

기술자료

# 소실모형주조법의 주형 열흡수능력에 미치는 도형막의 영향

경안정리  
頃安貞利

帝京大學理工學部  
製鐵製鋼工學科

## Effect of Coat on Cooling Capacity of Mold in Evaporative Pattern Casting Process

Sadatoshi Koroyasu

Teikyo University, Utsunomiya, Tochigi, Japan

### 1. 서 언

소실모형주조법에서는 용탕이 발포모형의 열분해로 생성된 공동으로 진입하기 때문에 탕류속도가 일반 공동주형과 비교하여 매우 느려진다. 그 결과, 용탕 선단부분에서는 주형으로의 방열 시간이 길게 되어 용탕온도저하가 일어난다. 이 때문에 주형의 열흡수 능력이나 도형의 전열저항등의 열적 특성을 파악하는 것이 중요하다. 종래, 건조충전층이나 도형막의 열전도율등과 주형의 열흡수에 관한 연구보고는 비교적 적다. 본 연구에서는 건조충전층의 열전도율을 측정하고 주형의 열흡수능력에 관해서 이론적 및 실험적으로 검토하였다. 또한 열전도율이 다른 2종류의 도형제에 대하여 용탕에서부터 주형으로의 열흡수속도에 관해서 이론적으로 검토하였다. 더불어 일부의 조건에서는 A319합금에 해당하는 알루미늄합금 용탕을 사용해 실험적으로 실증하였다.

### 2. 실험 방법

실험에 사용된 충전물은 6호규사, 지르콘사 및 강립(쇼트)이다. 중요한 물성값을 Table 1에 나타내었다. 쇼트는 Fe-0.87mass%C-0.82mass%Si의 조성이다. 또한 입형은 대부분 구형이고 거의 단일 입경의 입도분포를 가진다. 충전층의 겉보기 밀도는 규사에 비교하여 지르콘사의 경우는 약 1.8배 크고, 쇼트의 경우는 약 2.8배 크다.

Table 2에 열전도율이 다른 2종류의 도형제를 나타내었다. 시판의 소실모형주조용이다. 하나는 성분으로 마이카를 많이 포함하고 다수의 공공을 가지는 도형막을 형성하는 알루미늄합금주물용의 단열성도형제(High insulating)이다. 또 다른 하나는 실리카베이스로 주철주물등에 사용되는 일반용 도형제(Normal insulating)이다. 이들 도형제를 도포할 때 도형막의 열전도율의 값은 단열성도형제가 작고, 일반용도형제의 약 1/3의 크기이다[1].

Table 1. Physical properties of packed bed

	Particle size (mm)	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	Void	True density (kg/m <sup>3</sup> )
Silica sand	0.15	1.64 × 10 <sup>3</sup>	0.377	2.63 × 10 <sup>3</sup>
Zircon sand	0.10	2.96 × 10 <sup>3</sup>	0.365	4.66 × 10 <sup>3</sup>
Steel Shot	0.59	4.60 × 10 <sup>3</sup>	0.384	7.46 × 10 <sup>3</sup>

Table 2. Two kinds of test coats with different thermal conductivity

	Main components	Thermal conductivity (W/mK)
High insulating	Alumina, Silica, Mica	0.14
Normal insulating	Silica	0.49

Fig. 1은 충전층의 열전도율 측정장치 본체의 개략도를 나타낸 것이다. 장치본체는 두께 5 mm, 외경 80 mm, 높이 590 mm의 내부원통과 동일한 두께 및 높이의 내경 155 mm의 외부원통으로 구성되는 동재료로 제작된 이중원통으로, 내부원통의 내측에는 히터가 설치되어 있다. 이중원통의 상하면은 두께 약 100 mm의 단열재로 덮여져 있고, 상하면에서의 열이동이 최대한 작도록 하였다. 또한 내부원통 외측과 외부원통 내측에는 12개 위치에 지름 0.32 mm의 K-열전대를 설치하였다. 충전물은 이중원통 사이에 충전되고 충전층의 겉보기 열전도율은 히터에 약 600 W의 출력으로 통전을 하고 정상상태에 있는 내부원통 외측과 외부원통 내측의 온도차를 측정하는 것에 의하여 측정하였다.

