

다공성 매질이 존재하는 용광로 내부 이상유체 경계면의 특성

박경민,¹ 이동조,² 이정호,² 윤현식³

¹부산대학교 조선해양공학과

²포스코 포항연구소

³부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구소

CHARACTERISTICS OF INTERFACE BETWEEN TWO-PHASE FLUIDS FLOW IN A FURNACE WITH POROUS MEDIUM

G.M. Park,¹ D.J. Lee,² J.H. Lee² and H.S. Yoon^{*3}

¹Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National Univ.

²POSCO, Tech res Lab

³Global Core Research Center for Ship and Offshore Plants, Pusan National Univ.

The present study numerically investigated the deformation of the interface of two-phase fluids flow in a blast furnace. To simulate three-dimensional(3D) incompressible viscous two-phase flow in the furnace filled with the air and molten iron, the volume of fluid(VOF) method based on the finite volume method has been utilized. In addition, the porous medium with the porosity has been considered as the bed of the particles such as cokes and char etc. For the comparison, the single phase flow and the two-phase flow without the porosity have been simulated. The two-phase flow without porosity condition revealed the smooth parabolic profile of the free surface near the outlet. However, the free surface under the porosity condition formed the viscous finger when the free surface was close to the outlet. This viscous finger accelerated the velocity of the free surface falling and the outflow velocity of the fluids near the outlet.

Key Words : 다공성 매질(Porous medium), 공극율(Porosity), 이상유체(Two-phase fluid), Viscous finger.

1. 서 론

용광로 내부는 공기(Gas), 슬래그(Slag), 용선(Molten Iron) 그리고 코크스 입자(Cokes particle)로 이루어진 다상의 존재로 출선시 다상유동 흐름이 발생한다. 이는 제선 과정의 안전성과 생산성에 중요한 역할을 하기 때문에 용광로 내부에서 일어나는 다상유동에 대한 연구가 수행되어왔다[1,2,3,4].

위에서 언급한 다상유동이 용광로 운영 과정에 미치는 요소 중 하나는 출선시 나타나는 스플래시(Splash)이다. 스플래시는 용광로 주변 내화재에 손상을 입히고 이를 막기 위해

조기에 출선구를 막아 출선이 중단되면서 안정성과 생산성 감소로 이어진다[5].

이와 관련된 연구로써 He et al.[6]은 서로 다른 용광로 내부 조성물질 간의 화학 반응은 동일함에도 불구하고 스플래시의 발생시기와 규모의 차이가 존재함을 확인하였으며 이러한 원인을 찾기 위해 용광로 내부유동에 대한 실험을 수행했다. 실험은 상사법칙을 적용하여 용선 대신 물을 고려하였으며, 출선시 물과 공기의 상호작용에 의해 발생하는 스플래시를 모사하고 분석하였다. He et al.[6]은 스플래시의 발생 원인으로 출선 속도와 출선구 내부 거칠기에 주목하였으나, 지배적인 요인으로 출선구 내부에 유입된 공기임을 확인하였다. 따라서 He et al.[6]은 스플래시가 공기의 유입 시기와 유량에 관계있다고 보고하였다.

위에서 언급한 선행연구 내용을 바탕으로 스플래시의 조기 발생은 조기에 배출되는 공기가 원인임을 확인하고 이에

Received: December 21, 2015, Revised: March 28, 2016,

Accepted: March 28, 2016.

* Corresponding author, E-mail: lesmodel@pusan.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2016.21.1.110>

© KSCFE 2016

대한 원인을 가스-액체 경계면(G-L, Gas-Liquid interface)에서 생기는 viscous finger라 판단, 이에 대한 연구를 진행하였다 [7]. 위에서 언급한 viscous finger란 다공성 매질 안에서 점성이 작은 유체가 점성이 큰 유체로 이동할 시 두 상의 경계면이 불안정해 지면서 손가락 형태로 나타나는 현상을 말한다 [8]. viscous finger 현상은 용광로 내부뿐만 아니라 다양한 분야에서 나타나고 연구되어 왔다. 설탕 정제 시 사용되는 원통형정제기 내부에서 발생하는 viscous finger에 대해 연구[9]한바 있으며 석유 산업에서는 지하 내부의 다공성 암석에서 원유 회수 시(Oil Recovery)나타나는 viscous finger에 대해 연구가 진행되었다[10,11]. He et al.[7]은 용광로 모형 내부에 구슬을 이용하여 공극율을 고려하고 용선과 슬래그에 대해 상사법칙을 고려한 기름 그리고 염화아연을 이용해서 용광로 내부 유체를 모사하였다. 이들은 공극율과 다공성 매질의 상태가 viscous finger 발생에 미치는 영향과 viscous finger가 공기 배출 시간에 미치는 영향성을 평가하였다. viscous finger는 (1) 공극율의 감소, (2) 다공성 매질의 불균질인 경우 조기에 발생했으며 viscous finger 발생 시 공기가 조기에 배출되는 것을 확인하였다.

