

'99 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

금속 우라늄봉 주조용 연속주조장치 설계를 위한 열전달해석

Thermal Analysis for the Design of Continuous Casting Equipment of Metallic Uranium Rod

이주찬, 이운상, 구정희, 신영준

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

금속 우라늄 봉을 주조하기 위한 연속주조장치를 설계하였으며, 이 연속주조 공정에서의 물리적 현상을 컴퓨터 코드를 이용하여 시뮬레이션 함으로써 그 결과를 미리 예측하여 정확한 방안을 세움으로써 시행착오를 줄이기 위한 예비 열전달해석을 수행하였다. 유동 및 상변화를 고려한 열전달해석 모델을 사용하였으며, 유한체적 수치해석기법을 이용하여 해석을 수행하였다. 연속주조장치 설계에서는 주조속도, 주조온도 및 냉각조건 등이 중요한 변수가 되며, 본 연구에서는 주조속도, 주조온도 및 주형과 주괴 사이의 공극이 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과는 연속주조장치 설계, 제작을 위한 기본 자료로 활용될 예정이다.

Abstract

Continuous casting equipment has been designed to cast the metallic uranium rods, and a preliminary thermal analysis was carried out for continuous casting process. This analysis is to simulate the various physical phenomena in the casting process using a computer code to predict casting results and to establish the correct casting design. 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 velocity, casting temperature and cooling conditions should be considered as significant factors. In this study, the effects of casting velocity, casting temperature, and the gap between the uranium and mold are investigated. The results obtained this study will be applied to the design and fabrication of continuous casting equipment.

1. 서론

원자력연구소에서는 사용후핵연료 차세대 관리기술의 하나로 현재 가압경수로에서 발생하고 있는 사용후핵연료를 리튬 금속으로 전환시켜 우라늄 금속봉으로 주조하여 저장하는 차세대 관리 공정개발에 관한 연구를 수행하고 있다[1]. 이 주조봉은 직원도 및 직진도가 좋고 기공 등 결함이 없도록 주조되어야 하며, 우라늄 금속봉을 주조하기 위해 연속주조 장치를 설계하였다. 연속주조법은 용강의 정련과정에서 주형으로부터의 주입, 냉각, 절단, 압연 등의 일련의 공정이 연속적으로 이루어지기 때문에 실수율과 연료 이용면에서 매우 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 연구의 목적은 주조공정에서의 물리적 현상을 컴퓨터 코드를 이용하여 시뮬레이션함으로써 그 결과를 미리 예측하여 정확한 방안을 세움으로써 불량률 미리 방지하고 주조 과정에서 발생될 수 있는 시행착오를 최소화하는데 있다. 본 연구에서는 용탕의 주입조건 및 주편과 주형 사이의 공극 변화에 따른 해석을 수행하여 이들이 온도분포에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 연속주조장치의 개요

지름 13.5 mm, 길이 3 m의 우라늄 금속봉을 주조하기 위하여 연속주조장치를 설계하였다. 연속주조장치는 진공 챔버, 고주파유도 가열장치, 도가니, 주형 및 인출기 등으로 구성되며, 그림 1은 연속주조장치를 나타내고 있다. 1차 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 조정하여 연속주조 과정에서 용탕의 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 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. 연속주조 주형은 boron nitride를 사용하였으며, 주형에 열전대를 설치하여 연속주조 공정시 인출기와 연계하여 주조속도를 조절할 수 있도록 하였다.

3. 수치해석 이론

열해석에서는 Fluent 코드[2]를 사용하였으며, Fluent는 질량, 운동량, 에너지 그리고 화학종의 보존방정식을 기반으로 하는 범용 유동해석 코드로서 유한체적법(Finite Volume Method)을 이용하고 있다. 이와 같은 CFD 코드는 유동 및 열전달, 물질전달 및 화학반응 문제 등에 대한 해석할 수 있으며, 압축성, 비압축성 유동해석이 가능하고 자동차 산업, 전자장비 냉각계통, 열교환기 및 furnace 등의 해석에 널리 사용되고 있다. Fluent는 상변화를 갖는 문제에서 유동해석을 수행할 수 있으며, 연속주조 공정에 대한 해석도 가능하다.

주형 내를 흐르는 용융 금속의 거동은 일반적인 Navier-Stokes 방정식을 따르며, 층류유동을 가정하면 다음과 같이 표현된다.

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

이때, 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,

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

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.

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

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

4. 전산해석 평가

4.1 해석 모델링

연속주조장치의 열해석 모델은 2차원 축대칭 모델을 사용하였으며, 그림 2는 해석모델에 대한 치수, 재료 및 경계조건 등을 나타낸다. 표 1은 온도에 따른 우라늄의 열적인 물성치 [3, 4]를 요약하였으며, 온도의 변화에 따라 물성치가 큰 차이를 보이므로 온도에 따른 물성치를 고려하였다.

