

수소기관에서 NO_x 특성에 관한 연구(1)

이상준 · 최경호

계명대학교 자동차공학과
대구광역시 달서구 신당동 1000, 704-701

The Study on NO_x Emission for Hydrogen Fueled Engine(1)

S. J. Lee and 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 intake air temperature on NO_x emission were studied. The intake air temperature was controlled by flow rate of liquid nitrogen. The major conclusions of this work include : (i) the tested engine was run without backfire under 70 percent hydrogen fuel supplemented; (ii) radicals of nitrogen gas in the intake pipe were increased by 30 percent and cylinder gas temperature was decreased by 24 percent as the intake air temperature were changed from 23°C to 0°C ; and (iii) NO_x

emission per unit heating value of supplied fuel was decreased by 45 percent with same decrease of intake air temperature.

1. 서 론

최근 자동차 배출가스로 인한 환경오염이 날로 심각해지고 있다. 이러한 환경오염문제에 적극적으로 대처하기 위하여 각국에서는 자동차 유해배기가스 규제강화와 저공해·무공해 자동차의 의무적 판매를 법제화하고 있다. 이에 따라 HC, NO_x, CO₂, 입상물질 등을 배출하고, 가채매장량이 한계를 드러내고 있는 기존 석유자원 연료를 대체할 에너지원에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 관심의 대상이 되고 있는 자동차 대체에너지원으로는 메탄올, 에탄올, 압축천연가스(CNG), 수소 등을 꼽을 수 있다.¹⁻⁶⁾ 이 중에서도 수소연료에는 최근 거론되고 있는 온실효과 문제로 배기가스중의 CO₂를 저감시키기 위한 탄소성분이 포함되어 있지 않은 장점들이 있다. 그러나 수소연료는 쉽게 점화하는 성질로 희박혼합기를 사용하는 저부하 영역에서 열효율의 증대를 가져오나 농후혼합기를 사용하는 고부하영역에서는 실린더내의 고온부에

의하여 쉽게 조기착화되어 역화에 이르게 된다. 이러한 역화발생은 수소기관에서 가장 큰 문제중의 하나로 이를 억제하기 위한 실린더내 수소연료를 직접분사하는 방식으로 국내외적으로 많은 진전을 보이고 있다.⁷⁻⁸⁾

연료들의 특성을 나타낸 표1에서와 같이 수소는 가연한계가 0.1~7.14로 아주 넓어서 아주 희박혼합기는 물론 농후영역에서도 사용할 수 있으나 자기착화온도가 570℃ 정도로 디젤연료의 340℃와 가솔린 연료의 468℃에 비하여 높으므로 착화에는 상대적으로 어려움이 있다. 또한 수소의 단열화염온도가 2380K로 디젤연료의 2214K나 가솔린의 2251K에 비하여 130K이상 높으므로 열적 NO_x생성이 증가하게 된다.⁹⁻¹⁰⁾ 특히 수소 공기혼합기의 당량비가 0.5미만인 희박혼합기에서는 NO_x 생성이 문제시되지 않지만 진한혼합기로 될수록 NO_x 생성이 문제시되고 있는 것으로 알려졌다.¹¹⁾ 따라서 본 연구에서는 예혼합연소 방식으로 흡입공기 온도를 냉각시킴에 따라 이상연소를 억제하면서 이에 따른 NO_x 특성에 관하여 고찰하고자 한다.

[표 1] 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	10~714	53~450	54~359
(이론연소에 대한 비율%)			

2. 실험장치 및 방법

흡입온도 냉각방식에 따른 NO_x 특성을 파악하기 위한 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험대상기관은 단기통 농업용 직접분사식 디젤기관이며, 상세한 사양은 표1에 나타내었다.

