



## 발전용 대형엔진용 천연가스 분사밸브 동특성 연구 (I)

최 영 · †김용래 · 이석환 · 김창기

한국기계연구원 그린동력연구실

(2015년 11월 16일 접수, 2015년 12월 23일 수정, 2015년 12월 24일 채택)

### Dynamic Performance of Natural Gas Injection Valve for Heavy-Duty Power Generation Engine – Part I

Young Choi · †Yong-Rae Kim · Seok-Whan Lee · Chang-Gi Kim

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

(Received November 16, 2015; Revised December 23, 2015; Accepted December 24, 2015)

#### 요 약

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. 전기자의 변위와 지름을 변경해 가면서 실험을 수행하였는데, 그 결과 유량의 선형성이 잘 보장되고 1bar의 차압에서 2ms 이내의 응답성으로 분사밸브가 열리는 결과를 얻었다. 가스 유량 또한 100Liter/min(@2Hz) 이상으로 충분하기 때문에 본 연구에서 고안한 천연가스 분사밸브는 요구되는 동특성 성능실험을 만족하였기 때문에 MW급 발전용 천연가스 엔진 연료공급시스템에 적합할 것으로 판단된다.

**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. As a result of the experiments, linearity of flow rate was obtained and overall around 2ms of response time was observed at the pressure difference of 1bar. In addition, more than 100Liter/min(@2Hz) of gas flow rate was witnessed, which is expected to be adequate for the fuel supply system of a MW class natural gas engine.

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

#### I. 서 론

메탄이 주성분인 천연가스 연료는 지구상에 존재

하는 탄화수소 연료 가운데 가장 풍부한 매장량을 자랑하는 연료 중의 하나로서 그 사용가치가 매우 높은 것으로 알려져 있다. 또한 셰일가스 채굴기술의 발달로 인해 실질적인 가격 경쟁력을 확보할 것으로 기대되기 때문에 천연가스 연료를 이용하는 기술 개발 필요성이 그 어느 때보다 높아지고 있다. 이

†Corresponding author:yrkim@kimm.re.kr

Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

러한 이용 기술 개발은 여러 분야에서 나타나고 있는데 발전용 엔진에 천연가스 연료를 이용하는 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 연료 분사장치가 존재하진 않지만 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 회전수(rpm)가 1,500~1,800rpm에 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 분사밸브 이동관의 변위, 솔레노이드 코일의 권선 굵기, 전기자의 직경의 변화에 따른 영향을 살펴보고자 한다.

## II. 천연가스 분사밸브

1MW 8기통 천연가스 전소엔진과 1.5MW 8기통 천연가스-디젤 혼소엔진을 적용 대상으로 선정하여 본 연구의 실험 대상인 천연가스 분사밸브를 고안하여 설계 및 제작하였다. 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 24V를 공급하도록 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 이동관, 복귀 스프링과 바디 하우징으로 구성되어 있다. 전기자의 높이를 가변시킴으로서 전기자와 결합하여 이동하는 이동관의 변위(Stroke)가 0.3, 0.6, 0.9mm가 되도록 설계 및 제작하였는데 전기자의 재질 또한 솔레노이드 코어 재질과 일치하도록 초도품의 경우 FCS(Ferrite carbon steel) 재질로 제작하였다. 특히 상판과 하판, 이동관의 경우 충분한 유량을 확보할 수 있는 유로 구조를 갖도록 설계

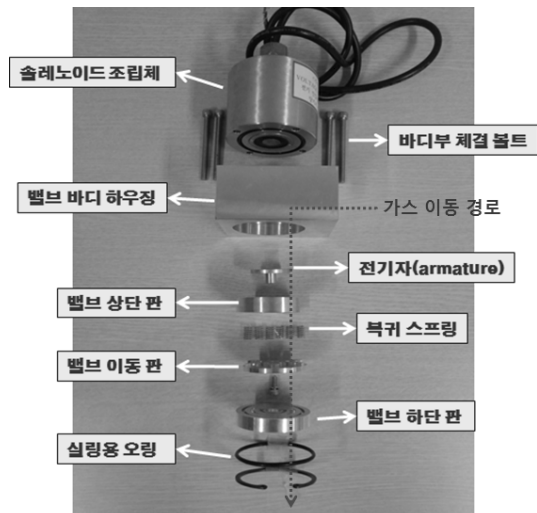


Fig. 1. Gas injection valve core components.

