

|||||
論 文
|||||

개량차분법에 의한 대형주강품의 3차원 응고해석

유 승 목*, 이 두 호**, 김 종 기**, 소 찬 영**, 홍 준 표*

Three Dimensional Solidification Analysis in Large Steel Castings by Modified Finite Difference Method

Seung-Mog Yoo *, Doo-Ho Lee **, Jong-Ki Kim **, Chan-Young So **, Chun-Pyo Hong **

Abstract

A computer program which consists of pre-processor, main solidification simulator and post-processor has been developed for three dimensional solidification analysis of steel castings. The pre-processor is used for mesh generation in a small personal computing system. The modified finite difference method is adopted for the main solidification simulation algorithm. The post -processor graphically presents the simulation results and shows the formation of shrinkage defects. Several experiments on large steel castings in sand mold were carried out. The temperature variations in casting and mold with time are measured experimentally, and the results are compared with calculation results. Several numerical examples for the prediction of shrinkage cavity in large steel casting of SC42 and SCNCrM2 alloys are compared with experimental results. The effect of sleeve and chills on solidification patterns are also studied. Formation of shrinkage defects for the three cases of experimental castings are relatively well predicted by present model.

1. 서론

주조작업은 용해된 금속을 임의의 형상을 가진 주형속에 주입하여 응고시킴으로써 만들고자하는 형상과 치수의 제품을 만드는 공정으로, 가공면에서 유리한 특징을 가지고있다. 그러나 용탕이 주형내에서 응고하는 과정중에 수축공, 기공 및 편석등의 구조결함이 발생하기 쉽기때문에 응고과정을 정확히 파악하고 정량적으로 제어하여 건전한 구조방안을 설정하는 것은 아주 중요하다.

현재 응고현상을 포함한 구조시의 열전달해석에 사용되는 수치해석법에는 유한차분법,^{1)~3)} 직접차분법,^{4)~6)} 유한요소법^{7)~9)} 및 경계요소법^{10)~12)} 등이 있다.

이러한 수치해석들은 계산에 사용될 컴퓨터의

용량 및 속도 혹은 해석대상에 따라 각각 장단점이 있다.

초기의 응고해석은 여러가지 제약으로 인하여 주로 2차원적인 고려가 이루어졌으나 복잡한 형상의 해석에는 어려움이 따른다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 3차원해석이 활발히 이루어지고있다^{13)~15)} 그러나 3차원해석의 경우 해석대상의 형상 데이터를 작성하는데 어려움이 따르고 그 데이터의 구조가 복잡하여지며 그양이 방대하여지는 결점이 있다. 그러므로 이러한 결점을 보완하기위한 연구도 이루어지고 있으며, 한편으로는 열유속 경계조건을 응용하여 주물내에서의 온도변화만을 계산하는 방법 등도 연구되고 있다.^{16)~17)}

수치해석적인 방법을 통하여 얻어진 응고해석결과는 응고완료시간의 추정, 적정 주형해체 시간에

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

**인천제철(Inchon Iron and Steel Co. Ltd.)

측, 응고속도 예측 및 수축공결함의 예측외에도 응고조직의 변화, 편석의 추정등 여러분야에 이용되어지고있다. 본연구에서는 현재 널리 보급되어있는 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 대형주강품 제조에 있어서 수축공결함의 발생위치와 그정도의 예측 및 응고완료시간등의 예측을 위해 3차원 응고해석을 수행하였다. 응고해석법으로는 개량차분법을 이용하였다.

또한 모형실험에서 얻어진 온도변화곡선 및 결함발생위치를 해석결과와 비교, 검토하여 본연구 결과의 타당성을 검증하였다.

2. 수치모델링

2.1 지배방정식, 초기조건 및 경계조건

응고현상을 포함하는 3차원 비정상 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} (K \frac{\partial T}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y} (K \frac{\partial T}{\partial Y}) + \frac{\partial}{\partial Z} (K \frac{\partial T}{\partial Z}) + \rho L \frac{df_s}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서, ρ : 밀도 (g/cm^3)
- C : 비열 ($cal/g^{\circ}C$)
- K : 열전도도 ($cal/cm^{\circ}C$)
- L : 응고잠열 (cal/g)
- f_s : 응고율
- X, Y, Z : 좌표계 (cm)

문제영역에서의 초기조건은

$$T = T_0 \text{ at } t=0 \text{ in } \Omega \dots\dots\dots (2)$$

와 같이 주어지며 경계조건은 다음과 같다.

$$T = \bar{T} \text{ on } \Gamma_1 \dots\dots\dots (3)$$

$$q = -K \frac{\partial T}{\partial n} \text{ on } \Gamma_2 \dots\dots\dots (4)$$

$$q = h(T_s - T) \text{ on } \Gamma_3 \dots\dots\dots (5)$$

여기에서 T_0 는 초기온도, \bar{T} 는 주어진 일정한 온도를 의미하며 T_s 는 주위의 온도를 나타낸다.

2.2 개량차분법에 의한 차분화

Fig.1은 3차원 직교좌표계에서 임의의 6면체 요소 (i, j, k) 에 대한 요소형상 및 좌표축을 나타내고 있다. 요소의 절점은 그 요소를 대표한다. 즉, 요소 내의 온도는 절점의 온도로서 표시된다. Fourier의 에너지 보존법칙으로부터 내절점법에 의한 전진개량차분식을 유도하여 미지수 $T_{ijk}^{n+\Delta t}$ 에 대하여 정리하면 (6)식이 얻어진다.

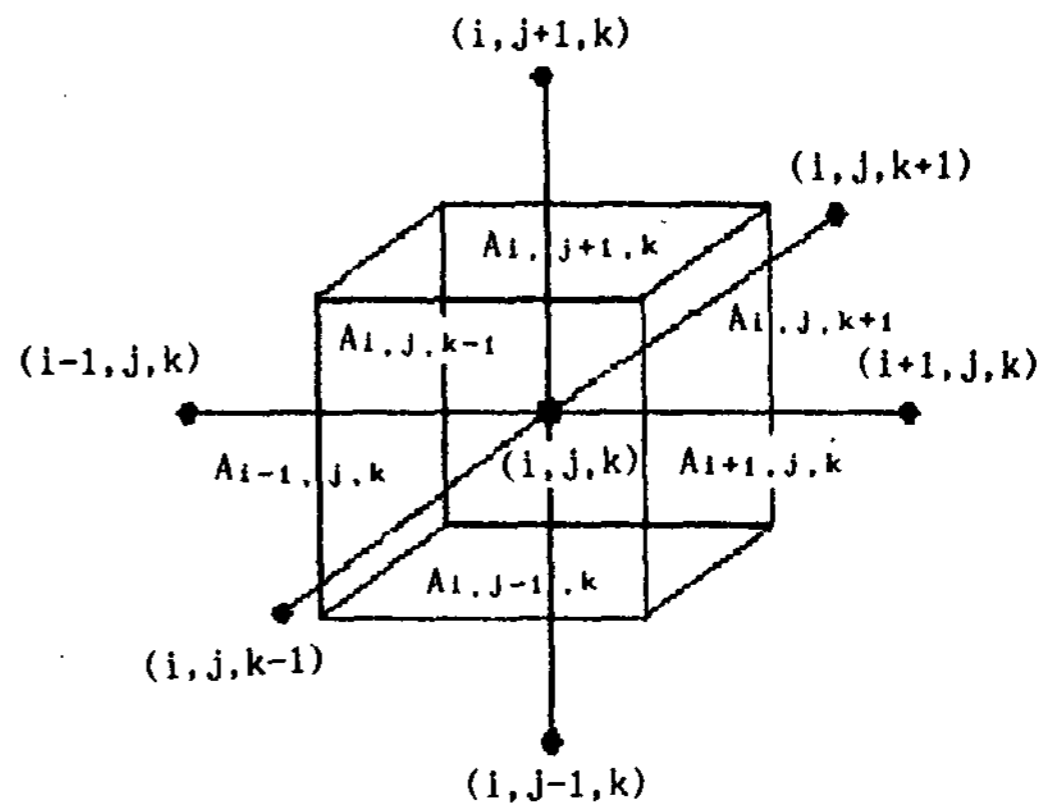


Fig. 1. Finite difference element used for three dimensional problem.

