

## 유적 합체기가 포함된 공기-물-기름 분리 공정에 대한 3상 Eulerian 전산유체역학

임영일<sup>†</sup> · Thuy T. Le · 박치균\* · 이병돈\* · 김병국\* · 임동하\*\*<sup>†</sup>

한경대학교 화학공학과 지속가능공정기술연구센터  
17579 경기도 안성시 중앙로 327  
\*전진엔텍

46729 부산광역시 강서구 가달1로 38  
\*\*생산기술연구원 동남지역본부

46742 부산광역시 강서구 과학산단1로 60

(2017년 2월 22일 접수, 2017년 3월 11일 수정본 접수, 2017년 3월 13일 채택)

## Three-Phase Eulerian Computational Fluid Dynamics (CFD) of Air-Water-Oil Separator with Coalescer

Young-II Lim<sup>†</sup>, Thuy T. Le, Chi-Kyun Park\*, Byung-Don Lee\*, Byung-Gook Kim\* and Dong-Ha Lim\*\*<sup>†</sup>

CoSPE, Department of Chemical Engineering, Hankyong National University, 327, Jungang-ro, Ansong-si, Gyeonggi, 17579, Korea

\*Jeonjin EnTech Co., LTD, 38, Gadal 1-ro, Gangseo-gu, Busan, 46729, Korea

\*\*KITECH Busan, 60, Gwahaksandan 1-ro, Gangseo-gu, Busan, 46742, Korea

(Received 22 February 2017; Received in revised form 11 March 2017; accepted 13 March 2017)

### 요 약

물이 포함된 원유는 oil separator 를 거쳐 물이 제거된다. 본 연구의 목적은 공기-물-기름 3상 혼합물에 대한 3차원 oil separator 의 분리성능을 예측하기 위하여 Eulerian 전산유체역학(CFD: computational fluid dynamics) 모델을 개발하는 것이다. 비압축성, 등온, 비정상상태 CFD 모델식은 공기상을 연속상으로, 물과 기름상을 분산상으로 정의하며, 운동량 보존식은 항력(drag force), 양력(lift force), 다공성매체 저항력을 포함한다. 또한, 난류현상으로 standard k-ε 모델이 이용된다. 물과 기름 출구압은 oil separator 의 액위를 결정하는 중요한 인자이며, 정상운전상태 액위 25 cm를 맞추기 위하여 측정압은 각각 6.3 kPa, 5.1 kPa으로 결정되었다. 시간에 따른 공기, 물, 기름의 부피분율의 변화를 조사하였고, 정상상태에 도달하였을 때, 물과 기름상의 침강속도를 oil separator의 중축 길이에 따라 분석하였다. 본 연구에서 제시된 CFD 모델로부터 얻은 oil separator의 기름분리성능은 99.85%이며, 실험값과 거의 일치하였다. 비교적 단순한 이 CFD 모델은 향후 oil separator의 구조를 변경하거나, 최적운전조건을 찾기 위하여 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

**Abstract** – Water is removed from crude oil containing water by using oil separator. This study aims to develop a three-dimensional (3D) Eulerian computational fluid dynamics (CFD) model to predict the separation efficiency of air-water-oil separator. In the incompressible, isothermal and unsteady-state CFD model, air is defined as continuous phase, and water and oil are given as dispersed phase. The momentum equation includes the drag force, lift force and resistance force of porous media. The standard k-ε model is used for turbulence flow. The exit pressures of water and oil play an important role in determining the liquid level of the oil separator. The exit pressures were identified to be 6.3 kPa and 5.1 kPa for water and oil, respectively, to keep a liquid level of 25 cm at a normal operating condition. The time evolution of volume fractions of air, water and oil was investigated. The settling velocities of water and oil along the longitudinal separator distance were analyzed, when the oil separator reached a steady-state. The oil separation efficiency obtained from the CFD model was 99.85%, which agreed well with experimental data. The relatively simple CFD model can be used for the modification of oil separator structure and finding optimal operating conditions.

**Key words:** Air-water-oil separator, Oil-water separation efficiency, Liquid outlet pressure, Settling velocity, Computational fluid dynamics (CFD)

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

E-mail: limyi@hknu.ac.kr, dongha4u@kitech.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.

## 1. 서 론

유전에서 채굴된 원유는 물, 소금, 중금속과 같은 불순물이 존재한다[1]. 물이 많이 포함된 원유 혼합물은 water-in-oil (W/O) 혹은 oil-in-water (O/W) emulsion으로 구분될 수 있다[2,3]. 기름은 분산상, 물은 연속상으로 간주되는 O/W emulsion은 기름 액적 표면에 존재하는 친수성 물질들로 인하여 매우 안정적이며, 20 mm 이하의 미세 유적으로도 존재할 수 있다[2]. 환경오염을 발생시킬 수 있는 기름을 함유하는 산업 폐수도 석유화학, 제철, 제약, 해운, 음식업체에서 많이 발생한다[4,5]. O/W 기름 입자는 자유 액적(free, 150  $\mu\text{m}$  이상), 분산 액적(dispersed, 20~150  $\mu\text{m}$ ), 미세분산 액적(emulsified, 5~20  $\mu\text{m}$ ), 그리고 수용성 액적(soluble, 5  $\mu\text{m}$  이하)으로 구분될 수 있다[4].

O/W emulsion으로부터 기름을 분리하기 위하여 화학적 그리고 물리적 처리 방법이 사용된다[3]. 화학적 방법은 유수 상분리를 증진시키는 물질(demulsifier)를 첨가하는 것이다[6]. 이 방법은 빠르지만, 비용이 많이 들고 첨가물을 제거해야 하는 단점을 갖는다. 물리적 방법은 중력 침강(gravity settler), 원심 침강(centrifugal settler), 공기부상(air flotation), 여과 및 분리막(filtration and membrane), 전기 침강(electrostatic settler), 초음파 침강(ultrasound settler) [4,6] 등이 있다. 이들 물리적 방법은 분산상 액적의 이동, 충돌, 합체를 도모하여 상분리를 향상시킨다[6]. 하지만, 이러한 물리적 방법은 일반적으로 액체 체류시간이 길고, 큰 장치 크기를 요구하는 단점을 갖는다. 또한, 100  $\mu\text{m}$  이하의 미세 액적에 대하여 중력 혹은 부력을 이용한 분리는 낮은 침강속도로 인하여 효과적이지 않을 수 있다.

장치 크기를 작게 하고, 액적의 포집과 합체를 향상시키기 위하여 기계적 포집기(mechanical coalescer)와 같은 내부구조체(internals)를 사용한다[7]. 기계적 포집기로는 plate-type, wire-mesh type, fiber-type, porous and granular beds 등이 있다[2,8]. 20  $\mu\text{m}$  이하의 미세 분산 액적(emulsified drops)의 분리를 위하여 fibrous membrane coalescer가 사용되어왔다[5,9,10]. Bansal *et al.* (2011)은 수용액상에 미세하게 분산된 평균 2  $\mu\text{m}$  유적(oil droplet)의 분리를 위하여 여러 가지 다공성 섬유 여과기(fiber filter)의 분리성능을 조사하였다[9]. 미세 액적은 다공성 섬유에 접근하고, 포집되며, 액적들간 합체되어 중력과 부력의 작용으로 침강하거나 부상한다. 섬유 포집기의 성능은 원료의 특성(액적 크기, 계면장력, 밀도차 등), 운전조건(유입속도, 압력차, 기름 농도 등), 포집체 물성(기공크기, 섬유 구조, 투과도, 두께 등)에 따라 변동될 수 있다[9]. Luo *et al.* (2016)은 20  $\mu\text{m}$  이하 유적을 선박폐수에서 회수하기 위하여 섬유 포집층을 이용하였고, 포집매체의 비표면적, 포집층 길이, 유입속도, 유입 기름 양 등에 따른 영향을 실험적으로 관찰하였다[10]. Li & Gu (2005)는 O/W emulsion으로부터 10  $\mu\text{m}$  이하 기름 액적을 분리하기 위하여 친유성 섬유 포집매체를 사용하였고, 원료 유입량, 유입 기름 농도, 섬유 길이에 따른 차압과 분리성능을 실험적으로 구하였다[2]. Xie *et al.* (2015)은 water-crude oil emulsion으로부터 물입자 응집을 증진시키고, 유수분리장치의 크기를 소형화할 수 있는 초음파 기술을 소개하였다. 초음파 투사를 통하여 물의 액적 크기는 20  $\mu\text{m}$ 에서 최대 75  $\mu\text{m}$ 으로 증가하였고, 유수분리 성능이 향상되었다[6]. Shin & Chase (2004)는 50  $\mu\text{m}$  보다 작은 물 액적을 기름상에서 제거하기 위하여 섬유 포집기를 사용했으며, 섬유표면 친수성, 섬유층 길이, 그리고 유속의 영향을 실험적으로 조사하였다[11]. Cai *et*

*al.* (2017)은 기름을 포함한 폐수에서 기름을 제거하기 위한 floatation column에 대하여 실험과 전산유체역학(CFD; computational fluid dynamics) 모사를 수행하였다. 입자수지식(population balance equation)을 포함하는 Eulerian CFD 모사에서 얻는 분리성능은 실험 결과와 잘 일치하였다[12].

다상(multiphase)에 대한 CFD 모델은 크게 2가지로 구분된다. Eulerian-Eulerian (EE) 방법과 Eulerian-Lagrangian (EL) 방법이다. EE 방법은 모든 상을 연속상(continuum phase)으로 간주하는 것이고, EL 방법은 하나의 상은 연속상으로 다른 한 상은 입자상(discrete phase)으로 접근하는 방식이다[13,14]. EE 방법은 다시 2가지 방법으로 구분되는데, VOF (volume of fluid) 모델과 Eulerian 모델이다. VOF는 surface tracking method로서 두 상간이 서로 섞이지 않는 경우(immiscible fluids)에 사용한다[7,13,14]. 두상이 서로 섞일 수 있을 경우, Eulerian 모델을 사용해야 하며, Eulerian 모델은 각 상에 대하여 연속방정식과 운동량 보존식을 각각 사용한다. Eulerian 모델은 VOF 모델과는 다르게 두상간의 운동량 교환 인자(momentum exchange coefficient)를 갖는 drag force 항이 포함된다[13].

Laleh *et al.* (2010)은 다상 원유분리장치에 대한 CFD 연구에 대한 연구현황을 소개하였다[14]. 원심 분리 방식의 선박용 유수분리기에 대한 정상상태 Eulerian CFD 모사를 통하여 원심분리 회전속도에 따른 압력장, 속도장, 기름 부피분율 등을 분석하였다[15]. 파이프 내 water-oil 층 흐름에 대하여 RNG (re-normalization group) k- $\epsilon$  난류모델을 포함하는 2상 VOF CFD 모사를 수행하였다[16]. Mohayjeji *et al.* (2016)은 원유에서 물과 소금을 제거하기 위한 나선형 중력 포집기(spiral gravitational coalescer)에 대하여 PBE 모델을 개발하였고, 온도, 유량, 그리고 압력강하에 따른 물과 소금 제거율을 구하였다[1]. Kharoua *et al.* (2013)은 사선으로 배치된 관형 포집기가 설치된 공기-물-기름 분리장치에 대하여 k- $\epsilon$  난류모델 및 PBE 모델을 포함하는 3차원 3상 Eulerian CFD 모델을 제시하였고, 유입 액적 DSD에 따른 분리성능, 체류시간, 침강속도, 그리고 DSD를 계산하였다. 이 CFD-PBE 모델은 2개 액체 분산상의 액적크기를 일정하다고 가정한 순수 Eulerian CFD 모델[17,18]보다 더 정확한 모사 결과를 제공하였다[7].

