

技術資料

컴퓨터에 의한 열 및 유동해석과 주조방안에의 적용

김성빈, 홍준표

Heat and Fluid Analyses and It's Application to the Design of the Casting Process

S.B. Kim and C.P. Hong

1. 서 론

주조기술의 발전에 따라 더욱 정교한 주조품을 보다 높은 생산성을 가지고 생산하는 것이 가능해졌으며, 그에 따라 한층더 정밀한 주조결함 및 주조공정의 제어가 요구되고 있다.

중력주조, 다이캐스팅 및 용탕단조와 같은 주조공정에 있어서 건전한 주조품을 얻기 위해서는 적절한 주형, 탕구방안 및 압탕설계를 통하여 주조시 수반되는 여러가지 주조결함들을 제어해 주어야 한다^{1~3)}. 주조결함에는 탕경(cold shut)⁴⁾, 공기 및 가스의 포집^{5,6)}, 개재물의 혼입⁷⁾등과 같이 용탕의 충전단계에서 탕류에 기인하는 결함과 수축공^{8,9)}, 응력변형^{10,11)}등과 같이 주입완료후 응고과정에서 주물의 수축에 기인하는 결함등이 있다. 이러한 주조결함들을 효과적으로 제어하기 위해서는 정확한 유동해석 및 열전달 해석, 응력해석을 수행하여 결함의 위치와 그 원인을 정밀하게 예측해야 하고 그에 따라서 적절한 주형, 탕구 및 압탕의 설계를 해야한다. 그러나 실제에 있어서 유동, 열전달 및 응력해석을 위한 정량적인 방법은 아직 확립되어 있지 않고 대부분의 경우에 있어서, 경험에 의존한 시행착오에 의해 주조방안을 최적화하고 있는 것이 현 상황이다.

근래에 들어 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 수치해석방법을 이용하여 주조품의 열전달 해석^{8, 9)} 및 응력해석이 활발히 이루어진 결과, 열전달 해석의 경우 현장에서 많은 응용¹²⁾이 이루어지고 있으나 주조공정에서 핵심을 이루고 있는 주입단계에 있어서의 용탕의 유동해석은 대부분 무시되

고 있다. 그러나 용탕의 유동에 관한 정확한 정보가 없이는 완벽한 열 및 응력해석을 기대하기 어렵고, 용탕흐름에 기인된 주조결함을 정량적으로 예측한다는 것은 더욱 어려운 일이다. 따라서 주입의 진행에 따라 계속적으로 변화하는 용탕의 자유표면을 추적하면서, 그와 동시에 탕류의 유동을 해석할 수 있는 수치해석방법의 개발이 절실하게 되었다.

이러한 요구에 따라 최근 용탕의 유동해석을 위한 여러가지 연구들이 발표되기 시작하고 있으며, 용탕의 흐름과 더불어 주형충진시의 용탕의 열분포도 함께 해석하려는 노력도 병행되고 있다. 따라서 주조생산성을 향상시키기 위해 주조방안에 적용되고 있는 여러가지 수치해석기술들을 소개하고, 이들의 원리를 살펴보면서 국·내외의 연구동향 및 현장응용 상황을 알아보는 일이 필요하게 되었다.

2. 주조공정의 열 및 유동해석방법

2.1 수치해석법에 의한 열 및 유동해석방법

주입후 주형을 채워들어가는 용탕의 유동을 해석하기 위해서는 용탕내부의 속도 뿐만아니라 용탕과 대기가 접하는 부분, 즉 용탕이 지니고 있는 자유표면영역에서의 속도들도 정확히 계산해 주어야 한다. 그러나 주형내로 충전되면서 시시각각 변화되어가는 용탕의 자유표면을 추적하여 자유표면의 위치와 형상을 인식하는 문제나, 바로 그 표면에서의 속도들을 계산하는 문제는 지극히 어려운 문제가 아닐 수 없다.

이러한 문제의 해결을 위해서는 유체역학분야에 있어서 전통적으로 사용되어 오던 Eulerian좌표계 접근과 Lagrangian좌표계 접근을 효과적으로 결합하여 이용해야 한다.

즉, 계산영역을 많은 수로 구성된 Eulerian셀로서 분할하여 유체이동에 관계없이 셀구조를 유지하면서 그 위치에서의 유체속도들을 계산해야 하고, Lagrangian접근방법을 이용한 자유표면추적법을 도입하여, 유체이동과 함께 좌표계를 이동시키면서 자유표면의 위치 및 형상을 계산해 주어야 한다.

이러한 의미에서 자유표면을 지닌 2차원 비압축성 유동을 해석하기 위하여 개발된 MAC, SMAC 및 SOLA-VOF계열의 수치해석 이론들은 Eulerian접근과 Lagrangian접근을 효과적으로 결합시킨 방법이라고 할 수 있다^{13~15)}. 그러나 이러한 수치해석방법들은 구조물의 용탕유동 문제에 직접 적용하기에는 많은 제한을 가지고 있으며, 임의의 형태의 주형과 다중 주입구를 고려하기 위해서는 상당한 수정이 필요하다. 더우기 3차원 확장의 경우, 이론적인 어려움과 함께 프로그램의 복잡성과 방대한 량의 계산 메모리를 요구하는 문제등이 있다.

따라서 이러한 수치해석법을 구조물 문제의 해석에 적용하기 위해서는 구조물 용탕유동의 특성을 고려함과 동시에 다양한 구조방안의 해석이 가능하도록 여러가지 교정 및 첨가를 해주어야 한다. 또한 반복적인 해석실험과 점진적인 시뮬레이터의 개발을 통하여 용탕의 유동해석에 이러한 수치해석법을 최적화시키도록 하는 연구가 요구된다.

2.2 열 및 유동해석의 지배방정식

모든 비선형항(non-linear term)을 포함시킨 완전한 Navier-Stokes방정식을 원시변수의 형태(primitive value form)로 유도하여 사용한다. 연속방정식(continuity equation)도 마찬가지로 원시변수의 형태로서 유도하여 사용한다.

MAC, SMAC 및 SOLA-VOF법은 지배방정식을 원시변수의 형태로 사용함으로써 속도 및 압력을 직접 계산할 수 있다. 계산의 정밀성과 수치해의 안정성을 높이기 위해 대류항의 계산에 있어서, 보통 중심차분법과 풍상차분법(upwind

scheme or donor cell schem)을 복합한 형태를 사용한다¹⁵⁾.

2차원 비압축성 유체를 해석하기 위해 사용하고 있는 기본방정식은 다음과 같다.

연속방정식 :

$$D = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} + \zeta \frac{u}{r} = 0 \quad (1)$$

Navier-Stokes방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial r} + \frac{\partial rv}{\partial z} + \zeta \frac{u^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \\ \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \zeta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} \right) \right] + g_r \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial r} + \frac{\partial vv}{\partial z} + \zeta \frac{uv}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \\ \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \zeta \frac{\partial v}{\partial r} \right] + g_z \end{aligned}$$

여기서 $\zeta=0.0$ 일 경우에는 직교좌표계, $\zeta=1.0$ 일 경우에는 원주좌표계를 의미한다. 비압축성 유체에 관한 3차원 열 및 유동해석에 사용된 기본방정식은 다음과 같다.

연속방정식 :

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Navier-Stokes 방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial q}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + g_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial q}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + g_y \quad (4) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} = \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial q}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g_z \end{aligned}$$

에너지방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho C_p u T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho C_p v T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho C_p w T) = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \end{aligned} \quad (5)$$

유체영역에서는 운동량보존과 질량보존의 원리(zero divergence, $D=0$)를 이용하여 속도 및

압력분포를 계산할 수 있으나 자유표면영역에서는 유체가 단위 셀을 부분적으로 채우고 있기 때문에 더 이상 질량보존의 원리를 사용할 수 없다.

자유표면영역은 유체영역과 빈영역의 경계, 즉 용탕과 대기의 경계를 포함하고 있기 때문에 자유표면 경계조건(free surface boundary condition)을 만족해야만 한다. 따라서 이러한 자유표면 경계조건을 이용하여 속도와 압력을 계산할 수 있다.

자유표면 경계조건은 다음과 같다¹³⁾.

전단응력조건(tangential stress condition) : 자유표면에서의 전단응력은 항상 0이어야 한다.

$$\nu [2n_x m_x \frac{u}{x} + (n_x m_x + n_x m_x) (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) + 2n_y m_y \frac{\partial v}{\partial y}] = 0 \quad (6)$$

여기서 n_x, n_x, m_y, m_y 등은 자유표면에 대한 수직방향 및 전단방향 단위벡터의 x, y 성분이다.

수직응력조건(normal stress condition) : 자유표면에서 수직응력은 항상 주어진 응력(applied pressure)과 표면장력(surface tension force)의 합에 균형을 이루어야만 한다.

$$2\nu [n_x n_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_y n_y (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) + n n \frac{\partial v}{\partial y}] = p_a + p_s \quad (7)$$

여기서 p_a 는 빈영역에서 가해지는 압력, 즉 대기압력을 의미하고, p_s 는 표면장력을 나타낸다. 이러한 2차원 관계식을 확장하여 3차원의 경우에도 사용할 수 있다.

2.3 용탕자유표면의 인식과 그 변화의 추적

자유표면(free surface)을 갖는 비정상(transient)유체를 해석하기 위해서는 먼저 자유표면의 위치와 그 형상을 인식해야 하고 시간에 따른 자유표면의 변화를 추적해야만 한다.

이러한 문제의 해결을 위하여 그동안 높이함수법(height function method), 선형구획법(line segment method), VOF법(Volume of Fluid) 및 Marker법등이 사용되어 왔다.

이러한 방법중 높이함수나 선형구획을 이용하는 방법은 복잡한 자유표면 형상을 해석하는데 있어서 한계를 지니고 있을 뿐만아니라, 주조문

제의 경우처럼 다중 주입구를 고려하는 경우에는 응용하기 어려운 난점이 있다.

Marker법은 자유표면을 수치적으로 직접 정의하는 대신에 전체 유체영역에 Marker입자들을 골고루 분산시킨 다음, 유동속도의 변화에 따라 Marker입자들을 이동시키는 방법이다. 이때 Marker입자의 유무에 따라 계산영역을 유체영역, 자유표면영역 및 빈영역으로 구별해 낼 수 있다. 이러한 Marker법은 자유표면의 형상과 유체의 흐름을 자세히 관찰할 수 있고 논리적으로 쉽게 이해할 수 있다는 장점이 있으나 Marker입자들의 위치를 계산하기 위하여 많은 기억용량을 필요로 하는 단점이 있다.

VOF법은 유체의 부피를 나타내기 위해서 유체함수(fluid function)를 정의하여 유체함수가 1인 곳은 유체영역, 0인 곳은 빈영역 그리고 0에서 1사이의 경우에는 자유표면 영역으로 구분하는 방법으로써, Marker법과 마찬가지로 복잡한 형상의 자유표면을 추적할 수 있는 방법이다. VOF법은 Marker법에 비하여 기억용량을 적게 사용할 수 있다는 장점이 있으나 자유표면을 지닌 3차원의 유동을 해석하는 경우, 자유표면영역에 있어서 유체의 기울기를 3차원으로 정의해야 하는 어려움이 있다. 따라서 VOF법은 3차원 유동해석에는 적용하기 어려운 난점이 있다.

대표적인 자유표면 추적기술인 Marker법과 VOF법을 그림 1과 그림 2에 서로 비교하여 나타내었다.

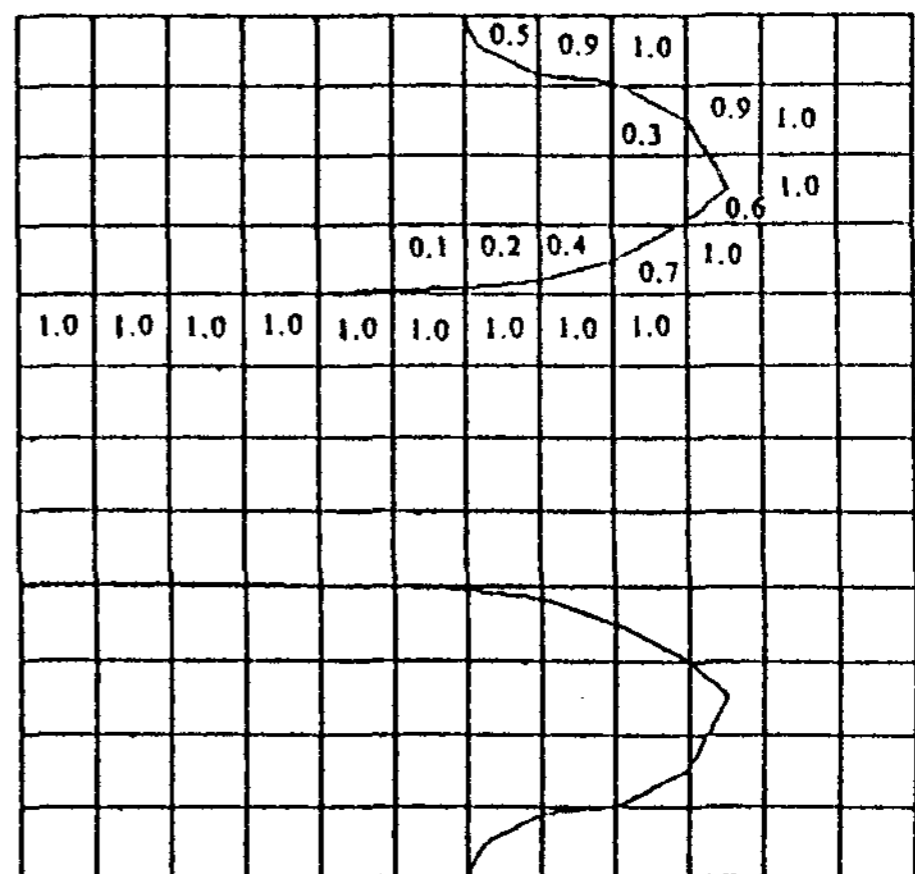


그림 1. Tracing of melt free surface by fluid function.

