

## 비례제어방식 솔레노이드 밸브 압력제어특성에 관한 동적해석

김형만<sup>\*1)</sup> · 태혁준<sup>2)</sup> · 이현우<sup>3)</sup> · 이창훈<sup>3)</sup>

인제대학교 기계자동차공학부<sup>\*1)</sup> · 인제대학교 대학원 기계공학과<sup>2)</sup> · (주)유니크 만해 기술 연구소<sup>3)</sup>

### Dynamics Analysis of Pressure Control Characteristics in a Variable Pressure Solenoid Valve

HyungMan Kim<sup>\*1)</sup> · Hyeokjun Tae<sup>2)</sup> · Hyunwoo Lee · Changhoon Lee<sup>3)</sup>

<sup>\*1)</sup>Department of Mechanical & Automotive Engineering, Inje University, Kyeongsangnam-do 621-749, Korea

<sup>2)</sup>Graduated School of Mechanical Engineering, Inje University, Kyeongsangnam-do 621-749, Korea

<sup>3)</sup>UNICK Corporation, 10-1 Chinyoung-eub, Kimhae, Kyeongsangnam-do 621-800, Korea

(Received 12 July 2003 / Accepted 25 September 2003)

**Abstract** : In the present paper, dynamics analyses of pressure control characteristics have been performed in a variable pressure solenoid valve. A number of solenoid valves have been used in the electronic control system, especially automatic transmission of an automobile. Variable pressure solenoid valve is intended to produce spatial movement by the electrical signal. Dynamics analyses of pressure control characteristics have been practiced by the Finite Difference Method, which show the pressure distribution in the solenoid valve. The results of numerical analyses show the dependence of pressure distribution on the displacement of the spool in the solenoid valve, and then, are compared with the experimental results.

**Key words** : Variable pressure solenoid valve(비례제어방식 솔레노이드 밸브), Automatic transmission(자동변속기), Pressure control characteristics (압력제어특성), Spool displacement(스풀 변위)

### 1. 서론

자동차의 전자제어 시스템 의존도가 높아지면서 많은 수의 솔레노이드 밸브가 자동차의 전자제어에 사용되고 있다. 자동차에 이용되는 솔레노이드 밸브는 작동방법에 따라 펄스폭 변조방식 솔레노이드 밸브와 비례제어방식 솔레노이드 밸브(Variable Pressure Solenoid Valve)로 구분할 수 있으며, 현재 대부분의 자동변속기에 사용이 되고 있는 솔레노이드 밸브는 펄스폭 변조방식 솔레노이드 밸브이다. 자동변속기의 변속충격은 운전자뿐만 아니라 동승

한 탑승자도 매우 민감하게 느끼는 성능지표로서 새로 개발되는 승용차의 전체품질에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서 많은 자동차회사에서는 마이크로 컨트롤러와 전기적인 신호로서 가변되어 압력을 발생시키는 솔레노이드 밸브를 이용한 능동적인 변속제어방법을 개발하였으며, 현재에는 이와 같은 전자제어방식이 일반화되어 있다.<sup>1)</sup>

펄스폭 변조방식 솔레노이드 밸브는 비례제어방식 솔레노이드 밸브에 비해 구조가 복잡하고 맥동압으로 인해 자동변속기에서 변속 시 변속충격을 일으킨다. 이에 비하여, 비례제어방식 솔레노이드 밸브는 짧은 열림 지연시간(opening delay time)을 가지며, 구조가 간단하고, 차지하는 부피가 작으며 맥

\*To whom correspondence should be addressed.  
mechkhm@inje.ac.kr

동압이 발생되지 않는 장점이 있다.<sup>2)</sup>

본 연구에서는 차량의 자동변속기에 적용되는 비례제어방식 솔레노이드 밸브의 압력제어특성을 실험을 통하여 확인하고, 전산유동해석을 이용하여 동특성 시뮬레이션으로 솔레노이드 밸브 내부의 유동장의 특징을 알아보고 실험결과를 비교·분석하였다.<sup>3,4)</sup>

## 2. 이론적 배경

### 2.1 이론적 고찰

본 연구에서 기본적인 모델로 적용이 된 비례제어방식 솔레노이드 밸브의 외부 구조는 Fig. 1과 같으며, 내부 구조는 아마추어(Armature)가 복원스프링 상부에 배치되어 있으며, 이러한 아마추어와 복원스프링을 솔레노이드 부의 코일이 둘러싸고 있는 형태이다.

