

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.7.513

연소실 매개변수에 따른 천연가스 연소 특성

이성욱* · 송영모* · 백두성†

(2008년 2월 1일 접수, 2008년 3월 18일 수정, 2008년 5월 19일 심사완료)

Parametric Study on Combustion Characteristics of CNG Fuel

Seangwock Lee, Youngmo Song and Doosung Baik

Key Words: CNG(압축천연가스), Pre-mixed Combustion(예혼합연소), Constant Volume Chamber (정적연소기), Swirl(스월), Visualization(가시화), CO(일산화탄소), NOx(질소산화물), HC(탄화수소)

Abstract

A parametric study was made to understand the fundamentals of combustion of CNG fuel in a constant volume chamber in the respect of swirl effect, and the numbers of spark ignition. Optical devices were applied for the visualization of the physics of combustion, and combustion pressures and exhaust emission were measured at several equivalence ratios by controlling speeds of a swirling motor. When the speed of a swirling motor was raised the combustion conditions were improved. The corresponding maximum combustion pressure and heat release rate were increased and the speed of flame propagation was getting faster. This research may contribute to improve the performance of CNG engine and reduce emissions in future.

기호설명

∅ : equivalence ratio (당량비)

1. 서론

자동차 연료로서 천연가스는 풍부한 매장량과 함께 청정성으로 인해 경제성과 저공해성을 모두 갖춘 연료로 인식되고 있다. 특히 옥탄가가 높기 때문에 안티노킹성이 우수하고 넓은 연소 한계, 낮은 미연탄화수소 배출 특성, 지구 온난화 물질인 CO₂ 배출 저감 등 친환경적 연료로서의 특성을 갖추고 있어 향후 세계적으로 강화되는 자동차 배출가스 규제에 능동적으로 대처할 수 있는 가장 현실적인 대체연료로 주목을 받고 있다.⁽¹⁾

또한, 엔진소음 및 진동에 있어 우수한 성능을 가지고 있어 현재 시내버스와 일부 청소차량에 상당수 보급되고 있으며 디젤 차량에 비해 PM과 같은 유해물질 배출이 현저하게 적다는 장점을 지니고 있다.

천연가스를 엔진에 적용하는 기술로는 기존 디젤기관의 실린더에 천연가스와공기의 혼합기를 흡입시키고, 이를 분사된 경유의 분무 화염으로 착화시키는 혼소 방식과 기존 디젤 엔진에 인젝터 대신에 점화 플러그를 장착하여 천연가스를 전기점화에 의한 전소 방식으로 나눌 수 있다. 향후 CNG 차량 기술은 전소 방식이 성능 및 배기측면에서 효과적인 기술로 평가되고 있다.⁽²⁻³⁾ 또한 CNG는 가스 상으로 저장되어 있으므로 연료 탱크의 체적에 비해서 주행거리가 짧은 단점이 있으나, 이를 보완하기 위해서 CNG를 액상으로 보관하는 기술이 최근에 개발되고 있다.⁽⁴⁻⁶⁾

현재, 국내의 CNG 엔진은 가솔린 자동차 엔진에서 카뷰레터 방식에 해당하는 믹서 방식에서

† 책임저자, 회원, 대전대학교 컴퓨터응용기계설공학과
E-mail : dsbaik@daejin.ac.kr
TEL : (031)539-1976 FAX : (031)539-1970
* 국민대학교, 자동차전문대학원

벗어나 고압연료를 대기압으로 감압하여 믹서에서 자연 흡입하는 방식인 TBI 방식으로 밸브 오버랩 기간에 혼합기의 일부가 연소실에서 배기관으로 빠져나감으로써 HC 배출이 증가하는 문제점이 있다. 이에 관한 해결책으로 연료량을 실린더별로 제어하는 MPI(Multi-Point Injection) 방식이 대안으로 제시되었다. 또한 기존의 예혼합 방식의 단점이 펌핑손실 및 응답성 향상을 위하여 직접분사에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽⁷⁻⁹⁾

향후, 천연가스 자동차에 이러한 직접분사 방식을 도입하기 위해서는 안정적인 점화가 매우 중요하며 분사시기를 조절하여 연료와 공기의 혼합기 분포를 최적화함으로써 기관 성능 향상과 배기가스 저감효과를 가져올 수 있다. 그러나 아직까지 천연가스 혼합기 형성과 관련된 고압분사에 따른 분무 형태, 점화 및 연소 특성에 관한 실험 및 연구가 부족한 현실이다.

