

工學碩士學位論文

유한요소법을 이용한 고속응답  
솔레노이드 밸브의 거동해석

Behavior Analysis of Fast-Acting Solenoid Valves  
Using Finite Element Method

國民大學校 自動車工學專門大學院  
엔진 및 공조 시스템 專攻

權 奇 泰

2000

유한요소법을 이용한 고속응답  
솔레노이드 밸브의 거동해석

指導教授 韓 華 鐸

이 論文을 碩士學位 請求論文으로 提出함.

2001年 7月 14日

國民大學校 自動車工學專門大學院  
엔진 및 공조 시스템 專攻

權 奇 泰

2000

權奇泰의

工學碩士學位 請求論文을 認准함.

2001年 月 日

審査委員長

①

---

審査委員

①

---

審査委員

①

---

國民大學校自動車工學專門大學院

# 목 차

국문 요약 .....	iii
Nomenclature .....	iv
List of Figures .....	v
List of Tables .....	vi
1. 서 론 .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 목적 .....	2
2. 장치 및 방법 .....	3
2.1 솔레노이드 밸브의 구조 .....	3
2.2 실험 장치 .....	5
2.3 실험 방법 .....	6
3. 수치해석 .....	7
3.1 자기장의 유한요소 모델링 .....	8
3.1.1 유한요소 해석 .....	8
3.1.2 격자 모델 .....	10
3.2 전기회로의 모델링 .....	11
3.2.1 구동 회로 .....	11
3.2.2 시간 차분법 .....	13
3.3 기계적 거동 모델링 .....	14
3.3.1 운동 방정식 .....	14
3.3.2 자기력의 계산 .....	16
3.4 유체 모델링 .....	17
3.4.1 유체 반력 .....	17

3.4.2 유량 계산 .....	19
4. 해석결과 및 고찰 .....	20
4.1 전자기장 유한요소해석 .....	20
4.2 입력전류와 자기력 .....	27
4.3 플린저의 거동 .....	30
4.4 유체반력과 유량선형성 .....	34
5. 결 론 .....	37
Reference .....	38
Abstract .....	40

## 국 문 요 약

본 연구에서는 고속응답 솔레노이드 밸브(solenoid valve)의 동적 시뮬레이션을 위한 새로운 알고리즘을 개발하였다.

고속 응답 솔레노이드 밸브는 전기·자기 및 기계 시스템이 결합된 형태로 동작하고 있다. 따라서 전기·자기 시스템의 수치해석을 위해 자기방정식과 회로방정식을 연관지어 해석하고, 연자성 소재의 비선형특성을 고려한 비선형 시변계 유한요소해석을 수행하였다. 또한 여기에 계산된 자기력을 금속의 등가강성과 등가댐핑을 고려한 기계시스템의 운동방정식에 입력하여 진동해석을 했고, 플런저(plunger) 운동시 유체의 점성에 의해 발생하는 유체반력(hydrodynamic force)을 축대칭 1차원 유한체적법으로 계산하여 운동방정식에 다시 적용하였다.

개발된 기법을 프로그래밍화하여 수치해석결과를 구하고 솔레노이드 밸브의 고속응답 특성을 측정할 수 있는 실험장치를 사용하여 얻은 실험결과와 비교해 개발된 해석기법의 타당성을 검증하였다.

# Nomenclature

$A$	: Magnetic vector potential
$B$	: Magnetic flux density
$c$	: Damping coefficient
$C$	: Capacitor
$E$	: Induced electromotive force
$F_m$	: Magnetic force
$F_p$	: Hydrodynamic force
$H$	: Magnetic field intensity
$I$	: Current
$J_0$	: Source current density
$J_e$	: Eddy current density
$J_m$	: Magnetization current density
$k$	: Spring coefficient
$L_n$	: Leakage inductance
$M$	: Magnetization
$q$	: Electric charge
$P$	: Hydrodynamic pressure
$R$	: Coil resistance
$V$	: Input voltage
$z$	: Plunger displacement
$z_0$	: Initial displacement of plunger
$\mu_0$	: Free-space permeability
$\sigma$	: Conductivity of soft magnetic material
$\eta$	: Viscosity coefficient

## List of Figures

Fig. 1	Fast-acting solenoid valve .....	3
Fig. 2	Characteristics of fuel injection rate .....	4
Fig. 3	Schematic of experimental setup for solenoid valves .....	5
Fig. 4	Flow chart of overall numerical modeling procedure .....	7
Fig. 5	Finite element model for axisymmetric solenoid valve .....	10
Fig. 6	Electric driving circuit for solenoid valve .....	11
Fig. 7	Equivalent circuit when driving voltage is applied .....	12
Fig. 8	Equivalent circuit when driving voltage is removed .....	12
Fig. 9	Dynamic model for plunger motion .....	15
Fig. 10	Shape of impact part .....	17
Fig. 11	BH-curve of the magnetic materials .....	21
Fig. 12	Distributions of magnetic vector potential A ( $t = 2.0\text{ms}$ ) .....	22
Fig. 13	Distributions of magnetic flux density B ( $t = 2.0\text{ms}$ ) .....	23
Fig. 14	Eddy current density $J_e$ at initial time step ( $t = 0.05\text{ms}$ ) .....	24
Fig. 15	Current density $J_0$ at initial time step ( $t = 0.05\text{ms}$ ) .....	25
Fig. 16	Timewise variation of solenoid valve inductance .....	26
Fig. 17	Timewise variations of current and magnetic force (airgap = $60\mu\text{m}$ ) .....	28
Fig. 18	Timewise variations of current and magnetic force (airgap = $130\mu\text{m}$ ) .....	29
Fig. 19	Comparisons with experimental results (with fuel supply) .....	32
Fig. 20	Comparisons with experimental results (without fuel supply) .....	33
Fig. 21	Distribution of pressure at impact part .....	34
Fig. 22	Plunger motion for injection time .....	35
Fig. 23	Mass linearity for injection time .....	35



## List of Tibles

Table 1	Input data for electromagnetic analysis .....	20
Table 2	Characteristics of solenoid valve .....	31

# 1. 서 론

## 1.1 연구 배경

솔레노이드 밸브(solenoid valve)는 구조가 간단하고 경제적이며, 정밀 제어가 가능하기 때문에 스위치, 릴레이, 밸브 등 여러 산업분야에서 광범위하게 이용되고 있다. 특히 자동차분야에서 기존의 가솔린 엔진뿐만 아니라 디젤엔진, LPG 엔진 및 수소엔진 등에서 연료량 제어를 위한 전자제어식 연료분사기로 솔레노이드 밸브를 사용하고 있다. 최근 배기가스의 배출허용기준이 강화되면서 배출유해가스의 생성을 억제하고 연비향상을 꾀하기 위해 더욱 정밀한 유량제어가 가능한 고속 응답 솔레노이드 밸브의 개발이 요구되고 있다. 연료분사압력과 플런저 리프트, 그리고 분사 지연시간 등에 의한 연료분사량과 분사 타이밍을 정밀하게 제어함으로써 연료저감 및 미연 탄화수소의 배출량을 급격히 감소시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>1)</sup> 그 동안 기계공학분야와 전자기공학분야에서 각각 솔레노이드 밸브의 제어기술 및 해석기술에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 채재우 등<sup>2)</sup>은 실제로 제작한 솔레노이드에 대한 실험결과를 제시하고 근사식을 이용한 설계방법을 제시하였고 홍순철 등<sup>3)</sup>은 디젤엔진의 인젝션 시스템 구현을 위한 제어기술을 개발하였다. 또 이형승 등<sup>4)</sup>은 수소인젝터의 성능을 예측하기 위한 해석방법을 제시하고 있다. 그러나 이들 연구는 주로 기계공학적 관점의 해석에 머물고 있으며 구동회로에 대한 단순한 해석방법을 이용할 뿐 전자기장의 시변계 해석을 수행하지 않고 있다. 반면 전기공학적 관점에서 접근한 연구논문<sup>5)</sup>에서는 유한요소법을 이용하여 솔레노이드 주위의 전자기장을 해석하고 있으나 운동방정식에 나타나는 스프링이나 충돌에 의한 탄성력과 유체역학적 점성력이나 댐핑효과 등에 대한 운동학적 거동의 해석에는 많은 한계를 드러내고 있다. 외국의 경우 우리 나라에 비해 오래 전부터 솔레노이드 밸브에 대한 연구를 진행해 오고 있다. Smith와

Spinweb<sup>6)</sup>은 니들의 바운드(bound)을 모사하기 위해서는 비정상 유체저항에 의한 댐핑효과를 고려하여야 한다고 주장하였으며, Spurk 등<sup>7)</sup>은 윤향방정식에 의한 댐핑효과를 고려하여 좀더 정밀한 운동학적 시뮬레이션을 수행할 수 있게 하였다.

## 1.2 연구 목적

고속응답 솔레노이드 밸브의 개발을 위해서는 자성재료의 비선형 전자기장 해석과 직류전압에 대한 회로해석, 그리고 플런저의 기계적 운동해석 등을 포함하는 복잡한 동적 시뮬레이션에 관한 연구가 필요하다. 짧은 지연시간을 가진 솔레노이드 밸브에서는 저속형과 달리 빠른 자화가 발생하므로 와전류(eddy current)와 같은 동적 효과를 고려한 시변계 유한요소해석을 해야 한다. 특히, 고속 응답 솔레노이드 밸브의 실제동작은 전기, 자기 및 기계 시스템의 결합된 형태로 나타나고 있다. 따라서 비정상 상태 해석 중에 각 시스템의 계산치를 매 시간스텝(time step)별로 교환해가며 해석해야 한다. 기존에 개발되어 있는 범용 시뮬레이션 프로그램들은 각 시스템의 해석은 용이하나 전기, 자기 및 기계 시스템이 결합되어있는 형태의 고속 응답 솔레노이드 밸브의 실제 동작에 대한 해석은 용이하지 않다.

본 논문에서는 자기, 전기 시스템 해석을 위해 자기방정식과 회로방정식을 결합하고 연자성 소재의 비선형특성을 고려한 비선형 시변계 유한요소 해석을 수행하고자 한다. 여기에서 계산된 자기력을 기계시스템의 운동방정식에 입력하여 진동해석을 하고 계산되는 플런저의 거동을 사용하여 전자기 해석의 유한요소격자를 수정하고 분사되는 연료량을 계산한다. 또한 개발된 기법을 프로그램화하여 수치해석결과를 구하고 솔레노이드 밸브의 고속 응답특성을 측정할 수 있는 실험장치를 이용해 얻은 실험결과와 비교함으로써 본 해석기법의 타당성을 검증하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 솔레노이드 밸브의 구조

본 실험에 사용한 고속 응답 솔레노이드 밸브의 단면도는 Fig. 1과 같다. 솔레노이드는 코일(coil)을 중심으로 자기력 발생시 이동하는 플런저(plunger)와 바깥을 감싸고 있는 케이스(case) 그리고 코일 안의 코어(core)로 연결되어진 자기회로를 형성하고 있다. 내부코일에 전류가 인가 되면 권선을 둘러싸고 있는 자기회로에 자속이 흐르게 된다. 자기회로를 흐르는 자속은 플런저에 자기력을 부여하고 이 자기력에 의해 플런저가 스프링력을 이기고 이동해 솔레노이드 밸브가 동작한다.

