

시일이 없는 공기실린더용 피스톤의 성능해석

김영철[†] · 김동수

한국기계연구원

Performance Analysis of Pistons for Sealless Pneumatic Cylinders

Young-Cheol Kim[†] and Dong-Soo Kim

Korea Institute of Machinery and Materials

Abstract – This paper shows a performance analysis for step type and conical type sealless cylinders. 2 dimensional Reynolds equation and finite difference numerical techniques are utilized for the performance analysis and the piston design. Centering forces of conical pistons are higher than those of step ones. Also, leakage flows of conical pistons are lower than those of step ones. But, the step type piston is practically suggested to apply for sealless cylinders because it is difficult that conical portion is precisely manufactured.

Key words – sealless piston, pneumatic cylinder, reynolds equation, self-centering force, leakage flow.

1. 서 론

일반적인 실린더는 슬라이딩 씸(sliding seal)을 사용하는데, 이는 큰 마찰력을 유발하고 저속 운동 시 고착 현상을 이 발생하기도 하며, 청정실이나 고온, 고속 환경에는 사용하기에 부적절하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 슬라이딩 씸을 사용하지 않고 스텝(step) 또는 경사(conical) 형태의 피스톤을 장착한 Sealless 실린더를 제안하고자 한다. 이 기술은 고속, 고정밀 선형운동을 담당하는 서보구동기(Servo Actuator)에 다양하게 적용될 수 있다.

Fig. 1은 Sealless 실린더의 기본 구조를 나타낸다. 피스톤 A는 step 또는 conical portion과 cylindrical portion의 두 부분으로 이루어져 있고, 가운데 출구 홀을 기준으로 대칭구조를 이루고 있다. 실린더 내부에 압력을 가하게 되면 피스톤을 중앙으로 부상시키는 힘(self-centering force)이 저절로 발생하게 되는데, 특히 피스톤이 좌우 왕복운동을 할 경우에는 이 힘이 더욱 커지게 된다. 따라서 이 부분은 기체 정압효과와 동압효과가 함께 작용하는 복합베어링의 기능을 가진다. B

부분은 기체정압 지지의 로드베어링(rod bearing)이고, C 부분은 단순히 plane seal과 같은 기능을 가진다. 유량보존법칙에 의해 다음의 관계식이 성립한다.

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_A + Q_B + Q_C \quad (1)$$

Sealless 실린더는 처음으로 Guido Belforte[1,2]에 의해 제안되었는데, 그는 정지된 실린더에 대해 1차원 레이놀즈방정식의 근사해를 유도하여 성능을 예측하였다. 본 연구에서는 왕복운동하는 Sealless 실린더에 대한 2차원적 레이놀즈 방정식을 유도하고, 유한차분법에 의해 그 해를 구한 후 그 결과를 설계에 적용할 수 있도록 하였다. 또한 스텝(step) 및 경사(conical) 형태의 sealless 실린더에 대해 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

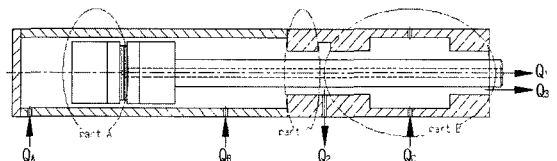


Fig. 1. Sealless pneumatic cylinder.

[†]주저자 · 책임저자 : yckim@kimm.re.kr

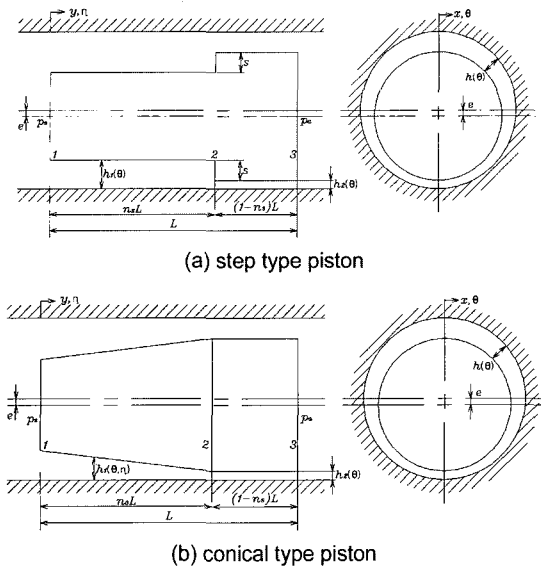


Fig. 2. Geometry of the sealess cylinders.

