

# 유입구 장치 구성이 다상 유수분리기 성능에 미치는 영향

김환교\* · 손창호\* · 김윤제\*\*†

## Effect of Inlet Device Configuration on the Performance of 3-Phase Separator

Hwan Gyo Kim\*, Chang Ho Son\*, Younjea Kim\*\*†

Key Words : FWKO(자유수 분리기), 3-Phase Oil-Water Separator(3상 유수분리기), Oil-sand(오일샌드), Inlet configurations(입구장치 구성), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

### ABSTRACT

The Free Water Knock Out (FWKO) vessel is commonly employed to separate oil, water, and gas from oil sands, which are categorized as unconventional energy resources. The effectiveness of this separation process is strongly linked to the residence time, which itself is governed by the vessel's internal geometry, including the inlet arrangement, baffles, and weir design. In this study, the inlet device structures of the FWKO were modified to enhance residence time, thereby aiming to increase overall separation performance. Four representative inlet types were defined according to the shape of the deflector that directs the incoming flow. Numerical simulations indicated that separation efficiency varied by as much as 17 percentage points among these configurations. Case B, characterized by a reversed-type inlet, achieved the highest performance with 95.35% efficiency. To further refine this case, the Response Surface Method (RSM) was applied for optimization of the inlet device position. Design of Experiments (DOE) was first conducted, and nine candidate designs were generated through Latin Hypercube Sampling (LHS). Using these data, a predictive model was constructed via RSM and then employed for single-objective optimization. As a result, optimization with the Nonlinear Programming by Quadratic Lagrangian (NLPQL) algorithm improved the separation efficiency by an additional 1.6%p.

### 1. 서 론

최근 몇 년간 전 세계 에너지 수요가 급격히 증가하는 반면, 화석 연료는 점차 고갈되고 있다. 이에 따라 에너지 자원을 보유한 국가들은 에너지자원을 무기화하고 있으며, 그로 인해 에너지 자원의 중요성은 더욱 커지고 있다. 전통적인 화석 연료가 점차 고갈됨에 따라, 오일샌드, 셰일가스과 같은 비전통적 에너지 자원에 대한 관심이 높아지고 있다<sup>(1)</sup>. 이 중 오일샌드는 기존 석유 매장량의 약 5배에 달하는 것으로 알려져 있어 특히 주목받고 있다. 오일샌드의 경우 점성이 매우 높다는 특징이 있으며, 생산 방법으로는 마이닝(Mining) 공정과 증기 보조 중력 배수 공법(SAGD, Steam Assisted

Gravity Drainage)이 대표적이다. 마이닝 공정은 지표면 50m 이내에 존재하는 오일샌드를 직접 채굴하여 땅 위에서 오일을 추출하는 방식이다. SAGD 공정은 고온의 스팀을 주입하여 오일샌드의 점도를 낮춰 지상으로 추출하는 방식이며, 대부분의 오일샌드는 깊은 층에 존재하기 때문에 SAGD 방식을 통해 생산된다<sup>(2, 3)</sup>. 고온의 스팀을 주입하여 추출된 오일샌드는 일반적으로 모래, 물, 오일, 가스로 구성되어 있으며, 먼저 디샌더(Desander)라는 장치를 통해 모래를 제거하는 과정을 거치게 된다. 이후 물, 오일, 가스로 구성되어 있는 비투멘 에멀전(Bitumen emulsion)은 각 상의 밀도차이를 이용하여 분리하는 과정을 거치는데, 이때 사용되는 장치가 3상 유수분리기이다. 각 상의 밀도 차이에 의한 분리과

