

시일과 스틸면 사이의 구형 마멸입자에 의한 접촉해석

박태조[†] · 유재찬* · 조현동**

경상대학교 기계항공공학부 · 항공기부품기술연구소, *두산모트롤(주), **경상대학교 대학원 기계항공공학부

Contact Analysis between Rubber Seal, a Spherical Wear Particle and Steel Surface

Tae-Jo Park[†], Jae-Chan Yoo* and Hyeon-Dong Jo**

School of Mechanical & Aerospace Engineering, ReCAPT, Gyeongsang National University

*Doosan Mottrol Co., Ltd.

**Graduate School, Dept. of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

(Received November 4, 2008; Revised November 26, 2008; Accepted December 1, 2008)

Abstract – In many dynamic seals such as lip seal and compression packings, it is well known that wear occur at the surface of heat treated steel shaft as results of the intervened wear particle. It is widely understood that the dominant wear mechanism related in sealing surfaces is abrasive wear. However, little analytical and experimental studies about this problems have been done until now. In this paper, a contact analysis is carried out using MARC to investigate the wear mechanism in contact seal applications considering elastomeric seal, a elastic perfect-plastic micro-spherical particle and steel surface. Deformed seal shapes, contact and von-Mises stress distributions for various particle sizes and interference are showed. The maximum von-Mises stress within steel shaft was exceeded its yield strength and plastic deformation occurred at steel surface. Therefore, the sealing surface can be also worn by sub-surface fatigue due to wear particles together with well known abrasion. The numerical methods and models used in this paper can be applied in design of dynamic sealing systems, and further intensive studies are required.

Key words – seal, steel surface, wear particle, contact stress analysis, MARC

1. 서 론

시일(seal)은 작동유체나 윤활유의 누설방지 뿐만 아니라 외부의 이물질이 시스템 내부로 유입되는 것을 방지하기 위하여 필수적으로 사용되는 기계요소이다. 특히, 외부에서 유입된 이물질은 상대운동을 하는 윤활면을 마멸(Wear)시키거나 필터(Filter)를 막히게 하는 등의 많은 문제를 유발시킨다는 것은 잘 알려진 사실이다. 한편, 경도와 강도가 상대적으로 아주 낮은 시일에 비하여 이것이 설치되는 상대면인 축은 표면경도를 높게 설계하고 있다. 이는 외부에서 침투한 이물질이나 시스

템 내부에서 발생한 마멸입자가 연한 시일에 박혀서 중요한 부품인 축을 손상시키는 것을 방지하기 위함이다. 즉, 시일과 접촉하는 스틸축이 장시간 사용한 후에 Fig. 1과 같은 표면상태로 변화되는 주된 원인이 연삭마멸(Abrasive wear)에 기인한 것으로 이해되고 있다. 하지만 시일과 미세입자가 관련된 마멸발생기구에 대한 연구결과는 극히 미흡한 실정이다[1].

Sun 등[2]은 강체로 가정한 강구(Steel ball)와 경질 코팅층 사이의 접촉문제를 축대칭 FEM 요소를 사용하여 해석하였으며, Kang 등[3]은 경질의 이물질에 의해서 발생하는 압흔(Dent)이 구름베어링을 조기에 파손시키는 원인으로 작용한다는 사실을 FEM 해석결과로 제시하였다. 특히, Conveny & Menger[4]는 탄성체와

[†]주저자 · 책임저자 : tjpark@gnu.ac.kr



Fig. 1. Wear marks of sealed steel shaft surface.

