

비정상 유한요소법을 이용한 고속응답 솔레노이드 밸브의 동적거동해석

권기태* · 한화택†
(2001년 10월 19일 접수, 2002년 4월 10일 심사완료)

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

Gitae Kweon and Hwataik Han

Key Words: Fast-Acting Solenoid Valve(고속응답 솔레노이드 밸브), Magnetic Circuit(자기회로), Finite Element Method(유한요소법), Fuel Injector(연료 분사기), Magnetization(자화)

Abstract

It is intended to develop an algorithm for dynamic simulation of a fast-acting solenoid valve. The coupled equations of electric, magnetic, and mechanical systems should be solved simultaneously in a transient nonlinear manner. The transient nonlinear electromagnetic field is analyzed by the Finite Element Method (FEM), which is coupled with nonlinear electronic circuitry. The dynamic movement of the solenoid valve is analyzed at every time step from the force balance acting on the plunger, which includes the electromagnetic force calculated from the Finite Element analysis as well as the elastic force by a spring and the hydrodynamic pressure force along the flow passage. Dynamic responses of the solenoid valves predicted by this algorithm agree well with the experimental results including bouncing effects.

1. 서론

전기에너지를 작은 변위의 직선운동으로 변환하는 장치로 사용되는 솔레노이드 밸브(solenoid valve)는 구조가 간단하고 경제적이며, 정밀제어가 가능하기 때문에 스위치, 릴레이, 밸브 등 여러 산업분야에서 널리 이용되고 있다. 특히, 자동차 연료분사기로 사용되는 솔레노이드 밸브는 정밀한 유량제어가 가능한 고속응답형으로서 개발을 위해서는 정확한 동적거동에 대한 해석이 필요하다.⁽¹⁻³⁾

고속응답형 솔레노이드 밸브는 빠른 자화 때문

에 내부에서 발생하는 와전류(eddy current) 등의 동적 효과를 고려한 비정상상태의 유한요소해석을 수행해야 한다. 특히, 전기·자기 및 기계 시스템이 상호 결합된 형태로 나타나기 때문에 매 시간스텝(time step)별로 각 시스템 간의 결과치를 서로 교환하면서 해석이 이루어져야한다. 하지만 기계공학분야의 기존 연구에서는 전자기장 시변계 유한요소해석을 하지 않고 단순화하거나 실험에 의존하는 경우가 많다.⁽¹⁻³⁾ 반면, 전기공학분야에서는 솔레노이드 밸브에 대한 유한요소해석은 이루어지고 있으나 기계거동에서 충돌시 발생하는 금속의 강성이나 댐핑효과, 유체의 점성에 의한 효과를 고려하지 않아 플런저의 거동해석에 한계를 보이고 있다.^(4,5)

본 논문에서는 자기방정식과 회로방정식을 결합하고 연자성 소재의 비선형특성을 고려한 비선형 비정상상태 유한요소해석을 수행한다. 여기에

* 국민대학교 자동차전문대학원
† 책임저자, 회원, 국민대학교 기계자동차공학부
E-mail: hhan@kookmin.ac.kr
TEL: (02)910-4687, FAX: (02)910-4839

서 계산된 자기력과 유체의 댐핑력을 고려하여 운동방정식으로부터 동역학적 거동을 해석하고자 한다. 또한 수치해석 결과를 솔레노이드 밸브의 고속 응답특성을 측정할 수 있는 실험장치를 사용해 얻은 실험 결과와 비교해 해석기법의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 실험

본 실험에서 사용된 솔레노이드 밸브는 자동차용 연료분사기(fuel injector)로 그 구조는 Fig. 1과 같다. 코어(core)와 플런저(plunger) 사이의 공극(airgap)의 크기를 변화시킬 수 있도록 솔레노이드 밸브를 수정제작하여 실험에 사용하였다.

