



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

유압 펌프 피스톤 소재 SACM645의 마모특성에 관한 연구



김 남 석

공학석사 학위논문

유압 펌프 피스톤 소재 SACM645의 마모특성에 관한 연구

지도교수 남 기 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2009년 8월

부경대학교 대학원

기계공학학연합동

김 남 석

김남석의 공학석사 학위논문을 인준 함

2009년 6월

주 심 공학박사 안 병 현 (인)

위 원 공학박사 안 석 환 (인)

위 원 공학박사 남 기 우 (인)



목 차

Abstract

1. 서 론	1
2. 이론적 배경	3
2.1 마모시험 개요	3
2.2 Tribology	4
2.2.1 마찰(Friction)	6
2.2.2 마모(Wear)	7
2.2.3 윤활(Lubrication)	8
2.3 마찰기구	10
2.4 마모기구	16
2.5 윤활기구	23
2.6 마모시험의 목적	27
2.7 마모시험에 영향을 미치는 요인	28
2.7.1 온도	32
2.7.2 하중	33
2.7.3 속도	35
2.7.4 시간	35
2.7.5 표면특성	36
2.7.6 분위기	38
2.7.7 윤활	38
2.7.8 기타	40

2.8	마모시험	41
2.8.1	구와구	41
2.8.2	직교원주	42
2.8.3	핀과 평판	43
2.8.4	평판과 평판	45
2.8.5	핀과 원판(핀이 회전하는 경우)	54
2.8.6	핀과 원판(원판이 회전하는 경우)	54
2.8.7	원통과 원통 (면접촉)	74
2.8.8	핀과 원판, 혹은 원통과 원통 (선접촉)	74
3.	재료 및 실험 방법	8
4.	결과 및 고찰	53
4.1	조직관찰	53
4.2	경도시험	53
4.3	인장시험	54
4.4	마모시험	59
4.4.1	상온 건조 상태	59
4.4.2	상온 윤활 상태	70
4.4.3	고온 윤활 상태	74
5.	결 론	79
	참고문헌	81

감사의 글

**A Study on Wear Property of SACM645 Steel
with Oil Hydraulic Pump Piston Material**

Nam-Seok Kim

*Department of UR Interdisciplinary Program of Mechanical Engineering
Graduate School
Pukyong National University*

Abstract

The oil hydraulic piston pump and motor generally have been using at an oil pressure system because these instruments can generate high oil pressure and torque with simple structure and small size.

The wear occurred at a narrow gap between piston and cylinder has a great influence on the performance and durability of the piston pump and motor. Characteristics of wear at a gap directly affect wear properties at a gap of the swash plate and the slipper pad and a gap of the cylinder block and the valve plate. According to high pressurizing trends of oil hydraulic machines, the importance of surface treatment technology has been increasing as well as a gap of relative motion part and a surface roughness.

In case of the oil hydraulic piston that makes highest pressure, outstanding surface hardness of main parts by using the surface

treatment technology is essential to improve wear resistance, fatigue resistance and corrosion resistance. Otherwise, the damaged surface by wear results in the fracture of pump. Therefore, it is necessary to study more about the surface treatment technology.

In this study, the characteristic of wear had been investigated on dry, lubrication and high temperature lubrication atmosphere after the various heat treatment of SACM645 steel for piston material. The results are given as follows.

(1) The maximum tensile strength of QT treated specimen, QT treated and shot peened specimen and QT treated and nitrided specimen have the similar value of all about 800 MPa, but the strains indicated big difference.

(2) The hardness of QT treated and nitrided specimen was very high with 800 Hv but the ductility was very low.

(3) The tensile strength of QT treated and high frequency induction hardened specimen showed very high as 1,700 MPa because this specimen was hardened completely on all section to the inside.

(4) The hardness of most of the specimen was similar to the hardness of base metal (210~230Hv). However, the high frequency induction hardened specimen showed about 550~600 Hv of hardness because of its complete hardening. And the surface hardness of the nitrided specimen was 800 Hv, while the hardness of inside has shown similar to hardness of base metal.

(5) As a result of wear test at dried condition in room temperature, the wear characteristic of the nitrided specimen, the QT treated and nitrided specimen and the high frequency induction hardened specimen

was very excellent. the QT treated specimen, the QT treated and shot peened specimen and the bulk specimen showed similar wear characteristic.

(6) The wear loss in the wear test at the lubricated condition in room temperature was generally large. From this result, the wear resistance was high at the nitrided specimen and the high frequency induction hardened specimen same as the dried condition at room temperature.

(7) At the lubricated condition in high temperature, the wear loss of the nitrided pin and the high frequency induction hardened pin was larger than that of base metal and QT treated pin.

(8) In case of the dried condition without oil, the nitrided specimen and the high frequency induction hardened specimen have shown good wear resistance that did not generate any wear. Also, it indicated the similar tendency in the result of low temperature. However, the wear resistance in the high temperature lubricated condition is thought to be related to ductility as well as surface hardness.

(9) The wear surface of the base metal, the QT treated specimen and the QT treated and shot peened specimen after wear test at the dried condition in room temperature indicated cohesion wear and grinding wear, respectively. However, the nitrided specimen, the high frequency induction hardened specimen, the QT treated and nitrided specimen and the QT treated and high frequency induction hardened specimen showed slide wear and oxidation wear from small wear loss of pin. However, in low and high temperature lubrication test, only grinding wear was observed because of using a silicon-carbide grinding paper as the relative material.

1. 서 론

유압 장치는 작은 힘으로 큰 힘을 전달할 수 있으며, 작업의 반복성이 우수하여 무거운 물체를 정밀하게 조작할 수 있다. 힘을 전달하는 방법은 전기를 사용하는 방법과 기계 또는 유압 장치를 사용하는 방법이 있다. 간단한 조작으로 운전과 정지가 가능하고, 속도 조절이 용이하며 정확하다. 복잡한 기어나 풀리 또는 레버를 사용하지 않고, 파스칼의 원리에 의해 힘을 수십 배 또는 수백 배 이상 증폭시킬 수 있다. 일정한 힘과 토크를 낼 수 있다. 기계식이나 전기식에 비하여 구성 요소가 간단하다. 힘과 전달 기구가 간단하고, 멀리 떨어진 위치에서도 배관 하나만으로 간단하게 힘을 전달할 수 있으며, 방향에 대한 제한을 받지 않는다.

기어펌프 : 유압유는 맞물려 돌아가는 기어 사이를 통하여 송출되며, 한쪽 기어는 전동기에 연결되어 회전하고, 다른 쪽 기어는 구동 기어와 맞물려서 회전한다. 이 펌프의 송출량은 300L/min, 송출 압력은 35~175kgf/cm²의 것이 많으며, 공작 기계나 건설 기계 등에 많이 사용되고 있는 외접형 기어 펌프, 내접 기어 펌프는 바깥쪽 기어의 한 곳에서 맞물리고, 반달 모양의 내부 실로 분리되어 있으며, 전동기에 의해 안쪽 기어가 구동하는 내접 기어 펌프, 그리고 하우징내에서 나사가 회전하며, 매우 조용하고 효율적으로 유압유를 송출하는 나사펌프가 있다.

베인펌프 : 원통형 케이싱 안에 편심된 캠 링과 로터가 들어 있으며, 로터에는 홈이 있고, 그 홈 속에는 판 모양의 베인이 삽입되어 자유로이 움직일 수 있게 되어 있다. 송출 압력은 1단에서 70kgf/cm², 송출량은 4~450L/min의 것이 많이 사용되며, 공작 기계, 사출 성형기, 산업 기계 등에 널리 사용된다. 정용량형과 가변 용량형 베인 펌프가 있으며, 정용량형 펌프에는 압력 불평형식과 압력 평형식이 있다.

피스톤 펌프 : 고속 운전이 가능하여 비교적 소형으로도 고압, 고성능을 얻을 수 있다. 여러 개의 피스톤으로 고속 운전하므로 송출압의 맥

동이 매우 작고 진동도 작다. 송출 압력은 $100 \sim 300 \text{kgf/cm}^2$ 이고, 송출량은 $10 \sim 50 \text{L/min}$ 정도이다. 피스톤 펌프는 축방향 피스톤 펌프와 반지름 방향 피스톤 펌프가 있다. 경사판의 경사각을 조절하여 유압유의 송출량을 조절한다.

유압펌프는 중장비용, 전차용 등으로 사용되고 있으며 유압을 이용하여 장비를 동작시키는 중요한 부품으로써 작은 크기의 제품으로 큰 동력을 만들어내는 목적에 사용된다. 특히, 중장비의 중량물에 대하여 상하이동 및 좌우회전 시 부드러운 동작과 함께 큰 동력을 만들어 내어 안전하고 정확한 동작을 구성하게 한다^{1~5)}.

유압 피스톤 펌프와 모터는 간단한 구조로서 고압의 유압원을 생성하거나 소형이면서도 높은 토크를 발생하기 때문에 유압시스템에 널리 사용되고 있다. 피스톤과 실린더 사이의 좁은 간극에서의 마모상태는 피스톤 펌프와 모터의 성능 및 수명에 직접적으로 아주 큰 영향을 미친다. 즉, 실린더 내를 왕복 운동하는 피스톤의 편심상태 등에 따라서 간극에서의 마모 특성을 크게 변화한다. 또한 간극에서의 마모 특성은 직접적으로 사판과 슬리퍼 패드 사이, 실린더 블록과 밸브 플레이트 사이 등에서의 마모 특성에도 영향을 주게 된다^{6~10)}. 유압기기들의 고압화에 따라 상대운동부의 간극 및 표면조도와 함께 표면처리 기술의 중요성이 더해지고 있다. 특히 가장 고압을 발생하는 유압 피스톤의 경우 주요 부품들의 표면처리 기술을 이용한 표면경도의 확보는 부품들의 내마모성, 내피로성, 내식성 등의 향상을 위해 반드시 필요하며, 그렇지 못할 경우 마모에 의한 표면손상으로 펌프가 파손되는 결과를 초래하므로 표면처리 기술에 대한 많은 연구가 필요하다^{11~13)}. 그러나 유압피스톤 펌프 모터에 대한 지금까지 수행된 많은 연구와 제품 개발, 생산에도 불구하고 피스톤과 실린더와의 마모 특성에 대한 이론적인 연구와 이에 관한 실험은 상당히 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 피스톤 재료로 사용되고 있는 SACM645소재를 다양한 방법으로 열처리를 실시한 후 건조, 윤활 및 고온 윤활 분위기에서 마모 특성을 조사하였다.

2. 이론적 배경

2.1 마모시험 개요

마모시험은 재료의 내마모성을 평가하는데 필요한 것으로서 여기에 쓰이는 마모시험기는 다른 재료 시험기와는 달리 여러 가지 형태가 있다. 실제로 미국의 윤활학회(ASLE)에서 1970년에 수행한 조사연구 결과에 따르면 1945년부터 1970년까지 미국에서 사용된 마모시험기는 시편의 모양에 따라 크게 12가지로 나뉘어 지고 이들에는 또한 여러 종류가 있어 230여 종류 이상의 마모시험기가 고안되어 사용된 것으로 나타났다.

다른 재료시험기와 달리 마모시험기에 이렇게 많은 종류의 것이 있는 것은 내마모성이라는 특성이 재료의 고유한 특성이 아니라는 점 때문이다. 인장강도나 파괴인성 등은 재료의 고유한 특성이기 때문에 어떠한 시험기로 시험하여도 그 값이 변하지 않으며 또한 시험방법도 간단하므로 시험기의 종류가 많지 않을뿐더러 기본적인 원리는 모두 같다. 그러나 내마모성은 재료의 고유한 특성이 아니라 마모시험 때 쓰이는 상대재료의 종류나 시험조건에 따라서 크게 바뀌는 상대적 특성이다. 그렇기 때문에 인장강도처럼 “이 재료의 내마모성은 얼마다” 하고 숫자로 나타낼 수 없고 시험방법, 시험조건, 상대재료, 시편의 모양 등을 자세히 밝혀야만 그 숫자 값이 의미가 있고 재현성 있는 결과를 얻을 수 있다.

더욱 마모시험을 복잡하게 하는 요인은 시험재료와 상대재료의 접촉이라는 사실 외에는 다른 재료라고 볼 수 있는 윤활제의 첨가에 따라 시험결과가 크게 영향을 크게 받는다는 점이다. 마모시험과 관련된 요소가 이렇게 다양하므로 단순히 마모 자체에 대해서만 이야기 하는 것이 실제적인 사용조건에서는 큰 의미가 없는 경우가 많으므로 마모, 윤

활, 마찰 등을 종합적으로 연구하는 것이 요구되며 이러한 특성을 강조하기 위하여 영국에서 1996년 트라이볼로지 (tribology)라는 새로운 낱말을 만들었다. Fig. 2.1은 마모와 관련된 구성요소가 어떻게 이루어져 있는지 개략적으로 나타낸 것으로서 독일규격 DIN50320에 명시되어 있는 것이다. 그림에서 보면 재료, 윤활제, 환경 등이 복합적으로 작용하는 것을 알 수 있다.

트라이볼로지(tribology)는 특히 에너지 부족과 함께 최근 들어 그 중요성이 커진 연구 분야이다. 위와 같은 이유 때문에 재료시험의 여러 종류 가운데에서도 가장 표준화가 더딘 분야가 마모시험에 대한 것이다. 그러나 마모시험의 중요성이 점차 커짐에 따라 보편성이 있는 시험 결과를 얻어야 하는 필요성이 더욱 커지게 되었고 이는 표준화된 시험 방법의 개발과 직결된 문제이기도 하였다. 이 결과 프랑스의 베르사이유에서 1984년에 열린 서방7개국 정상회담에서 신소재의 재료시험에 대한 표준화 연구를 같이 수행하기로 한 합의사항 가운데 첫 번째로 나타나는 분야가 마모시험에 대한 것으로서 이 분야의 주관연구 기관은 독일의 재료시험연구소인 BAM이다.

2.2 Tribology

독일규격(DIN 50320)에 따르면 “마모(wear)는 물체의 표면에서 기계적인 운동에 의해 물체가 점차적으로 부스러져 떨어져 나가는 현상을 말한다.”라고 되어 있으며 기계적인 운동으로는 기체, 액체, 고체 등의 접촉에 의한 것들이 있다고 하였다.

그러나 오늘날의 산업 현장에서 마모만이 독자적으로 작용하는 경우는 흔하지 않으며 대부분 마찰(friction) 과 윤활(lubrication)이 마모(wear)와 같이 작용하여 나타나므로 매우 복잡한 양상을 띄우게 된다. 마모 만에 대하여 검토하는 것은 연구의 목적 외에는 실제적인 응용이라는 측면에서 본다면 큰 의미가 없다. 따라서 마찰, 마모, 윤활의 3요

소를 종합적으로 연구하는 것이 필요하며 이들의 복합적 작용은 기계 장치의 구동 및 운전 효율에 큰 영향을 미친다. 실제로 산업계에서는 생산되는 총 에너지의 30%가 마찰 과정에서 소실되어 없어질 정도로 생산성과 밀접한 관계가 있어 에너지 절약에 직접적인 기여가 가능하다. 이 때문에 1996년에 영국에서 그리스어의 트라이보스(tribos: 문지른다는 뜻)에서 트라이볼로지 (tribology) 라는 단어를 만들어 낸 것이다. 따라서 이제는 마모(wear)라는 말보다 tribology라는 말을 더 많이 쓰게 되었 으며 아직 우리말로로는 정확한 번역이 되어있지 않다.



Fig. 2.1 The composition factors of friction, lubrication and wear system

2.1.1 마찰(Friction)

마찰은 양면성이 있는 현상이다. 즉 마찰이 필요한 경우가 있고 이것이 없을수록 좋은 경우도 있기 때문이다. 예를 들면 마찰열을 이용해 불을 만든 것이 그 하나이고 다른 하나는 마찰을 줄이기 위해 발명한 바퀴이다. 이 두 가지 모두 인류 역사상 위대한 발명품으로 뽑히는 것들이다.

학문적으로는 Galileo와 Newton에 의해 고전 역학이 완성된 다음에 Amonton이 1699년에, 그리고 Coulomb 이 1785년에 마찰과 관련된 실험식을 발표했다. 그 내용은 마찰력이 물체에 작용하는 수직 힘에 비례한다는 내용이며 여기에서 마찰계수가 처음으로 나타내게 된다. 이 실험 결과에 따르면 마찰계수가 접촉면적과 관계가 없는 것으로 나타났다. 이 현상을 설명하기 위해 접촉면의 형상은 불규칙하므로 표면 돌출부의 상호작용에 의해 생기는 것이 마찰력이라 하였고 이것은 마찰에 있어서 표면 거칠기 가정으로 알려졌다. 그러나 이미 Desagulier가 1724년에 응축 현상을 남과 남의 접촉에서 관찰했고 Leonardo da Vinci는 마찰력이 하중에 비례하여 그 값이 하중의 약 1/4 정도라고 알아내었다.

역학적으로 볼 때 표면돌출부가 변형이 안 되는 강체(rigid body)라면 미끄러지는 물체를 돌출부 위로 들어 옮기는 과정에서는 에너지 보존의 법칙에 의해 에너지 손실이 없어야 된다는 결론이 나오나 실제 로는 에너지 손실이 일어나게 된다. 따라서 Amoton과 Coulomb이 발견한 것은 극히 제한적으로 적용 가능한 어림식 이다. 그러나 워낙 이 관계식이 일찍부터 알려져서 법칙처럼 정착이 되었고 이 결과 마찰계수가 재료의 고유한 성질인 것으로 잘못 알려지게 되었다. 이 때문에 마찰에 대한 엄밀한 연구는 20세기에 들어와서야 다시 시작되었다.

1920년대에는 마찰력이 접촉면에서의 분자간 결합력을 끊는데 필요한 힘으로 설명되었다. 이 이론에 따르면 마찰력이 접촉면의 증가에 비례하여 늘어야 하나 그렇지 않은 점 때문에 받아들여지지 않았다. 그 후에 Holm, Ernst와 Merchant, Bowden, Tabor가(1940년대 연구논문) 마찰

력은 양면성이 있는 힘으로서 변형과 응착이 같이 작용하여 나타나는 현상으로 설명하였으며 이것이 오늘날 일반적으로 받아들여지고 있는 이론이다.

2.2.2 마모(Wear)

문헌상 나타나는 마모에 대한 연구는 Leonardo da Vinci가 처음이며 그는 구름 베어링에 대해 기록을 남겼고 마모량이 하중에 비례하여 증가한다고 설명하였으며 30%Cu-70%Sn 합금의 사용을 제시하기도 하였다. 그 이후 마모에 대한 연구는 1930년대에 독일에서부터 시작되었다. Fachtel은 건조마모(dry wear)를 표면 돌출부의 변형-전단의 반복에 의한 것으로 설명되었다. 이 이론은 Fink, Mailander와 Dies에 의해 발전되었으며 변형된 부분이 산화되는 것으로 마모에 있어서 분위기의 중요성을 알아내었다.

Siebel은 1938년에 review 논문을 발표하였는데, 여기서 마모를 7가지로 분류하였다.

- (1) 윤활 안된 표면에서 미끄럼 마찰에 의한 마모
- (2) 윤활 된 표면에서 미끄럼 마찰에 의한 마모
- (3) 윤활 안된 표면에서 구름마찰에 의한 마모
- (4) 윤활 된 표면에서 구름마찰에 의한 마모
- (5) 진동 접촉 상태에서의 마모
- (6) 움직이는 고체분말에 의한 마모(erosion)
- (7) 움직이는 액체에 의한 마모(cavitations)

그리고 Siebel은 이미 마모현상에 대해 이것이 여러 가지 복잡한 작용의 결과 나타나는 것이어서 간단한 마모시험으로 재료의 마모 특성을 나타낼 수 없다고 지적하였다.

2차 대전 중에는 마모연구가 중단되었고 50년대에 미국과 영국에서 다시 연구가 시작되었다. 이 결과 마모에 의한 금속의 닳아 없어짐과 옮겨 붙음의 차이가 구별되었고 마모의 단계별 기구가 설명되기 시작하였다. Burwell은 “마모”(wear)라는 전문 학술잡지의 창간호(1957)에서 마모현상을 다음과 같이 기구 별로 구별하였다.

- (1) 응착 마모 (Adhesive wear)
- (2) 연삭 마모 (Abrasive wear)
- (3) 부식 마모 (Corrosive wear)
- (4) 표면 피로 마모 (Surface fatigue wear)

이 분류는 오늘날까지 일반적으로 사용되고 있다.

2.2.3 윤활(Lubrication)

윤활의 목적은 두 접촉면의 사이에 유체의 막을 만들어 고체 접촉면에 손상을 주지 않고 미끄럼이 잘 일어나도록 하는데 있다. 윤활의 역사는 고대 이집트까지도 올라가나 실제적으로 연구가 시작된 것은 정밀한 기계가 만들어지기 시작한 산업혁명 때부터 이다. 이전까지는 주로 이상적인 상태에서의 유체 역학에 대한 수학적 연구가 진행되어 왔고 실제적인 응용은 극히 미약하였으며 이것은 수학자인 Neumann에 의해 지적되었다.

