

# 구름접촉 피로 수명에 영향을 미치는 인자 및 시험방법

문 한 규  
한국표준연구소 재료연구실 부장



- 1942년생
- 소성 역학을 전공하였으며 파괴역학 및 안전성 해석에 관심이 있다.

방 건 응  
한국표준연구소 재료연구실 선임연구원



- 1952년생
- 고순도 재료의 극저온 역학적 물성을 전공하였으며 저온 강도, 마멸, 이온주입 및 플라즈마를 이용한 표면처리등을 연구하고 있다.

## 1. 머리말

구름접촉 피로는 반복적인 구름 접촉에 의해 나타나는 것으로서 피로의 원인이 되는 반복하중이 두 물체의 반복적인 접촉에 의해서 일어난다는 점 때문에 일반적으로 피로연구 분야에서 다루어지지 않고 마멸, 마찰 연구 분야에서 다루어지고 있다 구름접촉 피로현상이 나타

나는 실제 예로서 베어링, 철도레일 등이 있다.

표 1은 두 물체의 접촉면적에 따른 응력상태와 실제예, 그리고 손상기구를 나타내 보인 것인데 접촉면적이 넓으면 작용 응력이 작고 마멸에 의한 손상기구가 주로 일어남을 알 수 있다. 두 물체가 선 또는 점 접촉을 하게 되면 접촉 면적이 작아지므로 작용 응력이 매우 커지게 되며 정적 접촉 상태에서의 응력 해석을

표 1 접촉상태, 응력분포, 손상기구 및 실제예

접촉 상태	응력 상태	실 제 예	손상 상태
진면접촉 (lower pair)	분산 응력	평판 베어링	마멸(mild)
		피스톤 링과 실린더 벽	마멸(mild), Scuffing
		브레이크, 클러치	마멸(mild), 마멸(severe)
		진동을 받는 부품	Fretting
선, 점접촉 (higher pair)	Hertz 응력	구름 접촉 베어링	Fretting, Pitting
		기어	Scuffing, Pitting
		캠	Scuffing, Pitting
		철도와 바퀴	마멸(Severe), Pitting

처음으로 한 Hertz의 이름을 따서 Hertz 응력이라고 부른다. 점접촉때와 선접촉때의 Hertz 응력은 다음의 식으로 나타난다<sup>(1,2)</sup>.

점접촉 :

$$\sigma = \frac{p}{2\pi a^2} \left[ 1 - \frac{r^2}{a^2} \right], \quad (1)$$

$$2a = \left[ 6(1-\nu^2) \frac{RP}{E} \right]^{1/3}$$

여기서

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad \frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$$

선접촉 :

$$\sigma = \frac{2P}{\pi bl} \left[ 1 - \frac{r^2}{b^2} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

$$2b = 4 \left[ \frac{(1-\nu^2) \cdot RP}{\pi E l} \right]^{1/2}$$

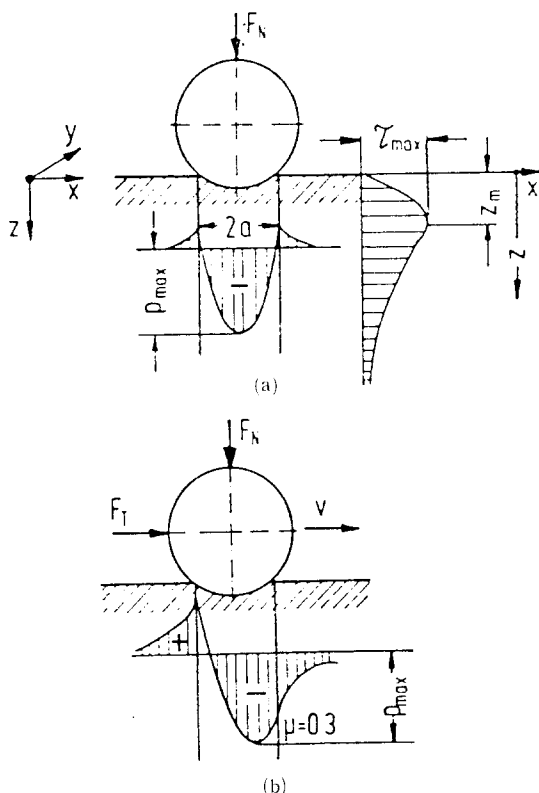


그림 1 수직힘만 작용할때와 수평힘이 같이 작용할 경우의 Hertz 응력분포

위의 식에서 특기할 사항은 두가지인데 그 하나는 접촉 상태가 선접촉, 점접촉이라고 하나 재료의 탄성 변형 때문에 실제 접촉면은 직경  $2a$ 의 원이거나(점접촉),  $2b \times l$ 의 직사각형(선접촉)이라는 점이다. 또 다른 하나는 최대 전단응력이 접촉면에서 나타나는 것이 아니라 표면아래 깊이  $0.47a$ (점접촉), 혹은  $0.47b$ (선접촉) 부분에서 나타난다는 점이다. 이것은 무슨 의미를 나타내고 있는가?

그림 1에서 보듯이 두 물체의 접촉면에 수직인 방향으로만 힘이 작용하면 Hertz 응력은 접촉면 외곽 경계부근을 제외하고는 거의 압축 응력이다. 그러나 접촉면과 평행한 방향의 힘이 작용하면 미는쪽의 부분은 인장응력이 커지고 밀리는 쪽, 즉 강구를 예로 들면 굴러가는 방향쪽은 압축응력이 커지게 된다<sup>(3)</sup>. 여기에서 미는 방향의 힘은 베어링의 경우 구름 접촉 마찰에 나타나는 힘이다. 따라서 구름접촉 마찰이 없는 순수한 구름접촉의 경우에는 구름접촉 피로 수명이 큰 문제가 되지 않으나 구름 마찰

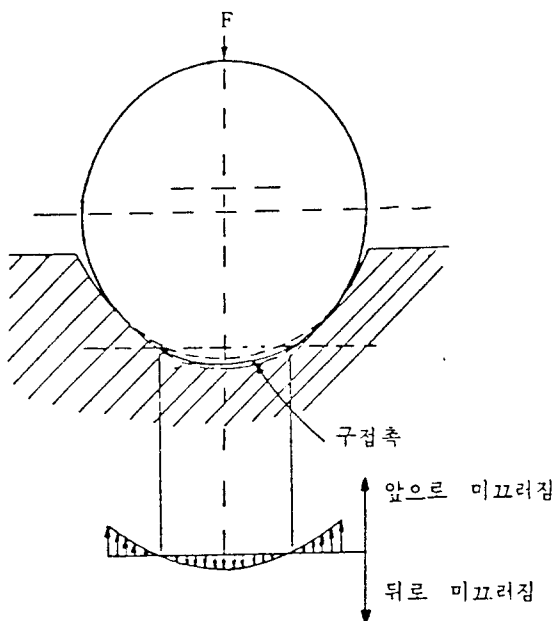


그림 2 구름 베어링에서 움직이는 거리가 다르기 때문에 미끄럼이 일어나는 부위

이 있으므로 해서 응력 분포에 변화가 생기게 되어 그림 1과 같은 인장·압축의 반복 전단응력을 받게 되며, 그 결과 구름접촉 피로가 일어나는 것이다.

