

유압실린더 로드씰을 위한 구조설계와 윤활설계 Structural and Lubrication Designs of Rod Seals for Hydraulic Cylinder

이영주¹, 최재혁¹, #*이병욱¹, 전정희², 민혜진²
Y. J. Lee¹, J. H. Choi¹, #*B. O. Rhee¹ (rhex@ajou.ac.kr), J. H. Jun², H. J. Min²
¹아주대학교 기계공학과, ²주원영셀

Key words : Rod sealing, Hydraulic cylinder, Structural analysis, Lubrication analysis

1. 서론

유압 실린더 로드 씰(Rod Packing)은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 유압측에 장착 되는 부품으로 변동압 완충, 압력 유지, 고온의 기름의 차단 및 실린더의 편축 형상을 예방하여 주는 부위이다. 간단한 형상의 구조물이지만 작동 환경이 고압, 고속 이므로 장시간 반복되는 피로에 강한 특성이 요구된다[1]. 유압 실린더 로드 씰은 실린더 내부에 위치하여 내부의 윤활작용이 일어나는 현상을 관찰하기 힘들 뿐만 아니라 그 내부 응력에 의하여 씰의 피로 파괴 및 변형을 관찰하기 힘들다. 로드 씰의 특징상 한번 설치가 되면 장기간 기능을 유지 하여야 하며 교환을 통한 유지 보수가 힘든 제품이기 때문에 설계에 유의하여야 한다[2]. 국내에서는 로드 씰과 같은 유압용 씰에 대한 설계 기술이 전혀 이루어지지 않았었다. 로드 씰 설계를 위한 해석으로서 씰의 구조 해석과 해당 구조를 가지는 씰이 유막을 형성하며 윤활작용을 할 수 있는지를 검토하는 윤활해석이 필요하다.

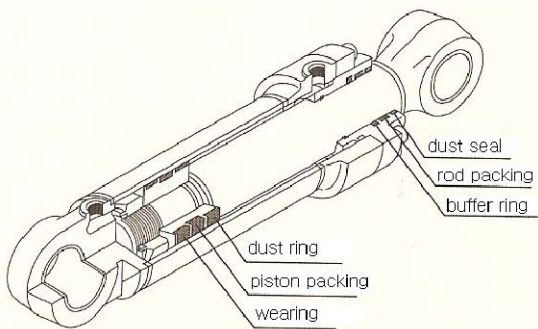


Fig. 1. Rod packing in the hydraulic cylinder [1]

본 연구에서는 로드 씰 설계를 위한 기본적인 구조해석과 윤활해석을 수행하였다. 구조해석은 로드 씰이 조립된 상태에서 변형에 의해 발생하는 접촉력을 계산하였다. 윤활해석은 초기 조립상태의 형상에서 유막이 형성되면서 발생하는 상승력을 구하였다. 구조해석과 윤활해석에서 구해진 접촉력과 상승력이 적정한 상태를 가지는가를 검토하였다. 보다 정확한 해석을 위해서는 구조해석과 유체해석이 병행되어야 하는 Multi-Physics Problem 으로 다루어야 하겠지만, 탄성체 특성을 가진 로드 씰의 변형을 해석하는 것은 매우 긴 시간과 노력을 필요로 하므로, 본 연구에서는 구조해석과 윤활해석을 분리하여 수행한 후 기본적인 조건을 검토하는 방법으로 연구를 진행하였다.

2. 구조 해석

로드 씰을 하우징의 취부홈에 장착하면 Lip 이 변형을 하게 된다. 조립에 의한 변형을 ABAQUS 를 이용하여 해석을 수행하였다. Fig. 2 는 하우징 취부홈 내에 결합된 로드 씰이 로드와 접촉하여 결합이 완료된 시점에 대한 구조해석 결과를 나타낸다. 로드 씰의 해석은 회전방향 곡률이 크지 않다는 가정하에 2 차원으로 해석하였다. 구조 해석은 로드와 접촉을 하는 Lip 부분의 변형을 중심으로 해석하였

다. 이 부분은 국부적인 변형이 가장 크게 일어나 응력이 집중되는 장소이며 윤활작용을 위한 공간의 형성에 가장 중요한 부분이기도 하다. 따라서 Lip 부분의 메시 밀도를 다른 곳보다 높여서 해석을 수행하였다.

