

|||||||
 論 文
 |||||

대형주강품에 대한 CAE 시스템 개발 연구

이영철 · 이두호** · 김종기** · 소찬영** · 최정길 · 홍준표*

Development of a Simultaneous CAE System for the Application to Large Steel Castings

Young-Chul Lee, Doo-Ho Lee**, Jong-Ki Kim**, Chan-Young So**, Jeong-Kil Choi and Chun-Pyo Hong*

Abstract

An integrated computer program consisting of a pre-processor, main solver, and post-processor was developed for the design of large steel castings. The pre-processor, based on the AutoCAD, enables the user to produce approval drawings, casting design drawings and mesh diagrams in sequence using a personal computer. In the main solver, two numerical models were employed; one models the fluid flow during mold filling, and the other models the heat transfer and solidification. The post-processor can be used to present simulation results such as flow pattern, mold filling sequences, solidification times, temperature gradients and location of shrinkage defects by color graphics. In order to validate the applicability of the present integrated program, a series of experiments on simple-shaped steel castings were carried out. After the validation of the present model, it was applied to the casting design of the large steel anchor of an SC42 alloy. Various solidification parameters such as a temperature distribution and a solidification time in the casting and the mold were compared with those obtained experimentally. Simulated results predicting shrinkage defects were in good agreement with those obtained experimentally. It was found that the present method can be successfully applied to the quantitative casting design for complex-shaped large steel castings. (Received June 4, 1997)

1. 서 론

대형주강품의 주조공정에 관한 컴퓨터 시뮬레이션은 주조분야에 있어서 컴퓨터의 집약된 기술의 도구로서 중요한 역할을 하고 있으며, 기존의 경험적인 방법들[1-3]보다 더욱 정확하고, 효율적으로 응고거동과 변수들을 예측하고 제어할 수 있는 장점을 제공하고 있다. 지금까지, 주물의 결함부위 예측을 위하여 여러 가지 수치해석기법들이 개발되어 왔다[4,5]. 이러한 시뮬레이션들은 주입조건과 게이트 형상등과 같은 주조공정 변수들의 최적화를 위한 결정적인 자료와 정보들을 제공하였다. 한편 급속한 하드웨어의 발전과 더불어, 워크스테이션급의 성능을 갖는 PC를 사용하여 주조공정의 수치해석을 수행하는 것이 가능하게 되었다. 한편, 용탕의 유동을 고려하지 않은 열전달 및

열응력 해석은 정량적인 주조방안 설계를 위한 정확한 방안을 제공할 수 없음을 많은 연구자들에 의해 밝혀졌다[6-9]. 그러므로 주조방안 설계에 있어 용탕충전과정과 완전충전후의 유동 및 열전도 해석이 동시에 수행되어야 한다.

한편, 소규모 주조업체에서 상용 컴퓨터 해석시스템을 적용하는데에는 우선 이미 작성된 주조도면을 직접적으로 응고 및 유동해석프로그램에 적용할 수 없다. 또한 적절한 프리프로세서의 확보 및 운용문제, 각종 컴퓨터 해석용 주조설계 및 도면작업등을 수행할 수 있는 인적자원 부재 및 경제적 여건등에 의하여 아직도 많은 어려움이 있다.

그림 1은 해석방법을 이용한 주조방안 작성 과정에 대한 기존의 방법과 본 연구에서 개발된 방법과의 차이점을 비교하고 있다. 그림 1의 (a)는 기존의 해석 적

한국생산기술연구원(Korea Institute of Industrial Technology)

