

연재강의 : 파면해석

거시적 파면(V) : 표면 파손

강 정 윤

Fracture Mechanism and Macro-Fractography : Surface Damage

Chung-Yun Kang

4. 표면 파손

표면 파손에는 기어의 피팅과 같이 표면층이 피로 혹은 부식에 의해서 침식되는 것과 프레이팅 부식과 같이 진동응력과 부식효과가 중첩하여 발생하는 것이 있다.

4.1 피로 마모(Pitting, Spalling)

회전 축수나 기어가 맞닿는 면에 생기는 피팅이나 스폐링은 반복되는 회전 접촉에 의한 피로현상이라고 알려져 있다. 일정 곡률을 가지는 원통 끼리를 일정 압력으로 누르는 경우를 생각 하여보자. 그림 49와 같이 그 하중에 따라서 일정한 폭 2b에서 탄성 접촉한다면, 그 최대 압력 P_0 는 소위 Hertz의 이론¹⁾에 의해서 구할 수가 있다. 또한 접촉부에서 내부로 향하는 응력분포도 그림 50과 같이 이론적으로 구할 수 있다. 이 그림에서 종축은 b(접촉반경)의 단위로 표현되고 횡축은 접촉점의 최대압력 P_0 를 단위로 표현되어 있다. x축, y축, z축 방향의 주응력 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 의 깊이 방향의 분포로부터 깊이 방향의 최대 전단 응력분포, $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 가 구해진다²⁾. 이들 최대 전단응력은 표면에서 0.786b의 깊이에서 최대치가 되고, 그 값은 거의 0.3 P_0 로 된다. 피팅은 이 최대전단응력 τ_{xy} 가 최대인 곳, 즉 표면에서 0.786b의 깊이인 곳에서 생긴다. 이 깊이에서 응력상

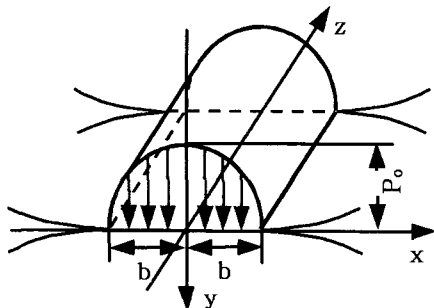


그림 49 회전 접촉하는 2개의 원통 표면에서 응력분포

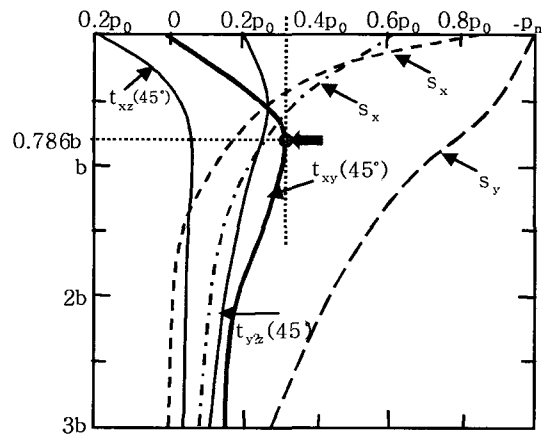


그림 50 접촉점에서 내부 방향으로의 응력분포

태를 살펴보면, 주응력은 그림 51(a)와 같이 되고, 주응력 면과 45도의 기울기를 갖는 면에서 최대전단응력 τ_{xy} 가 그림 51(b)와 같이 작용한다. 따라서 순수한 회전만을 생각하면 그림 51(c)와 같이 0.786b의 깊이인 점을 정점으로 하여 이 최대전단응력 면에 평행한 면을 가진 타원추형의 피트가 발생하는 것을 이론적으로 추정할 수 있다.

그러나 실제 기어나 회전축수에서 회전 접촉은 그림

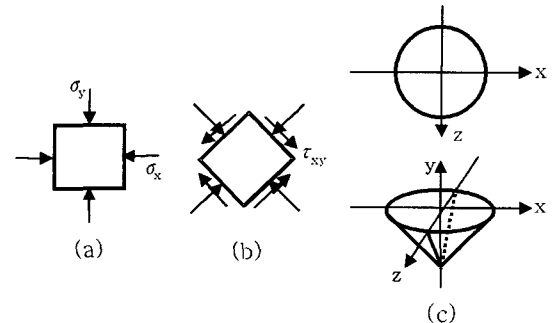


그림 51 순수 회전에서 피팅의 발생. (a)주응력 면에서 응력분포, (b)최대전단응력 면에서 응력분포, (c) 피트의 형성

52와 같이 표면에서 약간 미끌림 현상이 수반된다. 여기서 $V_r > V_e$ 이라고 하면, 그림 53의 큰 원통 상에서 정(positive)의 미끌림이, 작은 원통 상에서 부(negative)의 미끌림이 생긴다. 따라서 전술한 응력의 관계는 그림 52에 나타낸 것처럼 정(positive)의 미끌림에 의해서 최대 전단응력 면이 그림 53(b)와 같이 기울기가 어느 정도 변화한다. 이 때문에 이탈하는 형상도 그림 53(c)와 같이 된다. 실제 피팅은 그림 54와 같이 접근하여 가는 면에 대하여 부채꼴 모양으로 된다.

