

<논 문> SAE NO. 97370019

솔레노이드 구동 수소인젝터의 성능예측

Performance Prediction of Solenoid Actuated Hydrogen Injector

이 형 승*, 이 용 규*, 김 한 조*, 김 응 서**
H. S. Yi, Y. G. Lee, H. J. Kim, E. S. Kim

ABSTRACT

The performance of the solenoid actuated hydrogen injector and the capacitive peak-hold type driving circuit was predicted through the modeling of the injector and the driving circuit. the modeling was composed of the driving circuit, the solenoid, the moving parts of the injector, and the hydrogen injection system. The performance of the injector through the modeling was compared with the results of the solenoid and injector rig tests, and those were consistent with each other.

Through the prediction of the injector performance, the effects of the components such as electrical resistor, capacitor, and injector spring are easily known to the injector designer and it becomes convenient to choose the appropriate components which satisfy the injector performance required.

주요기술용어 : solenoid(솔레노이드), peak-hold type(피크-홀드형), gas injector(가스인젝터), hydrogen fueled engine(수소연료기관), characteristic method(특성곡선법)

1. 서 론

수소는 탄화수소나 일산화탄소와 같은 탄소화합물을 배출하지 않는 청정연료이며, 기후변화협약에 의해 온실 효과의 주원인으로 여겨지는 이산화탄소의 배출량이 제한되는 상황에서 매우 유

망한 에너지의 하나이다^{1),2)}.

대체에너지로서 수소를 연료로 사용하는 내연기관에 관한 연구는 다양하게 진행되어 왔으며, 현재까지의 수소 연료 기관에 관한 연구중 상당부분이 연료 공급 장치의 개발에 관한 것으로 이상 연소와 체적 효율의 저하없이 수소를 연소실에 공급하는 내용이 주된 과제였다.

수소를 연소실에 공급하는 방식중 연소실내 직접 분사 방식은 흡기 밸브가 닫힌 후 직접 연소

* 정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 서울대학교 기계공학과

실 내에 분사하므로 역화가 발생하지 않고 제적 효율도 감소하지 않는 장점을 지니고 있다. 그러나 이 방법을 실현하기 위해서는 연소실내에 직접 수소를 분사할 수 있는 장치의 개발이 선행되어야 하며, 이러한 장치중 가장 중요한 것이 수소 인젝터이다³⁾.

인젝터를 구동하는 방식으로는 캠, 유압, 솔레노이드 등 여러 가지가 있는데, 솔레노이드를 사용하는 방식은 분사 시작 시기 및 분사 지속 시간 등의 변화가 가장 용이하므로 수소 인젝터에 있어서 가장 적합하다 할 수 있으나, 이의 개발은 그리 용이하지 않다.^{4), 5), 6), 7)}.

솔레노이드로 구동되는 수소 인젝터를 개발하기 위해서는 인젝터의 구성요소인 솔레노이드, 구동회로, 인젝터의 운동부분, 그리고 수소 공급계에 대한 특성을 파악하여야 하며, 각 특성이 다른 인자에도 영향을 미치므로 이들 인자의 영향을 종합적으로 파악하여야 기관에서 필요한 요구 성능을 만족하는 인젝터를 설계할 수 있다.

수소 인젝터의 설계에 있어 가장 중요한 점은 빠른 작동과 함께 기관에서 소요로 하는 분사량을 원하는 시간에 정확하게 공급할 수 있는가의 여부이다. 이를 위해서 입력신호에 대한 분사량과 이 때의 지연시간을 정확히 알아야 할 필요가 있다. 이를 실험을 통하여 확인하기 위해서는 수소 인젝터 핀들의 시간에 따른 양정과 분사량을 모든 경우에 대해서 측정하여야 하므로 실험 과정이 복잡해지고 시간이 많이 걸리게 된다. 그리고 실험을 통하여 알기 어려운 물리량도 모델링과 수치해석을 통하여 예측 또는 확인할 수 있

었다. 따라서 인젝터의 개발기간을 단축하고 인젝터와 구동 회로 각각의 설계인자의 변경에 따른 성능의 변화를 빠르고 손쉽게 알아낼 수 있도록 구동 회로와 인젝터를 모델링 한 후, 수치해석을 통하여 핀들의 양정과 그에 따른 분사율을 예측할 필요가 있다.

본 연구에서는 이미 설계, 제작되어 발표된 솔레노이드 구동 연소실내 분사 수소 인젝터와 구동 회로를 대상으로 하였다.⁸⁾ 사용된 모델링은 크게 구동회로의 전기적 부분, 솔레노이드의 특성, 핀들과 그에 연결된 운동부의 동역학적 부분, 그리고 분사기구로 나뉜다. 여러 가지 인자를 변화시켜 성능 특성인 구동회로의 구동 전류, 솔레노이드의 구동력, 핀들의 양정, 그리고 인젝터의 분사량과 분사율을 파악하였으며, 예측 결과물 리그 시험결과와 비교하여 모델링의 타당성을 보였다.

2. 수소 인젝터와 구동회로

Fig.1은 수소 인젝터의 전체적인 조립도를 반 단면도의 형태로 나타낸 것으로서, 전체의 치수는 높이 140mm, 최대 지름 60mm이다. 본 연구의 대상인 수소 인젝터는 기관의 실린더 헤드에 직접 장착되어 흡기 밸브가 닫힌 뒤, 압축 행정 초기에 연소실 내에 직접 수소를 공급하며 일정한 분사압으로 분사 지속 기간을 변화시켜 분사량을 변화시키는 방법이다.

