

가스분사를 통한 Pot내에서의 입자 거동연구 A study on particles flow through gas injection in pot

김성수*1), 백제현2), 최민석3)

Sungsu Kim, Jehyun Baek, Minsuk Choi

This paper presents the result of numerical simulation of particles trace following melted zinc movement with nitrogen gas injection. The code of the computational fluid dynamics for numerical analysis was performed using FLUENT related to CFD. As application model, there was applied Eulerian multiphase model for simulation of melted zinc movement at first and then was used stochastic tracking technique for particles trace secondarily. Numerical simulation results are shown that particles move to the same direction as the movement of melted zinc.

1. 서론

표면처리 강판은 제조 과정에 따라 크게 용융도금강판과 전기도금강판, 그리고 도장강판으로 나눌 수 있으며 이중에서 아연을 이용한 용융아연도금강판은 철이 가지고 있는 단점인 녹발생에 대하여 강한 저항성을 가지고 있을 뿐만 아니라 아연에 의한 표면외관의 미려함, 외장성 그리고 도장성 등의 부가가치로 인해 자동차, 가전제품, 건축분야에서 유용하게 사용되고 있다[1]

연속 아연도금라인(Continuous Galvanized Line, CGL)의 구성은 도금을 위해 강판을 연속적으로 풀어주는 장치(Pay off reel), 강판을 열처리하는 소둔로(Annealing furnace), 강판을 도금하는 아연도금욕(Zinc pot), 도금된 강판을 연속적으로 말아주는 권취기(Tension reel)등으로 나눌 수 있다. Fig 1은 도금욕(Zinc Pot)의 개략도로써 강판은 입욕부(Entry side)에서 Snout을 통해 도금욕으로 유입되면 도금욕 내부 하단에 있는 Sink

roll과 상단에 있는 두개의 Stabilizing roll을 지나서 출욕구(Exit side)로 나오게 되며 도금욕 속에는 아연괴(Zinc Ingot)를 녹여주기 위한 유도가열기(Induction heater)가 설치되어 있다.

그리고 용융아연도금시 도금품질 향상을 위해 도금욕에는 아연의 소량의 원소들이 첨가되며 이중 Al은 0.005~0.2% 정도까지 첨가하면 도금욕의 유동성을 향상시키고 표면이 균일하며 광택성이 양호한 도금품질을 얻을 수 있으므로 첨가제로 가장 많이 사용되고 있다.

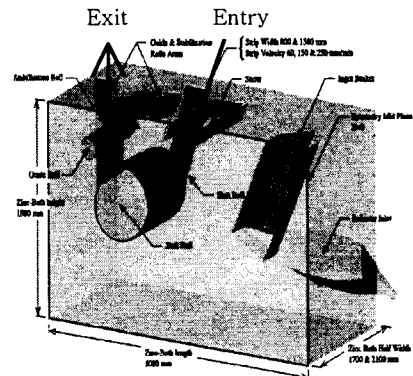
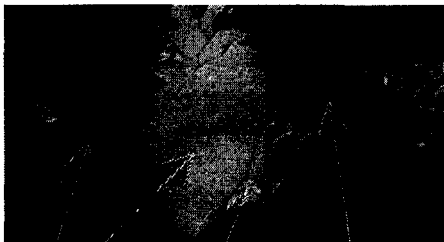


Fig.1 Layout of Zinc Pot

- 1) 포항공과대학교 철강대학원
- 2) 포항공과대학교 기계공학과
- 3) 포항공과대학교 기계공학과 대학원



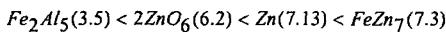
용융아연도금 강판에 있어서 도금층의 형성은 강판과 아연도금층간의 상호 금속 확산에 의해 금속간 화합물이 연속적으로 생성되면서 형성된다. 이때 강판 표면에서 도금욕으로 녹아 들어가는 Fe와 도금욕 내부의 Al이 상호 반응하면서 도금욕내에서도 미세입자(Particle) 타입의 금속간 화합물이 형성되며 이렇게 생성된 것을 드로스(Dross[Fig 2])라 하며 도금시 지속적으로 강판에서 Fe가 용출되고 도금욕에는 Al이 상존하므로 도금작업 중에는 항상 드로스가 발생하여 도금욕 내에는 일정량의 드로스가 상존하게 된다. 그리고 현재로서는 도금욕에서 드로스가 발생하는 것을 완벽하게 막을 수는 없으므로 적절한 Al의 농도관리를 통하여 드로스 발생량을 최소화하도록 관리하고 있다.



