

|||||||
論 文
|||||||

금속 우라늄봉의 연속주조공정에 대한 열전달 및 응고해석

이주찬 · 이윤상 · 오승철 · 신영준

Numerical Analysis of Heat Transfer and Solidification in the Continuous Casting Process of Metallic Uranium Rod

Ju-Chan Lee, Yoon-Sang Lee, Seung-Chul Oh and Young-Joon Shin

Abstract

Continuous casting equipment was designed to cast the metallic uranium rods, and a thermal analysis was carried out to calculate the temperature and solidification profiles. Fluid flow and heat transfer analysis model including the effects of phase change was used to simulate the continuous casting process by finite volume method. In the design of continuous casting equipment, the casting speed, pouring temperature and cooling conditions should be considered as significant factors. In this study, the effect of casting speed, pouring temperature, and air gap between the uranium and mold were investigated. The results represented that the temperature and solidification profiles of continuous casting equipment varied with the casting speed, pouring temperature, and air gap.
(Received January 4, 2000)

1. 서 론

1.1 연구목적

원자력연구소에서는 사용후핵연료 차세대 관리기술의 하나로 국내 원자력발전소에서 발생하고 있는 PWR (Pressurized Water Reactor) 사용후핵연료를 리튬 금속으로 전환시켜 우라늄 금속봉으로 주조하여 저장하는 차세대 관리 공정개발에 관한 연구를 수행하고 있다[1]. PWR 핵연료를 금속 전환할 경우 그 관리부피를 초기 대비 1/4로 줄이고 관리 안전상에 문제를 일으키는 고방열성 핵종인 세슘과 스트론튬을 선택적으로 제거하여 냉각부하를 1/2로 줄일 수 있는 이점이 있다. 금속으로 전환된 우라늄을 금속봉 형태로 주조하여 캐니스터에 저장할 예정이며, 우라늄봉 주조를 위한 연속주조장치를 개발하였다. 우라늄봉은 진원도 및 직진도가 좋고 기공 등 결함이 없도록 주조되어야 한다.

연속주조법은 강이나 비철금속의 봉을 용해로에서 직접 인출하여 주조봉을 만드는 방법으로서 용탕의 주입, 냉각, 압연, 절단 등의 공정이 연속적으로 이루어

짐으로서 실수율, 생산효율, 에너지 효율 측면에서 유리하다. 또한, 조업에 필요한 인력이 감소하고 주조조건이 일정하기 때문에 제품 품질 면에서도 매우 유리하여 표면이 매끈하고 일정한 크기의 지름의 봉을 연속적으로 제조할 수 있는 이점이 있다.

본 연구는 연속주조공정에서 금속의 응고 및 열전달 특성을 수치해석을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션 함으로서 그 결과를 미리 예측하여 시험주조 과정을 최소화하고 제반공정의 최적화 설계에 목적을 두고 있다. 본 연구에서는 용탕의 응고 및 유동을 고려한 열전달 해석을 수행함으로써 연속주조공정에서 용탕의 주입속도 및 주입온도, 냉각조건 등이 온도분포 및 응고 양상에 미치는 영향을 평가하였다.

1.2 주조공정에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 응용

연속주조공정을 이용하여 고품질의 빌렛을 얻기 위해서는 주조온도, 주조속도, 냉각방식 등과 같은 작업조건을 최적화 함으로써 주형 내부에서만 아니라 2차 냉각영역에서의 온도분포 및 고/액 공존 영역을 효

과적으로 제어해 주어야 한다. 이러한 변수들이 연속 주조 공정에 미치는 영향을 실험적으로 평가하기 위해서는 많은 비용 및 시간이 소요되고, 기타 기술적 제한 사항이 있으므로 연속주조과정을 수치해석 방법을 이용하여 시뮬레이션하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 수치해석 방법은 비용이 저렴하고 재현성이 좋으며, 측정이 불가능한 공정변수까지 고려하여 해석이 가능함으로서 주조공정에 대한 결과 분석과 사전 예측이 가능한 이점이 있다. 그러나 장치의 복잡한 형상 및 물리적 현상을 실제와 동일하게 모델링하는데 한계가 있어 실제 현상과 유사한 해석을 수행하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 초기 단계에서는 유동을 무시하거나 유효열전도도(effective thermal conductivity)를 도입하여 유동효과를 간접적으로 고려하였다[2]. 대류에 의한 열전달 특성은 유체의 속도, 유체가 흐르는 방향, 기타 기하학적 형상 등 여러 요인들에 의해 달라지므로 모든 방향으로 열이 이동한다고 가정하는 전도방식만으로 이를 처리하는데는 한계가 있다. 따라서 대류열전달을 무시한 해석결과는 실험치와 많은 오차가 발생할 수 있으며[3], 보다 정확한 해석을 위해서는 대류 효과를 고려한 유동해석이 필수적이다. 최근에 와서는 열, 유동 및 응력해석을 연계하여 온도분포, 유동장 및 응력분포를 동시에 계산할 수 있는 기술이 개발되고 있다[4].

2. 연속주조장치 설계

지름 13.5 mm, 길이 3m의 우라늄 금속봉을 주조하기 위한 연속주조장치를 설계하였다. 연속주조장치는 진공 챔버, 고주파 유도 가열장치, 도가니, 주형, 냉각장치, 온도 제어장치, 이송장치, 절단기, 차폐덕트 등으로 구성되며, Fig. 1은 장치의 개략도를 나타내고 있다. 우라늄 잉곳을 도가니에 장입하여 용해시킨 후 하주방식에 의해 용탕이 주형 하단부의 냉각대를 통과하면서 응고되어 인출되도록 하였다.