2. Sealess 피스톤의 해석 이론

2-1. Sealess 피스톤의 구조

Sealess 피스톤은 크게 Fig. 2(a)와 같은 step 피스톤 형태와 Fig. 2(b)와 같은 conical 피스톤 형태가 제안되어진다. 따라서 sealess 피스톤은 step 또는 conical portion과 cylindrical portion으로 구성되는데, 실린더 한쪽(1면)에 의 고압이 작용하고 그 반대면(3면)에 대기압 이 작용하게 된다.

피스톤과 실린더 사이의 기체막두께는 다음과 같다.

$$h_1 = c_1 + e \cos \theta \quad (0 \leq y < n_s L) \quad (2)$$

$$h_2 = c_2 + e \cos \theta \quad (n_s L \leq y \leq L) \quad (3)$$

여기서 c_1 과 c_2 는 각 portion에서의 반경방향 간극을 나타낸다. $c_2 = c$ 라고 두었을 때, step 피스톤의 경우

$$c_1 = c + s \quad (4)$$

와 같이 되고, conical 피스톤의 경우

$$c_1 = c + s - \frac{s}{n_s L} y \quad (5)$$

와 같이 표현된다.

2-2. Sealess 피스톤의 지배 방정식

Sealess 피스톤에 대한 지배방정식은 다음과 같이 공

기막에서 등온과정이라고 가정하여 유도되어진 무차원화된 Reynolds 방정식으로 표현되어질 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(PH^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \Gamma \frac{\partial}{\partial \eta} \left(PH^3 \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) = A \frac{\partial}{\partial \eta} (PH) \quad (6)$$

이 때 무차원 변수는 다음과 같다.

$$x = R\theta \quad (7)$$

$$y = L\eta \quad (8)$$

$$p = p_a P \quad (9)$$

$$\Gamma = \frac{R^2}{L^2} \quad (10)$$

$$A = \frac{6\mu R^2 U}{p_a c^2 L} \quad (11)$$

그리고, 편심률을 다음과 같이 정의하면,

$$\varepsilon = \frac{e}{c} \quad (12)$$

기체막두께는 다음과 같이 무차원화 되어진다.

$$H_1 = \frac{c_1}{c_2} + \varepsilon \cos \theta \quad (13)$$

$$H_2 = 1 + \varepsilon \cos \theta \quad (14)$$

경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{\eta=0} &= P_s \\ P_{\eta=1} &= 1 \\ P_{\theta=0} &= P_{\theta=2\pi} \end{aligned} \quad (15)$$

2-3. Sealess 피스톤의 성능 계산

식 (6)의 Reynolds 방정식을 이용하여 압력분포를 계산하기 위해 유한차분법을 이용하였다. 유한차분화 하면 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\bar{A}P^{k+1} = \bar{B}P_{i+1,j}^k + \bar{C}P_{i-1,j}^k + \bar{D}P_{i,j+1}^k + \bar{E}P_{i,j-1}^k \quad (16)$$

이 때,

$$\bar{A} = \bar{a} + \bar{b} + \Gamma \bar{c} + \Gamma \bar{d} \quad (17)$$

$$\bar{B} = \bar{a} \quad (18)$$

$$\bar{C} = \bar{b} \quad (19)$$

$$\bar{D} = \Gamma \bar{c} - A \bar{e} \quad (20)$$

$$\bar{E} = \Gamma \bar{d} + \Lambda \bar{f} \quad (21)$$

여기서,

$$\bar{a} = \frac{(P_{i+1,j}^k + P_{i,j}^k)(H_{i+1,j} + H_{i,j})^3}{8\Delta\theta^2} \quad (22)$$

$$\bar{b} = \frac{(P_{i,j+1}^k + P_{i,j}^k)(H_{i,j+1} + H_{i,j})^3}{8\Delta\theta^2} \quad (23)$$

$$\bar{c} = \frac{(P_{i,j+1}^k + P_{i,j}^k)(H_{i,j+1} + H_{i,j})^3}{8\Delta\eta^2} \quad (24)$$

$$\bar{d} = \frac{(P_{i,j-1}^k + P_{i,j}^k)(H_{i,j} + H_{i,j-1})^3}{8\Delta\eta^2} \quad (25)$$

$$\bar{e} = \frac{H_{i,j+1}P_{i,j+1}^k}{2\Delta\eta} \quad (26)$$

$$\bar{f} = \frac{H_{i,j-1}P_{i,j-1}^k}{2\Delta\eta} \quad (27)$$

따라서 식 (16)에 SOR법(successive over-relaxation method)을 적용하여 압력분포를 계산하였다. 압력분포를 얻게 되면 피스톤에 작용하는 중심으로의 부상력은 압력을 적분함으로써 다음과 같이 계산된다.