Bottom dross Zn Top dross
(Fe-Zn) (Fe₂Al₅)

Fig.2 Optical micrograph of dross

드로스는 종류에 따라 존재하는 위치가 다르며 밀도차에 의해 도금욕의 상부에 있는 드로스와 하부에 있는 드로스 크게 나눌수 있으며 각각의 비중은 아래와 같다.



그리고 하부에 있는 드로스는 용융아연 유동에 의해 도금작업중 Sink roll과 강판 사이에 들어가 강판표면의 찌힘이 생기는 품질결함을 유발하므로 이를 최소화 하기 위해 도금작업 완료 후 도금욕속에 랜스(Lance)를 넣고 여기에 질소 가스(N₂)를 불어넣어 이때 발생하는 bubble에 의해 하부 드로스를 부상시켜 드로스를 제거하는 작업을 한다.

본 연구는 용융아연도금 공정중 도금욕에서의 유량 변화에 따른 용융아연의 유동장 및 드로스의 부상경로를 추적함으로써 bubbling 작업의 최적화 공정을 도출하는데 목적을 둔다.

2. 수치해석기법

2.1 다상계에서 기포의 운동을 지배하는 법칙

Bubble 생성의 형태는 기체 유량에 따라 세 영역으로 나누어 질 수 있다. 적은 기체 유량에서는 일정한 부피의 bubble이 규칙적으로 생성되며 단 일 bubble 영역으로 일컬어진다. 기체 유량이 증가 함에 따라 bubble frequency가 일정한 전이상태 가 뒤따르게 된다. 이 영역에서는 유량의 증가에 따라 bubble 크기가 증가하게 되고, 연속적으로 생성되는 bubble 간의 거리가 점차 짧아지게 된다. 따라서 먼저 생성된 bubble이 뒤따라 생성되는 bubble에 영향을 줄 수 있으며 먼저 생성된 bubble의 흡입 효과에 의하여 뒤따르는 bubble은 보다 빠르게 생성되고 부상하는 동안 서로 합체가 일어날 수 있다. 유량이 더욱 증가하게 되면 bubble은 nozzle에서 연속적인 기체 Jet을 형성하게 된다. 이 영역에서는 유량 증가에 따라 nozzle에 가까운 bubble 크기는 급격히 증가하게 된다.[2]

기포의 크기에 대하여 여러가지 연구들이 나와 있는데 여러 변수중에서 일반적으로 nozzle의 외경이 기포의 크기를 결정하는 가장 큰 변수 인것으로 알려져 있으며 기포의 크기는 부력과 표면장력 사이에 평형이 되는 점에서 결정된다. [3] 기체의 유속이 작은 영역에서는 기포의 크기는 부력과 표면장력에 의해서만 결정되고 관성력은 영향을 주지 못하며 기체의 유속이 큰 경우는 기포의 부력과 관성력이 기포의 크기를 결정하고 표면장력은 영향을 끼치지 못한다. 기포크기는 일반적으로 아래의 식을 적용하여 구할수 있다.[3]

$$d_B = \left[\frac{3\sigma d}{g\rho_L} + \left\{ \frac{9\sigma^2 d^2}{g^2 \rho_L^2} + K \frac{V_G^2 d}{g} \right\}^{1/2} \right]^{1/3} \quad (1)$$

여기서 g 는 중력가속도, ρ_L 은 액체의 밀도, σ 는 액체의 표면장력, d 는 노즐경, V_G 는 가스의 유량, K 는 상수로 실험치를 적용한다.

2.2 지배방정식

1) Volumn fraction

Volumn fraction은 각각의 상에 의해 차지하고 있는 공간 비율로 phase continuity equation 으로부터 얻으며 조건을 만족시키기 위하여 모든 Volumn fraction의 합은 1이다

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1 \quad (2)$$

2) 연속방정식

Bubble 유동을 모사하는 계에서 비압축성 유체를 고려할 경우 연속방정식은

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \mathbf{v}_q) = \frac{1}{\rho} \left(\sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq} - \frac{d_q \rho_q}{dt} \right)$$

(3)으로 표현 할 수 있으며 각 secondary phase에 대한 이 방정식의 solution은 volumn fraction의 합이 1 이라는 조건에 따라 primary phase volumn fraction을 계산하며 \dot{m}_{pq} 는 상 p에서 상 q로의 mass transfer이다.

