

## 정밀여과용 관형막을 이용한 바이오디젤 제조

이 원 중 · 정 건 용<sup>†</sup>

서울산업대학교 화학공학과

(2010년 5월 24일 접수, 2010년 6월 16일 수정, 2010년 6월 16일 채택)

### Biodiesel Production using Microfiltration Tubular Membrane

Won Joong Lee and Kun Yong Chung<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received May 24, 2010, Revised June 16, 2010, Accepted June 16, 2010)

요 약: 카놀라유, 대두유, 자트로파유와 메탄올을 연속적으로 분리막 반응기에 순환시켜 바이오디젤을 제조하였다. 분리막은 반응기 역할과 반응 생성물로부터 미반응된 유지를 분리하여 고순도의 fatty acid methyl ester (FAME)를 생산하는 역할을 한다. 공칭 세공크기 0.2, 0.5  $\mu\text{m}$ 인 정밀여과형 세라믹 관형 분리막을 사용하였다. 운전압력 0.5 bar에서 0.2  $\mu\text{m}$  정밀여과막에 대한 투과유속은 공급유량 400 mL/min일 경우 15 L/m<sup>2</sup>·hr이었다. 또한 투과액 중 FAME 함량은 0.5 bar에서 가장 높았으며 운전압력이 증가할수록 감소하였다.

**Abstract:** Biodiesel was produced from Canola, soybean and Jatropha oils combined methanol using continuously recycled membrane reactor. The membrane served to react and separate the unreacted oil from the product stream, producing high-purity fatty acid methyl ester (FAME). Two ceramic tubular membranes having different nominal pore sizes of 0.2 and 0.5  $\mu\text{m}$  were used. Permeate was observed at 0.5, 1.0 and 2.0 bar with a given flow rate, respectively. The permeate flux for 0.2  $\mu\text{m}$  membrane at 0.5 bar and 400 mL/min flow rate was 15 L/m<sup>2</sup>·hr. Also FAME content in permeate was the highest at 0.5 bar, and decreased with increasing operating pressure.

**Keywords:** biodiesel, canola oil, soybean oil, Jatropha oil, FAME, microfiltration

#### 1. 서 론

바이오디젤은 식물이나 동물에 있는 지방성분을 경유(디젤)와 비슷한 물성을 갖도록 가공하여 경유를 대체하거나 혼합하여 디젤 엔진에 사용 가능하게 만든 친환경적 대체 에너지이다. 식물성유지에서 바이오디젤로 변환되면 일반적으로 분자량은 1/3 정도로 줄어들며 점도 역시 1/8 정도 감소하여 유동성이 크게 증가한다. 바이오디젤에는 약 10 wt% 정도의 산소가 포함되어 엔진 연소 효율을 높이지만 연료 안정성이 좋지 않아 적절히 관리하지 않으면 산가나 수분 증가 등 품질이 악화되어 연료계 금속부품의 부식 또는 손상을 유발하고 이젝터

막힘이나 실린더 내 카본 퇴적을 증가시킬 수 있다. 또한 석유정제 공정에서 생산되는 경유보다 유동성이 떨어지므로 필터 막힘 현상이나 시동성이 떨어질 수 있으므로 엄격한 품질관리가 필요하다[1]. 바이오디젤은 일반적으로 Fig. 1과 같이 전이에스테르화 가역 반응으로 제조된다. 먼저 3몰의 메탄올(알콜류) 중 1몰의 메탄올이 식물성 지방성분 중 98% 이상인 트리글리세라이드(Triglyceride, TG)와 반응하여 디글리세라이드와 지방산 메틸에스테르를 생성하고 순차적으로 모노글리세라이드, 글리세롤이 생성되면서 각각 지방산 메틸에스테르가 만들어져 바이오디젤의 주성분인 지방산 메틸에스테르(Fatty Acid Methyl Ester, FAME) 3몰이 생산된다[2]. 바이오디젤 생산에 필요한 촉매제로는 KOH와 NaOH 등이 있는데, 이러한 염기성 촉매제들은 황산 등의 산

<sup>†</sup>주저자(e-mail: kychung@snut.ac.kr)

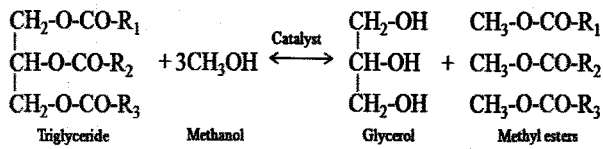


Fig. 1. Chemical equation for biodiesel production.

