

볼과 Plate간의 건식 구름접촉현상에 관한 실험적 고찰

차 금 환* · 황 동 환* · 김 대 은**

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계공학과

Experimental Study of Unlubricated Rolling Contact between Ball and Plate

Kum-Hwan Cha · Dong-Hwan Hwang · Dae-Eun Kim

1 서 론

작동중에 있는 대부분의 기계요소들은 접촉한 상태에서 상대운동을 경험한다. 이러한 접촉시 생기는 마찰·마멸은 기계요소들의 정밀도를 저하시키고 기계의 수명과 에너지 손실에 직접적인 영향을 미친다는 것은 잘 알려진 사실이다. 마찰 및 마멸현상은 크게 미끄럼접촉운동과 구름접촉운동에 의해 발생되며 구름접촉을 이용한 기계요소는 미끄럼접촉에 비해 마찰저항이 작으므로 많이 사용되어 왔다. 이러한 기계요소중에서 베어링, 볼나사 및 각종 이송기구는 기계제품의 정밀도 향상에 절대적인 영향을 미치므로 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다 [1-2]. 대표적인 구름계요소인 베어링은 거의 대부분의 회전체 지지부에 사용되고 있으며 그 회전정도에 따라 기계구조물의 정밀도가 결정되는 중요한 요소이므로 기계구조물에서 차지하는 비중은 매우 크다. 또한 볼나사는 볼과 웨드륵의 구름접촉을 이용하여 회전운동을 직선운동으로 전환해주는 장치로서 작동효율이 높고 마찰과 백래쉬가 적으므로 공작기계의 주축 및 정밀 이송시스템에 많이 사용된다. 이러한 베어링 및 볼나사에서의 웨드륵은 수명의 중요한 인자인 내마모성 및 내피로성이 중요하기 때문에 HRC60

전후의 경도가 필요하고, 표면경화에 의해 그 목적을 달성하고 있다. 베어링 및 볼나사 등에서 주로 사용되는 소재는 내마모성을 증가시키기 위해 Cr원소를 첨가시키고 담금질에 의한 경화깊이를 증가시키기 위해서 Mo를 첨가시킨 크롬몰리브덴강으로 SCM22H, SCM5H 등이 있다 [3].

대표적으로 사용되고 있는 표면경화법에는 침탄열처리법과 고주파 유도가열처리법이 있으며 최근에는 열처리변형을 줄이고 내마모성 등을 향상시키기 위해 플라즈마 이온질화열처리법이 고려되고 있다. 열처리를 통해 향상시킬 수 있는 재료의 성질은 경도, 적당한 경화깊이 그리고 안정된 조직이다. 침탄열처리법은 저탄소강의 표면에 탄소를 침투시켜 고탄소강으로 만든 다음에 이것을 담금질하여 경화하는 방법으로서 제품의 형상이 복잡하여도 쉽게 실시할 수 있고 높은 표면경도를 얻을 수 있는 장점이 있으나 열처리후 변형이 크고 잔류응력 등이 발생하므로 기계요소의 정밀도에 영향을 미치게 된다. 한편 새로 도입된 플라즈마 이온질화 열처리법은 저압의 질소 기체 분위기에서 음극으로 사용되는 피처리물과 양극으로 사용되는 진공용기 사이에 고전압을 가

하여 피처리물 주위의 Glow방전이 질소원자의 표면침투를 활성화시켜 질화층을 형성시키는 방법이다 [4]. 이러한 플라즈마 이온질화 열처리법을 제조공정에 이용한다면 다음과 같은 이점을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 질소가 들어감에 따라 내마모성이 좋아지며 비교적 저온공정이므로 열응력에 의한 변형을 많이 줄일 수 있으므로 생산단가를 낮출 수 있다. 그러나 이 열처리 방법은 표면에 비교적 큰 하중이 작용하는 경우에는 유효경화층깊이가 불충분하여 내마모성을 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 건식 구름접촉시 발생하는 tribological한 현상들을 plate on ball tester를 이용하여 실험적으로 고찰하였다. 실험의 주된 관심은 각 열처리 방법으로 제작한 시편에 대하여 건식 구름접촉시 cycle수에 따른 plate의 표면 거칠기, 트랙의 형상, 경도 및 구름저항의 변화이며 이런 자료를 토대로 열처리공정의 차이에서 오는 정도수명 및 피로수명에 대한 상대평가를 통해 마찰·마멸의 저감에 적합한 열처리방법을 제시하고자 한다.

