

자동변속기 SOLENOID 밸브의 온도에 의한 전류(I)-제어압(P) 특성 분석 Analysis of I-P Curve Characteristics by the temperature of Solenoid Valve for Automatic Transmission

최윤용 · 서승현 · 이상현 · 양행식
Y. Y. Choi, S. H. Seo, S.H. Lee, H. S. Yang

Key Words : Proportional Control Solenoid Valve(비례제어 솔레노이드 밸브), Automatic Transmission(자동변속기), Electromagnetic Force(흡인력), I-P Curve(전류 대 제어압 곡선), Temperature(온도)

Abstract: Various transmission technologies have been developed to satisfy environmental issues recently. Especially, the technology of the proportional control solenoid valve (PCSV) to ensure high level performance by electronic control has been studied. This study builds an analysis process for designing of the PCSV and characteristic predictions.

기호 설명

- A : Contact area between Spool and Sleeve (m²)
- a : Constant
- b : Constant
- C_{V/F} : Coefficient of viscous friction (N/(m/s))
- d_{bore} : Inner Diameter of Sleeve (m)
- d_{spool} : Outer Diameter of Spool (m)
- d_{20(bore)} : Inner Diameter of Sleeve at 20°C (m)
- d_{20(spool)} : Outer Diameter of Spool at 20°C (m)
- Δd_{bore} : Quantity of Inner Diameter change of Sleeve (m)
- Δd_{spool} : Quantity of Outer Diameter change of Spool (m)
- F_{shear} : Shear force (N)
- L : Contact length between Spool and Sleeve (m)
- l : Length of Sleeve (m)
- T : Thickness of Sleeve (m)
- Δt : Quantity of temperature change (°C)
- ΔV : Relative velocity between Spool and Sleeve(m/s)
- ΔY : Clearance between Spool and Sleeve (m)
- α : Coefficient of thermal expansion
- α_t : Coefficient of thermal expansion at t°C
- η_t : Absolute viscosity at t°C (kg/m·s)
- ρ_t : Density at t°C (kg/m³)
- ρ₁₅ : Density at 15°C (kg/m³)
- ν_t : Dynamic viscosity at t°C (m²/s)

1. 서론

최근 자동차의 변속기 기술은 환경문제와 효율성 향상의 Needs 에 따라 다단화 및 무단화, 전자제어화를 가속하고 있다.

이를 위해 변속 성능을 좌우하는, 전자제어의 신호를 받아 유압을 발생하는, 솔레노이드 밸브에 대해 높은 설계기술이 요구 되어지는 동시에 점점 넓어지는 사용 환경 아래에서 일관된 성능을 확보하기 위한 연구가 활발히 행해지고 있다.

그중, 자동 변속기 내에서 구성 부품이 성능을 발휘 할 수 있도록 하는(작동 유체 및 윤활유의 역할) 자동 변속기유(ATF, Auto Transmission Fluid)의 온도 변화에 의한 정상(性状)변화가 솔레노이드 밸브의 성능에 많은 영향을 미치는 것은 잘 알려져 있다.

이때문에, ATF 변화에 『영향을 받지 않는다』, 혹은, 『영향을 받아도 곧 원 상태로 돌아간다』를 위한 공리가 필요함은 말할 필요도 없다.

그러므로, 본연구에서는, 자동변속기 제어의 최전선에 있는 솔레노이드 밸브에 대해, ATF 온도 변화에 의한 영향(성능변화)를 정량적으로 예측 가능한 해석(Simulation)수법을 개발해, 제품 개발의 초기 단계부터 대책 가능하게 하는것을 목적으로 한다.

최윤용(책임저자): 자트코 코리아 엔지니어링
E-mail : yunyong_choi@jatco.co.jp TEL : 02-2082-7057

서승현/이상현/양행식: 자트코 코리아 엔지니어링

2. 솔레노이드 밸브의 특성 해석 수법

Fig.1 은 본연구에서 대상으로 하고 있는 스풀 타입의 비례 제어 솔레노이드 밸브를 나타낸다. 인가 전류에 의해 발생하는 전자기력(흡인력)과 스프링의 반발력, 또 밸브부의 출력압으로 부터 Feedback 된 유압과의 평형관계에 의해 의도한 제어압이 얻어질 수 있는 구조로 되어 있다. 이러한 시스템의 해석에는 운동 방정식, 유체 방정식, 자기 방정식등을 풀 수 있는 복합장 모델을 고려하지 않으면 안된다.

