

.....
論 文
.....

다이캐스트 주물의 금형공동내에서 탕류에 관한 수모델적 연구

김명제, 최희호, 조남돈

A Water Model Study on Molten Metal Flow in Die Cavity of Die Casting

Myung-Jae Kim, Hee-Ho Choi and Nam-Don Cho

Abstract

Water modeling experiments and computer simulation for the predictions of defects of die castings are very important to produce high quality castings with less cost.

The relation between the variable air vent system and the characteristics of the fluid flow in the die cavity is studied by using water modeling tests, which give ideas on reasonable designing of die cavity, vent arrangement and gating system.

In order to test the water modeling, injection is done by using water containing NaCl. Flow behaviors in cavities are visualized by high speed camera and video tape recorder, and local filling time is measured with electrode sensors.

Special attention is paid to the configuration of die cavity. Simulated results by computer are examined and compared with the results of water modeling experiments. There are close correlations between the simulated results and water modeling ones. (Received December 10, 1994)

1. 서 론

현재 다이캐스트 주물의 용도는 자동차 부품을 시작으로 점차 확대되고 있어 더욱 품질의 고급화 및 납기의 단기화에 대한 요구가 높아지고 있다.

이와같은 요구에 부응하기 위하여 다이캐스트의 금형설계에 있어서도 종래의 경험과 시행착오에 의존하는 설계로 인한 금형수정의 반복으로 많은 시간과 비용의 소비를 억제하는 방안이 절실히 필요한 실정이다.[1]

특히, 다이캐스팅 주물에 나타나는 결함의 주요원인들을 그 특성별로 분류하자면 금형의 기계적인 문제(mechanical problems), 용융금속의 야금학적 문제(metallurgical problems), 열류(heat flow)로 인한 결함, 마지막으로 용탕의 흐름(fluid flow)으로 인한 결함등으로 분류할 수 있다.

열류와 유체의 흐름과는 밀접한 관계가 있어 중력 금형주조에 관하여 최근에 일부 연구[2~4]가 진행되고 있지만 일부 연구자들은 용탕이 신속히 충전되어 비교적 열류의 영향이 적은 다이캐스팅 주조법에 있어서 주조결함의 85%가 용탕의 흐름으로 인하여 발생한다고 보고 있다[5~6].

따라서 건전한 주물을 제조하기 위하여 다이캐스트 금형설계의 최적화 작업은 주형충진거동(mold filling)에 의해 발생하는 거동을 사전에 관찰함으로써 이룰수 있다고 생각한다.

다이캐스트 주물의 금형공동부 내에서 탕류거동을 측정하는 방법으로는 실제 금형공동부에 센서를 부착하는 방법, 수모델 실험, 수치해석에 의한 computer simulation등의 실험이 금형설계에 응용되고 있다[7~12].

본 연구에서는 실제 금형공동부에서 센서를 부

국민대학교 금속재료공학과 (Dept. of Metallurgy and Materials Eng., Kookmin University)

착하여 유동을 관찰하는 방법은 금형이 불투명하고 용탕이 고온, 고압으로 충전되는 관계로 유동 관찰이 곤란하여 투명한 수지 주형을 이용하여 수모델 실험에 의한 탕류거동을 동적관찰을 한 후, computer simulation을 한 결과와 비교하여 탕류에 의한 결함의 발생요인과 탕류 거동과의 관계에 대하여 조사하였다.

2. 실험방법

수모델 실험장치는 Fig. 1과 같으며 용탕의 주입시에 각 부분에 도달하는 시간을 센서를 통하여 측정하였다. 이 센서들에서 감지한 data들은 data acquisition을 통하여 computer로 보내지며, computer에서 받은 data는 graphic으로 처리되어 공동부내에서 탕류의 거동을 관찰할 수 있게 하였다.

고속카메라로 촬영을 병행하여 충전거동을 재확인 하였다. 수모델 실험에 사용된 물의 sensing효과를 높이기 위하여 전도성을 크게 하는 NaCl을 첨가하였고, 비디오 촬영시 충전거동을 뚜렷이 나타내기 위하여 유색(검정색) 잉크로 착색하여 실험을 수행하였다.

금형은 투명수지판을 CNC밀링기에 의하여 Fig. 2와 같이 삼각판형, open frame 및 flat disc 공동부,(이하 삼각판형, open frame형, flat disc형 이라함)을 가공하였으며, 각 공동부에 150개의 센서를 부착하여 탕류의 유동을 10^{-5} sec까지 측정하였다.

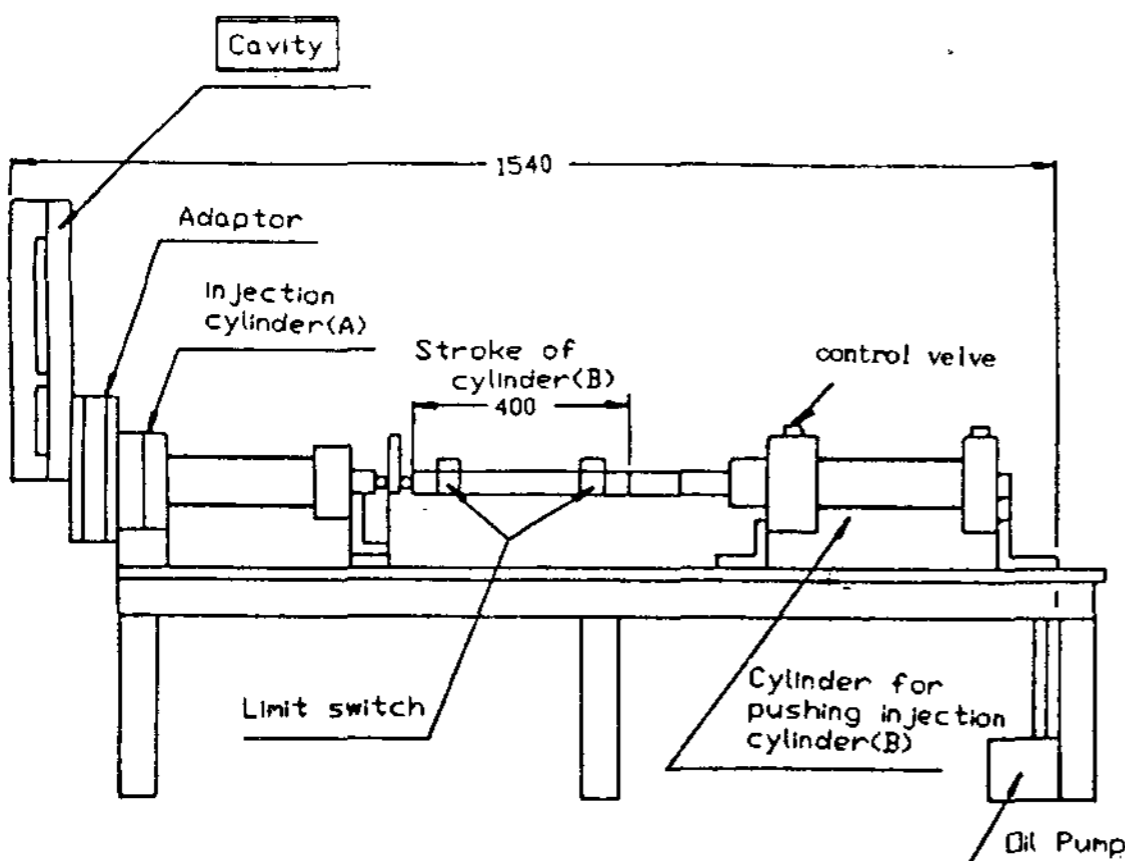


Fig. 1. Water model experimental injection apparatus.

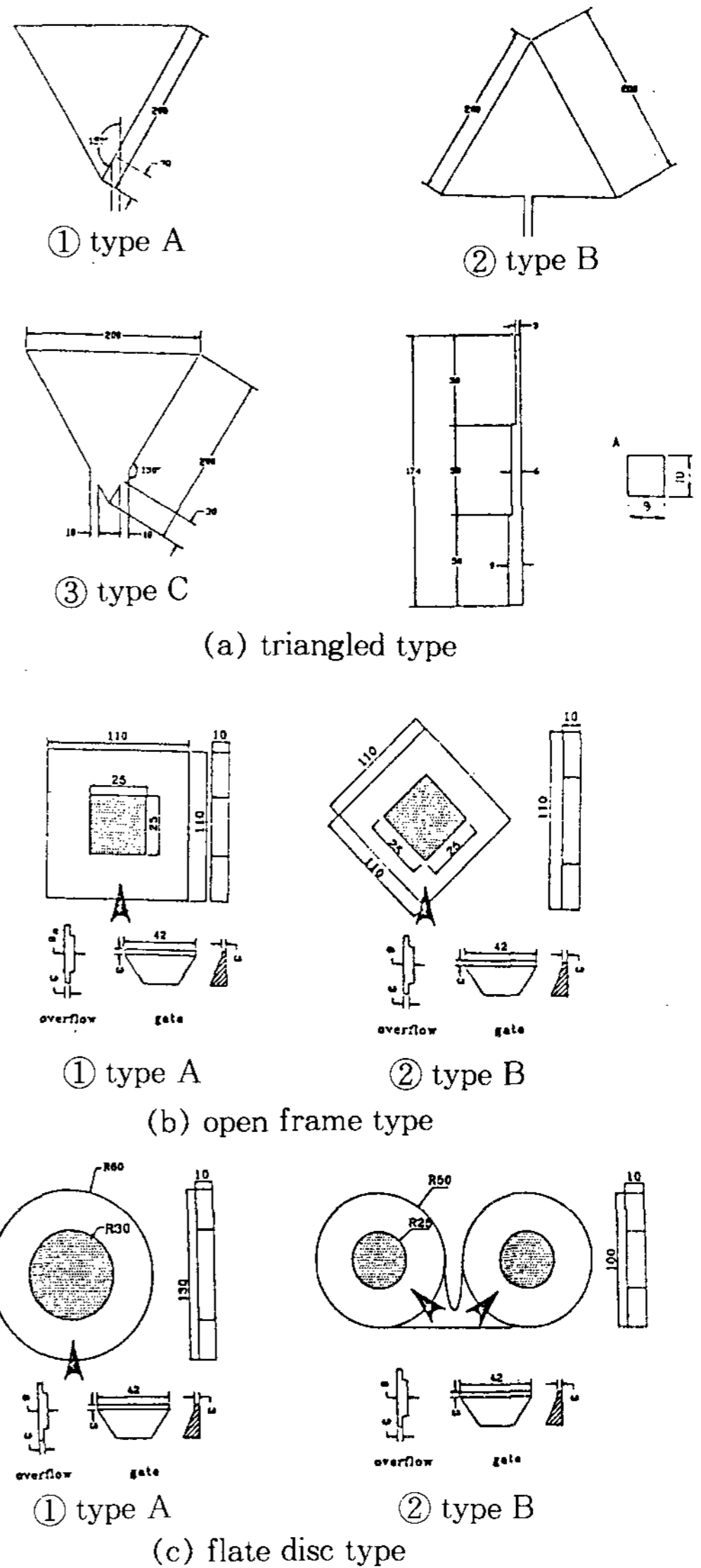


Fig. 2. Configurations and dimensions of various water model cavities.

