

## 순산소 전로의 증기드럼 내의 3차원 열 유동 해석모델 개발

정수진<sup>†</sup> · 문성준 · 장원준\* · 고순탁\*\* · 곽호택\*\*

자동차부품연구원  
31214 충남 천안시 동남구 풍세면 풍세로 303  
\*포스코 E&C  
37745 경상북도 포항시 북구 중흥로 307  
\*\*씨에이테크놀로지  
07563 서울시 강서구 공항대로 61길 29  
(2015년 9월 25일 접수, 2015년 12월 16일 수정본 접수, 2016년 2월 23일 채택)

## Development of Three-dimensional Thermo-fluid Numerical Model for Steam Drum of a Basic Oxygen Furnace

Soo-Jin Jeong<sup>†</sup>, Seong-Joon Moon, Won-Joon Jang\*, Suntak Kho\*\* and Hotaek Kwak\*\*

Korea automotive Technology Institute, 303, Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan, Chungnam, 31214, Korea  
\*POSCO E&C, 307, Jungheung-ro, Buk-gu, Pohang, Gyeongbuk, 37745, Korea  
\*\*CAE Technology, 29, Gonghang-daero 61-gil, Gangseo-gu, Seoul, 07563, Korea

(Received 25 September 2015; Received in revised form 16 December 2015; accepted 23 February 2016)

### 요 약

순산소 전로 후드의 일산화탄소와 열회수를 위해서는 고효율의 증기를 발생시키는 증기드럼의 장착이 필요하다. 그러나 제선-제강공정에서 증기발생은 간헐적이거나 주기적인 산소 취입공정기간에 제한적이다. 따라서, 증기드럼은 전로의 주기에 따른 산소의 취입기간 동안 효율적으로 증기를 발생시키도록 최적 설계되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 다양한 운전조건 및 기하학적 형상변화가 증기드럼 내의 열유동 특성과 성능에 미치는 효과를 예측할 수 있는 3차원 전산유체역학 모델을 제안하였다. 본 모델은 유체유동 및 열전달 뿐만 아니라 계면유동에서의 증발 및 응축을 위한 체적법을 사용하여 고려하였다. 본 모델의 예측성능을 검증하기 위하여 실험에서 구한 증기발생량과 비교하였으며 3.2%의 상대오차를 보였다.

**Abstract** – The efficient steam drum should be required to reduce carbon oxide emissions and heat recovery in oxygen converter hood system. However, steam generation is limited to the time of the oxygen blowing period, which is intermittent or cyclical in operation of steel-making process. Thus, steam drum should be optimized for an effective steam generation during the oxygen blowing portion of the converter cycle. In this study, a three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) model has been developed to describe the impacts of changing various operating conditions and geometric shape on thermo-fluid characteristics and performance of the steam drum. This model encompasses not only fluid flow and heat transfer but also evaporation and condensation at the interfacial surface in the steam drum by using VOF (Volume of Fluid) method. To validate the prediction performance of this model, comparison of the steam flow rate between numerical and experimental result has been performed, resulting in the accuracy of the relative error by less than 3.2%.

Key words: Oxygen Converter Hood, Steam Drum, Steam Flow Rate, Volume of Fluid, Evaporation, Condensation, Computational Fluid Dynamics

### 1. 서 론

철강(iron and steel)을 제조하기 위해서 가장 많이 사용되고 있는 순산소전로(basic oxygen furnace, BOF)는 높은 수준의 제강효율과

우수한 품질, 저렴한 설치비용과 공간적 제약이 작다는 점에서 유리한 장점을 가지고 있다. 오늘날 가장 많이 사용되는 산소전로 가스처리시스템(Oxygen Converter Gas Treatment System, OG)은 전로(converter)로부터 방출되는 높은 배기가스의 열을 적절한 온도로 냉각시켜서 에너지로 재순환시키는 시스템이다. 이 시스템은 배기의 먼지 제거 및 에너지 회수를 위하여 용선이 장입된 후에 15~20분 동안 산소를 노안으로 불어넣어 준다. 이 취입기간 동안, 용선 내의 실리콘이나 인을 함유한 불순물과 화학반응을 일으켜 제거함으로써 고

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: sjjeong@katech.re.kr

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.

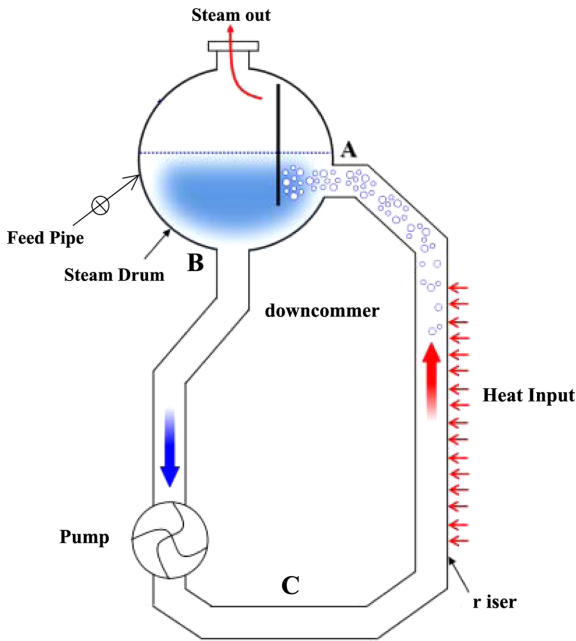


Fig. 1. Pumped circulation loop of HRSG in the oxygen converter.

