

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.9.571>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

다상유동 분리기 모듈화를 위한 유입구 형상 설계에 관한 수치해석적 연구[§]

홍 창 기* · 김 윤 제**

* 성균관대학교 기계공학부

Numerical Study on the Inlet Head Configuration of Multi-Phase Separator for Modularization

Chang-Ki Hong* and Youn-Jea Kim**

* School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.

(Received January 19, 2017 ; Revised June 20, 2017 ; Accepted June 21, 2017)

Key Words: FWKO(유수분리기), Multi-phase Separator(다상유동분리기), Oil-sand(오일샌드), Primary Separator(초기 분리기), Inlet Head(유입구), Modularization(모듈화)

초록: 본 연구는 수치해석 기법을 활용하여 오일샌드 플랜트에 사용되는 다상유동분리기의 다양한 유입구 형상에 따른 효율 분석에 관한 연구이다. 본 연구에 사용된 유수분리기(FWKO, Free-water knockout)는 유량 15,89 m³/d(100 bbl/d), SOR(Steam-to-Oil Ratio) 3.5의 값을 가지며 Stokes 이론을 기반으로 설계되었다. 모듈화를 위하여 두 개의 유수분리기를 병렬 연결하였고, 이에 따른 유입구 형상 최적화를 수행하였다. 유입구를 통해 유입되는 비투멘 에멀전은 150°C, 50 bar이며, API는 17의 값을 갖는다. 유수분리공정의 평균체류시간은 물과 오일이 95% 분리되는 시간으로 정의하였다. 다상유동의 밀도차에 의한 중력분리과정을 모사하기 위하여 유한체적법(VOF, Volume Of Fluid)과 상차분모델(DPM, Discrete Phase Model)을 조합하여 활용하였으며 준과도(Pseudo-transient) 해석기법을 활용하였다.

Abstract: In this numerical study, the separation efficiency of three-phase separator in an oil-sand plant was studied with various inlet head configurations. The free water knockout (FWKO) vessel was designed with a flow rate of 15.89m³/day (100 bbl/day) and the SOR(stream-to-oil ratio)=3.5 was derived using Stokes' law. For modularization, optimization of the design of the inlet head configuration was performed with parallel-connected dual FWKO vessels. The feed condition of bitumen emulsion was API=17, T_{in}=150°C and P_{in}=50 bar. A mean residence time was determined the time when 95% of the oil and water in FWKO vessel was separated. The combination between the volume of fluid (VOF) and the discrete phase model (DPM) was used to simulate the phase separation phenomenon in a multi-phase separator. Furthermore, in order to calculate multi-phase flow the pseudo-transient method was adopted.

- 기호설명 -

U_T : 종착속도(m/s)

W_{cl} : 응축수 유량(m³/day)

η_c : 연속상 점성(Pas)

S_{hl} : 무거운 유체의 상대밀도(kg/m³)

S_{ll} : 가벼운 유체의 상대밀도(kg/m³)

L_l : 유체계면 길이(m)

H_l : 유체계면 높이(m)

m_t : 추적입자 질량(kg)

$\eta_{separation}$: 분리효율

§ 이 논문은 대한기계학회 2016년도 학술대회(2016. 12.14.-16., 강원랜드 컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, yjkim@skku.edu

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

\dot{m}_{oo} : 출구배출 오일 질량유량(kg/s)
 \dot{m}_{io} : 입구유입 오일 질량유량(kg/s)

1. 서 론

오일샌드 플랜트 현장의 대부분은 극한지에 분포되어 있으며 이에 따른 현지 노무비용은 매우 높은 편이다. 따라서 플랜트 핵심 기자재를 상대적으로 작업 환경이 좋고 인건비가 저렴한 국내 또는 현지 저위도 지역에서 제작하여 운송이 가능한 경우 생산비용을 획기적으로 감소시킬 수 있기 때문에 저유가 상황에서도 오일샌드 플랜트가 경쟁력을 확보할 수 있게 된다. 오일샌드 생산 방법으로는 표면(지표면으로부터 50 m 이내)에 존재하는 오일샌드를 채굴하여 오일을 추출해 내는 마이닝(mining) 공정과 상대적으로 깊은 층에 존재하는 오일샌드를 스팀을 이용하여 용해시켜 생산하는 SAGD(steam assisted gravity drainage,

