

## 第2章 金屬學的 故障 分析 (Metallurgical Failure Analysis)

금속 부품에 대한 고장 분석은 수년 동안 금속 관련 단체에서 이미 실행하였다. 석유화학공장의 "정적 설비" 검사자는 우수하지만 기계 고장에 관한 좋은 분석 결과는 없었다. 금속 검사자들은 다음의 주요 고장 형태 및 그 원인을 가지고 운전 고장을 해결하는데 있다.

(1) 변형과 비틀림

(2) 파괴 분류

a. 연성 파괴

b. 취성 파괴

c. 피로 파괴

d. 환경 영향 파괴

(3) 표면과 재질 변화

a. 부식

• 균일 부식

• Pitting 부식

• 입계 부식

(4) 응력-부식 균열

(5) 수소 손상

(6) 부식 피로

(7) 온도에 의한 파손

a. Creep

b. 응력 파단

이와 같이 기계 부품의 고장에 대한 정밀 분석은 금속 검사에 의존하는 고도의 전문 분야이다.

### 1. 金屬學的 故障 分析 技法

#### (Metallurgical Failure Analysis Methodology)

기계 고장 분석가는 고장 부품의 금속학적 정밀 분석시 전문성이 부족할지라도 근본적인 고장 원인을 규명하여 해결책을 찾아야 한다. 그의 임무는 사고 원인을 규명하고 대책이나 예방책을 찾는 것이다. 금속학적 고장 분석중 수행되는 검사 목록은 표 2-1과 같다.

표 2-1 금속학적 고장 분석의 주요 단계

1. 기본 데이터 수집과 견본 선정
2. 고장 부분의 예비시험(육안 점검과 기록 유지)
3. 비파괴 시험
4. 기계적 시험(경도와 인성 시험)
5. 모든 시편의 청소나 보관, 선정, 규명
6. 현미경 시험 및 분석(파괴면, 2차균열, 기타 표면 현상)
7. 현미경 시험 및 분석
8. 금속 단면의 선정과 준비
9. 금속 단면의 시험과 분석
10. 파손 메커니즘의 규명
11. 화학적 분석 (Bulk, 국부, 면부식물, 침전이나 코팅, Microprobe 분석)
12. 파괴역학의 분석
13. 특별한 시뮬레이션 서비스 환경에서의 시험
14. 결론 유추를 위한 모든 상황의 분석
15. 권고를 포함한 보고서 작성

점검 전에 고장 분석을 위한 계획이 절대 필요하고, 고장의 원인과 일반적 특징에 관하여 충분히 조사해야 한다.

표 2-1의 여러 단계에서 예비 결론이 종종 나오며 조사 초기에 원인이 밝혀지면 나머지 시간은 예상되는 원인을 확인하여 다른 가능성을 줄이는데 할당해야 한다. 다른 경우의 조사는 그림 2-1의 논리 순서에 따라 다음 단계를 결정해야 하는데, 적절한 시험 설비를 이용할 수 있다면 분석가는 예비 결론을 내기 전에 기계적 시험, 화학적 분석, 파단별 사진, 현미경 검사 등의 결과를 수집하여 검토해야 한다.

조사 작업 감축을 위한 노력은 항상 해야 하고, 때로 파단면의 육안 검사나 한 개의 금속 조직 시편을 조사하는 것과 같이 분석 절차 측면에서 고장 원인에 대한 의견을 형성해야 한다. 최종 결론에 도달하기 전까지 당초 의견을 확인하는 추가 데이터를 구해야 한다. 금속 조직 단면과 같은 하나의 시편에서 얻은 결론은 유사한 파손 이력을

얻을 수 없으면 쉽게 의심받을 수 있다.

표 2-2의 점검 목록은 금속학적 조사 및 시험 그리고 가정된 결론에서 유추한 확증을 분석하는데 보조로 사용되어 왔다.

다른 고장 분석과 같이 조사의 마무리는 보고서 작성이다. 숙련된 조사자는 표 2-3과 같이 주요 부분으로 구분하여 보고서를 작성해야 한다고 제시하였다.

표 2-2 금속학적 고장 실험 목록

1. 고장 순서는 수립되었는가?
2. 균열이나 파괴 손상이 나타났다면, 초기 위치는 규명되었는가?
3. 표면이나 표면 아래에 균열이 시작되었는가?
4. 균열은 응력 집중과 관계가 있는가?
5. 균열은 얼마나 계속되는가?
6. 하중의 집중 정도는 얼마인가?
7. 하중의 형태는 무엇인가? : 정하중, 순환 하중, 간헐 하중
8. 응력은 어떻게 발생되었나?
9. 고장 메커니즘은 무엇인가?
10. 고장 발생시 온도는 어떠한가?
11. 온도가 고장에 영향을 주었는가?
12. 마멸이 고장에 영향을 주었는가?
13. 부식이 고장에 영향을 주었는가? 부식 형태는 무엇인가?
14. 적절한 재료가 사용되었는가? 더 우수한 재료가 필요한가?
15. 단면은 운전 등급에 충분한가
16. 재료의 질은 사양에 적합한가?
17. 재료의 기계적 요소는 사양과 대비하면 허용할 정도인가?
18. 고장 부품의 열처리는 적절한가?
19. 고장 부품은 적절히 제작되었는가?
20. 부품은 적절히 조립되어 설치되었는가?

표 2-3 금속학적 고장 보고서의 주요 부분

1. 고장 부품의 설명
2. 고장 발생시 운전조건
3. 주요 운전이력
4. 부품의 생산과 공정 이력
5. 고장에 대한 기계적, 금속적 연구
6. 품질의 금속학적 평가
7. 고장야기 메커니즘의 요약
8. 유사 고장 예방에 대한 권고 사항

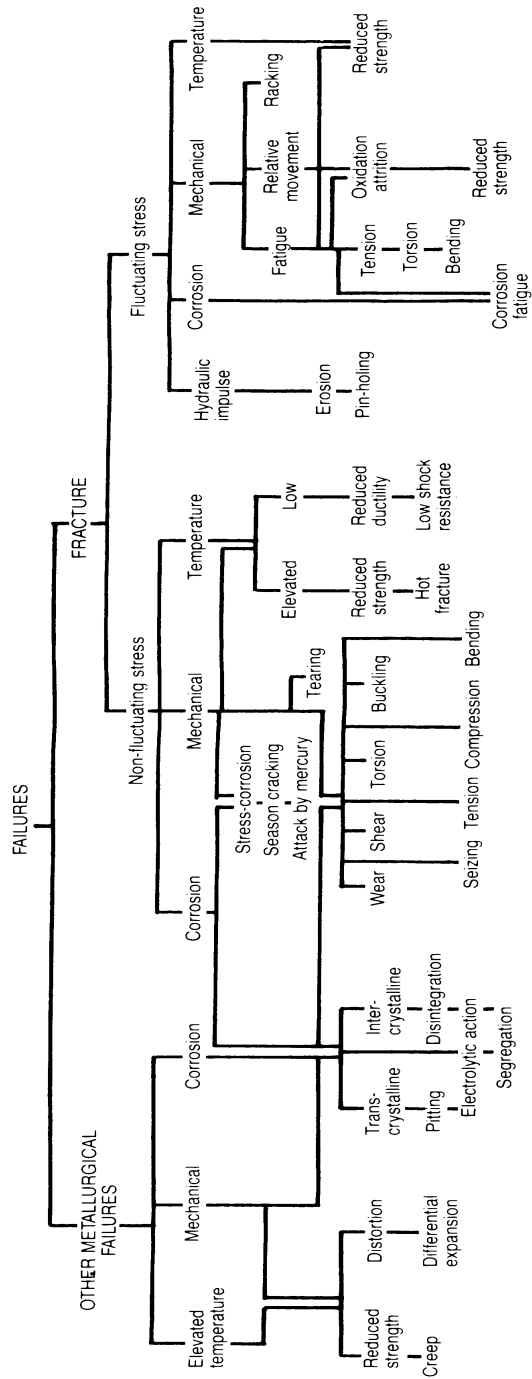


그림 2-1 금속의 고장 원인 분류

## 2. 볼트 締結部の 故障 分析 (Failure Analysis of Bolted Joints)

기계 고장 분석가는 때로는 나사 체결부나 볼트 체결의 파손도 다루어야 한다.

기계 고장 분석가는 구조 엔지니어링에 취약하기 때문에 볼트 체결에 대한 최신 설계 및 거동 기술을 숙지하여야 한다. 여기서 누설, 마멸, Slip, 파단, 헐거움, 단순한 오동작 등의 문제가 있을 수 있다.

여러 가지 인자가 체결 볼트의 고장에 영향을 미치게 되며 나사 체결부와 연관된 문제를 밝히는 통계를 참조하여 다음 사항을 고려하라. : 1964-1970 기간의 ATZ와 같은 대형 유럽 기계 보험회사의 연구 기관은 나사 체결부의 파손으로 기계가 고장난 사례가 132가지라고 보고하였다. 표 2-4는 고장의 원인과 형태에 관한 분포이다.

표 2-4 나사 조임 장치(Threaded Fastener)에 대한 고장 원인 및 형태

고 장 원 인	고장 분포 %
생산 문제	50.0
조작 문제	40.0
조립 문제	10.0
파손 형태	고장분포 %
피로 파손	40.0
크리프 파손	20.0
갑작스런 손상	
• 취성	10.0
• 소성	20.0
• 부식	10.0

Skylab 프로그램 작성중 체결부 고장을 연구한 결과, 표 2-5의 통계를 얻었다. 여기에서 우리는 문제 해결을 위해 고장 방지 목록과 고장 내용을 문서화해야 한다.

표 2-5 Skylab 프로그램의 볼트 체결부 고장 원인의 요약  
(모든 조임 장치는 힘을 받았음)

고 장 원 인	고장 분포(%)
<b>생산 결함</b>	
불충분한 설계	24.0
취급 부주의로 손상	23.0
부품의 결함	10.0
<b>조립 결함</b>	
부적절한 조립	29.0
예하중의 부적합	14.0

## 2.1 볼트 締結部는 왜 故障나는가? (Why do Bolted Joints Fail?)

볼트 체결부가 고장났을 때 필요한 질문을 할 수 있도록 전반적인 내용을 기술하려 한다.

볼트 체결부는 다양한 고장 형태를 보이며 다음과 같이 서로 작용함으로써 발생된다.

- (1) 상호 Slip 발생    (2) 단순히 분리    (3) 볼트 체결부의 파손(파괴)

이러한 기본 고장 형태는 표 2-6에 열거된 고장 형태에 의해 교대로 진행된다. 표 2-6은 주변 환경에 따라 체결 볼트의 고장을 유발하는 인자와 원인에 대한 아이디어를 준다.

다음 사항이 고려되지 않으면 석유화학산업 분야에서 기계 체결 부품의 문제가 발생할 것이다.

- (1) 적절한 체결 부품의 선정
  - (2) 적절한 체결 부품의 설계 변수
  - (3) 설치 및 정비 절차의 중요성
- 경험에 의한 몇 가지 중요한 예는 다음과 같다.

표 2-6 체결 볼트의 고장 유형

주요 원인 (인자)		정하중시 파단	피로 손상	진동에 의한 이완	체결부의 누설
설계 와 제작	진동축에 대한 볼트축의 방향			•	
	체결부의 댄핑			•	
	이완 효과		•	•	
	나사 뿌리 반경		•		
	볼트 체결부 강성률		•		•
	나사의 Run-out		•		
	Fillet의 크기와 모양		•		
	너트 수축	•			
	끼워 맞춤 불량	•			
	글링 (Galling)	•			
	부품 마무리		•		
	부적절한 열처리	•			
공구의 흠		•			
조립 관례	체결면의 조건				•
	개스킷의 조건				•
	볼트 체결 절차				•
	나사부 윤활	•	•	•	
	사용된 공구의 형태	•			
부적절한 Preload			•	•	
운전 조건	하중 이동의 크기	•	•		
	온도 순환				•
	부식	•	•	•	•

저 등급의 Cap Screw 사용. 적용되는 하중보다 매우 낮은 항복 강도의 캡 나사를 사용하면 신장되어 "Necking-out"이 초래되고(그림 2-2), 하중이 완화되면 길이가 증가하면서 볼트의 진동이 발생되어 너트가 헐거워진다. 예방 정비중, 이완 너트가 발견되



어 조이면 하중이 다시 가해지게 되어 매우 낮은 하중에서도 볼트가 신장되는데, 그것은 병목 지역의 금속 분포량 부족 때문이며, 대개의 경우 너트를 다시 조일 때 캡 나사가 완전히 파손된다. 이때 정비자는 너무 세게 렌치로 잡아당기기 때문에 파손이 일어난다고 생각하여 같은 등급의 볼트와 너트로 교체하게 될 것이고 악순환은 계속된다.

