

In-line형 심해 유수분리기의 분리 효율에 관한 연구

A Study on the Separation Efficiency of In-line Type Subsea Oil-water Separator

김현지¹, 김귀남², 김영주³, 우남섭⁴, 허선철^{5*}

Hyun-Ji Kim¹, Gwi-Nam Kim², Young-Ju Kim³, Nam-Sub Woo⁴, Sun-Chul Huh^{5*}

〈Abstract〉

The implementation of subsea separation and liquid boosting is becoming a common development scheme for the exploration of deep water fields. Subsea separation is an attractive and economic solution to develop deep offshore fields producing fluid without hydrate or wax. A subsea separator can avoid or simplifying costly surface platforms of floating vessels, as well as being an efficient tool to enhance hydrocarbon production. Subsea separation system should be reliable to ensure successful operation in a wide range of 3-phase flow regime. In this study, multiphase flow characteristics inside in-line type subsea separation system are investigated for the design of subsea separation system.

Keywords : Oil-water Separator, Finite Element Analysis, Separation Efficiency

1 김현지, 순천제일대학교 제철산업과, 교수
E-mail: hjkim@suncheon.ac.kr
2 김귀남, 순천제일대학교 기계자동차과, 교수
E-mail: gnkim@suncheon.ac.kr
3 김영주, 한국지질자원연구원 자원개발플랜트연구실,
책임연구원 E-mail: kyjp7272@kigam.re.kr
4 우남섭, 한국지질자원연구원 자원개발플랜트연구실,
책임연구원 E-mail: nswoo@kigam.re.kr
5* 허선철, 경상대학교 에너지기계공학과, 교수
E-mail: schuh@gnu.ac.kr

1 Dept. of Steel Industry, Suncheon Jeil College
2 Dept. of Mechanical and Automotive Engineering,
Suncheon Jeil College
3 KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral
Resources)
4 KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral
Resources)
5* Dept. of Energy Mechanical Engineering,
Gyeongsang National University

1. 서론

최근 해양플랜트 산업에서는 해상에서 운용되던 여러 생산 설비 및 기자재들의 해저 이동이 증가하는 추세이다.[1-3] 자원 생산 프로세스를 해저로 이동시키면 투자비용의 절감, 화학물질 주입의 필요성 감소 및 작업자의 위험 감소 등 여러 가지 장점이 있다. 해저로 이동 설치되는 기자재 중에는 해저 세퍼레이터를 예로 들 수 있다.[4]

세퍼레이터는 다양한 유체 또는 물질이 섞여있을 때 이를 물리적 화학적 방법으로 분리하는 장치이다. 특히 해저 세퍼레이터는 심해에서 추출된 여러 원유에서 기타 불순물들을 분리하는데 활용도가 높으며 해저 유·가스전 개발을 위해 사용된다.[5,6]

해저 세퍼레이터는 중력에 의해 유체를 분리하는 중력식(gravity type)과 유체가 지나는 관 내부에 회전 유도장치를 설치하여 원심력에 의해 유체를 분리하는 관 일체형(In-line type)으로 나뉜다. 중력식 세퍼레이터의 경우 해저면에 설치가 힘들고 심해로 갈수록 개발비용 및 장치 제작비용이 기하급수적으로 증가한다. 그러나 Fig. 1과 같은 관 일체형 세퍼레이터는 비교적 설치가 용이하고 수압에 의한 영향이 적어 활용도가 높다. 따라서 몇 년 전부터 관 일체형 세퍼레이터에 관한 연구가 증가하고 있다.[7,8]

Mika[9]는 하이드레이트가 감소되는 다상유동 순환시스템을 사용하는 세퍼레이터의 연구 및 설계하였고, Bymaster[10] 등은 고압 세퍼레이터 테스트를 통해 성능 추이 및 결과를 제시하였다. Roberto[11] 등은 다상유체 혼합율이 높아질수록 세퍼레이터의 분리 기술의 한계가 커지며 처리비용이 많이 든다고 하였다. 또한, Sagatun[12] 등은 다상유동 시험장비를 이용하여 실험을 진행하고, 그 결과로 관 일체형 세퍼레이터의 개념설계

를 제시하였다. 그러나 관 일체형 액-액 세퍼레이터를 해석적 방법으로 접근한 선행연구는 많지 않은 실정이다.

