

# 수소첨가에 따른 직분식 디젤기관에서의 연소 및 스모크특성에 관한 연구

최 경 호

계명대학교 자동차공학과  
대구광역시 달서구 신당동 1000, 704-701

## Effect of Additional Hydrogen Fuel on IDI Diesel Engines

Gyeong-Ho Choi

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

### Abstract

The combustion and smoke emission of an indirect injection diesel engine were investigated running the engine on Hydrogen/diesel fuels. Hydrogen fuel supplied to the intake pipe was varied 0 to 10 percent of DF2's heating value. The most important finding was that the smoke emission is not decreased with increase of hydrogen fuel supplement. Also, the ignition delay is almost negligible over 10 percent hydrogen fuel mixture.

### 1. 서론

오늘날 내연기관은 저연비 저공해를 추구하는

세계적 조류로 인해 기술혁신의 속도가 더욱 가속화되고 있다. 더욱이 디젤기관은 운전중 배출되는 유해성분에 있어서 가솔린기관과 비교할 때 탄화

수소와 일산화탄소의 배출은 적지만 스모크와 질소산화물이 많기 때문에 이들에 의한 대기오염으로 인하여 환경오염방지 차원에서 오늘날 관심사로 부각되고 있다. 디젤기관에서의 스모크배출은 가솔린기관과 달리 압축행정 끝에서 고온 고압으로 압축된 공기에 고압으로 연료를 분사하기 때문에 가장 늦게 분사된 연료가 차지하는 농후영역 내에서 탄화수소 연료의 열분해에 의해 스모크핵이 형성되어 성장된 스모크 미립자가 여러 반응에 의해 스모크가 생성된다. 그러므로 디젤기관에서의 스모크 저감대책은 농후영역을 줄이던가, 공급되는 연료의 많은 양이 예혼합연소에 참여하도록 해야 한다. 이러한 스모크를 저감시키기 위하여 많은 연구가 분무입경이 작으며 연소실내에 고루 분포할 수 있도록 무화기를 개선할 필요가 있고 그 방법으로서 연료를 고압분사 하는 것이 연구되고 있다<sup>[1-2]</sup>. 또한 디젤연료에 물을 첨가한 유화연료에서 유적중에 혼재된 작은 물액적이 돌풍을 일으켜 폭발적으로 유적을 미세화하는 2차 미립화를 이용하는 방법<sup>[3-4]</sup>, 스모크 발생에 억제효과가 있는 세륨계의 금속화합물을 디젤연료에 첨가하여 사용하는 방법<sup>[5-6]</sup> 등이 연구되어 왔다. 그리고 디젤연료에 알콜<sup>[7-8]</sup>, 천연가스<sup>[9-11]</sup>, 수소<sup>[12]</sup> 등을 첨가하여 스모크 저감을 시도하려는 연구 또한 활발하게 진행되고 있다.

본 연구에서는 직접분사식 디젤기관을 대상으로 수소가스를 흡기관에 첨가하여 분사노즐로부터 분사되는 디젤유와 함께 착화연소시켜서 대상기관에서의 연소 및 스모크 특성에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 공랭식 단기통 디젤기

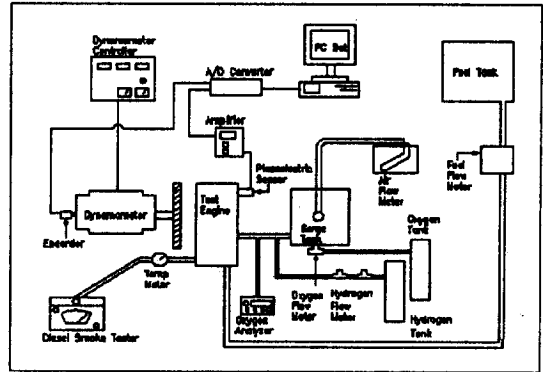


Fig. 1 실험장치 개략도

관, 부하조절을 위한 Eddy Current 동력계, 흡입 공기량을 측정하기 위한 유량 측정장치, 스모크를 측정하기 위한 스모크미터 등으로 구성된다. 첨가되는 수소는 고압으로 봄베에 충전되어 있는 수소가스를 사용하였으며, 2개의 압력조절기를 이용하여 1.5기압으로 감압한 후 병렬로 구성된 3개의 수소유량계(30 l/min)를 지나 흡기관에 공급된다. 수소공급량은 수소유량계 후방에 설치된 유량조절 밸브에 의해 조절된다. 흡기관으로 수소를 첨가함에 따라 산소량이 줄어들므로 고압으로 충전되어 있는 산소를 공급하여 모든 실험에서의 산소농도는 20.4%로 고정하여 흡기관으로 공급하였다. 흡기관 내에서의 산소농도는 산소가 공급되는 흡기관으로 부터 140cm 떨어진 곳에서 산소분석기로 측정하였다. 수소가스는 공급되는 디젤연료의 발열량의 최고 10%까지 첨가하였다. 연소실내의 압력을 측정하기 위하여 압력변환기를 연소실내에 삽입하였으며, 이를 통하여 구해진 실린더 압력을 이용하여 열방출량을 구한다. 열방출량을 구할 때 가정은 균일한 단일 영역연소, Specific heat가 실린더내의 온도만의 함수이며 Blow by의 영향은 무시하였다.

