

Groove 단면형상에 따른 유압 Spool Valve의 윤활해석

박태조[†] · 황윤건^{*}

경상대학교 기계항공공학부·공학연구원, *경상대학교 대학원 기계항공공학부

Lubrication Analysis of Hydraulic Spool Valve with Groove Cross Sectional Shapes

Tae-Jo Park[†] and Yun-Geon Hwang^{*}

School of Mechanical & Aerospace Engineering, ERI, Gyeongsang National University

*Graduate School, Dept. of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

(Received December 8, 2008; Revised December 30, 2009; Accepted January 7, 2009)

Abstract – The spools in most hydraulic spool type control valve have several circumferential grooves to prevent well known hydraulic locking problems which result in high friction force and excessive wear. In this paper, a commercial computational fluid dynamics (CFD) code, FLUENT is used to investigate the flow and lubrication characteristics of grooved hydraulic spool valve. The stream lines and pressure distributions are obtained for various groove cross sectional shapes and film thicknesses. The stream lines are highly affected by groove cross sectional shape but pressure distributions mainly depend on the film shape and its magnitude. Therefore the numerical method adopted in this paper and results can be use in designing of various grooved spool valve.

Key words – spool valve, groove, CFD(Computational Fluid Dynamics), FLUENT, vortex

1. 서 론

Fig. 1에 나타난 굴삭기용 MCV(Multiple control valve)는 유압유(Hydraulic oil)의 유동방향 등을 내부에 조립한 여러개의 스푸올(Spool)을 조작하여 제어함으로써 굴삭작업을 수행케 하는 핵심부품이다. 이때, Fig. 2에 나타난 것과 같은 스푸올에는 여러개의 그루브(Groove)를 설계하여 유체고착(Hydraulic locking) 현상을 방지하고 있다. 즉, 크기가 보통 10 μm 이하인 스푸올과 슬리브(Sleeve) 사이의 아주 작은 간극(Clearance)에서는 유압유의 박막유동(Thin film flow)에 의해서 형성되는 원주방향으로의 비대칭적인 압력분포가 스푸올에 반경방향의 힘인 측력(Lateral force)으로 작용한다. 유체고착은 이러한 측력이 스푸올을 슬리브 내벽쪽으로 편심되게 작용하여 마찰력을 증가시키므로 스푸올 밸브의 제

어가 어렵게 되는 상태를 말한다.

지금까지 유체고착문제의 해결과 스푸올 밸브의 성능향상을 위하여 많은 연구가 시도되었다[1-10]. Mannam[3]은 그루브의 수를 많게 할수록 측력은 급격하게 감소할 뿐만 아니라 이의 크기를 최소로 하는 각 그루브의 위치가 존재함을 정지한 스푸올 밸브에서 실험적으로 규명하였다. Lee & Park[6]은 운동하는 테이퍼진(Tapered) 스푸올에 여러개의 그루브가 있는 경우에 대한 이론해석을 처음으로 수행하여 참고문헌[3]의 실험결과와 일치할 뿐만 아니라 이 경우에는 1차원 레이놀즈 방정식으로도 정확한 해석이 가능함을 밝혔다. Milani[9]는 2차원 레이놀즈 방정식을 수치해석하고 그루브 내에서의 압력을 측정하여 그루브의 효과를 조사하였다. 한편, 박태조[10]는 유압유의 압력에 따른 점도변화를 고려한 고압용 스푸올의 최적 그루브 설계방법을 제시하고 이의 윤활특성을 해석하였다. 이상의 연구결과, 유체고착을 방지하는 가장 효과적인 방법은 스푸

[†]주저자 · 책임저자 : tjpark@gnu.ac.kr

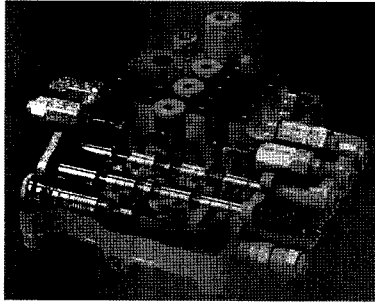


Fig. 1. Sectional view of a MCV.

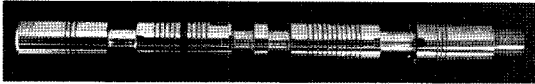


Fig. 2. Spool with multiple grooves.

울에 다수의 그루브를 설계하는 것과 테이퍼진 (Tapered) 형상으로 제작하는 것이다.

