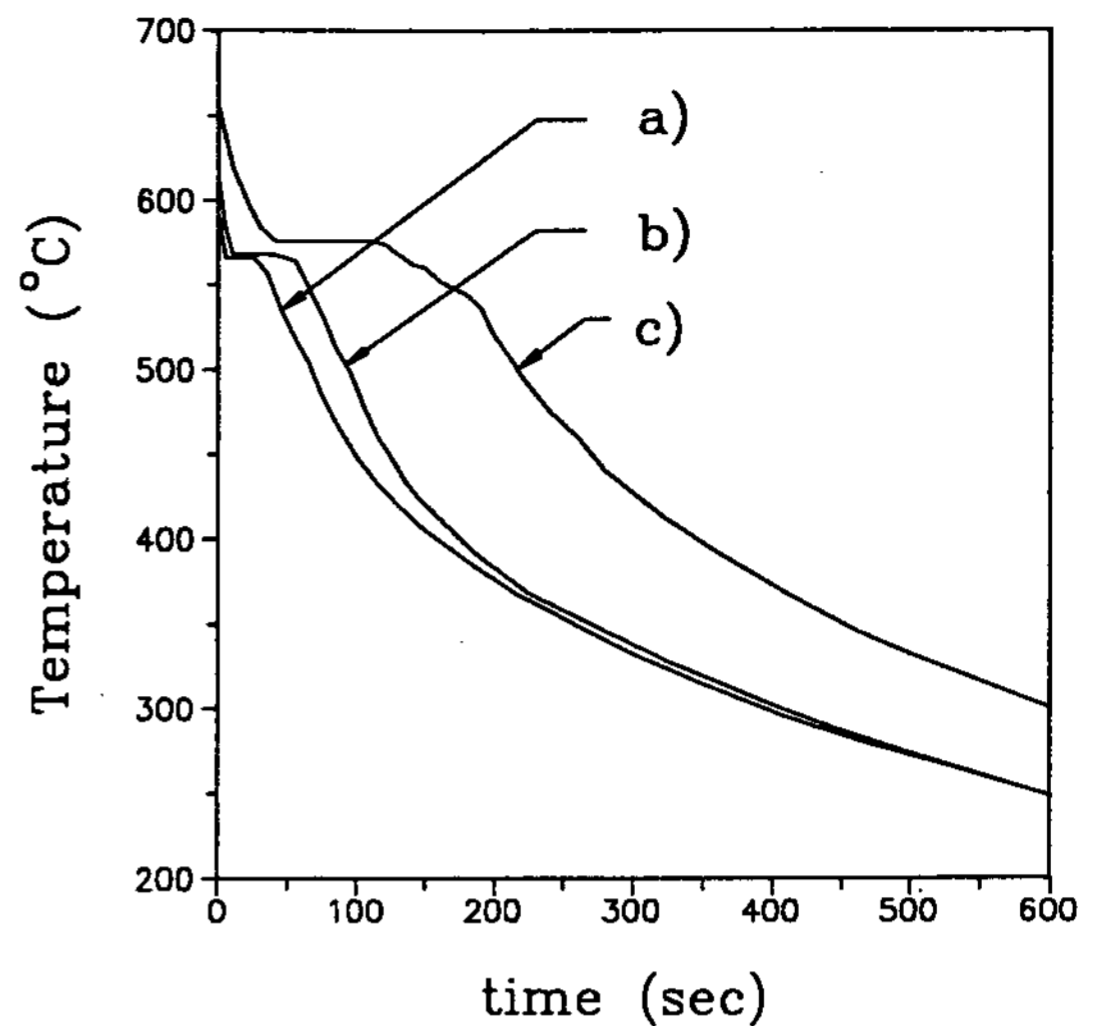


Fig. 5 Cooling curves of AC8A-alloy in talc molds with different heat treatments.

