

스풀 액추에이터의 노치 특성

윤소남[†]·강보식*

Notch Characteristics of Spool Actuator

So-Nam Yun and Bo-Sik Kang

Key Words: Spool(스풀), Notch(노치), Directional Control(방향제어), Sleeve(슬리브), Shock Pressure(충격압력)

Abstract

This paper presents the fluid characteristics of the spool actuator used for construction vehicles. A spool actuator is used for directional control of pressurized fluid and has a roll to lock the fluid flow. It is important to design the spool actuator optimally because this actuator is actuated in the sleeve by sliding motion and has some critical design parameters such as stick-slip, leakage and shock pressure. The parameters like stick-slip and leakage can be solved by precision manufacturing but the shock pressure which is taken place when the fluid direction is changed needs the parameter analysis procedure thoroughly.

In this study, mathematical modeling and 2 & 3 phase flow dynamics analysis of the spool actuator were achieved. Using suggested model, all possible operating conditions were analyzed..

1. 서론

산업용 트랙터에 사용되는 스푼 액추에이터(스풀 밸브)는 6/4 형식의 스푼 2개가 1개의 조합으로 되어 있으며, 조작용 스틱방식과 스프링센터 방식을 혼용하는 형태를 취하고 있다. 일반적으로 스푼 액추에이터의 경우에 있어서는 유량계인과 압력계인, 스틱 슬립, 누설과 충격압력 현상이 설계에 있어서 매우 중요한 인자인데, 전자인 유량/압력계인 및 스틱 슬립, 누설 현상은 정밀가공을 통하여 해결될 수 있지만, 밸브 여닫음 시에 발생하는 충격압력 발생현상은 슬리브와 스푼

개구부의 형상을 어떻게 하느냐에 따라서 매우 민감하게 반응하는 특성이 있다. 스푼 액추에이터에 발생하는 충격압 발생 현상은 밸브 자체의 성능과 내구성에 영향을 줄 뿐만 아니라 이 밸브를 채용하는 시스템에 악영향을 초래하여 안정성과 생산성에 영향을 주기도 하고, 승차감을 저하시키는 요인으로 작용하기도 한다. 따라서, 많은 연구자들에 의하여 충격압 발생을 저감시키는 연구들이 진행되었으며, 삼각형, 원형, 이중 기울기를 갖는 스푼 및 다단원형식을 갖는 스푼 액추에이터들이 제안되고 있다.

본 연구에서는 본 연구의 대상으로 하는 스푼 액추에이터의 최적 형상을 설계하기 위한 기초 연구로서 트랙터에 사용되는 스푼액추에이터 부회로를 모델링하였으며, 삼각형, 원형, 다단원형 노치에 대한 정특성을 수행하였다. 또한, 3상 유동특성 해석을 통하여 다단 원형 노치의 타당성을 제시하였다.

† 정회원, 한국기계연구원/나노기계연구본부

E-mail : ysn688@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7155 FAX : (042)868-7053

* 한국기계연구원/시스템엔지니어링연구본부

2. 이론해석

2.1 모델링

Fig. 1은 본 연구의 대상으로 하는 트랙터용 스푼 액추에이터의 내부구조 형상을 보이는 것으로 스프링 센터방식이며, 조작용 스틱을 이용하여 수동 조작하는 형식이다. Fig. 2는 Fig. 1을 해석하기 위한 모델로서, 모델링 시에는, 스푼은 슬리브의 중심원에 대하여 중앙에 위치하고 있으며, A/B 포트는 좌우대칭이고, 스푼은 슬리브 내 중앙에 위치하고 있다는 조건하에서 이루어졌다.

