

연속주조시 강종 혼합에 관한 수치해석적 연구

조명종* · 김인철* · 김상준* · 박헌** · 이승석**

Numerical Simulation of Steel Mixing during Sequential Casting of Dissimilar Grades in the Continuous Caster

M.J.Cho, I.C.Kim, S.J.Kim, H.Park and S.S.Lee

Key Words: Continuous Casting(연속주조), Numerical Simulation(수치해석), Steel Mixing(강종혼합), Sequential Casting of Dissimilar Grades(이강종연주)

Abstract

In order to investigate the mixing of dissimilar grades during the arbitrary grade transition in bloom caster, a computational model has been developed. The model is fully transient and consists of two sub models, which account for mixing in the bloom tundish, mixing in the strand. The developed model was verified using concentration histories measured on 1:1 scale bloom tundish water model. The result of numerical model showed good agreement with the experimental results of water model. By using this numerical model, the mixing of dissimilar grades in bloom caster has been simulated. As that result, the characteristics of the steel mixing in the bloom tundish and strand was showed and the amount of the intermixed grade bloom was predicted.

기호설명

- C : 강종 농도
 u_j : 속도 성분
 k : 난류운동에너지

그리스문자

- μ : 점성계수
 μ_t : 난류점성계수
 ρ : 밀도 (= 7800 kg/m³)

1. 서론

최근 들어 수요자들이 소요 목적에 따라 다양한 강종의 철강 제품을 요구함에 따라 여러 종류의 강종을 효율적으로 생산하는 기술의 필요성이 점차 증가하게 되었다. 연속 주조 특성상 서로

다른 성분의 강을 주조하기 위해서는 먼저 한 강종에 대하여 주조를 완료한 후 새로이 주조를 수행하여야하므로 이 과정에서 조업 중단에 따른 생산량 저감 및 내화물 사용 증가와 같은 문제가 발생되게 된다. 이에 따라 여러 제철소에서는 서로 다른 강을 조업 중단 없이 연이어 주조하는 이강종 연연주 방법을 고안하고 실시하고 있다. 이와 같이 서로 다른 강종을 연이어 주조하는 경우에는 조업 중단에 따른 시간 손실을 줄일 수 있다는 장점이 있는 반면 턴디쉬와 몰드에서 성분이 서로 다른 강종간 혼합이 발생되어 수요자가 요구하지 않는 성분의 제품이 일정량 생산되게 된다.

이강종 연연주 방법은 흔히 크게 L/D (Ladle) change방법과 Flying tundish방법 및 Separator insertion방법과 같은 3단계의 방법이 사용되고 있다. 이강종 연연주 시에는 기본적으로 성분이 서로 다른 강종이 제공되어야하므로 L/D change방법은 모든 이강종 연연주 방법에 공히 사용되는 첫 번째 단계이며, Flying tundish 방법은 L/D교환시 이전 강종이 남아있는 턴디쉬까지 함께 교환하므로써 턴디

* 정회원, RIST(포항산업과학연구원) 열유체연구팀

** 비회원, POSCO 포항제철 1연주공장

쉬 내의 강종 혼합을 최소화하기 위한 것이며, Separator insertion 방법은 이강종 연연주시 구조를 잠시 정지하고 주형에 인공적인 격막을 투입하여 M/D 내에서 강종간 혼합을 최소화한 것이다. 하지만, 위의 3단계 중 Flying tundish 방법과 Separator insertion 방법은 이강종 연연주시 강종 혼합을 최소화한 방법이라는 하나, 조업 중 사고 발생 가능성이 크다는 단점이 있다. 따라서 현재 대부분의 제철소에서는 동일 턴디쉬를 사용한 "동일 턴디쉬 이강종 연연주 방법"에 많은 관심을 가지고 연구가 진행되고 있다.

동일 턴디쉬 이강종 연연주 방법에 있어서는 L/D 교환으로 인해 새로운 강종이 이전 강종이 남아있는 턴디쉬로 쏟아질 때 시간에 따라 턴디쉬 내에서 강종간 서로 3차원적 복잡한 혼합이 발생되게 되고 혼합된 용강이 침지 노즐을 통하여 몰드로 내려가서 몰드에서 다시 한번 강종간 혼합이 나타나게 되어 최종적으로 강종이 서로 혼합된 제품이 생산된다. 따라서 이와 같은 동일 턴디쉬 이강종 연연주 방법을 사용할 경우에는 강종간 혼합 정도를 정확히 예측하고 수요가 요구하지 않는 범위의 혼합 강종을 제거하는 것이 그 무엇보다 중요하다.