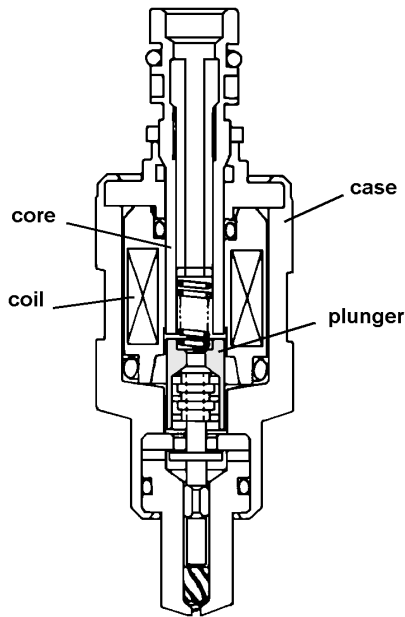


Fig. 1 Fast-acting solenoid valve

솔레노이드 밸브의 연료분사량 제어는 Fig. 2에서와 같이 제어 분사시간 (injection time)에 대한 연료분사량의 선형성을 유지할 수 있는 구간이

중요하다. 가솔린엔진에 적용되고 있는 솔레노이드 밸브의 경우 구동전압이 인가된 시점부터 밸브가 열릴 때까지의 지연시간 (opening delay time)이 약 1.5ms로 그 이하의 제어 분사시간에 대해서는 선형성을 유지할 수 없다.<sup>8)</sup>

최근 개발되고 있는 직접분사식 가솔린엔진 (Gasoline Direct Injection)이나 전자제어 Common Rail 분사 시스템식 디젤엔진에 적용되는 연료분사기용 솔레노이드 밸브의 경우에는 희박연소에 필요한 극소량의 연료량 제어가 필요하기 때문에 짧은 분사시간에 대해서도 선형성을 유지하여야 한다. 이를 위해서는 솔레노이드 밸브의 열림 지연시간(opening delay time)과 전압 제거 후부터 밸브가 닫힐 때까지의 지연시간(closing delay time)을 최소화할 필요가 있다.

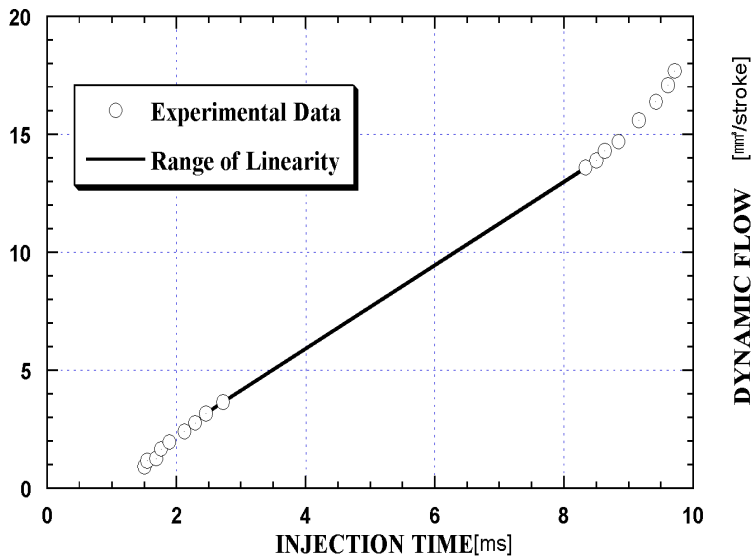


Fig. 2 Characteristics of fuel injection rate

## 2.2 실험 장치

고속 응답 솔레노이드 밸브의 성능실험을 위해서 빠른 자화에 의해서 발생하는 자기력을 동적 모드(dynamic mode)에서 측정할 수 있는 실험장치가 필요하였다. 실험에 사용된 자기력 측정장치의 개략도는 Fig. 3과 같다. 실험장치의 구성에 있어서 플런저(plunger)의 전체 행정거리가  $70\mu\text{m}$ 으로 아주 작기 때문에 로드셀(load cell)을 선정할 때 하중의 변화에 대한 변위가 매우 작은 것을 선정하여야 하고, 2~3ms의 짧은 시간동안 측정이 이루어지기 때문에 측정간격(sampling rate)이 충분히 짧은 디지털 오실로스코프(digital oscilloscope)를 필요로 한다.

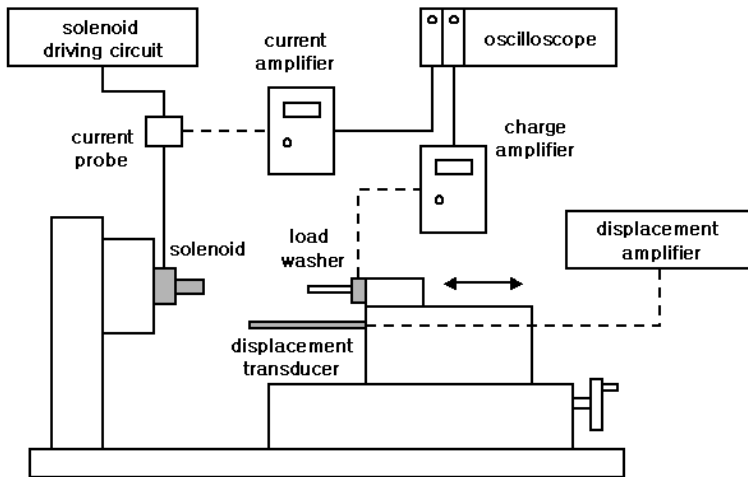


Fig. 3 Schematic of experimental setup for solenoid valves

본 실험장치에서는 정적모드와 동적모드의 자기력 실험이 가능하도록 하였다. 정적모드 실험은 전류변화나 Fig. 1의 플런저와 코어 사이에 존재하는 공극(airgap) 크기의 변화에 따른 자기력의 변화에 대한 측정이 가능하다. 동적모드 실험은 플런저의 공극을 일정하게 고정하고 솔레노이드 밸브

구동회로에서 펄스(pulse)형태의 전압을 인가하여 그때 발생하는 전류와 자기력의 변화를 측정할 수 있다.

Fig. 3의 실험장치에서 동작 중에 발생하는 자기력은 load washer(Kistler 9001A)와 charge amplifier(Kistler 5011)를 사용하였고, 공극 크기를 설정하기 위한 변위의 측정은 displacement transducer(HBM W10TK)와 amplifier(HBM KWS503.D)를 사용하였다. 발생하는 자기력, 구동 전압과 솔레노이드 코일에 흐르는 전류량을 동시에 측정하기 위해서 멀티 채널의 오실로스코프(Nicolet Pro90)를 사용하였다.

### 2.3 실험 방법

솔레노이드 밸브에 구동전압을 펄스형태로 인가하여 아주 빠른 속도로 변해 가는 자기력을 측정하기 때문에 실험에 세심한 주의가 요구되어진다. 실험 전 준비 사항으로 먼저 어떤 공극의 크기에서도 측정이 가능할 수 있도록 형상을 변경한 실험용 솔레노이드 밸브 샘플이 필요하고, 로드 워셔(load washer)에 연결된 연결대(connecting road)와 플런저를 접착제로 고정시켜 주었다. 단, 측정을 위해 밸브의 형상을 변경할 경우 자기회로를 고려하여 자기회로에 영향을 미치지 않도록 주의하였다..

실험에 들어가면 변위 트랜스듀서(displacement transducer)를 사용하여 솔레노이드 밸브의 공극을 결정하고, 전압인가 시 생성되는 자기력에 의한 움직임을 최소화하기 위해 고정나사로 이송대를 고정하였다. 측정전 전류탐침(current probe)을 감자(demagnetize)시키고 자기력 측정에 사용하는 charge amplifier를 동작시킨 다음 구동회로에 전압 펄스를 인가하였다. 솔레노이드에 걸리는 구동전압, current amplifier에서 나오는 전압(전류량 측정), charge amplifier에서 나오는 전압(자기력 측정)을 멀티 채널 오실로스코프(oscilloscope)를 사용하여 동시에 측정했다.

### 3. 수치 모델링

솔레노이드 밸브는 자기, 전기, 기계 시스템들이 결합된 형태로 작동하고 있다. 따라서, 고속 응답 솔레노이드 밸브의 동적 효과를 고려한 해석을 위해 Fig. 4와 같이 각 시스템을 시간 스텝 (time step)별로 계산해 구해진 결과를 다음 시간 스텝에서 다른 시스템의 입력으로 사용하여 해석하였다.

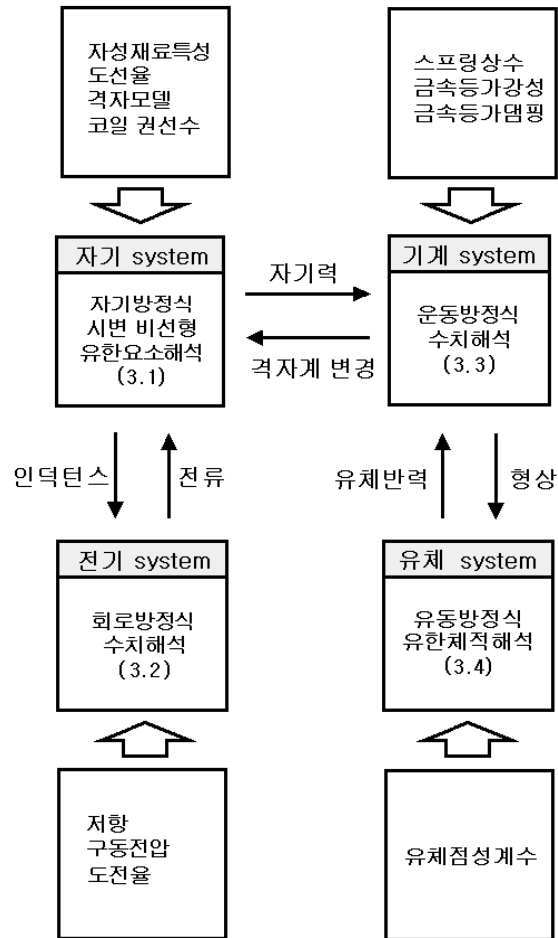


Fig. 4 Flow chart of overall numerical modeling procedure



먼저 연자성 재료의 비선형 자화특성을 고려하여 자기방정식의 유한요소 계수행렬(coefficient matrix)을 구한다. 벨브 구동회로의 회로방정식을 행렬식으로 표시하고 자기방정식의 계수행렬과 결합하면 선형연립방정식 형태로 나타낼 수 있다. 이러한 선형연립방정식을 계산하여 자기 벡터 포텐셜 A (magnetic vector potential)와 자기력(magnetic force)을 구하고, 전자기장 해석을 통해 얻은 자기력을 그 시간스텝(time step)의 플런저 운동해석의 입력 값으로 사용해서 플런저의 거동을 계산하게 된다. 계산된 플런저의 속도와 위치를 유체 시스템의 유동방정식에 입력 값으로 사용하여 내부 유체가 플런저에 미치는 유체반력과 유로를 통해 분사되는 유량을 계산할 수 있다. 유체반력은 다음 시간스텝의 플런저 운동 해석에 사용되고, 만약 플런저의 이동량이 일정크기 이상이 되면 유한요소 격자모델을 수정하여 다음 시간스텝의 유한요소 해석에 반영하였다.

