KIGAS Vol. 20, No. 4, pp 1~6, 2016
(Journal of the Korean Institute of Gas)
http://dx.doi.org/10.7842/kigas.2016.20.4.1

대형 CNG 엔진용 인젝터 모듈의 성능 개선을 위한 연구

†김용래 · 박원아 · 김창기 · 이장희
한국기계연구원 그린동력연구실
(2016년 4월 19일 접수, 2016년 7월 10일 수정, 2016년 7월 11일 채택)

Simulation Study for the Performance Improvement of the Injector Module for Heavy-duty CNG Engines

†**Yong-Rae Kim · Won-A Park · Chang-Gi Kim · Jang-Hee Lee**
Dept. of Engine Research, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, Korea
(Received April 19, 2016; Revised July 10, 2016; Accepted July 11, 2016)

요 약

버스와 같은 대형 차량에서 사용되는 대형 CNG 엔진에는 가스 연료 분사를 위한 인젝터가 6개 가량의 단위로 모듈 형태를 구성하고 있다. 이러한 인젝터 모듈은 연료 공급을 위한 입출구가 각각 한 곳으로 구성되어 있으며 쓰로틀 후단을 통하여 흡기관으로 연료를 공급하는 방식이므로 과도 운전에 대한 응답성이 매우 낮은 구조를 형성하고 있다. 본 연구에서는 이러한 인젝터 모듈의 내부 유로에 대한 유동 해석을 통하여 응답성을 개선할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 결론에 따르면 내부 유로의 체적을 감소시킴으로써 가스 연료의 공급 응답성을 개선할 수 있었고, 각각의 인젝터에서 모듈의 출구까지의 거리를 동일하게 하는 방안도 응답성과 연료 공급량의 선형성을 확보할 수 있는 것을 확인하였다. 다만 각 인젝터의 분사 순서 시기에는 큰 영향을 받지 않는 결과를 보였다.

Abstract - A fuel supply system of heavy-duty CNG engine is composed as a module structure which is integrated by about 6 injectors. There are only one input and output passage for gas fuel supply in this injector module. The response performance for transient operation of an CNG engine is very poor because only one output fuel supply line is connected to the intake pipe after a throttle valve. In this study, a new guideline and internal flow design for the CNG injector module is suggested for the improvement of response performance by fluid dynamic simulations. As a result, the response performance of gas fuel supply can be improved by decreasing the total volume of internal flow passages and a same distance design from each injector to the exit of module shows good response performance and acquirement of linearity of fuel supply. But the injection order has little influence to injection performances.

Key words : heave-duty CNG engine, module structure, injector, internal flow design

I. 서 론

국내의 경우 일부 지역을 제외하고 시내버스로는 대부분 CNG 버스가 운행되고 있으며, 현재는 유로6 배기규제를 만족해야 하는 만큼 대형 CNG 엔진에 있어서도 보다 정밀한 기술 적용이 필요한 상황이다. 엔진의 기본이 되는 연료 공급 시스템에 있어서 유로5 엔진의 경우에는 TBI(Throttle body injection) 시스템이 적용되었었고, 유로6 이후에는 일부 MPI(Multi-point port injection) 시스템이 적용되기도 하였으나 여전히 TBI 방식으로 운전되기도 한다. TBI 방식은 MPI 방식에 비하여 연료가 도달하는 거리가 길어짐에 따라 엔진의 과도 운전 구간에 있어서 응답성이 떨어지는 문제점이 있다.

대형 CNG 엔진에서 TBI 방식의 CNG 연료 분사장

†Corresponding author:yrkim@kimm.re.kr
Copyright ⓒ 2016 by The Korean Institute of Gas

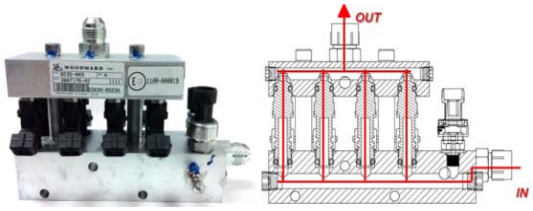

Fig. 1. Structure of the CNG injector module.

