

## 수소-천연가스 혼합연료기관의 최적 수소 분사율 검토

임희수<sup>†</sup>, 김윤영\*, 이종태\*\*

\*성균관대학교 대학원, \*\*성균관대학교 기계공학부

### An Investigation on the Proper Hydrogen Mixing Rate in Heavy-Duty Hydrogen-CNG Engine

H. S. LIM<sup>†</sup>, Y. Y. KIM\*, JONG T. LEE\*\*

\*Grad. School of Sungkyunkwan Univ.

\*\*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.

300 Chunchundong Jangangu, Suwon, Gyeonggi-do, 440-746, Korea

#### ABSTRACT

A heavy duty hydrogen enriched CNG engine has the possibility to obtain stable operation at ultra lean condition and to reduce emission extremely. And it can also serve as a so called bridge technology between the current fossil fueled engine and the future hydrogen power system. The emission, torque and brake thermal efficiency characteristics of a heavy-duty hydrogen-CNG engine were investigated to determine the proper mixing rate of hydrogen and CNG. It was found that the proper mixing rates at  $\lambda = 1.4$  and  $\lambda = 1.6$  were around 20% and 30% for hydrogen addition rate respectively.

**주요기술용어** : Heavy-duty hydrogen-CNG engine(수소-천연가스 중대형 기관), Proper mixing rate of hydrogen and CNG(수소-천연가스 혼합율), Ultra lean condition(초회박 운전조건), Hydrogen additon rate(수소첨가율)

#### 1. 서 론

수소-천연가스 기관은 수소와 천연가스를 혼합시킨 연료를 사용하는 고효율 환경친화적 중대형 동력시스템이다. 수소-천연가스 동력시스템은

천연가스에 수소를 첨가시켜 사용하므로 수소에 대한 불안감을 불식시키고 수소사용을 점진적으로 증가시켜 본격적인 수소에너지시대의 도래를 촉진시킬 수 있는 과도기적 수소이용기술에 해당한다.

천연가스는 가연한계가 좁고 연소속도가 느리지만 수소는 연소속도가 빠르고 가연한계가 현저

<sup>†</sup> Corresponding author : limhs@skku.edu

히 넓다<sup>1-4</sup>). 또한 수소는 탄소성분을 포함하지 않아 천연가스에 비해 배기특성이 우수하다<sup>5-7</sup>). 이에 따라 수소-천연가스 혼합연료의 수소 혼합율을 증가시킬수록 혼합연료의 연소 및 배기특성이 개선되고 희박운전영역이 확장되어 기관성능 향상을 도모할 수 있다<sup>8</sup>). 그러나 수소 첨가율이 어느 범위 이상 증가하면 역화와 같은 이상연소가 발생할 수 있고 연소가스 온도의 증가로 NO<sub>x</sub>의 배출이 증가한다<sup>9-11</sup>).

따라서 수소-천연가스 동력시스템의 출력, 효율 및 배기성능 등을 극대화하기 위해서는 연소 및 배기가스 배출특성이 상이한 수소와 천연가스의 적정혼합을 파악이 중요하다<sup>12,13</sup>).

본 연구에서는 수소-천연가스 동력시스템의 성능최적화를 위해 각 공기-연료 당량비 조건에서 수소 첨가율 변화에 따른 배기, 출력, 효율 특성을 검토하여 적정 혼합율을 파악하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험장치의 전체적인 개략도를 Fig. 1에 나타낸다. 실험장치는 단기통 수소-천연가스 기관, 혼합연료 공급시스템, 흡기 및 배기계통, 냉각계통, 동력측정 장치와 기타 제측장치 등으로 구성

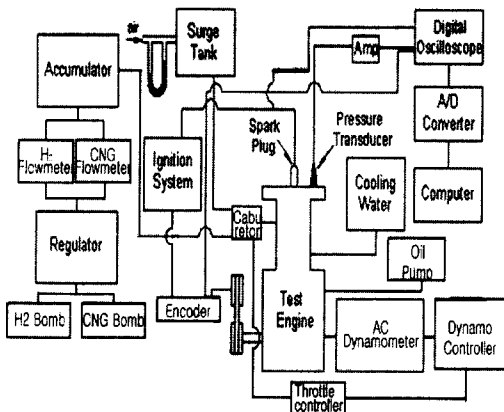


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

된다.