이에 본 연구에서는 일차적으로 먼저 Bloom 연연주기에 있어서 동일 턴디쉬 이강종 연연주 방법을 사용할 경우, 턴디쉬와 주형 내에서 발생하는 3차원적 유동 양상 및 강종 간 혼합 특성을 수치 해석적으로 살펴본다.

2. 수치 해석적 방법 및 지배방정식

Bloom 이강종 연연주시 발생하는 강종간 혼합 특성을 살펴보기 위해서는, 먼저 3차원적 양상을 보이는 턴디쉬와 주형 내 3차원적 용강 거동을 모사하는 것이 필요하며 이와 아울러 새로운 강종이 주입된 경우 시간에 따른 강종 혼합 특성 및 거동을 해석하는 것이 필요하다. 이에 본 연구에서는 아래와 같은 수치 해석적 방법을 사용하였다.

2.1 지배방정식

Bloom 턴디쉬와 주형 내에서 용강은 3차원 난류 상태(turbulent state)를 유지하므로 기

본적으로 Reynolds stress 항을 2 방정식으로 처리한 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 턴디쉬와 주형 내용장 유동을 해석하였으며, 강종 간 혼합은 농도 방정식을 도입하므로 수치 해석하였다. 이때 사용된 지배방정식들은 아래와 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

운동량 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = & - \frac{\partial p}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \overline{u_i u_j} \right] \end{aligned}$$

$k-\epsilon$ 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j k) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ & + G - \epsilon \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \epsilon) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ & + C_{\epsilon 1} f_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_{\epsilon 2} f_2 \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned}$$

농도방정식

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j C) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D_{eff} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right]$$

여기서,

$$D_{eff} = D_o + D_t = D_o + \frac{\mu_t}{\rho Sc_t}$$

이며, D_o 는 물질간 분자 확산(molecular diffusion)과 관계된 계수이며 D_t 는 난류 물질 확산 계수를 나타낸다. 액상 상태에서 강종 내 입의 원소들에 대해 D_o 를 측정된 Thomas 등 (1),(2)의 결과를 살펴보면 이강종 연연주시 물질간 분자 확산 계수 D_o 는 원소 성분에 상관없이 약 $10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ 정도의 값을 가질 만큼 작다는 것을 알 수 있다. 그리고 농도 방정식의 C는

$$C \equiv \frac{F(t) - F_{old}}{F_{new} - F_{old}}$$

와 같이 정의된 무차원 변수이며, F 는 강종 중 임의 성분의 양을 지칭하는 값이다. 이러한 정의에서 이전 강종은 "0"으로 새로운 강종은 "1"로 정의되며, 강종간 혼합 정도는 0~1사이의 농도 값으로 나타남을 알 수 있다.

2.2 계산 그외 사항

위 2-1절에서 언급한 지배방정식을 차분하기 위하여 유한체적법(FVM)을 사용하였다. 특히, 대류항과 확산항의 차분을 위하여 고차원 차분 방법인 HPLA 방법⁽³⁾을 사용하여 수치해의 정확도를 향상시켰으며, 압력 요동 현상을 제거하기 위하여, Majumdar의 모멘텀 내삽 방법⁽⁴⁾을 사용한 비엇갈림 격자계를 사용하였으며, 속도-압력 연계는 SIMPLEC⁽⁵⁾ 알고리즘을 적용하였다. 그리고 계산의 효율성을 향상시키기 위하여 벽면 부근에서 벽면 함수 방법을 사용하여 난류 유동 벽면 처리를 하였다.

턴디쉬 탕면 레벨의 변화를 고려하기 위하여 지배방정식을 Non-Eulerian 좌표계로 바꾸었으며 이때 발생하는 control volume 경계의 속도 벡터 처리는 Demirdzic 등⁽⁶⁾의 계산 테크닉을 사용하였다.