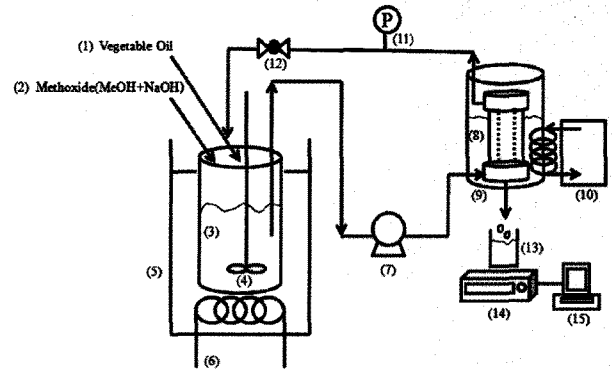
촉매에 비해 구하기 쉽고 반응속도가 빠르며 저압공정에서도 적용 가능하다. 일반적인 바이오디젤 제조 공정은 식물성오일의 지방산 제거를 위한 전처리 공정, 원료 용액과의 1차 반응 및 2차 반응, 분리, 증발, 세척, 건조 등으로 진행된다. 그러나 효율적인 바이오디젤 제조공정을 확립하기 위하여 다음의 몇 가지 해결과제가 있다. 먼저 원료용액인 TG와 알콜류(메탄올)가 서로 혼합되지 않아 교반을 하여도 분산 상태로 존재하므로 입자 표면에서만 제한적으로 전이에스테르 반응이 일어난다. 따라서 반응성을 향상시키기 위한 경제적인 교반 방법이나 물질전달 향상을 위한 추가적인 공정이 필요하다. 또한 바이오디젤 전이에스테르의 가역적 반응은 화학적 평형이 존재하므로 TG 전환율을 향상시킬 수 있는 방법이 필요하다. 원료용액 중 메탄올을 과량으로 공급하면 TG 전환율을 높일 수 있으나 추가적인 메탄올 회수공정이 필요하게 된다. 그리고 고온, 고압 반응이나 촉매량을 증가시킬 수 있지만 이 경우 에너지 소비량이 증가하거나 부산물인 글리세롤 내 촉매량이 증가하여 품질을 저하시킬 수 있다. 이 밖에 세척 공정에서 발생하는 다량의 폐수 중에는 비누성분 및 유리 글리세롤 등이 함유되어 있어 공정수로 재활용하거나 방류하기 위하여 추가적인 처리공정이 불가피하다[2-4].

따라서 본 연구에서는 이상의 문제점을 극복하기 위하여 고온에서 사용 가능하며 세척이 용이한 정밀여과용 세라믹 관형 분리막을 사용하여 원료 용액 중 분산되어 있는 TG를 분리하고 이를 계속적으로 반응시키고자 하였다. 식물성 지방유지인 카놀라유, 대두유, 자트로파유(Jatropha)에 각각 과량의 메탄올을 혼합하여 제조한 메톡사이드 원료 용액을 관형 정밀여과막에서 반응과 동시에 분리하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험재료 및 분리막 모듈

본 연구에서 사용한 식물성 오일은 시중에서 구할 수 있는 W사의 카놀라유, B사의 대두유를 사용하였다. 자



(1) Vegetable Oil (2) Methoxide (3) Biodiesel reactor  
 (4) Agitator (5) Water bath (6) Heating coil  
 (7) Feed pump (8) Membrane module (9) Water chamber  
 (10) Water circulator (11) Pressure gauge (12) Regulating valve  
 (13) Permeate collector (14) Electronic balance  
 (15) Personal computer

Fig. 2. Schematic diagram of tubular membrane system for biodiesel production.

트로파유는 인도네시아에서 재배하여 현지공장에서 제조한 것을 수입하여 사용하였다. 반응 및 투과실험에 사용한 관형 세라믹 막은 (주)나노기공소재에서 제작한 공칭 기공크기 0.2 또는 0.5 μm인 정밀여과막이며 내경 5 mm, 외경 9.5 mm, 그리고 길이 250 mm로서 유효 막 면적은 24 cm<sup>2</sup>이었다. 또한 이상의 관형막에 적합하게 아크릴모듈을 제작하였으며 양쪽 끝을 O링으로 밀봉하여 실험하였다.

