

FWKO 유수분리공정을 이용한 오일-물 혼합물의 분리특성

권순철 · 박근익 · 윤성민 · 김주연 · 박찬영* · 배위섭** · 이영우*†

충남대학교 바이오응용화학과
305-764 대전시 유성구 궁동 220
*충남대학교 녹색에너지기술전문대학원
305-764 대전시 유성구 궁동 220
**세종대학교 에너지자원공학과
143-747 서울시 광진구 군자동 98번지
(2011년 3월 11일 접수, 2011년 3월 30일 채택)

Characteristics of Water Separation for Oil-Water Mixture in a FWKO Vessel

Soon Chul Kwon, Kunyiik Park, Sung Min Yoon, Joo Yeon Kim, Chan Young Park*, Wisup Bae** and Young Woo Rhee*†

Department of Applied Chemistry and Biological Engineering, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

*Graduate School of Green Energy Technology, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

**Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University, 98 gunja-dong, gwangjin-gu, Seoul 143-747, Korea

(Received 11 March 2011; accepted 30 March 2011)

요 약

오일-물 혼합물에서 물을 제거하기 위하여 FWKO(Free Water Knock Out) vessel에서의 물 분리특성에 대해 연구하였다. 오일을 모사하기 위해 데칸, 톨루엔, 아스팔트를 사용하였다. 데칸을 이용하여 프로토타입 vessel에서 기초실험을 수행하였으며, 기초실험결과를 토대로 최적 water cut이 0.8인 것을 알게 되었다. 이에 이어 톨루엔을 이용하여 성능평가를 실행한 결과로 최적 체류시간이 1,200 sec인 것을 알 수 있었고 아스팔트를 사용하여 방해판의 개수, 실험온도를 변수로 FWKO vessel에서의 최적의 물 분리조건에 대해 조사하였다. 최적의 분리조건은 방해판 3개, 온도 45°C였다.

Abstract – Characteristics of water separation in a FWKO(Free Water Knock Out) vessel was investigated to remove water from oil-water mixture. Decane, toluene, and asphalt were used as model oils. Preliminary experiments were carried out for decane in a prototype FWKO vessel. Based on the results of preliminary experiments, the prototype vessel was modified and its performance was evaluated by using toluene. The effects of experimental variables on the separation of oil-water mixture were evaluated in terms of separation efficiency. The experimental variables include water cut(water ratio), number of baffles, residence times, and operation temperatures. The optimum conditions of water separation were found to be 0.8 water cut, 3 baffles, 1,200 sec, and 45 °C.

Key words: FWKO, Oil-Water Mixture, Water Separation, Asphalt

1. 서 론

아직 수소에너지 사회로 전환 중인 현대사회는 사용하고 있는 에너지 대부분을 화석연료에 의존하고 있으며 우리나라는 에너지 수입 의존도가 약 96%로 이중 대다수를 화석연료에 의지하고 있기 때문에 석유 생산량 및 가체매장량이 매우 중요시되고 있다[1]. 문헌에 의하면 2014년을 기점으로 석유 생산량이 줄어드는 것으로 보고된 바 있다[2,3]. 또한 영국의 석유고갈분석센터(Oil Depletion Analysis Centre, ODAC)는 2007년에 세계 석유 생산량은 늦어도

2011년 전에 정점에 이르고, 이후 급락할 것이라는 경고를 발표한 바 있다. 특히 생산 여건이 좋은 원유는 이미 2005년 전후로 생산량이 정점에 도달하였으며, 생산여건이 나쁘거나 품질이 떨어지는 중유도 2011년에는 생산량이 정점에 이를 것으로 분석되고 있다[4]. 따라서 새로운 대체 에너지를 확보하는 것뿐만 아니라 에너지 생산 효율을 높이는 방법 역시 당면 과제로 부각되고 있다.

천연적으로 생성되는 액체 탄화수소의 혼합물인 석유는, 가공되지 않은 형태에서는 여러 종류의 탄화수소를 주성분으로 황, 질소, 금속 등을 미량으로 함유하고 있으며, 불순물로 수분과 가스분을 함유하고 있다. 따라서 수출 또는 정유공장으로의 이송에 앞서 보통 간단한 처리를 거쳐 수분과 가스분을 제거하게 된다. 석유는 종류에 따라 연소방식이 다르며 인화점에 따라 상온에서 가스화하여 인

† To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ywrhee@cnu.ac.kr

‡ 이 논문은 충남대학교 유승곤 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

화되기 쉬운 가스로부터 휘발유(43 °C 이상), 등유(30~60 °C), 경유(50~90 °C), 중유(60~150 °C), 윤활유(130~150 °C), 아스팔트(200~300 °C) 등으로 분류할 수 있다[1].

석유 생산방법은 크게 유층 내의 자연적인 압력으로 생산하는 자연분출을 이용한 1차 생산(primary recovery)과 인공적으로 물 등의 유체를 주입하여 석유를 생산정으로 밀어 넣는 2차 생산(secondary recovery) 그리고 원유의 점도 등의 유동장애 요인을 제거하여 석유를 생산하는 3차 생산(tertiary recovery)으로 구분된다[5].