**부적절한 체결부품 사용.** 체결 볼트의 모든 부품은 하중에 잘 견디고, 수명 연장을 위해 서로 잘 맞아야 한다.

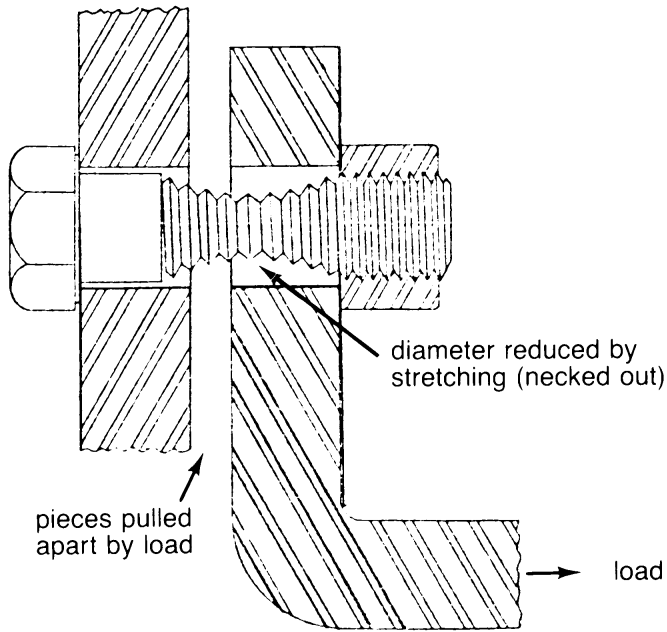


그림 2-2 캡 스크류의 Necking-Out

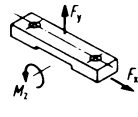
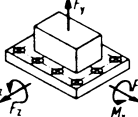
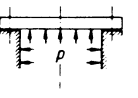
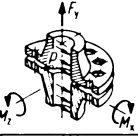
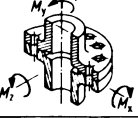
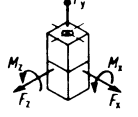
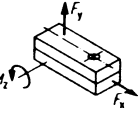
JOINT GEOMETRY	LOADS	TYPE OF LOAD
1 	$F_x$ $F_y$ $M_z$	longitudinal force axial force moment
2 	$F_x$ $F_y$ $F_z$ $M_x$ $M_z$	axial force cross force operating moment
3 	$p$	internal pressure
4 	$F_y$ $M_x$ $M_y$ $p$	axial force operating moment internal pressure
5 	$F_y$ $M_x$ $M_y$ $M_z$	axial force torque operating moment
6 	$F_x$ $F_y$ $F_z$ $M_x$ $M_z$	axial force cross force operating moment
7 	$F_x$ $F_y$ $M_z$	longitudinal force axial force moment

그림 2-3 볼트 체결에 의해 발생 가능한 작용 하중

**적절한 체결부 설계.** 정적이거나 순환하는 전이 하중의 종류와 방향은 나사체결 부품의 설계에서 매우 중요하지만, 실제 하중이나 힘을 거의 알 수 없으므로 설계자는 그림 2-3과 같이 힘과 모멘트를 고려하는 기본 가정을 가지고 시작해야 한다.

회전/왕복식 기계의 장시간의 순환 하중은 인장 강도가 높은 체결 부품에 의해 전달된다. 고인장 강도의 체결 부품을 얻으려면 제작후 열처리가 반드시 필요하지만, 변동

(진동) 하중 조건에서는 피로 파손의 위험을 야기한다. 체결에 적절한 하중을 주지 않으면 열처리 등급을 올릴수록 피로 파손의 위험성은 커진다.

적절히 설계되고 예하중이 걸린 체결 볼트는 추가의 고정 장치 없이도 매우 높은 신뢰성을 얻을 수 있다. 만약 충분한 탄성 강도를 가진 볼트와 최소의 Joint Interface가 있다면 고인장 강도로 사용하기에 충분하다. 볼트의 길이나 탄성 강도를 효과적으로 증가시키기 위한 설계 대책이 그림 2-4에 있고, 이것은 볼트의 하중 분포가 양호할 뿐 아니라, 이완 문제에 대해서도 확실한 대책이라 할 수 있다.

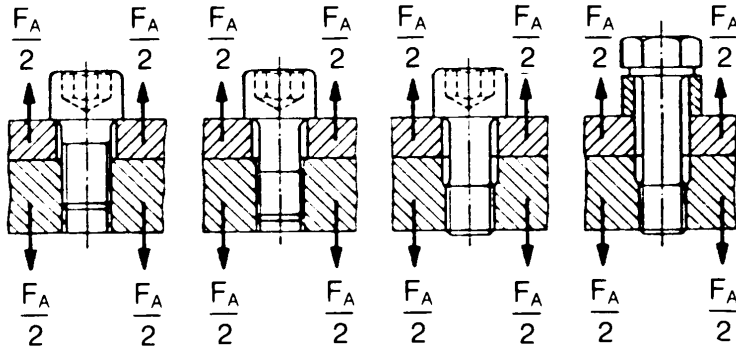


그림 2-4 이완에 대한 피로 강도 및 저항을 증가시키기 위한 체결 볼트 설계

**적절한 예압에서의 고장.** 볼트-너트에 적절한 예하중을 주는 것은 공장에서의 수많은 볼트 체결에 매우 중요한 작업이다. J. H. Bickford는 연결부 조립 과정에서 토크 렌치 사용과 관련된 문제를 열거하면서 볼트 예하중과 토크 조절의 어려움을 언급하였다.

마찰 (Friction)

운전자 (Operator)

형상 (Geometry)

FOGTAR\*

공구 정밀도 (Tool Accuracy)

이완 (Relaxation)

우리들 대부분은 이러한 문제에 부딪쳤고, 만약 "FOGTAR"에 무지하다면 J. H. Bickford의 체결 볼트 거동에 관한 책 내용을 숙지하여야 한다.

주요 기계의 체결 부품의 재사용에 신중해야 한다. 주요 적용례는:

- (1) 피스톤 로드의 고정 너트 - 왕복식 압축기
- (2) Cross Head-Pin의 고정 너트 - 왕복식 압축기
- (3) 임펠러 고정 너트 - 원심 펌프
- (4) 추력 디스크 고정 너트 - 원심 압축기
- (5) 볼트 너트 - 고성능 커플링

재사용이 불가능한 체결 부품은:

- (1) 범용의 토오크 고정 너트(나일론 삽입)
- (2) 범용의 토오크 볼트(맞춤 나사 간섭)
- (3) 무기성 점착성 고정 체결 부품
- (4) 비틀린 나사 너트
- (5) 보 형태의 자동 고정 너트
- (6) 스플라인 너트와 코터 키
- (7) 스플라인 너트와 스프링 핀
- (8) 평와셔
- (9) 탭와셔
- (10) 진동 저항 와셔
- (11) 록 와이어

결론적으로 말하면 재사용 전에 Nick, Burr, 공구 마크용 볼트-너트 등을 점검해야 한다.

## 2.2 故障 分析의 段階 (Failure Analysis Steps)

체결 볼트의 고장 분석은 다음과 같은 단계로 구성되어야 한다.

- (1) 고장 메커니즘의 정의
  - a. 정하중시 볼트의 고장은 조이는 중에 발생한 것인가? 보통, 파단면은 볼트 축과 90°이상 차이가 있는데, 이것은 인장과 비틀림 응력의 조합으로 인한 볼트 강성의 초과 때문이고, 순수 인장 파괴는 볼트축에 90°에서 일어난다.
  - b. 변동 순환 하중으로 볼트가 파손되었다. 고주파 피로는 파단면상에 "Beach Mark"가 나타나지만(그림 2-5) 이러한 특징은 피로 관련 메커니

증에 의한 것은 아니므로 결론이 될 수 없다.

- c. 부식에 의한 정적 또는 피로 파손
- d. 체결부가 설계 기능을 발휘하지 못하는 것은 체결력이 설계 필요치를 만족하지 못하기 때문이다. 예상되는 고장 형태는 부분 분리나 전체 분리(변위), 체결부의 미끄러짐(변위), 체결부 Fretting(부식), 너트 진동에 의한 이완(변위) 등이다. 결과적으로 고장 형태는 "누설"이다.

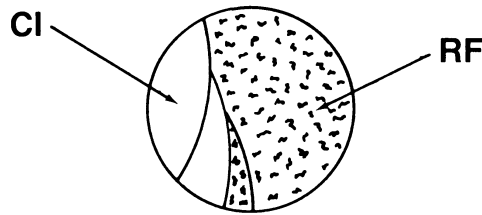


그림 2-5 고장에 의한 볼트 파단면은 균열 초기와 성장중의 파손영역(cI)에서는 부드럽고 광택인 반면, 급격한 파손 영역(rf)에서는 거칠게 나타난다.

(2) 설계 검토

- a. 분석가는 체결부의 하중 및 예하중을 추정하여 계산하고, 정적 파손이면 이 장의 말미에 열거된 적절한 참고 자료를 참조할 수 있다.
- b. 순환 하중에 의한 파손이면 후속 작업은 더 까다롭다. 즉, 파손과 관련된 부품의 내구 한계를 규명해야 하는데 실험이 필요하고 공개된 데이터는 많지 않다.

(3) 특별 변수의 점검

표 2-6과 같이 체결 부품의 파손에 영향을 주는 인자를 고려하라.

### 3. 軸의 故障 (Shaft Failures)

#### 3.1 軸의 故障 原因 (Causes of Shaft Failures)

정유 화학 공장의 축은 냉각 Ethylate 증기나 액체와 같은 극저온에서부터 가스 터빈과 같이 극고온에 이르기까지 매우 다양한 온도에서 운전된다.

축은 하나 이상의 하중(인장, 압축, 굽힘, 비틀림)과 진동으로 인한 고응력을 받는다. 베어링 사고로 인한 마멸을 제외한 축 고장의 일반적인 원인은 금속 재료의 피로이다. 피로 손상은 동적 응력을 받아 취약면에서 시작되고, 그 면은 전형적인 응력 상승면이

면서 동시에 급속적, 또는 기계적 성향을 갖는다. 때로 특별히 낮은 온도나 충격, 갑작스런 과도 하중에서 취성파괴가 발생한다. 먼처리로 고장력강에서 수소 분해가 발생하고, 상온에서 축의 취성을 유발한다.

일반적으로, 연성 파괴는 갑작스런 과하중으로 발생하지만 정상 운전 조건에서 일어나기 어렵고 고온에서 꼬인 형태인 Creep는 응력 파괴를 초래하며 축의 주요 치수를 과도하게 변형시켜 공차를 떨어뜨려 사고를 일으킨다.

### 3.1.1 軸의 破壞 根源 (Fracture Origins in Shafts)

축의 파괴는 설계나 조립 중에 생성된 응력 집중부에서 발단한다. 설계상의 응력 집중부는 Keyway 끝단, 압착된 부재의 모서리, Shoulder부 Fillet, Oil Hole 모서리 등이며, 조립하는 동안에 생긴 응력 집중은 Grinding 손상, 가공 마크나 새김눈, 열처리 과정에서 생긴 Quench Crack 등이 있다.

때때로 응력 집중은 축을 단조할 때 생성되어 Lap, Seam, Pit, Cold Shut, 파열 등과 같은 면내 결함을 갖게 한다. 단조되는 축의 Ingot가 응고시 면내 응력 집중이 발생하는데 일반적으로 배관, 결정, 구멍, 수축, 비금속 함유물과 같은 불연속 내부를 갖는다.

베어링의 축 정렬 불량으로 인한 파손은 조립이나 운전 중에 지지 구조물의 처짐으로 인해 발생되거나, 접합부 불량이나 축의 칼자국, 둥근 홈, 굽힌 자국 등의 취급 부주의로 발생한다. 빈도는 적지만 재료를 잘못 적용하여 생기는 축의 파손은 재료의 연성대 취성의 높은 천이온도를 가지는 재료를 사용하기 때문이다. 즉, 수소 취성, 템퍼 취성, 가성 취성, 또는 화학 조성이나 규정 외의 기계적 특성에 대해 저항이 낮아서 일어난다.

### 3.1.2 軸의 應力 시스템 (Stress Systems in Shafts)

축의 파손 원인을 정의하기 전에 축에 작용하는 응력 시스템과 정하중이나 단일 과도 하중에서의 연성과 취성거동에 의한 파손면을 정확히 이해해야 분석이 가능하다.

그림 2-6은 축이 순수 전단, 비틀림, 압축 하중을 받을 때 내부점에 발생하는 전단 응력과 수직 응력을 보이는 2차원 자유도이고 단일 과하중을 받는 연성과 취성 재료의 파단 형상은 각 하중 형태별로 다이어그램으로 나타내었다.

자유 물체의 응력 시스템을 무한한 작은 면적으로 가정하면, 인장과 압축 응력이 사각 면에 대해 인장, 압축하며 서로 수직으로 작용한다. 수직 응력에 45°인 전단응력이나 슬라이딩 응력은 사각형에 대각으로 작용하고, 3차원 원주 응력은 무시한다.

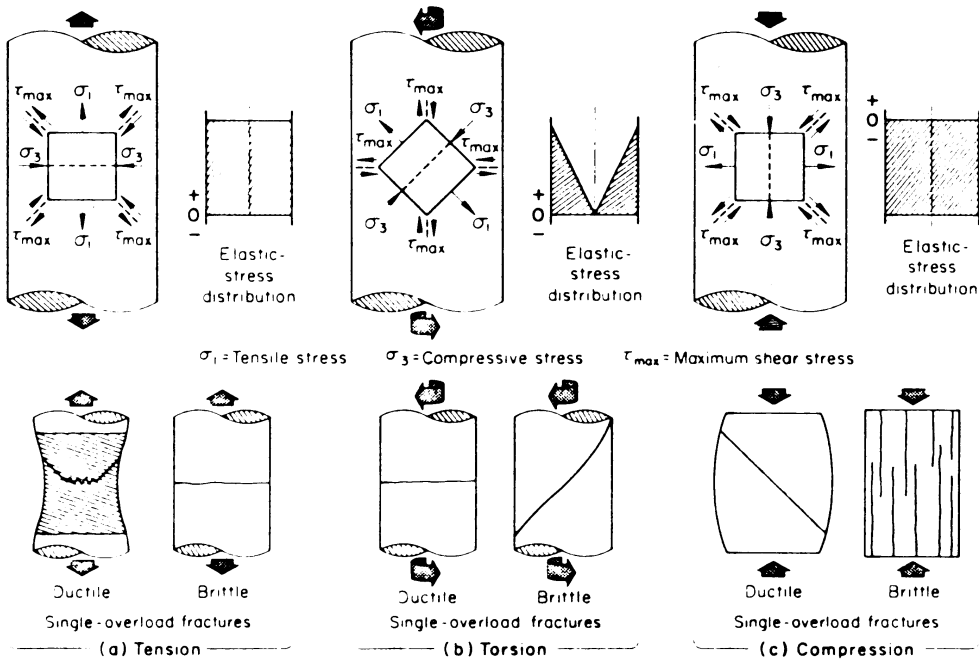


그림 2-6 축이 인장, 비틀림, 압축 하중을 받을 때 수직응력, 전단응력 순환 및 단일 하중에서의 연성과 취성 재료의 파손 형태.