이에 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 해저 유정분리 시스템에 사용되는 관 일체형 해저 세퍼레이터의 선회유동장치 (ISE; Internal Swirl Element) 형상 및 세퍼레이터를 설계 후, 다상 유체의 혼합비에 따른 분리효율에 관한 연구를 진행하였다. FLUENT를 이용한 유한요소해석을 통해 다상 유체의 흐름 및 분리특성에 관해 연구하고, 결과를 토대로 해저 유정분리 시스템 개발에 활용할 계획이다.

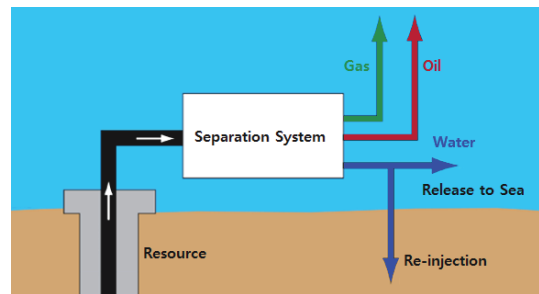


Fig. 1 Diagram of in-line type subsea separator

2. 이론적 배경

밀도가 높은 다상유체의 유동특성을 파악하기 위해 연속방정식과 운동량 방정식, 에너지방정식을 이용하여 지배방정식으로 사용하였다.

2.1 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) \quad (1)$$

α_q 및 \vec{v}_q 는 체적 분율 및 위상 q의 속도이며, m_{pq} 는 p^{th} 에서 q^{th} 까지의 질량 수송을 의미한다.

2.2 운동량방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(a_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (a_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = & -a_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + a_q + a_q \rho_q \vec{g} \\ & + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) \\ & + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wt,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q}) \end{aligned} \quad (2)$$

$\bar{\tau}_q$ 는 q^{th} 의 응력-변형 텐서이며, 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\tau}_q = a_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + a_q (\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q) \nabla \cdot \vec{v}_q \bar{I} \quad (3)$$

μ_q 및 λ_q 는 위상 q의 전단 및 점성이고, \bar{I} 는 단위 텐서이다.

2.3 에너지방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(a_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (a_q \rho_q \vec{u}_q h_q) = & a_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \bar{\tau}_q : \nabla \vec{u}_q - \nabla \cdot \vec{q}_q \\ & + S_q + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}) \end{aligned} \quad (4)$$

h_q 는 q^{th} 의 특정 엔탈피이고 \vec{q}_q 는 열유속을 나타낸다.

3. 수치해석

3.1 모델링

Fig. 2는 수치 해석에 사용된 세퍼레이터 모델링이다. 해석에 사용된 세퍼레이터의 배관 직경은 10cm이며 총 길이는 2m이다. 세퍼레이터 내부의 ISE는 네덜란드 ASCOM사[13]의 ISE형상을 벤치마킹 하여 Nose, Tail 및 9개의 Vane으로 구성하고, 배관 고정형으로 형상을 설계하고, 유체특성에 맞게 수정하였다.

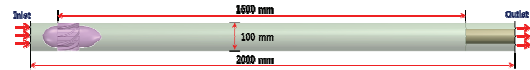


Fig. 2 Sketch of in-line type subsea separator

Fig. 3은 ISE 모델의 측면 이미지이다. ISE는 선회유동을 발생시키기 위하여 총 9개의 곡선형 날개 깃(Vane)과 Nose 및 Tail로 구성하였다. 유동 흐름을 기준으로 입구방향의 반구형 형상을 Nose, 출구방향의 꼬깔 형태의 형상을 Tail이라 한다. 날개깃의 직경은 10cm로 세퍼레이터 내부에 고정되도록 설계하였다. 또한 Nose, Vane, Tail은 각각 5:10:8 비율로 설계하였다.

