

# 전산유체기법을 이용한 연속주조 Tundish 의 형상 설계

조 지릉<sup>\*1</sup>, 하 만영<sup>\*2</sup>, 이 성우<sup>\*3</sup>

## CFD aided design of the continuous casting tundish

J.R. Cho, M.Y. Ha and S.W. Lee

Effects of dam and weir on the fluid flow and behavior of inclusions in the continuous casting tundish have been studied using the CFD (Computational Fluid Dynamics) technique. Inclusions affecting the quality of steel products have been considered to be passive: the fluid flow has been obtained for unstaggered grid points defined on body-fitted generalized curvilinear coordinates with no attention on inclusions, and the spatial propagation of inclusions has been determined by using the flow field data. The result show that the dam and weir direct the flow to the free surface and increase the residence time of inclusions significantly, and thereby that inclusions have much more chance to be floated to the free surface of the tundish where it is eliminated. It is also found that they offer more margin on the geometric design of exit nozzles connected to moulds. This finding is particularly important for twin casting operations where the quality of steel products from the two moulds be kept uniformly.

**Key Words:** 연속주조 Tundish (Continuous Casting Tundish), 불순물 (Inclusion), 체류 시간 (Residence Time), 유동 수정기 (Flow Modifier), 1-방정식 난류모형 (One-Equation Turbulence Model), 대류항 처리법 (Convection Scheme)

### 1. 서론

연속주조는 높은 생산성으로 인하여 제철 기술에 있어서 현재 가장 널리 채용되고 있는 공정이다. 이 공정에서는 쇳물이 Ladle 을 통하여 Tundish에 부어져서 쇳물이 여기에서 얼마간 체류한 후 다시 실제 쇳물의 응고가 일어나기 시작하는 Mould 로 부어져 냉각 과정을 통

하여 연속 Slab 혹은 Billet 으로 형성이 된다 (Fig.1). 이때 가장 문제가 되는 것은 최종 제품의 질을 좌우하는 불순물 (Inclusion) 의 존재이다. 연속주조에서 Tundish 의 주된 기능은 Ladle 과 Mould 사이에서 일시적인 Steel Reservoir 로서의 역할을 하며, 쇳물의 평균 체류 시간 (Residence Time) 을 가능한 증가를 시켜서 불순물이 부력 차이에 의하여 Tundish 의 표면으로 부상되도록 하여 제거함으로써 제품 내에 불순물이 혼입되지 않도록 한다. 그런데 Tundish 내부의 기하학적 형상은 불순물의 체류 시간에 크게 영향을 미쳐서 제품의 품질을 크게 좌우하는 것으로 알려져 있다.

\*1 정희원, 인제 대학교 기계공학과

\*2 부산 대학교 생산 기계공학과

\*3 삼성 중공업(주) 요소기술개발팀

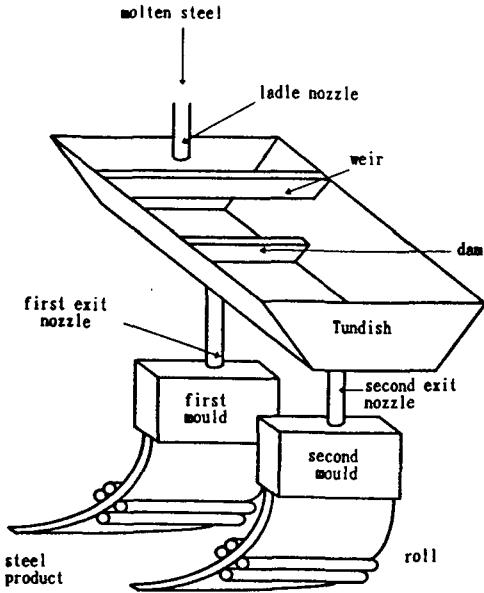


Fig. 1 Schematic view of continuous casting machine.

이러한 이유로 대부분의 제철 회사에서는 Full Scale의 대형 수조를 만들어 실험적으로 Tundish의 형상 설계를 수행하여 왔으나 대형 실험 장치 제작의 난이성, 속도장, 난류장, 온도장, 농도장 측정의 한계성 등에 의하여 많은 어려움을 겪어 왔었다. 이러한 실험상의 어려움을 해소하기 위하여 수학적 모델에 바탕을 둔 전산유체기법을 사용한 해석 방법이 근래에 많이 도입이 되고 있다. He & Sahai [1]는 Tundish의 유동을 k-ε 난류모형으로 근사를 하고서 Tundish 측벽의 경사가 유동 패턴 및 체류 시간의 변화에 미치는 영향을 연구하였으나, Tundish의 형상은 실제보다도 매우 단순화된 형태이며, Ladle 노즐이 침지형 (Submerged type) 이면서도 유동 수정기구 (Flow modifier)가 사용이 되지 않는 등 실제의 Tundish와는 많은 차이점이 있다. 또한 장방형의 격자계를 이용하는 관계로 측벽의 경사를 엄밀하게 취급하지 않은 단점도 있다. Takatani 등 [2]은 Tundish 내부의 유체 유동, 열 전달, 불순물의 거동을 전산 해석하였는데, Tundish의 깊이,

길이, 유량, 쇳물의 주입 방법 및 Dam의 존재가 불순물의 제거에 미치는 영향을 조사하였다. 이들은 물체 표면 부착좌표계를 이용하여 He와 Sahai의 경우보다는 정확한 수치 해석을 도모하고 있으나, Tundish의 기하학적 형상은 실제의 모습과는 많은 차이를 보이고 있다. Singh & Korla [3]는 Dam 및 Weir와 같은 Flow Modifier가 있는 경우와 없는 경우에 Ladle 노즐에서 Tundish에 쇳물을 주입하는 방법들이 유동의 패턴과 체류 시간에 미치는 영향을 실험적으로 관찰하였다. Mazumdar 등 [4]은 Tundish 모형의 상사성 실험을 통하여 Froude 수가 Reynolds 수보다도 지배적임을 보였다.