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

**인천제철(Incheon Iron & Steel Co. Ltd.)

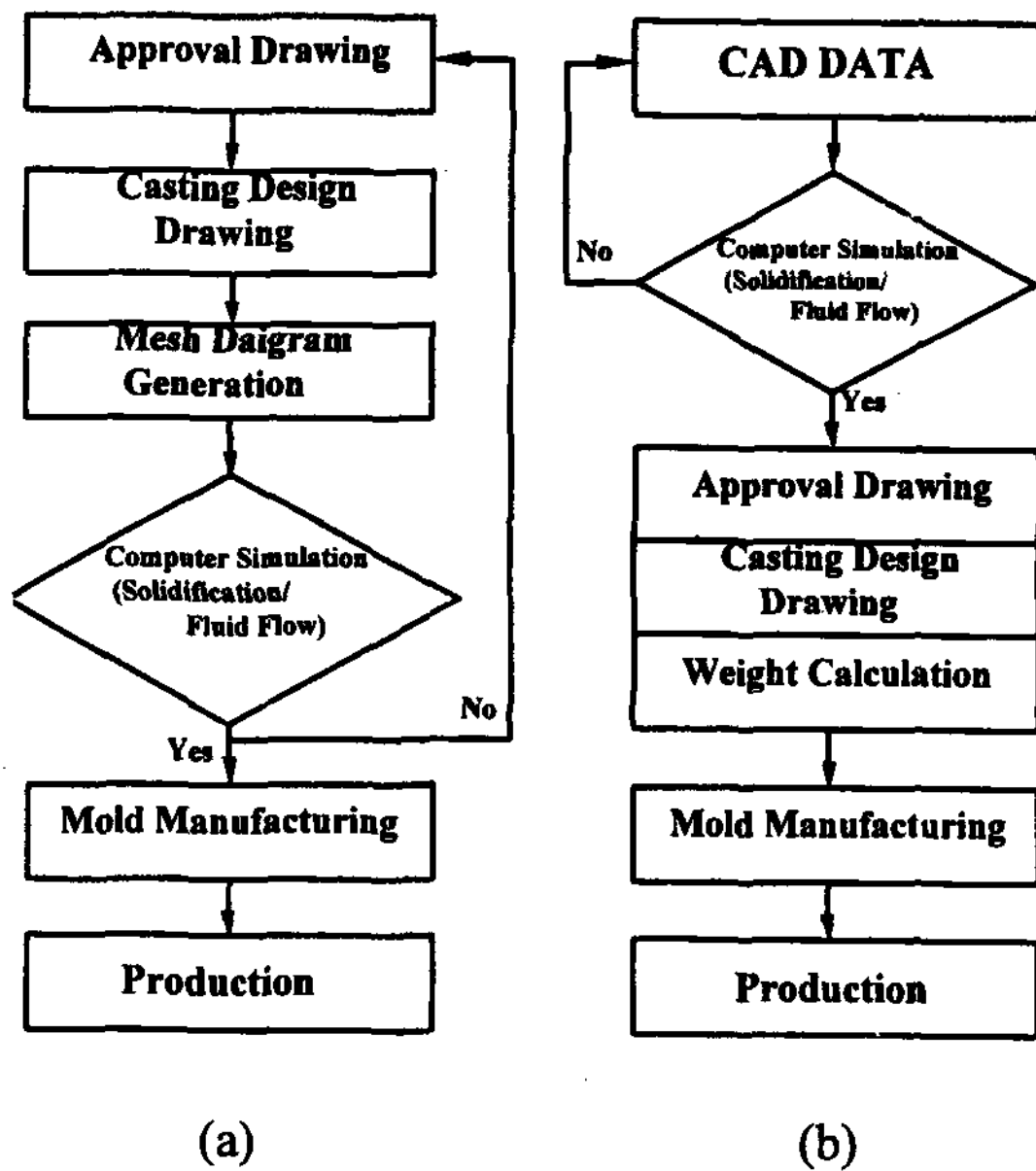


Fig. 1. The development of the integrated computer simulation technique; (a) conventional routine and (b) the present developed CAE routine.

용 과정으로, 주조작업자가 승인도, 주조방안 및 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하기 위한 요소분할도를 작성하는데 있어 여러 단계를 수행하여야 한다. 특히 적당하지 않은 방안에 대해서는 불필요한 과정을 여러번 반복하여야 하는 번거로움이 따르게 된다. 그러나 그림

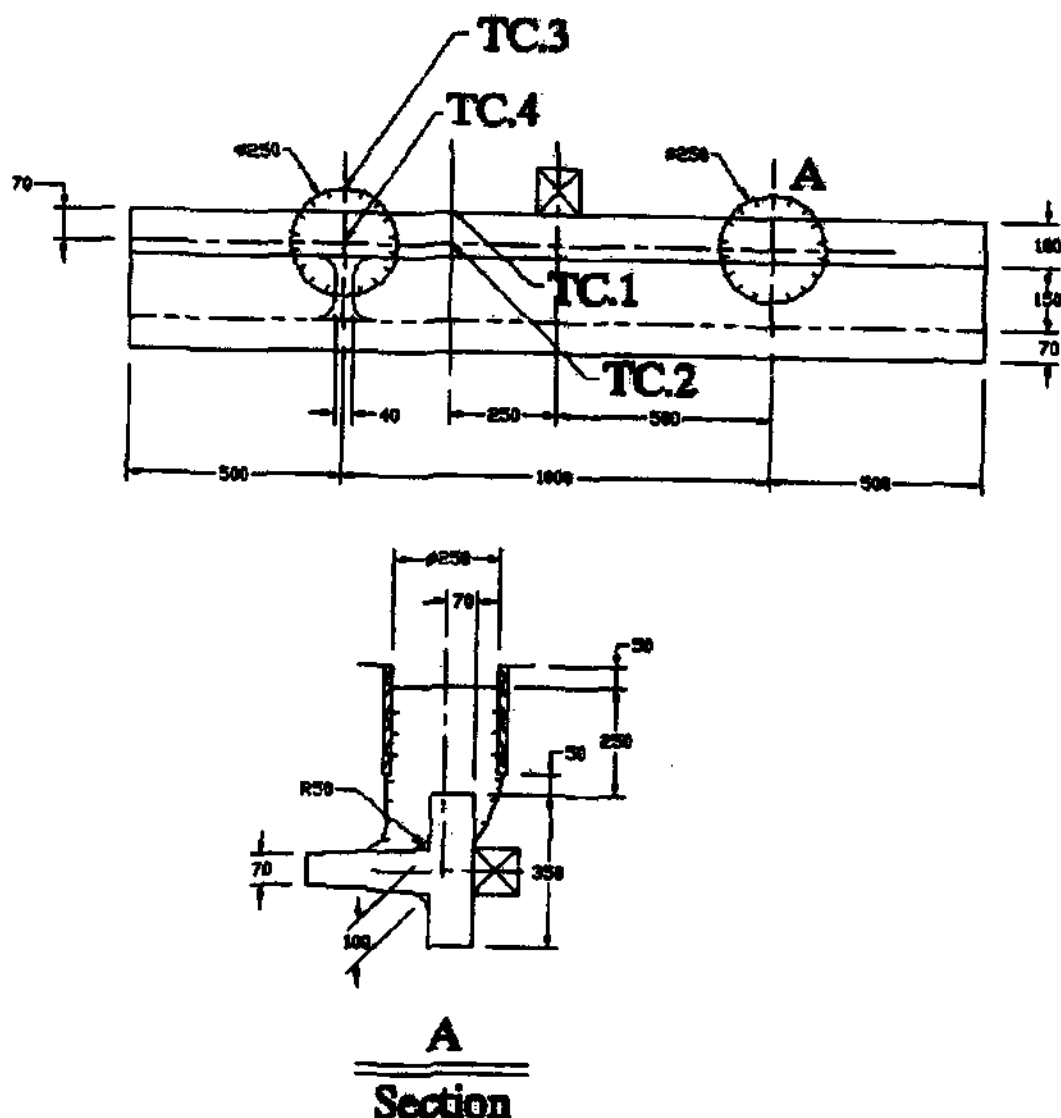


Fig. 2. Geometrical drawing of the testing.

1의 (b)와 같이 본 연구에서 제안하는 방법을 사용하여, PC용 범용 CAD인 AutoCAD를 이용함으로써 주조방안도, 승인도 및 요소분할도의 작성등의 일련의 과정을 효율적으로 동시에 수행하였다.