또한, Table 1에 나타낸 바와같은 parameter를 사용하여 workstation(Sylicon graphic, 85 Mix)에서 Easy-Flow 3D program[13]으로 computer simulation을 하여 수모델 실험 결과와 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 삼각판형내에서의 탕류의 흐름

삼각판형내의 계단에 45°의 각을 주었을 때와

Table 1. Parameters used in simulation

CELL SIZE	$\Delta X = 3.8\text{mm}$ $\Delta Y = 3.8\text{mm}$ $\Delta Z = 2.25\text{mm}$	KINEMATIC VISCOSITY	$\nu = 0.01\text{cm}^2/\text{sce}$
CELL NUMBER	$53 \times 45 \times 4 = 9540$ (triangled)	GATE SPEED	2.0m/sec(triangled)
	$30 \times 32 \times 13 = 12480$ (flat disc)		1.0m/sec(open frame, flat disc)
	$34 \times 39 \times 13 = 19248$ (open flame)		
MARKER NUMBER	64markers/cell ($4 \times 4 \times 4$)	BOUNDARY CONDITION	no slip on the wall

직각을 주었을 경우를 비교하였고 주입구의 위치와 공동부 두께에 변화를 주어 실험하였다.

Fig. 3은 type A내에서 계단의 형태에 따른 주입거리에 대한 순간 충전속도와의 관계를 나타낸 것이다. 사출속도는 두 경우 모두 1.2m/s이었다.

이 그림으로 부터 45°의 경사각을 갖는 계단에서의 충돌에 의한 운동에너지의 손실이 직각형태의 계단에 비하여 작기 때문에 주입초기의 충류의 형태가 불규칙한 난류를 적게 발생하여 속도가 크게 되고, 최종 충전부에서는 공동내 잔류공기의 압력이 상대적으로 크기 때문에 속도가 감소하는 것으로 예측되었다.

Fig. 4는 직각계단이 있는 type A, B, C 즉, 주입구의 형태를 3가지로 변화시켜 주었을 때

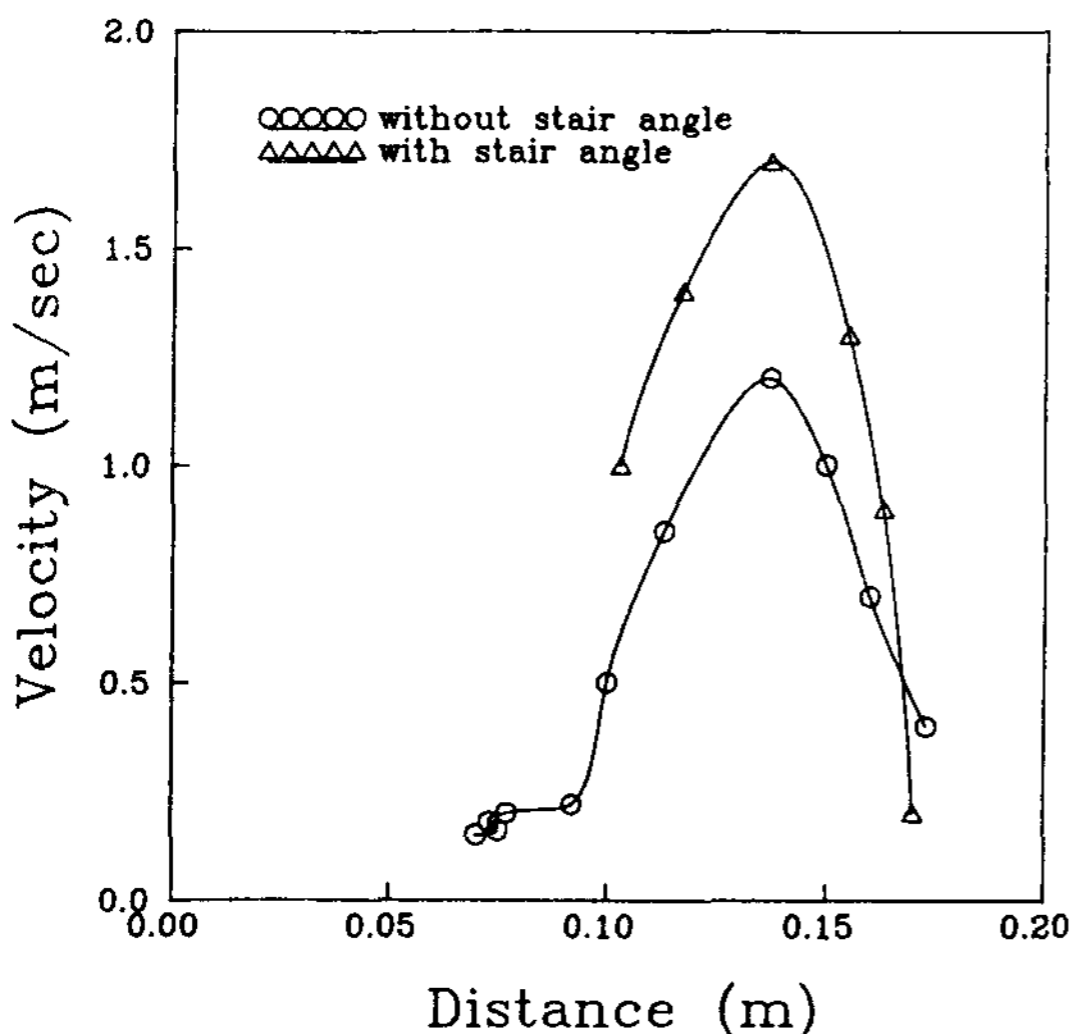


Fig. 3. Graph of the flow velocity in triangled platelike type A.

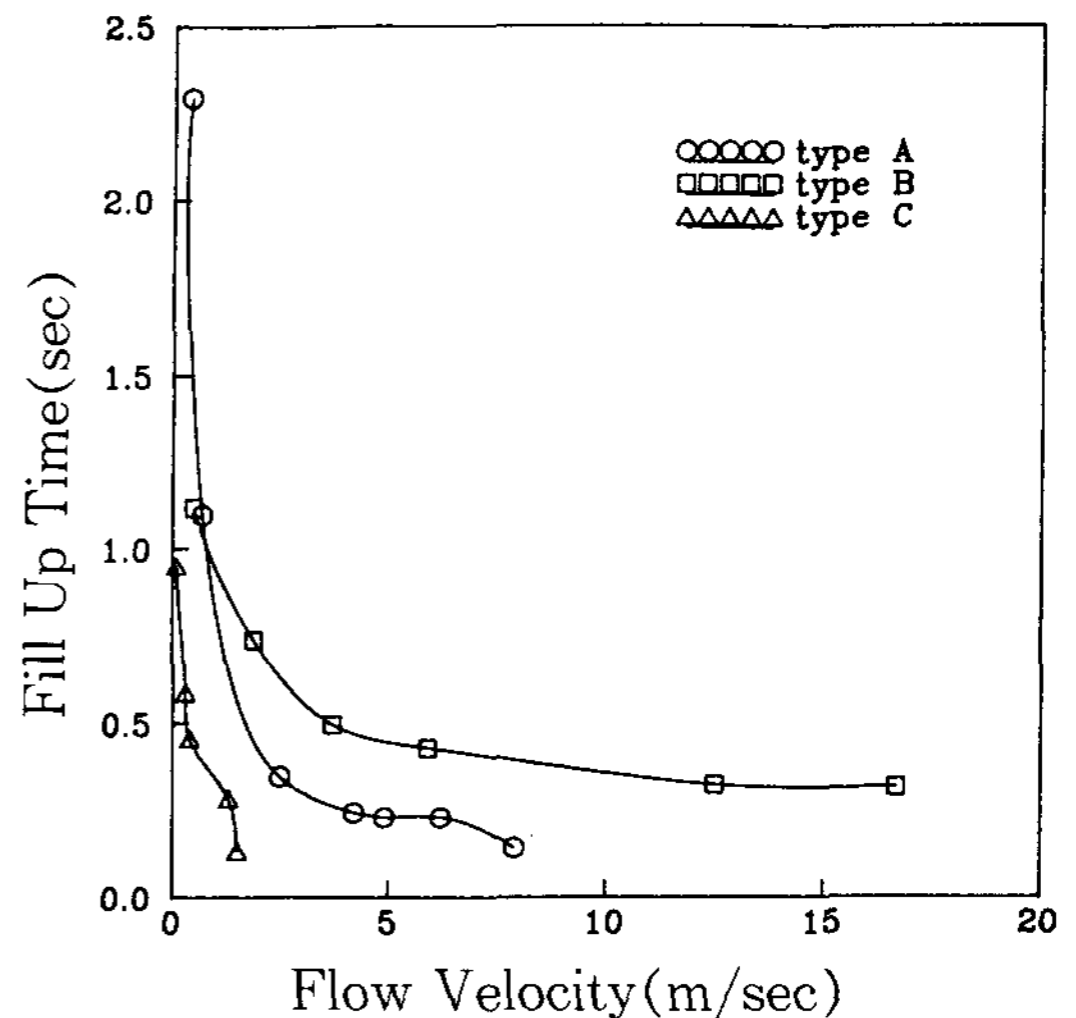


Fig. 4. Graph of injection velocity vs fill up time in triangled platelike type A, B, C.

Table 2에 나타낸 주입속도에 따른 최종 충전시간을 나타낸 것이다.

Type B는 사출된 탕류가 정면으로 충돌하여 주입된 탕류의 에너지 손실관계로 최종 충전되기까지는 많은 시간이 소요되나 type A, type C는 주입된 탕류가 경사각으로 된 면에 충돌하게 됨으로 충전시간이 비교적 빠르게 된것으로 판단된다.

또한, 주입속도가 작은 경우 type A의 충전시간이 type B보다 긴 이유는 주입구와 1차 계단과의 거리가 type B에 비하여 짧아 type B는 주입된 탕류가 계단에 바로 충돌하지 않고 최종 충전부까지 균일하게 충전되는 것도 그 원인이 되는 것으로 생각된다. 한편 type A와 type C의 관계에 있어서는 주입구 단면적이 커서 주입량이

Table 2. Injection velocity at gate outlet

type	Injection velocity(m/sec)							
type A	0.4	0.7	2.1	2.5	4.2	4.9	6.2	7.9
type B	0.5	1.9	3.7	4.2	5.9	8.0	12.5	16.7
type C	0.1	0.3	0.4	0.7	1.2	1.3	1.5	1.7

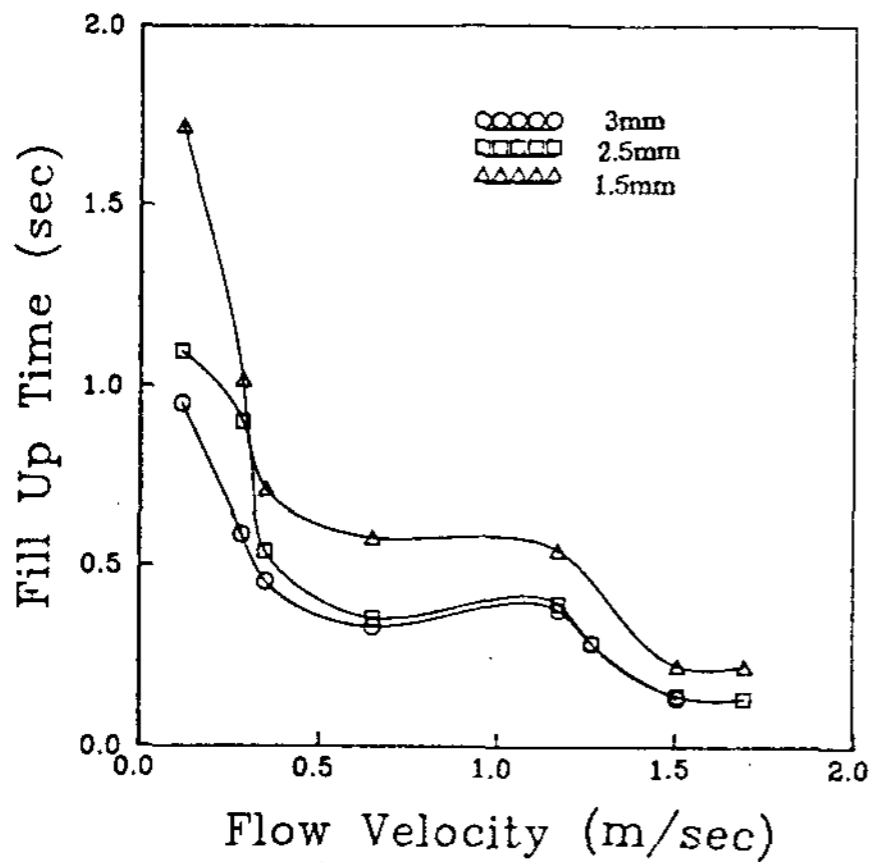


Fig. 5. Graph of injection velocity vs fill up time in different thickness of cavity.

