

마이크로 솔레노이드의 해석 및 설계 Analysis and Design of Micro Solenoid

김동수 · 전용식 · 배상규

D. S. Kim, Y. S. Jeon and S. K. Bae

Key Words : Solenoid On-Off Valve(솔레노이드 온-오프 밸브), Poppet(포펫), Magnetic Field(자기장), Flow Field(유동장), Finite Element Method(유한요소법), Stroke(스트로크)

Abstract: Recently, the on-off solenoid valves have been focused on core technology in the fields of the production line of semi-conductor chips and the micro fluid chips for bio-medical applications. A key characteristics for on-off solenoid valve, operated by compressed air, are high speed response and great repeatability. Indeed, it is also important to keep the pressure on the cross-sectional area of the poppet to be constant regardless of the fluctuation of the pressure exerted on the ports. In this study, we have designed and analysed the high-speed and high flow rate on-off solenoid valve using the analogy of equivalent magnetic circuit and Finite Element Method (FEM) respectively. In case of poppet, flow field characteristics was analyzed by the variation of poppet and it was able to display flow field by changing the location of the poppet. Also, we verified possibility of the design through the static and dynamic pressure and the 3D simulation using distribution curve of the force by working the front poppet.

기호 설명

- λ : 열방출계수
- W : 솔레노이드 액추에이터가 한 일
- U : 기자력
- B_g : 공극자속밀도
- F_{min} : 최소흡입력
- d : 코일에 선경
- K_s : 스프링 상수
- S_{out} : 권선외부면적
- ρ_n : 최대온도에서의 저항률
- l_m : 권선의 평균길이

1. 서 론

온-오프 솔레노이드 밸브는 최근의 컴퓨터, 각종 제어기술 등의 발달로 정밀제어가 가능하게 되었으므로 반도체칩 마운터, 전자제품 생산라인, 베어링

자동이송라인, 사출성형기, 피로 및 진동시험기 등 그 응용범위가 넓어지고 있다. 특히 최근에 반도체산업 등 기술 집약적 공정의 개발에 있어서 핵심기술로 자리 잡고 있다.^{1,3)}

온-오프 솔레노이드 밸브의 간략한 구성도는 Fig. 1과 같다. 구성은 압축공기의 방향을 제어하는 포펫, 가동자(plunger), 고정자(stationary core)와 스프링, 누설을 차단하게 해주는 O링 및 개스킷 등으로 이루어져 있다. 이러한 온-오프 솔레노이드 밸브는 고속, 반복 동작성이 좋고 포트에 걸리는 압력변동에도 포펫의 동단면적에 압력이 일정하게 작용하며 고 응답성을 나타낸다.

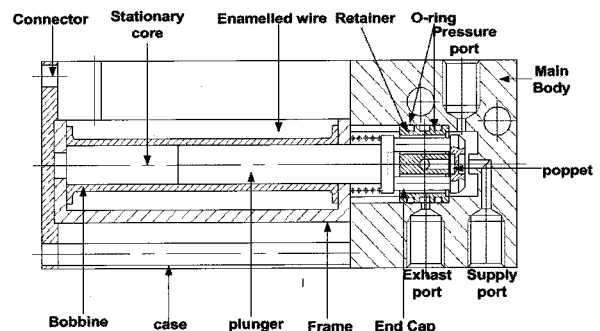


Fig. 1 Schematic diagram of solenoid valve

접수일 : 2006년 10월 1일

김동수(책임저자): 한국기계연구원 정보장비연구센터

E-mail : kds671@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7152

전용식, 배상규 : 한국기계연구원 정보장비연구센터

온-오프 솔레노이드 밸브의 동작원리를 살펴보면, 솔레노이드 통전 시 전자석의 힘에 의해 포켓을 전진시키고 공급포트를 통해 압력포트로 압축공기가 흐르며, 솔레노이드 비통전시에는 스프링 힘으로 포켓을 후진시켜 공급포트가 닫히게 되며, 배기포트로 배기되어 고속으로 왕복 운동한다.

