

폐타이어 저온열분해 복합유의 연소특성[†]

Combustion Characteristics of Waste Tire Oil Produced by Pyrolysis Process

김영중* 유영선* 윤진하* 강금춘* 이건중*
정회원 정회원 정회원 정회원 정회원
Y.J. Kim Y.S. Ryou J.H. Yun K.C. Kang K.J. Lee

1. 서론

폐타이어 발생량은 1997년의 경우 약 2000만개로서 그 중 약 61%가 재활용되고 있다. 정부에서는 폐타이어 재활용율을 2002년까지 85%로 잡고 있으며 이를 위해 폐타이어를 이용한 다양한 용도의 재생제품 기술개발 및 재생제품에 대한 수요기반 확충에 힘을 쏟고 있으나, 근본적인 처리방안 수립에 대한 대책이 미진하여 대부분 방치 또는 보관되고 있는 실정이다. 폐타이어의 이용방법으로는 폐타이어를 원형으로 이용하는 방법과 소각에 따른 열분해를 이용하는 방법 및 분말가공 방식을 통한 재활용방법 등이 있다. 원형 이용방법으로는 폐타이어를 재생하여 재활용하는 방법, 어초나 사방공사 등에 이용하는 방법이 있으며 소각 방법으로는 폐타이어의 직접소각방법(direct combustion), 열분해 방법(gasification and pyrolysis) 등이 있고, 분말 가공 방법으로는 폐타이어를 분쇄하여 분말형태의 고무입자를 가공하여 보도블록이나 고무벽돌 등을 제조하여 건설자재로 이용하거나 고속도로 등의 아스팔트 포장에 이용되는 고무아스팔트 등에 이용하는 방법이다. 직접소각은 완전산화방법이라 할 수 있고, gasification은 제한산화방법이고, pyrolysis는 비산화적 방법으로 무산소 상태의 열분해로 가스, 액체와 타르가 최종산물이다. 폐타이어의 저온열분해 공정은 파쇄된 폐타이어 또는 통타이어를 산소공급이 차단된 분해로에 투입하고서 일정시간동안 약 500C 이하에서 가열하면 복합유가 40~60%, 카본블랙 20~30%, 철심 5~10%, 미량의 가스 등이 타이어로부터 분해된다. 폐타이어의 열이용율은 일본 51%, 미국 77%로 우리나라의 3%에 비해 월등히 높다.

시설농업에서 폐타이어 재활용은 폐타이어를 건류소각하여, 그 열로서 온실난방을 시도한 바 있으나 설치비용이 고가일 뿐만 아니라 고온의 소각열로 인한 시설장치의 내구성 및 원료공급문제에 부딪쳐 크게 보급되지 못하였다. 그러나 시설농업에서 총경영비에서 난방비가 차지하는 비용이 지속적으로 증가하여 경유대체 연료의 개발이 시급한 실정이다. 폐타이어 열분해로에 의한 복합유의 경유대체 효과는 연간 약 1,000만개를 복합유생산으로 처리한다고 할 때 약 6만kl, 전체난방비의 8%인 200억원으로 추정된 바 있다 (김,1998). 그러나, 폐

[†] 본연구는 농림기술개발연구비에 의하여 수행되었음

* 농업기계화연구소

타이어복합유의 경유대체 연료로서의 가능성, 경유버너에서 연소상태 및 난방성능 등에 대해서는 아직 정확한 자료가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 페타이어 복합유의 물리적성질, 연소성능 및 난방성능을 경유와 비교 시험을 통하여 구명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 복합유의 특성

복합유의 특성을 조사하기 위해 원소분석, 발열량과 수분함량을 조사하였다. 발열량측정기는 PARR 1261 Calorimeter, 유기원소분석기는 C.H.N.-1000 Elemental Analyzer 와 총유황분석기는 SC-432DR Sulfur Analyzer를 사용하였으며 발열량분석방법으로는 KS M2057, 수분 분석방법으로는 KS M2058, 황분 분석방법은 KS M2060에 따랐다.

나. 동점도

복합유의 동점도를 측정하기 위하여 디지털점도계(Brookfield DV-II)를 사용하였고, 점도측정의 온도범위는 0~50℃에서 실시하였으며, 이때 밀도도 같이 측정하여 동점도를 환산하였다. 복합유의 온도조정은 실리콘유를 열매체로 하는 진공온도계가 부착된 전기가열식열수조를 이용하였다.

