

## 초임계유체 공정에 의한 유효지방산이 풍부한 현미유의 추출

김형진·신명옥·홍인권·박경애\*

단국대학교 공과대학 화학공학과, \*서울특별시 보건환경연구원  
(1997년 7월 28일 접수, 1997년 9월 18일 채택)

### Extraction of Brown Rice Oil Including Essential Fatty Acid Using Supercritical Fluid Process

H. J. Kim, M. O. Shin, I. K. Hong, and K. A. Park\*

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Dankook Univ., Seoul 140-714, Korea  
\*Seoul Metropolitan Government of Health and Environment, Seoul 137-130, Korea  
(Received July 28, 1997, Accepted September 18, 1997)

요약: 건강식품으로 각광받고 있는 현미유는 palmitic acid, linolenic acid, linoleic acid, oleic acid, stearic acid, tocopherol, squalene 등을 포함하고 있다. 본 연구에서는 국내산 현미겨로부터 초임계 이산화탄소를 이용하여 현미유를 추출하고, GC-MSD를 이용하여 조성을 분석하였다. 현미유의 추출량은 추출공정의 조작온도와 압력에 의존하였으며, 초임계 이산화탄소의 환산밀도에 따라 추출된 기름내 지방산의 조성이 변화되었다. 또한 70~80%의 기름이 4시간 정도의 조작시간내에 추출됨이 확인되었다. 특히 용매추출공정과 초임계유체 추출공정을 비교한 결과 초임계유체 추출공정에서 추출된 기름의 조성에서만 squalene이 포함되어 있음이 확인되었다.

**Abstract:** Brown rice oil contains palmitic acid, linolenic acid, linoleic acid, oleic acid, stearic acid, tocopherol, squalene, etc. The oil including essential fatty acids was extracted from the domestic brown rice bran using supercritical carbon dioxide(SCC) process, and the extracts were analyzed with GC-MSD. The extraction amount of brown rice oil was dependent upon the operating pressure and temperature, and the fatty acid composition of oil was varied with the reduced density( $\rho_r$ ) of the SCC. About 70~80% of brown rice oil was extracted in 4 hours. Especially, squalene which was not found in solvent extract phase was identified in supercritical fluid extraction phase only.

#### 1. 서론

최근 건강식품으로 각광받고 있는 현미유는 palmitic acid, linolenic acid, linoleic acid, oleic acid, stearic acid, tocopherol, squalene 등을 포함하고 있는데 이 중 linolenic acid, linoleic acid, oleic acid, tocopherol, squalene은 불포화 지방산으로서 인체내에 결핍하게 되면 과콜레스테롤혈증(hypercholesterolemia)이 증가되어 심장질환, 발육부진, 지방간, 탈모, 과도한 신진대사, 피부병 등을 유발한다. 특히 체내에 섭취된 linoleic acid와 linolenic acid는 대사작용에 의해 불포화  $C_{20}$ 과  $C_{22}$ 지방산으로 바뀌는데 이 때 합성되는 Prostaglandin은 평활근수축 및 혈압강하작용을 유발하므로 출산시 분만촉진 및 위궤양치료, 기관지 천식의 치료, 혈소판 응고방지의 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 또한 혈전색전증의 예방에 주효한 EPA(Eicosapentaenoic acid)는 linolenic acid로부터 유도된다. 이외에도 위에 열거한 지방산들의 수소결합으로 생기는 기하 지

방산(trans-fatty acid)들은 콜레스테롤 수치를 낮춘다거나 세포의 효소활동 등에 적용되고 있으며 이에 대한 활발한 연구가 진행중이다[1]. 곡류의 지방은 대부분 불포화지방산으로서 현미유는 현미를 도정하여 얻은 쌀겨와 쌀눈을 추출하여 얻는데 약 0.4~1.0%의 지방이 쌀눈과 쌀겨에 주로 들어 있고 불포화지방산은 전체의 73~92% 정도 존재하며 비타민 E도 함유하고 있다. 이러한 지질은 특히 현미유의 맛과 향에 영향을 준다[2].

초임계유체 기술의 적용은 1980년대에 접어들면서 많은 발전을 하여 1990년대에는 석유화학, 제약, 식품, 생화학 분야 뿐만 아니라 고분자의 합성, 고분자의 분획(fractionation), 고분자와 유기용매와의 분리, 단량체의 정제 및 건조, 촉매의 재생, 섬유의 염색 등 많은 분야에 사용되고 있다[3-8].