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

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

† 교신저자, E-mail : yjkim@skku.edu

정으로, 중력침강이 일어날 수 있는 충분한 체류시간을 거쳐야 높은 분리효율을 얻을 수 있다<sup>(4)</sup>. 유수분리기 장치는 수평형과 수직형으로 구분되며, 수평형 분리기의 경우 수직형보다 넓은 설치 공간을 필요로 하지만 넓은 접촉 영역을 형성하기 때문에 분리효율이 높다는 장점이 있다<sup>(5)</sup>. 수평형 유수분리기 내부에는 비투명 에멀전의 유동을 안정화시켜주는 다공성 배플과 물과 오일이 분리되는 위어로 구성되어 있으며, 유수분리기 내 형상 변수 변경을 통한 분리 성능 향상 연구가 주로 진행되어 왔다. Kim 등<sup>(6)</sup>은 MOGA 알고리즘을 사용하여 다공성 배플 홀 직경에 따른 분리효율 최적화 연구를 수행하였다. Kwon 등<sup>(7)</sup>은 수평형 유수분리기에서 오일-물 비율, 체류시간, 방해판의 개수와 높이에 따른 분리효율을 연구하였으며, 방해판의 유무 여부가 분리효율에 미치는 영향을 실험을 통해 확인하였다. Lu 등<sup>(8)</sup>은 수치해석을 이용하여 유수분리기 배플 유무에 따른 체류시간과 분리효율을 비교하였으며, 배플 설치에 따라 체류시간과 분리효율이 향상됨을 확인하였다. Lee 등<sup>(9)</sup>은 FPSO 환경의 유수분리기에서 입구 노즐, 유동 분배기, 그리고 배플 형상을 CFD로 최적화해 슬로싱 억제와 위어 넘침 방지로 분리효율을 개선하였다. Jung 등<sup>(10)</sup>은 오일샌드 플랜트의 모듈형 유수분리기를 대상으로 위어 기울기와 유입조건을 CFD로 비교하여, 위어를 오일 유출 방향으로 기울여 유면 접촉면적을 넓히면 분리효율이 상승함을 확인하였다. Simmons 등<sup>(11)</sup>은 분리기에서 저항 시간 분포와 유동 특성이 분리효율에 미치는 영향을 분석하였으며, 내부 구조물이 난류저감 효과를 가져오고, 이는 분리효율 상승으로 이어진다는 연구결과를 확인했다. Akpan 등<sup>(12)</sup>은 다상 분리 탱크 내부에서 유동 특성과 부가장비에 따른 중력 분리기의 유동특성을 기술하였다. Ahmed 등<sup>(13)</sup>은 파일럿 규모 수평형 유수분리기 두 대를 대상으로 실험과 CFD를 병행하여 분리효율을 검증하였고, 오일 및 물의 유량과 위어 높이가 효율에 미치는 영향을 평가하였다. Frankiewicz 등<sup>(14)</sup>은 내부 유동이 흔들리는 슬로싱 현상을 저감하기 위해 입구 노즐, 유동 분배기, 배플 형상을 변수로 수치해석 연구를 수행하여 분리효율을 향상시켰다. 이처럼 3상 유수분리기에서 분리 성능을 개선하기 위한 연구는 다수 진행되어 왔다<sup>(15-20)</sup>.

기존 연구가 주로 형상 변수에 따른 분리효율을 비교한 반면, 본 연구에서는 3상 유수분리기의 입구장치 구성에 따른 분리 성능을 비교분석하였으며, 이를 기반으로 유전 알고리즘을 활용한 입구장치 위치 최적화를 수행하여 3상 유수분리기에서 최적의 입구장치를 설계하는 것을 목표로 한다.

## 2. 수치해석

### 2.1 해석 모델

수치해석에 사용된 모델은 2.2 SOR(Steam-to-oil ratio),

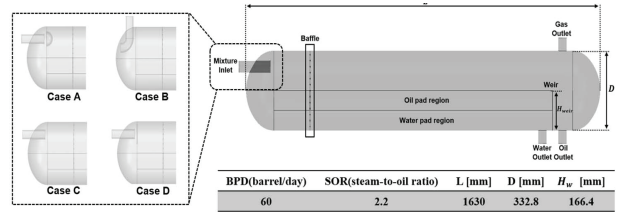


Fig. 1 Schematic of the modeled FWKO and inlet configuration

60 BPD(barrels per day)의 값을 가지며, Stokes 이론을 기반으로 설계하였다. 이는 식(1)에 정의된다. 오일과 물을 분리하는 위어의 높이는 오일과 물의 높이를 합한 값과 동일하며, 물의 높이는 위어 높이의 절반에 해당하므로, 오일과 물의 높이가 동일하다고 가정하였다. 분리기 내부 유체의 불규칙한 움직임을 줄이기 위해 다공성 배플이 고려되었으며, 모델은 Fig. 1에 나타내었다.

$$W_{cl} = C^* \left( \frac{S_{ht} - S_{lt}}{\mu} \right) L_i H_i \quad (1)$$

식에서  $W_{cl}$ 은 응축수의 유량( $m^3/day$ )이고,  $C^*$ 는 유수분리기 실험에서 얻은 실험 상수( $m^3 \cdot mPa \cdot s/m^2 day$ )이다.  $S_{ht}$ 는 물을 기준으로 무거운 액체의 비중이고,  $S_{lt}$ 는 가벼운 액체의 비중이다.

