

축분을 이용한 바이오가스 엔진 개발 - 기초설계 및 성능분석 -

백 이 김영중 강금춘 유영선 조기현

A Study on the Development of Bio-gas Engine Using Livestock Manure - Fundamental Design and Experimental Analysis on the Performance -

Y. Paek Y. J. Kim G. C. Kang Y. S. Ryou K. H. Cho

Abstract

This is a fundamental study to develop a bio-gas utilization technology using livestock manure. Especially, this study was carried out to develop an engine using bio-gas. A bio-gas engine was designed and manufactured by modification of a diesel engine of 3 cylinders powering 13.31 kW/2800 rpm, changing the fuel supplying system fit for bio-gas. The result showed that, when the Air/Fuel ratio was controlled with fixed spark timing, the power of biogas-fueled engine is about 10.6~14.6% lower than that of LNG-fueled engine because of low volumetric efficiency. The engine output and torque was 11.85~13.3 kW, 39.5~40.8 N·m, respectively at the engine speed of 2600 rpm. Bio-gas consumption rate was 260.20 g/kW/hr, 315.20 g/kW/hr in engine speed of 1000 rpm, 2800 rpm, respectively.

Keywords : Bio-gas engine, Bio-gas, Livestock manure, Compression ratio, Power

1. 서론

현대사회는 급속한 산업화로 인해 에너지 사용량 증가와 더불어 환경오염의 문제에 심각하게 직면하고 있으며, 이에 따라 연료소비 절감 및 저공해에너지의 이용 및 개발이 중요한 이슈가 되고 있다. 또한 환경오염 방지를 위하여 대기오염 규제가 엄격해 지고 있기 때문에 대체연료 개발, 유해배출물의 저감, 연료의 경제성 제고 등 국가적 차원의 에너지 이용 효율증대와 공해문제의 해결 등이 당면과제이다.

최근 축산물의 이용증가와 더불어 가축사육의 증가량이 매년 증가 추세('01농림부, 국립농산물품질관리원)에 있으며 가축의 사육두수를 보면 7,864천두('99) → 8,720천두('01)로 증가하고 있으며, 이로 인하여 축분에서 발생하는 바이오가

스의 대체연료개발이 절실히 요구된다. 바이오가스를 생성할 수 있는 메탄균은 저온성균(15~20°C), 중온성균(30~37°C), 고온성균(55~65°C)으로 분류되며, 기존의 연구는 겨울철 발효조의 온도를 일정온도 이상으로 유지시켜 메탄균의 활성을 높이는 데 집중되어 있다.

이와같은 현실을 고려할 때 바이오가스 이용기술 개발은 석유수입의 대체효과 측면에서도 매우 중요하다고 판단된다. 특히 석유 의존도가 높은 우리나라에 있어서 대체 연료로 현재 가장 기대를 가지는 연료 중의 하나가 바이오가스이다. 바이오가스가 대체 연료로서 유망시 되고 있는 이유는 축분의 에너지자원화 측면에서 자원이 풍부하고, 바이오가스발생 기술이 확립되어 발생면에서 안정성이 있고 취급이 비교적 용이하며, 기존 사용되는 내연기관의 구조를 크게 변형시키지

The article was submitted for publication in September 2002; reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in 2005. The authors are Y. Paek, Y. J. Kim, G. C. Kang and Y. S. Ryou, Researcher, NIAE, Rural Development Administration, Sunwon, Korea. The Senior researcher, Ki Hyun Cho, Dept. of Vehicle Machines, Kyongdo Provincial College, Yechon, Korea. The corresponding author is Y. Paek, Energy & Resource Laboratory, National Institute of Agricultural Engineering, 249 Seodun-dong, Kwonsun-ku, Suwon City, 441-100, Korea; Fax : +82-31-290-1930; E-mail : <paekyee@rda.go.kr>

않고도 사용이 가능하기 때문이다. 또한 바이오가스는 천연 가스와 더불어 가까운 장래에 기술적, 경제적으로 실용화의 가능성이 높고 실용화까지의 기간도 비교적 짧을 것으로 기대되고 있다.

이처럼 각광을 받고 있는 바이오가스 연료의 장점은 첫째로 옥탄가가 높으므로 가솔린 기관보다도 압축비를 높일 수 있어서 열효율 상승을 도모할 수 있다는 것이고, 둘째로는 질소 산화물(NOx)과 Soot의 발생이 적다는 것이고, 셋째로는 디젤 기관에서도 적용이 가능하며 가연한계가 넓으므로 연료의 양을 줄일 수 있고, 따라서 배기배출물저감의 효과가 기대된다는 점이다.