다. 연소특성

복합유와 경유의 연소특성을 조사하기 위하여 온풍기버너에서 화염의 길이 및 지름, 온풍기에서의 온풍온도, 배기가스성분 및 매연농도, 연료소비량 등을 조사하였다(Table 1).

Table 1. Experiments conducted to figure out the combustion characteristics of waste tire oil and light oil

| Main items | Checking items | Equipment | Condition | Remarks |
|------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---|------------------------------|
| Dimension of flame | length and diameter | digital camera | airflow rate: 4 levels (450, 688, 833, 1028 m ³ /hr) spraying pressure: 5 levels(6,8,10,12,14kg/cm ²) | gun type burner (3.75gal/hr) |
| Combustion performance | hot air temp. | hot air and exhaust gas temp. | T type thermocouple | same as above |
| | components of exhaust gas | CO, NO, SO ₂ , Smoke scale | exhaust gas analyzer | same as above |
| | fuel consumption | fuel consumption rate(kg/hr) | electronic balance | same as above |

건타입버너의 풍량은 댐퍼를 조정하면서 electronic barometer로 측정하였고, 분사압력은 분사펌프에 압력계를 부착하여 조정하였다. 풍량은 4수준으로 정하였고, 분사압력은 5수준으로 전부 20개의 처리를 만들어 각 처리에서 화염의 길이 및 지름을 디지털카메라로 촬영하여 화면을 읽으면서 그 크기를 정하였다. 다음, 같은 버너를 온풍기에 부착하여 온풍온도는

T타입 서모커플, 배기가스분석은 배기가스분석기를 사용하여 각 처리에서 측정하였으며, 또한 연료소비량도 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 성분과 발열량

표 2는 복합유와 경유의 성분과 발열량을 비교한 것이다. 탄소와 수소의 비율에서는 큰 차이를 보이지 않았으나 질소의 비율은 복합유가 약 25배 정도로 높았고 유황성분도 경유보다 40배 정도 더 함유하고 있음을 알 수 있었다. 보일러용 경유의 유황 규정치는 0.2%로서 복합유는 규정치 이상을 함유하고 있음을 알 수 있었지만 저유황 사용지역 이외의 난방용 규정치 1% 이하는 만족시키는 것으로 나타났다. 그리고 수분을 3.04% 정도 함유하고 있었다. 발열량은 복합유가 10,400kcal/kg 으로 경유의 9,200 kcal/kg 보다 1,200kcal/kg 더 높았다.

Table 2. Compositions and calorific value of the waste tire oil and the light oil

| item oil | compositions | | | | calorific value (kcal/kg) | water content (wt. %) | specific gravity (25℃) |
|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | carbon (wt%) | hydrogen (wt%) | nitrogen (wt%) | total sulfur (%) | | | |
| waste tire oil | 83.70 | 11.20 | 0.25 | 0.38 | 10,400 | 3.04 | 0.9 |
| light oil(B Co.) | 85.9 | 13.85 | 0.01 | 0.09 | 9,200 | - | 0.83 |

나. 동점도

그림 1은 복합유와 경유의 동점도를 보여준다. 점도 측정범위는 0℃에서 40℃로서 전체적으로 복합유의 동점도는 경유보다 1~2℃ 낮았다. 15℃에서 복합유의 동점도는 5cSt인 반면에 경유의 동점도는 3cSt로 측정되었다.