흡입온도를 냉각시키기 위하여 160리터 용기속의 액체질소를 사용하였다. 길이 30m, 지름 8mm 동관을 서지탱크에 설치한 후 액체질소를 동관으

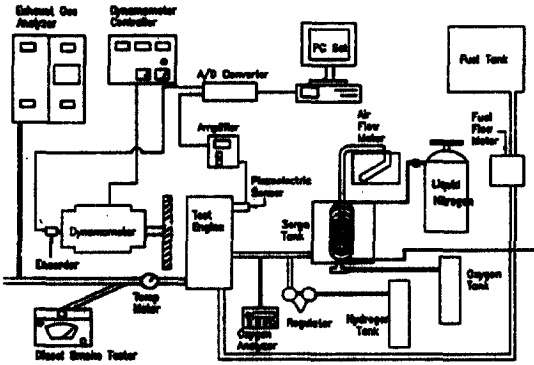


Fig. 1 실험장치의 개략도

【표 2】 실험기관의 주요제원

항 목	사 양
연소실 형식	직접분사식
배기량(cc)	632
기통수/싸이클	1기통/4싸이클
실린더 내경*행정(mm)	92 * 95
최대출력(hp)/회전수(rpm)	11 / 2,200
압축비	19

로 통과시키면서 흡입공기를 냉각시켰으며, 액체 질소 유량으로 흡입공기 온도를 조절하였다. 또한 NO_x와 HC등 배기가스를 측정하기 위하여 영국의 Signal사의 배기분석기를 이용하였고 Fig. 2에 나타내었다. Probe의 막힘을 방지하기 위하여 실험기관의 배기가스는 universal filter에서 분진 등을 여과하였다. 또한 배기가스를 기체상태로 유지하기 위하여 180℃로 유지되는 heated line을 통하여 heated module내에 있는 filter에서는 장치의 부식을 막기 위하여 수분을 제거한다. 이를 통과한 배기가스는 각 분석기로 보내지며 샘플링한 배기가스를 분석하는데 소요되는 시간은 2~5초이

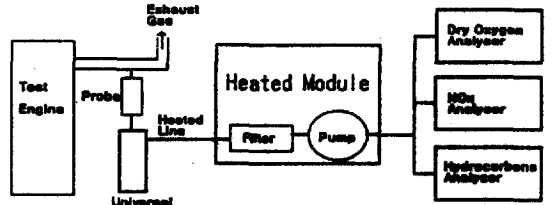


Fig. 2 배기가스분석기 개략도

며, 신뢰성을 높이기 위하여 데이터를 1분 동안 측정한 다음 평균값을 취하였다. 또한 흡기관으로 수소연료를 첨가함에 따라 기관으로 흡입되는 공기량이 감소하여 산소량이 줄어들게 된다. 줄어든 산소량은 수소연료 연소에 영향을 주므로 고압으로 충전되어 있는 산소를 공급하였으며 모든 실험에서 흡기관의 산소농도를 21%로 조절하였다. 흡기관 내에서의 산소농도는 산소가 공급되는 흡기관으로부터 14cm 떨어진 곳에서 산소분석기로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 기관회전수 및 출력을 일정한 상태로 유지하며, 공급되는 디젤연료를 수소연료로 대체하였다. 수소연료는 흡기관을 통하여 예혼합상태로 공급하여 기관에 공급되어지는 전체연료의 발열량을 기준으로 하여 70%까지 수소연료로 대체가 가능하였다. 이 상태에서 압력센서를 통하여 측정된 20사이클 데이터를 통하여 평균유효압력계수로 사이클 변동을 평가하여 Fig. 3에 나타내었다. 사이클 변동은 평균유효압력 변동을 (COV)로 나타내었으며, 이는 다수 사이클을 평균화한 도시평균압력에 대한 임의의 사이클의 도시평균 유효압력의 비로 정의되었다. 그림에서와 같이 수소첨가를 전체 발열량에 70%까지 공급하여 기

관부하가 100%인 경우 평균유효압력 변동율은 최고 7%가 넘는 것도 있지만 대부분 2%미만인 것으로 나타났다. 통상 평균유효압력 변동율은 10% 이상일 경우는 운전성에 문제가 되므로 본 실험결과들은 큰 문제가 되지는 않지만 결과해석의 신빙

성을 높이기 위하여 평균유효압력 변동율이 2%이하인 경우에만 데이터를 취득하였다.

