

직접분사 CNG 연료의 분사특성에 관한 연구

이성욱^{1†} · T. Rogers² · P. Petersen³ · 김인구⁴ · 강호인⁵

¹국민대학교 자동차공학과, ²RMIT 대학교 항공우주, 기계 및 제조 공학과, ³RMIT 대학교 미디어 및 통신학과,
⁴국민대학교 자동차공학전문대학원, ⁵대림대학교 자동차공학과

A Study on the Injection Characteristics of Direct Injection CNG Fuel

S. W. LEE^{1†}, T. ROGERS², P. PETERSEN³, I. G. KIM⁴, H. I. KANG⁵

¹Prof, Department of Automotive Engineering, Kookmin Univ., 77, Jeongneung-ro, Sungbuk-gu, Seoul, Korea

²School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing ENG, RMIT University, Australia

³School of Media and Communication, RMIT University, Australia

⁴Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin Univ., 77, Jeongneung-ro, Sungbuk-gu, Seoul, Korea

⁵Prof, Department of Automotive Engineering, Daelim Univ, 526-7 Bisan-dong, Dongan-gu, Anyang-si, Gyunggi-do, Korea

Abstract >> Two types of fuel supply method are used in CNG vehicles. One is premixed ignition and the other is gas-jet ignition. In premixed ignition, the fuel is introduced with intake air so that homogeneous air-fuel mixture may form. The ignitability of this method depends on the global equivalence ratio. In gas-jet ignition, CNG is introduced directly into the engine combustion chamber. The overall mixture is stratified by retarded fuel injection. In this study, a visualization technique was employed to obtain fundamental properties regarding overall mixture formation of direct injected CNG fuel inside a constant volume chamber. Jet angles, penetrations and projected jet area with respect to ambient pressure are investigated. The penetration decreases apparently and the time reaching the CVC wall was delayed as the chamber pressure increases. This is caused by the higher inertia of the fluid elements that the injected fluid must accelerate and push aside. It is same to liquid fuel such as diesel and gasoline, but this phenomenon is far more prominent for the gaseous fuel.

Key words : CNG(압축천연가스), CVC(정적연소기), DI(직접분사), Visualization(가시화), Schlieren Method

1. 서 론

개발도상국에서의 자동차 및 화석연료의 수요가 급증함에 따라 석유자원의 고갈과 대기환경 및 이상 기후 발생이라는 환경적인 문제에 직면해 있다. 이에 연료소비를 줄여 유해배출물 및 온실가스 배출량을 줄일수 있는 친환경 엔진의 필요성이 대두되고 있는

실정이다. 특히 온실가스 배출에 대한 규제가 점차 강화되고 있어 수송 분야에서 탄소를 적게 배출하는 대체연료의 보급은 크게 증가할 것으로 예상된다.¹⁾

현재까지 제안된 다양한 대체연료 중 압축천연가스(Compressed Natural Gas: CNG)는 가솔린이나 경유 등 화석연료보다 적은 탄소를 포함하고 있기 때문에 CO₂배출량 면에서 보다 유리하다고 알려져 있다. 연소실 내에 동일한 물수의 연료가 공급되었을 때, 이론적인 CO₂배출량은 가솔린을 사용하는 것 보다 CNG 사용 시 화학양론적인 조건에서 약 23% 적

[†]Corresponding author : energy@kookmin.ac.kr

[접수일 : 2014.03.28 수정일 : 2014.12.04 게재확정일 : 2014.12.31]

Copyright © 2014 KHNES

기 때문이며, 이는 CNG의 가솔린 대비 높은 H/C 비에 기인한다.²⁾

CNG엔진의 연소방식은 흡기포트에 연료를 분사한 후 스파크 플러그를 통해 점화되는 예혼합 점화방식(PFI)과 연소실 내 연료를 직접분사 후 스파크 점화를 통해 화염핵을 생성하고, 생성된 화염핵에 다시 연료를 분사하는 gas-jet 방식의 두 종류로 나누어 볼 수 있다.³⁾ 최근에는 높은 압축비와 희박연소를 통해 CO₂배출량을 더욱 줄이고 연소효율을 증가시키기 위해 spray-guided와 wall-guided의 분사전략이 연구되고 있다.^{4,5)} 또한 CNG 희박연소방식은

비교적 높은 연소효율과 낮은 질소산화물(NO_x)발생이라는 이점 때문에 가스엔진에 적합하지만 gas-jet을 적용할 경우 CO 및 NO_x 발생량을 증가시키지 않으면서 HC배출량이 감소함을 확인할 수 있었으며⁹⁻¹³⁾ 이에 따라 본 연구에서는 CNG연료를 연소실 챔버 내에 직접분사하면서 가시화촬영이 가능한 시스템을 구축하고 spray-guided와 wall-guided를 모사하여 CNG 연료직접분사방식 적용에 따른 분사특성을 파악하고자 한다.