먼저 축분의 자원화에 관한 연구 및 바이오가스 이용에 관한 연구를 살펴보면 다음과 같다. 박 등(1979)은 가축분에서 대체연료인 메탄가스를 생산하고자 축분을 혐기성으로 발효시킨 결과 원료의 투입량을 증가시킴에 따라 발효조 단위 용적당 가스발생량은 증가하나 유기물(VS) kg당 가스발생량은 감소하였으며, 유기물의 분해율 증대 즉 오염도를 낮추기 위해서는 체재기간을 길게 하는 것이 유리하다고 보고하였다. 홍(1992)은 농축산업의 전업화와 규모확대로 인하여 다량 소비되는 화석에너지와 대량 배출되는 폐기물 등에 관한 연구에서 에너지자원의 절약과 환경보존 대책이 필요함을 언급하였고, 환경파괴적인 농업에서 환경보존적인 저투입에너지, 고품질농산물의 지속적인 생산이 가능한 농업기술 체계가 필요하다고 보고하였다. 특히 깨끗한 자연에너지와 재생 가능한 바이오 에너지 등의 미이용 에너지자원을 활용하면 자연환경과 조화된 대체에너지 기술의 농업 이용이 가능하다고 보고하였다. 이(2002)는 '90년대부터 축산업의 규모 확대로 가축 분뇨처리가 새로운 문제로 대두되고 있으며, '01년 말 현재 축산분뇨발생량은 1일 133천 톤으로서 종축별로 보면 한우 21천 톤, 젖소 21천 톤, 돼지 75천 톤, 닭 12천 톤으로 돼지가 56%를 차지하고 있다고 보고하였다. 소규모농가에서 배출되는 분뇨는 주로 자체적으로 퇴비화 또는 시군에서 운영하는 축산폐수처리시설에 위탁처리하고, 전업 및 대규모 농가에서는 자원화시설로 퇴비화, 액비화 처리를 하고 있으며, 축산분뇨의 처리는 대부분을 자원화 및 정화방법으로 처리하지만 일부는 해양배출이나 유출되고 있는 것으로 추정된다고 보고하고 있다. 천연가스에 관한 연구로서 김 등(1991)은 4행정 천연가스 희박연소엔진의 성능향상에 관한 연구에서 희박연소한계를 넓혀 연료소비율, NOx 및 CO를 저감하였다고 보고하였으며, 민 등(1997)은 천연가스 조성이 CNG엔진의 탄화수소계 배기가스에 미치는 영향, 이 등(1998)은 천연가스조성이 CNG엔진의 배기가스에 미치는 영향, 이 등(1999)은 연료의 조성변화가 천연가스 차량의 연비 및 배출가스 특성에

미치는 영향 등의 연구보고에서 CNG는 단위질량당 발열량은 높지만 단위체적당 발열량이 낮아 충전효율이 저하된다고 기술하였다. Karim등(1983)은 메탄가스와 프로판가스를 이용하여 SI기관과 CI기관의 성능비교를 한 결과 프로판의 밀도가 메탄보다 높아 기체연료에 의한 공기 대 체적량이 적고 또 프로판이 메탄보다 연소속도가 빠르기 때문에 프로판 사용시의 출력이 메탄보다 높게 나타났다고 보고하였다. Sakai (1996)는 천연가스조성변화가 희박연소엔진의 성능에 미치는 영향을 조사하고 엔진에 대한 적합성과 동시에 공연비 피드백제어방식에 3원촉매를 부착 후 연료유량 변화가 공연비 제어특성과 배기가스성능에 미치는 영향 등을 분석하였고 또한 시험연료 규격작성에 기초데이터를 제공하였다고 보고하였다.

