

## 용강 내 아르곤가스의 개재물 흡착에 대한 수치적 연구

문창호\* · 황상무\*\*

# Numerical Study of Inclusion removal from Molten Steel by Argon Gas Flotation

C.H. Moon and S.M. Hwang

### Abstract

A finite element-based, integrated process model has been developed and applied to predict the detailed, three-dimensional aspects of the thermo-mechanical behavior occurring in the slab caster considering inclusion removal from molten steel by argon bubble flotation. Gas bubbles are simulated using the dispersion model calculating the volume fraction, and the bubble capture effect is included by a source term in the transport equation for particles. The process model is applied to the investigation of the effect of various process parameters on the inclusion removal in the molten steel.

**Key Words** : Three-dimensional finite element method, Slab caster, Bubble capture effect, Inclusion removal

### 1. 서 론

연속주조공정 중 용강에 포함된 개재물은 제품품질에 해로운 영향을 미치므로, 가능한 한 많은 수의 개재물을 제거하여 후공정에서의 품질결함을 최소화할 필요가 있다. 또한 침지노즐을 통해 주입된 아르곤 가스는 노즐근방에서의 난류를 생성함으로써 노즐막힘현상을 방지하고, 몰드내 용강유동변화 및 아르곤 기포로의 개재물 흡착 등으로 인해 개재물의 제거를 용이하게 한다. 지금까지 개재물의 제거에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔으나, 가스와의 상호작용에 의한 기포와 개재물 흡

착가능성을 고려하여, 용강유동 및 온도장 등의 결과를 연계한 연구는 극히 드물다. 따라서, 본 연구에서는 개재물 확산 지배방정식에 기포로의 개재물 흡착가능성을 고려한 가스 흡착항을 더하여 흡착된 개재물의 양을 계산하였고, 각각의 공정조건에 따른 영향을 살펴보았다.

### 2. 해석방법

#### 2.1 개재물의 가스기포로의 흡착가능성<sup>1)-3)</sup>

\* POSCO 기술연구소 계측제어연구그룹

\*\* 포항공과대학교 기계공학과

용강내에서 부유하는 개재물의 가스 기포로의 흡착 메카니즘은 아래와 같다.

가스기포에 접근한 개재물은 기포와 충돌하여 기포와 개재물간의 얇은 용강막을 형성하고, 기포표면에서 진동하거나, 표면을 따라 미끄러진다. 이로 인해 기포와 개재물 사이의 용강이 빠져나가며, 용강막의 두께가 막과피 임계 두께보다 작아지면, 막과피가 일어나 개재물, 기포 및 용강의 삼상접촉선(TPCL)을 형성하며, 흡착이 일어난다. 그러나, 개재물이 기포표면을 미끄러지는 시간  $t_s$  가 용강막의 형성에서 안정된 TPCL을 형성하기까지의 시간  $t_f$  보다 작아지면, 개재물은 기포에 흡착되지 않는다.

본 연구에서 사용된 개재물, 가스, 및 용강의 물성치는 Table 1에서 보는 바와 같으며,  $75\mu\text{m}$ 의 크기를 가진 구형 개재물의 경우  $t_s = 0.0084 [\text{sec}]$ ,  $t_f = 0.00001[\text{sec}]$ 이므로 개재물은 기포로의 흡착이 발생하는 것으로 가정한다.

또한, 한 개의 개재물이 한 개의 가스기포에 흡착할 가능성  $P$ 는 개재물의 기포와의 충돌가능성  $P_c$ , 미끄러지는 동안 부착할 가능성  $P_A$  및 부착된 개재물이 분리될 가능성  $P_D$  로 기술할 수 있다. 그러나, 용강과의 접촉각이  $144^\circ$ ,  $115^\circ$  인 알루미늄 또는 실리카 등의 개재물은 기포에 부착된 후 거의 분리가 안되는 것으로 알려져 있으므로  $P_D = 0$ 으로 가정한다.

$$P = P_c P_A$$

Fig. 1은 개재물 및 가스의 크기변화에 따른  $P$ 의 변화를 나타낸 것으로, 가스의 크기가 감소하거나 개재물의 크기가 증가할수록 가스와 용강과의 접촉면적이 증가하고, 개재물의 가스로의 충돌이 증가하여 흡착가능성이 증가함을 알 수 있다.

Table 1 Physical properties of alumina inclusions, argon, and liquid steel

Property	Value
liquid density $\rho$	$7.28 \text{ kgm}^{-3}$
$\rho_p (\text{Al}_2\text{O}_3)$	$2.7 \text{ kgm}^{-3}$
laminar viscosity $\mu$	$0.006 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
surface tension $\sigma_{\text{Fe-Ar}}$	$1.4 \text{ Nm}^{-1}$
angle starting sliding	$20^\circ$

## 2.2 요소내 개재물제거율

용강에 대해 일정상대속도로 움직이는 구형의 가스기

포에 요소내  $n_p$ 의 개수를 가진 개재물이 흡착하는 수는 아래와 같다.

$$N_p = A_B P n_p (u_B - u_p)$$

여기서  $u_B, u_p$ 는 용강에 대한 가스 및 개재물의 상대속도이며,  $A_B$ 는 가스기포의 단면적을 나타낸다.

