

論 文

SOLA-VOF법에 의한 정밀 주형내 용탕흐름의 수치 모델링

조 인 성, 홍 준 표

Numerical Modeling of Melt Flow in the Investment Mold by SOLA-VOF

In-Sung Cho, Chun-Pyo Hong

Abstract

A numerical model based on the SOLA-VOF method, which can calculate the transient free-surface configuration of the melt, has been developed in order to analyze melt flow in the investment mold. The computational results were compared with experimental results obtained from pure aluminum investment casting. Heat transfer analysis, with and without consideration of melt flow effect has been performed. It can be concluded that analysis of melt flow in the investment mold, provides the optimum conditions for gating design. It also enables more precise solidification simulation, since heat loss, while filling the thin and complex investment mold, plays an important role in determining the solidification sequence.

1. 서론

정밀주조나 다이캐스팅과 같은 주조공정에 있어서, 탕경, 공기 및 가스의 포집, 개재물의 혼입 등은 탕류에 기인한 주조결함으로서, 대부분 이 경우 경험에 의존한 시행착오 방법으로 이들 주조 결함을 제어하고 있다. 지금까지 이러한 주조 결함의 제어를 위한 정량적인 방법은 확립되어 있지 않다. 용탕의 충전 거동을 실험적으로 평가하는 여러가지 방법이 보고 되었으나, 이들 방법은 비용과 시간면에서 아주 비효율적이며 범용성이 없기 때문에 현장에 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 최근 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 주물의 응고 해석이 활발하게 이루어져 주조 현장에 널리 응용되고 있으나, 완전한 주조 결함의 제어를 위해서는 용탕의 충전 거동에 대한 유동 해석이 병행되

어야 한다.

용탕의 유동 해석은 Navier-Stokes 방정식이라 부르는 비선형 방정식에 의해 기술되는데, 실제문제에 대하여 이 방정식을 해석적으로 풀다는 것은 불가능하다. 그래서 Navier-Stokes 방정식을 적당한 초기조건과 경계조건을 이용, 유한차분법으로 해석하는 수치해석적 연구가 1965년경부터 미국의 Los Alamos 과학 연구소를 중심으로 진행되어져 왔는데, MAC, SMAC, SOLA, SOLA-VOF 등이 발표되었다.^{1,2)} 최근에는 이 수치해석법을 주조공학분야에 적용하고자 하는 노력이 Stoehr등에 의해 이루어졌으며,³⁾ 본 연구진에서는 SMAC법에 의한 용탕의 흐름 해석에 대한 연구를 수행하여 주조시 탕류 흐름을 가시화하였으며, 탕류에 기인한 결함들을 예측하였다.⁴⁾

주입구의 크기가 작고 형상이 복잡한 정밀 주형

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

내의 용탕의 해석은 Marker를 사용하기 때문에 기억 용량을 많이 차지하는 SMAC법보다는 기억 용량을 적게 차지하는 SOVA-VOF법의 응용이 기대된다.

본 연구에서는 정밀 주형내에서의 용탕의 충전 과정을 SOLA-VOF법을 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션하였다. 해석한 결과와 실험에 의해 얻어진 결과를 비교하여 본 해석의 타당성을 제시하고 각 주조 제어변수 (주입구 속도, 주형의 경사각 및 주입구 크기)의 용탕의 흐름에 미치는 영향을 계산하여 적절한 주조방안의 설정을 시도하였다.

2. 해석방법

본 연구에 사용된 해석 및 실험모델은 Fig. 1과 같다.

2.1 기본 방정식

Boussinesq approximation을 적용한 직교좌표계에서의 연속방정식과 비정상상태의 Navier-Stokes방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

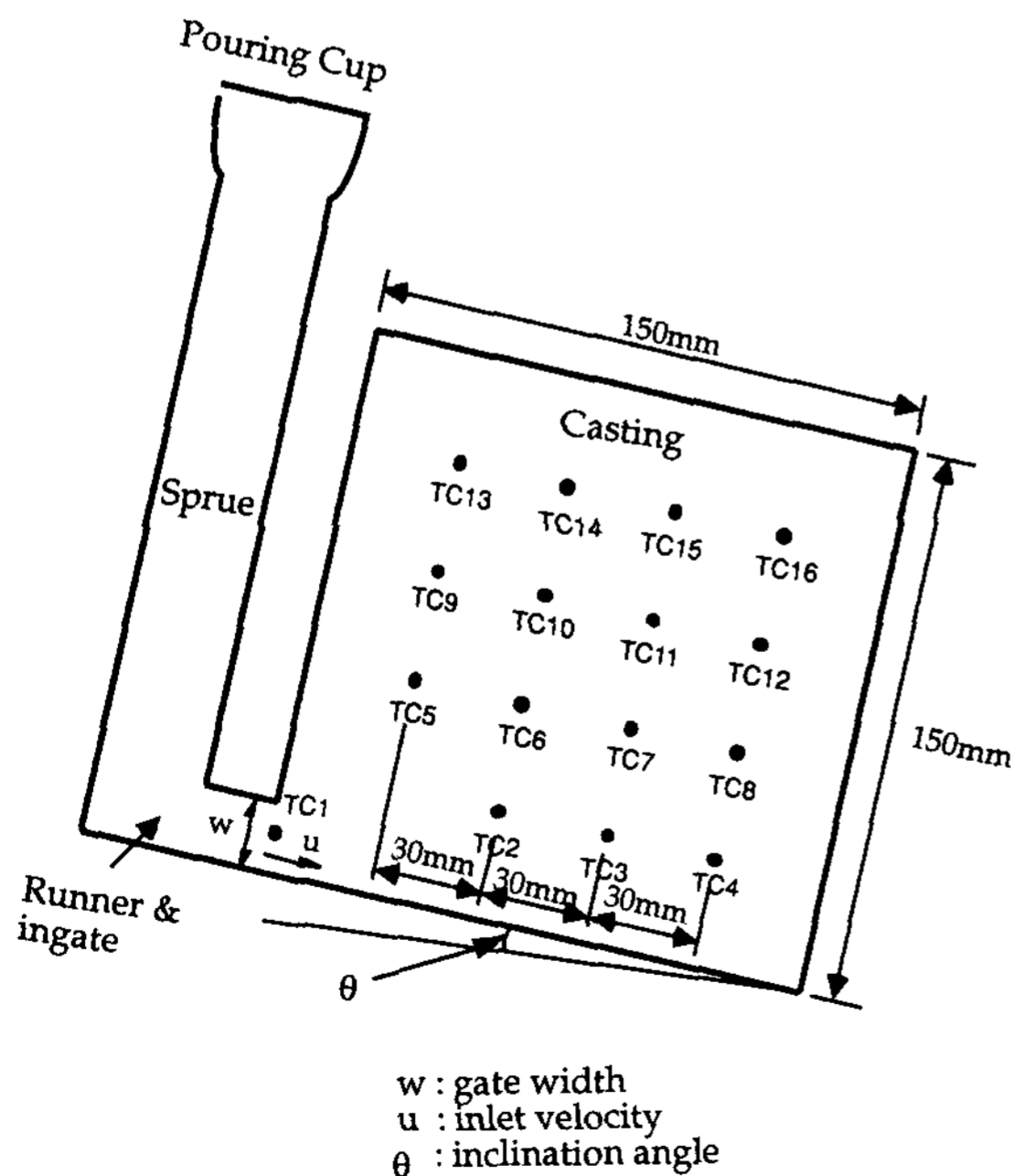


Fig. 1. Schematic model of investment mold.

Table 1. Parameters used in the calculation

Kinematic viscosity(Al)	$\nu=1.23 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 / \text{sec}$
Gravity constant	$g=981 \text{ cm} / \text{sec}^2$
Mesh cell size	$\Delta x=0.5 \text{ cm} \quad \Delta y=0.5 \text{ cm}$
Mesh cell number	$30 \times 30=900$
Convergence criterion	$\epsilon=5 \times 10^{-3}$
Boundary condition	free-slip condition

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + g_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + g_y \quad (3)$$

여기서 ν 는 동점성계수(kinematic viscosity), ρ 는 유체의 밀도, g_x , g_y 는 중력가속도이다.

2.2 이산화

이산화 방법은 일반적인 유한차분법을 적용하였으며, 시간항은 전진차분법을, 속도장은 엇갈린 격자망을 사용하고, 풍상차분법을 도입하는 SOLA 알고리즘을 이용하였다.⁵⁾ 계산에 사용되어진 변수들은 Table 1과 같다.

2.3 자유표면 형상의 인식과 그 변화의 추적

자유표면을 갖는 비정상 유체를 해석하기 위해서는 먼저 자유표면의 위치와 그 형상을 인식해야 하고 시간에 따른 자유표면의 변화를 추적해야만 한다.

이러한 문제의 해결을 위해 그동안 높이함수법, 선형구획법, Marker법, VOF법등이 사용되어왔다. 이러한 방법들 중 높이함수나 선형구획을 이용하는 방법은 복잡한 자유표면을 해석하는데 있어서 한계를 지니고 있을뿐만 아니라, 주조문제를 고려하는 경우에는 응용하기 어려운 난점이 있다.⁶⁾

Marker법은 자유표면을 수치적으로 직접 정의하는 대신에 전체 유체영역에 marker입자들을 골고루 분산시킨 후, 유체속도의 변화에 따라 marker입자들을 이동시키는 방법이다. 이때 marker입자의 유무에 따라 계산영역을 유체영역, 자유표면영역 및 빈 영역으로 구분할 수 있다. 이러한 marker법은 자유표면의 형상과 유체의 흐름을 관찰할 수 있으나 marker입자들의 위치를 계산하기 위하여 많은 기억용량을 필요로 한다. 그리고 주입구 크기가 작고 얇은 주물을 생산하는 정밀주조

법에서 중요한 변수로 작용하는 표면장력을 설정하기 위해서는 자유표면의 곡률반경을 설정하여야 하는데, marker법에서의 곡률반경의 계산은 가능하나 그 알고리즘이 복잡하다.

그래서 본 연구에서는 정밀주조법의 해석에 가장 적합하다고 생각되는 VOF (Volume of Fluid)법을 사용하였다.

