

|||||
 論 文
 |||||

용탕단조에 있어서의 열전달 해석

유승목*, 한요섭**, 이호인**, 홍준표*

Computer Analysis of Heat Transfer in Squeeze Casting

Seung-Mok Yoo*, Yo-Sub Han**, Ho-In Lee** and Chun-Pyo Hong*

Abstract

A basic heat flow model has been developed to estimate the heat transfer coefficient at the casting/mold interface during squeeze casting. Based on the measured temperature profiles in squeeze casting of Al-4.5%Si alloy, heat transfer coefficients which vary with time were calculated by numerical method. The influences of the load and the amount of fraction solid on the heat transfer coefficient have also been studied. Using the calculated heat transfer coefficient two dimensional solidification analysis in the the squeeze casting process was carried out by the finite difference method, and the results were in good agreement with the experiments. It may be concluded that heat flow analysis in the squeeze casting process with accurate heat transfer coefficient at the casting/mold interface is important for a proper design of cooling in die and finally for improving productivity and die life as well.

1. 서 론

금형주조, 다이캐스팅 및 용탕단조(squeeze casting)에 있어서 주물 및 금형내의 응고 및 냉각과정을 정량적으로 해석하고 제어하는 것은 제품의 품질향상 뿐만 아니라, 금형의 수명연장을 비롯하여 생산성을 향상시키는데 있어서 아주 중요하다.^{1)~4)} 컴퓨터에 의한 응고해석은 이러한 응고과정을 정량적으로 파악하는데 큰 역할을 하고 있다.

금형내에서의 응고현상은 특히 금형과 주물의 계면에서의 열전달에 의하여 크게 지배된다. 응고 수축에 따른 air gap의 형성,^{5),6)} 금형의 표면상태에,^{6),7)} 도형재 사용여부에 따른 금형/주물 계면에서의 열전달계수의 변화⁷⁾는, 주물의 냉각 및 응고 과정, 금형내의 온도분포 및 변화에 큰 영향을 주게된다. 또한 계면의 열전달 상황은 응고가 진행됨에 따라 변화한다고 알려져 있다. 특히 용탕단조의

경우는 압력이 가해짐에 따라 금형/주물 계면에서의 열전달 계수의 급격한변화를 수반하므로 주입 후 열전달 계수가 시간에 따라 어떻게 변화하는지 정확하게 파악하는 것은 정량적인 응고해석에 있어서 필수적인 요건이 된다.

최근 금형 내에서의 금속의 응고현상에 대한 연구에 유한차분법^{8)~11)}이나 유한요소법,^{3),12)} 경계요소법^{4),13)} 등의 수치 해석적인 방법등이 많이 적용되고 있다. 그러나 금형과 주물간의 열전달에 관한 연구 보고는 그다지 많이 이루어 지지 않고있다. Ho⁶⁾ 등은 중력주조시 중력의 영향을 고려한 알루미늄과 구리 냉금간의 열전달 계수를 계산하였고, Sugiyama⁷⁾ 등도 몇몇 종류의 금형/주물에 있어서의 열전달 계수를 구하여 보고하였다. 용탕단조에 있어서는 Nishida¹⁴⁾ 등이 금형과 주물 계면에서의 열전달 계수에 대한 압력의 영향을 연구 보고하였으며, Ramati¹⁵⁾ 등도 실험결과를 바탕으로 가압시의 열전달 계수값을 계산하였다. 본연구에서는 용

* 연세대학교 공과대학 금속공학과 (Dept. of Metallurgical Engr., Yonsei University)

** 한국과학기술원 (Korea Institute of Science and Technology)

탕단조시의 주물의 응고과정 및 금형의 냉각을 정량적으로 해석하는데 있어서 가장 중요한 금형/주물 계면에서의 열전달 계수를 구하기 위하여 기초적인 열전달 해석을 하였으며, Al-4.5%Si 합금에 대한 용탕단조 실험결과와 비교검토했다. 또한 용탕가압 및 응고진행에 따르는 열전달 계수의 변화에 관한 해석을 실시하여 용탕단조시의 응고현상을 정량적으로 파악하고자 하였다.

2. 실험 및 해석방법

2.1 실험방법¹⁶⁾

시험주조에 사용된 주물 및 금형의 크기, 요소분할도는 Fig.1에 표시한 바와 같으며, 금형 및 주물

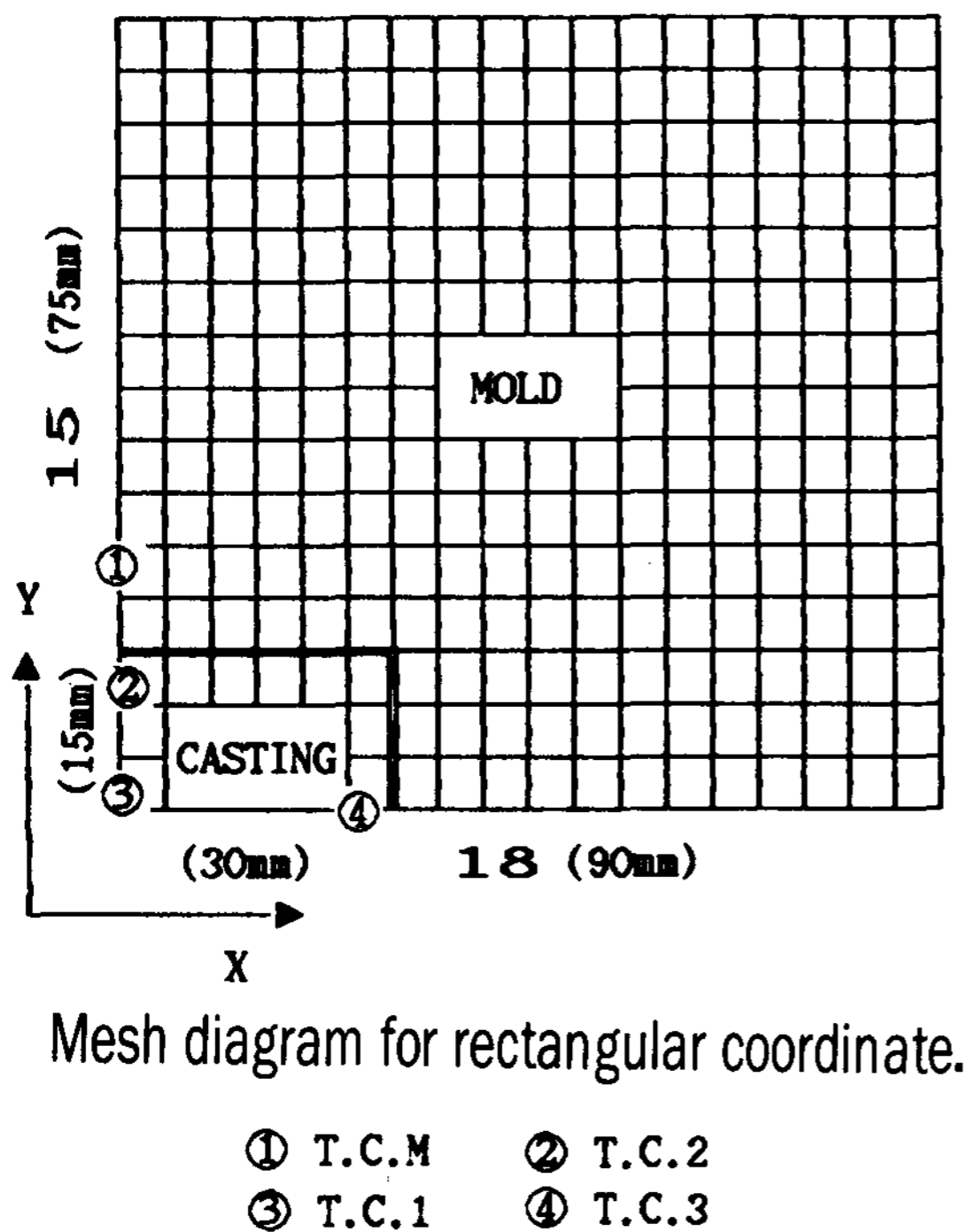


Fig. 1. Geometry of experimental casting and mesh diagram for computer simulation.