하지만 지금까지의 많은 연구에도 불구하고 그루브의 단면형상과 크기 등이 스푸울 밸브의 유회특성에 미치는 영향을 조사한 연구는 전무한 실정이다. 즉, 그루브는 축력이 고착력(Locking force)으로 작용하는 경우에 이를 완화시키는 것으로만 이해되고 있기 때문에 그루브의 폭과 깊이는 유막두께보다 아주 크게 설계하고 있다. 또한 간극에서의 유동을 박막유동으로 해석하고 있지만 그루브 내에서 이러한 가정을 적용하기에는 한계가 있다. 따라서, 다수의 그루브가 있는 스푸울 밸브의 유회특성을 정확하게 규명하기 위해서는 점성유체에 대한 운동방정식인 Navier-Stokes 방정식과 함께 연속방정식을 동시에 해석해야 되며, 이를 위해서는 전산유체역학(CFD, Computational fluid dynamics) 해석방법을 채용하는 것이 유리하다.

이에 본 논문에서는 유압 스푸울 밸브의 성능을 향상시키기 위한 연구의 일환으로 그루브의 단면형상과 유막두께 변화에 따른 그루브 내에서의 유동 및 유회특성을 열·유체해석 상용 프로그램인 FLUENT[11]를 사용하여 상세하게 조사하고자 한다.

2. 해석 방법

본 논문에서는 스푸울과 슬리브 사이의 유막과 그루브 내에서의 유압유 유동을 비압축성, 정상상태, 층류 유동으로 가정하였다 이 경우, 유동을 지배하는 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식은 각각 다음의 식 (1)과

식 (2)으로 표현된다.

$$\rho(U \cdot \nabla)U = -\nabla p + \mu \nabla^2 U \tag{1}$$

$$\nabla \cdot U = 0 \tag{2}$$

Fig. 3은 여러개의 그루브가 있는 스푸울 밸브를 개략적으로 나타낸 그림으로 테이퍼진 스푸울이 슬리브내에서 e만큼 편심되어 있다. 이때, 박막유동이 발생하는 스푸울과 슬리브 사이의 유막두께 h의 크기는 실제의 경우에 수 μm 정도이며, 이는 스푸울의 직경, 그루브의 폭과 깊이에 비하여 아주 작은 크기이다. 따라서, 스푸울의 원주방향으로 여러개의 그루브가 있는 경우에는 그루브 내에서의 유압유 유동을 2차원 점성유동으로 단순화할 수 있다[6].

Fig. 4는 본 논문에서 그루브 내에서의 유동특성을 해석하기 위하여 사용한 해석모델로 길이가 2L인 스푸울 랜드(Land)의 중앙부에는 폭과 깊이가 각각 B와 H인 그루브가 설계되어 있다. 이때, 랜드부 양단에서의 유막두께와 유체압력은 각각 h_0, P_0 와 h_n, P_n 이다.

본 논문에서는 그루브 단면형상에 따른 유동 및 유회특성을 조사하기 위하여 Fig. 5에 나타난 것과 같이 사각형, U자형 및 정삼각형의 3가지를 기본형상으로 채용하고 FLUENT의 부속프로그램인 Gambit을 이용하여

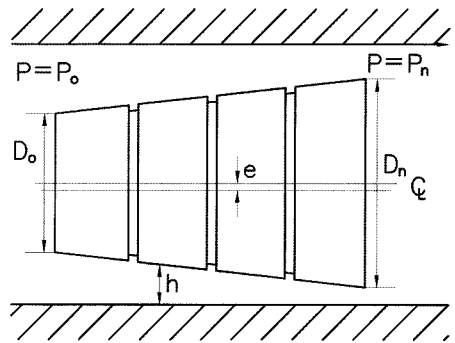


Fig. 3. Schematic of multi-grooved spool.

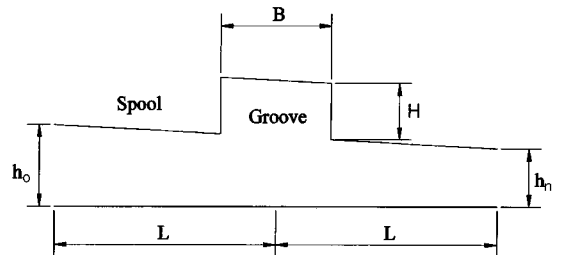


Fig. 4. Numerical model of grooved spool.