이에, 본 연구에서는 상용 소프트웨어를 사용해 복합적인 방정식을 푸는 한편, 목적으로 한 특성을 가시화 하는 프로세스를 개발 하고자 한다.

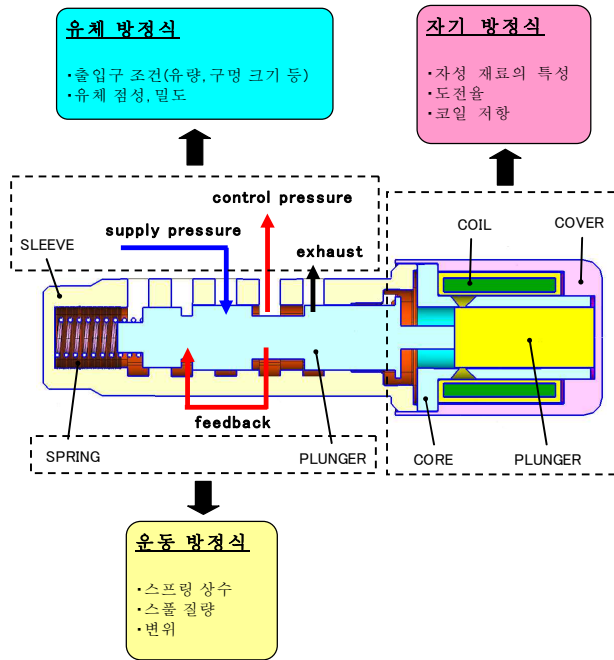


Fig.1 Spool type solenoid valve

2.1 전자기부 모델링과 해석 방법

전자기부에 대해서는 FEM(Finite Element Method) 유한요소 해석법을 기본으로 하는 상용 소프트웨어(Maxwell)을 이용해 자기해석을 실시해, 인가 전류의 변화에 의한 전자기력(흡인력)변화 결과를 확인 했다.

Fig.2 은 FEM 해석을 위한 전자기부의 메쉬 모델과 해석 결과의 일부인 자속밀도를 벡터로 나타낸 그림이다.

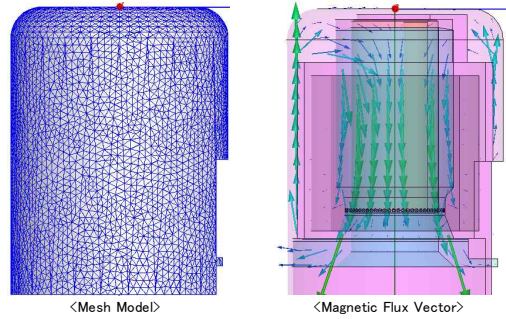


Fig.2 Mesh model & Magnetic flux vector

Table1 은 해석에 사용한 재료를 나타낸다.

Table1 Materials of PCSV

Item	Materials
Cover	Steel
Core	Steel
Plunger	Steel
Coil	Copper - Turns : 380 turns

인가 전류는 0A 에서 1A 로, 플런저의 Max 변위는 1.3mm 로 한다.

Fig.3 은 Maxwell 에서의 해석 결과로 인가 전류(I)와 스트로크(St)와 전자기력(F)의 관계(이하 I-F-St)를 나타낸다. 임의의 스트로크에 대해 전류와 전자기력이 거의 비례 관계가 있는 것으로 부터 비례 제어 솔레노이드 밸브의 특성을 잘 나타내고 있다고 판단한다.

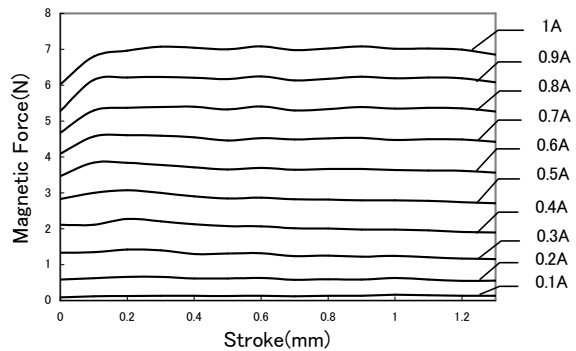


Fig.3 Result of Maxwell

또한, 상기의 해석 결과(I-F-St 특성)에 있어서도, 원래라면 자성 재료의 온도 변화에 기인한 미소한 영향이 예측되지만, 자동 변속기의 사용조건(200℃미만)이 자성 재료의 특성 변화를 일으키는 레벨의 온도(수백도 이상)까지는 도달하지 않으므로, I-F-St 특성은 온도에 관계 없이 일정 하다고 가정해 연구를 진척 시켰다.

