

수소기관에서의 배기가스에 관한 연구

조용래*, 최경호**, 배석천**

*계명대학교대학원, **계명대학교 자동차공학과

Study on Emission Characteristics in a Hydrogen-fueled Engine

U. L. Cho*, G. H. Choi**, S. C. Bae**

*Grad. School of Keimyung Univ.,

**Department of Automotive engineering, Keimyung Univ.,
1000 Shindangdong Dalsugu Daegu, 704-701, Korea

ABSTRACT

The goal of this research is to understand the NOx emission in direct injected diesel engine with premixed hydrogen fuel. Hydrogen fuel was supplied into the test engine through the intake pipe. Amount of hydrogen-supplemented fuel was 70 % basis on heating value of the total input fuel. The effects of intake air temperature and exhaust gas recirculation(EGR) on NOx emission were studied. The intake air temperatures were varied from 23°C to 0°C by using liquid nitrogen. Also, the exhaust gas was recirculated to the intake manifold and the amount of exhaust gas was controlled by the valve.

The major conclusions of this work include: (i) nitrogen concentrations in the intake pipe were increased by 30% and cylinder gas temperature was decreased by 24% as the intake air temperature were changed from 23°C to 0°C; (ii) NOx emission per unit heating value of supplied fuel was decreased by 45% with same decrease of intake air temperature; and (iii) NOx emission was decreased by 77% with 30% of EGR ratio. Therefore, it may be concluded that EGR is effective method to lower NOx emission in hydrogen fueled engine.

주요기술용어 : Hydrogen-fueled engine(수소기관), Exhaust gas recirculation(배기재순환), Intake air temperature(흡입공기 온도), Nitrogen concentration(질소농도), Unit heating value(단위발열량)

1. 서 론

최근 자동차 배출가스로 인한 환경오염이 날로

심각해지고 있다. 이러한 환경오염 문제에 적극적으로 대처하기 위하여 각국에서는 자동차 유해 배기가스 규제 강화와 저공해, 무공해 자동

차의 의무적 판매를 법제화하고 있다. 이에 따라 질소산화물(NOx), 이산화탄소(CO₂), 입상물질(PM) 등을 배출하고, 가체매장량이 한계를 드러내고 있는 기존 석유자원 연료를 대체할 에너지원에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 관심의 대상이 되고 있는 자동차 에너지원으로는 메탄올, 에탄올, 압축천연가스(CNG), 수소연료 등이 고려되고 있다¹⁻⁷⁾. 이중에서도 수소연료는 연료 자체에 탄소성분을 포함하고 있지 않아서 최근 거론되고 있는 온실효과를 줄이기 위해서는 최적의 대체에너지로 생각되어지고 있다.

그러나 수소연료는 최소 점화에너지가 작아서 희박혼합기를 사용하는 저부하 영역에서 열효율의 증대를 가져오지만 농후혼합기를 사용하는 고부하 영역에서는 실린더내의 고온부에 의하여 쉽게 조기착화되어 역화에 이르게 된다. 이러한 역화 발생은 수소기관에서 가장 큰 문제중의 하나로 이를 억제하기 위하여 실린더내 수소연료를 직접 분사하는 방식이 국내외적으로 연구가 진행되고 있지만 아직도 신뢰성 있는 수소기관의 연료공급방식은 명확히 확립되어있지 않은 상황이다⁸⁻¹⁰⁾.

수소는 연료들의 특성을 나타낸 표 1에서와 같이 가연한계가 0.1에서 7.14로 아주 넓어서 희박혼합기는 물론 농후영역에서도 사용할 수 있다. 그러나 자기착화온도가 570℃ 정도로 디젤연료의 340℃와 가솔린 연료의 468℃에 비하여 높으므로

자기착화는 상대적으로 어려움이 있다. 또한 수소의 단열화염 온도가 2380K로 디젤연료의 2214K나 가솔린의 2251K에 비하여 130K 이상 높으므로 NOx 생성이 증가하게 된다^{11,12)}. 연소실내로 들어온 윤활유가 연소되어 CO, HC 및 CO₂의 미미한 발생을 제외한다면 수소기관에서 발생되어지는 유일한 유해배기가스는 바로 NOx가 된다.