많기 때문에 type C의 충전시간이 가장 짧아졌다.

Fig. 5은 공동의 두께를 3mm, 2.5mm 및 1.5mm로 변화시켜 주입속도와 최종충진과의 관계를 나타낸 것이다. 두께가 얇을수록 공동내의 잔류공기의 배출이 원활하지 못하여 잔류공기의 배합의 영향으로 최종충진 시간이 늦어지며 또한 탕류전체의 공동부의 두께가 얇아지므로써 벽에 의한 표면마찰력이 크게 작용하여 탕류중심부의 흐름에도 표면마찰이 영향을 주어 최종충진 시간이 늦어지는 것으로 추측된다. 또한 공동부의 폭과 두께의 비가 클수록 난류가 심하게 되는 것도 관찰되었다.

Fig. 6은 type A에서 사출속도가 0.4m/s인 경

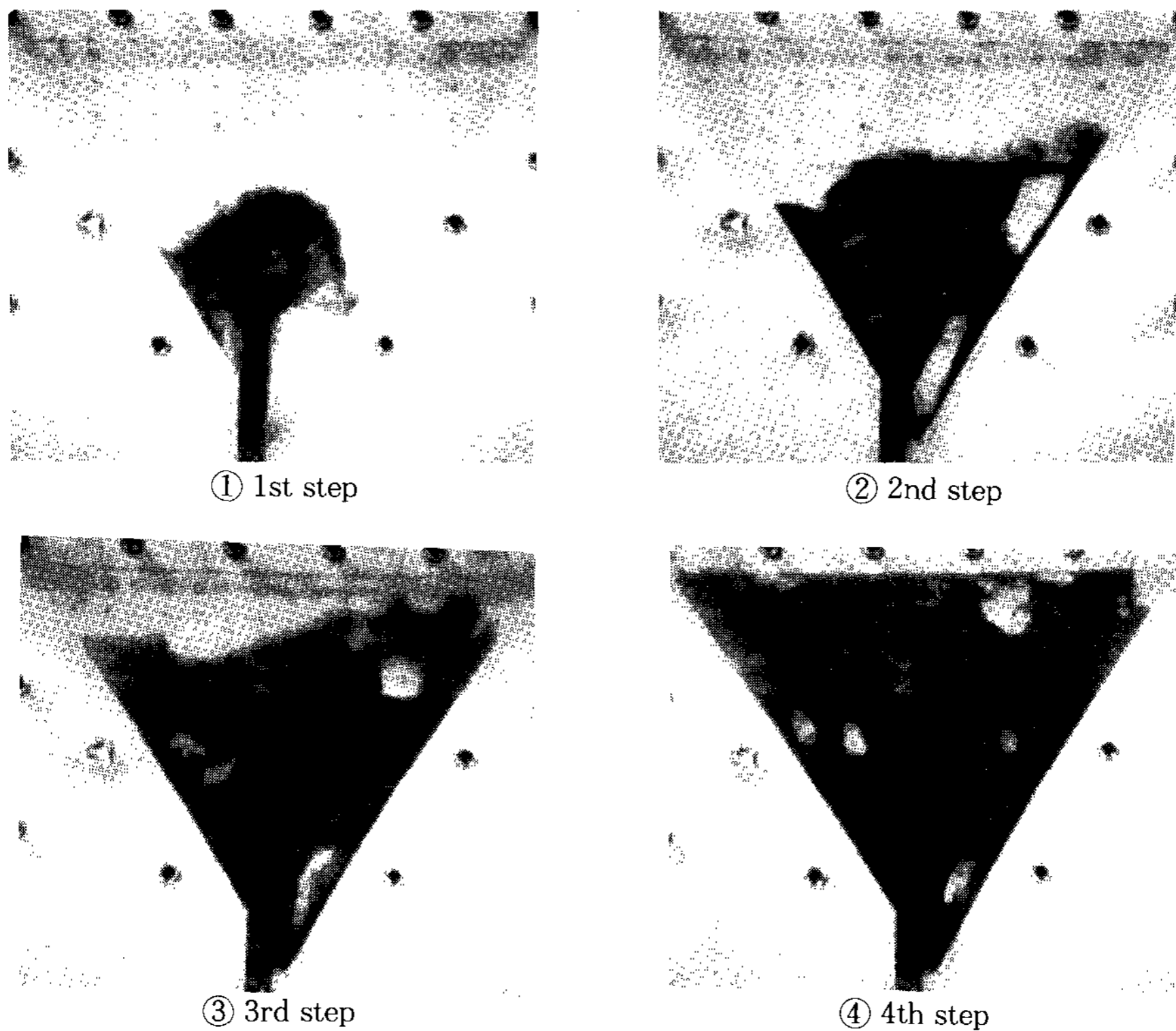


Fig. 6 Flow behavior in triangled cavity type B observed by high speed camera.

우의 공동내에서 시간에 따라 충전하고 있는 탕류의 거동이다. 주입초기 1차 계단에 충돌한 탕류는 탕류의 방향이 바뀌면서 공동내의 일부공기를 포위하면서 진행되어 속도가 감소하게 된다. 따라서 탕류는 계단 아래부분을 완전히 충전시킨 후 air pocket을 발생하여 탕류와 더불어 운반되면서 안정된 형태로 최종 충전부까지 충전하는 형태를 나타내고 있다. 이와같이 탕류의 방향의 급격한 변화는 air pocket을 발생하게 되어 바람직하지 않다.

Fig. 7은 type B에서 사출속도가 0.5m/s인 경우로써 주입직후 탕류가 중심부 속도가 크고 외각부는 낮게되어 초기부터 완전한 부채꼴 형태로 진행하다가 계단에 중심 선단부가 충돌하여 역향으로 충전되므로 큰 와류를 발생시켜 공기를 포위하여 큰 air pocket을 형성하면서 상부벽에 충돌한 다음 거의 직선적으로 되돌아 온후 최종부위를 충전할때까지 내부에 남는 것을 관찰되었다. 이와같은 와류에 혼입된 공기를 와류의 중심

은 압력이 낮게되어 외부로 배출되기 어렵게 되어 공기나 개재물의 혼입을 예상할 수 있다.

Fig. 8는 type C에서 사출속도가 1.7m/s인 경우로써 두개의 주입구로 부터 사출된 탕류가 유속이 빠르기 때문에 공기도 전방으로 신속히 운반되어 가장 안전된 충전 거동을 나타내고 있다.

3.2 Open Frame형 내에서의 탕류의 흐름

Fig.9는 type A에 air vent를 상부에 3개 저부에 2개를 설치한 경우로써 사출속도는 0.23m/s이다. 그림에서 나타낸 바와같이 사출 초기에는 매우 빠른 속도로 충전하던 탕류는 가운데 있는 장애물의 충돌로 인해서 장애물쪽에서 탕류가 spiting 및 splash를 발생하고 장애물 접촉면 부근에서는 탕류의 속도가 충돌로 인한 운동에너지의 감소로 작아지나 외측에서는 비교적 저항이 작은 속도로 유지되어 심한 난류를 일으키면서 air pocket을 형성하여 충전이 완료되는 것이 관찰되었다.

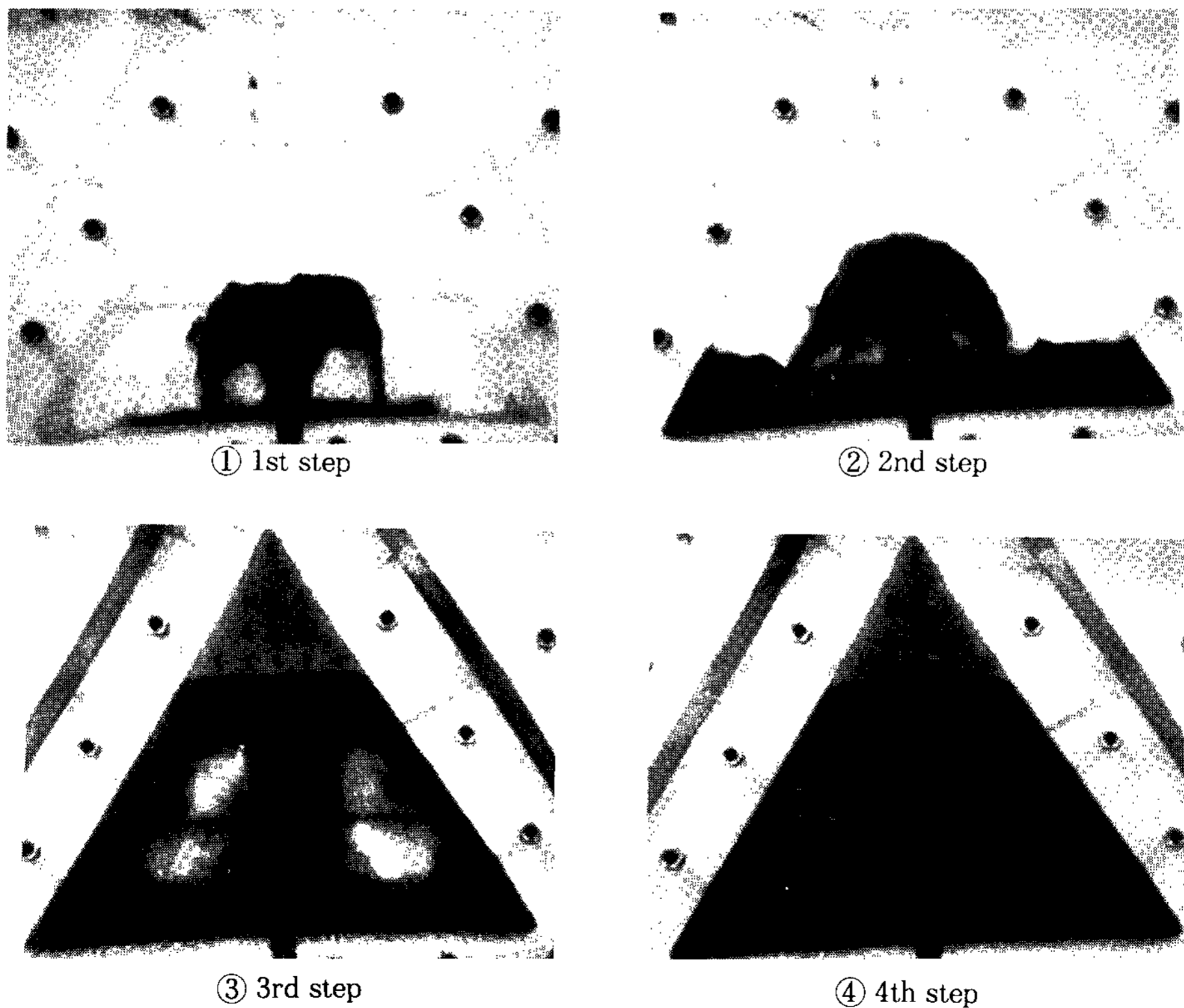


Fig. 7. Flow behavior in triangled platelike type B observed by high speed camera.

