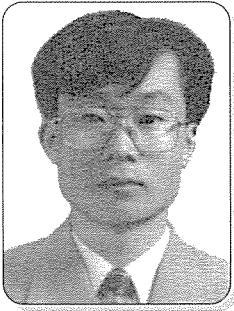


# 발전설비 손상원인 유형과 분석기법 및 사례



한국전력공사 전력연구원  
발전연구실 발전설비지원그룹  
과장 박수만  
Tel:(042)865-5313

## 1. 서론

### 1. 재료 파손요인 분석의 중요성

발전설비의 운전중에 발생하는 사고는 단순한 것 같아도 그 사건을 설명하는 것은 용이하지 않다. 특히 대규모적인 사고에서는 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하여 사고가 발생하기 때문에 시스템적인 검토가 필요하게 된다.

기계고장은 원인과 결과의 연쇄반응으로 나타나며, 반응의 끝 부분은 증상, 결함 또는 단순히 문제를 언급하는 성능상의 문제점들이다. 고장원인의 해결은 연쇄반응의 요소를 정의하기 위해 거슬러 조사하며, 현존 또는 잠재적 문제의 근본원인에 대한 현상분석의 근거에 의해 가장 가능성 있는 잠재적 원인과 결부시킨다. 문제의 원인을 찾는데 있어 단지 고장원인 해결 기법만으로 충분한 경우가 종종 있는데, 이는 간헐적인 동작불량이나 결함등의 일반적인 현상으로 고장형태가 불분명한 경우로 전문가도 당혹스럽게 하는 부분이다. 이러한 경우 조사자가 시스템을 알고 있다면 고장원인 해결은 성공적이고, 부품간의 상호작용, 운전 또는 파손유형, 기능특성에 익숙하지 않을 경우 문제해결은 허사가 될 수 있다.

현재는 기계, 구조물에 대한 유한요소법과 파괴역학 방법등을 이용해 응력의 측정정도가 향상되어 안정성이 매우 높아 졌지만, 설계, 시공상의 잘못에 의해 터빈 주요부품의 파괴, 펌프 축의 파손 및 탱크류

의 파손 사고가 간헐적으로 생기고 있다.

이러한 대형사고에 대해서 즉각 전문가로 구성된 조사반이 설치되고 철저한 원인규명이 행해지며, 그 조사결과는 제조 및 설계규정에 반영되어 유사 사고가 급감되고 있다. 이에 따라 "Case Study"라고 부르는 사례 연구의 중요성이 있고 주목받고 있다.

최근에는 파괴역학등이 발달하여 파면해석에 대한 정량성이 확보되어 보다 정확한 해석을 수행할 수 있게 되었다. 다만 어려운 점은 사고로 발생한 파면에서는 실험조건에서 얻을 수 있는 깨끗한 파면이 보존되지 않는다. 따라서 통상적인 파면해석 이외의 X선 회절등의 수단도 병용해야 하며, 손상관련 정보를 많이 얻도록 명심해야 한다.

### 2. 기계고장의 원인

기계고장분석과 고장원인 해결의 목적은 향후의 고장사고 방지, 기계수명 기간중 안전성, 신뢰성, 보수성 등의 확보에 있다.

고장이란 기계부품이나 요소가 변형하여 제기능을 발휘 못하는 것이라 할 수 있으며, 실제 최종적인 고장은 계속적으로 사용하기에 불안전하고 신뢰성이 없는 초기결함, 초기고장, 열화, 손상등이다.

고장원인의 일반적인 분류는 ① 설계결함 ② 재료결함 ③ 공정과 생산결함 ④ 조립불량 ⑤ 설계불량 또는 용역조건 미흡 ⑥ 정비결함 ⑦ 운전불량 등으로 나누며, 하나 이상의 특정 고장형태와 관련시켜 고장원인을 규명하는 것이 고장분석의 주요개념으로, 고장분석을 위해서는 '표 1'과 같은 검토를 수행해야 한다.

'표 2'은 기계요소부품의 고장 메카니즘의 기본 인자(외력, 시간, 온도, 그리고 부식환경 등)와 기계설계 특성을 나타낸 것이다. 장기적 고장의 감소는 규격과 설계의 수정으로 달성할 수 있다. 이러한 작업은 어떻게 하는가? 고장 형태를 확인 후, 고장난 기계

요소가 그 손상에 더 견딜 수 있는지 규명한다. 이는 '표 3'에서 보는 바와 같이 가능한 수정을 위해서 설계 변수를 점검해야 한다.

양호한 해답이 구해진다면 근본원인이 규명되어지고 재료, 요소, 어셈블리 또는 시스템의 취약성을 감소케 하는 무엇이든 자세히 지적할 수 있다.

기계요소부품은 강하게 한다고 해서 기계 손상에 좋은 영향을 미친다는 생각은 잘못임을 명심해야 한다. 유연성 있게 설계된 요소는 때로 강체 부분보다 어떤 운전조건에서도 잘 운전된다.

그러나, 고장형태는 고장의 결과이므로 고장의 원인과 혼돈하여서는 안되며, 정의된 고장 메카니즘은 고장형태가 어떻게, 왜 화학적 또는 금속적으로 발생했는지 말해주지만 고장의 근본 원인을 밝히지 못한다.