의 열물성치는 Table 1과 같다. 실험시 금형의 초기온도는 250°C로 유지하였으며 다이캐스팅(die casting)용 이형체를 0.1-0.05mm내외가 되도록 금형 내부에 균일하게 피복하였다. 용탕단조시의 가압개시 시간은 주입후 10-17초 사이에 이루어졌으며, 가압속도는 0.36cm/sec였다. 가압력은 1000kg/cm²이었고 가압유지 시간은 3분이었다. 냉각곡선을 얻기위하여 Fig.1에서와 같이 주물에서 3부분, 금형에서 1부분의 온도변화를 측정하였다. 온도측정을 위해서는 stainless steel 보호관으로 보호한 CA, 열전대를 사용하였다.

2.2 열전달 계수의 계산

실험에서 얻은 각 열전대 위치에서의 냉각곡선을 바탕으로 열전달 계수의 시간의존성을 구하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- ① 물체 내에서의 열전달은 오직 열전도 기구에 따르며 대류나 복사에 의한 영향은 무시한다.
- ② 열전도 계수를 계산함에 있어서 일방향으로 (열전대 설치 방향)의 열전달 만을 고려한다.

이제 Fig.2와 같은 형태로 주물과 금형에 열전대가 설치되어 있을 경우, 시간Δt 사이에 2번 요소 내의 열량 변화량 Q_a는

$$Q_a = \frac{\rho C}{\Delta t} V_2 (T_2^{t+\Delta t} - T_2^t)$$

단, ρ: 밀도, C: 비열, t: 시간,
V₂: 요소 2의 면적, Δt: 미소 시간 변화량,
T: 온도

(1)

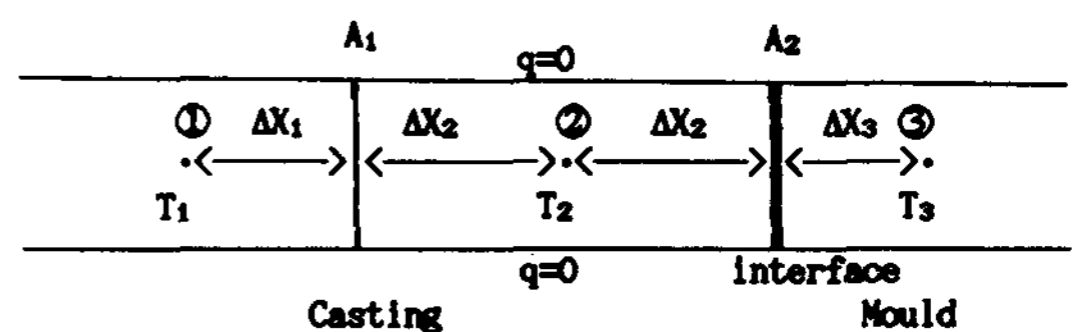


Fig. 2. Control volume at the casting/mold interface.

Table 1. Thermal properties used in the calculation

	density (g/cm ³)	thermal conduc. (cal/sec cm°C)	specific heat (cal/g°C)	liquidus temp. (°C)	solidus temp. (°C)
liq. Al-4.5Si	2.36	0.25	0.25	615.0	-
sol. Al-4.5Si	2.60	0.5	0.24	-	577.0
steel mould	7.80	0.105	0.11	-	-

로 표시된다. 또한 면 A_1 및 A_2 를 통하여 출입하는 열량 Q_a 는 다음과 같다.

$$Q_b = B_1 \cdot A_1 (T_1^t - T_2^t) + B_2 \cdot A_2 (T_3^t - T_2^t) \quad (2)$$

여기서, T_1, T_2, T_3 : 각각 요소 ①, ②, ③의 시간 t 에 있어서의 온도,

A_1, A_2 : 요소와 요소간의 접촉면의 길이,

B_1, B_2 : 각 면의 경계조건

$$B_1 = \frac{1}{(\Delta X_1 + \Delta X_2) / k_c}$$

$$B_2 = \frac{1}{\Delta X_2 / k_c + 1/h + \Delta X_3 / k_m}$$

k_c, k_m : 주물 및 금형의 열전도도,

h : 금형 / 주물 간의 열전달 계수

에너지 보존법칙으로 부터 (1)과 (2)식에서 다음과 같은 차분식이 얻어진다.

$$\frac{\rho C}{\Delta t} V_2 (T_2^{t+\Delta t} - T_2^t) = B_1 \cdot A_1 (T_1^t - T_2^t) + B_2 \cdot A_2 (T_3^t - T_2^t) \quad (3)$$

위의 (3)식은 일차원 문제이기 때문에 $V_2 = 2 \cdot \Delta X_2$ 이고, $A_1 = A_2 = 1$ 이 된다. 식 (3)에 경계조건을 대입하면 다음의 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\frac{2\rho C}{\Delta t} \Delta X_2 (T_2^{t+\Delta t} - T_2^t) = \frac{1}{(\Delta X_1 + \Delta X_2) / k_c} (T_1^t - T_2^t) + \frac{1}{\Delta X_2 / k_c + 1/h + \Delta X_3 / k_m} (T_3^t - T_2^t) \quad (4)$$

식 (4)에서 각 열전대가 위치한 곳에서의 시간에 따른 온도 변화값은 실험을 통해 구하였으며, 주물 및 금형의 열물성치는 알고 있으므로 결국 앞의 식에서 미지수는 열전달 계수 h 가 된다. 그러므로 식 (4)를 h 에 대하여 정리함으로써 각 시간에 있어서의 열전달 계수값을 계산해 낼 수 있다. 또한 계산되어진 열전달 계수값은 용탕단조에 있어서의 2차원 응고 해석에 적용되었다.

2.3 용탕단조시의 2차원 응고해석

상변화를 수반하는 2차원 비정상 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t}$$

여기서, f_s : 응고율, L : 응고잠열 (5)

본 연구에서는 응고과정을 해석하기 위해서 미소 요소에 대해 Fourier의 에너지 보존법칙을 적용하여 다음의 개량차분식을 도입하였다.

$$T_i^{t+\Delta t} = [1 - \frac{\Delta t}{\rho C} \frac{1}{V_i} (\sum_{j=1}^4 B_j A_j)] T_i^t + \frac{\Delta t}{\rho C} \frac{1}{V_i} \sum_{j=1}^4 B_j A_j T_j^t \quad (6)$$

응고잠열의 취급은 온도회복법¹³⁾에 의하여 평가하였으며, 시간에 대해 전진차분법을 사용하였다.