유전 내부의 압력과 에너지만으로 오일을 생산하는 1차 생산 후에도 유전의 저류층에는 2/3 가량의 석유가 남게 된다. 따라서 1차 생산 후에 저류층에 남아 있는 석유를 생산하기 위하여 2차, 3차 생산이 이루어지고 있다. 2차 생산은 1차 생산에서 자체 압력의 감소로 인해 회수되지 않는 저류층의 석유를 물이나 가스를 주입하여 회수하는 방법이다. 주로 물이 사용되며 이러한 방식을 수공법(water flooding) 또는 물주입법이라고 한다. 이로 인해 다량의 물을 함유한 석유를 생산하게 되고 생산된 오일과 물의 분리를 위하여 유수 분리공정(Free Water Knock Out, FWKO)을 이용한다. 3차 생산은 일반적으로 석유증진회수법(Enhanced Oil Recovery, EOR)이라고 한다. 이는 초중질유(extra heavy oil)와 같이 원유의 점성도가 매우 높아 1차와 2차 생산으로 오일을 생산할 수 없는 경우 혹은 2차 생산으로 더 이상의 경제적 생산이 어렵다고 판단될 때 시행된다. EOR법으로는 유동도 제어법, 화학공법, 혼합화유체 주입법, 열공법 등이 있다[5-8].

FWKO 공정은 오일과 물의 혼합물을 물과 오일을 분리하기 위한 중력분리 공정으로서, 물과 오일의 밀도 차와 중력침강에 의해 물은 유수분리장치의 바닥으로 내려가게 되고 상대적으로 가벼운 오일은 부유하여 오일과 물의 높이에 따라 웨어(weir)에 의해 오일과 물을 분리하는 공정이다. 밀도 차에 의한 분리이므로 중력침강이 일어날 수 있도록 충분한 체류시간을 거쳐야 하며, 최적의 분리를 위해 오일과 물 그리고 오일-물 혼합물의 층류 조건이 유지되어야 한다. 유수분리장치는 많은 양의 물을 제거하기 쉬운 뿐 아니라 운전 비용이 적게 들어 많은 석유 산업에서 널리 이용되고 있다[9].

FWKO 장치의 종류로는 수평형 용기(horizontal vessel), 수직형 용기(vertical vessel), 경사형 용기(inclined vessel)로 구분된다. 그 중에서도 수평형 용기는 상대적으로 긴 체류시간을 가지고 있으며, 중력침강을 이루기 쉽고, 무게 중심이 아래에 있어 안전하다는 장점 때문에 실제 공정에서 많이 사용되고 있다[10-14].

따라서 본 논문에서는 현재 실제 공정에서 가장 많이 사용되고 있는 수평형 FWKO 용기에서 오일-물 혼합물의 물 분리특성에 대해 연구하였다. 데칸(decane)과 톨루엔(toluene), 아스팔트(asphalt)를 모델오일로 사용하였다. 실험실 규모로 설계, 제작된 프로토타입(prototype) 용기에서 데칸을 사용하여 기초실험을 수행한 후, 기초 실험에서 얻어진 결과를 바탕으로 개선된 용기를 설계 제작하였으며, 톨루엔과 아스팔트를 사용하여 오일-물의 비율(water cut), 체류시간(residence time), 방해판(baffle)의 개수와 높이 등을 실험변수로 오일-물 혼합물의 분리효율을 조사하였다.

2. 실험

2-1. 실험재료

데칸(Junsei Chemical Co. Ltd.)과 톨루엔(Daejung Chemicals &

Metals Co., Ltd.)을 이용하여 기초실험을 수행하였고, 아스팔트(Dongnam Petrochemical MFG Co., Ltd.)를 사용하여 FWKO vessel에서의 최적의 분리조건을 조사하였다. 물은 3차 증류수를 사용하였으며, 무색투명한 데칸과 물 그리고 톨루엔과 물을 구별하기 위해 유기용매에서 작용하는 지용성 염료인 수단(Sigma-Aldrich, Inc.)를 오일 1 L당 0.02 g 첨가하여 붉게 염색하였다.

2-2. 실험방법

2-2-1. 데칸을 이용한 물 분리실험

문헌을 바탕으로 설계, 제작한 프로토타입 용기의 성능과 용기 내에서 일어나는 현상을 파악하기 위해 아크릴을 녹이지 않는 물질인 데칸을 모사물질로 사용하여 기초실험을 수행하였다. 실험은 물의 비율(water cut), 물의 배출 유속, 방해판의 개수 그리고 체류시간을 변수로 하여 데칸-물 혼합물의 분리효율을 측정하였으며, 기초실험 결과를 바탕으로 용기를 수정, 보완하여 개선된 용기를 제작하였다.