그림 2-6의 3가지 하중 형태에 관한 연성과 취성재료에 작용하는 전단 및 수직응력과 굽힘 하중에 의한 이들 효과를 다음에 설명한다.

**인장.** 인장 하중을 받을 때, 인장응력( $\sigma_1$ )은 축에 가로 방향이고, 압축응력( $\sigma_3$ )은 세로 방향을 갖는데, 최대 전단응력 요소( $\tau_{max}$ )는 축에 45°이다 (그림 2-6a). 연성 재료에서 인장 하중으로 전단응력이 발달하는데, 축의 중심에서 표면 쪽으로 발달하고, 축에 약 45°인 원추형 전단 릿(Lip)형으로 끝이 난다.

재료에서 인장의 과하중에 의한 파단은 인장응력에 수직이지만, 영구 변형은 거의 없고, 파손면은 외형상 거칠고 결정립체이다.

응력집중이 없을 때 순수 전단 하중을 받으면 탄성응력 분포가 단면에 일정하게 발생하고, 고응력이 작용하면 어느 점에서든 파단이 발생한다.

**비틀림.** 그림 2-6b 처럼 축이 비틀림 하중을 받으면 응력 시스템은 시계 방향으로 45°회전한다. 인장과 압축응력은 축에 45°이면서 서로 수직이므로 임의 전단응력 요소가 축중심에 평행하면 다른 요소는 축에 수직한다.

연성 재료가 비틀림 하중을 받으면 전단응력으로 파단 전에 상당한 변형을 일으키지만, 축의 형태가 변형되지 않기 때문에 그다지 중요하지 않은 반면, 비틀림 응력을 받는 축이 미끄러지는 얇은 디스크로 무한히 구성되면 변형은 간단하지만, 연성 재료의 파단은 축과 수직인 면에서 발생한다. 단순 비틀림시 최종 파손 범위는 축의 중심부이지만, 약한 굽힘에서도 중심을 벗어난다.

단순 비틀림을 받는 취성재료는 인장응력 요소에 수직인 파단을 유발하는데 축중심과는 45°이고 나선형의 파손면을 갖는다. 이의 탄성응력 분포가 표면에서 최대이고 축중심에서는 0 이므로 최대 응력면에서 파손이 시작된다.

**압축.** 축방향으로 압축을 받으면(그림 2-6c) 압축응력( $\sigma_3$ )은 축방향이고 인장응력( $\sigma_1$ )은 횡방향이므로 응력 시스템이 회전하게 되고 전단응력( $\tau_{max}$ )은 축방향으로 인장 하중을 받아 축과 45°가 된다.

과도 압축을 받는 연성 재료에서 전단응력은 심각한 변형을 일으키지만, 파단을 유발하지는 않고 축이 짧아지고 부풀어 진다. 단순 압축을 받는 취성재료는 좌굴되지 않으면 최대 인장응력에 수직으로 파단 된다. 인장응력은 횡방향이므로 취성 파괴 방향은 축과 평행하다.

응력 집중이 없을 때, 단순 압축을 받는 탄성응력의 분포는 단면에 일정하며, 파단이 발생하면 압축 하중이 축의 반경을 증가시키고 원주방향으로 재료를 신장시키기 때문에 길이 방향에서 일어난다.

**굽힘.** 축이 굽힘응력을 받을 때, 인장력을 받은 볼록한 면은 그림 2-6c와 유사한 탄성 응력 분포를 갖고 볼록면과 오목면의 중간은 응력이 "0"이 되는 정축이다.

### 3.2 軸의 疲勞 (Fatigue in Shafts)

축의 피로는 굽힘 피로, 비틀림 피로 그리고 축방향 피로 등으로 분류되고, 굽힘 피로는 세 가지 굽힘 하중에 의해 발생하는데 그것은 단일 방향, 두 방향(가역), 회전이 다. 비틀림 피로는 변동하는 또 교번하는 비틀림 모멘트와 토오크에 의해 발생하고 축방향 피로는 인장과 압축의 반복(교번)부하 또는 인장-인장의 변동 부하로 인해 발생한다.

**단일 방향의 굽힘 피로.** 축의 길이를 따라 균일 분포한 단일 방향의 굽힘 모멘트를 변화시키는 원통형 기둥에서의 축의 균열 방향은 불연속 표면처럼 몇몇 응력 증가 요소에 의해 결정된다.

그림 2-7a 및 b에서 보는 "Beach Mark" 형태는 화살표가 가리키는 위치에서 유일하



게 피로 균열 징조를 나타낸다. "Beach Mark"를 형성하는 균열 선단은 근원지에서 대칭이고 전반적으로 오목한 형태를 이룬다. 그림 2-7a의 단일 근원지 및 최종 파단 영역 모두 공칭응력은 낮고, 그림 2-7b의 비교적 큰 최종 파단영역은 공칭응력이 높음을 나타내고 있다.

그림 2-7c는 궁극적으로 하나의 균열 선단으로 합쳐지는 여러 가지 각 균열에서 시작되는 전형적인 피로 균열을 나타내고 이같은 여러 근원지는 공칭응력이 높다는 것을 암시한다. 균열 근원지 사이에 봉우리나 톱니모양의 마크를 주시하라.

그림 2-7d-j는 앞의 운전 조건하에서 응력집중 증가 함수로서 축의 파단면 모양을 나타낸다.

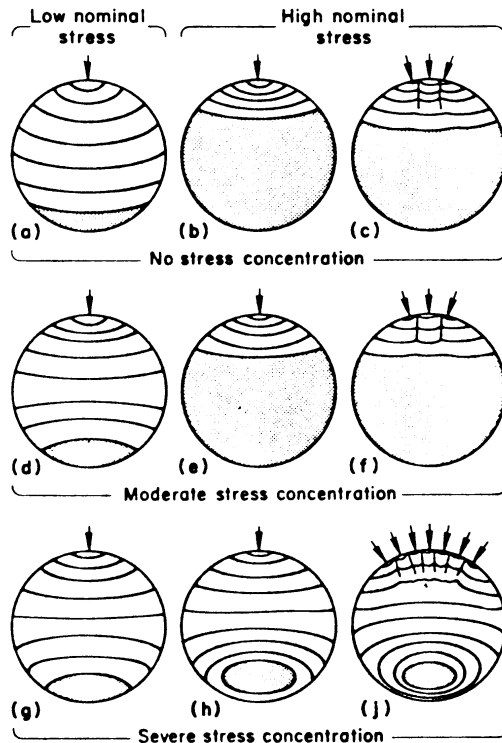


그림 2-7 낮거나 높은 정상적인 응력하에서 하나의 근원지로부터 발생하거나 높은 정상적인 응력하에서 여러 근원지로부터 발생한 단일 방향의 부하에 균일하게 부하를 받는 축의 전형적인 피로마크. 화살표는 균열 발생지이며 그림자 부분은 최종 파단영역이다.

**굽힘 피로.** 굽힘 모멘트가 교번으로 작용할 때 축의 모든 점은 인장과 압축응력의

반복으로 한쪽 굽힘면은 인장되고 반대쪽 면은 압축된다. 굽힘 모멘트의 크기가 양방향에서 같으면 두 균열의 길이는 같지만, 굽힘 모멘트가 한 방향에서 더 크면 두 균열의 길이는 다르다.

길이 방향으로 균일하게 분포한 가역 굽힘 모멘트의 영향으로 파손되는 비회전축 파단면의 피로 모양은 그림 2-8과 같다. 균열 발생부는 직경 중심으로 서로 반대지만 소수의 응력 증가 요소로 약간 변위된다. 그림 2-8a는 단일의 직경을 갖는 축의 응력집중이 없을 때의 형태로서 굽힘 모멘트는 양쪽에서 같다.

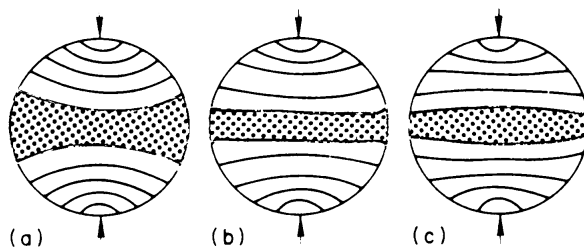


그림 2-8 일정한 하중을 받는 비회전축 파단면의 전형적 피로 특징:

(a)응력 집중이 없음 (b)중간 응력집중 (c)높은 응력집중

화살표는 균열의 발생부이고, 점선은 최종 파단부를 나타낸다.

축 직경이 변하는데 반경이 큰 Fillet을 사용하면 중간 응력집중이 발생하고 파단면의 형태는 그림 2-8b와 같은 반면, 반경이 작은 Fillet을 사용하면 응력집중이 커지고 파단면 형태는 그림 2-8c와 같다. 이러한 하중을 받을 때 각 균열은 인장과 압축응력을 반복적으로 받아 압축하는 동안 균열 표면이 서로 접촉되어 Rubbing한다. 때로, Rubbing은 여러 특정 표식을 완전히 없애고 균열면이 무더지고 마모된다.

**회전 굽힘.** 회전축과 비 회전축이 동일한 굽힘 모멘트를 받을 때의 차이점은 비 회전축의 인장 응력은 한쪽으로 제한되지만, 회전축은 모든 부분에서 매 주기마다 인장과 압축 응력을 받는다.

회전에 의한 차이는 단일 근원지에서 생긴 균열 선단 성장이 대칭이라는 것이다. 회전과 역방향으로 균열 선단이 두드러지는 경향이 있는데, 균열 선단은 그림 2-9a, c와 같이 약 15°이상 스윙하고 세 번째 차이점은 근원지가 여러 개로 분포한다는 것이다.

일정하지 않은 굽힘을 받은 비 회전축의 근원지는 최대 인장 범위 내에 있고(그림 2-7), 가역 굽힘을 받을 때의 근원지는 서로 반대이다 (그림 2-8). 그렇지만, 그림 2-9b, d와 같이 회전 굽힘시 축 주변의 모든 점은 매 회전마다 인장응력을 받으므로

모든 점에서 균열이 발생하고, 압축응력을 받으면 균열면에 마찰이 생긴다. 일반적으로 최종 파단으로 인해 균열이 심한 쪽이 그 반대쪽에 비해 상대적으로 약간 이동하지만, 종종 파단면을 크게 손상시키고 많은 마크를 없앤다. 그러나 한쪽의 큰 자국(High Spot)이 다른 쪽의 큰 자국을 마모시키더라도 폭 파진 곳의 자국은 남게 된다. 파진 곳의 그 반대편의 큰 자국의 역상(Mirror Image)이기 때문에 유익한 증거이다. 따라서 균열 또는 파단된 축부위 모두를 검사하는 것이 바람직하다. 회전 굽힘 피로와 비틀림 전단에 의한 파단축의 거시적 모양은 잘못 이해되기 쉽기 때문에 전문가의 도움을 받아야 한다.

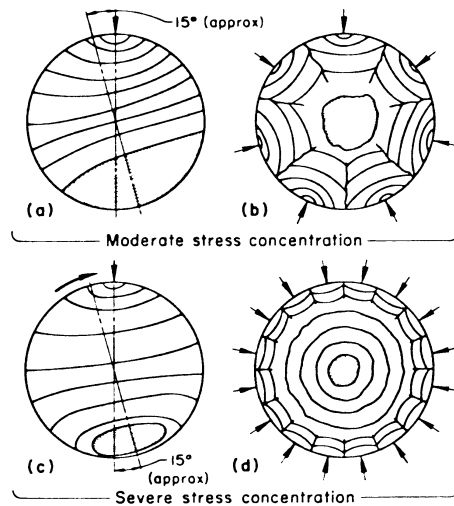


그림 2-9 균일 하중을 받는 회전체 파단면의 피로 특징은 중간 및 심한 응력집중을 갖는 하나 및 여러 개의 발생지(화살표에)를 나타내고 빗금 부분은 최종 파단영역으로서 축은 시계 방향으로 회전한다.

**비틀림 피로.** 비틀림 응력으로 발생한 피로 균열은 굽힘응력에 의한 것처럼 Beach Mark나 봉우리 형상으로 종 방향의 응력 증가 요소는 굽힘응력에서는 비교적 해가 적지만, 비틀림 하중에서는 원주방향 응력 증가 요소만큼 중요하다. 종방향의 응력 증가 요소에 대해 비틀림 하중을 받는 축의 민감도는 실제 중요한데, 그것은 축재료가 회전 축에 항상 평행하기 때문이다. 비틀림 피로 균열은 길이 방향의 개체물, Surface Mark, Spline 또는 Keyway 모서리에서 시작되고 약 45°로 가지친다.

원주방향의 흠과 같은 응력 증가 요소가 존재하면 응력의 다른 상황이 응력증가 요소 주위에 존재하고, 인장 응력은 전단응력의 4배정도 증가하므로 45°면에서 전단응력

이 강철의 전단 강도에 도달하기 전에 인장 응력이 강의 인장 강도를 초과한다. 파단이 45° 인장면에 수직으로 발생하고 원추형이나 별 모양의 파단 형태를 띤다. 이 같은 높은 응력의 영역에 대해서는 Shot Peening이 성공적으로 적용되어 왔다.