용광로 내부의 유체경계면에서 발생하는 viscous finger는 용광로 운영에 중요한 현상임에도 불구하고 저자들이 조사한 바에 따르면 수치해석을 통해 진행된 연구가 거의 없는 것으로 판단되어진다. 특히, 용광로 내부는 코크스(Cokes)와 같은 입자들이 존재하며 이는 용광로 내부를 다공성 매질상태로 만든다. 따라서 본 연구에서는 수치해석기법을 활용하여 다공성 매질의 유무에 따른 viscous finger 현상과 관련된 유체 경계면인 G-L 변화를 연구하였다.

또한, 이상유체 작동 환경에서 출선구 근처 유동장의 특성을 단상유동일 때와 비교하였다.

현재 연구는 용광로 내부의 다상유동 연구의 초기 단계로서 용광로 내부의 복잡한 조건을 단순화 시켜서 수치해석을 진행하였다. 이에 따라 다공성 매질의 영향은 용광로 내부의 빈 공간의 영향만을 평가하였으며 다공성 매질에 의해 추가적으로 발생하는 저항효과는 무시하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 상용코드인 STAR-CCM+(Ver.10.02)을 이용하여 수치계산을 진행하였다.

해석 시 고려된 용광로 내부는 다상유동 연구의 초기 단계로서 용광로 내부의 복잡한 조건을 단순화 시켜 모델링 하였다. 용광로 내부 다공성 매질의 영향은 빈 공간(Porosity)의 영향만을 평가하였으며 추가적인 저항의 영향(점성저항, 관성

저항)은 무시하였다. 용광로 내부의 유동은 비정상, 비압축성, 점성 그리고 난류유동으로 고려되었다. 지배방정식은 식 (1)의 연속방정식과 식 (2)의 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식이다.

식 (1), (2)에서 u_i 는 유체의 속도, χ 는 공극율, t 는 시간, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, μ 는 유체 점성계수 그리고 F_i 는 체적력(중력)이다. $\overline{u_i' u_j'}$ 는 레이놀즈 응력(Reynolds stress)항으로 realizable $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하여 해석하였다.

연구를 위해 사용된 STAR-CCM+에서는 다공성 매질로 인한 빈 공간의 영향을 식 (2)의 비정상(Unsteady)항에 있는 밀도(ρ)에 공극율(χ)을 적용하여 전체체적에서 유체가 차지하는 비율로 고려하였다[12].

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\chi u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \\ & \quad - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i' u_j') + F_i \end{aligned} \tag{2}$$

본 연구에서 고려된 용광로 내부의 유체는 이상유체(Two-phase)로써 유체사이에 계면이 존재한다. 계면을 추적하기 위한 방법으로 VOF(Volume Of Fraction)를 사용하였다. 식 (3)은 사용된 VOF 방정식이며 Q_δ 는 δ 번째 유체의 Volume fraction을 나타낸다. 각 상에서 각 Cell에 위치한 Q_δ 의 값이 0일 경우는 빈 것을 뜻하며 1인 경우 해당 Cell을 채운 것을 의미한다. 계면의 위치는 Q_δ 의 값이 0과 1사이에 위치하며 본 연구에서는 Q_δ 의 값이 0.5인 위치를 용선과 공기의 계면으로 포착하였다.

$$\frac{\partial Q_\delta}{\partial t} + u_i \frac{\partial Q_\delta}{\partial x_i} = 0 \tag{3}$$

2.2 해석영역 및 경계조건

본 연구에서는 출선구를 포함한 용광로 하부영역을 수치 해석영역으로 고려하였다. 이는 용광로 하부에 viscous finger 현상을 수반하는 이상유체 경계면의 변화가 크게 일어날 것으로 예상되어지기 때문이다. 해석영역은 Fig. 1에 나타난 바와 같이, 원통형으로 지름과 높이가 각각 1000 mm와 1500 mm 이다. 용선과 공기가 빠져 나가는 출선구의 축은 x-방향

