

유연운전에 따른 석탄화력보일러 수계통 튜브에서의 이상 유동가속부식(Two-Phase Flow Accelerated Corrosion) 고찰

김상호[†] · 이승민 · 이재홍

한국전력공사 전력연구원 엔지니어링센터, 대전시 유성구 문지로 105
(2024년 4월 05일 접수, 2024년 5월 08일 수정, 2024년 5월 09일 채택)

A Two-Phase Flow Accelerated Corrosion Study on Water Wall Tube of Coal-Fired Boiler According to Flexible Operation

Sang-Ho Kim[†], Seung-Min Lee, and Jae-Hong Lee

Department of Engineering Center, KEPCO Research Institute, Deajeon, Munji-Ro 105, Korea

(Received April 05, 2024; Revised May 08, 2024; Accepted May 09, 2024)

Recently, coal-fired power plants are experiencing many problems that they have never experienced before due to an increase in flexible operation. In particular, a two-phase flow accelerated corrosion on water wall tubes in a boiler has not been detected overseas or domestically. There is no response plan to deal with such corrosion problem either. However, oxide film damage and tube material corrosion due to a two-phase flow accelerated corrosion are being discovered on water wall boiler tubes of domestic coal-fired power plants recently. If this situation is severe, it can cause enormous damage such as tube rupture. Therefore, in this paper, in order to prepare a response plan for a two-phase flow accelerated corrosion on water wall tubes in the future, differences between a two-phase flow accelerated corrosion and a single-phase flow accelerated corrosion were investigated and an example of discovery of a two-phase flow accelerated corrosion on water wall tubes was presented.

Keywords: Two phase flow accelerated corrosion, Flexible operation, Water wall tube, Oxide film, Power plant

1. 서론

에너지 전환 정책에 따라 신재생 에너지 설비용량은 23년 기준 28.9 GW로 급증했다 [1]. 신재생 에너지의 급증은 낮은 전력 수요 시간대에는 전력이 남는 전력 초과 상황이 발생하게 된다. 이러한 상황으로 인해 기저부하를 담당하고 있던 기존 화력발전소는 전력 초과 상황을 해소하기 위해 출력 제어를 수행하고 이를 유연운전(Flexible Operation)이라고 한다. 즉, 화력발전의 유연 운전을 통해 전력 계통의 유연성을 높이고 전력 수급 관리를 원활하게 진행하고 있는 것이다. 신재생 에너지의 발전량이 증가할 경우 화력발전의 발전량을 낮춰야하고 신재생 에너지의 발전량이 감소할 경우 신속하게 화력발전의 발전량을 높여야 하는 것

이다. 유연운전에 따른 발전소의 기동정지횟수는 매해 증가하고 있는 추세이며 특히, 당진발전본부의 경우 기동정지횟수가 2018년 대비 2022년은 4배 이상 증가하였다. 이러한 운전 패턴의 변화로 인해 화력발전소는 과거에 경험해 보지 못한 운전 상황을 맞이하고 있다.

유연운전으로 인한 기동 및 정지와 출력변동 증가로 인해 보일러의 화염 불안정, 전열부 부식 등 문제, 열응력 변화로 인한 주요 부품의 피로, 터빈의 침식등의 문제가 발생할 수 있으며 급복수 계통의 부식생성물의 증가로 보일러 튜브 내 생성된 산화스케일에 영향을 미칠 수 있다.

EPRI에서는 유연운전으로 인해 석탄화력 보일러에서 생기는 손상을 다음과 같이 정리하고 있다 [2].

- Condenser/Feed Water Heater Tube: FAC, Corrosion, Deposition, SCC
- Feed water piping: Corrosion, FAC

[†]Corresponding author: sanghokim@kepcor.co.kr

김상호: 일반연구원, 이승민: 책임연구원, 이재홍: 선임연구원

- Feed water Heater shells and drains: Corrosion, FAC
- Boiler Tube: Corrosion fatigue, UDC, FAC (Eco Inlet), RH pitting
- HRSG Economizer/Ip & LP Evaporator: pH control, Two-Phase FAC

이처럼 EPRI의 경우 유연운전에 따라서 보일러 튜브 내에서 부식으로 이상 유동가속부식(Two-Phase Flow Accelerated Corrosion)을 언급하고 있지 않다. 그러나 국내의 경우 유연운전으로 인하여 석탄화력보일러 수계통(Water Wall) 튜브에서 이상 유동가속부식에 의한 튜브 내 산화스케일 및 튜브 모재의 손상이 발견되어 이에 대해 고찰해 보고자 한다.

2. 단상 및 이상 유동가속부식(Two-Phase Flow Accelerated Corrosion) 특성

2.1 단상 유동가속부식(Single-Phase Flow Accelerated Corrosion)

유동가속부식(FAC)은 튜브 내면에 생성된 산화피막의 용해, 제거 그리고 부식 등의 현상이 복합적으로 작용하는 현상으로 영향인자로 유체 온도, 속도, 수질, 튜브 재질 및 산화환원전위(ORP) 등이 있다. 유체의 온도, pH, 유량 및 재질의 구성은 산화피막의 안정성과 용해도에 지배적인 영향일 미쳐 단상 유동가속부식 발생량에 영향일 미친다. Fig. 1과 Fig. 2, Fig. 3에는 유체 온도, pH, 유량 및 튜브 재질의 Cr 함량에 따른