2. 솔레노이드 액추에이터의 설계 및 해석

2.1 등가자기회로법을 이용한 솔레노이드 설계

일반적으로 온-오프 솔레노이드 액추에이터의 설계를 위해서는 최소흡입력, 정격스트로크, 정격전압, 전압변동, 정격파워, 시간정격(Duty Ratio), 온도상승, 주변온도, 코일절연종류, 제한치수 등이 주어진다.⁵⁾

먼저 전압 변동을 고려하여 최소 흡입력(F_{min})을 충분히 크게 산정한다. 주어진 흡입력을 발생시키기 위해 공극자속밀도를 결정한다. 본 논문에서는 지수(Index-number)를 이용하여 공극자속밀도(B_g)를 산정하였다.

$$\text{Index-Number} = \sqrt{F_{\min}} / l_g \quad (1)$$

$$B_g = 0.4927[\log(\text{IndexNumber}) - 2]V \quad (2)$$

계산된 공극자속밀도와 흡입력을 이용하여 플런저의 면적을 계산한다. 산정된 자속밀도를 공급하기 위한 기자력(U)을 계산한다. 플런저, 코어, 프레임에서 소요되는 기자력을 산정할 수 없기 때문에 공극에서 소요되는 기자력에 적당한 계수(ζ)를 곱하여 전체 기자력을 산정한다.

$$U = \frac{\zeta B_g l_g}{\mu_0} \quad (3)$$

코일에서 발생된 열의 방출 면으로 코일의 외면만을 고려하는 경우, 온도상승식은 다음과 같다.

$$\theta_f = \frac{W}{\lambda S_{out}} = \frac{W}{\lambda(l_m + 4T)h} \quad (4)$$

여기에서, λ 는 열방출계수, S_{out} 은 권선 외부면적, l_m 은 권선의 평균길이를 의미한다. 식 (4)로부터 권선의 높이(h)와 폭(T)의 비율 $\beta = h/T$ 를 적절히 가정하면, 주어진 설계사양으로부터, 권선의 높이와 폭을 구할 수 있다.

코일의 선포는 다음 식으로부터 결정된다.

$$d = \sqrt{\frac{4\rho_h(r_1' + r_2')U}{V}} \quad (5)$$

여기에서 ρ_h 는 최대온도에서의 저항률을 의미한다. 코일의 선포가 결정되면 코일의 턴 수를 계산하고 프레임의 설계를 한다. 솔레노이드 설계가 완료되면 설계 데이터를 바탕으로 계산된 전류, 소모전력, 온도상승, 기자력이 설계 목표와 적합한지를 판단한다. Fig. 2는 전체적인 설계 과정을 나타낸 것이다. 본 논문에서는 이 설계 과정을 프로그램으로 제작하여 설계를 진행하였다. 제안한 설계방법을 이용하여 Table 1과 같이 주어지는 솔레노이드 액추에이터를 설계하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 이때 전압변동을 고려하여 최소흡입력은 1.3[N]으로 산정하였다.