Fig. 2는 제작된 수소-천연가스 중대형 단기통 기관의 실물사진을 나타낸 것이다. 수소-천연가스 기관은 보어×스트로크 111×139, 행정체적 1345cc, OHC 밸브시스템의 단기통 기관이다.

수소-천연가스 연료 공급은 고압으로 충전되어 있는 고압가스 봄베로부터 공급된다. 연료의 공급 압력은 1차 감압기에서 30bar로 감압된 후 각각의 수소, 천연가스 유량계를 거쳐 압력 조절기에서 4 bar로 일정하게 유지된다. 흡기관의 전방에는 약 200 리터 용량의 서어지 탱크를 설치하여 맥동현상을 최소화하였다. 흡입공기량은 서어지 탱크 상부에 설치된 laminar flowmeter로 측정하였다. 배기관 후방에는 람다센서와 배기가스 분석계를 설치하였다. 냉각수는 실린더 헤드와 실린더 블록에 독립적으로 순환한 후 배출되도록 제작하였다.

수소-천연가스 기관의 출력측에는 동력계를 직결하였다. 연소실내 압력측정을 위한 piezo 타입의 압력변환기를 배기포트 쪽으로 삽입하였다. 압력 신호는 charge amp에 의해 증폭된 후, data recorder와 A/D 변환기가 내장된 컴퓨터로 입력되고 해석된다.

실험은 천연가스 연료에 수소를 첨가시킬 경우

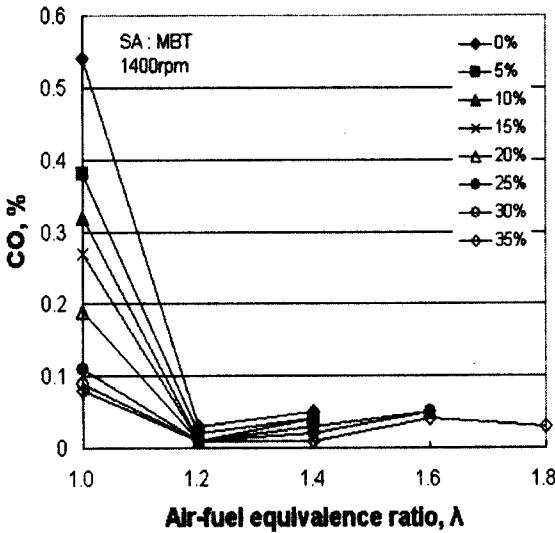


Fig. 3. CO emission characteristics of hydrogen enriched CNG engine at full load

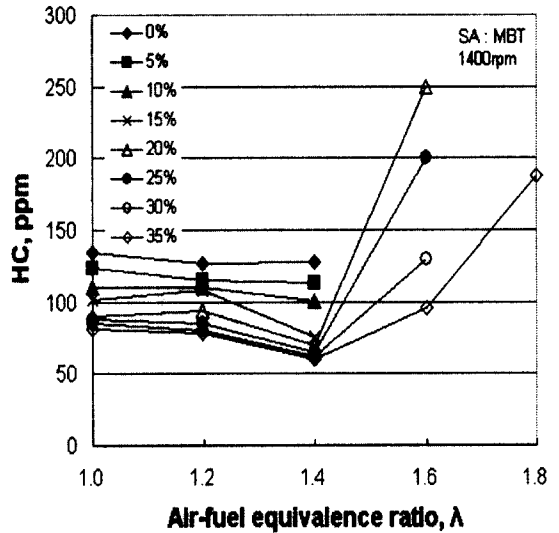


Fig. 4. HC emission characteristics of hydrogen enriched CNG engine at full load

의 회박영역 확장 및 배기성능 개선효과를 파악하는 것이다. 기관회전수는 1400rpm, 냉각수 온도는 70℃로 고정하였다.

실험은 수소-천연가스 중대형 단기통 기관에 대하여 각 공기-연료 당량비 조건에서 수소 첨가율을 변화시켜 배기특성과 열효율 및 출력 특성을 파악하는 것이다.