품질의 철강제품을 생산한다. 이때 전로(converter)에서는 1649~1927°C 온도의 이산화탄소가 다량 포함된 배기가스가 배출되어 수냉각 후드에 포집되어 다시 후드입구에서 산소와 연소된다. 이때 유입 배기가스 내 95% 농도의 일산화탄소가 10% 이하로 감소된다. 이 연소 생성물은 수랭식 후드에 의해서 냉각되어 600~1,000°C 수준으로 낮추어준다. 이러한 순산소전로 가스처리시스템은 박막 형태의 패널로 구성되며, 플랜트의 설치 상태에 따라 여러 가지 후드가 설치된다. 이 중 증기발생기(steam generator) 후드는 순산소전로에서 흘러나오는 배기가스의 열회수 및 냉각을 위해 설치되며, 증기드럼과 보일러 순환펌프, 보일러 마운팅 그리고 제어시스템으로 구성된다. 여기서, 증기드럼은 냉각 제어를 위한 가장 일반적인 시스템이다. 증기드럼의 운전방식은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 보일러의 부하범위 내에서 응축수(subcooled water)가 상승관(riser)을 타고 이동하며 배기가스로부터 열을 흡수하여 증기와 물의 혼합물 상태로 탱크내로 유입되며(A) 증기드럼 내에서 중력에 의하여 액상과 기상으로 분리되어 증기는 출구를 통해 빠져나간다. 그리고 드럼 내 남아 있는 물은 상승관으로부터 유입되는 높은 온도의 물과 섞이게 되며 온도가 낮은 물은 강하관(downcomer)을 타고 아래로 유출된다(B). 아래로 유출된 물에는 열을 가하지 않으며, 펌프의 작동에 따라 물의 순환속도는 변화한다(C). 펌프의 작동에 따라 물은 유입 튜브로 진입하게 되며, 가열로 인해 물은 응축수로 변환된다. 이때 물은 끓는점으로 가열되면서, 증기와 함께 기포가 발생한다. 한편, 증기발생은 전체 전환주기에서 순산소전로에 산소를 주입시키는 시간동안만 제한적으로 작동하기 때문에 간헐적이면서 순환적인 특징을 가진다. 즉 일반적으로 제강공정에서 40~45분의 전체 전로주기(converter cycle) 동안, 증기 발생주기는 20~25분으로 제한되기 때문에 증기발생량은 0~max~0 패턴이 반복된다.

이러한 증기드럼관련 최적설계기술에 대한 연구는 물-증기 혼합물의 속도 및 잔류시간과 같은 주요인자들을 해석적으로 예측하는데 집중되어져 왔다. 왜냐하면 증기 공간 내부의 필드등과 같은 중요

장치의 최적 설치위치 및 용량을 결정하기 위해서는 증기드럼 내부의 유체 속도 및 온도분포에 대한 정보가 필요하기 때문이다.

1980년대에는 실험식이나 경험식을 사용하여 무차원적 해석[1]이 이루어져왔다. 1990년대부터 컴퓨터의 성능이 급격히 향상되면서 전산유체역학해석(computational fluid dynamics, CFD) 기반의 전산모사를 통해 증발-응축을 예측하기 분석하는 연구가 활발히 수행되었다. Zarrouk 등[2]과 Pointon 등[3]은 지열저장소의 증기-물 분리기 분리효율과 압력강하등을 상용코드를 사용하여 3차원적으로 해석을 수행하였다. Ferng 등[4]은 원자로형 가압경수로에 장착되어 있는 증기발생기를 액상과 기상을 비등을 고려한 가상단일유동(pseudo-single phase flow)으로 가정하여 증기발생기 내부의 유속 및 온도장을 해석하였다. 그러나 이 모델은 기체와 액체사이의 상호작용을 고려할 수 없는 한계가 존재한다.

본 연구에서 고려한 OG 시스템의 증기드럼과 같이 액체와 기체가 자유표면을 경계로 공존하며 증발과 응축과 같은 상변화가 일어나는 열유동 현상을 예측할 수 있는 해석모델은 아직 개발되지 못한 상황이다. 최근 들어, Ahn[5]등은 증기드럼내의 증기영역만을 단일상으로 고려하여 3차원적 유속분포를 정상상태로 계산하였으나 이 연구의 경우 증발량을 유입조건으로 지정하여 주어야하는 제약이 있어 실제 설계에 적용하기에는 많은 제약이 있다. 증기드럼 내에 존재하는 자유표면에서의 증발에 따른 계면유동(interfacial flow)은 최근 들어서 Hardt 등[6]이 유체체적법(volume of fluids, VOF)을 사용하여 스테판 문제와 막비등현상을 예측하는데 성공하였다.

따라서 본 연구에서는 증기드럼 내의 액상 및 기상을 동시에 고려하여 증기드럼의 내부 열유동 특성을 파악하기 위해 유체체적법(VOF: Volume of Fluid)을 사용하여 증기드럼의 내부에서 발생하는 열전달 및 증발 그리고 자유표면의 이동, 증기 및 액상 내부의 속도장 등의 물리적인 현상을 분석한다. 그리고 증기드럼에서 액상과 분리되어 기상으로 유출되는 증기유량을 수치해석을 통해 예측하고, 실험결과와의 비교를 통해 해석모델의 예측정확도를 검증한다. 결론적으로 증기드럼 내부의 액상과 기상의 압력과 온도, 체적, 속도를 면밀하게 분석하고, 증기유량에 영향을 주는 주요설계인자를 예측할 수 있는 신뢰성 있는 3차원 해석모델을 제시하였다.

## 2. 수치 모델

### 2-1. 지배방정식

본 연구에서는 증기드럼의 유동을 3차원 비정상 압축성 난류유동으로 고려하였으며, 증기발생기 내의 액상과 기상의 경계면에서의 증발과 응축을 해석하기 위하여, 유체체적법(VOF: Volume of Fluid)[6,7,9]을 사용하였다. 이 모델은 격자 크기에 비해 큰 입자들을 가지고 있는 비혼합유체의 액상과 기상의 경계면을 추적하는 수치기법이다. 이 수치기법은 액상과 기상 역역이 모두 같은 운동량 및 에너지 방정식을 사용할 수 있다. 즉 각 상에서 같은 압력, 온도, 속도장을 공유할 수 있어 매우 경제적이며, 많은 연구자들이 사용하여, 해석 정확도가 입증된 바 있다[6,7,9]. 본 연구에서는 증기드럼 내부의 액상과 기상의 연속성을 계산하기 위해 동일한 지배방정식들이 액상과 기상의 체적분율을 계산하는데 사용되며, 이는 밀도와 점성에 적용되어 각 상을 연계시킨다.

본 연구에서 고려한 3차원 비정상 압축성 비혼합 유체에 대한 질량, 운동량 및 에너지보존방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i + f_\sigma \quad (2)$$

여기서,

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot (\mathbf{k}_{eff} \nabla T) + \dot{S}_{q,c} - \dot{S}_{q,e} \quad (3)$$

기상과 액상 경계면의 추적은 각 상의 체적분율( $\alpha$ )에 대한 아래의 연속방정식을 사용하여 수행된다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{u}_i \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} = -\dot{S}_{m,e} + \dot{S}_{m,c} \quad (4)$$

즉, 계산 셀이 전부 증기로 채워져 있으면,  $\alpha = 1$ 이고 반대의 경우는 영이다. 상 경계면에서는  $0 \leq \alpha \leq 1$ 의 값을 가지게 된다. 위의 식 (4)의 우측 항에 포함되어 있는  $\dot{S}_{m,e}$ 와  $\dot{S}_{m,c}$ 는 액체 표면에서의 증발율과 응축률이다. 각 계산셀에서의 액상과 기상의 혼합 밀도 및 동점성계수는 아래의 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\rho = \alpha_g \rho_g + (1 - \alpha_g) \rho_l \quad (5)$$

$$\mu = \alpha_g \mu_g + (1 - \alpha_g) \mu_l \quad (6)$$

VOF 모델에서는 에너지방정식에 포함되어 있는 에너지, E와 온도, T는 아래와 같이 질량평균을 하여 각 셀에서 사용한다.

$$E = \frac{\alpha_g \rho_g E_g + \alpha_l \rho_l E_l}{\alpha_g \rho_g + \alpha_l \rho_l} \quad (7)$$

여기서,  $E = c_p T$ 이며, 에너지방정식에 포함된  $\dot{S}_{q,e}$ 는 액체의 증발 잠열에 의한 에너지 생성항이며,  $\dot{S}_{q,c}$  증기의 응축에 의한 에너지 생성항이다.