2 접촉면의 압력해석

구름계요소에서 웨드론과 볼을 탄성체라고 가정하면 두 물체간에는 접촉면이 형성되며 그 형상은 하중에 따라 변화한다. 이 때 탄성 영역에서의 접촉압력상태를 다음과 같이 예측할 수 있다. 두개의 탄성체가 접촉하면 재료의 성질과 접촉표면의 곡률과 작용하중에 따라 접촉부위에 압력분포가 형성되고 이와 같은 접촉에 의하여 물체는 변형한다. 이러한 압력분포는 표면층의 파손현상과 밀접한 관계가 있다.

Hertz에 의하면 Fig. 1 과 같이 접촉면적이 타원형상과 원형상인 경우에 대해 표면의 압력분포는 다음과 같이 전개된다 [5].

i) 접촉면적이 타원형상인 경우

$$p = \frac{3N}{2\pi ab} \left[1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} \right]^{1/2}$$

$$a = k_a \left[\frac{3N}{2\Sigma\rho} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{1/3}$$

$$b = k_b \left[\frac{3N}{2\Sigma\rho} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{1/3}$$

$$\Sigma\rho = \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}}$$

여기서 k_a, k_b 는 곡률합에 의해 결정되는 상수로서 Palmgren에 의해 제시되어 진다 [6].

ii) 접촉면적이 원형상인 경우

$$p = \frac{3N}{2\pi a^2} \left[1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{z^2}{a^2} \right]^{1/2}$$

$$a = \left[\frac{3}{4} NR \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{1/3}$$

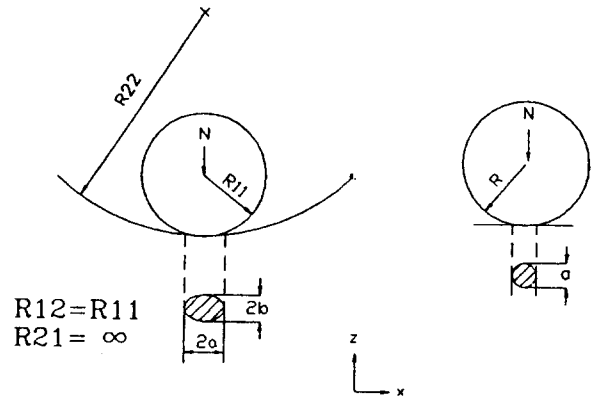


Fig. 1 Contact geometry of two bodies with arbitrary curvature

한편 상사계수는 웨드론의 곡률반경을 볼 지름으로 나눈 값으로 정의되는 데 완전상사의 경우 웨드론 곡률반경이 볼 반경과 같으므로 그 값이 1/2이 되며 이 값에 근접할수록 접촉에 의한 마찰열은 증가된다. 반면에 상사

계수가 커질수록 마찰은 감소되나 최대접촉응력은 증가하여 구름요소의 피로수명이 감소되는 원인이 된다. 이 때문에 적절한 상사계수를 선택해야 한다 [7].

3 실험 및 고찰

3.1 실험장치의 구성

실험장치의 개략도를 Fig. 2에서 보여주고 있다. 대부분의 구름계요소에서 일어나는 구름운동을 간략화하고 하중을 쉽게 가하기 위해서 탁상드릴링머신을 이용하여 Plate-on-ball tester를 제작하였다. 이 때 볼과 plate간에 발생하는 마찰토크는 스트레인 게이지에 의하여 전압으로 변환되고 이 전압은 Amp에 의해 증폭되어 A/D board를 통하여 PC에 저장된다. 하중은 추를 이용하여 28 kgf에서 58kgf까지 가할 수 있고 회전속도는 500rpm에서 3000rpm까지 변화시킬 수 있다.

