

천연가스 및 수소연료를 사용하는 소형 고속 가스엔진에 있어서 성능 및 배기 특성

김복석 · 塩路 昌廣* · 추병길**,
전남대학교 자동차연구소, *일본경도대학, **순천제일대학 산업안전과
(2000년 3월 8일 접수, 2000년 6월 18일 채택)

An Experimental Study on Performance and the Exhaust Emissions in a Small High Speed Gas Engine by Using Natural Gas and Hydrogen Fuel

B.S. Kim · M. Shioji* · B. G. Chu**
Automotive Research Center, Chonnam National Univ., Kwang Ju, Korea
**Kyoto Univ., Kyoto 606-8501, Japan*
***Dept. Industrial Safety, Suncheon First College, Suncheon, Korea*
(Received 8 March 2000 ; Accepted 18 June 2000)

요 약

본 실험 연구에서는 소형 고속기관의 가스엔진 특성을 다양한 방법으로 수행하였다. 그리고, 가스연료인 천연가스, 수소연료 및 휘발유 연료를 사용한 기관의 성능을 분석하고, 그에 대한 배기특성과 연소과정에 대하여 고찰하였다. 수소기관의 높은 회전과 고부하로 운전할 때 발생하는 역화를 방지하기 위하여 가스연료기관에 교축밸브를 설치하여 공기량을 조절하였다. 그리고 수소연료에 질소를 혼합하여 실험을 수행하였다.

그 결과 소형고속기관에 가스연료를 적용하여 운전하였을 때 여러 특성을 파악할 수 있었다.

Abstract - In this experimental study, we examined gas engine characteristics of a small high-speed engine in various ways. And we studied performance of natural gas, hydrogen gas and gasoline fuel engines, as emission characteristics and process of combustion. For the purpose of preventing back-fire occurred in case of high-speed and high load in hydrogen engine, we controlled air quantity by installing throttle valve in gas fuel engine. We performed experiment by mixing nitrogen to hydrogen fuel.

As a result, we could find out characteristics which of a high speed small engine by applying gas fuels.

Key words : High-speed Engine, Natural Gas and Hydrogen Engine, Performance and Exhaust Emission, Back-fire

1. 서 론

지구환경의 악화로 운송수단인 내연기관의 저공해화 고효율화를 추구하고 있다. 또, 석유 자원의 고갈에 따라서 대체연료의 개발도 요구되고 있다. 대체연료로서는 천연가스, 수소 등을 들 수 있는데 천연가스는 가체연수가 석유에 비하여 길고 중등의 의존성이 낮기 때문에 에너지 안전(energy security)면에서도 유리하다. 또한 대도시의 도시가스로서 사용되고 있기 때문에 인프라구조 정비에도 비교적 용이하다. 천연가스는 주성분이 메탄으로 단위발열량 당에 따른 이산화탄소 배출량이 적고, 유황 등의 불순물을 포함하지 않아서 유황산화물을 발생시키지 않는 등, 공해성이 낮은 연료라고 말할 수 있다.

수소는 분자가운데 탄소를 함유하지 않기 때문에 CO, CO₂, HC 등의 유해물질은 전혀 배출하지 않는다. 그리고 연소 후에 물로 변하는 순환성을 갖고 있다. 그리고 지역적으로 제약이 없고 풍부하게 존재하는 물을 유효하게 이용할 수 있는 대체연료로서 기대가된다.

그래서, 천연가스와 수소를 연료로 사용하는 가스엔진은 co-generation 및 자동차용으로 보급을 목표로 많은 연구가 수행되고 있다. 단기통엔진을 사용한 여러 가스연료의 실험이 수행되어 기관의 성능 및 배출가스와 연소특성을 보여주고 있었다. 그 결과에 의해 수소는 가연범위가 넓고 연소속도가 높아 연소변동이 적은 특성을 갖고 있기 때문에 스파크점화기관의 점화안정과 초회박화가 가능하다. 또, 낮은 연소온도에 의해 저부하일 때 NO_x 배출량이 줄어드는 등의 이점이 있다. 그 반면 최소점화에너지가 적고 연소온도가 높아서 고부하에서는 조기착화, 노크, 역화 등의 이상연소가 발생하기 쉽다는 것을 알 수 있다.^{1,2)}