솔레노이드 부분에 전류가 인가되면 밸브 내부의 코일에서 자력을 발생시키고 이 자력에 의해서 밸브 내부의 아마추어(Armature)가 복원스프링을 누르게 되면서 변위에 비례하는 반력과 평형에 의해서 자력을 기계적 변위로 변환시킨다. 비례제어방식 솔레노이드 밸브는 인가되는 전류에 따라 밸브 내부 힘의 균형이나 밸브에서 배출되는 유체의 압력이 변화되는 기능을 하기 때문에 그러한 이름으로 불리게 된다.<sup>5,6)</sup>

솔레노이드 밸브에 인가된 전류가 일정 값에 도달하기 전까지 서플라이(Supply)는 열려 있는 상태

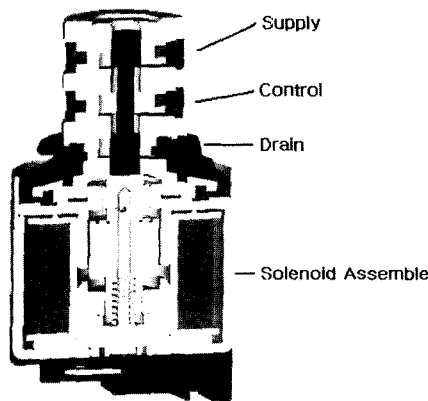


Fig. 1 Schematic of variable pressure solenoid valve

이다. 인가된 전류가 점차적으로 증가함에 따라 아마추어는 코일에 발생하는 자력에 의해 아래 방향으로 변위가 변화하고, 스펴(Spool)은 이런 아마추어의 변위 변화와 비례하여 변위가 변하게 된다. 이런 스펴의 변위 변화에 따라 서플라이를 통해 솔레노이드 밸브 내부로 공급되어 제어 부분으로 나와 피드백을 통하여 다시 밸브 내부로 공급되게 되는 작동유체(ATF; Automatic Transmission Fluid)의 압력은 감소하게 된다.

전류가 인가될 때와는 반대로 솔레노이드 밸브에 인가되는 전류가 감소함에 따라 아마추어는 복원스프링의 반력에 의해, 반대 방향으로 변위 변화가 일어나며 스펴 또한 반대 방향으로 변위가 변하게 되면서 밸브 내부에서 제어되는 작동유체의 압력을 점차적으로 복원시켜 솔레노이드 밸브에 전류가 인가되기 시작하는 초기의 상태로 돌아가게 된다.

### 2.2 유동해석 모델과 경계조건

본 연구에서 기본적인 모델로 적용이 된 비례제어방식 솔레노이드 밸브에서의 유동장 압력제어특성을 해석하기 위하여 상용 전산유체해석 프로그램인 CFD-ACE를 이용하였다. 그리고 동 해석프로그램의 하위 프로그램인 CFD-GEOM을 이용하여 솔레노이드 밸브를 모델링 한 후 격자를 나누었다.

모델링 된 솔레노이드 밸브의 형상은 하나의 작동유체 공급 부분과, 피드백(Feed back)과 연결된 제어 부분 그리고 대기상태로 작동유체를 흘려보내는 드레인으로 구성되어 있다. 솔레노이드 밸브 모델링에 적용된 총 격자의 수는 426,042개이며 압력의 변화가 가장 많은 서플라이와 스펴의 근접부분에 가장 조밀하게 격자를 적용하였다.

Table 1에는 비례제어방식 솔레노이드 밸브의 동적 수치해석에 적용되는 작동유체의 경계조건들을 나타낸다. 동적 수치해석 조건을 실험 조건과 동일하게 하기 위하여 솔레노이드 밸브의 입구를 통하여 공급되는 압력을  $P=421,830 \text{ N/m}^2$ , 대기압을  $P=0 \text{ N/m}^2$ 으로 설정하였다. 이때 작동유체의 온도는  $T=358\text{K}$ 로 설정하였다.

