

고압용 웨어링의 접촉거동 특성에 대한 유한요소 해석

최동열 · 고영배 · 김청균
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

on Contact Behaviour Characters of High pressure Wearing using Finite Element Analysis

Dong Yul Choi · Young Bae Ko · Chung Kyun Kim
Tribology Research Center, Hongik University

Abstracts - Piston seal is a device designed to prevent leakage in split connections or between relatively moving part. Contact force, critical pressure at which extrusion occurs, leakage rate, fluid film thickness and friction force have been analyzed for some design parameter such as clearance between cylinder wall piston, depth of rectangular groove and pressure of sealed hydraulic fluid. In this paper, we analyze displacement and stress of Wearing by finite element analysis to understand Contact Behaviour Characters.

Key Words : Wearing, Main piston, extrusion, finite element method

1. 서 론

액츄에이터는 동력전달의 역할을 맡아 광범위한 분야에서 사용되고 있다. 광범위한 분야란 건설기계, 농업기계, 선박, 공작기계, 사출성형기 등이 액츄에이터를 사용하는 각종기계이다. 이들 기계장치에 대해 고형경량화, 안전성향상, 기계로서의 종합효율의 향상 등 다종 다량의 대역을 띠고 각각의 목적에 대응한 활약을 하고 있다.

최근에 유압장치의 대용량화, 고성능화 및 장수명화 추세에 따라서 액츄에이터 설계자에게는 실린더용 왕복동형 밀봉 장치의 초기압축력, 임계압력, 누설 마찰력 등에 대한 정확한 해석 데이터를 필요로 한다.

시일의 파손 원인은 실린더 작동시의 작동유체의 압력, 상대접촉 운동 속도, 간섭량, 시일 소재의 특성등에 따라서 다르기는 하지만 가장 중

요한 원인이 시일의 돌출 현상(Extrusion)인 것으로 알려져 있다[1,2]

장갑차에 설치된 ISU(In-arm Suspension Units)의 밀봉 안전성을 위해 장갑차에 걸리는 정하중과 동하중을 액츄에이터 내부의 피스톤-실린더 사이에 장착된 미끄럼 마찰 접촉식의 피스톤 시일이 담당하고 있으며, 피스톤을 경계로 주입된 윤활유와 질소가스(N₂)를 완벽하게 분리시켜서 외부에서 가해지는 하중에 대한 감쇄기능을 보장하고 액츄에이터의 하중지지와 하중전달 기능을 안전하게 확보할수 있어야한다.

그중에서도 웨어링은 피스톤이 실린더에 대하여 미끄럼 마찰운동을 하면서 피스톤이나 실린더 마찰면에 발생하는 스코링 또는 스커피 마멸(scoring or scuffing wear)이 일어나지 않도록 하는 기능을 갖고 있다. 웨어링은 피스톤의 왕복 운동중에 편심량(eccentricity)을 발생을 억제하고, 동시에 패키지의 내구성을 향상시켜주는 역할을

담당한다[3].

본 논문은 장갑차 현가장치 시스템(ISU)의 안전설계를 위해서는 액츄에이터의 핵심기술인 피스톤 시일에 대한 기반연구를 통해 GTC(Greene Tweed) 시일제품인 웨어링의 변형거동 특성과 설계특성을 고찰하였다.

2. 모델링 및 해석 조건

액츄레이터에서 사용되는 시일재질은 일반적으로 고무계통의 폴리머(Polymer)재질로 구성되어 있는데, 이와 같은 재질은 소재의 특성상 대변형성, 비선형 응력-변형을 관계 등의 비선형 성질 때문에 유한요소 해석시 매우 주의 깊게 수행되어야 한다. 이러한 비선형성을 고려한 거동해석을 할 수 있는 범용 코드로는 ABAQUS, MARC와 고무재질 전용해석 코드인 B-REBBER가 있다[4].

