

LFG를 이용한 350kW급 가스엔진 발전시스템 개발

이장희*, 김영민*, 최영하*, 신동성**, 최명학**, 민균홍**, 최병철***, 이춘희***,
신동호***, 최병철**** (* KIMM, ** 두산인프라코어, *** 전남대, **** (주) 탬스)

요 약

본 과제에서는 참여기업인 두산인프라코어(구 대우종합기계)에서 양산중인 국산디젤엔진을 개조해 가스엔진을 제작하였으며, 두산인프라코어에서 500시간 내구시험을 2차례 실시하였고, 주관기관인 한국기계연구원에서 국산 ECU를 활용하여 도시가스를 연료로 시험을 수행한 후 김포매립지에서 현장 적용시험을 수행하였다. 메탄농도가 46~56%로 변하는 조건에서 350kW의 출력을 달성하였으며, 삼원촉매를 적용한 결과 2005년 배기규제를 만족하는 결과를 도출하였다. 위탁기관인 전남대에서는 촉매 특성에 관한 시험을 1차년도와 2차년도에 수행하였다.

본 과제에서 개발한 LFG(=매립지가스) 엔진은 국내에서 개발된 최초의 LFG 엔진으로서 쓰레기 매립지 뿐만 아니라 음식물 쓰레기 혐기소화 처리과정, 분뇨나 축분 등의 혐기소화 처리과정, 하수종말 처리장 등에서 발생하는 바이오가스를 이용한 발전 동력원으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서 론

현재 전국적으로 662개의 매립지가 있으며, 유기성 폐기물이 소화되는 과정에 연료 성분인 메탄(CH_4)성분을 다량 함유한 LFG가 발생하고 있으나, 이를 거의 활용하지 못하고 그냥 단순 소각하고 있어 많은 에너지가 낭비되고 있는 상태이다.

최근에 와서 김포 매립지와 부산 생곡 매립지 등에 외국에서 개발한 가스 엔진 발전시스템이 도입되어 운영 중에 있으며, 이미 전국적으로 약 30MW용량의 LFG 및 바이오가스 발전시설이 설치되어 운영이나, 국산 엔진에 의한 발전은 전무한 실정이다.

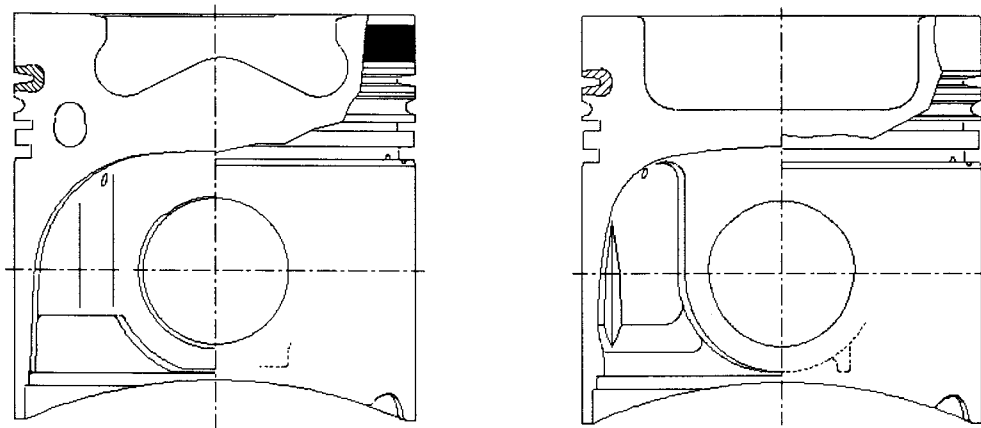
따라서 본 과제에서는 순수 국산기술로 LFG를 이용한 350kW급 전소형 바이오 가스엔진을 국내 최초로 개발하여 김포 매립지에서 실제 적용 시험을 수행하였다.

2. 가스엔진 설계 및 제작

일반적으로 디젤엔진을 천연가스 엔진으로 개조하는 경우에는 연료 특성상 불꽃

점화(Spark Ignition : SI) 연소시스템을 적용한다. SI 연소시스템은 연소 압력이 80~100bar 수준으로서 디젤 연소 시스템 대비 50~60% 수준이지만, 평균적인 연소실 온도와 배기가스 온도는 더 높게 나타난다. 즉, 디젤엔진을 천연가스엔진으로 개조하는 경우에는 기계적인 부하는 감소하나, 열적 부하는 상승한다. 따라서 본 과제에서는 엔진 개발 시에 열적부하의 상승을 고려한 부품 설계, 운전 조건 설정 및 냉각 시스템을 최적화하였다.

