

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.2.161

시일과 스틸면 사이에 구형입자가 있는 접촉문제의 해석

박 태 조*† · 조 현 동**

* 경상대학교 기계항공공학부 · 공학연구원, ** 경상대학교 기계항공공학부

Contact Analysis of a Spherical Particle Between Elastomeric Seal and Steel Surface

Tae-Jo Park*† and Hyeon-Dong Jo*

* School of Mechanical and Aerospace Engineering · ERI, Gyeongsang Nat'l Univ.

** School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ.

(Received August 25, 2009 ; Revised December 16, 2009 ; Accepted December 23, 2009)

Key Words: Seal(시일), Steel Surface(스틸면), Particle(입자), Contact Analysis(접촉해석), MARC

초록: 본 논문에서는 시일 설치면에서의 마멸발생기구를 정확하게 조사하기 위한 연구의 일환으로 미세입자가 시일과 스틸면 사이에 존재하는 경우의 접촉문제를 비선형문제해석 프로그램인 MARC를 사용하여 해석하였다. 이 결과, 시일의 재질은 스틸면에서의 응력분포와 변형형상에 아주 큰 영향을 미쳤다. 특히, PTFE와 같이 탄성계수가 높은 시일인 경우에 스틸 표면은 국부적으로 항복상태에 도달할 뿐만 아니라 시일을 제거한 후에도 영구변형과 함께 상당한 크기의 압축/인장 잔류응력이 존재하였다. 따라서, 시일과 스틸면 사이에 경질입자가 존재할 경우에는 연삭마멸과 함께 피로마멸이 발생할 수 있음을 확인하였으며, 다양한 설계변수에 대한 추가연구가 요구된다.

Abstract: Elastomeric seals are widely used in dynamic seal applications, and it is well known that the sealing surfaces can be gradually worn out. Abrasive wear is known to be the most dominant factor; however, little research has been carried out on this problem until now. In this study, a new contact problem related to elastomeric seals-a small spherical particle and steel surface-was modeled and analyzed using MARC. Variations of von-Mises and residual stress distributions as well as deformed seal and steel surface shapes with seal materials and interferences are presented. The stress distribution and surface deformation are highly affected by the elastic properties of seal. For PTFE, the maximum von-Mises stress exceeds the yield strength, and plastic deformation occurs on the steel surface. Therefore, the sealing surface can also be worn down by sub-surface fatigue due to intervening hard particles in the sealing surfaces together with the well-known abrasion.

1. 서 론

기계장치에서는 작동유체나 윤활유의 누설방지 뿐만 아니라 외부의 이물질이 시스템 내부로 유입되는 것을 방지하기 위하여 필수적으로 시일(Seal)을 사용하고 있다. 이러한 시일에는 적용조건과 용도에 따라 개스킷(Gasket), O-링(O-Ring), 립 시일(Lip seal) 등과 같이 형상이 아주 다양하며 주로 사용되는 재료는 여러 종류의 탄성체(Elastomer)로 주성분은 고무이다. 최근에는 우수한 화학적 안정성, 낮은 마찰 및 마멸 특성, 넓은

사용온도범위 등의 많은 장점을 가진 PTFE가 일반기계에서부터 의료기기, 반도체장비, 계측장비 등에 이르기까지 널리 적용되고 있다.

한편, 동적 시일(Dynamic seal)인 경우에는 시일이 상대운동면인 실링(Sealing)면과 접촉상태를 유지해야하기 때문에 마멸 등에 의한 실링성능의 저하는 피할 수가 없다. 실제에서는 이러한 이유로 설치후 일정시간이 경과한 시일은 교체하고 있는 실정이다. Fig. 1은 로타리 유니온(Rotary union)용으로 사용된 축에서 립 시일이 설치된 부분이 마멸된 사진으로 여기서 주목할 사실은 탄성체인 시일뿐만 아니라 상대적으로 경도가 아주 높은 축(Shaft) 등의 상대운동면에서도 마멸이 발

† Corresponding Author, tjpark@gnu.ac.kr

생한다는 것이다. 이는 시일과 축 사이에 존재하는 이물질이나 마멸입자 등의 경질입자에 기인하는 것으로 추정된다. 즉, 실링면으로 유입된 경질입자는 아주 연한 시일에 박혀서 상대적으로 경도가 아주 높은 실링면을 미세하게 연삭시키는 연삭마멸(Abrasive wear)이 주된 마멸발생기구일 것으로 이해되고 있다.⁽¹⁾

