Bio-Tribology의 응용과 그 현황

오 박 균
(한국과학기술연구원 기계공학부)

1. 서 론

바이오트라이보로지(biotribology)란 생물학 (biology)와 마찰학 (tribology)의 합성어로서 그리이스어의 τρcβοσ (마찰하다) 가 어원이며, 마찰 마모 윤활의 학술용어 " tribology " 가 영어로 된것은 1966년이다. 이때 마찰학이란 이학 또는 공학현상으로서 문제를 해석하는데 한정하였고 생물에 대한 문제까지 광범위하게 고려하지 못하였다.

1972년 영국 석유학회, 기계학회 그리고 Rheology 학회의 공동개최로 "윤활제의 레올로지" 회의가 열였다. 거기서 Dowson 교수 (기계공학) 와 Right 교수 (루마치스 의학)의 공동논문 " Bio-Tribology "를 발표해서 처음으로 그 용어를 제안하였다. Dowson교수가 열거했던 바이오트라이보로지의 대상은 다음과 같다.

(1) 기계에 사용되는 윤활제에 대한 미생물의 영향
(2) 인간의치의 마모
(3) 면도칼에 대한 저마찰 보호막의 작용
(4) 인체내의 유체수송(뇨관내의 유동기구, 타액의 운동, 혈액흐름)
(5) 모세혈관내에서 적혈구의 운동과 혈장에서 그의 윤활작용
(6) 화상치료시 "정압기체 축수" 적 부양
(7) 음식물을 씹을때 타액의 윤활작용
(8) 관절기능의 윤활학적 연구
(9) 인공골두와 인공관절의 윤활학적 연구

이것 이외에도 바이오트라이보로지의 대상은 대단히 많으며 임상학에 관련된 분야는 다음과 같다.

(10) 콘텍트 렌즈와 안구사이의 마찰문제

(11) 피부의 마찰, 특히 수지의 문채 유지력의 평가

(12) 힘줄과 힘줄사이의 마찰윤활

(13) 생식기 또는 피임구의 마찰문제

(14) 생체내의 역학적 기능에 대한 마찰의 역활

(15) 인공심장 판막에 대한 마찰문제

(16) 생체용 인공재료의 마찰에 대한 표면 경화

(17) 기타 치료용기 즉 수술용 매스에 대한 마찰문제등이 있다.

또한 기초의학에 있어서 생물에 관계되는 분야로서 다음과 같은 것이 있다.

(18) 생식기관에 있어서 발생 성장 대사 병변 치료에 대한 물리적 생물학적 마찰자극의 역활

(19) 일반적인 생식기능에 대한 역활

(20) 생물의 진화 과정에 있어서 기능의 변화와 그에 대한 윤활학적 접근방법

(21) 세포간의 마찰문제 등 여러가지가 있다.

이와같이 생물에 관한 마찰의 문제를 공학적으로 해석하는 것이 바이오트라이보로지의 활용분야이다. 이것은 임상학 또는 기초의학에 응용되는 연구분야이다.

2. 바이오트라이보로지 (Bio-Tribology)

2.1 바이오트라이보로지의 세계

인간과 동물의 신체는 거의 모든 부분이 마찰을 한다. 이와같은 마찰부분은 주물주가 설계하였으며 그의 기능은 인간이 설계한 기계축수의 성능을 여러지 면에서 능가하고 있다. 따라서 바이오트라이보로지는 조물주의 업적에 도전하는 연구분야중의 하나이다.

이 절에서는 관절을 포함하는 바이오트라이보로지의 전반적인 개략을 서술한다. 생체조직의 마찰은 그 매카니즘 (mechanism)을 해석하는 이공학적인 문제이며 또한 인공관절도 공학적인 문제에 속한다. 따라서 이에 대한 연구가 기계공학과 임상학 및 기초의학에서 공동으로 진행되고 있으며 바이오트라이보로지의 몇가지 예를들어 설명한다.

2.1.1 관절 (synovial joint)과 인공관절 (joint prosthesis)

윤활기술이 체계화되지 않았던 19세기 까지는 관절의 윤활성능에 관심이 없었다. 그러나 윤활학이 발달함에 따라서 1930년부터 이학적 또는 생리학적으로 어느정도 관심을 가지고 연구하기 시작했다. 그러나 1970년대에 이르러서 인공관절이 중요한 문제로 대두되었다.