### 3.1 자기장의 유한요소 모델링

#### 3.1.1 유한요소 해석

Fig. 1과 같은 솔레노이드 벨브에서 전자기장 해석은 입력전류가 고정되어있는 정적해석과는 달리 도전체인 연자성 재료의 내부에 발생하는 와전류(eddy current)를 고려해서 해석해야 한다.

맥스웰 방정식(Maxwell's equation)에 자기 벡터 포텐셜 A (magnetic vector potential)를 계 변수로 하는 시변계 자기 방정식은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \hat{A}) = \hat{J}_0 + \hat{J}_e + \hat{J}_m \quad (4)$$

해석영역에서 구동전압이 인가되는 경우 전류의 증가에 따라 시변자계가

형성되고 이 자계의 영향으로 연자성체 내에 와전류(eddy current)가 발생한다. 솔레노이드 밸브 내부에 발생하는 자속은 전류밀도  $J_0$  로 발생하는 자속과 와전류밀도  $J_e$  로 발생하는 자속 그리고 연자성체의 자화에 의해 발생하는 자속이 합성되어서 나타난다. 여기에 빠른 응답을 요구하는 솔레노이드 밸브일수록 와전류 밀도  $J_e$  가 증가함으로 전자장해석에서 와전류 성분을 무시할 수 없게 된다. 따라서 고속 응답 솔레노이드 밸브의 전자장해석은 꼭 유한요소 시변계해석이 필요하다.

식 (1)에 다음의 가정을 적용하면 식 (2)와 같이 정리할 수 있다.

- 축대칭 3차원 문제 ( $A_r = A_z = 0, J_{0r} = J_{0z} = 0, \partial A_\theta / \partial \theta = 0$ )
- 전위항 무시 ( $\Delta \phi = 0$ )
- 자성체의 히스테리시스(hysteresis) 특성 무시 ( $B = \mu H$ )

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\mu_0} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{A_\theta}{r} + \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right) \right] \\ & = - \frac{1}{\mu_0} \left[ \frac{\partial M_r}{\partial z} - \frac{\partial M_z}{\partial r} \right] + \sigma \frac{dA_\theta}{dt} - J_{0\theta} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)를 각 요소 e 에 대해 Galerkin 법으로 정식화하면 각 삼각형 요소의 요소 행렬(matrix) 방정식을 식 (3)와 같이 구할 수 있다.

$$[S_0]^{(e)} \{A\}^{(e)} + [P]^{(e)} \frac{d}{dt} \{A\}^{(e)} - \{Q\}^{(e)} I^{(e)} = \{J_m\}^{(e)} \quad (3)$$

식 (3)의 요소 행렬방정식을 조합하여 전체 행렬방정식을 구성한 다음 경계조건을 적용하면 선형연립방정식 문제로 계산할 수 있다.

### 3.1.2 격자 모델

유한요소 해석을 위해 솔레노이드 밸브의 단면을 622개의 노드(node)와 1136개의 요소(element)로 이루어진 Fig. 5의 격자(mesh) 모델로 구성하였다. 요소 분할 시 자속이 집중되는 공기부(airgap)와 축대칭 해석이기 때문에 중심축 부의 격자를 조밀하게 분할하여 해석의 정확도를 높이고 있다.

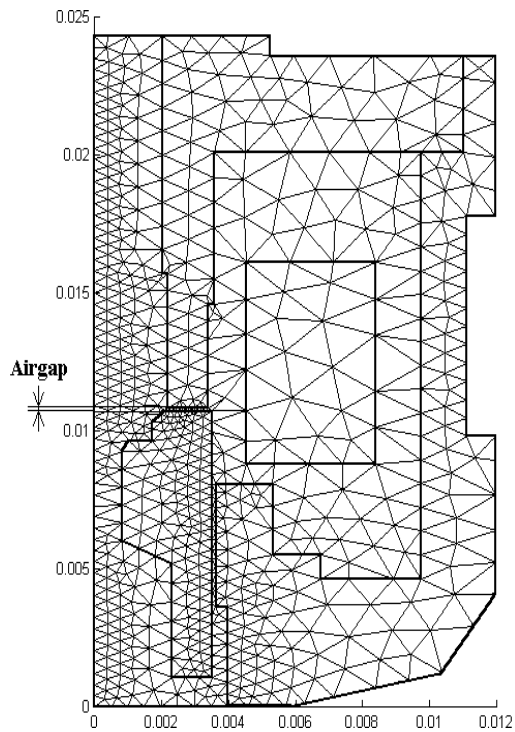


Fig. 5 Finite element model for axisymmetric solenoid valve

## 3.2 전기회로의 모델링

### 3.2.1 구동 회로

솔레노이드 밸브의 전류를 공급하는 구동회로는 Fig. 6과 같이 구성되어 있다.

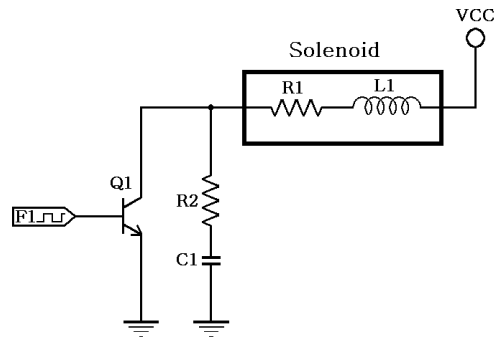


Fig. 6 Electric driving circuit for solenoid valve

구동 IC의 On/Off에 따라 전압이 인가되면 Fig. 7과 같은 RL 회로로 등가 되고 전압해제 시에는 Fig. 8과 같이 RLC 회로로 등가 되어진다.

등가회로의 회로방정식은 식 (4)와 같다.

$$V = (R_{sol} + R_{ext}) I_{(t)} + E + \frac{1}{C} \int I_{(t)} dt + L_n \frac{dI_{(t)}}{dt} \quad (4)$$

여기서,  $E$  는 유도기전력(induced electromotive force),  $C$  는 보호용 커패시터(capacitor)의 용량이고  $L_n$  는 누설 인덕턴스(leakage inductance)이다.

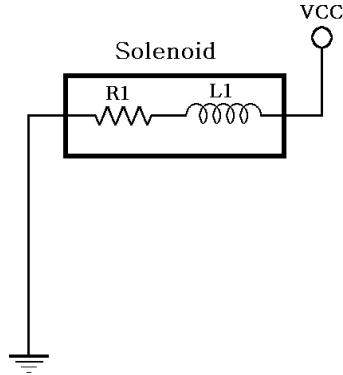


Fig. 7 Equivalent circuit when driving voltage is applied

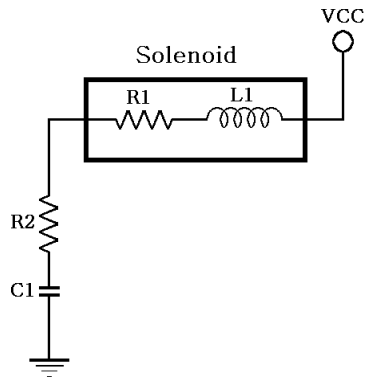


Fig. 8 Equivalent circuit when driving voltage is removed

솔레노이드 밸브 코일에 흐르는 전류는 정적해석의 경우 임의의 전류값으로 주어지지만 시변해석의 경우는 코일 안에 발생하는 유도기전력 때문에 시간에 따라 증가하게 된다. 시간에 대한 자속의 변화 때문에 발생하는 한 요소에 대한 유도기전력은 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
E^{(e)} &= \frac{2\pi N}{S} \frac{d}{dt} \int_{s^{(e)}} r N_{ie} A_{ie} ds \\
&= [G]^{(e)} \frac{d}{dt} \{A\}^{(e)}
\end{aligned} \tag{5}$$

식 (4)의 회로 방정식에서 누설 인덕턴스 항을 무시하고 식 (5)을 대입하여 한 요소에 대한 회로방정식의 요소 행렬식을 구하면 식 (6)과 같다.

$$[G]^{(e)} \frac{d}{dt} \{A^{(e)}\} + R_t I_{(t)} + \frac{1}{C} \int I_{(t)} dt = V \tag{6}$$

결국, 하나의 요소에서 발생하는 유도기전력을 자기 벡터 포텐셜 A (magnetic vector potential)로 유도하였다. 이제 회로방정식의 행렬식 식 (6)과 자기방정식의 행렬식 식 (3)이 모두 자기 벡터 포텐셜 A 으로 표현되므로 두 식을 연립하여 전기와 자기의 결합된 시스템의 유한요소해석이 가능하다.

### 3.2.2 시간차분법

고속 응답 솔레노이드 밸브의 전자기해석은 시변계 비선형해석이기 때문에 식 (3)와 식 (6)에 각각 시간미분항(dA/dt)을 포함하고 있다. 선형연립 방정식 형태로 두 식을 연립하기 위해서는 각 식에 포함되어있는 시간미분항을 후퇴차분법(backward difference method)을 적용하여 식 (7)과 같이 전체 행렬 방정식을 구성한다.