수소첨가율은 단위시간당 기관에 공급된 디젤

연료 및 수소가스의 질량에 대한 수소가스질량의 비로 정의하였으며 아래식과 같이 표시된다.

$$\text{수소첨가율} = \frac{m_h}{m_d + m_h} \times 100$$

여기서  $m_d$ 와  $m_h$ 는 디젤연료와 수소연료의 질량이다. 또한, 공기-연료 혼합기의 희박한 정도를 보다 정확히 파악하기 위하여 공기연료비를 연료-공기 당량비로 환산하여 나타내었다.

$$\phi = \frac{(A/F)_{stoichio}}{(A/F)_{actual}}$$

여기서  $(A/F)_{actual}$ 은 기관운전중에 소모된 디젤 및 수소연료와 공기질량의 비로써 실험에서 측정하여 구하였고  $(A/F)_{stoichio}$ 는 디젤연료 및 수소가스가 공기와 반응하여 완전히 연소한 경우의 공기-연료비로 나타내었다.

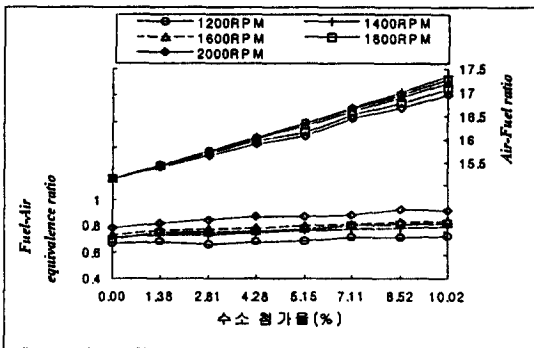


Fig. 2 수소첨가에 따른 공기연료비와 연료-공기당량비

Fig. 2에 수소첨가를 변화에 따른 공기연료비와 연료-공기 당량비의 관계를 나타내었다. Fig에 나타난 바와 같이 기관회전수를 증가할수록, 그리고 수소첨가율을 증가시킬때 따라 연료-공기 당량비가 커져서 공기-연료혼합 상태가 농후해짐을 알

수 있다. 또한 공기연료비  $(A/F)_{act}$ 가 증가할수록 연료-공기 당량비  $(\phi)$ 도 증가하는 것은 수소연료가 첨가되어 질수록 완전연소 조건의 공기연료비  $(A/F)_{stoi}$ 가 증가하는데 기인한다고 판단된다. 이는 수소첨가에 따라 공급되어야할 공기량이 많아져야함을 알 수 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

실험은 스모크배출정도가 심한 전부하 상태에서 수소첨가와 기관회전수를 변화시켰으며, 공급되는 디젤연료는 기관 회전속도 및 출력이 일정한 상태를 유지하며 수소의 공급량을 증가시켰다. 수소를 첨가함에 따라 기관의 운전상태를 나타내기 위하여 다수 사이클을 평균화한 도시평균 유효압력 (imep)에 대한 임의 사이클의 도시 평균 유효압력의 비로 정의된 평균유효압력 변동율(COV)로 나타낸다. 본 실험에서는 수소를 첨가시킬수록 평균유효압력 변동율은 증가하지만, 수소첨가율이 10%이하이므로 변동율의 차이는 1%미만으로 기관의 운전상태는 거의 변화가 없었다.

Fig. 3은 수소첨가에 따른 지압선도를 디젤연료만으로 운전하는 경우와 비교하였다. 이 경우 기관 회전 속도는 2000rpm이었다. Fig에 나타난 바와 같이 디젤연료만을 사용한 경우의 압력선도는 수소를 첨가한 경우보다 희박한 혼합기를 사용함에 따라 연소속도가 늦어져 압력 상승이 완만하고, 반면 수소첨가량을 증가시킬수록 연소실내 최고압력은 높아지고, 최고압력 발생시기도 빨라져 상사점으로 접근한다. 그림에서와 같이 수소가스를 약 9.4%첨가한 경우 실린더내 압력은 디젤연료만으로 운전하는 경우보다 약 8%정도 높을 것을 알 수 있었다.