구름 마찰을 일으키는 요소로는 미세미끄럼, 탄성이력, 소성변형, 응착효과<sup>(4)</sup> 등이 있는 것으로 알려져 있다. 구름 접촉의 경우 미끄럼이

없는 것으로 이해 되기 쉬우나 실제로는 그림 2와 같이 접촉면 전체에 걸쳐 미끄럼이 일어나므로 사실상 구름접촉에 의해 일어나는 현상은 구름-미끄럼이다<sup>(2)</sup>. 그리고 이 경우 주로 나타나는 손상형태는 표 1에 나타나 있듯이 피팅(pitting)이며 그림 3은 피팅 손상의 전형적인 사진이다<sup>(6)</sup>.

## 2. 구름접촉 피로수명에 영향을 미치는 인자

구름접촉 피로수명에 영향을 미치는 인자들은, 마찰, 마멸 시험에 영향을 미치는 인자들과 거의 같으며 이 인자들은 크게 재료에 관련된 것들과 시험조건에 관련된 것으로 나눌 수 있다. 표 2는 구름-미끄럼 시험의 전체적인 순서를 나타낸 것으로서 시험을 하기 전에 시험 결과에 영향을 미치는 인자들에 대한 검토 및 설정이 필요한 것을 알 수 있다<sup>(7)</sup>. 이 인자들에 대해 간략히 살펴 보겠다.

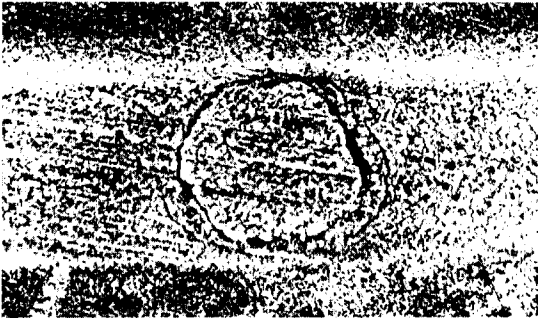
### 2.1 재료와 관련된 인자들

재료와 관련된 인자들은 주로 미세조직과 관련된 것들이며 그외에 잔류 응력, 경도, 강도 등이 있다. 구름접촉 피로에 대한 연구는 주로 베어링강을 중심으로 이루어져 왔기 때문에 이 재료에 대한 논문이 거의 대부분이며 다른 재료에 대한 연구는 별로 없다.

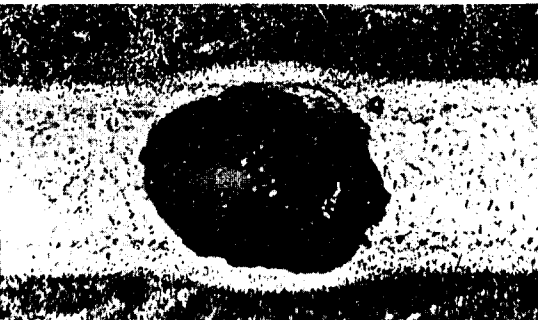
그림 4는  $30\mu\text{m}$ 보다 큰 크기의 산화물 개재물의 양에 따른 구름접촉피로 수명을 나타내고 있는 것으로서 재료의 청정도가 수명에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다<sup>(8)</sup>. 이와는 달리 황화물 개재물은 그 자체가 산화물보다 부드럽고 길쭉한 형상이기 때문에 어느 정도의 범위(0.008~0.033% S)에 걸쳐서는 그 영향이 큰 차이가 없는 것으로 알려져 있다<sup>(8)</sup>. 이 이외에도 베어링강에 용존되어 있는 산소 및 질소가 미치는 영향에 대해서도 연구가 이루어졌는데 산소는 큰 영향을 미치지 않으나<sup>(9)</sup> 질소의 경우에는 용존량이 많을수록 수명이 짧아지는 것으로 보고되고 있다<sup>(10)</sup>. 이러한 여러가지 이유



(a)



(b)



(c)

그림 3 구름접촉 피로결과 나타난 pitting failure

표 2 구름-미끄럼 시험과정 및 고려해야 될 인자

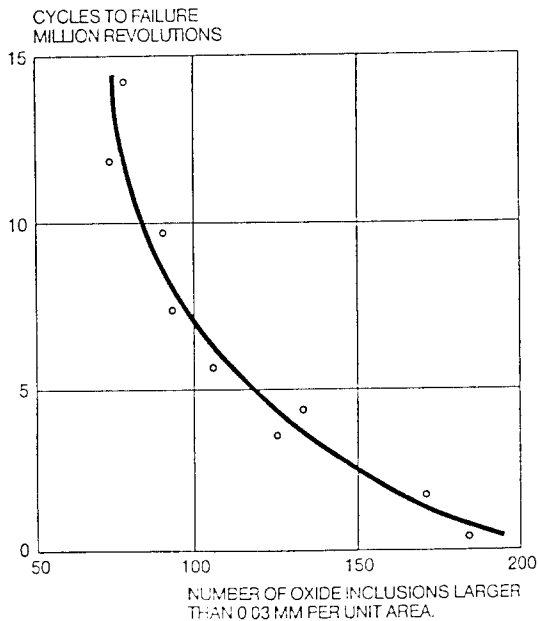
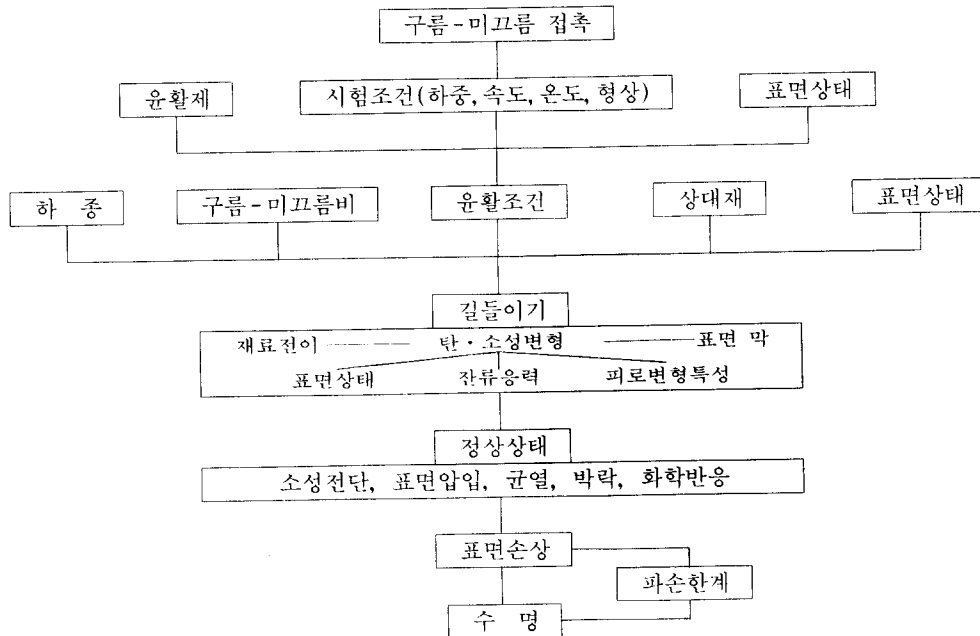


그림 4 구름접촉 피로수명과 산화물 비급속 개재물의 상관관계 (단위면적당 0.03mm 크기 이상의 산화물을 센 숫자임)

때문에 구름접촉 피로 시험을 할때는 시편을 가능한한 한개의 봉재에서 잘라다 쓰는 것이 좋다.