Sun 등⁽²⁾은 강체로 가정한 강구(Steel ball)와 경질인 코팅층 사이의 접촉문제를 축대칭 FEM 요소를 사용하여 해석하였다. Kang 등⁽³⁾은 FEM 해석으로 경질의 이물질에 의해서 웨도면에 발생하는 압흔(Dent)이 구름베어링을 조기에 파손시키는 원인으로 작용할 수 있다는 결과를 제시하였다. Coveney & Menger⁽⁴⁾는 상대운동을 하는 탄성체와 강체 사이에 삽입된 원통형 입자의 운동거동에 대한 2차원 접촉문제를, McColl 등⁽⁵⁾은 평판과 접촉하는 실린더가 진동하는 경우에 프레팅(Fretting) 마멸의 발생가능성을 검증하기 위하여 이를 2차원 평면변형문제로 각각 해석하였다. 이와 같이 지금까지의 다양한 형태의 접촉문제에 대한 아주 많은 연구에도 불구하고 탄성계수가 서로 크게 차이가 나는 시일과 실링면 사이에서와 같은 접촉문제해석은 소수일 뿐만 아니라 이에 관련하여 실링면의 마멸기구에 대한 연구는 전무한 실정이다. 다만, 본 논문의 저자^(6,7)는 탄성계수가 서로 큰 차이를 보이는 시일과 스틸면 사이에 미세입자가 존재하는 경우의 접촉문제를 처음으로 해석하였다. 이 결과, 시일 재질이 일반 고무에 비하여 PTFE와 같이 상대적으로 경도가 높은 경우에는 시일과 미세입자의 작용에 의해서 실링면에서 피로마멸이 발생할 수 있다는 해석결과를 제시하였다.

본 논문에서는 시일과 접촉하는 실링면에서의 정확한 마멸기구를 제시하기 위한 연구의 일환으로 시일의 재질과 간섭량의 차이에 따른 접촉거동을 상세하게 조사하고자 한다. 이를 위하여 시일과 스틸면 사이에 미세한 경질의 구형입자가 존재하는 경우의 접촉문제를 FEM모델링하여 해석하였다.

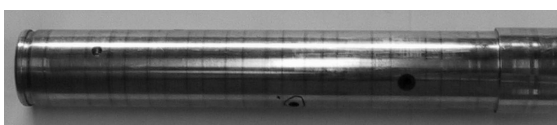


Fig. 1 Wear marks of sealed steel shaft surface

2. 해석방법

본 논문에서는 시일과 스틸면 사이에 미세한 구형의 경질입자가 존재하는 경우의 접촉문제를 비선형문제해석 프로그램인 MARC⁽⁸⁾를 사용하여 해석하고자 한다. 이때, 시일, 스틸면 및 경질입자는 모두 탄성체이며 이들의 탄성계수는 서로 크게 차이가 있다.

Fig. 2는 해석에 사용된 전체 격자계와 접촉부 부근의 확대한 격자계를 나타낸 그림으로 정확한 접촉해석을 위하여 구형입자 및 이와 접촉하는 부분의 격자는 상대적으로 조밀하게 구성하였다. 사용한 격자의 종류는 2D Axisymmetric Full Integration 10이며 격자의 수는 대략 12,000개 정도이다. 해석시간섭에 따른 시일의 과도한 변형에도 격자의 왜곡현상 등이 발생하지 않고 수렴될 수 있게 하기 위하여 리메싱(Remeshing) 기능을 활용하였다.

해석에서는 다음과 같은 방법과 조건으로 경계조건 등을 설정하였다. 먼저 조립시의 간섭량을 표현하기 위하여 시일 상부의 Rigid 요소를 접촉으로 정의하여 x방향으로 변위시켰으며, 스틸면 하단의 x방향 변위는 고정하여 간섭에 의해서 하부의 스틸면이 움직이는 것을 방지하였다(Fig.2 참조). 그리고 시일, 입자 및 스틸면 사이는 모두 접촉상태로 정의하였으며, 시일과 입자, 시일과 스틸면, 입자와 스틸면 사이에서의 마찰계수는 순서대로 임의로 0.5, 0.3, 0.1로 두었다.