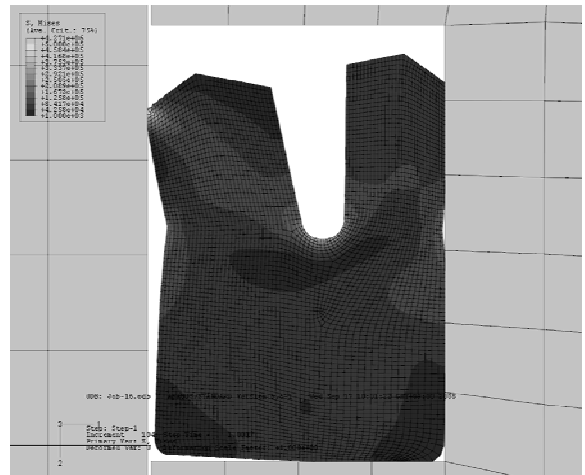


Fig. 2. Deformed shape of the rod packing after the initial assembly

결과를 살펴보면 비교적 두께가 얇은 외측 부분은 변형을 통해 취부홈 내면과 접촉을 하게 된다. 반면 유막이 형성 될 Lip 부위는 로드와 일부 접촉 하면서 밀폐와 동시에 유막이 형성 될 공간을 생성한다. 이 공간은 로드 씰의 윤활을 위한 중요한 기능적 요소로 작용한다. 때문에 로드 씰의 설계 변수에 따라 이 접촉면의 생성과 접촉각의 변화를 주의 깊게 살펴 보아야 한다. 해당 부위는 초기 조립에 의한 변형 이외에 유막 형성으로 인한 상승력으로 들어 올려지는 추가 변형을 하게 된다. 그러나, 본 연구에서는 상승력에 의한 추가 변형이 매우 작기 때문에 추가적인 해석을 수행하지는 않았다. 로드 씰이 로드 면에 대해 누르는 접촉력은 접촉이 발생한 부분에 걸리는 압력을 적분하여 계산하였다.

3. 윤활 해석

윤활 해석은 FLUENT 를 이용하여 수행하였다. 해석을 위한 모델은 Fig. 3 에서 보이듯이 윤활 작용이 발생하는 공간의 앞과 뒤의 공간은 오차를 줄이기 위해 윤활 공간에 비해 상대적으로 매우 크게 설정하였으며 메시 밀도는 상대적으로 작게 제작하였다. 구조 해석에서 계산된 로드 씰의 변형 형상을 이용하여 윤활해석을 수행할 형상 자료를 만들었다. 윤활해석을 위해 유막 두께는 미리 결정된 값으로 주어졌으며, 유막 두께를 변화하면서 유막에서 발생하는 상승력을 계산하였다. 윤활 작용에 의한 상승력은 윤활 공간에서 발생한 압력을 윤활 공간의 길이 방향으로 적분하여 얻었다.

윤활 해석은 변형 해석을 통해 관찰된 씰의 변형에 의해서 제한 조건이 설정된다. 로드 벽면과의 접촉 면적과 접촉할 때 생기는 각도에 따라 유체의 흐름과 저항이 발생한다. 윤활이론에 대한 초기 검증[3]을 하였고 접촉 각과

접촉 길이, 유속에 의하여 상승력이 선형적인 관계를 가지고 발달함을 관찰 하였다. 유막 두께를 0.02, 0.03, 0.035 mm 일 때 발생하는 상승력을 Fig. 4 에 나타내었다.

