

질화규소세라믹스의 접촉피로특성

유 성 근
나고야대학 재료기능공학과

Characteristic of Rolling Contact Fatigue in Silicon Nitride Ceramics

Sung-Keun Yoo

Department of Materials Science Engineering, Nagoya University

(1996년 6월3일 받음, 1997년 1월 29일 최종수정본 받음)

초 록 2종류의 질화규소에 대하여 Ring형시험편을 이용하여 접촉피로시험을 하였다. 질화규소는 금속재료에서와 같은 형태의 피로현상을 나타냈고, 파면해석 및 관찰결과 접촉피로에 있어서 균열의 발생은 고탄소크롬강의 경우와 같이 표면하의 반복전단응력에 의한 것으로 밝혀졌다. 그리고 시험편 파단면에서 표면하의 Hertz전단응력의 변동이 최대로 되는 깊이의 위치에 다수의 균열이 관찰되었다.

Abstract Rolling contact fatigue tests were performed for two types silicon nitrides using disk-type specimens. Materials showed a fatigue behaviour similar to that typically found in metallic materials. From the fractographic and metallographic observations, it has been found that the crack initiation in the silicon nitrides subjected to rolling contact fatigue is to be induced by cyclic subsurface shear stress, as is known in steel bearing. On the mid-sections of the specimens, many subsurface cracks which lay parallel to the contact surface can be found at a depth where fluctuation of the Herzian shear stress was the maximum.

1. 서 론

베어링, 압연롤, 기어등에 발생하는 접촉피로파손은 접촉면에 평행방향의 subsurface crack이 성장하고 이 부분이 떨어져 나가 생기는 것이 많다.

이 subsurface crack의 성장은 단순히 모델화하여 생각하면 Hertz접촉응력의 접촉면에 평행방향의 전단응력성분에 의한 이틀테면, 모드 II 피로균열진전의 일종이라 생각된다^{1,2)}. 또 실제로 베어링등의 설계는 이 전단응력이 기준으로 되고 있다. 이 같은 모드 II 진전은 금속에 있어서는 기본적으로는 균열선단부분의 미끄러짐, 또는 전단변위에 의해 일어나는 것이다^{3,4)}. 미끄러짐 또는 소성변형이 거의 일어나지 않는다고 생각되는 세라믹스에서는 금속의 경우와 같은 모드 II 진전기구에 의해 일어나는지 또는 전혀 이것과 다른 기구로 일어나는지를 밝히는것은 매우 흥미깊고 또 실용적으로도 의의가 있는 것이라 생각된다.

세라믹스 접촉피로의 경우도 표면상태, 사용조건, 재료에 따라 여러가지 파괴형태가 있고⁵⁾, 시험방법, 온도의 영향등을 조사하는 것 외에 미끄러짐 또는 접촉피로에 의한 파괴의 기구에 대해서도 조사되고 있다^{6,7)}.

본 실험에서는 통상의 인장, 압축응력하에서는 반복수의존형의 피로를 일으키지 않는 질화규소⁸⁾에 대하여 접촉피로시험을 하고 그 파괴기구에 대하여 조사하였다.

2. 실험 방법

시험장치는 스프링식 접촉피로시험기로, 로드셀은 스프

링의 상부에 위치하고 스프링은 베어링을 끼워 슬라이드식으로 되어있는 구동축과 접촉하고 있고, 윤활계로서는 물리코드(BR2플러스)를 사용하였다. 시험편은 균열의 발생, 진전이 2차원적으로 되어 시험편 측면에서 관찰가능한 평판Ring형시험편을 사용하였고, Fig. 1에 시험편 형상을 나타내었다. 시험편은 종동축회전축(위축)에 장착하고, 회전축과 시험편사이에 미끄러지지 않도록 고정되어 있다. 그리고 시험중 회전계에 의해 구동축과 종동축들의 회전속도를 측정할 결과 하중에 따라 다르지만, 1200rpm의 경우 종동축에서는 최고 2% 정도의 회전수의 감소가 인정되어 미끄러짐을 완전히 방지할 수는 없었다.

시험편 장착 후 가압 염색 필름을 이용하여 구동축(하축)과 종동축이 완전히 일치하지 않을 경우 조정하였다. 구동축의 접촉재료는 열간압연스테인레스강(일본규격 SUS 420J2Z)를 사용하였다.

실험에는 도시바세라믹스의 TSN-03(질화규소A) 및 일본특수도업의 EC141(질화규소B)등 2종류를 사용하였고 그 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다.