본 연구에서는 실제 산업 현장에서 널리 사용이 되고 있는 Tundish의 형상 및 운전 조건을 바탕으로 여기에 Dam과 Weir 같은 Flow Modifier를 설치하였을 경우에 나타나는 유동 패턴의 변화, 체류 시간의 변화등을 전산유체기법을 이용하여 해석을 하고자 한다.

## 2. 수학적 모형식

Tundish 내부의 유체 유동장은 복잡한 내부 형상에 의하여 일반적으로 3-차원의 유동 형태를 보이며, 또한 통상의 운전 조건에서는 난류 유동이 된다.

### 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

### 운동량 방정식

$$\frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (2)$$

유동의 난류 효과는 난류 와점성  $\nu_t$ 에 대한 다음과 같은 간단한 1-방정식 난류모형으로 표시를 한다.

난류 와점성 방정식

$$\frac{\partial \rho u_i \nu_t}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\nu} \frac{\partial \nu_t}{\partial x_j} \right) + \rho \nu_t \sqrt{S_{ij} S_{ji}} \left( c_1 - c_2 \frac{\nu_t}{\nu} \right) \quad (3)$$

여기서  $S_{ij} = \frac{1}{2}(\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i)$  그리고  $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$  이다. 현재 많이 쓰이고 있는 k-ε 혹은 RNG k-ε 난류 모형식들은 특정한 유동 조건 특히 2차원의 단순한 유동 조건의 경우에 있어서는 실험적 결과와 비교적 잘 일치하는 경우도 있으나, 유동 상황이 복잡한 경우 특히 3-차원의 유동 상황에서는 이 모형들은 현재로서는 많은 오류를 보인다. Reynolds stress 모형은 상기의 난류모형에 비하여 좀 더 신뢰성 있는 결과를 주기는 하지만 현재로서는 역시 많은 문제점들을 지니고 있다. 3차원 유동의 경우 계산에 요구되는 격자 수를 줄이기 위하여 대부분의 경우에 있어서 고 Reynolds 수 난류 모형을 도입하고, 벽면이 난류 유동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 소위 'Wall Function (벽함수)' 를 이용하고 있는데, 이는 난류 유동장에서 난류 에너지의 생성과 소멸률이 동등하다는 Local Equilibrium 가정과 평균유동장이 Log 분포를 가진다는 가정에 바탕을 두고 있으나 이는 지극히 이상적인 가정이며 대부분의 공학적 문제에서는 이러한 가정들이 더 이상 타당하지 않아서 자연히 유동장 내부의 난류 묘사가 많은 오류를 보인다. 벽함수법의 문제를 해결하기 위하여 고안이 되고 있는 것이 벽 근처의 난류 현상을 직접 방정식으로 묘사하는 저 Reynolds 수 난류모형들인데 이는 현재 2 차원 유동의 경우에 많이 적용이 되고는 있으나 3차원 유동의 경우에 있어서는 과도한 계산격자의 요구로 인하여 사용이 되지를 못하고 있는 형편이며, 물리적인 측면에서는 모형을 만드는 과정에서 도입되는 가정들이 일반적인 유동 상황하에서는 더이상 사용될 수 없는 요소들을 포함하기도 한다. 따라서 저 Reynolds 수 난류모형들 역시 적극적으로 사용이 되어질 수 없는 형편이

다. 특히 3차원 유동의 경우에 있어서는 Reynolds stress 모형은 지나친 기억 공간의 요구와 과도한 계산 시간의 요구에 의하여 현재로서는 제한적으로 사용이 되고 있는 형편이며 역시 k-ε 난류모형과 같은 근본적인 물리적인 제한성을 지니고 있다. 결론적으로 현재로서는 3차원의 공학적 문제에 있어서 난류모형은 그 결과의 엄밀성보다는 개략적인 난류효과를 운동량 방정식에 부여하는 역할에 만족해야 한다. 이러한 관점에서 공학적 응용성을 주목적으로 시도가 되고 있는 것이 단순한 1-방정식을 이용한 유효와점성 방정식을 해석하는 방법이며, 위 방정식도 그러한 시도로서 개발이 되어져서 현재 다수의 3차원 공학 문제에 적용이 되었다.

일반적으로 Tundish 내부로 유입되어지는 불순물의 상대적인 질량 유량은 무시될 정도이며, 이 불순물에 의하여 유체 유동이 받는 영향은 무시가 되며, 유동장이 일방적으로 이 불순물의 거동에 영향을 미친다고 간주가 된다. 즉, 불순물은 Passive contaminant 로 취급이 되며 따라서 유체 유동장이 구해지면 이 자료를 이용하여 불순물의 거동을 분석하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 Ladle 노즐에서 Tundish 로 유입된 불순물이 Mould 에 연결된 노즐까지 확산이 되기까지의 시간을 해석하여 불순물의 체류 시간을 구하고 이를 통하여 불순물의 제거 능력을 평가를 한다. 이는 다음과 같은 질량 수송 방정식으로 기술이 가능하다.

불순물의 질량 수송 방정식

$$\frac{\partial \rho f}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j f}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\mu_{eff}}{\sigma_f} \frac{\partial f}{\partial x_j} \right\} \quad (4)$$

본 연구에서 사용된 난류모형 상수는  $c_1 = 1.0$ ,  $c_2 = 0.098$ ,  $\sigma_\nu = 1.0$ ,  $\sigma_f = 1.0$  이다.

