

계단형상에 의한 스팔밸브의 유동력 보상

신원규*, 최현영, 신효필, 문의준(국방과학연구소)

Flow force compensation by stepped spool

W. G. Shin, H. Y. Choi, H. P. Shin, E. J. Moon(ADD)

ABSTRACT

This paper is on the study of flow force compensating method of spool type valve. A simple flow force compensating method using stepped spool is presented in this paper. It is easy to manufacture stepped spool in the presented method because the shape of it is simple. The method has the merit that the size of valve need not be increased. Actuating force required for driving means of spool can be decreased by the compensation of flow force. The effect of presented method is predicted through CFD analysis. The prototypes of flow force compensating Direct Drive Servo-Valve where the result of CFD analysis is reflected are manufactured, and the measurement of flow force is carried out. It is known from the measurement that the effect of flow force compensation is very similar to from CFD analysis.

Key Words : flow force(유동력), flow force compensation(유동력보상), spool(스풀), spool type valve(스풀형태 밸브), Direct Drive Servo Valve(직접구동형 서보밸브), CFD(전산유체해석)

기호설명

- F_f =flow force
- C_d =discharging coefficient
- C_v =velocity coefficient
- A =area of metering orifice
- P_s =Supply pressure
- P_R =Return pressure
- F_A =force exerted on wall 'A' of spool land
- $F_{Supply \rightarrow C1}$ =the sum of force exerted on wall of each spool land for section of Supply→C1
- $F_{C2 \rightarrow Return}$ =the sum of force exerted on wall of each spool land for section of C2→Return
- d_o =diameter of spool land
- d_s =diameter of step for flow force compensation
- d_r =diameter of spool land

1. 서론

스풀을 움직여 유체의 유량을 제어하는 밸브에 있어 유체가 좁은 유로인 메터링 오리피스를 통과

할 때 고속의 유동이 발생하게 되고 이 때 스팔랜드 벽면에 작용하는 압력 힘의 불균형으로 인해 유동력이 발생한다. 밸브의 스팔에 축방향으로 작용하는 유동력은 밸브의 가제어성과 서보시스템에 큰 영향을 미친다. 스팔을 움직여서 밸브의 오리피스 유로면적을 증가시키고자 할 때 유동력은 밸브의 움직임에 반대하는 방향으로 작용하기 때문에 밸브의 안정성을 좌우하는 중요한 요소라고 볼 수 있다 유압증폭단이 없는 직접구동형 서보밸브의 경우 더욱 중요한 문제이다.

정상상태의 유동력의 크기를 보상하고자 하는 많은 방법들이 시도되어 왔다. 밸브의 스팔 및 슬리브의 형상 변경 또는 밸브의 구조변경을 통해 유동력의 크기를 부분적으로 없애거나 전부 제거하는 방법들이 제시되어 왔으나 밸브에 실제로 적용하기 힘든 경우가 많았다. Guo Maoying 은 2 차원 해석모델에 대해 경계요소법을 이용하여 수치적으로 유동력의 크기와 보상방법에 대해 연구하였다[1]. Tetsuhiko Tsukiji 는 [1]에서와 같은 문제에 대해 유동장가시화 방법을 이용하여 실험적으로 연구하였다[2]. Clark 는 radial-hole orifice 를 이용한 유동력 보상방법을 제시하였다[3]. Fukushima 는 오리피스를 통과한

유동이 스플랜드벽면에 재부착하게 될 때 유동력 감소가 가능함을 나타내었다[4]. R.Miller 는 스플로드의 기하학적 형상을 변경시켜 유동력을 보상하였다. Wang 은 실험과 수치적인 방법을 이용하여 유동력 보상방법을 제시하였다[6],[7]. U.S. Patent 4,220,178 은 [5]와 유사하게 스플로드의 기하학적 형상을 변경시키는 방법을 제시하였다[8]. U.S. Patent 3,123,335 는 언더컷 노치를 이용한 유동력보상방법을 나타내었다[9]. U.S. Patent 5,944,042 는 스플랜드에 환형 흠을 이용하여 유동을 강제로 재순환시켜 유동력을 보상하였다[10]. U.S. Patent ,911,245 는 two-position valve(또는 on-off valve)에 적용될 수 있는 유동력 보상방법을 제시하였다[11].