$$T_{ijk}^{n+\Delta t} = [1 - \frac{\Delta t}{\rho C} \frac{1}{V_{ijk}} (B_{i-1} A_{i-1} + B_{i+1} A_{i+1} + B_{j-1} A_{j-1} + B_{j+1} A_{j+1} + B_{R-1} A_{R-1} + B_{R+1} A_{R+1})] T_{ijk}^n + \frac{\Delta t}{\rho C} \frac{1}{V_{ijk}} (B_{i-1} A_{i-1} T_{i-1}^n + B_{i+1} A_{i+1} T_{i+1}^n + B_{j-1} A_{j-1} T_{j-1}^n + B_{j+1} A_{j+1} T_{j+1}^n + B_{k-1} A_{k-1} T_{k-1}^n + B_{k+1} A_{k+1} T_{k+1}^n) \dots (6)$$

식(6)에서의 경계조건은 아래와 같이 주어진다. 예를 들면 면 A_{i-1} 에 대한 경계조건 B_{i-1} 은 다음과 같은 경우가 될 수 있다.

동일한 물질 1이 면 A_{i-1} 에서 열저항 없이 접촉하고 있는 경우

$$B_{i-1} = \frac{1}{\frac{\Delta \ell_1}{K_1} + \frac{\Delta \ell_2}{K_1}} \dots\dots\dots (7-a)$$

물질 1과 물질 2가 면 A_{i-1} 에서 열저항 $1/h$ 를 갖고 접촉하는 경우

$$B_{i-1} = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{\Delta \ell_1}{K_1} + \frac{\Delta \ell_2}{K_2}} \dots\dots\dots (7-b)$$

공기와 같은 외부환경과 열저항 $1/h_a$ 를 갖고 접촉하고 있는 경우

$$B_{i-1} = \frac{1}{\frac{1}{h_a} + \frac{\Delta \ell_1}{K_1}} \dots\dots\dots (7-c)$$

여기서 $\Delta \theta_1, \Delta \theta_2$ 는 이웃하는 요소의 절점에서 면 A_{i-1} 까지 이르는 거리를 각각 나타낸다.

전진차분법에서는 다음과 같이 time step에 관한 안정조건이 필요하다.

$$1 - \frac{\Delta t}{\rho C} \frac{1}{V_{ijk}} (B_{i-1}A_{i-1} + B_{i+1}A_{i+1} + B_{j-1}A_{j-1} + B_{j+1}A_{j+1} + B_{k-1}A_{k-1} + B_{k+1}A_{k+1}) \geq 0 \dots (9)$$

한편, 응고잠열의 평가를 위해서 온도계산시 우선 응고잠열의 방출을 고려하지 않고 온도해석을 한 후, Δt 시간마다 계산되어진 온도로 부터 온도강하량을 구하고 아직 응고진행 중인 경우에는 고상율의 증가에 따라 응고잠열의 방출량을 계산하여 온도를 회복시키는 온도회복법¹¹⁾을 채택하였다.

수축공 결함의 예측에는 응고시간법과 온도구배법을 이용하였으며, 수축공결함의 발생량은 주로 응고수축량에 관계가 있고 주물의 형상과 크기에 무관하며 단지 수축공결함의 위치와 크기만이 주물의 형상과 크기에 의존하는 것을 착안한 "Shrinkage potential"¹²⁾이라는 보조 파라미터로 합금의 응고수축량과 관련지어 정의한 방법을 택하였다.

Shrinkage potential은 수축공이나 기공이 존재할 가능성이 있는 요소의 체적을 나타내기 때문에 반드시 그 요소 전체가 수축공이나 기공으로 구성된 것을 의미하지는 않는다.

2.3 해석조건

3차원 응고해석에 사용될 주물의 모델을 1에 나타내었다. 형상의 대칭성을 고려하여 전체 주물의 1/4만을 모델링하였다. 해석모델은 각 요소가 x,y,z 방향으로 28mm × 50mm × 35mm 크기의 직육면체이며, 주형을 포함하여 18 × 15 × 18개로 총 4860개의 요소들로 이루어져 있다. 1차 실험에 대한 해석에 사용되어진 모델은 Photo.1 (a)와 같이 냉금 및 슬리브가 없는 경우이며, 2차 및 3차 실험에 대한 해석에 사용되어진 모델은 Photo.1 (b), (c)와 같다. 해석모델에 관한 형상데이터는 자동요소분할 프로그램에 의하여 생성시켜 사용하였다.