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	160	-
1300	-	160	-
1405	17,250	-	-

우라늄의 용융 온도는 1405 K이고, 잠열은 50,000 J/kg, 점성계수는 0.0065 kg/m-s를 적용하였다. 단열재인 graphite felt의 열전도율은 0.5 W/m-K를 고려하였다. 주형은 boron nitride 재료로 총 길이는 205 mm로 하였으며, 상단 65 mm까지는 우라늄, 주형 및 지르코니아 도가니의 모든 부위 온도가 용탕의 온도와 같은 1350 °C로 가정하였다. 주형의 상부는 단열재인 graphite felt로 감싸서 보온을 유지하도록 하였고, 주형 하단부는 냉각수를 통하여 냉각되도록 하였다. 냉각수와 접하는 주형 표면에서의 대류열전달계수는 냉각수를 정지된 유체로 가정하여 다음 식으로 구할 수 있다[5].

$$h = Nu_d \frac{k}{d} \text{-----} (4)$$

여기서,

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

k : Thermal conductivity of water (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 관계식을 사용하여 냉각수와 접하는 주형 표면에서의 열전달계수 $H = 2,000 \text{ W/m}^2\text{-K}$ 를 고려하였다. 모델의 외부는 진공 챔버로 밀폐되어 있으며, 진공 챔버 내부의 온도는 100 °C로 가정하여 대류 및 복사가 일어나는 것으로 고려하였다. 주형으로부터 인출된 봉은 외부 대기에 의해 자연 냉각되는 것으로 하였다. 해석조건은 용탕의 주입온도 1350 °C, 주입속도 2 mm/s, 냉각대의 냉각수온도 27 °C, 주형과 주편 사이의 공극 0.1 mm를 기본모델로 하여 주입속도 및 온도 그리고 공극의 변화에 따른 해석을 수행하였다.

4.2 해석결과 및 평가

주형에서의 평균 열전달율은 주조속도가 증가함에 따라 커지게 되며, 주조속도가 온도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 용탕의 주입속도를 1 mm/s ~ 4 mm/s로 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 이때 주입온도는 1350 °C, 주형과 주편 사이에는 0.1 mm의 공극이 있는 조건으로 하였다. 그림 3은 주입속도에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 주입속도가 빠를수록 주편의 온도가 크게 상승함을 보이고 있다. 따라서 연속주조장치 설계에서 주입속도가 중요한 변수임을 알 수 있다. 그림 4는 주입속도 변화에 따른 응고계면을 나타내고 있으며, 주입속도가 빠를수록 응고계면이 하부로 이동됨을 보이고 있다.

용탕의 주입온도를 1300 °C, 1350°C, 1400 °C, 1450 °C로 변화시켜 가면서 해석을 수행하였으며, 이때 주입속도는 2 mm/s로 하였다. 그림 5, 6은 용탕의 주입온도에 따른 온도분포 및 응고계면을 나타내고 있으며, 주입온도에 비례하여 온도가 높게 나타남을 알 수 있다.

연속주조에 있어서 주형은 주편으로부터 열을 빼앗는 한편 응고된 고상이 충분한 강도를 가질 때까지 이를 지지하는 역할을 한다. 초기에 주형과 밀착되어 있던 응고층은 냉각이 진

행되면서 수축을 하려고 하지만 내부에서 작용하는 장력으로 인하여 일정기간은 주형과 접촉해 있게 된다. 그러나 냉각이 진행됨에 따라 응고층은 주형과 분리되어 주형과 주편 사이에 공극이 발생하게 된다. 이 공극의 열저항에 의한 영향을 평가하기 위하여 공극이 없는 경우와 0.1 ~ 0.3 mm의 공극이 있는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 그림 7, 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 중요하다.

5. 결론

본 연구에서는 Fluent 코드를 이용하여 연속주조장치에 대한 열전달해석을 수행하였다. 용탕의 주입속도 및 주입온도, 그리고 주편과 주형 사이의 공극 변화에 따른 해석 결과 용탕의 주입온도 보다는 주입속도가 온도분포에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 또한, 주편과 주형사이의 공극도 온도분포에 큰 영향을 미치므로 정확한 온도분포를 얻기 위해서는 공극의 예측이 필수적으로 선행되어야 할 것이다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과는 연속주조장치의 설계 및 제작을 위한 기본 자료로 활용될 예정이며, 향후에는 냉각조건 등 및 기타 변수를 고려하여 정확한 온도분포를 예측하기 위한 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] 신영준외 "사용후핵연료 차세대 관리공정 요소기술 검증시험(I)", '98 춘계학술발표회 논문집 pp497- 501, 한국원자력학회, 1998.
- [2] FLUENT Computational Fluid Dynamics Software Version 4.3, Fluent Inc., 1995.
- [3] "Metals Handbook", American Society for Metals, 1978.
- [4] Takeshi Ikushima, "A Material Property Data Library for Thermal Analysis of Radioactive Material Transport Casks", JAERI-Data/Code 98-009, 1998.
- [5] J. P. Holman, "Heat Transfer", International Student Edition 5th Ed, 1985.