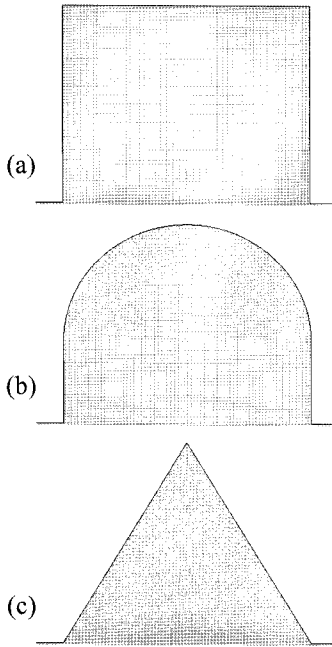


Fig. 5. Groove shape and grid system used in numerical analysis. (a) Rectangle, (b) U shape, (c) Equilateral triangle

격자계를 구성하였다. 수치해석에 사용한 격자수는 최대 25,000개 정도이며, 유압유의 밀도와 점도는 각각 962 kg/m^3 , $0.013468 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 이다. 한편, 전 해석과정에서 $L=1 \text{ mm}$, $P_o=5 \text{ MPa}$, $P_n=0 \text{ MPa}$ 로 고정하였다[15].

3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 스푸울 밸브의 그루브 내에서의 유동특성이 유회특성에 미치는 영향을 중점적으로 조사하기 위하여 Fig. 4에서 $B=0.3 \text{ mm}$, $H/B=0.866$, $h_o=h_n=4 \mu\text{m}$ 를 기준조건으로 사용하여 해석결과를 제시하였다.

3-1. 그루브 깊이의 영향

Fig. 6은 그루브 깊이 H에 따른 그루브 내에서의 유선의 분포를 나타낸 그림으로 색이 연할수록 상대적으로 유속이 빠르다. Fig. 6(a)과 같이 유막두께에 비하여 그루브 깊이가 2배(유막두께비로는 3배)인 경우에는 그루브 내의 평균유속은 1/3로 감소할 것이다. 따라서, 그루브 깊이가 깊어질수록 그루브 내에서의 유속은 급격하게 감소하며, 이러한 결과로 Fig. 7에 나타난 것과 같이 그루브 내에서는 유동방향의 유체압력(정압,

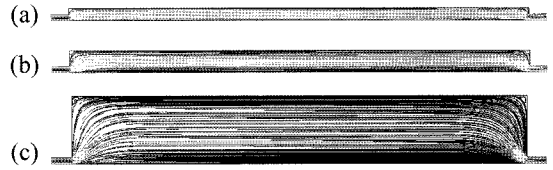


Fig. 6. Stream lines. (a) $H=4 \mu\text{m}$, (b) $H=10 \mu\text{m}$, (c) $H=40 \mu\text{m}$

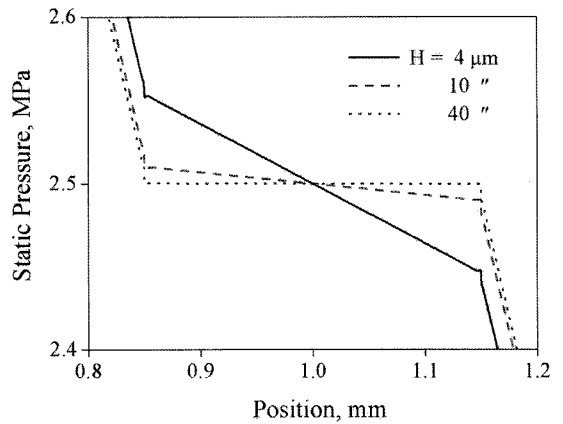


Fig. 7. Pressure distribution with groove depth.

