

수소기관에서 NO_x 특성에 관한 연구(2)

최경호

계명대학교 자동차공학과
대구광역시 달서구 신당동 1000, 704-701

The Study on NO_x Emission for Hydrogen Fueled Engine(2)

G. H. Choi

Department of Automotive Engineering
Keimyung University
1000 Shindang dong, Dalseo gu, Taegu, 704-701

Abstract

The goals of this research are to understand the NO_x 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 percent basis heating value of the total fuel. The effects of exhaust gas recirculation(EGR) on NO_x emission were studied. 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) the tested engine was run without backfire under 70 percent hydrogen fuel supplemented; (ii) the peak cylinder pressure was decreased with increase of EGR ratio due to the decrease of oxygen concentration in an intake pipe; and (iii) NO_x emission was decreased by 77% with 30% EGR ratio. Therefore, it may be concluded that EGR is effective method to lower NO_x emission in hydrogen fueled diesel engine.

1. 서론

에너지원의 수입의존 탈피와 날로 심화되어 지고 있는 배기 공해 문제로 인해 기존 석유자원 연료를 대체할 에너지원에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 관심의 대상이 되고 있는 자동차기관용 대체에너지원으로는 메탄올, 에탄올, 압축천연가스(CNG), 수소연료 등을 생각할 수 있다.¹⁻⁶⁾ 이중에서도 수소연료는 연료 자체에 탄소성분을 포함하고 있지 않아서 최근 거론되고 있는 온실효과를 줄이기 위해서는 최적의 대체에너지로 생각되어지고 있다. 그러나 연료들의 특성을 나타낸 표1 에서와 같이 수소는 자기착화온도가 570℃ 정도로 디젤연료의 340℃와 가솔린 연료의 468℃에 비하여 높으며 또한 수소의 단열화염 온도가 2380K로 디젤연료의 2214K나 가솔린의 2251K에 비하여 130K 이상 높으므로

NO_x 생성이 증가하게 된다.⁹⁻¹⁰⁾ 질소산화물(NO_x)을 저감하기 위한 방법으로는 산화촉매장치,³⁻⁴⁾ 물분사 방법, 또한 당량비의 조절에 의한 배기재순환(EGR) 방법⁵⁻⁷⁾이 연구 개발 되어져오고 있다. 이중에서도 장치 구조가 간편하며 질소산화물 저감효과가 탁월한 것은 EGR 장치로 알려져 있다. 그러나 EGR율을 증가할수록 흡기관 공기온도가 상승하여 수소기관의 가장 큰 문제인 역화가 쉽게 발생할 수 있다.

따라서 본 연구에서 역화가 일어나지 않는 운전상태에서 디젤기관의 흡기관내 수소연료를 공급하면서 EGR율 변화에 따른 연소특성과 배기특성에 관하여 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도는 그림1에 나타내었다. 실험에 사용된 기관은 압축비 19 인 단기통 직접분사식 디젤기관을 사용하였다. 기관에 가해지는 부하의

<표1> 연료특성

	수소(H ₂)	디젤(C ₇ H ₁₆)	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 (이론연소에 대한 비율 %)	10~714	53~450	54~359

조절과 측정을 위하여 Eddy Current 동력계를 사용하였다. EGR 장치는 기관의 배기관으로 부터 흡입관을 연결하는 순환관에 밸브를 설치하여 밸브의 열림량을 등간격으로 변화시키면서 배기가스 순환량을 조절하였다.

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

여기서 V_o 는 흡입 공기량이고, V_r 은 재순환되는 배기 가스량을 의미한다.