서로 직각으로 두 개의 비틀림 피로 균열의 상대적인 성장은 적용된 토오크 반전 (Torque Reversal)의 크기를 나타내며, 같은 길이의 균열은 토오크 반전의 크기가 같음을 나타내지만 균열은 비교적 초기 성장 상태에 있다. 이 단계를 넘으면 하나의 균열은 빨리 진행해서 이런 간섭이 더 이상 존재하지 않는다. 만약 축이 단 방향성 토오크를 전달하지만 두 균열이 서로 직각으로 성장한다면 토오크의 가역 특성을 예상할 수 있는데, 만약 토오크를 전달하는 축에 굽힘응력이 작용하면 피로 균열이 성장하는 곳에서 각이 변형되므로, 축과의 각이 45°와 상당히 다르면 굽힘응력이 존재한다.

**접촉 피로.** 높은 접촉 압력과 순환 하중을 받는 요소가 서로 회전하면서 미끄러질 때 접촉 피로가 발생하고 하중의 반복으로 Spalling은 하중이 몇 번 반복 후에 나타나며, 접촉면 아래에서 최대치가 되는 주기 접촉 응력에서 오는 금속 피로의 결과이다.

롤링 접촉 피로의 중요한 응력은 롤링하면서 방향이 바뀌는 최대 교번 전단응력이다. 순수 롤링시 표면 약간 아래에서 발생한 응력은 내부면의 균열을 초래하며 반복 하중을 받을 때 균열이 전파되어 표면에 도달, Spalling을 일으킨다.

롤링시 미끄러질 때 마찰에 의한 접선력과 열구배는 접촉면내 및 아래에서 응력의 크기와 분포를 변경시키고, 교번하는 전단응력은 점차 증가하여 미끄럼 작용에 의한 마찰로 표면에 더 가까이 이동한다. 단조, 경화 처리된 강철 롤은 표면 Spalling이 용이하여 표면하의 초기 피로 균열 또는 표면 균열을 유도하지만, 한가지 인자에 의한 것은 아니다. Spalling은 국부응력 집중 결과로 표면 아래쪽에서 발생하고 최대 반대 방향 전단점에서 소성 흐름(Plastic Flow)이나 파단을 유발한다.

### 3.3 軸의 延性과 脆性 破壞 (Ductile and Brittle Failures of Shafts)

취성 파괴란 응력을 받은 재료가 소성적으로 변형하지 못하는 것으로 약 1,830 m/sec 이상의 아주 높은 균열 전파율로 파괴 시작 영역에서 비틀림의 징후도 없이 갑자기 파괴되는 것이 특징이다. 이러한 파괴는 파괴면이 Herring-Bone 또는 Chevron 패턴과 같은 특징을 갖고 Chevron은 파괴 발생지 쪽으로 향한다.

연성 파괴는 파단면에서 비틀림(Plastic Flow)이 발생하고 통상 인장 시험이나 비틀림 시험편에서 관찰되는 것과 유사하다. 축이 축의 강도 보다 큰 단일 하중으로 파괴될 때 파괴되기 전에 보통 상당한 소성 변형이 있는데, 이것은 인장으로 파괴된 축을

육안 검사하면 쉽게 관찰되지만, 비틀림으로 파괴될 때는 종종 명확하지 않다. 재료의 소성 변형 성질을 연성이라 하는데, 연성으로 파단된 축의 표면은 축의 형상, 축에 작용하는 응력 형태, 하중 정도 등의 함수이고 합금의 경우는 온도의 함수이다.

축의 연성 파괴는 정상 운전 중에도 발생하는데, 운전 제한 조건 무시, 사용 재료의 강도 취약, 축이 단일 과하중을 갑자기 받을 때 등에서 발생하기도 한다. 재질이 좋지 않은 재료를 사용하거나 열처리 상태가 좋지 않은 재료(예, Quenching 및 Tempering 대신에 Annealing한 것)의 사용에 의한 결함은 연성 파괴를 발생시킬 수 있다.

### 3.4 腐蝕에 의한 軸 破損 (Shaft Failures Due to Corrosion)

대부분의 축은 일반적으로 부식이나 화학적 반응이 쉽게 일어나지 않는다. 표면 Pitting으로 발생하는 부식은 재료 표면의 금속성을 균일하게 제거하거나 스케일 또는 부식 물질로 균일하게 표면을 덮는다.

부식 Pit는 축의 하중 전달 능력에 주는 영향이 비교적 작지만, 균열이 발생하는 곳은 응력 집중점으로 작용한다.

부식 환경은 금속의 피로를 크게 가속시키는데, 대기에 금속을 노출시키면 진공상태보다 짧은 피로 수명을 야기한다. 소금물에 노출된 강축은 주기적으로 세척되어도 균한 곳, 잘린 모서리, 변형률이 높은 곳과 같이 가장 취약한 금속면으로 소금 용액이 침투한다. 부식 피로를 최소로 하기 위해서는 운전 환경에서 부식 저항이 큰 재료나 보호막이 있는 축을 사용하는 것이 필요하다.

일반적으로, 대형 축과 피스톤 로드는 부식이 쉽게되지 않는다. 원심 압축기는 수분, 소량의 부식성 가스나 액체 등을 포함하는 가스 등을 빈번히 다루는데, 만약 부식이 발생하면 스케일은 원래 형태로 있고 더 부식되면 증가하고, 유입된 액체(또는 고체)에 의해 침식되거나 회전시 축으로부터 분리되기도 한다.

응력부식 균열(Stress Corrosion Cracking)은 성장 균열 선단의 부식 및 응력의 결과로 발생하고 가끔 표면 Pitting을 동반하지만, 일반적인 부식은 빠르게 지나가기 때문에 나타나지 않으며 전반적인 부식은 응력 부식 균열을 동반하지 않는다.

스스로 손상을 일으킬 만큼 충분하지 않아도 부식과 반복응력이 동시에 발생할 때 부식 피로가 발생하여 손상을 야기하기도 한다. 그러한 조건이 일단 존재하면 축의 수명이 수년에서 수일이나 수주로 감소한다. 부식 피로 균열은 보통 결정립내 균열로서 응력피로 균열의 상태만큼은 아니어도 주요 균열의 가지선이 나타나며, 보통 부식은 균열 발생지 선단 및 이에 가까운 지역 모두에 존재한다.

## 4. 軸의 應力 增加要素 (Stress Raisers in Shafts)

대부분의 축 손상은 응력 집중을 일으키는 어떤 조건에 주로 기인하는데, 국부적으로 응력 값은 만족할 만한 운전 수명에 일치하는 하중 사이클 수에 재료가 견딜 수 있는 값 이상으로 상승한다. 재료의 피로 강도를 초과하여 반복 응력을 받는 재료의 작은 면적에서 균열이 시작된다. 불규칙한 작은 표면처럼 사소한 결함에서 응력이 높으면 축의 피로 강도가 상당히 감소할 수도 있다. 비틀림 및 굽힘 피로에 가장 취약한 지역은 축 표면이 급격히 변화하는 곳으로 파손 유발은 응력방향에 대한 불연속 위치에 따라 달라진다.

대부분의 가장 단순한 축은 유공(Oil Hole)이나 Keyway를 갖거나 축직경이 변화하지 않는다. 유공의 위치 및 마무리 상태, 직경 변화 상태, 그리고 Keyway 모양과 형식은 응력집중과 피로 Notch 인자의 크기에 상당한 영향을 주는데, 그 값은 1.0에서 5.0의 범위 또는 10 이상의 값을 갖는다.

응력 증가 요소는 다음과 같이 분류된다 :

- (1) 단계별 직경 변화, 넓은 일체형 Collar, 구멍, 모서리, Keyway, 홈, 나선선, Spline, 압입 또는 수축 맞춤시의 부착물 등의 불균일한 축의 형태.
- (2) Seam, Nick, Notch, 가공 마크, 표식 마크, 단조 Lap, Pitting과 부식과 같은 제조 관행 또는 운전 손상으로 일어난 표면의 비연속성.
- (3) 다공, 수축, 조잡한 비금속 함유물, 균열, 기공 등의 내부의 비연속성.

대부분 축은 1차 응력 증가 요소(1항 참조)에 의해 시작되고 2차 응력 증가 요소(2, 3항)가 파괴를 유발한다. 그 예로, 축 직경의 변화는 천이 지역에서 응력 집중을 야기하고 이곳의 표면이 균일하지 않거나 또 다른 불연속이 존재하면, 비연속적인 주위의 응력은 급격히 증가된다.

### 4.1 軸 直徑의 變化 (Changes in Shaft Diameter)

축의 직경이 작은 쪽 부위에서의 직경의 변화는 응력을 집중시킨다.

갑작스런 축직경의 변화 및 직경의 3단계 변화에 의한 응력집중 효과는 그림 2-10과 같다. 그림 2-10a의 Shoulder와 축이 교차하는 모서리 즉 직경이 큰 부분에서 작은 부분으로 변화하는 데에서 응력이 집중된다. 그림 2-10d의 반경이 큰 필렛은 응력이 최소한 제한되어 분포되지만, 그 필렛은 작은 직경의 단면과 접선이 되어야 하고 그렇지 않으면 반경이 큰 필렛의 유리한 효과를 감소시키는 날카로운 교차부분이 생긴다.

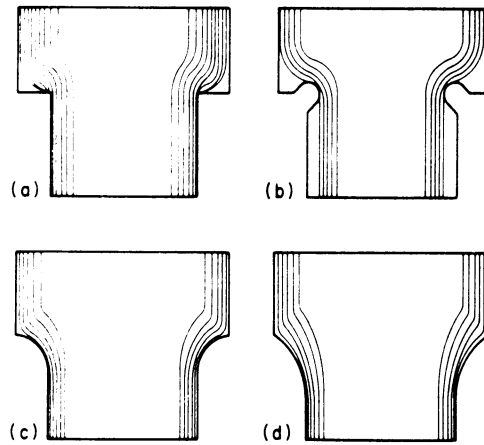


그림 2-10 축 직경 변화시 Fillet 반경 크기가 응력집중에 주는 효과

#### 4.2 壓入 및 收縮 組立 (Press and Shrink Fitting)

압입과 수축으로 치차, 풀리, 임펠러 부품을 축에 조립하나, 굽힘응력을 받을 때는 응력이 증가될 수 있다. 그림 2-11a는 압입부에서 Plain 축의 응력 흐름선이고, 압입요소 및 반경이 큰 Fillet을 사용하여 축을 키우면 그림 2-11b와 같은 응력 분포가 생긴다. Shoulder부에 반경이 작은 Fillet을 사용하면 그림 2-11a와 유사한 응력 형태를 보인다.

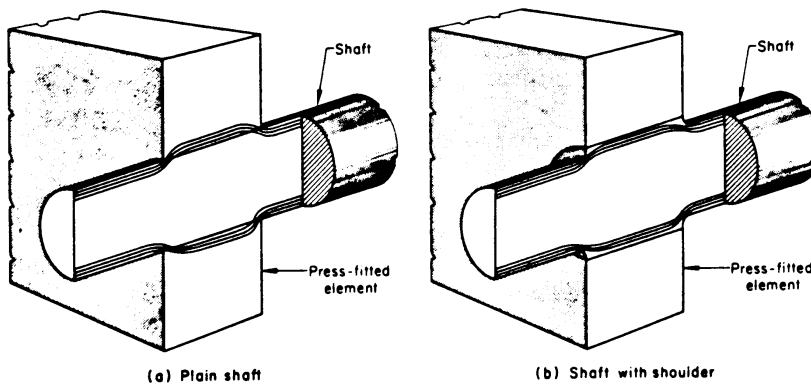


그림 2-11 힘 하중을 받을 때 압입된 요소를 갖는 회전축의 두 가지 형태의 응력 분포도

#### 4.3 縱 方向의 홈 (Longitudinal Grooves)

Keyway, Spline과 같은 종방향의 홈은 축이 비틀림 하중을 받을 때 손상되는데,

일반적으로 이들 손상은 응력 집중으로 인해 날카로운 모서리에서 작은 균열이 시작되는 곳에서의 피로 파괴로 일어난다. 균열은 단면이 부서질 때까지 응력이 반복됨에 따라 점점 커진다. Keyway의 날카로운 모서리는 평균 공칭응력의 10배정도 국부응력을 발생한다.

등근 Key가 사용 가능한 곳에서 반쪽 등근 Keyway를 사용하거나 Keyway에 완만한 Fillet 반경을 사용함으로써 이런 종류의 손상을 피할 수 있다. Keyway 깊이의 약 1/2이 되는 반경을 갖는 Fillet을 사용하면 좋은 결과를 얻는다. 반조각의 등근 Keyway는 평균응력의 2배 정도의 국부응력을 발생하므로 사각 모양의 Keyway보다 큰 하중을 전달한다. 사각의 Keyway를 갖는 많은 축은 응력이 낮거나 완만한 반경의 Fillet을 사용하기 때문에 운전중 파괴되지 않는다.

그림 2-12는 Keyway이나 Spline을 갖는 축의 응력장(Stress Field)과 이에 상응하는 비틀림 피로균열을 나타내며, 그림 2-12a는 Keyway 한 모서리의 Fillet은 곡선인 반면 다른 쪽 Fillet은 한 개의 균열이 생기는 날카로운 형태를 보인다. 여기서 주시해야 할 것은 이 균열은 초기 응력장에 거의 수직으로 발달한다는 것이다. 그림 2-12b의 Keyway의 날카로운 양쪽 Fillet은 응력장에서 균열의 Cross 효과가 일어나는 조건인 원래 응력장을 따르지 않는 2개의 균열을 발생시킨다. 그림 2-12c에서는 교번 비틀림을 받는 Spline 축은 Spline 바닥 모서리를 따라 발달한 균열을 볼 수 있는데, 이것은 국부적으로 높게 분포한 응력장이 균열의 성장에 영향을 크게 미치는 예이다.