Table 1에는 해석에 사용된 각 접촉물체에 대한 물성자료를 나타내었다. 정확한 해석을 위하여 사용한 시일인 NBR과 PTFE는 비선형적인 응

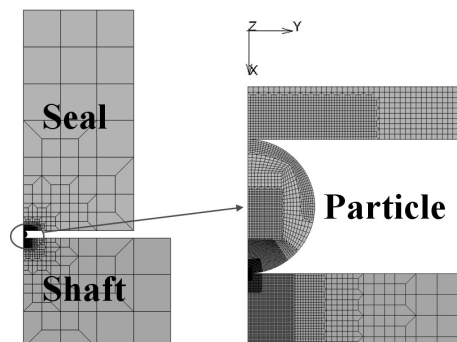


Fig. 2 FEM mesh structure.

Table 1 Material properties

Moony-Rivlin coefficient		C ₁₀	C ₀₁	
Seal	NBR	0.736	0.184	
	PTFE	61.33	15.325	
Material	Young's modulus, GPa	Poisson's ratio	Yield strength, GPa	
Particle	WC	520	0.24	4.16
Shaft	Steel	200	0.3	1.619

력-변형률 관계를 포함하는 Mooney-Rivlin 계수를 사용하였으며, 입자와 스틸면은 모두 탄성-완전소성 (Elastic-Perfect plastic)으로 가정하였다. 입자직경은 100 μm 으로 고정하고 간섭량은 최대 400 μm 까지 변화시켰다. 시일과 입자의 접촉부에서 시일의 과도한 변형으로 인하여 수렴되지 않는 경우를 피하기 위해서 Time Table을 정의하였다.⁽⁸⁾

3. 결과 및 고찰

Fig. 3에는 시일의 재질이 NBR과 PTFE이고 간섭량이 50 μm 와 400 μm 로 서로 다른 경우에 대한 변형된 시일형상과 각 접촉물체에서의 von-Mises 응력분포를 나타내었다. 간섭량이 50 μm 로 입자의 직경보다 작은 경우(Fig. 3(a),(b))에는 시일은 입자에만 접촉하지만 간섭량이 입자보다 클 경우에는 스틸면에도 접촉하게 될 것이다. 만일, 간섭량이 입자보다 한층 큰 경우(Fig. 3(c),(d))에는 시일은 입자를 거의 둘러싸는 형태로 변형되면서 스틸면과 접촉한다. 따라서, 간섭량의 증가에 따른 추가적인 접촉하중의 증가는 시일과 스틸면 사이에서 거의 발생하므로 Fig. 4와 같이 비선형적인 거동을 나타낼 것으로 쉽게 예상할 수 있다. 이 결과, NBR은 탄성계수가 낮으므로 경질입자로 인한 스틸면에서의 발생응력은 낮지만 PTFE인 경우에는 작은 간섭량에서도 스틸면에서는 항복상태에 도달할 뿐만 아니라 접촉면적보다 넓은 영역에서 소성변형이 발생하고 있다. 참고로 Fig. 3(d)에서 경질입자는 탄성상태이며, 최대 von-Mises 응력은 3.7GPa 정도이다. 이와 같이 간섭량이 동일할 경우에 시일의 재질 차이에 따른 시일의 변형형상은 거의 동일하지만 시일과 스틸면 사이에 존재하는 경질입자에 의해서 스틸면에서 발생하는 접촉응력은 아주 큰 차이를 나타내고 있다.

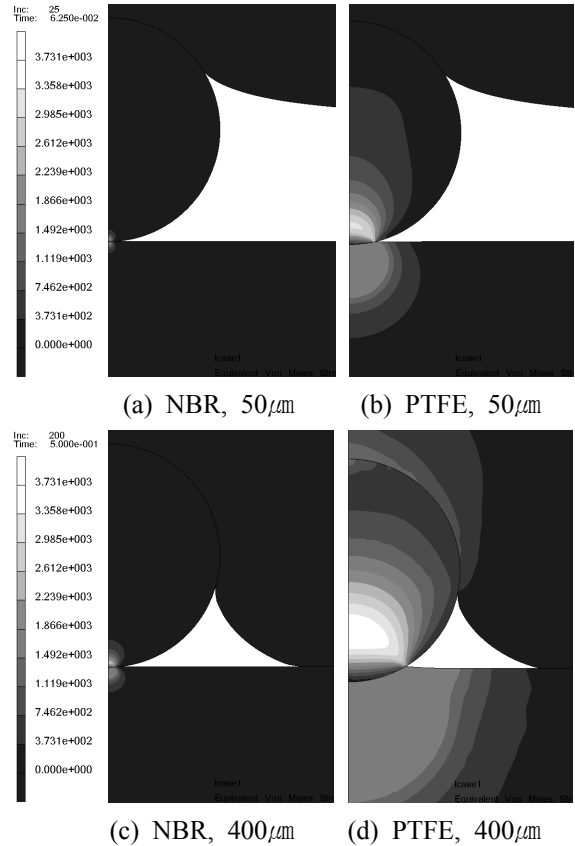


Fig. 3 Deformed seal shape and von-Mises stress distribution. Interference is (a) & (b) ; 50 μm , (c) & (d) ; 400 μm

