

# 자동차용 피스톤 주물의 3차원 응고해석

김지준\*, 김진수\*, 류관호\*\*, 최정길\*\*\*, 이진형\*\*\*\*, 홍준표\*

## Three Dimensional Solidification Analysis in Automotive Cast Piston

Ji-Joon Kim\*, Jin-Soo Kim\*, Gwan-Ho Ryu\*\*

Jeong-Kil Choi\*\*\*, Zin-Hyoung Lee\*\*\*\* and Chun-Pyo Hong\*

### Abstract

In gravity die casting, die cooling systems are frequently employed with water cooling to remove the heat of the solidifying metal. Thermal modeling is an important technique in mold design for improving the productivity of the process. Computer simulation system which consists of pre-processor, main solidification simulator and post-processor has been developed for three dimensional solidification analysis of cyclic gravity die casting. The pre-processor is used for mesh generation in a PC system. The modified finite difference method is adopted for the main solidification simulation algorithm during all the casting cycles. The post-processor graphically presents the simulation results. Several experiments in automotive cast piston were carried out. The temperature variations in casting and mold with time are measured experimentally, and the results are compared with calculation results. The effects of cycle number on solidification pattern are also studied. Several experimental results for the prediction of shrinkage defects are compared with calculated results.

(Received April 12, 1993)

### 1. 서 론

중력금형주조에 의한 자동차용 피스톤 주물의 반복주조작업에 있어서 피스톤 주물의 응고 및 금형 내의 냉각과정을 정량적으로 해석하고 응고 양상을 제어하는 것은 수축결함 발생의 방지, 금형수명의 연장, 작업시간 단축에 의한 생산성 향상, 냉각속도 조절에 의한 기계적 성질의 향상 등을 도모할 수 있다<sup>1)</sup>. 컴퓨터에 의한 응고해석은 반복주조작업시 일어나는 제 현상을 정량적으로 파악하는 데 큰 역할을 하고 있다. 응고현상을 포함한 주조시의 열전달해석에 사용되는 수치해석법에는 유한차분법<sup>2,3)</sup>, 직접차분법<sup>4,5)</sup>, 유한요

소법<sup>6,7)</sup> 및 경계요소법<sup>8,9)</sup> 등이 있다.

종래에는 금형에서의 열전달설계를 시행착오에 의한 방법으로 실행해 왔으나, 이 방법은 시간의 낭비와 금형설계에 의한 비용손실이 많았다. 최근 금형주조에 있어서 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 해석방법을 이용하여 금형의 냉각수 설계에 관한 연구가 보고되었다. Grant<sup>10)</sup>는 중력금형주조법에 있어서 반복 사이클에 따른 2차원 응고해석에 관한 연구를 보고하였다. 최근 용탕 단조시의 정확한 열전달계수의 평가 및 응고해석에 의한 최적 금형해체시간에 대한 연구<sup>11)</sup>가 보고된 바 있다. Hong<sup>1)</sup>은 경계요소법에 의한 3차원 응고해석의 연구사례를 제시하였으며, 특히

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

\*\* 동양피스톤(Dong Yang Piston Co. Ltd.)

\*\*\* 생산기술연구원(Korea Academy of Industrial Technology)

\*\*\*\* 한국과학기술원(KAIST)

금형주조와 같은 준정상상태에서의 금형의 열전달 계산에 계산시간을 줄이면서 적용할 수 있는 효과적인 방법으로 평가받고 있다. Choi<sup>1,12,13)</sup> 등의 연구에서는 주철의 'T'형 중력금형주조에서 반복작업에 따른 응고과정의 변화를 3차원 개량차분법으로 해석하였다. 응고해석 결과는 응고완료시간의 추정, 적정 주형해체시간 예측, 응고속도 및 수축공결함의 예측 외에도 응고조직의 변화, 편석의 추정 등 여러 분야에 이용되어지고 있다.

본 연구에서는 개량차분법을 이용하여 보다 복잡한 형상인 자동차용 피스톤 주물 및 금형을 3차원 pre-processor에 의해 입력한 후 반복주조작업에 따른 수축공결함의 발생위치와 그 정도의 예측 및 응고 완료시간 등의 예측을 위하여 3차원 응고해석을 수행하였다. 또한 실험에서 얻어진 온도 변화곡선 및 결함 발생위치를 해석결과와 비교, 검토하여 본 연구결과의 타당성을 검증하였다.

## 2. 해석방법

### 2.1 전처리 프로세서에 의한 자동차용 피스톤의 3차원 입력

자동차용 피스톤의 반복주조작업에 따른 3차원 응고해석을 하기 위해서는 먼저 해석대상 주물의 형상을 컴퓨터가 인식할 수 있도록 형상 데이터를 입력해 주는 과정이 필요하다. 이러한 과정을 얼마나 쉽게 수행할 수 있는가에 의해 컴퓨터 해석의 실용성이 평가된다. 본 연구에서는 생산기술연구원에서 개발한 EasyCast를 이용하여 자동차 피스톤의 3차원 입력을 하였다. pre-processor에 의한 입력은 피스톤 주물의 3차원적 형상을 먼저 2차원 단면으로 분해한 다음 각 단면별로 CAD 프로그램에 의해 정확한 치수와 형상을 입력한 후 형상의 생성은 삼각법을 근거로 하여 각각의 2차원 xy, yz, zx면의 3부분을 동시에

보며 작업할 수 있도록 되어 있다. 형상의 대칭성을 고려하여 전체 주물 및 금형의 절반만을 입력하여 해석대상으로 선정하였다. 해석모델은 각 요소의 x, y, z방향으로 50cm×30cm×20cm 크기이며, 금형 및 주물을 포함하여 53×39×27개로 총 55809개의 요소로 분할하였다. 이러한 방법으로 입력된 형상을 자동적으로 요소 분할 프로그램에 의하여 형상 데이터로 변환하여 사용하였다.

### 2.2 개량차분법에 의한 차분화

Fourier의 에너지보존법칙으로부터 내절점법에 의한 전진개량차분식을 유도하여 직교좌표계에서 임의의 6면체 요소(i, j, k)의  $\Delta t$  이후의 요소 내의 온도  $T^{t+\Delta t}$ 에 대하여 정리하면 다음식이 얻어진다.

$$T^{t+\Delta t} = \left[1 - \frac{\Delta t}{\rho C} \frac{1}{V} \sum_{i=1}^6 B_i A_i\right] T^t + \frac{\Delta t}{\rho C} \frac{1}{V} \sum_{i=1}^6 B_i A_i T_i$$

여기서  $A_i, B_i$ 는 요소(ijk)에 대한 각각 경계면과 경계조건을 나타내고,  $\rho$ 는 밀도,  $C$ 는 열용량,  $V$ 는 요소(ijk)의 전체 부피를 나타낸다. 본 연구에서는 시간에 대해 전진차분법(explicit finite scheme)을 사용하고 있어 다음과 같이 시간 스텝의 안정조건을 고려하였다.

$$1 - \frac{\Delta t}{\rho C} \frac{1}{V} \sum_{i=1}^6 B_i A_i \geq 0$$

한편, 응고잠열의 평가를 위해서 온도계산시 고상물의 증가에 따라 응고잠열의 방출량을 계산하여 온도를 회복시키는 온도회복법을 채택하였다. 계산에 사용된 열전도도 및 비열에 관한 열물성값을 Table 1에 나타내었다. 각 재질의 경우 그 값들은 온도의존성을 고려하여 온도의 함수로 주어지도록 하였다.

