

# 유압 스푼밸브 그루브 내에서의 유동특성 해석

## Analysis of Flow Characteristics in a Groove of Hydraulic Spool Valve

박 태 조  
T. J. Park

**Key Words** : CFD(전산유체역학, Computational Fluid Dynamics), FLUENT, Groove(그루브), Spool Valve(스푸울 밸브), Vortex(와류)

**Abstract**: All of the hydraulic spool valves adopt radially grooved spools to avoid hydraulic locking. In this paper, a commercial computational fluid dynamics (CFD) code, FLUENT is used to investigate the accurate Poiseuille flow characteristics inside single groove. The stream lines, velocity and pressure distributions are obtained for various groove widths, depths and shapes. The stream lines are highly affected by groove shape and there occurred large vortexes inside groove beyond a certain ratio of groove width to depth. Especially the U shaped groove restrains the occurrence of vortex. Therefore the numerical method adopted in this paper can be use in optimum designing of multi-grooved hydraulic spool valves.

### 1. 서 론

유압장치에서 유압유(Hydraulic oil)의 유량, 압력 및 유동방향을 제어하기 위한 각종 제어밸브에는 스푼(Spool)이 핵심부품으로 널리 사용되고 있다. 이때, 스푼과 슬리브(Sleeve) 사이의 아주 작은 간극(Clearance)에서는 유압유의 박막유동(Thin film flow)에 의해서 원주방향으로 비대칭적인 압력이 형성되고 이는 스푼에 반경방향 힘인 측력(Lateral force)으로 작용한다. 만일, 측력에 의하여 스푼이 슬리브 내벽쪽으로 더욱 편심되면 마찰력이 크게 증가하여 스푼의 조작성이 어려울 뿐만 아니라 마멸(Wear)이 발생할 수 있다. 유압공학분야에서 유체고착(Hydraulic locking) 현상이라고 잘 알려져 있는 이 문제의 해결을 위하여 스푼에 그루브(Groove)를 설계하는 등 지금까지 이에 대하여 많은 연구가 수행되었다<sup>1~11)</sup>.

Mannam<sup>3)</sup>은 정지상태의 스푼에 대한 실험결과, 그루브의 수가 많아질수록 측력은 급격하게 감소할 뿐만 아니라 그루브 수에 따라서 이의 크기를 최소로 하는 그루브들의 위치가 존재함을 밝혔다. Lee

& Park<sup>5)</sup>은 임의 개수의 그루브가 있는 테이퍼진(Tapered) 스푼이 운동하는 경우에 압력분포, 측력 등에 대한 해석적인 표현식을 처음으로 제시하고 참고문헌[3]의 실험결과가 정확함을 확인하였다. 또한, 스푼에 다수의 그루브를 설계하는 경우에는 1차원 레이놀즈 방정식의 해석으로도 윤회특성의 예측이 가능함을 밝혔다. Milani<sup>9)</sup>는 2차원 레이놀즈 방정식을 수치해석하고 정지상태인 스푼의 그루브 내에서의 압력을 측정하여 그루브의 효과를 조사하였다. 한편, Park<sup>10)</sup>는 고압용 스푼 밸브에서는 유압유의 점도변화를 그루브 설계시에 고려해야 하며, 이 경우의 윤회특성을 이론적으로 해석하였다.

이와 같이 지금까지의 많은 연구에도 불구하고 그루브의 형상과 크기 등에 관련된 상세한 연구결과는 거의 전무한 실정이다. 즉, 그루브는 단지 원주방향으로의 압력불평형을 해소하기 위한 수단으로 인식되고 있기에 이의 형상과 크기는 스푼과 슬리브 사이의 간극 크기인 유막두께보다 충분히 크게 설계하고 있을 뿐이다. 하지만, 그루브 내에서는 박막유동으로 가정하기가 어려울 뿐만 아니라 여기에서의 유동특성이 스푼 밸브의 성능에 영향을 미칠 수 있기 때문에 세밀한 해석이 요구된다. 따라서, 그루브 내에서의 유동특성을 정확하게 조사하기 위해서는 점성유체에 대한 운동방정식인

