

〈논 문〉

구름계의 구름저항 및 표면파손현상의 실험적 고찰

차 금 환* · 김 대 은**

(1996년 10월 10일 접수)

Investigation of Rolling Resistance and Surface Damage of Rolling Elements

Kum-Hwan Cha and Dae-Eun Kim

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

Abstract

It has been well established that resistant force and wear that occur during rolling motion depend on several factors such as material type, hardness, subsurface microstructure, applied load, and speed. The purpose of this work is to investigate the effect of microstructure and the state of deformed layer on the rolling contact characteristics in dry and lubricated rolling contacts. The results of this work show that the rolling resistance behavior depends on the state of the deformed layer. Also, lubrication can reduce the plastic flow at the surface but may still have an effect on the subsurface strain. The cross-sectional view of the microstructure shows that surface traction has a definite effect on the morphology of the surface region. That is, significant slip seems to have taken place between the ball than those of the dry rolling case. The surface generation effects were significantly less compared to the case of dry rolling contact.

1. 서 론

기계요소의 마찰기구는 크게 미끄럼마찰과 구름마찰이 있으며, 구름접촉을 이용한 기계요소는 미끄럼접촉에 비해 마찰저항이 작으므로 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)

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 주

장하였다. Brutowski⁽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⁾는 접촉표면에 작용하는 하중에 따른 구름저항을 고찰하여 재료의 항복상태에 따라서 구름저항이 달라짐을 보였다.

한편 구름접촉시 접촉부의 응력에 관한 연구는 Hertz의 선구적인 연구 이후로 Stribeck, Johnson 등에 의해 여러 조건에 대한 응력해석이 이루어졌다. 최근의 연구를 보면 Hertz의 접촉이론으로 설명하지 못하는 경우-소성영역에서의 응력해석 등-에 대한 연구가 행해지고 있다.⁽⁶⁾ 이러한 접촉응력은 결국 재료를 피로파괴로 이르게 하는데, Goodman 등은 접촉응력에 의한 재료의 피로파괴에 대한 연구를 최초로 시도하였고, 이후 Palmgren,

*연세대학교 대학원 기계공학과

**회원, 연세대학교 기계공학과

Lundberg 등의 수명연구에 기초가 되었다.⁽⁷⁾

구름요소의 수명 및 피로파손에 대한 근래의 연구동향을 보면 Kimura 등⁽⁸⁾은 경도차가 큰 재료간의 구름접촉시에는 경한 재료의 표면거칠기가 마멸량에 큰 영향을 미친다고 주장하였고 Cheng 등⁽⁹⁾은 미끄럼이 있는 구름접촉의 경우의 균열발생 및 전파로 인한 피팅현상을 고찰하여 미세균열은 가해진 응력의 종류, 시편의 기하학적 형상과 재료의 미세구조에 의존하며, 격자의 전위운동에 의한 미끄럼띠와 입자의 경계, 재료내부 불순물의 접촉부등을 따라서 발생한다고 주장하였다. 또한 Soda 등⁽¹⁰⁾은 구름접촉시 접선력과 표면거칠기가 균열의 발생 및 전파에 미치는 영향을 조사한 결과 가해진 접선력의 방향이 구름방향과 일치하면 피로수명이 증대되며 균열의 발생은 시편의 표면거칠기에 의해 주된 영향을 받으며, 균열의 전파는 접선력에 의해 영향을 받는다고 보고하였다.

Muro 등⁽¹¹⁾은 구름접촉시 피로파괴로 인한 구조적인 변화를 관찰하여 이는 시편의 온도, 접촉응력, 하중주기 등에 의존하며 표면하부에 작용하는 잔류응력은 전단응력에 의해 발생된다고 주장하였다.

그리고 Hamilton⁽¹²⁾은 미끄럼이 있는 볼러의 구름접촉에서 항복점 이상의 하중을 받는 경우 표면하부에 나타나는 소성흐름에 관한 연구를 통해 소성흐름은 작용하중, 접촉횟수, 윤활유부, 속도변화 등에 의존한다고 발표하였다.

이와 같이 구름저항 및 마멸에 대한 연구는 여러 관점에서 행해지고 있으나 아직 실용적이고 구체적인 구름 매커니즘이 밝혀지지 않고 있으며 따라서 현장에서 구름요소에 대한 설계나 적용시에 경험에 의존한 구름저항 개선방법이 주로 이용되고 있다. 그리하여 본 연구에서는 구름저항 및 마멸에 영향을 주는 여러 인자들 중에서 이제까지 논의되어 왔던 인자들 이외에 가공변질층과 표면상태 등의 표면품질에 대한 고려를 추가하여 구름마찰특성을 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

본 연구에서 각종 구름요소에서 일어나는 구름운동을 단순화시켜 Fig. 1과 같이 탁상 드릴링머신을 이용하여 Disk-on-ball 형태의 시험기를 제작하여 사용하였다.