수소 첨가율은 (식 1)에서 나타낸바와 같이 전체 공급 연료량에 대한 수소 공급량의 체적비로 정의된다. 수소 첨가율은 0%~35%까지 5%씩 단계적으로 변화시켰으며, 공기-연료 당량비는 λ=1.0~1.8까지 0.2씩 단계적으로 변화시켰다.

$$\text{수소첨가율(\%)} = \frac{V_{H_2}}{V_{H_2} + V_{CH_4}} \quad (\text{식 1})$$

상기 실험조건에서 기관부하는 전부하, 점화시기는 MBT, 기관회전수는 1400rpm, 냉각수 온도는 70℃로 고정하였다.

### 3. 수소 첨가율 변화에 따른 성능특성

### 3.1 수소 첨가에 따른 배기특성 개선

Fig. 3은 수소-천연가스 혼합연료 기관에서의 CO 배기특성을 각 공기-연료 당량비 조건에서의 수소 첨가율 변화에 대해 나타낸 것이다.

천연가스 연료에 수소를 첨가시킨 경우 천연가스뿐만 아니라 운전한 경우보다 CO 배출량이 감소하며, 수소 첨가율을 증가시킬수록 감소하는 경향이다. 또한 공기연료 당량비 λ=1.0에서 CO 배출량은 가장 크고 λ=1.2에서 가장 작게 나타난다. 그리고 공기-연료 당량비 λ=1.2보다 회박해질수록 다소 증가하는 경향을 나타낸다.

공기-연료 당량비 λ=1.0에서 천연가스만으로 운전한 경우보다 수소 첨가율 5%인 경우의 감소율은 약 30%정도로 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 수소 첨가율이 증가할수록 CO 배출량이 감소하는 것은 NOx 배출량이 증가하여 상대적으로 CO 발생량이 줄어들었기 때문이다. 공기-연료 당량비 λ=1.2 이상의 회박영역으로 갈수록 CO 배출량이 다소 증가하는 것은 회박영역에서의 사이클 변동율이 다소 증가한 것으로 알 수 있듯이 회박영역에서의 연소가 다소 불안정해졌기 때문으로 판단된다.

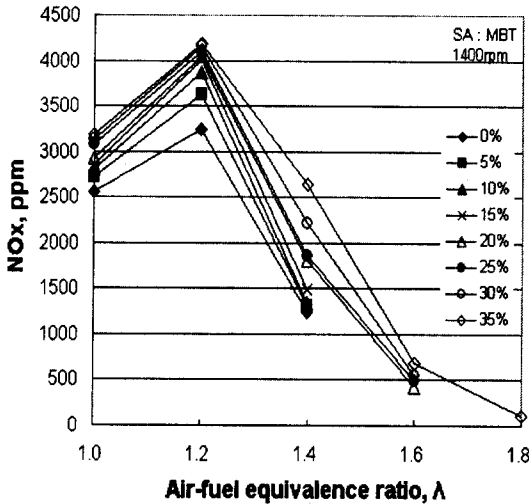


Fig. 5. NOx emission characteristics of hydrogen enriched CNG engine at full load

Fig. 4는 HC 배기특성을 각 공기-연료 당량비 변화에 대해 나타낸 것이다. 수소 첨가율을 증가시킬수록 HC의 배출량은 전반적으로 감소하는 경향이다. 공기-연료 당량비  $\lambda=1.4$ 까지 감소하다가  $\lambda=1.4$ 보다 희박영역으로 갈수록 배출량이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 공기연료 당량비  $\lambda=1.4$  구간에서, HC 배출량이 가장 낮으며 수소 첨가율 10%정도까지는 완만한 경향이지만 수소 첨가율 15%인 경우 감소율이 빠르게 나타난다. 수소 첨가율이 증가할수록 HC의 배출량이 줄어드는 것은 수소를 첨가함에 따른 소염거리의 감소와 혼합기의 연소가 촉진되었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5는 수소-천연가스 기관의 NOx 배출 특성을 각 공기-연료 당량비 조건에서의 수소 첨가율 변화에 대해 나타낸 것이다.