본 연구에서는 이상과 같은 선행연구를 기초로 하여 국내의 축분 발생량 등을 조사하였고, 축분에서 발생하는 바이오가스를 연료로 이용하는 엔진을 설계제작 하였으며, 바이오가스엔진의 성능을 분석하여 실용화를 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 엔진설계

1) 연소실 형상

기존 디젤엔진의 경우 압축비가 21:1이며, 이는 불꽃점화 기관인 바이오가스엔진에는 부적합하여, 이러한 높은 압축비를 낮추기 위해 압축비 조정이 반드시 필요하였다. 그림 1에서는 디젤엔진의 고압축비를 낮추기 위하여 실린더헤드와 실린더블록사이에 끼워지는 시임의 두께를 증대시켜 연소실의 체적을 증대시켰다. 바이오가스는 옥탄가가 비교적 높은 연료이므로 출력증대를 위해서 실린더헤드와 실린더 블록간에 삽입된 압축비 조정시임의 두께를 3.5 mm로 하였으며, 옥탄가와 노크한계를 고려하여 압축비를 9.5:1로 조정하였다. 또한, 피스톤 크라운부의 형상을 그릇의 형태로 수정함으로써 피스톤 헤드부의 체적은 30.25 cc로 하였다.

2) 연료공급장치

바이오가스엔진의 연료공급장치는 그림 2와 같이 바이오가스를 가스압축기(AG-15)를 이용하여 저장하고 볼베와 이 볼베에 충전된 액상의 가스에 함유되어 있는 불순물을 제거하는 필터와 전자석에 의해 작동되어 연료통로를 개폐하는 기상연료 공급밸브 및 액상연료 공급밸브, 이들 밸브를 통과한 바이오가스를 예열하는 프리히터와 프리히터를 지나면서 예

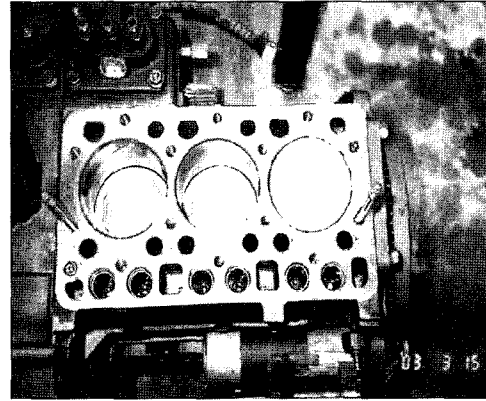
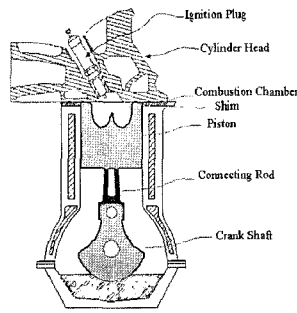


Fig. 1 Schematic diagram and photograph of the combustion chamber.

열된 고온의 바이오가스를 감압하여 기화시키는 베이퍼라이저, 기화된 바이오가스를 연료화하여 공기와 혼합하여 실린더내의 연소실로 공급하는 믹서 등으로 이루어진다.

바이오가스봄베에 저장된 바이오가스는 베이퍼라이저를 둘러싸고 있는 워터자켓내의 냉각수 온도를 감지하는 수온센서의 신호에 따라 선택적으로 개방되는 기상 또는 액상 송출밸브를 통해 프리히터로 보내진 다음 다시 베이퍼라이저로 공급되어지며, 프리히터와 연결된 공급호스는 상술한 수온조절기 하우징에 형성된 출구포트와 연결되어 있으며, 베이퍼라이저와 연결된 리턴호스는 수온조절기 하우징의 입구포트와 연결되도록 설계·제작하였다.

3) 전기점화장치

원형 디젤엔진을 바이오가스엔진으로 대체하기 위해서는 기존의 압축착화방식에서 불꽃점화방식으로 전환되어야 한다. 따라서 전기적인 점화장치의 필요에 따라 바이오가스엔진에서 채용한 배전기는 그림 3과 같이 하우징에 의해서 실린더블록의 외부에 설치되는 것으로 하이텐션코드를 사용하여

여 실린더헤드에 장착된 각 점화플러그에 고압의 전기를 공급하여 혼합기를 점화하게 된다. 배전기의 구조 및 기능은 가솔린 엔진에서 일반적으로 사용하는 배전기와 동일한 것을 사용하였으며, 기존의 디젤엔진에 배전기를 장착하기 위하여 기존의 연료 펌프구동축을 이용하여 구동하는 방식을 채택하여 구동하게 하였다.

이때 구동기어는 배전기 기어를 회전시킴으로써, 최적점화시기에 맞게 각 점화플러그에 고압의 전기를 1-2-3순으로 각 실린더에 분배하게 하였다.