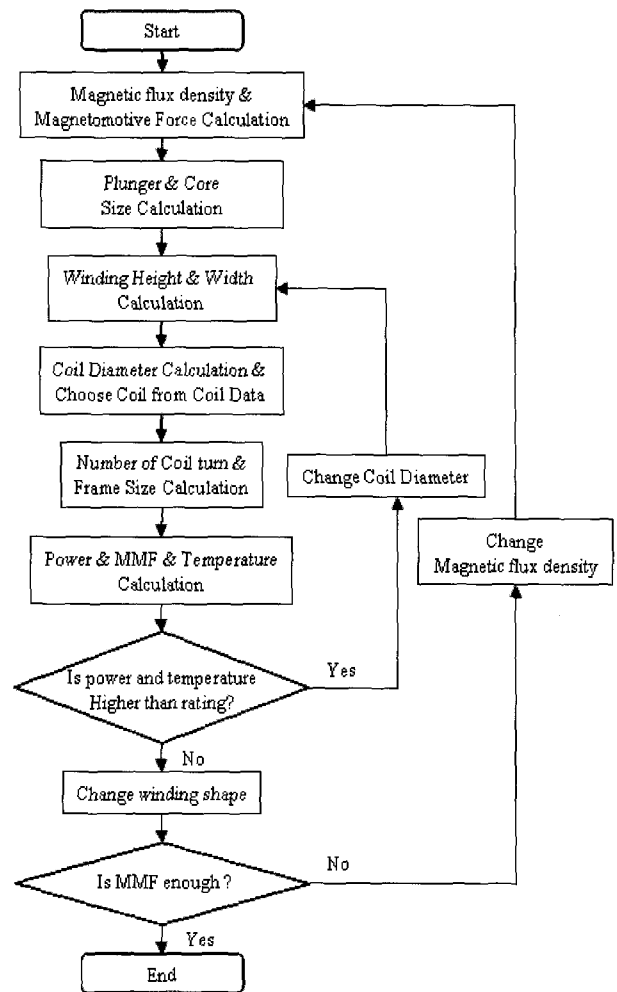


Fig. 2 Flow chart of design process

Table 1 Design specification

Magnetic Force	1.3[N]	Duty Ratio	1[ms]
Stroke	0.3[mm]	Temperature Rise Time	80[°C]
Supply Voltage	24[V]	Ambient Temperature	20[°C]
Voltage Variation	90-110[%]	Coil Insulation	A
Electric Power	0.35[W]	Limit Measure	20[mm]

Table 2 Design result

Plunger	Width	4.4[mm]
	Length	1.64[mm]
Stationaty Cle	Width	4.5[mm]
	Length	1.7[mm]
Frame	Thickness	0.72[mm]
	Height	21.5[mm]
Coil	Coil Diameter	0.04[mm]
	Thickness	1.47[mm]
	Height	18.5[mm]
	Coil Turn Number	6700 [turn]
Coil Resistance	1679 [Ω]	
Current	0.0142[A]	
Electric Power	0.35[W]	
Temperature Rise Time	50 °C	
Magnetomotive Force	81.4[At]	

2.2 차원 유한요소법을 이용한 특성 해석

먼저 설계된 데이터를 검증하기 위해 상용 프로그램인 맥스웰(Maxwell)을 이용하여 정특성과 동특성 해석을 시행하였다. 특성해석 시 정특성해석은 공극 0.3[mm], 전류 0.0142[A]에서 행하였고, 동특성 해석은 입력전압 24[V], 권선의 전체 저항 1679Ω에서 행하였다. 그리고 플런저와 코어는 QMR-5L, 그리고 프레임은 순철을 사용하였다.

Fig. 3은 설계된 솔레노이드 액추에이터와 정특성 해석 결과 얻어진 자속 밀도 분포를 나타낸 것이다. 플런저와 코어의 대부분에서 거의 포화가 일어남을 알 수 있다.

프레임 부분을 살펴보면 위쪽 프레임이 양 옆쪽 프레임에 비해 자속밀도가 높음을 보여준다. 이는 설계 시 옆쪽 프레임을 기준으로 프레임의 두께를 산정하였기 때문이다. 이처럼 프레임과 같은 국부적인 설계는 유한요소법을 이용하여 재설계를 할 필요성이 있음을 의미한다.

플런저에 작용하는 흡입력은 1.5[N]으로 나타났다. 이는 설계 목표로 잡았던 1.3[N]에 비해 충분하나 전압 변동을 고려했을 때는 0.1[N]정도 오차가 나타났다. 이는 기자력이 충분하지 않기 때문이

다. 초기 설계 시 기자력의 크기를 가정하기 때문에 이 가정부분에서 오차가 발생한 것이라 판단된다.

Fig. 4는 동특성 해석 결과 얻어진 시간-변위, 시간-흡입력 곡선을 나타낸다.

Fig. 5는 시간-전류곡선을 나타낸 것이다. 플런저는 약 0.5ms후에 이동을 시작했으며, 2ms 후에 이동을 완료하였다.

