

위어 형상과 오일 점도 변화가 유수분리기 성능에 미치는 영향

양현준* · 강현수** · 김윤제***†

The Effect on the Performance of FWKO by Changing the Configuration of Weir and the Viscosity of Oil

Hyeon-Jun Yang*, Hyun-Su Kang**, Youn-Jea Kim***†

Key Words : Multiphase flow(다상 유동), Transient analysis(과도 해석), FWKO(3상 유수분리기), Oil sand(오일샌드), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

ABSTRACT

Oil sands are usually extracted by SAGD(Steam Assisted Gravity Drainage) process and exist as emulsion that consists of water and oil. In the early process, emulsion is divided into water and oil through FWKO(Free Water Knock Out). Many numerical studies have been conducted to increase the separation efficiency of FWKO. And the viscosity of the bitumen varies depending on the location of the oil well. In this study, the separation efficiency of FWKO was analyzed by changing the radius of upper part of weir and the viscosity of oil. The flow rate of oil and water through inlet was set to 10 BPD(barrel per day) and 18 BPD. VOF(volume of fluid) was set as multiphase flow model. The results showed that the separation efficiency of FWKO having weir plate with curved surface consistent to the flow direction increased 10.9% for radius of curvature with 30 mm and 11.59% for radius of curvature with 50 mm compared to the reference model. In other case, the separation efficiency of FWKO having weir plate opposite to the flow direction decreased 1.9% for radius of curvature with 30 mm compared to the reference model. For the case of changing the viscosity of oil, separation efficiency of FWKO decreased 10.52% for 1000 cP and decreased 41.51% for 10000 cP compared to the reference model that have viscosity of 100 cP.

1. 서론

석유는 시추를 통해 채굴하는 전통 자원과 전통 자원과 다른 방식으로 채굴하는 비전통 자원으로 나뉜다. 비전통 자원의 대표적인 예로는 오일샌드(oil sand), 셰일오일(shale oil), 셰일가스(shale gas), 석탄층메탄(coalbed methane) 등이 있다. 비전통 자원은 석유, 가스 생산에서 오일은 9%, 가스는 27% 이상을 차지하고 있으며 비중은 커지고 있다⁽¹⁾.

오일샌드는 비전통 자원의 하나로 비투멘(bitumen)과 물, 점토나 모래 등이 섞인 혼합물 형태로서 지하에 존재한다. 지하에 매장되어 있는 오일샌드의 경우 SAGD(steam assisted gravity drainage) 공정을 통해 오일로 생산된다.

비투멘은 지하에 10000 cP(10 kg/m·s) 이상의 고점성 상태로 존재하여 유동성이 낮아 추출이 매우 어렵다. 따라서 고온의 증기(steam)를 주입하여 비투멘을 추출한다⁽²⁾.

고온의 증기를 주입하면 비투멘의 온도가 올라가며 점도는 낮아진다. 점도가 낮아진 비투멘은 광구의 하단으로 모임 이 이러한 점도가 낮아진 비투멘을 유정(oil well)의 밑부분에 설치된 파이프를 통해 추출된다.

추출된 비투멘은 SAGD 초기공정에서 3상 유수분리기(FWKO, free water knock out)를 통해 물과 오일로 분리된다. 물과 오일간의 밀도 차이로 분리되며, 수평형(horizontal type)과 수직형(vertical type)이 있다. 수직형의 경우 모래와 같은 고체 입자의 분리에 이점이 있으며, 수평형의 경우

* 성균관대학교 대학원 기계공학과(Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

** 포항산업과학연구원(RIST)

*** 성균관대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

† 교신저자, E-mail : yjkim@skku.edu

2022 한국유체기계학회 동계학술대회 발표 논문, 2022년 11월 30일~12월 2일, 제주 신화월당

The KFSM Journal of Fluid Machinery: Vol. 27, No. 1, February 2024, pp.110~115(Received 05 Nov. 2022; revised 05 Sep. 2023; accepted for publication 10 Oct. 2023)

오일 액적(droplet)이 유수분리기 내부 유동과 반대되지 않아 분리가 쉽다는 장점이 있다.

유수분리기에서 물과 오일을 분리하는 이유로는 파이프라인에서의 부하 방지와 유수분리기 이후 공정에서의 설비 소형화를 통한 비용 절감, 가열 비용 절감 등이 있다.

