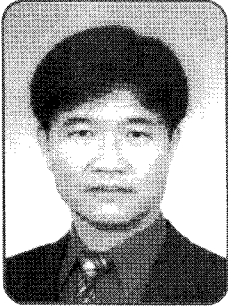


발전설비(HRSG)에서 FAC 진단 및 복구사례



한전 KPS(주) 솔루션센터
수명평가팀장(수석전문원)
용접기술사. 금속재료기술사,
비파괴검사기술사
오병진
Tel : (031)710-4458

HRSG Tube Failure Mechanisms

Compiled from surveys at 2001/2003 International Conferences

Thermal Fatigue	1
FAC	2
Corrosion Fatigue	3
Under-deposit corrosion	4
- Hydrogen Damage	
- Acid Phosphate Corrosion	
- Caustic Gouging	
Pitting	5
Longterm Overheating	No reports, yet!!

[그림 1] HRSG에서 FAC 발생 사고순위

1. FAC(Flow Accelerated Corrosion) 특성

1) FAC의 정의

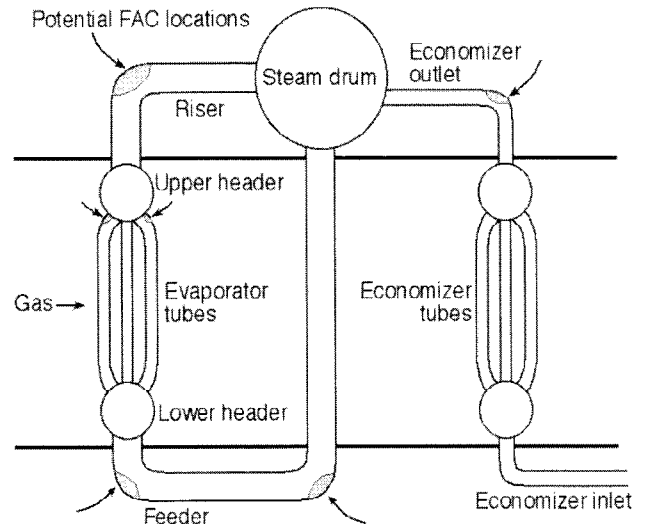
FAC는 유체의 유동특성과 부식환경 등이 함께 작용하여 탄소강이나 저합금강 재질로 설계된 HRSG 절단기 및 증발기의 튜브, 배관 그리고 드럼의 벽 등에 두께 감소를 발생시키는 손상기구이며, 튜브내면 거동을 보면 내면의 보호 산화층이 환원 및 마모되어 제거되고 다시 산화층이 생기는 반응이 반복되면서 두께감소가 발생한다.

2) FAC 발생위치

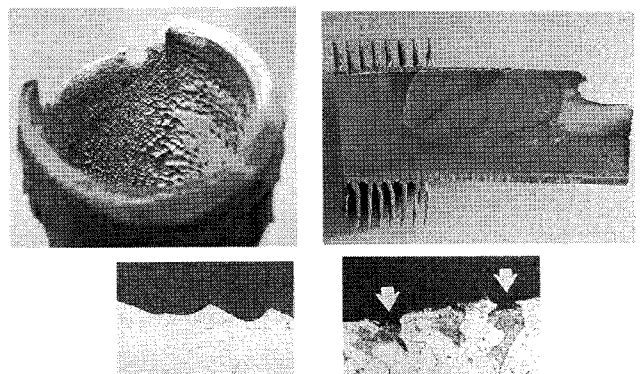
HRSG 설비에서 FAC가 주로 발생하는 위치는

- 급수계통
- 탈기
- 저압, 중압, 고압 Economizer Tubes
- 저압 Evaporator Tubes
- Economizer Inlet Header 연결 배관
- Economizer Inlet Header 튜브
- LP Drum 내부
- FAC은 유체의 온도와 유동에 아주 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 FAC는 유체온도 100~250℃ 범위에서 발생하며 약 150℃에서 최대가 되며, 또한 유동의 방향이 바뀌는 부위에서 진행속도가 급격하게 증가된다.

이러한 조건을 검토할 때 HRSG에서는 주로 LP Eva와 LP & HP Eco 부위에서 주로 발생하고 있다.