본 논문은 시일의 동적 거동상태를 해석하기 위하여 고무의 비선형성(비선형 재질, 기하학적 비선형성, 비선형 경계조건)을 고려하여 해석할 수 있는 Marc를 사용하였다[5].

Fig. 2(a)에서 메인 피스톤에서 웨어링은 좌우측에 1개씩 총 2개가 설치되어 밀봉성을 확보토록 하고, 웨어링 소재로는 강화 폴리에스터 레진(reinforced polymer resin)이 대표적이며, 이 레진은 웨어링의 기계적 강도와 내마멸성을 우수하게 유지해준다.

Table 2. Material propertise of an ACGT seal

	Wear ring
Material type	915 Polyester Fabric
Young's modulus, MPa	10,700
Possion's ratio	0.34
Mass density, kg/m ³	1630
Thermal expansion coefficient at 20°C $\mu\text{m/m} \cdot \text{K}$	54
Thermal conductivity, W/m · K	0.56
Specific heat, J/kg · K	1,000

2-1. 해석조건과 경계조건

피스톤과 실린더 사이를 밀봉하기 위한 피스톤시일의 기하학적인 형태와 변형은 축대칭이고 접촉력 해석시 시일이 온도는 등온상태(isothermal)을 유지하며 시일의 작동조건에 따른 영향은 피스톤 본체와 실린더를 제외한 고무에만 미친다고 가정한다.

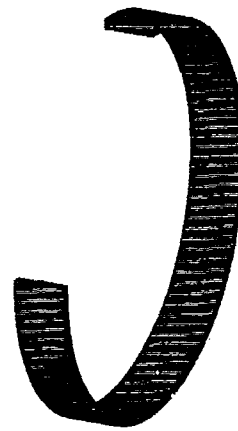
Fig. 2(b)는 피스톤 시일 모델 해석에 사용된 유한요소 데이터로 Wearing은 504개의 축대칭 4각형요소와 577개의 요소절점으로 구성되어 있다. 해석조건은 피스톤 조합시, 스트로시, 리턴스트로크시 3가지경우에 대하여 X축변위량과 응력의 변형량을 비교하였으며 마찰계수, 좌우압력차, 속도의 조건에 대하여서 고찰을 하였다.

3. 해석 결과 및 토의

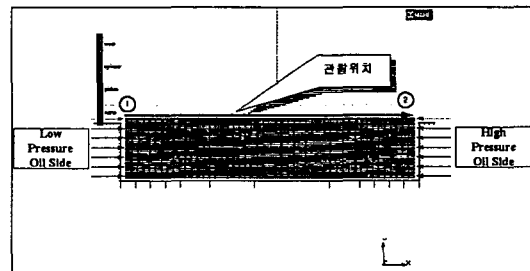
3-1. 응력분포 해석

① 조립 초기의 응력분포

웨어링이 구형 그루브(rectangular groove)에



(a) Analysis model of an Wearing



(b)Boundary condition

Fig. 2 FEM model and boundary condition

조립된 초기에 실린더와 피스톤 사이의 밀봉간극(sealing clearance)은 0.2mm, 마찰계수는 0.05, 피스톤 속도는 3m/s, 최고압력 800bar가 작용할 경우 웨어링에 걸리는 von Mises 최대응력은 856.7MPa로 웨어링의 바닥면에 균일하게 발생한다.

② 피스톤의 스트로크가 작용할 경우의 응력 분포

왕복운동을 하는 피스톤의 스트로크(stroke) 작용에 의해 웨어링이 마찰력을 받아 피스톤의 운동방향과는 반대되는 방향으로 이동할 경우, 웨어링에 걸리는 von Mises 최대응력은 856.8MPa로 피스톤의 운동방향으로 구형 그루브와 웨어링이 접촉하는 좌측 하단부 코너에서 발생한다.