$$W_x = \frac{W_x}{LRp_a} = \int_0^{2\pi} P \sin \theta d\theta dy \quad (28)$$

$$W_y = \frac{W_y}{LRp_a} = \int_0^{2\pi} P \cos \theta d\theta dy \quad (29)$$

따라서 작용하중은 다음과 같다.

$$W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (30)$$

그리고 입구 및 출구에서의 유체 유량은 다음과 같다.

$$\bar{m} = \int_0^{2\pi R} \frac{\rho_a}{2p_a} P \left(Uh - \frac{h^3}{6\mu} \frac{\delta p}{\delta y} \right) \delta x \quad (31)$$

3. Sealess 피스톤의 해석 결과

3-1. Sealess 피스톤의 압력분포 계산

Fig. 3은 $\epsilon=0.5$, $n_s=0.8$, $p_s=7$ bar일 때 압력분포를 계산한 것이며, Fig. 4는 이 때 $\theta=0$ 및 $\theta=180$ 인 경우 축방향으로의 압력분포를 무차원 값으로 그린 것이다. 그림에서 $\theta=0$ 일 때와 $\theta=180$ 일 때 압력차이가 발생함을 볼 수 있는데, 이로 인해 중심으로의 부상력(self-centering force)이 발생함을 예상할 수 있다.

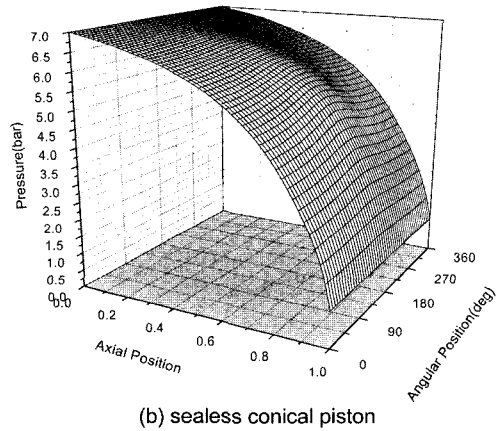
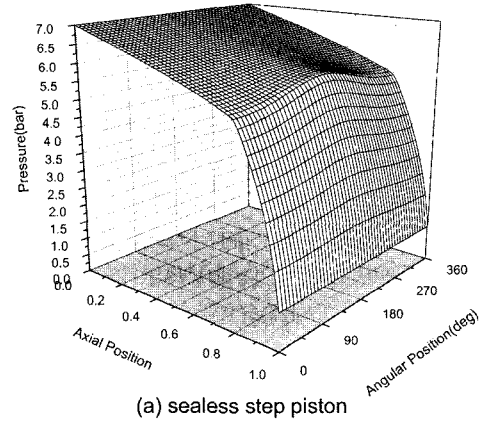


Fig. 3. Pressure distribution ($\epsilon=0.5$, $n_s=0.8$).

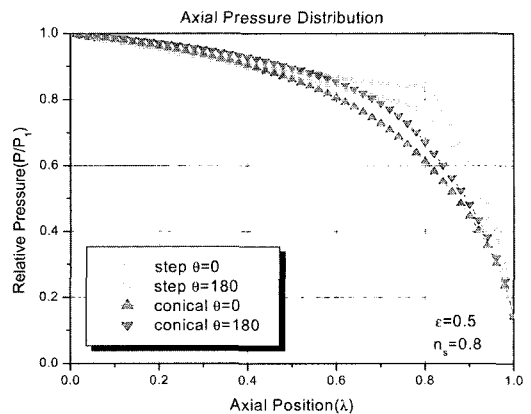
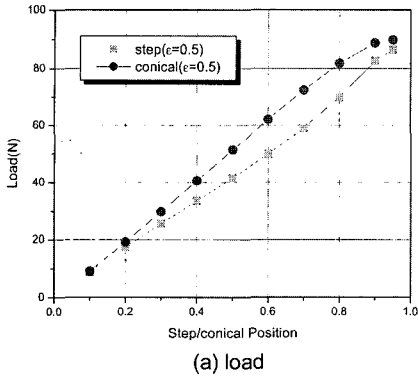