본 연구에서는 정적연소기내에서 천연가스의 예혼합방식의 연소특성을 개선하기 위해 다양한 당량비에서 모터의 회전속도, 점화원의 개수 등의 변화에 따른 연소압력 및 배출가스를 가시화하고 분석함으로써 천연가스의 연소특성 및 연소향상을 위한 기초자료를 제공하고, 나아가 CNG 기관의 배기가스 저감 및 성능향상에 기여하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 실험기기의 개략도는 Fig. 1과 같다.

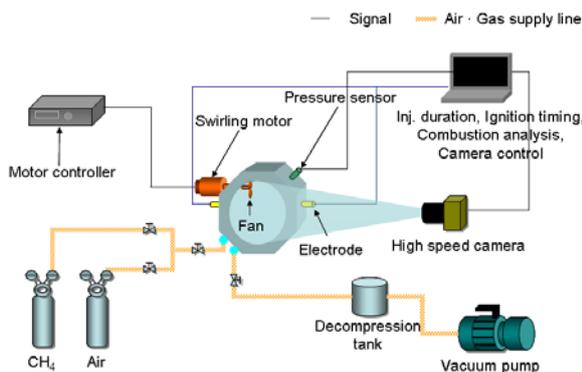


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

CNG 기관의 예혼합방식 연소현상을 가시화하기 위하여 직경은 123mm, 폭은 30~140mm로 조절이 가능한 정적연소기를 제작하였다. 정적연소기의 양측면에는 직경 153mm, 두께 40mm의 강화유리를 설치하고 고속 디지털 카메라를 이용하여 연소과정을 촬영했다. 또한 주변장치로 흡기 밸브, 배기 밸브, 압력 센서, 점화를 위한 스파크 플러그를 장착했고, 연소기내의 잔류가스는 진공 펌프와 감압탱크를 이용하여 제거하였다. 정적연소기의 구성은 실제 기관에서 불가능한 각종 실험 조건(스윙모터 속도, 점화 위치 등)을 자유로이 변경시킬 수 있도록 설계하였다.

Fig. 2와 table 1에 스윙 효과에 따른 연소특성을 파악하기 위한 스윙모터와 그 위치를 나타내고 있다. 또한 연소실 형상은 flat형 연소실 형상을 이용했다 (Fig. 3).

2.2 실험방법

실험실내 온도는 상온 298K 일정하게 하였으며 당량비는 연소실내 분위압에 대한 천연가스와 공기의 분압비를 이용하여 조절하였다. 천연가스와 공기를 정적연소기 내에서 예혼합 시킨 후 스파크플러그에 의해 점화를 시켜 연소될 때의 화염 발달과정을 파악하고자 했다. 촬영에는 고속 디지털 카메라를 사용하였으며 촬영속도는 2000fps로 설정하였다. 또한 압전식(piezoelectric) 압력센서를 이용하여 압력변화를 측정된 뒤 열발생율을 구하여 연소과정을 해석하였다. 연소압력 데이터는 LabVIEW를 기반으로 하는 DAQ(Data Acquisition: DAQ Card-6024E)를 사용하여 수집하였고 천연가스의 점화시기, 촬영시기 등의 모든 신호는 CodeVision AVR C언어를 사용하여 제어하였다. 연소생성물을 분석하기 위해 Horiba의 portable 가스분석기 MEXA-554JKNOx를 사용하였다.

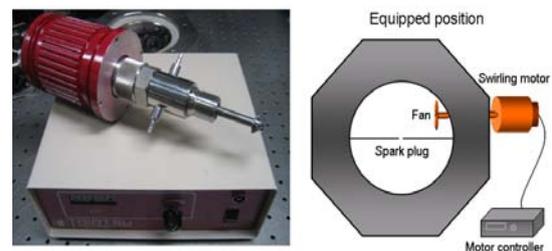


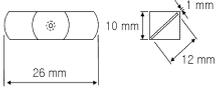
Fig. 2 Swirling motor and equipped position

3. 결과 및 고찰

3.1 스윙효과에 따른 연소 실험결과

실험은 예혼합 방식의 연소 하에서 스윙모터의 회전속도가 각각 200, 600, 1000rpm일 때, 연소실 내 분위기압을 1MPa로 일정하게 하고 당량비를 0.7~1.4까지 0.1씩 조정하였다. Fig. 4는 일정한 당량비 0.9 조건에서 모터 속도변화에 따른 화염 발달 과정을 보여준다. 그림에서 보는 것처럼 스윙모터의 회전속도가 빠를수록 스윙에 의한 난류 강도가 증가함으로써, 화염속도가 빨리 확산되는 양상을 보여주고 있다.

