

|||||||
論 文
|||||||

범용 구조해석 프로그램의 주물 열변형 해석에의 적용성

김기영[†] · 김정태* · 최정길*

Application of Commercial FEM Code to Coupled Analysis of Casting Deformation

Ki-Young Kim[†], Jung-Tae Kim* and Jung-Gil Choi*

Abstract

Dimensional defects of castings are mainly due to the stresses and strains caused by a nonuniform temperature distribution and phase transformation during solidification and cooling, and by mechanical constraint between the mold and casting. It is, however, nearly impossible to trace movements of the casting and mold during solidification and cooling by experimental measurements for castings with complex shape. Two and three dimensional deformation analyses of the casting and the mold were performed using commercial finite element code, MARC. It was possible to calculate deformation and temperature distribution in the casting and mold simultaneously. Cooling curves of the casting obtained by calculation were close to that measured in the field since it was possible to treat latent heat evolution of the casting which could be divided into two parts, primary and eutectic parts. Mold bent inward just after pouring due to the temperature gradient across the mold thickness, and mold returned to its previous position with time. Plastic deformation occurred at the part of the casting where solidification was slow.

(Received July 25, 2002)

Key words: Deformation Analysis, Coupled Analysis, Commercial Finite Element Code

1. 서 론

주물은 고온에서 냉각되면서 온도 저하와 더불어 밀도가 증가하므로 필연적으로 수축을 동반하며, 형상의 복잡함이 자유수축에 대한 장애가 되므로 주물에는 변형이 발생하게 된다. 이러한 변형은 주물의 치수정도에 직접 영향을 미치며, 주물의 치수정도를 확보하는 일은 기계가공비의 절약, 생산성의 향상과 직결되므로 다른 소형재 제조방법과의 경합을 고려할 때 매우 중요한 과제이다.

주물의 치수불량은 모형치수불량, 주형치수불량 및 응고 냉각 중의 주물 및 주형의 변형으로 구별할 수 있다. 이 중에서 응고·냉각 중의 변형은 액상에서 고상으로 상변태를 동반하므로 변형의 주체가 응고 중에

일어나는지, 아니면 응고 후에 일어나는지, 또는 주형에 의한 구속이 어느 정도인지 고온에서 일어나는 현상이므로 정성적인 판단 기준조차 적은 실정이다.

이러한 변형에 대하여, 간단한 형상의 주물에 대하여 변위 측정, 응력 측정 등의 연구가 이루어져 왔으나[1-6], 통상적으로 복잡한 형상을 가지는 주물의 변형을 측정하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 이러한 주물의 변형 예측 수단으로는 계산에 의한 방법이 유효하게 된다. 주물의 변형 예측 수단으로는 계산에 의한 방법이 개발되어 사용되고 있는데[7-9], 그 중의 하나가 범용 구조해석 코드를 이용한 주물의 변형 예측이다[10].

최근 주조 전용 해석 코드에 주물 및 금형의 응력분포 등의 계산이 가능한 모듈도 활용되고 있는 등[11]

한국기술교육대학교(Korea University of Technology and Education)
*한국생산기술연구원(Korea Institute of Industrial Technology)
[†]E-mail : simha@kut.ac.kr

열변형해석 기술의 보급이 이루어지고 있고 범용코드를 이용한 주물의 변형해석도 시도되었지만, 실제로 대부분은 온도만을 계산한 후 이를 열하중으로 하여 주물과 주형을 따로따로 변형해석을 하는 것이 대부분이다. 그러나 주조 시에 주물만이 변형하는 것이 아니고 주형도 변형되므로 주형의 변형에 의한 주물의 변형도 고려되어야 하는데, 이를 위해서는 주형과 주물의 온도와 변형이 동시에 계산되어야만 한다. 범용 구조해석 코드를 이용한 주물과 주형의 온도 및 변형의 동시 계산은 간단한 1차원 모델에 대해서 시도된 바 있으나 [12,13], 이를 2차원 이상의 모델에 대한 주물 및 주형의 동시 해석에 적용하기 위해서는 해결하여야 할 문제가 적지 않다.

본 연구에서는 범용 구조해석 코드를 이용하여 2차원 및 3차원 모델의 금형주물의 응고 냉각 시 금형 및 주물의 온도와 변형의 동시 계산을 시도하여, 이를 실제 주물의 변형계산에의 적용 가능성을 타진해 보고자 하였다.

2. 해석방법

해석에 사용한 코드는 범용 FEM 코드인 MSC-MARC(ver. 2000)이고, 컴퓨터는 Pentium IV 기종을 사용하였으며, 금형과 주물을 2차원 및 3차원으로 모델링하여 동시에 온도 및 변형을 계산하는 연성 해석을 하였다.

2.1 해석모델

2차원 모델은 Fig. 1과 같다. 주물의 크기는 100×25 mm, 금형은 150×75 mm를 대상으로, 요소 1개의 크기는 5×5 mm로 하였다. 해석요소는 4절점 사각형 요소로, 분할 수는 32×17로 하였다. 그리고 주물과 주형의 열 및 변형 계산을 동시에 하기 위하여 주물과 주형 사이에 중간요소를 삽입하는 방법을 택하였다. 그림에서 material1이 금형, material5가 중간요소, material9가 주물을 나타낸다. 주물과 금형의 동시 계산에서는 주물은 수축하고 금형은 열팽창하므로 계면에서의 절점처리가 곤란하기 때문에 중간요소를 삽입하였는데, 중간요소의 탄성율, 강도 등은 없는 것으로

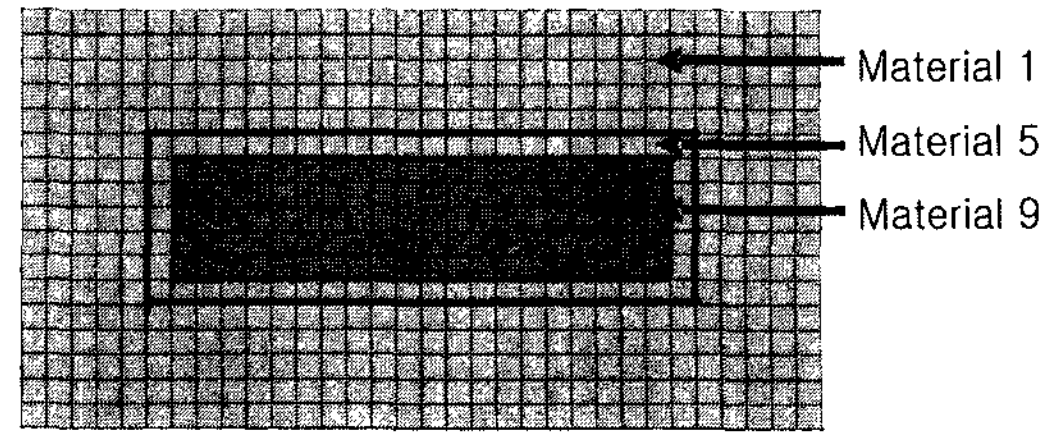


Fig. 1. Two-dimensional model.

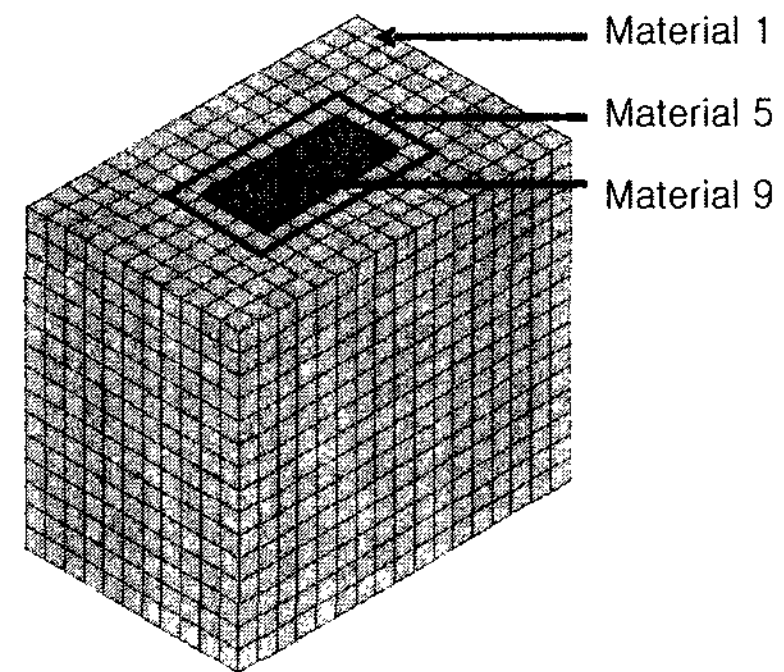


Fig. 2. Three-dimensional model.

