

특별강연 (I)

보일러튜브의 파열사고 원인분석

(사 례 중 심)

한 전 기 술 연 구 원
발전연구실설비개선연구역
김 전 영

목 차

1. 머 리 말	5
2. 보일러 파손사고의 분류	6
3. 파손사례	7
3.1 Creep 파열	7
3.2 고온부식	9
3.3 저온부식	11
3.4 알카리부식	12
3.5 유기물 혼입	14
3.6 수소 취화	16
3.7 기계적 피로	18
3.8 열피로	20
3.9 부식피로	23
3.10 응력부식균열	25
3.11 Drain cutting	27
3.12 Ash cutting	28
3.13 한다취성	29
3.14 Bending 가공불량	30
3.15 재료결합	31
3.16 재질결합	33
4. 맺 음 말	34

1. 머릿말

현재 발전설비의 기술동향은 고성능화의 요구에 따라 대형화, 고효율화로 되어 사용조건이 점점 가혹해지고 있다. 이에 따른 최근의 경향은

-효율향상을 위한 대응량화 및 고온고압화

-내구성향상 및 일부설비 교체에 의한 장수명화

-사고예방 및 신뢰성향상에 의한 인적, 경제적 손실방지

를 위한 경향이 뚜렷하며 특히 보일러는 그 특성상 설비가 방대하고 장기사용이 불가피하므로 정지사고예방을 위한 사고원인 분석기술과 경년열회관리 기술이 중요현안으로 대두되고 있다.

본고는 사고원인분석기술의 정립을 위해 1977년 이래 지금까지 국내에서 발생한 보일러 파손사고의 분석 결과를 위주로 사례별 거시적 현상인 손상형태의 중점을 두어 기술한 것이다.

거시적 관찰의 주 조사방법으로

(1) 외판검사

(2) 치수측정

(3) 파구형상 관찰

(4) 내면관찰

등을 이용하였으므로 미시적 관찰에 앞서 원인규명의 방향설정에 도움이 되 있으면 한다.

2. 보일러 파손사고의 분류

보일러 파손사고의 분류는 사고의 종류, 중간현상, 최초원인등에 따라 여러 가지 분류가 가능하나 편의상 표 1과 같이 분류한다

표 1 : 보일러 tube의 파손원인 분류 (형태기준)

<ul style="list-style-type: none"> — Creep 파열 — 부 식 — 균 열 — 마 모 — 기 타 	[단기간 creep
	[장기기간 creep
	[고온부식
	[저온부식
	[알칼리부식
[유기물혼입	
[수소취화	
[기계적피로	
[열피로	
[부식피로	
[한다취성	
[Drain cutting	
[Ash cutting	
(가공불량, 재료결함, 재질결함)	

이들 분류중 손상형태를 보면 몇가지 거시적 특징적 현상을 가지고 있으며 이 특징은 손상원인을 규명하거나 미시적 관찰에 커다란 도움이 된다.

3. 파손사례

파손사례는 손상형태를 근간으로 원인에 근거하여 사례를 열거하고 설명은 일반적현상 및 거시적관찰에 따라 미시적현상의 조사방법을 결정할 수 있는 착안점을 들었다.

3.1 Creep 파열 (creep rupture)

가. 현상

보일러강판은 고온하에서 내부에 정압이 걸리므로 creep 파단이 빈번히 발생하는데 비교적 단시간에 발생하는 경우와 장시간의 가동후 발생하는 경우가 있다. 단시간내에 발생하는 creep 파단은 강판이 정상적인 운전온도보다 훨씬 높은 온도까지 과열될 때 일어난다.

나. 관찰되는 현상 (단시간)

○판외면이 변색되어 있거나 다른 tube 외 색조가 다르다.

*외경이 팽출되어 있다.

○파구부형상이 fish mouth 상으로 선단은 Knife edge

○파구부 부근에 산화철이 부착되어 있다.

-관찰되는 현상 (장시간)

○판외면이 변색되어 있거나 같은 열의 다른 Tube 외 색조가 다르다.

○파구부주위에 미소한 crack 이 있다.

*외경이 팽출되어 있다.

○파구부형상이 fish mouth상으로 선단은 thick edge.

*파구부 부근에 산화철이 부착되어 있다.

다. 착안점

- 금속조직에 의한 온도판정. Aci 변태점이하 또는 그 이상
- 파구부, 결정립의 변형의 크기 (크다 또는 크지않다)
- Larson-Miller 곡선과 대비

라. 원인

- 판내의 유량불충분 (설계상의 순환불량, 伝熱面에 Castable 등의 도포 때문에 순환불균형, 이물폐쇄, drain plugging, 저수위, 管의 상류측에서 누설이 발생했을 때 그 하류에서 유량부족)
- 수열과승(Flame Impingement, 2 차연소, Over Firing)
- 伝熱面熱伝達不良 (내면 Scale 피마, 異物附着)

마. 파손에

- 1) 단기간 creep 파열 (사진 1)
- 2) 장기간 creep 파열 (사진 2)
- 3) 경면열화 creep 파열 (사진 3)

< Creep 파열 >



사진 1. 파열 tube 외관 (단기간)

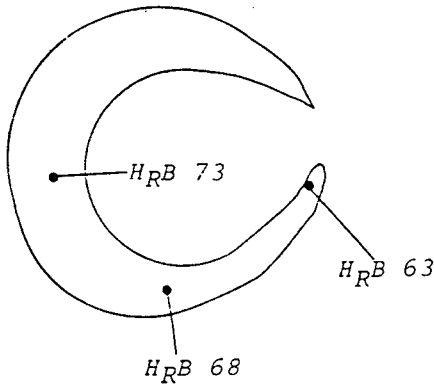


사진 2. 파열 tube 외관 (장기간)

