

대형 CNG기관의 직접분사화에 의한 희박한계확장

박정일[†] · 정찬문* · 노기철** · 이종태***

A study on expansion of lean burn limit with direct injection of the heavy-duty CNG engine

Jungil Park, Chanmoon Chung, Kichul Noh, Jongtai Lee

Key Words: DING Engine(직접분사식 천연가스기관), Lean Burn Limit(희박연소 한계)
Port Injection(흡기관분사식), Direct Injection(직접분사식), Injection Timing(분사시기)

Abstract

Lean combustion is one of the most promising method for increasing engine efficiency and reducing the exhaust emission from SI gas engines. Due to the possibility of partial burn and misfire, however, under lean burn operation, stable flame kernel formation and fast burn rate are needed to guarantee a successful subsequent combustion. Experiment data were obtained on a single-cylinder CNG fueled SI engine to investigate the effect of direct injection, spark timing and variation of injection timing.

Experimental results show that lean burn limit is $\lambda=1.3$ with port injection, and expansion of lean burn limit $\lambda=1.4$ with direct injection method, due to increase of turbulence intensity in cylinder and stratified charge. Combustion duration in lean region is improved by using the variation of injection timing.

1. 서 론

CNG기관은 유해가스 배출량이 적고 연료매장량이 비교적 풍부하여 차세대 저배기 청정기관으로서의 우수한 특성을 가지고 있다.⁽¹⁻³⁾ 현재까지 개발되거나 상용화된 CNG기관은 대부분 CNG연료와 공기를 예 혼합하여 스파크 점화시키는 흡기관 분사식 CNG기관이다.⁽⁴⁻⁵⁾ 가스 상태의 CNG연료를 흡기관 내로 공급할 경우 흡입공기량의 감소로 공급열량이 감소되어 기존의 가솔린 기관에 비해 출력이 저하되는 단점이 있다. 이를 해결할 수 있는 방법으로는 실린더 내에 천연가스를 직접 분사하는 것이다.

천연가스연료를 실린더 내 직접분사 하는 경우

에는 흡입공기량의 증가효과에 의해 체적효율과 출력이 증가되고 저 부하 영역에서 발생하는 흡기행정 중의 펌핑손실이 대폭 저감되는 효과가 있다. 상기와 같이 천연가스기관을 직접분사화 하는데 따른 연료분사방식으로 초 희박연소를 구현시키면 저공해의 실현이 가능할 것이다. 특히 기존 흡기관방식의 기관에서 한계가 있는 고정밀도의 연료분사 및 연소제어가 가능하여 부하에 따라 고출력 및 고효율을 실현시킬 수 있다. 그러나 현재 운행되고 있는 대형 천연가스자동차기관은 국내외를 막론하고 저압의 가스연료를 믹서 또는 인젝터를 통해 흡기관 내에 공급하는 간접 분사방식의 일종인 PI(Port Injection)방식이 대부분이다.⁽⁶⁻⁷⁾ 이 방식은 주지의 사실과 같이 흡기과정에서의 펌핑손실은 물론 체적효율의 저하와 배기가스의 배출을 효과적으로 줄이는데 한계를 가지고 있다. 특히 천연가스의 특징인 좁은 가연한계 낮은 연소속도는 연소측면에서는 대형엔진의 치명적인 단점이라 할 수 있으며 이를 극복하

[†] 저자, 성균관대학교 대학원

E-mail : pk5508@nate.com

TEL : (031)290-7472 FAX : (031)299-4754

* 회원, 성균관대학교

Table 1 Specifications of test engine

Combustion chamber	Open dish type
Bore × Stroke	123mm ×155mm
Displacement volume	1842cc
Compression ratio	10.5
Number of cylinder	Single
Cooling	Water cooling
Valve train	OHC

는 가장 효과적인 수단이 직접분사화라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 대형 CNG기관의 직접분사화에 의한 희박한계 확장효과를 파악하기 위하여 대형 직접분사식 단기통 CNG기관과 천연가스 전용 고압분사밸브를 개발·제작하고 흡기관분사와 직접분사에 대한 희박한계를 파악하였다.