윤활 이론의 기초가 된 수학적 기반은 유명한 Reynolds에 의해 1886년에 이루어졌다. 20세기 초 Stribeck 은 하중, 속도 등의 실제적인 운전 조건이 윤활에 미치는 영향에 대해 연구하였고 이 실험 결과는 Sommerfeld에 의해 이론적으로 설명되었다. 1920년에 Biel은 Stribeck 곡선은 윤활유 점도, 미끄럼 속도, 하중에 따른 일반적인 윤활 면의 특성을 보여 주는 것이라고 지적하였다. 이 결과는 유체 윤활 베어링 개발의 기반이 되었다.

그러나 유체 윤활에는 한계가 있다. 즉 고하중, 저속의 경우에는 아무리 점도가 높은 윤활제라도 두 접촉면이 떨어지지 못하고 돌출부는 서로 닿는다. Hardy는 1922년에 이 분야의 연구를 처음으로 시작 하였으며 그 이후 집중적인 연구가 이 분야에서 이루어졌다. 그와 동시에 윤활유 첨가제가 개발되기 시작하였으며, 2차 대전 이후 사용 조건이 점점 고하중, 고속, 고온 등으로 가혹해져 감에 따라 이 분야에 대한 관심이 커졌다. 50년대에 전문 학술잡지인 "Wear", "Transactions of ASLE"등이 창간되었다.

1960년대에는 마모로 인한 파손이 급격히 증가하는 경향이 나타났다. 이 결과 그 당시 진행되고 있던 생산 규모의 대형화, 자동화 때문에 생산 중단에 따른 손실이 대규모화 하였다. 이것은 곧바로 마모, 마찰, 윤활관계 전문가들의 주목을 끌게 되었다. 그때까지도 이 분야가 제대로 활용되지 못하고 또한 주목을 받지 못한 이유로 다음의 요인들이 지적되었다.

- (1) 기계공학, 물리, 금속공학, 화학 등의 분야에 걸친 것이라는 점이 무시되었다.
- (2) 생산기술의 중요성만이 강조되어 왔다.
- (3) "윤활"의 의미가 좁은 뜻으로만 쓰여 왔다.

이에 따라 영국에서는 마모로 인한 경제적 손실에 대하여 조사 연구를 수행하였으며 1966년에 Jost에 의해 작성된 보고서에서는 마모로 인한 경제적 손실이 GNP의 4% 정도에 이를 정도로 크다는 것이 밝혀졌다. 또한 마모, 마찰, 윤활에 대한 조사 연구 결과 처음으로 "트라이볼로지"(tribology)라는 단어가 만들어 졌으며 이 단어는 옥스퍼드(Oxford)사전의 편집자와 상의한 뒤에 만들어진 것으로서 그 정확한 정의는 아래와 같다.

"상대운동을 하면서 서로 영향을 미치는 표면 및 이와 관련된 제반 문제와 실제 응용에 관한 과학적 기술"이 이후 영국에서는 국가 정책

적으로 이 분야의 연구에 대한 투자를 시작하였으며 이것이 오늘날 영국이 이 분야에서 세계적으로 앞서가게 된 기반이 되었다.

2.3 마찰기구

마찰에는 고체/기체, 고체/액체, 고체/고체 등의 모든 계면사이에서 일어날 수 있으나 표2.1에서 보듯이 고체/기체, 고체/액체의 경우에는 마모 양상이 주로 침식(erosion)에 의해 일어나며 고체/고체 계면에서 일어나는 현상과 크게 다르므로 본 마모 시험에서는 고체/고체 마모 시험만을 다루겠다. 고체/고체 사이의 계면에서 일어나는 마찰에는 크게 미끄럼마찰과 구름마찰의 두 가지가 있다. 미끄럼마찰은 구름마찰보다 크며 마찰력의 차이 때문에 시험 방법도 서로 다르다.

미끄럼마찰은 “Amontons-Coulomb” 법칙에 의해 설명될 수 있는 것으로 알려져 왔으나 앞서 밝혔듯이 이것은 그렇게 간단한 것은 아니다. 즉 마찰계수 f 는 FF/FN 과 같다고 설명할 수 없으며 실제로 두 접촉면 사이에서 일어나는 일은 정지하고 있을 때와 움직일 때로 나누어 생각해야 한다.

두 물체가 접촉하고 있을 때 일어나는 현상을 이해하려면 먼저 물체의 표면이 어떤 형상인지 알아야 한다. 물체는 아무리 거울같이 빛나게 갈아도 그 표면이 평평하지 않으며 더욱이 기계 가공한 표면은 무수히 많은 돌출부(asperity)의 연속이다. 따라서 이러한 물체의 표면을 단면으로 관찰하면 Fig. 2.2와 같이 나타나며 이러한 표면 형상을 숫자로 나타낸 것이 표면 거칠기인 것이다.

전체 하중은 참 접촉면적 A_r 에 의해서 받쳐지고 있으며 접촉 부분에서는 접촉면적이나 돌출부의 모양에 따라 탄성변형이나 소성변형이 일어난다. 이러한 정적인 접촉상태에서 미끄럼 운동이 일어나면 그 계면에서 일어나는 일은 Fig. 2.3과 같으며 각 단계마다 나타나는 일은 다음의 순서로 진행된다.

- (가) 접촉부의 탄성변형
- (나) 접촉부의 소성변형
- (다) 흙 패임(plowing)
- (라) 응착부위의 전단 (shearing)

이 결과 전체적인 미끄럼마찰은 위의 4가지 일들의 합으로 나타난다.
즉,

$$F_r = \Sigma F_1 + \Sigma F_2 + \Sigma F_3 + \Sigma F_4$$

여기서, F_1 은 탄성변형에 대한 저항 때문에 생기는 마찰,
 F_2 은 소성변형에 대한 저항 때문에 생기는 마찰,
 F_3 은 전단(흙 패임)에 대한 저항 때문에 생기는 마찰,
 F_4 은 전단(응착부)에 대한 저항 때문에 생기는 마찰이다.

미끄럼마찰은 이와 같이 정성적으로 설명될 수 있으며 이들을 수식적으로 표현하면 더욱 복잡해진다. 표2.2는 금속/금속 혹은 비금속/금속 간의 접촉에 있어서 윤활조건에 따른 마찰계수의 크기를 나타내고 있다.

구름마찰은 미끄럼마찰보다 훨씬 작으나 이것도 역시 미끄럼마찰만큼이나 복잡하다. 미끄럼마찰에서는 전단변형에 대한 저항이 크게 작용하나 구름마찰에서는 전단이 거의 일어나지 않는다.
구름마찰에 기여 하는 요소로는 다음의 것들이 있다.

- (1) 미세 미끄럼(micro-slip, micro-sliding)
- (2) 탄성 이력(elastic hysteresis)
- (3) 소성 변형
- (4) 응착 효과

미세 미끄럼은 구름 접촉면에서 접촉 부위별로 표면과 평행인 방향으로 움직이는 거리가 다르거나 견인력 (traction force)이 다르기 때문에 나타난다. 예를 들면 볼 베어링의 경우, 볼과 내 외륜의 접촉면에서의 탄성 변형 때문에 실제로 고정적인 접촉이 되지 않으며 미끄러지는 현상 때문에 접촉면에서 움직이는 거리가 부위별로 다르게 되어 미세 미끄럼이 일어난다. Fig. 2.4는 이 현상을 나타낸 것으로서 미끄럼이 일어나는 부분을 알 수가 있다. 견인력이 다른 경우는 Fig 2.5에 나타나 있는데 이때는 움직이는 거리의 차이 때문에 생기는 미끄럼이 아니고 접촉면에서의 견인력 FT 가 수직으로 작용하는 힘 FN 보다 크면 미끄럼이 일어나는 것으로서 FN 은 Hertz압을 나타낸다. 따라서 Fig. 2.5를 보면 두 개의 원판이 닿아 있을 때 맞물리기 시작하는 반대쪽에서 미세 미끄럼이 일어나는 것을 알 수 있다.

탄성이력(elastic hysteresis)은 탄성변형이 일어났다가 다시 회복될 때 일어나는 에너지 손실 때문에 생기는 현상이다. 따라서 두 물체 접촉부위에서 서로 닿을 때 탄성변형이 일어났다가 떨어지면서 회복될 때 탄성 이력으로 인한 에너지 손실이 있게 되며 이것이 구름 마찰력의 일부 구성 요인으로 기여하게 된다. 두 물체의 접촉면에서의 부하가 어느 임계값을 넘으면 소성변형이 일어나며 여기에 소요된 에너지가 구름 마찰력으로 나타나게 된다. 소성변형에 의한 구름 마찰력은 구름운동의 초기에 그 기여도가 크고 점차적으로 그 효과가 감소한다. 응착 부위의 전단에 의한 구름 마찰력은 비교적 그 비중이 작은 편이다.

Table 2.1 The aspect of wear and friction

	마찰	마모양상	예
고체/기체	공기저항	유체침식 (fluid erosion)	공기베어링 , 비행기동체 , 터빈날개
고체/액체	점성저항	충돌침식 (cavitation erosion)	유압기기, 배, 송유관
고체/고체	마찰력	마모 (wear)	베어링, 기차바퀴 , 제동장치

Table 2.2 The sliding friction coefficient

	금속/금속	비금속/금속
청정표면	$2 \sim 50 \times 10^{-4}$	5×10^{-6}
나쁜 윤활조건	2×10^{-4}	5×10^{-6}
보통윤활조건	2×10^{-5}	5×10^{-6}
좋은 윤활조건	$1 \sim 20 \times 10^{-7}$	5×10^{-6}

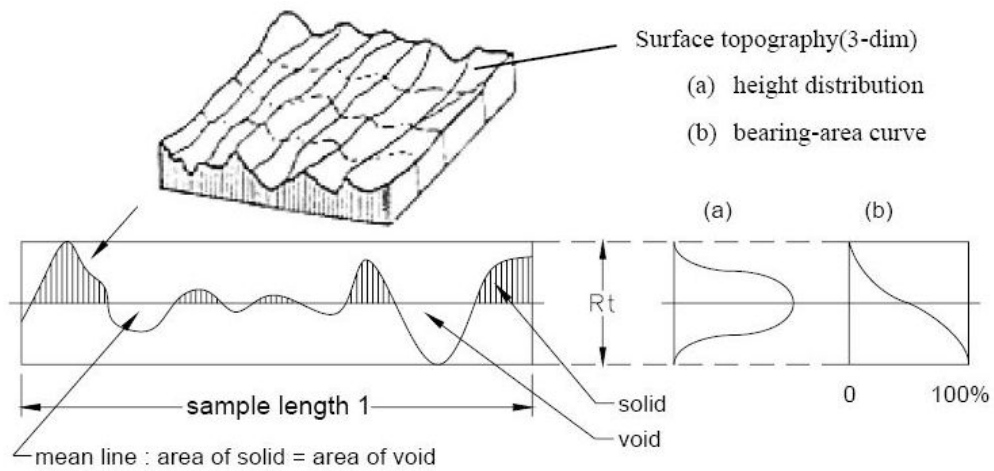


Fig. 2.2 The cross section and surface of materials



Fig. 2.3 The present state of contact region from stop to moving

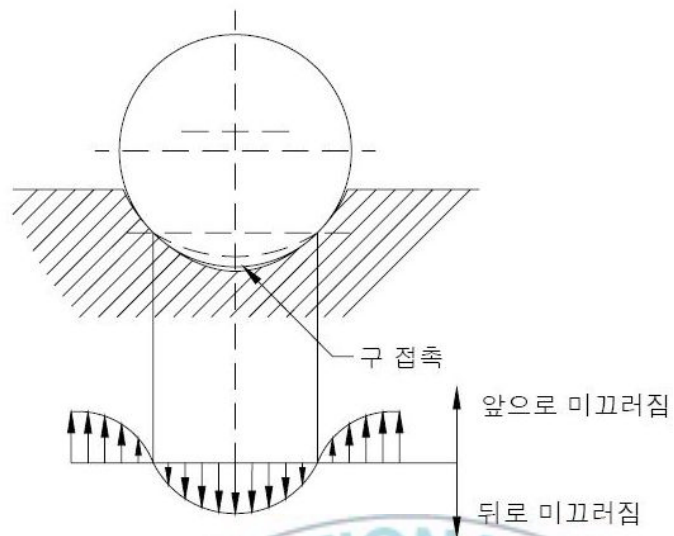


Fig. 2.4 The sliding position in cloud bearing

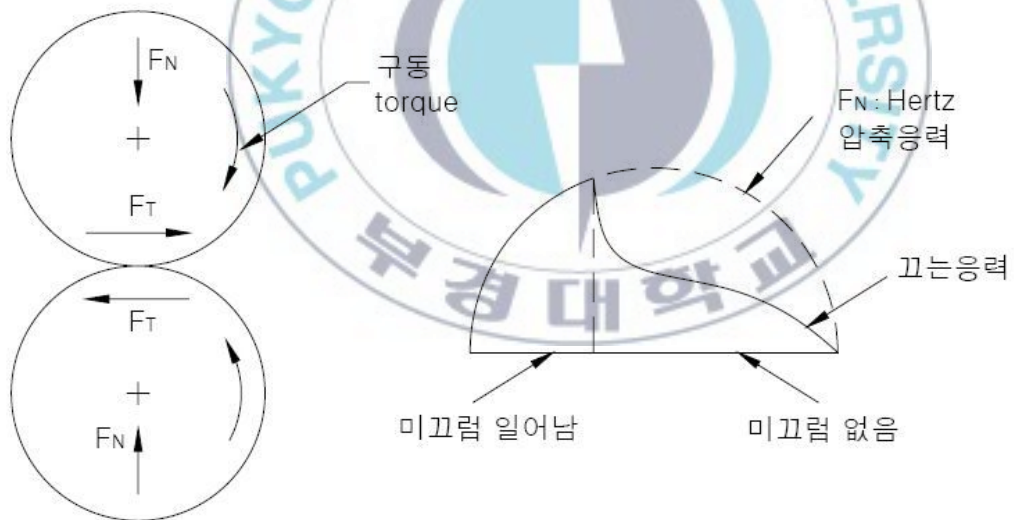


Fig. 2.5 The traction force in cloud contact surface

2.4 마모기구

마모기구의 분류는 앞서 밝힌 것처럼 1938년 Siebel이 제안한 것과 1957년에 Burwell이 제안한 것 두 가지가 있는데 Siebel은 상대운동의 종류에 따라 분류하였고 Burwell은 마모기구의 종류에 따라 분류한 것으로서 기계적 성질 시험과 비교하면 전자는 인장시험, 압축시험 등의 분류와 비슷하고 후자는 취성 파괴, 연성 파괴 등의 분류와 비슷하다. 실제 마모시험에 있어서는 위의 두 가지 요소 이외에 마모에 관련되는 다른 요소들도 알아야만 시험결과의 정확히 비교가 가능하다. 마모와 관련된 요소들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 상대운동의 종류
- (2) 관련 요소
- (3) 주요 마모기구
- (4) 하중, 마찰계수, 움직인 거리
- (5) 재료의 마모 특성
- (6) 마모율
- (7) 마모표면의 형상

마모와 관련된 기본적인 상대의 운동 종류는 미끄럼, 구름, 충격, 진동, 흐름의 5가지이며 대부분의 상대운동은 이들 기본적인 움직임이 홀로 나타나거나 둘 이상이 같이 나타나는 형태이다. 마모기구에는 표면피로, 연삭, 응착+전단, 부식마모(tribo-chemical wear)의 4가지가 있다. 실제 상황에서는 어느 한 가지 마모기구가 홀로 나타나는 경우는 드물고 대부분 2가지 이상이 복합적으로 작용한다. 이들 마모기구를 간단히 설명하면 아래와 같다. 이 가운데서 표면피로와 연삭은 주로 응력과 관계되는 것이고 응착 및 부식에서는 재료의 특성이 비교적 크게 작용한다.

- (가) 표면 피로마모: 표면에서의 반복 접촉에 의한 피로 때문에 균열이 생겨 일어나는 마모
- (나) 연삭 마모: 단단한 면의 돌기나 경질입자의 절삭 작용에 의해 일어나는 마모
- (다) 용착 마모: 참 접촉부에서 생긴 용착 부분의 전단에 의해 생기는 마모
- (라) 부식 마모: 분위기나 윤활제의 부식작용과 마찰의 기계적 작용이 같이 일어나면서 생기는 마모

표면피로는 주로 반복 접촉이 일어나는 구름 접촉 시스템, 즉 볼 베어링 같은 곳에서 잘 일어난다. 헤르츠의 계산 결과에 따르면 두 물체가 접촉할 때 최대 전단 응집력은 표면이 아니라 표면에 가까운 물체의 내부에서 나타난다. 따라서 베어링의 내륜이나 외륜의 어느 한 곳을 기준으로 보면 계속적으로 볼이 지나가면서 전단 응력을 반복적으로 받게 되어 결국 피로 현상에 의해 균열이 생기고 이것이 커져서 떨어져 나가게 된다. Fig. 2.6은 표면피로에 의해 생긴 마모표면으로서 핀-원판시험에서 원판이 반복적으로 하중을 받게 되어 생긴 결과이다. 연삭 마모 (abrasive wear)는 크게 2가지 물체가 작용하는 경우와 3가지가 작용하는 경우로 나눌 수 있으며 Fig. 2.7은 그 예이다. 이 마모기구(기)는 마모로 인한 손실 원인 가운데 50%를 차지할 정도로 많이 나타나는 것이며 Fig. 2.8에서 보듯이 미세전단(micro-cutting)에 의한 변형이 주요 기구이다. 연삭마모 때의 마찰계수는 표 2.3과 같이 미끄럼 마모보다 대략 1,000배 정도 크다. 따라서 연삭마모는 다른 마모에 비해 비교적 마모속도가 빠르고 이로 인한 손실이 크며 이 때문인지는 확실하지 않으나 여러 가지 마모시험 방법 가운데 비교적 일찍부터 규격화된 시험 방법이 연삭마모에 대한 것이다(ASTM G65).

연삭마모에서는 마모 부스러기나 연삭제의 경도가 매우 중요한데 경도에 따른 마모량은 Fig. 2.9와 같은 관계가 있으므로 마모손실을 줄려면 재료의 경도가 연삭제나 마모 부스러기의 정도보다 1.3배 이상이

어야 한다. 그러나 1.3배보다 무작정 커진다고 해서 비례적으로 좋아지는 것은 아니므로 굳이 1.3배 보다 크게 하려고 애쓸 필요는 없다. 응착 마모는 재료의 상호작용의 중요한 요소로 작용하는 마모기구이다. 응착은 Van der wals 힘과 1nm 정도 의 거리에서 작용하는 강한 표면력에 의해 나타나는데 그 종류는 Fig. 2.11과 같다. 응착의 원인이 되는 힘의 종류에서 알 수 있듯이 금속의 표면이 산화막에 덮여 있지 않으면 응착이 더욱 잘 일어난다.

따라서 응착 마모는 진공 중에서 잘 일어나며 재료의 특징이 중요하게 작용하는 마모기구이다. 응착마모는 응착이 일어난 부분에서 전단 등에 의한 파괴가 일어나면서 재료가 옮겨 붙거나 마모 부스러기가 생겨 일어난다. Fig. 2.10은 응착마모가 일어난 표면이다. 부식마모(tribo-chemical wear)는 앞서의 3가지 마모기구가 고체의 접촉에 의해서 나타나는 것인데 비해 주위 환경, 즉 분위기가 제 3의 요소로서 적용한다는 점이 다르다. Fig. 2.12는 이러한 예를 보여주고 있으며 일반적으로 2개의 접촉면이 먼저 주위 분위기와 반응하여 산화물, 염화물 등의 반응 생성물이 표면에 생기고 이들이 서로 접촉하면서 반응층이 깨져나가고 마모 부스러기가 생기며 새로운 표면이 나타나면서 위의 과정이 반복되어 일어난다. 마모기구 가운데서 가장 복잡한 형상이며 시험도 어려울 뿐 아니라 시험 결과의 해석도 쉽지 않다.