계산에 사용되어진 열물성값은 Table 1에 나타내었으며, 응고해석 프로그램의 순서도를 Fig.3에

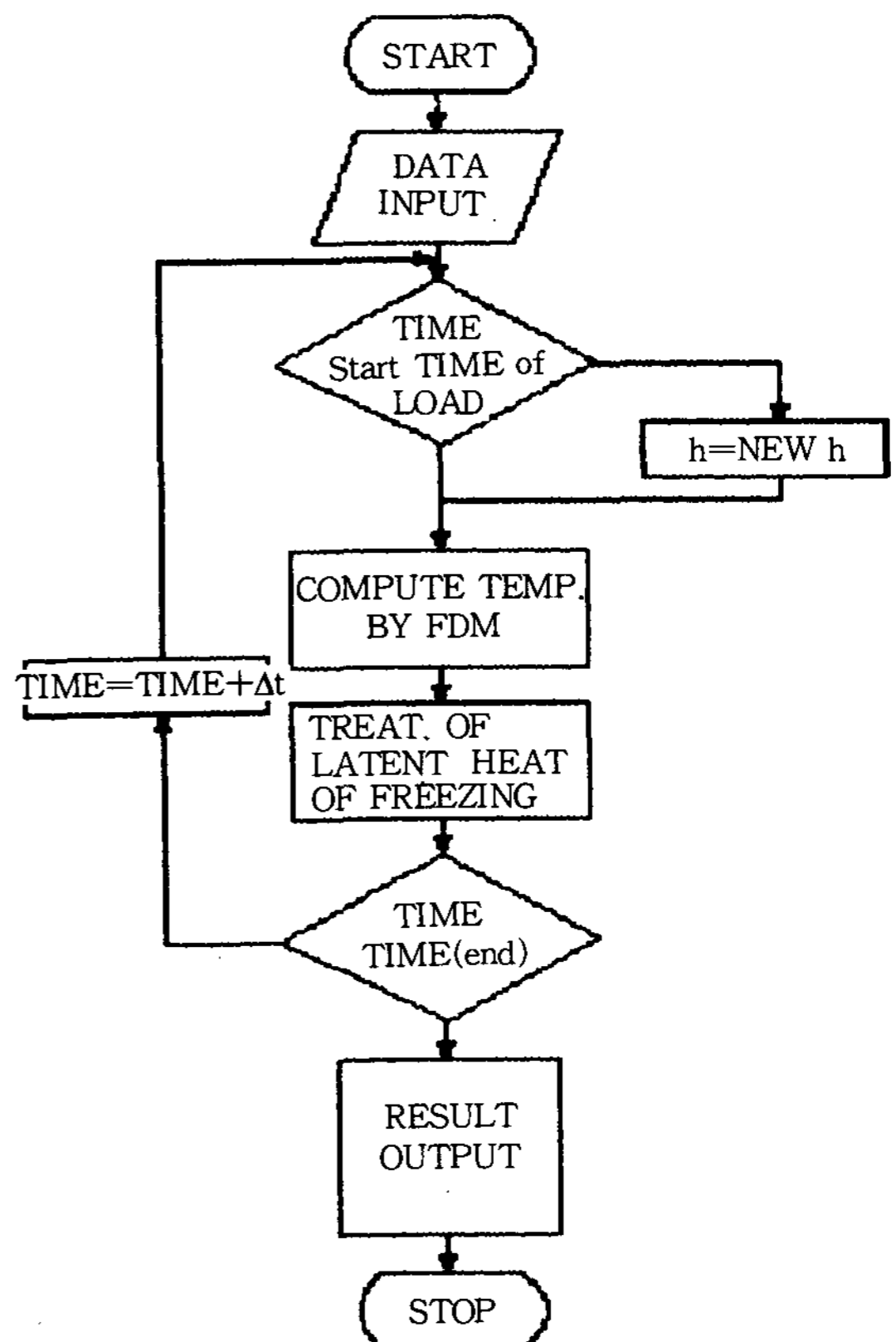


Fig. 3. Flow chart for computer simulation.

나타내었다. 가압개시 전까지는 일정한 값의 열전달 계수를 계산에 사용하였으며, 가압이 되는 순간부터 앞의 2.2절에 의해서 얻어진 결과를 이용하여 온도계산을 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험결과¹⁶⁾

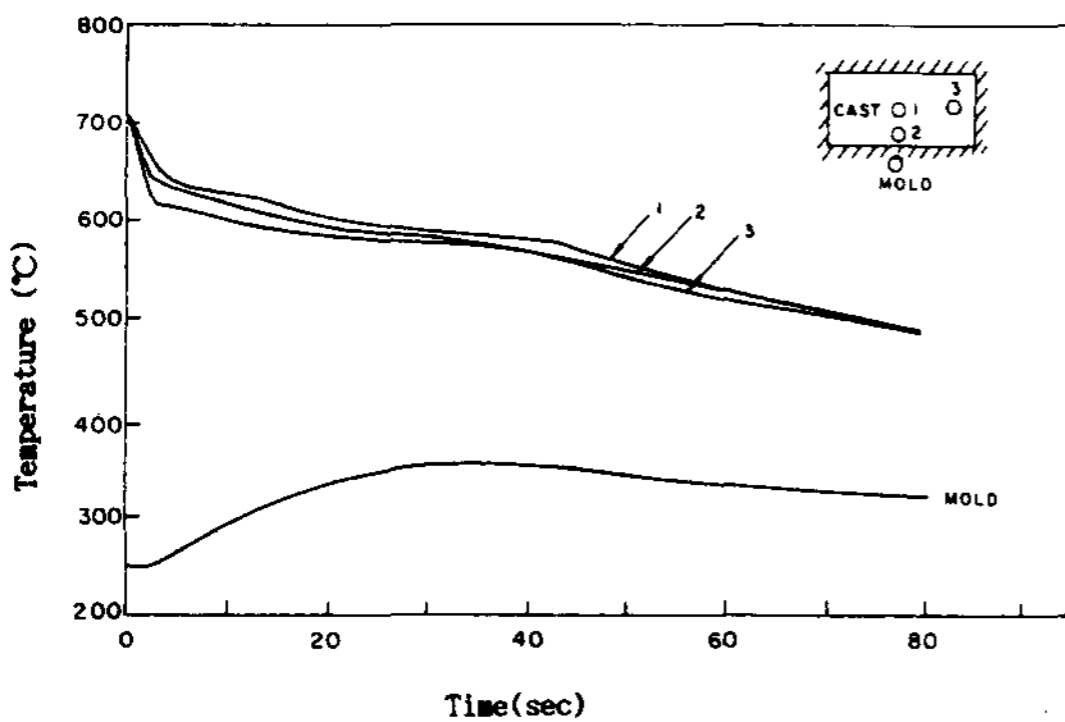
Al-Si 아공정 합금의 용탕단조에 있어서의 각 열전대 위치에서의 냉각곡선은 Fig.4(a),(b)와 같다. 실험에서 얻어진 결과에서 볼 수 있듯이 중력주조시에는 중심부의 응고까지 약 43초 가량이 소요되었으나, 1000kg/cm²가압응고시에는 중심부의 응고완료에 까지 약 29초 정도의 시간이 걸려서, 가압시 응고완료 시간이 단축 되어 응고속도가 크게

증가하였음을 알 수 있다. 이것은 가압에 의하여 열전달이 촉진 되었기 때문이다.

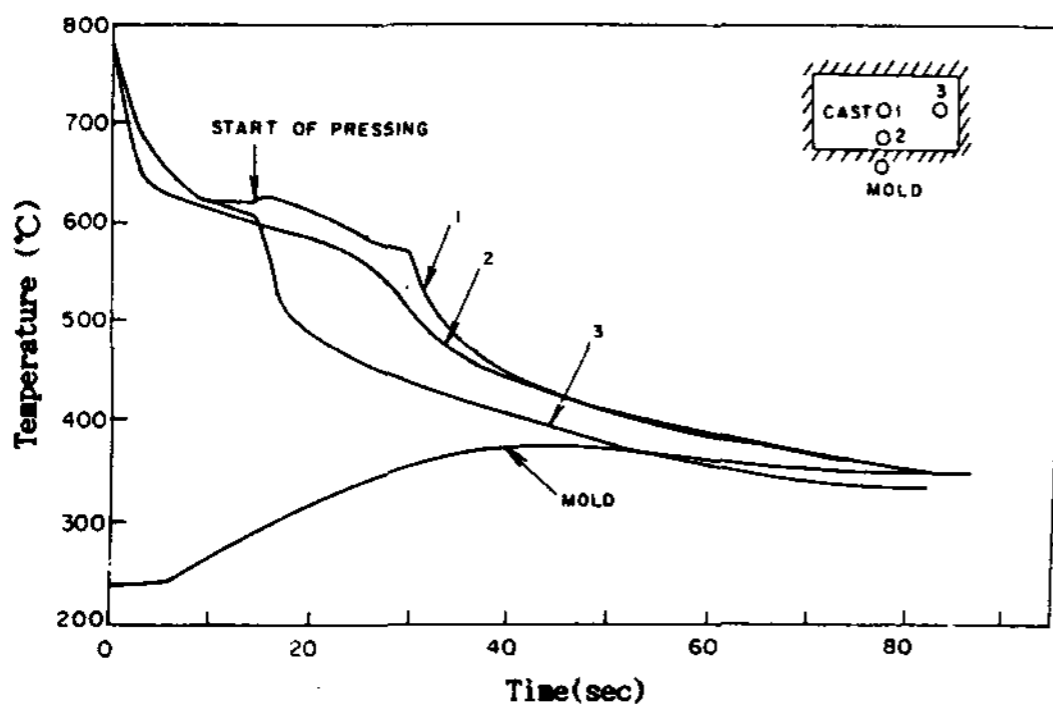
금형내에서는 가압의 경우가 중력주조시보다도 달최고온도가 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 가압주조시에는 금형이 보다 열적으로 안정된 것이 요구되며 금형내의 냉각수로 설치등의 방안이 요구된다. 또한, 가압시에는 용탕의 온도가 순간적으로 4°C정도 증가한 것을 관찰할 수 있는데 이는 압축 단열 효과가 발생한 것으로 보여지며, 본 연구에서 열전도해석 시에는 이점은 감안하지 않았다.

3.2 해석결과 및 고찰

식 (4)를 통하여 계산되어진 열전달 계수를 도식화 하면 Fig.5와 같다. 그림에서와 같이 가압개시 직후에 주물과 금형의 접촉상태가 양호하게 되어



(a)



(b)

Fig. 4. Experimental cooling curves of hypoeutectic Al-Si alloy.