탄화물의 형상과 크기의 분포에 대한 연구결과를 보면 탄화물이 크고 모가 난 형상일수록 수명이 짧아지며 구형이 될수록 긴 것으로 나타나 있다. 또한 같은 구형이더라도 그 크기가 작을수록 좋은 것으로 보고되어 있으며 실제로 탄화물의 평균 크기가  $0.56\mu\text{m}$ 인 것과  $1.4\mu\text{m}$ 인 재료를 실험한 결과  $0.56\mu\text{m}$ 의 경우가 수명이 2.5배나 되는 것으로 나타났다<sup>(11)</sup>.

베어링강의 경우에는 열처리 결과에 따라서 잔류 오스테나이트의 양이 바뀌는데 잔류 오스테나이트의 영향은 준안정상이므로 시험도중 점차 마르텐사이트로 변태된다. 잔류 오스테나이트의 영향은 시험조건에 따라 다르게 나타나며 균열진전 속도를 억제하고 가공경화 효과를 일으켜 피팅의 생성을 억제하는 효과가 있으나<sup>(12)</sup> 지나치게 많으면(부피피로 대략 10% 이상) 역효과가 나타나는 것으로 보고되어 있

다<sup>(13)</sup>.

그림 5는 정도의 영향을 보여주는 것으로서 HRC60 전후의 범위에서는 경도가 클수록 수명이 커지는 경향이 있다<sup>(14)</sup>. 구름접촉피로는 두 물체의 접촉에 의해 일어나는 것이므로 정도 차이에도 영향을 받게 된다. 그림 6은 NASA에서 5-ball 시험기로 시험한 결과 인데 이를 보면 정도 HRC 60 전후의 경우 1~2정도 정도 차이가 나는 것이 가장 좋다. 베어링에 비유하면 내외륜의 정도가 강구의 정도보다

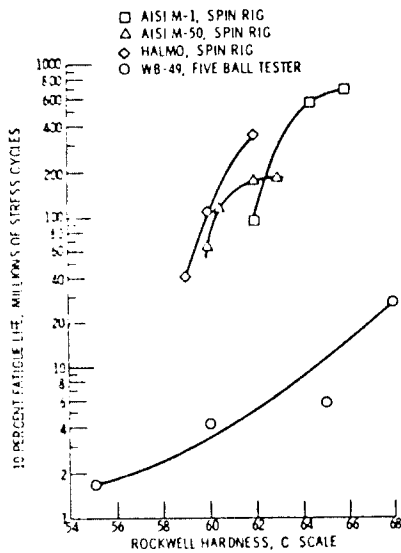


그림 5 구름접촉 피로수명과 정도의 상관관계

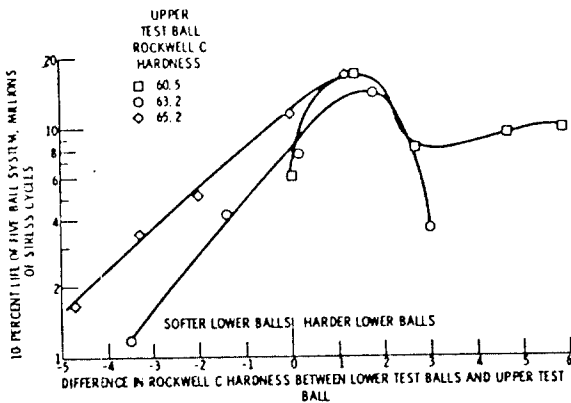


그림 6 두 접촉 재료간의 정도차이가 구름접촉 피로수명에 미치는 영향

약 1~2낮은 것이 좋다는 뜻이다.

재료의 flow도 수명에 영향을 미치는데 flow에 평행한 방향으로 파손이 잘 일어나는 것으로 보고되어 있다<sup>(15)</sup>. 따라서 시험을 할 때는 원소재(봉재)와 시편의 방향을 일정하게 유지해야된다. 잔류응력도 수명에 영향을 미치는데 압축잔류응력은 수명을 연장시키는 효과가 있다<sup>(16)</sup>.

## 2.2 시험조건과 관련된 인자들

시험조건과 관련된 인자들은 다시 시편의 물리적 상태와 관련된 것들과 시험조건과 관련된 것들로 나눌 수 있다. 시편의 상태와 관련된 것에는 표면거칠기, 시편의 형상등이 있고 시험조건과 관련된 것들은 하중, 온도, 속도, 분위기, 윤활 등이 있다.

표면이 거칠수록 돌출부의 접촉이 잘 이루어지므로 마찰이 커지며 수명도 짧아진다. 그림 7은 표준연구소에서 수행한 연구 결과로서 표면이 거칠수록 수명이 짧아지는 경향이 잘 나타나 있다<sup>(17)</sup>.

접촉각도의 영향은 접촉각도의 변화가 가능한 4-ball 시험기에서 주로 연구 되었는데 그림 8에서 보듯이 각도가 클수록, 즉 레이스의 직경이 커지고 수평접촉에 가까워질수록 수명이 짧아지는 것을 알 수 있다<sup>(18)</sup>. 이 이유는 각도가 커지면서 강구의 스핀운동, 즉 미끄럼이 커지면서 온도상승이 일어나고 이결과 EHD 윤활막도 얇아지고 정도가 떨어지면서 수명이 짧아지는 것으로 설명되고 있다.

구름접촉 피로수명 연구에 있어서 주의해야 될 분야는 윤활조건이다. 잘 알려진대로 그림

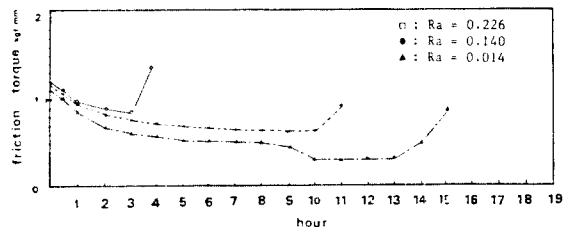


그림 7 표면거칠기와 수명의 상관관계

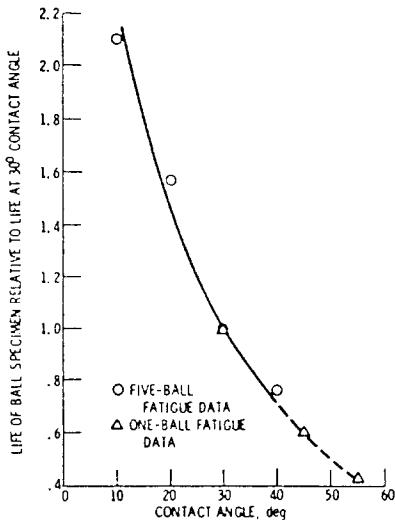


그림 8 접촉각도와 구름접촉 피로수명의 상관관계

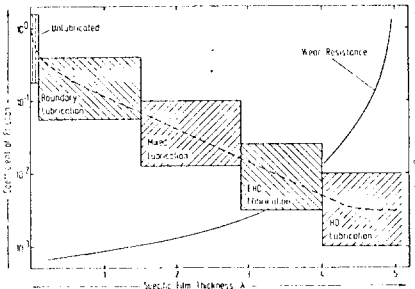


그림 9 윤활조건에 따른 마찰계수의 변화

9에 나타난 바와같이 윤활조건에 따라 마찰계수가 변한다<sup>(19)</sup>. 여기에서 유막계수  $\lambda$ 는 두 접촉면의 표면거칠기 및 유막두께와 관련이 있으며 다음의 식으로 표현된다.