액상표면에서의 증발 시 나타나는 증발잠열은 포화온도에서 증기와 액체의 엔탈피 차이로 계산되며, 아래식과 같이 표현된다.

$$h_{lat} = h_v(T_{sat}) - h_l(T_{sat}) \quad (8)$$

여기서,  $h_l(T_{sat}) = h_o(T_{sat}) + C_{pv}(T_{sat} - T_{ov})$ 이고,  $h_v(T_{sat}) = h_{ol} + C_{pl}(T_{sat} - T_{ol})$ 이며,  $T_{ol}$ 과  $T_{ov}$ 는 증기와 액체의 기준상태의 온도를 나타낸다. 해의 안정성을 확보하기 위해  $h_{ov}$  또는  $h_{ol}$ 은 영으로 설정하고, 다른 한 개는 적절한 값을 입력하였다. VOF 모델에서는 경계면에 포함되어 있는 계산셀에 작용하는 체적항으로 표면장력에 계산되어진다. STAR-

CCM+에서는 표면장력을 계산하기 위해 CSF(Continuum Surface Force) 모델[7]을 사용한다. 액상과 기상의 경계면에서는 큰 압력비약이 형성되어지며, 평형상태에서는 이 압력비약으로 인한 압력구배는 운동량방정식에 포함되어져 있는 부력항과 같은 크기여야 한다. 따라서 상 경계면에서 현저하게 나타나는 압력구배에 의한 힘은 아래의 식으로 표현되어진다.

$$\mathbf{f}_\sigma = -\sigma \left( \nabla \cdot \left( \frac{\nabla \alpha}{|\alpha|} \right) \right) (\nabla \alpha) \quad (9)$$

운동량방정식 (2)에 포함되어져 있는 유효동점성계수,  $\mu_{eff}$ 는 아래의 식으로 표현되어지며, 식에 포함되어져 있는 난류점성계수,  $\mu_t$ 를 계산하기 본 연구에서는 k- $\omega$  SST 난류모델[7]을 사용하였다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (10)$$

상 경계면에서의 증발과 응축을 고려하기 위해서 식 (7)과 같은 농도방정식을 각 상에 대해서 계산하였다[2-4].

$$\frac{\partial (\rho \chi_m)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \chi_m)}{\partial x_i} = -\rho D_{eff} \nabla^2 \chi_m - \dot{S}_{m,c} + \dot{S}_{m,e} \quad (11)$$

$$m = 1: vapor, m = 2: liquid$$

윗 식에 포함된  $\dot{S}_{m,c}$ 는 응축에 의한,  $\dot{S}_{m,e}$ 는 증발에 의한 물질 생성항을 의미하며, 단위표면적당 증발율( $\text{kg}/\text{sm}^2$ )과 응축율( $\text{kg}/\text{sm}^2$ )은 각각 아래식으로 표현된다.

$$\dot{S}_{m,e} = -\dot{S}_{m,c} = \frac{\rho_g D_g \frac{\partial \chi_g}{\partial n}}{1 - \chi_g^s} \quad (12)$$

위 식의 분모는 Stefan flow의 영향을 나타낸 것이고,  $\chi_g^s$ 는 표면에서의 질량분율을 나타내는 것이다.

### 2-2. 격자 모델링

본 연구에서는 3차원 증기드럼의 격자 생성 및 해석 모델을 적용하기 위해 STAR-CCM+ v9.04 (CD-adapco, UK)를 사용하였다. 계산영역은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 지름 3.1 m, 길이 12.83 m의 원통형 증기드럼이며, 비정렬다면체격자(unstructured polyhedral elements)를 통해 유동 부분의 격자를 모델링하였다. 그리고 증기드럼 내부의 상단에는 가로 9.6 m, 세로 2.165 m, 두께 0.055 m의 격벽(baffle)이 고정되어 있다. 증기드럼의 몸체 중간에는 총 5개의 상승관 유입구(SC<sub>il-15</sub>)가 있고, 왼쪽 하단에는 증기드럼 내의 수면을 유지하기 위

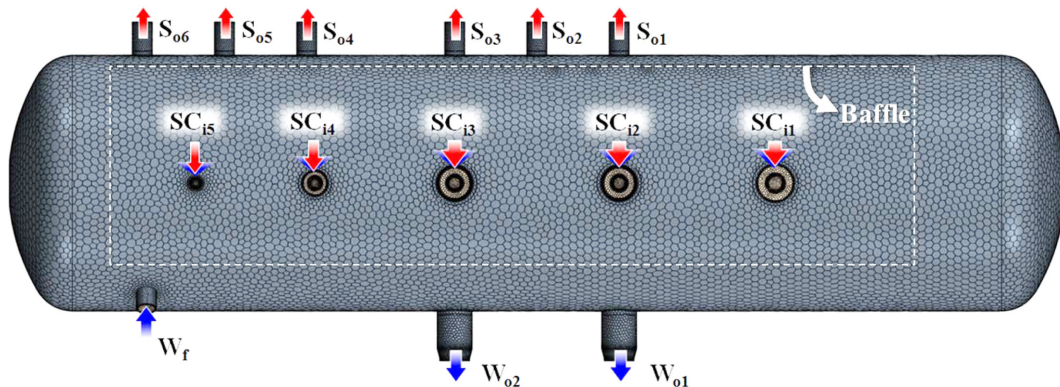


Fig. 2. Three-dimensional computational grid system of the steam drum for the CFD simulation.