치는 MPI 방식에서 사용되는 단일 가스연료 인젝터를 동일하게 사용하지만 Fig. 1 과 같이 6개 혹은 8개의 인젝터를 하나의 모듈로 통합하여 최종적으로 하나의 연료 공급 라인만을 출구로 이용되는 구조이다. 이는 엔진의 쓰로틀 바디 후단의 믹서 부근에 연결되어 엔진의 흡기 매니폴드에 연료가 공급되게 된다. 그런데, 대형 CNG 엔진에서 사용되는 CNG 연료용 인젝터 뿐만 아니라 TBI 방식용 인젝터 통합 모듈은 전량 해외업체의 제품을 그대로 사용하고 있기 때문에 국내 업체에서 개선할 수 있는 여지가 거의 없다. 그러나 앞에서도 언급을 했듯이 응답성이 떨어지는 현재의 구조에서는 향후 더욱 강화되는 규제에 대응하기 어렵다.

MPI 방식을 적용하는 것이 좋은 대안이 될 수 있으나 이는 흡기다기관의 형상을 다시 제작해야 하는 만큼 설계 변경의 폭이 크므로 본 연구에서는 TBI 방식의 인젝터 모듈의 내부 구조를 일부 개선함으로써 연료 공급의 응답성을 향상시킬 수 있는 방안을 모색하고자 한다. 인젝터 모듈은 엔진 본체와는 별도로 외부에 위치하기 때문에 엔진 본체의 구조 변경없이 모듈 자체만의 변경만으로 효과를 볼 수 있기 때문에 적은 노력으로 원하는 성능을 얻을 수 있을 것으로 기대한다. 본 연구에서는 이를 위하여 실험적인 방법 대신에 유동 해석을 이용한 시뮬레이션을 통하여 다양한 변경 조건을 빠른 시간 안에 살펴보고자 한다.

Ⅱ. 해석 방법 및 조건

인젝터 모듈의 형상에 따른 내부 유동 해석을 위하여 우선 Fig. 2와 같이 인젝터 모듈과 엔진 흡기 라인까지를 간략하게 모델링하였다. 6기통 엔진의 실제 데이터를 참조하였기 때문에 인젝터 모듈의 인젝터는 6개를 적용하였으며, 해석의 경우에는 인젝터 팁의 끝 부분에서부터 즉, 인젝터 모듈의 내부 공간의 시작점부터가 대상이 된다. 인젝터는 3개씩 2열의 배치로 되어 있으며, 가운데 통로를 통하여 서로의 열이 연결되고 그 중심 부근에 출구가 형성되어 있다. 그 출구에서부터 흡기 라인까지는 직선 형태의 관으로 간략하게 되어 있다.

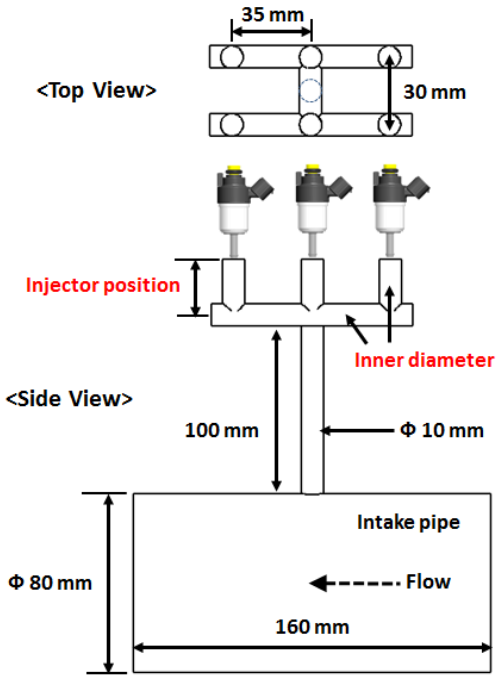

Fig. 2. CNG injector module modelling.

Table 1. Design parameters of CNG injector module

Parameter	Variation		
Injector position(mm)	5		25
Inner diameter(mm)	6	8	10
Internal flow design	Base	Alt. 1	Alt. 2
Injection order	Case 1		Case 2

이러한 형상에서 설계상의 변경 대상은 Table 1에서와 같이 인젝터의 위치 길이와 내부 유로의 직경 변화를 선정하였다. 현재 엔진에 적용되고 있는 인젝터 모듈에 따르면 인젝터 위치는 5mm, 내부 유로 직경은 10mm인 경우가 기본 형상이다. 그러나, 이와 같은 기본 형상에서는 각각의 인젝터에서 출구까지의 거리가 모두 다르고 직각으로 굽어있는 구조로 되어있기 때문에 한계가 있을 것으로 생각되어 Fig. 3 과 같이 대체 유로 형상을 두 가지 추가하였다. 첫 번째는 각 인젝터에서 출구까지의 길이가 모두 동일하고 직선으로 유로가 형성될 수 있도록 육각 형상으로 배치를 한 것이며,