③ 피스톤의 리턴 스트로크가 작용할 경우의 응력 분포

왕복운동을 하는 피스톤의 리턴 스트로크(return stroke) 작용에 의해 웨어링이 마찰력을 받아 피스톤의 귀환운동 방향으로 이동할 경우, 웨어링에 걸리는 von Mises 응력분포를 Fig. 3-1에서 보여주고 있다.

이 때에 웨어링에 걸리는 von Mises 최대응력은 857.5MPa로 피스톤의 리턴 운동방향으로 구형 그루브와 웨어링이 접촉하는 하단부 코너 우측에서 발생한다.

Fig. 3-2은 피스톤과 실린더 사이의 마찰계수는 0.05, 피스톤 속도는 3m/s, 최고압력이 800bar일 경우에 웨어링에 걸리는 von Mises 최대응력 크기를 밀봉간극의 크기를 0~0.2mm

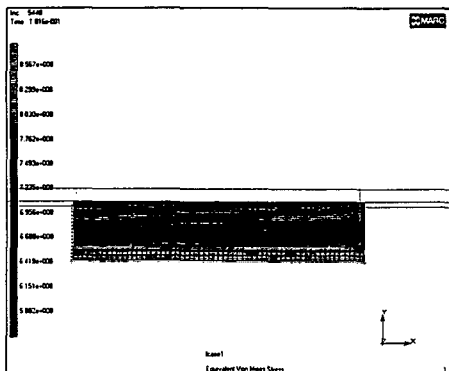


Fig. 3-1 피스톤의 1회 왕복운동후 발생한 von Mises응력 분포도

까지 변화시켜 가면서 웨어링의 설치 초기, 스트로크가 작용된 경우, 리턴 스트로크가 작용된 경우의 세가지에 대한 해석결과를 제시하고 있다. 웨어링이 설치된 초기에는 von Mises 최대응력이 856.7MPa로 대단히 작지만, 피스톤의 스트로크나 리턴 스트로크가 발생하는 경우는 case3경우처럼 1412.3MPa, 1412.5MPa로 대단히 큰 값을 제시하고 있다.

case1의 밀봉간극은 0.2mm, case2는 0.1mm, case3는 0mm인 경우로 Table 3-1에 요약되어 있다. 이들의 해석결과를 제시한 Table 3-2의

Table 3-1 밀봉간극과 모델과의 관계

Case	실린더-피스톤의 Clearance(mm)	비 고
1	최초 장착상태, 0.2	실린더와 웨어링이 비접촉(0.005)
2	0.1	
3	0	실린더와 피스톤이 접촉상태

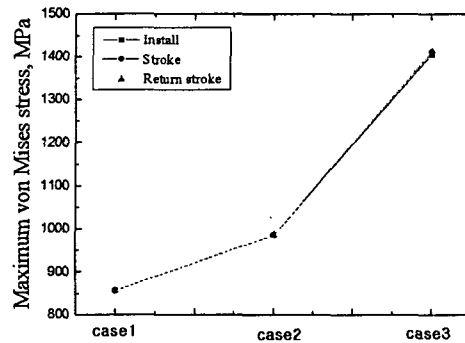


Fig. 3-2 피스톤과 실린더 사이의 밀봉간극 변화에 따른 von Mises 최대응력

Table 3-2 밀봉간극 변화에 따라 웨어링에 작용하는 von Mises 최대응력

Case	Install(MPa)	Stroke(MPa)	Return stroke(MPa)
Case1	856.7	856.8	857.5
Case2	986.1	986.5	987.3
Case3	1404	1412.3	1412.5

수치를 보면, 웨어링에 걸리는 von Mises 응력이 밀봉간극이 줄어들수록 급격하게 증가한다. 특히 왕복운동을 하는 피스톤이 리턴 스트로크를 발생할 경우에 case3에서 피스톤의 운동방향과는 반대되는 그루브와 웨어링이 접촉하는 하단부 코너에서 von Mises 최대응력 1412.5MPa가 발생한다.