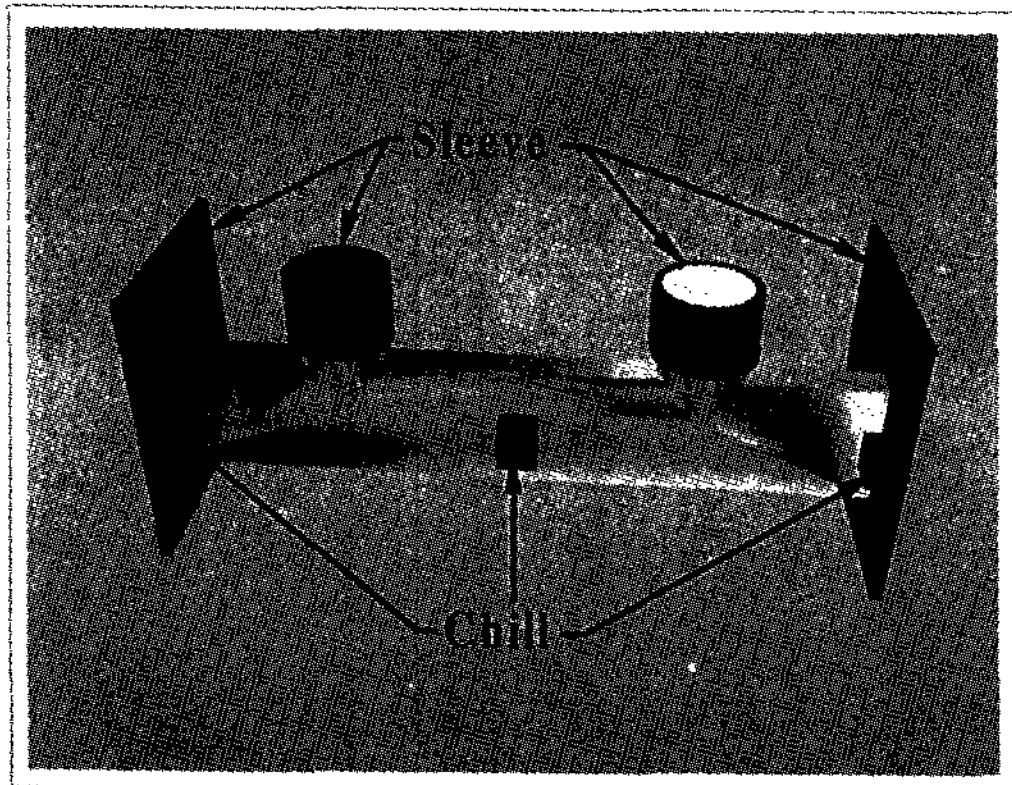
본 연구에서는 대형 주강품에 대하여 중량계산, 주물의 압탕 크기 및 표면적 계산이 가능하고, 응고 및 유동해석이 가능한 CAE 시스템을 개발하였다. 프리프로세서로서는 PC상에서 운용가능한 AutoCAD를 이용함으로써 해석에 필요한 요소분할도를 작성하였다. 솔버로는 C. P. Hong 등에 의해 개발된 Energy marker법[10]을 이용하여 대형주강품에 있어서 열 및 유동해석을 수행하였다. 개발된 시스템의 정확성을 검증하기 위하여 기본 형상 모델에 대하여 응고 및 탕류해석을 적용하고, 실험을 수행하여 해석결과와 실험결과를 비교하였다. 개발된 프로그램의 검증과정 후에 복잡형상의 실제 생산모델인 Anchor casting에 적용하여 압탕방안에 따른 최적의 주조조건 도출에 적용하였다.

2. 실험방법

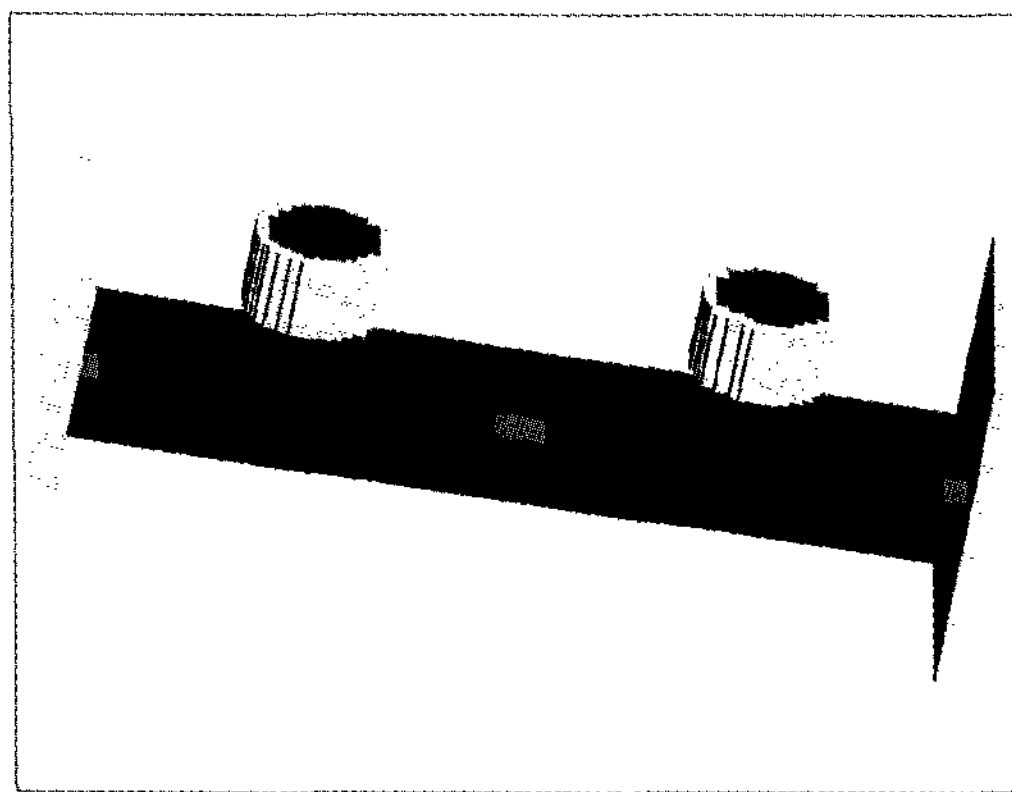
개발된 프로그램을 검증하고, 주물결함 및 주조공정에 있어 슬리브와 냉금의 효과를 알아보기 위하여, 기본형상 모델에 대한 실험을 수행하였다. 실험은 슬리브와 냉금을 사용하지 않은 경우와 사용한 경우의 2가지로 대별하여 행하였다. 사용된 냉금의 치수는 110 mm × 110 mm × 110 mm, 시험 주물의 치수는 길이 200 cm, 폭 32 cm, 높이 65 cm이었고, 직경 25 cm, 높이 20 cm의 압탕을 사용하였다. 양측면으로의 열손실을 방지하기 위하여 단열 슬리브를 사용하였다. 그림 2에 시험 모델에 대한 2차원 도면과 열전대의 위치를 표시하고 있다. 온도측정은 다중온도측정장치를 사용하여 대표적인 4곳에서 측정하였고, 시험 주조된 주물은 길이방향으로 분할하여 주조결함 여부를 확인한 후, 해석결과와 비교하였다.