하여 중간요소가 주물과 금형의 변형에 영향을 미치지 않도록 하였고, 또한 열전도도 = 열전달계수×거리의 관계가 있으므로 주물-금형 간 열전달계수는 중간요소의 열전도도로 환산하였는데, 이의 시간의존성은 고려하지 않았다. 2차원인 경우 평면응력과 평면변형량의 모델이 있으나 여기서는 평면변형량으로 하여 계산하였다. 그리고 재료의 고온 거동 모델로는 금형은 탄성, 주물은 탄소성모델을 가정하였다.

3차원 모델은 Fig. 2와 같으며, 주물의 크기는 100×25×100 mm, 금형은 150×75×140 mm로, 요소 1개의 크기는 10×10×10 mm로 하여, 요소분할 수는 17×11×15이고 해석요소는 8절점 육면체 요소로 하였다. 3차원모델에서도 역시 주물과 주형 사이에 중간요소를 삽입하는 방법으로 계산하였다.

2.2 열물성치

금형의 재질은 주철을 택하였고, 금형에 대한 물성치는 온도의존성을 고려하지 않았는데, 계산에 사용한 금형의 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1. Mechanical and physical properties of the metal mold [10,12].

$E, \times 10^5 \text{ MPa}$	$\alpha, \times 10^6 / \text{K}$	ν	$C_p, \text{ KJ/kg} \cdot \text{K}$	$k, \text{ W/m} \cdot \text{K}$	$\rho, \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
1.57	10.3	0.26	0.54	63	6.9

Table 2. Mechanical and physical properties of the casting [10].

ν	k, W/m · K	$\rho, \times 103\text{kg/m}^3$	$\alpha, /\text{K}$
0.33	146.4	2.7	25.6×10^{-6}

Table 3. Heat-transfer coefficient [10].

Heat-transfer coefficient	Mold-Air	Casting-Air
$h, \times 10^3\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	0.08	0.1

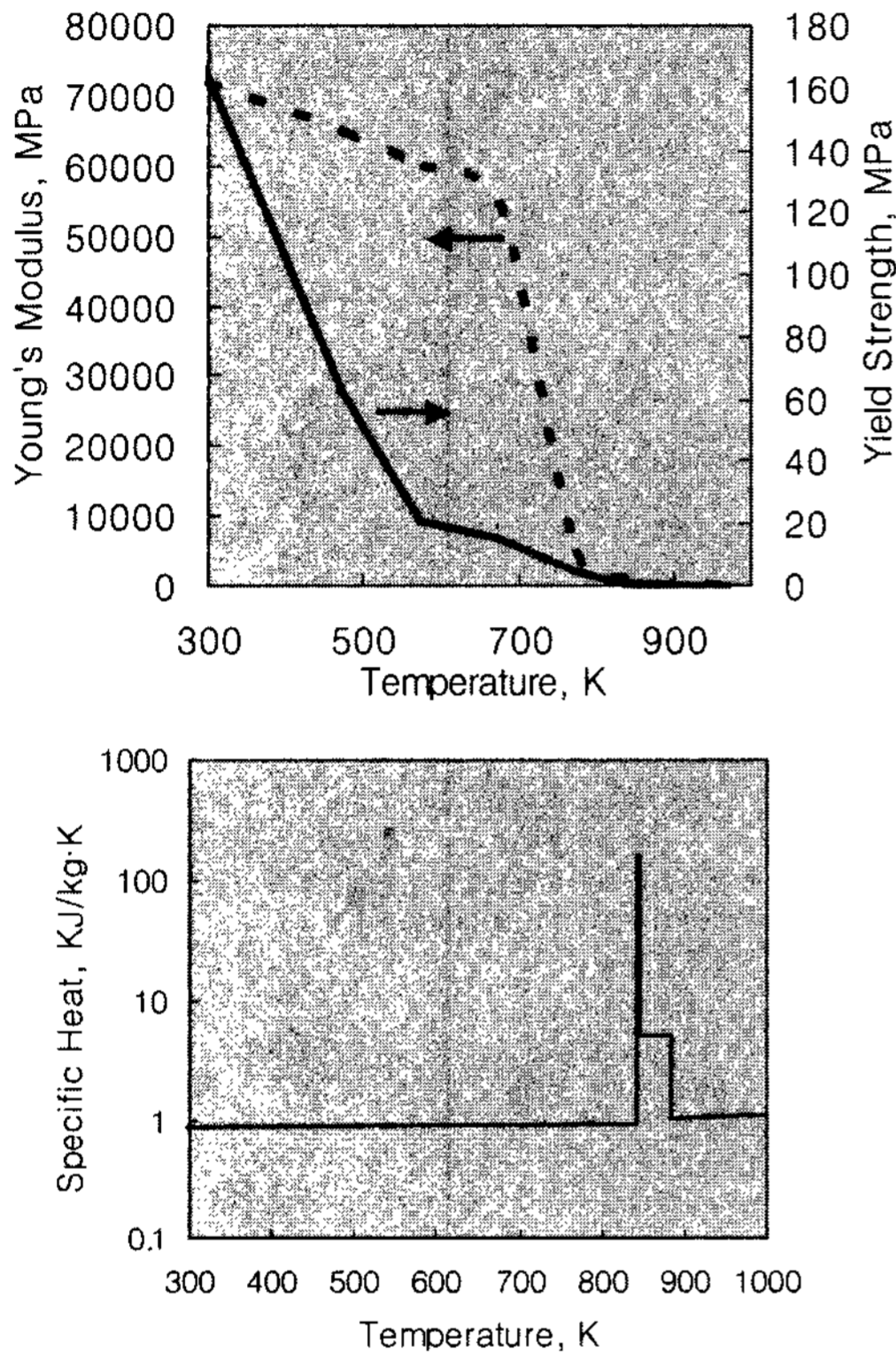


Fig. 3. Mechanical and physical properties of the casting according to temperature[10].

주물은 A356합금(Al-7%Si-0.3%Mg)으로 하여 탄성율, 항복강도, 비열은 온도의존성을 고려하였고, 열전도도, 밀도, 열팽창계수 및 포왓송비는 온도의존성을 고려하지 않은 일정한 값을 적용하였다(Table 2). Fig. 3은 각각 탄성율, 항복강도, 비열의 온도의존성을 나타낸 것이다.

2.3 계산조건

열변형 해석에 필요한 경계조건은 계면열전달 계수와 변위의 구속조건으로, 2차원모델의 경우는 금형과 대기와의 접촉부는 계면열전달 계수를 입력하였고, 변위는 왼쪽 하단부의 1점의 x, y 변위와 오른쪽 하단부의 1점의 y 변위를 구속하였다. 그리고 주물과 금형

사이의 열전달 계수는 주물과 주형 사이에 중간요소를 삽입하였으므로 열전달계수를 중간요소의 열전도도로 환산하여 입력하였다.

3차원 모델도 대부분 동일한데, 다만 변위의 구속은 밑변이 꼭지점 4군데로 하였고, 상부의 주물과 대기의 접촉부위는 열전달계수로 처리하였으며, 복사열전달은 고려하지 않았다. 금형-대기, 주물-대기 간의 열전달계수는 Table 3과 같고, 열전달계수의 시간변화는 고려하지 않았다. 그리고 주물의 초기온도는 973 K, 금형은 298 K로 하였다.

이상과 같이 물성치 및 경계조건을 입력한 뒤 계산은 열과 응력을 동시에 계산하는 연성해석을 하였는데, 즉 한 타임스텝 안에서 온도를 계산한 후 변형 계산을 하고나서 다음 타임스텝의 계산을 행하는 방법으로 금형과 주물을 동시에 계산하였다. 타임스텝은 0.1초로 하였고, 계산은 응고가 종료한 후인 50초까지 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 부위별 냉각곡선의 비교

2차원 모델에서는 Fig. 4(a)의 위치에서 시간에 따른 부위별 냉각곡선을 구하였는데, 그 결과는 Fig. 4(b)와 같다. A356합금은 응고 시에 초정과 공정이 나타난다. 응고해석 시에는 잠열의 방출이 고려되는데, Fig. 4(b)는 응고구간에서의 잠열방출을 A356합금의 열분석(DSC) 결과에 따라서 Fig. 3과 같이 잠열을 초정부와 공정부에 불균등 배분한 결과로, 응고 중간에 냉각곡선의 변곡점(그림의 원부위)이 나타나고, 초정부위와 공정부위의 평행선이 실제의 냉각곡선과 동일하게 나타나는 반면, 통상의 응고해석 소프트웨어에서는 응고잠열을 응고구간에서 균등하게 배분하여 계산하므로 응고구간에서 냉각곡선의 기울기가 일정하게 나타난다.