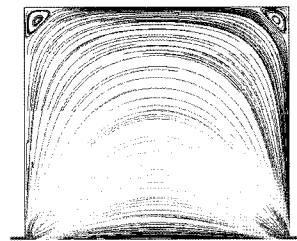


Fig. 8. Stream lines. $B=0.3 \text{ mm}$, $H/B=0.866$, $h_o=h_n=4 \mu\text{m}$

Hydrostatic pressure)은 일정할 것으로 추정된다. 보통 사용되는 스푸울 밸브에서 유막두께는 수 μm 정도임에 반하여 그루브의 깊이는 최소 0.1 mm 이상이다. 따라서, 이후의 제시할 결과는 그루브 깊이가 최소 0.25 mm 인 경우를 대상으로 하였다. 참고로, 유막내에서의 최대유속과 레이놀즈수는 각각 0.4338 m/s , 0.083 이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 기준조건에서의 유선과 그루브 내의 압력분포를 각각 나타낸 결과이다. 여기서, Fig. 8은 그루브 깊이를 제외한 나머지 조건은 Fig. 6과 동일하지만 결과비교를 위하여 폭을 축소하여 나타내었다. 좌측 렌드부를 통과한 유체는 Fig. 6(c)인 경우 보다 깊이가 아주 깊은 ($304 \mu\text{m}$) 그루브 내로 분출되면

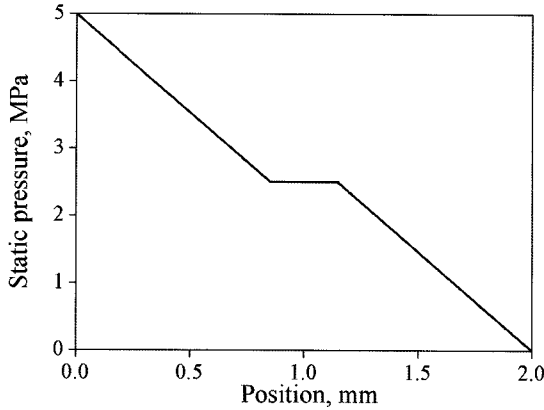


Fig. 9. Pressure distribution. $B=0.3$ mm, $H/B=0.866$, $h_o=h_n=4$ μ m

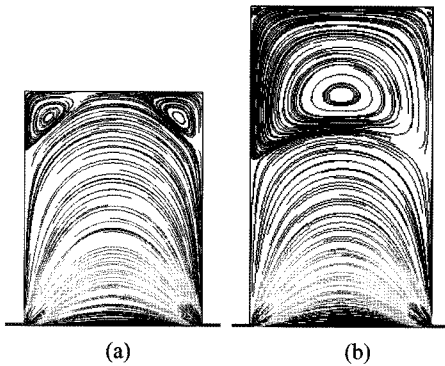


Fig. 10. Effect of groove depth on vortex shape. (a) $H/B=1.5$, (b) $H/B=2$

서 속도는 급속하게 감소하지만 우측 랜드부에서는 다시 빨라진다. 특히, 그루브 상단의 양쪽 모서리에서는 작은 크기의 Eddy가 발생하고 있다. 한편, 그루브 내에서는 압력이 일정하지만 유막두께가 동일하므로 랜드부에서는 직선적으로 변한다.

Fig. 10은 그루브 깊이가 다른 경우에 대한 유선을 비교한 것으로 그루브가 깊어질수록 Fig. 8에서 관찰된 모서리부 Eddy가 점차 성장하여 와류(Vortex)로 되었다[12-13]. 만일 그루브가 더욱 깊어지면 와류의 수는 추가될 것이며[14], 이는 압력 분포와 크기에는 영향을 미치지 않지만 유압유의 온도를 상승시키는 원인으로 작용할 것으로 예상된다.

3-2. 그루브 형상의 영향

Fig. 11은 그루브 단면형상이 다른 경우에 대한 유선의 분포를 나타낸 결과이다. Fig. 8의 사각형 Fig.

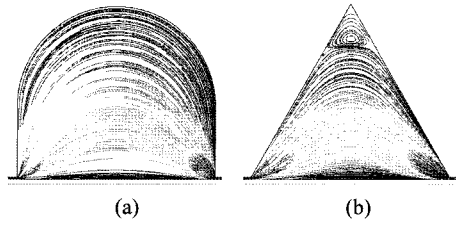


Fig. 11. Stream lines. (a) U shape, (b) Equilateral triangle

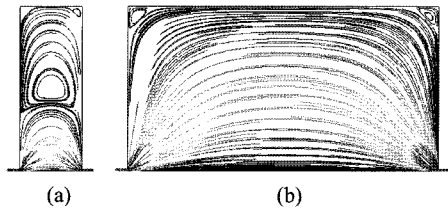


Fig. 12. Stream lines for rectangular groove. (a) $B=0.1$ mm, (b) $B=0.5$ mm

11(b)의 삼각형인 경우에는 Eddy가 발생하지만 그루브 내에서 모서리 부분이 없는 U자형에서는 Eddy가 관찰되지 않고 있다. 따라서, 그루브 단면이 유선형일수록 Eddy의 발생이 억제될 것으로 예상된다.