유수분리기의 성능 향상을 위한 많은 연구들이 진행되어왔다. 그러나 캐나다의 경우 겨울에는 기온이 매우 낮은 극한지라는 점에서 극한지 환경 조건을 고려하였을 때 실험적 연구보다는 주로 수치해석적인 연구가 수행되어왔다. Lu 등⁽³⁾은 유수분리기의 내부 배플(baffle)이 분리효율에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. Kang 등⁽⁴⁾은 배플의 배치 간격에 따른 유수분리기의 성능에 대하여 연구하였으며, Kwon 등⁽⁵⁾은 유수분리기의 방해판 개수에 따른 성능과 가동을 위한 최적의 watercut에 대하여 실험적으로 연구하였다. Kang 등⁽⁶⁾은 유수분리기의 입구에 베인 형상을 부여하여 분리효율에 대하여 연구하였으며, Jung 등⁽⁷⁾은 유수분리기의 위어 각도, 체류시간, 물과 오일의 비(water-to-oil ratio)를 변수로 설정하여 다양한 조건에서 유수분리기의 성능에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 위어 상단부 형상의 곡면을 조절하여 유수분리기의 성능에 대하여 수치해석적으로 연구하였으며, 또한 오일샌드를 채굴하는 광구마다 점도 차이가 있다는 점을 고려하여 점도에 따른 유수분리기의 성능에 대하여 수치해석적으로 연구를 진행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 Stokes 법칙

비투멘과 물이 혼합된 에멀전은 유수분리기 내부에서 흡착(coalescence)과 응집(flocculation)을 통해 액적이 커지며 비중이 작은 오일은 위로 물은 아래로 가라 앉으며 분리가 된다.

오일의 부유 속도, 물의 침강 속도는 다음과 같은 Stokes 법칙⁽⁸⁾을 이용하여 계산할 수 있다.

$$V = \frac{(\rho_p - \rho_g)d^2g}{18\eta} \quad (1)$$

여기서 ρ_p 는 액적의 밀도, d 는 액적의 지름, ρ_g 는 연속상의 밀도, g 는 중력 가속도, 그리고 η 는 연속상의 점도를 각

Table 1 Droplet velocity of working fluid

Viscosity of oil (kg/m · s)	Water droplet velocity (m/s)	Oil droplet velocity (m/s)
0.1	$1.09 \cdot 10^{-5}$	$1.087 \cdot 10^{-3}$
1	$1.09 \cdot 10^{-6}$	$1.087 \cdot 10^{-3}$
10	$1.09 \cdot 10^{-7}$	$1.087 \cdot 10^{-3}$

각 나타낸다.

실험에서 설정한 오일의 점도(100 cP, 1000 cP, 10000 cP)에 따른 오일 액적, 물 액적의 속도는 Table 1에 나타났다.

2.2 체류시간

유수분리기에서 분리효율을 결정짓는 중요한 요소 중 하나는 체류시간(residence time)이다. 이론적인 체류시간의 정의는 작동유체가 압력용기 내에서 차지하는 부피를 유입 유량으로 나눈 값이며 다음 식⁽⁹⁾과 같으며 계산된 체류시간(t)은 824 sec이다.

$$\bar{t} = \frac{\int_0^\infty Ct dt}{\int_0^\infty C_0 dt} = \frac{V}{q} \quad (2)$$

2.3 유수분리기 형상 및 물성조건

Stokes 법칙을 이용하여 오일 액적의 부유 속도를 구한 후 체류시간을 계산하여 지름 0.3 m, 길이 1.2 m의 압력용기 모델을 설계하였다(Fig. 1 참조). 또한, 위어의 높이는 0.107 m로 설정하였다.

본 연구에서는 위어의 형상 변경을 통해 유수분리기의 성능을 관측하였으며, Fig. 2에 도시한 바와 같이 위어 상단부의 곡률을 조절하였다. 유동 방향으로 50 mm, 30 mm, 유동 반대 방향으로 30 mm의 곡률 반지름을 갖는 총 4가지 케이스로 나누어 해석을 진행하였다(Fig. 2 참조).

