

연속주조 공정의 열적모델 및 해석



강 병 하

한국과학기술연구원 열·유체공학연구실

● 1958년생.
● 생산공정에서의 열전달을 전공하였으며, 열·유체기계시스템의 열해석에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

철강 생산 공정 중에서 연속 주조법(continuous casting process)은 비교적 최근에 개발되었지만 일반 조괴법에 의한 것보다 월등한 장점들로 인해 제강 공정에서 차지하는 비율(연주비)은 점점 증가하여, 1973년의 10%에 비해 1985년에는 40% 1988년에는 53% 그리고 현재에는 65% 이상을 보여 주고 있다. 이러한 연주비의 급속한 증가는 일반 조괴법보다 연속 주조 공정에서는 제품 품질의 균일성, 수율향상, 공정 단축 및 자동 공정이 가능하기 때문에 투자비, 노동비 그리고 에너지 절감 효과가 월등한데서 기인하고 있다.^(1,2)

연주공정에서 발생할 수 있는 여러가지의 제품 결함의 발생을 억제하고 양질의 주편을 대량으로 생산하기 위하여 각종 요소 기술이 꾸준히 개발되어 왔다. 그 중에는 높은 생산성 향상을 위한 고속주조(2m/min 이상) 기술, 용강저장기(ladle)-용강분배기(tundish)-주형(mold)간 일체형시스템 채용에 의한 용강 청정도 향상, 용강분배기에서의 전자 교반(electromagnetic stirring) 기술, 주형용 플럭스(flux) 및 2차 냉각시의 공기 안개 냉각(air mist cooling) 기술 등이 있는데 최근에는 대기시간의 단축 및 에너지 절약을 위해 연주기를 빠져나온 주편이 곧바로 압연공정으로 연결되는

HCR(hot charged rolling) 혹은 HDR(hot direct rolling)공정이 개발되었으며, 또한 자동기 및 운전중 생기는 문제를 예지하는 기술이 개발되어 조업의 무인화가 실현되고 있다.^(2~4) 주형 및 2차 냉각대에서의 냉각률이 주편의 응고과정, 주편의 품질, 연주물의 생산성 등에 크게 영향을 미치기 때문에 이에 대한 연구가 향후 연구기의 설계 및 운전 조건에 중요한 과제라 할 수 있다.

따라서 이 글에서는 연속 주조 공정을 간단히 기술하고, 연주기 내에서 일어나는 전열현상을 해석하기 위한 이론적 배경과 주형 및 2차냉각대에서 주편의 응고과정에 관한 열전달 해석 방법과 그 특징적인 결과를 소개하고자 한다.

2. 연속주조 공정의 개요

연속 주조기의 개략도가 그림 1에 나타나 있는데, 그 형태에 따라 그림 2에서 처럼 수직형(a), 수직 만곡형(b) 그리고 만곡형(c) 등 세 가지로 나누어지고, 최근에는 연주 기술의 발달로 연주기의 설비 높이가 최소화되는 만곡형이 많이 사용되고 있다.⁽⁵⁾ 연주기의 주요 구성 부분은 그림 1에 나타나 있는 것처럼 용강저장기(ladle), 용강분배기(tundish), 주형(mold), 냉각장치, 베어링과 롤(roll), 그리고 절단기로 구성되어 있다. 용강저장기는 제강 공정에서

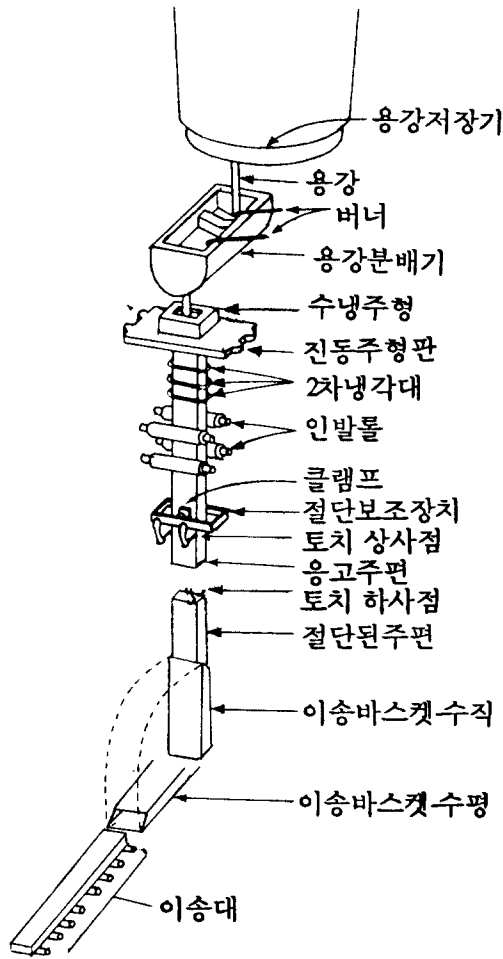


그림 1 연속공정의 개략도

서 정련된 용강을 공급받아 담고 있는 곳이고, 용강분배기는 용강저장기로부터 용강을 공급받아 일시적으로 용강을 저장한 후 각 스탠드(stand)로 분배하는 기능을 하는 곳이며, 수냉주형은 용강분배기로부터 주입된 용강을 일정한 형상으로 초기 응고시켜 주는 곳이며, 2차냉각대에서는 수냉주형을 지난 미응고 주편으로부터 열을 빼앗아 응고를 완료시키기 위한 롤과 스프레이 노즐(spray nozzle)로 구성된다. 그리고 화염(torch)을 이용한 주편 절단장치, 주편을 이송하는 이송대로 구성된다. 따