한 1개의 급수관 유입구( $W_1$ )가 위치한다. 그리고 상단에는 6개의 증기 유출구( $S_{01-06}$ ), 하단에는 2개의 강하관 유출구( $W_{01-02}$ )가 위치한다. 벽면에 인접한 난류경계층에서의 상태량을 정확히 계산하기 위해 4개의 격자 층을 사용하고, 벽면 근처의 두께는 0.02~0.08 mm의 조밀한 격자를 사용하여,  $y^+$  값은 50~80이 형성되도록 조절하여 벽 근처에서의 난류상태량 계산의 정확도를 높였다. 사용된 총 격자수는 2,200,000개다.

**2-3. 초기 및 경계조건**

초기상태의 증기드럼 내부는 최하단부로부터 0.519 m 높이까지 220 °C, 21.1bar의 온도의 포화액이 충전 되어 있으며 자유표면 상부에는 14 bar, 199 °C의 증기가 존재한다. 증기드럼 외부는 대기압 조건의 20 °C의 정지된 공기가 존재한다.

해석에 사용된 증기 및 물의 물성치를 Table 1에 나타내었으며 각 상에서의 밀도는 이상기체방정식으로부터 계산하였다. 또한 온도변화에 따른 유체의 물성치변화를 고려하기 위하여 점성과 비열계수 ( $C_p$ )는 STAR-CCM+에서 제공하는 온도를 독립변수로 갖는 다항식으로부터 계산하였다[7,10].

본 연구에서 개발한 증기드럼 열유동해석 모델을 검증하기 위하여 순산소전로가 50% 취련일 경우의 실 운전 조건의 평균값을 경계조건으로 사용하였다. 실제 증기드럼 내에 유입된 냉각수가 증발하면서 발생하는 평균 증기발생량은 약 25 ton/charge 이이며, 장입(charge)은 약 45 min 동안 지속된다. 이 기간 중 증기가 발생하는 기간은 20~25분 동안이며 이 기간 중 증기발생량의 패턴은 최소→최대→최소이다. 그러나 해석의 단순화를 위하여 모든 해석조건을 시간 평균값으로 입력하였다. 이에 대한 상세정보를 Table 2에 나타내었다. 증기드럼 내의 비정상 열유동해석을 위해 Fig. 2에 나타낸 것과 같은 강하관, 상승관, 급수관 및 증기 배출관의 유출입면에 경계조건을 지정하였다. 증기드럼의 몸체 중간에 위치한 총 5개의 노즐( $SC_{i1-i5}$ )은 유입구에 해당하며, 왼쪽에 있는 급수관( $W_1$ )은 급수탱크로부터 130.9 °C의 물을 유입시켜 증기드럼 내의 수위를 일정하게 유지한다. 그리고 증기드럼에서 분리된 증기는 상단에 있는 6개의 노즐( $S_{01-06}$ )을 통해 유출되며, 하단에 있는 2개의 노즐( $W_{01-02}$ )에서는 수위 유지를 위해 물이 유출된다. 증기드럼 벽면은 비점착조건을 사용하였으며 벽면에서의 난류상태량과 유체면과 인접한 벽면에서의 열전달계수를 계산하기 위하여 벽합수를 사용하였다.

이때 증기드럼 벽에서의 내외 온도차에 따라 발생하는 열손실은 식 (13)와 같이 대류 경계 조건을 적용하였으며, 대류열전달 계수( $h_{\infty}$ )

는 식 (14)와 같은 Rich [8]의 실험식을 사용하였다.

$$k \frac{\partial T_{surr}}{\partial r} = h_{\infty}(T_{air} - T_{surr}) \quad \text{at } r = R \quad (13)$$

$$Nu^{0.5} = 0.60 + \frac{0.38Ra_d^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \quad (14)$$

**2-4. 계산 방법**

편미분 방정식으로 이루어진 지배방정식 (1)~(12)들을 수치적으로 계산하기 위해서 STAR-CCM+ [7]에 내장되어 있는 algebraic segregated solver를 사용한 유한체적법을 이용하여 이산화하였다. 연속방정식과 운동량방정식의 연계를 위해서는 PISO 알고리즘을 사용하였으며, 반복계산 알고리즘은 AMG기법(Algebraic Multigrid Technique)[7]을 사용하여, 해의 수렴속도를 가속시켰다. 본 연구에서 모든 해석은 증기드럼의 비정상적 특성을 반영하기 위하여, 비정상상태로 계산하였다. 시간간분의 경우, 시간중분을  $1 \times 10^{-5}$ s로 설정하였으며, 이는 CFL (Courant number)를 0.25 이하로 유지할 수 있으므로 매우 안정된 시간단계별 수렴 해를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 계산된 시간간격은 20분이었으며 해의 안정된 수렴을 위한 하향이완계수는 압력, 운동량 그리고 난류운동에너지 변수에 각각 0.3, 0.8, 그리고 0.8을 사용하였다. 해의 수렴기준인 잔류량은  $10^{-4}$  이하로 설정하였다.

**3. 해석 결과**

전술한 3차원 전산유체역학을 사용하여, 순산소전로가 50% 취련일 때 배기가스처리를 위한 증기드럼 내부의 열유동특성을 수치적으로 분석하였으며 해석모델의 검증은 위하여 증기발생량을 실험값과 비교하여 예측정확도를 검증하였다.

Fig. 2에서 설명하였듯이, 본 연구의 대상 증기드럼에는 상승관 유입부 앞에 격벽이 설치되어 있다. 이는 상승관으로부터 증기드럼으로 유입되는 유체의 유속을 감소시켜 자유표면의 파동을 억제하기 위하여 설치한 장치이다. 본 연구에서는 개발된 해석모델을 사용하여 증기드럼의 기하학적 형상변화가 증기발생량에 미치는 영향을 예측하기 위하여 격벽의 설치 유무에 따른 증기 드럼내의 열유동 특성 및 증기발생량의 변화를 해석하였다.