질화규소A는 소결조제로서 Y_2O_3 를 사용하여 HIP로 제조된 것이며, 질화규소B는 가스압소결재로 인장, 압축응력하에서는 시간의존형, 즉 정적피로를 일으키고, 반복수의존형의 피로는 일으키지 않는 재료이다⁸⁾.

실험은 모든 재료에 대해서 접촉하중을 변화시켜 파단수명을 조사하였고, 그 때 회전수를 변화시켜 반복속도의 영향을 검토하였다.

또 파괴직전 및 파괴 후에 시험편을 연삭, 연마하고 재료

Table 1. Mechanical properties of materials.

Material	Density (g/cm ³)	Young's Modulus (MPa)	Fracture Toughness (MPa√m)	Hardness	Bending Strength (MPa)
Silicon Nitride-A TSN-03	3.24	2.95 × 10 ⁵	6.4	1590 (Vickers)	1116
Silicon Nitride-B EC-141	3.23	3.20 × 10 ⁵	6.0	1530 (Vickers)	900

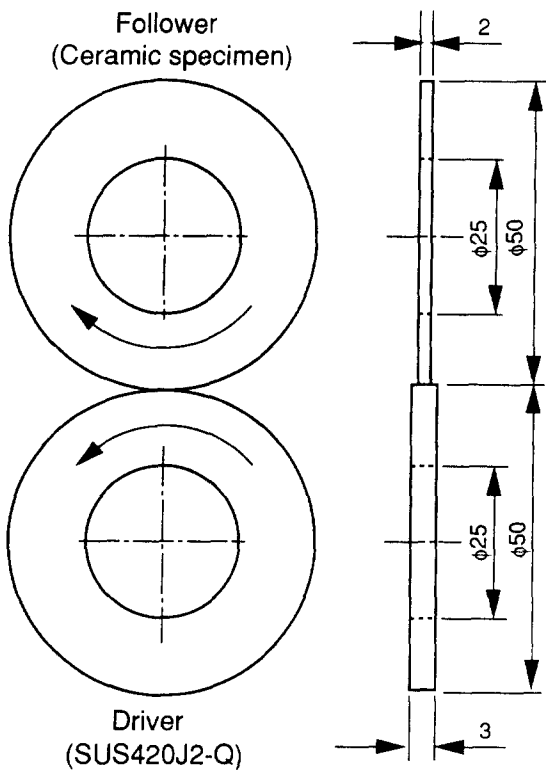


Fig. 1. Specimen for rolling contact fatigue of ceramics.

내부의 균열유무를 관찰하고 그 분포를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

S-N곡선과 반복속도의 영향

Fig. 2, Fig. 3 은 질화규소 A, B의 접촉피로시험결과로, 최대접촉면압(Hertz응력)과 파괴까지의 반복수의 관계, 즉 S-N곡선을 나타내고 있다.

Fig. 2는 질화규소A의 결과로 회전속도 240rpm (4Hz)와 1600rpm (27Hz)에서 각각 측정한 것이다. 응력저하와 더불어 수명은 증가하고 금속의 경우와 같은 S-N곡선을 나타내었다.

Fig. 3은 질화규소B를 400rpm (7Hz), 1200rpm (20Hz)으로 행한 결과를 나타낸 것으로 질화규소B도 질화규소A의 결과에서와 같이 응력의 저하와 더불어 수명이 증가하는 피로현상을 나타내는 S-N곡선을 나타내고 있다.

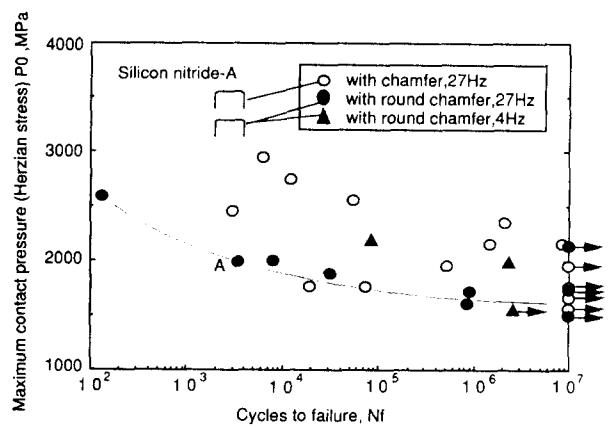


Fig. 2. Maximum contact pressure (Herzian stress P_0) versus cycles to failure for rolling contact fatigue tests of silicon nitride -A.