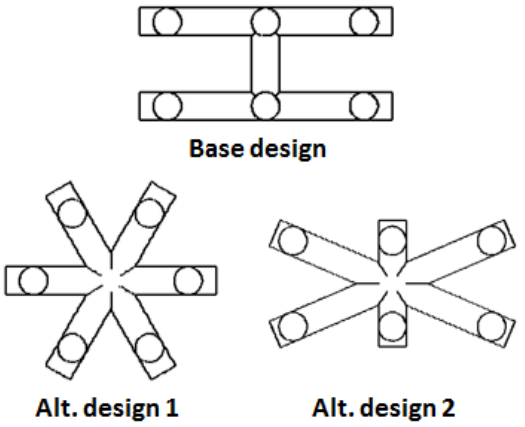

Fig. 3. Internal flow designs for the CNG injector module(Top view).

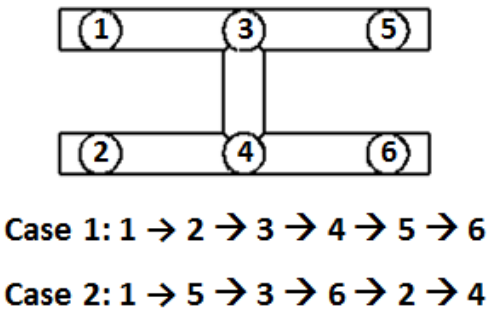

Fig. 4. Injection order of the CNG injector module.

인젝터까지의 길이는 기본 유로 형상의 내부 체적과 동일하도록 하는 조건으로 선정하였다. 두 번째는 기본 유로 형상의 인젝터 위치는 모두 그대로 유지하고 가장 멀리 있는 네 개의 인젝터에서 출구까지의 유로를 대각선 형상으로 일직선이 되게 함으로써 길이가 짧아지도록 한 것이다.

마지막으로 기본 유로 형상에서는 6개의 인젝터 분사 순서가 어떠한 차이를 보이는지 알아보기 위하여 두 가지의 분사 순서에 대하여 해석을 하였다. 첫 번째 경우는 가장 단순하게 생각하여 2열의 인젝터가 번갈아 가면서 분사가 되는 순서를, 두 번째는 실제 엔진에서 사용되고 있는 분사 순서를 찾아내어 적용을 하였다.

Fig. 5는 위와 같은 형상 및 조건에서 실제 해석을 수행하기 위한 3D 모델과 해석용 격자를 제작한 모습을 보여준다. 해석에 사용된 소프트웨어는 STAR-CD

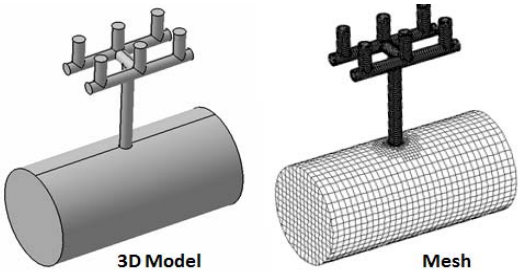

Fig. 5. 3D model and mesh of the base CNG injector module design.

Table 2. Operating load and speed condition of CNG injector module

Parameter	Low load	High load
Intake pressure(kPa)	40	190
Injection quantity(cc)	31	160
Injection duration(msec)	8	35

이며 해석 격자는 대략 117,000개이고 그 크기는 0.5~10mm로 되어 있다. 벽면 주변에는 약 0.5 mm 두께의 prism layer 2개를 설정하였다. 인젝터의 홀은 직경 2mm의 원형으로 모델링되었고 분사시기에 맞추어 메탄(CH_4) 가스가 8bar의 압력으로 분사되도록 설정하였다. 엔진의 운전 조건은 2100rpm의 최대 회전속도에서 Table 2와 같이 저부하 및 고부하 조건으로 나누어 적용하였으며, 이는 실제 엔진의 운전 조건을 반영한 것이다. 해석 수행 기간은 엔진의 응답성을 확인하는 차원에서 6개의 인젝터가 각각 4번씩 분사되는 기간까지 수행하였다. 계산 시작 시점의 흡기관과 인젝터 내부 유로의 압력은 Table 2의 압력 조건으로 설정하였고, 흡기관의 양 끝은 압력 경계조건(Pressure boundary)을 부여하고 흡기관 내부의 공기 흐름을 만들어 주기 위해 두 압력 경계 중 공기가 들어오는 부분과 나가는 부분의 차이를 1 kPa 로 설정하였다. 계산에 사용된 난류 모델로는 k-εRNG 모델이 사용되었고, 압력 경계와 내부 유로에서의 유동은 압축성 유체를 고려하여 계산되었다.