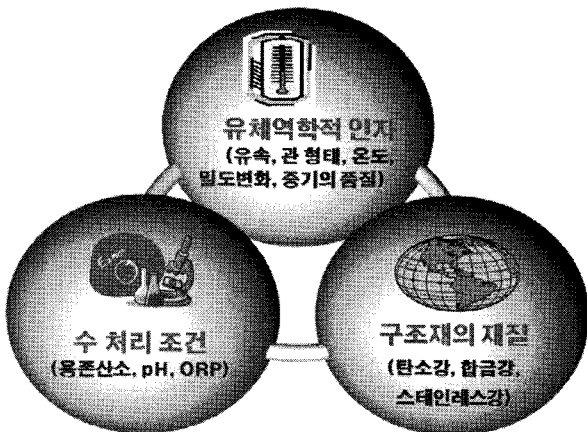
[그림 2] HRSG에서 FAC 발생위치



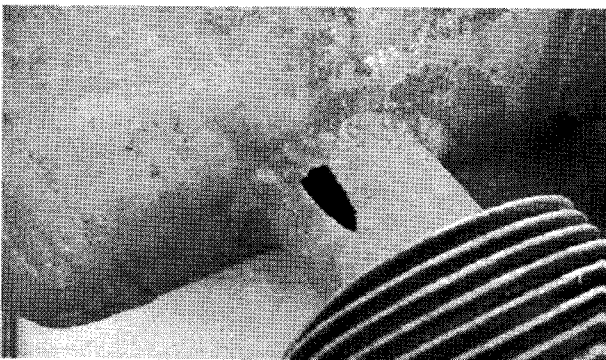
[그림 3] HRSG LP Eva에서 FAC에 의한 손상사례(Source : EPRI)

3) 발생요인

- FAC은 여러 가지 인자(수처리, 온도, 유속, 유동 조건, 재질, 증기의 품질)에 영향을 받는 현상임.
- ORP : ORP(Oxidation Reduction Potential, 산화환원전위)가 낮을수록 튜브 표면 산화보호층의 용해 및 제거가 쉽게 발생하므로 FAC 현상이 가속됨.
- pH : pH는 FAC에 영향을 미치는 두번째 중요 인자로 저 pH에서 FAC발생률이 증가되며 pH가 증가하면 부식과 FAC 현상이 감소된다. 그러므로 pH를 7.0이하로 유지하면 안 되고 pH 9.3~9.6정도를 유지해야 함.
- 급수의 온도 : 100~250°C 주변에서 FAC현상이 주로 발생하며, 약 150°C 주변에서 가장 심하게 진행됨.
- 유속 : FAC 발생에 민감한 변수로서 일반적으로 유속이 증가하면 FAC 현상도 증가함.
- 수처리 조건
 - 금속자체는 매우 불안정한 상태이므로 대기와 접촉하면 산소와 급속한 반응에 의하여 안정한 상태의 표면 보호층(Fe₃O₄)을 형성함. 이러한 표면 보호층은 부동태 피막으로 작용하여 금속



[그림 4] FAC 발생요인도

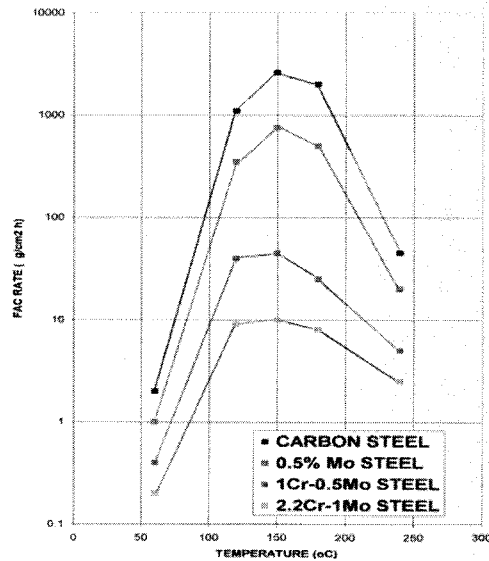


[그림 5] FAC 발생에 의한 튜브손상(예)

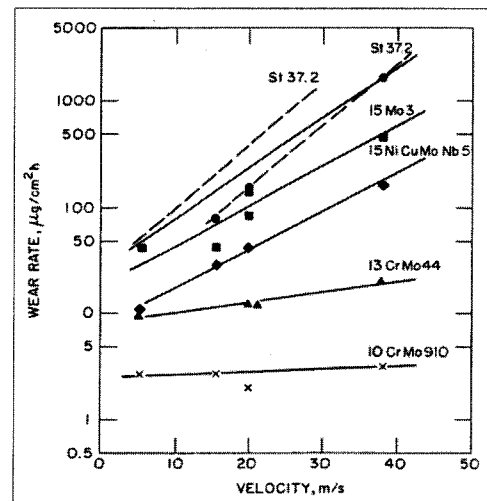
의 부식속도를 크게 저하시키는 역할을 함.