Orciuch *et al.* (2012)는 포집기 구조 설계에 도움을 줄 수 있는 2차원 PBE모델을 개발하였으며, 단순화된 섬유 포집기 미세 구조에 대하여 droplet size distribution (DSD)의 시간에 따른 변화를 예측하였다[19]. Mino *et al.* (2016)는 분리막 기반 포집기(membrane-based coalescer)에 대하여 2차원 2상 micro-scale CFD 모델을 제시하였고, 섬유표면 친수성, 유속과 섬유 직경의 영향을 고찰하였다[5]. 이들 모델들은 포집기의 미세구조를 고려함으로써 포집기 미세구조 설계에 기여할 수 있었다.

공기-물-기름 3상 상업용 분리장치에 대하여 액적의 합체과 분체를 포함하는 PBE 모델이 결합된 CFD 모사는 계산시간이 길기 때문에 [7], 분리장치 내 수력학적 특성 및 기름 분리성능을 신속하게 파악하기에는 문제점이 있다. 또한, 액적 포집기를 다공성 매체(porous media)로 간주하여 3상 원유분리장치의 분리성능을 예측한 연구와, 액상 출구 압력이 분리성능에 미치는 영향에 대한 연구는 찾아 볼 수 없다.

본 연구의 목적은 공기-물-기름 3상 수평 분리 장치에 대한 3차원 Eulerian CFD 모델을 개발하는 것이다. 분산상으로 정의된 2개의

액상에 대하여 균일 액적 크기를 적용하며, 액적 포집기(coalescer), 집무기(demister), 그리고 타공판(perforated plate)은 다공성 매체로 간주된다. 이러한 CFD 모사를 통하여 물과 기름에 대한 2개 출구 압력에 따른 액위 변화와 기름 분리성능을 예측한다. 본 연구는 균일 액적 크기가 적용된 3상 Eulerian CFD 모델이 상업용 원유분리 장치의 기름 분리성능을 단축된 계산시간과, 비교적 높은 정확도 범위에서 예측할 수 있음을 보여준다.

## 2. 공기-물-기름 분리공정

다상 원유분리장치는 1차 기액 분리를 포함하는 원료 유입부(primary separation zone), 유적 포집기를 포함하는 중력침강부(gravity separation zone), 그리고 기체 출구에 위치한 집무기(mist elimination zone)로 구성된다[14]. 1차 분리영역에서 공기-물-기름 혼합물이 분사되면서 액상은 기상과 분리된다. 분리된 기상은 분리 장치 출구 상부에 위치한 demister(집무기)를 거쳐 유출된다. 하부로 떨어진 액상은 기름상과 액상으로 분리되며, 타공판(perforated

plate)을 거치면서 안정적인 흐름을 갖는다. 액상은 타공판을 지나 판형 포집기(plate-type coalescer)를 거치면서 기름 액적이 포집되어 부상하여 분리가 가속화된다. 판형 포집기의 높이는 35 cm 이고, 분리장치 후단부에 있는 차단막(weir plate)은 25 cm이다. 차단막을 사이에 두고 전면에는 물 유출구(water outlet), 후면에는 기름 유출구(oil outlet)가 있다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 공기-물-기름 분리장치의 개념도를 보여준다. 이 분리 장치의 직경은 0.78 m 이고, 총 길이는 2.66 m이다.

Table 1은 공기, 물, 그리고 합성유에 대한 밀도( $\rho$ ), 점도( $\mu$ ), 그리고 표면장력( $\sigma$ )을 상압 상온에서 제시한다. 스테인레스 재질의 판형 포집기는 공극률( $\epsilon_p$ )이 0.954 이며, 판과 판 사이 간격은 2 cm 이다. 하지만, 비등방성 투과율을 갖는 다공성 매체로 간주되며, 각 방향에 따른 투과율은 Table 2에서 보여준다. Demister 와 타공판 또한, 다공성 매체로 간주되었다. 여기에서  $x$ 는 유체의 진행방향과 동일한 종방향이며,  $y$ 는 중력방향,  $z$ 는 횡방향이다. Permeability ( $K$ )를 구하는 식은 coalescer와 demister에 대하여 각각 다음 식을 적용하였다[2,20].

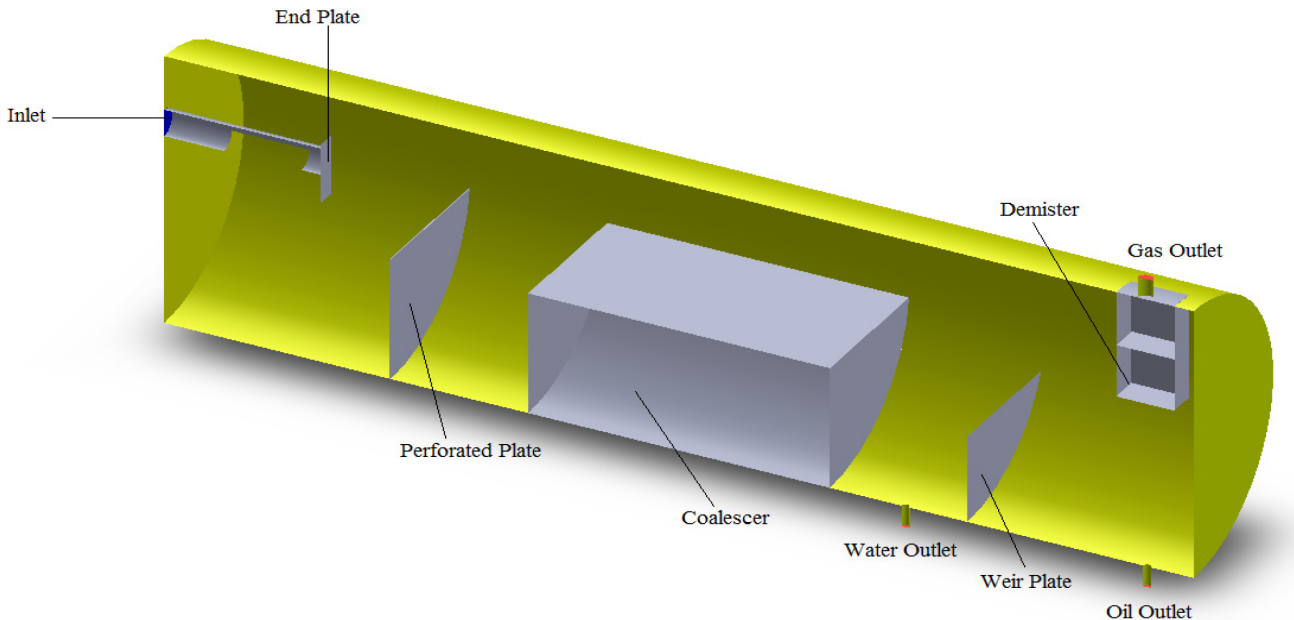


Fig. 1. Air-water-oil separator with plate-type coalescer.

Table 1. Physical properties of air, water and oil

Component	Phase	$\rho$ (kgm)	$\mu$ (Pa-s)	$\sigma$ (N/m)	Remarks
Air	Gas	1.2	$1.84 \times 10^{-5}$	-	1 bar, 20 °C
Water	Liquid	998	$1.00 \times 10^{-3}$	$72.8 \times 10^{-3}$ (with air)	1 bar, 20 °C
Oil <sup>a</sup>	Liquid	831	$7.21 \times 10^{-3}$	$27.2 \times 10^{-3}$ (with air)	1 bar, 20 °C

<sup>a</sup>Oil: synthetic oil

Table 2. Material properties of porous media

Material	Porosity ( $\epsilon_p$ )	Porous resistance (1/m <sup>2</sup> )			Inertial resistance (1/m)		
		$1/K_x^b$	$1/K_y$	$1/K_z$	$C_{r,x}^c$	$C_{r,y}$	$C_{r,z}$
Coalescer <sup>a</sup>	0.954	$4.53 \times 10^5$	0	$1 \times 10^{10}$	0	0	0
Demister	0.9801	$2.57 \times 10^6$	$2.57 \times 10^6$	$2.57 \times 10^6$	0	0	0
Perforated plate	0.25	0	0	0	31	31,000	31,000

<sup>a</sup>Coalescer: stainless steel and corrugated plate-type

<sup>b</sup> $K$ : Anisotropic porous resistance in  $x$ -,  $y$ -, and  $z$ -directions

<sup>c</sup> $C_r$ : Inertial resistance in  $x$ -,  $y$ -, and  $z$ -directions

$$\text{Coalescer [2]: } K = \frac{\epsilon_p^3}{K_c(1-\epsilon_p)^2 a_s^2} \quad (1)$$

이 식에서  $K_c$ 는 Kozeny 상수( $K_c=24.4$ )이고,  $\epsilon_p$ 은 공극률( $\epsilon_p=0.954$ ),  $a_s$ 는 고체만의 부피 대비 다공성매체의 면적을 표현하는 비표면적( $a_s=2,760 \text{ m}^2/\text{m}^3$ )이다.

$$\text{Demister [20]: } K = \frac{0.08(S-d)^4}{S^2 \epsilon_p^{0.3}} \quad (2)$$

이 식에서  $S$ 는 두 섬유포집체 사이의 간격( $S=2.684 \text{ mm}$ ),  $d$ 는 섬유포집체의 직경( $d=0.254 \text{ mm}$ ), 공극률  $\epsilon_p=0.9801$ 이다.

Coalescer의 투과도는 구조적 배열특성에 의거하여 중력방향 투과도( $K_y$ )는 매우 크다고 가정하였고, 유체의 흐름 방향인 종축 투과도( $K_x$ )는 Eq. (1)을 사용하였으며, 횡축 투과도( $K_z$ )는 막힌 판형 구조를 반영하여 매우 작은 값( $1 \times 10^{-10}$ )으로 설정하였다. 미세섬유매체로 구성된 demister의 투과도는 세 방향에 대하여 등방성으로 간주되었다. 일반적으로 타공판의 투과도는 매우 큰 것으로 가정되므로, 저항값은 0으로 주어졌다.

집무기와 포집기의 관성저항계수( $C_f$ , see Eq. (11) Section 3.1)은 다공성매체 내에서 속도가 매우 느리기 때문에 무시되었다. 즉, 집무기와 포집기에서는 점도저항만 고려되었다. 반대로, 타공판에서는 점도저항은 무시되지만, 타공판 구멍을 통과하는 유체의 속도가 빠르기 때문에 관성저항이 고려되었다. 관성저항계수값은 공극률과 구멍크기에 대한 타공판 두께의 비에 대한 도표로부터 구하였다 [21]. 유체 흐름방향( $x$ , 종축)으로의 관성저항계수값은 작고, 중력방향( $y$ )과 횡축( $z$ )은 큰 저항값으로 정의하였다.

