

전자 제어 분사식 과급디젤기관에서 에스테르화와 비에스테르화 바이오 디젤유의 연소 특성 비교

이상득¹ · 정석호[†]

(원고접수일 : 2012년 10월 30일, 원고접수일 : 2012년 11월 29일, 심사완료일 : 2012년 12월 21일)

Comparison of combustion characteristics between esterified and non-esterified bio-diesel oil on CRDI diesel engine with turbocharger

Sang Deuk Lee¹ · Suk Ho Jung[†]

요약: 비에스테르화 대두유의 활용 가능성을 평가하기 위해 현재 대부분의 디젤 자동차에 채택되어 있는 전자 제어 분사식 과급디젤기관에 경유, 에스테르화 바이오 디젤유 5% 및 비에스테르화 대두유 5% 혼합유를 사용하여 성능 실험을 실시하였다. 그 결과, 에스테르화 바이오 디젤유 5%와 비에스테르화 대두유 5%의 연소성능이 대부분 비슷하지만 NOx는 비에스테르화한 것이 더 적게 배출되었고 이는 Fuel NO에 의한 것을 밝혔다.

주제어: 바이오 디젤유, 에스테르화, 비에스테르화, 전자제어분사식, 디젤기관

Abstract: In order to judge that non-esterified soybean oil could be used on diesel engine with electronic control of fuel injection system, The test of combustion performance using only gas oil, gas oil blended with esterified bio-diesel oil 5% and non-esterified soybean oil 5% were carried out. It is noticed that most performances of gas oil blended with esterified bio-diesel oil 5% and non-esterified 5% have similar characteristics but non-esterified bio-diesel oil 5% emitted smaller NOx, resulting from fuel NO.

Keywords: Bio-diesel oil, Esterified, Non-esterified, Common rail direct injection, Diesel engine

1. 서 론

바이오 매스는 탄소의 증감이 0이 된다는 탄소 중립(Carbon neutral)의 이점을 가지고 있다. 그래서 탄소배출의 규제에 맞추어 탄소배출의 상당 부분을 차지하는 수송기계의 연료에 사용할 수 있는 바이오 연료에 대한 연구[1]-[3]가 활발하며 그 사용량 또한 증가되어 가고 있다. 특히, 디젤기관에 사용되는 경유의 대체 바이오 연료인 바이오 디젤유는 2009년 우리나라 전체 디젤유의 1.5%가 될 정도로 많이 사용되고 있고 장기적으로는 경유

(GO)에 5% 혼합하여 사용할 계획을 세워 놓았다 [4]. 그러나 현재의 바이오 디젤유는 식물유 또는 폐식용유를 메탄올과 반응시켜 에스테르화하는 공정 때문에 경제적 단점을 지니고 있다. 이에 폐식용유를 단순히 정제시켜 GO와 혼합한 비에스테르화 바이오 디젤유를 사용하여 캠타입 디젤기관에 이용, 경제적 측면에서의 장점을 부각시킨 연구가 진행되었었다[5][6]. 그러나 현재의 디젤 엔진은 대부분 전자 제어 방식을 채택하여 사용조건에 최적화를 원하고 있기 때문에 전자제어 방식의 디젤엔

† 교신저자:(608-739) 부산광역시 남구 신선로 365

부경대학교 기계시스템공학과, E-mail: sukhojung@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6198

1 한국해양대학교 운항훈련원, E-mail: sdlee@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4202

진에서의 실험적 연구가 필요하다. 한편 비에스테르화 바이오 디젤유로 이용할 수 있는 폐식용유는 수급량에 문제가 있기 때문에 생산량이 많은 식물유로 대두유를 선정하였다. 앞서 언급한 것처럼 바이오 디젤유를 경유에 5%까지 혼합하여 사용할 예정이기 때문에 본 연구에서는 에스테르화 바이오 디젤유(TVO:Transesterified Vegetable Oil) 및 비에스테르화 바이오 디젤유, 대두유(SO:Soybean Oil)를 GO에 5% 혼합한 혼합유를 이용하여 전자제어 방식 디젤엔진에서의 연소 및 배기특성을 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

Figure 1에 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 실험에 사용한 기관은 현대자동차(주) 제작의 D4EA이며 Table 1에 기관사양에 대해서 상세하게 나타내었다. 연료분사시기 및 연료분사압력의 제어는 MOTEC사의 M800이라는 ECU를 컴퓨터에 연결하여 실시간으로 제어할 수 있도록 장치를 구성하였다. 운전부하는 환웅(주) 제작의 와전류식 동력계 HE-130을 이용하여 조정하였다. 연소압력 측정은 키슬러사의 6052A를 사용하였고, 720p/r의 로터리 엔코더를 이용하여 크랭크 각 0.5° 간격으로 연소압력을 취득하였다.

