

스크레이퍼 시일의 접촉응력 거동에 관한 수치적 연구

Numerical Analysis of the Contact Stress Behaviour in Scraper Seals

나윤환^{*} · 김청균^{*} · 류병진^{**} · 유인석^{**}

^{*} 홍익대 트라이볼로지 연구센터 · ^{**} 삼성중공업 건기연구소

Abstract

This paper deals with a numerical study of the tribological contact stress distributions of elastomeric lip seals for oscillating shafts when the sealing interference and band width between the lip edge of contact seals and the shaft are present. Using the finite element method, the contact stress and band width of scraper seals are analyzed for the sealing interference including some nonlinearities such as geometrical nonlinearity, material nonlinearity and nonlinear contact boundary condition. The FEM results showed that the contact stress concentrated on the contacting lip zone between the contacting edge of lip and the shaft for the increased interference. In double lip scraper seals, the maximum contact stress of the dust lip, which is used to exclude foreign contaminants, is six times higher than that of the primary sealing lip, which is used to contain lubricants.

Key words : Scraper seals(스크레이퍼 시일), Contact stress(접촉응력), Sealing interference(밀봉 간섭량), Flinger spring(플링거 스프링), Finite element method(유한요소법)

1. 서론

외부로부터 침입하는 습증기, 먼지, 미세 모래 입자와 같은 이물질들을 차단하거나 또는 회전축에 공급한 그리이스가 원활한 윤활기능을 담당할 수 있도록 보호해주는 트라이볼로지 기소로 립 타입 스크레이퍼 시일(Scraper seal)이 널리 사용되고 있다. 스크레이퍼 시일에서는 립시일보다 접촉압력을 높이기 위하여 경질의 고무재를 사용하고, 립 선단부의 유연성을 확보하기 위해서 립부의 길이를 길게 하는 것이 일반적이다. 현실적으로 스크레이퍼 시일에서는 베어링에 충전된 내부의 그리이스가 외부로 누설되는 것보다는 외부로부터 침입하는 이물질로 인하여 메탈 베어링이나 회전축에서 발생하는 마멸입자를 최대한 억제하는 것이 회전축계의 안정성을 확보하고, 수명을 연장시키는 방안이다.

시일 립 선단부가 접촉하는 회전축의 가공상태 및 조립오차, 축을 회전·지지하는 메탈 베어링 시스템의 동적 강성도, 시일의 조립상태와 사용 조건 문제로 인하여 시일과 회전축 사이에는 항상 편심된 상태에서 운전되고 있다. 스크레이퍼 시일 선단부에는 메탈 베어링 내의 각종 이물질을 제거하기 위하여 주기적으로 배출시킨 그리이스에 외부로부터 침입한 이물질이 혼합되고, 이러한 상태에서 회전축은 반복적인 요동운동을 수행해야 하므로 접촉 운동면의 마찰조건은 대단히 가혹하다. 또한 시일이 실제로 밀봉기능을 수행하면서 접촉해야 하는 물질은 물, 모래, 흙먼지, 슬러지와 같이 매우 다양하고, 저온과 고온에 모두 견디어야 하므로 시일이 사용되는 환경은 매우 열악하다.

스크레이퍼 시일은 일반적으로 저속, 고하중 상태에서 이물질 차단이 주요 기능이므로 사용되

는 예가 특수하며, 이에 대한 연구는 립시일에 비하여 연구된 예가 많지 않으나 광산기계, 농업기계, 해양 플랜트 산업, 시멘트 산업, 건설 중장비 산업 등이 활성화 되면서 스크레이퍼 시일에 대한 관심도 높아가고 있다.

립타입의 접촉식 시일에 대한 접촉응력 거동문제는 고무재질이 갖는 비선형성 때문에 이론적 해석보다는 유한요소 해석법을 많이 사용하고 있다[1-5]. 재질의 비선형성을 고려한 접촉거동 문제를 해석할 수 있는 범용 프로그램 MARC[6], ABAQUS[7], B-RUBBER[8]의 개발은 실험적 연구에 의존하던 그동안의 시일 해석을 보다 용이하게 하였다.