Fig. 2는 실험에 사용된 주입장치의 개략을 나타낸 것이다. 주형상자는 내경 약 200 mm, 깊이 300 mm의 원통형의 주철상자로 만들어진 철제용기이다. 사용한 EPS모형은 발포배율이 60배, 크기 200×70×10 mm의 평판상의 모양이다. 이 2매를 사용하여 한편에는 단열성도형제를 또 다른 한쪽에는 일반용도형제를 도포하였다. 이 2매의 EPS모형에 대하여 주입조건을

"본 기술자료는 2005년도 하계기술강연대회에서 발표된 내용임"

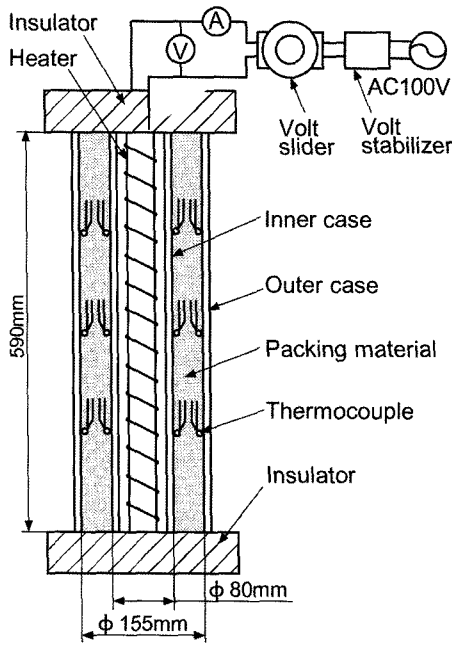


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus for thermal conductivity of packing bed.

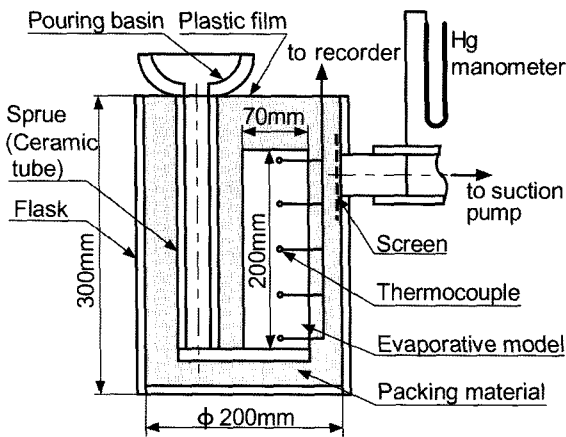


Fig. 2. Schematic diagram of casting apparatus.

동일하게 하기 위하여 이들을 1개의 주형상자 안에 설치하였다. 도형제로서는 Table 2에 나타난 2종류를 사용하였고 도형제의 도포는 칫적식으로 하였고, 도형막 두께는 약 1mm이었다.

주물의 응고냉각중에 있는 냉각곡선을 얻기 위하여 지름 0.32mm K-열전대의 접점부가 각각의 EPS모형 중앙 1곳에 설치되도록 하였다. 주물재료는 A319상당의 알루미늄합금이고, 주입온도는 973K이었다. 용탕의 충전이 보다 단시간에 되도록 주입중 및 응고진행중에 감압도-13kPa로 주형상자 내부를 감압 흡입하였다.

탕류 방향으로의 용탕 선단온도의 변화를 얻기 위하여 Fig. 2에 나타난 것처럼 K-열전대를 EPS모형의 용탕 진입구에서부터 10, 55, 100, 145, 190mm 위치 5곳에 설치하였다. 주물재료는 A319상당의 알루미늄합금이었다고 주입온도는 약 1073K이었다. 또한 주입중 및 응고진행중의 주형상자 내부의 감압조건