수소 인젝터는 솔레노이드(Lucas Ledex, model 3EF)로 구동되며, 솔레노이드의 직경은 33.3

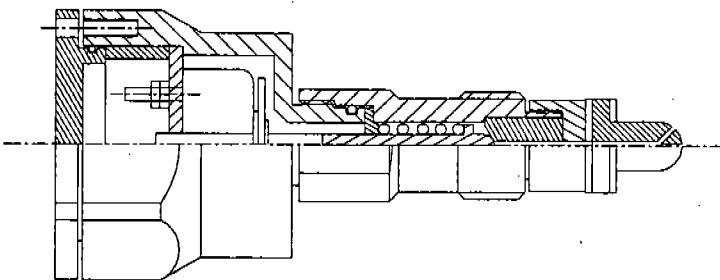


Fig.1 Sectional drawing of assembled hydrogen injector

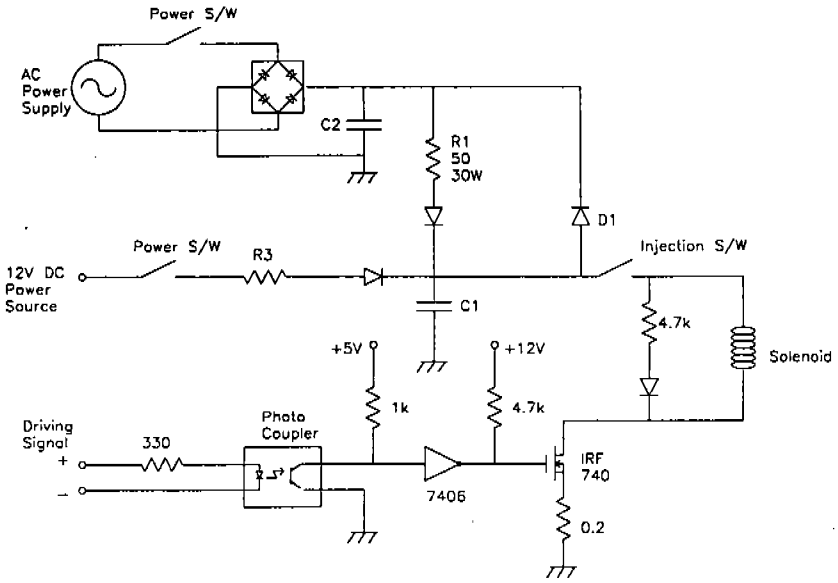


Fig.2 Hydrogen injector installed at cylinder head

mm로서, 수소의 공급 경로가 솔레노이드를 통과 하도록 하여, 공급되는 수소 기체에 의해 솔레노 이드가 냉각될 수 있도록 하였다. 수소 인젝터에서 핀들의 상승은 솔레노이드에 의해서 이루어지며, 하강시에는 스프링의 복원력에 의해서 핀들이 제자리로 되돌아가게 된다.

솔레노이드 구동 회로는 커패시터(capacitor)를 이용한 피크-홀드형을 채택하였는데, 이 회로의 회로도 는 Fig.2와 같다. 피크-홀드형의 회로에서는 초기 작동 시간에는 비교적 큰 전압을 인가하여 많은 전류가 흐르도록 하여 솔레노이드의 구동력을 크게 해주며, 일단 솔레노이드 코어가 다 움직인 뒤에는 전압을 낮추어 흐르는 전류의 양을 줄이도록 하여 솔레노이드의 구동력을 필요한 정도로 유지하게 하면서 솔레노이드에 과부하가 걸리지 않도록 한다.

3. 모델링

3.1 구동회로의 모델링

Fig.2에 나타난 회로를 간단한 전기적 등가회

로로 단순화하면, 고전압 전원으로 충전된 전하가 모두 방전되기까지는 정전압원에서 전류가 흐르지 않으므로 코일과 저항과 커패시터가 직렬로 연결된 회로로 생각할 수 있고, 방전된 후에는 코일과 저항과 정전압원으로 이루어진 회로로 생각할 수 있다.

$$L_s \frac{di}{dt} + i \frac{dL_s}{dt} + R_i i = V_c$$

$$V_c = V_{c0} - \frac{1}{C} \int i dt \quad \text{for } V_c > 12V \quad (1)$$

$$L_s \frac{di}{dt} + i \frac{dL_s}{dt} + R_i i = V, \quad \text{for } V_c = 12V$$

여기에서,

L_s = 솔레노이드 코일의 인덕턴스

i = 전류

R_s = 솔레노이드 코일의 저항

V_c = 커패시터 전압

V_{c0} = 커패시터 초기 전압

C_0 = 커패시턴스

R = R_s 와 Fig.3의 R_1 의 합

V_s = 홀드시 솔레노이드의 전압(12V)

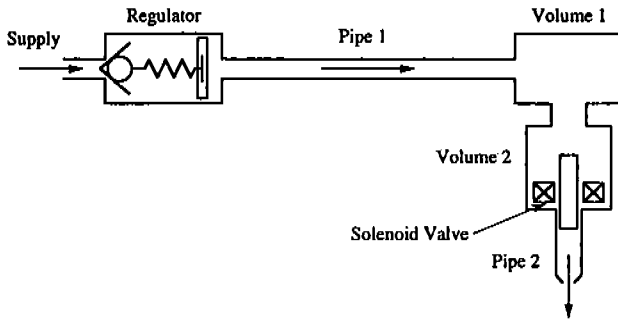


Fig.3 Circuit diagram of peak-hold type solenoid driving circuit

식 (1)에서 나타난 솔레노이드의 인덕턴스와 그의 시간에 따른 미분값은 솔레노이드 코어의 움직임, 즉 에어갭이 변화함에 따라 달라진다.

