



Euro 2 기준 LNG-경유 혼소엔진의 배출가스 특성에 관한 연구

†조규백 · 김종민 · 김동식 · 김홍석

한국기계연구원 그린동력연구실

(2010년 8월 13일 접수, 2010년 12월 30일 수정, 2010년 12월 30일 채택)

A Study on the Emission Characteristics of LNG-diesel Dual-fuel Engine for Euro 2 Standard

†Gyu Baek Cho · Chongmin Kim · Dong Sik Kim · Hong Suk Kim

Dept. of Engine research, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, 305-343,
Korea

(Received August 13, 2010; Revised December 30, 2010; Accepted December 30, 2010)

요 약

대형 디젤엔진은 주행거리가 길고 배기량이 크기 때문에 차량의 대수는 상대적으로 적지만 대기환경에 미치는 영향은 크다. 시내를 주행하는 시내버스의 경우 한일 월드컵을 계기로 CNG 버스로 전환되었다. 그러나 대형트럭과 장거리 시외버스의 경우 주행거리가 길고 CNG 충전소가 대도시의 시내버스 차고지 위주로 설치되어 있어 이용이 불가능하였다. 단열용기의 적용으로 천연가스를 압축상태가 아닌 액체 상태로 보관이 가능해져 주행거리가 긴 대형트럭이나 장거리 시외버스로의 적용이 가능해졌으며, 혼소엔진의 경우 LNG 충전이 어려운 지역에서는 디젤로 운행이 가능하다. 이와 같은 장점으로 인하여 석유 의존도를 크게 낮출 수 있어 에너지원의 다변화가 가능하며, 디젤차의 고질적인 단점으로 여겨왔던 매연 및 질소산화물뿐만 아니라 저탄소 연료를 사용함으로써 대표적인 온실가스중의 하나인 이산화탄소도 10%이상 저감할 수 있었다.

Abstract - Heavy duty diesel engine has relatively small portion of whole vehicles due to long drive distance and large engine displacement, but largely influences atmosphere environment. City buses changed to CNG (Compressed Natural Gas) bus with Korea-Japan Worldcup. Heavy duty truck and intercity bus, however, were impossible to use CNG because those kinds of vehicles had long drive distance and CNG station was installed mainly at the around of the bus garage of city. Insulation container storing the natural gas as a liquid makes heavy duty truck and intercity bus possible to use the natural gas. Drive using diesel is possible where is hard to recharge the gas. With LNG (Liquefied Natural Gas), the dependence on oil is largely decreased, PM (Particulate Matter) and NOx which is chronic disadvantage of diesel is remarkably reduced and finally CO₂, the representative green house gas, is reduced over 10%.

Key words : LNG, diesel, heavy duty engine, dual-fuel, carbon dioxide

1. 서 론

대형차량의 경우 큰 출력과 저속에서의 높은 토크 요구 때문에 대부분 디젤엔진이 많이 사용되어져 왔

다. 그러나 천연가스가 많이 생산되는 러시아나 남미 국가에서는 디젤엔진에서 발생하는 매연 및 질소산화물 저감뿐만 아니라 에너지의 효율적 사용과 다변화 정책에 힘입어 일찍부터 CNG 엔진이 개발되어 사용되었다.

국내에서도 소형차 위주로 CNG 차량이 개발되다

†주저자:gybcho@kimm.re.kr

가 2002년 월드컵을 계기로 서울시를 중심으로 지방의 대도시와 중소도시에서 환경개선을 목적으로 CNG 시내버스가 보급되어져 왔으며 2009년 12월 기준으로 22,870대가 보급되었으며 전국시내버스의 68%가 대체되었다[1]. 또한 보급촉진을 위해 전국에 142개소의 충전소가 시내버스 차고지 주변에 설치되었다.

그러나 장거리 주행을 하는 화물트럭이나 시외버스의 경우 CNG의 단점인 짧은 주행거리 때문에 보급이 불가능하였다. 단열용기의 개발로 압축상태로 저장되던 천연가스가 액화 상태로 저장이 가능해지면서 저장효율이 높아져 1회 충전으로도 장거리 운행이 가능해짐에 따라 대형 화물트럭을 대상으로 LNG-디젤 혼소 시스템의 적용이 가능해졌다[2-4].