냉각대는 수냉 챔버를 사용하여 주형에 부착하였으며, 주형으로부터 인출된 주조봉은 대기에 노출되어 자연냉각 되도록 하였다. 도가니는 지르코니아 재질로 우라늄 20 kg을 용해할 수 있는 용량을 가지며, 도가니 하단부는 주형과 연결된다. 광고온 온도센서에 의하여 용해조건을 조절하여 연속주조 과정에서 용탕의 온도가 일정하게 유지되도록 하였다. 주형은 boron nitride

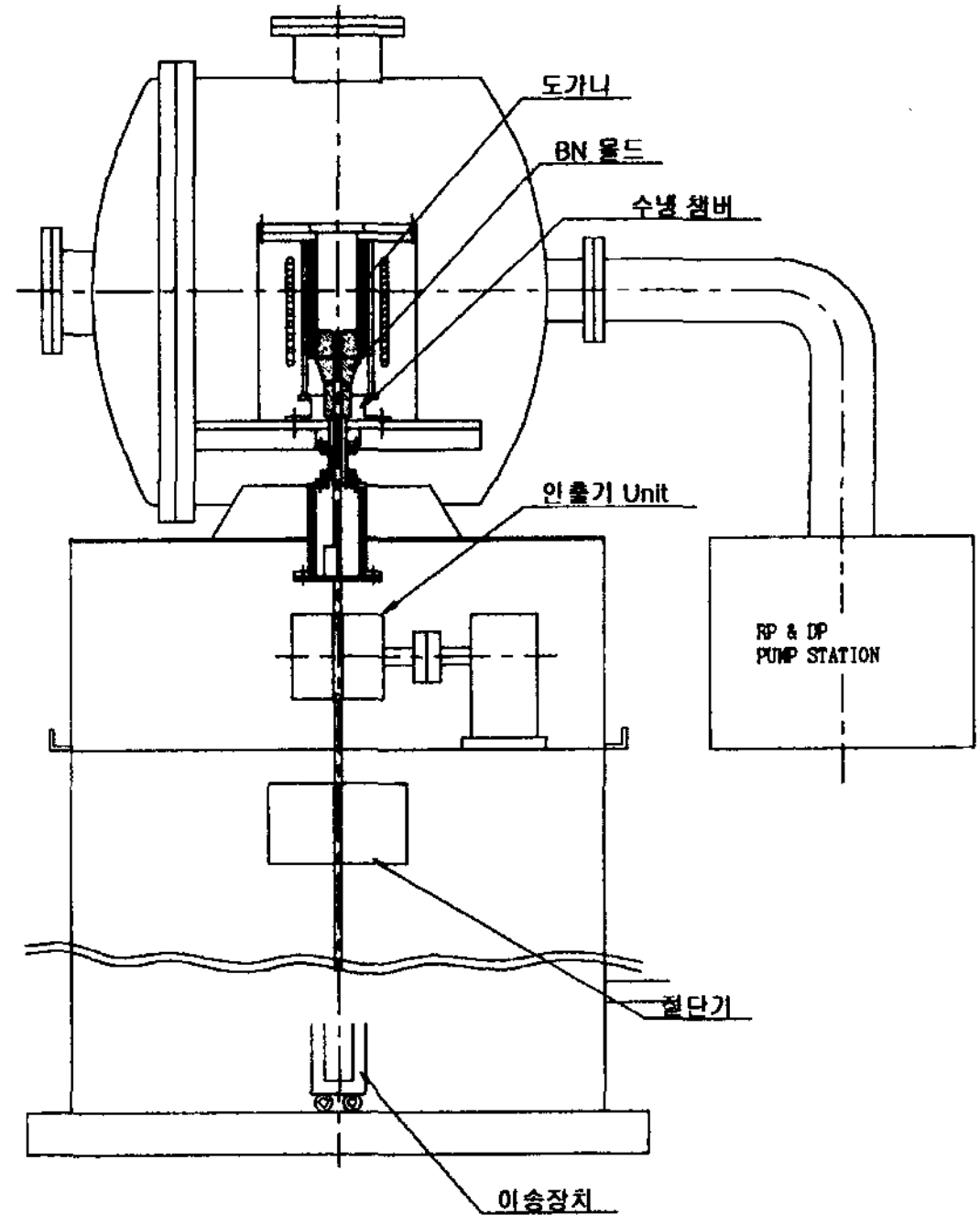


Fig. 1. Schematic drawing of continuous casting equipment.

를 사용하였으며, 응고계면 관찰을 위해 주형 상부 및 중간부위에 열전대를 설치하여 연속주조시 인출기와 연계하여 주조속도를 조절할 수 있도록 하였다. 우라늄은 산화성이 매우 강하여 대기중 용해 주조방식으로는 결함없는 연료봉 주조가 불가능하다. 따라서 용탕중에 존재하는 수소, 산소, 질소 등의 기체를 제거하여 진공 탈가스가 가능한 고주파 진공 유도 용해방법을 사용하였고, 진공도는 10^{-3} torr 이상을 유지할 수 있도록 설계하였다. 인출기는 서보모터, 인출롤, 원격제어반 등으로 구성되며, 인출롤의 구동은 AC servo motor 및 감속기를 사용하며, 인출속도는 최소 1 mm/s에서 최대 20 mm/s까지 가능하도록 하였다.

3. 수치해석 방법

범용 열유동해석 프로그램인 Fluent 코드[5]를 사용하여 해석을 수행하였으며, Fluent는 질량, 운동량, 에너지 보존방정식을 기반으로 하는 유한체적법(Finite Volume Method)을 이용하고 있다. 이와 같은 CFD (Computational Fluid Dynamics) 코드는 유동 및 열전달, 물질전달 및 화학반응 문제 등에 대한 해석을 수행할 수 있다. Fluent는 압축성, 비압축성 유동해석

이 가능하고 자동차 산업, 전자장비 냉각계통, 열교환기 및 furnace 등의 해석에 널리 사용되고 있다. 또한, 상변화를 갖는 문제에서 열전달 및 유동해석을 수행할 수 있으며, 연속주조 공정에 대한 해석도 가능하다.

3.1 지배방정식

연속주조시 용융금속의 유동은 비압축성의 정상흐름(steady flow)으로 가정하였으며, 용탕의 주입속도가 비교적 작기 때문에 층류유동(laminar flow)으로 해석하였다. 주형 및 빌렛 등 각 해석 영역의 열, 유동 및 응고해석에 사용된 기본 방정식은 다음과 같다. 주형 내를 흐르는 용융 금속의 거동은 일반적인 Navier-Stokes 방정식을 따르며, 층류유동일 경우 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V_i) + V \cdot \nabla(\rho V_i) = \mu \nabla^2 V_i + S_i \quad (1)$$

여기에서, ρ 와 μ 는 각각 용융 금속의 밀도와 점성계수를 나타내며, 일반적으로 고상과 액상에서 다른 값을 갖고 온도에 의존하는 값을 갖는다. S_i 는 생성항을 나타내며, 하첨자 ref가 기준점을 의미할 때,

$$S_i = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \beta_T (T_{ref} - T) \quad (2)$$

가 되고, g 는 중력가속도, β 는 체적팽창계수를 나타내며, 생성항 S_i 의 첫 번째 항은 압력구배와 관련된 항이고 두 번째 항은 자연대류에 대한 고려이다.