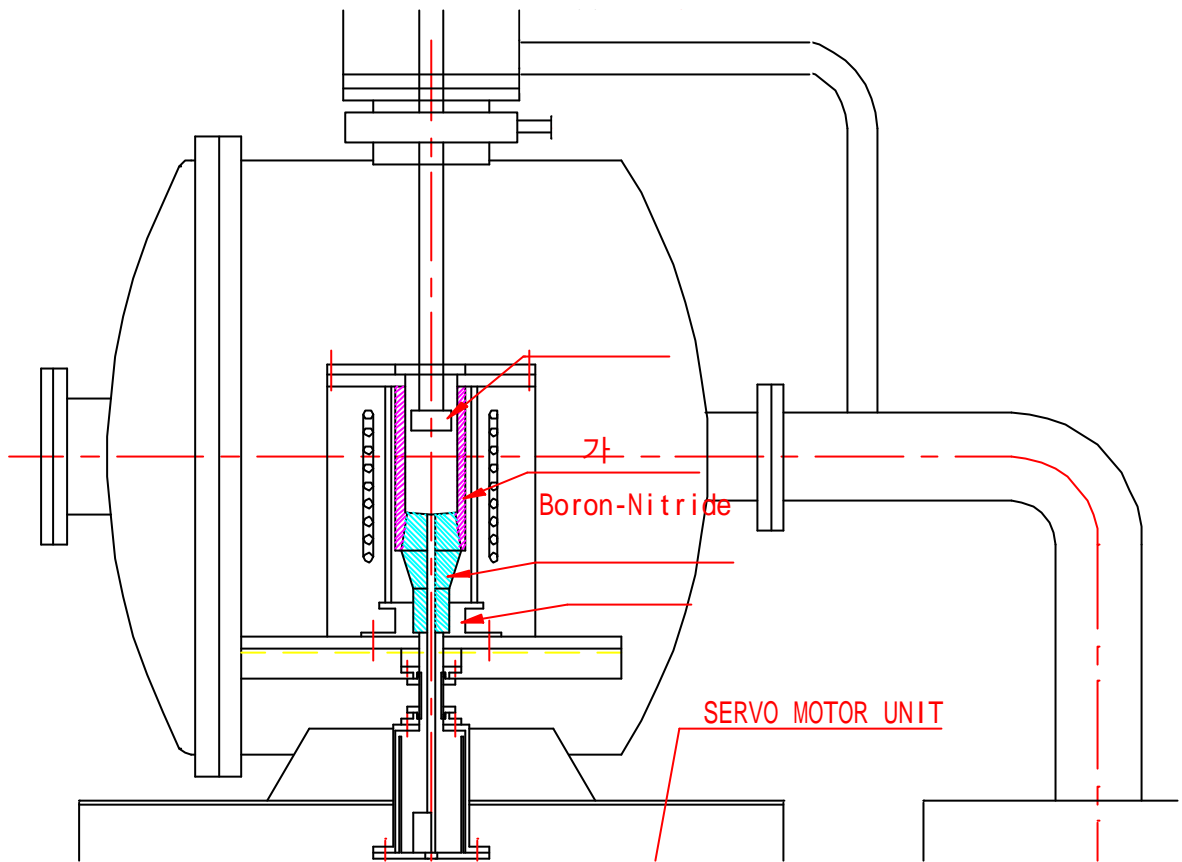


Figure 1. Drawing of Continuous Casting Equipment.

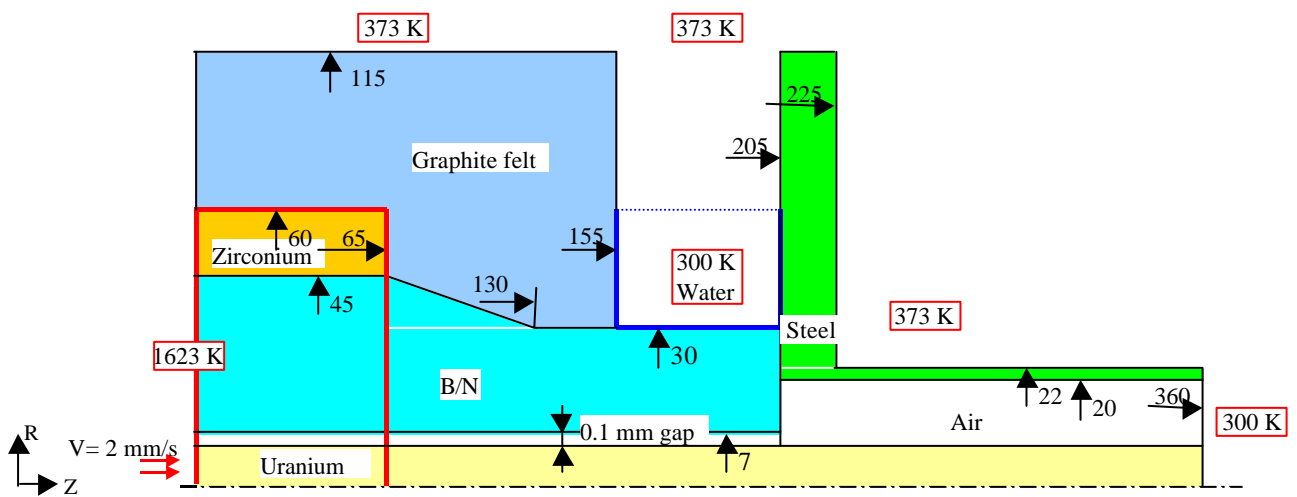
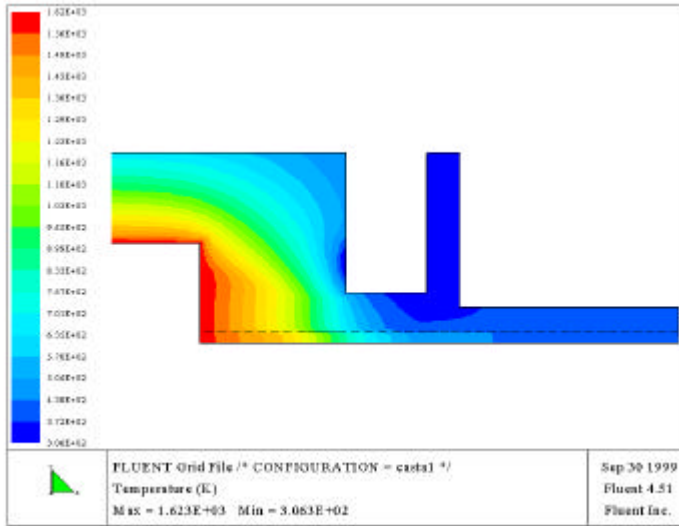
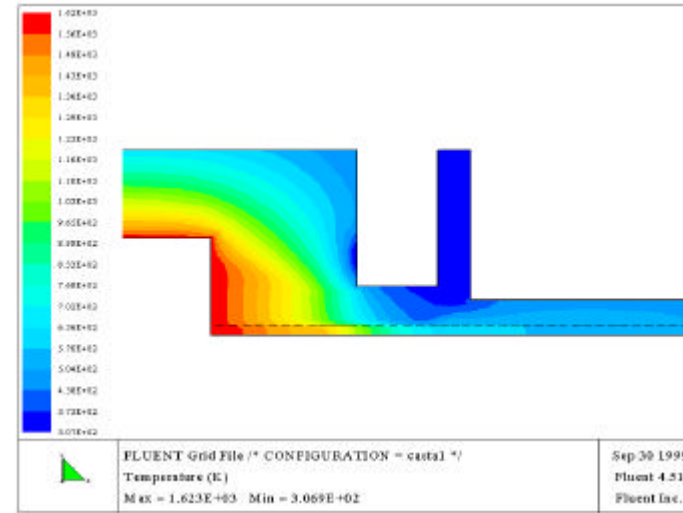