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} [S_0] + \frac{1}{\Delta t}[P] & -[Q] & 0 \\ \frac{1}{\Delta t}[G] & R_t & \frac{1}{C} \\ 0 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A^{t+\Delta t} \\ I^{t+\Delta t} \\ q^{t+\Delta t} \end{Bmatrix} \\
& = \begin{bmatrix} \frac{1}{\Delta t}[P] & 0 & 0 \\ \frac{1}{\Delta t}[G] & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A^t \\ I^t \\ q^t \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} J_m^{t+\Delta t} \\ V^{t+\Delta t} \\ 0 \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{7}$$

### 3.3 기계적 거동 모델링

#### 3.3.1 운동 방정식

밸브 플런저(plunger)의 거동해석은 플런저의 이동 방향과 자기 시스템에서 발생하는 자기력(magnetic force) 방향이 z 축만으로 구속되었다는 가정에서 외력  $F_m$ , 플런저의 질량  $m_1$ , 스프링  $k_1$  으로 구성된 1 자유도계 운동방정식으로 모델링 하였다. 또한 금속 충돌을 모사하기 위한 금속의 등가 강성(equivalent stiffness)과 등가 댐핑(equivalent damping)  $k_2, c_2, k_3, c_3$  등도 고려했다.. 이를 고려한 플런저의 동적모델은 Fig. 9와 같다.<sup>9)</sup>

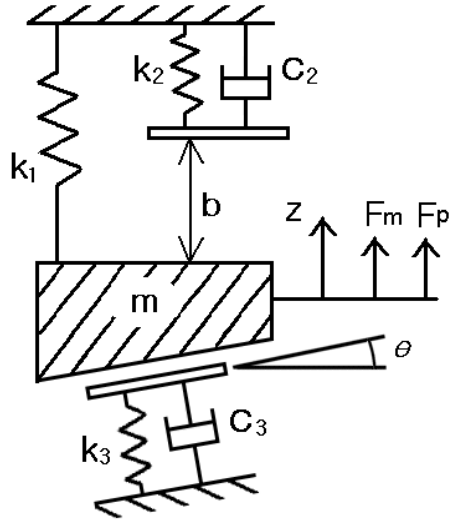


Fig. 9 Dynamic model for plunger movement

Fig. 9의 운동모델에서  $z$  를 플런저의 변위로 하고 뉴턴 법칙을 적용하여 운동방정식을 구하면 식 (8)이 얻어진다.

$$m\ddot{z} = -(k_3 + k_1 + k_2)z - (c_3 + c_2)\dot{z} + F_m + F_p + k_2b - k_1z_0 \quad (8)$$

여기서,  $z_0$  는 코일스프링의 초기변위이고  $b$  는 초기상태의 공극(air gap)의 크기이다. 또한  $k_1$  는 코일스프링 상수,  $F_p$  는 충돌시 발생하는 유체반력,  $k_2$  와  $c_2$  는 플런저와 코어 충돌에 적용하는 금속의 등가강성과 등가댐핑,  $k_3$ ,  $c_3$  는 플런저와 밸브시트(valve seat)면 충돌에 적용하는 금속의 등가강성과 등가댐핑이다.

$$\left( \begin{array}{l} 0 \leq z \leq b : k_3 = c_3 = k_2 = c_2 = 0 \\ z > b : k_3 = c_3 = 0 \\ z < 0 : k_2 = c_2 = 0 \end{array} \right) \quad (9)$$



운동방정식 식 (8)에 상하의 구속조건을 표현하기 위해 식 (9)의 분리조건을 부여하고 수치해석을 사용해서 진동해석을 할 수 있다. 운동방정식의 해석에서 한계 이동량 이상으로 플런저의 이동이 발생하면 자기장 유한요소 해석에 사용되는 격자들의 형상을 바꾸어 다음 시간스텝의 유한요소해석에 플런저 이동을 반영하였다.

### 3.3.2 자기력의 계산

플런저에 작용하고 있는 힘을 계산하기 위해 Maxwell Stress Tensor를 사용해서  $F_m$  을 나타내면 식 (10)과 같다.<sup>5)</sup>

$$\{F_m\} = \frac{1}{\mu_0} \int_s \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_r \\ n_z \end{Bmatrix} ds \quad (10)$$

여기서, 각 성분은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} T_{11} &= B_r^2 - \frac{1}{2}|B|^2, & T_{12} &= B_r B_z \\ T_{22} &= B_z^2 - \frac{1}{2}|B|^2, & T_{21} &= B_r B_z \end{aligned}$$

식 (10)을 각 성분별로 계산하여 플런저의 거동에 영향을 미치는  $z$  방향의 힘은 다음과 같이 나타내어진다.

$$F_{m_z} = \int_s \frac{1}{2\mu_0} [(B_z^2 - B_r^2)n_z + 2n_r B_r B_z] ds \quad (11)$$

전자장 유한요소해석에서 계산한 자기 벡터 포텐셜  $A$ 를 사용하여 자속밀도  $B$  (magnetic flux density)를 계산할 수 있다. 얻어진 자속밀도를 식 (11)에 대입하여 공극부에 존재하는 각 요소들의 자기력을 계산하면 플런저에 발생하는 자기력은 요소 자기력의 합으로 나타나게된다.

### 3.4 유체 모델링

자동차에 사용되는 연료들의 종류는 가솔린, 디젤, LPG, 수소 등과 같이 다양하다. 솔레노이드 밸브의 플런저와 코어의 충돌 시 충돌 면에서 발생하는 유체 점성에 의한 댐핑효과를 플런저의 운동해석에 반영해야 한다. 특히, LPG나  $H_2$  와 같이 점성계수(viscosity)가 낮은 연료의 경우에는 충돌 후 생기는 바운드(bound)가 분사량의 선형성에 영향을 미치기 때문에 유체의 점성에 의해 발생하는 유체 반력의 모델링이 꼭 필요하다.

#### 3.4.1 유체 반력

솔레노이드 밸브의 플런저 충돌부의 형상은 Fig. 10과 같다.

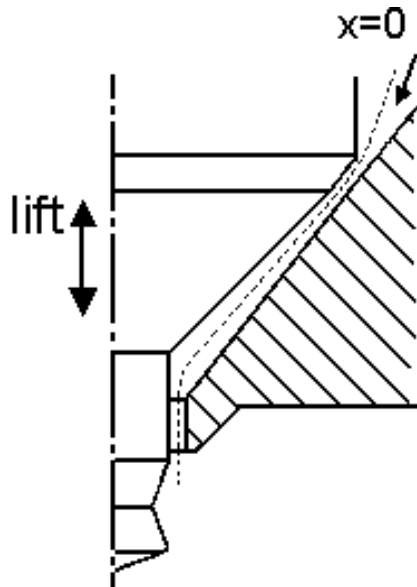


Fig. 10 Shape of impact part

플런저 충돌시 발생하는 유체댐핑 효과를 해석하기 위해 Fig. 10의 점선을 따라 축대칭 1차원 문제로 가정하였다. 충돌부 사이에서 발생하는 압력은 압력이 독립변수  $x$  만의 함수라 가정하면 식 (13)의 축대칭 1차원 유힬 방정식으로 나타난다.<sup>10)</sup>

$$6\eta \frac{\partial}{\partial x}(Urh) + 12\eta r \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial P}{\partial x} rh^3 \right) \quad (12)$$

여기서,  $U$  는 플런저 이동속도의 점선성분,  $h$  는 유로의 수직높이,  $\partial h / \partial t$  는 플런저 이동속도의 법선 성분,  $\eta$  는 유체의 점성계수, 그리고  $P$  는 유체압력이다.

식 (12)의 양변을 적분하고 검사체적내의 유체압력 분포를 부분 선형분포 형태로 가정하면 유힬 방정식은 다음의 이산화 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_e h_e^3 \frac{P_E - P_P}{(\delta x)_e} - r_w h_w^3 \frac{P_P - P_W}{(\delta x)_w} \\ + 6\mu [ U_w r_w h_w - U_e r_e h_e ] \\ - 12\mu [ \bar{r}_e \bar{h}_e (\Delta x)_e + \bar{r}_w \bar{h}_w (\Delta x)_w ] = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)을 행렬형태로 나타내기 위하여 식 (14)와 같은 형태로 나타내었다.

$$a_P P_P = a_E P_E + a_W P_W + b \quad (14)$$

여기서, 각 계수는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
a_P &= a_E + a_W \\
a_E &= \frac{r_e h_e^3}{(\delta x)_e}, \quad a_W = \frac{r_w h_w^3}{(\delta x)_w} \\
b &= 6\mu [ U_w r_w h_w - U_e r_e h_e ] \\
&\quad - 12\mu [ \bar{r}_e \bar{h}_e (\Delta x)_e + \bar{r}_w \bar{h}_w (\Delta x)_w ]
\end{aligned} \tag{15}$$

솔레노이드 밸브 동작 시 플런저의 충돌에 의해 발생하는 유체반력은 식 (14)에서 구한 각 검사체적의 압력과 수직 단면적  $A_z$  의 곱으로 구할 수 있다.

$$F_p = \sum_{i=1}^n P_i \cdot A_z \tag{16}$$

### 3.4.2 유량 계산

Fig. 10의 점선을 따라 흐르는 유체의 유량은 식 (14)에서 구한 검사체적의 압력을 사용하여 구할 수 있는데 일정 시간간격  $dt$  동안 유로에 흐르는 유체의 체적유량은 다음 식으로 나타난다.

$$dQ = \left\{ \frac{Uh}{2} + \frac{h^3}{12\eta} \left( - \frac{\Delta P}{\Delta x} \right) \right\} \cdot 2\pi r \cdot dt \tag{17}$$

## 4. 결과 및 고찰

고속 응답 솔레노이드 밸브의 동적 해석을 위해 각 시스템별로 모델링을 하고 수치해석법을 적용하였다. 이러한 해석기법을 수치해석용 프로그램인 MATLAB으로 프로그래밍 하여 솔레노이드 밸브의 실시간 해석이 가능하게 되었다.

개발된 해석프로그램을 사용해서 시간스텝 별로 물리량을 계산하고 그 과정에서 얻어진 결과를 나타내었는데, 이를 통해 구동 전압인가 후 솔레노이드 밸브 내부에서 일어나는 동작 특성을 분석할 수 있었다. 또한, 수치 모델 해석의 타당성을 검증하기 위해 실험치와 해석치를 비교하였다.

### 4.1 전자기장 유한요소해석

자기장해석에 사용되는 기본 입력 값은 밸브의 요소격자 모델, 자성재료의 초기 투자율 곡선(initial permeability curve), 자성재료의 도전율(conductivity)등이 필요하고 회로 해석에는 솔레노이드 구동전압 및 코일 저항, 코일 권전수, 콘덴서 용량(capacity)등이 필요하다. 해석에 사용되는 기본 데이터는 Table 1과 같다.