Fig. 5(a)는 3차원 모델의 종단면에서의 냉각곡선 측정 위치이고, Fig. 5(b)는 냉각곡선이다. 주물의 높이별로 보면 상부와 가운데 부위는 거의 비슷하나, 하부인 1310은 응고가 매우 빨리 진행함을 알 수 있다. 그리고 최종응고부위는 1603으로 나타나고 있다.

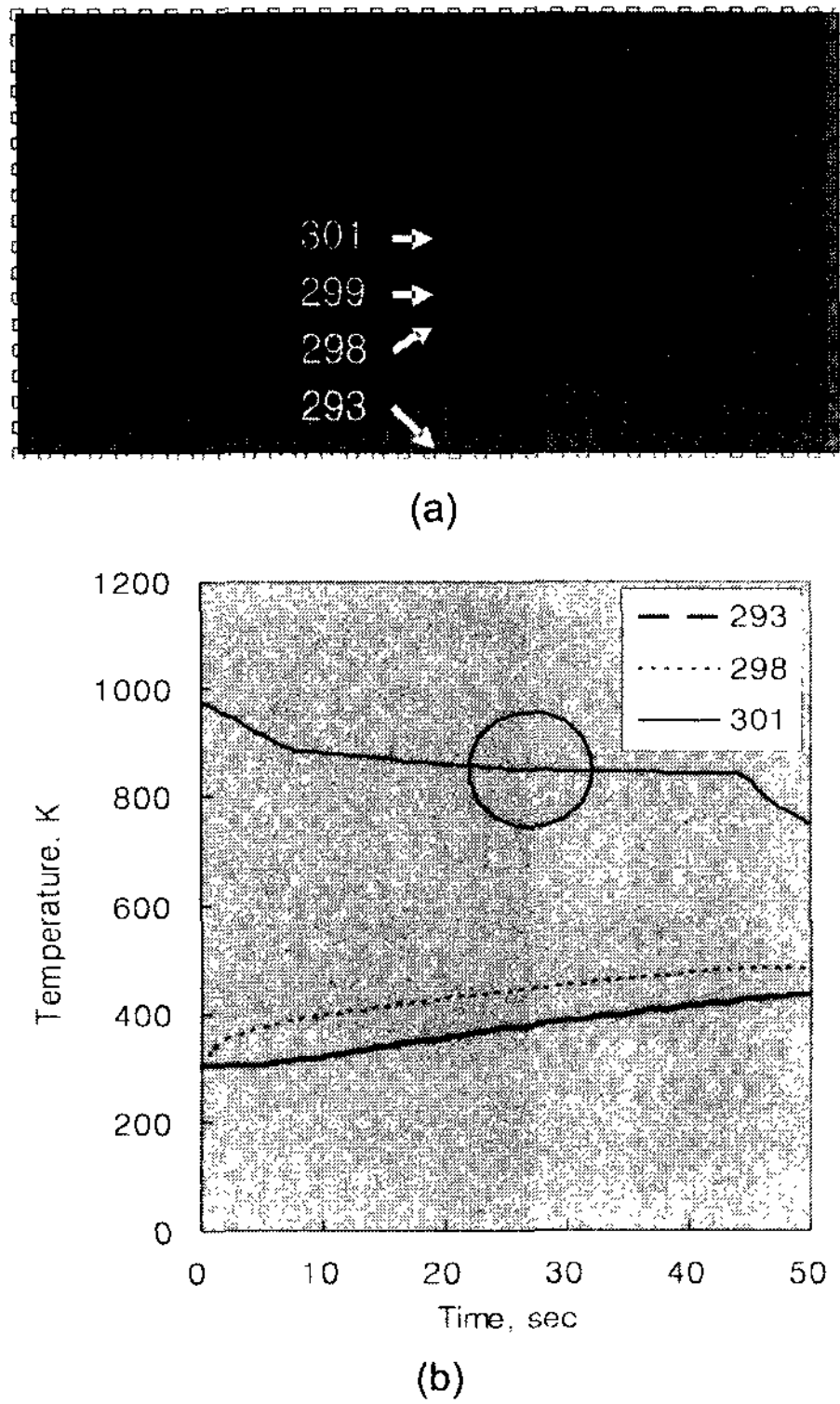


Fig. 4. (a) Locations of temperature acquisition in two-dimensional model (b) Calculated cooling curves in two-dimensional model with non-uniform evolution of latent heat at solidification range

3.2 주물 및 금형의 변형도

Fig. 6은 2차원 모델에서 금형과 주물의 온도 및 변형을 동시에 계산하여 주입 후 1초, 5초, 20초, 50초 후의 주물만의 변형도를 나타낸 것이다. 주입 후 응고는 단부에서부터 시작하므로 Fig. 6(a)와 같이 단부의 수축이 일어난다. 그림에서 변형량은 그 시각에서 크기를 자동조절하여 출력한 것이므로 각 경우에 크기가 다르게 나타나고 있다. 시간이 경과하면서 중앙부의 응고가 일어나면서 이에 따른 수축이 일어나고, 20초 후에는 아직 응고가 진행 중인 중앙부가 아직 수축이 일어나지 않은 상태로 된다. 50초는 응고가 전부 완료된 상태이다.

Fig. 7은 2차원 모델에서 주입 후 1초, 5초, 20초, 50초 후의 금형의 변형도를 나타낸 것이다. 주입 후 금형과 주물의 접촉부위의 온도가 상승하므로 Fig. 7(a)와 같이 금형은 주물을 향하여 휘게 되는데 이는 주물 접촉부위와 금형의 바깥 부위와의 온도차이 때문

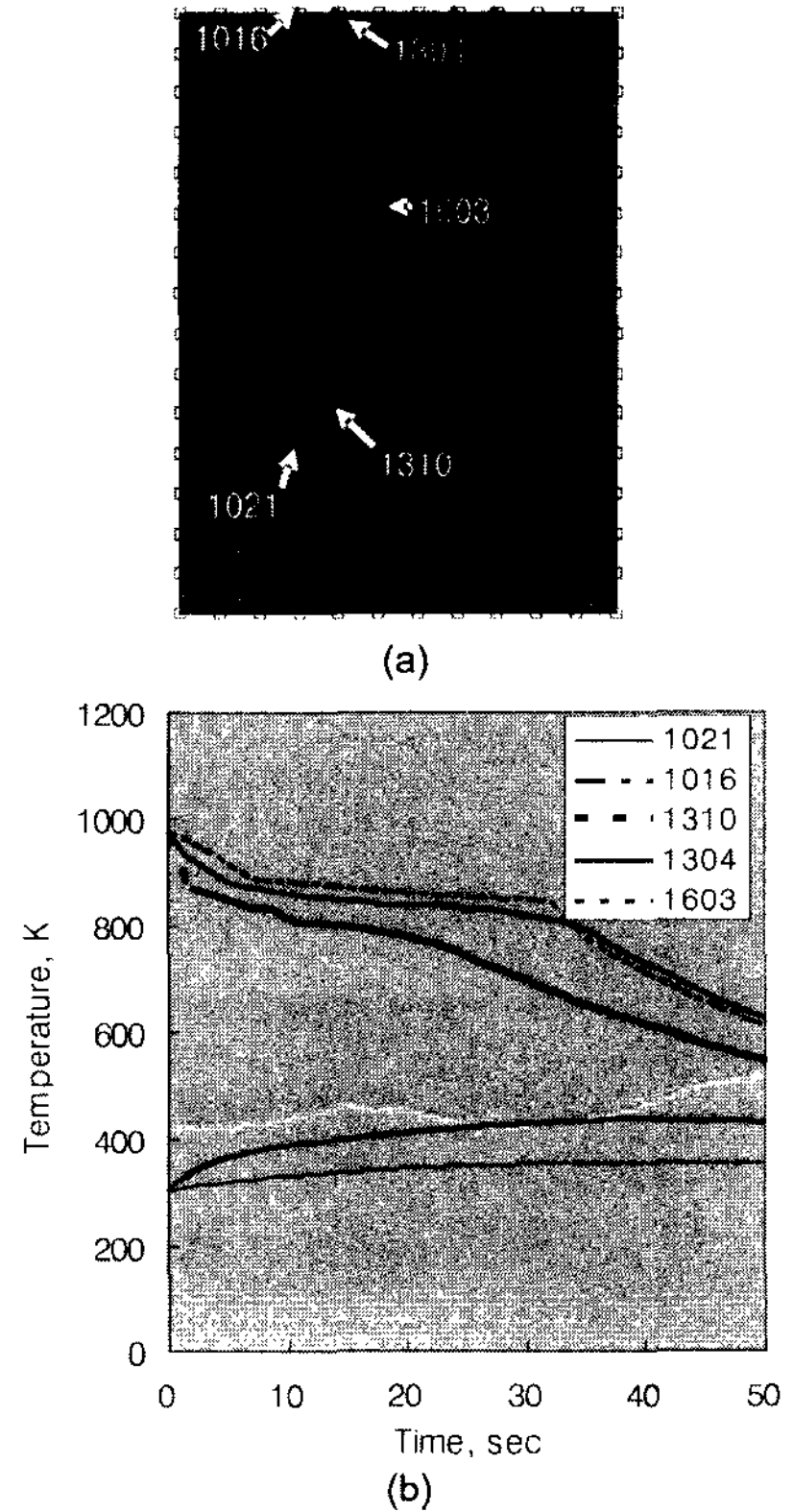


Fig. 5. (a) Locations of temperature acquisition in three-dimensional model (b) Calculated cooling curves at various locations in three-dimensional model