인공관절이 처음으로 출현하였을때는 윤활성능이 양호하였기 때문에 생체관절의 기능에 크게 주목하지 않았다. 그러나 생체내에서 인공물이 마찰하고 또한 인공관절의 심한 마모때문에 그의 수명이 3년정도 이고, 거기서 발생하는 마모가루는 생체에 유해한 반응을 일으켰다. 이와같은 인공관절의 마찰문제를 해결하기 위하여 생체관절의 기능을 상세히 연구하게 되었다.

관절의 윤활기능은 관절에 부과되는 하중이 빈동함에 따라서 "활액" 이라는 천연 윤활액이 스퀴즈(squeeze) 유체 윤활막을 만들에 유압을 발생하여 마찰면의 직접접촉을 방지하고 양호한 윤활상태를 유지하게 한다. 문제는 그 기능을 어떻게 해서 인공관절로 실현하는가에 있으며, 현재 그 것을 완전히 실현할 수 없는 것은 관절과 인공관절의 마찰계수 차이 때문이다. 단지 그 차이를 줄이는 방법에 대한 연구가 진행되고 있다.

2.1.2 피부 (표피 : epidermis)의 마찰

손과 발바닥에는 지문이 있기 때문에 미끄럼을 방지할 수 있으며 수지의 마찰계수는 1.5 이상이다. 그러나 생체관절의 마찰계수는 0.005정도이다. 피부의 마찰계수는 신체의 상태와 관계없고 단지 피로도와 관련이 있다고 추론하

고 있으며 원기가 좋은 피부는 마찰이 적다.

피부이삭술(skin abrasion technique)란 외과치료의 일종으로서 착색이상 상흔 또는 입흑을 제거한다. 이와 관련된 수술용 기기들은 마찰과 관련해서 연구되고 있다. 그리고 인공피부는 화상의 치료로서 임상적으로 실용화 되었다. 이것은 일시적인 치환재료에 불과하므로 그에 대한 연구가 필요하다.

2.1.3 건 (힘줄 : tendon)과 인대 (ligament)의 마찰

건은 코라겐 섬유 (collagen fiber)의 집합체로서 관절운동을 일으키는 근육의 힘을 골(뼈)에 전달하는 조직으로서 건초 (tendon sheath)을 포함하고 그것은 각각 뼈에 접촉해서 활차를 움직인다. 그 부분의 마찰이 문제가 되는 것은 급성 마찰성건초담 (acute frictional tensosynovits)이라는 병충때문이며 이것이 직업병이다.

건과 건초의 마찰에 대한 연구는 개의 근육을 가지고 실험하였으며 그 연구에 의하면 마찰계수는 0.013 ~ 0.022 정도이며 관절보다 약간 높다. 그러나 양호한 윤활상태를 유지하는 것은 같다. 이것은 관절액과 동일한 산성다당류의 윤활효과 때문이라고 추론한다. 이것을 기초로 해서 건의 활주를 잘 할수 있는 약제의 연구가 진행되고 있다. 히알루신산 (hyalulonic acid)은 생체내에서 광범위하게 존재하는 산성다당류의 일종으로서 윤활작용을 한다는 보고가 있다. 인공건은 아직 성공적으로 이용되지 못하고 있으나 뼈와 뼈를 연결하는 인공인대는 어느정도 임상학적으로 응용되고 있다.

2.1.4 인공심장판막 (heart valve prosthesis)의 마찰

그림 1 은 현재 임상적으로 응용되고 있는 4 종류의 인공심장판막을 보여준 것이다. 심장판막의 대부분은 티탄함금의 하우징 (housing)속에 페라이트의 리플릿(leaflet)을 넣는다. 이것은 개폐하는 구조를 이루고 있으며 마찰부분은 하우징과 피플릿 사이이다. 생체의 심장판막은 리플릿이 되는 개폐의 밑등부분이 마찰부분이 되고 변형을 일으킨다. 바이오트라이볼로지의 문제는 인공판

막에서 발생하고 그중에서도 접시형 인공판막은 마모문제가 심각하다. 인공판막의 마찰면은 수 mm^2정도이다. 마찰거리는 연간 40 km 정도이고 하중은 1N 정도이다. 하중이 적으면 총 마모량은 적어진다. 이전에 인공판막의 주요 연구 과제는 판막의 효율과 역류방지 였으나 지금은 마찰로 인한 인공판막의 내구성과 내마모성을 같이 연구하고 있다.