3.2 솔레노이드의 모델링

시간에 따른 전류값과 솔레노이드 코어의 위치에 따른 인덕턴스의 변화의 상관관계로서 솔레노이드에 발생하는 구동력을 구하기 위해서, 본 연구에서는 솔레노이드에 흐르는 전류와 그로 인한 자속과의 관계를 구한 후 다시 자속과 구동력의 관계를 구하는 방법을 택하지 않고 직접 에어갭에 따른 전류와 인덕턴스 등과 발생하는 구동력과의 관계를 솔레노이드 리그 시험을 통하여 구하였다. 이 때 사용된 식은 식 (2)와 같다.⁷⁾

$$F_{sol} \frac{d\tau_{Fi}}{dt} + \tau_{Fi} \frac{dF_{sol}}{dt} + F_{sol} = f(i, gap) \quad (2)$$

여기에서,

- F_{sol} = 솔레노이드 구동력
- gap = 솔레노이드 작동갭
- $f(i, gap)$ = 솔레노이드 구동력과 전류의 정상상태 관계
- τ_{Fi} = 솔레노이드 구동력/전류의 시간 상수

식(2)에서 나타난 τ_{Fi} 는 정상상태의 구동력과 전류의 관계에서 구할 수 있다. 전류의 변화에 따라 발생하는 구동력도 변화하게 되는데 언제나 구동력의 변화는 전류의 변화에 뒤처지게 된다. 이때 구동력-전류 지연 τ_{Fi} 를 일차 시상수로서 나타낼 수 있다.

3.3 인젝터 구동부의 모델링

인젝터 구동부는 전형적인 질량-스프링계로 생각할 수 있다.

$$m \frac{d^2h}{dt^2} = F_{sol} + F_{spring} \quad (3)$$

여기에서,

- m = 전체 구동부의 질량 = $m_a + m_n + m_s/3$
- m_a = 솔레노이드 코어(전기자)의 질량
- m_n = 인젝터 핀틀의 질량
- m_s = 스프링의 질량
- h = 인젝터 핀틀(또는 솔레노이드 코어)의 양정

F_{sol} = 솔레노이드에 의해 인젝터 핀틀에 가해지는 힘

F_{spring} = 스프링에 의해 인젝터 핀틀에 가해지는 힘

3.4 수소 분사계의 모델링

수소 분사계의 개략도는 Fig.4와 같다.

수소 용기에서 공급된 수소는 압력 조정기 (pressure regulator)를 통해 일정한 압력으로 조정되어 공급관을 통해서 인젝터로 공급된다. 구동 신호에 의해서 솔레노이드 밸브가 열리면 수소는 분사된다. 본 계산에서는 인젝터를 두개의 체적과 하나의 관으로 모델링하여 계산하였다. 관내의 유동은 관의 직경에 비해 관의 길이가 충분히 길기 때문에 일차원 비정상 유동으로 생각하여 특성 곡선

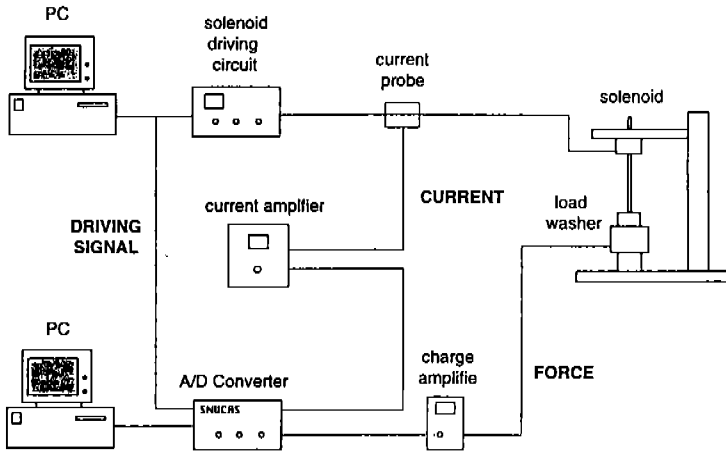


Fig.4 Schematic diagram of the hydrogen injection system

법을 이용하여 계산하였다.⁹⁾ 질량 보전식, 운동량 방정식, 에너지 방정식을 특성 곡선법을 이용하여 정리하면 유체의 압력 p , 유체의 밀도 ρ 와 유속 u 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dp}{dt} + \rho a \frac{du}{dt} + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 0 \quad \text{along} \quad \frac{dx}{dt} = u + a \quad (4)$$

$$\frac{dp}{dt} - \rho a \frac{du}{dt} + \Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3 = 0 \quad \text{along} \quad \frac{dx}{dt} = u - a \quad (5)$$

$$\frac{d\rho}{dt} - a^2 \frac{d\rho}{dt} + \Delta_1 = 0 \quad \text{along} \quad \frac{dx}{dt} = u \quad (6)$$

$$\Delta_1 = -(x-1)\rho(q+uG),$$

$$\Delta_2 = \frac{a^2 \rho u}{F} \frac{dF}{dx} \quad \Delta_3 = \rho a G$$

여기서 $a = \sqrt{\chi RT}$: 유체의 음속

$q = 2f \frac{\gamma}{\gamma-1} R \frac{1}{D} (T_w - T_p) u$: 유체의 유동에 의한 벽면에서의 열전달

$$G = f \frac{2u|u|}{D} : \text{벽면에 의한 마찰}$$

$$F = \frac{\pi}{4} D^2 : \text{관의 단면적}$$

$$f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho u^2} : \text{Darcy-Weisbach 마찰 계수}$$

χ : 유체의 비열비

Darcy-Weisbach 마찰계수 f 는 레이놀즈 수 (Reynolds number)의 함수로 표시되며, 벽면에서의 열전달량 q 는 Reynolds 상사성에 의해서 유체의 속도와 벽면과 유체의 온도 차에 의해서 표시될 수 있다. 계산의 안정성을 위하여 시간 간격 Δt 와 격자점의 간격 Δx 는 Courant의 안정 조건을 만족하도록 결정하였다.