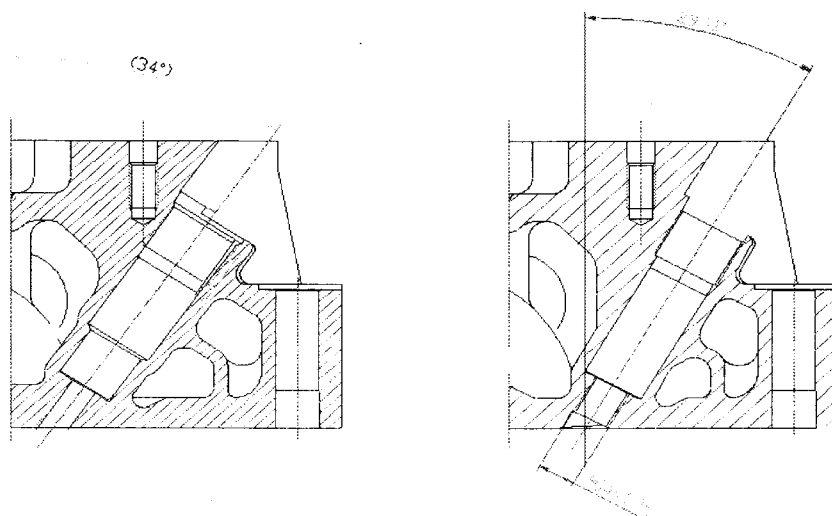
불꽃 점화기관의 연소 시스템 특성상 디젤엔진의 압축비(17:1)를 그대로 적용할 경우에는 knocking 등 이상 연소가 발생하므로, 10~12:1 사이의 적절한 압축비 설정이 필요하다. 따라서 그림 1과 같이 피스톤의 연소실 형상을 변경하였으며, 점화플러그의 장착을 위하여 피스톤 헤드를 그림 2와 같이 개조하였다.



[디젤엔진]

[천연가스엔진]

[그림 1 : 피스톤 형상]

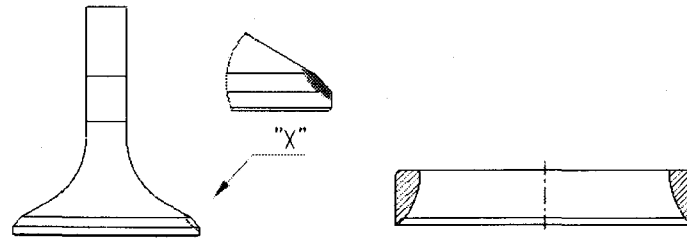


[디젤엔진]

[천연가스엔진]

[그림 2 : 피스톤 헤드의 개조]

천연가스를 연료로 사용할 경우에 경유와 같은 기존의 액체연료 사용 시에 비해 매우 건조한 연소실 조건을 나타낸다. 이는 고온에서 빠른 속도로 열고 닫히는 흡/배기 밸브 및 밸브 시트의 마모에 영향을 주므로, 그림 3과 같이 내마모성이 뛰어난 재질을 밸브시트 등에 적용하였다.



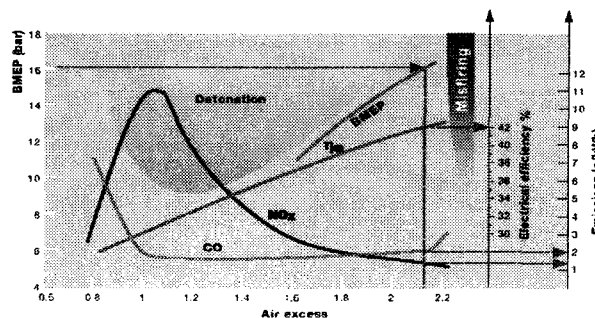
[그림 3 : 밸브 및 밸브시트]

디젤 엔진을 천연가스 엔진으로 개조함에 따라 변경되는 연소 방식과 연료 특성을 고려하여 연소실 관련 부품의 재설계와 연료, 점화 시스템 검토 및 선정을 실시하고, 설계 및 선정 완료된 시스템을 장착하기 위한 파이프 및 브라켓류를 설계, 제작하였다. 표 1에는 최종적으로 개조된 가스엔진의 사양을 나타내었다.