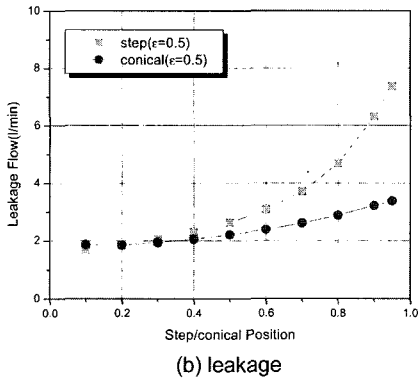
Fig. 4. Axial pressure distribution.

3-2. 스텝 또는 경사의 위치가 성능에 미치는 영향

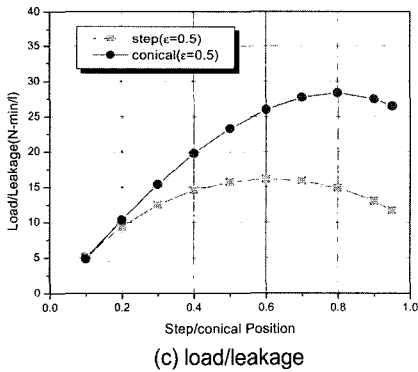
Fig. 5(a)와 (b)는 $\epsilon=0.5$ 일 때 스텝 또는 경사의 위치(n_s)의 변화에 따른 부상력과 누설유량을 그린 그



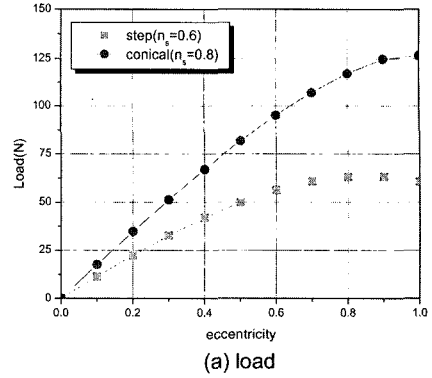
(a) load



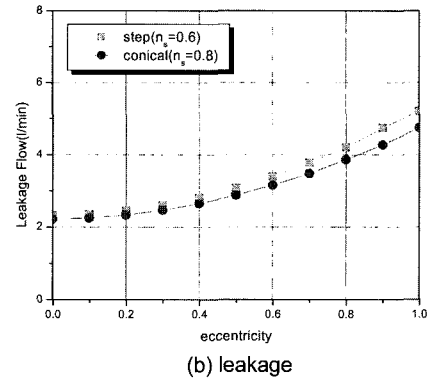
(b) leakage



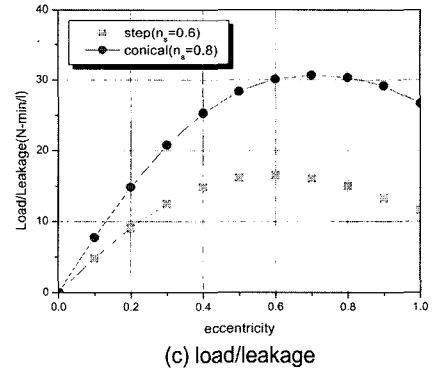
(c) load/leakage



(a) load



(b) leakage



(c) load/leakage

Fig. 5. step/conical position vs. performance curve.

래프이다. 부상력은 스텝 또는 경사의 위치가 후반으로 갈수록 증가하며, 누설유량 또한 스텝 또는 경사의 위치가 후반으로 갈수록 계속 증가한다. 부상력을 최대화하고 누설유량을 최소화하기 위해 Fig. 5(c)와 같이 load/leakage의 값을 그려보면, step 피스톤의 경우 $n_s=0.6$ 정도일 때 최적의 값을 가지고, conical 피스톤의 경우 $n_s=0.8$ 정도일 때 최적의 값을 가짐을 알 수 있다. Fig. 5에서 두 피스톤의 성능을 비교하면, 부상력과 누설유량 모두 conical piston의 경우가 더 좋은 성능을 발휘함을 볼 수 있다.