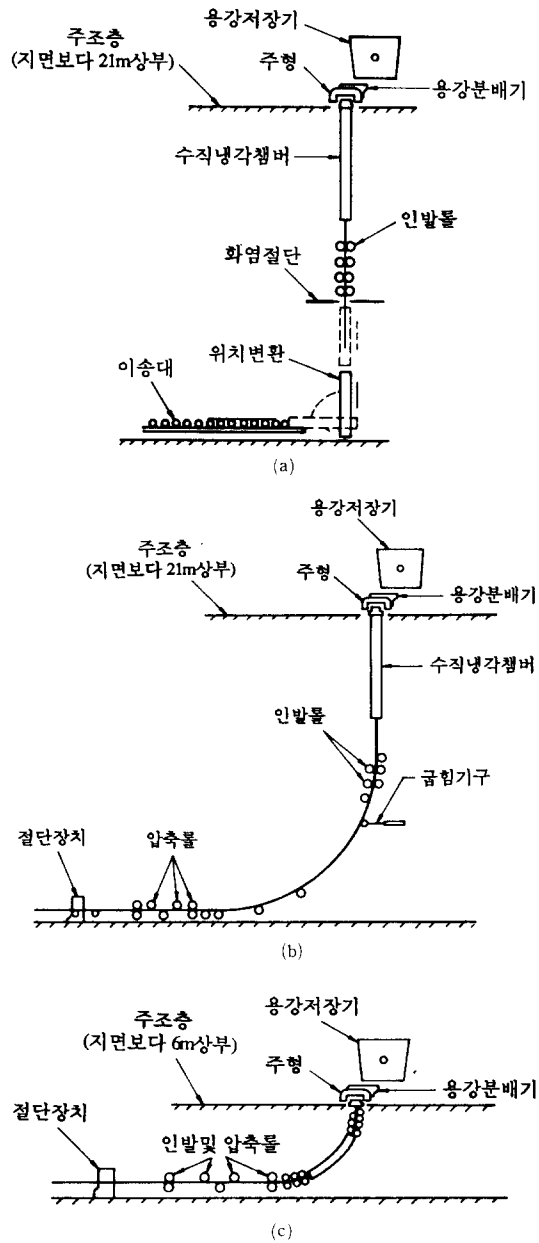


그림 2 3가지 형태의 연주기

라서 연속주조에서는 용강분배기로부터 주형으로 유입된 용강이 주형 내에서의 냉각수에 의한 1차냉각, 물 스프레이에 의한 2차냉각, 그 이후 대기방열에 의한 냉각 등 열전달이 매우

중요한 조업인자가 된다.

연속 주조 공정에서 주편의 품질에 영향을 미치는 열전달 공정은 수냉주형 및 2차 냉각대에서의 주편의 응고 과정으로, 용강의 응고는 수냉주형에서 시작하여 2차 냉각대를 통과하면서 응고가 점차 내부로 진행된다. 응고가 시작되는 지점으로부터 응고가 완전히 완료되는 지점까지의 거리를 응고길이(metallurgical length)라고 칭한다. 주조 속도와 냉각 수량 등의 주조 조건은 주형을 빠져나간 응고층이 용강의 철정압을 견딜 수 있도록 설정되어야 하며 주형과 주편 사이가 구속되는 현상(ticking)을 방지하기 위하여 주형은 수직방향으로 진동하며 주형과 주편 사이의 마찰력을 감소시키기 위하여 오일 혹은 주형 플럭스(flux)를 사용한다.⁽¹⁾ 주형의 재료는 주로 구리 혹은 그래파이트(graphite)를 사용하고, 주형 플럭스로서는 세라믹 파우더(ceramic powder) 혹은 그래파이트 또는 이황화 몰리브덴(MoS₂) 등이 사용된다.⁽⁴⁾

주형 직하부터 주편의 열을 빼앗아 응고가 완료되도록 하는 2차 냉각대는 물 스프레이 노즐들로 구성되어 주조조건에 적합한 냉각수를 살포한다. 2차 냉각대에는 주편을 지지하는 롤이 촘촘하게 배열되어 있다. 그림 3에는 연주

기의 2차 냉각대에서 동적제어시스템에 관한 개념도가 나타나 있다. 롤은 주편이 주조방향으로 똑바로 움직일 수 있도록 하는 기능과 응고시작면으로부터 높이가 낮아짐에 따라 증가하는 용강의 철정압에 의해 주편이 부풀리는 현상(bulging)을 방지하는 기능 등이 있다. 수직형 연주기를 제외하고 항상 존재하는 압착영역(straightening zone)에서는 주편을 곧게 펴고 이후 화염이나 전단기에 의해 목적하는 길이로 절단되고 후속 압연 공정을 위해 검사 혹은 적치된다.

이와 같이 연속주조공정을 궁극적으로 용강의 일련의 응고 과정이므로 열전달이 매우 중요한 조업인자인 동시에 주조조건외의 하나가 된다. 또한 연주기의 열전달은 연주의 생산성뿐만 아니라, 주편 표면 및 내부 품질에 막대한 영향을 미친다. 주편은 응고 중에 냉각과 냉각량 차이에 기인한 복열이 연속적이고, 반복적으로 일어나기 때문에 냉각에 의한 수축과 복열에 의한 팽창이 발생된다. 이와 같이 주편 내에서의 냉각량의 차이에 의한 응고층내 온도 구배의 급격한 변화는 열팽창을 야기하여 인장 응력을 일으킨다. 응고층내 인장응력, 특히 응고계면에서의 응력 집중은 강의 종류에 따라서 차이는 있으나 내부 결함을 유발하고, 주편 표면에서의 불균일 냉각은 표면 결함을 야기한다. 또한 응고층의 두께 및 응고층내 온도 분포는 강의 기계적 성질을 결정하기 때문에 용강의 철정압에 의해서 야기되는 벌징(bulging)량에 큰 영향을 미치므로 주편의 품질을 결정하는 중요한 인자이다.⁽¹⁾ 이와 같이 연주공정에서 열전달 해석을 통해서 연주기의 특성에 적합한 응고층의 두께 분포와 주편내 온도 분포를 결정하고, 이에 적절한 주조조건을 설정하는 것이 연주의 생산성 및 주편 품질 향상에 매우 중요하다.

