

마모시험의 KNOW-HOW

마찰 마모시험 도우미

Tribo Division

본 자료는 마모시험법에 대한 일반적인 기초 및 이론을 정리하였으며 시험목적에 따른 시편의 준비, 시험방법, 시험조건 등을 정리하였습니다.

본 자료는 마모시험에 소요되는 시간과 시행 착오로 인한 실험의 번거로움을 줄이는데 보탬이 되었으면 합니다.



주)알앤비

목차

마모시험(Wear test) 1. 개요 2. Tribology 2.1 마찰(Friction) 2.3 마모(Wear) 3. 마찰기구 4. 마모기구 5. 윤활기구 6. 마모시험의 목적 7. 마모시험에 영향을 미치는 요인 7.1 온도 7.2 하중 7.3 속도 7.4 시간 7.5 표면 특성 7.6 분위기 7.7 윤활 7.8 기타 8. 측정변수 및 측정방법 8.1 측정변수 8.2 온도 8.3 마모량 8.4 마모시험 monitoring 8.5 마모시험 주의사항 9. Hertz 10. 마모시험 10.1 구와 구 10.2 직교원주 10.3 핀과 평판 10.4 평판과 평판 10.5 핀과 원판(핀이 회전하는 경우) 10.6 핀과 원판(원판이 회전하는 경우)	10.7 원통과 원통(면 접촉) 10.8 핀과 원판 혹은 원통과 원통(선 접촉) 10.9 평판과 원주 혹은 원판 10.10 원판과 원판(선 접촉) 10.11 기타 10.12 마모시험기의 특성별 형태 10.13 마모시험 결과 보고 10.14 규격화된 마모시험 Pin on Disk 마찰 마멸 시험 기준 11. 개요 12. 시편 준비 13.1 재료 13.2 형태와 크기 13.3 표면 처리 13. 시험 변수 14.1 하중 14.2 속도 14.3 미끄럼 거리 14.4 온습도 14. 시험 절차 15. 시험결과분석 16.1 마멸양 16.2 마찰계수
---	--

마모시험(Wear test)

1. 개요

마모시험은 재료의 내마모성을 평가하는데 필요한 것으로서 여기에 쓰이는 마모시험기는 다른 재료 시험기와는 달리 여러 가지 형태의 것이 있다. 실제로 미국의 윤활학회(ASLE)에서 1970년에 수행한 조사연구 결과에 따르면 1945년부터 1970년까지 미국에서 사용된 마모시험기는 시험의 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 이유는 무엇일까?

그것은 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, 시험의 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, 윤활, 마찰 등을 종합적으로 연구하는 것이 요구되며 이러한 특성을 강조 하기 위하여 영국에서 1996년 트라이볼로지 (tribology)라는 새로운 낱말을 만들었다. 그림 1.1은 마모와 관련 된 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 연구분야이다.

위와 같은 이유 때문에 재료시험의 여러 종류 가운데에서도 가장 표준화가 더딘 분야가 마모시험에 대한 것이다. 그러나 마모시험의 중요성이 점차 커짐에 따라 보편성이 있는 시험결과를 얻어야 하는 필요 성이 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. 이 프로그램은 VAMAS(Versailles Project on Advanced Materials and Standard)라는 이름으로 추진되고 있으며 현재 전체총괄은 미국의 NIST에서 맡고 있다.

이 글에서는 마모시험과 관련된 마찰, 윤활 등에 대해 먼저 간략히 살펴보고 시험목적에 따라 시험조건이 바뀌는 것을 인식한 다음에 여러 가지 마모시험방법을 살펴보는 것으로 정리하였다.

2. Tribology

독일규격(DIN 50320)에 따르면 마모(wear)는 물체의 표면에서 기계적인 운동에 의해 물체가 점차적으로 부스러져 떨어져 나가는 현상을 말한다고 되어 있으며 기계적인 운동으로는 기체, 액체, 고체 등의 접촉에 의한 것들이 있다고 하였다. 그림 2.1은 마모기구에 따른 분류이다.

그러나 오늘날의 산업현장에서 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 3요소를 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 되었으며 아직 우리말로 정확한 번역이 안되어 있다. 그림 2.2는 tribology와 관련된 학문분야 및 상대 운동을 하는 두 물체의 표면에서 일어나는 현상을 개략적으로 나타낸 것으로서 여러 학문분야에 걸친 tribology의 특성을 잘 보여주고 있다.

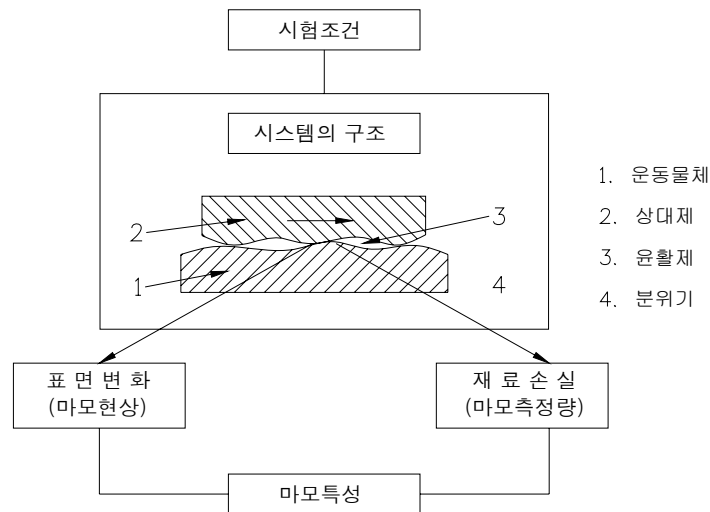


그림1.1 마모, 마찰, 윤활 시스템의 구성요소

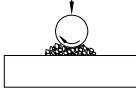
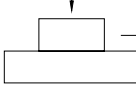
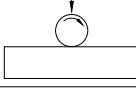
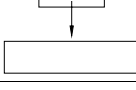
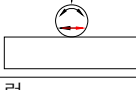
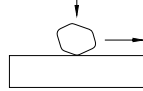
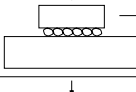
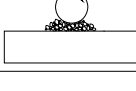
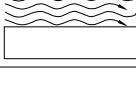
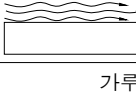
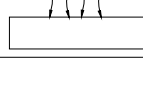
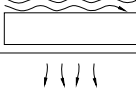
시 슷 템	상 대 운 동	마모종류	마 모 기 구			
			응 착	연 삭	표면피로	Tribo chemical reactions
-고 체 -계면체 (유체운할) -고체	미끄럼, 구름 때림 (Impact) 	—			×	×
-고 체 -고 체 (건조마찰, 경계운할, 혼합운할)	미끄럼 	미끄럼마모	×	×	×	×
	구름 	구름마모	×	×	×	×
	때림 (Impact) 	때림마모	×	×	×	×
	진동 	(부식마모)	×	×	×	×
-고 체 -고체나 가루	미끄럼 	미끄럼연삭		×		
	미끄럼 	미끄럼연삭 (3가지 이상 접촉)		×		
	구름 	구름연삭 (3가지 이상 접촉)		×		
-고 체 -가루가 섞인기체	흐름 	가루침식		×	×	×
-고 체 -가루가 섞인기체	흐름 	유체침식		×	×	×
	때림  가루 	때림마모		×	×	×
-고 체	흐름진동 	공식, 공식침식			×	×
-유 체	때림 (Impact) 				×	×

그림 2.1 마모의 종류 및 운동과 마모현상 및 마모기구(DIN 50320)

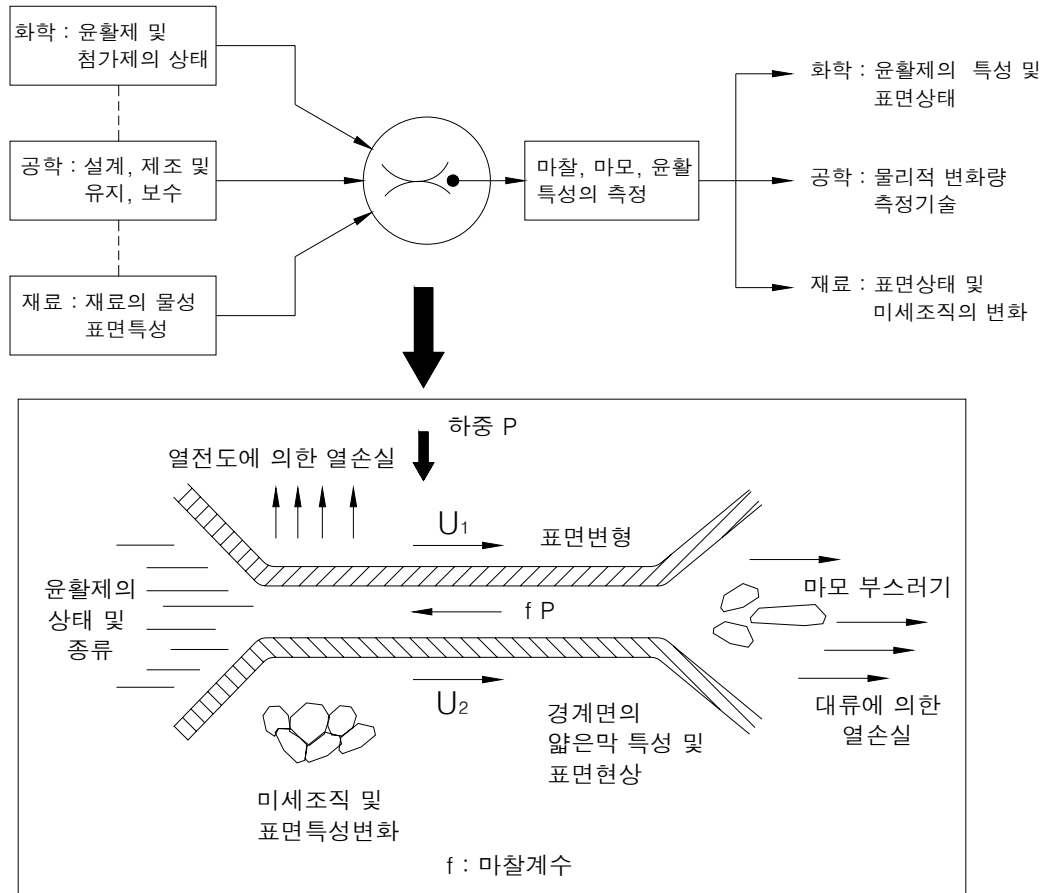


그림2.2 트라이볼로지와 관련된 학문분야 및 상대운동을 하는 두 물체의 표면에서 나타나는 여러 가지 현상

2.1 마찰(Friction)

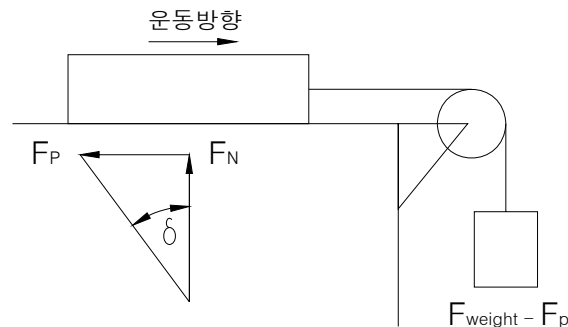
마찰은 양면성이 있는 현상이다. 즉 마찰이 필요한 경우가 있고 이것이 없을수록 좋은 경우도 있기 때문이다. 예를 들면 마찰열을 이용해 불을 만든 것이 그 하나이고 다른 하나는 마찰을 줄이기 위해 발명한 바퀴이다. 이 두 가지 모두 인류 역사상 위대한 발명품으로 뽑히는 것들이다.

학문적으로는 Galileo와 Newton에 의해 고전역학이 완성된 다음에 Amonton이 1699년에, 그리고 Coulomb이 1785년에 마찰과 관련된 실험식을 발표했다. 그 내용은 마찰력이 물체에 작용하는 수직 힘에 비례한다는 내용이며 여기에서 마찰계수가 처음으로 나타내게 된다. (그림2.3)

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 응착 현상을 납과 납의 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 실제로는 에너지 손실이 일어나게 된다. 따라서 Amonton과 Coulomb이 발견한 것은 극히 제한적으로 적용 가능한 이런 식 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 받아 들여지지 않았다. 그 후에 Holm, Ernst와 Merchant, Bowden, Tabor가(1940년대 연구논문) 마찰력은 양면성이 있는 힘으로서 변형과 응착이 같이 작용하여 나타나는 현상으로 설명하였으며 이것이 오늘날 일반적으로 받아 들여지고 있는 이론이다.



$$\text{마찰계수} : f = F_{Fr} / F_N = \tan \delta$$

그림 2.3 Coulomb의 마찰력 측정장치

2.2 마모(Wear)

문헌상 나타나는 마모에 대한 연구는 Leonardo da Vinci가 처음이며 그는 구름베어링에 대해 기록을 남겼고 마모량이 하중에 비례하여 증가한다고 설명하였으며 30%Cu - 70%Sn 합금의 사용을 제시 하기도 하였다.

그 이후 마모에 대한 연구는 1930년대에 독일에서부터 시작되었다. Fachtel은 건조마모(dry wear) 를 표면 돌출부의 변형-전단의 반복에 의한 것으로 설명되었다. 이 이론은 Fialk, Mailander와 Dies에 의해 발전 되었으며 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 마모특성을 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 전문학술잡지의 창간호에서 (1957)마모현상을 다음과 같이 기구별로 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.

2.3. 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 실제로 연구가 시작된 것은 정밀한 기계가 만들어지기 시작한 산업혁명때 부터이다. 이전까지는 주로 이상적인 상태에서의 유체 역학에 대한 수학적 연구가 진행되어 왔고 실제적인 응용은 극히 미약하였으며 이것은 수학자인 Neumann에 의해 지적되었다.

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

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

1960년대에는 마모로 인한 파손이 급격히 증가하는 경향이 나타났다. 이 결과 그 당시 진행되고 있던 생산규모의 대형화, 자동화 때문에 생산중단에 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) 이 분야가 기계공학, 물리, 금속공학, 화학 등의 분야에 걸친 것이라는 점이 무시되었다.
- (2) 생산기술의 중요성 만이 강조되어 왔다.
- (3) “윤활”의 의미가 좁은 뜻으로만 쓰여 왔다.

이에 따라 영국에서는 마모로 인한 경제적 손실에 대하여 조사연구를 수행하였으며 1966년에 Jost에 의해 작성된 보고서에서는 마모로 인한 경제적 손실이 GNP의 4% 정도에 이를 정도로 크다는 것이 밝혀졌다. 또한 마모, 마찰, 윤활에 대한 조사연구결과 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 정책적으로 이 분야의 연구에 대한 투자를 시작하였으며 이것이 오늘날 영국 이 이 분야에서 세계적으로 앞서가게 된 기반이 되었다.

3. 마찰기구

마찰에는 고체/기체, 고체/액체, 고체/고체 등의 모든 계면 사이에서 일어날 수 있으나 표3.1에서 보듯이 고체/기체, 고체/액체의 경우에는 마모양상이 주로 침식(erosion)에 의해 일어나며 고체/고체 계면에서 일어나는 현상과 크게 다르므로 본 마모시험에서는 고체/고체 마모시험만을 다루겠다. 고체/고체 사이의 계면에서 일어나는 마찰에는 크게 미끄럼 마찰과 구름 마찰의 두 가지가 있다.

미끄럼 마찰은 구름 마찰보다 크며 마찰력의 차이 때문에 시험방법도 서로 다르다.

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

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

표 3.1. 마찰과 마모 양상

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 그림3.1과 같이 나타나며 이러한 표면 형상을 숫자로 나타낸 것이 표면 거칠기인 것이다. 따라서 정지하고 있을 때 두 물체의 접촉은 그림3.2와 같이 돌출부의 접촉에 의해 이루어지고 있는 것이다.

전체하중은 참 접촉면적 A_r 에 의해서 받쳐지고 있으며 접촉부분에서는 접촉면적이나 돌출부의 모양에 따라 탄성변형이나 소성변형이 일어난다. 이러한 정적인 접촉상태에서 미끄럼 운동이 일어나면 그 계면에서 일어나는 일은 그림3.3와 같으며 각 단계마다 나타나는 일은 다음의 순서로 진행된다.

