

논문

용탕단조시 Al-4.5wt%Cu합금의 조직예측

조인성*, 홍준표*, 이호인**

Modeling of Microstructural Evolution in Squeeze Casting of an Al-4.5wt%Cu Alloy

In-Sung Cho*, Chun-Pyo Hong* and Ho-In Lee**

Abstract

A stochastic model, based on the coupling of the finite volume(FV) method for macroscopic heat flow calculation and a two-dimensional cellular automaton(CA) model for treating microstructural evolution was applied for the prediction of microstructural evolution in squeeze casting. The interfacial heat transfer coefficient at the casting/die interface was evaluated as a function of time using an inverse problem method in order to provide a quantitative simulation of solidification sequences under high pressure. The effects of casting process variables on the formation of solidification grain structures and on the columnar to equiaxed transition of an Al-4.5wt%Cu alloy in squeeze casting were investigated. The calculated solidification grain structures were in good agreement with those obtained experimentally. (Received September 2, 1996)

1. 서론

용탕단조법은 용탕을 응고종료시까지 가압, 성형시키는 주조법으로서 미세 기공이나 수축공과 같은 구조결함을 제거할 수 있고 응고속도를 일정하게 할 수 있어 주조품의 성능향상과 높은 수율과 효율적인 에너지 관리가 가능한 공정으로 널리 알려져 있다. 용탕단조시 주물의 응고속도는 상당히 증가하는데, 이는 가압력에 의하여 주물과 주형간의 계면 밀착이 개선되기 때문이다. [1] 용탕단조 주물은 따라서 일반 주조품보다 미세한 응고조직을 얻을 수 있다.

용탕단조시 주물의 응고특성은 주조품의 생산성 및 품질과 밀접한 관계가 있기 때문에, 응고과정을 제어할 수 있는 정량적인 연구가 중요하다. 그러므로 이러한 목적에 컴퓨터 시뮬레이션을 적용하는 것은 상당히 높은 잠재력을 가지고 있다. 기계적 성질과 밀접한 관계가 있는 응고조

직은 열전달 특성과 많은 관련이 있다. 용탕단조시 열전달은 주로 주형/주물간 계면열전달 계수에 의해 크게 지배받는데, 최근 고압하에서의 응고시 열전달 계수의 평가에 대한 연구들은 1차원 열전달 문제와[2-4] 2차원 열전달 문제[5]에 대하여 진행되어 오고 있다.

한편 주물의 응고시 응고특성과 미세조직의 형성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[6-8] 주조공정에 대하여 두가지의 미세조직 예측법이 개발되어 왔으며, 이들은 각각 deterministic model과 stochastic model로 구분된다.[9] 그러나 용탕단조공정에서의 응고조직 예측에 대한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 미세조직 예측법중의 하나인 stochastic model[10]을 Al-4.5wt%Cu합금의 용탕단조주물의 응고 조직 예측 및 주상정-등축정 천이 예측에 적용하였다. 용탕단조시 정확한 열전달 해석을 위해 역문제 해법을 이용한 주형

*연세대학교 금속공학과(Department of Metallurgical Engineering, Yonsei University)

**한국과학기술연구원 (KIST)

/주물간 계면 열전달 계수를 평가를 실시하였다. 또한 주조공정변수인 가압력, 주형온도, 주입온도, 접촉제가 용탕단조 주물의 응고조직에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, 예측된 응고조직은 같은 조건에서 실제 실험을 행하여 얻은 용탕단조 주물과 비교하였다.

2. 실험방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 주형의 모식도이다. 주물재료는 Al-4.5wt%Cu를 사용하였다. 주형 cavity와 주형내에 CA 열전대를 설치하였으며, #1, #2, #3은 각각 열전대의 위치를 나타내고 있다. 용탕 주입직후 용탕을 30톤 유압프레스로 가압하였으며, 가압전 응고를 방지하기 위하여 5초내에 가압을 실시하였다. 가압중 시간에 따른 온도와 압력변화를 열전대와 로드셀을 이용하여 측정하였다. 제조된 용탕단조 시편은 측방향으로 절단하였다. 절단된 시편은 응고조직의 관찰을 위하여 연마후 Tucker용액(25ml H₂O, 35ml HCl, 15ml HNO₃, 5ml HF)으로 부식시켰다.