3. 수치적 방법

3.1 물체 표면 부착 좌표계

방정식 (1)-(4) 를 살펴보면 이 방정식들은

직교 좌표계에서 다음과 같은 일반적인 수송량 방정식 형태로 쓰여질 수 있음을 알 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_j \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) = S_\phi \quad (5)$$

여기서 변수  $\phi$  는 연속 방정식의 경우  $\rho$ , 운동량 방정식의 경우  $U_i$ , 난류 와점성의 경우  $\nu_t$ , 불순물의 질량 방정식의 경우  $f$  를 의미한다. Tundish 내부의 복잡한 기하학적 형상을 엄밀하게 다루기 위하여, 위의 방정식을 Cartesian 직교 좌표계의 물리 공간에서  $\xi_i$  로 표시되는 물체 표면 부착 일반화 좌표계 (Body-fitted generalized coordinate) 로 변환을 하면 다음과 같은 식이 된다.

$$J \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi_j} \left( \rho U_j \phi - h_{jk} \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial \xi_j} \right) = JS_\phi \quad (6)$$

여기서

$$U_i = g_{pi} u_p$$

$$h_{jk} = h_{kj} = g_{pj} g_{pk} / J$$

$$J = \left| \frac{\partial \vec{r}}{\partial \xi_1} \cdot \left( \frac{\partial \vec{r}}{\partial \xi_2} \times \frac{\partial \vec{r}}{\partial \xi_3} \right) \right|$$

$$g_{pi} = \frac{\partial x_q}{\partial \xi_j} \frac{\partial x_r}{\partial \xi_k} - \frac{\partial x_r}{\partial \xi_j} \frac{\partial x_q}{\partial \xi_k}$$

$$\text{cyclic: } (i, j, k); (p, q, r)$$

### 3.2 대류항의 차분법

일반적으로 대류-확산 문제는 대류항의 차분화 방법에 의하여 크게 영향을 받는데 Leonard & Drummond [6] 그리고 Cho [7] 에 따르면 종래에 많이 쓰이던 Spalding [8] 의 Hybrid 도식법 또는 Patankar [9] 의 PLDS (Power-Law Difference Scheme) 등은 과도한 수치 확산에 의하여 경우에 따라서는 유동의 정성적인 측면 조차도 재현 할 수 없음이 확인이 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 Cho [7] 에 의하여 제안이 된 CDC (Convection Direction Constraint)

및 TVD (Total Variation Diminishing) 에 근거를 둔 차분법을 사용하는데, CDC 의 개념은 Fig. 2 에 나타내었다. 제어체적면에서의 유동 특성량은 다음과 같은 과정에 의하여 결정이 된다.

step 1 2차정도 상류 차분법으로 제어체적면에서의 값을 구한다:

$$\phi_f^{HOE} = \frac{3\phi_U - \phi_{UU}}{2}$$

step 2 TVD 제약 조건인 ULTRA [6] 를 정규화된 변수에 적용한다:

$$\tilde{\phi}_U \leq \tilde{\phi}_f^{HOE} \leq 1 \text{ if } 0 \leq \tilde{\phi}_U \leq 1$$

$$\tilde{\phi}_f^{HOE} \rightarrow 0 \text{ if } \tilde{\phi}_U \rightarrow 0+$$

$$\tilde{\phi}_f^{HOE} = \tilde{\phi}_U \text{ if } \tilde{\phi}_U < 0 \text{ or } \tilde{\phi}_U > 1$$

여기서

$$\tilde{\phi} = \frac{\phi - \phi_{UU}}{\phi_D - \phi_{UU}}$$

step 3 TVD 수정된 제어체적면에서의 값을 얻는다:

$$\phi_f^{TVD} = \phi_{UU} + \tilde{\phi}_f^{HOE} (\phi_D - \phi_{UU})$$

step 4 CDC [7] 를 적용한다:

$$\phi_f = \phi_U + g(u_f, u_{UU}) (\phi_f^{TVD} - \phi_U)$$

$$g = \sin \left( \frac{\pi}{2} \left\langle \left\langle \frac{u_{UU}}{u_f}, 0 \right\rangle_{\max}, 1 \right\rangle_{\min} \right)$$

위 과정의 마지막 단계에서는 안정된 반복 계산을 위하여 Khosla & Rubin [10] 의 지연 수정 (Deferred-correction) 기법을 이용하고 있다. 즉 우변의 첫번째 항은 SUDS (Simple Upwind Differencing Scheme) 에 의한 걸보기 대류항 차분으로서 안정된 행렬 구조를 형성토록 하며, 우변의 두번째 항은 SUDS 에서 야기되는 과도한 수치 확산을 줄이기 위한 고차의 반확산항으로 원천항에 포함이 된다.

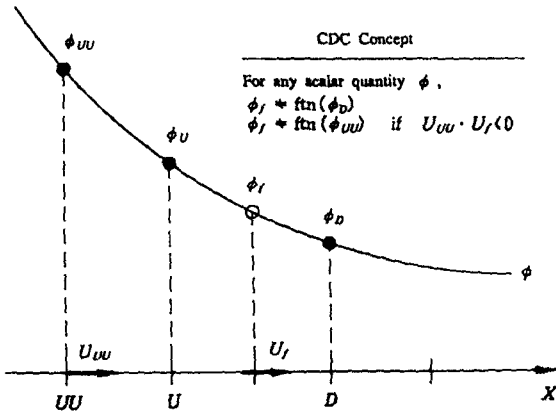


Fig. 2 Concept of the CDC.

3.3 경계 조건

Tundish 의 경계는 크게 벽면 및 자유표면으로 구성이 되는데, 평균 유동 및 난류모형 방정식에 대해서는 벽면에서는 벽함수 법에 근거하여 경계면에서의 유효와점성 계수를 부여하고

자유표면에서는 대칭 조건을 부여하였다. 불순물의 농도장 방정식에 대해서는 Ladle 노즐에서는 농도값을 1.5 로 고정을 하고 이외의 모든 경계에 대해서는 경계면에서의 구배가 0 이 되도록 하였다.