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

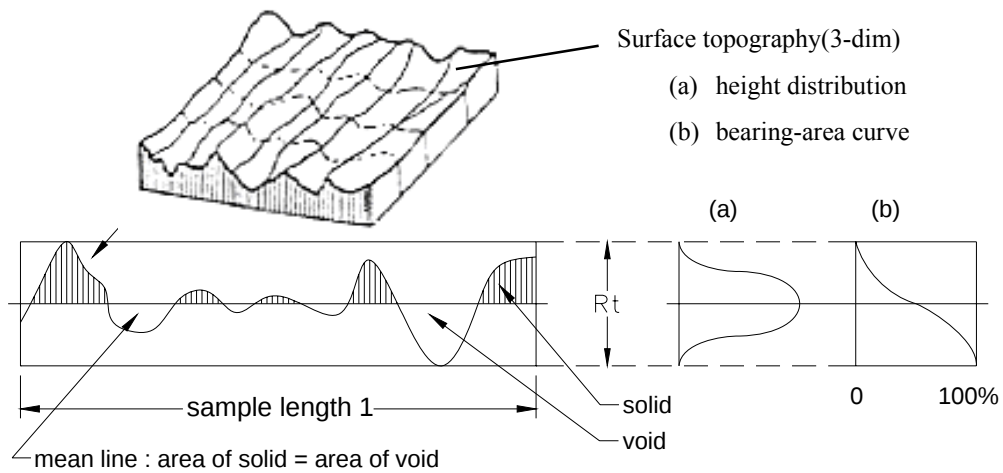


그림 3.1 물체의 표면 단면

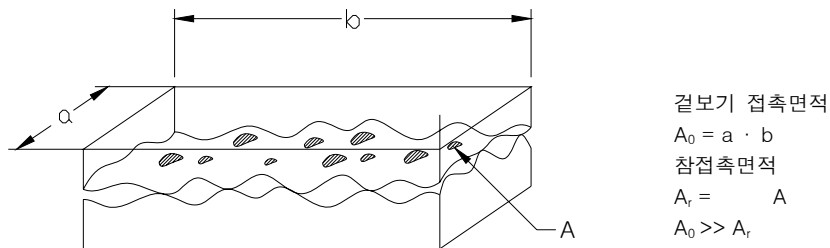
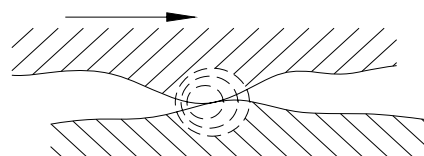
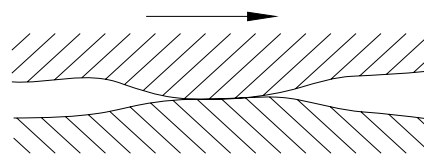


그림 3.2 정지상태에서 움직이기 시작할 때 접촉부위에서 나타나는 현상



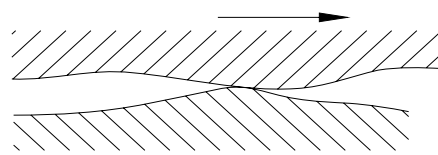
1 단계

1단계 : 탄성 및 소성 변형, 흠 패임



2 단계

2단계 : 응착(Adhesion)



3 단계

3단계 : 응착부위전단

그림 3.3 정지상태에서 움직이기 시작할 때 접촉부위에서 나타나는 현상

이 결과 전체적인 미끄럼 마찰은 위의 4가지 일들의 합으로 나타난다.

즉,

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

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.

미끄럼 마찰은 이와같이 정성적으로 설명될 수 있으며 이들을 수식적으로 표현하면 더욱 복잡해진다.

표3.2는 금속/금속 혹은 비금속/금속 간의 접촉에 있어서 윤활조건에 따른 마찰계수의 크기를 나타내고 있다.

구름마찰은 미끄럼 마찰보다 훨씬 작으나 이것도 역시 미끄럼마찰 만큼이나 복잡하다. 미끄럼마찰에서는 전단변형에 대한 저항이 크게 작용하나 구름마찰에서는 전단이 거의 일어나지 않는다. 구름마찰에 기여하는 요소로는 다음의 것들이 있다.

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

	금 속/금 속	비 금 속/ 금 속
청 정 표 면	$2 \sim 50 \times 10^{-4}$	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}

표 3.2. 미끄럼 마찰 계수

미세미끄럼은 구름접촉면에서 접촉부위별로 표면과 평행인 방향으로 움직이는 거리가 다르거나 견인력(traction force)이 다르기 때문에 나타난다. 예를 들면 볼 베어링의 경우, 볼과 내외륜의 접촉면에서의 탄성 변형 때문에 실제로 고정적인 접촉이 안되며 미끄러지는 현상 때문에 접촉면에서 움직이는 거리가 부위별로 달라지게 되어 미세미끄럼이 일어난다. 그림3.4는 이 현상을 나타낸 것으로서 미끄럼이 일어나는 부분을 알 수가 있다. 견인력이 다른 경우는 그림3.5에 나타나 있는데 이 때는 움직이는 거리의 차이 때문에 생기는 미끄럼이 아니고 접촉면에서의 견인력 F_T 가 수직으로 작용하는 힘 F_N 보다 크면 미끄럼이 일어나는 것으로서 F_N 은 Hertz압을 나타낸다. 따라서 그림3.5를 보면 두 개의 원판이 닿아 있을 때 맞물리기 시작하는 반대쪽에서 미세 미끄럼이 일어나는 것을 알 수 있다.

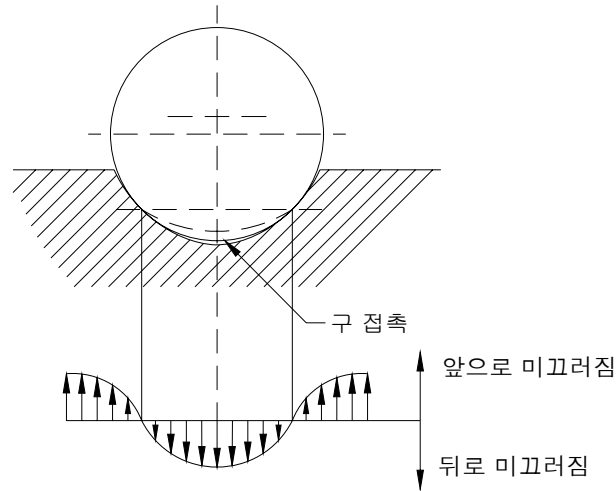


그림 3.4 구름 베어링에서 움직이는 거리의 다름 때문에 일어나는 부위

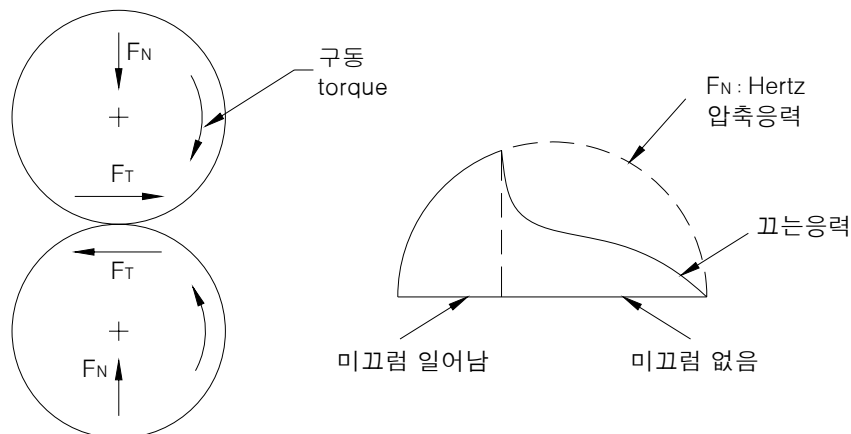


그림 3.5 구름접촉면에서 견인력 F_T 가 수직력 F_N 보다 커서 미끄럼이 일어나는 부위

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 탄성이력으로 인한 에너지 손실이 있게 되며 이것이 구름마찰력의 일부 구성 요인으로 기여하게 된다.

두 물체의 접촉면에서의 부하가 어느 임계 값을 넘으면 소성변형이 일어나며 여기에 소요된 에너지가 구름마찰력으로 나타나게 된다. 소성변형에 의한 구름마찰력은 구름운동의 초기에 그 기여도가 크고 점차적으로 그 효과가 감소한다.

응착부위의 전단에 의한 구름마찰력은 비교적 그 비중이 작은 편이다.

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, 연상 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 마모특성
- (6) 마모율
- (7) 마모표면의 형상

마모시험과 관련된 요소들은 뒤에서 자세히 기술되므로 본 난에서는 마모기구에 대해 간략히 살펴 보겠다.

마모와 관련된 기본적인 상대의 운동종류는 그림2.1에서 보듯이 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 한가지 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 반복접촉에 의한 피로 때문에 균열이 생겨 일어나는 마모
- (나) 연삭 마모: 단단한 면의 돌기나(asperity) 경질입자의 절삭작용에 의해 일어나는 마모
- (다) 응착 마모: 참 접촉 부에서 생긴 응착 부분의 전단에 의해 생기는 마모
- (라) 부식 마모: 분위기나 윤활제의 부식작용과 마찰의 기계적 작용이 같이 일어나면서 생기는 마모

그림4.1 은 그림2.1을 보다 간단히 나타낸 것이며 표4.1은 마모기구의 종류에 따라 일어나는 마모과정 및 마모표면의 형상을 정리한 것이다.

	마 모 과 정		
	마모물체 및 마모면	이동	변화
표면피로	피로	파괴	균열, 공식(pits)
연삭	변형	파괴	깊은 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)

표 4.1. 마모기구에 따른 마모과정의 종류 및 마모표면의 형상

마모 시스템 구 성	 상 대 운 동	마 모 기 구		응 력		응력 + 재료	
		표면 피로	연삭	응착	부식 마모		
고체 / 액체 -건조마모 -윤활마모	미끄럼(sliding)	미끄럼 마모					
	구름(rolling)	구름 마모					
	때림(impact)	때림 마모					
	진동(oscillation)	fretting 마모					
고체 / 고체	흐름(flow)	침 식					
고체/유체+가루	흐름(flow)	침 식					

그림 4.1 마모기구의 종류 및 상대운동의 종류

표면피로는 주로 반복접촉이 일어나는 구름접촉시스템, 즉 볼 베어링 같은 곳에서 잘 일어난다. 헤르츠의 계산결과에 따르면 두 물체가 접촉할 때 최대 전단응집력은 표면이 아니라 표면에 가까운 물체의 내부에서 나타난다. 따라서 베어링의 내륜이나 외륜의 어느 한 곳을 기준으로 보면 계속적으로 볼이 지나가면서 전단응력을 반복적으로 받게 되어 결국 피로 현상에 의해 균열이 생기고 이것이 커져서 떨어져 나가게 된다.

그림4.2는 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 그림4.3은 그 예이다. 이 마모기구(磨具)는 마모로 인한 손실 원인 가운데 50%를 차지할 정도로 많이 나타나는 것이며 그림4.4에서 보듯이 미세전단(micro-cutting)에 의한 변형이 주요 기구이다. 연삭마모 때의 마찰계수는 표4.2와 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 마모시험방법 가운데 비교적 일찍부터 규격화된 시험방법이 연삭마모에 대한 것이다(ASTM G65). 연삭마모에서는 마모 부스러기나 연삭제의 경도가 매우 중요한데 경도에 따른 마모량은 그림4.5와 같은 관계가 있으므로 마모손실을 줄이려면 재료의 경도가 연삭제나 마모 부스러기의 정도보다 1.3배 이상이어야 한다. 그러나 1.3배보다 무작정 커진다고 해서 비례적으로 좋아지는 것은 아니므로 굳이 1.3배 보다 크게 하려고 애쓸 필요는 없다.

응착마모는 재료의 상호작용의 중요한 요소로 작용하는 마모기구이다. 응착은 Van der Waals 힘과 1nm 정도의 거리에서 작용하는 강한 표면력에 의해 나타나는데 그 종류는 그림4.7과 같다. 응착의 원인이 되는 힘의 종류에서 알 수 있듯이 금속의 표면이 산화막에 덮여 있지 않으면 응착이 더욱 잘 일어난다. 따라서 응착마모는 진공중에서 잘 일어나며 재료의 특징이 중요하게 작용하는 마모기구이다. 응착마모는 그림3.3에서와 같이 응착이 일어난 부분에서 전단 등에 의한 파괴가 일어나면서 재료가 옮겨 붙거나 마모 부스러기가 생겨 일어난다. 그림4.6은 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. 그림4.8은 이러한 예를 보여주고 있으며 일반적으로 2개의 접촉면이 먼저 주위 분위기와 반응하여 산화물, 염화물 등의 반응생성물이 표면에 생기고 이들이 서로 접촉하면서 반응층이 깨져나가고 마모부스러기가 생기며 새로운 표면이 나타나면서 위의 과정이 반복되어 일어난다. 마모기구 가운데서 가장 복잡한 형상이며 시험도 어려울 뿐 아니라 시험결과의 해석도 쉽지 않다.

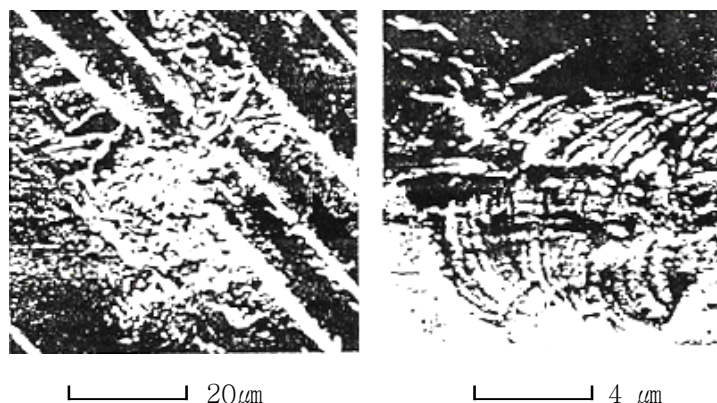


그림 4.2 표면피로와 마모면. -피로파괴의 특성인 물결부늑이 보인다.

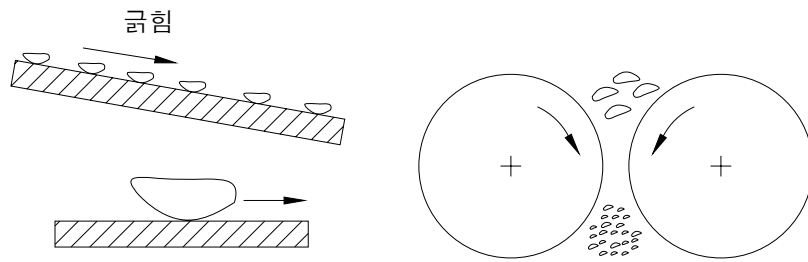


그림 4.3 연삭 마모의 작동 형상

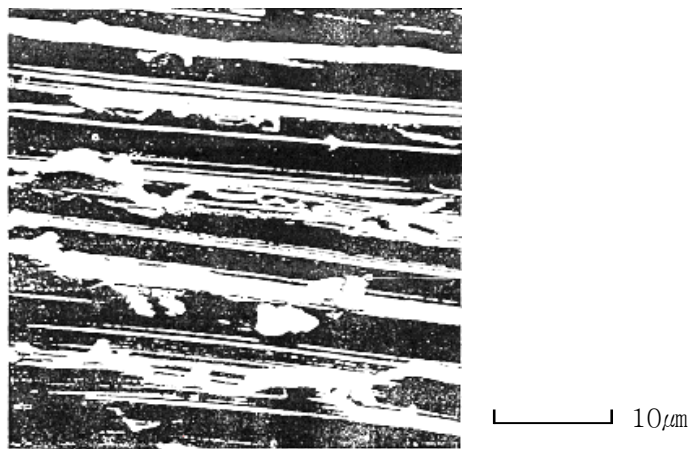


그림 4.4 연삭마모에 의한 마모흔적, 미세전단이 일어났음을 알 수 있다.

	연마제 크기	마찰계수
2 - body	$\sim 100 \mu\text{m}$	1×10^{-1}
3 - body	$\sim 100 \mu\text{m}$	5×10^{-2}
3 -body	$\leq 1 \mu\text{m}$	10×10^{-4}

표 4.2. 연삭마모 계수

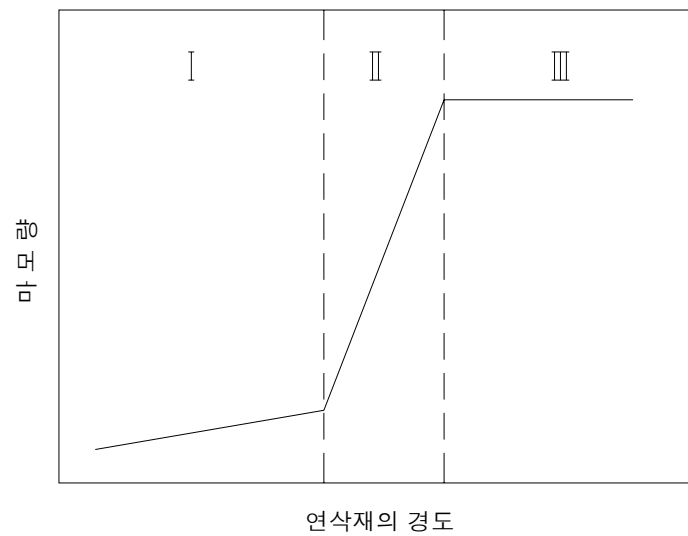


그림 4.5 연삭재의 경도에 따른 마모량의 변화

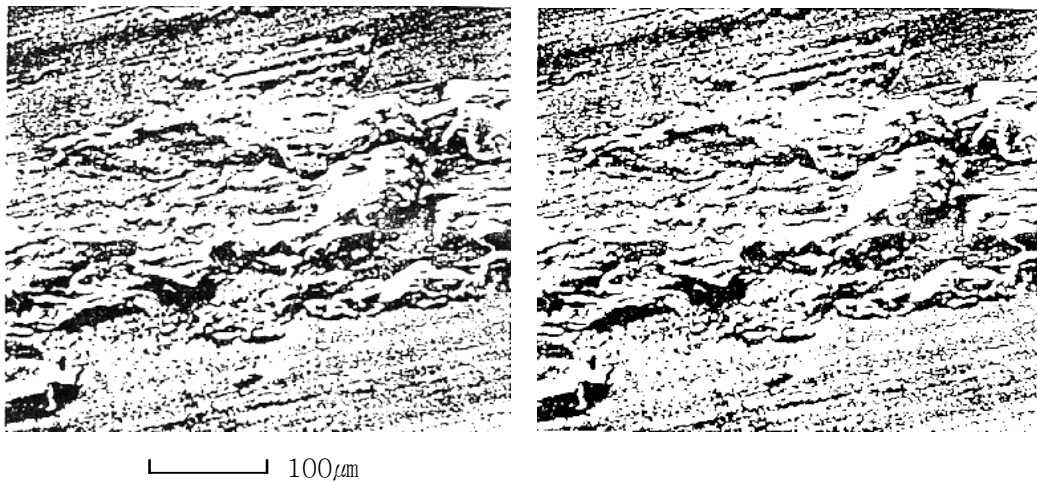


그림 4.6 응착마모 표면

전단에 의한 파괴가 응착이 일어난 계면에서 일어나지 않고
그 아래 부분에서 일어나 재료가 다른 표면에 옮겨 붙어 있는 것을 볼 수 있다.