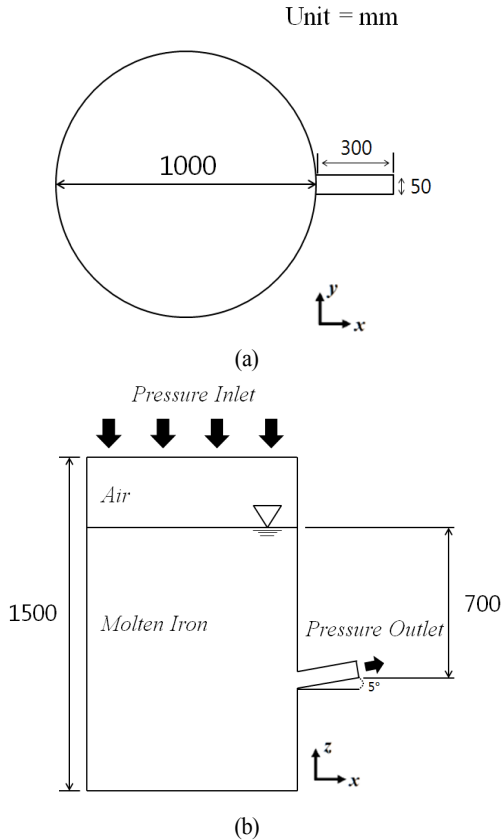


Fig. 1 Schematic of the computational domain and boundary condition at (a) x-y plane and (b) x-z plane

(지면)에 대하여 5° 기울어져 있으며, 지름과 길이는 각각 50 mm와 300 mm이다. 용선과 공기의 초기 경계면은 출선구 입구 중심을 기준으로 700 mm 높이에 위치해 있다.

모델의 입출구 경계들에는 압력조건을 설정하였으며 각각 계기압력으로 4.5 bar와 대기압을 부여하였다. 모든 벽면에는 접촉조건이 부여되어졌다.

수치해석 시 사용된 격자를 Fig. 2에 나타내었다. 격자는 STAR-CCM+에서 제공하는 격자분할기법(Cut-cell grid method)을 사용하여 생성하였다. 이상유체의 계면 포착의 정도를 높이기 위해 경계면이 이동하는 영역과 특성치 변화가 크게 나타나는 출선구 입구에 조밀한 격자를 분포하였다.

본 연구에서는 세가지 서로 다른 격자계(Coarse, Medium, Fine)를 고려하여 격자의존성 테스트를 수행하였다. 격자의존성 테스트의 주 관점은 자유수면과 이의 불안정성으로 인해 발생하는 viscous finger 이다. 따라서 본 연구에서 고려한 격자수를 유체의 유동과 관련된(내부 유동, 벽면에서 속도의 기울기와 관련된 전단층, 궁극적으로 난류스케일) 관점보다 가

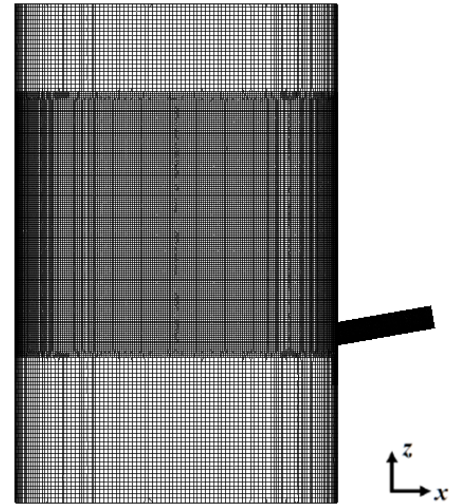


Fig. 2 Grid distributions

장 큰 기하학적 형상(적분스케일) 입장에서 접근하였으며 또한 복잡한 유동에 대한 계산의 효율성도 같이 생각하였다. 결론적으로 격자 의존성의 초점은 자유수면의 변형 그리고 하강속도 등으로 판단하고 세가지 서로 다른 격자계를 고려하여 격자의존성 테스트를 수행하였다.

각 격자계에 해당하는 격자수로는 5×10^5 (Coarse), 1.8×10^6 (Medium), 2.1×10^6 (Fine)이다. 전반적으로 자유수면 변형에는 큰 영향이 없었으며, 출선구 근처에 속도들의 크기도 1% 내의 차이를 보였다. 이에 따라 본 연구에서는 중간격자수인 1.8×10^6 (Medium)를 수치해석에 사용하였다.

