

구름계의 미소조직 변화와 구름운동의 상호관계

차 금 환, 김 대 은

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계공학과

Relationship between Rolling Motion and Microstructural Change in Rolling Element

Kum Hwan Cha and Dae Eun Kim

Abstract

The life of rolling elements depends on various factors such as operating conditions and material properties. In this work, the effect of microstructure on the rolling behavior is investigated. Specially, the deformations in the substrate regions before and after rolling are compared. It is found that rolling action causes severe flow of material in the direction opposite to the rolling direction in the case of dry rolling direction. With lubrication, the deformation is more severe at the subsurface region rather than at the surface.

Key Words : Rolling Resistance(구름저항), Surface Fatigue Wear(표면피로마멸), Delamination Wear(박리마멸), Deformed Layer(가공변질층), Microstructure(미세조직).

1. 서 론

기계요소의 마찰기구는 크게 미끄럼 마찰과 구름 마찰이 있으며 그중 구름접촉을 이용한 기계요소는 미끄럼접촉에 비해 마찰저항이 작으므로 예로부터 많이 사용되어 왔다. 이러한 기계요소중 베어링, 볼나사 및 각종 이송기구는 기계제품의 정밀도 및 신뢰성에 절대적인 영향을 미치므로 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다 [1, 2]. 그런데 구름운동을 이용한 기계요소에서의 에너지손실은 구름저항의 형태로 일어나게 되고 이로 인해 표면도 파손되게 된다. 이에 대한 지금까지의 연구를 보면 구름저항이 발생하는 원인에 대해서 Tabor [3]는 상세한 실험을 통해 구름저항은 하중의 지수 승에 비례하고 전동체 직경의 지수 승에 반비례하며 각 지수들은 재료 및 작동조건에 영향을 받는다고 주장하였다. Drutowski [4]는 구름저항과 여러 인자들과의 관계를 고찰하여 재료의 경도가 높으면 구름저항이 낮아지며 재료의 표면거칠기는 작용하중이 큰 경우 구름저항에 큰 영향을 미치지 못한다고

하였다. 그리고 Johnson [5]은 접촉표면에 작용하는 하중에 따른 구름저항을 고찰하여 재료의 항복상태에 따라서 구름저항이 달라짐을 보였다.

구름요소의 피로파손에 대한 근래의 연구동향을 보면 Cheng [6] 등은 미끄럼이 있는 구름접촉시의 균열 발생 및 전파로 인한 피팅현상을 고찰하여 미세균열은 가해진 응력, 시편의 기하학적 형상과 재료의 미세 구조에 의존하며, 격자의 전위운동에 의한 미끄럼 띠와 입자의 경계, 재료내부의 불순물 등을 따라서 발생한다고 주장하였다. 또한 Soda [7] 등은 구름접촉시 접선력과 표면거칠기가 균열의 발생 및 전파에 미치는 영향을 조사한 결과 가해진 접선력의 방향이 구름 방향과 일치하면 피로수명이 증대되며 균열의 발생은 시편의 표면거칠기에 의해 주된 영향을 받으며 균열의 전파는 접선력에 의해 영향을 받는다고 보고하였다. 그리고 Hamilton [8]은 미끄럼이 있는 롤러의 구름접촉에서 항복점 이상의 하중을 받는 경우 표면하부에 나타나는 소성흐름에 관한 연구를 통해 소성흐름은 작용하중, 접촉횟수, 윤활의 유무, 속도변화 등에

의존한다고 발표하였다.

이와 같이 구름접촉시에 발생하는 구름저항 및 피로파손에 대한 연구는 여러 관점에서 행해지고 있으나, 가공변질층이나 표면하부의 미세조직에 따른 표면 파손 및 구름저항에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 그리하여 본 연구에서는 구름저항 및 마멸에 영향을 주는 여러 인자들 중에서 이제까지 논의되어 왔던 인자들 이외에 가공변질층과 미세조직 등의 표면품질에 대한 고려를 추가하여 구름운동시 발생하는 구름마찰 특성을 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 각종 구름요소에서 일어나는 구름운동을 단순화시키고 하중을 쉽게 가하기 위하여 탁상드릴링머신을 이용하여 Plate-on-ball 형태의 시험기를 제작하여 사용하였다. 밑면의 디스크에는 구름운동에 안정성을 주고, 윗면의 디스크에 작용하는 접촉압력보다 작게 하여 상대적으로 주된 관심인 윗면 디스크에 가혹한 상태를 유발하기 위하여 트러스트 베어링의 레이스를 사용하였다.