<표 2> 기계요소부품의 고장 메카니즘 인자

힘	시간	온도	부식성 환경
<ul style="list-style-type: none"> <li>정상</li> <li>과도</li> <li>주기</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>매우 짧은 시간</li> <li>단시간</li> <li>장시간</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>낮음</li> <li>상온</li> <li>높음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>화학적</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>정상</li> <li>과도</li> <li>주기적</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>원자핵적</li> </ul>

<표 3> 기계설계 특성

구성재료의 레벨	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 재료 특성 : 연성, 크리프 저항, 열 저항 등</li> <li>2. 공정으로 인한 특성 : 주조, 압연, 단조 등</li> <li>3. 열처리로 인한 특성 : 열처리 안됨, 경화, 응력이완 등</li> <li>4. 표면 특성 : 절삭면, 접지면, 래핑면 등</li> <li>5. 부식과 마모 보호 조치로 야기된 특성 : 도금, 도장 등</li> <li>6. 접촉방법으로 인한 특성 : 용접, 열박음, 롤링 등 부품과 요소의 레벨</li> </ol>
부품과 요소의 레벨	<ol style="list-style-type: none"> <li>7. 모양과 형식으로 인한 특성 : 원통형, 나선형, 다공형 등 부품, 요소, 어셈블리 레벨</li> </ol>
부품, 요소, 어셈블리 레벨	<ol style="list-style-type: none"> <li>8. 운전의 적합성 : Plugging, 마모, 진동 등</li> <li>9. 조립 형태에 의한 특성 : 리벳, 핀, 볼팅 등</li> <li>10. 조립의 질 : 접시면 따기(Counter Sunk), 플러쉬(Flush), 타이트, 잠금 등</li> </ol>

<표 1> 고장 원인별 분류

설계와 사양에 대한 책임	<ul style="list-style-type: none"> <li>부품과 볼트조임불량</li> <li>얼라인먼트 불량</li> <li>불평형</li> <li>베어링접촉 불충분</li> <li>부적절한 시험</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>전자제어 고장</li> <li>공기 제어 고장</li> </ul>	
적용	<ul style="list-style-type: none"> <li>물리적조건(온도, 압력 등) 부정확</li> <li>물리적으로(mol, 중량 등) 부정확</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>선적과 저장상 책임</li> <li>선적 준비</li> <li>오일계통 청결불량</li> <li>배수 불량</li> <li>보호 코팅 미적용</li> <li>보호 코팅 오적용</li> <li>기기 청소 미실시</li> </ul>	
제원	<ul style="list-style-type: none"> <li>윤활계 불량</li> <li>조절기구 불량</li> <li>커플링 불량</li> <li>베어링 불량</li> <li>씰 불량</li> <li>정지장치 불량</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>운할</li> <li>오일내 먼지</li> <li>오일 불충분</li> <li>오일 펌프 고장</li> <li>유압 저하</li> <li>배관 막힘</li> <li>필터링 불량</li> <li>오일의 오염</li> <li>다른 오일</li> <li>오일내 물유입</li> </ul>	
구성 재료	<ul style="list-style-type: none"> <li>부식과 침식</li> <li>급격한 마멸</li> <li>피로</li> <li>초과 강도</li> <li>갈림(galling)</li> <li>경화법 적용 오류</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>보호</li> <li>보호장치의 불충분</li> <li>염에 의한 부식</li> <li>습도에 의한 부식</li> <li>취약한 포장</li> <li>dessicant 생략</li> <li>먼지에 의한 오염</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>정비기술</li> <li>공차 불량</li> <li>용접 불량</li> <li>면 마무리 불량</li> <li>맞춤 불량</li> <li>기능도 미숙</li> </ul>
설계	<ul style="list-style-type: none"> <li>배관 지지 불만족</li> <li>배관의 연성 부적절</li> <li>배관 치수 적음</li> <li>기초 불충분</li> <li>토양 데이터 불만족</li> <li>액체 흡입</li> <li>액체 배수 불충분</li> <li>설계 오차</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>물리적 손상</li> <li>하중 손상</li> <li>이송의 손상</li> <li>지지 불량</li> <li>Unloading의 손상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>조립</li> <li>기계적 손상</li> <li>부품이 다름</li> <li>부품의 생략</li> <li>미스어라인먼트</li> <li>조임 불량</li> <li>불평형</li> <li>배관응력</li> <li>잔류 이물질</li> <li>구성 재료가 다름</li> </ul>
vender 책임	<ul style="list-style-type: none"> <li>구성 재료</li> <li>균열이나 결함</li> <li>재료 부적절</li> <li>처리 부적절</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>설치상 책임</li> <li>기초</li> <li>설치</li> <li>그라우팅 결함</li> <li>균열이나 박리</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>예방 정비</li> <li>연기</li> <li>장기간 계획</li> </ul>
설계	<ul style="list-style-type: none"> <li>부적절한 제원</li> <li>선정 오류</li> <li>설계 오류</li> <li>윤활 불충분</li> <li>액체 배수 불충분</li> <li>임계 속도</li> <li>강도 불충분</li> <li>보호장치 불충분</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>배관</li> <li>미스어라인먼트</li> <li>청소 불량</li> <li>지지 불량</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>피로, 손상, 부품파손</li> <li>진동</li> <li>회로단락</li> <li>회로개방</li> <li>슬리브 베어링</li> <li>씰</li> <li>커플링</li> <li>샤프트</li> <li>피니언 기어</li> <li>불(Bull) 기어</li> <li>터닝(Turning)기어</li> <li>캐이싱</li> <li>로터</li> <li>임펠러</li> <li>슈라우드</li> <li>피스톤</li> <li>다이아프램</li> <li>휠</li> <li>블레이드</li> <li>블레이드 루트</li> <li>블레이드 슈라우드</li> <li>라빈리스</li> <li>스러스트 베어링</li> <li>Pivot 패드 베어링</li> <li>롤러/볼 베어링</li> <li>Crosshead 피스톤</li> <li>크랭크 샤프트</li> </ul>
조립	<ul style="list-style-type: none"> <li>열처리 부적절</li> <li>경도 부적절</li> <li>면마무리 불충분</li> <li>맞춤 부적절</li> <li>질량 불평형</li> <li>윤활로 닫힘</li> <li>용접결함</li> <li>공차 부적절</li> <li>부품의 생략</li> <li>부품의 결함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>조립</li> <li>미스어라인먼트</li> <li>조립 손상</li> <li>재료 결함</li> <li>조임 불량</li> <li>연결 불량</li> <li>잔류 이물질</li> <li>작업정신 미흡</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>총격</li> <li>열적</li> <li>기계적</li> <li>기동 불량</li> </ul>
조립	<ul style="list-style-type: none"> <li>윤활 불충분</li> <li>액체 배수 불충분</li> <li>임계 속도</li> <li>강도 불충분</li> <li>보호장치 불충분</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>조작과 정비 책임</li> <li>충격</li> <li>열적</li> <li>기계적</li> <li>기동 불량</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>운전</li> <li>액상 슬러그</li> <li>공정상 서징</li> <li>제어오차</li> <li>조절능력 저하</li> <li>운전미흡</li> </ul>
보조기기	<ul style="list-style-type: none"> <li>장치 손상</li> <li>불충분한 장비</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>보조기기</li> <li>장치 손상</li> <li>불충분한 장비</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>보조기기</li> <li>장치 손상</li> <li>불충분한 장비</li> </ul>