Table 1. Thermal properties used in the calculation

	density (g/cm <sup>3</sup> )	thermal conduc. (cal/sec cm °C)	specific heat (cal/g °C)	liquidus temp.(°C)	solidus temp.(°C)
AC8A alloy	2.36	0.25	0.25	615.0	577.0
mold	7.80	0.105	0.11	-	-

### 2.3 Cyclic casting에서의 반복계산의 원리

금형주조에서는 금형에 용탕을 주입하여 응고가 완료된 후에는 주물을 취출하고 나서 다시 금형을 합형하여 용탕을 주입하는 작업을 반복하게 된다<sup>13)</sup>. 따라서 금형의 온도가 계속 상승하기 때문에 주물의 응고양상은 일반주조와는 다르게 나타난다. 금형주조에서는 응고시간과 온도구배 등의 데이터 뿐만 아니라 주조 사이클에 따른 금형의 온도변화도 같이 고려되어야 한다. 이러한 과정들은 3차원 응고해석 프로그램을 개량하여 해석할 수 있는데, Fig. 1과 같다. 첫번째 주입시 주조금속은 주입온도, 금형은 예열온도를 초기치로 하여 용융금속의 응고완료 및 금형해체 전까지 해석하고 나서 응고된 주물이 취출되면 주형공간은 주물로부터 대기로 치환되며 금형과 경계면의 경계조건은 주조금속/금형에서 대기/금형의 경계조건으로 바뀌게 된다. 사이클이 완료될 때까지 이러한 상태에서 계산이 진행된다. 두번째 사이클이 시작되어 용탕이 주형 내로 주입되

면 주형공간은 대기에서 주조금속으로 치환되고 경계는 대기/금형에서 주조금속/금형으로 바뀌게 된다. 이와 같이 주입 및 취출의 과정을 반복하면서 목적하는 주조 사이클 수에 도달할 때까지 계산을 반복하게 된다. 이때 냉각라인에 해당하는 요소들은 반복되는 열전달과정에서 항상 일정한 실온을 유지하게 한다. 냉각라인과 금형의 경계면은 대류열전달로 취급한다.

### 2.4 후처리 프로세서에 의한 그래픽 출력

후처리 프로세서에 의한 그래픽 출력은 Easy Cast를 이용하여 응고해석 결과인 주물의 등응고시간 분포 및 등온도 분포와 주형내의 온도분포 등을 16가지 색깔에 의해 효과적으로 나타내었다. 수축공결함의 예측에는 응고시간법과 온도구배법을 이용하였고, 수축공결함의 발생량은 shrinkage potential<sup>8)</sup>이라는 보조 파라미터로 정의하여 계산하였다.

## 3. 자동차용 피스톤의 반복주조실험

본 연구에서는 반복주조작업에 따른 금형의 온도분포의 변화를 측정하기 위하여 자동차용 2156형 피스톤의 반복주조실험을 실시하였다. 2156형 자동차용 피스톤 금형은 상형, 중형(2개), 하형, 중자로 구성되어 있으며, 중자는 metal core를 사용하였으며 상부에 원통형의 압탕을 세우고 압탕 주위에 슬리브를 두른 중력금형주조를 실시하였다. 금형의 한쪽 중형에 5mm 직경의 구멍을 뚫어 열전대를 삽입하여 금형의 온도변화를 측정하였으며, Fig. 2에는 자동차 피스톤의 모식도와 열전대를 설치한 위치를 나타내었다. 열전대를 삽입한 후 금형을 볼트로 금형주조기에 조립하였다. 금형주조기는 반복주조작업이 가능하도록 작업시간에 따라 자동으로 금형을 열고 닫을 수 있도록 되어 있다. 각 부위의 온도분포는 자동온도측정시스템에 의해 측정하였으며, 자동온도측정시스템은 IBM PC와 A/D converter(Data Acquisition社의 DT2825)로 구성되어 있다. 금형재료는 아공정회주철이며, 주물재료는 AC8A 합금을 사용하였다. Table 2에 반복주조작업에 사용된 실험조건을 나타내었다. 용탕의 온도는 770°C였는데 운반시의 온도강하로 인

