

군용차량 변속기에 적용할 수 있는 솔레노이드밸브 해석기술에 관한 연구

최윤용 · 홍정표*

A Study on Analysis Technique for Solenoid Valve Applicable to Military Vehicle Transmission

Yun-Yong Choi · Jung-Pyo Hong*

ABSTRACT

Electronic of military vehicle that had relied on pure machinery system is ongoing. A large part of electronic of small-sized military vehicle has been already commercialized, which will expand to large-sized military vehicle field. Design of solenoid valve for automatic transmission is significantly important for stable driving performance of military vehicle. This research aims to develop simulation method which is capable of predicting performance of solenoid valve quantitatively according to its variation of ATF temperature. The research has been conducted in line with Maxwell, a magnetic field analysis program, and AMESim, a hydraulic analysis program. After simulation, it turned out to have been very similar to the test result in temperature range which excludes high temperature (over 120°C) and extremely low temperature (below -20°C).

Key words : Proportional Control Solenoid Valve, Automatic Transmission, Electromagnetic Force, I-P Curve, Temperature

요 약

순수 기계식 시스템에 의존하던 군용차량의 전자화가 진행되고 있다. 이미 소형 군용차량의 전자화는 상당부분 상용화되었으며, 점차적으로 대형군용차량으로 확대될 것이다. 군용차량의 안정적인 주행성능을 위해서는 자동변속기용 솔레노이드 밸브의 설계가 매우 중요하다. 본 연구에서는 솔레노이드 밸브에 대해 ATF 온도 변화에 의한 성능변화를 정량적으로 예측할 수 있는 해석(Simulation)수법을 개발하는 것을 목적으로 한다. 연구는 자장해석소프트웨어인 Maxwell과 유압해석프로그램인 AMESim을 연동하여 진행한다. 시뮬레이션 결과 고온(120°C이상)과 극저온(-20°C이하)을 제외한 온도 영역에서 실험결과와 매우 유사함을 보인다.

주요어 : 비례제어 솔레노이드 밸브, 자동변속기, 흡인력, 전류 대 제어압 곡선, 온도

1. 서 론

최근 자동차의 변속기 기술은 환경문제와 효율성 향상의 요구에 따라 다단화 및 무단화, 전자제어화를 가속하고 있다. 국내 군용차량 역시 순수기계식 시스템에 의존하던 과거와는 다르게 전자화가 시작되었다. 현재는 소형

군용차량의 변속기에 전자화가 이루어지고 있으며 점차 대형군용차량까지 확대되는 것을 기대하고 있다. 군용차량의 변속기는 최근에 와서야 전자화가 진행되고 있기 때문에 가장 전자화가 많이 이루어진 승용차의 변속기에 적용된 기술을 군용차량으로 확대적용 할 필요가 있다^[1].

안정성이 최우선시 되는 군용차량용 변속기기술을 위해 변속 성능을 좌우하며 전자제어의 신호를 받아 유압을 발생하는 솔레노이드 밸브에 대해 높은 설계기술이 요구되고 있다^[2]. 이와 동시에 다양한 사용 환경에서 일관된 성능을 확보하기 위한 연구가 활발히 행해지고 있다^[3].

그 중, 자동 변속기 내에서 구성 부품이 성능을 발휘

Received: 2 November 2015, **Revised:** 20 November 2015, **Accepted:** 27 November 2015

*Corresponding Author: Jung-Pyo Hong

E-mail: hongjp@hanyang.ac.kr

Hanyang University, Department of Automotive Engineering

할 수 있도록 하는(작동 유체 및 윤활유의 역할) 자동 변속기유(ATF, Auto Transmission Fluid)의 온도 변화에 의한 성상변화가 솔레노이드 밸브의 성능에 많은 영향을 미치는 것은 잘 알려져 있다^[4]. 이 때문에, ATF변화에 ‘영향을 받지 않는다.’, 혹은, ‘영향을 받아도 곧 원 상태로 돌아간다.’와 같은 의견에 대한 깊이 있는 고민이 필요함은 말할 필요도 없다.

그러므로 본 연구에서는, 자동변속기 제어의 최전선에 있는 솔레노이드 밸브에 대해, ATF온도 변화에 의한 영향(성능변화)을 정량적으로 예측하는 것이 가능한 해석수법을 개발하여, 제품 개발의 초기 설계단계부터 ATF영향을 고려한 설계실현으로 성능검증 횟수와 개발기간을 줄이는데 그 목적이 있다.