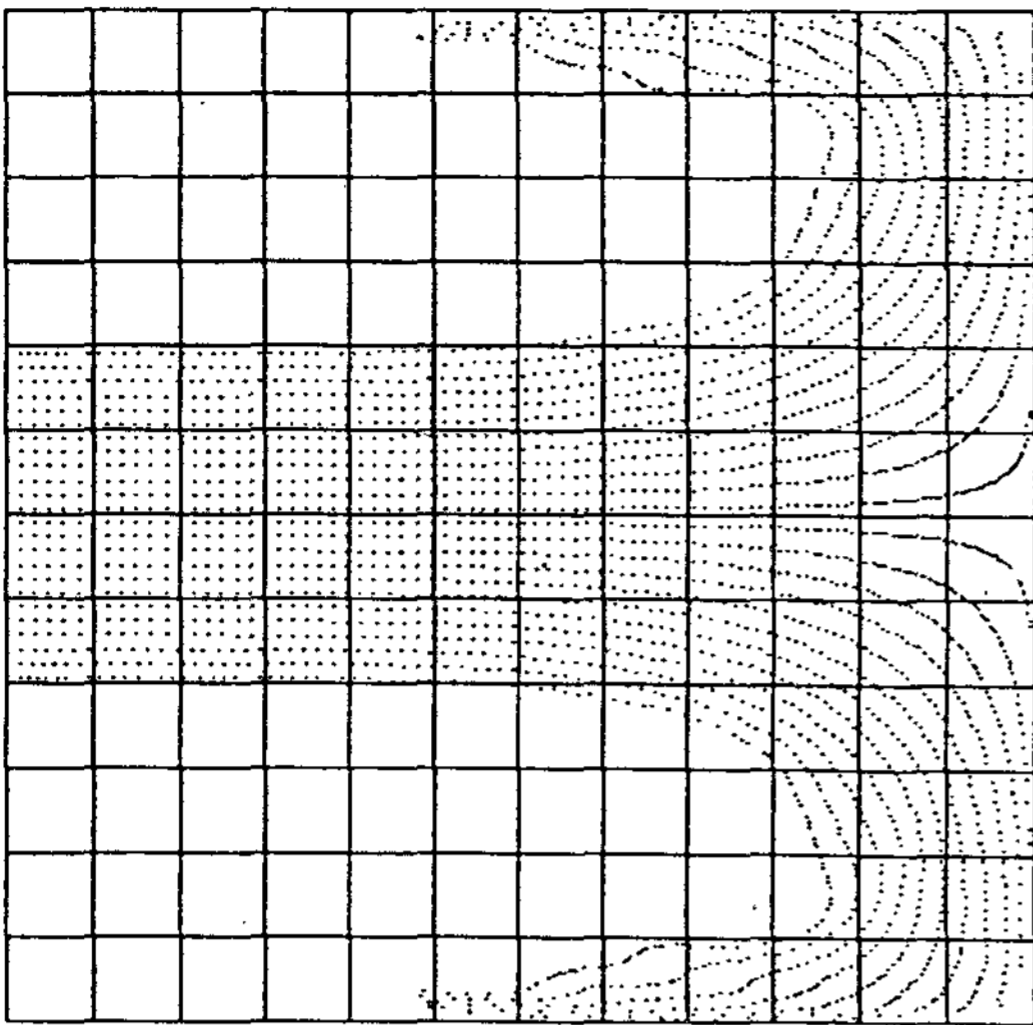


그림 2. Tracing of melt free surface by Marker technique.

2.4 열 및 유동해석을 위한 계산영역의 분류

자유표면의 추적을 통하여 인식된 유체영역, 자유표면영역과 빈영역은 셀방법(cell method)을 이용하여 5개의 영역으로 분류할 수 있다. 각 영역에 관한 정의는 다음과 같다^(3~15).

(1) 경계셀(boundary cell, B) :

경계조건의 원활한 투입을 위해 만든 가상의 셀

(2) 충전셀(full cell, FUL) :

Marker를 포함하면서 주위에 빈셀을 전혀 이

웃하고 있지 않은 셀, 즉 유체로만 채워진 영역

(3) 표면셀(surface cell, SUR) :

Marker를 함유하면서 주위에 1개 이상의 빈셀을 이웃하고 있는 셀

(4) 빈셀(empty cell, EMP) :

Marker를 전혀 포함하지 않은 셀, 즉 유체가 존재하지 않는 영역

(5) 장애물셀(obstacle cell, OB) :

고체벽이나 내부의 장애물 영역을 나타내는 셀 이와같이 계산영역을 분류한 후, 유체영역과 자유표면영역은 각기 다른 방법으로 압력과 속도를 구해야 한다. 그림 3과 그림 4에 대표적인 자유표면추적 방법인 Marker와, 셀을 이용한 계산영역의 분류방법을 제시하였다.

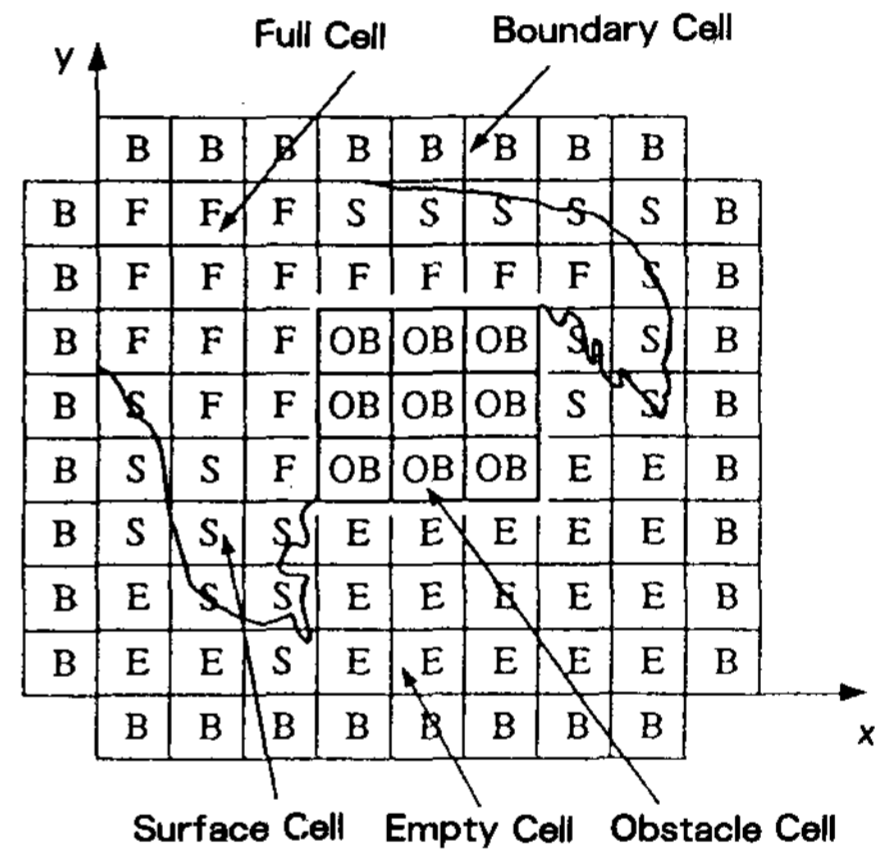


그림 4. Definition of fluid region and surface region using cell structure.

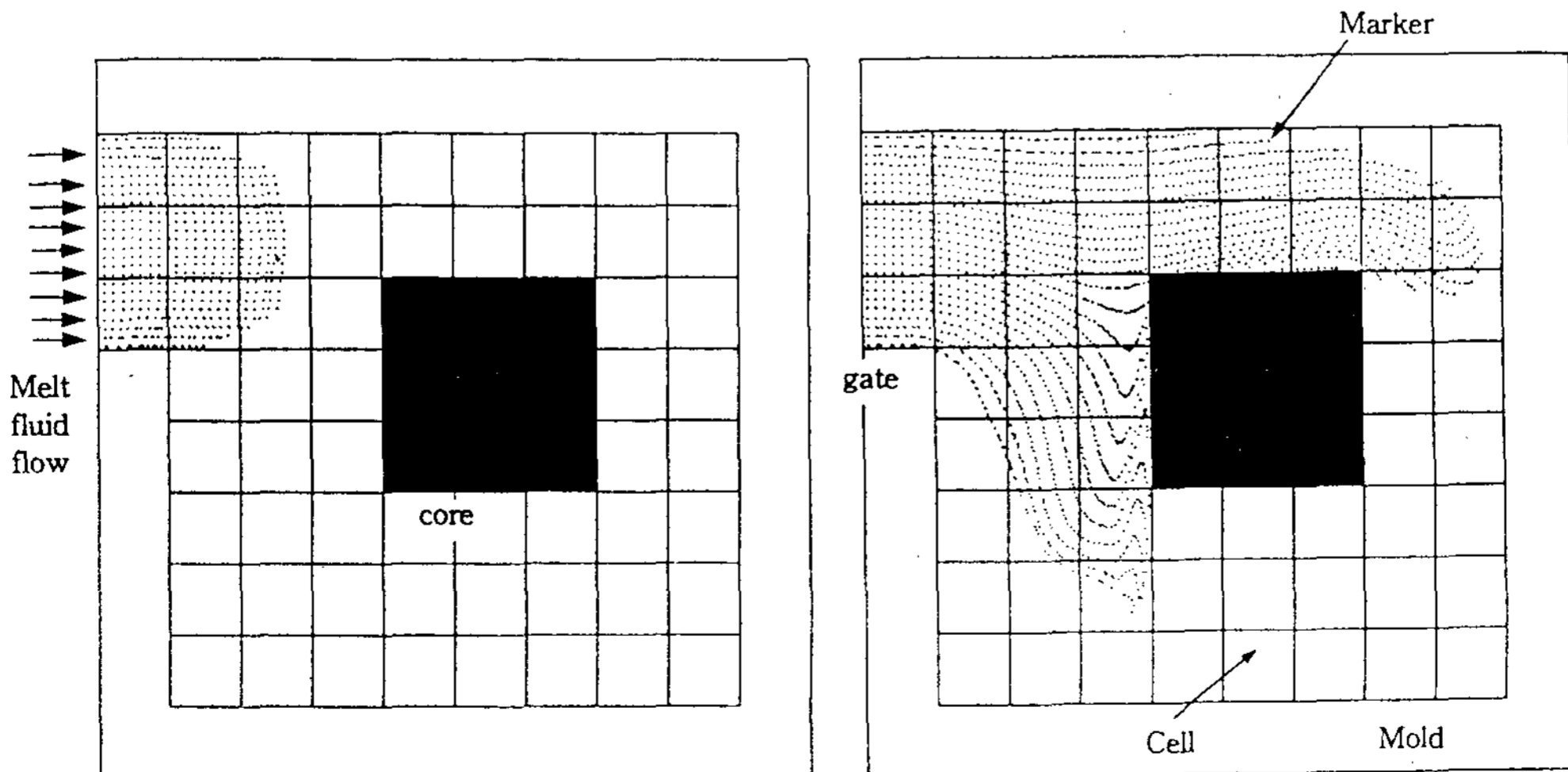


그림 3. Classification of fluid region and surface region using Markers.

3. 주조방안에 적용된 열 및 유동해석의 국·내외 현황

3.1 주조방안에 적용된 열 및 유동해석의 국외 현황

1983년 이후 위에서 소개한 수치해석법을 주조공학분야에 적용하고자하는 노력이 R.A. Stoehr, W.S. Hwang등에 의해 이루어졌는데¹⁶⁾, 이들은 이러한 방법들을 주조문제 해석을 위한 2차원 유동해석 모델에 적용하여 여러가지 주형에서의 용탕의 충전거동을 해석하였고, 이를 실험결과의 비교를 통해서 검증하였다. 히타찌연구소의 K.Anzai등은 다이캐스팅 분야에 SMAC법을 도입하여 擬3차원 및 3차원 유동해석을 통해서 주입구의 두께에 따른 용탕유동의 변화를 연구하였고¹⁷⁾, 다이캐스팅시에 발생하는 탕경등을 예측하여 실제 현장문제에 적용하였다. 최근 토요타자동차의 Y.Iwata등도 다이캐스팅 문제에 이러한 수치해석법을 도입하여 擬3차원 해석결과와 발표된 실험결과를 서로 비교하였고¹⁸⁾, 경금속 분야에서 H. Nomura등도 3차원 해석을 이용하여 계단식 직각수평평판에서의 용탕의 충전거동을 조사한 바 있다¹⁹⁾. 최근에는 이러한 용탕의 유동해석과 동시에 주형충진시의 열전달 현상을 해석하려는 연구가 시작되었고, C. Wang 및

M. Lipinski등의 연구결과들이 보고되고 있다^{20,21)}.

이러한 수치해석법에 의한 열 및 유동해석방법을 실제 주조품의 생산에 적용하여 주조생산성을 향상시킨 사례들을 몇가지 소개하고자 한다.

(1) 비디오헤드 드럼의 다이캐스팅 해석²²⁾

프레스법에 의해 생산하던 비디오헤드 드럼을 생산성과 비용, 그리고 치수면에서 유리한 다이캐스팅법으로 생산하기 위해 그림 5의 (1)과 같은 초기주조방안을 마련하였다. 이와같은 주조방안 아래서 제품을 주조한 후, 주조결함을 조사하기 위하여 기계가공과 열처리 실험을 실시한 결과 그림 6에서처럼 표면에 위치한 다수의 가스결함을 발견하게 되었다. 표면에 밀집하는 이러한 가스결함의 원인을 규명하기 위해서 3차원 유동해석을 수행한 결과 그림 7과 같은 수치해석결과를 얻었다. 그림 7에서 보듯이 최종충진부위는 over flow가 설치된 위치에서 형성되지 않고 오히려 드럼의 표면부에서 형성되기 때문에, 이곳에서 다수의 가스결함이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이러한 유동해석결과에 근거하여 over flow의 위치를 그림 5의 (2)와 같이 변경한 뒤 주조품을 생산한 후, 기계가공과 열처리 실험을 앞서와 같은조건으로 실시하여, 주조결함을 조사하였다. 그 결과 그림 8에서 보듯이 드럼의 표면부에서 가스결함이 거의 제거된 깨끗한 주조