< 표 1: 시제엔진 사양 >

항 목	내 용
엔진명	GV222TIC
형식	V형 12기통
배기량	21.927 liter
압축비	10.5 : 1
보어 × 스트로크 [mm]	128 × 142
급기방식	Turbocharged, Intercooled
점화방식	불꽃점화
연료공급방식	흡기관 믹서방식, 이론공연비 연소

3. 가스 엔진의 배출 가스 저감 기술



[그림 3: 가스 엔진의 공연비별 효율 및 배출가스]

가스 엔진의 공연비별 효율 및 배출가스 배출 특성은 그림 3과 같다. 가스 엔진의 배기가스 저감기술은 2가지로 분류된다. 하나는 이론공연비 연소 후 삼원 촉매를 사용하는 기술이고, 다른 하나는 희박연소 후 배출되는 배기가스를 SCR 등을 사용하여 저감하는 것이다. 그림 4에 나타난 바와 같이 희박연소 시에 NOx는 이론공연비 연소에 비해 적게 배출된다. 그러나 이론공연비 연소에서는 많이 배출되는 NOx를 삼원촉매를 사용하여 95%이상 저감하여 배기규제를 만족시킬 수 있으나, 희박연소에서는 적게 배출되는 NOx를 저감하는 기술개발이 부족하여 고가의 SCR 등을 사용하여 저감하여야 한다. 그림 3에서 알 수 있듯이 희박하면 할수록 NOx 배출량이 감소하므로 희박한계를 극대화하는 것이 바람직하나 실제적으로 어느 한계를 넘어서면 실화(misfire)가 발생하여 엔진이 정상적으로 작동하지 않는다. 따라서 본 과제에서는 삼원촉매를 사용하는 이론공연비 방식을 채택하였다.

4. 가스엔진 성능시험

개발엔진의 신뢰성 및 내구성을 검증하기 위하여 각 부품별로 성능 평가시험을 수행하여 최적의 부품을 선정 한 후, 1800rpm 410kW 조건에서 1차와 2차에 걸쳐 각각 500시간 내구 시험을 도시가스를 연료로 수행하였다. LFG는 도시가스에 비해 발열량이 50%전후 이므로 이에 따른 출력저하를 고려하여 도시가스 사용시의 부하조건을 410kW로 하였다.

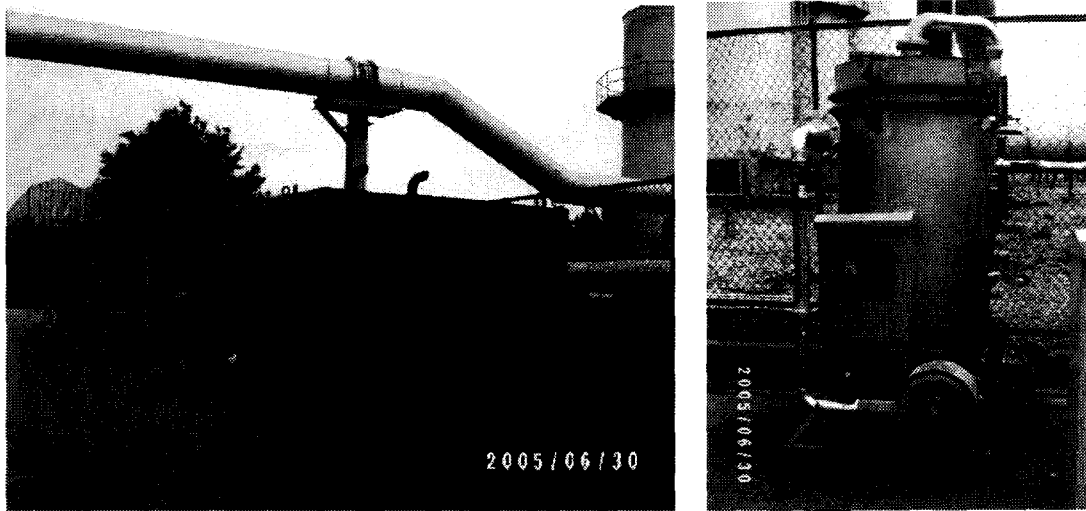
2차 내구 시험 결과는 표2와 같으며 별다른 문제점은 발견되지 않았다.