Table 1. Status of flexible operation of domestic power generation facilities [1]

TYPE		2018	2019	2020	2021	2022
Solar Power (GW)		8.6	12.8	17.8	22.1	26.2
Wind	Output control (Jeju)	15	26	77	64	98
Combined cycle	Start and stop twice a day at Seo In-Cheon CC	36	62	151	273	243
Coal	Start and stop at Dangjin	34	64	77	105	150

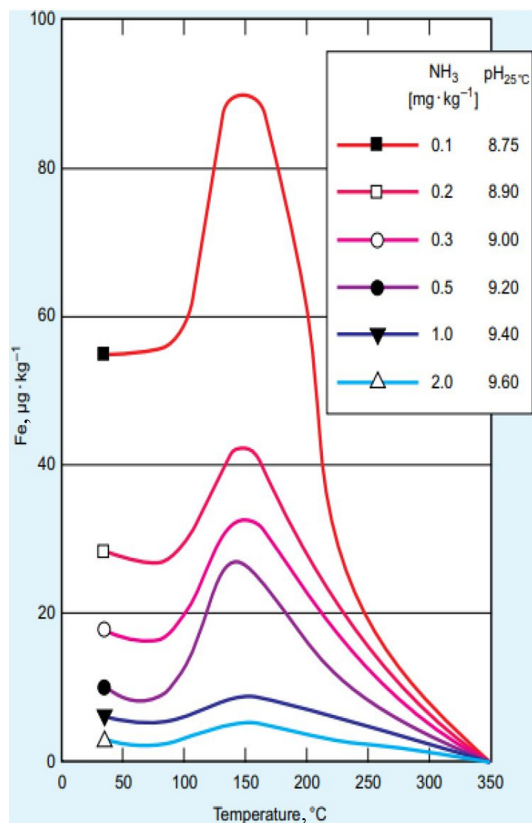


Fig. 1. Effect of temperature and pH (with ammonia) on solubility of magnetite [3]

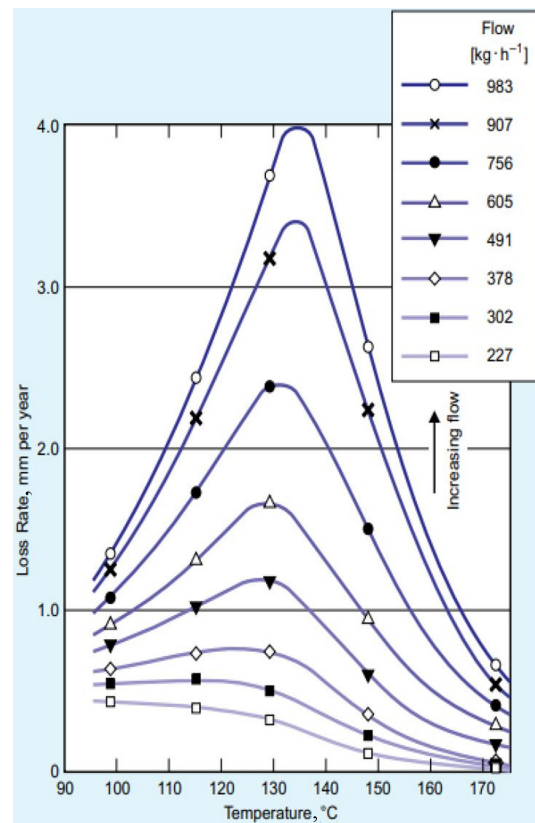


Fig. 2. Effect of temperature and Flow on FAC at pH 9.0 (with ammonia) [3]

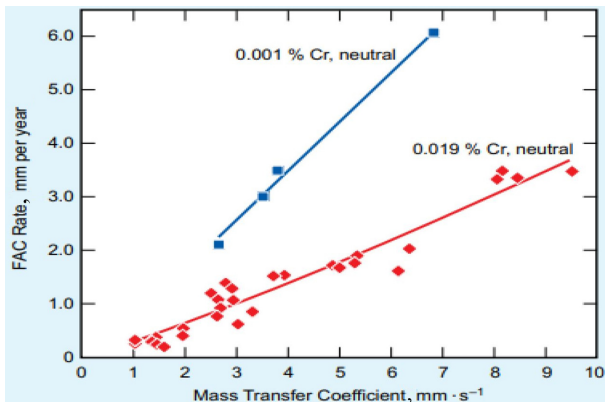


Fig. 3. Effect of chromium content of carbon steel on FAC rate (Neutral water 140 °C) [3]

단상 유동가속부식 발생량을 나타낸다. 이에 따르면 보일러 수 온도인 100 °C ~ 150 °C 범위에서 pH가 낮고 유체 속도가 빠를 때 단상유동 가속의 발생량은 증가하고, 재질에 Cr 함량이 높을수록 감소한다 [3].