Table 2.3 The friction process according to friction mechanism

	마 모 과 정		
	마모물체 및 마모면	이동	변화
표면피로	피로	파괴	균열, 공식(pits)
연삭	변형	파괴	금한 자국, 패인자국, 줄무늬모양 패인자국
응착	변형	파괴 (Transfer fracture)	원추모양(cone), 얇은 조각(flakes), 공식(pits)
부식	변형	파괴 (Adsorption fracture)	반응생성물(얇은 막, 부스러기)

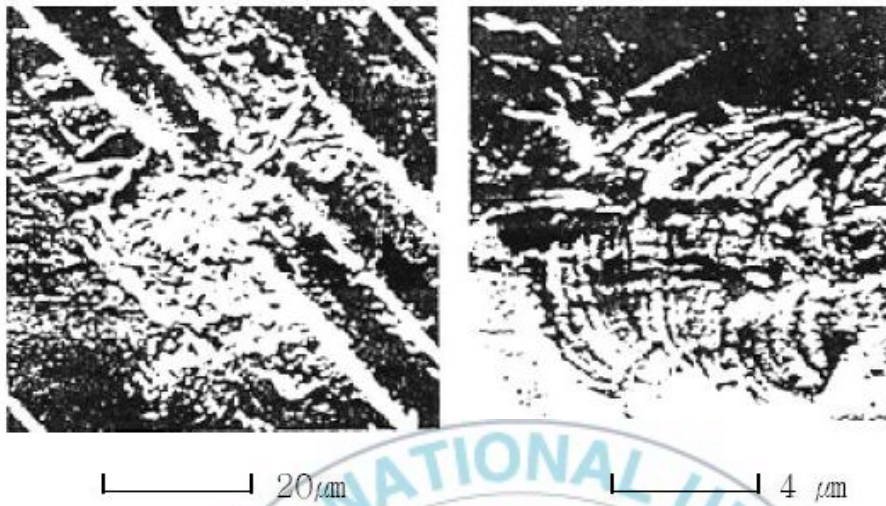


Fig. 2.6 The surface fatigue and friction surface



Fig. 2.7 The abrasive wear shape

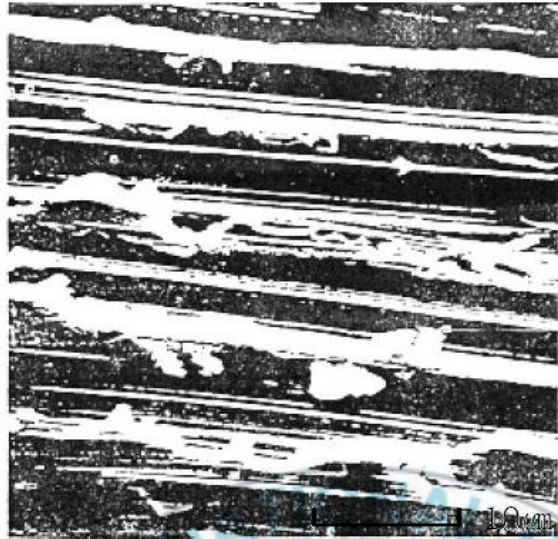


Fig. 2.8 The friction track by grinding friction



Fig. 2.9 The friction quantity with grinding material hardness

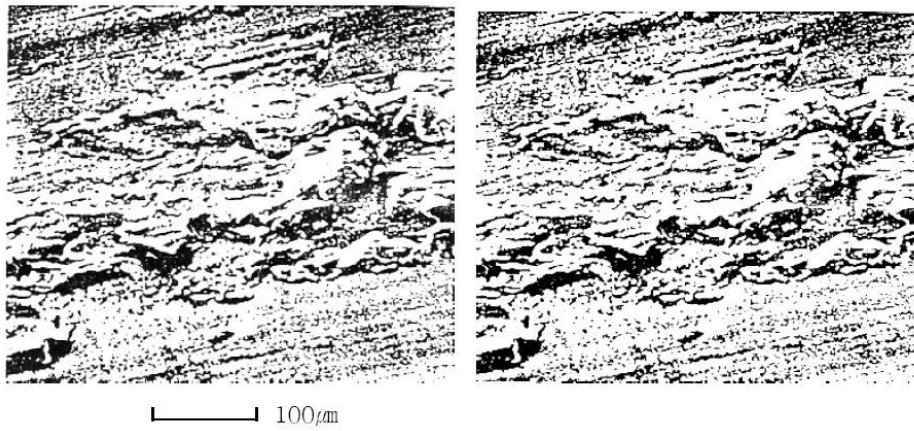


Fig. 2.10 The surface of adhesion wear



Fig. 2.11 The surface bonding force in adhesion state

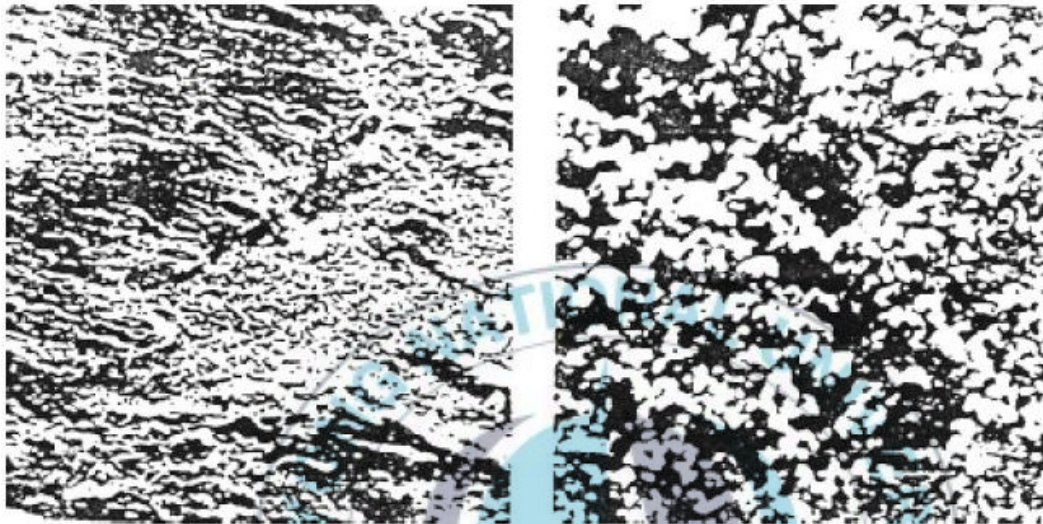


Fig. 2.12 The surface of tribo-chemical wear

2.5 윤활기구

윤활의 목적은 두 접촉 표면을 기름 등의 얇은 막으로 떼어 놓아 잘 미끄러지게 하는 것으로서 윤활의 양상에는 3가지가 있다. Fig. 2.13은 Stribeck 곡선으로서 마찰계수가 윤활조건에 따라 크게 바뀌는 것을 알 수 있으며 대략 3영역으로 나뉘어 질 수 있다. 즉 경계윤활, 혼합윤활, 유체윤활의 3영역으로서 이들의 윤활 조건에 따른 특성은 표 2.4와 같으며 비교를 위하여 건조 마찰의 경우를 추가하였다. 표에서 알 수 있듯이 유체윤활 상태에서는 두 접촉면이 유체의 얇은 막에 의해 완전히 분리되어 있으므로 마모는 거의 일어나지 않으며 따라서 이 조건은 윤활유의 특성을 평가하는데 자주 사용되는 조건이다. 즉 하중을 작게 하고 속도를 빠르게 하고 점도를 크게 하면 이러한 조건이 된다. 이 조건에서 마모시험을 하면 쓸모없는 결과만을 얻게 되므로 주의하여야 한다. 참고로 유체윤활 조건에서의 파손은 마모기구와 달리 피로, cavitation, 침식 등으로 나타나며, 나타나는 확률은 위의 순서대로 이다. 유체 윤활조건에서 하중이 커지거나, 윤활의 점도가 떨어지거나, 회전 속도가 느려지면 혼합 윤활조건이 되며 이때는 윤활막의 두께가 얇아져서 두 물체 표면의 돌출부가 부분적으로 닿기 시작하여 하중의 일부는 유체에 의해, 그리고 나머지는 돌출부의 접촉에 의해 받쳐지는 상태가 된다. 이때부터 부분적으로 마모가 일어나기 시작한다. 이 윤활 조건은 이론적으로 가장 발달이 더딘 분야이며, 지금까지 해결이 안된 어려운 문제들이 대부분 이 조건에 속한다.

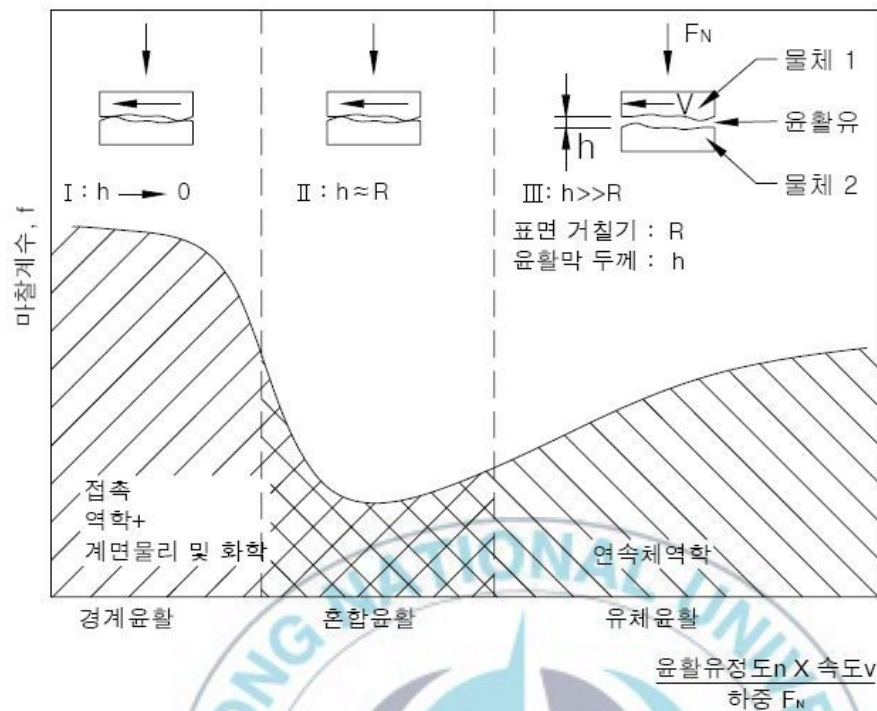
경계윤활 상태에서는 두 물체 표면의 돌출부가 본격적으로 닿기 시작하여 유체의 막 두께가 표면 거칠기보다 작은 상태이다. 마모가 문제가 되는 경우는 대부분 이 윤활상태에 속한다. 따라서 마모시험을 할 때는 시험 목적에 따라서 혹은 모의시험의 대상이 되는 시스템의 윤활조건에 따라서 주의 깊게 윤활조건을 설정 하여야 한다.

Table 2.3 The characteristics by lubrication conditions

	건조마찰	경계윤활(Ⅰ)	혼합윤활(Ⅱ)	유체윤활(Ⅲ)
윤활조건	건조표면	표면에 응집력으로 붙어 있는 얇은 기체나 액체막	부분윤활, (Ⅰ + Ⅱ)의 형태	완전 유체윤활
점도의 영향	없음	없음	부분적 영향	결정적 영향
접촉과정의	돌출부의	돌출부의 역학적 접촉	(Ⅰ + Ⅱ)의 형태	동수압적 또는 정수압적
특징	유착			접촉
마찰계수	$0.3 < f$	$0.1 < f < 0.3$	$0.005 < f < 0.1$	$f \leq 0.005 \sim 0.01$
유막두께(h)*	—	$5 \times 10^{-9} \sim 10^{-8} \text{m}$	$10^{-8} \sim 10^{-6} \text{m}$	$10^{-7} \sim 10^{-6} \text{m}$
유막계수(λ)**	—	$\lambda < 1$	$1 < \lambda < 4$	$1 < \lambda < 10$

* 유막두께 $h = (\eta \times v) / FN$ η : 윤활유 점도, v : 속도, FN : 하중 (Hertz 압)

** 유막계수 $\lambda = h / \lambda = h / \sqrt{R_1^2 + R_2^2}$, R_1, R_2 : 접촉면의 표면 거칠기



- I: 경계윤활(boundary lubrication)
 II: 혼합윤활(Mixed lubrication)
 III: 유체윤활(Hydrodynamic lubrication, 혹은 elastohydrodynamic Lubrication, EHD)

Fig. 2.13 Stribeck curve according to lubrication thickness vs. surface roughness

Fig. 2.14는 윤활현상을 보다 이해하기 쉽게 수상스키에 비유하여 그린 것으로서 탄성유체 윤활영역과 완전 유체 윤활영역이 구분되어 있는 것이 다르며 마찰계수의 변화와 유막의 변화가 (속도/압력)의 함수로 그려져 있다. 속도 및 하중은 유체윤활 조건을 기준으로 나타내었으며 이 그림으로 부터 몸무게가 가벼운 사람이 빠른 속도로 수상스키를 하면 유체윤활조건에 가장 가깝게 됨을 알 수 있다.

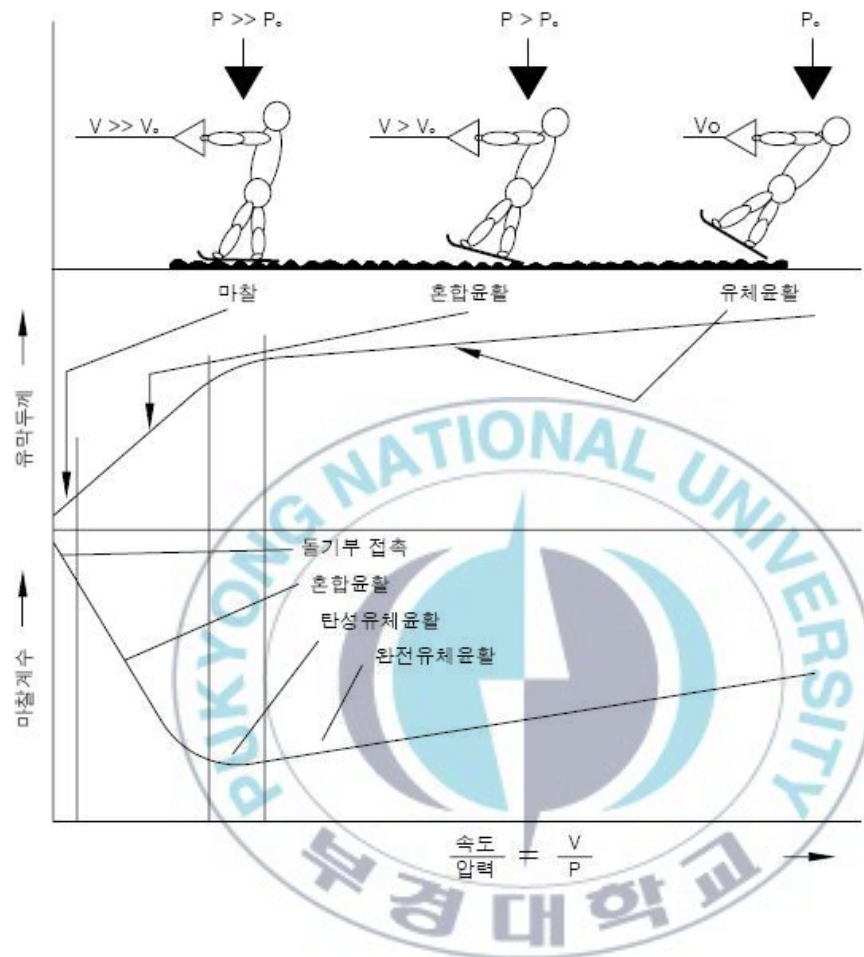


Fig. 2.14 The variation of lubrication condition by speed/pressure

2.6 마모시험의 목적

재료시험을 하는 목적은 재료의 특성을 알아내고 평가하는데 있다. 이러한 관점에서 볼 때 마모시험의 목적은 재료의 내마모성을 평가하는 것이라고 볼 수 있다. 그러나 마모시험은 또 다른 특성을 내포하고 있는데 그것은 모의시험이다. 이것도 또한 내마모 특성이 재료의 고유한 성질이 아니라는 데서 나타나는 특성이다. 즉 주어진 윤활 조건에서의 모의시험을 통해 가장 좋은 재료를 고르거나 주어진 재료에 적합한 가장 좋은 윤활방법을 찾는 것이 모의시험의 목적이다. 따라서 재료의 내마모성을 향상시키는 연구의 경우에는 일반적으로 적용 가능한 시험 결과를 얻을 수 있는 비교적 간단한 시험장치가 요구되나 모의시험이 목적인 경우에는 시험결과의 신뢰도가 중요한 요소로 등장하게 된다. 모의시험이 필요하게 된 이유는 마모가 비교적 긴 시간에 걸쳐 일어나는 현상이므로 모든 시험조건에 따른 결과를 얻으려면 오랜 시간이 걸리거나 모의시험의 대상이 압연기 등의 비싼 중장비 부품이어서 실물시험이 불가능하기 때문이다. 따라서 모의시험에서 중요한 요소는 모의 시험 결과가 과연 실제상황과 비슷하게 실시되었으나 이고 또한 얼마나 짧은 시간에 효과적으로 시험결과를 얻을 수 있는가 이다.

실제상황과 얼마나 비슷하게 시험이 이루어졌는가를 판단하는 기준은 마모면의 마모흔적 관찰을 통한 마모 기구의 비교결과와 마모 부스러기 형상의 비교결과이다. 이 두 가지 결과가 실제상황과 같으면 모의시험은 성공적이라고 볼 수 있다.

모의시험의 또 다른 목적인 가속시험은 실제 상황보다 열악한 조건, 즉 고하중, 고속 등의 조건에서 시험하여 마모가 빨리 일어나도록 하는 것인데 이때는 가속시험 조건에 따라 마모기구가 변하지 않도록 주의하여야 한다. 즉 속도가 빨라지면 경계윤활에서 유체윤활로 바뀔 수도 있으며 하중이 커짐에 따라 접촉면에서 발생하는 열이 커져서 온도에 의한 영향이 커질 수도 있는 것이다. 이러한 마모시험의 특성 때문에 “마모시험은 이렇게 하는 것이다.”로 간단히 끝나지 않고 새로운 마

모시험 장치를 고안하기도 해야 되고 끊임없는 개선이 요구되며 계속적인 사고와 시험 설계가 필요한 특이한 분야로서 이것이 다른 재료 시험법과 다른 점이다.

2.7 마모시험에 영향을 미치는 요인

지금까지 살펴 본 바와 같이 마모시험은 마찰, 마모, 윤활이 복합적으로 작용하는 시험이어서 그 시험이 간단하지 않음을 알았다. 따라서 마모시험에 영향을 주는 요인도 여러 가지이며 이들을 간단히 나누어 보면 아래와 같다.

- (1) 재료특성: 재료의 성분, 평균 입경(grain size), 탄성계수, 열전도도, 가공경화 특성, 경도 등
- (2) 시험방법 및 시편: 시편의 모양, 하중, 움직임의 종류, 표면 거칠기, 진동, 왕복 및 회전주기 등
- (3) 분위기: 온도, 습도, 분위기(불활성 가스, 진공, 산소분위기 등), 청정도 등
- (4) 윤활방법: 윤활제의 종류, 윤활유 안정도, 윤활조건 등

이들 요인 가운데 재료의 특성은 재료를 선정함으로서 결정되는 요인이고 나머지 요인들이 마모시험과 직접적으로 관련이 있는 요인들이다. 이 요인들이 마모시험과 어떤 관계가 있는지 보여 주고 있는 것이 Fig. 2.15이다. 이 그림에서 움직임의 종류는 시험방법에서의 상대운동이 어떤 종류인가를 나타내는 것으로서 여기에는 기본적으로 4가지의 움직임이 있으며 Fig. 2.16은 이를 보여 주고 있다. 이 4가지 움직임에 시간 t 의 변수를 곱하면 각 움직임마다 다음의 4가지 방법이 더 나타난다.



Fig. 2. 15 Factors of friction test

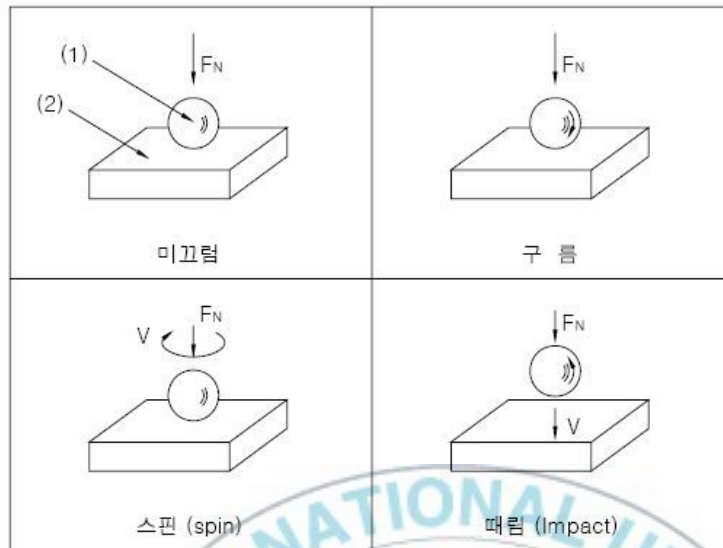


Fig. 2.16 4 fundamental motion of relative motion

- (1) 연속운동(Continuous)
- (2) 진동운동(Oscillating)
- (3) 왕복운동(Reciprocation)
- (4) 단속운동(Intermittent)

따라서 마모시험은 위의 조건들이 결합되는데 따라 갖가지 방법이 있을 수 있음을 알 수 있다. 미국 윤활 학회(ASLE)에서 조사한 결과 시험 방법의 종류가 230여 가지 이상이 되는 것도 무리가 아닌 것이다. 시험편들의 조합 및 운동방법 가운데 대표적인 것들을 간략히 그림으로 나타낸 것이 Fig. 2.17이다.