지하회수법) 공정 등이 있다(Fig. 1 참조). 전세계 오일샌드의 대부분은 지표면으로부터 50 m 이상 심층에 존재하기 때문에 오일샌드 플랜트의 채산성 향상을 위해 SAGD 공정에 대한 연구가 더욱 중요시 되고 있는 실정이다.

SAGD 공정은 크게 스팀주입(steam injection), 초기분리(primary separation), 잔유제거(de-oiling), 수처리(water treatment) 의 4가지 공정으로 구성된다. 심층에 존재하는 피드(feed)는 대부분 암석과 같은 형태로 이루어져 있기 때문에 유정에 스팀을 6개월 정도 지속적으로 주입하여 비투벤 에멀전(bitumen emulsion) 상태로 유동성을 갖게 만든다. 비투벤 에멀전은 유정에서 추출되어 초기 분리 공정으로 이동되는데 이때 사용되는 주요 공정유닛은 유수분리기(FWKO drum, free water knock out drum)이다 Fig. 2 참고).

SAGD 공정의 특성상 비투벤 에멀전은 스팀과 오일이 3~4:1의 비율로 존재하는데 이 스팀의 대부분을 분리해주는 역할을 한다. 이후 분리된 물은 de-oiling, water treatment 공정을 거쳐 재활용되거나 배출된다. 최근 환경오염에 대한 관심이 집중되고 있는 상황에서 물을 많이 사용하는 SAGD 공정에 대한 논란이 가속되고 있다. 따라서 초기 공정에서 다량의 물과 오일을 분리해 낼 수 있는 유수분리기의 성능특성은 전체 오일샌드 생산 효율을 높이며 공정 시간을 대폭 축소할 수 있어 환경영향평가에서 그 중요성이 더욱 중요시 되고 있다.

오일샌드가 가장 많이 분포되어 있는 광구로는 캐나다 및 베네수엘라가 있으며, 정치적인 안전성 및 투자 회수 가능성이 없는 베네수엘라를 제외하고 캐나다에서 가장 활발하게 채굴이 진행되고 있다. 캐나다의 오일샌드는 알버타주에 집중적으로 매장되어 있는데 지리적인 특성상 산지가 많이 분포되어 있고, 한겨울 온도가 영하 40°C 이하로 떨어지는 등 극한조건으로 인하여 과도한 생산비용이 발생하며 이는 오일샌드 산업의 생산성을 악화시키는 원인이 된다. 따라서, 최근에는 상대적으로 따뜻한 중위도 지방에서 오일샌드 처리장치를 육상 혹은 해상운송에 적합한 크기로 모듈화하여 현지 노무비용을 줄여 경제성을 확보하는 연구가 많이 수행되고 있다.