3. 해석방법

본 연구에서는 거시 열전달 모델을 위한 finite

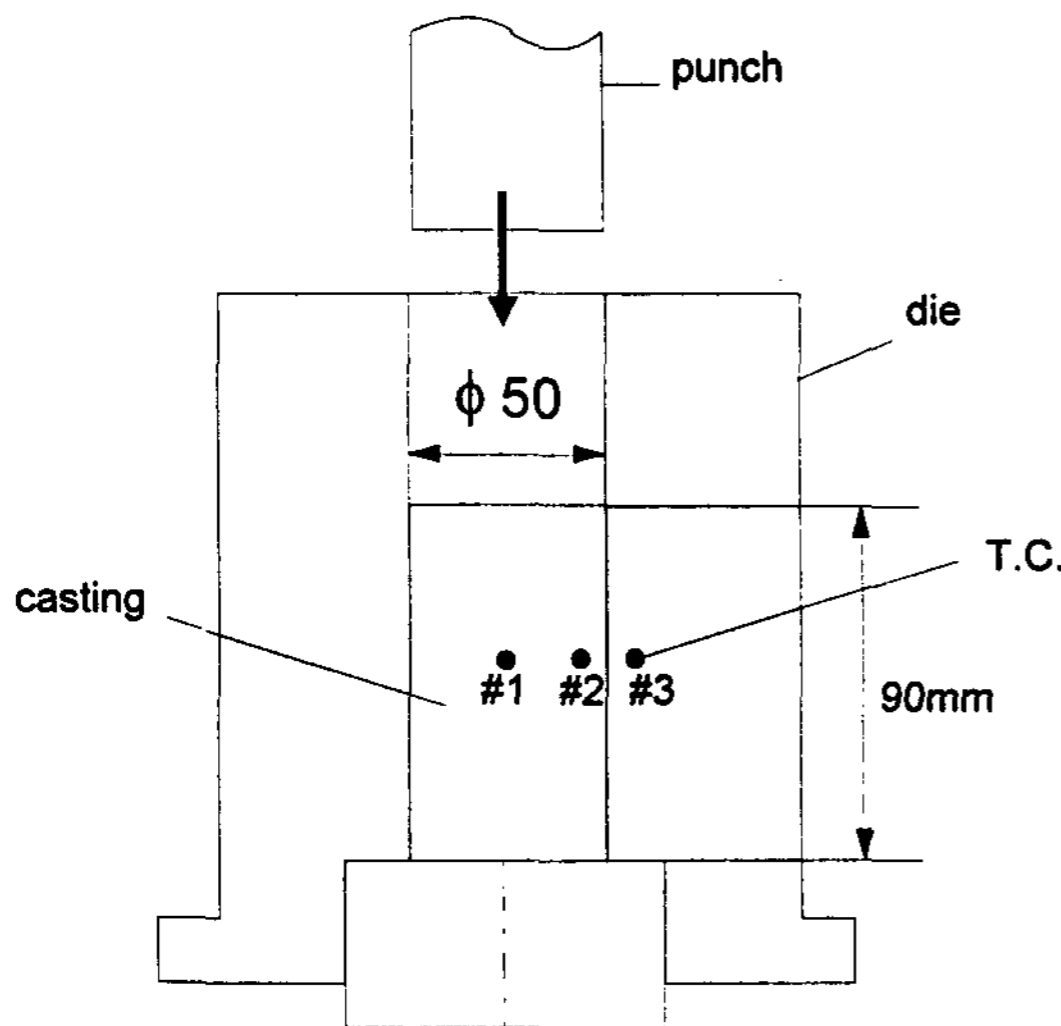


Fig. 1. Schematic diagram of the die assembly and locations of thermocouples.

volume법과 미세조직 예측을 위하여 2차원 cellular automata를 결합한 수치해석법을 용탕단조 주물의 응고조직 예측에 적용하였다.

3.1 주물/주형 계면 열전달 계수의 평가

용탕단조시 시간의 변화에 따른 주물/주형 계면 열전달계수를 계산하기 위하여 본 연구에서는 비선형 평가법[11]을 이용한 역문제 해법을 사용하였다. 역문제 해법은 측정된 온도와 계산된 온도를 최소화 하는 주형/주물간 열 방출량을 예측하는 수치해석법이다. 이전 연구에서는 2차원 비정상 열전도 방정식 문제를 이용하였다[5]. 중력주조와 용탕단조에 대한 계면 열전달 계수의 변화를 Fig. 2(a)에 나타내었다. 가압이 시작되는 시점에서 열전달 계수치가 급격히 증가함을 볼 수 있으며 최고 열전달 계수는 4700Wm⁻¹K⁻¹였다. 계산된 열전달 계수를 이용하여 주물내의 응고양상을 계산하여 Fig. 2(b)에 나타내었다. 계산된 주물내 온도 이력 곡선이 실험치와 잘 일치함을 알 수 있었다.

3.2 용탕단조시 응고조직의 시뮬레이션

본 모델은 두 가지 해석법으로 구성되어 있다. cellular automata(CA)는 응고 조직의 형성을 시뮬레이션 하는데 적용되고, finite volume (FV)법은 용탕단조에서 거시 열전달을 계산하는데 이용하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이, FV법에서는 열전달 계산을 위하여 사각형 요소(제어체적)가 이용된다. 각각의 제어체적은 6×6개의 사각형의 작은 CA cell로 구성되어 있다. 제어체적 절점의 온도는 전진 차분법으로 계산되며, 사각형 요소안의 CA cell의 온도는 네 개의 제어체적 절점의 온도를 이용하여 선형 내삽하여 구해진다.

어떠한 액상 cell이 핵생성하거나 어떤 고상 cell이 일정한 성장속도를 가지고 성장하는 것은 열전달에 의해 계산된 온도와 CA cell 고유의 국부 과냉도를 기준으로 예측된다. 만일 어떠한 액상 CA cell의 과냉도가 핵생성하는데 필요한 과냉도 보다 크면, CA cell은 액상에서 고상으로 변하게 된다. 고상으로 변하여 성장하는 CA cell의 성장속도는 KGT모델[12]에 의하여 계산되어진다.