2.2 실험시편 및 실험조건

본 실험에서는 KS 정밀도 등급 5급의 크롬베어링 강재를 볼시편으로 사용하였다. 볼의 표면거칠기는 $0.02\mu\text{m}$ 였으며 경도는 Hv 780이고 볼의 지름은 6.35mm였다. 또한 디스크 시편은 기계구조용 탄소강 (SM45C)을 표면거칠기와 경도가 일정하도록 선삭하여 사용하였다. 선삭조건은 가공시 생성되는 가공변질층의 깊이와 방향을 기준으로, 경미한 가공변질층을 보이는 절삭조건(디스크 A)과 격심한 가공변질층을 보이는 절삭조건(디스크 B) 및 가공시 생긴 가공변질층의 방향이 구름마찰 및 마멸에 주는 영향을 알아보기 위해 역방향 절삭조건(디스크 C)을 선택하였으며 Table 1과 같다.

Table 1. Machining condition of disk specimen

	Disk A	Disk B	Disk C	
Machining direction	Counter clockwise		Clockwise	
Machining condition	Cutting speed (m/min)	200	10	≈ 10
	Depth of cut (mm)	0.2	1.0	≈ 1.0

실험은 일반 실험실 조건에서 구름운동이 정상상태에 도달하여 구름저항이 일정해지는 시점까지 행하였으며 디스크의 회전속도는 900rpm (99m/min)이고 수직하중은 48kgf였으며 사용된 볼은 16개였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 건식조건

볼과 궤도사이의 접촉부에 윤활유 및 이물질의 영향을 최대한 배제시킨 상태에서 디스크 A, B, C에 대해 건식 구름접촉 실험을 행하였다. 구름저항에 대해서는 이제까지 여러 이론식이 있었지만 모든 경우에 적용되는 일반식이 없고 각각의 경우가 본 실험의 경우와는 다소 다르다고 판단되므로 본 연구에서 제시한 구름저항은 미끄럼 마찰계수와의 개념적인 비교를 통해 이해를 쉽게 하고자 실험장치에서 얻어진 구름마찰 토오크를 작용하중으로 나누어서 구했다. 그리고 각각의 그림에서 표시된 회전수는 볼의 수와 주축의 회전수를 곱한 값으로 볼과 디스크가 실제로 경험하는 접촉횟수이다.

회전수에 따른 구름저항의 전체적인 경향을 보면, 초기에는 작은 값을 갖다가 이후 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 그 과정을 살펴보면 초기 약 2×10^4 cycle 정도부터 마멸입자가 발생하는 것이 관찰되는데 이 과정 중에 진동이 많이 발생하게 되고 이러한 진동이 충격력으로 작용하여 구름저항이 증가하게 되며, 또한 접촉부에 존재하는 미끄럼으로 인하여 연삭마멸과 점착마멸이 증가하여 구름저항이 증가하는 것이라고 보여진다. 이후 구름저항이 거의 일정한 값을 갖는 것은 마멸입자의 발생이 계속되면 트랙에 잔존하는 양과 트랙 밖으로 돌출되는 양이 거의 평형을 이루기 때문이라고 생각된다. Table 2은 실험전후의 트랙의 특성치 변화를 나타낸다.