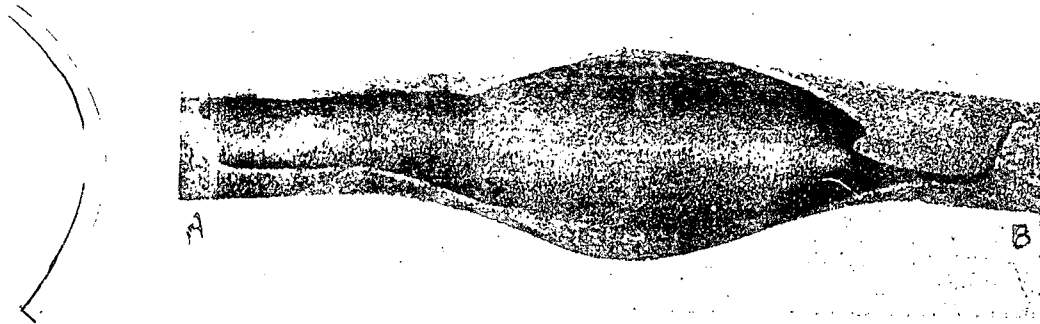


사진 3. 파열 tube 외판 (경년열회)

3.2 고온부식(High Temperature Corrosion)

가. 현상

고온부식은 기름전소 보일러의 (원유, 중유전소용) 피열기판이나 재열기판등 고온의 전열면이 고온의 연소가스나 부착회에 의해서 부식되는 현상이다.

나. 관찰되는 현상

- *판외면은 폼보형상으로 되어있다.
- 외경이 가늘게 되어 있다.
- 두께가 감육되어 있다.
- Fish Mouth상으로 선단은 Knife edge이다.

다. 착안점

- 管 温度는 620 ℃以上
- 외면 Scale에 Na, S, Fe, V등의 함량 (많다)

라. 원인

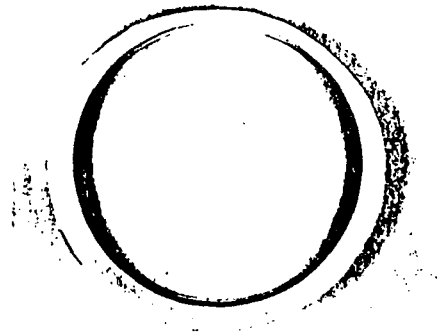
- 판의 외표면온도과승(Vanadium Attack에서는 620 ℃以上.)
- 연료중의 Na, S, V 함유량이 많다.

마. 파손예

< 고온부식 >



A. Tube 외부의 ash deposit



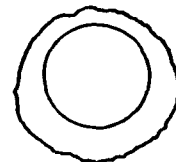
B. Ash corrosion이 일어난 곳의 두께 감육상태



A. 파열 외 관



B. 파열부 단면



C. 고온부식부 단면

사진 4. 고온부식에 의한 파열 tube 외관과 tube 단면

3.3 저온부식(Low temperature corrosion)

가. 현상

연료중에 포함되어 있는 유황분이 연소되어 가스로 변하였다가 절탄기 공기예열기등 출구쪽의 금속표면 온도가로점이하로 된 지역에서 응축하여 금속의 부식을 급격히 증가시키는 현상을 말한다.

나. 관찰되는 현상

○판외면은 변색되어 있지않다.

○외경이 가늘게 되어있다.

○두께가 감육되어 있다.

다. 착안점

○판 온도는 높지 않다.

○외면 Scale 은 습윤하며 S 분이 많다.

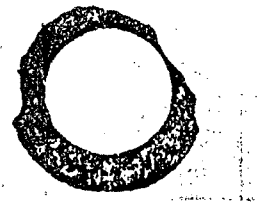
라. 원인

판에 접촉하 연소 gas가 노점이하로 냉각되었을 때 (판의 표면온도가 낮다. 수분축, 외기누입 등에 의함)

마. 파손예

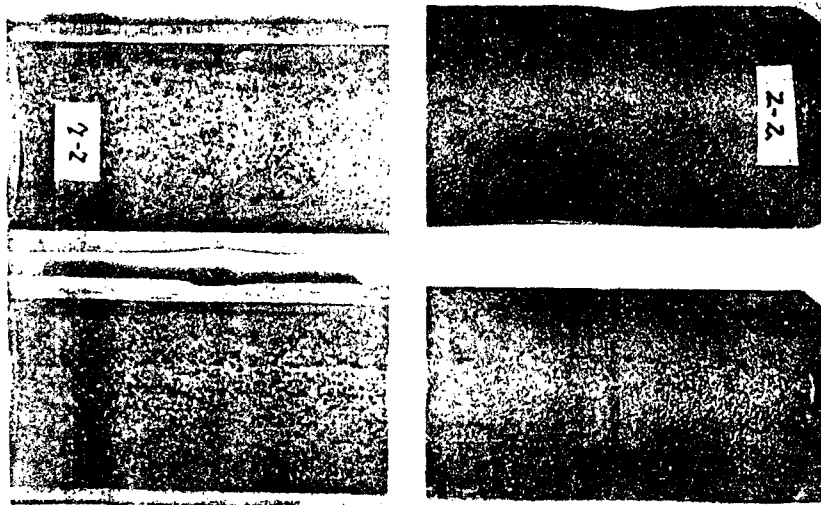


A. Tube 외부의 부식양상



B. 부식부 단면

사진 5. 부산회력 1호기 bottom tube 의 저온부식 양상



A. 내 면

B. 외 면

사진 6. 영남화력 2호기 Eco. tube 부식양상

3.4 알카리부식(Alkali corrosion)

가. 현상

증발판내에서 보일러 수의 판내벽과의 온도차이 즉 경막온도차가 큰 곳이 있을때 이곳에서 비등이 급격하게 일어나면서 보일러 수중에 존재하던 유리된 알카리가 잔사로 농축되어 일어나는 부식현상이다. 특히 pitting 이 일어난 부위, 불량용접에 의한 요철부, 기타 이물질이 있는부분, 판외면에 lug, fin 이 부착된 곳 등의 hot spot에 해당되는 부위에서 증발판내의 물이나 증기와 판벽사이의 온도차가 크기 때문에 일어나기 쉽다. 점식(pitting)이 군집된 현상으로 나타나는 경우가 많다.

나. 관찰되는 현상

○판외면은 변색되어 있지않다.

○외경이 팽출되어 있다.

*Crack 또는 중앙이 협소한 선상파구가 부정형선상이다.

○파구부선단의 두께가 두껍다.

다. 착안점

○수소취화와 같은 양상을 가진다.

○알카리의 농축이 원인이다.