(a) gravity die casting

(b) squeeze casting under 1000 Kg/cm² pressure

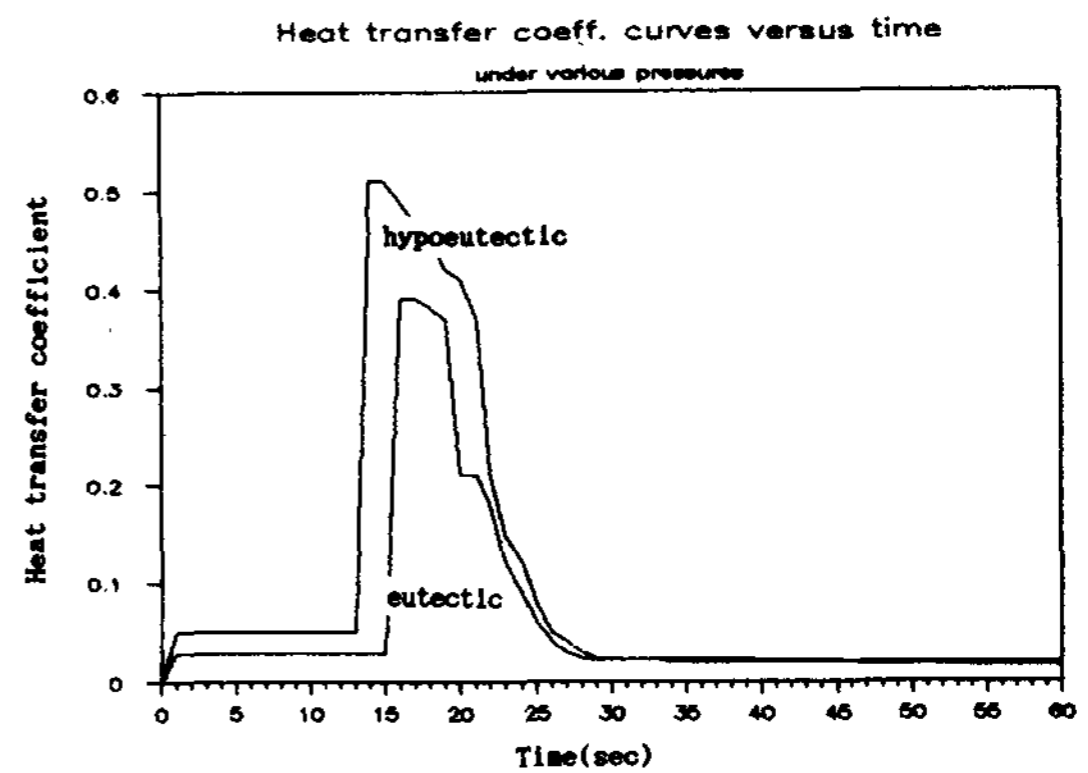


Fig. 5. Calculated heat transfer coefficients / time relation in squeeze casting.

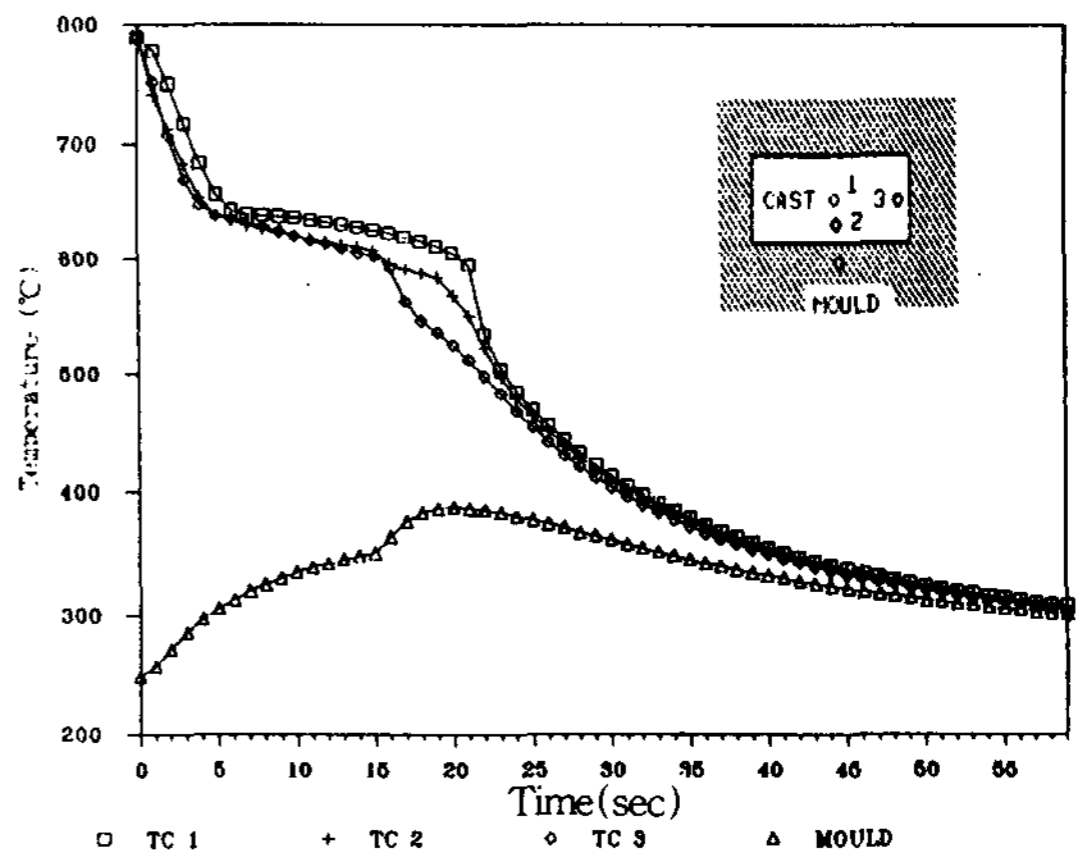
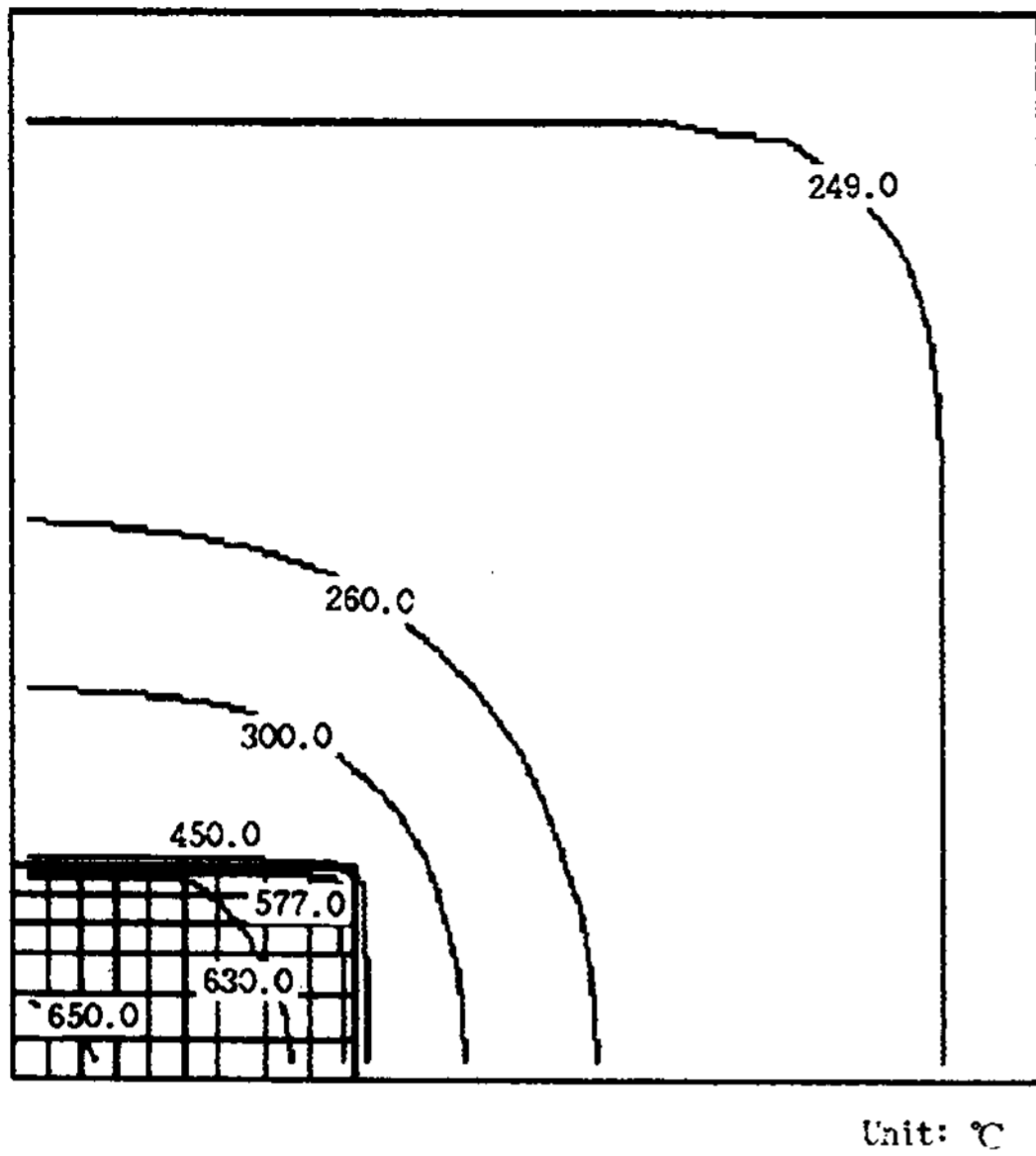
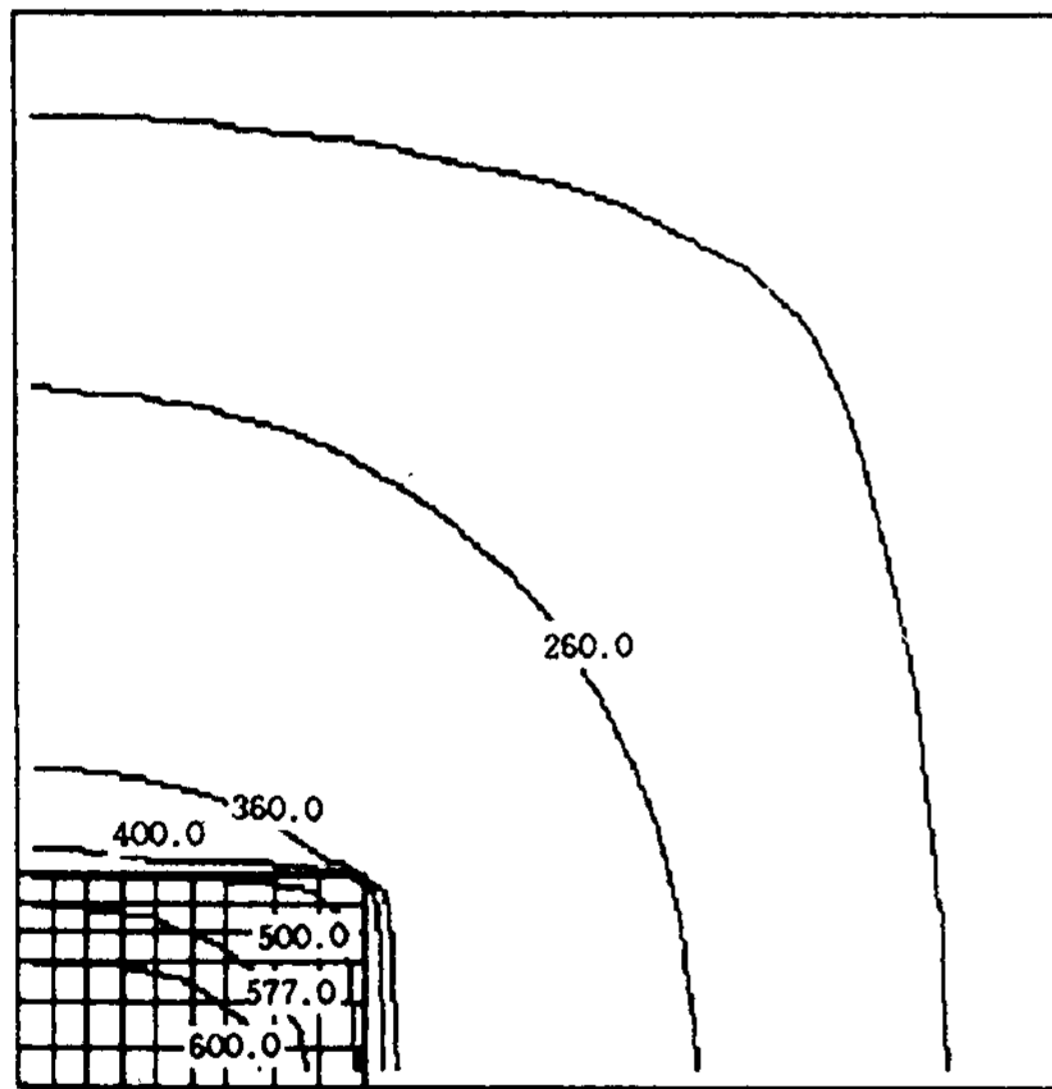