- (a) no heat treatment
- (b) 750°C for 1 hours
- (c) 1000°C for 3 hours

처리된 활석의 냉각능은 750°C-1hr인 경우 1.57 × 10<sup>6</sup> J<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>°C<sup>2</sup>s, 1000°C-3hr인 경우 0.26 × 10<sup>6</sup> J<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>°C<sup>2</sup>s이었다.

Table 3에서 활석의 열적 물성을 종합하여 나타내었다.

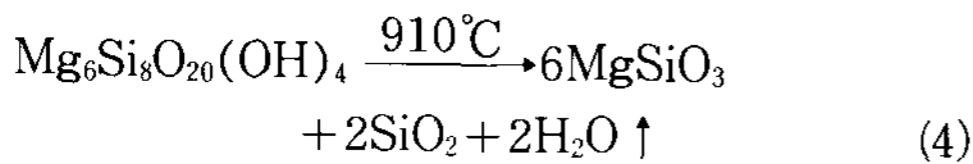
Table 3. Thermal properties of talc.

thermal conductivity	2.3~2.5W/m°C
specific heat	840J/kg°C
density	2580~2820kg/m <sup>3</sup>
thermal diffusivity	1.1 × 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
heat diffusivity	6.6 × 10 <sup>6</sup> J <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> °C <sup>2</sup> s
thermal expansion coefficient	1.25~1.92 × 10 <sup>-6</sup> m/m°C

### 3.3 활석의 탈수변태

Photo 1은 열처리 후의 활석 시편의 표면에 나타난 균열(crack)과 시편의 뒤틀림 정도를 나타내고 있다. 활석표면의 균열은 활석의 입계에서 나타나는 큰 균열과 표면 전체에 골고루 일정 방향으로 배열된 작은 균열이 있다. 열처리 후에

나타나는 균열의 발생원인[5]에는 냉각시 표면에 생기는 인장력에 의한 것과 탈수반응에 의한 부피감소가 있을 수 있다. 그러나 균열의 크기 및 분포정도가 냉각속도의 변화(공랭, 서냉 및 노냉)에 따라 변화가 거의 없고, 활석의 열팽창 계수가  $1.25 \sim 1.92 \times 10^{-6} \text{m/m}^\circ\text{C}$  정도로 작기 때문에 균열발생의 주원인은 탈수시 부피감소에 의한 것이라 여겨진다. 이 부피감소는  $910^\circ\text{C}$  정도 [6]에서 탈수반응이 일어나 식 (4)와 같이 enstatite와 cristobalite로 변태하면서 생긴다.



이때 탈수에 의해 질량변화와 부피변화를 동반하게 되는데 이론적으로 4.8%의 질량감소, 12.6%의 부피감소가 있었다. 본 연구에서 측정된 활

석의 질량감소는 4.5%~4.7%에 해당하였다. 이러한 부피감소에 의하여 열처리 도중에 표면에 균열이 발생하였을 것이다. 그리고 뒤틀림은 탈수반응 전후에 활석의 단사정계층상구조에서 enstatite의 사방정계 사슬 구조와 cristobalite의 정방정계로 바뀌면서 일어난 것으로 여겨진다. 또한 탈수반응시에 경도가 Mohr's 경도인 1의 활석에서 5인 enstatite로 바뀌므로 경도는 대단히 많이 증가하였다.

열처리 후에 표면에 발생하는 균열 때문에 활석 주형은 변태가 일어나는 온도인  $910^\circ\text{C}$  이상에서는 사용이 곤란하다. 결국 활석 주형은 알루미늄 합금 및 아연합금 등의 저용점 금속의 주조에 반복적으로 사용이 가능하다. 또한 탈수반응 전의 활석은 경도가 낮아 가공이 쉬우나 강도가 약하므로 가공시 또는 주형으로 사용할 때 파손되지 않도록 많은 주의가 필요하다.