2. 직접분사식 CNG기관 및 실험장치

2.1 직접분사식 CNG기관

본 연구에서는 직접분사식 CNG기관을 개발하기 위하여 D사의 천연가스버스(GE12TI)를 기초로 단기통 대형 직접분사식 CNG기관을 개발 하였으며, 제원은 Table 1과 같다. 연소특성에 영향을 주는 실린더헤드, 피스톤, 실린더 라이너, 커넥팅

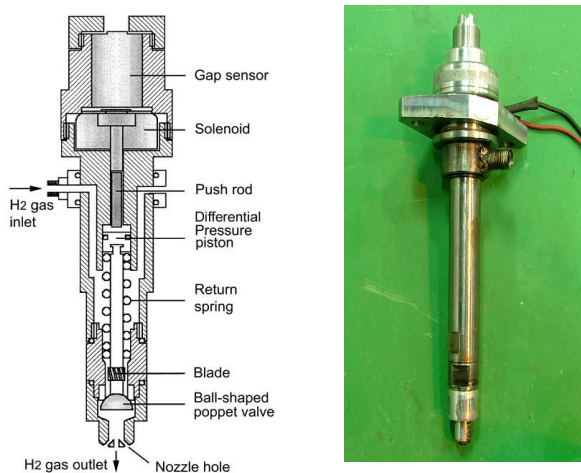


Fig. 1 Schematic diagram of CNG valve assembly

로드 등은 기존의 부품을 사용하였고 실린더 블록, 크랭크케이스, 실린더헤드 하우징은 별도로 제작하였다.

불-포핏밸브형 분사밸브의 경우 밸브에는 고압의 CNG 가스와 고장력의 스프링이 작용하므로 큰 구동력이 요구된다. 따라서 20~30bar의 고압의 CNG 가스에 원활한 구동과 응답성을 확보하고 분사량 제어가 용이한 슬레노이드 구동식 불-포핏밸브형 구조로 제작하였으며, 구조는 Fig. 1과 같다.

직접분사식 밸브는 냉각을 고려, 배기다기관을 거치지 않는 물통로(water jacket)부에 홀을 가공하여 설치하였다.

2.2 실험장치

실험장치는 CNG기관, 엔진의 부하제어를 위한 엔진동력계 및 동력계 컨트롤러, 기관주변장치를 제어하는 제어부, 압력데이터 취득장치 로 구성되며 Fig. 2와 같다.

2.3 실험방법

엔진 시동 후 냉각수 온도가 설정온도 353K로 안정된 후 실험을 실시하였으며 흡기관분사식의 경우 천연가스의 공급압력은 4bar로 흡입관로를 통하여 공급하였다. 직접분사식의 경우 공급압력은 약 30bar로 압력레귤레이터에 의해 일정하게 고압 분사밸브를 통해 분사된다.

기관은 일정한 압축비($\epsilon=10.5$)하 에서 기관회전수 별 스파크 타이밍과 공연비를 변화시키며 흡기관분사 및 직접분사에 의한 희박한계를 파악하였다.