Fig. 6. Calculated cooling curves of hypoeutectic Al-Si alloy in squeeze casting under 1000 Kg/cm² pressure.



(a)



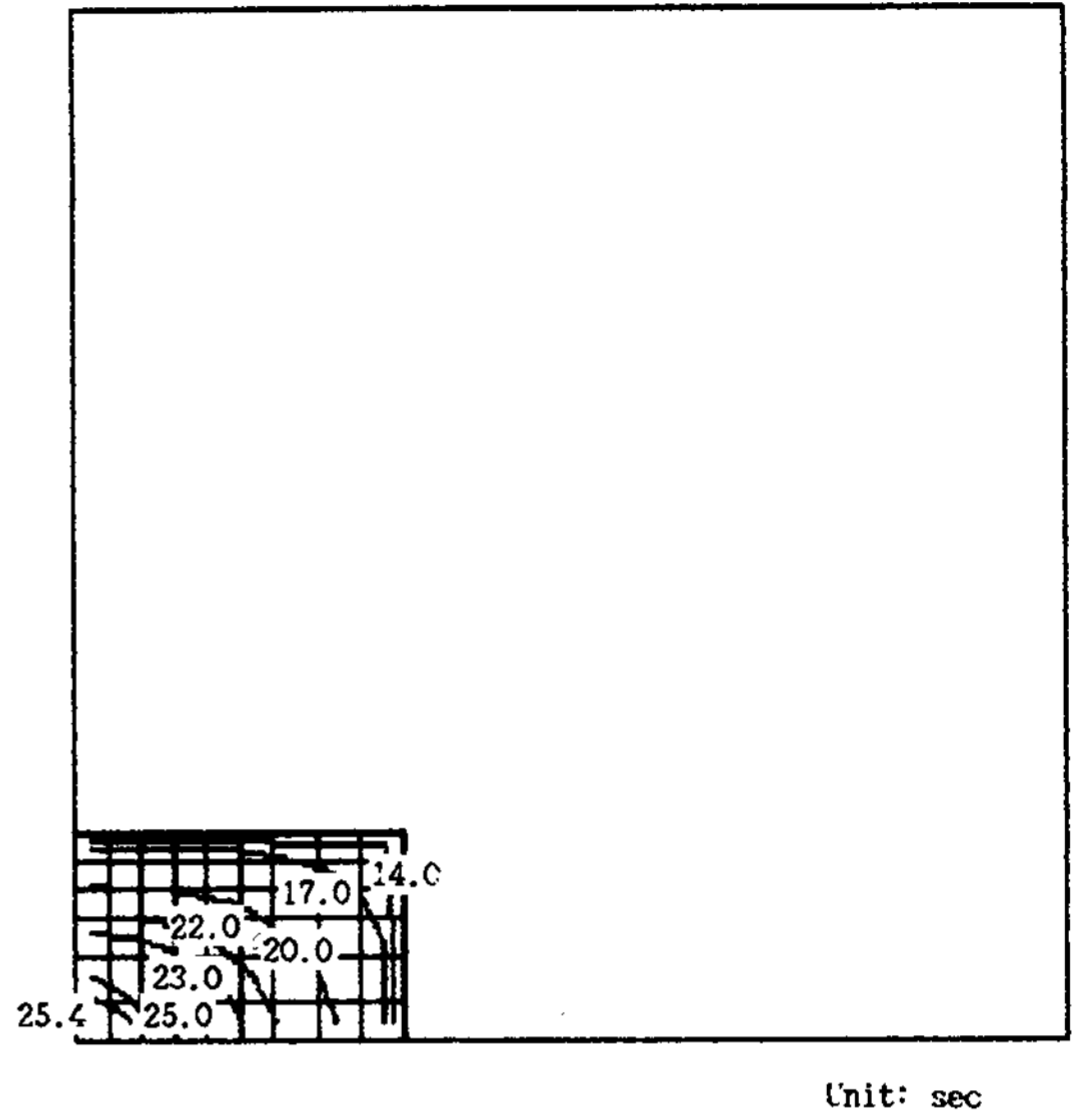
(b)

Fig. 7. Calculated temperature distributions in the casting and mold regions in squeeze casting.