으로서는 무감압에서 주입한 것과 감압도-13kPa로 감압흡입한 경우의 2종류로 설정하였다. 충전사로서는 6호규사 1종류만을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Table 3은 규사, 지르콘사 및 쇼트 충전층의 열전도율  $\lambda$ 의 실측값과 이들의 값에서부터 산출한 열확산율의 2승값  $b^2 (= \lambda c \rho)$ 의 비교를 나타낸 것이고, 이때 쇼트 하나의 비열에 관해서는 공식강(0.8%C, 573 K)의 값 570 J/(kgK)을 사용하였고, 규사 및 지르콘사에 대해서는 573 K에 있어서 85 J/(kgK) 및 610 J/(kgK)을 사용하였다. 또  $\rho$ 의 값은 실측값[2]을 사용하였다. 규사충전의 경우와 비교하여 지르콘사 및 쇼트충전의 경우는  $b^2$ 의 값은 약 2.3배이고, 응고시간이 약 43%로 단축한 것으로 추정된다.

여기서, Table 3의 열전도율 값을 사용하여 주물의 응고냉각 중에 있는 충전층으로의 열이동을 고찰하였다. 여기서는 Fig. 3에서처럼 온도  $T_1$ 의 평판상 주물의 표면에서부터 두께  $\delta$ 의 도형막을 통해 초기온도  $T_0$ 의 반무한두께의 충전층으로 일차원 전도전열로 고려하였다. Figure 중의  $x$ 는 주물표면에서부터의 거리를 나타낸다. 이 경우 기초식은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{Coat: } \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}$$

$$\text{Mold: } \rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2}$$

여기서  $t$ 는 시간,  $T$ 는 온도,  $\lambda, c, \rho$ 는 각각 겔보기 열전도율, 비열, 겔보기 밀도를 나타내고 첨자 2와 3은 각각 도형막

Table 3. Experimental results of thermal conductivity  $\lambda$  and 2nd power of  $b^2 (= \lambda c \rho)$

	Thermal conductivity $\lambda$ (W/mk)	ratio of $\lambda$	$b^2$	ratio of $b^2$
Silica sand	0.44	1.0	$0.62 \times 10^6$	1.0
Zircon sand	0.50	1.1	$1.44 \times 10^6$	2.3
Steel Shot	0.55	1.2	$1.44 \times 10^6$	2.3

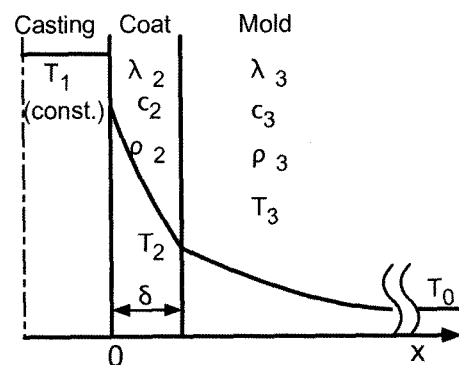


Fig. 3. Heat conduction model and coordinate system.

내 및 충전층에서의 값을 나타낸다. 또 간단하게 하기 위하여 주물표면온도는  $T_1$ 의 일정한 값으로 하였다. 이 경우 경계조건으로서는 각각 다음의 식이 적용된다.

$$\text{Casting - Coat} : T_2 = T_1 - \text{const}$$

$$\text{Coat - Mold} : \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}, T_2 = T_3$$

이 식은 해석적인 방법으로 해를 구할 수 있다.