현미유를 비롯한 대부분의 기름은 증류나 용매추출에 의해 생산되고 있는데 용매추출의 경우 초임계유체를 이용한 추출에 비해 다량의 기름을 얻을 수 있다는 장점은 있으나 추출된

기름과 쌀겨로부터 용매를 분리해야 하는 번거로움이 있고 또한 용매가 기름에 잔류할 가능성도 있다. 따라서 초임계 이산화탄소를 이용하여 추출할 경우 증류나 용매추출 등의 방법에서 발생할 수 있는 고온에 의한 변성, 유기용매에 의한 화학적 변성이나 인체에 유해한 추출용매의 잔류 가능성을 없앨 수 있으며, 전체 추출물의 추출효율을 증대시킬 수 있을 뿐만 아니라 초임계유체 용매를 회수하여 재사용함으로써 생산단가를 절감시킬 수 있다. 또한 초임계유체 크로마토그래피와 초임계유체 추출장치를 함께 사용할 경우 현미유에서 불포화 지방산들을 탄소수에 따라 분리하는 것도 가능하여 유효 지방산이 풍부한 형태의 현미유를 추출할 수 있을 것으로 기대된다[9].

따라서 본 연구에서는 초임계 이산화탄소를 이용하여 현미겨로부터 현미유를 추출하고, 추출온도와 압력을 변화시키고 이동상의 유량을 측정하므로써 최적의 추출 조작 조건을 제시하고 추출속도 특성을 관측하고자 하였다. 또한 각 추출조건에서 분배계수를 계산하여 유효 지방산의 선택적 추출이 가능한가를 연구하고자 하였고 초임계유체 추출공정을 부가가치가 큰 소량의 물질을 다루는데 적용시키고자 시도하였다.

## 2. 실 험

### 2.1. 시료의 준비

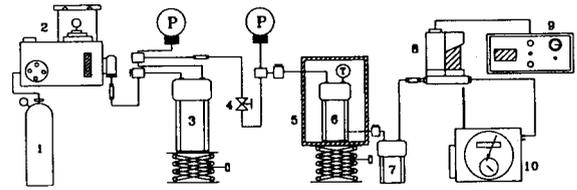
현미를 한 번 도정하여 얻은 고운 쌀겨를 세척하여 40℃의 오븐에서 2일간 건조한 후 분쇄하여 sieve를 이용하여 여과하였다. 여과된 입자의 평균 지름은 0.5mm이다.

### 2.2. 추출방법

#### 2.2.1. 초임계유체 추출

현재까지 많은 초임계 추출공정의 연구로부터 본 연구에서 설계되어야 할 초임계유체 추출장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 기체 펌프(Hydro-Pac사)를 사용하여 이산화탄소를 가압한 후 용매 저장조로 공급하였다. 추출조는 고압(약 7000 psi)에 충분히 견딜 수 있게 설계되었으며, 부피는 70ml로 고정하였다. 전방 압력조절기(Tescom 26-1021-24)로 추출조의 압력을 조절하여 용매 저장조의 이산화탄소를 추출조에 공급하였다. 준비된 시료 30g을 먼주머니에 담은 후 이를 추출조에 넣는다. 추출조 내부의 온도는 열전대를 설치하여 측정하며, 추출조의 온도를 일정하게 유지하기 위해 항온조를 이용하였다. 추출온도는 40℃, 50℃, 70℃로 유지하여 공정의 경제성과 추출되는 시료의 변성을 방지하였다. 압력범위는 3000 psi부터 6000 psi까지이며, 1000 psi씩 압력을 증가시키며 각 온도, 압력 조건에서 매 1시간마다 시료를 채취하면서 8시간 동안 추출조작을 계속하였다. 또한 초기 1시간 동안의 추출량을 따로 비교하기 위해 각 압력에서 1시간의 추출시간을 준 후 시료를 채취하였다.

초임계 이산화탄소의 유량을 측정하기 위해 마이크로 미터링 밸브, 유량계, 유속 조절기(Sierra 902C-PS)를 연결하여 유속을 900 SCCM으로 조절한 후, 습식 가스 계량기(SINA AWA W-NK-1A)를 연결하여 추출조에서 연속적으로 방출되는 초임계 이산화탄소의 유량을 측정하였다.



- |                               |                            |
|-------------------------------|----------------------------|
| 1. CO <sub>2</sub> cylinder   | 6. Extractor               |
| 2. Gas-booster                | 7. Extract sampling vessel |
| 3. SCC reservoir              | 8. Flow meter              |
| 4. Forward pressure regulator | 9. Flow rate controller    |
| 5. Air-bath                   | 10. Wet gas meter          |

Fig. 1. Schematic diagram to design SCFE - process.

