

## 바이오매스 순환유동층 보일러의 열교환기 고온 부식 특성

최유진 · 배달희<sup>†</sup> · 이도연<sup>\*,†</sup>

한국에너지기술연구원 온실가스연구단

34129 대전광역시 유성구 가정로 152

\*한밭대학교 건설환경공학과

34158 대전광역시 유성구 동서대로 125

(2023년 3월 7일 접수, 2023년 3월 24일 수정본 접수, 2023년 6월 13일 채택)

## Analysis of High-Temperature Corrosion of Heat Exchanger Tubes in Biomass Circulating Fluidized Bed Boiler

Yujin Choi, Dal-hee Bae<sup>†</sup> and Doyeon Lee<sup>\*,†</sup>

Climate Change Division, Greenhouse Gas Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon, 34129, Korea

\*Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

(Received 7 March 2023; Received in revised form 24 March 2023; Accepted 13 June 2023)

### 요 약

본 논문은 상용 바이오매스 발전소 가동 조건에서 열교환기 튜브의 고온 부식 특성 분석 결과를 보고하였다. 3종의 상용 열교환기 튜브(SA213T12, SA213T22, SA213T91) 및 열교환기 튜브의 표면 온도 조절이 가능하도록 자체 설계된 고온 부식 평가 장치를 사용하였으며, 약 300시간 동안 다양한 온도 및 가동 조건에서 고온 부식 실험을 수행하였다. 열교환기 튜브 소재에 따른 온도별 고온 부식 특성을 객관적으로 분석하기 위해서 국제표준(ISO 8407)에 입각하여 부식생성물을 제거 후 고온 부식 실험 전후의 튜브 시편 무게 변화량을 산출하였다. 이를 통해 최종적으로 튜브 시편의 평균 두께 감육량 및 감육 속도를 도출하였으며, 전자현미경(FE-SEM) 및 에너지분산형 분광분석법(EDS)을 이용하여 튜브 시편의 표면과 단면의 부식 상태를 분석하였다. 본 연구 결과, 상용 열교환기 소재의 구성 성분 중 크롬과 니켈의 함량이 증가할수록 소재의 고온 부식 특성이 우수하며, 표면 온도가 증가할수록 고온 부식이 촉진되는 것을 확인하였으며, 열교환 온도 조건에 따른 열교환기 튜브 교체주기를 예측할 수 있었다.

**Abstracts** – This paper presents the research results of analyzing the high-temperature corrosion characteristics of three currently commercialized heat exchanger tube materials under actual operating conditions of a biomass power plant. In order to precisely analyze the high-temperature corrosion characteristics of these materials, a high-temperature corrosion evaluation device was installed in the power plant equipment, which allows for adjusting the surface temperature of the heat exchanger tubes. Experiments were conducted for approximately 300 hours under various temperature and operating conditions. In this study, the commercialized heat exchanger tube materials used were SA213T12, SA213T22, and SA213T91 alloys. In order to objectively analyze the high-temperature corrosion characteristics of each material, an international standard-based process to remove corrosion products was applied to obtain the weight change of the specimens, and the average thickness loss and corrosion rate were derived. Thus, the high-temperature corrosion results for each condition were quantitatively compared and analyzed. In addition, in order to increase the reliability of the high-temperature corrosion evaluation method introduced in this study, the surface and cross-sectional corrosion of the specimens were confirmed by using scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray analysis. Based on these analysis results, it was found that the corrosion resistance of the commercial heat exchanger materials increases as the content of chrome and nickel in the composition increases. Additionally, it was found that the corrosion phenomenon is rapidly accelerated as the surface temperature increases. Finally, the replacement period (lifetime) of the heat exchanger tubes under each condition could be inferred through this study.

