



대형 CNG 혼소 엔진용 천연가스 분사밸브 동특성 연구

†김용래 · 최 영

한국기계연구원 그린동력연구실

(2017년 7월 20일 접수, 2017년 9월 4일 수정, 2017년 9월 5일 채택)

Dynamic Performance of Natural Gas Injection Valve for Heavy-Duty CNG Dual Fuel Engine

†Yong-Rae Kim · Young Choi

Dept. of Engine Research, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, Korea

(Received July 20, 2017; Revised September 4, 2017; Accepted September 5, 2017)

요약

천연가스 연료는 매장량과 경제성 측면에서 미래 가치가 매우 높기 때문에 여러 가지 이용 기술 개발이 활발하게 이루어지고 있으며 내연기관을 이용한 발전 분야에서도 그 중요성이 점점 증가하고 있는 실정이다. 천연가스 연료를 이용하는 MW급 발전용 대형 왕복엔진의 경우 연료공급시스템의 고도화 개발이 필요한데 그 중에서도 천연가스 분사기의 개발은 실질적인 천연가스 연료 이용을 위한 핵심이다. 본 연구에서는 천연가스 분사기를 상부에 위치한 솔레노이드의 전자기력에 의해 구동되고 하부의 밸브 바디부 전기자와 이동판이 상하로 움직이는 구조의 분사밸브 형태로 고안 및 설계하였으며 이 시작품의 동특성을 엔진 흡기 모사 조건에서 실험하였다. 지난 연구에서는 전기자의 변위와 지름 및 솔레노이드 코어 지름을 변경해 가면서 실험을 수행하였으며, 그 후속으로 솔레노이드 코어의 금속 재질 변경과 메인 하우징의 입구 크기 및 공급 압력에 따른 분사밸브의 동특성을 살펴보았다.

Abstract - Natural gas fuel has known to be very promising in terms of abundance and economic value. Therefore it is widely treated as research topics in a variety field of production, storage and utilization. Natural gas has become one of the major sources for the power generation by using internal combustion engines(ICE). Development of natural gas fuel injection device should be preceded to realize a reliable natural gas fuel supply system for a MW class power generation reciprocating ICE. In this research, an injection valve which consists of solenoid and body part with a moving plate was designed and its dynamic performance was experimented in the engine-like environment. Displacement length and diameter of an armature and diameter of a solenoid coil were tested at former study. In this research the effect of materials of solenoid core, size of main housing inlet and supply gas pressure are examined.

Key words : injection valve, solenoid core, armature, pressure difference, stroke, response time, flow rate

1. 서론

메탄이 주성분인 천연가스 연료는 지구상에 존재하는 탄화수소 연료 가운데 가장 풍부한 매장량

을 자랑하는 연료 중의 하나로서 그 사용가치가 매우 높은 것으로 알려져 있다. 또한 셰일가스 채굴 기술의 발달로 인해 실질적인 가격 경쟁력을 확보할 것으로 기대되기 때문에 천연가스 연료를 이용하는 기술 개발 필요성이 그 어느 때보다 높아지고 있다. 이러한 이용 기술 개발은 여러 분야에서 나타나고 있는데 발전용 엔진에 천연가스 연료를 이용하는

†Corresponding author: yrkim@kimm.re.kr

Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas

기술 분야 또한 매우 활발한 연구개발 활동을 전개해 나가고 있다.[1-5] 발전용 천연가스 엔진은 그 규모가 수 kW에서 수 MW까지 매우 광범위하게 펼쳐져 있는데 소형 엔진의 경우는 매우 안정적인 분사시스템이 구비되어 사용되어지고 있으나 대형 엔진을 위한 천연가스 연료공급시스템은 상용화되어 있는 연료분사장치기 존재하긴 하지만 아직까지 내구신뢰성 측면에서 부족함을 보고하는 목소리가 높은 것이 사실이다.