### 2.2 입구장치 구성

3상 유수분리기의 입구 장치 구역은 유입되는 에멀전 유동이 1차적으로 제어되는 구역이다. 따라서 입구장치 구성에 따라 비투명 에멀전이 안정화되는 속도의 차이가 발생하기 때문에 분리 성능에 큰 영향을 미친다.

본 연구에서는 4가지의 입구 장치 형상에 따른 분리성능을 비교 분석하였다. Case A와 B는 분리판이 없는 모델이며, Case C와 D는 분리판이 있는 모델이다. Case B에서 입구장치와 벽면과의 거리와, Case C, D 입구장치와 분리판 사이 거리는 동일하게 30mm로 설정하여 동일한 조건에서 수치해석을 수행하였다.

### 2.3 지배 방정식

유수분리기 내부 유동의 흐름과 각 상(phase) 간의 경계를 시뮬레이션하기 위해 Eulerian-Eulerian 접근법에 기반한 VOF(Volume of Fluid) 기법을 사용하였다. 난류 모델로는 상대적으로 예측 정확도가 높고, VOF 기법을 이용한 다상 해석과 결합 시 안정적으로 수렴이 가능한 것으로 알려진 Realizable k-ε 모델을 채택하였다. 압력용기 모델에서는 준 과도(pseudo-transient) 해석 기법을 적용하여 시간에

따라 유동이 안정화됨으로써 정상상태 조건에서 유동이 일정하게 유지되도록 하였으며, 수렴 조건은 잔차가  $1 \times 10^{-4}$  이내로 내려갈 때까지 반복 계산하였다.

본 연구에서 사용된 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \cdot U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (3)$$

준 과도 해석 기법은 수렴성을 향상시키는 데 있어 중요한 장점을 제공한다. 수송 방정식에 준 과도 항을 도입함으로써 식(4)와 같이, 비정상(unsteady) 상태를 가정하여 다상 유동을 해석할 수 있도록 한다.

$$\rho_p Vol_p \frac{\phi_p^{n+1} - \phi_p^n}{\Delta t} + a_p \phi_p^{(n+1)} - \sum a_i \phi_i^{(n+1)} = S_p \quad (4)$$

여기서  $\rho_p$ 는 밀도,  $Vol_p$ 는 체적,  $a$ 는 질량,  $\phi$ 는 단위 시간 당 보존량을 각각 나타낸다. 변환된 2차원  $u$ -운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{a_{i,j}}{\alpha_u} u_{i,j} = \sum a_{nb} u_{nb} + (p_{I-1,j} - p_{I,j}) A_{i,j} + b_{i,j} + \left[ (1 - \alpha_u) \frac{a_{i,j}}{\alpha_u} \right] u_{i,j}^{(n-1)} \quad (5)$$

위의 방정식과 과도 상태(transient state)에서의  $u$ -운동량 방정식의 비교는 다음과 같다.

$$\left( a_{i,j} + \frac{\rho_{i,j}^0 \Delta V}{\Delta t} \right) u_{i,j} = \sum a_{nb} u_{nb} + (p_{I-1,j} - p_{I,j}) A_{i,j} + b_{i,j} + \frac{\rho_{i,j}^0 \Delta V}{\Delta t} u_{i,j}^0 \quad (6)$$

식 (5)에서 위첨자  $(n-1)$ 은 이전 반복(iteration)을 나타내며, 식 (6)에서 위첨자 0은 이전 시간 단계(time step)를 의미한다. 변환된 정상 상태 방정식과 과도 상태 방정식은 다음과 같은 유사성을 보임을 확인할 수 있다.

$$(1 - \alpha_u) \frac{a_{i,j}}{\alpha_u} = \frac{(\rho_{i,j}^0 \Delta V)}{\Delta t} \quad (7)$$

식 (7)을 만족하는 시간 단계 크기를 선택하고 동일한 초기장(initial field)으로부터 준 과도(pseudo-transient) 연산을 수행함으로써, 주어진 초기장으로부터 변환된 반복 정상 상태 계산의 효과를 달성할 수 있음을 보여준다.