Table 1 Input data for electromagnetic analysis

Item	Input data	Item	Input data
Coil Resistance	14.4 $\Omega$	Air Gap	130 $\mu\text{m}$
Coil Turns	356 회	Conductivity	$10^6$ S/m
Voltage	13.3 V		

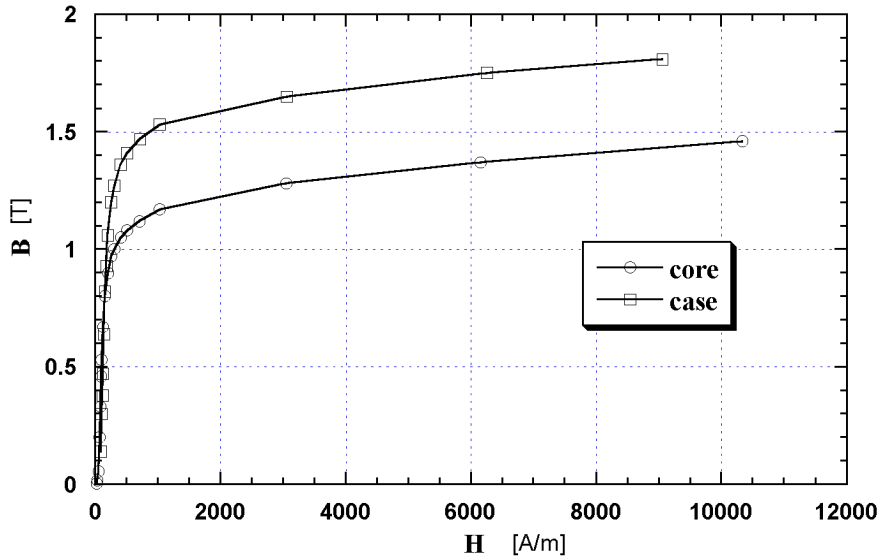


Fig. 11 BH-curve of the magnetic materials

Fig. 11에 나타난 자성재료의 비선형 초기투자율곡선과 Table 1의 기본 특성데이터를 사용하여 2 ms 동안 시간스텝 별로 솔레노이드 밸브 안에서 발생하는 전자기장 변화를 해석하였다.

해석프로그램에서는 시변계 비선형 유한요소해석을 통해 구동전압이 인가되는 시점부터 시간스텝 별로 전자기장을 계산하고 있다. Fig. 12~15는 코어(core)와 플런저 사이의 공극을 130 $\mu$ m 으로 플런저를 고정시킨 상태에서 계산된 결과이다.

Fig. 12~13은 공급전압 인가 후 2.0ms 경과시점에서의 자속밀도 B (magnetic flux density)와 자기벡터 포텐셜 A (magnetic vector potential)에 대한 분포형태를 나타내었다. 그림과 같이 솔레노이드 내부의 자화가 자기회로의 단면에 대해 균등하게 발생하지 않고 있어 자화를 균등하게 가정 한 수치계산은 문제가 있음을 보여주고 있다.

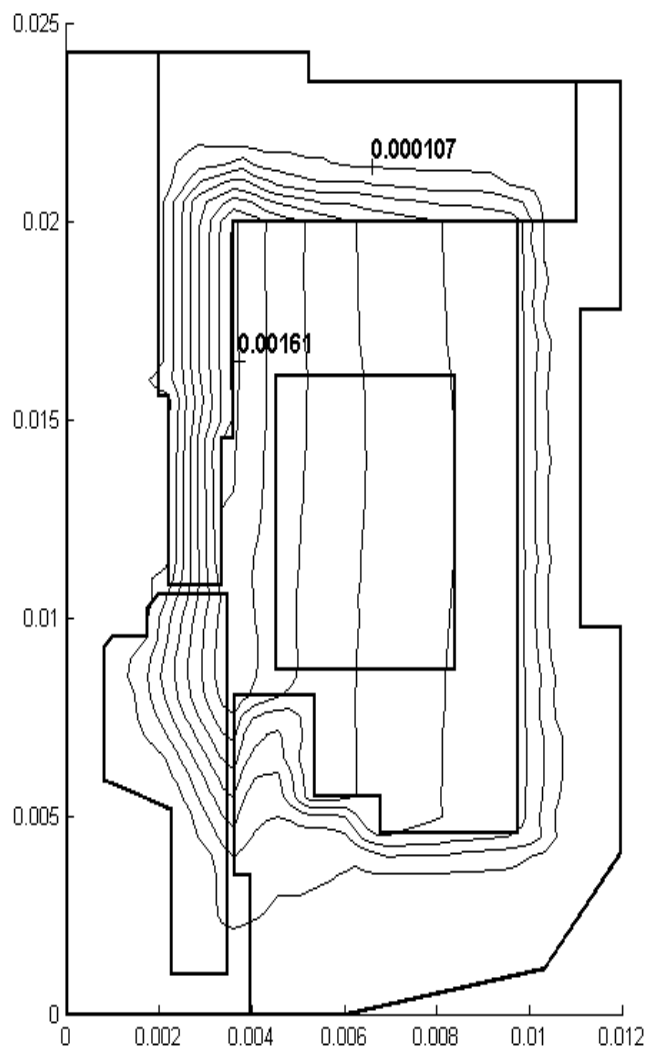


Fig. 12 Distributions of magnetic vector potential  $A$  ( $t = 2.0\text{ms}$ )

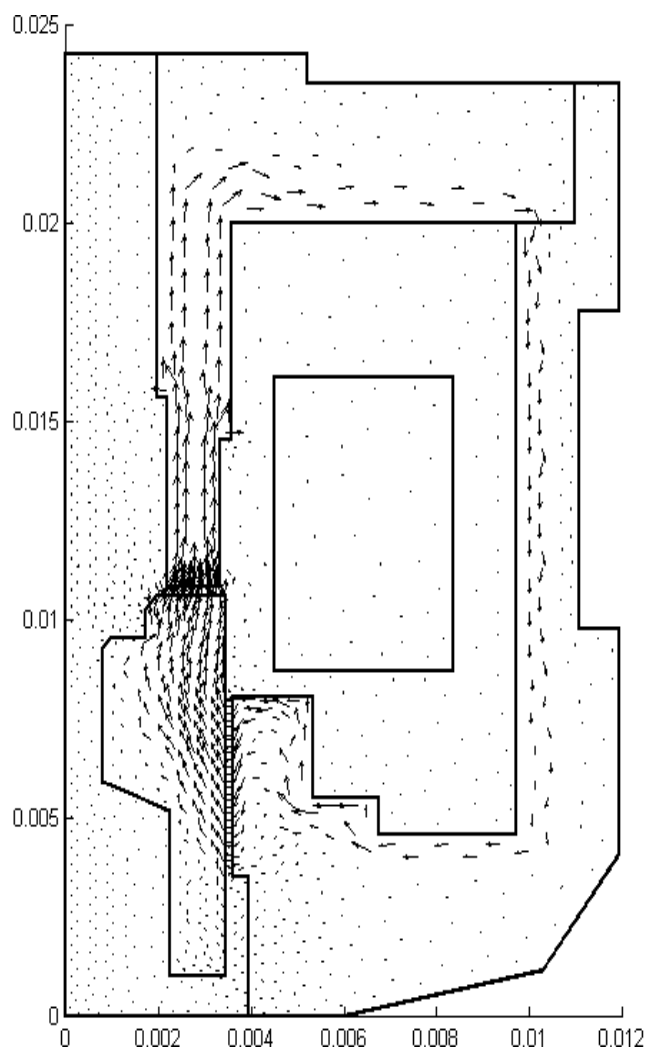


Fig. 13 Distributions of magnetic flux density B ( $t = 2.0\text{ms}$ )



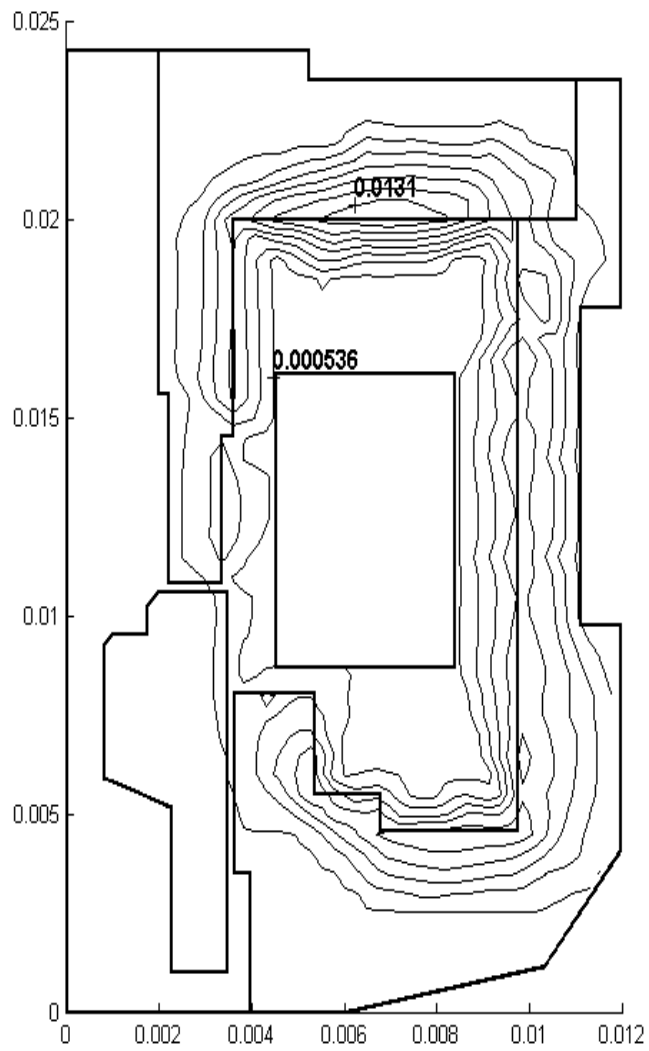


Fig. 14 Eddy current density  $J_e$  at initial time step ( $t = 0.05\text{ms}$ )