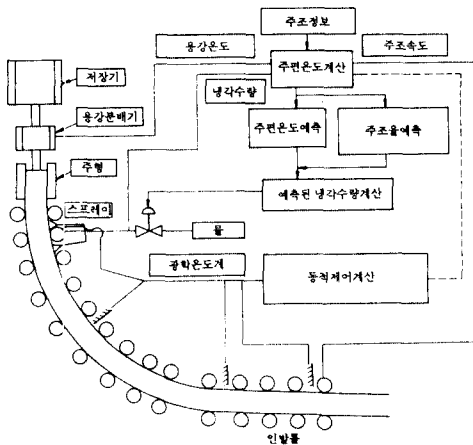


그림 3 연주기의 동적 제어 시스템

3. 연속주조 공정의 응고 과정의 해석

연속주조 공정에서의 열전달 해석은 상변화

과정이 일어나는 문제로 잠열의 흡수 및 방출이 존재하기 때문에 이론적인 해석에는 1차원 문제에 제한되어 있거나 혹은 해석을 위한 여러가지 가정을 필요로 할 만큼 상당히 제한되어 있다. 따라서 실제 문제와 유사한 2차원 및 3차원 해석은 유한 차분법(FDM) 및 유한 요소법(FEM)에 의존하고 있다. 일반적으로 상변화 문제의 해석은 에너지 방정식의 해를 구하기 위해 응고시의 잠열을 어떻게 처리하느냐에 따라 크게 두 가지 방법으로 나누어 진다.

첫번째는 액상 및 고상 영역 전체 영역을 하나의 계산 영역으로 고려하면서 액상-고상 계면에서는 비열 혹은 엔탈피를 적절히 수정함으로써 에너지 방정식의 해를 구하는 방법으로 엔탈피모델(enthalpy model) 혹은 연속체모델(continuum model)이라고 한다.

두번째는 액상과 고상을 분리해서 계산영역을 나누고 액상-고상 계면에서는 적절한 계면조건, 즉 잠열 및 빙점온도를 만족시키면서 에너지 방정식의 해를 구하는 것으로 2-영역(two-zone)모델이 있다. 2-영역 모델에서는 시간과 공간의 미지 함수인 액상-고상 계면을 계산 스텝마다 추적하여 반복계산하는 관계로 정확한 예측은 될지라도 계산 시간이 엔탈피 모델보다 많이 걸린다는 단점은 있다.

지금까지 연속 주조 공정의 해석에 관한 연구 결과들을 살펴보면, 우선 이론적 연구로 초기에는 연주공정에 응용되는 상변화 열전달 문제를 해석하기 위해서 열평형 적분법(the heat balance integral method)이 이용되었다.^(6,7) 이 연구에서는 적분 방정식을 풀기 위해서 다음의 세 가지 가정이 도입되었다.

- ① 열전도가 비록 연주의 축방향으로 일어난다 할지라도 횡방향 열전도만 존재한다.
- ② 주형에서의 냉각시 열전달 계수가 일정하다.
- ③ 용강 전부가 빙점온도로 유지되어 있다고 가정하여 온도구배는 고상층(solid layer)에서만 존재한다.

이러한 방법은 여러 가정 때문에 오직 간단

한 형상 및 조건에서만 가능하다. Mizikar⁽⁸⁾는 이 적분법을 고상내에서 비정상 2차원 열전도 문제까지 확장시켰다. 이 모든 연구들은 연주주편의 인발방향, 즉 축방향으로의 열전도는 무시한 결과이나 Sfeir와 Clumpner⁽⁹⁾는 축방향 열전도를 고려하여 실린더 봉의 연주 과정을 예측하기 위하여 열평형 적분 방법을 응용하였다. 이 결과에서 주편의 인발속도가 느린 경우 즉 저속 주조에서는 축방향 열전도의 영향도 상당하다고 밝혔다. 최근에는 Siegel⁽¹⁰⁻¹⁸⁾은 연속 주조공정에 관한 폭 넓은 해석해를 구하였다. 여기에는 주로 주편내의 열전도만을 고려하여 등각사상(conformal mapping) 그리고 Cauchy 적분식(integral formulatuion)에 의하여 완전해를 구하는 것이 특징이다. 대부분의 연구가 슬랩(slab) 형태의 2차원의 경우로서 경계조건이 액상-고상 계면의 형상 및 응고율 등에 미치는 영향을 고찰하였다. 축방향 열전도를 무시하면 3차원의 슬랩(slab) 연주의 경우에서도 해를 구할 수 있다는 것을 함께 보여 주었다.

연주 공정에 관하여 또 다른 해석적 및 수치적 연구도 많은 연구자들⁽¹⁹⁻²³⁾에 의해 수행되었는데, Blackwell과 Ockendon⁽¹⁹⁾은 주형으로 들어오는 용강의 온도가 주편의 빙점온도와 같고, 균일하게 주입된다는 가정하에서 완전해를 구하였다. 연주기의 여러 구간을 통과하는 주편(billet)의 2차원 모델이 DeBellis와 LeBeau⁽²⁰⁾에 의해서 서술되었는데, 여기서는 연주 공정에서의 여러 변수 즉 용강의 종류, 응고층의 두께, 주편내의 온도 분포 등에 미치는 영향을 논의하였다. Kroeger와 Ostrach⁽²¹⁾는 주형내의 액상 영역에서 자연 대류 효과도 함께 고려하여 순수 금속의 연주 공정중의 온도 및 유동장을 2-영역(two-zone)모델을 사용하여 유한 차분법으로 수치해석하였다. 계산을 위해 이동격자 및 좌표변환(coordinate mapping) 과정이 도입되었으며, 연구 결과로써 용탕내의 자연대류가 비록 액상의 유동장에는 많은 영향을 미치지만, 액상-고상 계면의 위치 및 형상에는

기의 영향을 미치지 않는다고 보고하였다.