Table 1 Physical properties of working fluids

Phase	$\rho [kg/m^3]$	$\mu [kg/(m \cdot s)]$	$\sigma [N/m]$
Gas	1.225	1.7894e-05	-
Oil	830	0.1	0.027 (with gas)
Water	998.2	0.001003	0.072 (with gas) 0.04 (with oil)

Table 2 Boundary conditions applied in this study

Boundary condition	Phase	Variables	Value
Inlet	Mixture	Velocity [m/s]	0.31056
Outlet	Air	Pressure [Pa]	0
	Oil		677.44
	Water		1983.78

## 2.4 경계 조건

다상 모델을 사용하여 다상 해석을 수행하였으며, 수치해석에 사용된 작동 유체는 물, 오일, 가스이다. 각 유체의 물성 및 상(phase) 간 표면 장력은 Table 1에 나타내었으며, 입구, 출구 조건은 Table 2에 나타내었다. 압력 용기 내부 물과 오일의 일정 액체 수준을 유지하기 위해 오일과 물 출구에 일정 압력을 설정하였다.

## 2.5 격자 생성

수치해석을 효율적으로 수행하기 위해 격자 의존성 테스트를 수행하였으며, Fig. 2에 나타내었다. 격자 수 40만 개~120만 개 범위에서 격자 개수에 따른 오일 출구에서의 오일 질량 유량을 기준으로 격자 의존성 테스트를 수행하였으며, 격자 의존성 테스트는 유동 특성이 급변하는 물-오일 계면과 입구장치 주변 영역에서 격자계 수를 단계적으로 달리하여 수행하였다. 그 결과 약 90만 개에서 수렴하는 경향을 확인하였으며, 90만 개의 격자 수로 수치해석을 수행하였다.

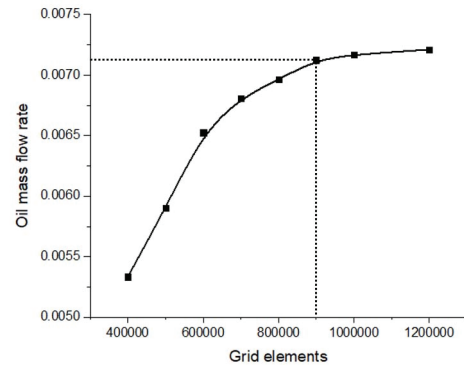


Fig. 2 Result of grid dependency test

격자 품질을 향상시키기 위해 입구, 출구, 배플 주위는 국부 세분화 영역으로 설정하여 격자를 더욱 효율적으로 구성하였다.

### 3. 결과 및 토의

본 연구의 수치해석 결과 검증을 위해, Kim 등<sup>(6)</sup>의 연구와 비교하였다. Kim 등<sup>(6)</sup>은 배플 직경에 따른 분리효율을 비교 분석하고, 최적 설계를 통해 분리효율 향상 효과를 확인하였다. 본 연구는 해당 연구와 동일 스케일의 모델과 동일 난류모델을 적용하여 수치해석을 수행하였으며, 그 결과 분리효율 수준과 내부 유동 특성의 경향이 일치함을 확인함으로써 본 해석의 신뢰성을 확보하였다.

#### 3.1 입구 장치 형상에 따른 분리효율

유수분리기에서 가장 중요한 성능 지표인 분리효율은 오일 출구에서의 오일과 물 혼합물의 질량 유량에 대해 오일 질량 유량의 비율을 백분율로 나타낸 값이며, 다음과 같이 표현한다.

$$\eta_{sep} = \frac{\dot{m}_{oil}}{\dot{m}_{oil} + \dot{m}_{H_2O}} \quad (8)$$

여기서  $\dot{m}_{oil}$  은 오일 배출구로부터 배출되는 오일의 질량 유량(kg/s)을 나타내며,  $\dot{m}_{H_2O}$ 는 오일 배출구로부터 배출되는 물의 질량유량(kg/s)을 의미한다.