## II. 본 문

### 1. 금속학적 손상원인 분석

손상해석은 손상의 원인과 메카니즘, 문제해결을 위한 대책 수립에 그 목적이 있다. 금속학적 손상분석(Metallurgical Failure Analysis)은 기계 요소 부품의 고장원인을 규명하는 도구로 이용되고 있다. 넓은 의미에서 손상은 기계요소 부품의 고유한 기능 상실로 정의되며, 손상해석은 고장의 원인 규명을 위해 손상 상황과 손상된 부품의 검사를 하는 것으로 정의한다.

손상원인은 다음과 같이 분류할 수 있다.

1) 잘못된 사용(Misuse) : 부품이 설계조건을 벗어난 곳에 설치되는 것으로, 이것은 일반적인 손상의 원인이다.

2) 조립 잘못과 정비 불량(Assembly errors and improper maintenance) : 조립 잘못은 부적절한 윤활제 사용과 볼트의 조임 같은 요소를 포함한다. 기기의 정비는 도색된 표면으로부터 청결과 윤활까지 고려해야 하며, 이것을 게을리 하면 손상이 일어날 수도 있으며 다른 부품까지 기기고장이 파급될 수 있다.

3) 설계 불량(Design errors) : 이것은 가장 일반적인 손상원인으로 설계과정에서 ① 부품의 크기와 형태 ② 재질 ③ 각종 물성치 등이 고려되어야 한다.

위에서 언급한 손상원인에 관한 여러 정보와 다음 사항을 비교하여 손상조사를 실시하여야 한다.

1) 부적합한 재료선정(Improper materials selection)

2) 정비불량(Improper maintenance)

3) 잘못된 설계 고려(Faulty design consideration) : 잘못된 설계고려나 재료 부적합에 따른 손상원인은 다음과 같다 ① 연성파괴(과도한 변형, 탄성 또는 소성, 찢어짐 또는 전단파괴) ② 취성파괴(임계크기의 응력상승자나 결함) ③ 피로파괴(loading cycle, strain cycle, thermal cycle, corrosion fatigue, rolling contact fatigue, fretting fatigue) ④ 고온 파괴(creep, oxidation, local melting, warping) ⑤ 정적자연파괴(수소취화, 가성취화) ⑥ 설계부터 과도한 응력상승인자 ⑦ 부적절한 응력해석 ⑧ 잘못된 제작-잘못된 조성에 기인한 결함, ingot 또는 casting결함, 가공결함, 과도한 국부소성변형), 용접결함, 열처리 불량, 부주의한 조립 따위

