

바이오 에탄올 혼합유에 대한 디젤기관의 연소특성

정 석 호*

다이하츠 디젤 주식회사 연구부

Combustion characteristics of diesel engine with bio-ethanol blend fuel

Suk-Ho JUNG*

Department of research and development, DAIHATSU DIESEL MFG. CO. LTD, Shiga-Pref., 524-0044, Japan

There are increased in using the bio-ethanol, as the carbon neutral attracts many researchers due to a reduction in carbon dioxide spotted as the global warming gas. A gasoline engine with 100% of the bio-ethanol was developed and used in Brazil already, but researches of using the bio-ethanol in diesel engines are lack. In this study, combustion tests with blend fuel of the gas oil and bio ethanol by 50% maximally due to a low cetane number of bio-ethanol were accomplished as a basic study of introduction of using the bio-ethanol in diesel engines. The result was that smoke emission was decreased with increase in proportion of the bio-ethanol, due to the increase of a amount of pre-mixed combustion with ignition delay. Although the amount of CO₂ is reduced according as the bio-ethanol is used(carbon neutral), the emission of CO₂ with increase in the proportion of the bio-ethanol was more increased due to lower a heat value of bio-ethanol than gas oil.

Key words : Bio-Ethanol, Ignition delay, Smoke reduction, Amount of premixed combustion

서 론

지구 온난화의 주범으로 지목되고 있는 이산화탄소(CO₂)에 관한 배출량 규제에 대해서 세계 각국이 움직이기 시작해서, 선진국들 간의 회담에서는 실제적인 규제 수준에 대한 논의가 이루어지고 있다. 이러한 상황에서 대두되고 있는 것

이 탄소 뉴트럴(carbon neutral)이다. 탄소 뉴트럴은 바이오매스로부터 바이오연료를 만들어 사용하고 연소에 의해 배출되는 이산화탄소는 다시 바이오매스의 광합성 작용에 이용되어 바이오매스가 성장하고, 성장한 바이오매스로 바이오연료를 만드는 탄소의 순환을 일컫는다. 탄소 뉴트

*Corresponding author: sukho1001@hotmail.com, Tel: 81-70-5502-2315, Fax: 81-77-583-6417

럴로 현재 가장 일반적으로 알려진 것이 바이오 에탄올로, 2005년 이후 소비량과 생산량이 급격히 증가하고 있다. 에탄올은 바이오 에탄올과 합성 에탄올로 나누어지는데, 합성 에탄올은 석유, 천연가스 및 석탄으로부터 생산하기 때문에 자원문제와 이산화탄소 감소와는 거리가 멀다. 때문에, 바이오매스로부터 얻어지는 바이오 에탄올이 청정에너지로서 가치를 인정 받고 있다.

현재, 바이오 에탄올의 생산량은 재료로부터 보면 사탕수수 5200(l/ha), 사탕무 3900(l/ha), 감자 2900(l/ha), 옥수수 2100(l/ha)의 순이지만, 재료의 중량당 생산량은 옥수수, 보리류, 단수수, 쌀의 순으로, 전부 340(l/t) - 300(l/t)의 생산효율을 가지고 있다고 OSEI (2008)는 보고하고 있다. 주요국의 에탄올 생산량을 보면 미국이 2006년 1838(만kl), 유럽은 158(만kl), 브라질이 약 1800(만kl)에 이르고, 아시아 지역에서도 중국이 375(만kl), 인도가 220(만kl)에 이른다. 생산량에 따라 각국의 자동차 연료로 에탄올의 이용률도 증가하고 있다.

현재 자동차 연료로 사용되고 있는 에탄올은 무수 에탄올을 휘발유에 3 - 10%정도 혼합시키는 저농도 혼합유에 사용되고 있다. 이는 종래의 가솔린 차량에 사용할 수 있는 바이오 에탄올의 혼합비가 10%이하의 기술적인 문제가 가미되어 있기 때문이다. 그러나 미국에서는 혼합비 85%의 바이오가솔린이 보급되기 시작했고, 특히, 브라질에서는 100% 바이오 에탄올이 사용 가능한 FFV (Flexible Fuel Vehicle)이 보급되어 있다.