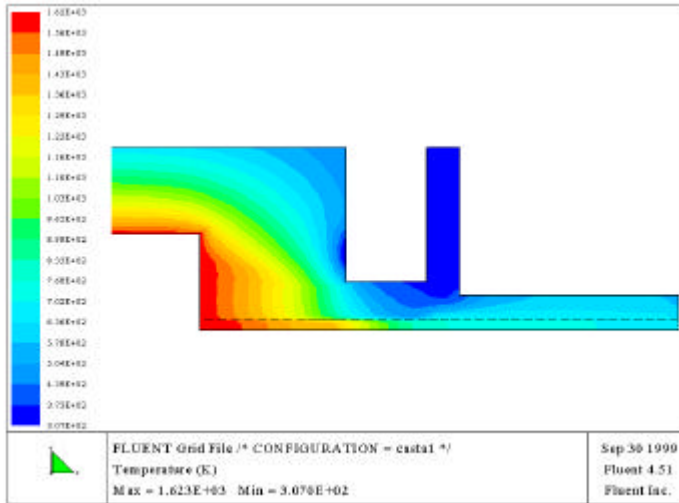
Figure 2. Thermal analysis model.



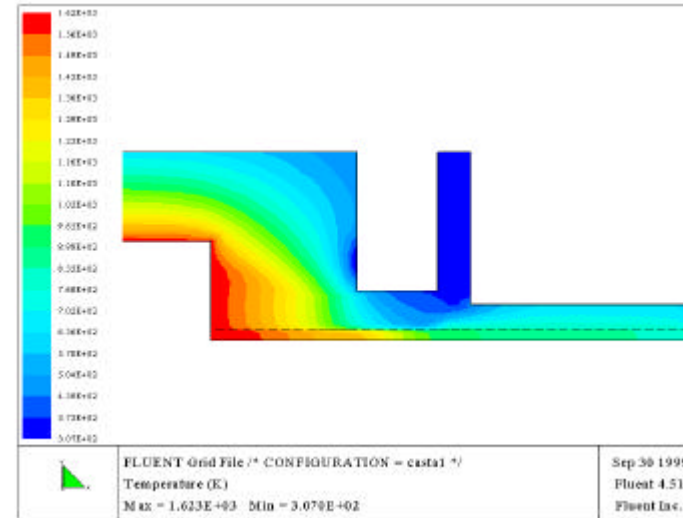
(a) V = 1 mm/s



(b) V = 2 mm/s

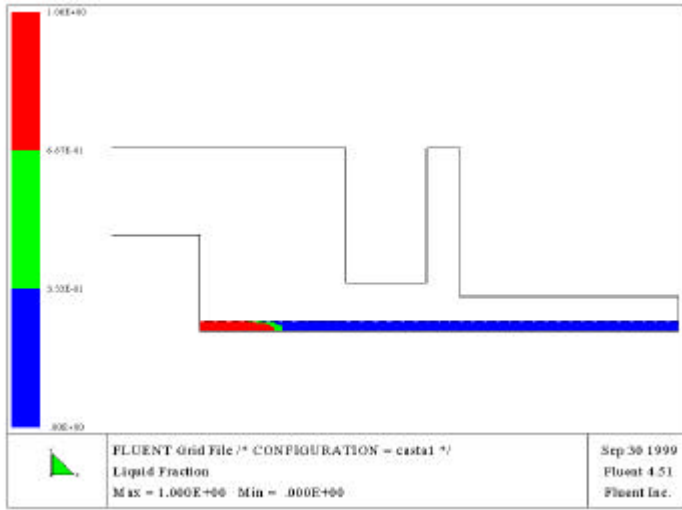


(c) V = 3 mm/s

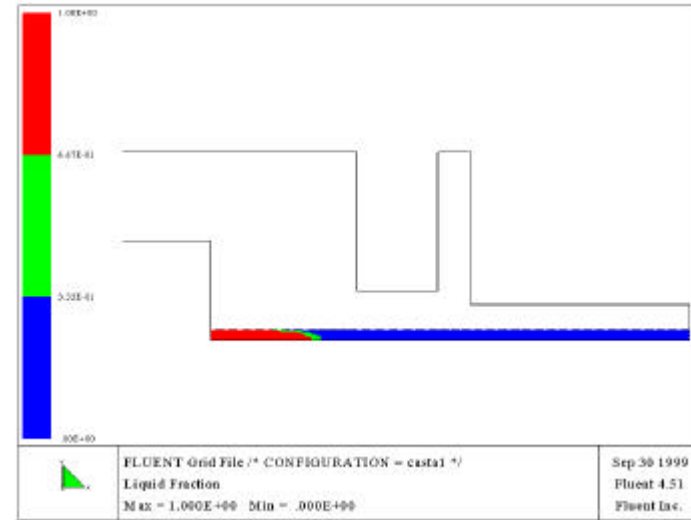


(d) V = 4 mm/s

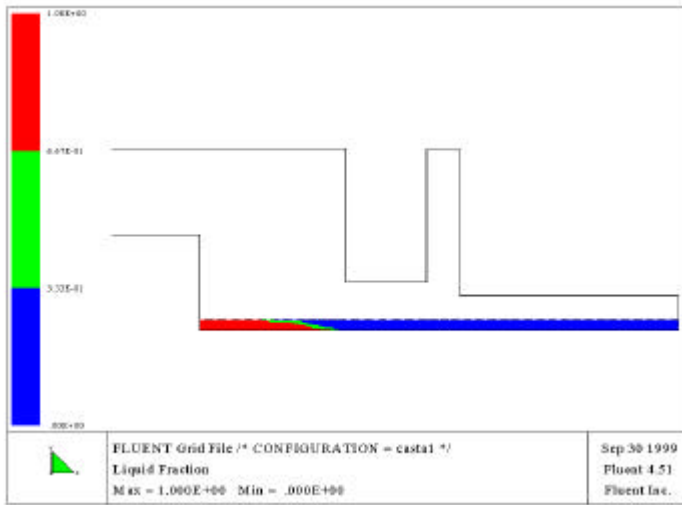
Fig. 3. Temperature Contours as a Variation of Casting Velocity.