Table 1 Boundary condition and Properties of ATF (Automatic Transmission Fluid)

Property	Symbol(Unit)	Value
Supply pressure	$P(N/m^2)$	421,830
Atmospheric pressure	$P(N/m^2)$	0
Temperature	$T(^{\circ}C)$	85 (358 K)
Density	$\rho(kg/m^3)$	826.55
Viscosity	$\nu(m^2/s)$	1E-005

2.3 수치해석

솔레노이드 밸브 내부에서 작동유체의 유동이 고압, 고속이므로 중력에 의한 압력 손실과 마찰 저항에 의한 압력 손실은 무시하였으며, 층류 유동으로 가정하였다.

밸브 내부에 위치하고 있는 스펴의 직경은  $\phi 4.3$  mm이며, 밸브 내부의 유로와 스펴 사이의 작동간극은 실제 솔레노이드 밸브의 작동간극과 동일한 16  $\mu$ m로 하였다. 밸브 내부 스펴의 총 행정은 1.20mm이며 스펴의 변위를 초기조건인 0mm에서, 스펴의 움직임에 따라 제어된 작동유체 압력을 알 수 있는 동적 수치해석을 시작하였다.

동적 수치해석에서는 스펴의 경계조건으로 스펴 전체에  $-0.00075 \times \sin(2\pi T)$  [m]의 경계 조건을 주어 밸브 내부에서 스펴이 변위 0.75mm까지 내려가는 운동에 따른 압력제어특성을 알아보았다. 스펴의 변위 0.75mm 이후의 압력제어특성은 동적 수치해석을 위한 모델링의 특성상 격자의 변형으로 인하여 결과를 보지 못하였다.

Fig. 1에서 보는 것과 같이 작동유체 공급 부분을 통해 공급된 작동유체는 밸브 내부로 흐르게 된다. 밸브 내부로 공급된 작동유체는 스펴의 변위가 0.75mm 이전에는 대부분의 작동유체가 제어 부분(Control)으로 흐르게 되며, 스펴의 변위가 0.75mm 이후에는 대부분의 유체는 압력강하가 일어난 후 드레인(Drain)으로 흐르게 된다. 이때 스펴의 변위는 상관없이 제어 부분으로 배출된 작동유체는 Fig. 1의 우측에 보이는 피드백을 통하여 밸브 상부로 돌아가게 되며, 밸브 상부에 존재하는 작동간극을 통해 다시 밸브 내부로 흘러 들어가게 된다.

3. 결과 및 검토

3.1 스펴 변위에 따른 압력제어특성

본 연구의 목적은 실험에 적용된 비례제어방식 솔레노이드 밸브의 내부 형상을 CFD-ACE를 이용하여 동적 수치해석을 수행하여 밸브 내부의 압력 제어특성을 알아보려고 하는 것이다. 여기에서 실험과 동일한 경계조건을 주기 위해 일치성을 준 가장 중요한 조건으로는 솔레노이드 밸브 내부 형상과 초기조건일 경우의 스펴의 위치와 솔레노이드 밸브 내부의 작동간극(16 $\mu$ m)이다.

Fig. 2 ~ 6은 동적 수치해석 결과를 스펴 변위 0 ~ 0.75mm까지 0.15mm 간격으로 압력분포를 나타낸 것이다. 스펴의 변위 변화에 따라 얻어지는 제어부분의 압력을 Table 2에 나타낸다.

동적 수치해석 결과, 스펴의 변위가 0.15mm까지의 경우에는 제어된 작동유체의 압력이 입구를 통하여 공급되는 압력과 거의 일치하여 변화가 작은 것을 알 수 있었다. 그러나 스펴의 변위가 0.15mm 이후부터 제어된 작동유체의 압력에 변화가 나타나는 것을 알 수가 있었으며 실험 결과와 유사한 압력 변화 결과를 얻었다.

