



0.8MPa급 CNG 인젝터 노즐의 가스 분사 특성에 관한 실험적 연구

남 충 우¹⁾ · 이 호 길^{*1)} · 김 재 광²⁾ · 김 재 경²⁾ · 이 준 혁²⁾ · 전 완 재²⁾

자동차부품연구원 그린카파워시스템연구본부 · 모토닉 기술연구소²⁾

Experimental Study on Gas Jet Characteristics for 0.8MPa CNG Injector Nozzle

Chungwoo Nam¹⁾ · Hokil Lee^{*1)} · Jaekwang Kim²⁾ · Jaekyoung Kim²⁾ · Junhyuk Lee²⁾ · Wanjae Jeon²⁾

¹⁾Green Car Power System R&D Division, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 31214, Korea

²⁾R&D Center, Motonic Corporation, 530 Dalseo-daero, Dalseo-gu, Daegu 42702, Korea

(Received 25 January 2019 / Revised 13 March 2019 / Accepted 15 March 2019)

Abstract : With the worsening energy crisis and environment pollution, a higher-efficiency internal combustion engine with lower emissions is crucial for engine manufacturers. Gas fuels like natural gas and hydrogen are currently regarded as promising alternative fuels whose use can resolve both the aforementioned problems, and there industry and engine research centers are exerting much effort to make these gas fuels viable for use in engines. This work was motivated by the desire to gain further insights into the characteristics of the low-pressure gas jet. Experimental gas jet investigation was successfully conducted through the schlieren technique, using a solenoid-valve injector with a maximum injection pressure of 0.8 MPa(absolute pressure) driven by a standard injector driver. Its supply voltage is 12 V, and its opening time, 1.4 ms. The injection pressure has a significant effect on the jet penetration. Also, a higher injection pressure leads to longer jet tip penetration. A high injection pressure leads to a higher jet momentum and higher turbulence energy, which means that the fuel-air mixing rate can be increased by increasing the injection pressure. The research results will be used to support the authors' ongoing low-pressure injection natural gas engine project.

Key words : CNG(압축천연가스), Injector(인젝터), Spray penetration length(분무도달거리), Spray angle(분무각도), Schlieren(설리렌)

1. 서 론

유럽 및 신흥국을 중심으로 온실가스 저감에 유리한 CNG차량 개발 및 양산이 이루어지고 있으며, 운행노선이 자유로운 승용 CNG자동차는 충전 인프라 제약을 극복하기 위하여 가솔린 연료시스템에 별도의 CNG 연료 시스템을 장착하여 Bi-fuel 형식으로 운용 되고 있다. 한편 최신의 가솔린 엔진시스템은 강화되는 연비규제에 대응하기 위하여 Turbo GDI시스템을 대부분 장착하고 있으며, 따라서 CNG 연료분사시스템도 과급기 장착으로 인한 흡기 압력 상승에 따른 직진성 향상과 흡기 온도 상승에 따른 연료밀도 저하에 대응하기 위하여 CNG 인젝터 공급압력의 상승이 요구된다. 일반적으로 Turbo GDI/CNG Bi-fuel 시스템에서 가솔린 연료는 실린더 내에 직

분사 하여 연소시키며, CNG 연료는 흡기포트에 분사되어 과급된 흡입공기와 함께 실린더 내로 공급되어 연소가 이루어진다. 따라서 기존 0.2~0.4 MPa로 공급되는 인젝터의 문제점을 극복하기 위하여 공급압력을 0.7~0.8 MPa로 증대시키고 있으며, 이를 통하여 과급압에 따른 CNG 연료의 유량 및 직진성을 향상시키는 것으로 알려져 있다.¹⁻³⁾ CNG 연료는 기상 연료로써 기존 액체연료의 흡기포트 분사에 따른 흡기포트 벽면에 연료가 달라붙는 현상(Wall-wetting)이 없으며, 높은 운동량에 의해 공기와 연료의 혼합물 형성에 효율적이지만, 액상연료와의 물리적인 특성 차이로 인하여 기존의 액체 인젝터와는 다른 구조를 가진다. 또한 기상 연료의 온도에 따른 낮은 밀도 및 부족한 유량 개선을 위해 고압으로 분사하면 과소팽창 제트(Under expansion jet)가 발생되고 이에 따른 유량

*Corresponding author, E-mail: hklee@katech.re.kr

^{*}This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

감소 및 소음 증대 등을 동반할 수 있다. 따라서 인젝터 노즐의 설계는 연료분사형태 및 혼합기형성과 연소 및 배출가스에도 영향을 미치는 매우 중요한 인자 중 하나이다.

과소팽창 제트는 인젝터 노즐 내부와 출구의 높은 압력비로 인해 노즐 출구에서 유동은 초음속으로 가속되면서 팽창파(Expansion wave)를 발생시키고 CNG 연료와 같은 압축성 유체에서의 팽창파는 유동 경계면에서 압축파(Compression wave)로 반사 된다.^{4,10)} 이러한 가스 제트의 영향은 흡기포트내에서 공기와 연료의 혼합기 형성에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 작동압력 0.8 MPa급의 CNG 인젝터를 설계·제작하였으며, 쉘리렌 기법을 이용하여, CNG 인젝터의 공급 압력 증대에 따른 분무도달 거리 및 분위기 압력에 따른 CNG 인젝터의 분무각도 비교, 과소팽창 제트 억제 설계가 반영된 인젝터와 과소팽창 제트가 활성화된 인젝터의 분무 특성을 살펴보았다.