인젝터의 체적 내의 압력은 집중 체적법을 이용하여 계산하였다. 체적과 외부와의 열전달은 고려하지 않았으며 개방 시스템의 열역학 제1법칙에 의하여 체적 내의 물성치를 계산하였다. 체적의 압력은 식 (7)와 같이 표현된다.

$$\frac{dp}{dt} = \frac{x-1}{V} \left[m_{in} \left(\frac{\chi}{x-1} RT_{in} + \frac{1}{2} u_{in}^2 \right) - m_{out} \left(\frac{\chi}{x-1} RT_{out} + \frac{1}{2} u_{out}^2 \right) \right] \quad (7)$$

체적의 밀도의 경우 식 (8)과 같이, 연속 방정식으로 부터 질량의 유출입에 의해서 계산하였다.

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{V}(\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) \quad (8)$$

관의 경계 조건에서는 유동의 방향에 따라 질량 보존식과 정상 상태 에너지식, 등엔트로피식, 등압 조건 등을 이용하여 계산하였다.¹⁰⁾ 또한 솔레노이드 모델링으로부터 얻은 핀틀 양정의 계산 결과를 분사계 계산을 위한 입력으로 이용하였다.

구동회로로, 솔레노이드, 인젝터 운동부의 모델링에서 얻어낸 미분방정식들은 핀틀의 양정과 시상수에 대한 연립 미분 방정식의 형태가 되므로 연립하여 동시에 풀어야 한다. 따라서 미분방정식을 연립하여 4차 Rounge-Kutta 방법을 이용하여 시간의 경과에 따른 전류, 구동력, 양정을 구하였다. 그리고 특성 곡선법을 이용한 수소 분사계의 모델링에 의한 입력 자료로 계산된 양정을 이용하여 분사율과 수소 공급관내에서의 압력변동을 계산하였다.

4. 실험 장치 및 방법

솔레노이드의 특성을 시험하기 위하여 강철 재질의 축으로 코어와 로드 셀(load cell) 그리고

로드 와셔(load washer)를 연결하여 다이얼 게이지(dial gauge)가 설치된 볼 스크류(ball screw)를 이용하여 솔레노이드 코일을 수직 방향으로 0~1mm까지 0.1mm 간격으로 이송하여 코일에 흐르는 전류와 그로 인해 발생하는 구동력을 측정하였다. 이 시험에 사용된 장치의 개략도는 Fig. 5와 같다.

구동 전류의 크기와 모양은 전류 프로브(Tektronix사, model A6303)와 전류 증폭기(Tektronix사, model AM503)를 이용하여 측정하였으며, 솔레노이드의 구동력은 스트레인 게이지형 로드 셀(Minebea사, model T3P1)과 압전형 변환기인 로드 와셔(Kistler사, model 9031A)로 측정하여, 솔레노이드 구동 전류와 함께 A/D 변환기로 PC에 저장하였다.

인젝터 핀틀의 양정을 측정하기 위하여 인젝터의 수소 공급관과 전극이 설치된 인젝터의 캡 대신, 홀-효과(hall-effect)를 이용한 양정 센서(Wolff사, style 2)를 장착할 수 있는 어댑터를 가공하여 설치하였다.

분사량 측정을 위하여 인젝터 분사구 끝부분에 관을 연결하고 관의 끝은 매스실린더에 연결하여 상방치환에 의해 분사되는 수소기체의 체적을 측정하였다.

인젝터의 노즐 끝의 반대편에 피에조리저스티브(Piezoresistive)형 압력 센서(Kistler사, model 4043A)를 장치하여 인젝터로부터 발생하는 제트

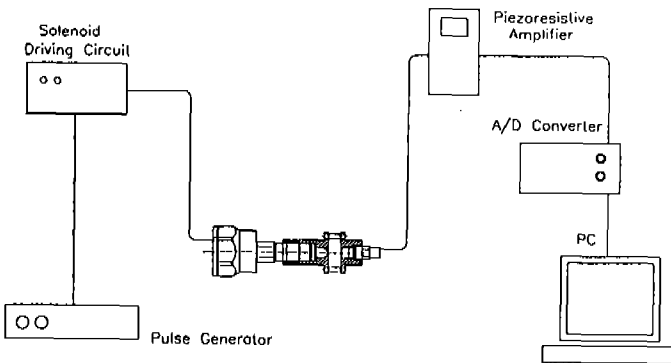


Fig.5 Schematic diagram of the solenoid rig test apparatus

의 운동량에 의한 압력을 측정하여 이로부터 분사율을 계산하였다. 센서에서 감지되는 압력 신호의 크기가 인젝터에서 발생하는 제트의 운동량과 비례하므로, 가스 제트의 운동량과 1회 분사량을 독립적으로 측정된 뒤, 측정된 운동량 프로파일의 제곱근과 1회 분사량의 곱으로부터 분사율을 구하였다.

5. 결과 및 검토

Fig.6은 솔레노이드가 충분히 포화될 때까지 직각 파형의 전압을 가했을 때 에어갭이 0.6mm 인 정상 상태에서의 전류 및 발생하는 구동력을 나타내는데, 전류는 완전히 포화되는 시점이 10ms 이상이고 구동력은 20ms 이상의 시간이 지난 후에야 최대값으로 올라가는 것을 볼 수 있다. 구동 신호를 보낸 뒤 전류가 상승하는 것을 1차 응답으로 본다면, 공급 전압에 대한 전류 상승 시상수를 구할 수 있으며 이로부터 솔레노이드의 인덕턴스를 구할 수 있다. Fig.7와 Fig.8은 에어갭에 따른 전류 상승 시상수와 그로부터 구한 인덕턴스를 나타낸다. 여기서 전류 상승 시상수는 전류가 처음 가해져서 최대값에 이를 때까지 걸리는 시간에 영향을 주게 되는데, 전류 상승 시상수와 솔레노이드 코일의 인덕턴스는 코어의 위치가 코일로부터 멀어짐에 따라 선형적으로

감소함을 볼 수 있다.