Fig. 5를 살펴보면 A구간에서는 플런저의 움직임이 거의 없어 인덕턴스가 일정한 상태이다. 이는 다음의 식으로 설명된다.

$$V = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} \tag{6}$$

B구간에서는 플런저의 속도가 증가하면서 전류가 감소하는 구간으로 인덕턴스가 변화하기 때문에 다음의 식으로 설명할 수 있다.

$$\begin{aligned} V &= i(t)R + \frac{d}{dt}(L(t)i(t)) \tag{7} \\ &= i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} \Big|_{L=c} + i(t) \frac{\partial L}{\partial i} \frac{\partial i(t)}{\partial t} \Big|_{x=c} \\ &\quad + i(t) \frac{\partial L}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \Big|_{i=c} \end{aligned}$$

이 구간에서는 플런저의 속도가 매우 빠르기 문에 우변의 4항이 매우 우세한 경우이다.

즉, 전류가 일정한 상태에서 공극이 감소하면 인덕턴스가 증가하고 코일의 유기전압에 의해 전류가 감소하는 구간이다. C구간에서는 플런저의 이동의 끝난 상태로 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V &= i(t)R + \frac{d}{dt}(L(t)i(t)) \tag{8} \\ &= i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} \Big|_{L=c} + i(t) \frac{\partial L}{\partial i} \frac{\partial i(t)}{\partial t} \Big|_{x=c} \end{aligned}$$

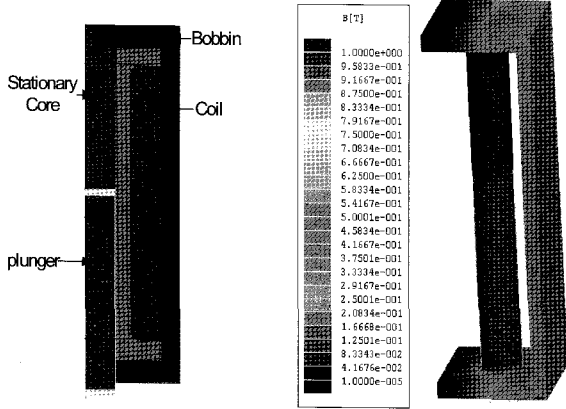


Fig. 3 Analysis model and magnetic flux density

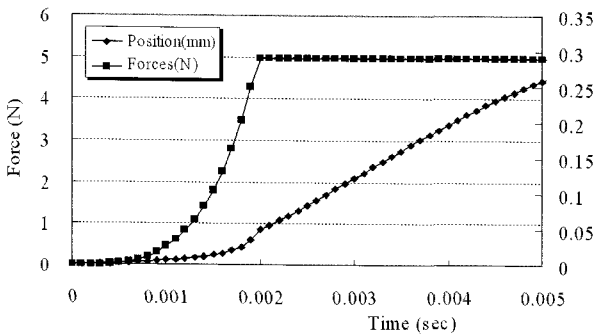


Fig. 4 Time-attraction force and time-position waveform

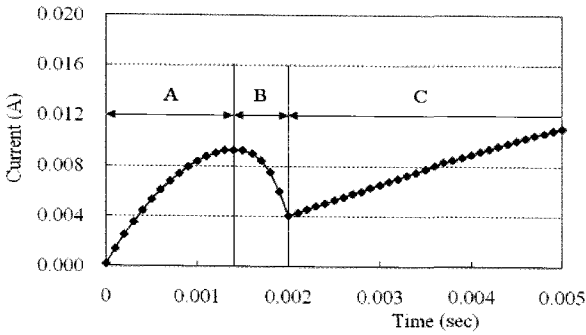


Fig. 5 Time-current waveform

3. 밸브 내부 유동장에 관한 수치해석적 연구

3.1 계산영역 및 경계조건

본 연구에서는 온-오프 솔레노이드 밸브 내부 유동장 특성을 파악하기 위하여 포핏에 작용하는 유동력과 이의 분포를 중심으로 수치계산을 실시하였다. Fig. 6은 온-오프 솔레노이드 밸브의 유체가 흐르는 부분으로이다. 유동장 해석을 위한 격자는 사면체 격자와 육면체 격자를 혼용한 하이브리드격자를 사용하였으며 격자수는 약 120,000개의 엘리먼트를 생