### 2.2. 실험장치 및 운전방법

바이오디젤 투과실험을 위한 장치의 개략적인 흐름도는 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 먼저 가열기(6)로 물 항온조(5)를 반응온도인 65 ± 1°C까지 가열시킨 후 식물성 유지(1) 1,500 mL, 그리고 촉매인 NaOH (식물성 유지의 1 wt%) 4.4 g와 메탄올 혼합물인 methoxide 용액(2) 1,500 mL를 3 L 크기의 바이오디젤 반응기(3)에 공급하였다. 반응기 내에 교반기(4)를 50 rpm으로 유지하면서 원료용액을 20분 동안 가열한 후 Masterflex사의 정량펌프(7)로 가압하여 일정 유량을 세라믹 분리막 모듈(8)에 공급하였다. 이때 분리막 모듈 외부에는 항온기(10)로 가열된 물을 순환시키면서 반응온도와 같게 유지하며, 분리막 모듈을 투과하지 못한 농축 용액은 압력 조절 밸브(12)로 압력을 조절한 후 반응기로 재순환된다. 분리막을 투과한 용액은 전자저울(14) 위에 위치한 투과액 용기(13) 내로 수집되며 측정된 무게자료

**Table 1.** Nomenclature of Fatty Acid Methyl Ester (FAME)

No of Carbon	Number of double bond			
	0	1	2	3
14	Myristic Acid	-	-	-
16	Palmitic Acid	Palmitoleic Acid	-	-
18	Stearic Acid	Oleic Acid	Linoleic Acid	Linolenic Acid
20	Arachidic Acid	Gondoic Acid	Eicosadienoic Acid	Eicosatrienoic Acid

는 전자저울에 연결된 컴퓨터(15)에 저장되었다.

### 2.3. 바이오디젤 성분 분석

시료는 GC (Younglin Acme 6000)로 FAME함량을 측정하여 바이오디젤의 순도를 확인하였다. 실험에 사용된 컬럼은 모세관식 HP-INNOWAX 컬럼(30 m × 0.250 mm × 0.5 μm)이며 오븐온도는 140°C에서 1분간 유지시킨 후, 분당 5°C씩 가열하여 245°C에서 3분간 유지하였다. 주입구 온도는 250°C, 컬럼 유량은 3 mL/min, 분할비 30 : 1에 검출기 온도 250°C의 조건으로 FID 컬럼을 이용하여 분석하였다. 내부 표준물질인 95% methyl heptadecanoate (MH, Aldrich)를 일정 비율로 99% heptane (Junsei)에 용해시켜 표준 용액을 만든 후 표준 용액 5 mL에 채취한 시료 250 mg를 용해시켜 GC로 측정하였다. GC로 검출된 피크 중 methyl ester 면적을 구하여 이 중 표준용액의 피크를 제외하고 다음의 식으로 각 시료의 methyl ester 함량을 계산하였다. C14 : 0에서 C20 : 3까지의 FAME 명명법은 Table 1에 나타난 바와 같다. 단, Ca : b에서 a는 C분자의 개수이며 b는 이중결합(불포화지방산)의 개수를 나타낸다.

$$Y_{ester}(\%) = \left[ \frac{\sum A - A_{MH}}{A_{MH}} \right] \times \left[ \frac{C_{MH} \times V_{MH}}{m} \right] \times 100$$

여기에서  $\sum A$ 는 GC 분석결과 총 피크 면적,  $A_{MH}$ 는 MH의 면적,  $C_{MH}$ 는 MH의 농도(mg/mL),  $V_{MH}$ 는 MH의 부피(mL)이고 채취한 시료의 양은  $m$ (mg)으로 나타내었다. 또한 각각의 지방산 시료의 함량은  $Y_{fat}$  식으로 나타내었다.

$$Y_{fat}(\%) = \left[ \frac{A_L}{\sum A - A_{MH}} \right] \times 100$$

여기에서  $A_L$ 은 각각의 지방산 시료의 피크 면적이며

위의 계산식을 통해 총 함량 내의 특정 지방산의 함량을 계산할 수 있다[5].