본 연구에서는 수치해석 기법을 기반으로 오일샌드 공정유닛(process unit) 중 가장 선단에 위치

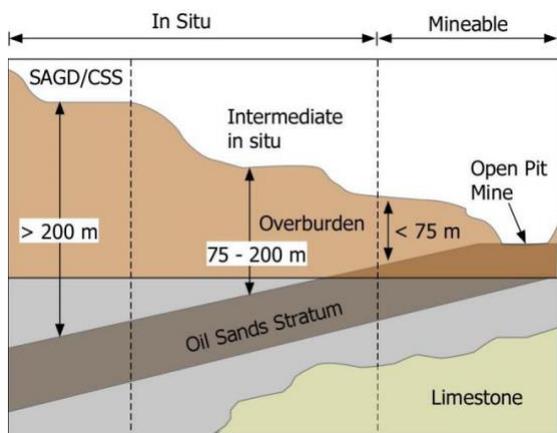


Fig. 1 Oil-sand mining method according to oil-sand stratum depth⁽¹⁾

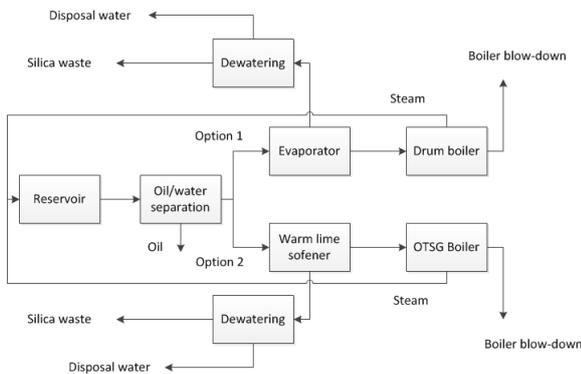


Fig. 2 Schematic of SAGD(steam assisted gravity drainage) process

한 FWKO 드럼에 대한 연구를 토대로 모듈화를 위해 20 barrel/day(3.198m³/day) 규모의 유수분리기 2대를 연결하여 컨테이너 사이즈에 적합한 30 barrel/day(4.396m³/day)급 유수분리기의 헤더형상 설계를 수행하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식 및 중력침강이론

본 연구에서 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

i) 연속방정식

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

ii) 운동량 방정식

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

여기서,

$$\tau = \mu \left(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta_{ij} \nabla \cdot U \right) \quad (3)$$

본 연구에서 사용된 다상유동분리기 모델은 Fig. 3에 도시하였으며, 수평형 중력침강 방식의 유수분리기 구조를 기반으로 설계를 수행하였다. 수평형의 경우 중력침강 방식을 사용하기 용이하며, 넓은 계면을 형성할 수 있어 분리 효율이 높고 낮은 무게중심으로 인한 구조적 안전성을 확보할 수 있지만, 계면형성 시기 등 경계층 제어에 어려움을 가지고 있다.⁽²⁾

비투멘 에멀전은 오일 속에 수분이 분산되어 있는 상(phase), 물속에 오일이 분산되어 있는 상을 가지고 있다.⁽³⁾ 비투멘 에멀전이 오일과 물로

분리되는 과정은 응집과 유착에 의해서 이루어진다.⁽⁴⁾ 두 가지 상의 밀도 차이가 액적의 농도 구배를 야기하며 응집이 일어나고, 액적막에서 농도구배가 존재할 때, 경계면이 임계 두께 이하로 얇아지며 파열되어 모세관압(capillary pressure)의 차이로 하나의 액적으로 합쳐진다. 합쳐진 액적의 침강은 다음 식 (4)에 명시된 Stokes 법칙에 의해 설명이 가능하다.

$$U_T = \frac{2r^2 \Delta \rho g}{9\eta_c} \quad (4)$$

여기서, U_T 는 액적의 종착속도(m/s)이며, r 은 액적의 반지름, η_c 는 연속상의 점성(Pa·s)을 나타낸다.

Stokes 법칙을 기반으로 수평형 유수분리 장치의 용량설계가 가능하며 이는 식 (5)로 정의된다.⁽⁵⁾

$$W_d = C^* \left(\frac{S_{hl} - S_{ll}}{\mu} \right) L_l H_l \quad (5)$$

위 식에서 W_d 은 응축수의 유량(m³/day)이며, C^* 는 유수분리기 실험을 통해 얻은 실험상수(m³mPa s/m² day)이며, Table 1에 작성하였다. S_{hl} 은 물을 1로 기준하였을 때, 무거운 유체의 비중이며, S_{ll} 은 가벼운 유체의 비중이다. μ 는 연속상의 점성(mPa·s)을 나타내며, L_l 은 유체계면의 길이(mm), H_l 은 유체 계면의 넓이(m²)이다.⁽⁶⁾