$$\lambda = h / \sqrt{R_1^2 + R_2^2} \quad (3)$$

여기에서  $h$ 는 유막두께이고  $R_1$ 과  $R_2$ 는 각각 표면거칠기이다. 유막두께는 또한 윤활유 점도 및 속도의 곱에 비례하고 하중에 반비례한다. 점도는 또 온도가 상승함에 따라 감소하므로 구름접촉 피로 현상을 연구할때 하중이나 온도, 또는 속도등을 바꾸어 가면서 실험할때는 이들 실험조건 변화에 의해 윤활조건이 바뀌지 않도록 주의 하여야 한다. 그림 10은 하중

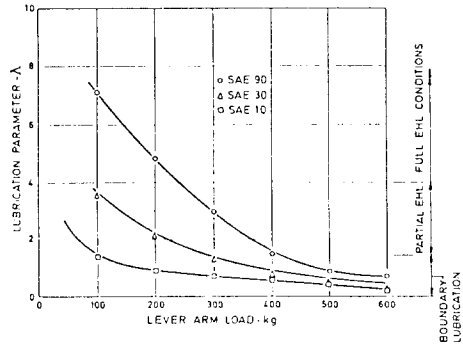


그림 10 실험하중에 따른 유막계수의 변화 및 윤활조건 변화

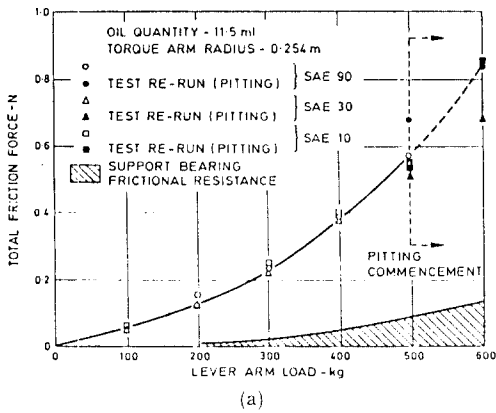
의 변화에 따른 유막계수의 변화와 함께 윤활조건이 바뀌는 것을 보여주고 있다<sup>(20)</sup>. 표면거칠기를 바꾸어서 실험할 경우는 그 영향이 훨씬 크므로 더욱 주의하여야 한다.

하중이 커지면 마찰계수가 커짐과 동시에 작용응력이 커져서 수명이 짧아진다. 이 경우 Hertz 응력을 계산하여 시편의 표면에서 소성변형이 일어나지 않도록 하중조건을 결정하여야 한다.

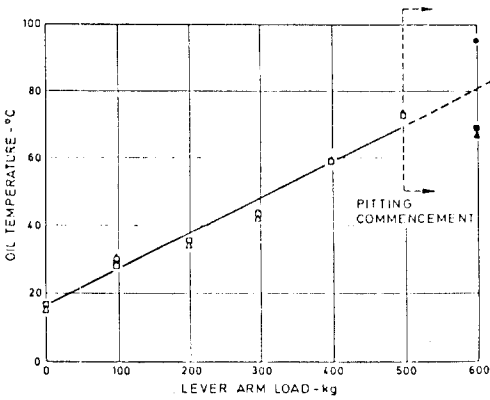
시험속도를 결정할때는 윤활조건을 감안하여야 한다. 너무 빨라지면 유체윤활쪽으로 조건이 바뀌어 재료의 구름접촉 피로 현상을 연구하는 것이 아니라 윤활유 특성을 연구하는 결과가 될수도 있다.

온도가 상승하면 윤활유의 열화와 함께 재료의 연화가 일어나는데 주로 하중의 증가나 표면거칠기의 증대에 의한 마찰계수의 상승에 기인하는 경우가 대부분이다. 그림 11은 하중과 마찰계수, 그리고 하중과 윤활유 온도의 관계를 나타내고 있는 실험결과로서<sup>(20)</sup> 하중의 증대에 의한 마찰계수 및 온도의 상승이 크게 나타남을 알 수 있고 한국표준연구소에서도 같은 연구 결과를 얻었다. 따라서 온도를 일정하게 유지하기 위해서는 항온조가 필요하다.

윤활유의 종류에 따라 윤활특성이 바뀌고 수명도 그에 따라 영향을 받는 것은 잘 알려져 있다. 즉 그림 10을 예로들면, 실험하중을 200~400kgf의 범위에 걸쳐 연구한다고 할 경



(a)



(b)

그림 11 하중에 따른 마찰계수 및 윤활유 온도의 변화

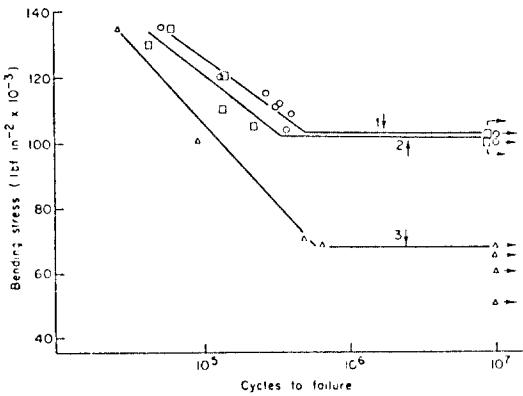


그림 12 물에 오염된 윤활유가 굽힘 피로수명에 미치는 영향(1 : dry base oil, 2 : base oil + 0.02%wt 물 3 : base oil + 0.05%wt 물)

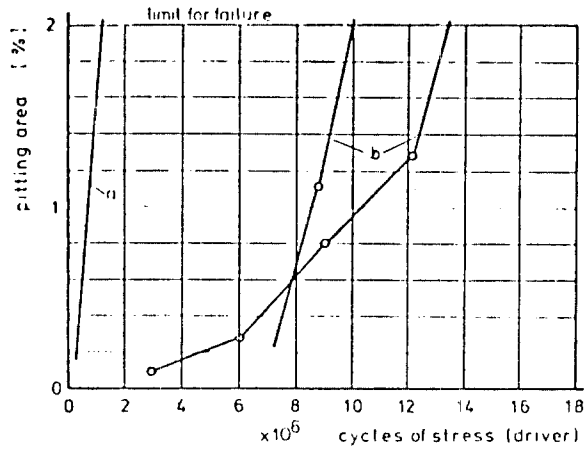


그림 13 길들이기 처리가 구름접촉 피로수명에 미치는 영향

우 SAE 20을 선택해야 윤활조건의 변동이 없이 실험이 가능함을 알 수 있다. 여기에 더하여 주의해야 할 것은 윤활유의 오염, 즉 물이나 입자 등이 윤활유에 섞이면 피로 수명이 짧아지므로 실험을 할 때는 항상 새 윤활유를 쓰는 것이 좋다. 이 예는 그림 12에 나타나 있으며 물에 의한 오염에 의해 수소취성 현상이 나타나서 미소균열이 많이 생성된다고 보고되고 있다<sup>(21)</sup>.