수소 첨가율을 증가시킬수록 NOx의 배출량은 증가하는 경향이다. NOx 배출량은 공기-연료 당량비  $\lambda=1.2$ 에서 가장 크며, 이보다 희박해질수록 감소하는 것으로 나타난다. 공기-연료 당량비  $\lambda=1.2$ 에서 수소 첨가율 20%인 경우와 35%인 경우에서의 NOx 배출 증가율은 3.5%이다.  $\lambda=1.4$ 에서

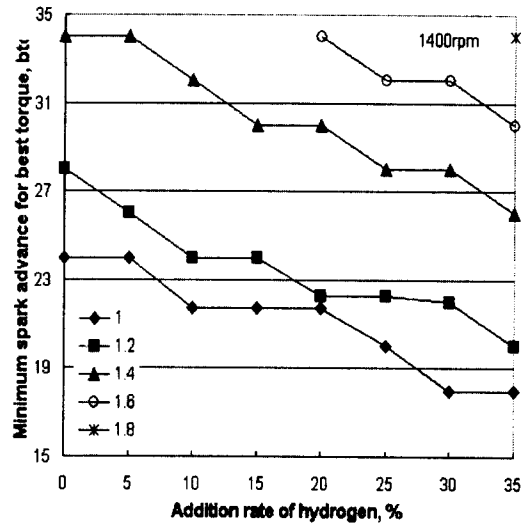


Fig. 6. MBT of hydrogen enriched CNG engine

의 증가율은 45.8%,  $\lambda=1.6$ 에서의 증가율은 61.9%로 공기-연료 당량비가 희박해질수록 증가율은 크게 나타난다. 또한 수소 첨가율 35%인 경우  $\lambda=1.0$ 에서  $\lambda=1.2$ 로의 감소율은 23.9% 정도이며  $\lambda=1.2$ 에서  $\lambda=1.4$ 으로의 감소율은 37% 정도로 나타난다. 또한 공기-연료 당량비  $\lambda=1.6$  이상의 희박영역으로 갈수록 배출량이 현저히 감소하는 것으로 나타난다.

이와 같이 수소 첨가율이 증가할수록 NOx 배출량이 증가하는 것은 수소를 첨가함에 따른 연소촉진으로 연소가스의 최고온도가 높아졌기 때문이다. 수소첨가에 의한 희박영역의 확장으로  $\lambda=1.4\sim 1.6$ 부근에서는 통상의 천연가스 기관에 비해 오히려 NOx 배출량을 줄일 수 있다. 다만 본 실험에서는 정속주행모드에서 얻은 수치로서 실제 허용치와는 다소 차이가 있을 수 있다.