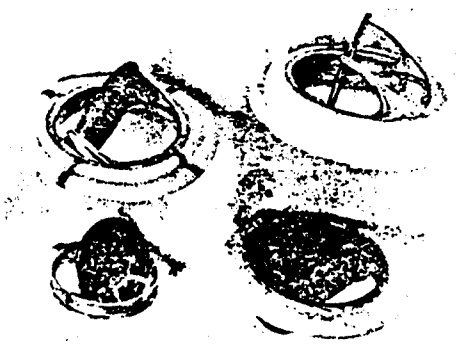

그림 1. 심장판막의 4 종류

2.1.5 치아 (tooth)의 마모

치아는 식물과 치아사이의 마찰에 의하여 마모한다. 치아에 부과되는 하중은 오직 교합근의 근력에 의해서 발생한다. 그 힘은 남성이 약 700N 이고 여성은 500N 정도이다. 접촉면적이 좁고 견고하기 때문에 면압은 상당히 크다. 치과용 인공재료와 인공의치의 내마모성은 중요한 문제이다. 최근에 복합레진 (composit resin)의 내마모성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

또하나 치아의 마모를 연구하는 그룹 (group)이 있다. 이들은 인간진화의 문제를 치아의 마모흔에서 찾고자 한다. 이와같은 진화과정을 이해하기 위해서는 마모에 대한 매카니즘을 연구하는 것이 필요하다.

2.1.6 생식기에 관계되는 마찰

동물의 마찰 부분으로서 생각하지 않을 수 없는 것이 생식기이다. 성적 불능의 치료에 남성기내에 실리콘돔 봉을 삽입하여 외과 치료용으로 이용한다. 또한 피임 기구로서도 마찰이 중요한 문제가 된다.

바이오트라이보로지의 과제는 마찰이 적고 마모가 적은 것을 원한다. 또한 이것을 정확하게 이해하기 위해는 마찰과 윤활이론을 연구해야 한다.

3. 윤활과 마찰 및 마모

이 절에서는 윤활 마찰 그리고 마모를 바이오트라이보로지의 기초개념에 의하여 간단히 해석한다. 이 분야는 완전히 물리 또는 공학적인 문제로서 발달해 왔으며 현재는 생물의 세계에도 적용될 수 있는 학문영역이다.

3.1 유체 윤활

3.1.1 마찰과 윤활의 개념

그림 2와 같이 2 개의 물체 (고체) 가 하중 W 로서 서로 접촉하여 미끄러지는 경우 하중과 직각방향으로 저항력 F 를 발생한다. 이때 F 를 마찰력 또는 마찰저항이라고 하고 다음과 같이 수식으로 표시한다.

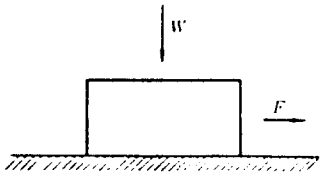

그림 2. 두고체간의 마찰

$$f = F/W \qquad (3.1)$$

여기서 무차원 수 f 를 마찰계수(coefficient of friction)라고 한다. 2개의 면이 상대적으로 미끄름 운동을 하기 위해서는 2 면 사아에 있는 물체 (고체 액체 기체 등)가 전단변형을 일이킨다. 그 전단저항이 마찰저항이 되고 전단이 용이한 물질이 2면 사이에 존재하면 마찰저항은 적게된다. 이와같은 것을 기술용어로 " 윤활 (lubrication) "이라 한다. 유체는 전단이 용이한 대표적인 물질이며 2면간에 유체가 충만된 상태를 유체윤활 (hydrodynamic lubrication or fluid film lubrication)이라 한다.