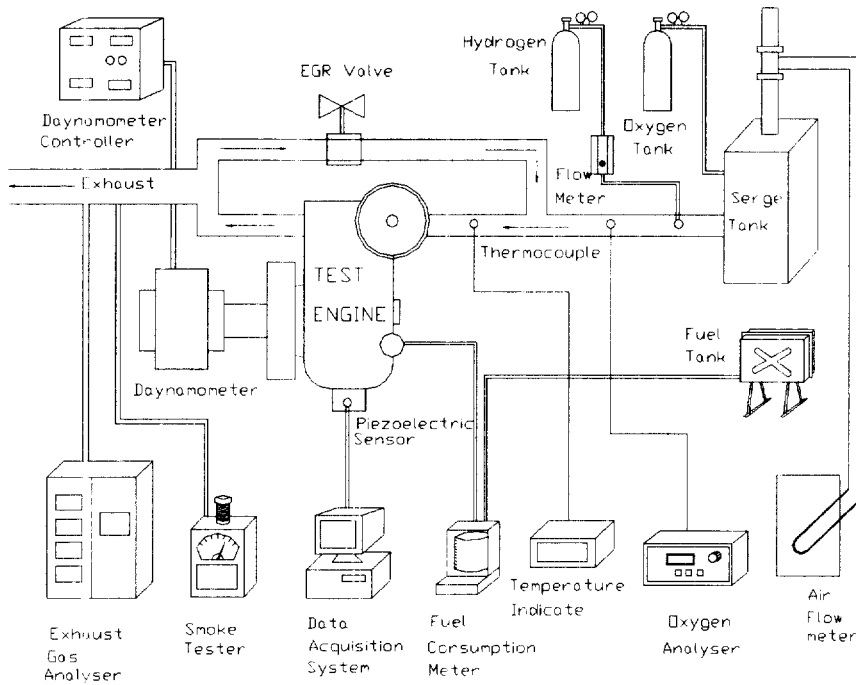


그림 1. 실험장치의 개략도

EGR율은 순환되는 배기가스가 흡입공기를 대체함으로써 나타내는데, 그 식으로는 흡입 공기량과 배기가스를 순환 시켰을 때 배기가스 순환량으로 계산하였으며 일정운전 조건에서는 체적 효율이 일정한 것으로 가정하였다.

첨가되는 수소는 고압으로 봄베에 충전되어 있는 수소 가스를 사용하였으며, 2개의 압력 조절기를 이용하여 1.5기압으로 감압한 후 병렬로 구성된 3개의 수소유량계(30 l/min)를 지나 흡기관에 공급된다. 수소공급량은 수소유량계 후방에 설치된 유량 조절밸브에

의해 조절된다. 수소연료 공급량을 늘릴수록 기관 내로 분사되는 디젤연료는 조속기의 메카니즘에 의하여 줄어들게 된다. 조속기의 계략도를 그림2에 나타내었다.

율이 줄어들므로 고압으로 봄베에 충전되어 있는 산소를 서지탱크에 21%로 공급한 후, 배기재순환 가스와 혼합되어 기관으로 공급되어진다.

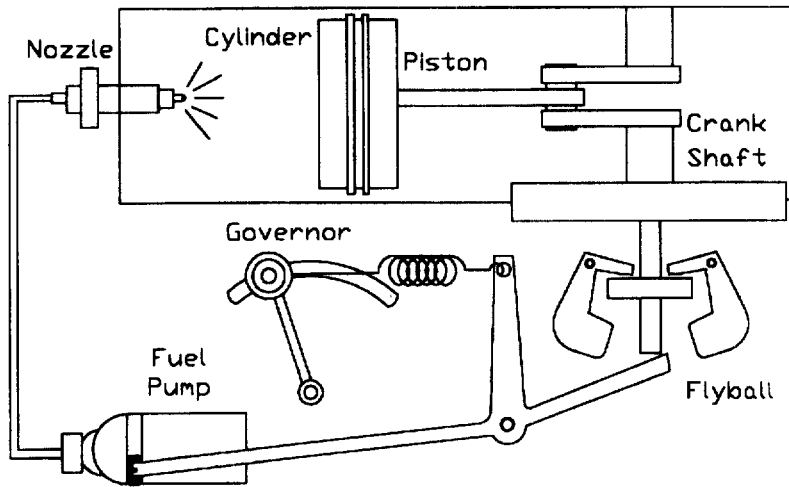


그림 2. 조속기의 개략도

수소연료는 그림에 나타낸 조속기 구에 의해서 디젤연료와 대체된다. 그 원리는 수소연료를 공급할수록 크랭크축의 회전이 빨라져 Flyball이 원심력에 의하여 벌어지므로서 기관으로 공급되는 디젤연료를 줄어 들게 한다. 또한 수소연료의 공급을 줄이게 되면 크랭크축의 회전이 감속되어 원심력이 줄어들어 Governor에 있는 스프링의 장력에 의하여 다시 기관으로 공급되는 디젤연료를 많이 공급하는 방향으로 플런저를 움직이게 된다. 이러한 방식으로 수소공급량을 계속적으로 늘리어 전체 공급에너지의 70%를 대체할 수 있었다. 또한 흡기관으로 수소를 공급함에 따라 흡입공기중에 산소비

3. 실험결과 및 고찰

수소공급량을 계속적으로 증가시켜 디젤연료를 수소연료로 대체함에 따라 부분적인 역화와 이상연소에 의하여 사이클변동이 심해져 불안정한 운전이 나타난다. 본 실험에서는 비교적 안정된 운전 조건에서 수소를 최대한 공급하였을 때의 결과를 취하였다. 이때의 연료공급 상황은 디젤연료를 착화보조원으로 사용하고 수소연료량은 전체발열량의 70%를 차지하였으며 본 논문에서는 이를 수소기관이라 칭한다.