### 3. 실험결과 및 토론

식물성유지인 카놀라유, 대두유 및 야트로파유 1,500 mL에 메탄올 1,500 mL와 알칼리성 촉매인 NaOH 4.4 g을 혼합시킨 methoxide 용액을 65°C에서 전이 에스테르화 반응시켰다. 그 후 0.2 μm 내지 0.5 μm 정밀여과용 관형 분리막을 통과시켜 바이오디젤인 FAME를 제조하였으며 분리막의 운전압력과 공급유량을 변화시키면서 FAME 함량을 측정하였다. 바이오디젤 반응 생성물에는 FAME, 글리세롤과 미 반응 식물성유지, 메탄올 및 촉매인 NaOH 등으로 이루어진다. 식물성 유지인 TG는 메탄올과 혼합되지 않고 분산성 오일입자(oil droplet)로 존재하며 입자크기는 12 내지 400 μm 범위이며 평균입자는 44 μm로 측정되었다[6,7]. 바이오디젤 생산을 위한 전이 에스테르 반응은 오일표면에서 촉매와 접촉하여 일어나며 생성된 FAME는 메탄올과 잘 혼합하여 동일한 상(phase)을 이룬다. 또한 전이 에스테르 반응의 부산물로 생성되는 글리세롤은 역미셀 입자를 형성하며 입자의 평균크기는 zeta potential 분석기로 측정된 결과 2.21 μm이었다[2]. 따라서 Fig. 3과 같이 0.2 μm 내지 0.5 μm 정밀여과막을 사용하여 반응 생성물 중 미 반응된 분산성 오일입자인 TG를 분리하여 재사용하고, 부분적으로는 반응 부산물인 글리세롤 역미셀 입자를 제거하여 효과적으로 FAME를 생산하고자 하였다.

#### 3.1. 운전압력, 공급유량에 따른 FAME 함량

먼저 카놀라유를 원료 TG로 사용하여 공칭크기 0.5 μm 정밀여과막에 통과시켜 FAME를 제조하였으며, 운전압력 0.5, 1.0, 그리고 2.0 bar, 공급유량 250, 300, 그

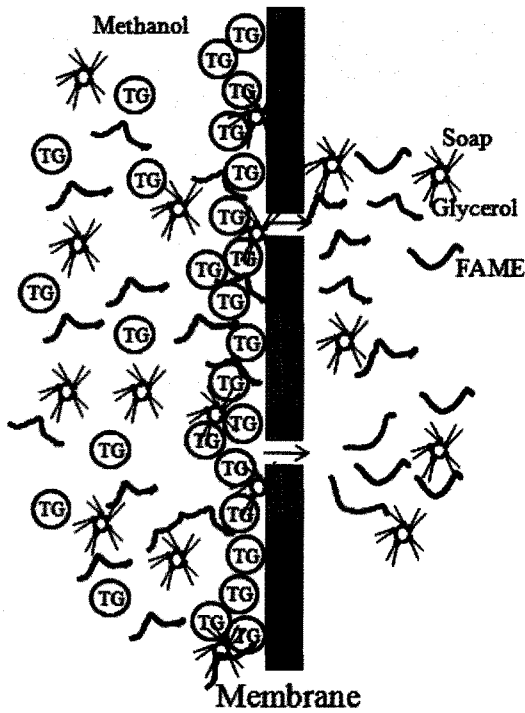


Fig. 3. Separation of triglyceride (TG) from FAME reactants by microfiltration membrane.

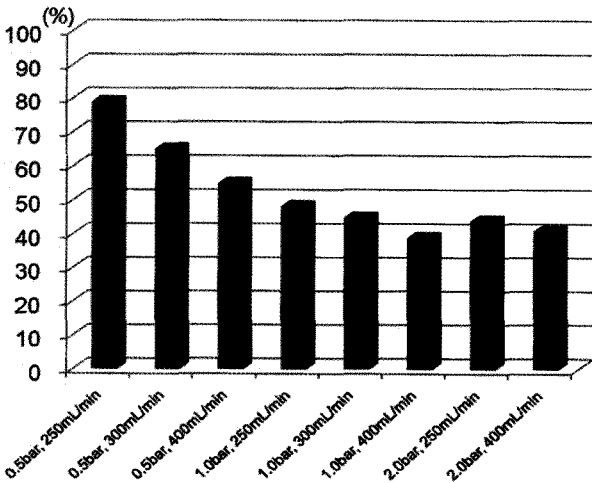


Fig. 4. FAME composition in permeate for Canola oil with respect to operating pressure and flow rate for 0.5 μm membrane module.