2.3 해석조건

용광로 내부는 코크스 입자들이 존재하며 이는 용광로 내부를 다공성 매질상태로 만든다. 이를 고려하기 위하여 수치해석 시 공극율을 적용하였다. 고려된 공극율은 산업 현장에서 용광로 내부 입자들로 인해 일반적으로 측정되는 값인 0.36으로 결정하였다. 공기와 용선의 물성치 또한 산업 현장에서 고려되는 값들로 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Properties of fluids in furnace

Properties	Values
Gas dynamic viscosity(kg/m·s)	1.85×10^{-5}
Gas density(kg/m ³)	1.18
Molten Iron viscosity(kg/m·s)	7.15×10^{-3}
Molten Iron density(kg/m ³)	7000
Viscosity ratio, gas/iron	0.25×10^{-3}
Density ratio, gas/iron	1.68×10^{-4}

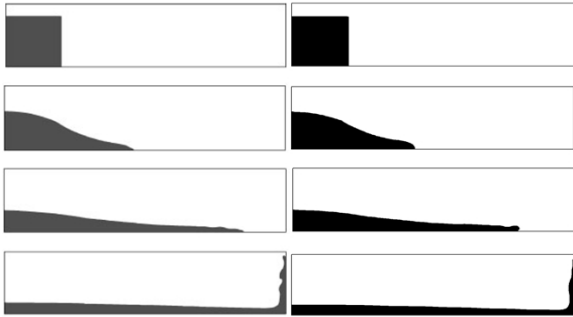
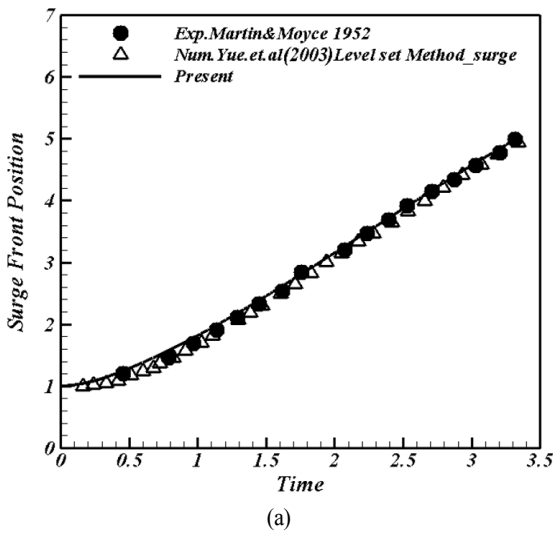
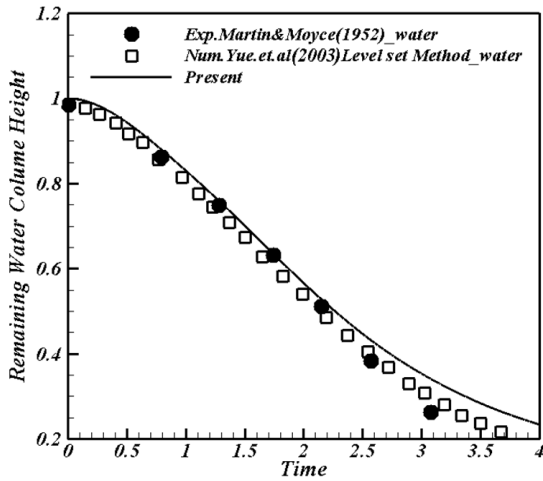


Fig. 3 Instantaneous free-surface position of broken dam; Yue et al.[13](left column) and present result(right column)



(a)



(b)

Fig. 4 (a) Surge front positions and (b) water column height of free-surface position of broken dam

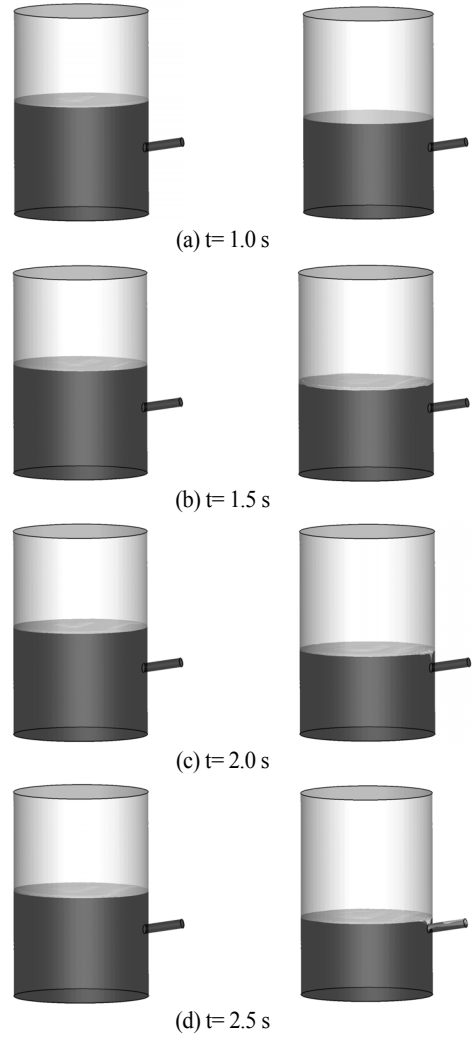


Fig. 5 Time sequences of the remaining molten iron at regular intervals from 1.0s to 2.5s of tapping process for (left column) without porosity and (right column) with porosity