**3-1. 증기드럼 내의 열 및 유체거동**

Fig. 3는 열 유동 패턴이 정상상태에 도달하는  $t=120 \text{ sec}$ 에서의 유체내부의 유동특성을 상승관 유입면에서의 유체입자들의 궤적선으로 나타내었고, 증기영역에서의 속도분포를 벡터장으로 표현하였다. 또한 기상과 액상의 경계면을 등위면으로 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 상승관 유입면으로 유입되는 기수혼합물은 드럼 내의 포화액과 균일하게 혼합되고 있으며 자유표면에서는 활발한 증발로 인하여 급격한 농도구배가 형성되어 있으며 증발된 증기는 좌우측 모서리에서 재순환영역을 형성하며 증기 출구를 빠져나가고 있음을

**Table 1. Physical properties of the fluids**

		Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Ideal gas
Liquid Phase Fluid	Water (H <sub>2</sub> O)	Viscosity [Pa·sec]	Polynomial in T
		Saturation Pressure [bar]	Polynomial in T
Gas Phase Fluid	Steam (H <sub>2</sub> O)	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Ideal gas
		Viscosity [Pa·sec]	Polynomial in T

**Table 2. Boundary conditions at the inlet and steam pipe outlet**

	Gauge Pressure (Bar)	Temperature (°C)	Composition (% , mass fraction)	
			Steam	Water
Inlet pipes (SC <sub>i1</sub> ~SC <sub>i5</sub> )	21.1	220	70	30
Outlet ( $W_{01}, W_{02}$ )	21.1	215	-	100
Outlet ( $W_{01}$ ~ $W_{06}$ )	20.9	220	100	-

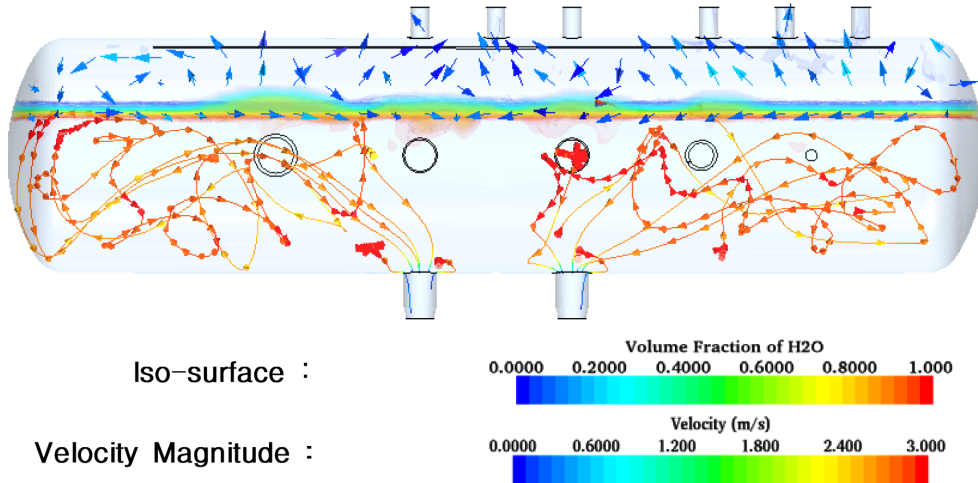


Fig. 3. Plot of streaklines in the water region and velocity vector field within steam region.

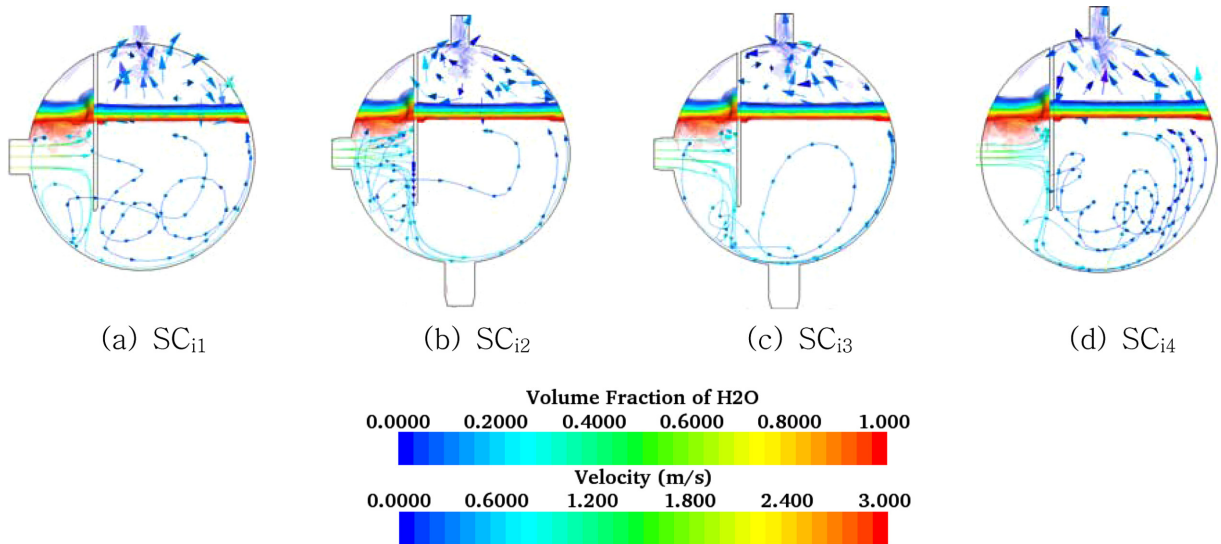


Fig. 4. Multi-sectional plots of particle streaklines, velocity vector field and vapour concentration field near the free surface.

볼 수 있다. 농도장에서 0은 완전증기를 1은 물을 의미한다. 이 결과로부터 본 해석모델이 증기드럼 내에서 일어나는 각 상에서의 유동 분포 및 자유표면에서의 증발을 효과적으로 표현할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 상승관 유입구 SC<sub>i1</sub>~SC<sub>i4</sub>의 각 중앙 종단면에서의 유입면으로부터의 기수 혼합물의 궤적선, 자유표면 근처에서의 증기의 농도분포 그리고 증기영역에서의 속도분포를 나타낸 것이다. 상승관 유입부를 통해 들어오는 고온의 기수 혼합물은 격벽으로 인하여 큰 유동저항을 받으므로 유입부 앞에서 큰 재순환 유동이 형성되고

있으며 이후 격벽 하부를 통과하여 반시계 방향으로 상승 회전하며 증기드럼 내부의 포화액과 혼합이 이루어짐을 볼 수 있다. 격벽 상류의 자유표면은 상승관 유입부에서 토출되는 유동의 추력과 격벽으로 인한 큰 유동저항으로 인하여 높은 파고가 형성되어 있지만 격벽 뒤쪽 하류의 자유표면은 정적 평형 상태를 유지하고 있음을 볼 수 있다. 격벽의 양끝단에 해당하는 Fig. 4(a)와 (d)는 유입부로 토출되는 유동이 격벽을 타고 격벽 뒤쪽으로 가속되어 빠른 속도로 흘러 들어가고 있음을 볼 수 있다. 이는 격벽 아래쪽을 통과하여 상승하는 유동과 합쳐지면서 결과적으로 격벽 하류에서 활발한 혼합이 이루

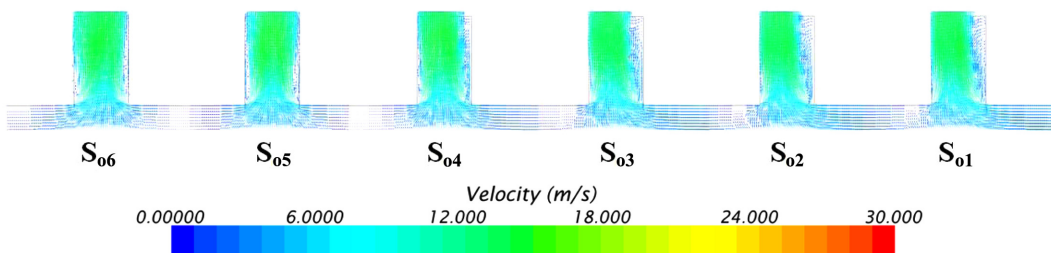


Fig. 5. Mid-section zoomed view of velocity vector field at steam outlet area.