- 발전설비에서 Water 접촉 튜브의 표면은 전회 발생처리(All Volatile Treatment : AVT)인 경우 다공성의 마그네타이트(Fe₃O₄)가 생성되고, 산소처리 (Oxygenated Treatment : OT)의 경우에는 치밀한 Hematite (Fe₂O₃)가 생성됨.
- 튜브표면에 생성된 Magnetite는 수질의 조건에 따라서 생성과 용해 현상이 반복되면서 균형을 유지하게 됨. 하지만 Magnetite의 용해 및 제거속도가 생성속도보다 높게 되면 FAC에 의한 손상(튜브 두께감소) 발생속도가 증가하게 됨.
- 보일러 수처리 조건이 환원성으로 될수록 튜브 표면의 Magnetite는 용해속도가 증가되고

FAC DAMAGE RATES AS A FUNCTION OF WATER TEMPERATURE OF A VARIETY OF STEELS. pH = 7, FLOW RATE = 35 m/sec.



[그림 6] 유체온도에 따른 FAC 마모율



[그림 7] 유속변화에 따른 재질별 마모율 변화

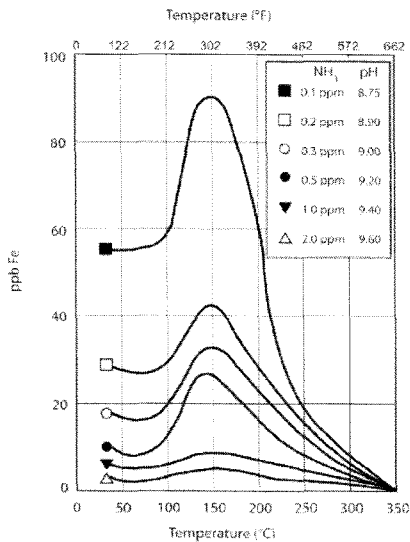
CPH입구 Header Stub 튜브와 같이 와류가 발생하기 쉬운 부위에서는 Magnetite의 제거와 모재의 Fe용출이 급격하게 발생됨.

- EPRI (Boiler Tube Failures : Theory and Practice) 조건이 다음과 같이 환원성일 경우에 FAC 손상이 심하게 발생하는 것으로 되어 있음.

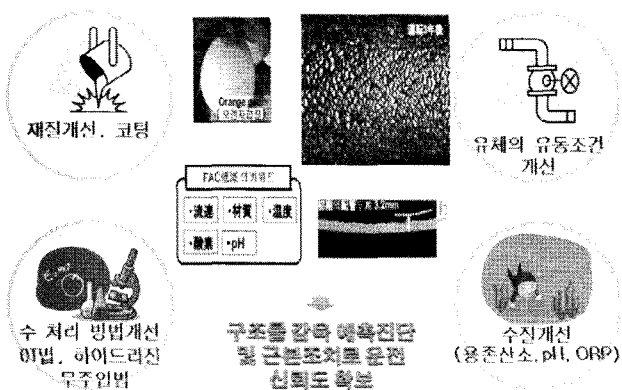
- CPH 입구 O2 농도 : \ll 1 ppb
- CPH 입구 N2H2 농도 : \gg 20ppb
- CPH 입구 ORP : \ll -300 mV

○ 형상 : 구조물의 조직, 진원도, Backing Ring 등 유속이 증가하거나 유동 방향이 바뀌는 형상에서 유체흐름이 난류가 발생하면 FAC 현상이 가속됨.

○ 재질 : 탄소강에서 주로 발생하고 있으며, Cr, Cu, Mo이 첨가된 합금강은 표면에 난용성 Spinel Oxide(MoFe2O4)가 생성되어 FAC 발생속도를 현격하게 저하시킴.