단상 유동 가속 부식은 물과 접촉되는 산화스케일 표면에서만 발생하고 증기와 접촉된 부위에서는 발생하지 않는다 [4]. 따라서 기수 분리가 이루어지는 초임계압의 경우 보일러수가 350 °C 이므로 보일러 수계통 튜브에서는 단상 유동가속부식이 발생되기 어렵다. 또한 보일러 수의 수처리 방법이 전회발성전처리(AVT)에서 산소 주입처리(OT)로 변경됨에 따라 산화피막이 용해

도가 높은 마그네타이트(Fe_3O_4)가 아닌 용해도가 낮은 헤마타이트(Fe_2O_3)로 형성되어 단상유동가속부식 발생이 더 어렵게 되었다. Fig. 4에 산화원전위와 마그네타이트, 헤마타이트의 형성 과정을 나타내었다 [5]. 산화환원전위(단위:mV)는 보일러 수의 수처리방법에 따라 달라진다. 산소주입처리(OT)일 경우 용존산소가 높아 산화성분위기가 되어 산화환원 전위는 높아지며 튜브 내면의 산화피막에는 단상 유동가속부식 발생을 억제하는 헤마타이트가 형성된다. 반대로 전회발성전처리(AVT)일 경우 하이드라진(N_2H_4) 함량이 높을수록 용존산소가 제거되어 산화환원전위가 낮은 환원성분위기로 되어 단상 유동가속부식의 발생이 용이한 마그네타이트가 형성되게 된다.

2.2 이상 유동가속부식

이상 유동가속부식은 튜브내에 부식이 발생하는 점과 단상 유동가속부식과 유사 하나 이상 유동가속부식은 액적에 의한 마모가 발생한다는 점에서 차이가 있다. 튜브 내 보일러 수는 튜브 벽 쪽으로 얇은 층을 형성하며 이동하고 증기는 중앙에서 형성되어 보일러 수보다 빠른 속도로 이동한다. 이때 두 상의 속도 차이로 인해 전단력(Shear Force)이 작용하게 된다. 이 전단력이 보일러 수의 표면장력보다 커지게 되면 보일러 수가 증기와 보일러 수의 경계를 뚫고 증기 속으로 들어가 매우 작은 물방울 모양의 액적이 발생하게 된다.

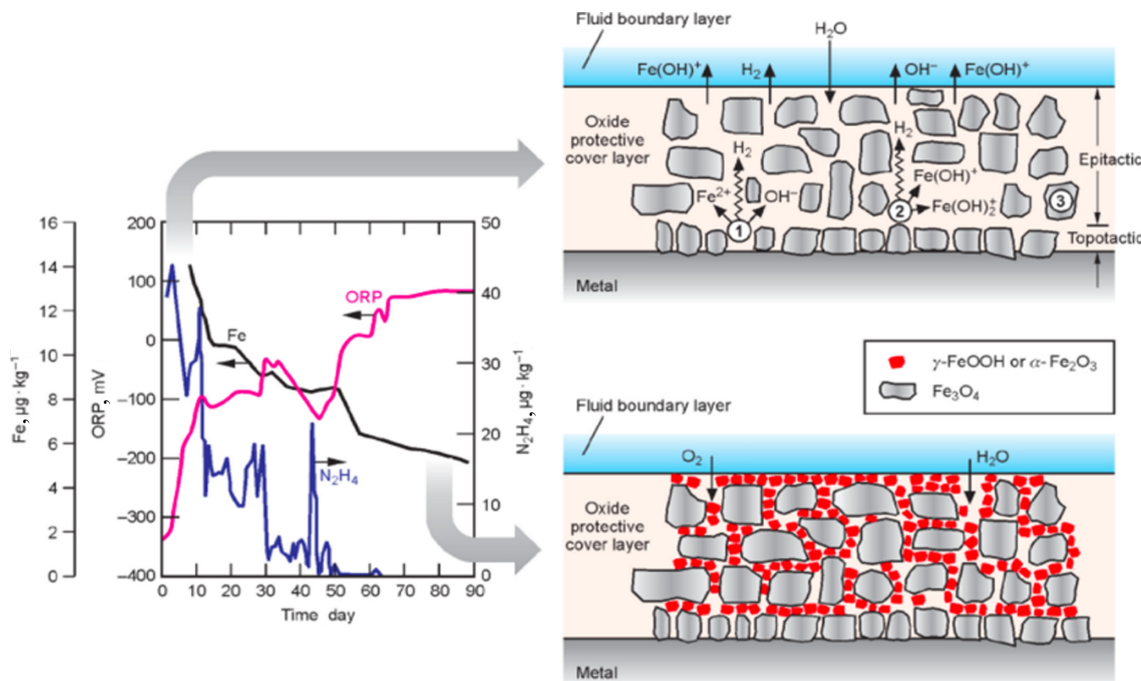


Fig. 4. Oxidation Reduction Potential (ORP) and Oxide Film Fe_3O_4 Dissolution and Fe_2O_3 Formation Process [5]