2.4 VOF Method

VOF법에서는 각각의 mesh cell에서 유체영역을 정의하기 위해 각각 하나의 독립적인 값이 쓰이게 된다. 유체가 차지있는 부분을 정의하기 위해 cell안에 여러점을 잡는다는 것은 불필요하다. 그 대신 각 어느 점에서 유체가 차지한 부분을 1로, 그외의 경우 0값을 가진 함수 F를 정의하자. Fig. 2와 같이 cell안의 평균 F값은 유체에 의해 차지하여진 분율을 나타내게 된다. 특별히 F값이 1인경우는 유체로 완전히 차지된 cell이며, 0인경우는 유체가 존재하지 않는 cell이다. 그 이외의 경우에는 자유표면이 될 것이다. 그러므로 VOF법 즉, fractional volume of fluid법은 Marker법과 같이 자유표면의 형상추적이 가능하다.

F 함수의 시간에 따른 이동량은 다음식으로 표시될 수 있다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \tag{4}$$

VOF법에서는 시간에 따른 F함수의 이동을 위해 Donor-Acceptor method가 도입된다.

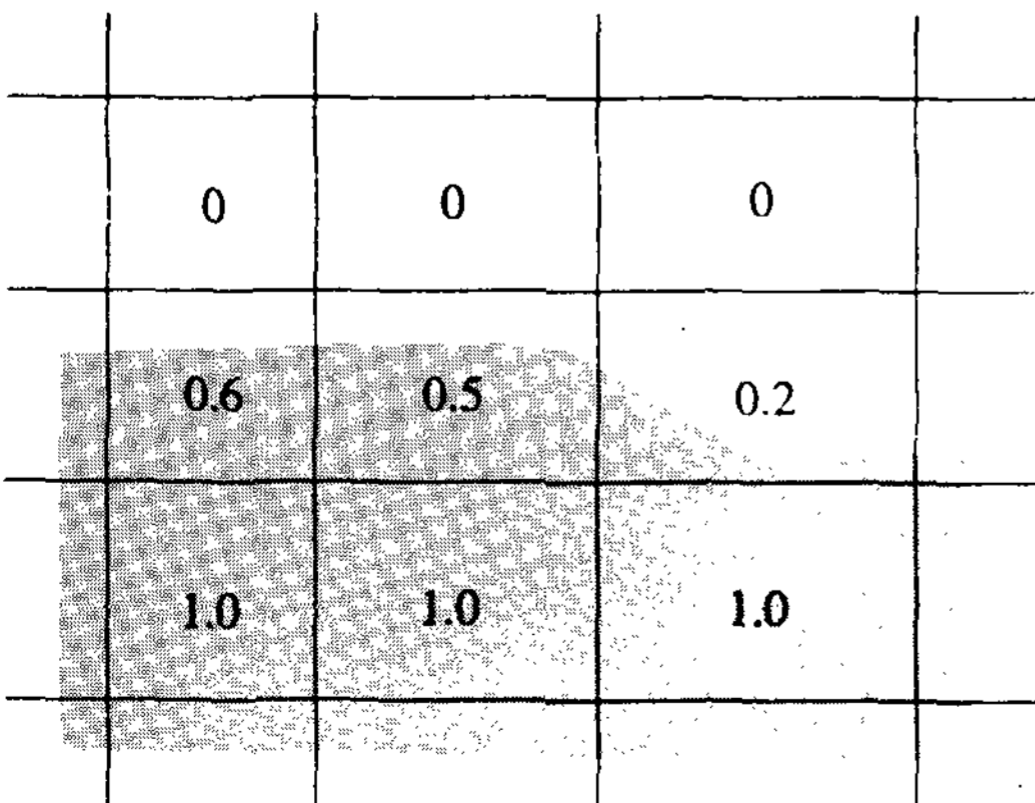


Fig. 2. Values of F function in each mesh cell.

Donor-Acceptor method는 mesh cell안의 F의 변화를 계산하기 위해 mesh표면을 가로지르는 F의 이동량(flux)을 계산하는 특별한 방법이다. 시간의 진행에 따른 F함수가 계산된 후, 자유표면의 mesh cell을 가로지르는 자유표면과 그 기울기를 설정할 수 있으며, 자유표면에 알맞은 곡률반경을 설정함으로써 표면장력을 고려한 압력을 계산할 수 있다.

2.5 경계조건

주형벽의 경계조건은 free-slip condition을 사용하였다. 또한 자유표면영역은 유체영역과 공간영역의 경계, 즉 용탕과 대기와의 경계를 포함하고 있기 때문에 자유표면 경계조건을 만족해야 한다. 자유표면의 경계조건은 수직응력조건과 전단응력조건으로 나뉘며 각각 다음과 같다.

$$p - 2\nu [n_x n_y \frac{\partial u}{\partial x} + n_x n_y (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) + n_y n_y \frac{\partial v}{\partial y}] = 0 \tag{5}$$

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

Fig. 3에 자유표면구조 및 자유표면에서의 단위벡터를 나타내었다.

2.6 Mold Filling Simulation에의 적용

SOLA-VOF법을 정밀주조 주형내 용탕흐름을 해석하는데 적용할 경우, F 함수의 특징때문에

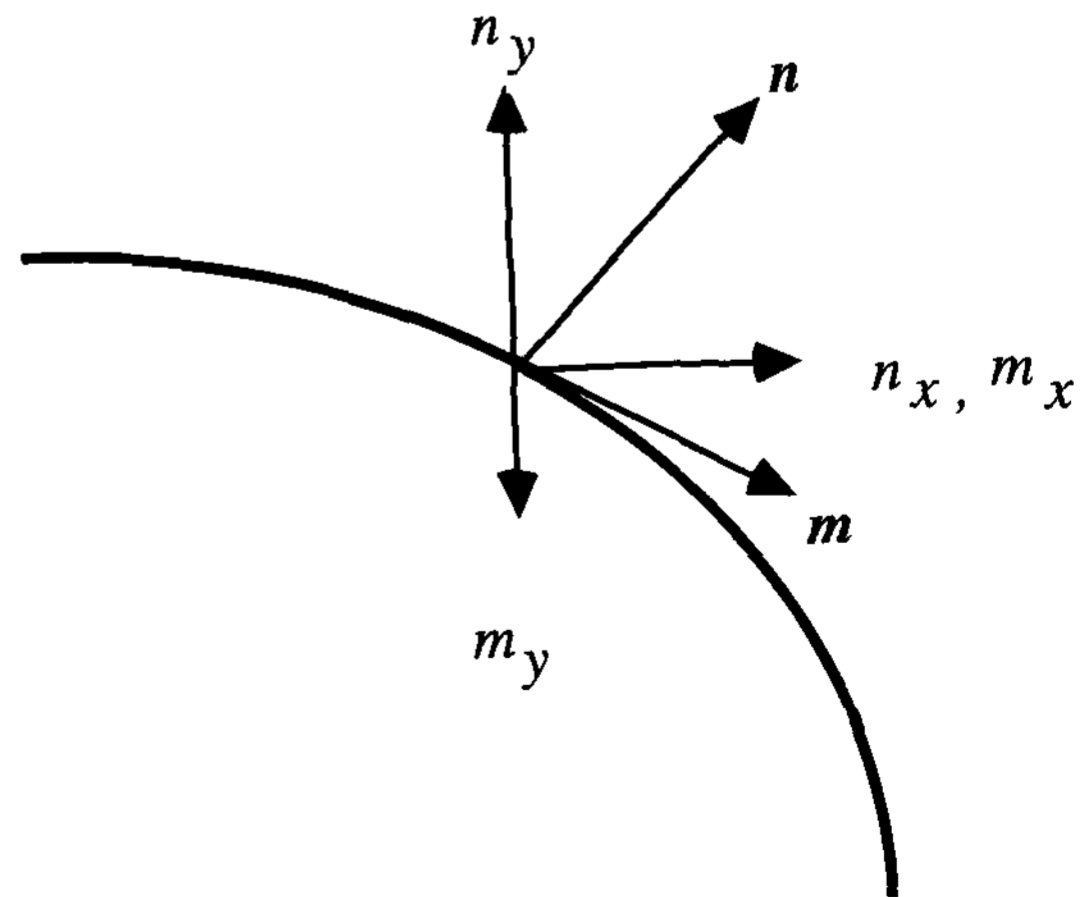


Fig. 3. Vector components of free surface.