유수분리기 4가지 입구 형상에 대한 수치해석 결과, Case B에서 95.35%로 가장 높은 유수 분리효율이 나타났고, Case C에서 78.7%로 가장 낮은 분리효율 결과가 나타났다. 입구로 유입되는 유동이 일차적으로 제어되는 벽의 유무에 따라 분리효율에 차이가 발생함을 알 수 있다. 유동이 유입되고 120초 후 유수분리기 단면에서 물 체적 분율 분포를 비교해 본 결과, 분리효율이 가장 높게 나왔던 Case B에선 물이 위

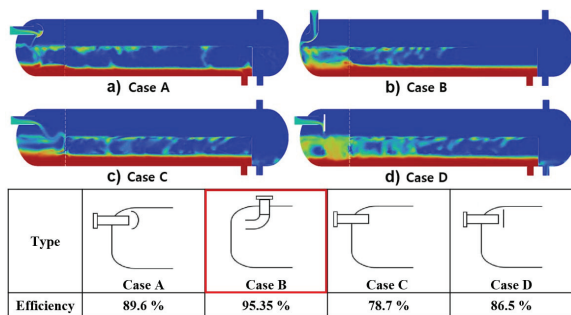


Fig. 3 Water volume fraction contour in horizontal sections of FWKO

어부근까지 도달하지 못했지만, Case C에선 위어를 넘어 오일 출구까지 도달한 것을 알 수 있다. 입구장치 형상에 따라 유수분리기 내부 체류 시간의 차이가 발생하였고, 이로 인해 약 17%의 분리효율 차이가 발생함을 알 수 있다.

#### 3.2 입구장치 위치 최적 설계

##### 3.2.1 실험 계획법

4가지 입구장치 형상 중 분리성능이 가장 높게 나타났던 Case B의 입구장치 위치에 따른 분리 성능을 비교 분석하기 위해 실험계획법(DOE, Design of Experiments)을 수행하였다. 설계변수는 입구 장치의 종 위치와 횡 위치 두 가지로 설정하였으며, 목적 변수는 분리효율로 설정하였다. 설계변수  $P_1$ ,  $P_2$ 는 Fig. 4에 나타내었으며, 범위는  $-10\text{mm} \sim +10\text{mm}$ 로 설정하였다. NLPQL 알고리즘의 국소해 민감도를 완화하기 위해, 설계점은 단변수 투영의 균질성과 공간충진성이 우수한 라틴 하이퍼큐브 샘플링(Latin Hypercube Sampling)으로 생성하였다. 또한 두 개의 설계 변수를 고려하여, 오차 자유도의 최소 표본수를 확보하기 위해 9개의 설계점을 도출하였으며, 이는 Table 3에 나타내었다.

##### 3.2.2 반응 표면법

DOE 결과를 기반으로 설계 변수 간의 영향을 파악하고자 응답 표면법(RSM, Response Surface Method)을 수행하였

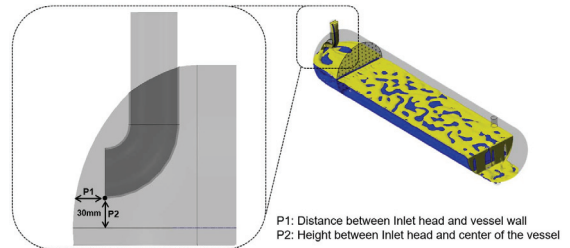


Fig. 4 Configuration parameters for inlet location

Table 3 DOE results at the design points

Case	$P_1$ [mm]	$P_2$ [mm]	$\eta$ [%]
1	-2.22	-6.67	95.44
2	4.44	-2.22	95.67
3	-8.89	-8.89	95.01
4	2.22	0	95.22
5	-6.67	6.67	93.67
6	8.89	-4.44	96.33
7	0	8.89	94.11
8	6.67	4.44	95.22
9	-4.44	2.22	94.31

다. 반응 표면 생성은 데이터 자체로부터 함수 형태를 유연하게 추정하는 회귀 기법인 비모수 회귀(NPR, Non-Parametric Regression)를 사용하였다. 반응 표면의 적합성을 수치적으로 평가하기 위해 결정 계수(Coefficient of Determination( $R^2$ )), 평균 제곱근 오차(RMSE, Root Mean Square Error), 상대 평균오차(RAE, Relative Average Error)를 Table 4에 나타내었으며, 매우 높은 정확도를 보이는 것을 확인할 수 있다. 반응 표면 모델의 예측값이 실제 데이터와 일치하는지 평가하기 위해 설계지점에서의 분리성능과 반응표면 모델이 예측한 분리성능을 비교해 보았으며, Fig. 5에 나타내었다. 그 결과 반응 표면이 높은 정확도로 예측하고 있음을 알 수 있다.