3. 계산 방법

시험모델의 형상을 AutoCAD R13을 사용하여 솔리드 모델링 하였고, 이로부터 요소분할도를 작성하였다. 총 요소수는 121,332개이고, 그림 3에 솔리드 모델링 및 요소분할도를 나타내었다. 해석은 RAM



(a)



(b)

Fig. 3. Solid modeling and mesh diagram of the testing. (a) solid modeling and (b) mesh diagram

64MB, 166MHz 586 PC에서 수행하였다. 해석에 사용되는 요소는 솔리드 모델링으로부터 자동적으로 생성되었다. 해석을 수행하기 전에 주물의 총중량, 표면적 및 주물 각부위 모출계산을 AutoCAD상에서 솔리드 모델을 이용하여 수행하였고, 이로부터 John's 방정식(11)을 사용하여 압탕의 크기를 간편하게 결정할 수 있었다.

Table 1. Physical properties used in calculations

Material	Density (g/cm ³)	Initial temp.	Latent heat	T _{liq.} (°C)	T _{sol} (°C)
SC42	7.50(s) 7.00(l)	1530.0	65.0	1515.0	1455.0
mold	2.75	20.0	-	-	-
sleeve	1.10	20.0	-	-	-
chill	7.60	20.0	-	-	-

Table 2. Heat transfer coefficients used in the calculation

	cal/cm ² ·sec·°C
cast/mold	0.2
chill/mold	0.2
cast/chill	0.013
cast/air	4.0 × 10 ⁻⁴
mold/air	2.0 × 10 ⁻³

$$D_R \sqrt[3]{\frac{24FW_c}{\pi\rho}} = 9.86 \sqrt[3]{FW_c}$$

(여기서 D_R; 압탕 직경, F; 압탕/주물의 부피비, W_c; 주물중량, ρ; 주물밀도)

해석에 사용된 주물 및 주형의 열물성치는 Table 1 [12]에 나타내었고, 각 물질간의 열전도도는 Table 2 [12]에 나타내었다. 그리고 열전도도 및 비열은 온도 구간별 측정값을 Table 3[12]과 같이 사용하였다. 주물 및 압탕의 중량은 860 Kg과 230 Kg이었고, 주입시간은 76초이었다.

3. 1 지배방정식

열 및 유동해석을 위한 기본방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Navier-Stokes 방정식 :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u + g_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v + g_y$$

Table 3. Thermal conductivity and specific heat used in the calculations

Temp. (°C)	Thermal conductivity (cal/cm·sec·°C)		Specific heat (cal/g·°C)	
	SC42	Mold	SC42	Mold
~200	0.114	1.969 × 10 ⁻³	0.121	0.170
300	0.103	1.842 × 10 ⁻³	0.138	0.180
500	0.093	1.872 × 10 ⁻³	0.163	0.188
700	0.081	2.011 × 10 ⁻³	0.211	0.195
900	0.071	2.239 × 10 ⁻³	0.180	0.200
1100	0.072	2.603 × 10 ⁻³	0.181	0.205
1200	0.074	2.972 × 10 ⁻³	0.192	0.207
T _{liq.} ~	0.100	-	0.200	-

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w + g_z$$

(여기서 u, v, w; x, y, z 방향속도, p; 압력, g; 중력가속도 v; 동점성계수, ρ; 밀도)

에너지 방정식 :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K \frac{\partial T}{\partial z}) + \rho L \frac{\partial fs}{\partial t}$$

(여기서 L; 응고잠열, fs; 고상율)

3.2 열 및 유동해석 방법

주형 cavity내의 충전과정을 분석하기 위하여 SMAC[13]법을 사용하였다. Navier-Stokes식과 연속방정식은 규칙격자를 사용한 차분법을 이용하여 이산화하였으며, 압력은 경계조건으로 잡는데 어려움이 많으므로, 포텐셜함수로 대체하여 사용하였다. 또한 속도 경계조건과 자유표면 응력조건(수직 및 전단)을 이용하여 매 time step마다 경계조건을 보정하였다. 3차원 열전도 해석은 유동해석에서 사용된 요소분할 구조에

대하여 전진차분법을 이용하여 수행하였다. 기존의 MAC 또는 SMAC 방법[13,14]은 사용되는 marker가 단지 표면의 위치만을 정의 할 수 있었고, 에너지의 전달과정은 계산할 수 없었다. 그러나 Energy marker법 [10]을 이용하면, 주형충전과정에서의 전도 및 대류에 의한 열전달 문제를 동시에 해결할 수 있다. 즉 매 time step마다 각 cell 은 주변요소와 에너지를 교환하면서 충전 양상을 해석하는 것이 가능하다.