3.4 계산 격자계

격자 점에서의 유동 특성량들은 위의 방정식 (6) 을 격자 점에서 정의되는 제어 체적에 대하여 적분을 함으로써 얻어진다. 본 연구에서는 비교차격자계 (Non-staggered grid system) 를 사용하며, 이때 속도장 및 압력장의 비결합성에 의하여 야기되는 수치해의 진동은 Rhie & Chow [5] 의 SIMPLE/PWIM 방법을 사용하여 제거하였다. Tundish 내부의 격자 생성에는 소위 대수적 방법이 사용되어 졌으며, 생성된 격자계를 Fig. 3 에 나타내었다. 사용된 격자의 수는 x, y, z 방향으로 각기 58 x 15 x 30 로, 총 26,100 개의 격자점이 사용되었다. 주지하다시피 3차원의 유동 해석에 있어서는 컴퓨터 기억용량의 한계와 격자 수의 증가에 따라 급격히

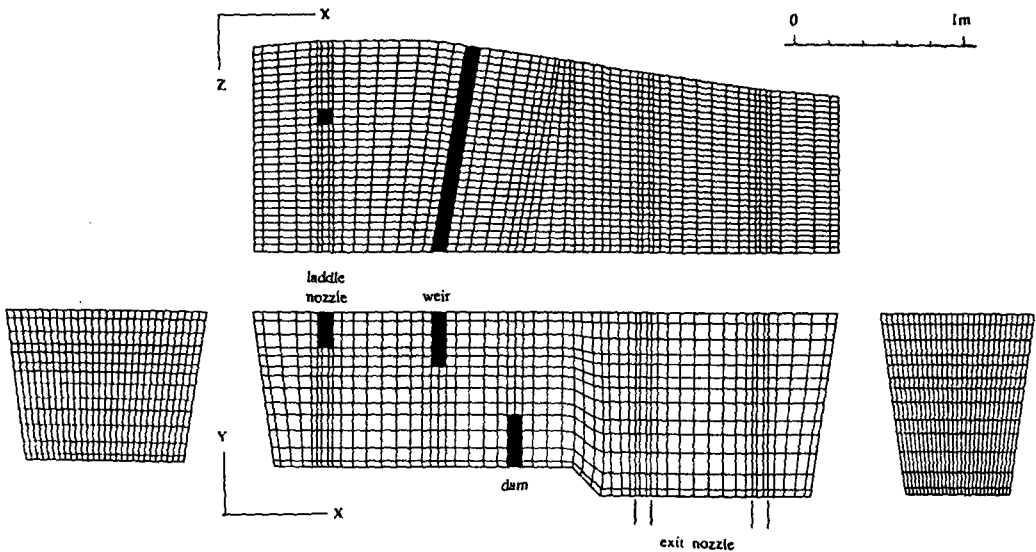


Fig. 3 Computational grid of the tundish.

증가하는 계산 시간으로 인하여 계산 격자를 충분히 취할 수 없는 문제점이 이 격자계에서도 그대로 나타나고 있는데, 벽으로부터의 첫 번째의 격자가 너무 멀리 떨어져 있는 관계로 경계 조건으로 이용되는 Wall Function의 정확도가 매우 떨어지리라는 것을 짐작할 수 있다. 그러나 벽 부근에서 일정한 오류가 있다고 하더라도 전반적인 유동의 형태에 보다 관심이 있는 본 연구에서는 Tundish 내부의 형상 변경에 따른 유동장의 변동을 본 논문의 제4장에서 보는 바와 같이 충분히 파악 할 수 있었다.

### 3.5 계산의 조건

본 연구에서는 현재 산업 현장에서 널리 사용이 되고 있는 Tundish의 형상에 대하여 수치 해석을 수행하는데, 주요한 제원은 다음과 같다.

Table 1 Parameters for the tundish.

Operation	Twin Casting
Ladle Nozzle Depth	250 mm
Nozzle Diameter	100 mm
Inlet Flow Rate	302 liter/min
Outlet Flow Rate	151 + 151 liter/min

위와 같은 조건하에서 Dam과 Weir가 모두 없는 경우 (NN case) 및 모두 있는 경우 (WD case)에 대하여 유동 수정기, 즉 Dam과 Weir의 효과를 해석한다.

## 4. 계산의 결과 및 토의

Fig. 4와 5는 앞서의 격자계를 이용하여 각기 Weir와 Dam이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 얻어진 유동장을 나타낸다. 두 그림에서 (a)는 Ladle 노즐을 포함하는  $y-z$  단면에서의  $v-w$  속도 벡터를, (b)는 Tundish 상부의 자유표면 ( $x-z$  단면)에서의  $u-w$  속도 벡터를, 그리고 (c)는 Exit 노즐을 포함하는  $x-y$  단면에서의  $u-v$  속도 벡터를 나타낸다. Ladle 노즐에서 나온 쇳물은 (Fig. 4(a)와 5(a)) 먼저 Tundish의 하부면에 충돌을 한후 옆으로 퍼지

면서 Tundish의 전면 및 후면에 커다란 소용돌이를 형성하면서 자유표면을 향하여 상승함을 볼 수가 있다. 그리고 Ladle 노즐이 Tundish의 중심선 부위에 위치하지 않고 상대적으로 Tundish의 후면에 가까운 관계로 폭이 좁은 Tundish의 후면보다는 폭이 넓은 전면 쪽으로 보다 많은 유체가 흐른다. 이러한 이유로 자유표면에서의 속도는 (Fig. 4(b)와 5(b)) Ladle 노즐 근처에서는 Tundish의 폭 방향 ( $z$ -방향)을 따라 큰 속도 구배를 보인다. 또한 Ladle 노즐에서 분사된 쇳물은 주변의 유체를 Entrain시키면서  $x-y$  단면에서도 소용돌이를 형성한다 (Fig. 4(c)와 5(c)).