하였으며, 누설을 최소화시키고 안전성을 극대화하기 위하여 바다 하우징은 일체형으로 하였다.

### III. 실험장치 및 방법

이 전 절에서 설명한 천연가스 분사밸브 초도품을 대상으로 동특성 실험을 수행하기 위하여 1.5MW 천연가스 엔진용 흡기계를 모사할 수 있는 분사밸브 유량 성능평가 장치를 구성하여 제작하였다. 본 연구에서는 실제 천연가스 연료 대신 공기를 사용하여 모사할 수 있도록 하였으며, 1.5MW급 발전용 엔진에서 요구되는 연료유량을 충분히 재연할 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 공기 유량을 측정하였으며 본 분사밸브 요구 성능 부하여부를 파악하기 위하여 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 110V의 승압 전압이 가능하다. 분사밸브의 전기자에 의한 밸브 이동편의 이동 변위를 측정하기 위하여 레이저 변위 센서를 이용하였는데 파장 길이 670nm, 최대 출력 1mW, 정도(Resolution) 0.5  $\mu$ m의 사양을 가진다. 데이터획득(DAQ)시스템의 경우 본 실험에서 의도하는 응답성 범위인 ms 수준의 정보를 정확하게 얻을 수 있도록 4800Hz의 데이터 샘플링비율(Sampling rate)로 데이터가 수집될 수 있도록 구성하였다.

솔레노이드 코일 저항은 2~8 $\Omega$ 까지 2 $\Omega$ 간격으로 변화시켜가면서 밸브 작동성을 파악하였는데 4, 6, 8 $\Omega$ 의 경우 초기 구동을 위한 전압값이 너무 크게 요구되어 본 연구에서 목적으로 하는 성능 구현이 어려워 2~4 $\Omega$  범위에 초점을 맞추어 실험을 진행하였다. 그 결과 2.3~2.6 $\Omega$  범위가 최적임을 확인하였으며 이 범위에서는 성능 변화가 크지 않았기 때문에 같은 전압에 대해 가장 높은 초기 전류를 인가하여 가장 높은 자기력을 발생시킬 수 있는 2.3 $\Omega$ 의 솔레노이드를 사용하여 동특성을 실험을 통해 평가하였다. 또한 순철 재질의 솔레노이드 코어의 지름은 16mm인 경우 가는 굵기 권선을 사용한 것과 14mm인 경우 굵기 권선을 사용한 두 가지로 제작하였는데, 이는 권선의 굵기 변화에 대하여 동일한 저항값을 유지하기 위함이다.

Table 1. Experimental parameter summary

	실험 1	실험 2
고정 조건	전기자 지름 38mm	이동 변위 0.3mm
공통 변수	솔레노이드 코어 지름 14mm, 16mm	
변수	이동 변위 0.3mm, 0.6mm	전기자 지름 36mm, 38mm

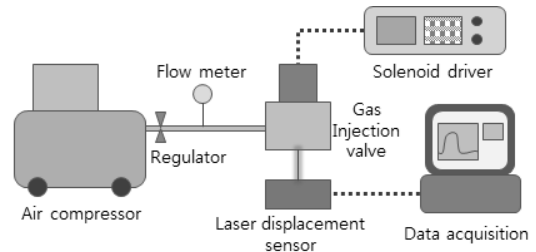


Fig. 2. Equipments for dynamic performance experiment.