Fig. 1에 FWKO 장치를 이용한 오일-물 분리공정도를 나타내었으며 Fig. 2에 FWKO 용기를 이용한 분리실험방법을 나타내었다. 데칸과 물의 water cut을 0.5~0.9로 맞추어 유입탱크에서 교반기(GLOBAL LAB, s-10)를 이용하여 상온에서 10분 동안 2,000 rpm

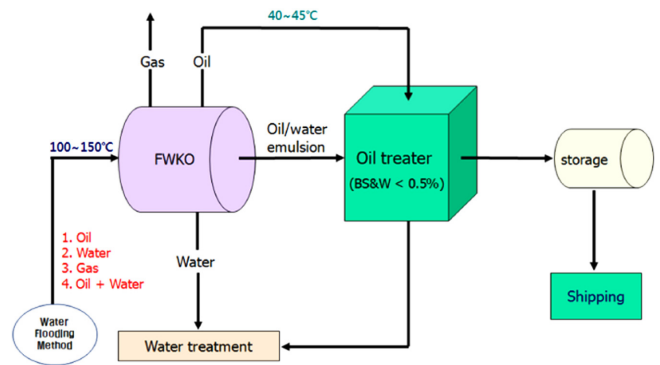


Fig. 1. Schematic diagram of oil/water separation.

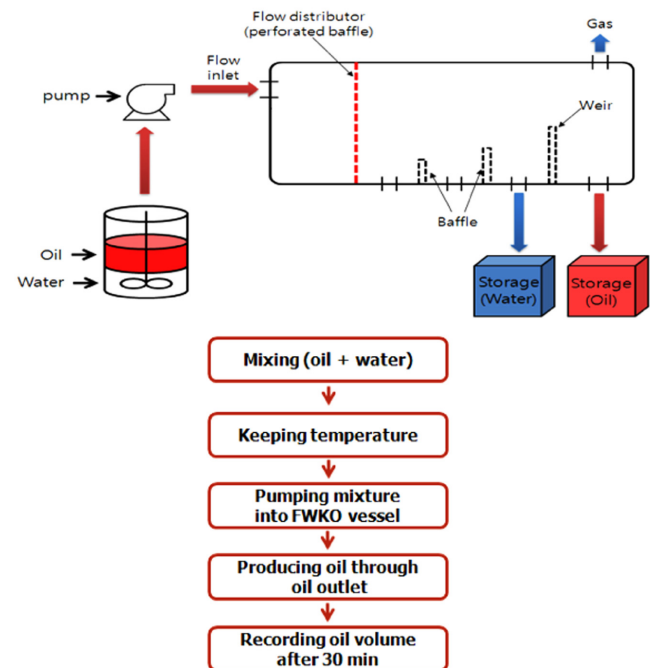


Fig. 2. Experimental method of FWKO process.

의 속도로 섞어준다. 교반기의 속도를 유지하면서 총 40 L의 혼합 물을 체류시간에 따라 1.0~3.0 L/min의 일정한 속도로 펌프를 이용하여 용기로 주입시킨다. 적정한 오일의 계면 높이와 물의 계면 높이를 유지하기 위하여 데칸이 위어를 넘어가는 순간 일정한 속도로 용기 하부에 설치된 물 배출구로 분리된 물을 배출한다. 물 배출유속은 0.3 L/min으로 고정시키며, 실험이 종료된 뒤, 배출된 오일의 양을 통해서 분리효율을 계산한다.

실험변수별로 water cut에 따른 분리효율과 체류시간에 따른 분리효율을 측정하였으며, 방해판의 개수가 분리효율에 미치는 영향과 물 배출유속의 영향을 측정하였다. 체류시간은 800~2,400 s로 변화시켜 분리효율을 측정하였다. 또한 방해판의 개수를 2개, 1개 그리고 방해판이 없을 때의 분리효율을 측정하였다.

분리효율은 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\text{Separation efficiency (\%)} = \frac{V_s}{V_f} \times 100 \quad (1)$$

여기서, V_f = 초기 유입탱크 속의 오일의 양, ml

V_s = 오일 저장 탱크로 배출된 오일의 양, ml

2-2-2. 톨루엔을 이용한 물 분리실험

데칸을 사용하여 분리효율이 높았던 water cut을 선택하였고, 기초실험 결과를 바탕으로 프로토타입 용기를 수정, 보완하여 개선된 용기를 제작하였다. 톨루엔을 사용해서 개선된 용기에서의 오일-물 혼합물의 물 분리효율을 측정하였다.

톨루엔-물 혼합물을 사용하여 개선된 용기의 물 분리성능을 평가하였다. 기본적인 실험방법은 데칸을 이용한 분리실험과 동일하다. 톨루엔도 역시 데칸처럼 무색투명하기 때문에 물과의 구별을 위하여 지용성 염료인 수단을 사용하여 붉게 물들인다. 데칸의 실험결과를 통해 얻은 최적의 water cut이 0.8이므로 데칸과 물을 2:8의 비율로 1 L와 4 L를 교반기를 사용하여 2,000 rpm의 속도로 10분 동안 섞어준다. 실험에 따라 실험온도를 25, 35, 45 °C로 유지시키며, 펌프를 사용하여 혼합물을 체류시간에 따라 0.25~2.0 L/min의 속도로 일정하게 용기의 유입구로 주입시킨다. 실험이 종료된 뒤, 배출된 오일의 양을 통해서 분리효율을 측정한다. 체류시간과 방해판의 개수 그리고 실험온도를 실험변수로 변화시키며 분리효율을 측정하였다.