그리고 길들이기 과정을 거치느냐 안 거치느냐에 의해서도 피로수명이 영향을 받으며 그림 13은 그 효과를 보여주고 있다<sup>(22)</sup>. 이 연구에서 채택된 길들이기는 장시간 수명 시험에서 가해지는 하중의 1/2을 미리 가하는 것이다.

### 3. 구름접촉 피로수명 시험 설계

피로수명시험의 주 목적이 재료의 피로특성에 대한 연구이거나 윤활제에 대한 평가일 때는 실험조건의 설정등이 비교적 간단하다. 그러나 연구의 목적이 산업적 응용에 필요한 자료를 얻기 위한 모의시험일 경우에는 시험 설계를 주의깊게 하여야 한다. 왜냐하면 모의 시험의 목적은 짧은 시간안에 현장과 비슷한 조건에서 일어날 수 있는 자료를 수집하는데 있으므로

일종의 加速試驗이며, 또한 실물시험이 어려운 경우 유용한 자료를 쉽게 얻는데도 그 목적이 있으므로 두가지 경우 모두 시험 결과의 신뢰도가 중요하게 된다. 여기서 시험결과의 신뢰도와 함은 두 물체의 접촉에 의해 일어나는 파손 기구가 워낙 다양하므로 가속시험을 하느라 하중이나 회전 속도 등을 실제 상황보다 높게, 즉 보다 열악한 조건에서 시험 하다 보면 실제 파손기구와 다른 파손기구에 의해 파손이 일어날 경우가 많으므로 모의실험에 의해 나타나는 파손기구가 실제 파손기구와 같은가가 그 내용이다. 다시 말해 파손기구가 다른 경우에는 모의실험 결과를 실제 시스템에 적용할 수 없다는 뜻이다.

이 신뢰도를 판단하는 기준은 여러가지가 있으나<sup>(23)</sup> 우선적으로 마멸면의 마멸흔적 비교 관찰과 마멸 부스러기 형상이 같아야 한다. 이 두가지 결과가 실제 시스템의 결과와 같으면 최소한 파손기구가 같다는 점에서 모의시험의 기본적인 신뢰도는 확보되었다고 볼 수 있다. 구름접촉피로 수명 시험을 예로들면 피팅 손상을 들 수 있다.

그림 14는 모의시험 결과의 현장 적용 과정을 나타낸 것인데 구름접촉 피로 시험에도 동일하게 적용될 수 있다<sup>(24)</sup>. 먼저 재료 및 윤활제를 선정하고 파손기구와 시험조건의 영향을 모델시험을 통해 알아낸 다음 최적 재료 및 윤활제를 결정하고 이를 바탕으로 부품시험으로 들어가며 여기에서 같은 과정을 거쳐 최종제품의 개발과 현장시험에 들어가게 된다. 부품시험 과정에서는 시험결과에 따라 설계 변경을 하게 되며 모델시험은 비교적 간단한 시스템으로 시험을 하고 부품시험은 실물시험에 비교적 가깝다.

위의 시험과정에서 각 단계의 시험시 고려하여야 될 구름접촉피로 시험조건을 보다 자세하게 설명한 것이 표 2이며 모든 시험조건과 윤활조건을 결정하고 난 다음에 길들이기 과정과 정상 상태 과정을 거치면서 고려하여야 되거나 관찰해야 되는 현상들이 설명되어 있다.

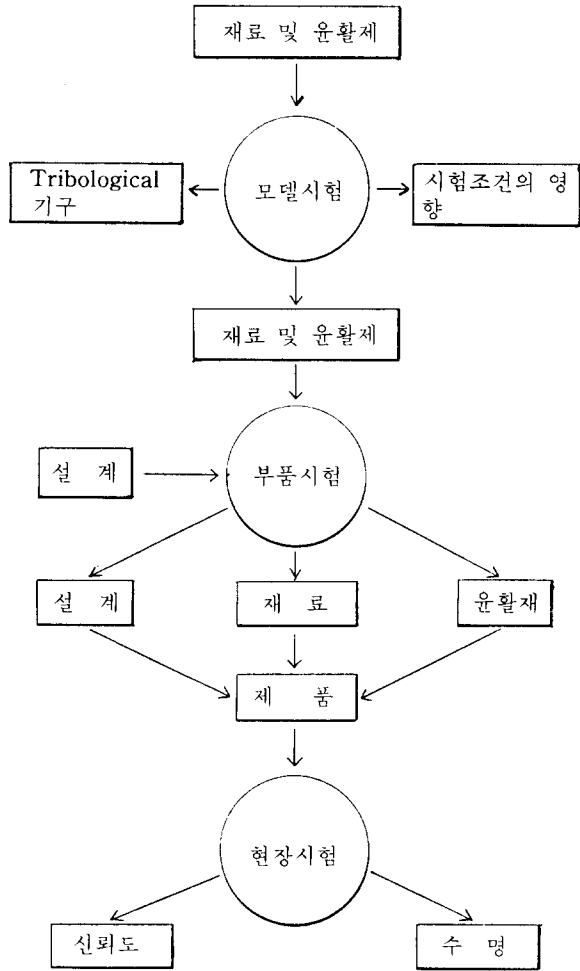


그림 14 모의시험 결과의 현장적용 과정

#### 4. 구름 접촉피로 시험장치

지금까지는 구름접촉 피로시험과 관련된 시험조건 등에 대해 설명하였다. 그러면 실제로 구름접촉 피로수명 시험기에는 어떤 것들이 있는가? 먼저 모델 시험 단계에서의 시험기들을 살펴보겠다.

그림 15는 윤활유의 극압성 시험에 사용되던 4-ball 미끄럼 시험기를 4-ball 구름시험기로 개조한 영국 국립공학 연구소(NEL)의 시험기 개략도이다<sup>(25)</sup>. 여기에서 강구를 지지하는 아



래의 레이스는 베어링의 외륜을, 그리고 강구 3개는 강구를, 맨위의 강구는 내륜을 나타낸다고 볼 수 있으며 시편은 맨위의 강구이고 또한 일반적으로 가장 먼저 파손된다. 미국의 NASA에서는 가운데 부분의 강구 숫자를 하나 더 늘려 5-ball 시험기를 제작하여 많은 연구실적을 남겼다. 이 시험기들은 구조가 간단하고<sup>(14)</sup> 접촉 각도를 조절할 수 있다는 장점이 있으나 그 반면에 재료의 특성을 연구하는데는 단점이 있다. 즉 재료의 조성이나 미세조직 등의 재료 관련 인자가 구름접촉 피로수명에 미치는 연구를 수행하려면 시편으로서 강구를 만들어야 하는데 연구실에서 소량으로 강구를 만들기는 매우 어렵다는 점이다.