Fig. 4는 예혼합 수소기관의 경우와 디젤기관에서의 NO_x 와 HC를 당량비로 나타내었다. 두 기관 모두 기관부하는 100%이며, 흡기관의 공기온도가 10°C일 때인 경우를 나타내었다. Fig에서와 같이 일정 기관회전수에 대하여 수소가 예혼합 되어지는 경우에 당량비가 디젤연료만을 공급할 때 보다 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 수소연료가 흡기관을 통하여 공급되어질수록 공급되어지는 공기량이 줄어들므로 전체적으로 농후혼합기 영역에서 운전되어지는 것을 알 수 있다. 또한 수소연료를 공급한 경우는 수소연료를 공급하지 않고 디젤연료만으로 운전된 경우보다 질소산화물이 월등히 높은 것을 알 수 있었으며, 미연탄화수소로 수소연료가 탄소성분을 포함하고 있지 않기 때문에 수소연료를 첨가한 경우에는 급격히 줄어드는 것을 알 수 있었다.

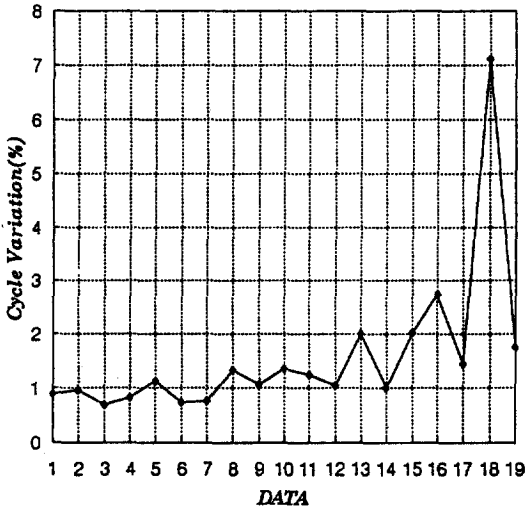


Fig. 3 예혼합 수소기관의 사이클 변동

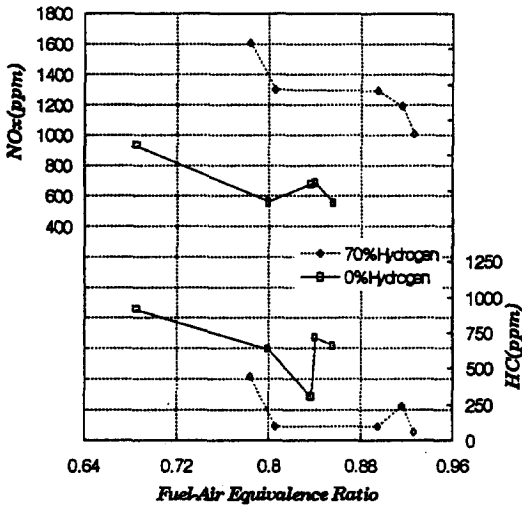


Fig. 4 디젤기관과 수소기관의 당량비에 대한 NO_x 와 HC 배출량

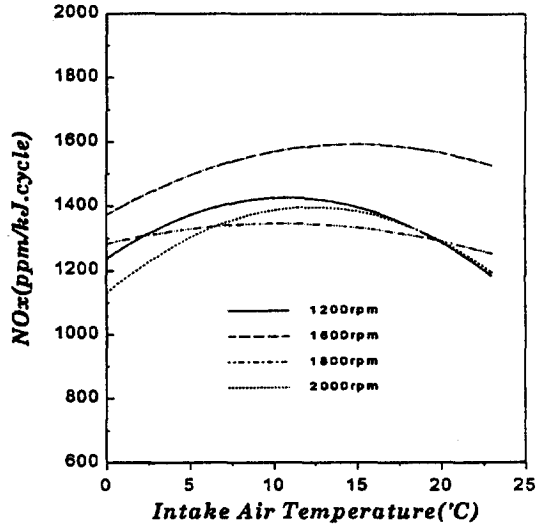