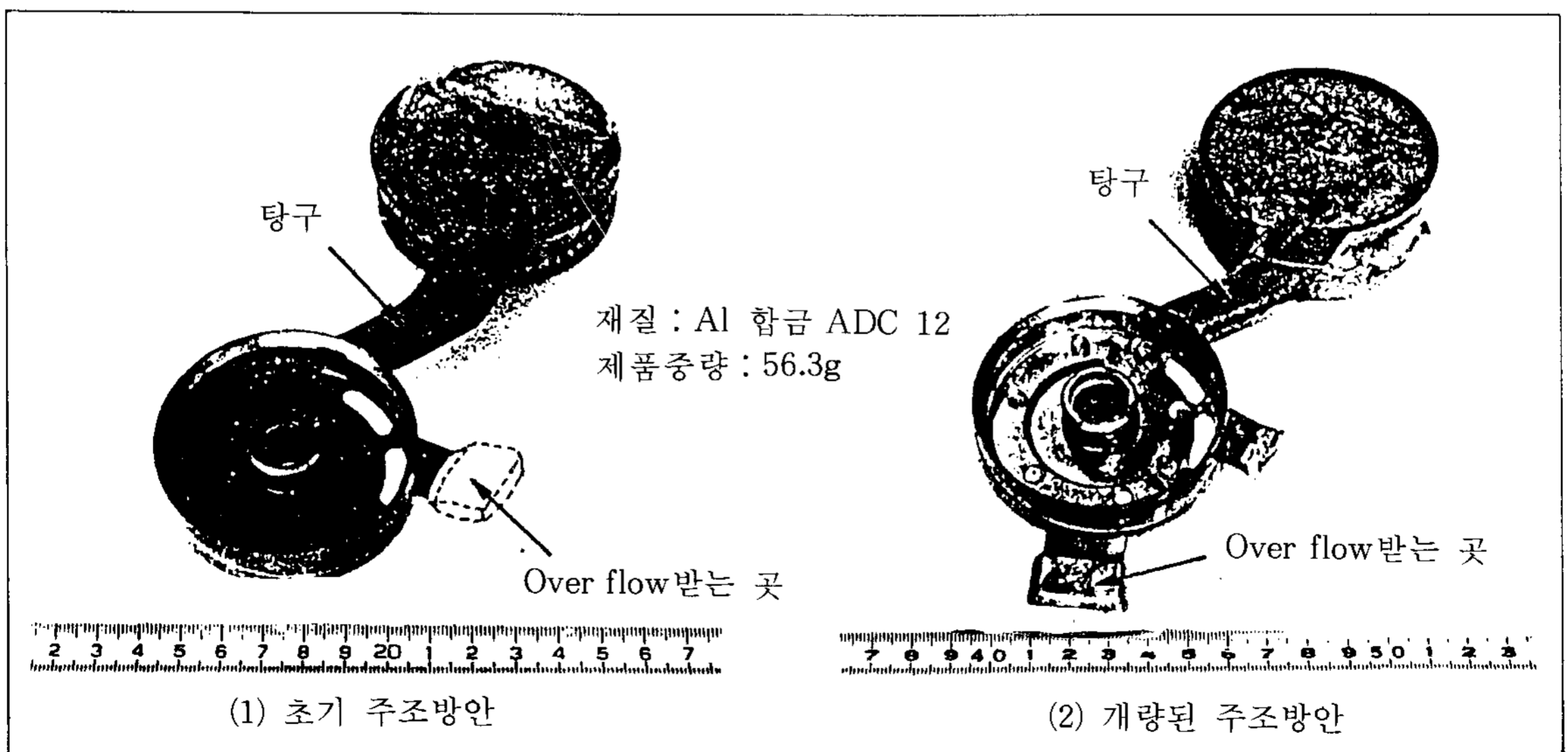


그림 5. 비디오헤드 드럼의 다이캐스팅 해석²²⁾

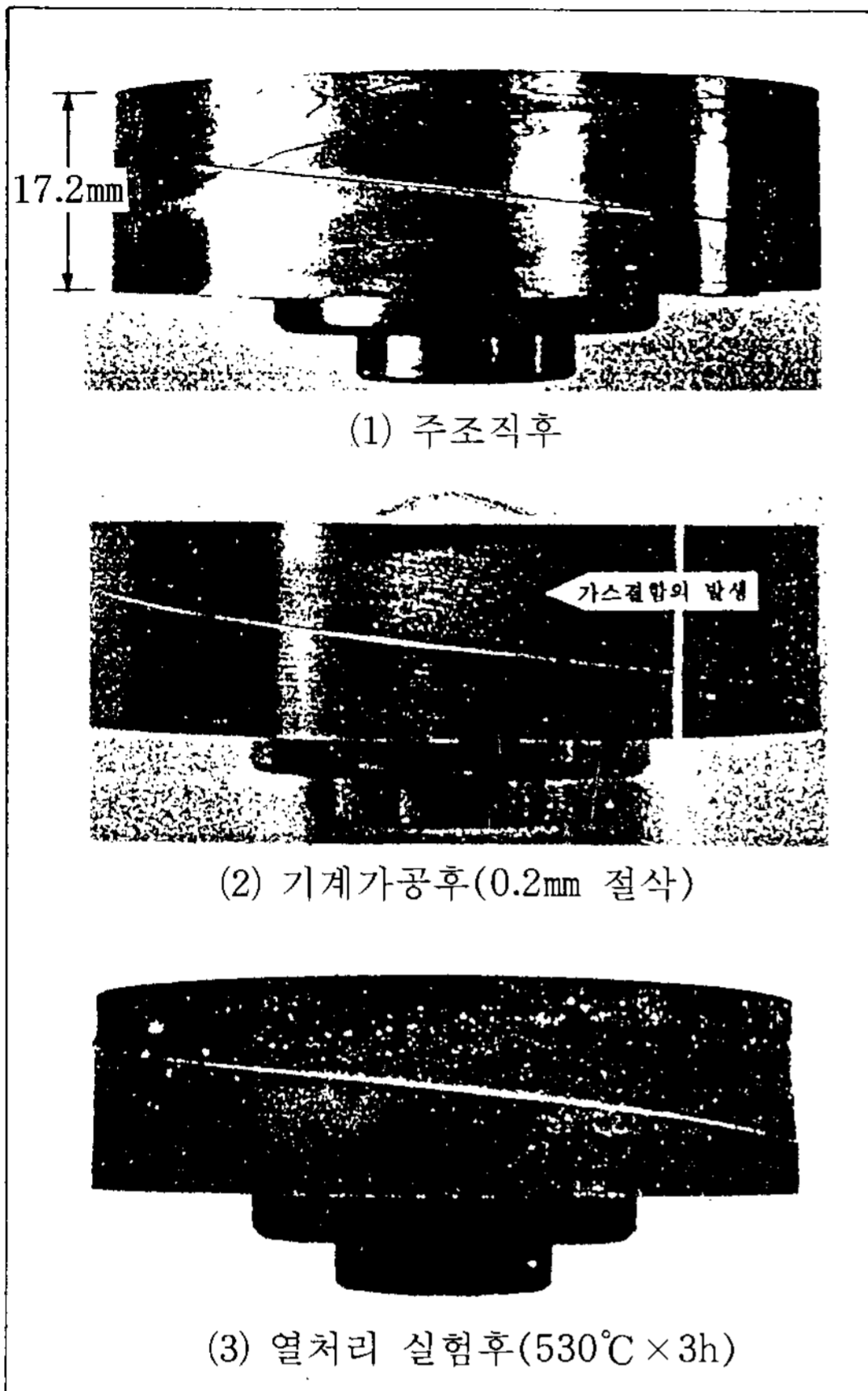
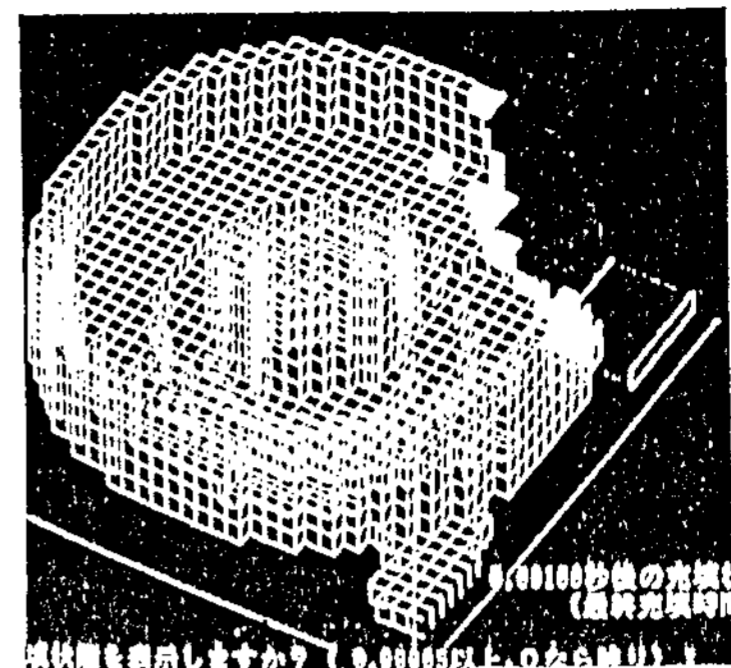


그림 6. 초기 구조방안에 의한 주조실험 결과²²⁾

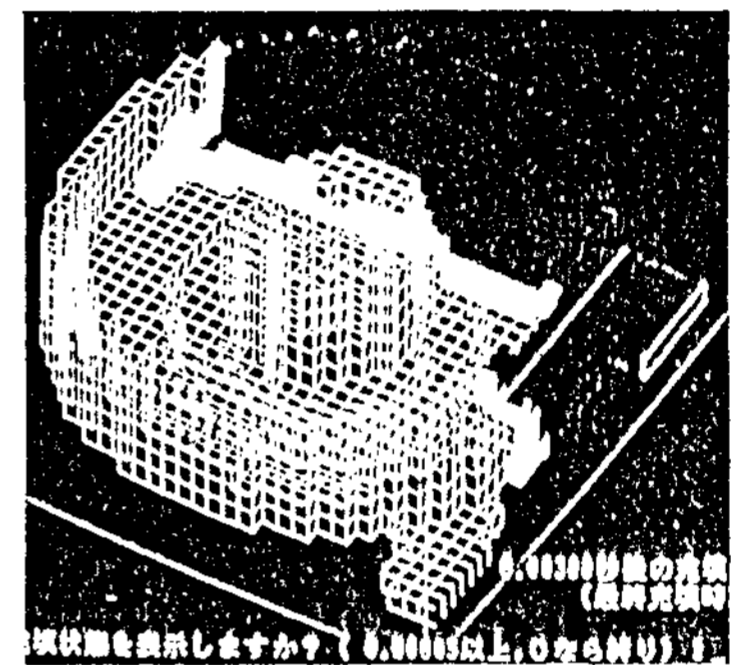
조직을 얻게 되었다. 이와같이 다이캐스팅 공정에 있어서 제품의 형상이 3차원적으로 복잡해질수록 주조결함의 정확한 예측을 위해서는 3차원 유동해석이 거의 필수적이라 할 수 있겠다.

(2) 콤팩트 디스크 플레이어의 레이저 반사기 시스템의 다이캐스팅 해석²²⁾

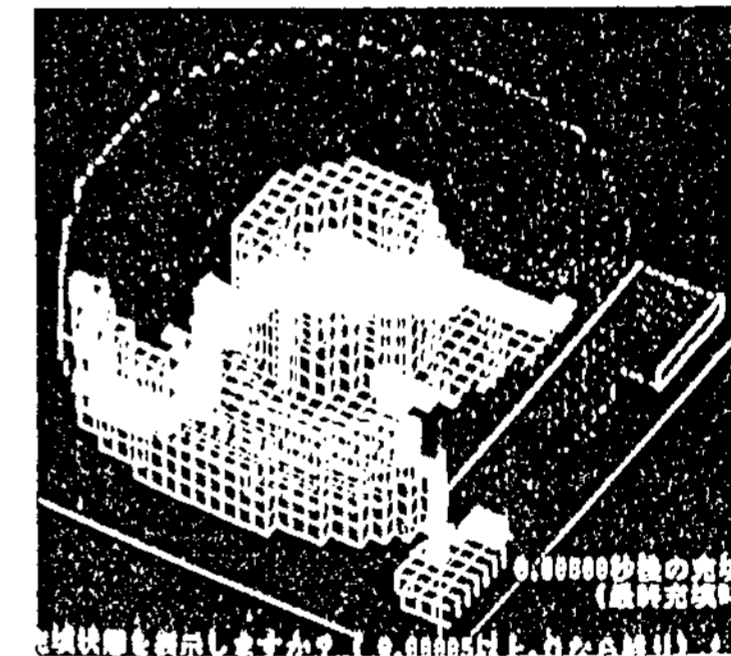
작고 매우 정밀한 부품인 콤팩트 디스크 플레이어의 레이저 반사기 시스템을 다이캐스팅으로 생산하기 위한 기본적인 탱구방안은 그림 9의 (b)와 같다. 그림 9의 (a)와 (b)에서 보듯이 크기는 약 2cm x 2cm x 1cm에 불과한 부품이지만 내부적으로는 굉장히 복잡한 현상을 지닌 주조품이다. (b)의 구조방안하에서 생산한 주조품을 조사해보니, 레이저반사경을 장치하는 중앙부에서 (c), (d)에서 나타난 바와 같이 B부위에서 치명적인 cold shut이 발생하였다. 이러한 결함의 원인을 찾기 위해서 3차원 유동해석에 의하여 부품의



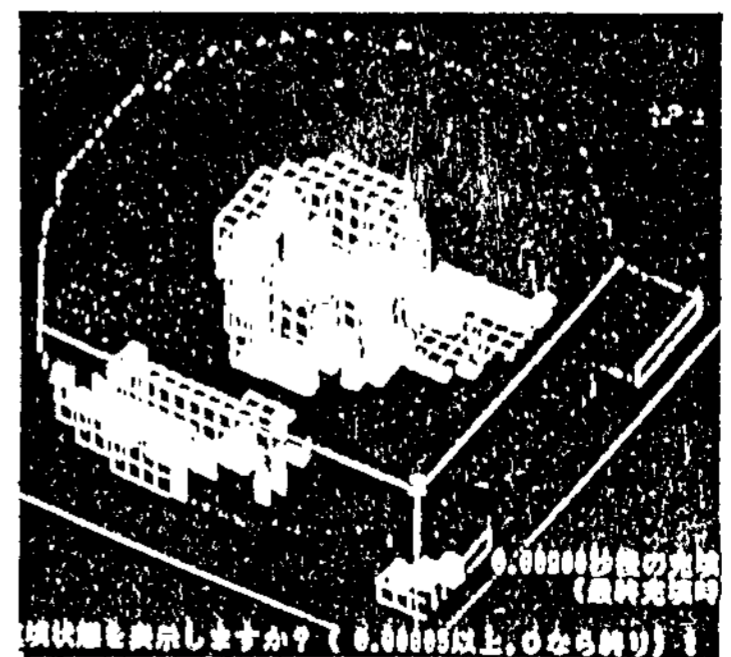
(1) Time = 0.001(s)



(2) Time = 0.003(s)



(3) Time = 0.006(s)



(4) Time = 0.009(s)

그림 7. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 3차원 유동해석 결과(비디오헤드 드럼의 다이캐스팅)²²⁾

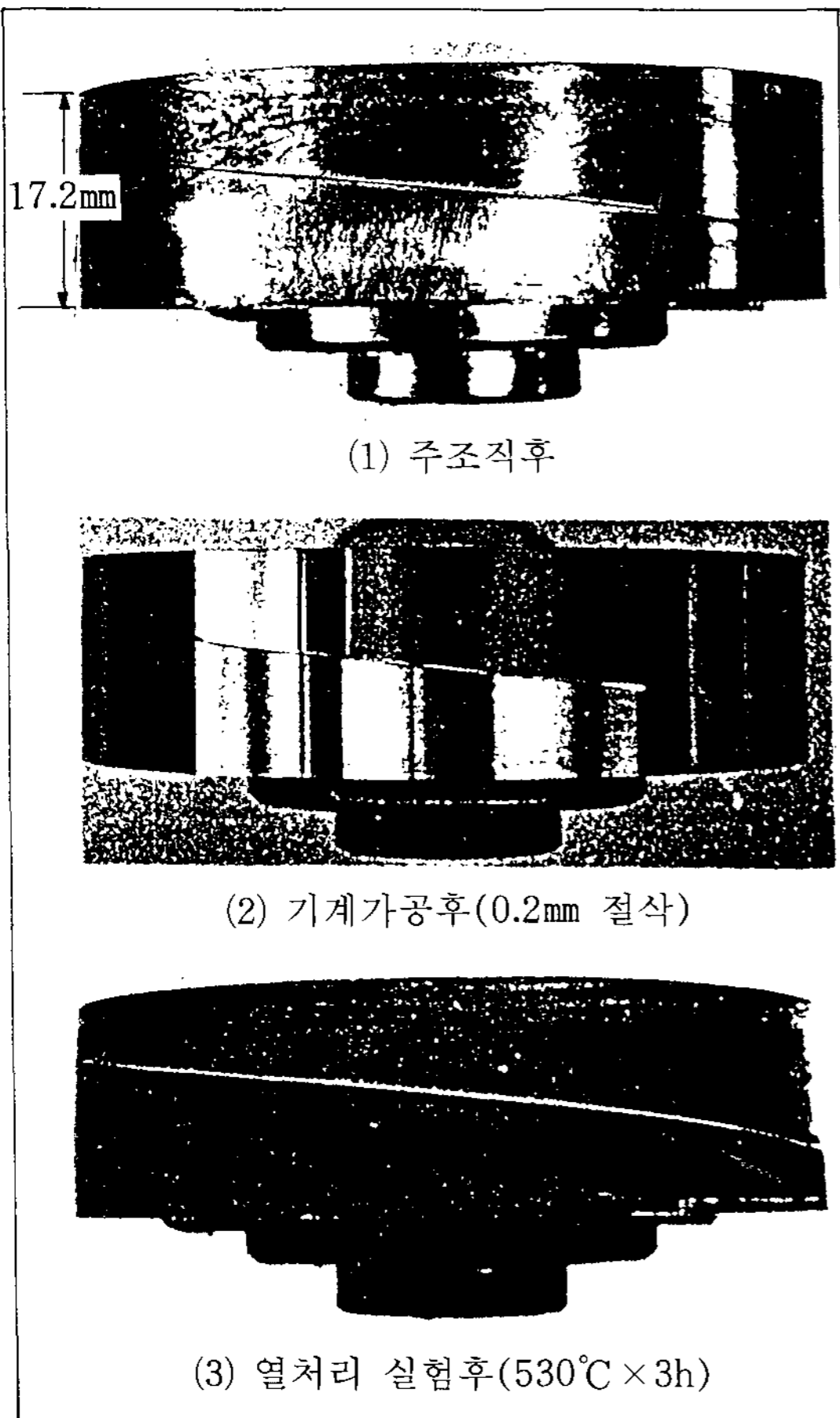


그림 8. 개량된 주조방안에 의한 주조실험 결과

주조시 빠른 속도로 주형을 충전해가는 용탕의 충전상황을 조사하였다. 그 결과는 그림 10에 나타낸 바와 같다. 그림 10에서 보듯이 용탕은 그림 9의 A부위를 순차적으로 충전하지만 B부위의 경우에는 용탕이 충전해 들어온 후 빠져나가지 못하고 응고완료시간까지 이곳에 계속 머무르게 되어, 결국 최종충진부위를 형성하게 된다. 이러한 해석결과를 기본 바탕으로 주조방안을 점차 개량하여 결국은 새로운 제품에 대한 주조방안을 확립하였다. 이와같이 3차원적으로 매우 복잡한 주형내를 충전하는 용탕의 흐름은 주조실무자의 직관이나 경험으로는 해석하기 어려울 때가 많으며 3차원 유동해석과 같은 정량적인 분석방법이 필요하다.