Ⅲ. 해석결과 및 고찰

3.1. 인젝터 위치 변경에 따른 특성 변화

주어진 조건에 따라서 해석을 수행하였으며 인젝터의 위치 변경에 따른 대표 결과를 Fig. 6에 나타내었

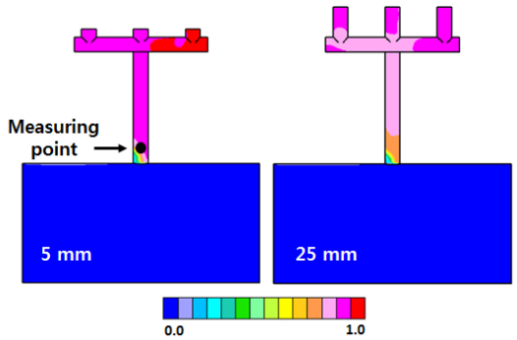

Fig. 6. Simulation result of CH4 distribution with regard to injector position of CNG injector module after 4th injection cycle.

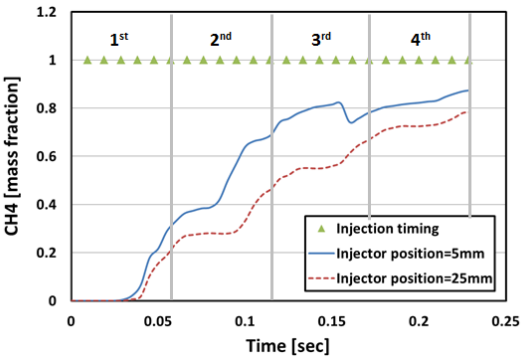

Fig. 7. Simulation result with regard to injector position of CNG injector module.

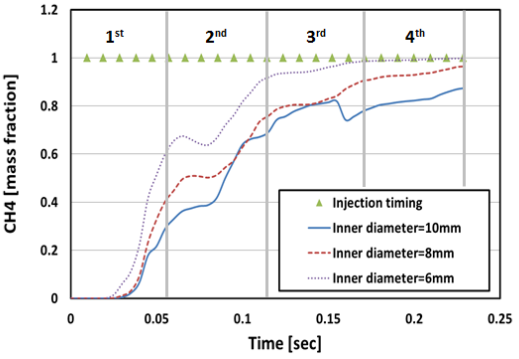

Fig. 8. Simulation result with regard to inner diameter of CNG injector module.

다. 4번의 사이클 해석이 끝난 뒤에 메탄가스의 분포를 평면상으로 표시한 것이다. 인젝터 위치 변경의 목적은 인젝터 팁에서 가스 연료가 내부 유로의 벽면을 향해 바로 분사되므로 유동의 저항이 있을 것으로 생각되어 길이 변화에 따른 차이를 살펴보고자 함이었다. 즉, 인젝터의 위치를 더 길게 하는 경우에 더욱 빠른 흐름을 가질 것으로 예상하였으나 결과에 따르면 인젝터의 위치가 더 긴 25mm 인 경우가 짧은 경우보다 메탄가스의 분포 농도도 낮고 흡기관까지의 전달도 늦는 것을 볼 수 있다.

전체 해석 수행 기간 동안의 변화를 살펴보기 위하여 Fig. 6 에 표기한 지점(흡기관으로부터 약 15mm 위치)에서의 메탄가스의 질량 분율을 측정한 결과를 살펴보기로 하였으며 이를 Fig. 7 에 그래프로 나타내었다. 이 지점에서의 단면의 평균값을 표기하도록 하였으며, 앞으로는 모든 해석 결과도 모두 이와 같은 방법에 의하여 시간 경과에 따른 그래프로 표시하기로 한다. 결과에 따르면 첫 번째 분사 사이클의 세 번째 인젝터가 분사되는 시점에서 메탄가스가 검출되기 시작하며 시간 경과에 따라 점차 그 농도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 인젝터의 위치에 따른 결과는 앞선 설명과 같이 긴 길이를 가지는 경우가 더 늦게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 이는 결과적으로 길어진 길이만큼 내부 체적이 증가하였기 때문에 이 공간만큼 가스 연료가 다 채워진 이후에 흡기관 방향으로 전파될 수 있었기 때문이다.