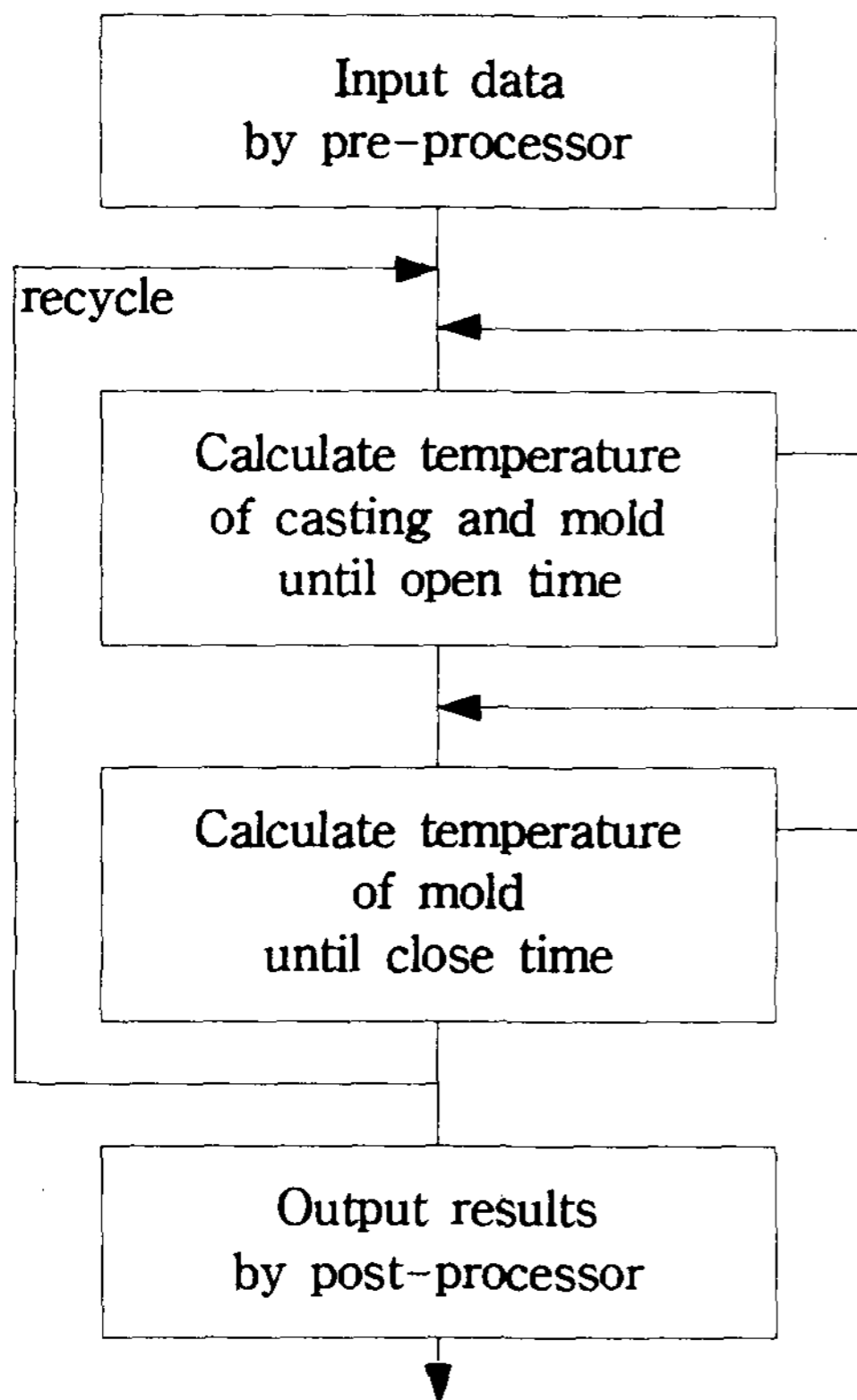


Fig. 1. Flow chart of cyclic casting

Table 2. Experimental casting conditions

Experimental casting conditions	Value
Period of Closed mold	270sec
Period of Opened mold	30sec
Pour to pour time	300sec
Pouring temperature of melt	760°C
Preheating temperature of mold	100°C
Temperature of cooling channels(Inlet)	20°C
Temperature of cooling channels(Exit)	36°C

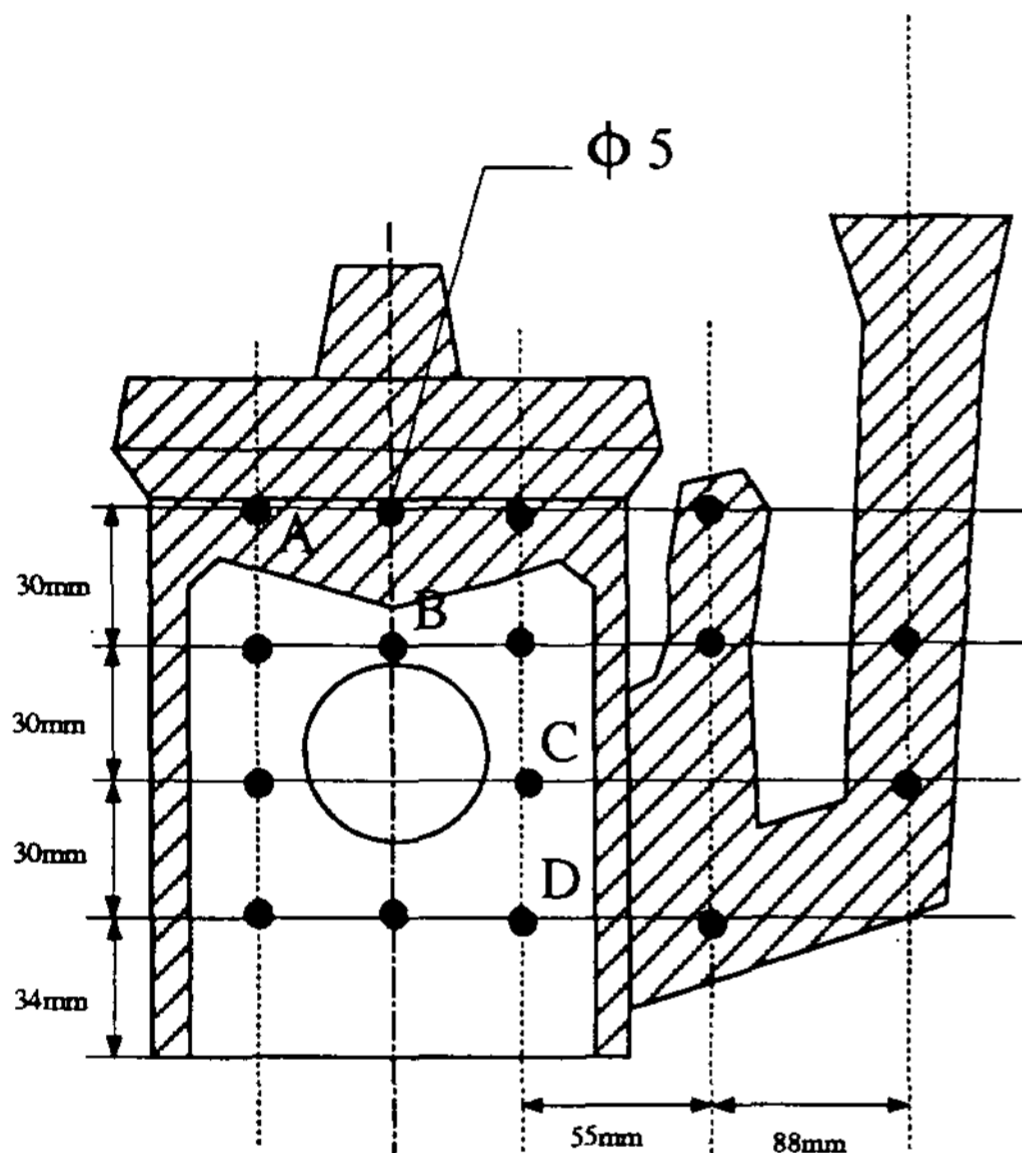


Fig. 2. Schematic model of automotive piston

하여 주입은 대략 760°C 정도의 온도에서 이루어졌다. 주물의 전체 중량은 약 4.7kg이었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험 및 계산에 의한 온도변화

반복주조작업에 따른 자동차용 피스톤 주물의 주조시 실험적인 온도변화곡선과 계산에 의해 구해진 온도변화곡선을 조사하였다. Fig. 3에 반복주조작업시 자동온도측정시스템에 의해서 점 A에서 측정된 주조 사이클에 따른 주형의 온도변화를 나타내었다. 온도분포는 크게 3단계로 나타나는데 초기주조단계(예열단계), 초기잠정상태, 준정상상태로 구분된다. 사이클에 따른 금형의 평균온도는 초기주조상태에서부터 준정상상태에

이르기까지 상승한다. 초기정상상태가 경과한 후 금형온도는 그림과 같이 각 주조 사이클에서 준정상상태의 값 주위에서 변동한다. Fig. 3에는 금형의 예열이 끝난 후 첫번째 사이클일 때 A, B 및 D점에서 측정된 온도분포를 나타내었다. 일반적으로 주입시 온도가 상승하다가 일정시간 경과 후 가동되어지는 냉각수로의 냉각효과에 의해서 하강하고 있다. 피스톤 주조작업시 이렇게 상승 및 하강하는 온도변화가 주조작업시에 반복적으로 나타나며 일정 시간이 경과하면서 금형의 온도가 계속 상승하게 된다. 각 위치에서 측정된 온도분포에서 살펴보면 피스톤은 하부에서 상부로 방향성응고가 일어남을 알 수 있다.