### 3.2 수소 첨가에 따른 열효율 및 출력 특성

Fig. 6는 각 공기-연료 당량비 조건에서 수소 첨가율 증가에 따른 수소-천연가스 기관의 최적 점화시기를 나타낸 그림이다. 최적점화시기는 수

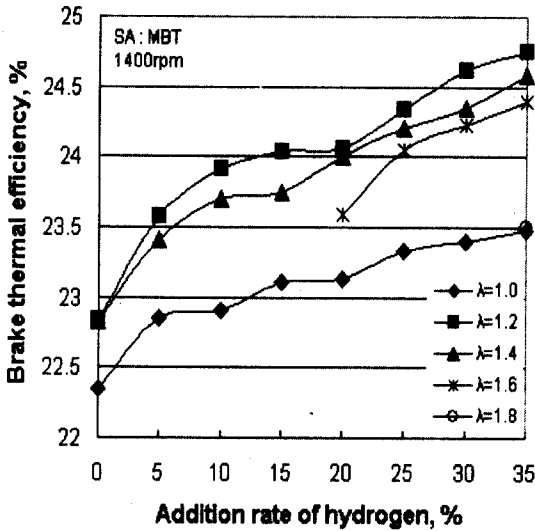


Fig. 7. Brake thermal efficiency of hydrogen enriched CNG engine

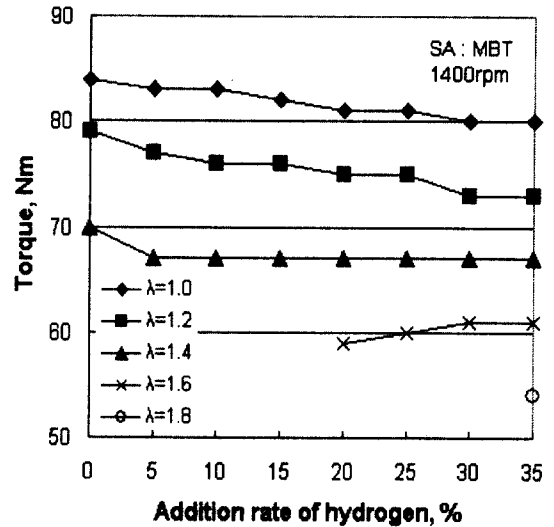


Fig. 8. Torque of hydrogen enriched CNG engine

소 첨가율이 증가할수록 수소의 빠른 연소속도로 지각되는 경향을 나타낸다. 또한 각 수소 첨가율 조건에서 공기-연료 당량비가 희박해짐에 따라 화염전파속도가 느려져 최적점화시기가 진각되는 것을 보인다. 수소 첨가율 변화에 대한 최적점화시기의 지각 정도는 공기-연료 당량비  $\lambda=1.0$ 에서 3.5%,  $\lambda=1.4$ 에서 5.2%정도로 희박한 조건에서 크게 나타났다.

Fig. 7은 수소 첨가율 변화에 따른 수소-천연가스 기관의 제동 열효율을 공기-연료 당량비로 구분하여 나타낸 것이다.

수소 천연가스 혼합연료 기관의 열효율은 전반적으로 수소 첨가율을 증가시킬수록 증가한다. 또한 공기-연료 당량비  $\lambda=1.2\sim 1.4$ 에서 효율은 가장 높으며 이보다 희박해질수록 감소하는 경향이다. 수소 첨가율 0%인 경우 열효율은  $\lambda=1.2\sim 1.4$ 의 경우가  $\lambda=1.0$ 의 경우보다 전반적으로 약 0.5%정도 증가한다. 그러나 수소를 첨가할 경우 열효율은 약 1%정도가 증가하였다. 이는 수소 첨가량이 증가할수록 수소의 빠른 연소속도와 넓은 가연한계로 초기와 주연소기간의 연소가 촉진되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 8은 각 공기-연료 당량비 조건에서 수소 첨가율 증가에 따른 수소-천연가스 기관의 토크를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 공기-연료 당량비  $\lambda=1.2$  이하에서는 수소 첨가율이 증가할수록 토크는 감소하는 경향이다. 그러나 공기-연료 당량비  $\lambda=1.4$  이상에서는 반대로 증가하는 경향을 나타낸다.

이러한 출력증감 현상을 공급 열량의 차이에 기인하는 것으로 예측되므로 각 수소 첨가율에서의 공기-연료 당량비 변화에 대한 이론공급열량을 조사하여 Fig. 9에 나타낸다. 이론공급열량은 공기-연료 당량비  $\lambda=1.4$ 미만에서 수소 첨가율이 증가함에 따라 감소하는 경향이지만 공기-연료 당량비  $\lambda=1.4$ 이상에서 수소 첨가율이 증가할수록 공급열량이 증가하는 경향을 나타낸다. 단위산소몰수당 수소의 연료몰수는 천연가스의 4배인 반면 단위몰당 발열량은 수소(57.85kcal/mol)의 경우 천연가스(190.876kcal/mol)의 0.3배이다. 따라서 공기-연료 당량비  $\lambda=1.4$  부근을 기준으로 수소 첨가율 변화에 대한 공급열량 증감경향이 상반되게 나타나는 것은 동일 행정체적내 수소와 천연가스의 몰수 및 발열량 차이 등의 요인이 공기-

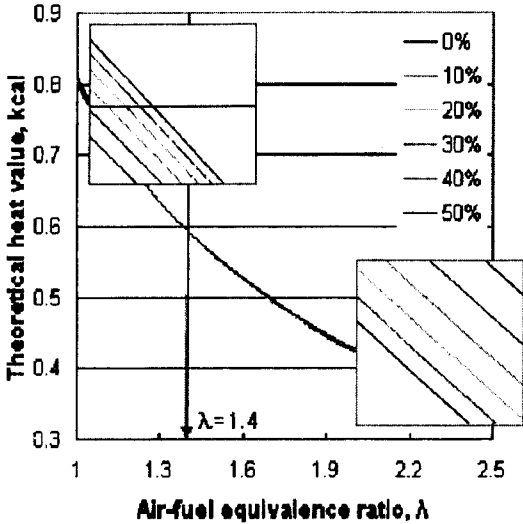


Fig. 9. Theoretical heat release at each air-fuel ratio

연료 당량비 조건에 따라 상반된 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

이와 같이 동일 공기-연료 당량비 조건에서는 천연가스기관에 수소 첨가에 의한 출력감소 문제는 현저하지 않을 것으로 판단된다. 그러나 수소-천연가스 동력 시스템은 주로 공기-연료 당량비  $\lambda=1.6$  이상의 희박영역에서 운전되므로 희박영역 확장에 따른 출력 감소에 대한 대책이 필요하다.