밀면의 디스크에는 구름운동에 안정성을 주고 뒷면의 디스크에 작용하는 접촉압력보다 작게 하여 상대적으로 주된 관심인 윗면 디스크에 가혹한 상태를 유발하기 위하여 트리스트 베어링의 레이스를 사용하였다. 이때 볼과 디스크간의 구름운동으로 인해 발생하는 마찰토크는 Fig. 1에서처럼 스트레인게이지에 의해 전압으로 변환되고 이 전압은 앰프에 의해 증폭되어 A/D 변환기를 통하여 PC에 저장된다.

2.2 실험조건

본 시험에서는 볼의 진구도 불량이나 표면거칠기 저하로 인한 추가적인 구름저항이 발생하지 않도록 하기위해 정밀도 등급 5의 크롬베어링 강재 (STB2)를 사용하였다. 볼의 표면거칠기는 0.02 μm 였으며, 경도는 HV 780이고, 볼의 지름은 6.35 mm였

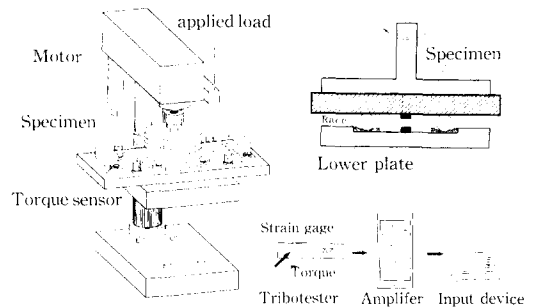


Fig. 1 Disk-on-ball tribotester and schematic diagram of the data acquisition method

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

Table 2 Experimental condition

Temp (°C)	Humidity (%)	Speed (rpm)	Load (kgf)	Number of ball
15~25	20~40	900 (99 m/min)	48	16

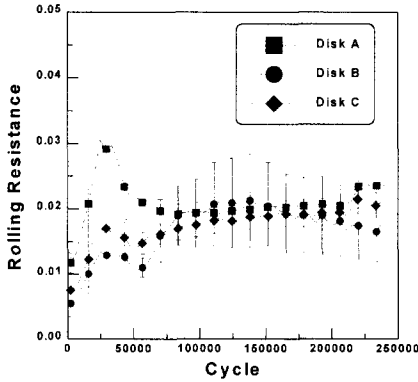


Fig. 2 Rolling resistance of SM45C with respect to contact cycles without lubrication

다. 또한 디스크는 기계구조용 탄소강(SM45C)을 NC선반을 이용하여 표면거칠기와 경도가 일정하게 선삭하였다. 가공조건은 가공시 생성되는 가공변질층의 깊이와 방향을 기준으로, 경미한 가공변질층이 나타나는 절삭조건(디스크 A)과 격심한 가공변질층을 보이는 절삭조건(디스크 B) 및 선삭가공시 생긴 가공변질층의 방향이 구름마찰 및 마멸에 어떤 영향을 주는지 알아보기 위해 역방향 절삭조건(디스크 C)를 선택하였으며, Table 1과 같다.

실험시간은 예비실험을 통해서 구름운동이 정상상태에 도달하여 구름저항이 일정해지는 시점을 파악하고 그 시점까지 행하였다.

그 이외의 실험조건은 Table 2와 같다.

실험후 디스크의 마멸량은 표면거칠기 측정장치를 이용하여 마멸트랙의 형상을 측정하고 그 단면적을 통해 구하였으며, 구름운동으로 인한 표면파손과 마멸입자는 금속현미경과 SEM을 이용하여 관찰하였다. 그리고 초기 선삭가공으로 인한 단면조직 및 구름접촉으로 인한 표면 하부조직의 변화를 관찰하기 위해 디스크로부터 횡방향으로 조각을 채취하였다. 이를 알루미늄 연마액을 사용하여 최종적으로 경면이 되도록 연마한 후 2% nital 용액(질산 : 에탄올 = 2 : 100)에서 10초간 에칭하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 건식조건

볼과 케도사이의 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 생각한다. 따라서 본 연구에서 제시한 구름저항은 미끄럼 마찰계수와의 개념적인 비교를 통해 이해를 쉽게 하고자 실험장치에서 얻어진 구름마찰토크를 작용하중으로 나누어서 구했다. 그리고 각각의 그림에서 표시된 회전수는 볼의 수와 주축의 회전수를 곱한 값으로 볼과 디스크가 실제로 경험하는 접촉횟수이다. 회전수에 따른 구름저항의 경향을 Fig. 2에서 볼 수 있다.

여기서 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 과정에서 진동이 많이 발생하게 되고 이러한 진동이 충격력으로 작용하여 구름저항이 증가하게 되며 또한 접촉부에 존재하는 미끄럼으로 인하여 연삭마멸과 점착마멸이 증가하여 구름저항이 증가하는 것이라고 보여진다. 그리고 생성된 마멸입자가 트랙에 남아 볼의 구름을 방해하는 역할을 하고 접촉면적의 확대에 의해 접촉면의 미끄럼이 증대하는 등의 이유로 구름저항이 계속적으로 큰 값을 갖는다고 판단된다. 이후 구름저항이 거의 일정한 값을 갖는 것은 마멸입자의 발생이 계속되면 트랙에 잔존하는 양과 트랙 밖으로 돌출되는 양이 거의 평형을 이루며 마멸트랙이 어느 정도 넓어져 접촉부의 미끄럼도 거의 일정해지기 때문이라고 판단된다.