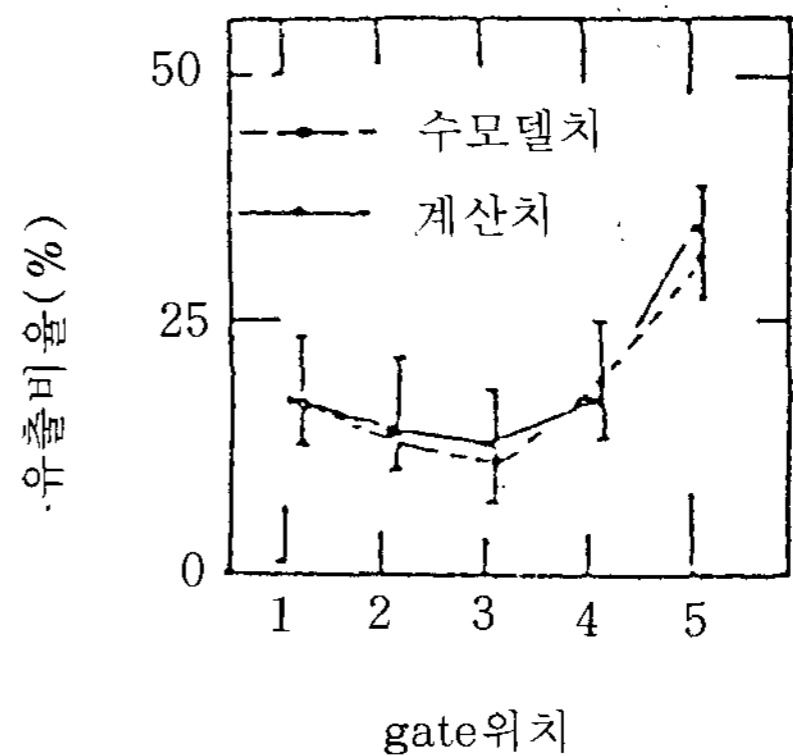


표 1. 5개의 gate로부터의 유출비율¹⁸⁾

(3) 자동차용 평판상 다이캐스팅 주물의 주조방안 해석¹⁸⁾

그림 11-13과 표 1은 5개의 주입구가 장치된 주조방안에 의해서 생산되는 판상 다이캐스팅 주물의 실험결과와 해석결과이다. 그림 11은 용탕흐름센서에 의하여 용탕 충전상태를 그린 것이다. 여기에서 보듯이 주입구에서 유입된 용탕은 흩어지지 않고 서로 평행으로 전진해서 반대편 주형벽에 최종충진부위를 남기게 된다. 이러한 주조현상을 해석하기 위하여 擬 3차원 연구보고에서는 그림 12와 같은 비교적 성긴 격자망을 이용하여 수치해석하였다. 그림 13은 충전과정중 용탕의 선단부 즉, 용탕과 공기가 접하는 부근을 선으로 나타낸 것이다. 여기에서 보듯이 용탕충진상태는 실험과 거의 일치하고 있고 최종충진부위를 정확하게 예측하고 있다. 표 1은 주조실험에 쓰인 주형과 같은 크기의 플라스틱 주형을 제작하여, 수모델로 실험한 결과와 계산결과를 비교한 것인데 전체적으로 전 주입구에 있어서의 유출비율이 거의 일치하고 있다. 이상의 결과에서 보듯이 3차원 탕류해석은 용탕의 충전경향과 각 주입구에 있어서의 유출비율등을 비교적 정확하게 예측할 수 있을 뿐만아니라, 이외에도 여러가지 유용한 정보를 손쉽게 제공하는 것이 가능하다.

그림 14-17과 표 2-3은 4개의 주입구가 장치된 경우에 있어서, 판상 자동차용 다이캐스팅 주물의 실험결과와 해석결과를 나타내고 있다. 그림 14에서 보듯이 용탕의 충전은 주형설계자의

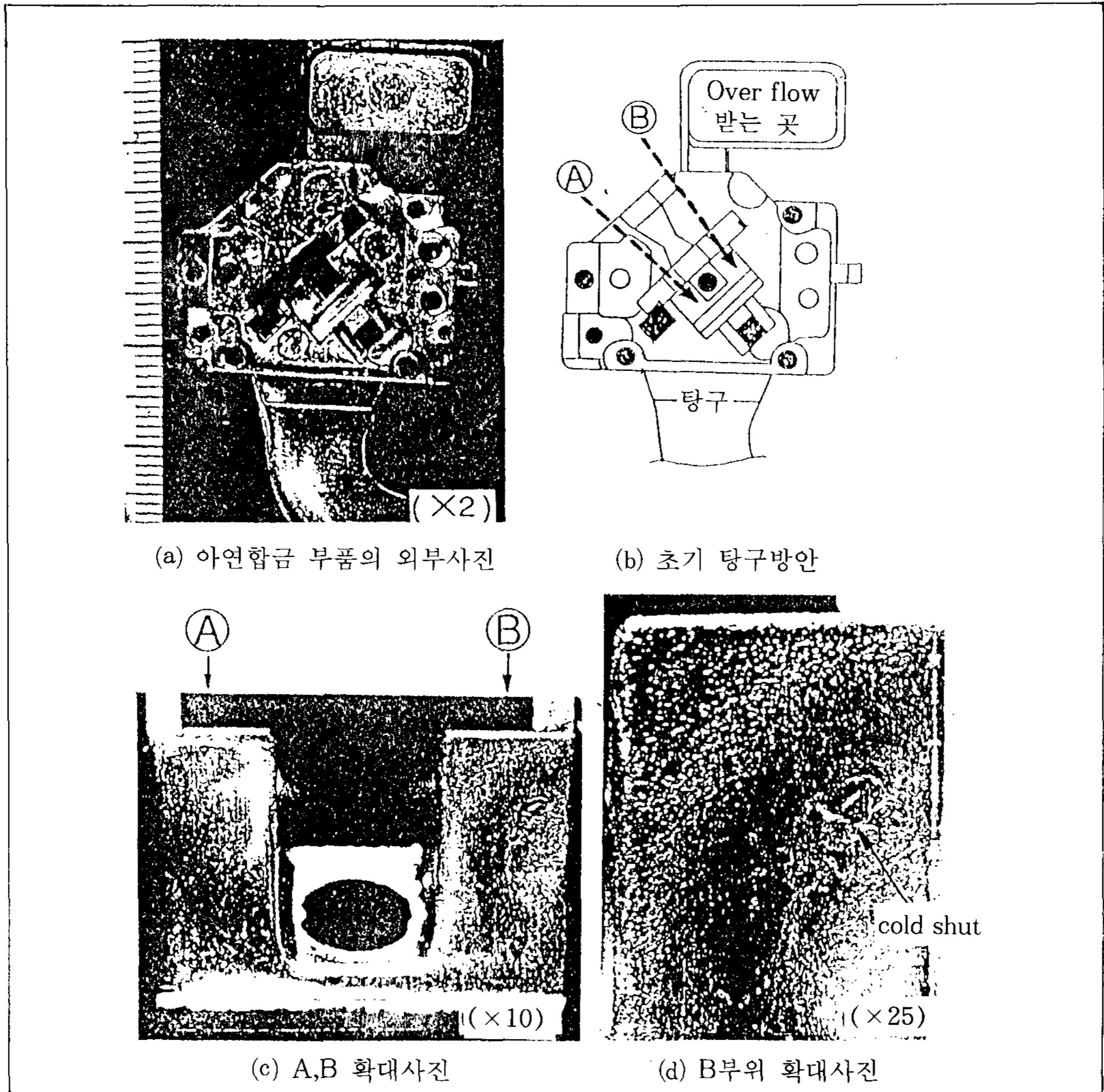


그림 9. 콤팩트 디스크 플레이어의 레이저 반사기 스템의 다이캐스팅 해석²²⁾

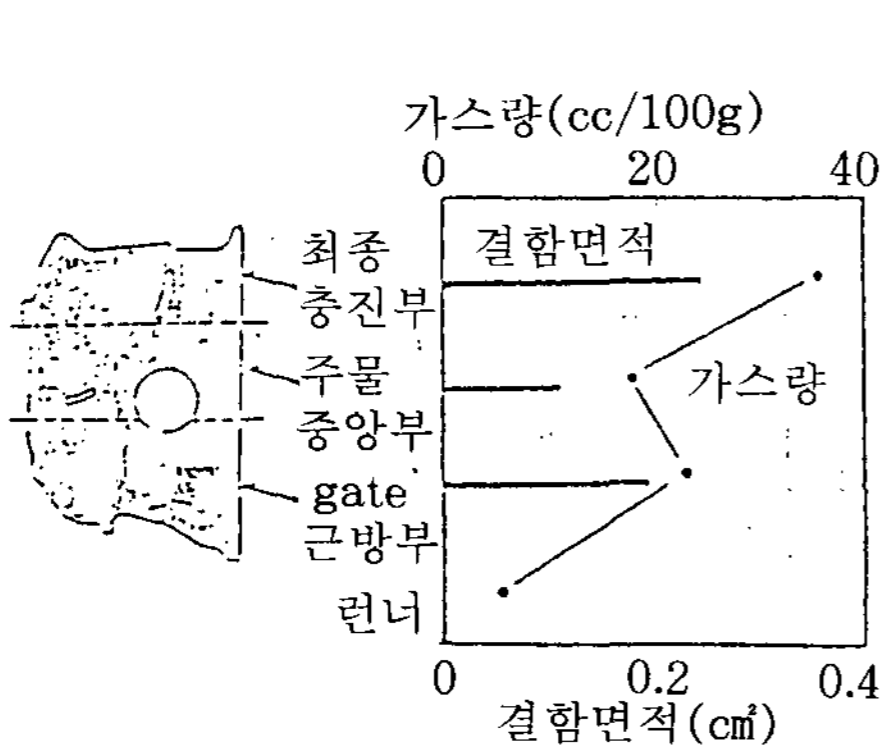


표 2. 측면과 하부의 gate를 가진 판상 다이캐스팅 주물의 결함분포(가스량 및 결함면적)¹⁸⁾

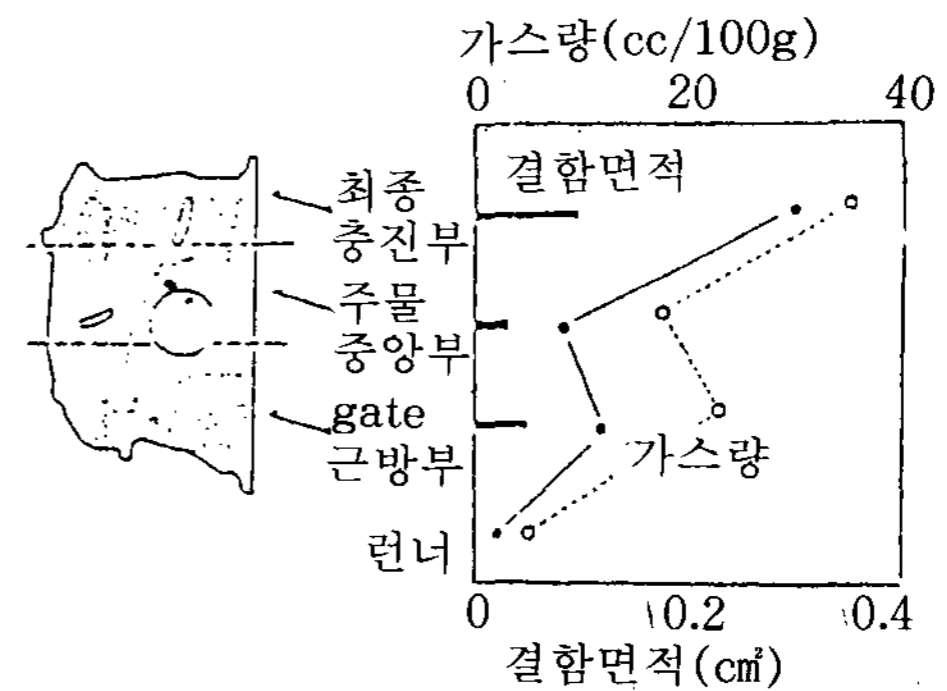
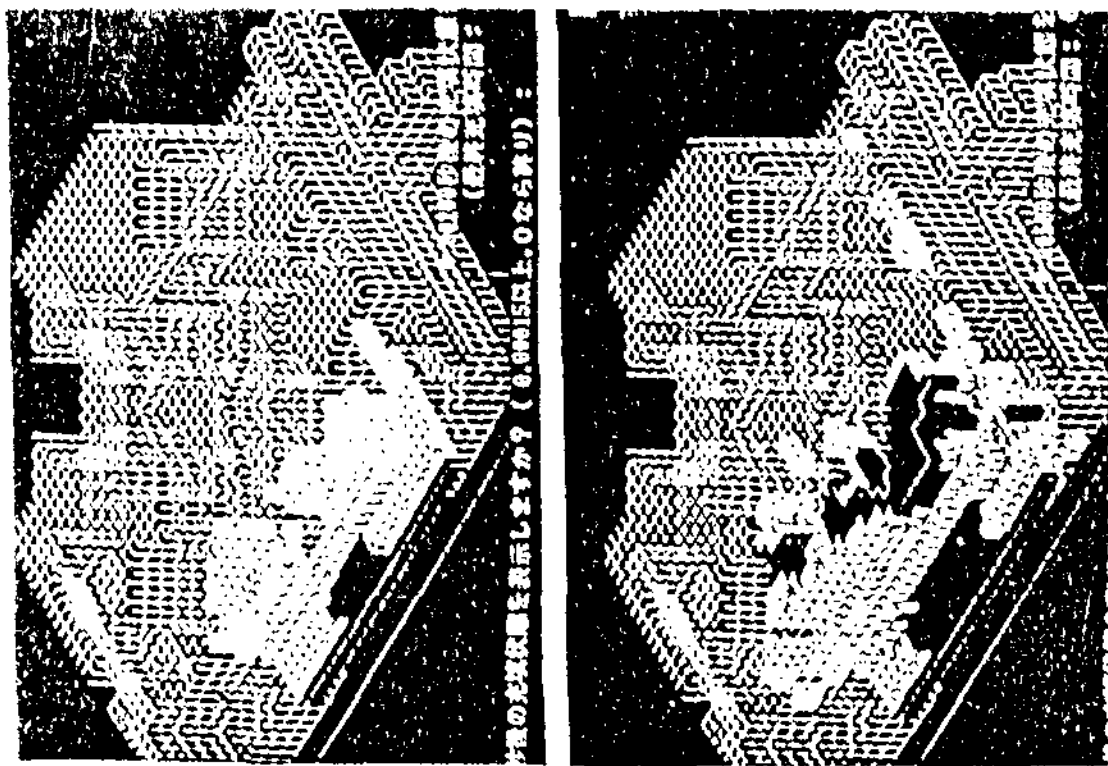
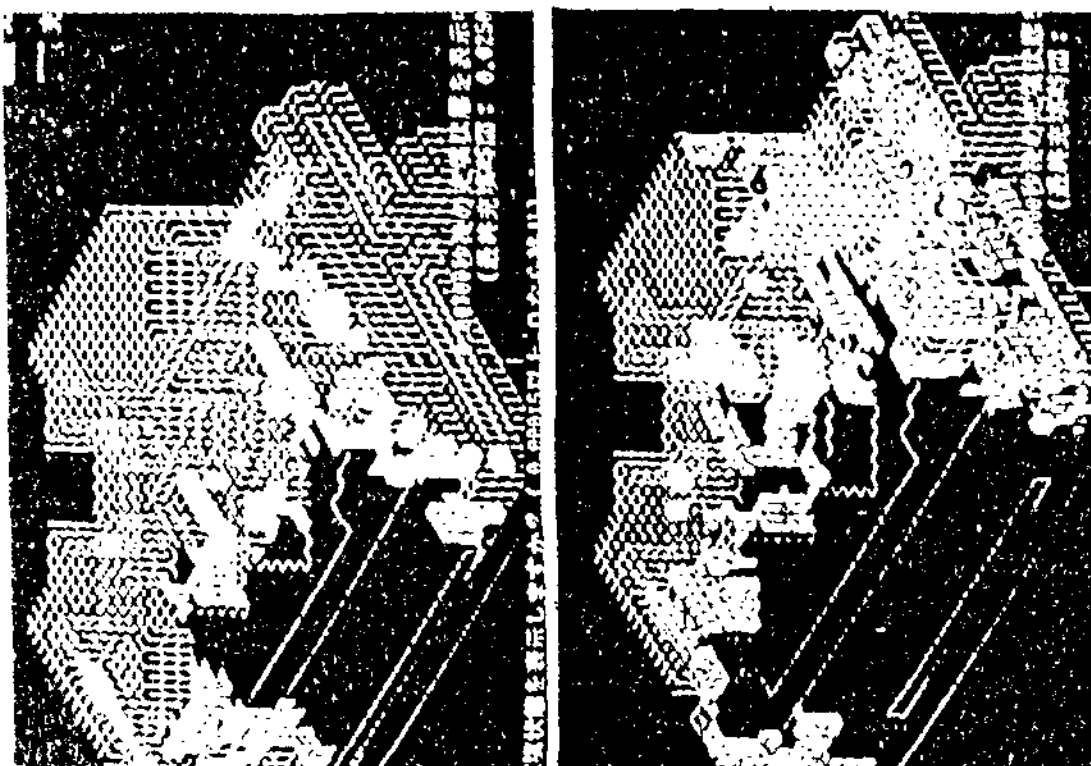