천연가스 연료공급시스템은 크게 연료탱크, 연료라인, 연료분사기, 연료제어기 등으로 구분 지을 수 있는데 그 중에서도 가장 중요한 부분을 차지하는 부분이 바로 연료분사기이다. 연료분사기는 일정량의 연료를 원하는 시기에 엔진 흡기계 또는 엔진 연소실로 공급해 주는 부품으로서 유량의 선형성과 빠른 응답성이 매우 중요하다. 특히 MW급의 대형 천연가스 엔진의 경우 요구되는 천연가스 연료 공급 유량이 매우 크고 4행정을 갖는 발전용 엔진의 경우 엔진의 분당 회전수가 1,500~1,800 rpm에 이르기 때문에 각각의 실린더에 공급시켜주어야 하는 천연가스 연료 유량이 매우 크면서도 매우 빠르게 공급시켜주어야만 한다.[6] 따라서 이와 같은 대유량의 빠른 개폐특성을 갖는 천연가스 분사밸브의 개발이 실질적인 대형 천연가스 엔진용 연료시스템 구현을 위해서 반드시 필요하다.[7-9]

본 연구에서는 MW급 천연가스 엔진을 위한 대유량 천연가스 분사밸브를 고안하여 시작품을 제작하였고, 분사밸브의 동특성 성능평가를 통해 분사밸브 유량 선형성과 최대 유량, 분사밸브 개폐 응답성을 측정하였다. 또한 천연가스 분사밸브 성능 최적화를 위해 지난 연구에[10] 이어서 솔레노이드 코어의 금속 재질 변경, 메인 하우징의 입구 크기 및 가스 공급압력의 변화에 따른 영향을 살펴보고자 한다.

II. 천연가스 분사밸브의 구조

본 연구의 실험 대상인 천연가스 분사밸브를 고안하여 설계 및 제작하였으며, 실제 밸브의 부품 사진을 Fig. 1에 나타내었고, 모든 부품이 조립된 단면도를 Fig. 2에 표기하였다. 분사밸브는 크게 밸브를 열게 만드는 구동력을 제공하는 솔레노이드부와 천연가스 연료의 유동을 통해 가스연료를 엔진 흡기계로 공급해주는 바디부의 두 부분으로 나눌 수 있다.

솔레노이드부는 다시 솔레노이드 코어와 코일, 솔레노이드 하우징과 전원케이블 등으로 크게 나눌

수 있는데 솔레노이드 코어는 코일이 위치하여 전자기력을 발생시키는 부분으로서 초도품의 경우는 순철을 재질로 사용하였으며 코일의 경우는 구리를 사용하였다. 전자기력을 극대화시키기 위해서 코어에서 코일이 감기는 위치는 도넛 모양의 코일부 안쪽의 면적이 바깥쪽 면적의 1/2이 되도록 설계하여 제작하였다. 솔레노이드 하우징은 솔레노이드 코어가 위치하고 전류가 공급되는 부분으로서 전원은 케이블로 공급되도록 구성하였으며 센터링을 설치하여 솔레노이드 코어가 정중앙에 위치하도록 설계하였다. 또한 솔레노이드 하우징의 재질은 가공성과 방열 용이성을 고려한 후 선정하여 설계 및 제작에 반영하였으며 전원은 직류 24 V를 공급하도록

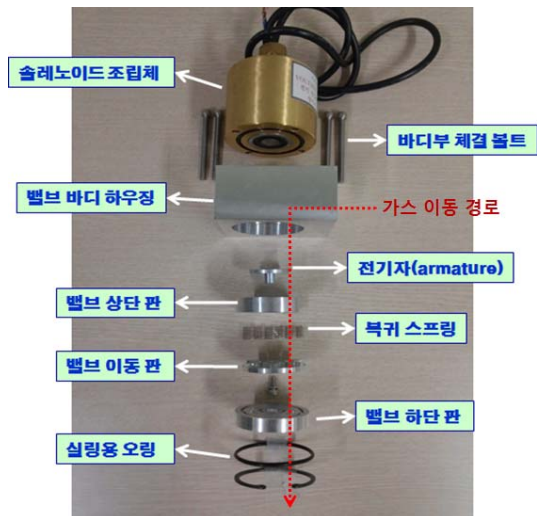


Fig. 1. Gas injection valve core components.

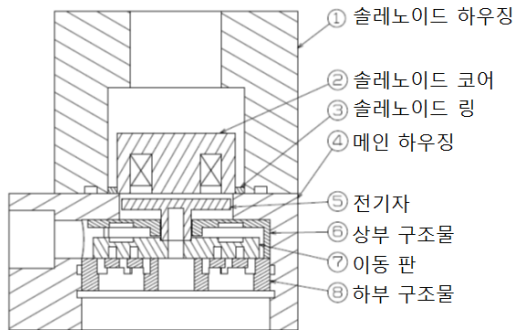


Fig. 2. Sectional view of a gas injection valve.