### 2.2.2. 용매추출

본 연구에서 용매추출은 Bligh 등[10]의 방법에 의해 다음과 같이 실시하였다. 즉 분쇄한 현미겨 30g을 클로로포름:메탄올:물(1:2:0.8, 부피비) 혼합용매 600ml와 혼합하여 진탕 플라스크에 넣고 테플론 마개를 막고 20℃의 진탕배양기로 48시간 추출하고, 이 추출물을 분액 여두에 옮겨 클로로포름:물(1:1, 부피비) 혼합용매를 넣어 분액 여두내의 조성을 클로로포름:메탄올:물(2:2:1.8, 부피비)의 비율로 하여 정치시킨 후 하부의 클로로포름층을 회수하였다. 추출하고 남은 잔사에 혼합용매를 넣고 24시간 더 추출하여 클로로포름층을 회수하고, 최종적으로 24시간 더 추출하여 클로로포름층을 회수하였다. 회수된 클로로포름층은 감압해서 회전 증발기를 이용하여 35℃에서 농축하였다.

### 2.3. 분석

추출되는 시료는 에스테르화한 후 GC-MSD를 사용하여 분석하였다. 본 연구는 다음과 같은 방법으로 추출된 현미유를 에스테르화하였다. 현미유 100mg을 시험관에 취하고 BF<sub>3</sub>-메탄올 용액 2ml를 가한 후 냉각기를 붙이고 5분간 80℃로 가열하였다. 가열이 끝나면 방냉하였다가 염화나트륨 포화용액 6ml를 가하고, 다시 헥산 6ml를 가하였다. 시험관을 흔들어 섞고 지방산 methylester를 헥산층으로 용해하고 잠시 정치하였다가 두 층으로 분리되면 상층을 분리하여 무수황산나트륨으로 건조시켰다[11].

GC는 HP사의 5890 series II 모델을 사용하고 질량분석기는 HP사의 5972 mass selective detector를 사용하였다. 이 때 오븐의 온도는 150℃에서 320℃까지 10℃/min으로 승온시키면서 분석하였으며, 검출기의 온도는 280℃로 유지하였다. 시료의 주입량은 1 μl로 하였으며, 컬럼은 길이 30m, 내경 0.2mm인 HP1 컬럼을 사용하였다. 이동상으로는 헬륨을 사용하였으며 capillary head pressure는 15psi, split ratio는 100:1로 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 추출속도 특성

일정한 온도에서 압력에 따른 1시간 동안의 추출량 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 여기서, 추출량은 최대 추출량, W<sub>0</sub>를 정

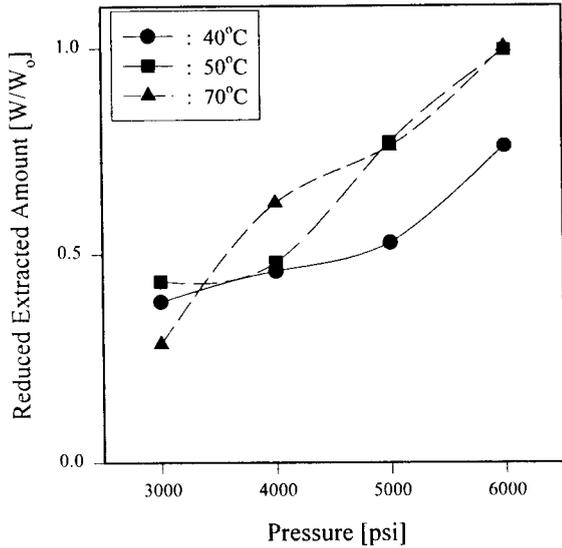


Fig. 2. Reduced extracted amount of brown rice oil vs. extraction pressure in 1 hour.

규화(normalization)하여 각 압력에서의 추출량,  $W$ 를 나타낸 값이다. 그림에서 알 수 있듯이 일정한 온도에서 압력이 증가함에 따라 추출량은 증가하였으며, 추출압력이 5000, 6000 psi 인 경우에는 50°C와 70°C의 추출량이 비슷함을 알 수 있고 40°C의 경우에는 50°C와 70°C에 비해 추출량이 많지 않으므로 공정의 경제성을 고려할 때 70°C보다는 50°C가 적합한 추출온도로서 추천될 수 있다. 또한 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는 추출온도 40°C, 50°C, 70°C에서 추출시간에 대한 추출량의 변화를 나타낸 그림으로서 추출시간이 4시간일 경우 전체 추출량의 약 70~80%가 추출됨을 확인하였다. 또한 온도가 일정할 경우 기름의 전체량이 추출되기 위한 소요시간은 높은 압력에서 빠르다는 것을 알 수 있다.