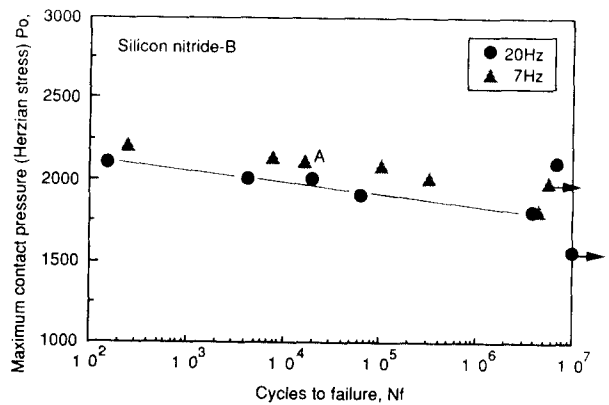


Fig. 3. Maximum contact pressure (Herzian stress P_0) versus cycles to failure for rolling contact fatigue tests of silicon nitride -B.

일반적으로 세라믹스는 응력부식균열현상에 의한 slow crack growth가 일어나기 때문에 반복피로에 대하여 시간 의존형 파괴를 나타내는 것으로 알려져 있다⁹⁾. 만일 이번 접촉피로실험에서도 응력부식균열에 의한 것이라고 하면 반복속도가 낮은 경우가 빠른 경우보다 파단까지의 반복수가 적을 것이나 실험결과는 오히려 그 반대의 경향을 나타내고 있다.

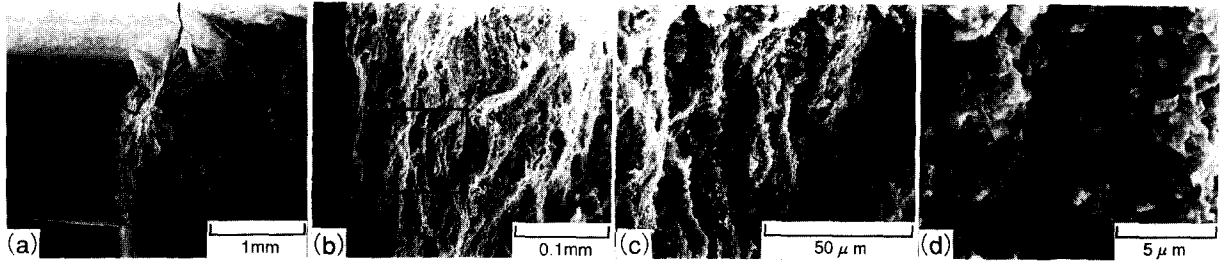


Fig. 4. Fractograph of the specimen designated by "A" in Fig. 2 (Silicon nitride-A). Figures(b), (c) and (d) are higher magnification views of a part shown in figure(a).