2. 솔레노이드 밸브의 특성 해석 수법

Fig. 1은 본 연구의 대상이 되는 스펴 타입의 비례 제어 솔레노이드 밸브(PSCV, Proportional Solenoid Control Valve)를 나타낸다. 인가 전류에 의해 발생하는 전자기력(흡인력)과 스프링의 반발력, 또 밸브부의 출력압으로 부터 피드백 된 유압과의 평형관계에 의해 의도한 제어압이 얻어질 수 있는 구조로 되어 있다^[5]. 이러한 밸브의 해석을 위해서는 압축된 스프링에 의해 반력을 받고 있는 스펴의 거동을 파악하기 위하여 운동 방정식을 풀어야 한다. 또한 밸브 내부 유체의 압력거동과 전자기력에 의한 영향을 파악해야 하므로 유체방정식과 자기방정식도 풀어야 한다. 때문에 복합장 모델을 고려하지 않을 수 없다.

2.1 전자기부 모델링과 해석 방법

전자기부에 대해서는 FEM (Finite Element Method)을 기본으로 하는 상용 소프트웨어(Maxwell)를 이용해

자기해석을 실시해, 인가 전류의 변화에 의한 전자기력(흡인력)변화를 확인 했다^[6].

Fig. 2는 FEM해석을 위한 전자기부의 메쉬 모델과 해석 결과의 일부인 자속밀도를 벡터로 나타낸 그림이다.

인가 전류는 0A에서 1A로, 플런저의 최대변위는 1.3 mm로 한다. 본 솔레노이드 밸브의 권장 사용 최대전류는 1A이고 비례제어 특성 상 1A 이하의 모든 영역에서 가변이 되기 때문에 인가 전류 범위를 0A에서 1A로 설정하였다. Table 1은 해석에 사용한 재료를 나타낸다.

Fig. 3은 Maxwell에서의 해석 결과로 인가 전류(I)와 스트로크(St)와 전자기력(F)의 관계(이하 I-F-St)를 나타낸다. 솔레노이드 밸브에 전류를 가하면 전자기력이 발생하고 이러한 전자기력이 밸브의 스펴에 스트로크를 발생

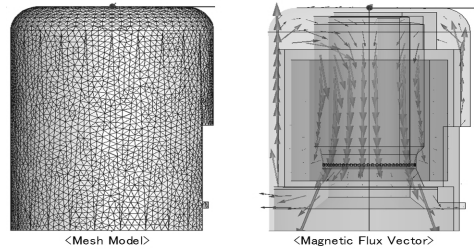


Fig. 2. Mesh model & Magnetic flux vector

Table 1. Materials of PCSV

Item	Materials
Cover	SUY
Core	S10C
Plunger	SUY
Coil	Copper - Turns : 380 turns

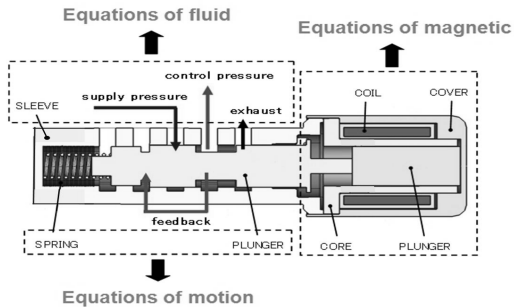


Fig. 1. Spool type solenoid valve

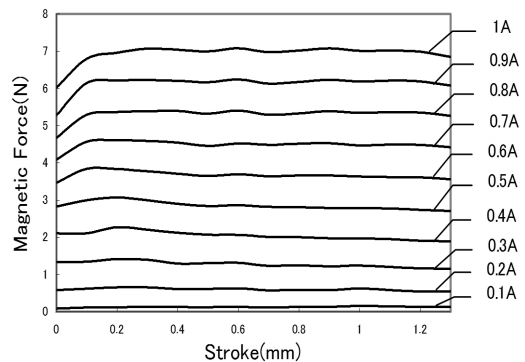


Fig. 3. Result of Maxwell

시킴으로써, 이러한 연동관계가 표현된 I-F-St특성을 살펴봐야 한다. 임의의 스트로크에 대해 전류와 전자기력이 거의 비례 관계가 있는 것으로부터 비례 제어 솔레노이드 밸브의 특성을 잘 나타내고 있다고 판단한다.