엔탈피 모델 혹은 연속체모델 (continuum model) 이라고 말하는 1-영역 (single-zone) 방법은 앞에서 많은 연구자들이 사용한 2-영역 (two-zone) 방법보다 훨씬 간단하고, 계산 시간이 적게 걸리기 때문에 상변화 문제를 해석하는데 폭 넓게 이용되고 있다. Bennon과 Incropera⁽²⁴⁻²⁶⁾는 2성분 혼합물의 상변화 문제에서 엔탈피 모델을 이용하였고, Hunter와 Kuttler⁽²⁷⁾는 Kirchhoff 변환과 좌표 변환 등과 엔탈피 모델을 조합한 형태로 상변화 관련 이동 경계면을 갖는 열전도 문제를 수치해석하였다. 최근에는 엔탈피 모델에 근거하여 연속 주조공정의 해석을 위해 유한 요소법 및 유한 차분법을 이용하여 용탕내의 자연대류 및 인발 방향의 열전도도 함께 고려한 결과도 발표되었다.^(28,29) 연속 주조 시스템에서의 응고 과정 및 열전달에 관한 체계적인 연구를 통하여 현존하는 연주 시스템의 더 나은 운전 조건을 제시할 수 있고, 좋은 품질, 더 높은 생산성 그리고 나아가 미래의 새로운 연주 시스템의 최적 설계에 중요한 역할을 할 수 있을 것이다.

4. 연속주조 공정의 해석 방법

3절에서 소개한 많은 연구자들의 연주공정의 해석에 관한 연구는 크게 세 가지로 분류되며, 본 절에서는 열평형 적분 방정식에 의한 해석해,⁽⁶⁾ 2-영역모델에 의한 2차원 수치해,⁽²¹⁾ 그리고 엔탈피 모델에 의한 수치해⁽²⁹⁾를 구하는 방법과 그 특징적인 결과를 소개하고자 한다.

4.1 열평형 적분 방정식

열평형 적분법은 수리학에서 경계층 문제의 해를 구하기 위해 사용하는 Von Karman과 Pohlhausen의 운동량 적분식과 유사한 방법으로 연속 주조 공정의 문제의 해석에 적용된다. 그림 4는 몇 가지 가정을 전제하고 열평형 적분 방법을 사용하기 위한 연속 주조공정의 개략도를 나타낸 것이고, 그림 5는 적분법을 응

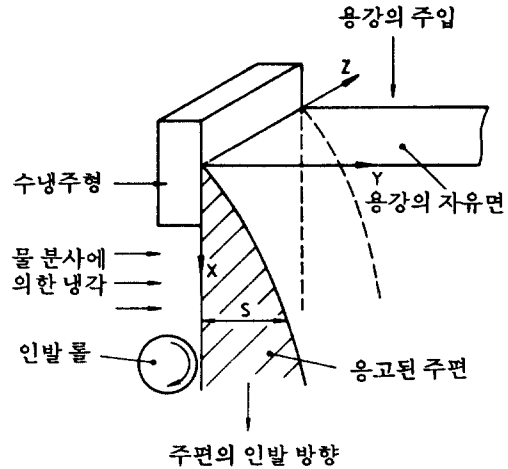


그림 4 열평형 적분법을 적용하기 위한 연주공정 모델

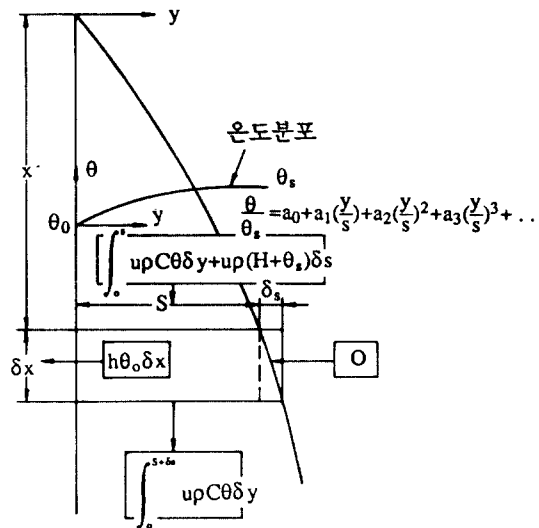


그림 5 연주공정에서의 열평형

용하기 위하여 응고층을 포함한 검사 체적에서의 열평형을 보여 주고 있다. 여기서 에너지 보존 법칙으로부터 다음의 열평형 식을 얻을 수 있다.

$$upC \frac{d}{dx} \left[\int_0^s \theta dy \right] = up(H + C\theta_s) \frac{dS}{dx} - h\theta_0 \quad (1)$$

적분 방정식 (1)의 해를 구하기 위하여 응고층 내의 온도 분포를 다음의 다항식 형태로 가정

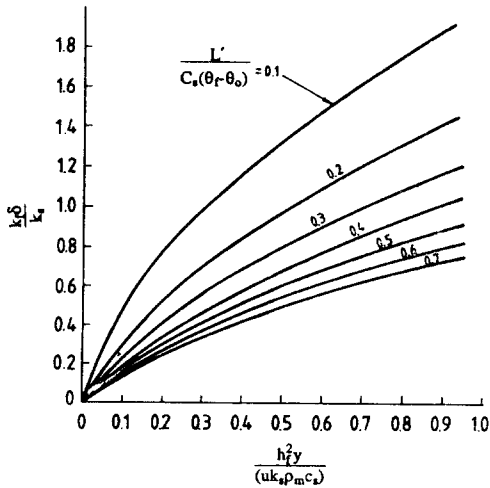


그림 6 주형내 응고 시작면으로부터의 거리와 응고층 두께와의 관계

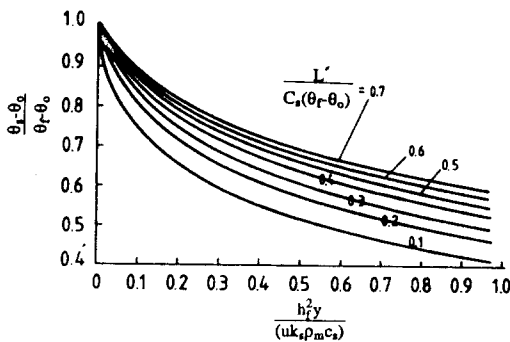


그림 7 주형내 응고 시작면으로부터의 거리와 주형 표면 온도와의 관계

하며, 그 계수들은 경계 조건들로부터 구한다.