라. 원인

Boiler 수중에 알칼리분이 있고 Heat(Hot) Spot. 나 부식이 발생할 수 있으면 이 부분에 알칼리가 농축되어 부식이 촉진된다. 이때 수소가 발생하여 취화현상이 일어나는 일이 있다.

마. 파손예

<알칼리부식>



A. 알칼리부식 및 수소취화로 인한 파열형태



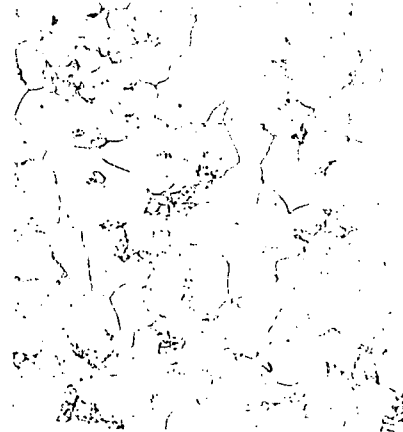
B. 파단부의 형태 및 알칼리부식 범위



알칼리부식부의 조직, 연마상태, × 50



수소취화부의 조직, × 400



정상부의 조직, × 400

사진 7. 서울히력 5호기 W/W tube 의 알카리부식

3.5 유기물혼입

가. 현상

급수에 의해 보일러에 들어가게 되는 Fe, Cu, An, Ni, Al, Ca, Mg, SiO₂ 및 유지성분은 보일러 증발판 내부에서 Scale 을 형성하며, 이것이 운전중 성장한다. Scale 은 열전도가 나쁘며, 보일러 Tube의 관벽온도를 상승시킨다. Scale 의 열전도도는 조성, 물리적성상, 부착상태에 따라 틀리며 연강의 1/15~1/100 가량된다. 발전용 보일러의 Scale 의 주성분은 대부분 Fe O의(cuo) 이며 기타 Condenser tube leak 로 인해 Ca, Mg, Si, 등이 소량있다.

나. 관찰되는 현상

- 판외면은 변색되어 있지않다.
- 외경이 팽출되어 있다.
- 파구가 fish mouth상으로 선단의 두께가 두껍다.

다. 착안점

- 내면 Scale 중 탄소함량이 많다.

라. 원인

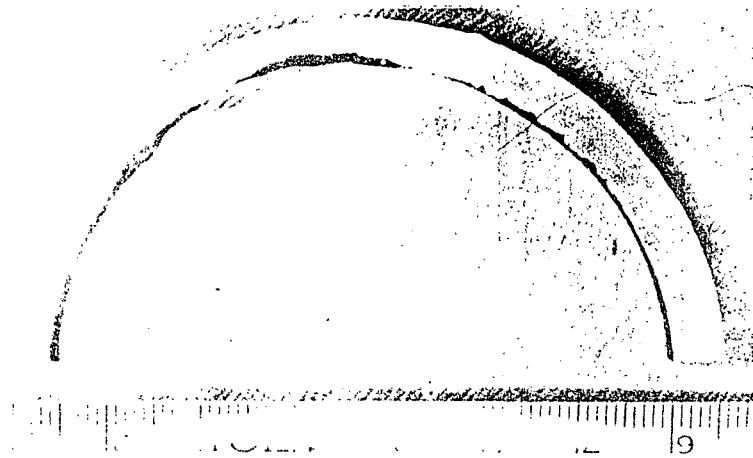
- 원수에 유기물이 있으나 처리장치가 없을 때
- 복수중에 유기물이 있으나 처리되지 않고 합수되었을 때
- Ion 교환수지 입
- 유지부착

마. 파손에

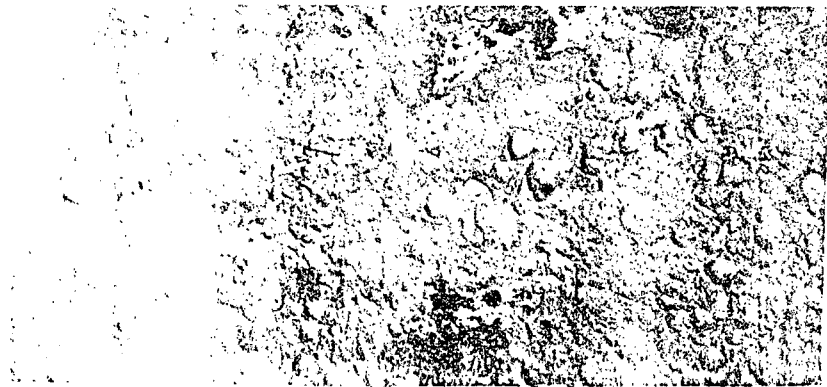
<유기물흔위>



A. Fire side의 부식형태



B. Fire side 부식부의 단면



C. 부식부의 확대사진, $\times 5$

사진 8. 부산 2호기 W/W tube의 부식양상

3.6 수소취화(Hydrogen damage)

가. 현상

강이 수소를 흡수하여 이로인해 미소균열(micro-fissure)이 생기고 재료가 영구적으로 취약해지는 현상

나. 관찰되는 현상

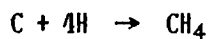
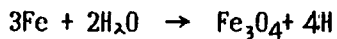
- 판외면이 변색되어 있지 않다.
- 파구부 주변에 미소한 crack 이 있다.
- 외경이 팽출되어 있지 않다.
- 개구부선단의 두께가 두껍다.
- *부식되어 있다.

다. 착안점

파구의 주변은 탈탄되고, Micro Void가 발생되어 있다.