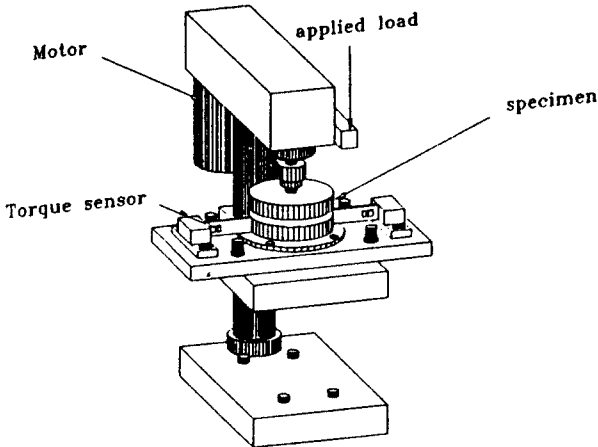


Fig. 2 Plate-on-ball tester

3.2 실험조건

실험에 사용한 시편의 재질은 SM45C, SCM22H, SCM5H이고 범용선반을 이용하여 디스크형태로 제작한 후 열처리하였다. 선택한 볼의 재질은 STB2(고탄소 크롬베어링강)로 경도는 약 HRC63이고 표면 거칠기(Ra)는

0.02 μ m이다. 사용한 실험조건은 Table 1과 같고 작동속도와 하중 및 재질을 변화시켜가면서 표면의 형상변화와 마찰토크를 측정하였다. 각 실험조건에 대하여 실험을 두번씩 실행하였으며 그림에 제시된 값들은 그 값들의 평균이다. 또한 cycle수는 볼의 수와 회전수를 곱한 값으로 plate가 실제로 경험하는 접촉횟수이다. 또한 여기서 구름저항은 전동체가 받는 하중과 이것을 구름운동시키는데 필요한 힘의 비로 정의되고, 이 힘은 측정된 마찰토크로부터 얻는다 [8].

Table 1 Experimental condition

온도 ($^{\circ}$ C)	습도 (%)	회전수 (rpm)	수직하중 (kgf)
19~22	30~40	577, 900, 1080, 1800	28,38,48

3.3 실험 결과

3.3.1 하중, 회전속도에 따른 구름저항의 변화

예비실험으로 회전속도와 하중을 변화시켜가면서 구름저항을 측정하였다. 이 때 사용한 소재는 SM45C이며 표면경도는 HRC23이었고 표면 거칠기(Ra)는 0.2 μ m였다. 볼은 지름 4.76 mm를 세척하지 않는 상태로 사용하였으며 따라서 약간의 유기물질이 존재하였고 판단된다. 밀면은 같은 소재로 V홈 그루브를 가공하여 사용하였다.

회전속도를 577rpm로 일정하게 한 상태에서 하중을 변화시켜서 얻은 결과가 Fig. 3에 제시되었다. 하중이 증가할수록 표면에 작용하는 압력은 증가되고 이로 인해 구름저항이 증가되는 시점은 빨라지며 그 관계는 대략 반비례하는 것을 알 수 있다. 그리고 하중을 38kgf로 일정하게 한 상태에서 회전속도를 변화시켜서 얻은 결과가 Fig. 4에 제시되었다. 일반적으로 마찰속도가 증가하면 접촉부위의 온도를 상승시키고 이로 인해 재료의 경도저하를 유발하

며 마멸에 취약하게 한다 [9]. 그러나 본 실험에서 사용한 회전속도의 범위에서는 접촉면간의 상호작용이 구름저항의 변화에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