Fig. 3-3는 피스톤과 실린더 사이의 밀봉간극은 0.2mm, 마찰계수는 0.01~0.1, 피스톤 속도는 3m/s, 최고압력이 800bar일 경우에 웨어링에 걸리는 von Mises 최대응력 크기를 웨어링의 설치 초기, 스트로크가 작용된 경우, 리턴 스트로크가 작용된 경우의 세가지에 대한 해석결과를 제시하고 있다.

여기서 웨어링이 설치된 초기에는 마찰계수가 작으나 크나 관계없이 von Mises 최대응력이 595.9MPa로 균일하게 나타났으며, 피스톤의 스트로크나 리턴 스트로크가 작용하는 경우는 마찰계수가 증가함에 따라서 약간씩 증가하는 경향을 나타낸다. 피스톤의 스트로크보다는 리

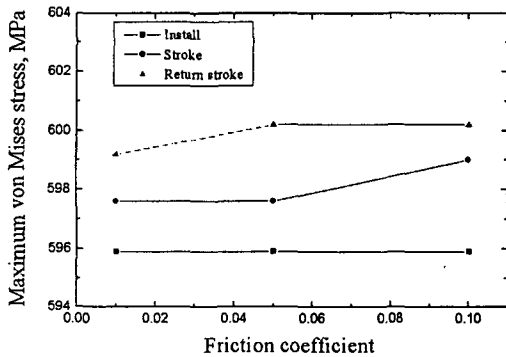


Fig. 3-3 피스톤과 실린더 사이의 마찰계수 변화에 따른 von Mises 최대응력

Table 3-3 피스톤의 운동방향에 따라 마찰계수가 웨어링에 작용하는 von Mises 최대응력

Friction coefficient	Install(MPa)	Stroke(MPa)	Return stroke(MPa)
0.01	595.9	597.6	599.2
0.05	595.9	597.6	600.2
0.1	595.9	599	600.2

턴 스트로크에서 분명한 마찰계수의 영향을 관찰할 수 있다.

마찰계수 데이터는 피스톤의 왕복운동에서 밀봉간극에 유막을 형성시켜 웨어링에 걸리는 응력분포를 완화시키는 것도 대단히 중요함을 알 수 있다. 이들의 해석결과를 제시한 Table 3-3의 수치를 보면, 웨어링에 걸리는 von Mises 응력은 마찰계수에 의해 영향을 받는다.

Fig. 3-4은 피스톤과 실린더 사이의 밀봉간극은 0.2mm, 마찰계수는 0.05, 피스톤 속도는 0.1~3m/s, 최고압력이 800bar일 경우에 웨어링에 걸리는 von Mises 최대응력 크기를 웨어링의 설치 초기, 스트로크가 작용된 경우, 리턴 스트로크가 작용된 경우의 세가지에 대한 해석결과를 각각 제시하고 있다.

웨어링이 설치된 초기에는 피스톤의 속도가 작으나 크나 관계없이 von Mises 최대응력이 595.9MPa이며, 피스톤의 스트로크나 리턴 스트로크가 작용하는 경우는 피스톤의 속도가 증가

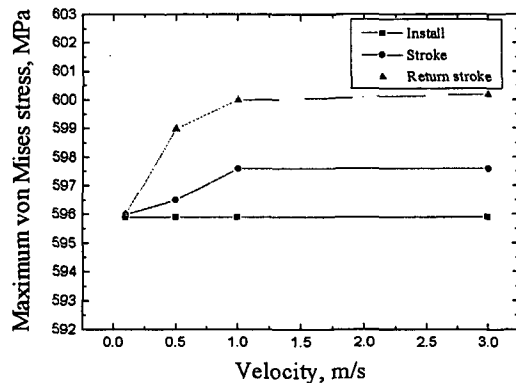


Fig. 3-4 피스톤의 왕복동 속도 변화에 따른 von Mises 최대응력

Table 3-4 피스톤의 속도에 따라 웨어링에 작용하는 von Mises 최대응력

Velocity	Install(MPa)	Stroke(MPa)	Return stroke(MPa)
0.1	595.9	596	596
0.5	595.9	596.5	599
1	595.9	597.6	600
3	595.9	597.6	600.2