3-3. 그루브 깊이/폭 비의 영향

그루브 깊이는 동일하지만 폭이 다른 경우의 사각형과 삼각형 그루브에 대한 유선의 분포를 Fig. 12와 Fig. 13에 각각 나타내었다. 그루브 깊이 대 폭의 비(H/B)가 증가하면 (그루브 폭이 좁아지면) Fig. 10에서와 같이 와류가 발생하였으며, 이러한 경향은 U자형인 경우에서도 동일하였다. 즉, 그루브의 깊이/폭 비가 대략 2.5 이상인 경우에는 단면형상에 무관하게 와류가 발생하였다. Fig. 14는 이들의 경우에 대한 압력분포를 나타낸 것으로 Fig. 6에서의 결과와 같이 유막두께에 비하여 그루브의 깊이가 아주 크기 때문에 단면형상과 깊이/폭 비에 관계없이 그루브 내에서의 압력은 동일하였다.

3-4. 그루브 크기의 영향

Fig. 15는 그루브 깊이/폭의 비가 같은 삼각형 그루브에서 그루브 크기가 다른 경우에 대한 유선을 비교하여 나타낸 결과이다. 그루브의 크기에 따라 그루브 내에서의 속도는 차이가 있지만 유선의 분포는 Fig. 11(b)와 동일하였다. 참고로, 사각형과 U자형인 경우도 Fig. 6과 Fig. 10(a)와 동일한 분포를 보였으며, 압력

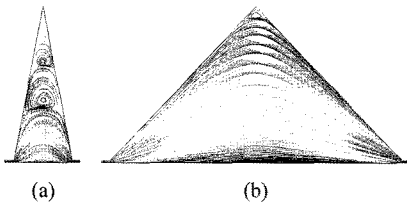


Fig. 13. Stream lines for triangular groove. (a) $B=0.1$ mm, (b) $B=0.5$ mm

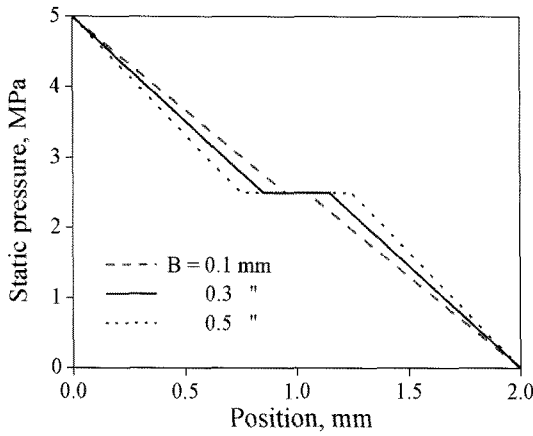


Fig. 14. Pressure distribution with groove width

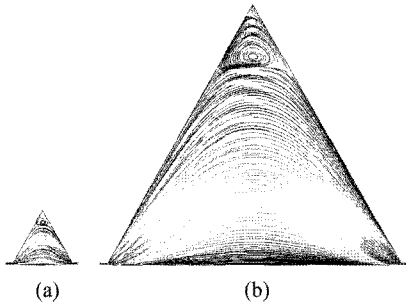


Fig. 15. Stream lines for triangular groove with equal shape. (a) $B=0.1$ mm, (b) $B=0.5$ mm

분포는 모두 Fig. 14와 일치하였다.

3-5. 유막형상의 영향

여기부터는 지금까지의 $h_o=h_n=4\mu\text{m}$ 와는 달리 유막 두께가 일정하지 않은 경우에 대한 해석결과를 나타내었다.