또한, 상기의 해석 결과(I-F-St특성)에 있어서도, 원래라면 자성 재료의 온도 변화에 기인한 미소한 영향이 예측되지만, 자동 변속기의 사용조건(200°C미만)이 자성 재료의 특성 변화를 일으키는 레벨의 온도(수백도 이상)까지는 도달하지 않으므로, I-F-St특성은 온도에 관계없이 일정 하다고 가정해 연구를 진척 시켰다.

2.2 밸브부의 모델링과 해석 수법

밸브부에 대해서는, 유압해석을 하기 위한 상용소프트웨어인 AMESim을 이용해, 인가 전류(I)의 변화에 의한 제어압(P) 변화를 확인 했다.

Fig. 4는 유압 해석을 하기위해 솔레노이드 밸브를 모델링한 그림으로, 크게 전류 전원 부, 흡인력 발생부, 밸브부, 공급압부, 제어압부로 구성되어 있다. 앞의 Maxwell 해석 결과(I-F-St)가 AMESim모델의 흡인력 발생부에 입력된다.

Table 2는 유압 해석을 위한 조건으로, 실험결과와의 비교를 위해 동일 조건을 적용한 것을 기본으로 했다.

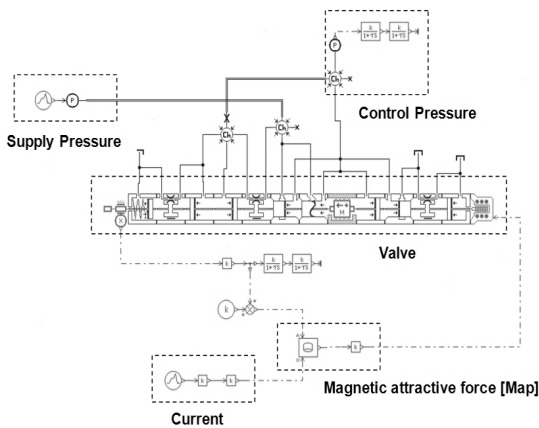


Fig. 4. Schematic of PCSV modeling by AMESim

Table 2. 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)

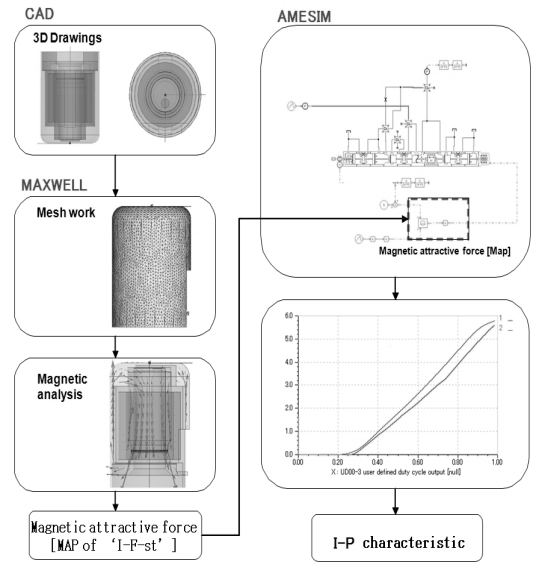


Fig. 5. Process of analysis

2.3 솔레노이드 밸브의 통합 해석 프로세스

본 연구에서는 전자기부의 Maxwell해석 결과(I-F-St특성)를 AMESim에 입력하는 연계해석 방법을 이용했다. Fig. 5는 이 일련의 해석 프로세스를 도시한 것이다. 우선 밸브의 솔레노이드 부분을 3D도면 작업을 진행한다. 그 후 Maxwell 해석도구를 활용하여 매쉬 작업을 진행하고 I-F-St맵을 도출한다. 도출된 맵을 기 개발된 AMESim 해석모델에 적용하여 유압부분과 솔레노이드부분을 연계하여 해석을 진행한다. 그렇게 하여 최종적으로 전류와 제어압의 특성을 도출해낸다.

3. 온도에 의한 전류(I)-제어압(P)특성

이상에서 설명한 해석 프로세스를 기반으로, 스플 타입의 비례 제어 솔레노이드 밸브의 온도 의존성을 해석 시뮬레이션 했다.

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

3.1 온도 변화에 의해서 변하는 변수의 산정

온도변화에 의하여 변하는 변수들은 이론수식으로 나타내는 것이 가능하며, 수식을 구성하는 기호는 다음과 같다.