가공조건에 따라 비교해 보면, 초기에는 디스크 A의 구름저항이 디스크 B와 C보다 높지만 8×10^4 cycle 정도 후에는 세 디스크가 거의 같은 값을 갖는 것으로 나타났다. 디스크 B, C가 디스크 A보다

초기의 구름저항이 낮은 이유는 선삭가공으로 인한 미세균열이나 표면거칠기 요소는 작용하중이 크기 때문에 구름저항에 큰 영향을 주지 못하지만 선삭가공으로 인한 모재의 경도의 증가는 구름접촉시 소성변형 되는 양을 줄여 구름저항을 감소시키는 역할을 하기 때문이라고 생각된다. 이후 세 경우가 비슷한 값을 갖는 것은 마멸입자의 발생으로 인한 트랙의 깊이가 가공면질층의 깊이를 초과하여 그 영향이 줄어들기 때문이라고 판단된다.

Table 3은 실험전후의 트랙의 특성치를 나타낸다. 실험후에는 모든 시편이 가공경화로 인해 경도가 증가했고 트랙의 표면거칠기는 미세균열 및 마멸입자발생 등의 표면파손으로 인해 악화됨을 알 수 있다. 여기서 보인 표면거칠기는 볼의 구름운동으로 생성된 궤도면에 대해 접선방향으로 측정할 중심선 평균 거칠기(Ra)이다.

또한 구름운동으로 인한 표면하부의 조직변화를 알아보기 위해 실험전의 모재와 구름운동으로 인해

Table 3 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
Hardness (HV)	Initial state	0.03	0.05	0.04
	After 2.4×10^5 cycles	0.99	1.21	1.05

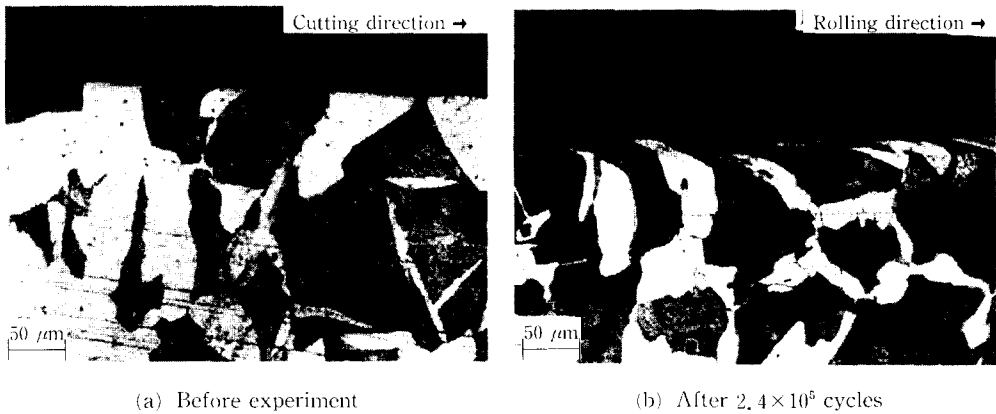


Fig. 3 Optical micrographs of microstructure of disk A

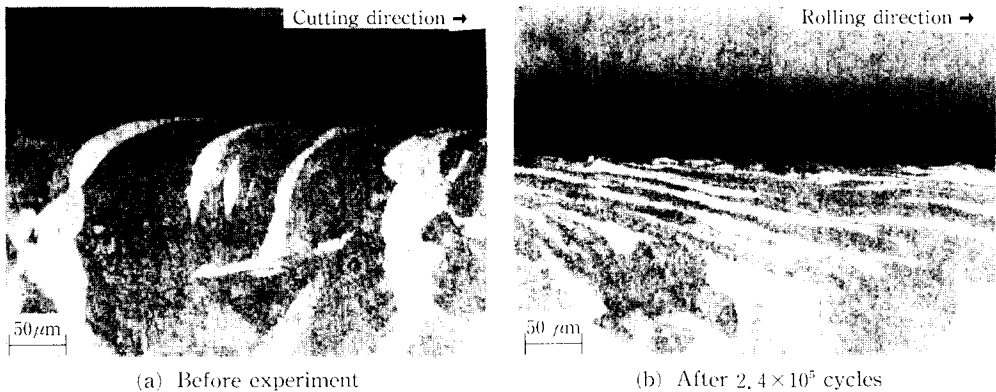


Fig. 4 Optical micrographs of microstructure of disk A

발생한 트랙단면의 조직상태를 비교하였다. Fig. 3과 Fig. 4 및 Fig. 5에 각각 디스크 A, B, C의 실험 전 후의 조직사진을 나타내었다. 여기서 흰색결정들은 순철에서 주로 나타나는 페라이트조직이며, 흑색결정들은 탄소함량에 비례하여 증가하는 펄라

이트조직이다.