2. 실험 장치 구성 및 방법

2.1 실험 장치 구성

본 연구는 CNG 인젝터의 분무특성 가시화 실험을 진행하기 위해서 압력조절 밸브, 유량계, 온도센서, 압력센서를 인젝터 전단의 공급라인에 설치하였다. 쉘리렌 가시화 장치는 광굴절의 원리를 이용하여 유동체의 유동패턴의 가시화를 진행하였다. 공급기체는 CH₄(순도 99.9%) 가스를 인젝터에 공급하였으며, 분위기 압력을 형성하기 위해서는 챔버에 N₂ 가스를 통해 목표 분위기 압력을 유지하였다. 인젝터 분사에 따른 챔버 내부 압력 상승을 막

Table 1 Specifications of experiment injectors

Item	A sample	B sample
Supply pressure (MPa)	0.8	0.8
Plunger weight (g)	1	3.06
Outlet pressure range (Ω)	8	8.5
Number of coil (-)	356	412
Plunger size (Φ×mm)	6.2×11.5	8×11.9
Max. Flow (L/min)	150@0.8 MPa	150@0.8 MPa

기 위해서 릴리프 밸브 및 역압레귤레이터를 장착하여 해당 분위기 압력을 유지하도록 하였다. 잔압에 따른 벤트는 별도의 송풍기(진공펌프)를 연결하여 챔버 내부의 가스를 대기로 방출시킬 수 있도록 제작하였다. 초고속 카메라는 Phantom V2512를 사용하였으며, 해상도는 1280×800 pixels, 최대 촬영속도는 1,000,000 fps, 셔터속도(최소)는 1μs이다. 인젝터 분무특성을 평가하기 위한 Test Bench 실험장치는 Fig. 1에 나타내었다. 인젝터 구동 장치는 해당 인젝터인 전압제어방식으로 1shot 분사가 가능하며, 유량 확보 및 저압에의 shock 억제를 위해 설계된 서로 다른 두 개의 시제작 인젝터를 사용하였다. CNG 인젝터에 공급되는 연료압력은 동일하며, B sample이 A sample에 비해 플렌저의 무게가 약 3배 크다. 자세한 제원은 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험 방법

CNG 인젝터의 노즐 팁에서의 분무(유동) 가시화 실험을 하기 위해서는 쉘리렌 기법을 이용하여 인젝터 노즐 팁에서의 분무(유동) 가시화를 진행하였다. 실험조건은 인젝터의 공급전압은 12 V, 분사시간은 10 ms로 일정하게