한편, 가솔린 기관에 바이오 에탄올을 이용하는 연구가 진보된 것에 비해, 육용뿐 아니라 선박에도 사용되고 있는 디젤기관에 바이오 에탄올을 이용하는 연구가 거의 진행되고 있지 않다. 이는 에탄올의 세 탄가가 낮은 특성 때문에 압축착화 방식의 디젤기관에는 맞지 않는 연료이기 때문이다. 특히, 경유와 에탄올은 혼합되지 않고 분리되기 때문에 가솔린과 같이 혼합유 사용도

쉽지 않다. 디젤기관에 에탄올을 이용한 연구는 Ahmed (2001), Hahn-Hägerdal et al.(2006), Hansen et al.(2005), Kwanchareon et al.(2007), Mohammadi et al.(2005), Yamada et al.(2005) 모두 경유에 최대 20%의 에탄올을 유화시켜 연소 특성을 살펴본 것이 대부분이다.

바이오 에탄올은 함산소 연료이기 때문에 디젤기관이 풀어야 할 큰 과제인 매연의 감소에 큰 효과가 있을 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서는 세 탄가가 낮은 바이오 에탄올을 디젤기관에 이용하기 위해 안정적인 연소를 얻을 수 있도록 경유와 최대 50%까지 혼합시킨 연소실험을 행하였고, 혼합비에 따른 연소특성과 배기특성을 밝혔다. 특히, 매연감소의 원인에 대해서는 연소특성과 관련하여 규명하였다.

실험장치 및 방법

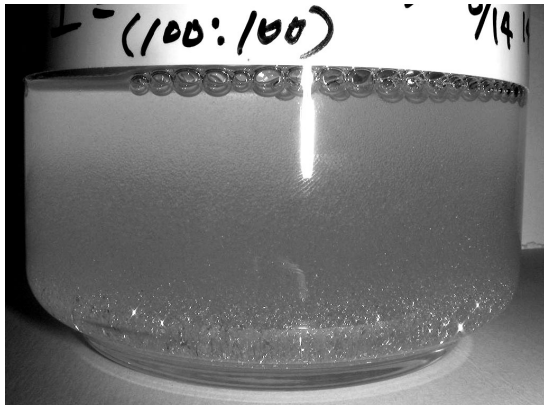
시료 제조방법

경유와 에탄올은 실온에서 에탄올 혼합비가 약 10% 정도까지는 단순히 혼합이 가능하다. 그러나 에탄올의 혼합비가 이를 초과할 경우에는 금방 분리되기 때문에 분리를 방지하기 위한 분리방지제 또는 유화제를 첨가할 필요가 있다. Miwa et al.(1988)에 따르면 혼합유 제조에 있어서 첨가물과 에탄올에 함유된 수분 및 주위 온도에 따라 분리방지를 위한 첨가물의 농도가 달라진다. 본 연구에서는 다른 분리방지제에 비해 첨가량도 적고 손쉽게 입수할 수 있는 옥탄올(순도 99.9%)을 분리방지제로 채택하였다. 그리고, 경유는 일본 시판의 JIS 2호를, 바이오 에탄올은 순도 99.5%를 사용하였다.

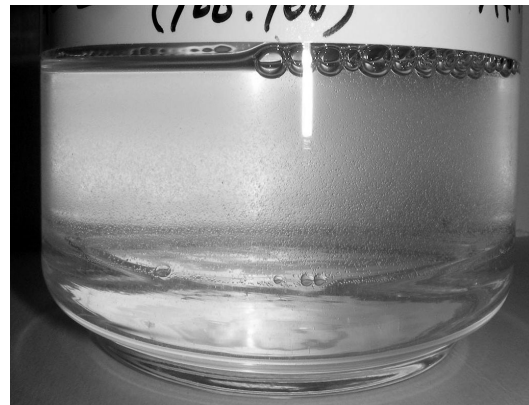
혼합유는 경유에 대한 바이오 에탄올의 체적비를 각각 10, 20, 25, 30, 50 및 60%로 혼합시켰고, 적당한 옥탄올을 각 혼합유 별로 첨가시켜 제조하였고, 표 1에 제조된 혼합유의 성상을 나타내었다. 표에서 혼합유는 EtOH의 뒤에 각각 바이 에탄올의 체적비를 붙여서 나타내었다. 그러나 EtOH60의 경우는 저부하에서도 실화로 인

Table 1. Properties of tested fuels.

