

무패킹 유압피스톤의 미세간격내 압력분포에 관한 연구

우삼용*(한국표준과학연구원 질량힘), 최인묵(한국표준과학연구원 질량힘), 김부식(한국표준과학연구원 질량힘)

Pressure Distribution in the Clearance of Packing-free Hydraulic Pistons

S. Y. Woo (Mass and Force, KRISS), I. M. Choi (Mass and Force, KRISS) and B. S. Kim (Mass and Force, KRISS)

ABSTRACT

The packing-free piston has become widely distributed in certain branches of instrument making and precision machine building. A large number of the most diversified instruments are now being constructed on the principle of the packing-free piston like piston manometers, vacuum manometers, hydraulic machines, dynamometers, hardness measuring instruments, power indicators, hydraulic scales, and many others. In spite of the widespread application of systems with a packing-free piston, there were practically no special papers to the theory and practice of the application of such systems. This paper describes the theoretical approaching method to get the pressure distribution profile between the piston and cylinder using finite element method.

Key Words : Packing-free piston (패킹이 없는 피스톤), Pressure distribution (압력분포), Measurement(측정), FEM (유한요소법), Pressure instrument (압력계측기), Elastic deformation (탄성변형)

1. 서론

패킹이 없는 피스톤은 압력계측기 제작이나 압축기, 펌프, 자동제어기, 충격흡수기 등 정밀기계 제작에 널리 쓰이고 있지만 이에 대한 압력분포 및 변형에 관한 해석은 만족스럽지 못하다. 본 연구에서는 좁은 간격을 갖고 있는 무패킹 피스톤의 축방향 압력분포에 대해 논하고자 한다. 높은 압력이 작용하는 미세간격내의 압력분포는 일반적으로 선형분포로 가정하지만 본 연구에 의하면 비선형 압력분포를 보임을 알 수 있다. 본 해석에서는 간격내의 유체 유동은 Navier-Stokes 방정식을 적용하고 아울러 압력분포에 따른 유체의 점도와 밀도변화를 고려한 유체의 연속방정식을 만족시키도록 하였다. 또한 압력분포는 피스톤 변형과 그 바깥의 실린더의 변형을 유발하여 유로의 간격 변화를 가져오므로 유동방정식을 다시 바꾸어야 하는 문제점이 생긴다. 이것은 적당한 알고리즘을 적용하여 반복법을 활용하면

압력분포와 탄성변형이 수렴하도록 할 수 있다. 여기서 피스톤과 실린더의 탄성변형은 유한요소법(FEM)을 이용하여 구할 수 있다. 본 연구결과의 실제 적용을 위해 고압용 무패킹 피스톤식 압력계측기에 본 연구결과를 적용하여 보았다. 아래 그림 1은 500 MPa (약 5000 기압)까지 측정할 수 있는 압력기준기에 사용되는 무패킹 피스톤 장치이다. 피스톤과 실린더는 원통형이며 피스톤 외경은 실린더 내경보다 몇 분의 1 μm 정도 작으므로 실린더 사이에 부드럽게 삽입될 수 있다. 또한 피스톤 하단에는 유체에 의한 고압이 작용하고 있어 피스톤 상단에 위치하고 있는 대응 분동의 중력과 힘의 평형을 이루고 있다. 이 평형상태(float)에서 피스톤과 실린더 사이 미세간격에는 축 방향을 따라 압력이 고압에서 대기압까지 경계조건을 갖고 변화한다. 본 연구는 이때 피스톤과 실린더 사이의 미세간격내의 압력분포가 어떠한가 하는 것이 본 연구의 초점이다.

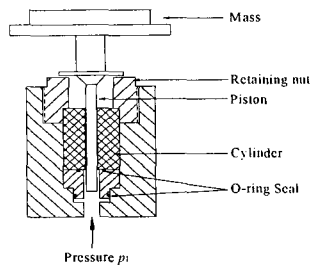


Fig.1 Typical packing-free piston/cylinder unit.

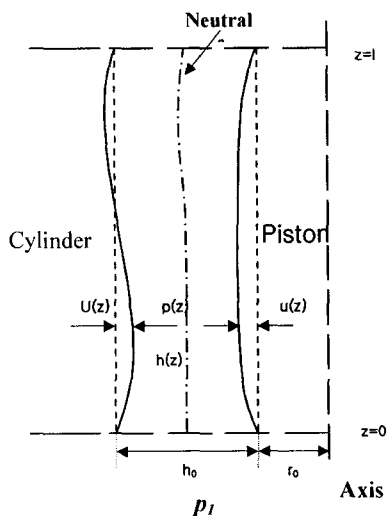


Fig.2 Schematic representation of the packing-free piston/cylinder unit.