실험전의 디스크 A는 절삭저항이 작은 온건한 가공조건으로 절삭하여 표면하부에 소성흐름이 관찰되지 않았지만 디스크 B와 V는 가혹산 절삭조건으로 인해 표면근처에서 격심한 소성흐름이 절삭

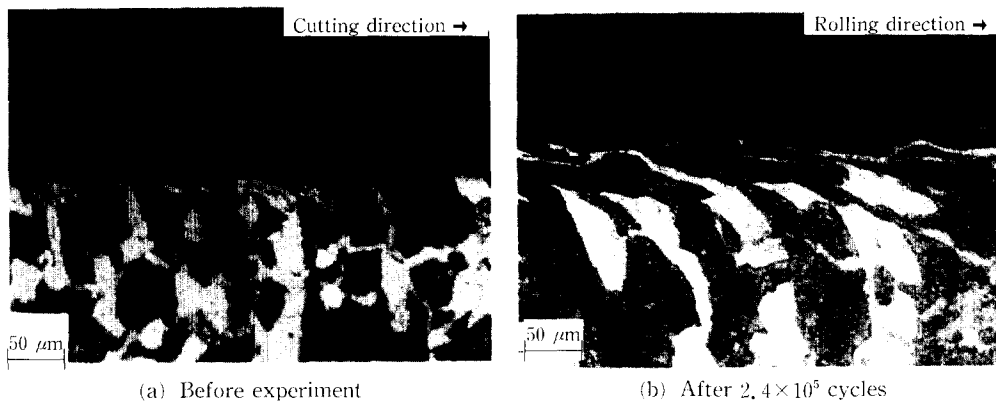


Fig. 5 Optical micrographs of microstructure of disk A

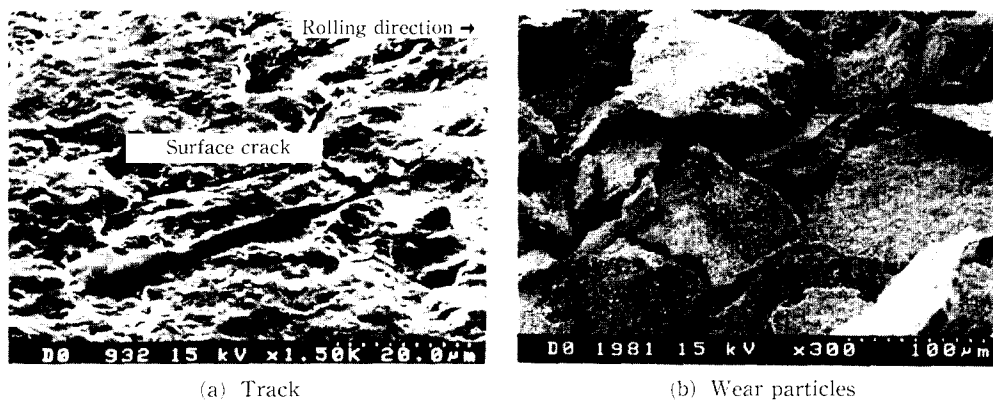


Fig. 6 SEM micrographs of disk A

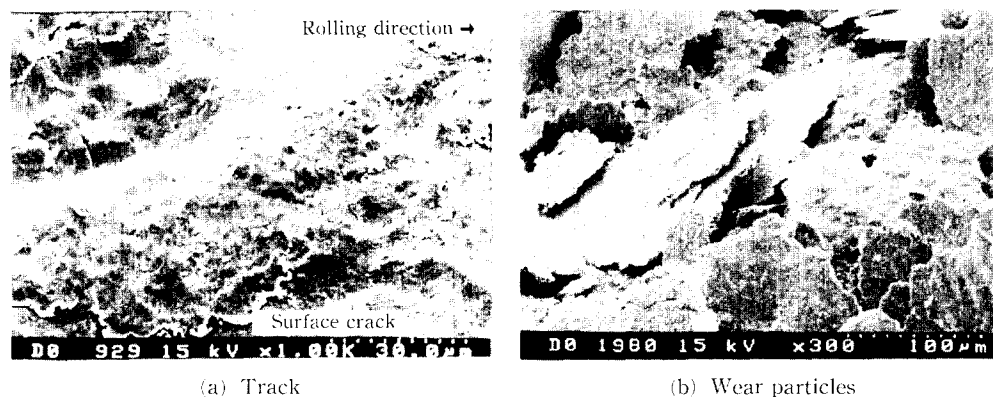


Fig. 7 SEM micrographs of disk B

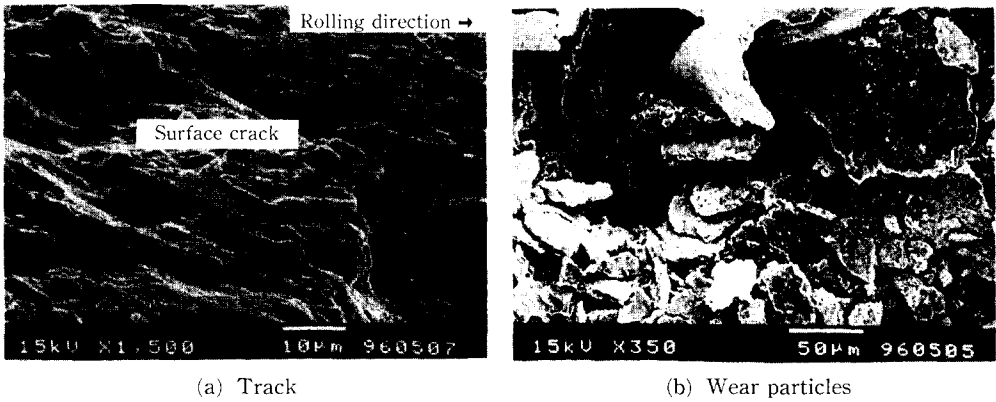


Fig. 8 SEM micrographs of disk C

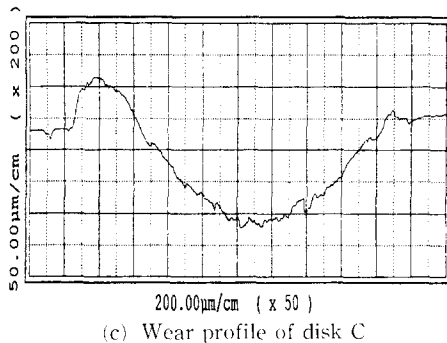
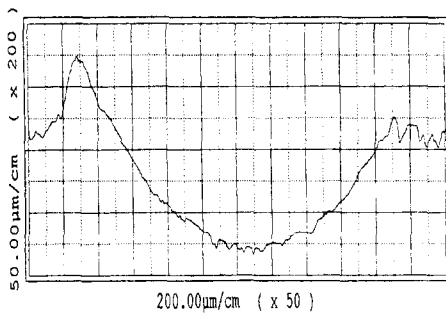
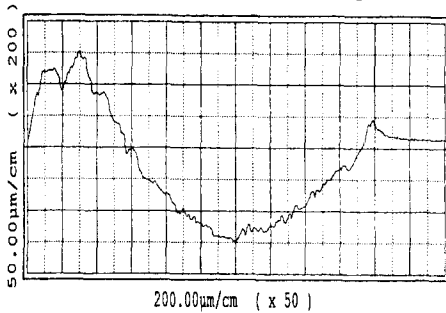


Fig. 9 Wear track profiles of disk A, B, C, after 2.4×10^5 cycles

방향을 따라 오른쪽으로 형성되었으며, 경도도 HV 100 정도 높게 나타났다. 또한 2.4×10^5 cycles 후에는 디스크 A, B, C 모두 왼쪽방향으로 소성흐름을 보이는 것을 알 수 있는데, 이것은 절삭으로 인한 표면의 소성흐름이 볼과 접촉면간의 적심한 마멸로 인해 모두 제거되고 볼의 회전운동이 표면에 심각한 접선력으로 작용하기 때문이라고 생각된다.