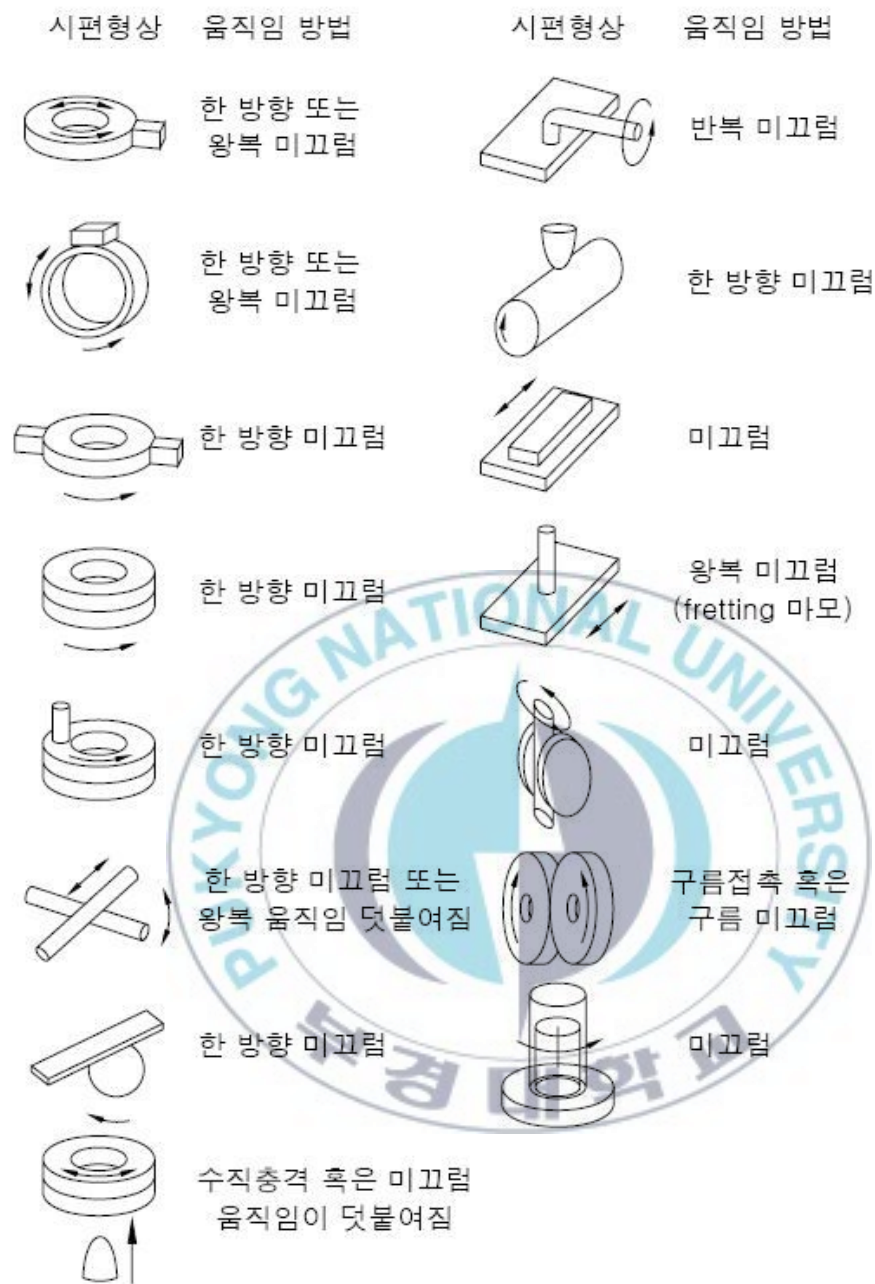


Fig. 2.17 Various kinds of wear test with specimen shape and motion

이 그림을 보면 유체에 의한 마모, 즉 침식(erosion)이나 공식(cavitations)이 포함되어 있지 않는 것을 알 수 있다. 실제로 이들은 고체와 고체의 접촉에 의한 마모시험보다 훨씬 더 시험하기가 어려우며 앞서 밝혔듯이 본 마모시험에서는 포함시키지 않기로 했다. 마모시험 방법의 분류는 Fig. 2.16의 움직임의 종류에 따른 것으로서 마모시험기에 따라 그 특성이 다 다르다.

2.7.1 온도

온도는 마찰과 마모에 영향을 미치는 요인들 가운데서 가장 중요한 것이다. 온도에는 두 가지가 있는데 주위온도와 접촉면 사이에서의 온도이다. 실제로 중요한 것은 접촉면 사이의 온도로서 이온도는 측정하기도 어려울 뿐더러 지금까지도 만족스러운 측정방법이 개발되지 않았다. 아래의 식은 접촉면의 온도를 나타낸 것으로서 이로부터 접촉면 사이의 온도가 무엇의 영향을 받는지 알 수 있다.

$$TS \propto (f P v / A K + T_a)$$

여기서, TS : 접촉면 사이의 온도, v : 속도, f : 마찰계수, T_a : 주위온도, P : 하중, A : 면적, G : 열전달 함수, K : 열전도도

위 식에서 또 다른 고려점은 두 개의 접촉하는 시편의 모양이 대칭이고 같은 재료이면 양쪽으로 같은 양의 열이 흘러나가나 모양이 대칭이라도 재료가 달라서 열전도도가 다르면 온도분포가 다르게 된다는 점이다. 더구나 시편의 형상이 다른 경우, 즉 편과 원판 시험 같은 경우는 원판의 크기에 따라서 시험결과가 달라질 수가 있는데 그 이유는 편이 닳지 않는 동안 원판의 마모궤도 부분의 온도가 내려가고 그런 다음에 다시 편에 닿게 되어 온도의 반복적인 상승-하강을 겪는데 온도변화 크기가 원판회전 속도 가 일정하다면 원판의 크기에 따라 결정되기 때문

이다. 따라서 시험을 할 때는 시험의 대상이 되는 윤활시스템을 주의 깊게 훑내 내어 실험하여야 한다.

그리고 접촉면의 평균속도는 접촉부분에 열전대를 가까이 대어서 알 수도 있으나 실제 접촉하고 있는 돌출부의 온도는 매우 높은 온도까지 이르게 되며 마모과편을 분석해 보면 실제로 녹는점 이상으로 오르는 것으로 알려져 있다. 표면의 온도가 상승하면 나타날 수 있는 재료 및 윤활상의 현상은 다음의 것들이 있다.

- (1) 재료가 더 연해지고 이 결과 연삭마모가 증가되며 골링(galling)이 더 잘 일어나고 표면의 피막이 쉽게 깨져 떨어진다.
- (2) 윤활제와 주위 분위기와 반응이 더 잘 일어나게 되어 표면피막이 두꺼워지며 윤활제의 특성에 따라 마모가 더 증가하거나 줄어든다.
- (3) 윤활제의 점도가 떨어지며 윤활막이 얇아지게 되며 돌출부의 접촉이 더 쉽게 되면서 마모가 촉진 된다.
- (4) 온도가 어느 정도 이상이 되면 윤활제가 기능을 못하게 되면서 마모가 급격히 증가한다.

2.7.2 하중

하중도 온도와 마찬가지로 마모에 영향을 미치는 중요한 요인이다. 하중이 시험에 미치는 영향은 다음과 같다.

- (가) 표면의 온도에 직접적으로 영향을 미치며 그 결과 앞서서와 같이 온도상승 때 나타나는 효과를 가져 올 수 있다.
- (나) 하중이 증가하면 참 접촉 면적이 증가하며 이 결과 마모량이 늘어나게 된다.
- (다) 하중이 증가하면 윤활막의 두께가 줄어들고 돌출부의 접촉이 더 많이 일어나게 되며 이결과 마모량이 늘어난다.

대부분의 마모시험은 비교적 낮은 하중에서 이루어진다. 그 이유는 하중을 크게 하려면 시험기가 더 튼튼해야 되고 보다 더 큰 구동력이 필요하게 되기 때문이다. 따라서 대부분의 마모와 관련된 이론은 가벼운 하중에서 얻은 시험결과를 바탕으로 한 것이다.

마모시험에서 실제의 무거운 하중을 가할 수 있으면 접촉응력과 접촉면의 온도가 비슷한 조건에서는 시험의 흉내 내기 정도는 만족할 만하나 한 가지 고려해야 될 요소가 있다. 즉 산화막 같은 표면피막이 나타나므로 주의해야 된다. 이 이유는 확실히 알려지지 않았으나 하중이 커지면 정렬(alignment)이 어렵게 되기 때문이 아닌가 추측된다. Fig. 2.18은 하중에 따라 마모율이 비례적으로 증가하지 않고 급격히 늘었다 줄었다 하는 양상을 보여주고 있다.

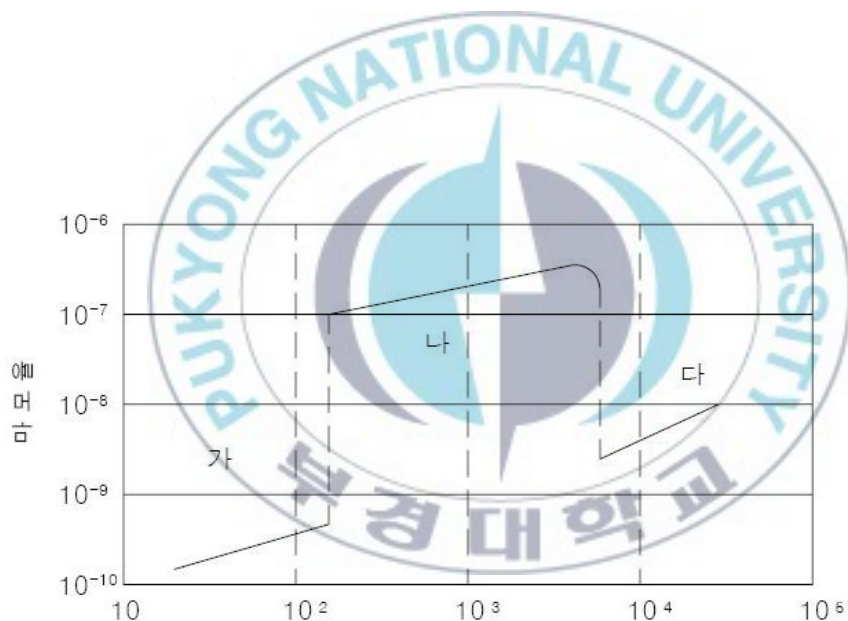


Fig. 2.18 Wear rate according to load variation

2.7.3 속도

속도는 하중과 마찬가지로 표면온도와 윤활막의 두께에 영향을 미친다. 속도를 비슷하게 흉내 내는 것은 어렵지 않으므로 큰 문제가 없으나 문제는 고하중, 고속의 조건에서 나타난다. 즉 시험시간을 줄이 기 위하여 가속시험을 할 때 시험조건이 고속, 고하중이 되기 쉬운데, 이때 윤활조건이 실제상황과 같은 조건이 되도록 주의해야 한다. Fig. 2.19는 속도에 따라 마찰계수가 변하는 것을 보여주고 있다.



Fig. 2.19 Wear rate according to speed variation

2.7.4 시간

시간은 직접적으로 시편이 움직인 거리와 관계가 있으며 시험기간의 설정에 있어서 주의해야 될 점이 두 가지가 있다. 일반적으로 마모율은 시간에 비례하는 것으로 알려져 있으나 특별한 형상의 시편의 경우에는 마모가 진행됨에 따라 접촉면적이 증가하여 이에 따른 현상, 즉 마모율의 감소 등의 현상이 일어 날 수 있다. 또한 마모에 있어서 피로가 중

요한 작용을 하므로 동일한 시간 동안 동일한 거리 만 큼 움직였다 하더라도 시편의 크기(예: 편과 원판에서 원판의 크기)가 작으면 반복하중의 횟수가 크므로 피로의 영향을 더 많이 받게 된다는 점을 고려해야 한다. 그리고 다른 하나의 요소는 대부분의 마모 시험은 실제 상황과 비슷하게 해서 시험하면 시간이 오래 걸리므로 짧은 시간 안에 끝내기 위해서 가속시험을 하게 되는데 가속시험을 위해 하중과 속도를 크게 늘리는 것이 일반적이다. 그렇게 되면 실제 마모상황에서는 표면에서의 마모가 일어나는데, 시험상으로는 표면층 내부에서 손상이 일어나게 되는 수가 있다. 즉 마모의 양상이 전혀 다르게 됨으로 급격한 마모파손(scuffing 혹은 seizure)이 일어나게 된다. 따라서 가속 시험 때는 마모 양상이 변하지 않는 범위 내에서만 하중과 속도를 조절하여 무리하게 시간을 단축시키지 않도록 해야 한다.

위와 같은 문제를 극복하는 방법으로는 시험적으로 마모상황과 비슷한 조건에서 장시간 시험하여 마모 율-시간관계 곡선을 구한 다음 마모 율이 시간에 비례하여 일정하게 증가하는 영역에 이르는 시간을 알아내어 이 시간만큼 시험하는 방법이 있다.

2.7.5 표면특성

앞서 간단히 밝혔듯이 마모율은 겉보기 접촉면적의 영향을 크게 받지 않고 참접촉 면적에 비례한다. 참 접촉 면적은 하중과 경도에 관계가 있는데 다음 식과 같다.

$$Ar = \frac{P}{V}$$

여기서, Ar : 참 접촉 면적, P : 하중, V : 압입경도

그러나 하중이 높아지면 Ar 은 겉보기 접촉면적과 같게 되고 마찰계수

도 감소하므로 주의해야 된다. 그리고 결보기 접촉 면적이 커지면 마모 부스러기들의 영향이 점점 더 커지게 된다. 그 이유는 마모 부스러기들이 더 많이 두 물체의 표면 사이에 끼이게 되기 때문이다. 결보기 면적이 작아지면 유체윤활이 작용하는 면적이 같이 작아져서 마모율이 증가한다. 초기의 마모, 마찰에 대한 연구에 있어서는 표면 끝마무리, 즉 거칠기 등이 매우 중요한 요소로 인식 되었으나 실험결과 그렇게 중요한 요소는 아닌 것으로 밝혀졌다. 그러나 시험조건에 따라서는 중요하게 작용할 경우도 있다. 즉 두 접촉재료의 경도차이가 클 경우가 하나이며 또 다른 경우는 윤활의 경우로서 거칠기가 클수록 경계윤활의 가능성이 커진다. 또한 시험하면서 거칠기가 변하여 윤활조건이 바뀌면서 시험결과에 영향을 줄 수도 있다. 경계윤활 조건에서 시험하다가 마찰 계수가 0.05이하로 떨어지면 윤활조건이 바뀌었을 가능성이 있으므로 주의하여야 한다.

그리고 최근 들어 표면과학이 발달하면서 마모결과에 미치는 표면특성, 특히 표면층의 미세구조나 화학물 등의 영향에 대한 연구가 활발히 이루어졌다. 이 결과 진공중이나 산화분위기, 혹은 습기가 있는 분위기 등에서는 표면특성이 크게 바뀌어 시험결과에 큰 영향을 미치는 것이 밝혀졌다. Fig. 2.20은 표면층의 구조를 나타내고 있다.

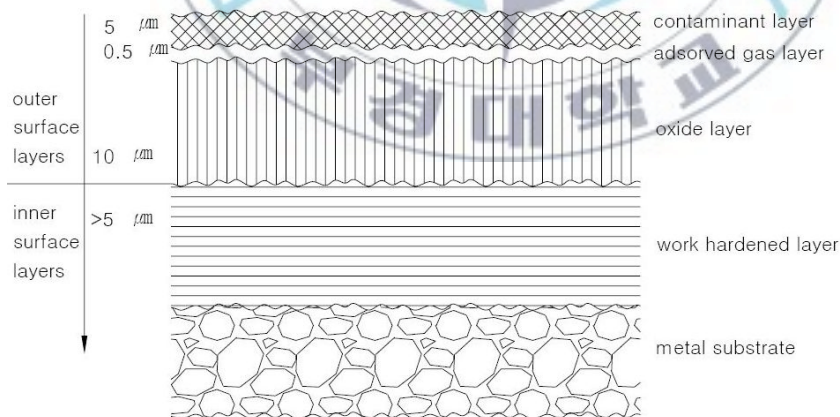


Fig. 2.20 Cross-section of materials surface

2.7.6 분위기

마모시험에 있어서 분위기가 중요한 요인인 것으로 밝혀진 것은 최근에 들어서이다. 공기층의 습기도 시험결과에 많은 영향을 미치므로 습기에 예민한 재료를 시험 할 때는 주의 하여야 하며 시험기 및 시험기 부품들을 깨끗이 유지하여야 한다. Fig. 2.21은 1.5% Mn강의 마모시험결과에 미치는 습도의 영향을 잘 보여주고 있다. 특히 산소의 영향은 매우 큰 것으로 나타나고 있으며 불활성 분위기나 진공 중에서의 시험결과는 공기 중에서의 시험결과와 매우 다른데다 마모기구도 다르다. 시험은 실제상황과 비슷한 분위기에서 수행하여야 하며 우주공간 모의 시험 같은 경우에는 초고진공에서 시험을 하여야 한다.



Fig. 2.21 Influence of humidity on wear ratio

2.7.7 윤활

윤활은 앞서 설명하였듯이 3가지 경우로 나눌 수 있다. 즉 유체윤활, 혼합윤활, 경계윤활로서 유체윤활을 증진시키게 되는 요인으로서는 속도 증가, 면적증가, 윤활제 점도증가, 하중감소, 거칠기 감소 등이다.

탄성유체윤활은 완전 유체윤활과 비슷하나 표면에서의 탄성변형이 같

이 고려된 경우로서 점접촉이나 선접촉의 경우에 나타나며, 특히 구름 베어링, 기어의 톱니바퀴 등과 같이 접촉부에서 고압이 발생 되는 경우 나타난다. 완전유체윤활과 비슷하나 재료의 탄성계수와 항복강도가 부가적인 요인으로 작용 한다.

경계윤활은 유체 윤활막이 있어 두 접촉면의 돌출부가 서로 닿을 정도로 얇을 경우에 나타나는 것으로서 윤활제의 점도보다도 윤활제의 고리길이, 표면에의 흡착에너지, 극압첨가제 등이 윤활상태에 영향을 미친다. 미끄럼 특성이 단지 1~2층의 분자 층에 의해서 크게 바뀌게 되므로 시험을 할 때 극히 조심 하여야 한다. 또한 온도변화에도 민감하므로 온도를 상온으로 유지하도록 주의하여야 한다.

경계윤활이나 유체, 혹은 탄성유체 윤활조건을 마모시험 동안 일정하게 유지하여야 시험 결과를 해석 할 수 있다. 혼합윤활 조건에서는 시험결과의 해석이 어려우며 실제상황이 이러하여 이 조건에서 시험해야 되는 경우를 빼고는 안하는 것이 좋다.

유체로 된 윤활제와 달리 고체로 된 윤활제가 사용될 경우도 있는데, 고체 윤활제가 마찰계수에 미치는 영향은 일반적으로 Fig. 2.22와 같다. 그림의 영역(가)에서는 표면 미끄럼이 일어나고 영역(나)에서는 윤활막의 전단이 일어나는 부분이다. 영역 (가)에서는 온도가 증가함에 따라 고체 윤활제의 강도가 떨어지나 접촉 면적이 증가하므로 마찰계수가 일정하다. (마찰계수 $f = Ar \cdot S/P$, 여기서 S 는 고체 윤활의 전단강도, P 는 하중, Ar 은 접촉면적) 그러나 어느 임계온도가 되면 재료가 연화되어 Ar 은 겉보기 접촉면적 Ao 와 같게 된다. 이 때문에 마찰계수가 갑자기 증가한다. 그러나 이때부터는 접촉 면적이 일정하므로 온도가 상승함에 따라 S 가 줄어들면서 f 도 작아진다. 고체 윤활제는 유체윤활과 특성이 많이 다르며 유체 윤활제보다 수명이 짧으므로 주의해야 한다. 윤활제의 선택은 흥내내는 대상의 윤활제에 따라 결정되며 고체 윤활제는 유체 윤활제 사용이 불가능한 경우, 즉 진공이나 고온에서 사용된다.