나. 실험방법

이상과 같이 설계·제작한 바이오가스엔진의 성능을 시험하기 위하여 동력계, 흡기계통, 연료공급계통, 배기계통, 연소 해석장치, 배기분석장치 및 온도센서, 유량계, 계측용 컴퓨터 등으로 구성된 시험장치를 그림 4와 같이 제작하였다.

표 1은 공시엔진의 주요제원이며, 실린더 내경 85 mm, 행정 82 mm, 배기량 1395 cc이고, 최대출력은 19.2 PS/2800 rpm이다. 본 시험에 사용한 동력계는 와전류식 전기 동력계

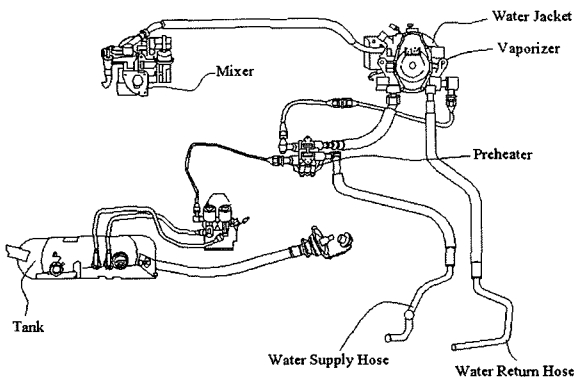


Fig. 2 Fuel supply system of the experimental bio-gas engine.

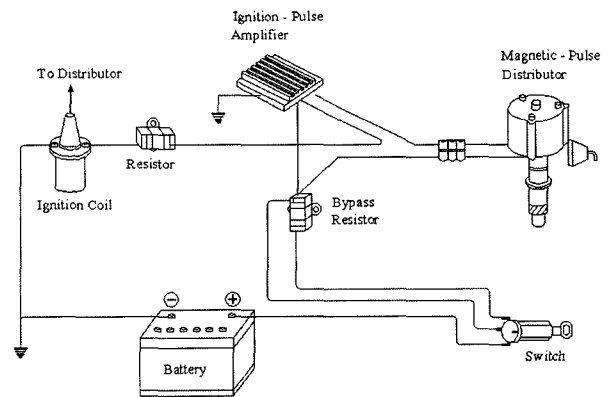


Fig. 3 Electric ignition system of the experimental bio-gas engine.

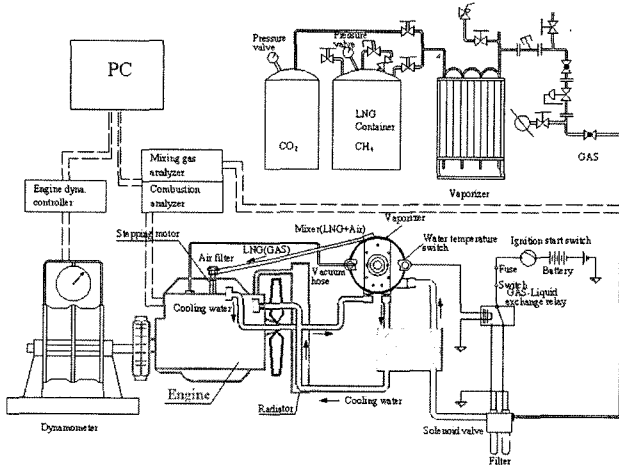


Fig. 4 Schematic diagram of the bio-gas engine test system.

Table 1 Specifications of the Bio-gas engine

Item	Specification
Type	4 cycle
Number of cylinder	3
Bore × Stroke	85 mm × 82 mm
Connecting rod	133 mm
Displacement volume	1,395 cc
Rated horse power	19.2 kw
Max. speed	2,800 rpm
Rated speed	2,600 rpm
Combustion chamber	Bowl chamber
Compression ratio	9.5
Ignition timing	25° BTDC
Ignition order	1-2-3

(Froud Korea(AG-80)이며, 배출가스분석은 직접채취식 분석계(HCA-4000)를 이용하였다. 시험운전 조건은 점화진각은 MBT(minium spark advance for best torque)상태로 설정하였고 스로틀밸브를 모두 전개한 상태 즉, WOT(wide open throttle)상태로 하였으며, λ=1 상태에서 기관의 회전수를 변화시키면서 기관의 출력, 토크, 연료소비율 등을 측정하였다. 공시연료는 표 2와 같으며, 시중에서 판매되는 LNG(메탄, 90%)와 축분에서 발생하는 바이오가스(메탄, 70%)를 사용하였으며, 바이오가스를 연료로 이용하는 경우의 엔진성능을 LNG를 이용하는 경우와 비교하여 분석하였다.