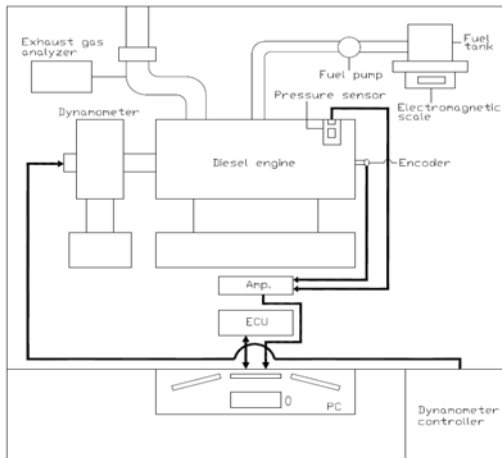


Figure 1: Schematic diagram of experiment.

실험에 사용한 연료는 GO와 GO에 TVO와 SO를

각각 체적비로 5% 섞은 TVO5, SO5의 세 종류로, 한국고분자시험연구소(주)에 각 연료의 성분 시험 의뢰한 결과를 Table 2에 나타내었다. 실험은 기관 회전수 2000rpm에서 각 연료를 이용하여 분사시기 (Tinj), 커먼레일 압력(Pcr), 부하(load)를 변화시키며 실행하였다. 분사시기는 15°, 10°, 5° BTDC, 커먼레일 압력은 30, 40, 50MPa, 부하는 8.7, 17.5, 26.3kW으로 변화시켰다. 각 실험은 10분의 안정 기간을 거친 후 연소압력, 연료 소비량, 배기가스 데이터를 측정하여 PC에 저장하였다.

Table 1: Specification of tested engine.

Description	Specification
Model	HYUNDAI D4EA
Engine type	Water-cooled 4 stroke diesel engine
Number of cylinders	4
Piston displacement	1991 cc
Bore × Stroke	83mm × 92mm
Maximum power	84/4000 kW/rpm
Compression ratio	17.7

Table 2: Components of tested fuels.

Components	GO	TVO5	SO5
Carbon %wt.	85.2	84.5	85.2
Hydrogen %wt.	14.3	13.7	13.6
Nitrogen %wt.	0.5	1.2	0.7
Oxygen %wt.	0.6	0.6	0.5

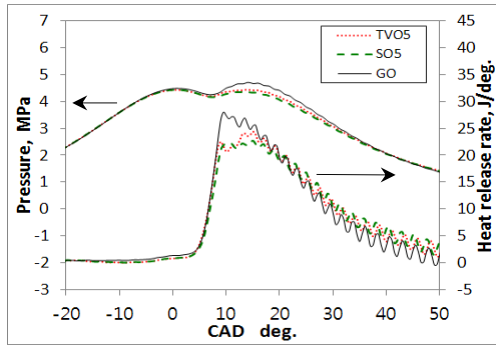
Table 3: Ignition point and maximum combustion pressure in CRDI diesel engine with diesel oils blended bio diesel oils.

Load, kW	8.8		17.5				26.3	
Tinj, ° BTDC	10	5	10		15	10		
Pcr, MPa	40		30	40	50	40		
GO	IP	1.0	5.2	0.8	0.2	-1.0	-4.5	-1.8
	MCP	50.7	47.1	49.6	54.8	58.2	65.9	65.5
TVO5	IP	0.6	4.9	1.0	0.0	-0.8	-4.6	-1.5
	MCP	49.9	44.5	47.3	54.7	56.3	65.4	63.8
SO5	IP	0.9	5.2	0.8	-0.2	-0.8	-4.2	-1.6
	MCP	49.2	44.4	47.6	53.9	55.9	64.7	63.5