<표 2 : 내구시험 평가결과 요약>

대분류	평가항목	평가기준	시험 결과	판정
엔진 성능	출력	목표 출력의 2% 이내	405 ~ 415 kW	양호
	연료 소비율	2% 이내의 변화	205 ~ 210 g/kW-h	양호
	압축압력	13 bar 이상 유지	16 ~ 17 bar	양호
	오일소모량	0.25 g/kW-h 이하	0.13 ~ 0.16 g/kW-h	양호
	블로우바이 가스량	150 l/min 이하 유지	120 ~ 135 l/min	양호
부품 내구성	부품관찰	이상마모 현상 없을 것	주요 엔진 부품들에 이상 마모 현상 없음	양호
	점화플러그 간극	0.6mm 이하 유지	0.4 ~ 0.5 mm	양호
	밸브시트 마모량	0.3 mm 이하 마모	흡기밸브 : 0.1 mm 이하 배기밸브 : 0.1 mm 이하	양호
엔진오일 내구성	동점도	신유 대비 ± 20% 이내 변화	신유의 90%	양호
	전산가	신유 대비 2.0 이하의 증가	신유 대비 0.95 증가	양호
	전염기가	신유 대비 50% 이상 유지	신유의 73%	양호

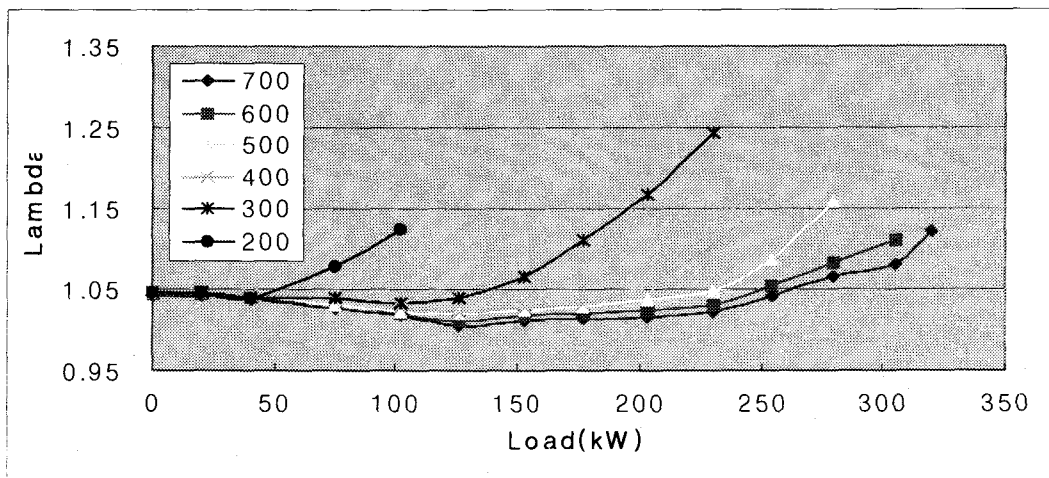
5. 현장 적용 실험

매립지가스 적용실험을 위해 수도권매립지 공사의 지원을 받아 김포매립지의 중앙소각장 가까이 그림 5와 같이 매립지가스 발전시설을 설치하였다. 출력시험결과 매립지가스의 공급량이 부족해 부스터를 설치하였으며, 부스터 구동 전원은 자체 발전으로 충족하였다. 출력시험은 400kW급 부하시험기를 자체 제작하여 사용했고, 부하의 미세조정을 위하여 20kW 용량의 부하 미세조정기를 설치하였다.



[그림 5 : 설치된 LFG 발전시스템과 부스터]

그림 6은 사용한 Mixer의 특성을 나타낸 것으로서, 부스터 공급압력에 따라 공연비의 변화가 있으며, 공급압이 증가할수록 최대 발전출력이 증가하고, 고부하 영역에서 공급압이 증가할수록 공연비가 농후해 지고 있다.