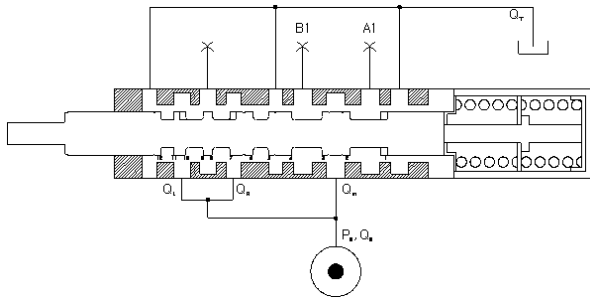


Fig. 1 Model of spool actuator

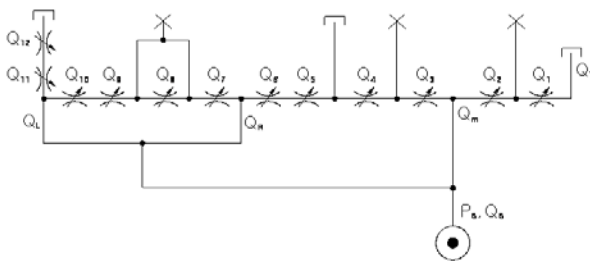


Fig. 2 Analysis model

슬리브와 스푼 액추에이터로 공급되는 유량은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_s = Q_m + Q_c + Q_R \dots\dots\dots(1)$$

$$Q_m = Q_2 + Q_3 \dots\dots\dots(2)$$

$$Q_R = Q_6 + Q_7 \dots\dots\dots(3)$$

$$Q_L = Q_{10} + Q_{11} \dots\dots\dots(4)$$

식(2)에서 아래첨자 1, 2, ab은 Fig. 1과 Fig. 2에 보이는 바와 같이 스푼과 슬리브 사이에서 일어나는 교축부를 각각 나타내는 것으로 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$Q_2 = Q_1 + Q_{ab} + \beta V_1 \frac{dP_a}{dt} \dots\dots\dots(5)$$

$$Q_1 = c_{d1} \cdot A_{d1} \sqrt{\frac{2(P_a - P_T)}{\rho}} \dots\dots\dots(6)$$

$$Q_{ab} = c_{dab} \cdot A_{dab} \sqrt{\frac{2(P_a - P_b)}{\rho}} \dots\dots\dots(7)$$

$$Q_2 = c_{d2} \cdot A_{d2} \sqrt{\frac{2(P_s - P_a)}{\rho}} \dots\dots\dots(8)$$

식(6), 식(7), 식(8)을 식(5)에 대입하면, 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$c_{d2} \cdot A_{d2} \sqrt{\frac{2(P_s - P_a)}{\rho}} = c_{d1} \cdot A_{d1} \sqrt{\frac{2(P_a - P_T)}{\rho}} + c_{dab} \cdot A_{dab} \sqrt{\frac{2(P_a - P_b)}{\rho}} + \beta V_1 \frac{dP_a}{dt} \dots\dots\dots(9)$$

교축부 3과 4부의 유량식은 다음과 같다.

$$Q_3 = Q_4 + Q_{ba} + \beta V_2 \frac{dP_b}{dt} \dots\dots\dots(10)$$

$$Q_3 = c_{d3} \cdot A_{d3} \sqrt{\frac{2(P_s - P_b)}{\rho}} \dots\dots\dots(11)$$

$$Q_4 = c_{d4} \cdot A_{d4} \sqrt{\frac{2(P_b - P_T)}{\rho}} \dots\dots\dots(12)$$

$$Q_{ba} = c_{dba} \cdot A_{dba} \sqrt{\frac{2(P_b - P_a)}{\rho}} \dots\dots\dots(13)$$

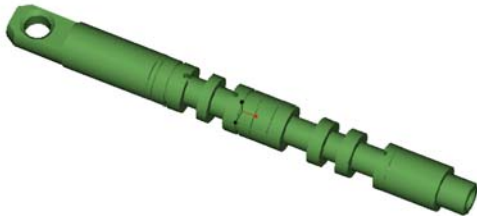
식(11), 식(12)를 식(10)에 대입하면, 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$c_{d3} \cdot A_{d3} \sqrt{\frac{2(P_s - P_b)}{\rho}} = c_{d4} \cdot A_{d4} \sqrt{\frac{2(P_b - P_T)}{\rho}} + c_{dba} \cdot A_{dba} \sqrt{\frac{2(P_b - P_a)}{\rho}} + \beta V_2 \frac{dP_b}{dt} \dots\dots\dots(14)$$