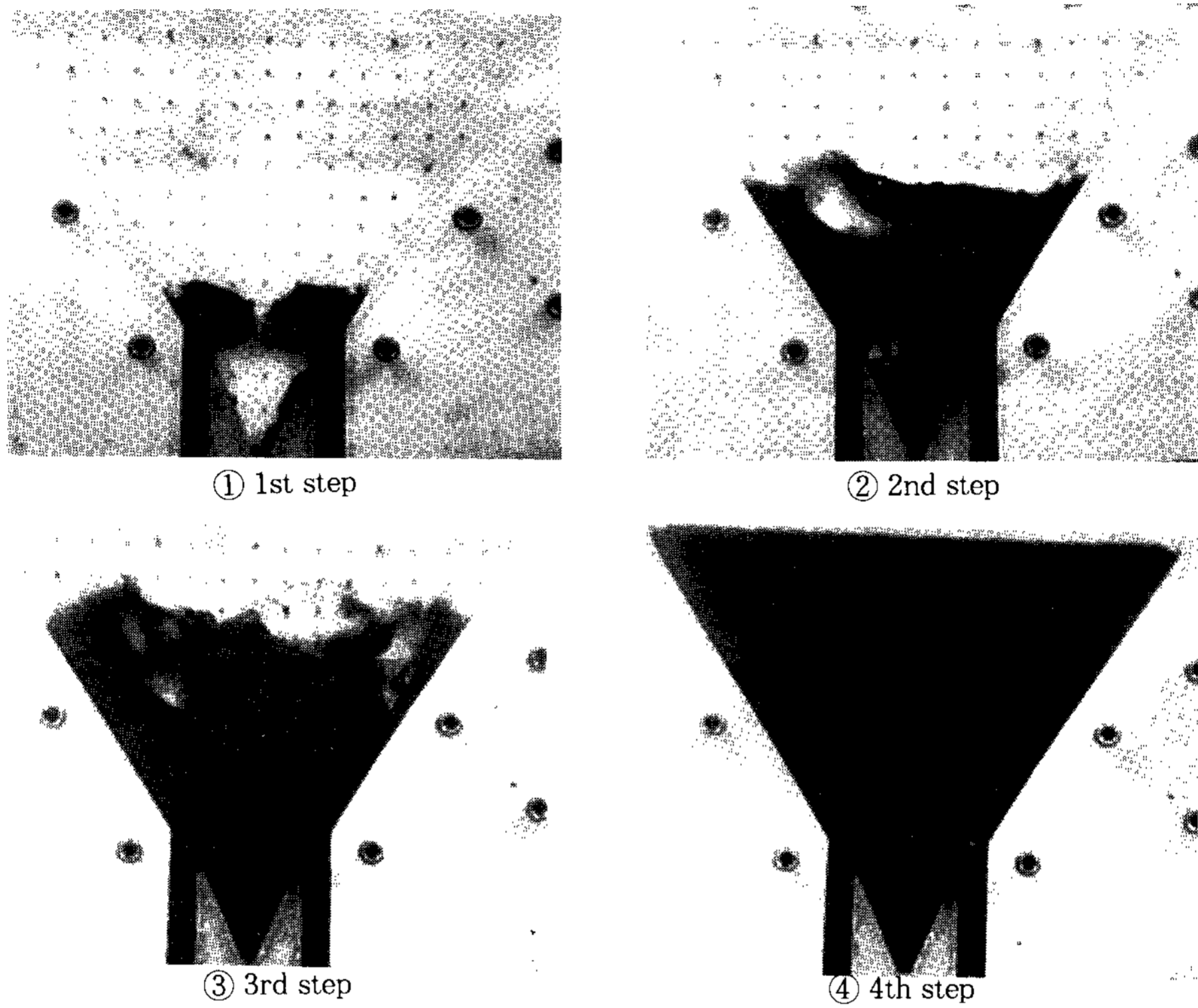


Fig. 8. Flow behavior in triangled platelike type A observed by high speed camera.

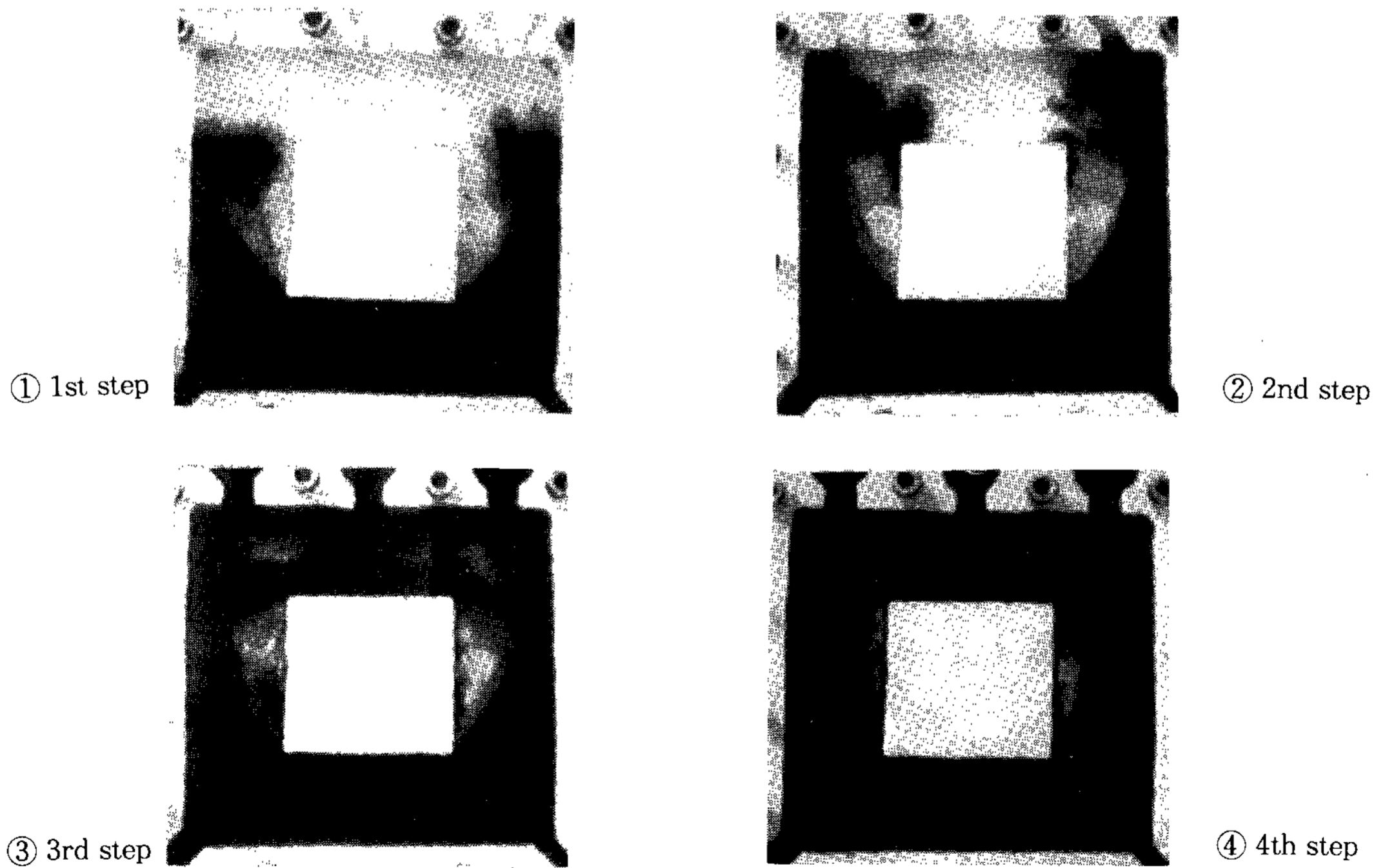


Fig. 9. Flow behavior in open frame type A observed by high speed camera.

Fig. 10 (a)는 type A에서 저면에 air vent를 설치하지 않은 경우이고, (b)는 설치한 경우의 flow line을 나타낸 것이다.