접수일 : 2007년 10월 28일

박태조(책임저자) : 경상대학교 기계항공공학부 공학연구원

E-mail : tjpark@gnu.ac.kr, Tel : 055-751-5315

Navier-Stokes 방정식과 함께 연속방정식을 동시에 수치해석해야 되며, 이를 위해서는 전산유체역학 (CFD, Computational fluid dynamics) 해석에 근거한 유동해석이 요구된다. Fig.1은 굴삭기 등에 사용되는 MCV(Multiple control valve)와 이에 조립되는 스푸얼을 나타낸 그림으로 여러개의 그루브가 거의 일정한 간격으로 설계되어 있다. 참고로 지금까지 여러 종류의 공동유동(Cavity flow)에 대한 연구가 수행되었지만<sup>13~17)</sup> 아직까지 스푸얼 밸브의 그루브에 대한 결과는 제시되지 않고 있는 실정이다.

이에 본 논문에서는 유압 스푸얼 밸브의 성능을 향상시키기 위한 연구의 일환으로 다양한 형상과 크기의 그루브를 채용한 스푸얼의 그루브 내에서의 유동특성을 열·유체해석 상용 프로그램인 FLUENT<sup>11)</sup>를 사용하여 상세하게 조사하고자 한다.

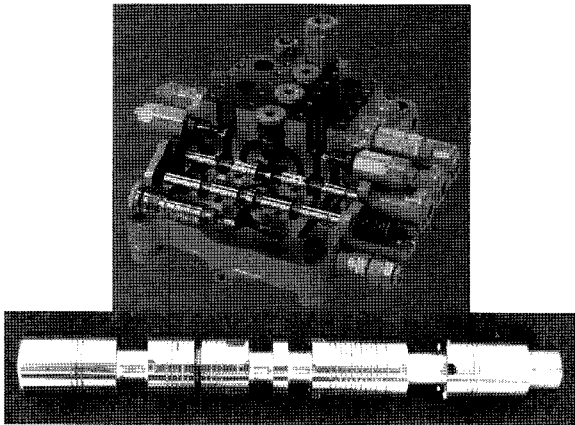


Fig. 1 MCV and spool with multiple grooves.

## 2. 수치해석 모델 및 방법

본 논문에서는 유압 스푸얼 밸브의 그루브 내에서의 유동특성을 해석하기 위하여 유압유의 유동을 비압축성, 정상상태, 층류유동으로 가정하였다. 이 경우, 유동을 지배하는 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식은 각각 다음의 식(1)과 식(2)으로 표현된다.

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

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (2)$$

여기서,  $\rho$ 와  $\mu$ 는 유압유의 밀도와 점도이고,  $p$ 는 압력이며  $U$ 는 속도벡터이다.

Fig. 2는 다수의 그루브가 있는 스푸얼 밸브의 개략형상을 나타낸 그림으로 테이퍼진 스푸얼이 슬리브 내에서  $e$ 만큼 편심되어 있다. 이때, 박막유동이

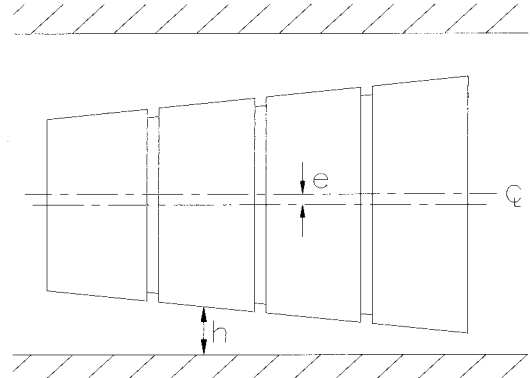


Fig. 2 Schematic of grooved spool.

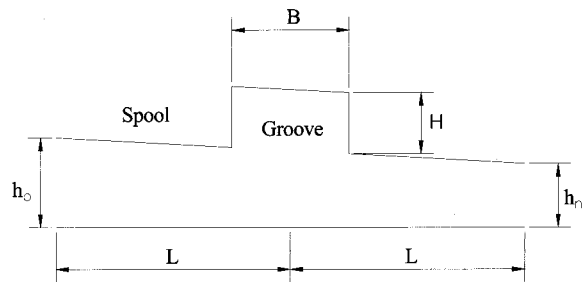


Fig. 3 Numerical model of grooved spool.