LNG의 주원료는 천연가스로서 디젤에 비해 탄소의 수가 적어 대표적인 온실가스의 하나인 이산화탄소의 저감이 가능할 뿐만 아니라 가격도 저렴하기 때문에 고유가 시대에 새로운 에너지원 확보 이상의 의미가 있다. 또한 혼소의 경우 기존의 연료시스템을 그대로 사용하기 때문에 LNG 충전이 어려운 지역에서는 디젤로의 운행도 가능하고 엔진의 개조가 거의 없어 효과적인 시스템으로 인정받고 있다[5-7].

본 연구에서는 Euro 2 기준을 만족시키는 대형 디젤엔진을 LNG-디젤 혼소 엔진으로 개조하였을 때 출력 및 배출가스 특성에 대해서 연구하였다. 뿐만 아니라 디젤연료의 대체에 따른 이산화탄소 저감량을 측정하였을 뿐만 아니라 혼소로 인해 발생할 가능성이 있는 미량유해 물질도 함께 측정하였다.

II. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험에 사용된 장치들의 구성도를 보여준다. 실험에 사용된 엔진은 H사의 대형엔진으로서 3가지 출력 모델이 사용되었으며 자세한 사양은 Table 1에 나타내었다.

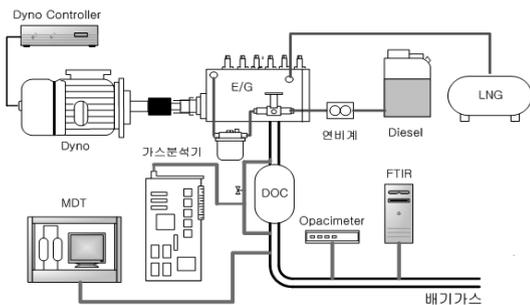


Fig. 1. Test set-up diagram.

출력을 측정하고 모드 운전을 하는 동력계는 AC 동력계(호리바 ATS, HD460)를 사용하였으며 배기가스는 가스상 물질의 경우 가스 분석계(호리바, MEXA 7100EGR)로, 입자상 물질의 경우 마이크로 희석터널(NOVA, Microtol 5)로 측정하였다. 유해미량 물질 측정을 위해 FTIR (thermo)을 사용하였으며 연료의 경우 LNG는 MFC (Brooks, 5863E), 디젤의 경우 액체 연비계(Max machinery, Max 214-410)를 사용하여 측정하였다. 배기가스 유량을 산출하기 위해 엔진에 유입되는 흡입공기의 양을 총류유량계(Meriam, 50MC2-6)로 측정하였다. 실험은 우선 혼소개조에 따른 출력변화를 측정하기 위해 전부하 실험을 하여 디젤 연료일 때와 비교하였다. 그리고 전운전 영역에서의 배기가스 및 연료량을 측정하여 운전조건에 따른 특성을 분석하였다.

배출가스의 경우 Euro 2 기준의 측정모드인 ISO 8178 규정 Cycle B에 따라 D-13 모드를 적용하였다. Table 2는 D-13 모드의 속도 및 부하조건, 가중치가 나타나 있다. 측정된 결과는 온도와 습도의 영향을 배제하기 위해 정해진 방법에 따라 보정하였다.

Table 1. Engine specification

최대출력 (ps/rpm)	380 ps /1900rpm	410 ps /1900rpm	440 ps /1800rpm
흡기/연소방식	TCi, DI		
배출가스수준	EURO-2		
적용차종	카고	카고	버스