설계하였다. 솔레노이드 코어에 위치한 코일이 최적의 위치를 유지하면서 가스연료 또는 외부와의 접촉을 방지할 수 있도록 예폭시로 절연하였으며 솔레노이드 하우징 하단부 중간 위치에 오링을 삽입할 수 있도록 설계하여 가스연료의 누설이 최소화되도록 설계 및 제작하였다.

밸브 바디부는 크게 상판과 하판, 전기자(Armature)와 이동판, 복귀 스프링과 바디 하우징으로 구성되어 있다. 특히 상판과 하판, 이동판의 경우 충분한 유량을 확보할 수 있는 유로 구조를 갖도록 설계하였으며, 누설을 최소화시키고 안전성을 극대화시키기 위하여 바디 하우징은 일체형으로 하였다.

III. 실험장치 및 방법

천연가스 분사밸브 시작품을 대상으로 동특성 실험을 수행하기 위하여 천연가스 엔진 흡기계를 모사할 수 있는 분사밸브 유량 성능평가 장치를 구성하여 제작하였다. 본 연구에서는 안전상의 이유로 실제 천연가스 연료 대신 공기를 사용하여 모사할 수 있도록 하였으며, 엔진에서 요구되는 연료유량을 충분히 구현할 수 있는 대용량 컴프레서를 구비하였고, 압력 레귤레이터를 통해 성능평가 대상 분사밸브의 입구 가스압력을 조절하여 실제 엔진 연료공급 환경을 모사하도록 구성하였다. 가스 유량계(Micro motion CMF015M)를 구비하여 공급되는 공기 유량을 측정하였으며, 본 분사밸브에서 요구되는 가스온도를 충분히 높일 수 있는 히터를 가스라인 중에 설치하여 공급가스 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 구비하였다.

분사밸브 구동 드라이버는 Peak and hold 방식을 적용하였으며, 초기 구동력 강화를 위하여 최대 110 V의 승압 전압을 사용하였다. 분사밸브의 전기자에 의한 이동판의 이동 변위를 측정하기 위하여 레이저 변위 센서를 이용하였는데 파장 길이 670 nm, 최대 출력 1 mW, 정도(Resolution) 0.5 μ m의 사양을 가진다. 데이터획득(DAQ)시스템의 경우 본 실험에서 의도하는 응답성 범위인 ms 수준의 정보를 정확하게 얻을 수 있도록 4800 Hz의 데이터 샘플링비율(Sampling rate)로 데이터가 수집될 수 있도록 구성하였다.

이전 연구에서 얻은 결론에 따라 솔레노이드 코어의 지름이 16 mm 이면서 가는 굵기의 권선을 사용한 것과 전기자의 지름은 38 mm인 것을 공통의 기본 조건으로 선정하였다. 전기자의 이동 변위는 본 실험에 적합한 0.3 mm 수준에서만 시행하였으며, Table 1에서와 같이 본 실험에서 변경해 보고자

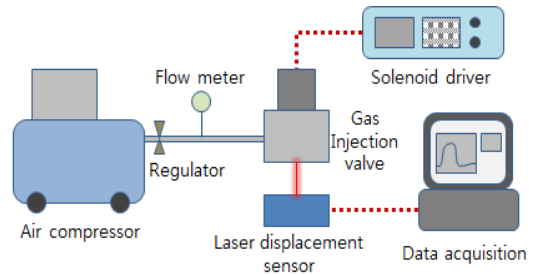


Fig. 3. Equipments for dynamic performance experiment.

Table 1. Experimental parameter summary

	Test 1	Test 2	Test 3
Common condition	Diameter of armature = 38 mm Moving distance of armature = 0.3 mm		
Variables	Material of solenoid core	Size of housing inlet	Gas supply pressure
	FCS(Ferrite carbon steel), Pure iron, Silicon steel	1/2 inch, 3/4 inch	1 bar, 1.4 bar

하는 솔레노이드 코어 재질, 하우징 입구의 크기, 가스의 공급압력 등에 대한 분사 밸브 성능의 차이를 살펴보고자 하였다. 가스의 공급압력은 밸브 설계에 대한 직접적인 인자는 아니지만, 작동환경의 중요 부분이므로 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 위하여 포함하였다. 각 실험 수행시 세 가지 변경 조건의 기본 조건은 재질의 경우에 순철, 하우징 입구의 크기는 1/2 inch, 가스공급압력은 1 bar를 유지하는 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 코어의 재질은 전자기 분야에서 가장 많이 추천되는 FCS(Ferrite carbon steel)와 규소강을 추가하여 제작을 하였다. 이전 연구와 마찬가지로 공급 가스 유량은 2 Hz로 밸브를 구동시키면서 측정하였다.