Fig. 4는 충전물로서 규사 및 쇼트를 사용하고, 도형제로서는 단열성도형제 및 일반도형제를 사용한 경우의 계산결과 일례를 나타낸 것으로 주물표면에 있는 열유속  $q$ 의 값을 시간에 대하여 나타낸 것이다. 주물표면온도는 Al+Si공정응고온도 840 K이다. 약 10s이내의 짧은 시간 영역에서  $q$ 의 값은 단열성도형제를 사용한 경우가 1/2 크기이고, 도형막의 열전도율의 영향은 비교적 크지만, 충전물 종류의 영향은 적었다. 이것은 주물에서부터 주형으로 향해 온도분포도달이 도형막내에 있고 주형중으로 도달하지 않기 때문이다. 또 시간이 100 s 부근의 비교적 긴 시간영역에서는 도형제의 영향은 전혀 없고, 충전물의 영향만으로 된다는 것을 알 수 있다. 여기서 이 시간 영역에서는 주물 표면에서부터 도형중으로의 온도분포 도달거리와 비교하여 도형막 두께가 충분히 얇기 때문이다. 그러므로  $q$ 의 값은 주입직후 탕류의 기간에는 도형막에 의해 억제되지만, 결정이 형성되는 시간영역에서는 도형막의 열유속에 미치는 영향은 적고, 대부분 주형의 열흡수능력에만 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 규사 및 쇼트를 충전한 경우 평판상의 알루미늄합금 주물의 냉각곡선의 실측값을 나타낸 것으로, 도형제로서 단열성도형제를 사용한 경우와 일반도형제를 사용한 경우를 나타낸다. Figure 중의 O는 본 연구에서 정의한 응고완료점을 나타내고, Al+Si공정응고정지 온도에서부터 10 K 낮아진 시점에서 정의된 것이다. 규사를 충전한 경우의 주물의 응고시간은 일반용 도형제를 사용한 경우보다도 단열성도형제를 사용한 쪽이 약 20% 길어진다. 단열성도형막의 열전도율이 일반용도형

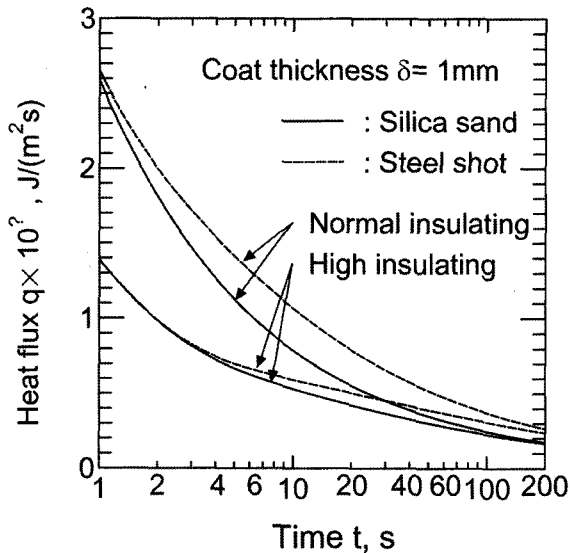


Fig. 4. Effects of coat and packing material on heat flux at casting surface

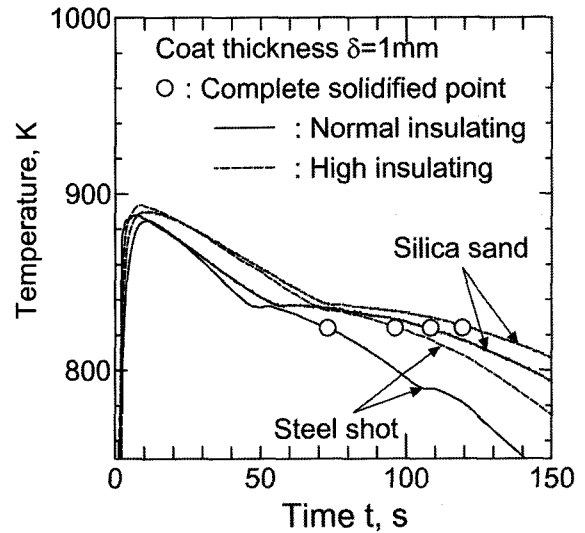


Fig. 5. Effects of coat and packing material on cooling curve of aluminum alloy.

막의 약 1/3의 크기인 것을 고려하면 단열성도형막의 응고시간에 미치는 효과는 크지 않은 것으로 된다.

이것은 본 실험조건의 두께가 10 mm 알루미늄합금주물이 응고하는 시간영역에 있어서는 주형내 온도분포가 주물표면에서부터 수십 mm에 달하고, 이 거리와 비교하여 도형막 두께가 매우 작기 때문에 Fig. 4에 나타낸 계산결과와 정성적으로 일치한다.

다음으로 쇼트를 충전한 경우는 규사충전의 경우와 비교하여 응고시간은 짧아진다. 또 규사충전의 경우와 동일하게 일반용도형제를 사용한 경우보다도 단열성도형제를 사용한 경우가 응고시간이 길어지고 그 증가는 약 30%이다. 이 값은 규사충전의 경우보다도 약간 크다.