4. 결과 및 고찰

4.1 개발된 프로그램의 검증

그림 4는 주물 및 주형에 삽입된 열전대로 측정된 실험값과 해석값을 표시한 것이다. 본 해석시스템의 타당성을 검증하기 위하여 두가지 계산을 수행하였다. 첫 번째는 유동을 고려하지 않은 응고해석만 수행한 경우이고(Code 1), 두 번째는 Energy marker법을 사용한 유동 및 응고해석을 동시에 수행한 경우이다 (Code 2). [10, 15] 그림 4(a)와 (b)에 주입구 부분의 TC. 1과 압탕부분의 TC. 2에 대한 냉각곡선을 나타내

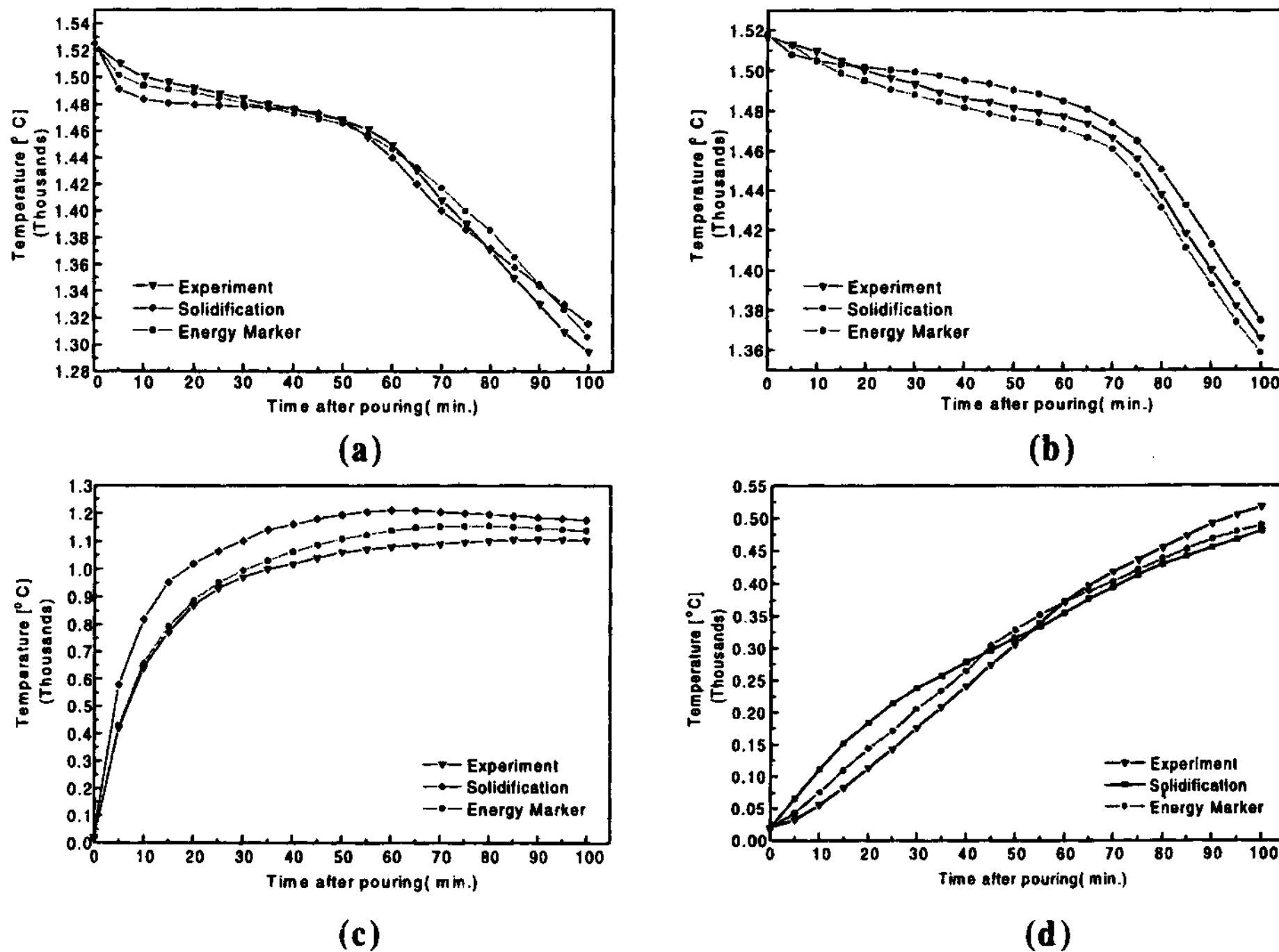


Fig. 4. Thermal histories at different locations in the casting and mold without sleeves and chills; (a) TC. 1, (b) TC. 2, (c) TC. 3, and (d) TC 4.

고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 냉각의 초기단계에서는 Code 1에 의해 계산된 온도변화는 항상 Code 2 및 실험에 의한 결과보다 낮게 나타난다. 이는 Code 1은 계산의 초기에 용탕이 주형을 완전 충전하고 있다고 단순하게 가정하고 있기 때문으로, 이는 실제 상황과는 매우 다른 점이다. 반면에 Code 2는 cavity내를 용탕이 충전되어 가는 과정을 고려함으로써 주입용탕의 온도는 충전과정에서 감소하고, 주형의 온도는 초기 온도보다 상승하는 효과를 잘 예측하고 있다. 따라서 Code 2에 의해 계산된 결과는 Code 1의 결과보다 실험결과에 더욱 일치함을 알 수 있다. 그림 4(c) 및 (d)는 주입구쪽의 주형에 대한 열전대 TC. 3과 압탕부근의 열전대 TC. 4에 대한 온도변화를 나타내고 있다. 여기서 알 수 있듯이 Code 2에 의한 결과가 실험결과와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

또한 구조결함의 형성에 대한 슬리브 및 냉금의 효과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5 (a)-(c)에서 보듯이 수축공은 응고시간 및 최종 온도분포 곡선상의 페루프 부위 존재로부터 적색의 부분에서 발생함을 알 수 있고, 이는 실험결과로부터 확인할 수 있다. 반면에 슬리브와 냉금을 사용한 경우 그림 5(d)-(f)에서 보듯이 주물부분에 수축공이 발생하고 있지않음을 해석결과 및 실험결과로부터 알 수 있으며, 해석결과가 정확함을 볼 수 있다. 따라서 기본 모델에 적용하여 본 결과,