또한 요소체적당 존재하는 가스기포의 개수는  $\sigma^g/V_B$ 이므로, 흡착되는 개재물의 총수는

$$N_t = P \frac{A_B}{V_B} \sigma^g n_p (u_B - u_p)$$

그러므로, 단위시간당 요소체적당 요소내 개재물 제거율은 다음과 같다.

$$S_c = -\frac{dC}{dt} = P \frac{A_B}{V_B} \sigma^g C (u_B - u_p)$$

여기서  $C$ 는 용강내 가스에 흡착되지 않은 개재물의 개수밀도와 노즐출구에서의 개재물 개수밀도의 비를 나타내며,  $V_B$ 는 가스기포의 체적이다.

## 2.3 지배방정식 및 경계조건

용강유동( $u_i$ ), 난류( $K = \ln k, E = \ln \epsilon$ ), 열전달( $T$ ), 가스체적분율( $\sigma^g$ ) 등을 위한 지배방정식 및 경계조건 등은 Moon<sup>5)</sup>과 같으며, 용강내 개재물 개수밀도( $C$ )에 대한 지배방정식은 아래와 같다.

$$\rho u_j C_{,j} = \left[ \frac{\mu}{\sigma_{cl}} C_{,j} \right]_{,j} - \rho S_c$$

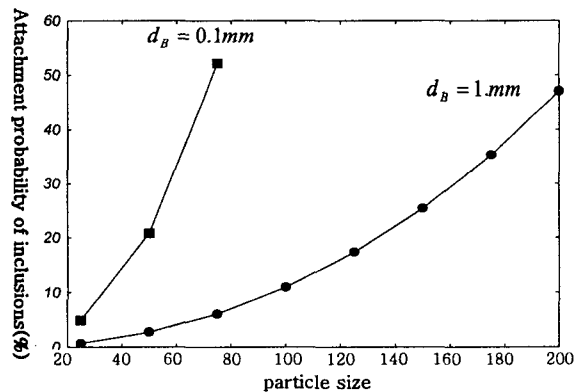


Fig. 1 Overall probability of attachment of inclusion to bubble  $P$  as function of particle diameter  $d_p (\mu\text{m})$

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 가스를 가지지 않은 경우(a), 가스에 의한 개재물 흡착효과를 고려하지 않은 경우(b), 용강내 가스장(c), 및 가스에 의한 개재물 흡착후 용강내 남아있는 개재물의 농도(d) 등을 나타낸 것이다. 아르곤가스에 의한 유동변화는 탕면에서의 개재물 농도를 증가시키고, 하부 회전류의 크기를 증가시켜 개재물농도를 상대적으로 균일하게 만든다. 또한 가스의 개재물 흡착으로 인해 전체적으로 용강내에 포함된 개재물의 농도가 감소하였으며, 상대적으로 가스농도가 적은 하부영역에서 상부영역으로의 농도확산이 증가하여 하부영역에서의 개재물농도가 감소하였고, 용강내 포함된 개재물의 최대농도 위치가 단변부 근방으로 이동함을 알 수 있다.

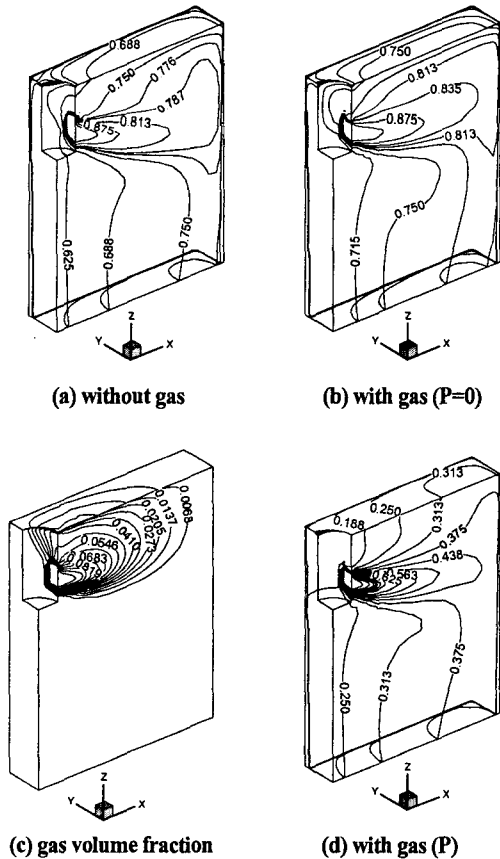


Fig. 2 Normalized inclusion concentration field (a) without gas, (b) with gas(P=0), (d)with gas(P) and (c) gas volume fraction filed.

