

고급강 제조 반응 모델의 검토 : Part. 2. 종합 모델 및 단일 반응 모델

김정인* · §김선중**

*조선대학교 첨단소재공학과(현 Graduate school of Engineering, Tohoku University), **조선대학교 재료공학과

A Review of Kinetic Model for Production of Highgrade Steel : Part. 2. Complex Reaction Model and Single Reaction Model

Jeong-In Kim* and §Sun-Joong Kim**

**Dep. of Advanced Materials Engineering, Chosun University, now, Graduate school of Engineering, Tohoku University*

***Dep. of Materials Engineering & Science, Chosun University*

요 약

고품질 철강의 수요가 증가함에 따라 2차 정련 공정의 중요성이 높아지고 있다. 하지만 공정 시간에 따라 변화하는 용강, 슬래그 및 비금속 개재물의 조성은 정련 공정이 평형 상태가 아님을 의미하며, 정련 공정에서는 용강, 슬래그, 비금속 개재물, 내화물 및 합금 원소 간의 동시 다발적 반응이 일어난다. 다양한 상들의 비평형 상태에서 복잡한 반응을 고려하기 위해, 이전 연구자들은 실험을 통해 도출된 반응 속도 수식들을 기반으로 kinetic 기반의 고급강 제조 정련 시뮬레이션 모델을 발표하였다. 정밀한 시뮬레이션 모델의 개발을 위해 보고된 2차 정련 모델들의 분석 및 검토가 필요하다. 본 연구에서는 국내외로 발표된 정련 공정 관련 종합 모델 및 단일 반응 모델들에 대하여 검토하고 소개하였다.

주제어 : 2차 정련, Kinetic 모델, 종합 모델, 단일 반응 모델

Abstract

As a demand of high-end steel raises, the importance of secondary refinement process also increases. However, the content of each component in molten steel, slag and inclusions change with the time, meaning the secondary refinement process is not an equilibrium state. Furthermore, many reactions occur between molten steel, slag, inclusion, refractory and alloying element during secondary refinement process. In order to consider the above complex reactions with non-equilibrium state, a few researchers developed kinetic models in secondary refinement process based on the experimental numerical equations. It is important to analyze and review to the previously reported models to develop a precise model. Therefore, in present study, the complex reaction models based on kinetic in secondary refinement process were analyzed, reviewed, and introduced. Moreover, the single reaction models also introduced which would be applied to the complex reaction models.

Key words : Secondary refinement process, Kinetic model, Complex reaction model, Single reaction model

· Received : August 19, 2020 · Revised : December 15, 2020 · Accepted : December 23, 2020

§ Corresponding Author : Sun-Joong Kim (E-mail : ksjoong@chosun.ac.kr)

Department of Materials Engineering & Science, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

고품질의 철강은 2차 정련 공정을 통한 합금 조성 및 비금속 개재물의 제어의 정도로 구분된다¹⁾. 하지만, 2차 정련 공정에서 시간에 따라 용강, 슬래그 및 비금속 개재물의 조성이 변화하는데, 이는 2차 정련 공정이 비평형 상태를 의미하며 공정 제어가 쉽지 않음을 시사한다. 용강의 불순물을 흡수하는 슬래그는 원활한 화학 반응을 위해 적절한 조성을 갖추어야 할 필요성이 있으며, 용강에 잔존하는 비금속 개재물 중 특히 MgO·Al₂O₃ 스피넬계 개재물은 고강도와 고용점을 갖고 있어 철강 제품의 제조 후 내구성의 악영향, 그리고 추후 전기로에서 스크랩으로 재활용될 때 용강의 정밀한 조성 제어를 어렵게 만들 수 있다. 즉, 비금속 개재물은 철강제품의 물리화학적 특성을 크게 저하시키기 때문에 2차 정련 공정 간 반드시 제어해야 한다^{2,3)}.

2차 정련은 용강, 슬래그, 비금속 개재물, 내화물 및 합금 원소 간의 반응이 동시 다발적으로 일어나기 때문에 공정에 대한 예측은 쉽지 않지만¹⁾, 많은 연구자들은 실험을 통해 공정의 여러가지 메커니즘을 밝혀냈다. 보고된 메커니즘들은 열역학 데이터의 바탕⁴⁾이 되었으며, 수학적 수식으로 나타낼 수 있다. 국내외의 이전 연구자들은 이러한 열역학 데이터들과 수식들을 종합하여, 공정 예측을 단순화하기 위해 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 이러한 시뮬레이션 모델들은 공정의 비평형 상태를 고려하기 위해 반응 속도론을 기반으로 개발되었으며, 수 kg의 실험실 규모부터 수 십 톤 이상의 실제 조업 결과를 예측할 수 있다⁵⁻²⁴⁾.

2차 정련의 시뮬레이션 모델은 전술한 논문(part. 1)에서 설명한 Coupled reaction 모델 기반의 모델들⁵⁻¹⁵⁾부터, 2절에서 소개할 EERZ 모델¹⁶⁻¹⁸⁾, ReSMI 모델^{19,20)}, Metsim 모델²¹⁾, ICS 모델^{22,23)}, Kumar 등이 발표한 모델²⁴⁾들로 구분될 수 있다. 위와 같이 2차 정련의 여러가지 복잡한 반응들을 고려하고 있는 종합 모델들 외에도, 2차 정련 공정에서 일어나는 한 가지 반응에 대하여 보고한 단일 반응 모델들^{25-32,35)}도 존재한다. 보다 정밀한 시뮬레이션 모델을 개발하기 위해, 보고된 모델들을 검토 및 분석하는 연구가 필요하지만 현재까지 보고된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 2차 정련 공정을 예측할 수 있는 종합 모델들을 소개하며, 각각의 모델에서 활용된 기본

개념과 반응 속도를 결정하는 물질 이동 관련 식들을 정리하였다. 그리고 보고된 종합 모델 이외에 단일 반응에 초점을 둔 모델들에 대해서도 검토하고 소개하였다.

2. 2차 정련의 종합 모델

본 연구에서 종합 모델이란 2차 정련에서의 용강-슬래그 반응을 기반으로, 합금 원소 첨가에 대한 반응, 비금속 개재물의 형성과 거동에 대한 고려, 내화물의 용손 반응 등의 여러 가지 반응을 동시에 수반하고 있는 모델을 의미한다.

2.1. Effective Equilibrium Reaction Zone (EERZ) 모델 기반의 종합 모델(Van Ende 등)

Van Ende 등이 발표한 Effective Equilibrium Reaction Zone (이하, EERZ) 모델은, 접촉한 두 상의 반응을 고려하여 시간의 흐름에 따라 각 상 내 성분의 농도 변화를 구할 수 있는 모델이다¹⁶⁻¹⁸⁾. EERZ 모델에서는 용강과 슬래그 상이 접촉한 계면의 반응 영역을 결정하고, 그 반응 영역이 물질 이동으로 대체된다. EERZ 모델의 모식도는 Fig. 1에 나타냈다³³⁾. 그림과 같이, 금속 상과 슬래그 상은 각각의 일정한 비율을 갖는 벌크 영역과 계면 영역으로 나눌 수 있다. Interface 영역의 접촉 계면은 반응 경계면의 영역을 형성하게 되며, 각 상의 Bulk 영역과 Interface 영역은 평형 반응에 기초하여 성분의 조성이 계산된다. 즉, 금속 상의 V_M^b 와 V_{MS}^* , 슬래그 상의 V_S^b 와 V_{SM}^* 은 각각 평형 반응이 고려된다. 반응 경계면의 영역에서의 반응 속도와 물질 이동 계수를 계산하기 위해, 공정 조건에 따라 변화하는 조성, 온도 및 유동 등을 고려하여 반응 경계면의 영역을 결정하게 된다. 이렇게 결정된 각 반응 경계

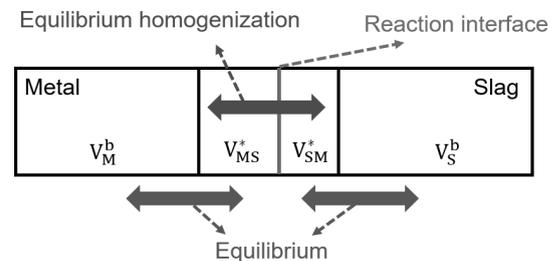


Fig. 1. Schematic of Effective Equilibrium Reaction Zone model.