계산에 사용되어진 열전도도 및 비열에 관한 열물성값을 Table 1에 나타내었다. 각재질의 경우

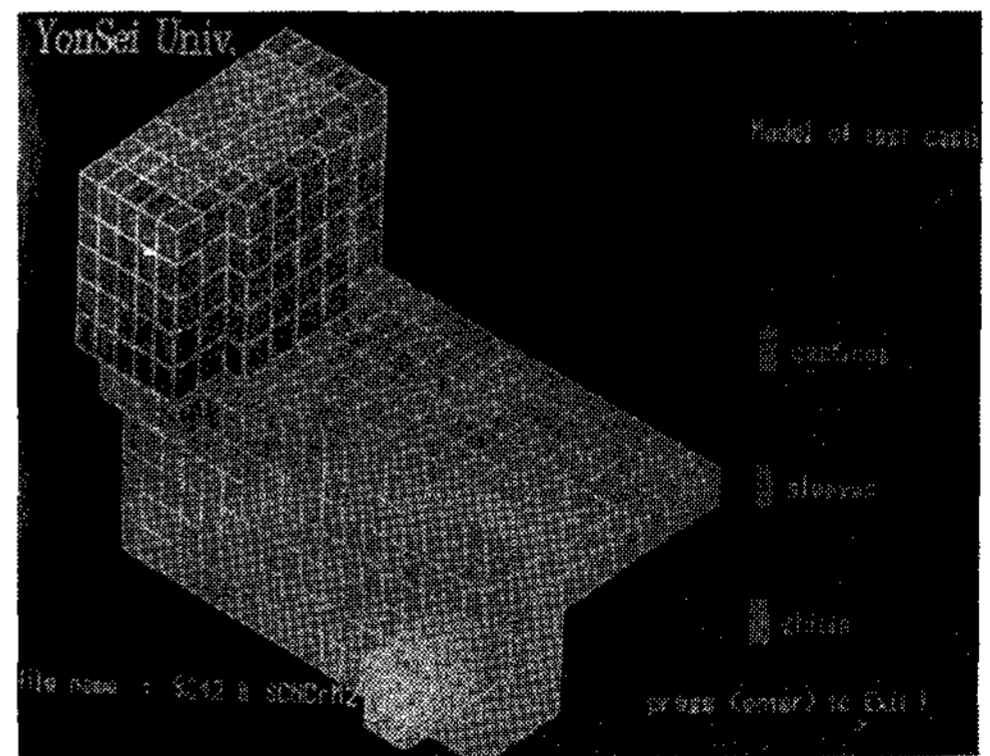
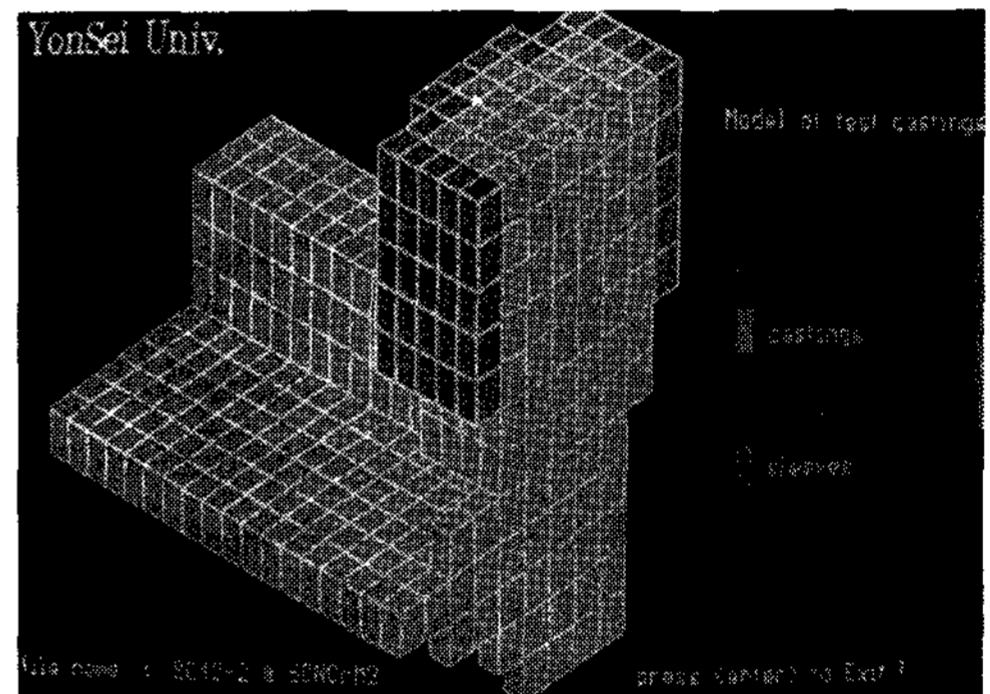
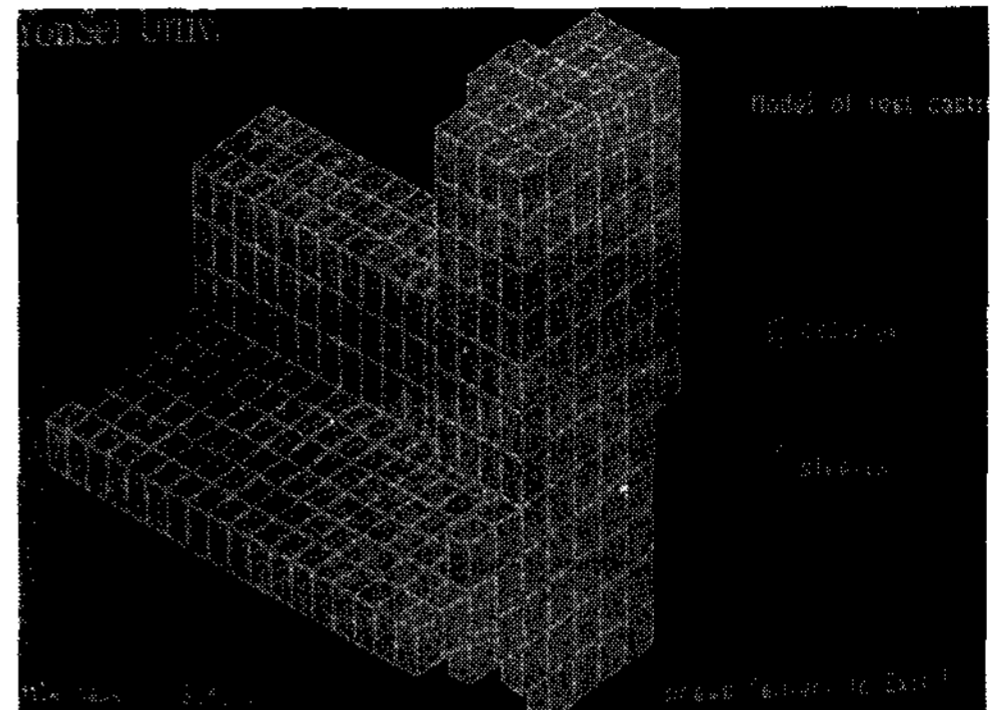


Photo. 1. Three dimensional models for solidification simulations :

(a) casting 1, (b) casting 2, and (c) castig 3

그 값들은 온도의존성을 고려하여 온도의 함수로 주어지도록 하였다. 그밖에 열물성값은 Table 2와 3에 나타내었다.

한편 해석시에 대기의 온도는 20℃로 일정하게 설정하였으며, 주강의 임계유동고상율은 0.67로 채택하였다.

Table 1. Thermal conductivity and specific heat used in calculations.

Temp. (°C)	Thermal Conductivity (cal/cm·sec·°C)			Specific heat (cal/g·°C)		
	SC42	SCNCRM2	mould	SC42	SCNCRM2	mould
~200	0.114	0.107	1.969×10^{-3}	0.121	0.122	0.170
300	0.103	0.103	1.842×10^{-3}	0.138	0.130	0.180
500	0.093	0.089	1.872×10^{-3}	0.163	0.156	0.188
700	0.081	0.075	2.011×10^{-3}	0.211	1.200	0.195
900	0.071	0.064	2.239×10^{-3}	0.180	0.128	0.200
1100	0.072	0.068	2.603×10^{-3}	0.181	0.144	0.205
1200	0.074	0.071	2.972×10^{-3}	0.192	0.152	0.207
Ti1 →	0.100	0.100	—	0.200	0.180	—

Table 2. Physical properties used in calculations.

material	density (g/cm ³)	initial temp. (°C)	latent heat (cal/g)	T _{liq} (°C)	T _{sol} (°C)
SC42	7.50(s) 7.00(l)	1530.0	65.0	1515	1455
SCNCRM2	7.85(s) 7.3(l)	1530.0	66.2	1493	1396
mould	2.75	20.0	—	—	—
sleeve	1.10	20.0	—	—	—
chill	7.60	20.0	—	—	—

Table 3. Heat transfer coefficients used in calculations.

	cal/cm ² sec °C
cast / mould	0.2
chill / mould	0.2
cast / chill	0.013
cast / air	4.0×10^{-4}
mould / air	2.0×10^{-3}

3. 대형 주강품의 응고실험

본 연구에서는 3회에 걸쳐 각각 주조조건을 달리 하며 응고실험을 실시하였다. 슬리브 및 냉금이 응고과정 및 주조결함에 미치는 영향 등을 비교하기 위하여 1차 실험에서는 슬리브 및 냉금을 설치하지

않고 구조용 저탄소강에 대한 실험을 행하였으며, 2차 실험에서는 동일한 재질을 사용하였으나 압탕 주위에 발열슬리브를 설치하였고 냉금을 부착하였다.

3차 실험에서는 슬리브와 냉금을 설치하고 재질을 변경하여 대형기어재료로 널리 이용되고 있는 구조용 저합금강에 대한 실험을 실시하였다.

주조 시험에 사용된 주물의 형상 및 치수를 Fig. 2에 나타내었다. 목형은 20/1000의 수축률을 고려하여 제작하였으며, 주형은 하형과 상형의 두부분으로 나누어 제작하였다. 주형의 두께는 가장 얇은 곳이 150mm 이상이 되도록 하였으며, 주형사는 silica sand를 사용하였다. 전술한 바와 같이 1차 실험에서는 슬리브와 냉금을 설치하지 않았고, 2차 및 3차 실험에서는 그림 2와 같이 주물의 뒷쪽 3곳에 110mm × 110mm × 110mm 크기의 냉금을 설치하였으며 압탕부에 발열슬리브를 설치하였다.