본 논문에서는 밸브의 크기를 증가시키지 않으면서 밸브에 실제로 적용할 수 있는 유동력 보상 방법을 제안하였다. 전산유체해석(CFD)을 통해 유동력 감소효과 예측 및 최적화를 시도하고 유동력 측정시험을 통해 유동력 감소효과를 검증하였다.

2. 유동력 보상

2.1 스플에 작용하는 유동력

정상상태 유동력은 각각의 스플랜드에 작용하는 압력힘의 크기와 같으며 (1)과 같이 메터링 오리피스의 면적, 즉 유량의 크기 및 유로의 압력차에 비례한다[14].

$$F_f = 2C_d C_v A(P_s - P_R) \quad (1)$$

2.1.1 일반적인 유동력 비보상밸브

Fig.1 은 유동력 보상을 하지 않는 3-land 4-way 형태 밸브에서 스플과 슬리브가 조합되었을 때의 단면을 나타내고 있다. 유동력의 크기는 스플의 랜드벽면에 축방향으로 작용하는 압력힘의 합으로 표현되며 (2)와 같다. Fig.2 에서 화살표는 유동의 방향을 나타내고 있다. 유체가 고압의 Supply 로부터 들어와서 좁은 오리피스를 통과하게 되면서 고속의 유체가 발생하게 되며 Return 측으로 빠져 나간다. 베르누이 법칙에 따라 유동이 빠른 스플 랜드 벽면(A, D)에 작용하는 압력의 크기는 작으나 스플 랜드 벽면(C, E)에 작용하는 압력은 크다. 따라서 유동력은 밸브의 오리피스를 닫는 방향으로 작용한다.

$$F_f = -F_A + F_C - F_D + F_E \quad (2)$$

2.1.2 제안된 유동력 보상밸브

Fig.2 는 본 논문에서 제안하는 유동력 보상을 위한 계단형상 스플과 슬리브가 조합되었을 때의 단면이다. Supply 측에 있는 스플랜드를 계단형상으로 만들어 좁은 오리피스 면적을 통과한 후 발생하

는 고속의 유체가 계단형상의 윗면에 부딪히게 한다. 이 때 A' 벽면의 주변에는 유동이 발생하지 않으므로 베르누이 법칙에 따라 Fig.2 에 비해 압력이 커지게 된다. 스플에 작용하는 유동력의 크기는 (3)과 같다. (3)에서와 같이 A' 벽면에 작용하는 힘($=F_{A'}$)만큼 유동력이 감소하게 된다. 스플이 반대 방향으로 움직인다면 D' 벽면에 작용하는 힘($F_{D'}$)만큼 유동력이 감소하게 된다.

$$F_f = -F_A - F_{A'} + F_C + F_{C'} - F_D - F_{D'} + F_E + F_{E'} \quad (3)$$

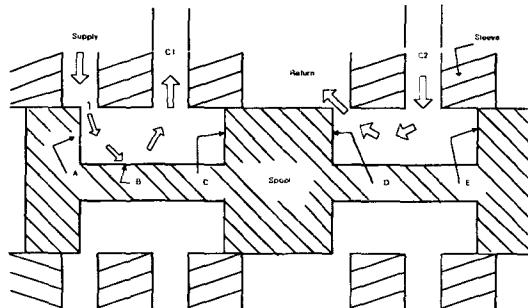


Fig. 1 A schematic of the assembly of sleeve and conventional spool

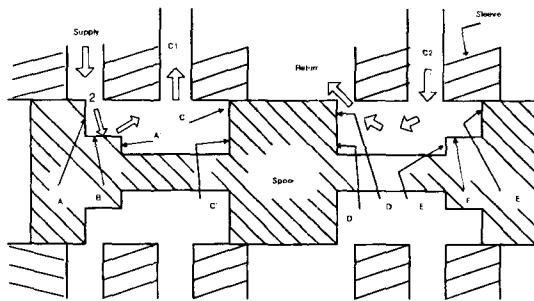


Fig. 2 A schematic of the assembly of sleeve and spool suggested for flow force compensation

2.2 CFD 를 통한 유동력 크기 예측

본 절에서는 CFD 를 통해 스플 형상 및 세부 치수에 따른 유동력의 크기 변화에 대한 경향을 살펴보고 2.1.2 절에서 제안한 유동력 보상 스플 형상을 최적화하였다.

