



NUFLEX의 상변화, 분무유동 및 MHD 해석

유 흥 선,¹ 노 경 철,² 강 관 구,³ 허 남 건⁴

NUMERICAL ANALYSIS OF PHASE CHANGE, SPRAY AND MHD FLOW USING A NUFLEX

Hong-Sun Ryou,¹ Kyoung Chul Ro,² Kwan Gu Kang,³ and Nahmkeon Hur⁴

NUFLEX is a general purpose program for the analysis 3D thermo/fluid flow and pre/post processor in a complex geometry. NUFLEX is composed various physical models, such as phase change(solidification/melting) and spray, MHD(Magneto Hydraulic Dynamics) models. It is possible to simulate of continuous cast iron process and spray droplet breakup/collision phenomenon. For the verification of these models, compared with the experimental data and commercial CFD code's results. The results show good agreements with experimental and comercial CFD codes's results.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 범용프로그램(General Purpose Program), 상변화(Phase Change), 응고(Solidification), 용해(Melting), 분무유동(Spray), MHD(Magneto Hydrolic Dynamics),

1. 서 론

응고 및 용해를 포함하는 상변화 과정은 금속의 주조 과정 및 성형 과정, PCM(Phase Change Materials)을 이용하여 에너지를 저장하는 축열 장치의 설계, 원자력 발전소 사고 분석 등 다양한 분야에서 중요한 열전달 특성으로 여겨지고 있다. 특히 연속주조공정에서는 유동을 제어하기 위해 전자 기력 EMBR(Electro Magnetic Braker Ruler)을 사용하는 것이 일반적이다.

상변화 시 고체-액체 상경계의 시간에 따른 거동 및 잠열의 변화를 수치해석하는 방법은 고정 격자계를 사용하는 Voller등이 제안한 엔탈피 방법(Enthalpy method)[1]이 가장 널리 사용되고 있다. 엔탈피 방법은 이동 상경계에서의 열 및 질량 조건들이 적절한 생성항의 정의에 의해 지배방정식에 적용된다. 따라서 액체와 고체에 모두 같은 지배방정식을 적

용할 수 있고, 정확한 상경계의 위치를 알 필요성이 없다. 또한, 격자를 재 생성할 필요가 없어서 계산이 용이하기 때문에 응고 및 용해의 상변화 해석시 가장 많이 사용되는 방법이다.

또한 기상과 액상이 공존하는 다상유동의 대표적인 분무 유동은 내연기관의 연료 분사 시스템이나 화재 억제용 물분무 시스템, 표면 처리 등의 산업분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 분무 유동은 주변 기상과의 공기역학적 상호작용에 의한 액적분열 현상이 활발히 발생하여 액적의 크기 및 속도 등의 특성을 크게 변화시킨다. Reitz와 Diwarkar[2]는 기상의 밀도 변화에 따른 공기 역학적 액적분열 특성을 파악하고 액적 분열 과정에 대한 수치해석 모델을 제시한 바 있다. 분무의 형성과정에서 액적 충돌은 액적크기 및 속도분포에 직접적인 영향을 주기 때문에 액적충돌현상에 대한 물리적 이해를 높이는 것이 매우 중요하다. O'Rourke[3]는 액적 충돌에 대해서 운동학 이론(kinetic theory)과의 유사성을 바탕으로 해석 모델을 제시한 바 있으며 분무의 수치적 해석에 관한 많은 연구 및 해석 프로그램에서 사용되어 왔다. 그러나 최근에 와서 O'Rourke모델이 갖고 있는 문제점들이 지적됨에 따라 Ko[4]등은 액적간 충돌에 의한 부가적인 미립화 특성이 분무간 충돌 현상의 거시 구조와 액적들의 입경분포에 큰 영향을 있음을 보이고 O'Rourke 모델의 경우 이러한 현상을 적

1 중앙대학교 기계공학부

2 중앙대학교 대학원 기계공학과

3 Department of Mechanical Science and Engineering,
University of Illinois

4 서강대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: cfdmcc@cau.ac.kr



절하게 모사할 수 없음을 지적한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 개발된 범용프로그램인 NUFLEX에 상변화 모델 및 MHD 유동해석, 분무해석을 위한 여러 모델들을 개발 적용하였다.