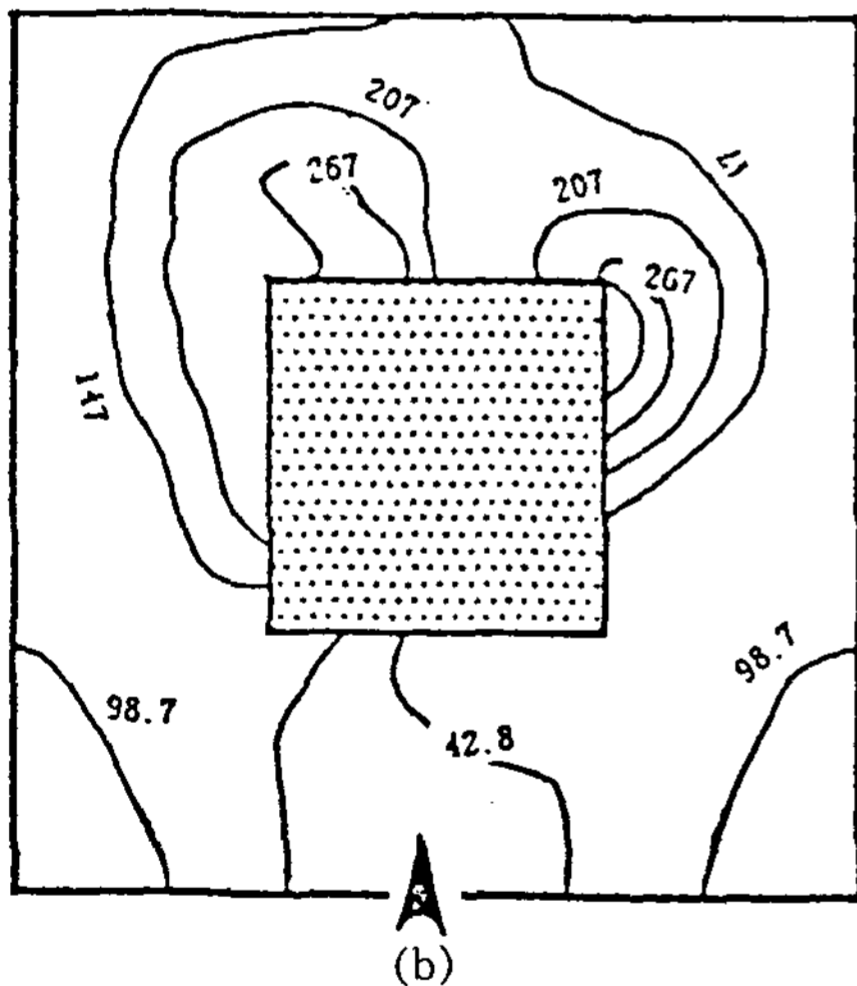
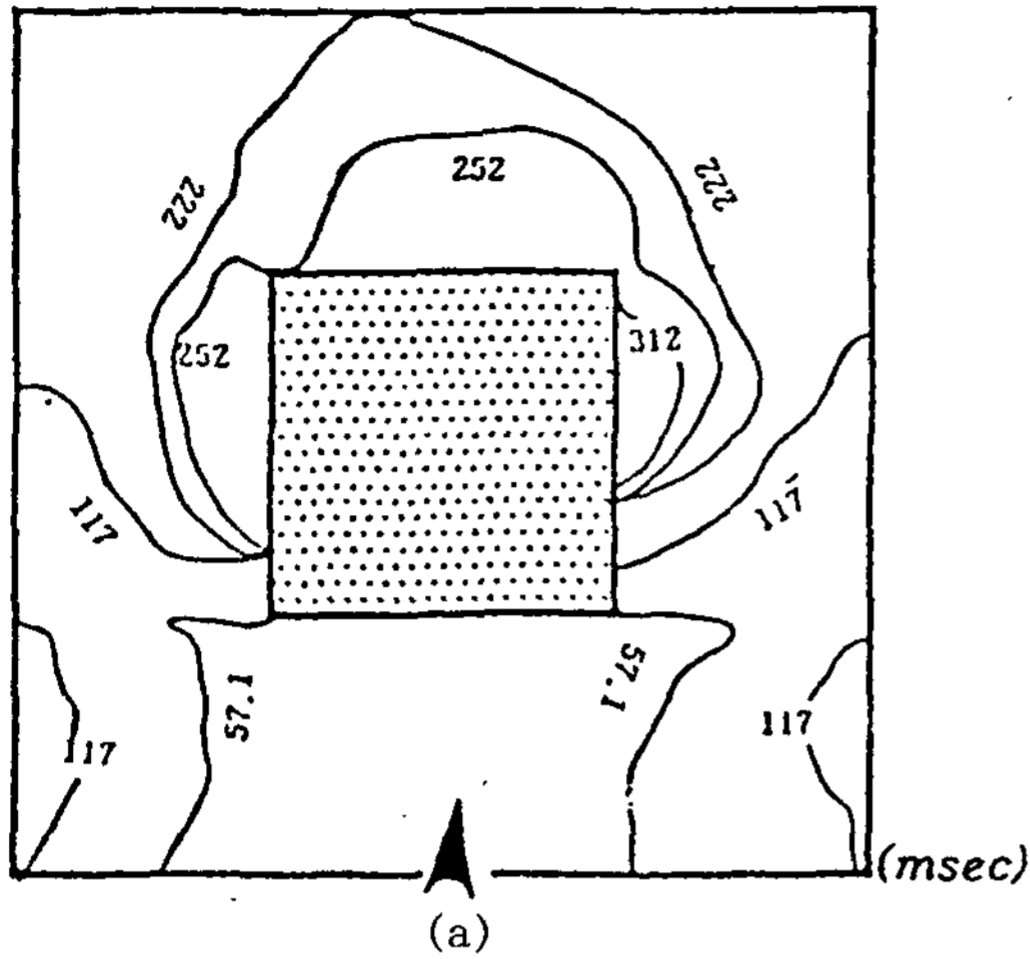
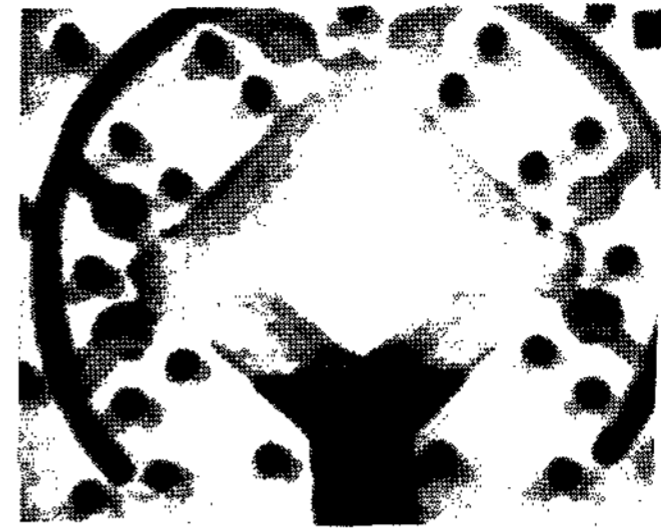


Fig. 10. Flow line in open frame type A by water modeling test.

(a)에서는 0.267sec에 충전이 완료되었다. 충전시 air pocket을 형성하며 완료되었으나 (b)에서는 air vent를 설치한바 와류가 심하지 않게 되었다.

탕류의 진행동안에 와류현상과 최종충진이 완료될때까지 기포의 형성등이 관찰되었다. 따라 Fig. 11은 type B로서 주입구의 위치를 모서리부로 바꾸어 주어 0.28m/sec로 충전시킨 경우로서



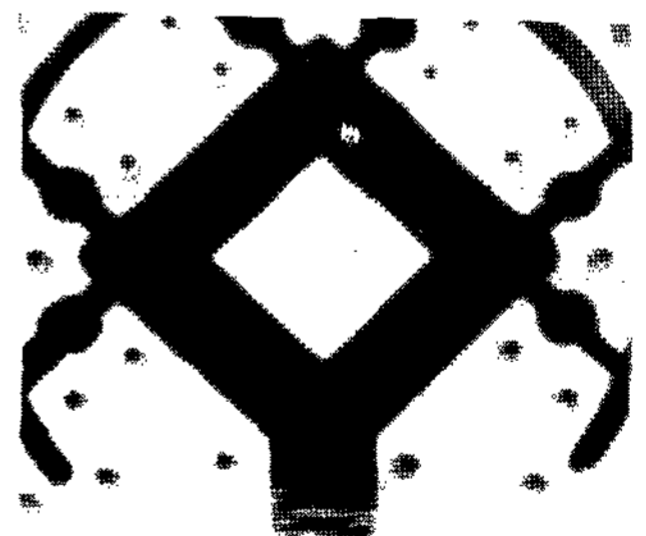
① 1st step



② 2nd step



③ 3rd step



④ 4th step

Fig. 11. Flow behavior in open frame type B observed by high speed camera.

충돌하는 장애물이 경사각이 있기 때문에 비교적 에너지 손실이 작게 되고 공동부내에 거의 직선적으로 진행하므로 와류현상과 기포의 형성등이 type A의 경우보다 감소되었다.

Fig. 12는 type B에서 사출속도를 0.13m/sec,

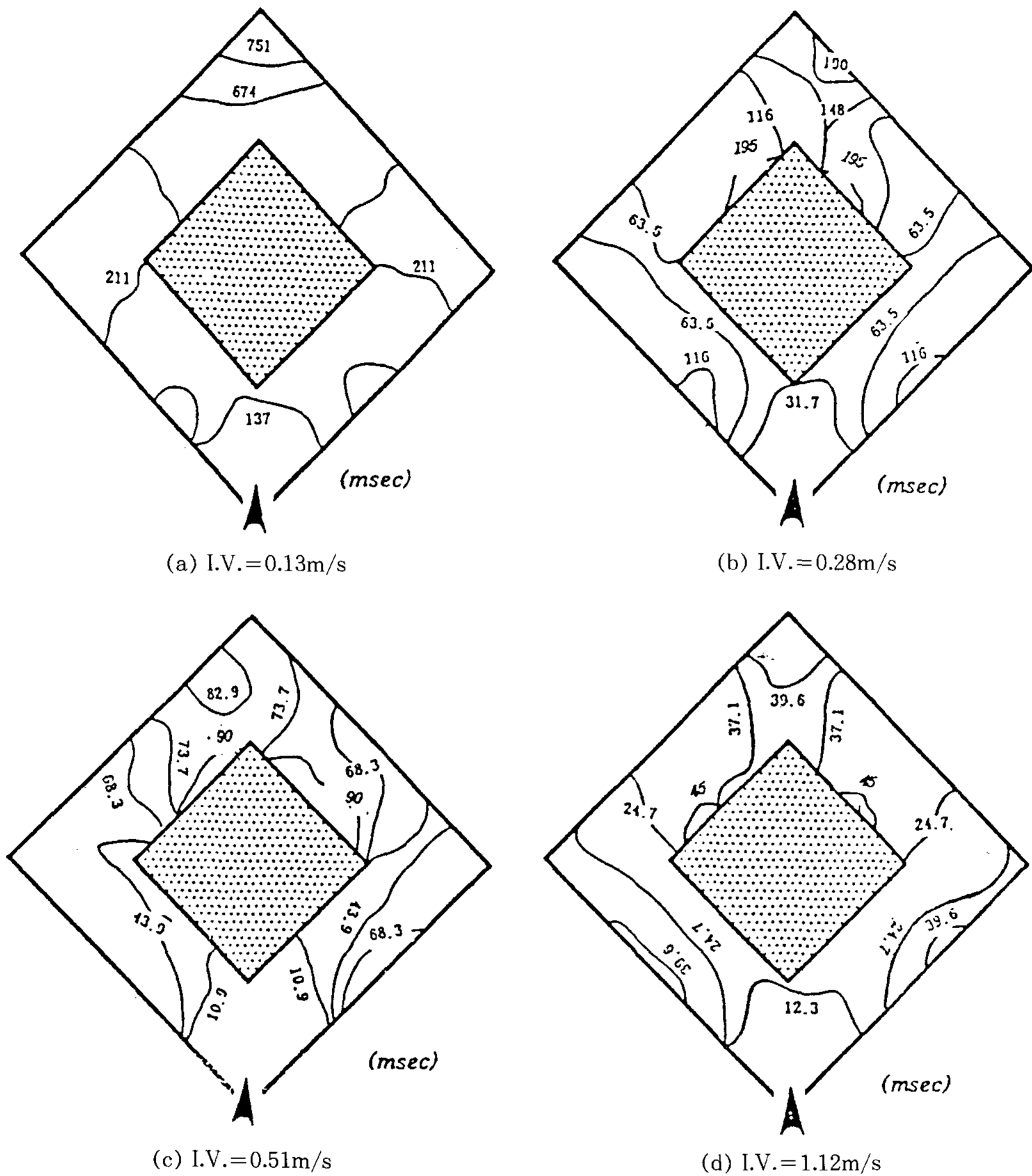


Fig. 12. Flow line open frame type B by water modeling test.

0.28m/sec, 0.51m/sec 및 1.12m/sec로 변화시켜 탕류의 충전거동을 등시간 곡선으로 나타낸 것이다. 사출속도의 증가에 따라 최종 충전시간이 짧게 되었으나 air pocket생성이 비교적 많이 나타났다. 그 이유는 탕류가 높은 속도로 충전되는 동안 공동내의 벽에 계속된 심한 충돌로 인하여 탕류가 벽으로 부터 떨어져 발생한 심한

splash 및 난류로 인하여 air pocket이 발생된 것으로 판단되었다.