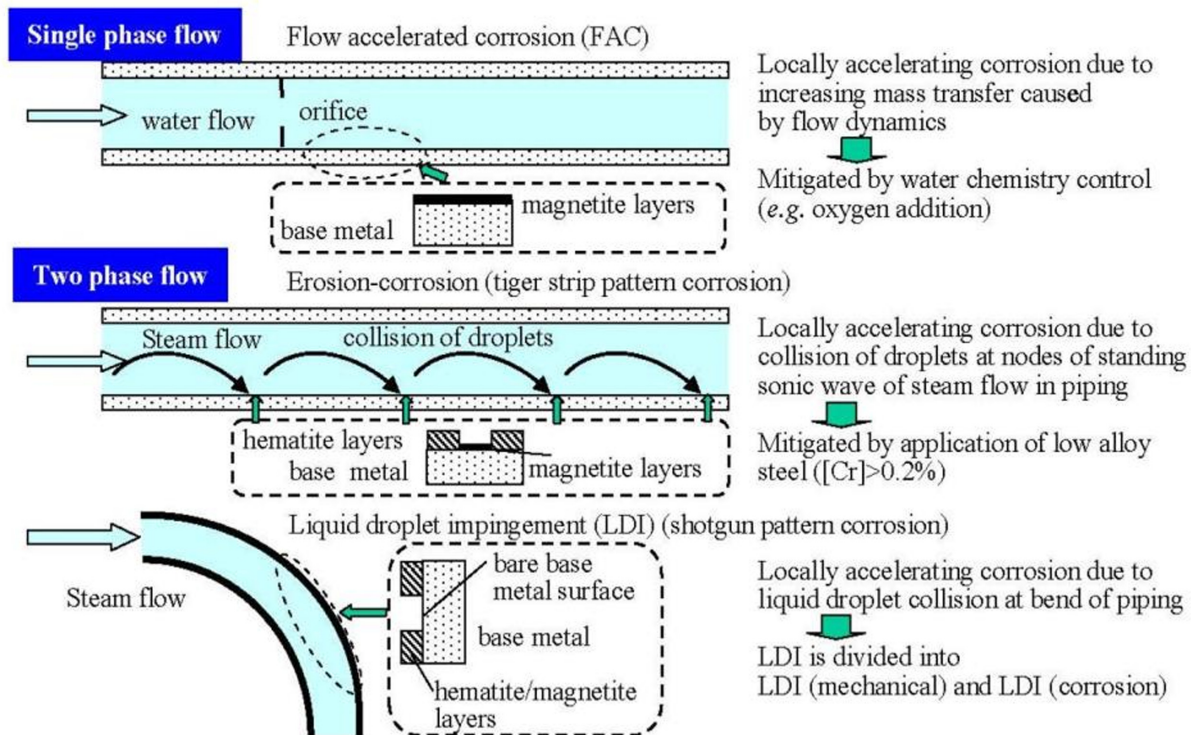


Fig. 5. Oxidation Reduction Potential (ORP) and Oxide Film Fe_3O_4 Dissolution and Fe_2O_3 Formation Process [5]

이 액적은 증기 속에서 가속하게 되고 튜브 표면에 형성되어 있는 산화피막에 부딪혀 산화표면과 튜브 모재에 손상을 입히게 되는 액적충돌침식(Liquid Droplet Impingement)을 발생시키고 튜브 표면에 말발굽 모양의 형태가 발견되며 산화층 피막에는 Tiger Stripe 무늬를 나타낸다 [4]. 발생한 액적의 속도가 매우 빠를 경우 위와 같은 액적충돌침식이 발생하게 되며 액적의 속도가 느릴 경우 일반적인 유동 가속 부식이 일어나는 형태를 보인다. Fig. 5에 단상 유동 가속 부식과 이상 유동 가속 부식을 나타낸다.

이상 유동가속부식은 최대 발생 유체 온도가 단상 유동가속부식과 동일하게 $150^{\circ}C$ 이나 $100^{\circ}C \sim 300^{\circ}C$ 범위에서 발생가능하고 [6] 유체속도가 3 m/s에서 10 m/s 범위에서 발생하는 단상 유동가속부식과 달리 이상 유동가속부식은 30 m/s 까지 발생한다는 특징을 가진다 [7].

3. 손상사례

3.1 개요

보일러 튜브 내면의 산화스케일은 튜브 모재의 부식을 방지하는 산화피막의 역할을 하기도 하지만 과도하게 성장하면 열전도도율을 감소시켜 연료소모량을 증가시키고 튜브 모재의 온도를 상승시켜 튜브파손을 일

으키는 원인이 된다. 따라서 일정한 기준을 넘는 산화스케일의 경우 이를 제거하고 다시 산화피막을 입히는 화학세정을 수행하여야 하고 산화스케일의 부착량 및 성장 등을 일정 주기마다 분석하여야 한다. 최근 산화스케일의 관리 추적 중 많은 보일러 수계통 튜브에서 이상 유동가속부식에 의한 산화스케일의 손상 및 모재 침식이 발견되어 이 중 한 개 호기의 검사결과를 소개하고자 한다.

3.2 검사방법

스케일 추적 관리를 위해 발체한 보일러 수계통 튜브를 내부를 볼 수 있도록 절단하여 스케일 상태를 육안확인하고 전자주사현미경(Phenom Pure모델 - ThermoFisher社)를 사용하여 3000배 확대 분석을 수행하였다. 또한 모재 부식을 확인하기 위해 5% 염산 및 0.5% 부식억제제를 사용하여 $70^{\circ}C$ 에서 3시간동안 튜브 내 스케일을 탈리 시킨 후 전자주사현미경으로 3000배 확대 분석을 수행하였다.

해당 튜브의 재질은 저합금강인 SA213-T12이며 외경 34 mm, 두께 7.2 mm 이다. 수처리 방식은 산소주입처리(OT)를 하고 있다.