$$\frac{\theta}{\theta_0} = a_0 + a_1\left(\frac{y}{s}\right) + a_2\left(\frac{y}{s}\right)^2 + a_3\left(\frac{y}{s}\right)^3 \quad (2)$$

계산결과를 표현하기 위하여 다음 세 개의 무차원 그룹을 도입한다.

$$\frac{h_f y}{uk_s \rho_m C_s}, \quad \frac{L'}{C_s(\theta_r - \theta_0)}, \quad \frac{h_f}{k_s} \delta \quad (3)$$

여기서, h_f 는 주형과 주물 경계면에서의 열전달계수, y 는 주형을 따르는 길이, u 는 연주 속도, θ_0 는 수냉 주형의 온도, d 는 응고층의

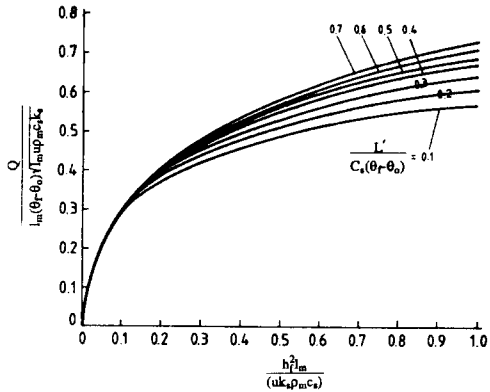


그림 8 주형의 길이와 수냉 주형에서의 열전달과의 관계

두께이며 L' 는 $L + C_m(\theta_p - \theta_r)$ 이다. 적분 방정식의 해석 결과가 이 무차원 변수로 표시되어 그림 6부터 그림 8에 나타나 있다. 이 그림들은 연주기의 예비 설계시에 필요로 하는 적정 주조 속도를 위한 주형의 최소 길이, 응고되는 주편 응고층 두께, 수냉 주형의 최저 냉각수량 등을 예측하는데 사용될 수 있다.

4.2 2-영역모델

2-영역 모델을 이용하여 연속주조공정을 해석하기 위한 개략도가 그림 9에 나타나 있다. 이 그림에서 $X=0$ 에서의 공급되는 용강은 균일한 온도를 가지면서, 전단 면적에 걸쳐서 균일한 층류로 가정한다. 연주 속도, 냉각수량 등의 운전조건 하에서 액상에서의 유동분포, 액상과 고상의 온도분포, 액상-고상 계면의 위치 및 형상 등에 미치는 영향이 관심사이기 때문에 용탕 내의 자연대류 및 주편의 인발방향의 열전도를 고려한 지배방정식은 다음과 같다.

○액상영역에서의 지배 방정식

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\beta g(T - T_s)$$

$$-\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial P_d}{\partial X} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right)$$

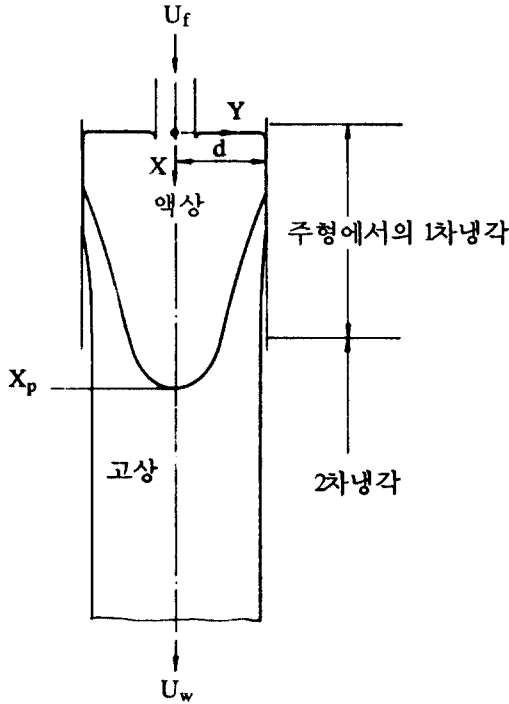


그림 9 2-영역 모델 적용을 위한 연속공정의 개략도

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial P_d}{\partial Y} + v \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right)$$

$$U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y} = \alpha_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

○액상영역에서 경계조건

$$X=0; 0 < Y < Y_0: U=U_f; V=0; T=T_f$$

$$0 < X < X_p; Y=0; \frac{\partial U}{\partial Y}=0;$$

$$V=0; \frac{\partial T}{\partial Y}=0 \quad (5)$$

○액상-고상 계면에서의 필요조건

$$Y=\hat{Y}(X); U=U_w; V=0; T=T_s \quad (6)$$

○고상영역에서의 에너지방정식

$$U_w \frac{\partial T}{\partial X} = \alpha_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) \quad (7)$$

○고상영역에서의 온도경계조건

$$0 < X < \infty; Y=Y_0: T=T_0$$

$$X_p < X < \infty; Y=0: \frac{\partial T}{\partial Y}=0$$

$$X \rightarrow \infty; 0 < Y < Y_0: T=T_0 \quad (8)$$

○액상-고상 계면에서의 필요조건

$$-k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} + k_l \frac{\partial T_l}{\partial n} = \rho_s \Delta H V_s n \quad (9)$$

위의 지배방정식의 해를 구하기 전에 다음과 같은 무차원수를 도입한다.

$$x = \frac{X}{Y_0}; y = \frac{Y}{Y_0}$$

$$u = \frac{U-U_w}{U_0}; V = \frac{V}{U_0}; P_d = \frac{P_d}{\rho_s U_0^2}$$

$$\Theta = \frac{T-T_s}{T_f-T_s}; \theta = \frac{T-T_0}{T_s-T_0} \quad (10)$$

특성속도 U_0 는 용강의 공급속도 혹은 주변의 인발속도 U_w 로 표시될 수 있으나 자연대류 효과를 가시화시키기 위해서는 U_0 를 다음식으로 표시한다.