표 3. 측면과 하부의 gate를 가진 판상 다이캐스팅 주물의 결함분포(가스량 및 결함면적 개량된 gating system)¹⁸⁾



(1) Time=0.002(s) (2) Time=0.005(s)



(3) Time=0.007(s) (4) Time=0.015(s)

그림 10. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 3차원 유동해석 결과(컴팩트 디스크 플레이어의 레이저 반사기 스템)²²⁾

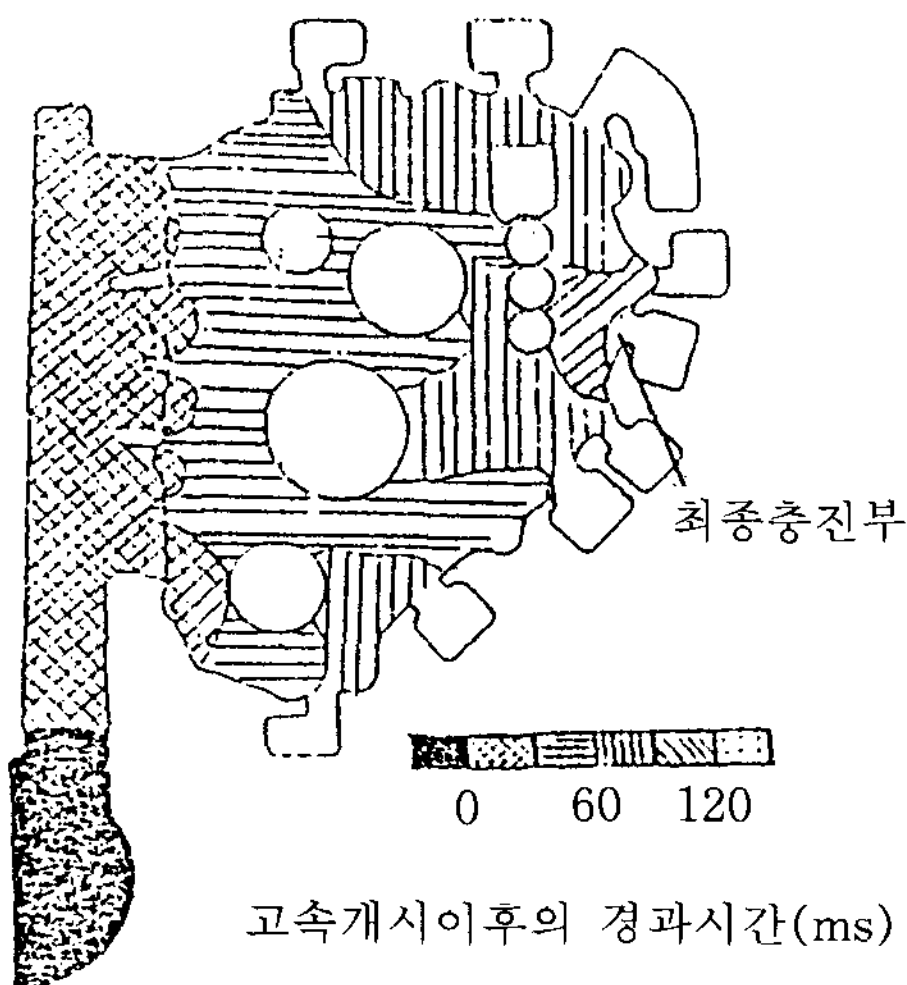


그림 11. 5개의 gate를 가진 판상 다이캐스팅 주물의 용탕충진상태도¹⁸⁾

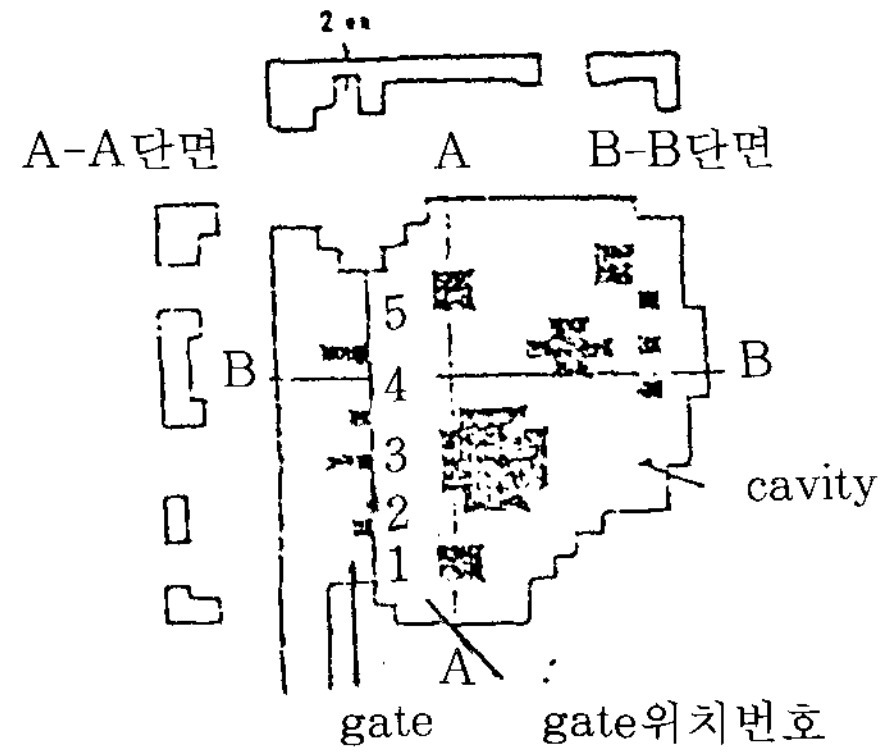
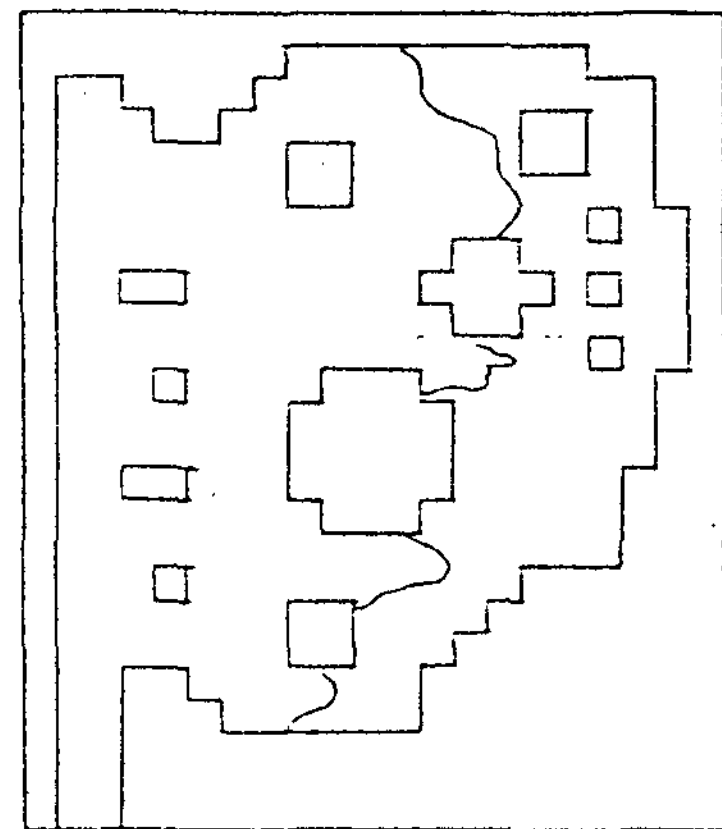
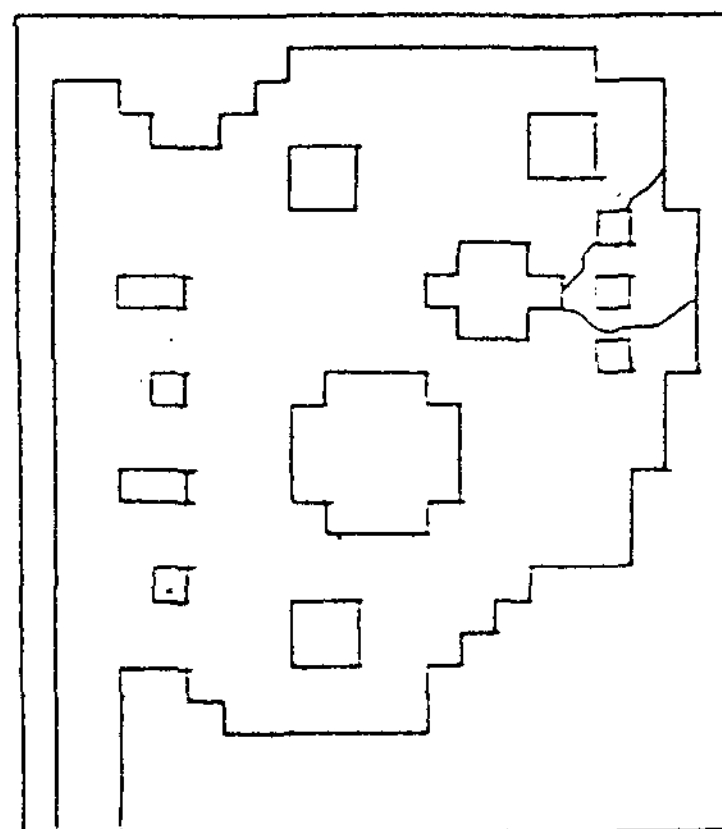


그림 12. 5개의 gate를 가진 판상 다이캐스팅 주물의 시뮬레이션을 위한 mesh분할¹⁸⁾



T=0.10sec



T=0.13sec

Fig. 13 5개의 gate를 가진 판상 다이캐스팅 주물의 유동해석결과¹⁸⁾

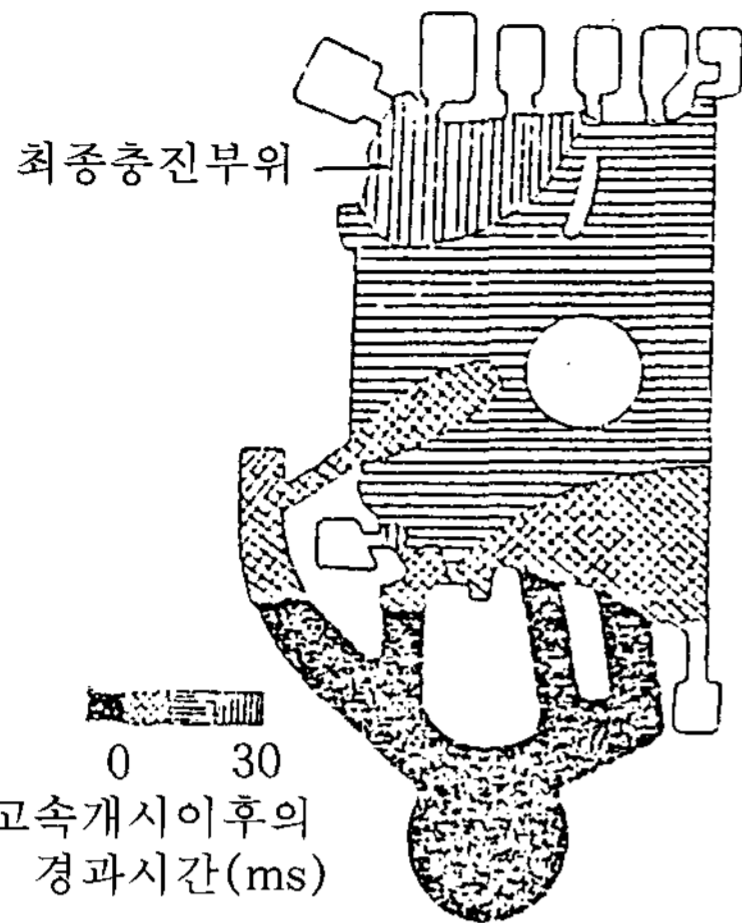


그림 14. 측면과 하부의 gate를 가진 판상 다이캐스팅 주물의 용탕충진상태도¹⁸⁾

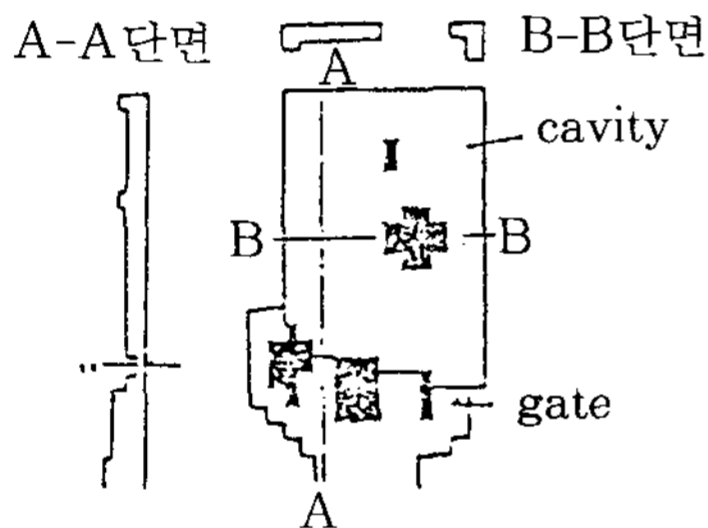


그림 15. 측면과 하부의 gate를 가진 판상 다이캐스팅 주물의 mesh분할¹⁸⁾

의도와는 달리 최종충진부위를 평행하게 채우지 않고 왼쪽으로 치우쳐서 채우고 있다. 표 2는 이러한 주물의 결함을 여러가지 방법으로 분석한 결과로서 최종 충진부위 및 주입구 근방에서 결함면적과 가스량이 큰 것을 알 수 있다. 그림 16은 이러한 경우를 계산한 결과로서 실험과 잘 일치하는 양상을 보이고 있다. 이와같은 결함을 줄이기 위해 여러가지로 반복적인 시뮬레이션을 실시한 결과 그림 17과 같이 가장 왼쪽에 위치한 주입구를 제거한 3개의 주입구만으로 구조하였을 경우 용탕이 주형을 순탄하게 충전하면서 최종충진부위도 평행하게 형성하는 것을 예측할 수 있었다. 이러한 계산결과를 바탕으로 실험을 실시하여 결함분석을 해본 결과, 표 3에 나타난 바와 같이 결함면적 및 가스량이 현저하게 줄어든