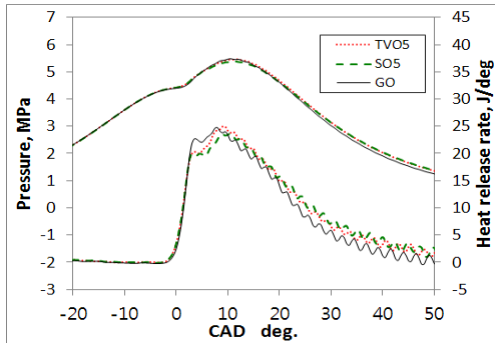
3. 결과 및 고찰

3.1 분사시기에 따른 연소특성

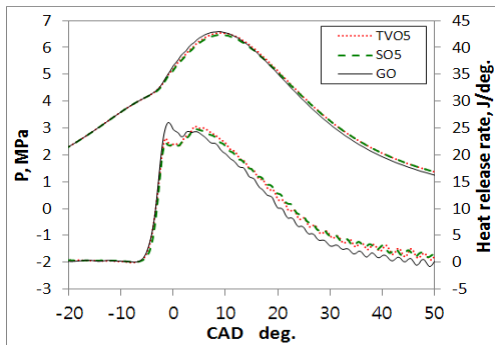
분사시기를 15°, 10°, 5° BTDC로 변화시켜 실험한 각 연료의 연소이력을 Figure 2에 나타내었다. 그래프 내에서 위쪽이 연소압력을, 아래쪽이 열발



(a) Tinj:5° BTDC

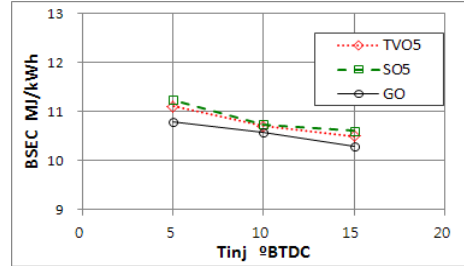


(b) Tinj:10° BTDC

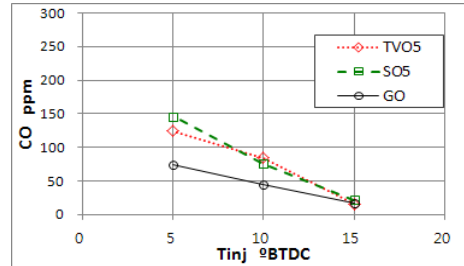


(c) Tinj:15° BTDC

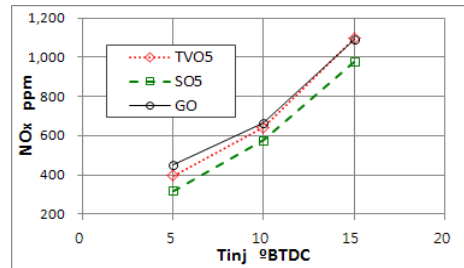
Figure 2: Change in combustion history due to injection timing (load:17.5kW, Pcr:40MPa)



(a) Brake specific energy consumption



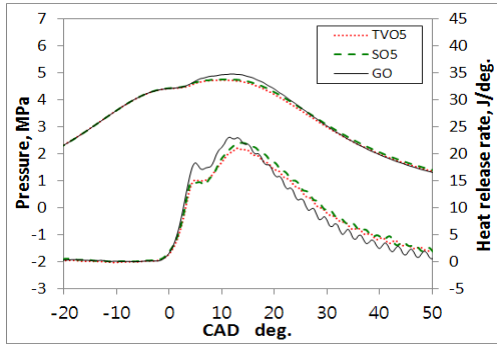
(b) CO



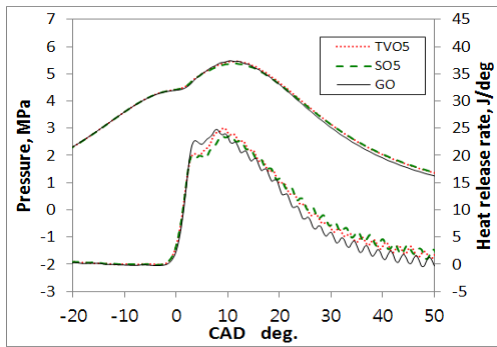
(c) NOx

Figure 3: Change in fuel consumption, CO and NOx emissions due to injection timing (load: 17.5kW, Pcr:40MPa)