2-2-3. 아스팔트를 이용한 물 분리실험

아스팔트는 25 °C에서 고체 상태로 존재하기 때문에 온도를 80 °C로 높여서 녹인 뒤, 45 °C에서 액상을 유지시킨다. 실험온도는 25, 35, 45 °C이며 톨루엔을 넣어 점도를 10 cP 이하로 낮춘다. 점도는 회전형 점도계(Brookfield, LVT)를 사용하여 측정하였고, 측정결과를 Table 1에 나타내었다. 아스팔트-톨루엔 혼합물과 물을 2:8로 섞어주며, 실험방법은 톨루엔을 이용한 분리실험과 동일하다. 아스팔트는 검은색을 띠는 탄화수소화합물이고 데칸, 톨루엔에 비

해 물과 잘 섞이므로 이를 구별하고자 지용성 염료인 수단을 사용하였다. 하지만 예상과 달리 색이 변하지 않았고 FWKO vessel 내에서 물과의 구분이 불가능하였지만, 오일배출구로 배출 후 물과의 구분이 가능하였다.

2-3. 실험장치

2-3-1. 프로토타입 용기

실험장치의 설계는 Fig. 3과 같이 하였다. 장치변수로는 L/D 값 (Length-Diameter ratio)과 방해판(baffle)이나 충전물의 배치, 재질 등이 있다. 현재 상용화되어 있는 FWKO 용기의 경우 L/D 값은 2.8~6.8이다(Table 2). 프로토타입 용기는 실험실 규모인 직경 0.3 m, 길이 1.0 m로 L/D 값을 3.3으로 설계하였다. 내부를 관찰할 수 있도록 재질은 아크릴로 선택하였고, 플랜지(flange)를 사용하여 방해판을 탈부착할 수 있도록 하였으며, 다공방해판을 설치하여 층류 형성이 용이하도록 설계하였다.

2-3-2. 개선된 FWKO 용기

데칸을 이용한 기초실험 결과를 바탕으로 FWKO 용기를 수정, 보완하였다. 우선 용기의 크기를 직경 0.1 m, 길이 0.3 m로 변경하였다. 초기의 프로토타입 용기는 처리용량이 너무 커서 실험결과와 오차범위가 컸기 때문에 보다 정확한 측정값을 얻기 위해 용기의 부피를 줄였다. 그리고 처리대상 오일이 톨루엔과 아스팔트이기 때문에 재질을 내화학성이 우수하며 내부관찰이 가능한 유리를 선택하였고, 내부의 다공방해판과 방해판 그리고 위어 또한 내화학성이 우수한 테플론을 사용하였다. 초기 프로토타입에서는 방해판이 플랜지에 고정되어 함께 움직였지만, 개선된 용기는 방해판이 자유로이 분리되며 여러 높이의 방해판을 사용할 수 있게 설계하여, 다양한 방해판의 조합이 가능해졌다. 그리고 잘못 조립하면 깨질 가능성이

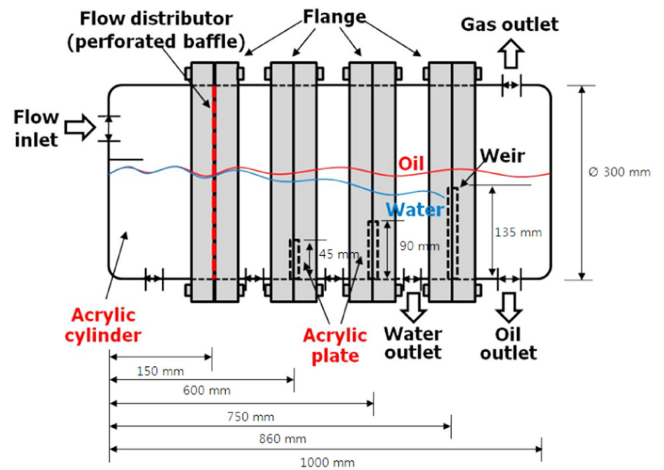


Fig. 3. Design of prototype FWKO vessel.

Table 2. Dimension of Free Water Knock Out Vessels[15]

Plant Name	Diameter (D) (m)	Length (L) (m)	L/D	Volume (V) (m ³)
Milne Point	3.60	24.5	6.8	249.38
Kinneil	3.05	12.3	4.0	89.87
Magnus	3.00	10.0	3.3	70.69
Ula 1	3.30	10.0	3.0	85.53
Ula 2	2.64	7.4	2.8	40.51
Prototype	0.30	1.0	3.3	0.0225

Table 1. Viscosity of Asphalt and Asphalt Mixture

	Temperature (°C)	Ratio	Viscosity (cP)
Asphalt	45	1	619.1
Asphalt-Toluene Mixture	45	1:2	100.5
(Asphalt-Toluene)-Water Mixture	45	1:4	4
(Asphalt-Toluene)-Water Mixture	35	1:4	7
(Asphalt-Toluene)-Water Mixture	25	1:4	9