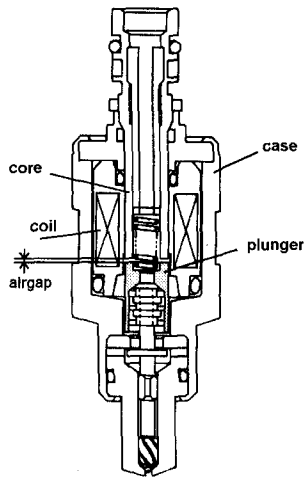


Fig. 1 Fast-acting solenoid actuator

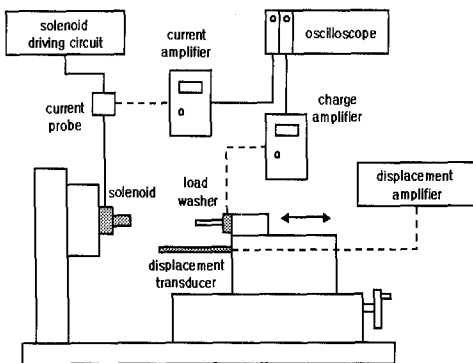


Fig. 2 Schematic of experimental setup

솔레노이드 밸브 성능실험을 위한 실험장치의 구성도는 Fig. 2와 같다. 실험장치에서 플런저의 변위가 70 μ m 정도로 매우 작기 때문에 하중의 변화에 대해 변위량이 작은 로드셀(load cell)을 사용하였다.

변위 트랜스듀서(displacement transducer)를 사용하여 원하는 크기로 밸브의 공극을 미리 결정하고, 전압 인가시 생성되는 자기력에 의해 실험장치에서 발생하는 유격을 최소화하기 위해 고정나사로 이송대를 고정하였다. 구동회로에 전압 펄스를 인가하면서 공급전압과 솔레노이드 코일을 흐르는 전류 그리고 로드와셔(load washer)에 가해지는 자기력을 멀티 채널 디지털 오실로스코프를 사용하여 동시에 데이터를 수집하였다.

3. 수치 모델링

솔레노이드 밸브의 동적 거동을 시뮬레이션 하기 위해서는 밸브에 영향을 미치는 각 시스템을 연계하여 해석해야 한다. 각 시스템 사이의 연관 관계는 Fig. 3에 보인다.

3.1 자기장의 유한요소 모델링

맥스웰(Maxwell) 방정식으로부터 자기벡터 포텐셜(magnetic vector potential)을 시스템변수로 하는 자기 방정식은 식 (1)과 같다.

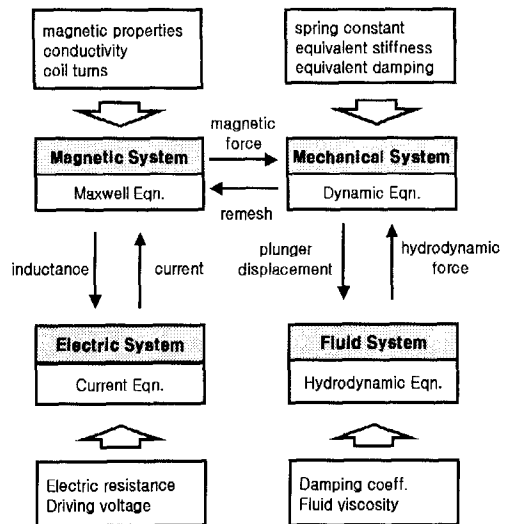


Fig. 3 Flowchart of overall numerical modeling

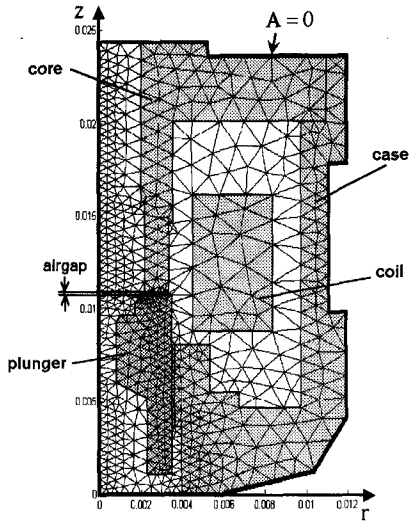


Fig. 4 FEM mesh for axisymmetric cross-section

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

여기서, μ_0 는 진공내 투자율, \mathbf{A} 는 자기벡터 포텐셜 [A], \mathbf{J}_0 는 입력 전류밀도 [A/m^2], \mathbf{J}_e 는 와전류밀도 [A/m^2], \mathbf{J}_m 은 자화에 의한 등가 자화 전류밀도 [A/m^2]이다.

식 (1)을 축대칭 2차원 문제로 가정하면 자기벡터 포텐셜의 θ 축 성분만 남게되고 전위항과 자성체의 히스테리시스(hysteresis) 특성을 무시하면 아래와 같이 정리할 수 있다.⁽⁴⁾

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

여기서, σ 는 자성체의 도전율(conductivity)이다. 식 (2)를 각 요소 e에 대해 Galerkin법으로 정식화하면 식 (3)의 요소행렬 방정식이 얻어진다.