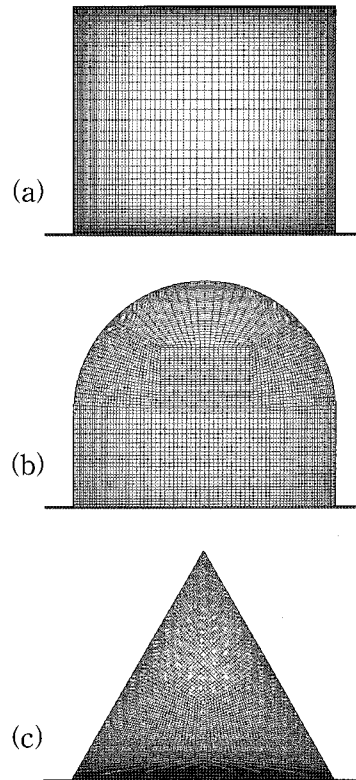


Fig. 4 Basic groove shapes and grid system. (a) Rectangle, (b) U-shape, (c) Equilateral triangle

발생하는 스푸얼과 슬리브 사이의 유막두께  $h$ 의 크기는 수  $\mu\text{m}$  정도이며, 이는 실제 그루브의 폭과 깊이

에 비해서 아주 작다. 따라서, Fig.1에서와 같이 그루브가 여러개 설계되어 있는 스푸울의 경우, 그루브내에서는 2차원유동으로 단순화할 수 있다. Fig.3은 본 논문에서 그루브내에서의 유동특성을 해석하기 위하여 사용한 해석모델로서 길이가 2L인 스푸울 랜드부의 중앙부에 폭과 깊이가 각각 B와 H인 그루브가 설계되어 있다. 이때, 랜드부 양단에서의 유막두께와 작용압력은 각각  $h_0, P_0$ 와  $h_n, P_n$ 이다.

본 논문에서는 그루브 형상에 따른 유동특성을 조사하기 위하여 사각형, U형 및 정삼각형의 3가지를 기본적인 그루브 단면형상으로 채용하였다. Fig.4는 유동해석 프로그램인 FLUENT의 부속프로그램인 Gambit을 이용하여 구성된 각 그루브에 대한 격자계를 나타낸 그림으로 격자수는 최대 25,000개 정도이다.

Table1에는 해석에 사용한 유압유의 물성치와 해석영역의 크기(L) 및 출구부 압력조건( $P_n$ )을 나타내었다.

Table 1 Oil properties and numerical conditions.

$\rho, \text{ kg/m}^3$	$\mu, \text{ kg/m}\cdot\text{s}$	L, mm	$P_n, \text{ MPa}$
962	0.013468	1	0

### 3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 그루브 형상에 따른 그루브내에서의 유동특성을 중점적으로 조사하기 위하여 Fig.3에 나타낸 스푸울과 슬리브 사이의 유막형상은  $h_0=h_n=h$ 로 일정하게 두었다.

$B=0.3\text{mm}$ ,  $H/B=0.866$ ,  $h=4\mu\text{m}$ ,  $P_0=5\text{MPa}$ 인 경우에 대한 그루브내에서의 유선과 속도 분포는 Fig. 5에, 해석영역내의 압력분포는 Fig. 6에 각각 나타내었다. Fig. 5에 나타낸 그루브의 좌측 랜드부 유막을 통과한 고압의 유체는 유막두께비(4 : 304)가 큰 그루브내로 분출되면서 상대속도는 급속하게 감소하지만 우측 랜드부에서는 높은 압력차이와 작은 유막두께로 인하여 다시 빨라진다. 특히, 그루브의 상단부 양측 모서리부에는 작은 크기의 Eddy가 발생하고 있다. 한편, 유막두께의 크기에 비하여 그루브 깊이가 아주 깊으므로 유체압력(정압, Hydrostatic pressure)은 그루브 내에서 일정하며, 랜드부에서는 유막두께가 일정하므로 직선적인 분포를 나타내고 있다. Fig.5와 Fig.6은 다음에 제시할 다른 조건에 대한 해석결과와의 비교에 사용된다.