따라서 본 연구에서는 수소기관에서 문제가 되는 역화를 최대로 줄이면서 유일한 유해배기가스인 NOx를 줄이기 위하여 기관내로 유입되는 흡입공기를 냉각시키는 방식과 배기가스 재순환(EGR)방식에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 이론 및 실험장치

수소기관에서 생성되는 질소산화물은 주로 NO이며 약간의 NO₂와 합하여 NOx로서 배출된다. 대기 공기중의 질소와 산소가 화합하는데 약 1500℃ 이상의 고온에서만 NO가 발생하며, 고온이 될수록 NO는 급증한다. NO는 반응속도가 느려 평형에 도달할 때까지 긴 시간이 요구된다. 그러므로 화학평형에 의하여 배기 중의 NO를 정확히 예측할 수는 없지만 Zeldovich 기구(Zeldovich mechanism)를 이용하고 속도정수를 대입하면 아래와 같은 식이 얻어진다¹²⁾.

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{6 \times 10^{16}}{T^{1/2}} \exp\left(\frac{-69090}{T}\right) [O_2]^{1/2} [N_2] \quad (1)$$

상기의 관계로 부터 NO의 생성은 흡기관내의

Table 1. Fuel properties

	수소(H ₂)	디젤(C ₁₇ H ₃₆)	가솔린(C ₈ H ₁₈)
저위발열량 (MJ/kg)	120	42.5	44
단열화염온도 (K)	2380	2214	2251
이론공연비	34.3	15.1	14.6
자기착화온도 (℃)	571	340	468
가연한계	10~714	53~450	54~359
(이론연소에 대한 비율%)			

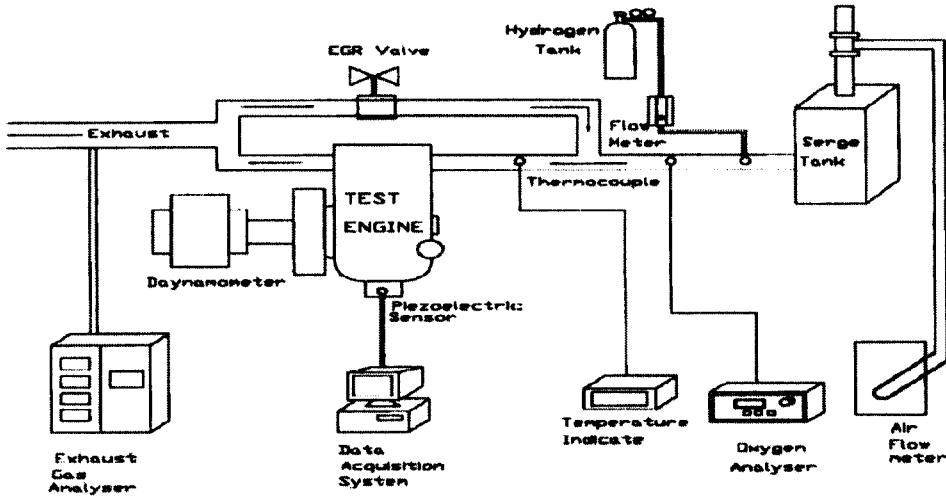


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

온도를 변화시켜 실린더내의 연소가스 온도와 EGR율의 변화로 연소시 실린더내의 산소와 질소농도에 따라 변화함을 예상할 수 있다.