본 연구에서는 기존의 접촉식 스크레이퍼 시일이 주로 접촉력을 증가시키기 위하여 경질의 고무소재를 사용하거나 또는 간섭량을 증가시켜서 누설이나 이물질 침입을 차단하려는 연구를 탈피하고자 한다. 그러기 위해서는 기존의 스크레이퍼 시일에 대한 수치적 해석을 수행하고, 이것을 바탕으로 밀봉된 그리이스의 누설을 방지하는 기능과 특히 외부의 이물질 침입을 차단하는 기능을 분리시켜서 스크레이퍼 시일의 성능을 향상시킨 새로운 시일모형을 개발하고자 한다.

2. 수치적 해석 조건

그리이스를 밀봉해야 하는 스크레이퍼 시일은 경질의 NBR(사용온도 : $-40\sim 120^{\circ}\text{C}$), 에틸렌 아크릴(사용온도 : $-35\sim 150^{\circ}\text{C}$; Vamac : duPont 제품명), TFE 플로르 카본(사용온도 : $-85\sim 200^{\circ}\text{C}$; Teflon : duPont 제품명) 등의 탄성 고무재질을 사용하고 있다. 본 연구에서는 스크레이퍼 시일의 접촉거동 특성에 관련된 기본 설계자료를 획득하기 위한 연구이므로 등방성의 NBR 소재에 Mooney-Rivlin 모델을 사용하였다. 스크레이퍼 시일의 접촉거동 문제는 비선형 유한요소 해석 프로그램인 MARC를 사용하여 기존의 스크레이

퍼 시일에 대한 트라이볼로지적 특성을 고찰하고, 이 결과를 사용하여 새로운 접촉식 시일을 개발하고자 한다.

스크레이퍼 시일의 기하학적 형태와 변형은 축대칭이고, 회전 요동운동(Oscillating motion) 상태에서 시일 립의 온도는 30°C 인 등온 상태를 유지하며, 회전축의 운동조건이 변화하여도 접촉응력 상태는 단일립 시일(Single lip seal)의 경우 금속 보강테(Metal case) 아래 고무에만 작용한다고 가정하고, 이중립 시일(Double lip seal)의 경우는 플링거 스프링(Flinger spring)의 아래쪽 고무에만 미친다고 가정한다. 여기서 고무에 접합된 플링거 스프링은 시일을 하우징에 용이하게 설치하도록 강성도를 제공하고, 누설 차단을 위한 1차 밀봉 선단부와 더스트 밀봉기능을 갖는 2차 밀봉 선단부에 균일한 탄성력을 지지해 준다.

하중지지용 시일축이 회전함에 따라서 축방향으로 발생하는 시일 립 선단부의 미세한 미끄럼 이동은 존재하나 본 연구에서는 원주방향의 접촉거동 해석에 관심을 갖고 있으므로 립 선단부와 회전축 계면사이의 상대속도가 대단히 낮다고 가정하여 축방향의 마찰영향을 배제하였다. 즉, 수치해석을 위하여 원주방향의 솔리드 엘리먼트 절점은 구속하고, 반경방향의 변형거동은 허용하였다.

Fig. 1은 기존에 사용중인 스크레이퍼 시일의 접촉응력 거동문제를 해석하기 위하여 사용한 유한요소해석 솔리드 모델을 보여주고 있는데, 특히 회전축과 접촉하는 시일 립 선단부는 미세한 메쉬로 재구성하였다. 단일립 스크레이퍼 시일 모델에 대해서는 1323개의 축대칭 4각형 요소와 1418개의 요소 절점으로 구성되어 있다.

