

시일과 코팅된 스틸면 사이의 구형 입자에 의한 접촉해석

박태조[†] · 조현동^{*}

경상대학교 기계항공공학부 · 항공기부품기술연구소, *경상대학교 대학원 기계항공공학부

Contact Analysis Between Rubber Seal, a Spherical Particle and Coated Steel Surface

Tae-Jo Park[†] and Hyeon-Dong Jo^{*}

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

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

(Received May 20, 2009; Revised June 29, 2009; Accepted July 10, 2009)

Abstract – Seals are very useful machine components in protection of leakage of lubricant or working fluid, and incoming of debris from outside. Various elastomer are widely used as sealing materials and the shaft surfaces are generally coated with high hardness material after heat treatment. It is generally known that the foreign debris and wear particles get stuck into sealing surface, the steel shaft surface can be damaged and worn by mainly abrasive wear. In this paper, using MARC, contact analysis are conducted to show the hard coated steel shaft surface can be fatigue failed by very small elastic particle intervened between seal and steel surface. Variations of contact and von-Mises stress distributions and contact half-widths with interference and coating thickness are presented. The maximum von-Mises stress occurs always in the coating layer or between coated layer/substrate interface. Therefore the coated sealing surface can be fatigued and then failed by very small particles. The results can be used in design of sealing surface and further studies are required.

Key words – seal(시일), hard particle(경질입자), coating(코팅), contact analysis(접촉해석), fatigue wear(피로마멸), MARC

1. 서 론

모든 기계장치에는 주로 작동유체나 윤활유의 누설 방지를 위하여 개스킷(Gasket), O-링(O-ring), 메카니컬 시일(Mechanical seal) 등과 같은 다양한 종류의 시일(Seal)이 사용되고 있다. 이러한 시일의 부차적인 기능은 외부의 이물질이 시스템 내부로 유입되는 것을 방지하는 것이다. 특히, 상대운동부에 사용되는 대부분의 동적 시일(Dynamic seal)에서는 탄성체(Elastomer)인 시일이 상대적으로 강성이 아주 큰 실링면과의 접촉상태가 항상 유지되어야만 한다. 따라서, 설치 후 일정시간이 경과한 시일은 다양한 원인으로 손상되어 실링

(Sealing) 성능이 저하되므로 교체하여 사용하고 있다. 한편, 시일과 접촉하는 축(Shaft)의 표면은 열처리나 경질재료로 코팅(Coating)하는 등의 방법으로 표면경도를 높게 하지만 이곳에서도 마멸이 발생한다. Fig. 1은 로타리 유니온(Rotary union)용의 경질 코팅된 축에서 립 시일(Lip seal)이 설치된 부분이 마멸된 사진이다. 이러한 마멸흔적은 상대운동을 하는 시일과 실링면 사이에



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

[†]주저자 · 책임저자 : tjpark@gnu.ac.kr

존재할 것으로 예상되는 이물질이나 마멸입자(Wear particle)의 작용에 기인할 것으로 추정된다. 즉, 실링면에 유입된 경질입자가 연한 시일에 박혀서 경도가 높은 실링면을 미세하게 연삭시키는 연삭마멸(Abrasive wear)이 주된 마멸발생기구일 것으로 이해되고 있다. 하지만 지금까지 경질재료 등으로 코팅된 실링부의 마멸기구에 대한 연구결과는 크게 미흡한 실정이다.