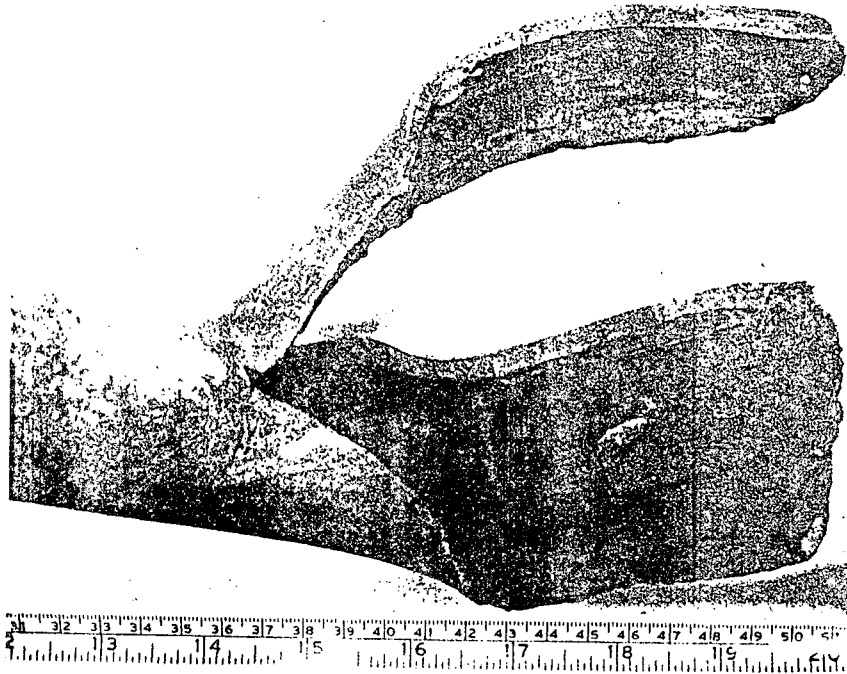
라. 원인

일시취화와 영구취화의 2 종류가 있다고 한다. 일시취화는 가역적이지만 영구취화는 비가역적이다. Back Ring 이음등 돌기나 격간이 있는 부분에 부식이 발생하고 이때문에 발생된 수소가 강중의 탄소와 결합하여 CH₄ (메탄)가 발생하기 때문에 취화한다고 볼수 있지만 취화기구는 정량적으로 분명하지 않다.

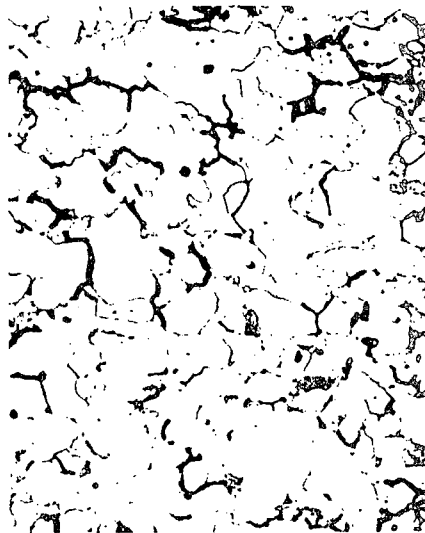


마. 파손예

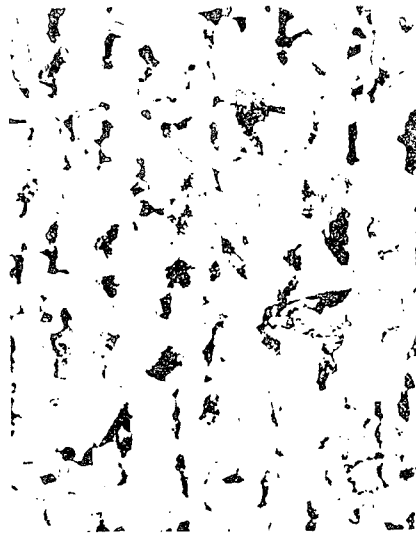
< 수소취화 >



A. 수소취화 파열양상



B. 수소취화부위의 조직, × 400



C. 정상부조직, × 400

사진 9. 인천회력 S/H discharge line의 수소취화 파열

3.7 기계적피로(Mechanical fatigue)

가. 현상

Furnace 나 연소부는 연소가스가 고속으로 통과하며 또한 통로의 변
회도 있기 때문에 이로인해 기주(氣柱)의 진동이나 외류(칼만외류)에 의해
진동이 발생하며 이러한 진동이 보일러 튜브 자체의 고유진동과 일치하여 공
진하는 경우에는 피로균열에 까지 이르게 된다.

나. 관찰되는 현상

○판외면이 변색되어 있지 않다.

○외경이 팽출되어 있지 않다.

○crack 또는 협소한 선상파구 또는 부정형파구가 관축과 거의 평행
이거나 $7 \sim 8^\circ$ 의 경사직선

다. 착안점

○일반적으로 판립 Crack 이다.

○파면은 피로파면(Striation이 있다)을 나타낸다.

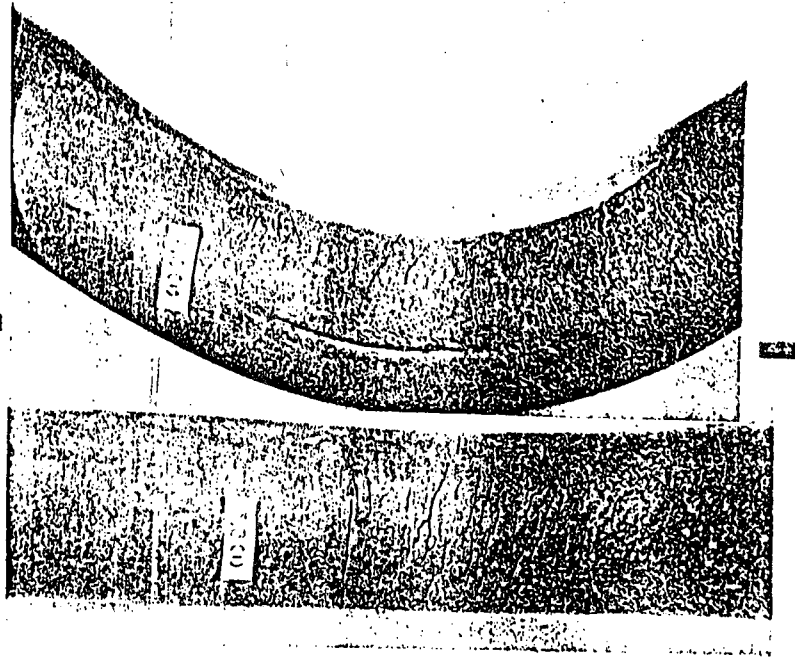
라. 원인

진동, 요동에 의해 발생한다.