Fig. 2는 스크레이퍼 시일의 기능중에서 회전축과 메탈 베어링 사이에 원활한 그리이스 윤활작용을 할 수 있도록 도와주는 밀봉기능과 외부의 이물질 침입 차단기능을 분리시켜서 설계한

이중립 형태의 접촉식 시일을 보여주고 있다. 이중립식의 스크레이퍼 시일 모델에 대한 접촉응력 거동문제를 해석하기 위해 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 1104개의 축대칭 4각형 요소와 1280개의 요소 절점으로 구성하였고, 회전축과 접촉하는 더스트 시일 립 선단부와 그리이스축과 접촉하는 둥근 형태의 밀봉립 선단부는 미세한 메시로 재구성하였다.

시일립 선단부와 회전축 사이의 접촉문제 해석에서 초기에 접촉되었던 절점이 하중을 받게되면 절점에서는 변형이 일어나면서 접촉하고 있던 초기의 절점이 서로 떨어지는 현상이 발생한다. 유한요소해석에서 이들의 절점이 서로 떨어지면 해석할 수 없으므로 변형된 이후의 절점간 거리가 1.1×10^{-3} mm이내에 있다면 절점이 서로 접촉된 것으로 간주하였고, 또한 접촉 절점간의 상대속도가 0.5×10^{-3} mm/s일 때에 압착(Sticking)이 일어난다고 가정하였다.

스크레이퍼 시일에 대한 접촉거동 문제를 해석하고, 시일이 정상상태에 도달하였을 때의 응력 분포 해석을 위한 시일소재 니트릴 고무(NBR)에 대한 물성치와 유한요소해석을 위한 데이터는 Table 1과 Table 2에서 각각 제시하고 있다.

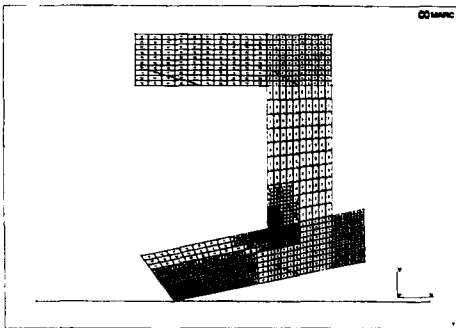


Fig. 1 FEM solid model of single lip scraper seals.

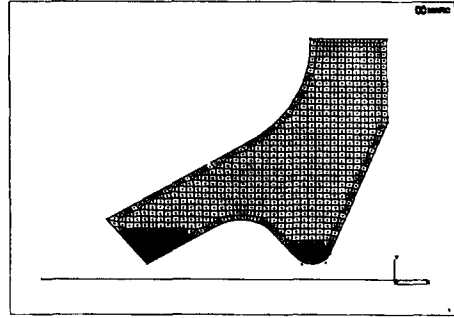


Fig. 2 FEM solid model of double lip scraper seals.

Table 1. Material properties of nitrile rubber

Material properties	Values
Young's modulus, MPa	5.914
Poisson's ratio, ν	0.49
Density, kg/cm^3	1460
Mooney-Rivlin constant C_1 , MPa	-0.4219
Mooney-Rivlin constant C_2 , MPa	1.3610

Table 2. FEM modeling data

	Single lip scraper seals	Double lip scraper seals
Number of nodes	1418	1280
Number of elements	1323	1104
Element type	5-node isoparametric quadrilateral axisymmetric ring with extra pressure node and Hermann formulation	
Contact distance tolerance, mm	1.1×10^{-3}	
Relative sliding velocity, mm/sec	0.5×10^{-3}	

3. 해석결과 및 토의

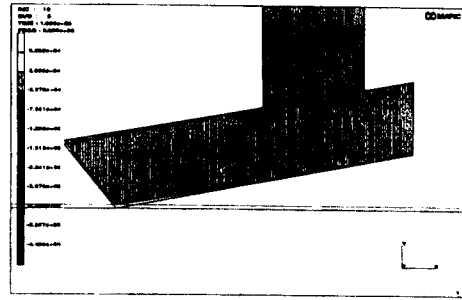
3-1. 단일립식 스크레이퍼 시일

Fig. 3은 단일립을 갖는 기존의 스크레이퍼 시일 선단부에 $\delta=1.0\text{mm}$ 의 밀봉 간섭량(Sealing interference)을 가하였을 때 접촉점에서의 반경방향 접촉응력 분포도를 나타낸 것으로 밀봉 그리이스와 접촉하는 립 선단부에서 최대의 접촉압력이 발생함을 보여주고 있다.