이 분리 장치는 흐름방향에서 좌우 대칭임으로 CFD 모사 영역은 한쪽 면만 고려한다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 분리장치의 구조 및 크기를 보여준다.

Fig. 3은 본 장치의 격자 구조를 보여준다. polyhedral 격자구조이며, 총 격자수는 495,000 개이다. 복잡한 내부구조물 형상으로 인하여 1차적으로 tetrahedral 격자 구조를 사용하였고, 다음에는 복잡한 형상은 유지하면서 격자수를 줄이기 위하여 polyhedral 구조로 변환하였다. 유체의 흐름이 빠른 입구(inlet) 및 출구(water, oil and gas outlets)와, 두께가 매우 얇은 다공성 매체 타공판(perforated plate) 주변은 고밀도의 격자로 구성되었다. 다공성 매체인 판형 포집기(coalescer) 및 집무기(demister) 내에서의 유체흐름은 격자수에 비교적 민감하지 않지만, 액상 혹은 기상의 흐름이 빨라지는 영역임으로 중밀도의 격자로 구성되었다. 차단막(weir plate)은 유체가 통과하여 흐르지 않지만, 두께가 얇아 주변의 격자수가 증가되

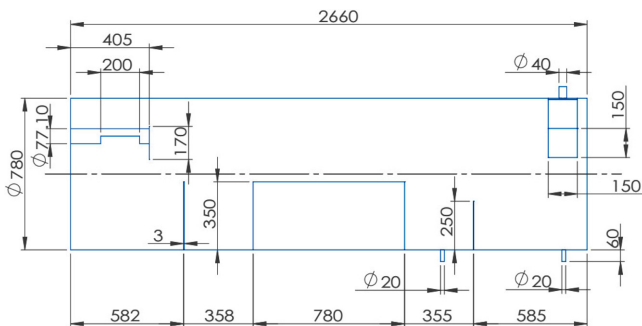


Fig. 2. Geometry and size of air-water-oil separator (units: mm).

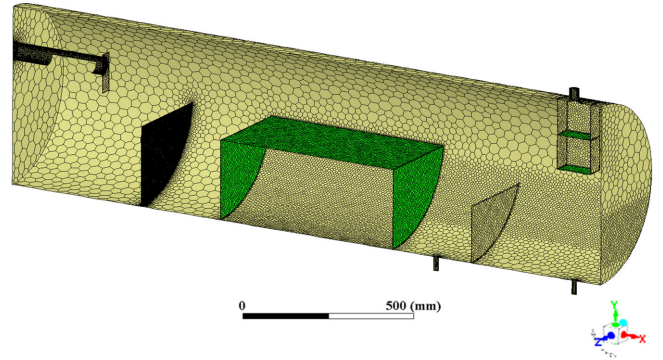


Fig. 3. Mesh structure of air-water-oil separator.

었다. 액상흐름 영역과 기액 계면 주변은 비교적 격자수가 많지만, 기상이 존재하는 상부는 유수분리에 큰 영향을 주지 않으므로 적은 격자수를 사용하였다.

### 3. 3상 Eulerian 전산유체역학 모델

본 연구에서 고려하는 CFD 모사 영역은 oil separator 내부이며, 이 내부에는 내부구조물들(internals)이 존재하고, 2개의 액상과 1개의 기상이 공존함으로 3상 CFD 모델이 적용되어야 한다. 이 3상 CFD 모델은 다음과 같은 가정들을 기반으로 개발되었다.

- 1) 공기-물-기름상은 모두 비압축성 등온상태로서 밀도와 온도가 일정하다.
- 2) 액상에서 유화(emulsification) 및 거품 생성(foaming) 현상은 무시된다.
- 3) 기상은 연속상, 물과 기름은 분산상으로 간주하며, 물과 기름의 액적 크기는 일정하다.
- 4) 분산상의 액적크기가 일정함으로 기액상에 존재하는 액적들의 합체와 분체는 고려되지 않는다.
- 5) 액상은 Newtonian 유체로서 점도가 일정하다.
- 6) 유적 포집기(oil coalescer), 집무기(demister), 타공판(perforated plate)의 미세 구조는 무시하고, 일정하고 균일한 등방성 공극률을 갖는 다공성 매체(porous media)로 간주한다.

GLL (gas-liquid-liquid) 3상 유체에 대한 CFD 지배방정식은 질량보존법칙과 운동량보존법칙에 근거한 연속방정식(continuity equation)과 Navier-Stokes 방정식으로 각각 표현된다[5,13,15]. 운동량방정식에서 구성방정식으로는 항력모델(drag force model), 양력모델(lift force model), 그리고 다공성 매체 저항력 모델(porous media resistance model) 등이 추가된다. 또한, 난류 운동에너지와 이 운동에너지의 소실속도에 대한 standard k-ε 모델을 사용한다.

#### 3-1. Governing and constitutive equations

본 연구에서 사용된 Eulerian CFD의 지배방정식(governing equation)은 연속방정식, Navier-Stokes 식으로 구성된다. 총괄물질수지식에 해당하는 공기-물-기름 3상 비압축성 연속방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho_w \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_w) &= -\rho_w \bar{\nabla} \cdot (\alpha_w \bar{u}_w) \\ \rho_o \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_o) &= -\rho_o \bar{\nabla} \cdot (\alpha_o \bar{u}_o) \\ \alpha_G + \alpha_w + \alpha_o &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서,  $\rho$ 는 밀도( $\text{kg/m}^3$ )이고,  $\vec{u}$ 는 속도벡터, 그리고  $\alpha$ 는 부피 분율이다. 하첨자  $G, W, O$ 는 각각 공기, 물, 기름을 의미한다. 공기는 연속상, 그리고 물과 기름은 분산상으로 정의된다. 분산상의 입자는 일정한 크기를 갖는 완전 구형으로 가정된다. 공기의 부피분율( $\alpha_G$ )은 전체 분율의 합이 1이라는 식을 통하여 계산된다.

Navier-Stokes (NS) 방정식으로 알려져 있는 운동량 보존식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho_G \frac{\partial(\alpha_G \vec{u}_G)}{\partial t} &= -\rho_G \vec{u}_G \cdot \vec{\nabla}(\alpha_G \vec{u}_G) - \alpha_G \vec{\nabla}P + \vec{\nabla} \cdot \alpha_G \vec{\tau}_G \\ &+ \rho_G \alpha_G \vec{g} + (\vec{F}_{GW} + \vec{F}_{GO}) + (\vec{F}_{ift,GW} + \vec{F}_{ift,GO}) + \vec{F}_{R,G} \\ \rho_W \frac{\partial(\alpha_W \vec{u}_W)}{\partial t} &= -\rho_W \vec{u}_W \cdot \vec{\nabla}(\alpha_W \vec{u}_W) - \alpha_W \vec{\nabla}P + \vec{\nabla} \cdot \alpha_W \vec{\tau}_W \\ &+ (\vec{F}_{GW} + \vec{F}_{WO}) + (\vec{F}_{ift,GW} + \vec{F}_{ift,WO}) + \vec{F}_{R,W} \\ \rho_O \frac{\partial(\alpha_O \vec{u}_O)}{\partial t} &= -\rho_O \vec{u}_O \cdot \vec{\nabla}(\alpha_O \vec{u}_O) - \alpha_O \vec{\nabla}P + \vec{\nabla} \cdot \alpha_O \vec{\tau}_O \\ &+ (\vec{F}_{GO} + \vec{F}_{WO}) + (\vec{F}_{ift,WO} + \vec{F}_{ift,GO}) + \vec{F}_{R,O} \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서  $P$ 는 압력이고,  $\vec{g}$ 는 중력가속도이며,  $\mu$ 는 Newtonian 점도,  $\vec{\tau}$ 는 전단응력이다. 상간의 운동량전달은 3개항으로 구성된다: 공기-물상의 drag force ( $\vec{F}_{GW}$ ), 공기-기름상의 drag force ( $\vec{F}_{GO}$ ), 그리고 물-기름상의 drag force ( $\vec{F}_{WO}$ ). 항력(drag force)은 두 상의 속도차에 의해서 유발되며,  $\vec{F}_{GW}$ 의 경우 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \vec{F}_{GW} &= K_{GW}(\vec{u}_W - \vec{u}_G) \\ K_{GW} &= \frac{\rho_W f}{6\tau_W} d_{b,W} \alpha_{GW}, \quad \tau_W = \frac{\rho_W d_{b,W}^2}{18\mu_G} \\ \alpha_i &= \frac{6\alpha_G \alpha_W}{d_{b,W}}, \quad \text{and } f = \frac{C_D \text{Re}_{GW}}{24} \end{aligned} \quad (5)$$

공기-물 운동량 전달계수( $K_{GW}$ )는 항력 함수( $f$ ), 단위부피당 공기-물 상간의 접촉 면적( $\alpha_{GW}$ ), 그리고 particulate relaxation time ( $\tau_W$ )의 함수로 표현된다.  $\tau_W$ 는 유체흐름 속에 존재하는 입자가 새로운 조건에 놓일 때, 이에 응답하는 시간을 의미한다.  $C_D$ 는 항력계수(drag coefficient)이고,  $\text{Re}_{GW}$ 는 공기-물상에 대한 상대적 Reynolds number이다.

$$\text{Re}_{GW} = \frac{\rho_G |u_G - u_W| d_{b,W}}{\mu_G} \quad (6)$$

만일 두 개의 분산상 물-기름상에 대한 상대적 Reynolds number ( $\text{Re}_{WO}$ )는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Re}_{OW} = \frac{\rho_{OW} |u_O - u_W| d_{b,OW}}{\mu_{OW}} \quad (7)$$

여기에서 밀도, 입자크기, 점도는 각 분산상의 부피 분율을 곱한 혼합값(mixture value)으로 사용된다.

$$\begin{aligned} \rho_{OW} &= \alpha_O \rho_O + \alpha_W \rho_W \\ d_{b,OW} &= \alpha_O d_{b,O} + \alpha_W d_{b,W} \\ \mu_{OW} &= \alpha_O \mu_O + \alpha_W \mu_W \end{aligned} \quad (8)$$

사용된 항력계수( $C_D$ )는 Tomiyama 모델이다[22].

$$\begin{aligned} C_D &= \max \left( \min \left[ \frac{16}{\text{Re}_{GW}} (1 + 0.15 \text{Re}_{GW}^{0.687}), \frac{48}{\text{Re}_{GW}} \right], \frac{8}{3} \cdot \frac{E_o}{E_o + 4} \right) \\ E_o &= \frac{g(\rho_G - \rho_W) d_{b,W}^2}{\sigma_{GW}} \end{aligned} \quad (9)$$

여기에서  $E_o$ 는 Eotvos number 이고, 표면장력( $\sigma_{GW}$ ) 대비 부력의 비를 의미한다. 항력 모델은 두 상간의 운동량 전달을 표현하는 식으로 Tomiyama 모델은 기액 흐름에서 자주 사용된다(ANSYS Fluent Theory guide, 2016).