한편 천연가스는 안티노크(antiknock)성이 높기 때문에 압축비를 높일 수 있다. 수소에 비해서 출력이 좋은 특징을 들 수 있는데 반대로 회박연소시에는 연소하지 않는 가스가 대량으로 배출되는 등의 문제가 있다. 그러나 가스엔진을 보다 광범위한 용도에 사용하기 위해서는 고속운전특성을 밝혀야할 필요가 있다. 특히 수소는 연소속도가 높기 때문에 고속운전에 적합하다고 생각한다. 그러나 연소실 용적의 팽창속도를 증가시키는 것보다 수소의 급격한 연소에 따라 이상연소를 피할 수 있는 것도 기

대된다. 수소와 천연가스는 단위체적당 발열량이 낮고 흡입공기량이 감소하여 정미출력이 저하하지만, 높은 회전수에 의해 단위 시간당의 일을 증가시켜 소형의 편리성을 유지하고 출력저하를 보완할 수 있을 것이다.

따라서, 본 연구는 기존의 소형 4기통 고속기관을 천연가스 및 수소연료에 의해 운전실험하고 여러 기관회전수, 점화시기, 부하조건에 있어서 기관의 성능 및 연소과정을 조사하고자 했다. 다시 이 결과를 가솔린 연료의 실험과 비교함으로써 소형고속가스엔진의 특성을 분석하여 이용가능성을 찾고자 한다.

2. 실험장치 및 측정방법

먼저 본 연구에서는 오토바이의 4기통, 수냉식 4싸이클 스파크점화기관(Kawasaki ZR250)을 사용했다. 연소실의 형상은 펜트루프(pent roof)형으로 Table 1에 기관의 제원을 나타냈고 Fig. 1에 엔진의 단면도인 실린더헤드 및 연소실을 나타냈다. 이 기관의 점화 위치는 실린더 헤드 윗면의 중심위치에 있다.

Table 1. Specification of 4 single cylinder engine

Bore × Stroke	49.0×33.1
Displacement	4×249cc
Compression	12.2 : 1
Timing of Valve	
I.O	43° BTDC
I.C	61° ABDC
E.O	60° BBDC
E.C	36° ATDC

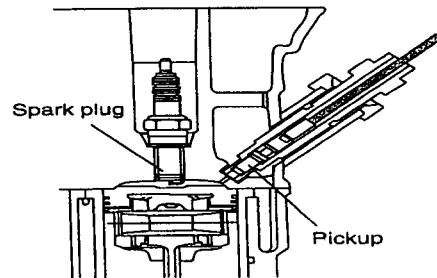


Fig. 1. Diagram of combustion

연료로는 천연가스(메탄 88%, 에탄 6%, 프로판 4%, 부탄 2%)와 수소(순도 99.9%) 및 가솔린을 사용했으며 Fig. 2는 실험장치의 개략도를 나타냈다.