3.2. 내부 유로 직경 변화에 따른 특성 변화

다음으로는 인젝터 모듈의 내부 유로 직경 변화에 대한 결과를 살펴보았는데, 이는 결국 내부 유로의 체적 변화가 미치는 영향을 보고자 함이다. 기본 조건인 직경 10mm 는 현재 적용되고 있는 모듈의 수치이며, 이를 8mm와 6mm로 축소시켰을 때의 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 8mm인 경우는 10mm인 경우에 비하여 초기에 메탄가스가 나타나는 시점은 비슷하나 결국 4번째 사이클 이후에는 더 많은 양이 공급되고 있으며, 6mm인 경우에는 가장 빠르게 그리고 많은 메탄가스가 공급되는 것을 볼 수 있다. 즉, 내부 유로 직경을 축소시킴으로써 체적을 줄일 수 있다면 더 빠른 연료의 공급이 가능할 것으로 보인다. 그러나 너무 작은 직경의 경우에는 사용 목적에 맞도록 최대 가스 연료 공급량이 가능한 수준과 제작 가공성을 고려하여 제한이 되어야 할 것이다.

3.3. 내부 유로 형상 변경에 따른 특성 변화

위의 결과들이 기본 유로 형상 조건에서 결국 내부 체적 변경에 따른 변화 양상을 살펴본 것이라면, 앞에서 제시한 두 가지 추가 형상에 대하여 어떠한 차이가 있는지 Fig. 9에서 그 결과를 확인할 수 있다. 초기의 응

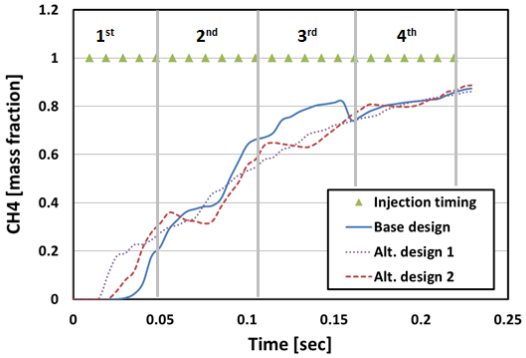

Fig. 9. Simulation result with regard to flow design of CNG injector module.

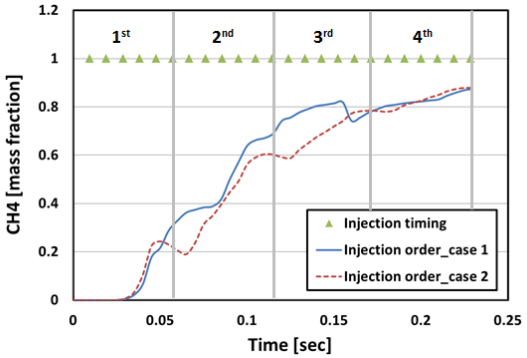

Fig. 10. Simulation result with regard to injection order of CNG injector module (Low load operating condition).

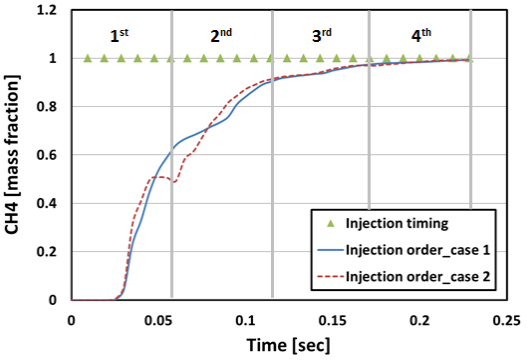

Fig. 11. Simulation result with regard to injection order of CNG injector module (High load operating condition).

답성 측면에서는 6개의 인젝터가 모두 출구까지의 길이가 동일하게 설계된 첫 번째 설계안이 가장 빠르고 기본 형상이 가장 느린 것을 볼 수 있었다. 이는 분사 순서에 따라 출구로부터 가장 먼 곳에 위치한 인젝터부터 연료 분사가 시작되기 때문이다. 약 세 번째 사이클이 진행되는 동안 메탄가스의 분포량이 세 디자인 사이에서 변동이 생기는 양상을 보이다가 이후에는 거의 동일한 분포량 패턴을 보이고 있다. 즉, 어느 정도 시간이 지난 이후에는 큰 차이를 보이지 않기는 하지만, 첫 번째 설계안의 경우가 응답성 면에서도 유리하고 시간 경과에 따른 유량의 선형성 면에서도 좋기 때문에 결국 엔진의 연소 안정성 측면에서 장점이 있을 것으로 보인다.