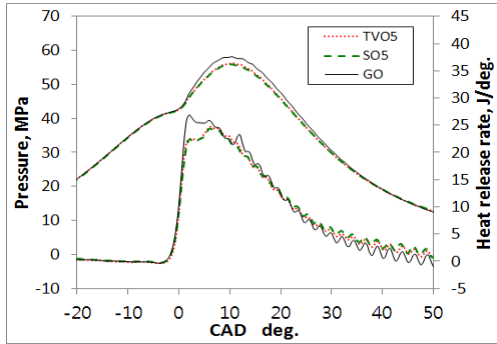
생률을 나타내고 있다. 또 짧은 점선은 TVO5, 긴 점선은 SO5, 실선은 GO를 각각 나타낸다. Table 3에 나타난 착화점(IP:Ignition Point)은 예혼합 연소기의 열발생률에 대한 점선과 세로축의 0점과의 교점으로 정의하였고, MCP(Maximum Combustion Pressure)는 최대연소압력을, IT(Injection Timing)는 분사시기를 나타낸다. 세 연료의 착화점은 분사시기가 5°씩 빨라짐에 따라 약 5°정도 빨라지고 있으며 연료의 종류에 상관없이 거의 일정하다. 압력 및 열발생률 곡선에 있어서 TVO5와 SO5는 GO에 비해 최대연소압력이 약간 낮으면서 연소기간이 길어지는 형태로 거의 비슷한 특성을 나타내



(a) Pcr:30MPa



(b) Pcr:40MPa



(c) Pcr:50MPa

Figure 4: Change in combustion history due to common rail pressure. (load:17.5kW, $T_{inj} : 10^{\circ}$ BTDC)

고 있다. 이는 예혼합 연소량이 약간 적고 확산 연소량이 많아지는 것을 의미한다. 바이오 디젤유는 원재료에 따라 지방산 메틸 에스테르의 성분 및 함량이 달라진다[7]고 하지만 본 실험에서는 Table 2에 나타난 것처럼 TVO5와 SO5의 화학성분의 차이가 거의 없기 때문에 두 연료의 특성이 비슷한

것으로 사료된다. Figure 3에는 분사시기에 따른 정미 에너지 소비율 (a), CO (b), NOx (c)의 변화를 각각 나타내었다. 마름모의 짧은 점선이 TVO5, 삼각형의 긴 점선이 SO5, 원형의 직선이 GO를 각각 나타낸다. 연료의 종류에 관계없이 분사시기가 빨라질수록 정미 에너지 소비율(BSEC)과 일산화탄소(CO)는 선형적으로 감소하고 질소산화물(NOx)는 증가하는 경향을 나타내고 있다. BSEC과 CO에 있어서는 TVO5와 SO5가 거의 비슷한 값을 나타내는 반면 NOx의 경우는 SO5가 다른 연료에 비해 40-60ppm 작은 값을 나타낸다. NOx의 배출량에 대해서는 3.3절에서 고찰한다.

3.2 커먼레일 압력에 따른 연소특성

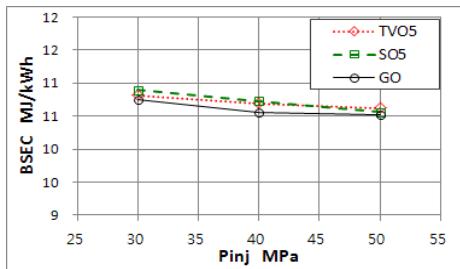
커먼레일 압력을 30, 40, 50MPa로 변화시켰을 때의 연소이력을 Figure 4에 나타내었다. 세 연료 모두 커먼레일 압력이 커질수록 초기 분사량이 많아지고 무화가 빨리 진행되기 때문에 Table 3에 나타난 것처럼 착화시기가 약 1° 씩 빨라지며 예혼합 연소량이 많아지는 특성을 나타내고 있다. 분사시기에서와 마찬가지로 TVO5와 SO5는 GO에 비해 예혼합 연소량이 적고 확산 연소량이 많아지는 경향을 나타내며 같은 형태를 하고 있다. 이는 점도가 높은 바이오 디젤유의 미립화가 늦어지기 때문인 것으로 사료된다. Figure 5에 커먼레일 압력 변화에 따른 BSEC, CO, NOx의 변화를 각각 나타내었다. 연료의 종류에 관계없이 커먼레일 압력이 커질수록 BSEC와 CO는 선형적으로 감소하고 NOx는 증가하는 경향을 나타내고 있다. BSEC과 CO에 있어서는 TVO5와 SO5가 경우에 비해 약간 높은 값을 나타내며 거의 비슷한 값을 나타내는 반면 NOx의 경우는 TVO5가 경우에 비해 20ppm정도 낮고 SO5는 거기에 50-70ppm 작은 값을 나타낸다.