슬리브 및 냉금의 정확한 사용은 주물내부의 수축공의 발생을 억제할 수 있으며, 측정된 냉각곡선으로부터 Energy Marker법을 사용한 Code 2가 응고해석만 수행한 Code 1보다 실제 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

4.2 Anchor casting에 대한 적용

Energy Marker법을 고려한 해석 시스템을 실제 현장에서 생산하고 있는 복잡형상인 Anchor주물에 적용하였다. 재질은 SC42이고, 사형주형을 사용하였다. 해석하기 위한 모델 입력은 AutoCAD를 사용하였으며, 이로부터 얻어진 솔리드 모델로부터 해석에 필요한 요소분할도를 작성하였다. 총 요소갯수는 210,000개이고, 요소생성시간은 1시간이었다. 또한 압탕을 포함한 총 주물중량은 17,250 Kg이었다. 그림 6은 적당하지 않은 압탕을 설치하였을 경우의 Anchor casting의 구조방안을 보여주고 있다. 그림 6(a), (b)는 솔리드모델링 및 요소분할도를 보여주고 있으며, (c)는 90% 충전되었을 경우의 계산된 충전 상황을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 온도가 가장 높은 부분이 이미 응고한 부분들로부터 고립되어 있음을 알 수 있다. 이 결과 용탕의 유동이 수축공이 발생할 부위에 추가적인 공급을 억제당하여 설치된 압탕의 효율적 사용이 불가능하다. 그림 6의 (d), (e)는 완전충전시의 해석에 의

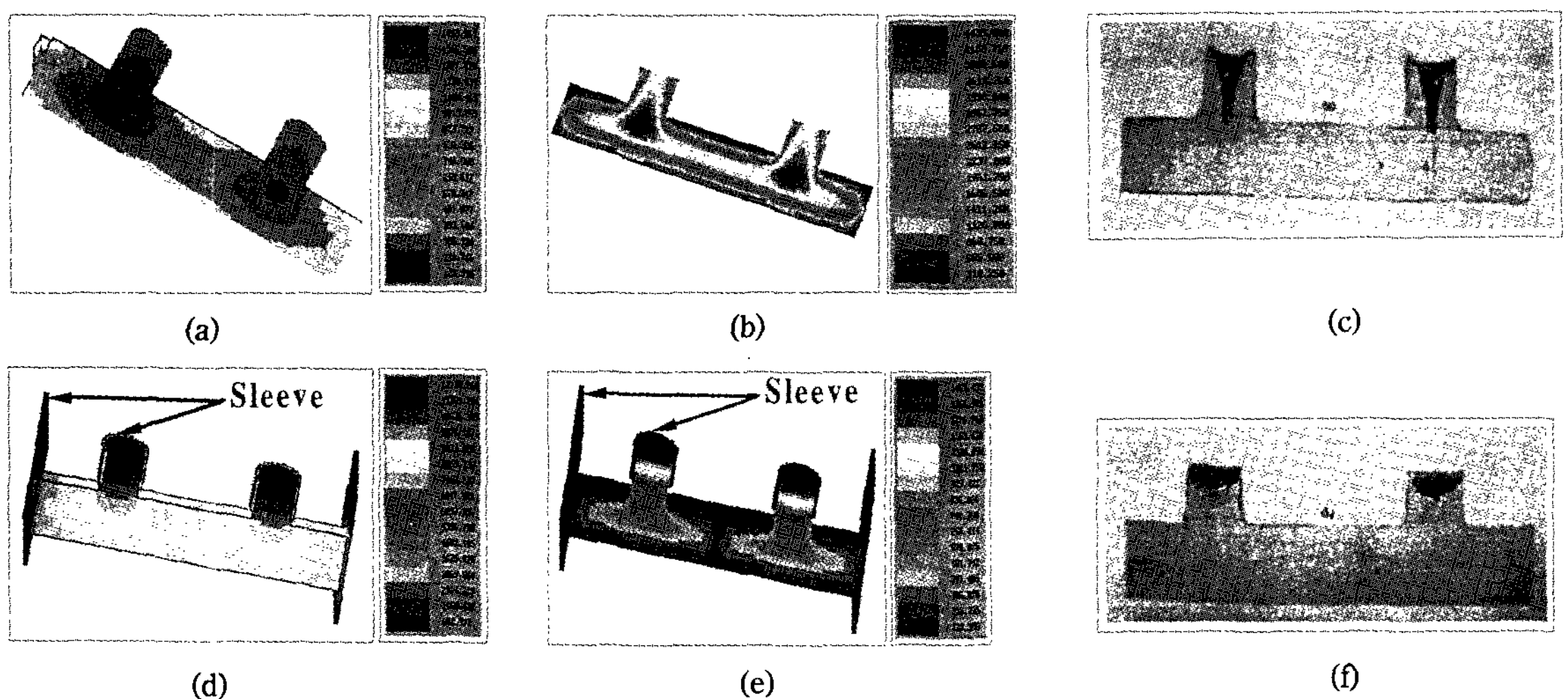


Fig. 5. The effects of sleeves and chills on solidification defects in the simple shaped casting. (a) temperature distribution (without sleeves and chills), (b) solidification time (without sleeves and chills), (c) sectioned test casting (without sleeves and chills), (d) temperature distribution (with sleeves and chills), (e) solidification time (with sleeves and chills), and (f) sectioned test casting (with sleeves and chills)