Fig. 6. eccentricity vs. performance curve.

3-3. 편심률이 성능에 미치는 영향

Fig. 6(a)와 (b)는, step 피스톤의 경우 $n_s=0.6$ 일 때, conical 피스톤의 경우 $n_s=0.8$ 일 때, 편심률의 변화에 따른 부상력과 누설유량을 그린 그래프이다. 부상력과 누설유량 모두 편심률이 커질수록 증가한다. 부상력을 최대화하고 누설유량을 최소화하기 위해 Fig. 6(c)와 같이 load/leakage의 값을 그려보면, step 피스톤의 경우 $\epsilon=0.6$ 정도일 때 최적의 값을 가지고, conical 피스톤의 경우 $\epsilon=0.7$ 정도일 때 최적의 값을 볼 수 있다. Fig. 6에서 두 피스톤의 성능을 비교하면, 부

상력과 누설유량 모두 conical piston의 경우가 더 좋은 성능을 발휘하는데, 특히 부상력은 2배 이상의 현저히 좋은 성능을 발휘함을 알 수 있다.

3-4. 간극비가 성능에 미치는 영향

Fig. 7(a)와 (b)는, step 피스톤의 경우 $n_s=0.6$, $\epsilon=0.5$ 일 때 스텝의 높이(s) 또는 간극비(c_2/c_1)의 변화에 따른 부상력과 누설유량을 그린 것이다. 또, conical 피스톤의 경우 $n_s=0.8$, $\epsilon=0.5$ 일 때, conical

입구높이(s) 또는 간극비($c_2/c_{1,max}$)의 변화에 따른 부상력과 누설유량을 그린 것이다. Step 피스톤의 경우, 간극비가 0.6정도일 때, 즉 스텝 높이가 반경방향 간극의 2/3일 때 가장 큰 부상력을 발생하고, 이에 반해 스텝의 높이가 작아질수록 누설유량은 작아짐을 볼 수 있다. Conical 피스톤의 경우, 간극비가 0.33정도일 때, 즉 경사 입구높이가 반경방향 간극의 2배정도일 때 가장 큰 부상력을 발생하고, 경사입구높이가 작아질수록 누설유량은 작아짐을 볼 수 있다.

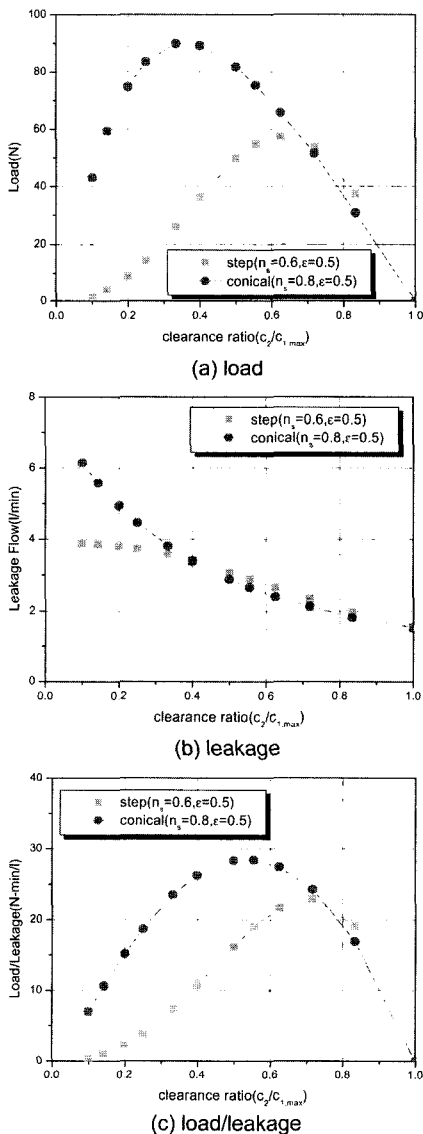


Fig. 7. clearance ratio vs. performance curve.