2.2.1 스플밸브 해석방법

제안된 계단형상 스플을 이용한 유동력 보상방법의 효과를 예측하기 위해서 CFD S/W 인 FLUENT 를 이용하였다. 본 논문에서 제작된 직접구동형 서보밸브는 3-land 4-way 의 구조를 갖고 있으며 슬리브에는 Supply, C1, C2, Return 측에 각각 6 개의 슬롯

이 있으며 스팔의 중심 축방향에 대해 대칭이다. 이러한 대칭성을 이용하여 스팔, 슬리브 부에 대해 1/6 모델을 만들어 해석을 용이하게 하였다. Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7에서 모델의 1/6 단면은 symmetry 조건으로 하였다. C1과 C2의 압력조건은 유체의 비압축성으로 인해 같다고 가정할 수 있으므로 유체의 흐름을 Supply→C1인 부분과 C2→Return인 부분으로 나누어 해석을 수행하여 각각의 스팔 랜드 벽면에 작용하는 압력힘의 크기를 합하여 유동력을 계산하였다. 유동력의 크기는 (4)와 같다.

$$F_f = F_{\text{Supply} \rightarrow C1} + F_{C2 \rightarrow \text{Return}} \quad (4)$$

2.2.2 CFD를 통한 스팔 형상에 따른 유동력 크기의 변화

Fig. 3은 계단형상 스팔의 주요한 설계 변수를 나타내고 있다. 스팔밸브에서 스팔 형상과 관련된 설계변수는 유동력 크기 및 유량에 영향을 줄 수 있다. [14]는 스팔밸브에서 유량포화 현상을 방지하기 위해 밸브의 모든 유로면적 메터링 오리피스 면적의 4 배 이상을 유지하는 것이 좋다고 언급하였다. Table 1의 CASE 1~4 모두 $do=9.2\text{mm}$ 다만 CASE 1의 dr은 메터링 오리피스 면적의 4 배를 만족시키는 값이며 유동력 비보상 직접 구동형 서보밸브는 CASE 1을 기준으로 설계되었다. CASE 2는 본 논문에서 제안하는 유동력 보상밸브에 있어 계단형상 스팔의 치수를 나타낸 것이다. Table 1은 CFD를 통해 유동이 Supply→C1 일 때 밸브가 최대로 열린 상태에서 유동력의 크기 및 CASE 1에 대한 상대적인 유량의 증감을 나타내었다. 유동력의 크기는 CASE 3, CASE 4, CASE 1, CASE 2의 순서로 크다. dr이 가장 작은 CASE 3의 경우 유동력이 상대적으로 많이 크며 CASE 2에서와 같이 스팔의 형상이 계단형상인 경우 유동력의 크기가 가장 작았다. 계단 형상 스팔을 이용하면 2.1.2 절에서 언급한 바와 같이 유동력 감소효과를 보임을 알 수 있다. 유량은 CASE 3, CASE 1, CASE 4, CASE 2의 순서로 크다. dr이 클수록 유로면적이 작아지기 때문에 흐르는 유량이 약간 줄어들었다.