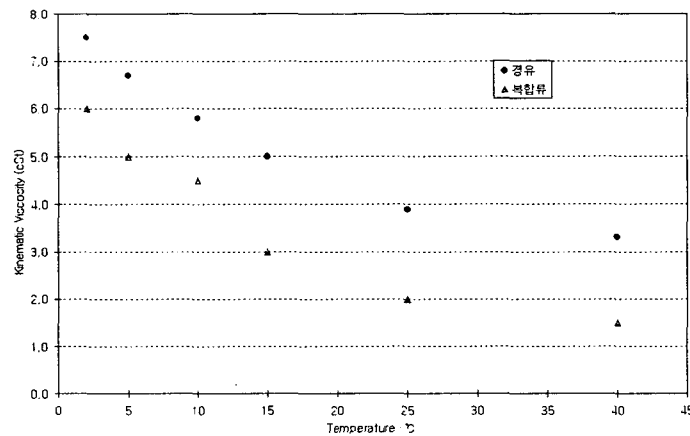


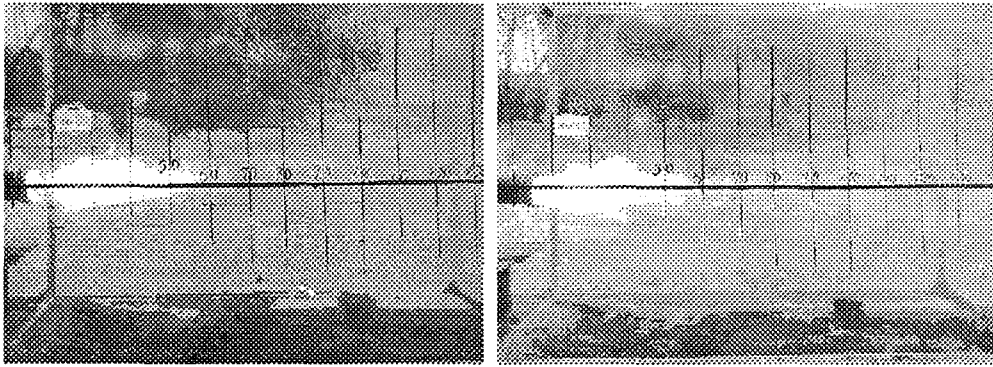
Figure 1. Comparison of kinematic viscosity between waste tire oil and light oil.

다. 화염크기

오일연소에서 화염이 좋다는 것은 오렌지색깔을 띄고 불꽃은 힘있게 적당한 길이로 굵게

나와야 하며, 탄산가스함량이 완전연소 기준에 근접해야 한다.

연소과정에서 화염의 상태를 관찰한 결과 그림 2에서 보는 바와 같이 분사압력이 10kg/cm² 이고, 풍량 833m³/hr인 경우에 복합유와 경유의 화염의 길이와 지름은 각각 580, 600mm로 160, 120mm로 관측되었고, 화염의 색깔은 경유가 복합유보다 노란빛을 더 띄고 있었다.



Light oil

Waste tire oil

Figure 2. Flame size of light oil and waste tire oil at the same combustion condition of 10kg/cm² and 833m³/hr of air supply.

표 3은 각기 다른 분사조건에서 복합유와 경유의 화염크기를 나타낸다.

Table 3. Flames dimensions of waste tire oil and light oil at the different combustion conditions

| Spraying pressure (kg/cm ²) | Air supply rate(m ³ /hr) | Dimension of flame (mm) | | | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------|----------|----------------------|-----------|----------|----------------------|
| | | waste tire oil | | | light oil | | |
| | | length | diameter | spraying rate(kg/hr) | length | diameter | spraying rate(kg/hr) |
| 6 | 450 | 800 | 200 | 11.2 | 680 | 160 | 10.1 |
| | 688 | 600 | 150 | | 520 | 150 | |
| | 833 | 550 | 140 | | 500 | 130 | |
| | 1228 | 520 | 120 | | 480 | 120 | |
| 8 | 450 | 700 | 160 | 12.5 | 680 | 160 | 11.2 |
| | 688 | 620 | 130 | | 560 | 150 | |
| | 833 | 600 | 140 | | 520 | 140 | |
| | 1028 | 580 | 120 | | 510 | 110 | |
| 10 | 450 | 880 | 170 | 14.4 | 870 | 180 | 12.7 |
| | 688 | 600 | 210 | | 620 | 140 | |
| | 833 | 580 | 160 | | 600 | 120 | |
| | 1028 | 570 | 130 | | 510 | 120 | |
| 12 | 450 | 880 | 180 | 15.5 | 980 | 180 | 13.8 |
| | 688 | 760 | 160 | | 650 | 160 | |
| | 833 | 700 | 150 | | 620 | 150 | |
| | 1028 | 650 | 140 | | 560 | 110 | |
| 14 | 450 | 1050 | 190 | 16.4 | 880 | 220 | 15.0 |
| | 688 | 810 | 200 | | 950 | 150 | |
| | 833 | 700 | 140 | | 620 | 140 | |
| | 1028 | 650 | 130 | | 600 | 130 | |

일반적으로 압력과 풍량이 클수록 화염의 크기는 작아진다는 것을 알 수 있었지만, 복합유와 경유에서 그 차이가 분명하다고 할 수 없었다. SAS분석에 의하면 귀무가설 “화염의 길이는 오일의 종류에 따라 다르다”, “화염의 지름은 오일의 종류에 따라 다르다”는 명제를 각각 확률 0.33, 0.25 수준에서 기각시킴으로서 복합유와 경유의 화염크기는 차이가 없다는 것이 입증되었다.