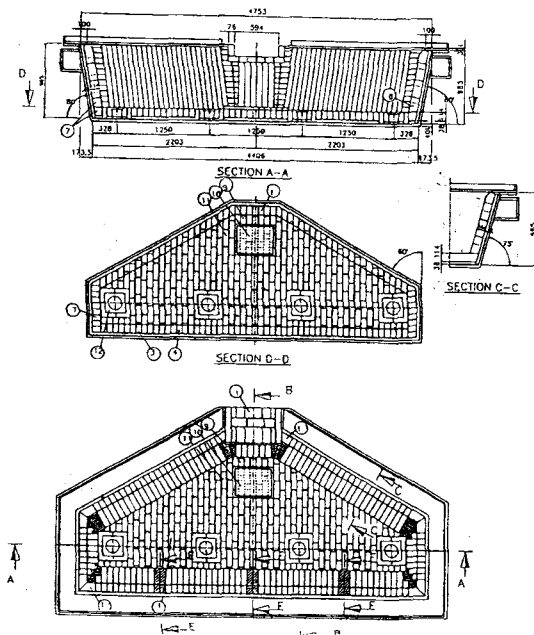


Fig. 1 Drawings of the bloom tundish

3. 수치해석 프로그램의 검증

상기 2장에서 기술된 수치해석 방법을 토대로 개발된 본 연구의 이강종 연연주시 3차원 난류 유동 및 강종 혼합 해석 프로그램의 직접적인 검증을 위하여, Bloom 턴디쉬를 1:1 scale의 수모델 장치를 제작하고, 염수($\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$)를 이용하여 이강종 연연주 조업과 유사한 실험을 실시하고 그 결과 턴디쉬 배출구에서 나타나는 시간별 염수 농도 변화를 측정하고 측정된 결과를 수치해석 결과와 비교하였다. 실제 수모델 실험은 먼저 소금이 함유된 염수가 수모델 턴디쉬 내에서 흐르도록 한 뒤 어느 순간부터 담수를 턴디쉬에 공급하고 턴디쉬 배출구에서 시간별 소금의 농도를 측정하였다. 먼저 Bloom 턴디쉬 수모델 실험을 통하여 최저 잔량량이 5.1톤, 10.5톤인 경우에 대하여 각각 수모델 실험을 실시하고 그 결과 나타난 혼합 농도와 본 연구에서 개발된 수치해석 모델의 계산 결과를 Fig.2와 3에 함께 도시하였다.

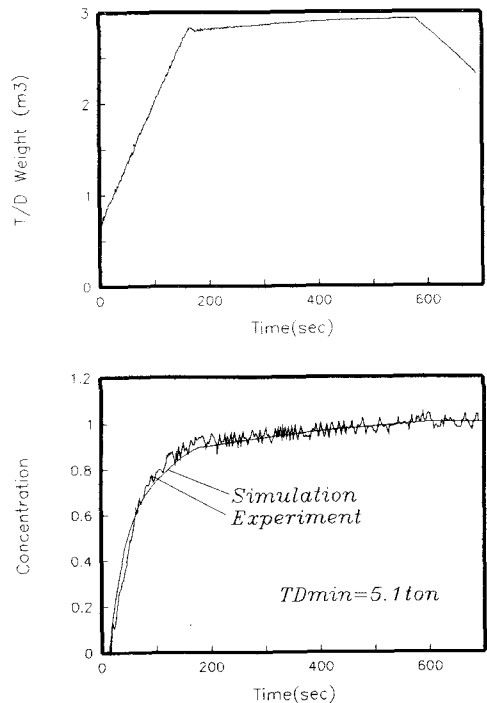


Fig. 2 Comparison of concentration history ($TD_{min}=5.1ton$)

수모델 실험은 그림에서 보는 바와 같이 턴디쉬 레벨을 원하는 정도까지 내린 후 수모델 L/D에서 담수를 공급받으므로 Time=0초 이후 용강 레벨이 급격히 상승하게 되며 정상 레벨 도달 후 일정 레벨이 유지되도록 하였으며, 아울러 이 강종 연연주 초기 혼합 농도의 급격한 변화구간에 대해 수치 해석 모델이 잘 예측하는지를 보기 위하여 주조 속도를 L/D 교환시에도 항상 일정하도록 하였다. 그 결과 잔탕량 5.1톤인 경우 Fig.2와 Fig.3 경우 모두 수모델 결과와 수치해석 모델의 해석 결과는 아주 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

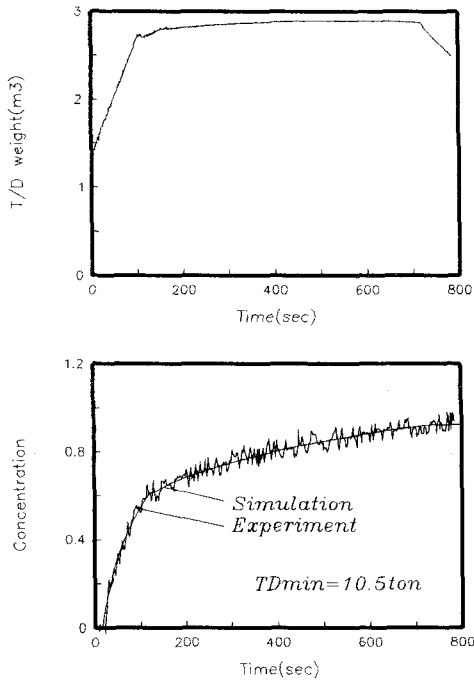


Fig. 3 Comparison of concentration history ($TD_{min}=10.5\text{ton}$)