2. 수학적 모델 및 지배방정식

2.1 상변화 모델

상변화를 묘사하기 위해 연속체모델을 적용하였고, 잠열을 계산하기 위해서 Voller가 제안한 엔탈피 방법을 사용하였다. 지배방정식중 에너지방정식에서 생성항은 총엔탈피를 현열 ($h = c_p T$)과 잠열(ΔH)로 나누어서 유도된 항이다.

속도장 계산시 Mushy zone 에서의 유동감속효과를 고려하기 위해서 투과율을 액상분율의 함수로써 계산한 Darcy's law 에서 유도된 생성항계수 식 (1)를 운동량방정식에 적용하였으며, mushy-zone의 액상분율은 온도에 따라 선형적으로 식 (2) 처럼 변화한다고 가정하였다.

$$A = - \frac{C_m(1-f_l)^2}{f_l^3} \quad (1)$$

$$f_l = \begin{cases} 1 & h > h_{liq} \\ \frac{h - h_{sol}}{h_{liq} - h_{sol}} & h_{sol} < h < h_{liq} \\ 0 & h < h_{sol} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 전자기장 모델

유동장의 유체가 전기전도성을 가지고 있을 경우 전자기장을 걸어줌으로써 발생하는 로렌츠힘을 유체유동의 제어에

이용할 수 있다는 가능성이 여러연구자에 의해 고려되었다. 예를들면 전자기력이 유동의 안정성을 증가시키고, 난류로의 천이를 지연시킬 수 있다는 것이다. 양도체인 움직이는 용강(molten steel)에 직류자장을 가하면 전류가 유도된다. 유동하는 용강에 직류자장이 가해지면 운동의 속도와 자장의 세기에 비례하는 크기의 전류가 유도되고, 이 전류는 인가자장과 작용하여 유동방향과 반대되는 방향으로 로렌츠력을 발생시킨다. 로렌츠력을 사용하여 주형상부 부근의 유동을 억제하여, 용강내의 유동을 균일화 시키고 함유물과 기포가 쉽게 부상하도록 한다. 유체의 단위 체적당 발생하는 로렌츠력은 다음과 같은 관계식에 의해 계산되고 모멘텀 방정식의 생성항이 된다.

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (3)$$

여기서 \vec{J} 는 전류밀도 벡터이고 \vec{B} 는 자기장 벡터이다. 따라서, 주어진 자기장에 대하여 전류밀도를 알면 로렌츠힘을 계산할 수 있게 된다. 전류밀도는 다음과 같은 Maxwell 방정식을 사용 한다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (4)$$

$$\vec{J} = \sigma_e (\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B}) \quad (5)$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (6)$$

유위의 식을 정리하면 다음과 같은 전위에 대한 Poisson 방정식을 Table 1과 같이 얻을수 있다.

Table. 1 The Governing Equations of Poisson Equation

Mass	$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$
Momentum	$\frac{\partial(\rho U_j U_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \right] + \rho g_i \beta (T_{ref} - T) + A(U_i - U_{i,cast}) + F_i$
Energy	$\frac{\partial(\rho U_j h)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial(\rho U_j \Delta H)}{\partial x_j} - \frac{\partial(\rho(U_j - U_{j,cast})(H_f - \Delta H))}{\partial x_j}$
k	$\frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon + S_k$
ϵ	$\frac{\partial(\rho U_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon}}{k} \mu_t \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{C_{2\epsilon} \epsilon^2}{k} + S_\epsilon$
Electircpotential	$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial(\epsilon_{ijk} U_j B_k)}{\partial x_i}$