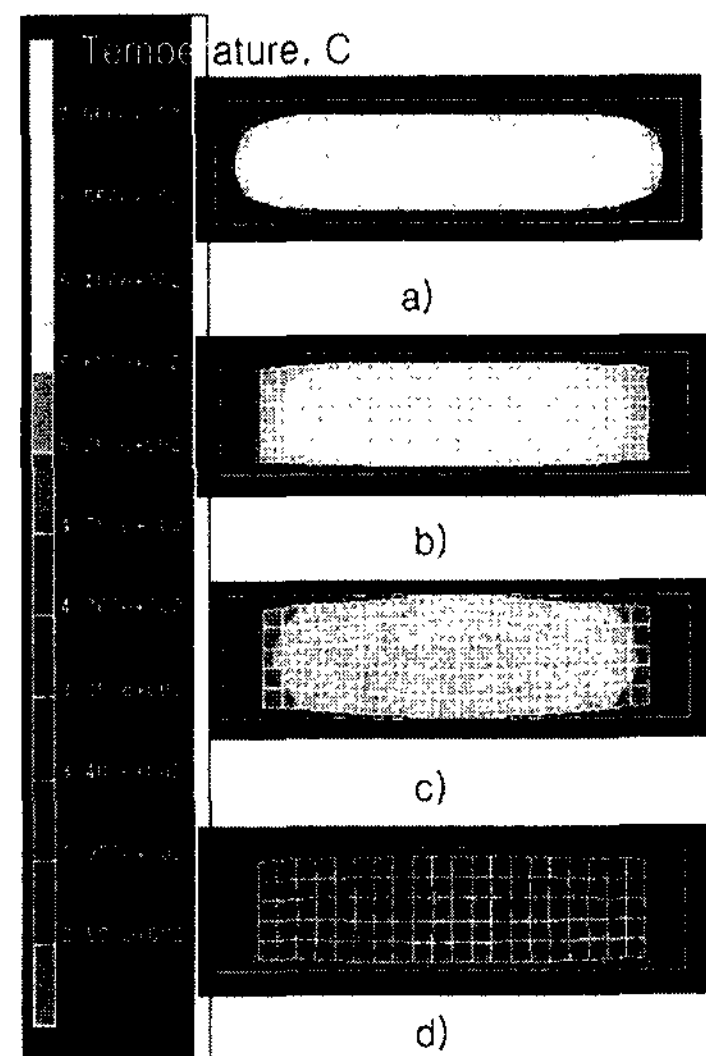


Fig. 6. Deformed figures of the casting with time after pouring (two-dimensional model) (a) 1 second (b) 5 seconds (c) 20seconds (d) 50seconds

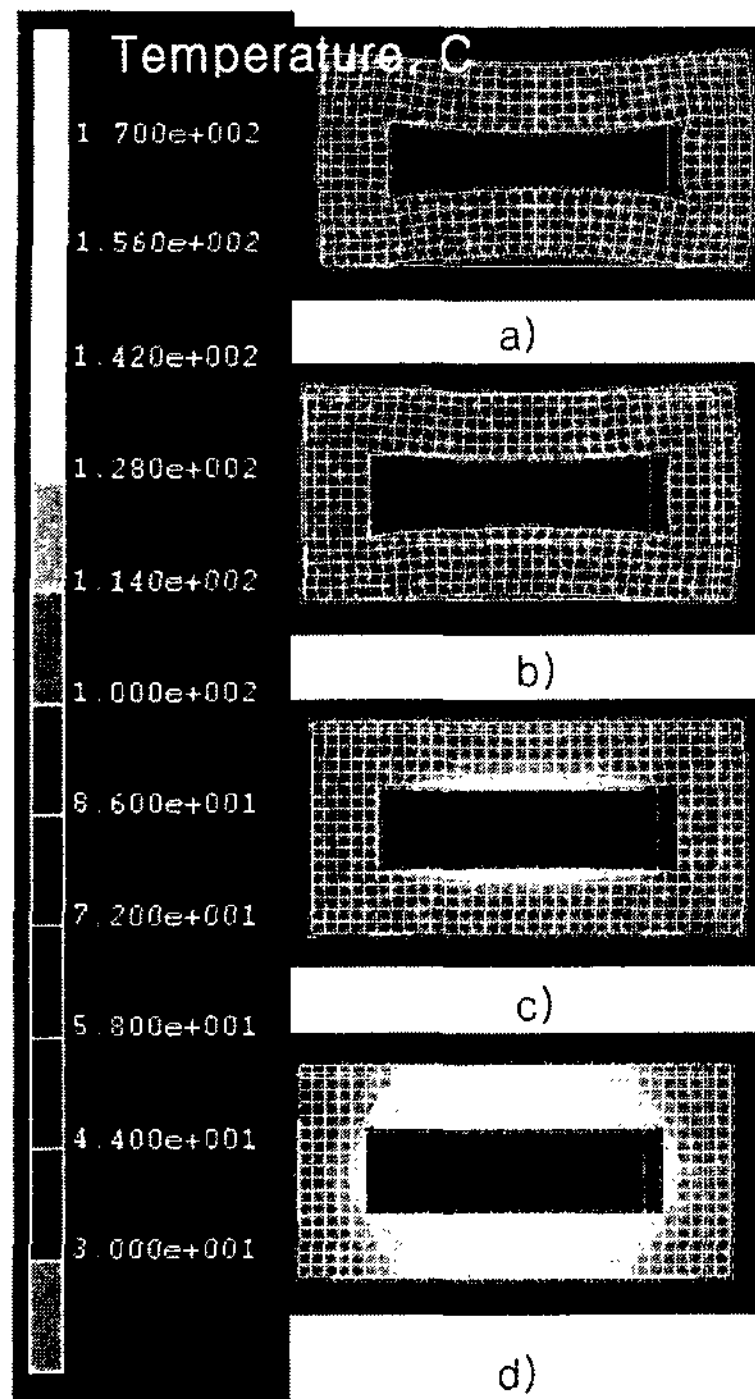


Fig. 7. Deformed figures of the metal mold with time after pouring(two-dimensional model) (a) 1 second (b) 5 seconds (c) 20 seconds (d) 50 seconds

이다. 시간이 지나면서 이 온도차이가 작아지면서 휘었던 부분이 점차 원래의 상태로 돌아오게 된다. 그러나 금형 전체의 온도가 상승하므로 전체적으로는 팽창이 지속된다[10].

Fig. 8은 3차원 모델에서 주입 후 1초, 5초, 20초, 50초 후의 주물의 변형도를 나타낸 것이다. 주입 후 응고는 하단부에서부터 시작하므로 Fig. 8(a)와 같이 하단부의 수축이 먼저 일어난다. 상단부는 대기와 접촉하여 응고가 약간 늦으므로 아직 수축이 나타나지 않고 있다. 그림에서 변형량은 그 시각에서 자동조절하여 출력한 것이므로 각 경우에 크기가 다르게 나타나고 있다. 시간이 경과하면서 상부의 응고가 진행되므로 이에 따른 수축이 일어나고, 20초 후에는 아직 응고가 진행 중인 중앙부가 아직 수축이 일어나지 않은 상태로 된다. 50초는 응고가 전부 완료된 상태이다.