용융금속의 열전달 해석에서는 다음의 기본방정식을 따른다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) + V \cdot \nabla(\rho c T) = k \nabla^2 T + S \quad (3)$$

여기에서, c 와 k 는 비열과 열전도계수를 의미하며, 역시 고상과 액상 그리고 온도에 의존하는 성질을 갖는다. S 는 잠열의 발생에 의한 생성항을 나타낸다.

3.2 수치해석 모델

수치해석 모델은 주형 내부 용융금속의 유동을 층류유동으로 가정하였고, 비압축성 유동을 고려하였다. 용탕의 응고 거동을 평가하기 위하여 상변화 모델을 사용하였고 정상상태에 대한 해석을 수행하였으며, 유동장 내부에서의 자연대류를 고려하였다.

연속주조장치의 열해석 모델은 2차원 축대칭 모델을 사용하였으며, Fig. 2는 해석모델에 대한 치수, 재료 및 경계조건 등을 나타내고 있다. 주형의 총 길이는 205 mm로 하였고, 상단 65 mm까지는 히터가 영향을 미치는 영역으로 용탕, 주형 및 지르코니아 도가니의 모든 부위 온도가 용탕의 온도와 같은 1350°C로 가정하였다. 주형과 주편사이에는 공극이 있는 것으로 모델링하여 공극에 의한 열저항을 고려하였다. 도가니로부터 주입된 용탕은 주형을 통과하면서 응고되어 외부로 인출되도록 하였다.

주형 상부는 단열재인 graphite felt로 감싸서 보온이 유지되도록 하였고 주형 하단부의 냉각수를 통하여 우

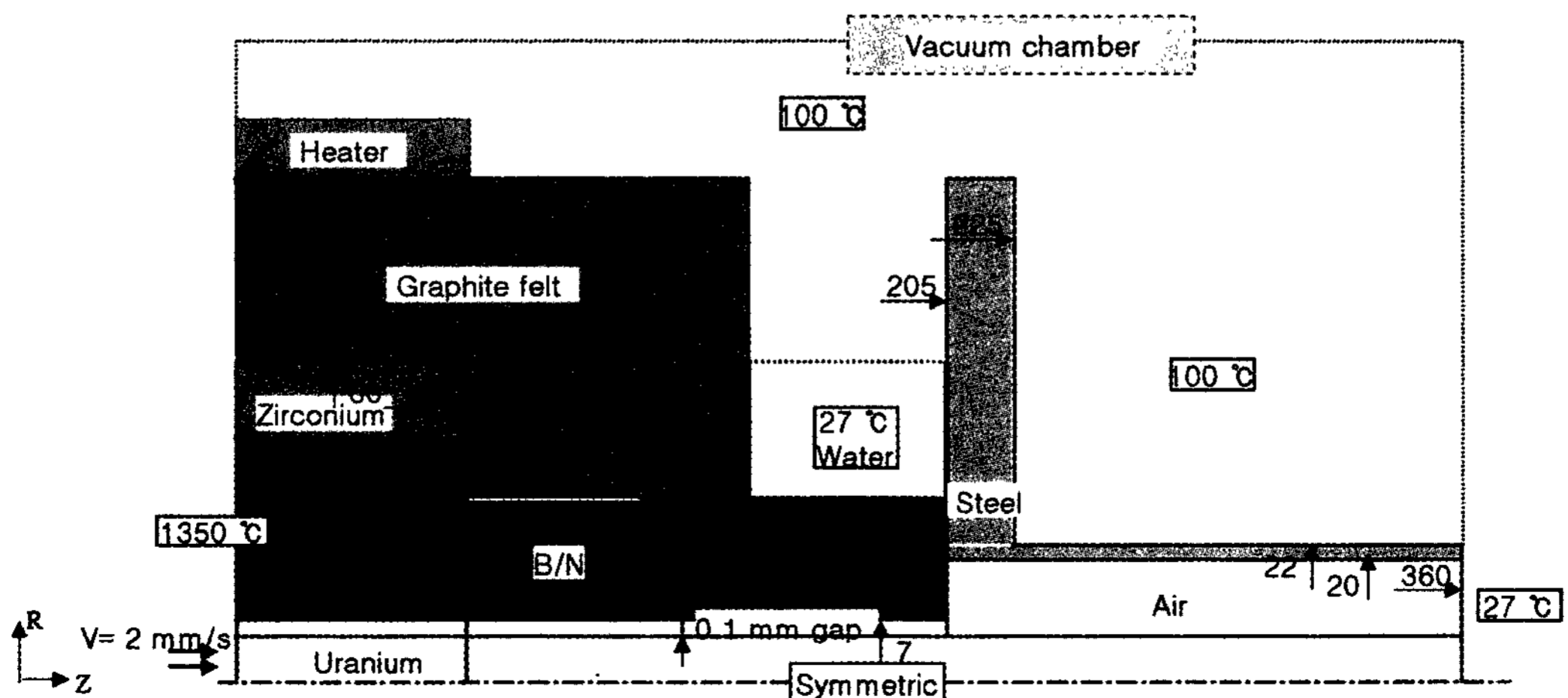


Fig. 2. Thermal analysis model.

라늄 금속봉이 응고되도록 하였다. 외부로 인출된 주조봉은 대기에 노출되어 자연냉각 되도록 하였다. 해석모델의 외부는 진공 챔버로 밀폐되어 있으며, 해석모델에서는 진공 챔버를 제외하고 진공 챔버 내부의 온도를 100°C로 가정하여 대류 및 복사가 일어나는 것으로 고려하였다.

3.3 열전달 물성치

표 1은 온도에 따른 우라늄의 열적인 물성치[6,7]를 요약하였으며, 온도의 변화에 따라 물성치가 큰 차이를 보이므로 온도에 따른 물성치를 고려하였다. 우라늄의 용융 온도는 1132°C이고, 잠열은 50,000 J/kg, 점성계수는 0.0065 kg/m-s를 적용하였다. 단열재인 graphite felt의 열전도율은 0.5 W/m-K를 고려하였다.