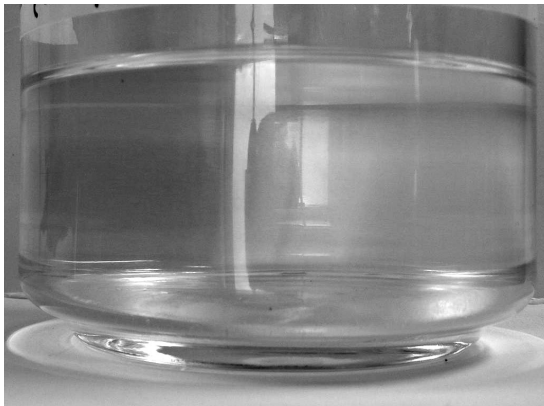
	Gas Oil	EtOH10	EtOH20	EtOH25	EtOH30	EtOH50	Ethanol
Gas Oil(vol%)	100	88.2	78.4	72.6	68.0	48.1	0
Ethanol(vol%)	0	9.8	19.6	24.5	29.1	48.1	100
Octanol(vol%)	0	2.0	2.0	2.9	2.9	3.8	0
Lower heating value(kcal/kg)	10250	10067	9696	9595	9415	8750	6400
Heat of vaporization(kcal/kg)	60	72.5	86.3	92.6	99.3	126.1	206
Boiling point(°C)	190 - 350						78.3
Oxygen(wt%)	0	3.5	7.0	8.7	10.4	17.4	34.8
Cetane number	55	41.7	32.9	29.4	26.3	18.1	8



(a) immediately.



(b) after 10 minutes.

Fig. 1. Failing forms of gas oil-ethanol blend fuels due to small amount of octanol (EtOH50).

(a) EtOH30.



(b) EtOH50.

Fig. 2. Forms of gas oil-ethanol blend fuels.

해 연소실험이 불가능하였기 때문에 실험조건에서는 제외하였다.

바이오 에탄올의 순도가 99.0%인 경우에 99.5%의 경우와 같은 양의 옥탄올(4%)을 첨가

하여 혼합유 제조에 실패한 경우를 Fig. 1에 나타내었다. 혼합 직후에는 Fig. 1 - (a)와 같이 혼합된 것처럼 보이지만 시간이 흐름에 따라 Fig. 1 - (b)와 같이 바이오 에탄올 내에 경유가 혼합

된 혼합유와 경유로 분리되었다. 참고로 Fig. 2에는 바이오 에탄올의 혼합비가 30%와 50%인 경우에 완전히 혼합된 혼합유의 모습을 나타내었다.

실험장치 및 실험방법

실험에 사용한 기관은 단기통 고속 직분식 디젤기관으로, YANMAR(洋) 제작의 NFD170-(E) 타입이다. 표2에 기관사양에 대해서 나타내었다. 실린더 직경과 행정이 각각 102(mm)와 105(mm)로 배기량은 857(cc)이고, 최고출력은 2400(rpm)에서 12.5(kW), 압축비는 17.8이다.