Table 2. Change of material properties of disk A, B, C without lubrication

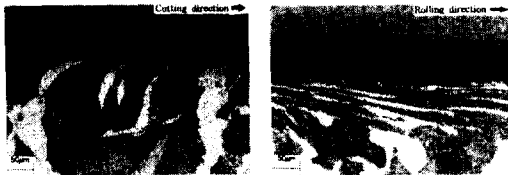
		Disk A	Disk B	Disk C
Hardness (Hv)	Initial state	230	320	312
	After 2.4×10^5 cycles	360	385	387
Surface roughness ($Ra: \mu\text{m}$)	Initial state	0.03	0.05	0.04
	After 2.4×10^5 cycles	0.99	1.21	1.05

실험 후에는 모든 시편이 가공경화로 인해 경도가 증가했고 트랙의 표면거칠기는 미세균열 및 마멸입자 발생 등의 표면파손으로 인해 악화됨을 알 수 있다.

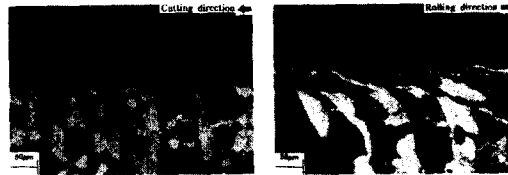
구름운동으로 인한 표면하부의 조직변화를 알아보기 위해 실험전의 모재와 구름운동으로 인해 발생한 트랙단면의 조직상태를 비교하기 위해 Fig. 1~Fig. 3에 각각 디스크 A, B, C의 실험전후의 조직사진을 나타내었다.



(a) before experiment (b) after 2.4×10^5 cycles
Fig. 1 Optical micrographs of microstructure of disk A



(a) before experiment (b) after 2.4×10^5 cycles
Fig. 2 Optical micrographs of microstructure of disk B

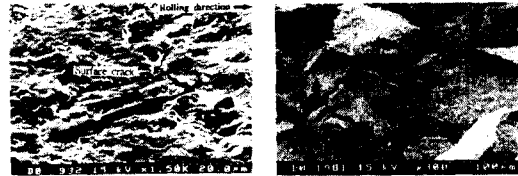


(a) before experiment (b) after 2.4×10^5 cycles
Fig. 3 Optical micrographs of microstructure of disk C

실험전의 디스크 A는 절삭저항이 작은 온건한 가공 조건으로 절삭하여 표면하부에 소성흐름이 관찰되지 않았지만 디스크 B와 C는 가혹한 절삭조건으로 인해 표면근처에서 각각의 절삭방향으로 소성흐름이 형성되었으며 경도도 Hv 100정도 높게 나타났다. 또한 실험 후에는 디스크 A, B, C 모두 왼쪽방향으로 소성흐름을 보이는 것을 알 수 있는데 이것은 절삭으로 인한 표면의 소성흐름이 볼과 접촉면간의 격심한 마멸로 인해 도두 제거되고 볼의 회전운동이 표면에 심각한 접선력으로 작용하기 때문이라고 생각된다.

이러한 접선력은 표면 및 표면하부에서 발생한 균

열을 반복적인 접촉과정을 통해 표면과 평행하게 전파시켜 마멸을 일으키며 이렇게 생성된 마멸입자는 얇은 종이모양의 마멸입자를 발생시키는 박리마멸의 형태를 보이는데 실험 후에 디스크 A의 마멸트랙과 마멸입자를 나타낸 Fig. 4는 이것을 잘 보여주고 있다. 그러나 각 디스크간에 마멸입자의 형상 및 크기는 큰 차이가 없었다.



(a) track (b) wear particles
Fig. 4 SEM micrographs of disk A

미끄럼접촉시에는, 디스크 B가 디스크 A보다 경도가 높지만 표면에 작용하는 접선력이 선삭가공시 생성된 표면의 미세균열의 전파를 촉진시켜 마멸량에서 볼 때 경도가 낮은 디스크 A보다 많았다 [9]. 그러나 구름접촉운동에 있어서는 실험후 각 디스크의 마멸트랙의 형상으로부터 1회전당 마멸량을 추정한 결과 각각 디스크 A, B, C에 대해 4.2×10^{-5} mm/cycle과 5.5×10^{-5} mm/cycle 및 5.1×10^{-5} mm/cycle로 그러한 경향성은 보이지 않았다.

그리고 마멸트랙의 형상에서 볼 때 Fig. 5에서 처럼 왼쪽에 들출된 모양을 볼 수 있다.