추출용매의 유속, 온도, 압력에 따른 조작조건에서 추출속도 특성은 각각의 그림에서 알 수 있듯이 일정 시간내에는 추출속도가 대체로 선형적으로 나타나고, 그 시간이 경과하면 추출속도가 감소하여 비선형으로 나타나는데 추출속도가 변화하는 시간을 전이시간(transition time;  $t_{shift}$ )으로 정의할 수 있다. 즉, 추출속도가 선형인 단계에서는 일정한 막울속 단계(film-controlled constant rate mode)를 따르고 추출속도가 비선형으로 바뀌면서 확산율속 단계(diffusion-controlled falling rate mode)를 따르게 되는데 본 연구에서는 90%가 추출되는 5시간을 전이시간으로 정의하였다. 정량적인 관점에서 볼 때 추출량은 전이시간 이전에 대부분 추출( $m_{shift}/m_0 > 0.9$ )되는 것으로 나타나기 때문에 다음과 같은 추출속도식을 적용할 수 있다[12].

$$m(t) = k_g A_s V \Delta C_m \quad (1)$$

$$A_s = 6(1-\phi)/d_p \quad (2)$$

$$\Delta C_m = \frac{C_{sat} - C_{ext}(t)}{\ln \frac{C_{sat}}{\sum C_{ext}(t)}} \quad (3)$$

위 식에서  $m(t)$ 는 시간  $t$ 에서 추출된 기름의 양이고,  $A_s$ 는

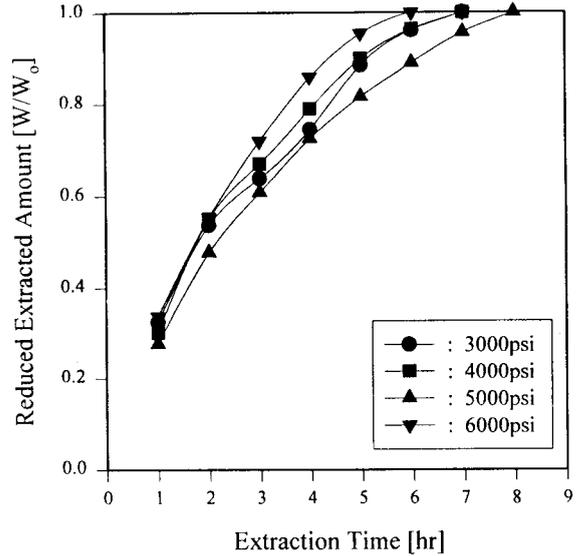


Fig. 3. Reduced extracted amount of oil as a function of contacting time in extractor at 40°C.

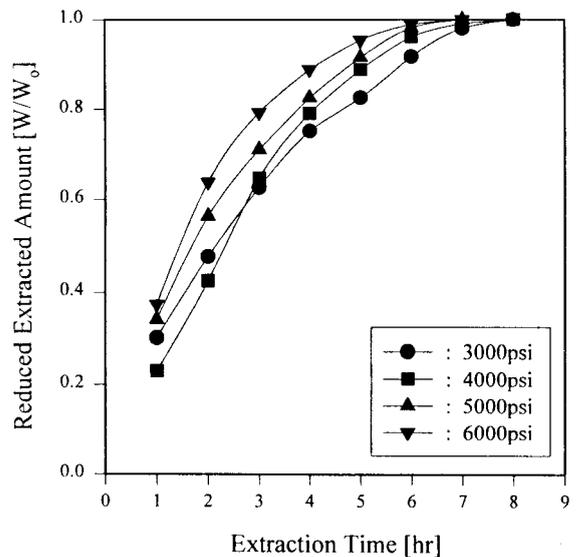


Fig. 4. Reduced extracted amount of oil as a function of contacting time in extractor at 50°C.

조임계 이산화탄소 용매와 고체시료의 유효 접촉면적,  $V_t$ 는 추출조내 고정층의 부피,  $\Delta C_m$ 은 시료의 초기 포화 기름량에서 특정시간까지 추출된 양에 대한 대수평균으로 식 (3)과 같다.  $k_g$ 는 추출조내에서 고체 시료상으로부터 조임계유체상 사이의 조임계유체내 확산과 유체흐름에 의한 영향을 종합하는 물질 전달 계수이다. 각 조건에서의 최대추출량과 초기 포화농도,  $\Delta C_{sat}$  그리고 물질전달계수를 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서는 무차원수를 이용하여 유사해석을 하기 위해 조임계 이산화탄소 용매내에서 확산계수( $D_c$ )를 Takahashi가 제안한 식을 이용하여 계산하였다[13]. 위 식으로부터 확산계수를 계산한 결과 조임계 이산화탄소 용매의 밀도  $\rho = 0.959 \text{ g/cm}^3$