초기주조단계의 예열온도를 초기조건으로 대

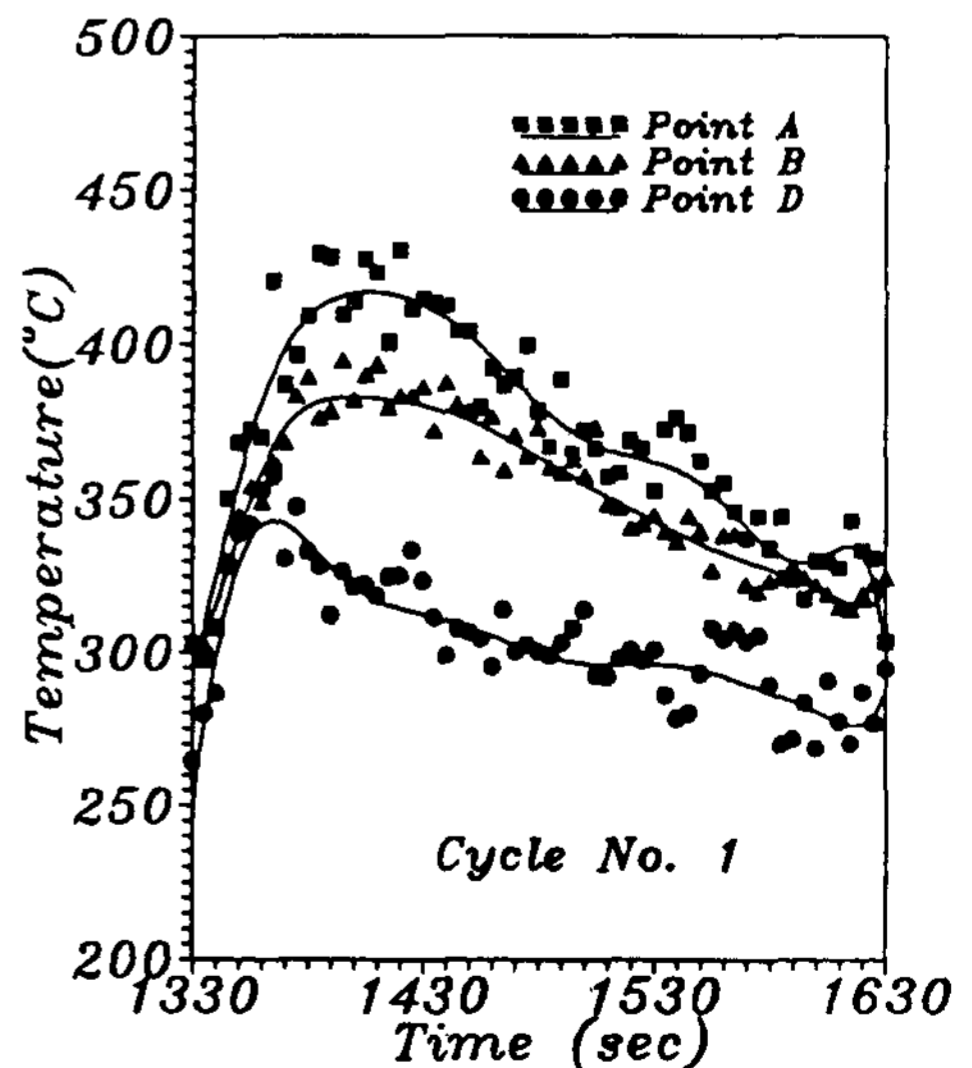


Fig. 3. Measured temperature profiles at point A in the piston mold during cyclic casting processes

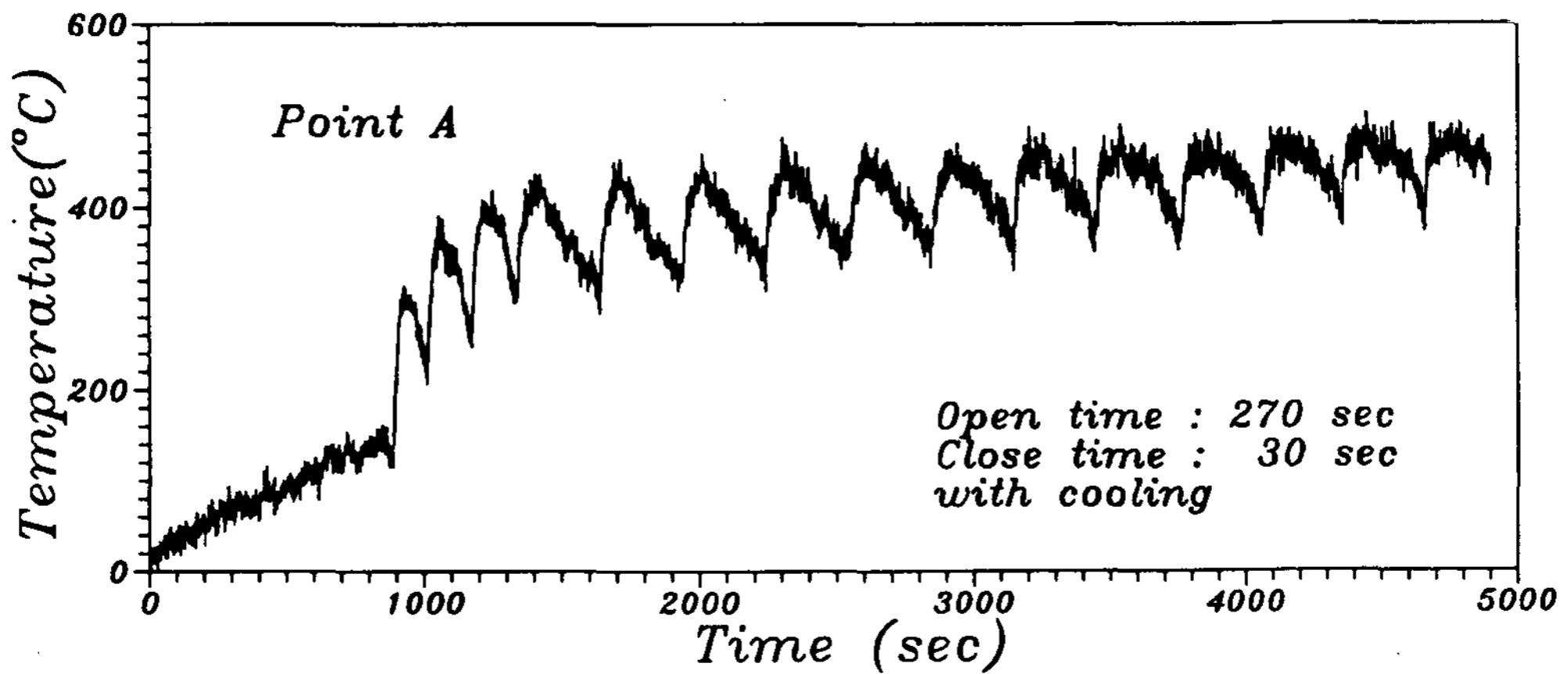


Fig. 4. Measured temperature profiles in the piston mold at casting cycle 1

입하여 자동차용 피스톤 주물의 응고해석을 실시하였다. Fig. 5에는 반복주조작업시 열전대가 설치된 A, B, C 및 D점에서 계산한 금형 내의 온도분포를 나타내었다. 그림에서와 같이 금형 온도는 변동하게 되는데, 준정상상태의 구간에서의 이러한 주조 사이클에 따른 양상이 실제 생산조건에 부합되며, 이 기간에서의 열전달은 매우 중요하므로 모델링에 의한 열전달이 필요하다. 중력금형주조에 의한 주물제조시 전체 시스템의 열전달은 피스톤의 하부에서 상부로 방향성 응고가 진행되어 피스톤 상부의 압탕 부위에 최종 응고가 진행하도록 금형이 설계되어 있으므로 점 D에서 측정된 부위의 온도가 점 A에서 측정된 온도값이 높게 나타난다. 2156형 피스톤 주물의