2.4 검증

서론에 언급한 바와 같이 본 연구와 유사한 선행연구가 거의 없는 관계로 이상유체의 계산을 위해 적용되는 VOF 기법에 대한 검증문제로서 자유수면 즉 이상유체의 계면이 존재하는 댐 붕괴에 대한 문제를 선택하였다.

수치해석 결과 검증을 위해 본 연구에서 사용된 수치해석 기법을 적용하여 얻은 각 시간별 자유수면의 형상과 자유수면의 surge front position 및 water column height를 Reference [13,14]과 비교한 결과를 Fig. 3와 Fig. 4에 각각 나타내었다.

Fig. 3와 Fig. 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 수치해석 결과가 선행연구와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

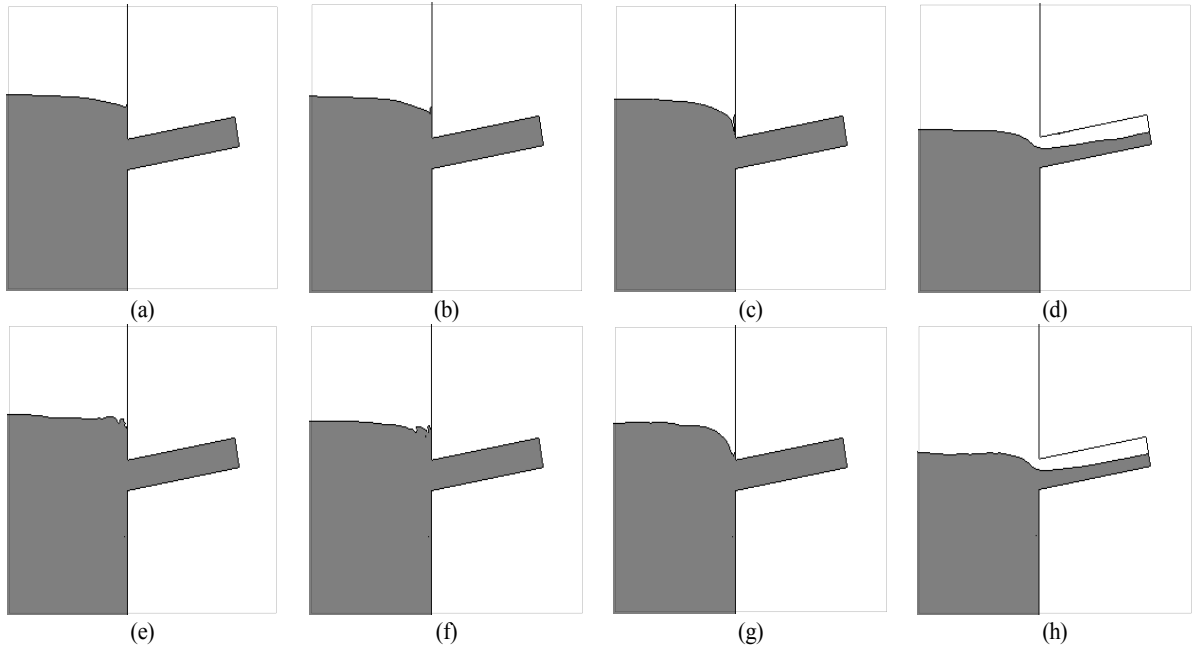


Fig. 6 Comparison of free surface shape according to location around taphole for (a)-(d) without porosity and (e)-(h) with porosity

3. 결 과

다공성매질을 고려하지 않은 이상유동과 공극율(0.36)이 적용된 다공성매질이 고려된 이상유동 하에서 전형적인 자유수면의 변화를 Fig. 5에서 보여준다. 공극율을 적용한 경우 검사체적이 감소되기 때문에 같은 시간대임에도 불구하고 공극율이 고려되었던 경우의 자유수면이 공극율이 적용되지 않은 자유수면보다 빨리 하강함을 Fig. 5의 같은 시간대의 두 경우의 자유수면들의 상호비교를 통해 확인할 수가 있다.