Key words: High-temperature corrosion, Heat exchanger tube, Biomass, Circulating fluidized bed boiler

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

E-mail: dylee82@hanbat.ac.kr, dalbae@kier.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

최근 전세계적으로 신재생에너지 사용 확대 정책에 의해서 폐기물 에너지 전환 설비의 적용이 급격히 증가하고 있다[1]. 특히 바이오매스를 원료로 재활용하여 발전하는 바이오매스 발전소의 건설 및 활용에 대한 다양한 연구들이 진행되고 있다[2-5]. 또한, 최근에는 폐기물 에너지 전환 설비의 성능이 기존 석탄발전소와 근접한 열효율을 나타내고 있다는 연구결과들이 발표되었다[6]. 하지만 폐기물 연소과정에서 발생하는 각종 산성 가스들을 포함하는 연소 생성물들과 폐기물의 불균일한 발열량으로 인한 내부 온도의 급격한 상승 등과 같은 문제들로 인해 야기되는 열교환기 튜브 표면의 고온 부식 현상은 튜브 표면의 유효 두께가 감소하는 문제뿐만 아니라 튜브 표면에 부식 생성물 및 부착물이 축적되어 열 전달 손실을 일으키기 때문에 설비의 지속적인 가동에 커다란 악영향을 끼치고 있다[7-15]. 특히 최근에는 에너지효율을 높이기 위해서 열교환기의 가동 온도와 압력 등을 높여 설비를 운전하기 때문에 고온 부식에 관련된 문제들이 더욱 심각하게 나타나고 있으며 폐기물 에너지 전환 설비 가동 중단에 약 70%에 달하는 원인이 고온 부식에 의한 것이고, 부식과 관련된 비용이 전체 유지비용의 10% 이상되는 것으로 보고되고 있다[16]. 이러한 설비 내의 열교환기 튜브의 고온 부식 문제들을 해결하기 위해서 고온 내열 내식 특성이 매우 우수한 소재인 Ni-based 합금을 적용한 HVOF (high velocity oxygen fuel), overlay welding 등의 기술들에 대한 연구들이 최근에 매우 활발하게 진행되고 있지만[17-24], 이러한 연구들은 아직 실험실 규모에서 진행된 것일 뿐 실제 설비에 적용할 경우 열교환기 시공 및 교체 등의 현실적인 제약과 이를 통해 발생하는 복합적인 문제들로 인한 설비의 안정적인 가동에 대한 어려움들 때문에 실제 설비에 적용한 사례는 거의 보고되고 있지 않다.

본 연구에서는 실제 발전소 설비 내의 열교환기 튜브의 표면 온도별 고온 부식 특성에 대해 분석했다(Fig. 1). 기존의 발표된 연구 사례들을 보면 대부분 실제 설비의 온도 조건을 구현하기 위해 실험실 규모의 장치를 구성하여 고온 부식 평가를 진행한 것들이 대

부분이고[25] 이 경우 실제 설비의 가동 조건들(온도, 가스, 연소 생성물 등)을 구현하는 것에 제약이 있다. 이를 극복하기 위해 실제 바이오매스 발전소 설비 내에 튜브를 삽입하고 표면 온도를 제어할 수 있는 장치를 설계 하였으며, 상용 바이오매스 발전소에 설치하였다. 상용화된 세 종의 열교환기 튜브의 표면 온도별(400, 450, 500, 550 °C)로 약 300시간 동안 고온 부식 실험을 진행하였다.

## 2. 실험 방법

### 2-1. Materials

본 연구에서는 다양한 보일러 시스템 설비에서 사용되는 세 종의 열교환기 튜브 소재(SA213T12/22/91, Table 1)를 대상으로 실제 발전소 설비 내에서 표면 온도별 고온 부식 특성을 분석하였다. 이러한 고온 부식 실험을 위해 강종 별로 한 쪽 말단이 막힌 외경 33.4 mm, 두께 3.38 mm, 길이 0.7 m의 열교환기 튜브 시편을 사용하였다.

Table 1. Components of three types of commercially available heat exchanger tubes

Component [%]	SA213T12	SA213T22	SA213T91
C	0.05 ~ 0.15	0.05 ~ 0.15	0.07 ~ 0.14
Si	≤ 0.5	≤ 0.5	0.20 ~ 0.50
Mn	0.30 ~ 0.61	0.30 ~ 0.61	0.30 ~ 0.61
P, S	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.02
Cr	0.80 ~ 1.25	1.90 ~ 2.60	8.0 ~ 9.5
Mo	0.44 ~ 0.65	0.87 ~ 1.13	0.85 ~ 1.05
Ni	-	-	≤ 0.4
V	-	-	0.18 ~ 0.25
Al	-	-	≤ 0.015
W	-	-	-
B	-	-	-
Nb	-	-	0.06 ~ 0.10
N	-	-	0.07