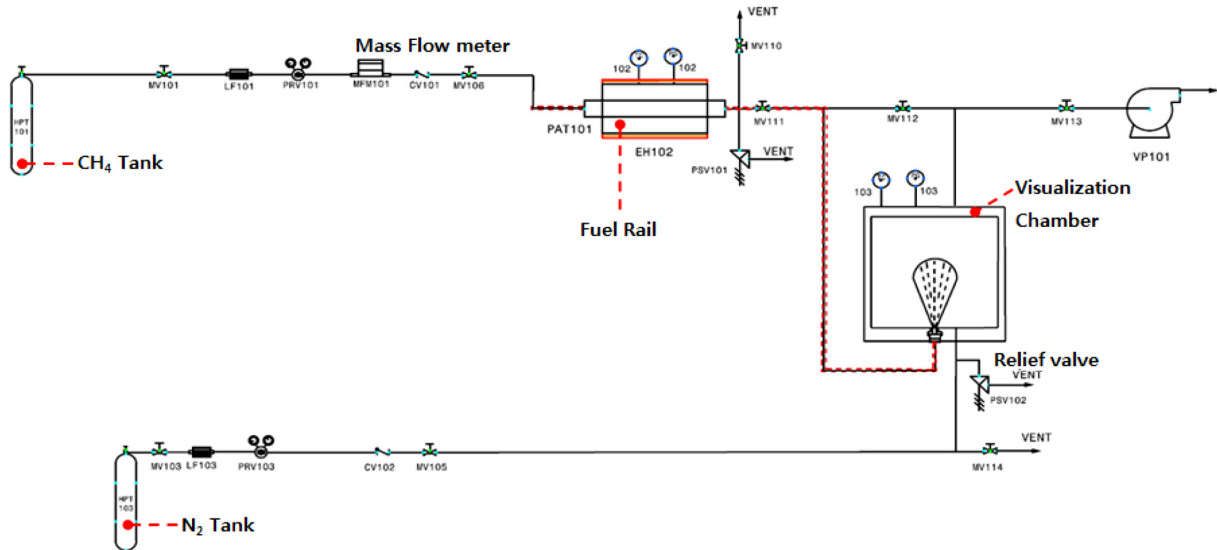


Fig. 1 Schematic diagram of experiment

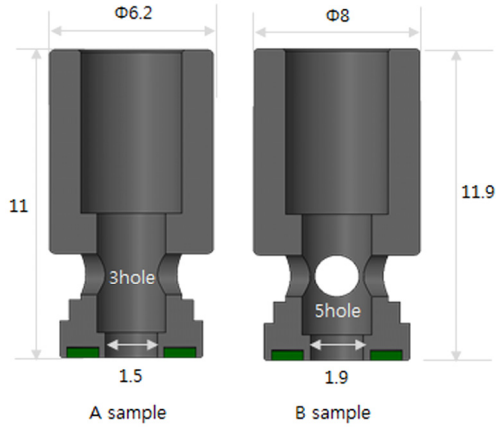


Fig. 2 Plunger structure of A sample vs. B sample

고정하였다. 가솔린 직분사 과급엔진에서 과급여부에 따른 분무된 연료의 운동성을 파악하기 위하여 분위기압력(챔버압력)을 0 MPa, 0.1 MPa, 0.2 MPa(절대압력)의 세 가지 조건으로 설정하였으며, 각각의 분위기 압력에서 연료공급압력은 0.8 MPa과 0.3 MPa로 공급할 때 분무의 도달거리 및 분무각도 등 분무형상을 비교 측정하였다.

실험에 사용된 인젝터의 연료공급방식은 Top Feed 방식으로 위에서 아래로 공급되는 기존 가솔린 인젝터와 비슷한 구조로 되어 있으며, 종래의 CNG 버스 인젝터의 경우 Bottom Feed 방식으로 하여 대유량에 대응했지만, 인젝터 냉각 및 이물질에 대한 취약한 구조를 지니고 있다. 반면에 개발한 CNG 인젝터의 A sample을 기준으로 B sample은 노즐에 공급되는 유량 확대를 위한 플런저의 홀 사이즈의 개수와 크기를 증대시켰으며, 오직 플런저의 유로 방향 및 유로 사이즈만 변경하였다. 자세한 유로 구조는(인젝터 단면은) Fig. 2와 Fig. 10에 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3은 A sample 인젝터의 공급압력(0.8 MPa), 챔버압력(0 MPa)일 때의 연료분무 형상을 나타낸 것으로, 0.2 ms부터 육안으로 분사된 연료가 정확하게 보이며, 0.3 ms부터는 층류가 아닌 난류가 형성되는 것으로 추정된다. 이는 0.4 ms에서 주변공기가 분사된 연료에 강하게 유입되면서 순간적으로 제트의 속도가 증가한 것으로 판단된다. Table 2에는 0.2~0.7 ms까지의 노즐 팁에서의 제트 속도 측정결과를 나타내었다. 0.4 ms에서 주위 공기의 영향에 따른 Air entertainment 효과로 인해 0.5 ms까지 도달 속도가 158 mm/ms로 가장 높으며 이후 감소하는 것으로 측정되었다. 이는 노즐 팁에서의 제트 초기 단계에서는 더 많은 추진력을 갖지만, 주변의 공기가 필요한 것으로 판단된다. 반복 실험한 결과 0.4 ms에서 Air entertainment 효과가 나타나면서 침투력이 증가된다.

Fig. 4는 B sample 인젝터의 공급압력(0.8 MPa), 챔버압력(0 MPa)일 때의 연료 분무 형상을 나타낸 것으로 1.7 ms부터 육안으로 분사된 연료가 정확하게 보이며, A sample 대비 분무 도달 속도가 느리게 측정되었다.

Table 2 Nozzle tip gas jet velocity of A sample (0.2~0.7 ms)

Time (ms)	Penetration (mm)	Velocity (mm/ms)
0.2	6.9	-
0.3	13.8	69
0.4	25.7	119
0.5	41.4	158
0.6	51.4	100
0.7	59.3	79

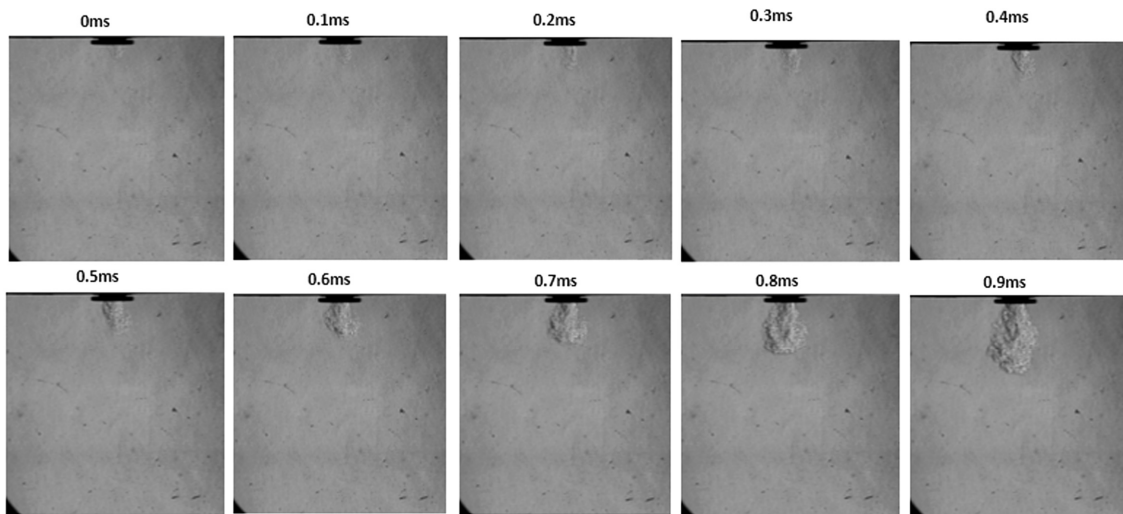


Fig. 3 Image of spray evolution according to time with A sample injector (fuel supply pressure : 0.8 MPa, chamber pressure : 0 MPa)