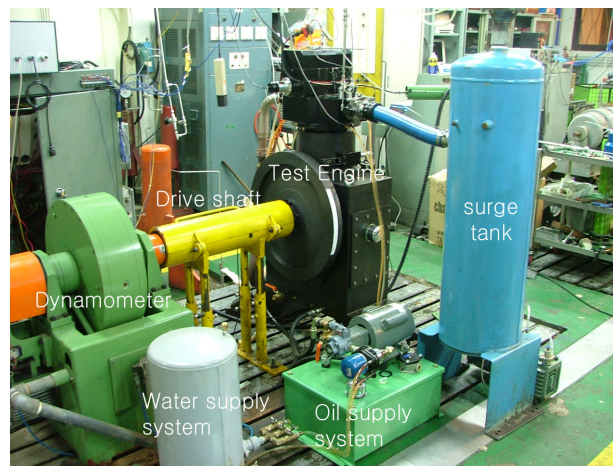


Fig. 2 Experiment setup of DING engine

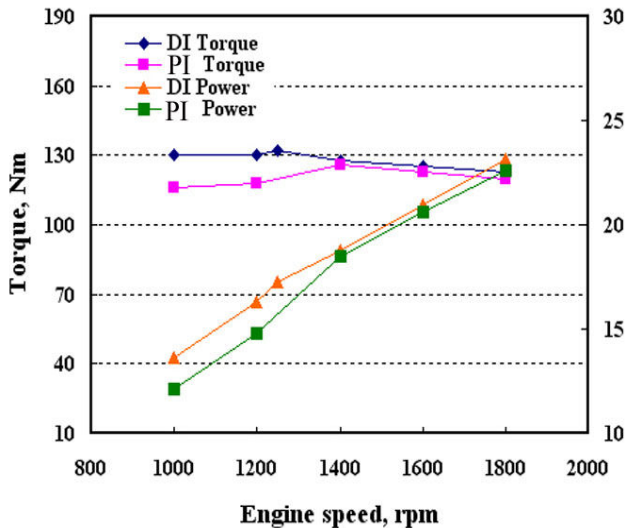


Fig. 3 Comparison of power and torque for each injection method

3. 연구결과 및 고찰

3.1 분사방식에 따른 기관의 성능

Fig. 3은 기관 회전수의 변화에 대한 직접분사식 CNG기관의 최대 토크와 출력을 흡기관 분사식의 경우와 비교하여 나타낸 것이다.

연구용 대형CNG기관의 토크는 기관회전수 1200~1400rpm 영역에서 가장 크고 회전수가 증가할수록 작아지는 경향을 보이며 직접분사식(DI)의 토크가 저 회전 영역에서는 약 10%, 고 회전 영역에서는 5%정도 크게 나타난다. 흡기관 분사식에 비해 직접분사식의 토크가 크게 나타나는 것은 CNG연료를 직접 분사할 경우 흡기관 분사에 비해 체적효율 상승으로 인한 공급열량이 증가하는 효과에 기인한다. 출력 면에서도 직접분사방식과 간접분사방식(PI)의 출력차가 저 회전 영역에서 크게 나타나고 기관의 회전수가 증가할수록 전반적으로 작아지는 경향이다.

Fig. 4는 직접분사식 CNG기관의 실린더 내 압력선도를 흡기관 연속분사와 비교하여 나타낸 것이다.

직접분사식 CNG기관의 실린더 내 압력은 압축과정 중 가스연료를 실린더 내에 직접 분사하는데 다른 압력상승으로 압축초기부터 흡기관 분사식의 경우보다 전반적으로 높은 것을 보인다. 실린더 내 최고압력은 직접분사식이 WOT Full-load 상태에서 약 68bar정도로 가장 높으며 흡기관

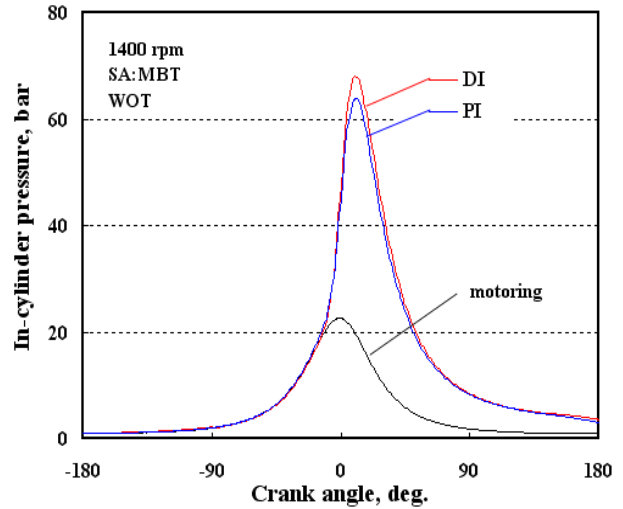


Fig. 4 In-cylinder pressure as a function of each injection method

연속분사가 63bar로 약 5bar정도가 낮다. 직접분사식의 실린더 내 최고압력이 흡기관 분사식에 비해 5bar 이상 높게 나타나는 것은 전술한 바와 같이 CNG 연료를 실린더내로 직접 분사할 경우 흡입공기량의 증가로 공급열량이 증가하는 효과에 기인한다.

Fig. 5는 실린더 내 직접분사식과 흡기관 연속분사식 CNG기관의 전 연소기간을 초기 연소, 주 연소 및 후기 연소기간으로 구분하여 나타낸 것이다. 여기서 초기연소기간, 주연소기간 및 후기 연소기간은 각 질량연소율의 0~5%, 10~95%, 95~100%로 정의된 값이다.