IV. 실험결과 및 토론

분사밸브의 동특성 파악을 위한 실험결과는 분사밸브의 열림과 닫힘을 파악할 수 있는 시간에 따른 분사밸브 이동판의 변위(Stroke) 변화와 인가 펄스 지속시간에 따른 연료 유량 변화 위주로 측정하여 도식화하였다. 다만 실제로는 분사밸브 인가 펄스 지속 시간과 실제 분사밸브 열림 지속 시간과는

차이가 발생하기 때문에 실제 분사밸브 열림 지속 시간을 별도로 측정하여 이에 따른 유량 변화도 나타내었다.

4.1. 솔레노이드 코어 재질 변경에 따른 특성

본 연구에서 솔레노이드 코어의 재질로 선정된 금속 재료들은 가장 중요한 자기특성 뿐만 아니라 가공성, 가격 그리고 내구성 등의 특성이 모두 다른 것으로 알려져 있으며, 사용 목적에 따라 적절한 것으로 선택되어야 한다. 가공성이나 가격 면에서는 순철이 유리하고 내식성이나 경년변화에는 규소강이 강점을, 고투자율 등의 자기특성은 FCS가 좋은 것으로 보고되어 있으나, 본 연구에서는 이러한 특성에 기반하여 최종적으로 설계에 맞도록 제작된 분사 밸브의 유량 성능을 기준으로 특성을 비교하였다.

Fig. 4는 분사 밸브의 전류 인가 시간에 따른 실제 전기자의 이동 변위를 측정된 결과이고, Fig. 5와 6은 각각 전류 인가 시간 및 실제 전기자가 열려있는 시간을 기준으로 측정된 가스 유량 측정 결과를 나타내었다. 전기자가 이동하기 시작하는 시점은 모두 동일하지만 자화가 해제되면서 다시 복귀되는 시점은 규소강이 가장 빠르고 전류인가 시간에 따라 차이는 있으나 순철이 가장 느리다. 이렇듯 전류인가 시간에 따라 실제 밸브가 열려있는 기간의 차이는 그대로 가스의 유량에 반영이 되므로, 실제 열림 기간이 짧은 규소강의 경우에만 나머지 두 재질에 비하여 작은 유량의 결과를 보이고 있다.

물론 이를 실제 열림 기간으로 변경하여 표기해 보면 순철과 FCS의 경우에는 거의 동일한 패턴을 보이고 있고, 거의 유사한 기울기의 유량 패턴이지만 규소강이 약간 기울기가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 밸브에서 요구되는 유량의 선형성 측면에서는 세 가지 재질에 따른 차별이 어렵다고 보여지는데, 밸브 제어의 관점에서 생각해 보면 규소강이 단 힘 응답성이 더 좋으므로 좀 더 유리하다고 할 수 있다고 판단된다.

4.2. 하우징 입구 크기 변경에 따른 특성

분사 밸브의 메인 하우징 측면에 공급 가스의 입구가 위치하고 있으며, 가스 공급 호스와의 연결을 위한 피팅 커넥터가 체결되는 구조이다. 제작된 밸브의 하우징 크기로 인하여 선택할 수 있는 피팅 커넥터의 크기는 1/2 및 3/4 inch급 두 종류밖에 없었으며, 이에 따라 변경되는 하우징 입구 크기의 변경은 분사 밸브의 유량 공급 특성에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. Fig. 7와 8은 각각 두 중

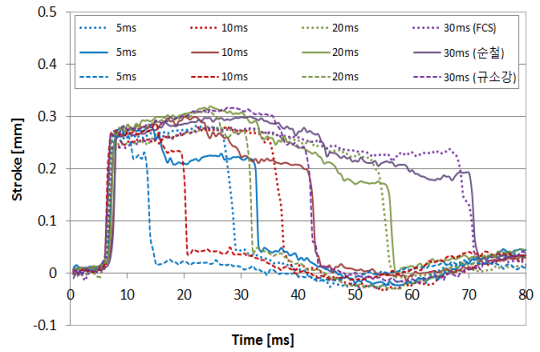


Fig. 4. Stroke measurement according to the pulse duration time in solenoid material variation.