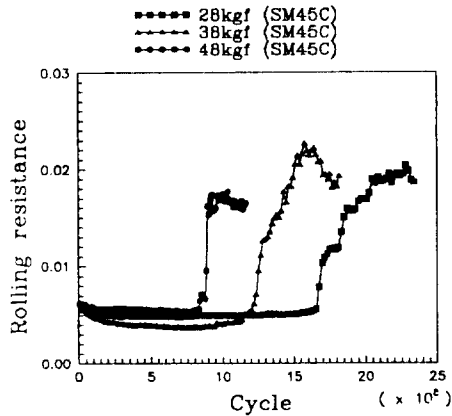


Fig. 3 Variation of rolling resistance of each applied load with respect to cycles

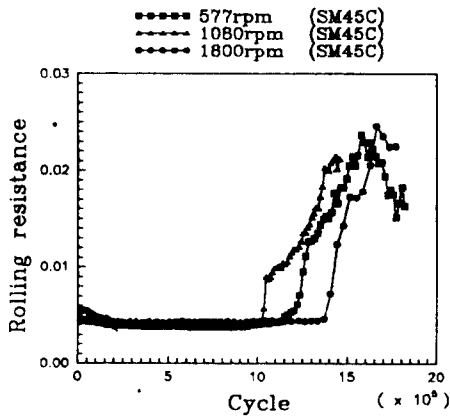


Fig. 4 Variation of rolling resistance of each speed with respect to cycles

3.3.2 열처리방법에 따른 마찰·마멸특성

하중과 회전속도를 각각 48kgf와 900rpm으로 일정하게 유지한 상태에서 열처리 방법을 변화시키면서 cycle수의 증가에 따른 경도, 표면 거칠기, 표면형상 및 구름저항을 측정하였다. 이 때 plate부분은 침탄열처리한 SCM22H와 플라즈마 이온질화열처리한 SCM5H 그리고 열처리 안한 SCM5H를 사용하였다. 시편제작후 표면을 연마하여 표면 거칠기(Ra)를 0.03

μm로 일정하게 하였다. 표면경도와 경화층깊이는 침탄시편이 각각 약 HRC61과 1.5mm였고 플라즈마이온질화시편의 경우 약HRC53과 0.2mm였다. 볼의 재질, 거칠기 및 경도는 앞에서 사용한 것과 같고 지름은 6.35mm였다. 이 실험에서는 건식 구름운동을 얻기 위하여 볼을 세척하여 유기물질을 제거하였다. 밀면은 구름운동에 안정성을 주고 plate에 작용하는 접촉압력보다 작게 하여 상대적으로 plate에 가혹한 상태를 유발하기 위해 스톱스베어링을 그루브로 사용하였다. 이 경우 그루브의 상사계수는 0.53이었고 이때 발생한 타원형상접촉에서 접촉타원의 장반경은 0.267mm, 단반경은 0.051mm였으며 최대접촉압력은 약 98kgf/mm² 정도였다. Plate의 경우 초기 원형상 접촉상태에서는 접촉반경이 0.083mm였고 최대접촉응력은 약 193kgf/mm² 정도였다. 또한 마멸트랙의 형상은 surface roughness tester를 이용하여 측정하고 이 형상을 통해 마멸량을 구하였다. 그리고 각 cycle수의 증가에 따라 금속현미경 사진을 촬영하여 표면형상을 관찰하였다.

Cycle수의 증가에 따른 각 시편들의 경도변화를 Fig. 5에 나타낸다. 여기서 열처리 안한 시편의 경도는 급격한 증가를 보이고 열처리 한 시편들의 경도는 약간 증가하는 것으로 나타나며 이것은 볼과 plate접촉시 가공경화 때문이라고 사료된다.

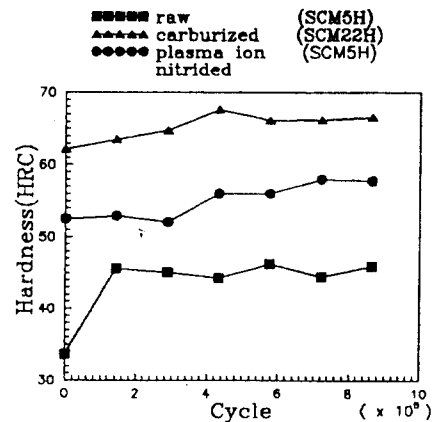


Fig. 5 Variation of Hardness with respect to cycles

Cycle수의 증가에 따른 트랙의 접선 방향 표면 거칠기 변화를 Fig. 6에 나타낸다. 열처리 안한 시편의 경우 급격한 증가를 보이며 열처리한 시편은 완만한 증가를 보인다. 또한 표면 거칠기가 증가하는 시점은 열처리 안한 시편이 가장 빠르고 열처리한 시편의 경우는 서로 비슷하다.