4. Bloom 이강종 연연주시 강종 혼합 특성

본 연구에서 개발되고 수모델 실험을 통해 검증된 Bloom 턴디쉬 및 주형 내 3차원 유동/강종 혼합 거동 해석 프로그램을 이용하여, Bloom 이강종 연연주 시 나타나는 강종간 혼합 특성을 살펴보고자 한다. 실제 이강종 연연주 조

업 패턴을 살펴보면 L/D 개공시 최저 주속/주속 하강 기울기/주속 상승 기울기/턴디쉬 최저 잔탕량/턴디쉬 정상량/턴디쉬 정상 도달 시간/턴디쉬 용강량 정상 도달 패턴/턴디쉬 무게 변화/침지노즐 개공 시점 등과 같은 다양한 조업 인자들의 변화가 따르나, 본 연구에서는 우선 Bloom 턴디쉬와 몰드 내에서 발생하는 3차원 강종 혼합 형태 및 거동 특성을 관찰하기 위하여 턴디쉬 내 잔탕량이 최저로 유지 되도록 L/D에서 턴디쉬로 투입되는 용강과 턴디쉬에서 주형으로 배출되는 용강량을 일치시킨 단순한 이강종 연연주 조업에 대하여 먼저 수치해석을 실시하고 그 경우에 대하여 다른 조업 인자 영향 없이 3차원적 강종 혼합 양상만을 살펴본다. 이를 위하여 턴디쉬 잔탕량이 8톤으로 유지되며 주속이 0.4m/min 혹은 1.0m/min으로 일정한 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다.

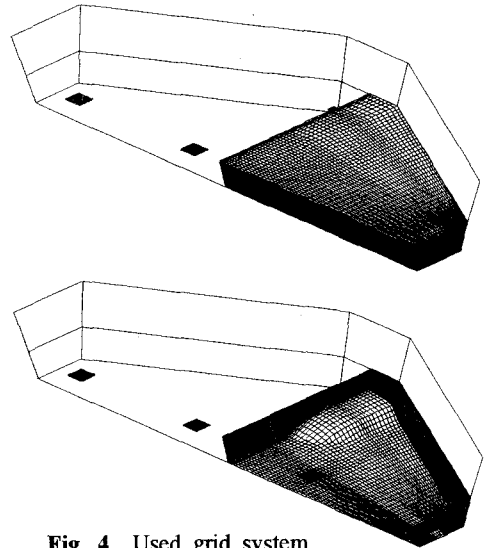


Fig. 4 Used grid system

먼저 턴디쉬 내 용강 거동 계산에 사용된 격자계는 Fig.4에 도시한 바와 같이 유동의 대칭성을 고려하여 전체 턴디쉬 영역의 1/2만을 계산 영역으로 적용하였으며, 잔탕량 8톤 주속 1.0m/min인 경우에 대한 턴디쉬 내 강종 혼합 계산 결과의 균일 농도면을 Fig.5(a)~(c)에 시간별로 나타내었다. 시간 진행에 따라 계산된 결과를 살펴보면 이전 강종이 존재하는 턴디쉬 내

로 새로운 강종이 투입되고 투입된 새로운 용강은 턴디쉬 바닥까지 흐른다. 이때 바닥에 도달한 새로운 강종은 턴디쉬 바닥에서 사방으로 퍼지면서 이전 강종과 혼합이 활발히 일어난다.