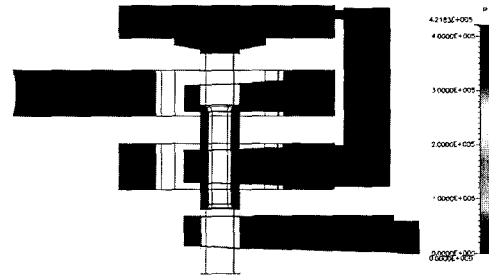


Fig. 2 Pressure distribution at spool displacement, 0.15mm

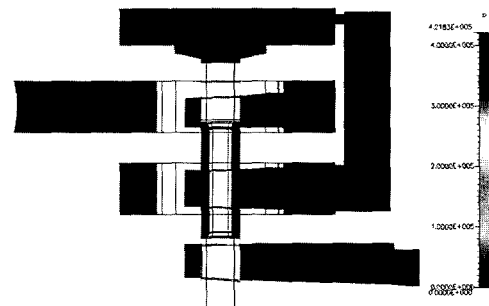


Fig. 3 Pressure distribution at spool displacement, 0.30mm

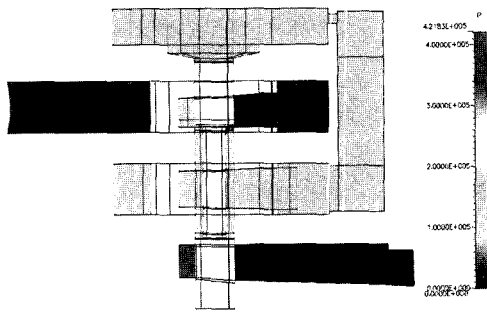


Fig. 4 Pressure distribution at spool displacement, 0.45mm

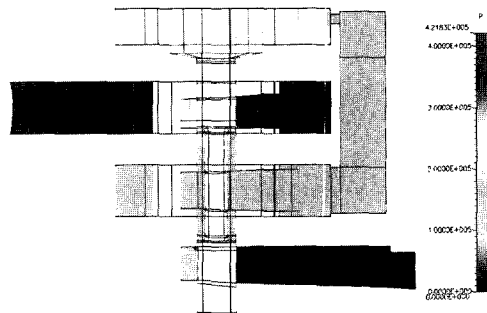


Fig. 5 Pressure distribution at spool displacement, 0.60mm

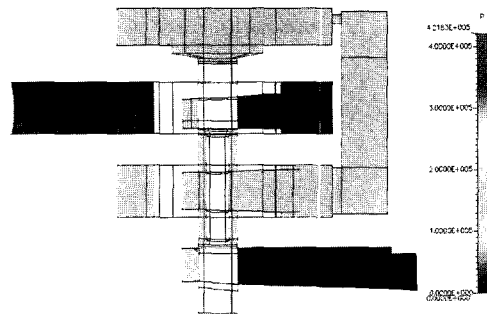


Fig. 6 Pressure distribution at spool displacement, 0.75mm

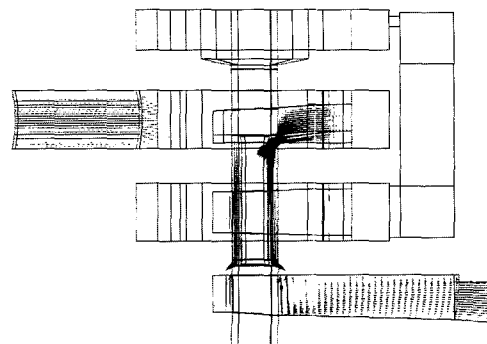


Fig. 7 Velocity vector at spool displacement, 0.15mm

Table 2 Results of the control pressure

Spool displacement (mm)	Control pressure $P(N/m^2)$
0	421,830
0.15	407,327
0.30	360,801
0.45	293,352
0.60	203,960
0.75	115,536

본 연구에 적용이 된 비례제어방식 솔레노이드 밸브는 스톱의 변위가 0.70mm일 때 서플라이가 완전히 닫히게 되는 구조로 되어 있으며, 동적 수치해석 결과 스톱의 변위가 0.45mm 이후부터 공급된 작동유체의 압력 감소가 급격해져서, 스톱변위 0.75mm 이후부터 제어되는 작동유체의 압력이  $1 N/m^2$  이하가 되는 것으로 사료된다.