실험은 크게 세 가지 항목에 중점을 두어 수행하였는데 먼저 전기자의 길이를 변경하여 이동편의 변위가 0.3, 0.6, 0.9mm로 변경되도록 함으로써 응답성과 유량을 측정하였고 전기자의 지름을 38mm에서 36mm로 변화시켜 그 영향을 살펴보았다. 분사밸브 입구와 출구의 차압은 1bar를 유지하면서 실험을 진행하였고, 각각의 실험조건에 대하여 2Hz로 밸브를 구동시키면서 유량을 측정하였다. 실제 밸브는 이보다 더 빠른 속도로 작동을 해야 하지만 아직 솔레노이드의 내구성이 부족하여 이 이상의 고속으로는 실험이 어렵다.

### IV. 실험결과 및 토론

MW급 발전용 천연가스 엔진에서는 충분한 양의 천연가스 연료가 빠른 시간 안에 엔진 연소실로 공급되도록 연료공급시스템을 구비하여야 한다. 따라서 실험결과는 분사밸브의 열림과 닫힘을 파악할 수 있는 시간에 따른 분사밸브 이동편의 변위(Stroke) 변화와 인가 펄스 지속시간에 따른 연료 유량 변화 위주로 측정하여 도식화하였다. 분사밸브 인가 펄스 지속 시간과 실제 분사밸브 열림 지속 시간과는 차이가 발생하기 때문에 실제 분사밸브 열림 지속 시간에 따른 유량 변화 또한 측정하여 나타내었다.

#### 4.1. 전기자 변위 변화에 따른 동특성

Fig. 3 은 순철 재질과 가는 권선의 솔레노이드 코어 (직경 16mm)를 사용하고 직경이 38mm인 전기자를 적용하였을 경우, 분사밸브 입출구의 차압이 1bar인 조건에서 입력 펄스의 시간에 따른 이동관의 변위를 측정된 결과를 보여주고 있다. 이동관의 변위가 0.9mm인 조건에서는 솔레노이드의 자기력이 충분하지 않아 밸브 개폐가 이루어지지 않았다. 결국 변위가 0.3mm와 0.6mm인 경우에서만 이동관의 변위 변화를 비교하여 나타내었다. 실제로 측정된 변위는 가공 공차 및 조립 공차로 인하여 설계치수와는 차이를 보이고 있다.

Fig. 4 는 위와 동일한 조건에서 굵은 권선의 솔레노이드 코어(직경 14mm)를 적용하였을 경우의 실험 결과이며, 마찬가지로 변위가 0.3mm와 0.6mm인 경우

에서만 작동을 하였다.

이동관 변위가 20% 가량 움직이는 시간을 분사밸브의 열림과 닫힘 응답성으로 정의한다면, 전반적으로 밸브가 열리는 시간은 모든 경우 2ms 이내로서 매우 빠른 응답성을 보이고 있지만 밸브가 닫히는 시간은 상대적으로 느린 반응을 보이며 펄스 지속 시간이 길어질수록 응답성이 더욱 지연됨을 확인할 수 있다. 이는 솔레노이드 코일이 자화되는 시간보다 자화가 해제되는 데에 더 많은 시간이 필요하기 때문이다. 권선 굵기에 따른 차이를 살펴보면 굵은 권선을 사용한 경우가 전반적으로 실제 열림이 지속되는 기간이 짧다. 이는 굵은 권선일수록 자화가 해제되는 시간이 빠름을 의미한다.

위의 결과에서 모두 짧은 변위를 갖는 전기자를 사용하였을 경우가 같은 펄스 신호에 대해 좀 더 빠른

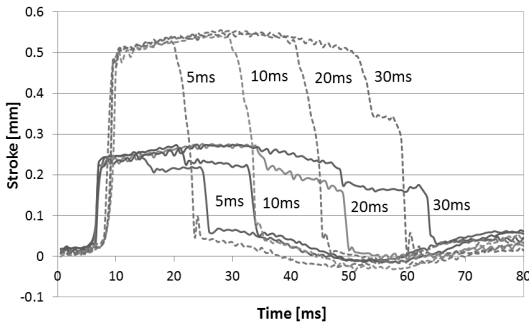


Fig. 3. Stroke variation according to the pulse duration time with the 16mm diameter of pure iron solenoid core when two different armatures are applied.