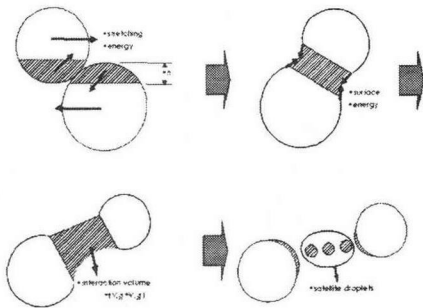


Fig. 1 The Schematic diagram of stretching separation process

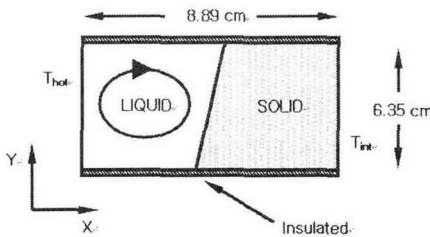


Fig. 2 Problem domain after onset of melting

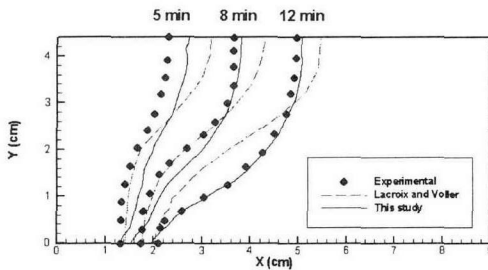


Fig. 3 Comparison with Experiment data

2.3 분무 유동 모델

NUFLEX에는 분무 유동을 해석하기 위하여 액적 분열 해석에는 R&D 모델을 충돌 모델에서는 O'Rouke 모델과 Ko&Ryou 모델을 적용하였다. 상용프로그램에서는 분열모델은 R&D, TAB, WAVE 모델등 다양하게 사용되고 있으나, 충돌 모델은 STAR-CD 및 FLUENT 모두 O'Rouke 모델만을 적용하고 있다. 그러나 NUFLEX에서는 O'Rouke 모델뿐 아니라 O'Rouke 모델의 단점인 충돌시 위성액적을 고려하지 못하는 점을 개선한 Ko&Ryou 모델을 추가로 적용하여 충돌 조건에 관련된 새로운 기준식을 제시하고 충돌 전후의 질량, 운동량 및 에너지 보존식을 근거로 한 새로운 액적 충돌 모델을 제시하였다.

Fig. 3은 스트레칭 분리의 진행과정을 나타내고 있다. 위성

액적의 특성을 정의하기 위해서는 스트레칭 분리과정을 통해 충돌액적으로부터 분리되는 질량(또는 체적)을 결정하는 것이 필요하다. 이러한 위성액적의 특성을 고려한 위성 액적의 직경 및 속도, 위성액적수는 다음과 같다.

$$d_{sa} = \left[\frac{C_V(\phi_1 \Delta^3 + \phi_2)}{N} \right]^{1/3} d_2 \tag{7}$$

$$u_{sa} = \frac{\Delta^3(\phi_1 - \phi_2)}{(1 + \Delta^3)(\Delta^3\phi_1 + \phi_2)} u \tag{8}$$

$$N = \left[\frac{N \cdot ES_{sa}}{\sigma \pi C_V^{2/3} (\Delta^3\phi_1 + \phi_2)^{2/3} d_2^2} \right]^3 \tag{9}$$

3. 해석 모델 검증

3.1 상변화 모델

NUFLEX에 적용된 상변화 모델의 검증을 위해서 사각공동 (rectangular cavity)에서 한쪽 벽면의 높은 온도로 인한 순수 갈륨의 용해 문제를 2차원적으로 수치해석을 수행하였다. 순수 갈륨은 상변화가 상온과 유사한 29.78 °C에서 등온과정으로 진행되어서, 상경계면을 실험적으로 추적하기 용이하고 실험치도 풍부하다. 따라서 본 연구에서는 Gau 등의 실험 결과와 비교를 통해서 수치해석의 타당성을 검증하고, 제안된 알고리즘과 기존 알고리즘과의 비교를 통해서, 제안된 수치 해석 방법의 시간적 효율성과 적용의 타당성을 제시하고자 한다. Fig. 2는 계산영역과 경계조건을 보여준다. Fig. 4는 실험결과와 수치해석 결과를 비교한 그림으로, Voller의 해석에 비해 NUFLEX 해석 결과가 실험치와 더 정확하게 일치함을 알 수 있다. 매 시간 간격마다 약간의 오차는 보이고 있으나, 전반적인 경향이 매우 유사하며, 응고시간이 길수록 해석 정확성이 더 높아짐을 알 수 있다.

3.2 MHD 유동 및 연속주조 공정 해석

길이 1.32m, 폭0.2m의 크기의 EMBR을 적용한 연주 공정에서의 유체 유동, 상변화를 포함하는 열전달, 용질의 거동에 대해서 수치해석 하였다. 본 연구에서 해석할 연주공정의 개략도는 Fig. 4과 같으며, 자기장의 세기의 변화에 따른 유동장의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 EMBR이 없는 경우의 유동 형태이다. 침지 노즐을 통해서 유입되는 용강의 제트 유동은 주형의 좁은 면에 강하게 충돌하여 서로 반대 방향으로 갈라지며, 주형 영역의 상부와 하부에 강한 재순환 유동장을 형성시킨다.