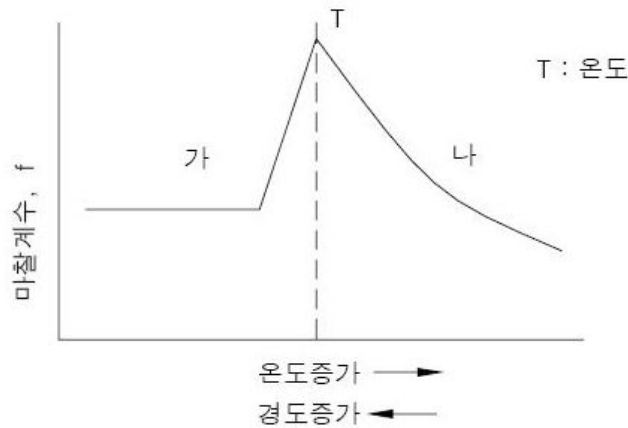


Fig. 2.22 Property of solid lubrication material

2.7.8 기 타

기타 요소로는 진동과 재료의 특성을 들 수 있다. 진동은 재료시험 때 대개 고려되지 않는 요소이나 시험결과에 영향을 미칠 수 있으므로 진동의 영향을 연구하는 목적이 아니면 될 수 있는 대로 진동을 배제하여야 한다. 재료의 특성이 중요하다는 것은 말하지 않아도 되나 지금까지 윤활분야에서의 연구에서는 재료 특성이 별로 고려되지 않았었다. 특히 재료의 표면특성이 시험조건이 바뀔에 따라 같이 변하므로 이 영향은 매우 크다. 윤활유에는 일반적으로 첨가제가 들어있으며 이에 따라 윤활유 특성이 크게 바뀐다. 따라서 첨가제의 영향을 연구하는 것이 목적이 아니면 윤활유로서 대개 첨가제가 섞이지 않은 광유(mineral oil)를 사용한다.

2.8 마모시험

마모시험은 필요에 따라 여러 가지 모양으로 설계되어 사용되었기 때문에 종류가 무척 많다.

2.8.1 구와 구

구와 구의 조합에 의한 마모시험은 4개의 구를 이용하는 시험이 대표적인 것이다. Fig. 2.23은 4구 시험기의 개략도로서 밑에 있는 3개의 구가 위의 1개의 구를 받쳐주고 있는 모양이다. 이 시험기는 본래 윤활유의 특성 평가에 많이 쓰이는 것으로서 위의 구는 회전하고 밑의 3개의 구는 회전하지 않고 고정되어 있는 형식이 대부분이다. 따라서 이 경우는 시험기간이 길지 않으나 마모시험에는 적용하기 어렵고 윤활유의 극압성 등을 평가하는데 많이 쓰인다. 영국의 국립공학 연구소(NEL)에서는 이 시험기를 조금 변형하여 밑의 3개의 구도 회전이 가능하도록 하였다. 위의 구는 베어링의 내륜, 3개의 구는 베어링의 구, 그리고 3개의 구를 받치는 부분이 베어링의 외륜을 흉내 낸 것 과 같이 되어 베어링의 마모 연구에 활용 될 수 있다.

이 시험기의 장점은 시험기의 구동부나 하중 장치 등은 그대로 두고 시험편의 모양이나 조합을 여러 가지로 바꾸어도 시험이 가능하다는데 있다. 마모량은 밑의 3개의 구가 고정되어 있는 경우, 하중이 50kg 이하로서는 낮은 경우의 시험에서는 일정 기간 동안의 시험이 끝난 다음에 3개의 구 표면에 생긴 마모 흔적(wear scar)의 직경으로 결정한다.

하중이 800kg까지 가해지는 경우는 윤활유의 극압성을 평가하는 것이 주목적으로서 하중을 증가시켜 가면서 시험을 하는데 10초 동안 회전시켜 강구 사이에 용접이 일어나는지 여부를 보고 용접이 일어나지 않는 최대하중을 판단의 기준으로 잡는다. 3개의 구도 같이 회전하는 경우에는 진동 측정 장치를 부착하여 구를 접촉 피로에 의해 구의 표면에

pitting 등의 손상이 생겨 진동이 커질 때 시험이 중단 되도록 되어 있어 시험이 끝날 때까지의 시간이 나 회전수 등을 마모량으로 측정한다.

하중은 지렛대 방식이나 유압식으로 가하여 로드셀로 교정을 하여야 한다. 마찰력은 용수철을 이용 하거나 스트레인 게이지를 이용하여 측정하고 토크셀을 3개의 고정된 구의 아래 축에 설치하여 마찰력을 측정하는 방법도 있다.



Fig. 2.23 Four circle test

2.8.2 직교 원주

이 시험은 Fig. 2.24에서 보듯이 한 원주는 회전하고 그 위에 직각 방향으로 다른 원주가 눌러져 있는 모양으로서 매우 간단한 장치이며 여러 가지 장점이 많다. 즉 원주의 직경도 임의로 바꿀 수 있고 두 개의 원주의 크기가 달라도 되며 온도 조절도 원주 내부에 열선을 넣거나 냉각수를 흘려보냄으로써 가능하고 고하중, 회전속도, 분위기 조절이 쉽다는 점이다. 이 시험장치의 가장 큰 장점은 한쪽의 원주를 시험하면서 기둥방향으로 조금씩 이동시키면 마모되지 않은 면이 항상 닿게 되므로 표면 거칠기의 영향을 연구할 수 있다는 점이다.

마찰력은 스트레인 게이지를 시험편에 부착하여 측정하며 마모량은 마

모 깊이를 제어 마모부피를 계산, 마모거리의 함수로 나타내거나 주어진 시간 동안의 무게감소로 나타낸다.

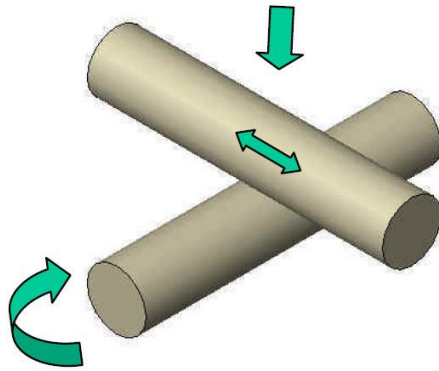


Fig. 2.24 Cross-column test

2.8.3 편과 평판

이 종류의 시험기는 크게 편이 움직이는 경우, 평판이 움직이는 경우, 접촉면이 2곳 이상인 경우의 3가지로 나눌 수 있다.

(1) 편이 움직이는 경우

이 시험기는 주로 마찰력을 측정하여 마찰계수를 계산하는데 많이 활용되고 있으며 그 모양은 Fig. 2.25와 같다. 마찰력은 편이나 편을 잡고 있는 막대에 스트레인 게이지를 붙여서 측정하며 편 모양은 대부분 끝이 반구 모양이나 전단된 상태로 쓰이는 경우도 있다. 편이 시편인 경우도 있으나 대부분 평판이 시편으로서 평판에 입힌 얇은막의 특성을 평가하거나 평판의 내마모성을 높이기 위한 표면처리를 한 다음에 표면 처리된 층의 특성을 평가하는데 많이 쓰인다. 이 경우는 편 끝이 전단된 상태이면 모서리가 날카로워서 신뢰성 있는 결과를 구할 수 없으므로 편 끝을 반구 모양으로 하거나 강구를 사용한다. 마찰력을 재는

것이 주목적이므로 왕복운동이 대부분이며 그 속도도 또한 수십 mm/s 정도 로 느린 편이다. 이 시험기는 진공이나 고온 등의 분위기에서 많이 쓰인 것으로 나타나있다.

(2) 평판이 움직이는 경우

평판이 움직이는 경우는 핀이 움직이는 경우와 큰 차이가 없으며 다만 시험기를 설계하는데 있어서 어느 쪽이 편리한가에 따라 결정되고 구동방식 만이 다를 뿐이다. 목적도 (1)과 비슷하며 시험조건에도 큰 차이가 없다. 핀과 평판이 조합된 시험 방법에서 평판이 항상 핀 아래에 있을 필요는 없으며 위에 있을 수도 있다. 이 경우에는 마모 부스러기가 마모 궤적(wear track)에 쌓이게 되지 않으므로 마모 부스러기의 영향을 배제할 수 있는 장점이 있다.

(3) 접촉면이 여럿인 경우

이 시험기도 근본적으로 미끄럼 시험이라는 데서 (1), (2)의 시험기와 차이가 없으나 다만 접촉면이 2곳 이상이라는 것이 다르다. 즉 핀이 3개가 있는 것이 대부분으로서 이렇게 설계한 가장 큰 이유는 3개의 받침점에 의해 하중이 받쳐지게 되므로 핀이 한 개인 경우보다 안전하고 하중 을 가하는 것이 비교적 용이하다는 것 때문이다.

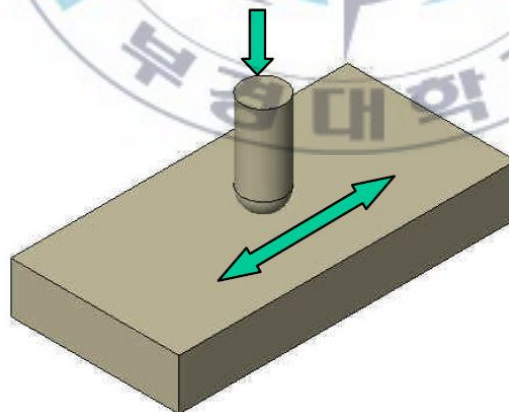


Fig. 2.25 Pin and flat test

2.8.4 평판과 평판

핀과 평판의 마모시험은 핀이나 구가 마모되면서 결과적으로 접촉부위의 형상이 변하여 평판모양이 되는 단점이 있다. 즉, 마모시험의 조건이 초기와 후기가 다르게 되어 시험결과의 해석이나 재현성이 어렵게 된다. 이러한 단점을 극복할 수 있는 시험방법이 평판과 평판으로 조합된 시험이다.

평판시험은 접촉면적이 시험이 끝날 때까지 일정하다는 특징 때문에 마찰계수의 측정등과 같은 마찰과 관련된 시험에 많이 활용되며 또한 접촉면적이 넓으므로 고하중에서의 시험에도 적합하다.

2.8.5 핀과 원판(핀이 회전하는 경우)

핀과 원판은 미끄럼 마모 시험에서 널리 쓰이는 방법 가운데 하나이다. 여기에서는 원판이 고정되어 있고 핀이 회전하는 방식의 시험기로서 Fig. 2.26과 같다. 이 종류의 시험기는 거의 대부분 고체 윤활제의 특성평가 시험이 주목적이다. 우주공간에서는 액상의 윤활유를 쓸 수 없으므로 MoS_2 와 같은 고체 윤활제의 사용이 필수적인데 이러한 고체 윤활제의 우주공간에서의 윤활특성 평가 때문에 대부분의 시험이 진공 중에서 이루어졌다. 핀의 크기는 대부분 직경이 1/4인치 정도이고 핀은 하중을 가하는 것과 구동의 편의성을 위해 보통 3개이며 끝부분은 반구 모양으로 가공되어 있다. 하중은 0.1kg 같은 작은 데서 200kg 정도의 고하중까지 가해지고 회전속도도 3.3rpm에서 900rpm까지로 다양하다.

2.8.6 핀과 원판(원판이 회전하는 경우)

원판이 회전하는 시험기는 미끄럼 마모시험기 가운데 가장 널리 쓰이는 방식이다. 핀이 회전하는 경우는 핀이 보통 3개 있으나 원판이 회

전하는 경우는 대부분 핀이 한 개인 점이 다르다. 핀이 한 개이고 고정되어 있으므로 마찰력의 측정이 비교적 쉽고 구동방식도 핀을 회전시키는 것이 아니라 원판을 회전시키므로 쉽다. 시험목적도 다양하며 시험조건도 그에 따라 매우 넓은 범위에 걸쳐있다. 즉, 진공, 불활성 가스 분위기뿐만 아니라 고온 및 저온 분위기, 고속 및 저속회전 등도 포함되어 있다. 핀은 보통 1/4인치 직경의 것이 많이 쓰이고 끝 부분은 반구 모양으로 가공되어 있으며 원판의 직경은 보통 5~10cm이다. 핀 대신에 강구 나 원주가 쓰이기도 한다.

마모 특성 시험을 시작할 때 극미량의 하중을 가하는 시험에서는 전기 저항을 측정하여 어느 때 산화층의 막이 깨지는지 감지하기도 한다. 마모량의 측정은 핀과 원판이 각각 다른데 핀의 경우에는 끝이 반구 모양으로 가공된 시편이 마모되어 생기는 마모면의 원지름을 현미경으로 켰 다음 이 결과로부터 마모 된 부피를 계산하여 나타내고, 원판의 경우는 마모 궤적에서 4~6곳을 선정하여 표면 형상을 측정한 다음 그 평균 깊이와 원주 길이를 곱하여 마모 부피를 알아내어 나타낸다.



Fig. 2.26 Pin and negative plate test

2.8.7 원통과 원통 (면접촉)

이 시험기는 고정되어 있는 원통과 회전하는 원통으로 구성되어 있는 것이 대부분이며 필요할 때는 원통 대신에 원판으로 구성되기도 한다. 시험조건도 다양하며 마모량은 거의 대부분 줄어드는 무게로 나타난다. 원통의 직경은 보통 1인치 정도 이고 높이는 약 3/4인치 정도이다. Torque측정이 비교적 쉬우며 자동차 클러치 재료의 마모 특성 평가에 많이 쓰인다.

2.8.8 핀과 원판, 혹은 원통과 원통 (선접촉)

핀과 원판의 시험기가 핀이 원판의 회전축과 평행한대 비하여 이 시험기는 핀이 회전축에 수직한 방향으로 놓여 있으면서 원판의 옆면과 접촉하게 되어 있다. 이 시험기는 원판의 옆면에 핀이 닿으므로 원판이 윤활유가 반정도 담긴 상태에서의 시험이 가능하다. 다만 접촉면이 평면이 아닌 곡면이므로 핀의 마모면이 시험이 진행됨에 따라 곡면이 되는 특징이 있다. 핀의 종류로는 끝이 반구 모양이거나 평면인 것, 혹은 원통과 밀착되게 곡면으로 가공된 것이 있고 필요에 따라 구나 원추모양의 시편이 쓰인다.

시험조건은 넓은 범위에 걸쳐 있어 필요에 따라 결정되며 시험기의 회전축과 원판이 동심 축을 이루지 않으면 진동이 발생하므로 허용공차가 0.01mm 이내가 되도록 가공하여야 한다. 이 문제는 원판을 회전축에 붙인 다음에 연마하면 해결 가능하다. 마찰력은 회전축 중간에 토크셀을 붙이면 측정 가능하다. 원판의 두께 및 크기는 시험조건에 따라 결정되며 보통 1/2인치 두께에 5cm정도의 직경이다¹⁴⁾.

3. 재료 및 실험방법

본 실험은 피스톤과 밸브플레이트가 면 접촉을 이루고 있어 이를 가정하기 위하여 pin on disk 형태의 마모시험을 실시하였다. 실험 사용한 Pin 재료는 (주)포스코사의 에서 제조한 SACM645를 각종 열처리 방법을 달리하여 사용하였으며, disk 재료는 GCD500을 사용하였다. Table 1에 사용 소재의 화학성분을 나타내었다. Disk는 아무런 처리 없이 원소재를 사용하였으며, Pin은 모재, QT, 질화, 고주파, QT+질화, QT+고주파 및 QT+쇼트피닝 등 다양한 처리를 실시하여 총 7가지 시험편을 제작하였다. Table 2에 Pin의 각종 처리 조건을 나타내었다. 인장시험편은 KSB 0801규격에 맞게 제작하여 INSTRON 8516 만능재료시험기를 사용하여 cross hear speed 1mm/min의 속도로 실시하였으며, 경도는 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 측정하였다.

마모시험은 pin on disk형태로 실시하였으며, 회전수 400rpm, 총 마모거리 3km, 하중은 상온건조 상태 29MPa, 상온유회 및 고온 유회 상태에서는 98MPa로 실시하였다. 마모시험 500m마다 시험을 중지하고 정밀저울로 마모량을 측정하였다. 마모시험 조건은 아래와 같이 실시하였다.

- Dry분위기, 상온(25℃), 회전수 400rpm, 마모거리 3km, 하중 2.97kg
- Oil분위기, 상온(25℃), 회전수 400rpm, 마모거리 2km, 하중 2.97kg
- Oil분위기, 고온(100℃), 회전수 400rpm, 마모거리 3km, 하중 2.97kg

위의 3가지 조건으로 나누어 실험을 실시하고 위 실험의 조건에서 상대원판의 경우 dry한 분위기에서는 가능하였던 실험이 oil 분위기에서는 마모량이 발생하지 않아, 하중을 18kg까지 증가시켰지만, 마모량이 나타나지 않아 결국 실리콘카바이드연마지를 상대재로 이용하여 실험을 실시하였다. 실리콘카바이드연마지는 기존의 상대원판에 양면테이프를

이용하여 부착하였으며, 상대원판의 고정시키는 치구에 완전 밀착되어 실험 중 움직이거나 흔들리지 않도록 주의하였다.

마모시험에 사용한 오일은 베어링용 모빌 레이러스 424(Mobil Rarus 424) 제품을 이용하였으며, 한번 주입하는 오일의 양은 700ml~800ml 정도이다. 오일이 고온에 의하여 변색되었거나, 마모량이 많아서 오일에 마모된 입자들에 의하여 어느 정도 검게 보이면 오일을 교체하여 실험을 계속하였다. Fig. 3.1은 핀 형상, Fig. 3.2는 disk 형상, Fig. 3.3은 pin on disk 시험 개략도 및 Fig. 3.4는 마모 시험기를 각각 나타내고 있다.

마모시험 전 각 시험편의 표면 거칠기를 조사하여 Table 3에 나타내었다. 표면 거칠기는 한 시험편당 3회 실시하여 그 평균값으로 하였으며, 어느 정도의 산포는 존재하지만 Ra 0.72 μ m 이하로 나타나 우수한 표면 거칠기를 가지고 있었다. 하지만, 쇼트 피닝 시험편의 경우에는 쇼트 피팅 작업 때문에 표면 거칠기가 증가한 것을 알 수 있다.



Table 3.1 Chemical composition of used materials

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Fe
SACM645	0.43	0.32	0.34	0.08	1.48	0.19	0.17	1.11	Bal.
GC500	2.70	2.65	0.30	—	—	—	—	—	Bal.

Table 3.2 Each treatment conditions of SACM645

	Treatment condition
QT	900 °C Oil-Quenched, 650 °C 1hr Tempered
Nitriding	520 °C 60 hr, furnace cooling
Induction Hardening	850 °C 1 sec, air cooling
Shot Peening	steel ball 50 μm , shot press 0.4 MPa shot distance 150 mm, shot time 2 min

Table 3.3 The surface roughness of each specimen

Matrix	Nitriding	Induction hardening	QT	QT +Nitriding	QT +Induction hardening	QT +Shot peening
0.38 μm	0.72 μm	0.73 μm	0.26 μm	0.64 μm	0.31 μm	2.18 μm

(FCD 500 : 0.69 μm)

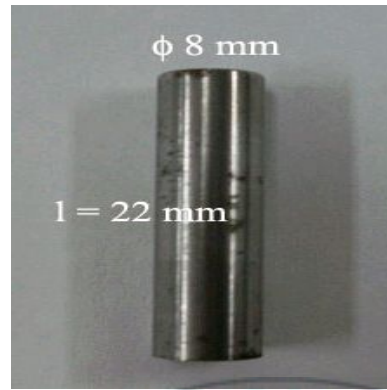


Fig. 3.1 Pin specimen

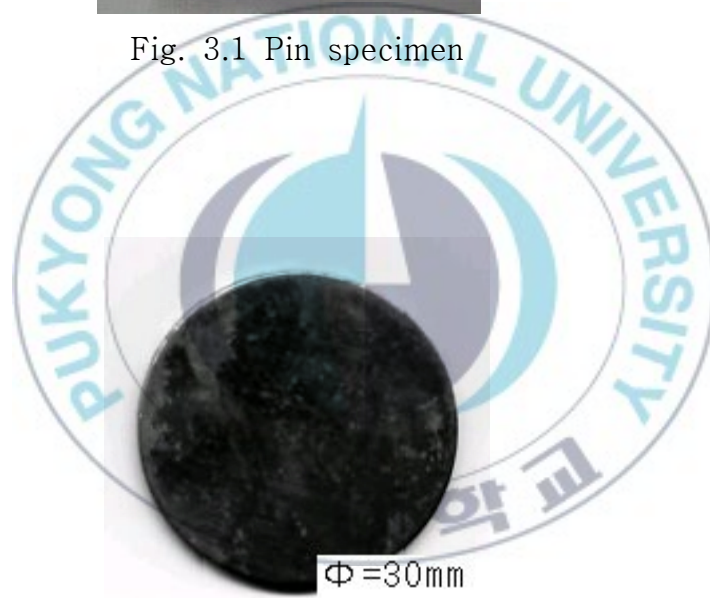


Fig. 3.2 Disk specimen

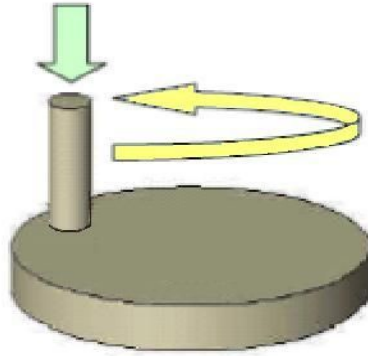


Fig. 3.3 Schematic drawing of pin on disk type test



Fig. 3.4 Ware tester

4. 결과 및 고찰

4.1 조직관찰

Fig. 4.1은 본 실험에 사용한 pin 소재인 SACM645와 disk 소재인 GCD500의 미세조직을 관찰한 것이다. Pin 소재는 여러 가지 방법으로 열처리를 실시하였지만, 대표적으로 QT+질화처리 후의 미세조직을 Fig. 4.1(a)에 나타내었다. 사진에서 나타나는 것처럼 질화처리 깊이는 표면에서 약 $200\mu\text{m}$ 정도로 나타났으며, 열영향을 받은 부분도 일부 관찰되었다. 내부에는 QT처리에 의한 템퍼드 마르텐사이트 조직으로 관찰되었다. Fig. 4.1(b)는 GCD500의 미세조직으로서 전형적인 구상흑연 주철의 조직으로 나타났다. Fig. 4.1(c)는 현재 피스톤 펌프에 사용되고 있는 실제 피스톤 펌프를 절단하여 단면 미세조직을 관찰한 것이다. 사진에 나타나는 바와 같이 양쪽으로 질화처리가 된 모습을 알 수 있다.