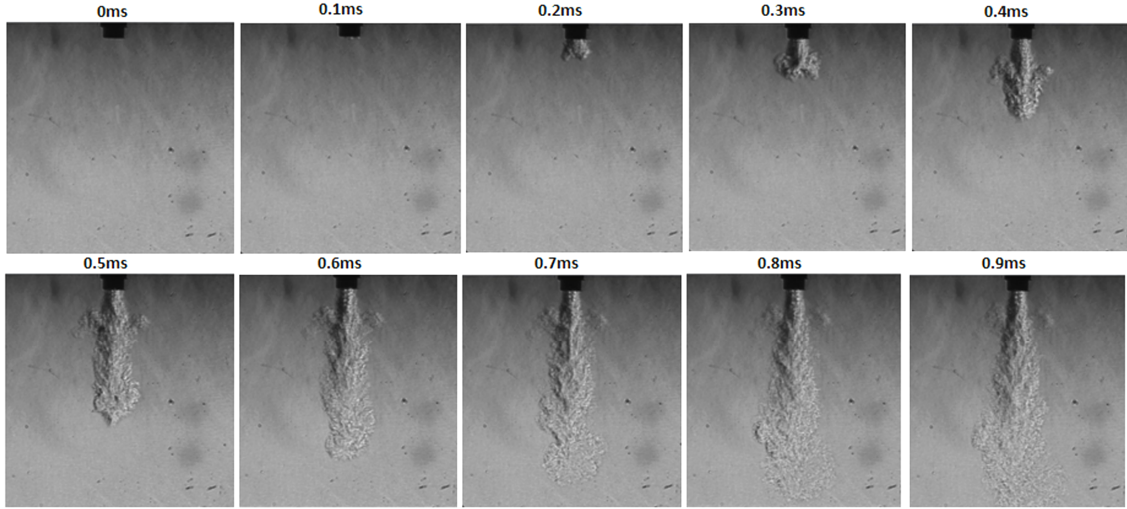


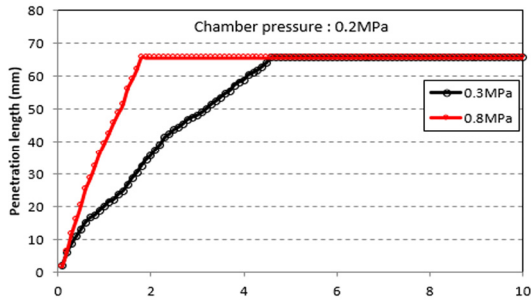
Fig. 4 Image of spray evolution according to time with B sample injector (fuel supply pressure : 0.8 MPa, chamber pressure : 0 MPa)

3.1 CNG 인젝터의 압력비에 따른 분무도달거리

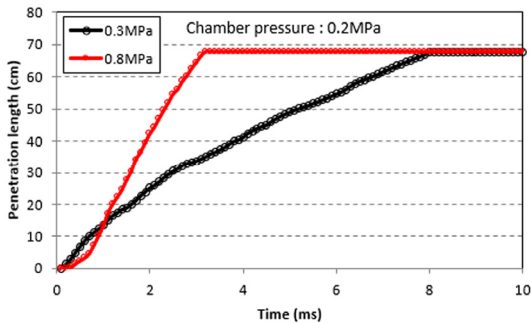
흡기과급조건에서 연료공급압력 변화에 따른 분무도달거리 특성을 파악하기 위해 챔버압력(0.2 MPa)이 동일한 조건에서 공급압력 0.3 MPa와 0.8 MPa 두 조건으로 실험을 진행하였다. Fig. 5는 A sample과 B sample의 공급압력에 따른 분무도달거리를 비교한 그래프로써 압력비(게이지압력)는 공급압력/챔버압력 값의 비로 나타내었다. B sample의 경우 초기 도달거리가 공급압력 0.3 MPa

(압력비 1.3)일 때 약 1초까지 약 13 mm를 먼저 도달한다. 반면 A sample의 경우 공급 압력이 높을수록 시간에 따른 도달거리가 길어진다. 이는 B sample의 경우 스프링 하중으로 인해 공급압력과 챔버압력의 비가 적은 공급압력 0.3 MPa에서 초기 약 1초 동안에는 먼저 플런저가 열린다. 공급압력 0.8 MPa(압력비 3)에서 스프링 하중 및 공급압력에 의해 초기 분무도달거리의 곡선이 변곡점이 생기는 것으로 판단되며, 공급압력이 낮을 때, 챔버압력에 의해 플런저를 쉽게 들어 올리는 것으로 추정된다.