### 3.4 활석 주형에서의 유동도

활석 주형에서 Al합금(AC8A)의 유동도를 측정한 결과 Photo 2와 같은 결과를 얻었다. 주형의 온도가  $330^\circ\text{C}$ 인 경우  $30^\circ\text{C}$  경우보다 유동도가 향상되었다. 활석주형의 유동도는 양호하여 관의 두께가 2.5mm의 경우 대부분의 관을 용탕이 채웠고, 두께 1mm인 경우 주형온도  $30^\circ\text{C}$  및  $330^\circ\text{C}$ 에서 각각 45.1cm, 78.3cm 흘러올라 갔다. 유동도는 주입금속의 종류, 응고형태, 주입온도와 주형의 종류, 온도, 채널 단면적의 크기, 도형제 그리고 주입속도 등 여러가지 요인에 따라 변

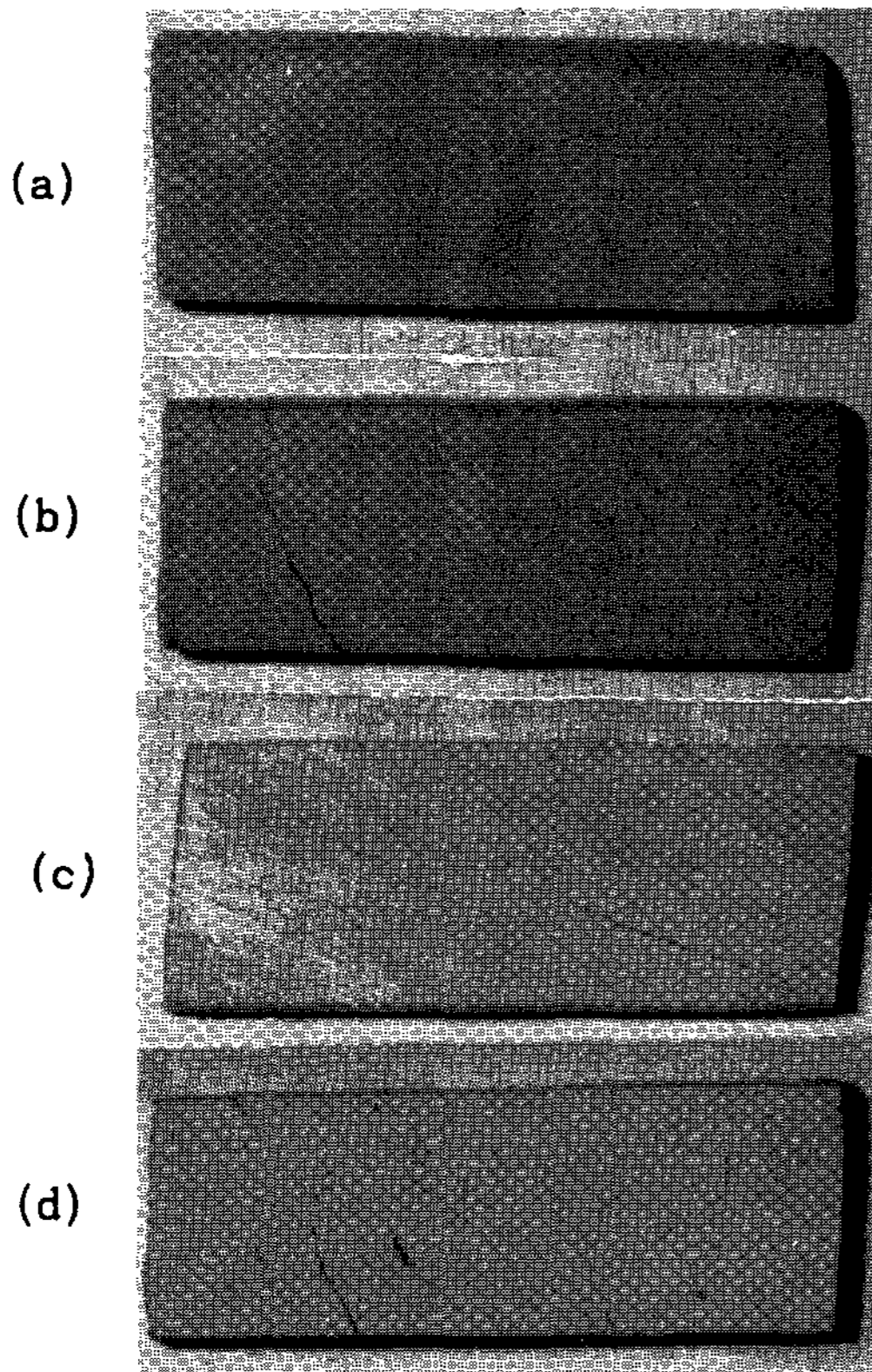
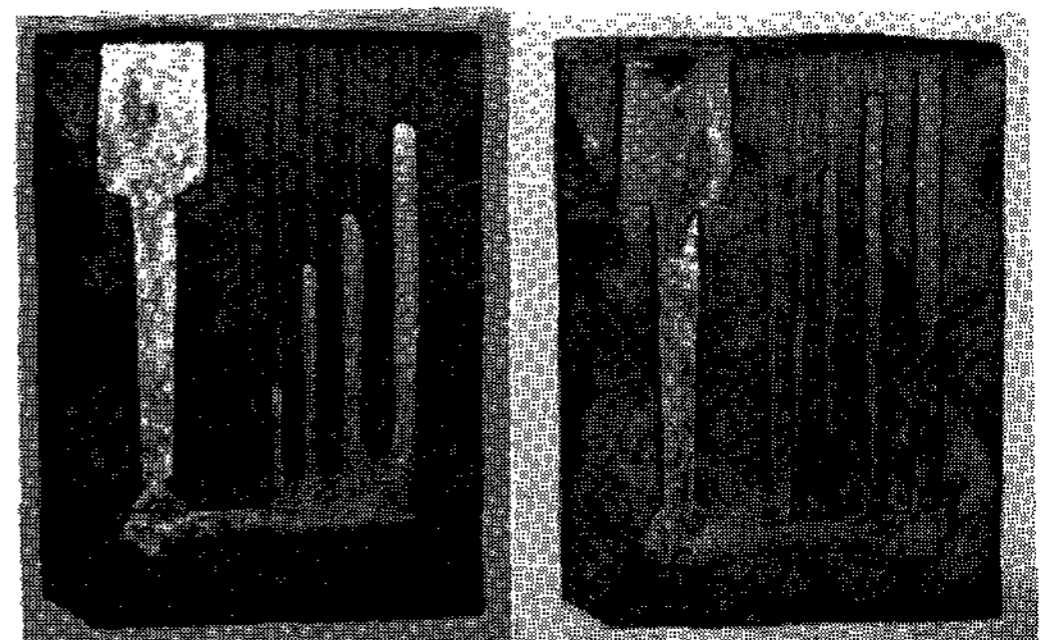