Zhang 등[1]은 코팅한 실린더와 구형인 강체입자에 하중이 작용하는 문제에서 코팅층의 영향을 축대칭문제로 해석하였으며, Tilbrook 등[2]은 코팅표면에 경질의 구형입자에 의한 Hertz 접촉하중이 작용할 때 접촉깊이의 영향을 해석하였다. 또한 Sun 등[3]은 강구(Steel ball)와 코팅층 사이의 접촉문제를 축대칭 FEM 요소를 사용하여 해석하였으며, Coveney & Menger[4]는 탄성체와 강체 사이에 침투한 마멸입자가 운동하는 경우의 접촉문제를 해석하였다. 하지만 접촉문제에 관련된 최근까지의 많은 연구에도 불구하고 시일을 설치한 스틸면의 마멸기구에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 다만, 본 논문의 저자[5-6]가 시일과 실링면 뿐만 아니라 마멸입자도 탄성체인 접촉문제를 처음으로 해석하였다. 특히, 참고문헌[6]에서의 코팅을 하지 않은 경우에 대한 해석결과는 피로에 의해서 시일을 설치한 스틸면도 마멸될 수 있음을 밝혔지만 실제에서 실링면은 열처리와 코팅을 하여 사용하기 때문에 추가 연구의 필요성을 제기하였다.

본 논문에서는 시일과 접촉하는 스틸면에서의 정확한 마멸기구를 조사하기 위한 연구의 일환으로 시일과 코팅된 스틸면 사이에 구형(Sphere)의 경질입자가 존재하는 경우의 접촉문제를 비선형문제해석 S/W인 MARC[7]를 사용하여 해석하였다.

2. 해석 모델 및 방법

본 논문에서는 시일과 코팅된 스틸면 사이에 경질입자가 삽입된 경우의 접촉문제를 해석하고자 한다. 이때, 입자가 구형이기 때문에 정확한 해석을 위해서는 3D해석이 요구되지만 해석을 쉽게 하기 위하여 축대칭요소로 정의하여 해석하였다. 해석순서는 시일과 스틸면 사이의 구형입자에 의한 접촉응력분포를 Hertz 탄성접촉이론에 의한 결과와 비교하여 해석결과의 정확성을 검증한 다음 코팅된 스틸면에서의 접촉문제를 해석하였다.

Hertz 탄성접촉시 최대접촉압력 P_{max} 와 접촉반폭 a 는 각각 다음 식으로 구할 수 있다[8].

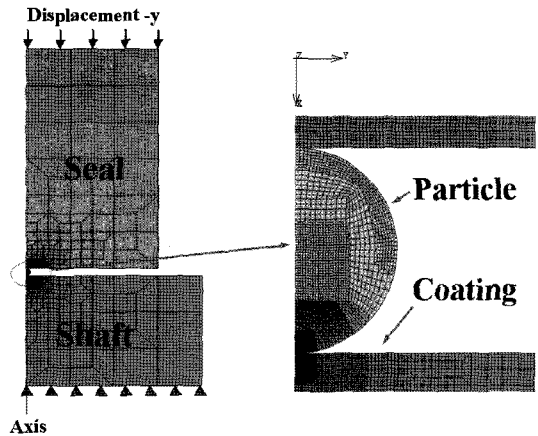


Fig. 2. Mesh structure of 3D contact model and boundary condition applied.

$$P_{max} = \frac{3W}{2\pi a^2} \quad (1)$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3WR}{4E}} \quad (2)$$

여기서, W 는 시일의 간섭으로 인하여 구형입자에 작용하는 하중이고, R 은 입자의 반경이며, E 는 입자와 스틸면에 대한 등가탄성계수이다.

Fig. 2는 본 논문에서 해석을 위하여 사용한 전체 격자계와 시일 접촉부분을 확대한 격자계를 나타낸 그림이다. 크기가 매우 작은 경질입자에 의한 접촉문제를 정확하게 해석하기 위하여 축과 입자가 접촉하는 부분에는 메쉬(Mesh)는 매우 조밀하게 배치하였다. 전체 메쉬 숫자는 대략 11,000개 정도이다. 해석에 사용된 경계조건으로는 시일에 작용하는 간섭량에 의한 하부 스틸면의 움직임을 방지하기 위해서 스틸면 하단의 x방향 변위는 고정하였고, 간섭량을 표현하기 위해 시일의 상부에는 Rigid 요소를 접촉으로 정의하여 변위시켰다.