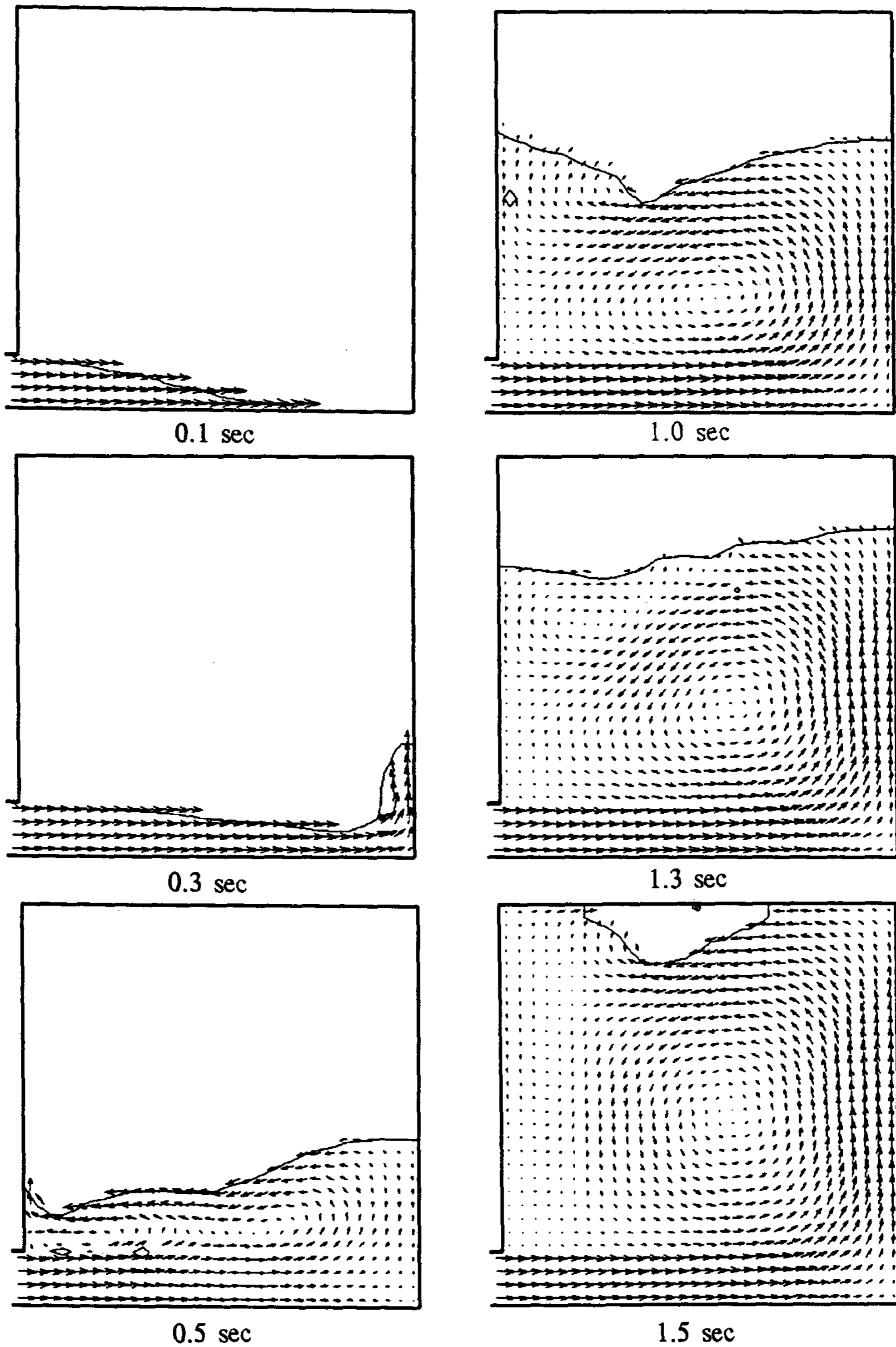


Fig. 4. Velocities and free-surface configurations of Al melt flow in the investment mold at $u=70$ cm/sec, $w=2$ cm and $\theta=0^\circ$.

현실과는 다른 결과를 보이게 된다. 즉, 기존 SOLA-VOF법은 용탕이 주형벽에 충돌하기전에 용탕이 충돌한것 같은 현상이 일어나기 때문에 이러한 오차를 없애기 위해 기존 SOLA-VOF법에 수정을 가하였다. 즉, 용탕이 주형벽 바로옆의 mesh cell까지 도달하였을때, 그 cell의 압력을 0으로 만들어 줌으로써 용탕이 벽에 닿은 후 옆으로 퍼지는 결과를 얻을 수 있었다. 이때 표면장력의 영향을 제외한다면 용탕이 처음 주형벽에 닿기전에 용탕이 가지고 있는 압력은 0이므로 이러한 수정은 타당하다고 사려된다.

3. 실험방법

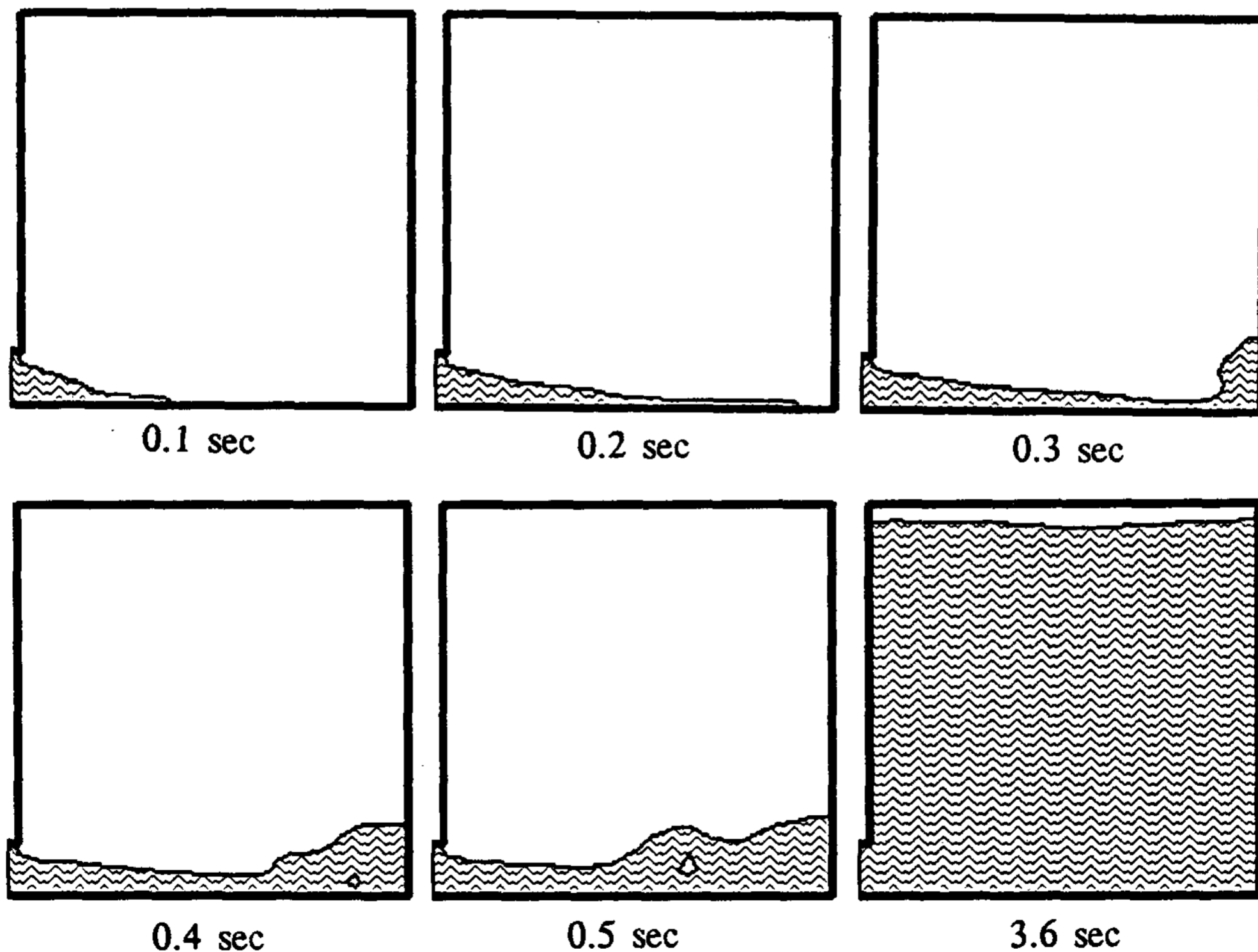
사용된 재료는 공업용 순 Al (99.8%)이며 용해온도 760℃에서 저항가열로를 이용하여 용해한 후 가열된 주형에 주입하였다. mold는 investment주조용 내화물로 제작하였으며, 본 실험에 사용된 수평판 주물의 크기는 150mm×150mm이다. 주형내 각 부분에 16개의 열전대(K type)를

삽입, 매몰하여 주입후의 온도를 A/D Converter및 Personal Computer로 이루어진 자동온도측정 시스템에 의해서 용탕이 열전대에 접촉하는 시간 및 주형내 온도분포를 측정하였다. 본 연구에서는 2가지 경우에 대한 실험을 행하였는데, 각각 주형을 기울이지 않았을때와 ($\theta=0^\circ$), 주형을 15° 경사로 기울였을때($\theta=15^\circ$)이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 각 구조제어변수에 따른 정밀주조 주형내 Al용탕흐름의 영향

Fig. 4는 $w=2\text{cm}$, $\theta=0^\circ$, $u=70\text{cm/sec}$ 시 정밀주조 주형내 Al 용탕흐름의 속도와 자유표면형상을 나타내고 있다. 계산된 흐름패턴은 초기 용탕이 오른쪽에 부딪혀 높이 올라가게 된다. 그리고 반향이 반대쪽으로 흘러 왼쪽 빈 부분을 채우게 되며, 입구부분에 큰 vortex를 형성시킨다. 그후 용탕은 왼쪽벽을 치면서 주형에 충전되며, 이때 vortex는 입구쪽에서 주형의 중심으로 이동



(a)