리고 400 mL/min까지 변화시켰다. 각각의 실험에 대한 분리막 투과액을 GC로 분석하여 FAME 함량을 Fig. 4에 나타내었다. 투과액 중 FAME 함량은 운전압력이 0.5 bar이고 공급유량이 250 mL/min인 경우 최대 79%로 나타났으며 0.5 bar일 경우 공급유량이 300, 400

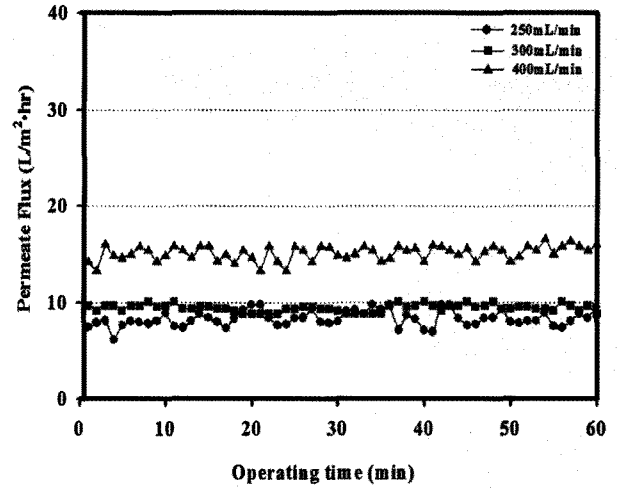


Fig. 5. Permeate flux with respect to operating time for 0.2 μm microfiltration module at 0.5 bar.

mL/min로 증가할수록 FAME 함량은 65%, 55%로 각각 감소함을 알 수 있다. 또한 공급유량을 250 mL/min로 일정하게 유지하고 운전압력이 1.0 bar로 증가시킬 경우, 투과액 중 FAME 함량은 48%로 급격하게 감소하였으나 계속하여 운전압력을 2.0 bar까지 증가시키면 투과액 중 FAME 44%로 거의 일정하게 유지되었다. 1.0 또는 2.0 bar의 운전압력에서 공급유량을 250에서 400 mL/min까지 증가시키면 투과액 중 FAME 함량은 53%에서 약 39%까지 감소함을 알 수 있다. 이는 Fig. 3에서와 같이 분리막에서 제거된 TG가 분리막 표면에 축적되어 제2의 오일층을 형성하고 오일층이 TG 또는 글리세롤을 효과적으로 제거하기 때문으로 판단된다. 그러나 오일층을 유지하는 임계압력 이상으로 운전 압력을 상승시키면 오일 입자의 형태가 변형되어 그 중 일부가 분리막을 투과하게 되고 결국 오일층이 파괴될 수 있으므로 제거율이 감소될 수 있다[8]. 또한 공급유량이 증가하면 분리막 표면에 전단속도가 증가하여 표면에 형성되는 오일층의 두께가 감소할 수 있으므로 0.5 bar에서와 같이 FAME 함량이 감소할 수 있다[9,10]. 이 경우는 분리막 표면에 축적된 오일층의 저항이 감소하는 경우이므로 임계압력 이상에서 오일층이 급격하게 파괴되는 과정과는 다르게 점진적으로 변화한다. 따라서 Fig. 4에서와 같이 공급유량에 따른 투과액 중 FAME 함량 변화가 압력 영향보다 적게 크게 나타날 수 있다.

### 3.2. 원료유에 따른 FAME 함량

원료유 종류와 공급유량을 변화시키면서 투과액 중

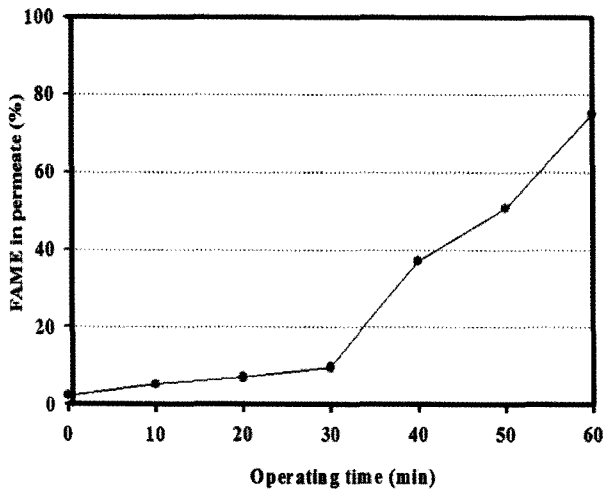


Fig. 6. FAME composition in permeate with respect to operating time for 0.2  $\mu\text{m}$  microfiltration module at 0.5 bar and 300 mL/min.