성하여 수치계산 하였다. 유동장 입구의 압력을 온-오프 솔레노이드 밸브의 작동압인 0.3MPa로 고정된 상태에서 온-오프 솔레노이드 밸브 3D 모델의 밸브 변위를 변화시켜 해석 하였다. 수치계산에 사용한 작동유체는 공기(비열비 1.4)이며, 입구 경계조건은 입구압력, 출구 경계조건은 대기압으로 설정하였다. 포핏의 밸브변위 범위는 $0 \leq x \leq 0.3(\text{mm})$ 로 가정하였다.

3.2 지배방정식

수치계산에서는 아래의 식들로 주어지는 압축성 나비에스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 적용하였다. 난류가 마이크로밸브 내부 유동장에 미치는 영향을 적절히 모사하기 위하여 보즈네스크(Boussinesq) 가설을 도입한 와점성 모델인 standard k-ε 난류모델을 사용하였다.

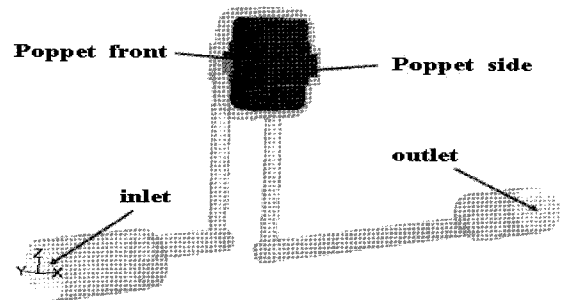


Fig. 6 Fluid area of micro On-Off valve

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u_i' u_j') \tag{10}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(x + \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j (\tau_{ij})_{eff} \right) \tag{11}$$

식 (9)는 연속방정식이며 식 (10)은 운동량 방정식, 식 (11)은 에너지방정식이다. 해의 수렴판정을 위하여 각 상태량의 미세오차를 10^{-4} 으로 설정하였으며 유동장 입구와 출구에서의 질량유량의 변화를 조사하여 유량의 합이 0.3% 이하로 되는 조건을 수렴조건으로 설정하였다.

3.3. 수치해석 결과 및 고찰

Fig. 7은 포켓이 최대 개방(밸브변위=0.3mm)된 상태의 정압분포를 나타낸 것이다.

유동장의 정압은 상류에서 가장 높으며 하류로 갈수록 유동속도가 증가함에 따라서 과팽창(over expanded) 되어 유동장 출구에서는 대기압 이하로 과팽창 됨을 알 수 있다. 특히 유동이 포켓과 충돌하는 포켓정면(poppet front)과 포켓 하부의 수직관 끝단에서 국부적으로 정압이 상승하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 완전 개방상태에서 포켓정면이 받는 동압 분포를 나타낸 것이다.

포켓정면에 작용하는 동압분포는 Fig. 8과 같이 포켓 중앙부가 함몰되어 있는 3차원형상을 나타낸다. 포켓 중앙부는 유동이 포켓정면에 충돌하면서 속도가 0이 되고 충돌한 유동은 다시 반대방향으로 가속되어 나아가므로 중앙부가 함몰되고 중앙부 가장자리에서 가장 큰 값을 가진 동압분포곡선을 나타내게 된다.

Fig. 9는 완전 개방상태에서 포켓정면이 받는 힘을 3차원 그래프로 나타낸 것이다.

포켓정면부의 단면적은 약 $1.21204 \times 10^{-5} l/s$ 이며 이를 바탕으로 정압과 동압을 고려하여 포켓정면에 작용하는 힘의 분포를 3차원 그래프로 나타낸 것이다.

완전개방 상태에서 발생하는 최고 힘은 약 3.17N 정도이며 포켓의 중앙부에서 발생함을 알 수 있다. 포켓정면에 작용하는 전합력(total force)은 약 1.16N 이었다.