Fig. 9는 3차원 모델에서 주입 후 1초, 5초, 20초, 50초 후의 금형의 변형도를 나타낸 것이다. 주입 후 금형과 주물의 접촉부위의 온도가 상승하므로 Fig. 9(a)와 같이 금형은 주물을 향하여 휘게 되는데 이는

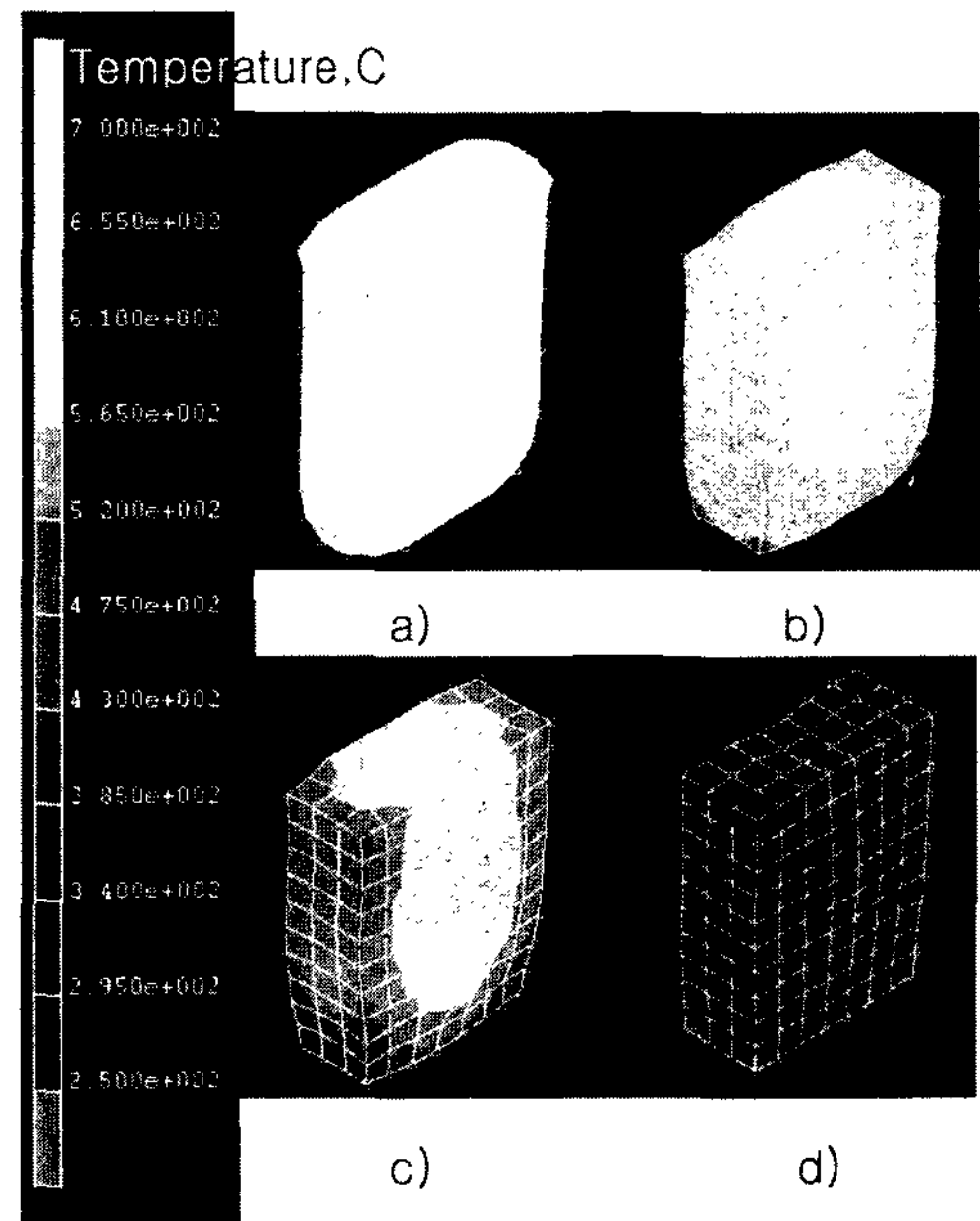


Fig. 8. Deformed figures of the casting with time after pouring(three-dimensional model) (a) 1 second (b) 5 seconds (c) 20 seconds (d) 50 seconds

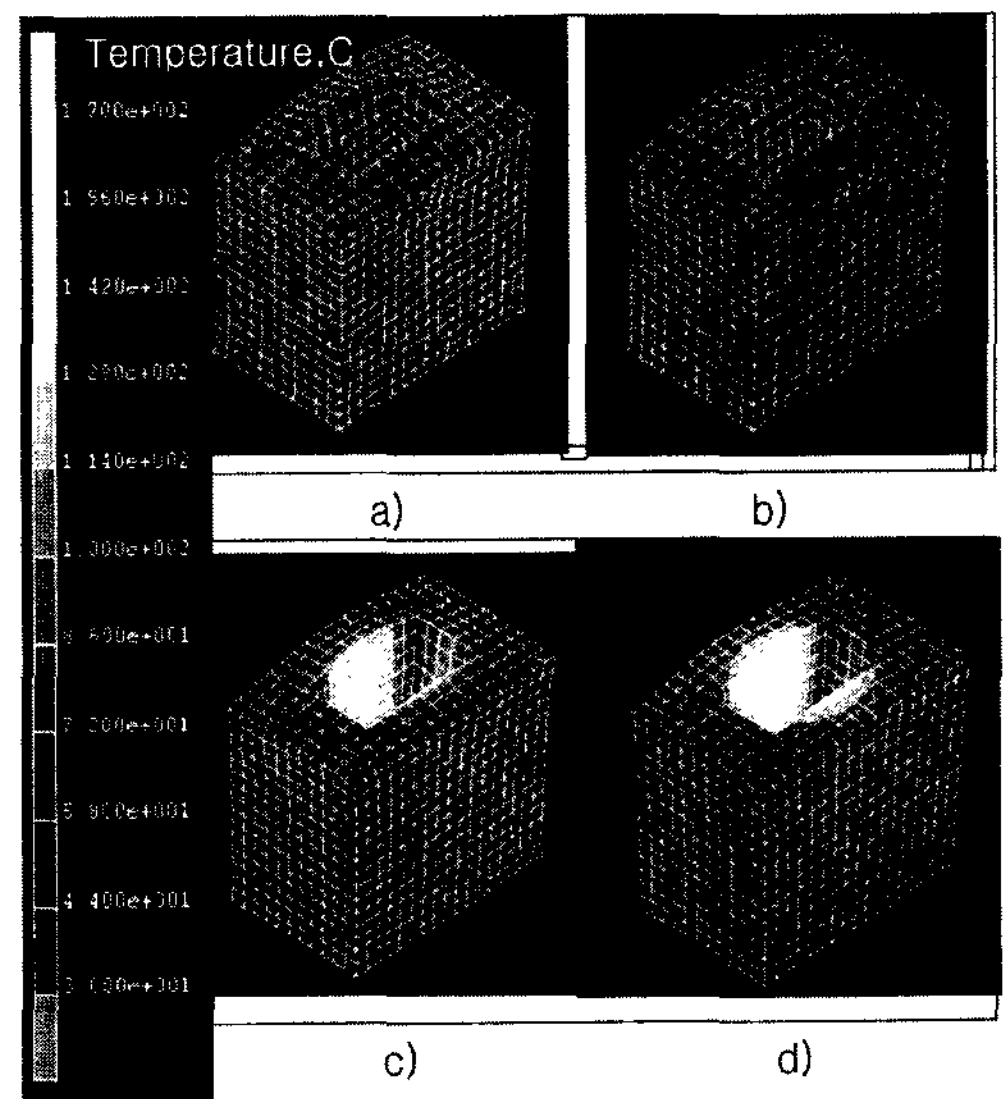


Fig. 9. Deformed figures of the metal mold with time after pouring(three-dimensional model) (a) 1 second (b) 5 seconds (c) 20 seconds (d) 50 seconds

주물 접촉부위와 금형의 바깥 부위와의 온도차이 때문이다. 시간이 지나면서 이 온도차이가 작아지면서 휘

있던 부분이 점차 원래의 상태로 돌아오게 된다. 그러나 금형 전체의 온도가 상승하므로 전체적으로는 팽창이 지속된다. 높이별로 보면 중앙부위의 금형의 온도 상승이 빠르므로 먼저 주물을 향하여 휘게 된다. 상부의 온도상승은 이보다 느리므로 금형의 형태는 중앙부는 들어가고 상부는 상대적으로 튀어나오는 것 같은 형태를 하게 된다. 그러나 시간이 지나면서 전체 온도 상승이 비슷해지면 원래의 형태로 돌아오기 시작한다.