흡입온도 냉각방식과 배기가스 재순환에 따른 기관내의 온도와 산소 및 질소농도 변화를 통하여 NO_x 생성특성을 파악하기 위한 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험에 사용된 기관은 배기량 632cc, 압축비 19인 직접분사식 단기통 디젤기관을 사용하였다. 흡입온도의 냉각은 160 리터 용기속의 액체 질소를 사용하였다. 길이 30m, 지름 8mm 동관을 서지탱크에 설치한 후 액체질소를 동관으로 통과시키면서 흡입공기를 냉각시켰으며, 액체질소 유량으로 흡입공기 온도를 조절하였다. 유해배기물질인 질소산화물을 줄이기 위한 배기가스 재순환(EGR)장치는 기관의 배기관으로부터 흡입관을 연결하는 순환관에 밸브를 설치하여 밸브의 열림량을 등간격으로 변화시키면서 배기가스 순환량을 조절하였다. EGR율은 순환되는 배기가스가 흡입공기를 대체 함으로서 나타내는데, 그 식으로는 흡입공기량과 배기가스를 순환시켰을 때 배기가스 순환량으로 계산하였으며 일정한 운전 조건에서는 체적 효율이 일정한 것으로 가정하였다.

$$EGR \text{ 율}(\%) = \frac{V_r}{V_0 + V_r} \times 100 \quad (2)$$

여기서 V_0 는 흡입공기량이고, V_r 은 재순환되는 배기량을 의미한다.

공급되는 수소연료는 고압으로 봄베에 충전되어 있는 수소가스를 사용하였으며, 2개의 압력조절기를 이용하여 1.5기압으로 감압한 후 병렬로 구성된 3개의 수소 유량계(30 l/min)를 지나 흡기관으로 공급된다. 수소 공급량은 수소유량계 후방에 설치된 유량 조절밸브에 의해 조절된다. 또한 수소연료 공급량을 늘릴수록 기관내로 분사되는 디젤연료는 조속기 기구에 의하여 최대 70% 까지 줄어들게 되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 흡입온도

Fig. 2는 흡입공기온도를 변화시킬 때 한 사이클에 공급되어지는 연료의 단위 발열량당 질소산화물을 기관회전수별로 나타낸 것이다. 그림은 기관부하 100%인 경우에 대한 것이며, 전부하인 경우에는 예혼합 수소기관이 1800rpm 이상

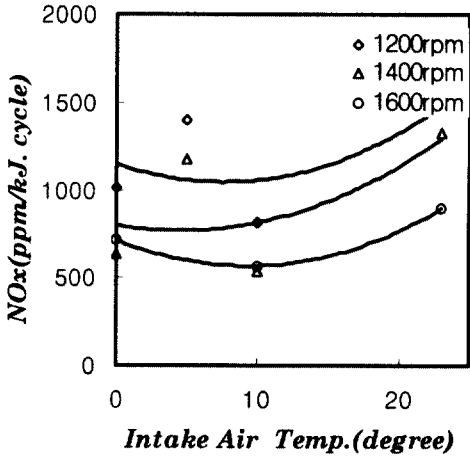


Fig. 2. NOx emissions with different intake air temperatures in hydrogen fueled engine.

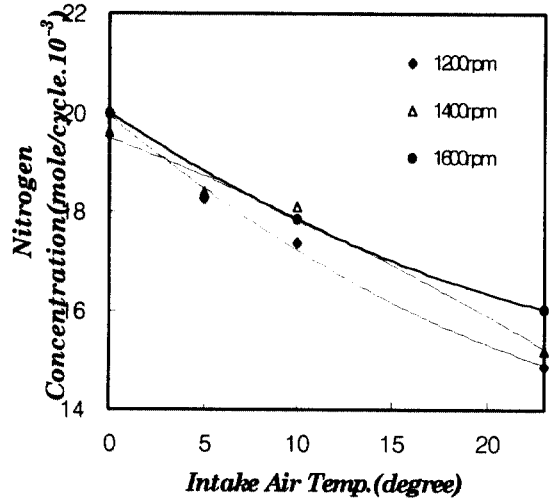


Fig. 4. Nitrogen Concentrations with different intake air temperature in hydrogen fueled engine.