Fig. 3에는 실험 장치도를 나타내었다. 모든 실험에 걸쳐 기관회전수는 1,200±5(rpm)으로, 흡기매니폴드에서의 흡기압은 송풍기를 이용하여

표준대기압으로, 흡기온도는 흡기시스템에 장착된 전기히터를 이용하여 60±0.5(°C)로 일정하게 유지하였다. 연료 공급에 있어서는 혼합유 실험의 경우는 엔진보다 높은 곳에 혼합유 제조탱크를 설치하여 연료를 공급하였고, 경유만의 경우는 연료공급펌프를 이용하였다. 이때, 연료소비량은 저울을 이용하여 10분간 측정하였다. 또, 연료분사시기는 4°CA BTDC이다. 연소실내 압력과 니들리프트는 한 사이클 당 크랭크 각 0.25°마다, 총 350 사이클의 데이터를 수집, 그 평균치를 나타내었다. NOx는 감압형 화학발광법(CLD)에 의한 NOx 자동계측기(야나모토제작소 ECL-77형)를, THC는 수소 화염 이온 검출법(FID)에 의한 THC 자동계측기(야나모토제작소 EHF-710H형)를 이용하여 각각 10분간 계속한 데이터의 평균치를 취득하였다. 매연농도는 보쉬 스모크미터를 이용하여 취득하였다.

Table 2. Engine specifications

Description	Specification
Model	YANMAR NFD170-(E)
Engine Type	water-cooled 4 stroke diesel engine
Number of cylinder	1
Piston Displacement	857 cc
Bore × Stroke	102mm × 105mm
Maximum power	12.5/2400 kW/rpm
Compression ratio	17.8

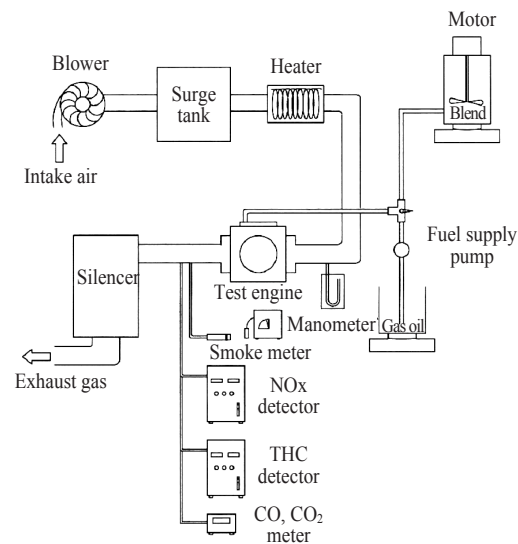


Fig. 3. Schematic diagram of system for experiment.

결과 및 고찰

바이오 에탄올 혼합유의 연소특성

Fig. 4는 각 에탄올의 혼합비율에 있어서 부하에 따른 연소특성을 나타내고 있다. Fig. 4-(a)는 정미평균유효압력 Pme=0.13(MPa)의 경우, Fig. 4-(b)는 정미평균유효압력 Pme=0.51(MPa)의 경우를 나타낸다. 그래프에서 횡축의 CA는 크랭크 각도를, 종축의 P, dQ/dθ, Lift는 각각 실린더 내 연소압력, 열발생율, 니들리프트를 나타내고 있다. 바이오 에탄올의 혼합비 증가에 따라 저부하와 고부하 모두에서 니들리프트의 그래프로부터 알 수 있듯이 분사지연은 일어나지 않았지만, 열발생율 그래프로부터 착화지연이 커지는 것을 알 수 있다. 혼합유의 세탄가 저하에 따라 착화지연이 커지며, 최고 열발생율의 피크점이 지연되면서 그 값도 증가하고 있다. 이는 바이오 에탄올의 혼합량이 증가함에 따라 예혼합 연소량은 증가하고 확산 연소량은 감소함을 의미한다. 확산 연소의 감소는 매연의 감소와 관련이 있다. 한편, 에탄올 혼합비 50%의 경우