면의 영역은 평형이라고 가정되며, 반응 경계면 영역에서의 모든 성분들의 물질 이동 계수가 같다고 가정되면, 이러한 반응 경계면의 영역은 물질 이동 계수를 대체할 수 있다. 즉, 공정 조건에 따라 반응 경계면 영역의 부피는 바뀌며, 평형 균질화가 이루어지게 되어 각 상 내 성분의 조성이 계산된다. 이는 식 (1) 및 식 (2)를 통해 정의된다. 식 (1)은 각 상의 Bulk 영역과 Interface 영역에서의 성분의 농도(각 $[\%i]^b$, $[\%i]^*$; mass%의 단위)를 사용하여 계산한다. 그 성분에 대한 유속(J_i ; m/s의 단위)를 의미한다. 식 (2)는 반응 경계면 영역에서의 성분의 부피(W_M/ρ_M ; m³의 단위)를 반응 면적(A_M ; m²의 단위)으로 나누고 시간의 항(Δt ; s의 단위)을 고려하여, 반응 경계면 영역을 물질 이동 계수(k_M ; m/s의 단위)로 대체할 수 있음을 나타내는 수식이다. 즉, 식 (2)를 통해 계산된 물질 이동 계수를 사용하여 식 (1)에서의 물 유속 밀도를 도출하면, 시간에 따른 한 상에서의 각 성분들의 물질 이동을 계산할 수 있다.

$$J_i = k_i \{ [\%i]^b - [\%i]^* \} \quad (1)$$

$$k_M = \frac{W_M}{\rho_M \cdot A_M \cdot \Delta t} \quad (2)$$

EERZ 모델과 이중 경막 이론⁵⁻¹⁵⁾의 기본 개념은 각 상 내의 각 원소에 대한 물질 이동 계수를 기반으로, 한 상 내의 Interface 영역과 Bulk 영역의 농도 차이를 통해, 시간의 흐름에 따른 원소의 유속 밀도를 구함으로써 한 상 내에서 각 원소에 대한 전반적인 물질 이동의 정도를 구하는 개념이다. 하지만 각 상의 Interface 영역끼리 맞닿고 있는 반응 경계면의 영역이 시간이 흐름에 따라 지속적으로 변하여 물질 이동 계수를 계산하는 EERZ 모델에 비해, 이중 경막 이론은 일정한 반응 경계면의 비율을 고정하는 데 큰 차이가 있다.

2016년 Van Ende 등은 EERZ 모델을 기반으로 개발한 2차 정련 시뮬레이션 모델을 발표한다¹⁸⁾. 이 모델은 Fact Sage Macro Processing³⁴⁾을 사용하여 작동된다. Fig. 2는³³⁾ EERZ 모델이 수반하고 있는 여러 가지 반응들을 도시하였다. 용강-슬래그 반응, 용강-비금속 개재물 반응, 내화물의 용강 및 슬래그로의 용손 반응, 개재물의 슬래그로의 부유, 용강 및 슬래그의 온도 변화, 합금 원소 첨가 등의 복잡한 반응을 고려하였다. EERZ 모델은 165 톤의 실

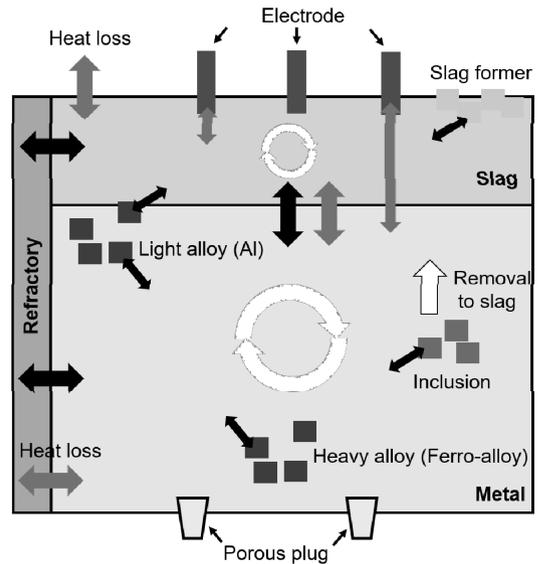


Fig. 2. Schematic diagram for reactions in secondary refinement model based on EERZ model.

제 조업 데이터를 사용하여 시뮬레이션 한 결과, 용강 및 슬래그의 조성도와 온도 등을 잘 예측하였다. 그리고 Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $CaO \cdot 3Al_2O_3$, $CaO \cdot 6Al_2O_3$ 등의 비금속 개재물의 생성량의 변화도 계산할 수 있다.

2.2. Refractory-Slag-Metal-Inclusion 모델(Shin 등)

2017년 Shin 등은 EERZ 모델을 기반으로 한 Refractory-Slag-Metal-Inclusion (ReSMI) 모델을 발표한다^{19,20)}. 이 모델은 Fig. 3에 도시되어 있는 바와 같이 크게 세 종류의 반응을 고려하고 있다. Fig. 3에서 반응 R1은 용강과 슬래그의 반응, 반응 R2는 내화물의 슬래그 상으로의 용손 반응, 반응 R3은 반응 R1과 R2의 변화에 따른 용강 내 비금속 개재물의 형성 반응이다. 반응 R1으로 표현되는 용강과 슬래그의 반응은 식 (3)과 같이 반응 계면 영역을 고려하여 계산된다. MgO 기반의 내화물의 슬래그 상으로의 용손 반응은 식 (4)에 의해 계산되며, 이 때 내화물로부터 슬래그로의 MgO 성분의 물질 이동 계수는 슬래그 내 MgO 의 물질 이동 계수로 사용된다. 식 (4)에서 MgO 의 물질 이동 계수를 고려하여 시간의 흐름에 따른 MgO 의 농도를 계산할 수 있으며, 계산된 MgO 의 농도를 사용하여 슬래그 상으로 용손되는 MgO 의 양을 식 (5)를 통해 계산할 수 있다. 용강 중 비금속 개재물이 부유하여 슬래그

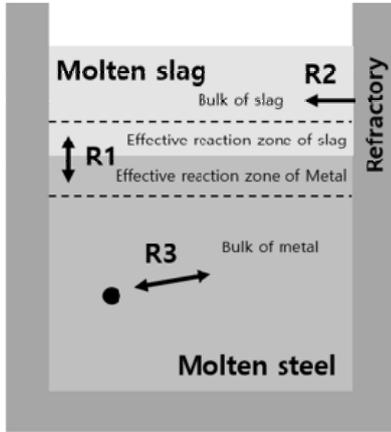


Fig. 3. Schematic diagram of Refractory-Slag-Metal-Inclusion model.