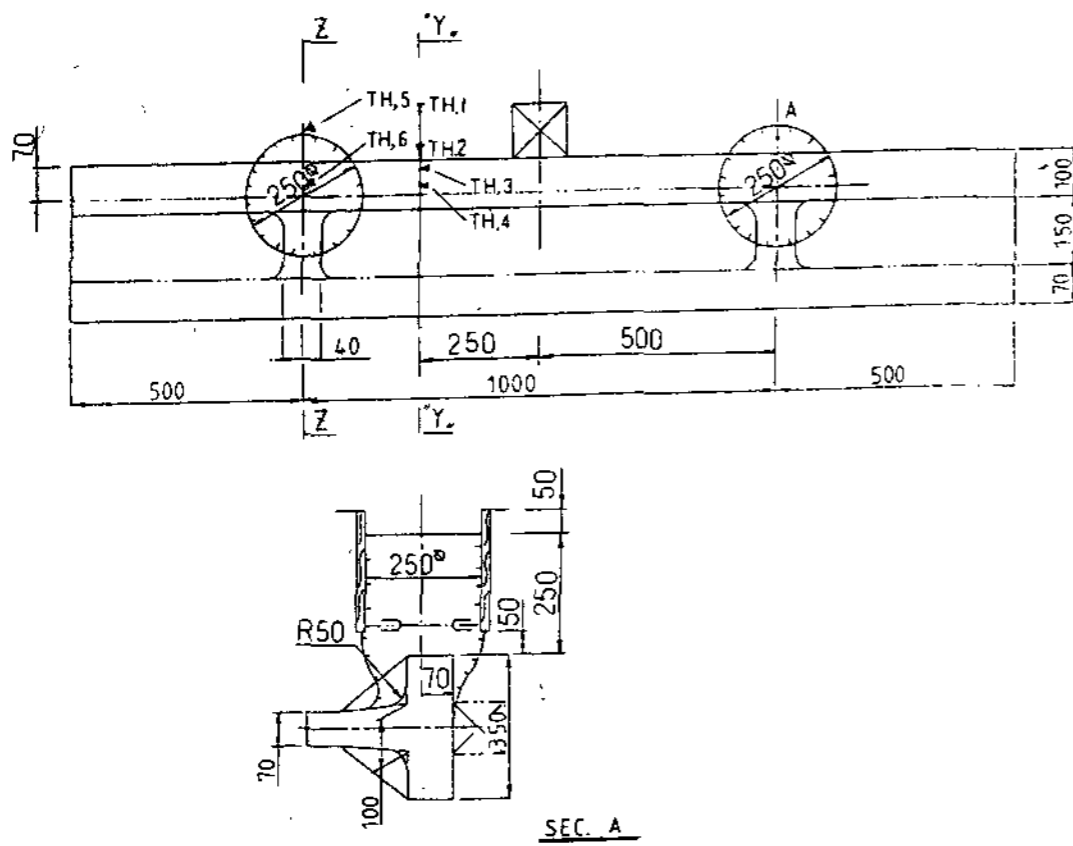


Fig. 2. Schematic of experimental casting.

또한 각 경우 모두 제품의 양끝에는 단열슬리브를 설치하여 주물의 측면으로의 열방출을 최대한 억제하였다. 용탕의 주입방법은 하주법을 택하여 주형 밑부분에 주입구를 설치하였다. 주입완료 후 충분한 시간이 경과한 다음 주형해체기를 이용하여 탈사하였다. 열처리 과정을 거친 시편은 뒷쪽 70mm를 절삭가공하여 결함을 관찰하였다. 그밖의 제품내부의 결함은 절삭가공면에서 초음파 검사를 통하여 그 유무를 확인하였다.

주조시 주물 및 주형내에서의 온도변화를 측정하기 위하여 주물 및 주형 각각 3곳 씩 열전대를 설치하였다. 열전대는 B-type 을 사용하였으며, 다중온도측정장치를 통하여 시간에 따른 온도변화를 측정 기록하였다. 용강중에 노출되는 열전대는 Al₂O₃ 99.5%이상의 Corundum 자기관에 넣은 후 다시 석영관에 넣어 이중 보호하였으며, 주형속에 삽입되는 것은 Corundum 자기관으로만 보호하였다.

용강은 전기로에서 제강한 후 하주식 레이들로 출강하여 주조장으로 운반되었다. 출강온도는 1570℃였으며, 10t 레이들을 사용하였다. 출강과

운반시의 온도 강하로 인하여 주입은 대략 1530℃ 보다 낮은 온도에서 이루어 졌다. 주물중량은 860kg, 압탕중량은 230kg으로 총 주입중량은 1090kg이었다. 주입시간은 약 76초였다. 주강품의 화학조성을 표 4에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험 및 계산에 의한 온도변화

Fig.1의 (a)에 1차 주조에 대한 주물내에서의 온도변화의 측정결과 및 계산결과를 표시하였다. 측정값과 계산값이 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

2차 주조에 대한 실험 및 계산결과는 Fig 3의 에 나타내었고, 3차 실험에 대한 것은 Fig 3의 에 나타내었다. 각 경우 모두 초기에 측정값이 주입온도에 까지는 미치지 못하고 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 주입전에 주형을 예열하지 않았으므로 대기온도로 유지되어있던 주형 속으로 용탕이 주입되어 냉각된 것에 의한 영향과 열전대가 2중보호관으로 보호되었기 때문에 온도민감성이 저하되었기 때문이라 생각된다.