Fig. 16은 유막두께가 그루브 중앙부에서는 $4\mu\text{m}$ 로 동일하지만 입출구부에서는 크기가 서로 반대인 경우의

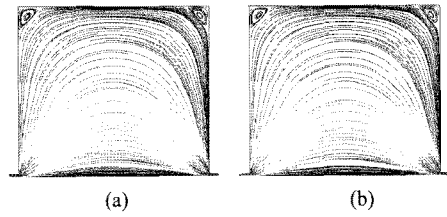


Fig. 16. Stream lines. (a) $h_o=5\mu\text{m}$, $h_n=3\mu\text{m}$, (b) $h_o=3\mu\text{m}$, $h_n=5\mu\text{m}$,

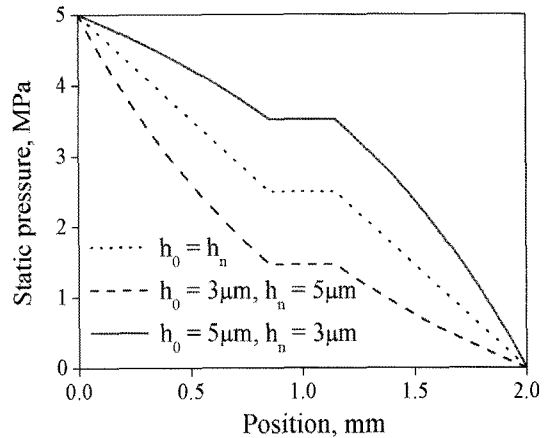


Fig. 17. Pressure distribution

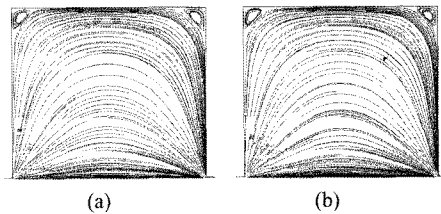


Fig. 18. Stream lines. (a) $h_o=3\mu\text{m}$, $h_n=1\mu\text{m}$, (b) $h_o=1\mu\text{m}$, $h_n=3\mu\text{m}$

유선분포를 나타낸 것으로 결과는 거의 동일하다. 하지만 미세한 유막두께 차이에도 불구하고 그루브 내에서의 압력분포는 Fig. 17에 나타낸 것과 같이 아주 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 고압측으로 유막이 커질수록 유막과 그루브 내에서는 높은 압력이 작용하고 있다.

Fig. 18에는 Fig. 16에서의 유막두께가 전체적으로 $2\mu\text{m}$ 감소한 경우의 결과로 유선의 분포는 거의 같지만 유속은 감소하였다. 각각의 조건에 대한 압력분포를 Fig. 16의 결과와 비교하여 Fig. 19와 Fig. 20에 나타내었다. 유막두께가 작아지더라도 저압측에 비해

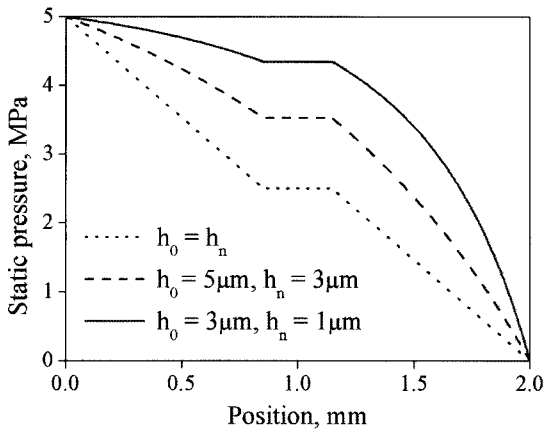


Fig. 19. Pressure distribution.

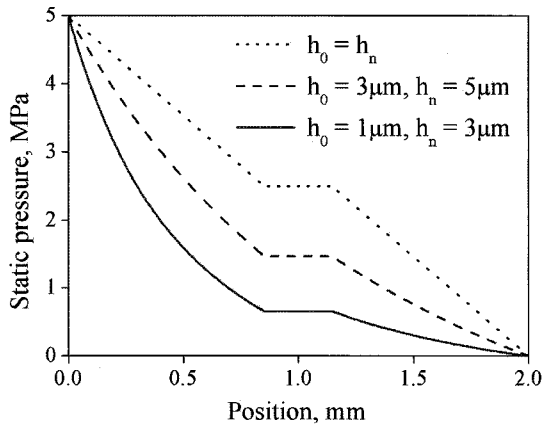


Fig. 20. Pressure distribution.

여 고압축이 크다면 유막과 그루브 내에서의 압력은 더욱 크게 된다. 따라서, 슬리브내에서 편심된 스푸울 (Fig. 3 참조)에 작용하는 압력분포가 Fig. 19와 같은 경우에는 중심력(Centering force)이 작용하지만 반대로 Fig. 20에서는 고찰력으로 작용하게 된다.