2. 실험 장치 및 절차

직접분사 CNG연료의 분사특성을 가시화하기 위해 보어96mm, 폭39mm 갖는 연소실내에서 CNG 인젝터를 이용하여 연료를 분사하였으며 초고속 카메라로 이를 가시화하였다. 실험 조건은 Table 1에 명시하였다. 연료분사 전 연소실의 내부를 고압 상태로 만들기 위해 표준대기온도인 20°C의 질소와 산소를 충전하였으며, Photon社의 초고속카메라(FASTCAM Ultima 512)로 분사속도20000 & 30000fps(초당프레임)의 연료분사형상(광원: LED lamp)을 각각 시각적으로 분석하였다. Fig. 1은 연료의 분사특성을 파악하기 위한 가시화시스템의 전체적인 개략도를 보여주고 있다. CNG는 8.5MPa의 분사압력으로 분사하

Table 1 Experimental conditions

CVC (mm)	96 × 39 (Bore × Width)
Volume (cm ³)	282
Fuel Delivery	Direct injection
Injection pressure (MPa)	8.5
Injection duration (ms)	2.0 ~ 4.5
Injector	0.19 mm, 6 hole
Fuels (vol.%)	CNG (CH ₄ ≥ 90%)
P _{ambient}	Atmospheric condition 0.5 MPa (P _{inj} /P _a =14.3) 1 MPa (P _{inj} /P _a =7.8)
T _{ambient}	20°C

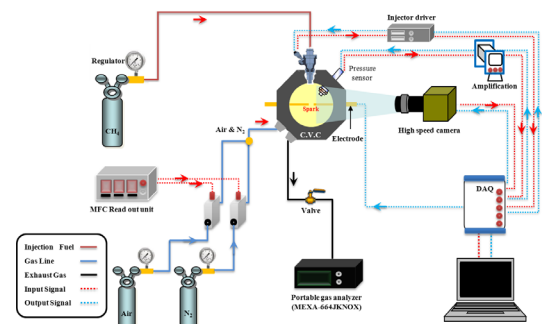


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus with a constant volume chamber

였으며, 연소실내 분위기 압력은 0, 0.5, 1MPa로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 분사 압력이 8.5MPa 일 때 분위기 압력 (gage) 0, 0.5, 1 MPa의 조건에서 spray-guided를 모사한 CNG 자유분사를 슈리렌 기법으로 가시화한 이미지를 나타내며, Fig. 3은 이들 이미지로부터 추정된 관통거리를 나타내고 있다.

분사가 시작하는 시점부터 3.55ms 까지 시간 순으로 나타내고 있으며, 연소실내 압력이 증가함에 따라 관통력이 감소하고 연료가 벽면에 도달하는 시간이 상당히 지연되는 것을 분사 가시화 실험을 통해 알 수 있었다. 분사된 CNG가 가속화되고 옆으로 밀리

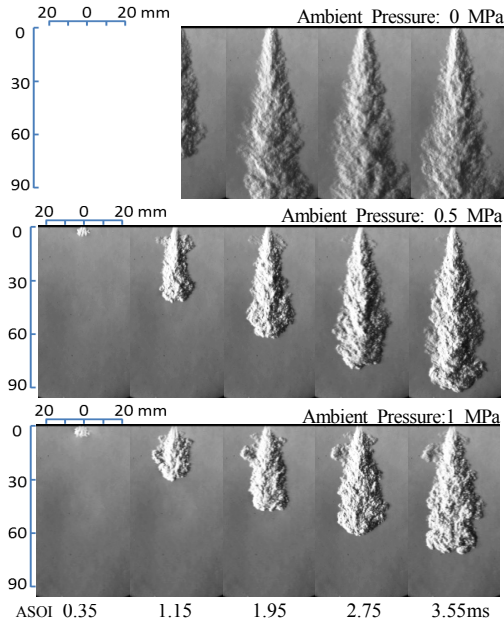


Fig. 2 Schlieren images of the transient CNG free jet under different ambient pressure (simulated spray-guide)