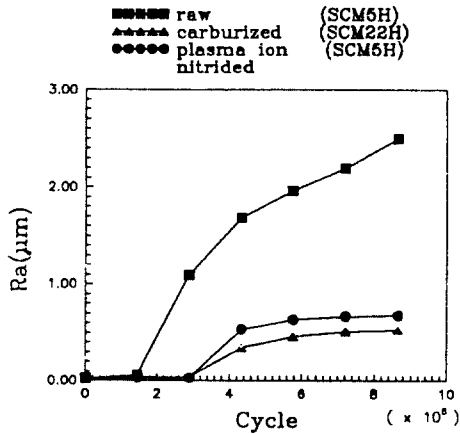


Fig. 6 Variation of surface roughness in the tangential direction with respect to cycles

Fig. 6과 Fig. 7에서 cycle수의 증가에 따라 구름저항이 증가하는 시점은 표면 거칠기가 증가하는 시점과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 구름저항이 증가하는 시점은 열처리 안한 시편이 가장 빠르고 열처리한 시편의 경우는 서로 비슷하다.

구름저항이 증가하는 이유는 생성된 마멸입자가 구름운동을 방해하며 또한 표면거칠기의 증가에 따라 표면요철간의 간섭이 증가하기 때문이라고 판단된다. 마멸입자의 생성은 불과 전동면사이의 미소 slip으로 인한 plowing 효과와 부수적으로 surface fatigue, adhesion 등에 기인한다고 사료되며 정확한 마멸생성기구해석을 위해서는 추가실험이 요구된다.

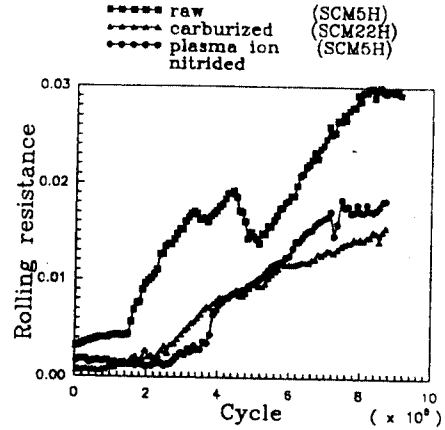
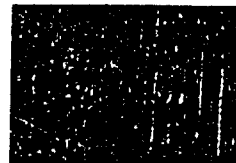
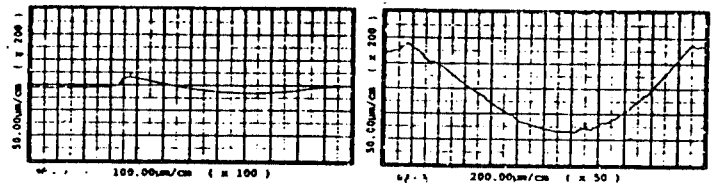


Fig. 7 Variation of rolling resistance with respect to cycles

Fig. 8에서는 144400cycle과 864000cycle에서의 마멸트랙형상을 보여주고 있다. 864000 cycle후의 마멸트랙의 깊이와 마멸량은 열처리 안한 시편이 약 200µm, 18.4mm²였고 플라즈마 이온질화시편이 약 80µm, 5.3mm²였으며 침탄시편이 약 23µm, 1.7mm²였다.

마멸량을 경도와 비교해 보면 구름접촉에서도 미끄럼접촉에서도 마찬가지로 경도가 높을수록 마멸량이 적으나 그 관계를 명확히 규정하기 힘들다.