3) 유체-유체간 모멘텀 방정식

어떤 유체 q 상에 대한 모멘텀 보존은 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \mathbf{t} +$$

$$\alpha_q \rho_q \mathbf{g} + \alpha_q \rho_q (\mathbf{F}_q + \mathbf{F}_{lift,q} + \mathbf{F}_{vm,q}) +$$

$$\sum_{p=1}^n (K_{pq}(\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_q) + \dot{m}_{pq} \mathbf{v}_{pq}) \quad (4)$$

여기서 \mathbf{F}_q , \mathbf{F}_{lift} , \mathbf{F}_{vm} , K_{pq} , \mathbf{v}_{pq} 는 external 체력, 부상력, virtual mass force, interphase momentum exchange계수, interphase velocity

4) 유체-유체 interphase exchange coefficients

fluid-fluid flow를 위해 각각의 secondary phase는 물방울이나 bubble로 형성되었다고 가정하며 bubble, liquid-liquid, 또는 gas-liquid mixture type의 exchange coefficient는 다음과 같다.

$$\tau_{pq} = \alpha_p \rho_p f / \tau_p \quad (5)$$

drag function인 f 는 모델의 종류에 따라 식이 다르게 적용되며 Re수에 의해 정해진다 Particulate relaxation time인

$$\tau_p = \rho_p d_p^2 / 18 \mu_q \text{로 } d_p \text{는 상 } p \text{의 bubble의 직경이다}$$

5) 난류모델

Multiphase flow에서는 momentum equation에 관련되는 인자들이 매우 많아서 multiphase simulation의 난류모델을 매우 복잡하게 만든다. FLUENT는 $\kappa-\epsilon$ 모델과 함께 multiphase model에서의 난류 모델을 위해 혼합 난류 모델, 분산 난류 모델, 각 상들에 대한 난류 모델의 3가지 방법을 제공하며 혼합 난류 모델(Mixture turbulence model)은 상들 사이의 밀도비가 1에 가까울 때 적용되며 분산 난류 모델(Dispersed turbulence model)은 secondary phase의 농도가 묽을 때 적용된다.[4] 이 경우 입자간의 충돌은 무시할수 있고 secondary phase의 유동량은 primary phase의 평균특성, particle relaxation의 비율 및 eddy-particle interaction time을 조건으로 하여 주어진다. 여기서는 secondary phase의 농도 및 밀도가 primary phase에 비해 현저히 작으므로 분산 난류모델을 적용했다.

2.3 수치해석 과정

수치해석을 위한 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD) 코드는 CFD와 관련된 FLUENT를 이용하여 본 연구를 수행하였으며 이를 위해 수치 해석적 모델은 먼저 Eulerian multiphase model을 이용하여 질소가스 유입에 따른 용융아연의 유동장을 해석하였고 이후 stochastic tracking technique을 이용하여 입자의 궤적을 추적하였다.

2.4 대상계의 물성치 및 경계조건

1) 물성치

Fig 3은 CFD 해석을 위한 도금욕의 치수로써 현장 조건과 동일한 조건을 부여 하였으며 Table 1은 계산수행을 위해 사용된 물질들의 특성치[5]이다.