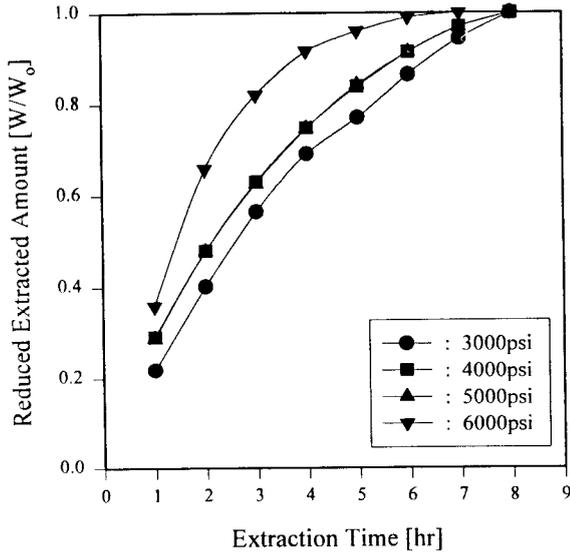


Fig. 5. Reduced extracted amount of oil as a function of contacting time in extractor at 70°C.

Table 1. Maximum Amounts for 5 Hours and External Mass Transfer Coefficients

Temp. (°C)	Pressure (psi)	Max. Amount(g)	$C_{sat}(g/cm^3) \times 10^5$	$k_f(cm/s) \times 10^5$	$D_v(cm^2/s) \times 10^5$	Re	Sc	Sh
40	3000	1.1306	0.761	1.32	4.137	277.45	11.49	83.372
	4000	1.1694	9.76	1.54	2.971	258.68	17.16	127.686
	5000	1.6639	1.06	1.64	2.062	243.70	26.23	187.653
	6000	1.6093	1.44	1.04	1.267	231.54	44.93	188.306
50	3000	1.2797	0.807	1.42	5.893	297.55	7.52	67.364
	4000	1.9827	1.16	1.81	4.140	276.07	11.53	113.157
	5000	2.2149	1.44	1.92	3.089	259.43	16.45	152.959
	6000	2.7147	1.69	2.13	2.200	246.02	24.35	229.777
70	3000	1.0825	0.732	1.29	9.714	332.56	4.06	44.000
	4000	1.9212	1.19	1.78	7.157	308.83	5.94	71.992
	5000	2.3740	1.47	1.99	5.466	289.06	8.31	97.678
	6000	2.8593	1.77	2.19	3.930	272.55	12.26	142.554

에서  $1.04 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 으로 가장 작았고,  $\rho = 0.860 \text{ g/cm}^3$ 에서  $2.19 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 으로 가장 크게 나타났다. 초임계 유체계에서 Schmidt 수(Sc)는 기체상태의 경우 1에서 액체의 경우 약 1000 사이 값을 갖는 것으로 밝혀진 바 있는데[14], 본 연구에서는 4.06~44.93의 값을 갖는 것으로 나타났다. 초임계유체 추출은 유체의 자연대류와 강제대류의 혼합공정으로 볼 수 있어 Sherwood 수(Sh), Schmidt 수(Sc), Reynolds 수(Re)와 같은 무차원 수로 상관시켜 표현할 수 있는데 다음 모델을 적용할 수 있다[15].

$$Sh = CRe^{0.385}Sc^{1/3} \quad (4)$$

$$Sh = \frac{k_f d_p M_{av}}{\rho D_v} \quad (5)$$

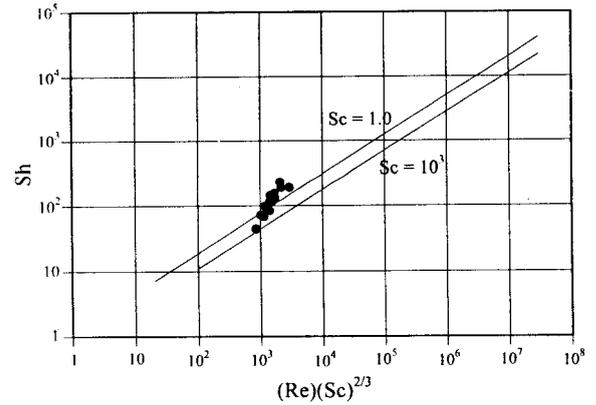


Fig. 6. Correlation for combined natural and forced convection in the brown rice bran bed-supercritical CO<sub>2</sub> system.