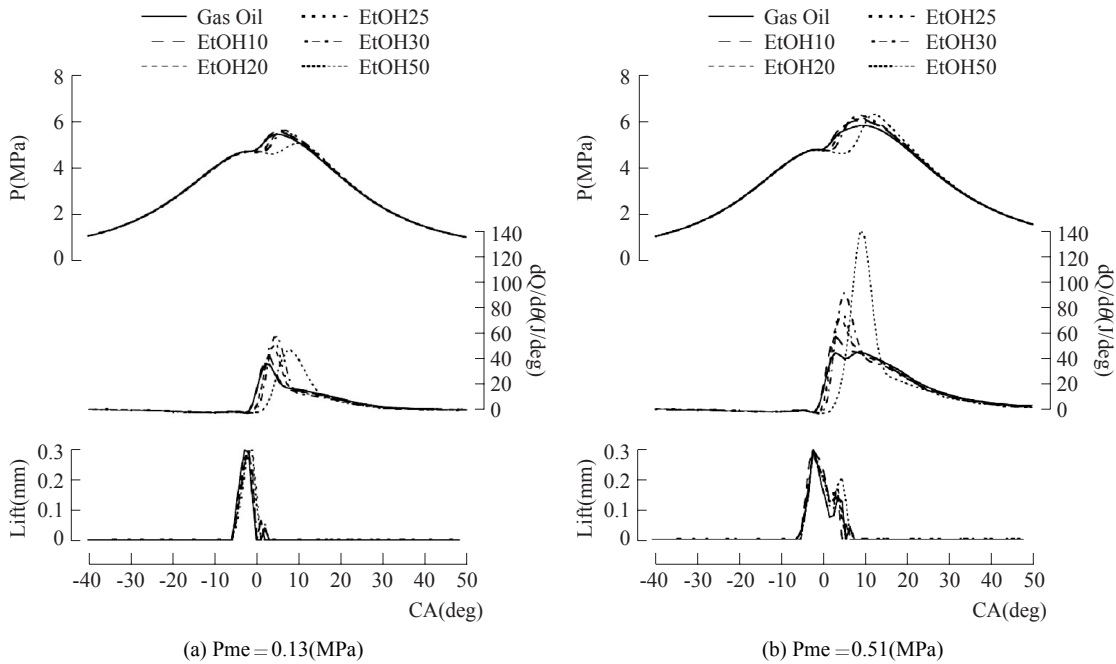


Fig. 4. Change in combustion history due to blend ratio of ethanol/gas-oil ($T_{IN}=60(^{\circ}C)$, $\theta_{inj}=4^{\circ}BTDC$).

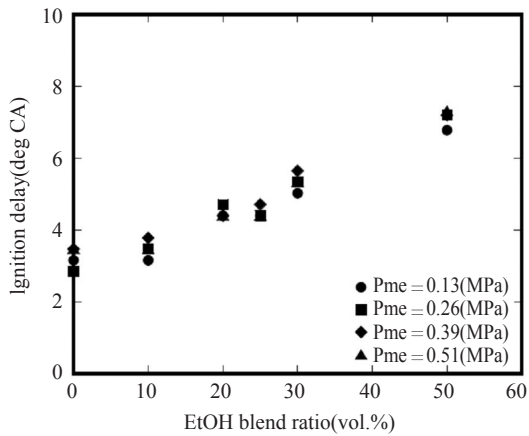


Fig. 5. Change in ignition delay due to blend ratio of ethanol/gas-oil.

는 저부하에서 과도한 착화지연에 의해 연소가 불안정해지면서 실화에 가까워지고, 바이오 에탄올 혼합비 60%의 경우는 실화에 이르러 연소 실험이 불가하였다. 또 고부하에서는 폭발적인 예혼합 연소에 따른 최대 열발생율이 140(J/deg

CA)에 도달하여 노킹현상에 대한 우려를 배제할 수 없었다.

Fig. 5는 각 실험 조건에 있어서 착화지연의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 부하의 증가에 따른 착화지연은 최대 1°CA 이하로 변화하지만, 바이오 에탄올의 혼합비에 따른 착화지연은 최대 4°CA까지 길어지고 있다. 착화지연은 연료의 세탄가와 분위기 온도에 의해 좌우되는데, 분위기 온도는 기관의 제원과 흡기 온도 등에 의존하기 때문에 착화지연에 미치는 분위기 온도의 영향은 적다고 볼 수 있다. 따라서 이 조건에서는 연료의 세탄가에 의한 착화지연으로 사료된다. 즉, 표 1에 나타난 것처럼 바이오 에탄올의 혼합비 증가에 따라 세탄가가 약 75% 낮아져 착화지연이 최대 4°CA 길어지는 것으로 추측된다. 또한 바이오 에탄올의 증가에 따른 착화지연은 앞서 설명한 예혼합 연소량이 증가하는 원인이 된다.