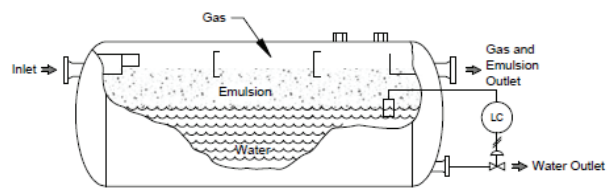


Fig. 1 Schematic of FWKO⁽¹⁰⁾

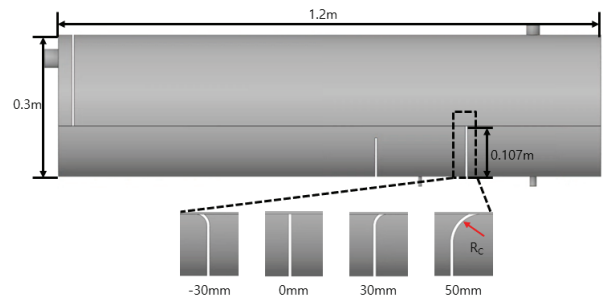


Fig. 2 Schematic of weir configuration in FWKO

Table 2 Properties of working fluid

Material	Density (kg/m ³)	Viscosity (kg/m · s)
Gas	1.225	1.846 · 10 ⁻⁵
Oil	930	0.1
Water	980	0.001003

Table 3 Boundary conditions

Variables	Value
Inlet gas flow rate (kg/s)	0.00033
Inlet oil flow rate (kg/s)	0.017104
Inlet water flow rate (kg/s)	0.0324421
Pressure (bar)	10

Table 4 Experiment cases

Case	Viscosity (kg/m · s)	Radius of curvature (mm)
1	0.1 (100 cP)	-30
2	0.1 (100 cP)	30
3	0.1 (100 cP)	50
4	0.1 (100 cP)	0
5	1 (1000 cP)	0
6	10 (10000 cP)	0

해석에서 사용한 작동유체의 물성치는 Table 2에 나타냈다. 3상 유수분리기의 가스는 공기로 설정하였으며, 오일은 희석된 비투멘(diluent bitumen)의 130 °C에서의 물성치인 밀도 930 kg/m³, 점도 100 cP로 설정하였다. 유입되는 오일의 유량은 10 BPD, 물의 유량은 18 BPD로 설정하였다.

점도 영향을 고찰하기 위해서는 Table 4의 case 4, 5, 6 총 3가지 케이스에 대하여 해석을 진행하였다.

3. 수치해석

본 연구에서는 ANSYS사의 상용 코드 Fluent Ver 21.1을 사용하였다. 수치해석에서 다상 유동 모델로 VOF(volume of fluid)모델을 사용하였다. VOF 모델은 표면 추적 기법이며, 하나의 운동량 방정식을 각 상에 적용하며, 격자에서는 각 상의 부피만을 고려하여 계산을 한다. VOF모델의 지배 방정식은 다음과 같다.

운동량 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j + F_j F_{gravity} = m_p \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \quad (3)$$

체적분을 보존 방정식:

$$\frac{\partial \varepsilon_k}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon_k}{\partial t} = S_{\varepsilon k} \quad (4)$$

해석에서 표면장력을 고려하는 경우 표면장력의 영향은 운동량 방정식에 추가적인 항을 고려하여 아래의 식으로 표현한다.

$$\vec{F}_{pq} = \frac{\sigma(\alpha_p \rho_p k_p \nabla \alpha_p)}{\frac{1}{2}(\rho_p + \rho_q)} \quad (5)$$

$$k = \nabla \left(\frac{\nabla \alpha}{\|\nabla \alpha\|} \right) \quad (6)$$

난류 모델로 realizable k-ε 모델을 사용하였다. realizable k-ε 모델은 소산(dissipation)에 대한 식과 eddy viscosity에 대한 새로운 식을 적용하여 기존의 k-ε 모델보다 높은 정확도를 가진다는 장점이 있으며 다음 식으로 표현된다⁽¹⁰⁾.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}} \quad (7)$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ji} + \widetilde{\Omega}_{ij} \widetilde{\Omega}_{ji}} \quad (8)$$

$$\widetilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (9)$$

$$\Omega_{ij} = \widetilde{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (10)$$

$$A_0 = 4.04, A_s = \sqrt{6} \cos \Phi \quad (11)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (12)$$

해석은 과도상태(transient)로 진행하였으며, 계산시간단 계(time step)는 0.001, 반복횟수(iteration)는 82400, 압력은 10 bar, 수렴조건은 10⁻³로 설정하였다. 경계조건은 Table 3에 나타냈다.