이상은 범용유한요소해석 코드를 이용하면 금형과 주물의 온도 및 변형의 동시 계산이 가능하다는 것을 보여 준다. 즉 온도 및 변형의 계산이 한 타임스텝 안에서 연성 계산이 가능하다는 것으로, 금형은 온도가 상승하므로 팽창하고, 주물은 온도가 강하하므로 수축하게 되는데 이런 경우 분리되는 계면의 처리가 매우 까다롭다. 특히 2차원 모델의 코너부에서는 x, y 양방향으로 수축이 일어나서 금형과 주물의 분리가 일어나고, 3차원 모델의 코너부에서는 x, y, z 세방향으로 수축이 일어나서 금형과 주물의 분리가 일어나기 때문에 통상의 해석 방법으로는 금형과 주물의 동시 계산이 불가능하다. 그러나 본 연구에서처럼 금형과 주물 사이에 중간 요소를 삽입하여 계산하는 방법은 처리방안의 하나가 될 수 있음을 알 수 있다.

3.3 x, y, z 방향 변위

Fig. 10은 2차원 모델에서 시간에 따른 x 및 y방향의 변위를 나타낸 것이다. 위치는 Fig. 4(a)의 온도측정부위와 같다. x 방향의 변위를 보면 금형의 온도가 올라가면서 팽창하므로 그림에서와 같이 금형 부위인 298, 293의 변위가 0.1 mm 정도 나타나고 있다. 현재 모델에서는 변위의 구속점이 왼쪽 하단이어서 변위가 한쪽으로만 나타난다. y 방향 변위는 주물과 접촉하는 부위의 금형의 온도가 올라가면서 주물 쪽으로 휘어지는데, 아직 강도가 없는 상태인 주물부위의 299와 301은 금형의 변형에 따라서 앞으로 나아갔다(+변위) 금형내부의 온도구배가 감소에 따라 금형이 다시 원위치로 돌아오면서 주물도 같이 따라오게 되므로 "-" 변위를 나타내게 된다. 응고가 진행되면서 금형과 주물의 분리가 일어나고 주물 자체의 온도강하로 인한 수축으로 다시 "+" 변위를 나타내게 된다. 금형과 대기의 접촉부위인 293은 앞으로 나아갔다(+변위) 제자리로 돌아오게 되는데, 이후로는 금형이 전체적으로는 팽창하게 되므로 "-" 변위를 나타내게 된다(Fig. 7 참고).

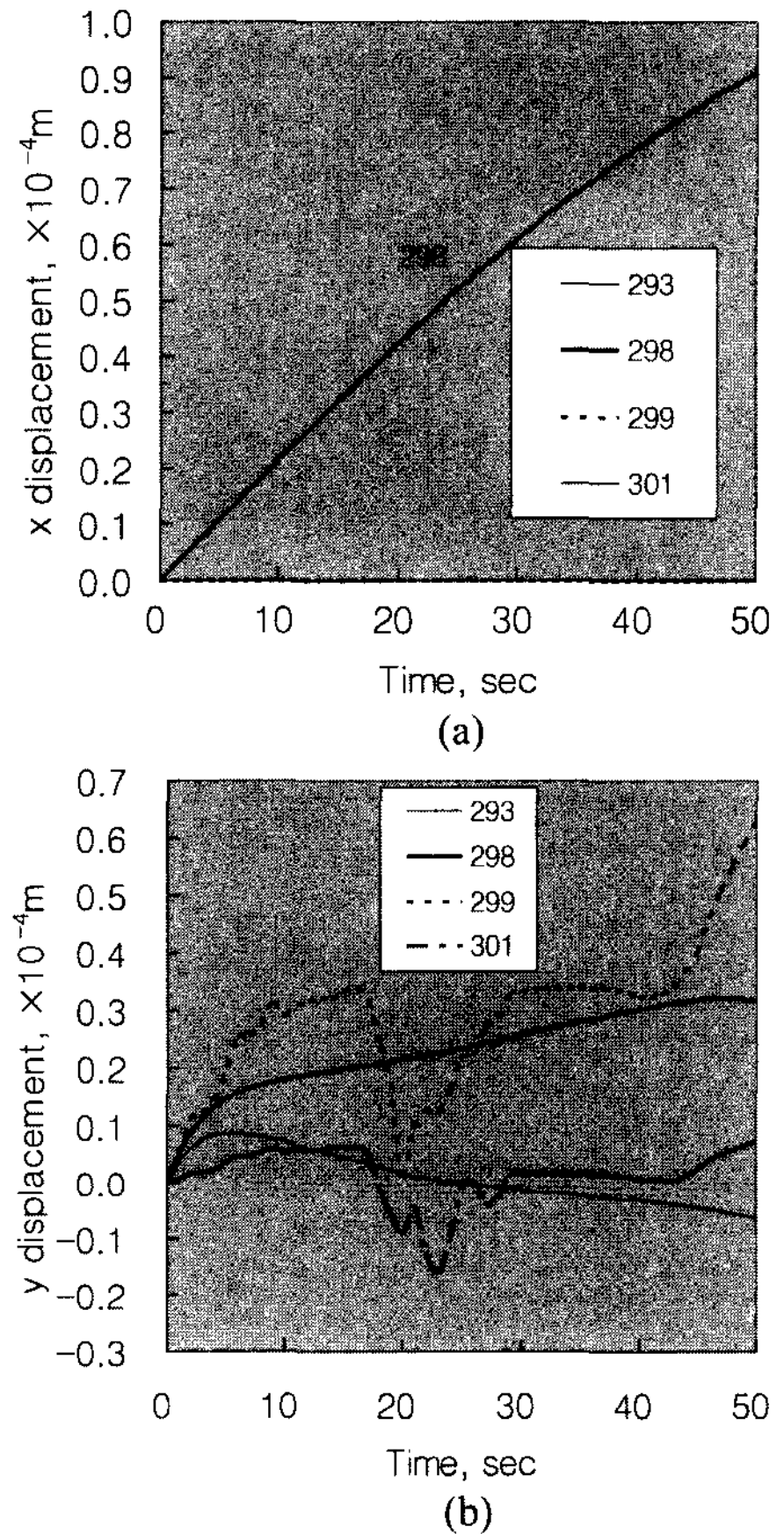
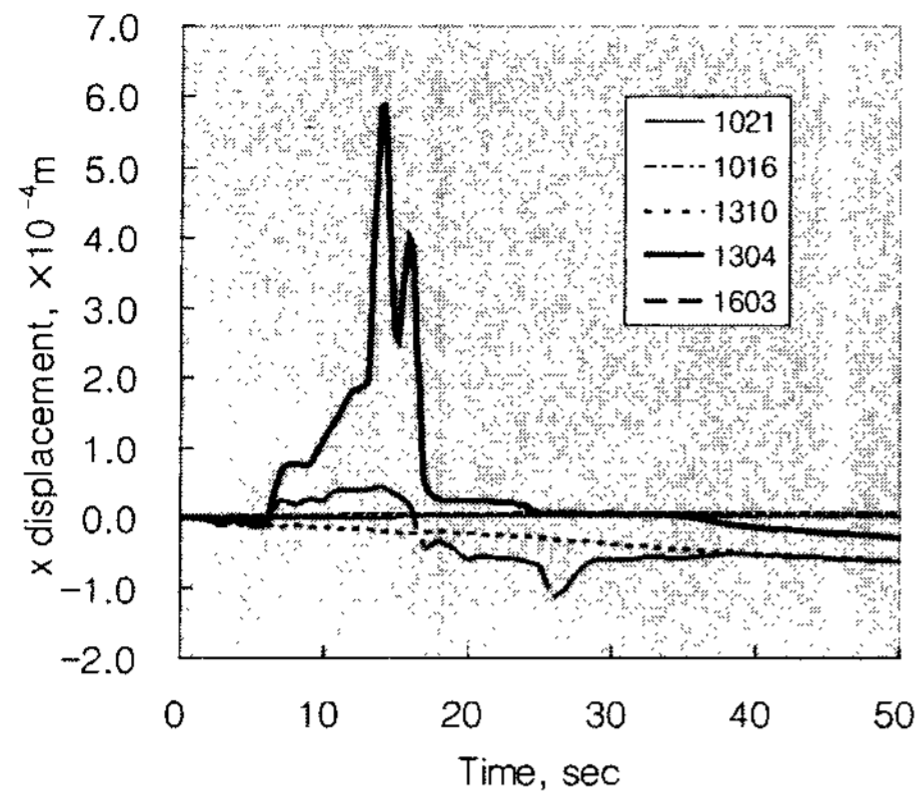