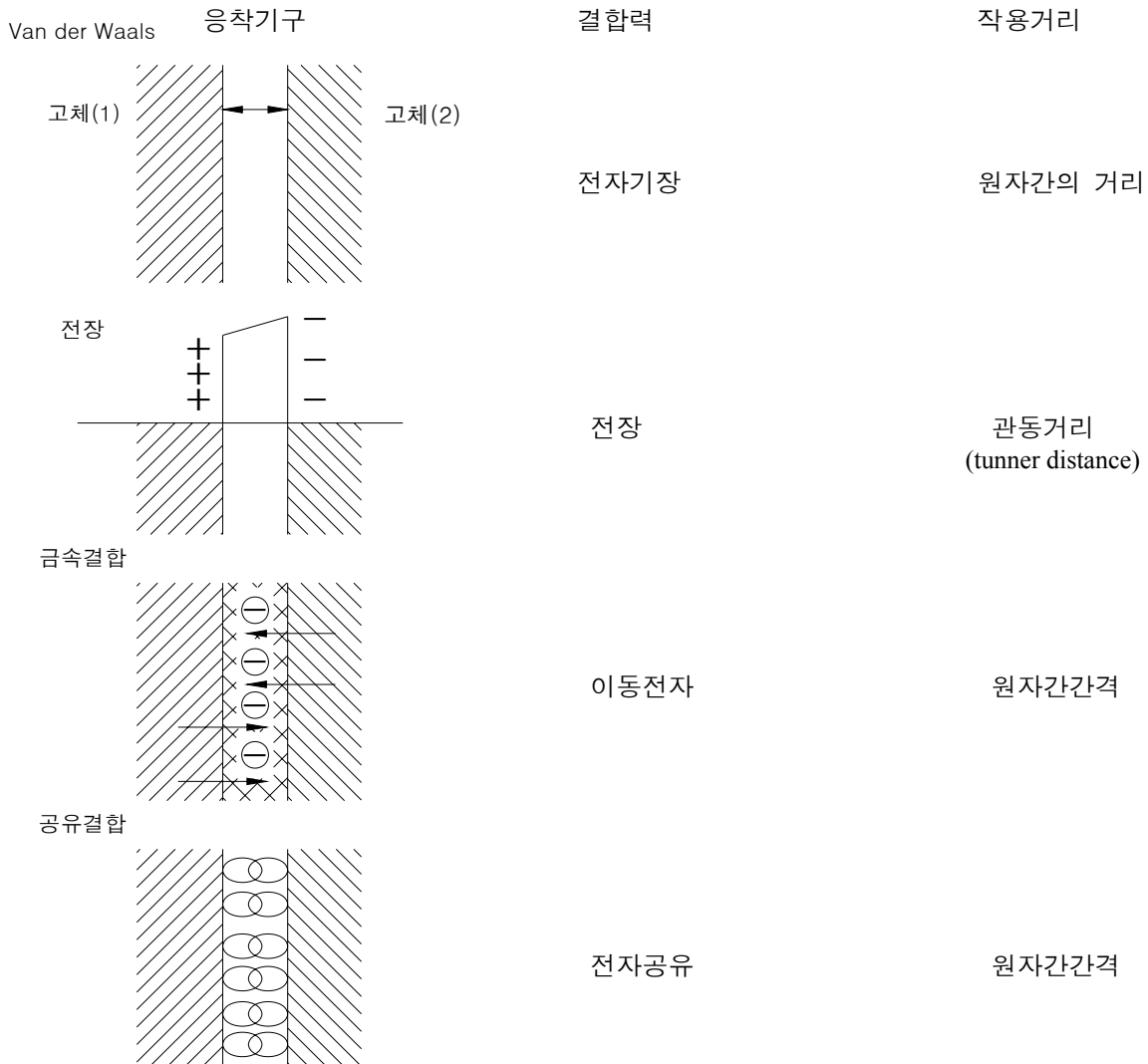


그림 4.7 응착(adhesion)에서 작용하는 표면 결합력의 종류와 작용거리

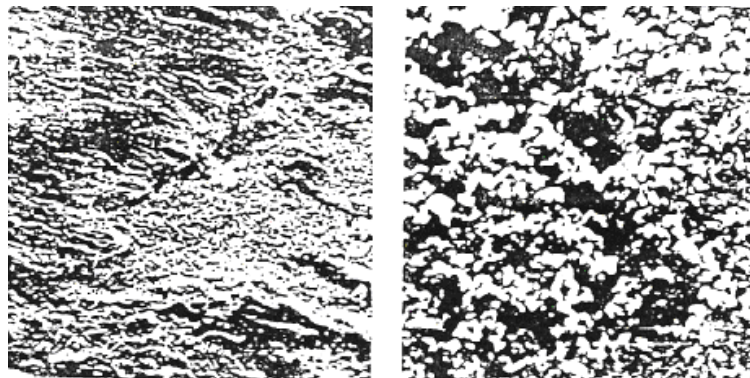


그림 4.8 부식마모(tribo-chemical wear)가 일어난 표면

5. 윤활기구

윤활의 목적은 두 접촉표면을 기름 등의 얇은막으로 떼어 놓아 잘 미끄러지게 하는 것으로서 윤활의 양상에는 3가지가 있다. 그림 5.1 은 Stribeck 곡선으로서 마찰계수가 윤활조건에 따라 크게 바뀌는 것을 알 수 있으며 대략 3영역으로 나뉘어 질 수 있다. 즉 경계윤활, 혼합윤활, 유체윤활의 3영역으로서 이들의 윤활조건에 따른 특성은 표 5.1 과 같으며 비교를 위하여 건조마찰의 경우를 추가하였다.

표에서 알 수 있듯이 유체유티환 상태에서는 두 접촉면이 유체의 얇은 막에 의해 완전히 분리되어 있으므로 마모는 거의 일어나지 않으며 따라서 이 조건은 유티환유의 특성을 평가하는데 자주 사용되는 조건이다. 즉 하중을 작게 하고 속도를 빠르게 하고 점도를 크게 하면 이러한 조건이 된다. 이 조건에서 마모시험을 하면 쓸모 없는 결과만을 얻게 되므로 주의하여야 한다. 참고로 유체유티환조건에서의 파손은 마모기구와 달리 피로, cavitation, 침식 등으로 나타나며, 나타나는 확률은 위의 순서대로 이다. 유체유티환조건에서 하중이 커지거나, 유티환의 점도가 떨어지거나, 회전속도가 느려지면 혼합유티환조건이 되며 이때는 유티환막의 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 윤활조건은 이론적으로 가장 발달이 더딘 분야이며, 지금까지 해결이 안된 어려운 문제들이 대부분 이 조건에 속한다.

	건조마찰	경계유탈(Ⅰ)	혼합유탈(Ⅱ)	유체유탈(Ⅲ)
유탈조건	건조표면	표면에 응집력으로 붙어 있는 얇은 기체나 액체막	부분유탈, (Ⅰ+Ⅱ)의 형태	완전 유체유탈
점도의 영향	없음	없음	부분적 영향	결정적 영향
접촉과정의 특징	돌출부의 유착	돌출부의 역학적 접촉	(Ⅰ+Ⅱ)의 형태	동수압적 또는 정수압적 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)**	-	$\Lambda < 1$	$1 < \Lambda < 4$	$1 < \Lambda < 10$

표 5.1. 유희조건에 따른 특성

*유막두께 $h = (\eta \times v) / F_N$

η : 윤활유 점도, v : 속도,

F_N : 하중 (Hertz 압)

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

경계유흡상태에서는 두 물체 표면의 돌출부가 본격적으로 닿기 시작하여 유체의 막 두께가 표면 거칠기보다 작은 상태이다. 마모가 문제가 되는 경우는 대부분 이 유흡상태에 속한다. 따라서 마모시험을 할 때는

시험 목적에 따라서 혹은 모의 시험의 대상이 되는 시스템의 윤활조건에 따라서 주의 깊게 윤활조건을 설정 하여야 한다.

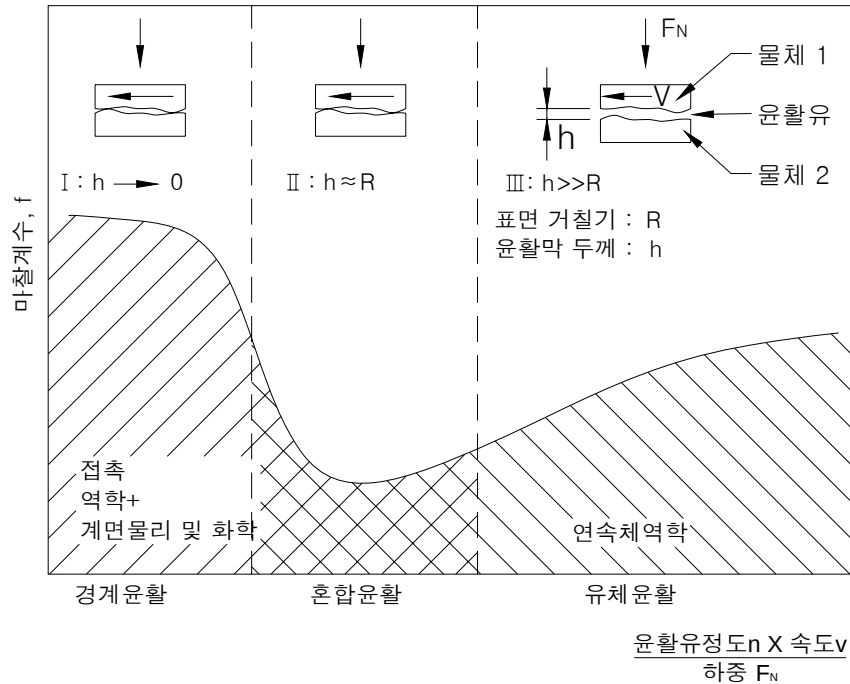


그림 5.1 윤활막의 두께와 표면 거칠기의 상관관계에 따른 마찰계수의 변화(Stribeck 곡선)

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

그림 5.2는 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 유체윤활조건을 기준으로 나타내었으며 이 그림으로 부터 몸무게가 가벼운 사람이 빠른 속도로 수상스키를 하면 유체윤활조건에 가장 가깝게 됨을 알 수 있다.

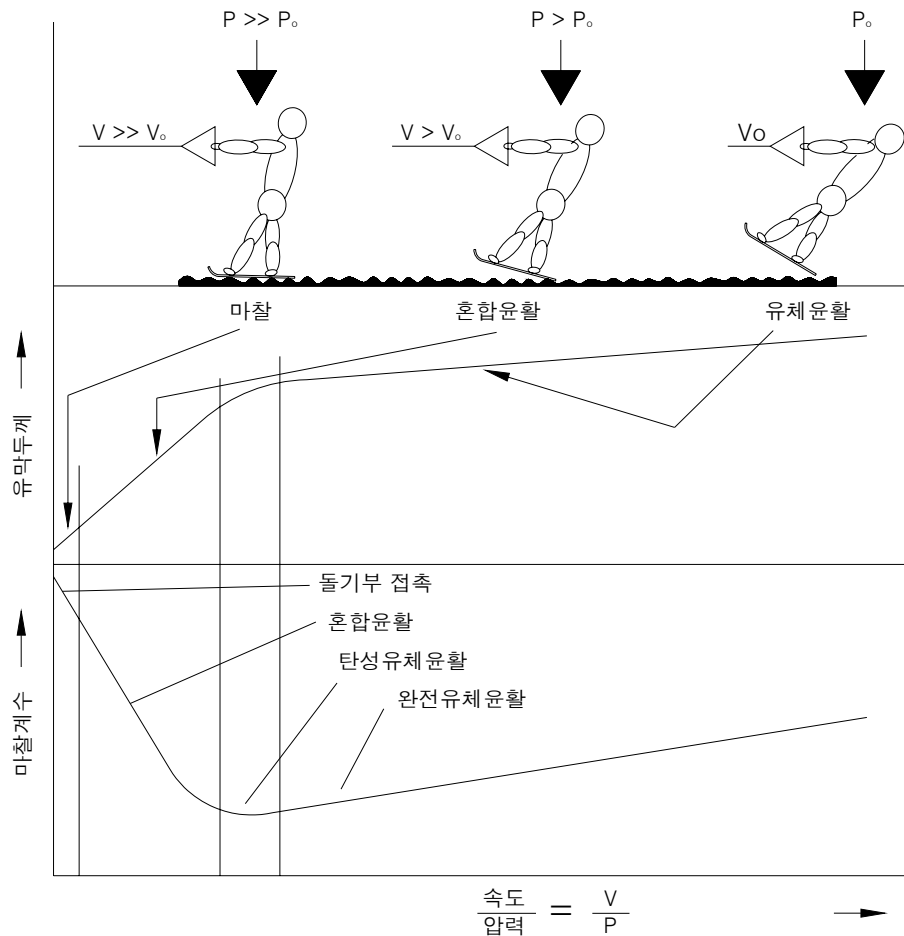


그림 5.2 (속도/압력)에 따른 운환조건의 변화

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 모의실험이다. 이것도 또한 내마모 특성이 재료의 고유한 성질이 아니라는 데서 나타나는 특성이다. 즉 주어진 운환조건에서의 모의시험을 통해 가장 좋은 재료를 고르거나 주어진 재료에 적합한 가장 좋은 운환방법을 찾는 것이 모의시험의 목적이다. 따라서 재료의 내마모성을 향상시키는 연구의 경우에는 일반적으로 적용 가능한 시험결과를 얻을 수 있는 비교적 간단한 시험장치가 요구되나 모의시험이 목적인 경우에는 시험결과와 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 모의시험 결과가 과연 실제상황과 비슷하게

이루어졌는가 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 실제상황보다 열악한 조건, 즉 고하중, 고속 등의 조건에서 시험하여 마모가 빨리 일어나도록 하는 것인데 이때는 가속시험조건에 따라 마모기구가 변하지 않도록 주의 하여야 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 마모시험 장치를 고안하기도 해야 되고 끊임없는 개선이 요구되며 계속적인 사고와 시험설계가 필요한 특이한 분야로서 이것이 다른 재료시험법과 다른 점이다.

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, 열 전도도, 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 선정함으로써 결정되는 요인이고 나머지 요인들이 마모시험과 직접적으로 관련이 있는 요인들이다. 이 요인들이 마모시험과 어떤 관계가 있는지 보여 주고 있는 것이 그림 7.1 이다. 이 그림에서 움직임의 종류는 시험방법에서의 상대운동이 어떤 종류인가를 나타내는 것으로서 여기에는 기본적으로 4가지의 움직임이 있으며 그림7.2는 이를 보여 주고 있다. 이 4가지 움직임에 시간 t의 변수를 곱하면 각 움직임마다 다음의 4가지 방법이 더 나타난다.

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

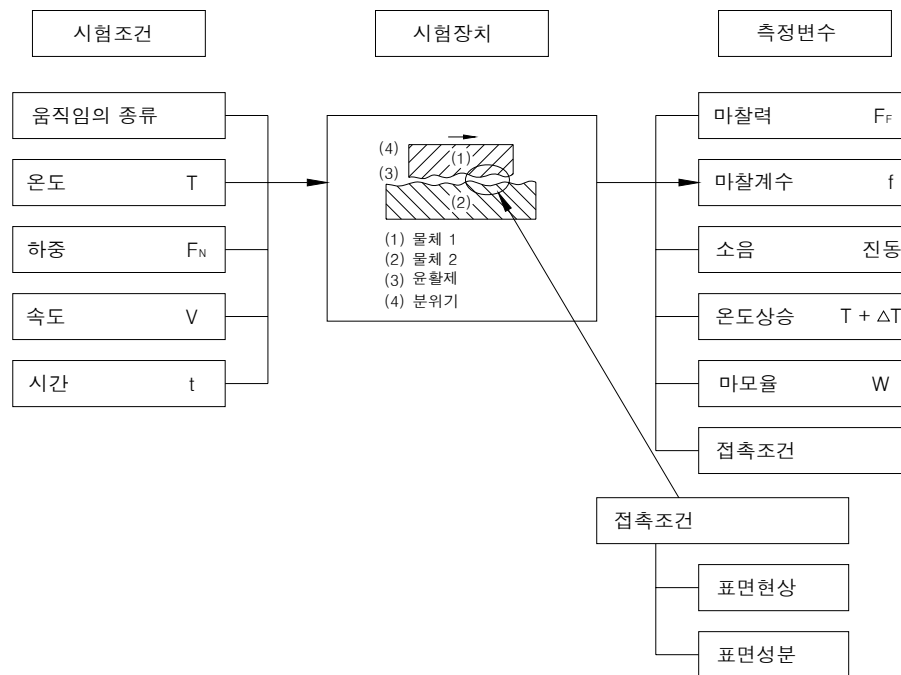


그림 7.1 마모시험에 영향을 미치는 요인들

따라서 마모시험은 위의 조건들이 결합되는데 따라 갖가지 방법이 있을 수 있음을 알 수 있다. 미국 윤활 학회(ASLE)에서 조사한 결과 시험방법의 종류가 230여 가지 이상이 되는 것도 무리가 아닌 것이다. 시편들의 조합 및 운동방법 가운데 대표적인 것들을 간략히 그림으로 나타낸 것이 그림 7.3 이다.