유수분리기의 성능을 평가하는 인자로는 분리효율(η)로 설정하였는데, 오일 출구에서의 오일 유량(Q_o)과 혼합물 유

량($\dot{Q}_m = (\dot{Q}_w + \dot{Q}_o)$)의 비로 정의하였다.

$$\eta = \frac{\text{출구 오일 유량}(\dot{Q}_o)}{\text{출구 혼합물 유량}(\dot{Q}_m)} \quad (13)$$

수치해석 연구의 정확성을 위해 격자의존시험(grid dependency test)을 수행하였고, 약 500000개로 설정하여 수치해석 실험을 진행하였다(Fig. 3 참조).

4. 결과 및 고찰

4.1 위어 형상 영향

수치해석을 통해 오일 출구에서의 오일 유량과 처리수량에 대한 결과를 얻었으며 Table 5에 나타냈다.

오일 유량과 처리수량을 통해 유수분리기의 분리효율을 계산하였으며, Table 6에 나타냈다.

기존 모델의 분리효율은 80.99%이며, 유동 방향으로 곡면을 준 경우 30mm의 경우 10.9% 증가한 91.89%, 50 mm의 경우 11.59% 증가한 92.58%의 분리효율을 보였다. 유동 반대 방향으로 곡면을 준 경우 30 mm에서 1.9% 감소한 79.09%의 분리효율을 보였다. 유동 방향의 경우 곡면의 곡률 반지름이 증가할수록 분리효율이 증가하는 것을 보였으며, 유동 반대 방향의 경우 분리효율이 감소하였다.

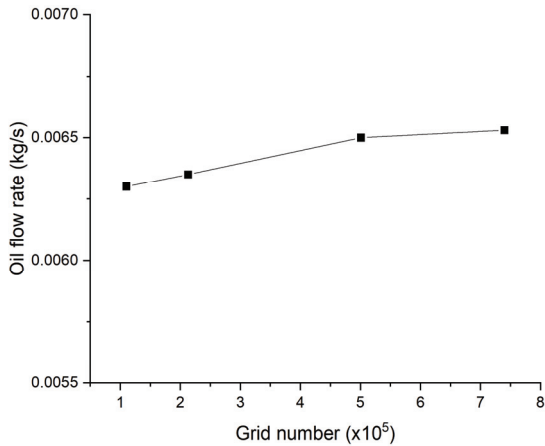


Fig. 3 Grid dependency test

Table 5 Flow rate at oil outlet with oil viscosity of 100 cP

Case	Radius of curvature (mm)	Water (kg/s)	Oil (kg/s)
1	-30	0.0022	0.0079
2	30	0.0008	0.0086
3	50	0.0007	0.0090
4	0	0.0023	0.0093

Table 6 Separation efficiency, changing weir configuration

Case	Radius of curvature (mm)	Separation efficiency (%)
1	-30	79.09
2	30	91.89
3	50	92.58
4	0	80.99

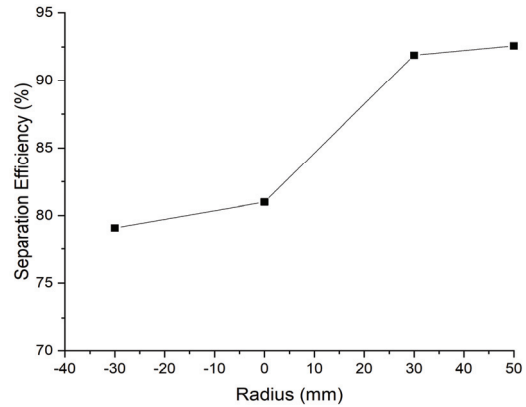


Fig. 4 Weir radius vs. separation efficiency graph

4.2 오일 점도 변경 영향

오일의 점도는 100 cP, 1000 cP, 10000 cP로 조절하였으며, 출구에서 오일 유량은 Table 7에 나타내었다. 오일 유량은 100 cP에서 0.0093 kg/s, 1000 cP에서 0.0075 kg/s, 10000 cP에서 0.0022 kg/s의 유량을 가졌다. 10000 cP의 높은 점성을 가지고 있는 오일 케이스의 경우 유동성이 낮아 제대로 흐르지 않아 위어 부근에서 정체되어 있는 것을 확인하였다(Fig. 7 참조).