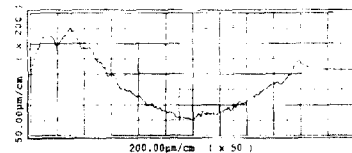


Fig. 5 Wear track profiles of disk A after 2.4×10^5 cycles

이것은 볼의 구름운동 방향에 대해 트랙을 수직으로 절단하여 예칭한 Fig. 6을 보면 볼기가 있는 왼쪽으로 미세조직의 소성흐름이 있는 것으로 보아 볼이 트랙전체를 따라서 크게 공전운동하면서 트랙내에서는 시계방향으로 자전운동을 하기 때문에 발생한 것이라고 생각된다.

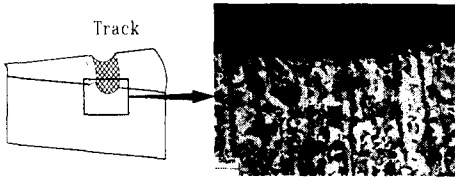


Fig. 6 Optical micrograph of cross-section of disk C

전체적으로 건식조건에서는 궤도를 따르는 공전구름운동 외에 트랙내에서 볼과 그루브간의 미끄럼 및 볼간의 미끄럼이 많이 일어나며 이러한 미끄럼은 어느 정도 접촉회수가 지나면 표면 및 표면하부에 존재하는 균열을 표면으로 전파시키고 이렇게 발생된 마멸입자는 얇은 종이모양을 띄게 되는 박리마멸을 일으킨다. 또한 절삭으로 인한 가공변질층은 초기의 구름저항 이외에는 영향을 미치지 못하였으며 역방향으로 절삭한 디스크 C의 경우도 마멸량 및 구름저항의 뚜렷한 차이가 없었다.

3.2 윤활조건

윤활조건의 경우 앞서 서술한 건식조건의 구름저항 및 표면과손 기구와 어떻게 다른지를 알아보기 위하여 윤활실험을 하였으며 이 때 사용한 윤활유는 DTE24 (ISO VG46 at 40°C)였다.

윤활유는 각각 초기에 한 번 주입하고 이후 연속적인 급유를 하지 않았지만 실험후의 접촉표면을 관찰한 결과 작동중의 윤활상태는 적어도 경계윤활 이상의 단계라고 생각된다. Table 3은 각각의 가공조건으로 선삭한 초기의 디스크와 실험 후 디스크의 특성치를 나타낸다.

Table 3. Change of material properties of disk A, B

		Disk A	Disk B
Hardness (Hv)	Initial state	230	320
	After 4.8×10^5 cycles	270	340
Surface Roughness (Ra: μm)	Initial state	0.03	0.06
	After 4.8×10^5 cycles	0.02	0.03

여기서 보면 건식조건과는 달리 실험 후 트랙부분의 경도상승이 두드러지지 않았는데 이것은 표면간의 직접적인 접촉이 건식조건의 경우보다 감소하여 가공경화가 크지 않았기 때문이라고 생각된다. 또한 표면

거칠기가 실험 후에 좋아지는 것은 선삭으로 인한 요철들이 구름운동으로 인해 평탄화되는 run-in 현상이 나타나기 때문이다.

각각의 가공조건에 따른 구름저항을 보면 작동초기에는 건식조건과 비교하여 구름저항은 큰 차이가 없지만 이후에는 윤활유가 볼과 궤도사이 및 볼간의 직접적인 접촉을 방지하여 마멸입자의 발생을 억제하고 미끄럼을 줄여주기 때문에 구름저항은 건식조건의 경우보다 낮아진다.

Fig. 7에서는 표면하부조직의 변형을 보여준다. 실험후의 표면근처에는 선삭가공으로 인한 오른쪽 방향의 소성흐름이 실험 후에도 남아있는 것으로 보아, 앞에서의 건식조건과는 달리 표면에는 미끄럼으로 인한 심한 접선력은 작용하지 않지만 표면하부에는 최대전단응력이 작용하는 깊이 근처에서 볼의 구름운동으로 인해 왼쪽방향의 소성흐름이 발생하는 것을 알 수 있었다.