Fig.9는 앞에서 언급한 구동력-전류 시상수를 나타내는 그림이다. 이 구동력-전류시상수는 전류가 흐르기 시작할 때와 전류가 끊어졌을 때에 많은 영향을 주는데, 이는 스프링에 의한 힘이 상대적으로 전류에 의해서 발생하는 구동력에 비하여 작으므로 전류가 끊어졌을 때, 즉 판들이 닫히기 시작하는 시간에 더 큰 영향을 주게 된다. 구동력-전류 시상수 역시 에어갭이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 10에는 각각의 에어갭에 따른 정상 상태의 전류와 구동력을 측정하여 그것들의 관계를 나타낸 그림이다. 이로부터 솔레노이드에 인가되는 전압과 전류와 그로 인해 발생하는 구동력의 시간 경과에

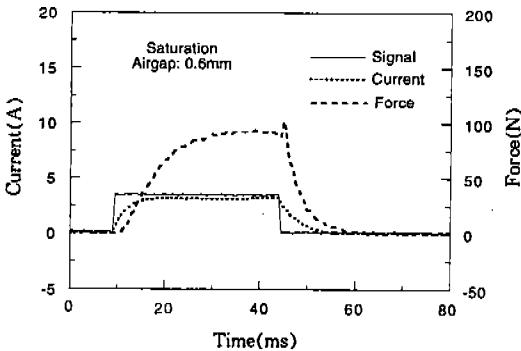


Fig.6 Solenoid current and force generated by saturation type circuit with a 12V square voltage pulse applied (steady state, airgap : 0.6mm, signal width : 35ms)

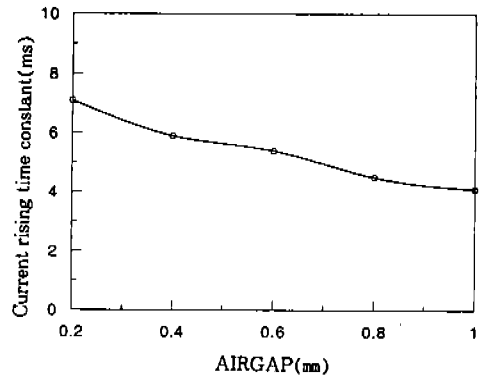


Fig.7 Current rising time constant of solenoid coil vs. airgap

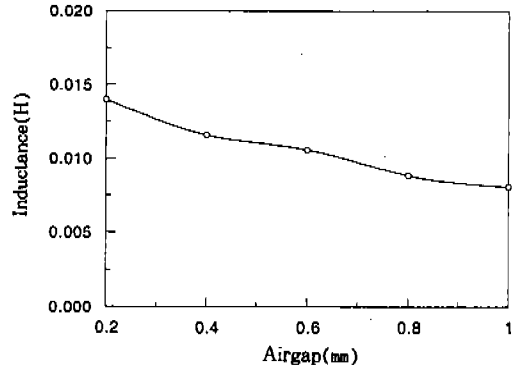


Fig.8 Inductance of solenoid coil vs. airgap

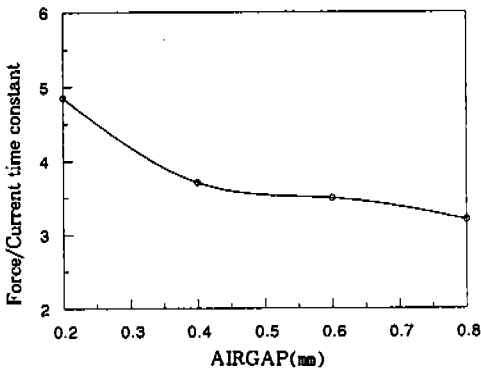


Fig.9 Force/current time constant vs. airgap

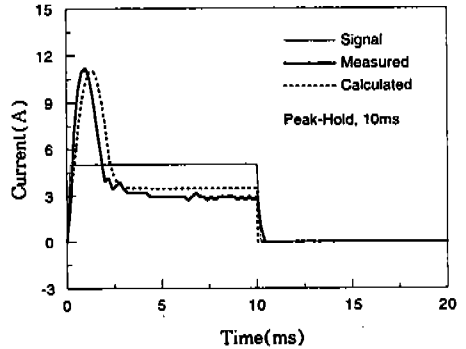


Fig.11 Comparison of measured and calculated current(peak-hold type, signal width : 10ms)

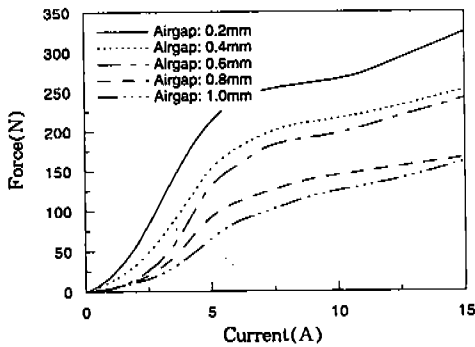


Fig.10 Solenoid force vs. current for various airgaps(steady state)

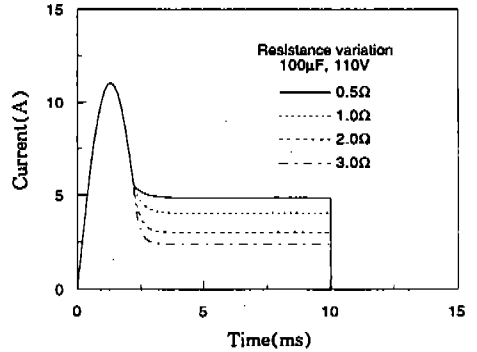


Fig.12 Current vs. time for various resistance of R3 in Fig.3

따른 관계를 알 수 있으며, 이러한 결과들은 식 (1)과 (2)의 솔레노이드의 모델링에 사용되었다. Fig.11은 피크-홀드형의 회로를 사용했을 때, 실제로 솔레노이드 코일에 흐르는 전류를 측정 한 값과 수치 해석에 의한 계산값을 나타낸 그림인데, 그림에서는 최대 전류값의 위치에 있어 계산값이 실측값보다 0.3ms 정도 늦게 나타났고 홀드 전류가 0.5A 정도 많게 나타났지만 대체로 일치하는 모습을 보여준다.