3.4. 분사 순서 변경에 따른 특성 변화

마지막으로 6개의 인젝터가 분사되는 순서가 연료 유량 변화에 미치는 영향을 살펴본 결과이다. 분사 순서를 제외한 모든 조건은 기본 조건 및 유로 형상을 기반으로 하였다. 해석 결과를 저부하 조건과 고부하 조건에 대하여 각각 Fig. 10과 11에 나타내었는데, 두 가지 분사 순서에 대하여 공통적으로 중간 과정에서의 연료 분포량의 차이를 제외하면 초기 응답성 면이나 후반부의 분포량에 있어서 차이를 보이고 있지 않다. 실제 엔진에서 사용되고 있는 Case 2와 같은 분사 순서가 특이한 순서로 설정되어 있었기에 이에 대한 특별한 이유가 있을 것으로 예상하였으나, 아주 단순하게 임의로 설정한 Case 1의 분사 순서와 결과적으로 큰 차이가 없는 것으로 보아 연료분사 순서는 크게 중요하지 않을 것으로 생각된다.

다만 분사 순서는 수많은 경우의 가짓수를 조합하여 볼 수 있기 때문에 향후 추가적으로 몇 가지 대표성이 있는 조합에 대하여 해석을 진행함으로써 확실한 결론을 내릴 필요가 있다. 그러나 한편으로는 앞서 첫 번째 설계안(Alt. 1)이 가장 좋을 것으로 예측되었는데, 이를 실제 제작하여 엔진에 반영한다면 출구까지의 거리가 모두 동일하므로 분사 순서가 거의 의미없을 것으로 보인다.

Ⅳ. 결 론

대형 CNG 엔진에서 사용되는 인젝터 모듈의 응답성능 개선을 위한 몇 가지 설계 변수 변경을 통한 내부 유동 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 인젝터의 위치 변경이나 내부 유로의 직경 변화와 같은 직접적인 설계 인자 변경은 이로 인한 직접적인 유동의 영향보다는 모듈 내부의 체적 변경에 따

라 가스 연료가 모듈 내부에 충진되는 시간에 더 민감한 영향을 받는다. 즉, 인젝터의 위치는 낮게 그리고 내부 유로 직경은 작은 방향으로 설계하는 것이 응답성 면에서 유리하다.

2. 인젝터의 위치를 결정하는 유로의 형상은 현재의 2열 방식보다는 최종 출구로부터 방사형으로 각각의 인젝터가 동일한 거리에 위치하는 방식의 설계안이 초기 응답성과 시간에 따른 연료의 공급 선형성에 장점을 가진다.
3. 인젝터의 분사 순서는 연료 공급에 따른 응답성이나 분포량에는 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 유추된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 산업원천기술개발사업(10053151, 800kPa급 고압·고정밀 NGV 연료시스템 국산화 개발)의 지원을 받아서 이루어졌습니다.

REFERENCES

[1] Lee, S. H., Lee, J. W., Jee, K. H., Choi, M. H., and Roh, Y. H., "Development of High MPI Gas Injector for Heavy Duty Natural Gas Engine", *Journal of the Korean Institute of Gas*, 13(1), (2009)

[2] Kang, S. H., Rhyu, Y., Kim, C. S., and Par, C. J., "The Development of Fuel Metering System for CNG Engines", KSAE Fall Conference, 35-43, (1995)

[3] Park, C. W., Lee, S. Y., Kim, C. G., Won, S. Y., and Lee, J. H., "A Study on Applicability to Dual-Fuel Engine of Low Caloric Gas", *Journal of the Korean Institute of Gas*, 14(1), (2010)

[4] Boretti, A., Lappas, P., Zhang, B., and Mazlan, S. K., "CNG Fuelling Strategies for Commercial Vehicles Engines-A Literature Review", SAE Techical Paper, 2013-11-27, (2013)

[5] Jang, Y. S., Woo, S. D., Ohm, I. Y., Kim, S. K., and Park, J. N., "Experimental Study on Pressure Fluctuation of Fuel Rail in Gas Injection System", KSAE Fall Conference, 685-690, (2005)