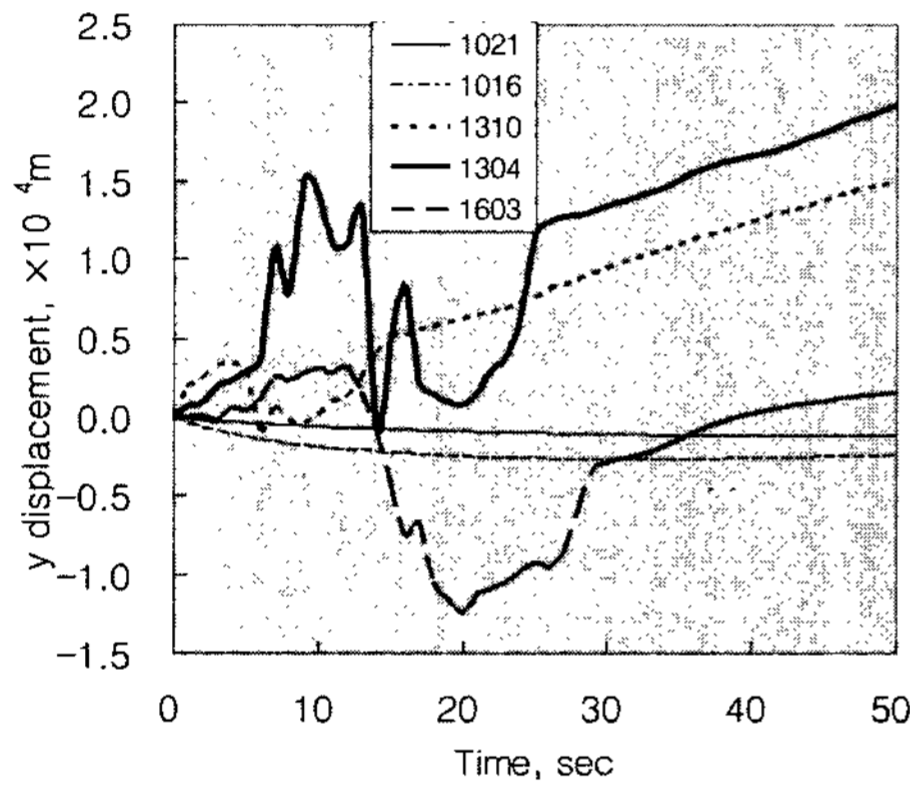
Fig. 10. Displacements at various locations with time(two-dimensional model) (a) x direction (b) y direction.

Fig. 11은 3차원 모델에서 x, y, z 방향의 변위를 나타낸 것이다. 위치는 Fig. 5(a)와 같다. x방향의 변위를 보면, 금형의 온도가 올라가면서 팽창하므로 그림에서와 같이 금형 부위인 1016, 1021의 변위는 거의 없으나, 주물과 대기의 계면에 있는 1304의 변위의 변화가 심하게 나타난다. 이는 이 곳이 대기와 접촉하는 주물 부위이고 응고가 늦은 편이기 때문에 타 요소의 변위에 영향받기 때문이다.

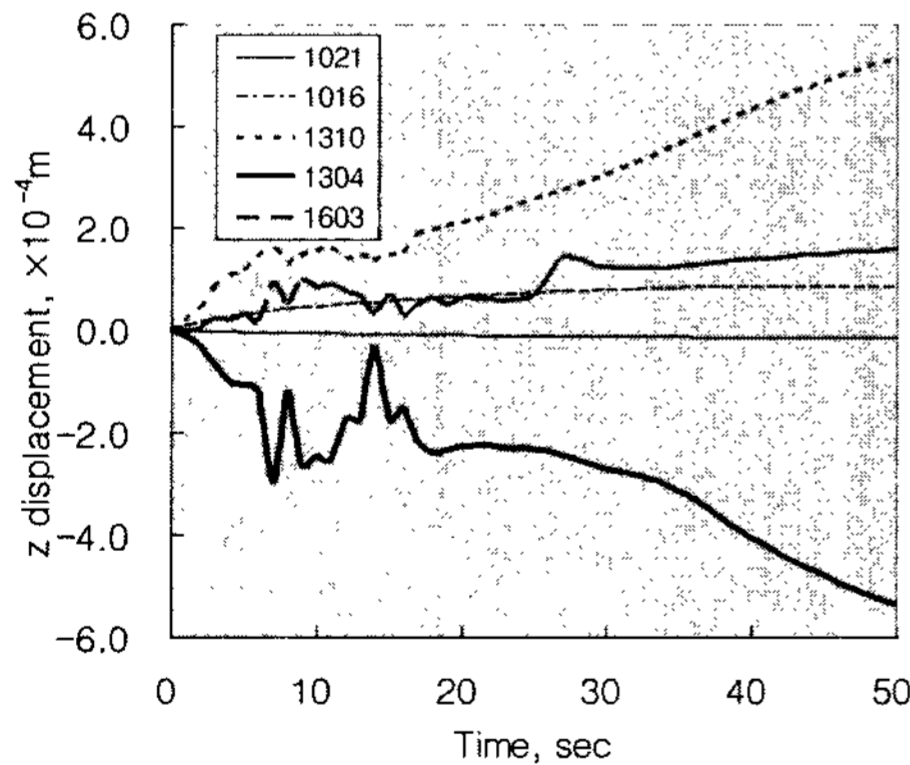
y방향의 변위를 보면, 금형의 온도가 올라가면서 팽창하므로 그림에서와 같이 금형 부위인 1016, 1021의 변위는 심하지 않으나, 주물과 대기의 계면에 있는 1304와 주물 중앙부의 1603의 변위가 심하며, 특히 오른쪽으로 갔다가("+방향) 다시 돌아오는 경향을 보인다("-"방향). 이는 주물 에지부가 응고하면서 안쪽으로 오그라들기 때문으로 보인다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 11. Displacements at various locations with time(three-dimensional model) (a) x direction (b) y direction (c) z direction

z방향의 변위를 보면, 금형중앙부의 온도가 올라가면서 주물 쪽으로 휘므로 금형 상부인 1016는 이에 따라 상승하게 된다. 그러나 주물의 상부인 1304는 주물이 수축하므로 아래 쪽으로 변위하게 된다. 중앙부의

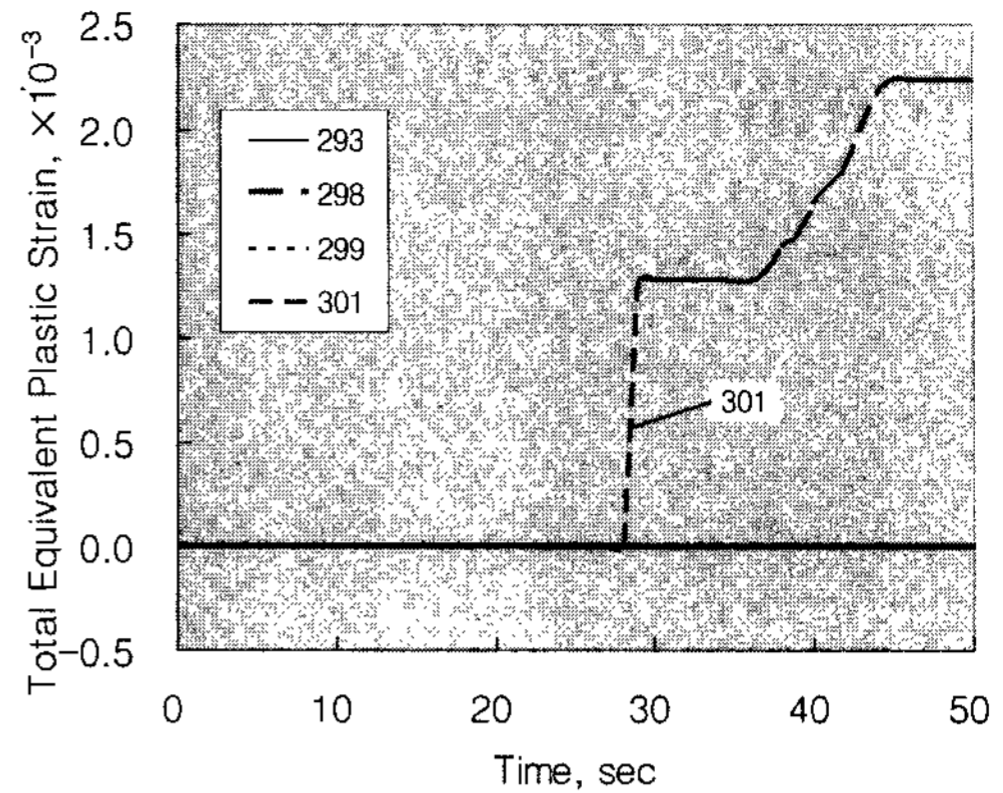


Fig. 12. Plastic deformation at various locations with time in two-dimensional model

z방향 변위는 뚜렷하지 않다.