Fig.12, Fig.13, 그리고 Fig.14는 회로상의 여러 인자들을 변화시켜 계산한 결과의 그림이다. Fig.12는 Fig.3의 홀드 전류 조정용 저항 R3의 값을 0.5, 1.0, 2.0, 3.0Ω 등으로 변화시켰을 때 이들의 변화가 전류 크기에 미치는 영향을 보여

주는데, 상승했다가 떨어지는 피크 전류의 값은 일치하지만 설치된 저항값이 커질 수록 더욱 낮은 홀드 전류를 나타내고 있고 저항값이 같은 비율로 증가할 때 전류의 감소폭은 커지는 것을 볼 수 있다. 이 홀드 전류는 구동 회로 제작시에, 사용되는 스프링의 강성과 솔레노이드의 종류에 따라 솔레노이드 코일의 과열과 지나친 전력의 소비를 막기 위해 적절한 최소값을 선택해야 한다.

Fig.13은 Fig.3의 구동용 커패시터인 C1의 값을 10, 50, 100, 220 μF으로 변화시키면서 계산을 수행한 결과이다. 커패시터의 용량이 증가할수록 피크 전류의 최고값과 폭이 넓어지는 것을 볼 수 있다. 피크 전류의 크기와 지속 시간은

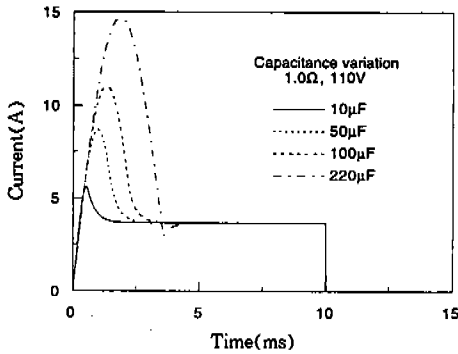


Fig.13 Current vs. time for various capacitance of C1 in Fig.3

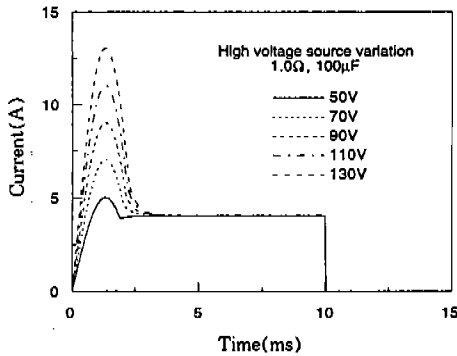


Fig.14 Current vs. time for various high voltage source

솔레노이드의 초기 구동력과 밀접한 관계가 있으나, 그림에서 볼 때, 피크 전류가 상승할 때의 기울기는 커패시터의 용량과는 무관하게 항상 같은 경향을 보인다. 따라서 용량이 큰 커패시터의 사용은 솔레노이드의 구동거리가 멀어서 구동 초기에 많은 전류와 긴 지속시간을 필요로 할 때 적절하며, 같은 양정을 가진 경우에는 커패시터의 교환만으로 어느 정도 이상의 빠른 응답을 기대하기 힘들다.

Fig.14는 회로에 사용된 고전압 공급원의 전압만을 달리하였을 때 발생하는 전류의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면, 전압이 상승할 수록 피크 전류의 좌우폭은 거의 변하지 않고

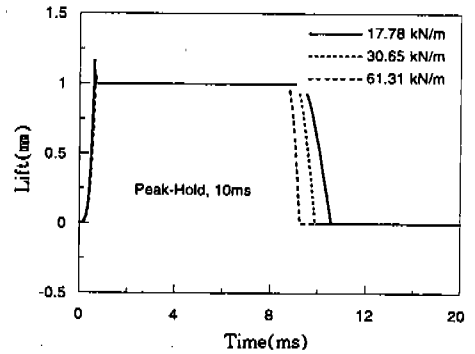


Fig.15 Calculated pintle lift vs. time for spring constant of 17.78, 30.65, 61.31kN/m(peak-hold type, signal width : 10ms)

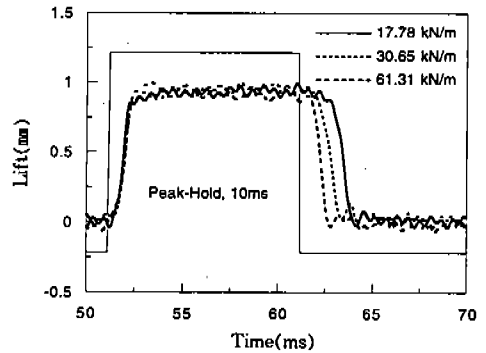


Fig.16 Measured pintle lift vs. time for spring constant of 17.78, 30.65, 61.31kN/m (peak-hold type, signal width : 10ms)

최고값과 전류의 상승 기울기만 전압의 증가폭에 정비례해서 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 고전압 공급원의 전압을 바꾸는 것은 구동 지연 시간을 줄이려 할 때 그 영향이 가장 확실하며 또한 예측하기도 쉬우나, 과도한 고전압은 회로를 구성하고 있는 소자들과 솔레노이드 코일의 수명을 단축하기 쉽다. 그러므로 작동 성능에 영향을 많이 주지 않는 범위 내의 최소값을 택하는 것이 바람직하다.