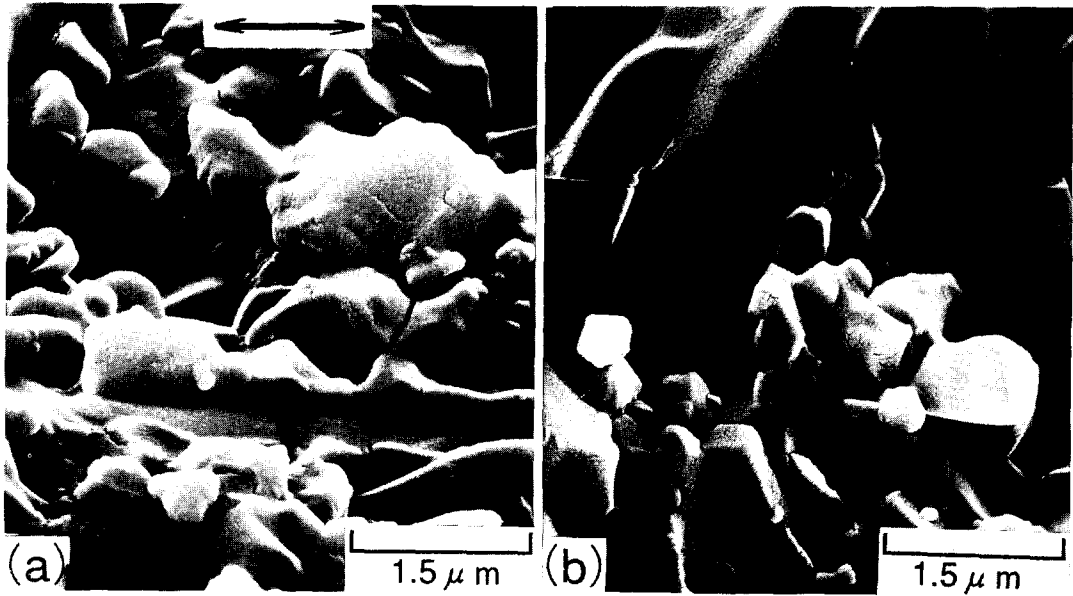


Fig. 5. Fractograph of the tensile fracture and the shear fracture (Silicon nitride-B). (a) Shear fracture (b) Tensile fracture

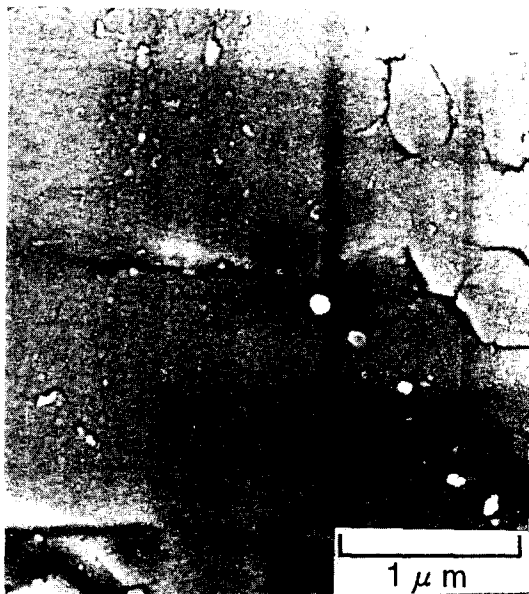


Fig. 6. Fractograph of the internal crack of the silicon nitride-B.

이것은 질화규소의 접촉피로에 있어서는 응력부식균열과는 다른 별도의 기구에 의한 파괴가 일어나고 있는것을 시

사하고 있다.

질화규소B에 대해서는 그 피로특성이 충분히 조사되고 있고, 인장·압축반복하중하에서는 표면에서부터 응력부식균열에 의해 파괴되고 반복수 의존을 나타내지 않은 재료이다. 접촉피로에서는 다른 재료에 비해 피로에 의한 강도저하는 작으나, 명료한 피로현상을 나타내고 있고, 후술하는 것과 같이 시험편내부에 생긴 균열에서 부터 파괴에 이르고 있다. 이 같은 파괴형태의 차이는 접촉피로에 있어서는 시험편의 표면에 큰 인장응력이 생기지 않기 때문에 응력부식균열이 생기기 어렵기 때문이라 생각된다.

접촉피로의 파면관찰

Fig. 4는 접촉피로시험에 의해서 파괴된 질화규소A 시험편의 파면을 SEM관찰한 것으로 이것의 균열발생부라고 생각되는 부근(Fig. 4(a))을 확대한 것이 Fig. 4(b),(c),(d)이다. 균열발생부의 확인은 어려우나 거시파면형태에서 대략 그 판단은 가능하다.

Fig. 4(c),(d)에서 알수 있는 것 같이, 다른 부위와는 다르게 접촉면에 평행한 계단상의 파면이 존재한다. 접촉면에 평행한 균열은 판두께 중심부에서 발달하고 있고, 판 두께 중심부에 발달한 균열이 주변부에 전파하였다고 생각된다.

Fig. 5는 질화규소B의 접촉피로에 의해 파괴된 파면과



Fig. 7. Fractograph of the internal crack of the silicon nitride-A. Figure(b) are higher magnification views of part shown by figure (a).

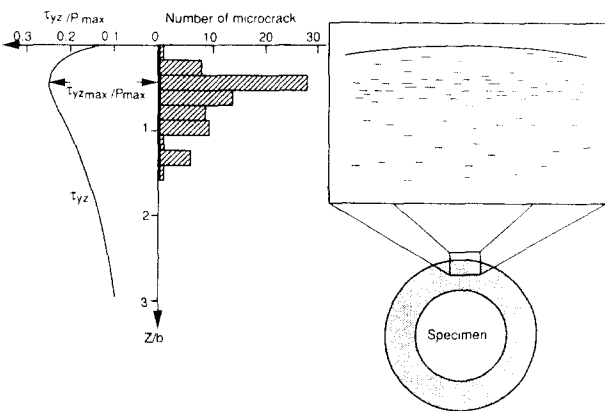


Fig. 8. The shear stress distribution and the microcrack distribution under rolling contact surface (Silicon nitride-B).