이상의 고찰에서, 스푸울 밸브의 스푸울과 슬리브 사이에서는 유막두께가 아주 작기 때문에 극히 느린 점성유동이 발생하였다. 이 결과, 원주방향으로 비대칭적인 압력분포로 인하여 유체고착이 쉽게 발생할 수 있다. 만일, 유막두께보다 몇배 정도의 깊이를 가지는 그루브를 설계하면 유체고착을 크게 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 그루브의 단면형상과 깊이는 압력분포에 거의 영향을 미치지 않지만 유동특성은 이들의 영향을 아주 크게 받는다. 이와는 반대로 유막의 크기와 형상은 그루브 내의 유동특성에 거의 영향을 미치지 않지

만 압력분포는 아주 크게 변화시킨다. 따라서, 스푸울의 운동까지 고려한 다양한 운전조건과 그루브 형상과 배치에 따른 스푸울 밸브의 유희특성을 조사하기 위해서는 많은 추가연구가 요구된다.

4. 결 론

본 논문에서는 유압 스푸울 밸브의 성능향상을 위한 연구의 일환으로 그루브 형상과 유막두께가 그루브 내에서의 유동 및 유희 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 열·유체해석 상용프로그램인 FLUENT를 사용하였다. 이 결과, 그루브 깊이가 유막두께보다 몇 배 이상일 경우에는 그루브 내의 압력분포는 단면형상의 영향을 거의 받지 않지만 유동특성은 아주 크게 변화하였다. 특히, 그루브 깊이/폭 비가 증가하면 큰 와류가 발생하였다. 이와는 반대로 유막의 크기와 형상은 그루브 내의 유동특성에 거의 영향을 미치지 않지만 압력분포는 아주 크게 변화시켰다. 따라서, 본 논문의 해석방법과 결과는 스푸울 밸브의 그루브 설계에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대되며, 추가적인 연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 2단계 BK21사업과 두산모트롤(주)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Meritt, H. E., "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, 1967.
2. Sweeney, D. C., "Preliminary Investigation of Hydraulic Lock", *Engineering*, Vol. 172, pp. 513-516, 1951.
3. Mannam, J., "Further Aspects of Hydraulic Lock", *Proc. of Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 173, pp. 699-716, 1959.
4. Sweeney, D. C., "Eight Ways to Overcome Hydraulic Lock", *Engineering*, Vol. 190, pp. 592-593, 1960.
5. Hessey, M. F., Martin, B. P. and Brighton, D. K., "Hydraulic Lock Forces on Tapered Pistons", *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 184, pp. 983-992, 1969-1970.
6. Lee, C. O. and Park, T. J., "Querkräfte an hydraulischen Ventilen mit mehreren Umfangsnuten", *Ölhydraulik und Pneumatik*, Vol. 34, pp. 269-274, 1990.

7. Sasaki, A. and Yamamoto, T., "Review of Studies of Hydraulic Lock", *Lubrication Engineering*, Vol. 49, pp. 585-593, 1993.
8. Borghi, M., "Hydraulic Locking-in Spool-Type Valves: Tapered Clearances Analysis", Proc. of Instn. Mech. Engrs., *J. of Systems and Control Eng.*, Vol. 215, pp. 157-168, 2001.
9. Milani, M., "Designing Hydraulic Locking Balancing Grooves", *Proc. of Instn. Mech. Engrs., J. of Systems and Control Eng.*, Vol. 215, pp. 453-465, 2001.
10. 박태조, "압력에 따른 점도변화가 그루브를 한 유압 스푸울 밸브에 미치는 영향", 한국윤활학회지, 제22권, 제6호, pp. 307-313, 2006.
11. FLUENT, FLUENT 6.0 Manual, 2002.
12. Moffatt, H. K., "Viscous and Resistive Eddies near a Sharp Corner", *J. Fluid Mech.*, Vol. 18, pp. 1-18, 1964.
13. Shankar, P. N. and Deshpande, M. D., "Fluid Mechanics in the Driven Cavity", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 32, pp. 93-136, 2000.
14. Cheng, M. and Hung, K. C., "Vortex Structure of Steady Flow in a Rectangular Cavity", *Computers and Fluids*, Vol. 35, No. 10, pp. 1046-1062, 2006.
15. 박태조, 황윤건, 유재찬, "유압 Spool Valve의 Groove내에서의 유동해석", 유공압시스템학회 추계 학술대회논문집, pp. 88-93, 2007.