Table 1에는 해석에 사용된 각 재료와 경질입자인 WC(Tungsten Carbide)의 물성치를 나타내었다. 보다 정확한 해석을 위해서는 PTFE(Polytetrafluoroethylene)의 비선형적인 응력-변형률 관계를 포함하는 Mooney-Rivlin이나 Ogden 상수 등을 사용하는 것이 바람직하다. 하지만 본 논문에서는 해석을 간단하게 하기 위해서 PTFE는 탄성(Linear elastic)으로, 경질입자, 스틸면 및 코팅은 모두 탄성-완전소성(ElasticPerfect-plastic)으로 각각 가정하였다. 본 논문에서는 경질입자의 직경을 100 μm 로 고정하고 시일의 간섭량은 0~10 μm ,

Table. 1 Material properties

	Material	Young's modulus, GPa	Poisson's ratio	Yield Strength, GPa
Seal	PTFE	0.46	0.46	
Particle	WC	520	0.24	4.16
Coating	"	"	"	"
Shaft	Steel	200	0.3	1.619

코팅층의 두께는 0~4 μm 범위로 변화시키면서 접촉 문제를 해석하였다. 이때, 접촉부의 과도한 변형발생으로 인하여 수렴되지 않는 경우를 피하기 위해서 Time Table을 정의하였다[7].

3. 결과 및 고찰

Fig. 3에는 코팅하지 않은 스틸면인 경우에 간섭량에 따른 수직응력과 접촉반폭의 크기변화를 식(1)과 식(2)의 Hertz 탄성접촉이론식으로 구한 결과와 서로 비교하여 나타내었다. 여기서, Hertz 탄성접촉이론식에 사용한 하중 W 는 주어진 간섭량에서 시일이 입자에 작용하는 힘과 동일하다. 이 결과, 접촉해석으로 구한 수직응력과 접촉반폭이 Hertz 탄성접촉이론으로 구한 결과와 거의 일치하는 것은 본 논문에서의 해석결과가 매우 정확함을 의미한다.

Fig. 4는 이후에 제시하는 결과들에 대한 이해를 높이기 위한 그림으로 시일의 간섭에 의해서 경질입자와 스틸면 사이에 작용하는 접촉하중의 변화를 나타내었다. 사용한 입자가 미세하고 간섭량이 아주 작기 때문에 경질입자와 스틸면 사이에서의 접촉하중은 아주 작은 상태이다.

Fig. 5에는 간섭량이 6 μm이고, 코팅층의 두께가 0 μm, 1 μm, 4 μm로 서로 다른 경우에 대한 코팅된 스틸면에서의 von-Mises 응력의 분포를 나타내었다. Fig. 5(a)의 코팅하지 않은 결과는 표면뿐만 아니라 내부의 깊은 영역까지 항복상태에 도달하고 있다. 즉, 시일의 간섭량이 아주 작을지라도 실링면에서는 미세입자에 의해서 항복이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 한편 Fig. 5(b)와 (c)같이 코팅층이 존재할 경우에는 코팅층을 경계로 응력분포가 급격히 변화한다. 특히, 코팅층의 두께가 얇은 Fig. 5(b)에는 항복상태에 상당하는 높은 응력이 코팅층 뿐만 아니라 모재층에서도 발생하였으며, 간섭량이 많아질수록 항복영역은 점차 커