- 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)
- △d_{bore} : Quantity of Inner Diameter change of Sleeve (m)
- △d_{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)
- △t : Quantity of temperature change (°C)
- △V : Relative velocity between Spool and Sleeve(m/s)
- △Y : 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)

온도 변화에 의해서 변하는 변수로는 ATF의 물리적인 특성인 밀도(Density), 점도(Viscosity), 체적탄성률(Bulk modulus), 점성 마찰계수(Viscous friction)와 스펴과 슬리브 사이의 클리어런스를 산정했다. 또 기준온도는 80°C로 하고, 각각의 요소는 다음의 식으로 근사했다^{17,81}.

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,

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

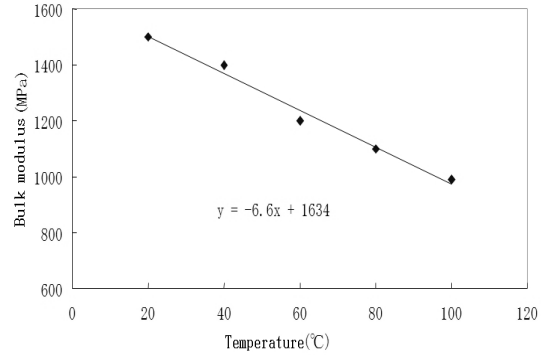


Fig. 6. The temperature characteristic of Bulk Modulus

점성마찰계수에 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 실제 측정치를 나타낸다.

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

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

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

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

식 (5), (6)이 이러한 경 변화량을 표현한 것이다⁹¹.

3.2 해석 시뮬레이션의 결과와 검증

시뮬레이션 모델에서 가변인자를 ATF온도와 인가 전류로 선정하고 고정인자를 공급압력으로 선정하였으며, 고정인자가 유지되고 가변인자가 가변될 때 제어압력을 최종출력으로 살펴보았다.

이상의 기본 검토를 기준으로 시뮬레이션을 행하여 얻은 해석 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 각 전류(I)에 대한 제

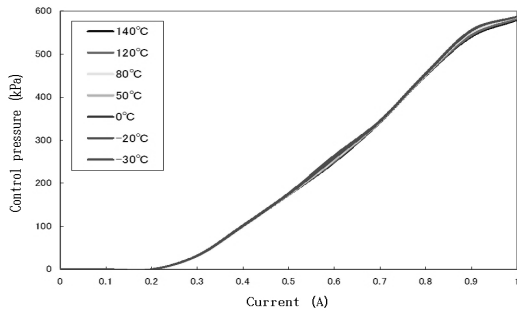


Fig. 7. Characteristics of PCSV

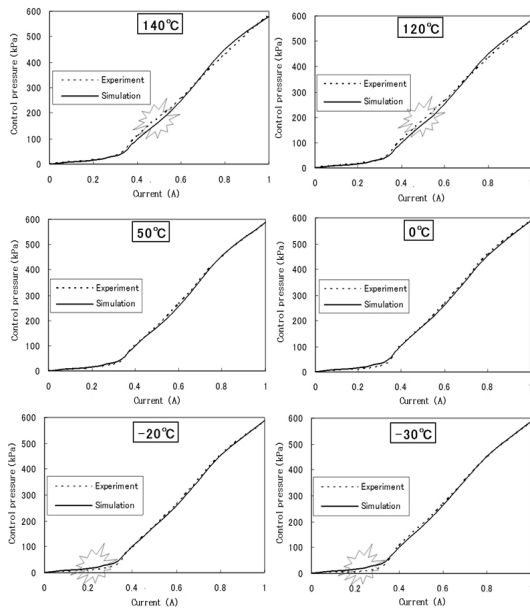


Fig. 8. Comparison of results

어압(P)의 값이 각 온도별로 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 온도별 차이는 크다고 할 수는 없지만 고온으로 갈수록 제어압력이 낮아지는 경향성은 보여주는 결과이다.

또한, Fig. 8은 해석 결과와 실험 결과를 비교한 그래프이다. 비교 결과, 고온(120°C, 140°C)에서는 주로 중전류대(약 0.5A)에서 실험값(출력압력)이 해석값보다 최대 20 kPa (13%) 크게 나타났고, 저온(-20°C이하)에서는 주로 저전류대(약 0.3A)에서 실험값(출력압력)이 해석값보다 최대 20 kPa (50%) 작게 나타나고 것을 알 수 있다.