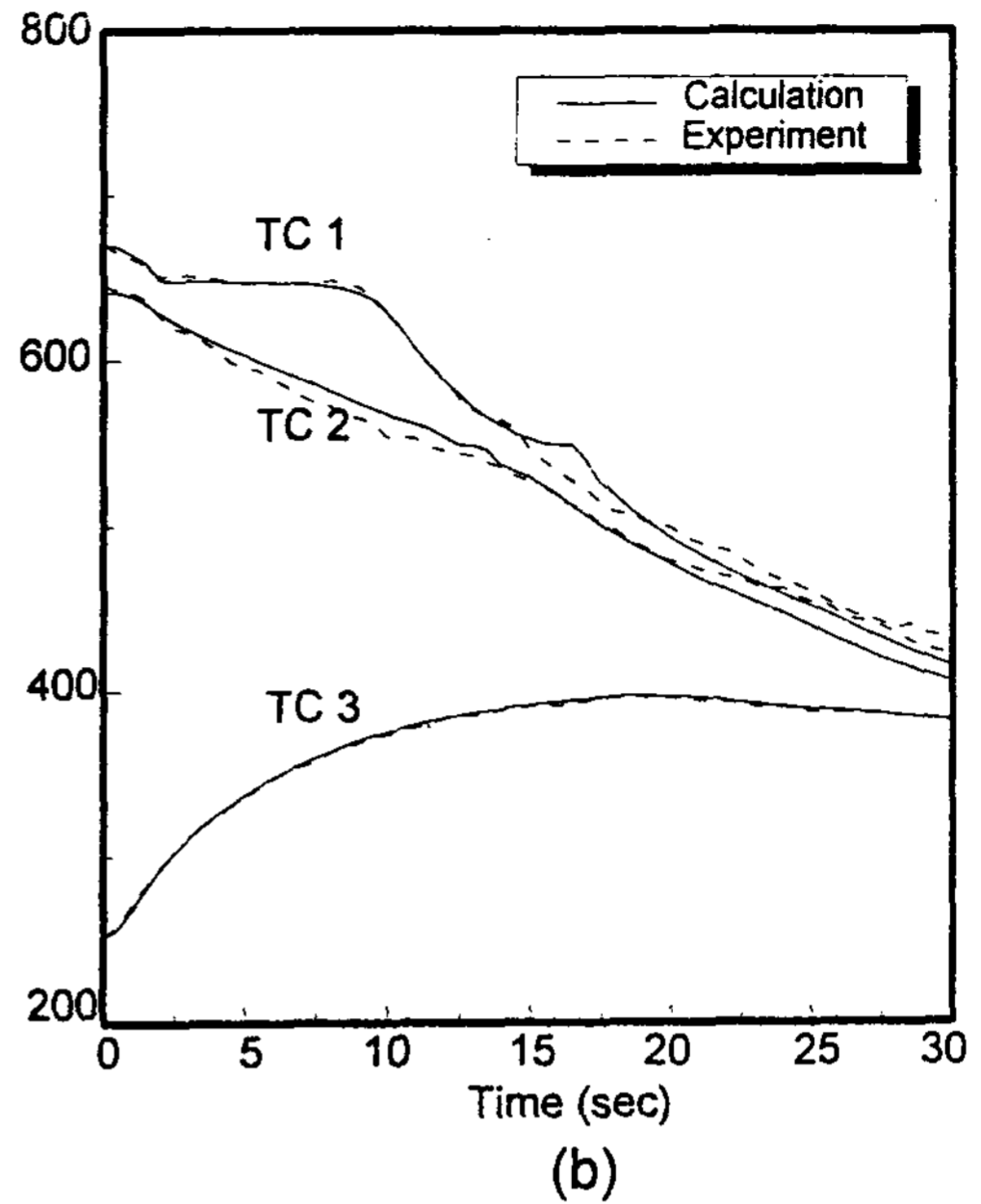
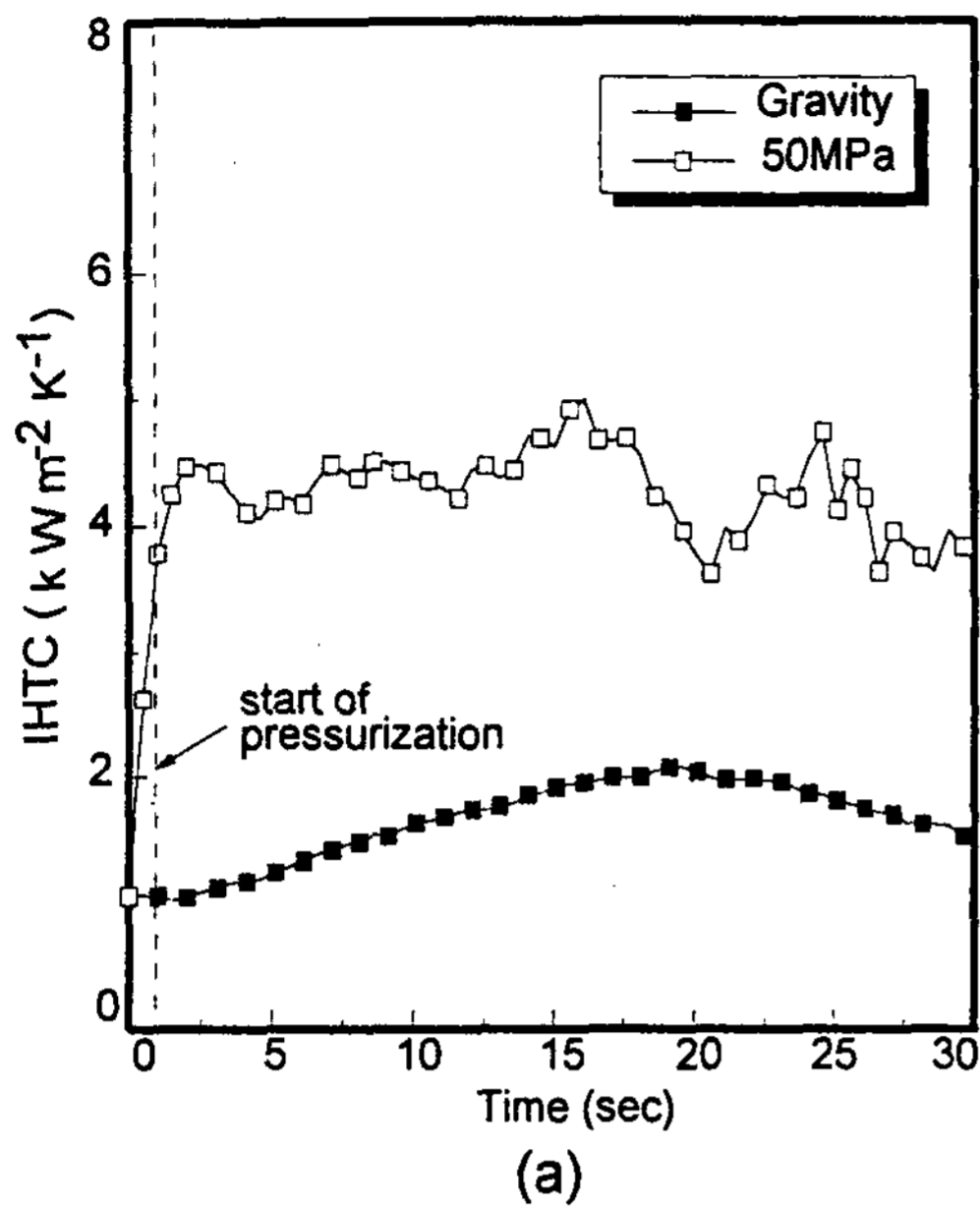


Fig. 2. (a) Heat transfer coefficients at the casting/die interface with time and (b) cooling curves of an Al-4.5wt%Cu alloy at a pressure of 50MPa.