유체가 2면 사이에 존재하면 유압이 발생한다. 그 압력에 총 접촉면적을 곱하면 하중 W 와 같고, 그 유체가 하중을 지지한다. 2면 사이에 존재하는 유체는 얇은 막이 형성되기 때문에 이것을 윤활막 (lubrication film), 유체막 또는 유막 (oil film)이라 한다. 그 윤활막의 구성은 역학적으로 해석할 수 있으며 유

체역학의 응용이다. 하나의 예로서 고체는 변형하지 않고 액체가 유체인 경우 다음과 같은 9개의 가정하에 점성유체의 운동방정식과 연속방정식을 얻을 수 있다.

(1) 고체는 강체이다.

(2) 유체는 Newton 점성유체이다.

(3) 유체는 비압축성이다.

(4) 유체의 흐름은 층류이다.

(5) 유체에 작용하는 체적력(중력등)은 무시한다.

(6) 유체의 관성력은 무시한다.

(7) 유체의 점도 및 압력은 윤활막의 두께방향에 대하여 변하지 않는다.

(8) 유막의 두께방향의 속도구배는 다른방향의 속도구배에 비해서 충분히 크다.

(9) 고체 벽면에서 유체는 고체와 동일한 운동을 한다.

그림 3과 같이 좌표를 정하고 유체의 운동방정식과 연속 방정식을 적용하여 미소항을 생략하고 적분하면, 다음과 같은 Reynolds 방정식이라는 유체윤활의 기초 방정식을 얻는다.

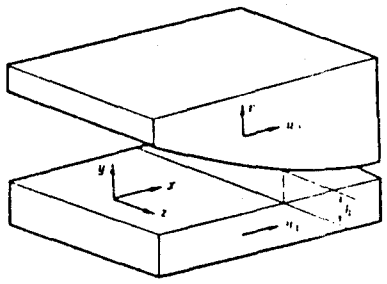

그림 3. 유체윤활에 대한 벽면운동과 좌표

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h^3}{\eta}\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{h^3}{\eta}\frac{\partial p}{\partial z}\right)=6(u_1-u_2)\frac{\partial h}{\partial x}+6h(u_1+u_2)+12v \qquad (3.2)$$

위의 방정식의 좌변은 압력의 발생을 나타내고 우변항은 그 압력을 발생하는 운동량을 나타낸다. 그림 4 에서 보듯이 우변의 제 1항은 2면이 기울어져 유체를 끌어 들이는 작용에 의해서 유막이 형성되는데 이것을 쐐기막 (wedge film)이라 하고 그 효과를 쐐기막 효과라고 한다. 또한 우변의 제 3항은 2면이 접근할때 유체의 점성효과가 떨어지고 유체내의 압력이 발생하는 효과로서 이것에 의하여 발생하는 윤활막을 스퀴즈막 (squeeze film)이라 하고 그 효과를 스

퀴즈막 효과라 한다.

3.1.2 쐐기막 (wedge film)

그림 4 에서 보듯이 쐐기막이란 2개의 고체면이 성대운동에 의해서 틈새가 넓은 쪽에서 좁은 쪽으로 유체가 빨려 들어가기 때문에 발생한다. 하나의 예로서 길이가 B 이고 무한 평판인 경우 단위 폭당 부하용량 W 와 마찰저항 F 는 다음과 같이 수식으로 나타낸다.

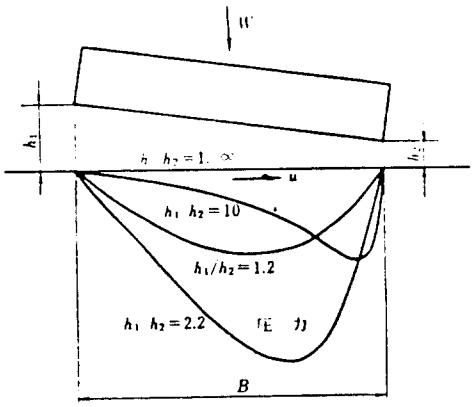

그림 4. 스퀴즈막

$$W = \frac{\eta u B^2}{h_2^2}\phi_1\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \tag{3.3}$$

$$F = \frac{\eta u B}{h_2}\phi_2\left(\frac{h_1}{h2}\right) \tag{3.4}$$

또한 마찰계수는 다음과 같다.

$$f = \sqrt{\frac{\eta u}{W}}\phi_3\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \tag{3.5}$$

여기서 ϕ_1,ϕ_2,ϕ_3 는 $\frac{h_1}{h_2}$ 의 함수이다. 평판위의 압력분포는 그림 4 에 그려져 있다. 그리고 마찰계수는 전단저항이 된다.