중력침강식 유수분리 장치는 충분한 체류시간을 필요로 하며 이를 통하여 분리 효율을 확보한다. 체류시간의 측정은 입자추적방식을 사용하며 추적입자로는 Bromine-82를 사용한다.⁽⁷⁾ 체류시간의 밀도 함수는 다음 식으로 정의된다.⁽⁸⁾

$$E(t) = \frac{c(t)}{\int_0^\infty c(t) dt} \quad (6)$$

Table 1 Value of C*(empirical constant) for liquid-liquid separators

Emulsion characteristic	Droplet diameter, μm	Constant, C^*
Free liquids	200	1100
Loose emulsion	150	619
Moderate emulsion	100	275
Tight emulsion	60	99

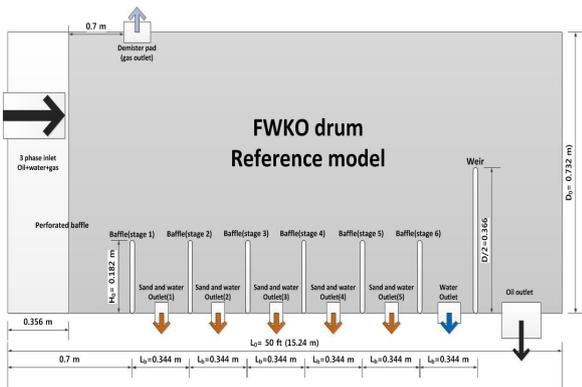


Fig. 3 Schematic of FWKO drum(reference model)

여기서,

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad (7)$$

또한,

$$\int_0^{\infty} c(t) dt = \frac{m_t}{Q_A} \quad (8)$$

여기서 m_t 는 추적입자의 질량이며, Q_A 는 수분 상 혹은 유기상의 체적이다. 이를 기반으로 한 평균체류시간(mean residence time, MRT)은 다음 식 (9)으로 정의할 수 있다.⁽⁹⁾

$$MRT = \int_0^{\infty} tE(t) dt \quad (9)$$

식 (6)을 대입하여 변수분리 후 정리하면, 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$MRT = \frac{\int_0^{\infty} tc(t) dt}{\int_0^{\infty} c(t) dt} \quad (10)$$

2.2 경계조건 및 수치해석기법

캐나다 알버타주에 설치된 실제 유수분리 장치의 운전조건 및 설비 제원을 바탕으로 3차원 모델링을 수행하였으며, 경계조건을 설정하였고 이를 Table 2에 정리하였다. 유수분리장치의 L/D

Table 2 Boundary conditions for fluid domain

Variables	Value
Inlet flow rate, Q_i [m^3/s]	0.0174
Oil outlet condition[atm]	0
Water outlet condition[atm]	0
Wall condition	No slip wall
Temperature	140°C
Working fluid	Water and engine-oil mixture

Table 3 Physical property of engine-oil

Variables	Value
Density [kg/m^3]	750
Cp(specific heat) [J/kgK]	1845
Thermal conductivity [$W/m\cdot K$]	0.145
Viscosity [$kg/m\cdot s$]	1.06

(Length/Diameter) 값은 5로 설정하였으며, SOR (Steam-to-Oil Ratio) 값은 3.5로 설정하였다. 유입되는 비투멘 에멀전은 실제 실험에 사용될 비투멘 모사 물질인 엔진오일로 설정하였고 이에 대한 물성은 Table 3에 정리하였다. 유동의 연속 계면 추적에 위해 VOF(Volume of Fluid) 모델을 선정하였고,⁽¹⁰⁾ 해석의 수렴성 및 경제성을 확보하기 위해 준과도상태 해석(pseudo-transient method)을 적용하여 해석을 수행하였다. 준과도상태 해석시 계산시간간격은 식 (11)에 의하여 계산된 0.001초를 적용하였으며, 각 케이스별로 10,000번씩 계산하였다.

$$\Delta t = \frac{length}{velocity} \quad (11)$$

격자계는 비정렬격자계를 적용하였으며, 유량 조절판 주위, 입출구 주변에서 해석의 정확성을 위해 인플레이션(inflation)조건을 적용하였다.