초기연소 기간은 직접분사방식이 12°, 흡기관 연속분사방식이 17°로 직접분사방식이 다소 짧게 나타났다. 이는 CNG연료를 압축과정 중 고압으로 분사함으로써 난류강도 증가에 기인한다고 판단된다. 주연소기간 및 후연소기간은 두 방식 모두 45°정도로 비슷하였으며, 이는 실린더 내에 직접 분사된 연료에 의한 가스유동에 의해서 초기에 급격한 연소를 하고, 시간이 어느 정도 지나 예혼합기가 형성이 되면 가스유동이 약해서 연소가 완만하게 이루어지는 것으로 판단된다.

각각의 분사방식에 대한 전연소기간은 흡기관 연속분사방식이 다소 길게 나타났다. 이는 직접분사방식이 간접분사 방식에 비해 상대적으로 연소가 빠르게 진행됨을 의미하며, 직접분사식의 경우 MBT timing이 BTDC 18°로 흡기관 연속분

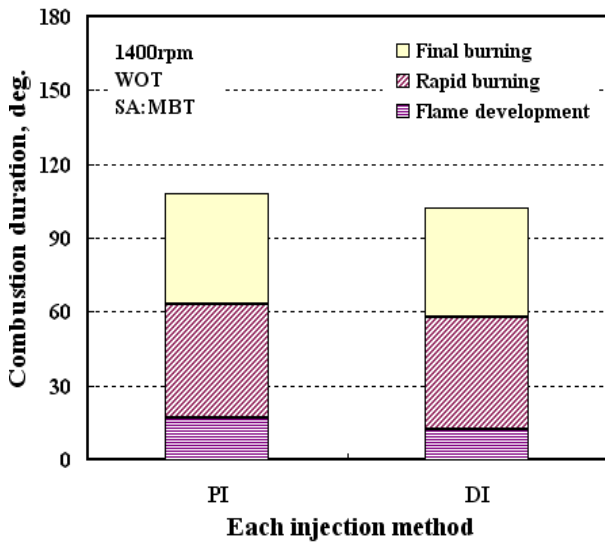


Fig. 5 Combustion duration at each injection method

사방식에 비해 약 3°정도 지각(retard)되는 것으로도 확인할 수 있었다. 이는 CNG연료의 단점인 느린 연소속도를 직접분사에 의해 개선할 수 있음을 보여준다.

3.2 희박한계 확장

Fig. 6은 실험용 CNG기관의 직접분사에 의한 과농 및 희박 한계를 기관회전수와 공기연료당량비(λ)에 따라 나타낸 것이다. 전반적으로 직접분사에 의한 가연한계 확장 효과는 기관의 최고토