반복주조작업시 한 사이클 주조시에 소요되는 시간이 300초일 때 초기잠정상태에서 준정상상태에까지 도달하는 주조 사이클 수는 6회 정도로 추정되었다.

#### 4.2 계산에 의한 주물 내에서의 응고시간과 온도분포 예측

반복주조작업에 따른 전체 피스톤 주물의 등응고시간, 주물 및 금형의 온도분포를 조사하였다. 주조 사이클 수가 2, 3 및 6일 때 계산된 등응고시간을 Fig. 6에, 응고완료시의 온도분포를 Fig. 7에 각각 나타내었다. 각 주조 사이클에 따른 등응고시간과 온도분포를 살펴보면 피스톤의 하부로부터 상부로 방향성응고가 진행되어 초기에는 압탕 부위에서 작은 수축공이 예측되었고 반복주조작업의 횟수의 증가와 더불어 수축공 예측부위가 압탕 하부에서 피스톤 상단까지 확대되어 증가하는 것을 예측할 수 있다. 자동차용 피스톤은 실제 주조작업시 압탕 부위를 절단하고 피스톤 상단 중앙에 홈을 내게 되므로 반복주조작업이 진행됨에 따라 축열 부위가 증가하더라도 실제의 제품에 영향을 미치지 않는다.

반복주조작업시 사이클 수가 2 및 5일 때 응고완료시의 계산된 금형 온도분포를 Fig. 8에 나타내었다. 금형의 온도분포도 냉각수로의 영향으로 금형의 하부에서 상부로 온도가 상승하였으며, 사이클 수의 증가에 따라 축열 부위와 금형의 평균온도분포가 증가하였다. Fig. 9에 다섯번째 반복주조작업에서 금형이 열릴 때 그리고 5

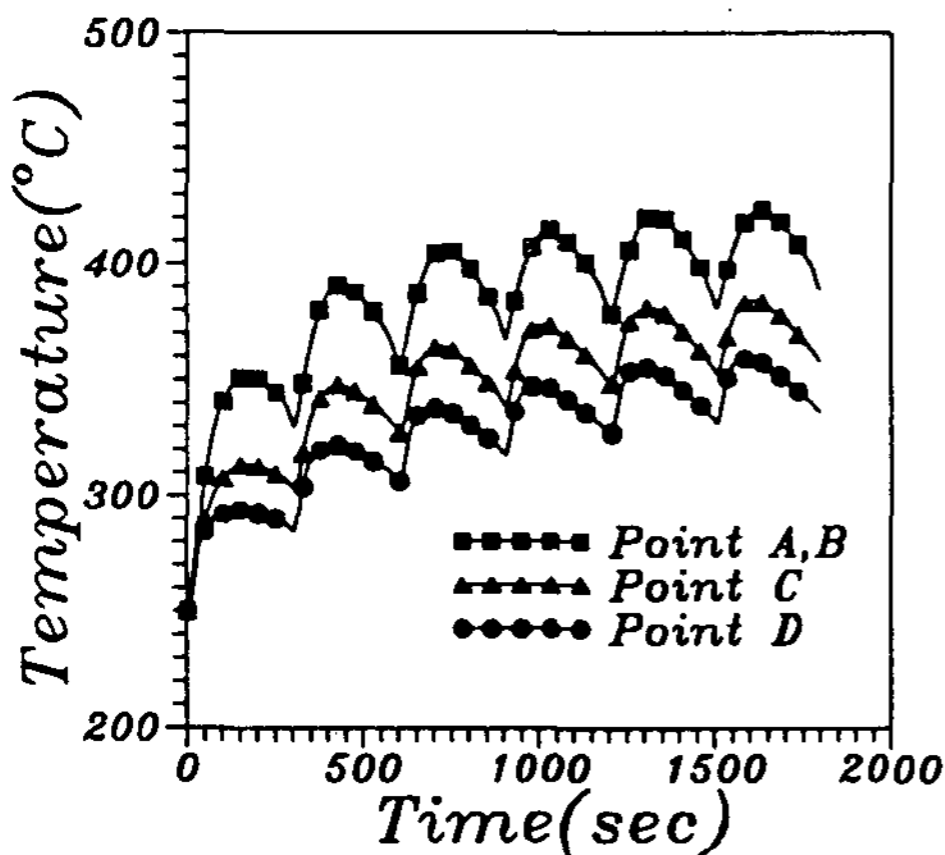


Fig. 5. Calculated temperature profiles in the piston mold during cyclic casting processes