4.2 경도 시험

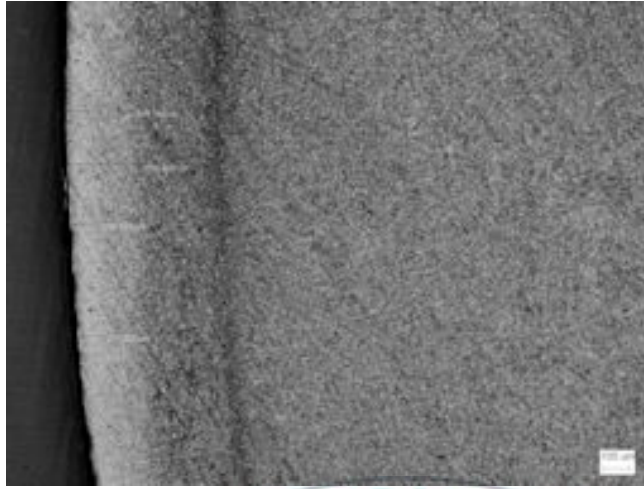
각종 처리방법에 따른 경도값을 측정하여 Fig. 4.2에 나타내었다. 모재 및 QT 시험편의 경도는 $210\sim 230\text{Hv}$ 로 나타났으며, 시험편의 열처리에 따른 경도를 비교하여 볼 때, 고주파 열처리 한 시험편은 내부까지 $550\sim 600\text{Hv}$ 정도의 경도를 유지하고 있어, 표면경화를 넘어서 전경화되었음을 알 수 있다. 이것은 시험편의 직경이 작아 표면에 가열된 열이 냉각되기 전에 내부에 영향을 미치게 되면서 전경화가 발생한 것으로 판단된다. 이와 달리 질화처리를 한 시험편의 경우에는 표면의 경도는 800Hv 이상으로 높게 나타나는 반면, 시험편의 바깥쪽으로부터 $200\mu\text{m}$ 정도에서 거의 모재와 QT처리 시험편과 비슷한 경도를 가지는 것을

알 수 있다.

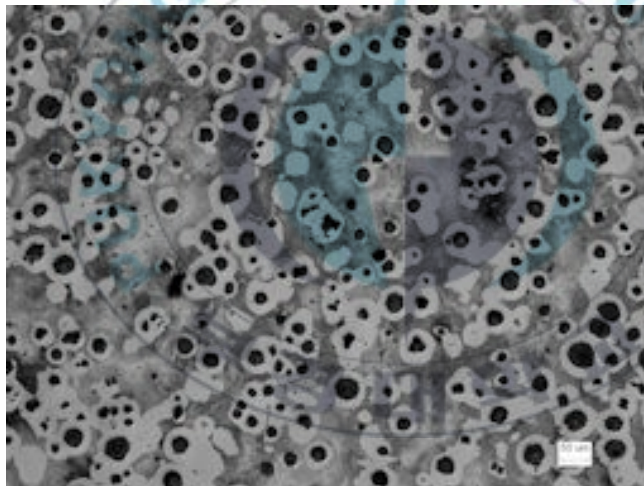
4.3 인장 시험

마모 시험에 사용한 시험편의 인장시험 결과를 Fig. 4.3에 나타내었다. QT 시험편, QT+shot peening 시험편 및 QT+질화 시험편의 최대응력은 800MPa 부근으로 비슷한 값을 나타내고 있으나, 변형률은 많은 차이를 나타내었다. 즉, 변형률의 크기는 QT 시험편, QT+shot peening 시험편 및 QT+질화 시험편 순서로 감소하고 있다. QT 시험편은 경화 후에 인성을 부여하였기 때문에 많은 변형이 발생하였다. 그리고 QT+shot peening 시험편은 표면에 압축잔류응력을 부여하였으나, 표면 개질 깊이가 얕아서 인장특성에는 영향이 거의 없었고, 변형률에는 약간의 영향을 주었다. QT+질화 시험편은 질화처리 후 경도가 Hv 800으로 매우 높으며, 연성이 매우 적게 나타났다.

본 연구는 고강도 피스톤 소재를 개발하는 것이 주목적이다. 따라서 피스톤이라는 것은 마모가 일어나서는 안 되는 부품이다. 마모로 인한 오차가 가장 최소화 되어야 피스톤의 기능과 효율이 초기와 같이 유지될 수 있다고 생각할 때, SACM645의 피스톤 부분의 재료 적용에 있어서, 현재 데이터 값으로 볼 때 질화처리가 가장 좋은 처리방법이라고 판단된다.



(a) SACM645 after nitriding treatment



(b) GCD500



(c) Cross section of piston with nitriding treatment

Fig. 4.1 Micro structure of the used materials

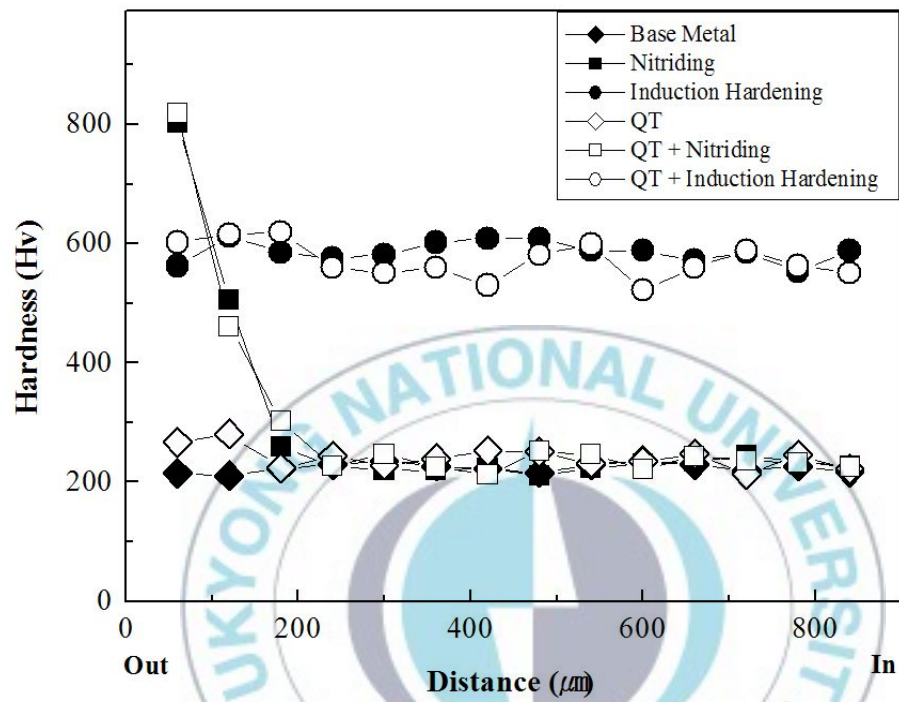


Fig. 4.2 Micro Vickers hardness of SACM645 with various treatment

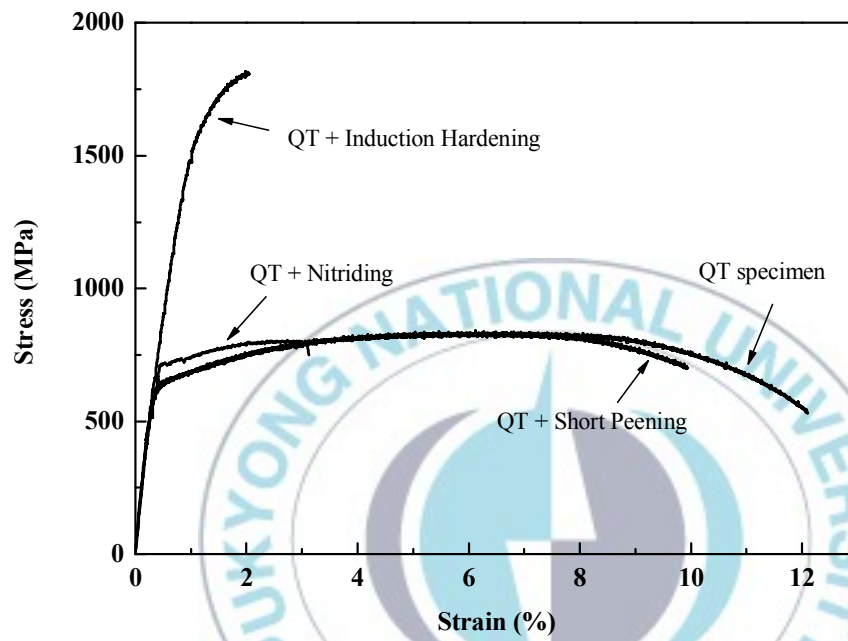


Fig. 4.3 Stress-strain curves of SACM645 with various treatment

4.4 마모 시험

4.4.1 상온 건조 상태

마모실험은 SACM645 소재를 1) 모재, 2) 질화처리, 3)고 주파처리, 4) QT처리, 5) QT처리 후 질화처리, 6) QT처리 후 고주파처리, 7) QT처리 후 Stot peening처리를 한 7가지 시험편을 제작하여 상온에서 건조 상태로 회전수 400rpm 에, 하중 2.96kg 을 가하여 Pin on Disk 방식으로 총 마모거리를 3km 로 정하고 매 500m 마다 시험편을 회수하여 세척하고 무게를 측정하여 마모량을 체크하고 시험편의 마모면을 광학현미경을 통하여 관찰하였다. 표면개질 처리한 7 종류의 SACM645 핀 시험편을 사용하여 실온 건조상태에서 마모시험을 실시한 결과를 Fig. 4.4에 나타내었다. 마모량은 QT 시험편이 가장 많았으며, 다음으로 QT shot peening 시험편, 모재 시험편으로 나타났다. QT shot peening 시험편은 shot peening에 의하여 수 μ m 깊이까지 압축의 잔류응력을 부여하여 피로수명은 증가한다. 그러나 shot peening 경화층이 마모하면, QT 시험편과 같은 조건이므로 내마모성 향상에는 전혀 도움이 되지 않았다. 그리고 질화 시험편, 고주파 시험편, QT 질화 시험편 및 QT 고주파 시험편은 Fig. 4.4에 타원형으로 나타난 것과 같이 거의 비슷한 마모량을 나타내었다. 이것을 확대하여 Fig. 4.5에 나타내었다. 질화 시험편과 QT 질화 시험편, 고주파 시험편과 QT 고주파 시험편은 각각 비슷한 마모량을 보였다. 각각에서 QT 후 표면 개질한 시험편이 약간 마모량이 적었다. 이것은 tempering에 의하여 내부의 인성이 증가하였기 때문이다. 그러나 전체적으로 고주파 시험편 질화 시험편 순서로 마모량이 적게 나타났다. 디스크의 마모량을 Fig. 4.6에 나타내었다. 디스크의 마모량은 핀 시험편의 마모량이 증가할수록 마모량도 함께 증가하였다. 이것은 핀 시험편과 디스크의 마모량이 많을수록 마모에 의한 온도 상승이 원인이라 판단한다.

디스크의 마모량은 핀 시험편의 마모량과 비슷하게 나타났다. 모재 시험편, QT 시험편 및 QT shot peening 시험편의 디스크 순으로 마모량이 많았으며, 나머지는 Fig. 4.6의 원형에 나타내듯이 마모량이 비슷하게 나타났다. 이것을 상세하게 파악하기 위하여 타원형 부분을 확대하여 Fig. 4.7에 나타내었다. 고주파 시험편의 디스크 마모가 가장 많았으며, QT+질화 시험편과 QT+고주파 시험편의 디스크는 비슷한 마모량을 나타내었다. 그리고 질화 시험편의 디스크가 가장 적은 마모량을 나타내었다. QT+질화 시험편과 QT+고주파 시험편의 디스크가 비슷한 마모량을 나타낸 것은 표면의 단단한 부분과 내부의 인성이 강한 부분의 적절한 결합에 의한 것으로 판단된다. 질화 시험편의 디스크의 마모량이 가장 적은 것은 전체적으로 경도가 높아서 슬립현상이 발생한 것으로 추정된다. 핀 시험편과 디스크의 마모량 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 핀 시험편과 디스크의 마모량에서 기울기가 클수록 핀 시험편이 마모에 강하다는 것을 의미한다. Fig. 4.8에서 원으로 표시한 부분을 확대하여 Fig. 4.9에 나타내었다. Fig. 4.8 및 4.9에서 나타나듯이 질화 시험편, QT+질화 시험편, 고주파 시험편 및 QT+고주파 시험편의 기울기가 크게 나타났으며, QT, QT+shot peening 시험편 및 모재 시험편은 작은 기울기를 가지는 비슷한 마모 특성을 나타내었다. 우수한 내마모성을 갖는 SACM645의 열처리 방법은 고주파처리와 질화처리를 한 것이 표면경도가 큰 만큼 마모에 잘 견디는 것을 알 수 있었다.

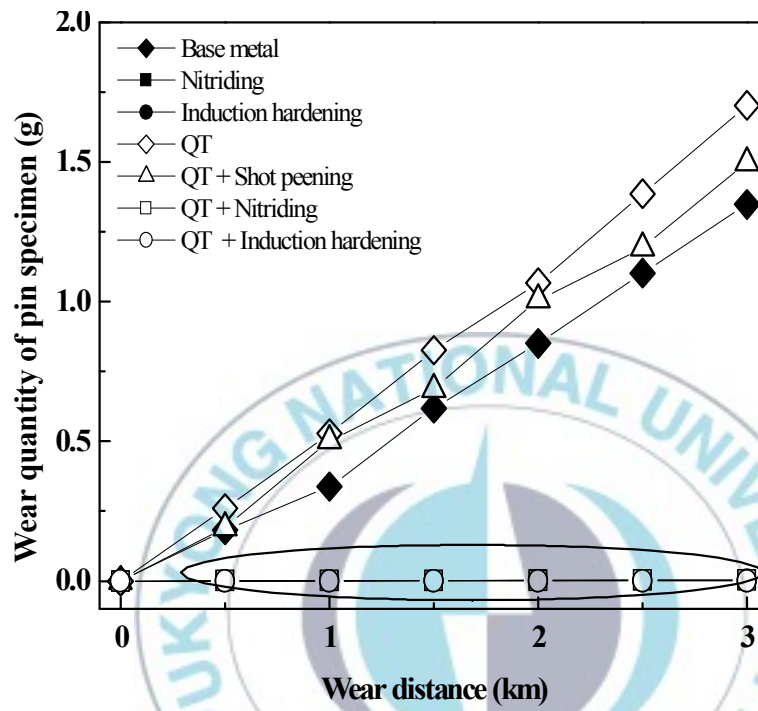


Fig. 4.4 Relationship between wear quantity of pin and wear distance

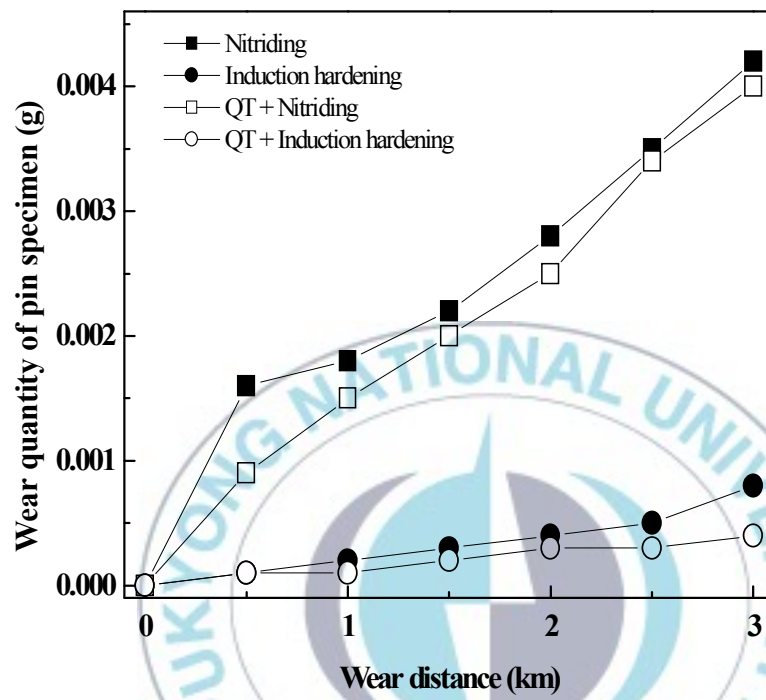


Fig. 4.5 Enlarged figure of circle part in Fig. 4.4

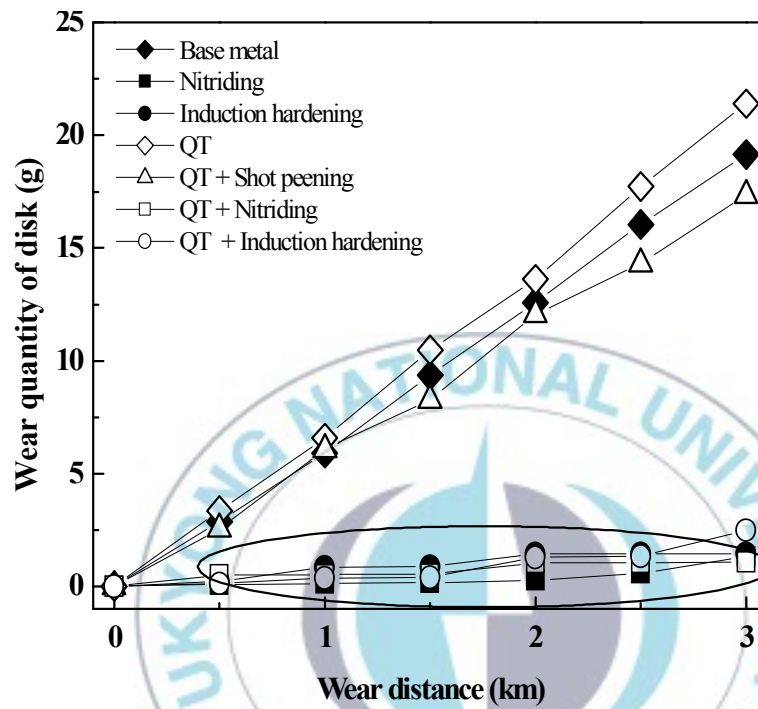


Fig. 4.6 Relationship between wear quantity of disk and wear distance

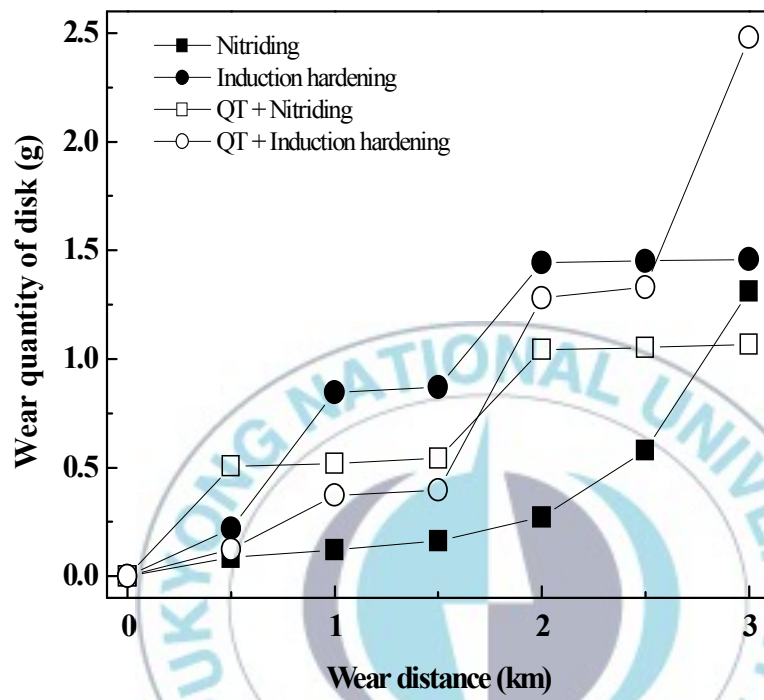


Fig. 4.7 Enlarged figure of circle part in Fig. 4.6

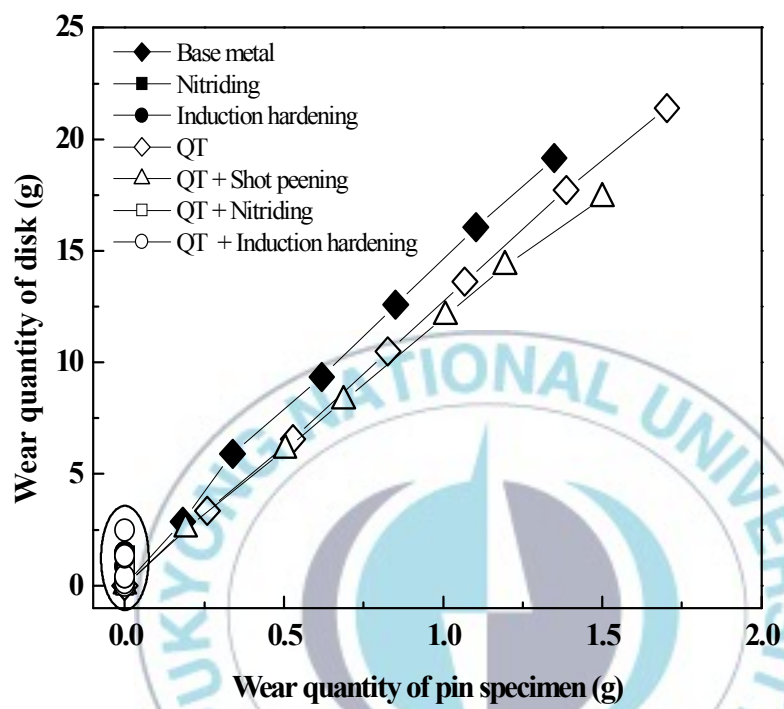


Fig. 4.8 Relationship between wear quantity of disk and wear quantity of pin specimen