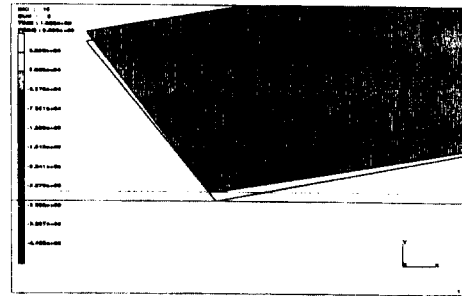
Fig. 4는 회전축에 가하는 밀봉 간섭량을 $\delta=0.5\sim 2.4\text{mm}$ 으로 변화시켰을 때 립 선단부에 걸리는 최대 접촉응력의 크기를 나타낸 결과로 밀봉 간섭량이 증가할수록 시일립 선단부에서 최대 접촉응력이 증가하고 있다. 간섭량이 작을수록 시일 립 선단부에 걸리는 접촉응력은 작으나 립 선단부는 초기의 접촉점으로부터 공기측으로의 이동이 미세하게 일어난다. 그러나 간섭량이 증가할수록 립 선단부에서의 접촉응력은 증가하고, $\delta=2.4\text{mm}$ 부근에서 수렴하는 해석 결과를 보여주고 있으며, 립 선단부가 공기측으로 이동하는 길이도 수렴하는 결과를 보여주고 있다.

Fig. 5는 단일립 선단부와 회전축 사이의 간섭량의 변화에 따른 최대 접촉응력과 접촉폭 사이의 관계를 보여주고 있다. 회전축의 간섭량이 증가할수록 최대 접촉응력과 접촉폭은 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 립선단부의 공기측에서는 접촉응력이 점차적으로 증가를 하나 그리이스측에서는 접촉응력이 급격히 감소하는 특성이기인하것으로 생각된다.

Fig. 1과 같은 단일립 시일 모델에 대한 해석 결과에 의하면 단일립 스크레이퍼 시일의 립 선단부와 회전축간 밀봉 간섭량의 최적화와 그리이스측 내지는 공기측의 경사각도가 중요한 설계 파라미터로 작용하고 있음을 설명해주는 결과라 생각된다.



(a) Contact stress distribution of single lip scraper seals



(b) Contact stress distribution in the lip edge

Fig. 3 Contact stress distributions of single lip scraper seals with a sealing interference $\delta=1.0\text{mm}$ in the radial direction.

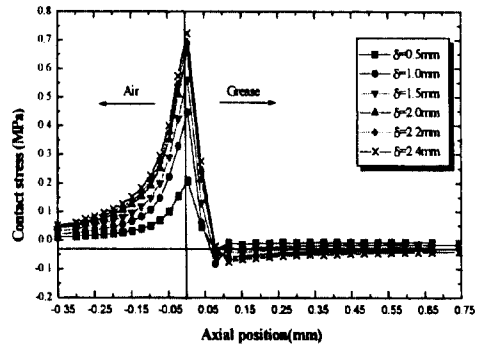


Fig. 4 Maximum contact stress of single lip scraper seals along the contacting surfaces for various values of the sealing interference.