Fig. 6은 분무의 발달과정을 쉽게 파악할 수 있는 4 ms에서 sample 별 공급압력에 따른 이미지 나타냈다. A sample의 경우 압력비가 낮은 공급압력 0.3 MPa에서 분사



(A) A sample



(B) B sample

Fig. 5 Spray penetration length depending on the fuel supply pressure by each injectors

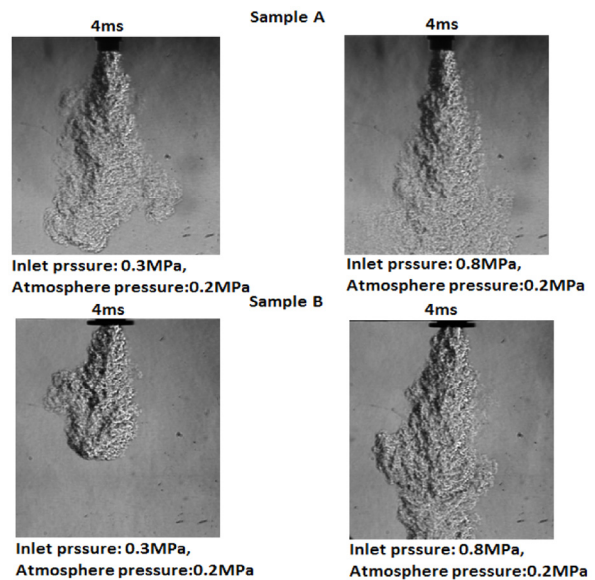


Fig. 6 Image of spray evolution depending on fuel supply pressure at 4 ms

된 제트가 넓게 형성되어 직진성이 떨어지는 것으로 나타났다. B sample의 경우 현저하게 압력비가 낮으면 분무 도달거리가 4 ms에서 공급압력 0.8 MPa 대비 약 26 mm 적게 도달한다. 앞에서 언급한 대로 초기 압력차가 적어 플런저는 먼저 열리나, 공급압력이 낮아서 침투속도가 느린 것으로 판단된다.

Fig. 7과 8은 인젝터 공급압력이 0.8 MPa일 때 챔버압력을 0 MPa, 0.1 MPa, 0.2 MPa로 변경하여 분무도달거리를 측정된 결과를 나타낸 그래프로써 A sample의 경우, 압력비가 낮아질수록 분무도달시간이 길어지는 것으로 나타났으며, 압력비 9에서 3으로 낮아질수록 챔버압력 증대에 따른 밀도 증가에 따라 침투성이 떨어지는 것으로 판단된다. 메탄이 (밀도:0.714kg/m³@0°C, 1atm) 상대적으로 밀도가 높은 질소(밀도:1.251 kg/m³@0°C, 1atm) 속으로 침투하려면 속도가 확보되어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 7은 B sample의 분무도달거리를 나타낸 것으로서 챔버 압력이 0 MPa이 0.1 MPa 보다 도달시간이 근소하게 적은 것으로 측정되었다. 압력비가 낮아짐에 따라 A sample 대비 뚜렷한 차이를 나타나지 않았지만, 챔버압력이 0.2 MPa일 때 압력비가 3으로 초기에 플런저를 쉽게 들어져서 분무도달거리가 빨라진 이후 급격하게 느려지며, 이는 인젝터 조립시 스프링 세팅에 있어서 문제가

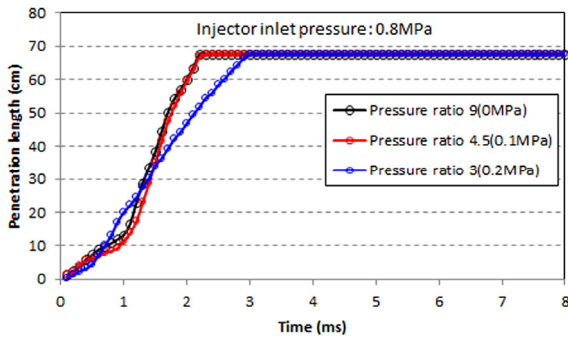


Fig. 7 Penetration length of A sample at fuel supply pressure 0.8 MPa

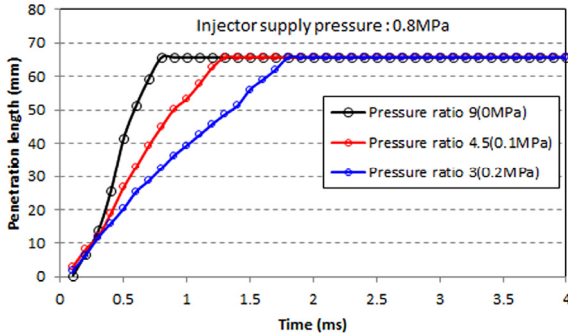


Fig. 8 Penetration length of B sample at fuel supply pressure 0.8 MPa

있는 것으로 판단된다. 따라서 샘플별 유량 측정 및 기능 시험에서는 문제없었으나, 추후 분해하여 원인분석이 필요하다.

3.2 공급압력 0.8 MPa에서의 분무 거리 및 각도 측정

Fig. 9는 CNG 인젝터에 공급되는 연료압력 0.8 MPa과 챔버압력은 흡기가 과급되지 않는 조건인 0 MPa조건에서 분무거리 및 분무각도를 측정된 결과이다.