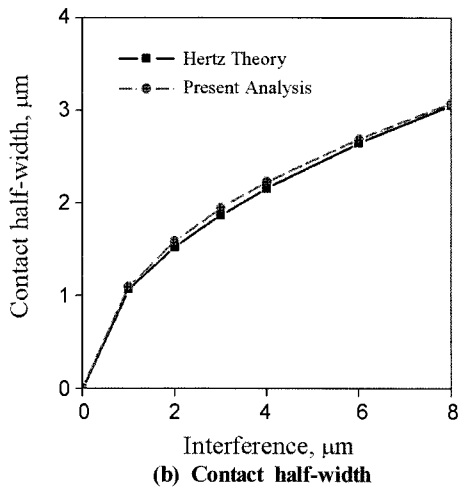
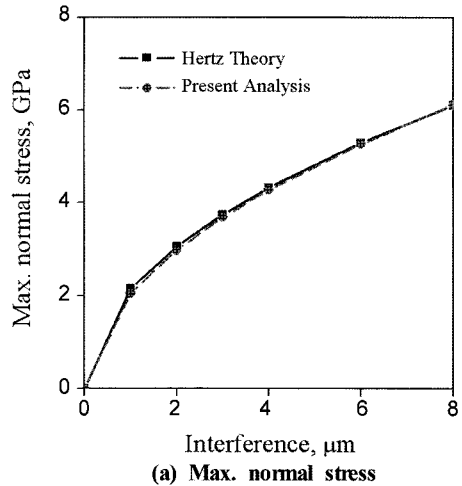


Fig. 3. Results comparison between Hertz contact theory and numerical analysis.

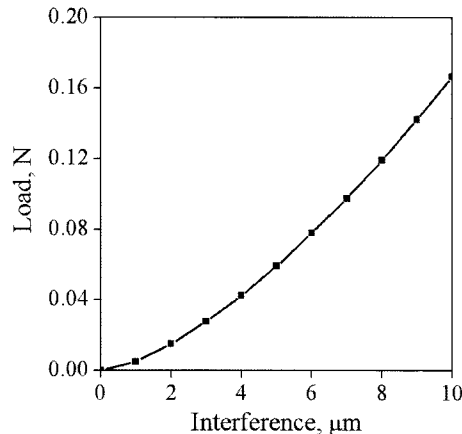
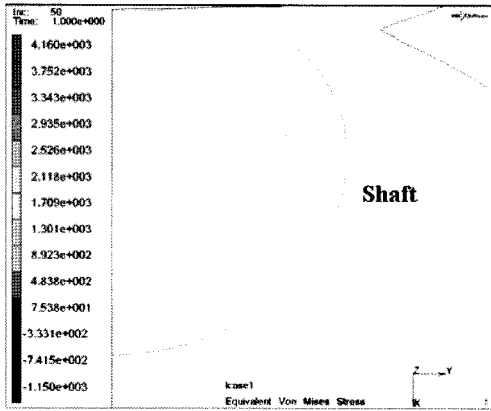
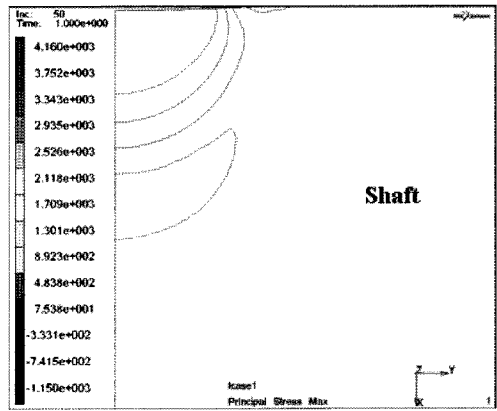


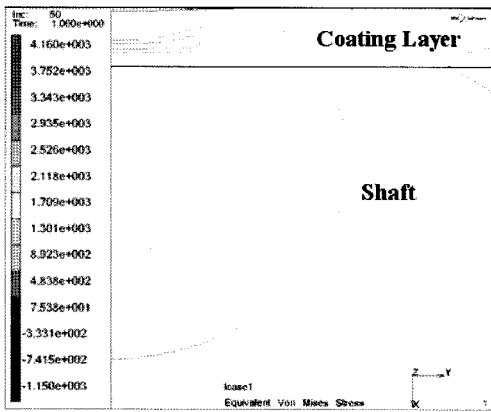
Fig. 4. Variation of contact load between particle and steel surface with interference.