유동 수정기, 즉 Dam과 Weir,의 기능은  $x-y$  및  $x-z$  단면의 속도 벡터들에서 뚜렷이 관찰할 수가 있다. 즉  $x-y$  단면에서 살펴보면 유동 수정기가 없는 경우에는 Ladle 노즐에서 나온 쇳물의 일부는 자유표면을 향하여 상승하지만 일부는 Tundish의 하부면을 따라서 직접 Exit 노즐을 향함이 관찰이 되고 있다. 반면에 Dam을 설치한 경우는 Tundish의 하부면을 따르는 흐름이 차단이 되고 모든 유체가 자유표면을 향한다. 즉 Dam은 Ladle 노즐과 Exit 노즐 사이의 'Short Circuit' 현상을 효과적으로 방지하여 불순물의 직접적인 전파를 방해하고 있다. Weir의 기능은  $u-w$  속도 벡터에서 잘 관찰된다. 즉 유동 제어기가 없는 경우 자유표면에서 Tundish의 상당한 길이에 걸쳐서 소용돌이가 형성이 되고 이 결과 Exit 노즐의 상부 자유표면에서는  $z$ -위치에 따라 Tundish 길이 방향의 속도의 변화가 매우 큼을 관찰할 수 있다. 그러나 Weir가 설치된 경우  $x-z$  단면에서의 소용돌이는 Weir에 의하여 차단이 됨을 볼 수가 있다. 게다가 Weir 그리고 Dam과 같은 장애물은 유동속도가 커짐에 따라 유동에 보다 큰 저항력을 발생시켜서  $z$ -위치에 따른 유동속도의 변화를 대폭 감소시키고 있음을 볼 수 있다. 이는 Tundish의 폭, 즉  $z$ -방향에 따른 불순물의 전파 속도의 차이를 줄이는데 크게 기여하게 된다.

이렇게 얻어진 유동장의 자료를 이용하여 Ladle 노즐에서 분사된 불순물이 Tundish 내에

서 시간에 따라 전파되는 과정은 방정식 (4) 를 적분을 하여 구하였으며, 그 결과는 Fig. (6)-(10) 에 시각별로 도시를 하였다. 그림들에서 'NN' 은 Weir 와 Dam 이 모두 없는 경우를, 'WD' 는 Weir 와 Dam 이 모두 있는 경우를, 그리고 'B' 는 Ladle 노즐 중심과 Tundish 의 후면 벽의 중간의 일정 K 단면을, 'C' 는 Ladle 노즐의 중심을 지나는 일정 K 단면을, 'T' 는 Exit 노즐을 지나는 일정 K 단면을 의미한다. Fig. 6 은 Ladle 노즐을 통하여 불순물을 투입하고서 10 sec 뒤의 농도 분포를 나타낸다. 이 시간까지는 아직 불순물이 충분히 전파가 되지를 못하였으며 두 경우가 거의 비슷한 농도 분포를 보인다. Fig. 7 은 30 sec 뒤의 농도 분포인데, 대체로 Tundish 의 하부면을 따른 불순물의 전파 속도가 자유표면에서의 전파 속도 보다 빠르다. 그러나 상대적으로 두 경우 모두 Tundish 전면 부 (NN-T, WD-T) 의 불순물 농도가 후면부 (NN-B, NN-T) 보다 빨리 상승을 하고 있는데 이는 앞서  $v-w$  속도 벡터의 관찰과 물리적으로 부합하는 결과이다. 주목할 점은 불순물의 전파가 Tundish 전면 부에서는 하부면과 상부의 자유표면을 따라 동시에 일어나며, 후면부에서는 주로 하부면을 따라서 전파가 이루어진다. Fig. 8 은 1 분 뒤의 농도 분포인데 이 시점에 이르러 Weir 와 Dam 의 뚜렷한 역할이 나타난다. Weir 는 자유표면을 따르는 불순물의 확산을 막고, Dam 은 하부면을 따르는 확산을 차단하고 있다. 이 결과 불순물은 일종의 Jet 효과에 의하여 Tundish 의 자유표면을 향하여 Convection 이 되고 있다. 장애물이 없는 NN 의 경우 이 시점에 불순물의 선단이 이미 첫 번째 Exit 노즐에 상당히 접근하고 있음을 볼 수 있으며, Tundish 하부면을 따른 불순물의 확산이 자유표면을 따르는 확산보다도 지배적임을 볼 수 있다. 따라서 Dam 이 Weir 보다도 직접적인 불순물 제어 (Inclusion Control) 수단이라고 판단된다. Fig. 9 는 2 분 뒤의 농도 분포이다. NN 의 경우 이미 상당한 불순물이 Exit 노즐까지 전파되어, 첫 번째 Exit 노즐 부위의 불순물의 농도는 약 0.1 정도이고, 두 번째 Exit 노

즐에서는 약 0.01 정도이다. 그러나 WD 의 경우는 아직도 Exit 노즐 부에 불순물이 나타나지 않고 있으며, Fig. 10에서 보듯이 3분 뒤에도 불순물의 선단이 Exit 노즐에 이르지 못한다. 즉 불순물의 체류 시간이 Weir 및 Dam 에 의하여 크게 증가되고 있다. 이는 쇳물보다는 비중이 작은 실제의 불순물의 경우에 있어서는 이들이 Tundish 의 자유표면으로 부상할 확률이 대폭 증가함을 의미한다. NN 의 또다른 문제점은 Fig. 10 에서 보이듯이 주어진 시각에서 첫 번째 및 두 번째 Exit 노즐에서의 불순물의 농도 차이가 매우 크다는 점이다. 반면에 WD 의 경우에 있어서는 균일 농도 선이 Tundish 의 하부면과 비교적 평행하게 형성됨으로써 두 Exit 노즐에서의 농도차가 대폭 감소함을 볼 수 있다. 또한 앞서 관찰한  $z$ -위치에 따른 Tundish 길이 방향 속도 ( $u$ ) 분포의 차이도 명확히 드러나는데, NN 의 경우  $z$ -위치에 따라서 불순물의 농도 차이가 크게 나타나는데 비하여 WD 의 경우는  $z$ -위치에 따른 농도 차이 역시 대폭 감소하고 있다. 즉 이상의 두 관찰 결과는 WD 가 NN 에 비하여 Tundish 의 Exit 노즐 부근 하부면의 불순물 농도가 매우 낮으면서도 공간적으로 매우 균일하여, WD 의 경우는 Exit 노즐의 위치 설정에 있어서 많은 유연성을 가지며 따라서 Mould 부와의 접촉이 용이하고, 두 Mould에서 나오는 제품의 품질을 균일하게 유지하는 것이 가능하여 진다.