공업적으로 이용되는 쐐기막의 대표적인 예가 저어널 축수이다. 그림 5 에서 축수와 축간에 윤활제가 충만되어 있는 경우 하중 W 의 아래쪽은 축이 회전하면 편심으로 인하여 윤활막의 두께는 최소로된다. 이와같이 윤활막이 넓은 쪽에서 좁은 쪽으로 기름이 들어가 범위 (그림ABC) 에서 압력이 발생하여 부하용량 W 와 같게 되고 반대로 CDA 범위에서는 압력이 발생하지 않는다. 보행중에도 쐐기막이 형성된다고 하자만 마찰속도가 작기 때문에 실제로는 거의 없다고 생각한다.

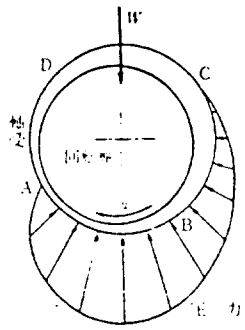

그림 5. 축수와 축사이의 쐐기막

3.1.3 스퀴즈막 (squeeze film)

이것은 2 면이 근접 할때 발생하는 윤활막으로서 쐐기막과 다르다. 2 면이 미끄름 방향과 직각 방향의 운동에 의해서 형성되는 것이 특징이다. 따라서 동일하중 W 의 작용하에서 윤활막이 압축되어 시간이 지남에 따라 유막 두께는 감소하는데 그 과정중에 스퀴즈 막이 형성된다. 간단한 예로서 평판위에 반경·a 인 원판을 근접시킬때 윤활막의 두께는 h_1 에서 h_2 까지 감소하는데 걸리는 시간 t 는 다음과 같은 식으로 표시 된다.

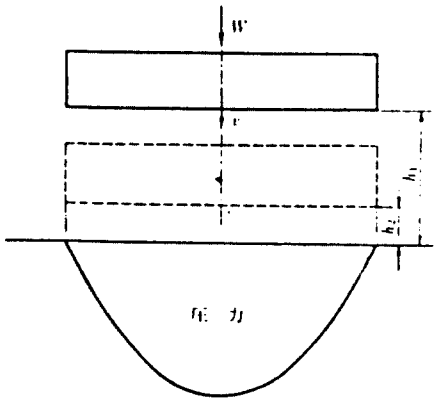

그림 6. 스퀴즈막

$$t = \frac{3\pi\eta a^4}{4W}\left(\frac{1}{h_2^2} - \frac{1}{h_1^2}\right) \qquad (3.6)$$

스퀴즈막은 2면이 근접하기 때문에 면적이 크면 부하용량은 급격히 증가한다. 또한 변동하중이 작용하는 부분에 스퀴즈막이 유효하게 작용하는 경우가 많다. 생체 부하 관절과 같은 인공관절은 그 효과가 나타난 것으로 알려져 있다. 그림 6 는 일정하중 하에서 시간이 경과 함에 따라 두께는 감소하고, 그림 7 에서 보듯이 구멍을 통해서 그림 6 에서 발생하는 압력을 유지는 유체를 유입하면 하중 W 를 지지하기 때문에 윤활막은 정상적으로 일정한 두께를 유지한다. 이것을 정압윤활 (hydrodynamic lubrication) 이라 하고 화상 치료시 침대로 이용하여 피부를 보호하는 역활을 한다.