공기-물상에 대한 양력( $\vec{F}_{ift,GW}$ )은 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{F}_{ift,GW} = C_l \rho_G \alpha_W (\vec{u}_G - \vec{u}_W) \times (\vec{\nabla} \times \vec{u}_G) \quad (10)$$

양력계수( $C_l$ )는 Tomiyama 모델을 사용한다[23]. 이 모델은 Eotvos number 에 따라 양력계수를 정의하며, 변형 가능한 비교적 큰 액적 혹은 기포에 적용되어 왔다(ANSYS Fluent Theory guide, 2016).

다공성 매체에서 공기 유체가 받는 저항력( $\vec{F}_{R,G}$ )은 다음과 같이 정의된다[24].

$$\vec{F}_{R,G} = -\frac{\epsilon_p \mu_G}{K} \vec{u}_G - \frac{C_r}{2} \rho_G |\vec{u}_G| \vec{u}_G \quad (11)$$

여기에서  $\epsilon_p$ 는 다공성 매체의 공극률,  $\mu_G$ 는 공기 점도,  $K$ 는 투과도(permeability),  $C_r$ 는 관성저항 인자이다. 저항력의 오른쪽 첫째항은 유체 점성에 따른 소실되는 힘(viscous loss)을 의미하고, 두번째항은 관성 소실항(inertia loss)이다.  $K$  값은 축방향에 따라 변하므로 비등방성으로 정의되며, 이 값은 Table 2에서 제시되었다. 다공성 매체 저항력은 다공성 매체로 정의된 CFD 영역에서만 적용된다.

다상 흐름에서 난류모델을 적용하기 위해서는 밀도, 속도, 점도에 대하여 mixture value ( $\rho_m, u_m, \mu_m$ )를 사용해야 한다.

$$\begin{aligned} \rho_m &= \alpha_G \rho_G + \alpha_W \rho_W + \alpha_O \rho_O \\ \vec{u}_m &= \alpha_G \vec{u}_G + \alpha_W \vec{u}_W + \alpha_O \vec{u}_O \\ \mu_m &= \alpha_G \mu_G + \alpha_W \mu_W + \alpha_O \mu_O \end{aligned} \quad (12)$$

이들 혼합값들과 함께 난류흐름에 대한 standard k- $\epsilon$  모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_m k}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_m \vec{u}_m k) &= \vec{\nabla} \cdot \left[ \left( \mu_m + \frac{\mu_m}{\sigma_k} \right) \vec{\nabla} k \right] + G_k + G_b - \rho_m \epsilon \\ \frac{\partial \rho_m \epsilon}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_m \vec{u}_m \epsilon) &= \vec{\nabla} \cdot \left[ \left( \mu_m + \frac{\mu_m}{\sigma_\epsilon} \right) \vec{\nabla} \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho_m \frac{\epsilon^2}{k} \\ \mu_m &= \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \end{aligned} \quad (13)$$

여기에서  $k$ 는 turbulence kinetic energy,  $\epsilon$ 는  $k$ 의 소멸속도,  $G_k$ 는 평균속도 기울기에 따른  $k$ 의 생성,  $G_b$ 는 부력에 기인한  $k$ 의 생성,  $\mu_m$ 은 난류 점도이다.  $\sigma_k$ 와  $\sigma_\epsilon$ 은 각각  $k$ 와  $\epsilon$ 에 대한 turbulent Prandtl number를 의미한다.  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$ ,  $C_{3\epsilon}$ 는 상수이다.

**Table 3. Boundary condition (BC) and initial condition (IC) of CFD model**

		Boundary conditions
Inlet BC	Air	Velocity inlet, $u_G = 16.79$ m/s (0.0444 kg/s), $T = 20$ °C
	Water	Velocity inlet, $u_W = 0.031$ m/s (0.1067 kg/s), $T = 20$ °C
	Oil	Velocity inlet, $u_O = 0.052$ m/s (0.0711 kg/s), $T = 20$ °C
Outlet BC	Air	Pressure outlet, $P = 101.3$ kPa
	Water	Pressure outlet, $P = 101.3$ kPa + 5.6, 6.0, 6.3, or 6.4 kPa
	Oil	Pressure outlet, $P = 101.3$ kPa + 4.2, 4.7, 5.1, or 5.4 kPa
IC	Gas phase	Air at $P = 101.3$ kPa, $T = 20$ °C
	Liquid phase	Water and air mixture at $P = 101.3$ kPa, $T = 20$ °C

본 연구에서 사용한 CFD 모델은 PBE 모델[7]을 포함하고 있지 않지만, 양력모델[23]을 포함한다. 액적포집기에 대한 실제 구조를 고려하지 않고, 다공성 매체로 간주하였으므로 격자수가 적게 사용된다. 또한, 분산상으로 정의된 두 액상의 액적 크기가 일정하다고 가정하였으므로, 액적의 접근, 포집, 합체, 부상 등의 물리적 현상이 고려되지 않는다.

### 3-2. Boundary conditions and model parameters

장치 및 공정의 입구면에 대한 경계조건(BC: boundary condition)은 운전조건으로 주어진다. CFD 모델을 해석하기 전에 미리 정해져야 하는 경계조건과 초기조건(IC: initial condition)은 Table 3에 정리되어 있다. 유입구의 경계조건은 속도 유입으로, 유출구는 압력 유출로 정의된다. 모든 벽면은 no-slip boundary condition 이 적용된다. 분리장치 상부의 공기 출구압력은 대기압으로 정의되며, 하부에 위치하는 물출구와 기름출구는 조절밸브에 의하여 적절한 압력이 가해진 상태이다. 이 두 액체 출구의 압력에 따라 분리 장치내 수위가 제어됨으로 4가지 다른 출구압이 적용되었다. 기름 출구압은 물 출구압에 비하여 약 1.0 kPa 작게 주어진다. 이 분리장치는 초기에 기상은 공기로 채워져 있고, 액상은 물로 높이 25 cm로 채워져 있다. 이 높이는 정상상태 운전조건인 NLL (normal liquid level)에 해당한다.

Table 4는 본 연구에서 사용된 모델 인자값 및 모사 인자값을 보여준다. 분산상으로 정의된 2개 액상에 대하여 기름상과 물상의 액적 크기는 100  $\mu\text{m}$ 로 고정하였다. Kharoua *et al.* (2012, 2013) 및 Vilagines and Akhras (2010)에서도 물상과 기름상의 액적크기를 100  $\mu\text{m}$ 로 고정하여 CFD 모사를 수행하였으며[7,17,18,25], 이 크

기는 액적 평균 직경으로 가정되었다. 운동량 보존식에서 사용된 drag force coefficient ( $C_D$ )는 Tomiyama 모델을 적용하였고, lift force coefficient ( $C_l$ )도 Tomiyama 모델을 사용하였다. 사용된 난류 모델 인자값은 Table 4에 정리되어 있다.

비정상상태 3상 3차원 Eulerian CFD은 ANSYS Fluent R17 (ANSYS Inc., USA)를 이용하여 해석되었다. 압력-속도 상관식은 SIMPLE를 사용하였고, 공간방향에 따른 3차원 편미분항의 구간화를 위하여 상분율( $\alpha$ )에 대해서는 QUICK scheme, 운동량 보존식에서는 First-order upwind를 사용하였다. 각 시간 간격에서 최대 반복 모사 횟수는 50 번으로 설정되었으며, 수렴오차는  $1 \times 10^{-3}$  이하로 주어졌다. 액상의 평균 체류시간은 20분 정도이며, 정상상태에 도달할 수 있는 40분을 모사시간으로 정하였다. 사용된 고성능계산기는 2.7 GHz CPU가 24 개 장착된 3개 노드(CPU 72개 병렬 처리)로 구성되었으며, 각 노드 당 128 GB RAM이 장착되었다.

## 4. 전신유체역학 모사결과

앞서 주어진 CFD 모델식과 경계조건을 이용하여 물 출구압과 기름 출구압에 대한 영향에 대하여 고찰하였다. 실험에서 확인된 액위 높이와 일치하는 두가지 출구압을 CFD 모사를 통하여 구한 후, 3가지 상에 대한 부피분율( $\alpha$ ), 속도( $\vec{u}$ ), 그리고 침강속도( $u_y$ )를 분석하였다. 마지막으로 CFD 모사에 예측된 3가지 상의 분리성능을 제시하였고, 기름상의 분리성능은 실험값과 비교하였다.

### 4-1. Effect of water outlet pressure

본 연구에서 사용된 CFD 모델에서 기액상 출구압은 경계조건으로

**Table 4. CFD model parameters**

	Symbol	Value or reference
Dispersed phase setup	$d_W$	Water droplet size ( $\mu\text{m}$ )
	$d_O$	Oil droplet size ( $\mu\text{m}$ )
Momentum equation (Drag and lift forces)	$C_D$	Drag force coefficient
	$C_l$	Lift force coefficient
	$C_r$	Inertial resistance factor in porous media
Turbulence (standard k- $\omega$ model)	$I_t$	Turbulence intensity of inlet velocities (%)
	$\sigma_k$	Turbulent Prandtl number for $k$
	$s_e$	Turbulent Prandtl number for $\varepsilon$
	$\sigma_d$	Dispersion Prandtl number
	$C_1, C_{2\varepsilon}$	Turbulence energy dissipation coefficients
	$C_\mu$	Turbulent viscosity coefficient
Simulation setup	Maximum number of iterations at each time step	
	Convergence tolerance	
	Flow time ( $t$ , min)	

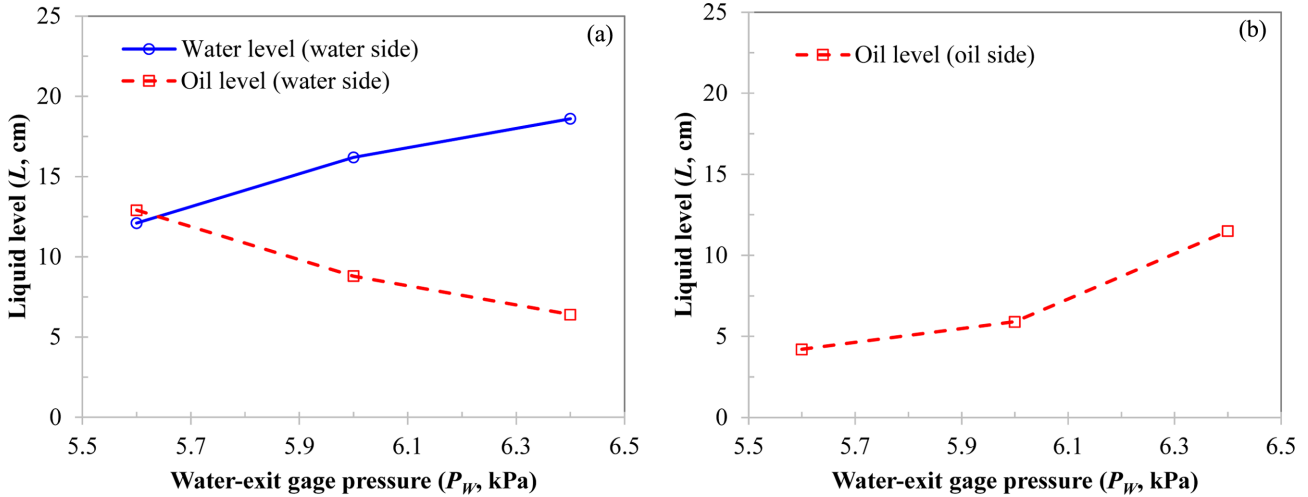


Fig. 4. Effect of water exit pressure ( $P_w$ ) on liquid level ( $L$ ) at  $P_o=4.2$  kPa. (a) Liquid level of water side, (b) Liquid level of oil side.