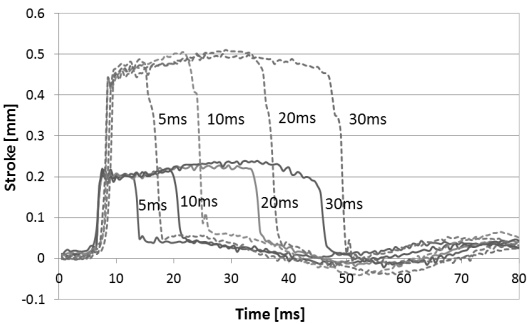


Fig. 4. Stroke variation according to the pulse duration time with the 14mm diameter of pure iron solenoid core when two different armatures are applied.

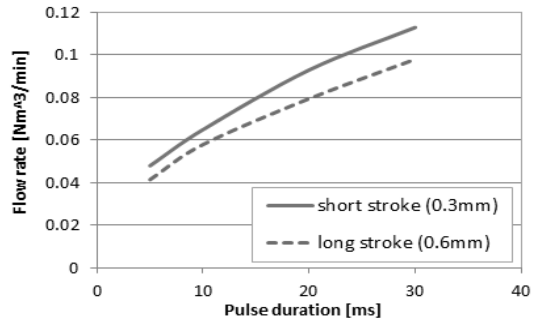


Fig. 5. Flow rate variation according to the pulse duration time with the 16mm diameter of pure iron solenoid core when two different armatures are applied.

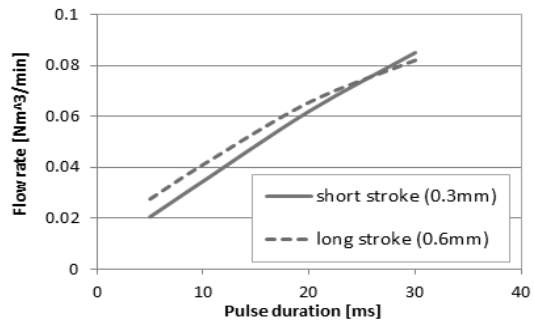
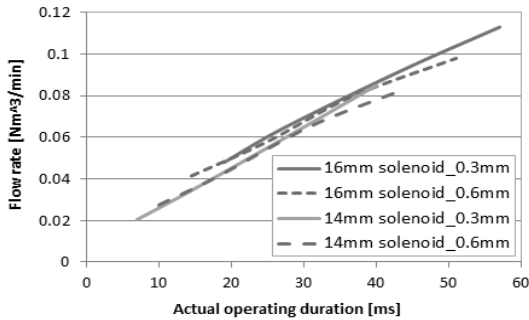


Fig. 6. Flow rate variation according to the pulse duration time with the 14mm diameter of pure iron solenoid core when two different armatures are applied.



**Fig. 7.** Flow rate variation according to the actual valve opening duration time with the 16mm and 14mm diameter of pure iron solenoid core when two different armatures are applied.

시간 안에 밸브가 열림을 볼 수 있는데, 이는 솔레노이드 코일과 전기자의 거리가 짧기 때문에 더 큰 전자기력이 작용한 결과이다. 그러나, 밸브가 닫히는 시기는 솔레노이드 코어의 종류에 따라 다르게 나타났다. 가는 권선을 사용한 솔레노이드 코어의 경우에는 짧은 변위를 갖는 전기자를 사용하였을 때 더 늦게 밸브가 닫히지만 굵은 권선을 사용한 솔레노이드의 경우에는 더 일찍 밸브가 닫힘을 확인할 수 있다. 이는 앞서 설명한 것과 같이 굵은 권선을 사용한 솔레노이드의 자화 특성에 기인한 것으로 볼 수 있다.