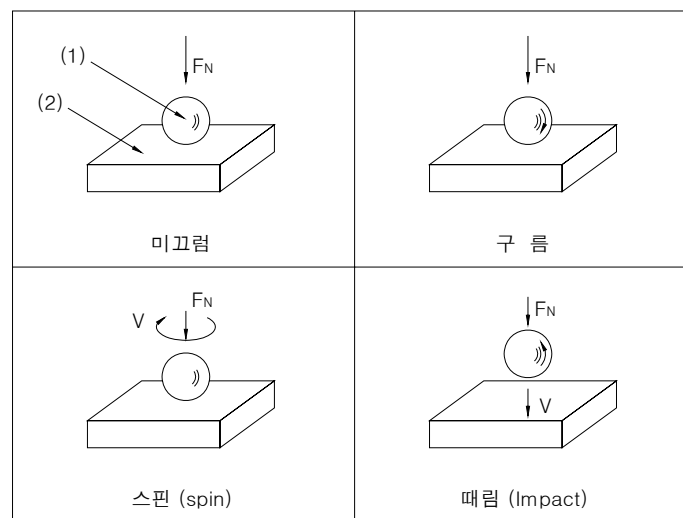


그림 7.2 상대운동의 4가지 기본 움직임

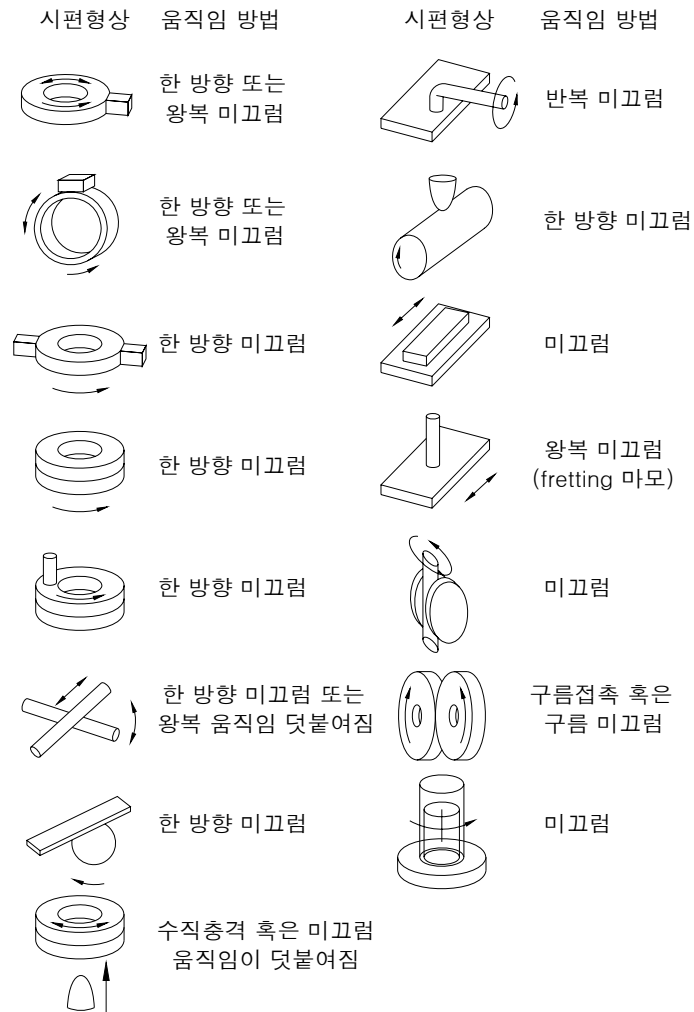


그림 7.3 시편의 모양 및 운동방법에 따른 각종 마모시험방법

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.

마모시험방법의 분류는 그림7.2의 움직임의 종류에 따른 것으로서 마모시험기에 따라 그 특성이 다 다르다. 이들에 대해서는 다음절에서 하나하나 살펴보고 본 난에서는 마모시험에 있어서 공통적으로 영향을 미치는 시험조건, 즉 요인들에 대해 살펴보고 측정 변수 및 측정 방법에는 무엇이 있는지 알아 보겠다.

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 이 온도는 측정하기도 어려울 뿐더러 지금까지도 만족스러운 측정방법이 개발되지 않았다. 아래의 식은 접촉면의 온도를 나타낸 것으로서 이로부터 접촉면 사이의 온도가 무엇의 영향을 받는지 알 수 있다.

$$T_s \propto (fPu/AK \times G + T_a)$$

여기서	T_s : 접촉면 사이의 온도	u : 속도
	f : 마찰계수	T_a : 주위온도
	P : 하중	A : 면적
	G : 열전달 함수	K : 열전도도

위 식에서 또 다른 고려점은 두 개의 접촉하는 시편이 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 핀과 원판 시험 같은 경우는 원판의 크기에 따라서 시험결과가 달라질 수가 있는데 그 이유는 핀이 닳지않는 동안 원판의 마모궤도 부분의 온도가 식고 그런 다음에 다시 핀에 닿게 되어 온도의 반복적인 상승-하강을 겪는데 온도변화 크기가 원판회전 속도가 일정하다면 원판의 크기에 따라 결정되기 때문이다. 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 마모파편을 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.

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 앞서와 같이 온도상승 때 나타나는 효과를 가져올 수 있다.
- (나) 하중이 증가하면 접촉측 면적이 증가하며 이 결과 마모량이 늘어나게 된다.
- (다) 하중이 증가하면 윤활막의 두께가 줄어듦과 돌출부의 접촉이 더 많이 일어나게 되며 이 결과 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 흥내내기 정도는 만족할 만하나 한가지 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. 그림 7.4는 하중에 따라 마모율이 비례적으로 증가하지 않고 급격히 늘었다 줄었다 하는 양상을 보여주고 있다.

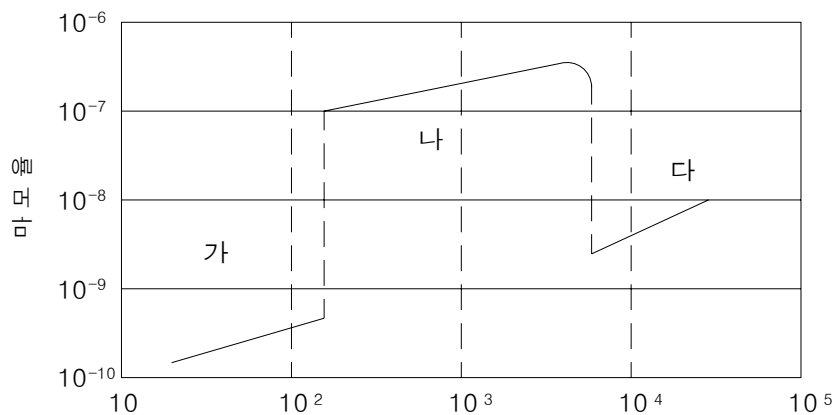


그림 7.4 하중에 따른 마모율의 변화(AISI 1052, 핀-원판시험)

7.3 속도

속도는 하중과 마찬가지로 표면온도와 윤활막의 두께에 영향을 미친다. 속도를 비슷하게 흥내 내는 것은 어렵지 않으므로 큰 문제가 없으나 문제는 고하중, 고속의 조건에서 나타난다. 즉 시험시간을 줄이기 위하여 가속시험을 할 때 시험조건이 고속, 고하중이 되기 쉬운데, 이때 윤활조건이 실제상황과 같은 조건이 되도록 주의해야 한다. 그림 7.5는 속도에 따라 마찰계수가 변하는 것을 보여주고 있다.

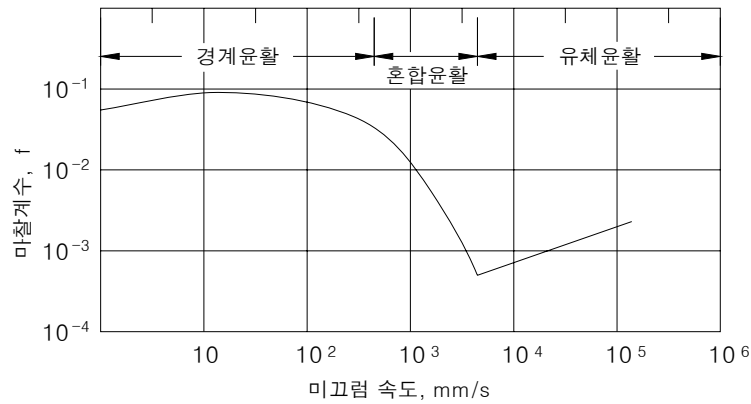


그림 7.5 속도에 따른 마찰계수의 변화

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 일어날 수 있다. 또한 마모에 있어서 피로가 중요한 작용을 하므로 동일한 시간 동안 동일한 거리 만큼 움직였다 하더라도 시편의 크기(예: 핀과 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 달라지게 되므로 급격한 마모파손(scuffing 혹은 seizure)이 일어나게 된다. 따라서 가속 시험 때는 마모양상이 변하지 않는 범위 내에서만 하중과 속도를 조절하여 무리하게 시간을 단축시키지 않도록 해야 한다.

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

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.

$$A_r = P/V$$

여기서 A_r : 참 접촉 면적

P : 하중

V: 압입경도

그러나 하중이 높아지면 Ar은 겉보기 접촉면적과 같게 되고 마찰계수도 감소하므로 주의해야 된다. 그리고 겉보기 접촉면적이 커지면 마모부스러기들의 영향이 점점 더 커지게 된다. 그 이유는 마모부스러기들이 더 많이 두 물체의 표면 사이에 끼이게 되기 때문이다. 겉보기 면적이 작아지면 유체윤활이 작용하는 면적이 같이 작아져서 마모율이 증가한다.

초기의 마모, 마찰에 대한 연구에 있어서는 표면 끝마무리, 즉 거칠기 등이 매우 중요한 요소로 인식되었으나 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 마찰계수가 0.05이하로 떨어지면 윤활조건이 바뀌었을 가능성이 있으므로 주의하여야 한다.

그리고 최근 들어 표면과학이 발달하면서 마모결과에 미치는 표면특성, 특히 표면층의 미세구조나 화합물 등의 영향에 대한 연구가 활발히 이루어졌다. 이 결과 진공중이나 산화분위기, 혹은 습기가 있는 분위기 등에서는 표면특성이 크게 바뀌어 시험결과에 큰 영향을 미치는 것이 밝혀졌다. 그림 7.6은 표면층의 구조를 나타내고 있다.

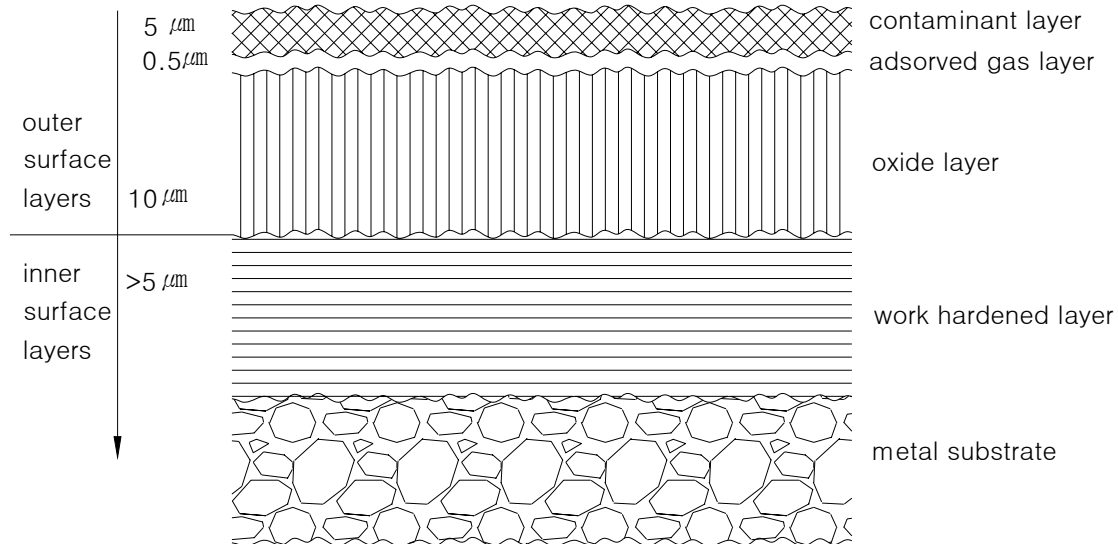


그림 7.6 재료의 표면 층 단면

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. 그림 7.7 은 1.5% Mn강의 마모시험결과에 미치는 습도의 영향

을 잘 보여주고 있다. 특히 산소의 영향은 매우 큰 것으로 나타나고 있으며 불활성 분위기나 진공 중에서의 시험결과는 공기 중에서의 시험결과와 매우 다른뿐더러 마모기구도 다르다. 시험은 실제상황과 비슷한 분위기에서 수행하여야 하며 우주공간 모의시험 같은 경우에는 초고진공에서 시험을 하여야 한다.

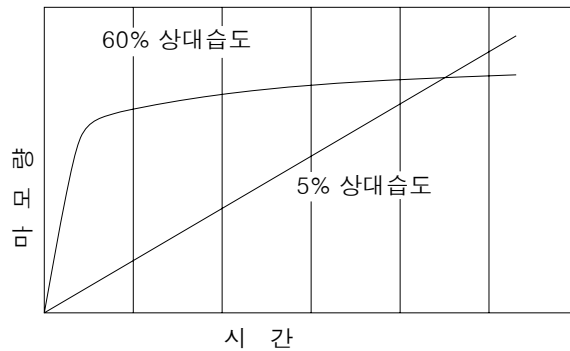


그림 7.7 마모율에 미치는 습도의 영향(직교원주 시험)

7.7 윤활

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

탄성유체윤활은 완전 유체윤활과 비슷하나 표면에서의 탄성변형이 같이 고려된 경우로서 점접촉이나 선접촉의 경우에 나타나며, 특히 구름 베어링, 기어의 톱니바퀴 등과 같이 접촉 부에서 고압이 발생되는 경우 나타난다. 완전유체윤활과 비슷하나 재료의 탄성계수와 항복강도가 부가적인 요인으로 작용한다.

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

경계윤활이나 유체, 혹은 탄성유체 윤활조건을 마모시험 동안 일정하게 유지하여야 시험 결과를 해석할 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, 고체윤활제가 마찰계수에 미치는 영향은 일반적으로 그림 7.8 과 같다. 그림의 영역(가)에서는 표면 미끄럼이 일어나고 영역(나)에서는 윤활막의 진단이 일어나는 부분이다. 영역 (가)에서는 온도가 증가함에 따라 고체 윤활제의 강도가 떨어지나 접촉면적이 증가하므로 마찰계수가 일정하다. (마찰계수 $f = \frac{Ar \cdot S}{P}$, 여기서 S는 고체 윤활의 전단강도, P는 하중, Ar은 접촉면적) 그러나 어느 임계온도가 되면 재료가 연화되어 Ar은 겹보기

접촉면적 A_0 와 같게 된다. 이 때문에 마찰계수가 갑자기 증가한다. 그러나 이때부터는 접촉 면적이 일정하므로 온도가 상승함에 따라 S 가 줄어들면서 f 도 작아진다. 고체윤활제는 유체윤활과 특성이 많이 다르며 유체윤활제보다 수명이 짧으므로 주의해야 한다. 윤활제의 선택은 흥내내는 대상의 윤활제에 따라 결정되며 고체윤활제는 유체윤활제 사용이 불가능한 경우, 즉 진공이나 고온에서 사용된다.

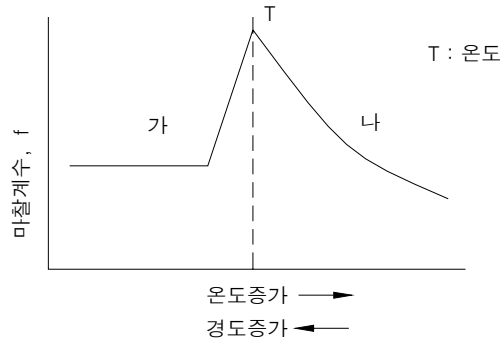


그림 7.8 고체윤활제의 특성

여기서 경도 H 는 고체 윤활막의 경도이다.

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 안 섞인 광유(mineral oil)를 사용한다.

8. 측정변수 및 측정방법

마모시험을 하면서 측정해야 하는 것들은 마모시험결과 나타나는 물리적인 양이며 그 종류는 그림7.1에 있는 것 같이 여러 가지이다. 즉, 단순히 인장강도 시험처럼 강도에 해당하는 마모율만을 측정해서는 시험 결과의 보편성이 없다. 따라서 시험조건의 제시와 함께 여러 요소들의 측정결과도 보고해야 된다. 본 절에서는 마모시험을 어떻게 하고, 무엇을 측정해야 되고, 어떤 기술이 있는지 살펴보겠다.

8.1 측정변수

마모시험에 있어서 하중, 속도, 분위기는 일반적으로 시험하기 전에 결정되고 시험하면서 측정해야 되는 변수들은 기계량, 열량, 물질량의 3가지로 나눌 수 있다. 기계량에는 마찰력, 마찰계수, 진동 및 소음 등이 있고, 열량에는 온도가 있으며, 물질량으로는 마모율이 있다. 이 밖에도 윤활막의 두께나

접촉저항 그리고 표면손상 등도 측정해야 되는 변수들이다.

이 가운데서 마찰력은 변형게이지나 토크셀을 이용하면 측정이 가능하고 전체적인 온도는 정지되어 있는 시편의 접촉면 근처에 열전대를 설치하면 측정이 가능하다. 속도는 속도계로 측정이 되며 분위기는 시험 전에 미리 결정하여 유지하면 된다.

그러나 접촉면의 온도, 저항, 표면 접촉상태 등은 매우 측정하기 어렵다. 온도는 매우 중요한 측정변수이므로 다음절에서 따로 다루겠다. 접촉면 사이의 저항을 재려면 낮은 전압에서(10~100mV) 측정 가능한 장치가 필요하며 이로부터 참접촉 면적이 어느 정도나 되는지 알 수 있어 윤활제의 성능을 표시해 주는 변수로 활용 될 수 있다. 즉, 윤활제가 좋을수록 두 표면을 잘 떨어지게 하므로 저항이 증가한다. 그러나 이 방법은 저항이 0.1Ω에서 100KΩ까지 μs 안에 극심하게 변하므로 측정이 쉽지 않다. 따라서 측정장치에는 고속신호처리기능이나 신호저장 장치가 필요하다. 실험결과의 해석도 쉽지 않으며 윤활유 첨가제, 접촉면 등의 영향도 고려하여야 한다.