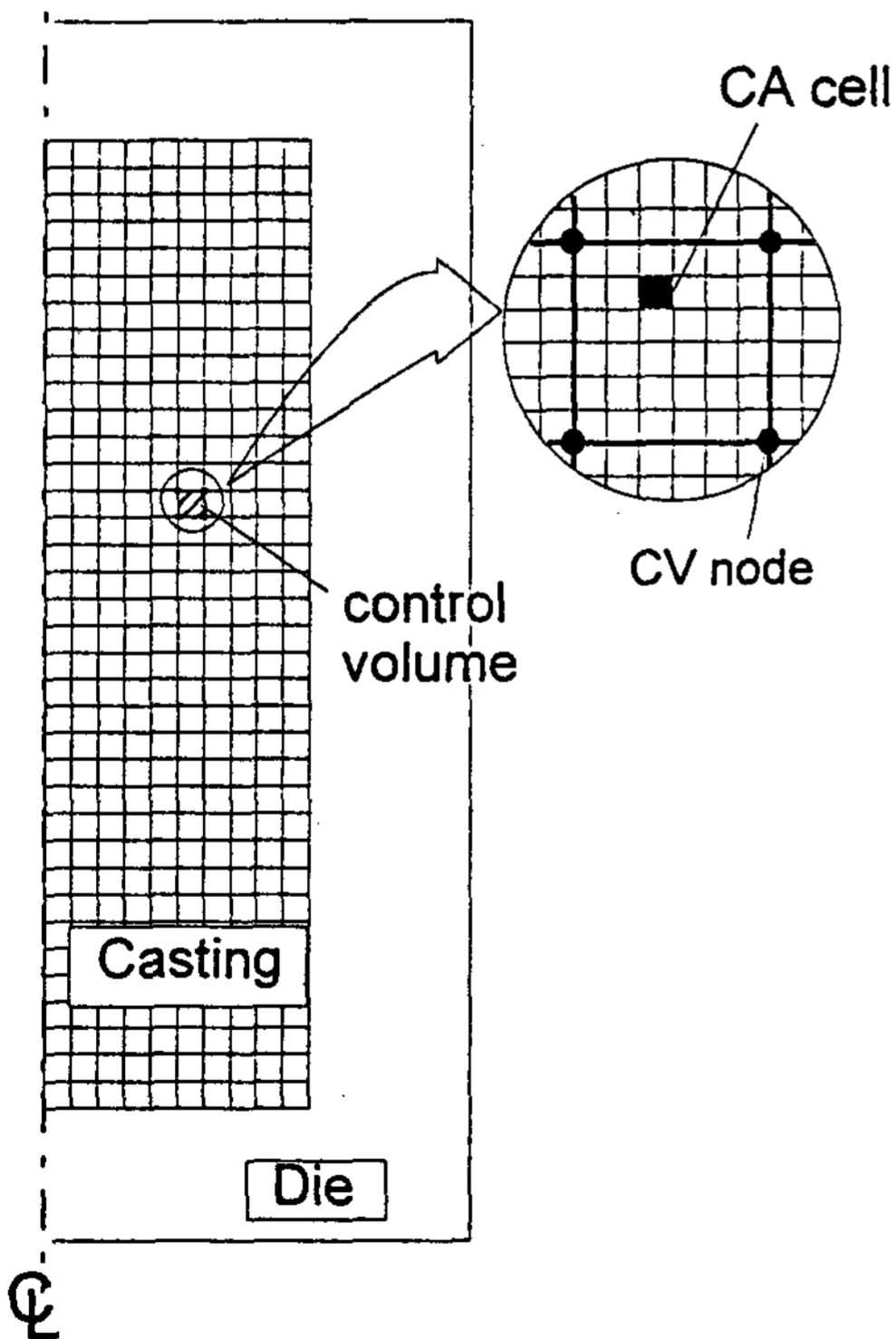


Fig. 3. Schematic diagram of superimposing CA cells with FV nodes.

성장하는 CA cell이 응고중에 발생하는 잠열은 온도회복법[13]을 이용하여 평가한다. 그다음 제어체적 절점의 온도는 CA cell 온도를 내삽하여 회복되게 된다. 마지막으로 이렇게 수정된 온도를 이용하여 거시 열전달 계산이 계속된다. 이러한 일련의 계산이 응고 종료시까지 반복된다. Table 1에 계산에 이용된 물성치와 계산상수들을 나타내었다.[14,15]

4. 결과 및 고찰

본 모델에 의하여 Al-4.5wt%Cu합금의 용탕단조 주물의 응고조직을 시뮬레이션 하였으며 계산된 결과를 실험결과와 비교하였다. 용탕단조 공정제어변수, 즉 가압력, 주형온도, 주입온도, 그리고 접종제의 영향에 대한 응고조직의 변화를 관찰하였다.

4.1 응고조직 형성 과정의 시뮬레이션

Fig. 4는 용탕단조시 응고의 진행에 따른 응고조직 형성 과정을 보여주고 있다. 이때의 주입온도는 760℃, 주형 온도는 120℃ 이며 가압력은 50MPa였다. 주형 cavity에 용탕이 주입되면, 주

Table 1. Thermal and physical properties used in the calculation.