#### 3.1 유막두께 및 작용압력의 영향

Fig.7과 Fig.8은 유막두께와 압력차이에 따른 속도분포를 각각 나타낸 그림이다. 여기서 유막두께 변화는 Fig.2에 나타낸 스푸울의 편심량이 변화하는 경우에 해당된다. Fig.5에 나타낸 속도분포와 비교하면 유막두께와 작용압력의 차이가 커질수록 속도는 빨라지지만 유선의 형상은 서로 일치하였다. 참고로 유막의 크기가 균일하므로 압력분포의 기울기는 Fig.6의 결과와 모두 동일하였다.

#### 3.2 그루브 깊이의 영향

Fig.9는 그루브의 폭(B)이 일정한 경우에 깊이(H)의 증가에 따른 유선의 분포변화를 나타낸 그림이다. 그루브가 깊어질수록 Fig.5에서 관찰된 모서리부의 2개의 Eddy는 점차 성장하여 크게 발달한 와류(Vortex)로 변화하였다. 만일 그루브가 더욱 깊어지면 여러개의 와류가 생성된다<sup>12-13,17</sup>. 한편, 유막에서의 박막유동으로 인하여 그루브 내에서 발생하는 이러한 와류는 압력의 분포나 크기에는 영향을 미치지 않지만 유압유의 온도를 상승시키거나 운전조건에 따라서는 캐비테이션(Cavitation)을 발생시키는 원인으로 작용할 것으로 예상된다.

#### 3.3 그루브 형상의 영향

Fig.10과 Fig.11에는 그루브의 형상과 이의 깊이에 따른 유선을 각각 나타낸 결과이다. 단순한 삼각형 그루브의 꼭지부에서는 Eddy가 발생하지만 U형 그루브에서는 나타나지 않고 있다. 또한 그루브가 깊어지면 U형에서도 와류가 생성되지만 이의 크기는 Fig.9에 나타낸 사각형의 경우 보다는 작다. 한편, Fig.11에 나타낸 삼각형에서는 사각형에 정삼각형을 결합한 형태이기에 와류의 크기가 작지만 이등변 삼각형인 경우에는 다수의 와류가 발생할 것으로 예상된다<sup>12</sup>. 따라서, 와류의 발생을 억제하는 그루브 단면형상으로는 U형이 가장 적합함을 알 수 있다.

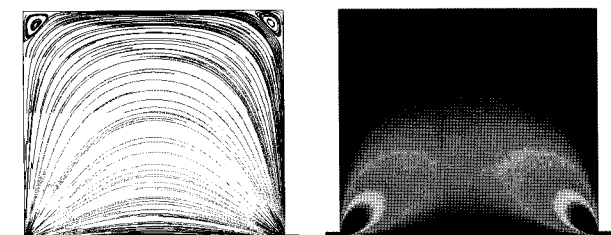


Fig. 5 Streamlines (left) and velocity distribution (right).  $B=0.3\text{mm}$ ,  $H/B=0.866$ ,  $h=4\mu\text{m}$ ,  $P_0=5\text{MPa}$

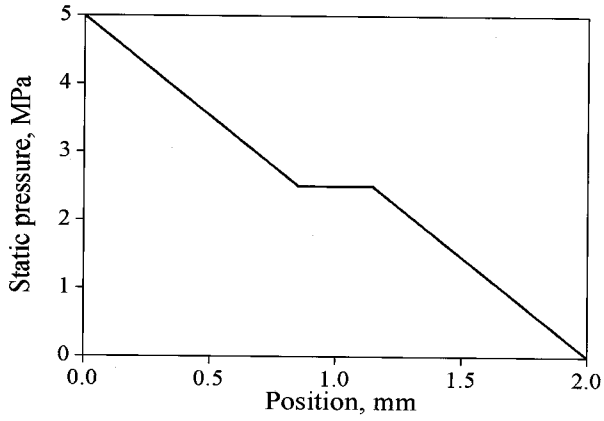


Fig. 6 Pressure distribution.  $B=0.3\text{mm}$ ,  $H/B= 0.866$ ,  $h=4\mu\text{m}$ ,  $P_o=5\text{MPa}$