상으로 흡수되어 제거되는 양은, 용강의 전체 질량에 대하여 시간의 흐름에 따라 용강의 질량 비인 W_M^i/W_M 의 값으로 고려되어 계산된다. ReSMI 모델은 50g의 실험실 규모의 조건을 대입한 시뮬레이션에서, 용강의 조성을 예측함으로써 신뢰성을 확보하였다. 더불어 전체 비금속 개재물에 대한 Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$ 개재물 및 $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot MgO \cdot SiO_2$ 의 4원계 액상 조성 개재물에 대하여 각각의 분율을 계산할 수 있다.

$$V_M^i = \frac{W_M^i}{\rho_M} = d_M \cdot A \cdot \Delta t \quad \text{or} \quad (3)$$

$$V_S^i = \frac{W_S^i}{\rho_S} = d_S \cdot A \cdot \Delta t$$

$$k_{(MgO)} \cdot t = -\ln \left[\frac{(\%MgO)_{sat.} - (\%MgO)_{time}}{(\%MgO)_{sat.} - (\%MgO)_{initial}} \right] \cdot \left(\frac{W_S^i}{\rho_S \cdot A_{Slag-Refractory}} \right) \quad (4)$$

$$W_{(MgO)}^i = \frac{(\%MgO)_{time}}{100 - (\%MgO)_{time}} \cdot W_S^{i-1} \quad (5)$$

2.3. Metsim 모델(Peter 등)

2005년 Peter 등은 Metsim 모델을 발표한다²¹⁾. Metsim 모델은 실제 조업 규모의 공정 데이터를 시뮬레이션 하기 위해 개발되었으며, 용강-슬래그 반응과 개재물의 형

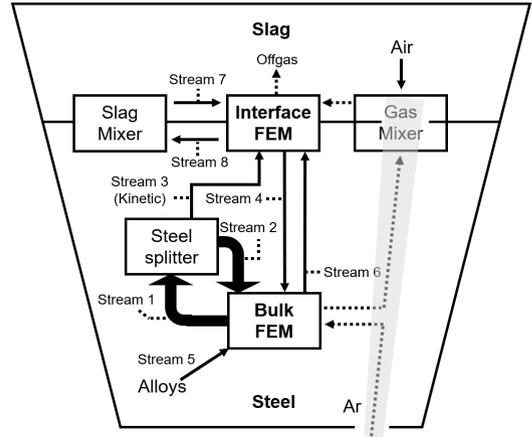


Fig. 4. Schematic diagram of Metsim model.

성을 계산할 수 있다. 이 모델의 모식도는 Fig. 4에 나타냈으며, 그림과 같이 Free Energy Minimizer (FEM), Mixer, Splitter 및 Stream 등의 네 종류의 모듈들을 사용하여 개발되었다. 용강과 슬래그의 반응에서 각 상의 물질 이동 계수는 시뮬레이션 결과와 실제 공정 결과를 비교하여 결정하였다. 하부에서 투입되는 Ar 가스의 유량에 따른 물질 이동 계수를 최적화하기 위해, 서로 다른 26 가지의 유량에서 물질 이동 계수를 결정하였고, 이는 식 (6)과 같은 일반식으로 정의된다. 각 상 내 성분들의 활동도 계수는 FactSage 계산³⁴⁾을 기반으로 사용하였으나, 후후 시뮬레이션을 통해 최적화하여 사용하였다. 각 상의 농도는 식 (6)으로 결정된 물질 이동 계수를 사용하여, 식 (7)과 같이 계산된다. 용강과 슬래그의 반응은 FEM 모듈을 사용하여 계산하며, 공정 온도는 실험을 통해 결정된 평균 온도를 사용하였다. 용강의 Bulk 영역에서의 압력은 1.3 atm, Interface 영역에서는 1 atm으로 가정하였다. Stream 모듈은 용강의 Bulk 영역의 유동을 고려하고 있는 모듈이며, Fig. 4에서 Stream 1은 시간에 따른 용강의 총 질량을 의미한다. Stream 3을 통해 슬래그와의 Interface 영역에서 반응하는 용강의 양이 계산되고, Stream 2는 Stream 1과 Stream 3의 차이를 나타낸다. Stream 4는 슬래그와의 Interface 영역에서 용강의 Bulk 영역으로 반환되는 양이 계산된다. 용강에 합금 원소로 추가되는 성분들은 Stream 5에 의해 표현된다. 용강 중의 산화물 및 비금속 개재물의 슬래그 상으로의 부유는 Stream 6로 나타낸다. Stream 7과 Stream 8은 Interface 영역의 FEM과 슬래그 Mixer 사

이의 반응을 표현한다. Ladle의 하부에 투입되는 Ar 가스는 낮은 밀도로 인해 부유하게 되며, 가스 Mixer를 통해 공기와 혼합되어 용강과 슬래그 간의 Interface 영역에서 슬래그와 용강과 함께 반응하며, 이후 가스 배출을 통해 제거된다. Metsim 모델은 123 톤, 151 톤의 실제 조업 데이터를 사용한 시뮬레이션에서 신뢰성을 확보하였다.

$$k_M = \frac{[\%i]}{W_M} \sqrt{14.23 \frac{Q_{Ar} \cdot T \cdot A}{N^{1/4}} \log\left(1 + \frac{h_0}{1.5P_0}\right)} \quad (6)$$

$$[\%i] = [\%i]_{eq.} + ([\%i]_0 - [\%i]_{eq.}) \cdot \exp(-kt) \quad (7)$$

2.4. Inclusion Composition in Steel (ICS) 모델 (Shu 등)

2011년 Shu 등은 Ladle 하부에서 투입되는 Ar 가스를 통해 교반하는 용강을 고려하여, 용강과 슬래그의 반응, 내화물의 용강 및 슬래그로의 용손 반응, 그리고 Al₂O₃, MgO·Al₂O₃, CaO·6Al₂O₃ 및 CaO-MgO-Al₂O₃ 3원계 개재물의 형성을 계산할 수 있는 Inclusion Composition in Steel (ICS) 모델을 발표한다^{22,23}. ICS 모델은 SimuSage 프로그램을 사용하여 개발되었으며, 고려하고 있는 반응은 Fig. 5에 도시되어 있는 것과 같이 크게 네 종류로 정리된다. Ar 가스의 교반에 의한 Ladle 내의 혼합, 용강과 슬래그의 반응, 비금속 개재물의 슬래그 상으로의 부유, 내화물의 용강과 슬래그로의 용손 반응이 고려됐다. 하부에서 투입되는 Ar 가스에 의해 Ladle 내 흐름이 생기고, ICS 모델에서는 Ladle을 각각의 Tank 영역으로 나누어, Tank 영역 간의 순환을 고려하여 반응이 계산된다. Fig. 5에서, Ladle 내 용강은 각 영역의 조성도와 온도가 균일하다고 가정된 Tank 1, Tank 2, Tank 3과 플룸(Plume) 영역으로 구성된다. Ladle 내 각 Tank 영역에서는 용강이 하부로 흐르며, 플룸 영역은 Ar 가스의 하부 투입으로 인해 상부로 흐르므로 용강이 순환되는 원리이다. Tank 영역 내 각 성분의 조성 변화는 Tracer의 이동에 의해 결정되며, 여기서 Tracer는 물질 이동의 개념과 유사하다. 식 (8)에 의해 Tank 영역 내 Tracer의 성분 변화가 설명된다. 식 (9)는 Tracer의 성분 변화를 계산하기 위한 용강 내 물질의 재순환 속도 식을 의미한다. 식 (9)에서 Ladle 내 균일 혼합 시간(t_{Mixing})은, 하부 투입되는 Ar 가스의 유량과 Ladle의 직경과 높이로 식 (10)에 의해 계산된다. 슬래그 상은

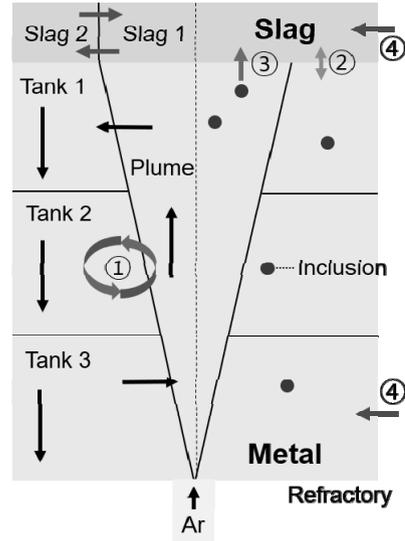


Fig. 5. Schematic diagram of Inclusion Composition in Steel model.