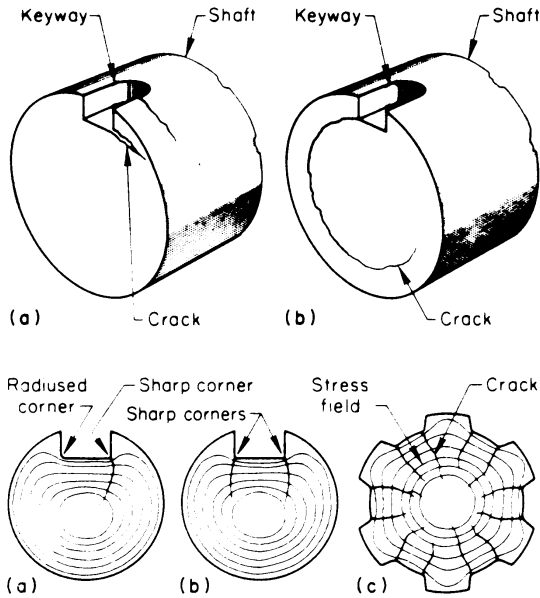




그림 2-12 Keyway나 Spline을 갖는 축의 비틀림 피로 균열과 응력장

#### 4.4 生産 工程에 의한 故障 (Failures Due to Manufacturing Processes)

제작 중이거나 축이 기계에 조립되면서 생성된 불연속면은 응력 집중점으로 작용하여 축의 손상을 유도한다. 이러한 응력상승을 유발하는 운전이나 조건은 다음과 같다:

- (1) 공구 마크, Scratch와 같은 응력상승을 유발하는 생산 공정.
- (2) 부적절한 Grinding, 용접 정비, 전기 가공, 아크 불뚱과 같이 면의 높은 인장 응력을 유발하는 생산 공정.
- (3) 표면과 평행하지 않는 단조 흔적(Flow Line) 같이 금속을 취약케 하는 공정, 즉 수소 취성을 야기하는 도금 또는 탈탄을 야기하는 열처리.

높은 압축 잔류응력이 축 표면에 가해지게 되면 피로 강도가 증가되지만, 표면을 롤링 또는 광택, Shot Peening, Tumbling, 주조, 유도 경화, 케이싱 경화를 통해 해결할 수 있다.

#### 4.5 冶金學的 因子들의 影響 (Influence of Metallurgical Factors)

기공이나 함유 물질, 적층, 단조, 폭발, 내부 불연속은 어떤 조건하에서 응력 집중 인자로 작용하여 피로 파괴를 유발한다.

불연속에 의한 영향을 이해하려면 응력이 처음 재료의 강도를 초과하는 표면이나 내부 등 어느 위치에서도 파괴가 일어날 수 있음을 알아야 한다. 응력은 표면에서 최대인 반면, 중앙이나 중립 축에서는 0 이므로 비틀림이나 굽힘시 응력 기울기를 고려해야 하고 인장시 응력은 단면을 가로질러 일정하게 작용한다.

굽힘이나 비틀림 인장 하중으로 응력이 크게 일어나는 지역에서 앞에서 말한 불연속이 나타나면 균열이 시작되지만, 중립축 근처와 같이 응력이 낮은데서 불연속이 있으면 덜 유해하다. 마찬가지로, 높은 인장의 반복응력을 받는 축은 중립축이 존재하지 않기 때문에 심한 결함이 없어야 한다. 강도에 비해 응력이 높으면, 결함은 응력 집중 인자가 되어 피로 균열의 발생지가 될 수 있다.

주응력에 평행한 비금속 함유 물질은 주응력에 90°인 피로 저항만큼 크게 영향을 미치지 않는다.

#### 4.6 不連續 表面 (Surface Discontinuities)

분쇄기(Mill) 운전시 Lapping, Folding, 난류 유동이 발생할 때 재료의 열간 소성 작업에 의해 여러 가지 표면 결함이 발생하며, 이에 의한 불연속 표면을 Lap, Seam,

Cold Shut이라 말하며 Fillet과 나사 진조(Thread Rolling) 같이 냉간 작업 시에도 발생한다. 또 다른 표면 결함은 작업중 압력이 높게 작용할 때 내부 이물질에서 발달하는데, 예를 들면 산화물이나 모재 Chip이 때로 표면에 압연되고 단조될 때이다. 대부분의 불연속은 최종 공정전 금속 내부에 나타나지만, 표면 쪽으로 개방된다. 액체 침투 및 자분탐상 검사 같은 표준 비파괴 시험으로 면의 불연속을 쉽게 알아내지만, 탐지되지 않으면 불연속은 부식이나 균열의 초기 발생지로 작용되기도 한다.

피로 균열 시작은 축의 수명 조절 인자이므로 표면 결함을 없게 하는 것이 가혹한 조건에서 운전되는 기계에서 점점 중요하게 인식되고 있다. 마찬가지로, 표면 근처의 내부 결함은 순환 하중일 때 성장하여 임계 크기에 달하면 균열을 발생시킨다. 전통적으로 피로 수명을 고려하여 설계한 축에서 결함이 있으면 균열이 조기 발생되어 운전 수명은 상당히 단축된다. 표면이나 표면하의 결함은 축이 연성에서 취성으로 변하는 천이온도 이하에서 운전된 시간이 짧더라도 취성 파괴를 발생할 수 있다. 운전 온도가 천이온도 이상이거나 결함이 임계결함 크기에 비해 작거나 특히, 순환 하중의 응력 범위가 크지 않을 때 운전 수명에는 영향을 주지 않는다.

#### 4.7 破損된 軸의 調査 (Examination of Failed Shafts)

일반적으로, 손상된 축의 조사 절차는 표 2-2와 유사하지만, 앞의 사항을 종합해 볼 때 독특한 특징을 갖는 축은 특별한 주의가 요구된다.

Spline, Keyway, 십자 구멍과 축재료 변경, 기계 특성, 열처리, 시험 위치, 비파괴 시험, 기타 공정상 요구 조건과 같은 잠재적인 응력 증가 요소나 집중 인자에 주의해야 한다.

Shot Peening 같은 특수 처리나 마무리 작업, 압연, Burnishing, 판금, 금속 스프레이, 페인팅은 성능에 영향을 주므로 분석가는 이러한 것에 주의해야 한다.

**기계적 조건.** 축이 가공 기계에서 지지되거나 조립되는 방식과, 손상 부품과 관련 부재간의 관계는 가치 있는 정보가 될 수 있다. 기계 하중, 충격, 진동이나 열 증감으로 인한 처짐이나 비틀림으로 베어링의 Alignment 상태에 주는 어떠한 영향, 그리고 베어링이나 지지물의 수와 위치가 고려되어야 한다. 압착, 용접, 나사 접속, 스크류, Keyway같이 구동부나 중동부를 축에 연결하는 방법은 손상에 영향을 준다. 치차, 스플라인, 벨트, 체인, 토오크 변환기로 축에 동력을 전달하는가 또는 전달받는가에 따라 영향이 다르다.

**운전 이력 (Operating History).** 부품의 설치, 정기 정비 그리고 점검시 Assembly

에 대한 운전 및 정비 기록을 점검해야 하며 이들 기록 또한 정비 운전이 제작자 권고 사항에 따라 수행되었는지를 보아야 한다. 전형적인 축 사고 사례 경우와 분석 예는 다음과 같다.

#### 4.8 보일러 Fan의 터빈 축 破壞事例 [The Case of the Boiler Fan Turbine Shaft Fracture (그림 2-13a와 b)]

캐나다의 정유 공장에서 터빈 로터 축의 사고를 점검한 후 실험실에서 다음과 같이 조사보고 하였다. 정유 공장에서 제출한 F-703 터빈축의 파단면을 조사한 결과 파괴된 후 축이 접촉 및 상대 운동으로 상당히 손상되었음에도 불구하고 세 가지의 뚜렷한 영역이 나타났다.

- (1) Outer Ring은 Shaft의 축(Axis)에 수직한 표면에 약 5 mm 폭이 비교적 손상이 안 됐고, 정밀점검을 통해 상대운동에 의한 다소의 침식이 있음을 알았다.
- (2) 중앙으로 20 mm 확장된 Mid-Radius Ring은 축의 반쪽(Halves) 두 부분의 접촉과 상대 운동으로 심하게 마멸되어 원래 손상의 특징은 불분명하게 되었으며 파손 윤곽은 얇은 "Cup and Cone" 형상을 보였다.
- (3) 직경이 약 25 mm인 중앙 부분은 축의 반쪽 두 부분의 상대 운동과 접촉에 의한 마멸로 표면에 연속 Gouging 또는 Ploughing이 야기되어 표면이 비교적 부드러워지고 빛이 났다.

축 표면은 심하게 굽히고 산화된 면은 마찰열에 의해 생길 가능성이 있지만 축이나 파괴된 어느 쪽에도 특징적인 부식물은 없었다.

축의 미세 조직이 다소 Proeutectoid Ferrite를 갖는 Tempered Martensite라는 금속 조직 테스트로 확인되었고 파단면은 마멸에 의한 마멸 변형 물질로 덮여 있었다. 그림 2-13a는 이들 물질이 표면에서 생성하고 또한 심한 마멸에 의해 내부층으로 침투된 것을 보여주며 일반적인 미세 조직임을 나타내고 있다. 표면 손상이 너무 심각하여 원래 입계 파단인지 입내 파단인지 구별할 수 없으며 손상면에 부식은 나타나지 않았다. 손상면의 변환 물질은 축의 굽힌 면에서 조각으로 나타나고 이 부산물의 형태는 운전중 축 표면의 굽힘 및 마멸 때문에 발생하였다.

평균 경도는 266 HV/10 즉 25 HRC이다. 축단면의 모서리나 중심의 정도에는 특별한 변화가 없었다.

전자 현미경으로 파단면을 시험한 결과 여러 면에서 대부분의 표면이 마멸되었음을 알 수 있었다. 파단 후, 마멸의 영향을 받은 몇몇 지역은 분명하지 않고 파단면은 부

드럽고 별다른 특징이 없다. 축의 과단면이 심하게 마멸되어 손상의 성질을 결론적으로 말할 수 없으나, 어떤 특징으로 축이 피로에 의해 손상되었음을 암시한다. 회전축에 가해지는 굽힘 모멘트에 의한 균열 전파를 발생할 정도의 심한 응력 집중을 받으면 피로 균열은 여러 곳에서 시작되었음을 과단면 주변 외곽 지역을 보면 알 수 있다. 운전중에 축 표면이 긁혀서 응력집중이 발생되었다.

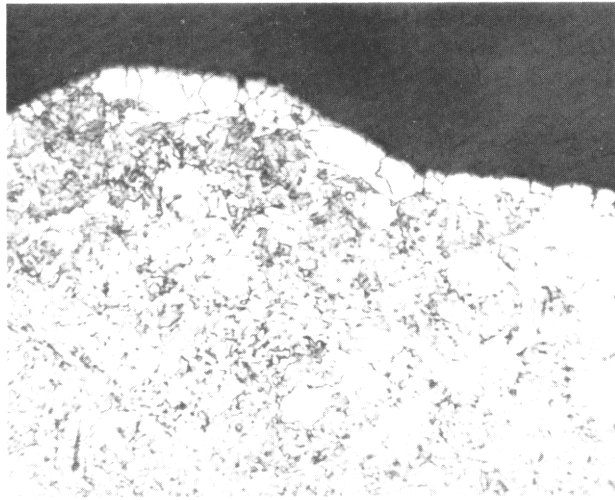


그림 2-13a 터빈 축 파손 형상 및 일반적인 미세구조.

Etchant : 2% Nital (200×)

사용자측 기술자는 본 보고서를 이용하여 손상의 근본적인 원인 및 교정에 관심을 두고 그의 코멘트는 다음과 같다.

축이 회전시 굽힘 모멘트에 의한 균열이 발생되었다고 보고서에 제시했는데 가장 가능성 있는 손상 원인의 가정과 일치하고 있다. 이러한 파손은 그림 2-13b와 같이 터빈과 피니언 로터를 지지하는 3개의 슬리브 베어링을 세밀하게 얼라인먼트를 하면 피할 수 있다고 생각한다. 내부 Alignment 확인용으로 Blueing Pattern을 얻고자 베어링에 기준(Dummy) 축을 조립하는 맨드릴(Mandrel) 기술을 이용하고 있다. 맨드릴은 실제 베어링의 간극을 줄이기 위해서 저널 직경보다 커야 하며 베어링 캡은 마지막 조립할 때 조여야 한다. 이렇게 하면 수직방향뿐 아니라 다른 모든 방향에서 적절한 Alignment 상태가 된다.