## 5. 요약 및 결과

(1) 본 연구에서는 3차원의 실제 Tundish 형상에 대하여 유체 유동 및 불순물의 전달 현상을 파악할 수 있는 컴퓨터 코드를 개발하였으며, 수치해 결과의 정확도를 높이기 위하여 TVD 및 CDC 가 고려된 대류항 차분법을 도입하였다.

(2) 유동 수정기 즉 Dam 및 Weir 는 Ladle 노즐에서 유입된 쇳물의 흐름을 자유표면으로 향하게 하고, 불순물의 체류 시간을 크게 증대 시킴을 확인하였으며, 따라서 쇳물에 혼입된 불

순물이 Tundish 의 자유표면으로 보다 쉽게 떠오르고, 출구 노즐을 통하여 Mould 로 투입될 가능성을 저감시키고 있다. 즉 보다 고품질의 제품을 생산 가능케 하고 있다.

(3) 유동 수정기를 설치할 경우 이것이 없는 경우에 비하여 출구 노즐부 주변에서 비교적 균일한 불순물의 농도 분포를 보인다. 따라서 Twin 구조의 경우 두 Mould 에서 생산된 제품 품질의 균일성을 유지하는데 도움을 준다. 이것은 또한 출구 노즐의 위치 설정에 많은 설계 여유를 제공한다.

## 후기

본 연구는 삼성 중공업(주)의 연구비 지원 하에 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] He, Y. and Sahai, Y., "The effect of tundish wall inclination on the fluid flow and mixing: A modelling study," *Metallurgical Transactions B* **18** (1987), pp. 81-92.
- [2] Takatani, K., Shirota, Y., Higuchi, Y. and Tanizawa, Y., "Fluid flow, heat transfer and inclusion behavior in continuous casting tundishes," *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* **1** (1993), pp. 265-274.
- [3] Singh, S. and Koria, S., "Study of fluid flow in tundishes due to different types of inlet streams," *Steel Research* **66** (1995), No. 7, p. 294.
- [4] Mazumdar, D., Yamanoglu, G., Shankar-narayanan, R. and Guthrie, R.I.L., "Similarity considerations in the physical modelling of steel making tundish systems," *Steel Research* **66** (1995), No.1, pp. 14-19.
- [5] Rhie, C.M. and Chow, W.L., "Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation," *AIAA J.* **21** (1983), pp. 1525-1532.
- [6] Leonard, B.P., and Drummond, J.E., "Why you should not use 'Hybrid', 'Power-Law' or related exponential schemes for convective modelling-There are much better alternatives," *Int. J. Numer. Methods Fluids* **20** (1995), pp. 421-442.
- [7] Cho, J.R., "A convection scheme sensitized to the convection direction of a scalar quantity," *KSME J.* (accepted for publication).
- [8] Spalding, D.B., "A novel finite difference formulation for differential expressions involving both first and second derivatives," *Int. J. Numer. Methods Eng.* **4**, (1972), pp. 551-559.
- [9] Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, New York (1980).
- [10] Khosla, P.K., and Rubin, S.G., "A diagonally dominant second-order accurate implicit scheme," *Comput. Fluids*, **2** (1974), pp. 207-218.



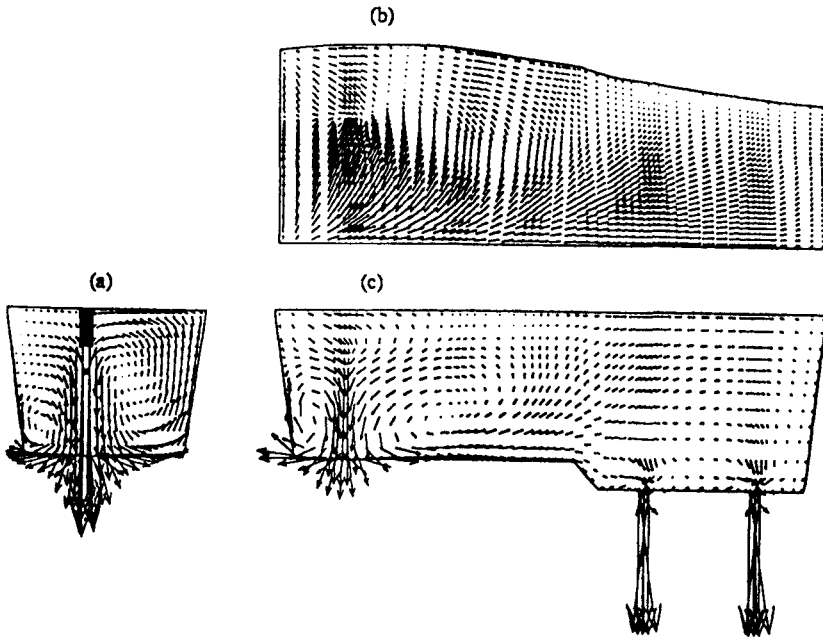


Fig. 4 Velocity vector plots for the NN case.