완전개방 상태에서 온-오프 솔레노이드 밸브의 출구유량을 고려하면, 온-오프 솔레노이드 밸브의 작동 압력인 0.3MPa에서 실험을 통해 얻어진 출구의 유량은 약 $1.6 \times 10^{-4} l/s$ 이었다. 이 실험결과를 토대로 수치해석에서 유량을 계산하였으며, 그 값은 Table 3과 같다.

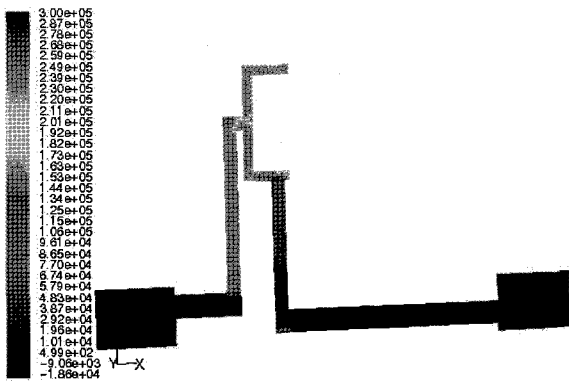


Fig. 7 Static pressure distribution

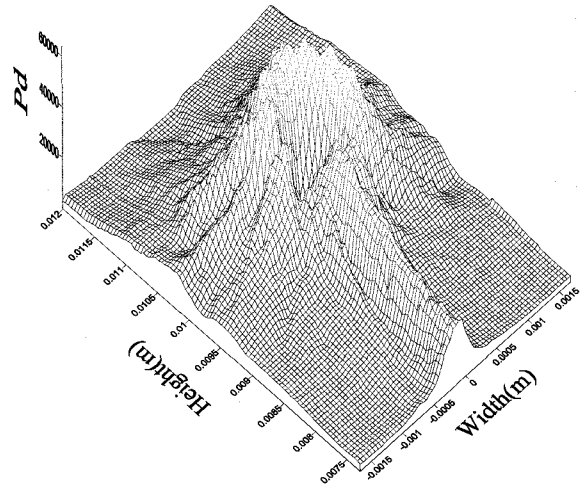


Fig. 8 Dynamic pressure distribution at poppet front

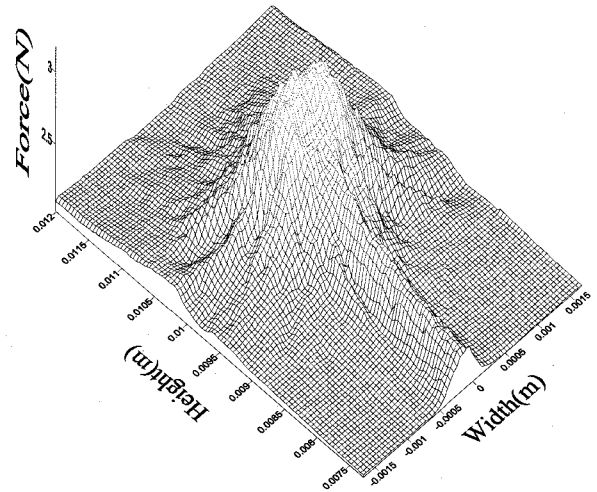


Fig. 9 Force distribution at poppet front

Table 3 Flow rate of each position

Cross sectional area location			
Inlet	Hole A	Outlet	Experiment(outlet)
2.15×10^{-4} [l/s]	1.80×10^{-4} [l/s]	1.75×10^{-4} [l/s]	1.66×10^{-4} [l/s]

수치해석 결과 구한 출구유량은 실험유량과 비교하여 출구유량을 $0.09 \times 10^{-4} l/s$ 정도 과대평가하는 것

으로 나타났다. 또한 입구(Inlet)와 홀(Hole) A의 유량을 비교할 때 홀 A의 유량이 입구유량에 비해서 $0.35 \times 10^{-4} l/s$ 정도 작게 나오고 있는데, 이는 입구유량의 16%에 달하는 값이다.