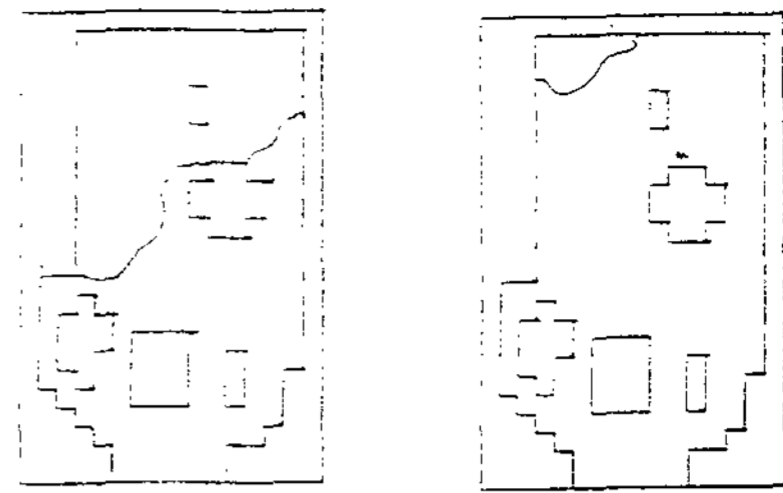


그림 16. 측면과 하부의 gate를 가진 판상 다이캐스팅 주물의 유동해석결과¹⁸⁾

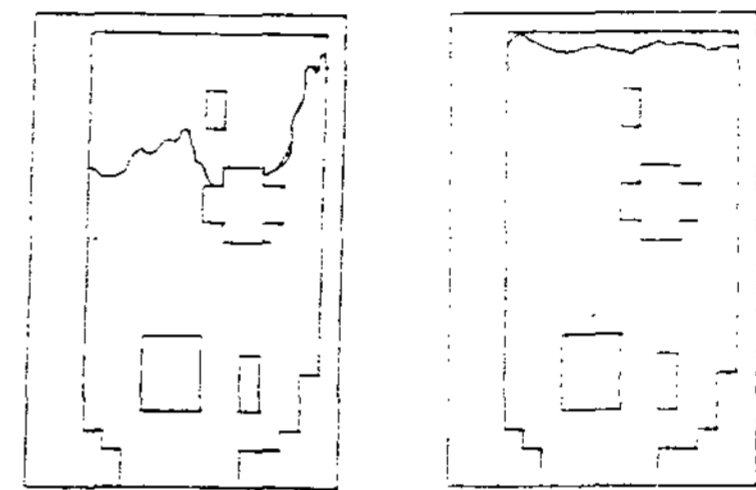


그림 17. 측면과 하부의 gate를 가진 판상 다이캐스팅 주물의 유동해석결과 (개량된 gating system)¹⁸⁾

것을 볼 수 있다. 이상의 결과에서 알수 있듯이 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 탕류해석은 비용과 시간이 많이 드는 실제실험에 비해 빠른시간내에 비용을 거의 들이지 않고 원하는 결과를 예측하는 것이 가능하며, 이러한 예측결과는 구조결함의 제어나 주형 및 탕구방안의 설계에 많은 정보를 제공하는 잇점을 가져 옴으로써 결과적으로는 생산성 향상에 높은 기여를 할 것이다.

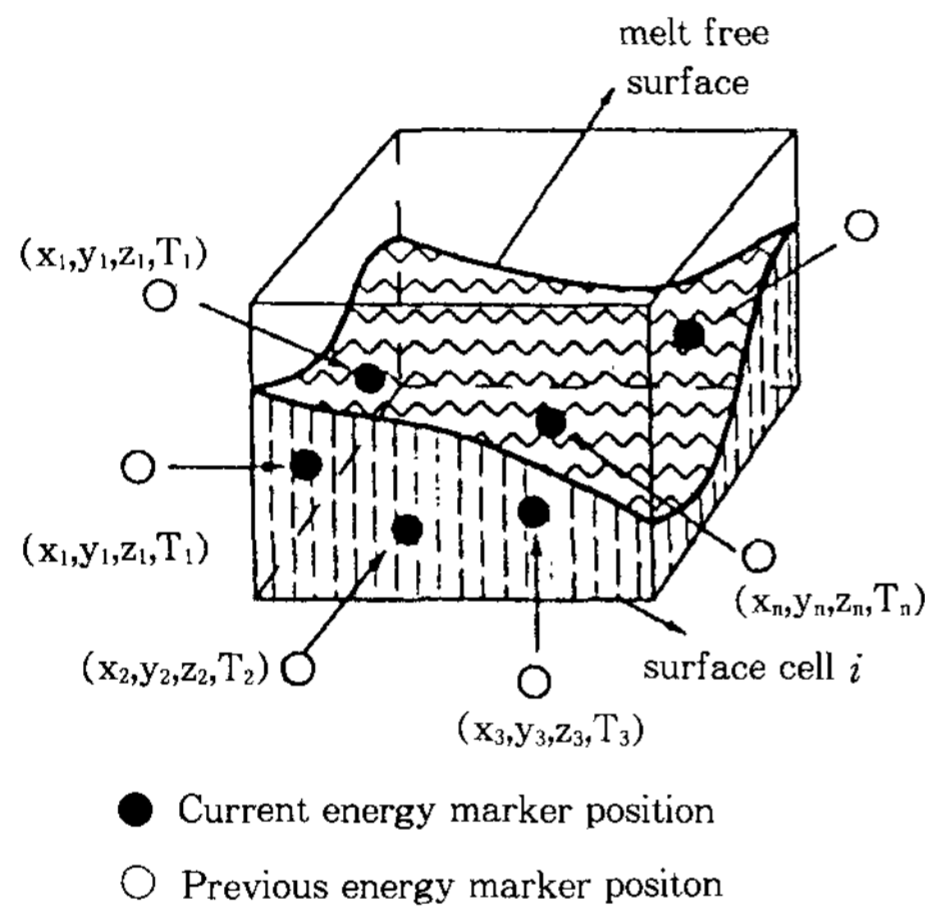
이밖에 R. A. Stoehr, C. Wang의 자동차용 휠의 저압주조해석 결과²⁰⁾, M. Lipinski, W. Schaefer, S. Anderson등의 주철주조해석 결과²¹⁾가 보고되어 있고 유럽지역에서는 J. T. Cross, A. S. Usmani, V. Tran, R. W. Lewis등의 휠형상의 Al금형주조결과²³⁾, I. Idasiak, P. Meyer의 구상흑연주철 주조해석결과²⁴⁾, Houdry J. P., Vanpeene P., Webrouck G.등의 중력 다이캐스팅해석 결과²⁵⁾ 등등이 보고되고 있다.

3.2 주조방안에 적용된 열 및 유동해석의 국내 현황

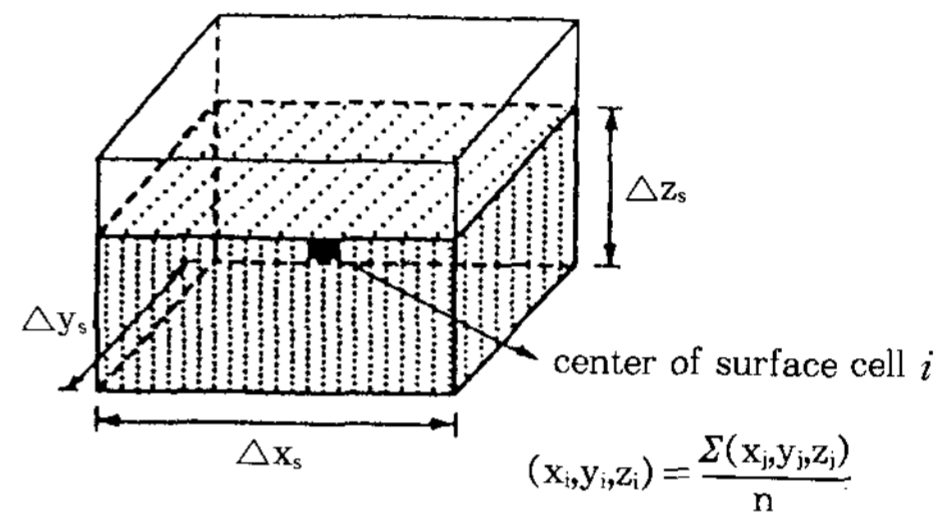
국내에서는 1991년이후 주형충진시 용탕의 유동해석에 관한 연구가 진행되고 있으며, SMAC 및 SOLA-VOF법에 의한 탕류해석결과가 차례 차례 보고되고 있다^{26,27}. 최근에는 용탕의 유동과 함께 주형충진시의 열전달 현상을 해석하기 위하여 에너지 Marker법이 개발되어 2차원 및 3차원 탕류해석에 적용할 수 있게 되었다. 이러한 에너지 Marker법의 기본원리는 그림 18과

같다. 이러한 방법에 의한 열 및 유동해석결과는 주조품의 응고해석시에 적절한 초기조건을 제시할 수 있다는 점에서 기존의 응고해석보다 유리하다고 할 수 있으며, 결과적으로 열 및 유동해석과 그것에 바로 연결된 응고해석이 종합적으로 결합된 해석시스템이 필요하다고 할 수 있겠다. 이와같은 기본개념을 구현하기 위하여 최근에 연구된 해석모델은 그림 19와 같다.

그림 20에서 21은 이러한 해석모델을 이용하여 두가지 형태의 스텝형상의 사형주조를 해석한



(a) Step I -Energy markers flowing into a surface cell *i*

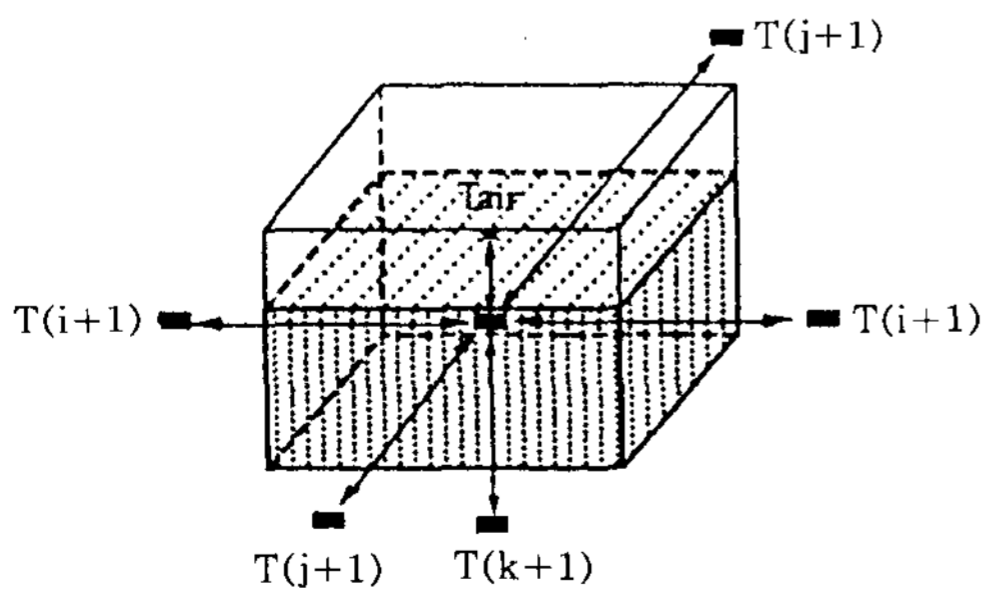


volume of fluid of surface cell *i* = $\frac{(\Delta x_s, \Delta y_s, \Delta z_s)}{(\Delta x_F, \Delta y_F, \Delta z_F)}$

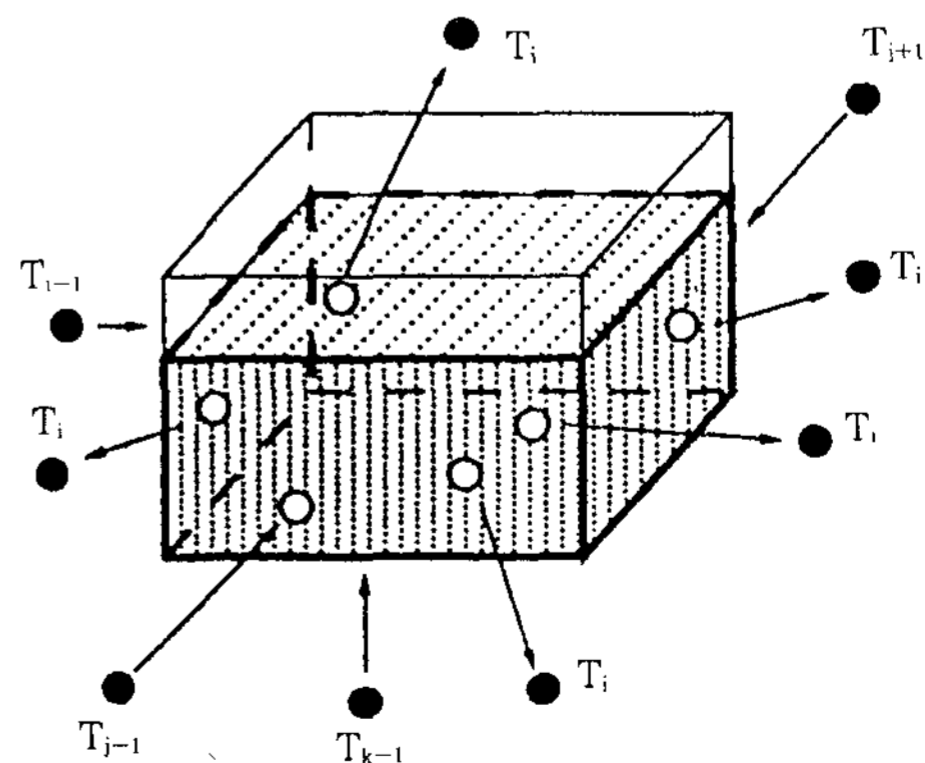
temperature of surface cell *i* (= T_i) = $\frac{\sum_{j=1}^n T_j}{n}$

Here the subscripts s and F indicate surface cell and full cell, and n the total number of energy markers in a surface cell *i*.