바이오 에탄올 혼합유의 배기특성

Fig. 6에는 바이오 에탄올 혼합비 0, 20, 50%에 있어서의 배기특성과 에너지 소비율에 대해서 나타내었다. 종축의 Te, THC, NOx, Smoke 및 be는 각각 배기온도, 미연탄화수소 배출량, 질소산화물 배출량, 매연 농도 및 에너지 소비율을 나타낸다. 바이오 에탄올 혼합비에 따른 배기온도의 변화는 보이지 않았다. THC는 저부하에서 바이오 에탄올 혼합비가 증가함에 따라 지나친 착화지연으로 인해 불완전 연소의 결과로 배출량이 증가하였다. 또한 THC의 증가는 저부하에 있어서 바이오 에탄올의 혼합비 증가에 따라 에너지 소비율을 증가시키는 원인이 되고 있다. 한편, NOx의 배출량에 있어서는 큰 차이가 보이지 않았다. 매연의 경우는 저부하보다는 고부하에

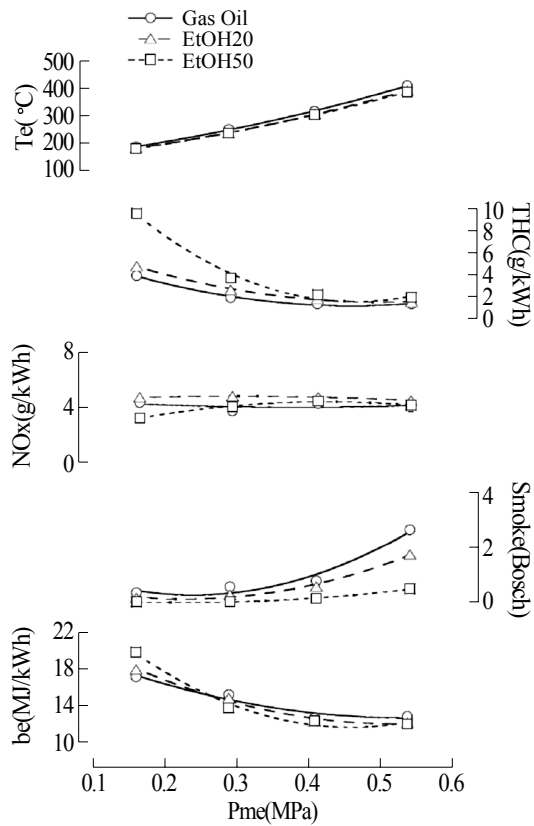


Fig. 6. Change in exhaust emissions and fuel consumption ratio due to blend ratio of ethanol/gas-oil.

서 바이오 에탄올의 혼합비 증가에 따라 감소하는 추세를 보이고 있으며 최대 90% 감소하였다.

바이오 에탄올의 혼합비 증가에 따른 매연농도의 감소에 대해서 좀 더 구체적으로 설명하기 위해 Fig. 7에 각 부하별로 순수 경유의 매연 농도에 대한 바이오 에탄올 혼합비 증가에 따른 매연 농도의 감소율을 나타내었다. 바이오 에탄올의 혼합비 증가에 따라 매연 농도가 감소되며, 혼합비가 50%가 되면 최소 80% 이상 감소되었다. 바이오 에탄올 혼합비 증가에 따른 매연농도의 감소되는 첫 번째 이유로는 바이오 에탄올이 합산

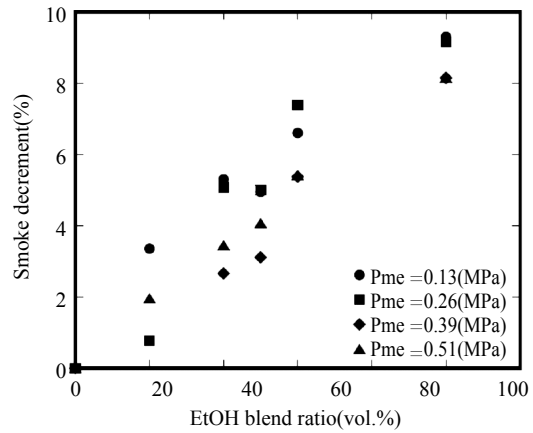


Fig. 7. Relationship between decrement of smoke emission and blend ratio of ethanol/gas-oil.