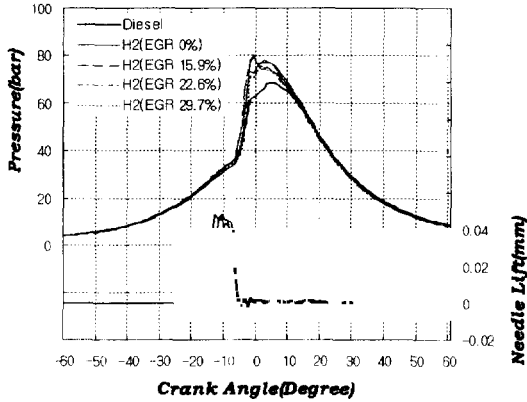


그림 3. 1600rpm, 50%부하조건에서의 EGR에 대한 압력과 Needle Lift

그림3은 수소연료량이 전체발열량의 70%를 차지하였을 때의 EGR에 대한 실린더내 가스압력과 디젤분사밸브의 니들리프트 파형을 나타낸 것이다. 그림의 니들리프트 파형으로부터 디젤연료만을 사용하였을 때 보다 수소를 공급하였을 때 파형의 면적이 줄어드는 것은 디젤연료 분사량이 적어지는 것을 의미한다. 이것은 앞서 설명한 바와 같이 조속기구의 움직임에 의해 수소공급량의 증가에 따라 실린더내에 분사되는 디젤연료량이 감소하였기 때문이다. 또한 실린더내 가스압력의 최고치는 디젤연료만을 사용한 경우보다 높은 것을 나타내고 있다. 이것은 흡기관내에 수소연료를 공급하는데 따라 예혼합 되는 연료량이 증가하였기 때문이다. 그리고 EGR율이 증가할수록 최고압력이 낮아지고 압력 상승율도 완만해지는 것은 EGR율의 증가로 인하여 흡입 산소량이 감소되어 초기연소 등이 둔화되는데 기인하는 것이라 판단된다.

그림4는 수소기관의 EGR을 변화시킨 경우의 열발생율을 디젤연료만을 사용한

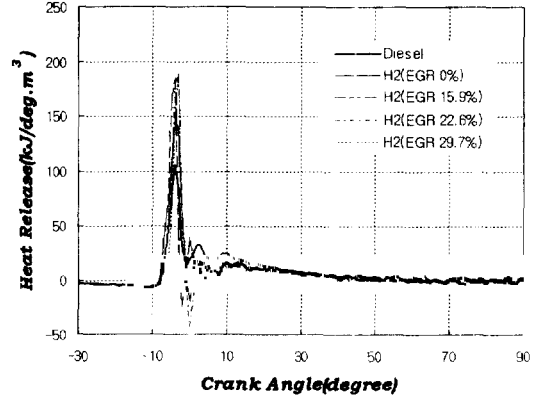


그림 4. 1600rpm, 50%부하조건에서의 EGR에 대한 열발생율

경우와 비싼 것이다. 그림에서 수소가 공급되어진 경우의 열발생율은 디젤연료만을 사용한 경우보다 높은 것을 나타내고 있다. 이것은 수소연료의 공급으로 인하여 초기발열량이 증가하였기 때문이다. 또한 그림에서 수소연료를 공급하였을 때의 후연소기간은 디젤연료만을 사용한 경우에 비해 아주 짧은 것을 알 수 있다. 이것은 수소연료의 예혼합에 의하여 연소초기부터 산소와 충분히 섞여서 연소하기 때문인 것으로 생각된다. EGR율이 증가할수록 착화지연기간은 늘어나는 것은 EGR율의 증가에 의한 불활성가스 증가에 의해 흡입산소량이 감소하기 때문이라고 생각된다.