Fig. 5와 6은 앞의 두 가지 경우에 대하여 입력 펄스 기간에 따른 유량값을 0.3mm(short stroke)와 0.6mm(long stroke)의 전기자 변위별로 보여주고 있다. 모든 경우에 대하여 인가되는 펄스의 시간이 증가함에 따라 유량이 선형적으로 증가하는 이상적인 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 가는 권선을 갖는 솔레노이드 코어를 사용하였을 경우 작은 변위의 전기자를 적용하였을 경우가 오히려 더 높은 유량 분포를 나타내고 있음을 알 수 있는데 이것은 변위 측정 결과에서 확인할 수 있듯이 동일한 펄스 인가 기간대비 더 오랜 기간 동안 밸브가 열려 있는 것에 기인한 결과이다. 동일한 이유로 인하여 굵은 권선의 솔레노이드 코어 경우에는 반대로 큰 변위를 갖는 전기자를 사용하였을 경우가 전체적으로 더 큰 유량분포를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

두 솔레노이드 코어의 유량범위가 약 20% 정도 차이를 보이고 있는데 이는 실제로 밸브가 열려있는 기간에 차이가 있기 때문이며, 따라서 실제 밸브의 개폐시간에 따른 가스 유량 차이를 살펴보는 것이 필요하다.

Fig. 7에서는 실제 밸브의 개폐 시간에 따른 유량으로 표기하여 보았다. 그 결과 변위가 긴 경우에 열림 기간이 길어질수록 선형성 면에서 약간 부족하긴 하지만 전반적으로는 전기자의 변위 차이에 상관없이 거의 동일한 유량 패턴이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이는 본 연구에서 실험한 조건에서는 작동 변위의 변화가 유량을 변경할 수 있는 인자가 아니라는 것을 의미한다. 본 연구에서 설계된 밸브는 매우 복잡한 내부 유로를 형성하고 있기 때문에 아마추어 상하이동에 따라 최종적으로 외부와 연결된 부분의 단면적이 아닌 다른 내부의 특정 부위에서 유동의 흐름이 결정된다고 볼 수도 있을 것으로 추정되며, 이는 추후 유동해석이 가능한 범위에서 추가 연구가 필요하다.

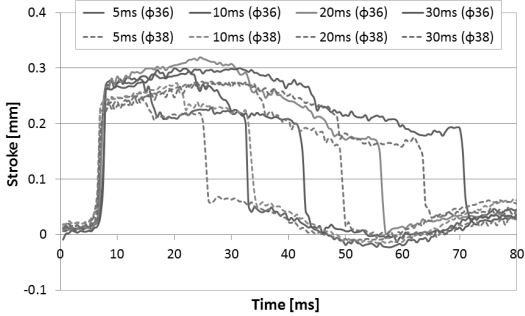
또한 솔레노이드 권선의 굵기 차이에 따라 전반적인 유량의 범위가 차이가 나던 결과 역시 실제 밸브가 개폐되는 시간을 기준으로 살펴보면 거의 차이가 없다는 것을 볼 수 있다. 즉, 실제로 밸브가 얼마 동안 열려있느냐가 유량을 결정짓는 기준이 될 수 있다. 다만 굵은 권선의 솔레노이드 코어의 경우가 실제 밸브가 열리는 시간이 인가되는 펄스의 기간에 좀더 가깝기 때문에 제어적인 측면에서 유리한 결과를 나타내고 있는 것으로 분석된다.

#### 4.2. 전기자 지름 변화에 따른 동특성

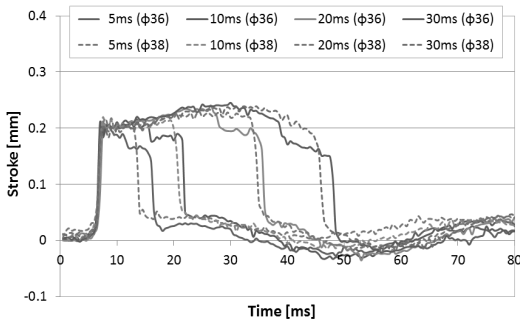
전기자의 변위의 크고 작음과 더불어 전기자의 크기 또한 솔레노이드 자기력에 의해 영향을 받을 것으로 판단되어 전기자 지름 변화에 따른 분사밸브의 열림과 닫힘, 유량 특성을 파악하였다. Fig. 8 와 9 은 각각 가는 권선과 굵은 권선의 솔레노이드 코어를 적용한 경우에 전기자 지름이 36mm인 것과 38mm인 것을 비교한 것으로써, 전기자의 변위는 0.3mm로 동일하게 유지하였다.