위와 같은 단점을 극복하기 위하여 고안된 시편의 형상이 그림 16과 같이 끝 부분이 원추 모양으로 된 것으로서 연구실에서 간단히 만들 수 있어 재료특성 연구에서는 많이 선호되고 있다<sup>(26)</sup>. 그리고 이 시험기로는 ball-on-flat 시험도 가능하며 조금만 개조하면 미끄럼 시험도 가능하다는 장점이 있어 여러가지 연구 목적으로 활용할 수 있다. 그러나 동력전달이 한쪽에서만 이루어지므로 구름-미끄럼 시험시 요구되는 구름-미끄럼 비율의 조절이 불가능하여 구름-미끄럼 피로수명 시험에는 부적당하다. 그림 17은 일본에서 보고된 시험기로서 시편마다 구동축이 별도로 있어 구름-미끄럼의 조절이 가능한 장점이 있다<sup>(27)</sup>.

그림 18은 영국 Uni-steel 사에서 개발한 ball-on-flat 시험기로서 시험기가 간단한 장점이 있으나 시편의 크기가 고정되어 있고 ball-on-flat 시험이외의 다른 시험은 불가능하다는 단점이 있다<sup>(28)</sup>.

그림 19는 NASA에서 개발한 고속구름접촉 피로시험기로 터보 시스템에 사용되는 재료의 피로수명 시험을 위한 것으로 구동장치도 일반 모터가 아닌 터보 시스템이다. 시편의 가공이 쉽고 고속시험에 유리한 장점이 있으나 다른 형태의 시편 혹은 다른 시험방법이 어렵다는 단점이 있다<sup>(29)</sup>. 그림 20은 ball-on-rod 시험기

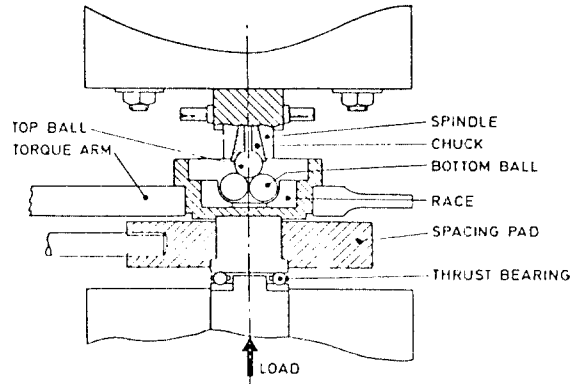


그림 15 4-ball 구름접촉 피로수명 시험기

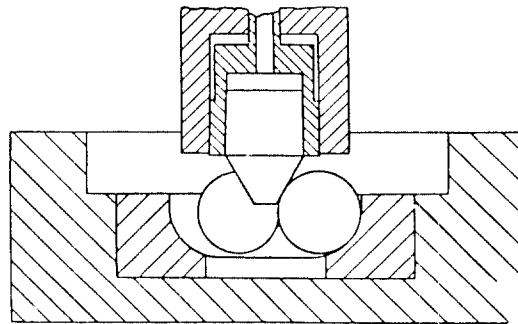


그림 16 Cone-on-ball 구름접촉 피로시험기

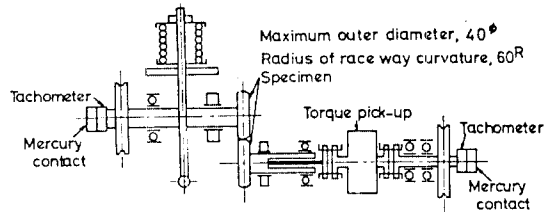


그림 17 구름-미끄럼 시험기

로서 시험기가 복잡하고 튼튼해야 된다는 단점이 있다<sup>(20)</sup>.

위의 시험기들은 모두 단순 모델시험에 응용될 수 있는 간단한 구조의 것들이며 이 단계를 거쳐 부품시험에 들어가게 되면 시험기들은 보다 더 다양해지고 복잡해진다. 철도의 레일과 바퀴의 구름접촉 피로시험기는 일본 및 영국에서 보고된 바 있으며<sup>(31~33)</sup>, 베어링의 구름접촉 피로 시험기에는 베어링에 하중을 가하는 방식도 여러가지이고 한번에 시험하는 베어링의 숫

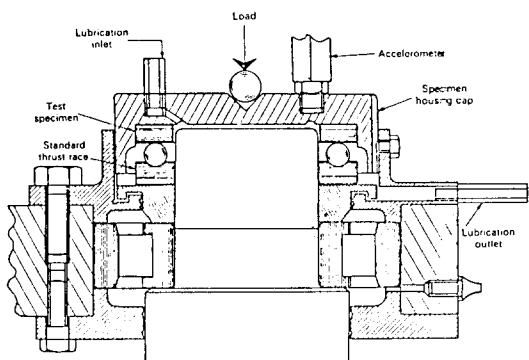


그림 18 Uni-steel 사이에 개발한 구름접촉피로 수명시험기

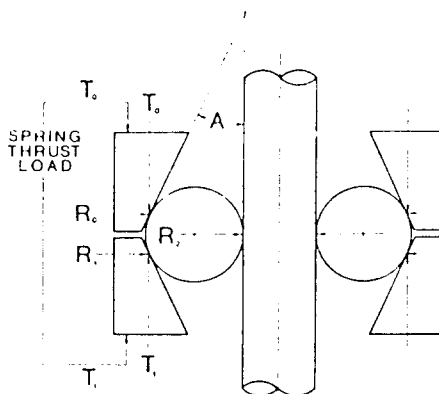


그림 20 Ball-on-rod 구름접촉 피로시험기 (가운데 부분의 실린더가 시편이다)

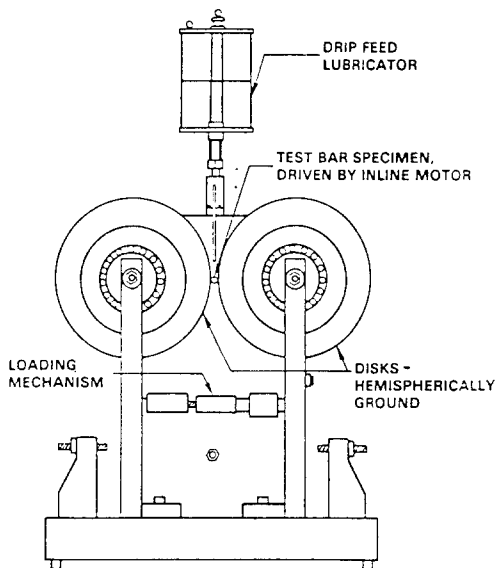


그림 19 NASA에서 개발한 고속 구름접촉피로 수명시험기(가운데 부분의 봉재가 시편이다)

자도 한개 혹은 여러개인 경우도 있으며 모두 장·단점이 있다.