여기서, Fig. 6에 나타낸 것처럼 하주입 방향에서 반무한 평판상의 EPS모형중에 용탕이 속도  $u$ 로 충전하는 경우를 고찰한다. Figure 중의  $d/2$ 는 모형의 반두께,  $\delta$ 는 도형막 두께,  $L$ 은 주형의 두께를 나타낸다. 이 경우 용탕에서 도형막을 통하여 주형중으로의 열전도율에 대해서, 용탕중, 도형막중 및 주형중에 있는 기초식은 다음 식으로 주어진다.

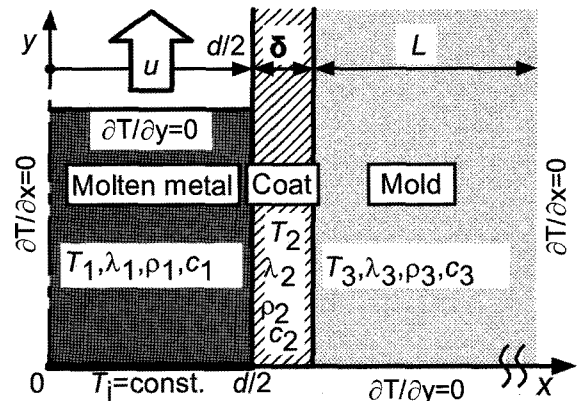


Fig. 6. Heat conduction model and coordinate system during Mold Filling.

$$\text{Molten metal: } \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right)$$

$$\text{Coat: } \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right)$$

$$\text{Mold: } \rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right)$$

이제 탕류 유동중의 현상만을 고려하여 응고에 의한 잠열은 고려하지 않았다. 이 경우의 경계조건으로서는 다음의 식이 적용될 수 있다.

$$t > 0, x = 2/d; \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = h(T_2 - T_1)$$

$$t > 0, x = 2/d + \delta; \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}, T_2 = T_3$$

Fig. 7은 두께 10 mm의 반무한평판의 EPS모형에 대해서 탕류속도  $u = 10 \text{ mm/s}$ 로 용탕선단이 용탕진입구에서부터 50 mm 위치에 도달했을 때의 용탕내, 도형막내 및 주형내 온도분포의 계산결과를 나타낸 것이다. (a)가 일반용도형제, (b)가 단열성도형제를 사용한 경우의 결과이다. 용탕진입구에서의 용탕온도는 탕구, 탕도에서의 온도저하를 고려하여 실험조건 주입온도보다도 낮은 973 K이었다. 용탕내 온도는 중심부( $x=0$ )에서 도형막으로 향해 낮아지고, 용탕진입구( $y=0$ )에서부터 용탕선단으로 향하여 저하한다. 단열성도형막의 경우가 도형막, 주형내 400 K의 등온도선이 용탕표면에서보다 가까운 위치에 있고 이것과 동시에 용탕내 온도저하도 적은 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 일반용도형제를 사용한 경우의 냉각곡선의 실측값을 나타낸 것으로, 0~15 s의 주입개시에서부터 짧은 시간영역에서의 범위이다. Figure 중의 파라미터  $y$ 는 EPS모형 하단의 용탕진입구에서부터 거리를 나타내고, 열전대의 설치 위치이다.  $y$ 의 값이 크게 됨에 따라서, 즉, 탕류방향으로 향하여 온도의 첫위

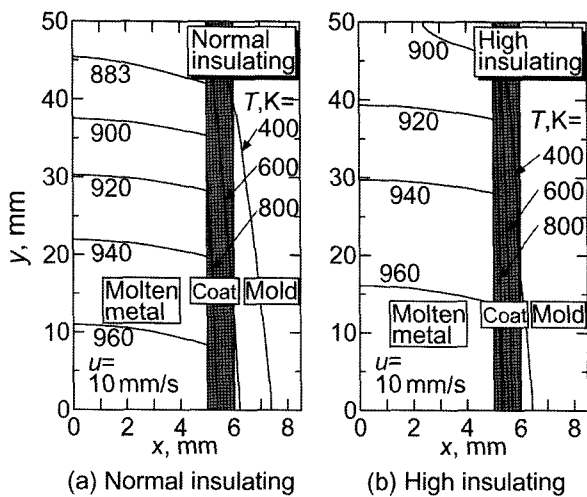


Fig. 7. Effect of high insulating coat on temperature profile during mold filling.