(a) 5 sec after pouring

(b) 20 sec after pouring

짐에 따라 순간적으로 열전달 계수가 급격히 증가하며, 응고가 진행되어 가면서 그 효과가 감소함을 알 수 있다.



Unit: sec

Fig. 8. Calculated solidification time in squeeze casting.

Fig.6에서는 계산된 열전달 계수값을 바탕으로 2차원 응고해석을 행하여 얻어진 냉각곡선을 표시하였다. 해석결과에서 보듯이 응고완료 때까지는 실험결과(Fig.4b)와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 후반부에서는 실제 실험값과 해석간에 차이가 나타나는 것을 볼 수 있는데 이것은 열전달 계수 계산이 일차원적인 고려만을 하였기 때문이라 생각된다. Fig.7은 주입후 일정시간에서의 주물 및 금형에서의 온도분포곡선을, Fig.8은 주물에서의 등응고완료곡선을 나타낸다. 응고완료시간의 예측을 통하여 용탕단조시의 최적금형해체시간의 예측 및 반복작업시 작업사이클(cycle)당 필요로 하는 최소작업시간예측이 가능하다.

Fig.9와 10에서는 앞에서 계산되어진 열전달 계수를 이용하여 원주좌표계로 계산한 브레이크 마스터실린더의 용탕단조시의 주물 및 금형에서의 온도분포곡선과 등응고완료곡선을 나타낸다. 복잡한 형상의 주물의 연속제조시에는 구조상의 향상을 위하여 금형에서의 축열부위를 제거하는 것이 필수적이다. 그러므로 앞서와 같이 열전도해석을 통하여 축열부위를 계산하여, 냉각수로를 설치할 적절한 위치를 예측하는 것은 금형설계 및 생산성의 향상에 있어서 매우 중요하다고 할 수 있다.

금형에 냉각수로를 설치할 경우에 예상되어지는 온도곡선을 Fig.11에, 주물의 응고완료시간 변화를

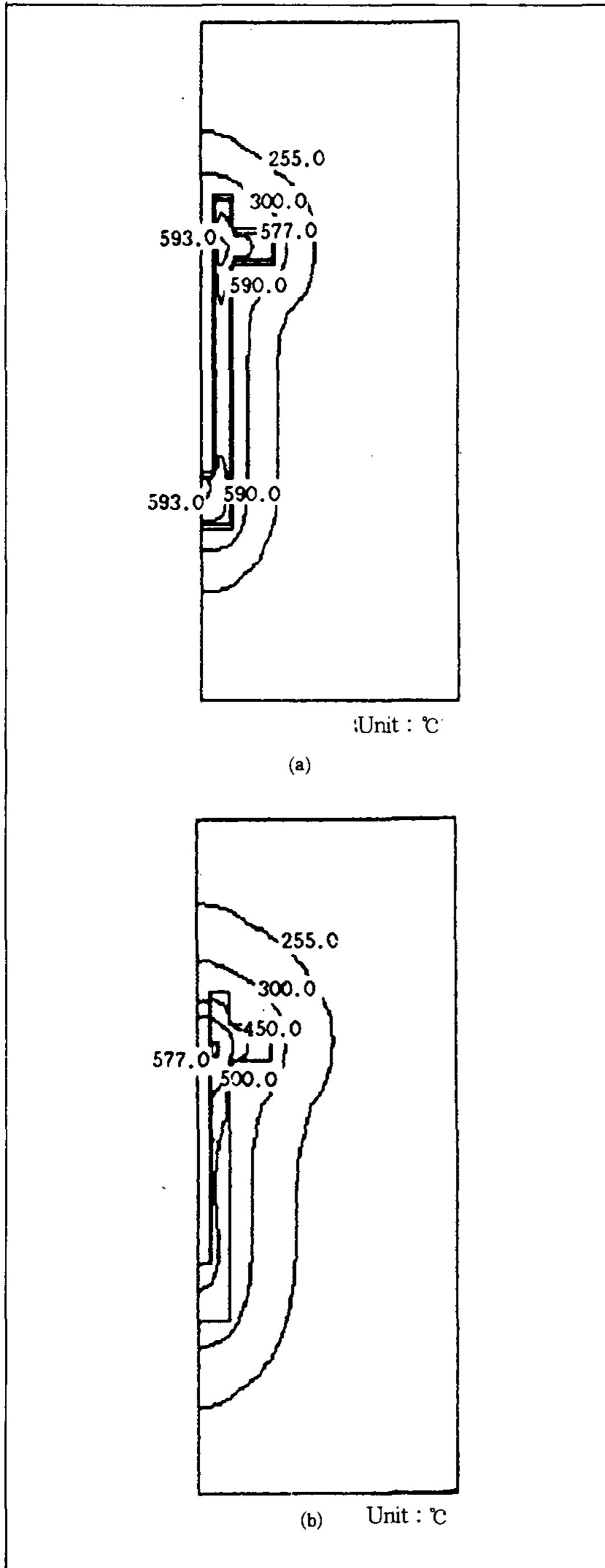


Fig. 9. Calculated temperature distributions in the casting and mold regions for squeeze casting of master cylinder.
 (a) 5 sec after pouring
 (b) 10 sec after pouring