### 5. 구름접촉 피로 시험 모니터링

구름접촉 피로수명 시험뿐만 아니라 모든 마멸·마찰 현상에 대한 연구는 그 현상이 두 물체의 접촉면에서 일어난다는 점 때문에 시험하

면서 일어나는 현상을 계속 관찰하는 것이 어렵다. 즉 접촉면을 관찰하려면 시험을 중단하고 두 물체를 떼어야 되고 그러면 시험의 연속성을 유지하는데도 문제가 생기므로 시험결과가 주로 처음과 끝의 상태를 비교하는 단속적인 경우인 것이 많았다.

최근 들어 연구수준이 고도화 되어감에 따라 마멸·마찰 시험도중 일어나는 일들을 시험하면서 계속 측정하는 기술에 대한 연구가 활발해지고 있다<sup>(34)</sup>. 구름 접촉피로 수명시험도 전에는 주어진 시험조건 상태에서 수명이 얼마나 되는가를 측정하는 것이 대부분이었으나 이제는 파손이 일어나기 전까지의 기간동안에 무슨 일이 일어나고 있는지, 그리고 파손이 언제쯤 일어날 것인지를 예측하기 위한 기술개발 연구가 많이 이루어지고 있다. 특히 이 기술은 최근들어 공장설비의 상태진단 기술에 대한 수요의 증대와 함께 파손을 미연에 방지하기 위한 수명예측의 필요성 때문에 더 중요해지고 있다.

여기에서는 한국표준연구소에서 지금까지 연구개발한 구름접촉 피로시험기를 중심으로 하여 측정기술을 간략히 설명하겠다. 그림 21은 한국표준연구소에서 수행한 “파손방지 측정기술 개발” 연구과제의 일환으로 제작된 구름접촉 피로 시험기이다. 기본적인 구조는 NEL에서 개발된 4-ball 구름시험기와 같으나 여러가

지 구조변경을 시도하였다.

우선적으로 진동 신호분석에 의한 파손 예측 기술의 개발을 목적으로 진동신호의 통계처리 기술을 연구 개발하였다<sup>(35)</sup>. 단순히 진동의 세기만을 재는 경우에는 시험조건에 따라 진동의 세기가 바뀌는 경우가 있어 파손을 예측하기 위한 기준을 잡는데 어려움이 있으나 진동 신호의 통계처리에 의해 하중의 변화에 영향을 받지 않고 파손이 예측가능한 것으로 나타났다. 그리고 마찰력의 측정을 위한 토크 암(torque arm)을 설치하였고 그와 동시에 시편 하우징에 고정되어 있던 열전대를 쓰지 않고 시편의 접촉부 부근에 열전대를 강력접착제로 부착하여 온도를 측정하는 방식을 채택하였다. 그 결과 그림 7에 나타난 것과 같이 실험이 진행되면서 마멸 트랙 폭이 넓어짐과 동시에 마찰 계수의 상승으로 인해 토크가 증가되고 파손이 일어나기 전에 급격히 상승하는 경향이

나타났다. 온도 측정결과 실험시간의 증가, 혹은 하중의 증가에 따라 온도 상승 현상이 관찰되어 이를 보정하기 위한 수단으로 윤활유 온도를 일정하게 유지하기 위한 항온조를 설치하였다. 그와 동시에 구름접촉 피로가 진행되면서 마멸 트랙의 깊이가 커지는 것을 감지하기 위하여 추를 걸어놓는 지렛대 팔에 전기 마이크로미터를 설치하였으며 지렛대의 원리에 의해 마멸된 깊이가 증폭되어 나타나는 효과가 있었다. 그 결과는 그림 22와 같았고 시편 표면이 거칠수록 마멸율이 큰 것을 알 수 있다.

윤활유에 대한 분석을 통하여 마멸진진 상태를 알기 위해 우선적으로 ICP-MS를 이용하여 윤활유에 용존된 금속성분의 분석기술을 확립하였다. 그 다음에는 마멸부스러기를 채취하여 화학적으로 분석하는 기술을 확립하였다. 용존

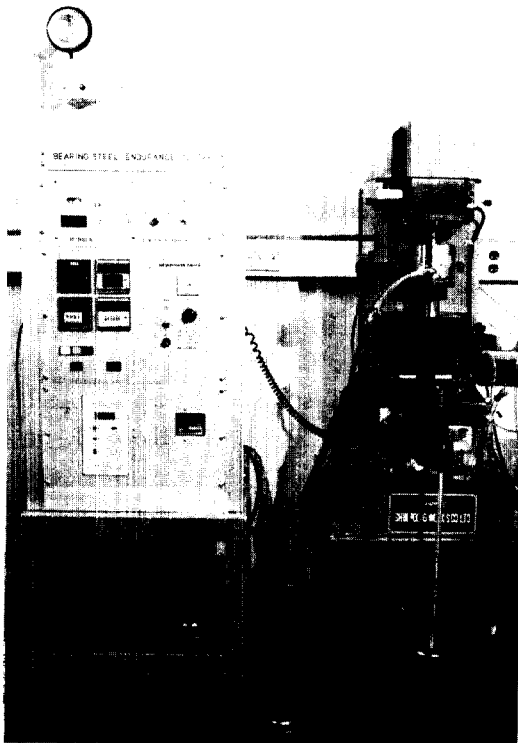


그림 21 KSRI 구름접촉 피로시험기

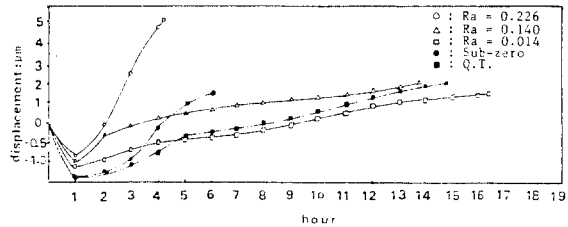


그림 22 구름접촉 피로시험기에 따른 마멸깊이의 증가(초기의 감소현상은 온도 때문이다)

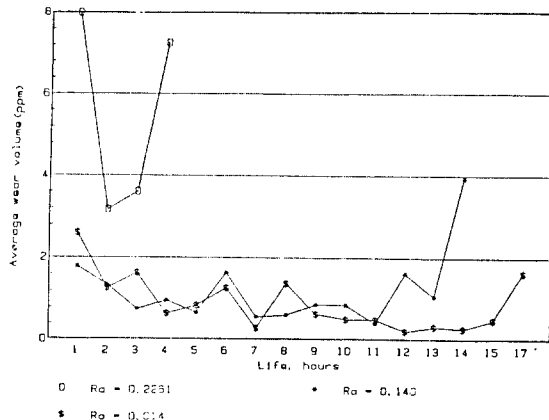


그림 23 ICP-MS 이용한 마멸부스러기 성분 분석 결과

표 3 마멸부스러기의 크기 및 색깔과 마멸상태의 상관관계

	마멸입자의 특징 및 크기, $d$	표면 특징	마멸율
(가)	금속마멸 부스러기; $d < 5\mu\text{m}$	유리면 같거나 매우 거칠음	→0
(나)	금속마멸 부스러기; $d < 15\mu\text{m}$	몇몇 페인곳 외에는 평활함	적다
(다)	금속마멸 부스러기; $d > 150\mu\text{m}$	균한흔적, 소성변형 및 표면균열	크다
(라)	빨간색 산화물 부스러기, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , $d < 150\mu\text{m}$	균한 흔적과 산화막 보임	크다
(마)	검은색 산화물 부스러기, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{FeO}$ , $d < 150\mu\text{m}$	균한흔적의 산화막 보임	크다
(바)	금속마멸 부스러기; $d < 1\text{mm}$	심하게 균하고 소성변형이 크게 일어남	급격하다

금속 성분의 분석기술은 구름 접촉피로 시험시에 생기는 마멸량이 워낙 적어서 어떤 경향을 잡아내는데는 실패하였으나 마멸 부스러기의 분석은 윤활유 순환 라인에 필터를 설치하여 주기적으로 채취 분석하여 분석한 결과 그림 23처럼 파손이 일어나기 직전에 마멸량이 많아지는 것을 알 수 있었다.