는 것은 유체의 높은 관성에 원인이 있다.¹³⁾ 이 현상은 디젤 및 가솔린 등의 액상연료의 경향과 흡사하나 가스연료에서 더 확연하게 나타난다. 관통속도, 각도 및 CNG의 투영면적 그래프를 Fig. 4, 5에 나타내었고, 이를 통해 주위 압력이 증가하면 연료의 관통속도가 크게 감소하는 경향이 확연하게 나타나는 것을 확인하였다. 차원해석에는 압축성의 비정상 jet 관통거리 Z_t 를 사용하였다.¹⁴⁾ 즉 비정상 jet의 관통거리 Z_t 는 $(\dot{M}_n/\rho)^{1/4}$ 에 비례하며 챔버밀도 ρ 는 이상기체방정식의 $P_{ambient}$ 와 관련이 있다. 균일한 종료조

$$Z_t = \Gamma \left(\frac{\dot{M}_n}{\rho} \right)^{\frac{1}{4}} t^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

\dot{M}_n : Momentum flux through the orifice

ρ : Chamber density

t : Time elapsed from the start of injection

Γ : The scaling constant

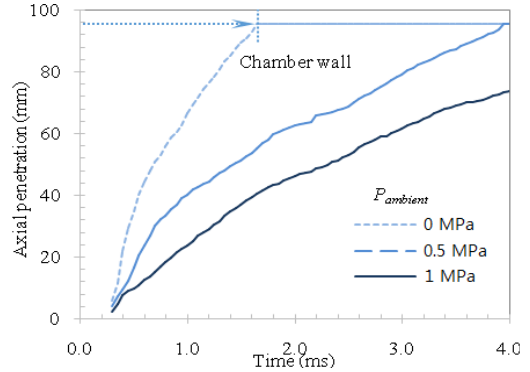


Fig. 3 CNG free-jet penetration (spray-guided)

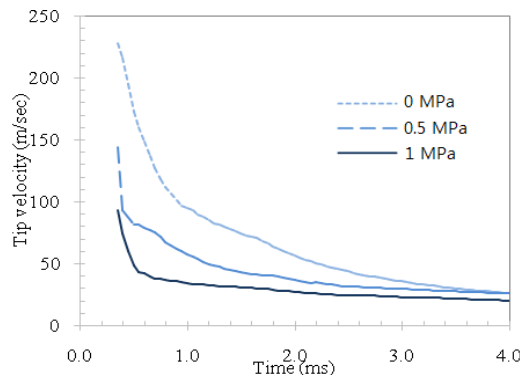


Fig. 4 CNG free-jet tip velocity (simulated spray-guide)

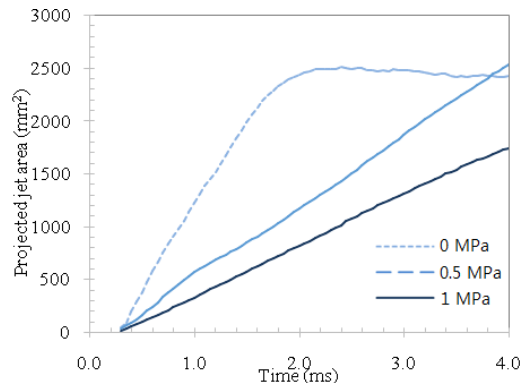


Fig. 5 CNG free-jet projected area (simulated spray-guide)

건으로 가정하는 경우 M_n 은 노즐의 질량유량 및 출구속도 v 의 결과이며 M_n 과 v 모두 $P_{injection}$ 에 비례하고 아음속 조건의 $P_{ambient}$ 에 반비례 한다. 요약하면 \dot{M}_n/ρ 은 아음속의 두 $P_{injection}/P_{ambient}$ 의 비율과 임계 유동에 비례하게 된다.¹⁴⁾ Fig. 4, 5를 통해 CNG 자유