FAME 함량 변화를 측정하였다. 이 경우에는 공칭크기 0.2  $\mu\text{m}$  세라믹 관형 정밀여과막을 사용하였으며 압력을 0.5 bar로 운전하여 FAME 함량을 높게 유지하였다. Fig. 5는 먼저 카놀라유를 원료 TG로 사용할 경우 투과 시간에 따른 투과 유속을 나타낸 것으로 운전 시간에 따라서 투과유속은 일정하게 유지되었다. 공급유량이 작은 250과 300 mL/min일 경우는 투과유속이 8 내지 10  $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$  범위에서 낮게 유지되었으나 400 mL/min로 증가하면 약 15  $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ 까지 크게 증가함을 알 수 있다. 또한 공급유량 300 mL/min인 경우 투과액 중 FAME 함량을 운전시간에 따라서 분석하여 Fig. 6에 나타내었다. 분리막 투과 후 약 30분 이내에서는 전이 에스테르 반응이 천천히 진행되어 투과액 중 FAME 함량이 10% 이하이었지만 그 이후에 급격하게 증가하여 60분에는 73%까지 도달하였다. Table 2에서와 같이 바이오디젤 반응물을 분리막에 투과시킨 후 60분 경과시 투과액 중 FAME 함량은 공급유량 250, 300, 400 mL/min일 때 각각 59, 75, 그리고 94%로 증가하였다. 이 결과는 공칭크기 0.5  $\mu\text{m}$  관형 정밀여과막의 경우와 대조적으로 공급유량이 증가하면서 투과액 중 FAME 함량이 증가하는 특이한 현상이다. 반복적인 실험에도 불구하고 유사한 결과를 나타냈으며 이와 같은 현상에 대하여는 추가적인 연구가 필요하다.

원료유종을 대두유와 자트로파유로 변경하여 공칭크기 0.2  $\mu\text{m}$  세라믹 관형막에서 0.5 bar로 실험을 수행하

Table 2. FAME Composition in Permeate for Canola, Soybean and Jatropha Oils for 0.2  $\mu\text{m}$  Membrane Module at 0.5 bar and 60 mins

	Canola oil	Soybean oil	Jatropha oil
250 mL/min	59 wt%	77 wt%	88 wt%
300	75	38	72
400	94	43	60

Table 3. Density of Methanol, Triglyceride and Permeate Membrane from Canola Oil

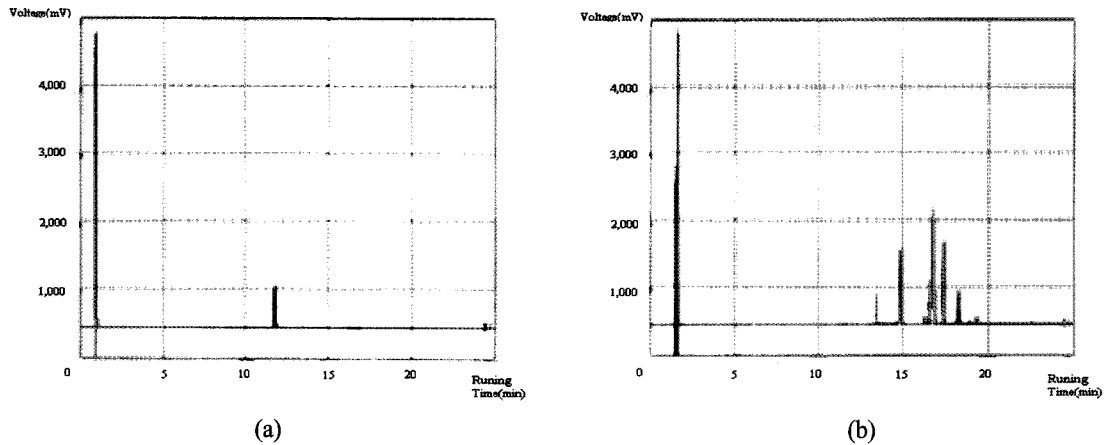
	Methanol	Canola oil	Permeate	Retentate	
				Upper	Lower
Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0.793	0.917	0.790	0.792	0.909