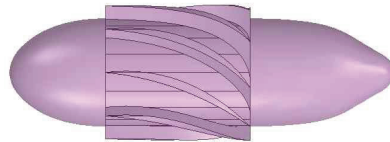


Fig. 3 ISE modeling of in-line type subsea separator

격자는 약 160만개의 Element와 약 410만 개의 Node로 구성하였다. 또한 ISE를 통과하는 구

간은 Skewness에 의한 발산을 방지하기 위해 Tetra mesh로, 그 외 유체가 통과하는 구간은 Hexa mesh로 모델 형상의 특성을 고려하여 설정하였다.

Fig. 4는 격자의 품질을 나타내는 그래프이며, X축은 품질, Y축은 격자 개수를 나타낸다. 품질이 1에 가까울수록 수렴도가 좋으나 해석시간의 효율을 고려하여 평균 약 0.83 범위에 들도록 구성하였다.

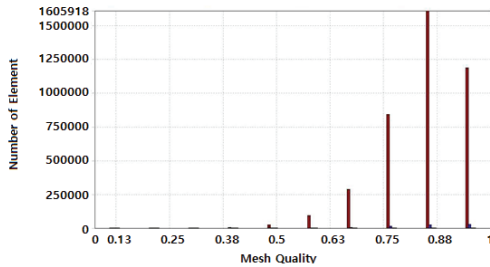


Fig. 4 Mesh quality graph of subsea separator

3.2 난류모델

난류모델은 점성계수의 취급에 따라 여러 가지로 나뉘지며 일반적으로 $k-\epsilon$ 모델이 사용된다. 하지만 세퍼레이터 내부는 고 Reynolds 수를 갖는 난류 유동으로 강한 유선 곡률과 비등방성을 가지기 때문에 $k-\epsilon$ 모델을 사용하는데 적합하지 않다.

따라서 강한 선회 유동이 작용하는 세퍼레이터 내부 수치 모사에 적합한 Reynolds stress model (RSM)을 적용하였다. 또한, 회전하는 와류 (Swirling) 유체 흐름에서는 Quadratic Pressure-strain relation을 가지는 RSM 모델이 더 적합하여 RSM-Quadratic Viscosity 모델을 사용하였다.

3.3 경계조건

입구에서 유입된 혼합유체는 Vane을 통과하면서 선회유동을 일으키며 원심력에 의해 유체별로 분리된다. CFD 해석을 위해 다상 유체에 적합한 Eulerian 모델을 적용하였고 원유(Oil)를 연속상 (continuous phase), 물(water)을 분산상 (dispersed phase)으로 설정하였다. 해석에 사용된 Solver는 상용 CFD 코드인 ANSYS FLUENT 2019 R2를 사용하였다. 또한 혼합유체의 혼합비에 따라 4 Case를 설정, 각 혼합비는 Table 1에 정리하였다. 그 외 입구유속은 7 m/s, 출구 조건은 대기압으로 동일하게 적용하였다. 또한 수치해석에 적용한 작동유체 중 오일의 물성치는 밀도 830kg/m³ 점도 0.00332 kg/ms, 물은 일반 물의 물성치를 적용하고 Table 2로 나타내었다.

Table 1. Boundary conditions of each case

Condition		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Mixture	Oil	90 %	80 %	50 %	30 %
	Water	10 %	20 %	50 %	70 %

Table 2. Boundary conditions of materials

Working Fluid		
Density [g/ml]	Oil	830
	Water	998.2
Dynamic Viscosity [N.s/m ²]	Oil	0.00332
	Water	0.001003

4. 해석 결과

Fig. 5는 Case 1~4의 해석 결과를 각각 보여주고 있으며, 축 방향 단면에서의 물의 부피비

(water volume fraction)를 나타낸다. 각 두 장의 그림은 ISE를 기준으로 분리 직후의 유체 분포를 확인하기 위한 이미지와 전체 해석결과로 나타내었다. 또한 푸른색을 띠는 구간이 오일로서 현재 혼합유체가 ISE를 통과 후 밀도 차에 의해 가운데로 분리 밀집됨을 확인하였다.

