시일과 코팅된 스틸면 사이의 구형 입자에 의한 미끄럼 접촉 해석

박태조[†] · 이준혁^{*}

경상대학교 기계공학부 · 공학연구원

^{*}경상대학교 대학원 기계항공공학부

Sliding Contact Analysis of a Spherical Particle between Rubber Seal and Coated Steel Counterface

Tae-Jo Park[†] and Jun-Hyuk Lee^{*}

School of Mechanical Engineering, Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

^{}Graduate School, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University*

(Received July 8, 2012; Revised August 31, 2012; Accepted September 5, 2012)

Abstract – In this study, a new sliding contact problem involving an elastomeric seal, a spherical particle and a hard coated steel counterface was modeled to investigate the detailed wear mechanisms related to the sealing surface. The model was also used to design the optimum coating conditions. A three-dimensional finite element contact problem was modeled and analyzed using the nonlinear finite element code, MARC. The deformed steel surface and stress distributions are presented for different coating layers and thicknesses. When the coating thickness is relatively small, the entrapped particle produces surface plastic deformations such as groove and torus. In addition, the sealing surface can be damaged by abrasive wear as well as fatigue wear. For a relatively thick and multi-layered coating, on the other hand, surface plastic deformation does not occur, and the amount of abrasive and fatigue wear is reduced. Therefore, the proposed contact model and results can be used in the design of various sealing systems, further intensive studies are required.

Keywords – seal(시일), hard particle(경질입자), coating(코팅), contact analysis(접촉해석), abrasive wear(연삭마멸), fatigue wear(피로마멸), MARC

1. 서 론

상대운동을 하는 대부분의 기계장치에서 시일(Seal)은 윤활유나 작동유체의 누설과 외부의 이물질이 시스템 내부로 침투하는 것을 방지하기 위하여 널리 사용되고 있다[1]. 실제에서는 시일과 상대운동면인 축(Shaft)이 거의 접촉상태로 운전되므로 사용시간의 경과에 따라 시일의 노화 등으로 인하여 실링(Sealing) 성능이 점차 저하된다. 따라서 대부분 주기적으로 시일을 교체하고 있다. 특히, Fig. 1에 나타낸 것과 같이 장치

간 사용후에는 상대적으로 경도가 극히 높은 재료로 코팅(Coating)한 축의 표면에서도 마멸이 발생하여 이를 사용하는 장치의 성능에 심각한 문제를 유발시키고 있다. 이는 내부에서 발생한 마멸입자나 외부에서 침투한 이물질이 연한 시일에 박혀서 축표면을 미세하게 연삭시키는 연삭마멸(Abrasive wear)이 주된 원인으로 추정되고 있다[2]. 따라서, 마멸을 최대한 억제하기 위하여 열처리나 TiN, TiC, 다이아몬드, DLC(Diamond-like carbon) 등과 같은 내마모성이 우수한 재료로 표면을 코팅하는 방법이 널리 사용되고 있다. 하지만 지금까지의 연구결과로는 코팅된 실링면에서의 마멸기구(Wear

[†]Corresponding Author: tjpark@gnu.ac.kr

Fig. 1. Wear marks on the lip-sealed steel shaft surface.

mechanism)를 완전하게 설명하기에는 크게 부족한 실정이므로 상대운동하는 시일과 코팅된 실링면 사이에서 미세입자의 접촉거동에 대한 정확한 해석이 요구되고 있다.

Holmberg 등[3]은 Scratch 시험에서와 같이 다이아몬드 압입자(Indenter)가 경질코팅된 표면위로 미끄러지는 접촉문제를 3차원 FEM으로 해석하였고, Zhang 등[4]은 다층(Multi-layer)코팅된 스틸(Steel)면에서 발생하는 접촉응력과 전단응력의 분포를 구하였다. Coveney & Menger[5]는 탄성체와 강체 사이에 단면이 6각형인 입자가 운동하는 2차원 접촉문제를, Ye & Komvopoulos[6] 강구(Steel ball)가 코팅된 표면위로 미끄러지는 경우에 잔류응력과 마찰계수의 영향을 각각 해석하였다. 하지만 지금까지의 접촉문제에 대한 수많은 연구에도 불구하고 시일, 입자 및 실링면에서와 같이 3개의 접촉물체가 전부 탄성체이면서 각각의 탄성계수가 크게 차이가 나는 접촉문제는 거의 해석되지 않았다. 다만 본 논문의 저자[7-10]가 이 문제의 해석을 처음으로 시도한 결과, 미세입자로 인하여 실링면에서는 연삭마멸뿐만 아니라 피로마멸도 발생할 수 있음을 보였지만 정지상태이거나 코팅하지 않은 경우의 결과들이다.