(b) Step II -Convective heat transfer calculation



(c) Step III -Convective heat transfer calculation by the control volume FDM.



(d) Step IV -Energy markers flowing out of a surface cell *i*, with a new temperature T_i .

그림 18. Energy marker concept²⁸⁾.

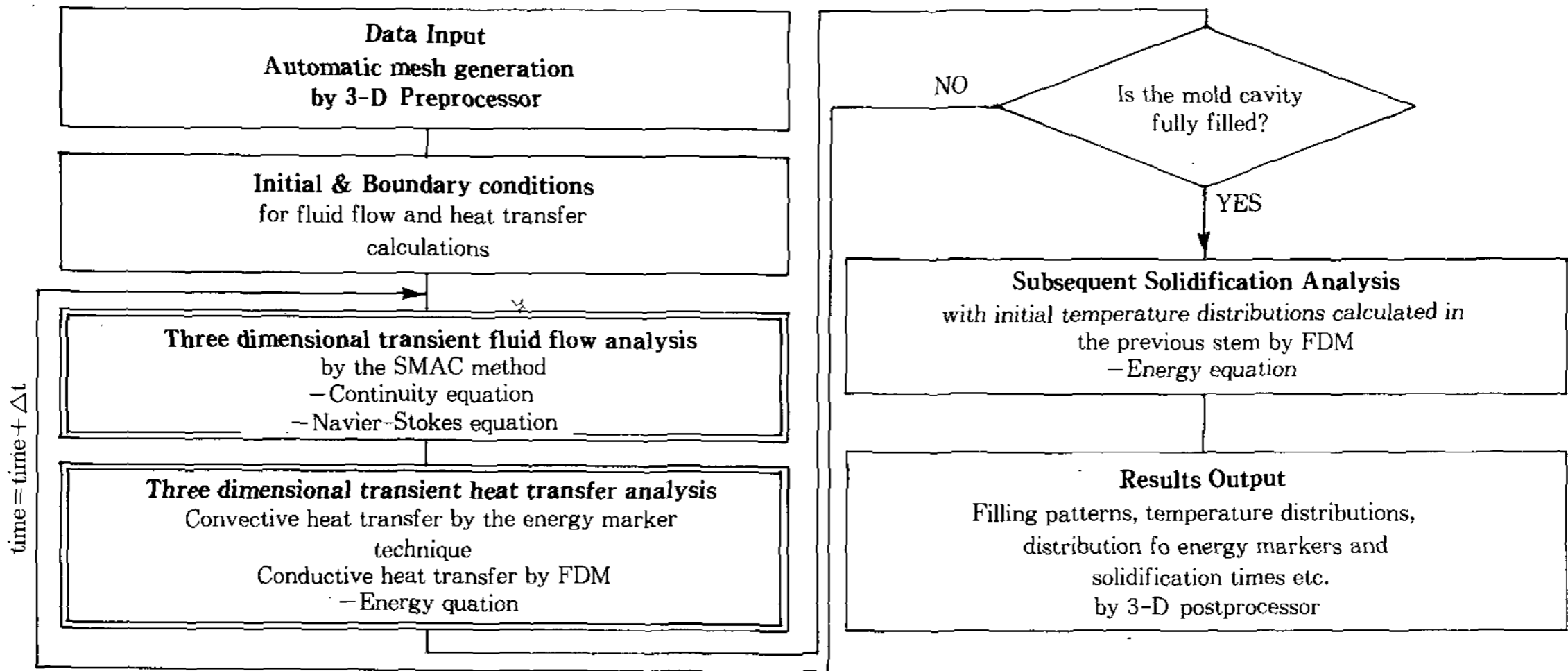
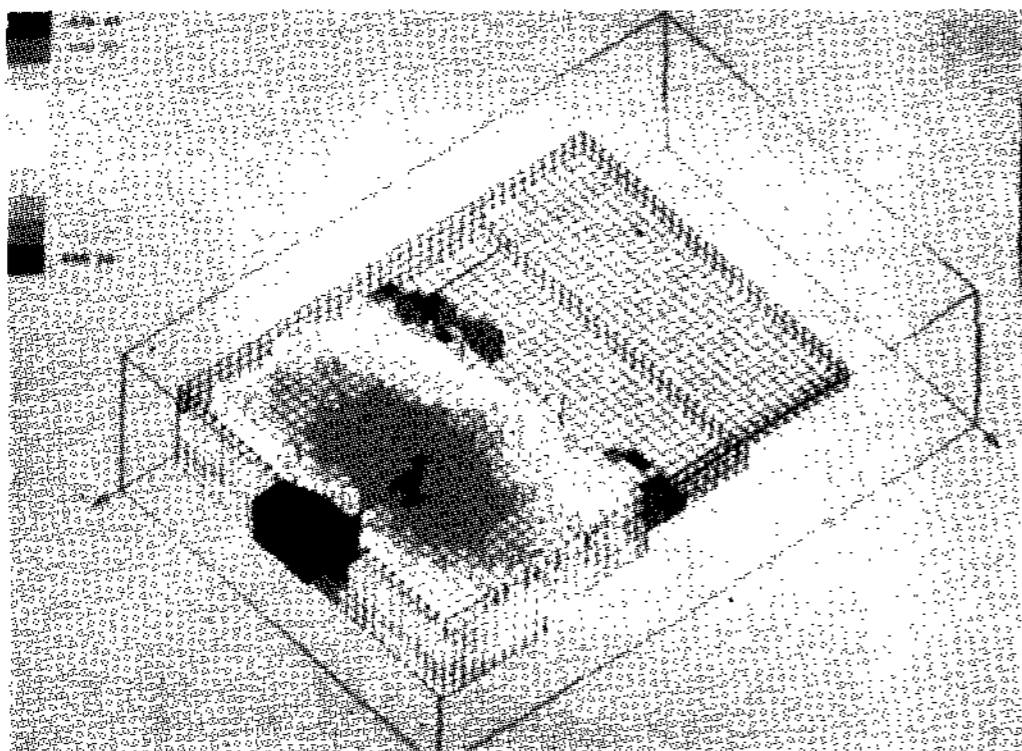
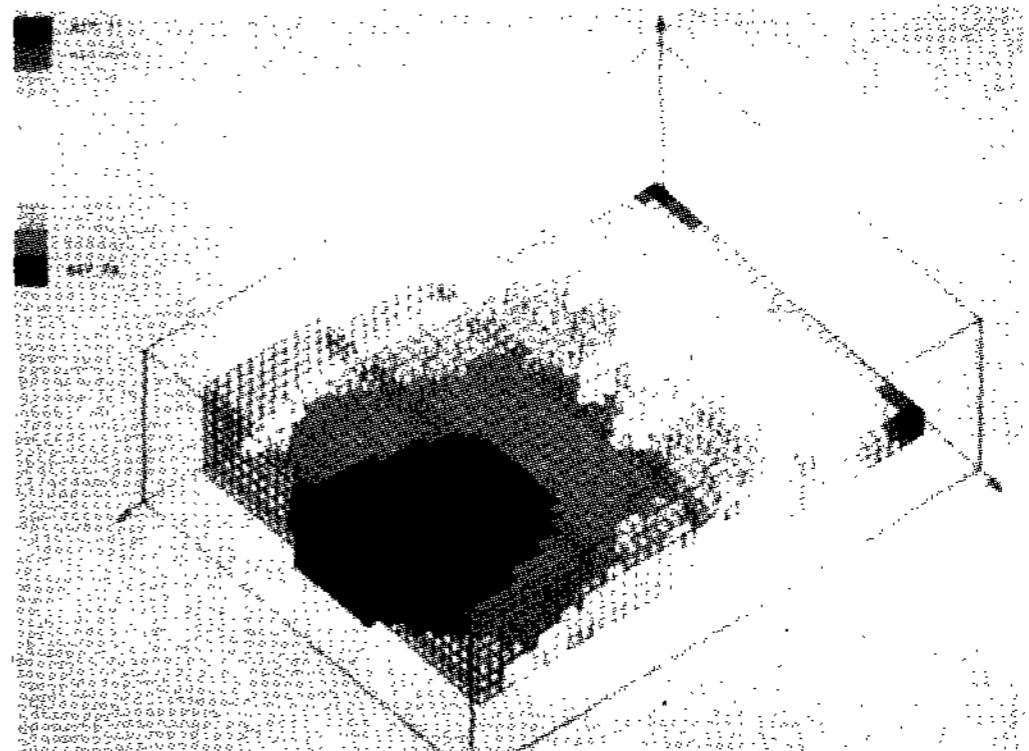


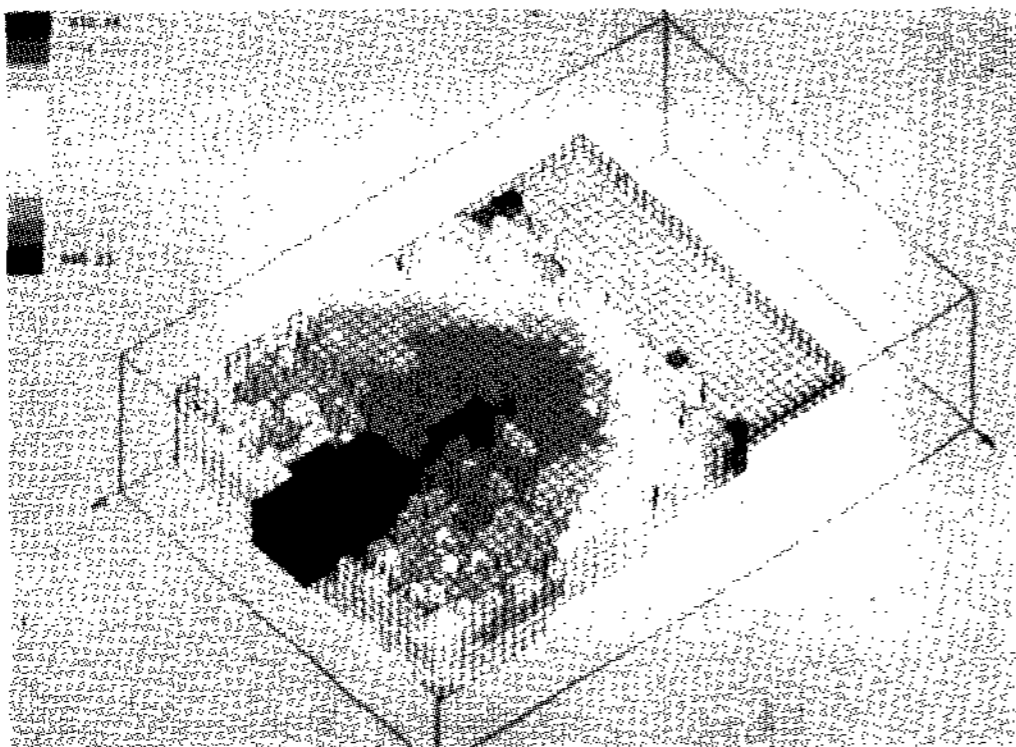
그림 19. Main flow diagram for computer model²⁸⁾.



30% filling

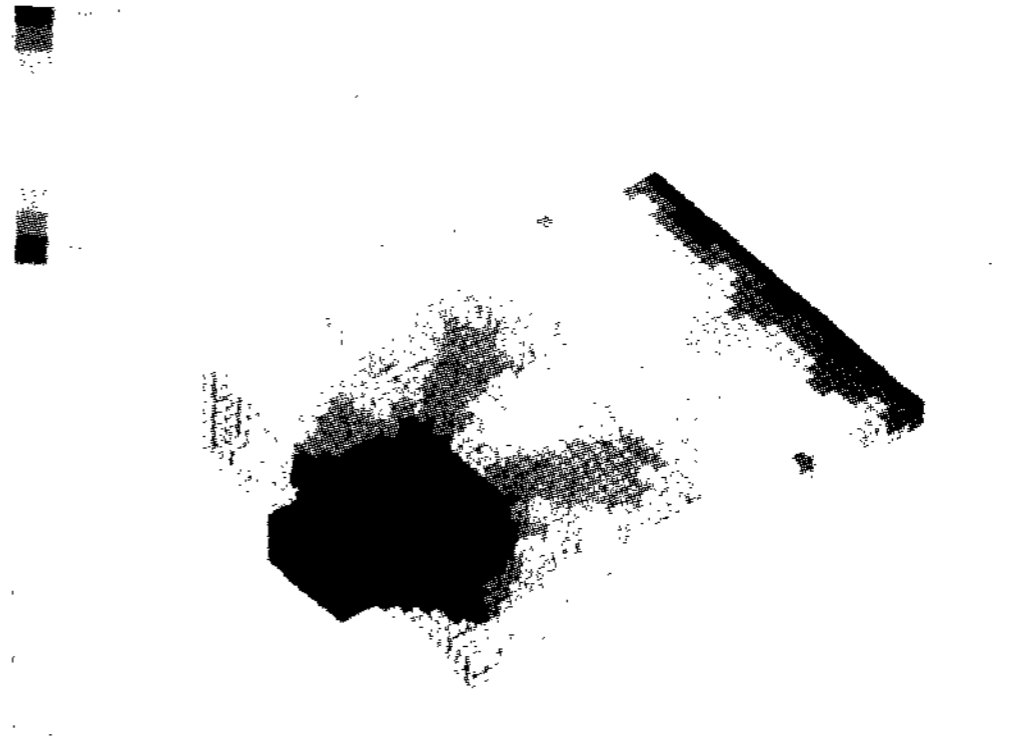


30% filling



55% filling

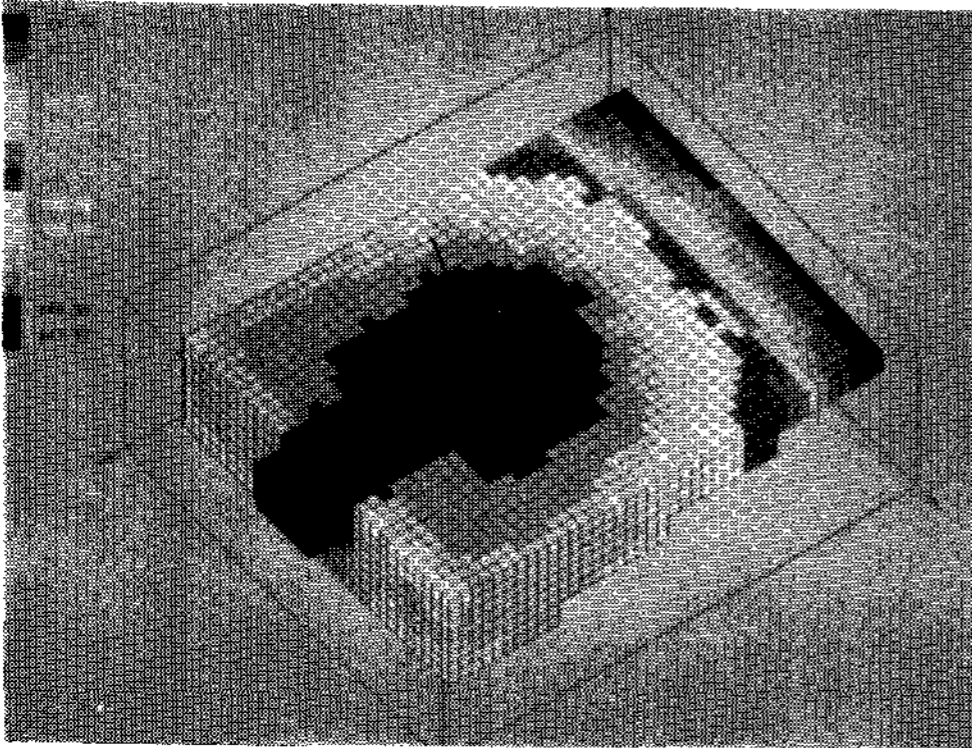
Case(a)