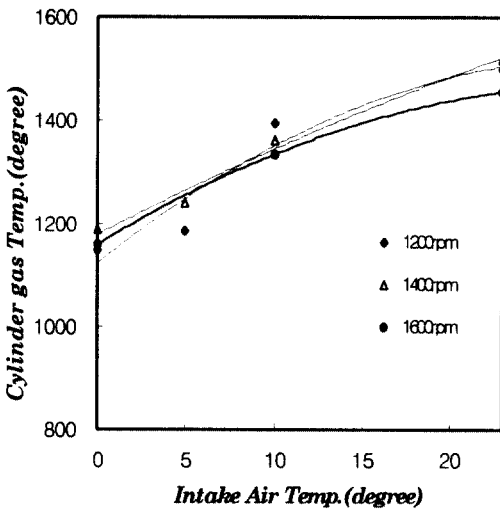


Fig. 3. Cylinder gas temperatures with different intake air temperatures in hydrogen fueled engine.

의 기관회전수로 운전될 때 운전성이 불안정하여 데이터를 얻을 수 없었다. 그림에서 흡입공기 온도가 23°C에서 0°C로 변할 때 단위발열량당 질소산화물은 약 25%정도의 감소를 보이고 있다. 이것은 흡입공기 온도가 낮아질수록 연소실

내의 가스온도가 감소되어 열적 NOx 생성이 감소한 것으로 생각된다.

Fig. 2의 결과를 자세히 살펴보기 위하여, 흡입공기온도 변화에 따른 연소실내 온도를 Fig. 3에 나타내었다. 연소실내 온도는 실린더내의 압력센서로부터 측정된 지압선도에서 최고압력을 기준으로 구한 값이다. 이 계산과정에서 가정은 균일한 단일영역 연소이며, 비열비가 실린더내 온도만의 함수이고, blow-by의 영향은 무시하였다. Fig. 3에서와 같이 전부하인 경우 흡입공기온도를 23°C에서 0°C로 낮추면 실린더내 온도가 약 450°C로 연소온도가 낮아진다. 이것으로 볼 때 전부하시에 흡입공기온도 변화에 따라 연소실내 가스온도 변화가 크므로 열적 NOx생성에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4는 흡입공기온도 변화에 따라 연소실로 공급되는 질소 물수를 전부하 상태에 대하여 나타낸 것이다. 흡입공기온도를 23°C에서 0°C로 액체질소를 이용하여 냉각시킨 경우 질소물수는 전부하에서는 약 30%가량 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 동일한 운전조건에서 흡입공기 온도가 낮아짐에 따라 공기밀도가 증가하게 되는데

따른 질소물수의 증가로 생각된다.

Fig. 2에서 Fig. 4까지의 결과로부터 전부하 조건에서 흡입공기온도를 23℃에서 0℃로 냉각시키면 열적 NO_x 생성요인인 연소실온도는 약 25% 정도 감소하며, NO_x 생성요인인 질소농도는 약 30% 정도 증가하는 것을 알 수 있었다. 흡입 공기 온도를 같은 조건으로 냉각시킬 때 앞의 두 요인을 고려하면 단위발열량당 질소산화물의 생성이 약 20% 정도 감소하는 것을 나타낸다.