연속주조장치의 외부표면에서는 대류와 복사가 일어나며, 경계조건은 다음과 같은 관계식으로 정의된다.

$$q_{boundary} = H_{nc}(T_s - T_a) + \sigma \epsilon (T_s^A - T_a^A) \quad (4)$$

여기에서,

H_{nc} : Natural convection coefficient (W/m²-K)

σ : Stefan-Boltzmann constant (W/m²-K⁴)

ϵ : Surface emissivity

T_s, T_a : Surface and ambient temperature (K)

냉각수 및 외부 공기와 접하는 주형 표면에서의 대류열전달계수는 다음 식으로 구할 수 있다[8].

$$h = Nu_d \frac{k}{d} \quad (5)$$

여기서,

$$Nu_{ud} = c(Gr Pr)^a, Gr_d = g \beta (\Delta T)d^3/\nu^2$$

k : Thermal conductivity of water or air (W/m-K)

a : Exponent dependent on the flow regime

c : Coefficient dependent on the flow regime and geometry

g : Acceleration of gravity (m/s²)

d : Diameter of mold (m)

β : Coefficient of volumetric expansion (1/K)

ΔT : Temperature difference (K)

ν : Dynamic viscosity (m²/s)

위와 같은 식을 이용하여 냉각수와 접하는 주형 표면에서의 열전달계수는 냉각수를 정지된 유체로 가정하여 2,000 W/m²-K로 계산되었다. 또한 공기와 접하면 표면에서의 자연대류 열전달계수는 5 W/m²-K로 계산되었다. 복사열전달에 영향을 주는 방사율은 graphite felt는 0.5, 스테인레스강은 0.3으로 고려하였다.

3.4 해석조건

해석조건은 용탕의 주입온도 1350°C, 주입속도 2 mm/s, 냉각대의 냉각수온도 27°C, 주형과 주편 사이의 공극 0.1 mm를 기본모델로 하여 용탕의 주입속도를 1~4 mm/s, 주입온도를 1300~1450°C로 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 연속주조에 있어서 주형은 주편으로부터 열을 빼앗는 한편 응고된 고상이 충분한 강도를 가질 때까지 이를 지지하는 역할을 한다. 초기에 주형과 밀착되어 있던 응고층은 냉각이 진행되면서 수축하려 하지만 내부에서 작용하는 장력으로 인하여 일정기간은 주형과 접촉된다. 그러나 냉각이 진행됨에 따라 응고층은 주형과 분리되어 주형과 주편 사이에 공극이 발생된다. 이 공극의 열저항에 의한 영향을 평가하기 위하여 주형과 주편사이의 공극이 없는 경우와 0.1~0.3 mm의 공극이 있을 경우에 대한 해석을 수행하였다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 주입속도의 영향

주형에서의 평균 열전달율은 주입속도가 증가함에 따라 커지게 되며, 주입속도가 온도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 용탕의 주입속도를 1 mm/s~4 mm/s로

Table 1. Thermal properties of uranium metal

Temperature (K)	Thermal properties		
	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg)	Conductivity (W/m-K)
300	19,050	117	27.6
600	-	145	31.7
800	-	172	38.1
900	-	190	41.3
1000	18,130	179	43.9
1100	-	160	46.3
1200	17,910	-	-
1300	-	160	-
1405	17,250	-	-

변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 이때 주입온도는 1350°C, 주형과 주편 사이에는 0.1 mm의 공극이 있는 조건으로 하였다. Fig. 3은 용탕의 주입속도에 따른 온도분포를 나타내며, 주입속도가 빠를수록 열전달이 빨리 진행되어 주편 하단부 온도가 크게 상승하는 것으로 나타났다. Fig. 4는 주입속도 변화에 따른 응고계면을 나타내고 있다. 전체 주형 길이가 205 mm이며, 용탕 주입속도가 1 mm/s의 경우 주형 상부로부터 99 mm 지점에 응고계면이 발생하였고 4 mm/s인 경우에는 123 mm 지점에서 응고계면이 나타났다. 따라서 연속주조장치 설계에서 주입속도가 중요한 변수임을 알 수 있다.

4.2 주입온도의 영향

용탕의 주입온도를 1300°C, 1350°C, 1400°C 및 1450°C로 변화시켜 가면서 해석을 수행하였으며, 이때 주입속도는 2 mm/s로 하였다. Fig. 5 및 6은 용탕의 주입온도에 따른 온도분포 및 응고계면을 나타내고 있다.

용탕의 주입온도에 비례하여 주형 상부의 온도는 다소 높게 나타났으나 고온의 용탕이 수냉 챔버를 통과하

면서 급격히 냉각되어 응고되는 경향을 보이고 있다. 용탕의 주입온도 변화가 응고계면의 위치에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 우라늄봉의 직경이 14 mm로서 비교적 작으므로 우라늄봉의 온도분포가 반경방향으로는 거의 일정하게 나타났고 길이 방향으로만 큰 온도차를 보이고 있다.

4.3 공극의 영향

우라늄 용탕이 냉각되면서 응고층이 주형과 분리되어 주형과 주편 사이에 공극이 발생하며, 이 공극이 열전달에 미치는 영향을 평가하기 위하여 공극이 없는 경우와 0.1~0.3 mm의 공극이 있는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 이때 용탕의 주입속도는 2 mm/s, 주입온도는 1350°C의 조건을 고려하였다. Fig. 7 및 8은 공극의 변화에 따른 온도분포 및 응고계면을 나타내고 있다. 해석결과에서 주형과 주편 사이의 공극이 온도분포에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 정확한 온도분포를 얻기 위해서는 주편과 주형사이에 발생하는 공극의 예측이 중요할 것으로 판단된다.