[그림 8] pH와 암모니아 농도에 따른 마그네타이트 용해도



[그림 9] FAC 방지대책

4) FAC 방지대책

□ CPH입구 O2 농도 적정 유지

- 하이드라진 주입량을 조정하여 O2농도를 5~7ppb 정도로 유지할 것을 추천함. (AVT 수처리 용존산소 기준 : 7ppb 이하)
- CPH입구 O2농도가 증가하게 되면 급수는 환원성 분위기가 완화되어 Pre Boiler 및 CPH Tube에서 Magnetite 용해 및 Fe이온의 용출이 감소됨.

□ 수처리방법 개선

- 전회발성처리(AVT)와 산소처리(OT) 방법 중 산소 처리는 금속표면에 치밀한 산화피막(Hematite)을 형성하여 부동태영역에 머물게 함으로서 수중에 철이온의 용출을 최소화하며 증발관의 오염속도를 저하시킴. 따라서 FAC 방지를 위하여 OT법이나 하이드라진 무주입 수처리 방법으로 개선을 검토하기 바람.

□ 재질 개선

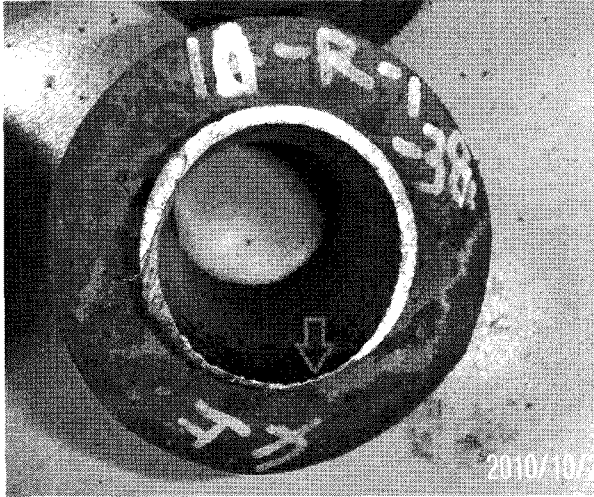
- Cr이나 Mo 등이 합금으로 첨가되면 튜브 내면에 난용성의 Iron-chromium spinel oxide(FeCr2O4) 또는 Iron-molybdenum spinel oxide (MoFe2O4)가 생성되어 FAC 발생속도는 현격하게 저하됨.
- FAC가 발생된 튜브교체 작업시 SA213 T1(0.5Mo) 또는 T12 (1Cr-0.5Mo), SA213-T11(1.25Cr 0.5Mo)등의 저합금강으로 재질개선을 하면 FAC을 방지하는데 효과가 있음.

2. FAC 진단 및 복구사례

1) 개요

OO발전소 HRSG설비는 가동년수 10년이 경과된 설비로서 진단 시기가 적절 했으며 진단결과 부분적으로 0.3~0.8mm(원재료 두께 2.8~3.2mm) 정도까지 곡관부가 FAC 현상에 의해 감육현상이 발생되었으며 장단기 조치 권고 사항에 대한 후속 작업 여부 판단과 의사결정도 신속하게 진행되 최적의 재질(탄소강→SA213-T11)을 구입하여 짧은 공기 내에 교체 완료하였다. LP Eva, 상부 Header Stub 곡관부(FAC 손상부)튜브에 대해 단관 전량을 교체하였기 때문에 향후 이 부위에 대해서는 Life Time 동안 큰 문제없이 안정적

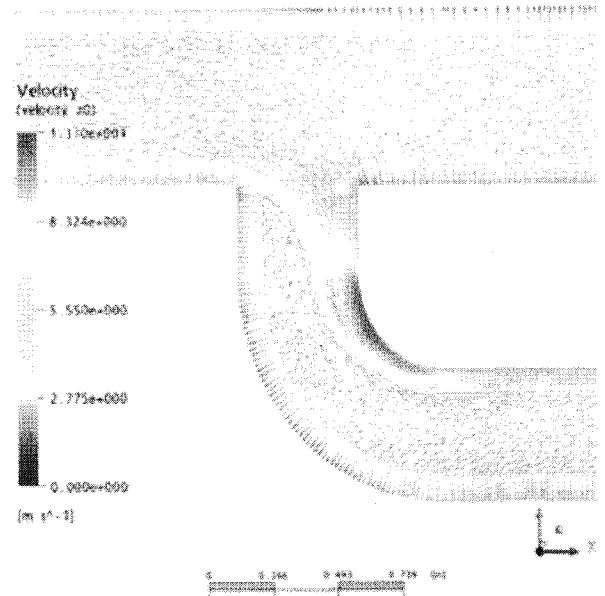
으로 운영될 것으로 판단된다. 부분적으로 절단 보수가 불가한 조건이며 필요시 여러 부분의 Tube 열을 절단 하여야 하는 번거로움과 돌발 복구시 많은 시간과 노력 요구되고, 불특정부위에서 빈발하게 누설 발생시 심각한 경제적 손실을 초래할 수 있었으나 이를 미연에 방지할 수 있었던 좋은 사례라고 할 수 있다.