강체 사이에 삽입된 마멸입자가 운동하는 경우에 대한 접촉문제를 해석하였다. McColl 등[5]은 평판과 접촉한 실린더가 진동하는 경우를 2차원 평면변형문제로 해석하여 프레팅(Fretting) 마멸의 발생가능성을 검증하였다. 하지만 많은 연구에도 불구하고 탄성계수가 상대적으로 아주 낮은 시일과 접촉하는 기계면에서의 마멸에 대한 연구는 거의 시도되지 않은 실정이다. 다만, 본 논문의 저자[6,7]는 시일, 스틸면 및 이들 사이에 존재하는 미세입자에 관련된 3개의 접촉물체가 모두 탄성체인 경우를 2차원 평면변형문제로 가정하여 해석하였다. 이 결과, 비록 해석모델에 채용된 입자가 원통형인 관계로 실제와는 차이가 있지만 미세입자에 의해서 스틸면에서도 피로마멸이 발생할 수 있다는 결과를 처음으로 제시하였다.

본 논문에서는 시일과 접촉하는 스틸면에서의 정확한 마멸기구를 제시하기 위한 연구의 일환으로 시일과 스틸면 사이에 경질의 구형(Sphere)인 마멸입자가 존재하는 경우에 대한 접촉문제를 비선형문제해석 프로그램인 MARC를 사용하여 해석하였다.

2. 해석 모델 및 방법

본 논문에서는 시일과 스틸면 사이에 마멸입자(혹은 이물질)가 삽입된 경우의 접촉문제를 해석하고자 한다. 마멸입자가 구형이기 때문에 3차원 해석이 요구되지만 접촉모델이 대칭적인 형상일 뿐만 아니라 간단하게 해석하기 위하여 축대칭요소를 정의하여 해석하였다.

Fig. 2에는 해석에 사용된 전체 격자계와 접촉부 부근의 격자계를 확대하여 나타내었다. 격자종류는 2D Axisymmetric Full Integration 10으로 전체 격자수는 대략 12,000개 정도이다. 이때, 시일과 스틸면에 비하여 크기가 매우 작은 마멸입자에 의한 접촉문제를 정확하게 해석하기 위하여 마멸입자 및 이와 접촉하는 부분에서는 격자를 아주 조밀하게 구성하였다. 해석에 사용된 경계조건은 다음과 같다. 먼저 조립시의 간섭량을 표현하기 위해 시일 상부의 Rigid 요소를 접촉으로 정의하여 -y방향으로 변위시켰다. 이때, 시일 간섭

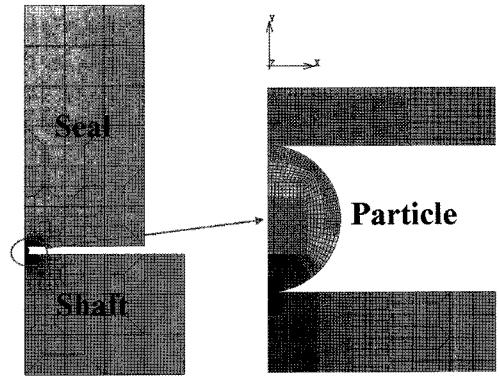


Fig. 2. FEM mesh structure.

Table 1. Material properties

	Young's modulus, GPa	Poisson's ratio	Yield strength, GPa
Seal (PTFE)	0.46	0.46	-
Particle (WC)	520	0.24	4.16
Shaft (Steel)	200	0.30	1.619

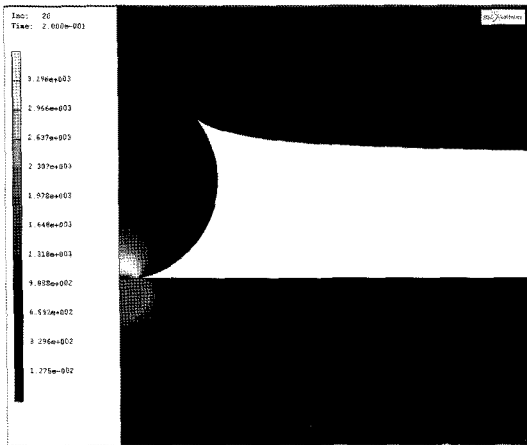
량에 의해서 하부의 스틸면이 움직이는 것을 방지하기 위하여 스틸면 하단의 y방향 변위를 고정하였다. 그리고 시일과 입자, 스틸면 사이는 모두 접촉상태로 정의하였다.