라. 배기가스

복합유와 경유를 건타입버너로 각 연소조건에서 연소시켜 배기가스성분을 채취하였다 (Table 4 와 5). 복합유의 전체적 연소경향은 경유와 배기가스온도, CO농도 등에서는 큰 차이를 보이지는 않았지만 황산화물(SO₂), 일산화질소(NO)에서는 매우 큰 차이를 보이고 있다. 이는 표 1에서 나타나 바와 같이 오일의 구성성분 차이 때문일 것이다. 본 시험에서 사용한 버너의 정격분사조건(10kg/cm², 688m³/hr)에서 SO₂의 농도는 경유 0 ppm, 복합유 185 ppm으로 복합유가 훨씬 높지만 저유황 1.0% 이하지역 대기환경기준치 540ppm 보다는 낮은 수치로 대기배출 허용기준은 통과하는 것으로 나타났다.

Table 4. Compositions of exhaust gas when the waste tire oils are burning in the burner

| Spraying pressure (kg/cm ²) | Air supply rate(m ³ /hr) | Compositions of exhaust gas | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|-----------------------------|----------|---------------------|--------|---------------------|-----------|----------------------|----------------------|-------------|
| | | waste tire oil | | | | | | | | |
| | | O ₂ (%) | CO (ppm) | CO ₂ (%) | NO (%) | SO ₂ (%) | air ratio | T _{gas} (C) | T _{air} (C) | smoke scale |
| 6 | 450 | 2.5 | 193 | 13.7 | 302 | 169 | 1.14 | 177 | 27 | 8 |
| | 688 | 8.5 | 0 | 9.2 | 321 | 125 | 1.68 | 237 | 27 | 6 |
| | 833 | 10.4 | 38 | 7.8 | 244 | 47 | 1.97 | 250 | 26 | 4 |
| | 1228 | 12.8 | 7514 | 6.1 | 125 | 31 | 2.54 | 253 | 26 | 5 |
| 8 | 450 | 1.3 | 8982 | 14.6 | 222 | 180 | 1.06 | 172 | 26 | 9 |
| | 688 | 6.0 | 4 | 11.1 | 433 | 154 | 1.39 | 242 | 25 | 5 |
| | 833 | 9.2 | 10 | 8.7 | 329 | 48 | 1.77 | 259 | 24 | 3 |
| | 1028 | 11.4 | 194 | 7.1 | 194 | 16 | 2.18 | 272 | 22 | 4 |
| 10 | 450 | 1.2 | off | 14.7 | 252 | off | 1.06 | 158 | 30 | 7 |
| | 688 | 5.1 | 0 | 11.8 | 422 | 185 | 1.32 | 254 | 30 | 2 |
| | 833 | 7.5 | 0 | 10.0 | 393 | 171 | 1.55 | 273 | 28 | 4 |
| | 1028 | 10.2 | 0 | 8.0 | 291 | 95 | 1.94 | 286 | 27 | 2 |
| 12 | 450 | 1.5 | off | 14.5 | 221 | off | 1.08 | 139 | 29 | 8 |
| | 688 | 4.0 | 3 | 12.6 | 391 | 273 | 1.23 | 252 | 29 | 4 |
| | 833 | 6.5 | 3 | 10.7 | 386 | 238 | 1.44 | 274 | 28 | 2 |
| | 1028 | 9.0 | 18 | 8.9 | 315 | 130 | 1.74 | 295 | 27 | 2 |
| 14 | 450 | 1.2 | off | 14.7 | 252 | off | 1.06 | 141 | 27 | 8 |
| | 688 | 1.9 | 21 | 14.1 | 348 | 252 | 1.10 | 268 | 26 | 6 |
| | 833 | 5.2 | 0 | 11.7 | 429 | 243 | 1.33 | 285 | 28 | 4 |
| | 1028 | 8.3 | 0 | 9.4 | 356 | 169 | 1.65 | 308 | 29 | 2 |