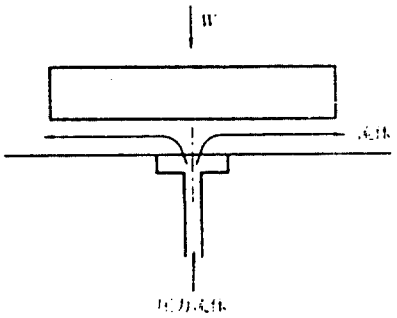

그림 7. 정압윤활

3.1.4 탄성 유체윤활

보통 유체의 윤활론은 앞에서 열거한 9 개항의 가정하에서 계산하였다. 그

와같은 가정이 성립하지 않는 경우는 부하용량은 커다란 영향을 받게 된다. 생체에 윤활론을 적용할때 문제가 되는 것은 고체를 강체로 보는 것이다. 이것을 변형하기 쉬운 탄성체로 보면 윤활막의 압력이 높은 부분은 탄성체로서 변형되어 부하용량은 약간 증가한다. 이와같이 고체를 탄성체로 보고 변형을 고려한 유체윤활을 탄성 유체윤활 (elastohydrodynamic lubrication)이라 한다. 특히 스퀴즈막에는 탄성변형의 효과가 현저하다.

관절등의 유체윤활을 논할때 탄성 유체윤활을 고려하는 것이 필요하다. 즉 수학적으로 말하면 탄성역학의 기초 방정식과 점성유체의 기초 방정식을 연립해서 컴퓨터를 이용하여 해결한다.

3.2 경계 윤활 (boundary lubrication)

3.2.1 유체윤활과 적용한계

유체윤활은 역학적으로 완성된 체계를 얻을 수 있으며 원리적으로 모든 문제의 해를 얻을 수 있다. 아무리 정밀도가 높은 표면에도 또한 생체의 결장성 장면 등의 자연표면에도 반드시 미소한 요철부분이 존재한다. 예를들면 관절표면에는 0.1 ~ 10 μm 정도의 높은 요철부분이 있다. 공업적으로 평활한 정밀도의 연삭면에도 같은정도의 요철부분이 있다. 2 면이 직접접촉 할때는 유체는 미끄름 유체로서 윤활을 할 수 없는 경우가 있다. 이런 상태에서도 윤활제는 윤활 존재효과가 남게 되는데 이것을 경계윤활 (boundary lubrication) 이라고 한다.

3.2.2 경계윤활의 개념과 특성

2 개의 고체면이 직접 접촉한 경우 모형적으로 도시화 한 것이 그림 8 이다. 볼록한 면은 접촉하게 되고 오목한 면은 접촉하지 않는다. 따라서 접촉 하중은 볼록면에서 지지하게 되고 그 접촉부분의 총합을 실제 접촉면적((real area of contact) 이라 한다. 그것에 대한 전체면적 즉, 유체윤활이 이루어 지려면 그

의 면적 전체로 하중을 지지 하는데 그 면적은 겉보기 접촉면적(apparent area of contact) 이라 한다. 실제 접촉면적의 각각은 상당히 작다. 또한 그부분의 접촉면압은 상당히 높고 일반적으로 고체는 소성변형을 한다. 따라서 고체의 소성항복응력을 p_m 이라하면 실제 접촉면적은 다음과 같이 된다.

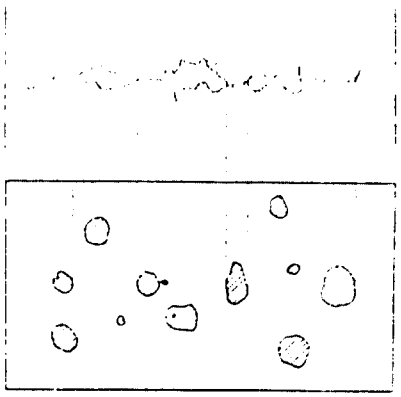

그림 8. 두면사이의 직접접촉 부분의 형상

$$A_R = \frac{W}{p_m} \tag{3.7}$$

여기서 실제접촉 면적은 하중 W 에 비례한다. 또한 흡착분자막의 전단강도를 s 라 하면 마찰저항 F 는 다음과 같이 주어 진다.

$$F = s\,A_R \tag{3.8}$$

따라서 마찰계수는

$$f = \frac{F}{W} = \frac{s}{p_m} \tag{3.9}$$

이 되고, 이것은 하중 마찰속도 그리고 겉보기 접촉면적에 무관하며 일정한 값을 얻게 된다. 즉 경계윤활 상태는 Coulomb의 마찰법칙이 성립한다.