4) 운전중 변형(Deterioration in service) - 예기치

못한 하중상태나 과하중, 마모, 부식, 부적절한 수리나 정비, 화학적 침식에 의한 분해, 방사선 손상, 비정상적인 과도한 상태 등

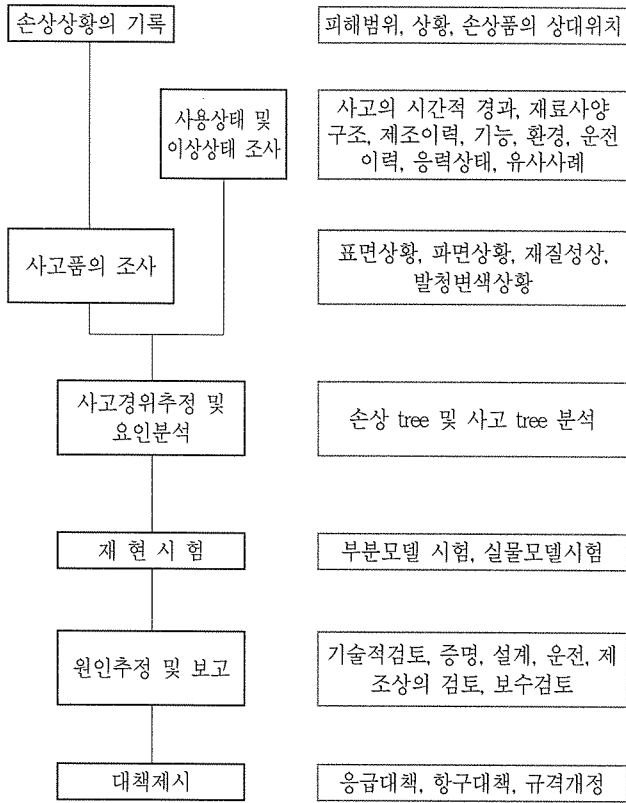
이처럼, 기계요소부품의 손상에 대한 정밀분석은 금속 검사에 의존하는 고도의 전문분야이다. 그러나, 기계 손상원인을 규명하고자 하는 조사자는 손상부품의 금속학적 정밀분석에 대한 전문성이 부족할지라도 근본적인 손상원인의 해결책을 찾아야 한다. 그의 임무는 사고 원인을 규명하고 대책이나 예방책을 찾는 것이다. 금속학적 손상 분석중 수행하는 검사 목록과 조사 순서는 '그림 1'과 '표 4'과 같다.

<표 4> 고장분석의 주요단계

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

'그림 1' 처럼 손상해석 절차는 ① 손상상황의 기술(손상이력 자료, 부품의 설계자료와 같은 손상과 관련된 정보, 사진 등) → ② 육안조사 → ③ 기계적인 설계 자료 분석 및 시험 → ④ 화학적인 설계 자료 분석 → ⑤ 파면분석 → ⑥ 금속조직 검사 → ⑦ 기계적 특성시험 → ⑧ 손상 재현(Failure simulation) 순으로 수행하는 것이 일반적이다. '표 1'은 '그림 1'이

나 위에서 언급한 손상해석의 또 다른 절차로 일반적으로 사용되고 있으며, 방법적인 차이는 있지만 근본적인 접근 방법은 동일하다.