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

여기서, $[S_0]$, $[P]$, $[Q]$ 는 요소계수행렬이고, I 는 코일에 흐르는 전류이다.

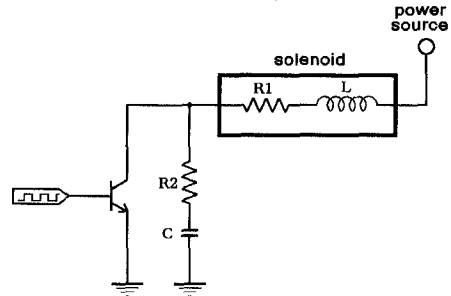


Fig. 5 Electric driving circuit for solenoid valve

식 (3)의 요소 행렬방정식을 사용해 전체 요소에 대한 행렬방정식을 구성하고 Fig. 4에 보이는 바와 같이 격자모델의 외곽경계를 따라서 고정 경계조건 ($\mathbf{A} = 0$)을 적용하였다.

3.2 전기회로의 모델링

솔레노이드 밸브에 전류를 공급하는 구동회로는 Fig. 5와 같이 구성되어 있고 회로방정식은 식 (4)와 같다.

$$V = E + (R_1 + R_2)I(t) + \frac{1}{C} \int I(t)dt \quad (4)$$

여기서, E 는 자속량 변화로 발생하는 유도기전력(induced electromotive force)이고, C 는 구동회로에 사용된 콘덴서의 용량이다.

식 (4)의 회로 방정식의 유도기전력 항을 시간에 대한 자기벡터포텐셜의 변화로 표현하면 각 요소에 대한 회로방정식의 요소 행렬식은 아래와 같이 된다.

$$V = [G]^{(e)} \frac{d}{dt} \{A\}^{(e)} + R_t I(t) + \frac{1}{C} q \quad (5)$$

여기서, $[G]$ 는 요소에 대한 계수행렬이고, q 는 전하량이다. 식 (3)과 식 (5)에 시간미분항을 후퇴차분법(backward difference method)을 적용하고, 두 식을 결합해 자기방정식과 회로방정식을 포함한 전체 행렬방정식을 구하면 특정 시간스텝에서의 자기벡터 포텐셜과 전류값을 계산할 수 있다.

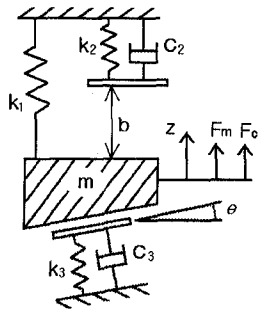


Fig. 6 Dynamic model for plunger movement

3.3 기계적 거동 모델링

솔레노이드 밸브 플런저(plunger)의 거동은 플런저의 이동 방향과 자기 시스템에서 발생하는 자기력 방향이 z축만으로도 구속되었다는 가정하에서 자기력 F_m , 플런저의 질량 m , 스프링 k_1 으로 구성된 운동방정식으로 모델링이 가능하다. 또한 플런저의 동작이 일정거리의 구속조건을 가지고 있기 때문에 충돌시 유체에 의해 발생하는 유체반력(hydrodynamic force) F_c , 급속 충돌을 모사하기 위한 급속의 등가 강성(equivalent stiffness)과 등가 댐핑(equivalent damping) k_2, c_2, k_3, c_3 등을 고려한다.

플런저의 동적모델은 Fig. 6과 같고⁽⁶⁾ z를 플런저의 변위로 하는 운동방정식은 식 (6)과 같다.

$$m\ddot{z} = -(k_3 + k_1 + k_2)z - (c_3 + c_2)\dot{z} + F_m + F_c + k_2b - k_1z_0 \quad (6)$$

여기서, F_m 은 공극부에서 발생하는 자기력, F_c 는 유체의 점성에 의한 유체반력, b 는 최대변위, z_0 는 초기 변위이다.

플런저에 작용하는 자기력 F_m 은 Maxwell 응력 텐서를 사용하여 식 (7)과 같이 계산할 수 있다.⁽⁴⁾

$$F_m = \int_s \frac{1}{2\mu_0} [(B_z^2 - B_r^2)n_z + 2n_r B_r B_z] ds \quad (7)$$

여기서, n 은 단위벡터, s 는 각 격자의 면적, B 는 공극부(airgap)의 자속밀도[Wb/m²]이다.