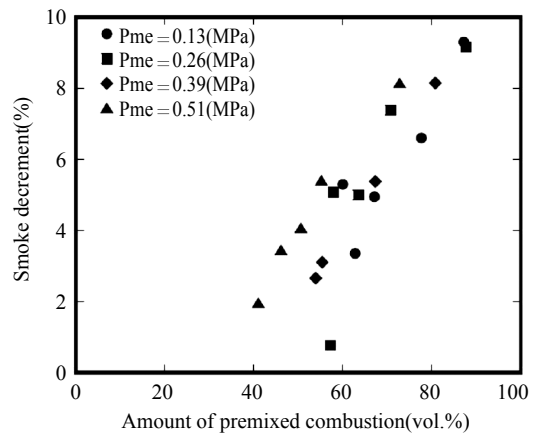


Fig. 8. Relationship between decrement of smoke emission and amount of premixed combustion.

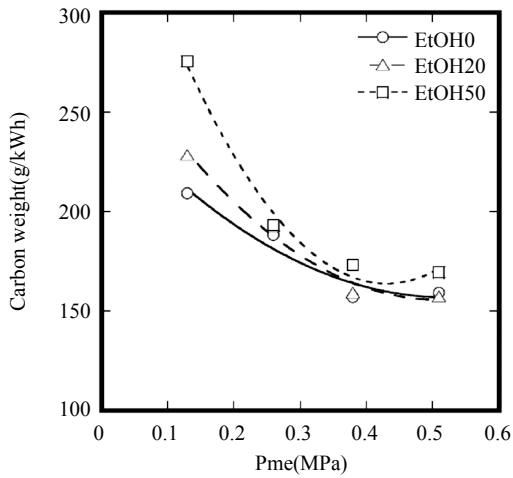


Fig. 9. Total carbon weight estimated with fuel consumption.

소 연료인 것을 들 수 있다. 두 번째 이유는 예혼합 연소량의 증가 때문이다. Fig. 8에는 예혼합 연소량과 매연농도 감소량의 관계를 나타내었다. 여기서 예혼합 연소는 열발생율이 착화점으로부터 급격히 증가한 후 하강할 때 완만하게 변하는 변곡점까지로 정의하고, 이 변곡점에서 연소 끝점까지를 확산연소로 정의하였다. 그림에서 종축은 전체 열발생량에서 차지하는 예혼합 연소량의 비를 나타내었다. 바이오 에탄올의 혼합비의 증가에 따라 착화지연이 길어지고, 에탄올은 저비점의 연료이기 때문에 분사 후에 분무의 증발이 빨라 예혼합 연소량이 증가하여 매연 생성의 주요인자인 확산 연소량이 감소함에 따라 매연 농도가 감소한다.

Fig. 9에는 연료소비율로부터 배출되는 탄소의 양을 환산하여 나타내었다. 산소의 무게를 더하면 이산화탄소의 배출량과 같다. 산출한 방법은 다음과 같다. 경유의 화학식을 몰중량 170과 H/C의 비 1.8로부터 $C_{11}H_{19.8}$ 로 정의하였고, 바이오 에탄올의 화학식은 C_2H_6O , 옥탄올의 양은 무시하여 다음 식과 같이 계산하였다.

$$C = be \times [(1 - W_{EtOH}) \times C_{GO} + W_{EtOH} \times C_{EtOH}] \quad (1)$$

(g/kWh)