바이오가스발생량에 대한 조사는 가스발생조의 1일 원료 투입량을 10000 kg, 고형물체류시간을 20일로 기준하였으며, 발생조의 유효체적 200 m³, 저장조의 유효체적은 100 m³가 되며 발생조의 온도는 35℃ 중온소화조를 선택하여 분석하였다.

Table 2 Physical properties of LNG and Biogas

Component (Vol, %)	LNG	Biogas
CH ₄	90.00	70.00
C ₂ H ₄	5.81	2.00
C ₃ H ₈	3.25	0
i-C ₄ H ₁₀	0.45	0
n-C ₄ H ₁₀	0.44	0
i-C ₅ H ₁₂	0.02	0
n-C ₅ H ₁₂	0.01	0
N ₂	0.02	1.86
CO	0	1.30
CO ₂	0	24.8
H ₂ S	0	0.03
H ₂	0	0.01
Total	100	100

전기 동력계에 있어서 축출력은 동력계의 출력을 흡수하는 토크 T(kgf·m), 회전수 N(rpm)를 이용하여 하여 다음 식 (1)에서 구할 수 있다.

$$B_{hp} = \frac{2\pi NT}{75 \times 60} \quad (1)$$

여기서, Bhp : 제동출력(ps)

N : 회전속도(rpm)

T : 토크(kgf·m)

토크(T)계산은 동력계 부하 F(kgf)가 길이 L(m)인 동력계 암에 수직으로 작용할 때 다음 식 (2)에서 구할 수 있다. 또한 축토크는 표준 대기압(101,292 Pa), 온도(20℃), 습도(65%)를 기준으로 수정계수를 사용하면 계산할 수 있다.

$$T = F \times L \text{ (kgf} \cdot \text{m)} \quad (2)$$

$$F = \frac{F'}{K}$$

$$K = \frac{749}{P_a - P_w} \times \sqrt{\frac{273 + \theta}{293}}$$

여기서, F : 수정계수를 고려한 동력계 하중(kgf·m)

F' : 수정계수를 고려하지 않는 동력계 하중(kgf·m)

L : 동력계 토크 암의 길이(m)

P_a : 대기압(Pa)

P_w : 대기중의 수증기압(Pa)

제동평균유효압력(BMEP)과 연료소비량은 단위 시간당 기

관이 소비하는 연료의 양이며 제동연료소비율은 단위 출력당의 연료 소비량으로서 식 (3), 식 (4)로 나타낸다.

$$P_{bme} = \frac{P_{bps}}{V_s N_i}, N/cm^2 \quad (3)$$

여기서, P_{bme} : 제동평균유효압력(P_a)

V_s : 행정체적(m^3)

N : 실린더수

I : 상수(4행정사이클 기관 : 1/2)

3. 결과 및 고찰

가. 가스발생량조사

가스발생량조사는 축산연구소에서 시행하였으며, 조사기간은 2001년~2003년 동안 1일 간격으로 가스발생량을 측정하였다. 돼지의 사육두수는 2,000두로, 1일 분뇨발생량은 총 17,200 kg이며 1두당 8.6 kg이었다. 또한 가스발생조에 1일 동안 투입되는 분뇨양은 10,000 kg, 발생조온도는 35°C 인 중온을 유지하였다. 가스발생량 계측은 가스저장조에서 측정하였으며, 가스저장조는 상하 2중 분리형구조로 하부저장조는 물이 들어있고 발생조에서 발생한 가스는 저장조의 하부로 들어와 이물질 제거를 위해 물속을 지나 부력에 의해 상부저장조에 저장되도록 하였다. 바이오가스발생량을 상부저장조에 저장된 부피로 측정한 결과, 1일 가스발생량은 0.14 Nm³/두의 바이오가스가 생산되는 것으로 나타났다.