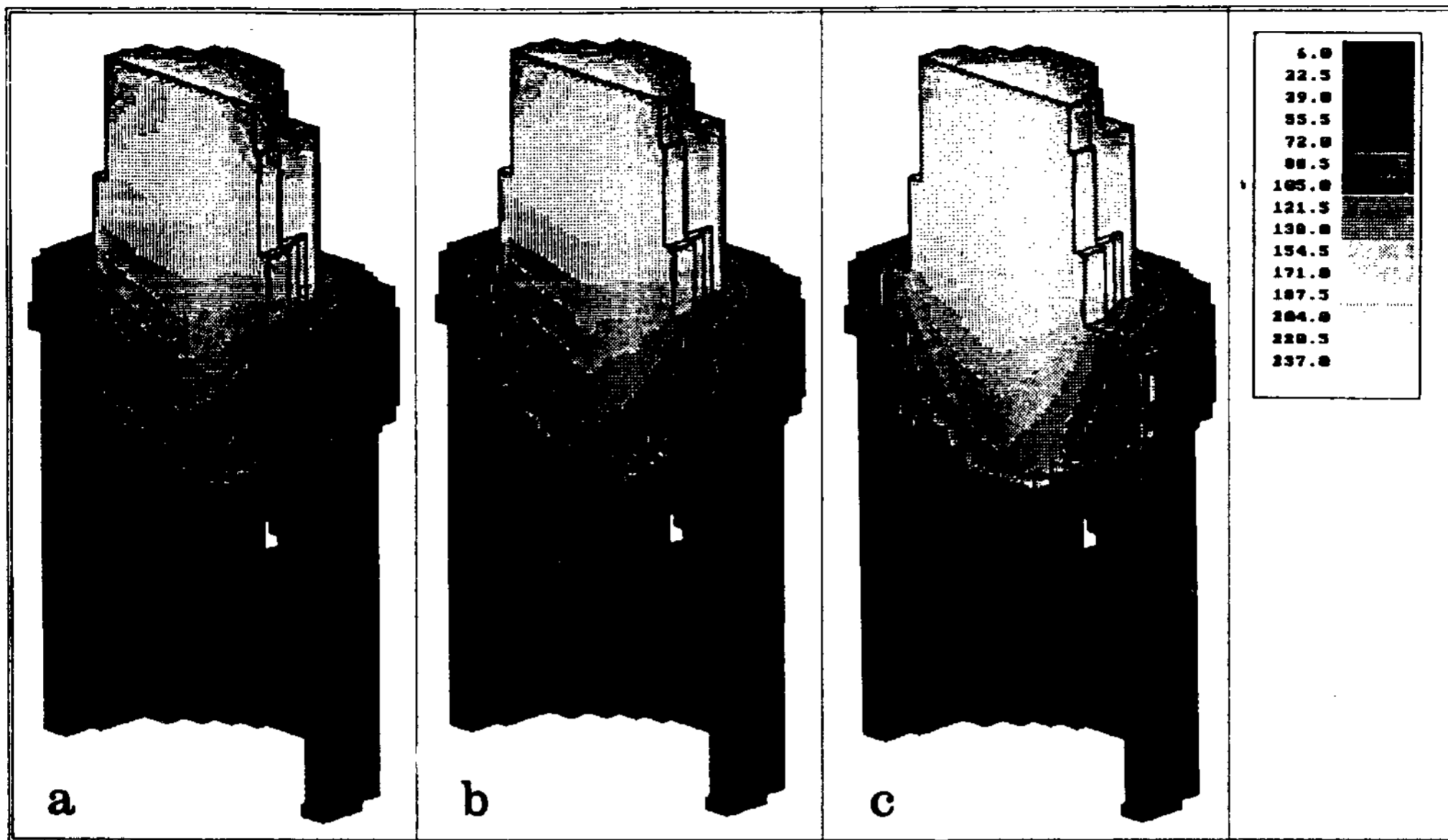


Fig. 6. Calculated solidification times contours in the automotive piston casting during cyclic process (a) cycle 2 (b) cycle 3 and (c) cycle 6

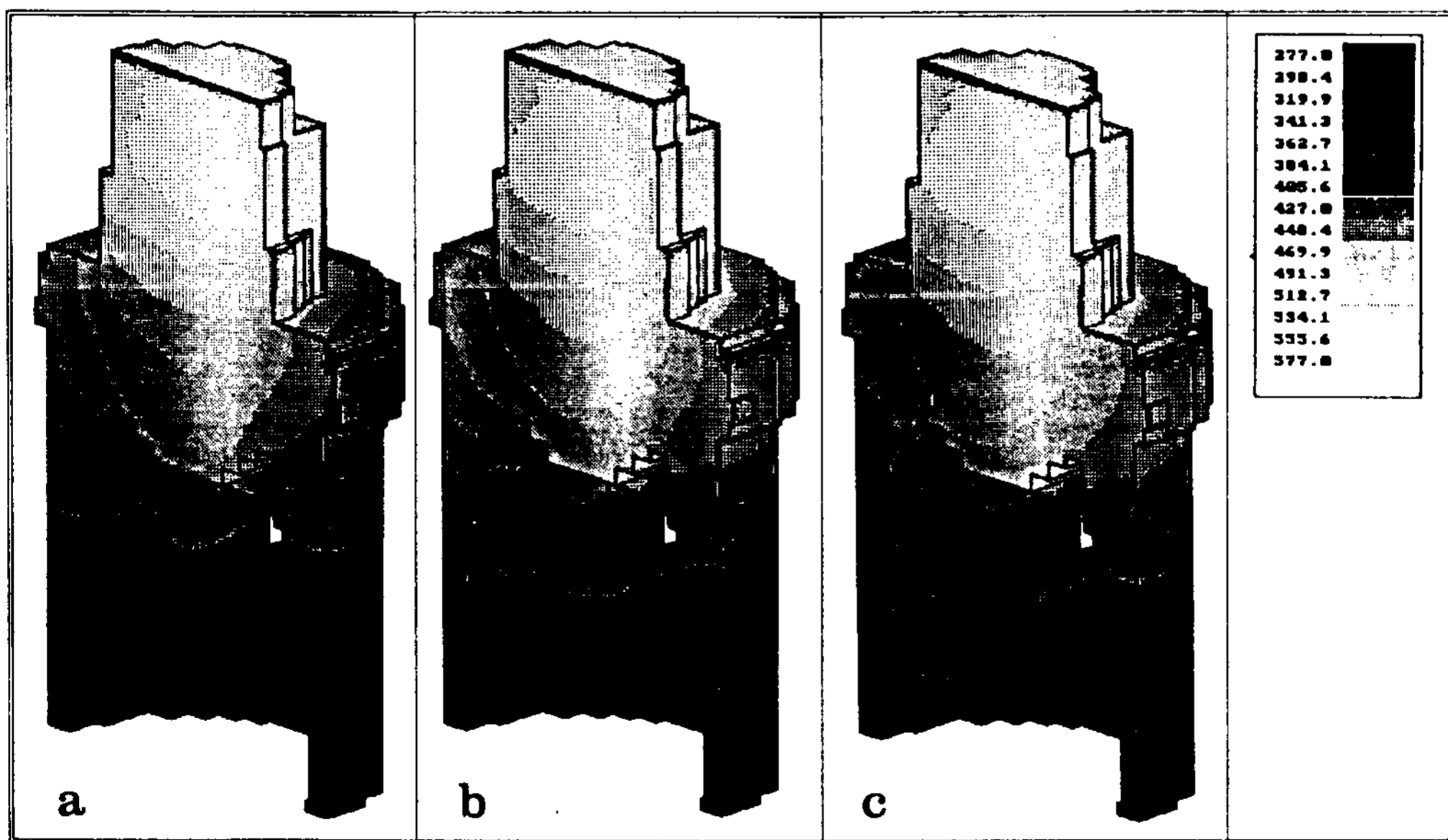


Fig. 7. Calculated temperature distributions in the automotive piston casting after solidification (a) cycle 2 (b) cycle 3 and (c) cycle 6

번째 사이클이 완전히 끝날 때의 금형의 온도분포를 나타내었다. 다섯번째 반복주조작업에서 금형이 열릴 때의 금형의 온도분포는 Fig. 8 (b)의 응고완료시보다 축열되었지만, 응고된 주물이 취

출된 후 주형공간이 주물로부터 대기로 치환되어 금형의 온도분포는 하강하여 정상상태에 빨리 도달할 수 있었다.