경계윤활은 액체의 흡착분자층을 전단하기 때문에 그의 마찰계수는 유체윤활에 비해서 훨씬 크다. 비교적 우수한 윤활제라고 하는 직쇄 지방산의 마찰계수 f = 0.1~ 0.08 정도이다. 경계윤활은 유체의 점도에 관계없이 분자의 크기 형태 극성 그리고 고체와의 흡착성등 물리학적 성질에 의하여 지배된다.

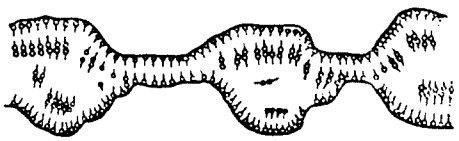

그림 9. 경계윤활 상태의 2면의 접촉모형

3.2.3 건조마찰 (dry friction)

마찰저항은 전단저항이고 경계윤활은 액체의 분자에 의해서 이루어 진다. 이느것도 존재하지 않을때 예를든이 대이분 위에서 회빙 (석회석의 일종)이 미

끄러지는 경우 테이블과 회명 사이에 마찰이 이루어지며 연한쪽이 전단하게 된다. 이와같은 마찰상태를 건조마찰 (dry friction)이라 한다. 이것은 2면 사이에서 수중기 산소 혹은 질소 또는 미소량의 유기물을 흡착하고 있다.

건조마찰의 경우 식 (3.8) 과 (3.9)의 s 는 2 고체의 연한 쪽의 전단강도를 s_m 이라 하면 건조 마찰계수는 다음과 같다.

$$f = \frac{s_m}{p_m} \tag{3.10}$$

건조마찰의 경우 그림 10 에서 보듯이 단단한 봉침이 연한쪽의 평판을 압입할때 발생한다. 이때 봉침은 마찰하면서 전진하게 되는데 전단면적을 A' 그리고 전단저항을 F' 라 하면 다음과 같은 식을 얻는다.

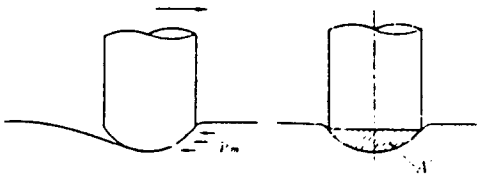

그림 10. 건조마찰의 보기

$$F' = A'.p_m \tag{3.11}$$

따라서 마찰계수는 다음과 같다.

$$f = \frac{s_m}{p_m} + \frac{A'.p_m}{W} \tag{3.12}$$

여기서 제 1항은 실제 접촉면적에 대한 전단항 (shearing term)이고, 제 2항은 봉침이 굴착한 항 (plousing term) 이다. 건조마찰에도 Coulomb 의 법칙이 성립한다. 따라서 건조 마찰계수는 표면의 조도에 의해서 일정하지 않지만 f = 0.2~0.5 정도가 많다.

3.3 마모(wear)

3.3.1 마모의 개념

고체 표면부분의 수차 감량을 마모(wear)라고 한다. 마모는 복잡한 현상이며 현재에도 그의 구성 및 특성을 충분히 이해하지 못하고 있다. 건조마찰의 식에서 보듯이

$$f = \frac{s_m}{p_m} + \frac{A'.p_m}{W}$$

으로서 제 1항이 되는 마모를 응착마모 (adhesive wear)라 하고, 제 2항이 되는

마모를 연마제 마모 (abresive wear) 라 한다. 응착마모란 직접접촉에 있어서 2 고체의 같은 입자가 딘라 붙이서 시로 끊이 당기면서 발생하는 마찰이며, 연마제 마모는 연하는 표면이 압입되어 상대방 고체를 연삭하면서 발생하는 마모이다. 또한 소립자의 이물질이 침입하여 연삭되는 경우도 있다. 마모에 있어서 고체표면에서 계외로 탈락하는 미립자를 마모분 (wear particle)이라고 한다. 이것은 크고 작은 여러가지 형태가 있으며 조직이 일정하지 않다.