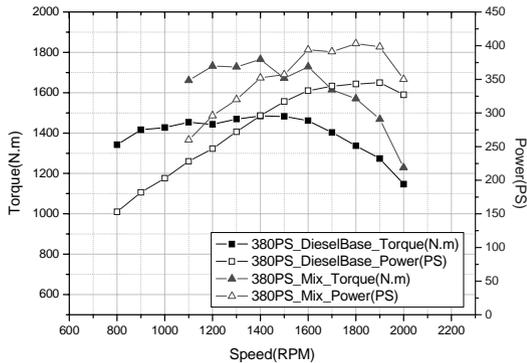
Table 2. D-13 Mode

운전모드	원동기회전수(RPM)	부하율(%)	가중계수
1	Idling	-	0.25/3
2	Intermediate 회전수	10	0.08
3		25	0.08
4		50	0.08
5		75	0.08
6		100	0.25
7	Idling	-	0.25/3
8	최대출력시 회전수	100	0.10
9		75	0.02
10		50	0.02
11		25	0.02
12		10	0.02
13	Idling	-	0.25/3

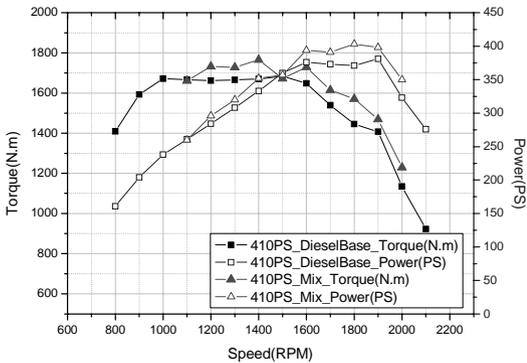
III. 시험결과

3.1. 전부하 시험

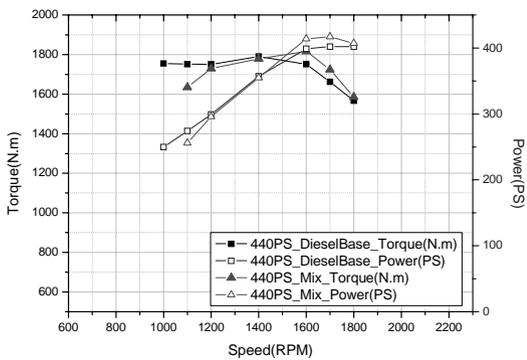
Fig. 2는 380 PS 410 PS, 440 PS의 전부하 시험 결과를 보여준다. 디젤 베이스 엔진은 엔진의 노후로 인



(a) 380마력



(b) 410마력



(c) 440마력

Fig. 2. Full load test results.

하여 정격출력에 약간씩 모자라는 경향을 보이고 있으나 혼소모드에서의 토오크와 출력은 디젤모드보다 약 3%에서 5% 정도 혼소모드가 높은 출력을 보이고 있다.

각 엔진은 동일한 엔진 본체를 사용하고 출력에 따라 연료분사시스템과 ECU의 맵핑값의 차이가 있다. 따라서 상대적으로 낮은 출력을 갖는 엔진에서 출력의 상승률이 높다. 이는 디젤의 경우 설정된 출력을 얻기 위해 공급되는 연료량을 제한하는 반면 혼소 엔진의 경우 혼소용 ECU에서 원하는 출력을 얻기 위해 공기량에 영향을 미치더라도 연료량의 공급을 늘릴 수 있기 때문이다.

세 가지 모델 모두 저속영역에서는 출력의 증가율이 떨어지거나 오히려 디젤보다 낮아지는 경향을 보이는데 이는 가스상의 연료에 의해 흡입공기의 양이 제한되기 때문이다. 특히 디젤엔진의 경우에도 저속영역에서는 출력이 비슷하고 출력차가 고속영역에 비해 훨씬 적다. 이는 저속에서의 공연비가 고속에 비해 높기 때문에 저속에서의 공기량 저하는 출력의 저하로 이어지기 때문이다.