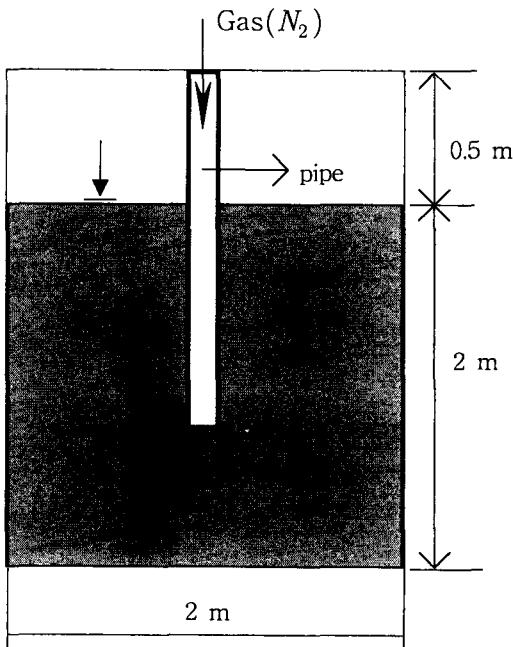


Fig.3 Schematic of dimensions for simulation

Item	Value
Liquid density (at 419°C)	6620 kg/m ³
Liquid viscosity(419°C)	0.00385 N/m
Liquid surface tension(450°C)	0.755N/m
Gas density	1.138kg/m ³
Gas viscosity	1.66E-5 N/m
Particle diameter	Max 50 μ m

Table.1 Physical properties for calculation

2) 경계조건

질소가스가 액체내부로 나오는 pipe 하단에서의 Input B.C은 velocity inlet, output B.C은 pressure outlet로 하였으며 나머지 부분은 wall B.C로 하였고 Volumn fraction은 input과 output 부분에서 각각 질소가스를 1로 두고 계산하였다.

3) 그리드 구성 및 수렴 기준

Mesh independent solution을 결정하기 위해 세가지의 다른 mesh combination (250 × 200, 100 × 80, 70 × 59)을 수행하였는데 이중 100 × 80의 non-uniform mesh가 모든 조건에서 가장 적합하였으며 continuity residual에 대한 수렴기준은 10⁻⁵으로 가정하였다.

3. 계산 결과 및 고찰

Table 2는 유량의 변화에 따른 pipe 하단에서의 가스 속도와 이때의 bubble경을 나타내며 pipe는 액체속에 1.5m 침지된것으로 가정하고 2차원으로 계산을 수행하였다.

Volumn	Item	Value
3Nm ³ /hr	Gas Velocity	2.7m/s
	Bubble Diameter	50 mm
6Nm ³ /hr	Gas Velocity	5.3m/s
	Bubble Diameter	66 mm

Table.2 Data for calculation

1) Pot내의 유동장

Fig 4는 3Nm³/hr의 가스 Volumn fraction을 1분단위로 보여주고 있는데 가스는 액체 전체에 영향을 주면서 상승하는 것이 아니라 시간에 관계없이 항상 pipe 외벽면을 따라 상승하면서 외부로 배출되고 있음을 보여주었다. 이는 Fig 5와 같이 시간당 투입되는 유량을 배로 증가해도 똑같은 모습을 보여 주었는데 이는 액체 밀도가 가



스 대비 매우 커서 가스가 액체 바닥면으로 퍼지지 못하고 부력에 의해 pipe 외벽면을 따라 바로 상승하는것으로 추정되며 물과 공기를 통한 실험에서도 동일한 것으로 관찰되었다.

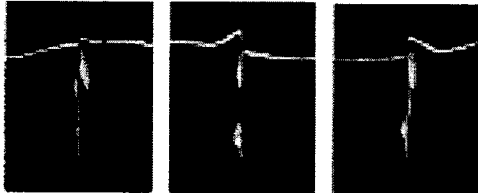


Fig.4 Volumn fraction of gas [3Nm³/hr]

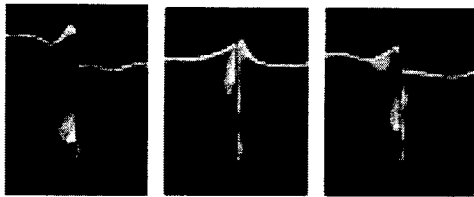


Fig.5 Volumn fraction of gas [6Nm³/hr]

Fig 6은 액체의 Volumn fraction을 30초 간격으로 보여주는것으로 유동장은 좌우 대칭적으로 형성되는 것이 아니고 어느정도 일정한 시간을 두고서 먼저 좌측으로 유동장이 크게 형성되면 다음에 우측으로 유동장이 형성되고 시간이 지나면서 전체적으로 유동이 전달되는 것으로 나타났다. Fig 7은 Pot내의 속도장으로써 pipe 외벽면을 따라 부상된 가스가 대기로 나오면서 상부면에 있는 액체를 pipe 근처로부터 pot 방향으로 밀어내면 액체는 다시 pot 벽면을 통해서 pot의 하단부로 흘러들어가는 모습을 보여준다. 그리고 유량을 증가할수록 전체 유동장의 순환주기도 빨라졌으나 유량을 급격히 증가할경우 상부로 떠오른 입자들을 포집도 하기전에 다시 pot 하단으로 침강할 수 있으므로 조업여건에 맞추어 적절한 유량을 결정하여야 한다.