Table 1 Swirling motor specifications

Working pressure range	Vacuum ~ 20 MPa
Max. working temp.	300°C
Motor type	DC brushless motor
Working speed	100 ~ 1000 rpm
Regular torque	35 N · cm
Swirling fan shape	

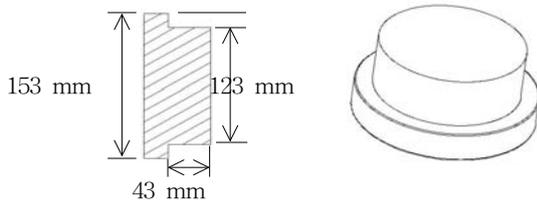


Fig. 3 Flat type combustion chamber cover

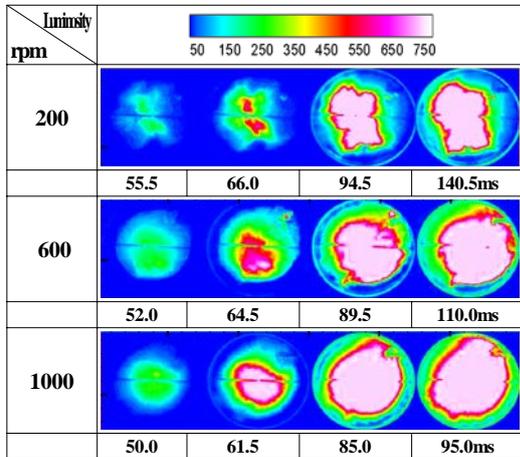


Fig. 4 Combustion images for various swirling motor speeds (at equivalence ratio 0.9)

Fig. 5, 6, 7에 각각의 스윙 강도에 따른 압력선도와 열 발생율을 나타내었다. 스윙 모터의 회전속도가 증가함에 따라 최대 연소 압력 및 열 발생율이 높아지고, 연소 속도 또한 빨라짐을 알 수 있다. 이는 회전속도가 증가할수록 스윙의 영향이 커져서 연료와 공기가 균일한 혼합 상태로 연소 조건이 향상된 것으로 판단된다.

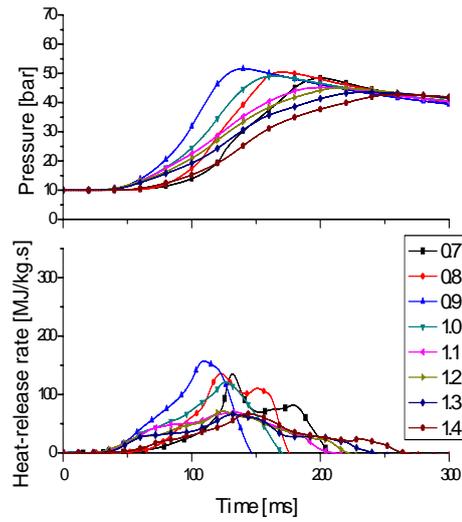


Fig. 5 Combustion pressure and heat-release rate at various equivalence ratios (at swirling motor speed 200 rpm)

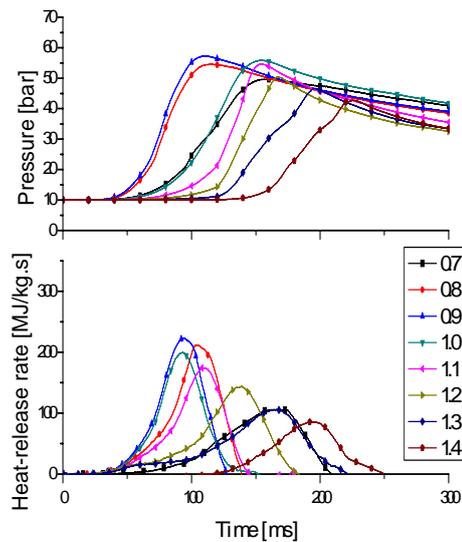


Fig. 6 Combustion pressure and heat-release rate at various equivalence ratio (at swirling motor speed 600 rpm)

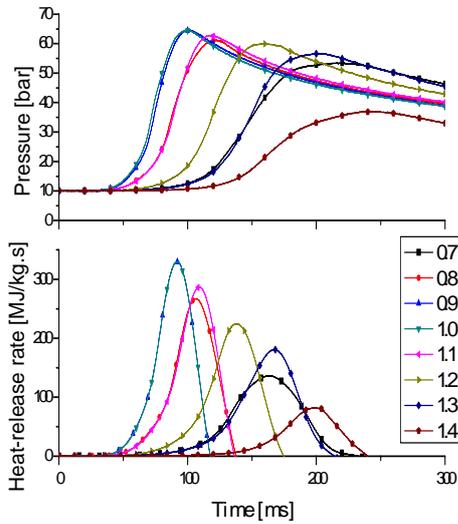


Fig. 7 Combustion pressure and heat-release rate at various equivalence ratio (at swirling motor speed 1000 rpm)