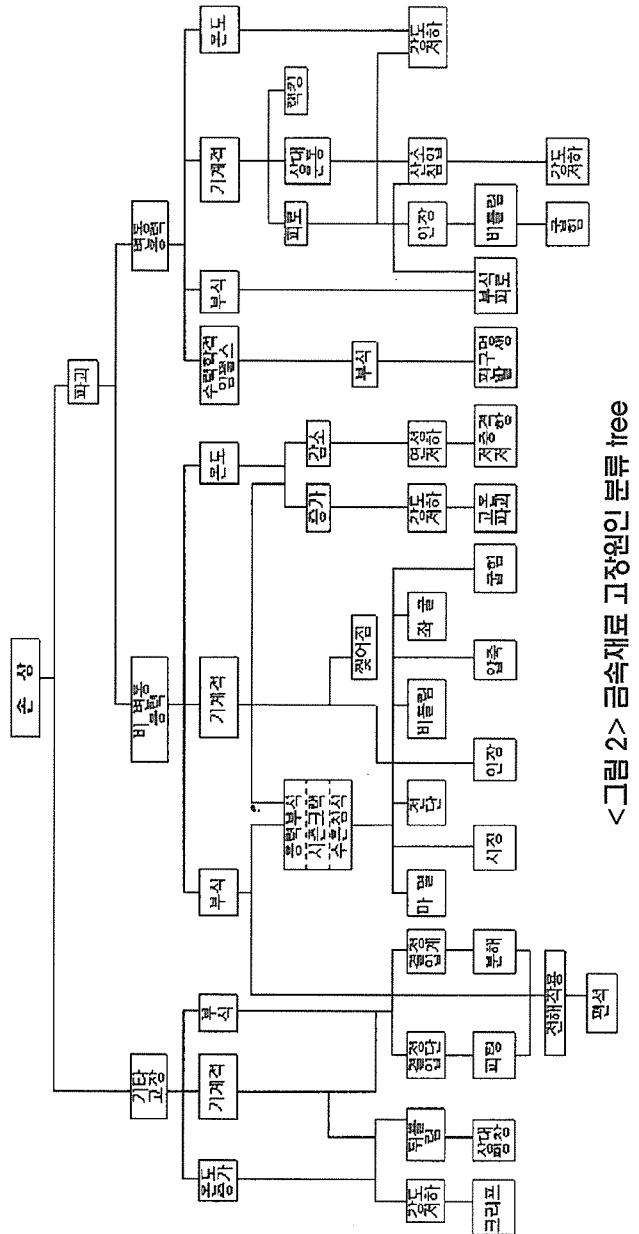
<그림 1> 사고 조사순서

고장 분석을 위한 점검 전에는 계획이 필요하고, 고장의 원인 배경과 일반적 특징에 관하여 충분히 조사해야 한다. '표 1'의 여러 단계에서 예비결론이 종종 나오며 조사 초기에 원인이 밝혀지면 나머지 시간은 예상되는 원인을 확인하여 다른 가능성을 줄이는데 할당해야 한다. 다른 경우의 조사는 '그림 2'의 논리순서에 따라 다음단계를 결정해야 하는데, 적절한 시험 설비를 이용할 수 있다면 분석가는 예비 결론을 내기 전에 기계적 시험, 화학적 분석, 파단면 사진, 현미경 검사 등의 결과를 수집하여 검토해야 한다. 조사 작업 감축을 위한 노력은 항시 해야 하고, 때로 파단면의 육안 검사나 한 개의 금속조직 시편을 조사하는 것과 같이 분석절차 측면에서 고장 원인에 대한 의견을 형성해야 한다. 최종 결론에 도달하기 전까지 당초 의견을 확인하는 추가 데이터를 구해야 하며, 금속조직 단면과 같은 하나의 시편에서 얻은 결론은 유사한 파손 이력을 얻을 수 없으면 쉽게 의심받을 수 있다.

## 2. 손상유형별 파면특성

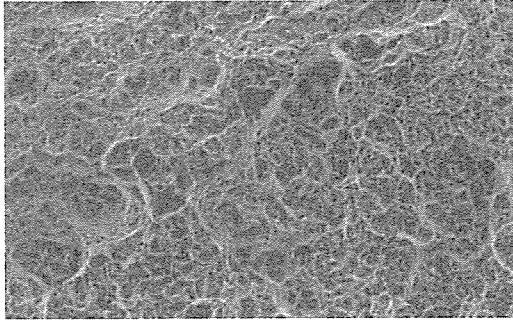
재료특성에 따른 파괴유형은 연성파괴와 취성파괴로 분류하고, 파괴형상별로는 크게 입내파괴와 입계파괴로 분류할 수 있다.

연성파괴(ductile fracture)의 전형적인 파면은 dimple pattern으로 파면형상은 하중조건에 따라 equiaxed, elongated, shear & tear, swallow로 나타난다.



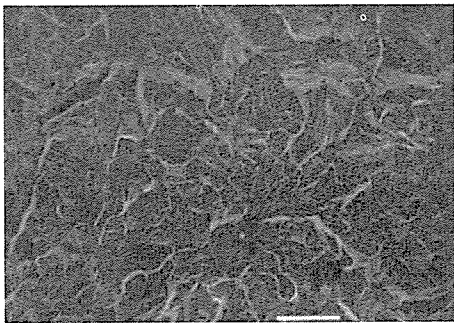
<그림 2> 금속재료 고장원인 분류 tree

dimple 이외의 미세적특징은 ripples, woody, serpentine glide, stretching, microvoid coalescence등으로 구별되고, 거시적으로는 fibrous, radial mark, shear lip 및 소성변형 정도 등으로 구분할 수 있다.



<사진 1> 과하중에 의한 연성파괴(dimple)

취성파괴(brittle fracture)는 낮은 온도, 3축 응력상태, 충격하중하에서 발생하며 균열은 입내면(transgranular plane)을 따라 전파한다.

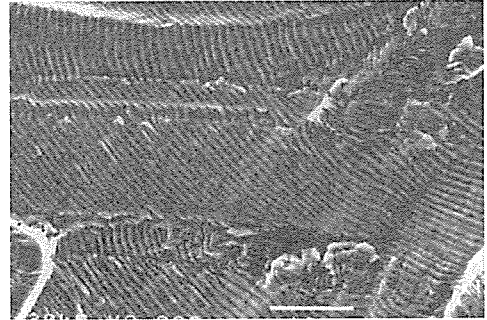


<사진 2> 충격하중에 의한 벽개파면

거시적 파면형상은 chevron mark, herringbone mark, radial mark 등으로 나타나고 미시적 형상은 cleavage facet, cleavage tongue, quasi-cleavage, river pattern, tear ridge, fan & feather-like cleavage 및 rock-candy 형태로 구분되어진다.

피로파괴(fatigue fracture)는 재료에 반복하여 하중을 가하면 반복되는 횟수가 증가함에 따라 재료의 강도가 저하하는 현상을 피로라 하며, 금속이 반복적으로 응력 또는 변형을 받으면 단일하중을 받고 파괴를 일으키는데 필요한 응력보다 훨씬 작은 응력에서 파괴가 일어나는데 이처럼 반복하중 또는 변형을 받고 생기는 파괴를 피로파괴라 한다. 피로파괴의 특징은 경고없이 갑자기 일어나며 파괴시 큰 변형이 수반되지 않고 외형적으로 취성파괴의 파면을 보이며, 거시적으로는 파면이 주 인장응력의 방향에 수직인 것이 보통이다. 파괴의 시작은 보통 노치 같은 응력집중부위나 금속조직상의 응력집중점에서 일어나며, 파괴면은 파괴의 시작점으로부터 내부로 진행되는 일련의 원형자국인 beach mark, clamshell mark, conchoidal mark, ratchet mark 및 crack arrest line 등으로 나타나

고, 미시적으로는 striation mark, tire track, ripple mark, rub mark, Walther line 등의 특징으로 구분할 수 있다.