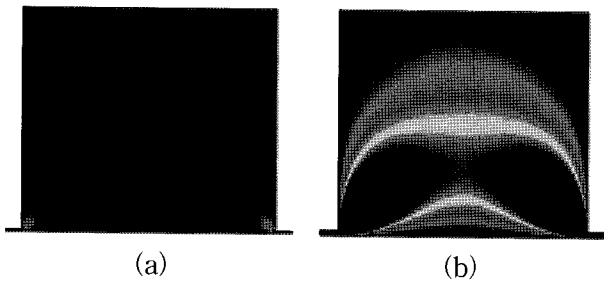


Fig. 7 Effect of film thickness on velocity distribution. (a)  $h=2\mu\text{m}$ , (b)  $h=6\mu\text{m}$

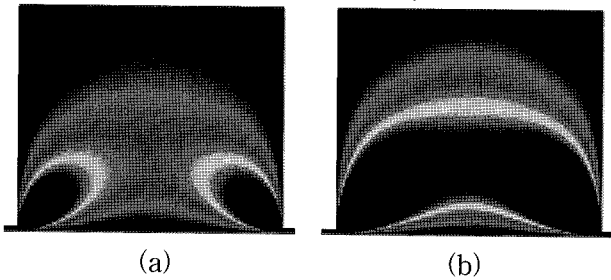


Fig. 8 Effect of operating pressure on velocity distribution. (a)  $P_o=10\text{MPa}$ , (b)  $P_o=20\text{MPa}$

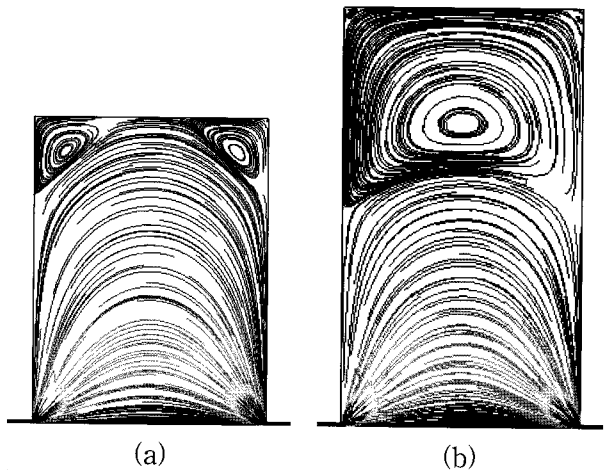


Fig. 9 Effect of groove depth on streamlines. (a)  $H/B=1.5$ , (b)  $H/B=2$

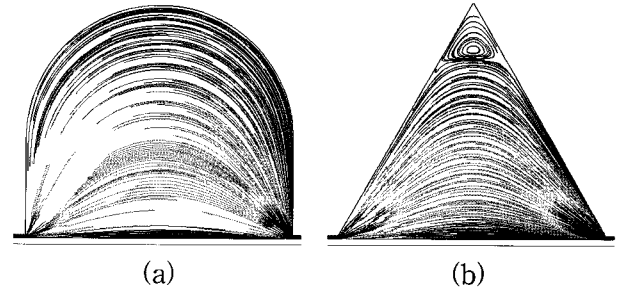


Fig. 10 Effect of groove shape on streamlines. (a) U-shape, (b) Equilateral triangle

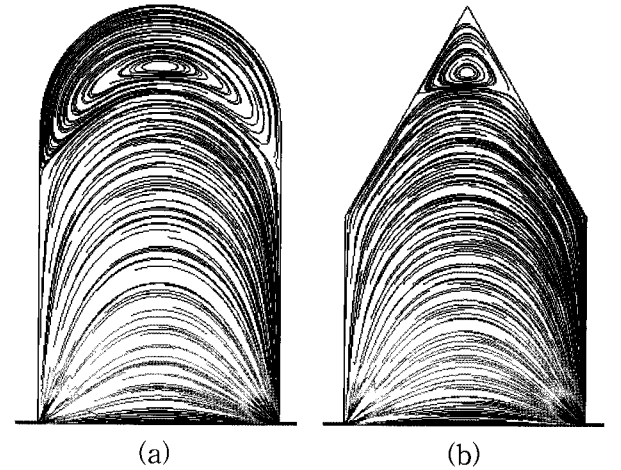


Fig. 11 Effects of groove shape and depth on streamlines. (a) Partial U-shape, (b) Partial equilateral triangle