분리효율의 경우 높은 점성을 가진 오일의 경우 위어 부근에서 정체되며 오일 출구 측으로 흐르는 물의 흐름을 방해하여 오일 유량과 혼합물의 유량의 비를 사용할 경우 분리효율은 높게 측정되며, 생산성 측면에서 유량까지 고려할 경우 적절하지 않아 식 (13)을 새로운 분리효율(η^*)인 다음 식으로 대체하였다.

$$\eta^* = \frac{\text{출구 오일 유량}(\dot{Q}_{o,out})}{\text{유입 오일 유량}(\dot{Q}_{o,in})} \quad (14)$$

계산한 분리효율은 Table 8에 나타냈다. 100 cP는 54.37%, 1000 cP는 43.85%, 10000 cP는 12.86%를 기록하였다. 100 cP에서 분리효율과 오일 유량이 가장 높은 수치를 기록하였다. 점도가 낮을수록 유동성이 확보되어 오일이 위어 부근에서 정체되지 않고 흐르는 것을 확인할 수 있었다. 점도가 높아질수록 위어 유동성이 떨어져 위어 부근에서 정체되어 유량이 적어지며 이에 따라 분리효율 또한 감소하였다.

Table 7 Flow rate of oil

Case	Viscosity (kg/m · s)	Oil flow rate (kg/s)
4	0.1 (100 cP)	0.0093
5	1 (1000 cP)	0.0075
6	10 (10000 cP)	0.0022

Table 8 Separation efficiency, changing viscosity

Case	Viscosity (kg/m · s)	Separation efficiency (%)
4	0.1 (100 cP)	54.37
5	1 (1000 cP)	43.85
6	10 (10000 cP)	12.86