표면손상의 측정은 가장 좋은 방법이 사진을 찍는 것으로 인식되어 있으나 이것만으로는 부족하고 표면의 형상(profile)을 측정해야 한다. 윤활막의 두께는 광학현미경을 이용하거나 정전용량 (capacitance) 방법, X-선을 이용한 방법 등으로 측정이 가능하다.

8.2 온 도

Tribology의 발전에 있어서 가장 큰 장애요인 가운데 하나는 지금까지 접촉면의 온도를 측정할 수 있는 좋은 기술이 발명되지 않았다는 점이다. 지금까지 개발된 접촉면의 온도를 측정하는 방법으로는 대략 4가지가 있는데 그림8.1과 같다.

위의 방법들은 모두 장단점이 있다. 즉 시편 자체가 열전대 역할을 하는 경우에는 윤활유 첨가제에서 발생하는 기전력이나 여러 곳의 접점이 문제이고 열전대를 시편의 접촉면 근처에 대는 경우는 직접적인 온도 측정이 불가능하다. 이 문제를 해결하기 위해 일정한 간격을 두고 열전대를 여러 개 부착하여 온도 구배 곡선을 구해서 접점의 온도를 외삽하여 구하는 방법이 있다. 복사온도계로는 정확한 온도 측정이 어렵거나 투명한 재질의 경우만 정확한 측정이 가능한 단점이 있다.

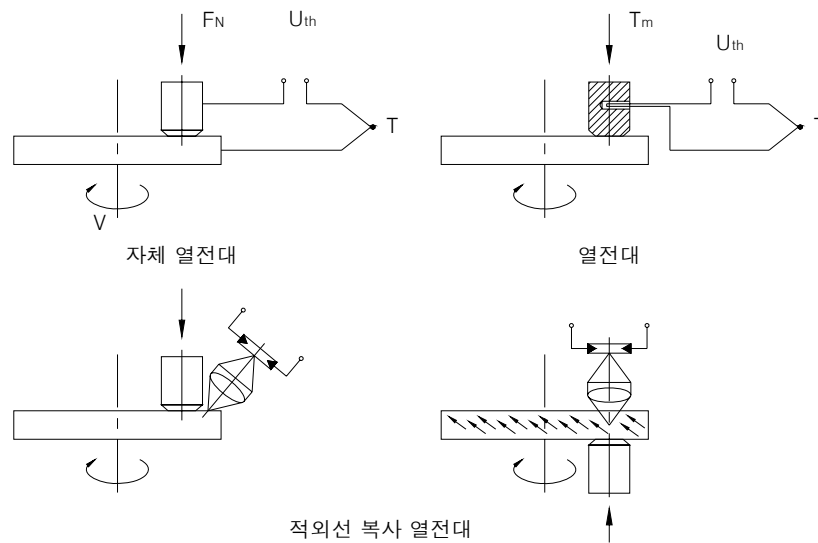


그림 8.1 접촉면 온도측정 기술의 종류

8.3 마모량

마모량의 측정에는 여러 가지가 있다. 독일규격 DIN 50321에 따르면 마모량은 직접적인 방법이나 상대적인 방법에 의해 측정가능 하다고 되어 있다. 직접적인 측정방법으로는 다음의(1), (2), (3)이 있다.

(1) 시편의 형상변화

- 길이 변화
- 단면적 변화
- 부피 변화

(2) 시편의 질량변화

(3) 마모되어 나간 재료의 부피

상대적인 측정방법으로는 다음의 (4), (5), (6), (7)이 있다.

(4) 시간에 따른 마모량

(5) 거리에 따른 마모량

(6) K = (마모계수:)

(7) K' = (Archard's 마모계수)

이것과 큰 차이가 없으며 또 다른 분류에 따르면 다음의 6가지로 나눌 수 있다.

(1) 두께 마모율

$$K_L = \text{두께감소량/거리 (h/L)}$$

(2) 부피 마모율

$$K_V = \text{다은부피/거리·면적 } (\Delta v/LA_a)$$

(3) 에너지 지수

$$K_E = \text{다은부피/마찰일}(\Delta v/FL)$$

(4) 중량 마모율

$$K_W = \text{줄어든 중량/거리·면적 } (\Delta W/LA_a)$$

(5) 연삭성

$$r = \text{다은부피/마찰일}$$

$$= (\Delta v / FL = (\Delta v / WL) / f = \dot{f} / f$$

(6) 연삭 마모 저항계수 $\beta = \text{마찰일} = 1/r = f/\dot{f}$

여기서 L 은 미끄러진 거리, F 는 마찰력, f 는 미끄럼 마찰계수, $\dot{f}$ 은 연삭 마모계수이다. (3)과 (5)는 같은 내용이며 $K_w = \rho K_v$ 의 관계식이 성립한다. ρ 는 닳은 재료의 밀도이다. 접촉면의 직경이 마모에 따라 같이 커질 때는 이를 미끄러진 거리 L 대신 써도 된다.

직접측정방법이나 다른 방법들을 마모량이 적은 시험에 적용하기는 어렵다. 즉, 초기 길들이기 과정에서 마모는 그 양이 적으므로 길이 변화나 질량변화의 측정을 통해서 마모량을 구하는 것이 쉽지 않다. 그 이유는 질량측정에는 표면의 산화에 의한 오차가 있을 수 있고 또한 마모되었으나 마모부스러기가 아직 시편에 붙어 있을 때도 있기 때문이다. 크기의 변화도 마모량이 적을 때는 변화량이 적다.

마모량이 적을 때의 마모량 측정을 위해 고안된 방법으로 시편표면에 압입 흔적을 만들어서 시험하는 방법이 있다. 그러나 오차를 줄이려면 전체적으로 마모가 보다 많이 일어나도록 하는 것이 유리하다.

마모량이 많은 경우에는 질량변화를 재는 것이 편리한 방법이다. 그러나 이 방법에는 두 가지 단점이 있는데 첫째로 마모량은 기본적으로 닳아 없어진 부분과 직접적인 관련이 있으므로 질량변화는 간접적인 척도라는 점이다. 따라서 실제적인 비교를 위해서는 재료의 밀도가 고려되어야 하며 밀도가 다른 재료의 경우에는 질량 변화량을 비교하는 것이 의미가 없게 된다. 둘째로 웅착 마모가 일어날 때처럼 시편의 무게가 줄어드는 것이 아니라 반대로 늘어나는 경우도 있다는 점이다.

부피 변화량이나 길이 변화량은 마모결과와 직접적인 관계가 있는 값이나 측정이 어렵다. 즉 마모 부분의 형상측정 결과로부터 부피를 재는 것은 복잡하면서도 시간이 걸린다. 이 때문에 부피 대신에 마모흔적의 깊이나 넓이 등으로 마모량을 간접적으로 나타내기도 한다. 그러나 이 방법도 적용할 수 있는 시편의 형상에 제한이 있다.

간접적인 측정방법으로 위에서 제시된 것 이외에도 다른 방법이 있다. 표면의 박막이 닳아 없어지는데 걸리는 시간으로 박막의 내마모성을 나타내거나 하중을 점점 늘려 가다가 마모가 급격히 심해지기 시작하는 하중을 임계값으로 나타내는 것이 그것이다. 또는 표면의 반사도가 변하는 것을 이용하기도 한다.

일반적으로 시도되는 방법중의 하나로 마모되어가는 양을 재기 위하여 마이크로 미터를 설치하여 길이의 변화를 재는 방법이 있으나 이 방법은 마모되어 나간 부분과 함께 마모열에 의한 재료의 열팽창도 같이 측정되므로 결과 해석이 쉽지 않다.

8.4 마모시험 monitoring

마모시험은 인장시험이나 파괴인성시험에 비하여 시간이 많이 걸리는 시험에 속한다. 피로시험도 시간이 걸리는 시험중의 하나인데 피로시험의 경우 피로균열의 진전이 직접적으로 측정되나 마모의 경우 이것이 쉽지 않다. 즉 피로 시험에서는 균열을 직접 관찰하므로 언제 시험이 끝나는지 균열이 어느 정도 나 진전되었는지 알 수 있으나 마모시험의 경우에는 지금 마모가 어느 정도나 진전되었는지, 급격한 마모단계로 접어 들었는지 알기가 어렵다. 그래서 마모시험을 계속 감지할 수 있는 상태진단기술의 개발이 필요한데 그 이유는 마모율이 단순히 시간에 비례하여 증가하는 경우도 있으나 많은 경우 시간에 따라 마모율이 변하기 때문이다. 따라서 마모시험을 할 때는 어느 단계를 시험이 끝난 것으로 볼 것인가와 어떤 일이 일어나고 있는지 알 필요가 크다. 다시 말해서 마모시험은 계속적인 monitoring이 필요하다는 뜻이다.

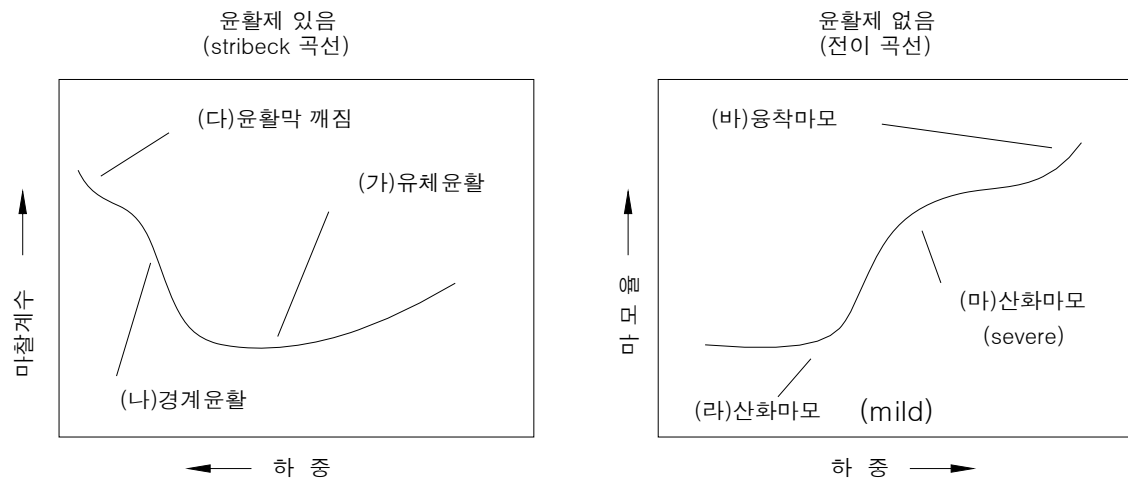
이러한 목적으로 마모시험에 응용되고 있는 기술로는 진동해석기술, 마찰계수측정, 온도변화측정 등이 있으며 특히 최근에 주목 받고 있는 기술은 마모결과 생기는 부스러기의 분석을 통한 상태진단기술이다. 여기에는 부스러기의 화학성분을 분석하는 기술(SOAP), 자기 검출기(magnetic chip detector) 이용법, 방사성 추적자 이용법, 마모 부스러기 분석기술(ferrography)등이 있다. 그림8.2는 마모부스러기의 크기 및 색깔과 마모상태의 관계를 보여주고 있는 것으로서 마모시험을 하면서 부스러기를 계속적으로 채취하여 분석하면 쓸모 있는 정보를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림8.3은 산화마모 기구를 개략적으로 보여주고 있는 그림으로서 이해를 돕기 위하여 참고로 덧붙였다.

또한 새로이 부각되고 있는 방법으로 진동신호해석기술이 있다. 최근까지 진동신호의 이용은 단순히 진동의 크기만을 이용하는데 그쳤으나 이제는 진동신호를 분석하여 통계적 변수를 뽑아내어서 마모 시험결과와의 상관관계를 파악하여 마모시험을 감시하는데 이용하려는 시도가 이루어 지고 있다. 또한 음향방출 신호를 이용하는 기술도 주목할 만한 분야이다.

8.5 마모시험 주의사항

마모시험에 있어서 주의해야 될 점들이 간간히 나왔으나 정리하면 아래와 같다.

- (가) 시험 시편은 반드시 시작 전에 깨끗이 닦아야 한다.
- (나) 경계윤활 시험 때는 유체윤활 조건이 되지 않도록 주의하여야 된다.
- (다) 미끄럼 시험에 있어서 접촉면의 반복접촉 대 시간간격이 실제상황과 비슷해야 한다.
- (라) 진동은 격리되어야 한다.
- (마) 시험시간 동안 시험조건을 바꾸지 말아야 한다.
- (바) 변수의 영향을 연구할 때는 독립적인 시험을 반드시 수행하여야 한다.



	마모입자의 특징 및 크기, d	표면특징	마모율
(가)	금속마모 부스러기; $d < 5 \mu m$	유리면 같거나 매우 거칠	$\rightarrow 0$
(나)	금속마모 부스러기; $d < 15 \mu m$	몇몇 패인 곳 외에는 평활함.	적다
(다)	금속마모 부스러기; $d < 150 \mu m$	굵힌흔적, 소성변형 및 표면균열	크다
(라)	빨간색 산화물 부스러기; $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ $d < 150 \mu m$	굵힌 흔적과 산화막 보임	크다
(마)	검은색 산화물 부스러기; $r\text{-Fe}_2\text{O}_3, \text{Fe}_3\text{O}_4, \text{FeO}$, $d < 150 \mu m$	굵힌 흔적과 산화막 보임	크다
(바)	금속마모 부스러기; $d < 1 \text{ mm}$	심하고 굵히고 소성 변형이 크게 일어남	급격하다

그림 8.2 마모부스러기의 크기 및 색깔과 마모상태의 상관 관계

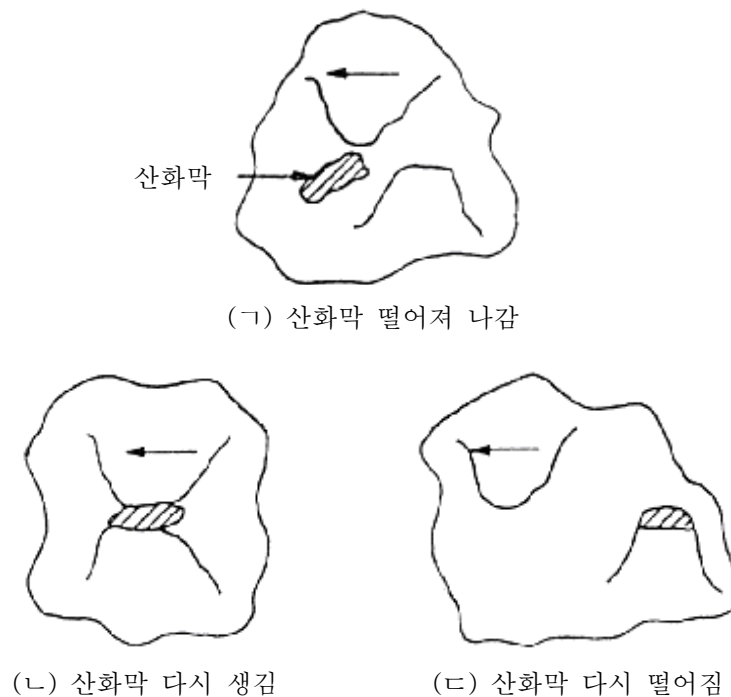


그림 8.3 산화막모이기

9. Hertz 압축응력

마모와 관련된 시험이나 연구논문에서 자주 부딪히는 전문용어 가운데 하나가 Hertz 응력으로서 접촉면에서의 수직응력을 말하며 Hertz 압이라고도 불린다. 두 개의 물체가 접촉하면 그림 9.1과 같이 형상에 따라 점 접촉이나 선 접촉을 이루나 하중을 받으면 탄성변형에 의해 접촉면이 생기면서 그 모양은 원이거나 네모꼴이 된다. 이때 접촉면에서의 응력분포를 처음으로 1896년에 H.Hertz가 수학적으로 해석 하였으며 지금까지 쓰이고 있다.

그림 9.2(가)과 같이 접촉하고 있을 때 접촉면은 구일 경우에는 그림 9.2(나)처럼 원이 되고 원주와 원주, 혹은 원판과 원판일 경우에는 그림 9.2(ㄷ)처럼 네모꼴이 된다. 접촉면이 원 일 때 원의 크기는 다음의 식과 같이 주어진다.

$$2a = (\sigma PR/E)^{1/3}$$

여기에는 a 는 하중 P 에 의해 생기는 접촉면의 원 크기의 반지름이고 R 과 E 는 다음의 식으로 표시된다.

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2$$

$$1/E = 1 - \nu_1^2/E_1 + 1 - \nu_2^2/E_2$$

여기에는 R_1, R_2 는 접촉하고 있는 구나 원주의 반지름이고 E_1, E_2 는 탄성계수이며 ν_1, ν_2 는 프와송 비 이다. 만약 접촉하고 있는 구나 원주가 같은 재질이고 크기도 같아서 $R_1 = R_2$ 이고 $E_1 = E_2$ 이며 $\nu_1 = \nu_2$ 라면 다음의 식이 유도된다.

$$2a = [\sigma (1 - \nu^2) PR/E]^{1/3}$$

접촉면에서 반지름 a 에 따라 분포되는 Hertz 응력 값은 다음의 식으로 주어 진다.