Fig. 4는 유동력 비보상 밸브(CASE 1)에서 Supply 측으로부터 유체가 들어와서 C1 측으로 빠져나갈 때의 밸브 내부의 속도장을 나타내고 있다. Fig. 5는 계단 형상 스팔을 이용한 유동력 보상밸브에서 오리피스를 통과한 고속의 유동이 계단형상의 윗면을 부딪히고 나가게 되면서 Fig. 3의 A'의 주위에서 유동이 거의 생기지 않음을 알 수 있으며 이 부근에 작용하는 압력은 Fig. 3의 C' 벽면에 작용하는 압력과 거의 같아지게 된다. 따라서 유동력 보

상효과가 생긴다고 할 수 있다. Table 2는 CFD를 통해 CASE 1, CASE 2의 경우에 대해 계단 형상 스팔을 이용하기 전후의 유동력 크기를 나타내고 있으며 유동력의 크기는 24%정도 감소하는 것으로 나타났다.

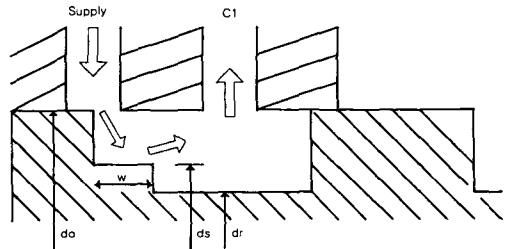


Fig. 3 A schematic that shows chief dimensions of spool

Table 1 Magnitude of flow force according to various dimension of spool(Supply→C1)

	dr (mm)	ds (mm)	w (mm)	Flow force (N)	Flow rate
CASE 1	4.6	-	-	35.1	-
CASE 2	3.0	5.4	1.9	13.2	-1.28%
CASE 3	3.0	-	-	73.6	+0.2%
CASE 4	5.4	-	-	49.0	-1.09%

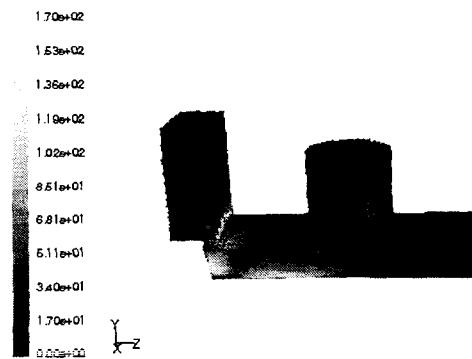


Fig. 4 Velocity Contour of CASE 1(Supply→C1)

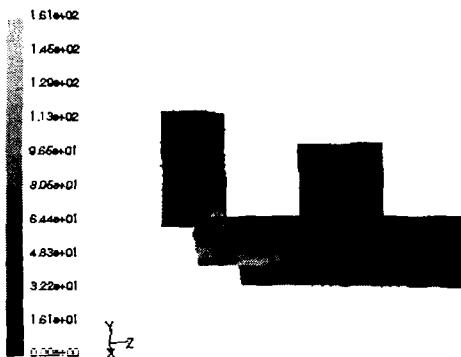


Fig. 5 Velocity Contour of CASE 2(Supply→C1)

Table 2 Effect of flow force compensation

유동력 보상	보상전 (N)	보상후 (N)
$F_{Supply \rightarrow C1}$	35.1	13.2
$F_{C2 \rightarrow Return}$	57.3	57.3
Flow force	92.8	70.5

2.2.3 CFD 를 통한 계단형상 스풀의 최적화

계단 형상 스풀의 주요 설계 변수는 너비(w)와 높이($=(ds-dr)/2$)이다. 유동력 크기의 최소화를 위해 CFD 를 통해서 너비와 높이를 최적화하였다. Fig. 6 은 계단형상 스풀 차수에 따른 유동력 크기($=F_{Supply \rightarrow C1}$)를 나타내고 있다.