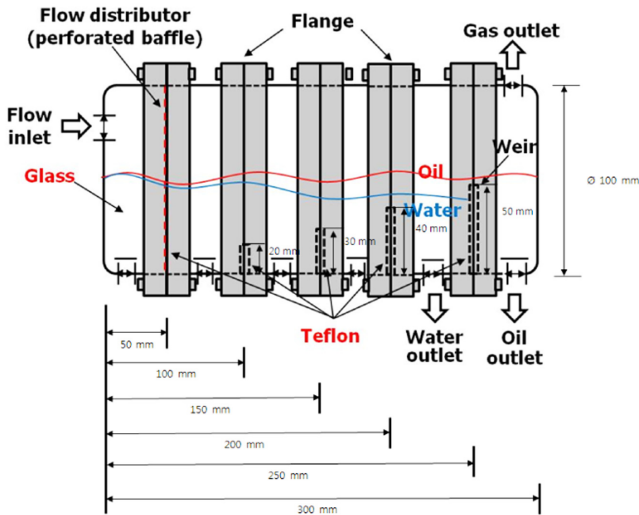


Fig. 4. Design of modified FWKO vessel.

있던 플랜지를 간편하고 안전한 형식으로 교체하였다. 마지막으로 온도 조절기를 추가하여 실험온도를 변화시킬 수 있도록 하였다. 개선된 용기의 설계도를 Fig. 4에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 데칸을 이용한 분리실험

Fig. 5에 water cut과 방해판의 개수에 따른 분리효율을 나타내었다. water cut이 증가할수록 분리효율이 증가하는 추세를 알 수 있다. water cut 0.5, 0.6일 때의 분리효율은 0.7, 0.8, 0.9일 때의 분리효율에 비해 매우 낮으며, 0.8일 때의 분리효율은 95.9%로 최고의 분리효율을 나타냈다. water cut 0.9일 때는 분리효율이 94.4%로 떨어지는데, 이로부터 물과 오일의 비율은 오일의 양보다 물의 양이 많을수록 분리효율이 좋다는 것을 알 수 있다. 그러나 물의 양이 지나치게 많을 경우에는 매우 적은 양의 오일을 추출하게 되므로 오히려 효율이 떨어졌으며 따라서 실험실 규모의 실험에서는 water cut이 0.8일 때 최적의 분리가 일어난다는 것을 알 수 있었다.

방해판의 개수에 따른 영향을 살펴보면, 방해판이 1개일 때와 2개일 때의 분리효율은 거의 차이가 없는 오차범위 내의 결과를 나

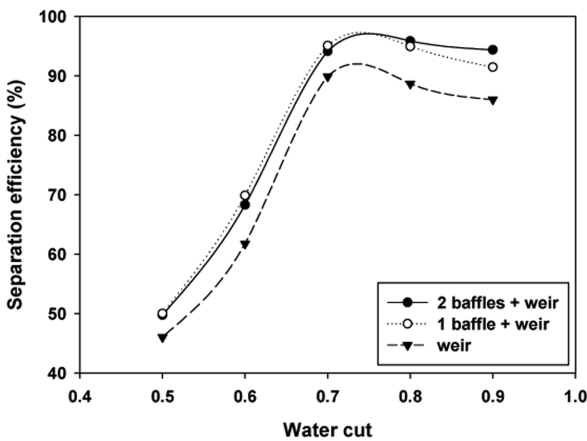


Fig. 5. Effect of water cut and number of baffles on separation efficiency of decane-water mixture (25 °C, 2,400 s).

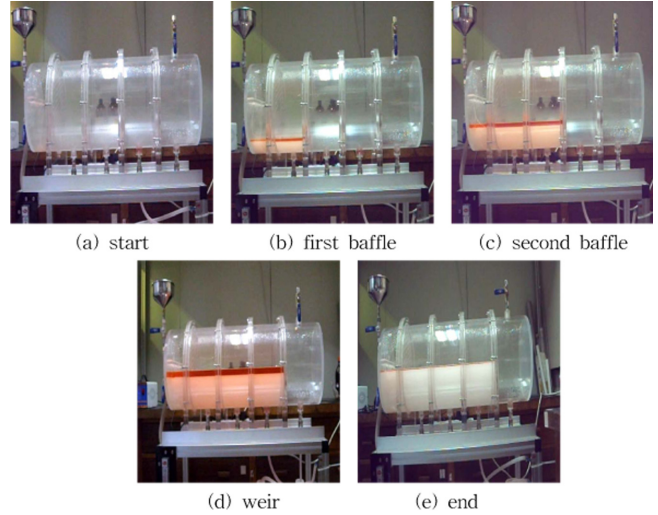


Fig. 6. Water separation process at water cut 0.8.

타냈다. 특히 water cut 0.5~0.7에서의 분리효율은 방해판이 1개일 때의 분리효율이 2개일 때의 분리효율보다 약간 높았다. 그러나 방해판이 없고 위어만 있을 때와 방해판이 있을 때의 분리효율을 비교하면 방해판이 있을 때의 분리효율이 훨씬 높았다. 이는 방해판의 개수가 적거나 방해판의 높이가 낮아서 방해판들의 성능이 전부 발휘되지 못했거나, 실험에 사용된 모사오일인 데칸의 소수성이 너무 커서 방해판들이 제대로 기능을 발휘하지 못했기 때문으로 판단된다.