Fig. 5에서처럼 Slag 1과 Slag 2 영역으로 나뉘며, 각 영역의 조성 변화는 용강과 마찬가지로 Tank 영역 순환 개념을 사용하여 계산한다.

$$[\%i]_{Tank_x, t} = \frac{[\%i]_{Tank_x, t-\Delta t} \cdot (W_{Tank_x} - r_M \cdot \Delta t) + [\%i]_{Tank_{x-1}, t-\Delta t} \cdot r_M \cdot \Delta t}{W_{Tank_x}} \quad (8)$$

$$r_M = \frac{W_{Tank_x}}{(0.02517356 + 0.0189t_{Mixing})} \quad (9)$$

$$t_{Mixing} = 25.4 \cdot Q_{Ar}^{-0.33} \cdot d_{ladle}^{2.33} \cdot h_{Ar}^{-1} \quad (10)$$

용강과 슬래그의 계면 반응에서의 화학 반응 속도는 매우 빠르다고 가정되었기 때문에, 물질 이동이 율속 단계로 가정된다. ICS 모델에서의 용강과 슬래그의 물질 이동 계수는 k_M=0.001 m/s, k_S=0.0005 m/s로 고정되어 사용하였다. 용강과 비금속 개재물의 계면에서 반응은 평형이라고 가정되어 개재물의 형성이 고려된다. 위 모델은 비금속 개재물의 부유 속도 상수를 결정하여, 슬래그 상으로의 비금속 개재물의 흡수, 제거를 고려하고 있다. 부유 속도 상수는 이전의 실험 결과들을 토대로 Al₂O₃, MgO·

Al₂O₃, CaO·6Al₂O₃ 개재물 및 액상 개재물의 각각의 부유 속도 상수를 결정하였다. 내화물의 용강 및 슬래그로의 용손 반응은 실 조업에서 일반적으로 사용하는 MgO-C 기반의 내화물을 고려하여, 내화물의 MgO와 C 성분의 환원 반응과 내화물의 용강과 슬래그의 접촉 면적을 고려하여 용손 정도를 계산한다.

2.5. Kumar의 모델(Kumar 등)

2017년 Kumar 등은 실제 조업 규모에 초점을 두고 2차 정련 모델을 발표하였다²⁴⁾. 용강과 슬래그의 반응 및 비금속 개재물의 부유 거동을 고려하였다. 내화물의 용강 및 슬래그 간의 반응은 평형 상태가 고려됐기 때문에 용손 반응은 고려되지 않았다. 용강과 슬래그의 반응은 식 (11)으로 정의하는 물질 이동을 고려하였다. Fig. 6은 용강과 슬래그의 반응의 모식도를 나타낸다. 시간의 흐름에 따라 용강 및 슬래그 상의 일정한 질량 분율을 Interface 영역으로 이동시키고, Interface 영역의 반응을 평형이라고 가정하여 각 상 내 성분의 조성 변화를 계산한다. 이중 경막 이론의 경우에는 시간의 흐름에 따라 Interface 영역의 비율을 고정시키고, 계산된 상 내 전체적인 원소의 양을 설정된 Interface 영역의 분율을 통해 결정한다. 하지만 Kumar의 모델은 각 상에서 Interface 영역으로 일정한 질량 분율을 이동시킬 때 물질 이동 계수를 기반으로 한 질량 분율을 설정했다는 차이가 있다. 즉, 이중 경막 이론의 경우 물질 이동 계수를 변화시키더라도 Interface의 질량 분율은 고정되었지만, Kumar의 모델은 Interface의 질량 분율이 물질 이동 계수에 종속된다는 차이점이 있다. 일반적으로 물질 이동 계수는 확산도의 제곱근에 비례하며, 슬래그 상의 확산도는 용강에 비해 100배 작기 때문에, 용강과 슬래그의 물질 이동 계수 비(k_M/k_S)는 10으로 고려된다. 하지만 슬래그 상에 존재하는 40% 정도의 고상 슬래그를 고려하여, 용강과 슬래그의 물질 이동 계수 비(k_M/k_S)는 15로 사용하였다. 용강과 비금속 개재물의 반응은 이들의 Interface 영역에서 매우 큰 물질 이동 계수를 고려할 수 있기 때문에 평형 상태의 반응이라고 가정하였으며, 용강의 물질 이동 계수는 보고된 값으로 고정하여 사용하였다. 비금속 개재물의 슬래그 상으로의 부유는 개재물의 부유 속도 상수를 사용한 식 (12)로 계산된다. 이 모델은 241.3톤의 실제 조업 데이터를 사용한 시뮬레이션에서, 용강의 성분에 대한 조성 변화에 대하여 신뢰성을 갖는다. 비금속

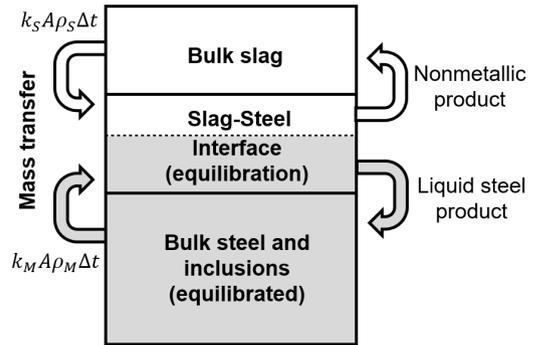


Fig. 6. Schematic for reaction between molten steel and slag by Kumar et al. model.

속 개재물의 형성에 대해서도 전체 개재물 중 Mg, Al 및 Ca의 조성 변화를 계산할 수 있으며, 이러한 계산 결과를 바탕으로 실제 공정에서 발견된 비금속 개재물과의 농도 변화를 근거로 모델의 신뢰성을 보고하였다.

$$MT = \frac{k \cdot \rho \cdot A \cdot \Delta t}{W} \quad (11)$$

$$(\%inclusion)_{final} = (\%inclusion)_{initial} - F \cdot (\%inclusion)_{time} \cdot \Delta t \quad (12)$$

2.6. 종합 모델에 대한 정리

발표된 2차 정련의 종합 모델들을 시간의 순서로 정리해보면 다음과 같으며, Fig. 7을 통해 설명할 수 있다. 1984년 Robertson 등이 Coupled Reaction 모델을 발표하였으며, 이중 경막 이론을 사용하여, 실험실 규모에서 용강과 슬래그 간의 반응에서의 용강의 조성 변화를 예측하였다^{5,6)}. 2005년 Peter 등은 Metsim 모델을 개발하였고, 용강 내 Ar 가스의 취입에 의한 용강의 흐름을 고려하여, 123 톤과 151 톤의 실제 조업 규모에서의 용강과 슬래그의 조성 변화를 예측할 수 있었다²¹⁾. 2008년 Graham 등은 Coupled reaction 모델을 기반으로 하여 Multi-component kinetic 모델을 발표하였다⁷⁻⁹⁾. 165 톤의 조업 규모에서 합금 원소 첨가 반응까지 고려하여, 용강과 슬래그의 조성 예측과 안정한 상의 개재물의 형성 역시 고려하였다. 2011년 Shu 등은 취입되는 Ar 가스를 고려하여 Ladle 내부에 나뉘어진 각각의 Tank 영역이 순환하여, 각 영역에서 성분의 조성이 계산되는 ICS 모델을 발표하였다^{22,23)}. 210 톤