Table 1에는 해석에 사용된 접촉하는 재료의 물성자료를 나타내었다. 이때, 정확한 해석을 위해서는 고무의 비선형적인 응력-변형을 관계를 포함하는 Mooney-Rivlin이나 Ogden 상수 등을 사용해야 된다. 하지만 본 논문에서는 해석을 간단하게 하기 위해서 시일은 탄성(Linear elastic)으로, 구형입자와 스틸면은 완전탄소성(Elastic - Perfect plastic)으로 각각 가정하였다.

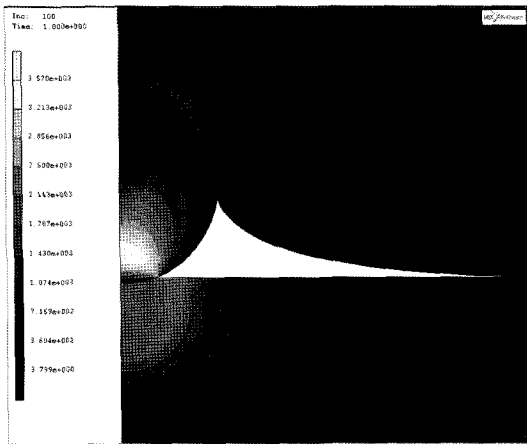
본 논문에서 사용한 마멸입자의 직경은 10 μm , 50 μm , 100 μm 의 3종류이고, 간섭량은 최대 200 μm 까지 변화시켰다. 그리고 접촉부에서의 과도한 변형발생으로 인하여 수렴되지 않는 경우를 피하기 위해서 Time Table을 정의하였다[8].

3. 결과 및 고찰

Fig. 3에는 마멸입자의 직경이 100 μm 일 때, 간섭량이 20 μm 와 200 μm 로 서로 다른 경우에 대한 von-Mises 응력분포와 함께 변형된 시일의 형상을 나타내



(a) 20 μ m

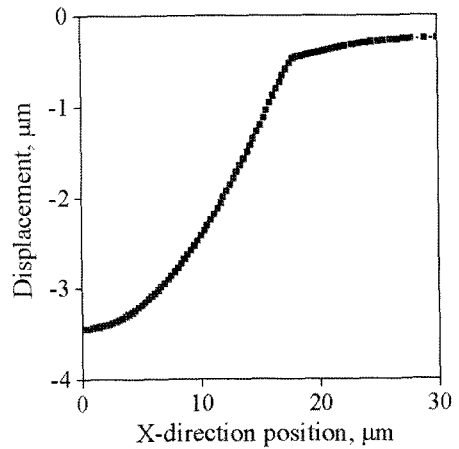


(b) 200 μ m

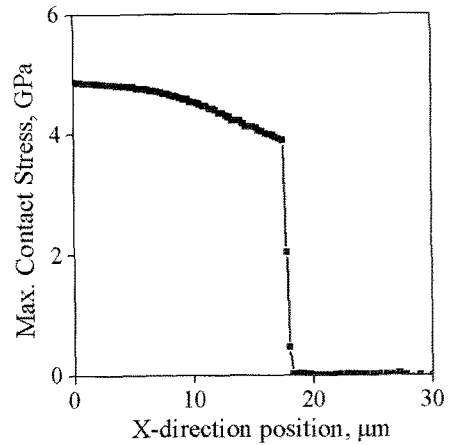
Fig. 3. Deformed seal shape and von-Mises stress distribution for different interferences.

었다. 간섭량이 커질수록 스틸면에 작용하는 응력의 크기는 점차 증가하여 항복응력에 도달할 뿐만 아니라 접촉길이보다 넓은 범위로 분포한다. 또한, 간섭량이 20 μ m인 경우에는 시일이 마멸입자에만 접촉하지만 간섭량이 200 μ m일 때는 시일도 크게 변형되어 입자를 감싸면서 스틸면과도 넓게 접촉하게 된다. 따라서, 시일의 간섭으로 마멸입자와 스틸면 사이에 작용하는 하중이 간섭량에 따라서 선형적으로 변하지 않을 것임을 쉽게 예상할 수 있다.