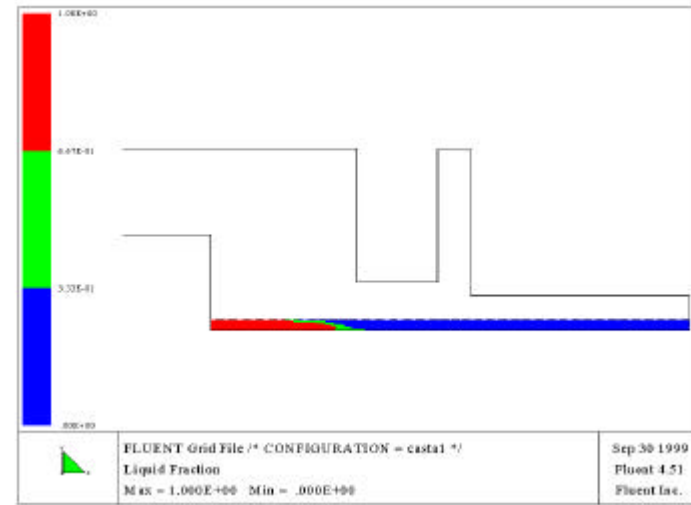
(a) $V = 1$ mm/s



(b) $V = 2$ mm/s

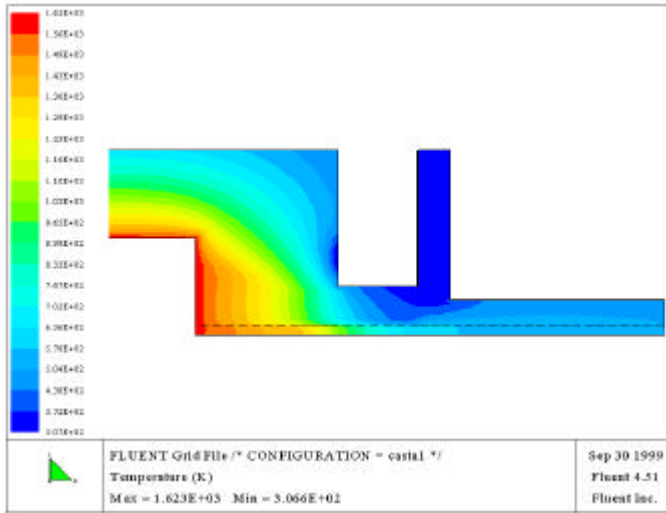


(c) $V = 3$ mm/s

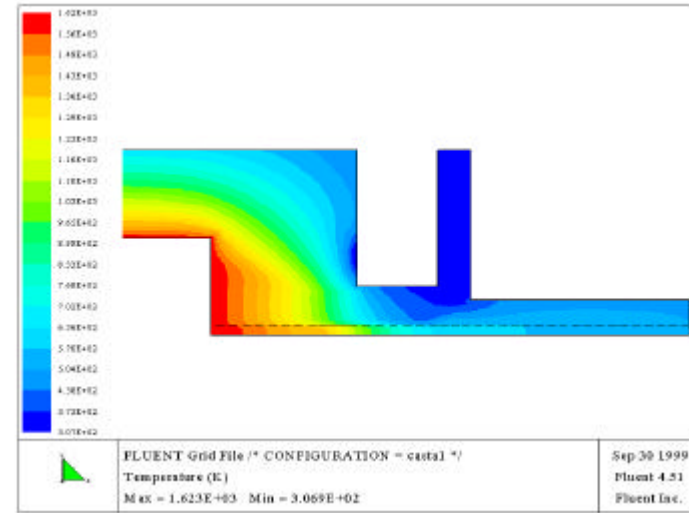


(d) $V = 4$ mm/s

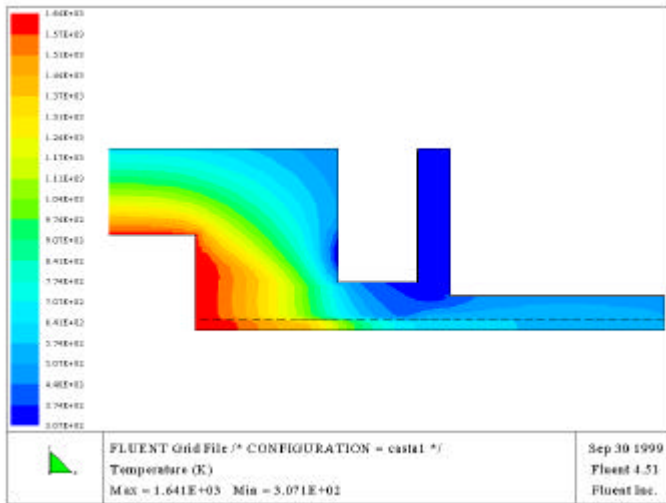
Fig. 4. Contours of Liquid Fraction as a Variation of Casting Velocity.