이러한 접선력은 표면 및 표면하부에서 발생한 균열을 반복적인 접촉과정을 통해 표면과 평행하게 전파시켜 마멸을 일으키며, 이렇게 생성된 마멸입자는 얇은 종이모양의 마멸입자를 발생시키는 박리 마멸의 형태를 보이는데 2.4×10^5 cycles 후에 디스크 A, B, C의 마멸트랙과 마멸입자를 나타낸 Fig. 6과 Fig. 7 및 Fig. 8은 이것을 잘 보여주고 있다.

또한 마멸트랙의 표면에는 무수한 균열이 존재하는 것이 보이는데 균열입구의 방향이 볼의 구름운동방향과 연관성이 있는 것으로 보아 볼이 궤도를 구름운동할 때 트랙 안에서 불규칙적인 자전운동을 하는 것으로 보여진다.

미끄럼접촉의 경우는 디스크 B의 경우 디스크 A보다 경도가 높지만 표면에 작용하는 접선력이 선삭가공시 생성된 표면의 미소균열의 전파를 촉진시켜 마멸량에서 볼 때 경도가 낮은 디스크 A보다 많았다.⁽¹³⁾ 그러나 구름접촉운동에 있어서는 Fig. 9에 나타낸 것처럼 마멸트랙의 형상으로부터 1회전당 마멸량을 추정한 결과 각각 디스크 A, B, C에 $4.2 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{cycle}$ 과 $5.5 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{cycle}$ 및 $5.1 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{cycle}$ 로 그러한 경향성은 보이지 않았다.