3.2. 부분부하시험

전 운전영역에서의 배출가스 특성을 분석하고자 부분부하 조건에서 시험을 하였다. 본 논문에서는 중간급인 410마력 급만 비교하였으나 나머지 두 엔진도 비슷한 특성을 보였다. Fig. 3은 410마력 엔진의 디젤모드 운전에서 NMHC, CO, NOx와 CO₂ 배출 특

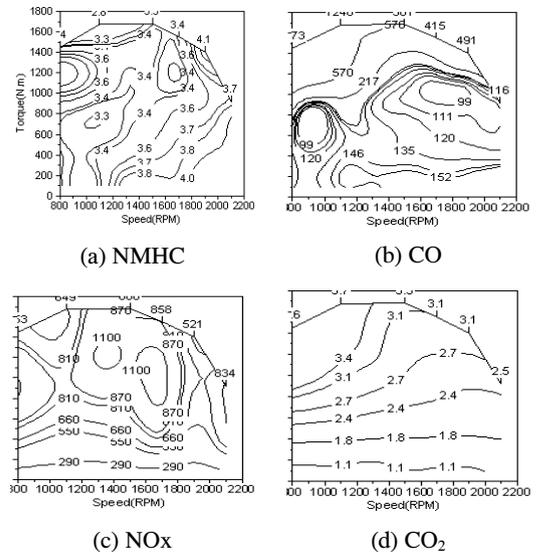


Fig. 3. Part load test result of 410PS diesel base.

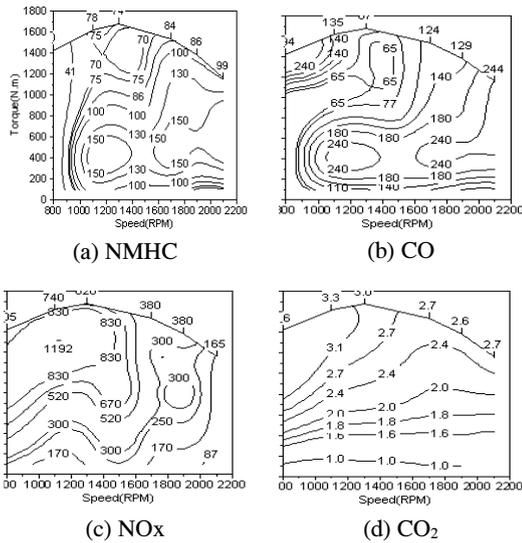


Fig. 4. Part load test result of 410PS dual fuel

성을 보여 주며 Fig. 4는 LNG 혼소 모드 운전에서 동일한 배출가스의 배출 특성을 보여준다.

디젤모드의 경우 NMHC와 CO가 비슷한 경향을 보이는데 NMHC의 경우 부분적이 차이는 있으나 전체적으로 낮은 배출가스 특성을 보여준다. CO의 경우에도 부하가 증가 할수록, 회전속도가 낮을수록 배출량이 많은데 이는 공연비가 높후할수록 높게 배출되기 때문이다.

LNG 혼소 모드의 경우 디젤보다 10배 이상 배출되는데 이는 우선, LNG와 디젤의 혼소일 때 공연비가 이론공연비에 가깝게 연료가 공급되어야 하고 또한 디젤의 pilot 인젝션에 의해 점화된 화염이 연소실의 가장자리로 확산되어야 하며 이때 화염이 벽면 가까이에서 소멸(quenching)되거나 피스톤 링 상부의 크레비스(crevice) 영역에서 완전 연소가 되지 않은 미연연소가 많이 발생하기 때문이다. 물론 배기관 후단에 산화촉매가 장착되어 있으나 배출되는 양이 촉매의 용량을 초과했기 때문으로 판단된다.

CO의 경우에는 저부하 운전영역에서는 디젤보다 많이 발생하나 부하가 증가할수록 감소하는 경향을 보여준다. 이는 배기관에 장착된 촉매에 의해 산화되었기 때문으로 판단된다. NMHC는 증가한데 비해 CO가 감소한 이유는 NMHC에 비해 촉매에서의 산화 온도가 낮고 또한 경쟁반응에서 유리하기 때문에 NMHC는 증가한 반면 CO가 감소될 수 있었다.

디젤 모드에서의 NOx는 공연비의 함수로서 희박할수록 증가하는 경향을 보이거나 아주 희박한 저부하

영역에서는 낮은 배출특성을 보인다. 부하가 증가함에 따라 함께 증가하다 고부하로 가면 오히려 감소하는 경향을 보이는데 이는 고부하 영역으로 갈수록 이론공연비에 가깝기 때문에 NOx의 배출특성이 떨어진다.