검증된 반응 표면 모델을 기반으로 입력변수 P1과 P2가 출력 변수 P3에 미치는 영향을 평가하기 위해 국소 민감도 분석(Local Sensitivity Analysis)을 수행하였으며, Fig. 6에 나타내었다. 분석 결과 P1은 분리 성능에 비선형적인 영

Table 4 Goodness-of-fit statistics of the Response Surface Model ( $R^2$ , RMSE, RAE)

$R^2$	RMSE	RAE
0.99886	0.0002662	3.1594

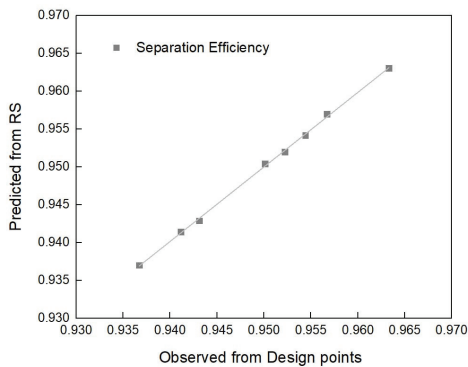


Fig. 5 Comparison of the predicted value and the observed value

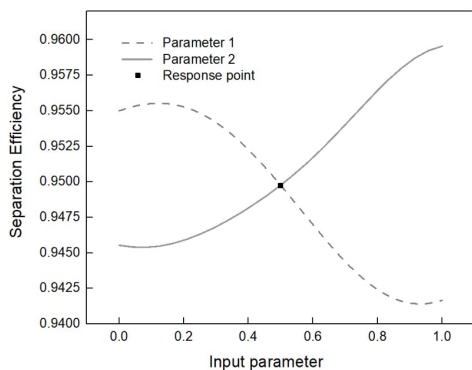


Fig. 6 Results of local sensitivity analysis results

향을 나타내었으며, 입력값이 최소값에서 최대값으로 증가함에 따라 분리 성능은 일시적으로 증가한 뒤 점차 감소하는 경향을 보였다. 반면 입구장치 높이를 조절하는 변수인 P2의 경우, 분리 성능과 선형적인 양의 상관관계가 나타났다.

### 3.2.3 NLPQL이용 최적화

반응표면 결과를 기반으로 단일 목적함수 최적화(Single-objective optimization)를 수행하였다. 최적화 알고리즘에는 NLPQL(Nonlinear Programming by Quadratic Lagrangian)을 사용하였으며, 이는 연속 설계 변수에 대해

### 3.3 입구장치 최적 설계 분석

빠르고 안정적인 수렴 특성을 가지는 구배 기반 기법이다. 최적화의 목적은 분리 성능 최대화이며, 제약 조건은 0.96 이상으로 설정하였다. 입구장치 설계점 최적화 결과는 Table 5에 나타내었으며, 수렴기준 그래프는 Fig. 7에 나타내었다. NLPQL 알고리즘이 예측한 최적 설계점의 검증을 위해 수치 해석을 수행하였다. 최적화 모델의 수치해석 결과 분리 효율은 96.92%로 나타났으며, 예측 모델과의 오차율은 약 0.6% 미만으로 나타났다. 오차율이 매우 낮은 수준을 보여 최적화 모델이 검증되었다고 할 수 있다. 최적화 모델과 기존 모델을 비교해 보았을 때 분리효율은 약 1.6%p 상승한 것을 알 수 있으며, 입구 장치 위치 최적화 과정을 통해 분리 성능이 향상된 것을 알 수 있다. 이는 Table 6에 나타내었다. 입구장치 위치에 따라 분리효율의 차이가 발생하는 원인을 분석하기 위해 기존 모델과 최적화 모델의 물 질량 분율

Table 5 Optimal design point for inlet device predicted by NLPQL

Case	$P_1$ [mm]	$P_2$ [mm]	$\eta$ [%]
Predicted Model	10	-5.1689	96.35

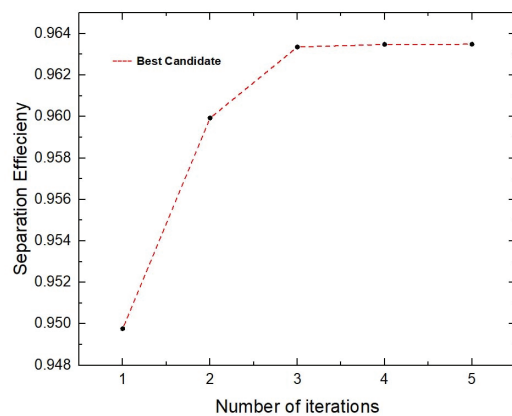


Fig. 7 NLPQL algorithm convergence criteria result

Table 6 Comparison of results between the reference model and optimized one

Case	$P_1$ [mm]	$P_2$ [mm]	$\eta$ [%]
Reference model	0	0	95.35
Predicted model	10	-5.1689	96.35
Optimization model			96.92