3.4 유체 모델링

플런저 충돌부의 형상은 Fig. 7과 같다. 충돌시 발생하는 유체효과를 점선을 따라 축대칭 1차원

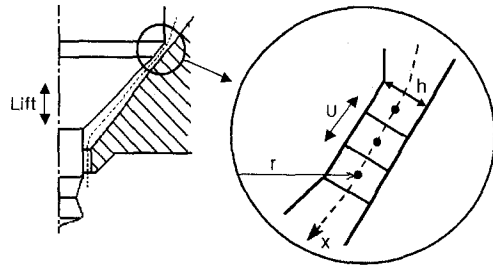


Fig. 7 Geometry of impact part

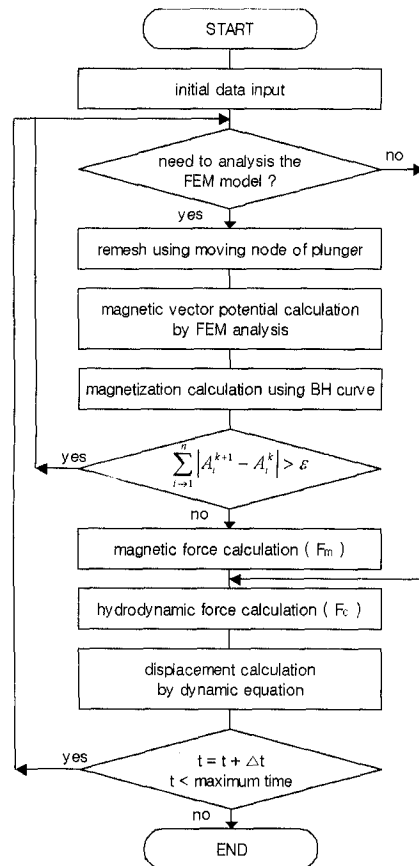


Fig. 8 Flowchart of the present analysis program

문제로 가정하면 충돌부 사이에서 발생하는 압력은 식 (8)의 편미분 방정식으로 나타난다.⁽⁷⁾

$$6\eta \frac{\partial}{\partial x} (Urh) + 12\eta r \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial p}{\partial x} rh^3 \right) \quad (8)$$

여기서, η 는 점성계수, U 는 플런저 이동속도의 접선성분, h 는 유로의 수직높이, $\partial h / \partial t$ 는 플런저 이동속도의 법선성분, p 는 유체압력이다.

Table 1 Input data for electromagnetic analysis

Item	Input data
Coil Resistance	14.4Ω
Coil Turns	356
Voltage	13.3V
Air Gap	130μm
Conductivity	10 ⁹ S/m

3.5 수치해석 프로그램

지금까지 열거한 자기, 전기, 유체 및 운동방정식의 수치모델링을 MATLAB의 M-file을 사용해 프로그래밍을 하였다. Fig. 8은 수치해석 프로그램의 흐름도를 보인다.

해석 프로그램에서는 우선 유한요소해석으로 수립된 자기벡터포텐셜을 구하고, 자기벡터포텐셜을 사용해서 자속밀도를 계산하였다. 얻어진 공극부의 자속밀도를 식 (7)에 대입하여 플런저에 영향을 미치는 자기력을 계산하고, 충돌부에서 유체접성에 의해 발생하는 유체반력은 식 (8)에서 계산된 압력을 각 격자의 수직면적에 대하여 적분함으로써 계산하였다. 계산된 자기력(F_m)과 유체반력(F_c)를 운동방정식에 대입하여 플런저의 변위를 계산한 다음 변위량이 리메쉬(remesh)가 필요한 한계치에 도달하면 격자를 수정한 후 비선형 유한요소해석을 재수행하였고 다음 시간스텝에 대하여 위 과정을 반복하였다. 수치해석에서 운동방정식의 시간스텝은 0.001ms로 하였고, 자기장 유한요소해석의 시간스텝은 0.1ms로 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 자기벡터포텐셜과 자속밀도 분포

본 해석에서 사용된 솔레노이드의 입력값은 Table 1과 같다. Fig. 9와 Fig. 10은 공급전압 인가 후 2.0ms 시점에서의 자기벡터포텐셜 A (magnetic vector potential)와 자속밀도 B (magnetic flux density)에 대한 분포를 보이고 있다.