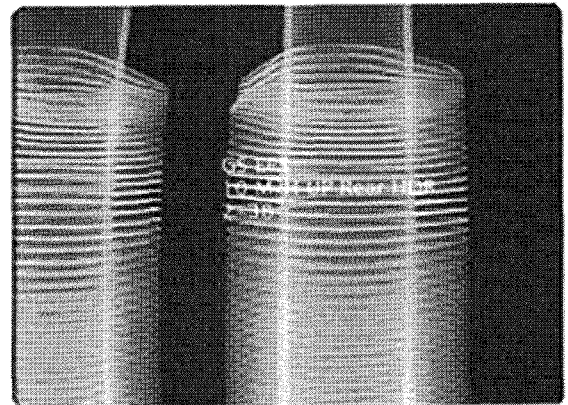
[그림 10] Header Stub FAC에 의한 감육상태



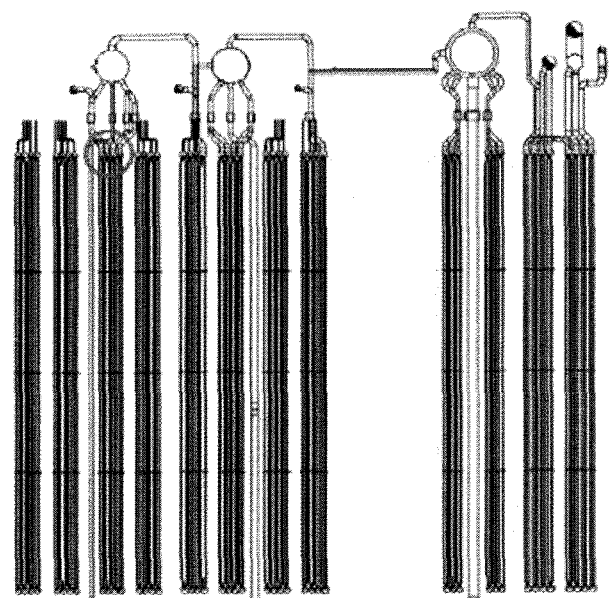
[그림 11] LP Eva. 상부 Header Stub 교체상태



[그림 12] 해석 및 취약개소 선정



[그림 13] 취약개소 Stub Tube CR 촬영



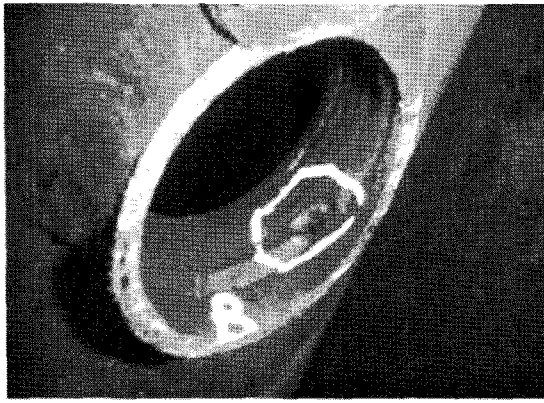
[그림 14] 취약부 선정 비파괴 검사

2) HRSG 진단방법

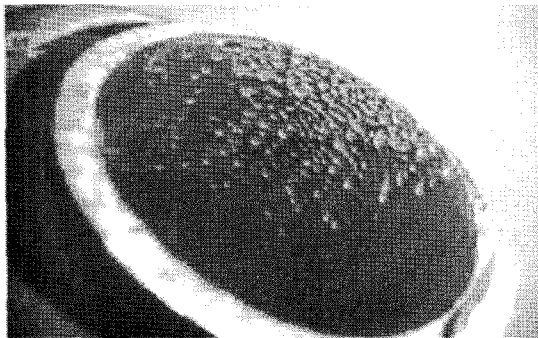
- 온도/재질/운전자료/유동해석 등을 검토하여 취약개소 선정
- 취약개소 두께측정, 내시경검사, Sample 검사, 비파괴 검사(MT, CR)