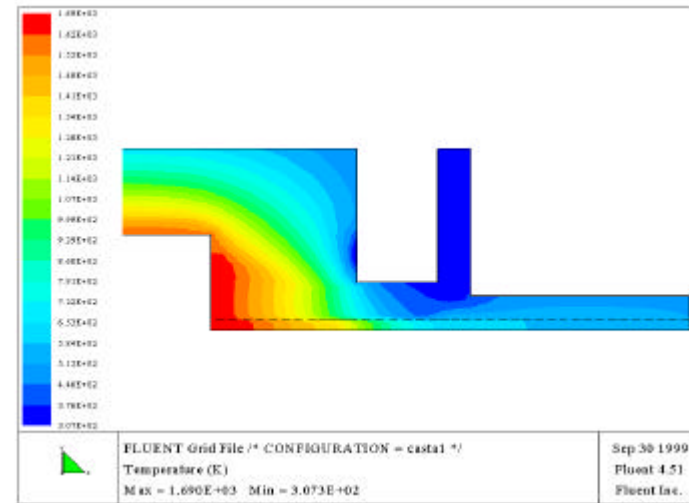
(a) T = 1573 K (1300 °C)



(b) T = 1623 K (1350 °C)

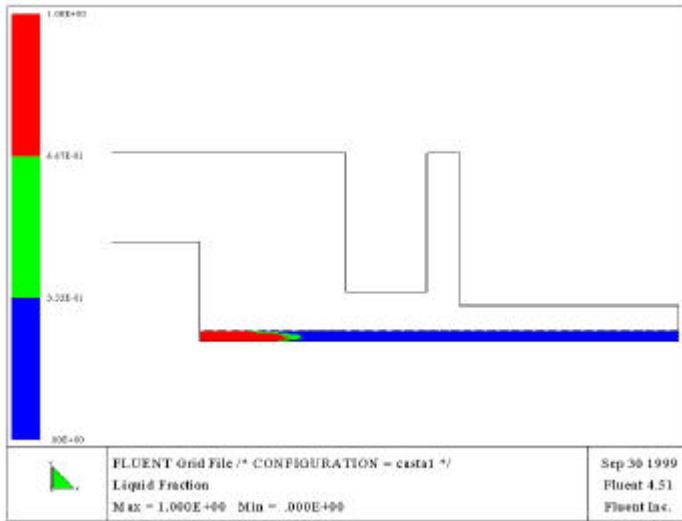


(c) T = 1673 K (1400 °C)

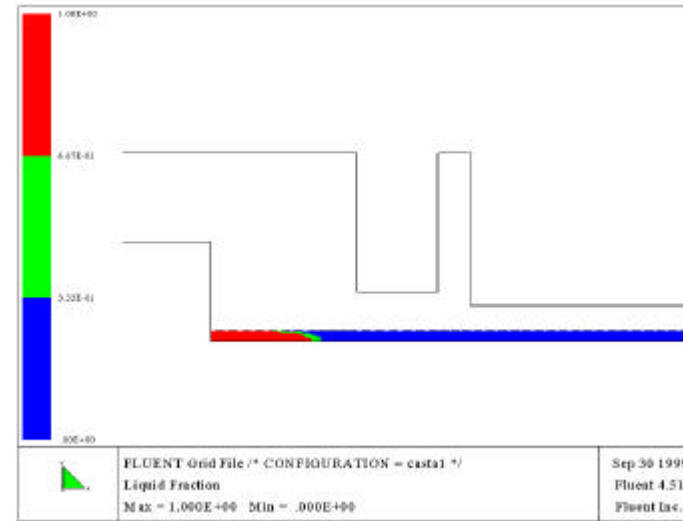


(d) T = 1723 K (1450 °C)

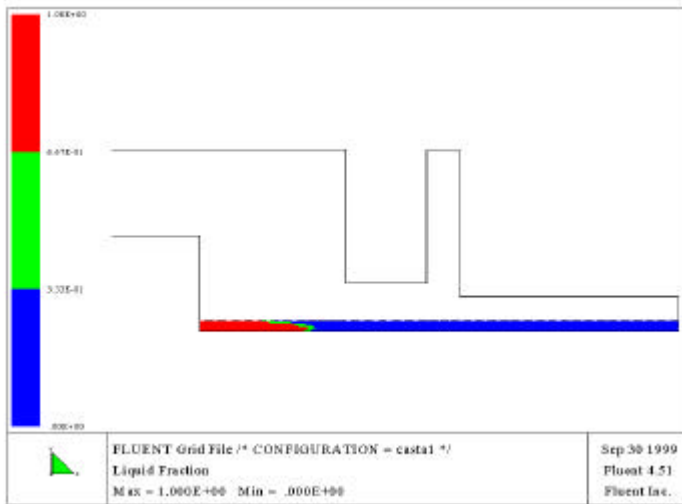
Fig. 5. Temperature Contours as a Variation of Casting Temperature.