자유수면 형상의 시간에 따른 변화는 두 경우 모두, 자유수면은 출선구 근처에 가기 전까지는 변화가 거의 없이 초기의 형상을 유지하는 것을 Fig. 5(a), (b)에서 확인할 수가 있다. 하지만 공극율이 고려된 경우에는 출선구 근처에서 출선구쪽으로 유체가 상대적으로 빠른 속도를 가지고 유출이 됨으로 저압에 의한 suction 때문에 자유수면이 출선구에 가까워 질수록 자유수면의 변형은 출선부 상부의 자유수면부터 일어나는 것을 Fig. 5(c), (d) 오른쪽 열에서 확인할 수가 있다.

Fig. 5에 삼차원으로 가시화되어진 자유수면의 공극율의 의존성을 보다 자세히 확인하기 위해서 출선구 중앙을 지나는 이차원 단면에서 출선구 근처 자유수면의 위치에 따른 변화를 Fig. 6에 나타내었다.

다공성매질을 고려하지 않은 이상유동 조건 하에서 자유수면은 수평을 유지하면서 아래쪽으로 점차 내려오다가 출선

구 근처에서 출선구 입구쪽으로 점점 휘어지는 것을 Fig. 6(a)-(d)에서 확인을 할 수가 있다. 출선구쪽으로 더욱 더 내려가면 공기가 출선구로 유입되면서 출선구 내부를 따라 공기와 액체가 같이 유출되는 것을 확인할 수가 있다. 결론적으로, 공극율을 고려하지 않은 경우의 자유수면은 출선구쪽으로 연속적인 포물선형태의 기울진 형상을 보이면서 공기가 출선구로 유입된다. 이에 반해, 공극율이 고려되었던 경우의 자유수면은 출선구에 가까워짐에 따라 다소 불연속적으로 찢어진 형태의 자유수면을 보여주는 것을 Fig. 6(e)-(h)에서 확인할 수가 있다.

앞선 공극율이 적용되었던 경우 자유수면의 변형을 보다 구체적으로 확인하기 위해서 Fig. 7(a)에 출선구 근처에서의 자유수면을 확대해서 나타내었다.

다공성 매질 안에서 점성이 작은 유체가 점성이 큰 유체로 이동할 시 두 상의 경계면이 불안정해 지면서 손가락 형태의 viscous finger로 나타나는 현상을 본 연구의 결과인 Fig. 7(a)를 통해서도 확인할 수가 있다.

또한, He et al.[15]은 실험을 통해서 용광로 내에 탭 근처에서 viscous finger가 생성됨을 Fig. 7(b)와 같이 확인하였다. 이러한 viscous finger는 작동환경에 따라 다양한 형상으로 나타나며, 유사한 조건하에서도 이의 형상은 시간과 공간에 강하게 의존함을 Saffman and Taylor[8]의 연구에서 확인할 수가 있다. 따라서, 작동 환경이 매우 복잡한 용광로 내에서 이

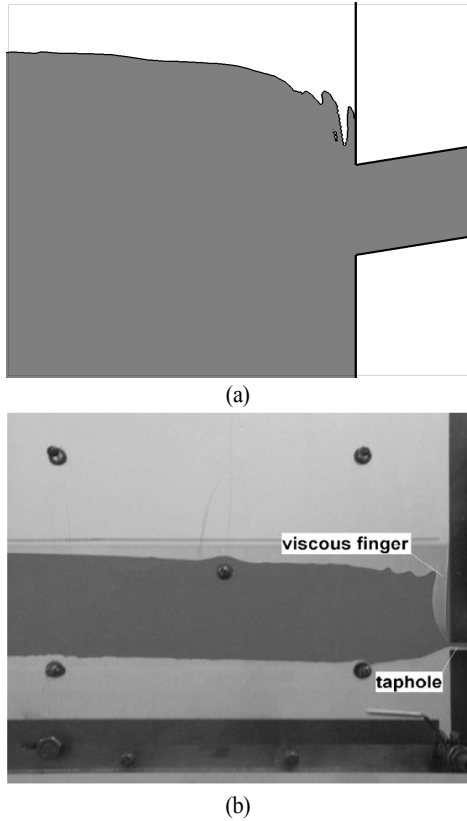


Fig. 7 Comparison of (a) the present free surface with (b) the experimental results of He et al.[14]

들의 형상을 유사 연구의 결과와 정확히 비교를 하기는 매우 어렵다. 하지만, 용광로 내에서는 다상유동이 존재할 경우 He et al.[15]이 실험을 통해 viscous finger가 발생함을 밝힌 바와 같이, 본 연구의 전산해석을 통해서도 확인할 수가 있다. 결론적으로, Fig. 7에서 실험결과와의 비교는 형상에 대한 결과의 유사성에 대한 검증보다는 용광로 내의 viscous finger의 존재에 대한 검증을 목적으로 하였다.