3.3 Flat disc형 내에서의 탕류의 흐름

Fig. 13(a)는 flat disc type A에서 사출속도가 0.23m/sec일때 air vent의 위치를 변화 시킨때의 충전거동을 나타낸것으로 상부의 3개의 air vent

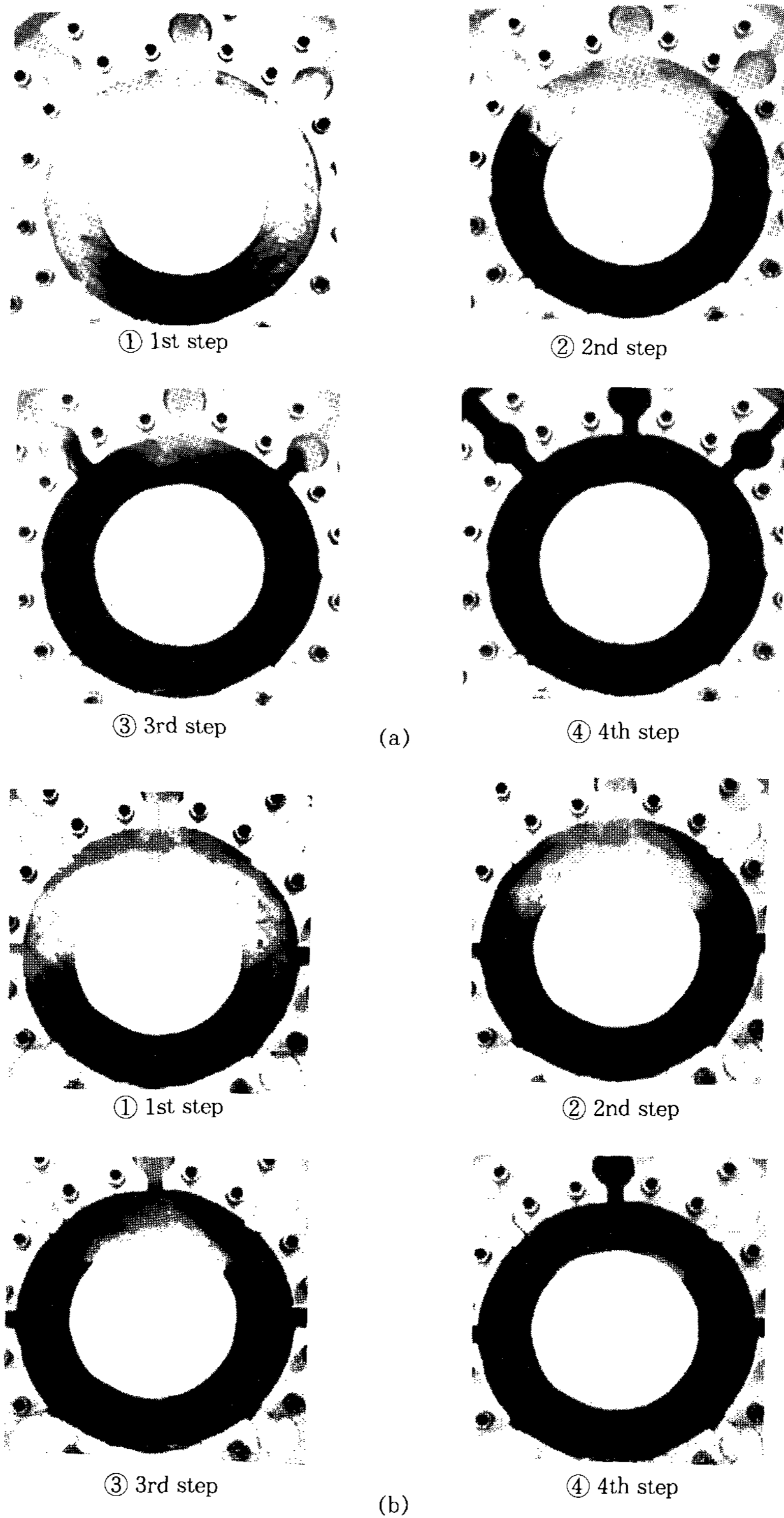


Fig. 13. Flow behavior in flat disc type A observed by high speed camera.(a) (b)

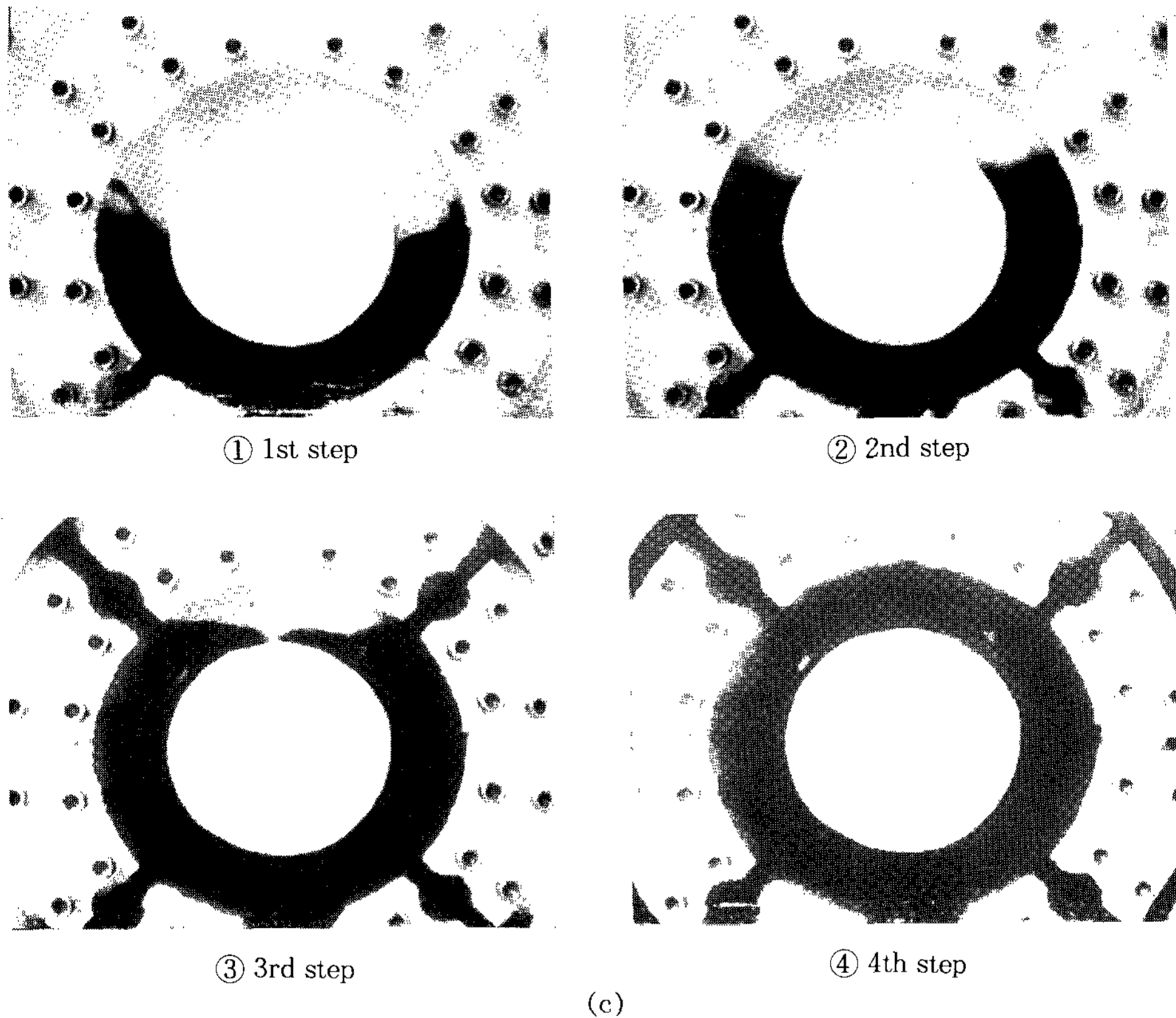


Fig. 13. Flow behavior in flat disc type A observed by high speed camera.(c)

를 설치한 경우로 원형의 공동내에서의 탕류의 흐름은 와류 현상등을 관찰되지 않고 장애물 근처에서 충돌로 인한 현저한 splash발생이 나타났으나 비교적 충전거동이 안정되었다. 용탕이 합류하는 때의 충돌에 의하여 약간의 와류가 발생하였다.

(b)는 상부 양측면에 각각 1개씩 air vent를 설치한 경우로써 초기에 상부의 air vent가 1개 밖에 설치되어 있지 않아 급속히 탕류가 진행할 때 공동부 상부에서 순간 공기압력의 영향을 받고 또한 양측면의 air vent로 탕류가 배출되어 충전시간은 (a)보다 길게 나타났고 비교적 splash발생이 적었으나 상부 합류되는 장소에 작은 air pocket이 발생하였다.

(c)는 일정한 간격으로 4개의 air vent를 설치한 경우로써 하단부의 공동부와 air vent의 교차부분에서 splash현상이 초기에 발생하여 심한 와

류가 발생하였으나 압력의 영향을 적게 받아 충전시간은 짧게 나타났으나 내부에 air pocket이 남은 것이 관찰되었다. 따라서 (a)의 경우에서 제일 양호한 충전결과를 얻을 수 있었다.

한개의 탕도로 부터 2개의 공동부를 가진 flat disc type B에 0.25m/sec의 사출속도로 충전했을 때 탕류의 진행과정을 Fig. 14에 나타내었다. (a)의 경우는 air vent를 공동부내에 붙이지 않은 경우로써 충전시 중간 부분에서 약간 지연되었는데 이것은 용탕 선단부에 걸린 공기 압력 때문이라고 생각된다. 충전완료 시간은 0.127sec이었으며 이때 공기가 혼입된 상태를 나타내었다.

(b)의 경우는 사출속도를 0.5m/sec로 2배 증가시킨 결과로써 0.25m/sec에서 보다 오히려 충전완료 시간이 길게 나타낸것으로 보아 공동부내의 공기압이 충전속도에 민감하게 작용한다는 것을 확인하였다. 또한 (c)와 같은 공동부내에 각