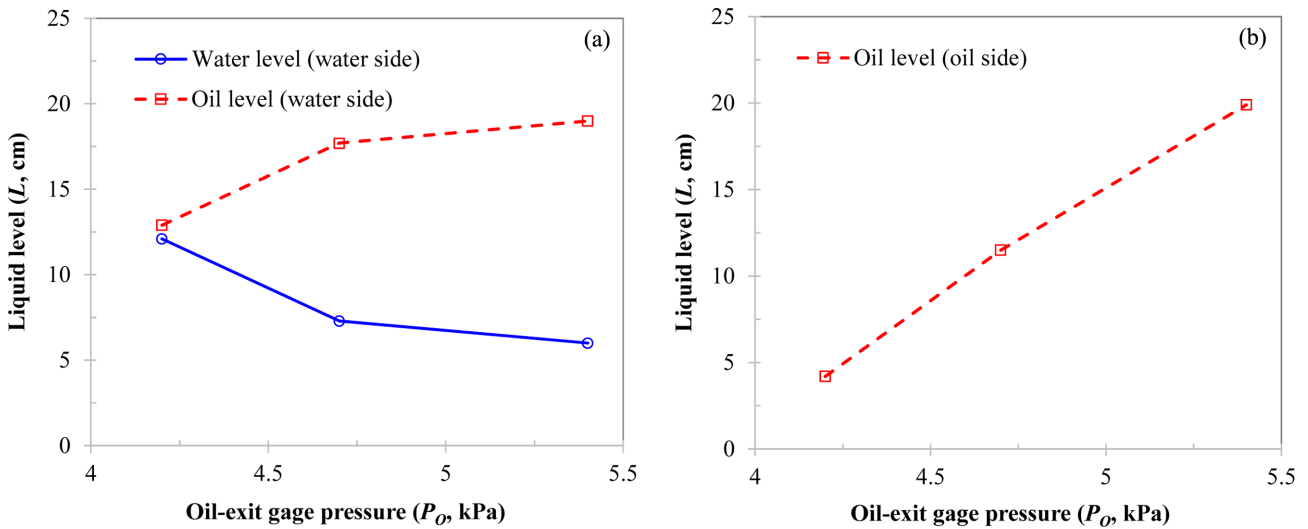


Fig. 5. Effect of oil exit pressure ( $P_o$ ) on liquid level ( $L$ ) at  $P_w=5.6$  kPa. (a) Liquid level of water side, (b) Liquid level of oil side.

주어졌으며, 사용자가 그 값을 지정해야 한다. 기상은 대기압으로 정의하였고, 물 출구압과 기름 출구압은 모델인자로 처리하여 분리 장치 내 액위 변화를 고찰하였다. Fig. 4는 기름 출구압( $P_o=4.2$  kPa)을 일정하게 하고, 물 출구압( $P_w$ )을 변화시켰다. 차단막 전 유수 분리층에서의 물 액위는  $P_w$ 에 따라 증가하고, 기름 액위는 감소한다(Fig. 4a). 차단막 후 기름층의 액위는  $P_w$ 에 따라 증가한다(Fig. 4b). 즉, 물 출구압의 증가는 유수분리층에서 물 액위를 높이고, 기름은 기름층으로 더 많이 흘러가 기름층의 액위를 증가시킨다. 물출구 압력변화에 따른 평균 액위변화량( $\Delta L/\Delta P_w$ )은 유수분리층의 물액위, 기름액위, 그리고 기름층의 기름액위에 대하여 각각 8.1, -8.1, 그리고 9.1 cm/kPa이다.

반대로  $P_w$ 를 고정하고,  $P_o$ 를 변화시키는 경우,  $P_o$ 의 증가에 따라 기름층 액위는 증가한다(Fig. 5b). 동시에 유수분리층에서의 기름 액위도 증가하면서, 물 액위는 내려간다. 유수분리층의 액위는 차단막의 높이인 25 cm를 늘 유지해야 함으로, 기름 액위와 물 액위는 서로 반대의 경향을 보인다. 기름출구 압력변화에 따른 평균 액위 변화량( $\Delta L/\Delta P_o$ )은 유수분리층의 물액위, 기름액위, 그리고 기름층의 기름액위에 대하여 각각 -5.1, 5.1, 그리고 13.1 cm/kPa이다. 물

출구압 및 기름출구압 변화에 대하여 모두 기름층의 액위변화량은 유수분리층의 액위변화량보다 크다. 하지만, 유수분리층의 물액위는 기름출구압이 증가하면서 감소하고, 물출구압이 증가하면서 증가한다.

실험에서 확인된 기름층 액위는 차단막의 높이와 거의 동일하였다. 이에 따라 기름층 액위를 25 cm로 맞추기 위해서는 물 및 기름 출구압을 증가시켜야 한다. 또한, 유수분리층에서 물 액위와 기름 액위는 거의 반씩을 차지하였으므로[7], 몇 번의 CFD 모사를 통하여 물 출구압과 기름 출구압은 각각  $P_w=6.3$  kPa,  $P_o=5.1$  kPa로 정하였다.

#### 4-2. Hydrodynamics of air-water oil separator

물 출구압과 기름 출구압을 각각  $P_w=6.3$  kPa,  $P_o=5.1$  kPa으로 설정하고 구한 CFD 결과는 정상상태에 도달된 시간( $t=40$  min)에서 부피분율, 속도, 중력방향 침강속도에 대하여 분석된다. Fig. 6은 공기, 기름, 그리고 물의 부피 분율을 보여준다. 3가지 상은 원료 주입부에서 혼합되어 존재하다가 분리장치의 후반부로 가면서 매우 명확하게 구분되어 분리된다. Fig. 7은 초기부터 30분까지의 시간에

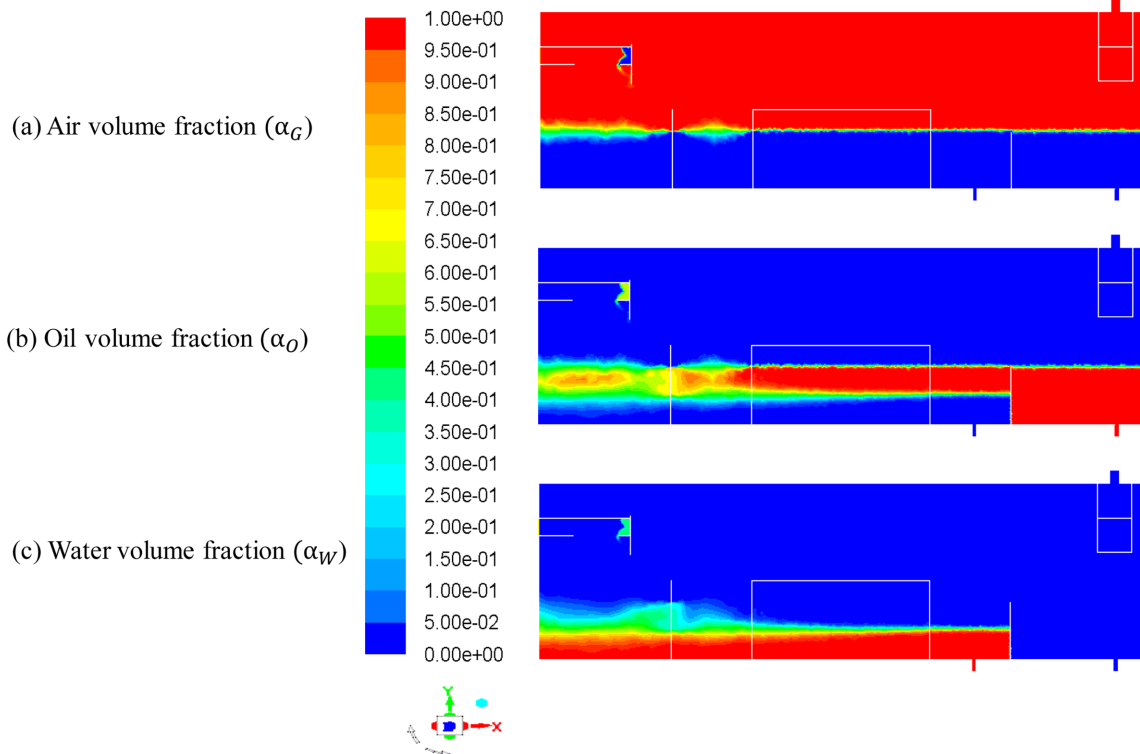


Fig. 6. Volume fraction ( $\alpha$ ) contours at  $P_H=6.3$  kPa, and  $P_O=5.1$  kPa.

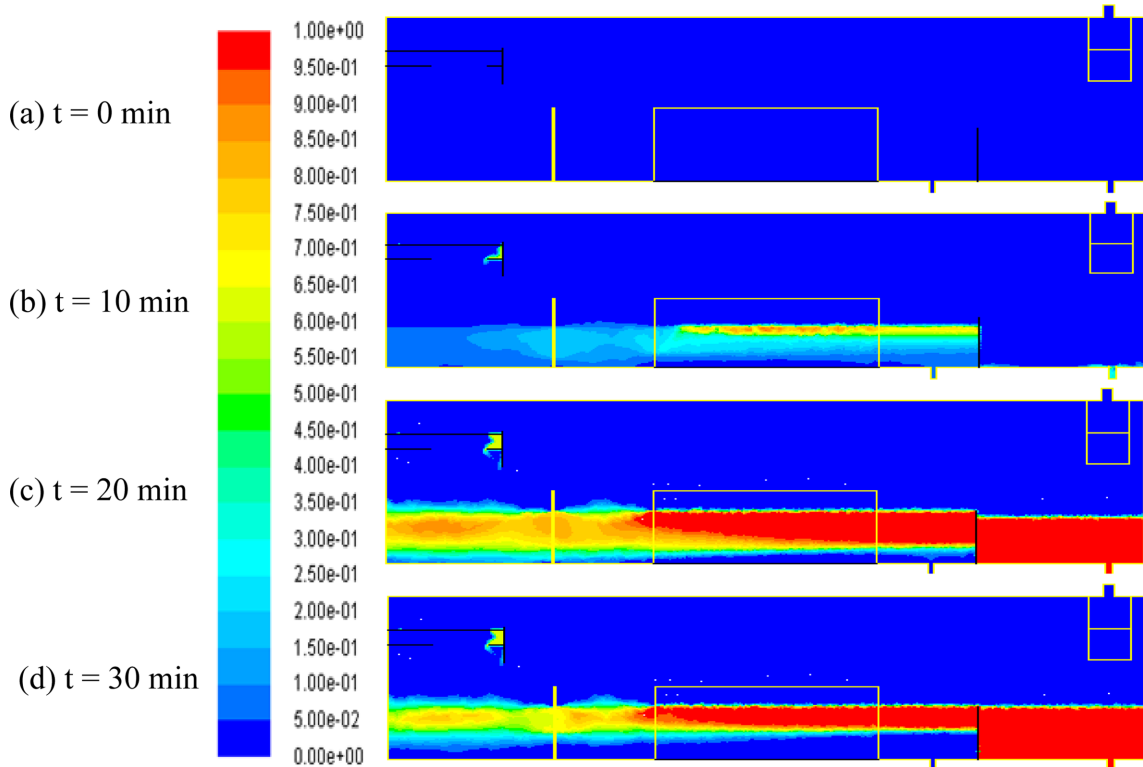


Fig. 7. Time evolution of oil volume fraction ( $\alpha$ ) contours at  $P_H=6.3$  kPa, and  $P_O=5.1$  kPa.