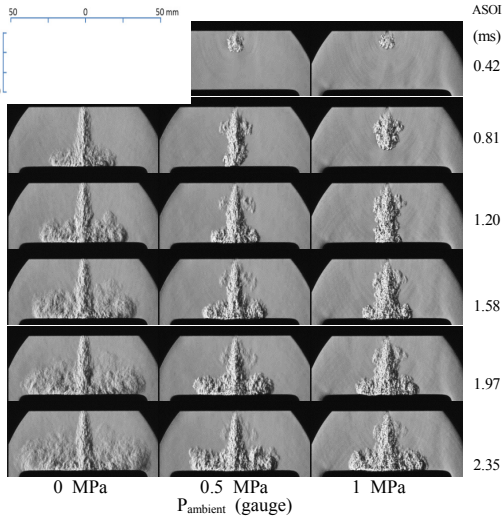


Fig. 6 Schlieren images of the transient CNG impingement jet under different ambient pressure (simulated wall-guide)

분사 시 말단속도는 주위 압력이 증가함에 따라 크게 감소하는 경향을 보여준다. 특히 연소실 내 압력이 대기압과 동일한 조건에서 SOI(Start of injection) 직후의 말단속도는 1MPa 조건대비 두 배 이상 빠르며 이는 높은 분위기압력 상태에서 CNG연료를 분사할 경우 조금 더 큰 코어와 작은 관통력을 가지고 있는 것을 의미한다. 또한 1MPa의 높은 분위기압력에서 CNG연료는 벽면에 충돌할만한 관통력이 없는 것으로 판단된다. 분사 영역은 1 MPa의 분위기압력 조건보다 대기압 조건에서 약 4 배 더 큰 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 8.5MPa의 분사압력과 0, 0.5, 1 MPa의 분위기압력에서의 CNG 충돌분사 슐리렌 이미지를 보여준다. 충돌판은 팁으로부터 30mm지점에 위치하도록 설정하였다.

Fig. 7, 8은 사진으로부터 반경방향 관통거리와 투영면적 결과를 보여준다. 대기압상태에서 분사된 연료는 수직으로 관통하여 SOI 0.42ms후에 충돌판에 도달하였다. 분위기압력이 0.5MPa와 1MPa로 증가하면, 분사된 가스와 충돌판이 충돌하는 시간이 약 0.3ms 정도씩 지연되는 것을 확인할 수 있다. 또한 분무 중심선의 양쪽에 있는 두 개의 큰 소용돌이가 반대방향

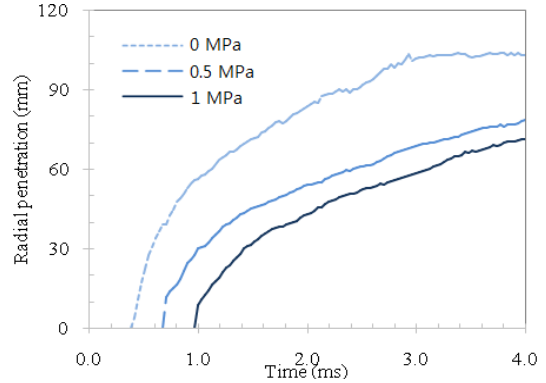


Fig. 7 CNG Radial Penetration

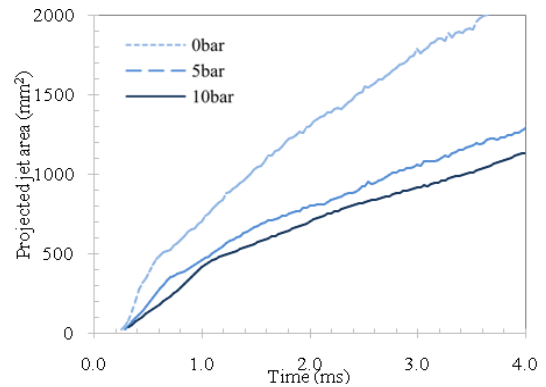


Fig. 8 CNG in chamber projected area (simulated wall-guide)

으로 회전하고 있고 분위기압력이 증가함에 따라 관통반경과 투영면적이 확실히 감소한 것을 보여준다.