A sample은 분무 도달거리인 약 66 mm에 약 0.7 ms에 도달하며, B sample은 약 2 ms에 도달한다. 이는 B sample의 경우 초기 약 2.4 ms까지는 인젝터의 목표공급압력인 0.8 MPa에 플런저가 초기에 제대로 들리지 못하며, 2.4 ms 이후 플런저가 급격히 열림으로서 분무거리가 급격히 증가하는 것으로 판단된다. 또한 분사초기 플런저가 제대로 열리지 못해 초기 분무각이 크게 형성되는 것으로 추정된다. 따라서 스프링 하중에 의한 초기 직진성이 떨어지는 것으로 추정된다. A sample의 경우 초기 분무 각도가 약 50°이지만, 2 ms 이후 약 20°로 수렴된다. B sample 또한 약 36.8°로 수렴되지만 수렴되는 시간이 4 ms로서 A sample 보다 긴 것으로 측정되었다. 이는 높은 유속은 초기 단계에서 가스 제트의 높은 운동량으로 이어지기 때문에 Sample 별 분무각이 크게 형성되는 이유는 플런저의 유료가 기존 3개에서 5개로 증대 시켜서 나타난 결과

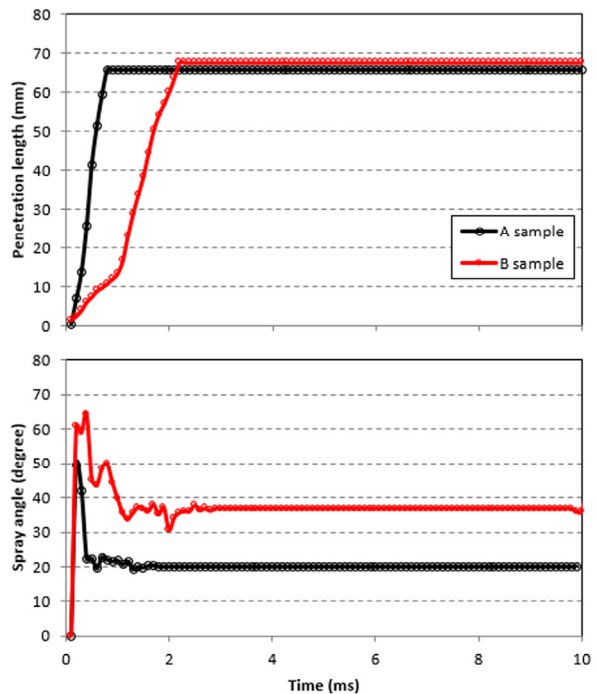


Fig. 9 Comparison of penetration length and spray angle for each injector (fuel supply pressure : 0.8 MPa, atmospheric pressure : 0 MPa)

로 추정된다.

A sample과 B sample을 공급압력 0.8 MPa일 때 챔버압력 0 MPa에서 분무도달 거리 및 분무 각도 측정 결과 A sample이 성능이 더 좋으며, 앞절에서 공급압력 및 챔버압력에 따른 분무도달거리 측정결과도 A sample이 우수한 것으로 측정되었다.

Fig. 10은 A sample에 대한 유로 구조 및 인젝터 내부유동 해석을 진행한 결과로서 레일에서 공급되어 노즐 방향으로 나가는 유로는 Route-1으로 정의 했으며, 플런저에서 인젝터의 가장자리로 나가는 유로를 Route-2로 정의 하였다. A sample의 경우 Route-2에서 인젝터 노즐목에서 초킹(Chocking)이 발생하며, Route-1에서는 인젝터 노즐목에서 초킹이 발생하지 않는 것으로 해석결과 나타났다.

이 결과를 바탕으로 A sample의 분무각도 편차를 확인해보면 분사된 연료의 직진성을 확보하기 위해서 Route-2를 인젝터 노즐목에서의 유동을 초킹시켜 노즐시트 출구에서의 속도를 증대시켰다. 반면 Route-2에 많은 유량이 가해지게 되면 오히려 4홀의 인젝터 노즐에서 분사된 제트가 출동을 일으킬 수 있을 것으로 추정된다.

3.3 A sample 인젝터의 가이드 제거 및 1hole 일 때 분무특성

본 논문에서는 고압으로 분사된 가스연료의 직진성과 분무 도달거리 및 각도를 최적화하기 위해 인젝터 노즐 후단에 설치된 가이드의 영향과 효과를 분석하고, 분사 초기 가이드 내부에서 고압가스연료의 유동을 좀 더 면밀하게 분석하기 위하여 인젝터 노즐 가이드를 제거한

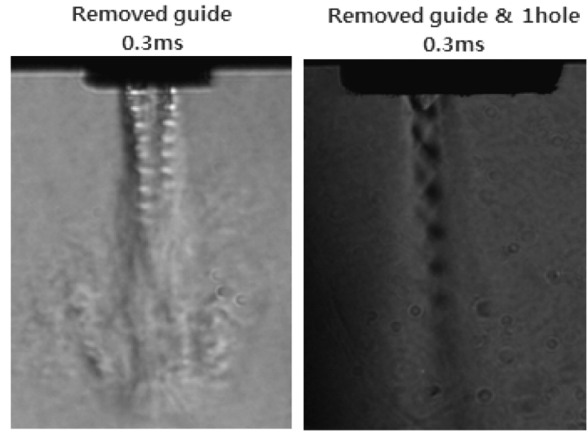


Fig. 11 Spray Image of injector without guide at 0.3 ms (4hole vs. 1hole)

후, 노즐 팁 부분을 포커싱 하였다. 또한 4홀 분사에 따른 상 겹침 현상을 방지하기 위하여 3개홀을 막고 1개 홀에 대한 분무 가시화도 진행하였다.

Fig. 11은 연료공급압력 0.8 MPa, 챔버압력 0 MPa 조건에서 가이드를 제거한 후 분사했을 때 가시화를 나타낸 것이다.