전반적으로 이전 결과와 같이 가는 권선을 적용한 경우가 밸브의 열림 기간이 긴 것을 볼 수 있으며, 지름이 다른 두 전기자를 비교하면 초기에 밸브가 열리는 시간에는 차이가 없으나 전기자 지름 38mm인 경우가 36mm보다 더 빨리 닫히는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 가는 권선이 적용된 경우일수록 더 큰 차이를 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이는 전기자의 지름이 큰 경우가 자화 해체에 더 유리함을 의미한다.

전기자 지름 36mm의 경우는 유량 측면에서 38mm인 경우는 제어적인 측면에서 더 유리할 것으로 예측이 되며, 이는 Fig. 10~12 에서와 같이 유량 측정 결과에서 명확하게 확인할 수 있다. 이전과 같이 Fig. 10과 11는 펄스의 인가 기간에 따른 유량 결



**Fig. 8.** Stroke variation according to the pulse duration time with the 16mm diameter of pure iron solenoid core when the diameter of armature is varied.

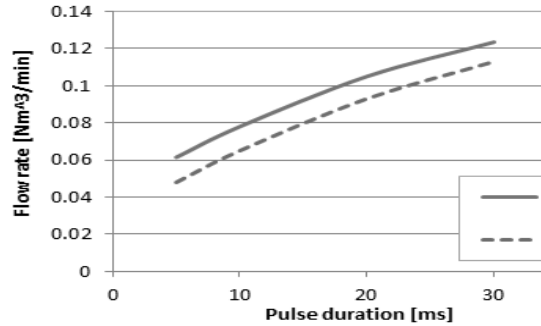


**Fig. 9.** Stroke variation according to the pulse duration time with the 14mm diameter of pure iron solenoid core when the diameter of armature is varied.

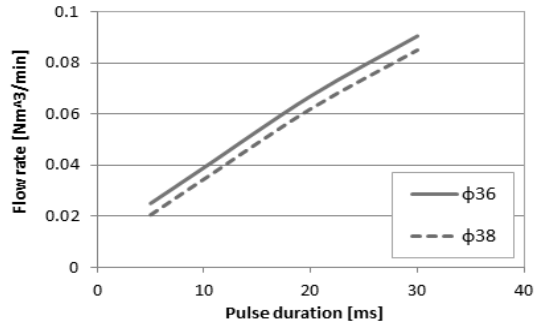
과이며, Fig. 12는 실제 밸브가 열리는 기간을 기준으로 변경한 결과이다.

전반적으로 전기자의 크기 변화에 상관없이 유량의 선형성은 잘 보존되고 있는 결과를 얻었다. 이전의 실험결과와 유사하게 실제 밸브가 열리는 시간을 기준으로 비교하여 보면, 두 전기자의 지름 차이가 밸브의 열리는 기간에만 영향을 미칠 뿐이고 동일한 유량 패턴을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 솔레노이드 권선 굵기 차이도 밸브가 열리는 기간에만 영향을 미칠 뿐이며 실제로 동일한 밸브의 열림 기간을 기준으로 하는 동일한 수준의 유량이 흐른다는 것을 볼 수 있다.