Photo 1. Cracks on the surface of talc after heat treatment.

(a) before heat treatment (b)  $1000^\circ\text{C}$  for 1 hours  
(c)  $1000^\circ\text{C}$  for 3 hours (d)  $1200^\circ\text{C}$  for 3 hours



(a) (b)

Photo 2. Fluidity measurement in talc mold with different initial mold temperature.

(a)  $30^\circ\text{C}$  (b)  $330^\circ\text{C}$



하지만 주형재료의 관점에서 본다면 주형재료의 열전도도, 비열 및 밀도(Table 3)가 결정적이다[7].

3.5 지향성응고 계산결과

Fig. 6은 사형내에 활석 인서트를 압탕으로부터 6cm 떨어진 곳에서부터 10cm까지 주철 인서트를 10cm에서 15cm까지 설치한 모양을 보여주고 있다. Fig. 7은 사형에서 인서트를 사용하지 않는 경우, 주철 인서트만 사용한 경우 그리고 인서트로서 주철과 활석을 함께 사용한 경우에 대하여 압탕로부터 거리에 따른 응고종료시 ( $f_s=0.9$ )의 온도구배를 나타내었다. 인서트가 없는 경우에 있어 온도구배는 주물의 대부분에 있어  $0^\circ\text{C}/\text{cm}$ 가 된다. 또한 내부 수축결함이 없

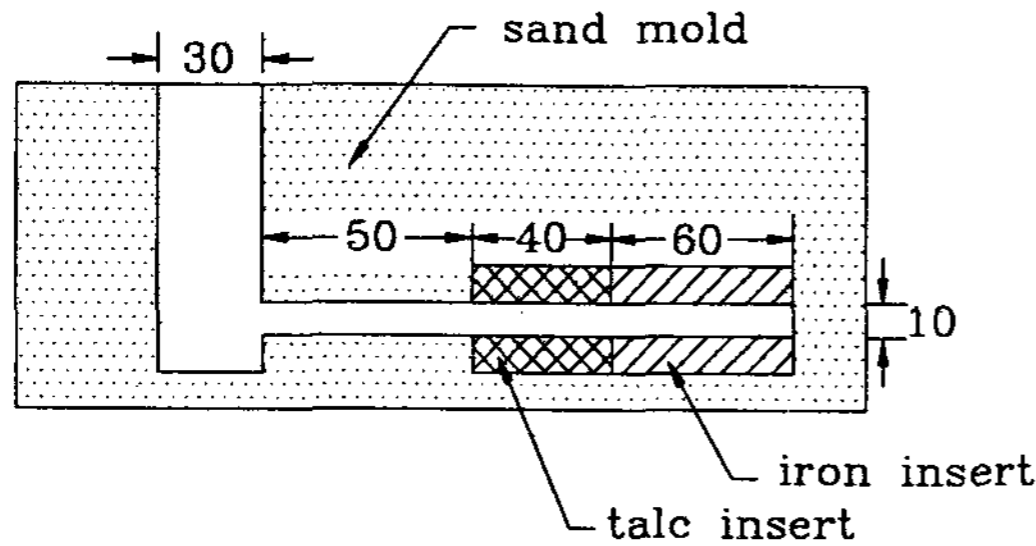


Fig. 6 Schematic of sand mold with talc and iron insert(unit : mm).