따른 기름상의 부피분율 변화를 보여준다. 초기에는 물과 공기만 존재하므로 기름은 존재하지 않고(Fig. 7a), 10분 정도에 원료가 차단막에 도달하게 되고(Fig. 7b), 20분이 흐르면 기름층의 수위가 많이 높아진다(Fig. 7c). 30분이 지나면, 거의 정상상태에 도달하는 것으로

보인다(Fig. 7d).

Fig. 8은 공기, 물, 기름에 대한 속도벡터를 화살표와 함께 보여준다. 공기는 주입부에서 상당한 난류흐름을 보이다가 대부분 demister 로 배출되며, 극소량의 액상에 있는 공기는 수면위로 올라온다(Fig. 8a).

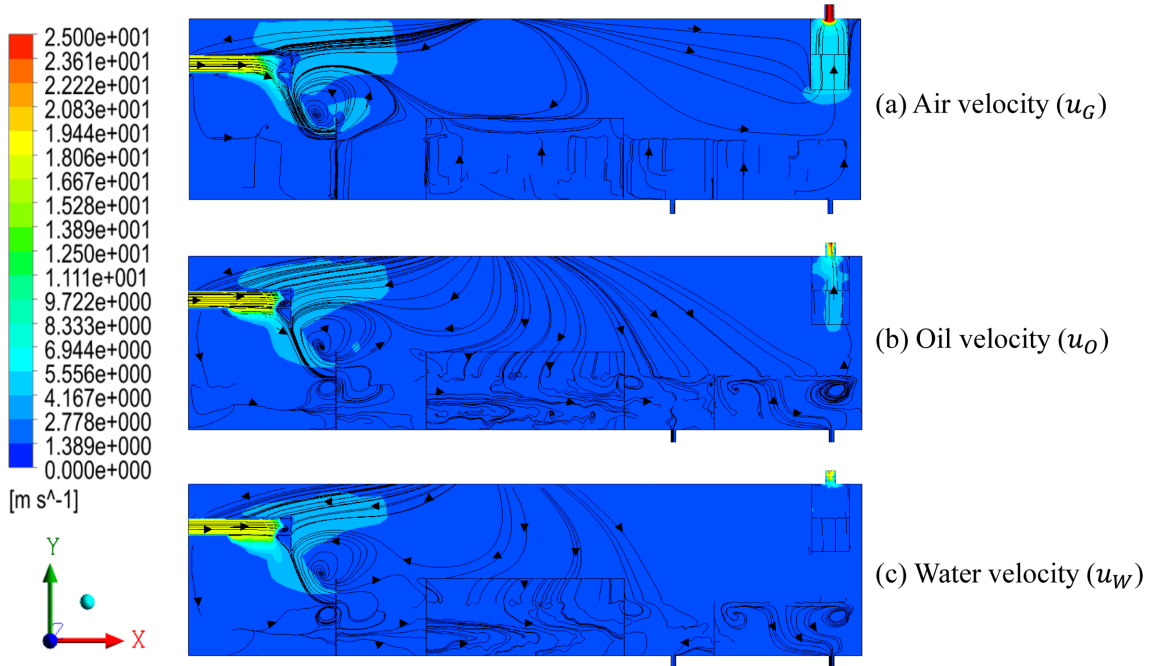


Fig. 8. Velocity vectors ( $u$ ) at  $P_H=6.3$  kPa, and  $P_O=5.1$  kPa.

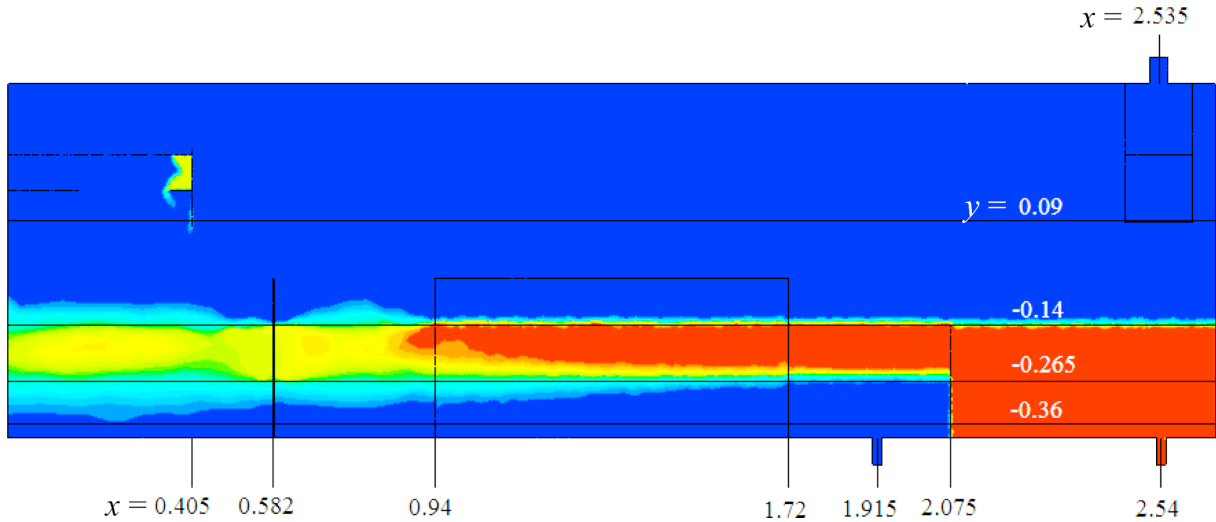


Fig. 9. Horizontal and vertical positions used to plot vertical velocity component ( $u_v$ ).

기름은 주입부에서 유입되어 종방향( $x$ )으로 흐르게 되며, 일부 기체 상에 있는 기름은 횡방향( $z$ ) 좌우 벽면을 타고 올라가다가 중앙 상단부에서 아래방향( $y$ )으로 하강한다. 분리 장치 후단의 기름층에서 액상 기름의 재순환흐름도 관찰된다(Fig. 8b). 물의 흐름은 기름의 속도벡터와 유사하지만, 기상의 물은 기름보다 적게 흐르는 것으로 확인된다(Fig. 8c).

물과 기름의 중력방향 침강속도를 확인하기 위하여 Fig. 9와 같은  $y$  방향 기준선을 정한다. 주어진  $y$  값은 탱크의 반경에 해당하는 39 cm 높이를  $y=0$ 으로 정할 때의 값을 표현한다. 기상 침강속도는  $y=0.09$  m에서 확인 가능하며, 기름에 대해서는  $y=-0.14$  m에서, 물에 대해서는  $y=-0.265, 0.360$  m에서 쉽게 관찰할 수 있다. 주요 장애물이 설치된 곳에 대한  $x$  값(중축)도 Fig. 9에서 표시되어 있다.

Fig. 10은 4개 위치에서 중력방향 물의 속도( $u_{W,y}$ )를 종축방향( $x$ )에 따라 보여준다. 물은 기상에서 거의 존재하지 않지만, 대부분 하강

속도를 보이고, coalescer 전과 demister 에서는 상승하는 흐름이다 (Fig. 10a). 기액 접촉면에서 ( $y=-0.14$  m) 액상의 물은 대부분 하강 속도를 보인다. 특히 유입부에서 강한 하강속도를 보여준다(Fig. 10b).  $y=-0.265$  m에서, 액상의 물은 유입부에서 Fig. 10b에서 보여준 강한 하강흐름의 반작용으로 상승하며, 물의 양이 매우 적은 기름층 ( $2.2 \leq x \leq 2.54$  m)에서 하강흐름이 상대적으로 크게 나타난다. 차단 막(weir) 주변의 상승흐름은 벽면 영향(wall effect)으로 해석될 수 있다(Fig. 10c). 탱크 바닥부분에서의 물은 비교적 평온한 상태를 유지한다. 속도값의 변화폭이 작지만, 물과 기름 출구에서는 하강 흐름이 비교적 강하다(Fig. 10d). 이러한 물의 침강속도는 Kharoua *et al.* (2013)[7]에서 보여주는 경향과 비슷하다.

Fig. 11에서 보듯이 물과 기름상의 침강속도 경향은 대체적으로 일치한다. 기상내 소량 존재하는 기름은 demister 부분에서 밀도가 낮기 때문에 물보다 더 강한 상승흐름을 보인다(Fig. 11a).  $y=-0.14$  m