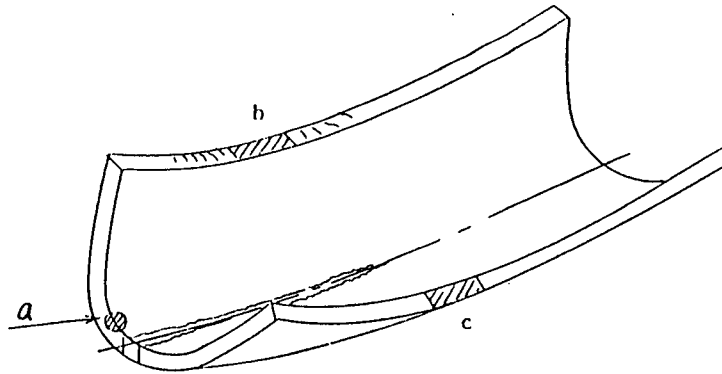
연소관통부, 판교차부등으로 열팽창을 구속하고 이것이 반복되었을 때
발생한다.

마. 파손예

< 기계적 피로 >



A. 사고 tube 의 외판



B. 위치 a, main crack입점부의 균열형상 (X 50)

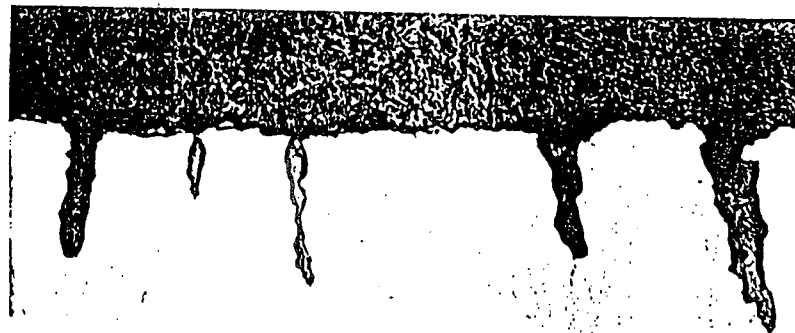


사진 11. 기계적 피로

3.8 열피로(Thermal fatigue)

가. 현상

보일러판은 기동정지 및 가동중의 온도변화에 의해 길이 방향 및 두께방향으로 팽창, 수축을 일으키게 된다. 특히 증발판과 같이 연소가스와 직접 접촉되는 부분은 다른 부위보다 온도가 높아 양자의 온도차에 의해 열응력을 발생시키기 쉽다.

열팽창구속에 의한 피로균열이 발생하기 쉬운곳은 보벽에 casing, wind-box의 같은 구조물이 취부되어 있을 때 이 구조물과 판사이에 온도차가 커서, 기동정지의 반복으로 열응력에 의한 피로파괴가 일어나기 쉽다.

이 경우는 대개 저 cycle 열피로이며 급격한 기동정지의 경우는 수회의 반복으로 사고가 발생한다.

나. 관찰되는 현상

- 판외면이 변색되어 있지 않다.
- 외경이 팽출되어 있지 않다.
- Crack 또는 협소한 선상파구가 판축에 거의 직각이다.
- 파구부 선단의 두께가 두껍다.

다. 착안점

○Crack 중에 산화생성물이 충전되어 있고 그 중앙에 Crack 이 있다

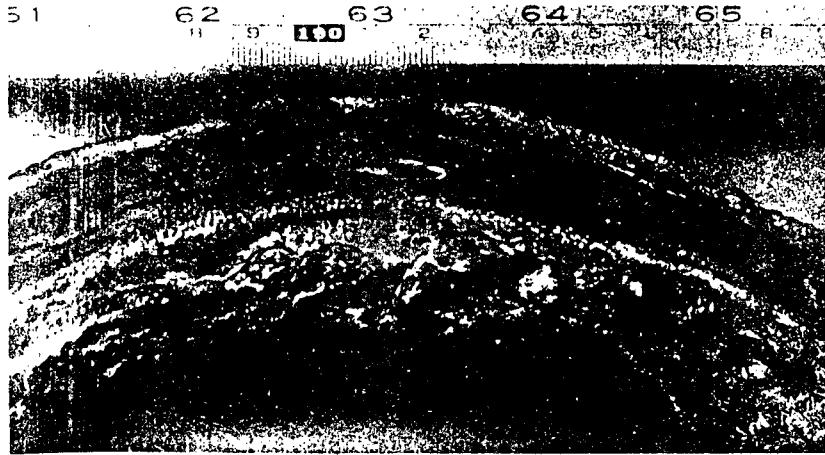
라. 원인

- 판의 동일단면에서 온도차가 있을 때
 - 다른 병열판과의 사이에 온도차가 있을때
 - 다른설비의 판이 병열로 상하, 교정되어 취부되어 있을때
- 등으로 온도의 반복이 있다.

이들이 급격하면 열충격이 된다. 부식피로의 일종이라 말할수 있다.