수치해석은 상용코드인 ANSYS사의 FLUENT Ver. 17.1을 사용하였으며, 격자형성과 FWKO 모델링을 위하여 ANSYS사의 Design Modeler를 사용하였다.

SAGD 공정에 의해 생성된 비투멘 에멀전이 2개의 유수분리 장치로 동일유량이 들어갈 수 있게 배관 크기를 조정하였고, 유입구 헤드 각도 변화에 따른 유수분리기의 분리효율은 식 (12)를 이용하여 계산하였다.

$$\eta_{separation} = \frac{\dot{m}_{oo}}{\dot{m}_{io}} \quad (12)$$

위 식에서 \dot{m}_{oo} 는 출구로 배출되는 오일의 질량유량(kg/s)이며, \dot{m}_{io} 는 유입구로 유입되는 오일의 질량유량이다.

유입구 헤드 각도에 따른 내부 오일/물 경계면 형성 위치 분석과 내부 난류 강도 변화에 따른 특성을 분석하여 분리효율과의 연관인자를 찾아내고 이를 기반으로 최적화된 유입구 헤드 형상을 설계하였다(Fig. 4 참고). 유입구 헤드 각도를 120~145° 사이로 5°씩 변화를 수행하여 수치해석을 수행하였고, 이를 기반으로 경계면 형성 시점이 빠르고, 난류 강도가 낮은 130~140° 부근을 2.5°간격으로 5가지 케이스로 나누어 유동해석을 수행하였다. 유입구 헤드의 각도 변화는 Table 4

Table 4 Design variables of inlet head angle

Variables	Value
α_1	132.5
α_2 (reference model)	135
α_3	137.5
α_4	140
α_5	142.5

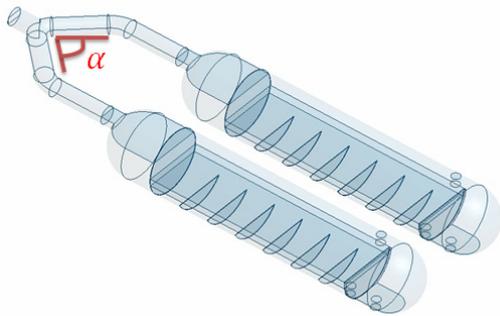


Fig. 4 Schematic of FWKO modular drum (reference model)

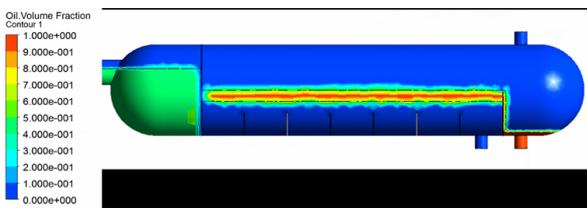


Fig. 5 Volume fraction of oil-phase on reference model (α_2)

에 정리하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동해석

수치해석 기법을 통해 모듈화된 유수분리기의 내부 유동특성을 분석하여 유입운동량과 계면형성시기, 효율을 분석하였다. Fig. 5는 기준모델의 준과도상태 해석을 통해 도출된 유수분리기 내부 오일 체적분율이다. 유입구로 유입된 비투멘 에멀전 모사 물질이 다공유량조절판을 거쳐 분리영역으로 유입된다. 다공유량조절판 이전 유동은 오일과 물의 경계면이 형성되지 않으며, 다공유량조절판 이후 유동은 첫 번째 분리판과 다공유량 조절판 사이에서 오일과 물의 계면이 형성되어 오일의 체적비가 1이 되며, 오일과 물의 분리가 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 안정된 경