4홀 전체 분사시 분사된 연료가 가운데로 집중되는 현상이 있으며, 일정 거리에 도달 후 각 홀에서 분사된 연료가 중앙에서 충돌하여 발달되어 나가는 것을 볼 수 있다. 또한 3개의 홀을 막고 1개 홀만 분사했을 때도, 인젝터 노즐 중앙으로 집중되어 분사되는 것으로 측정되었다.

Fig. 12와 13은 동일한 연료압력(0.8 MPa)과 서로 다른 챔버압력 조건에서 A sample 인젝터의 가이드 장착유무에 따른 분무도달거리 측정 결과를 나타내었다. 가이드가

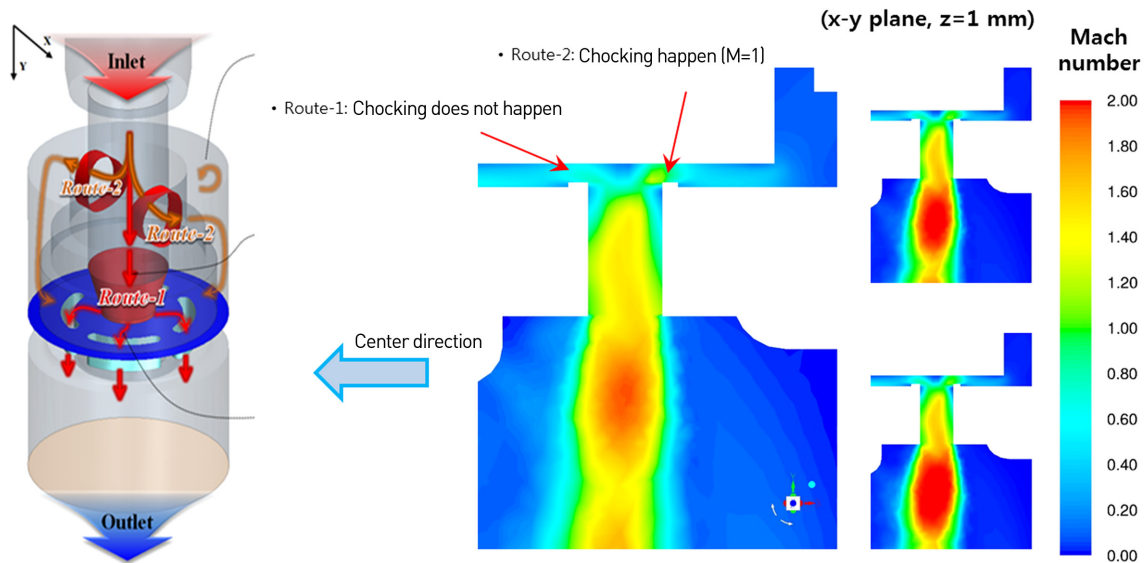


Fig. 10 Picture of injector flowpath structure and flow simulation result of A sample

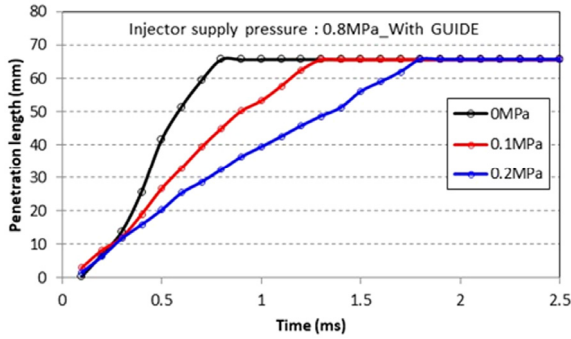


Fig. 12 penetration length of injector with guide at supply pressure 0.8 MPa

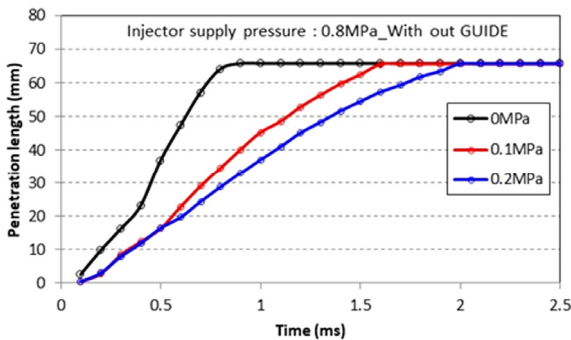


Fig. 13 penetration length of injector without guide at supply pressure 0.8 MPa

장착된 인젝터의 경우 초기 분무 도달거리(10 mm)까지 소요 시간이 0.3 ms로 챔버압력에 상관없이 동일한 것으로 측정되었다. 하지만, 가이드가 없는 경우 챔버압력 0 MPa에서 분사된 연료가 주위 공기에 방해받지 않아 0.3 ms로 소요시간이 동일하게 측정되지만, 챔버압력 0.1 MPa, 0.2 MPa 조건에서 초기 분무 도달 거리(10 mm)까지의 소요되는 시간에 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 가이드가 없는 경우 초기에 분사된 연료가 주변 공기에 의해 직진성이 나빠지는 것으로 추정된다. A sample과 B sample 비교시 B sample이 플런저의 작동 반응속도가 늦으며, 인젝터 노즐목에서 초음속 유동이 잘 생성되지 않는 것으로 추정된다. 향후 가이드 길이 변경에 따른 분무도달거리 측정을 통해 최적의 가이드 길이 선정이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 기본적인 CNG 인젝터의 유로 형상에 따른 분무 가시화를 평가하여, 향후 가솔린과 CNG를 겸용으로 사용하는 Bi-fuel 차량에 적용시 주요 설계 인자 선정 및 성능 극대화할 수 있는 CNG 인젝터 개발에 적용할 예정이다.