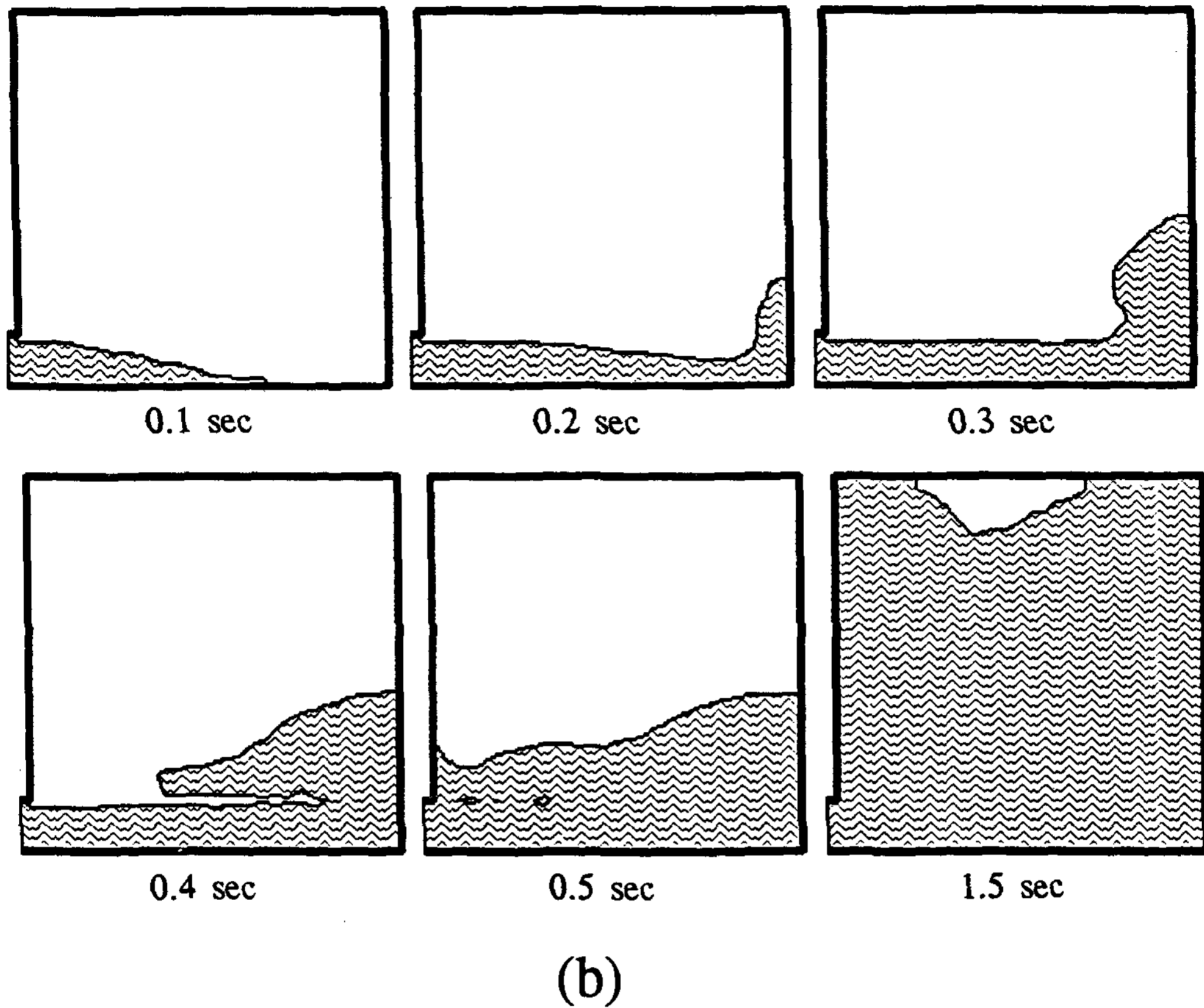


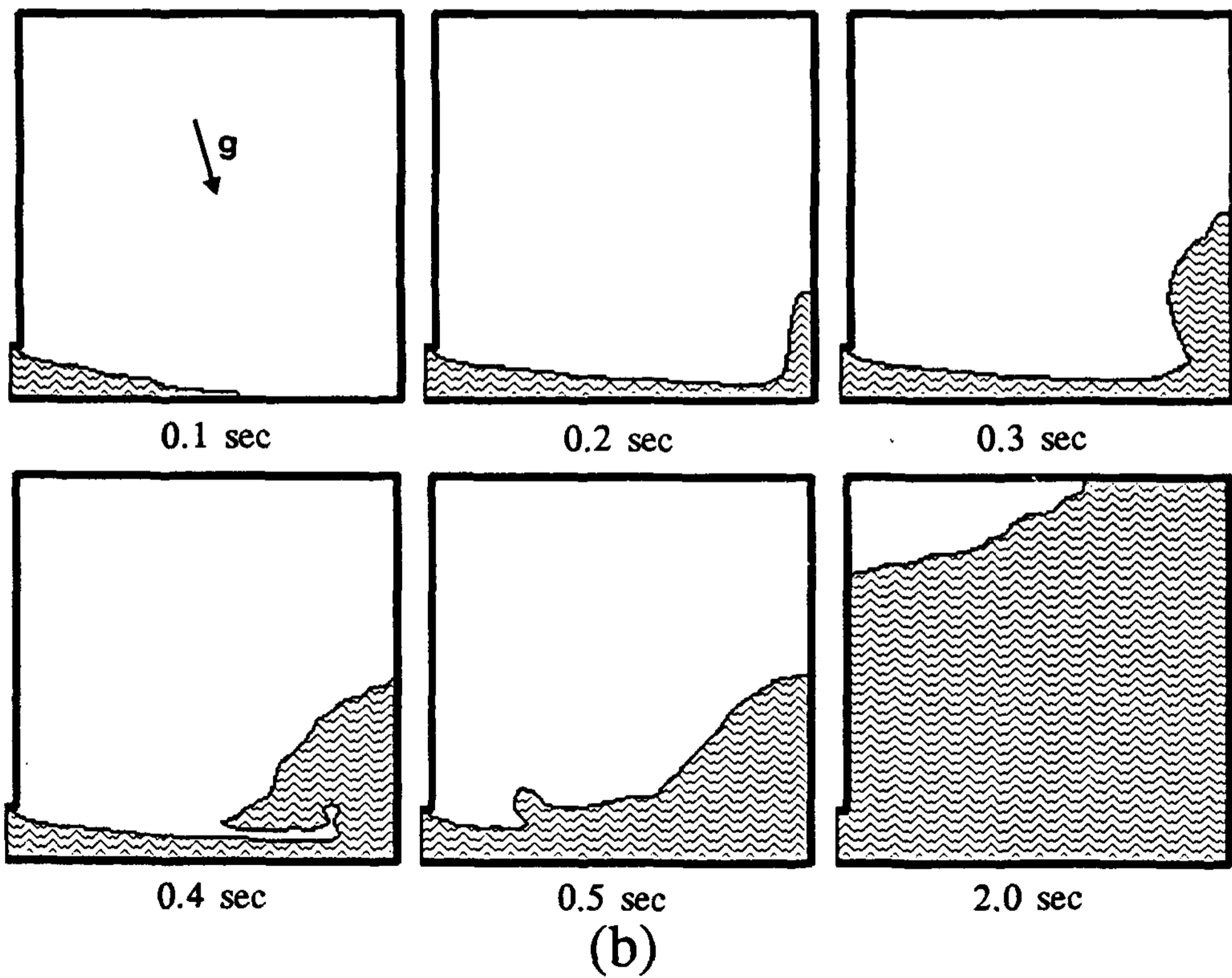
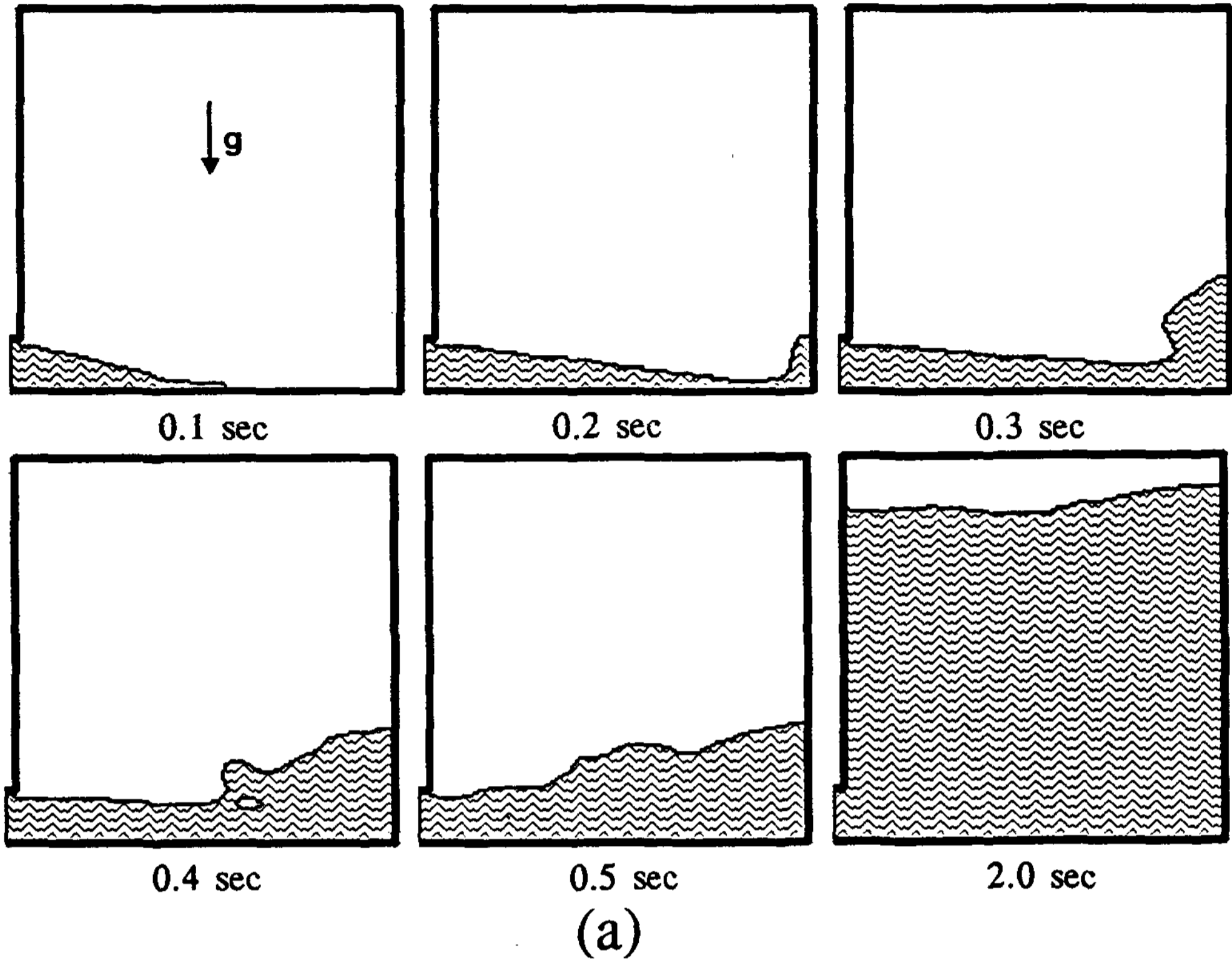
Fig. 5. Effect of the inlet velocity on free surface configurations of Al melt flow in the investment mold at $w=2$ cm and $\theta=0^\circ$: (a) $u=30$ cm/sec and (b) $u=70$ cm/sec.

된다. 이러한 흐름패턴은 주조제어변수에 관계없이 닮은 형상을 가진다.

Fig. 5는 $w=2$ cm, $\theta=0^\circ$ 일때 주입속도의 변화에 따른 정밀주조 주형내 Al 용탕흐름의 자유표면형상을 나타내고 있다. Fig. 5(a)는 $u=30$ cm/sec일때의 시간에 따른 자유표면형상이며, Fig. 5(b)는 $u=70$ cm/sec일때이다. 0.3초때의 우측벽으로 올라가는 용탕의 모양은 Fig. 5(a), Fig. 5(b) 모두 폭과 높이의 크기가 거의 같으나, 속도가 증가함에 따라 폭과 높이의 크기가 모두 증가함을 알 수 있다. 또한 최종충진부위는 속도가 증가함에 따라 중앙으로 집중함을 알 수 있다. 일반적으로 탕경이나 공기의 포집등 용탕의 흐름에 기인한 주조결함등은 최종충진부위에서 일어나므로 충전속도가 늦은 경우에는 최종충진부위가 넓어 주조결함은 주형 윗부분에 고르게 분포되나,

충진속도가 빠를때 주조결함은 중심부분에 집중하게 된다. 그러므로 이러한 최종충진부위에 압탕을 설치하는등 주조방안을 설정하여 주조결함을 최소화시킬 수 있다.