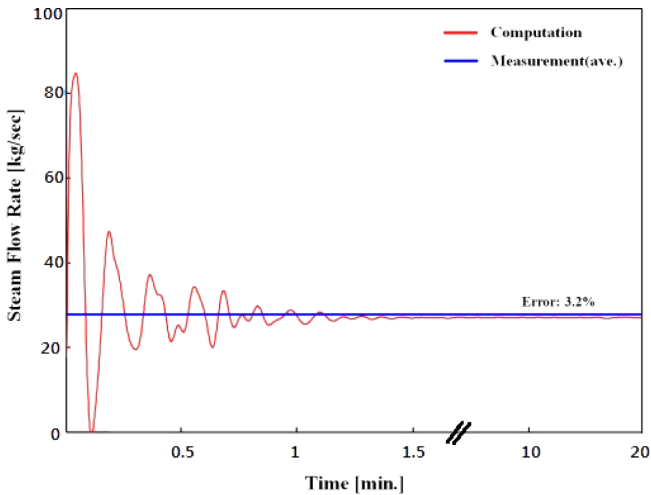


Fig. 6. Comparison of steam flow rate between computation and measurement (ave.).

Table 3. Comparison of steam flow rate for with or without baffle plate

Design Parameter	Steam Flow Rate [kg/sec]	Improvement [%]
Baffle Mounting w/ Baffle	27.08	standard
w/o Baffle	26.87	-0.8

어지고 있다. 특히 유입구의 단면적이 큰 SC<sub>14</sub> 단면의 경우 격벽 하류영역에서 유입유동과 포화액과의 매우 활발한 혼합이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 5에 상단에 존재하는 6개의 증기 유출구(S<sub>01~06</sub>)의 중앙단면에서의 속도장을 확대하여 나타내었다. 배출구 중심축방향과 배출되는 증기의 유선이 일치하는 유입구(S<sub>06</sub>, S<sub>05</sub>) 단면에서는 상대적으로 유동손실이 작고 매끄럽게 배출되고 있는데 비하여 배출되는 증기의 유선의 방향과 출구중심축 방향과 크게 벗어나있는 유출구(S<sub>01~S<sub>04</sub></sub>) 들의 경우는 유출구 입구에서 박리로 인하여 큰 재순환영역이 발생하여 유동단면적이 크게 감소하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 최대의 증기발생률을 얻기 위해서는 증기영역의 유동장을 정확하게 고려하여 최적위치를 선정하여 증기 유출구 유입부에서의 재순환 영역을 최대한 억제하여야 한다.

본 연구에서 개발한 수치해석모델의 정확도를 검증하기 위해 수치해석을 통해 산출한 증기발생량과 실제 증기드럼에서 측정된 증기발생량을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 결과로부터 알수 있듯이, 약 120초 이후에 정상상태에 도달하였으며 실험결과와 비교한 상대 오차는 3.2% 이내로 나타났다.

3-2. 격벽 효과

상승관으로부터 빠른 속도로 유입되는 기수 혼합물로부터 증기

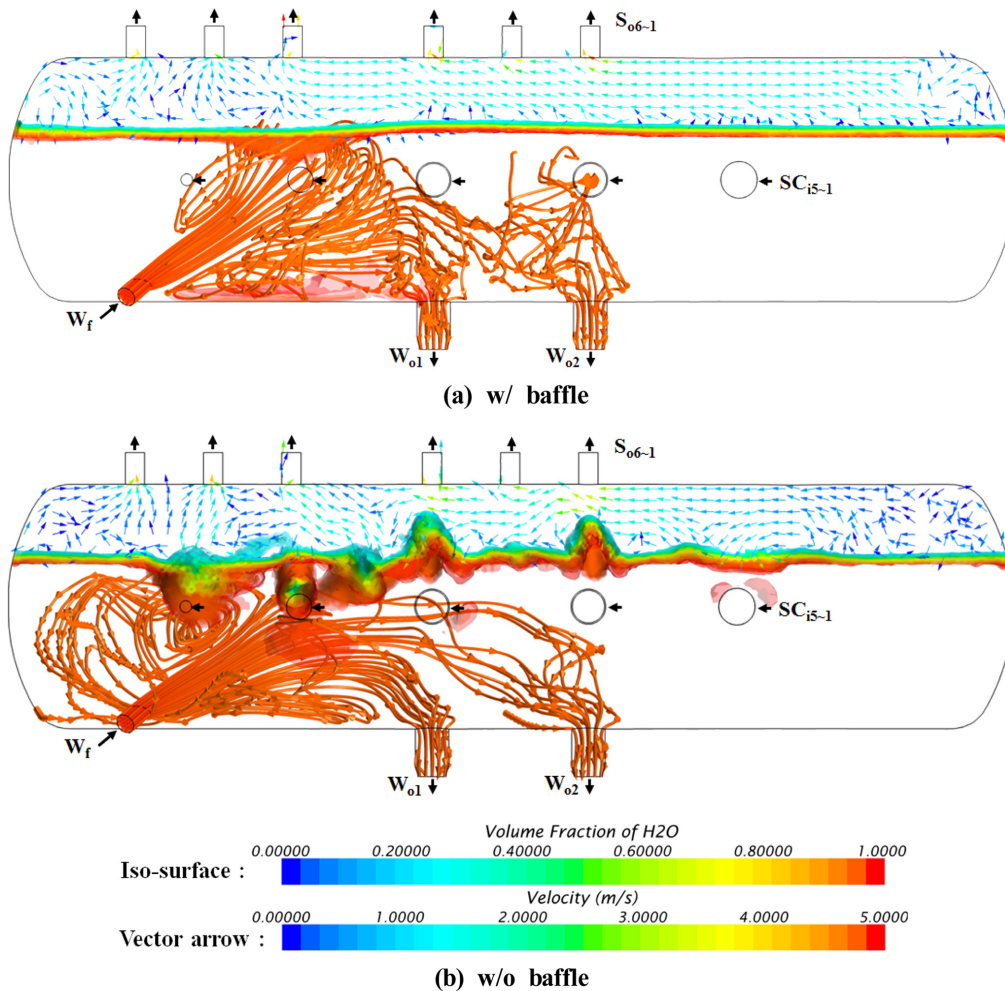


Fig. 7. Longitudinal section plots of vapor concentration, velocity vector field in the steam region and particle streak lines in the region of steam (with or without baffle).