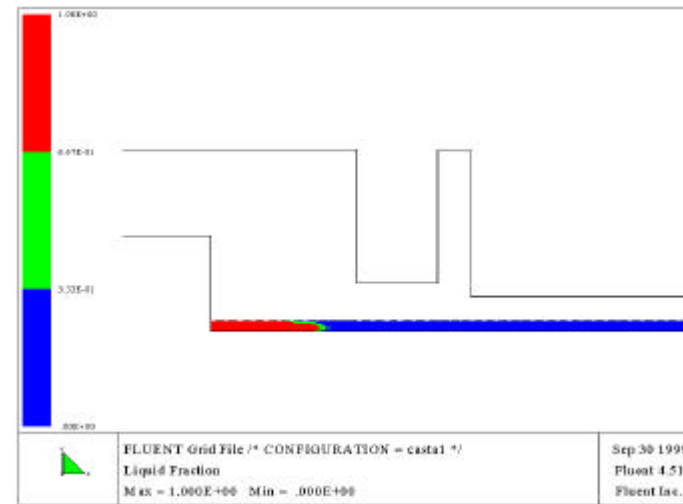
(a) T = 1573 K (1300 °C)



(b) T = 1623 K (1350 °C)

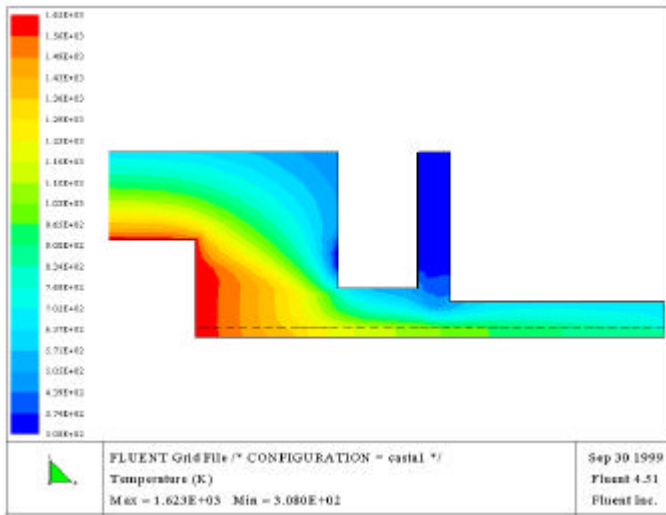


(c) T = 1673 K (1400 °C)

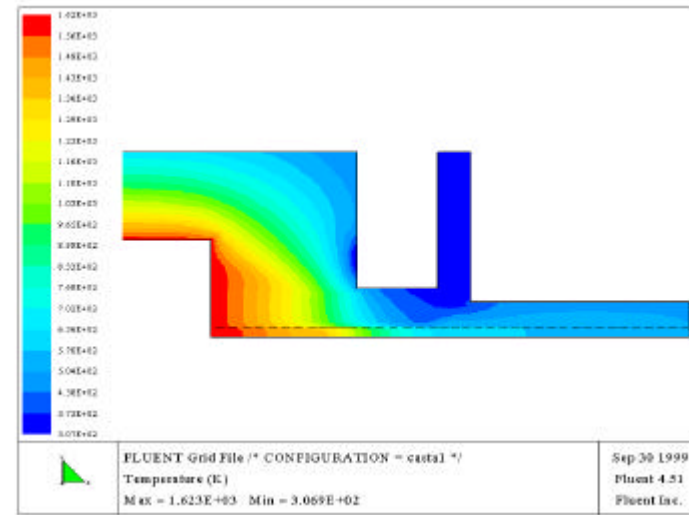


(d) T = 1723 K (1450 °C)

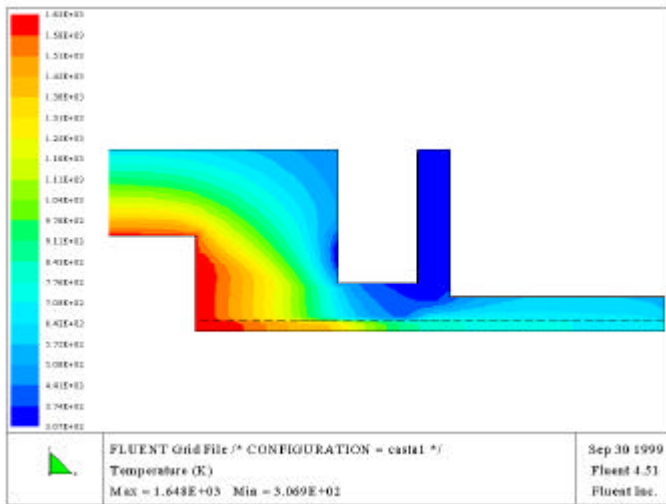
Fig. 6. Contours of Liquid Fraction as a Variation of Casting Temperature.