혼소모드의 경우 대부분의 운전영역에서 디젤 모드보다 낮은 배출특성을 보여준다. 대부분의 운전영역에서 이론공연비와 유사한 조건에서 연소되기 때문이다.

CO₂의 경우 디젤모드는 회전속도보다 부하의 영향이 더 큰 것으로 나타난다. 물론 동일한 부하일 때 회전속도가 증가하면 CO₂의 배출량도 증가하나 증가율은 아주 낮다.

LNG 혼소 모드의 경우 300 N·m 이하의 저부하 영역에서는 CO₂의 배출특성이 디젤 모드와 유사하나 그 이상의 부하조건에서는 확연하게 차이가 나타난다. 이는 저부하 영역일 경우 LNG의 대체율이 낮고 대부분 디젤에 의해 운전되기 때문이며 부하가 증가할수록 LNG의 대체율이 높기 때문에 CO₂의 배출량도 디젤에 비해 확연하게 구분될 정도로 감소된다. 이는 LNG의 주성분인 메탄의 분자 구조상 C와 H의 비가 디젤보다 높기 때문이다.

3.3. 디젤 대체율

LNG 혼소 모드시의 디젤 대체율은 두 가지로 분석할 수 있다. 첫 번째는 출력 당 디젤 대체율로 아래 식과 같이 디젤엔진에서 사용한 디젤량에서 LNG 혼소 엔진에서 사용한 디젤량을 제외한 양을 비율로 나타내는 것이다.

디젤 대체율

$$= (\text{디젤엔진의 디젤사용량} - \text{LNG혼소엔진의 디젤사용량}) / (\text{디젤 엔진의 디젤사용량}) \times 100$$

Table 3에서는 각 엔진별로 76%에서 79% 수준의 높은 디젤 대체율을 보여주고 있다. 공급 LNG의 양을 증가시키고 pilot 분사되는 디젤의 양을 감소시키면 CO₂의 배출량을 감소시키면서 디젤의 대체율은 더 증가시킬 수 있다. 그러나 한도를 넘을 경우 미연가스에 의한 HC의 급격한 증가가 일어나 기준치 이상의 배출량을 나타내며 또한 CO 또한 증가하며 촉매에서 HC와 CO의 산화에 의해 오히려 CO₂의 배출량을 증가시키는 결과도 초래할 수 있다. 따라서 최적의 디젤 대체율은 본 연구의 결과인 76-79% 선이 적정 비율이다.

다른 한 방법은 디젤엔진의 에너지 사용량에 대한 LNG 혼소엔진의 LNG 사용 에너지의 비를 나타내는 것이다.

Table 3. Diesel replacement ratio (g/kWh)

경유사용량 (대체율)		380PS	410PS	440PS
출력기준	디젤	214.5	223.7	201.5
	혼 소	52.1 (-76%)	48.2 (-79%)	42.0 (-79%)
에너지베이스	디젤	214.5	223.7	201.5
	혼 소	276.6 (29%)	249.9 (12%)	243.3 (21%)

디젤 등가 대체율

$$= (\text{LNG 혼소엔진에서 LNG 사용에너지량} + \text{디젤 사용 에너지량}) / (\text{디젤엔진에서 디젤 사용에너지량}) \times 100$$

이렇게 LNG-Diesel 등가 열량으로 환산하여 비교하면 오히려 12%에서 29%의 에너지를 더 소비하는 것으로 나타났다. 이는 엔진의 연소방식과 비교할 필요성이 있다. 디젤엔진의 경우 높은 압축비와 희박연소에 의해 가솔린엔진에 비해 30%가량 열효율이 높게 나타난다. 그러나 LNG 혼소엔진의 경우 연료와 혼합된 공기가 공급되고 pilot 분사에 의해 점화되기 때문에 일종의 SI엔진으로 볼 수 있다. 이에 SI엔진과 유사한 열효율을 나타내기 때문에 기존 디젤 모드에 비해 12~29% 정도 낮게 나온 것이다.