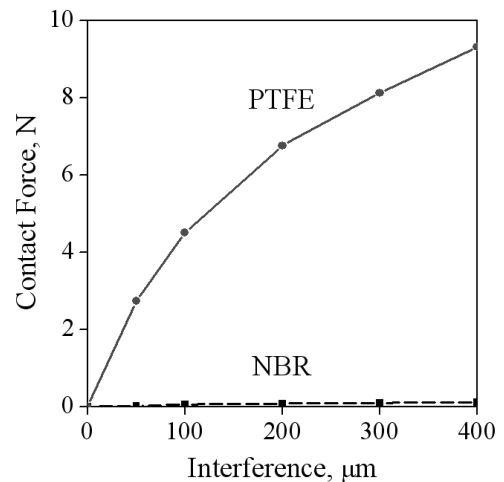
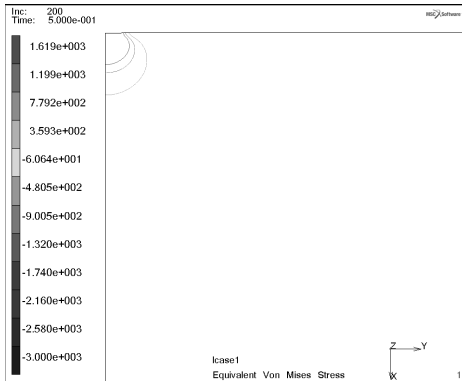
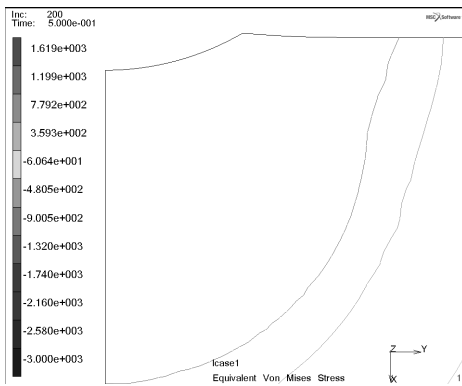


Fig. 4 Variation of contact force between seal and particle with interference

참고로 Fig. 3(c),(d)로부터 입자보다 간섭량이 큰 경우에는 입자가 연한 시일에 둘러싸이고 박혀서 상대적으로 경도가 아주 높은 스틸면을 미세하게 연삭시킬 것으로 쉽게 추정할 수 있다.



(a) NBR



(b) PTFE

Fig. 5 von-Mises stress distribution at steel surface ; Interference is $400\mu\text{m}$

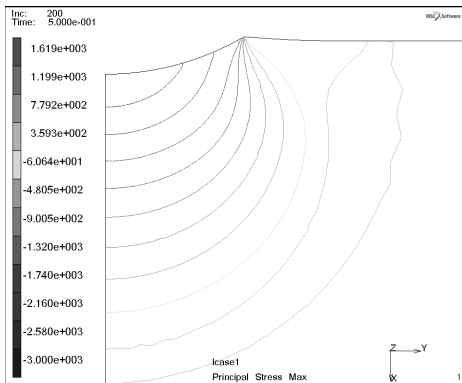


Fig. 6 Principal stress distribution for PTFE ; Interference is $400\mu\text{m}$

Fig. 5는 Fig. 3(c),(d)에 제시한 스틸면에서의 von-Mises 응력분포와 표면형상을 상세하게 나타낸 결과이다. Fig. 4에서 나타낸 것과 같이 NBR인 경우에는 시일의 간섭으로 인한 접촉하중이 아주 미세하기에 응력은 아주 작은 면적에서 발생하며 표면에서의 변형은 거의 나타나지 않았다. 하지만 PTFE인 경우에는 상당히 넓은 범위에