$$U_0 = \sqrt{g\beta\Delta T Y_0} \quad (11)$$

○액상영역에서의 무차원 지배 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\left(\frac{Re}{\sqrt{Gr}} + u \right) \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\Theta - \frac{\partial P_d}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{Gr}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$\left(\frac{Re}{\sqrt{Gr}} + u \right) \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial P_d}{\partial y} + \frac{1}{\sqrt{Gr}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

$$\left(\frac{Re}{\sqrt{Gr}} + u \right) \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \frac{\partial \Theta}{\partial y} = \frac{1}{Pr\sqrt{Gr}} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \right) \quad (12)$$

○액상영역에서의 무차원 경계조건

$$x=0; 0 < y < 1.0: u=v=0; \Theta=1.0$$

$$0 < x < x_p ; y = 0 : \frac{\partial u}{\partial y} = 0 ;$$

$$v = ; \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$$

$$y = \bar{y}(x) : u = v = 0 ; \theta = 0 \quad (13)$$

○ 고상영역에서의 무차원 지배 방정식

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{1}{p} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (14)$$

○ 고상영역에서의 무차원 경계조건

$$y = \bar{y}(x) : \theta = 1.0$$

$$0 < x < \infty ; y = 1.0 : \theta = 0$$

$$x_p < x < \infty ; y = 0 : \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$$

$$x \rightarrow \infty ; 0 < y < 1.0 : \theta = 0 \quad (15)$$

그림 10에는 2-영역 모델에서 요구되는 액상 및 고상 각각의 경계밀착 (body-fitted) 격자계를 보여주고 있다. 그림 11은 2-영역 모델에 의해서 얻어진 용탕 내에서 혼합 대류가 일어나는 경우의 유동장을 나타낸 것이며 그림 12는 용탕내의 온도분포를 나타낸 것이다.

4.3 엔탈피 모델

2차원에서 엔탈피 모델을 적용하기 위한 연구공정의 개략도가 그림 13에 나타나 있다. 경계조건으로서 주형 및 2차 냉각대 등에서의 열전달 계수가 일정하다는 가정을 하였다. 엔탈피 모델은 액상 및 고상의 전영역을 계산영역으로 동시에 처리하기 때문에 지배 방정식을 액상과 고상으로 구분할 필요가 없으며, 용탕내에서의 자연대류 및 축방향 열전도도도 함께 고려한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nabla \cdot (v \nabla \bar{v})$$

$$+ g\beta(T - T_\infty)$$

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho \bar{v} \cdot \nabla H = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (16)$$

각 상(phase)에서의 엔탈피는 다음과 같이 정의된다.

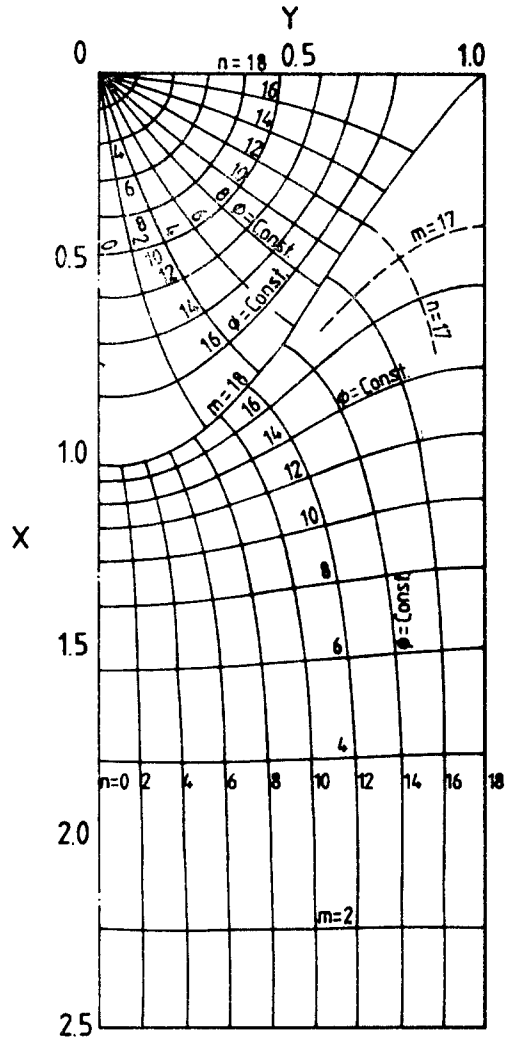


그림 10 2-영역 모델에서의 경계밀착 격자망

$$H_k = \int_0^T C_k dT + H_k^0 \quad (17)$$

따라서 각 상(phase)에서의 엔탈피와 온도와의 관계는 다음식으로 표현된다.