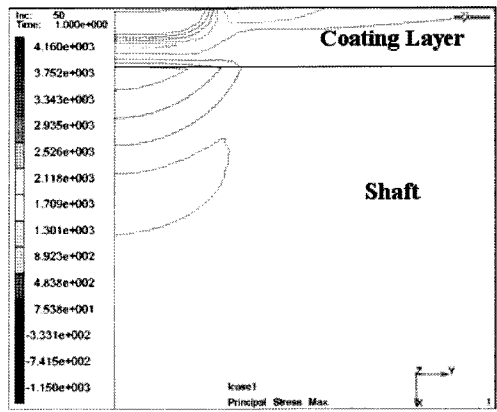
(a) 0 μm (No-coating)



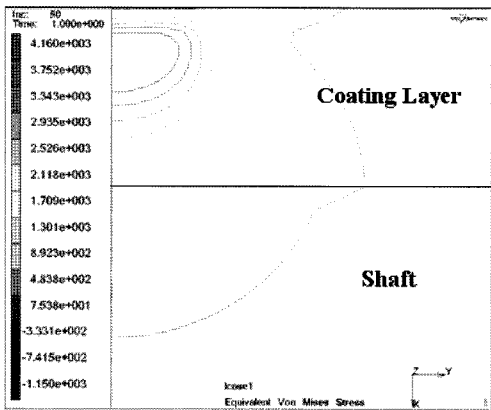
(a) 0 μm (No-coating)



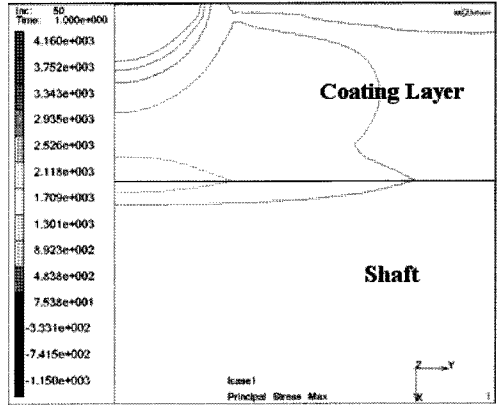
(b) 1 μm



(b) 1 μm



(c) 4 μm



(c) 4 μm

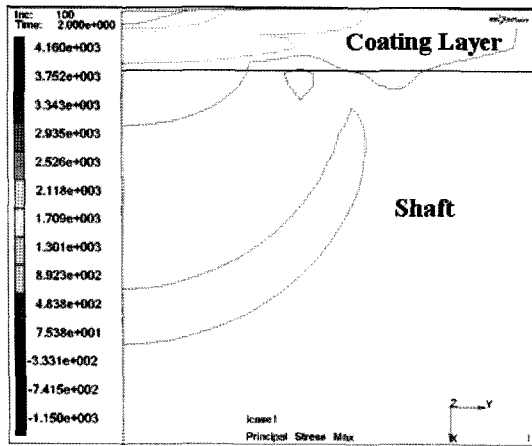
Fig. 5. Max. von-Mises stress distribution with coating thickness.

지는 것으로 나타났다. 이와는 달리 코팅층이 상대적으로 두꺼운 경우인 Fig. 5(c)에서는 코팅층 내부는 항복상태에 도달하지만 모재층은 항복에 이르지 않았다.

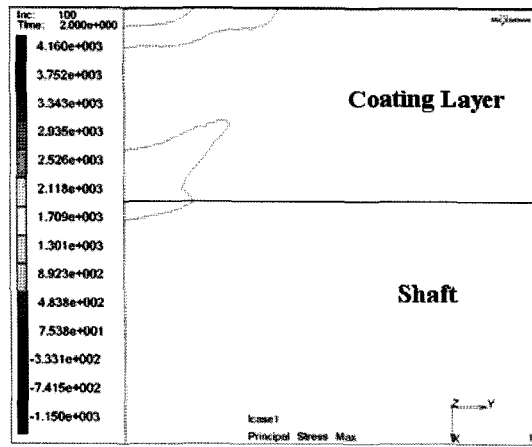
Fig. 6에는 Fig. 5와 동일한 조건에 대한 주응력의

Fig. 6. Max. principal stress distribution with coating thickness.