그림5는 동일한 조건에서의 누적열발생량을 나타내었다. 그림에서와 같이 누적열발생량이 초기에는 디젤연료만이 연소하는 경우에 완만히 증가하는데 비해 수소연료를 공급하였을 때는 예혼합 연소기간의 열발생이 급격히 증가하다가 일시적으로 감소하다가 완만히 증가하는 추세를 보이고 있다. 이것은 발열량이 높고 연소속도가 빠

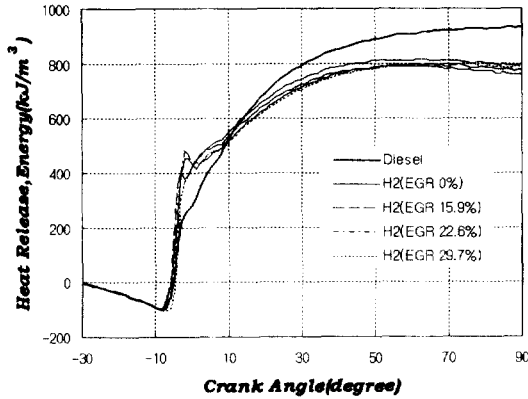


그림 5. 1600rpm, 50%부하에서의 EGR에 대한 누적열발생량

른 수소연료가 첨가되어 초기에 급격히 연소한 후 산소부족으로 연소가 일시 멈춤현상을 보이다가 후기연소기간에서 다시 주위의 산소와 반응하여 서서히 연소하는데 기인하는 것으로 생각된다. 이 후기연소기간에서는 디젤연료만을 사용한 경우보다도 훨씬 연소가 느리게 진행된다. EGR율이 증가할수록 산소는 더욱 부족하여 연소는 서서히 이루어져 누적열발생율은 완만히 증가한다. 그러나 전체적으로 수소공급기관에서의 EGR율에 의한 누적열발생량에 미치는 영향은 미미하게 나타나고 있다.

그림6은 디젤기관과 수소기관의 EGR율에 대한 CO₂와 O₂의 배출량을 나타낸 것이다. 그림에서 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. 또 그림에서

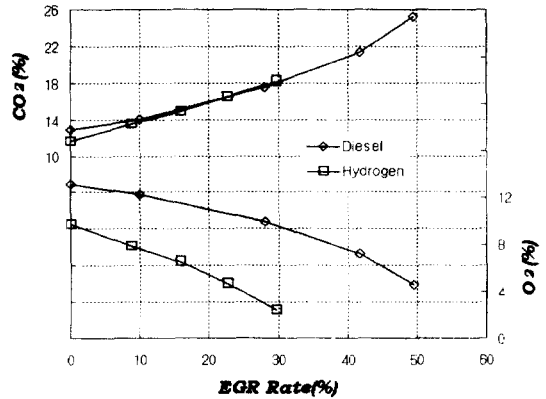


그림 6. 디젤기관과 수소공급기관의 EGR율에 대한 CO₂와 O₂ 배출량

EGR율이 늘어날수록 CO₂ 배출량이 증가하고 있다. EGR율 증가에 의해 흡입산소량이 감소함에도 불구하고 CO₂의 배출량이 증가하는 것은 재순환되는 CO₂가 누적되어 배출량이 증가하는 것으로 보인다. 또한 낮은 EGR율에서 디젤기관의 경우보다 수소공급기관의 CO₂ 배출량이 적은 것은 수소연료에 의해서 디젤연료가 감소하는 영향으로 볼 수 있다. 그러나 수소공급기관에서 EGR율이 증가할수록 기관의 회전속도가 저하되므로 조속기 메카니즘에 의해 기관에 디젤연료를 많이 공급하게 되어 CO₂의 배출량이 증가하여 디젤기관의 CO₂ 배출량과 비슷해지는 것으로 판단된다.

그림7은 EGR율에 대한 NO_x의 배출량을 디젤기관과 수소공급기관에 대해서 나타낸 것이다. 예상했던 것처럼 디젤기관보다 수소공급기관의 NO_x의 배출량이 약 2배 가량 많은 것을 알 수 있다. 이것은 수소의 단열화염온도가 높아 NO_x의 배출량이 증가하는 것이다. 그러므로 수소기관 개발에서 선행되어야 할 연구는 NO_x를 줄이는 방