Fig. 6에 가장 좋은 분리효율을 보인 water cut 0.8에 대해 FWKO vessel에서의 물 분리상태를 나타내었다. 수단 3를 사용한 데칸은 선명한 붉은색을 띠며, 물과의 소수성 때문에 주입되자마자 분리되는 모습을 보였다. 물 층은 분산된 데칸 입자에 의해 얼은 주황빛을 띠며, 실험이 종료된 후에도 투명해지지 못하고 흰색을 띠는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7에 데칸-물 혼합물의 체류시간에 따른 분리효율을 나타내었다. 체류시간이 증가할수록 분리효율이 증가하는 경향을 보였다. 체류시간 1,200 s를 전후로 800 s에서 1,200 s까지는 급격히 증가하였고, 1,200 s 후에는 완만하게 증가하면서 수렴하였다. 이로부터 약 3,000~3,500 s 사이에 정점에 도달하는 것으로 추론할 수 있다. 체

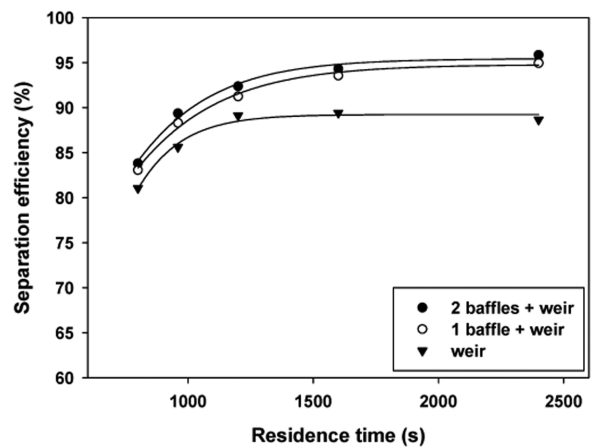


Fig. 7. Effect of residence time on separation efficiency of decane-water mixture (25 °C, water cut 0.8).

류시간이 증가할수록 분리효율이 증가하는 이유는 FWKO 공정의 기본 분리 원리인 중력침강과 응집이 주로 체류시간에 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 5와 7을 비교할 때, water cut에 따른 분리효율 실험보다는 체류시간에 따른 분리효율 실험에서 방해판의 개수에 따른 분리효율 곡선이 보다 분명하게 나타났다. 방해판이 있는 경우엔 분리효율이 약 94%로 수렴하였고 방해판 없이 위어만 있는 경우엔 약 89%로 수렴하였다.

3-2. 톨루엔을 이용한 분리실험

Fig. 8에 체류시간과 방해판의 개수에 따른 분리효율을 나타내었다. 체류시간이 증가할수록 분리효율이 증가하였다. 또한 Fig. 7과 비교하였을 때, 체류시간 1,200 s에서 방해판 없이 위어만 있을 때의 분리효율은 거의 유사하였으며, 방해판이 있을 때의 분리효율은 Fig. 7보다 약간 높았다. 체류시간 500 s에서는 90, 89, 86.5, 80%로 실제 FWKO 공정의 분리효율과 유사한 결과를 얻었다.

방해판의 개수가 늘어날수록 분리효율이 높아지는 경향을 나타내었다. 방해판의 개수가 3개일 때와 2개일 때의 분리효율의 차이는 거의 없었지만, 2개일 때와 1개일 때의 차이 그리고 1개 있을 때와 위어만 있을 때의 분리효율의 차이가 점점 커졌다. 이로부터 방해판은 한 개 이상이 있을 경우, 개수가 늘어날수록 분리효율은 증가하지만, 개수 대비 효율성은 낮아진다는 것을 알 수 있다.

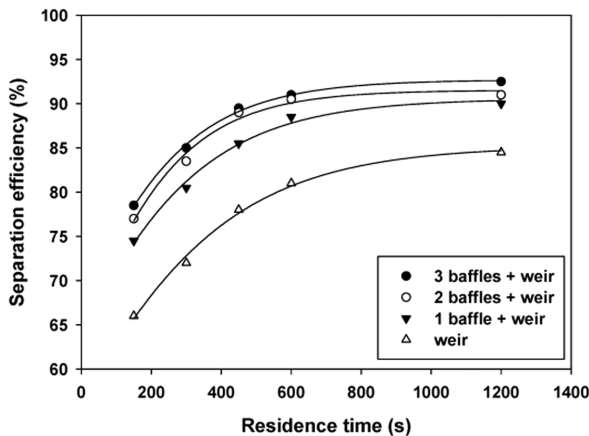


Fig. 8. Effect of residence time and number of baffles on separation efficiency of toluene-water mixture (25 °C, water cut 0.8).

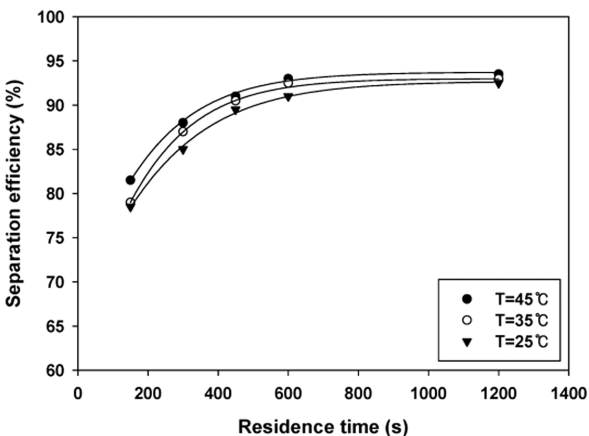


Fig. 9. Effect of operation temperature on separation efficiency of toluene-water mixture (water cut 0.8, 3 baffles).