였다. 카놀라유, 대두유와 자트로파유를 TG로 사용할 경우 투과액 중 FAME 함량을 각각 분석하여 Table 2에 나타내었다. 앞에서 설명한 바와 같이 카놀라유 실험결과와는 대조적으로 공급유량이 가장 낮은 250 mL/min에서 대두유 및 자트로파유를 TG로 사용할 경우 각각 77% 및 88%로 높게 나타났다.

### 3.3. 조성 분석

#### 3.3.1. 밀도에 의한 FAME 생성

메탄올과 식물성 원료유(TG), 바이오디젤의 밀도차를 이용하여 간접적으로 FAME 함량을 추정하였다. 먼저 메탄올과 카놀라유를 각각 400 mL씩 혼합하여 상온인 20°C에서 0.5 bar, 300 mL/min의 운전조건으로 40분 동안 분리막을 투과하였다. 그 결과 150 mL의 용액이 투과하였으며 이 용액을 상온에서 1일 이상 방치하여도 상분리가 일어나지 않았다. 하지만 분리막 배제액은 2상으로 층 분리되었다. 따라서 메탄올, 카놀라유, 투과액, 그리고 배제액의 상부액 및 하부액의 밀도를 밀도 측정기(AntonPaar사, AT/DMA 4500M)를 사용하여 측정하였으며 Table 3에 나타내었다. 투과액과 배제액 상부층의 밀도는 각각 0.790 및 0.792  $\text{g}/\text{cm}^3$ 로서 메탄올과 같으나 배제액 하부층의 밀도는 0.909  $\text{g}/\text{cm}^3$ 로서 카놀라유 밀도인 0.917  $\text{g}/\text{cm}^3$ 과 비슷하였다. 이러한 결과는 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 분리막이 실제적으로 TG는 투과시키지 않음으로써 FAME의 함량 향상을 가능하게 한다는 것을 나타낸다.



**Fig. 7.** Multi-GC peaks of (a) crude Canola oil and (b) permeate using Canola oil as triglyceride (TG) for 0.2 μm membrane module.

**Table 4.** FAME Compositions from Different Oils[11]

Vegetable oil	FAME Composition (wt%)				
	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
Soybean	6~10	2~5	20~30	50~60	5~11
Fried oil	2.5~6.5	1.3~5.6	14~43	44~68.7	-
Canola	4.3	1.3	59.9	21.1	13.2
Cotton	20~25	1~2	23~35	40~50	-
Palm	35.1	8.2	47.7	7.7	0.3
Jatropha	14.1~15.3	3.7~9.8	34.3~45.8	29.0~44.2	0.3

3.3.2. FAME 함량 분석

카놀라유 원액과 메탄올과 1 wt% NaOH 촉매 하에서 에스테르 반응 후 분리막을 투과한 시료의 FAME 함량을 GC로 분석하여 Fig. 7(a)과 (b)에 나타내었다. 카놀라유 원액의 피크에서는 Fig. 7(a)에서와 같이 최초 2 내지 3분에 heptane의 피크가 크게 검출되었으며 이후 14분대에서 MH 표준용액의 피크가 가장 크게 검출되었다. 그러나 반응 후 분리막 투과액을 분석하면 Fig. 7(b)에서와 같이 heptane과 MH 표준용액 피크 외에 C16:0~C18:3에 해당하는 FAME 피크가 나타남을 확인할 수 있다.