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_v} \quad (6)$$

$$Re = \frac{\rho u d_p}{\mu} \quad (7)$$

여기서  $d_p$ 는 시료 입자의 직경,  $\rho$ 와  $\mu$ 는 각각 용매인 이산화탄소의 밀도와 점도이고,  $u$ 는 용매의 공압속도(superficial velocity)이다.  $M_{av}$ 는 이산화탄소와 추출된 현미유의 평균분자량으로서 이산화탄소의 유속이 900 SCCM이므로 추출된 현미유의 양은 무시하고 이산화탄소의 분자량으로 하였다. 또한  $C$ 는 상수로서 Powell 회귀방법(Powell regression method)에 의해 계산하였는데 본 연구에서 파라미터  $C$ 값은 2.691로 나타났다. 대부분의 연구에 의하면 충전층내에서 공극률(void fraction)이 0.4~0.45일 경우  $C$ 값은 1.17 정도로 나타나는데[15], Fig. 6에 본 연구의 결과와 비교하여 나타내었다. 그림에서 연구 결과가 Schmidt 수가 1일 때의 물질전달 거동을 나타내는 직선에 근접함을 볼 수 있는데 이로써 본 연구의 초임계유체 추출 거동이 액상보다는 기상에서의 추출공정과 유사함을 알 수 있다.

### 3.2. 분리 특성

Fig. 7은 GC-MSD 분석에 의한 초임계유체 추출과 용매추출에 의해 추출된 현미유의 크로마토그램중의 하나이다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 가지 추출방법에 의해 palmitic, linoleic, oleic acid가 추출됨을 알 수 있으며, 특히 초임계유체 추출에 의해서 squalene이 추출됨을 확인하였다. 또한 GC 크로마토그램으로부터 지방산의 분자량이 증가함에 따라 GC 컬럼에서의 머무름시간(retention time)이 증가하는 경향을 확인하였다. 분석결과로부터 분배계수(partition coefficient,  $K$ )를 산출하기 위해  $K$ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$K = \frac{w_i^{SF}}{w_i^S} \quad (8)$$

여기서,  $w_i^{SF}$ 는 초임계유체 추출에 의해 추출된 현미유에 포함된 지방산의 질량분율(mass fraction)이고,  $w_i^S$ 는 모액의 질량분율로써 용매추출법에 의한 추출상의 조성을 이용하였다.

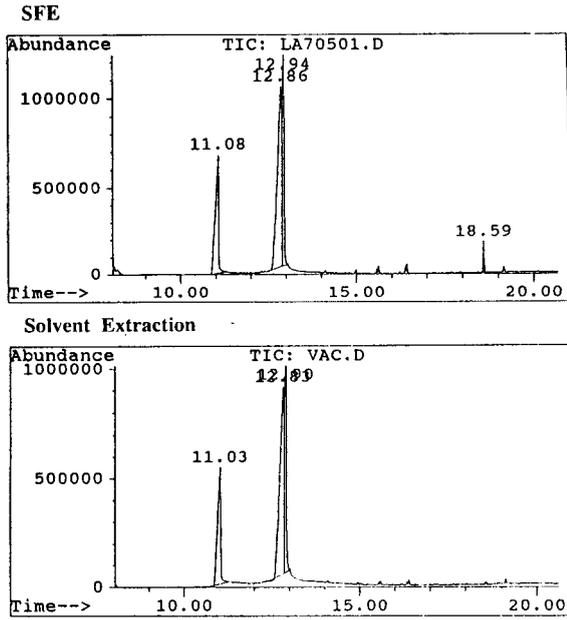


Fig. 7. GC chromatogram of solvent extracted phase and SFE phase at 50 °C, 3000 psi.

Table 2. The Partition Coefficient of the Fatty Acids in the Extracted Oil Phase

Reduced density of SCC	1.80	1.90	1.98	2.04	1.68	1.81	1.91	1.97	1.42	1.62	1.75	1.83
No. of C-atoms												
16:0	0.45	0.40	0.56	0.56	0.51	0.52	0.46	0.59	0.61	0.63	0.54	0.60
18:2	0.84	1.10	1.40	1.41	0.78	0.83	1.20	1.36	0.65	0.91	1.14	1.17
18:1	2.07	1.76	0.98	0.97	2.10	2.01	1.53	1.07	2.12	1.68	1.45	1.31
30:0*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\* Because that was not existed in solvent extraction phase, the partition coefficient of C 30:0 was not defined.

K를 지방산 각각에 대해 산출하므로써 지방산이 선택 추출됨을 확인할 수 있었으며, 각 추출조건에서 K값은 Table 2와 같다. K값은 대체로 linoleic acid의 경우  $\rho_r$ 이 증가할수록 증가하였으나 oleic acid의 경우에는 반대의 경향을 나타내었다.