따라서 LNG혼소의 경우 디젤 대체율은 높지만 에너지 효율 면에서는 디젤모드가 더욱 나은 것을 알 수 있다.

3.4. D-13 Mode Test Result

Table 4는 D-13모드의 시험 결과를 보여준다. NMHC의 경우 3종류 엔진 모두 4000%에서 7000%에 달하는 배출결과를 보여주는데 이는 연소방식의 차이와 가스상의 연료인 LNG의 특성 때문이다. 부분부하 실험 결과에서도 언급했듯이 디젤모드의 경

우 인젝터에서 분사된 연료 주변에서 확산화염에 의해 연소되기 때문에 연료 분무를 제외한 대부분은 희박한 조건으로 HC의 생성이 어렵다. 반면에 LNG 혼소의 경우 흡기 매니홀드에서 LNG의 주성분인 메탄 연료가 미리 공기와 혼합된 후 연소실로 유입된다. 이후 압축과정을 거쳐서 디젤연료의 pilot 분사에 의해 점화가 되고 화염전파 과정을 거쳐서 연소가 종료된다. 이때 화염이 실린더나 실린더 헤드의 벽면과 부딪혀 소멸될 수 있으며 피스톤 탑 링의 상부 크레비스 영역에서 다량의 미연가스가 발생할 수 있기 때문에 NMHC의 배출이 증가한다. 촉매를 배기관 후단에 장착하였지만 HC의 배출량이 많고 또 경쟁관계에 있는 CO에 반응이 뒤지기 때문에 일부분만 산화되고 나머지는 그대로 배출되기 때문이다. 반면에 CO의 경우 시동초기 촉매가 예열되지 않았을 때만 발생이 되고 이후에는 산화촉매에 의해 대부분이 산화되었다. 또한 LNG 연료의 C (carbon)의 수가 H (hydrogen) 수에 비해 적은 것도 CO의 배출이 감소한 이유다.

CO₂ 배출량은 CO와 마찬가지로 디젤에 비해 H/C의 값이 크기 때문에 동일한 에너지를 사용하더라도 줄어든다. LNG의 디젤 대체율이 높을수록 CO₂ 저감율도 높아야 한다. 그러나 연료가 완전연소가 되지 않을 경우 미연소된 연료는 배기관의 산화촉매에서 산화가 되어 CO₂로 변환된다.

NO_x의 경우에는 디젤에 비해 농후한 공연비 조건에서 운전되었기 때문에 대부분의 운전영역에서 감소되었다.

PM의 경우 정도의 차이는 있으나 경유 대체율 수준의 저감효율을 보여준다.

3.5. 미규제 물질 검출

Fig. 5는 FTIR을 사용하여 미규제 물질인 SO₂의 검출결과를 보여준다. 디젤 베이스에서는 초저유황 경유(ULSD)의 사용으로 인하여 검출이 되지 않았으나 LNG 혼소 모드시 촉매 전단과 후단에서 SO₂가 검출되었다. 이는 LNG에 첨가된 부취제에 미량의

Table 4. Result of D-13 Mode Test g/kWh, ():Reduction rate

출력 / Emission	380PS		410PS		440PS	
	DieselBase	Mix	DieselBase	Mix	DieselBase	Mix
NMHC	0.0105	0.662 (6202.9%)	0.0115	0.880 (7554.8%)	0.0113	0.673 (4952%)
CO	3.307	1.071 (-67.6%)	2.882	1.303 (-54.8%)	2.635	0.345 (-86.9%)
CO ₂	687.5	606.7 (-11.7%)	679.4	608.6 (10.4%)	611.552	542.665 (-11.3%)
NO _x	5.815	3.984 (-31.5%)	7.309	5.803 (-20.6%)	6.314	3.768 (-40.3%)
PM	0.227	0.042 (-81.6%)	0.162	0.052 (-68%)	0.131	0.069 (-52.7%)

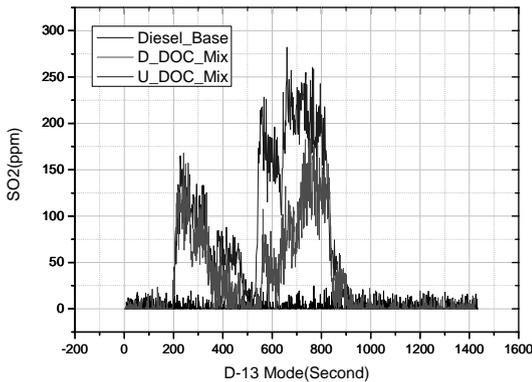


Fig. 5. Plot of SO2 (Non-regulation Gas).