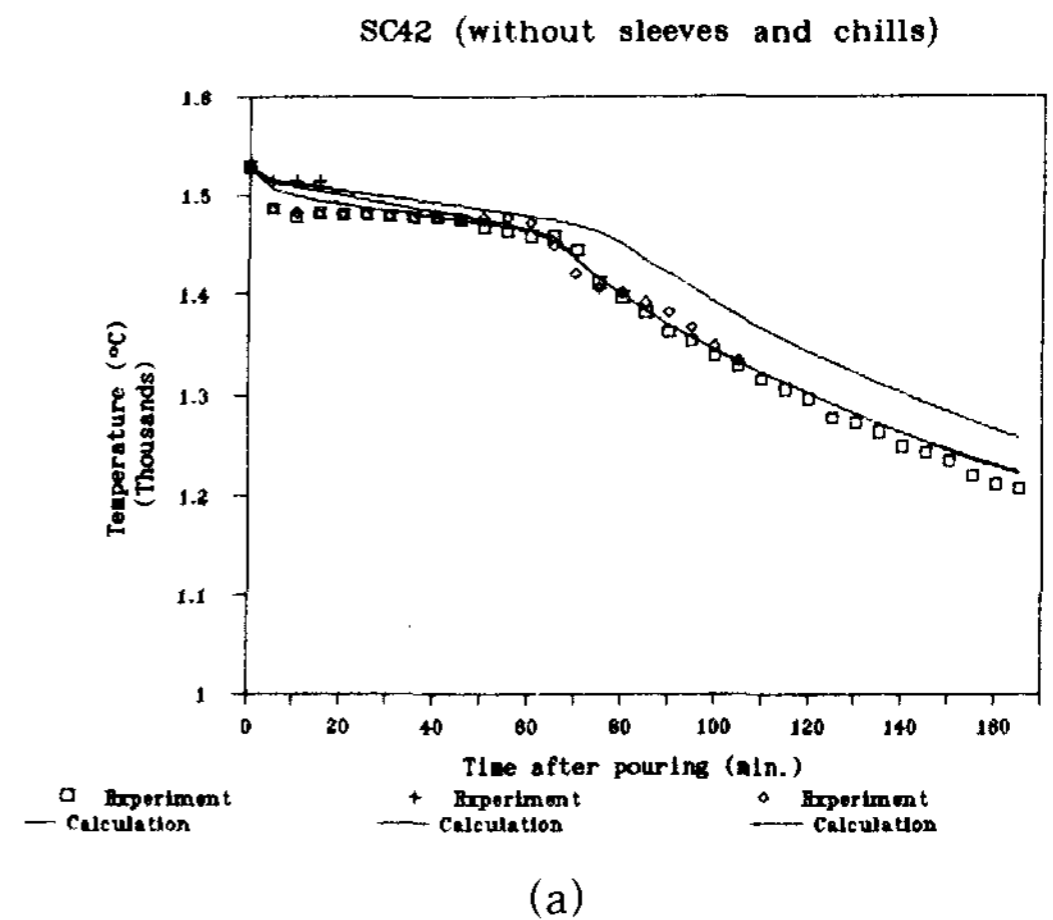
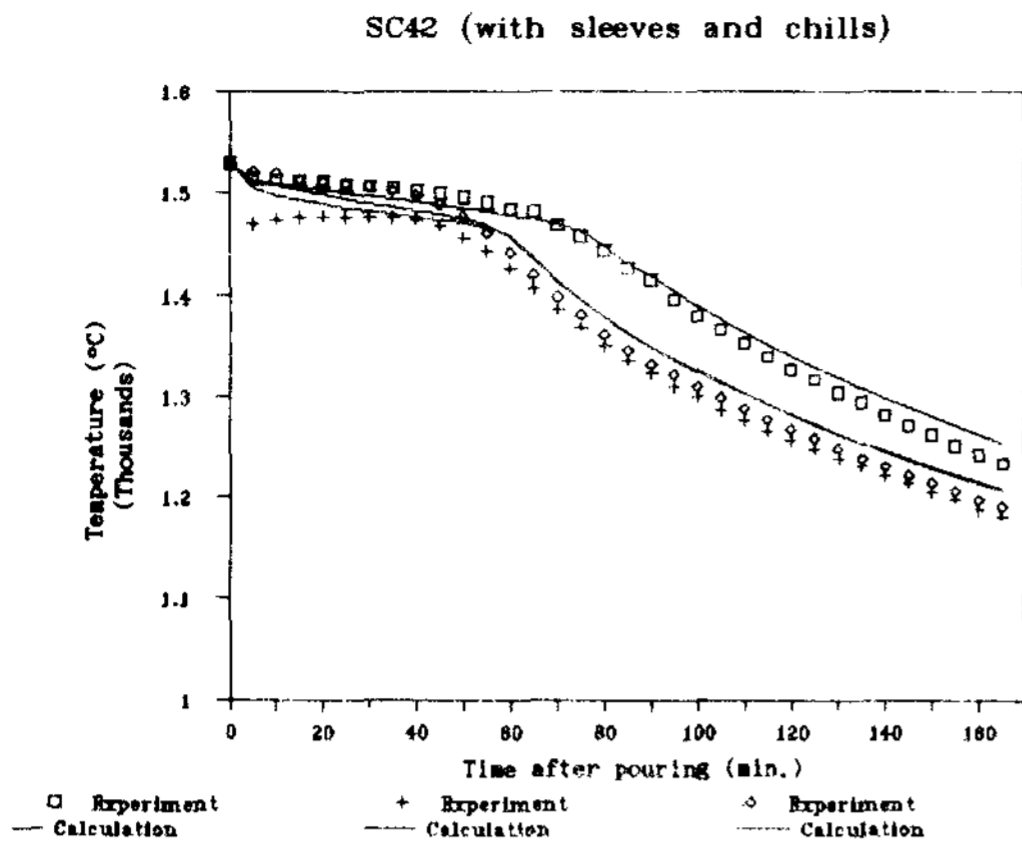
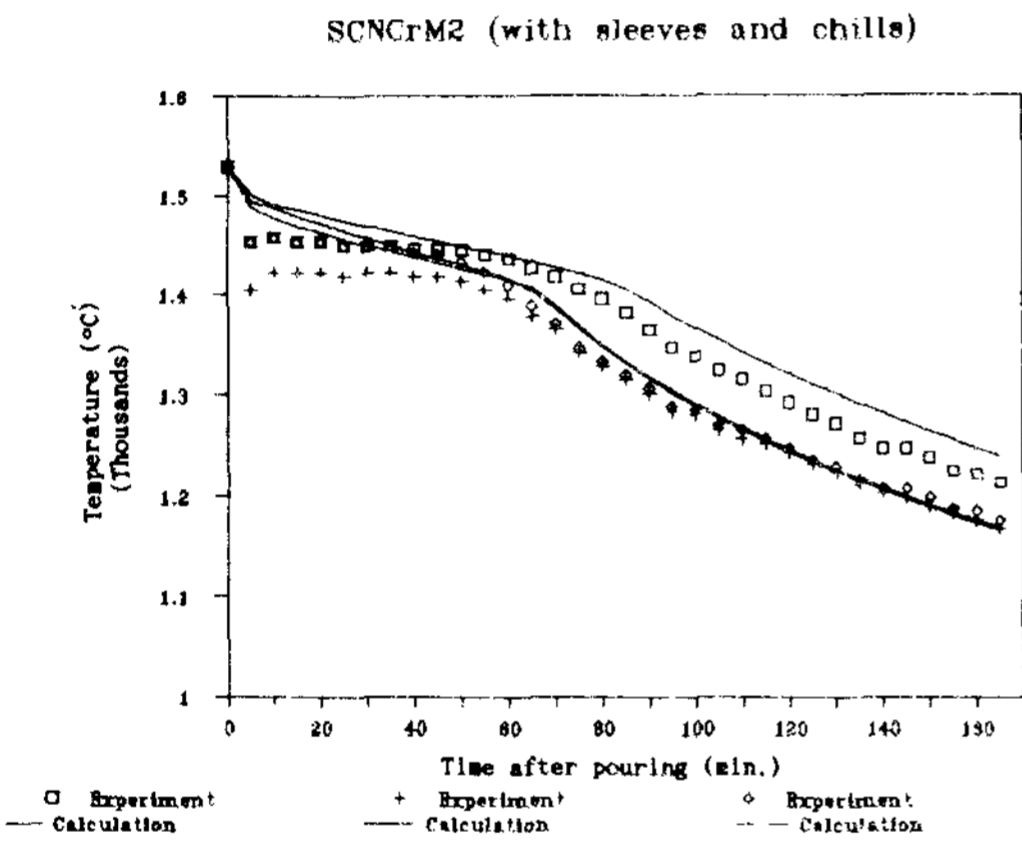


Table 4. Chemical composition(wt%) of SC42 and SCNCrM2 alloys.

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Sn	Al	Ni	Cr	Mo
SC42-1	0.16	0.41	0.75	0.01	0.01	0.01	0.00	0.08	0.0	0.00	0.01
SC42-2	0.18	0.39	0.81	0.01	0.02	0.01	0.07	0.21	0.09	0.06	0.02
SCNCrM2	0.28	0.43	1.07	0.01	0.01	0.07	0.08	0.12	1.53	0.33	0.19



(b)



(c)

Fig. 3. Time-temperature variations calculated in castings :
 (a) casting 1 (SC42), (b) casting 2, (c) casting 3 (SCNCRM2)

4.2 계산에 의한 주물내에서의 온도분포 예측
 Photo 2, Photo 3 및 4에는 각 실험의 경우에 대하여 주입후 주물이 70%정도 응고가 되었을 때