치가 후방으로 편재하여 위치하고, 첫위치 후의 최고도달온도도 서서히 낮아진다. 또,  $y$ 의 값이 145 mm와 190 mm에서는 온도상승 후 거의 일정한 온도를 나타내지만, 여기서는 이 위치에 용탕이 도달했을 때 액상선온도까지 저하하기 때문인 것으로 사료된다. 또,  $y$ 의 값이 10 mm 위치와 190 mm 위치에서의 온도상승 개시의 시간차, 즉, 각각의 위치에 용탕이 도달했을 때, 그 차에서부터 선단속도의 평균값을 구했다. 이 경우의 용탕선단속도는 27 mm/s이었다. 더욱이 그 위치에서 온도상승 후의 최고도달온도를 본 연구에서는 그 위치에 용탕이 도달한 때의 용탕선단온도로 정의하였다.

Fig. 9는 단열성도형제를 사용한 경우의 냉각곡선의 실측값을 나타낸다.  $y$ 의 값이 190 mm 위치에 있어서도 첫위치 후의 최고도달온도가 액상선온도보다도 약간 높고, Fig. 8의 일반도형제를 사용한 경우보다도 높다. 또 이 경우 선단속도는 23 mm/

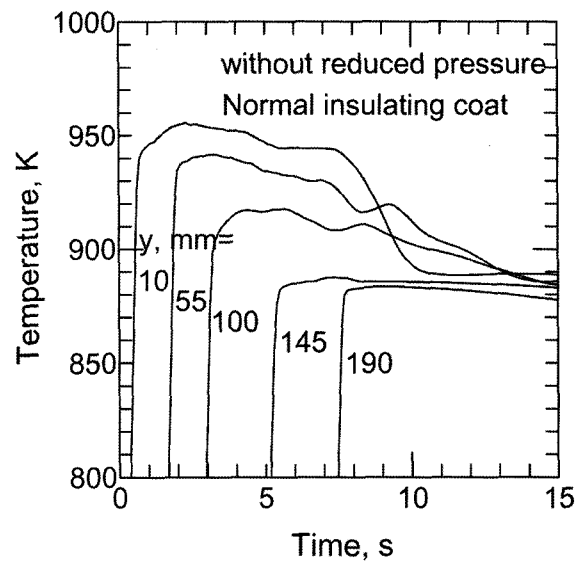


Fig. 8. Cooling curve during mold filling for normal insulating coat.

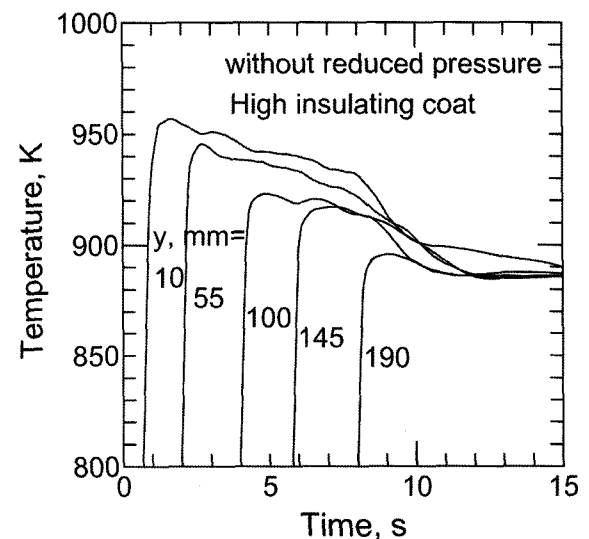


Fig. 9. Cooling curve during mold filling for high insulating coat.