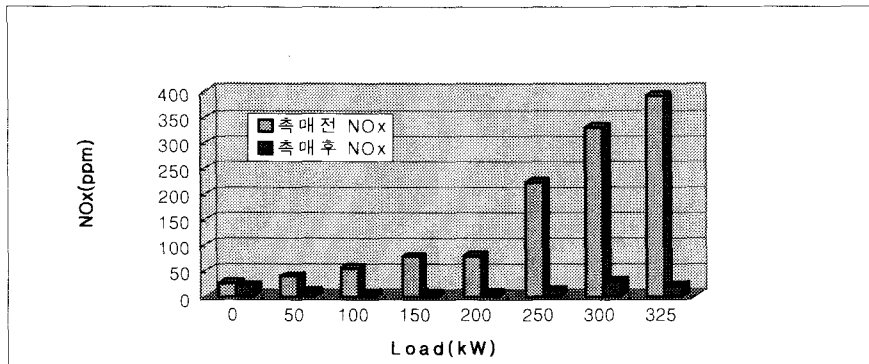


[그림 6 : 부스터 공급압력에 따른 부하별 공연비 변화]

가. 성능시험 결과

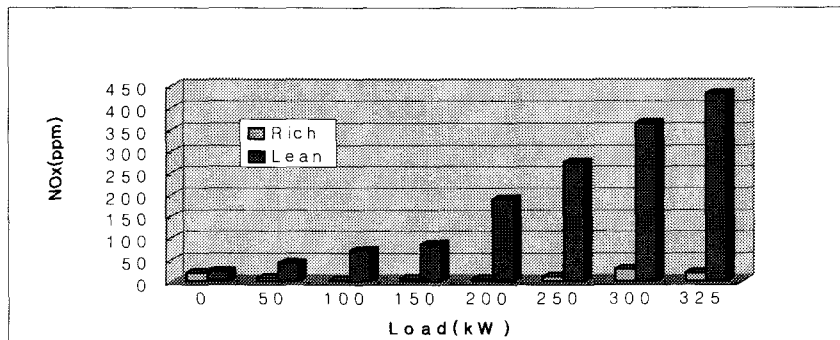
그림 7은 Rich 영역($\lambda = 0.99 \sim 1.00$)에서의 촉매 전단과 후단의 NOx를 측정한 결과이다. Rich 영역에서는 촉매의 환원반응이 원활하게 진행되어, 전부하 영역에서 2005년 배기규제치인 50 ppm @13% O₂를 만족하고 있다.

촉매전단의 NOx 측정값을 도시가스로 실험한 결과와 비교해보면 배출량이 1/2 이하로 확인되었고, 이는 바이오가스 성분 중에 다량 포함된 CO₂에 의해 최고연소온도가 낮아져 Thermal NOx가 적게 생성(EGR 효과)되는 것으로 보인다.



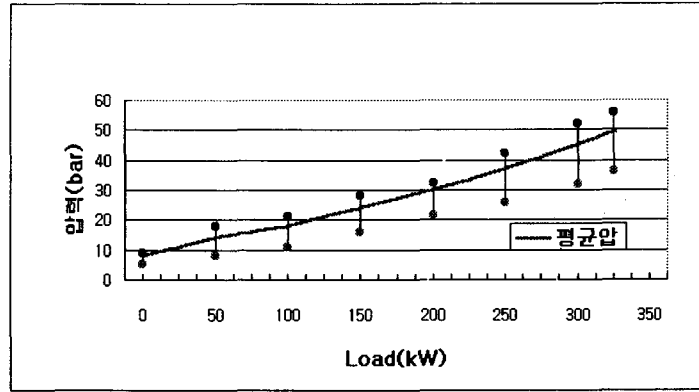
[그림 7 : 촉매 전단과 후단에서의 NOx (@13% O₂ : Rich영역)]

그림 8은 Rich 영역($\lambda = 0.99 \sim 1.00$)과 Lean 영역($\lambda = 1.00 \sim 1.02$)에서 촉매 후단의 NOx를 측정한 결과이다. Lean 영역($\lambda = 1.00 \sim 1.02$)에서는 촉매의 환원반응이 원활하지 않아 NOx가 다량으로 배출되고 있다.