3) 손상위치 및 감육상태

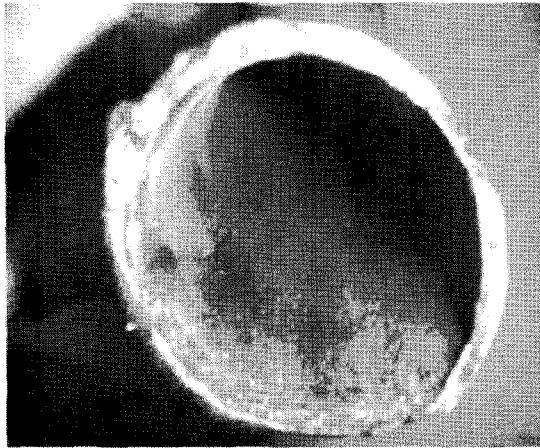
- LP Eva 상, 하부 HDR Stub Tube 곡관부 및 용접부 전 튜브
- 잔존두께 : 2.8 → 0.3~0.8 mm



[그림 15] Header 용접부 용접 Bead 손상



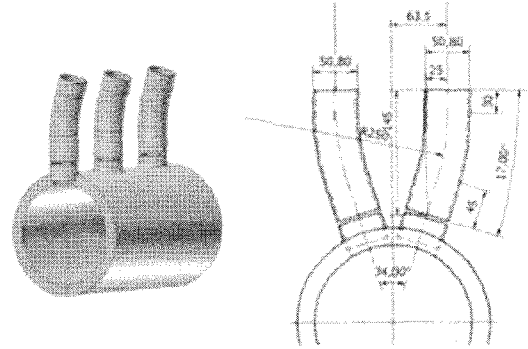
[그림 16] Stub Tube 곡관부 FAC 현상



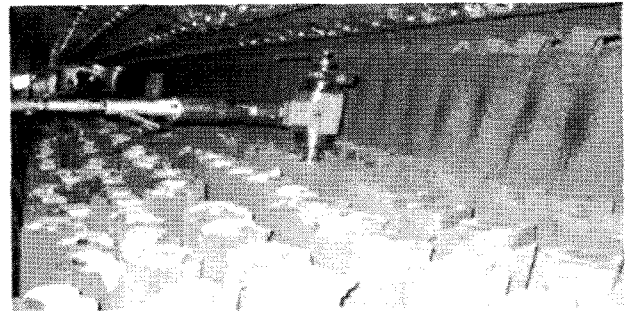
[그림 17] FAC로 인한 두께감소

4) 대책

- FAC에 보다 저항력이 큰 저합금강 SA213-T11으로 단관을 구입 제작하여 LP Eva. 상부 Header에 전면 대하여 교체가 바람직하다.
- 품질확보를 위하여 예열 및 비파괴 시험이 필요하다.
- SA213-T11의 경우 국내 생산이 되지 않기 때문에 원자재는 최소 6개월 전에 자재 발주가 되어야 하며 복구작업 전에 Bending 제작 되어야 한다.



[그림 18] Stub Tube 단관 제작도면 생성



[그림 19] Butt Joint Bevelling

5) 교체 절차

자재 확보가 우선적으로 필요하다.

가. HRSG 정지 및 COOLING

나. 비계설치 & Baffle 제거

다. Header 고정

라. 곡관튜브 & Fin 커팅

마. Butt 용접부 Fim제거 및 Bevelling, Header 용접부 가공

바. 단관길이 조정 및 Bevelling

사. HDR 내부 이물질 제거 및 청소

아. 예열 120°C 이상

자. Tube 용접 (HDR : 5 Layer, Butt Joint : 2 Layer)

차. RT & MT

타. 수압시험

파. Baffle 설치

하. 시운전

6) 의견

HRSG 시운전 이후 8~10년이 되었다면 정밀진단이 필요한시기입니다. 정밀진단 결과 취약개소에 대하여 최적의 설비 개선을 미연에 실시해야만, 설비 수명기간 동안 안정적인 운영을 보장받을 수 있습니다.