Fig. 4는 압력선도로부터 구한 압력상승률을 수

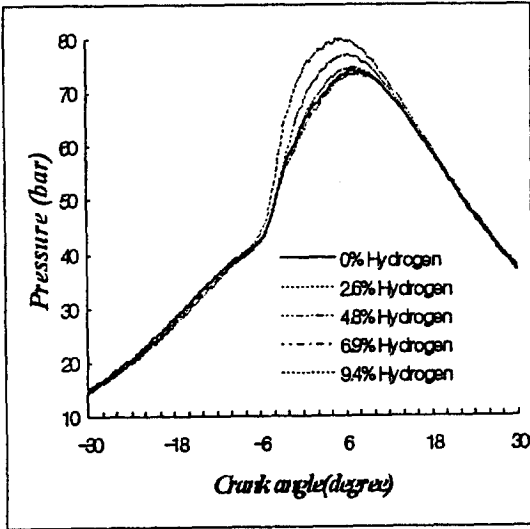


Fig. 3 수소첨가에 따른 지압선도

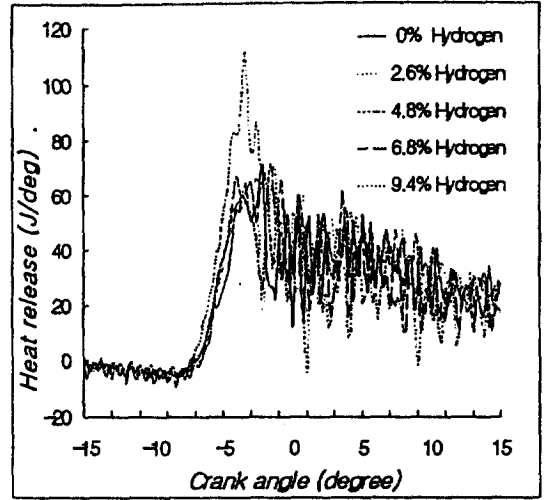


Fig. 5 수소첨가에 따른 열발생률

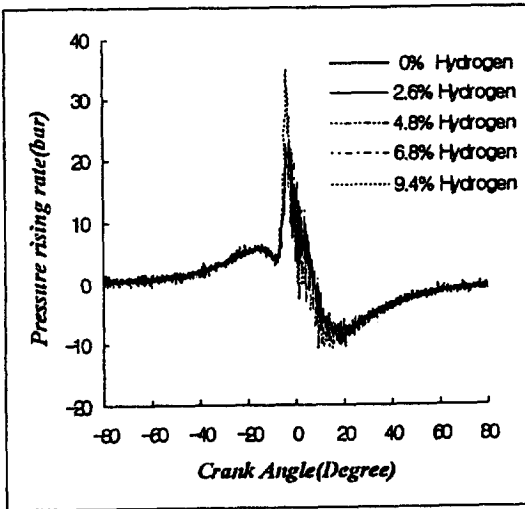


Fig. 4 수소첨가에 따른 압력상승률

수소첨가에 대하여 나타내었다. Fig. 3에서와 같이 수소첨가율이 증가함에 따라 압력상승률은 현저히 증가한다. 이것은 수소연료의 빠른 연소속도에 기인한 것으로 생각되며 압력상승률의 최고값은 디젤연료만으로 운전하는 경우는 20.5bar/deg이고,

수소첨가율이 9.4%인 경우 35.0bar/deg로서 약 71%의 증가를 나타낸다.

Fig. 5는 전부하상태, 2000rpm일 때의 수소첨가에 따른 열발생률 곡선을 나타내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 수소연료를 더 첨가하여도 착화지연기간에는 큰 변화가 없고, 최고 열발생율은 늘어나는 것을 알 수 있다. 이것은 수소의 착화온도가 디젤연료보다 무려 200℃가량 높은데도 불구하고 착화지연기간의 차이가 크지 않은 것은 최소점화에너지가 작은 수소연료의 특성에 기인한 것으로 보인다. 또한, 사용한 기관의 압축비가 21로서 압축행정 말기인 연소전의 온도는 수소연료가 착화하기에는 충분한 주위온도가 된다. 끝으로, 최고 열발생율이 늘어난 것은 수소연료의 발열량이 디젤연료의 발열량보다 약 3배정도 크기 때문인 것으로 보인다.