Fig. 6은 $w=2$ cm, $u=50$ cm/sec 일때 주형의 경사각 변화에 따른 정밀주조 주형내 Al 용탕흐름의 자유표면형상을 나타내고 있다. Fig. 6(a)는 주형을 기울이지 않았을때이고, Fig. 6(b)는 주형을 15° 각도로 기울였을때이다. 0.3초일때 우측벽에 차오르는 용탕의 가로폭의 크기는 비슷하나 주형의 경사각 증가에 따라 높이의 크기가 증가함을 알 수 있었다. 또한 Fig. 6(b)의 경우 최종충진부위는 왼쪽상단으로 집중된다. Fig. 6(c)와 6(d)는 각각 Fig. 6(a)와 6(b)에 대한 실험사진이며 주입량을 적게하여 표면의 위치를 보였다. 각 경우에 대해 해석결과와 비교하면 유사한 자유



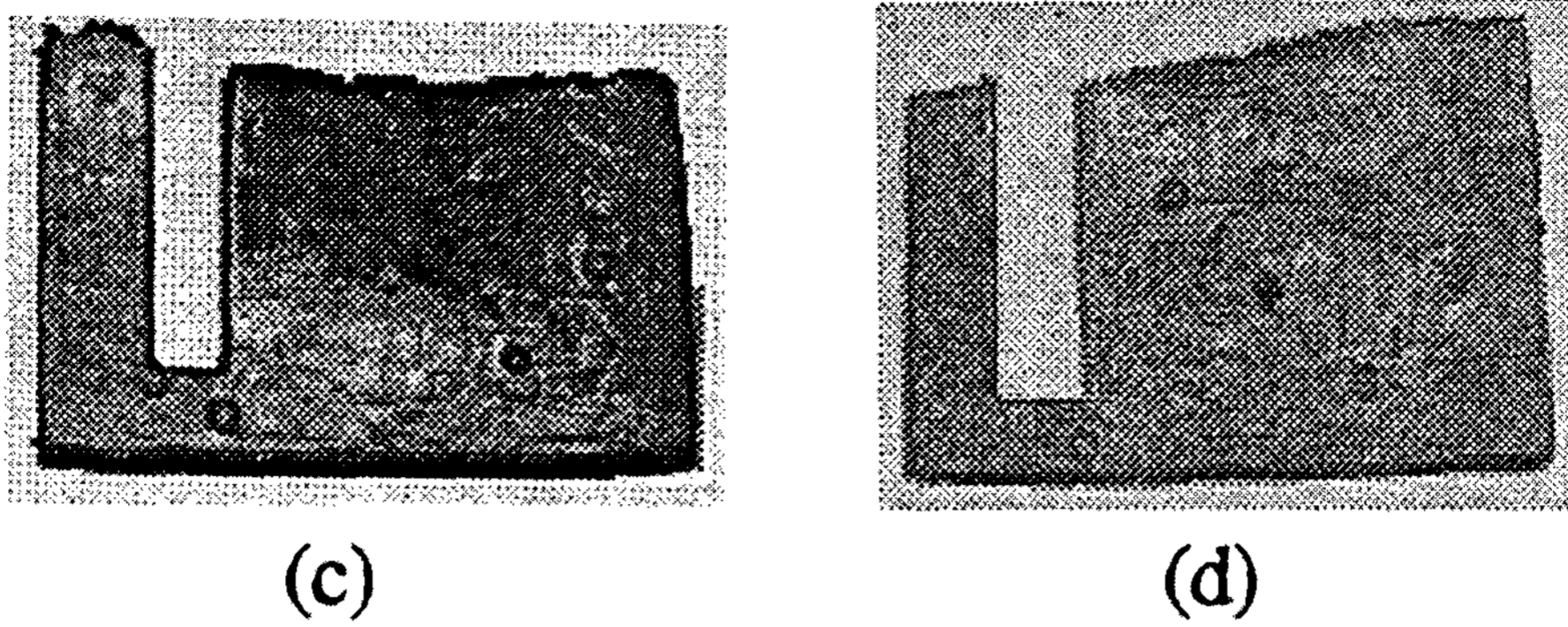


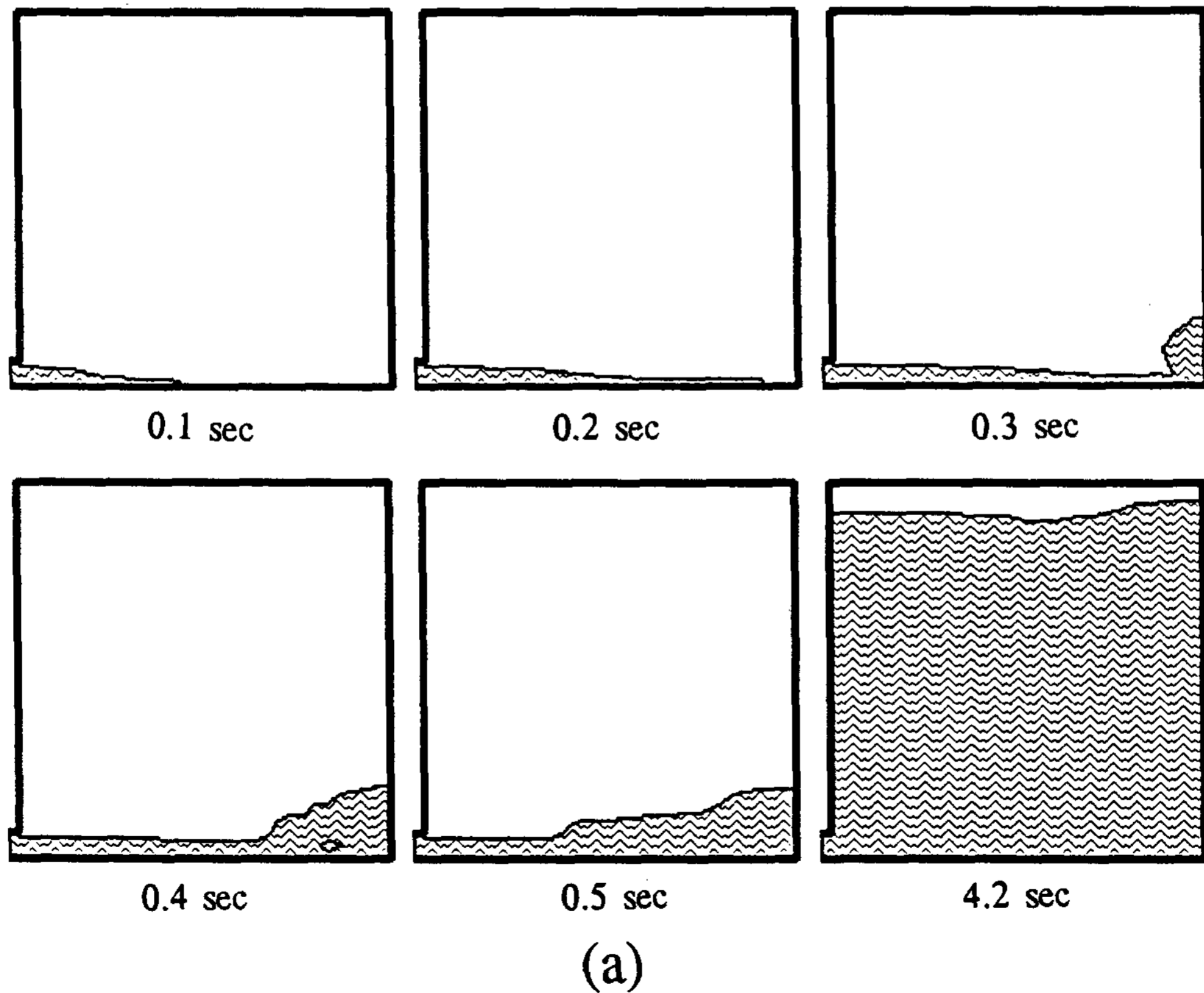
Fig. 6. Effect of the inclination angle on free surface configurations of Al melt flow in the investment mold at $w=2\text{cm}$ and $u=50\text{ cm/sec}$: (a) $\theta=0^\circ$ and (b) $\theta=15^\circ$. (c) and (d) are photographs of specimen.

표면 형상이 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 $u=50\text{ cm/sec}$, $\theta=0^\circ$ 일때 주입구의 크기변화에 따른 정밀주조 주형내 Al 용탕흐름의 자유표면형상을 나타내고 있다. Fig. 7(a)는 $w=1\text{cm}$ 이고, Fig. 7(b)는 $w=4\text{cm}$ 일때이다.

0.3초시 우측벽에 차오르는 용탕은 입구크기가 증가함에 따라 폭과 높이의 크기가 증가하였으며, 높이가 좀더 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 8은 $u=50\text{ cm/sec}$, $\theta=0^\circ$ 일때 주입구의 크기변화에 따른 정밀주조 주형내 Al 용탕흐름의