원소재

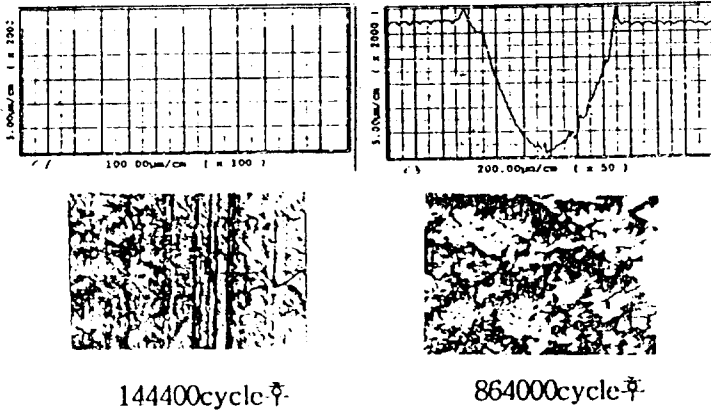


144400cycle-후



864000cycle-후

칩탄



플라즈마 이온질화

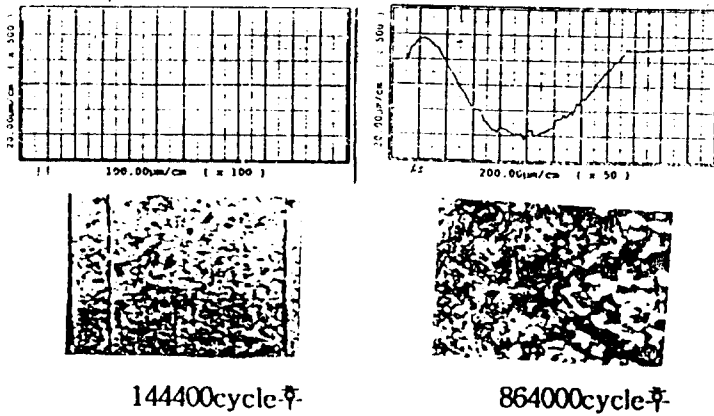


Fig. 8 Variation of surface topography with respect to cycles

4 결론

- 1) Cycle수의 증가에 따라 구름 저항은 트랙의 접선방향 표면 거칠기에 따라서 함께 증가한다.
- 2) Cycle수의 증가에 따라 열처리 안한 시편의 경도는 급격한 증가를 보이며, 열처리한 시편들의 경도는 약간 증가하게 된다.
- 3) 구름저항이 증가하는 시점은 하중에 반비례한다.
- 4) 구름접촉시 열처리방법의 효율성을 비교

해본 결과 플라즈마 이온질화시편은 표면 거칠기나 구름저항이 칩탄시편보다 조금씩 크고 마멸량을 고려해보면 내마모성 및 내피로성등이 떨어진다고 사료된다.

5 참고문헌

- (1) R. L. Thom, Jr, 1993, "Rolling contact fatigue study of soft coated bearing steel", The University of Wisconsin, Ph. D. Thesis.
- (2) M. Lin, 1989, "Design and mechanics of the ball screw mechanism", The University of Wisconsin, Ph. D. Thesis.
- (3) 상공부, 과기처, 1994, "고정밀 측정기술 및 가공기술에 대한 보고서".
- (4) R. D. T. Whittle and V. D. Scott, "Improving the Wear Resistance of Austenitic Alloys by Surface Treatment", J. of Tribology, Vol. 107, pp. 180-186, 1985.
- (5) J. Halling, 1983, "Principles of Tribology", The Macmillan Press LTD, pp. 48-60.
- (6) T. A. Harris, 1966, "Rolling Bearing Analysis", John Wiley and Sons, Inc, pp. 120 -128.
- (7) 이 영신, 1990, "베어링 기술", 산업도서출판공사.
- (8) A. D. Sarkar, 1976, "Wear of Metals", Pergamon Press Ltd, pp. 96-102.
- (9) A. D. Sarkar, 1980, "Friction and Wear", Academic press LTD.