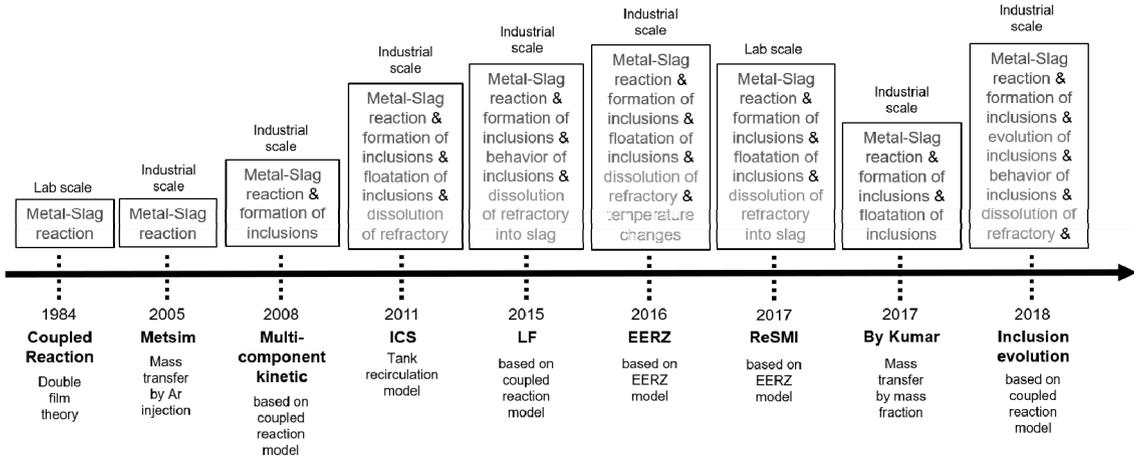


Fig. 7. Development flow of secondary refinement simulation models.

의 공정 데이터를 사용하여 용강과 슬래그의 조성 예측과, 용강과 비금속 개재물의 평형 반응에 기초하여 Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $CaO \cdot 6Al_2O_3$ 및 $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$ 3원계 개재물의 형성 역시 계산하였다. 2015년 Harada 등은 Coupled reaction 모델을 응용하여 LF 모델을 발표하였다¹⁰⁻¹²). 용강과 슬래그의 반응을 바탕으로, 내화물의 용강 및 슬래그로의 용손 반응, 합금 원소 첨가에 의한 반응, 용강과 비금속 개재물의 반응, 비금속 개재물의 세 가지 거동을 고려하였다. 165 톤의 조업 데이터를 사용한 시뮬레이션에서, 용강과 슬래그의 조성 변화를 잘 예측하였으며, Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $CaO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot SiO_2$ 개재물의 양적 변화도 계산할 수 있었다. 2016년 Van Ende 등은 반응 영역의 부피를 물질 이동으로 대체한 EERZ 모델 기반의 2차 정련 모델을 보고하였다¹⁸). 용강과 슬래그의 반응, 용강과 비금속 개재물의 반응, 내화물의 용강 및 슬래그로의 용손 반응, 비금속 개재물의 슬래그로의 부유, 용강 및 슬래그의 온도 변화 등의 반응을 고려하여 165 톤의 조업 결과를 예측하였다. 2017년 Shin 등은 EERZ 모델을 응용하여 ReSMI 모델을 발표하였다^{19,20}). 용강과 슬래그의 반응, 용강과 비금속 개재물의 반응 및 내화물의 슬래그로의 용손 반응, 비금속 개재물의 슬래그로의 부유를 고려하였으며, 실험실 규모의 시뮬레이션에서 용강과 슬래그의 조성 예측과 더불어 비금속 개재물의 형성을 잘 예측할 수 있었다. 2017년 Kumar 등은 241.3 톤의 조업 규모를 예측할 수 있는 2차 정련 모델을 발표하였다²⁴). 용강과 슬래그의

반응은 Bulk 영역의 질량 분율을 Interface 영역으로 이동시키는, 물질 이동을 고려하여 계산하였으며, 비금속 개재물의 조성을 계산할 수 있다. 2018년 Kim 등은 LF 모델을 기반으로 한 Inclusion evolution 모델을 발표한다¹³⁻¹⁵). 이 모델은 추가적으로 Mg-Al 계 개재물의 진화 반응을 고려하여, Mg-Al 계 개재물의 조성 변화와 조성 변화에 따른 개재물 내 활동도의 변화 역시 고려하였다. 210 톤의 조업 조건을 사용한 시뮬레이션에서 용강과 슬래그의 조성 변화를 잘 예측하였으며, Mg-Al 계 개재물을 억제하기 위해 용강 및 슬래그의 초기 조성에 대한 영향을 보고하였다.

3. 단일 반응 모델

본 연구에서의 단일 반응 모델이란 2차 정련에서 발생할 수 있는 한 가지의 반응에 초점을 두고 있는 모델을 의미한다. 상기 종합 모델에 단일 반응 모델의 내용을 추가하여 정밀한 시뮬레이션 모델을 개발할 수가 있다.

3.1. 비금속 개재물 형성 반응에 대한 모델

제강 공정 중 $MgO \cdot Al_2O_3$ 스피넬 개재물은 높은 용점과 낮은 변형률을 가지고 있어, 철강 제품의 기계적 성질을 저하시키기 때문에 개재물의 형성 거동을 예측해야 할 필요가 있다. 2000년 Okuyama 등은 Al_2O_3 개재물로부터 $MgO \cdot Al_2O_3$ 개재물의 조성 변화에 초점을 맞춘 모델

을 발표하였다²⁵⁾. 용강과 슬래그의 반응은 이중 경막 이론^{5,6)}을 기반으로 하여, 용강 중 Al과 슬래그 중 MgO의 환원 반응으로 용강 내 Mg의 농도가 증가하도록 계산하였다. MgO·Al₂O₃ 개재물의 형성이 시작할 때는 개재물 중 MgO의 농도는 10 mass% 정도로 가정하였고, MgO 포화 상태에서는 최대 28 mass%까지 증가하도록 고정하였다. MgO·Al₂O₃ 개재물 내 증가하는 Mg의 농도의 율속 단계는 용강 내 Mg의 비금속 개재물 내의 확산과, 용강 중 Mg의 농도에 대한 슬래그 환원 반응의 영향으로 나누어 두 가지 경우를 고려하였다. 비금속 개재물 층으로의 용강 중 Mg의 확산이 율속 단계인 경우 식 (13)을 사용하여 MgO·Al₂O₃ 개재물 중 증가하는 Mg의 농도를 계산하였으며, 개재물 외경의 변화는 고려하지 않았다. 슬래그의 환원 반응이 율속 단계의 경우, 용강과 개재물의 평형 반응을 고려하여 식 (14)를 통해 개재물 중 MgO의 농도를 계산한다. MgO·Al₂O₃ 개재물의 MgO 포화 농도를 28%로 고정하여 계산하였기 때문에 MgO 포화 농도 이상에서의 MgO 농도의 증가는 계산되지 않았다. 개재물의 농도 변화는 20kg의 실험실 규모의 실험 결과와 잘 일치하였다.