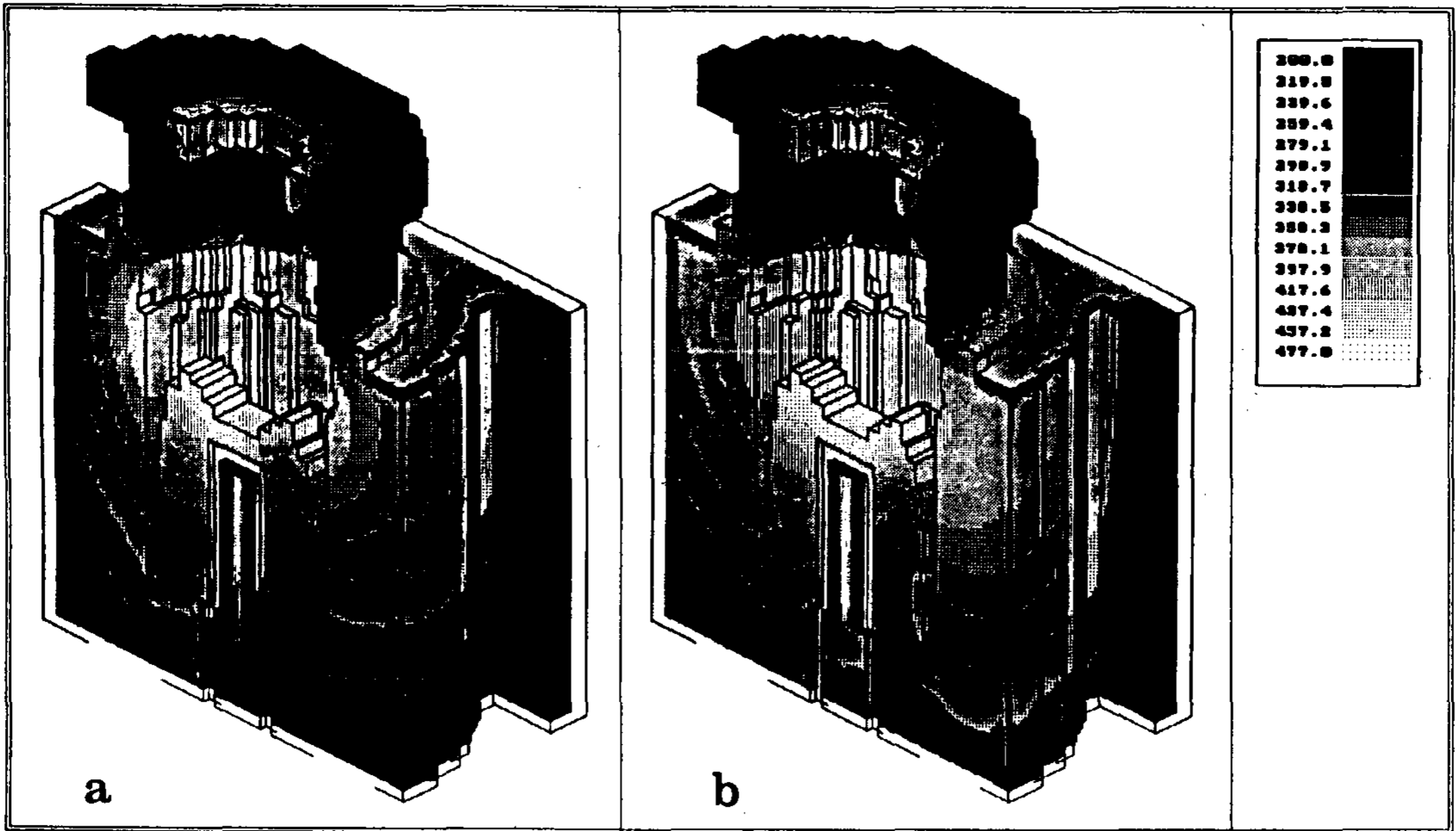


Fig. 8. Calculated temperature distributions in the metal mold after solidification  
 (a) cycle 2 and (b) cycle 5

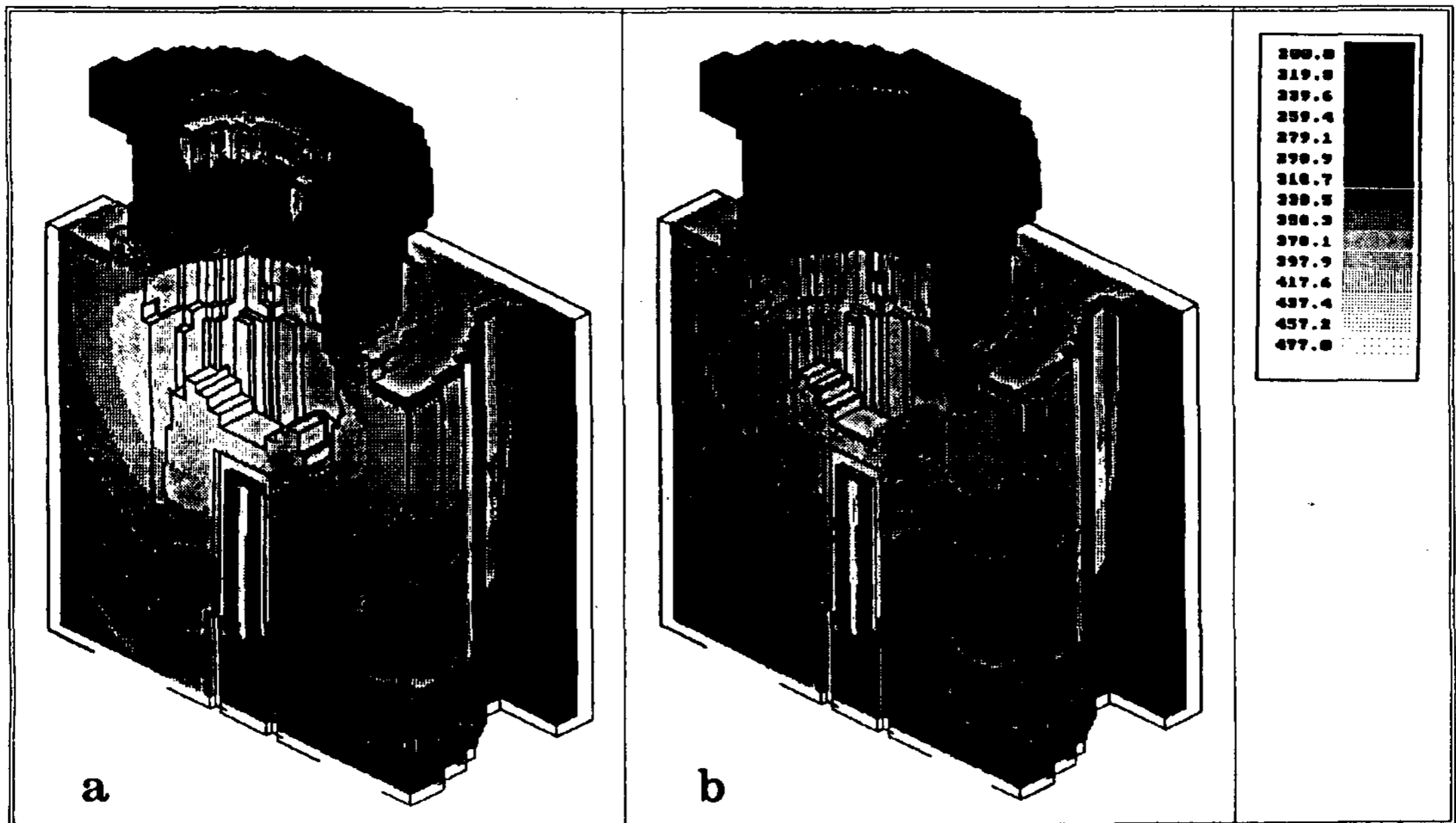


Fig. 9. Calculated temperature distributions in the metal mold at cycle 5

4.3 실제 결함발생위치와 결함예측부위의 비교  
 반복주조작업에 따른 실제결함 발생위치와 응고시간법과 온도구배법을 이용하여 계산한 수축공결함 예측부위를 비교하였다. 실제결함 발생위

치는 응고완료후 대칭면을 절반으로 절단가공한 다음 압탕 및 제품 중에 발생된 수축결함을 관찰하였다. 한편 가공면에서 초음파검사를 실시하여 제품 내부에는 결함이 없는 것을 확인하였다.