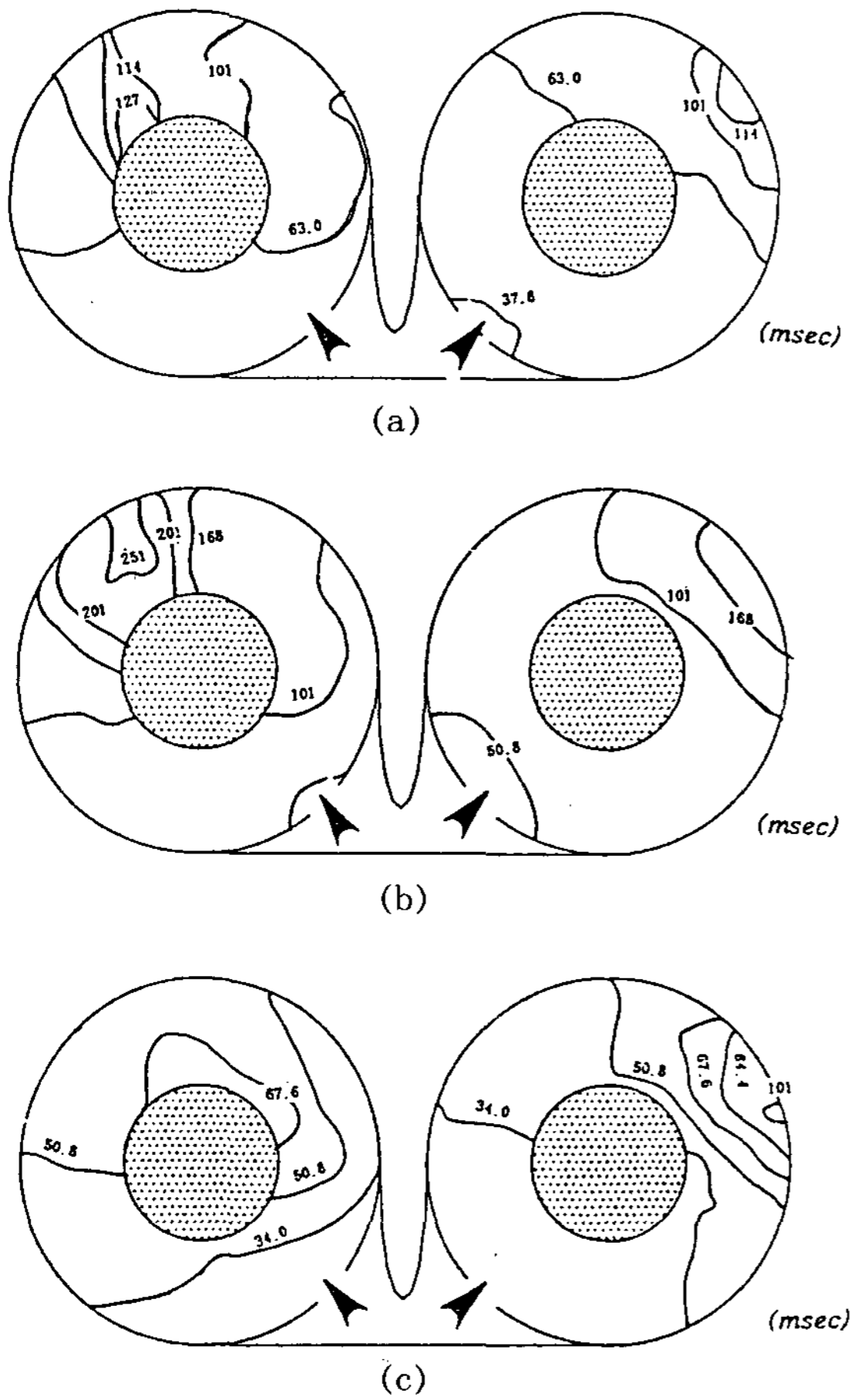


Fig. 14. Flow line in flat disc type B by water modeling test.

각 1개의 air vent를 설치하고 0.25m/sec로 사출한 바 충전완료 시간이 (a)의 경우보다 약 2배 빨라지는 것을 알수 있었다. 그 이유는 공동부내에 air vent가 설치됨으로써 공기가 신속히 배출되어 압력의 영향이 적었다는 것이 재확인되었다.

이 경우에도 역시 장애물의 충돌로 인한 splash가 발생하여 주입구 방향의 장애물 표면부에 air pocket이 형성되었다.

3.4 Computer simulation 실험

cell의 수를 삼각형, open frame형 및 flat disc형의 경우에 각각 9540, 19248, 12840개로 나누어 simulation하였다.

본 실험에 응용한 탕류해석 program(Easy-Flow 3D)의 원리는 다음과 같다. 주입후 주형을 채워 들어가는 용탕의 유동을 해석하기 위하여 용탕의 내부의 속도 뿐만 아니라 용탕과의 대기가 접촉하는 부분, 즉 용탕이 지니고 있는 자유표면을 추적하여 자유표면의 형상과 위치를 인식하기 위하여 Eulerian좌표계 접근과 Lagrangian좌표계 접근을 효과적으로 결합하여 사용되었다. 즉 계산영역을 많은 수로 구성된 Eulerian cell로 분할하여 각 cell에서의 속도를 계산하면서 그와 동시에 Lagrangian입자들(Marker 또는 Particle)을 계산영역에 분산시켜 이들을 추적함으로써 자유표면의 위치를 계산하였다.

용탕내부의 3차원 유동현상을 계산하기 위하여 Eulerian좌표계 상에서 모든 지배방정식을 차분하였고, 3차원 marker들을 공동부내에 주입시켜 이들의 움직임을 계속적으로 추적함으로써 유체 영역과 자유표면 영역을 분류하였다. 이렇게 분류된 각 cell영역에서 서로 다른 방법으로 유체의 압력과 속도를 계산하였다. 이와같은 방법으로 일부 공동부에 적용한 computer simulation결과를 Fig. 15에 나타내었다.

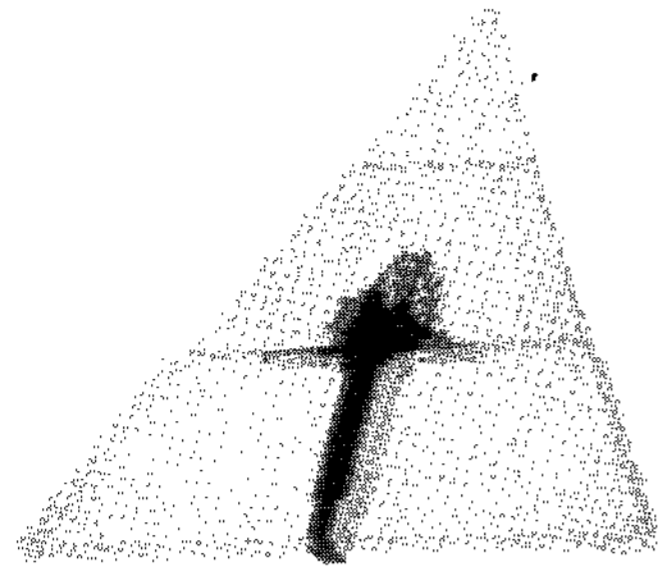
Fig. 15 (a)는 삼각판형 type B의 공동부에 대하여 Table 2.와 같은 parameter를 이용한 simulation결과이다. 1차 계단에서 충돌한 후 와류가 발생하며 일부 탕류가 역류하여 air pocket을 형성하면서 부채꼴 형태로 퍼지면서 전진하는데, 이 현상을 수모델 실험결과와 와류 발생위치 및 진행 방향이 비교적 일치 하였다.

그러나 충전 과정에 있어 탕류가 오른쪽으로 치우친 현상은 computer를 이용하여 계산하는 과정의 문제점으로 계속적으로 연구되어야 할 과제라고 사료된다.

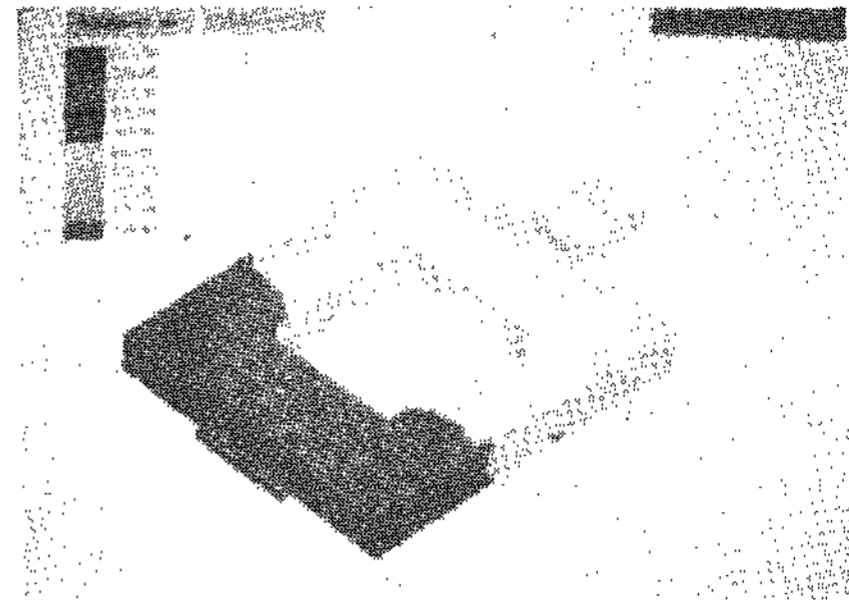
(b)는 open frame형성에 air vent를 한개만 상단에 설치한 경우로써 충전방향은 수모델의 경우와 거의 일치하나 초기 충전시 장애물과 충돌하여 splash가 발생하면서 탕류가 역류하여 air pocket을 형성하는 거동이 완전히 일치하지는 않았다.

(c)는 flat disc형으로써 탕류의 충전방향이 거의 일치하고 있으나 최종충진부에서 내부에 air pocket의 형성은 자세히 관찰할 수 없었다.