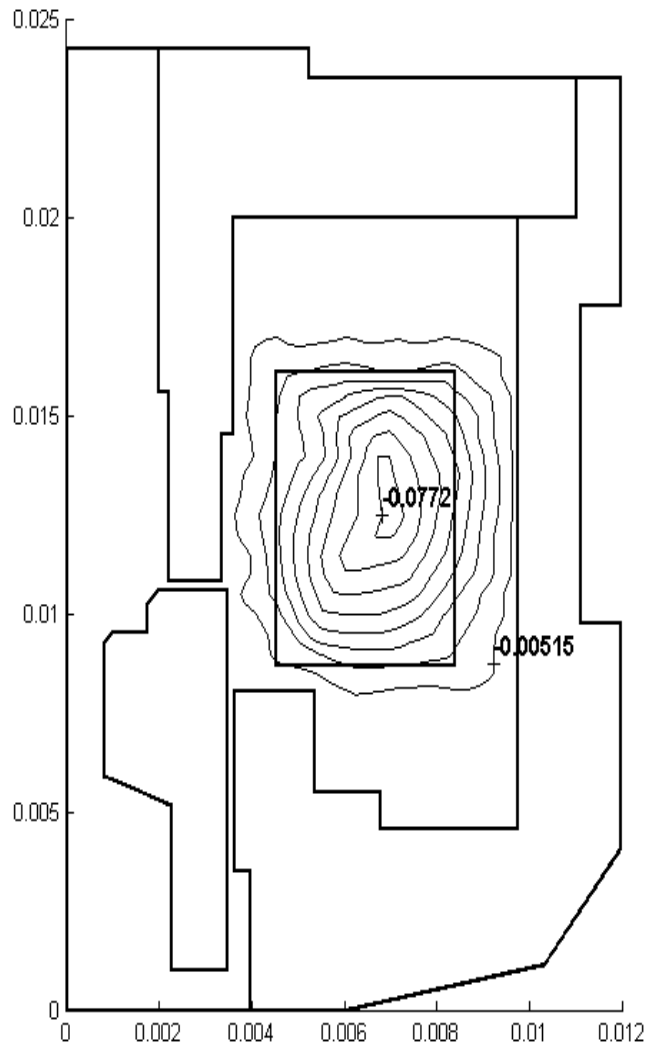


Fig. 15 Current density  $J_0$  at initial time step ( $t = 0.05\text{ms}$ )

코일에 공급되는 전류가 일정한 정적상태의 해석과는 달리 일정전압을 코일에 인가해 시간에 따라 전류가 상승되는 시변해석은 식 (1)에서 보듯이 와전류밀도  $J_e$  (eddy current density)항이 추가된다. 와전류(eddy current)는 시간에 따라 자속이 변할 때 자기회로를 구성하고 있는 연자성 재료 안에서 페러데이 법칙에 의해 발생한다. 특히 시간에 대한 자속의 변화량은 전압인가 시점 근처에서 크게 나타났고 초기 전류증가는 와전류밀도  $J_e$  에 의해 크게 영향을 받았다. Fig. 14와 Fig. 15에서 시변해석 초기 시간스텝에서 와전류 밀도  $J_e$  과 전류 밀도  $J_0$  를 도시하였다. 여기서도 보듯이 초기 시간 스텝 (0.05ms)에서 와전류밀도의 최고치  $0.0131 \text{ A/m}^2$  는 전류밀도의 최고치  $0.0772 \text{ A/m}^2$  비해 무시할 수 없는 양임을 보여주고 있다.

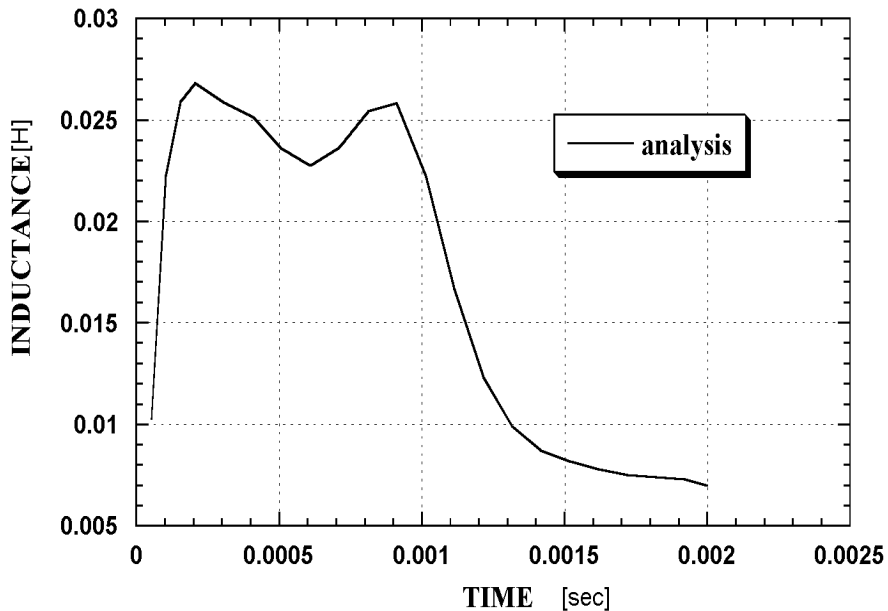


Fig. 16 Timewise variation of solenoid valve inductance

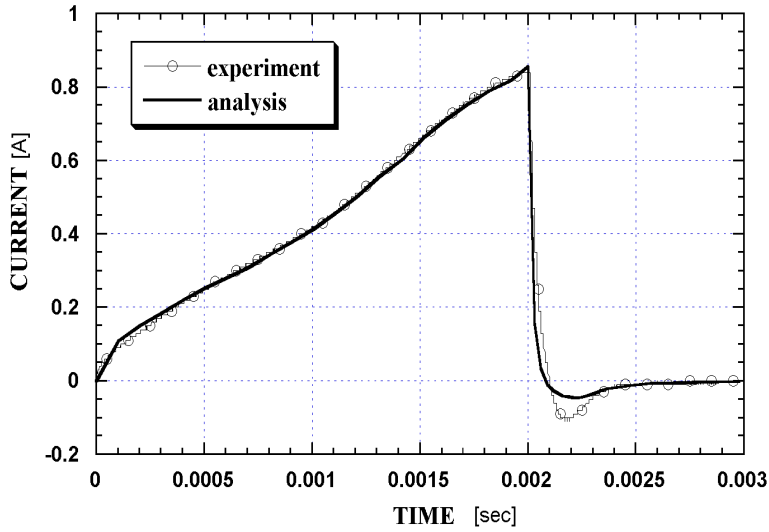
기존의 솔레노이드에 대한 연구에서는 솔레노이드 내부 인덕턴스(inductance)를 일정하다고 가정하고 있다. 하지만 Fig. 11과 같이 연자성 재료의 비선형 특성 때문에 밸브가 열리는 과도상태 시 솔레노이드의 내부 인덕턴스가 변화하는 것으로 나타났다.

Fig. 16은 솔레노이드 밸브의 구동시 시간에 따라 계산된 인덕턴스  $L$  을 나타내고 있다. 전압인가 후 초기에 급격히 상승하였다가 연자성재료의 자화가 포화되는 1ms 이후부터 감소하는 것을 보이고 있다.

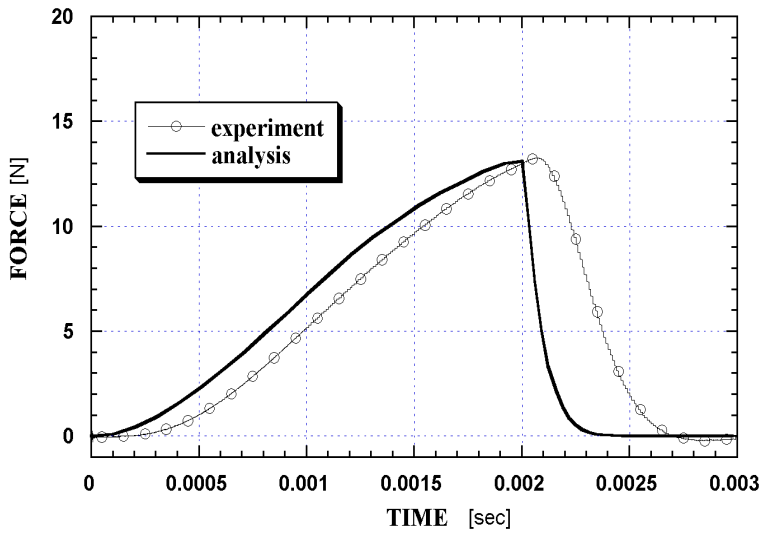
## 4.2 전류와 자기력

Fig. 3의 실험장치에 의한 자기력의 측정은 플런저를 일정 공극크기로 고정된 다음 구동 전압을 펄스(pulse)형태로 인가하면서 솔레노이드 밸브를 흐르는 전류량의 증가와 플런저가 받는 자기력의 증가를 측정하였다. 따라서, 해석 프로그램에서도 플런저의 운동방정식의 해석을 제외하고 전자기장 유한요소해석만을 사용해 전압인가 후 시간의 경과에 따라 변화하는 자기력과 전류를 계산하여 실험치와 비교하였다.

해석 조건은 Table 1 과 같고 공극 크기를  $60\mu\text{m}$ 과  $130\mu\text{m}$  경우로 나누어 실험하였다. 솔레노이드 밸브에 전압을 펄스형태로 인가하면 RLC회로의 과도현상과 같은 함수형태 전류변화가 나타나지 않고 Fig. 17(a)와 Fig. 18(a)에서처럼 비선형 특성을 보이며 전류가 변화하는데, 초기에는 전류의 증가가 완만하다가 1ms 이후부터 급해지고 있다. 이것은 Fig. 11의 초기 자화율 곡선의 비선형 특성 때문에 전기에너지가 자기에너지로 바뀌는 자화 능력의 변화 때문이다. 유한요소 해석 프로그램의 해석치도 전류의 변화가 비선형 특성을 나타내며 실험치와 근사하게 증가하고 있다.

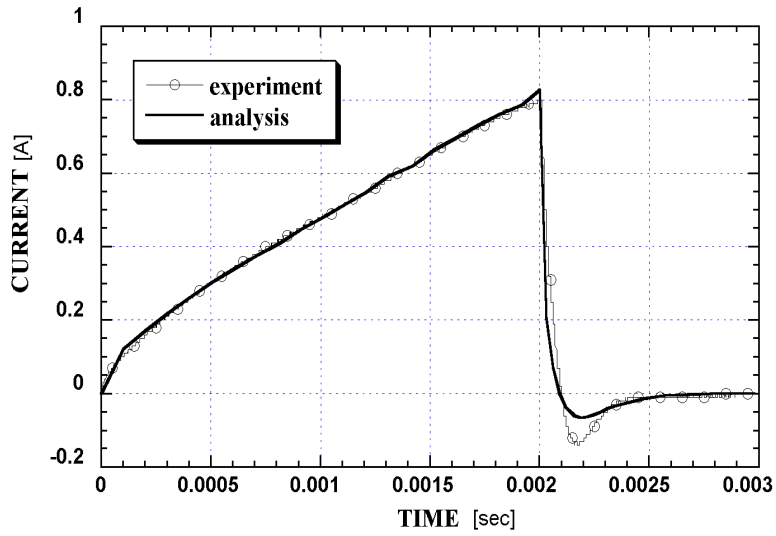


(a) Current

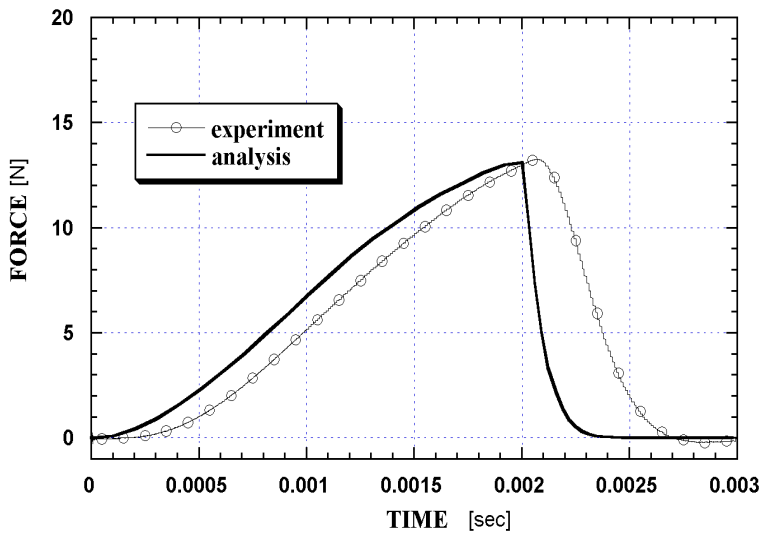


(b) Magnetic force

Fig. 17 Timewise variations of current and magnetic force  
(airgap =  $60\mu\text{m}$ )