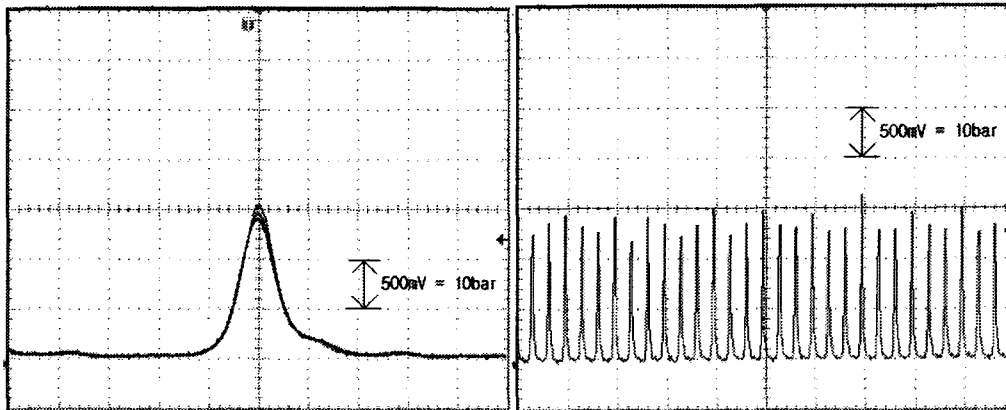
[그림 8 : 촉매 후단에서의 NOx(@13% O₂)]

그림 9는 각 부하별 연소실내의 최고연소압력을 나타낸 것이다. 부하의 증가에 따라 최고연소압력이 증가하고 있다.



[그림 9 : 부하별 연소실 최고 폭발압력]

그림 10은 200kW에서의 압력을 측정 한 것으로서, 최고 폭발압력 30kg/cm² 부근에서 Cyclic Variation이 존재하고 있음을 알 수 있다.

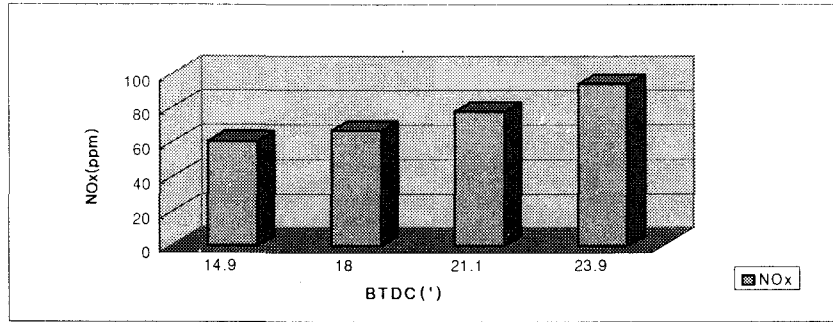


[그림 10 : 연소실 압력 선도 (부하 200kW)]

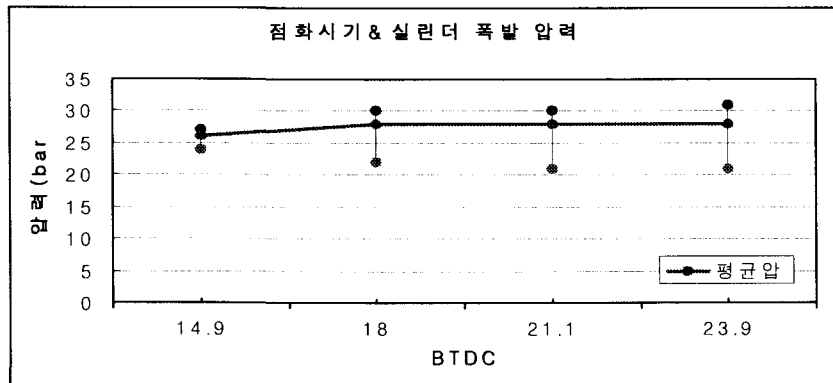
나. 점화시기 변화에 따른 성능 특성

그림 11은 Rich 영역($\lambda = 0.99 \sim 1.00$), 200kW 부하조건에서 점화시기를 변화시키면서 촉매 전단의 NOx 측정 결과를 나타낸 것으로서 점화시기 진각에 따라 NOx 배출량이 증가하고 있음을 알 수 있다.

그림 12는 점화시기 변화에 따른 연소실내의 최고폭발 압력변동을 나타낸 것으로서 점화시기를 진각시킴에 따라 연소실내 최고 연소압력이 증가하고 있으나, 점화시기가 BTDC 14.9°에서 안정적으로 연소가 진행되고 있음을 알 수 있다.