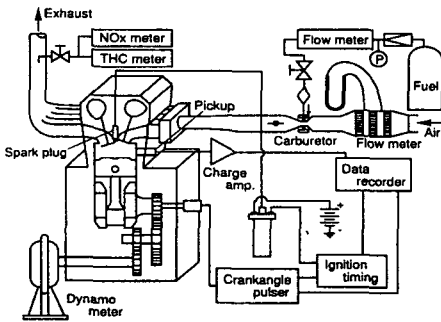


Fig. 2. Experimental apparatus

가스연료는 고압탱크로부터 0.3MPa까지 압력을 낮추고, 흡기포트에서 약 45cm떨어진 곳에서 LPG용 벤츄리형 혼합기에 의해 흡기관에 정상 공급되고 throttle밸브를 사용하여 공기유량을 조절했다. 천연가스 및 수소연료 유량은 열선형 질량유량계(HFM-201), 흡입공기량은 증류형유량계(可測研 LFE-50B)에 의해 측정하고, 이에 의해 혼합기의 연료-공기의 당량비(ϕ)를 산출했다. 기관출력은 기관 내부의 감속기를 통해 출력축을 수동력계(東京플랜트 PTB-60)에 연결해서 측정했다. 점화를 위해서 스파크점화용 플러그(NGK CR9E)를 장착했으며 트랜지스터 점화방식을 썼다. 기존 시스템으로 점화는 각 기통의 상사점 부근에서 회전수에 대응하여 고정된 시기에 설정되어 있고, 최소 스파크점화 에너지에 의해 착화되어 역화에 이르기 때문에 점화플러그는 수소연료에 있어서 역화의 원인이 된다. 그래서 여기에 맞는 냉형(冷形)으로 설치했다. 가스연료 운전은 기관회전수를 일정하게 하고 연료유량과 동력계에 의해 부하를 조정하고 연료에 따라 여러 점화시기를 설정하여 기관의 성능 및 배기특성을 조사했다. 또 가솔린 운전을 위한 혼합기 공급을 기존의 기화기(京洪CVKD30)를 사용하고, 가솔린 유량은 bullet식 유량계로 측정했으며 연료농도는 거의 일정조건으로 유리하면서 흡기량의 조정에 의해 부하를 변화시켰다.

연소과정을 조사하기 위해 실린더 내의 압

력 p 를 압전식 변환기(Kistler 6052A1)에 의해 검출하고, 그 출력을 증폭기(charge amp., Kistler 5011B)를 통해 측정하고, 점화신호를 기록했다. 크랭크각도는 크랭크 덮개를 가공하여 로터리 엔코더(rotary encoder, Omron E6D)를 크랭크축에 붙여서 검출했다. 또한, 각 사이클에 있어 최고압력 p_{max} 으로부터 변동강도를 구해 30cycle의 p_{max} 평균치에 대해 상대표준편차 δ 에 의해 연소변동을 표시했다. 앙상블 평균압력의 경과를 구해서 열발생을 해석에 이용했다. 배기는 배기포트 직후에서 온도를 측정하고, 배기밸브 50cm위치에서 흡입된 배출가스 탄화수소(HC)는 전탄화수소계(MEXA-1160 TFI-H)로 측정하였으며, NO와 NO₂측정에는 화학발광분석계(Yanaco EC-30)를 사용했다. 배기관 하단에는 소음억제를 위해 기존의 소음기를 부착하고 별도로 소음방지장치를 설치했다.

실험은 기관회전수 4500, 8000, 및 12000 rpm으로 하고, 냉각수 온도 70℃, 마찰손실은 회전수에 대해 일정하게 하여 감속비(減速比)는 4.638로 수행했다. 실험은 교축밸브(throttle valve)를 완전개방(WOT)의 조건에서 기본성능 및 배기특성을 조사했다.

3. 결과 및 고찰

가스엔진의 광범위한 이용을 위해서는 고속 운전특성의 해명이 필요하여서 실험결과에 의한 연소와 배기특성 및 연소변동, 연소과정을 관찰해 보기로 한다.

3.1. 성능 및 배기특성

천연가스 및 수소연료에 있어 기관성능과 배기특성의 변화를 조사했다. Fig. 3에 천연가스 연료실험의 엔진효율 η_e , 당량비 ϕ , 배기온도 T_e 및 NO_x, HC의 배기농도를 실린더 평균유효압력 p_e 에 대한 변화를 나타냈다. 천연가스에서 η_e 은 기관회전수 n 및 점화시기 θ_i 가 빨라질수록 증가하고 p_e 에 대해서도 증가한다. θ_i 가 빨라짐에 따라 엔진효율이 높아지며 어떤 회전수에서도 그 최고값은 약 25%수준을 나타내고 있다. 배기온도 T_e 는 실린더압력의 증가와 더불어 증가하고 고속일수록 높게 나타났다.

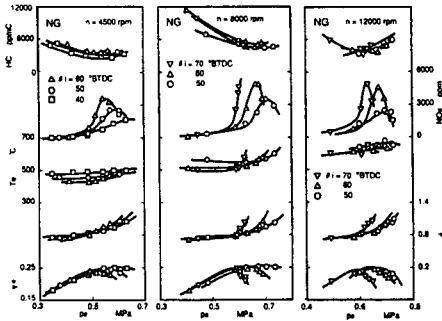


Fig. 3. The engine performance and pollutant emissions(NG fuel)