#### 4. 적정 수소혼합율

상기에서 수소 첨가를 변화에 대한 혼합연료 동력시스템의 제반 성능을 파악한 결과, 운전조건 중에서 공기-연료 당량비 조건에 따라 수소첨가에 의한 성능변화 경향이 상이하게 나타났다. 또한 수소-천연가스 동력시스템은 주로 희박영역에서 운전되므로 최적분사율은 공기-연료 당량비  $\lambda=1.4$  및  $\lambda=1.6$ 에서 중점적으로 검토하고자 한다. 본 실험 수소첨가를 변화범위에서 역화나 노크와 같은 이상연소가 관찰되지 않았으므로 적정혼합율은 배기특성, 열효율 및 출력 특성을 고려하여 결정하였다.

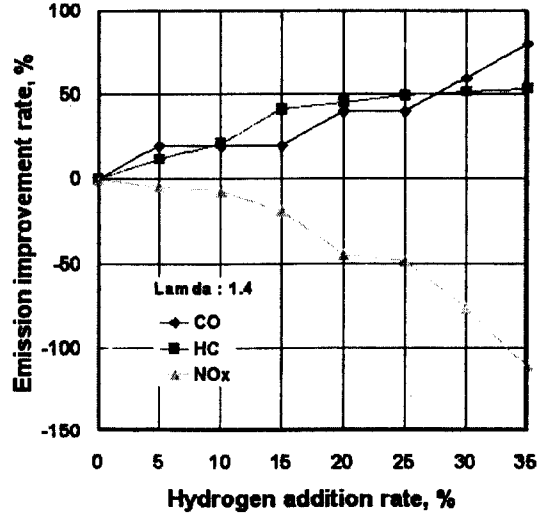


Fig. 10. Hydrogen-CNG Emission improvement rate

Fig. 10과 Fig. 11는 각각 공기-연료 당량비  $\lambda=1.4$ 에서의 수소 첨가를 변화에 대한 배기 향상율과 성능 향상율을 나타낸 것이다. 여기서 배기 및 성능향상율은 천연가스만으로 정상운전이 가능한 희박한계 공기-연료 당량비  $\lambda=1.4$ 조건을 기준으로 수소첨가에 따라 배기 배출량이 감소되는 정도와 효율 및 토크가 증가되는 백분율로 정의한다. 부하조건은 전부하이머, 점화시기는 MBT, 기관회전수는 1400rpm이다.

그림에서 보는바와 같이 HC는 수소 첨가율이 증가함에 따라 지속적으로 향상율이 증가하는 추세이나 CO의 경우 수소 첨가율 20%이상부터는 향상율의 증가폭이 작아져 거의 일정한 수준을 나타낸다. NOx의 향상율은 전반적으로 음의 2차 함수 형태로 나타나 수소 첨가율이 증가할수록 급격히 NOx의 배출이 증가한다. 또한 열효율 향상율은 수소 첨가율에 대해 1차함수의 관계로 증가하며 토크 향상율은 수소 첨가율에 큰 영향을 받지 않는다. 이와 같이 수소 첨가율이 증가할수록 HC와 열효율의 경우 지속적인 증가경향을 나타내지만 수소 첨가율 20%이상에서 CO와 토크는 크게 증가하지 않고 NOx의 배출량 또한 현저히 증가하므로 공기-연료 당량비  $\lambda=1.4$ 조건에서