(a) Current



(b) Magnetic force

Fig. 18 Timewise variations of current and magnetic force  
(airgap=130 $\mu$ m)

Fig. 17(b)와 Fig. 18(b)에서는 실험장치에서 얻은 자기력의 실험치와 해석 프로그램에서 계산한 해석치를 비교하였다. 공극 크기가 커질수록 공극부분에 자기저항이 증가하여 플런저에 작용하는 자기력은 감소함을 알 수 있었다. 여기서 자기력의 해석치가 실험치에 비해 시간 지연이 발생하는데 이 차이는 자기력 측정장비가 가지고 있는 동적 측정의 응답성 문제로 판단되어 진다.

### 4.3 플런저의 거동

완제품 상태에서 솔레노이드 밸브의 구동 시에는 플런저의 이동 때문에 로드 와셔(load washer)를 이용한 자기력 측정이 불가능하였다. 솔레노이드 밸브 구동실험은 전류 측정기를 사용해서 전류의 변화량을 측정하고 플런저에 연결된 핀틀(pintle) 주위에 유도 코일을 두어 플런저의 움직임으로 발생하는 유도기전력을 증폭시켜 플런저의 거동을 측정하였다. 단, 연료가 공급 될 때에는 핀틀 주위에 유도 코일을 설치할 수 없기 때문에 실험치를 얻지 못했다.

실험은 솔레노이드 밸브 내부에 연료를 공급하는 경우와 공급하지 않는 경우로 나누어 실험하였다. 해석프로그램에서도 연료를 공급하는 경우와 공급하지 않는 경우로 나누어 해석하였는데 유체에 의한 유체반력 계산에 적용되는 점성계수를 가솔린 점성계수(viscosity)와 공기 점성계수로 달리 적용하여 계산하였다.

해석에 사용된 기본 특성 데이터는 Table 2 과 같다.

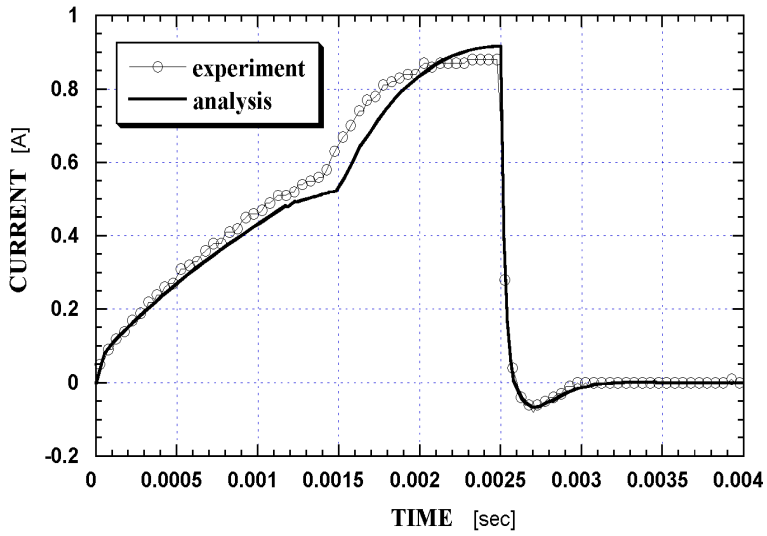
Table 2 Characteristics of solenoid valve

Electromagnetic Properties	Input Data	Mechanical Properties	Input Data
Coil Resistance	14.4 $\Omega$	Spring Constant	1625 N/m
Voltage	14.0 V	Viscosity of Air	$1.79 \times 10^{-3}$ [N · s/m <sup>2</sup> ]
Coil Turns	356 회	Viscosity of Gasoline	$3.1 \times 10^{-4}$ [N · s/m <sup>2</sup> ]
Conductivity	$10^6$ S/m	Initial Spring Force	4.0 N
		Initial Air Gap	136 $\mu$ m

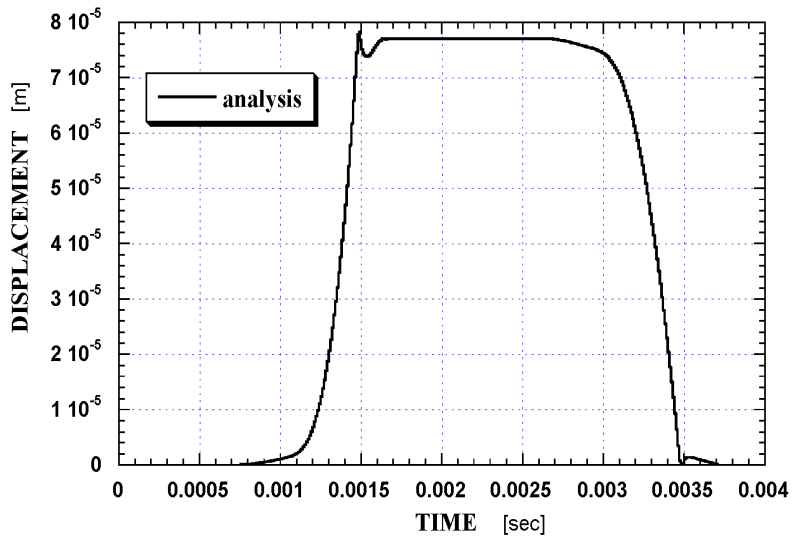
Fig. 19 과 Fig. 20 는 솔레노이드 밸브 작동 시 권선부에 인가되는 전류와 플런저의 거동을 보여주고 있다. 실제 동작에서 측정된 Fig. 20(a)의 전류 증가 곡선은 플런저를 고정시킨 Fig. 18(a)의 전류 증가 곡선과 달리 전류값이 오히려 감소하는 부분이 발생하였다. 이것은 플런저가 상승할 때 자기회로내의 공극 크기가 감소하면서 공극을 포함하는 전체 자기저항을 감소시켜 자화를 많이 일어나게 하기 때문이다. 따라서, 공급되어지는 전기에너지가 자기에너지로 급격히 변환되면 전류의 감소로 나타나는 것이다.

Fig. 20(b)는 연료가 공급되지 않는 경우에 플런저의 거동에 대한 실험치와 해석치의 비교이다. 실험치에 비해 해석치의 열림시간이 늦게 나타났다. 이것은 완제품 상태에서 실험에 사용되는 솔레노이드 밸브의 형상값이나 스프링 상수값을 측정하지 못하고 제품의 기본설계치를 사용했기 때문으로 사료되어진다.



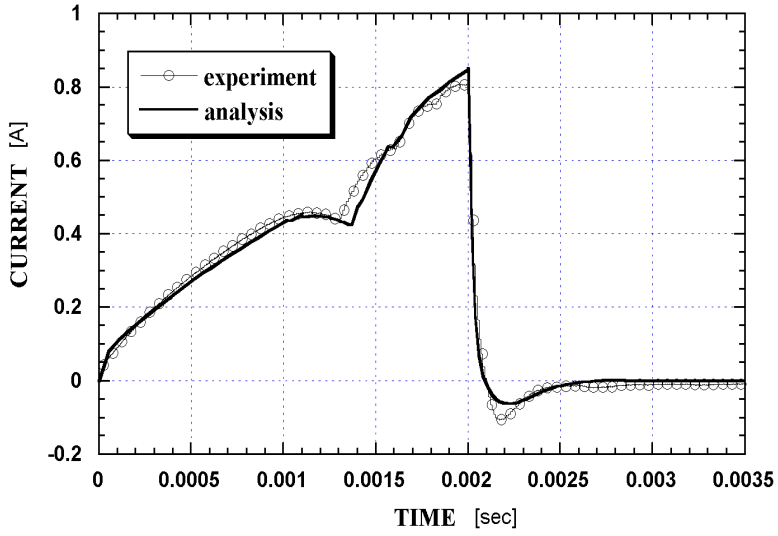


(a) Electric current

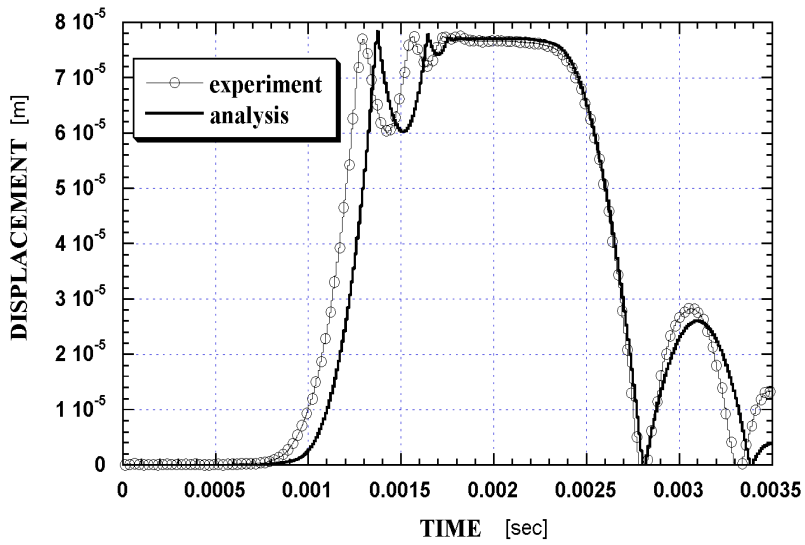


(b) Plunger motion

Fig. 19 Comparisons with experimental results (with fuel supply)



(a) Electric current



(b) Plunger motion

Fig. 20 Comparisons with experimental results (without fuel supply)

#### 4.4 유체반력과 유량선형성

식 (14)로부터 압력분포를 구하고 식 (16)을 사용해서 플런저 충돌부에 발생하는 유체반력을 계산하였다. Fig. 21은 플런저 행정이 각각  $30\mu\text{m}$ 과  $77\mu\text{m}$  일 때의 계산결과이며 압력강하는 상대적으로 유로 면적이 작은 충돌부( $0.0018\text{ m}$ ) 와 핀틀( $0.0033\text{ m}$ ) 부근에서 크게 발생하고 있다.