	Al-4.5wt%Cu(casting)	SKD61(die)
density(kg m ⁻³)	2780[14]	7890[14]
thermal conductivity(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	192.5[14]	14.4[14]
specific heat(J kg ⁻¹)	1086[14]	580[14]
liquidus temperature(K)	922[14]	-
solidus temperature(K)	781[14]	-
partition coefficient	0.117[15]	-
nuclei density(m ⁻³)	2 × 10 ¹⁰ [15]	-

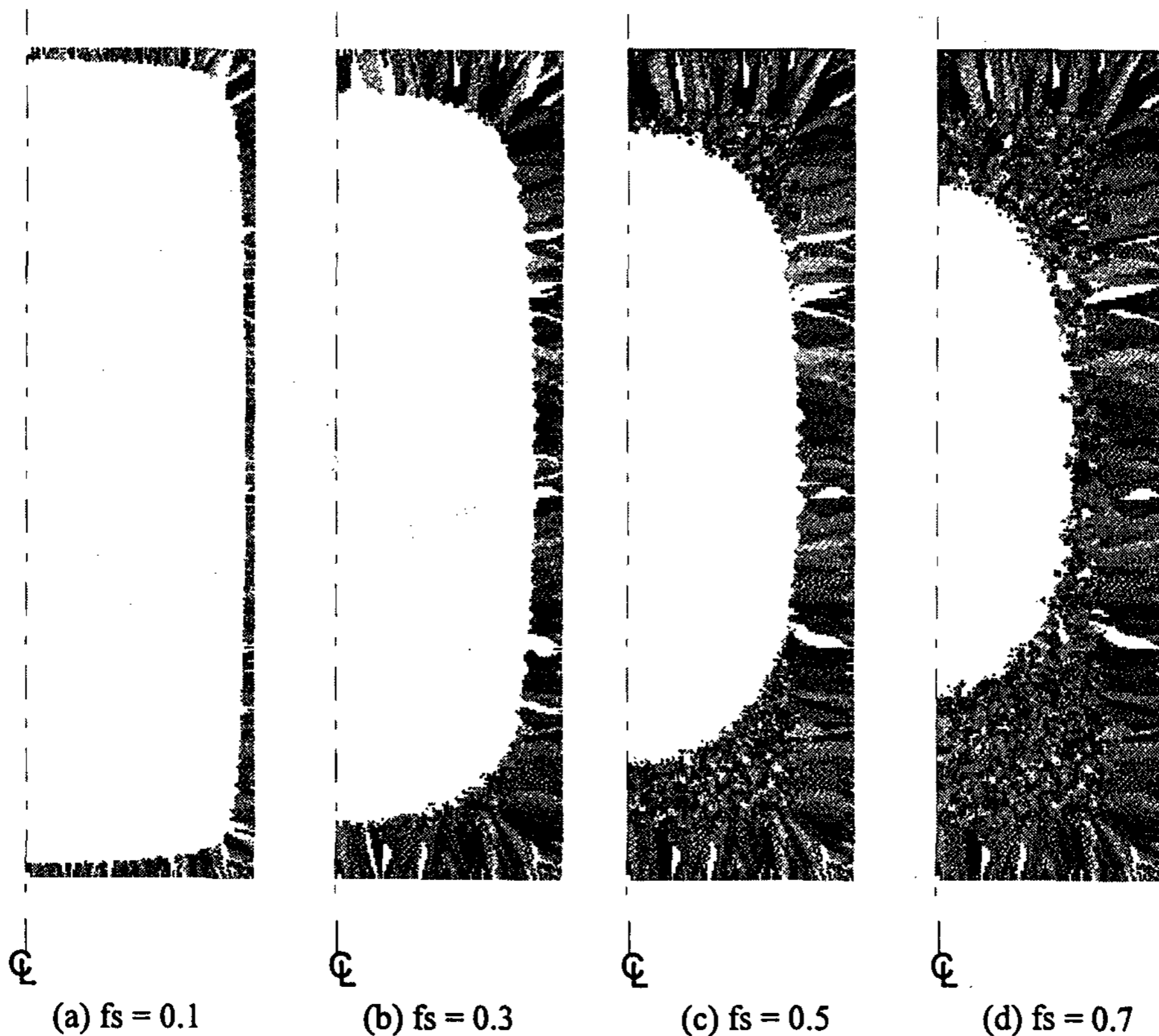


Fig. 4. Stages of solidification grain structures formation at a pressure of 50MPa with a pouring temperature of 760°C and a die temperature of 120°C; (a) fs=0.1, (b) fs=0.3, (c) fs=0.5, and (d) fs=0.7.

형 벽으로 부터 많은 불균일 핵생성이 일어난다. 핵생성후 주형벽으로 부터 주상정이 성장하게 되며, 주상정은 열 흐름 방향의 반대 방향으로 성장하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 주조 조건에서, 용고층의 두께가 증가하면, 불균일 핵이 성장하는 주상정 전방의 액상 부근에서 생성된다. 그 후, 핵은 등축정으로 성장하게 되며, 이것이 주상정-등축정 천이를 일으키고 있음을 보여준다.

4.2 가압력의 영향

Fig. 5는 주입온도 760°C, 주형온도 120°C인 경우 가압력을 변화시켰을 때의 계산 및 실험 응고조직을 나타내고 있다. (a), (d)는 중력금형주조, (b), (e)는 50MPa, (c), (f)는 150MPa로 각각 가압했을 경우이다. 가압력이 증가할 수록 주상정의 길이가 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 가압력이 증가할 수록 액상선 온도는 증가하고 계면 열전달 계수가 증가할 수록 성장