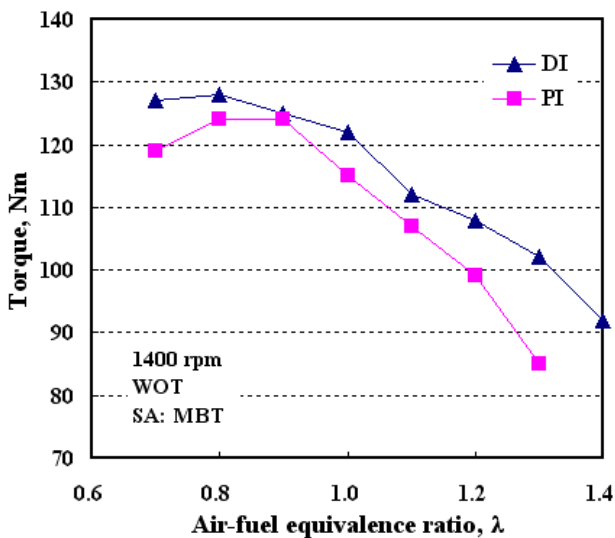


Fig. 7 Comparison of torque as a function of air-fuel equivalence ratio

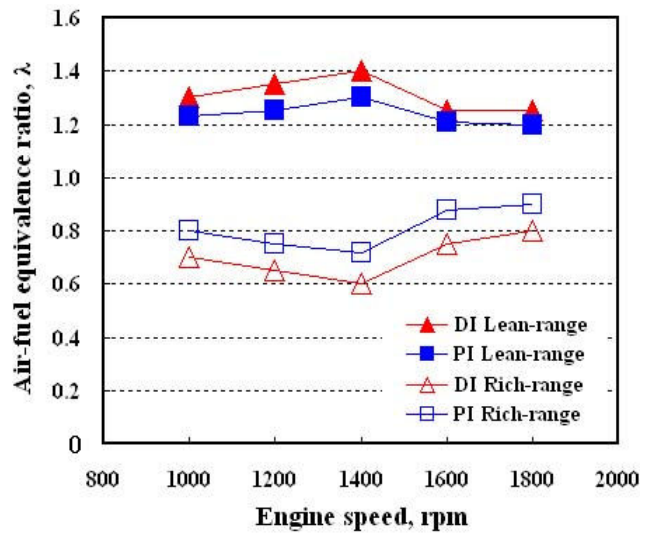


Fig. 6 Comparison of LBL limit as a function of each injection method

크 영역인 회전수 1400rpm영역에서 확장 폭이 가장 크게 나타나며 희박 한계보다 농후 한계시의 확장 폭이 크고 비교적 안정적인 운전 성향을 나타낸다. 반면에 희박해 질수록 확장 한계 폭은 좁아지며 불안정한 운전성향을 나타낸다. 이는 최대토크 영역에서 공기와 CNG의 혼합과 기관의 기계적 특성이 복합적으로 작용한 결과이며 분사 방식에 관계없이 동일한 경향을 보인다. 흡기관 분사식 대비 직접분사식의 가연한계 확장 효과는 약 $\lambda=0.1$ 정도를 보이며 기관의 최대 토크 영역

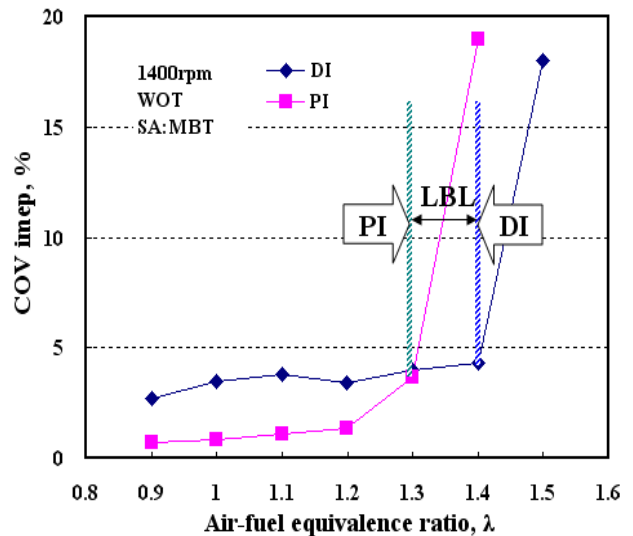


Fig. 8 Coefficient of cycle variation at each air-fuel equivalence ratio

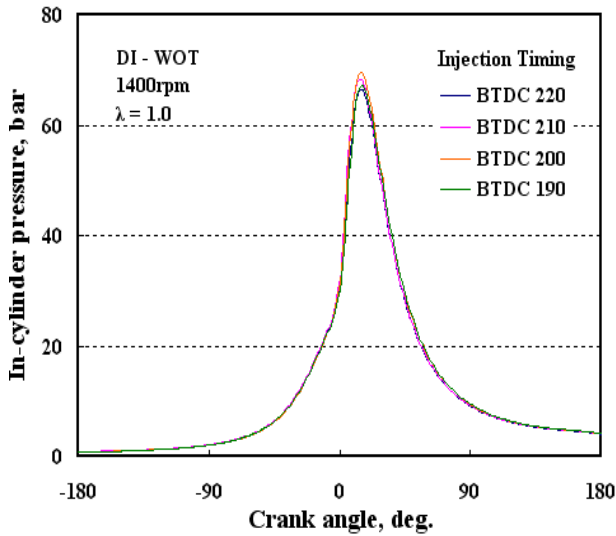


Fig. 9 In-cylinder pressure with variation of injection timing at $\lambda=1.0$

에서 가장 크고 기관 회전수가 증가 할수록 공기와 연료의 혼합시간의 부족으로 인해 가연한계의 폭이 줄어드는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 1400rpm, WOT 상태에서 공기연료당량비(λ)를 변화시킨 경우 기관의 토크변화를 각각의 분사방식에 대해 나타낸 것이다.