탈리된 튜브 내면 스케일량은 스케일 제거 전 후 무게 차이로 계산하고 염산에 용해되어 있는 성분을 유도결합

Table 2. Chemical Composition of SA213_T12 (Unit : %) [8]

Standard	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
ASME	0.05 ~ 0.15	0.50 Max	0.30 ~ 0.61	0.025 Max	0.025 Max	0.80 ~ 1.25	0.44 ~ 0.65
JIS	0.15 Max	0.50 Max	0.30 ~ 0.60	0.035 Max	0.035 Max	0.80 ~ 1.25	0.45 ~ 0.65

Table 3. Chemical Composition of Oxide Scale (Unit : %)

Amount of oxide scale (mg/cm ²)	Cr as Cr ₂ O ₃	Fe as Iron Oxide	Mn as MnO	Mo as Mo ₃ O ₄	Si as SiO ₂	etc
23.68	2.44	96.11	0.73	0.46	0.08	0.18

플라즈마분광광도계(SPECTRO ARCOS모델 - AMETEK社)를 사용하여 각 산화물 형태로 분석하였다.

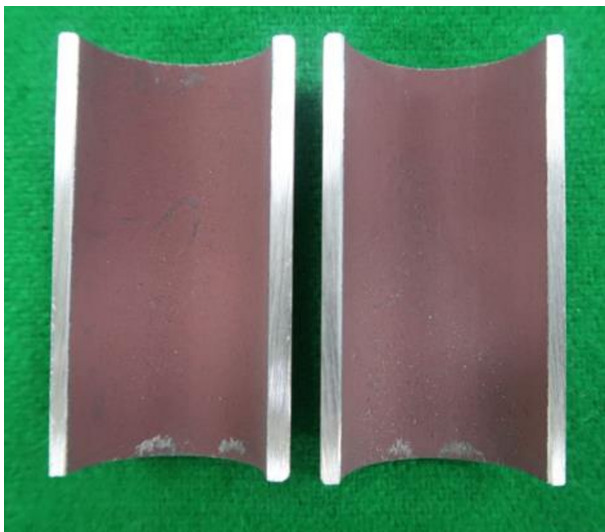
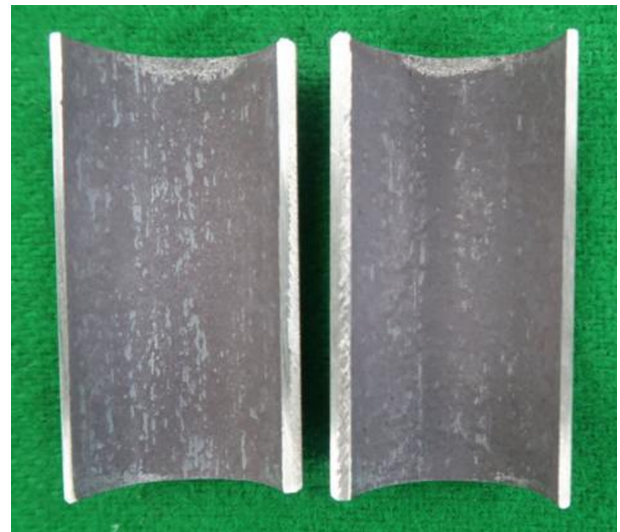
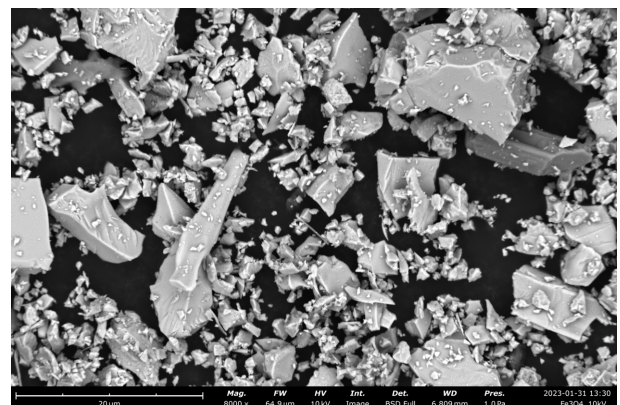
3.2 산화피막 검사 결과

일반적으로 보일러 튜브 내면에 형성된 산화피막의 경우 고르게 형성되어 있으나 해당 튜브의 경우 산화피막에 손상이 발견되었다. Fig. 6에 정상적인 산화피막을 Fig. 7에 손상된 산화피막을 나타내었다.

정상적으로 산화피막을 형성한 튜브의 내면 산화스케일을 전자주사현미경으로 확대하여 보면 산소주입처리의 결과로 각진 모양을 가지고 수 μm 의 크기를 갖는 마그네타이트(Fe_3O_4)와 둥근모양을 가지고 sub μm (1,000 nm 이하)의 크기를 갖는 헤마타이트(Fe_2O_3)가 공존하고 있다. 그러나 이상 유동가속부식으로 인해 산화피막이 상된 튜브의 내면 스케일은 산화피막에 압력이 가해지고 일부 용해된 모습을 볼 수 있다. Fig. 8 및 Fig. 9에 마그네타이트와 헤마타이트 표준시료의 형태를 나타 내었고 Fig. 10과 Fig. 11에 정상적인 산화

피막과 손상된 산화피막을 전자주사 현미경으로 확대한 모습을 나타내었다.