각각 스윙 모터의 회전속도 200rpm에서는 당량비가 0.9인 경우, 600rpm에서는 당량비 0.9인 경우, 1000rpm에서는 당량비가 1.0일 경우 가장 높은 압력과 큰 열발생을, 빠른 연소가 이루어졌다. 그리고 각각 당량비를 0.7로 설정하였을 경우, 희박한 조건으로 인해 화염전파도 느리고 압력 또한 낮게 나타남을 알 수 있었으나, 스윙 강도가 클수록 이러한 차이는 크게 향상되었고 당량비가 높을수록 스윙 모터로 인한 효과가 큼을 알 수 있었다.

스윙 강도에 따른 각 조건에서의 배출가스 특성을 Fig. 8, 9, 10에 나타내었다. Fig. 8에서 당량비가 높을 때 불완전 연소에 따른 CO 생성량이 높아지고 스윙이 강해질수록 CO가 줄어들음을 확인할 수 있었다. Fig. 9에서 NOx의 경우 연소실 온도에 민감하여 특히 당량비 0.9~1.0의 조건에서 많이 배출됨을 알 수 있었고, 스윙에 의한 난류강도가 증가해서 연소가 더 활발히 일어나므로 NOx 배출량이 증가함을 알 수 있었으나, 당량비 1.2 이후부터는 불완전 연소로 인해 스윙 강도의 차이에 의한 영향은 미미했다. Fig. 10에서는 당량비가 농후할수록 HC의 발생량이 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 이 또한 스윙이 강해질수록 미연소에 따른 HC 발생량이 줄어드는 것을 알 수 있다.

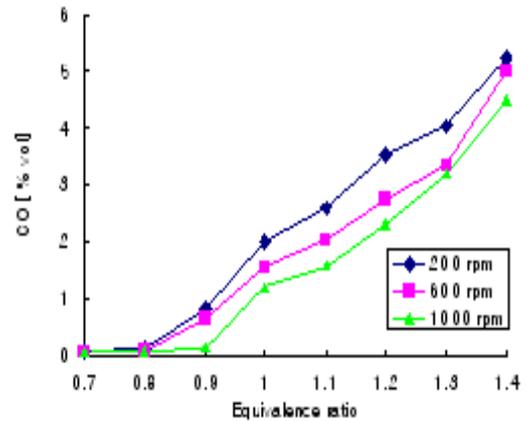


Fig. 8 CO emission for equivalence ratio (at various swirling motor speed)

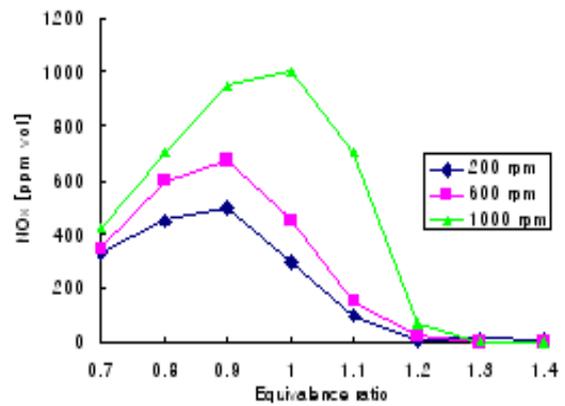


Fig. 9 NOx emission for equivalence ratio (at various swirling motor speed)

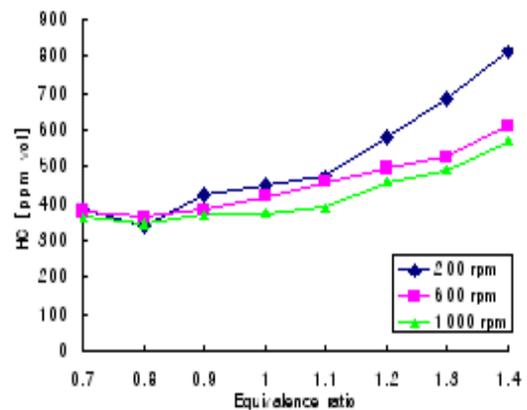


Fig. 10 HC emission for equivalence ratio (at various swirling motor speed)