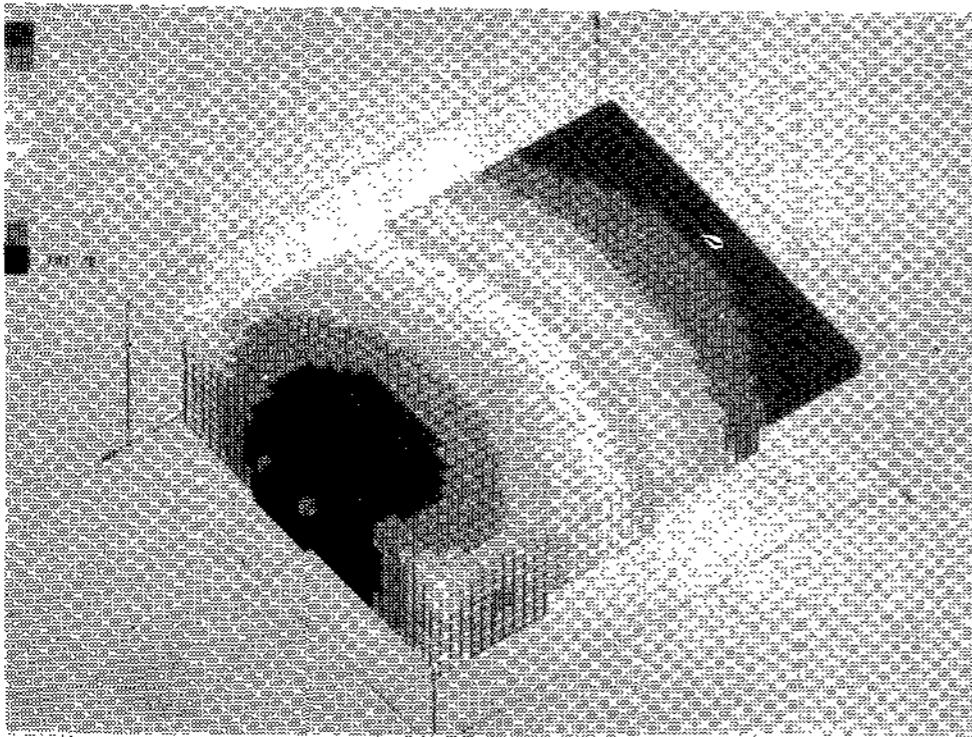
55% filling

Case(b)

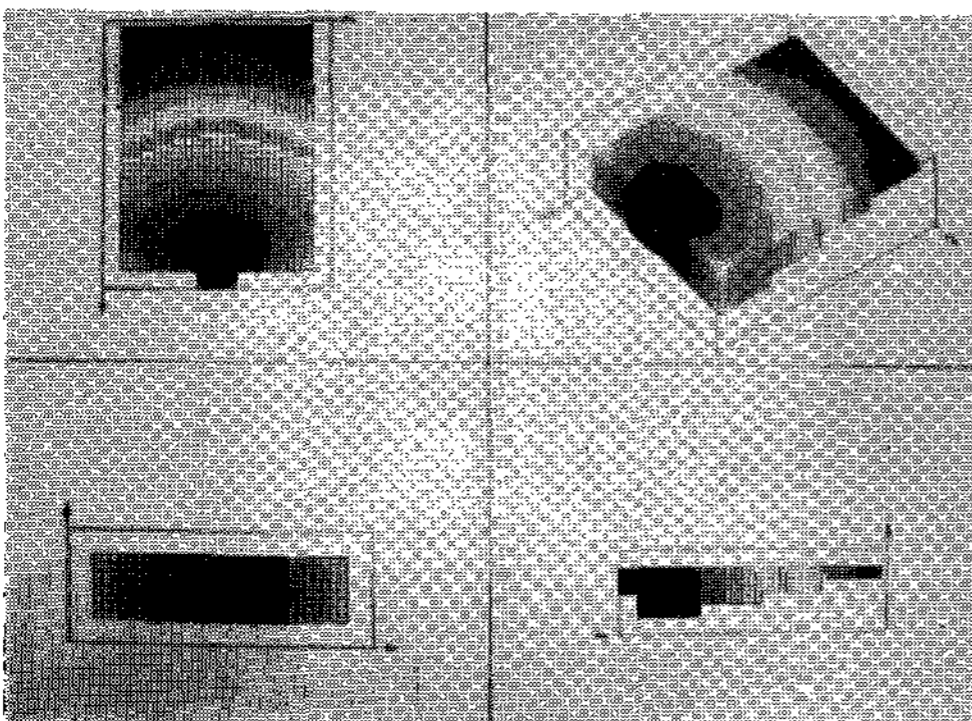
그림 20. Calculated filling sequence and temperature profiles in the step-plate castings for two types of gating system²⁸⁾.



(a) Calculated temperature distributions at 100% filling



(b) Calculated solidification time



(c) Calculated solidification time visualized by three 2D sections on x-y, y-z and z-x planes

그림 21. Calculated temperature distributions at 100% filling and solidification time for a step-plate casting²⁸⁾.

결과이다. 열전대를 이용하여 용탕의 흐름과 온도를 측정하고, 이러한 실험결과를 3차원 탕류해석결과와 비교하였으며, 각각의 경우 주형을 30%, 55% 채웠을 때의 용탕흐름과 온도분포를 도시하였다. (a)의 경우는 용탕이 주입된 후 가장 아래에 위치한 부분, 즉 주입구에서 가까운 쪽부터 채워나가면서 점차로 얇은 부위를 충전시키는 양상을 보이고 있고, (b)의 경우는 용탕이 우선 얇은 부위까지 전진한 다음 차례로 위쪽 면을 채우면서 마지막으로 주입구쪽을 채워 나오는 (a)의 경우와는 정반대의 흐름형태를 보이고 있다. 이와같이 같은 형상의 주조품이라도 주입구의 설치방향에 따라 충전양상이 현격히 달라지고, 또한 충전완료시 초기 온도분포도 서로 많이 다른 경향을 보이게 된다. 실제 실험에 있어서 28개의 열전대를 설치하여 용탕이 열전대에 닿는 순간을 충전시간으로 하고, 그 때의 온도를 충전시의 온도로 측정하고, A/D converter를 사용해서 데이터를 컴퓨터에 저장하고 이를 각 측정위치에서 해석결과와 비교하였다. 그 결과 측정데이터는 컴퓨터에 의해 시뮬레이션한 결과와 비교적 잘 일치하였다. 그림 21에서 (a)는 100% 충전이 완료되었을 때의 초기 온도분포인데 그림에서 보듯이 충전완료시 부위별로 상당한 온도차가 존재한다. 따라서 이러한 현상을 고려하지 않고 초기 온도를 바로 주입온도로 가정하여 응고해석을 하는 일반적인 응고해석은 보다 복잡하고 유로가 얇아서 misrun이 생길 가능성이 있는 주조방안에 있어서는 해석에 무리가 따르게 된다. 그러므로 완벽한 응고해석을 하기 위해서는 주형을 충전해 들어가는 용탕의 유동현상을 해석해야 하며, 이를 바탕으로 그때의 온도분포로 계산할 수 있어야 한다. 특히, 앞으로의 주조방안의 컴퓨터 적용은 이러한 열과 유동이 동시에 계산되는 방법이 주로 요구될 전망이다. (b)는 이러한 초기 온도 분포를 기초로 해서 응고해석을 하여 전체 주물의 응고완료되었을 때의 응고시간 분포이다. 여기서 실험과 해석에 사용된 스텝형상의 3차원 주물은 비교적 그 형상이 간단하여 열흐름이 일정하기 때문에 초기 온도분포를 고려한 응고해석이나 주입온도를 일률적으로 가정하고 응고현상을 계산한 결과나 거의 비슷하다. 그러나 자동차 부품들과 같이 복잡한 형상의 3차원 주물들은 어떤

특정부위가 먼저 응고하여 순탄한 충진을 방해하는지를 알아내기 위해서나 구조결함을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 이러한 열 및 유동해석이 필요하리라 예상된다. (c)는 (b)에서 나타낸 응고완료시간을 x,y,z면으로 자른 단면을 나타낸 것으로서 복잡한 형상의 경우 내부의 결함을 관찰하기 위해서는 이러한 해석이 필요하리라고 생각된다. 이러한 경우 3가지 단면해석에 볼 수 있듯이 최종응고부위는 주입구 쪽에서 관찰되고 있고, 이것은 실험에서 사용한 주물을 절단하여 그 단면을 관찰함으로써 해석과 같은 부위에 수축결함이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다.

4. 결 론

지금까지 주조분야에 적용된 컴퓨터에 의한 열 및 유동해석 기술들을 소개하였고, 이러한 기술들의 현장적용 상황을 국내와 국외로 나누어 조사하였다. 컴퓨터에 의한 열 및 유동해석은 3차원의 주조품에 적용되어 구조결함의 예측에 응용되어 왔고 주조생산성의 향성에 점차 중요한 역할을 담당하고 있다. 또한 이러한 기술들은 주조분야 뿐만아니라 용융금속을 다루는 여러가지 다양한 프로세스에 점진적으로 적용되어갈 전망이다.

참 고 문 헌

1. M. Brezina and V. Kondic, "Flow Phenomena in Investment Casting", British Foundrymen, Vol. 66, pp.337-348, 1973.
2. S. T. Anderson and P. Ingerslev, "A Study of Pouring a Symmetrical Casting by Means of Film Shots and Pressure Measurements", 50th International Foundry Congress, Cairo, Egypt, 1983.
3. 김종원, 이영철, 홍준표, "개량차분법에 의한 주조품 및 대형 잉고트의 응고해석과 수축공해석", 한국주조공학회지, Vol. 9, No. 1, pp. 67-72, 1989.
4. Y. Iwata, K. Tozawa, Y. Yamamoto etc, "Filling velocities and defects of plate shaped die castings", J. Japan Inst. Light Metals, Vol. 37, p.48, 1987.
5. T. H. Siau and A. J. Davis, "Flow Analysis in Tapered Runners", Tech.report paper No. G-T79-054, Transaction SDCE, 1979.
6. Y. Iwata, Y. Yamamoto, M. Nakamura, "Defects and molten metal velocity near the gate of die castings", J. Japan Inst. Light Metals, Vol. 39, No. 8, p.550, 1989.
7. K. G. Davis and J. G. Magny, "Trapping Slag and Solid nonmetallic Materias in Gating System", Tech.report PM-M-73-5, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, 1973.
8. E. Niyama, "Calculation of Solidification Rate of Shape Casting by the Flux-Boundary Method," IMONO, 49, 10, pp.608-613, 1977.
9. 유승목, 이두호, 김종기, 소찬영, 홍준표, "개량차분법에 의한 대형 주강품의 3차원 응고해석", 한국주조공학회지, Vol. 11, No. 1, pp. 54-62, 1991.
10. S. Engler, D. Boenisch and B. Kohler, "Metal and Mold Wall Movement during Solidification of Cast Iron", AFS Cast Metals Research Journal, 3, pp.20-30, 1973.
11. K. Ohsasa and T. Takahashi, "Radial Contraction Behavior of Solidifying Shell for Cylindrical Al-3%Si Alloy Ingot", J. Japan Inst. Metals, 52(12), pp.1012-1019, 1988.
12. C. P. Hong, J. K. Kim and D. O. Kim, "Computer Simulation of Solidification Process in the Gravity Die Casting", Conf. Proceeding, 55th International Foundry Congress, Moscow, CCCP, No. 32, pp.3-11, 1988.
13. J. E. Welch, F. H. Harlow, J. P. Shannon and B. J. Dally, "The MAC Method, A Computing Technique for Solving Viscous, Incompressible, Transient Fluid Flow Problems Involving Free Surfaces", Tech, report LA-3425, Los Alamos Scientific Laboratory, 1965.
14. A. A. Amsden and F. H. Harlow, "The SMAC Method, A Numerical Technique for

- Calculating Incompressible Fluid Flows”, Tech.report LA-4370, Los Alamos Scientific Laboratory, 1970.
15. B. D. Nichols, C. W. Hirt and R. S. Hotchkiss, “SOLA-VOF, A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries”, Tech.report LA-8355, Los Alamos Scientific Laboratory, 1980.
 16. R. A. Stoehr and W. S. Hwang, “Modeling the Flow of Molten Metal Having a Free Surface During Entry into Molds”, Modeling of Casting and Welding Processes II, Conference Proceedings, The Metallurgical Society of AIME, 1984.
 17. K. Anzai, T. Uchita, K. Kataoka, “Prediction of Defects in Die Castings by Quasi Three-Dimensional Flow Analysis”, IMONO Vol. 60, No. 12, p.763, 1988.
 18. Y. Iwata, K. Yonekura and Y. Yamamoto, “Computer Simulation of Molten Metal Flow for Thin Section Die casting,” IMONO, Vol. 62, No. 7, p.536, 1990.
 19. H. Nomura, K. Terashima and K. Keishima, “Prediction of Die Casting Flow Behavior by Three Dimensional Simulation,” IMONO, Vol. 63, No. 5, p.425, 1991.
 20. R. A. Stoehr and C. Wang, “Advances in Fluid Flow, Heat Transfer, and Solidification Modeling and Application to Actual Foundry Problems”, Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes V, TMS, pp.725-732, 1990.
 21. M. Lipinski, W. Schaefer and S. Anderson, “Modeling of combined heat and fluid flow for determination of filling sequence for real complex shaped castings”, Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes V, TMS, pp.771-776, 1990.
 22. 安齊浩一, “ダイカストの湯流れ解析法の開発と鑄造缺陷豫測への應用”, 學位論文, 東北大學, 1991.
 23. R. W. Lewis, H. C. Huang, A. S. Usmani and J. T. Cross, “Finite element analysis of heat transfer and problems, using adaptive remeshing, including application to flow problems”, Int. J. of Numerical Methods in Engineering, 32, pp.767-781, 1991.
 24. P. Meyer, “La modelisation en founderie automobile aluminum”, Mutation du Metier, Les Entretiens de la technologie, Paris CNIT La Defense, 1992.
 25. Houdry J. P., Vanpeene P., Werbrouck G., Examples of the European Expertise in the Computer Simulation of Solidification and Casting, RWTH Aachen, B-9,10, 1992.
 26. 최정길, 김성빈, 홍준표, “SMAC법에 의한 2차원 탕류해석에 관한 연구”, 한국주조공학회지, Vol. 12, No. 1, pp.40-50, 1992.
 27. 조인성, 홍준표, “SOLA-VOF법에 의한 정밀주형내 용탕흐름의 수치모델링”, 한국주조공학회지, Vol. 12, No. 5, pp.18-30, 1992.
 28. Sung-Bin Kim and chun-Pyo Hong, “Modeling of Combined Fluid Flow, Heat Transfer and Solidification in the Filling of Castings”, 60th World Foundry Congress, Hague, Netherlands, 1993.