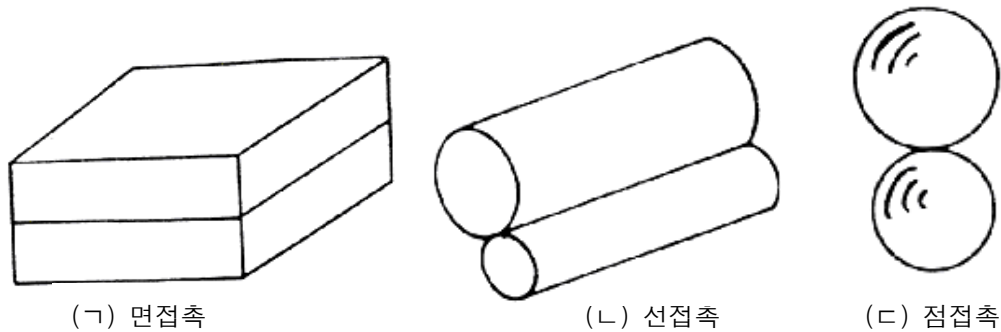


그림 9.1 접촉면의 형상

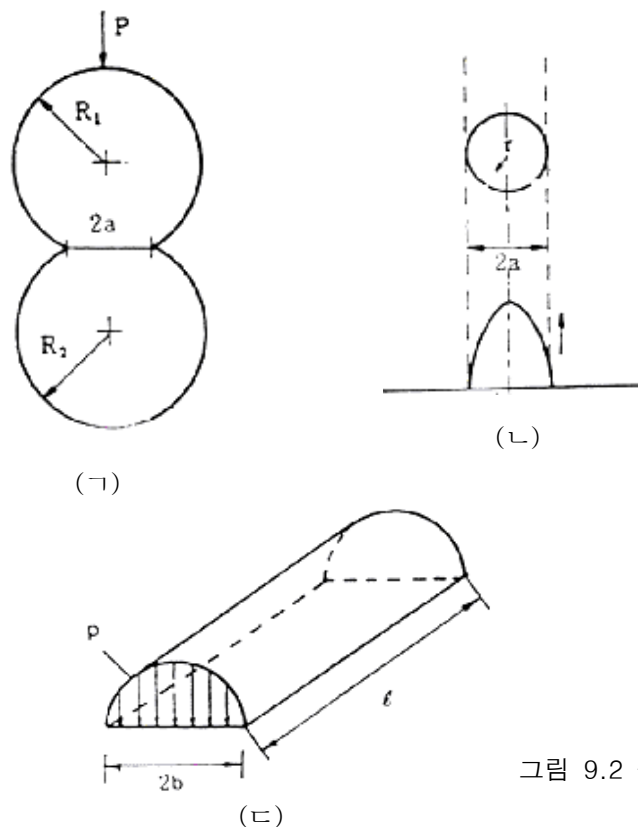


그림 9.2 접촉면에서의
압축응력 분포

$$\sigma = P/2\pi a^2 / P [1 - r^2 / a^2]^{1/2}$$

따라서 최대 Hertz 압은 $r=0$ 이 될 때, 즉 원의 중심부에서 나타나며 그 크기는 $P/2\pi a^2$ 이다. 이 결과에 따른 압축응력분포를 보여주고 있는 것이 그림 8.1(l)으로 타원형의 모양을 나타낸다.

두 개의 접촉하고 있는 것이 구가 아니고 원주일 때는 그 접촉면의 모양이 네모꼴로서 변의 길이를 $2b$ 와 ℓ 로 나타내면 $2b$ 의 값은 아래의 식과 같다.

$$2b = 4[(1 - \nu^2) \cdot PR / \pi E \ell]^{1/2}$$

Hertz압의 분포는 그림 8.2(c)과 같으며 그 식은 다음과 같다.

$$\sigma = 2P / \pi b \ell [1 - r^2 / b^2]^{1/2}$$

또한 Hertz의 계산결과에 따르면 최대수직응력은 접촉면에서 작용하나 최대전단응력은 접촉면의 중심에서 표면아래 $0.5a$ (사각형의 경우 $0.5b$)인 곳, 즉 재료내부에서 나타나며 그 크기는 최대수직응력과 같은 관계식을 갖는다.

$$\tau_{\max} = 0.31\sigma_{\max}$$

10. 마모시험

마모시험은 앞서 밝힌 것처럼 필요에 따라 여러가지 모양으로 설계되어 사용되었기 때문에 종류가 무척 많다. 이 모든 시험기를 다 소개할 수는 없으므로 미국 윤활 학회에서 보고된 자료를 중심으로 시험의 형상과 조합에 따라 10가지 정도로 줄여서 소개하고 그 특징과 시험조건을 간단히 기술하고자 한다.

10.1 구와 구

구와 구의 조합에 의한 마모시험은 4개의 구를 이용하는 시험이 대표적인 것이다. 그림 10.1은 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 둔채 시험의 모양이나 조합을 여러가지로 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.

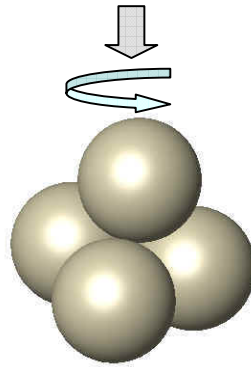


그림 10.1 4구 시험

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 시간이나 회전수 등을 마모량으로 측정한다.

하중은 지렛대 방식이나 유압식으로 가하여 로드셀로 교정을 하여야 한다. 마찰력은 용수철을 이용하거나 스트레인 게이지를 이용하여 측정하고 토크셀을 3개의 고정된 구의 아래 축에 설치하여 마찰력을 재는 방법도 있다. 시험조건은 표 10.1과 같다.

	3 구 고정식(고하중)	3 구 고정식(저하중)	3 구 회전식
하 중	6~800 kg	0.1~50 kg	~600 kg
속 도	1500~1800 rpm	600,1200,1800 rpm	~1500 kg
윤활유	10 ml*	10ml*	16 ml max
시 편	0.5" 직경베어링 강	왼쪽과 같음	왼쪽과 같음
시 간	10 초 혹은 1 분**	1~2 시간	시험조건에 따라 바뀜
분위기	조절가능	왼쪽과 같음	왼쪽과 같음
온 도	조절가능	조절가능	조절가능

표 10.1. 4구 시험기 시험 조건

* 마모-하중 곡선을 구하는데 모두 100~200ml 필요

** 한가지 윤활유 평가에 모두 약 2시간 소요됨

이 시험기의 설계 및 제작에 있어서 주의해야 될 점은 위의 시편인 구를 붙잡는 물림쇠(chuck), 회전축(spindle) 등의 시편 구동부의 허용공차가 적어도 0.001mm 이어야 하는 것으로서 이것은 시험 결과의 신뢰도 및 재현성에 영향을 미치므로 정밀가공이 요구된다. 그리고 3구 고정식의 경우는 미끄럼만이 일어나게 되어 마찰열이 매우 크므로 온도 변화가 중요한 요소일 때는 온도조절에 주의하여야 한다.

3구 회전식은 4개의 구가 모두 회전하므로 마찰열은 별로 나타나지 않으나 고 하중에서 장시간 시험하면 온도상승 경향이 나타난다.

이 시험기의 단점으로는 윤활유를 시험할 때는 시편으로서 베어링 볼을 사용하면 되나 베어링 볼을 시험하는 경우는 실험실에서 강구를 만드는 것이 어렵다는 점이다. 이 문제 때문에 영국에서 고안된 것이 구 대신에 원주의 끝을 원뿔모양으로 가공하여 시편으로 쓰는 방법이다.

10.2 직교 원주

이 시험은 그림10.2. 에서 보듯이 한 원주는 회전하고 그 위에 직각 방향으로 다른 원주가 놓리어 있는 모양으로서 매우 간단한 장치이며 여러가지 장점이 많다. 즉 원주의 직경도 임의로 바꿀 수 있고 두 개의 원주의 크기가 달라도 되며 온도 조절도 원주 내부에 열선을 넣거나 냉각수를 흘려 보냄으로써 가능하고 고하중, 회전속도, 분위기 조절이 쉽다는 점이다. 이 시험장치의 가장 큰 장점은 한쪽의 원주를 시험하면서 기동방향으로 조금씩 이동시키면 마모되지 않은 면이 항상 닿게 되므로 표면거칠기의 영향을 연구할 수 있다는 점이다.

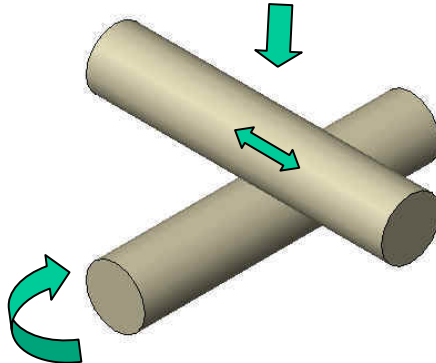


그림 10.2 직교 원주시험

마찰력은 스트레인 게이지를 시편에 부착하여 측정하며 마모량은 마모 깊이를 재어 마모부피를 계산, 마모거리의 함수로 나타내거나 주어진 시간 동안의 무게감소로 나타낸다. 시험장치의 제작에 있어 주의할 점은 회전축의 동심성(concentricity)이 0.001mm 보다 작아야 하며 이보다 크게되면 마모율이 감지 될 정도로 늘어난다.

시험조건은 이 시험기의 장점을 그대로 나타내듯이 하중의 경우 범위가 $10^{-5}g$ 에서 15, 50, 250kg까지이며 회전속도는 1mm/s에서 20mm/s 까지이다. 특히 건조 마모(dry wear) 시험 때는 공기중의 수분이 큰 영향을 미치므로 주의해야 한다.

10.3 핀과 평판

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

(1) 핀이 움직이는 경우

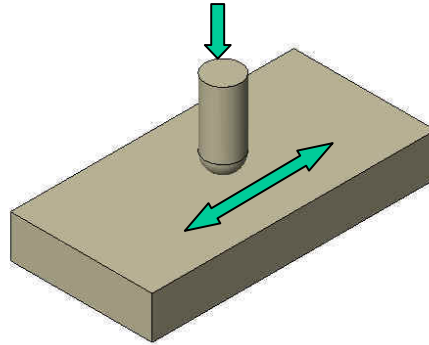


그림 10.3 핀과 평판시험

이 시험기는 주로 마찰력을 측정하여 마찰계수를 계산하는데 많이 활용되고 있으며 그 모양은 그림 10.3 과 같다. 마찰력은 핀이나 핀을 잡고 있는 막대에 스트레인 게이지를 붙여서 측정하며 핀의 모양은 대부분 끝이 반구 모양이나 전단된 상태로 쓰이는 경우도 있다. 핀이 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 핀의 끝이 전단된 상태이면 모서리가 날카로워서 신뢰성 있는 결과를 구할 수 없으므로 핀의 끝을 반구 모양으로 하거나 강구를 사용한다. 마찰력을 재는 것이 주 목적이므로 왕복운동이 대부분이며 그 속도도 또한 수십 mm/s 정도로 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. 그림10.4는 시험기의 한 예이다. 핀과 평판이 조합된 시험방법에서 평판이 항상 핀 아래에 있을 필요는 없으며 그림10.5와 같이 위에 있을 수도 있다. 이 경우에는 마모 부스러기가 마모 궤적(wear track)에 쌓이게 되지 않으므로 마모 부스러기의 영향을 배제할 수 있는 장점이 있다.

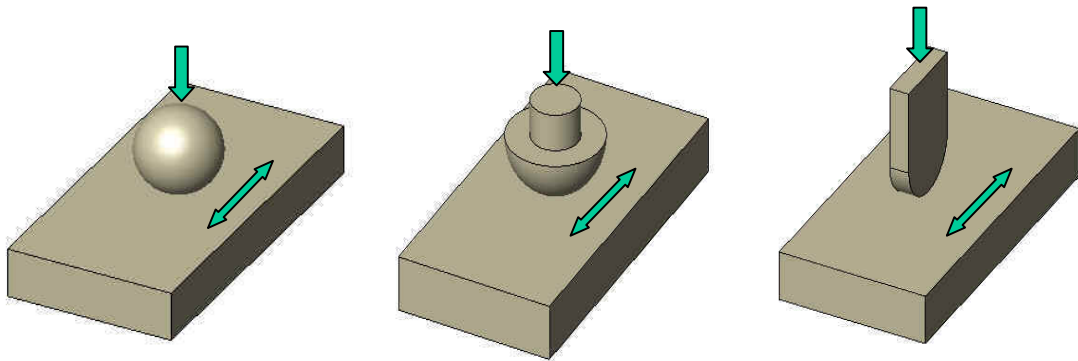


그림 10.4 핀과 평판시험(평판이 움직이는 경우)
핀 대신에 강구 등의 다른 것들이 쓰일 수 있다.

(3) 접촉면이 여럿인 경우

이 시험기도 근본적으로 미끄럼시험 이라는 데서 (1),(2)의 시험기와 차이가 없으나 다만 접촉면이 2곳 이상이라는 것이 다르다. 즉 핀이 3개가 있는 것이 대부분으로서 이렇게 설계한 가장 큰 이유는 그림 10.6 에서 보듯이 3개의 받침점에 의해 하중이 받쳐지게 되므로 핀이 한 개인 경우보다 안전하고 하중을 가하는 것이 비교적 용이하다는 것 때문이다.

이 가운데 특이한 시험기는 그림 10.7과 같은 것으로서 60톤 정도의 하중을 가하게 되어 있으며 핀의 소성변형이 일어날 정도의 하중에서 마찰력의 변화를 측정할 수 있게 되어 있다.

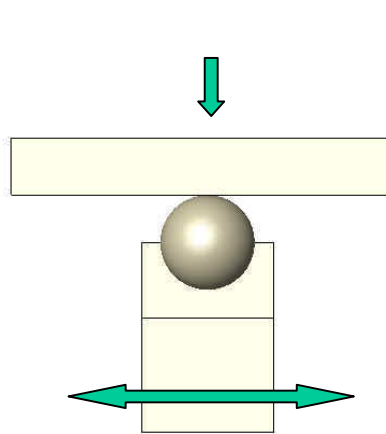


그림 10.5 핀이 아래에 있고
평판이 위에 있는 경우

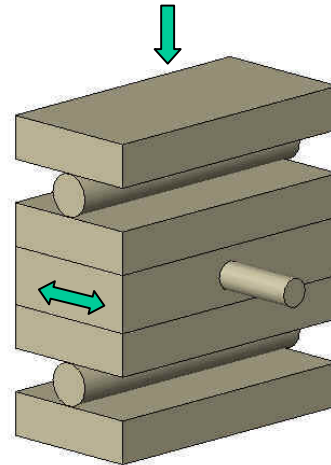


그림 10.7 대용량 시험

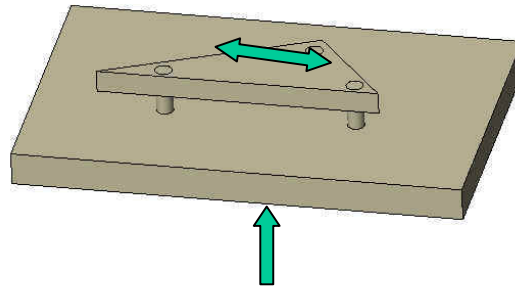


그림 10.6 3판-평판시험

10.4 평판과 평판

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

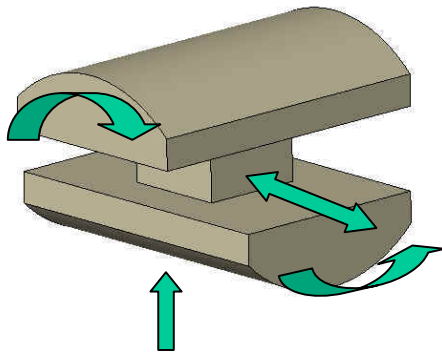


그림 10.8 평판-평판시험

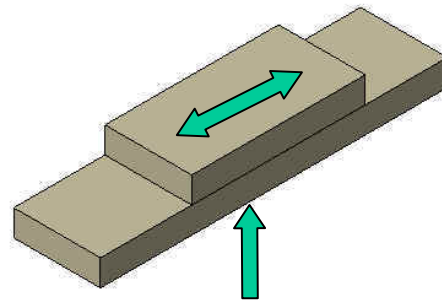


그림 10.9 평판-평판시험

평판시험은 접촉면적이 시험이 끝날 때까지 일정하다는 특징 때문에 마찰계수의 측정등과 같은 마찰과 관련된 시험에 많이 활용되며 또한 접촉면적이 넓으므로 고하중에서의 시험에도 적합하다. 그림10.8은 고하중에서의 시험장치인데 평판의 다른면을 곡면으로 가공하여 정렬이 자동적으로 이루어지게 되어 있는 것으로서 미국의 NASA에서 로켓 발사대의 조임쇠 모의시험에 쓰인 것이다. 그림10.9는 정지 마찰계수와 운동 마찰계수의 비(stick-slip-ratio)를 구하는데 쓰인 시험기의 시험조합 모양을 보여 주고 있는 것으로서 평판시험기의 특징을 잘 나타내는 시험이다. 시험결과에 따르면 표면 거칠기가 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

10.5 핀과 원판(핀이 회전하는 경우)

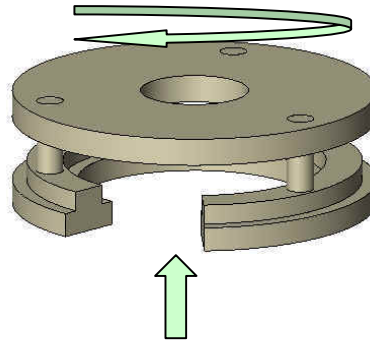


그림 10.10 핀-원판 시험

핀과 원판은 미끄럼 마모 시험에서 널리 쓰이는 방법 가운데 하나이다. 여기에서는 원판이 고정되어 있고 핀이 회전하는 방식의 시험기로서 그림 10.10 과 같다. 이 종류의 시험기는 거의 대부분 고체윤활제의 특성평가시험이 주목적이다. 우주공간에서는 액상의 윤활유를 쓸 수 없으므로 MoS₂ 와 같은 고체 윤활제의 사용이 필수적인데 이러한 고체윤활제의 우주공간에서의 윤활특성 평가 때문에 대부분의 시험이 진공중에서 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 3.3 rpm에서 900 rpm까지로 다양하다.