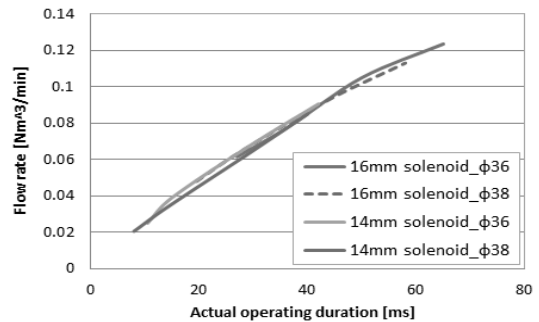
이상과 결과를 살펴보면 최대 유량 범위는 약 100 Liter/min (@2Hz) 가량으로 본 연구에서 적용하고자 하는 MW급 발전용 엔진에 충분한 연료 유량을 제공할 수 있으며, 응답성 또한 만족할 만한 성능을



**Fig. 10.** Flow rate variation according to the pulse duration time with the 16mm diameter of pure iron solenoid core when the diameter of armature is varied.



**Fig. 11.** Flow rate variation according to the pulse duration time with the 14mm diameter of pure iron solenoid core when the diameter of armature is varied.



**Fig. 12.** Flow rate variation according to the actual valve opening duration time with the 16mm and 14mm diameter of pure iron solenoid core when the diameter of armature is varied.

보여주고 있다. 다만 솔레노이드 코어의 설계 특성에 따른 자기력 크기와 분포, 분사밸브 내부 유로 구조, 복귀 스프링 힘과 유체 상류(Up-stream)로부터 작용하는 압력의 상호 작용 등 다양한 원인에 의하여 성능이 결정되는 만큼 향후 다른 설계 인자들도 변경해 보면서 추가적인 성능 특성 분석을 수행하고자 한다.

## V. 결론

MW급 발전용 천연가스 엔진에 적용되는 천연가스 연료공급시스템 중에서 가장 핵심적인 천연가스 분사기를 설계 및 제작하였으며, 제작된 분사밸브 형태의 분사기 동특성을 실험을 수행하였다. 전반적으로 유량의 선형성이 잘 보장되고 1bar의 차압에서 2ms 이내의 응답성을 보였으며 혼소 엔진에 충분한 유량을 확보하는 결과를 얻었다. 가스 분사기의 설계 인자 최적화를 위하여 주요 설계 인자를 변경하면서 동특성 및 유량 성능을 측정하여 본 결과, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 전기자의 변위를 변화시켜가면서 분사밸브의 열림과 닫힘 응답성을 측정한 결과 0.9mm의 최대 변위인 경우 일반적인 작동이 불가능하였고 0.3mm와 0.6mm를 적용하였을 경우 모두 2ms 내외의 양호한 응답성을 나타내었다.

(2) 가는 권선의 솔레노이드 코어를 사용한 경우가 굵은 권선보다는 자화 특성의 차이로 인하여 동일한 인가 펄스 시간 대비 밸브 열림 시간이 더욱 길게 나타났으나, 실제 밸브가 열리는 시간을 기준으로 유량을 비교해 보면 권선의 굵기나 전기자의 변위 차이는 큰 영향을 미치지 못하지만 변위가 0.6mm인 경우에는 유량의 선형성 측면에서 0.3mm보다 다소 불리한 면이 있었다. 다만 제어적인 측면에서는 인가 펄스 시간과 실제 분사밸브 열림 지속 시간이 근접한 굵은 권선의 솔레노이드 코어 사용이 유리하다.

(3) 전기자의 지름을 설계 최대값인 38mm에서 36mm로 변경하여 동특성 실험을 수행한 결과, 전기자 지름 38mm의 경우가 인가된 펄스 시간에 더 근접한 실제 분사밸브 열림 시간 특성을 보였기 때문에 제어적인 측면에서 다소 유리하다고 할 수 있다. 유량 결과에 있어서는 전기자 지름 36mm의 경우가 더 긴 밸브 열림으로 인하여 보다 큰 유량을 제공하였으나, 실제 밸브가 열리는 시간을 기준으로 비교해

보면 전기자의 지름 변화에도 유량이 동일한 수준으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 2014년도 산업통상자원부 에너지자원 기술개발사업에 의한 연구비 지원 및 한국기계연구원의 기관고유사업으로 수행되었습니다.

## 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)