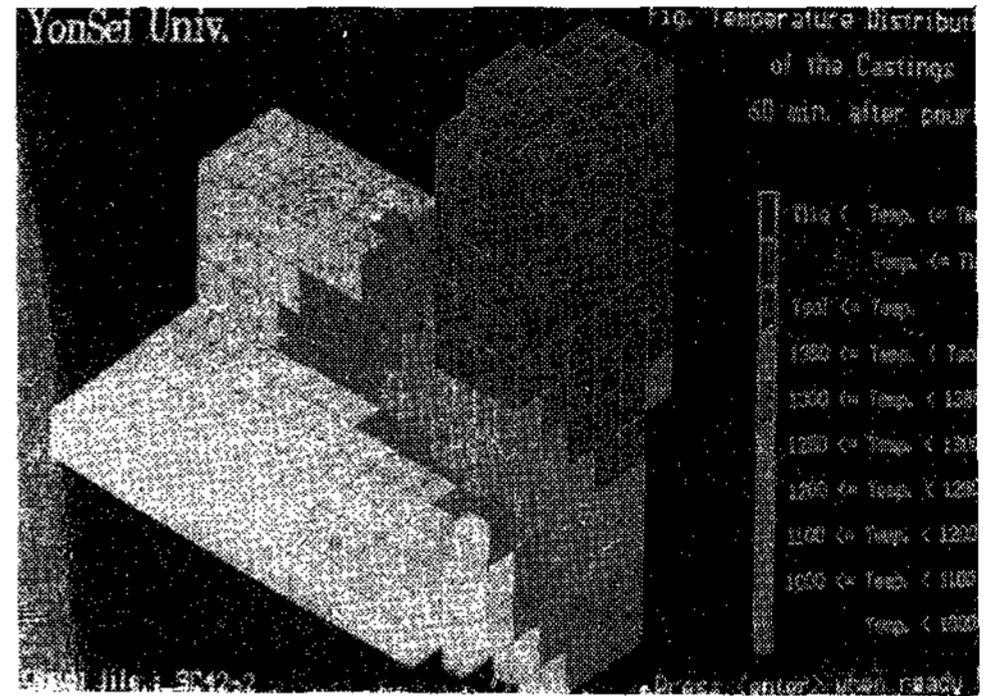


Photo. 2. Temperature distributions in casting 1 :
 (a) 20 min after pouring and (b) 60 min after pouring.

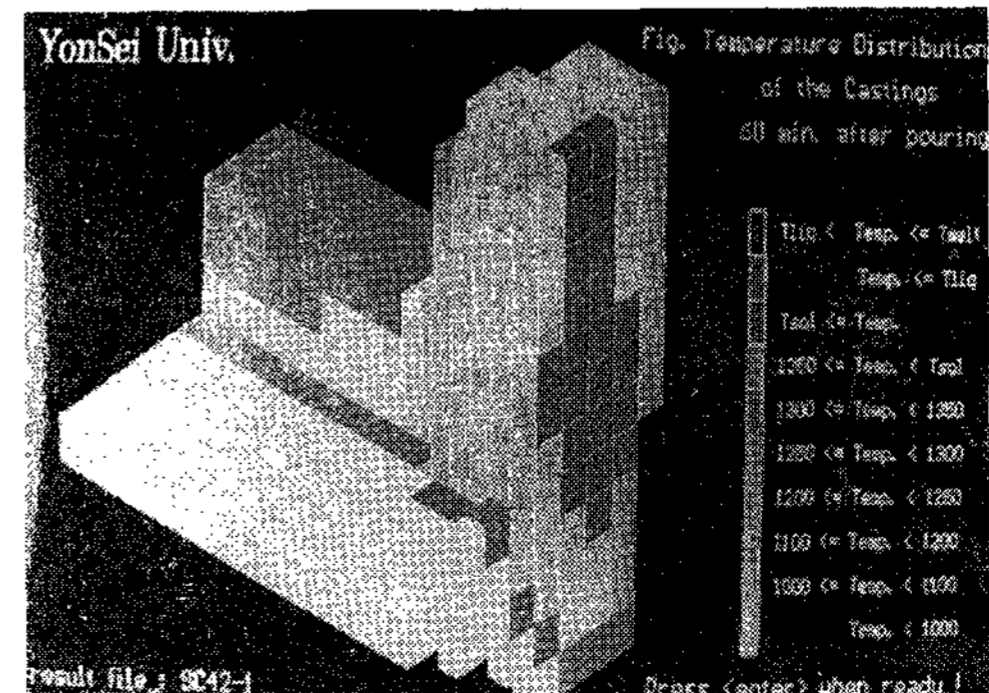
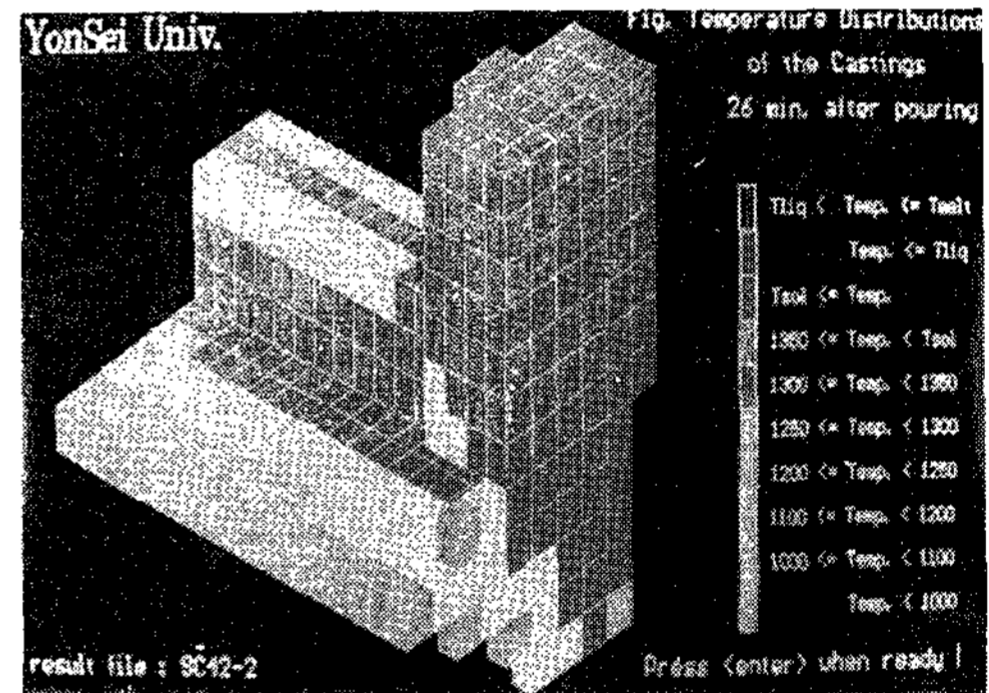


Photo. 3. Temperature distributions in casting 2 :
 (a) 26 min after pouring and (b) 60 min after pouring.