He et al.[15]은 viscous finger의 발생은 용선의 배출속도증가와 용광로내의 용선 높이 감소의 원인으로 지적하였다. 앞선 Fig. 5에서 확인한 바와 같이, 공극율이 적용된 경우의 자유수면이 공극율이 적용되지 않는 경우의 자유수면보다 일찍 하강하였다. 이러한 원인으로 He et al.[15]이 보고한 viscous finger를 지목할 수가 있다.

viscous finger가 출선구 입구의 유체의 속도에 미치는 영향을 보다 정량적으로 확인하기 위해서 출선구 입구 상부의 속도값을 통해 Fig. 8에서 살펴보고자 한다. 여기서, 공극율이 적용되지 않은 이상유동(two-phase)와 단상유동(single phase)일 때 속도들의 시계열도 함께 나타내었다. 입구 및 출구의 압

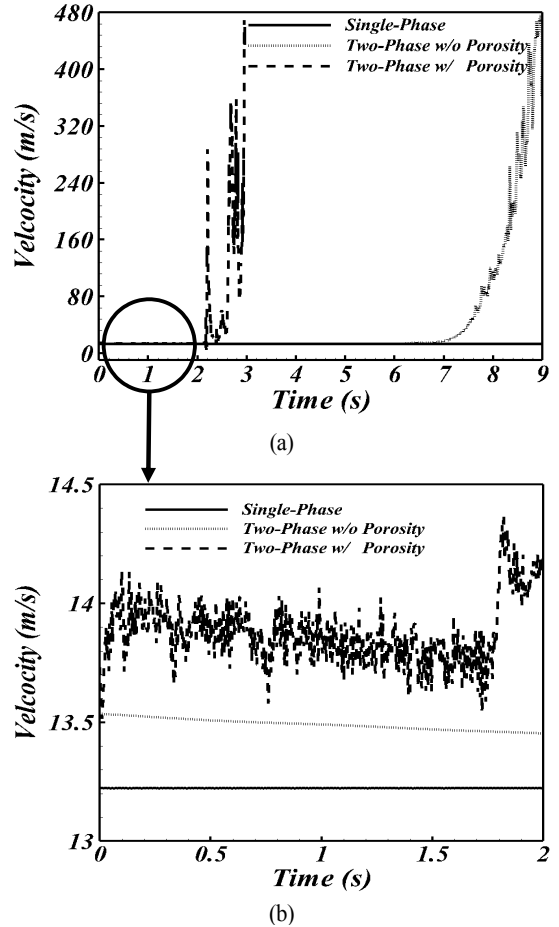


Fig. 8 Time histories of velocity at upper part of taphole (a) until 9s, (b) until 2s

력조건에 의해 초기에 유체의 속도는 순간적으로 매우 커진 후 안정적인 거동을 보인다. 하지만, 이러한 초기의 순간적인 변화 값은 좌표축과 거의 겹쳐서 나타나기 때문에 Fig. 8에서는 확인하기가 어렵다. Fig. 8(a)에서 확인할 수 있는 바와 같이, 단상유동(single phase)의 속도값은 시간에 따라 변화가 없이 일정하다. 이에 반해, 공극율과 관계없이 이상유동 경우에는 일정시간 후에 공기가 유입되면서 속도값이 급격히 증가하는 것을 확인할 수가 있다. Fig. 8(b)에서는 공극율이 적용되지 않는 경우에는 속도가 일정한 값을 유지하다가 급격히 증가하지만, 공극율이 적용된 경우에는 속도값이 급격히 증가하기 이전부터 매우 불규칙하게 진동하는 것을 확인할 수가 있다.

이는 viscous finger현상으로 인해 공기가 용선사이로 국부적으로 불규칙하게 이동하기에 발생하는 것으로 추정된다. 특히, 진동하는 값들은 공극율이 적용되지 않는 경우의 값보

다 더 크며 이는 자유수면의 빠른 하강속도와 연계되어지는 것으로 He et al.[15]의 연구결과와 일관성이 있다.

4. 결 론

본 연구에서 용광로 내부의 유동현상 중에서도 유체의 경계면의 변형과 관련된 viscous finger 현상을 확인하기 위하여 삼차원 비압축성 다상유동을 수치해석 하였다. viscous finger 현상은 다공성 매질과 관련되는 현상으로 보고되어져 있다 [8]. 용광로 내부는 코크스와 같은 입자들이 존재하는데 이를 본 연구에서는 직접적으로 고려하지 않고 다공성 매질로 대체하였다. 다공성 매질의 공극율은 산업현장에 제안하는 공극율 0.36로 고정하였다.