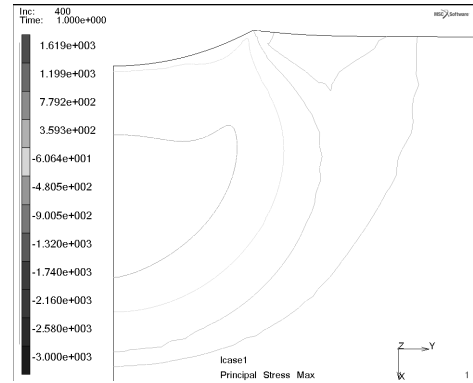


Fig. 7 Residual stress distribution after removing interference for PTFE

서 항복상태에 도달할 뿐만아니라 경질입자가 스틸 표면으로 침투하였다.

다음의 Fig. 6~Fig. 8에는 시일이 PTFE인 경우에 대한 스틸면에서의 주응력, 잔류응력 및 표면의 변형형상을 순서대로 나타내었다.

Fig. 6는 간섭량이 $400\mu\text{m}$ 인 경우에 대한 주응력 분포를 나타낸 결과로 접촉중양부에서는 최대 3.3GPa 정도의 높은 압축응력이 발생하였다. 경질입자와의 접촉부 주변의 표면에서는 상대적으로 크기는 작지만 0.6GPa 정도의 인장응력이 발생하는 점이 특징적이다.

Fig. 7에는 Fig. 3(d)인 상태에서 경질입자(혹은 시일)를 완전히 제거한 경우의 스틸면에서의 잔류응력분포를 표면형상과 함께 나타내었다. 경질입자와 시일의 간섭에 의해서 소성변형된 스틸면 아래에는 넓은 영역에 걸쳐 최대 0.6GPa 정도의 압축응력이, 경질입자와의 접촉부 주변의 표면에는 0.35GPa 정도의 인장응력이 각각 잔류하였다. 따라서, PTFE와 같은 탄성계수가 큰 재료를 사용하는 경우에는 간섭에 의하여 발생하는 높은 응력 뿐만아니라 경질입자가 제거된 후에도 남아 있는 상당한 크기의 잔류응력이 실링면의 손상에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 특히, 운전시에는 미세입자가 장시간 반복접촉하기 때문에 스틸 표면 아래에서 피로파괴가 시작될 수 있을 것으로 추정된다.⁽⁷⁾

Fig. 8에는 간섭량을 $400\mu\text{m}$ 까지 순차적으로 증가시킨 다음 시일 (혹은 경질입자)을 제거한 경우의 스틸면의 변형형상을 나타내었다. 간섭량이 증가할수록 입자와 접촉하는 스틸표면은 수직방향으로 더욱 깊게 함몰되지만 반대로 접촉부 주변에서는 약간 돌출된다. 특히, 시일을 제거하였

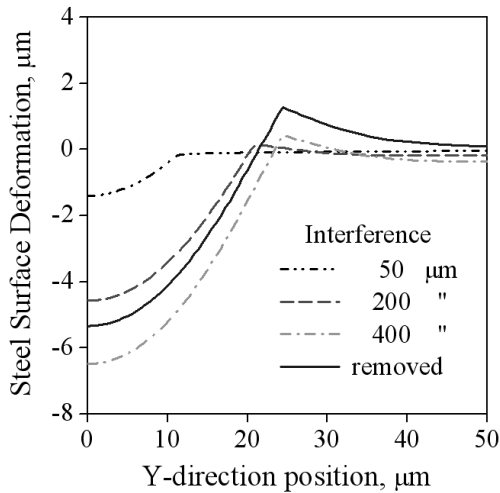


Fig. 8 Steel surface deformation for PTFE.

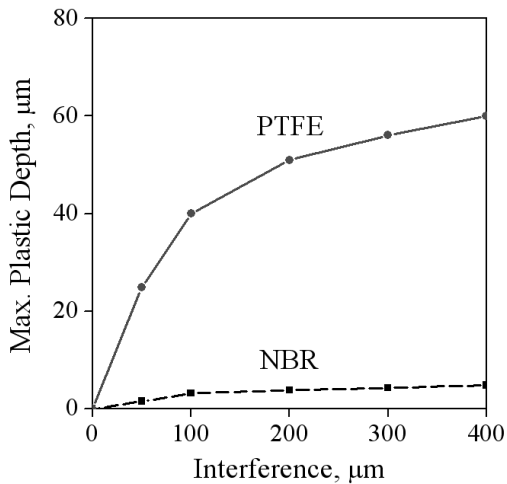


Fig. 9 Variation of max. plastic depth with interference

음에도 불구하고 스틸면에는 상당한 깊이의 압흔이 생성되었으며 접촉부 주변의 표면은 더욱 들출되었다. 이러한 결과로부터 실링면에 경질입자가 존재할 경우에는 단순하게 연삭가공한 스틸면의 거칠기는 증가할 수 있음을 알 수 있으며, 이는 결과적으로 시일의 수명에 아주 큰 악영향을 미칠 것으로 추정된다.