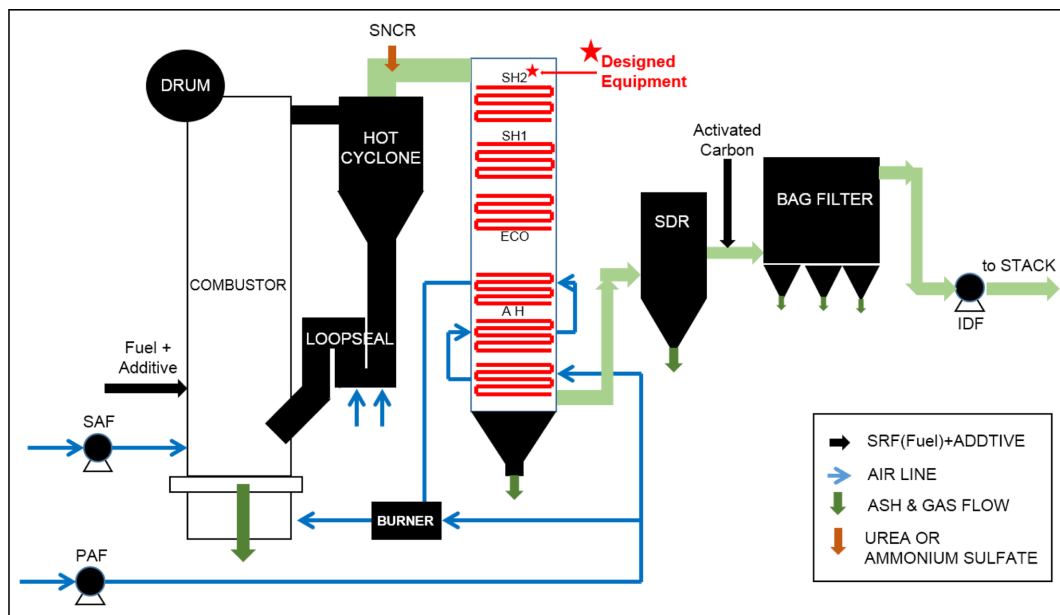


Fig. 1. Schematic diagram of biomass-fired boiler.

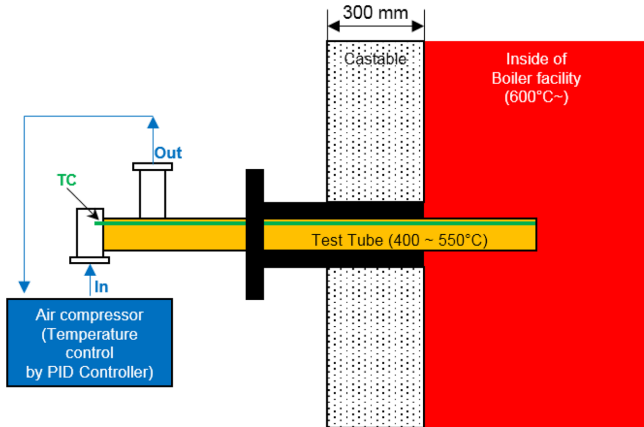


Fig. 2. High temperature tube corrosion evaluation device.