윤활유 중 마멸 부스러기의 물리적 분석은 ferroggraphy라 하여 1970년대 중반부터 연구되기 시작한 기술인데 표 3에서 보듯이 부스러기의 형상 관찰만으로도 어떤 마멸기구에 의해 어느정도나 심하게 마멸되었는지 개략적으로 알 수 있으므로 현장 응용을 위해 많이 연구되고 있다. 구름 접촉피로시에는 마멸 부스러기의 양이 많지 않아서 본격적인 응용을 아직 시도하지도 못하고 있으나 미끄름 시험시에는 유용한 수단이 될 것으로 판단된다. 그 외에 별도의 시험장치를 이용하여 방사화 분석법에 의한 마멸율 측정연구도 수행하였다.

### 6. 맺음말

지금까지 구름접촉 피로 수명시험 설계에 있어서 고려하여야 될 요인들이 수명시험결과에 미치는 영향에 대해 간략히 기술하였다. 이 글이 보다 정확하고 신뢰성 높은 구름접촉 피로 시험 결과를 얻는데 도움이 되기를 바라면서 글을 맺는다.

### 참고 문헌

- (1) H. Hertz, 1882, *Über Die Berührung Fester Elastischer Körper und Über Die Harte*. Sitzungsberichte des Vereins zur Förderung des Gewerbefleißes s. 449-463.
- (2) I.V. Kragelsky, M.N. Dobychin, V.S. Komalov, 1982, *Friction and Wear, Calculation Methods*, Pergamon Press. Oxford.
- (3) Karl-Heinz zum Gahr, 1987, *Microstructure and Wear of Materials*, p. 54, Elsevier, Amsterdam.
- (4) Horst Czichos, 1978, *Tribology*, Elsevier, Amsterdam p. 82.
- (5) O. Zwirlein, H. Schlicht, 1982, *Rolling Contact Fatigue Performance, Rolling Contact Fatigue Testing of Bearing Steels*, ASTM STP 771, J.J.C. Hoo ed, pp. 358~379.
- (6) P. Kenny 1977. *Rolling Contact Fatigue: Performance Testing of Lubricants*, R.Tour-et, E.P.Wright Ed., Heyden and Son, pp. 47~71.
- (7) Ref. 3, p. 500.
- (8) I. Fernlund, *The Era of the Industrial Bearing*, Technical Forum, Held at SKF Engineering and Research Center Nie-

- uwegein, 1982, Netherlands, June pp. 54~63.
- (9) D. Scott and P.J. McCullagh, 1973, Hardness Changes in Rolling Contact-Their Significance in Ball-Bearing Steel Performance, *Wear*, 24, pp. 119~126.
- (10) D. Scott, D.J. McCullagh, 1973, The Role of Nitrogen Content on the Rolling Contact Fatigue Performance of En 31 Ball Bearing Steels, *Wear*, 25, pp. 339~344.
- (11) K. Monma, R. Maruta, T. Yamamoto, Y. Wakikado, *Jap. Inst. Metals, J.*, 1968, 32, 1198~204.
- (12) Ref. 3, Chap. 7, p. 523.
- (13) E.V. Zaretsky, R.J. Parker, W.J. Andersen 1965, D.W. Reichard, NASA Technical Note, D3101.
- (14) E.V. Zaretsky, R.J. Parker, W.J. Andersen, 1982, ASTM STP 771, J.J.C. Hoo ed., pp. 5~45.
- (15) S. Ito, N. Tsushima, H. Muro, ASTM STP 771, J.J.C. Hoo ed., 1982, pp. 125~135.
- (16) R.L. Scott, R.K. Kepple, M.H. Miller, In *Rolling Contact Phenomen*, J.B. Biclwell, Ed., Elsevier, New York, 1962, pp. 301~316.
- (17) 문한규외, 1988, "파손방지 측정기술개발", 한국표준연구소 연구보고서, KSRI-88-67-IR.
- (18) E.V. Zaretsky, W.J. Anderson, R.J. Parker, 1962, *Trans ASLE*, Vol. 5, No. 1, pp. 210~219.
- (19) Ref. 3, p. 499.
- (20) F.T. Barwell, J.K. Bunce, V.A. Davies, B. J. Roylance, 1977, "The Rolling Four Ball Machine-A Study of Its Performance", Ref. 6, Heyden and Sons. p. 27.
- (21) W.R. Murphy, E.L. Armstrong, P.S. Wooding Heyden, 1977, "Lubricant Performance Testing for Water-Accelerated Bearing Fatigue", Ref. 6, p. 273, Heyden and Sons.
- (22) W.J. Bartz. V. Kruger, 1977, "Test Method for Evaluating the Influence of Lubricants and Iubricant Addifives on Fatigue Failure of Quenched and Tempered Case Hardened Spur Gears, Ref. 6, Heyden and Sons.
- (23) Ref. 4, p. 264.
- (24) Ref. 3, p. 500.
- (25) D. Scott, J. Blackwell, 1967, NEL Report, 312.
- (26) D. Scott, J. Blackwell, 1977, NEL Rolling Four-Ball Test Machines, Ref. 6, Heyden and Sons.
- (27) K. Sugino, K. Miyamoto, M. Nagumo, 1971, *Trans. ISIJ*, 11 9.
- (28) K.L. Day Uni-steel Testing of Aircraft Engine Bearing Steels, ASTM STP 771, J. J.C. Hoo ed., pp. 67~84, 1982.
- (29) E.N. Bamberger, J.C. Clark, Development and Application of the Rolling Contact Fatigue Test Rig, ASTM STP 771, J.J.C. Hoo ed., pp. 85~106, 1982.
- (30) D. Glover, A Ball-Rod Rolling Contact Fafigue Tester, ASTM STP 771, J.J.C. Hoo ed., pp. 107~124, 1982.
- (31) S. Nishida, K. Sugino, C. Urashima, H. Masumoto, 1985, *일본기계학회논문집(A)*, Vol. No, 461, p. 291.
- (32) S. Nishida, K. Sugino, C. Urashima, H. Masumoto, 1985, *일본기계학회논문집(A)*, 51, No. 461, p. 296.
- (33) J.E. Garnham, J.R. Brightling, J.H. Beynon, 1988 *Wear*, 124, 45~63(1988).
- (34) Ref. 4, Chap. 7.
- (35) 문한규외, 1987, "파손방지 측정기술개발", 한국표준연구소 연구보고서 KSRI-87 23-IR.