2.2 밸브부의 모델링과 해석 수법

밸브부에 대해서는, 유압해석을 하기 위한 상용 소프트웨어(AMESim)를 이용해, 인가 전류(I)의 변화에 의한 제어압(P) 변화를 확인 했다.

Fig.4는 유압 해석을 하기위해 솔레노이드 밸브를 모델링한 그림으로, 크게 전류 전원부, 흡인력 발생부, 밸브부, 공급압부, 제어압부로 구성되어 있다. 앞의 Maxwell 해석 결과(I-F-St)가 AMESim 모델의 흡인력 발생부에 입력 된다.

Table2 는 유압 해석을 위한 조건으로, 실험치와의 비교를 위해 동일 조건을 적용한 것을 기본으로 했다.

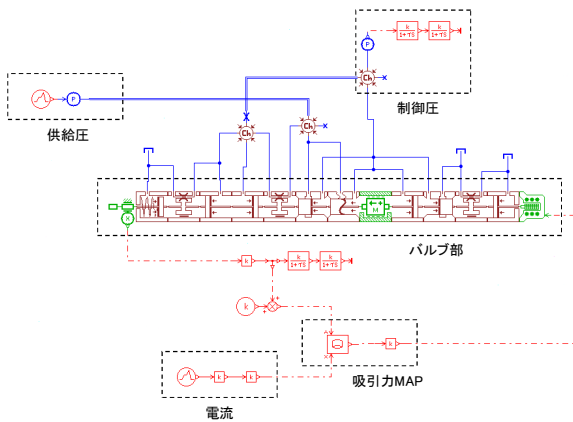


Fig.4 Schematic of PCSV modeling by AMESim

Table2 Test Condition

Item	Properties
ATF temperature	-30°C, -20°C, 0°C, 50°C, 120°C, 140°C
Supply pressure	588kPa
Current	0A→1A (sweep)

2.3 솔레노이드 밸브의 통합 해석 프로세스

본 연구에서는 전자기부의 Maxwell 해석 결과(I-F-St 특성)를 AMESim 에 입력하는 연계해석 방법을 이용했다. Fig.5 는 이 일련의 해석 프로세스를 도시한 것 이다.

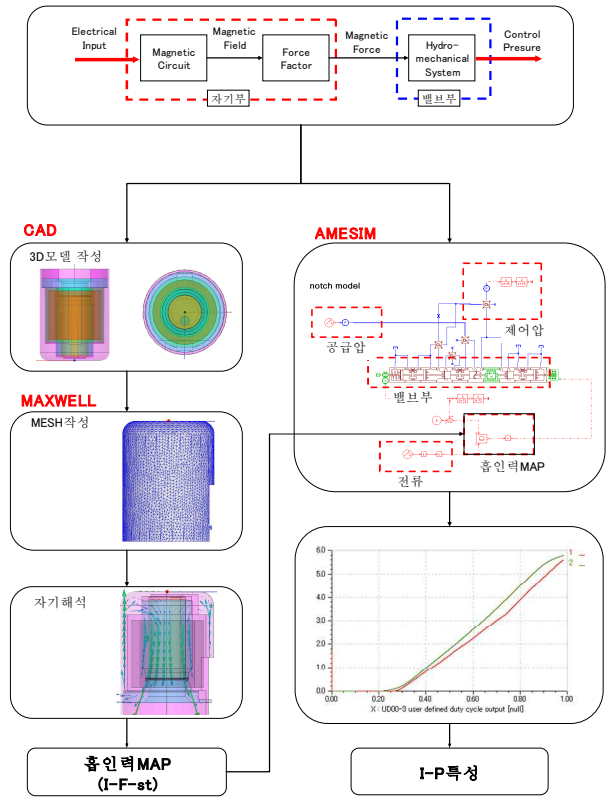


Fig.5 Process of analysis

3. 온도에 의한 전류(I)-제어압(P) 특성

이상에서 설명한 해석 프로세스를 기반으로, 스펀 타입의 비례 제어 솔레노이드 밸브의 온도 의존성을 해석 Simulation 했다.

또한, 앞서와 같이 본 연구에서 주목한 온도는 -30°C, -20°C, 0°C, 50°C, 120°C, 140°C 이며, 각 온도별 고려해야 할 요소(온도 변화에 의해서 변하는 Parameter)에 대해서는 다음과 같이 선정해 예측치를 계산 했다.