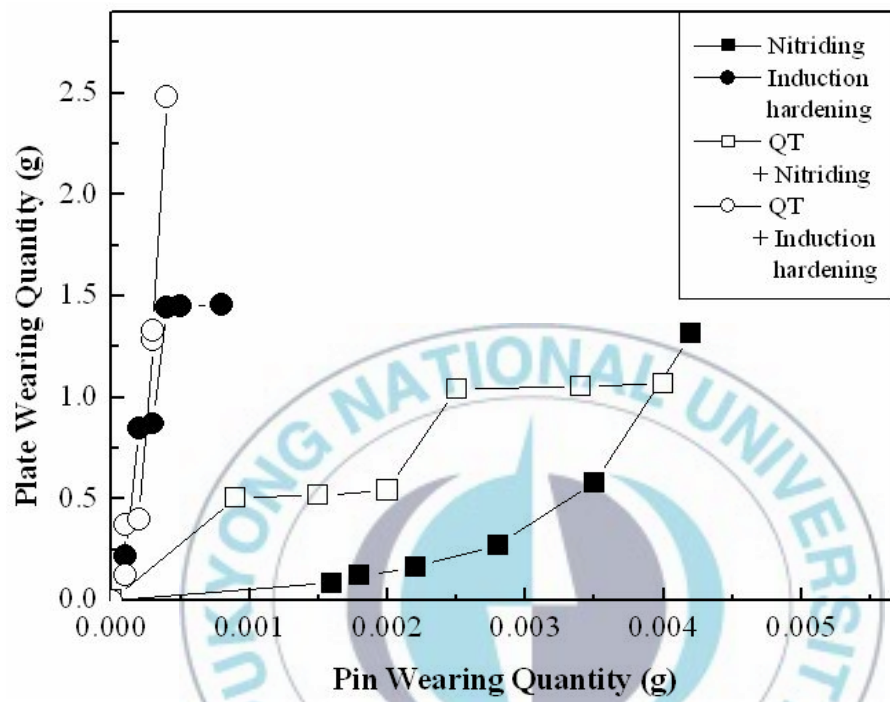
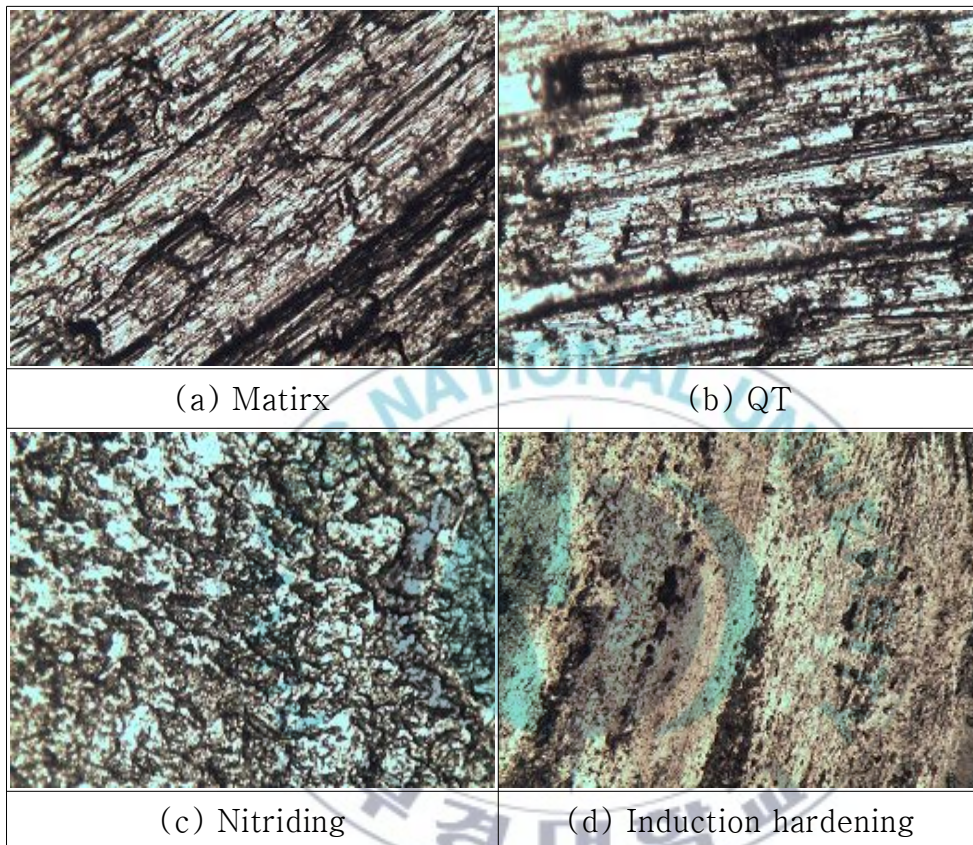


Fig. 4.9 Enlarged figure of circle part in Fig. 4.8

핀의 상온 건조 마모면은 시험 종료 후 광학현미경을 사용하여 관찰하여 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 인장강도와 시험편의 마모량이 많은 (a) 모재 시험편, (b) QT 시험편, (f) QT+Shot peening 시험편의 마모면은 응착마모와 연삭마모에 의한 마모흔적을 볼 수 있다. 핀 시험편은 연성이 풍부하여 주철인 디스크에 의하여 표면 돌출부의 국부적 부분에서 응착하기 때문에 고압력이 되고 양금속간에 응착이 일어난다. 계속해서 금속간의 습립보다 응착부근에 큰 변형이 생겨 표면에 균열이 발생하기 시작하며 연삭에 의하여 많은 마모가 발생하였다. 그리고 (c) 질화 시험편, (d) 고주파 시험편, (e) QT+질화 시험편, (g) QT+고주파 시험편은 핀 마모량이 적은 것에서 미끄럼마모와 산화마모가 일어난 것으로 판단된다. 표면의 경도가 높아서 상대적인 접촉에 의하여 미끄럼이 발생하고, 장시간의 마찰에 의하여 온도가 상승하면서 산화에 의한 마모가 발생하였다고 판단된다.





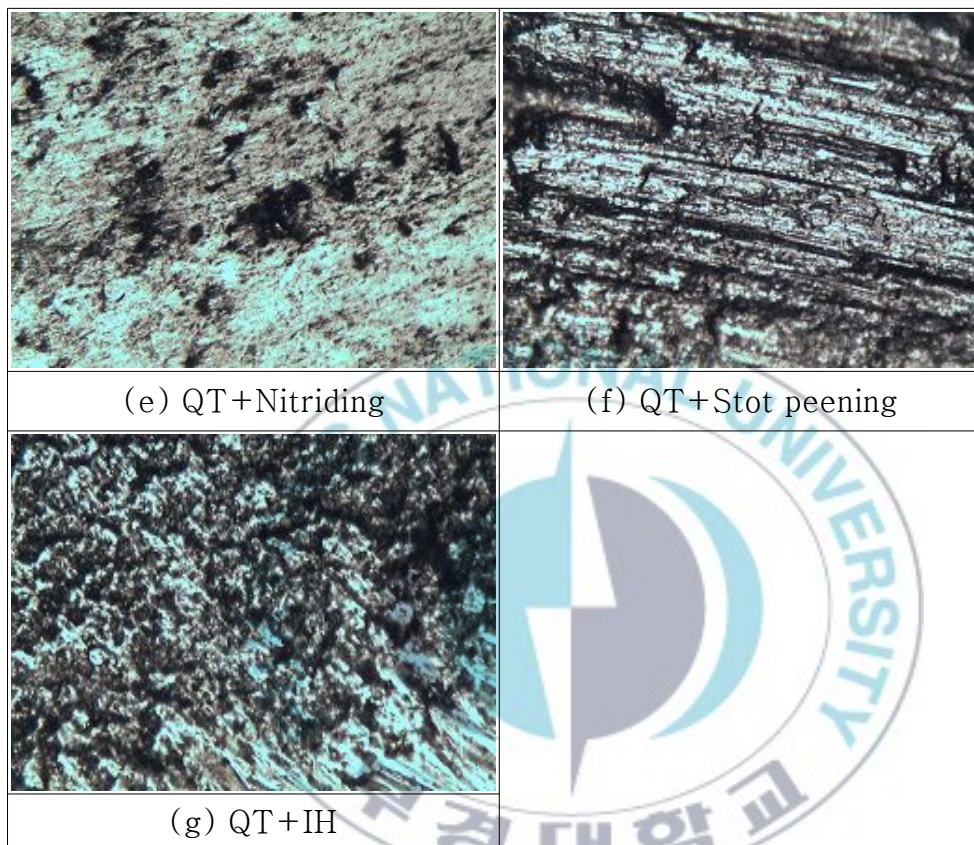


Fig. 4.10 Optical microstructure observation after wear test

4.4.2 상온 윤활 상태

윤활 상태에서 시험 핀과 상대원판 사이에서 하중을 18kg까지 증가시켰는데도 불구하고 연삭마모가 일어나지 않고 계속적으로 미끄럼마모가 일어나면서 마모량이 발생하지 않았다. 이에 따라 상온 및 고온 윤활 조건에서는 DISK를 GCD 500에서 실리콘카바이드 연마지로 교체하여 마모시험을 실시하였다. 실리콘카바이드연마지를 기존의 상대원판에 양면테이프를 이용하여 부착하였으며, 상대원판을 고정시키는 시험기 치구에 완전 고정시킴으로써 연마지가 움직이는 것을 막았다.

상온 윤활상태의 특징으로는 우선 마모량이 많은 편이어서, 마모거리를 총 3km까지 진행하지는 못하였고, 2/3인 2km까지 진행하였다. 상온 윤활 상태에서의 마모 시험 결과를 Fig. 4.11에 나타내었다. 시험 핀의 마모량의 특성으로 볼 때, 상온 건조 조건과 마찬가지로 질화처리, 고주파처리를 한 시험 핀의 마모량이 적었고, 모재, QT처리, QT처리 후 shot peening처리를 한 시험 핀이 마모량이 많았다. 그 이유 역시 상온 건조조건과 마찬가지로 경도와 마모량의 상관관계가 나타난다고 판단되며, 그래프에서 고주파처리와 질화처리의 마모량이 처음에는 고주파처리가 더 작았으나 뒤에 마지막 500m 에서는 모재, QT처리한 시험핀과 거의 동일한 마모량이 나오는 것으로 보아, 그 부분은 고주파 열처리가 미치는 영역을 넘어서서 원래 베이스의 마모량과 거의 흡사한 양의 마모가 발생하였다고 판단된다. 전체적으로 마모량이 많았다는 것과 열처리로 인하여 조직이 개선된 부분을 넘어서 마모가 발생하였다는 것에 미루어 추론해 볼 때, 가장 내마모성이 가장 강한 시험 핀은 상온 건조 상태와 마찬가지로 질화처리 및 고주파 처리를 실시한 시험 핀이라고 판단된다.

Fig. 4.12에 상온 윤활 조건에서 마모 시험 후의 마모면을 관찰하여 나타내었다. 이번 마모 시험은 실리콘카바이드연마지를 사용하여 마모 시험을 실시하였기 때문에 마모면의 특성이 그렇게 구분되어지기 힘들었고, 모두 연삭마모와 비슷한 마모면을 가지는 것을 관찰할 수 있었다.

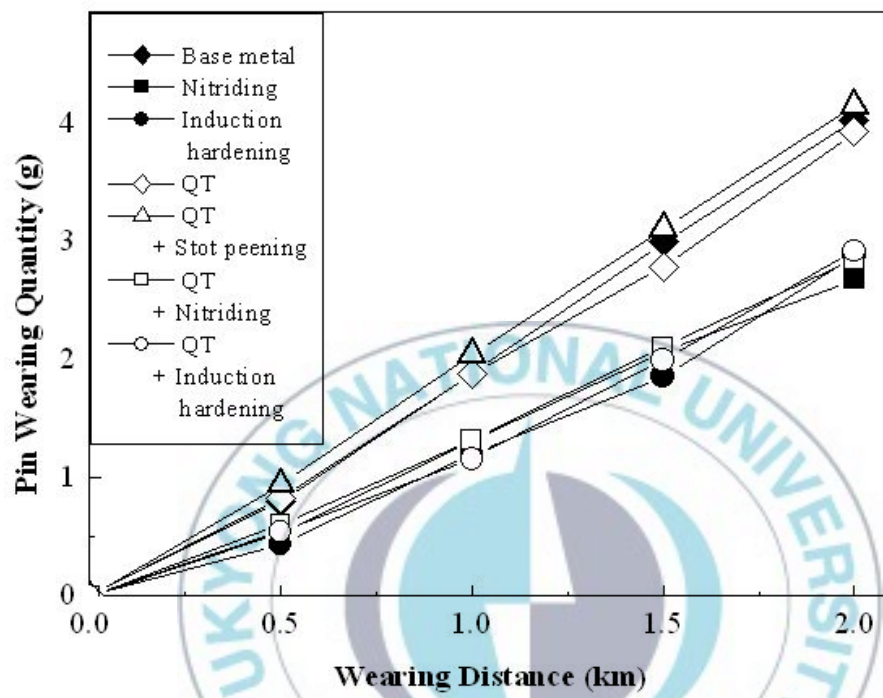
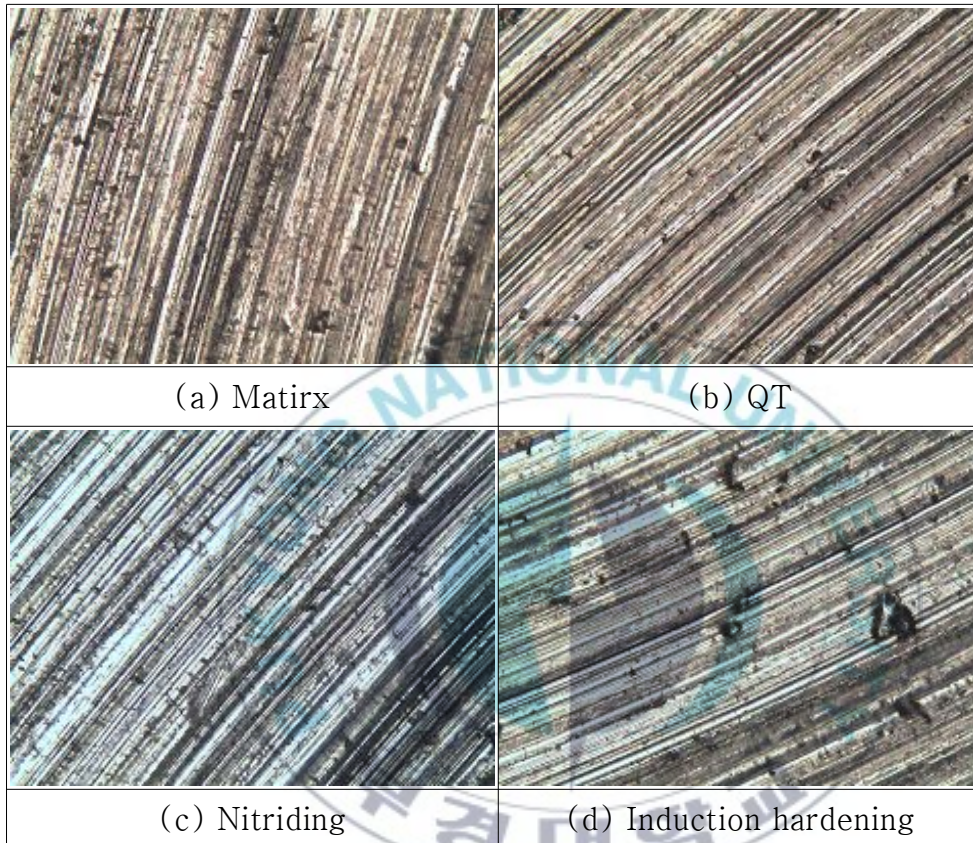


Fig. 4.11 Pin wearing quantity versus wearing distance using SiC paper under room temperature oil condition



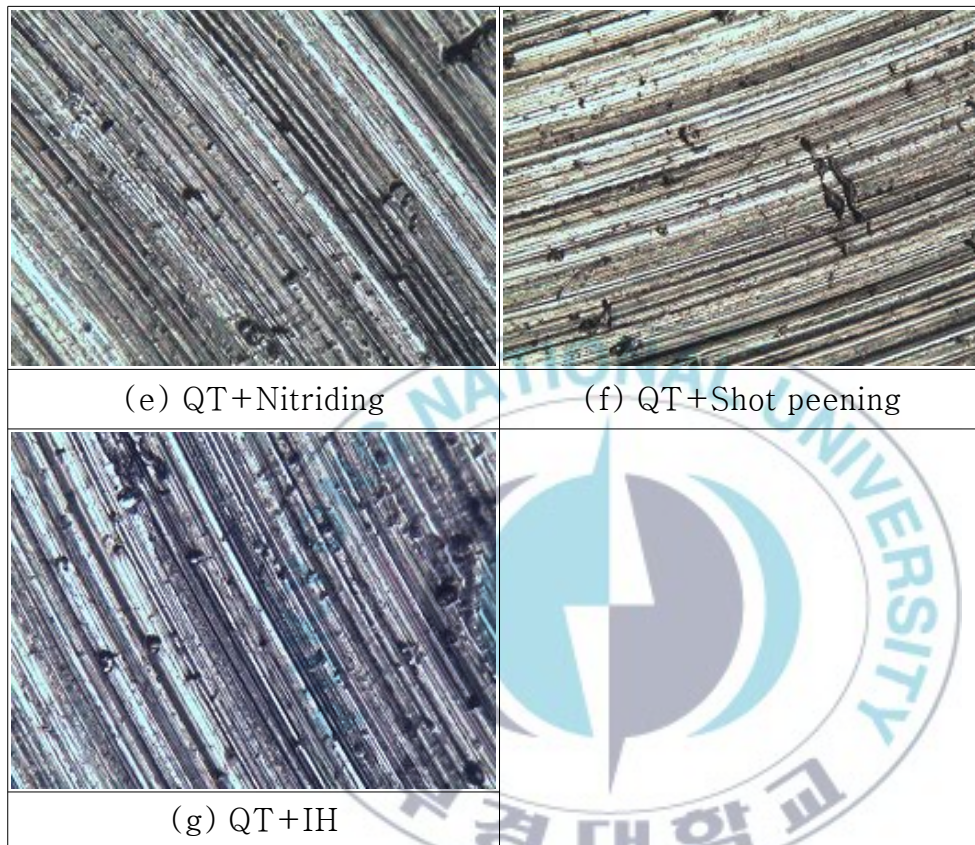


Fig. 4.12 Optical microstructure observation after wear test under room temperature oil condition

4.4.3 고온 윤활 상태

4.4.1절에서 나타낸 바와 같이 윤활 상태에서 시험 핀과 상대원판 사이에서 하중을 18kg까지 증가시켰는데도 불구하고 연삭마모가 일어나지 않고 계속적으로 미끄럼마모가 일어나면서 마모량이 발생하지 않아 고온 윤활 조건에서는 DISK를 GCD 500에서 실리콘카바이드 연마지로 교체하여 마모시험을 실시하였다. 실리콘카바이드연마지를 기존의 상대원판에 양면테이프를 이용하여 부착하였으며, 상대원판을 고정시키는 시험기 치구에 완전 고정시킴으로써 연마지가 움직이는 것을 막았다.