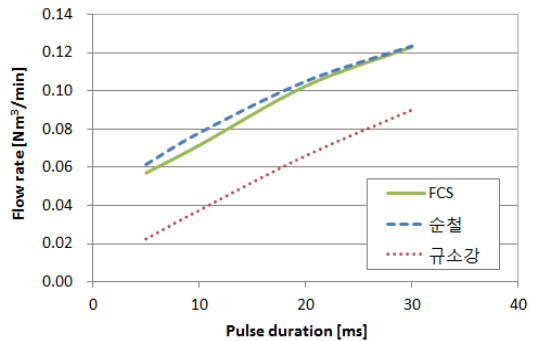


Fig. 5. Flow rate measurement according to the pulse duration time in solenoid material variation.

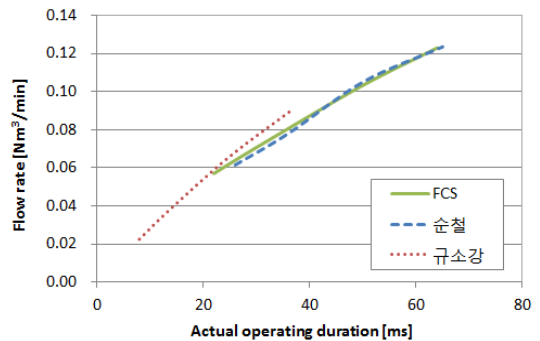


Fig. 6. Flow rate measurement according to the actual valve opening duration time in solenoid material variation.

류의 하우징 입구 크기에 대하여 전류인가시간 및 실제 밸브 열림 시간을 기준으로 측정된 유량을 나타내었다.

전류인가시간을 기준으로 살펴보면 입구의 크기가 큰 3/4 inch의 경우가 대략 20 % 정도 많은 유량을 공급하는 것을 볼 수 있다. 즉, 일반적으로 입구의 크기가 클수록 가스의 흐름에 유리한 조건이 형성될 것으로 예상되는 결과와 일치한다. 그러나, 실제 밸브가 열리는 시간으로 유량 결과를 다시 표기해 보면, 동일한 열림 기간에는 동일한 유량이 흐르는 것으로 나타났다. 즉, 하우징 입구의 크기가 큰 경우에는 같은 시간동안 전류가 인가되더라도 전기자가 다시 복원되는 시간이 더 걸리게 되어 실제 밸브가 열리는 시간이 길어지는 결과만 가져올 뿐이고 이에 따른 유량 추가 증대의 효과는 없는 것으로 보인다.

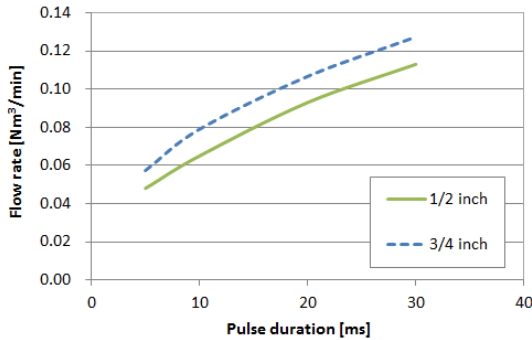


Fig. 7. Flow rate measurement according to the pulse duration time in housing inlet size variation.

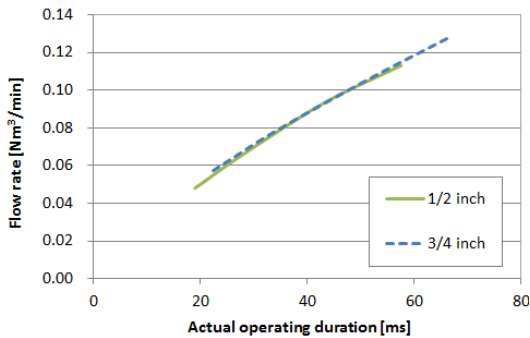


Fig. 8. Flow rate measurement according to the actual valve opening duration time in housing inlet size variation.