3.3 운전부하에 따른 연소특성

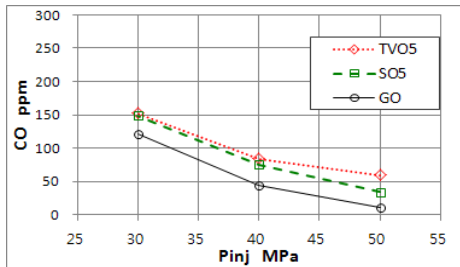
세 연료의 운전 부하에 따른 연소이력을 Figure 6에 나타내었다. 저부하에서는 세 연료가 거의 비슷하게 예혼합 연소만 일어나기 때문에 Figure 7 (a)에서 보는 바와 같이 세 연료의 BSEC가 거의

같은 것과 일치한다. 그러나 고부하로 갈수록 TVO5와 SO5는 GO에 비해 최고압력이 떨어지면서 확산 연소가 많아져 BSEC과 CO의 양이 많아지고 있다. 따라서 TVO5와 SO5는 GO에 비해 저부하에서 좋은 특성을 지니는 것을 알 수 있다. NOx의 양은 SO5가 다른 연료에 비해 30-100ppm 감소하는 추세를 나타낸다. 앞선 다른 조건들을 포함해서 SO5가 TVO5에 비해 NOx가 낮게 배출되고 있는데 이는 열발생율에서는 거의 차이가 없기 때문에 Table 2에 나타난 것처럼 연료의 성분 내에 포함된 질소성분의 차이 때문으로 판단된다. 즉, TVO5가 SO5에 비해 질소성분을 0.5%wt. 더 많이 가지고

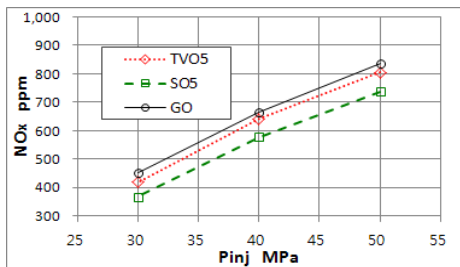
있으며, 이로부터 생성되는 Fuel NO가 TVO5의 NOx 배출량을 증가시키는 원인으로 고려된다.



(a) Brake specific energy consumption

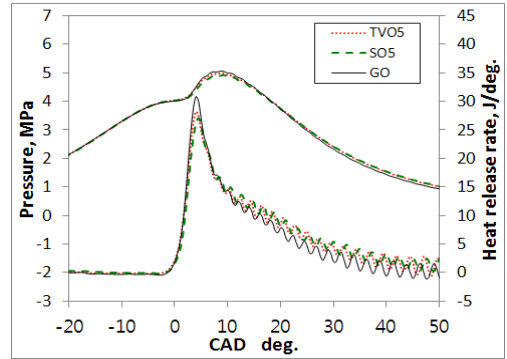


(b) CO

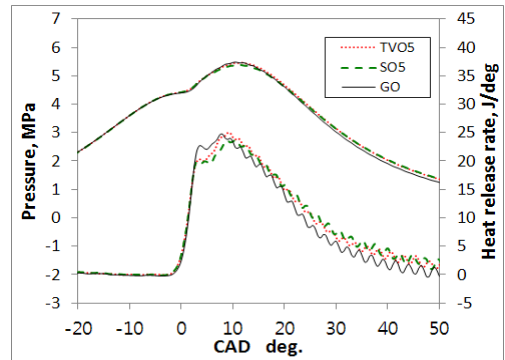


(c) NOx

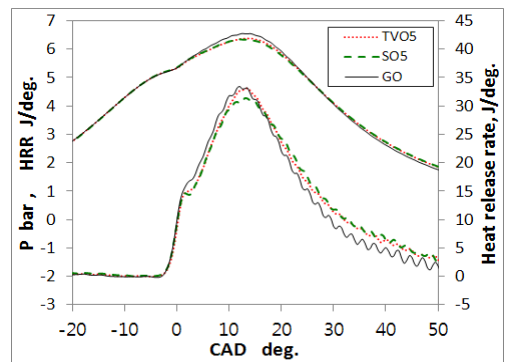
Figure 5: Change in fuel consumption, CO and NOx emissions due to common rail pressure (load:17.5kW, Tinj:10° BTDC)