함에 따라서 약간씩 증가하는 경향을 나타낸다. 피스톤의 스트로크보다는 리턴 스트로크에서 분명한 속도의 영향이 크다는 사실을 관찰할 수 있다. 피스톤 속도가 0.1m/s 에서는 웨어링의 응력이 비교적 균일하게 나타나기 때문에 별다른 문제점이 없으나, 이들의 해석결과를 제시한 Table 3-4의 수치를 보면, 웨어링에 걸리는 von Mises 응력은 피스톤의 속도에 의해 약간 영향을 받는다. 특히 왕복운동을 하는 피스톤이 리턴 스트로크를 발생할 경우에 큰 von Mises가 발생한다.

Fig. 3-5는 피스톤과 실린더 사이의 밀봉간극은 0.2mm, 마찰계수는 0.05, 피스톤 속도는 3m/s, 최고압력이 0~800bar일 경우에 웨어링에 걸리는 von Mises 최대응력 크기를 웨어링의 설치 초기, 스트로크가 작용된 경우, 리턴 스트로크가 작용된 경우의 세가지에 대한 해석결과를 제시하고 있다. 여기서 웨어링의 좌우에 걸리는 압력차가 있다해도 von Mises 최대응력은 웨어링의 설치 초기에 595.9MPa, 스트로크가 작용된 경우에 597.6MPa, 리턴 스트로크가 작용된 경우에 600.2MPa 등으로 거의 균일하게 나타났다. 이것은 웨어링의 기계적 강성도가 대단히 크기 때문에 웨어링에 걸리는 압력차 정도는 전혀 문제가 될 수 없다.

3-2 변위량 분포 해석

① 조립 초기의 수평변위량 분포

웨어링이 구형 그루브에 조립된 초기에 실린더와 피스톤 사이의 밀봉간극은 0.2mm, 마찰계

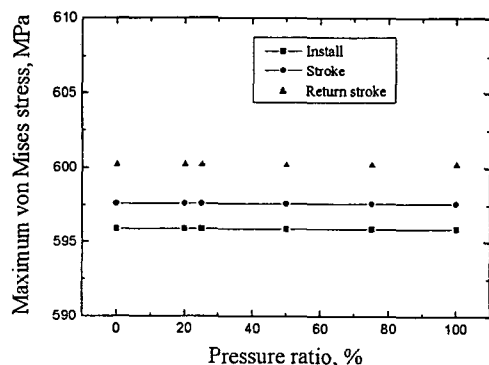


Fig. 3-5 웨어링에 걸리는 압력차에 따른 von Mises 최대응력

수는 0.05, 피스톤 속도는 3m/s, 최고압력이 800bar 작용할 경우 웨어링에서 발생된 최대 변위량은 0.1855으로 웨어링의 끝단부에서 균일하게 발생한다.

② 피스톤의 스트로크가 작용할 경우의 수평 변위량 분포

왕복운동을 하는 피스톤의 스트로크(stroke) 작용에 의해 웨어링이 마찰력을 받아 피스톤의 운동방향과는 반대되는 방향으로 이동할 경우, 웨어링에 걸리는 최대 변위량은 0.1857mm로 운동방향과 반대되는 그루브와 웨어링이 접촉하는 상단부의 밀봉간극 코너에서 발생한다.

③ 피스톤의 리턴 스트로크가 작용할 경우의 변위량 분포

왕복운동을 하는 피스톤의 리턴 스트로크(return stroke) 작용에 의해 웨어링이 마찰력을 받아 피스톤의 귀환운동 방향으로 이동할 경우, 웨어링에 걸리는 변위량 분포를 Fig. 4-26에서 보여주고 있다.