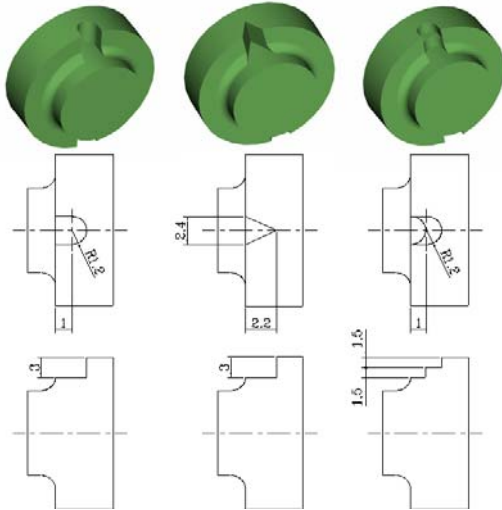
2.2 스푼 노치 유동해석

Fig. 3에서 a)는 본 연구에서 해석된 스푼 액추에이터의 3D 모델을 보이는 것이고, b), c), d)는 각각 노치 형상들을 보이고 있다. b)는 폭과 깊이가 각각 2.4mm, 3mm 이고, 길이 1mm까지는 사각형태이며, 나머지는 R1.2mm의 반원형태를 갖는 노치이다. c)는 폭과 깊이가 크기가 b)와 동일하

고, 길이 2.2mm 전구간이 삼각형을 이루는 노치이다. d)는 2단형태의 노치 형상을 보이는 것으로 첫단의 크기는 깊이 3mm, R1.2mm의 원형이고, 둘째단의 크기는 첫단의 끝지점에서 시작하여 깊이가 1.5mm, R1.2mm의 원형을 가지는 노치이다.

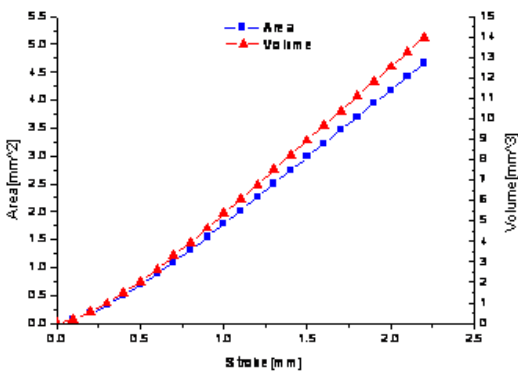


a) 3D model of spool actuator

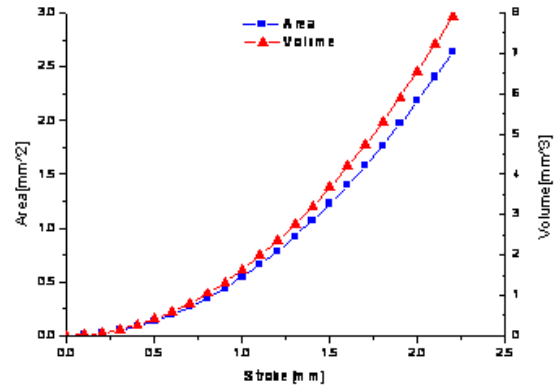


b) Circle b) Triangle c) 2-stage circle
Fig. 3 Notch shape for spool actuator

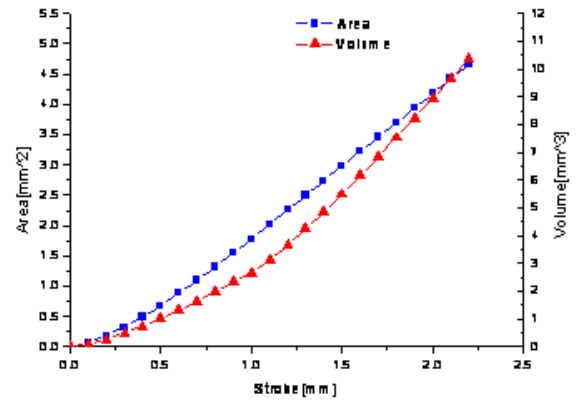
Fig. 4는 각각 Fig. 3의 모델 a), b) 및 c)의 노치형상에 따른 개구면적 및 개구부 체적 변화값을 나타낸 것이다.