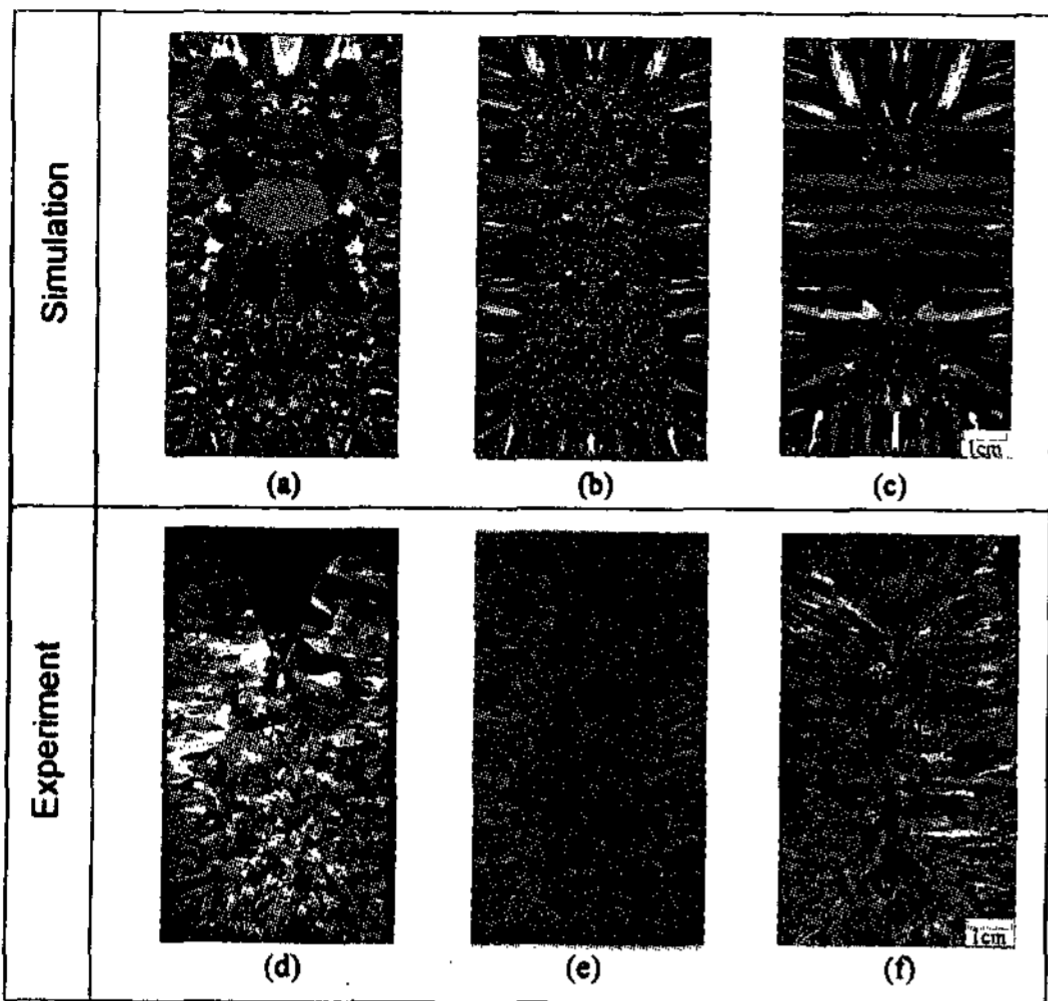


Fig. 5. Effect of applied pressure on solidification grain structures with a pouring temperature of 760°C and a die temperature of 120°C; (a),(d) gravity die-casting, (b),(e) 50MPa and (c),(f) 150MPa.

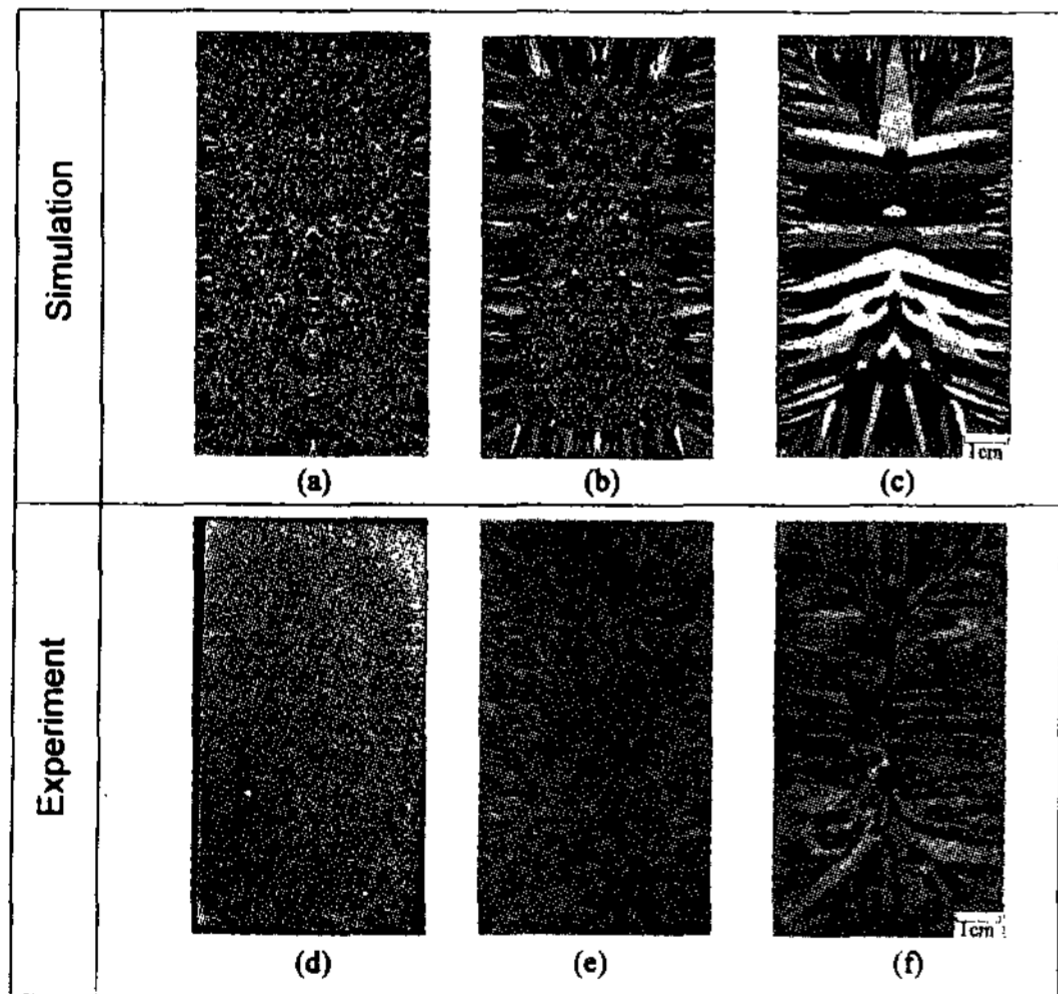


Fig. 6. Effect of die temperature on solidification grain structures with a pouring temperature of 760°C at a pressure of 50MPa; (a),(d) 50°C, (b),(e) 120°C, and (c),(f) 250°C.