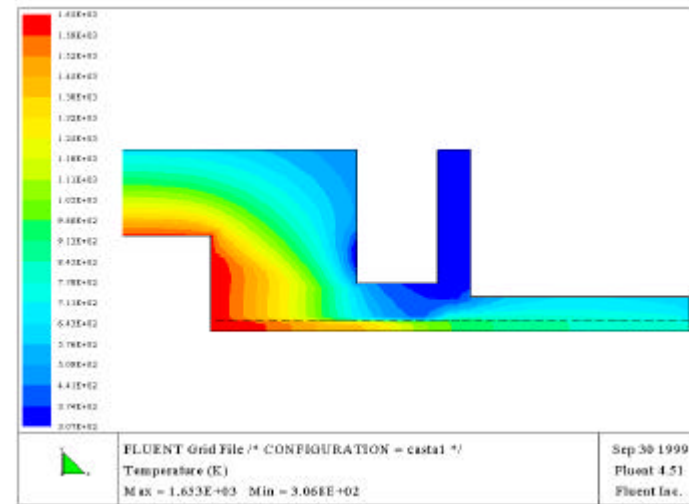
(a) No air gap



(b) 0.1 mm air gap

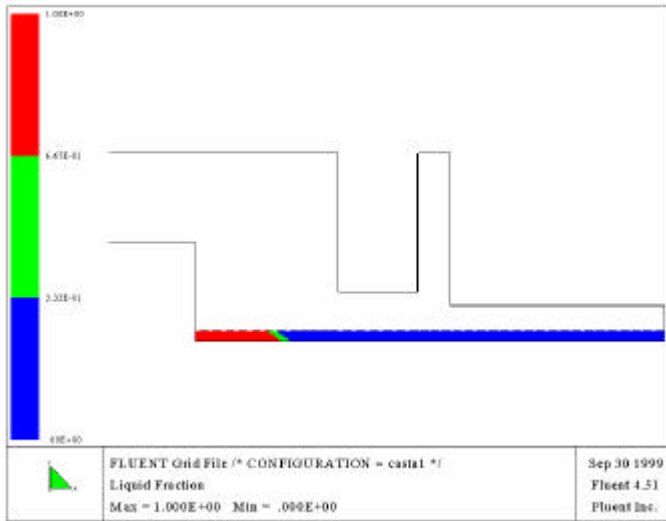


(c) 0.2 mm air gap

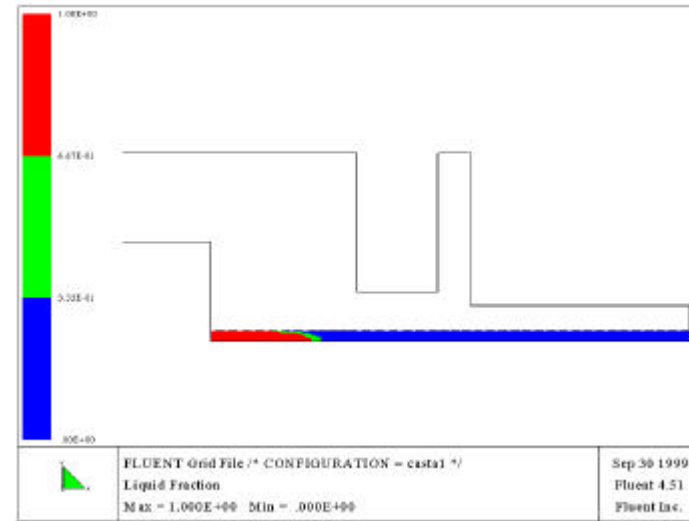


(d) 0.3 mm air gap

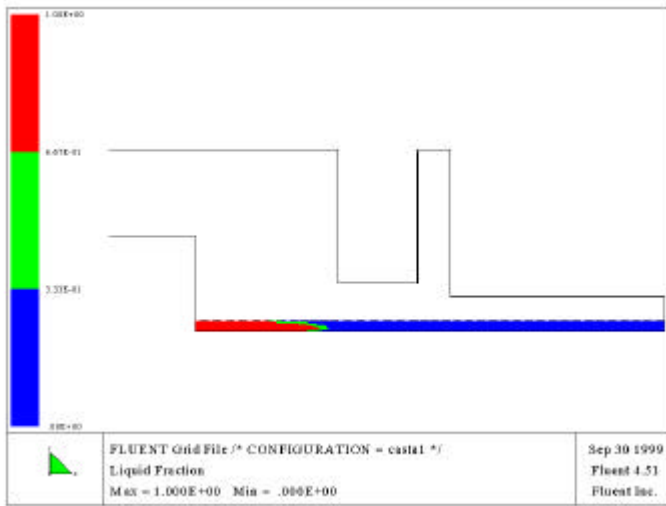
Fig. 7. Temperature Contours as a Variation of Air gap.



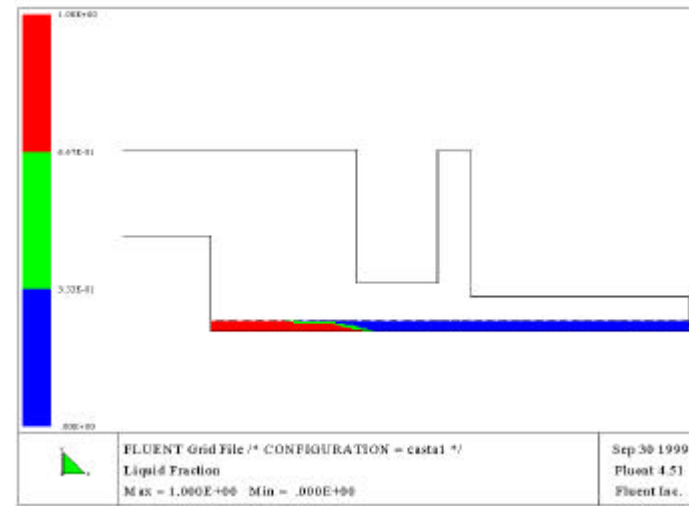
(a) No air gap



(b) 0.1 mm air gap



(c) 0.2 mm air gap



(d) 0.3 mm air gap

Fig. 8. Contours of Liquid Fraction as a Variation of Air gap.