그리고 마멸트랙의 향상에서 볼 때 왼쪽에 돌출

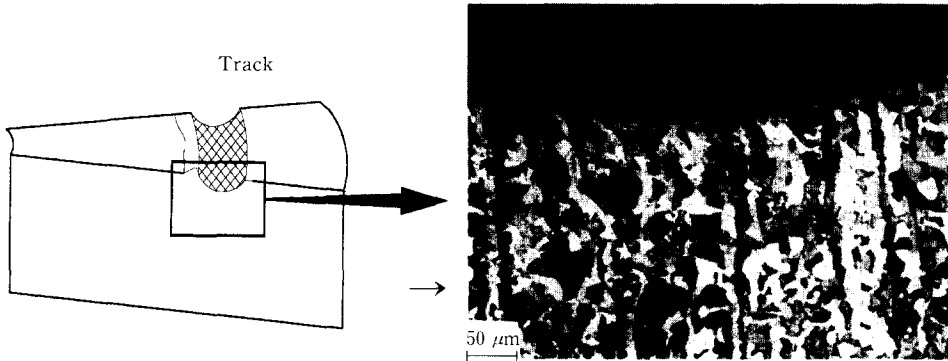


Fig. 10 Optical micrograph of cross-section of disk C

된 모양이 있는데, 이것은 볼의 구름운동 방향에 대해 트랙을 수직으로 절단하여 에칭한 Fig. 10을 보면 돌기가 있는 왼쪽으로 미세조직의 소성흐름이 있는 것으로 보아 볼이 트랙전체를 따라서 크게 공전운동하면서 트랙 내에서는 시계방향으로 자전운동을 하기 때문에 발생한 것이라고 생각된다.

전체적으로 보아 건식조건에서는 궤도를 따르는 공전구름운동 이외에 트랙 내에서 볼과 그루브간의 미끄럼 및 볼간의 미끄럼이 많이 일어나며 이러한 미끄럼은 어느 정도 접촉회수가 지나면 표면 및 표면하부에 존재하는 균열을 표면에 평행하게 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

윤활조건인 경우 앞서 서술한 건식조건인 구름저항 및 표면파손 기구와 어떻게 다르며 또한 윤활유의 점도가 어떤 영향을 미치는 지를 알아보기 위하여 특정한 윤활유를 사용하여 구름접촉실험을 행하였다. 윤활유는 점도를 기준으로 하여 점도가 매우 높은 그리스(Grease)와 어느 정도 낮은 DTE24를 선택하였고, 이에 대한 사양은 Table 4와 같다. 윤활유는 각각 초기에 한번 주입하고 이후 연속적인 급유를 하지 않았지만 실험후의 접촉표면을 관찰한 결과 작동중의 윤활상태는 적어도 경계윤활 이상의 단계라고 생각된다.

Table 5는 각각의 가공조건으로 선삭한 초기의 디스크와 4.8×10^5 cycles후 디스크의 특성치를 나

Table 4 Specification of lubricant

Lubricant A	DTE24 (ISO VG46 at 40°C)
Lubricant B	Grease (NLGI NO. 2)

Table 5 Change of material properties of disk A, B, C with lubricant A

		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	0.021	0.03

타낸다. 이것을 보면 건식조건과는 달리 실험후 트랙부분의 경도상승이 두드러지지 않았는데 이것은 요소간의 직접적인 접촉이 건식조건인 경우보다 감소하여 가공경화가 크지 않았기 때문이라고 생각된다. 또한 표면거칠기가 실험후에 좋아지는 것은 선삭으로 인한 요철들이 구름운동으로 인해 뭉개져서 평탄화되는 run-in 현상이 나타나기 때문이다.

각각의 가공조건에 따라 두 윤활유를 사용하여 얻은 구름저항을 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 작동초기에는, 건식조건과 비교하여 구름저항은 큰 차이가 없지만 이후에는 윤활유가 볼과 궤도사이 및 볼간의 직접적인 접촉을 방지하여 마멸입자의 발생을 억제하고 미끄럼을 줄여주기 때문에 구름저항은 건식조건인 경우보다 낮아진다. 이 경우 구름저항이 발생하는 원인은 건식조건과는 달리 윤활유의 점성효과가 부가적으로 첨가되며 초기에는 재료

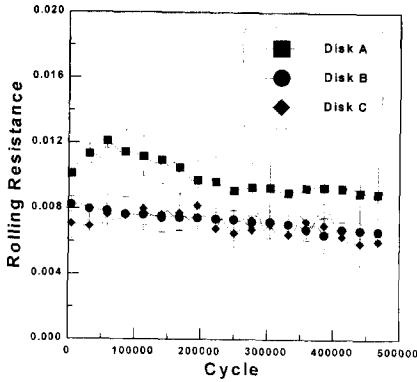


Fig. 11 Rolling resistance with respect to contact cycles lubricant A

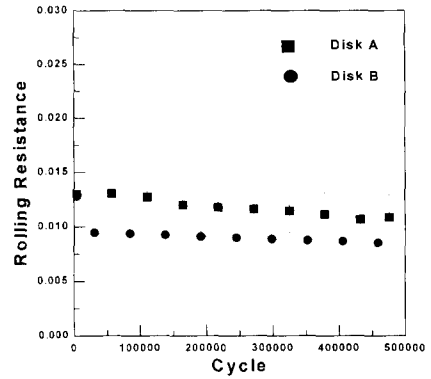
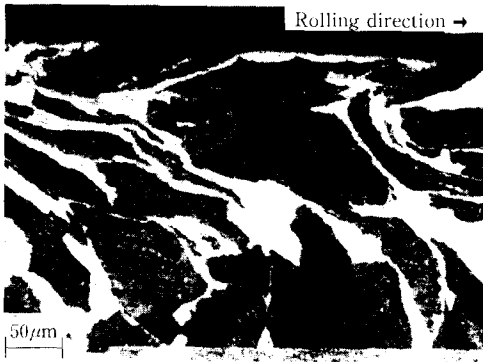