Fig. 5 부분부하시 예혼합 수소기관에서 흡입 공기 온도변화에 따른 단위발열량당 NO_x 배출량

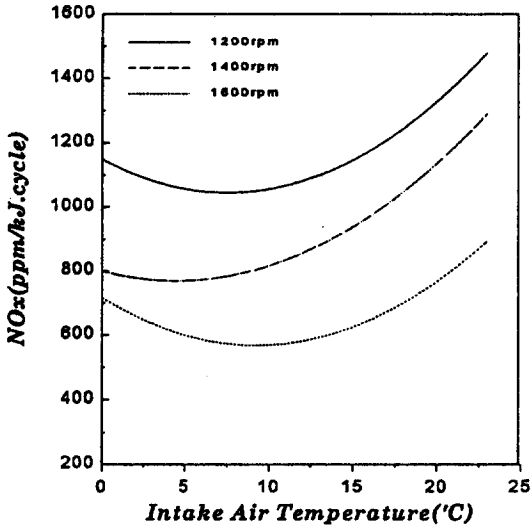


Fig. 6 전부하시 예혼합 수소기관에서 흡입공기 온도 변화에 따른 단위 발열량당 NO_x 배출량

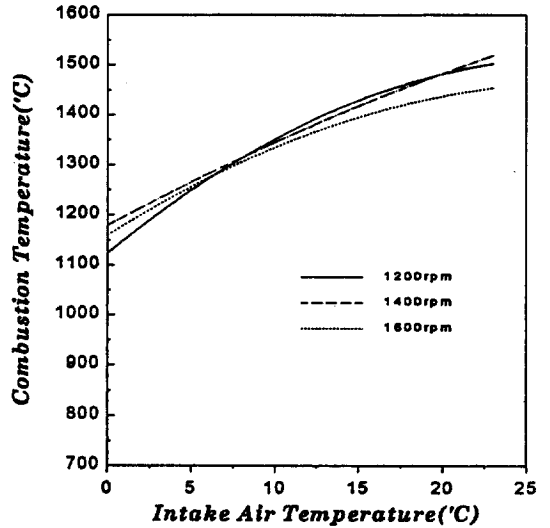


Fig. 8 전부하시 예혼합 수소기관에서 흡입공기 온도 변화에 따른 연소실 온도

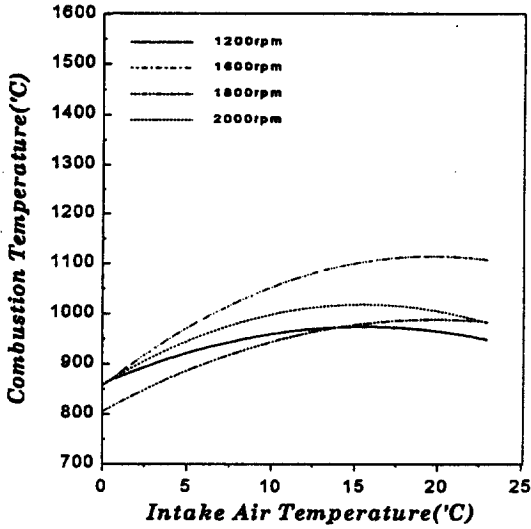


Fig. 7 부분부하시 예혼합 수소기관에서 흡입공기 온도 변화에 따른 연소실 온도

Fig. 5와 6은 흡입공기 온도를 변화시킬 때 한 사이클에 공급되어지는 연료의 단위 발열량당 질소산화물을 기관회전수별로 나타내었다. 각각의

Fig은 기관부하 50%와 100%인 경우에 대하여 나타냈으며, 전부하인 경우에는 예혼합 수소기관이 고속으로 운전될 때 운전성이 불안정하여 데이터를 얻을 수 없었다. Fig. 6에서, 전부하인 경우는 흡입공기 온도가 23°C에서 0°C로 변할 때 단위 발열량당 질소산화물은 약 40~50% 정도의 감소를 보이고 있다. 이것은 흡입공기 온도가 낮아질수록 연소실내의 가스온도가 감소되어 열적 NO_x 생성이 감소한 것으로 생각된다.