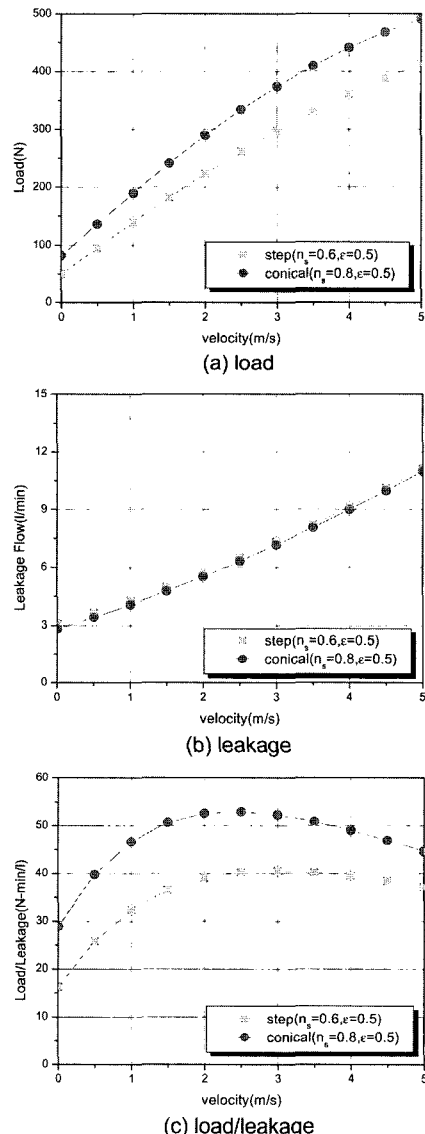


Fig. 8. piston velocity vs. performance curve.

Fig. 7(c)는 부상력을 최대화하고 누설유량을 최소화 하기 위해 간극비에 따른 load/leakage의 변화를 그린 것인데, step 피스톤의 경우 간극비가 0.7정도일 때(스텝높이가 간극의 0.43배정도) 최적 값을 가지며, conical 피스톤의 경우 간극비가 0.5정도일 때(경사입구높이가 간극 정도) 최적 값을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 7에서 두 피스톤의 누설유량을 비교해 보면 비슷한 성능을 보이고 있다. 그러나 부상력에서 뿐만 아니라 각각의 최적 간극비 조건에서는, step 피스톤의 경우가 나은 성능을 보이는 구간이 약간 나타나기는 하지만, 대체적으로는 conical piston의 경우가 현저히 더 좋은 성능을 발휘함을 확인할 수 있다.

3-5. 피스톤의 속도가 성능에 미치는 영향

Fig. 8(a)와 (b)는, step 피스톤의 경우 $n_s=0.6$, $\epsilon=0.5$ 일 때, conical 피스톤의 경우 $n_s=0.8$, $\epsilon=0.5$ 일 때, 피스톤의 속도에 따른 부상력과 누설유량을 나타낸 것이다. 부상력과 누설유량은 피스톤의 속도가 증가할수록 급격히 커지게 되는데, 속도가 5.0 m/s일 때 정지 상태에 비해 대략 5배 이상의 부상력과 3배 이상의 누설유량이 발생함을 볼 수 있다. Fig. 8(c)는 부상력을 최대화하고 누설유량을 최소화하기 위해 속도에 따른 load/leakage의 변화를 그린 것인데, 피스톤의 속도가 2.5~3.0일 때 가장 좋은 성능을 발휘함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 스텝 및 경사 형태의 sealess 실린더에 대해 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 왕복 운동하는 sealess 실린더에 대한 2차원적 레이놀즈 방정식을 유도하고, 유한차분법에 의해 그 해를 구한 후, 그 결과를 설계에 적용할 수 있도록 하였다. 피스톤 중심으로의 부상력(self-centering force) 및 누설유량(leakage flow)에 대한 해석결과를 비교하면, conical 피스톤의 경우가 step 피스톤의 경우보다 보다 우수한 성능을 발휘한다. 그러나 conical 피스톤의 경우 높은 수준의 기계적 가공정도를 요구하기 때문에 가공비가 크게 올라갈 뿐 아니라 설계대로 정밀하게 가공하기가 쉽지 않다. 따라서 실제로는 step 피스톤을 사용할 것을 권장된다.

참고 문헌

1. Belforte G, Raparelli T., Mazza L. and Trivella A., "Analysis and design of pistons for sealess pneumatic cylinders," *Fluid Power, Forth JHPS International Symposium*, pp. 459-464, 1999.
2. Belforte G, Raparelli T., Ferraresi C. and Trivella A., "New design of low friction cylinders," *12 Aachene Fluidtechnicshes Kolloquium*, Aachen, Germany, pp. 629-642, 12-13 March, 1996.