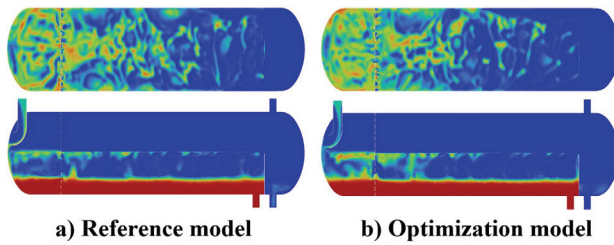


Fig. 8 Comparison of oil volume fraction results

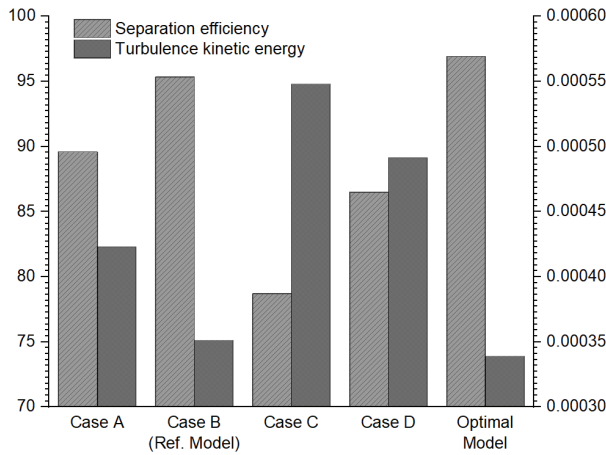


Fig. 9 Oil-water separation efficiency and turbulent kinetic energy

분포를 비교해보았으며, Fig. 8에 나타내었다. 그 결과 최적화 모델의 오일 출구 근처에 물의 체적 분율이 확연히 줄어들음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 언

본 연구에서는 3상 유수분리기 유입구 장치의 형상 및 장착 위치에 따른 분리 성능을 비교 분석하였으며, 위치를 설계변수로 하여 최적화 과정을 수행함으로써 분리효율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 최적화에는 NLPQL 알고리즘을 사용하였고, 예측 모델과 수치해석 결과 간 오차는 약 0.6%p 이하로 나타났다. 유입구 장치 형상에 따라 최대 약 17%p 수준의 분리효율 차이가 발생하였으며, 위치 최적화 과정을 통해 기준 형상 대비 약 1.6%p의 분리효율 향상이 달성되었다.

입구장치 형상에 따라 분리효율의 차이가 발생하는 원인을 분석하기 위해 다공성 배플을 지난 구간에서의 난류 운동 에너지(turbulent kinetic energy, TKE)를 비교한 결과를 Fig. 9에 나타냈으며, 분리효율과 TKE 사이에 뚜렷한 반비례 관계가 확인되었다. 이는 입구 장치의 형상과 장착 위치에 따라 유입되는 유동의 방향성과 강도가 달라지고, 초기 난류 강도 분포가 달라지기 때문으로 판단된다. 난류 운동 에너지가 높을수록 내부 혼합 효과가 증가하여 상(phase) 간 분리가 저해되고, 전체 분리 성능이 감소하는 결과로 이어졌다. 또한, 물 체적 분율 분석을 통해 출구 및 위어 주변에서 물의 체적분율이 감소하는 것이 확인되었다. 따라서, 유입구 장치의 형상 및 위치는 분리기 내부의 상분리 과정에 상당한 영향을 미치며, 적절한 입구장치 설계는 전체 유수분리효율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

해당 공정은 대량의 비투멘 에멀전을 연속 운전으로 처리하므로 분리효율의 약 1.6%p 향상은 누적 생산량 측면에서 의미 있는 차이를 만들며, 분리효율이 낮을 경우 유수분리기 후단에서 추가적인 분리 공정을 수행해야 하는 점을 고려하면 비용 및 운전 측면에서 유의미한 개선으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원(KAIA)의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2024-00142936).