- 1) 기존 저압 인젝터 대비 공급압력 0.8 MPa CNG 인젝터의 경우 과급엔진에서의 CNG 연료의 직진성을 확보 할 수 있으며, 초기 주변의 공기유입에 따른 분사된 기체의 속도가 증가되는 것으로 측정되었다.
- 2) 인젝터의 압력비(공급압력/챔버압력)에 따라 분무도달거리가 차이가 나는 것으로 측정되었다. 과급엔진에서는 흡기매니폴드 압력은 약 0.2 MPa로 밀도가 낮은 메탄이 침투하려면 높은 속도를 유지하기 위해서는 공급압력이 높으면, 분무도달거리가 길어진다.
- 3) A sample 인젝터의 내부유로로 Route-1보다는 Route-2에서 초킹(인젝터 노즐목)되면서 속도가 더 높은 것으로 해석결과를 통해 알 수 있었으며, 가이드 제거 후 가시화한 결과 인젝터 축방향으로 분사된 유동이 쏠리는 것으로 측정되었다.
- 4) 가이드 제거 유/무에 따라 챔버압력 0 MPa일 때는 분무도달거리에서 차이가 나타나지 않으며, 챔버압력이 0.1 MPa 이상에서는 가이드를 제거한 인젝터에서 분사된 연료가 도달하는 시간이 길어지는 것으로 측정되었다. 이는 초기 분사된 연료가 주변의 공기의 혼합으로 인해 직진성이 떨어지는 것으로 판단된다.
- 5) 가이드가 있는 인젝터의 경우 챔버압력에 상관없이 0.3 ms까지는 동일한 분무도달거리를 나타내며, 0.3 ms 이상에서는 압력비에 따른 도달 거리가 차이가 난다. 향후에는 CNG 인젝터 노즐 팁에서 주변 공기에 의한 영향을 측정하기 위해 가이드 길이에 따른 분무 도달거리 및 인젝터 내부유로에 따른 분무 가시화 진행을 검증할 계획이며, 향후 기체에 액체를 혼합하여 추적기반의 레이저유기형광법(LIF) 기술을 통해 CNG 인젝터에서 분사된 가스 제트의 특성을 파악하여 검증할 계획이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 산업원천기술개발사업(10053151, 800 kPa급 고압·고정밀 NGV 연료시스템 국산화 개발)과 에너지기술개발사업(20162020107210, CO₂ 배출량 20% 저감형 승용 Turbo GDI/CNG Bi-fuel 엔진 및 연비 최적화 기술개발)에 지원을 받아서 이루어졌습니다.

References

- 1) Y. C. Han, K. B. Kim and Y. S. Oh, "A Study on performance and Characteristic of Exhasut Emission in CNG Dedicated Engine," Transactions of KSAE, Vol.8, No.3, pp.12-17, 2000.
- 2) AUDI Service Traning Center, AUDI A3 Sportback g-tron, ADUDI AG, Ingolstadt, pp.24-29, 2013.

- 3) C. W. Nam, H. K. Lee, S. J. Moon, G. K. Kim, G. H. Kim and K. Y. Lee, "Experimental Study on Characteristics for CNG Electronic Pressure Regulator," Transactions of KSAE, Vol.25, No.5, pp.525-532, 2017.
- 4) Volkswagen Service Training Center, Eco Fuel Natural Gas Drive in Touran and Caddy, Volkswagen AG, Wolfsburg, pp.18-33, 2010.
- 5) C. W. Nam, H. K. Lee, S. D. Oh, G. K. Kim, Y. D. Park, J. K. Kim, J. H. Lee and W. J. Jeon, "Experimental Study on Spray characteristics for CNG Injector Tip," The Korean Institute of Gas Conference, p.176, 2018.
- 6) J. Bai, T. Wang, K. Lei, M. Zhong, Y. Jiang, M. Tang, J. Yu, X. Pei and P. Li, "Large-eddy Simulation of the Three-dimensional Experiment on Richtmyer-meshkov Instability Induced Turbulence," International Journal of Astronomy and Astrophysics, Vol.2, pp.28-36, 2012.
- 7) A. W. Cook and W. H. Cabot, "Hyperviscosity for Shock-turbulence Interactions," Journal of Computational Physics, Vol.203, Issue 2, pp.379-385, 2005.
- 8) A. N. Karpetsis and R. S. Barlow, "Measurements of Flame Orientation and Scalar Dissipation in Turbulent Partially Premixed Methane Flames," Proceedings of the Combustion Institute, Vol.30, Issue 1, pp.665-672, 2005.
- 9) V. M. Salazer and S. A. Kaiser, "An Optical Study of Mixture Preparation in a Hydrogen-Fueled Engine with Direct Injection Using Different Nozzle Designs," SAE 2009-01-2682, 2009.
- 10) H. S. Sim and C. W. Lee, "An Experimental Study on Fuel Injection rate Control of a Gas Power Generation System," KSAE05-Y0025, pp.67-72, 2005.