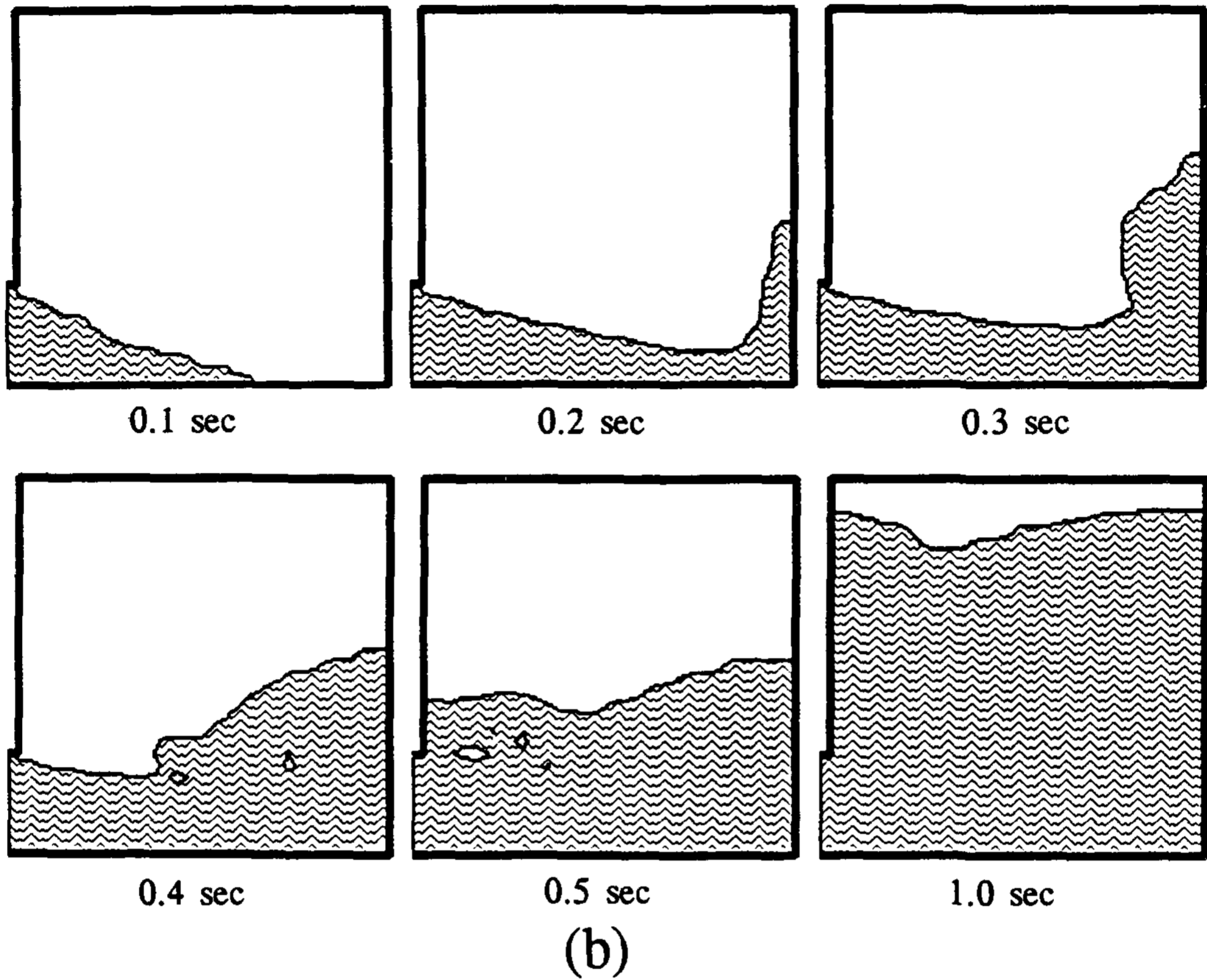
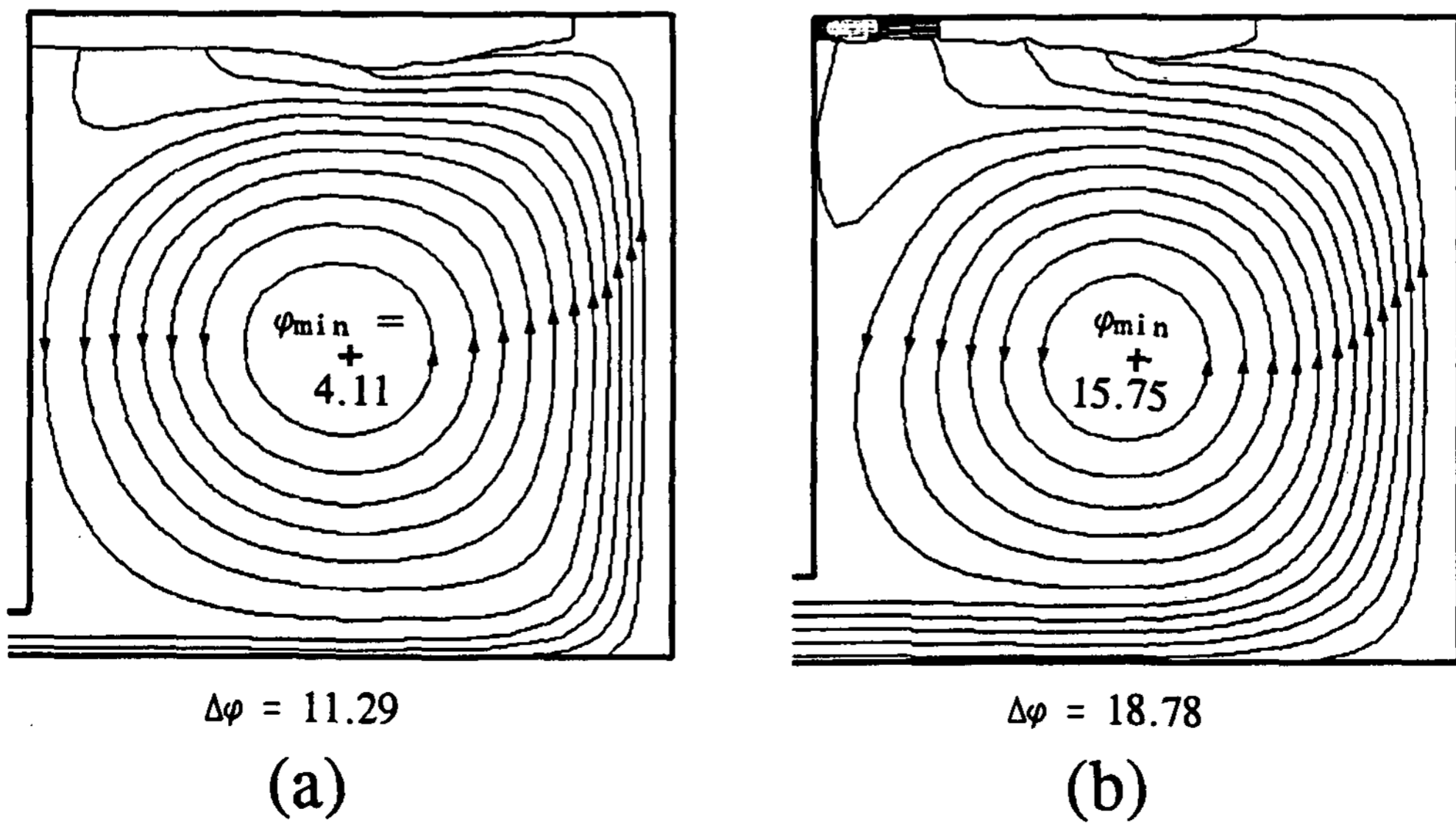
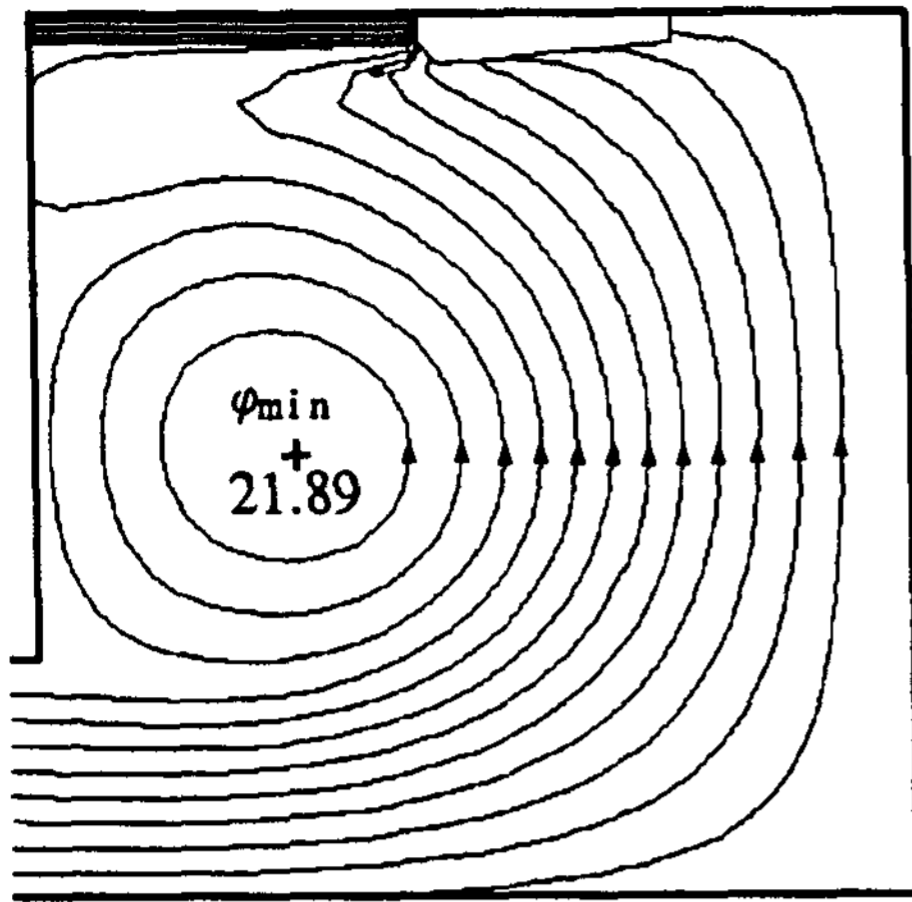


Fig. 7. Effect of the gate width on free surface configurations of Al melt flow in the investment mold at $u=50$ cm/sec and $\theta=0^\circ$: (a) $w=1$ cm and (b) $w=4$ cm.





$\Delta\phi = 18.89$

(c)

Fig. 8. Effect of the gate width on vortex positions of Al melt flow in the investment mold at $u=50$ cm/sec and $\theta=0^\circ$. Flow patterns are calculated by stream function: (a) $w=1$ cm, (b) $w=2$ cm and (c) $w=4$ cm.

vortex 위치의 변화를 나타내고 있다. Fig. 8(a)는 $w=1$ cm일때, 8(b)는 $w=2$ cm, 8(c)는 $w=4$ cm일때이다. 입구 크기가 증가할 수록 vortex의 위치는 입구쪽으로 접근함을 알 수 있다. 이것은 입구쪽에서 큰 흐름이 들어올때 그 큰 흐름의 대부분이 우측벽을 따라 상승하므로 vortex는 그 흐름에 밀려 반대편 벽으로 이동하였다고 생각된다.