a) Circle notch



b) Triangle notch



c) 2-stage circle

Fig. 4 Area & volume variation by notch shape

Fig. 4의 c) 결과에서와 같이 1단과 2단의 노치를 적절히 사용하면, 면적과 체적 변화각도를 임의로 변경시킬 수 있음을 알 수 있으며, 면적 및 체적의 변화 각도가 충격압력을 적절히 조절하는데, 기여할 수 있음을 예측할 수 있다.

Fig. 5의 a)는 수치해석 모델을 나타내고 있다. 노치 형상에 따른 누설 유량 및 0.3mm 간극에서의 유량을 예측하기 위하여 노치가 위치한 스폴의 일부분을 해석하였다. 입출구는 압력경계조건으로 해석하고, 3-D로 해석하였다. Fig. 5의 b)는 수치해석을 위한 격자를 나타내고 있다. 3-D 해석을 위하여 입구측은 해석모델 직경의 10배 정도로 확장하고, 출구측은 약 20배정도 확장하여 계산하였다. 노치 형상에 따른 내부 유동을 해석하기 위해 비압축성 정상상태로 가정하였고, 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다.

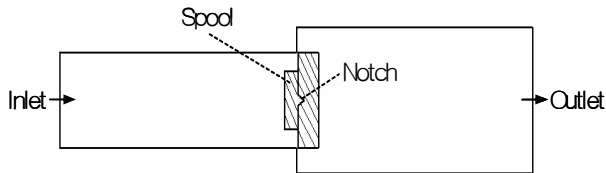
수치해석에 사용된 연속방정식, 운동량 방정식

및 에너지 방정식은 각각 다음과 같다.

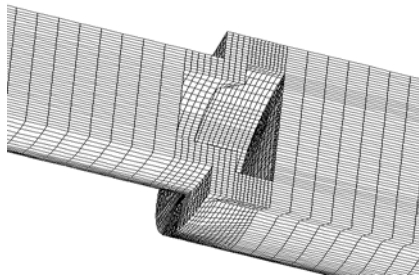
$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \dots\dots\dots(15)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial X_j} = -\frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial X_j} [\rho \overline{u_i u_j}] \dots\dots(16)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i T)}{\partial X_j} = \frac{\partial P}{\partial X_j} \left[\left(\frac{\mu}{P_r} + \frac{\mu_t}{\sigma_r} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \dots\dots\dots(17)$$



a) Schematic diagram for CFD



b) Grid system for CFD

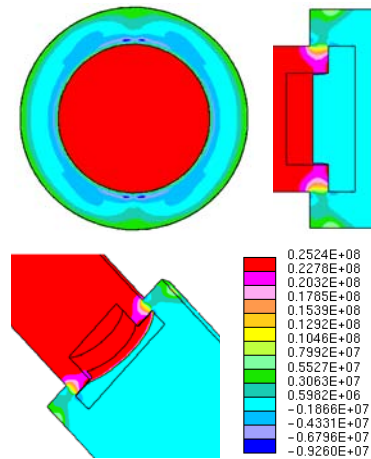
Fig. 5 CFD analysis condition

수치해석에 사용된 난류모델은 비교적 계산이 간단하며, 격자수의 절약 등 여러 가지 측면에서 공학적으로 그 가치가 인정되어 폭넓게 사용되고 있는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 대류항은 유동방향을 고려하고 상류쪽의 값을 반영하기 위해 풍상차분법(Uppwind differencing scheme)을 사용하였다. 또한 압력항의 처리는 Patankar가 제안한 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다.