솔레노이드 밸브 내부에서 발생하는 자속이 Fig. 10과 같이 자기회로의 단면적에서는 상대적으로 면적이 작은 공극부에 집중되고 있어 공극부의 단면적이 플런저의 거동에 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

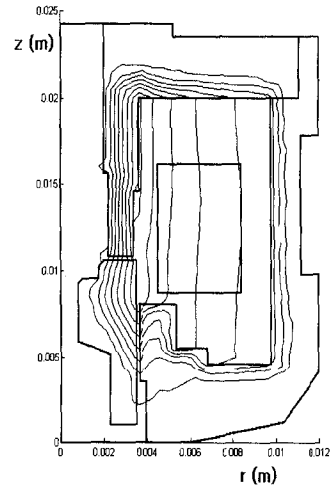


Fig. 9 Distributions of magnetic vector potential A (t = 2.0ms)

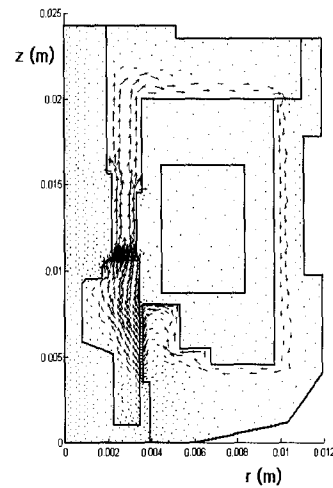


Fig. 10 Distributions of magnetic flux density B (t = 2.0ms)

4.2 충돌부에 발생하는 압력분포

유체반력을 구하기 위하여 플런저의 충돌부를 따라서 계산된 압력분포는 Fig. 11과 같다. 플런저 행정이 각각 30μm과 77μm 일 때의 계산 결과를 보인다. 행정이 작은 경우에는 압력강하가 주로 유로 면적이 작은 충돌부(0.0019m)에서 발생하며 행정이 큰 경우에는 압력강하가 핀틀(0.0035m) 부근에서 크게 발생하고 있다. 압력분

포에 의한 전체적인 유체반력은 행정이 큰 경우에 크게 나타난다.

4.3 구동시 플런저의 변위

솔레노이드 밸브의 구동실험은 전류 탐침 (probe)을 사용해 전류의 변화량을 측정하였고, 플런저의 변위측정은 플런저에 연결된 핀틀 (pintle) 주위에 유도 코일을 두어 플런저의 거동시 발생하는 유도기전력을 증폭하여 측정하였다.

Fig. 12는 구동전압을 인가할 때 밸브의 코일에 흐르는 전류량이고, Fig. 13과 Fig. 14 각각은 연료가 공급되지 않을 때와 공급될 때의 플런저 변위에 대한 실험결과와 수치해석 결과를 비교해서 보여주고 있다. Fig. 12의 코일에 흐르는 전류 증가 곡선은 연자성 재료의 비선형 자화특성에 의한 비선형 전류증가와 더불어 플런저의 이동으로 발생하는 밸브 자화능력의 변화로 1.3ms 부근에서는 오히려 전류가 감소하는 구간을 보이고 있다. 이것은 급격히 자화가 이루어지는 시점을 말하며 자기에너지가 전기에너지로 변환된 때문이다. Fig. 13의 플런저 변위 곡선에서는 자기·회로해석을 유체·동역학 해석과 결합해 충돌시 발생하는 플런저의 충돌반발(bouncing) 효과까지 묘사하고 있다. Fig. 14에서는 솔레노이드 밸브 안에 유체가 공급될 경우 충돌시 발생하는 유체의 점성효과로 플런저의 바운싱 효과가 크게 작아지는 것을 알 수 있다.

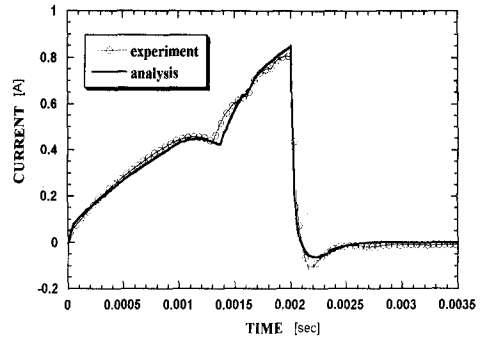


Fig. 12 Electric current (without fuel supply)

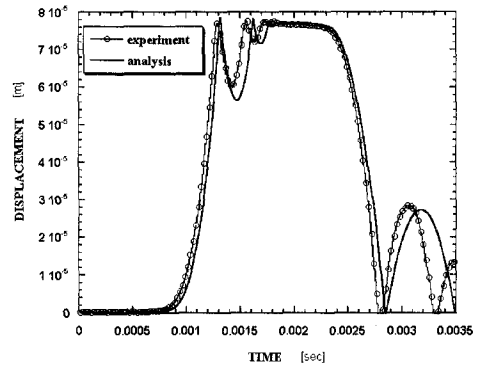


Fig. 13 Plunger displacement (without fuel supply)