연속주조공정에서는 응고계면이 발생하는 위치가 중요한 변수가 되며, Table 2는 해석 조건별 응고계면이

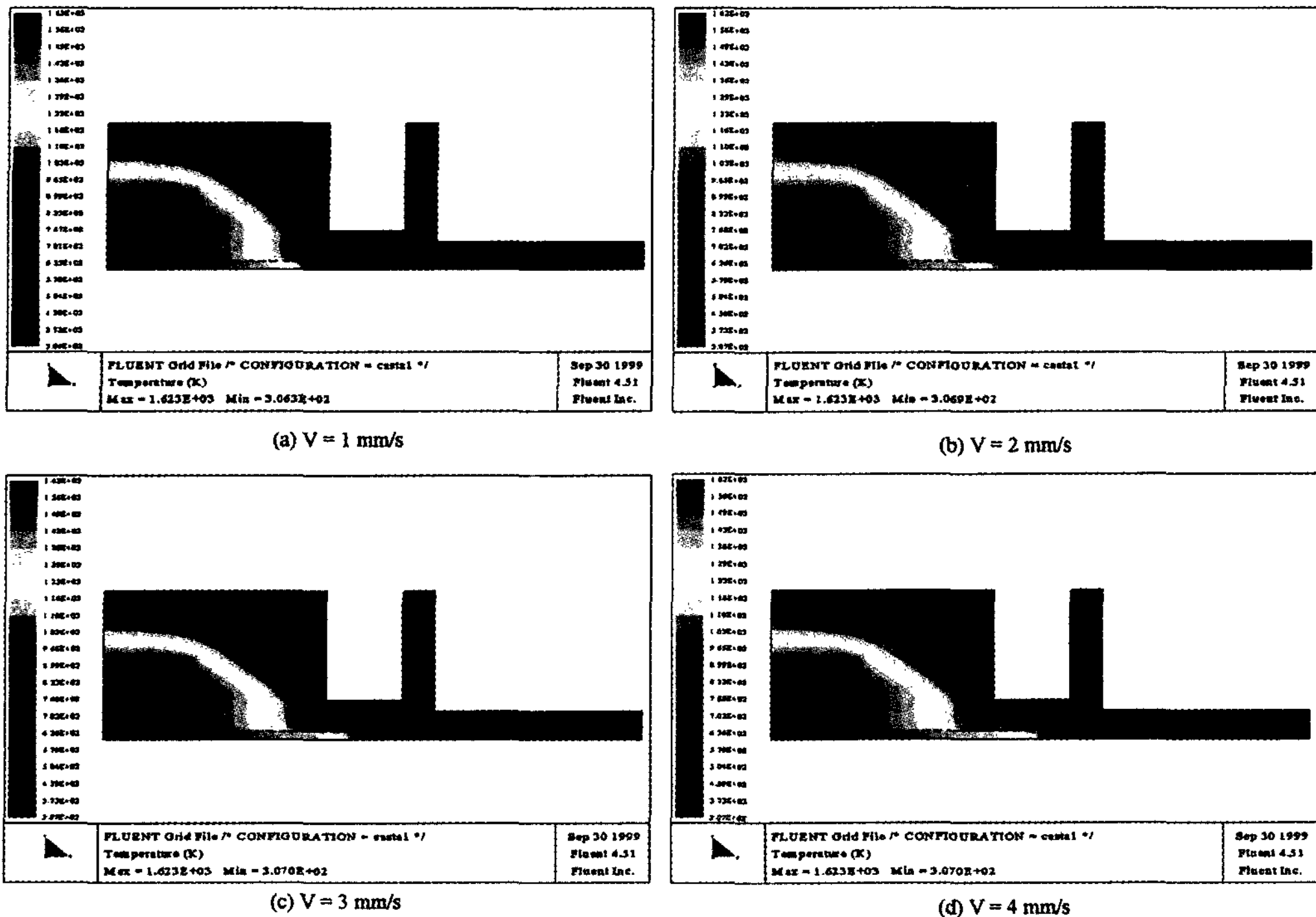


Fig. 3. Temperature contours as a variation of casting speed (T = 1350°C, δ = 0.1 mm)

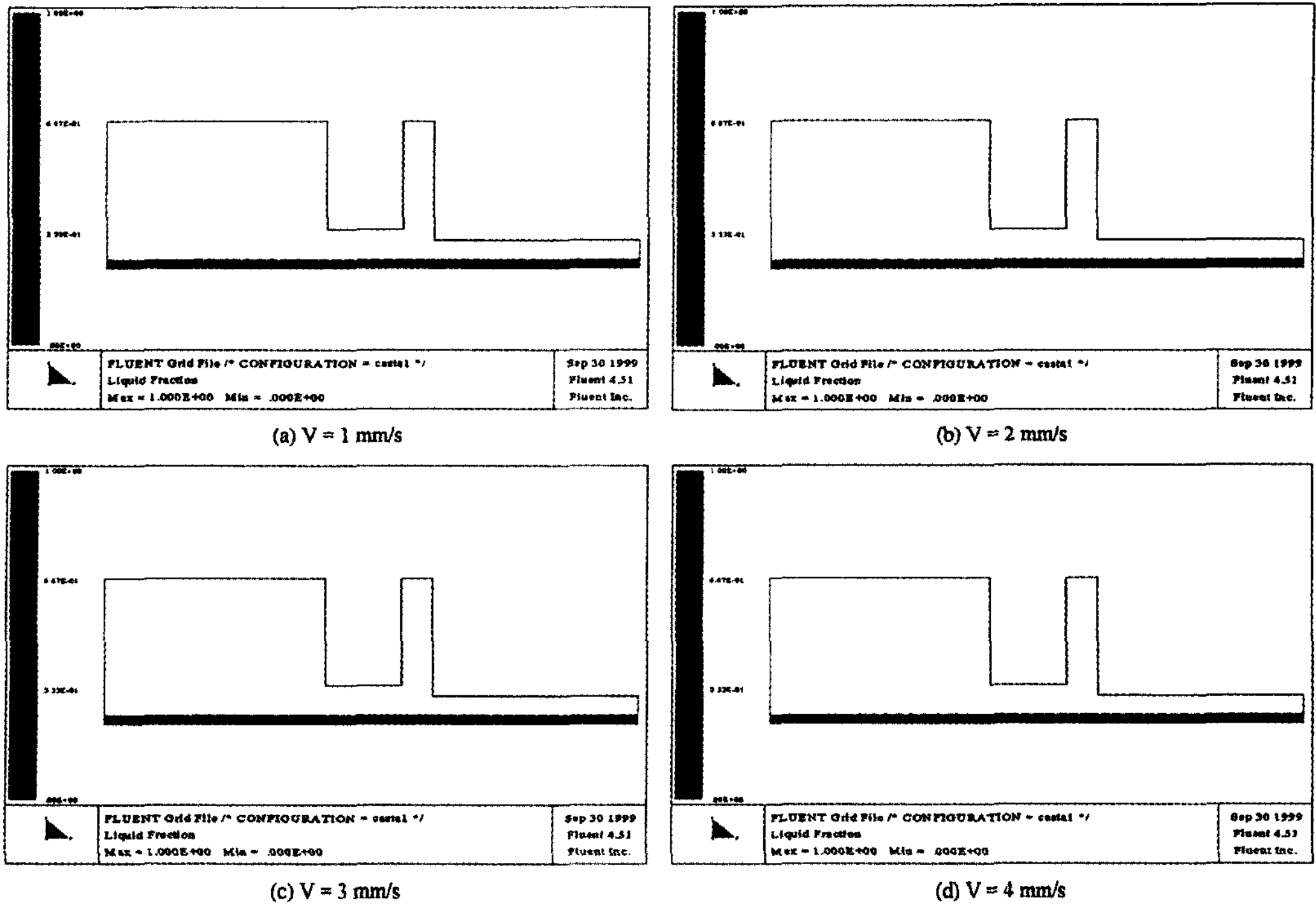


Fig. 4. Contours of liquid fraction as a variation of casting speed ($T = 1350^\circ\text{C}$, $\delta = 0.1 \text{ mm}$)