4.2 계산결과와 실험결과의 비교에 의한 계산의 타당성 고찰

정밀주조 주형내 Al용탕 흐름에 대한 특정위치의 시간에 따른 온도변화의 측정결과를 나타내면 Fig. 9와 같다. 3번 위치의 열전대에 대한 온도곡선을 보면, 주입후 2.21초가 지난후 온도가 급격히 상승됨을 볼 수 있으며, 7번인경우 3.32초후, 11번인경우 3.82초후에 온도가 급격히 상승함을 볼 수 있다. 여기서 온도가 급격히 상승할때의 측정시간이 열전대의 접촉시간이 된다. 1번 열전대는 주형입구에 설치되었으므로, 각 열전대의 접촉시간에서 1번 열전대의 접촉시간을 빼게되면 주

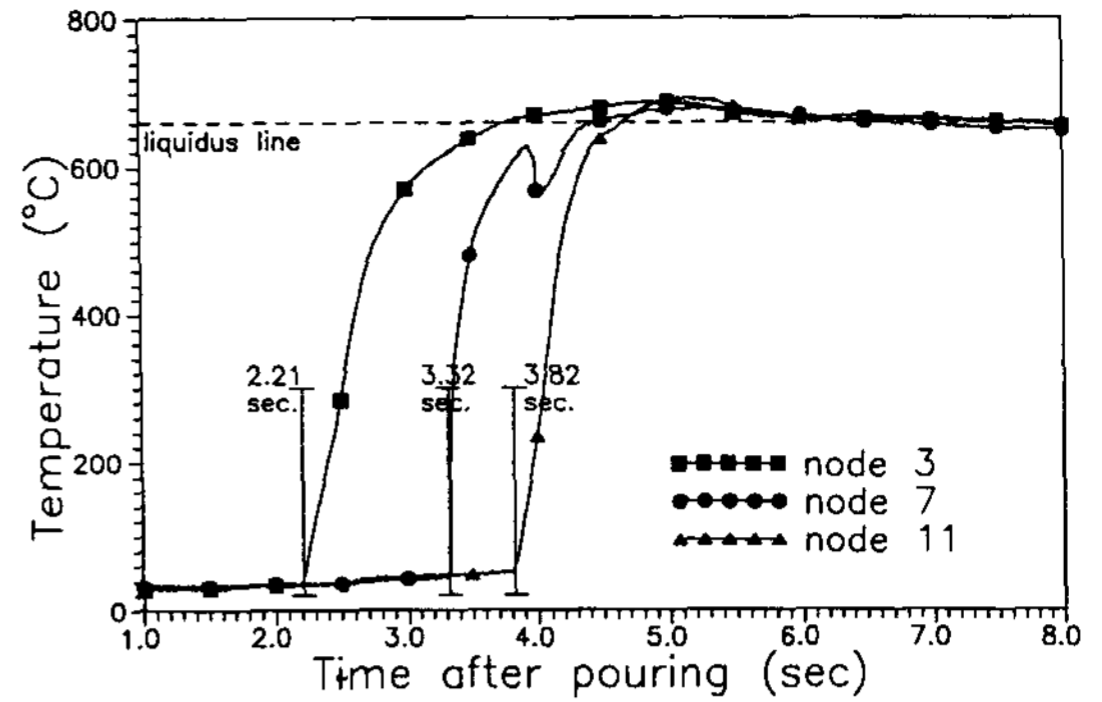
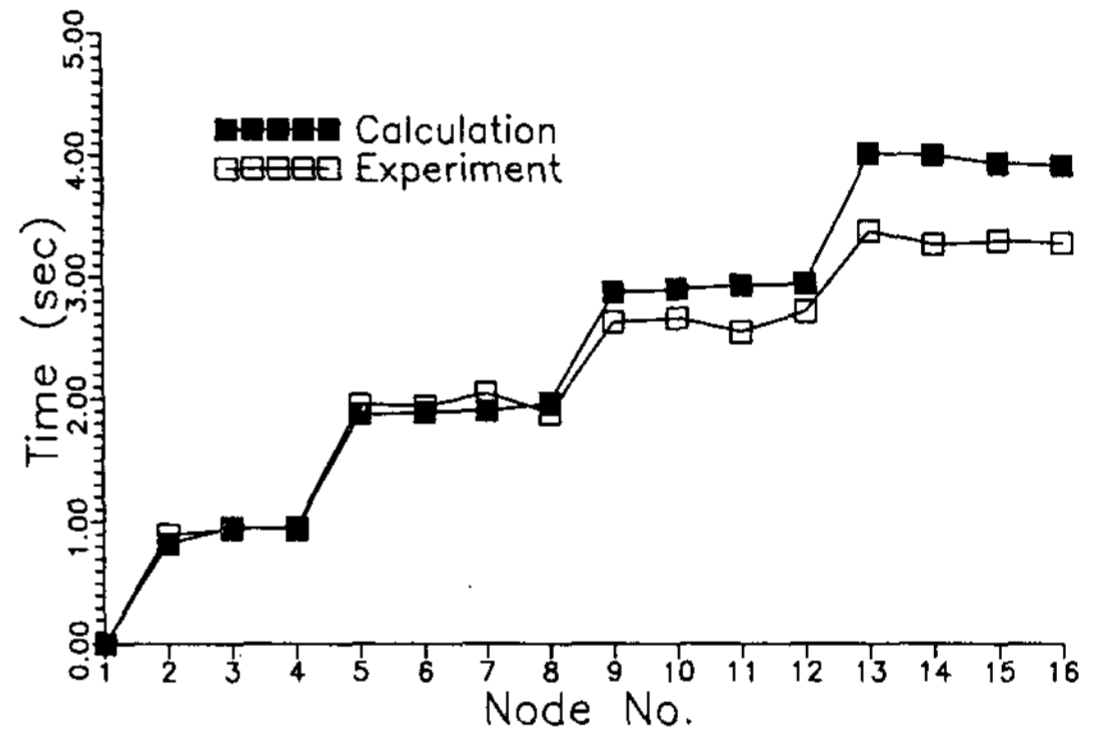
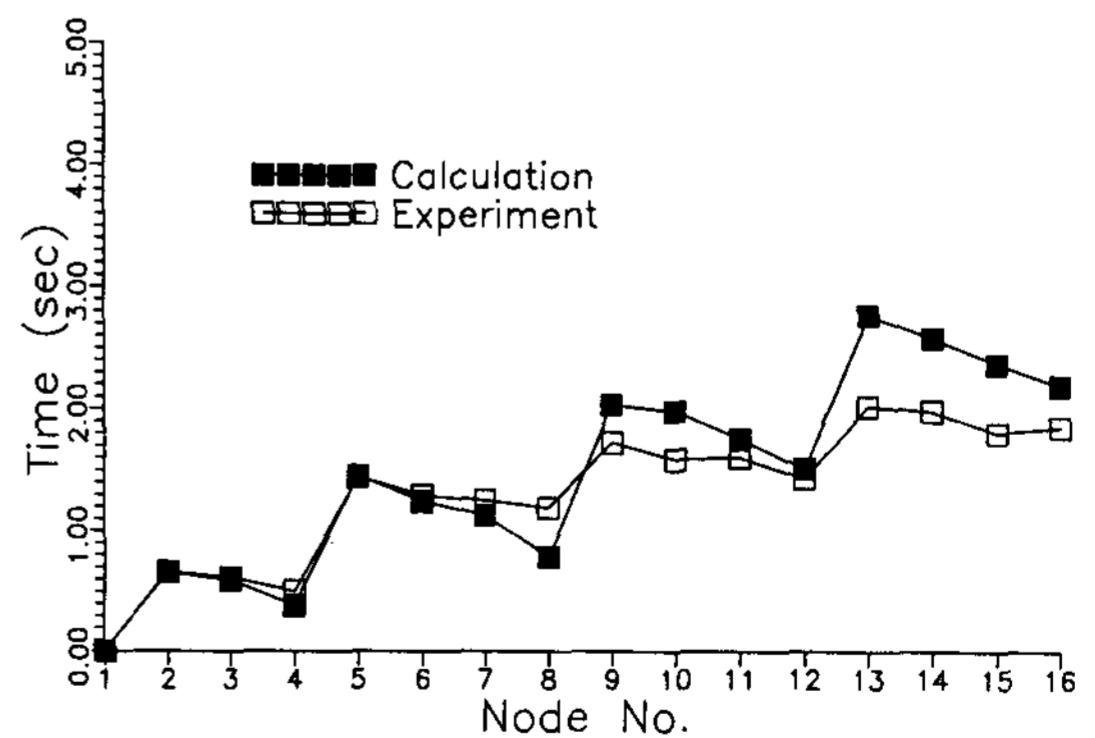


Fig. 9. Experimental temperature profiles of Al melt flow at the specific locations in the investment mold.



(a)



(b)

Fig. 10. Comparison of contact times at specific locations in the investment mold between experiment and calculation by SOLA-VOF: (a) no inclination and (b) 15 deg. of inclination.

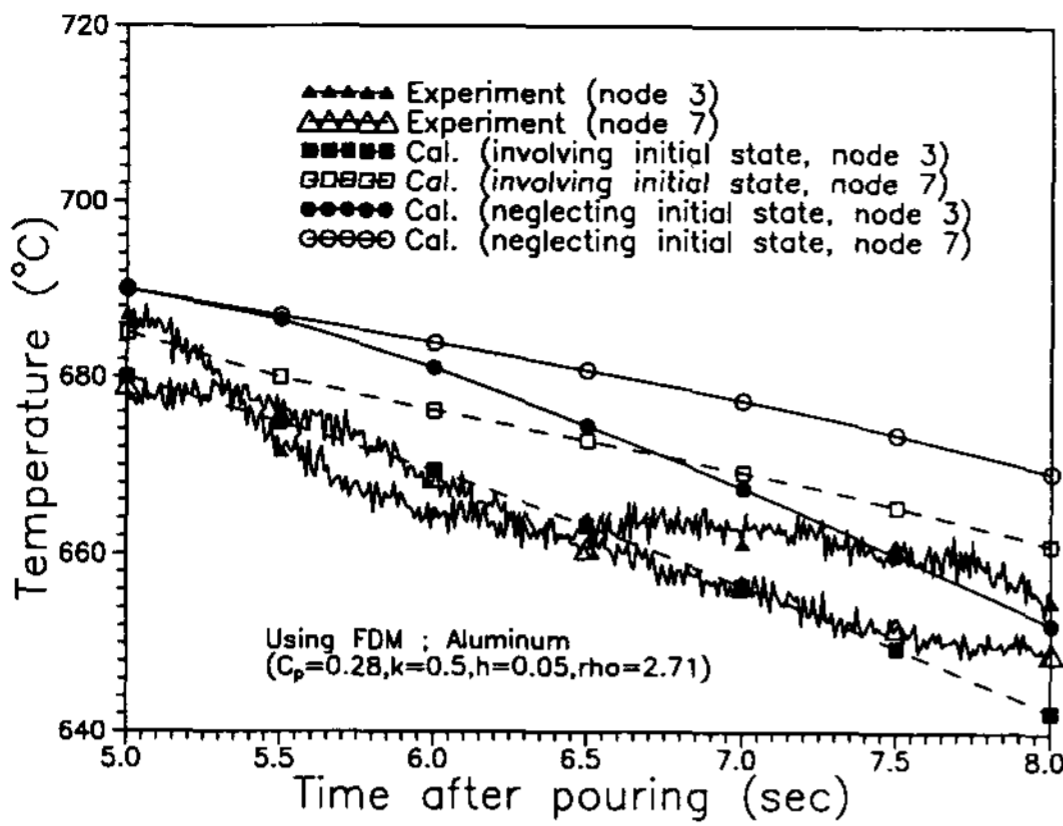


Fig. 11. Effect of temperature profiles on the initial temperature distribution at the specific locations in the investment mold. Calculated results were performed by FDM.