Fig. 4.13은 고온 윤활 상태에서의 마모 시험 결과를 나타낸 것이다. 우선 시험 핀의 마모량을 보면, 앞의 두 실험과 다르게 질화처리와 고주파 처리를 한 시험 핀의 마모량이 많은 편이었으며, 모재와 QT처리를 한 시험 핀이 가장 낮은 마모량을 나타내었다. QT처리 후 Stot peening처리를 한 시험 핀도 이번 경우에는 처음에 어느 정도의 마모량을 기록하다가 뒤에 마모량이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 고온 윤활 조건에서는 질화 처리된 시험핀이 가장 마모량이 많이 나타났다. 이 이유는, 우선 100℃의 오일 속에서는 상온에서와 달리 실리콘카바이드연마지가 제대로 작용이 되지 않았다는 것이 가장 유력한 약점이었다고 생각된다. 또한, 실험 후 시험핀이 기울어진 것을 알 수 있다. 한 핀 속에서 마모거리가 가장 긴 것이 바깥쪽, 적은 쪽이 안쪽에 위치하여 안쪽은 마모량이 적고 바깥쪽은 마모량이 많다는 것을 관찰할 수 있었습니다. 이것으로 미루어 짐작해 볼 때, 100℃를 견디지 못한 실리콘카바이드 물질들이 마모에 의하여 종이고 분리되어 떨어져나가면서 시험핀의 바깥쪽을 마모시켜 시험 핀이 점점 기울어 진 것으로 판단된다. 하지만 이것에서 발생하는 오류는 모재와 QT처리는 마모량이 너무 작다는 것이다. 모재에는 충분한 연성적인 부분이 가미되어 있어 마모될 때 강한 실리콘카바이드 입자에 마모되는 형태가 부드럽게 지나갈 수 있었으나, 취성적인 고주파나 질화 처리를 한 시험 핀의 경우는 그것과의 마모에 의해 시험 핀이 부서지듯이 취성 파괴가 일어나면서 시험 핀이 기울어

지고 마모량이 더 많았던 것이라고 판단된다.

Fig. 4.14는 고온윤활 조건에서 마모 시험 후의 마모면의 현미경 사진을 나타낸 것이다. Fig. 4.12의 상온 윤활 조건 마모면 관찰과 마찬가지로 실리콘카바이드연마지에 의한 연삭마모의 흔적만 보이며, 서로 비슷하여 특이할만한 사항이 없는 것으로 나타났다.

마모 시험은 목적에서 언급한 바와 같이 모의실험을 통하여, 시험편이나 조건, 분위기에 따른 데이터의 비교를 통하여 재료의 내마모성을 평가하는 시험이다. 이번 실험에서 건조한 분위기를 Oil 분위기로 바꾸어 실험하였을 때 마모량이 발생하였다면 가장 좋은 실험과 데이터 값을 얻었을 수 있었으나, 마모량이 극히 미비하여 비교할 수 없을 정도의 마모량 값을 가지면서, 상온 및 고온 윤활조건에서의 마모시험의 경우, 하중을 높이는 조건을 바꾸는 것으로 부족하여 상대재를 실리콘 카바이드 연마지를 사용하였다. 상온 윤활조건의 경우는 마모량이 조금 많아서 마모거리가 3km에 이르지 못한 결과를 가져왔고, 고온 윤활조건의 경우는 마모량이 온도라는 변수가 작용하여 건조 및 상온 윤활 조건과는 많이 상이하게 나타났다.

하지만, 건조조건의 경우 오일이 없는 상태에서도 질화처리나 고주파 처리의 경우는 거의 마모량이 발생하지 않을 정도로 좋은 내마모성을 보여주었으며, 저온 윤활조건의 경우에서도 마찬가지로 일반 모재와 QT처리를 한 시험 핀에 비하여 다소 좋은 내마모 특성을 나타내었다. 아울러 고온 윤활조건에서는 내마모성이 표면경도에만 관계를 가지는 것을 넘어 연성과도 밀접한 관계를 가지고 있다는 것을 알 수 있었다.

이번 연구를 통해 마모시험의 전반적인 특성을 확인한 것은 우선, 하중이 증가함에 따라서 마모량이 증가한다는 것, 표면경도가 마모량에 영향을 미친다는 것, 윤활상태에서는 Dry한 상태보다 극히 마모량이 작다는 것, 내마모성이 표면경도 뿐만 아니라 어느 정도의 연성도 도움을 준다는 것 등의 사실을 확인할 수 있었다.

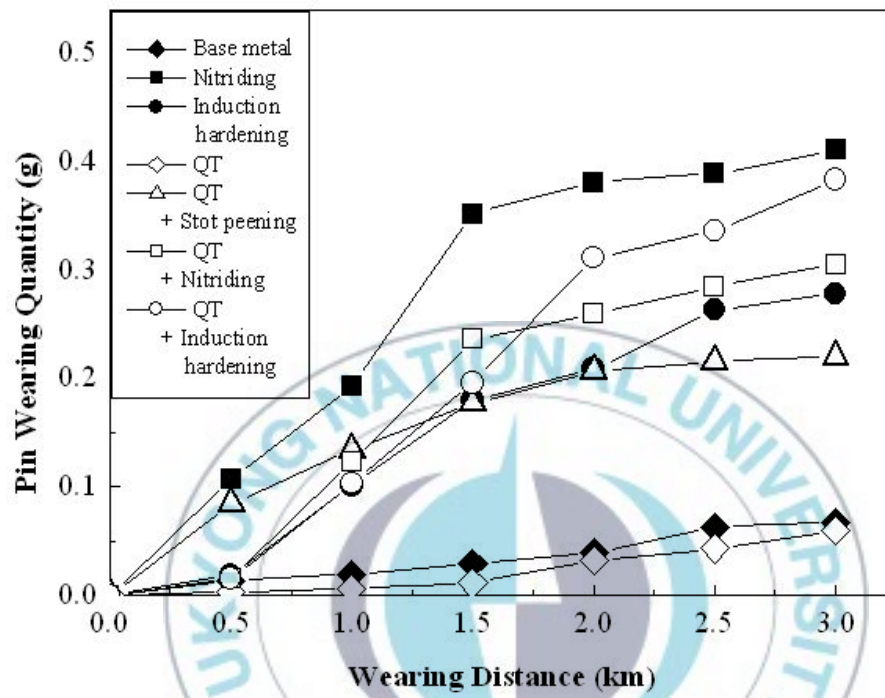
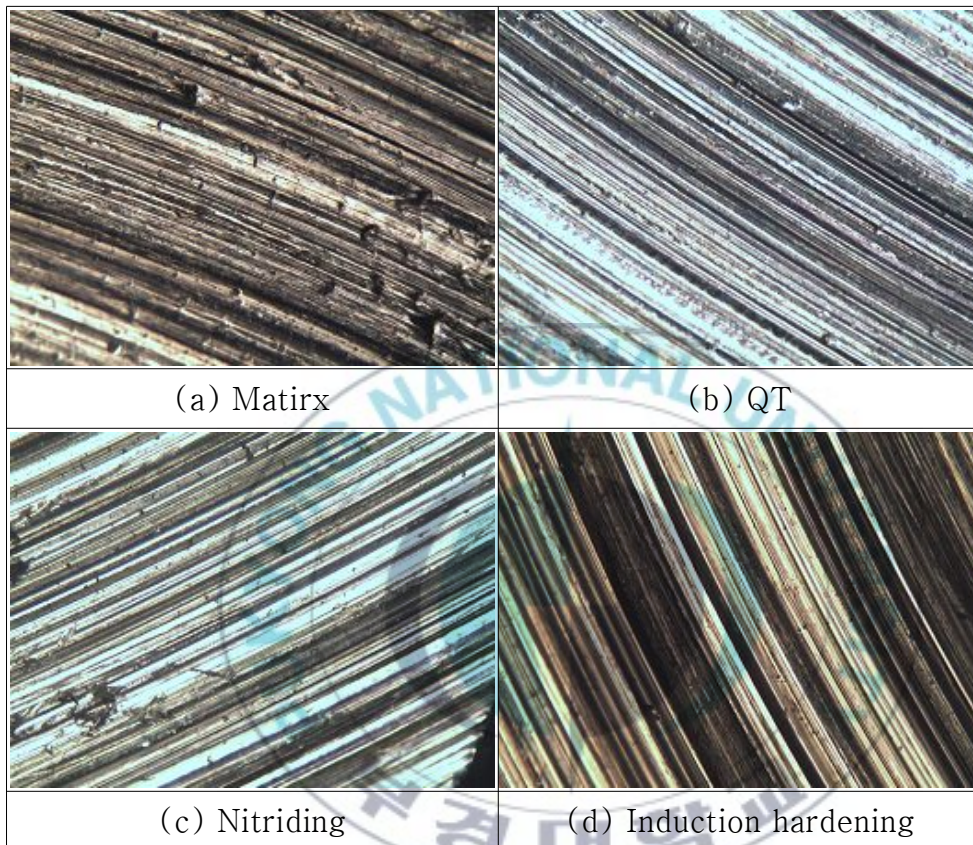


Fig. 4.13 Pin wearing quantity versus wearing distance using SiC paper under 100°C oil condition



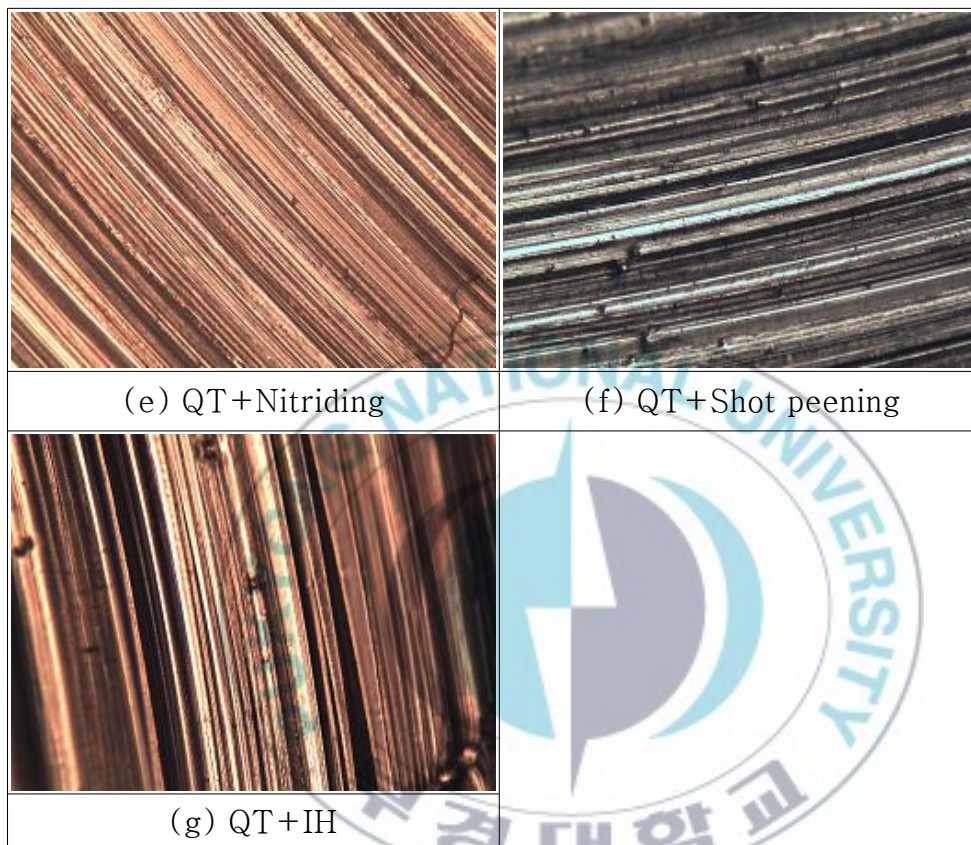


Fig. 4.14 Optical microstructure observation after wear test under 100°C oil condition

5. 결 론

본 연구에서는 피스톤 재료로 사용되고 있는 SACM645소재를 다양한 방법으로 열처리를 실시한 후 건조, 윤활 및 고온 윤활 분위기에서 마모 특성을 조사하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장강도 측정 결과 QT 시험편, QT+shot peening 시험편 및 QT+질화 시험편의 최대응력은 800MPa 부근으로 비슷한 값을 나타내고 있으나, 변형률은 많은 차이를 나타내었다. QT+질화 시험편은 질화처리 후 경도가 Hv 800으로 매우 높으며, 연성이 매우 적게 나타났고, QT 고주파 시험편은 내부까지 전경화되어 1,700MPa로 매우 높았게 나타났다.

(2) 경도 측정결과 대부분의 시험편은 모재와 비슷한 경도 값 (210~230Hv)을 나타내었지만, 고주파 처리한 시험편은 전경화되어 550~600Hv 정도로 나타났으며, 질화처리한 시험편에서는 표면 경도가 800Hv, 내부는 모재와 비슷한 경도를 나타내었다.

(3) 상온 건조 상태에서 마모시험 결과 질화 시험편, QT+질화 및 고주파 시험편에서 마모 특성이 우수하게 나타났으며, QT, QT+shot peening 시험편 및 모재 시험편은 작은 기울기를 가지는 비슷한 마모 특성을 나타내었다.

(4) 상온 윤활상태에서 마모 시험결과, 전체적으로 마모량이 많았으며, 가장 내마모성이 가장 우수한 시험편은 상온 건조상태와 마찬가지로 질화처리 및 고주파 처리를 실시한 시험편이라고 판단된다.

(5) 고온 윤활상태에서는 질화처리와 고주파 처리를 한 시험 편의 마모량이 많은 편이었으며, 모재와 QT처리를 한 시험 편이 가장 낮은 마모량을 나타내었다.

(6) 건조조건인 경우 오일이 없는 상태에서 질화처리나 고주파처리의 경우는 거의 마모량이 발생하지 않을 정도로 좋은 내마모성을 보여주었으며, 저온 윤활조건인 경우에서도 마찬가지로 일반 모재와 QT처리를 한 시험 편에 비하여 다소 좋은 내마모 특성을 나타내었다. 하지만, 고온 윤활조건에서는 내마모성이 표면경도에만 관계를 가지는 것을 넘어 연성과도 밀접한 관계를 가지고 있다는 것을 알 수 있었다.

(7) 상온 건조 조건에서 마모시험 후 마모면 관찰에서는 모재 시험편, QT 시험편, QT+shot peening 시험편의 마모면은 응축마모와 연삭마모에 의한 마모흔적을 볼 수 있었고, 질화 시험편, 고주파 시험편, QT+질화 시험편, QT+고주파 시험편은 편 마모량이 적은 것에서 미끄럼마모와 산화마모가 일어난 것으로 확인할 수 있었다. 하지만, 저온 및 고온 윤활 시험에서는 실리콘카바이드연마지를 상대재로 사용함으로 인하여 연삭마모의 흔적만 관찰되었다.

참 고 문 헌

- [1] 정재연·백일현·조인성·송규근·오석형·정석훈, “유압 피스톤 펌프의 슬리퍼 정압베어링에 관한 윤활특성 연구”, 유공압시스템학회 논문집, 제 4권, 제 3호, pp. 1~6, 2007.
- [2] 정재연·송규근·오석형·김종기, “유압 피스톤 펌프의 실린더 블록과 밸브 플레이트 사이의 유막 특성”, 유공압시스템학회논문집, 제 1권, 제 2호, pp. 8~14, 2004.
- [3] 이용범·김형의·유영철·박종호, “유압펌프 및 모터 피스톤 조립체의 수명예측을 위한 가속실험 모델”, 유공압시스템학회논문집, 제 2권, 제 4호, pp. 14~22, 2005.
- [4] 홍예선·이상율·김치봉·김성훈·임현식·김성대, “사축식 유압 피스톤 펌프의 저속 마찰 특성 개선”, 유공압시스템학회논문집, 제 1권 제 3호, pp. 7~13, 2004.
- [5] 정재연·백일현·조인성·송규근·오석형·정용욱, “사축식 유압 피스톤 펌프의 디스크 편심률에 따른 실린더블록 구동영역에 대한 연구”, 유공압시스템학회논문집, 제 5권, 제 2호, pp. 1~7, 2008.
- [6] 전정식, “유압유의 종류와 선정방법”, 유공압시스템학회지, 제 1권 제 2호, pp. 1~8, 2004.
- [7] 강만곤·최세령, “유압 펌프 및 유압모터의 소음 레벨 측정법”, 유공압시스템학회지, 제 4권, 제 3호, pp. 47~55, 2007.
- [8] 함영복·박경민·윤소남·김성동, “유압 피스톤 펌프/모터의 동력 변환 메카니즘에 대한 고찰”, 유공압시스템학회지, 제 1권, 제 3호, pp. 47~56, 2004.
- [9] 정헌술·김형의·김종기, “유압 피스톤 펌프·모터의 효율에 관하여”, 유공압시스템학회지, 제 1권, 제 3호, pp. 39~46, 2004.
- [10] 정재연, “유압 피스톤 펌프·모터의 특징과 고성능화”, 유공압시스템학회지, 제 1권, 제 3호, pp. 32~38, 2004.

- [11] 조유중·오창근, “굴삭기용 유압펌프의 최근 개발동향”, 유공압시스템학회지, 제 1권, 제 3호, pp. 1~7, 2004.
- [12] 구영모, “유압시스템에서 작동유가 미치는 영향”, 유공압시스템학회지, 제 1권, 제 2호, pp. 9~11, 2004.
- [13] 조유중, “국내 유압산업의 현황(건설 중장비용 액시얼 피스톤 타입의 펌프/모터를 중심으로)”, 유공압시스템학회지, 제 1권, 제 1호, pp. 15~22, 2004.
- [14] 박성길, wear Test Guide, (주)네오플러스, 2008.



감 사 의 글

석사과정에 입학한 것이 엇그제 같은데 벌써 2년이라는 시간이 지났습니다. 제가 여기에 오기까지 많은 분들의 격려와 도움이 있었습니다. 지난 세월 돌아보니 감사 드려야 할 분들이 너무나 많습니다. 이 글을 통하여 조금이나마 감사의 마음을 전합니다.

먼저 저에게 석사과정을 소개해 주시고 공학에 적응하기 어려워할 때마다 격려와 용기를 주셨을 뿐만 아니라, 논문이 완성되기까지 헌신적인 지도를 해주신 남기우 지도교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

또한 연구와 학사일정에 바쁘신 가운데서도 저의 논문이 완성될 때까지 연구방향과 모든 결과물의 도출과정까지 함께 고생해주시고 도와주신 안석환 교수님께도 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 귀한 시간 내주시어 논문의 부족한 부분에 대하여 세세히 지적해 주시고 충고해 주신 안병현 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고 재료강도 및 비파괴 연구실의 박승원군을 비롯한 여러 원우님들께도 감사드립니다. 석사과정 동안 격려해주시고 도와주신 성기용 박사를 비롯한 회사 직원여러분께도 감사의 말씀을 드립니다. 이밖에도 제가 지금까지 직장생활을 하면서 오늘의 영예로움이 있기까지 저에게 많은 격려와 용기를 주시고 도와주신 모든 분들께 감사의 말씀을 드리며 항상 건강하시고 행복하시길 빌겠습니다.

앞으로 제 인생의 여정을 가는 동안 부경대학교에서 이룬 명예에 누가되지 않는 삶을 살도록 열심히 노력하겠습니다.

그리고 끝으로 제 사회생활과 석사과정을 포함한 모든 삶의 과정에서 묵묵히 인내하며 헌신적인 뒷바라지를 해준 아내에게 진심으로 감사드리며 사랑한다는 말을 전합니다.

2009년 08월

격려해 주시고 도와주신 분들께 감사를 드리면서.....

김 남 석 배상.