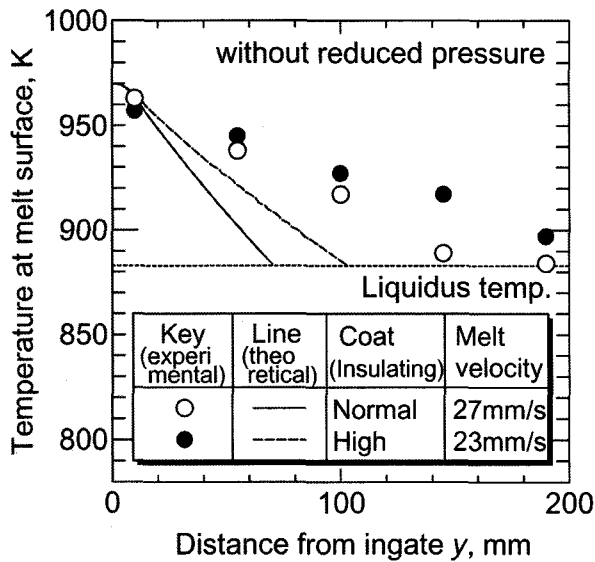


Fig. 10. Effect of high insulating coat on melt surface temperature.

s로서, 일반용도형제의 경우와 비교하여 약간 적다. 이것은 단열성도형막의 통기도가 적기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 10은 Fig. 8, 9에 나타난 냉각곡선의 실측결과에서부터 선단온도를 구하고, 이것을 용탕선단 도달거리y에 대하여 나타낸 것이다. Figure 중의 ○ 및 ●는, 각각 일반용도형제 및 단열성도형제를 사용한 경우의 용탕선단 온도의 실측값이다. Figure 중의 실선 및 파선은 수치해석 결과를 나타낸 것이고, 선단속도의 실측값을 사용하여, y=10 mm에 있는 용탕선단온도의 계산값과 실측값이 거의 동일한 값으로 되도록 용탕진입구에서의 온도를 970 K로 하여 계산한 것이다. 도형막 두께 실측값은 양 도형제가 거의 1 mm로 동일하지만, 도형막의 통기도가 다르기 때문에 선단속도도 도형제에 따라 다르고, 일반도형막이 약간 큰 값이다. 일반도형제의 경우, 용탕진입구에서부터 145 mm 이상에서 선단온도의 변화가 없는 것은 약

855 K에서 액상선온도에 도달하기 때문인 것으로 사료된다. 여기에 대해서 단열성도형제를 사용한 경우는 용탕진입구에서부터 190 mm 위치에 있어서도 액상선온도 이상이다. 이 결과에서부터 단열성도형제를 사용한 경우가 액상선온도까지 저하하는 데 요구되는 용탕의 유동길이가 크게 되고, 탕회불량의 가능성이 적은 것이다. 단열성도형제의 경우 선단온도 저하는 일반용도형제의 경우의 약 1/2의 값으로 이 비례는 Fig. 7에 나타낸 해석결과와 일치한다.

또 용탕진입구에서부터 선단온도저하의 계산값은 실험결과와 비교하여 매우 큰 것을 알 수 있다. 이것은 용탕이 공동내로 진입했을 때의 유동이 층류적인 것은 아니고 난류를 수반한 복잡한 흐름으로 있는 것이 원인의 하나인 것으로 판단되며, 이러한 조건하에서는 용탕흐름이 선단을 내부의 온도 용탕으로 갱신되면서 진입하는 유동이고, 용탕내에서의 용탕유동 방향의 전열이 촉진되는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 언

- (1) 규사충전의 경우와 비교하여, 지르콘사 및 쇼트충전의 경우의 충전층의 열전도율의 값은 전혀 변화가 없지만, 주형의 열흡수능력은 약2배 크다.
- (2) 응고시간영역에서의 주형으로의 열흡수량에 미치는 도형막의 단열성의 영향은 주형의 열흡수능력이 큰 것이 약간 크지만, 그 결과는 그다지 크지 않다.
- (3) 탕류기간의 짧은 시간영역에서는 도형막의 단열성의 영향은 비교적 크고, 용탕선단온도 저하 저감의 효과가 있다.

#### 참 고 문 헌

[1] S. Koroyasu and M. Matsuda: J. JFS, **76** (2004) 679.  
 [2] S. Koroyasu and M. Matsuda: J. JFS, **58** (1996) 949.