3.2 배기가스 재순환(EGR)율

Fig. 5는 디젤기관과 수소공급기관의 배기가스 재순환(EGR)율에 대한 CO₂와 O₂의 배출량을 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 O₂ 배출량은 EGR율이 증가함에 따라 감소한다. 이것은 EGR율의 증가에 의해 흡입산소량이 감소하기 때문이며, 디젤기관보다 수소공급기관의 O₂ 배출량이 적은 것은 수소연료의 이론 공기연료비가 높기 때문에 수소와 반응한 산소량이 많기 때문인 것으로 생각된다. 또한 EGR율이 늘어날수록 CO₂ 배출량이 증가하고 있다. EGR율 증가에 의해 흡입산소량이 감소함에도 불구하고 CO₂의 배출량이 증가하는 것은 재순환되는 CO₂가 누적되는데 의한 것으로 보인다. 또한 낮은 EGR율에서는 디젤기관보다 수소공급기관의 CO₂ 배출량이 적은 것은 수소연료에 의해서 디젤연료가 감소하므로 CO₂ 배출량이 줄어든다. 그러나 EGR율이 증가할수록 디젤기관과 CO₂ 배출량 증가율이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 수소공급기관에서 EGR율의 증가로 기관의 회전속도가 저하되므로 flyball에 의해 기관에 디젤연료를 많이 공급하게 되는 조속기 기구로 인하여 디젤연료량이 증가하는데 기인하는 것이라 판단된다.

Fig. 6은 EGR율에 대한 NO_x의 배출량을 디젤기관과 수소공급기관에 대해서 나타낸 것이다. 예상했던 것처럼 수소공급기관의 NO_x의 배출량이 디젤기관의 경우보다 약 2배 가량 많은 것을

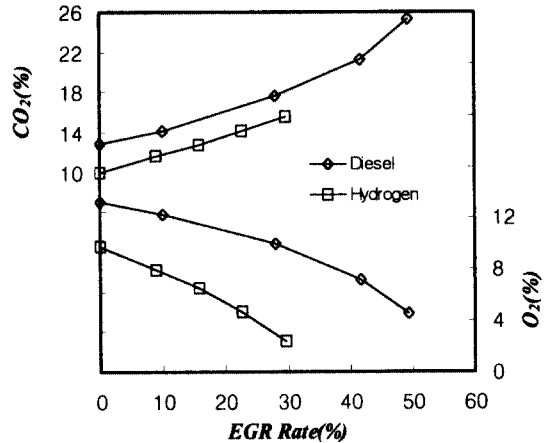


Fig. 5. CO₂ and O₂ emissions with different EGR rates in hydrogen and diesel engines.

알 수 있다. 이것은 수소의 단열화염온도가 디젤의 경우보다 높아 NO_x의 배출량이 증가하는 것이다. 그러므로 수소기관 개발에서 선행되어야 할 연구는 NO_x를 줄이는 방법에 관한 연구이어야 할 것이다. NO_x를 줄이는 방법의 하나가 통상의 기관의 경우와 마찬가지로 배기가스의 재순환에 의한 것이다. NO_x의 배출량은 그림에서 나타난 바와 같이 EGR율이 증가함에 따라 현저히 감소하는 것을 나타내고 있다. 특히 수소공급기관의 경우 EGR율 30%에서 NO_x 감소율이 약 77% 정도로 저감효과가 탁월한 것을 볼 수 있다. 이처럼 NO_x가 저감되는 것은 재순환되는 배기가스에 의해 연소온도가 낮아져 NO_x의 배출량이 감소하는 요인과 흡입산소량의 감소에 의한 NO_x가 감소하는 것이라고 생각된다.

앞의 결과로부터 수소기관에서 EGR에 의한 NO_x의 저감효과가 탁월한 것을 알 수 있었다. 그러나 이러한 결과가 EGR에 의한 흡입산소량의 감소나 실린더내의 가스온도와 연관된 열용량의 증가 중 어느 요인이 더욱 NO_x의 저감에 많은 영향을 주는지 파악하여 보고자 하였다.

Fig. 7은 수소공급기관에서의 EGR율에 대한 흡기 산소농도와 흡입 열용량을 나타낸 것이다.