마. 파손에

< 열피로 (열응력) >



A. 열응력에 의한 피로균열 형태



B. 피로균열부의 단면



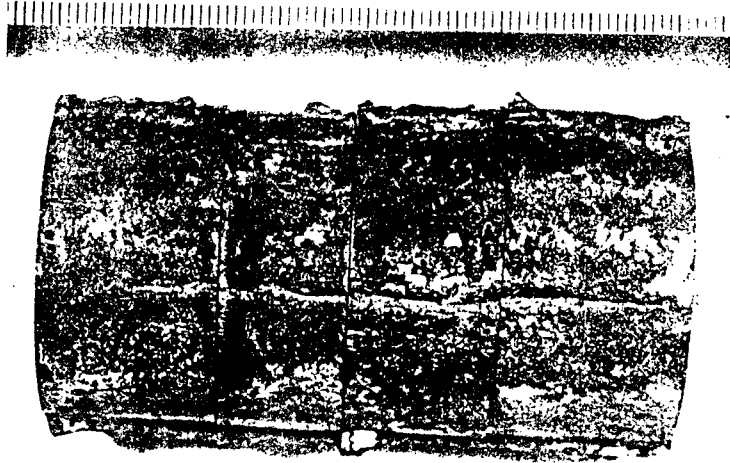
C. 균열부의 조직, × 400



D. 피로균열 양상

사진 11. 울산 1호가 Cage wall tube의 열응력에 의한 피로균열 양상

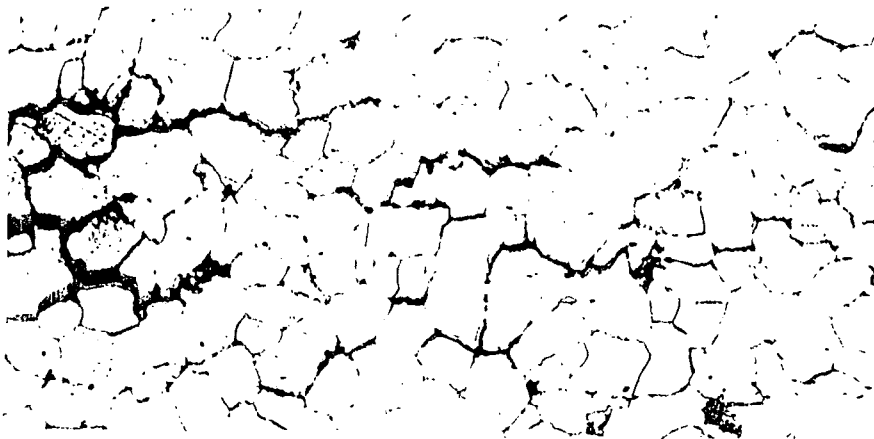
< 열피로 (열팽창구속) >



A. 균열 tube 외관



B. 균열 횡단면 Water side의 micro crack.



C. Main Crack 주위의 표면조직, $\times 400$

사진 12. 울산 1호기의 열팽창 구속에 의한 피로균열사고 양상

3.9 부식피로(Corrosion fatigue)

가. 현상

반복응력과 부식분위기가 복합적으로 작용할때 발생하는 균열로 균열 부위에는 부식생성물이 부착되어 있다.

나. 관찰되는 현상

○판외면이 변색되어 있지 않다.

○외경이 팽출되어 있지 않다.

○Crack 또는 중앙에 협소한 선상파구가 판축과 거의 직각이다.

*부식되어 있다.

다. 착안점

○열피로와 유사하다.

○판벽온도는 상승되어 있지 않다.

○부식되어 있다.

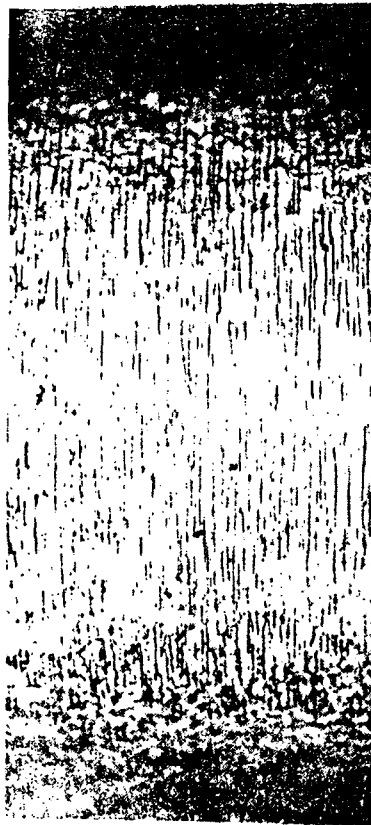
○응력은 Crack 에 직각이다.

라. 원인

○Boiler 급수중이나 연소 gas와 같은 분위기중에 부식인자가 있고
반복응력이 작용했을때 (급수관의 지지가 부적당하여 응력집중이
발생했을때 등)

마. 파손예

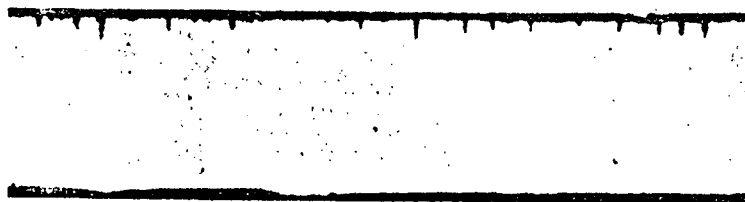
< 부식피로 >



A. Tube 외부표면의 균열



B. 균열의 진행양상



C. Tube 외벽의 평행한 균열

사진 13. 부식피로의 양상

3.10 응력부식균열(Stress Corrosion Crack)

가. 현상

응력과 부식분위기가 함께 작용하여 발생하며 부식분위기는 특정재료에 대하여 예민하게 작용한다. 예로서 스텐레스강과 Cl이온 구리와 이산화황, 탄소강의 경우는 알칼리계통의 부식분위기에서 발생한다.

고온고압보일러의 경우는 피열기관 및 재열기관으로 스텐레스강이 사용되므로 응력부식균열의 발생가능성이 있다. 부식의 특징은 먼저 점식(pitting corrosion)이 생기고 이곳이 기점이 되어 균열이 수직상으로 가지를 치면서 진행되는 것이 일반적이다.

나. 관찰되는 현상

○판외면이 변색되어 있지 않다.

○외경이 팽출되어 있지 않다.

*crack 또는 중앙에 협소한 선상파구가 부정형 선상이다.

○파구부 선단의 두께가 두껍다.

다. 착안점

○Crack 은 수직상으로 되어 있다.

○Scale 에 부식매체가 있다.

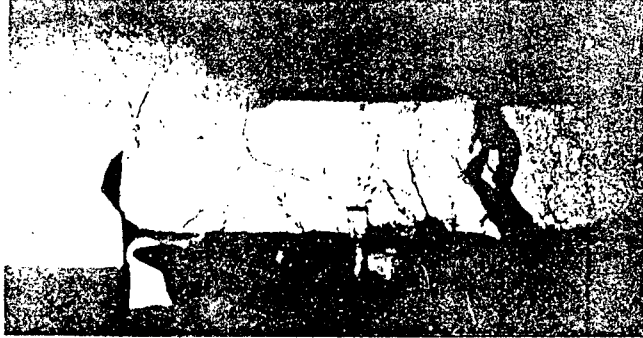
○Austenite Stainless 와 황동에 많다.