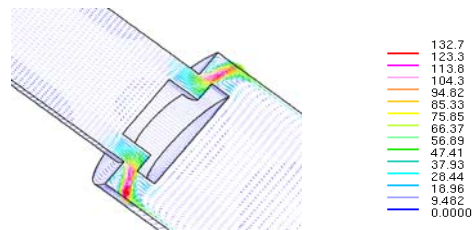
지배방정식을 풀기 위해 사용된 경계조건은 입구 쪽에서 유입되는 작동유의 압력을 250bar로 유입시키고, 유입 작동유의 온도를 293K로 가정하였다. 유입속도에서 수직 성분의 유속은 0으로 하였으며, 난류강도는 5%로 균일하게 설정하고, 대칭조건을 사용하였다.

3. 스푼 노치 유동해석 결과

Fig. 6의 a)와 b)는 각각 Fig. 3의 a) 모델에서 노치부가 0.3mm 열렸을 때의 압력 분포 및 속도 분포를 보이는 것이고, Fig. 7의 a)와 b)는 각각 Fig. 3의 b) 모델에서 노치부가 0.3mm 열렸을 때의 압력 분포 및 속도 분포를 보이는 것이다.

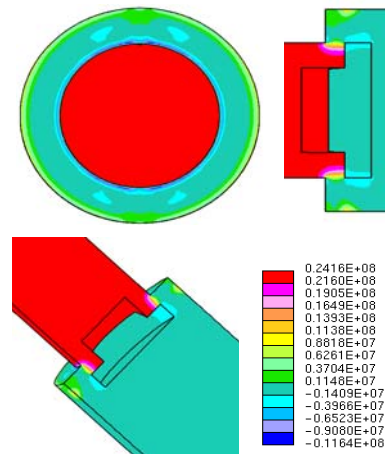


a) Pressure distribution

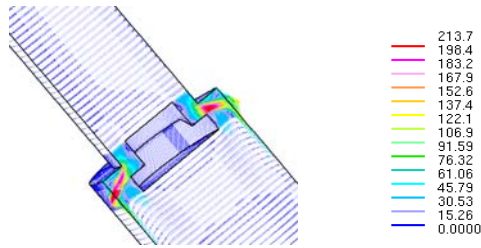


b) Velocity distribution

Fig. 6 Analysis results of a) model of Fig. 3(at the 0.3mm opened)



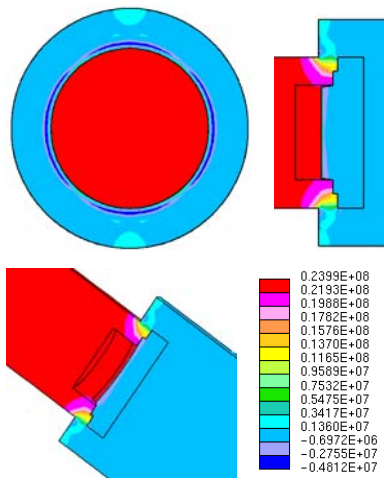
a) Pressure distribution



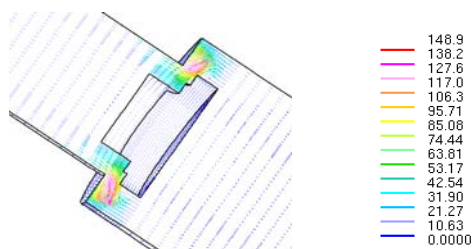
b) Velocity distribution

Fig. 7 Analysis results of b) model of Fig. 3(at the 0.3mm opened)

Fig. 8의 a)와 b)는 각각 Fig. 3에서 2단 형식 노치가 있는 모델을 이용하여 해석한 결과를 노치부가 0.3mm 열렸을 때를 기준으로 압력 분포 및 속도 분포를 보인 것이다.



a) Pressure distribution



b) Velocity distribution

Fig. 8 Analysis results of c) model of Fig. 3(at the 0.3mm opened)

Fig. 9는 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8에서 얻어진 압력 및 속도 분포를 기준으로 하여 최종적으로 스펴 액추에이터가 슬리브에 닫혀있는 경우와 0.3mm 열렸을 때에 토출되는 유량 결과를 나타낸 도표이다. 도표에서 알 수 있는 바와 같이, 2단형식의

노치(2-stage notch or bi-circular notch)인 경우는 닫혀있을 때의 누설유량은 2위, 0.3mm 열렸을 때의 토출유량은 3위를 하고 있어, 적절한 누설 보상이 이루어지고 있으며, 갑작스런 토출 유량 발생이 일어나 유체가 급속하게 열고 닫히는 경우가 발생하지 않음을 예측할 수 있다.