$$\frac{d(\%MgO)_{spinel}}{dt} = \frac{D_{Mg}}{r^2} \cdot \frac{d}{dr} \left(r^2 \cdot \frac{d(\%MgO)_{spinel}}{dr} \right) \quad (13)$$

$$\frac{d(\%Mg)_{spinel}}{dt} = [\%Mg] \cdot L_{Mg} \left[1 - \exp \left(- \frac{3D_{Mg} \cdot \rho_M}{R_0^2 \cdot L_{Mg} \cdot \rho_S} \cdot t \right) \right] \quad (14)$$

한편, 2017년 Tabatabaei 등은 Multilayer 모델을 사용하여 2차 정련 간 생성되는 Ca-Al 계 개재물의 형성에 대한 모델을 보고하였다²⁶⁾. 일반적으로 Al 탈산 이후의 Ca 처리는 Ca-Al 계 개재물을 형성하며, MgO·Al₂O₃ 스피넬 개재물과 같이 변형률이 낮고 용점이 높은 개재물을 소프트하게 변화시키는 개재물 처리 방법 중 하나이다. Al₂O₃ 개재물 중 CaO의 농도가 증가함에 따라 Al₂O₃ 코어 외부에 CaO 농도가 다른 다상층으로 형성한다고 가정하였다. 식 (15)를 통해 Al₂O₃ 코어의 수축을 계산하며, 수축하는 Al₂O₃ 코어의 직경 변화와 함께 CaO 농도의 증가를 계산

한다. 그리고 용강과 개재물 사이 계면 영역에서는 평형 반응을 유지하며, CaO 농도 변화에 따른 개재물의 고상과 액상에서의 CaO와 Al₂O₃ 활동도의 변화는 다음과 같이 고려하였다. 고상일 경우 각 활동도는 보고된 값을 사용하여 고정하였으며, 액상일 경우 식 (16)과 식 (17)을 활용하여 각 활동도를 계산하였다. 상기 모델을 사용하여 용강 중 Ca 농도 변화와 개재물의 직경 및 부피 분율에 따른 개재물의 변화 시간을 계산하였으며, 용강 중 Ca이 2ppm 이상일 경우 Al₂O₃ 개재물로부터 액상 Ca-Al 계 개재물까지의 변화에 최대 25초가 필요하다는 결과를 보고하였다.

$$\Delta V_{Al_2O_3, \Delta t} = \frac{4}{3} \pi \left[(r_{t, new})^3 - (r_{t, old})^3 \right] \quad (15)$$

$$a_{Al_2O_3} = 9.40288 \cdot X_{Al_2O_3}^{5.38576} \quad (16)$$

$$a_{CaO} = 15.34197 \cdot \exp \left(- \frac{X_{Al_2O_3}}{0.1031} \right) + 0.018 \quad (17)$$

3.2. 하부 취입 Ar 가스의 영향 및 거동에 대한 모델

Ladle 하부의 Ar 주입은 용강을 교반시켜 용강-슬래그의 화학반응을 촉진시키며, 비금속 개재물의 부유를 통해 용강의 품질을 개선시킨다. 더불어 기존에 발표된 종합 모델들의 경우, Ar 가스 주입으로 인한 비금속 개재물의 슬래그로의 부유 거동은 일정한 속도 상수를 도출하여 계산하지만, 부유 거동에 대한 정밀한 수학적 고려가 필요하다. 따라서 Ladle 하부 가스 주입의 거동 연구에 대해 다음과 같은 연구가 진행되었으며 관련된 수학적 모델이 연구되었다.

D. Mazumdar 등은 1995년까지 발표된 Ladle 내 가스 주입 모델들을 물리적, 수학적 모델로 세분화하여 요약하였다²⁷⁾. 물리적 모델의 경우 가스 주입 초기의 기포 생성에 관하여 주입 조건 등이 중요한 변수로 작용하지만, 기포의 완전한 성장 이후 기포의 크기 및 분포, 이동 속도 등은 가스 주입 조건에 거의 영향을 미치지 않는다고 보고하였다. 주입된 가스로 인해 생성된 기포의 이동 조건은 Ladle의 조건과 주입되는 가스에 대한 유량으로 계산되는 교반 에너지에 영향을 받는 식 (18)로 표현되며, 여기서 ρ_{normal} 은 Ladle온도에 대한 정상 기체 밀도의 비를 의

미한다. 물리적 모델들을 고려하며 실험적 검증을 바탕으로 수학적 모델을 결합시키려는 연구도 활발히 진행되었는데 크게 유체 역학 및 열 전달, 물질 이동 현상을 조사하였다. 결론적으로 Ladle의 유동 현상은 관성에 의해 대부분 지배된다는 것을 시사하였으며, 이러한 유동 현상으로 발생하는 열 및 물질 이동에 대해서는 이동 길이와 확산 계수를 사용한 무차원 수인 Sh 수를 사용한 식 (19)를 통해 수식화 하였다.

$$\epsilon_m = 71.84(Q_g \rho_{normal})^{-0.38} D^2 L^{-0.66} \quad (18)$$

$$Sh = 0.078 \cdot Re^{0.7} \cdot Sc^{0.356} \quad (19)$$

이후 Ar 가스 주입에 대한 포괄적인 내용을 기반으로, 세부적인 현상을 수학적 모델로 도식화 하기 위한 많은 연구가 진행되었다. M. Söder 등은 2004년 가스 기포를 통한 비금속 개재물의 제거에 대한 연구를 실시하였다²⁸⁾. 비금속 개재물의 크기에 따른 기포의 부유 방법을 Stokes 부유와 구형 기포 부유로 구분하였고, 25 μ m 이상의 큰 비금속 개재물은 보통 Stokes 부유에 의해 제거되며, 비교적 작은 비금속 개재물은 구형 기포에 흡착하여 부유하는 것으로 보고하였다.

2005년 Aoki 등은 하부 취입으로 인해 비금속 개재물이 슬래그로 부유하는 현상을 고려한 모델을 발표하였다²⁹⁾. 취입하는 가스에 의해 생성되는 용강의 흐름과 기포의 밀도 및 크기 등의 변화를 고려하였다. 용강 내 압력(P_0)과 온도(T)를 이용하여 일정 위치에서 기포의 밀도($\rho_{bubble,j}$)와 직경($d_{bubble,j}$)을 식 (20)과 식 (21)를 사용하여 계산하였다. 기포의 최대 크기($d_{bubble,j}^{maximum}$)는 주입되는 가스의 유량(Q_{gas})을 고려한 식 (22)에 의해 결정된다. 이를 토대로 비금속 개재물이 상승 기포에 부착되는 확률(PA)을 식 (23)을 통해 계산할 수 있으며, 계산된 확률을 사용하여 기포에 부착되는 개재물의 수(NP)는 식 (24)에 의해 고려된다. 계산된 용강의 흐름을 고려하여 기포에 흡착하여 슬래그 상으로 부유하는 비금속 개재물의 거동을 계산한다.

$$\rho_{bubble,j} = \rho_{bubble,0} \cdot \frac{P_0 + \rho_{liquid} \cdot g \cdot (h_{ladle} - y_i)}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \quad (20)$$

$$d_{bubble,j} = d_{bubble}^{bottom} \left(\sqrt[3]{\frac{\rho_{bubble}^{bottom}}{\rho_{bubble,j}}} \right) \quad (21)$$

$$d_{bubble}^{maximum} = 0.04 \cdot \left(\frac{Q_{gas}^2}{g} \right)^{0.2} + 0.0007 \quad (22)$$

$$PA = \left(\frac{d_c}{d_{bubble} + d_{inclusion}} \right)^2 \quad (23)$$

$$NP = PA \cdot \frac{\pi \cdot (d_{bubble} + d_{inclusion})^2}{4} \cdot UV \cdot \Delta t \quad (24)$$