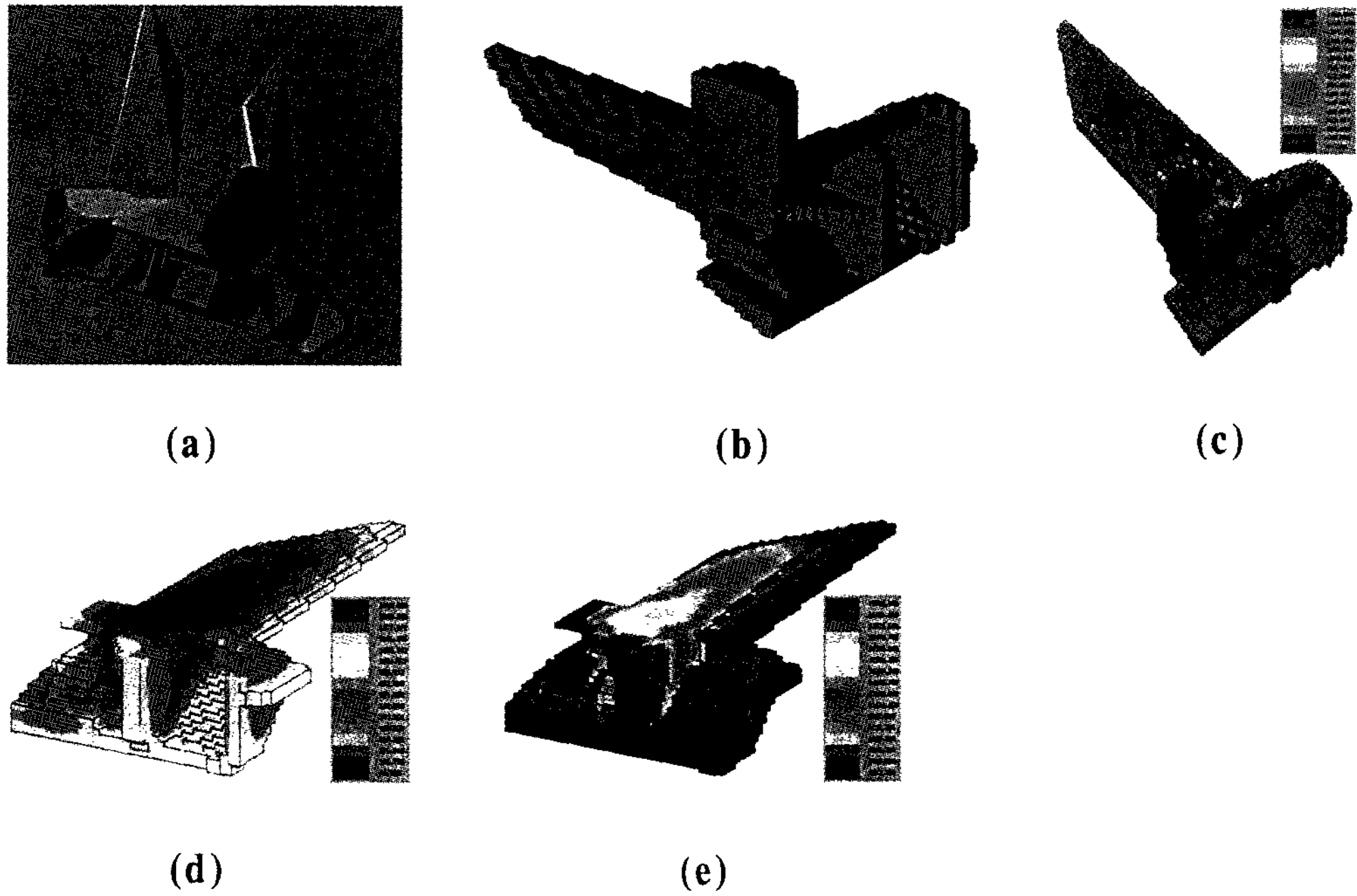


Fig. 6. Improper design of anchor casting with an inappropriate attachment of a riser and sleeve. (a) solid model, (b) mesh diagram, (c) filling pattern at 90% of capacity, (d) temperature distribution, and (e) solidification time