이에 본 논문에서는 시일과 접촉하는 실링면에서의 정확한 마멸발생기구를 규명함과 동시에 실링부에 대한 최적의 코팅조건을 설계하기 위한 연구의 일환으로 미세한 구형입자가 시일과 코팅된 스틸면 사이에 존재하는 경우의 3차원 미끄럼 접촉문제를 해석하고자 한다.

2. 해석 모델 및 방법

본 논문에서는 시일과 코팅된 스틸면 사이에 구형인 미세경질입자가 삽입된 상태에서 미끄러지는 경우의 3차원 접촉문제를 비선형문제해석 S/W인 MARC[11]를 사용하여 해석하였다.

Fig. 2에는 해석에 사용된 경계조건이 적용된 전체

Fig. 2. Mesh structure of 3D sliding contact model and boundary condition applied.

격자계와 입자주변의 확대된 격자계를 나타내었다. 여기서, 해석대상인 접촉모델은 x-y면에 대칭이기에 절반만 모델링하였다. 해석에 사용된 요소는 3D Hex Full Integration 7이며 전체 요소수는 대략 3만 여개이다. 이때, 시일은 리메싱(Remeshing) 기능을 활용하여 미끄럼에 따른 심한 변형에도 요소의 왜곡현상 등이 발생하지 않게 하여 쉽게 수렴되게 하였고, 정확한 해석을 위해 구형입자와 접촉하는 축 표면의 요소는 매우 조밀하게 구성하였다. Table 1에는 해석에 사용된 각 재료의 물성치를 나타내었다. 단층코팅인 경우에는 TiN만으로, 다층코팅인 경우는 3개의 코팅층을 TiN-Ti-TiN의 순서로 각각 코팅하였다. 시일에 대한 정확한 해석을 위하여 고무의 비선형적인 응력-변형률 관계를 포함하는 Mooney-Rivlin 상수를 사용하였으며, 입자, 스틸면 및 코팅층은 완전탄소성(Elastic-perfect plastic)으로 가정하였다. 경계조건으로는 먼저 시일의 조립시 간섭량을 표현하기 위하여 시일의 상부에 -y방향으로 변위조건을 설정하였고, 이후에 시일의 왼쪽면

Table 1. Material properties

		Young's modulus, GPa	Poisson's ratio	Yield strength, GPa
Particle	TiN	400	0.24	6
Coating	Ti	120	0.3	1
Shaft	Steel	200	0.3	1.619
Mooney-Rivlin coefficient			C ₁₀	C ₀₁
Seal	PTFE		61.33	15.325

에 +x방향으로의 변위조건을 적용하여 미끄럼 운동을 처리하였다. 시일과 입자, 코팅면 사이는 모두 접촉상태로 정의하였으며, 실제 상태를 고려하여 임의로 설정한 시일과 입자, 시일과 코팅면 및 입자와 코팅면 사이의 마찰계수는 순서대로 0.5, 0.3, 0.1이다.

본 논문에서는 입자의 직경과 간섭량을 각각 100 μm 와 120 μm 로 고정하였으며, 코팅층 두께는 10 μm 와 30 μm 의 2가지를 채용하였다. 시일과 입자의 접촉부에는 과도한 변형으로 인하여 수렴되지 않는 경우를 피하기 위하여 Time table[11]을 정의하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3에는 간섭이 작용한 상태의 시일이 미끄러지는 경우에 코팅하지 않은 스틸면에서의 von-Mises 응력과 주응력의 분포를 나타내었다. 시일은 압축상태에서 미끄러지므로 미세입자는 구름/미끄럼 운동을 하게 된다[10]. 시일의 운동에 따라 스틸면에서 소성변형이 발생하는 영역이 입자의 반경보다 넓을 뿐만 아니라 운동방향으로 점차 크게 되었다. 이러한 결과는 입자에 비하여 스틸면의 항복응력값이 상대적으로 크게 낮기 때문이다. 특히, 입자가 미끄러져 지나간 자리와 앞부분에는 각각 그루브(Groove)와 토러스(Torus) 형태의 소성변형된 형상들이 뚜렷하게 발생하였다. 또한 입자의 앞부분에서 압축응력이, 입자 바로 뒤쪽에서 인장응력이 각각 최대로 발생하였다. 이러한 변형형상과 응력분포로부터 실링부를 손상시키는 원인으로 일반적으로 이해되고 있는 연삭마멸을 설명할 수 있다[10].