Fig. 6은 수소첨가에 대한 착화지연기간 및 주연소기간의 변화를 나타내었다. 여기서 착화지연기간은 디젤연료의 분사시점부터 초기 열발생율이 상승하는데 걸리는 시간이며, 주연소기간은 질량

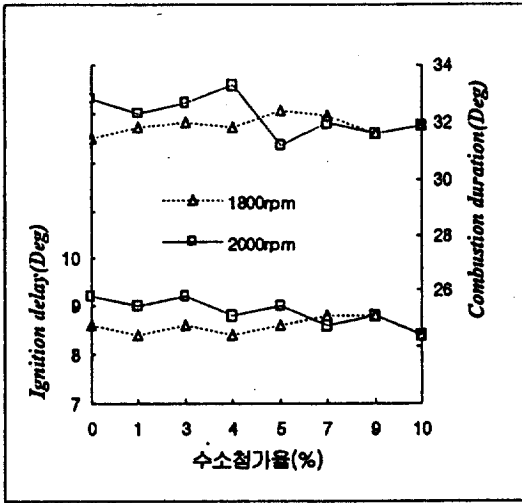


Fig. 6 수소첨가에 따른 착화지연기간과 주연소기간

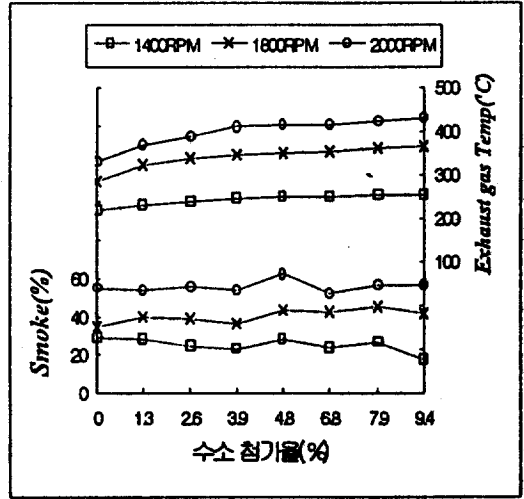


Fig. 8 수소첨가에 따른 각 RPM에서 스모크와 배기온도

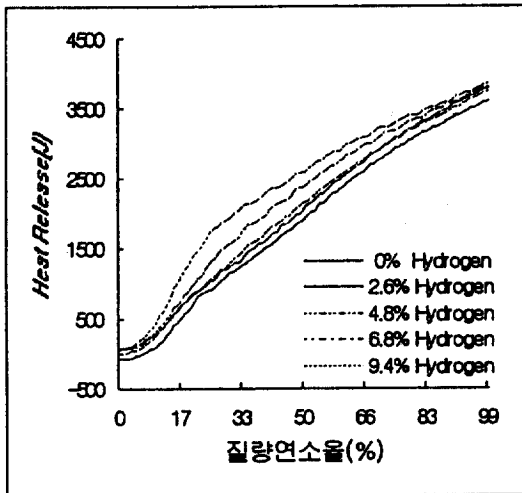


Fig. 7 수소첨가에 따른 질량 연소율

연소율의 10%에서 90%까지의 기간을 의미한다. Fig. 6에서와 같이 수소첨가에 따라 착화지연기간은 큰 변화는 없지만 주 연소기간은 단축되는 것을 볼 수 있다. 수소첨가율이 8.5%인 경우 디젤연료만으로 운전하는 경우 보다 착화지연기간은 약

2.3% 늘어나고, 주 연소기간은 약 3.7% 감소함으로 커다란 차이가 없었다.

Fig. 7은 수소첨가에 대한 질량연소율을 디젤연료만을 사용한 경우와 비교하였다. 디젤연료만으로 기관을 운전할 경우의 질량연소율은 완만한 상승을 보이는데 비하여, 수소를 첨가한 경우의 질량연소율 급격한 기울기를 나타내고 있어 수소가 스를 첨가함에 따라 수소연료의 빠른 확산연소속도에 기인한 것으로 판단된다. 수소가스를 첨가함에 따라 후기연소 속도는 늦어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 주연소기간에 수소가스가 연소하면서 연소실내의 한정된 산소를 많이 소비하여 디젤연료가 연소하는데 어려움이 있는 것으로 생각된다.