라. 원인

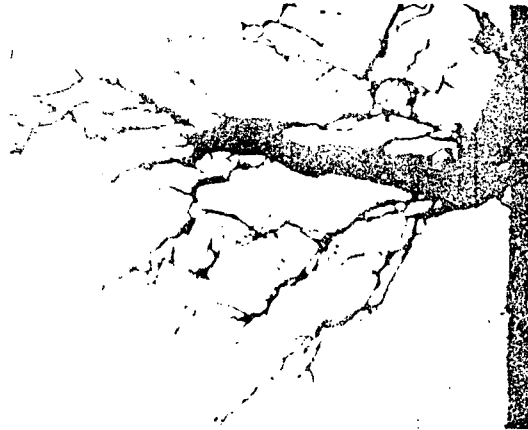
SUS 판에서 발생하기 쉬지만 순금속이외의 어떤 재료에서도 발생한다
부식매체(SUS에는 Cl , 탄소동에는 NaOH 수용액등) 수분, 산소, 응력,
임계치는 일정하지 않다.

마. 파손에

< 응력부식균열 >



A. 스테레스강 용접부 응력 부식 균열양상



B. 응력부식에 의한 Crack의 branching 현상, $\times 100$



C. 사진B의 확대사진, $\times 400$

사진 14. Stress Corrosion Cracking 의 양상

3.11 Drain cutting

가. 현상

Soot blower 의 drain 이나 또는 증발판의 사고로 분출되는 액체상태의 매체에 의해 강판이 마모되는 현상을 말한다.

나. 관찰되는 현상

*판외면이 변색되어 있거나 같은 열의 다른 tube의 색조가 다르다

○외경이 가늘게 되어 있다. (두께가 감속)

○파구가 fish mouth상으로 선단은 knife edge 이다.

○두꺼운 Scale 이 부착되어 있다.

*부드러운 Scale 이 부착되어 있다.

다. 착안점

○파구부 이외의 내경은 변화가 없다.

○외면에 Cutting 이 발생되어 있다.

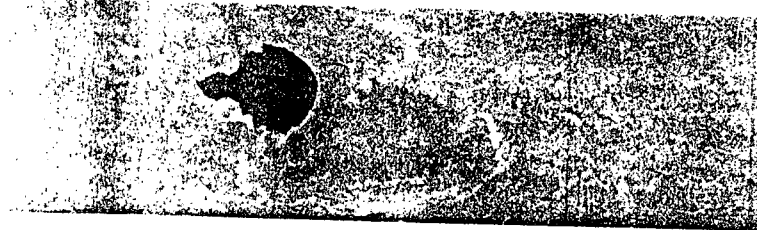
라. 원인

○Soot Blower , 주위에서 발생하기 쉽다.

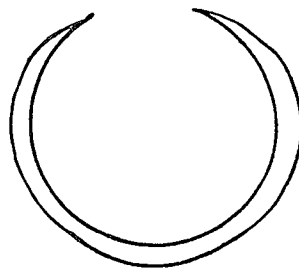
○drain 배수불충분

○Soot Blower 위치불량등

마. 파손예



A. Pinhole 사고양상



B. Pinhole 부 단면의 마모상태

사진 15. Pinhole 발생 tube외관 및 Pinhole 부 단면

3.12 Ash cutting

가. 현상

Ash cutting 은 연소가스중에 포함되어 있는 fly ash 에 의한 마모를 말한다. 기름전소보일러에서는 심하지 않으나 석탄연소보일러 특히 우리나라와 같이 저질탄을 사용하는 경우 심하다. Ash cutting (마모) 의 정도는 연소가스중의 회분함량, 연소가스의 유동속도에 크게 좌우되며 일반적으로 가스 속도가 10m/sec, 이상이면 ash cutting 이 일어날 가능성이 있다.

나. 관찰되는 현상

- *관외면이 변색되어 있거나 같은 열의 다른 tube의 색조가 다르다
- 외경이 가늘게 되어 있다. (두께가 감옥)
- 파구가 fish mouth상으로 선단이 예리한 knife edge 이다.

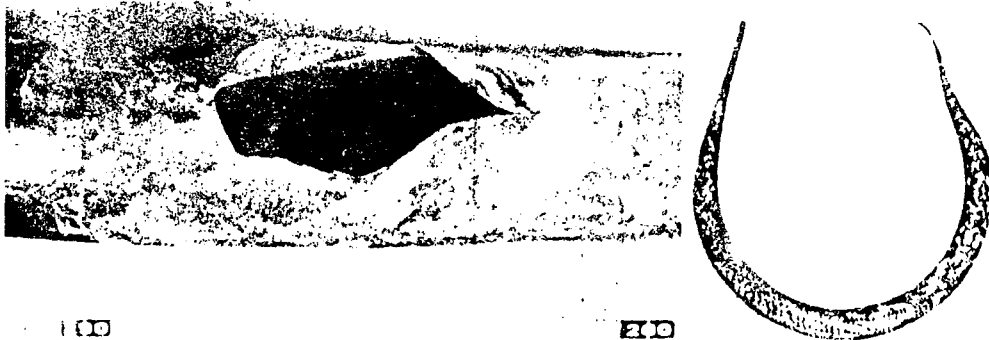
다. 착안점

Drain cutting 과 같으나 상황 (발생부가 Soot blower 의 영향권이 아님) 따라 drain cutting 과 구별할 수 있다.

라. 원인

- 석탄연소 Boiler에서 발생한다.
- Gas 유로가 좁아 gas 유속이 커졌을 때(10m/sec 이상)
- Soot Blower 외 판이 가까울 때
- Soot Blower 분사압력이 높을 때
- 석탄성상이 나쁠 때 (저카토리, 회분이 많은 등)

마. 피손에



A. 파열 tube 외관

B. 파단면

사진 16 Ash cutting

3.13 한다 (半田) 취성

가. 현상

헨더취성은 Liquid metal embrittlement현상의 하나로 Liquid copper 가 Steel 의 입계를 따라 입계균열을 발생시키는 현상이다.

나. 관찰되는 현상

- 판외면이 변색되어 있지 않다.
- 외경이 팽출이 없다.
- Crack 또는 증앙이 협소한 선상파구가 부정형 선상이다.
- 개구부 선단의 두께가 두껍다.
- *동미막이 있다.