Fig. 9에 온도에 따른 분리효율을 나타내었다. 25, 35, 45 °C의 온도에서 실험을 수행하였다. 그 결과, 온도가 상승함에 따라 분리효율이 증가하였다. 체류시간 600 s의 경우 25 °C에서의 분리효율은 91%, 35 °C에서는 92.4%, 45 °C에서는 93%였다. 그러나 분리효율의 증가폭은 크지 않았다. 실제 공정에서 열에 의한 분리방법보다 중력침강에 의한 분리방법이 압도적으로 많은 이유가 이와같이 온도 증가에 따른 분리효율의 증가폭이 크지 않기 때문인 것으로 사료된다.

3-3. 아스팔트를 이용한 분리실험

Fig. 10에 아스팔트-물 혼합물의 체류시간에 따른 분리효율을 나타내었다. 체류시간이 증가할수록 분리효율이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 전체적인 분리효율이 데칸-물 혼합물과 톨루엔-물 혼합물의 분리효율보다 낮았다. Fig. 8의 결과와 비교해 보면 처음 체류시간 150 s에서의 분리효율은 비슷하지만, 1,200 s에서의 분리효율은 방해판의 개수에 따라 차이가 커지는 경향을 나타냈다. 그리고 방해판의 개수에 따른 영향은 데칸과 톨루엔을 이용한 실험 결과와 달리 3개일 때의 분리효율과 2개일 때의 분리효율의 차이가 2개일 때와 1개일 때의 분리효율의 차이보다 컸다. 이것은 오일모사물질인 데칸과 톨루엔, 아스팔트의 물성 차이 때문인 것으로 판단된다. 데칸과 톨루엔은 무색투명한 단일물질로서 그 처리나 분리현상 등을 파악하기 쉽기 때문에 아스팔트 실험 전 모사물질로 선택되었다. 아스팔트도 복합탄화수소화합물로서 소수성이 강하지만, 데칸과 톨

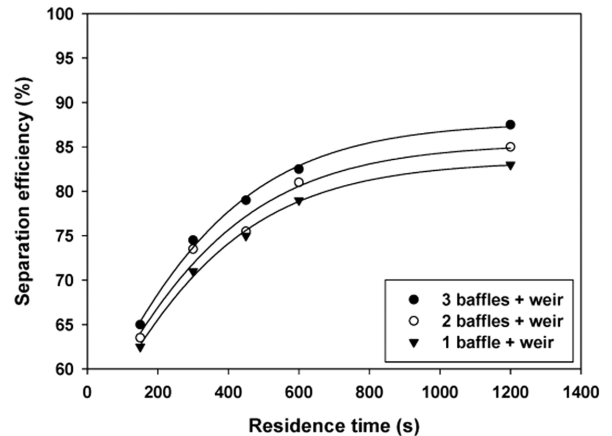


Fig. 10. Effect of residence time and number of baffles on separation efficiency of asphalt-water mixture (45 °C, water cut 0.8).

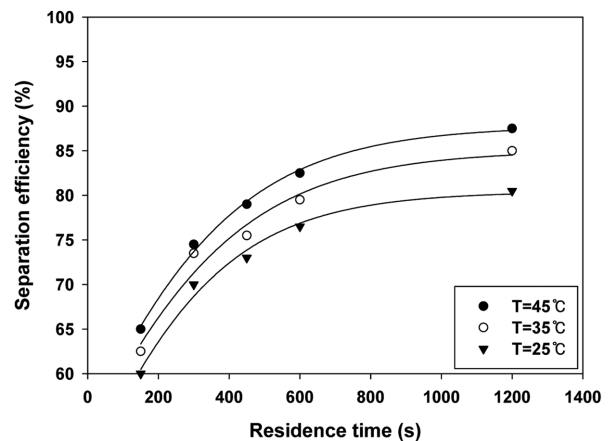


Fig. 11. Effect of operation temperature on separation efficiency of asphalt-water mixture (water cut 0.8, 3 baffles).

루엔에 비해 상대적으로 친수성이 크기 때문에 데칸-물 혼합물, 톨루엔-물 혼합물에 비해 에멀전화된 방울(droplet)이 많아서 방해판의 영향을 더 크게 받는 것으로 사료된다.