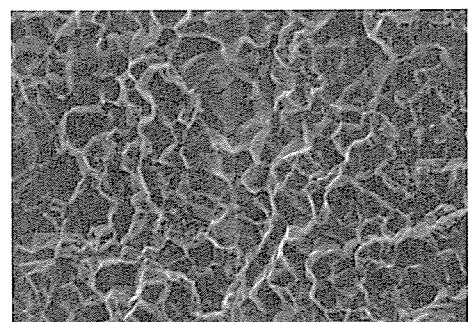


<사진 3> 피로파괴의 특징(striation)

피로파괴는 저·고주기피로, 열피로 및 부식피로로 나눈다. 저주기피로( $N < 10^4$  이하, High Cycle Strain  $\rightarrow$  Low Cycle Fatigue)는 하중·응력 제어하에서 이루어지는 것이 아니라 변형을(탄성변형+소성변형)의 제어하에서 발생하며, 피로균열곡선에서 'Stage II' 균열전과가 피로수명 중 가장 많은 부분을 차지한다.

부식과 관련된 손상유형은 균일부식, 갈바닉부식, 틈새부식, 공식 및 선택적부식, 입계부식, 응력부식균열, 부식피로, 수소취화, 침부식 등으로 분류한다.

응력부식균열(SCC)는 특정한 부식환경과 정적 인장응력이 동시 작용할 때 일어나는 취성파괴로 SCC를 야기시키는 응력은 하중뿐만 아니라 용접잔류응력, 운전중의 열응력등에 기인하고, 금속조직과 관련된 파면은 입계(Intergranular, IG)균열과 입내(Transgranular, TG)균열로 구분된다. 이러한 균열현상이 뚜렷이 구별되기는 하지만 열처리상태, 응력 및 환경의 부식요인(이온농도, 온도, pH, 전위 등)에 따라 다른 형태의 균열 또는 양 형태의 균열이 모두 나타나기도 한다. 균열 경로는 인장응력에 수직인 방향으로 진행하고, 가지(branched)를 뺀으며 전파속도는 수소취화보다 느린 편이다.



<사진 4> SCC에 의한 입계파괴 파면

수소취화(Hydrogen Induced Cracking, HIC)는 합금의 결정구조내에 수소원자의 확산·침투에 의해 야기되는 brittle mechanical fracture로 SCC와 유사하다. HIC는 SCC보다 훨씬 더 brittle하고 빠르게 전파되며 일반적으로 가지를 뺀(unbranched) 형태로 나타난다. HIC의 균열형태는 IG 모드보다는 TG 경향이 강하며, TG-HIC 균열은 매우 취화한 벽개형태의 형상을 보이고 수소의 bubbles에 의해 야기되는 것으로 추정되는 미소공공(micropores)과 미소한 소성변형 기구에 의한 ductile hairlines 파면형상이 나타난다.

부식피로(Corrosion Fatigue)는 부식환경과 주기적응력의 상호작용에 의해 발생하는 취성파괴로, 주기적응력 주파수가 주요한 인자로 작용하며 균열면에 부식생성물 존재, SCC나 HIC에 비해 균열선단이 무디고(blunt), 대부분 입내파괴 형상이고 beach mark, striation mark가 관찰된다.

### 3. 주증기관 파열손상 사례

화력발전소 주증기관인 HRSG HP SH Start-up Manifold의 용접부가 운전중 파열되어 운전 및 설계 조건 확인 → 재질시험(기계, 금속시험과 열처리, 용접성 등) → 파면해석 → 배관응력해석 → 원인규명 → 대책제시 등을 검토한 사례이다.

#### 가. 수행방법

##### (1) 손상현황파악 및 배관설계 조건검토

- 온도 및 압력(552°C, 134kg/cm<sup>2</sup>), 재질(SA 312TP 304H), 규격(OD323.9 x 54t)
- HRSG는 잦은 기동정지와 가혹한 운전조건 때문에 열응력이 반복적으로 배관에 작용함.
- 손상은 용접부와 열영향부위의 경계면에서 시작되어 용접부를 통과한 파열로 거시적 파면형상(사진)은 거칠었으며 회색 빛을 띄고 있었음.