3.1 온도 변화에 의해서 변하는 Parameter 의 선정

온도 변화에 의해서 변하는 Parameter 로는 ATF 의 성질 - 밀도(Density), 점도(Viscosity), 체적 탄성률(Bulk modulus), 점성 마찰계수(Viscous friction)- 과 스펀과 슬리브 사이의 클리어런스를 선정했다. 또 기준온도는 80°C로 하고, 각각의 요소는 다음의 식으로 근사했다.

밀도에 대해서는,

$$\rho_t = \rho_{15} \times \exp(-\alpha_T \times \Delta t \times (1.0 + 0.8 \times \alpha_T \times \Delta t)) \quad (1)$$

동점도에 대해서는,

$$\log \log(v_t + 0.7) = a - b \times \log(273.15 + t) \quad (2)$$

점도에 대해서는,

$$\eta_t = v_t \times \rho_t \quad (3)$$

점성 마찰 계수에 대해서는,

$$C_{V/F} = \frac{F_{shear}}{\Delta V} = \eta_t \times A \times \frac{1}{\Delta Y} \quad (4)$$

$$A = \pi \times L \times d_{spool}$$

$$\Delta Y = \frac{d_{bore} - d_{spool}}{2}$$

또, Fig.6은 온도별 ATF의 체적 탄성률의 측정치를 나타낸다.

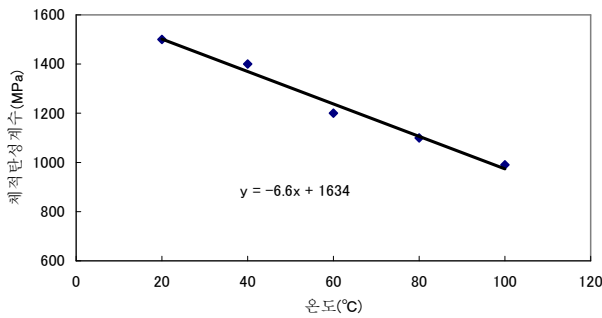


Fig.6 The temperature characteristic of Bulk Modulus

측정 되지 않은 온도(-30°C, -20°C, 0°C, 120°C, 140°C)의 체적 탄성계수에 대해서는 근사선으로부터의 예측치를 산정했다.

그리고, 스펴과 슬리브 사이의 열팽창에 의한 클리어런스(경 방향)변화에 대해서는 스펴과 슬리브 각각의 경변화량을 계산해 뺄셈했다. (경 변화량을 계산함에 있어, 기준은 20°C에서의 경을 기준으로 한다.)

$$\Delta d_{bore} = d_{20(bore)} * \alpha * \Delta t \quad (5)$$

$$\Delta d_{spool} = d_{20(spool)} * \alpha * \Delta t \quad (6)$$

3.2 해석 시뮬레이션의 결과와 검증

이상의 기본 검토를 기준으로 해석 Simulation을 행한 결과를 Fig.7에 나타냈다.

각 전류(I)에 대한 제어압(P)의 값이 각 온도별로 차이가 있는 것을 확인할 수 있다.

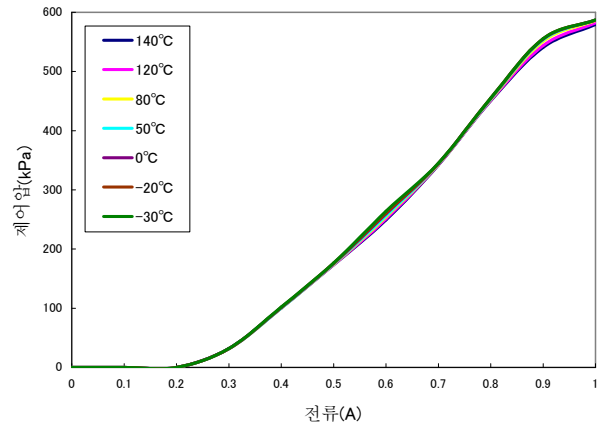


Fig.7 characteristics of PCSV

또한, Fig.8은 해석 결과와 실험 결과를 비교한 그래프이다.