#### References

- (1) Miller, R. G. and Sorrell, S. R., 2014, "The future of oil supply," The Royal Society Publishing, Vol. 372, pp. 20130179.
- (2) Liu, J., Xu, Z., and Masliyah, J. H., 2005, "Processability of oil sand ores in Alberta," Energy & Fuels, Vol. 19, No. 5, pp. 2056~2063.
- (3) Dai, Q. and Chung, K. H., 1995, "Bitumen-sand interaction in oil sand processing," Fuel, Vol. 74, No. 12, pp. 1858~1864.
- (4) Acharya, T. and Potter, T., 2021, "A CFD study on hydrocarbon mean residence time in a horizontal oil-water separator," SN Applied Sciences, Vol. 3, pp. 492.
- (5) Wu, F., Huang, K., Li, H., and Huang, C., 2022, "Analysis and Research on the Automatic Control Systems of Oil-Water Baffles in Horizontal Three-Phase Separators," Processes, Vol. 10, pp. 1102.
- (6) Kim, S. B., Kim, H. G., Jeong, H. S., and Kim, Y. J., 2025, "Optimal design of perforated baffles for enhancing oil-water separation performance using genetic algorithms," Results in Engineering, Vol. 26, pp. 104668.

- (7) Kwon, S. C., Park, K. Y., Yoon, S. M., Kim, J. Y., Park, C. Y., Bae, W. S., and Rhee, Y. W., 2011, "Characteristics of water separation for oil-water mixture in a FWKO vessel," *Korean Chem. Eng.*, Vol. 49, No. 6, pp. 823~828.
- (8) Lu, Y., Lee, J. M., Phelps, D., and Chase, R., 2007, "Effect of internal baffles on volumetric utilization of an FWKO—a CFD evaluation," *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE-109944-MS.
- (9) Lee, C. M., van Dijk, E., Legg, M., and Byeseda, J., 2004, "Field Confirmation of CFD Design for FPSO-mounted Separator," *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, U.S.A., OTC-16137.
- (10) Jung, K. J. and 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.
- (11) Simmons, M. J. H., Komonibo, E., Azzopardi, B. J., and Dick, D. R., 2004, "Residence time distributions and flow behaviour within primary crude oil-water separators treating well-head fluids," *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 82, No. 10, pp. 1383~1390.
- (12) Akpan, D. G., 2013, "Performance of internals in three-phase tank separators," M.S. Thesis, Department of Petroleum Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- (13) Ahmed, T., Russell, P. A., Hamad, F., and Gooneratne, S., 2019, "Experimental Analysis and Computational-Fluid-Dynamics Modeling of Pilot-Scale Three-Phase Separators," *SPE Production & Operations*, SPE-197047-PA, DOI: 10.2118/197047-PA.
- (14) Frankiewicz, T. and Lee, C. M., 2002, "Using computational fluid dynamics (CFD) simulation to model fluid motion in process vessels on fixed and floating platforms," *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, San Antonio, TX, SPE-77578-MS.
- (15) Oshinowo, L. M. and Vilagines, R. D., 2020, "Modeling of oil-water separation efficiency in three-phase separators: Effect of emulsion rheology and droplet size distribution," *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 159, pp. 278~290.
- (16) Li, Z., Li, Y., and Wei, G., 2023, "Optimization of control loops and operating parameters for three-phase separators used in oilfield central processing facilities," *Fluid Dyn. Mater. Process.*, Vol. 19, No. 3.
- (17) Le, T. T., Ngo, S. I., Lim, Y. I., Park, C. K., Lee, B. D., Kim, B. G., and Lim, D. H., 2018, "Three-phase Eulerian computational fluid dynamics of air-water-oil separator under off-shore operation," *J. Petrol. Sci. Eng.*, Vol. 171, pp. 731~747.
- (18) Hong, C. K. and Kim, Y. J., 2017, "Numerical study on the inlet head configuration of multi-phase separator for modularization," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 41, No. 9, pp. 571~577.
- (19) Kharoua, N., Khezzar, L., and Saadawi, H., 2012, "Using CFD to Model the Performance of Retrofit Production Separators in Abu Dhabi," *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, Abu Dhabi, UAE, SPE161521.
- (20) Ghaffarkhah, A., Dijvejin, Z. A., Shahrabi, M. A., Moraveji, M. K., and Mostofi, M., 2019, "Coupling of CFD and semiempirical methods for designing three-phase condensate separator: case study and experimental validation," *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, Vol. 9, pp. 353~382.