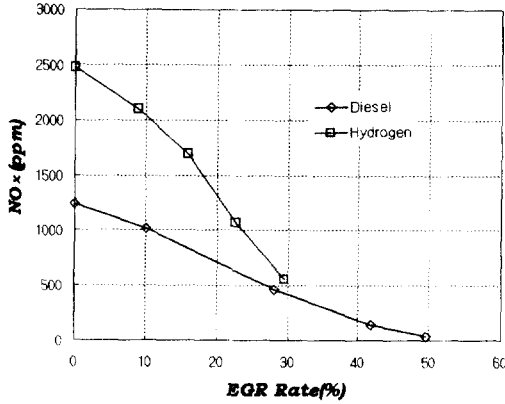


그림 7. 디젤기관과 수소공급기관에서의 EGR율에 대한 NO_x의 배출량

법에 관한 연구이어야 할 것이다. NO_x를 줄이는 방법으로 본 연구에서 사용하여 본 결과 그림7에서와 같이 EGR율이 증가함에 따라 NO_x의 배출량은 감소한다. 특히 수소공급기관의 경우 EGR율 30%에서 NO_x 감소율이 약 77% 정도로 저감효과가 탁월한 것을 볼수 있다. 이처럼 NO_x가 저감되는 것은 재순환되는 배기가스에 의해 연소온도가 낮아져 NO_x의 배출량이 감소하는 요인과 흡입산소량의 감소에 의한 NO_x가 감소하는 것이라고 생각된다.

순수한 수소연료만을 사용한 수소기관에서는 연료중의 탄소성분이 없으므로 매연과 CO₂의 배출이 없으나 수소연료의 단열화염온도가 높으므로 NO_x의 배출량이 증가하는 것으로 알려져 있고 또한 앞의 실험 결과로부터 살펴보았다. 전술한 바와 같이 수소기관에서 EGR에 의한 NO_x의 저감효과가 탁월한 것을 알 수 있었다. 그러나 이러한 결과가 EGR에 의한 흡입산소량의 감소

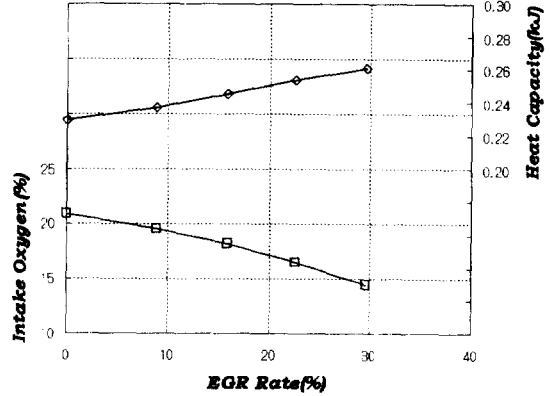


그림 8. 수소공급기관에서의 EGR율에 대한 흡기 산소농도와 흡입 열용량

나 실린더내의 가스온도와 연관된 열용량(?)의 증가 중 어느 요인이 더욱 NO_x의 저감에 많은 영향을 주는지 파악하여 보았다. 그림8에 수소공급기관에서의 EGR율에 대한 흡기 산소농도와 흡입 열용량을 나타내었다. 여기서 열용량의 계산에 사용된 온도는 흡입구에 장착된 열전대로 측정된 값이며 재순환되는 배출가스는 배기가스분석기로 측정된 O₂와 CO₂의 농도를 근거로 구한 것이다. 그림에서 EGR율이 증가할수록 흡입 산소량이 줄어들고 있음을 알 수 있다. 또한 열용량도 증가하여 NO_x의 저감요인임을 알 수 있다. 여기서 볼 때 흡입 산소량이 감소하는 것은 재순환되는 배기가스에 의해 흡입 공기량이 감소하여 전체적인 산소량이 감소하는 것이고, 열용량이 증가하는 것은 기관에서 배출되는 열용량이 큰 가스성분이 EGR율이 증가할수록 순환하는 양이 많아지는 데 의한 것으로 보인다.