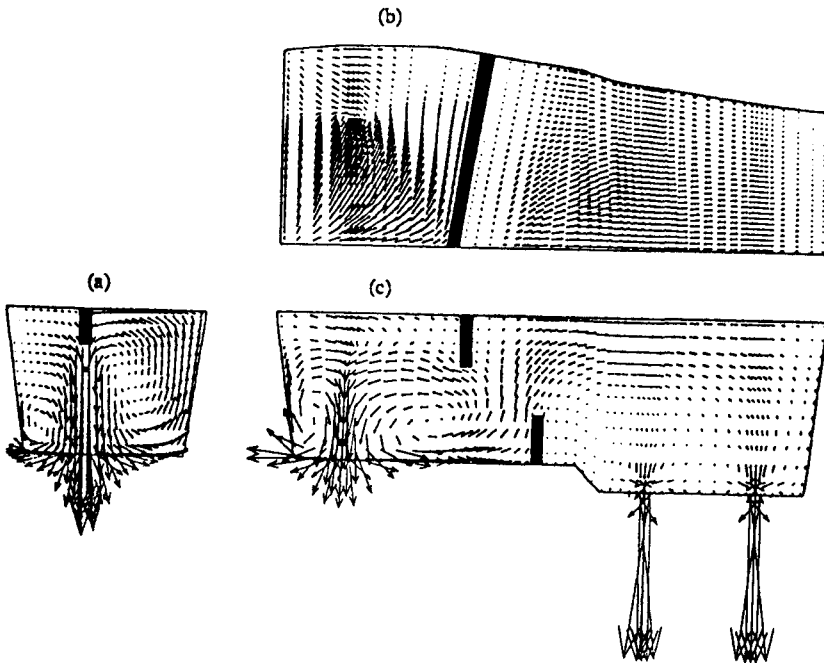


Fig. 5 Velocity vector plots for the WD case.

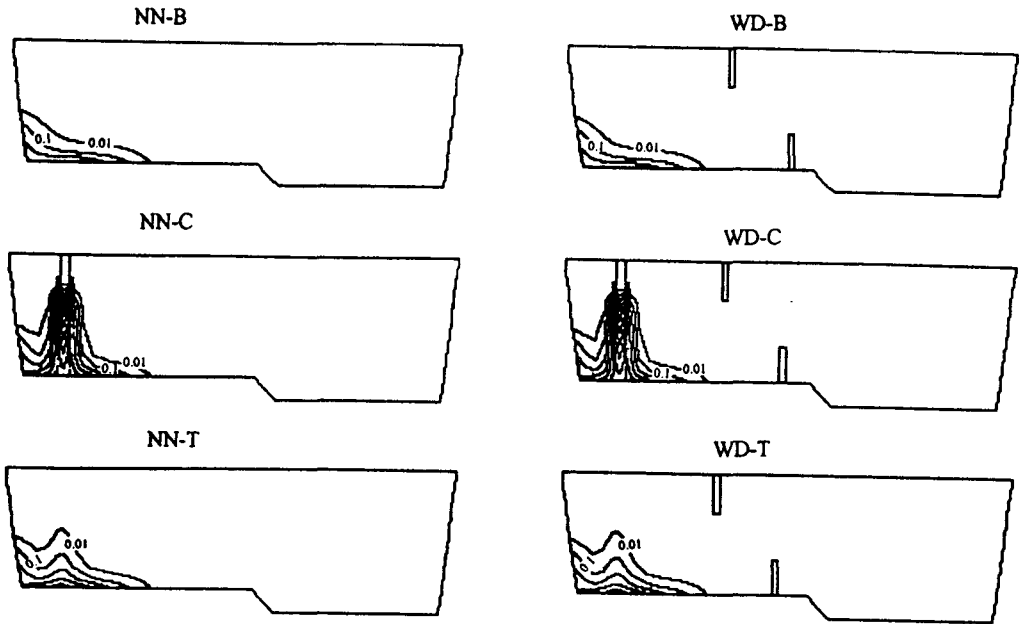


Fig. 6 Distribution of the inclusion density at t=10 sec.

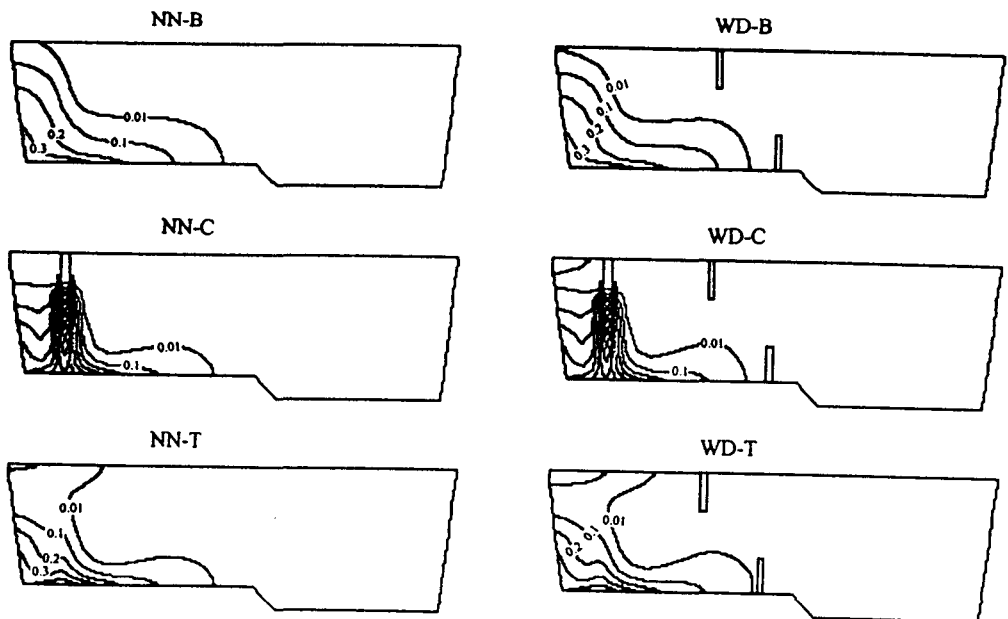


Fig. 7 Distribution of the inclusion density at t=30 sec.