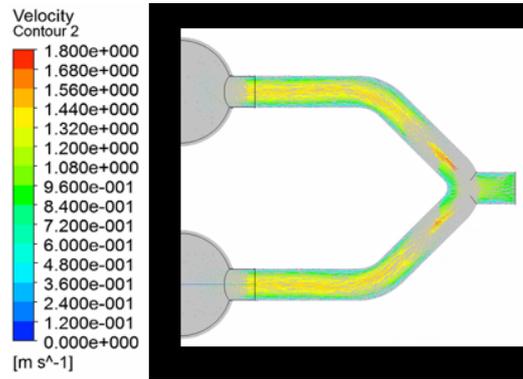


Fig. 6 Results of velocity vector distribution on inlet head (reference model, α_2)

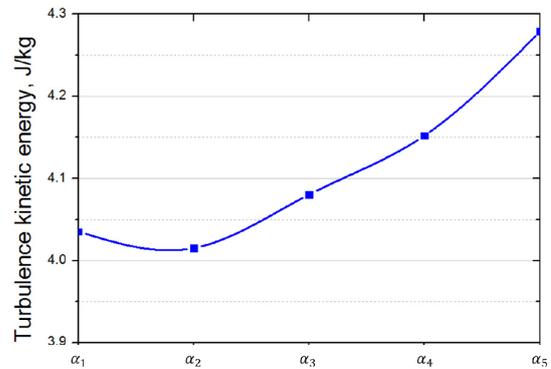


Fig. 7 Mean turbulence kinetic energy with various inlet head angles

계면을 빠르게 가질 경우 분리효율을 높일 수 있으며, 작은 체류시간으로도 충분한 양의 분리 효율을 확보할 수 있다.⁽¹¹⁾ 오일과 물의 계면형성시점은 유수분리기의 분리효율과 직접적인 상관관계를 가지며, 계면형성 시기가 다공유량조절판에 접근할수록 분리효율은 높아진다.

유입구 헤드 형상을 분석하고 헤드 형상에 대한 최적설계를 수행하기 위하여 유입구 헤드 내부에 대한 벡터장을 Fig. 6에 도시하였다. 유동이 2개의 유로로 분리되는 위치에서 재순환영역은 형성되지 않았고 Re 수가 180 이하로 난류강도가 높지 않기 때문에 유동 분리는 적절하게 이루어진다고 판단할 수 있다. 헤드파이프 벽면에서의 유속은 줄어들고 유동이 분리되는 부분의 유속이 가속되어 수치해석이 적절하게 모사되었다고 판단할 수 있다.

3.2 헤드최적화

유입 헤드 형상을 최적화하기 위하여 5가지 케이스에 대한 수치해석을 수행하였고 이를 통하여

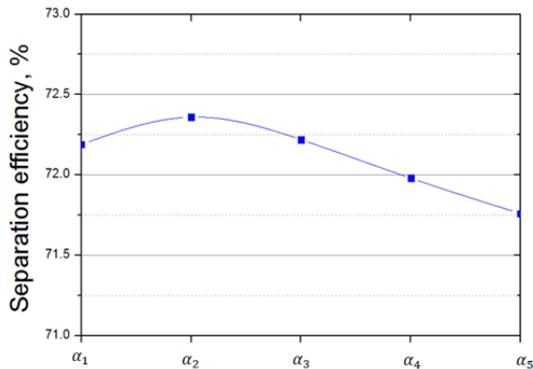


Fig. 8 Separation efficiency with various inlet head angles

난류강도와 분리 효율을 분석하였다.

다공유량조절판과 첫 번째 분리판 사이에서 5 가지 케이스 모두 오일과 물의 계면이 형성되었으며, 정량적 분석을 위하여 다공유량조절판과 첫 번째 분리판 사이의 중간지점 수직단면에서의 평균난류운동에너지를 계산하여 Fig. 7에 도시하였다.