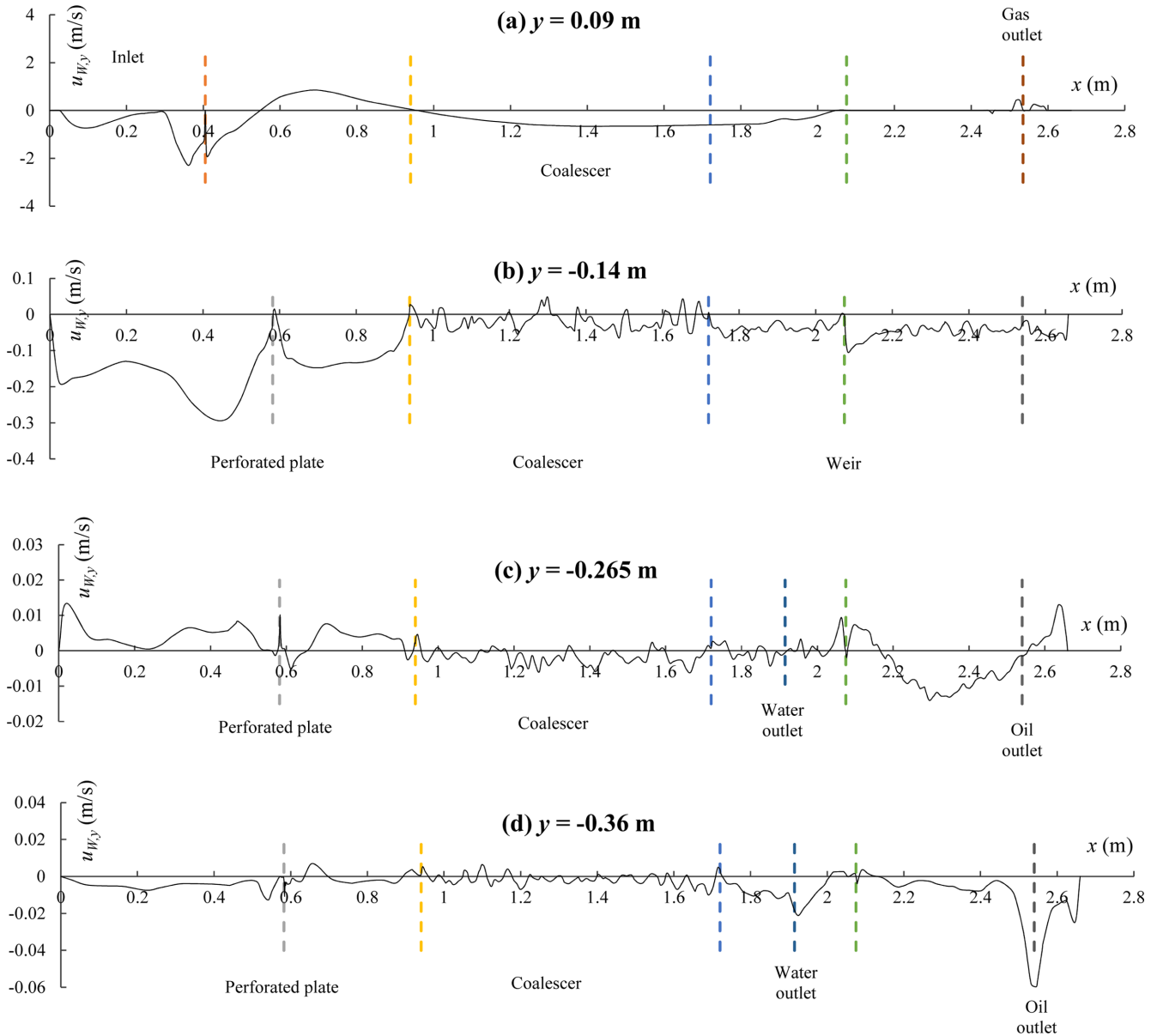


Fig. 10. Vertical water velocity ( $u_{w,y}$ ) with respect to axial direction ( $x$ ) at  $P_H=6.3$  kPa, and  $P_O=5.1$  kPa.

에서 물과 기름은 거의 동일한 거동을 보인다(Fig. 11b). 유수 계면에서 ( $1.72 \leq x \leq 2.075$  m, Fig. 9) 기름은 밀도차에 의하여 물보다 더 큰 상승흐름을 가져야 한다. Fig. 11c에서 보듯이 물 출구 근처에서 기름은 물보다 상승흐름이 큰 것을 관찰할 수 있다. 탱크 바닥 근처 ( $y=-0.36$  m)에서 기름도 물과 비슷한 침강속도를 보인다(Fig. 11d).

4-3. Residence time and oil separation efficiency

물과 기름의 체류시간은 분리장치 설계에서 매우 중요한 요소이다[7,26]. 물의 평균 체류시간( $t_{r,w}$ )은 대략적으로 다음과 같이 예측될 수 있다.

$$t_{r,w} = \frac{A_w L_{weir}}{Q_w} \tag{14}$$

이 식에서  $A_w$  ( $=0.0479$  m<sup>2</sup>)는 차단막 직전에서 물 액위에 대한 단면적이고,  $L_{weir}$  ( $=2.075$  m)는 차단막까지의 길이이다.  $Q_w$  ( $=0.0087$

m<sup>3</sup>/min)는 물의 유입 부피유속이다. 기름의 평균 체류시간은 대략적으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_{r,o} = \frac{A_o L_{weir} + A_{o,exit} L_{oil}}{Q_o} \tag{15}$$

위 식에서  $t_{r,o}$ 는 기름의 체류시간이고,  $A_o$  ( $=0.0855$  m<sup>2</sup>)는 차단막 직전에서 기름 액위에 대한 단면적이고,  $A_{o,exit}$  ( $=0.1334$  m<sup>2</sup>)는 차단막 이후의 기름상 단면적,  $L_{oil}$  ( $=0.585$  m)는 기름층만 있는 길이이다.  $Q_o$  ( $=0.0145$  m<sup>3</sup>/min)는 기름의 유입 부피유속이다. 제시된 모든 단면적값은 CFD 결과에서 얻은 것이다. 물의 체류시간은 약 11.4 분, 그리고 기름의 체류시간은 약 17.6 분이다. 기름의 체류시간은 분리장치 후반부를 거치면서 물보다 더 길다. CFD 결과로부터 좀 더 직접적으로 구할 수 있는 체류시간( $t_{r,CFD}$ )은 다음과 같다.

$$t_{r,CFD} = \frac{V_{CFD}}{Q} \tag{16}$$

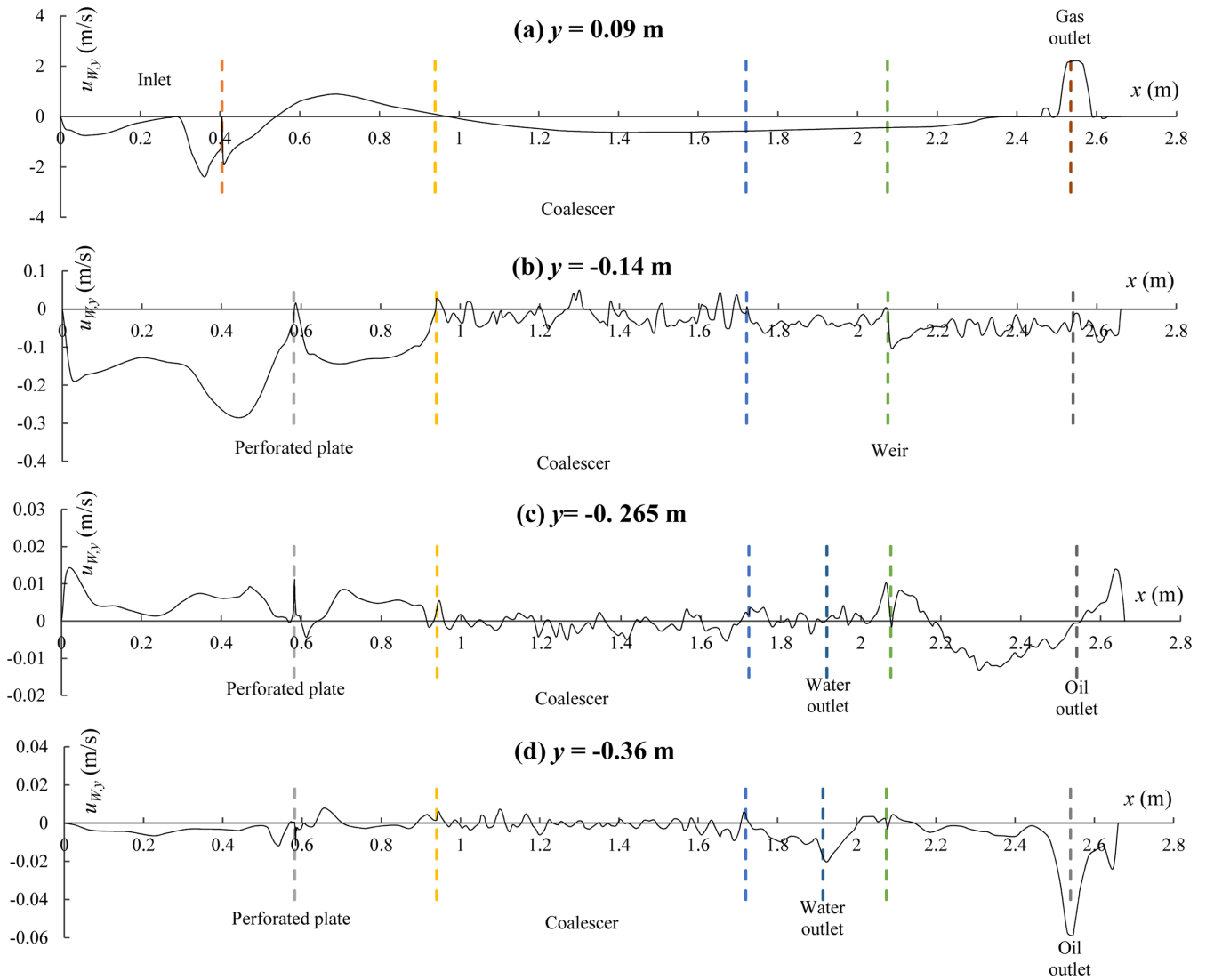


Fig. 11. Vertical oil velocity ( $u_{O,y}$ ) with respect to axial direction ( $x$ ) at  $P_H=6.3$  kPa, and  $P_O=5.1$  kPa.

이 식에서  $V_{CFD}$ 는 물 또는 기름의 액상 부피이며,  $Q$ 는 유입 부피 유속이다.  $V_{CFD}$ 는 CFD 모사 결과에서 정확하게 얻어진다. 물과 기름의 유입부피유속은 각각  $0.00435, 0.00725$   $m^3/min$ 이며, 분리장치 내 물과 기름의 부피는 각각  $0.06375, 0.11655$   $m^3$ 으로 계산되었다. 이들 값들은 대칭구조에서 실제유량과 부피의 절반이다. CFD 모사 결과에서 직접적으로 구한 평균 체류시간은 물과 기름에 대해

여 각각 14.7분과 16.1분이다. Eq. (15)에서 구한 대략적인 값보다 CFD 결과에서 직접 구한 물의 체류시간은 길고, 기름의 체류시간은 짧다.

Table 5는 공기, 물, 그리고 기름 출구에서 각각의 성분에 대한 질량분율(c), 분리성능(h), 실험결과, 그리고 실험결과와 모사결과와의 차이값을 보여준다. 기름 출구에서 채취한 시료에 대하여 기름

Table 5. Separation efficiency of outlet air, water, and oil at  $P_H=6.3$  kPa, and  $P_O=5.1$  kPa

		Mass fraction ( $\chi$ )	Separation efficiency ( $\eta$ , wt%)	Exp. Results (wt%)	Error (%) <sup>a</sup>
Outlet gas	water	$1.6 \times 10^{-5}$	99.99 (air)	-	-
	oil	$7.2 \times 10^{-6}$			
	air	0.9999			
Outlet water	water	0.9996	99.96 (water)	-	-
	oil	$4.5 \times 10^{-4}$			
	air	$8.8 \times 10^{-10}$			
Outlet oil	water	$1.5 \times 10^{-3}$	99.85 (oil)	99.96 (oil)	0.11
	oil	0.9985			
	air	$4.8 \times 10^{-9}$			

<sup>a</sup>Error =  $100 \times (\eta_{exp} - \eta_{CFD}) / \eta_{exp}$

의 질량 분율 만이 실험적으로 측정되었다. CFD 결과는 기액상 모두에서 매우 높은 분리성능을 보여준다. CFD 에서 얻은 기름층의 분리성능은 실험값 보다 약간 낮은 편이며, 실험값과 모사값의 차이는 0.11% 이다. 본 장치에서 액체 체류시간이 길고, 장치가 충분히 길기 때문에 유수 분리성능은 매우 높다.

## 5. 결 론

공기-물-기름 분리장치의 유수 분리성능을 예측하고, 액상 침강속도를 분석하기 위하여 3상 3차원 비정상상태 CFD 모델을 개발하였다. 공기-물-기름 분리장치는 기상의 미세 액적을 제거하는 집무기(demister), 유입되는 유수 혼합물의 흐름을 균일하게 하는 정류판(perforated plate), 그리고 액적 포집기(coalescer)를 포함한다. 비압축성 유체로 가정된 CFD 모델은 연속방정식과 항력, 양력, 다공성매체 저항력, 그리고 난류현상에 대한 standard  $k-\varepsilon$  모델을 포함하는 운동량 보존식으로 구성되었다. 집무기, 정류판, 그리고 포집기의 실제 미세 구조는 고려되지 않았고, 균일한 공극률을 갖는 다공성매체로 간주되었다.