이 때에 웨어링에 걸리는 최대 변위량은 0.185mm로 피스톤의 리턴 운동방향과 반대되는 그루브와 웨어링이 접촉하는 상단부의 밀봉간극 코너에서 발생한다.

Fig. 3-7은 피스톤과 실린더 사이의 마찰계수는 0.1, 피스톤 속도는 3m/s, 최고 압력이 800bar일 경우에 웨어링에 발생되는 최대 변위량 크기를 밀봉간극의 크기를 0~0.2mm(Table 3-1 참조)까지 변화시켜 가면서 웨어링의 설치

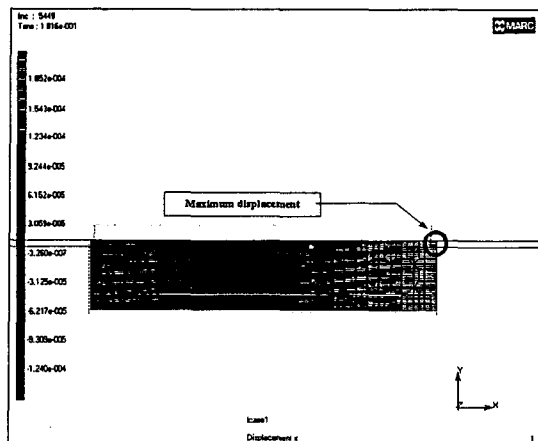


Fig. 3-6 피스톤의 리턴 스트로크에 의해 발생된 변위량 응력 분포도

초기, 스트로크가 작용된 경우, 리턴 스트로크가 작용된 경우의 세가지에 대한 해석결과를 제시하고 있다. 여기서 밀봉간극이 큰 case1(밀봉간극 0.2mm)에서는 최대 변위량은 0.1855mm이며, 밀봉간극이 줄어드는 case2부터는 피스톤이 왕복동 운동을 하면서 웨어링에서 발생하는 최대 변위량이 증가하는 결과를 Fig. 3-7에서 제시하고 있다.

이들의 해석결과를 제시한 Table 3-5의 수치를 보면, 웨어링에 걸리는 최대 변위량은 밀봉간극이 줄어들수록 급격하게 증가한다. 특히 왕복운동을 하는 피스톤이 리턴 스트로크를 발생할 경우에 피스톤의 운동방향과는 반대되는 그루브와 웨어링이 접촉하는 상단부 코너에서 최대 변위량이 발생한다.

Fig. 3-8에서 피스톤과 실린더 사이의 밀봉간극은 0.2mm, 마찰계수는 0.01~0.1, 피스톤 속도는 3m/s, 최고압력이 800bar일 경우에 웨어링에서 발생하는 최대 변위량 크기를 피스톤이 왕복동 운동을 하는 스트로크가 작용된 경우와

리턴 스트로크가 작용된 경우의 두가지에 대한 해석결과를 제시하고 있다. 여기서 웨어링이 설치된 초기에는 마찰계수가 작으나 크나 관계없이 최대 변위량은 0.1855mm 정도로 대단히 작다.

이들의 해석결과를 제시한 Table 3-6의 수치를 보면, 웨어링에서 발생한 최대 변위량은 마찰계수에 의한 영향이 있다는 사실이다. 마찰계수가 0.1인 스트로크 과정에서 최대 변위량 0.18573mm이다.

Fig. 3-9에서 피스톤과 실린더 사이의 밀봉간극은 0.2mm, 마찰계수는 0.05, 피스톤 속도는 0.1~3m/s, 최고압력이 800bar일 경우에 웨어링에서 발생한 최대 변위량 크기를 스트로크가 작용된 경우와 리턴 스트로크가 작용된 경우의 두가지에 대한 해석결과를 각각 제시하고 있다.