2013년 W. Lou 등도 CFD-PBM 모델을 사용하여 가스 교환에 의한 비금속 개재물의 거동에 대한 연구를 보고하였다³⁰⁾. 가스 주입으로 생성된 기포에 의해 비금속 개재물이 포집되고 그 기포가 부유하여 결과적으로 비금속 개재물이 용강에서 제거되는 메커니즘에 대하여, 무작위적인 난류의 흐름과 기포 자체의 부력이 기포의 부유에 있어서 영향을 미치는 것을 밝혀냈다. 150 톤의 Ladle 공정에서 가스 유량이 200NL/min 이상에서 비금속 개재물의 제거율은 거의 동일하다는 결과를 도출하였다. 즉, 일정 조건 이하에서는 주입되는 가스의 유량과 기포의 부유가 비례하나, 그 조건 이상에서는 기포의 부유에 한계가 있음을 의미한다.

2018년 Q. Cao 등은 CFD 모델을 통하여 3차원적으로 비금속 개재물의 기포를 통한 제거에 대하여 연구하였다³¹⁾. 비금속 개재물의 크기와 주입되는 가스의 유량 및 기포의 직경에 대한 영향을 바탕으로, 비금속 개재물의 움직임을 예측하였고 이를 통해, 슬래그로의 혼입과 개재물의 기포에 부착, Ladle의 내화물에 대한 부착 등의 다양한 비금속 개재물의 제거 메커니즘을 밝혀냈다. 비금속 개재물의 제거에 대하여 슬래그로의 혼입이 지배적인 개재물의 제거 메커니즘임을 보고하였으며, 가스의 유량이 이러한 제거 메커니즘의 효율을 높이기 위한 가장 중요한 변수임을 밝혀냈다.

3.3. 빅데이터 기반 Ladle 온도 예측 모델

2차 정련 공정은 연속 주조 전의 마지막 공정이기 때문에, 2차 정련에서 용강의 온도는 액상 온도 이상으로 적절히 제어되어야 할 필요가 있다. 2017년 Wang은 빅데이터

인공지능인 Machine learning 기반의 Random forest라는 이름의 Ladle 온도 예측 모델을 보고하였다³²⁾. 기존에 보고되었던 Ladle 온도 예측 모델인 Ensemble 모델은 실험실 규모 및 적은 수의 공정 조건에서만 Ladle 내 온도 예측이 가능하다는 단점이 있었기 때문에³⁵⁾, Ensemble 모델을 응용하여 계산 구조와 Learning 알고리즘을 병렬식으로 변경하여 Random forest 모델로 개선하였다. Ladle 내의 열 출입은 식 (25)과 같이 아크로부터 얻는 열, 내화물 벽으로의 열 손실, 합금 원소 첨가에 의한 열 출입, 상부 슬래그 층에서의 열 손실 등이 있는데 이 모든 열 출입을 고려하여 모델링 되었다. 머신 러닝 기반의 모델이기 때문에 많은 샘플의 시물레이션을 통하여 모델의 온도 값에 대한 오차인 Ensemble 오차를 줄이는 방식을 채택하였다. 총 1714개의 샘플을 사용하였으며, 이 중 95%는 모델의 교육을 위해 사용되었다. Ensemble 오차에 대하여 최대 오차 값과 평균 제곱근 오차 등의 기준을 세우고, 기존에 보고되었던 Ensemble 모델들의 계산 결과 값과 비교하였다. 시물레이션 된 샘플의 수가 많을수록 오차 값이 감소하였으며 Random forest 모델이 실제 Ladle 내 온도를 가장 정확하게 예측했다는 결과를 보고하였다.

$$\Delta T = \Delta T_{Arc} + \Delta T_{Wall} + \Delta T_{add} + \Delta T_{surface} \quad (25)$$

4. 결 론

본 연구에서는 현재까지 발표된 반응 속도 기반의 2차 정련 시물레이션 모델을 검토하고 분석하였다. 용강과 슬래그의 반응을 바탕으로, 합금 원소 첨가 반응, 비금속 개재물의 형성 및 거동, 내화물의 용손 반응 등을 동시에 고려하고 있는 모델을 종합 모델로서 분류하였다. 발표된 종합 모델은 시간 순서로 Coupled reaction 모델, Metsim 모델, Multi-component kinetic 모델, ICS 모델, LF 모델, EERZ 모델, ReSMI 모델, Kumar 등이 발표한 모델, Inclusion evolution 모델 등이 있다. 보다 정밀한 공정 예측을 위해 비금속 개재물의 진화, Ladle 내부 온도 변화 등에 대한 단일 반응 모델들을 종합 모델에 적용할 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 중소벤처기업부의 기술개발사업(No.S2912283)과 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20172010106310).

부 록

본문에서 사용한 수식의 기호는 다음과 같이 정의된다.

J_i	성분 i에 대한 유속[m/s]
k_i	성분 i에 대한 물질 이동 계수[m/s]
$[\%i]$	금속 상 내 성분 i의 질량 분율[mass%]
$(\%i)$	산화물 상 내 성분 i의 질량 분율[mass%]
W_i	성분 i의 질량[kg]
ρ_i	성분 i의 밀도[kg/m ³]
A	반응 면적[m ²]
t	시간[s]
V	반응 부피[m ³]
d	단위 시간에 따른 반응 경계면 영역의 깊이(m/s)
Q	유량(Nl/min)
T	절대 온도(K)
N	강 내 모멘텀의 변화(N)
h	Ladle의 높이(m)
P	압력(atm)
r_m	용강 내 물질 재순환 속도(m/s)
d_{ladle}	Ladle의 직경(m)
F	비금속 개재물의 부유 속도 상수(s ⁻¹)
D_i	성분 i의 확산도(m ² /s)
r	비금속 개재물의 반경(m)
L_i	금속 성분 i의 산화식에 대한 평형 분배 비
a_i	성분 i의 활동도[-]
X_i	성분 i의 몰 분율[-]
y_i	Ladle 바닥으로부터의 위치[m]
g	중력 가속도[9.8m/s ²]
PA	비금속 개재물이 기포와 부착되는 확률[-]
NP	기포에 부착되는 비금속 개재물의 수[-]
UV	단위 부피 당 개재물의 수[m ⁻³]
l	기포의 경로 길이[m]

본문에서 사용된 첨자의 기호는 다음과 같이 정의된다.