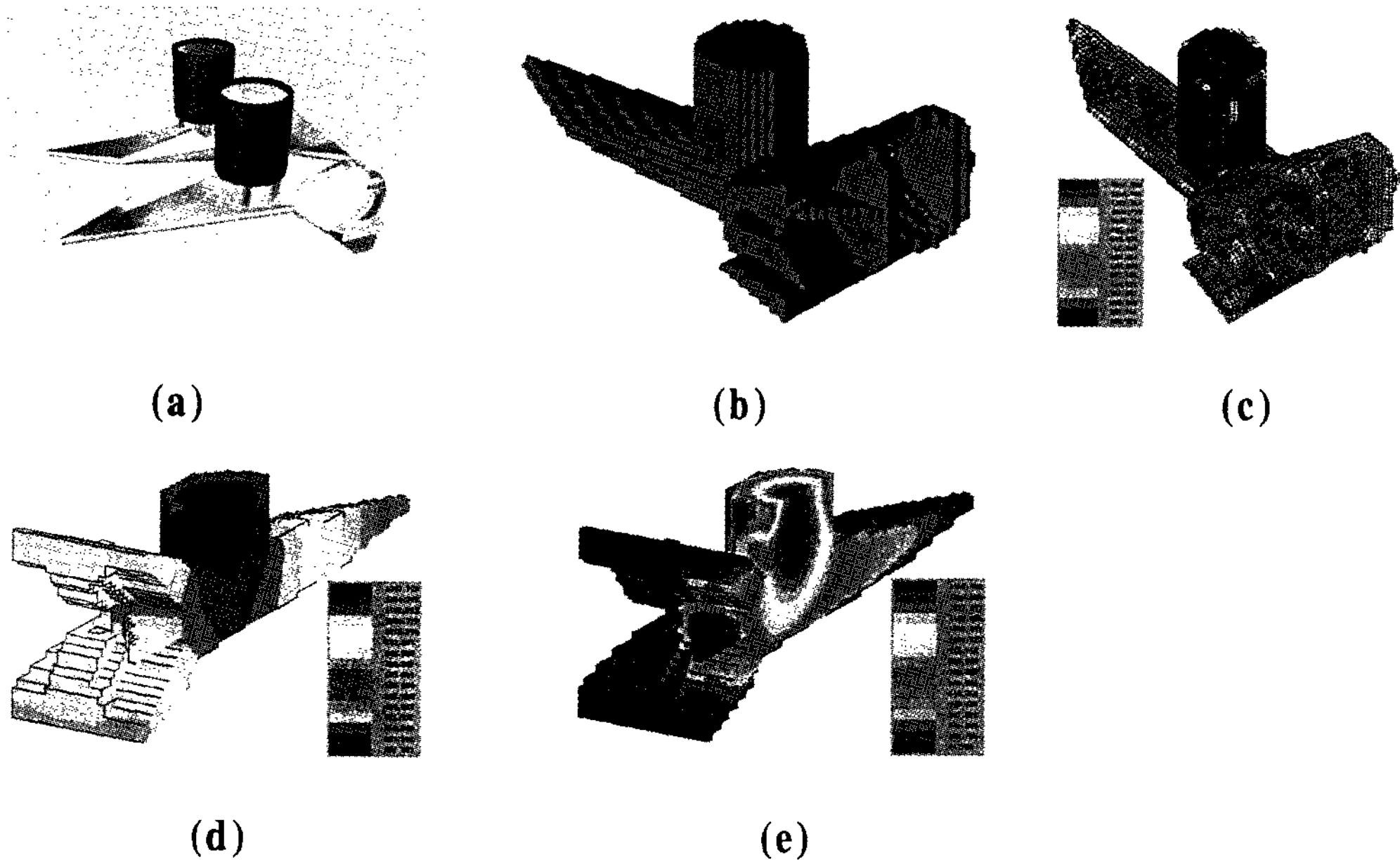


Fig. 7. Improved casting design of the anchor, based on the simulation results. (a) solid model, (b) mesh diagram, (c) filling pattern at 90% of capacity, (d) temperature distribution, and (e) solidification time



Fig. 8. Experimental results of sectioned anchor casting with proper conditions.

한 온도 분포 및 응고시간 분포를 나타내고 있다. 수축공의 발생위치는 그림에서 보듯이 제품내부에 발생하고 있음을 볼 수 있다.

따라서 위의 결과를 기본으로 압탕의 위치를 변경하여 해석 및 실험을 수행하였다. 그림 7은 개선된 주조방안도에 의한 솔리드 모델 및 주조방안도를 보여주고 있다. 그림 7의 (c)에서 보듯이 충전 90%에서의 해석결과로부터 최종응고 지역이 압탕설치 지역으로 방향성으로 진행하고 있음을 알 수 있고, 이는 용탕이 수축공 발생 지역을 보충할 충분한 역할을 압탕이 수행할 수 있음을 알 수 있다. 그림 7의 (d), (e)의 100% 충전시의 응고시간 및 온도분포도로부터 제품의 최종응고지역은 압탕으로부터 용탕을 공급받아 건전한 제품을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 8에서 보듯이 실제 생산된 Anchor는 그림 7의 방안으로 건전하게 제작되었음을 알 수 있다. 이로부터 건전한 제품은 최적의 주조방안으로부터 얻을 수 있음을 알 수 있었고, 본 연구에서 개발된 해석시스템과 실험결과는 잘 일치함을 알 수 있었다.

5. 결 론

대형주강품 해석을 위하여 프리프로세서, 솔버 및 포스트프로세서로 구성된 컴퓨터 프로그램을 개발하

였다. 솔버에서는 열전달 및 유동을 동시에 시행할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 프리프로세서는 PC상에서 운용가능한 AutoCAD를 사용하여 솔리드 모델링 작업으로 요소분할도, 주조방안도 및 승인도, 더 나아가 중량, 표면적 계산 등 일련의 작업을 동시에 수행할 수 있었다. 본 해석 시스템의 정확성을 검증하기 위하여 기본 형상 모델에 대하여 적용하여 실험결과와 해석결과가 잘 일치함을 알 수 있었고, 실제 생산되고 있는 복잡형상 제품인 대형선박용 Anchor casting에 대하여 적용하여 본 결과 본 해석 시스템에 의하여 설계된 주조방안에 의하여 건전한 제품을 얻을 수 있으며, 다른 종류의 대형 주강품 생산에 본 시스템의 적용이 가능하다고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] C. P. Hong, T. Umeda and Y. Kimura : Metall. Trans., 15B, (1984) 91.
- [2] C. P. Hong, T. Umeda and Y. Kimura : IMONO, 56, (1984) 758.
- [3] J. K. Choi, D. O. Kim and C. P. Hong : The Proc. of the Conf. on the 55th World Foundry Congress, Moscow (1988) Paper No. 32.
- [4] R. J. Sarjant and M. R. Slack : J. of Iron Steel Inst., 177, (1954) 428.
- [5] J. G. Henzel, Jr. and J. Keverian : J. of Metals, 17, (1965) 651.
- [6] I. Ohnaka and T. Fukusako : IMONO, 48, (1976) 139.
- [7] C. Wei, P. N. Hansen, and J. T. Berry : Numerical Method on Thermal Problems, vol II, Pineridge Press (1981) 193.
- [8] I. Ohnaka : "Introduction to Computerized Heat Transfer and Solidification Analysis", Maruzen (1984).
- [9] E. Niyama, T. Uchida, M. morikawa and S. Saito : J. of Cast Met., 6, (1981) 16.
- [10] S. B. Kim and C. P. Hong : Proc. of the Conf. on the Modeling of Combined Foundry Congress, Hague, Netherlands, (1988) Paper No. 17.
- [11] R. A. Jhons : AFS Trans., 88, (1980) 77.
- [12] 유승목, 이두호, 김종기, 소찬영, 홍준표 : 한국주조공학회지 11, (1991) 54.
- [13] A. A. Amsden and F. H. Harlow : Tech. Report LA-4370, Los Alamos Scientific Laboratory (1970).
- [14] J. E. Welch, F. H. Harlow, J. P. Shannon and B. J. Daly : Tech. Report LA-3425, Los Alamos Scientific Laboratory (1966).
- [15] S. B. Kim and C. P. Hong : Proc. of 2nd Asian Foundry Congress, Kitakyushu, Japan (1994) 286.