10.6 핀과 원판(원판이 회전하는 경우)

원판이 회전하는 시험기는 미끄럼 마모 시험기 가운데 가장 널리 쓰이는 방식이다. 핀이 회전하는 경우는 핀이 보통 3개 있으나 원판이 회전하는 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. 그림 10.11 은 이 시험기의 시편조합방식을 보여주고 있다. 핀 대신에 강구 나 원주가 쓰이기 도 한다.

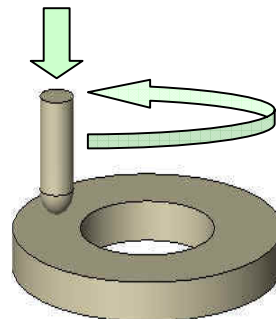


그림 10.11 핀-원판시험

마모특성시험을 시작할 때 극미량의 하중을 가하는 시험에서는 전기저항을 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 잴 다음 이 결과로부터 마모된 부피를 계산하여 나타내고, 원판의 경우는 마모궤적에서 4~6곳을 선정하여 표면형상을 측정한 다음 그 평균 깊이와 원주길이를 곱하여 마모부피를 알아내어 나타낸다.

10.7 원통과 원통 (면접촉)

이 시험기는 고정되어 있는 원통과 회전하는 원통으로 구성되어 있는 것이 대부분이며 필요할 때는 원통대신에 원통과 원판으로 구성되기도 한다. 그림10.12는 이 시험기의 시편 조합도를 보여주고 있다. 시험조건도 다양하며 마모량은 거의 대부분 줄어든 무게로 나타낸다. 원통의 직경은 보통 1인치 정도 이고 높이는 약 3/4인치 정도이다. Torque측정이 비교적 쉬우며 자동차 클러치 재료의 마모특성 평가에 많이 쓰인다.

10.8 핀과 원판, 혹은 원통과 원통 (선접촉)

핀과 원판의 시험기가 핀이 원판의 회전축과 평행한대 비하여 이 시험기는 그림10.13처럼 핀이 회전 축에 수직인 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 회전 축에 붙인 다음에 연마하면 해결 가능하다. 마찰력은 회전축 중간에 토크 셀을 붙이면 측정 가능하다. 원판의 두께 및 크기는 시험조건에 따라 결정되며 보통 1/2인치 두께에 5cm정도의 직경이다.

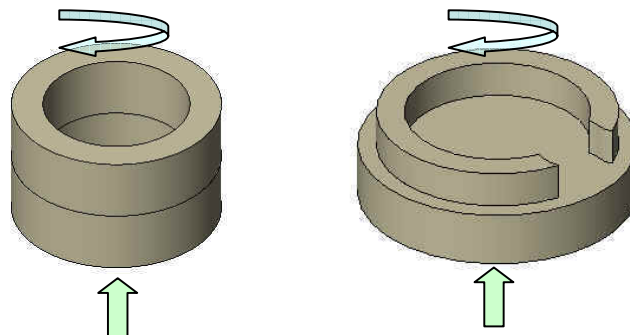


그림 10.12 원통과 원통시험

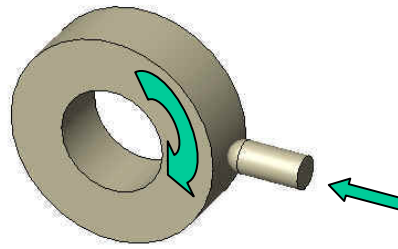


그림 10.13 핀-원판시험

10.9 평판과 원주 혹은 원판

이 형식의 시험기에는 일찍부터 상용화되어 널리 쓰이고 있는 Falex 회사의 pin and V-blocks와 Holman 사의 dual rub shoes and ring이 대표적인 것이다. 그림 10.14와 10.15는 이 시험기의 시편구동 방식을 보여 주고 있다. 이러한 형식의 시험기들도 그 사용목적이 다양하므로 시험조건도 매우 넓은 범위에 걸쳐 있다. 마모량은 일반적으로 평판에 생긴 마모흔적(wear scar)의 깊이나 길이로 나타낸다. 핀의 중량 감소량으로 나타내는 경우도 있다. Pin and V-blocks 시험기의 경우에는 처음에는 V-block과 핀의 접촉현상이 선접촉이나 시험이 진행됨에 따라 면접촉으로 바뀌어 가므로 접촉면의 폭으로 마모량을 나타내기도 한다.

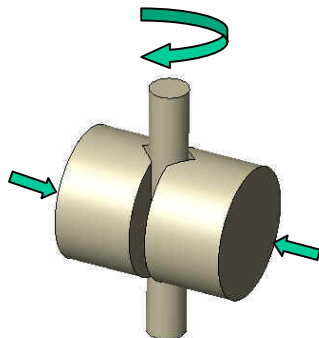


그림 10.14 핀-V block 시험
(Falex사)

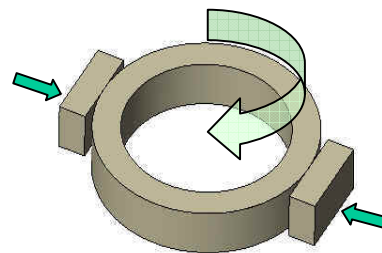


그림 10.15 원주 두 개의 평판
(Hohman)

회전하는 원주를 중심으로 양쪽에서 평판의 시편을 가하는 방식은 한쪽에서만 하중을 가할 때 생기기 쉬운 굽힘현상을 효과적으로 없앨 수 있는 장점이 있으나 두 평판을 정렬시키는 것이 어렵다는 단점이 있다. 대부분의 시험은 경계윤활 조건에서 이루어 진다. 회전축에 토크셀을 붙여 마찰력을 계산할 수 있으나 접촉면적이 마모가 진행됨에 따라 일정하지 않고 계속 늘어나므로 주의하여야 한다.

10.10 원판과 원판 (선접촉)

이 종류의 시험기에서 널리 알려진 상용시험기에는 암슬러(Amsler)회사 제품으로서 그림10.16과 같은 모양이다. 이러한 종류의 시험기의 가장 큰 특징은 두 개의 원판의 회전속도를 임의의 비로 조절하여 구름 접촉뿐만 아니라 구름-미끄럼 접촉도 가능 하다는데 있으며 이 때문에 구름-미끄럼 접촉 현상이 나타나는 톱니바퀴 재료나 윤활제의 연구에 많이 쓰이는 윤활제나 재료의 연구를 위해 수만rpm까지

회전속도가 올라 갈 수 있는 특수 시험기도 있다. 다른 시험기와 달리 구름-미끄럼 마모를 흉내 낼 수 있는 장점이 있으나 두 개의 원판이 모두 회전하므로 열전대의 부착이 어려워 온도 측정이 쉽지 않은 단점이 있다.

시편의 크기는 보통 직경이 5~10cm 정도이며 시편의 옆면은 선접촉이 되도록 원판의 회전축과 평행하게 가공되거나 크라운(crown)가공을 하여 곡면상으로 만들어 점 접촉이 되게 하기도 한다. 원판의 옆면을 회전축에 평행하게 가공하면 시험조건에 있어서 고하중을 가할 수 없다는 단점이 있다.

고하중을 가하면 원판의 가장자리에서부터 시편이 깨져나가기 때문에 고하중을 가하는 시험에서는 시편의 형상이 곡면이어야 한다.

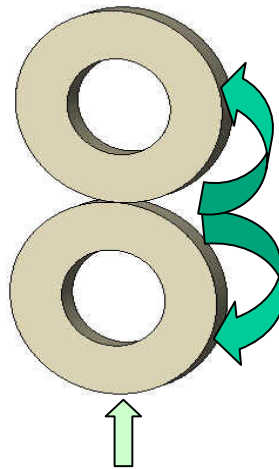


그림 10.16 원판과 원판시험

마모량은 원판의 직경의 변화, 중량의 감소 등으로 나타낸다. 이 시험기는 주로 톱니바퀴나 베어링의 모험시험에 많이 활용되고 있다.

10.11 기타

지금까지 마모시험기 가운데 비교적 활용도가 높은 시험기에 대해 설명하였으나 마모시험 자체의 특성 때문에 이 밖에도 여러 가지 시험기가 있다. 이들의 주요 목적은 실제상황과 비슷하게 모의시험을 해보는데 있는 만큼 그 형상이나 작동도 특수한 것이 많으며 후렛팅(fretting) 마모시험기도 이중의 하나이다.

최근에는 여러 가지 측정기술과 가공기술이 진보되어 새로운 기술을 마모시험기에 적용하는 경향이 있다. 그 예로서 마모시험을 하면서 진동신호를 받아들여 진동의 전체적인 크기가 어느 만큼 이상이면 시험이 끝나던 것에서 더 나아가 신호자체를 분석하여 무엇이 진행되고 있는지 알아내는 기술의 개발이 그 하나이다. 음향방출 신호를 이용하여 피팅(pitting) 파손시기를 알아내기도 하고 마모 부스러기 분석기술을 시험하면서 계속적으로 활용하여 연속적인 정보를 알아내기도 하고 있다. 지금까지 소개된

마모시험기의 조합은 기본적인 것이어서 큰 변화가 없으나 측정기술의 큰 진보는 점차적으로 마모현상에 대한 정확한 이해를 돕고 있다. 그리고 표면처리기술이 진보됨에 따라 얇은 박막이나 폴리머층의 마모시험이 많이 이루어 지고 있으며 이들의 경우 대부분 하중이 비교적 작다는 특징이 있고 지금까지의 시험방법과 다른 새로운 마모시험이 개발되기도 한다. 마모시험의 영역이 끊임없이 넓어져 감을 알 수 있다.

10.12 마모시험기의 특성별 형태

지금까지 소개된 그림은 시편의 모양과 조합에 대해서만 그려진 것이므로 마모시험기의 구동형태에 따른 시험방법과 시험기 선정의 이해를 위하여 몇가지 특성별 마모시험기의 모양을 나타내보았다.

다목적마찰마모시험기 (TRIBOSS Model MP-101)

Test mode

- Pin on Disc test
- Bal on Disc test
- Thrust washer test
- Ball on Flat test
- Temperature control
- Humidity condition control
- Oscillating test
- Rolling Fourball test
- Wear loss measuring
- Friction coefficient measuring



다양한 지그의 교체로 면접촉, 점접촉, 선접촉에 의한 미끄럼마모 (sliding wear test) 시험과 구름마모 (rolling wear test)를 수행할 수 있고, 분위기 제어 (온도, 습도)가 가능하다. 정하중 장치에 의해 저하중, 고하중의 하중선택 범위가 넓으며, 전용 프로그램에 의한 시험조건 설정, 제어, 데이터 습득이 가능하도록 되어있다.

Pin on Disc Wear Tester (TRIBOSS Model PD-102)

Test mode

- Pin on Disc test
- Bal on Disc test
- Thrust washer test
- Ball on Flat test
- Temperature control
- Wear loss measuring
- Friction coefficient measuring



저하중 범위의 pin on disc, ball on disc, thrust washer test를 기본으로 수행 할 수 있으며, 회전속도에 따라 three pin, three ball on test 까지 가능하다. 윤활유 특성에 따른 마모시험도 가능하도록 윤활챔버의 구성이 가능하다.

금속재료, 세라믹, 비철재료, 복합재료 등 소재의 내마모성 비교평가에 유용하며, 시편의 형상에 따라 지그의 교체가 다양하며, 특수목적에 따른 지그의 고안으로 다양하게 시험이 가능하다.

Rolling Contact Wear Tester (TRIBOSS Model RC-106)

Test mode

- Two Rolling Test
- Block on Ring Test
- Lubricant Evaluation Test
- Ring on Ring Test
- Temperature



구름접촉에 의한 재료의 피로마모 현상을 실험할 수 있으며, 지그의 교체에 따른 block on ring test를 수행 할 수 있다. 구름접촉에 의한 마모시험의 경우 시편의 크기나 형상에 많은 제약이 따르나 TRIBOSS model RC-106 시험기의 경우 작은형상의 시편으로도 구름접촉에 의한 마모량 측정이 가능하다. 마모량은 원판직경의 변화를 측정하거나, 중량의 감소 등으로 나타낼 수 있다. 이 시험기는 톱니바퀴, 기어 또는 베어링의 수명 모의시험에 많이 활용되고 있다.

직선왕복마모시험기 (TRIBOSS Model FR-104)

Test mode

- 직선왕복 stroke control
- Load control
- Friction test
- Friction coefficient
- Temperature control
- Sliding motion test
- Rolling motion test

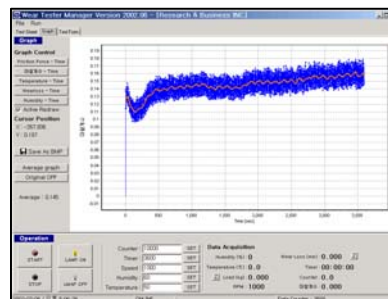


주로 재료의 마찰계수 측정에 유리하며, 평판에 입힌 얇은막의 특성을 평가하거나 평판의 내마모성을 높이기 위해 표면처리를 한 다음에 표면처리된 층의 특성을 평가하는데 많이 쓰인다. 마찰력을 측정하는 것이 주목적이므로 왕복운동이 대부분이며 그 속도도 대부분 느린 편이나 요즈음 가속한 조건에서의 소재 특성을 평가하기 위하여 고속의 왕복운동도 가능하도록 구성되었다.

고압마모시험기 (TRIBOSS Model HP-113)

Test mode

- High pressure
- High Temperature
- Sliding wear
 - Pin on disc test
 - Ball on disc test
 - Thrust washer test

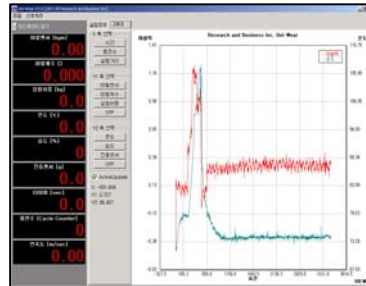


가혹한 환경의 고온, 고압의 조건에서 재료의 내마모성 특성을 평가 할 수 있는 장비로서 분위기 제어에 의한 시험이 가능하도록 구성되었다. 지그의 교체에 따라 간단한 형태의 시편으로 미끄럼, 구름운동에 의한 마모, 마찰거동을 고압 및 상압조건에서 비교 평가할 수 있다.

Fourball Wear Tester (TRIBOSS Model RF-109)

Test mode

- Four ball test
- Rolling four ball test
- Lubricant evaluation

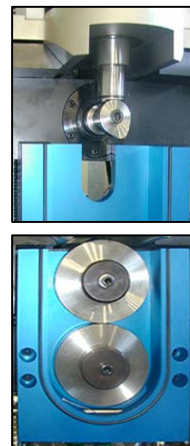


구름접촉에 의한 재료의 피로마모특성을 평가 할 수 있으며, 윤활유 특성평가가 주목적으로 사용된다. Four ball test, EP- test 를 수행하여 윤활유의 내마모성, 내산화성, 극압성 등의 평가를 할 수 있다.

Cam & Tappet Wear Tester (TRIBOSS Model CTR-201)

Test mode

- Two Roll Test
- Block on Ring Test
- Cam & Tappet Test
- Temperature control
- Lubrication condition

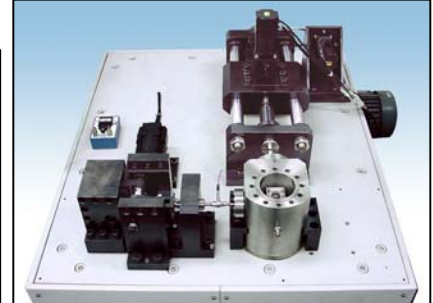
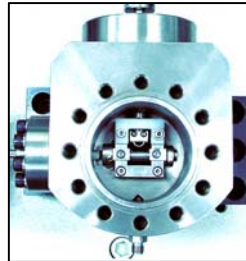


자동차 엔진부품 (Cam & Tappet)의 마모현상을 구현 할 수 있도록 구성된 시험기로 rolling contact에 의한 fatigue wear test, 회전비의 조절에 의한 sliding wear 현상과 jig의 교체에 의한 block on ring wear test (ASTM G77, ASTM D3704) 까지 수행 할 수 있어 다양한 형태의 마모시험 평가가 가능하다.

Fretting Wear Tester (TRIBOSS model FR-105)

Test mode

- High temperature
- High pressure
- High frequency wear
- Impact wear



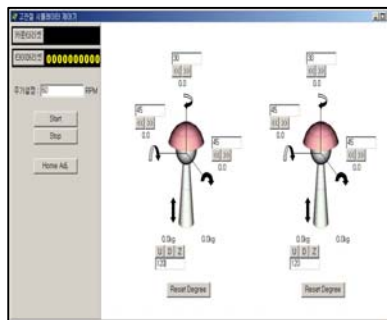
고온 고압상태의 환경에서 고속반복에 의한 sliding wear 현상에 의한 재료의 마모특성을 평가하는 장비로서, 특히 직선왕복에 임의의 충격하중을 가하여 열악한 작동상황을 재현할 수 있도록 구성되었다.



HIP Simulator (TRIBOSS Model HS-112)

Test mode

- HIP joint wear tester
- Angle
- Load
- Temperature
- Environment



인공 고관절에서 사용되는 생체재료의 마멸특성을 평가 할 수 있는 장치로 인체의 고관절 운동 범위를 고려하여 시뮬레이터의 축 방향 하중의 구동을 포함하고, 링크부의 작동에 따른 Flexion/ Extension, Adduction/ Abduction, Internal rotation/External rotation 운동을 4자유도 (degree of freedom)로 구성하고, 4개의 station을 동시에 가동시킬 수 있어 장시간 시험에서 불리한 시험시간을 단축하여 한번의 실험에 4개의 데이터를 얻을 수 있도록 구성되었다.