Fig.15와 Fig.16은 각각 스프링 상수의 변화에 따른 계산결과와 실제로 측정된 양정의 변화를 나타낸다. 핀트의 상승시에는 전류에 의해 발생하는 구동력에 비하여 스프링에 의한 힘이 상

대적으로 작으므로 스프링 상수가 커져도 핀들의 상승 시간에는 별 영향을 미치지 않지만, 핀들이 원상태로 회복하는 데는 17.8, 30.7, 60.3kN/m의 스프링을 사용했을 때 최대 2ms 정도까지 차이가 나고 기울기도 스프링 상수가 클수록 가파른 것을 볼 수 있다. 또한 계산 결과와 측정 결과를 비교할 경우 그 경향과 크기가 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig.17은 공급 압력 2MPa, 분사 기간 10ms인 경우에 인젝터 상부 관에서 측정된 압력과 특성 곡선법에 의해서 계산한 압력을 비교한 것이다. 분사 기간 중에 인젝터 상부의 압력이 일정하게 유지되지 못하고 하락하는 것을 볼 수 있다. 이는 본 인젝터의 1회 분사량이 사용된 압력 조정기의 한계 유량을 초과하기 때문이다. 분사 기간 중의 압력 변화를 보면 크게 세 개의 구간으로 구별할 수 있다. 첫째는 핀들이 들리기 시작되면서 Fig.4의 체적 2와 관 2의 큰 압력차에 의해서 관 2로 많은 유량이 공급되면서 급한 압력의 하락을 보이는 구간이고 둘째는 관 2에 압력이 증가하여 인젝터내로 공급되는 유량과 분사되는 유량이 평형을 이루어 압력 변화가 거의 없는 구간이며, 셋째 구간은 관의 압력의 하락으로 첫 번째 구간보다는 완만하게 압력이 하락하는 구간이다. 분사가 종료된 후 관내의 압력은 다시 서서히 상승하게 되는데, 계산의 경우에 그 맥동하는 효과가 실제 측정의 경우보다 빨리 소멸하

고 있음을 알 수 있다.

Fig.18은 공급 압력 3MPa, 동일 분사 기간에 대한 인젝터 상부의 관에서 측정된 압력과 계산에 의한 압력을 비교한 것으로서 2MPa의 경우보다 압력 하강 폭이 0.5MPa 정도 큰 것을 알 수 있다. 이는 공급 압력이 높을 경우 분사량이 많기 때문이다.

Fig.19는 공급 압력 3MPa, 분사 기간 10ms에 대하여 10번 연속 분사한 경우의 인젝터 상부 관내 압력 변화의 측정 결과와 계산 결과를 나타낸 것이다. 앞의 단발 분사의 경우보다 실제에 보다 가까운 조건의 결과로 연속 분사 중에는 관내 압력이 초기 공급 압력인 3MPa보다 약간 낮은 압력으로 유지되고 있음을 알 수 있다.

Fig.20은 분사 기간 변화에 따라 상방 치환으로 측정된 분사량과 계산에 의한 결과를 비교한 것으로서 분사 기간이 증가함에 따라 분사량도 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 피크-홀드형 구동 회로를 사용하였으므로, 1ms 정도의 짧은 분사 기간을 포함한 모든 분사 기간에 대하여 슬레노이드 밸브에 의해서 핀들이 들리는 형태와 닫히는 형태가 거의 동일하고 분사 기간이 증가함에 따라 거의 선형적으로 핀들이 최대 양정에 도달해 있는 시간이 증가하기 때문이다. 이상의 측정된 압력과 분사량의 비교를 통하여 본 계산 방법이 실제 분사계의 유동을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

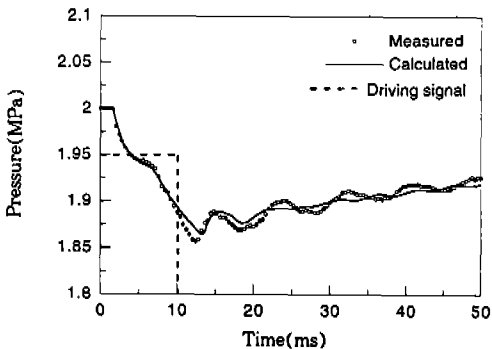


Fig.17 Comparison of the pressure at the side of the injector(supply pressure 2MPa, injection duration 10ms)

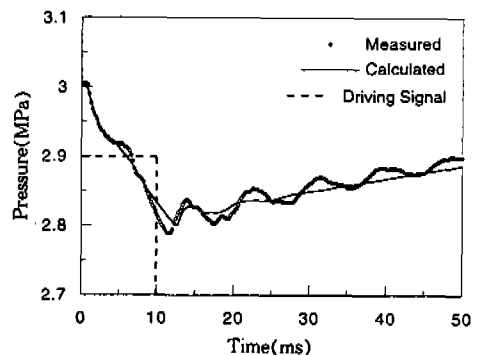


Fig.18 Comparison of the pressure at the side of the injector(supply pressure 3MPa, injection duration 10ms)

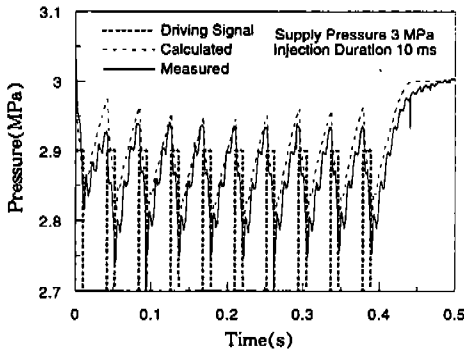


Fig.19 Comparison of the pressure at the side of the injector (10 intermittent injections, supply pressure 3 MPa, injection duration 10ms)