드럼 상부에 형성되어있는 자유표면(표준수위)의 안정화를 유지하기 위하여 설치한 격벽의 유무에 따른 증기드럼 내부의 열 유동특성 및 증기발생량의 차이를 본 연구에서 개발한 해석모델을 이용하여 예측 분석하였다. Table 3은 증기드럼 내부의 격벽 유무에 따라 동일한 경계조건을 사용하여 계산한 증기발생량을 비교한 결과를 보여준다. 격벽이 장착된 경우의 증기발생량이 존재하지 않는 경우에 비해 약 0.8% 증가하였다. 보다 상세한 분석을 위하여 Fig. 7에 격벽의 유무에 따른 횡방향 중앙단면에서의 기수 각 영역에서의 속도장과 자유표면 근처에서의 증기의 농도분포를 나타내었다. 우선 Fig. 7(a)에서 보듯이 격벽이 존재할 경우의 증기영역 내 속도장의 특징은 상승관을 통하여 많은 양의 기수 혼합물이 격벽 우측 모서리를 돌아 혼합되어 자유표면으로 증발되므로 오른쪽에서 왼쪽으로 주유동이 형성되어 있으며  $S_{01} \sim S_{04}$ 의 출구로 빠져나간다. 한편 격벽 좌측모서리로 빠져나간 상대적으로 약한 유동은 보다 낮은 속도로 증발되어  $S_{05}, S_{06}$  출구로 배출되고 있다. 증발이 일어나는 자유표면은 대체적으로 정적인 평형을 유지하고 있다. 자유표면아래쪽에 포화액 영역 내에서 수면유지를 위하여 공급관으로 유입되는 기수 혼합물의 궤적선을 나타내었다. 공급관으로 나온 유체는 일부는 표면위로 향하고 일부는 좌측 모서리 영역에서 재순환되며 일부는 출구로 빠져나가고 있음을 볼 수 있다.

격벽을 제거한 Fig. 7(b)의 경우를 보면, 자유표면에 큰 파고가 형성되어 있음을 볼 수 있으며 이는 상승관으로부터 유입되는 기수 혼합물이 바로 자유표면위로 상승하기 때문이다. 따라서 상승관 유입구 위쪽 자유표면에 파고가 형성되어 있다. 증기영역의 속도장을 보면 격벽이 존재하는 경우와는 다르게 주유동은 형성되어 있지 않으며 상승관으로부터 유입되는 기수 혼합물이 상승하는 자유표면영역에 빠른 증기속도분포가 형성되어 있으며 기수 혼합물의 유입이 미미한 영역인 좌우측 모서리 영역에서는 상대적으로 낮은 속도의 증기영역이 존재하고 있다. 따라서 격벽이 있는 경우에 비해 자유표면

으로부터 증발하는 증기의 속도장분포가 불균일하다고 할 수 있으며 표면으로부터 증발하는 증기의 속도의 불균일도가 높아 각 영역별 속도장간의 상호 간섭이 심하게 일어나고 있음을 볼 수 있다. 이러한 이유로 Table 3에서 보았듯이, 격벽이 있는 경우의 증기발생율이 높았을 것으로 사료된다.

Fig. 8에 유입구,  $SC_{13}$ 의 중심축을 기준으로 한 종단면의 기수 각 영역내의 유속분포와 자유표면에서의 증기의 농도분포를 나타내었다. 먼저, Fig. 8(a)의 격벽이 있는 경우는 유입구로 들어온 기수 혼합물이 격벽에 부딪히며 아래로 흐르며 격벽 후방으로 흘러들어가 포화액과 반시계방향으로 선회하며 혼합되는 것을 볼 수 있다. 이는 자유표면에서 보다 균일한 속도분포를 형성할 수 있으므로 증기영역에서 균일한 속도로 큰 유동저항 없이 출구를 빠져나갈 수 있다. 한편, 격벽이 없는 Fig. 8(b)를 보면 유입되는 기수 혼합물이 바로 자유표면으로 상승하면서 표면위에서 활발한 증발이 일어나고 있으며 자유표면을 타고 흐르다가 뒤쪽벽면을 타고 내려오는 하강유동을 형성하며 드럼 내 포화액과 혼합되고 있음을 볼 수 있다. 증기의 속도분포가 매우 불균일하며 국부적으로 높은 속도영역이 존재함을 볼 수 있다. 결국, 이러한 결과로부터, 증기드럼의 설계 시 유입되는 기수 혼합물과 드럼 내의 포화액과의 혼합 균일도는 증발되는 증기의 속도장에 큰 영향을 미칠 수 있는 주요 설계인자임을 알 수 있다. 또한 증기의 속도장은 증기배출구 위치를 결정짓는 주요 설계인자이며 이는 배출되는 증기발생률에도 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 해석모델은 증기드럼 설계 시 증기배출구 및 기수 혼합물의 유입구 그리고 내부 부품들의 위치 및 크기를 최적화하는데 유용하게 활용될 것으로 기대할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 순산소전로의 증기드럼 내의 최적설계를 위하여