[그림 11 : 점화시기 변경에 따른 NOx]



[그림 12 : 점화시기변화에 따른 연소실내 압력 변동]

6. 결론

대체에너지 활용을 위해 매립지가스를 이용한 350kW급 바이오가스엔진 발전시스템이 개발되었다.

이를 위하여 참여기업인 두산 인프라코어(주)에서 베이스엔진을 제작하였고, 도시가스를 이용한 기본성능시험과 2차레에 걸친 500시간 내구성시험이 수행되었다. 주관기관인 한국기계연구원에서는 엔진제어장치(ECU) 개발과 바이오가스 발전시스템을 구성하여 수도권 매립지 현장에 설치하여 실험을 수행하였다.

촉매 부분에 대한 기본연구는 전남대에서 위탁과제로 수행하였으며, 예산상의 문제로 인하여 본 과제에 2년간 참여하였다.

본 과제에서 수행한 결과는 다음과 같다.

- 두산 인프라코어에서 제작한 베이스엔진은 천연가스를 연료로 하여 시험한 결과 410kW의 출력을 얻을 수 있었으며, 410kW(1800 rpm) 부하로 1차와 2차에 걸쳐 각각 500시간 내구시험을 진행한 결과 별다른 문제점을 발견하지 못하였다.
- 김포매립지에 개발한 바이오가스 발전시스템을 설치하여 성능시험을 수행하였

으며, 메탄농도가 46.6 ~ 51.8 %로 변함에도 불구하고 안정적인 운전이 가능함을 확인하였다.

- 목표 출력 350kW는 냉각수 과온으로 인한 발전기 트립문제로 인하여 시험하지 못하였지만, 325kW까지 출력시험 하였으며, 냉각팬 구동출력(약 16kW로 추정)과 부스터 구동 전력 등을 고려하면 실질적으로는 목표출력을 달성한 것으로 판단된다. (10월 중순 실험에서는 357kW출력을 달성하였음 : 발표시 동영상 참고)

- 325kW 시험에서 Throttle Body Actuator 개도와 분기점 압력 등의 상태를 확인한 결과 350kW 이상의 출력시험이 가능함을 확인하였다.

- 삼원촉매와 이론공연비 제어운전 결과, 2005년 배기규제인 NOx 50ppm(@13% O₂)를 충족하고 있음을 확인하였다.

현장실험을 하면서 연료성분 변화에 따라 공연비를 제어할 수 있는 방법을 알게 된 것은 좋은 경험이라 하겠으며, 본 과제를 통하여 개발된 국내 최초의 전소형 바이오가스엔진이 국내에 팽배한 국산기술 불신풍조를 극복하고 많이 보급되었으면 하는 바람이다.

감사의 글

본 과제를 수행하는 데 실험현장을 제공해 주신 수도권 매립지 공사의 관계자 여러분에게 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김영민, 이장희 : "열병합 발전용 천연가스 엔진의 기술동향", 대한기계학회 2000년도 열공학부문 추계학술대회 논문집, pp 175-184, (2000)
2. 박종환 : "청정개발체제를 통한 온실가스 저감 및 매립가스자원화 방안", 한국폐기물학회 2000년 폐기물 매립기술 심포지엄, pp 69-83, (2000)
3. 이장희, 김영민, 이종윤, 박종환, 유만식: "유기성폐기물의 처리과정에서 생성되는 바이오가스를 이용한 발전기술", 한국폐기물학회 2000년도 추계학술대회논문집 pp287-292 (2000)
4. 이장희, 김영민, 노운현, 최병철, 팽성일, 김성진 : "바이오가스를 이용한 혼소형 가스엔진발전시스템 개발", 제6회 환경기술세미나 (2004)
5. David P. M., Gary D. B., John C. H., and John T. K. : "Evaluation of Six Natural Gas Combustion Systems for LNG Locomotive Applications", SAE972967, (1997)

6. Gary P. Mueller : "Landfill Gas Application Development of the Caterpillar G3600 Spark ignited Gas Engine", Trans. ASME J. ICE-Vol 22, pp 161-168, (1994)
7. A. Raubaud, D. Favrat : "Improving Performance of a Lean Burn Cogeneration Biogas Engine Equipped with Combustion Prechambers", Fuel 84 pp 2001-2007 (2005)