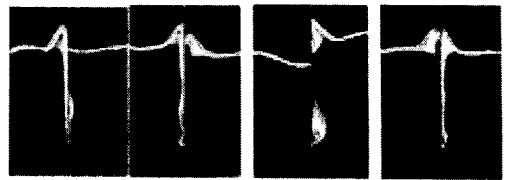


Fig.6 volumn fraction of liquid [3Nm³/hr]

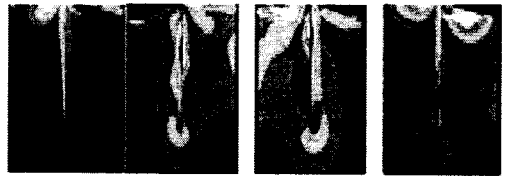


Fig.7 Velocity of liquid

2) Particle 궤적

Fig 8과 9는 액체의 백터 및 입자의 궤적을 1분 단위로 보여주는것으로 액체속에 존재하는 입자의 궤적추적을 위해 먼저 액체의 유동장을 푼후 여기에 X축은 전체길이 방향, Y축은 바닥기 준으로 상부 0.5m 까지로 하여 여기에 입자에 100개 존재하는 것으로 가정하고서 해석한 결과 입자는 액체의 유동장과 똑 같이 움직임을 알 수 있었는데 이는 가스에 의해 발생하는 유동장에 의해 상부로 떠 오를려는 부력이 작용해도 입자의 크기가 50 μ m로 너무 적어 액체 유동장과 관계 없이 자체적으로 상승하지 못하고 액체 유동방향으로 같이 움직인 것으로 판단하며 일반적으로 particle size가 클수록 입자의 자체 상승속도도 큰 것으로 알려져 있다.[2]

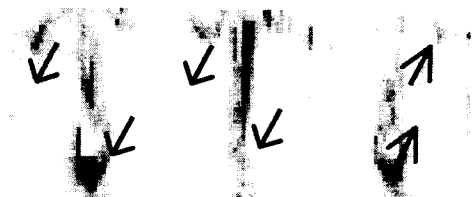


Fig.8 Vector of liquid

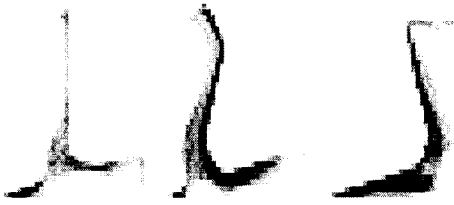


Fig.9 Particle trace

4. 결 론

제철 Plant중 용융아연 도금공장에서 도금욕 내의 질소bubbling을 통한 용융아연의 유동장 및 불순물인 드로스의 거동을 고찰하기 위하여 도금욕을 단순화 한 후 CFD 코드를 이용하여 Simulation 하였다. 이를 통해 전체 유동장 패턴 및 불순물의 궤적추적을 파악할 수 있었으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가스는 액체 내부 전지역에 골고루 퍼지면서 유동장이 형성되는 것이 아니고 pipe 외벽면을 통해 대기로 방출되면서 이때 발생하는 유동에 의해 전체적으로 유동이 전달된다.
- 2) 하부에 있는 입자는 부력에 의해 수직상방향 부상하는 것이 아니며 액체의 유동패턴과 동일한 방향으로 움직인다.

참고문헌

- [1] Posco, 용융도금이론,(1997) p.3-5
- [2] Postech, 김선효, 래들 Bubbling 공정 최적화를 위한 수모델 모사 연구, (1995) p.4-20
- [3] Franz Oeters, The metallurgy of steel making, (1999) p. 325-352
- [4] Fluent 6 user guide (2000)
- [5] Frank Porter, Zinc handbook, (1992) p. 38-45