## 2-2. High-temperature corrosion experiments

보일러 설비의 가장 대표적인 특징은 열교환기 튜브 외부로부터 열을 전달받아 튜브 내부의 온도가 높아지면서 스팀을 발생시키는 것이다. 이 열전달 과정에서 열교환기 튜브의 외부와 내부의 온도 및 가스 조건이 크게 차이가 나는데 이러한 실제 설비의 가동 조건들을 구현하기 위해서 고온 부식 평가 실험 장비를 설계하였다 (Fig. 2). 고온 부식 평가 실험에 사용할 열교환기 튜브 형태의 샘플들은 내화재 시공과 fringe, O-ring 등을 통해 실제 발전소 설비 내에 삽입가능토록 했으며 thermo-couple, flow-meter, air compressor, PID (proportional integral derivative) controller를 통해 튜브 내부에 cooling air를 주입함으로써 튜브 시편의 표면 온도를 일정하게 제어할 수 있었다. 튜브 시편의 외부는 실제 바이오매스 발전소 설비 가동 조건(온도, 가스 조성, 연소 생성물 발생 등)과 동일하며, 내부는 튜브의 표면 온도 제어를 통해 실제 스팀 생성으로 인한 열교환기 튜브 내외부의 조건을 구현할 수 있다. 이렇게 실제 설비의 온도 및 공기 조성 등의 가동 조건을 구현할 수 있는 장치를 실제 발전소 내부에 설치하여 상용화된 세 종의 열교환기 튜브 소재에 대한 온도별 고온 부식 실험(온도 조건: 400, 450, 500, 550 °C, 실험 시간: 약 300 h)을 진행했다. 고온 부식 실험 후 튜브 시편의 표면 및 단면을 전자현미경(FE-SEM, Regulus 8220/HITACHI)과 에너지분산형 분광분석법(EDS, Regulus 8220/HITACHI)으로 분석하였다. 국제표준(ISO 8407)에 입각하여 부식생성물을 제거함으로써 고온 부식 실험 전후의 튜브 시편 무게 변화량을 산출하여 소재별, 온도별 고온 내열 내식 특성을 정량적으로 비교 및 분석하였으며, 최종적으로는 열교환기 튜브의 평균 두께 감속량 및 속도를 도출하였고 이를 통해 각 조건별 열교환기 튜브의 교체주기를 예측할 수 있었다.

## 2-3. Sample characterization

튜브 표면 온도별 고온 부식 실험 종류 후 열교환기 튜브 시편의 부식 특성을 평가하기 위해 두께 10 mm의 분석용 시편을 준비하였다. 준비된 시편들은 크게 두 가지 방법을 통해 고온 부식 특성에 대한 분석 및 평가에 사용됐다. 첫 번째 방법은 고온 부식 실험을 통해 샘플의 표면에 만들어진 부식생성물들의 제거한 후에 튜브 모체(mother specimen)와 부식 튜브 시편의 무게 차이로 그 소재에 대한 고온 부식 특성을 평가하는 것이다. 부식 생성물들로는 샘플의 표면에 생성되는 metal oxide layers와 연소생성물들이 부착되는

fouling 현상으로 형성되는 clinker 등이 있다. 본 연구에서는 이러한 부식 생성물을 제거하기 위해서 ISO 8407:2009 “Corrosion of metals and alloys – Removal of corrosion products from corrosion test specimens” 표준에 입각하여 튜브 표면의 부식 생성물을 물리화학적 세척 방법으로 제거하였다. 이러한 물리화학적 세척 방법의 의해 부식생성물이 제거 된 후 부식 전후의 무게 변화를 통해 각각의 조건 별로 부식된 정도를 정량적으로 분석할 수 있었다. 두 번째 방법은 FE-SEM, EDS 분석법을 이용하여 물리화학적 세척 전후의 튜브 시편 표면 및 단면에 대한 microstructures 및 주요 원소 분포 등에 대해 분석하는 것이다. 부식 생성물은 대부분 산소 결합물이기 때문에 산소 원소 분포와 열교환기 튜브 소재의 가장 주요한 원소인 철 원소 분포를 비교해 보면 부식 평가를 상대적으로 비교할 수 있다. 특히 단면에 대한 분석을 통해 부식생성물의 두께 및 세척에 의한 부식생성물의 유무 등을 보다 면밀히 파악할 수 있었다. 따라서 고온 부식 테스트 전후 및 부식 생성물 제거 과정 전후에 대한 FE-SEM, EDS를 통한 해당 샘플들의 표면 및 단면에 대한 microstructures와 주요 구성 원소들(Fe, O)의 분포 추이에 대한 결과와 고온 부식 테스트 전의 샘플 모체의 무게와 고온 부식 테스트 후 부식생성물들을 모두 제거한 시편의 무게 간의 차이로부터 고온 부식에 대해 조건 별로 정성적, 정량적 분석이 가능해졌다.