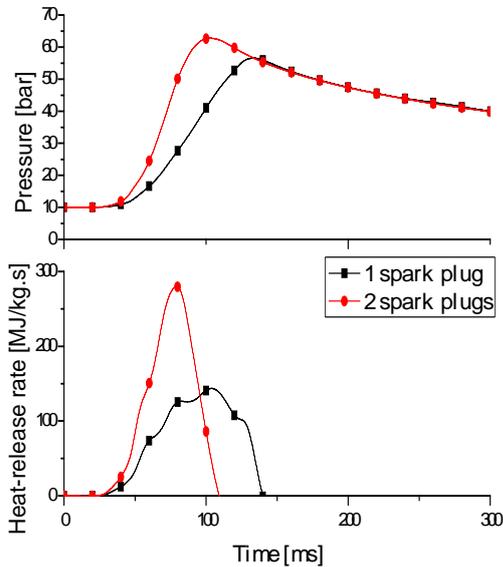


Fig. 11 Combustion pressure and heat-release rate for various numbers of spark plug ($\phi = 0.9$, 1000rpm)

3.2 점화원의 개수에 따른 연소 실험결과

스윙모터의 회전속도를 1000rpm으로 고정하고, 연소실내 분위기압은 1MPa, 당량비 0.9인 조건에서 연소실 벽면에 위치한 스파크 플러그를 1점에서 점화시켰을 때와 2점에서 동시에 점화시켰을 때의 연소압력을 측정하였다. Fig. 11에서 2개의 스파크 플러그를 동시에 점화 시켰을 때 최대 연소 압력과 열발생율이 1개의 스파크 플러그를 이용했을 때보다 더 높음을 알 수 있다. 이는 2점 점화의 경우 화염전파 거리가 1점 점화에 비해 1/2로 줄어들 수 있으므로 그만큼 연소 조건이 향상되었기 때문이다.

4. 결론

천연가스의 연소특성에 대해서 정적연소기를 사용하여 스윙모터의 회전속도, 연소실 형상과 점화원의 개수를 변화시키며, 압력 및 화염의 가시화 계측으로부터 다음의 견해를 얻었다.

(1) 예혼합방식의 천연가스 연소 실험 결과, 스윙모터의 회전속도가 증가함에 따라 혼합기 형성이 개선되어 최대 연소 압력과 열발생율이 커지고, 화염전파 속도 또한 빨라짐을 알 수 있었다.

또한 당량비에 따른 연소의 차이를 개선하는 효과도 확인하였다.

(2) 스파크 플러그의 수가 많을수록 다점점화에 의해 화염전파 거리가 상대적으로 짧아지므로 최대 연소 압력, 화염전파 속도 및 열발생율이 향상됨을 확인하였다.

(3) 스윙모터의 회전속도가 증가함에 따라 CO와 HC의 발생량은 줄어들었으나, 반대로 NO_x의 양은 증가하여 배출가스의 trade-off 관계를 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Han, Y. C., Kim, K. B. and Oh, Y. S., 2000, "A Study on Performance and Characteristic of Exhaust Emission in CNG Dedicated Engine," *Transactions of KSAE*, Vol.8, No.3, pp.12~17.
- (2) Andrea Emilio Catania, Stefano D'Ambrosio, Antonio Mittica, Ezio Spessa, 2000, "Performance Analysis and Comparison of a Multivalve SI Engine Running on either Gasoline or CNG," *SAE*, 2000-05-0086.
- (3) Kim, B. S., Shioji, M. park, C. G. 2000, "Improving Performance and Emissions in a Diesel Engine Dual Fueled with Compressed Natural Gas," *SAE*, 2000-03-0029.
- (4) Lee, W. S., Cho, I. E., Lee, S. W., Kang, H. I. and Han, Y. C. 2006, "A Study on Combustion Characteristics of CNG Fuel," *Fall Conference Proceedings, KSAE*, pp.589~595.
- (5) Deanna E. Wang, "Direst Injection Compressed Natural Gas Combustion and Visualization," *SAE* 2002-01-1838.
- (6) Talus Park, "Operation of a Compressed Ignition Engine with a HEUI Injection System on Natural Gas with Diesel Pilot Injection," *SAE* 1999-01-3522.
- (7) Kichiro Kato, "Development of Engine for Natural Gas Vehicle," *SAE* 1999-01-0574.
- (8) Czeminski, J., "Sequential Multipoint Trans-Valve Injection for Natural Gas Engines," *SAE* 1999-01-0565.
- (9) Umiuerski, M. "Fuel Efgcient Natural Gas Engine with Common-Rail Micro-Pilot Injection," *SAE* 2000-01-3080.