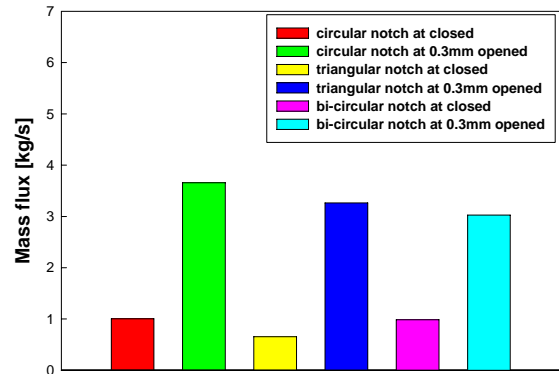


Fig. 9 Mass flux for notch type and operating condition.

4. 결론

본 연구에서는 트랙터용 스펴 액추에이터에 대해서 기초적인 해석이 이루어졌다. 연구의 목적은 스펴 액추에이터의 안정적인 작동성 및 우수한 성능 확보를 하는데 있으며, 이를 위하여 스펴 액추에이터에서 발생할 수 있는 스틱 슬립, 누설 및 충격압력에 대해서 논의되었다. 연구를 통하여 본 연구에서 제안하는 2단 방식의 노치가 비교적 초기 충격압 저감과 질량유량의 속도 구배를 조절할 수 있음을 확인할 수 있었다.

일반적으로 이 연구는 많은 연구지들에 의해서 그 특성이 해석되어지고, 실험을 통하여 충격압력 발생 원인을 분석하고 있으나, 사용유량과 압력에 따라서 최적 노치형상을 제안할 수 있는 방법에 대해서 정량화 되어 있지 않다.

따라서, 본 연구자들은 질량유동 현상을 고려하여, 노치에 대한 보다 상세한 해석을 할 예정이며, 해석시에 모델을 제작하여 실험을 하고, 이론해석의 타당성을 증명할 예정이다.

무엇보다도 성능과 내구성이 우수한 스펴 액추에이터를 위하여 노치의 길이, 깊이, 폭, 형상 및 사용유량과 압력 그리고 조작 속도 등을 고려한 최적 설계기법이 논의되어야 할 것으로 사료된

다.

참고문헌

- (1) Herbert E. Merrit, 1967, "Hydraulic Control System", *John Wiley & Sons, Inc.*, pp. 76~79.
- (2) J. Montgomery, 1969, "Asymmetrical Lap and Other Non-linearities in Valve-controlled Hydraulic Actuators", *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, Vol. 183, Pt1, No. 33, pp. 663~682.
- (3) Kenji WATANABE, Kazunori TSUSHIMA, 1995, "Static Characteristics Analysis of Hybrid-type Servovalve", *Hydraulics & Pneumatics*, Vol. 26, No. 7, pp. 888~895.
- (4) C. R. Burrows, 1972, "Fluid Power Servomechanism", *Van Nostrand Reinhold Company*, pp. 47~54.
- (5) H. Lausch, S. Helduser, 2000, "Development and Optimization of Industrial Proportional Pressure-Relief Valves," *Proceedings of the 45th National Conference on Fluid Power*, pp 509-514.
- (6) G. Geibler., 2001, "Modellbildung Von Proportional-magneten mittels konzentrierter Parameter," *ölhydraulik und Pneumatik*, Vol. 45, Nr. 1, pp. 49-52.
- (7) John F. Blackburn, 1960, "Fluid Power Control", *The M.I.T Press*, pp. 181~183.
- (8) Frank Yeaple, 1990, "Fluid Power Design Handbook", *Marcel Dekker, Inc.*, pp. 609~622.