Fig. 8은 수소첨가에 따른 스모크의 변화와 배기온도 변화를 나타내었다. 배기가스온도는 배기밸브로부터 18cm 떨어진 곳에서 측정하였다. Fig. 6에서와 같이 수소첨가량이 늘어날수록 배기가스온도가 증가하는 것은 첨가된 수소의 높은 단열화염온도에 기인하는 것으로 보인다. 또한 기관회전

수가 증가할수록 배기가스온도가 증가하는 것은 더 많은 에너지를 공급하기 때문인 것이라 볼 수 있다. 수소가스가 9.4% 첨가된 경우는 배기가스 온도가 703 K로 디젤연료인 경우의 603 K보다 약 16.6% 높은 것을 볼 수 있다. 또한 스모크의 양은 수소가 첨가할수록 줄어들다가 다시 늘어나는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 연소실내에서 디젤연료와 연소되는 수소량이 적당량일 때 수소에 의해 연소가 향상되므로 스모크의 생성이 감소되지만 수소연료가 너무 많이 공급되면 분사된 디젤연료와의 연소하기 위한 압축공기와의 접촉을 방해하므로 오히려 연소가 악화되어 스모크 발생량이 증가하기 때문인 것으로 생각된다. 즉 디젤기관이 회박연소기관이기는 하지만 전부하 고속상태에서는 연료-공기 당량비가 0.8이상이므로 공기중의 산소가 충분치 못한 실정이다. 여기에서 주연소기간의 초기상태일 때 수소가 연소하면서 많은 양의 공기를 소모하므로 후연소기산에서 디젤연료가 연소할 때는 농후한 상태가 되어 스모크 발생이 더 많은 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구는 직접분사식 디젤기관에 수소가스를 첨가함으로써 스모크와 연소특성에 미치는 영향을 연구하였다. 실험은 수소가스를 흡기관으로 공급 하였으며 수소첨가로 인한 적어진 산소는 과급시켜서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수소첨가량을 증가시킬수록 연소실내의 최고압력은 높아지고, 최고압력 발생시기도 빨라져 상사점으로 접근한다. 이와 같은 현상은 적은 점화에너지와 연소속도가 빠른 수소연료의 특성에 따른 것으로 볼 수 있다.
2. 수소연료의 착화온도가 디젤연료보다 높음에도

불구하고 수소첨가량이 증가함에 따라 착화지연기간이 차이가 크지 않은 것은 최소점화에너지가 적은 수소연료의 특성임을 알 수 있었다.

3. 수소첨가량이 늘어날수록, 주연소기간의 초기상태 연소는 20%~40%에 정도 연소속도가 빠른 것은 수소연료의 빠른 연소속도에 기인한다고 생각한다.
4. 수소첨가량이 늘어날수록 스모크 양이 줄어들다가 수소첨가량 3.9% 이후에 다시 늘어나는 것을 알 수 있었다. 이것은 전부하-고속상태에서 과잉공기가 충분치 못한 상황에서 초기의 수소가 연소하면서 많은 양의 공기를 소모하여 디젤연료가 연소할 때는 농후한 상태가 되기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구는 1994년도 계명대학교 비사연구기금으로 이루어 졌음.

#### 참고문헌

- 1) Yokota, "Fast Burning and Reduced Soot Formation via Ultra-High Pressure Diesel Fuel Injection", SAE No. 910225.
- 2) T. Kamimoto, "Effect of High Pressure Injection on Soot Formation Processes in a Rapid Compression Machine to Simulate Diesel Flames", SAE No. 871619.
- 3) Hsu, B. D., "Combustion of Water-in-Diesel Emulsion in an Experimental Medium Speed Diesel Engine", SAE No. 860300.
- 4) Yoshimoto, et. al., "Influence of Emulsified Fuel Properties on the Reduction of BSFC", SAE No. 891841.
- 5) Levin, M. D. et. al., "Copper Fuel

- Additives as a Part of a Particulate Emission Control Strategy”, SAE No. 901619.
- 6) General Motors, “Diesel Fuel Comprising Cerium and Manganese Additives for Particulate Reduction”, Patent 4,568,357.
- 7) R. L. Bechtold, et. al., “Ford Methanol Flexible Fuel Vehicles Performance/Emission Experience”, SAE No. 902157.
- 8) J. Czerwinski, “Performance of HD-DI-Diesel Engine with Addition of Ethanol and Rapeseed Oil”, SAE No. 940545.
- 9) Hill, P. G. and Ding, Xianhua, “Emission and Fuel Economy of a Prechamber Diesel Engine with Natural Gas Dual Fuel”, SAE No. 860069.
- 10) Christopher S. W. and Sean H. T., “Dual Fuel Natural Gas/Diesel Engine Technology, Performance, and Emissions”, SAE No. 940548.
- 11) Yasuhiro. Daisho et. al., “Combustion and Exhaust Emissions in a Direct Injection Diesel Engine Dual-Fueled with Natural Gas”, SAE No. 950465.
- 12) 한동성, 채재우, “수소혼소 엔진의 성능 및 미립자상 물질의 배출특성에 관한 연구”, 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp. 85-90, 1992.