Fig. 12 Rolling resistance with respect to contact cycles lubricant B

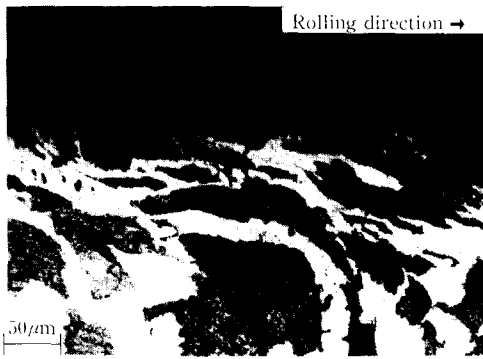


(a) Disk A

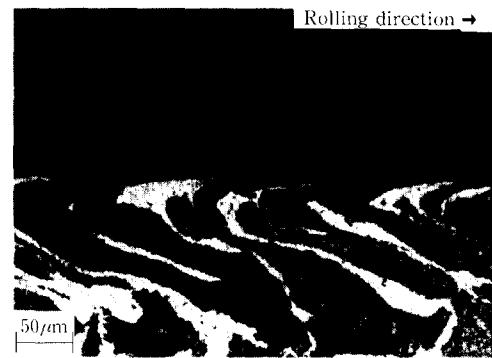


(b) Disk B

Fig. 13 Change of microstructure of disk A, B, after 4.8×10^5 cycles with lubricant A



(a) Disk A



(b) Disk B

Fig. 14 Change of microstructure of disk A, B, after 4.8×10^5 cycles with lubricant B

의 소성변형 및 히스테리시스로 인한 에너지 손실 때문에 그리고 이후에는 트랙면의 shakedown으로 인한 재료의 탄성 히스테리시스 손실때문에 구름저항이 발생하게 된다.

또한 각각의 윤활유 A, B 모두에 대해서 디스크 A가 디스크 B보다 좀더 큰 구름저항을 갖는 것으로 나타났는데, 이것은 앞의 건식 구름접촉의 경우에서 이미 언급한 것처럼 가공으로 인한 디스크의

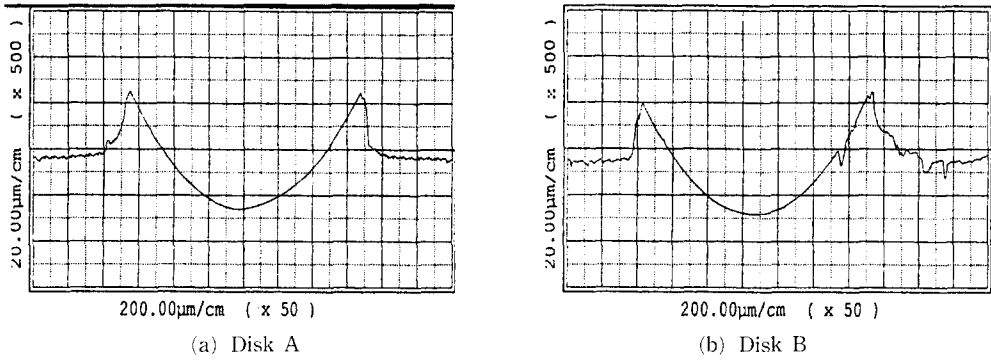


Fig. 15 Wear track profiles of disk A, B after 4.8×10^5 cycles with lubricant A

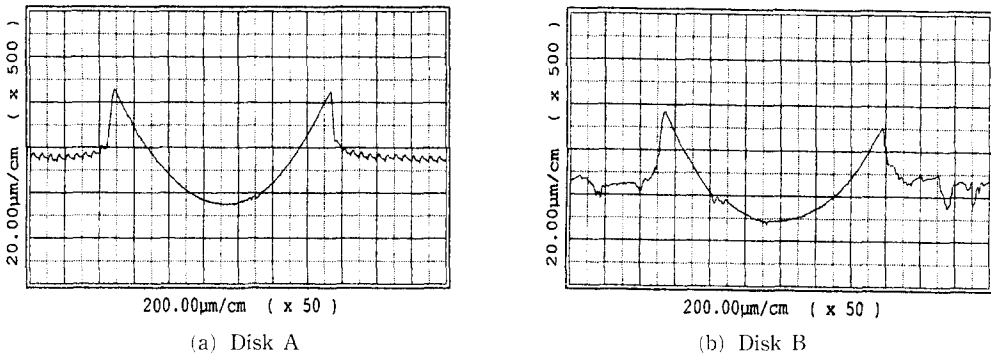


Fig. 16 Track profiles of disk A, B after 4.8×10^5 cycles with lubricant B

경도상승에 기인한 것이라고 사료되며 구름저항을 낮추는데 경도를 높이는 것이 타당성이 있다고 생각한다. 또한 윤활유 B를 사용했을 때의 구름저항이 윤활유 A를 사용했을 때보다 높은 것은 윤활유 B의 점도가 윤활유 A보다 높기 때문에 생기는 점성저항의 영향으로 보인다.