4.1 Case 1 해석 결과

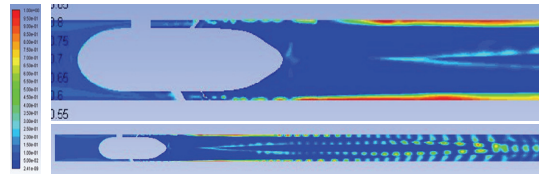
Fig. 5(a)는 Case 1 (Oil 9: Water 1)의 해석 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 혼합유체가 ISE를 통과 후 대부분 물과 오일로 분리되지만, 물의 양이 너무 작기 때문에 축 방향 단면의 Contour 상으로는 구분이 어렵다. 분리된 물이 기포 형태로 관 벽과 유체 흐름을 따라 이동함을 확인할 수 있다.

4.2 Case 2 해석 결과

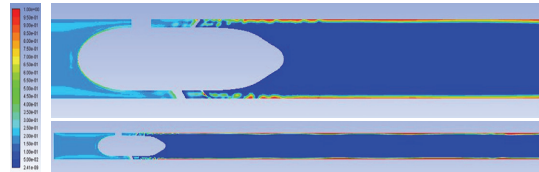
Fig. 5(b)는 Case 2 (Oil 8: Water 2)의 해석 결과이다. ISE 통과 후 오일이 비교적 선명하게 분리되고 있으나 물은 오일과 혼합유체 형태로 관 벽을 따라 선회한다. 또한 혼합유체 중 물의 양이 적어 Contour 이미지로는 확인이 어려우나, Case 1과 달리 분리된 물은 관 벽으로만 밀집되어 유체 이동방향으로 흐른다.

4.3 Case 3 해석 결과

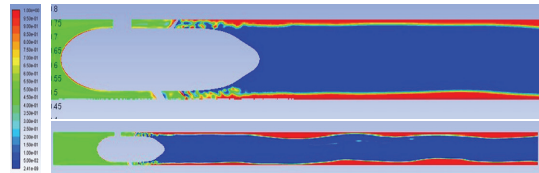
Fig. 5(c)는 Case 3 (Oil 5: Water 5)의 해석결과로 분리된 물은 관 벽을 따라 부드럽게 흐르고, 혼합유체에서 물의 비율이 증가함에 따라 관 가장자리를 따라 흐르는 물의 양도 증가한다. 또



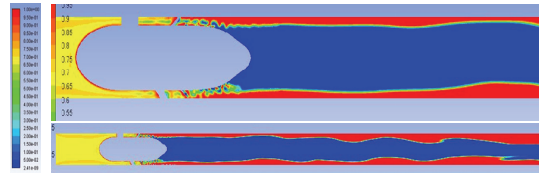
(a) Case 1 (Oil 9 : Water 1)



(b) Case 2 (Oil 8 : Water 2)



(c) Case 3 (Oil 5 : Water 5)



(d) Case 4 (Oil 3 : Water 7)

Fig. 5 Contour of water volume fraction

한 유체 점도에 의해 Vortex 형성을 위한 와류가 발생함을 알 수 있다.

4.4 Case 4 해석 결과

Fig. 5(d)는 Case 4 (Oil 3: Water 7)의 해석 결과를 나타낸다. 이 경우, 혼합물의 유속이 빠른 속도와 회전력을 가진다. 따라서 혼합유체가 분리된 후에도 벽 쪽으로 가까워질수록 Vortex가 강해지고 고속으로 회전함을 확인할 수 있다.

4.5 정량적 분석

해석결과를 정량적으로 확인하기 위해 물의 부피비를 Fig. 6에 그래프로 나타내었다. 또한 Fig. 6(a)에 그래프 측정 지점을 간략하게 그림으로 나타내었다. Fig. 6(b)에서 X축은 관 중심부터 가장자리까지 양 끝 단면방향으로 표시하였다. Y축은 물의 부피비를 나타내며, Y축 값이 0이면 오일, 1에 가까울수록 물을 의미한다.