CFD 모사를 통하여 물과 기름의 출구압에 따라 분리장치내 액위 변화를 조사하였다. 물과 기름의 출구압이 각각 6.3, 5.1 kPa에서 실험적으로 관찰된 액위(25 cm)에 도달하였다. 이러한 출구압에서 정상상태에 도달하였을 때 공기, 물, 그리고 기름의 부피 분율, 중력방향 침강속도, 체류시간, 그리고 유수 분리성능을 분석하였다. 물과 기름의 중력방향 침강속도는 분리장치내 실제 현상을 잘 설명하였다. 물과 기름의 체류시간은 각각 14.7, 16.1분, 분리성능은 각각 99.96, 99.85%로 예측되었다. 실험으로 측정된 기름층에 대한 분리성능은 99.96% 이고, CFD 모사값은 실험값과 매우 근접하였다. 유속이 느리고, 체류시간이 충분하여 분리성능은 높게 계산되었다.

본 연구에서 제시된 CFD 모델은 액적의 크기 분포를 표현하는 입자수지식(population balance equation)이 포함되지 않았고, 액적 포집기에서 일어나는 액적의 접근, 포집, 합체 등의 물리적 현상을 무시하였다. 이 CFD 모델은 비교적 단순한 모델이지만, 상업용 크기의 유수분리장치의 분리성능을 효과적으로 예측하기에 알맞은 방법으로 판단된다.

## Acknowledgements

This research was supported by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE), Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) through the Encouragement Program for The Industries of Economic Cooperation Region (경제협력권산업 육성사업, R0003996).

## Nomenclature

$A$	: cross-sectional area [ $m^2$ ]
$a_{ij}$	: interfacial area per unit volume between $i$ and $j$ phases [ $m^2/m^3$ ]
$a_s$	: specific surface area [ $m^2/m^3$ ]
$C_{1e}$	: constant of $k-\varepsilon$ model
$C_{2e}$	: constant of $k-\varepsilon$ model
$C_{3e}$	: constant of $k-\varepsilon$ model
$C_D$	: drag coefficient

$C_l$	: lift force coefficient
$C_r$	: inertial resistance factor
$C_m$	: turbulent viscosity coefficient
$d$	: diameter [mm or mm]
$d_b$	: bubble diameter [m]
$Eo$	: Eotvos number
$f$	: drag function
$\bar{F}$	: drag force [ $N/m^3$ ]
$\bar{F}_{lift}$	: lift force [ $N/m^3$ ]
$\bar{F}_R$	: porous resistance forces [ $N/m^3$ ]
$g$	: gravitational acceleration [ $m/s^2$ ]
$G_k$	: generation of $k$ [ $J/m^3/s$ ]
$G_b$	: generation of $k$ caused by buoyancy [ $J/m^3/s$ ]
$I_t$	: turbulence intensity [%]
$K$	: permeability [ $m^2$ ]
$K_c$	: Kozeny constant
$k$	: turbulence kinetic energy [ $J/kg$ or $m^2/s^2$ ]
$K_{ij}$	: momentum exchange coefficient between $i$ and $j$ phases [ $kg/m^3/s$ ]
$L$	: length [m]
$P$	: pressure [kPa]
$Q$	: volume flow rate [ $m^3/min$ ]
$Re$	: Reynolds number
$S$	: distance between two adjacent fibrous knits [mm]
$t$	: time [s or min]
$t_r$	: residence time [min]
$T$	: temperature [ $^{\circ}C$ ]
$\bar{u}$	: velocity [m/s]
$V$	: volume [ $m^3$ ]
$x$	: longitudinal direction [m]
$y$	: gravity direction [m]
$z$	: transverse direction [m]

## Greek symbols

$\alpha$	: volume fraction
$\chi$	: mass fraction
$\varepsilon$	: dissipation rate of $k$ [ $m^2/s^3$ ]
$\varepsilon_p$	: porosity of porous media
$\eta$	: separation efficiency
$\mu$	: viscosity [ $kg/m/s$ ]
$\mu_t$	: turbulent viscosity [ $kg/m/s$ ]
$\rho$	: density [ $kg/m^3$ ]
$\sigma$	: surface tension [N/m]
$\sigma_d$	: dispersion Prandtl number
$\sigma_k$	: turbulent Prandtl number of $k$
$\sigma_\varepsilon$	: turbulent Prandtl number of $\varepsilon$
$\tau$	: particulate relaxation time [s]
$\bar{\tau}$	: shear stress tensor [Pa]

## Subscripts

$G$	: gas phase
$m$	: mixture

*O* : oil phase  
*W* : water phase

## References

- Mohayjeji, M., Farsi, M., Rahimpour, M. R. and Shariati, A., "Modeling and Operability Analysis of Water Separation from Crude Oil in an Industrial Gravitational Coalescer," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, **60**, 76-82(2016).
- Li, J. and Gu, Y., "Coalescence of Oil-in-Water Emulsions in Fibrous and Granular Beds," *Sep. Purif. Technol.*, **42**(1), 1-13 (2005).
- Zolfaghari, R., Fakhru'l-Razi, A., Abdullah, L. C., Elnashaie, S. S. E. H. and Pendashteh, A., "Demulsification Techniques of Water-in-Oil and Oil-in-Water Emulsions in Petroleum Industry," *Sep. Purif. Technol.*, **170**, 377-407(2016).
- Lu, H., Yang, Q., Xu, X. and Wang, H.-L., "Effect of the Mixed Oleophilic Fibrous Coalescer Geometry and the Operating Conditions on Oily Wastewater Separation," *Chem. Eng. Technol.*, **39**(2), 255-262(2016).
- Mino, Y., Kagawa, Y., Matsuyama, H. and Ishigami, T., "Permeation of Oil-in-Water Emulsions through Coalescing Filter: Two-Dimensional Simulation Based on Phase-Field Model," *AIChE J.*, **62**(7), 2525-2532(2016).
- Xie, W., Li, R., Lu, X., Han, P. and Gu, S., "Acoustically Aided Coalescence of Water Droplets and Dehydration of Crude Oil Emulsion," *Korean J. Chem. Eng.*, **32**(4), 643-649(2015).
- Kharoua, N., Khezzar, L. and Saadawi, H., "CFD Modelling of a Horizontal Three-Phase Separator: A Population Balance Approach," *Amer. J. Fluid Dyn.*, **3**(4), 101-118(2013).
- ACS, "Liquid-Liquid Coalescer Design Manual," ACS Industries, Houston(2014).
- Bansal, S., von Arnim, V., Stegmaier, T. and Planck, H., "Effect of Fibrous Filter Properties on the Oil-in-Water-Emulsion Separation and Filtration Performance," *J. Hazard. Mater.*, **190**(1-3), 45-50(2011).
- Lu, H., Yang, Q., Liu, S., Xie, L.-S. and Wang, H.-L., "Effect of Fibrous Coalescer Redispersion on W/O Emulsion Separation," *Sep. Purif. Technol.*, **159**, 50-56(2016).
- Shin, C. and Chase, G. G., "Water-in-Oil Coalescence in Micro-Nanofiber Composite Filters," *AIChE J.*, **50**(2), 343-350(2004).
- Cai, X., Chen, J., Liu, M., Ji, Y. and An, S., "Numerical Studies on Dynamic Characteristics of Oil-Water Separation in Loop Flotation Column Using a Population Balance Model," *Sep. Purif. Technol.*, **176**, 134-144(2017).
- Lim, Y.-I., "State-of-Arts in Multiscale Simulation for Process Development," *Korean Chem. Eng. Res.*, **51**(1), 10-24(2013).
- Laleh, A. P., Svrcek, W. Y. and Monnery, W. D., "Design and CFD Studies of Multiphase Separators-a Review," *Can. J. Chem. Eng.*, **90**(6), 1547-1561(2012).
- Kim, B. J., Kim, S. Y., Roh, C. S. and Lee, Y. H., "A Study on the Flow Characteristics of Oil-Water Separator for Marine Ship CFD," *Korean Fluid Mach. Assoc.: J. Fluid Mach.*, **19**(4), 48-53(2016).
- Al-Yaari, M. A. and Abu-Sharkh, B. F., "CFD Simulation for Stratified Oil-Water Two-Phase Flow in a Horizontal Pipe," *Asian Trans. Eng.*, **1**(5), 68-75(2011).
- Kharoua, L., Khezzar, L. and Saadawi, H. N. H., "Application of CFD to Debottleneck Production Separators in a Major Oil Field in the Middle East," *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, October 8-10, 2012, San Antonio, Texas, USA, pp. SPE-158201(2012).
- Kharoua, N., Khezzar, L. and Saadawi, H. N. H., "Using CFD to Model the Performance of Retrofit Production Separators in Abu Dhabi," *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, October 8-10, 2012, San Antonio, Texas, USA, pp. SPE-161521(2012).
- Orciuch, W., Makowski, ł., Moskal, A. and Gradoń, L., "Evolution of the Droplet Size Distribution During a Two-Phase Flow through a Porous Media: Population Balance Studies," *Chem. Eng. Sci.*, **68**(1), 227-235(2012).
- Tamayol, A. and Bahrami, M., "Transverse Permeability of Fibrous Porous Media," *Proceedings of the 3rd International Conference on Porous Media and Its Applications in Science and Engineering (ICPM3)*, Engineering Conferences International, June 20-25, 2010, Montecatini, Italy, pp. 1-8(2010).
- Weber, L. J., Cherian, M. P., Allen, M. E. and Muste, M., *Head-loss Characteristics for Perforated Plates and Flat Bar Screens*, 1st ed., Iowa Institute of Hydraulic Engineering, The University of Iowa, Iowa(2000).
- Tomiyaama, A., Tamai, H., Zun, I. and Hosokawa, S., "Transverse Migration of Single Bubbles in Simple Shear Flows," *Chem. Eng. Sci.*, **57**(11), 1849-1858(2002).
- Frank, T., Shi, J. and Burns, A. D., "Validation of Eulerian Multiphase Flow Models for Nuclear Safety Applications," *Third International Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation*, Assembly of World Conferences on Experimental Heat Transfer Fluid Mechanics and Thermodynamics, Sept. 22-24, 2004, Pisa, Italy(2004).
- Wang, L., Wang, L.-P., Guo, Z. and Mi, J., "Volume-Averaged Macroscopic Equation for Fluid Flow in Moving Porous Media," *Int. J. Heat Mass Transfer*, **82**, 357-368(2015).
- Vilagines, R. D. and Akhras, A. R., "Three-Phase Flows Simulation for Improving Design of Gravity Separation Vessels," *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, September 19-22, 2010, Florence, Italy, pp. SPE-134090 (2010).
- Xiuli Wang and Economides, M., *Advanced Natural Gas Engineering*, 1st ed., Gulf Publishing Co., Houston(2009).