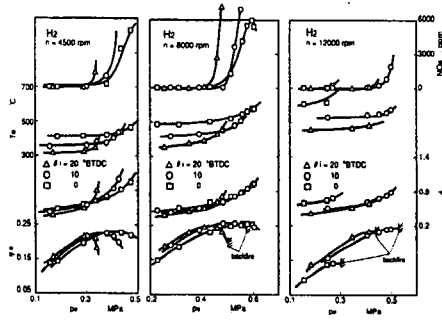


Fig. 4. The engine performance and pollutant emissions (hydrogen fuel)

또 NO_x 는 $\phi > 0.8$ 에서 급증하고, $\phi = 0.9$ 부근에서 최대가 되며 조기점화 및 고속의 조건에서 높다. 고속에서는 연소가스의 고온체류시간이 짧기 때문에 발생 열량에 비해서 열손실량의 증가가 작고 연소온도가 높게되기 때문에 배기온도 및 NO_x 농도가 증가하는 것으로 생각된다. HC는 이론공연비에 가까운데서 감소하고 그 값은 고속이 될수록 높다.

Fig. 4는 수소연료에 대한 기관성능 및 배기 특성을 실린더 평균유효압력에 대해 나타냈다. 수소연료로는 $n=4500rpm$ 에서는 $0.4 < \phi < 1.1$ 의 광범위한 혼합비 운전이 가능하며 고속에서는 연소온도가 높게되어 ϕ 가 0.8이상에서 역화가 발생하여 운전이 불가능하게 됐다. 엔진효율은 저부하에서 천연가스보다 높지만 같은 당량비에서 출력이 낮기 때문에 최대효율이 나타나는 평균유효압력 p_e 은 낮아진다. 최대효

율은 회전수 4500rpm에서 천연가스보다 약간 낮고, 8000rpm에서는 높게되어 25%를 넘어섰다. 배기온도는 천연가스와 같은 회전수에서 상승폭이 분사시기에 따라 차이를 보임을 알 수 있다. NO_x 는 고부하에서 높은 값을 나타내지만 저부하에 있어서는 극히 낮은 수치를 기록하고 있다.

Fig. 5는 가스기관과 비교하기 위해 실시한 가솔린 엔진의 운전 성능 및 배기특성의 결과이다. 분사시기는 WOT의 MBT로서 $n=4500, 8000, 12000rpm$ 에 대해 각각 분사시기 θ_i 를 40, 40, 45° BTDC로 했다. 이 실험의 경우 $1.1 < \phi < 1.3$ 의 과농도의 혼합비 조건에서 수행했다. 엔진효율은 p_e 와 함께 증가하고 WOT의 고부하 조건에서 25%에 달한다. 그러나 회전수가 4500rpm에서는 엔진효율이 20%이하가 되지만 이것은 당량비 ϕ 가 과대하기 때문으로 생각한다. 또 배기가스온도의 실린더 평균유효압력 p_e 에 대한 변화는 적고, 천연가스와 같이 고속에서 높으며, NO_x 는 p_e 및 n 의 증가와 함께 증가한다.

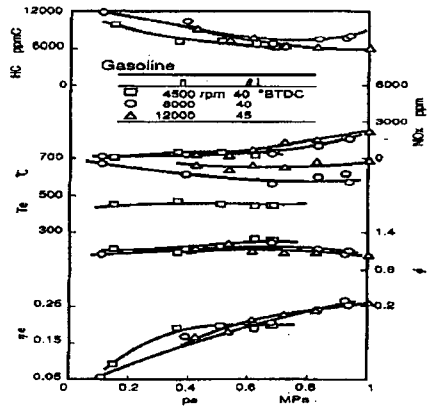


Fig. 5. The engine performance and pollutant emissions (gasoline fuel)

3.2. 연소변동

불꽃점화기관에서 회박연소시켜 부분부하의 열효율을 향상시키고 동시에 NO_x 의 억제될 기할 수 있다. 특히 가스연료는 가연범위가 넓기 때문에 충분히 회박한 혼합기로 기관을 운전할 수 있지만 촉매가 없이도 NO_x 의 큰 저감이 가능하다. 이 때의 문제는 회박화에 따라 연소변

동이 심해진다.

Fig. 6에서는 천연가스와 수소연료 사용시의 연속 10cycle의 연소압력과 크랭크각의 경과를 나타냈다. 수소에서는 어떤 회전수에 있어서도 천연가스에 비해 연소변동은 극히 적고 정속한 운전이 가능한 것으로 나타났다.