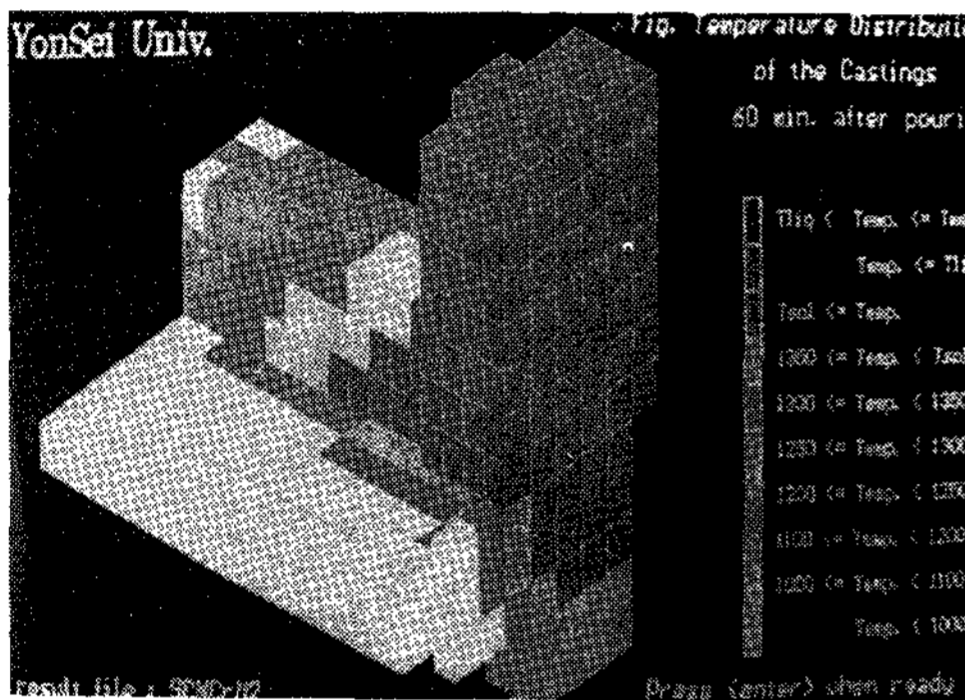
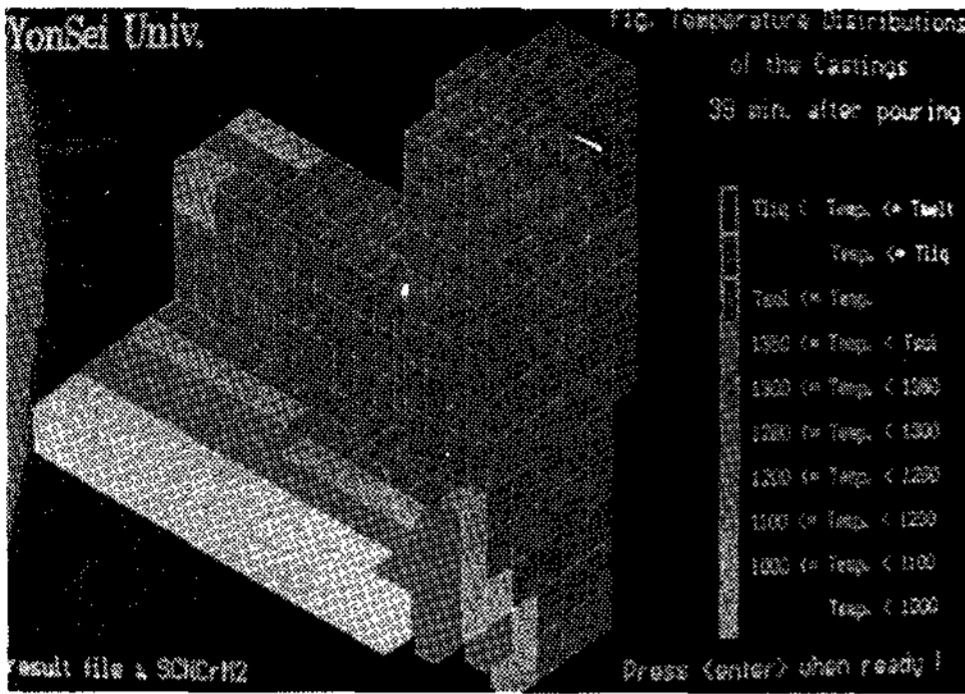


Photo. 4. Temperature distributions in casting 3 :
 (a) 39 min after pouring and (b) 60 min after pouring.

의 시간 및 온도 분포와, 주입후 60분 경과시의 주물의 온도 분포를 나타내었다. 해석 모델에서 압탕 주위에 발열슬리브를 설정하지 않는 경우(Photo 2)는 압탕에서 응고가 비교적 빨리 진행되어지고 있음을 확인할 수가 있다. Photo 3 및 Photo 4에서는 발열슬리브의 영향으로 압탕에서의 응고가 상당히 지연되고 있음을 알 수 있다.

4.3 실제 결함 발생위치와 결함 예측부위의 비교

Photo 5는 실험을 통하여 얻어진 수축공결함 형태이다. 전술한 바와 같이 응고완료후 탈사하여 제품의 뒤쪽을 70mm 절삭가공한 다음 압탕 및 제품중에 발생한 수축결함을 관찰하였다.

Photo 5(a)는 1차 실험 결과로 압탕주위에 발열슬리브를 설치하지 않았던 것인데 압탕이 응고수축량을 충분히 보상해 주지 못하여 수축결함이 제품중으로 내려온 것을 확인할 수 있다. (b)와 (c)는 발열슬리브 및 냉금을 설치한 경우로 슬리브의 영향으로 인해서 수축결함의 형태가 (a)와는 다른 양

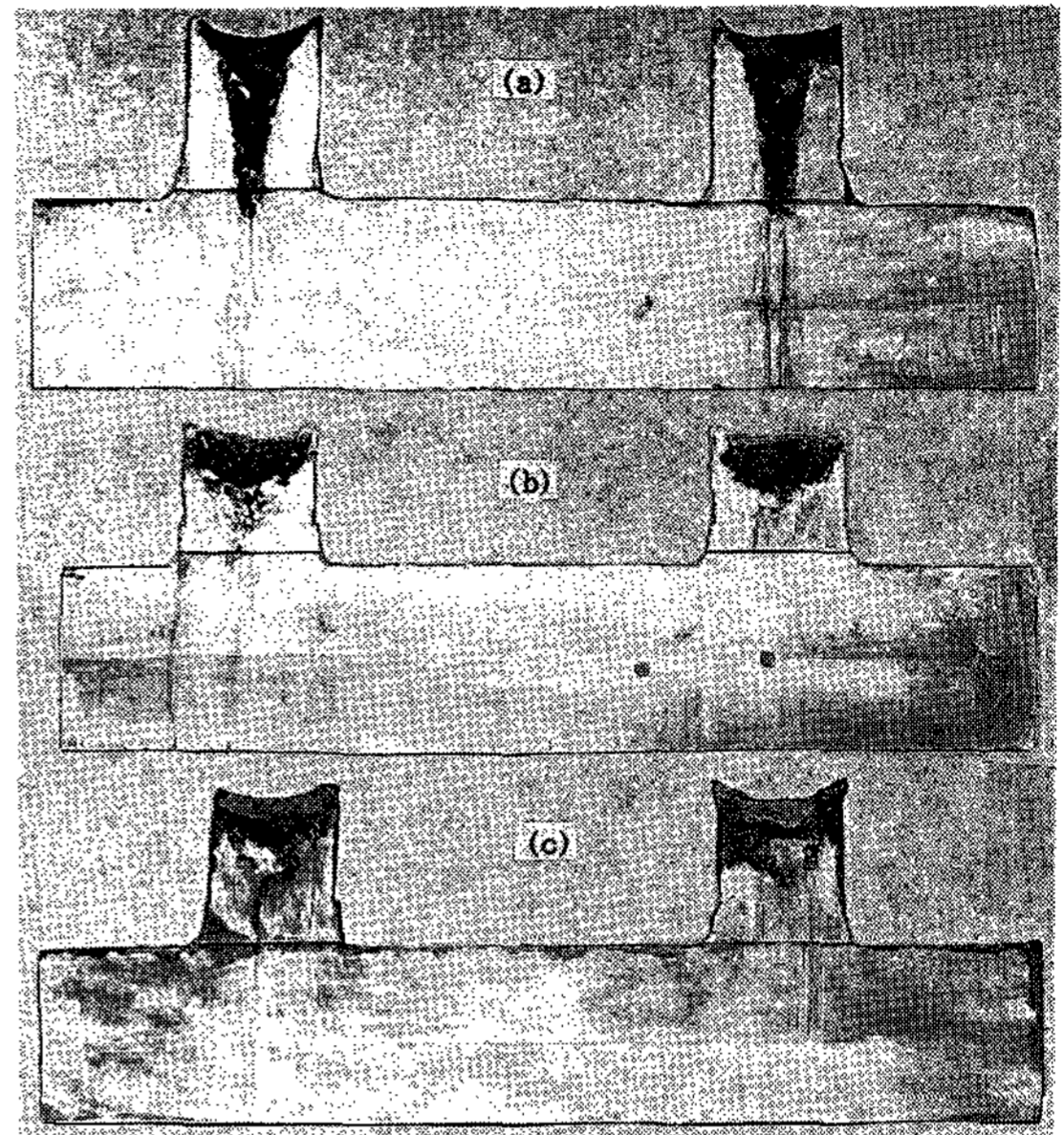


Photo. 5. Formation of shrinkage defects in experimental castings :
 (a) SC42 without sleeves and chills (casting 1)
 (b) SC42 with sleeves and chills (casting 2)
 (c) SCNCRM2 with sleeves and chills (casting 3)

상을 보여주고 있다. 한편 가공면에서 초음파 검사를 실시하여 제품 내부에는 결함이 없는 것을 확인하였다.