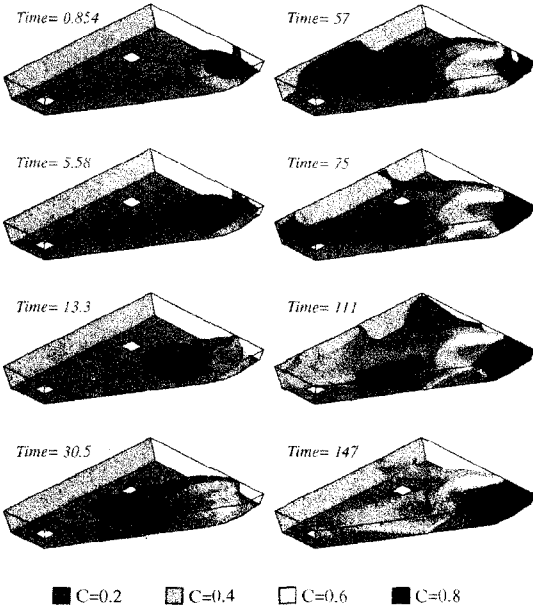


Fig. 5(a) The calculated iso-concentration surfaces

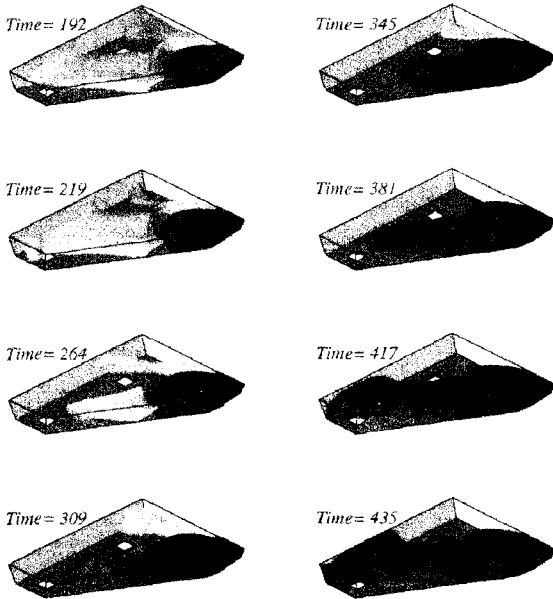


Fig. 5(b) The calculated iso-concentration surfaces

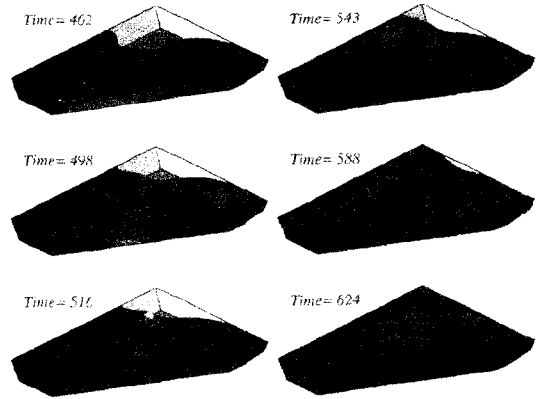


Fig. 5(c) The calculated iso-concentration surfaces

일부 턴디쉬 바닥을 따라 턴디쉬 후방으로 진행된 새로운 강종은 턴디쉬 뒷 벽면으로 인하여 탕면으로 이동하게 되고, 탕면에 도달한 새로운 강종은 탕면을 따라 턴디쉬 하류로 흐르게 된다. 그러나 L/D에서 나와 턴디쉬 바닥을 거쳐 턴디쉬 하류로 바로 진행되는 유동은 턴디쉬 탕면을 따라 흐르는 유동보다 더 빠르게 턴디쉬 하류로 진행하게 되고 턴디쉬 하류에 도달한 용강은 일부 침지 노즐을 통해 주형으로 내려가고, 배출되지 못한 용강은 다시 턴디쉬 내를 재순환하게 된다. 결국 이런 유동 형태를 따라 새로운 강종의 주 흐름이 결정되고 새로운 강종은 이러한 주요 흐름으로 진행하면서 활발히 이전 강종과 혼합이 일어나게 된다.

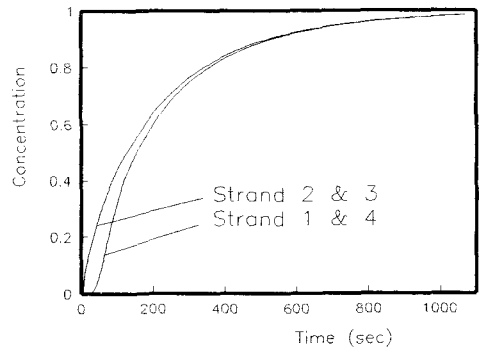


Fig. 6 The calculated concentration history at tundish outlet ($TD_{min}=8\text{ton}$, $V_{cast}=1\text{mpm}$)

Fig.6은 턴디쉬 배출구 즉 침지 노즐을 통해 배출되는 강종의 시간별 혼합 농도를 도시한 것인

데, 이 결과를 살펴보면 L/D과 보다 가까운 Strand에 새로운 강종이 먼저 도달하였으나, 시간이 진행됨에 따라 두 Strand간 강종 혼합 농도 차이는 크지 않다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 위에서 언급한 유동 구조로서 설명이 되는데, L/D에서 턴디쉬 하류로 내려간 용강이 모두 침지 노즐로 배출되지 못하고 재순환되면서 턴디쉬 내에서 또 다른 강종 혼합이 발생되기 때문이다. 그래서 이강종 초기에는 이러한 재순환이 활발하지 않으므로 L/D과 보다 가까운 쪽의 Strand에 더 많은 새로운 강종이 나오게 되었으나, 시간이 진행됨에 따라 침지 노즐로 배출되지 못한 용강들간의 재순환으로 점차 두 Strand간 혼합 농도차이는 없어지게 된 것이다.