작동유체는 유체 공급 부분과 스톱 사이를 지날 때 압력감소가 발생하며, 또한 스톱과 밸브 내부 사이의 작동간극을 지나면서 압력감소가 발생한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 2 ~ 6에 나타난 것과 같이 입구를 통하여 공급된 작동유체는 내부로 들어가면서 압력감소가 발생하며, 서플라이의 뒷부분과 제어된 압력에까지 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 CFD-ACE로 동적 수치해석을 수행하여 스톱의 변위 0.15mm일 때 솔레노이드 밸브 내부의 속도 벡터를 z축 단면으로 보여 주고 있다.<sup>7)</sup> 공급된 작동유체는 서플라이 입구까지 속도 벡터의 형태에 변화가 없으며 유체 공급 부분과 스톱 사이의 공간을 흐르면서 속도 벡터가 증가되는 것을 알 수 있으며, 증가된 속도 벡터는 솔레노이드 밸브 내부와 스톱 사이 공간에도 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 스톱 변위 0.45mm일 때 솔레노이드 밸브 내부 유동장에서 유선(Stream Line)을 나타낸다. 작동유체는 서플라이를 거쳐 제어되면서 강한 와류가 발생한다. 또한 피드백을 통하여 밸브 상부로 돌아가게 되면서 작동간극을 통하여 밸브의 내부로 흐르기 전에 와류가 발생하는 것을 알 수 있으며, 드레인을 통하여 외부로 흐를 때에도 와류가 발생된 상태로 나가게 되는 것을 알 수 있다.

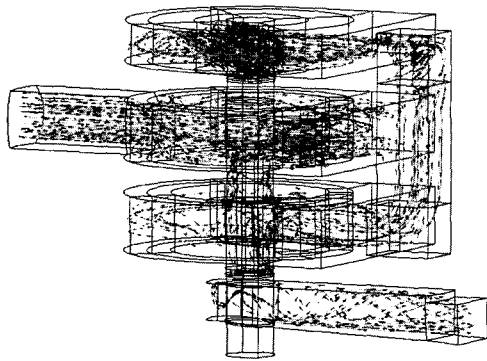


Fig. 8 Stream line in variable pressure solenoid valve

### 3.2 실험 결과와의 비교

동적 수치해석에 앞서 본 연구에서는 스펴의 변위를 0.15mm씩 이동시켜 정적 수치해석을 수행하였다.

정적 수치해석에서는 스펴의 변위가 0.60mm 이전의 경우에는 제어된 작동유체의 압력이 입구를 통하여 공급되는 압력과 차이가 발생하지 않아 실험 결과 값과 다소의 차이가 있었다. 그러나 스펴의 변위가 0.60mm 이후부터 제어된 작동유체의 압력에 변화가 나타나는 것을 알 수가 있었으며 실험 결과와 정성적으로 같은 변화를 얻었다. 이러한 정적 수치해석의 문제점을 기본으로 하여 동적 수치해석을 수행하였다.

Fig. 9는 동적 수치해석결과와 실험결과와의 비교 그래프를 나타낸다. A는 동적 수치해석 결과이며 C는 실험결과에서 스펴의 변위가 하강할 때의 제어된 압력 결과이며, C는 실험결과에서 스펴의 변위가 상승할 때의 제어된 압력 결과이다. 그리고 D는 비례제어방식 솔레노이드 밸브에 공급되는 작동유체의 압력  $P=421,830 N/m^2$ 이며 항상 일정하다. 동적 수치해석 결과 스펴의 변위 0.15mm까지는 B와 동일한 결과를 보임을 알 수 있으며, 스펴의 변위 0.15mm 이후부터 0.75mm까지는 C와 동일한 결과를 보임을 알 수 있다. 그리고 스펴의 변위 0.75mm 이후의 제어된 압력은  $1 N/m^2$  이하로 떨어져서 스펴변위 1.2mm에서는 대기압과 같아질 것이라고 예상된다.