10.13 마모시험 결과 보고

마모시험결과가 보편성 있는 자료로서 유통이 되려면 마모시험 자체가 복잡한 만큼 기록하고 보고해야 되는 항목도 많다. 그러나 이것이 귀찮다고 가벼이 여길 일이 못되며 그 중요성은 보고서 양식이 다른 재료시험방법과 달리 규격화되어 있다는 것을 보면 알 수 있다. 규격화된 양식은 독일규격 DIN50320에 나와 있다.

일반적으로 마모시험 결과의 기록 및 보고에서 빠뜨리지 말아야 할 사항 등은 아래와 같다.

- 시험 장치
- 접촉 현상
- 운동 방법
- 하중
- 속도
- 분위기
- 마모 부스러기
- 재료 종류
- 윤활제의 종류 및 윤활방법
- 길들이기 과정에 대한 설명(있는 경우)
- 이상 현상 (무게 증가 등)
- 표면가공 형태
- 시편 준비
- 표면 거칠기

10.14 규격화된 마모시험

앞서 마모시험은 그 특성 때문에 표준화가 느리게 이루어지고 있는 분야의 하나라고 밝혔다. 그런 가운데도 몇몇 가지 시험방법은 표준화가 되어 쓰이고 있다. 여기에서는 이들 시험방법에 대해 제목을 소개하였다.

- | | | |
|------|------------|--|
| KS | D8335-1986 | : 도금의 내마모성 시험방법 |
| ASTM | G40-83 | : Standard terminology to "Erosion and Wear" |
| ASTM | G65-85 | : Standard practice for "conducting dry sand/ rubber wheel abrasion tests" |
| ASTM | D2714-68 | : Standard method for "calibration and Operation of the alpha model LFW-1 friction and wear testing machine" |
| ASTM | D3702-78 | : Standard test method for "wear rate of materials in self-lubricated rubbing contact using a thrust washer testing machine" |
| ASTM | G83-83 | : Standard test method for "wear testing with a crossed-cylinder apparatus" |

ASTM	G77-83	: Standard practice for "Ranking resistance of materials to sliding wear using block-on-ring wear test"
ASTM	G76-83	: Standard practice for "Conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jet"
ASTM	G56-82	: Standard test method for "Abrasiveness of ink-impregnated fabric printer ribbons"
ASTM	G32-85	: Standard method for "Vibratory cavitation erosion test"
DIN	50320	: "Wear-Terms, systematic analysis of wear processes, classification of wear phenomena"
DIN	50332	: "Testing of materials-Abrasive jet wear testing"
ASTM	G75-82	: "Slurry abrasively by Miller number"

11. 핀온디스크 마찰 마멸 시험 기준

11.1 개요

여기서는 일반적으로 가장 많이 사용되는 마모시험방법 중에 pin on disc test 방법에 대해 관련자료를 참고로 하여 보편 타당한 기준화된 방법을 소개하였다.

처음에 핀온디스크(pin-on-disk) 마찰 마멸 시험을 위해서는 우선 볼과 디스크 시편을 준비하여야 한다. 먼저 볼 시편의 경우에는 구형 강체를 선택하며, 볼의 재료와 물성치 등은 용도에 맞게 다양하게 선택할 수 있다. 볼의 재료와 경도, 표면 거칠기 등의 물성치는 마찰 마멸 시험 결과에 큰 영향을 주는 인자이므로 시험에 사용된 볼의 사양을 시험 결과에 명시하여야 한다.

볼 시편은 수직으로 장비에 장착된 핀의 끝단에 고정되어 디스크 시편에 수직으로 정해진 하중을 인가하게 된다. 이때 하중은 암-레버 구조에 추를 얹는 방식으로 가해주는 것이 일반적이지만, 이 방식으로는 큰 하중을 가하기 어려우므로 큰 하중을 가할 때에는 전동식이나 유압식으로 하중을 가할 수 있다.

핀온디스크 시험 결과는 여러가지 인자로 표현할 수 있다. 가장 많이 활용되는 데이터는 시험 사이클 동안의 평균마찰계수와 평균마찰력이다. 이밖에 정의된 수식을 통해 비 마모량과 내마모성 등을 평가할 수도 있으며, 마찰 마멸시험 전후의 디스크와 볼의 선형 치수와 형상을 측정하여 마멸량을 계산할 수 있다. 이때 마멸량을 여러 미끄럼 거리에 대하여 측정하면, 미끄럼 거리 대 마멸량 그래프를 얻을 수 있다. 여기서 미끄럼 거리와 마멸량은 일정 구간에서 비선형성을 보일 수 있는데, 이는 마멸 방식이 전환될 때 나타나는 현상이다. 이와 같은 비선형성 구간의 비중은 시험 재료나 조건에 따라 달라질 수 있다.

마찰 마멸 시험기에 변위센서가 장착되어 볼의 수직변위를 측정할 수 있는 경우에는 시험이 진행되는 동안 마멸 깊이를 실시간으로 측정하여 마모량 값을 연속적으로 얻을 수 있다. 그러나 이 경우에는 시편이 마모되는 과정에서 마멸 트랙에 발생하는 마멸 입자와 전이막(transfer film) 때문에 마멸 깊이 측정이 왜곡될 수 있으며, 또한 마멸 과정에서 발생한 열로 인해 열팽창이 일어나서 마멸 깊이가 잘못 측정

될 수 있다. 따라서 시험이 진행되는 동안에 연속적으로 산출된 마모량 데이터는 시험 후에 별도로 측정된 마모량과 비교하여 검증할 필요가 있다.

12. 시편 준비

12.1 재료

시편의 재료는 시험 목적에 따라 다양하게 선택할 수 있다. 즉 마찰, 마멸 특성을 평가하고자 하는 재료로 디스크와 볼 시편을 제작해야 한다. 다만 시편의 크기, 형태, 표면처리상태, 조성, 미세조직 구조, 가공 방법 및 경도 등을 명시해야 한다. 디스크 시편의 경우에는 시험 도중 수직 하중으로 인해 시편이 휘는 등의 변형이 일어나거나 마찰로 인한 응력을 견디지 못하고 파손되는 일이 없도록 시편의 크기를 결정해야 한다.

12.2 형태와 크기

핀온디스크 시험장치 중 핀 시편은 원통형태로 가공하여 사용할 수도 있으며, 긴 원통형 끝에 볼을 끼워 사용할 수도 있다. 볼 시편의 경우 일반적으로 지름이 2 mm~10 mm인 크기를 사용하며, 디스크 시편은 30 mm~100 mm의 지름과 2 mm~10 mm 두께의 시편을 사용한다.

12.3 표면 처리

디스크 시편의 평균 표면 거칠기는 0.8 μm 이하인 것을 사용한다. 시편을 표면 처리할 때에는 시편의 내부 모재에 손상이 가해지지 않도록 특별히 주의해야 한다. 시험 보고서에는 표면처리 방법을 명시해야 한다.

13. 시험 변수

시험에 영향을 미치는 변수는 하중, 속도, 미끄럼 거리, 온 습도와 같은 환경 등이 있다.

13.1 하중

핀 시편을 통해 디스크 시편 위에 수직으로 가해지는 하중의 크기는 힘의 SI단위인 N(뉴턴)으로 표시한다. 하중의 크기는 시험 시편과 마찰, 마멸 특성에 맞게 작업자가 선택해야 하며, 시험 하중 값을 보고서에 명시해야 한다. 일반적으로 금속 재료에 대한 마찰, 마멸 시험에서는 수십 g에서 수십 kg 정도의 하중이 선택된다.

13.2 속도

핀과 디스크가 상대 운동하는 지점의 선 속도를 SI단위인 m/s로 표시한다. 일반적으로 속도를 측정하기 위해서는 디스크의 회전각속도를 측정한 후 디스크의 중심으로부터 마찰이 일어나는 지점까지의

셋팅된 반지름 값을 이용하여 선속도로 환산하게 된다.

디스크의 회전 각속도가 (rpm)이며, 마찰이 일어나는 지점이 디스크 중심으로부터 (m)만큼 떨어져 있다면, 이때 선속도 (m/s)는 다음 식으로 계산할 수 있다.

13.3 미끄럼 거리

마찰 시험중의 총 미끄럼거리를 SI단위인 m로 표시해야 한다.

13.4 온·습도

온도의 경우에는 마찰이 일어나는 지점의 국부 온도를 측정해야 하며, 습도는 마찰이 일어나는 주위의 대기 조건을 측정하여 기록한다.

14. 시험 절차

14.1 시험 또는 시편의 무게 측정전에 시편을 깨끗하고 건조한 상태로 만들어 주어야 한다.

시편 표면에 묻은 불순물이나 시편 재료 이외의 물질이 붙어있는지 확인하고 제거해 준다. 염소 성분이 포함되지 않고, 시편 표면에 막을 형성하지 않는 용제를 사용하여 시편을 세척한다. 세척 후에는 건조 과정을 통해 시편 표면의 틈새에 남아있을 수 있는 세척액을 제거한다.

자성을 가진 금속 시편의 경우에는 자성을 없애주어야 한다. 시편 세척 방법을 보고서에 기술한다.

14.2 시편의 치수 및 무게를 측정한다.

치수의 경우에는 1 μm 분해능으로 측정하며, 무게의 경우에는 0.1 mg 분해능으로 측정한다.

14.3 디스크 시편을 고정 장치에 설치한다.

이때 디스크는 중심축으로부터 $\pm 1^\circ$ 이내의 수직도로 설치 되어야 한다.

14.4 핀 시편을 핀 홀더에 설치한다.

핀 시편이 디스크와 $\pm 1^\circ$ 이내로 수직하게 접촉할 수 있도록 한다.

14.5 레버-암 구조를 가진 경우, 핀 상단부에 적당한 추를 얹어서 원하는 수직 하중을 가한다.

14.6 핀을 디스크에 접촉시키지 않은 상태에서 구동 프로그램을 작동하여 원하는 회전속도로 모터를 회전 하는지 확인한 후 다시 모터를 정지시킨다.

소프트웨어 셋팅시에 샘플링 주파수를 디스크 회전주파수의 10배로 셋팅하는 것이 이상적이다. 그러나

빠른 디스크 회전속도에서 시험할 경우에는 A/D 변환기의 한계로 인해서 샘플링 주파수를 크게 가져갈 수 없다. 이러한 경우에는 샘플링 주파수를 디스크 회전주파수의 최소 2배 이상으로 셋팅하도록 한다.

14.7 구동 프로그램을 셋팅하여 시험이 종료될 조건을 입력한다. 시험 종료 조건으로는 일정 회전 수, 시간 등이 사용된다.

14.8 시편에 원하는 수직하중이 가해진 상태에서 구동 프로그램을 실행하여 시험을 시작한다.

14.9 시험이 종료되면 시편을 꺼내어 마멸 입자를 제거한다. 마멸 트랙을 관찰하여 돌출부, 변색, 미세 균열 등이 있으면 기록해 둔다.

14.10 시편의 치수 및 무게를 시험 전과 같은 방법으로 다시 측정한다.

14.11 필요한 경우, 같은 방법으로 다른 시편에 대해 시험을 반복한다.

14.12 위와 같은 시험 과정에 대한 정보와 시험 데이터는 표 2.1과 같은 시험 데이터 양식에 기입한다.

시험번호				
시험일자	년 월 일			
작성자				
시험환경	시험 전 온도	℃	시험 전 습도	% R.H.
	시험 후 온도	℃	시험 후 습도	% R.H.
시험장비	제조회사	모델	기기번호	작동모드
시험시편	(1) 핀 시편		(2) 디스크 시편	
	기하학적 형상		기하학적 형상	
	재료		재료	
	밀도	kg/m ³	밀도	kg/m ³
	dimension		dimension	
	표면 거칠기	μm	표면 거칠기	μm
	경도		경도	

	열처리방법				열처리방법			
	표면처리방법				표면처리방법			
	무게	시험 전	g		무게	시험 전	g	
		시험 후	g			시험 후	g	
시험조건	회전속도				RPM			
	시험하중				N			
	디스크 중심으로부터 마찰지점까지의 거리				mm			
	총 시험 사이클 수				cycle			
	총 시험시간				s			
	시험온도				℃			
	사용된 윤활제	종류						
		화학조성						
		점도						
시험결과	평균마찰력()				N			
	평균수직하중()				N			
	평균마찰계수()							
	마멸양(질량)				mg			
	마멸양(부피)				mm³			
	데이터 저장파일 이름							
	비 고							

표 2.1) 시험 데이터 양식

16. 시험 결과 분석

16.1 마멸양

마멸양은 디스크와 핀 시편에 각각에 대해 mm³ 단위로 측정한다.

① 핀 시편의 끝단이 반지름이 인 구형이며, 디스크 시편이 초기에 편평하다면, 핀 시편이 마멸되었을 때와 디스크 시편이 마멸되었을 때의 각각의 시편의 마멸양은 다음 식으로 표현된다.

$$W_{pin} = \frac{\pi h}{6} \left(\frac{3D_{wear}^2}{4} + h^2 \right) \dots\dots\dots (16.1)$$

여기서, $h = r_{pin} - \sqrt{r_{pin}^2 - \frac{D_{wear}^2}{4}}$

W_{pin} : 핀의 마멸양(mm³)

D_{wear} : 핀 시편의 마멸된 부분의 지름(mm)

r_{pin} : 핀 끝단 구의 반지름(mm)

$$W_{disk} = 2\pi R_{wear} \left(r_{pin}^2 \sin^{-1} \left(\frac{a_{wear}}{2r_{pin}} \right) - \frac{a_{wear}}{4} \sqrt{4r_{pin}^2 - a_{wear}^2} \right) \dots\dots\dots (16.2)$$

여기서, $h = r_{pin} - \sqrt{r_{pin}^2 - \frac{D_{wear}^2}{4}}$

W_{pin} : 핀의 마멸양(mm³)

D_{wear} : 핀 시편의 마멸된 부분의 지름(mm)

r_{pin} : 핀 끝단 구의 반지름(mm)

R_{wear} : 마멸트랙 반지름(mm)

a_{wear} : 마멸트랙 폭(mm)

이때 식(16.1)은 디스크의 마멸이 거의 없다고 가정했을 때의 핀의 마멸양이며, 식(16.2)는 반대로 핀의 마멸이 거의 없다고 가정했을 때의 디스크의 마멸양이다. 식(16.1)과 식(16.2)를 약간 변형하여 약간의 오차를 갖는 간편식으로 다음과 같이 표현할 수도 있다.

$$W_{pin} = \frac{\pi D_{wear}^3}{64 r_{pin}} \dots\dots\dots (16.3)$$

$$W_{disk} = \frac{\pi R_{wear}^3 a_{wear}}{6 r_{pin}} \dots\dots\dots (16.4)$$

여기서, W_{pin} : 핀의 마멸양(mm³)
 W_{disk} : 디스크의 마멸양(mm³)
 D_{wear} : 핀 시편의 마멸된 부분의 지름(mm)
 r_{pin} : 핀 끝 단 구의 반지름(mm)
 R_{wear} : 마멸트랙 반지름(mm)
 a_{wear} : 마멸트랙 폭(mm)

이때 식(16.3)은 디스크의 마멸이 거의 없다고 가정했을 때의 핀의 마멸양이며, 식(16.4)는 반대로 핀의 마멸이 거의 없다고 가정했을 때의 디스크의 마멸양이다. 식(16.3)은 $\frac{D_{wear}}{r_{pin}} < 0.3$ 인 경우 1 % 이내로 정확하며, $\frac{D_{wear}}{r_{pin}} < 0.7$ 인 경우에는 5 % 이내로 정확하다. 또한 식(16.4)는 $\frac{a_{wear}}{r_{pin}} < 0.3$ 인 경우 1 % 이내로 정확하며, $\frac{a_{wear}}{r_{pin}} < 0.8$ 인 경우 5 % 이내로 정확하다.

- ② 만약 핀 시편의 끝단 형상이 구형이 아닌 경우에는, 시험 전후 시편의 형상에 따라 기하학적으로 마멸양을 산출해야 한다.
- ③ 마멸 트랙의 단면 형상을 측정할 때에는 적어도 2곳 이상의 대표성을 띄는 지점에서 측정한 후 평균하여야 한다.
- ④ 핀과 디스크 시편 모두에서 마멸이 일어난 경우에는 양쪽 시편에서 모두 마멸 깊이 프로파일을 측정해야 한다. 이러한 측정에는 일반적으로 축침형 표면 거칠기 측정기가 사용되며, 측정된 디스크 표면의 마멸된 단면 형상에 마멸 트랙 길이를 곱하여 디스크 시편의 마멸양을 계산한다. 핀 시편의 경우에는, 마멸된 부분을 90° 방향으로 두 번 측정하여 평균한 후 핀의 마멸양을 계산한다.
- ⑤ 마멸된 부분의 질량은 밀도와 부피식을 통해 간단하게 계산할 수 있다. 위에서 구한 마멸양(부피)에 시편의 밀도를 곱하여 구한다.

- ⑥ 만약 핀온디스크 시험 결과, 핀과 디스크 시편 사이에 상당한 양의 물질 전이가 일어난 경우에는 위와 같은 방법으로 측정된 마멸양이 실제 일어난 마찰, 마멸의 정도와 비례한다고 볼 수 없기 때문에 위와 같은 방법으로 마멸의 정도를 평가하면 안 된다.

16.2 마찰계수

마찰 계수는 마찰력과 수직하중의 비로 계산되며, 디스크와 핀 사이의 상대운동이 시작하는 순간과 정상 상태에서 각각 측정하여야 한다.

$$\mu = \frac{F}{N} \dots\dots\dots (16.5)$$

여기서, μ : 마찰계수

F: 마찰력(N)

N: 수직하중(N)

16.3 시편의 특성 기록

시험에 사용된 시편의 여러 특성은 시험 결과에 큰 영향을 주기 때문에, 시편의 재료, 형태, 가공 공정, 표면처리 및 시편 준비 과정을 기록해야 한다. 필요한 경우, 시편의 경도값도 기록해야 한다.