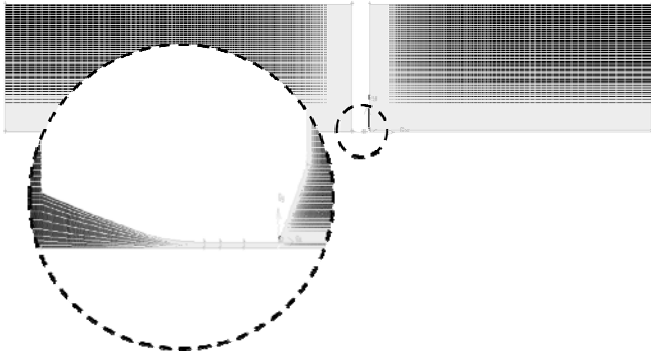


Fig.3. Lubrication analysis model for the FLUENT

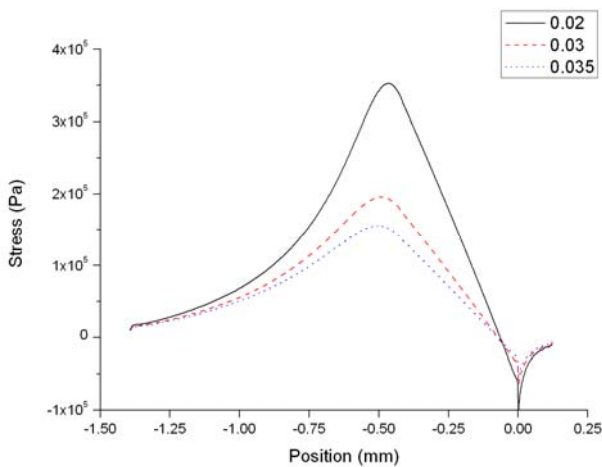


Fig.4. Lifting force according to various oil film thicknesses

4. 결과 검토

윤활 해석의 결과를 살펴 보면 유막 두께에 따른 응력은 유막 두께가 두꺼워 질수록 반경 방향 응력이 감소하고 이에 따라 상승력이 감소하였다. 초기 조립으로 인한 로드 쉘의 접촉력의 크기를 구조 해석을 통하여 계산한 후 이를 윤활 해석에서 얻어진 유막 두께의 변화에 따른 상승력과 비교 검토하였다. 접촉력과 동일하거나 큰 상승력이 발생할 수 있는 유막 두께가 주어진 작동유에서 형성될 수 있는 상태가 되어야만 원활한 윤활 작용이 발생할 수 있을 것이다. 이와 같은 비교 검토를 통해 주어진 접촉력에 대해서 원활한 윤활 작용이 가능한 최대 유막 두께를 예측할 수 있다. 기존 로드 쉘의 물성과 형상 정보를 이용하여 계산한 로드 쉘의 접촉력은 100.07 N/m 이었다. 윤활 해석에 의해 유막 두께가 0.035mm 가 되면 상승력이 94.65N/m 가 발생하는 것을 알 수 있었다. 유막 두께가 0.035mm 보다 약간 작아진다면 계산된 접촉력을 이기고 유막을 형성할 수 있을 것이다. 즉, 주어진 상태에서 형성될 수 있는 최대 유막 두께는 약 0.035mm 보다 약간 작은 값일 것이며 이는 충분히 형성 가능한 유막 두께로서 주어진 로드 쉘이 윤활 작용을 하는데 문제가 없음을 나타낸다.

로드 쉘의 특성을 결정하기 위한 몇 가지 설계변수를 설정할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 설계변수의 예로서 중앙 홈 깊이를 선정하였으며 설계변수의 변화에 따른 접촉력의 변화를 검토하였다. 그 외의 치수는 고정된 상태로 설정하였다. 중앙 홈 깊이를 기존 제품의 치수를 기준으로 양쪽으로 각각 5mm 씩 2 수준씩 변화를 주어서 결과를 관찰하였다. 중앙 홈 깊이를 총 5 수준으로 변화하면서 계산한 결과는 Fig. 5 와 같다.

예측한 대로 중앙 홈의 깊이가 얕아질수록 굴곡부 두께

가 증가하여 변형이 작아지므로 탄성 계수가 상승하며 중앙 홈 부위에 응력이 높게 발생 하는 것을 관찰 할 수 있었다. 또한 이때의 Lip 은 외측에서 충분한 변형을 하지 못한 결과로 높은 응력이 발생하며 큰 변형으로 인한 넓은 접촉부위를 생성하게 되며 접촉력이 증가하였다. 증가된 접촉력은 원활한 윤활작용을 위해 더욱 얇은 유막 두께가 요구된다. 예측된 유막 두께가 사용된 유압 작동유가 형성할 수 있는 두께보다 작아지는 경우 유막이 제거되면서 건 접촉이 발생할 것이다. 건접촉이 발생하면 로드의 운동에 따라 매우 큰 마찰력이 발생하며 로드 쉘이 파손될 확률이 높아지므로 주의하여야 한다.

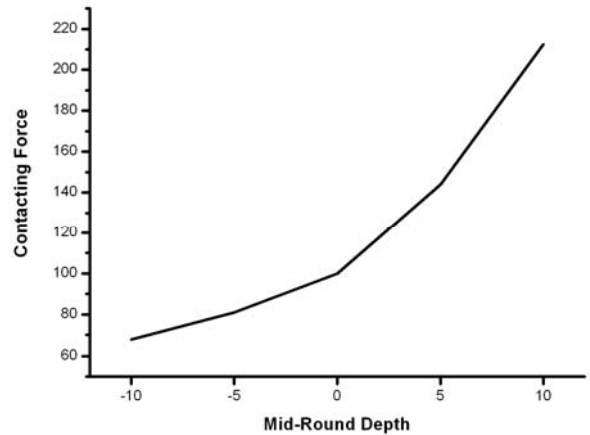


Fig.5. Contacting force of the rod packing at various groove depth of the middle position

5. 결론

본 연구에서는 구조 해석과 윤활 해석을 각각 수행하여 각각 로드 쉘의 접촉력과 윤활작용에 의한 상승력을 예측하였다. 계산된 접촉력과 상승력을 비교 검토하여 주어진 로드 쉘 구조가 형성할 수 있는 최대 유막 두께를 찾아 내었다. 계산된 유막 두께가 유압 작동유가 형성할 수 있는 유막 두께 범위 안에 있는지를 검토함으로써 로드 쉘의 구조가 적정한지를 검토할 수 있는 설계 방법론을 개발하였다. 구조 해석을 통해 기존에 사용되는 로드 쉘의 접촉력을 계산하였고 이를 위한 최대 유막 두께를 확인하였으며 이 두께는 유압 작동유가 문제 없이 형성할 수 있는 유막 두께임을 확인함으로써 개발된 설계 방법론이 타당함을 입증하였다. 본 연구에서 계산한 유막 두께와 로드 쉘의 응력 상태는 추후 적절한 실험 자료와의 비교를 통하여 검증이 필요하다.

후기

본 연구는 지식 경제부와 한국산업 기술재단의 전략기술 인력양성사업과 중소기업청의 선도형 기술혁신 전략과제 지원사업(중소기업 블루오션 지원사업)의 지원으로 진행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. NOK 社 STANDARD PRODUCTS TECHNICAL NOTE (P152 - 156)
2. Leonard J. Martin, "Practical Seal Design", DEKKER, 4-8, 1984
3. Alastair Cameron, "Basic Lubrication Theory", ELLIS HORWOOD, 52-66, 1981.