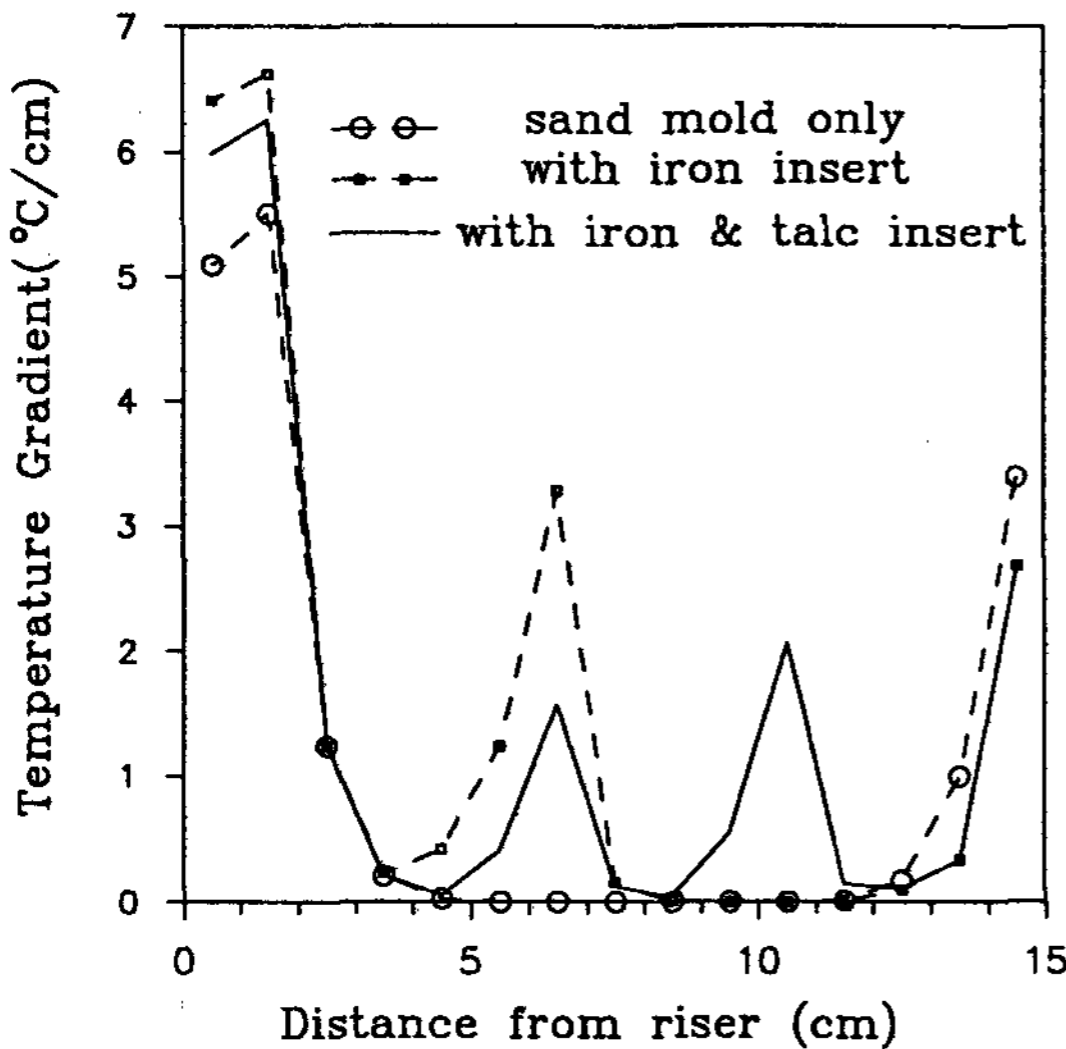


Fig. 7 Temperature gradient at solid fraction  $f_s=0.9$  in sand molds. Length to thickness ratio of the casting was 15.

는 부분이 압탕효과와 끝난 효과에 의해 대략 주물의 두께의 4.5배에서만 존재한다는 사실[1]에 비추어 보면 온도 구배가  $0^\circ\text{C}/\text{cm}$  정도가 되는 5cm와 11cm 사이 구간은 내부 수축결함이 존재할 것이다. 그러나 주철을 인서트로 사용한 경우에 있어서는 사형과 주철 인서트의 경계면인 6cm 근방에 온도구배가 큰 구간이 존재하여 내부 수축결함이 없는 부분이 전의 경우보다 늘어나지만 8~11cm 사이는 여전히 수축결함의 가능성이 존재한다. 이를 개선하기 위하여 Fig. 6과 같이 활석 인서트를 주철 인서트와 함께 사용한 결과 끝단 효과가 겹쳐서 전체적으로 온도구배를  $0^\circ\text{C}/\text{cm}$  이상으로 올려줄 수 있었다.