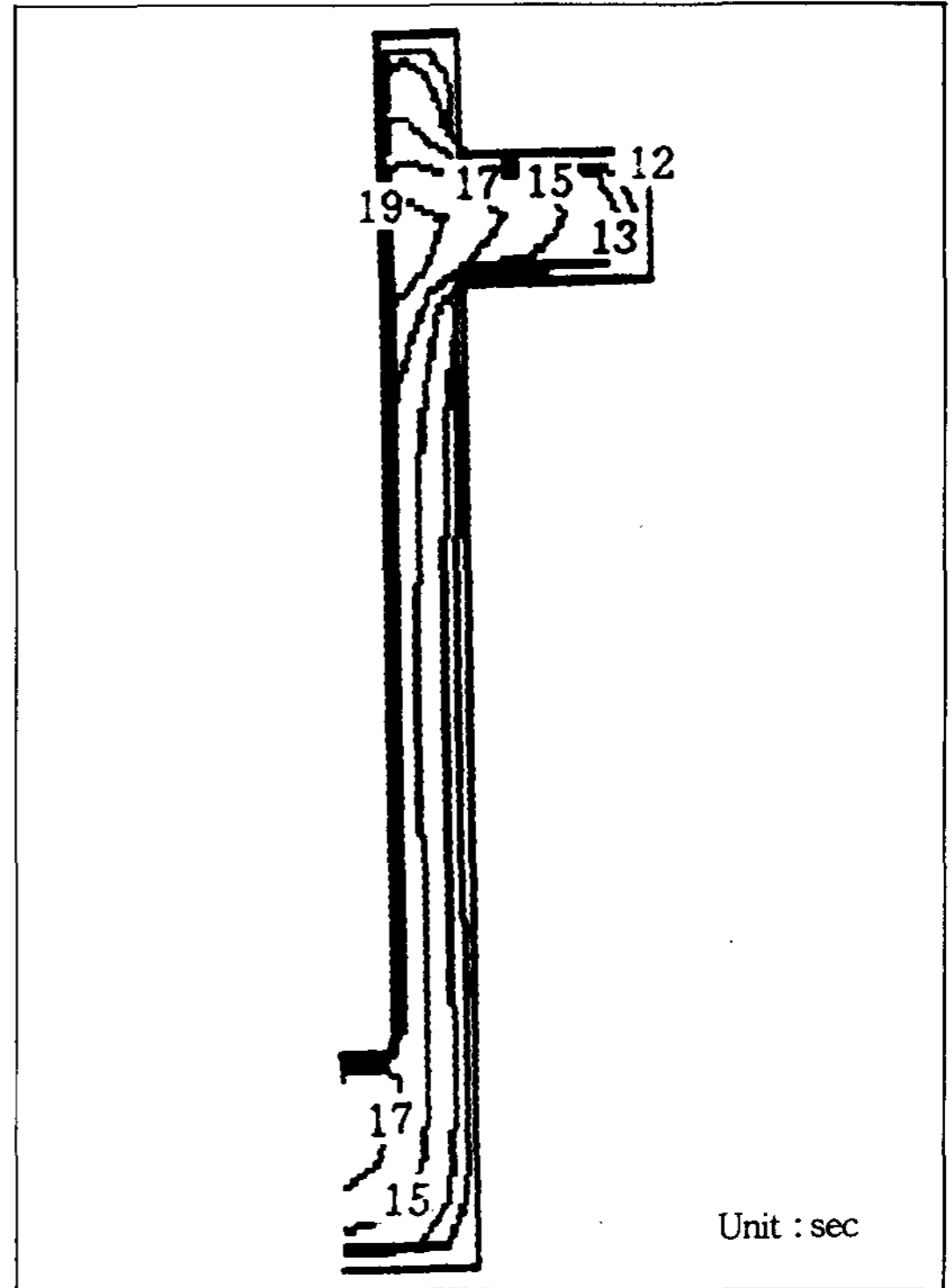
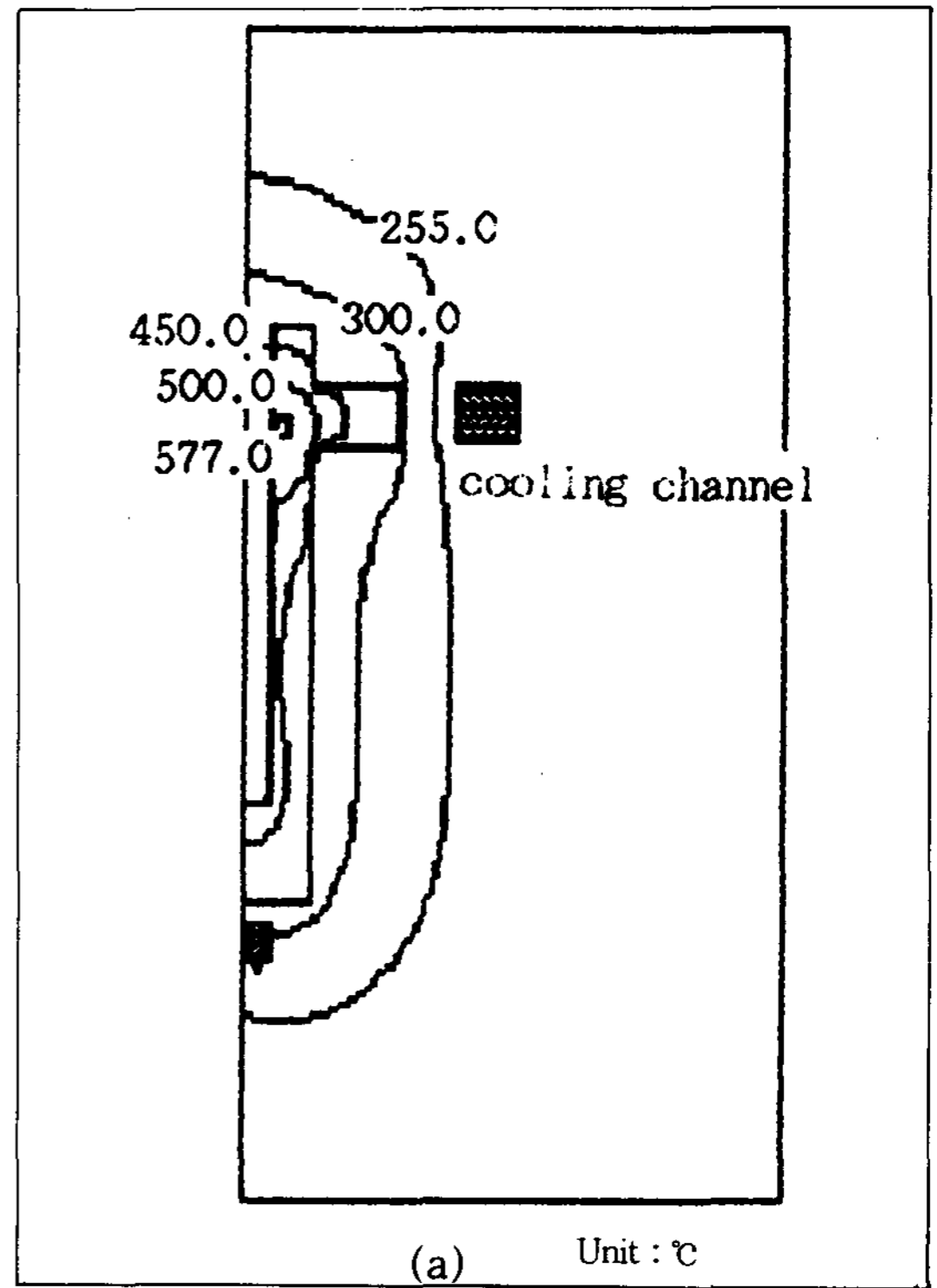


Fig. 10. Calculated solidification time in squeeze casting.



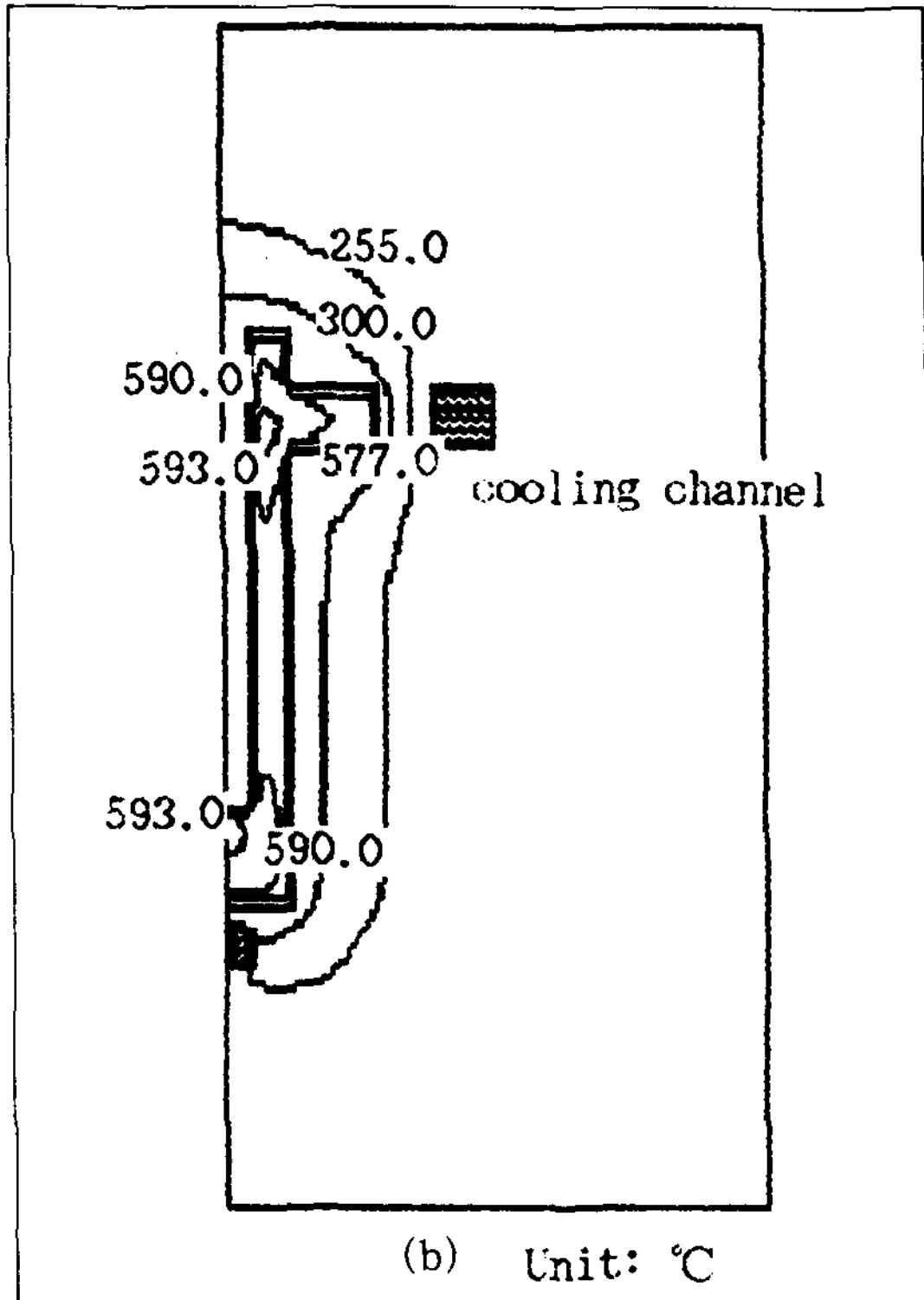


Fig. 11. Effect of cooling channels on temperature distributions in mold.