Fig. 6(b) 해석결과, 각 케이스에서 혼합유체가 회전와류에 의해 오일과 물로 분리됨을 알 수 있으며, 오일은 관 중심부로, 물은 벽 가장자리로 밀집되어 있음을 알 수 있다. 또한 부피 비율의 증가에 따라 분리 된 물의 양이 비례하여 증가한다. ISE 통과 후 물과 오일이 분리, 특히 물은 관 벽 가장자리에 모두 밀집되어있고 혼합비에 따라 분리된 물의 양도 달라짐을 확인할 수 있다.

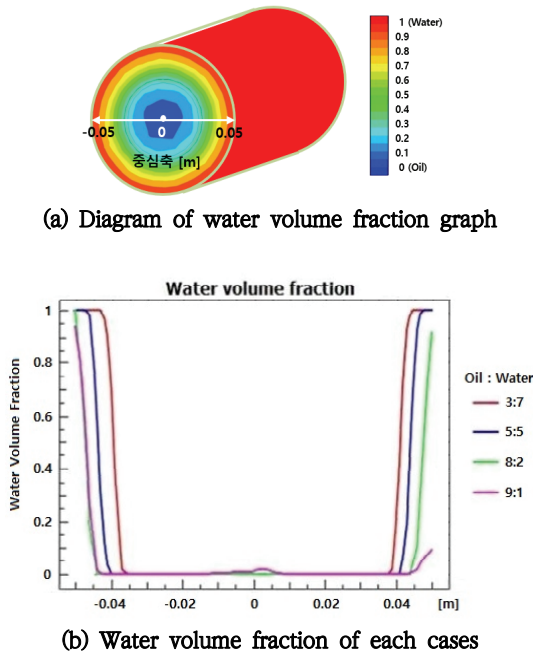


Fig. 6 Compare of water volume fraction

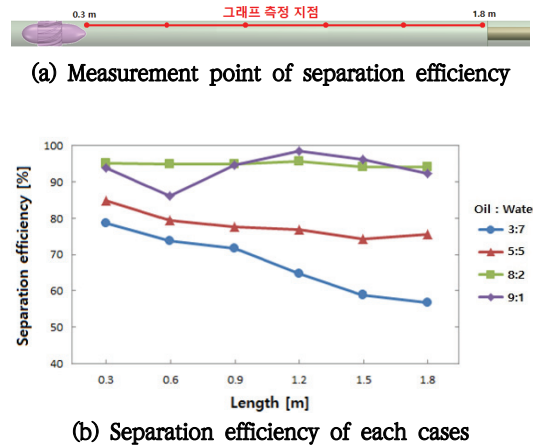


Fig. 7 Compare of separation efficiency

Fig. 7은 유체 혼합비에 따른 각 케이스의 길이 방향 분리효율을 측정하여 나타낸 그래프이며, (a)는 각 측정지점, (b)는 측정 지점별 분리효율을 정리한 그래프이다. 또한 X축은 ISE에서부터의 거리로, 유체 진행방향으로 정리하였고, Y축은 효율을 계산하여 나타내었다. 측정지점은 Fig. 6의 그래프 결과를 토대로 물과 오일 분리 경계면을 따라 0.3m마다 측정하였다.

그래프 분석결과, 물의 양이 증가할수록 Swirl이 강하게 발생하여 분리 효율이 떨어진다. 또한 약 0.9m 구간을 기점으로 효율이 점차 감소하는데 이는 선회유동의 회전력이 점차 줄어들어 분리된 유체들이 경계 면에서 재혼합되기 때문이라 생각한다. 따라서 각 물과 오일의 분리관 위치는 ISE로부터 0.9 m 거리가 최적 지점임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 해저 유정분리 시스템에 사용되는 액-액 분리용 관 일체형 해저 세퍼레이터를 유한요소해석을 통해 형상을 최적화하고, 각 혼합비

에 따른 다상유체 분리특성에 관해 연구를 진행하였다.