Fig. 9는 시일의 재질과 간섭량의 변화에 따라서 스틸면이 소성변형된 깊이의 변화를 나타낸 것으로 PTFE인 경우에는 간섭량이 커질수록 상당한 깊이까지 소성변형되었다. 여기서 간섭량이 입자보다 큰 경우에 기울기가 감소하는 것은 Fig. 3과 Fig. 4의 고찰결과와 같이 시일이 스틸면에도 접촉하게 되기 때문이다.

이상의 결과, 시일과 스틸면 사이에 경질입자

가 존재하는 경우에는 시일의 재질에 따라서 스틸면에 발생하는 응력분포와 변형형상은 아주 큰 차이를 보였다. 특히 PTFE와 같이 탄성계수가 높은 시일인 경우에는 간섭에 의하여 스틸면은 국부적으로 항복응력상태에 도달할 뿐만 아니라 접촉 이후에는 영구변형과 함께 상당한 크기의 잔류응력이 존재하였다. 따라서 장시간 운전할 경우에 시일과 접촉하는 스틸표면에서는 연삭마멸 뿐만아니라 피로마멸이 동시에 발생할 수 있을 것으로 예상된다. 한편, 본 논문에서 사용한 조건과는 달리 실제 적용에서는 시일과 접촉하는 스틸면은 표면경화처리와 함께 경질 코팅 처리하므로 이에 대한 추가연구가 요구된다.

4. 결론

본 논문에서는 시일을 설치한 스틸면에서의 정확한 마멸기구를 제시하기 위한 연구의 일환으로 미세한 경질입자가 시일과 스틸면 사이에 존재하는 경우의 접촉문제를 비선형문제해석 프로그램인 MARC를 사용하여 해석하였다. 이때 간섭량과 시일의 재질에 따른 시일과 스틸면의 변형형상, von-Mises응력 및 주응력 분포 등을 구하였다. 이 결과, 시일의 재질에 따라서 스틸면에 발생하는 응력분포와 변형형상은 아주 큰 차이를 보였다. 특히, NBR과 달리 PTFE와 같이 탄성계수가 높은 시일을 사용하는 경우에는 간섭에 의하여 스틸면은 국부적으로 항복상태에 도달할 뿐만 아니라 시일(혹은 경질입자)을 제거한 이후에도 영구변형과 함께 상당한 크기의 압축/인장 잔류응력이 존재하였다. 따라서, 시일과 스틸면 사이에 경질입자가 존재할 경우에는 스틸면에서 연삭마멸과 함께 피로마멸이 발생할 수 있음을 확인하였으며, 다양한 설계변수에 대한 추가연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 2단계 BK21사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Bhusan, B., 1998, Principles and Applications of Tribology, Marcel Dekker.

- (2) Sun, Y., Bloyce, A. and Bell, T., 1995, "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.
- (3) Kang, Y. S., Sadeghi, F. and Hoeprich, M. R., 2004, "A Finite Element Model for Spherical Debris Denting in Heavily Loaded Contacts," *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol.126, pp.71~80.
- (4) Coveney, V. A. and Menger, C., 2000, "Behaviour of Model Abrasive Particles between a Sliding Elastomer Surface and a Steel Counter-face," *Wear*, Vol.240, pp.72~79.
- (5) McColl, I. R., Ding, J., and Leen, S. B., 2004, "Finite Element Simulation and Experimental Validation of Fretting Wear," *Wear*, Vol.256, pp.1114~1127.
- (6) Park, T. J. and Cho, H. D., 2008, "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.
- (7) Park, T. J., Yoo, J. C. and Jo, H. D., 2008, "Contact Analysis between Rubber Seal, a Spherical Wear Particle and Steel Surface," *J. of KSTLE*, Vol.24, No.6, pp.297~301.
- (8) MSC. MARC/MENTAT, 2007, "2007r1 User's Guide," Vol.A~E.