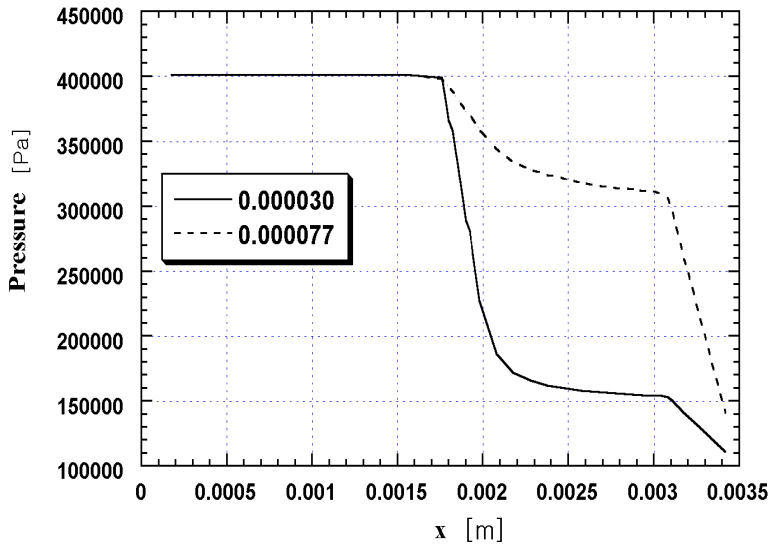


Fig. 21 Distribution of pressure at impact part

본 논문에서 해석대상으로 사용한 솔레노이드 밸브는 자동차 연료분사기용 밸브를 사용하였다. 연료분사기의 열림 지연시간은  $1.5\text{ ms}$  정도로 고속 솔레노이드 밸브에 속하며 자동차의 이상연소를 위해 공급되는 공기량에 대한 정확한 연료량의 분사가 중요하다. 이를 위해 자동차 연료분사기용 밸브는 제어 분사시간의 변화에 대한 연료분사량의 선형형을 보장해야 한다.

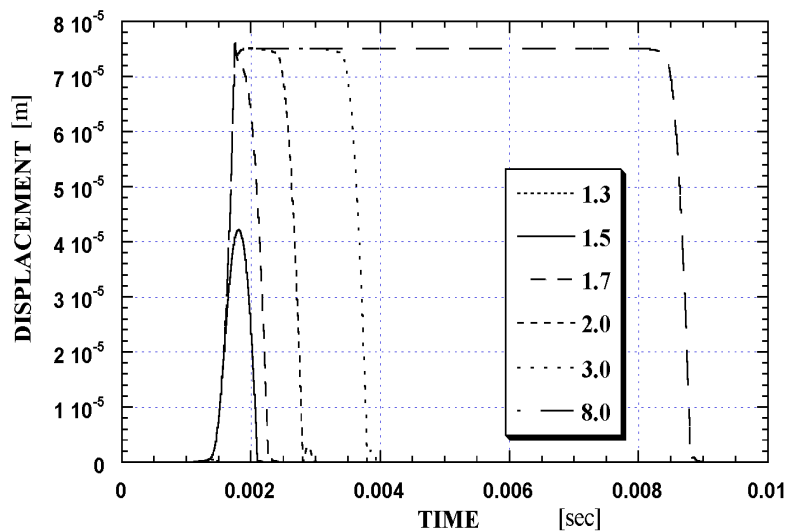


Fig. 22 Plunger motion for injection time

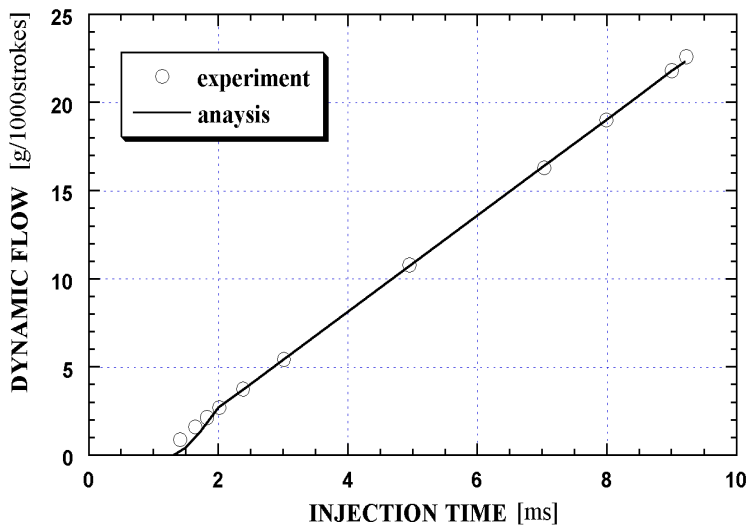


Fig. 23 Mass linearity for injection time

Fig. 22는 제어 분사시간에 대한 솔레노이드 밸브 플런저의 거동 해석치를 표시하였다. 1.3 ms의 분사시간동안 전압을 인가한 경우에는 솔레노이드의 응답지연시간 때문에 플런저의 거동이 발생하지 않았고, 1.5 ms 경우에는 완전히 밸브가 열리지 못하고 닫혔다. 이런 이유로 1.5 ms 이하의 제어 분사시간에서는 Fig. 2와 같이 선형성을 유지할 수 없음을 알 수 있다.

해석 프로그램에서 제어 분사시간에 대한 유체의 분사량은 식 (17)을 사용하여 구할 수 있다. Fig. 23은 해석을 통해 얻어진 유량 선형성 곡선과 실험을 통해서 얻은 선형성 곡선을 비교하였다. 선형구간(2.0 ~ 8.0 ms)에서는 실험치와 해석치가 일치함을 보였으나 2.0 ms 이하의 분사시간에서는 실험치와 차이를 보이고 있는 것은 Fig. 20에서 해석치가 실험치에 비해 밸브가 늦게 열리는 해석 오차 때문으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 고속 응답 솔레노이드 밸브의 동적 시뮬레이션 기법을 개발하고, 실험장치를 사용한 자기력 및 실제동작 특성실험의 결과와 개발된 해석 프로그램의 수치해를 비교 검증하였다.

펄스자화(pulse magnetization) 형태로 자화가 발생하는 솔레노이드 밸브의 동작에서 연자성재료 내부에 흐르는 와전류와 같은 동적 영향(dynamic influence)을 시변계 유한요소해석을 통해 시뮬레이션 할 수 있었고, 이때 계산된 내부코일의 인덕턴스는 시간에 따라 일정하지 않은 비선형 특성을 갖는 것으로 나타났다. 또한 플런저의 운동해석에서는 충돌면에서 발생하는 유체의 댐핑효과를 고려해 플런저의 충돌 및 반발 특성을 해석할 수 있었다. 액체연료 보다 기체연료인 경우에 바운드 효과가 크게 나타났으며, 연료 분사량의 계산에도 영향을 미칠 것으로 예상된다.

개발된 해석 프로그램은 솔레노이드 밸브의 설계사양과 연자성재료의 자성특성 실험치만으로 플런저(plunger)의 거동을 예측할 수 있었다. 따라서 해석 프로그램은 솔레노이드 밸브의 개발이나 원가절감을 위한 제품설계에 각 설계인자의 변경에 대한 밸브 동작특성의 변화 경향을 파악하는데 유용하게 활용될 것으로 기대한다.

## Reference

1. Gerhard Stumpp, Wilhelm Polach, N. Muller and J. Warga, "Fuel Injection Equipment for Heavy Duty Diesel Engine for U.S 1991/1994 Emission Limit," USA SAE 890851, 1989.
2. 채재우, 정영석, 이상만, 황재원, 양이진, 장석채, "디젤엔진 유닛 인젝터용 고속응답 솔레노이드 밸브 설계, 한국자동차공학회 추계학술대회, 96380250, 1996.
3. 홍순철, 이장희, 김창수, "디젤엔진의 Common Rail Injection System 구현을 위한 솔레노이드 밸브 제어기술 개발," 한국자동차공학회 추계학술대회, 97380257, 1997.
4. 이형승, 이용규, 김한조, 김응서, "솔레노이드 구동 수소인젝터의 성능예측," 한국자동차공학회 논문집, 제5권, 제1호, pp. 174-185, 1997.
5. 정인성, 허진, 윤상백, 현동석, "솔레노이드 액츄에이터의 형상최적화에 관한 연구," 전기학회 논문집, 제47권, 제9호, pp. 1325-1330, 1998.
6. David H. Smith, David A. Spinweber, "A General Model for Solenoid Fuel Injector Dynamics", USA SAE 800508, 1980.
7. Spurk, J. H., Betzel, T., and Smon, N., "Interaction of Nonlinear Dynamics and Unsteady Flow in Fuel Injectors", USA SAE 920621, 1992.
8. Max Greiner, Peter Romann, Ulfich Steinbrenner, "BOSCH Fuel Injectors New Developments", USA SAE 870124, 1987.
9. Efren Moreno Benavides, Juan Ramon Arias Perez, Ramon Perez Herrero, "Numerical Simulation of the Injection Process in a Two

Stroke Diesel Engine", SAE TECHNICAL PAPER SERIES, 2000-01-0291, 2000.

10. J.H. Spurk, T. Betzel, N. Simon, "Interaction of Nonlinear Dynamics and Unsteady Flow in Fuel Injectors", SAE, 920621, 1992.



## **Abstract**

### Dynamic Analysis of Fast-Acting Solenoid Valves Using Finite Element Method

*by Gi-Tae Kweon*

The professional Graduate School of  
Automotive Engineering  
Kookmin University Seoul, Korea

The purpose of the present paper is to develop a new algorithm for dynamic simulation of fast-acting solenoid valves. It is necessary to analyze the coupled equations of the electric, magnetic, and mechanical systems in a transient nonlinear manner. The transient nonlinear electromagnetic field is simulated by using the Finite Element Method (FEM), which is solved simultaneously with the coupled nonlinear electronic circuit. The mechanical movement of the solenoid valve is analyzed at every time step from the force balances acting on the plunger, which include the electromagnetic force calculated from the Finite Element analysis as well as the elastic force by a spring and the fluid damping force between air gaps. Dynamic responses of the solenoid valves predicted by this algorithm agree closely with the experimental results including bouncing effects. The algorithm is applicable to predict precisely the dynamics of various types of electronically controlled solenoid valves with different characteristics and specifications of the solenoid material and configurations, and can be used to design optimal fast-acting solenoid valves.