나. 기관출력

그림 5는 MBT, WOT, $\lambda=1.0$ 인 상태에서 사용연료 및 회전수변화에 따른 기관 출력을 나타낸 것이다. 시험 결과 회전속도가 높을수록 출력이 증가함을 나타내었으며, 바이오가스를 연료로 사용하였을 경우에 LNG를 사용하였을 때보다 약

10.6~14.6%의 출력이 감소 된 것으로 나타났다. 최대속도인 2800 rpm에서 출력을 보면 LNG를 사용했을 때는 13.3 kW, 바이오가스를 사용했을 경우는 11.9 kW로 나타났다. 회전속도의 증가에 따른 출력의 변화는 LNG를 이용한 경우 6.02~13.31 kW로 나타났으며, 바이오가스를 이용한 경우 5.14~11.9 kW로 나타났다. 이와 같이 출력은 회전속도에 거의 비례하여 증가하였으며, 이것은 전부하시 회전속도에 관계없이 토크가 거의 일정하기 때문이다. 또한, 바이오가스를 연료로 사용했을 때 출력이 감소되는 원인은 연료의 발열량 차이에 의한 것으로 판단되었다.

다. 연료소비율

그림 6은 MBT, WOT, $\lambda=1.0$ 인 상태에서 회전수변화에 따른 연료소비율을 나타낸 것이다. 연료소비율은 엔진 회전수가 1000~1400 rpm으로 증가할 때까지는 약간 감소하였으나, 엔진회전수 1400 rpm 이상에서는 증가하는 추세를 보였으며, LNG에 비하여 바이오가스의 연료소비율이 약간 작게 나타났다. 또한, 회전속도 1000 rpm에서의 연료소비율은 LNG의 경우 258.8 g/kW/hr, 바이오가스는 260.2g/kW/hr, 회전속도 1400 rpm에서는 LNG 256.12 g/kW/hr, 바이오가스 257.8 g/kW/hr, 2800 rpm에서는 LNG 303.688 g/kW/hr, 바이오가스는 315.2 g/kW/hr로 나타났다. 연료소비율은 최대토크가 나타나는 부근에서 최소로 나타났으며 이는 최대토크가 나타나는 부근에서 연료의 경제성이 가장양호하기 때문이다.

라. 토크

그림 7는 회전수변화에 따른 토크를 나타낸 것이다. 엔진 회전수가 1000~2600 rpm의 범위에서 토크의 변화는 LNG의 경우 37.0 N·m~45.0 N·m, 바이오가스를 사용하였을 경우 35.5 N·m~43.5 N·m로 변화가 거의 없었으며, 회전속도 1400 rpm 부근에서 LNG를 사용하였을 경우에는 45.0

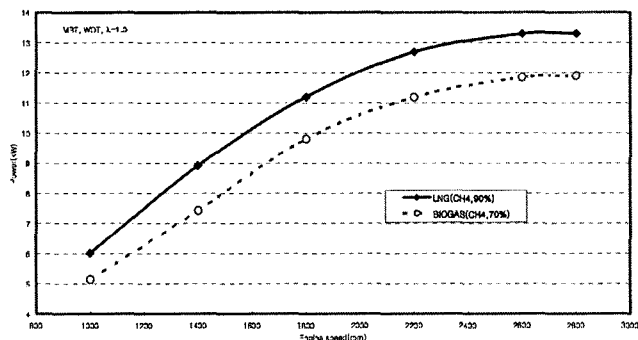


Fig. 5 Relation between power and engine speed when fueled with LNG and Bio-gas.

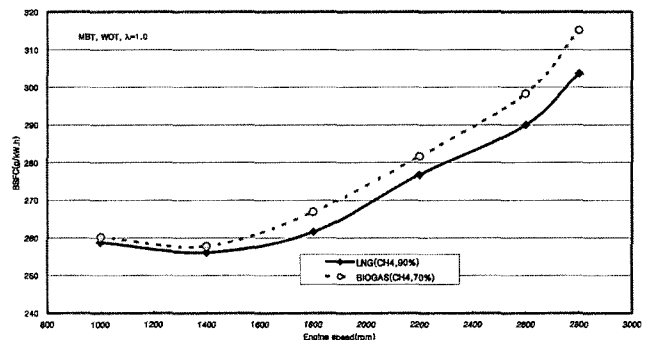


Fig. 6 Relation between BSFC and engine speed when fueled with LNG and Bio-gas.