Fig. 13과 Fig. 14에서는 표면하부조직의 변형을 보여준다. 선삭한 원래의 시편의 단면 형상과 가공 변질층의 방향은 건식실험의 경우와 같다. 실험후의 표면근처에는 선삭가공으로 인한 오른쪽 방향의 소성흐름이 실험후에도 남아있는 것으로 보아, 앞에서의 건식조건과는 달리 표면에는 미끄럼으로 인한 심한 점선력은 작용하지 않지만, 일정한 값을 가지므로 Hertz 이론을 이용하면 표면하부 약 60~100 μm 정도에서 최대전단응력이 작용하는 것을 알 수 있다. 또한 이 깊이 근처에서 볼의 구름운동으로 인해 왼쪽방향의 소성흐름이 시작되는 것으로 보여진다. 그림에서의 화살표 방향은 볼의 진행 방향을 나타낸다.

또한 각각의 윤활유에 대해서 4.8×10^5 cycles

작동한 후의 트랙형상을 Fig. 15와 Fig. 16에 제시하였다. 여기서 보면 건식조건과는 달리 트랙의 양측면에 돌출된 모양이 나타나는데 이것은 볼의 구름운동 방향에 대해 트랙을 수직으로 절단하여 예칭하여 볼 때 돌기가 있는 양쪽으로 미세조직의 소성흐름이 있는 것으로 보아 볼이 트랙을 따라서 크게 공전운동하면서 트랙 내에서는 불규칙한 자전운동을 하기때문에 발생한 것이라고 생각된다. 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 구름요소의 구름저항 및 파손기구를 알아보기 위해 소재의 가공변질층의 깊이와 방향, 윤활상태 등의 인자들을 변화시킨 구름접촉실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 볼의 구름운동으로 인해 표면하부에 미세조직의 변화가 발생하며 가공변질층의 깊이와 방향은 구름저항 및 표면파손에 큰 영향을 미치지 않고 경도증가로 인해 구름저항이 감소됨을 알 수 있었다.

(2) 건식 구름접촉시에는 구름 외에 미끄럼이 상당부분 존재하여 구름저항이 높았으며 얇은 종이모양의 마멸입자를 생성하는 박리마멸의 형태를 보인다.

(3) 윤활조건에서는 요소간의 직접적인 접촉이 건식조건에 비해 훨씬 감소하여 구름저항은 건식조건보다 작게 되고, run-in 효과로 인하여 표면 거칠기가 감소되는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Harris, T. A. and Mindel, M. H., 1973, "Rolling Element Bearing Dynamics," *Wear*, Vol. 23, pp. 311~337.
- (2) Aihara, S., 1987, "A New Running Torque Formula for Tapered Roller Bearings Under Axial load," *J. of Tribology*, Vol. 109, pp. 471~478.
- (3) Tabor, D., 1956, "The Mechanism of Free Rolling Friction," *Lubrication Engineering*, Vol. 12, pp. 379~386.
- (4) Drutowski, D., C., 1959, "Energy Losses of Balls Rolling on Plates," *J. of Basic Engineering*, Vol. 81, pp. 233~238.
- (5) Johnson, K. L., 1972, "Rolling Resistance of a Rigid Cylinder on an Elastic Plastic Surface," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 14, pp. 145~148.
- (6) Johnson, K. L., 1985, "Contact Mechanics," Cambridge University Press.
- (7) Kragelsky, I. V., 1982, *Friction and Wear Calculation Methods*, Pergamon Press Ltd.
- (8) Kimura, Y. and Okada, K., 1981, "Wear during Lubricated Rolling Contact," *ASLE. Trans.*, Vol. 24, pp. 15~22.
- (9) Cheng, H.S. et. al., 1989, "Micropitting in Rolling and Sliding Contact under Mixed Lubrication," *J. of Tribology*, Vol. 111, pp. 605~613.
- (10) Soda, N. and Yamamoto, T., 1981, "Effect of Tangential Traction and Roughness on Crack Initiation/Propagation During Rolling Contact," *ASLE. Transactions*, Vol. 25, No. 2, pp. 198~206.
- (11) Muro, H. and Tsubima, N., 1970, "Microstructural, Microhardness and Residual Stress Changes due to Rolling Contact," *Wear*, Vol. 15, pp. 309~330.
- (12) Hmilton, G. M., 1963, "Plastic Flow In Rollers Loaded Above the Yield Point," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 177, No. 25, pp. 667~675.
- (13) 정중현, 김대은, 1996, "탄소강의 가공조건과 마찰·마멸과의 관계" 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제5호, pp. 1468~1476.