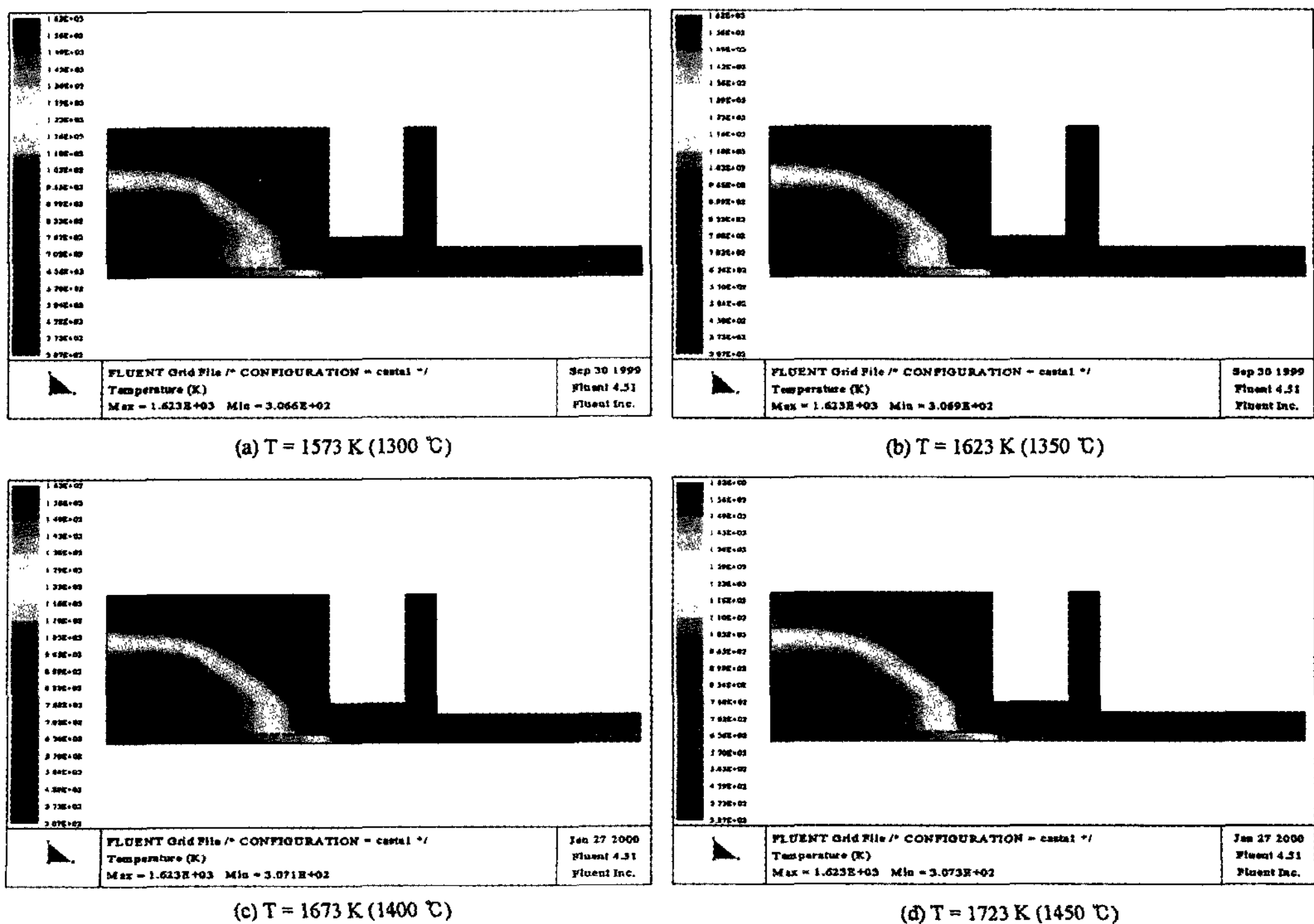


Fig. 5. Temperature contours as a variation of pouring temperature ($V = 2 \text{ mm/s}$, $\delta = 0.1 \text{ mm}$)