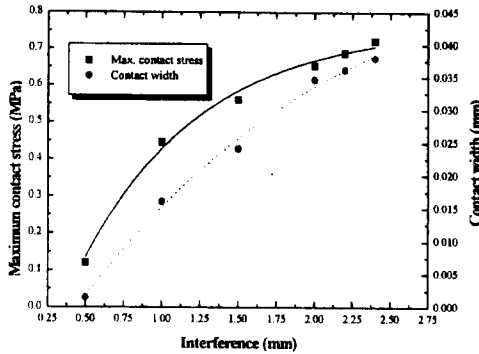


Fig. 5 Effect of shaft interference on the maximum contact stress and contact width of single lip scraper seals.

3-2. 이중립식 스크레이퍼 시일

Figs. 6~8은 회전축과 이중립 선단부 사이의 밀봉 간섭량(Sealing interference)을 0.4~2.4mm 까지 회전축에 가하였을 때 외부의 이물질 차단 을 위한 더스트 시일 립 선단부와 그리이스의 누 설을 방지하기 위한 고무재 등근 립 선단부의 접 촉응력을 유한요소법으로 해석한 결과로 시일 립 선단부에서의 응력 분포도를 보여주고 있다.

간섭량이 1.0mm인 경우에 대한 반경방향으로 의 접촉응력 분포도를 보면 더스트 립 선단부에서 는 Fig. 6에서 보여주는 것처럼 간섭량에 따른 더스트 립 선단부의 압축변형 거동이 공기측으로 크게 진행되고, 1차 밀봉 선단부에서는 그리이스 측에서 공기측으로 약간 변형되는 거동을 보여주고 있다.

본 연구에서 제시한 Fig. 2의 모델은 외부로부터 침입하는 이물질 차단에 효과적이라는 사실을 Fig. 6(c)의 결과로부터 알 수 있다. 2차 밀봉부 인 더스트 립 선단부에서 발생하는 접촉응력의 크기를 회전축 위치에 따라서 표시한 Fig. 7의 결과를 보면 립 선단부의 간섭량이 증가할수록 접촉응력은 증가한다. 이 결과를 기존의 스크레이퍼 시일인 Fig. 4와 비교하면 간섭량이 작을수

록 유사한 접촉응력 패턴을 보여주지만, 간섭량이 큰 $\delta=2.4\text{mm}$ 에서는 6배 정도로 커다란 접촉 압력 증가를 보여준다.

또한 Fig. 8의 결과는 밀봉된 그리이스의 누설 방지, 즉 1차 밀봉기능을 수행하는 등근 립 선단부에서의 최대 접촉응력을 제시한 결과로 간섭량의 증가는 접촉응력의 증가로 나타나고, 그 크기는 기존의 Fig. 1 모델에서 제시한 Fig. 4의 결과와 유사하나 간섭량이 커질수록 약간 증가된 접촉응력 크기를 보여준다.

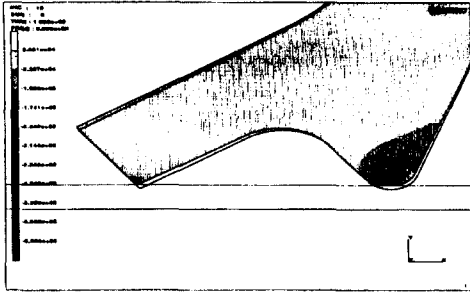
Fig. 9와 Fig. 10에서는 이중립식 스크레이퍼 시일에 대한 회전축 간섭량의 변화에 따른 최대 접촉응력과 접촉폭을 나타내고 있다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 더스트 립 선단부의 최대 접촉응력과 접촉폭은 비선형적으로 증가를 하고 있음을 보여주고 있으나, 단일립 시일 모델에 대한 Fig. 5의 결과와 비교하여 다른 경향을 보여주고 있다. 이는 더스트 립 선단부의 형상의 다른 차이에 기인한 것으로 판단된다.

또한 Fig. 10은 1차 밀봉을 수행하는 등근 립 선단부에서는 간섭량이 증가함에 따라 최대 접촉응력이 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 립 선단부가 등근형상을 하며, 시일립부의 경사각도가 2차 밀봉부에 비하여 대단히 크다는 사실에 주목할 필요가 있다.