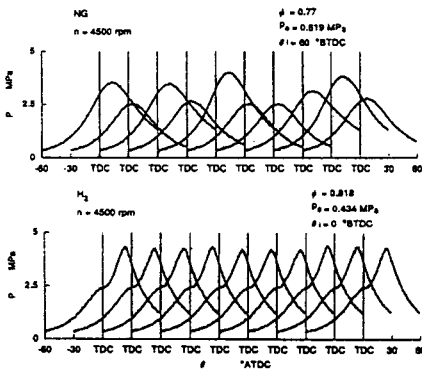


Fig. 6. Variations of cylinder pressure and cycle course (continuous 10cycle)

천연가스의 연소변동은 모든 회전수에서 저부하시 점화시기가 빠른 조건에서 크게 나타났다. 반대로 고부하일 때는 점화시기를 지연시키면 크다. 그럼으로는 나타내지 못했지만 12000 rpm의 고부하서 연소변동이 급격히 상승하는 것으로 나타났으며, 이것은 고부하에서 노크가 발생하기 때문으로 생각한다. 수소연료에서도 천연가스와 같은 경향을 나타내고 있는데, 어느 회전수에서나 저부하시에는 점화시기가 빠른 조건에서 연소변동이 크고, 고부하일 때는 점화시기를 지연하는 조건에서 운전하면 연소변동이 크게 나타났다. 전체적으로 천연가스와 비교해서 수소연료가 낮은 연소변동을 나타내지만 12000rpm에서는 고부하서 급격히 상승한다. 이것은 연소온도가 높아져서 이상연소가 발생하기 때문이라고 생각되고 역화의 전단계 과정이라고 볼 수 있다.

3.3. 연소경과

Fig. 7은 천연가스와 수소를 회전수 4500 rpm, 당량비 ϕ 가 약 1.0의 조건에서 p-v선도를 그렸다. 천연가스에 비해 수소는 연소에 의한 압력상승이 급격하고 이상적인 오토 사이클

(Otto cycle)의 p-v선도에 가까워서 높은 열효율이 기대된다. 그러나, 실제로는 급격한 연소 때문에 연소실 벽면으로의 열손실이 증가하여 높은 열효율을 갖지 못한다.³⁾

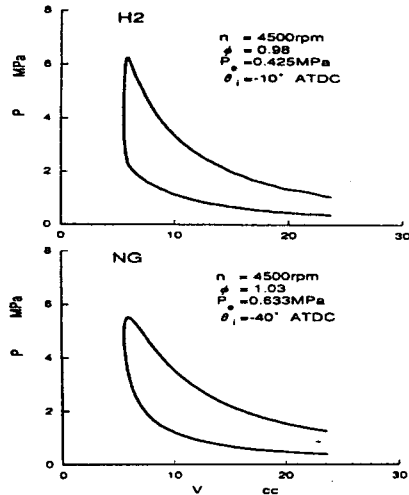


Fig. 7. The P-V diagram of hydrogen and natural gas engine

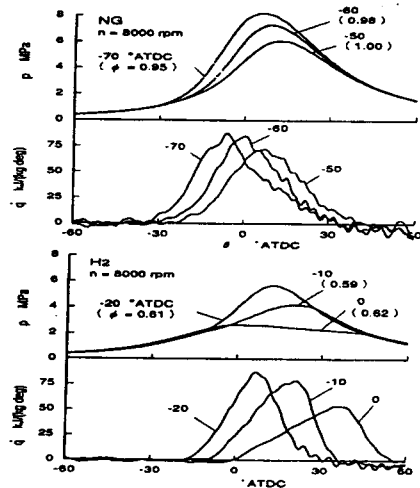


Fig. 8. Variations of p and heat release rate depending on spark ignition timing

Fig. 8은 당량비가 약 0.8의 상태에서 수소 및 천연가스의 연소실 압력변화와 열발생률 \dot{q}

의 크랭크각 θ 에 따른 경과를 비교해 나타낸 것이다. 여기서 열발생률은 실린더내의 압력 값으로부터 계산하고 Annand식으로 열손실을 추정했다.⁴⁾