기어의 경우, 수동 기어와 구동기어는 서로 맞물려

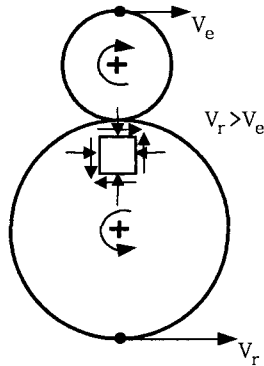


그림 52 서로 접촉하여 회전하는 직지경이 다른 원통 사이에 생긴 미끌림

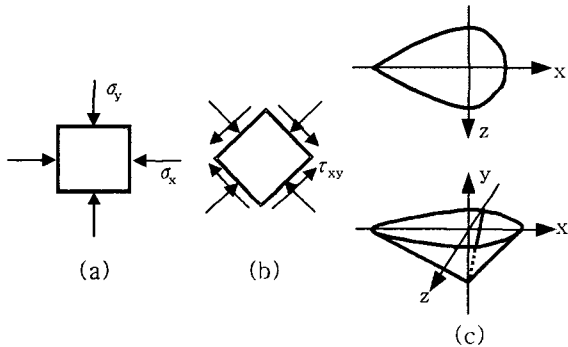


그림 53 미끌림을 동반한 회전 접촉에서 피팅의 발생. (a) 그림 52의 응력분포에서 표면 미끌림을 첨가한 전단응력. (b) 최대전단응력 면에서 응력 분포. (c) 피트의 형성

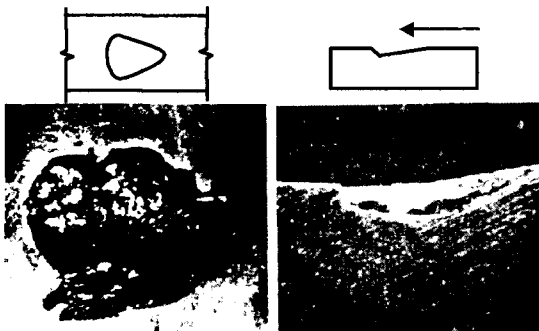


그림 54 피팅의 형태와 방향

돌때 처음과 끝에서 각각 그림 55(a), (b)와 같은 방향으로 미끌림이 생긴다. 따라서 기어에 있어서 피팅은 피치타임을 경계로 그림 55(c)와 같이 대칭형상으로 된다.

기어 피팅에는 일반적으로 2 종류가 있고, 맞물림 초기에 일시적으로 맞닿는 면에 생기는 것이다. 이것은 사용 중에 점차 소멸되어 버린다. 한편 파괴적 피팅이라는 것은 장기간 사용한 맞닿는 면에 나타나고, 점차 수가 증가하여 간다. 이 피팅으로부터 균열이 진행하여 부재 전체가 피로파괴를 일으키기 쉽다.

스플링이라는 것은 표면 경화한 기어나 회전축수에서 경화층과 내층의 경계, 즉 강도가 급격히 저하하는 부분에서 피로에 의해서 균열이 표면에서 평행하게 진행하고, 표면층이 박리하는 현상이다. 따라서 일반적으로 스플링은 피팅에 비하여 피트는 깊고 넓은 표면에 평행하게 확대되고, 눈두렁 모양과 같은 그림 56과 같은 외관을 나타낸다. 기어에서는 이와 같은 피팅이나 스플링 이외에 절삭마모 또는 과부하에 의한 소성변형 등의 원인으로 표면의 손상을 초래한다.

4.2 캐비테이션

캐비테이션은 액 중에서 고속으로 운동하는 금속체의 표면에 생기는 특수한 압력 파괴현상이다. 유체의 속도 변화가 생기면 베르누이의 법칙에 나타나는 것처럼 속도에너지와 정압과의 사이에 에너지 전환이 일어나고, 정압이 그 유체의 증기압 정도까지 저하하여 버린다. 이 때문에 유체는 비등하고 소위 캐비테이션 기포를 발

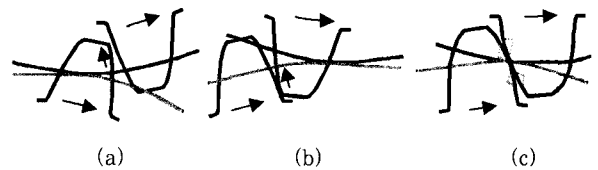


그림 55 기어의 피팅 발생과 방향. (a) 맞물림 말기, (b) 맞물림 초기 (c) 피팅 방향



그림 56 스플링의 단면(×100)