여기서 웨어링이 설치된 초기에는 피스톤의 속도가 작으나 크나 관계없이 최대 변위량은 0.1855mm이며, 피스톤의 스트로크나 리턴 스트로크가 작용하는 경우는 피스톤의 속도가 증가

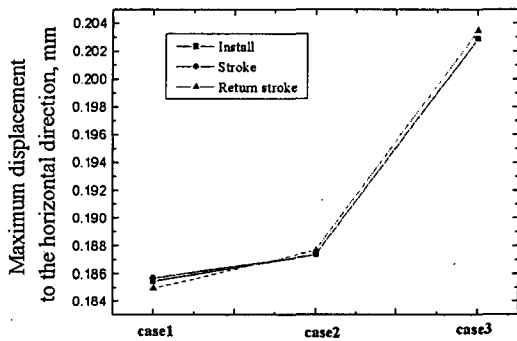


Fig. 3-7 피스톤과 실린더 사이의 밀봉간극 변화에 따른 최대 변위량

Table 3-5 밀봉간극 변화에 따라 웨어링에 발생하는 최대 변위량

Case	Install(mm)	Stroke(mm)	Return stroke(mm)
Case1	0.1855	0.1857	0.185
Case2	0.1874	0.1874	0.1877
Case3	0.2029	0.2029	0.2035

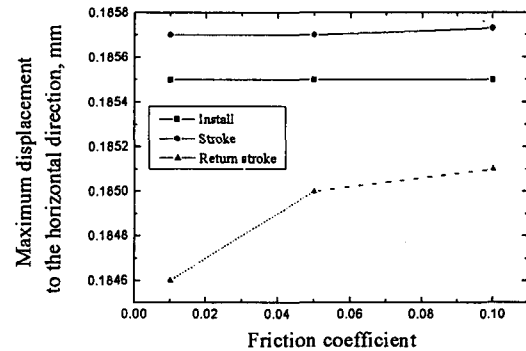


Fig. 3-8 피스톤과 실린더 사이의 마찰계수 변화에 따른 최대 변위량

Table 3-6 피스톤의 운동방향에 따라 웨어링에서 발생하는 최대 변위량

Friction coefficient	Install(mm)	Stroke(mm)	Return stroke(mm)
0.01	0.1855	0.1857	0.1846
0.05	0.1855	0.1857	0.185
0.1	0.1855	0.18573	0.1851

함에 따라서 최대 변위량이 증가하는 경향을 나타낸다.

이들의 해석결과를 제시한 Table 3-7의 수치를 보면, 웨어링에서 발생된 최대 변위량은 피스톤의 왕복동 속도에 의해 영향을 받는다는 사실이다. 특히 왕복운동을 하는 피스톤이 스트로크 과정에서 발생한 변위량은 3m/s에서 0.1857mm가 발생되어 가장 큰 변위량이 발생했다.

Fig. 3-10에서 피스톤과 실린더 사이의 밀봉 간극은 0.2mm, 마찰계수는 0.05, 피스톤 속도는 3m/s, 최고압력이 0~800bar일 경우에 웨어링에서 발생된 최대 변위량 크기를 피스톤에 스트로크가 작용된 경우와 리턴 스트로크가 작용된 경우의 두가지에 대한 해석결과를 제시하고 있다. 여기서 웨어링의 좌우에 걸리는 압력차가 있다 해도 웨어링에 걸리는 최대 변위량은 피스톤의 스트로크가 작용된 경우에 0.1857mm, 리턴 스트로크가 작용된 경우에 0.1853mm로 거의 균일