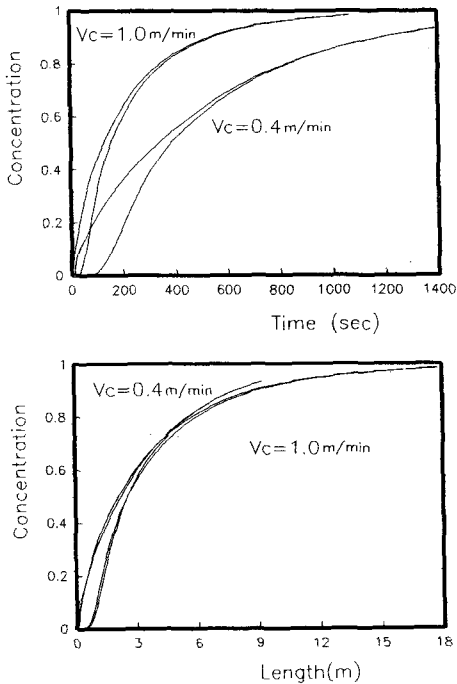


Fig. 7 The calculated concentration history at tundish outlet ($TD_{min}=8ton$)

그리고 Fig.7에 주조 속도를 달리한 경우, 턴디쉬에서 배출되는 강종 혼합 농도를 시간별 및 Bloom길이로 환산하여 나타내었다. 이 결과에서 보면 주조 속도가 느릴수록 천천히 새로운 강종의 혼합 농도가 증가하는 것을 알 수 있으나, 이때 시간을 Bloom길이로 환산하면 주속이 느

린 경우(0.4m/min)가 상대적으로 주속이 빠른 1.0m/min인 경우에 비하여 턴디쉬 내에서 전반적으로 유속 및 재순환이 저하되므로 강종 혼합 길이가 조금 줄어드는 결과를 보이나 그 차이는 그다지 크지 않은 것을 알 수 있다.

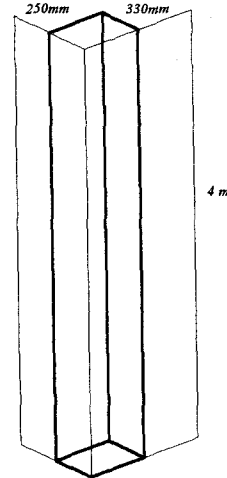


Fig. 8 Computational domain for simulating steel mixing in the bloom mold

그리고 턴디쉬에서 강종이 혼합된 용강이 침지 노즐을 통하여 Bloom주형 내로 주입된 경우에 발생하는 Bloom주형 내 강종 혼합을 수치해석 하였다. 침지 노즐은 토출구가 Bloom의 각각 단면 방향으로 하나씩 대향되도록 배치된 4공 노즐을 사용하였으며, 앞선 턴디쉬 계산과 마찬가지로 유동의 대칭성을 고려하여 전체 영역의 1/4만을 계산 영역으로 사용하였다. 계산에 사용된 계산 영역은 Fig.8에 도시되었으며 잔탕량 8톤에 주속이 0.4m/min인 경우에 대한 수치해석 결과중 동일 농도면 및 농도 등고선을 Fig.9(a)~(b)에 나타내었다. 이 그림에서 계산 영역을 가로지르는 선은 새로운 L/D교환시 탕면을 나타낸 것이며, 실제 이강종 연연주 조업 시 시간 지체로 인해 주변 위에 자동 marking되는 이종 주입선을 나타낸 것이며 시간이 진행함에 따라 응고층과 동일한 속도로 진행하게 된다. 이강종 연연주 초기 턴디쉬에서 혼합된 용강이 주형 내로 투입될 때는 침지 노즐 토출구 형상에 따라 침지 노즐에서 4단변를 향해 진행된다. 그 후 단변부에서 재순환된 용강이 일부는 하류로

일부는 탕면으로 흐르고, 탕면 방향으로 진행된 용강은 탕면에서 다시 재순환되어 하류로 흐르며 먼저 하류로 진행된 용강과 합쳐지게 된다. 이러한 주 유동 형상을 따라 턴디쉬에서 나온 혼합 강종은 그 보다 농도치가 낮은 이전 강종과 활발히 혼합하게 되어 최종적으로 강 성분이 혼합된 Bloom을 생산한다.