Fig. 4에는 Fig. 3과 동일한 조건에서 10 μm 와 30 μm 두께로 단층코팅과 다층코팅한 경우에 대한 von-Mises 응력분포를 나타내었다. 코팅층이 상대적으

(a) von-Mises stress

(b) Principal stress

Fig. 3. Stress distribution of no-coated case.

로 얇은 경우(Fig. 4(a), (c))에는 코팅층의 표면과 모재층 모두가 항복상태에 도달하였다. 이는 코팅두께가 얇은 경우에는 코팅층이 과도하게 소성변형되므로 연삭마멸의 발생을 방지하는 효과가 작음을 나타낸다. 반면에 코팅두께가 상대적으로 두꺼우면 코팅층 내부에서 항복응력에 필적하는 von-Mises 응력이 발생하였다. 특히 단층코팅한 경우(Fig. 4(b))에는 모재층이, 다층코팅한 경우(Fig. 4(d))에는 3번째 코팅층과 모재층 모두가 항복응력상태에 도달하지 않았다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 조건에서의 주응력 분포를 나타낸 그림으로 최대압축응력은 미세입자의 앞부분과 접촉표면에서, 최대인장응력은 미세입자가 접촉한 영역 바로 뒤편에서 각각 발생하였다. 이때, 압축잔류응력은 코팅층이 얇은 경우에는 코팅층 아래의 모재층에서 0.1~0.6 GPa 정도이지만 두꺼운 경우에는 코팅층 내부에서 0.3~0.5 GPa 정도로 발생하였다. 반면에 인장잔류응력은 모두 접촉표면주변에서 발생하며, 이의

(a) Single-layer coating, 10 μm (b) Single-layer coating, 30 μm (c) Multi-layer coating, 10 μm (d) Multi-layer coating, 30 μm **Fig. 4.** von-Mises stress distribution with coating type and thickness. (a) Single-layer coating, 10 μm (b) Single-layer coating, 30 μm (c) Multi-layer coating, 10 μm (d) Multi-layer coating, 30 μm **Fig. 5.** Principal stress distribution with coating type and thickness.

Fig. 6. Equivalent von-Mises stress distribution with coating type and thickness.

크기는 얇은 경우에는 1.5~2 GPa, 두꺼운 경우에는 1~2 GPa 정도였다. 미세입자에 의해서 반복적으로 발생하는 이러한 인장/압축 잔류응력은 코팅층이 모재에서 박리되거나 피로마멸을 발생시키는 원인으로 작용할 것으로 추정된다.

Fig. 6은 대칭면에서의 von-Mises 응력분포를 비교한 결과이다. 코팅두께가 상대적으로 얇은 경우에는 코팅층과 모재의 경계부에서 최대 von-Mises 응력이 발생하며, 코팅층과 모재층 모두에서 항복상태에 도달하였다. 그리고 입자가 미끄러져 지나간 자리에는 그루브와 같은 소성변형형상이 나타났으며, 코팅층과 모재의 경계에서는 응력이 불연속적으로 변화하였다. 이러한 결과에서 코팅두께가 작은 실링면에서는 미세입자에 의한 연삭마멸이 지배적이며 코팅층에 작용하는 높은 응력과 잔류응력에 의하여 피로마멸이나 코팅층의 박리에 의한 표면손상도 발생할 수 있을 것으로 추정

된다. 한편, Fig. 6(b)와 (d)에서와 같이 코팅층이 상대적으로 두꺼운 경우에는 코팅층 내부에서 최대 von-Mises 응력이 발생하고 표면은 소성변형되지 않았다. 따라서, 미세입자에 의한 실링부의 연삭마멸을 방지하기 위해서는 두껍게 코팅하는 것이 유리함을 알 수 있다. 특히, 두껍게 다층코팅하는 경우(Fig. 6(d))에는 제일 위의 코팅층에서만 항복응력에 상응하는 von-Mises 응력이 발생하지만 아래의 코팅층에서는 응력이 크게 낮아졌다. 또한, Fig. 6(b)에 비하여 최대 von-Mises 응력이 발생하는 깊이가 얇기 때문에 코팅층의 피로마멸을 더욱 억제할 것으로 추정된다.