각 케이스에 대한 효율은 앞서 언급한 식 (12)를 이용하여 계산하였고 이는 Fig. 8에 도시하였다. 효율이 가장 높은 모델은 헤드각도가 135도를 갖는 기준 모델이며, 유입구 질량유량 253.4 kg/s, 두 개의 오일 출구로 배출되는 질량유량 183.2 kg/s로 약 72.3%의 분리효율을 갖는다. 이는 내부유동이 안정된 이후 10초간의 체류시간을 기준으로 계산된 값을 토대로 분석한 효율로 실제 식 (10)에 의해 계산된 체류시간인 24분이 경과하게 될 경우 높은 수준으로 증가될 것으로 사료된다.

난류운동에너지는 난류강도를 의미하는 척도로 난류운동에너지와 분리효율은 반비례 관계를 보이며, 이를 기반으로 난류운동에너지와 효율의 상관관계를 도출하였고, 식 (13)으로 정의하였다. 이는 선행연구 사례를 통해 확인할 수 있다.⁽¹²⁾

$$\eta_{separation} = K \frac{1}{\phi_T} \quad (13)$$

여기서 K 는 보정상수이며, ϕ_T 는 난류운동에너지이다.

4. 결 론

본 연구에서는 다상유동 분리를 모듈화하기 위해 20 barrel/day 급 드럼 2개로 구성된 40

barrel/day 급 다상유동 분리기 헤드 형상을 설계 하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 오일과 물의 계면형성 시점은 오일의 체적 분율을 통해 판단할 수 있으며, 계면형성이 유입구쪽으로 접근할수록 분리 효율이 높아진다.

(2) 난류강도가 낮을수록 분리 효율은 높아지는 상관관계를 가진다.

(3) 수치해석 결과 가장 높은 분리효율을 갖는 헤드 각도를 도출하였고 이를 검증하기 위한 실험적 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원 (15IFIP-B089065-02)으로 수행되었고 관계자분께 감사의 말씀을 드린다.

참고문헌 (References)

- (1) <http://www.energy.alberta.ca/Oilsands>
- (2) Polderman, H. G., 2003, "Three-phase Separator," U. S. Patent, No. 6,537,458.
- (3) Hong, J. H., Kim, B. S. and Kim, D. C., 2004, "Demulsification of Oil-water Emulsion by Microwave Irradiation," *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 42, pp. 662~668.
- (4) Wiley, R. M., 1954, "Limited Coalescence of Oil Droplets in Coarse Oil-in-water Emulsions," *Journal of Colloid Science*, Vol. 9, No. 5, pp. 427~ 437.
- (5) Johansson, I., 2004, "Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology," John Wiley & Sons, Inc. Vol. 6, 4th Edition, pp. 812~832.
- (6) Bahadori, A., 2014, "Natural Gas Processing: Technology and Engineering Design," Elsevier Inc.
- (7) Korea National Oil Corporation, 2010, "Understanding of the Oil Industry," Oil Information Center, Korea National Oil Corporation, Anyang.
- (8) Danckwerts, P. V., 1982, "Continuous Flow System-distribution of Residence Times," *Chemical Engineering and Science*, Vol. 2, pp. 1~13.
- (9) Levenspiel, O., 1999, "Chemical Reaction Engineering," 3rd Edition, John Wiley and Sons, USA.
- (10) Myong, H. K., 2009, "Numerical Simulation of Multiphase Flows with Material Interface due to Density Difference by Interface Capturing Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 33, No. 6, pp. 443~453.
- (11) Taylor, K. C., Din, N. E. and Hisham, A., 1996,

“The Effect of Synthetic Surfactants on the Interfacial Behaviour of Crude Oil/Alkali/Polymer Systems,” *Colloids Surf., A Physicochemical Engineering*, Vol. 108, pp. 49~72.

(12) Prasad, R. R. S., 1986, “One-step Process for Transforming a Water-in-oil Emulsion into an Oil-in-water Emulsion,” U. S. Patent, No. 4,627, 458.