Table 5. Compositions of exhaust gas when the light oils are burning in the burner

| Spraying pressure (kg·cm ²) | Air supply rate(m ³ ·hr) | Compositions of exhaust gas | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|-----------------------------|----------|---------------------|----------|-----------------------|-----------|----------------------|----------------------|-------------|
| | | light oil | | | | | | | | |
| | | O ₂ (%) | CO (ppm) | CO ₂ (%) | NO (ppm) | SO ₂ (ppm) | air ratio | T _{gas} (C) | T _{air} (C) | smoke scale |
| 6 | 450 | 3.3 | 82 | 13.1 | 36 | 0 | 1.18 | 181 | 33 | 9 |
| | 688 | 9.2 | 94 | 8.7 | 27 | 0 | 1.79 | 235 | 33 | 3 |
| | 833 | 11.0 | 1346 | 7.4 | 6 | 0 | 2.09 | 246 | 33 | 3 |
| | 1228 | 15.9 | 3599 | 3.7 | 22 | 68 | 4.10 | 187 | 32 | 5 |
| 8 | 450 | 1.2 | 11523 | 14.7 | 27 | 327 | 1.06 | 169 | 33 | 9 |
| | 688 | 6.9 | 0 | 10.4 | 40 | 0 | 1.49 | 243 | 33 | 2 |
| | 833 | 9.5 | 0 | 8.5 | 34 | 0 | 1.82 | 257 | 33 | 2 |
| | 1028 | 11.8 | 2101 | 6.8 | 4 | 0 | 2.28 | 270 | 33 | 4 |
| 10 | 450 | 0.6 | off | 15.1 | 31 | off | 1.03 | 164 | 32 | 8 |
| | 688 | 5.4 | 1 | 11.5 | 47 | 0 | 1.34 | 251 | 31 | 1 |
| | 833 | 11.0 | 21 | 7.4 | 28 | 0 | 2.10 | 284 | 33 | 2 |
| | 1028 | 10.6 | off | 7.6 | 31 | off | 2.02 | 285 | 32 | 1 |
| 12 | 450 | 1.1 | off | 14.8 | 36 | off | 1.06 | 156 | 32 | 9 |
| | 688 | 4.1 | 0 | 12.5 | 51 | 0 | 1.24 | 256 | 32 | 2 |
| | 833 | 6.5 | 0 | 10.7 | 48 | | 1.44 | 281 | 33 | 1 |
| | 1028 | 9.6 | 0 | 8.4 | 38 | | 1.84 | 295 | 31 | 2 |
| 14 | 450 | 1.3 | off | 14.6 | 33 | over | 1.07 | 151 | 31 | 8 |
| | 688 | 2.6 | 0 | 13.7 | 52 | 0 | 1.14 | 267 | 31 | 3 |
| | 833 | 6.0 | 0 | 11.1 | 49 | 0 | 1.39 | 273 | 28 | 1 |
| | 1028 | 8.5 | 0 | 9.2 | 49 | 0 | 1.68 | 306 | 29 | 1 |

4. 요약 및 결론

페타이어복합유의 원소성분중 탄소, 수소의 양은 경유와 비슷하였지만 질소, 황은 각각 0.25, 0.38%로 경유의 0.01, 0.09% 보다 월등히 높았고 이로 인해 배기가스 성분에서 질소화합물과 황화합물도 높게 나타났다. 복합유의 연소특성시험은 건타입버너에서 분사압력과 버너의 풍량을 조절하여 화염크기와 배기가스성분을 경유와 비교하여 조사한 결과 복합유의 화염의 크기 및 배기가스온도는 경유와 차이가 없었고 배기가스 중의 SO₂와 NO는 높았으나 대기오염 배출허용기준치 이하로 나타나 경유대체유로 사용하여도 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

- 가. 김홍모. 1998. 시설농업 난방용 연료회수를 위한 페타이어의 저온열분해 처리기술개발. 농림기술개발사업계획서
- 나. 김광렬, 노수영. 1995. 연소공학 동화기연
- 다. 김영중, 유영선, 장진택, 윤진하, 연태용. 1999. 온풍난방기용 중유버너의 분사특성과 연소특성. 한국농업기계학회지 제 24권 2호.