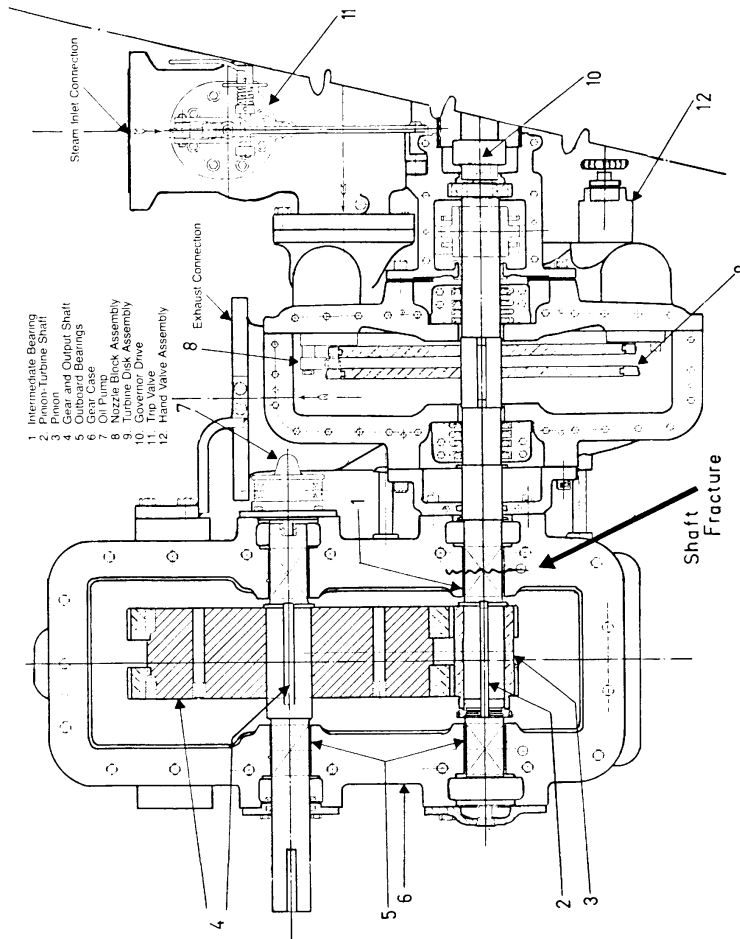


그림 2-13b 내장된 기어 터빈의 수평 단면

## 5. 表面變化의 故障 分析 (Analysis of Surface-Change Failures)

재료 표면의 변화에 의한 손상은 마멸, 피로와 부식에 의해 일어나며 이들 손상 형태의 각각은 여러 조건, 환경, 하중 형태, 결합부의 상대 속도, 윤활, 온도, 경도와 표면 마무리 등의 영향을 받는다. 마찰면에서 재료의 제거나 마멸은 여러 표면을 손상시키고, 마멸은 "연삭"과 "접착"으로 분류된다. 만약 부식이 존재하면 접착성 마멸 즉 "부식성 마멸" 형태로 나타난다.

### 5.1 研削性 磨滅 (Abrasive Wear)

재료가 부드러운 표면을 Scratch하거나 Gouging할 때 발생하는 연삭성 마멸은

마멸 관련 사고의 50%정도 차지하는 것으로 추정되었다. 전형적인 연삭성 마멸의 예는 왕복식 압축기의 크랭크샤프트 저널 파손으로서 단단한 먼지(Dirt) 입자가 유막을 깨트리고 들어가 부드러운 저널면을 자르거나 Scratch한다.

## 5.2 接着性 磨滅 (Adhesive Wear)

접착성 마멸의 파손 유형은 스크어링(Scoring), 골링(Galling), 시징(Seizing), 스커핑(Scuffing)으로써, 높은 국부 압력이나 온도가 가해질 때 두 결합부는 슬라이딩 부분에서 미세한 돌출부가 서로 융합될 때 일어난다. 융합후, 슬라이딩 힘은 한 표면의 금속을 찢어서 한 면에는 미세한 기공이 되고 또 다른 면에는 미세 돌출부를 유발하여 손상을 더 야기 시킴으로 접착성 마멸은 미세하게 시작되지만 크게 진전된다.

접착성 마멸은 슬라이딩 면에서 금속간 슬라이딩 접촉 방지로 최대로 감소시킬 수 있고 윤활막이나 적절한 코팅, 테프론(Teflon) 주입층 같은 침전물로도 가능하다. 3장의 기어 사고 분석시 접착성 마멸이 좀더 논의된다.

## 5.3 腐蝕成 磨滅 (Corrosive Wear)

부식성 마멸은 보통 윤활 요소에서 생기는데, 빈번한 기동과 정지하는 가스-엔진 부품 마멸의 주 근원은 오일내 물에 의한 부식이다. 회전 기기에서 윤활유의 관리 는 주로 오일내 물의 제거와 이와 관련한 부식성 마멸이다. 이와 같은 주제는 3장에서 더 자세히 논하겠다.

## 5.4 腐蝕의 影響 (Effects of Corrosion)

노련한 사고 분석가는 부식이 기계 요소 사고 조사를 복잡하게 하는 것을 안다. 부식은 원래 표면 상태를 변화시키거나 재료가 국부 손상을 일으키는 재료 표면에서의 화학적 또는 전기 화학적 반응이다.

물에서 재료가 부식하는 경우 산화와 병행하여 일어나는 환원과정 이 있다. 그림 2-14는 일반적인 부식 형태를 보인다. 구멍이나 바늘 형상은 "피팅 부식"이라 부른다.

만약 부식 저항 재료가 기술적이나 경제적으로 타당성이 입증되면 그 재료를 선택해야 하나 그렇지 않으면 부식 방지는 아래와 같이 해결될 수 있다.

- (1) 표면의 코팅
- (2) 표면층 형성
- (3) 유체에 부식 예방 첨가제 투입
- (4) 양극(Anodic) 또는 음극(Cathodic)의 분극

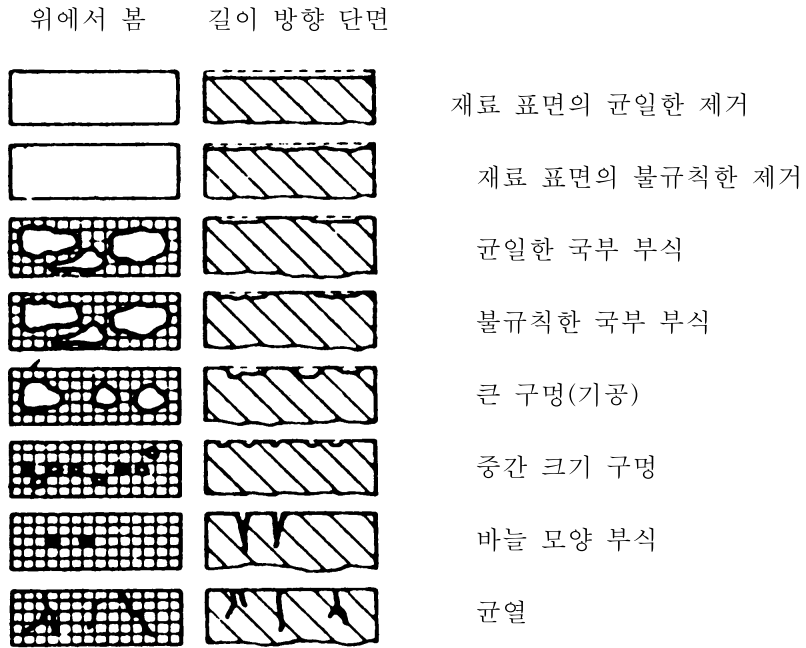


그림 2-14 전형적인 부식 형태

모든 재료는 화학적 또는 전기 화학적 반응에 대해서 저항을 갖는다. 서두에서 사고 예방 전략으로 손상 저항의 증가에 대해 이미 언급하였는데, 이러한 전략은 상당히 효과적이다. 따라서, 설치를 위한 다양한 재료가 평가되었고, 고장 원인을 해결하려고 하면 그림 2-15와 같이 발표된 여러 가지 표층 하나를 찾아보면 된다.



materials

MATERIALS OF CONSTRUCTION FOR PUMPING VARIOUS LIQUIDS

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5
Liquid	Condition of Liquid	Chemical Symbol	Specific Gravity	Material Selection
Acetaldehyde	.....	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	0.78	C
Acetate Solvents	.....	.....	.....	A, B, C, 8, 9, 10, 11
Acetone	.....	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	0.79	B, C
Acetic Anhydride	.....	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	1.08	8, 9, 10, 11, 12
Acid, Acetic	Conc. Cold	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	1.05	8, 9, 10, 11, 12
Acid, Acetic	Dil. Cold	.....	.....	A, 8, 9, 10, 11, 12
Acid, Acetic	Conc. Boiling	.....	.....	9, 10, 11, 12
Acid, Acetic	Dil. Boiling	.....	.....	9, 10, 11, 12
Acid, Arsenic, Ortho-	.....	H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub> , ½H <sub>2</sub> O	2.0-2.5	8, 9, 10, 11, 12
Acid, Benzoic	.....	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	1.27	8, 9, 10, 11
Acid, Boric	Aqueous Sol.	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	.....	A, 8, 9, 10, 11, 12
Acid, Butyric	Conc.	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	0.96	8, 9, 10, 11
Acid, Carbolic	Conc. (M.P. 106 F)	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	1.07	C, 8, 9, 10, 11
Acid, Carbolic	(See Phenol)	.....	.....	B, 8, 9, 10, 11
Acid, Carbonic	Aqueous Sol.	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	.....	A
Acid, Chromic	Aqueous Sol.	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O	.....	8, 9, 10, 11, 12
Acid, Citric	Aqueous Sol.	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> + H <sub>2</sub> O	.....	A, 8, 9, 10, 11, 12
Acids, Fatty (Oleic, Palmitic, Stearic)	.....	.....	.....	A, 8, 9, 10, 11
Acid, Formic	.....	.....	1.22	9, 10, 11
Acid, Fruit	.....	.....	.....	A, 8, 9, 10, 11, 14
Acid, Hydrochloric	.....	.....	1.19 (38%)	11, 12
Acid, Hydrofluoric	.....	.....	.....	10, 11, 12, 14, 15
Acid, Hydroiodic	.....	.....	.....	11, 12
Acid, Hydrophosphoric	.....	.....	0.70	C, 8, 9, 10, 11
Acid, Hydroperchloric	.....	.....	.....	3, 14
Acid, Hydroperfluoric	.....	.....	.....	A, 14
Acid, Hydropernitric	.....	.....	.....	A, 14
Acid, Lactic	.....	.....	1.25	A, 8, 9, 10, 11, 12
Acid, Mine	.....	.....	.....	A, 8, 9, 10, 11
Acid, Mixed	.....	.....	.....	C, 3, 8, 9, 10, 11, 12
Acid, Muriatic	.....	.....	.....	.....
Acid, Naphthoic	.....	.....	.....	C, 5, 8, 9, 10, 11
Acid, Nitric	.....	.....	1.50	6, 7, 10, 12
Acid, Nitric	.....	.....	.....	5, 6, 7, 8, 9, 10, 12
Acid, Oxalic	.....	.....	1.65	8, 9, 10, 11, 12
Acid, Oxalic	.....	.....	.....	10, 11, 12
Acid, Orthophosphoric	.....	.....	1.87	9, 10, 11
Acid, Picric	.....	.....	1.76	8, 9, 10, 11, 12
Acid, Pyrogallous	.....	.....	1.45	8, 9, 10, 11
Acid, Pyrofluoric	.....	.....	.....	A, 8, 9, 10, 11
Acid, Sulfuric	.....	.....	1.69-1.84	C, 10, 11, 12
Acid, Sulfuric	.....	.....	.....	11, 12
Acid, Sulfuric	.....	.....	.....	10, 11, 12
Acid, Sulfuric	.....	.....	.....	10, 11, 12
Acid, Sulfuric	.....	.....	.....	A, 10, 11, 12, 14
Acid, Sulfuric	.....	.....	1.92-1.94	3, 10, 11
Acid, Sulfuric	.....	.....	.....	A, 8, 9, 10, 11
Acid, Tannic	.....	.....	.....	A, 8, 9, 10, 11, 14

Summary of Material Selections and National Society Standards Designations

Material Selection	Corresponding National Society Standards Designation	Remarks		
	ASTM	ACI	AISI	
1.....	A48, Classes 20, 25, 30, 35, 40 & 50	.....	.....	Gray Iron—Six Grades
1(a).....	A536 & A395	.....	.....	Ductile Cast Iron—Six Grades
2.....	B143, 1A, 1B & 2A; B144, 3A; B145, 4A	.....	.....	Tin Bronze & Leaded Tin Bronze—seven alloys (includes 2 alloys not covered by ASTM Specifications, as explained above under Selection #2)
3.....	A216-WCB	.....	1026	Carbon Steel
4.....	A217-C5	.....	501	5% Chromium Steel
5.....	A296-CA15	CA15	410	12% Chromium Steel
6.....	A296-CB30	CB30	.....	20% Chromium Steel
7.....	A296-CC50	CC50	446	28% Chromium Steel
8.....	A296-CF-8	CF-8	304	19-9 Austenitic Steel
9.....	A296-CF-8M	CF-8M	316	19-10 Molybdenum Austenitic Steel
10.....	A296-CN-7M	CN-7M	.....	20-29 Chromium Nickel Austenitic Steel with Copper & Molybdenum
11.....	.....	.....	.....	A series of nickel-base alloys
12.....	A518	.....	.....	Corrosion Resistant High-silicon cast iron
13.....	A436	.....	.....	Austenitic cast iron—2 types
13(a).....	A439	.....	.....	Ductile Austenitic Cast Iron
14.....	.....	.....	.....	Nickel-Copper alloy
15.....	.....	.....	.....	Nickel

\*ASTM—denotes American Society for Testing Materials  
ACI—denotes Alloy Casting Institute  
AISI—denotes American Iron and Steel Institute



그림 2-15 펌프의 재료 구성 목록 예

### 5.5 프레팅 腐蝕 (Fretting Corrosion)

프레팅 마멸이나 부식은 실제로 심각한 고장 형태이며 프레팅 부식은 "마찰 산화(Friction Oxidation)", "블리딩(Bleeding)", "붉은 진흙(Red Mud)", "핏(Pit) 부식"이라 불리며 미세 진동 변위가 있는 재료 접촉부에서 일어나는 가속된 표면 손상으로 정의 되는데, 모든 종류의 압입, 스플라인 접촉, 베어링, 리벳팅 또는 볼팅된 조인트 등 여러 곳에서 발견된다.