Fig. 10은 포펫이 관의 출구 직전까지(밸브변위 0.05mm) 전진하였을 때의 정압분포를 나타낸 것이다. 포펫을 기준으로 상류와 하류의 정압분포가 극명하게 차이가 나고 있음을 알 수 있다. 또한 온-오프 솔레노이드 밸브 입구측 보다 포펫 주위의 정압이 더욱 높게 나타나고 있는데, 이는 입구에서 유입되는 유동이 포펫에 충돌한 후 포펫과 관 출구사이의 좁은 틈을 통하여 유동의 일부만 하류로 빠져 나가고 나머지는 모두 상류로 역류하면서 포펫 주위의 정압을 상승시켰기 때문이다.

포펫에 충돌한 후 하류방향으로 흐르는 유동은 수직관을 지나면서 하류와의 압력차의 영향으로 가속되다가 수직관 끝단에서 수평관로와 충돌하면서 이 부분에 국부정압도 상승되는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 11은 밸브변위가 0.05mm인 경우 포펫정면에 작용하는 정압분포를 3차원 그래프로 나타낸 것이다. 이 경우는 상기의 경우와는 완전히 다른 양상을 보이고 있다. 상기의 경우에는 중앙부가 상승하는 형태의 정압분포곡선을 가지고 있었으나 이 경우는 중앙부로 갈수록 감소하였다가 다시 원래의 압력을 회복하는 형태를 보이고 있다. 그리고 입구의 압력에 비하여 포펫정면에서의 정압이 $4.5 \times 10^5 l/s$ 까지 상승되어 있다.

또한 대칭성을 고려하면, 상기의 완전개방의 경우는 정압분포가 비대칭적으로 분포하였으나 이 경우는 거의 포펫 중앙부에서 대칭성을 유지하며 정압이 분포되어 있음을 알 수 있다.

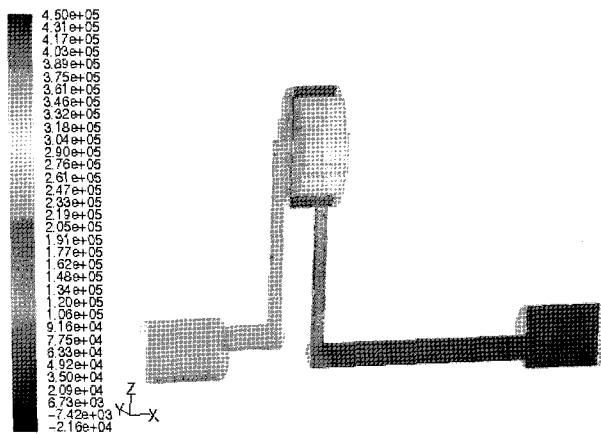


Fig. 10 Static pressure distribution at center plane

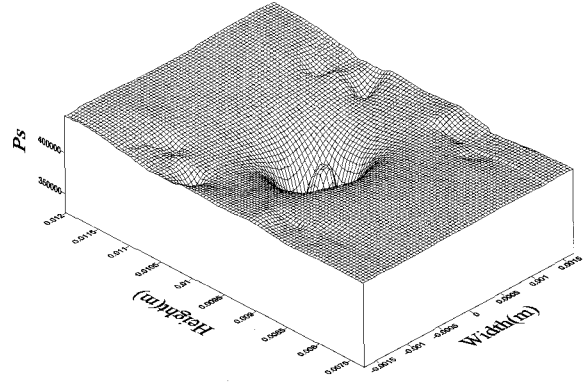


Fig. 11 Static pressure distribution at poppet front (stroke=0.05mm)

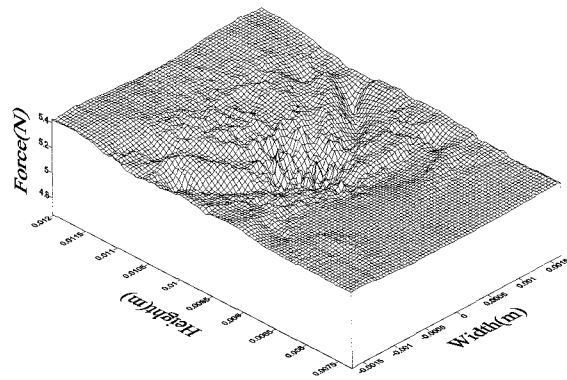


Fig. 12 Force distribution at poppet front (stroke=0.05mm)