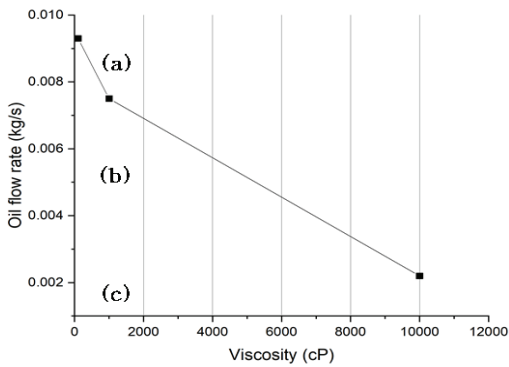


Fig. 6 Viscosity vs. oil flow rate graph

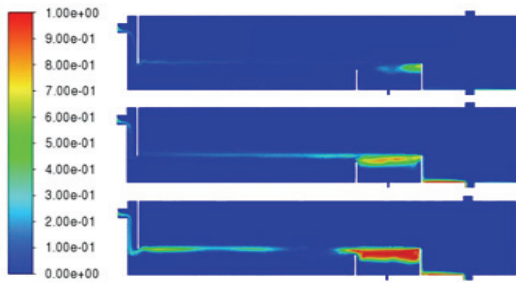


Fig. 7 Contour of volume fraction of oil (a) 100 cP, (b) 1000 cP, (c) 10000 cP

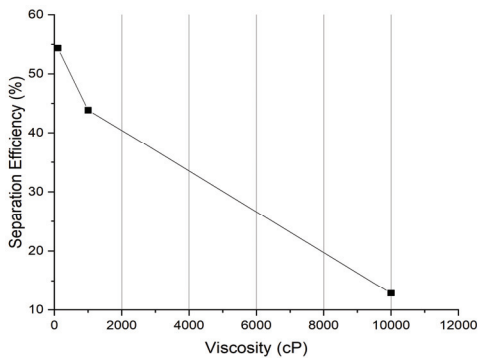


Fig. 8 Viscosity vs. separation efficiency of oil graph

5. 결론

본 연구에서는 유수분리기의 위어 상단부 형상과 오일의 점도 변화에 따른 분리효율에 대해 수치해석적으로 분석하였다. 위어 상단에 곡면 형상을 부여하여, 오일 출구에서 오일과 혼합물의 비, 즉 분리효율을 통해 성능을 평가하였다. 오일의 점도 변화에 따른 유수분리기의 경우 분리효율과 오일 출구에서의 오일 유량을 통해 성능을 평가하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 유동 방향으로 곡면 형상을 준 경우 분리효율은 오일 출구에서 오일 유량과 혼합물 유량의 비로 계산하였으며, 곡률반지름 30 mm, 50 mm에서 각각 10.9% 증가한 91.89%, 11.59% 증가한 92.58%로 유동 방향으로 곡률 반지름이 증가할수록 분리효율이 증가하는 것을 확인하였다. 유동 반대 방향의 경우 반지름 30 mm에서 분리효율이 1.9% 감소한 79.09%를 기록하여 분리효율이 유동 반대 방향에서는 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 유수분리기 위어 상단부에 곡률 반지름을 유동 방향으로 주어 유수분리기의 성능을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 오일의 점도를 100 cP, 1000 cP, 10000 cP로 총 3가지 케이스로 나누어 수치해석연구를 진행하였다. 분리효율은 유출 유량과 유입 유량의 비로 계산하였으며, 100 cP는 54.37%, 1000 cP는 43.85%, 10000 cP는 12.86%로 측정되었다. 오일 유량의 경우 100 cP는 0.0093 kg/s, 1000 cP는 0.0075 kg/s, 10000 cP는 0.0022 kg/s로 측정되었다. 점도가 높을수록 유동성이 떨어져 위어 부근에서 오일이 흐르지 않으며 정체되어 생산되는 오일 유량이 적어지는 것을 확인하였다. 따라서 유수분리기의 생산 유량 측면에서 성능 향상을 위해 오일의 유동성 확보가 중요한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었음. (No. RS-2022-00142936)

References

- (1) Grushevenko, E., Grushevenko, D., 2012, "Unconventional oil potential tends to change the world oil market," Energy science and Technology, Vol. 4, No. 1, pp. 68-74.
- (2) Giacchetta, G., Leporini, M., & Marchetti, B., 2015, "Economic and environmental analysis of a Steam

- Assisted Gravity Drainage (SAGD) facility for oil recovery from Canadian oil sands,” *Applied Energy*, Vol. 142, pp. 1–9.
- (3) Lu, Y., Lee, J. M., Phelps, D., & Chase, R., 2007, “Effect of internal baffles on volumetric utilization of an FWKO—A CFD evaluation,” *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, OnePetro*.
- (4) Kang, J. Y., Hong, C. K., Kim, Y. J., 2016, “A Study on the FWKO Performance with Various Configurations of Porous Baffle,” *Proceedings of the KFMA Annual Meeting*, pp. 219–220.
- (5) Kwon, S. C., Park, K. Y., Yoon, S. M., Kim, J. Y., Park, C. Y., Bae, W. S., & Rhee Y. W., 2011 “Characteristics of water separation for oil–water mixture in a FWKO vessel,” *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 49, No. 6, pp. 823–828.
- (6) Kang, J. Y., Lee, J. G., & Kim, Y. J., 2016, “Effects of the Change of Inlet Vane Configuration on the Separation Efficiency of FWKO,” *대한기계학회 춘계학술대회*, pp. 605–610.
- (7) Jung, K. J., Kim, Y. J., 2020, “Effect of Weir Configurations on the Performance of Oil–Water Separator,” *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 13, No. 4, pp. 759–766.
- (8) Hinds, W. C., & Zhu, Y., 2022, *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*, John Wiley & Sons.
- (9) Zemel, B., Bowman, R. W., 1978, “Residence time distribution in gravity oil–water separations,” *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 30, No. 02, pp. 275–282.
- (10) Stewart, M., Arnold, K., 2008, “Eulsions and Oil Treating Equipment Selection, Sizing and Troubleshooting,” Elsevier, p. 2.
- (11) ANSYS Inc, “Fluent User Guide and Fluent Theory Guide, version 15.0,” 2013.