### 3.4 그루브 폭의 영향

그루브의 깊이를 고정한 상태에서 그루브의 폭이 다른 경우에 대한 유선의 분포를 Fig. 12에 나타내었다. 동일한 그루브 깊이에서도 그루브 깊이/폭의 비( $H/B$ )가 증가하면 Fig. 9의 결과와 동일하게 큰 와류가 발생하였다. Fig. 13은 이 경우에 대한 유막과 그루브내의 압력분포를 나타낸 그림으로 그루브내에서의 압력은 동일하였다.

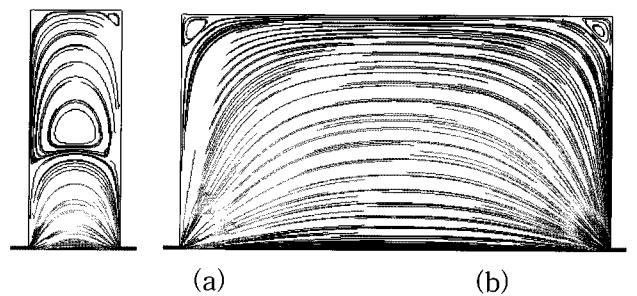


Fig. 12 Effect of groove width on streamlines. (a)  $B=0.1\text{mm}$ , (b)  $B=0.5\text{mm}$

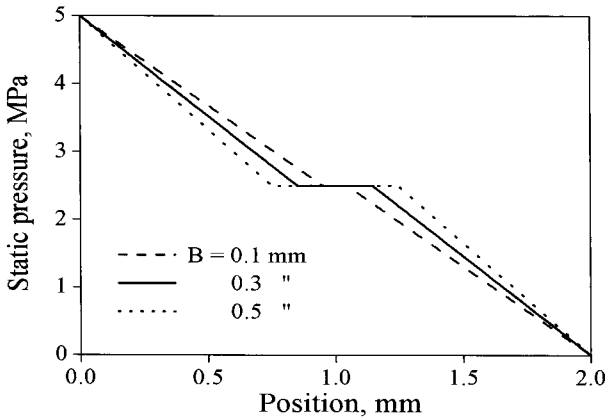


Fig. 13 Variation of pressure distribution with groove width.

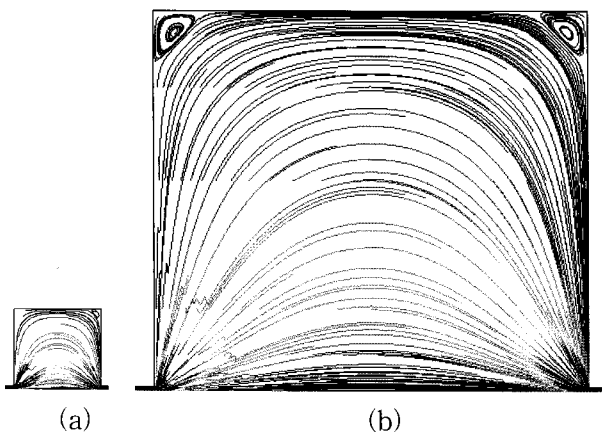


Fig. 14 Effect of groove size on streamlines. (a) B=0.1mm, (b) B=0.5mm

### 3.5 그루브 크기 비율의 영향

Fig. 14에는 그루브 깊이/폭의 비가 동일한 사각형 그루브에서 그루브의 크기가 다른 경우의 유선을 서로 비교하여 나타내었다. 이 결과, 그루브의 크기에 따라 그루브내에서의 전체적인 속도에는 차이가 있지만 유선의 분포는 Fig.7 및 Fig.8과 경향이 동일하였다. 참고로, 각 조건에 대한 압력분포는 Fig.13의 결과와 일치하였다.