- 1) 각 Case별 해석 결과, 혼합된 유체가 ISE를 통과하여 밀도 차에 의해 유동관 중심에 오일이 분리 밀집되고 물이 가장자리 쪽에서 선회 이동함을 알 수 있다.
- 2) 또한 유체의 혼합비에 따라 Case 2의 분리 효율이 약 95%이며, 대부분 물과 오일로 분리되지만 분리되지 않은 소량의 혼합유체도 경계면에 존재하였다.
- 3) ISE로부터 약 0.9 m 구간을 기점으로 효율이 점차 감소하는데 이는 선회유동의 회전력이 점차 감소하여 유체의 경계면이 무너졌기 때문이라 생각한다. 따라서 0.9 m위 치에 물-오일 분리관을 설치하는 것이 적합하다.

향후 잔류 혼합유체 분리 및 효율 향상을 위한 액-액 세퍼레이터 모델에 대한 형상 최적화 및 저유량대에서의 유체 분리효율을 높일 수 있는 심층 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업(No.2018R1A5A5A05022883) 연구지원비에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

[1] Kim, Y.J., Woo, N.S., Han, S.M., Kim, H.J.,

- Lee, W.D. and Huh, S.C., “A Study on the Liquid-liquid Separation Characteristics of In-line type Subsea Separator”, Conference of KSME, Th04A001. (2017)
- [2] Bell, J.M., Chin, Y.D. and Hanrahan, S., “State of the Art of Ultra Deepwater Production Technology”, Offshore Technology Conference, OTC 17615.(2005)
- [3] Devegowda, Deepak. “An assessment of subsea production systems.” PhD diss., Texas A&M University, 2005.
- [4] Kondapi, Phaneendra, Y. Doreen Chin, Ashesh Srivastava, and Zuying F. Yang. “How Will Subsea Processing and Pumping Technologies Enable Future Deepwater Field Developments?.” In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, 2017.
- [5] Devold, Havard. Oil and gas production handbook: an introduction to oil and gas production. Lulu. com, 2013.
- [6] Devold, Havard. Oil and gas production handbook: an introduction to oil and gas production, transport, refining and petrochemical industry. ABB Oil and Gas, 2013.
- [7] Atkinson, Ian, Bertrand Theuveny, Michel Berard, Gilbert Conort, Joel Groves, Trey Lowe, Allan McDiarmid et al. “A new horizon in multiphase flow measurement.” Oilfield Review 16, no. 4 (2004): 52-63.
- [8] Lush, David, Jonathan Eng, Hikmet Ucok, Dave Hopgood, Chris Landeck, and Ken Carmon. “Subsea riser separator system.” U.S. Patent 6,651,745, issued November 25, 2003.
- [9] Mika, T., “Subsea Separation – Enabling Deepwater Deployments with Compact Technology”, Deep Offshore Technology International, No.171 (2013)
- [10] Bymaster, A.S., Olson, M.D., Grave, E.J., Svedeman, S.J., Viana, F., Mikkelsen, R. and Akdim, R., “High-Pressure Gas-Liquid Separation: An Experimental Study on Separator Performance of Natural Gas Streams at Elevated Pressures”, Offshore Tehnology Conference, OTC 21781. (2011).

- [11] Roberto, D.S., Stephanie, A., Sadia, S., Nicolas, B., Xavier, R. and Kathleen, D.M., “A Novel Gas/Liquid Separator to Enhance Production of Deepwater Marginal Fields”, Offshore Technology Conference, OTG 21394. (2011).
- [12] Segatun, S.I., Gramme, P., Lie, G. H., Horgen, O.J., Storvek, M. and Ruud, T., “The Pipe Separator: Simulations and Experimental Results”, Offshore Tehnology Conference, OTC19389. (2008).
- [13] Slot, J.J., Campen, L.J.A.M., Hoeijmakers, H.W.M. and Mudde, R.F., “In-line Oil-water Separation in Swirling Flow”, 8th International Conference on CFD in Oil & Gas at Trondheim, CFD11-121. (2011).

(접수: 2021.03.02. 수정: 2021.06.02. 게재확정: 2021.06.04.)