다. 착안점

입계를 따라 Crack 이 진행되어 있고 동(Cu)분이 침투되어 있다.

라. 원인

판의 가열굽힘 (달구어 Bending 시키는 것) 가공이나 용접중에 Cu가 혼입했을 때로, 급수중에 Cu가 있어 이것이 판 에 부착되어 가열됐을 경우이다.

마. 파손예



사진 17. 헨더취성, X 200

3.14 Bending 가공 불량

가. 현상

Tube의 bending가공시 가열온도가 적정치않거나 기타 bending 기술의 부족으로 가공후 tube의 원주방향으로 균열이 발생하는 일이 있다.

나. 관찰되는 현상

○판외면이 변색되어 있지 않다.

○외경이 팽출이 되어 있지않다.

○Crack 또는 중앙이 협소한 선상파구가 판축과 거의 직각이다.

다. 착안점

○파면은 연성파면이 많다.

○Crack 부근의 형상 정도에 변화가 있는 일이 있다.

라. 원인

○Core 금구불량

○가공시 온도부적 (Bending 수정포함)

마. 파손에

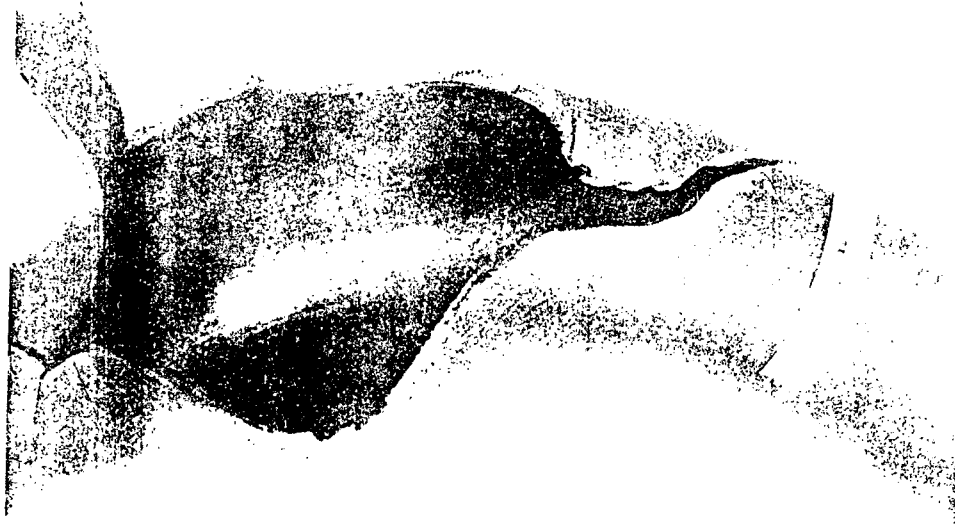


사진 18. Bending 가공 불량

3.15 재료결함

가. 현상

강판소재에 편석과 비금속개재물이 다량 존재하여, 국목가공이나 용접작업시 이 부분이 응력집중이 생겨 균열이 발생하는 경우가 있다. 즉 소재 자체에 기인하는 균열인데 이러한 경우는 조립후 수압시험중에 또는 운전초기에 발견되는 것이 보통이다.

나. 관찰되는 현상

○판외면이 변색되어 있지 않다.

○외경이 팽출되어 있지 않다.

○Crack 또는 협소한 선상파구가 판축과 거의 평행이거나 $7 \sim 8^\circ$ 의 경사직선이다.

○파구부 선단의 두께가 두껍다.

○파구전후에 재료결함이 있다.

다. 착안점

○파면은 대부분은 연성파면 (Dimple Pattern이다. 판립 Crack이 많다)이다.

○파면에 잠재결함의 착색변해 있는 일이 있다.

라. 원인

○강판(tube)에 발생한 흠

마. 파손에

재료결합



사진 19. 용착금속부의 균열

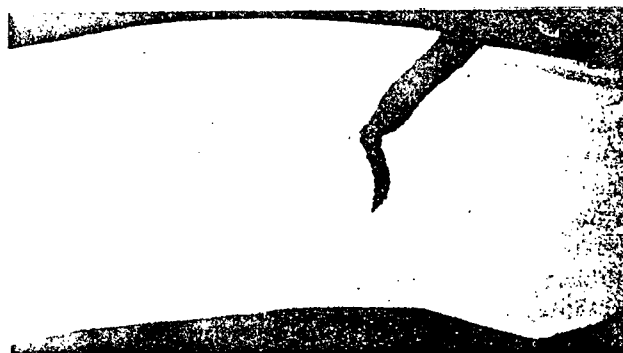


사진 20. 용접 열영향부의 균열

3.16 재질결함

가. 현상

재료의 재질이 규격에 미달하거나 또는 외관상으로 유사한 tube를 잘못 시공하여 creep 강도 부족으로 파열사고가 발생한다.

나. 관찰되는 현상

○판외면이 변색되어 있지 않다.

○외경이 팽출되어 있지 않다.

○파구형상이 fish mouth상으로 선단에 Knife edge이다.

다. 착안점

○결함부근에 탈탄현상을 동반한다.

○각성분 원소비율을 규격과 대비한다.

라. 원인

○자재관리 불량

○시공감독 소홀

4. 맺음말

지금까지 보일러 tube 에서 발생하는 각종 파괴사고를 거시적 관찰에 주안점을 두어 사례별로 원인을 추정하여 보았다.

국내 화력발전소에서 70년대에 많은 파손사고가 발생하여 그때마다 파손사고의 원인을 조사하여 관련자에게 넓게 보급한 결과 보일러 tube의 파손사고를 예방할 수 있었으며 이를 바탕으로 수명예측연구를 수행하여 보일러 수명을 연장할 수 있어 기술판리의 새로운 전기를 맞이하였다.

수명평가를 좀더 정확히 하기 위해서는 파손사고분석기술, 수명예측기술 외에 비파괴상태 진단기술을 개발하여 수명평가 기술의 종합적 발전이 수행되어야하므로 이분야의 연구를 계속할 것이다.



그림 1.