4. 결 론

직접분사엔진에 대한 혼합물 형성의 최적화를 위한 CNG연료의 분사 패턴 및 CNG연료의 분사특성을 정적연소기에서 조사하였다. 분사패턴의 특성을 영상으로 시각화하여 관찰하였고 CNG free-jet의 슐리렌 이미지는 8.5MPa의 분사압력과 각각 다른 분위기압력에서 촬영하였다. 또한 시간관점에서 축 방향과 반경방향으로 관통거리, 말단속도와 같은 분사 형상을 정량적으로 확인하였으며, 이와 같은 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 챔버 내 압력이 증가함에 따라 분사된 연료의 관통력이 감소하고 연료가 챔버 벽면에 도달하는 시간이 지연됨을 확인 하였으며, 이 현상은 디젤 및 가솔린 등의 액상연료에 비해 가스연료인 CNG 에서 더욱 확연하게 나타남을 확인하였다.
- 2) 챔버압력이 대기압과 같은 조건에서의 SOI 직후 연료 말단속도는 1MPa 조건대비 두 배 이상 빠른 것을 확인하였으며, 1MPa조건에서의 분사된 연료는 챔버에 충돌할만한 관통력이 없다는 것을 확인하였다.
- 3) 충돌판을 설치한 상태인 분사의 경우 대기압상태에서 SOI 0.42ms 후에 충돌하였으며, 0.5MPa 와 1MPa의 경우 충돌까지 소요되는 시간이 약 0.3ms 정도씩 지연되는 것을 확인하였다. 또한 분위기 압력이 증가할수록 관통반경과 투영면적이 감소한 것을 확인하였다.

이상 본 연구를 통해 CNG 직접분사엔진을 이해하고 jet 및 연소를 개선하는데 도움을 줄 것으로 기대된다.

References

1. H. M. Cho and B. Q. He, Spark ignition natural gas engines, *Energy Conversion and management*, 48 (2007), pp. 608-618.
2. R. Tilagone, S. Venturi and G. Monnier, Natural gas - an environmentally friendly fuel for urban vehicles: the SMART demonstrator approach, *Oil & Gas Science and Technology*, 61 (2006), pp. 155-164.
3. M. Ali, Y. Kidoguchi, Y. Oka and T. Kaida, Improvement of combustion of CNG engine using CNG direct injection and gas-jet ignition method, *SAE Paper No. 2011-01-1994* (2011).
4. S. Taniguchi, Y. Tsukasaki and A. Yasuda, Study of compressed natural gas injection engine, *FISITA paper No. F2006P089* (2006).
5. M. Baratta, A. E. Catania, E. Spessa, L. Herrmann and K. Roessler, Multi-dimensional modelling of direct natural gas injection and mixture formation in a stratified-charge SI engine with centrally mounted injector, *SAE Int. J. of Engines* 1 (2008), pp. 607-626.
6. Z. Huang, S. Shiga, T. Ueda, H. Nakamura, T. Ishima, T. Obokata, M. Tsue and M. Kono, Combustion characteristics of natural-gas direct-injection combustion under various fuel injection timings, *Proc. of the IMechE*, 217(5) (2003), pp. 393-401.
7. Y. Kidoguchi, S. Masaaki, U. Hiromitsu and K. Miwa, A fundamental study on improvement of ignitability and combustion stability of CNG jet, *Trans. of JSAE*, 36 (1), pp. 15-20.
8. R. D. Nine, N. N. Clark, B. E. Mace and L. ElGazzar, Hydrocarbon speciation of a lean burn spark ignited engine, *SAE Paper No. 972971* (1997).
9. E. W. Deanna and C. W. Harry, Direct injection compressed natural gas combustion and visualization, *SAE Paper No. 2000-01-1838* (2000).
10. S. Riccardo, W. Thomas, M. Nicholas, S. Victor and K. Sebastian, Mixture formation in direct injection hydrogen engines: CFD and optical analysis of single and multi-hole nozzles, *SAE Paper No. 2011-24-0096* (2011).
11. S. Turns, *An Introduction to Combustion*. 2nd ed. McGraw-Hill. New York (1988).
12. L. Johansen, E. Siemes, and P. Dahlander, Analysis of transient compressible gas jets using high speed Schlieren imaging, *SAE Paper No. 2013-01-0871* (2013).
13. S. W. Lee, D. S. Baik, T. Rogers and P. Petersen, Characteristics of CNG fuel engine, *Advanced Science and Technology Letters Vol.33* (Bioscience and Medical Research), pp.29-32, (2013)
14. Benjamin R. Petersen, *Transient High - Pressure Hydrogen Jet Measurement*, University of Wisconsin - Madison, pp.16, (2006)