산화피막 모양과 층을 전자주사현미경으로 분석한 결과 움푹파인 형태를 보였으며 Tiger Stripe 무늬가 발생되어 전형적인 이상 유동가속부식에서 나타나는 특

**Fig. 6. Normal Oxide Film on Water Wall Tube****Fig. 7. Damaged Oxide Film on Water Wall Tube****Fig. 8. Magnetite (Fe_3O_4) Standard Sample**

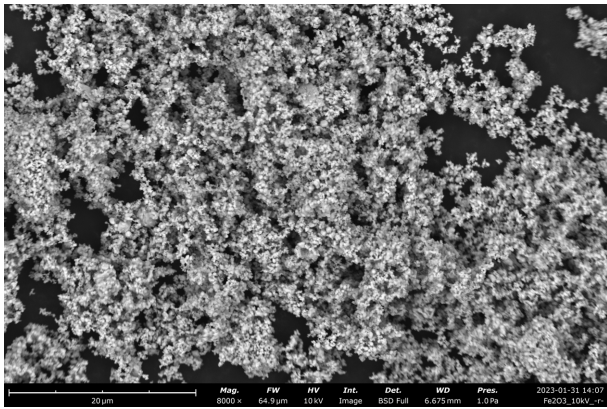


Fig. 9. Hematite (Fe_2O_3) Standard Sample

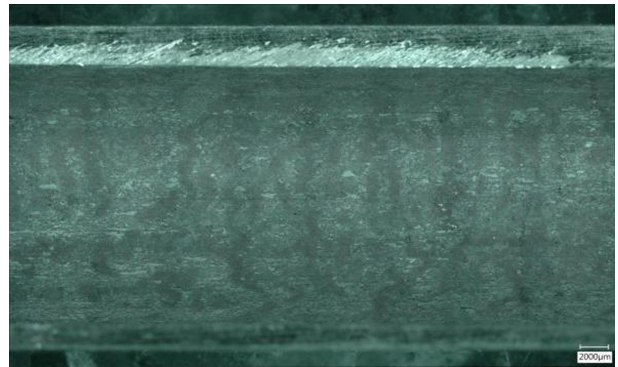


Fig. 12. Appearance of Damaged Oxide Film on Water Wall Tube (Tiger Sprite)

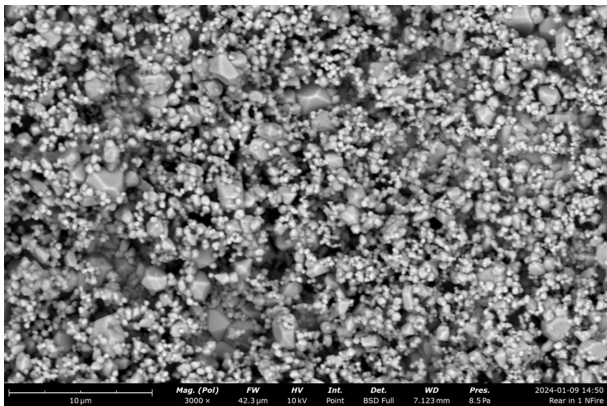


Fig. 10. Shape of Normal Oxide Film

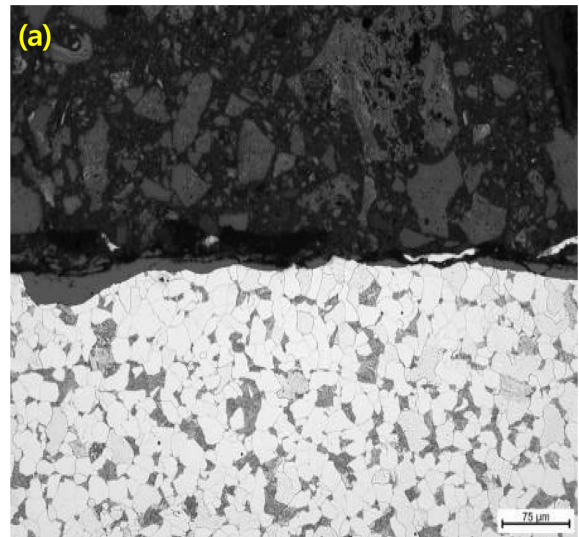


Fig. 13. Surface Oxide Layer (Thin and Trace of Corrosion)

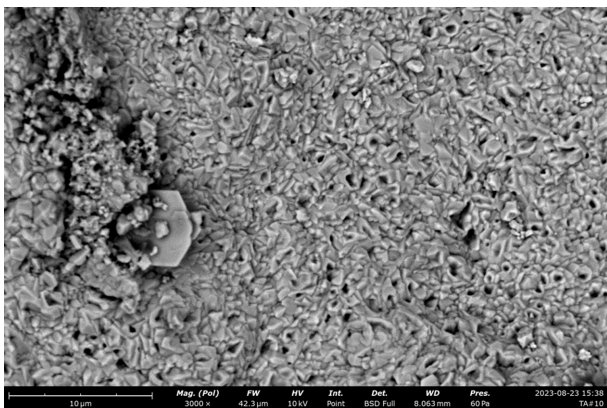


Fig. 11. Shape of Damaged Oxide Film

징을 보였다. 또한 표면 산화층이 일정하지 않고 얇아 지거나 부식흔적이 나타나고 부식으로 공동 내부 산화층이 형성되었음을 볼 수 있다. Fig. 12에 튜브 내면 산화피막 형태를 나타내었고 Fig. 13 과 Fig. 14에 표면 산화층 및 공동 내부 산화층을 나타내었다.