$$H_s = C_s T$$

$$H_l = C_l T + \{(C_s - C_l) T_m + L\} \quad (18)$$

여기서 L 은 잠열을 나타내며, 액상과 고상의 공존영역에서의 엔탈피와 열전도계수는 선형적으로 변화한다는 연속체(continuum)의 가정하

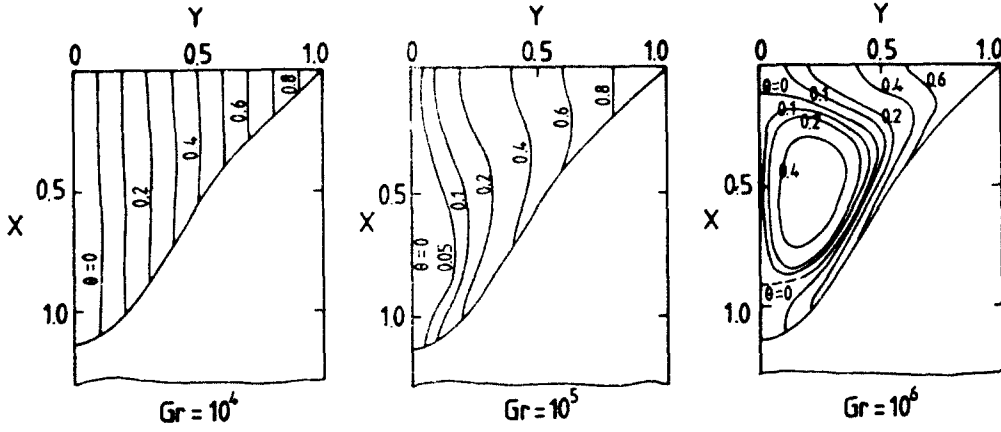


그림 11 2-영역 모델로부터 얻은 용탕 내의 유동장

에서 다음식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} H &= H_s + f_1(H_1 - H_s) \\ k &= k_s + f_1(k_1 - k_s) \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 액상의 질량 분율 f_1 은 열평형으로부터 다음식으로 표시된다.

$$f_1 = \begin{cases} 0 & H \leq C_s T_m \\ (H - C_s T_m) / L & C_s T_m < H < (C_s T_m + L) \\ 1 & H \geq (C_s T_m + L) \end{cases} \quad (20)$$

그림 14는 엔탈피 모델에 의해 얻어진 유동장과 액상 및 고상내에서의 온도장 그리고 온도장에서 빗금친 부분은 액상과 고상이 공존하는 부분을 표시한다. 2-영역 모델에서는 액상-고상 계면이 하나의 선으로 표시되는데 비해

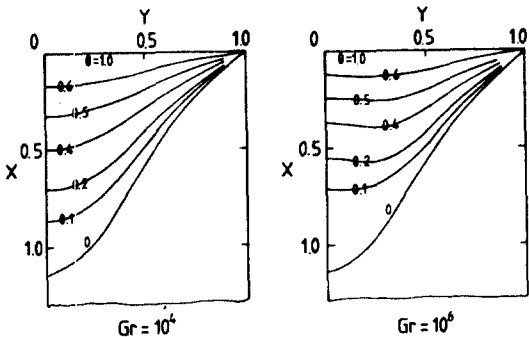


그림 12 2-영역 모델로부터 얻은 주편의 온도장

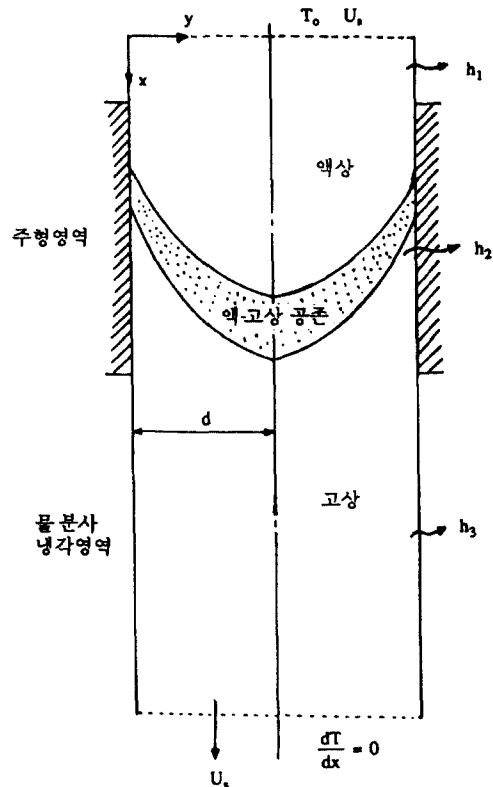


그림 13 2차원에서 엔탈피 모델 적용을 위한 연주공정의 개략도

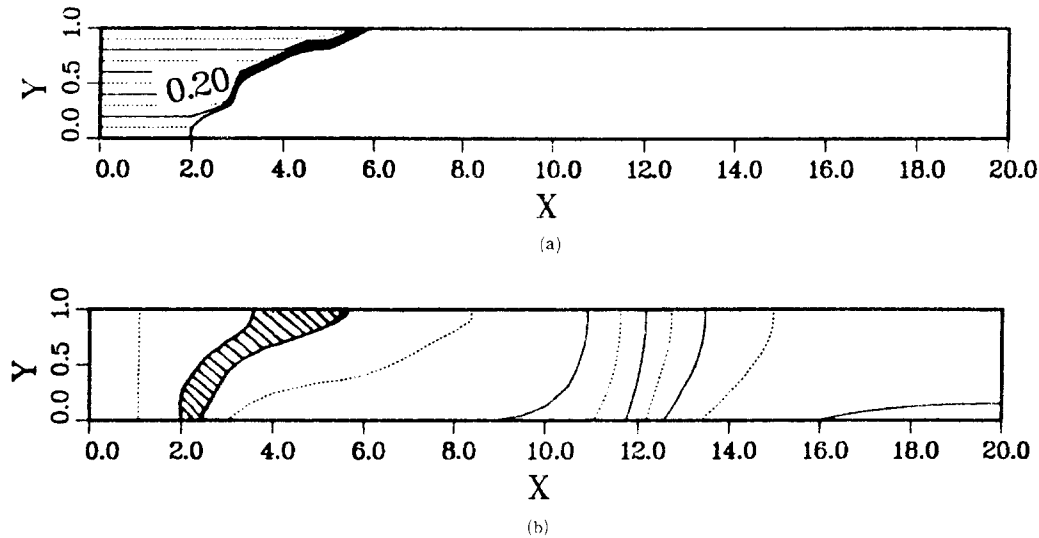


그림 14 엔탈피 모델로부터 얻은 유동장 및 온도장

엔탈피 모델 자체에서 고려한 액상-고상 공존 지역의 존재로 액상선과 고상선이 함께 나타나는 것이 특징이다.