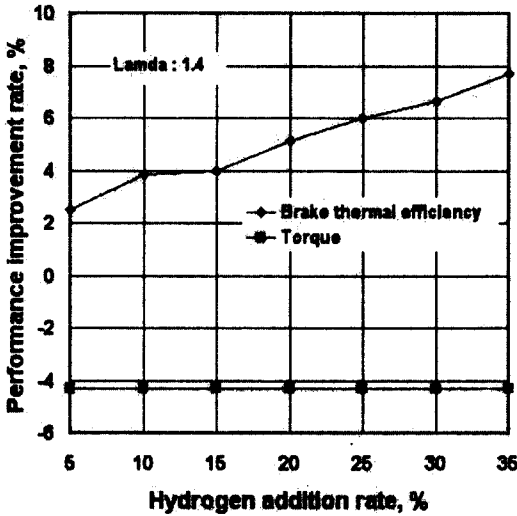


Fig. 11. Hydrogen-CNG performance improvement rate

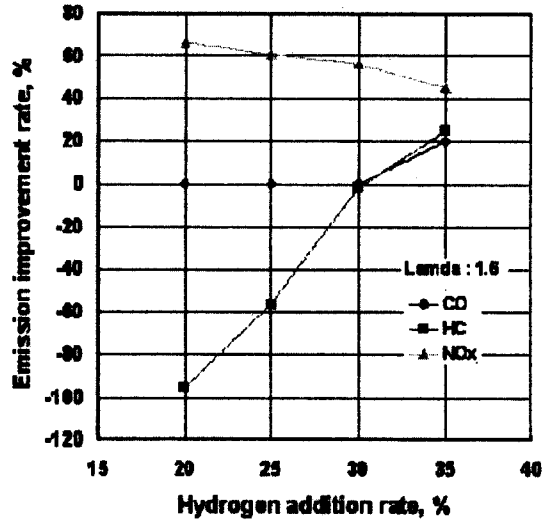


Fig. 12. Hydrogen-CNG Emission improvement rate

는 수소 첨가율 20%를 최적분사율로 결정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

공기-연료 당량비  $\lambda=1.6$  조건에서 수소 첨가율 변화에 대한 배기 향상율과 성능 향상율을 조사하여 Fig. 12 및 Fig. 13에 나타낸다.

CO 향상율은 수소 첨가율 30%이후부터 나타나기 시작하여 수소 첨가율 35%에서 20% 정도의 향상율을 나타내며 HC의 경우도 수소 첨가율 30%이전까지는 음의 향상율을 보이다가 이후부터 CO와 비슷한 수준의 향상율을 나타낸다. NOx는 수소변화를 변화범위 전반에서 양의 향상율을 보이나 수소 첨가율이 증가할수록 다소 향상율이 작아지는 경향이다. 효율 및 토크 향상율의 경우 수소 첨가율이 증가함에 따라 증가하며 수소 첨가율 30% 이후부터 토크 향상율은 크게 변화되지 않는다.

이와 같이 공기-연료 당량비  $\lambda=1.6$ 에서 수소 첨가율 30%이후부터 CO와 HC의 향상율이 나타나고 토크 향상율은 거의 일정하다. 또한 수소 첨가율을 30% 이상으로 증가시키면 열효율 향상율을 더욱 높일 수 있지만 반면 NOx의 향상율이 감소하므로 공기-연료 당량비  $\lambda=1.6$ 의 경우 적정혼

합율은 수소 첨가율 30%로 파악된다.

수소-천연가스 동력시스템은 본격적인 수소에너지시대를 대비하는 완충기술에 해당하므로 수소-천연가스의 적정혼합율은 상기의 기술적 타당성 이외에도 수소 공급인프라 및 경제성등을 다각적으로 검토하여 결정하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

중대형 수소-천연가스 기관의 적정 수소혼합율을 파악하기 위해 수소 첨가율 변화에 대한 배기, 열효율 및 출력 특성을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수소-천연가스 혼합연료 기관의 공기-연료 당량비  $\lambda=1.4$ 에서 수소 첨가율을 증가시킬수록 CO와 HC의 배출량은 감소하지만 NOx 배출량은 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 수소첨가에 의한 희박운전영역에서는 NOx 배출량은 천연가스에 비해 감소한다.
- 2) 수소-천연가스 혼합연료 기관에서의 열효율은 수소 첨가율이 증가할수록 증가한다.