Fig. 8~10은 추출온도가 각각 40°C, 50°C, 70°C일 때 추출용매인 초임계 이산화탄소의 환산밀도에 따른 지방산의 조성변화를 면적분율(area fraction)을 보정하여 무게분율(weight fraction)로 나타낸 그림이다. 즉, 기지농도의 표준시료로 검량선을 작성한 후, 초임계유체 추출과 용매추출에 의해 추출된 현미유의 크로마토그램상에서 동일 성분의 피크 면적을 비교하므로써 정량하였다. 그림에서 알 수 있듯이 각각의 추출온도에서 환산밀도가 증가함에 따라 linoleic acid(C<sub>18:2</sub>)의 추출량은 증가하는 반면 oleic acid(C<sub>18:1</sub>)는 감소하는 경향을 확인하였다. Squalene의 경우 환산밀도가 증가할수록 추출량은 감소하는 경향을 나타내었으며, 70°C, 3000 psi에서 전체 추출량의 2.9%로써 가장 많이 추출됨을 확인하였다. 또한 불포화 지방산의

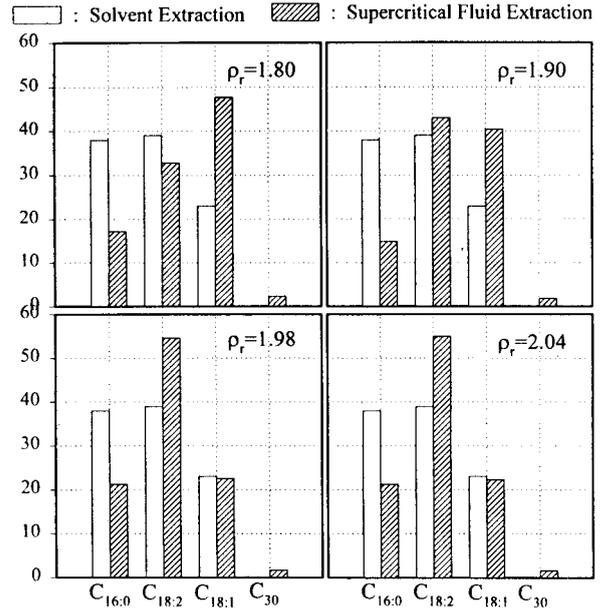


Fig. 8. Comparison of the fatty acid composition of SFE phase to solvent extraction phase at 40°C.

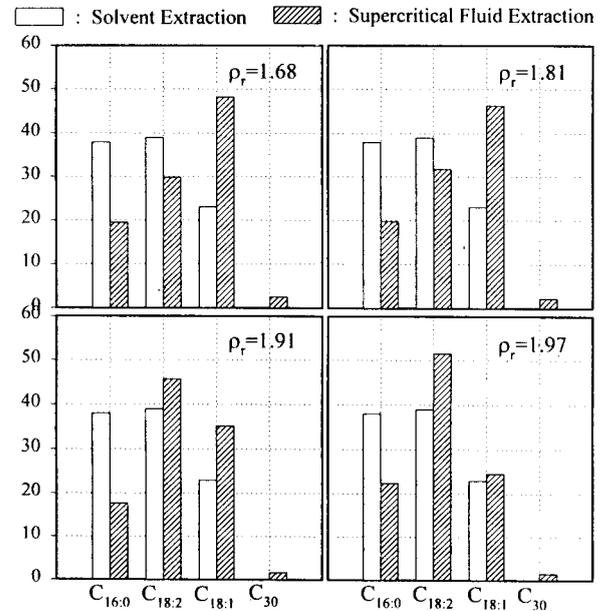


Fig. 9. Comparison of the fatty acid composition of SFE phase to solvent extraction phase at 50°C.

경우에는 40°C, 4000 psi에서 전체 추출량의 83.4%가 추출됨으로써 가장 많은 양이 추출됨을 확인하였다.

따라서 추출하고자 하는 지방산의 종류에 따라 적합한 추출조건을 선택하고, 같은 조건에서 추출을 반복하므로써 특정 성분을 농축시키는 초임계유체 추출공정의 설계가 가능함을 확인할 수 있었다.

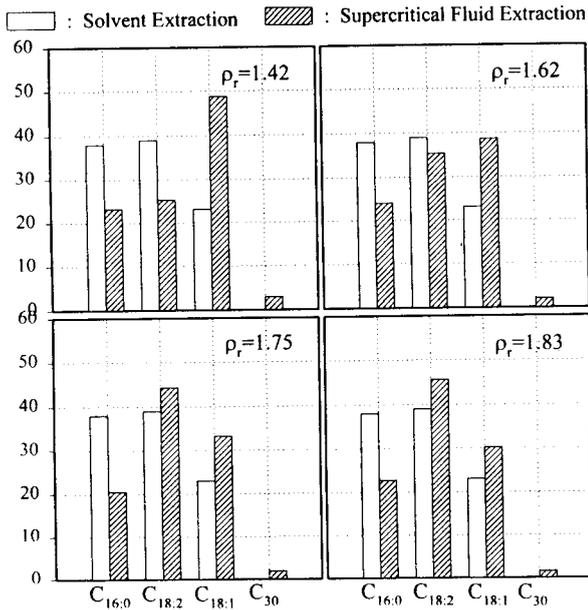


Fig. 10. Comparison of the fatty acid composition of SFE phase to solvent extraction phase at 70°C.