생시킨다. 예를 들면 그림 57과 같은 벤추리 관을 생각하자. 입구에서 압력은 그 관의 목의 부근에서 속도가 변화한다. 만약 유량이 충분하다면, 목의 부분의 정압은 유체 증기압 (그 유체가 휘발하는 압력) 이하로 되어, 기포는 파괴한다. 기포가 파괴 될 때 주위에서 유체가 집중되므로, 이 부분에서 아주 높은 국부적인 압력이 걸린다. 기포가 파괴 된 곳이 금속의 표면일 때는 그 금속 벽에 반복하여 높은 압력이 걸리므로 금속 표면이 이탈한다. 이와 같은 캐비테이션은 디젤엔진 선박의 프로펠라, 발전소의 터빈 등에서 생기기 쉽다³⁾. 그림 58은 강제 펌프 부품의 캐비테이션 손상 예를 나타낸 것이다. 그리고 이 캐비테이션이 핵이 되어 피로가 진행하고, 부품 전체가 파손하는 경우도 있다.

4.3 프레이팅 부식

프레이팅 부식의 다른 명칭은 마모산화라고 한다. 2개의 금속 물체가 접촉한 경우, 진동에 의해서 서로 조금 미끄러질 때 접촉에 의해서 산화 되는 현상이다. 이와 같은 부식은 스프라인 폼이나 나사로 크래프된 표면에 진동이 가해지는 경우에 생긴다. 그림 59는 그 일 예를 나타낸다. 프레이팅 부식된 부분을 기점으로 피로파괴가 발생한다. 일반적으로 압력에 의해 고정된 축의 피로한계는 고정되지 않는 것의 1/2 - 1/3으로 된다. 실제로 끼워져 있는 부품을 분해하여 보면, 외관으로는 알 수 없지만 피로균열이 프레이팅 부식 부위를 기점으로

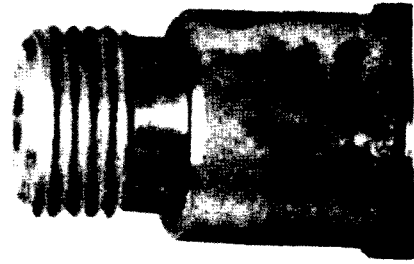


그림 59 오일 펌프 구동 기어의 축에 발생한 프레이팅 부식

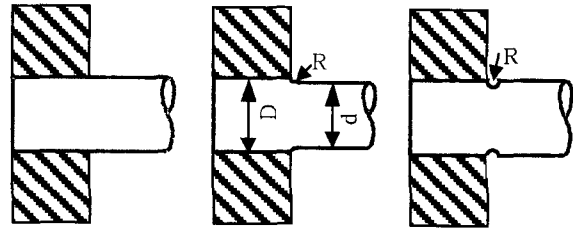


그림 60 프레이팅 부식 방지 방법

로 진행하고 있는 것도 있다. 특히 유명한 실례로서는 선박으로 수송 중인 자동차의 회전 축수에 일어난 프레이팅 부식을 들 수 있다. 그 파손 상황은 브리넬 경도의 압흔과 같은 모양이 되므로 유사 브리넬링(False Brinelling)이라고 칭한다⁴⁾.

프레이팅 부식 때문에 생기는 피로 현상을 개선하기 위한 방법으로서 그림 60과 같이 제안되고 있다. (A)는 일반적으로 끼우는 방법이고, 이와 같이 끼워진 기어나 초일 축의 피로 강도가 상승한다. Peterson이 어닐링 한 0.5% 탄소강, 직경 7-9인치 축으로 실험한 결과에 의하면, (B)(C)에서 $R=0.4D$ 로 하면 피로강도는 (A)의 1.3 배로 된다. 또 끼워지는 부분을 롤 압연되면, 피로강도는 그 배가 된다는 보고도 있다⁵⁾.

참 고 문 헌

1. H. Hertz : Über die Berührung fester elastische Körper, Philosoph. Magazine(1881)
2. Beeching, R. and S.W. Nicholls : A theoretical Discussion of Pitting failure of Gears, Inst. of Mech. Engr.(194)
3. E. E. Shipley : Machine design, Dec. (1967)
4. A. M. Surgert : Superfinish, Lynn Publishing, Detroit(1940)
5. R.E. Peterson and A.M. Wahl : J. Appl. Mech. Trans. ASME 57, A1(1935)

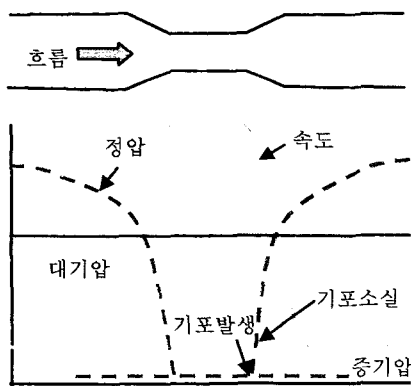


그림 57 벤추리 관에서 캐비테이션 발생시 액체의 압력과 속도



그림 58 펌프 부품의 캐비테이션 손상 예



• 강정윤(姜晶允)
 • 1953년생
 • 부산대학교 재료공학부
 • 접합공학, 계면미세조직 제어
 • e-mail : kangcy@pusan.ac.kr