프레팅 마멸의 주요 영향은 피로 손상에 기여하여 프레팅된 지역의 내부나 모서리에서 피로균열이 시작한다고 과단면 조사로 알 수 있었다. 열화된 Al-Cu-Mg 합금의 피로에 대한 프레팅 영향의 예가 그림 2-16에 나타나 있다. 프레팅 마멸에 관한 상세한 내용은 Waterhouse씨에 의해 전해졌고, 프레팅 마멸에 영향을 주는 인자는 다음과 같다.

- (1) 슬립 : 상대운동이 표면간 슬립을 유발하기에 충분하지 않으면 프레팅이 발생할 수 없다.
- (2) 주파수 : 프레팅 마멸율은 저주파수에서 증가하고 주파수 증가에 따라 일정하다.
- (3) 수직 하중 : 슬립 진폭이 일정하면 작용 하중에 따라 프레팅 마멸은 증가한다.
- (4) 지속 기간 : 프레팅 마멸은 사이클 횟수에 따라 선형으로 증가한다.
- (5) 온도 : 프레팅 마멸은 온도 감소에 따라 일반적으로 증가하는 경향이 있다.
- (6) 대기 : 대기나 산소 중에서 발생한 프레팅 마멸은 불활성 대기에서 일어난 것 보다 심각하다.
- (7) 습도 : 상대습도의 증가는 대부분 금속의 프레팅 마멸을 감소시키는데, 이것은 대기 습도가 접촉 지역의 과편 제거를 촉진하는 유막 역할을 하기 때문이다.
- (8) 면 다듬질 : 일반적으로 매끄러운 마무리는 표면에 더 작은 윤활 포켓(Pocket)을 가지기 때문에 표면이 매끄러울 때 프레팅 마멸은 더욱 심각하다.
- (9) 윤활제 : 프레팅 마멸은 산소의 접근을 막는 윤활제에 의해 약화되고, 윤활제는 프레팅 영역의 과편을 제거하여 마찰 계수를 변화시킨다.
- (10) 경도 : 재료의 경도 증가는 프레팅 마멸을 감소시킨다.
- (11) 마찰 계수 : 슬립 진폭의 감소로 인한 마찰계수의 감소에 따라 프레팅 마멸이 감소한다.

결과적으로 프레팅 부식과 마멸을 예방하기 위해서는 상대변위가 감소해야 하는데, 이에 의한 방법은 맞춤 간극을 줄여야 한다. 예를 들어, 프레팅 부식을 진단하는 고장

원인 해결사는 작업중 축 공차를 개선하는 것을 잘 볼 수 있다. 이러한 대책으로 억지 맞춤은 축과 보어(Bore)의 접촉 면적을 증가시켜 결과적으로 마찰력을 증가시킨다.

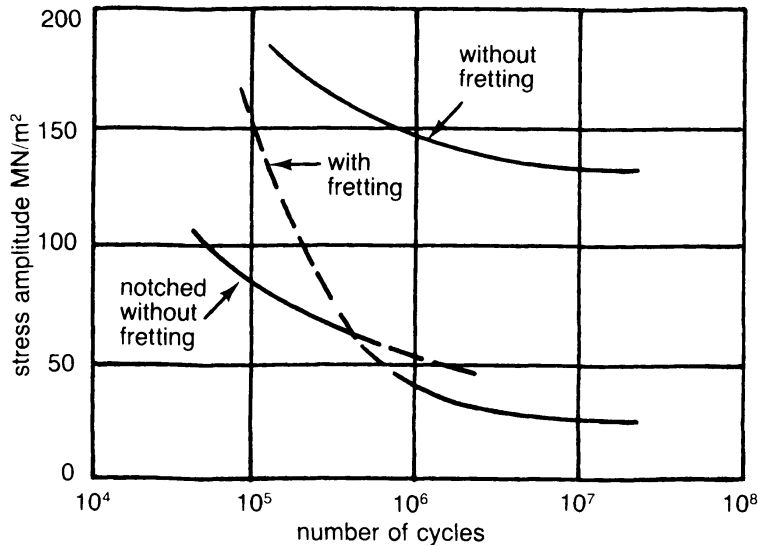


그림 2-16 열화된 Al-Cu-Mg 합금 피로에 대한 프레팅 영향

또 다른 예방책은 마찰계수의 증가인데, 적절한 마찰 요소를 갖는 재료를 접촉 표면에 코팅함으로써 가능하다. 이것은 금속 또는 비금속 코팅으로서, 성공적으로 사용되어온 금속 코팅은 카드뮴, 은, 금, 주석, 납, 구리, 크롬 등이 적용되고, 비금속 코팅에는 인산화(Phosphatizing), 양극 처리(Anodizing), 황화(Sulfidizing)와 같은 화학 처리나 중합체인 MoS<sub>2</sub>와 같은 재료의 결합이나 접촉면에 테프론(Teflon) 부착 등이 적용된다. 침탄, 질화, 냉간가공과 같은 확산 코팅은 접촉부의 강도를 강화한다.

마지막으로, 분석가는 프레팅 마멸에 영향을 주는 인자를 찾아서, 이 같은 고장 형태의 경제적인 예방을 위하여 손실을 최소화해야 한다.

## 5.6 케비테이션 腐蝕 (Cavitation Corrosion)

케비테이션 즉 유체내 기공 생성은 유체가 흐를때 지속적으로 나타났다가 기포가 터지는 현상이다. 액체의 정압이 너무 낮아서 특정점에서 액체의 온도와 관련한 증기압(Vapor Pressure)에 이를 때 기포가 발생한다. 정압이 유로의 증기압보다 높아지면 기포는 갑자기 터지고 갑작스런 응축이 일어난다. 이러한 터짐이 유동 액체 안이 아닌 유동 유체를 담고 있는 부품의 벽에서 발생하면 케비테이션은 재료의 침식을 유발시킨다.

최근 캐비테이션에 관한 연구에 의하면, 폭죽이 일단 시작되면 기포가 처음에는 역전하고 그후, 기포 내부 쪽으로 향한 유체 마이크로 제트(Microjet)가 형성되어 기포의 반대벽을 관통하는 것을 알았다. 느린 동작의 사진에서 기포는 벽에 접근하여 있고, 액체 마이크로 제트는 항상 벽쪽을 향하고 고속으로 벽에 충격을 줌을 알았다. 이것은 화학작용에 의해 교대로 강렬해지는 재료의 분해를 일으킨다. 즉 마이크로제트는 액체 속의 용존산소를 동반하며, 이것은 수증기 중에서 유리되고 벽 표면의 재료 입자의 경계 사이에서 높은 압력이 걸리게 된다. 이러한 과정은 재료의 벽 부식을 증가시킨다.

캐비테이션 부식의 첫 번째 현상은 Pitting이며 진행시 형태는 벌집 모양으로써, Sponge 형상과 구조를 갖는다. 캐비테이션으로 제거된 재료의 량은 다음 사항에 의해 결정된다.

- ① 형상 치수    ② 중량 손실
- ③ 육성 정비 재료량 즉, 사용된 분자 금속량이나 용접으로 피복된 금속
- ④ 평균 정비 시간

그림 2-17과 2-18은 캐비테이션 상태에서 운전시간이 5년이 넘는 석유화학공장의 냉각탑 펌프의 청동제인 혼류형 펌프 임펠러를 보여주고 있다. 고장원인 해결사는 보통, 설계 변경이나 운전 변경으로 캐비테이션 부식의 영향을 줄이려고 한다. 예를 들어, 수직 냉각탑 펌프의 설치시 기존의 침수 조건 변경이 비경제적이기 때문에, 기포의 와해를 유동로 벽에서 중심으로 이동시키는 것은 종종 불가능해진다. 이 같은 현상에서는 재료의 구성 변경이 타당하다.

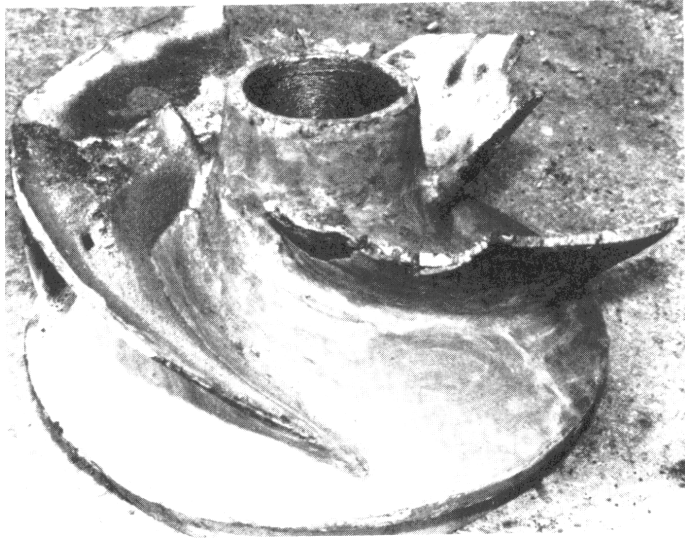


그림 2-17 캐비테이션에 의한 부식으로 청동 주조 혼류형 펌프 임펠러의 손상 공동 현상에 대한 재료 저항은 높은 부식 저항과 함께 높은 피로 강도와 연성을 가져야 하며 재료에 대한 저항 지수는 표 2-7과 같다.



그림 2-18 그림 2-17의 펌프 임펠러 확대 사진

표 2-7 캐비테이션으로 유발한 펌프 재료의 중량 손실 지수

회주철	1.0
주강	0.8
청동	0.5
캐스트 크롬강	0.2
다중요소 청동	0.1
크롬 니켈강	0.05

## 6. 磨滅 故障 分析 (Analyzing Wear Failure)

마멸의 정확한 고장 분석은 크게 세 가지 기본 요소와 관련되는데, 즉 마멸 표면, 운전 환경, 마모 파편 등이다. 표면 손상은 Polishing 또는 Burnishing 상태에서부터 비교적 많은 량의 재료 제거까지의 범위를 말한다. 제거된 재료, 손상이나 고장 형태, 표면 막의 존재 및 특징 등에 관한 많은 정보를 마멸면의 조사를 통해서 얻을 수 있고 더구나 마멸면과 마멸 입자의 상대 운동 방향, 마멸 입자가 표면에 박혔는지 어떤지, 어떤 요소가 우선적으로 작용하는지를 말해 준다.

### 6.1 環境 條件 (Environmental Conditions)

고장이 발생하는 환경은 금속 제거율과 메커니즘에 크게 영향을 미치므로 이에 관한 상세한 지식을 알아야 한다. 예로, Coke 분쇄기는 어떤 비정상 운전 조건에서 마멸이 증가하는 불규칙한 마멸이 발생한다면 어떤 환경이 비정상 운전 조건을 야기하는지 파악해서 이들을 제거시켜, Coke 분쇄기의 마멸 가속을 막아야 한다. 마멸 환경은 부식성으로써 윤활 계통의 고장과 같이 운전중에 변경되거나, 불충분한 윤활유 공급을 이루거나 원래 재료선정시 가정한 환경과 달라지거나 한다.

마멸 표면 사이, 표면에 박힌 윤활제 속, 또는 마멸 부품 옆에서 발견된 마멸 파편은 마멸 메커니즘에 대한 어떤 실마리를 제공한다. 금속의 중심부가 산화물로 구성된 마멸 입자는 접촉이나 연삭마멸로 마멸면에서 분리되어 결과적으로 자연 환경에 노출되어 산화가 되고, 단지 산화물로 구성된 작은 마멸 입자는 기계적으로 제거된 마멸 표면의 부식 때문에 생긴다.

### 6.2 分析 節次 (Analysis Procedure)

조건은 크게 다르지만 마멸 고장 분석에 관한 일반적 단계는 표 2-8과 같다.

표 2-8 마멸 고장 분석

1. 마멸된 부품, 환경, 연마, 마멸 파편, 윤활 등에서 실제의 재료를 확인한다.
2. 마멸 메커니즘의 조합이나 메커니즘, 즉 연마, 접촉, 부식, 표면 피로, 침식 등을 확인한다.
3. 원래의 표면과 마멸면의 표면 구성을 정의한다.
4. 방향과 속도를 포함하는 시스템에서 상대 운동을 정의한다.
5. 결합면 간 또는 마멸면과 마모 환경간의 거시적 또는 미시적 힘과 압력을 정의한다.
6. 마멸율을 정의한다.
7. 마찰계수를 정의한다.
8. 윤활의 형태와 효율성을 정의한다. 즉 오일, 그리스, 표면막, 자연 발생하는 산화층, 흡수막 등
9. 관찰된 마멸의 특수 적용에 대해 정상 또는 비정상인지 확인한다.
10. 필요시 해를 구하라

### 6.3 運轉 條件 (Operating Conditions)

마멸 고장 분석에서 첫 단계는 마멸의 형태를 확인하거나 한가지 이상 마멸 형태가 의심된다면 각 형태에 대한 상대적 중요성을 가능한 정량적으로 평가하는 것이다. 마멸형태 확인은 충분한 경험과 면밀한 관찰을 기초로 하며 상세한 운전 조건이 요구된다. 운전 조건을 임시적이고 피상적으로 기술하는 것은 무의미하다.