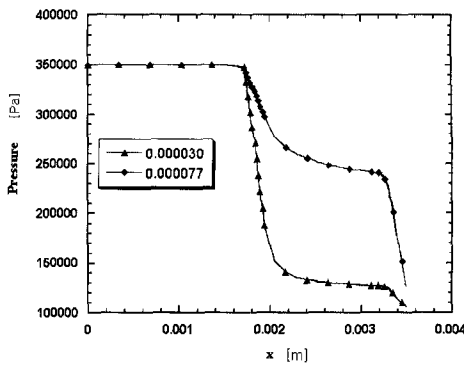


Fig. 11 Distribution of pressure at impact part

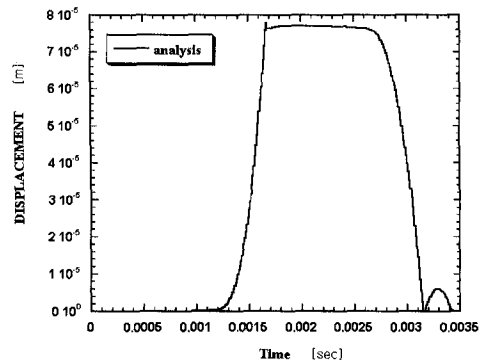


Fig. 14 Plunger displacement (with fuel supply)

5. 결론

본 연구에서는 고속응답 솔레노이드 밸브의 동적 시뮬레이션 기법을 개발하고 실험장치를 사용한 자기력 및 실제동작 특성실험의 결과와 개발된 해석 프로그램의 수치해를 비교 검증하였다. 솔레노이드 밸브에서 연자성 재료 내부에 발생하는 자계의 동적 효과를 비정상상태의 유한요소해석으로 계산함으로써 전압인가 초기에 밸브 내부에 많이 발생하는 와전류를 계산할 수 있었다. 또한 플런저의 운동해석에서 유체 점성에 의해 발생하는 충돌부의 유체반력을 축대칭 1차원 유동방정식 문제로 계산하여 플런저의 충돌 및 반발 특성을 해석할 수 있었다. 충돌 및 반발은 연료를 사용하는 경우 크게 줄어드는 것으로 해석되었다.

개발된 해석 프로그램은 솔레노이드 밸브의 설계사양과 연자성재료의 자성특성 실험치 만으로 플런저의 변위를 예측할 수 있기 때문에 솔레노이드 밸브의 개발이나 원가절감을 위한 제품설계 시 각 설계인자의 변경에 대한 밸브 동작특성의 변화 경향을 파악하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 앞으로 보다 정확한 정밀제어 솔레노이드 밸브 해석을 위해 자화 히스테리시스의 영향을 포함한 다른 변수들의 영향에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

참고문헌

(1) Hong, S. C., Lee, J. H., and Kim, C. S., 1997,

"Development of Solenoid Valve Control Technology for Common Rail Injection System of Diesel Engine," *Proc. of KSAE Conference*, Paper #97380257.

(2) Yi, H. S., Lee, Y. G., Kim, H. J., and Kim E. S., 1997, "Performance Prediction of Solenoid Actuated Hydrogen Injector," *J. of KSAE*, Vol. 5, No. 1, pp. 174~185.

(3) Jae-Won Hwang, Han-Joo Kal, Jae-Keun Park, and Jae-Ou Chae, 1999, "A Numerical Study for the Design of Fast Solenoid," *J. of KSAE*, Vol. 7, No. 3, pp. 94~102.

(4) In-Soung Jung, Jin Hur, Sang-Baeck Yoon, and Dong-Seok Hyun, 1998, "A Study on the Shape Optimization of Solenoid Actuator," *J. of Electrical Engineering and Information Science*, Vol. 47, No. 9, pp. 1325~1330.

(5) Tonk-Ki Park, Jeong-Hwan Jin, and Se-Jin Seong, 1997, "A Study on the Optimal Design for Plunger Type Solenoid Using Finite Element Method," *2nd International Power Electronics and Motion Control Conference, Proc. of IP EMC'97*, pp. 278~283.

(6) Efren Moreno Benavides, Juan Ramon Arias Perez, and Ramon Perez Herrero, 2000, "Numerical Simulation of the Injection Process in a Two Stroke Diesel Engine," *SAE Technical Paper Series*, 2000-01-0291.

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