Fig. 10에는 실험결과로부터 수축결함을 관찰한 것인데, 초기에는 상부의 압탕 부위에 발생하다가 사이클에 따라 금형의 과열로 인하여 넓게 퍼져 나가면서 커져가고 있으며, 등응고시간(Fig. 6) 및 등온도분포곡선(Fig. 7) 등으로부터 추정된 결과와 잘 일치하고 있다.

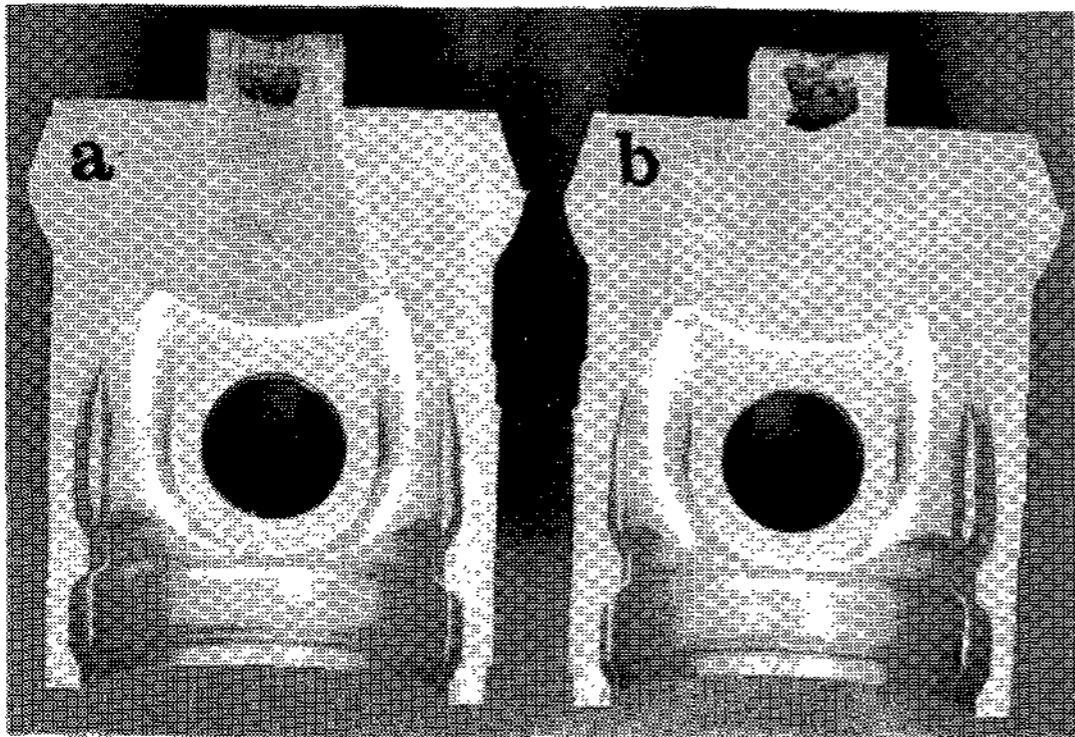


Fig. 10. Formation of shrinkage defects in experimental automotive piston castings (a) cycle 2 and (b) cycle 6

### 5. 결 론

알루미늄합금주물의 중력금형주조에서 반복주조에 따른 금형과 주물의 열전달 및 응고과정을 효과적으로 해석 및 제어할 수 있는 해석방법을 개발하였다. 금형 및 주조금속의 초기잠정상태로부터 준정상상태에 이르기까지의 열전달 및 응고에 따른 변화들을 해석하여 실제 실험결과를 비교하여 그 타당성을 검증하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 피스톤 주조작업시 상승 및 하강하는 온도 변화가 주조작업시에 반복적으로 나타나며 일정 시간이 경과하면서 초기잠정상태로부터 금형이 점차로 축열되면서 준정상상태에 도달하였다. 각 위치에서 측정된 온도분포와 계산치는 잘 일치하였으며 하부에서 상부로 방향성응고가 일어났다.
- 2) 금형의 과열로 인하여 사이클에 따라 주물의 중심부와 압탕 상부에서의 싱크형의 수축공이 점차 확대되는 경향을 나타냈으며, 등응고시간

및 등온도분포법 등으로부터 추정된 결과와 잘 일치하고 있다.

그러므로, 중력금형주조에 있어서 주물의 반복주조작업시의 응고 및 열전달해석을 적용하여 응고양상을 제어함으로써 수축결함 발생의 방지, 금형수명의 연장, 작업시간 단축에 의한 생산성 향상, 냉각속도 조절에 의한 기계적 성질의 향상 등을 도모할 수 있으리라 사료된다.

### 참 고 문 헌

1. J. K. Choi and C. P. Hong : Cast Metals, 4 (1992) 226
2. R. J. Sarjant and M. R. Slack : J. Iron Steel Inst., 177 (1954) 428
3. E. Niyama : IMONO, 49 (1977) 608
4. I. Ohnaka : Tetsu-to-Hagane, 65 (1979) 1737
5. 이영철, 이학주, 홍준표 : 대한금속학회지, 28 (1988) 770
6. I. Ohnaka and T. Fukusako : IMONO, 48 (1976) 139
7. R. W. Lewis, K. N. Seetharamu and K. Morgan : Solidification Technology in the Foundry and Cast House, The Metallurgical Society of AIME (1983) 40
8. C. P. Hong, T. Umeda, Y. Kimura : IMONO, 56 (1984) 758
9. C. P. Hong, T. Umeda, Y. Kimura : Modeling of Casting and Welding Processes, J. T. Berry and J. Dantzig (Eds.), The Metallurgical Society of AIME (1984) 221
10. J. W. Grant : Modeling of Casting and Welding Processes, H. D. Brody and D. Apelian (Eds.), The Metallurgical Society of AIME (1982) 19
11. 유승목, 한요섭, 이호인, 홍준표 : 한국주조공학회지, 10 (1990) 39
12. J. K. Choi, D. O. Kim and C. P. Hong : 55th World Foundry Congress, Moscow, Paper 32 (1988)
13. 최정길, 홍준표 : 한국주조공학회지, 11 (1990) 247