토크는 모든 분사방식에서 희박할 수 록 낮아지고 그 낮아지는 폭은 흡기관분사방식이 크다. 흡기관분사방식은 LBL(Learn Burn Limit)영역이 $\lambda=1.3$ 이며 직접분사방식은 $\lambda=1.4$ 로 공기연료당량비를 약 $\lambda=0.1$ 만큼 확장시켰다. 흡기관분사방식의 경우 $\lambda=1.3$ 에서 약 85Nm의 토크를 보였으며 동일 공기연료당량비에서 직접분사식의 경우 102Nm, $\lambda=1.4$ 에서 92Nm로 각각 20%, 8%의 기관출력 상승효과를 볼 수 있었다. 이러한 경향은 희박할 수 록 그 격차가 커지는 경향이다.

Fig. 8은 공기연료당량비(λ)를 변화시킨 경우의 사이클 변동치를 각각의 분사방식에 대해 나타낸 것이다.

사이클 변동치는 두 분사방식모두 최고압력이 나타나는 공연비 $\lambda=0.9$ 부근에서 가장작고 이보다 희박하면 증가하는 경향이다.

직접분사식의 평균 사이클 변동치는 약 3%로서 흡기관분사식의 1%에 비해 다소 크게 나타난다. 직접분사식의 사이클 변동치가 흡기관분사식에 비해 큰 것은 CNG가스를 실린더내로 압축과정 초기에 직접 분사함에 따라 혼합기 형성기간

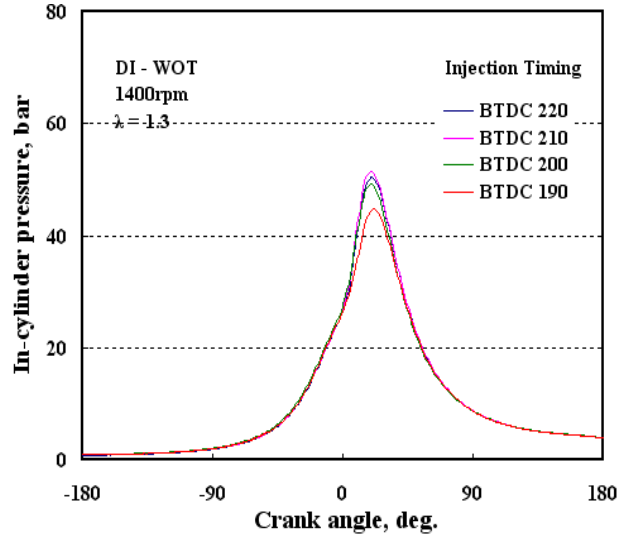


Fig. 10 In-cylinder pressure with variation of injection timing at $\lambda=1.3$

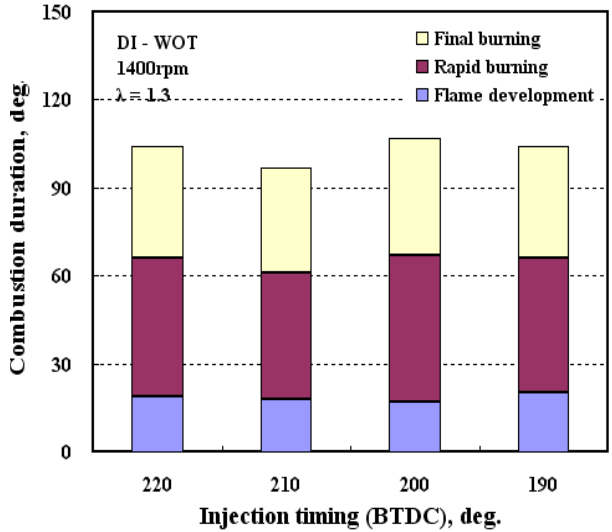


Fig. 11 Combustion duration with variation of injection timing at $\lambda=1.3$

이 짧아지게 되어 사이클마다 혼합기의 불균질성이 증가되는데 기인한다. 그러나 통상의 기관안정성 평가기준치인 5%미만에 해당하므로 직접분사식 CNG기관의 운전성에 큰 문제가 없다고 판단된다.

흡기관분사식의 경우 희박영역인 $\lambda=1.3$ 부근에서 사이클 변동치는 5%가까이 증가하고 그 이상에서는 급격히 증가된다. 이는 희박영역에서 천연가스의 느린 연소속도와 불안정 연소에 기인한다고 판단된다. 그러나 직접분사식의 경우 $\lambda=1.4$ 에서도 사이클 변동치가 5%미만으로 흡기관 연

속분사식에 비해 $\lambda=0.1$ 만큼 희박한계를 확장시키는 효과가 있었다. 이는 희박영역에서의 흡입 공기량 증가에 의한 연소 안정성과 연료를 압축과정 중 분사함으로써 증가한 난류강도에 기인한다고 판단된다.