Photo 6에는 계산결과로부터 결함예측지역을 표시한 것인데 실제결함 발생위치(Photo 5)와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 주조작업에 대하여 경험이나 직감에 의존하지 않고 최근 급속히 보급되고 있는 퍼스널 컴퓨터에 의해 주조설계를 가능케하는 3차원 응고해석 시스템을 완성하였다. 대형 주강품에 대한 주조실험을 통하여 냉각곡선 및 수축공 결함의 위치를 측정된 후 응고해석 결과와 비교 검토함으로써 본 연구의 타당성 및 실제작업에 대한 적용성 등을 입증하였다.

본 연구에서 완성된 3차원 응고해석 시스템은 형상이 비교적 단순한 대형 주강품의 주조설계에 용

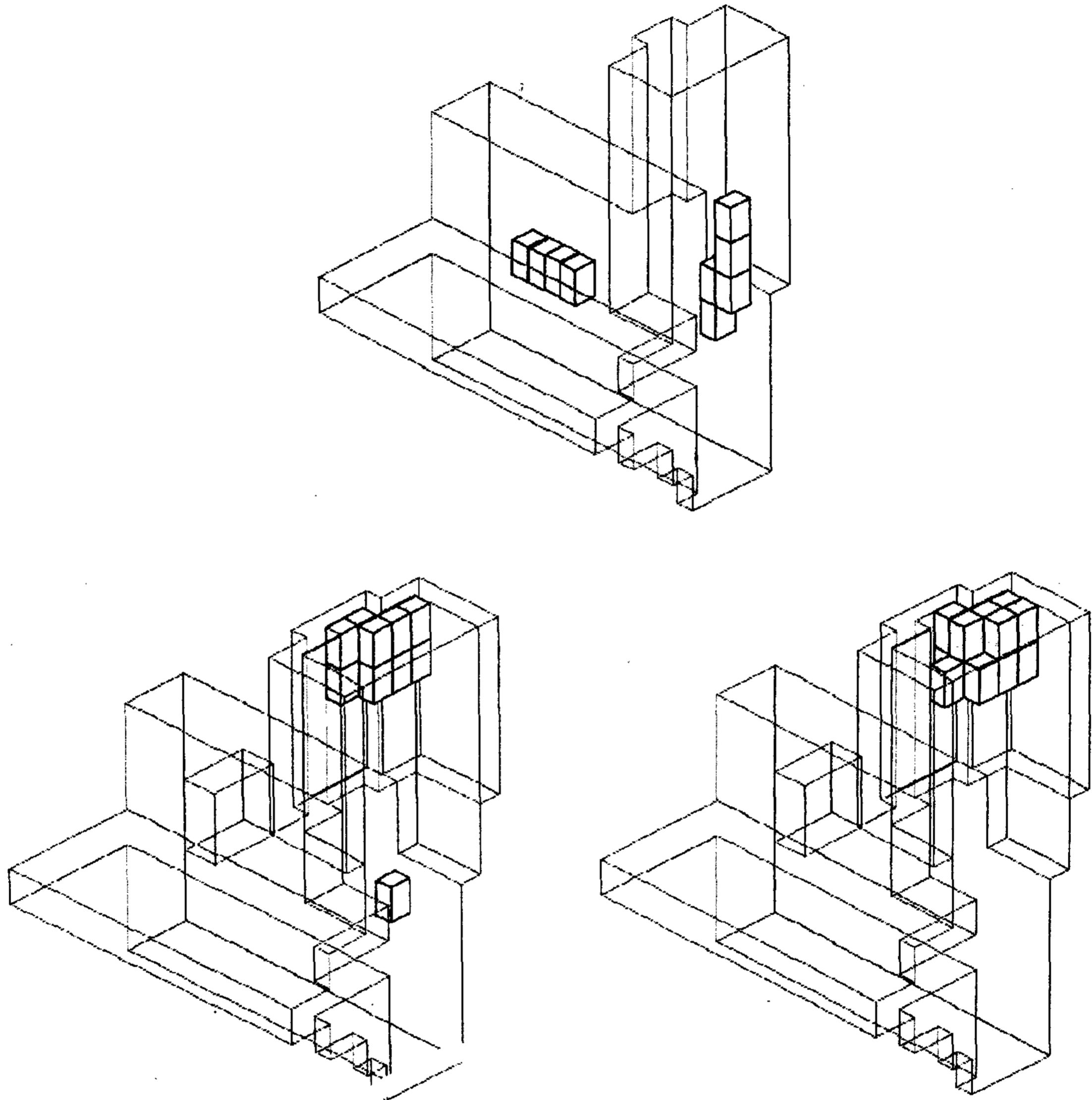


Photo. 6. Computer prediction of shrinkage defects in experimental castings :

- (a) SC42 without sleeves and chills (casting 1)
- (b) SC42 with sleeves and chills (casting 2) and
- (c) SCNCrM2 with sleeves and chills (casting 3)

이하에 적용될 수 있었으며, 생산성 및 주조품의 성능향상 등에 크게 기여하리라 본다. 그러나 보다 복잡한 형상의 주조품에서의 적용을 위해서는 pre-processor 및 post-processor의 기능향상을 위한 연구가 기대된다.

참고 문헌

1. R. J. Sarjant and M. R. Slack ; J. Iron Steel Inst., 177 (1954) 428.
2. J. G. Henzel, Jr. and J. Keverian : J. of

Metals, 17, 5 (1965) 651.

3. E. Niyama : IMONO, 49 (1977) 608.
4. I. Ohnaka : Tetsu-to-Hagane, 65 (1979) 1737.
5. 이영철, 이학주, 홍준표 : 대한금속학회지, 28, 8, (1988) 770.
6. J. K. Choi, D. O. Kim and C. P. Hong : 55th World Foundry Congress. Moscow (1988) Paper No.32.
7. I. Ohnaka and T. Fukusako : IMONO, 48 (1976) 139.
8. R. W. Lewis, K. N. Seetharamu and K. Morgan : Solidification Technology in the foundry and cast house, The Metallurgical Society of AIME (1983) 40.
9. C. W. Kim and G. K. Ruhlandt : Modeling and Control of Casting and Welding Processes, ed. by S. Kou et al., The Metallurgical Society, London(1986) 557.
10. C. P. Hong, T. Umeda and Y. Kimura : Metall. Trans., vol. 15B, 1 (1984) 91, 101.
12. C. P. Hong, T. Umeda Y. Kimura : IMONO, 56, 12 (1984) 758.
13. I. Ohnaka, T. Aizawa, K. Namekawa, M. Komiya and M. Kaiso : Solidification Processing 1987, The Institute of Metals (1988) 300.
14. T. Nakagawa and Y. Takebayashi : J. Japan Light Metals Soc., vol. 36, 7 (1986) 445.
15. C. P. Hong, S. M. Yoo, J. K. Choi, C. Y. So, J. K. Kim and D. H. Lee : 57th Foundry Congress, Osaka(1990).
16. E. Niyama : IMONO, 48, 10, (1977) 608
17. C. Wei, P. N. Hansen, and J. T. Berry : Numerical Method on Thermal Problems, Vol 2, Pineridge Press, (1981) 193