2. 해석 이론

그림 2 와 같은 과장된 피스톤, 실린더 장치를 생각하자. 실제 피스톤과 실린더는 매우 끈고 평행하다. 여기서 r_0 를 피스톤과 실린더가 겹친 부분의 피스톤 아래의 반경이고, h_0 를 피스톤과 실린더 사이의 아랫부분 간격이라 생각한다. 압력이 가해지기 전의 피스톤과 실린더의 형상은 근사적으로 원통형이고 평행하다. 그러나 피스톤과 실린더 장치에 압력이 가해지면 피스톤과 실린더는 변형하게 되고 그 형상이 복잡하게 된다. 여기서 u_0 와 U_0 는 압력이 작용하지 않는 초기 상태에

대하여 압력 p_1 상태에서 피스톤과 실린더의 공유부분 하단에서의 피스톤과 실린더의 반경방향 변형량을 나타낸다. $u(z)$ 와 $U(z)$ 는 공유높이 z 인 곳과 공유높이 0 인 곳의 반경방향 길이변화를 나타낸다. 또 l 은 피스톤과 실린더의 공유길이이고 $p(z)$ 는 공유높이 z 인 곳의 압력분포를 나타낸다. 피스톤과 실린더 사이의 압력분포 $p(z)$ 를 구하기 위해 피스톤과 실린더 사이의 간격 내를 피스톤 축 방향으로 흐르는 점성유체의 유동을 고려하면 Navier-Stokes 방정식에 의해 질량유량 Q_m 은 다음식으로 표현된다.

$$Q_m = -\frac{\pi_0 h^3(z) \rho(p) dp}{6\eta(p) dz} \quad (1)$$

여기서 $\rho(p)$ 는 압력 p 에서의 밀도 (단위: kg m^{-3})이고 $\eta(p)$ 는 압력 p 에서의 점도(단위: Pa s)이다. 본 해석에 사용된 유체는 세바케이트 오일(di-2-ethyl-hexyl-sebacate)이고 온도 20°C , 압력 500 MPa 까지의 오일의 밀도와 점도는 다음 식으로 알려져 있다[1,2].

$$\rho = 912.67 + 0.7521 p - 1.6448 \times 10^{-3} p^2 + 1.45625 \times 10^{-6} p^3 \quad (2)$$

$$\eta = 0.02155(1 + 0.00190036 p)^{8.81} \quad (3)$$

그런데 피스톤과 실린더 사이의 간격 내에서 피스톤 축 방향으로의 압력분포는 측정압력에서 대기압까지 변화하므로 압력에 따른 피스톤과 실린더의 변형을 수반하게 된다. 따라서 피스톤과 실린더 사이의 간격은 더 이상 평행한 유로를 유지하지 못하고 이로 인해 식(1)에 적용되는 간격 $h(z)$ 가 변화하게 된다. 따라서 압력분포 $p(z)$ 를 다시 설정하여야 하는 문제가 발생되어 간격 $h(z)$ 를 재설정하게 만든다. 이와 같이 서로 연관된 문제를 풀 수 있는 방법으로서 해석적방법과 FEM 을 이용한 수치적방법이 있다[3].

유한요소법에 사용된 피스톤-실린더 장치의 기하모형을 그림 3 에 나타내었다. 피스톤-실린더 장치의 유한요소 모델은 절점(node)과 요소(element)로 구성되며 여기에 적당한 하중과 구속조건을 부여하게 된다. 피스톤과 실린더는 축대칭으로 간주하여 2 차원으로 모델링할 수 있다. 표 1 은 피스톤과 실린더 모델의 keypoint 들을 나타낸 것이다. 여기서 직선 5-6, 10-11 및 11-12 에는 압력 p_1 이 가해지고, 직선 6-1 과 12-7 에는 간격내의 압력 $p(z)$ 가 가해진다. 직선 2-3 과 8-

9는 y 방향으로 구속되며, 직선 9-10은 x 방향으로 구속되어 있다. 피스톤과 실린더 사이의 공유길이를 200 등분한 길이를 한 번으로 하는 삼각형 평면요소로 요소망을 자동 구성하였으며 실린더 바깥 반경쪽으로 갈수록 요소망을 성기게 하여 전체적으로 요소 수가 4000 개 정도가 만들어지도록 하여 변형량을 계산할 때 메모리 부족이 일어나지 않도록 제어하였다.

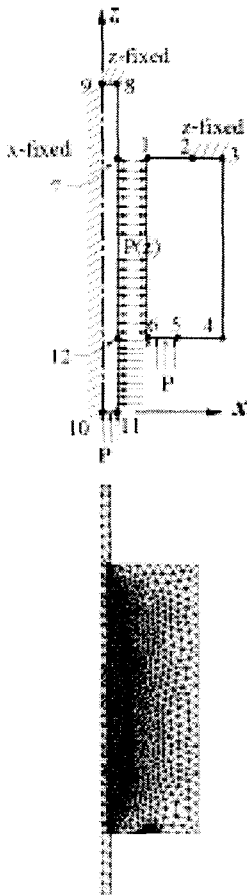


Fig.3 Geometric model and finite element mesh of the piston/cylinder unit.