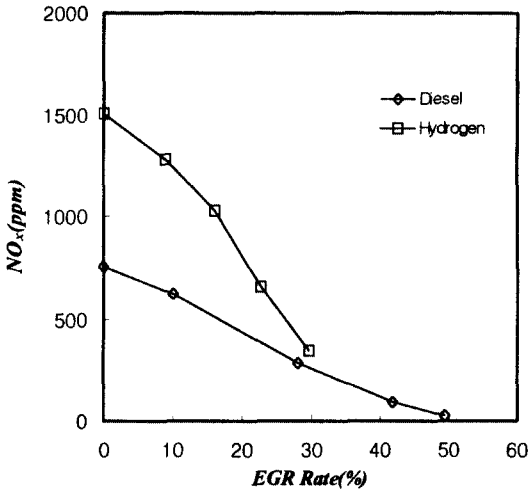


Fig. 6. NOx emission with different EGR rates in hydrogen and diesel engines.

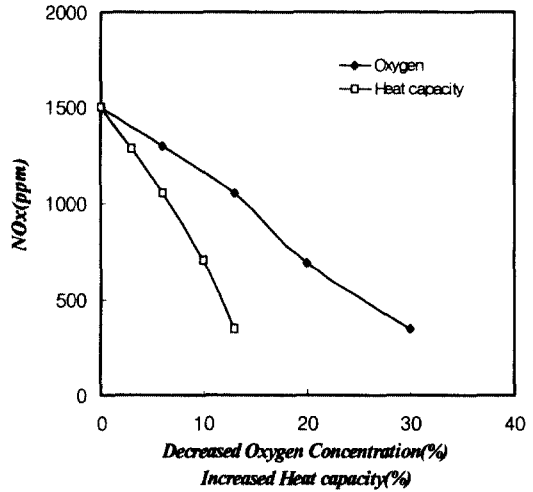


Fig. 8. NOx emissions with different intake oxygen concentrations and heat capacities.

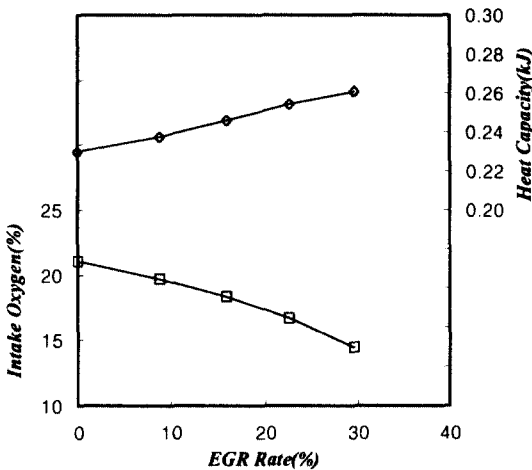


Fig. 7. Intake oxygen concentrations and heat capacities with different EGR rates.

여기서 열용량의 계산에 사용된 온도는 흡입구에 장착된 열전대로 측정된 값이며 재순환되는 배출가스는 배기가스분석기로 측정된 O₂와 CO₂의 농도를 근거로 산출되었다. 그림에서 EGR율이 증가할수록 흡입 산소량이 줄어들고 있음을 알 수 있다. 또한 열용량도 증가하여 NOx의 저감요인임을 알 수 있다. 여기서 흡입 산소량이

감소하는 것은 재순환되는 배기가스에 의해 흡입 공기량이 감소하는데 의한 것이며, 열용량이 증가하는 것은 기관에서 배출되는 열용량이 큰 가스성분이 EGR율의 증가에 따른 순환량의 증가에 기인하는 것이라 생각된다.

NOx의 저감요인을 더 자세히 파악하기 위하여 감소된 흡입 산소량과 열용량의 증가율에 따른 NOx의 배출량을 Fig. 8에 나타내었다. NOx의 배출량은 그림에 나타난 바와 같이 EGR율을 0%에서 30%로 증가시킬 때 흡입산소량의 감소율과 열용량의 증가율에 따라 현격히 감소하고 있는 것을 알 수 있다. NOx의 배출량이 줄어드는 것은 재순환되는 배기가스에 의해 흡입산소량이 줄어들어 NOx의 생성기구를 저해하는데 의한 것이라 보여진다. 또한 EGR율이 증가할수록 배기가스 성분중 비교적 열용량이 큰 CO₂, N₂ 등이 증가하여 연소온도가 낮아져 NOx 생성을 억제한다고 생각되어진다. 이 결과로부터 동일한 NOx가 저감되는 조건에서 흡입산소의 감소량은 약 31% 정도인데 비해 열용량은 약 14% 정도 증가하는 것이 보여졌다. 따라서 수소기관에서의 NOx의 감소는 흡입산소에 대한 영향보다 열용