Fig. 9 및 Fig.10은 1400rpm WOT 상태에서 이론공연비 및 희박혼합기에서의 분사시기 변화에 따른 연소압력을 나타낸다.

이론공연비에서는 분사시기에 따라 큰 변화를 보이지 않지만 BTDC 200deg에서 분사한 경우가 약간 빠른 압력 상승률과 최고 연소 압력을 가진다. 희박조건일 때는 분사시기에 따라 현저한 차이를 보이며 분사시작이 이론공연비에서 보다 진각된 BTDC 210deg에서 최고 연소압력을 가진다. 분사시작이 이보다 진각되거나 지각되면 연소압력이 낮아지며 그 폭은 약 6bar 정도로 희박영역에서 크게 나타났다.

분사시작이 압축과정 초기에 가까워질수록 높은 연소압력을 나타내는 이유는 고압으로 분사된 CNG에 의해 증가한 난류강도의 혼합기가 그대로 흡입됨으로서 연소속도가 빨라질 수 있으며 또한 유동중인 흡입공기에 CNG를 분사하는 것이 CNG와 공기의 혼합에 유리할 수 있고 점화플러그부근의 공기 연료 혼합기 분포가 좋아질 수 있기 때문이라고 생각된다.

Fig. 11은 희박혼합기에서 분사시기 변화에 따른 연소기간을 나타낸 것이다.

최고 연소압력 나타나는 BTDC 210°에서 최소 연소기간을 가지며 분사시기가 이보다 진각되거나 지각되었을 경우 연소기간이 늘어났다. 연소기간의 단축은 희박혼합기에서 기관의 연소안정성을 향상 시켰으며, 이는 직접분사식의 경우 연소압력의 감소 없이 연소기간이 최소가 되는 분사시기가 존재하며 이로 인해 흡기관분사식에 비해 희박한계가 확장되는 결과를 보였다.

4. 결 론

대형 직접분사식 단기통 CNG기관을 개발하고 흡기관분사와 실린더 내 직접분사를 통한 희박한계를 파악하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

두 분사방식 모두 최대토크가 발생하는 영역에서 기관이 가장 안정적이었으며, 이는 다른 기관 회전수에 비해 희박한계 범위가 확장되었다.

흡기관분사식의 경우 희박한계는 $\lambda=1.3$ 이었으며 직접분사식의 경우 $\lambda=1.4$ 로 약 $\lambda=0.1$ 의 희박한계를 확장시켰다. 이는 직접분사식의 경우 성층연소를 통해 희박한 영역에서 출력의 큰 감소 없이 안정된 운전이 가능함을 보여준다.

직접분사식의 경우 이론 공연비 및 희박혼합기에서 분사시기에 따른 연소 특성을 파악하였으며 희박혼합기에서 분사시기 변화에 따른 영향이 크게 나타났다. 희박혼합기에서 최적분사를 통해 급속한 연소가 이루어져 기관의 안정성을 향상시켰으며 이로 인해 희박한계를 보다 확장 시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR project(무·저공해 자동차사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) W. Wang, X. Sun, R. Bata, M. Gautam. N. Clark, G. Palmer, D.Lyons : "A Study of Emissions from CNG and Diesel Fueled Heavy-duty Vehicles", SAE 932826
- (2) Sudhakar Yedla, Ram M. Shrestha, "Multi-Criteria Approach for the Selection of Alternative Options for Environmentally Sustainable Transport System in Delhi", Transportation Research Part A 37, pp.717 ~ 729. 2003.
- (3) A. Unich, R. Beta, D. Lyons : "Natural Gas : A Promising Fuel for I.C. engines", SAE930929.
- (4) D. Vermet, C. Ferrone : "A Review of Natural Gas Engine Development for the Fleet Operator", SAE 942312.
- (5) K. Hara, H. Yonetani, N. Okanishi, I.Fukutani : "CNG Utilization in Small Engines", SAE 940763.
- (6) X. Buyan, M. Furuyama, "The Jet Character of CNG Injector Used in MPI Mode", JSAE Review 19, pp.109
- (7) T. Yamauchi, N. Baba, "Examination of fuel supply system for CNG engine based on multi point injection system", JSAE Review, Volume 19, pp.101~109, 1998