Fig. 4에는 마멸입자의 직경이 100 μ m이고 간섭량이 200 μ m 경우에 스틸표면에서의 변위와 접촉응력의 분포를 나타낸 그림으로 마멸입자의 중심은 좌표축의 원점에 위치하고 있다. 마멸입자와 접촉하는 부분에서는



(a)



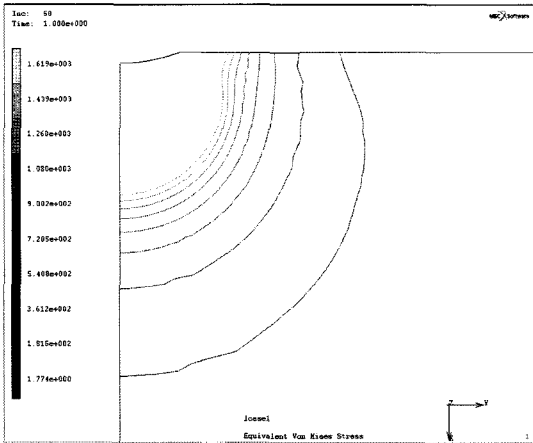
(b)

Fig. 4. Path plot along steel surface. (a) displacement, (b) contact stress.

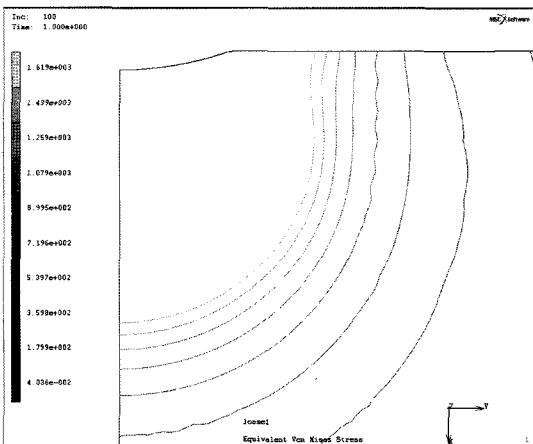
비접촉부에 비하여 표면이 확연하게 크게 변형되고 있다. 또한, 미세한 크기의 마멸입자가 탄성체인 시일에 의해서 조금만 눌러지더라도 아주 작은 접촉부에서는 국부적으로 높은 접촉응력이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에는 시일 간섭량이 100 μ m이고 직경이 50 μ m와 100 μ m인 마멸입자에 의한 스틸에서의 von-Mises 응력분포와 표면의 변형형상을 각각 나타내었다. 입자가 클수록 스틸면과의 접촉면적은 크게 될 뿐만 아니라 항복응력상태에 도달한 범위도 넓어졌다. 특히, 표면에는 아주 미세하지만 소성변형으로 인한 압흔자국이 나타나고 있다.

Fig. 6(a),(b)는 직경이 100 μ m인 마멸입자에 200



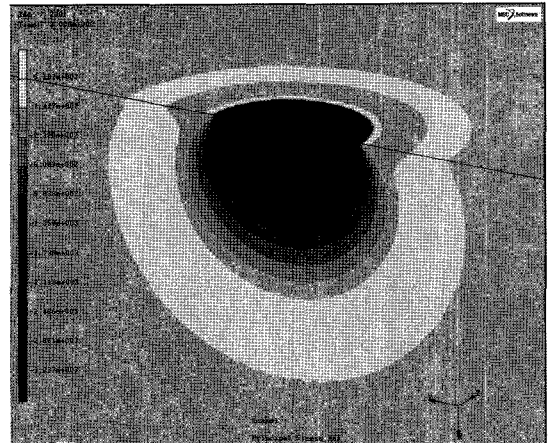
(a)