b	벌크 (Bulk) 영역
*	계면 (Interface) 영역
sat.	포화 상태
M	금속 상
S	슬래그 상

References

1. K. W. Lange, 1988 : Thermodynamic and kinetic aspects of secondary steelmaking processes, *Int. Mater. Reviews*, 33(1), pp.53-89.
2. J. H. Park and Y. Kang, 2017 : Inclusions in Stainless Steels – A Review, *Steel Res. Int.*, 88, 1700130.
3. J. H. Park and H. Todoroki, 2010 : Control of MgO·Al₂O₃ Spinel Inclusions in Stainless Steels, *ISIJ Int.*, 50(10), pp.1333-1346.
4. M. Hino and K. Ito, 2010 : Thermodynamic data for steel-making, pp.10, Tohoku University Press, Sendai, Japan.
5. D. G. C. Robertson, B. Deo and S. Ohguchi, 1984 : Multi-component Mixed-Transport-Control Theory for Kinetics of Coupled Slag/Metal and Slag/Metal/Gas Reactions: Application to desulphurization of molten iron, *Ironmaking and Steelmaking*, 11(1), pp.44-55.
6. S. Ohguchi, D. G. C. Robertson, B. Deo, et al., 1984 : Simultaneous dephosphorization and desulphurization of molten pig iron, *Ironmaking and Steelmaking*, 11(4), pp.202-213.
7. K. J. Graham and G. A. Iron, 2008 : Coupled Kinetic Phenomena in Ladle Metallurgy, In *Proc. of the 3rd international conference on process development in iron and steelmaking*, pp.385-396, SCANMET III, MEFOS, Lulea, Sweden.
8. K. J. Graham, 2008 : Integrated Ladle Metallurgy Control, Thesis, McMaster University, Canada.
9. K. J. Graham and G. A. Iron, 2009 : Toward Integrated Ladle Metallurgy Control, *Iron and Steel Tech.*, 6(1), pp. 164-173.
10. A. Harada, N. Maruoka, H. Shibata, et al., 2013 : A Kinetic Model to Predict the Compositions of Metal, Slag and Inclusions during Ladle Refining: Part 1. Basic Concept and Application, *ISIJ Int.*, 53(12), pp.2110-2117.
11. A. Harada, N. Maruoka, H. Shibata, et al., 2013 : A Kinetic Model to Predict the Compositions of Metal, Slag and Inclusions during Ladle Refining: Part 2. Condition to Control the Inclusion Composition, *ISIJ Int.*, 53(12), pp. 2118-2125.
12. S. -J. Kim, A. Harada and S. Kitamura, 2011 : Condition to suppress spinel formation in ladle treatment predicted by the kinetics simulation model, *Proc. of AISTech 2015*, 3261, Cleveland, Ohio, USA.
13. J. -I. Kim, S. -J. Kim and S. Kitamura, 2018 : Effect of inclusions behaviors on the formation of Al₂O₃ and Spinel inclusions in ladle treatment by simulation model, *Proc. of ICS 2018*, CD-ROM, Venice, Italy.
14. J. -I. Kim and S. -J. Kim, 2020 : Evolution of Mg-Al-based Inclusions with Changes in Mg Content during Ladle Treatment Based on a Coupled Reaction Model, *ISIJ Int.*, 60(4), pp.691-698.
15. J. -I. Kim and S. -J. Kim, 2020 : Influence of Cr Content in Steel on the Behavior of MgO·Al₂O₃ Spinel Inclusions During Ladle Treatment by Using Kinetic Reaction Model, *Trans. Indian Inst. Met.*, Online-published, Springer Link.
16. M. -A. van Ende, Y. -M. Kim, M. -K. Cho, et al., 2011 : A Kinetic Model for the Ruhrstahl Heraeus (RH) Degassing Process, *Metall. Mater. Trans. B*, 42(3), pp.477-489.
17. M. -A. van Ende and I. -H. Jung, 2014 : Development of a Thermodynamic Database for Mold Flux and Application to the Continuous Casting Process, *ISIJ Int.*, 54(3), pp. 489-495.
18. M. -A. van Ende and I. -H. Jung, 2016 : A Kinetic Ladle Furnace Process Simulation Model: Effective Equilibrium Reaction Zone Model Using FactSage Macro Processing, *Metall. Mater. Trans. B*, 48(1), pp.28-36.
19. J. H. Shin, Y. Chung and J. H. Park, 2017 : Refractory-Slag-Metal-Inclusion Multiphase Reactions Modeling Using Computational Thermodynamics: Kinetic Model for Prediction of Inclusion Evolution in Molten Steel, 48(1), pp. 46-59.
20. J. H. Shin and J. H. Park, 2017 : Modification of Inclusions in Molten Steel by Mg-Ca Transfer from Top Slag: Experimental Confirmation of the ‘Refractory-Slag-Metal-Inclusion (ReSMI)’ Multiphase Reaction Model, *Metall. Mater. Trans. B*, 48(6), pp.2820-2825.
21. J. Peter, K. D. Peaslee and D. G. C. Robertson, 2005 : Experimental Study of Kinetic Processes during the Steel Treatment at two LMFs, *Proc. of AISTech 2005*, pp.959-973.
22. Q. Shu, O. Volkova, S. Lachmann, et al., 2011 : Modification of Inclusion Composition in Steel During Secondary Metallurgical Ladle Treatment – A Comprehensive Process Simulation Model, *Proc of AISTech 2011*, pp.537-547, Indianapolis, Ind., USA.
23. T. Dubberstein, O. Volkova, S. Lachmann, et al., 2012 : Investigation on steel cleanliness of a heat resistant steel grade characterization of non-metallic inclusion in ladle

- treatment, Proc. of International Conference on Clean Steel 8.
24. D. Kumar, K. C. Ahlborg and P. C. Pistorius, 2017 : Application of Kinetic Model for Industrial Scale Ladle Refining Process, Proc. of AISTech 2017, pp.2693-2706.
 25. G. Okuyama, K. Yamaguchi, S. Takeuchi, et al., 2000 : Effect of Slag Composition on the Kinetics of Formation of Al₂O₃-MgO Inclusions in Aluminum Killed Ferritic Stainless Steel, ISIJ Int., 40(2), pp.121-128.
 26. Y. Tabatabaei, K. S. Coley, G. A. Irons, et al., 2018 : A Multilayer Model for Alumina Inclusion Transformation by Calcium in the Ladle Furnace, Metall. Trans. B, 49(1), pp.375-387.
 27. D. Mazumdar and R. I. L. Guthrie, 1995 : The Physical and Mathematical Modelling of Gas Stirred Ladle Systems, ISIJ Int., 35(1), pp.1-20.
 28. M. Söder, P. Jönsson and L. Jonsson, 2004 : Inclusion Growth and Removal in Gas-Stirred Ladles, Steel Research Int., 75(2), pp.128-138.
 29. J. Aoki, L. Zhang and B. G. Thomas, 2005 : Modeling of Inclusion Removal in Ladle Refining, Proc. of The 3rd International Cong. On the Science and Technology of steelmaking, Warrandale, PA, Australia.
 30. W. Lou and M. Zhu, 2013 : Numerical Simulations of Inclusion Behavior in Gas-Stirred Ladles, Metall. Mater. Trans. B, 44(B), pp.762-782.
 31. Q. Cao and L. Nastac, 2018 : Numerical modelling of the transport and removal of inclusions in an industrial gas-stirred ladle, Ironmaking and Steelmaking, 45(10), pp.984-991.
 32. X. Wang, 2016 : Ladle furnace temperature prediction model based on large-scale data with random forest, IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 4(4), pp.770-774.
 33. S. -J. Kim, 2019 : Past and present of secondary refining model for inclusion composition control, Kinzoku, 89(9), pp.53-59.
 34. FactSage 7.1, Thermfact/CRCR and GTT-Technologies, 1976-2020.
 35. H. X. Tian, Z. Z. Mao, 2009 : An ensemble ELM based on modified AdaBoost. RT algorithm for predicting the temperature of molten steel in ladle furnace, IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, 7(1), pp.73-80.

김정인



- 조선대학교 재료공학과 공학사
- 조선대학교 첨단재료공학과 석사
- 현재 Graduate school of Engineering, Tohoku University

김선중



- 경성대학교 신소재공학과 공학사
- 일본 東北大學 공학연구과 석/박사
- 일본 東北大學 다원물질과학연구소 조교수
- 현재 조선대학교 재료공학과 조교수