(a) 5 sec after pouring

(b) 10 sec after pouring

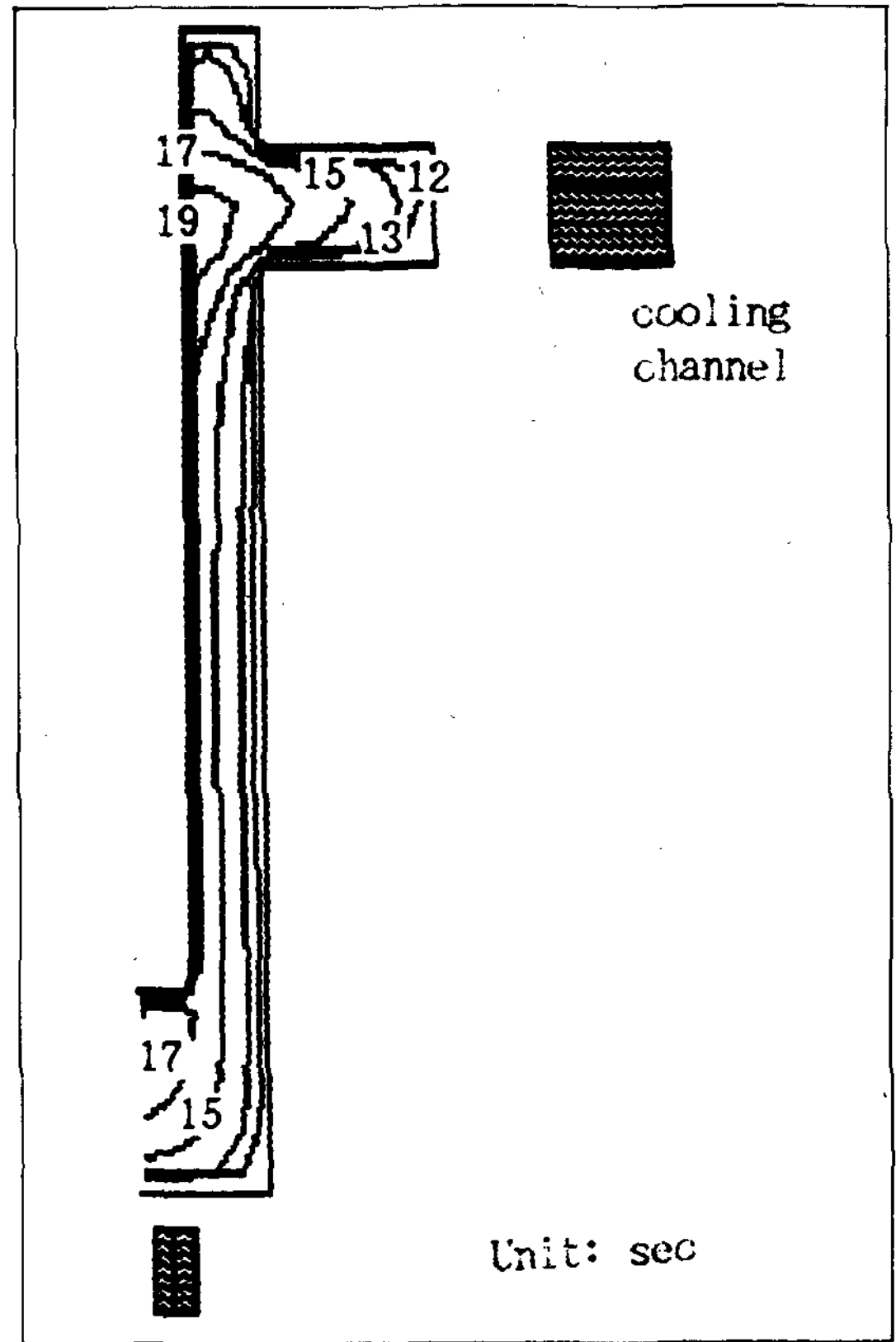


Fig. 12. Effect of cooling channels on solidification time of master cylinder.

Fig.12에 각각 나타내었다. 계산결과에서 알수 있듯이 계산결과를 통하여 축열부위를 쉽게 판별해내고 냉각수로의 적절한 위치를 예측하여 금형의 일정부위에 축열되는 것을 제거할 수 있다.

4. 결론

용탕단조시의 주물/주형에서의 열전달계수의 정량적인 평가를 위하여 기초적인 열전달해석을 하였으며, 평가된 열전달계수를 이용하여 용탕단조시의 응고현상을 해석하고 그 결과를 실험결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1)일차원 열전달 해석에 의하여 용탕단조시의 주물/금형간의 열전달계수를 정량적으로 평가할 수 있었다.

(2)용탕단조시 주물/금형간의 열전달계수는 용탕가압 및 응고진행과 더불어 크게 변화하며, 주물의 응고과정 및 금형의 냉각과 밀접한 관계를 가짐

을 알았다.

(3)수치적으로 계산된 열전달 계수에 의한 응고 해석 결과는 실험적으로 측정된 결과와 비교적 잘 일치하였다.

(4)용탕단조시의 정확한 열전달 계수의 평가 및 응고해석은 최적 금형해체시간의 예측, 금형내의 냉각수로 설계에 있어서 필수적이며, 이를 통하여 생산성 및 금형수명의 향상을 가져올 수 있다고 사료된다.

본 연구는 1989년도 한국과학재단 연구비의 지원을 받아 수행한 연구의 일부로서, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. J. R. Wallace and W. J. Stuhke : Modern Castings,44,1 (1966) 51.

2. B. F. Caswell and P. Lorentzen : Die Casting Engineer, (March-April) (1968) 26.
3. R. B. Weatherwax and O. K. Rigger : AFS Trans., 85 (1977) 317.
4. C. P. Hong, T. Umeda and Y. Kimura : in Modeling of Casting and Welding Process-II, J. T. Berry and J. Dantzig Eds., The Metallurgical Society of AIME (1984) 221.
5. Y. Nishida, W. Droste and S. Engler : Metall. Trans., vol. 17B (1986) 833.
6. K. Ho and R. D. Pehlke : Metall. Trans., vol. 16B (1985) 585
7. M. Sugiyama, T. Umeda, H. Takeuchi and H. Kato : IMONO, vol. 47 (1977) 178.
8. J. K. Choi, D. O. Kim and C. P. Hong : 55th World Foundry Congress Paper No.32, Moscow, 1988.
9. 최정길, 홍준표 : 한국주조공학회지, Vol. 110, No.3 (1990) 247.
10. J. K. Choi, D. O. Kim and C. P. Hong : in The Physical Metallurgy of Cast Iron IV, G. Ohira et al. Eds., Mater. Res. Soc. Proc., (1989) 441.
11. J.W. Grant : Modeling of Casting and Welding Processes.
- H. D. Brody and D. Apelian Eds., The Metallurgical Society of AIME (1982) 19.
12. O. K. Riegger : in Modeling of Casting and Welding Process I, H. D. Brody and D. Apelian Eds., The Metallurgical Society of AIME (1982) 39.
13. C. P. Hong, T. Umeda and Y. Kimura : Metall. Trans. vol. 15B (1984) 101.
14. Y. Nishida and H. Matsubara : British Foundryman (1976) 274.
15. S. D. E. Ramati, G. J. Abbaschian, D. G. Backman and R. Mehrabian : Metall. Trans. Vol. 9B (1978) 279.
16. 한요섭 : 한국과학기술원 석사학위 논문, 1984.