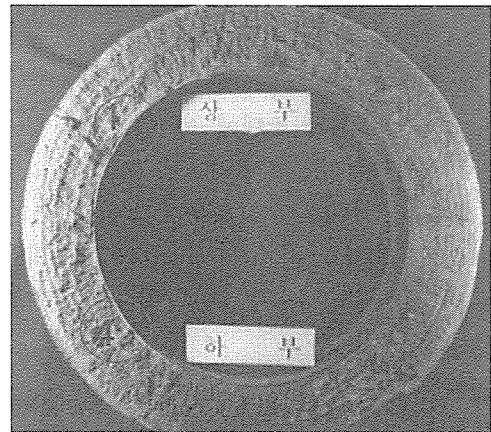
##### (2) 재질시험 : 기계적성질시험 및 화학성분분석, 금속조직시험, 용접성검토

- 기계적특성(경도, 충격시험) 및 화학성분등의 재료물성은 건전한 상태였음.
- 용접 열영향부위(HAZ)에 많은 균열들이 입계를 따라 존재하였으며, 이들 균열은 HAZ부에 탄화물석출에 의한 예민화현상으로 가속된 것으로 나

타났음. 따라서, 용접시 HAZ부에 발생하는 예민화현상과 잔류응력제거를 위해 후열처리를 수행토록 권고함.

#### (3) 파면해석

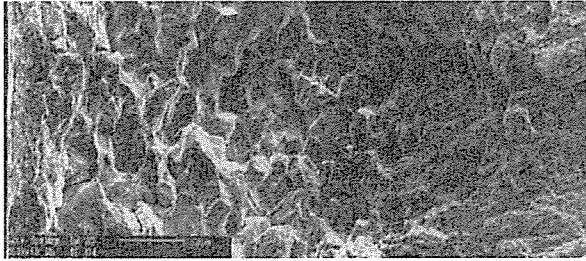
- 파괴는 배관내부 용접 루트부위에 균열이 발생하여 입계를 따라 성장하다 배관에 열충격등의 외력이 가해져 균열이 빠르게 성장하면서 파열된 형상임.
- 입계파괴 형상으로부터 응력부식균열, 열피로, 열충격 및 크리프 손상 가능성을 검토한 결과 열피로-크리프의 상호작용에 의해 파열된 것으로 도출되었음.
- HRSG는 잦은 기동정지와 가혹한 운전조건 때문에 열충격 및 열응력이 배관에 작용하여 저주기 피로가 발생하며, 운전조건과 열영향부위 및 용접부위에서 관찰되는 wedge type 균열들의 형상으로부터 크리프 손상이 진행된 것으로 판단됨.



<사진 5> 배관파면외형



<사진 6> HAZ부 파괴시작부위 금속조직



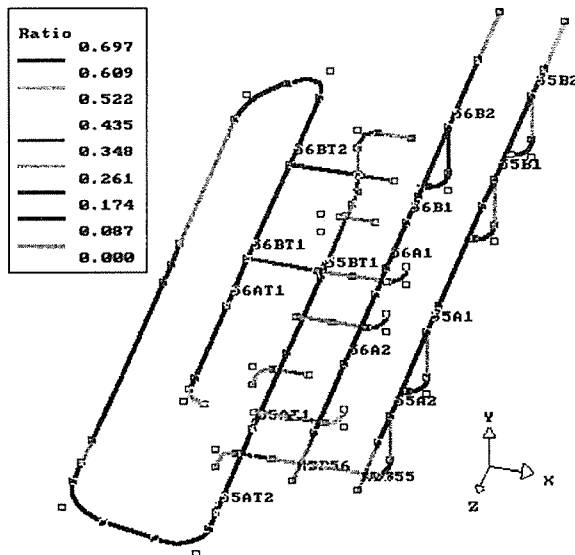
<사진 7> 파괴기점부위의 파면형상

(4) 배관응력해석

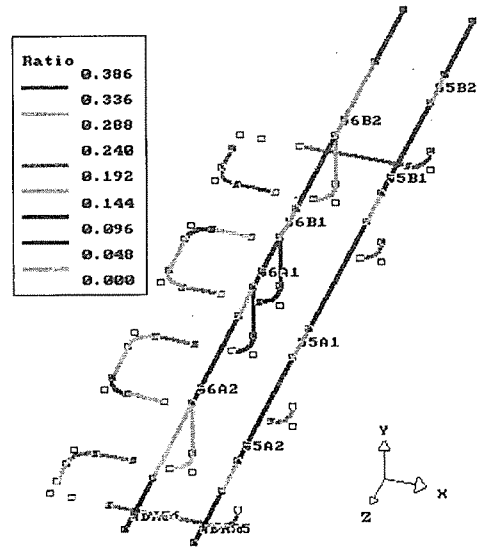
주증기관 절손과 관련하여 기존 배관을 철거하고 해다를 직결하는 방안에 대해 배관해석 전용 프로그램인 PIPEPLUS 프로그램을 이용하여 기존 및 직결시 배관응력을 검토하였다.

기존 배관의 변위값과 직결시 변위값을 비교한 결과 X, Y, Z방향으로 거의 유사한 결과를 나타냄으로써 기존 배관의 직결시 배관길이 축소로 인한 열팽창 변위상의 문제는 없는 것으로 나타났다. 응력해석결과 운전중 절손된 Inlet manifold elbow 위치의 응력은 배관허용응력의 약24.6%로 나타나 구조적인 배관응력으로 인해 배관절손이 발생된 것은 아닌 것으로 검토되었다.

또한, 직결시 배관시스템에 발생하는 열응력 상태를 고찰하기 위해 설계변경전과 설계변경후의 응력해석을 수행한 결과는 각각 '그림 3, 4'와 같으며, 배관 직결시 설계변경전보다 정상운전시 약 44%의 응력감소가 발생되어 직결할 경우 배관 응력측면에서 더 안정할 것으로 나타났다.