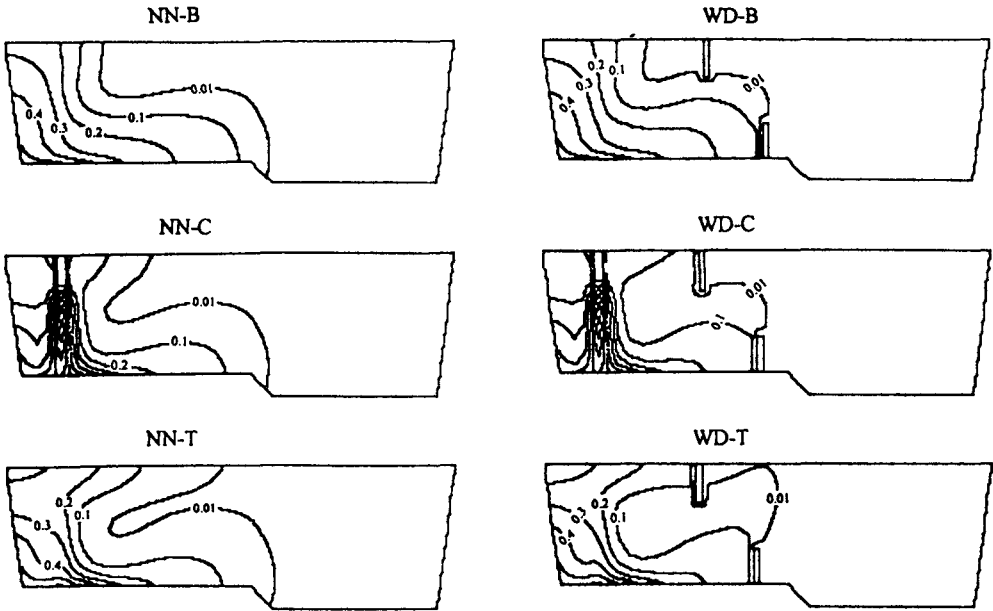


Fig. 8 Distribution of the inclusion density at t=60 sec.

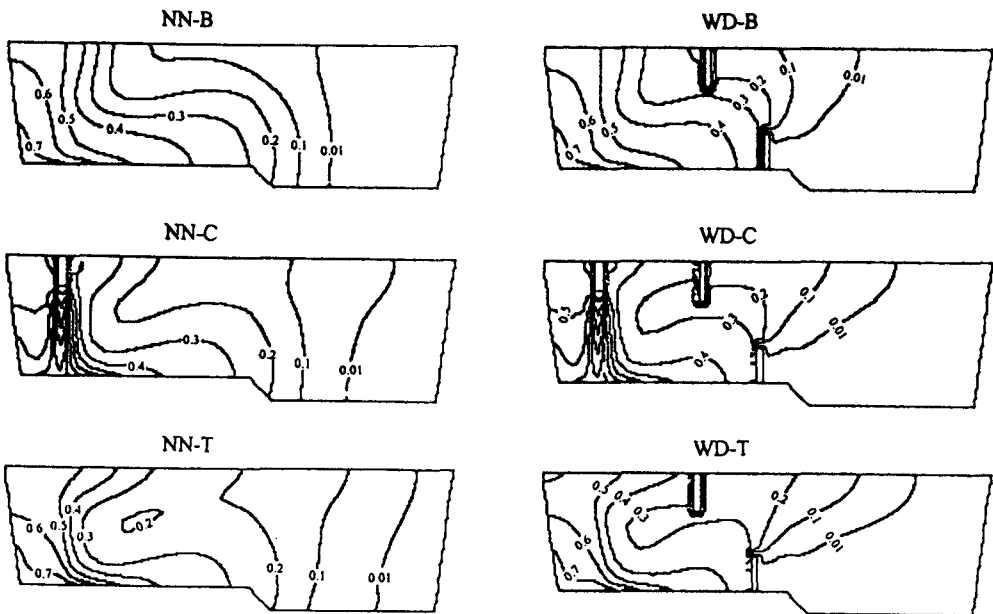


Fig. 9 Distribution of the inclusion density at t=120 sec.

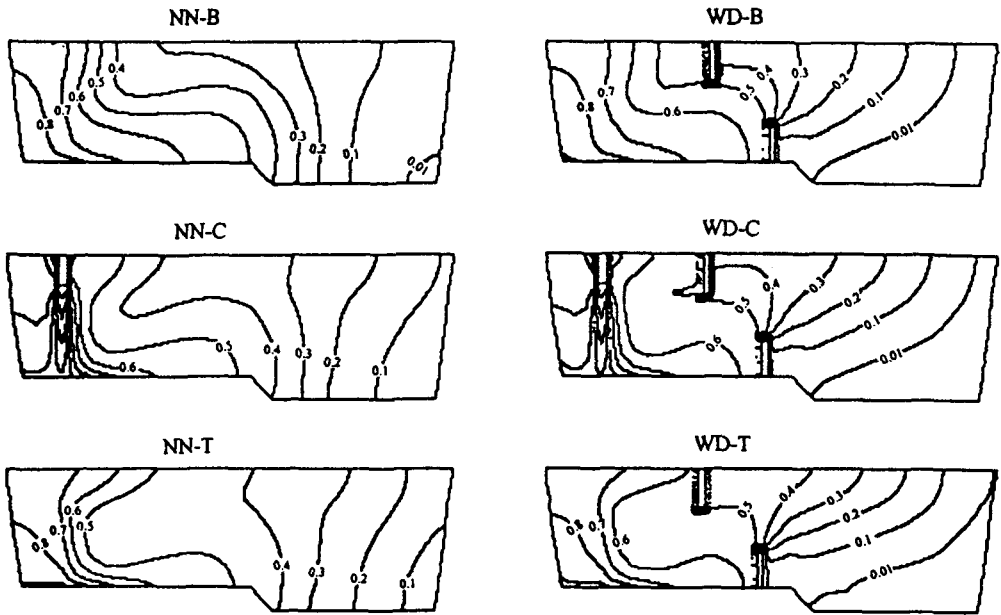


Fig. 10 Distribution of the inclusion density at t=180 sec.