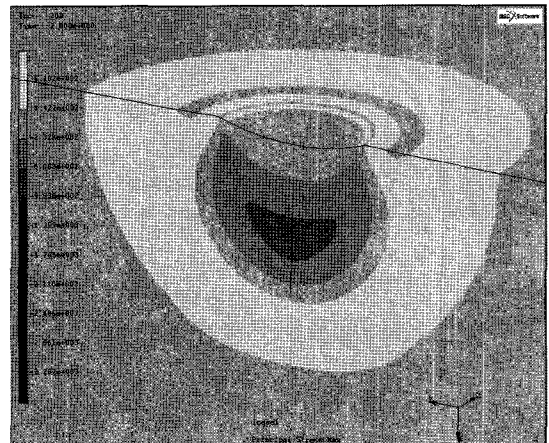
(b)

Fig. 5. von-Mises stress distribution with 100 μm interference. Particle diameter is (a) 50 μm , (b) 100 μm .

μm 의 간섭량을 적용한 경우와 여기서 간섭량을 제거한 후의 주응력분포를 각각 나타낸 결과이다. 먼저 Fig. 6(a)의 경우에는 Fig. 5에서 이미 고찰한 바와 같이 표면이 움푹하게 눌러진 형상을 나타내고 있다. 이때, 접촉중양부에는 최대 3 GPa 정도의 높은 압축응력이 발생하는 반면에 주변표면에서는 상대적으로 낮지만 0.2 GPa 정도의 인장응력이 발생하였다. 한편, Fig. 6(b)로부터 시일의 간섭을 제거하였음에도 불구하고 표면에는 접촉형상이 거의 그대로 남아 있는 것으로부터 Fig. 6(a)의 스틸면은 이미 항복응력상태에 도달하였음을 알 수 있다. 특히, 영구변형된 표면하에서는 최대 0.7 GPa의 압축응력이, 주변표면에는 0.1 GPa의 인장응력이 각각 잔류하였다. 따라서, 시일의 간섭으로



(a)



(b)

Fig. 6. Principal stress distribution. (a) applying interference is 200 μm , (b) after interference is removed.

발생하는 상당한 크기의 접촉응력과 잔류응력의 결과로 미세입자가 장시간 반복접촉할 경우에는 스틸표면부근에서 피로파괴가 시작될 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 시일의 간섭량에 따라 스틸면에 발생하는 최대 접촉압력과 von-Mises 응력의 변화를 마멸입자의 크기에 따라서 나타낸 결과이다. 간섭량이 동일한 경우에 마멸입자가 작을수록 응력의 크기는 증가하였다. 전체적으로 아주 작은 간섭량에서도 쉽게 항복응력상태에 도달하는 것은 접촉해석모델에서 시일을 변형시키는 힘이 전부 입자에만 작용하기 때문이다.

이상의 결과에서 시일과 스틸면 사이에 마멸입자가 존재하는 경우에는 시일의 간섭에 의하여 스틸면은 국부적으로 쉽게 항복응력상태에 도달할 뿐만 아니라 접