분포를 나타낸 결과로 이때 최대압축응력은 모두 입자와 접촉하는 표면에서는 발생하였다. Fig. 6(b)와 같이 코팅층이 얇을 경우에는 모재층에서 압축응력이 작용하는 반면에 입자와 접촉하고 있는 반경방향의 표면에



(a) 1 μm

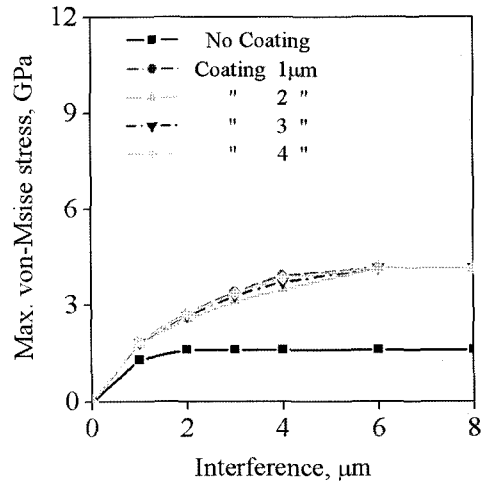


(b) 4 μm

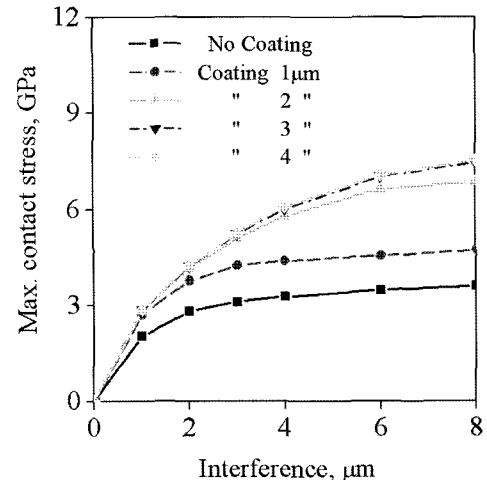
Fig. 7. Principal stress distribution with coating thickness after seal interference is removed.

서는 인장응력이 발생하였다. 한편, Fig. 6(c)와 같이 코팅층의 두께가 증가하면 모재와 코팅층 경계에서 최대인장응력이 발생하였다.

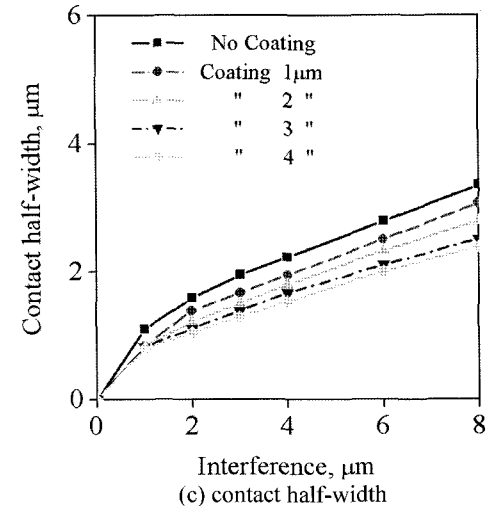
Fig. 7은 10 μm 의 간섭량을 작용시킨 다음 제거한 경우에 코팅층의 두께가 1 μm 와 4 μm 인 축에 잔류하는 주응력의 분포를 나타낸 그림이다. 코팅층의 두께가 얇은 경우에는 입자와 접촉했던 부분의 반경방향 주변부와 코팅층/모재의 경계에서 1 GPa 정도의 높은 인장응력이 잔류하는 반면에 코팅층 아래의 모재에서는 0.15 GPa 정도의 압축잔류응력이 발생하였다. 또한 Fig. 7(b)와 같이 코팅층의 두께가 두꺼운 경우에는 입자와 접촉했던 코팅층 표면의 반경방향 주변부보다 0.4 GPa의 인장응력이, 코팅층 내부에는 0.1 GPa의 압축응력이 각각 잔류하였다. 이와 같이 코팅층이 얇을



(a) Max. von-Mises stress



(b) Max. contact stress



(c) contact half-width

Fig. 8. Effects of interference and coating layer thickness.