Fig. 5와 6의 결과를 자세히 살펴보기 위하여, Fig. 7과 8은 흡입공기 온도 변화에 따른 연소실 온도를 나타내었다. 연소실내의 온도는 실린더내의 압력센서로부터 측정된 지압선도에서 최고압력을 기준으로 구한 값이다. 이 계산과정에서의 가정은 균일한 단일영역 연소이며, 비열비가 실린더 내의 온도만의 함수이고, blow by의 영향은 무시하였다. Fig. 7에서와 같이 흡입공기 온도를 23°C에서 0°C로 낮추면 실린더내 온도가 약 300°C 줄었

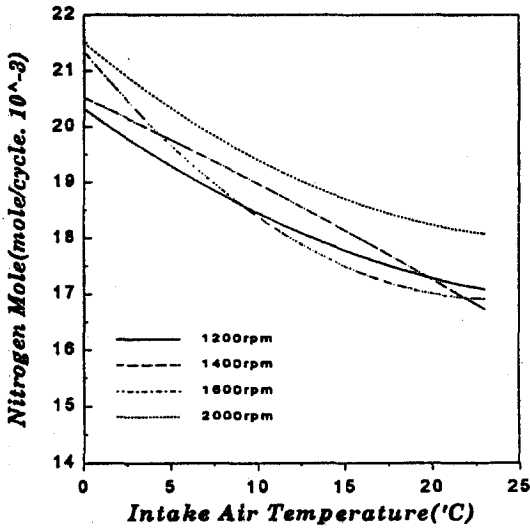


Fig. 9 부분부하시 수소기관에서 흡입공기온도 변화에 따른 흡입질소몰수

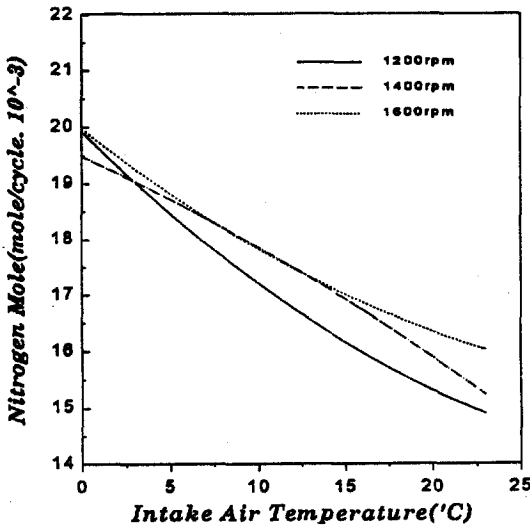


Fig. 10 전부하시 수소기관에서 흡입공기온도 변화에 따른 흡입질소몰수

으며, Fig. 8에서와 같이 전부하인 경우는 약 450°C로 연소온도가 낮아졌다. 이것으로 볼 때 부분부하보다는 전부하시에 흡입공기온도 변화에 따라

연소실내의 가스온도 변화가 크므로 열적 NO_x 생성에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 또한 전반적으로 같은 흡입공기온도일 때 연소실내의 온도는 부분부하보다 전부하시가 약 400°C가량 높은 것으로 나타났다.