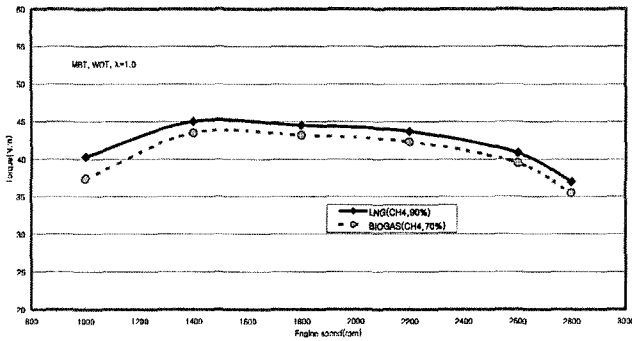


Fig. 7 Relation between torque and engine speed when fueled with LNG and Bio-gas.

N · m, 바이오가스를 연료로 사용하였을 경우에는 43.5 N · m로 최대값을 나타내었고, 그 이상에서는 토크가 급격히 감소되는 것으로 나타났다. 이것은 저속회전에서는 가스누설손실 및 냉각손실이 크고 체적효율이 낮은 것으로 판단되며, 고속회전에서는 마찰손실이 증가하고 체적효율이 감소하여 토크가 감소하기 때문이다. 또한 바이오가스를 사용하였을 경우 토크는 LNG에 비하여 약 6.6% 감소하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 바이오가스 발생량 조사와 3기통 수냉식 디젤기관을 보디로 하여 압축비, 점화장치, 연소실형상 등을 개조하여 제작한 바이오가스엔진의 성능시험을 수행하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 사육두수 2,000두의 1일 분뇨 발생량은 총 17,200 kg이며, 돼지 1마리당 1일 분뇨배출량은 8.6 kg이었고, 가스 발생조에 1일 분뇨투입량은 10,000 kg으로 바이오가스발생량은 0.14 Nm³/일/두로 나타났다.
- (2) MBT, WOT, λ=1.0인 상태에서 사용연료 및 회전수변화에 따른 기관 출력은 회전속도가 높을수록 출력이 증가하였으며, 바이오가스를 연료로 사용하였을 경우 LNG를 사용하였을 때보다 엔진출력이 약 10.6~14.6% 감소하는 것으로 나타났다. 최대속도인 2800 rpm에서 출력을

보면 LNG를 사용했을 때는 13.3 kW, 바이오가스를 사용했을 경우는 11.9 kW로 나타났다.

- (3) 연료소비율은 엔진 회전속도가 1000~1400 rpm의 3구간에서는 감소하다가 1400 rpm 이상에서는 다시 증가하는 추세를 보였으며, LNG에 비하여 바이오가스의 연료소비율이 약간 높게 나타났다.
- (4) 엔진의 회전수 변화에 따른 토크를 분석한 결과 최대토크는 1400 rpm에서 LNG를 사용하였을 경우는 45.0 N · m, 바이오가스를 연료로 사용하였을 경우에는 43.5 N · m로 나타났으며, 그 이상에서는 감소하는 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. Karim, G. A and I. Wierzb. 1983. Comparative studies of methane and propane as fuels for spark ignition and compression ignition engines. SAE Paper 831196.
2. Sakai, T and E. Kuroda. 1996. Effect of natural gas composition on engine performance and exhaust emissions. Jidosya Kennkyu, 18(1):23-26.
3. 김창업, 김창기, 김성수, 방효선, 한정욱, 조양수. 1991. 4행정 천연가스 희박연소엔진의 성능향상에 관한 연구. 자동차공학회지. 13(3):49-57.
4. 농림부. 2001. 농축산 통계연보.
5. 민병혁. 1997. 천연가스조성이 CNG엔진의 탄화수소계 배기가스에 미치는 영향. 고려대학교석사논문.
6. 박영대, 박남중, 임재현. 1979. 가축분에 의한 메탄가스 생산에 관한 연구. 농촌진흥청 농공이용연구소. 농사시험연구보고서 Vol. 21권:61-68.
7. 이남권. 1998. 천연가스조성이 CNG엔진의 배기가스에 미치는 영향. 고려대학교석사논문.
8. 이상길. 2002. 축산분뇨처리 시책방향. 2002년도 축산농가교육교재. 농림부:3-26
9. 이영재, 김강출. 1999. 연료의 조성변화가 천연가스 차량의 연비 및 배출가스 특성에 미치는 영향. 한국자동차공학회지. 7(8):121-131.
10. 홍지형. 1992. 시설농업을 위한 미이용 에너지 자원의 활용. 생물생산시설환경 1(1):84-92.