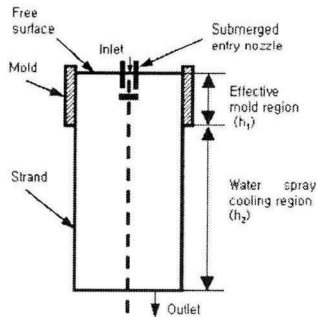


Fig. 4 Schematics of Continuous Casting

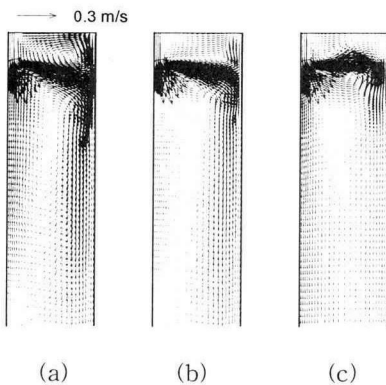
Fig. 5 Velocity vectors with the variation of magnetic flux density (a) $B_z=0.0T$, (b) $B_z=0.17T$, (C) $B_z=0.35T$

Fig. 5 (a)에서 매니스커스 영역의 강한 재순환 유동은 자유 표면을 매우 불안정하게 만들고 또한, 주형 분말 함입의 주원인이 된다. 반면 Fig. 5 (b)와 (c)를 보면 재회전 유동이 상부와 하부에서 자기장에 세기에 비례해서 모두 줄어들 수 있다. 이는 유도 전류와 정자기장과의 상호작용에 의해 유동의 방향과 반대되는 방향으로 로렌츠 힘이 작용해서이며, 이러한 현상들이 NUFLEX에서 정확히 구현되고 있다.

3.3 분무 유동

NUFLEX에 적용된 모델의 예측특성을 살펴보기 위하여 Inter-Spray 해석결과를 실험과 비교를 통해서 해석 모델의 신뢰성을 검증하였다. Fig. 6은 분사압력에 따른 액적의 SMD 계산 결과를 나타내며, 위성액적을 고려하지 않는 O'Rourke[3] 모델의 오차가 Ko&Ryou[4] 모델에 비해 상대적으로 매우 크게 나타나며, 이는 분사압력이 높은 고 We 수 영역에서 더 큰 차이를 보이고 있다. We 수가 높을 수록 분사압력이 높을 수록, 고 We 수 영역에서 충돌에 의한 위성액적 수의 증가로 인해 액적의 평균직경과 SMD가 작아지게 되기 때문이다. 현재 Ko&Ryou 충돌 모델은 NUFLEX에만 적용되어 있으며,

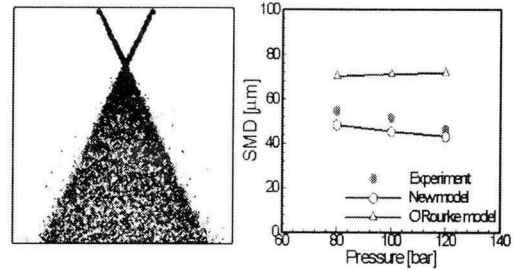


Fig. 6 The Comparisons of the calculation results with the experimental data

해석 결과의 신뢰성 또한 다른 충돌 모델에 비해 매우 높음을 알 수 있다.

5. 결 론

범용유동해석 프로그램인 NUFLEX에 적용된 상변화 및 분무, MHD 유동해석 모델은 문헌 및 상용프로그램과의 실제 해석을 통해 해석 신뢰성을 확보하였으며, 해석결과와 신뢰성 및 신모델의 적용 또한 일반 상용프로그램에 비해 전혀 손색이 없으므로 향후 다양한 해석 및 수정, 보완을 통해 보다 높은 수준의 프로그램이 개발될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산자부의 범용 열/유체 유동 해석 프로그램 개발 사업의 연구비지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Voller, V.R. and Prakash, C., 1987, "A fixed grid numerical modeling methodology for convection/diffusion mushy region phase change problems," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.30, pp.1709-1719.
- [2] Reitz, R.D. and Diwakar, R., 1986, "Structure of High-Pressure Fuel Sprays", *SAE paper870598*.
- [3] Peter J. O'Rourke, 1981, "Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays," Ph.D. Thesis, *Mechanical and Aerospace Engineering*, Priston University, USA.
- [4] Ko, G.H., Lee, S.H., Ryou, H.S. and Choi, Y.K., 2003, "Development and Assessment of a Hybrid Droplet Collision Model for Two Impinging Sprays", *Atomization and spray*, Vol.13, pp.251-272.