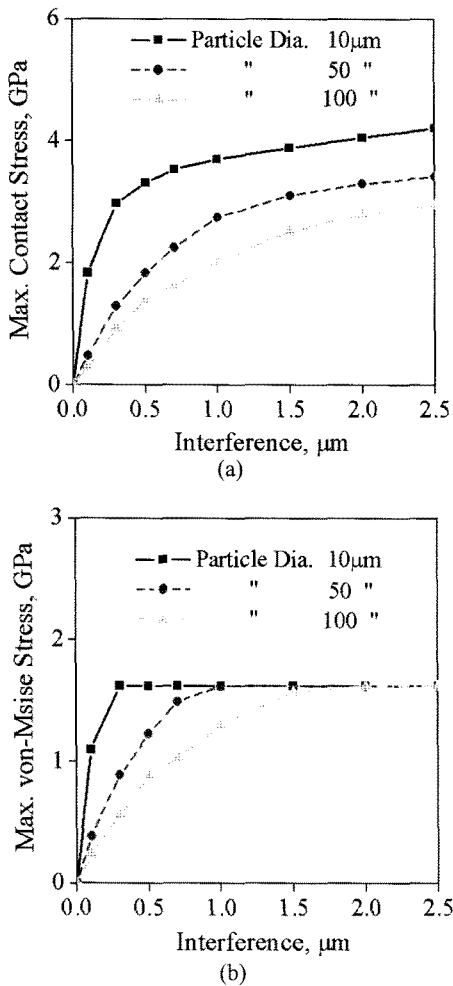


Fig. 7. Variation of max. stresses with interference. (a) contact stress, (b) von-Mises stress.

촉 이후에는 영구변형과 함께 상당한 잔류응력이 존재하였다. 따라서 장시간 운전할 경우에 시일과 접촉하는 스틸표면에서는 피로마멸이 발생할 수 있을 것으로 예상된다. 한편, 본 논문의 조건과는 달리 실제 적용에서는 시일과 접촉하는 스틸면은 표면경화처리와 함께 경질 코팅처리하므로 이러한 조건에 대한 추가연구가 요청된다.

4. 결 론

본 논문에서는 시일을 설치한 스틸면에서의 정확한 마멸기구를 제시하기 위한 연구의 일환으로 경질의 구형입자가 시일과 스틸면 사이에 존재하는 경우의 접촉

문제를 MARC를 사용하여 해석하였다. 이때 간섭량과 마멸입자의 크기에 따른 시일과 스틸면의 변형형상 및 접촉응력 등을 구하였다. 이 결과, 마멸입자가 작고 간섭량이 커질수록 스틸면은 쉽게 항복응력상태에 도달하였으며, 입자가 클수록 소성변형되는 면적이 넓어졌다. 특히, 접촉 후에 시일의 간섭이 없는 경우에도 스틸표면에는 영구변형과 함께 상당한 크기의 압축/인장 응력이 잔류하였다. 따라서, 장시간 운전시에는 시일과 스틸면 사이에 존재하는 마멸입자에 의해서 스틸면에 피로마멸이 발생할 수 있음을 처음으로 확인하였다. 또한, 본 논문에서 사용한 해석 방법 및 결과는 각종 시일의 설계, 실링면의 열처리 및 코팅 설계 등에 유용하게 사용될 것으로 기대되며, 다양한 설계변수에 대한 추가연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 2단계 BK21사업과 지식경제부 지방기술 혁신사업(RTI04-01-03)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- Bhushan, B., Principles and Applications of Tribology, Marcel Dekker, 1998.
- Sun, Y., Bloyce, A., and Bell, T., "Finite Element Analysis of Plastic Deformation of Various TiN Coating/Substrate Systems under Normal Contact with Rigid Sphere", *Thin Solid Films*, Vol. 271, pp. 122-131, 1995.
- Kang, Y. S., Sadeghi, F., and Hoeprich, M. R., "A Finite Element Model for Spherical Debris Denting in Heavily Loaded Contacts", *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol. 126, pp. 71-80, 2004.
- Coveney, V. A. and Menger, C., "Behaviour of Model Abrasive Particles between a Sliding Elastomer Surface and a Steel Counterface", *Wear*, Vol. 240, pp. 72-79, 2000.
- McColl, I. R., Ding, J., and Leen, S. B., "Finite Element Simulation and Experimental Validation of Fretting Wear", *Wear*, Vol. 256, pp. 1114-1127, 2004.
- 유재찬, 박태조, "시일과 스틸면 사이의 마멸입자에 의한 접촉응력해석", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 523-524, 2007.
- 유재찬, 박태조, "시일과 코팅된 스틸면 사이의 마멸입자에 의한 접촉응력해석", 한국윤활학회 제 44회 춘계학술대회논문집, pp. 253-258, 2007.
- MSC. MARC/MENTAT, "2007r1 User's Guide", Vol. A~E, 2007.