(a) load:8.7kW

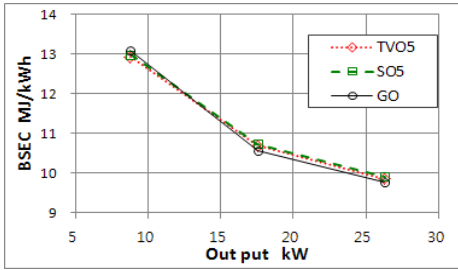


(b) load:17.5kW

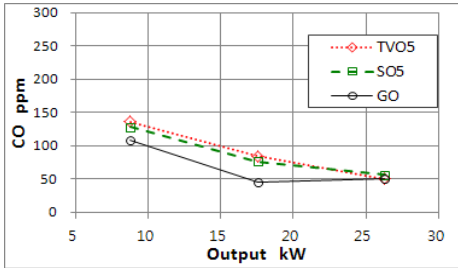


(c) load:26.3kW

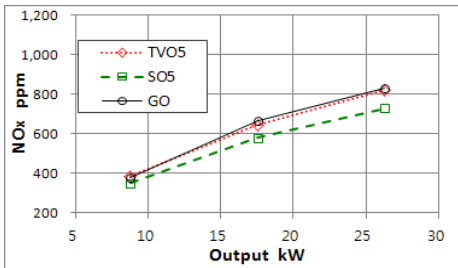
Figure 6: Change in combustion history due to engine load (Pcr:40MPa, Tinj:10° BTDC)



(a) Brake specific energy consumption



(b) CO



(c) NOx

Figure 7: Change in fuel consumption, CO and NOx emissions due to engine load (Pcr:40MPa, Tinj:10 ° BTDC)

4. 결 론

에스테르화한 바이오 디젤유에 비해 경제성이 좋은 비에스테르화 바이오 디젤유를 전자분사식 디젤기관에 적용하여 분사시기, 커먼레일 압력, 부하를 변수로 하여 실험한 결과는 다음과 같다.

[1] 에스테르화와 비에스테르화 바이오 디젤 혼합유는 모든 조건에서 경유와 다른 연소형태를 나타내었고 정미 에너지 소비율과 CO의 배출량이 높았으나 두 연료의 특성은 비슷하였다.

[2] NOx에 있어서는 TVO5에 비해 SO5가 전반적으로 30-100ppm 낮은 값을 나타내었고 이는 Fuel NO에 의한 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Y. T. Oh, "A study on the usability of used vegetable oil as a diesel substitute in diesel engine", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, vol. 22, no. 4, pp. 481-488, 1998.
- [2] S. H. Jung, M. Ishida, S. Yamamoto, H. Ueki and D. Sakaguchi, "Enhancement of NOx-PM trade-off in a diesel engine adopting bio-ethanol and EGR", International Journal of Automotive Technology, vol. 11, no. 5, pp. 611-616, 2010.
- [3] S. H. Choi and Y. T. Oh, "Experimental study on emission characteristics and analysis by various oxygenated fuels in a D. I. diesel engine", International Journal of Automotive Technology, vol. 6, no. 3, pp. 197-203, 2005.
- [4] G. Daiko industry research, Trend of Technology Market in Bio Fuel and Friendly Environmental Vehicle, BIB, Seoul, p. 85, 2011 (in Korean).
- [5] S. H. Jung, M. S. Kim, S. H. Jang, D. K. Koh and S. K. Ahn, "Analysis of combustion characteristics of bio diesel fuel in a DI diesel engine using PXI and LabVIEW", The Korean Society for Power System Engineering, vol. 8, no. 2, pp. 18-23, 2004 (in Korean).
- [6] M. S. Kim, H. C. Doh, D. K. Koh and S. K. Ahn, "A study on droplet distribution of bio diesel fuels using immersion sampling method", The Korean Society for Power System Engineering, vol. 10, no. 4, pp. 5-10, 2006 (in Korean).
- [7] Y. K. Lim, C. H. Jeon, S. Kim, E. S. Yim, H. O. Song, S. C. Shin and D. K. Kim, "Detemination of fuel properties for blended bio-diesel from various vegetable oils", Korean Chemical Engineering Research, vol. 47, no. 2, pp. 237-242, 2009 (in Korean).