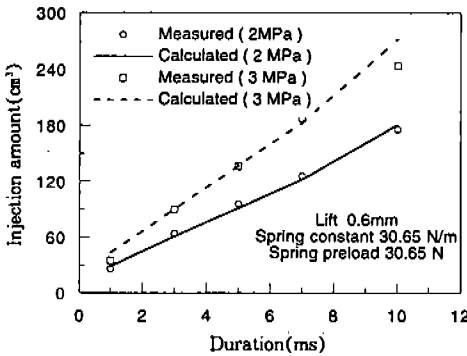


Fig.20 Comparison of the injection amount according to the injection duration

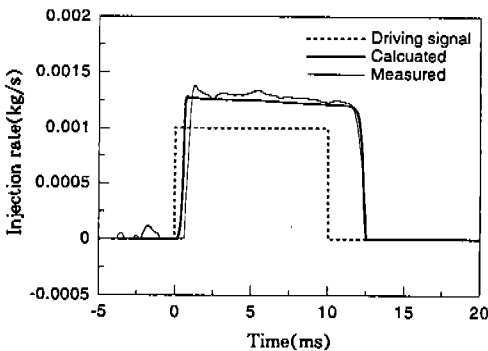


Fig.21 Comparison of the injection rate (supply pressure 2 MPa, injection duration 10ms)

Fig.21은 본 계산 방법에 의하여 얻은 공급 압력 2MPa, 분사 기간 10ms인 경우의 분사율 형태이다. 초기의 분사율은 Fig.4의 2번 관에서의 급격한 압력 상승으로 최고값에 도달하였다가 공급부의 압력과 2번 관내의 압력이 평형 상태에 이르면서 일정한 값을 유지하게 된다. 그 후 공급부의 압력의 하락으로 분사율은 완만하게 하강하게 되고 솔레노이드 밸브가 닫히면서 분사는 종료하게 된다. 이는 전형적인 솔레노이드 구동 수소 인젝터의 분사율 형태이며, 분사 기간이 증가함에 따라 분사 지속 기간만이 증가하게 되며 분사 초기와 말기의 분사율 형태는 대부분의 경우에 일정하다. 그러나 0.1ms 정도의 매우 짧은 분사 기간의 경우에는 구동 회로가 정상 작동을 하지 못하게 되어 핀들이 끌리지 못하게 되므로, 분사율 형태의 모습이 다르다.

6. 결론

실제, 제작된 솔레노이드 구동 수소 인젝터와 구동 회로, 그리고 분사계를 모델링한 뒤 여러 인자를 변화시켜 인젝터의 성능 특성인 구동 회로의 구동 전류, 솔레노이드의 구동력, 핀들의 양정, 인젝터의 분사량과 분사율을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 솔레노이드 리그 시험을 통하여 얻은 구동력-전류 시상수를 이용하여 복잡한 솔레노이드의 전자기장 해석을 피하고 솔레노이드의 특성을 간단하게 모델링할 수 있었다.
- 2) 모델링을 통하여 파악한 구동전류, 구동력, 분사량, 분사율 등의 인젝터 성능 특성과 분사관내에서의 압력 변동 등은 실제 리그 시험을 통하여 얻은 결과와 일치하였으며, 이로부터 성능 예측에 사용된 모델링이 타당함을 알 수 있었다.
- 3) 모델링의 결과로 저항, 커패시터, 고전압원 등과 같은 구동 회로의 소자와 스프링과 같은 인젝터 부품의 선택에 따른 인젝터의 성능 특성의 변화를 쉽게 예측할 수 있어 요구되는 인젝터 성능 특성을 만족하는 최

적화된 소자와 부품의 선택이 용이하였다.

- 4) 커패시터를 이용한 피크-홀드 구동 회로의 경우, 저항, 커패시터, 고전압원 등 소자의 용량을 크게 할수록 솔레노이드의 구동력 또는 응답 시간이 상승하게 되지만, 반면 과도한 발열과 수명 저하의 문제가 있으므로, 인젝터 설계시 적절한 용량의 선택이 중요하다.
- 5) 분사율의 형태는 분사 기간과는 상관없이 그 형태가 유사하며, 초기 급격한 상승기간과 분사율이 일정한 주분사기간, 그리고 분사율의 하강기간으로 나눌 수 있으며 초기 급격한 상승 기간에 분사율의 최고값을 나타낸다.

후 기

이 논문은 통상산업부에서 시행한 G7과제(차세대자동차기술) 개발사업의 기술개발 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

1. Carl A. Kukkonen, and Mordecai Shelef : "Hydrogen as an alternative automotive fuel", *automotive engineering*, vol. 102, No. 10, pp. 25~29, 1994.
2. T. Petkov, T. N. Veziroglu, and J. W. Sheffield : "An Outlook of Hydrogen as an Automotive Fuel", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 14, No. 7, pp. 449~474, 1989.
3. L. M. Das : "Fuel Induction Techniques for a Hydrogen Operated Engine", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 15, No. 11, pp. 833~842, 1990.
4. C. J. Green, and J. S. Wallace : "Electrically Actuated Injectors for Gaseous Fuels", SAE paper 892143, 1989.
5. H. Hong, T. Krepec, and R. M. H. Cheng : "Optimization of Electronically Controlled Injectors for Direct Injection of Natural Gas in Diesel Engines", SAE paper 930928, 1993.
6. T. Krepec, T. Giannacopoulos, and D. Miele : "New Electronically Controlled Hydrogen-Gas Injector Development and Testing", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 12, No. 12, pp. 855~861, 1987.
7. H. Kekedjian, and T. Krepec : "Further Development of Solenoid Operated Gas Injectors with Fast Opening and Closing", SAE paper 940450, 1994.
8. 이형승, 김한조, 김용서, "솔레노이드 구동 수소인젝터의 성능특성", 한국자동차공학회 논문집 제3권 제6호, 1995.
9. R. S. Benson, *The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal-Combustion Engines*, Clarendon Press, 1982.
10. J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, pp. 756~762, McGraw-Mill, Inc., 1988