산화피막이 얇아지면 보호막 역할이 약화 되며 부식

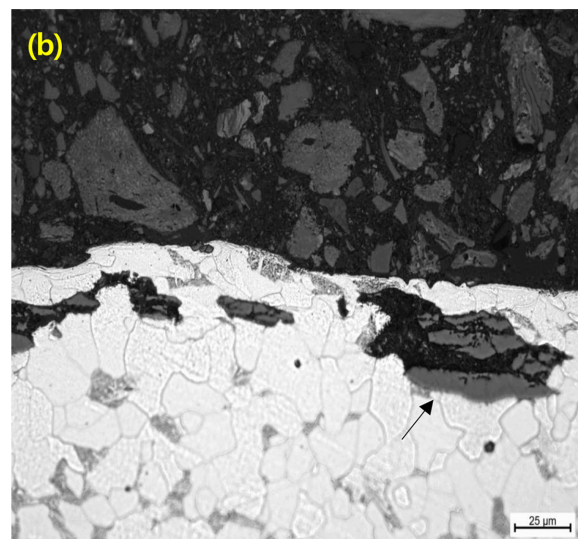


Fig. 14. Oxidation Layer Inside the Cavity Formed by Corrosion



Fig. 15. Tube Material Condition

속도는 증가하여 결국은 부식과 용해속도가 일치하게 되고 안정된 부식 수준에 이르게 된다.

3.3 튜브 모재 검사결과

산화피막을 벗겨낸 튜브 모재에서는 Pitting 처럼 보이는 감육이 육안으로 확인 되었고, 이를 전자주사현미경으로 관찰한 결과 말뚝굽 모양의 액적침식(LDI : Liquid Droplet Impingement)에 의한 손상형태를 관찰할 수 있었다. Fig. 15에 튜브 모재 상태를 나타내었고 Fig. 16과 Fig. 17에 액적침식에 의한 손상형태를 나타내었다.

또한 최대 1.54 mm 의 모재 감육이 발견되었고 국소 부위가 아닌 튜브 전반적으로 감육이 발생되었음을 확인하였다. Fig. 18와 Fig. 19에 모재 감육 상태를 나타내었다.

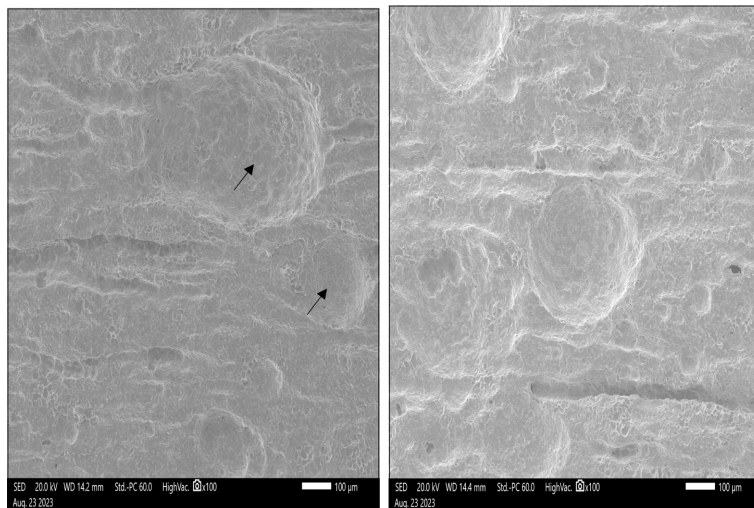


Fig. 16. Damage Shape of Tube Material

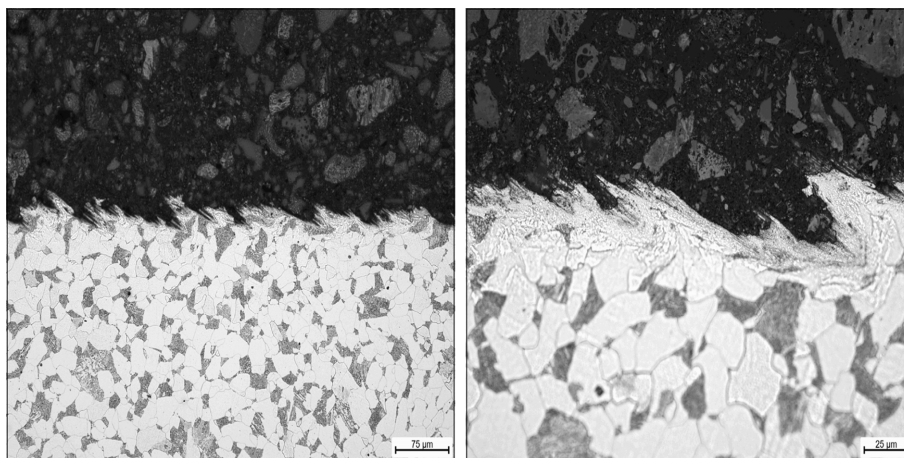


Fig. 17. Damage Shape caused by LDI (Liquid Droplet Impingement)