끝으로 Fig. 9와 10은 흡입공기온도 변화에 따라 연소실로 공급되는 질소 몰수를 부분부하와 전부하상태에 대하여 나타내었다. 부분부하에 비하여 전부하 상태에서는 흡기관으로 공급되어지는 수소연료양이 많아지므로 연소실로 공급되는 질소 몰수는 전체적으로 감소하였다. Fig에서와 같이 흡입공기온도를 23°C에서 0°C로 액체질소를 이용하여 냉각시킨 경우 질소몰수는 부분부하에서는 약 21%, 전부하에서는 약 30%가량 증가하는 것을 알 수 있었다. 이것은 동일한 운전조건에서는 흡입공기 온도가 냉각됨에 따라 공기밀도가 증가하게 되므로 질소몰수가 증가한 것으로 생각된다.

Fig. 5에서 10가지의 결과로부터 전부하조건에서 흡입공기온도를 23°C에서 0°C로 냉각시키면 열적 NO_x 생성요인인 연소실온도는 약 24% 감소하며, 라디칼 NO_x생성요인인 라디칼은 약 30% 증가하는 것을 알 수 있었다. 흡입공기 온도를 같은 조건으로 냉각시킬 때 앞의 두 요인을 고려하면 단위발열량당 질소산화물의 생성이 약 45% 감소하게 된다. 따라서 본 실험조건에서는 열적 NO_x 생성요인이 라디칼 NO_x생성요인 보다 크게 작용하며 흡입공기 온도냉각에 따른 NO_x저감은 효과적인 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구는 단기통 직접분사식 디젤기관에 수소 연료를 공급할 때 흡입공기 온도를 23°C에서 0°C까지 변화시키면서 NO_x 생성에 미치는 영향을 연구하였다. 수소기관의 흡입공기 온도를 냉각

시키기 위하여 액체질소를 이용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 실험기관으로 공급된 전체연료 발열량의 70%을 흡기관을 통하여 수소연료를 공급한 결과 평균유효압력 변동률은 최고 7%이었으며 대체로 사이클변동이 2%미만으로 안정적이었다.
2. 전부하 조건에서 흡입공기 온도를 23℃에서 0℃로 액체질소를 통하여 낮추었을 때 1사이클당 연소실로 공급되는 질소몰수는 약 30% 증가하며, 연소실 가스온도는 24% 감소한다.
3. 같은 조건에서 기관의 흡입공기 온도를 23℃에서 0℃로 낮추었을 때 공급연료의 단위발열량당 NO_x의 배출량은 약 45% 감소한다.
4. 종합적으로 볼 때 NO_x의 생성은 흡입관의 질소 라디칼에 의한 영향보다 연소실 가스온도에 의한 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다.

후기

본 연구는 1997년 한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 연구기금으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. R. J. Nichols, "Futher 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. S. M. Aceves et al., "Optimization of a CNG series hybrid concept vehicle", SAE Paper No. 960234, 1996.
4. P. A. Salanki and J. S. Wallace, "Evaluation of the hydrogen-fueled rotary engine for hybrid vehicle Applications", SAE Paper No. 960232, 1996.
5. Jong Tai Lee, "Current status and characteristics of hydrogen fueled engine", Journal of the KSAE, Vol. 18, No. 2, 1996.
6. Furuham, "Combustion Improvement in a Hydrogen Fueled Engine", Int. Journal of Hydrogen Energy, Vol. 2, No. 3, 1977.
7. 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.
8. S. Furuham et. al., "Hydrogen Combustion Study in Direct Injection Hot Surface Ignition Engine", SAE Paper No. 861579, 1986.
9. A. M. Kanury, "Introduction to Combustion Phenomena", Gordon & Breach, 1975.
10. J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, 1988.
11. F. B. Parks, "A Single-Cylinder Engine Study of Hydrogen-Rich Fuels", SAE Paper No. 760099, 1976.