경우에 잔류응력이 보다 크게 발생하는 이유는 동일한 간섭량에서 축은 더욱 많이 변형되기 때문으로 해석된다. 따라서 시일이 축과 접촉한 상태로 장시간 운전되는 실링면에서는 이 사이에 존재하는 미세한 경질입자로 인하여 발생하는 반복적인 수직하중과 잔류응력의 영향으로 코팅층 축의 표면도 피로에 의해서 손상될 수 있을 것으로 추정된다. 특히, 코팅층이 얇을수록 코팅층내에서의 잔류응력이 크게 작용하므로 피로에 의한 마멸이 보다 쉽게 발생할 것으로 예상된다.

Fig. 8은 간섭량과 코팅층 두께에 따른 최대 von-Mises 및 접촉응력과 접촉반쪽의 변화를 나타낸 그림으로 간섭량이 커질수록 접촉응력과 접촉반쪽의 크기는 증가하였다. 하지만 최대 von-Mises응력이 코팅층의 두께에 따라 차이가 아주 작게 나타나는 것은 경질입자가 아주 작아서 코팅층 내부에서 이의 최대치가 발생하기 때문이다. 따라서, 장시간 운전시에는 피로에 의해서 실링면의 코팅층이 손상될 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 논문에서는 시일과 접촉하는 스틸면에서의 마멸 기구를 정확하게 조사하기 위하여 경질의 구형 입자가 시일과 코팅된 스틸면 사이에 존재하는 경우의 접촉문제를 MARC를 사용하여 처음으로 해석하였다. 이때, 시일 간섭량과 코팅층 두께에 따른 응력분포 등과 함께 간섭량을 적용후 제거하였을 때의 잔류응력 변화를 조사하였다. 이 결과, 간섭량이 커질수록 경질입자의 존재로 인하여 코팅된 스틸면에 작용하는 von-Mises 응력, 접촉응력 및 접촉반쪽은 크게 되었다. 특히, 간섭량이 아주 작은 경우에도 스틸면이나 코팅층에는 항복상태나 이에 가까운 응력이 발생하였다. 경질입자에 의한 코팅을 한 실링부의 손상은 코팅층이 얇을 경우에는 코팅층/모재의 경계에서, 두꺼울 경우에는 코팅층 내부에서 각각 피로마멸이 시작될 수 있을 것으로 추

정된다. 그리고 실링면에서의 마멸기구를 보다 정확하게 규명하고 이의 발생을 저감시키기 위해서는 추가적인 연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 2단계 BK21사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 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 & Design*, Vol. 28, pp. 47-54, 2007.
2. Tilbrook, M. T., Paton, D. J., Xie, Z., and Hoffman, M., "Microstructural Effects on Indentation Failure Mechanisms in TiN Coatings : Finite Element Simulations", *Acta Materialia*, Vol. 55, pp. 2489-2501, 2007.
3. 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.
4. 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.
5. Park, T. J. and Cho, H. D., "Contact Stress Analysis of a Spherical Wear Particle between Seal and Steel Surface", *Friction, Wear and Wear Protection*, ed. by Fisher A. and Bobzin, K., pp. 744-749. 2008.
6. 박태조, 유재찬, 조현동, "시일과 스틸면 사이의 구형 마멸입자에 의한 접촉해석", *한국윤활학회지*, Vol. 24, No. 6, pp. 297-301, 2008.
7. MSC, MSC. MARC/MENTAT 2007r1 User's Guide, A-E, 2007.
8. Williams, J. A., *Engineering Tribology*, Oxford Univ. Press, 1994.