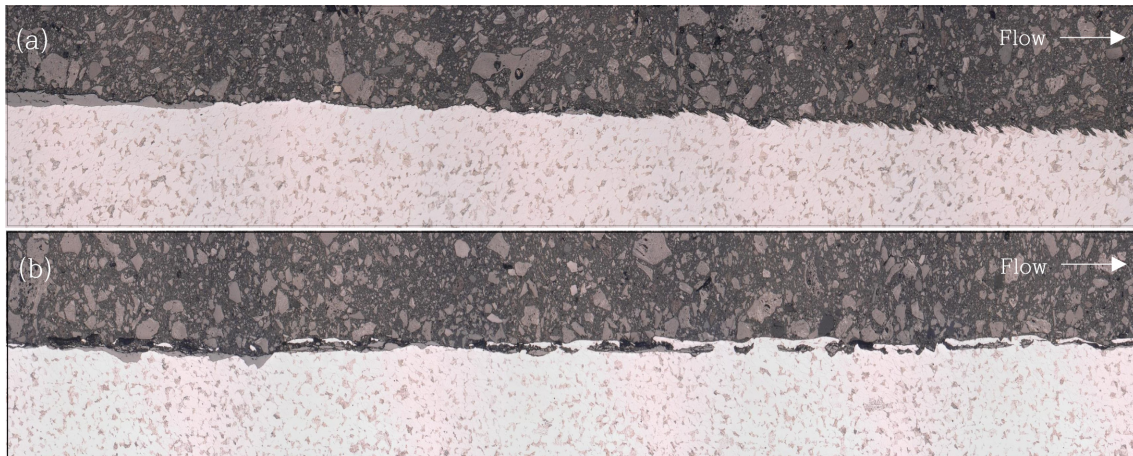


Fig. 19. Longitudinal Cross-Sectional Shape (a) Flame Side (b) Non-Flame Side

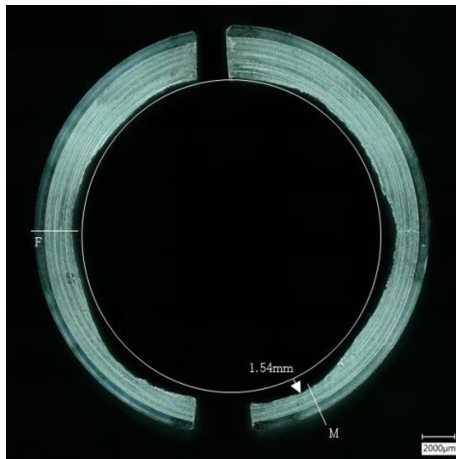


Fig. 18. Tube Material Thinning

4. 결론

유연운전이 급증함에 따라 화력보일러는 매우 가혹한 조건을 마주하게 되었다. 이에 따라 많은 기계 및 화학적 손상이 우려되고 있으나 보일러 수계통 튜브에서 이상 유동가속부식에 대해서는 알려진 바가 없다. 이상 유동가속부식에 의해 산화 피막이 얇아지면 보호막 역할이 약화되며 부식 속도는 증가하여 결국은 부식과 용해속도가 일치하게 되고 안정된 부식 수준에 이르게 된다. 그리고 특정 영역에서 산화층이 너무 얇아져 금속 재질면이 명확하게 드러나게 되어 튜브의 rupture 등 중대한 문제를 발생시키게 될 수 있다. 최근 국내 화력발전소에서 이상 유동가속 부식이 많이 발생되고 있으나 자료 및 기존 사례가 많지 않아 대응 방안 마련에 많은 어려움을 느끼고 있다. 또한 보일러 출력이 변동됨에 따라 해당 문제가 발생하는 위치가

달라질 것으로 파악되어 이상 유동부식을 감지하기 위한 보일러 튜브 발체 위치를 정하기가 어렵다는 문제점도 존재한다. 따라서 본 논문에서는 향후 이상 유동가속부식의 대응방안을 마련하기 위한 자료로 활용하기 위해 실제 화력발전소 수계통 튜브 손상 사례를 제시하고 단상 유동가속부식과의 차별성을 분석하였다. 그리고 유연운전에 따른 이상 유동가속부식의 방지를 위해 보일러 수 유량 변경, 수처리 방법 변경등에 대한 논의가 되고 있으며 이에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

References

1. S. I. Sohn, KIPHRD Magazine POWER HRD, Vol. 57, Korea Institute of Power HRD (2023). http://blog.naver.com/power_hrd/223178305630
2. S. Stephan, *Flexible Operation Conf.*, p. 389, Influence of Flexible Operation on Cycle. Chemistry (2019).
3. B. Dooly and D. Lister, Flow-Accelerated Corrosion In Steam Generating Plants, *Power Plant Chemistry*, **20**, 194 (2018). <http://www.competitivepower.us/pub/pdfs/flow-accelerated-corrosion.pdf>
4. V. Kain, Flow Accelerated Corrosion: Forms, Mechanisms and Case Studies, *Procedia Engineering*, **86**, 576 (2014). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.083>
5. R. B. Dooly, Flow-Accelerated Corrosion inn Fossil and Combined Cycle/HRSG Plants, *Power plant Chemistry*, **10**, 68 (2008). <http://competitivepower.us/pub/pdfs/flow-accelerated-corrosion-in-fossil-and-cc-hrsg-plants.pdf>
6. G. Andrei, A. Vivek, Flow-Accelerated Corrosion in Nuclear Power Plant, US DOE Office of Nuclear Energy,

- Report Number INL/EXT-15-36611-Rev000 (2015).
Doi: <https://doi.org/10.2172/1482991>
7. R. B. Dooley and W. P. Mcnaughton, EPRI Heat Recovery Steam Generator Tube Failures: Theory and Practice, Vol. 2 : Water Touched Tubes, pp. 31 - 38 (2007).
8. ASME SA213-T12, Tube for Boiler and Heat Exchanger (2016). <https://steelmax.co.kr/2016/07/25/sa213-t12-tube-boiler-heat-smls/>