또한 열효율은 공기-연료 당량비  $\lambda=1.2\sim$

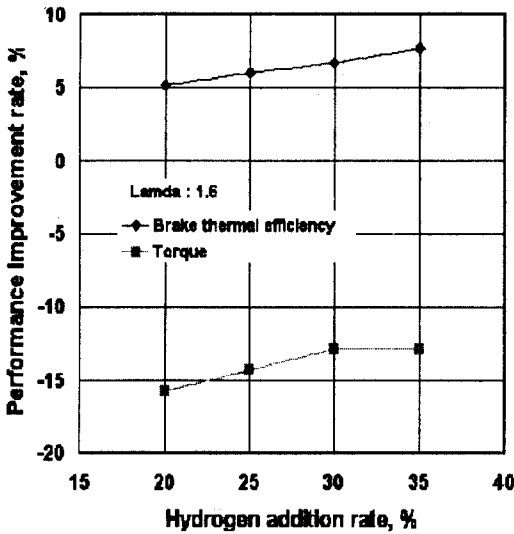


Fig. 13. Hydrogen-CNG performance improvement rate

1.4에서 가장 높게 나타났으며 이보다 희박영역으로 갈수록 감소한다.

- 3) 동일 행정체적 내로 공급되는 수소와 천연가스의 몰수 및 발열량 차이 등에 의해 공기-연료 당량비  $\lambda=1.4$ 를 기준으로 공급열량이 증감하여 출력증감 현상이 나타났다.
- 4) 수소 첨가율 변화에 대한 배기특성, 열효율 및 출력성능 등을 파악한 결과, 수소-천연가스 동력시스템의 적정혼합율은 공기-연료 당량비  $\lambda=1.4$ 에서 수소 첨가율 20%,  $\lambda=1.6$ 에서 30%정도가 바람직한 것으로 파악되었다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 에너지·자원 기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 1) Shoichi Furuham, "Trend of Social

Requirement and Technological Development of Hydrogen-Fueled Automobiles", JSME Review, vol. 13, No. 1, 1991, pp. 4-13.

- 2) shouichi furuhama, "Trend of social requirement and technological development of hydrogen-fueled automobiles", JSME Rewiw, vol. 13, No. 1, 1991, pp. 4-13
- 3) Per Tunestal, Magnus Christensen, Patrik Einewall, Tobias Andersson, Bengt Johansson, Owe Jonsson : "Hydrogen Addition For Improved Lean Burn Capability of Slow and Fast Burning Natural Gas Combustion Chambers", SAE 2002-01-2686
- 4) Joseph G. Finegold et. al, "The UCLA Hydrogen Cat : Design, Construction, and Performance." SAE730507, pp. 1626-1637.
- 5) Ennio P. Silva, Waldyr L. R. Gallo, Jaime Szajner Edurado G. Armalar, Carlos R. Bezerra, "State of the Art in the Use of Hydrogen as a Automotive Fuel", SAE 931706
- 6) 김윤영, 강정호, 이종태, "고출력 저배기 CNG기관의 개발을 위한 실린더내 직접분사방식의 검토", 한국자동차공학회, 추계 학술대회 논문집, 2001. 11, pp. 196-202.
- 7) 김윤영, 강정호, 이종태, "실린더내 직접분사식 CNG기관의 개발을 위한 연구", 한국천연가스차량협회, 추계학술대회, 2001. 11, pp. 1-8.
- 8) 이종태, 이재영, "수소이용기술분야의 개요 및 TRM", 한국수소에너지학회, 춘계학술대회, 2002.5, pp. 39-47
- 9) 이창욱, 백성호, 이종태, "수소기관의 역화방지에 관한 기초연구", 한국에너지기술연구소, 제11회 에너지절약워크샵, 1996. 11, pp. 217-230.
- 10) J. Futon, F. Lynch, R. Marinara, B. Wilson, "Hydrogen for Reducing Emissions from Alternative Fuel Vehicles", SAE 931813



- 11) J. T. Lee, Y. Y. Kim, C. W. Lee, J. A. Caton, "An Investigation of a Cause of Backfire and its Control Due to Crevice Volumes in a Hydrogen Fueled Engine", ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.123, 2001.1, pp. 204-210
- 12) 임희수, 김윤영, 이종태, "수소 첨가에 의한 중대형 천연가스 기관의 기관 성능 향상", 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, 2003.11, pp. 163-169
- 13) 임희수, 김윤영, 이종태, "중대형 천연가스 기관의 수소혼합율변화에 대한 연소 및 배기특성", 한국수소 및 신에너지학회 춘계학술대회 논문집, 2003.6, pp. 101-106