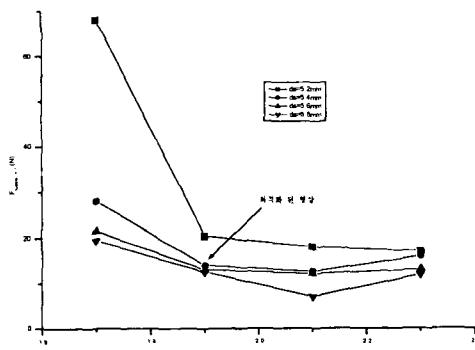


Fig. 6 Optimization of dimension of stepped spool

너비가 너무 작으면 $w=1.7\text{mm}$ 인 경우와 같이 메터링 오리피스를 통과한 제트가 계단 형상의 윗면에 부딪히지 않고 C1 으로 빠져 나갈 수 있어 유동력 감소효과가 없다. 계단 형상의 너비가 최적점 보다 커질수록 유동력의 크기는 증가하게 되는 경향을 얻을 수 있었다 계단 형상의 너비는 이러한 관점에서 최적화되어질 수 있다. 계단형상의 높이

가 커지면 유로면적이 작아지기 때문에 유량포화가 발생하여 밸브가 훌릴 수 있는 최대유량에 제한이 가해질 수 있다. $d_s=5.6\text{mm}$, $d_s=5.8\text{mm}$ 인 경우 유량포화 현상이 나타났다.

3. 유동력 측정시험

CASE 1 의 치수를 갖는 스풀이 조립되어진 유동력 비보상밸브와 CASE 2 의 치수를 갖는 계단형상 스풀을 이용한 유동력 보상밸브의 시제품을 각각 제작하였고 유동력 효과를 검증하기 위해 유동력 측정시험을 수행하였다.

3.1 유동력 측정 시험장치

Fig. 7 은 유동력 감소효과를 검증하기 위한 유동력 측정시험장치이다. 유동력 측정시험시 밸브 안에 있는 모터의 회전자 및 고정자와 모터축을 제거하였고 가늘고 긴 봉 형태의 퀄(quill)을 마이크로미터와 스풀 사이에 연결하여 스풀의 양방향 움직임에 대한 유동력 측정이 가능하게 하였다. 퀄을 이용하면 정확한 축방향 힘의 측정이 가능하다. 시험 중 밸브 몸체의 양단 덮개를 제거하여 스풀에 배압이 걸리지 않도록 하였기 때문에 유체로 인한 순수한 유동력의 크기만 측정할 수 있었다.

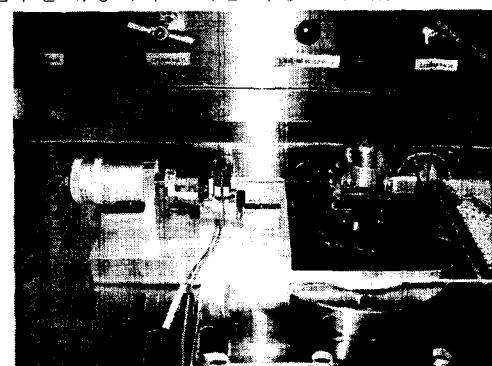


Fig. 8 Experiment for flow force measurement

3.2 유동력 측정 시험결과

Fig. 8 은 유동력 측정시험결과를 나타내고 있다. 유동력 측정 결과 스풀을 양방향으로 움직이는 과정 중에 약간의 히스테리시스가 나타나긴 했지만 히스테리시스의 크기가 유동력 크기에 비해 매우 작은 값으로 나타났기 때문에 무시할 수 있다. 유동력의 크기는 유량의 크기에 비례함을 알 수 있으며 유량이 흐르지 않는 중립 위치 부근을 제외한 모든 구간에서 유동력이 감소함을 알 수 있다. 최대 스트로크에서 유동력 크기가 약간 줄어드는 결과가 나타났기 때문에 유동력 감소정도는 12.5%정도로 표 2 에서보다 약간 작으나 전체적인 감소정도

는 20%전후로 표 2에서 예측된 값과 비슷하다. 시험 결과 계단 형상 스플을 이용한 유동력 보상밸브에서는 유량포화 현상이 나타나지 않았다.