4.3. 가스 공급압력 변경에 따른 특성

마지막으로 가스 공급 압력의 차이는 공급 유량의 차이에 어느 정도의 영향을 미치는지 실험을 수행하여 보았다. 제작된 밸브의 성능으로는 안정적으로 작동이 되는 최대 압력 조건이 1.4 bar였으며, 따라서 기본 조건인 1 bar 공급 압력과 비교해보기로 하였다.

Fig. 9 에는 두 압력 조건에서 실제 전기자가 움직이는 변위를 측정된 결과를 나타내었는데, 압력이 높은 1.4 bar 조건에서는 전기자가 약 1.5 ms 정도 늦게 작동하기 시작하는데, 이는 높은 압력으로 인하여 전기자를 누르고 있는 힘이 더욱 커졌기 때문으로 생각할 수 있다. 그런데, 전기자가 다시 복원되기 시작하는 시점은 전류인가시간이 짧은 경우에는 1.4 bar에서 두드러지게 빨라지지만 긴 경우에는 동일하게 측정되었다. 이에 대한 원인을 생각해

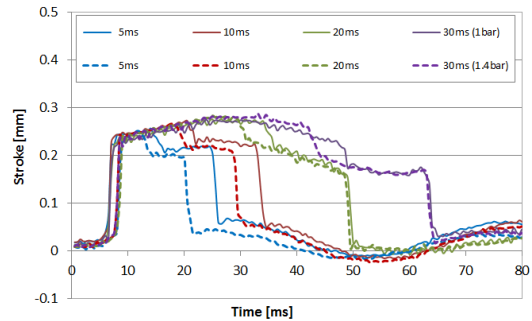


Fig. 9. Stroke measurement according to the pulse duration time in supply gas pressure variation.

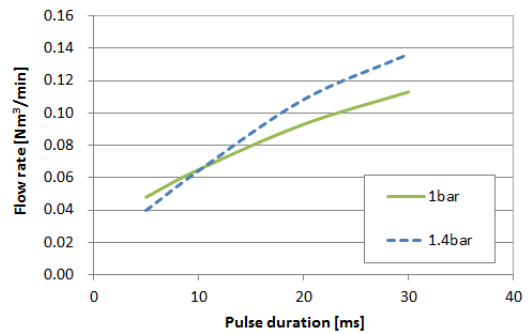


Fig. 10. Flow rate measurement according to the pulse duration time in supply gas pressure variation.

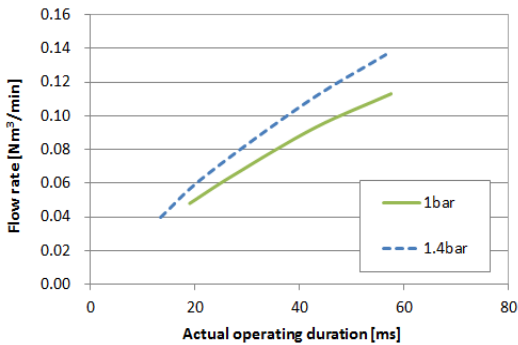


Fig. 11. Flow rate measurement according to the actual valve opening duration time in supply gas pressure variation.

보면 전류가 증가되어 전기자가 솔레노이드 코일에 끌려갈 때, 둘 사이에는 미세한 틈이 발생하며 이 틈 사이에도 공급되는 가스가 존재한다. 전기자의 이동변위 그래프를 살펴보면 작은 차이이긴 하지만 전류 인가시간이 길어질수록 전기자의 변위가 점점 길어지는 경향을 보이고 있으며, 따라서 전류 인가 시간이 짧은 경우에는 전기자와 솔레노이드 밸브 사이의 공간이 상대적으로 크기 때문에 전기자가 복귀하는 경우에 공기의 압력이 힘으로 작용할 수 있는 여지가 많다.

이러한 현상으로 인해 1.4 bar 압력 조건에서는 전류 인가시간대비 실제 밸브 열림시간의 변화 정도가 1 bar와는 다르게 나타나고, 이는 곧 유량 측정 결과에도 영향을 주게 된다. Fig. 10 와 11은 앞에서와 마찬가지로 각각 전류인가시간 및 실제 밸브 열림 시간을 기준으로 측정된 유량 데이터이다. 단순 전류인가시간을 기준으로 보면 예상과는 달리 전류인가시간이 짧은 경우에는 1.4 bar 에서의 유량이 더 낮게 측정되었으며, 전류인가시간이 길어질수록 다시 역전되는 모습을 보여준다. 실제 밸브 열림 시간을 기준으로 살펴보면 1.4 bar 조건인 경우의 유량 기술품이 완전히 다르게 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 향후 솔레노이드 밸브의 성능을 좀 더 개선하여 보다 높은 압력의 가스 공급이 가능해지면, 이러한 가스 공급 유량 특성을 반영하여 불필요가 있을 것이다.