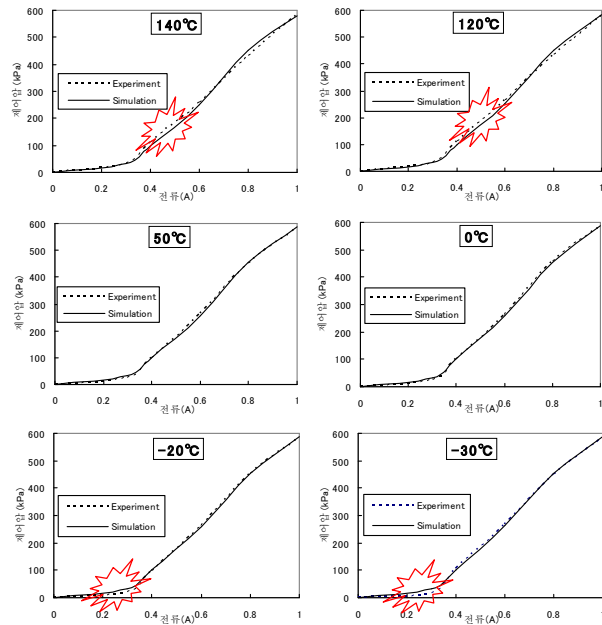


Fig.8 Comparison of results

비교 결과, 고온(120°C, 140°C)에서는 주로 중전류대(약 0.5A)에서, 저온(-20°C이하)에서는 주로 저전류측(약 0.3A)에서 MAX 20kPa 상당의 오차가 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

실험 결과와의 오차는, 식(5), (6)에서 사용한 열 팽창 계수(α)의 이론적 수치와 실험 측정치와의 오차, 그리고, ATF의 체적 탄성계수를 적용하는 중, 실측치 이외의 온도에 대해 적용한 근사화한 Fig.6의 선형 함수와 실험 측정치와의 오차(특히, 0°C 이하에 대해서도 같은 선형 함수를 적용)가 원인으로 생각된다. 더 나아가 슬리브와 스프링의 축방향의 열 팽창도 고려한다면, 해석의 정도를 높일 수 있다고 생각된다.

4. 결론

본 연구는 상용 소프트웨어를 이용해 비례 제어 솔레노이드 밸브의 온도에 의존하는 전류(I)-제어 압(P)특성 변화를 해석 Simulation 한 것으로, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 상용 소프트웨어인 Maxwell 과 AMESim 을 연계해, 솔레노이드 밸브의 특성 예측을 위한 해석 프로세스를 개발 할 수 있었다.
- 2) 온도 변화에 따라 고려해야 할 Parameter 선정과 적용 방법을 고안 할 수 있었다.
- 3) 해석 결과는 고온(120°C이상)과 극 저온(-20°C이하)를 제외한 온도 영역에서는 실험치와 거의 일치하는 경향을 확인 할 수 있었기 때문에 한층 더 개선된 연구의 가치가 있다고 판단 된다.

비례 제어 솔레노이드 밸브의 개발에 있어, 온도 뿐만 아니라 여러가지 사용 조건에 의한 특성 변화를 상용 소프트웨어를 이용해 예측 하는 프로세스는, 금후에도 다양한 설계 방책의 모색이나 제품 개발 기간의 단축을 실현하는데 있어 불가결한 수법이 된다고 생각된다.

따라서, 앞으로도 온도 변화는 물론, 공급압 변화나 공기 함유량, 맥동과의 연관관계등 한발 더 나아가간 과제에 대해서도 연구를 지속적으로 실시한다면 비례 제어 솔레노이드 밸브의 개발에 있어 유용한 결과를 얻을 수 있다고 사료 된다.

참고 문헌

- 1) 송창섭, 이용주, 유세준, “A/T 용 솔레노이드 밸브의 동특성 해석에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, 제 12 권, 제 8 호. 1995. 8
- 2) Takashi Arakawa and Shigeki Nimi, “Optimization Technology of Magnetic Circuit for linear Solenoid”, SAE 2002-01-0565
- 3) B. H. Cho, G. H. Jung and K. I. Lee, “Modeling of Proportional Control Solenoid Valve for Automatic Transmission Using System Identification Theory ” . SAE 1999-01-1061.
- 4) 윤소남, 함영복, 박평원, “비례솔레노이드 액추에이터를 이용한 압력제어 밸브”, 대한기계학회 논문집 A 권, 제 30 권, 제 30 호, pp. 1202~1208, 2006
- 5) William H. Hayt, “Engineering Electromagnetics” . 1989
- 6) Institute of Electronics Engineers, “Magnetic Actuators and Sensors”, John Wiley & Sons, Inc., 2006
- 7) Herbert E. Merritt, “Hydraulic Control Systems”, John Willy & Sons, Inc., 1967