분석가가 공장과 떨어진 실험실에서 근무한다면 때로, 운전 조건을 완벽하게 파악하지 못하기 때문에 심각한 핸디캡을 유발하게 되는데, 예를 들어, 과열 고착된 엔진 실린더의 문제점을 연구한다고 가정해 보자. 적합한 엔진 오일을 사용하였으므로 분명히 이것은 금속간 접촉 마멸이나 윤활 마멸에 대한 예이다. 더욱이 오일 교환시 시스템의 사용 오일을 세척하기 위해 용매로 Flushing하였는데, 불행히도 새 오일 대신 용매가 채워졌다고 가정해 보자. 또한, 누설이 느려 용매 손실이 일어나도 운전시 즉시 엔진이 과열되는 것을 탐지하지 못했다고 가정하자. 아마도 분석가는 엔진을 들어내어서 청소하고 포장한 후 파손 부분(실린더 블럭과 피스톤)을 받아 조사하게 된다. 만약 "윤활 대체품"의 증거가 명확하게 드러나지 않으면 고장 원인의 규명은 매우 어렵거나

불가능하다.

마찬가지로, 운전 조건에 관한 불완전한 기술은 연삭마멸 분석에 오류를 유발하는데, 예로써 펌프 임펠러 바닥의 마멸을 유발하는 연삭마멸 근원에 대해 기술함에 있어 Coke 입자와 같은 문제의 연삭마멸에 대한 일반화된 참조 사항은 매우 모호하다. 연마에 관한 연구가 정성적, 정량적으로 이루어지지 않으면 효과적인 판단이 정상이든 아니든 불가능하다.

#### 6.4 磨滅問題의 解決 (Solving Wear Problems)

앞서 기술한 바와 같이 마멸은 오랜 시간에 걸쳐 발생하기 때문에 피로와 같은 여러 손상모드와 다르며 부품이 갑자기 기능을 발휘하지 못하는 경우는 드물다. 대부분의 경우, 마멸 문제는 두 가지 접근 방법으로 해결된다. 즉 파괴 환경을 줄이도록 운전 조건을 변경하거나 특이 운전 조건에 마멸 저항이 높은 재료를 선정하는데 후자가 더 쉽고 비용이 저렴하므로 자주 선택된다.

#### 6.5 磨滅 部品の 檢査 (Laboratory Examination of Worn Parts)

마멸 고장 분석은 마멸을 유발하는 운전 조건에 관한 지식에 전적으로 의존하지만, 거시적 미시적인 세심한 검사에 여러 가지 결정적 인자가 필요하다. 비교적 장시간 노출되어 마멸이 발생하지만, 손상시 얻은 정보는 원인을 밝히는데 유용하다. 예를 들어, 윤활제와 같은 Sample 분석으로 시스템의 마멸 파편이나 연마량과 성질을 밝힐 수 있다.

**절차.** 마멸 부품의 검사는 육안 관찰과 치수 측정으로 시작한다. 손상면의 특징 및 손상량의 관찰은 세밀하게 조사되어야 한다. 광학 비교기(Comparator), 현미경, 기록 프로파일로미터(Profilometer), 또는 정밀 측정 장치들은 손상량을 제대로 평가하는데 필요하다.

마멸 부품의 중량을 측정하여 사용하지 않은 부품과 비교하여 재료의 손실량을 구하고, 이 손실량은 연삭마멸시 일어나거나 접착마멸시 반대쪽 면으로 전달될 때 발생한다. 중량 손실의 추정으로 서로 다른 재료로 구성되었거나 다른 메커니즘에 의해 마멸된 두 면의 상대마멸율을 규명하는데 도움이 된다.

각 입자의 크기와 입자의 크기별 중량의 백분율을 규명하기 위해 연삭제 또는 마멸 파편을 고르는 것은 때로 도움이 되는데, 연삭 혼합물의 한 성분이 마멸을 유발할 때나 마멸 파편 및 연마제가 마멸시 동시에 존재할 때 골라낸 여러 가지 입자의 크기 규명 및 화학분석 역시 도움이 된다. 코커 볼 분쇄기(Fluid Coker Ball Mill)에서 일어나는 것처럼 시간에 따른 연마 입자의 크기 및 형상의 점진적인 변화를 Screening과 현미경

의 조합으로 자세히 밝힐 수 있다.

물리적 측정으로 마멸 손상의 양과 위치를 알 수 있지만, 손상 원인이나 메커니즘에 관한 정보는 충분히 알 수 없다.

현미경은 Scratch 또는 Gauge의 구성, 분포, 방향, 그리고 미세구조의 특수 성분의 우선 제거의 징후 등을 나타내는 마멸면 특징을 관찰할 때 사용되고 또는, 마멸 파편이나 연마 입자의 모서리의 형상과 구성(날카롭거나, 둥글다)을 연구할 때와 마멸 진행중 파괴 여부를 규명할 때 사용된다.

현미경을 이용하여 금속의 조직 관찰로 마멸 부의 초기 미세 조직이 어떠한지 규명하고, 또한 국부적인 상변환, 냉간 작동 표면(Cold-Worked Surface Layer), 박혀 있는 마모 입자의 존재 여부를 밝힐 수 있다.

**테이퍼 단면.** 테이퍼 단면은 얇은 표면층의 현미경을 이용한 미세 경도 측정이나 금속의 조직 관찰을 효과적으로 분석하기 위해 필요하다. 금속 조직의 Mount에서 시편의 모서리를 지지하는 특수 재료(예, 시편에서 니켈 도금 또는 Mounting 재료에 유리를 분말 처리)를 꼭 사용하여야 하고 Mounting된 시편을 조심스럽게 연마해야 한다.

미세구조의 조사를 위해서는 시편의 준비 외에 부식액을 처리하면 마멸면의 특징을 볼 수 있다. 마멸면 애칭(Etching)으로 나타나는 두 가지 특징은 상대 면에 국부 접촉에 의한 상변화와 심한 슬라이딩 접촉시 철주물이나 강철에서 발달하는 "백색층(White Layer)(Untempered Martensite)"과 같이 과도 마찰에 의한 과열 결과이다.

거시적 또는 미시적인 경도 측정으로 연삭 마멸에 대한 재료의 저항을 알 수 있다. 단단한 재료는 연성인 재료에 흠집을 내거나 절단시키기 쉽기 때문에 Sliding하는 두 면의 경도 비교는 중요하다. Martensite 강의 미세 경도 측정으로 마찰열로 강이 과열되었는지, 또한 Tempering Curve(템퍼링 온도에 대한 경도 곡선)를 사용하면 표면 온도를 대략 예측할 수 있다. 또한 마멸 부품의 열처리 상태가 정확한지도 알 수 있다.

**화학적 분석.** 습도분석, 분광분석, 열량측정, X-선 형광분석, 원자흡수, 전자빔 마이크로프로브(Microprobe) 분석과 같은 여러 화학분석 기술은 마멸 손상을 적절히 분석하는데 필요하다. 마멸 재료의 실제 조성, 마멸 파편, 연삭과 표면막 등은 마멸과 관련한 문제에 대한 해답을 얻기 위해 알고 있어야 한다. 만약 마멸된 윤활 요소가 존재한다면 윤활 분석을 당연히 해야 한다.

## 6.6 表面 損傷의 記錄 (Recording Surface Damage)

숙련된 고장원인 해결사는 표면의 특징 형태를 기록 유지하며 여기에 몇 가지



방법을 적용하는데, 그 하나 예는 손상된 치차 톱니 표면에 액체 상태로 주조하는 Dental Impression Material (Silicone Rubber)를 사용하는 것으로 이 재료는 표면 손상의 정확한 흔적을 나타낼 수 있다.

한 전문가에 의해 성공적으로 적용된 다른 방법이 있는데, 이것은 비교적 간단하며 Pitting, Scoring, 일반적인 마멸처럼 여러 가지 표면 손상을 기록하는데 사용할 수 있다. 그것으로 원통형의 표면 전체나 치차 측면의 복사(Replica)는 단 한 장의 종이로 영구 기록이 가능하며, 과정은 다음과 같다.

- (1) 면을 청결히 하고 얇은 유막을 남겨 둔다.
- (2) Graphite Powder로 재생할 표면을 솔질하고 여분은 부드러운 브러쉬나 휴지로 쓸어 낸다.
- (3) 압력에 민감한 투명 테이프(Matte Scotch Tape)를 표면에 사용하고 잘 부착되도록 테이프를 문지른다.
- (4) 테이프를 떼고 표면의 영구 기록을 위해 백지나 유리 슬라이드에 붙인다.

결론적으로, 표 2-9는 기계 부품과 이의 잠재적인 표면 고장 형태의 목록이다. 표 2-10과 표 2-11은 파편의 특징과 외형을 파악하므로써, 주요 마멸 고장 형태를 규명하는데 도움을 준다. 이것은 표 2-12에서 나타난 바와 같이 개선된 재료 선정에 도움이 된다.

표 2-9 기계 부품의 마멸 고장 형태

	스커핑	프레팅 마멸	골링	부식	침식	고착
터빈의 트립 밸브 스템 (Stem)	•	•	•			•
터빈의 조속기 밸브 스템		•				•
터빈의 조속기 연결 피벗 (Linkage Pivot)		•				•
펌프 Wear Ring	•		•			
펌프 임펠러				•	•	
기계적 씬을 사용하는 슬리브나 축		•				•
Seal Face, 고점성 유체						•
Seal Face, metal on metal	•		•			
Antifriction Bearing		•		•		
원심 압축기 임펠러				•		
원심 압축기 Labyrinth			•	•		
원심 압축기 축 슬리브			•	•		
원심 압축기 깨진 Bushing	•					
베어링과 씬을 사용하는 원심 압축기 씬		•				
원심 압축기 가이드 베인과 다이어프램		•		•		•
펌프 케이싱				•	•	
펌프 슬리브	•					
비윤활 압축기 밸브 판, 씬, 스프링	•					
압축기 피스톤 로드	•					
압축기 피스톤 링	•			•		
엔진 피스톤	•					
엔진 피스톤 링	•					
엔진 캠축	•					
엔진 밸브 스템	•		•			•
커플링-허브 (Coupling-hub) 축 맞춤		•				
기어 커플링	•					
기어	•					
열교환기 스크래퍼 (Scraper for exchanger)	•					•
기어 펌프	•					
터빈 밸브 기어용 캠이나 종차 (Follower)	•					
왕복식 플런저 (Plunger)	•					
왕복식 피스톤	•					
왕복식 밸브	•					
왕복식 증기 피스톤	•					
왕복식 밸브 기어	•					
Progressive cavity 펌프 임펠러	•					
스크류 펌프 로터와 아이들러 (Idler)	•					
기계의 슬라이딩 배관 지지물	•	•				



표 2-11 파편과 재료 손실 메커니즘

마멸 파편	재료 손실 메커니즘
길거나 굽어진 형태의 String 또는 Chip	연마-마멸을 유발하는 입자(어떤 것은 날카로운 각 형상이지만, 대부분은 둔각임)를 포함하는데 어떤 것은 연마 입자(컷팅(Cutting) 메커니즘) 보다 먼저 생성되기도 하지만, 대부분은 통과 입자의 반복적인 작용으로 생성된 재료이고 이 입자가 저 사이클 피로로 인해 부서진다.
고체 입자, 때로는 갈라진 표면을 가짐	접착-상대적으로 움직이는 두 면(코팅 및/또는 Substrate 재료 사이)간의 강한 접착력은 인장응력을 유발하여 재료를 파괴하기에 충분하다. 고장 형태는 다양한 에너지 손실량이나 연성 등 재료특성에 좌우된다.  저 에너지와 연성 -- 취성 파괴
심하게 변형된 고체 때로 산화물 덩어리가 섞임	고 에너지와 연성 -- 연성파괴
고체 입자, 때로 리플 패턴(Ripple)으로 갈라진 표면을 가짐.	피로-보통 재료의 항복이하의 응력레벨에서 반복하중에 의한 피로는 고사이클 피로라고 부르기도 한다.

표 2-12 재료 손실 메커니즘과 마멸 저항

재료 손실 메커니즘	마멸 저항에 대한 재료의 특징	재료 선정시 주의사항
부식	주변 영역의 부식 감소 즉, 합금의 추가나 연성의 균질 재료 선정으로 재료의 부식 저항이 증가됨.	연성재료는 골링과 시저를 증가시키는 경향이 있다.
컷팅 (Cutting)	탄화물, 질화물 또는 매우 단단한 입자를 갖는 고경도 재료와 단단하거나 매우 단단한 입자가 포함된 재료로 코팅된 것을 사용	컷팅 저항의 증가법은 취성파괴 저 피로저항을 유발한다.
연성 파괴	냉간가공, 내부 균열을 일으키거나 급속간 화합물의 접착력을 넓게 취약하게 하는 열처리 방법외 다른 방법으로 고강도 달성시킴.	
취성 파괴	냉온으로 인장 잔류응력의 최소화 즉, 저온의 취성전이 확인, 마르텐사이트의 템퍼링 (Temper), 탈산재료의 사용, 균열을 일으키는 매트릭스와 Filler간의 양호한 접착력을 유도한다.	
저 사이클 피로	변형이 쉽지 않은 고인장 재료와 균질한 재료의 사용 즉, Filler와 매트릭스간의 접착이 취약한 두 상(Two Phase)의 시스템이나 재료의 과잉을 피하라.	연성재료는 취성으로 손상되지 않고 컷팅에 저항하지 못한다.
고 사이클 피로	강과 티타늄의 경우, 인장강도의 반보다 작은 응력의 사용, 즉 10 <sup>8</sup> 보다 작은 하중 사이클을 받는 다른 재료의 경우 인장강도의 1/4 보다 작은 응력을 허용하고 면의 탈탄을 피하고, 탈탄이나 질화에 의한 압축 잔류응력의 형성이나 인장응력을 피한다.	응력의 계산에서는 Tractive 응력의 영향을 고려해야 한다.