#### 4. 결 론

초임계 이산화탄소를 이용하여 현미로부터 현미유를 추출한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초임계 이산화탄소를 이용한 현미유의 추출에서 추출속도를 무차원 수로 상관한 결과 다음 식을 만족하였으며 초임계유체 추출거동이 액상보다는 기상추출공정과 유사함을 알 수 있었다.

$$Sh = 2.691Re^{0.585} Sc^{1/3}$$

2) 일정한 온도에서 압력이 증가할수록 linoleic acid의 추출량은 증가하는 반면 oleic acid의 추출량은 감소하였으며, 70~80%의 기름이 4시간 정도의 반응시간 내에 추출되어 추출거동에 대한 특정한 전이속도가 존재함이 확인되었다.

3) 초임계유체 공정을 이용한 현미유의 추출은 위와 같이 환산밀도(reduced density)에 의존하므로 온도와 압력을 적절히 조절하므로써 유효 지방산이 풍부한 현미유의 추출이 가능함을 확인할 수 있었으며, 이를 반복하므로써 특정성분의 농축공정으로 적용가능할 것으로 사료된다.

#### 사 용 기 호

- $A_s$  : specific mass transfer area, [cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>]
- $C_{sat}$  : initial saturated concentration, [g/cm<sup>3</sup>]
- $\Delta C_m$  : concentration difference of oil between the initial saturated and extracted in the brown rice bran bed, [g/cm<sup>3</sup>]
- $D_v$  : molecular diffusivity, [cm<sup>2</sup>/sec]
- $d_p$  : particle diameter of brown rice bran, [cm]

- $K$  : partition coefficient, [-]
- $k_g$  : external mass transfer coefficient, [cm/sec]
- $M_w$  : average molecular weight, [g/gmol]
- $m(t)$  : solute extraction rate at time t, [g/sec]
- $Re$  : Reynolds number, [-]
- $Sc$  : Schmidt number, [-]
- SCCM : standard cubic cm per min., [cm<sup>3</sup>/min]
- $Sh$  : Sherwood number, [-]
- $u$  : superficial velocity, [cm/sec]
- $V_t$  : total effect volume of brown rice bran bed, [cm<sup>3</sup>]
- $w_i$  : fatty acid mass fraction of the  $i$ -component, [-]

#### Greek Letters

- $\mu$  : viscosity, [g/cm·sec]
- $\rho$  : density, [g/cm<sup>3</sup>]
- $\phi$  : void volume fraction, [-]

#### Subscripts

- $r$  : reduced

#### Superscripts

- SF : supercritical fluid phase
- S : parent liquid phase

#### 참 고 문 헌

1. J. F. Mead, "Lipid", Plenum press, 459-473(1986).
2. 송재철, "식품재료학", 교문사, 228-237(1992).
3. V. J. Krukonis and R. T. Kurnik, *J. Chem. Eng. Data*, **30**, 247(1985).
4. T. C. Amon, R. J. Martin, and R. Kobayashi, *Fluid Phase Equilibria*, **31**, 89(1986).
5. 김형진, 박경애, 정일현, 홍인권, *공업화학*, **6**, 155(1995).
6. E. H. Chimowitz and K. J. Pennisi, *AIChE J.*, **32**, 1665(1986).
7. R. A. Van Leer and M. E. Paulaitis, *J. Chem. Eng. Data*, **25**, 257(1980).
8. S. Wolfgang, K. Dierk, and S. Eckhard, *Textile Res. J.*, **63**, 135(1993).
9. 이승범, 성대형, 김형수, 홍인권, *공업화학*, **7**, 1043(1996).
10. E. G. Bligh, and W. J. Dyer, *Can. J. Biochem. and Physiol.*, **37**, 911(1959).
11. 주현규, 조현기, 박충균, 조규성, 채수규, 마상조, "식품분석법", 유럽문화사, 410-414(1992).
12. K. P. Yoo and I. K. Hong, "Modeling of the Supercritical Fluid Extraction of Oilseeds", in *Supercritical Fluid Technology in Oil and Lipid Chemistry*, AOCS, Illinois, 132-154(1996).
13. S. Takahashi, *J. Chem. Eng. Japan*, **7**, 417(1974).
14. G. B. Lim, G. D. Holder, and Y. T. Shah, *ACS Symp. ser.* **406**, Washington, D. C. 379-395(1989).
15. W. L. McCabe, J. C. Smith, and P. Harriot, "Unit Operations of Chemical Engineering", 2nd ed., McGraw-Hill, 647-685(1993).