Fig. 12는 포펫정면에서 힘의 분포를 나타낸 3차원 그래프이다. 이 그림으로부터 밸브가 거의 닫힌 상태인 포펫정면의 밸브변위가 0.05mm인 경우 힘의 분포는 포펫정면 상단에 더 크게 작용하고 있으며, 포펫정면의 중앙부에 작용하는 힘이 상대적으로 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 힘의 크기도 순간 집중하중을 고려할 때 최고 5N까지 작용하고 있다.

밸브가 완전히 닫히기 직전인 포펫정면의 밸브변위가 0.05mm인 경우에 포펫정면에 작용하는 전체 작용력은 약 2.89N으로 나타났다. 즉 해석상에 발생하는 오차를 고려하여 5%정도의 과대평가 하였다고 가정을 하더라도 밸브를 완전히 닫기 위해서는 적어도 2.8N보다는 큰 힘을 포펫에 가해야 한다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 자기장 해석과 유동장해석을 통하여 온-오프 솔레노이드 밸브의 최적설계를 목표로

하였다. 등가자기회로법을 이용하여 솔레노이드 액추에이터를 설계하였고 설계된 데이터를 바탕으로 3차원 유한요소법을 이용한 자기장 해석으로 설계의 타당성을 검증하였다. 해석결과 플런저의 이동이 완료되기까지 0.002sec의 고응답 시간 및 0.35W의 소비 전력도 확인할 수 있었다.

포펫 정면에 가해지는 정압과 동압, 그리고 힘의 3차원 분포곡선을 구하였으며, 이를 다양한 방법으로 힘의 작용정도를 명확하게 가시화 할 수 있었다. 이를 바탕으로 포펫정면에 작용하는 전합력과 힘의 불균형 정도를 파악 할 수 있었다.

통전시(밸브변위 0.3mm)에는 솔레노이드 액추에이터에 발생하는 흡인력이 약 1.5N이었으며 포펫에 작용하는 전합력은 약 1.16N이므로 밸브를 개방하기에 충분한 힘을 얻을 수 있는 것을 확인 할 수 있었다.

비통전시(밸브변위 0.05mm)에는 솔레노이드 액추에이터에 발생하는 흡인력이 약 4.2N이었으며 포펫에 작용하는 전합력은 약 2.89N이므로 밸브를 폐쇄하기에 충분한 힘을 얻을 수 있는 것을 확인 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 에너지절약과제인 “초절전형 마이크로밸브 개발” 과제지원으로 연구되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) 中田高義, “有限要素法による直交電磁石の設計と応用”, 森北出版株式會社, 1991.
- 2) C. R. Herbert, “Electromagnetic Devices”, John Wiley & Sons, 1995.
- 3) 최인호, 고창섭, 정태경, 한송엽, “솔레노이드 액추에이터 전자기 시스템의 유한요소 해석”, 대한전기학회 논문집, Vol. 40, No. 11, 1991.
- 4) B. J. Sung, E. W. Lee and H. E. Kim, “Empirical Design of an On and Off Type Solenoid Actuator For Valve Operation”, KIEE International Trans on EMECS, Vol. 4-B, No. 2, pp. 39~46, 2004.
- 5) B. W. Andersen, “The Analysis and Design of Pneumatic Systems,” John Wiley & Son Inc., pp. 48~61, 1967.
- 6) W. L. Green, “The Poppet Valve-Flow Force Compensation,” Proceedings of Fluid Power International conference, pp. S1~S6, 1970.
- 7) K. Kakano, H. Watanabe and G. Mao-ving, “Experimental Study for the Compensation of Axial Flow Force in a Spool Valve,” Journal of the Japan Fluid Power System Society, Vol. 18, No. 6, pp. 475-482, 2000.