5. 맺음말

이상과 같이 연속주조공정에서 주형과 2차냉각 영역에서의 주편의 응고과정에 관한 열전달 문제를 다루는데 해석적 및 수치적방법의 기본 원리와 그 결과를 간단히 소개하였다. 연속주조공정중 상변화가 일어나는 주형과 2차냉각대에서 온도제어를 효율적으로 수행하기 위하여 주조온도, 강중, 주조속도, 냉각수량 등 운전 인자에 따른 주편온도분포 및 응고층두께를 이론적으로 구하는 방법만을 취급하였지만, 실제로는 주편온도 및 응고층 두께를 측정하는 실험적 방법이 상호보완적으로 이루어져야 향후 제품결함이 적고, 높은 생산성을 꾀할 수 있는 신 연주기의 개발이 가능할 것이다.

참고문헌

(1) 신영길 외, 1991, 강의 연속주조, 산업과

학기술연구소, 제강 연구부.

- (2) Doyle, L.E., 1985, Manufacturing Processes and Materials for Engineering, 3rd Ed., Prentice Hall.
- (3) Siegel, R., 1984, "Two-Region Analysis of Interface Shape in Continuous Casting with Superheated Liquid," J. Heat Transfer, Vol. 106, pp. 506~511.
- (4) Schey, J.A., 1987, "Introduction to Manufacturing Process," McGraw-Hill, 2nd Ed.
- (5) Kalpakjian, S., 1985, Manufacturing Processes for Engineering Materials, Addison Wesley Pub. Co.
- (6) Hills, A. W. D. and Moore, M. R., 1967, "Use of Integral-Profile Methods to Treat Heat Transfer during Solidification," Heat and Mass Transfer in Progress Metallurgy, pp. 141~171, The Institute of Mining and Metallurgy.
- (7) Veynick, A.I., 1962, "Theory of Special Casting Methods," Trans. ASME.
- (8) Mizikar, E. A., 1967, "Mathematical Heat Transfer Model for Solidification of

- Continuously Cast Steel Slabs," Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 239 : pp. 1747~1753.
- (9) Sfeir, A. A. and Clumpner, 1977, "Continuous Casting of Cylindrical Ingot," J. Heat Transfer, pp. 29~34.
- (10) Siegel, R., 1978, "Shape of Two-Dimensional Solidification Interface during Directional Solidification by Continuous Casting," J. Heat Transfer, Vol. 100, pp. 3~10.
- (11) Siegel, R., 1978, "Analysis of Solidification Interface Shape during Continuous Casting of a Slab," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.21, pp.1421~1429.
- (12) Siegel, R., 1983, "Cauchy Method for Solidification Interface Shape during Continuous Casting," J. Heat Transfer, Vol.105, pp. 667~671.
- (13) Siegel, R., 1984, "Solidification Interface Shape for Continuous Casting in an Offset Mold-Two Analytical Methods," J. Heat Transfer, Vol. 106, pp. 237~240.
- (14) Sen, A.K., 1987, "Perturbation Solutions for the Shape of a Solidification Interface Subjected to a Spatially Periodic Heat Flux," J. Heat Transfer, Vol.109, pp. 835~840.
- (15) Siegel, R., 1985, "Control of Solidification Boundary in Continuous Casting by Asymmetric Cooling and Mold Offset," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.28, pp.500~502.
- (16) Siegel, R., 1985, "Analysis of Three-Dimensional Solidification Interface Shape," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.28, pp. 701~705.
- (17) Siegel, R., 1986, "Free Boundary Shape of a Convectively Cooled Solidified Region," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 29, pp. 309~315.
- (18) Siegel, R., 1986, "Boundary Perturbation Method for Free Boundary Problem in Convectively Cooled Continuous Casting," J. Heat Transfer, Vol. 108, pp. 230~235.
- (19) Blackwell, J.H. and Ockendon, J.R., 1982, "Exact Solution of a Stefan Problem Relevant to Continuous Casting," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, pp. 1059~1060.
- (20) DeBellis, C.L. and LeBeau, S.E., 1989, "A Verified Thermal Model for Continuous Casting Processes," In Shah, R.K., Editor, Heat Transfer in Manufacturing and Materials Processing, ASME 1989 National Heat Transfer Conference, pp. 105~111.
- (21) Kroeger, P.G. and Ostrach, S., 1974, "The Solution of a Two-Dimensional Freezing Problem Including Convection Effects in the Liquid Region," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 17 pp. 1191~1207.
- (22) Sen, A.K., 1987, "Perturbation Solutions for the Shape of a Solidification Interface Subjected to a Spatially Periodic Heat Flux," J. Heat Transfer, Vol.109, pp. 835~840.
- (23) Yao, L.S., 1984, "Natural Convection Effects in the Continuous Casting of a Horizontal Cylinder," Int. J. Heat Transfer, Vol. 27, pp.697~704.
- (24) Bennon, W.D. and Incropera, F.P., 1987a, "A Continuum Model for Momentum, Heat and Species Transport in Binary Solid-Liquid Phase Change Systems-I. Model Formulation," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, pp.2161~2170.
- (25) Bennon, W.D. and Incropera, F.P., 1987b, "A Continuum Model for Momentum Heat and Species Transport in Binary Solid-Liquid Phase Change Systems- II. Application to Solidification in a Rectangular Cavity," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, pp.

- 2171~2187.
- (26) Bennon, W.D. and Incropera, F.P., 1988, "Developing Laminar Mixed Convection with Solidification in a Vertical Channel," J. Heat Transfer, Vol. 110, pp. 410~415.
- (27) Hunter, L.W. and Kuttler, J.R., 1989, "The Enthalpy Method for Heat Conducting Problems with Moving Boundaries," J. Heat Transfer, Vol.111, pp.239~242.
- (28) Chidiac, S.E., Samarasekera, I.V. and Brimacombe, J.K., 1989, "A Numerical Method for Analysis of Phase Change in the Continuous Casting Process," In Thompson et al., Editor, Numiform 89, pp. 121~128.
- (29) Kang, B.H. and Jaluria, Y., 1992, "Thermal Modeling of the Continuous Casting Process," J. Thermophysics Heat Transfer, to Appear. 