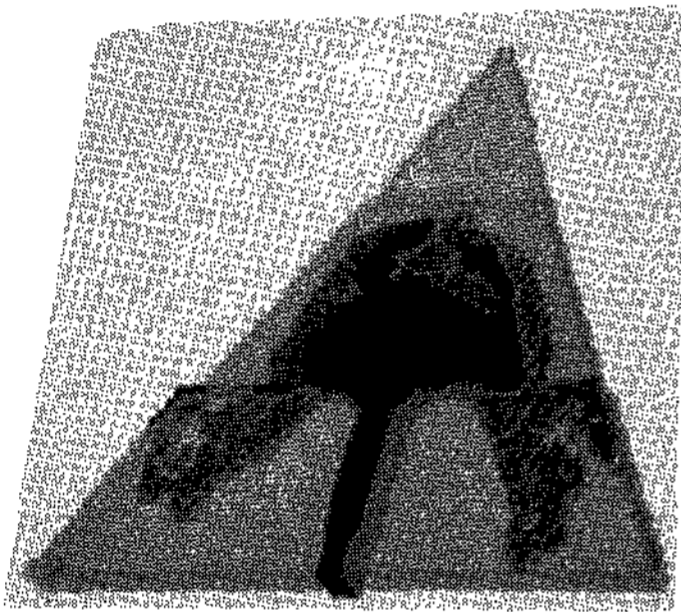
본 연구에서는 단지 등온적 조건하에서 수모델



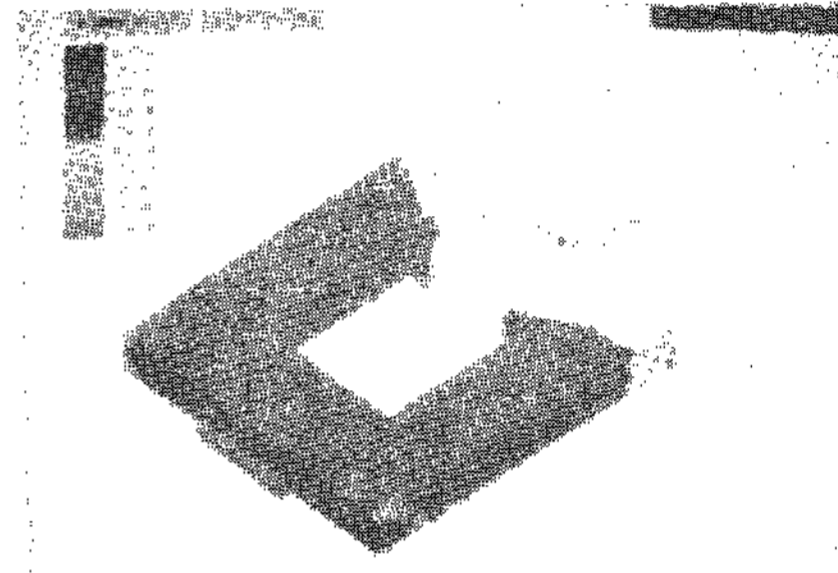
① 1st step



① 1st step



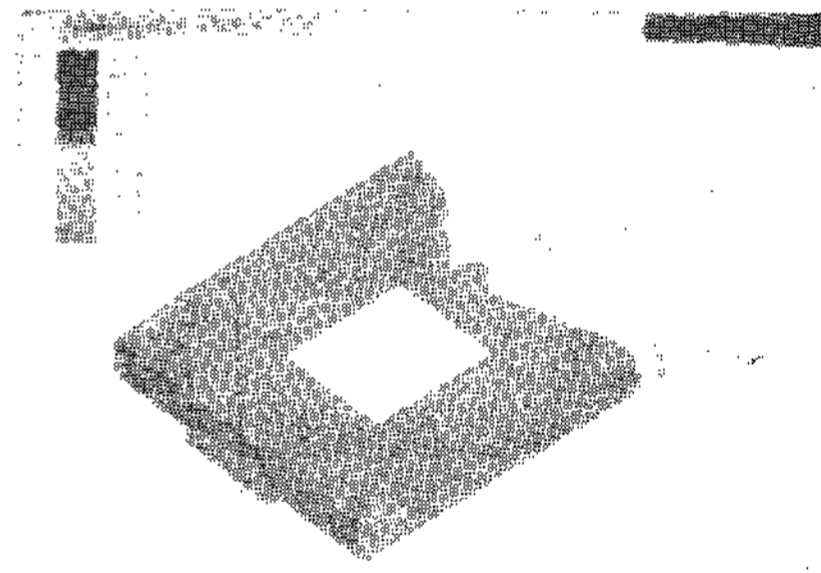
② 2nd step



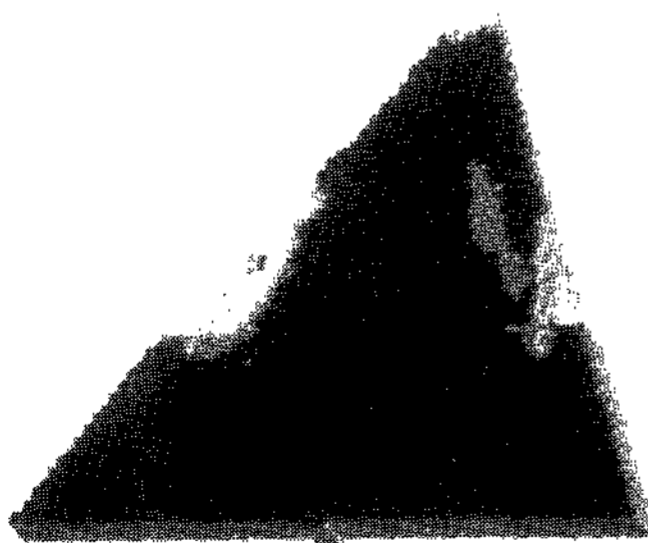
② 2nd step



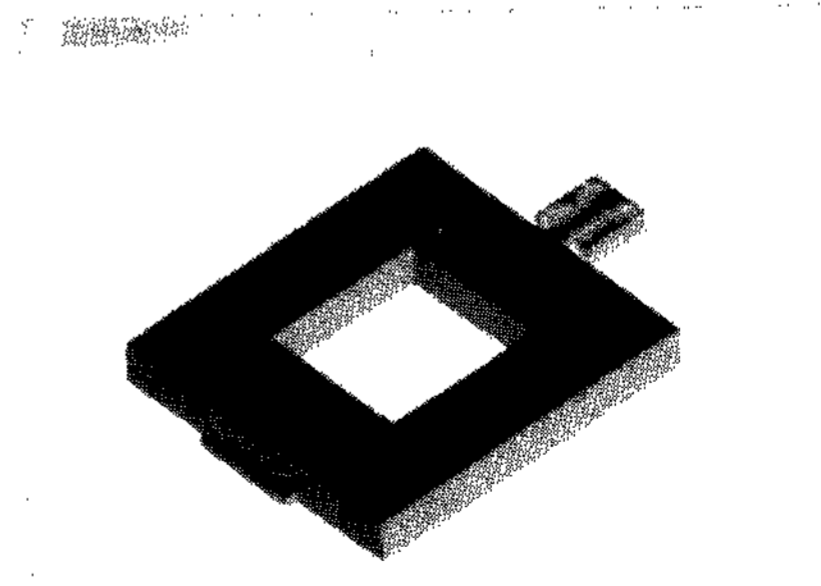
③ 3rd step



③ 3rd step



④ 4th step
(a)

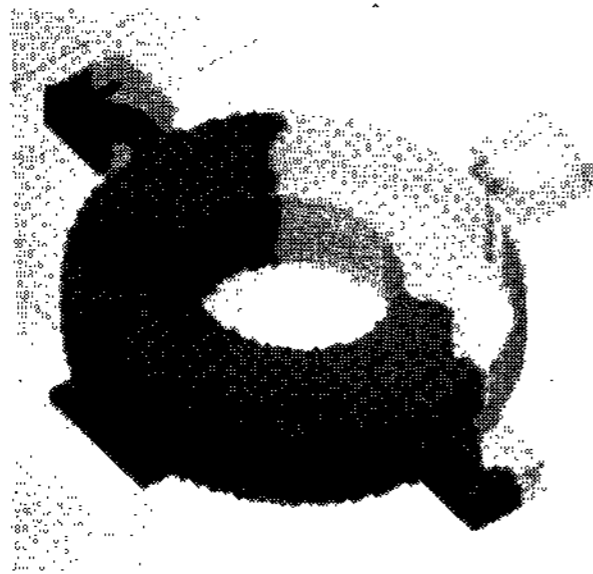


④ 4th step
(b)

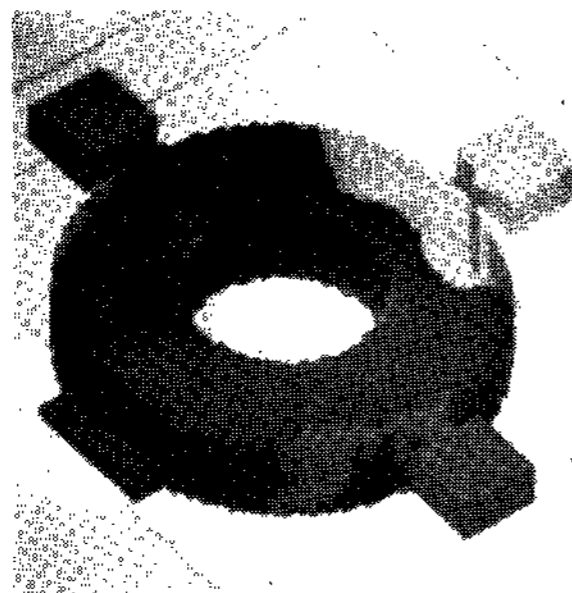
Fig. 15. The simulation results in mold filling in cavities.(a) (b)



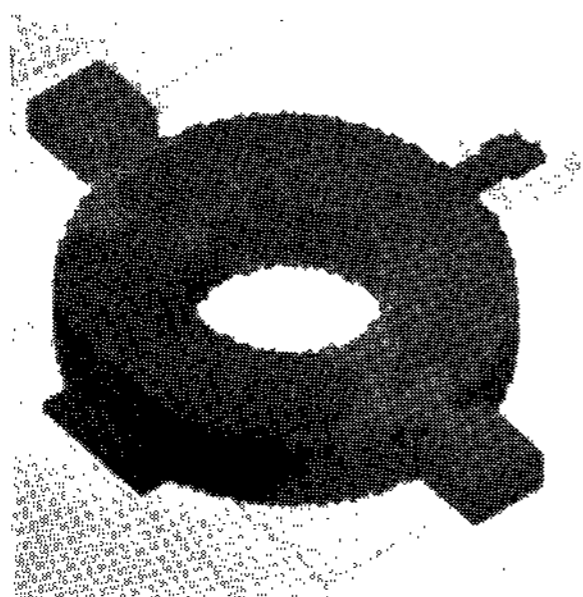
① 1st step



② 2nd step



③ 3rd step



④ 4th step
(c)

Fig. 15. The simulation results in mold filling in cavities.(c)

실험과 computer simulation에 의한 탕류의 거동을 고찰하였다. 그러나 실제 다이캐스트 조업에서는 시간에 따라 온도의 강하로 인한 점성의 증가, 때로는 spitting 및 splash등의 발생으로 인한 불안정한 충전, 조기응고로 인한 탕경 및 air pocket내의 공기가 배출되지 못하여 편홀등의 발생하는 결함이 발생하고 있으므로 앞으로 이를 예측할 수 있는 세부적인 연구도 절실히 필요하다고 생각된다.

4. 결 론

다이캐스트 주물의 삼각형, open frame형 및 flat disc형의 금형공동내에서 탕류에 관한 수모델 실험 및 computer simulation을 진행한바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 주물결함의 원인이 되는 와류가 주입구로부터 사출된 부근과 장애물 충돌직후에 심한 spitting 및 splash와 난류로 인한 air pocket이 형성되었다. 더우기 충전속도가 클수록 탕류가 공동부 벽에 충돌하여 난류가 심하게 발생되었다.

2. 주입구의 위치를 탕류의 충전방향의 급격한 변화를 작게 받도록 변경하였을때 와류는 물론 air pocket도 상당히 감소되었다.

3. 두께가 얇은 공동부내에서 충전완료 시간은 사출속도와는 반듯이 비례적으로 단축되지 않았다. 그러나 최종충진부에 air vent의 설치가 충전에 효과적이었다. 그 이유는 최종충진부내의 순간적 공기압의 감소가 그 원인으로 판단되었다.

4. Computer simulation과 수모델 실험에 의한 충전거동을 비교한바 탕류의 진행방향이 비교적 일치되어 air vent의 위치 선정등 구조방안의 활용에 도움을 줄것으로 생각 되었다. 그러나 충돌에 의한 미세한 spitting과 splash나 air pocket발생거동을 완전히 나타내지 못하였다.

후 기

이 논문은 1993년도 한국 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] D. M. Stefanescu et al; Metals Handbook, vol.15. 1988, p.286-289
- [2] I. Ohanaka; Modeling of casting, Welding and Advanced Solidification Process 1993, p.337-348
- [3] Z. A. Xu and F. Manpaey; 60th World Foundry Congress, 1993, Paper No.18
- [4] S. B. Kim and C. P. Hong; 2nd Asian Foundry Congress 1994, p.286-295
- [5] E. Niyama and K. Anzai; Material Process Vol. 34, No. 3, 1993
- [6] Y. Yamamoto, Y. Iwata and M. Nakamura; Imono, vol.60, No. 12, 1988, p. 770-776
- [7] J. K. Choi, S. B. Kim, C. P. Hong; jujo, Vol. 12, No. 1, 1992, p.40-50
- [8] J. K. Choi, D. O. Kim and C. P. Hong; 55th World Foundry Congress, 1988, Paper No. 23
- [9] K. Chijiwa and K. Shirahige; Imono, Vol. 52, No. 11. 1980, p.641-647
- [10] C. W. Chen, C. R. Li, T. H. Han, C. T. Shei and W. S. Hwang; 2nd Asian Foundry Congress, 1994, p.327-337
- [11] H. Nomura and K. Terashima; Modeling of Casting and Solidification Process, 1991, p.53-162
- [12] H. J. Lim and W. S. Hwang; AFS Trans. Vol. 97, 1989, p.855-890
- [13] 최정길, 이영철 등; 컴퓨터를 이용한 주조 기술지원 사례집, 생산기술 연구원, 1994, p.67-73