여기서, C는 전체 탄소배출량, be는 연료소비율 (g/kWh), C_{GO} 는 경유 1g에 함유된 탄소중량비, C_{EtOH} 는 에탄올 1g에 함유된 탄소중량비, W_{EtOH} 는 에탄올의 중량혼합비이다. 그림과 같이 전반적으로 바이오 에탄올의 혼합비 증가에 따라 이산화탄소의 배출량이 다소 증가하므로 이산화탄소 감소에 악영향으로 볼 수 있다. 이에 대해서 OSEI et al.(2008)은 탄소 뉴트럴에 의해 바이오 에탄올의 이산화탄소 배출량은 처음부터 0으로 보는 것이 타당하다고 주장하지만, 앞으로 이산화탄소 배출량의 규제가 시행된다면 실제적인 규제치에 대한 논란의 요소를 해결할 필요는 있다고 본다.

결 론

본 연구에서는 바이오 에탄올을 디젤기관에 사용하기 위해 경유와 혼합유를 제조하여 연소 실험을 행하였다. 혼합유에 있어서 바이오 에탄올의 혼합비가 50%의 경우, 저부하에서는 착화 지연의 증대에 따라 실화가, 고부하에서는 폭발적인 예혼합 연소에 따른 노크가 예지됨에 따라 바이오 에탄올 혼합유는 혼합비율 최대 50%까지 실험용 디젤기관에 사용할 수 있었다. 바이오 에탄올의 혼합비 증가에 따른 착화지연의 증가는 바이오 에탄올의 혼합비에 따른 세타가 저하에 의존하는 것으로 운전부하에 따른 영향은 없었다. 매연의 발생량에 있어서는 바이오 에탄올의 혼합비 증가에 따라 최대 90%까지 감소되었다. 이는 착화지연이 증가함에 따라 예혼합 연소량이 증가하므로 매연 발생의 주원인인 확산 연소량이 감소하기 때문이다. 바이오 에탄올의 가장 큰 잇점인 탄소뉴트럴에 따르면 이산화탄소의 발생량이 감소한다고 볼 수 있지만, 바이오 에탄올의 혼합비 증가에 따라 순수 이산화탄소의 발생량은 증가하였다. 따라서 실질적인 이산화탄소의 규제치에 관한 법률을 제안할 경우에는 이 부분에 대한 적절한 대처가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- Ahmed, I., 2001, Oxygenated diesel: Emission and performance characteristics of ethanol-diesel blends in CI engine. SAE 2001-01- 2475. pp. 6.
- Hahn-Hägerdal, B., M. Galbe, M.F. Gorwa-Grauslund, G. Lidén and G. Zacchi, 2006. Review : Bio-ethanol-the fuel of tomorrow from the residues of today. TRENDS in Biotechnology, 24(12), 549 - 556.
- Hansen, A.C., Q. Zhang and P.W.L. Lyne, 2005. Ethanol-diesel fuel blends-a review. Bioresource Technology. Vol. 96, 277 - 285.
- Kwanchareon, P., A. Luengnaruemitchai and S. Jai-In, 2007. Solubility of a diesel-biodiesel-ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine. Fuel, Vol. 86, 1053 - 1061.
- Miwa, K., T. Wakabayashi, T. Ohsawa and M. Ikegami, 1988. Combustion and performance of a diesel engine with ethanol-gas oil blends. International Symposium on Alcohol Fuels, Vol. 8. 595 - 600.
- Mohammadi, A., T. Ishiyama, S.S. Kee, N. Horibe and T. Kakuta, 2005. Improvement in exhaust emissions from a diesel engine utilizing ethanol blended fuel. JSME Series B, Vol. 71, No. 706, 1715 - 1722.
- OSEI, S., 2008. The spearhead of bio ethanol-revised edition. Kogyo Chosakai Publishing Inc. of Japan. pp. 4 - 37.
- Yamada, T., J. Kawashima, N. Miyamoto and T. Murayama, 2005. A Study on diesel engines with alcohol fuels(Solubility and combustion characteristic with ethanol-Heavy oil fuel blends). JSME Series B, Vol. 49, No. 441, 1087 - 1094.
-
- 2009년 5월 8일 접수
2009년 5월 15일 1차 수정
2009년 5월 15일 수리