실험에서는 스펴이 상하로 움직이는 동적 상태일 때 제어되는 작동유체의 압력을 압력센서로 측정하는 것이고, 동적 수치해석에서는 스펴의 변위에 경계

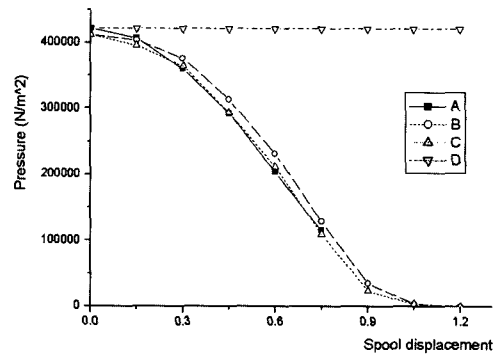


Fig. 9 Dependence of control pressure on the spool displacement

조건을 주어 0 ~ 0.75mm까지 동적 수치해석을 수행하여 제어 부분의 압력을 알아보았기 때문에 결과값에서 미소한 차이가 발생한 것으로 분석되었다.

### 4. 결론

본 연구에서는 상용 전산유체해석 프로그램인 CFD-ACE를 이용하여 비례제어방식 솔레노이드 밸브의 압력제어특성에 대하여 동적 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 스펴 변위 0.15mm 이전에서는 제어된 압력의 변화가 실험결과 값보다 다소 높은 것을 알 수 있었으며, 스펴 변위 0.30mm에서부터 제어된 압력은 실험결과 값과 동일한 변화가 발생하였다.
- 2) 작동유체는 공급 부분과 스펴 사이의 공간을 흐르면서 대부분의 압력 감소가 발생하며, 동시에 스펴과 밸브 내부의 작동간극 사이를 흐르면서 압력 감소가 발생한다. 이렇게 압력감소가 발생한 작동유체는 밸브 내부 전체의 유동장에 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

본 연구 결과는 비례제어방식 솔레노이드 밸브 내부의 스펴이 움직이도록 하는 경계조건을 주어 스펴 변위에 따른 결과로서 시간에 따른 압력변화가 실험결과와 일치함을 알 수 있었다.

### 후 기

본 논문은 2002년도 인제대학교 학술연구조성비의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) G.-H. Jung, B.-H. Cho, K.-I. Lee, "Shifting Control Method for EF-Automatic Transmission with Proportional Control Solenoid Valve," Transactions of KSAE, Vol.7, No.4, pp.251-259, 1997.
- 2) K.-T. Kwon, H.-T. Han, "A Study on the Dynamic Simulation of Solenoid Actuator for Automobiles," KSAE Spring Conference Proceeding, Vol.I, pp.129-136, 2001.
- 3) K.-W. Baek, S.-H. Lee, N.-H. Cho, "Numerical Optimization of the Coolant Flow Rates through Cylinder Head Gasket Holes by applying CFD Techniques," Transactions of KSAE, Vol.8, No.5, pp.121-128, 2000.
- 4) M.-H. Kim, M.-H. Lee, K.-H. Choi, "In-Cylinder Flow Analysis a Spark-ignited Direct Injection Engine using CFD," Transactions of KSAE, Vol.7, No.5, pp.22-30, 1999.
- 5) V. K. Garg, M. A. Masrur, K. O. Prakaj-Asante, "Application of Solenoids in Automobiles," THINK Technologies and Scientific Research Laboratory, Ford Motor Company.
- 6) J.-W. Hwang, H.-J. Kal, J.-K. Park, J.-O. Chae, "A Numerical Study for the Design of Fast Solenoid," Transactions of KSAE, Vol.7, No.3, pp.94-102, 1999.
- 7) H.-N. Lee, G.-M. Park, D.-G. Lee, "A Study on the Flow Characteristics in Dividing Rectangular Duct by using PIV and CFD," KSAE Spring Conference Proceeding, Vol.I, pp.421-427, 2001.