량의 증가에 대한 영향을 더 많이 받고 있다고 생각되어진다.

4. 결 론

단기통 직접분사식 디젤기관에 수소연료를 공급할 때 흡입공기 온도를 23℃에서 0℃까지 변화시키고 또한 EGR을 변화에 대한 NOx 생성에 미치는 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 전부하 조건에서 흡입공기 온도를 23℃에서 0℃로 액체 질소를 통하여 낮추었을 때 한 사이클당 연소실로 공급되는 질소물수는 약 30% 정도 증가하며, 연소실내 가스온도는 25% 정도 감소하며 이때 공급연료의 단위 발열량당 NOx의 배출량은 약 45% 정도 감소한다.
- 2) 수소기관의 배기가스 재순환(EGR)을 30%에서 NOx의 감소율이 약 77% 정도로 현저한 것을 보아 수소기관에서 EGR에 의한 NOx 저감방법은 통상의 기관과 마찬가지로 효과적이라 생각된다.
- 3) EGR에 의하여 동일한 NOx를 저감시킬 때 흡입산소의 감소량은 약 31% 정도인데 비해 열용량은 약 14% 정도 증가한다. 이것으로 볼 때 수소기관에서는 NOx의 감소가 흡입산소에 대한 영향보다 열용량 증가에 의한 영향을 더 많이 받고 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 2001년 한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차 부품기술 개발센터의 연구기금으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) R. J. Nichols : "Further Development of the Methanol-Fueled Escort", SAE Paper No. 830900, 1983.

- 2) J. E. Sinor and B. K. Bailey : "Current and Potential Future Performance of Ethanol Fuels", SAE Paper No. 930376, 1993.
- 3) 김윤영, 안중윤, 이종태 : "직접분사식 고압 수소분사밸브의 개발에 관한 연구", 수소에너지, Vol. 11, No. 3, 2000, pp. 107-117.
- 4) S. M. Aceves et. al. : "Optimization of a CNG series hibird concept vehicle", SAE Paper No. 960234, 1996.
- 5) P. A. Salanki and J. S. Wallace : "Evaluation of the hydrogen-fueled rotary engine for hybrid vehicle Applications", SAE Paper No. 960232, 1996.
- 6) 이종태 : "수소기관의 개발현황 및 특성," 한국자동차공학회지, Vol. 18, No. 2, 1996.
- 7) S. Furuhamo : "Combustion Improvement in a Hydrogen Fueled Engine", Int. Journal of Hydrogen Energy, Vol. 2, No. 3, 1977.
- 8) Ji Moon Kim, Young Tae Kim, Jong Tai Lee, and Song Yol Lee : "Combustion Characteristics of Hydrogen Fueled Engine with the Direct Injection and Spark Ignition System", SAE Paper No. 952498, 1995
- 9) S. Furuhamo et. al. : "Hydrogen Combustion Study in Direct Injection Hot Surface Ignition Engine", SAE Paper No. 861579, 1986.
- 10) 백성호, 박재범, 김윤영, 이종태 : "수소기관의 역화한계당량비 확장에 관한 연구", 수소에너지, Vol. 8, No. 3, 1997, pp. 111-119.
- 11) A. M. Kanury: "Introduction to Combustion Phenomena", Gordon & Breach, 1975, pp. 130-131
- 12) J. B. Heywood : "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, 1988, p. 774.