노즐을 통하여 들어오는 개재물은 노즐내에서 가스흡착이 일어나지 않는 것으로 가정하고, 들어오는 개재물의 유량에 대한 가스와의 흡착을 통해 제거되는 개재물의 총량의 비  $\gamma$ 를 개재물의 크기, 가스기포의 크기, 가스유량 및 공정조건변화 등에 대해 살펴보았다.

$$\gamma = \left| \frac{\sum_{i=1}^{numel} \int_{\Omega_i} S_c d\Omega}{\int_{nozzle} u_j^p n_j Cd\Gamma} \right|$$

Fig. 3에서 보는 바와 같이 가스유량, 개재물의 크기가 증가하거나, 가스의 크기가 감소할수록 가스와 개재물의 충돌가능성이 증가하여, 가스로의 흡착이 증가함을 알 수 있다.

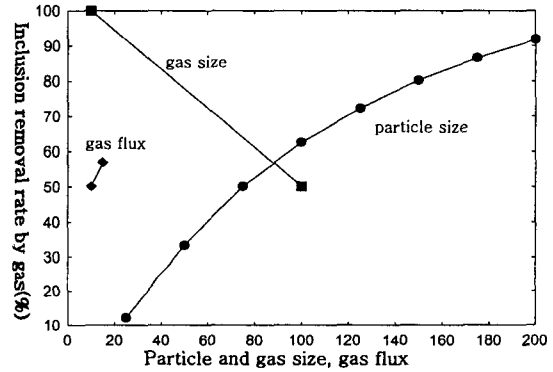


Fig. 3 Effects of particle size ( $\mu\text{m}$ ), gas size ( $d_B \text{mm} \times 10$ ) and gas flux ( $\text{l/min}$ ) on inclusion removal rate from molten steel by Ar gas flotation

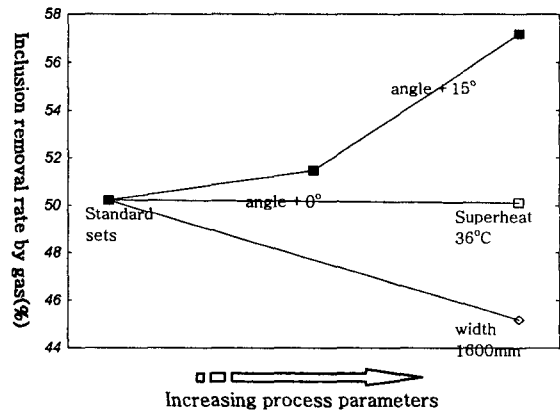


Fig. 4 Effects of process parameters on inclusion removal rate from molten steel by Ar gas flotation (standard conditions : casting speed 1.5m/min, nozzle exit angle  $-15^\circ$ , submerged depth of nozzle 100mm, inclusion size  $75\mu\text{m}$ , bubble size 1mm, gas flux 10 l/min, slab width 250mm, slab thickness 1250mm, superheat temperature  $30^\circ\text{C}$ )

또한, 노즐출구각이 증가하거나, 주편폭이 감소할수록 가스로의 개재물제거율이 증가하며, 과열도에 의한 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다.

그러나, 흡착된 개재물을 포함한 가스 모두가 제거되는 것은 않으므로 이를 고려하여 정의된 제거율에 대한 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

개재물의 가스기포로의 흡착가능성을 고려한 개재물 농도확산방정식을 유도하였고, 구해진 용강유동장, 온도장, 가스장에 연계하여 용강내에서 가스에 의해 제거되는 개재물제거율을 구하였다. 또한 공정변수, 가스 및 개재물의 크기 등의 개재물 제거에 대한 영향을 살펴보았다.

#### 참 고 문 헌

- (1) L. Zhang, S. Taniguchi, "Fundamental of inclusion removal from liquid steel by bubble flotation", *International Materials Reviews*, 2000, vol.45, no.2, pp.59-82.
- (2) L. Wang, H.G. Lee, P. Hayes, "Prediction of the optimum bubble size for inclusion removal from molten steel by flotation", *ISIJ*, 1996, vol.36, no.1, pp.7-16.
- (3) A.V. Nguyen, J. Ralson, H.J. Schulze, *Int. J. Miner. Process.*, 1998, vol.53, pp.225-249.
- (4) P. Wei et al, *J. Iron Steel Inst.Jpn*, 1987, vol.78, no.8, pp.1361-1368.
- (5) C.H. Moon, S.M. Hwang, "Coupled analysis of continuous casting by FEM", *한국소성가공학회 추계학술대회 논문집*, 2001, pp. 181.