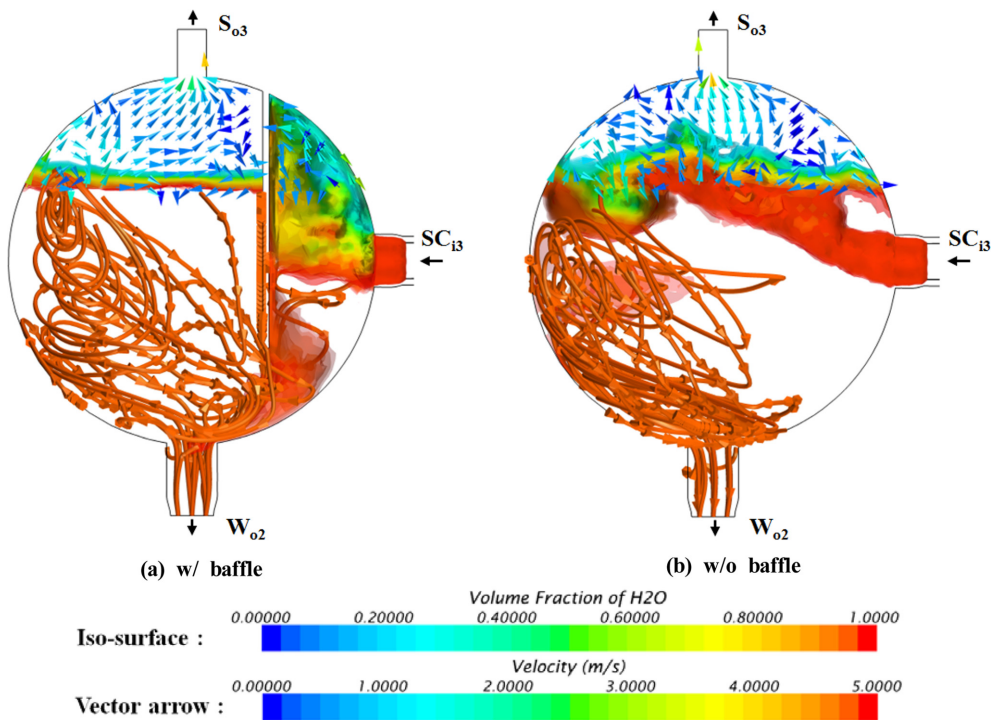


Fig. 8. Cross-sectional plots of vapor concentration, velocity vector field in the steam region and particle streak lines in the water region.

VOF 수치기법을 활용하여 자유표면에서의 증발과 응축, 그리고 기수 각 영역에서의 난류 열 유동을 해석할 수 있는 3차원 해석모델을 개발하였으며 이를 활용하여 실 운전조건 하에서의 증기드럼 내에서 발생하는 열 및 유체거동을 상세하게 분석할 수 있었다. 또한 증기발생량에 영향을 미치는 다양한 설계인자들을 분석하여 향후 증기드럼의 최적설계의 기본 가이드라인을 제시하였다. 본 연구에서 개발된 해석모델을 실 운전조건 하에서 계산을 하여 공기취입기간 동안의 평균 증기발생량을 실험값과 비교한 결과 약 3.2%의 오차 정도를 가지고 예측할 수 있었다.

개발된 해석모델을 이용하여 실 운전조건의 증기드럼 내의 열 및 유체거동특성을 분석한 결과, 상승관으로 유입되는 기수 혼합물의 포화액에서의 혼합 유동특성이 자유표면 상부에 형성되는 증기영역 내에서의 속도장에 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 또한 증기영역에서의 속도장은 증기 배출관에서의 유동저항과 직접적인 영향이 있음을 알 수 있었다. 즉 유입되는 증기의 유선과 유출관의 중심축과의 편각이 큰 경우 유출관 입구에 박리로 인한 큰 재순환 영역이 존재하여 결과적으로 유동단면적을 감소시키는 결과를 가져올 수 있다. 따라서 증기영역의 속도장과 증기 유출관의 위치선정이 증기드럼의 중요 설계인자 인자임을 확인하였다.

본 해석모델을 사용하여 증기드럼 내의 격벽 유무에 따른 해석을 수행한 결과, 격벽유무에 따라 유입되는 기수 혼합물과 포화액의 혼합특성이 매우 크게 변화하며 이는 자유표면 위의 증기영역의 속도장에 많은 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다.

이러한 결과로부터, 본 연구에서 개발된 해석모델은 증기드럼 설계 시 최적 형상설계 및 운전조건 선정에 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였으며 증기 드럼 내의 포화액 영역과 증기 영역 내에서의 속도분포는 상호 밀접한 연관성이 있음을 알 수 있었다.

## 감 사

본 연구는 포스코건설(Posco E&C) 주관 “열회수용 증기드럼의 3차원 열유동 해석연구”의 일환으로 포스코건설과 씨에이테크놀로지 관계자분들의 후원을 통해 수행되었으며, 관계자분들께 진심으로 감사드립니다.

## Nomenclatures

D	: diffusivity
g	: gravitational acceleration
h	: heat transfer coefficient
k	: conductivity
n	: normal direction
r	: radial direction
R	: radius of cylinder
P	: pressure
t	: time
x	: position in space
y <sup>+</sup>	: dimensionless normal distance from wall
ρ	: density

μ	: viscosity
ν	: kinematic viscosity
c <sub>p</sub>	: specific heat
χ	: species mass fraction
∇	: gradient
Nu	: Nusselt number
Pr	: Prandtl number
Ra	: Rayleigh number

## Subscripts

air	: air
eff	: effective
g	: gas
i, j	: coordinate
l	: liquid
s	: surface
sat	: saturation
v	: vapour
sur	: surface
surr	: surrounding
o	: reference
∞	: ambient

## References

- Gerunda, A., “How to Size Liquid-Vapour Separators,” *Chem. Eng.* **88**, 81-84(1984).
- Zarrouk, S. J. and Rurnanto, M. H., “Geothermal Steam-water Separators: Design Overview,” *Geothermics*, **53**, 236-254(2015).
- Pointon, A. R., Mills, T. D., Seil, G. J. and Zhang, Q., “Computational Fluid Dynamic Techniques for Validating Geothermal Separator Sizing,” *GRC Trans.*, **33**, 943-948(2009).
- Ferng, Y. M. and Chang, H. J., “CFD Investigating the Impacts of Changing Operating Conditions on the Thermal-hydraulic Characteristics in a Steam Generator,” *Applied Thermal Engineering*, **28**(5-6), 414-422(2008).
- Ahn, J., Lee, Y. S. and Kim, J. J., “Steam Drum Design for a HRSG based on CFD,” *Journal of Korean Society for Computational Fluids Engineering*, **16**(1), 67-72(2011).
- Hardt, S. and Wondra, F., “Evaporation Model for Interfacial Flows Based on a Continuum-field Representation of the Source Terms,” *Journal of Computational Physics*, **227**(11), 5871-5895(2008).
- “User Guide STAR-CCM\_ Ver.9.04,” CD-adapco, UK(2014).
- Rich, B. R., “An Investigation of Heat Transfer from an Inclined Flat Plate in Free Convection,” *Trans. ASME*, **75**, 489-499(1953).
- Welch, S. W. J. and Wilson, J., “A Volume of Fluid Based Method for Fluid Flows with Phase Change,” *J. Comput. Phys.* **160**, 662-682(2000).
- Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Poling, B. E., The properties of gases and liquids, 4<sup>th</sup> Ed., McGraw-Hill, New York(2000).