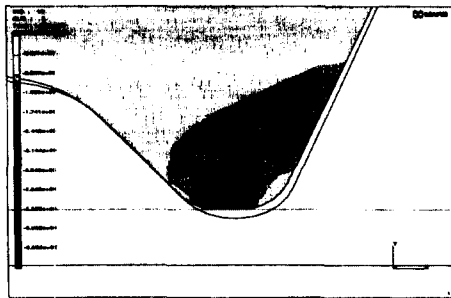
기존의 스크레이퍼 시일에서는 단일립 선단부가 그리이스의 밀봉기능과 더스트 차단기능을 동시에 갖어야 하기 때문에 1차 밀봉기능을 강조하면 그리이스 누설은 완화될 수 있으나 이물질 침입이 문제가 된다. 반대로 이물질 차단 기능을 강조하여 선단부의 접촉력을 증가시키면 그리이스의 배출기능이 떨어지면서 오염물질에 의한 메탈 베어링의 윤활성능이 저하되고, 립 선단부와 회전축 사이에는 마찰과 마멸이 급속히 진행된다. 이러한 문제는 이중립 타입의 스크레이퍼 시

일에 립 선단부를 보호할 수 있는 메카니즘을 도입함으로써 해결할 수 있다.

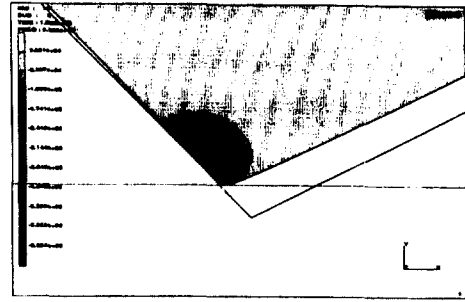
이중립 스크레이퍼 시일은 단일립 시일에 비하여 설치공간이 문제가 될 수 있으나, 이 문제는 최적화 설계와 풀링거 스프링의 강성도를 적절히 활용함으로써 해결할 수 있다. 그래서 본 연구에서 제시한 이중립 선단부를 갖는 새로운 스크레이퍼 시일(Fig. 2 참조)은 그리이스를 밀봉해야 하는 1차 밀봉 등근 립 선단부의 접촉압력 크기가 약간 증가되었으나, 외부 이물질 침입이 우려되는 더스트 립 선단부의 2차 밀봉기능을 더욱 보강시켜서 스크레이퍼 시일의 밀봉성능을 크게 향상시켰다.



(a) Contact stress distribution of double lip scraper seals



(b) Contact stress distribution in the primary lip edge



(c) Contact stress distribution in the secondary lip edge

Fig. 6 Contact stress distributions of double lip scraper seals with a sealing interference $\delta=1.0\text{mm}$ in the radial direction.

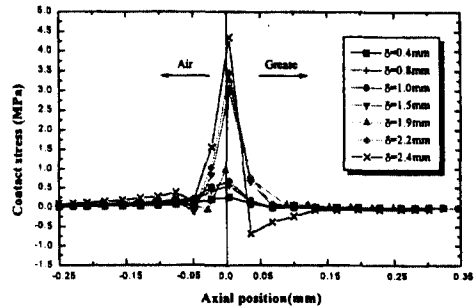


Fig. 7 Maximum contact stress along the secondary sealing zone of double lip scraper seals for various values of the sealing interference.

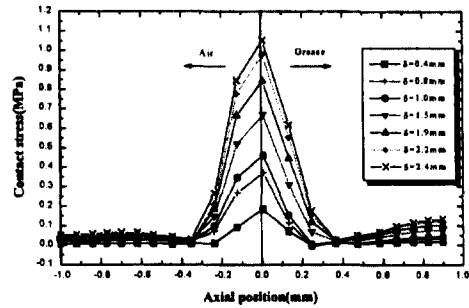


Fig. 8 Maximum contact stress along the primary sealing zone of double lip scraper seals for various values of the sealing interference.