이상에서 고찰한 바와 같이 유체고착을 방지하기 위하여 스푸울에 설계한 그루브내에서는 그루브 양쪽 랜드부에서의 압력차이로 인하여 느린 점성유동(Poiseuille flow)이 발생한다. 이 결과, 그루브의 형상, 폭, 깊이 등에 따라서 유압유의 유온상승과 캐비테이션 발생의 원인으로 작용할 것으로 예상되는 상당히 큰 와류가 생성되었다. 특히, 와류의 발생을 억제하기 위해서는 그루브의 폭에 비하여 깊이를 너무 크게 설계하지 않고, U형의 단면형상을 채용하는 것이 유리하였다. 한편, 유막두께가 일정한

경우에 그루브내에서의 압력은 일정하였다. 따라서, 스푸울의 운동을 고려한 다양한 운전조건과 그루브 형상 및 배치 등에 대한 그루브내에서의 정확한 유동특성을 조사하기 위한 추가적인 연구가 요구된다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 유압 스푸울 밸브의 성능을 향상시키기 위한 연구의 일환으로 다양한 단면형상과 크기의 그루브를 채용한 스푸울 밸브의 그루브 내에서의 유동특성을 조사하였다. 이를 위하여 열·유체해석 상용프로그램인 FLUENT를 사용하였으며 스푸울과 슬리브 사이의 유막두께가 일정한 경우, 유막두께, 작용압력, 그루브의 형상, 깊이, 폭 및 크기 등의 변화에 따른 그루브 내에서의 유선 및 속도, 압력 분포를 상세하게 조사하였다. 이 결과, 유막에서의 박막유동에 의하여 스푸울 밸브의 그루브 내에서도 와류가 발생한다는 결과를 제시하였다. 특히, 그루브의 폭에 비하여 깊이가 깊을 경우에는 큰 와류가 발생하며, 그루브 단면형상이 U형인 경우에는 와류발생이 억제되었다. 한편, 유막두께에 비하여 그루브의 깊이가 깊을 경우에는 그루브 형상에 관계없이 그루브내에서의 압력은 일정하였다. 따라서, 본 논문에서 제시한 해석방법과 결과는 스푸울 밸브 설계에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대되며, 다양한 운전조건과 그루브 형상 등에 대한 집중적인 추가연구가 요구된다.

## 후 기

이 논문은 2007년도 지방대학혁신역량강화사업과 동명모트롤(주)에 의하여 지원되었습니다.

## 참고 문헌

- 1) Meritt, H. E., "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, 1967.
- 2) Manhajm, J. and Sweeney, D. C., "An Investigation of Hydraulic Lock", Proc. of Instn. Mech. Engrs., Vol.169, pp.865~879, 1955.
- 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) Lee, C. O. and Park, T. J., "Querkräfte an hydraulischen Ventilen mit mehreren Umfangsnuten", Ölhydraulik und Pneumatik, Vol.34, pp.269~274, 1990.
- 6) Park, T. J. and Lee, C. O., "Hydrodynamic Lateral Force on a Tapered Piston Subjected to a Large Pressure Gradient", Proc. of 3rd ICFP, pp.44~48, 1993.
- 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) Park, T. J., "The Effect of Pressure on Viscosity in Grooved Hydraulic Spool Valves", J. of the KSTLE, Vol.22, No.6, 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) Adachi, T. and Uehara, H., "Linear Stability Analysis of Flow in a Periodically Grooved Channel", Int. J. for Numerical Methods in Fluids, Vol.41, No.6, pp.601~613, 2003.
- 15) Arghir, M., Roucou, N., Helene, M. and Frene, I., "Theoretical Analysis of the Incompressible Laminar Flow in a Macro-Roughness Cell", J. of Tribology, Vol.125, No.2, pp. 309~318, 2003.
- 16) Billy, F., Pineau, G., David, L. and Arghir, M., "Two-dimensional Poiseuille Flow in a Grooved Channel", J. of Flow Visualization and Image Processing, Vol.11, No.4, pp.299~310, 2004.
- 17) 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.