Fig. 8은 금형내에 활석 인서트를 넣은 모양이고 Fig. 9는 금형내에 인서트가 없을 때와 인서

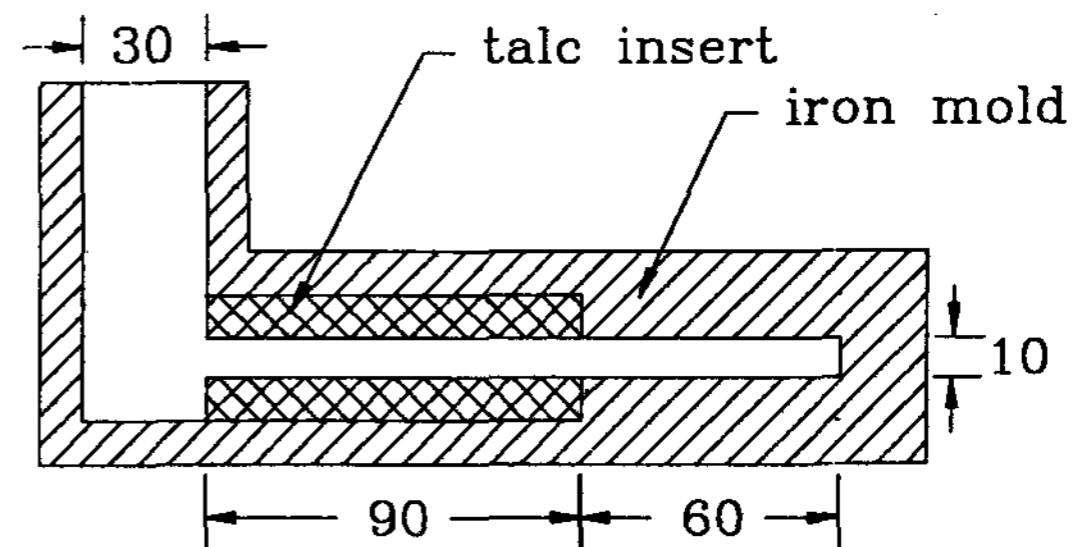


Fig. 8 Schematic of iron mold with talc insert(unit : mm).