실험 결과와의 오차는, 식 (5), (6)에서 사용한 열팽창 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 측

정치와의 오차(특히, 0°C 이하에 대해서도 같은 선형 함수를 적용)가 원인으로 생각된다.

이러한 해석결과를 토대로 하여 슬리브와 스프링의 축방향의 열팽창도 고려한다면, 해석의 정도를 높일 수 있다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 상용 소프트웨어를 이용해 비례 제어솔레노이드 밸브의 온도에 의존하는 전류(I)-제어압(P)특성 변화를 해석 시뮬레이션 한 것으로, 성과와 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 상용 소프트웨어인 Maxwell과 AMESim을 연계해, 솔레노이드 밸브의 특성 예측을 위한 해석 프로세스를 개발 할 수 있었다.
- (2) 온도 변화에 따라 고려해야 할 변수선정과 적용 방법을 고안 할 수 있었다.
- (3) 해석 결과는 고온(120°C이상)과 극저온(-20°C이하)을 제외한 온도 영역에서는 실험결과와 거의 일치하는 경향을 확인 할 수 있었기 때문에 한층 더 개선된 연구의 가치가 있다고 판단된다.

비례 제어 솔레노이드 밸브의 개발에 있어, 온도뿐만 아니라 여러 가지 사용 조건에 의한 특성변화를 상용 소프트웨어를 이용해 예측 하는 프로세스는, 금후에도 다양한 설계 방책의 모색이나 제품 개발 기간의 단축을 실현 하는데 있어 불가결한 수법이 된다고 생각된다.

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

References

1. Y. Y. Choi, S. H. Seo, S. H. Lee and H. S. Yang “Analysis of I-P Curve Characteristics by the temperature of Solenoid Valve for Automatic Transmission”, Spring Conference of Korea Society of Fluid Power & Construction Equipments, KSFC, pp. 7-11, 2010.
2. C.S. Song, Y.J. Lee, S.J. You (1995), “A Study on the Analysis of Dynamic Characteristics of the Solenoid Valve of Automatic Transmission”, Journal of the Korea Society

- for Precision Engineering, Vol. 12, No. 8, pp. 122-130.
3. Takashi Arakawa, Shigeki Nimi (2002), "Optimization Technology of Magnetic Circuit for linear Solenoid", SAE 2002-01-0565.
 4. B.H. Cho, G.H. Jung, K.I. Lee (1999), "Modeling of Proportional Control Solenoid Valve for Automatic Transmission Using System Identification Theory". SAE 1999-01-1061.
 5. S.N. Yun, Y.B. Ham, P.W. Park (2006), "Pressure Control Valve using Proportional Electro-magnetic Solenoid Actuator", Journal of the Korea Society of Mechanical Engineers A, Vol. 30, No. 30, pp. 1202-1208.
 6. Y. Y. Choi, S. H. Seo, S. H. Lee and H. S. Yang "The development of a analysis process of a current(I)-control pressure(P) characteristic using CAE of a solenoid valve for automatic transmission", Autumn Conference of Korea Society of Fluid Power & Construction Equipments, KSFC, pp. 43-48, 2009.
 7. William H. Hayt, Engineering Electromagnetics. McGraw-Hill Education, 1989.
 8. Institute of Electronics Engineers, Magnetic Actuators and Sensors, John Wiley & Sons, Inc. 2006.
 9. Herbert E. Merritt, Hydraulic Control Systems, John Willy & Sons, Inc. 1967.



최 윤 용 (gipson12@hanyang.ac.kr)

1993 동아대학교 기계공학과 공학사
 2002 경남대학교 기계설계과 공학석사
 1994~2014 자트코코리아 수석연구원/팀장
 2012~현재 한양대학교 미래자동차공학과 박사과정

관심분야 : 자동차 및 산업기계의 전기구동계통 동역학 모델링&시뮬레이션



홍 정 표 (hongjp@hanyang.ac.kr)

1983 한양대학교 전기공학과 공학사
 1985 한양대학교 전기공학과 공학석사
 1995 한양대학교 전기공학과 공학박사
 1996~현재 한양대학교 미래자동차공학과 교수

관심분야 : 전기회전기기의 전자기 설계 및 해석소프트 개발