<그림 3> 설계변경전 배관응력



<그림 4> 설계변경후 배관응력

나. 사고원인

HRSG HP SH Start-up Manifold의 원주용접부에서 균열이 발생, 파열된 배관의 파단 원인규명을 위해 재료선정의 적정성, 용접의 적정성등 설계측면의 기술검토와 열피로, 열충격, 응력부식균열, 입계부식균열 및 열피로-크리프손상등의 가능성에 주안점을 두고 파면해석을 실시하였다. 파면형상은 거칠고 불연속적이었으며, 균열은 결정립계를 따라 진전되었다. 열영향부위 금속조직에서 예민화와 균열선단주위의 높은 응력장에 의해 수많은 입계균열이 존재하고 있었으며, 이는 열영향부위의 예민화와 잔유응력제거를 위한 후열처리를 행하지 않아 나타난 용접불량에 기인한 사고임을 입증하는 것이다. 또한 균열형상과 파면형태, 운전조건을 고려할 때 2차적인 손상요인은 열피로-크리프의 상호작용에 의한 것으로 나타났다.

따라서, 배관손상은 후열처리를 행하지 않아 예민화에 의한 입계균열과 기동·정지시의 열응력이 균열을 가속시켜 발생된 것으로 규명되었다.

다. 대책

배열회수보일러(HRSG) 주증기배관이 파열시 고온·고압의 증기가 누출되어 설비 및 인명에 손상을 줄 수가 있고, 복구 정비작업시 설비를 장기간 정지해야 하므로 발전정지 손실이 수반된다.

배관의 재질이 오스테나이트계 스테인레스강(SA 312TP 304H)으로 용접시 후열처리를 수행하지 않은

것이 일반적이거나 파열된 배관은 용접두께가 약 54mm 정도로 열영향부위의 예민화현상을 방지하기 위해 후 열처리를 행하는 것이 바람직하였다. 또한, 타호기 배관용접부위의 비파괴검사를 수행한 결과 균열이 진행되고 있었으며, 배관설계 및 운전상황을 검토한 결과 본 Start-up attemperator 배관을 기동시 사용하지 않고 있어 철거하여도 문제가 없는 것으로 배관해석결과 나타났으며, 운전효율도 향상되는 것으로 나타났다. 또한 원인규명결과 용접불량에 기인된 것으로 나타나 제작사의 하자정비를 유도하여 전호기에 대해 Start-up 배관을 철거하고 주 배관과 직결 처리하도록 하였다.

### III. 결 론

다음 표는 일반 산업플랜트의 기계요소부품에서 발생하는 손상사례를 파괴모드 유형별로 통계화한 자료이다.

발전설비 주요구성부품의 손상사례도 이처럼 다양하게 나타나고 있으며, 앞 절에서 기계요소부품의 손상유형 및 분석기법을 절차를 통해 문제해결에 일관성 있는 접근방법의 필요성을 설명하였다.

고장원인해결기법(Troubleshooting)이 일반적으로 손상해석보다 확대된 의미의 고장발생 원인규명을 위한 일련의 활동으로 본다면, 손상해석(Failure Analysis)은 고장난 기계요소부품에 대한 사후 점검이라 할 수 있지만 손상원인해결의 과정은 거기서 멈추지 않고 문제점 제거까지 포함한다. 결함 또는 사고의 조기에방은 설비 안정성과 신뢰성 있는 운전을 위해 반드시 필요하며, 사고가 발생했을 때 근본적인 원인 규명을 통해 향후 사고예방, 기계수명 기간 중 안정성, 신뢰성, 보수성의 확보에 필수적이다.

금속학적 손상해석기법이 고장원인 규명을 위한 수단이기는 하지만 정확한 문제점 해결을 통한 대책을 제시하고 향후 설비의 문제점과 유사사례를 예방하는 것이 주목적이라 하겠다.

원 인	%
· Corrosion	29
· Fatigue	25
· Brittle Fracture	16
· Overload	11
· High-temperature corrosion	7
· SCC/CFC/HIC	6
· Creep	3
· Wear, abrasion & erosion	3

## TBN 정비사례



**한전기공(주)**  
**기술개발원 전문원실**  
**과장 이시연**  
**Tel : (031)710-4394**

### 1. 개요

00사업소 S/T 2호기는 반도체회사에 증기와 전력

을 공급하는 열병합 발전소로 1997년 건설이후 Initial Overhaul이 수행되지 않는 상태에서 운전이 되었으며 Type은 Westinghouse SC23기종으로, 재원은 Condensing, Cross Compound, Power44MW, 회전수 3600RPM, 발전기와 터빈사이 Reducing Gear없는 커플링직결형이며 Turning 장치는 최첨단 설비인 Automatic Overrunning 3S Clutch이다.

2001. 01. 07. 15:00경 정상운전 중 소내 전원차단으로 터빈정지과정에서 Turning Gear 장치고장으로 Turning불가상태에서 재 기동 중 No.1 Bearing(Tilting Pad LOP Type)유막 파손으로 심한 마찰이 발생하여 Journal 및 베어링의 극심한 손상, Control Rotor