하는 주상정 전방의 액상의 온도 구배가 증가하기 때문에, 등축정 형성에 필요한 불균일 핵생성이 억제되기 때문이라고 사료된다.

4.3 주형온도의 영향

주형 온도가 응고조직에 미치는 영향을 Fig. 6

에 나타내었다. 이때의 주입온도는 760°C, 가압력은 50MPa였다. (a), (d)는 주형온도 50°C, (b), (e)는 120°C, (c), (f)는 250°C인 경우이다. 주형온도가 증가할 수록 주상정의 길이가 증가함을 알 수 있었다.

4.4 주입온도의 영향

Fig. 7은 주형온도 120°C, 가압력 50MPa인 경우 주입온도가 응고조직 형성에 미치는 영향을 보여주고 있다. 주입온도가 증가할수록 주상정영역이 증가함을 알 수 있다. 이는 높은 주입온도에서는 고온의 용탕에 의해 핵생성 밀도가 감소함에 기인한다고 사료된다.

4.5 접종제의 영향

접종제의 첨가 유무에 따른 응고조직의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 이 경우 주입온도는 760°C, 주형온도는 250°C, 가압력은 50MPa였다. (a)와 (c)는 접종제를 첨가하지 않은 경우이고, (b), (d)는 접종제를 첨가한 경우이다. 불균일 핵생성시 접종제의 영향을 평가하기 위해 핵생성 밀도를 $2 \times 10^{13} \text{m}^{-3}$ 으로 1000배 정도 증가하는 것으로 가정하였다. 접종제 TiB_2 를 0.01wt% 첨가한 경우 계산치와 실험치 모두 등축정이 주물의 전체부분에서 관찰되었다. 이는 응고초기에

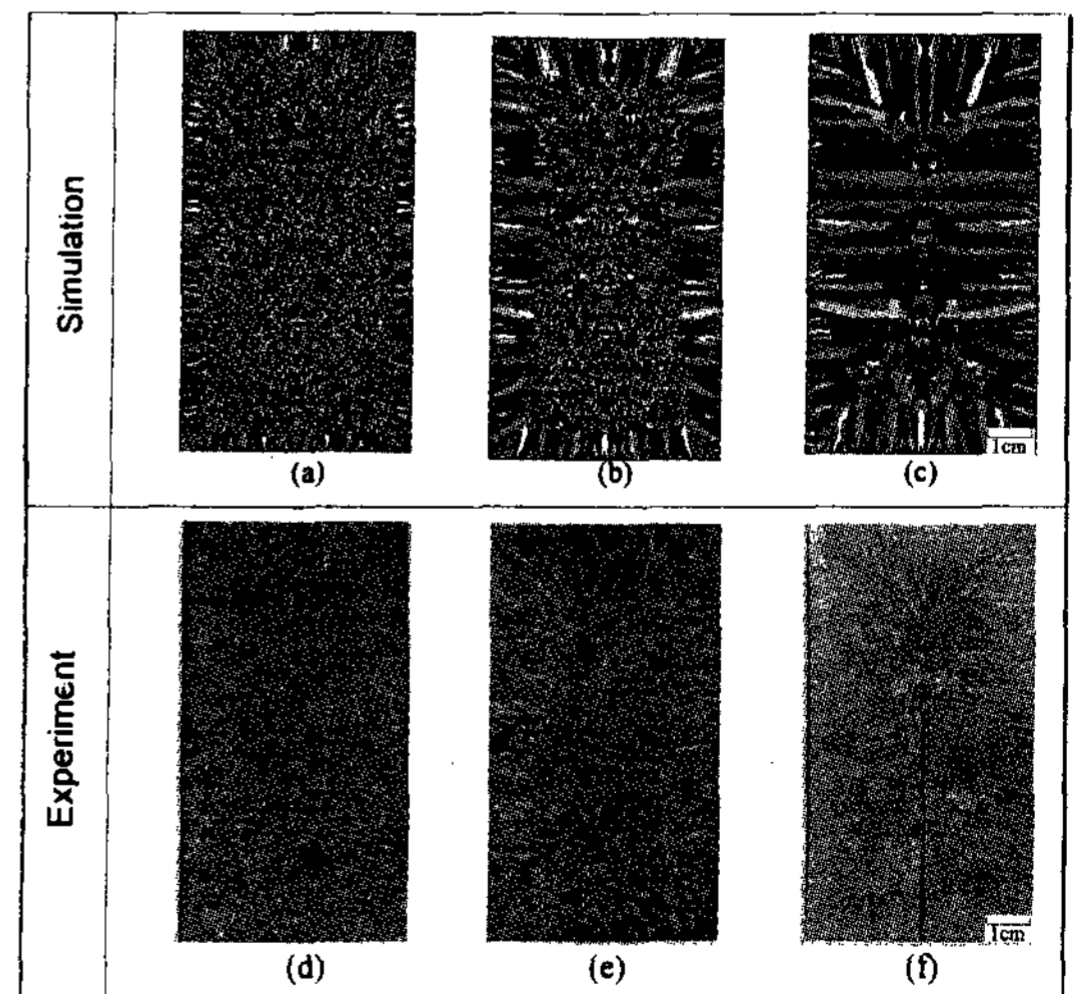


Fig. 7. Effect of pouring temperature on solidification grain structures with a die temperature of 120°C at a pressure of 50MPa; (a),(d) 710°C, (b),(e) 760°C, and (c),(f) 810°C.