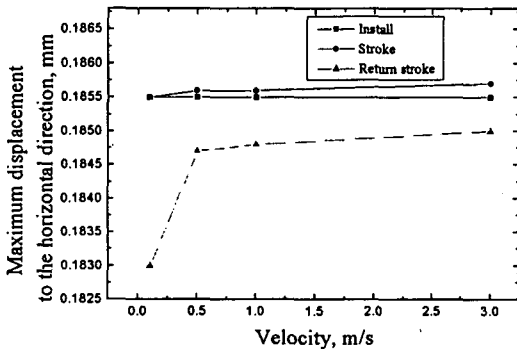


Fig. 3-9 피스톤의 왕복동 속도 변화에 따른 최대 변위량

Table 3-7 피스톤의 속도에 따라 웨어링에서 발생된 최대 변위량

Velocity	Install(mm)	Stroke(mm)	Return stroke(mm)
0.1	0.1855	0.1855	0.183
0.5	0.1855	0.1855	0.1847
1	0.1855	0.1856	0.1848
3	0.1855	0.1857	0.185

하게 나타났다. 이것은 웨어링의 기계적 강성도가 대단히 크기 때문에 웨어링에 걸리는 압력차 정도는 전혀 문제가 될 수 없다는 사실을 제시한다.

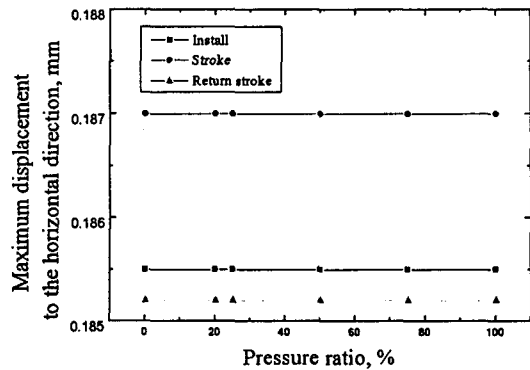


Fig. 3-10 웨어링에 걸리는 압력차에 따른 최대 변위량

4. 결 론

시일의 밀봉성능은 액추에이터의 하중지지 용량이나 위치제어, 감쇄 성능 등에 직접적인 영향을 미치는 핵심부품으로 엄밀한 해석하에 최적화 설계가 이루어져야 한다. 즉, 장갑차 궤도에 설치된 ISU 시스템의 밀봉성을 충분히 확보하여 오일과 유압 작동유, 유압 작동유와 질소 가스 사이의 하중지지 감쇄 안전성을 보장하기 위한 동적시일 시스템 구축은 대단히 중요한 안전설계이다. 이것을 위하여 메인 피스톤에는 2개의 웨어링으로 유막의 형성과 이동, 메인시스템의 왕복동 운동에 관련된 피스톤의 안전성을 확보해야한다. 본 논문의 결과로 최소 밀봉 간격 0.2mm를 유지하는 것이 피스톤의 편심력에 의한 손실을 최소화 시킬수 있는 이상적인 간격이다. 또한 가능한 마찰계수를 작게하는 것이 응력과 변형량측면에서 유리하다. 메인 피스톤의 최대 속도인 3m/s보다는 웨어링의 수명과 메인 피스톤의 효율을 고려하여 최적의 속도를 구하는 것이 중요하다.

참고문헌

- [1] Botto, P., Dragoni, E., and Strozzi, A., "Finite Element Redesign of Reciprocating 'PTFE' Rod Seals," Proc of 13th BHRA Conf., pp673~678, 1992
- [2] Belforte, G., Raparelli, T., and Velardocchia, M., "Effect of Mounting Tolerances on Pneumatic Cylinder Lip Seal Friction Forces," STLE, Vol. 50, No. 11 pp. 841~845, 1994
- [3] Rober V. Brink, Daniel E. Czernik, Leslie A. Horve, "Handbook of fluid sealing," Macgraw-hill, pp. 12.8~12.9, 1993.
- [4] Arridge, R. G. C., "Mechanics of Polymers," Charendon Press, 1975.
- [5] MARC Analysis Research Corporation, Computer Program *MARC*, California, USA.1994