현재 바이오디젤을 생산하기 위하여 사용되는 각종 식물성 유지(TG)에 따른 FAME 조성을 Table 4에 요약하였다[11]. 앞에서 실험한 바와 같이 카놀라유를 TG로 사용하고 0.2 μm 정밀여과막으로 투과한 FAME 시료의 GC로 분석 결과를 Table 5에 나타내었다. 분리막 공급유량 250 mL/min인 경우, C18:1 함량은 62.0%로 다른 운전조건의 경우보다 약 6% 높으며 C18:2 함량

은 약 3% 낮게 분석되었으나 전반적으로 비슷한 FAME 조성 분포를 이루고 있다. 또한 Table 3과 4에 카놀라유 자료와 비교하면 본 실험에서 생성된 C18:3 함량이 5% 가량 낮지만 정상적으로 바이오디젤이 생산되었음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

고온에서도 사용 가능한 세라믹 정밀여과막은 바이오디젤 생산 원료유인 TG를 분리하여 전이 에스테르반응에 재활용할 수 있도록 사용되었으며 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 카놀라유를 원료 TG로 사용할 경우 내경 5 mm, 공칭 기공 0.5 μm 정밀여과막 투과액 중 FAME 함량은 운전압력 0.5 bar, 공급유량 250 mL/min 일 때 79%로 가장 높았다. 운전압력 1.5 bar, 공급유량 400 mL/min까지 각각 증가할수록 FAME 함량은 감소하였다.

2) 카놀라유 원료 TG의 경우 운전압력 0.5 bar에서

**Table 5.** FAME Composition in Permeate for Canola Oil for 0.2  $\mu\text{m}$  Membrane Module at 0.5 bar

Flow rate	FAME Composition (wt%)				
	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
250 mL/min	4.1	2.6	62.0	19.6	7.9
300	4.5	2.9	56.8	22.4	8.6
400	5.9	2.5	57.5	22.0	8.8

0.2  $\mu\text{m}$  정밀여과막에 대한 투과유속은 공급유량 400 mL/min일 경우 약  $15 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 이었다.

3) 대두유 및 자트로파유를 원료 TG로 사용할 경우 0.2  $\mu\text{m}$  정밀여과막 투과액 중 FAME 함량은 운전압력 0.5 bar, 공급유량이 최저인 250 mL/min일 때 각각 77% 및 88%였다.

그러나 분리막을 이용한 효율적인 바이오디젤 생산 공정을 확립하기 위하여 과량으로 사용된 메탄올의 회수와 반응에 재활용할 경우 바이오디젤 품질 관리 등 추가적인 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. K. Y. Chung, L. H. Kim, S. I. Chen, W. J. Lee, and H. C. Shin, "The experiment of oxidation characteristics for biodiesel," Technical Report, Seoul National Univ. of Tech. (2007).
2. Y. Wang, X. Wang, Y. Liu, S. Ou, Y. Tan, and S. Tang, "Refining of biodiesel by ceramic membrane separation," *Fuel Processing Tech.*, **90**, 422 (2009).
3. P. Cao, M. A. Dube, and A. Y. Tremblay, "High-purity fatty acid methyl ester production from canola, soybean, palm, and yellow grease lipids by means of a membrane reactor," *Biomass & Bioenergy*, **32**, 1028 (2008).
4. P. Cao, M. A. Dube, and A. Y. Tremblay, "Methanol recycling in the production of biodiesel in a membrane reactor," *Fuel*, **87**, 825 (2008).
5. Young Lin Corporation, "Analysis of ester contents in biodiesel using gas chromatography," www.younglin.com (2009).
6. P. DeRoussel, D. V. Khakhar, and J. M. Ottino, "Mixing of viscous immiscible liquids. Part 2: Over-emulsification-Interpretation and use," *Chem. Eng. Sci.*, **56**, 5531 (2001).
7. P. Cao, A. Y. Tremblay, M. A. Dube, and K. Morse, "Effect of membrane pore size on the performance of a membrane reactor for biodiesel production," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **46**, 52 (2007).
8. K. Y. Chung, J. J. Kim, K. J. Kim, and A. G. Fane, "Microfiltration characteristics for emulsified oil in water," *Membrane Journal*, **8**, 203 (1998).
9. S. H. Yoon and C. H. Lee, "The critical flux in microfiltration: Comparison between theoretical and experiment values," *Membrane Journal*, **7**, 150 (1997).
10. J. G. Choi and K. Y. Chung, "Permeation characteristics of the microfiltration tubular module using the discharged rod," *Membrane Journal*, **19**, 285 (2009).
11. E. Warsiki and G. Sitompul, "Jatropha curcas as biodiesel feedstocks," pp 5-75, SBRC, New York (2007).