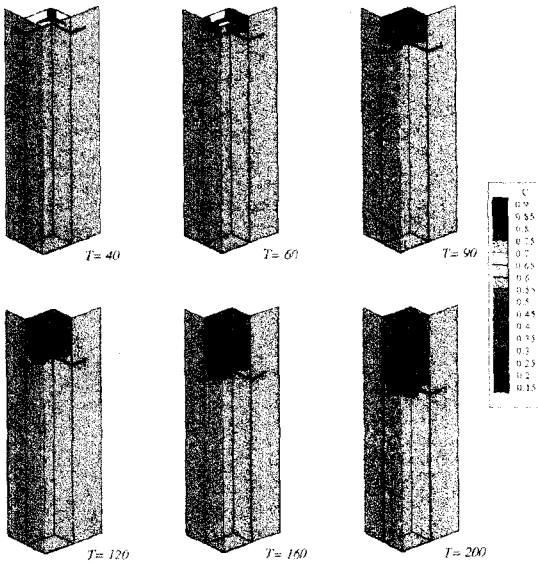


Fig. 9(a) The calculated iso-concentration surfaces

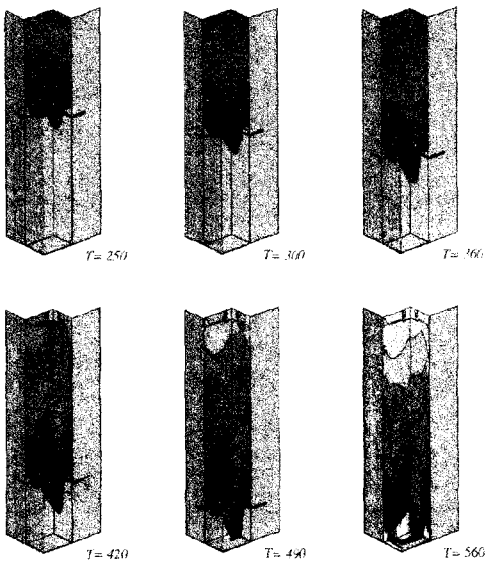


Fig. 9(b) The calculated iso-concentration surfaces

Fig. 9의 계산 결과를 잘 살펴보면 침지 노즐에서 토출된 용강이 단변부 등에서 재순환되면서 응고가 아직 이루어지지 않은 주형 가운데 쪽으로 많이 흐르게 된다. 그 결과 주형 중심부에서는 주형 하부로 침투되는 용강의 유속이 빠르게 되고 혼합 강종은 Bloom 중심부 부근에서 더 깊숙히 침투하게 되는 결과를 보이며 시간 진행에 따라 L/D교환시 탕면 marking부보다 더 하류로 내려가게 되며 단변부는 응고층으로 인하여 주형 중심부에 비하여 낮은 농도치를 가지게 된다. 그리고 결과에서 보는 바와 같이 침지 노즐 토출구에서 하류 적당 거리 내에서 강종 혼합이 활발히 일어나서 시간에 따라 농도치가 변화하는 결과를 보이나 일정 거리 이상부터는 위에서 형성된 농도 분포를 그대로 유지하면서 하류로 이동하게 된다. 따라서 실제 혼합 주편의 길이를 예측하기 위해서 혼합 주편 길이가 모두 포함되도록 주요 방향으로 상당히 긴 영역을 계산할 필요가 없으며 그림에서 보는 바와 같이 단면의 농도 분포가 일정히 유지되는 적당 길이 만큼을 계산 영역으로 하고 시간 변화에 따른 출측 단면의 농도를 관찰하는 것으로 가능해진다.