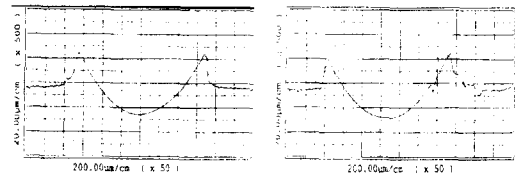


(a) disk A

(b) disk B

Fig. 7 Change of microstructure of disk A, B after 4.8×10^5 cycles with lubrication

그리고 실험후의 트랙표면의 형상을 Fig. 8에 제시하였다. 여기서 보면 건식조건과는 달리 트랙의 양 측면에 돌출된 모양이 나타나는데 이것은 볼의 구름운동 방향에 대해 트랙을 수직으로 절단하여 예칭해 보았을 때 돌기가 있는 양쪽으로 미세조직의 소성흐름이 있는 것으로 보아 볼이 트랙을 따라서 크게 공전 운동하면서 트랙내에서는 불규칙한 자전운동을 하기 때문에 발생한 것이라고 생각된다.



(a) disk A

(b) disk B

Fig. 8 Wear track profiles of disk A, B after 4.8×10^5 cycles with lubrication

또한, 건식조건과는 달리 재료의 소성흐름으로 인해 양측으로 밀려 올라간 부분이 형성된 트랙의 크기와 거의 비슷한 것으로 보아 실제로 마멸된 양은 매우 작으며 실험후의 마멸입자도 건식의 경우와는 달리 극소량이었다.

4 결론

본 연구에서는 구름운동시의 구름저항 및 미세조직변화를 알아보기 위해 가공조건에 따른 구름접촉실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 볼의 구름운동으로 인해 표면하부에 미세조직의 변화가 생기며 가공변질층의 깊이와 방향은 구름저항 및 표면파손에 큰 영향을 미치지 않고 경도증가로 인한 구름저항의 감소만이 두드러졌다.

2. 건식 구름접촉시에는 구름 외에 미끄럼이 상당부분 존재하여 구름저항이 높았으며 얇은 종이모양의 마멸입자를 생성하는 박리마멸의 형태를 보이고 표면하부 및 표면조직 전체에 미세조직의 변화가 관찰되었다.

3. 윤활조건에서는 요소간의 직접적인 접촉이 건식조건보다 매우 감소하여 구름저항은 건식조건보다 작게 되고 run-in 효과로 인하여 표면거칠기가 감소되었으며 볼의 구름운동으로 인한 미세조직변화는 표면하부에만 국한되는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] T. A. Harris and M. H. Mindel, "Rolling Element Bearing Dynamics", *Wear*, Vol. 23, pp. 311-337, 1973.

[2] S. Aihara, "A new Running Torque Formula for Tapered Roller Bearings Under Axial load", *J. of Tribology*, Vol. 109, pp. 471-478, 1987.

[3] D. Tabor, "The Mechanism of Free Rolling Friction", *Lubrication Engineering*, Vol. 12, pp. 379-386, 1956.

[4] D. C. Drutowski, "Energy losses of balls rolling on plates", *J. of Basic Engineering*, Vol. 81, pp. 233-238, 1959.

[5] K. L. Johnson, "Rolling Resistance of a Rigid Cylinder on an Elastic Plastic Surface", *Int. J.*

Mech. Sci., Vol. 14, pp. 145-148, 1972.

[6] H. S. Cheng et al, "Micropitting in Rolling and Sliding Contact under Mixed Lubrication", *J. of Tribology*, Vol. 111, pp. 605-613, 1989.

[7] N. Soda and T. Yamamoto, "Effect of Tangential Traction and Roughness on Crack Initiation/Propagation During Rolling contact", *ASLE. Transactions*, Vol. 25, No. 2, pp. 198-206, 1981.

[8] G. M. Hamilton, "Plastic Flow In Rollers Loaded Above the Yield Point", *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 177, No. 25, pp. 667-675, 1963.

[9] 정 종현, "가공공정에 따른 표면품질과 마찰·마멸과의 관계", 연세대학교 석사학위 논문, 1995.