응착마모에 대해서 고려하여 보자. 마모는 실제 접촉면적내에서 발생하기 때문에 마모체적 V 는 실제 접촉면적 A_R 에 비례하고 또한 미끄름 거리 L 에 비례한다. 따라서 $A_R = W/p_m$ 이 되기 때문에 k 를 비례상수라 하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$V = k.A_R.L = k\frac{W.L}{p_m} \qquad (3.13)$$

여기서 마모량은 하중과 미끄름 거리에 비례하고 연한쪽의 소성 항복응력 p_m 에 반비례한다. 이것을 Holm 의 법칙이라 한다. 식 (3.13) 에서 $w_s = k/p_m$ 이라 놓으면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$w_s = \frac{V}{W.L} \qquad (3.14)$$

여기서 w_s 는 단위 하중과 단위 마찰거리당의 마모체적을 나타낸다. 이것을 비 마모량(specific wear)이라고 한다. 이것은 마모의 비교에 편리한 방법으로 쓰이고 있다.

3.3.2 응착마모

이것은 최근에 많이 나타나는 현상이지만 마모 형태에 관계없고 그 기구가 복잡하기 때문에 해석하기가 매우 어렵다. 또한 이것은 실제접촉면을 구성하는 각각의 직접 접촉부분의 고체면은 금상학적인 연속성을 이루는 결합조직이 있다. 따라서 마찰이 수반되는 연한쪽의 고체면에서 전단이 일어난다. 이것에 의해서 한쪽의 고체 입자는 다른쪽 면으로 이동하는 형태가 된다. 이런 현상을 이착 (transfer)라고 한다. 응착마모에 있에서 이착현상을 설명하는 것이 용이하다.

응착마모에 있어서 마찰거리와 마모량의 관계는 매우 복잡하며 Holm 식에 의해서 예측한 V 와 L의 직접관계는 드물다. 응착마모는 어느 고체에서도 발생하며, 특히 2 면의 경도 차이가 적을때, 금속에 의한 소성 변형이 용이 할 때, 윤활 상태가 좋지 않을때 현저하게 나타난다.

3.3.3 연마제 마모와 그외 기타

연마제 마모는 일종의 절삭작용이며 2 개의 고체면에서 경화된 쪽의 표면 조도가 클때 혹은 경화된 쪽의 형상이 뾰쪽 할때 그리고 소립자 등의 이물질이 침입할때에 현저하게 나타난다. 마모분은 절삭가루와 같은 형상을 이루며 때로는 긴 실같은 형상으로 커얼 (curl)이 되는 경우도 있다.

응착마모와 연마제 마모가 혼합된 경우 연마제 마모 현상만 나타난다. 극히 윤활상태가 양호한 경우 연마제 마모는 생기지 않는다. 그러나 윤활막의 압력, 특히 스퀴즈막 압력에 의해서 고체표면에 해를 주는 액체가 압입되어 그것이 점점 고체표면 부분을 피로파괴에 이르게 한다. 이것을 피로마모라 하고 직접 생체에 관련해서 발생하는 경우는 드물다.

4. 결 론

바이오트라이보로지는 생체조직에서 발생하는 마찰을 이공학적으로 해석하여 그것을 인공관절, 인공심장판막 등의 임상학 및 기초의학에 응용함으로서 인류의 건강을 증진하는 응용학문이다.

본 연구에서는 생체조직에서 발생하는 마찰에 대해서 간단히 설명하였고 몇가지 예를들었다. 즉, 관절과 인공관절의 윤활기능, 힘줄과 인대의 마찰, 인공심장 판막의 마찰 그리고 치아의 마모에 대해서 간단히 소개하였다.

또한 이공학에서 발생하는 윤활 마찰 그리고 마모에 대하여 그의 원리를 공학적으로 간단히 설명하였으며 생물의 세계에 이떻게 적용되는가를 보여 주

었다. 따라서 바이오트라이보로지는 기계공학과 임상학 및 기초의학의 공동연구 과제로서 현재 그에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 공학적인 면에서 특히 윤활학의 새로운 활용분야이다.