천연가스는 당량비가 약 1.0에서의 결과를 비교한 것으로 점화시기가 빠를수록 열발생이 급격하기 때문에 그만큼 빠른 크랭크각에서 피크(pick)를 이룬다. 또 수소는 당량비가 약 0.6의 희박한 연소조건에서 연소과정을 비교하면 수소는 점화지연이 거의 없고 회전수와 함께 연소기간이 길며 크랭크각 후에 연소가 활발하게 된다. 수소연료가 천연가스에 비해 열발생이 급격히 일어나고 온도가 상당히 높게되어 열손실이 증가한다. 이 과열은 Annand의 식에 고려된 것이지만 그만큼 열효율이 저하하는 것으로 생각된다. 이것은 천연가스 특성이 수소와는 다르고 연소속도가 늦기 때문에 높은 회전수에서는 연소가 뒤따르지 못해 투입열량은 미연연료 및 배기손실로 빠져나가는 것으로 사료된다.

천연가스의 경우는 점화지연 및 연소기간이 증가하고 열발생률이 완만하게 이루어지지만 반대로 수소연료는 점화지연은 거의 없고, 회전수를 크게 하면 천연가스와 같은 열발생량이 있기는 하나 급격한 연소에 의해 열손실이 감소하는 것으로 생각된다.

3.4. 수소기관에 있어서 역화와 그 억제

역화는 기관을 정지시키고 엔진의 수명을 단축시키기 때문에 운전상 절대 피해야 한다. 고속수소기관에 있어서 회전수를 높이면 연소가스의 고온상태에서 체류기간이 짧게 되고, 역화가 발생한다.^{5,6)} 이를 방지하기 위해 연소속도를 지연시키거나, 희박연소를 시키고 점화시기를 지연시키는 방법으로 역화를 방지할 수 있다고 생각한다. 구체적인 방법으로 교축밸브의 사용과 질소가스의 희석에 의해서 역화를 방지하려고 했다.

3.4.1 교축에 의한 영향

흡입공기를 교축해서 투입되는 연료량을 상대적으로 감소시켜 연소온도를 억제할 수 있다. 지금까지 수소기관의 실험은 수소연료와 공기를 혼합하는 벤츄리 하단에 설치된 교축밸브를 완전히 전개(WOT)한 상태로 흡입공기량을 최대치에 고정하고 수소연료 공급량을 변화시켜 출력조절을 행했다. 일정 회전속도에서

교축밸브의 열림 정도에 따라 흡입공기와 연료가스의 유량 Q_m 이 결정된다. 그래서 교축밸브의 완전개방을 기준으로 해서 $Q_m=100\%$, 80% , 60% 로 조절하고, 기관회전수는 8000rpm , 점화시기는 -10° ATDC의 조건으로 실험을 했다. Fig. 9는 그 결과로서 기관성능 및 NO_x 배출특성을 당량비에 대해 나타냈다. 그림에서와 같이 $Q_m=100\%$ 에서 당량비가 0.8일 때 역화를 일으키지만 $Q_m=80\%$ 에서는 당량비가 0.9부근에서 발생한다. 그러나 $Q_m=60\%$ 에서 이론공연비 이상에서도 역화가 발생하지 않는다.

교축에 의해서 배출온도 T_e 는 내려가고, NO_x 의 배출농도는 대폭 감소한다. 그렇지만 엔진효율 η_e 는 Q_m 의 값이 작을수록 높은 당량비에서 높게 나타나나 그 값은 낮았다. 이것은 흡입공기를 교축으로 인해 유입연료 유량이 감소하기 때문에 역화는 억제할 수 있지만 펌프손실이 증가하기 때문으로 본다.