3. 적용 및 결과

실험에 사용된 장치는 프랑스 Desgranges et Huot사에서 제작한 피스톤-실린더 세트(S/N 4784) 공칭단면적 2 mm^2 이고 피스톤은 공칭직경 1.58 mm . 재질은 강(hard steel)이며 열팽창계수는 $10.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 영율은 $2 \times 10^{11} \text{ Pa}$, 포아송비는 0.3 이다. 또 실린더는 외경 17 mm , 내경 1.58 mm , 길이 27 mm 의 텅스텐카바이드로 만들어져 있으며

열팽창계수는 $4.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 영율은 $6.2 \times 10^{11} \text{ Pa}$, 포아송비는 0.218 이다[3]. 피스톤과 실린더사이의 겹침을 나타내는 공유길이는 실린더 길이와 같은 27 mm 이다.

Table 1. Coordinates of keypoints and boundary conditions of the piston-cylinder model.

Keypoint	X/mm	Z/mm
1	0.79041	36
2	5.9	36
3	8.5	36
4	8.5	9
5	D/2	9
6	0.79041	9
7	0.78980	36
8	0.78980	44
9	0	44
10	0	0
11	0.78980	0
12	0.78980	9

정확한 피스톤의 직경은 $(1.5796 \pm 0.00005) \text{ mm}$ 이고 피스톤과 실린더 사이의 평균 간격 h_0 는 $(0.61 \pm 0.1) \mu\text{m}$ 이었다. 측정시 실험실 온도는 $(23 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ 로 유지하였으며 keypoint 5 를 나타내는 오링 (OR106)의 평균 직경은 8.0 mm 이다 (즉 표 1 에서 $D=8$).

그림 4 는 측정압력 300 MPa 에서 직경 크기가 서로 다른 3 종류 오링에 대하여 피스톤과 실린더 간격 내의 피스톤 축 방향 압력분포를 나타낸 것이다. 이때 가로축은 공유 높이 z 값을 공유길이 l 로 나눈 무차원 값이고 세로축은 공유 높이 z 에서의 압력 $p(z)$ 를 측정압력 300 MPa 로 나눈 무차원 값이다. 압력분포는 일반적으로 생각하는 선형분포가 아닌 비선형적 분포를 보여 주고 있으며 특히 공유길이 l 하단과 상단에서 포물선 분포를 보여주고 있다. 또 오링 직경이 클수록 공유길이 상단 부분 ($z=0.8-1.0$) 에서 압력구배가 작게 나타나는데 이것은 공유길이 상단에서 오링 크기가 증가할수록 피스톤과 실린더 사이의 간격이 넓어지기 때문이다. 실제로 오링 직경이 4.8, 8.0, 11.7 로 증가함에 따라 출구 간격이 각각 0.31, 0.40, 0.55 μm 로 증가하였다.

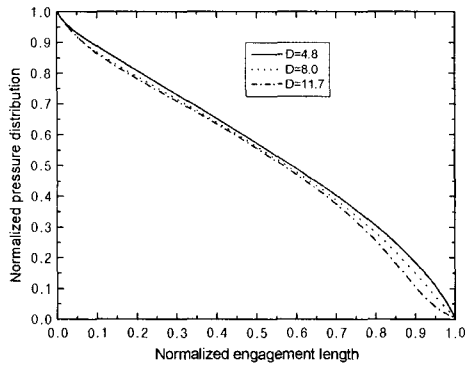


Fig. 4. Pressure distributions along the engagement length for three types of O-ring with different diameters at 300 MPa.

4. 결론

패킹이 없는 피스톤에 대한 압력분포해석을 수행하였다. 0.001 mm 이하의 좁은 간격을 갖고 있는 무패킹 피스톤의 축방향 압력분포 해석을 위하여 점성 유동방정식과 재질의 탄성 변형을 연관시켜 연속방정식이 만족되도록 반복적 방법으로 해석하였다. 높은 압력이 작용하는 미세 간격내의 압력분포는 일반적으로 선형분포로 가정하지만 본 연구에 의하면 비선형 압력분포를 보임을 알 수 있었다. 본 연구 결과는 피스톤 실린더 사이의 유동 및 변형량 해석을 포함하고 있으므로 다양한 산업분야의 설계 기본자료로의 응용이 기대된다.

참고문헌

1. Molinar G. F., Barbera B., Bianchi L., Cresto P. C., Maghenzani R., *High Temp.-High Press.*, 1992, **24**, 259-266.
2. Vergne P., *High Temp.-High Press.*, 1990, **22**, 613-621 (1990).
3. Molinar G. F., Sabuga W., Robinson G., Legras J. C., *Metrologia*, 1998, **35**, 739-759.