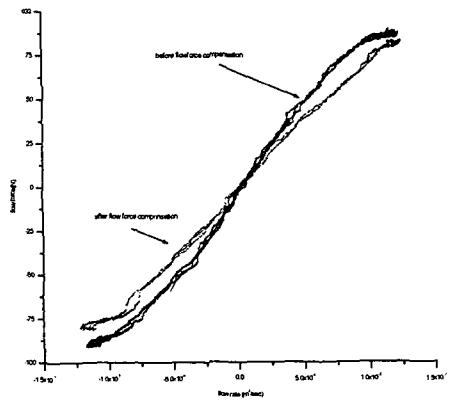


Fig. 9 The result of flow force measurement

4. 결론

본 논문에서는 CFD를 이용하여 스플 밸브에 있어 스플의 주요 설계 변수에 따른 유동력의 크기 및 유량 크기를 예측하였고 스플 형상 변경을 통한 유동력 보상방법을 제안하였다. 3-land 4-way 직접구동형 서보밸브의 유동력 비보상형과 유동력 보상형의 시제품을 각각 제작하여 유동력 측정시험을 하였다. 전산유체해석을 통해 예측된 유동력 감소정도와 시제품을 각각 만들어 유동력 감소효과를 비교해 본 결과 전산유체해석을 통해 예측된 결과에 비해 시험결과가 유동력 감소정도가 더 작았지만 전체적인 경향은 일치하였다. 본 논문에서 제안된 계단 형상 스플을 이용한 유동력 보상방법은 형상이 간단하기 때문에 가공성이 좋고 밸브의 크기를 증가시키지 않는다는 장점이 있으며 적용하기가 쉽다. 본 논문에서 제안된 유동력 보상방법은 다른 형태의 스플밸브에도 적용이 가능하다.

후기

본 연구는 민군겸용기술사업의 “고성능유압서보밸브개발” 과제로 수행되었다.

참고문헌

1. Guo Maoying, Kazuno Nakano, "Numerical Study for the Compensation of Axial Flow Force in a Spool Valve by Boundary Element Method", Proceedings of the 2nd International Conference on Fluid Power Transmission and Control, 1989.
2. Tetsuhiro Tsukiji, Koji Takahash, "A Study on the Axial flow forces in a spool valve Using Flow Visualization and image Processing Technique", Proceedings of the 2nd International Conference on Fluid Power Transmission and Control, 1989.
3. Clark R.N., "Compensation of Steady-State Flow Forces in Spool-Type Hydraulic Valves", Trans. ASME, Vol.79, No.8, pp.1784-1788, 1957.
4. Fukushima T., "Reattachment of the Jet in Spool Valves", J. Japan Hydraulics & Pneumatics Society (in Japanese), Vol.5, No.3, pp. 127-133, 1974.
5. R. Miller, Y.Fujii, "CFD Simulation of Steady-State Flow Forces on Spool-Type Hydraulic Valves", SAE TECHNICAL PAPER SERIES 1999-01-1058, Ford Motor Co.
6. Wang Linxiang, Chen Ying, "The Experimental Study on the Fluid Flow in a Spool Valve", New Achievements in Fluid Power Engineering, world Academic Press, pp.6, 1997.
7. Wang Linxiang, Chen Ying, "Numerical Study on the Axial Flow Force of a Spool Valve", Fluid Power Systems and Technology, Vol.5, 1998.
8. Jackson, "Momentum Balance Spool", U.S. Patent 4,220,178, 1980.
9. M. C. Darling, "Stabilized Piston Valve", U.S. Patent, 3,123,335, 1961.
10. Takahashi et al., "Flow Force Compensating Method and Flow Control Valve of Spool Type Using the Same Method", U.S. Patent 5,944,042, 1999.
11. J. Roger Weber, "Flow Force Spool Valve", U.S. Patent 5,911,245, 1999.
12. John F. Blackburn, "Fluid Power Control", M.I.T, 1960.
13. D. McCloy, "Control of Fluid Power: 2nd(Revised) Edition", Ellis Horwood Limited, 1980.
14. Herbert E. Merritt, "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, 1967.
15. Kazuo Nakano, "Experimental Study for the Compensation of Axial Flow Force in a Spool Valve", The Journal of Fluid Control, Vol.21 Issue 2-3, 1987.
16. FLUENT 5.5 Manuals, FLUENT.INC.
17. "Aerospace Information Report 1362", SAE., 1975.