별도 인장파괴시킨 파면을 고배율로 비교한 것으로 Fig. 5 (a)의 접촉피로에 의해 파괴된 파면은 입자가 전단응력방향(화살표)으로 변형하고 있는 것 같이 보이며 Fig. 5(b)의 인장파괴시킨 파면은 입계가 명료하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

표면하의 내부균열관찰

Fig. 6은 질화규소B시험편을 파괴에 도달하기 전에 시험을 중단하고, 시험편의 단면을 연삭하여 판두께 중심부의 상황을 SEM으로 관찰한 것이다.

또 Fig. 7은 질화규소A의 파단된 시험편의 파손부 근방의 판두께 중심의 관찰결과이다. 표면아래쪽에 표면과 평행한 방향으로 수 μm의 길이의 균열이 다수 보인다. Fig. 6은 접촉면에서 약 300μm 정도 깊이의 곳에서 찍은 SEM 사진이다.

여기에서 Hertz의 접촉이론을 이용하면 이 시험편의 실험조건에서는 접촉방향으로 평행한 전단응력 τyz의 진폭이 최대로 되는 깊이는 z=0.5b 결국 약 350μm의 깊이이다. 이것은 실제균열이 나타난 깊이와 큰 차가 없는 것으로 판단되어 전단응력의 작용하에서 생긴 균열이 발달, 연결하고, 전파하여 파괴에 이른것이라 생각된다. 이 시험편에 있어서 전단응력성분의 분포¹⁰⁾와 관찰된 균열의 분포상황을 대응시킨것이 Fig. 8이다. 전단응력의 진폭이 최대로 되는 τyz 최대의 위치에서 균열이 다수 발생하고 있는 것을 알

수 있다.

Fig. 9는 시험결과로 나타난 질화규소A의 파면(Fig. 9 (a))과 이전¹¹⁾에 보고된 접촉피로시험결과인 고탄소크롬강(Fig. 9(b)) 및 모드II피로진전재현시험결과인 공구강(Fig. 9(c))의 파면을 비교한 것으로 거시적 또는 저배율의 관찰에서는 피로파면은 극히 유사함을 나타내고 있다. Fig. 10에 강과 세라믹스의 접촉피로파괴과정을 나타낸 모식도이다.

본 연구결과에 의하면 세라믹스에 있어서는 접촉면에 거의 평행한 균열이 압축응력에 의해 파쇄되고, 균열은 그 방향 및 파면형태로부터 전단형(모드II진전)이라고 생각된다. 결국 세라믹스의 접촉피로손상은 기본적으로는 강과 같은 반복수에 의존하는 피로는 일어나지 않으나, 반복수에 의존하고 있는 것 같이 보이는 경우가 있는 것은 응력부식 균열기구에 의한 균열의 전파과정으로 입자의 bridging효과가 하중반복에 의해 억제되는 등 기계적인 효과에 의한 것이라 생각된다. 그러나 본 연구의 결과는 약간의 압축응력과 전단응력의 중첩하에서는 응력부식균열과는 다른 내부 균열의 생성, 안정성장 과정을 거친 후 파괴에 이른다 고 말할 수 있다. 반복속도의 영향에 대해 본 연구에서는 그 이유를 밝힐 수 없었고, 세라믹스의 입계파괴에 미치는 변형속도의 영향을 검토할 필요가 있다고 생각된다.

4. 결 론

- 1) 질화규소 A, B 모두 현저한 접촉피로 거동을 나타내었고, Hertz접촉응력의 증대에 따른 피로 수명은 저하하였다.
- 2) 파단전에 하중을 제거한 시험편에 대해 연삭하여 내부를 조사한 결과, 접촉방향에 평행한 반복전단응력이 최대로 되는 위치 근방에서 미소균열이 다수 관찰되었다. 이러한 균열이 발달, 연결되고 전파하여 파단에 이른것이라 생각된다.
- 3) 파괴발생위치, 반복속도의 영향으로부터 생각해보면, 본 재료에서는 접촉피로가 환경의 영향을 받지 않는 반복수 의존형의 피로에 의해서 생긴것이라 생각된다. 질화규소B는 인장, 압축하중하에서는 반복수 의존형의 피로가 나타나지 않는 재료이며, 이러한 사실은 압축응력과 전단응력의 중첩하에서는 세라믹스에 있어서도 반복수 의존