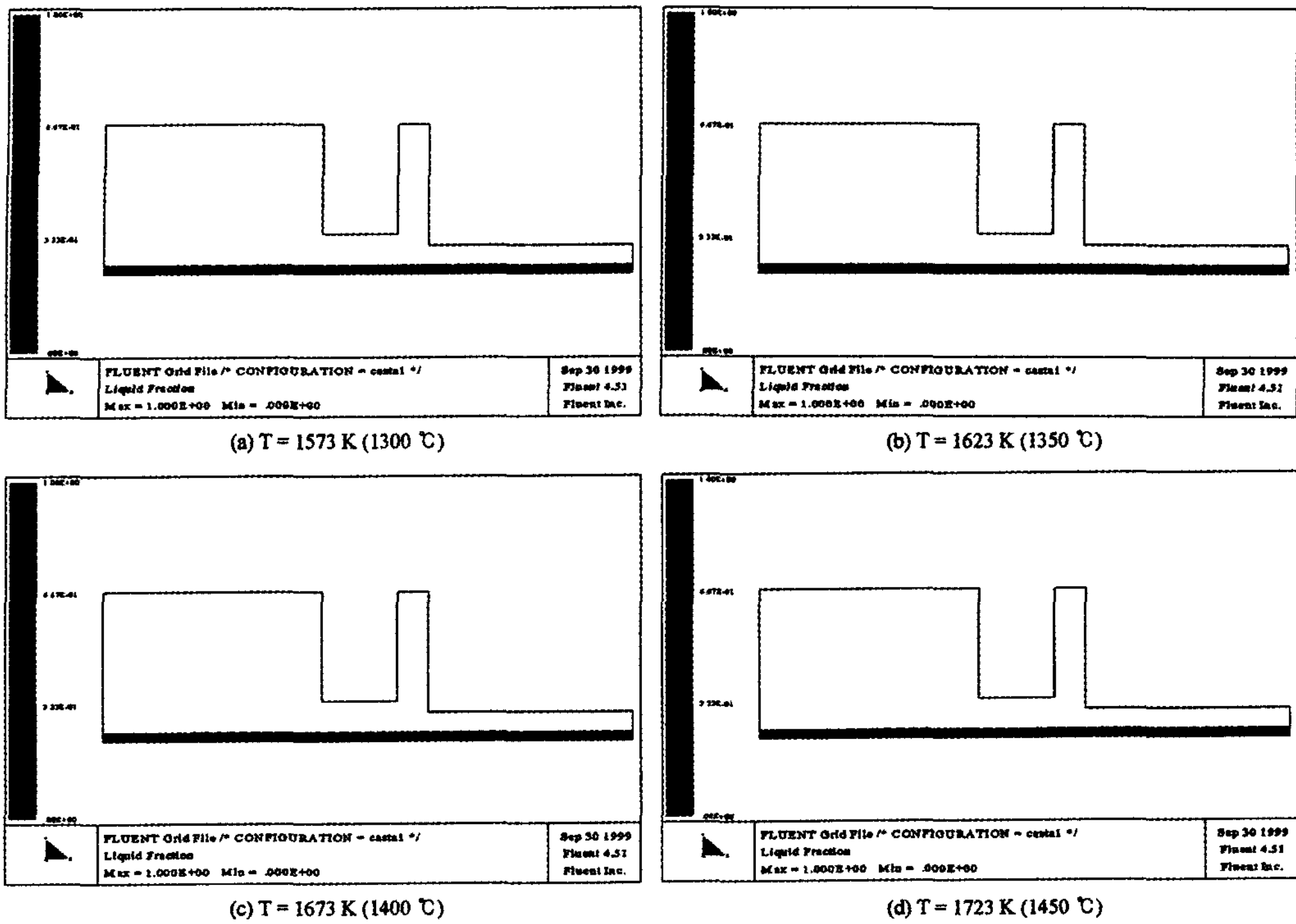


Fig. 6. Contours of liquid fraction as a variation of pouring temperature ($V = 2 \text{ mm/s}$, $\delta = 0.1 \text{ mm}$)

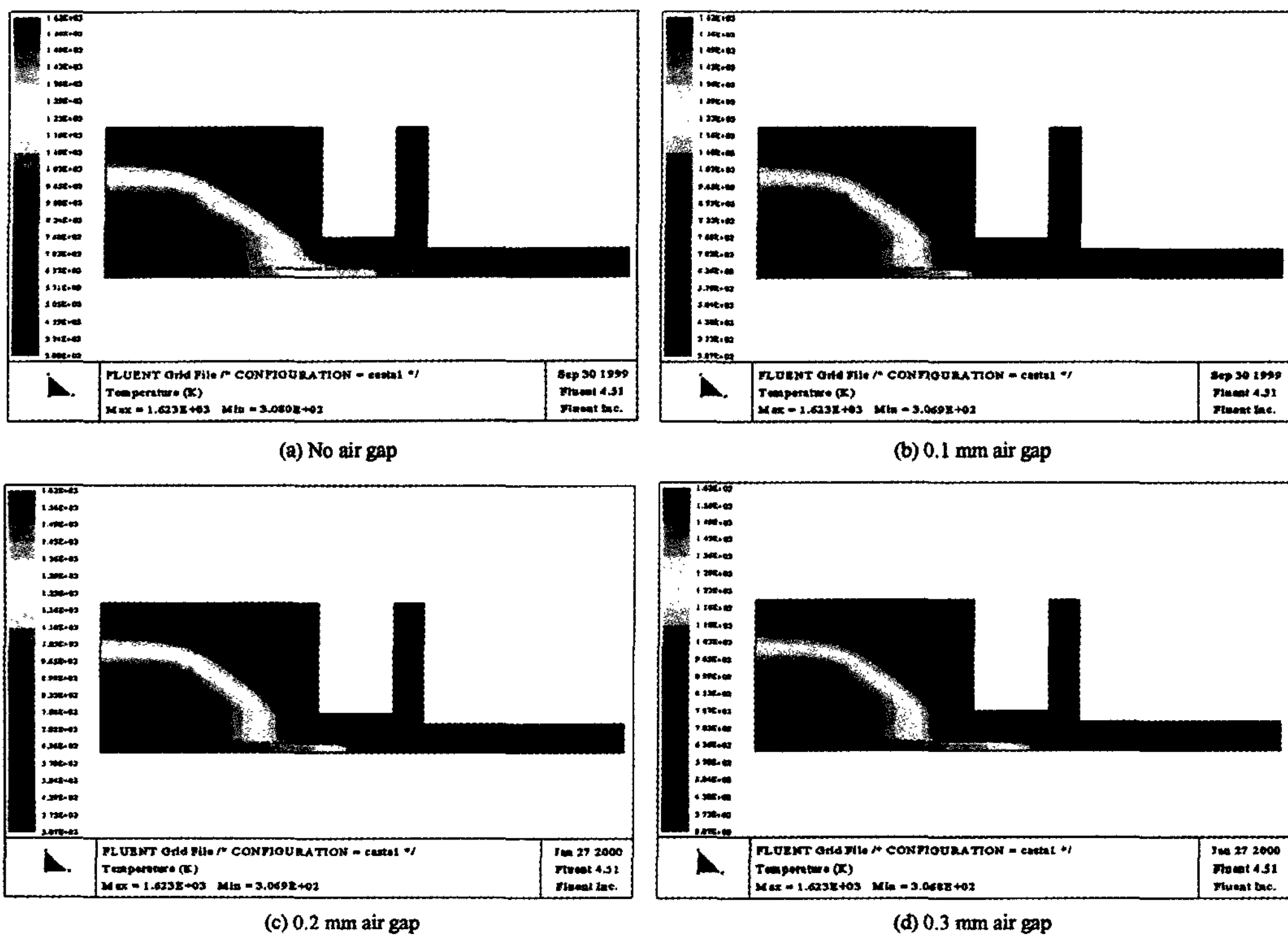


Fig. 7. Temperature contours as a variation of air gap ($T = 1350^\circ\text{C}$, $\delta = 2 \text{ mm}$)