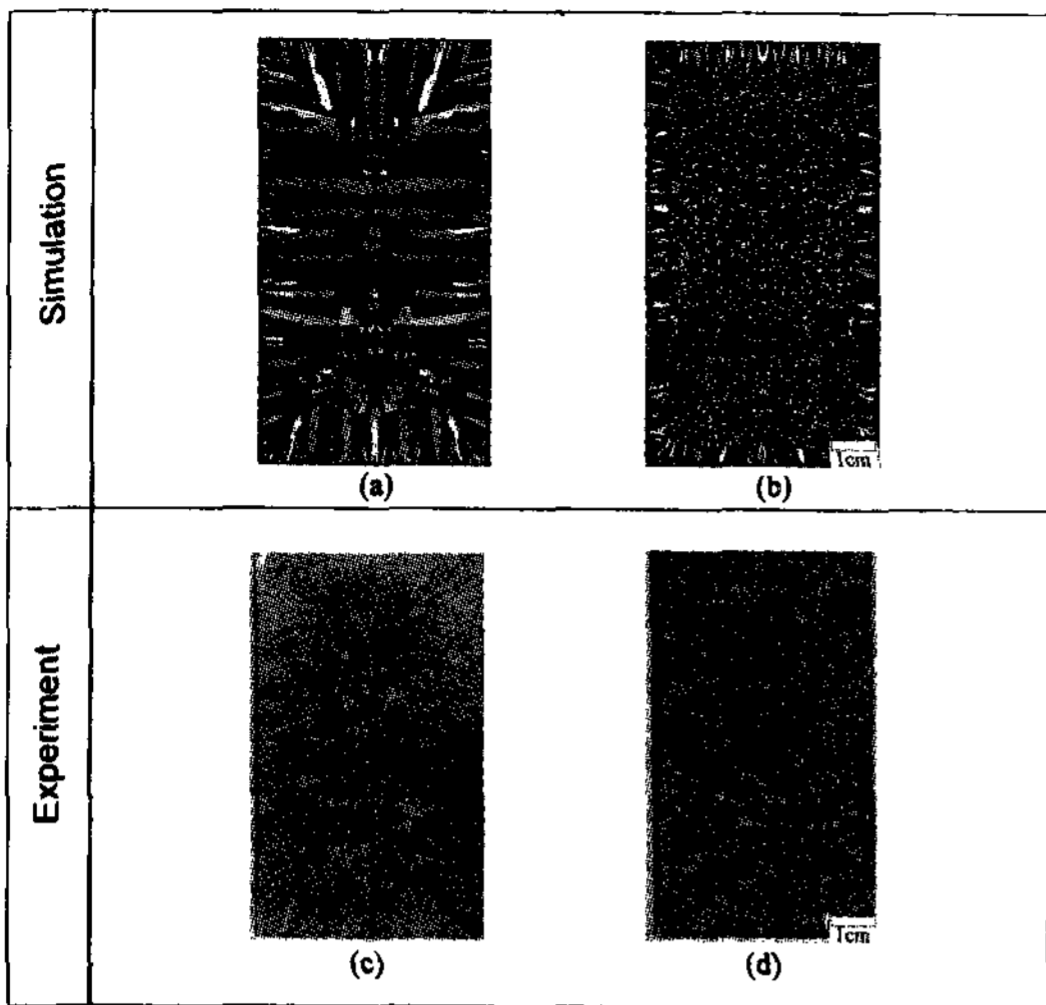


Fig. 8. Effect of inoculation on the solidification grain structures with a pouring temperature of 760°C and a die temperature of 250°C at a pressure of 50MPa; (a),(c) no inoculation and (b),(d) with inoculation.

접종제에 의하여 액상에서 쉽게 핵생성될 수 있기 때문이다.

5. 결 론

용탕단조시 응고조직의 예측을 위하여 거시 열 전달은 유한체적법을 사용하고 미세조직 계산을 위하여 cellular automata를 결합시킨 stochastic 모델을 개발하였다. 역문제 해법을 기초로 하여 계산된 주형/주물 열전달 계수를 이용하여 용탕 단조시 열전달 해석에 수행하였다. 여러 구조제어 변수, 즉 가압력, 주형온도, 주입온도, 접종제가 용탕단조시 Al-4.5wt%Cu합금의 응고조직의 형성 및 주상정-등축정 천이에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

가압력이 증가할 수록 주상정의 길이는 조금 증가하는 경향을 보였으며, 주형온도와 주입온도가 증가할 수록 주상정 영역이 확대됨을 알 수 있었다. 접종제 0.01wt%TiB₂를 첨가한 경우에는 실험과 계산결과 모두 주물 전 영역에서 등축정이 형성됨을 알 수 있었다. 계산된 응고조직은 실험 응고조직과 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 본 모델이 용탕단조시 응고조직 예측에 성

공적으로 적용될 수 있다고 사료된다.

후 기

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구 조성비(신소재분야)에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] G. S. Reddy and J. A. Sekhar, Acta metall., 37 (1989) 1509
- [2] Y. Nishida and M. Matsubara : British Foundrymen, 69 (1976) 274
- [3] 유승목, 한요섭, 이호인, 홍준표 : 한국주조 공학회지, 10 (1990) 495
- [4] 김진수, 안재영, 한요섭, 이호인, 홍준표 : 한국주조공학회지, 14 (1994) 248
- [5] I. S. Cho and C. P. Hong : Int. J. of Cast Metals Res., 9 (1996), to be published.
- [6] Ph. Thevoz, J. L. Desbiolles and M. Rappaz : Metall. Trans., 20A (1989) 311
- [7] S. G. R. Brown and J. A. Spittle : J. Mater. Sci., 23 (1989) 1777
- [8] P. Zhu and W. Smith : Acta Metall., 40 (1992) 3369
- [9] D. M. Stefanescu : ISIJ Int., 35 (1995) 637
- [10] K. Y. Lee and C. P. Hong : ISIJ Int., to be published
- [11] J. V. Beck : Int. J. Heat Mass Transfer, 213 (1970) 703
- [12] W. Kurz, B. Giovanola and R. Trivedi, Acta Metall., 34 (1986) 823
- [13] C. P. Hong, T. Umeda and Y. Kimura, Metall. Trans. 15B (1984) 101
- [14] R. D. Pehlke, A. Jayarajan and H. Wada : Summary of Thermal Properties for Casting Alloys and Mold Materials, (The University of Michigan), (1982)
- [15] Ph. Thevoz : Ph. D. Thesis, (1988)