더 자세히 NO_x의 저감요인을 파악하기 위하여 감소된 흡입 산소량에 대한 NO_x의 배출량을 그림9에 나타내었다. (여기

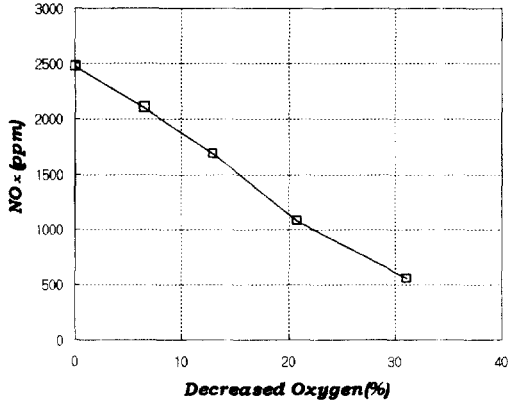


그림 9. 흡입산소 감소량에 대한 NO_x의 배출량

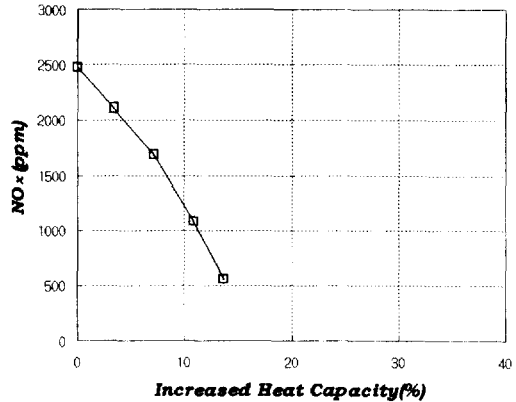


그림 10. 열용량 증가율에 따른 NO_x의 배출량

서 불 때) EGR율을 0% 에서 30% 증가시킬 때 흡입산소량의 감소율에 대해서 NO_x의 배출량이 감소하고 있는 것을 보이고 있다. 이것은 재순환되는 배기가스에 의해 흡입산소량이 줄어들어 NO_x의 생성기구를 저해함으로써 NO_x의 배출량이 줄어드는 것으로 보여진다. 그림10은 열용량의 증가율에 따른 NO_x의 배출량을 나타낸 것이다. 그림에서도 앞의 그림9와 마찬가지로 EGR율이 0%에서 30% 증가할 때 열용량의 증가율에 따른 NO_x의 배출량은 현격히 감소하고 있다. EGR율이 증가할수록 배기가스 성분중 비교적 열용량이 큰 CO₂, N₂ 등이 증가하여 연소온도가 낮아져 NO_x 생성을 억제한다고 생각된다. 그림9와 비교하여 불 때 동일한 NO_x가 저감되는 조건에서 흡입산소의 감소량은 약 31% 정도인데 비해 열용량은 약 14% 정도 증가한다. 이것으로 불 때 수소기관에서의 NO_x의 감소는 흡입산소에 대한 영향보다 열용량의 증가에 대한 영향을 더 많이 받고 있다고 생각되어진다.

4. 결론

디젤기관에 흡기관으로 수소를 공급하여 전체발열량의 70%를 대체한 수소기관에서의 EGR에 대한 연소와 배기가스특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. EGR율이 증가할수록 최고압력은 낮아지고 압력 상승율도 완만해진다. 이것은 EGR율의 증가로 인하여 흡입 산소량이 감소되어 초기 연소가 둔화되어진 것이라 판단된다.
2. 열발생율에서 수소공급기관은 후기연소기간이 없음을 알 수 있다. 이것은 수소연료의 이론공연비가 높을 뿐만 아니라 예혼합에 의하여 산소와 충분히 섞여서 연소하기 때문인 것으로 생각된다.
3. EGR율 30%에서 NO_x의 감소율은 약

77% 정도로 NO_x 저감의 방법으로 EGR에 의한 방법이 효과적인 것이라 생각된다.

4. EGR율에 의하여 동일한 NO_x를 저감시킬 때 흡입산소의 감소량은 약 31% 정도인데 비해 열용량은 약 14% 정도 증가한다. 이것으로 볼 때 수소기관에서는 NO_x의 감소가 흡입산소에 대한 영향보다 열용량의 증가에 대한 영향을 더 많이 받고 있다고 판단된다.

후기

본 연구는 1999년 과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 연구기금으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) A. M. Kanury, "Introduction to Combustion Phenomena", Gordon & Breach, 1975.
- 2) J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, 1988.

- 3) D. L. McKinnon et. al., "International experience using diesel catalytic converters for urban buses", SAE No. 940238, 1994.
- 4) R. Bruck, R. Diewald, P. Hirth, and W. Kaiser, "Design criteria for metal substrates for catalytic converters", SAE No. 950789, 1995.
- 5) Hilden, D. L. and Bergin, S. P., "Effect of Manganese Fuel Additive Exhaust Gas Recirculation on Diesel Particulate Emissions", SAE No. 861986.
- 6) Odaka, M., Koike, N., Tsukamoto, Narusawa, K. and Yoshida, K., "Effect of EGR with a Supplemental Manifold Water Injection to Control Exhaust Emissions from Heavy-Duty Diesel Power Vehicles", SAE No. 910739, 1991.
- 7) Stawsky, A., Lawson, A., Vergeer, and Sharp, F. A., "Diesel Exhaust Emissions Control using EGR and Particulate Filter", 86th Annual General Meeting of CIM, 1984.