형입구에서부터 특정부분의 열전대까지의 접촉시간을 계산할 수 있다. 그것을 모든 열전대에 적용하게 되면 Fig. 10과 같은 곡선을 얻을 수 있다. 이 측정결과를 SOLA-VOF법에 의한 해석결과와 비교하였을때 실험치와 거의 일치함을 알 수 있었다. Fig. 10(a)의 경우 주형을 기울이지 않았을때의 실험결과와 계산결과와의 비교이며, Fig. 10(b)의 경우는 15° 경사각을 주었을 경우이다.

4.3 응고해석시 순간주입의 초기온도분포와 용탕흐름을 고려한 초기온도분포에 대한 비교

종래에는 주형내 용탕의 초기온도분포를 정의하기 위하여 용탕은 순간적으로 주형에 충전되어 응고과정의 초기에 유체의 운동이 없는 순간주입(instantaneous filling)을 가정하여 응고해석을 실시해 왔다. 그러나 용탕이 주형내에 충전되는 과정에서 많은 열손실이 있게되며, 또한 유체의 흐름에 크게 영향을 받게 된다. 특히 정밀주조의 경우 형상이 복잡한 경우가 많으므로 용탕흐름에 대한 초기온도분포의 고려는 중요하다고 할 수 있다. Fig. 11은 정밀주조 주형내 특정위치의 온도분포곡선이다. 순간 주입시와 용탕흐름을 고려했을때를 비교하면 용탕흐름을 고려했을경우가 실험치에 훨씬 가까운 결과를 보여주고 있다.

한편 용탕흐름에 대하여 초기온도분포를 가정했을때의 응고해석시 온도분포는 전체주형의 온

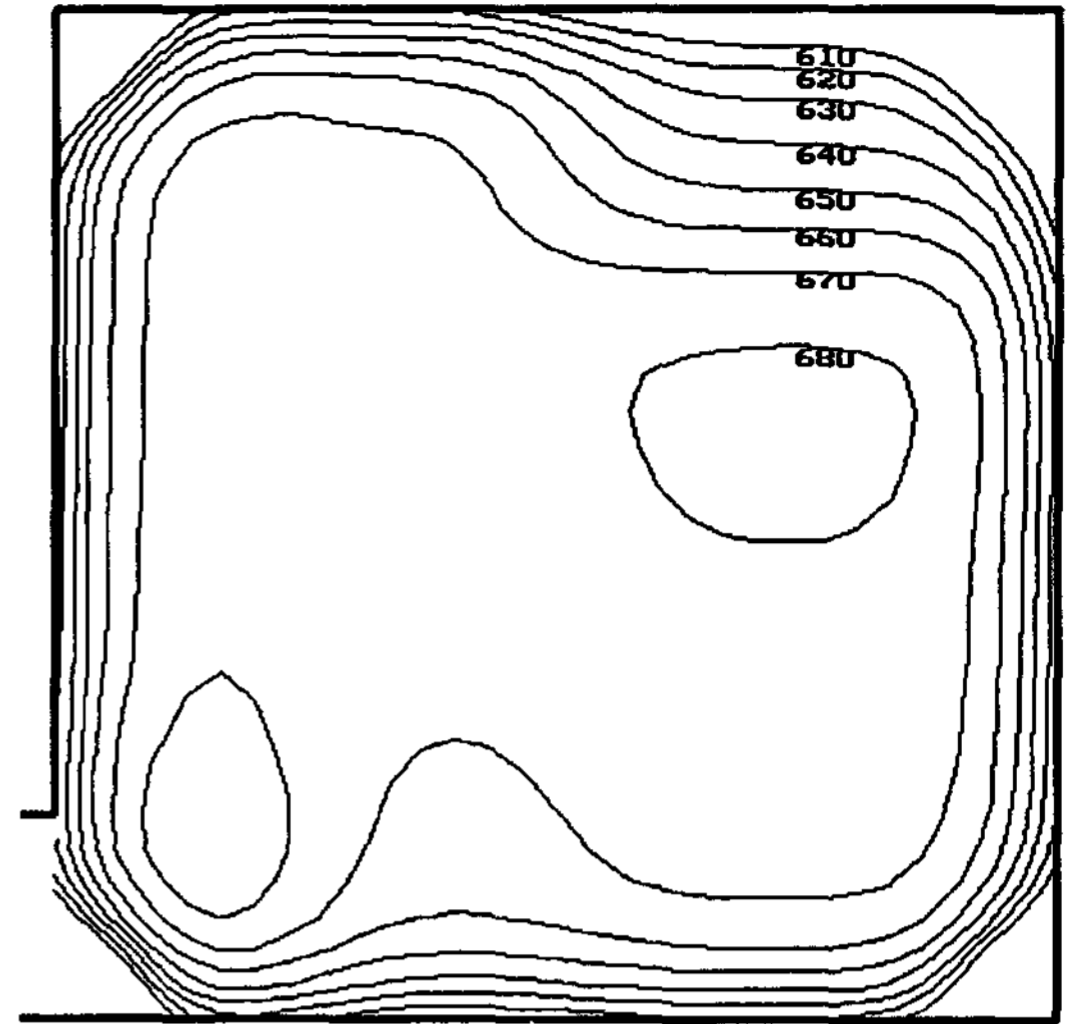


Fig. 12. Calculated temperature distribution involving initial state of Al melt in the investment mold by FDM. 6 sec. after pouring.

도분포에 큰 영향을 미친다. Fig. 12는 용탕흐름을 고려한 초기온도분포를 사용하여 유한 차분법으로 계산한 정밀주조 주형내 Al 용탕의 온도분포를 나타내고 있다. 순간주입을 가정했을때의 온도분포는 대칭적인 분포를 가지나, 충전과정을 고려했을때의 온도분포는 Fig. 12와 같이 비대칭적인 분포를 보인다. 그러므로 응고해석은 순간주입보다는 용탕흐름을 고려한 경우가 실제현상을 보다 정확히 예측할 수 있다.

5. 결 론

정밀 주조법에 있어서 용탕의 충전에 따른 주조시의 결함을 정량적으로 예측할 수 있는 방법을 제시하기 위하여 정밀 주형내로 흘러가는 용탕의 흐름을 SOLA-VOF법으로 시뮬레이션하였으며, 각 주조 제어변수 (주입구 속도, 주형의 경사각, 주입구 크기)가 용탕의 흐름에 어떻게 영향을 주는가를 계산하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SOLA-VOF법에 의하여 정밀 주형내의 용탕주입시 시간의 진행에 따른 자유표면 형상의 변화를 정량적으로 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 본 해석 결과와 자동 온도 측정 시스템에 의해서 측정된 실험 결과를 각 실험 조건에 따라

비교하여, 본 해석 프로그램의 타당성을 제시할 수 있었다.

(2) 정밀주형내로 흘러가는 용탕의 흐름에서 각 주조 제어 변수(주입구 속도, 주형의 경사각, 주입구 크기)들은 서로 복잡하게 연관되어 있고 상호 의존적이므로 본 프로그램으로 해석하면 주조 방안을 설정하기 어려운 정밀 주조법에 적용될 수 있으리라 사려된다.

(3) 정밀주조법에 의한 주조시 일반주조보다 탕구의 크기는 상당히 작고 모양은 아주 복잡하다. 그러므로, 기억용량이 SMAC법보다 적게 차지하는 SOLA-VOF법이 정밀 주조법의 시간에 따른 자유표면 형상의 변화를 해석하는데 용이하였다.

(4) 종래의 응고해석에서는 순간주입으로 가정하여 수치해석하였는데 그 결과는 용탕흐름이 있는 초기온도분포를 고려하지 않았기 때문에 정밀 주조시의 실제현상과는 큰 차이가 있다. 그러므로, 용탕흐름을 고려한 초기온도분포를 사용하여 정밀주형의 응고해석을 실시하기 위해서는 본 연구와 같은 시간의 진행에 따른 용탕흐름의 해석이 필요하다.

Acknowledgment

SOLA-VOF 프로그램을 작성하는 동안 많은 도

움과 격려를 주신 Tohoku University의 prof. E. Niyama와 Dr. K. Anzai께 감사드리며, 또한 실험 mold제작에 도움을 주신 (주)한국로스트와 스 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. A. A. Amsdem and F. H. Harlow : J. Comp. Phys., 3 (1980) 80.
2. C. W. Hirt and B. D. Nichols : J. Comp. Phys., 39 (1981) 201.
3. R. Stoehr and W. S. Hwang : Modeling of Casting and Welding Processes II, Conference Proceedings, AIME (1983) 47.
4. 최정길, 김성빈, 홍준표 : 한국주조공학회지 12 (1992) 40.
5. B. D. Nichols, C. W. Hirt, R. S. Hotchkiss : Los Alamos Scientific Laboratory report LA-8355 (1980).
6. 김성빈 : 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 용탕의 유동해석에 관한 연구, 연세대학교 석사학위논문, 1992.
7. E. Niyama, K. Anzai : Personal Communication.