황 성분이 포함되어 있기 때문이며 연료의 양이 증가 할수록 함께 증가하는 경향을 갖는다.

초저유황유를 사용하는 디젤연료의 경우에도 수 ppm 수준의 황 성분이 포함되어 있으나 대부분 PM에 흡착되거나 낮은 배기온도에 의해 쉽게 응축되기 때문에 가스상으로 거의 검출되지 않는 것으로 판단된다.

그림에서와 같이 일부 운전조건에서 이산화 황 성분이 검출되고 있으나 관련기관의 시험결과에 의하면 촉매의 성능을 저하시킬 수준은 아닌 것으로 판단하고 있다. 그러나 이산화황 배출 메커니즘에 대한 정확한 규명과 촉매의 성능에 미치는 영향을 파악하기 위한 추가 연구가 필요하다.

IV. 결 론

디젤엔진을 디젤-LNG Dual Fuel 방식의 엔진으로 개조하여 엔진특성과 배출가스 특성을 연구한 결과 다음과 같다.

1. NMHC는 디젤모드에 비해 4~7배 정도 증가하였으며 이를 해결하기 위해서는 LNG-디젤 혼소에 맞게 연소실 구조를 최적화 하거나 전용 촉매를 개발할 필요성이 있다.

2. CO는 촉매의 영향으로 인하여 약 55%에서 80%

가 저감되었으며 온실가스로 분류되는 CO₂는 모든 엔진에서 10% 이상 저감되었다.

3. 디젤엔진에서 문제가 되는 NO_x는 20% 이상 저감되었으며 PM도 50% 이상 저감되었다.

4. 모든 엔진에서 70%대의 높은 디젤 대체율을 보였으나 디젤-LNG 열량 환산을 통한 대체율에서는 12%에서 29%의 열량이 더 소비되는 것으로 나타났다.

5. 미규제 물질인 SO₂가 LNG-디젤 혼소 모드시 촉매의 전, 후단에서 모두 검출되었으며 정확한 발생 메커니즘 분석과 촉매에 미치는 영향에 대한 추가연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] 환경부 천연가스자동차 보급현황 발표자료(2009. 12.31일 기준)
- [2] J. Mckinley Addy, Avtar Binning, Paul Norton, Eric Perterson, Kevin Campbell, and Oreste Bevillaqua, "Demonstration of Caterpillar C10 Dual Fuel Natural Gas Engines in Commuter Buses", SAE 2000-01-1386, (2000)
- [3] N. John Beck, Robert L. Barkhimer, William P. Johnson, Iloi C. Wong, and Kresimir Gebert, "Evolution of Heavy Duty Natural Gas Engines- Stoichiometric, Carbureted and Spark Ignited to Lean Burn, Fuel Injected and Micro-Pilot", SAE 972665, (1997)
- [4] Kresimir Gebert, N. John Beck, Robert L. Barkhimer, and Iloi-Ching Wong, "Strategies to Improve Combustion and Emission Characteristics of Dual-Fuel Pilot Ignited Natural Gas Engines", SAE 71712, (1997)
- [5] 윤성식, 허성준, 노운현, "LNG 혼소 시스템이 적용된 디젤엔진 및 차량 주행특성", KSAE08-s0076, (2008)
- [6] 이석환, 이진욱, "LNG 혼소엔진 기술동향 분석", KSAE07-J0005, (2007)
- [7] 이석환, 이진욱, 허성준, 윤성식, 노운현, "13L급 LNG-디젤 혼소엔진의 기초성능 특성 연구", KIGAS Vol. 11, No.4, (2007)