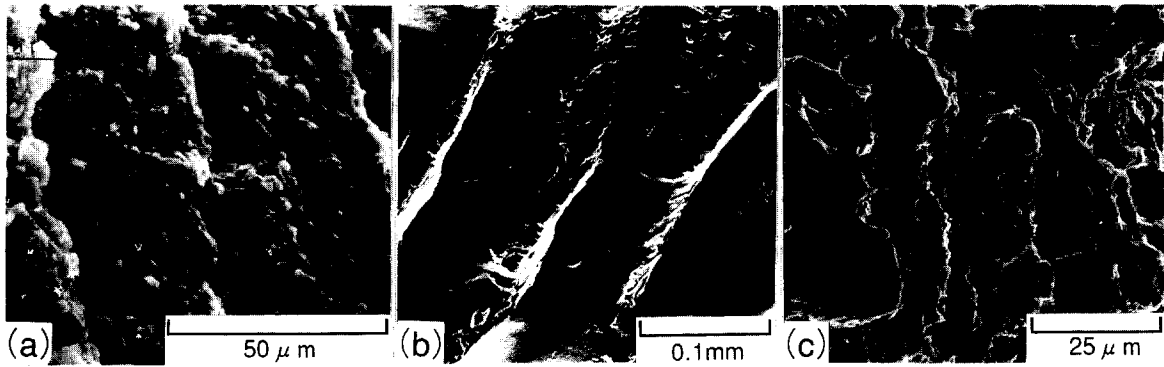


Fig. 9. Fractographs of mode II fatigue fracture surfaces of various materials. (a) silicon nitride-A (b) high carbon chromium bearing steel (c) tool steel (quench - tempered)

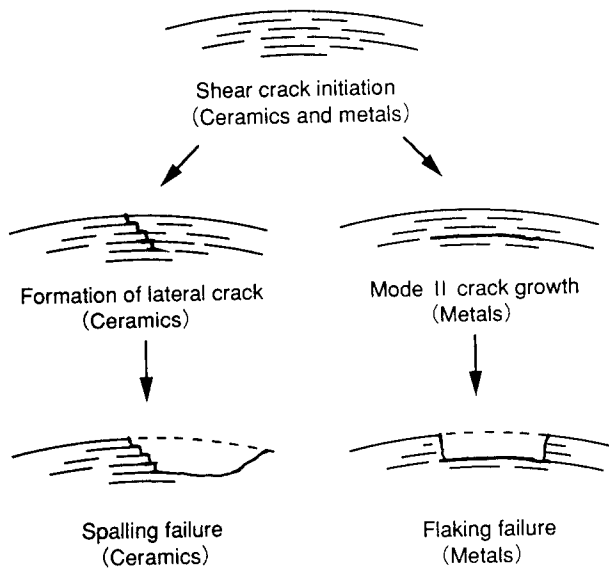


Fig. 10. Schematic illustration of the processes of rolling contact failure in ceramics and metals.

의 피로가 일어날 수 있는 것을 의미한다.

참 고 문 헌

1. M.T. Hanson and L.M. Keer, Tribology

Transactions, **35**, 451 (1992).
 2. A.D. Hearle and K.L. Jonson, J. Mech. Phys. Solids, **33**, 61 (1985).
 3. A. Otsuka, K. Mori and T. Miyata, Engineering Fracture Mechanics, **7**, 429 (1975).
 4. A. Otsuka and K. Mori, Journal of J. S. M. E, **45**, 1312 (1979).
 5. A. Yoshida, M. Fujii, H. Hayashi and H. Uchiyuki, Tribologist, **37**(1), 54 (1992).
 6. J.F. Braza, H.S. Cheng, M.E. Fine, A.K. Gangopadhyay, L.M. Keer and R.E. Worden, Tribology Transactions, **32**, 1 (1989).
 7. J.F. Braza, H.S. Cheng, M.E. Fine, Tribology Transactions, **32**, 439 (1989).
 8. H. Sugawara, A. Otsuka, Y. Ishihara and T. Amano, J. Soc. Mat. Sci. Japan, **40**(454), 914 (1991).
 9. A. Otsuka and H. Sugawara, J. Soc. Mat. Sci. Japan, **40**(453), 700 (1990).
 10. K.L. John, Contact Mechanics, Cambridge University press, **285** (1985).
 11. 유성근, 한국재료학회지 Vol.7, No.1, (1997)