Fig. 11에 아스팔트-물 혼합물의 온도에 따른 분리효율을 나타내었다. 온도가 증가할수록 분리효율이 증가하며, Fig. 10과 비슷한 경향을 보였다. 아스팔트는 상온(25 °C)에서 고체 상태로 고온에서 녹인 뒤 점도를 낮추기 위해서 톨루엔을 섞어주었지만 다시 온도가 25 °C까지 떨어졌기 때문에 점도가 높아지고, 유동도가 낮아져 아스팔트 일부가 용기1 내에서 흡착한 것으로 판단된다. 특히 체류시간이 길어질수록 45 °C와 35 °C에서의 분리효율은 같은 경향을 보인 반면 25 °C에서의 분리효율은 증가폭이 급격히 줄어드는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 오일-물 혼합물에서 FWKO 공정을 이용해서 효과적으로 물을 분리하기 위하여 오일모사물질로 데칸을 사용하여 기초실험을 실시한 후 프로토타입의 용기를 수정, 보완하여, water cut과 물 배출유속이 물 분리효율에 미치는 영향을 파악하여 최적의 운전조건을 구하였다. 또한 톨루엔과 아스팔트를 사용하여 개선된 용기의 물 분리성능을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 오일모사물질인 데칸을 이용한 기초실험 결과, water cut이 0.8일 때 가장 높은 분리효율을 보였으며, water cut 0.9일 때의 분리효율은 감소하였다. 체류시간은 1,200 s를 전후하여 1,200 s까지는 급격한 증가를 보였고, 이후 완만한 증가곡선을 보였다.

(2) 톨루엔-물 혼합물의 분리실험의 경우, 체류시간과 방해판의 개수가 증가할수록 분리효율이 증가하였다. 체류시간 600 s까지는 분리효율이 급격히 증가하지만 이후 거의 증가하지 않았다. 방해판이 1개일 때와 2개일 때의 분리효율의 차이는 작았지만, 방해판이 없을 때와 비교 시 분리효율의 차이는 컸다.

(3) 톨루엔-물 혼합물을 이용한 실험에서 실험온도가 증가할수록 분리효율이 증가하는 경향을 보였다. 실제 산업공정에서 사용되는 체류시간인 500 s에서 높은 효율을 보였지만, 온도의 증가 대비 분리효율의 증가폭이 적었다.

(4) 아스팔트-물 혼합물의 분리실험의 경우, 체류시간과 방해판의 개수가 증가할수록 분리효율은 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만 데칸과 톨루엔의 분리효율에 비해 전체적으로 낮았다. 방해판의 개수에 따른 분리효율은 체류시간이 증가함에 따라 차이가 컸다.

(5) 아스팔트-물 혼합물의 실험온도에 따른 분리효율은 방해판에 따른 분리효율과 유사한 곡선을 보였다. 25 °C와 달리 45 °C와 35 °C에서의 분리효율은 거의 동일한 폭으로 증가하였다.

(6) 실험결과를 종합해 볼 때 water cut 0.8, 45 °C, 3개의 방해판

의 vessel에서 체류시간이 1,200 s일 때가 최적의 운전 조건으로 판단되며, 경제적인 측면을 고려하면 온도를 35 °C로 유지하고, 체류시간이 600 s일 때가 최적의 운전조건으로 판단된다.

감 사

본 연구는 에너지관리공단의 에너지자원기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Korea National Oil Corporation, "Understanding of the Oil Industry," Oil Information Center, Korea National Oil Corporation, Anyang(2010).
2. Méjean, A. and Hope, C., "Modelling the Costs of Non-conventional Oil: A Case Study of Canadian Bitumen," *Energy Policy*, **36**(11), 4205-4216(2008).
3. Nashawi, I. S., Adel, M. and Mohammed, A. B., "Forecasting World Crude Oil Production Using Multicyclic Hubbert Model," *Energy Fuels*, **24**, 1788-1800(2010).
4. Robert, L. H., "Peaking of World Oil Production : Recent Forecasts," National Energy Technology Laboratory, Dept. of Energy (2007).
5. Lim, J. S., "Enhanced Oil Recovery (EOR) Technology Trend," *Quarterly Petroleum*, **23**, 123-142(2007).
6. Nouredini, H. and Rempe, M. L., "Pelargonic Acid in Enhanced Oil Recovery," *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **73**, 939-941(1996).
7. Van Poolen, H., "Fundamentals of Enhanced Oil Recovery," Penn Well Books, Tulsa, Oklahoma(1980).
8. Baviere, M., "Basic Concepts in Enhanced Oil Recovery Processes," Springer, New York(1991).
9. Sayda, A. F. and Taylor, J. H., "Modeling and Control of Three-phase Gravity Separators in Oil Production Facilities," *Proc. American Control Conference*, 11-13(2007).
10. Komistek, S. M., "Inclined Free Water Knockout," U.S. Patent, No. 0,162,806(2002).
11. Polderman, H. G., "Three-phase Separator," U.S. Patent, No. 6,537,458(2003).
12. Fenwick, B. T., "Method and Apparatus for Treating Oil-water Emulsions," U. S. Patent, No. 0,023,228(2005).
13. Coombs, H. W. and Pearson, R. D., "Oil/water Separator," U. S. Patent, No. 6,110,383(2000).
14. Chamberlain, N. P., Bedwell, I. C., Christiansen, B., Vangen, G. and Hoydal, J., "Separators," U. S. Patent, No. 6,409,808(2002).
15. Simmons, M. J. H., Komonibo, E., Azzopardi, B. J. and Dick, D. R., "Residence Time Distributions and Flow Behaviour Within Primary Crude Oil-water Separators Treating Well-head Fluids," *Chem. Eng. Res. Des.*, **82**, 1383-1390(2004).