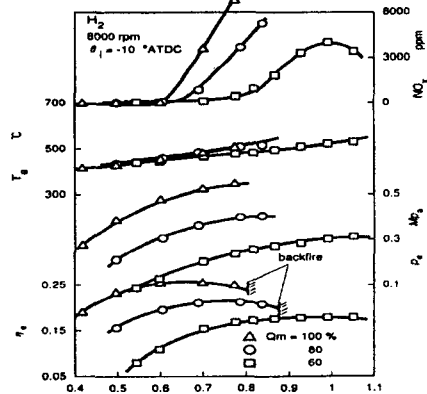


Fig. 9. Effect of the opening of throttle valve on hydrogen engine performance

3.4.2 질소희석 연료에 대한 영향

수소연료를 질소와 희석하고 수소비율 r 에 따라 변화하는 기관성능 및 연소경과를 조사했다. 질소를 희석하는 것에 의해서 연소온도를 억제할 수 있다. 수소연료 및 희석용 질소가스는 고압탱크로부터 0.3MPa 에 달하도록 감소시켜 공급관내에서 혼합하여 흡기포트에 정상분사했다. Fig. 10은 그 결과로 기관의 성능 및 NO_x 의 배출특성을 당량비에 대해 나타냈다. 수소만의 연료로서 당량비가 0.8보다 약간 높

은 혼합비에서는 역화가 발생한다. 수소비율이 80%에서도 당량비가 0.9보다 낮은 상태에서는 역화한다. 이에 비해 수소비율이 60%일 때는 연소가 충분하고 완만하게 이루어지기 때문에 이론공연비에서도 역화는 발생하지 않았다. 또 같은 당량비로 보면 NOx의 배출농도는 질소의 회석에 의해 감소함을 알 수 있다. 그러나 엔진 효율은 큰 당량비에서 최대가 되며 그 값은 교축에 비하여 높다.

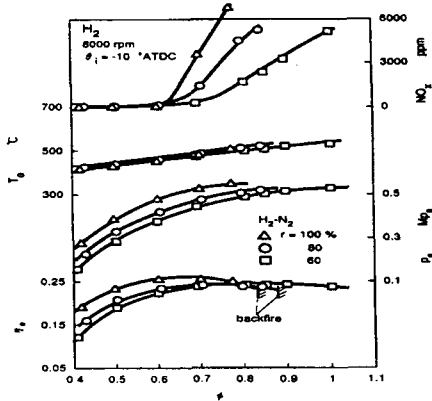


Fig. 10. Effects of the mixing of nitrogen on hydrogen engine performance

5. 결 론

소형고속기관의 가스엔진 특성을 검토했다. 천연가스기관, 수소기관의 성능, 배기특성, 연소과정에 대해 가솔린엔진과 비교 고찰했다. 수소기관의 고회전, 고부하시에 발생하는 역화를 방지하기 위해 수소연료기관에 교축밸브를 적용했고, 수소연료에 질소를 혼합해서 실험을 수행했다. 그 결과를 종합하면 다음과 같다.

- 1) 수소기관은 기관회전수 4500rpm의 조건으로 운전할 때 광범위한 혼합비에서의 운전이 가능하다. 그러나 8000rpm 이상의 고회

전에서는 당량비 0.8부근에서 역화가 발생하여 운전이 불가능하게 됐다.

- 2) 수소기관은 저부하에서 열효율이 천연가스보다 높고 질소산화물 배출농도가 극히 낮지만 고속에서는 배기온도 및 질소산화물 배출농도가 높다.
- 3) 수소기관에서는 기관회전수가 4500rpm보다 8000rpm일 때가 열효율이 높다. 이는 고회전화가 수소연료의 급격한 연소특성에 영향이 있는 것으로 생각한다.
- 4) 천연가스에서는 기관회전수를 크게 하면 열발생율이 낮아지는데, 이 연료의 미연소와 배기손실이 증가하기 때문으로 본다.
- 5) 고속운전과 고부하시에 수소기관에서 발생하는 역화는 흡기의 교축에 의한 흡입공기량의 조절과 질소회석 연료의 사용으로 방지할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 古濱監修, 일본자동차공학 전서, Vol. 8, pp. 174~, 1984.
2. 濱, 일본 자동차 기술, Vol. 45-8, pp. 51, 1991.
3. T.Fukuma, et al. Hydrogen Combustion Study in Direct Injection Hot Surface Ignition Engine, SAE No. 861579, 1986.
4. Annand, W. J. D. and Ma, T. H., PIME, 185-75, pp. 976, 1970~1971.
5. M. Ikegami, K. Miwa and M. Shioji, A Study of Hydrogen-fueled Compression Ignition Engines, Int. J. Hydrogen Energy, Vol.7, No4, pp.341-358, 1982.
6. P. V. Blarigan, Development of a Hydrogen Fueled Internal Combustion Engine Designed for Single Speed/Power Operation, SAE No. 961690, 1996.