V. 결론

대형 천연가스 엔진에 적용되는 천연가스 연료 공급시스템 중에서 가장 핵심적인 천연가스 분사

밸브를 설계 및 제작하였으며, 제작된 분사밸브 형태의 분사기 동특성을 실험을 수행하였다. 전반적으로 유량의 선형성이 잘 보장되었고, 엔진 용량에 충분한 유량을 확보하는 결과를 보였다. 가스 분사밸브의 설계 인자 최적화를 위하여 주요 설계 인자를 변경하면서 동특성 및 유량 성능을 측정하여 본 결과, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 솔레노이드 코어의 재질 변경에서는 유량의 선형성 측면에서는 모든 재질이 유사하지만, 규소강판이 전류인가시간 대비 짧은 밸브열림 시간특성을 보였기 때문에 제어 관리성 측면에서 유리하고 또한 동일 밸브열림기간 대비 유량확보가 약간 우세한 경향을 보였다.

(2) 메인 하우징의 입구 크기 변경에 따라 최대 유량의 차이는 있으나, 실제 밸브열림기간 기준으로는 유량의 선형성 및 실제 값의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

(3) 실제 작동환경 변수인 공급가스의 압력 차이에 대해서는 압력 증가에 따라 전류인가시간 대비 실제 밸브열림 기간에 큰 차이점이 나타났으며, 이로 인하여 고압의 공급압력일수록 공급유량의 선형 기술품이 점차 커진다는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 산업원천기술개발사업(10053151,800kPa급 고압·고정밀NGV 연료시스템 국산화 개발)및 한국기계연구원의 기관고유사업으로부터 지원을 받아서 이루어졌습니다.

REFERENCES

- [1] Corbo, P., Gambino, M., Iannaccone, S. and Unich, A., "Comparison between Lean-burn and Stoichiometric Technologies for CNG Heavy-duty Engines", *SAE Paper*, No.950057, (1995)
- [2] Lee, S.Y., Huh, K. Y., Kim, Y. M. and Lee, J. H., "Analysis of In-cylinder Fuel-air Mixture Distribution in a Heavy Duty CNG Engine", *Int. J. Automot. Technol.*, 2(3), 93-101, (2001)
- [3] Kim, C. and Oh, S., "A Study on the Characteristics of Dual Fuel Engine Fueled by Natural Gas and Diesel", *KIGAS*, 17(6), 20-26, (2013)
- [4] Cheenkachorn, K., Poompipatpong, C. and Ho, C. G., "Performance and Emissions of a Heavy-duty Diesel Engine Fuelled with Diesel and

- LNG(liquid natural gas)", *Energy*, 53, 52-57, (2013)
- [5] Lee, S., Lee, J., Heo, S., Yoon, S. and Roh, Y., "Characteristics of Electronically Controlled 13L LNG-Diesel Dual Fuel Engine", *KIGAS*, 11(4), 54-58, (2007)
- [6] Papagiannakis, R. G. and Hountalas, D. T. "Experimental Investigation Concerning the Effect of Natural Gas Percentage on Performance and Emissions of a DI Dual Fuel Diesel Engine", *Applied Thermal Engineering*, 23, 353-365, (2003)
- [7] Heywood, J. B., *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill, New York, (1988)
- [8] Glasmachers, H., Melbert, J. and Koch, A., "Sensorless Movement Control of Solenoid Fuel Injectors", *SAE Paper*, No.2006-01-0407, (2006)
- [9] Liu, L. and Chang, S. Q., "Motion Control of an Electromagnetic Valve Actuator based on the Inverse System Method", *Proc. IMechE Part D: J. Automobile Engineering*, 226(1), 85-93, (2011)
- [10] Choi, Y., Kim, Y., Lee, S. and Kim, C., "Dynamic Performance of Natural Gas Injection Valve for Heavy-Duty Power Generation Engine - Part 1", *KIGAS*, 19(6), 15-21, (2015)