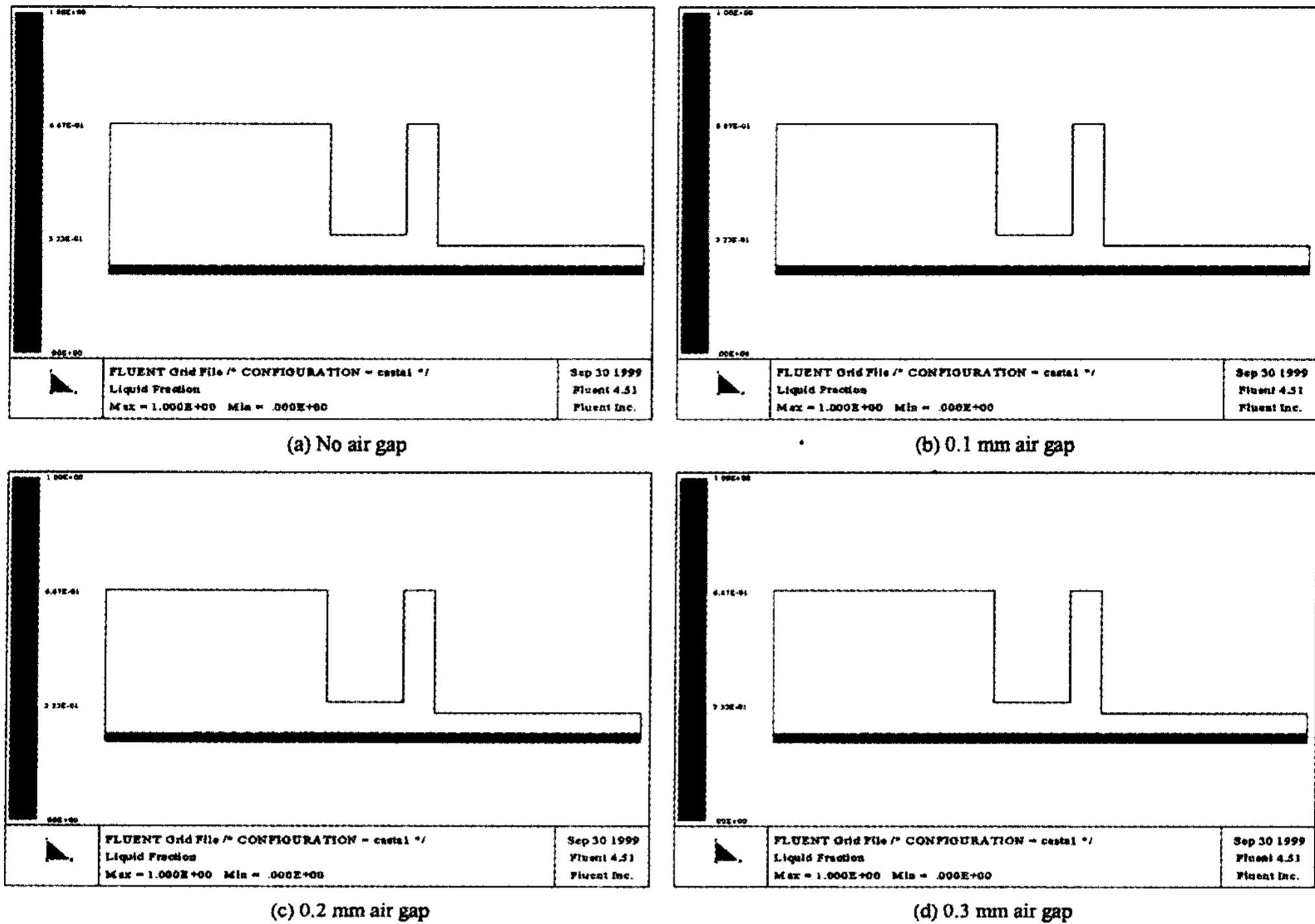


Fig. 8. Contours of liquid fraction as a variation of air gap ($T = 1350^{\circ}\text{C}$, $\delta = 2 \text{ mm}$)

발생되는 위치를 나타내고 있다. 주형의 총 길이가 205 mm이며, 모든 조건에서 주형의 중간 부분인 주형 상부로부터 99-125 mm 지점에서 응고계면이 발생하는

것으로 나타났다. 해석결과에서 용탕의 주입온도 보다는 주입속도 및 주형과 주괴사이의 공극이 온도분포에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Table 2. Distance from the top of the mold to the solidifying point

Analysis condition	Distance from the top of mold to the solidifying point (mm)
1. Casting velocity	
- 1 mm/s	99
- 2 mm/s	107
- 3 mm/s	115
- 4 mm/s	123
2. Pouring temperature	
- 1300°C	104
- 1350°C	107
- 1400°C	111
- 1450 °C	115
3. Air gap	
- 0.0 mm	102
- 0.1 mm	107
- 0.2 mm	115
- 0.3 mm	124

5. 결 론

금속 우라늄봉 제조용 연속주조장치에서 용탕의 주입속도 및 주입온도, 냉각조건 등이 온도분포 및 응고양상에 미치는 영향을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용탕의 주입속도 및 온도 변화에 따른 해석 결과, 연속주조공정에서 용탕의 주입온도 보다는 주입속도가 더 큰 변수로 작용함을 알 수 있었다.
- 2) 주편과 주형사이에 발생하는 공극이 온도분포에 큰 영향을 미치므로 정확한 해석 결과를 얻기 위해서는 공극의 예측이 필수적으로 선행되어야 할 것이다.
- 3) 길이 205 mm의 주형 중간 부위에서 응고계면이 발생되어 본 장치를 이용하여 우라늄 금속봉 주조가 가능할 것으로 사료된다.
- 4) 본 연구에서 얻어진 결과로서 우라늄 금속봉 주

조시 작업조건을 보다 정량적으로 설정하여 주조시험 과정에서 발생하는 시행착오를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

5) 열해석 결과를 기초로 연속주조장치를 설계하였으며, 또한 해석결과는 향후 주조시험을 위한 기본 자료로 활용될 예정이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Y. J. Shin et al. : Proceeding of Korea Nuclear Society

Spring Meeting, Korea Nuclear Society, (1998) 497-501

[2] S. Kawasaki et al. : Nippon Steel Technical Report, No. 23, (1984) 69-76

[3] H. Fujii et al. : Nippon Steel Technical Report, No. 13 (1979) 18

[4] J. E. Lee et al. : J. of Korean Inst. Met. & Mater, 34 (1996) 723

[5] FLUENT Computational Fluid Dynamics Software Version 4.5, Fluent Inc., 1995

[6] Metals Handbook, American Society for Metals, 1978

[7] Takeshi Ikushima : A Material Property Data Library for Thermal Analysis of Radioactive Material Transport Casks, JAERI-Data/Code 98-009, 1998

[8] J. P. Holman : Heat Transfer, International Student Edition 5th Ed. 1985