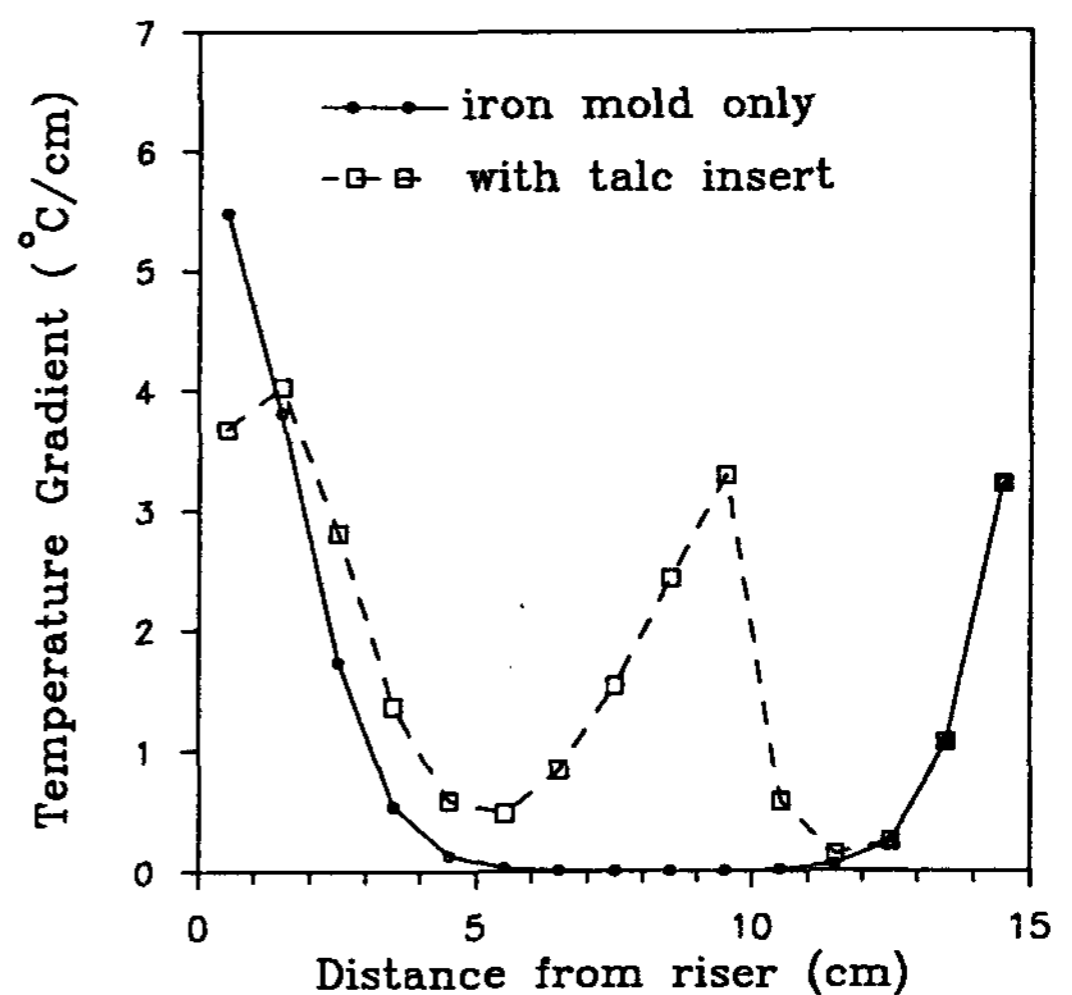


Fig. 9 Temperature Gradient at solid fraction  $f_s=0.9$  in iron molds.

트로서 활석을 사용할 때의 온도구배의 변화를 보여준다. 특히 이 경우에는 금형과 활석 사이의 면에서 활석의 서냉효과가 나타나는 것을 잘 보여주고 있다. 그리고 주물의 길이와 두께의 비가 15인 경우에 있어서 활석 인서트만을 사용해서 금형에서는 지향성 응고가 가능함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

덩어리 활석을 주형재료로서 사용할 수 있는 가능성을 문헌조사와 실험을 통한 연구를 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 활석의 열전도도는 상온과 130°C 사이에서 2.3~2.5W/m°C의 값으로 나타났다.
- 2) 활석의 열처리시 표면의 균열은 탈수반응시 부피감소에 의해 발생되며, 큰 균열은 입계에서만 생성되고, 작은 균열은 표면전체에 일정한 방향으로 골고루 분포하였다.
- 3) 활석의 냉각능은 상온에서  $5\sim 6 \times 10^6 \text{ J}^2/\text{m}^4 \text{ } ^\circ\text{C}^2\text{s}$  정도의 값을 가지며, 주철의 1/28, 사형의 5배의 크기를 지닌다. 그리고 탈수반응 후에는 냉각능이 감소한다.
- 4) 탈수반응이 910°C 정도에서 일어난 후의 활석은 경도는 크지만 표면 균열과 비틀림 때문에 주형으로 사용이 어렵고, 탈수 전의 활석은 강도가 약하여 가공은 용이하나 사용시 견고하지 못하다. 따라서 활석은 탈수반응 이전의 온도에서 주조 가능한 금속, 즉 알루미늄 합금이나 아

연 합금 등의 저융점 합금에 사용이 가능하며 충분한 빠기 구배를 주고 조심스럽게 취급하여야 한다.

- 5) 활석을 주철과 함께 사형 또는 금형내에서 지향성 응고를 위한 인서트로 사용하기에 적당하다.

#### 참 고 문 헌

- [1] R. A. Flinn : Fundamentals of Metal Casting, Addison-Wesley Publishing Co. INC, (1963) 50~63
- [2] K. Strauss : Applied Science in the Casting of Metals, Pergamon Press, (1970) 499~510
- [3] Y. S. Touloukian and T. Makita : Thermophysical Properties of Matter. Specific Heat. the TPRC Series, Plenum Press, (1980) 1502~1503
- [4] M. C. Flemings : Solidification Processing, McGraw-Hill, (1974) 6~12
- [5] W. D. Kingery, H. K. Bowen and D. R. Uhlmann : Introduction to Ceramics, A Wiley-Interscience Publication (1976) 816~845
- [6] R. E. Grim : Applied Clay Mineralogy, McGraw-Hill Book Co. INC, (1962) 93
- [7] S. Engler and Z. H. Lee : Giesserei-Forschung, 30 (1978) 107