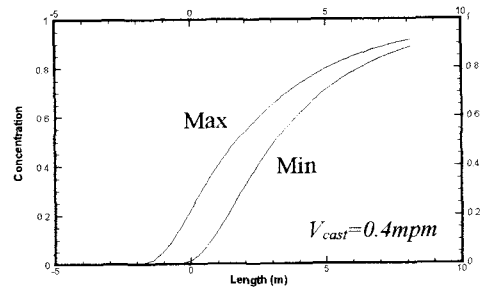


Fig. 10 The calculated results for grade transition

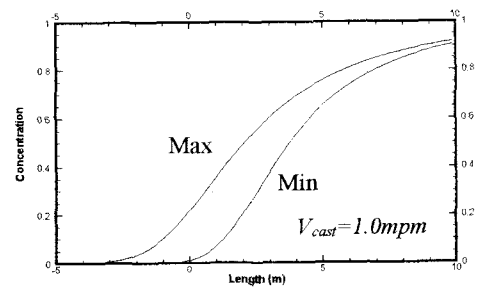


Fig. 11 The calculated results for grade transition

Fig.10은 이와 같이 계산을 수행한 결과 출측 주형 단면에서 나타나는 농도치의 최대 최소치를 Bloom길이로 환산하여 나타낸 결과이며, 동시에 주조 속도를 1.0m/min으로 증가시킨 결과도 Fig.11에 도시하였다. 이러한 주조 속도별 계산 결과에서 주조 속도가 빠른 경우 주조 연결 부보다 새로운 강종이 더 많이 침투했음을 알 수 있으며 약 혼합 농도 (20:80)을 혼합 농도의 상하한치로 정의한 경우 주조 속도가 0.4m/min인 경우는 6.83m의 혼합 영역이 발생된 반면 1.0m/min인 경우는 7.26m로서 주조 속도가 빠른 경우 주형 내의 강종 혼합으로 인하여 강종 혼합 길이가 더 증가한다.

5. 결 론

상기한 바와 같이 본 연구에서는 Bloom 이강종 연연주시 턴디쉬와 주형 내에서 발생하는 강종 혼합 거동을 살펴보았다. 이러한 연구를 위하여 우선 턴디쉬와 주형 내 3차원 난류 유동 및 강종 혼합 해석을 위한 프로그램을 개발하였으며, 개발된 해석 프로그램은 1:1 scale로 제작된 수모델 Bloom 턴디쉬 실험 데이터와의 직접적인 비교를 통하여 그 해석능을 검증하였다. 이렇게 검증된 해석 프로그램을 사용하여 Bloom 이강종 연연주시 턴디쉬 및 주형 내에서 나타나는 3차원 강종 혼합을 해석하였다. 그 결과 시간에 따른 턴디쉬와 주형 내 강종간 혼합 거동을 가시적으로 관찰할 수 있었으며 혼합 거동 특성을 살펴볼 수 있게 되었다. 향후 본 연구에서 개발된 해석 프로그램을 이용하여 Bloom 이강종 연연주시 다양한 조업 인자 변화에 따른 혼합 특성에 대한 연구가 추가되어 조업 인자와 강종 혼합간의 상관성을 분석하는 것이 필요하다.

참고문헌

- (1) Huang, X, Thomas, B. G., 1996, "Intermixing Model of Continuous Casting During a Grade Transition", *Metallurgical and Materials Trans. B*, vol.27, p.617.
- (2) Huang, X, Thomas, B. G., 1993, "Modeling of Steel Grade Transition in Continuous Slab

- Casting Processes", *Metallurgical and Materials Trans. B*, vol.24, p.379.
- (3) Zhu, J., 1991, "A Low-diffusive and Oscillation-free Convection Scheme," *Comm. in Appl. Numer. Meth.*, Vol.7, pp.225~232.
- (4) Majumdar, S., 1988, "Role of Under relaxation in Momentum Interpolation for Calculation of Flow with Non-staggered Grids," *Numerical Heat Transfer*, Vol.13, pp.125~132.
- (5) Van Doormaal, J. P. and Raithby, G. D., 1984, "Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows," *Numerical Heat Transfer*, Vol.7, pp.147~163.
- (6) Demirdzic, I., Preric, M., 1988, "Space Conservation Law in Finite Volume Calculations of Fluid Flow," *I.J. for numer. meth. in fluids*, Vol.8, p.1037.
- (7) Yeh, J. L., Hwang, W. S., Chou, C. L., 1993, "The Development of a Mathematical Model to Predict Composition Distribution in Casting Slab and Intermix Slab Length during Ladle Changeover Period and Its Verification by Physical Model," *ISIJ international*, Vol.33, p.588.
- (8) Chakraborty, S. et al., 1999, "Transition Reduction and Simultaneous Maintenance of Steel Quality in Granite City Tundishes," *Steelmaking conference*, p.97.
- (9) Rasmussen, P., 1997, "Mixed Grade Casting with Trbostop Impact Pads at Dofasco," *Iron & Steelmaker*, Vol.24, p.69.
- (10) Huang, X, Thomas, B. G., 1996, "Modeling of Transient Flow Phenomena in Continuous Casting of Steel," *CFD and Heat/Mass modeling conference*, p.129.
- (11) Vassilicos, A. et al., 1992, "Prediction of Intermix Slab Composition at Gray No.2 Caster," *Steelmaking conference*, p.573.
- (12) Thomas, B. G., 1996, "Modeling Study of Intermixing in Tundish and Strand during a Continuous Casting Grade Transition," *79th Steelmaking conference*, p.519.