주조 시에는 주물만이 변형되는 것이 아니고 주형도 변형되는데, 주입 초기에는 주물의 강도가 없는 상태이므로 주물의 변위는 주형의 변형에 의하여 직접 영향받게 된다[10]. 따라서 주형의 변형에 의한 주물의 변형도 고려되어야 하는데, 본 연구에서의 방법으로는 주형과 주물의 온도와 변형의 동시 계산은 가능하였다. 그러나 주형의 변형에 의한 주물의 변형, 예를 들면 주입 직후에 금형 내부의 온도구배가 커지면서 금형은 주물 쪽을 향하여 휘게 되며, 이 때 주물은 응고 초기 상태로 강도가 약하므로 주물은 금형에 의하여 변형되게 되는데, 현재의 계산 방법으로는 이의 고려가 불가능하다. 따라서 주형의 변형을 고려한 해석방법이 개발되어야만 한다.

3.4 소성변형량

Fig. 12는 2차원 모델에서 시간에 따른 소성변형량을 나타낸 것이다. 위치는 Fig. 4(a)와 같다. 금형은 탄성 변형한다고 가정하였으므로 293, 299의 소성변형량은 없으나, 주물부위인 299, 301 부위는 소성변형이 나타나고 있다. 특히 최종응고부위인 301의 경우는 응고구간에서의 소성변형이 커지고 있음을 알 수 있다. Fig. 13은 3차원 모델에서 부위별 소성변형량을 나타낸 것이다. 위치는 Fig. 6과 같다. 금형은 탄성변형한다고 가정하였으므로 1016, 1021의 소성변형량은 없으며, 주물부위에서 하단부이어서 응고가 빠른 1310은 소성변형이 없으나, 응고가 늦은 1304 부위는 주입 후 15초 경과하면서 급격한 소성변형이 나타나고 있다.

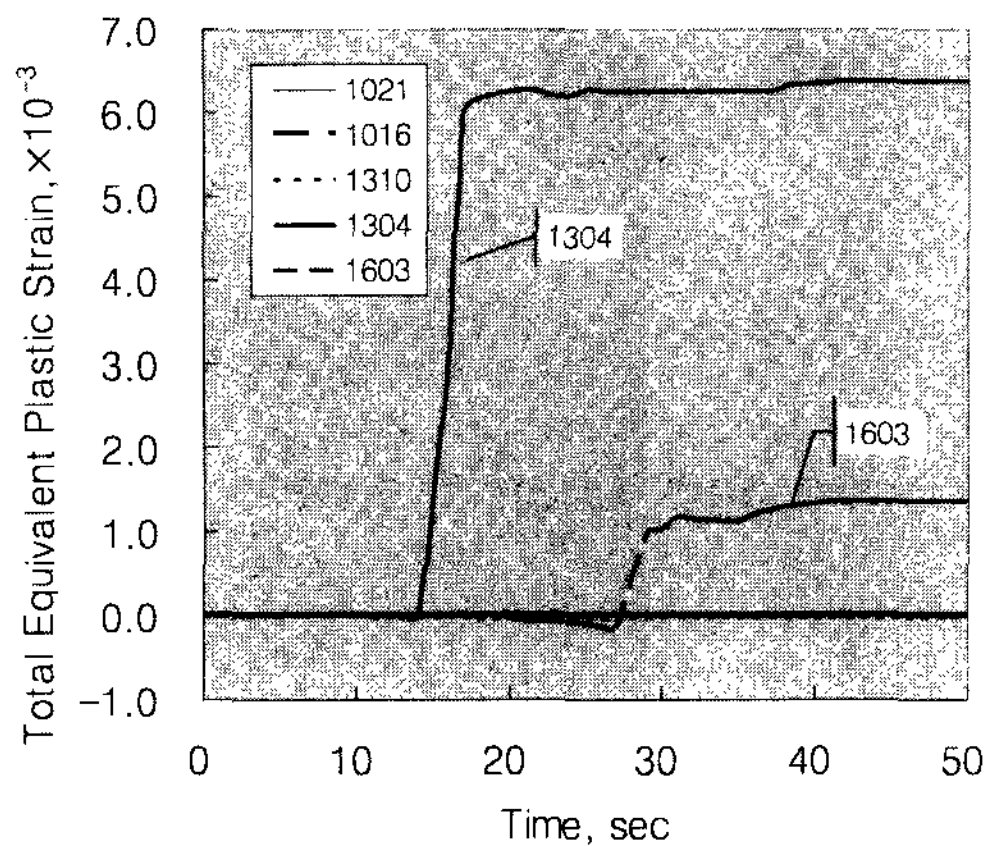


Fig. 13. Plastic deformation at various locations with time in three-dimensional model

4. 결 론

범용 유한요소 해석코드를 이용하여 2차원 및 3차원 모델을 대상으로 주물 및 금형의 변형을 동시에 계산한 결과 다음의 결론이 얻어졌다.

1) 범용 유한요소 해석코드를 이용하면 초정과 공정이 나타나는 주물에서 초정과 공정에 대한 잠열의 분배 처리가 가능하므로 주물 응고 시의 냉각곡선의 보다 정확한 예측이 가능하였다.

2) 2차원 모델 뿐만아니고 3차원 모델에 있어서도 주물과 금형의 온도 및 변형의 동시 계산은 주물과 금형 사이에 중간요소를 삽입하는 방법으로 가능하였다.

3) 금형은 주입 후 금형 내부의 온도차에 의하여 주물 쪽을 향하여 휘게 되지만 시간의 경과와 함께 다시 펴지는데, 이런 경우 주물의 변형은 금형의 변형에 직접 영향 받음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2001년도 산업자원부 중기거점기술 개발 연구 과제인 "주물, 열처리의 지능형 엑스퍼트 시스템 개발"의 일부로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드

립니다.

참고문헌

- [1] S. Engler, D. Boenisch and B. Kohler : "Metal and Mold Wall Movement during Solidification of Cast Iron", AFS Cast Metals Research Journal, (1973) 3, 20-30.
- [2] B. B. Nyichomba, V. Kondic and G. H. J Benett : "Dimensional Tolerances of Sand Castings Made of Aluminum and Grey Cast Iron", Transactions of AFS, (1994) vol. 102, 813.
- [3] W. C. Faustine, R. C. Voigt : F. E. Peters, "Dimensional Variability of Aluminum Castings", Transactions of AFS, (1999) 107, 829-838.
- [4] F. E. Peters, R. Velaga and R. C. Voigt : "Assessing Dimensional Repeatability of Metalcasting Processes", Transactions of AFS, (1996) 104, 181.
- [5] D. R. Gunasegaram, A. K. Dahle and T. T. Nguyen : "Mechanism of Gap Formation During Solidification of Commercial Al-Si Alloys", Transactions of AFS, (1999) 107, 257.
- [6] K. Y. Kim et al : "Displacement of the Solidified Shell and Metal Mold for AC4C Alloys ", J. of JFS, (1989) 61, 171-176.
- [7] J. O. Kristiansson : "Thermomechanical Behavior of the Solidifying Shell Within Continuous Billet Molds-Numerical Approach", J. of Thermal Stresses, (1984) 7, 209-226.
- [8] P. Barral and P. Quintela : "A numerical Algorithm for Prediction of Thermomechanical Deformation during the Casting of Aluminum Alloy Ingots", Finite Elements in Analysis and Design, (2000) 34, 125-143.
- [9] K. Y. Kim et al : "Effect of Mold Constraint on the Deformation of AC4C Alloys in Plane Metal Mold Castings", J. of JFS, (1990) 62, 277-282.
- [10] K. Y. Kim et al : "Deformation Behavior of Al-Si Alloy Castings and the Associated Metal Mold", (1992) Cast Metals, 5, 42-50.
- [11] ProCast web site, www.ues-software.com.
- [12] H. Sakuta et al : "Application of a Multipurpose Finite Element Code for Deformation Analysis of Casting Metals", J. of JFS, (1989) 61(7), 490.
- [13] H. Sakuta et al : "Deformation Analysis of One Dimensional Permanent Mold Casting by Finite Element Methods", J. of JFS, (1989) 61(8), 570-574.