이상의 결과에서 상대운동을 하는 시일과 코팅한 스틸면 사이에 존재하는 미세경질입자가 실링부의 파손 원인으로 인정되는 연삭마멸 뿐만 아니라 코팅층을 피로마멸시키는 원인으로 작용함을 알 수 있다. 그리고 코팅은 다층으로 두껍게 코팅하는 것이 연삭마멸과 피

로마멸의 발생을 동시에 억제할 수 있기 때문에 보다 효과적인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 실링면에서의 마멸발생기구를 규명함과 동시에 최적의 코팅조건을 설계하기 위한 연구의 일환으로 미세한 구형입자가 시일과 코팅된 스틸면 사이에 존재하는 경우의 3차원 미끄럼 접촉문제를 비선형문제해석 전용S/W인 MARC를 사용하여 해석하였다. 전체적으로 코팅두께가 얇은 경우에는 미세입자의 연삭작용으로 인하여 표면에 그루브나 토러스 등의 소성변형 형상이 남을 뿐만 아니라 코팅층에 작용하는 높은 응력과 잔류응력에 의하여 피로마멸이나 코팅층의 박리와 같은 표면손상이 발생할 것으로 예상된다. 반면에 코팅층이 두꺼우면 코팅층 내부에서 높은 응력이 발생하지만 표면은 소성변형되지 않으며, 다층코팅이 연삭마멸과 피로마멸의 발생을 동시에 억제할 수 있기 때문에 보다 효과적인 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서 사용한 해석방법과 결과는 시일설치부의 설계와 시일의 손상원인 규명에 사용될 수 있을 것으로 기대되며 추가연구가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2단계 BK21사업과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. 2011-0014650)

참고문헌

1. Miller H. K. and Nau, B. S., Fluid Sealing Technology - Principles and Applications, Marcel Dekker, 1998.
2. Bhushan, B., Principles and Applications of Tribology, John Wiley & Sons, 1999.
3. Holmberg, K., Laukkanen, A., Ronkainen, H., Wallin, K., Varjus, S. and Koskinen, J., "Tribological Contact Analysis of a Rigid Ball Sliding on a Hard Coated Surface Part I : Modelling Stresses and Strains," *Surface & Coating Tech.*, Vol. 200, pp. 3793-3809, 2006.
4. Zhang, X. C., Xu, B. S., Wang, H. D., Wu, Y. X., and Jiang, Y., "Hertzian Contact Response of Single-Layer, Functionally Graded and Sandwich Coatings," *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 47-54, 2007.
5. 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.
6. Ye, N. and Komvopoulos, K., "Effect of Residual Stress in Surface Layer on Contact Deformation of Elastic-Plastic Layered Media," *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol. 125, pp. 692-699, 2003.
7. 박태조, 유재찬, 조현동, "시일과 스틸면 사이의 구형 마멸입자에 의한 접촉해석," *한국윤활학회지*, 제 24권, 제6호, pp. 297-301, 2008.
8. 박태조, 조현동, "시일과 코팅된 스틸면 사이의 구형 입자에 의한 접촉해석," *한국윤활학회지*, 제25권, 제4호, pp. 225-230, 2009.
9. 박태조, 조현동, "시일과 스틸면 사이에 구형입자가 있는 접촉문제의 해석," *대한기계학회논문집 A권*, 제 34권, 제2호, pp. 161-166, 2010.
10. 박태조, 이준혁, "시일과 스틸면 사이에 구형 입자가 있는 미끄럼 접촉 해석," *한국윤활학회지*, 제28권, 제1호, pp. 1-6, 2012.
11. MSC, "MSC. MARC/MENTAT 2012r1 User's Guide," A-E, 2012.