공극율을 고려하지 않은 경우의 이상유체의 상 경계인 자유수면은 출선구쪽으로 연속적인 포물선형태의 기울진 형상을 보이는 반면에 공극율이 고려되어진 경우의 자유수면은 출선구에 가까워짐에 따라 불연속적으로 찢어진 형태의 자유수면을 보였다. 이는 선행연구들에서 보고되어진 viscous finger 현상과 동일한 형태를 보였다. 이를 통해 viscous finger 현상이 용광로 내에서 용선의 출선에 관련이 있을 것으로 추정되어진다.

공극율이 고려되어진 경우에 발생한 viscous finger 현상은 용선의 배출속도증가와 용광로내의 용선 높이 빠른 감소에 직접적인 영향을 미치는 것을 출선구 입구의 속도 시계열과 속도분포를 단상유동 및 공극율이 적용되지 않은 이상유동 결과와 비교하여 검증할 수 있었다.

후 기

이 과제는 2013년도 부산대학교 교수국외장기파견지원비에 의하여 연구되었음.

References

- [1] 1984, Tanzil, W.B.U., Zulli, P., Burgess, J.M. and Pinczewski, W.V., "Experimental Model Study of the Physical Mechanisms Governing Blast Furnace Hearth Drainage," *Tran. Iron Steel Inst. Jpn.*, Vol.24, No.3, pp.197-205.
- [2] 1987, Tanzil, W.B.U. and Pinczewski, W.V., "Blast Furnace Hearth Drainage: Physical Mechanisms," *Chemical Engineering Science*, Vol.42, No.11, pp.2557-2568.
- [3] 1993, Yagi, J.I., "Mathematical Modeling of the Flow of Four Fluids in a Packed Bed," *ISIJ International*, Vol.33, No.6, pp.619-639.
- [4] 2010, Ueda, S., Natsui, S., Nogami, H., Yagi, J.I. and Ariyama, T., "Recent Progress and Future Perspective on Mathematical Modeling of Blast Furnace," *ISIJ International*, Vol.50, No.7, pp.914-923.
- [5] 2005, Stevenson, P. and He, Q., "Slug flow in a blast furnace taphole," *Chemical Engineering and Processing*, Vol.44, No.10, pp.1094-1097.
- [6] 2002, He, Q., Zulli, P., Lee, B., Dunning, J. and Evans, G., "Flow Characteristics of a Blast Furnace Taphole Stream and Its Effects on Trough Refractory Wear," *ISIJ International*, Vol.42, No.3, pp.235-242.
- [7] 2006, He, Q., Zulli, P., Evans, G.M. and Tanzil, F., "Free Surface Instability and Gas Entrainment during Blast Furnace Drainage," *Dev. Chem. Eng. Mineral Process.*, Vol.14, No.1, pp.249-258.
- [8] 1958, Saffman, P.G. and Taylor, G., "The Penetration of a Fluid into a porous Medium or Hele-Shaw Cell Containing a More Viscous Liquid," *Proc. R. Soc. (London) Sect. A*, Vol.245, No.1242, pp.312-329.
- [9] 1952, Hill, S., "Channelling in packed columns," *Chem. Eng. Sci.*, Vol.1, No.6, pp.247-253.
- [10] 1987, Tabeing, P., Zocchi, G. and Libchaber, A., "An experimental study of the Saffman-Taylor instability," *J. Fluid Mech.*, Vol.177, pp.67-82.
- [11] 1987, Homsy, G.M., "Viscous fingering in porous media," *Ann. Rev. Fluid mech.*, Vol.19, pp.271-311.
- [12] 2014, Star-ccm+, User guide, CD-adapco, New york, pp.2912-2913.
- [13] 2003, Yeu, W., Lin, C.L. and Patel, V.C., "Numerical simulation of unsteady multidimensional free surface motions by Level set method," *International journal of numerical methods in fluids*, Vol.42, No.8, pp.853-884.
- [14] 1952, Martin, J.C. and Moyce, W.J., "An experimental study of the collapse of liquid columns on a rigid horizontal plane," *Phil. Trans. Royal Soc. of London Ser.*, Vol.244, No.882, pp.312-324.
- [15] 2012, He, Q., Evans, G., Zulli, P. and Tanzil, F., "Cold Model Study of Blast Gas Discharge from the Taphole during the Blast Furnace Hearth Drainage," *ISIJ International*, Vol.52, No.5, pp.774-778.