## 2-4. Assessment of residual life from wall thinning

튜브 모체와 고온 부식 테스트 후 생성된 부식물을 모두 제거한 튜브 시편 간의 무게 감량값(W)과 본 연구에서 적용한 열교환기 튜브 샘플의 재질(SA213T12/22/91)에 대한 밀도( $\rho$ ), 시편의 높이(A), 두께(h), 직경(D) 등으로부터 고온 부식으로부터 발생하는 열교환기 튜브의 노출 시간당 평균 두께 감속값(x) 및 평균 두께 감속 속도(MPY, milli-inch per year)를 도출할 수 있다(식 (1)~(5)). 또한, 이렇게 도출된 열교환기 튜브의 평균 두께 감속 속도를 통해 각 강종별, 온도별 잔존 수명에 대해서도 정량적으로 예측할 수 있었다.

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{W}{Ah} \quad (1)$$

$$A = \frac{W}{\rho h} = \left\{ \left( \frac{D}{2} \right)^2 - \left( \frac{D}{2} - x \right)^2 \right\} \pi \quad (2)$$

$$x = \frac{D}{2} - \sqrt{\left( \frac{D}{2} \right)^2 - \frac{W}{\pi \rho h}} \quad (3)$$

$$x \sim \frac{W}{D\pi \rho h} \quad (\because A \sim D\pi x) \quad (4)$$

$$MPY = \frac{x}{\text{Test Time (ex.300 h)}} (365 \text{ days} * 24 \text{ h}) \quad (5)$$

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3-1. Microstructural characterization

Fig. 2에 나타난 고온 부식 평가 장치를 실제 바이오매스 발전소 설비 내의 super-heater 2 부근에 설치하여 열교환기 튜브 SA213T12를 온도별(400, 450, 500, 550 °C)로 약 300시간 동안 고온 부식 실험을 진행한 튜브 시편 및 이로 인해 생성된 부식생성물을 국제표준에 따라 제거한 시편의 표면을 FE-SEM, EDS로 분석한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 고온 부식 실험 후 생성된 부식 생성물은 고온의 조건에서 산소와 열교환기 튜브 표면이 만나면서 생성되는 금속산



화물인 경우와 발전소의 연료인 바이오매스를 연소하면서 생성되는 각종 연소 생성물이 열교환기 표면과 물리적, 화학적으로 부착하여 성장하는 경우로 크게 두 가지로 구분 지을 수 있다. 결국 두 가지 모두 산소와 반응하여 생성되는 부식물이기 때문에 열교환기 표면에 형성되는 부식생성물의 대표적인 구성 원소는 산소일 것이다. 따라서 기존 상용화된 세 종의 열교환기 튜브 소재의 주요 구성 원소인 철(Fe)과 부식생성물의 주요 구성 원소인 산소(O)의 구성 비율과 분포를 알 수 있다면 해당 시편의 부식된 정도를 확인할 수 있을 것이다. 이를 분석하기 위해 고온 부식 실험 직후(부식 생성물 세척 전 상태)의 시편을 먼저 FE-SEM, EDS를 통해 분석한 후에 동일한 시편을 부식 생성물 세척 후에 다시 같은 방법으로 분석하여 부식생성물의 구성 원소 비율 및 분포와 세척 공정을 통한 잔여 부식물의 유무 등을 확인했다. Fig. 3에서처럼 고온 부식 실험 후

부식 생성물 세척 공정 전에는 온도 조건에 관계 없이 시편의 표면에 부식 생성물이 지배적으로 존재하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 부식 생성물을 세척을 마친 후에 분석 결과에서는 부식물의 주요 구성 원소인 산소가 거의 존재하지 않는 것과 열교환기 튜브 소재의 주요 구성 원소인 철이 다량 분포하는 것을 통해 부식 생성물이 세척 과정을 통해 제거되었다고 판단할 수 있다. 이는 동일 시편들의 단면 FE-SEM, EDS 분석 결과들을 통해서도 확인할 수 있다 (Fig. 4). 고온 부식 실험 직후 부식 생성물 세척 공정 전에는 Fig. 3과 동일하게 단면에서도 FE-SEM 분석을 통해 생성물들이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 단면의 EDS 분석을 통해서도 경계 없이 부식 생성물의 주요 구성 원소인 산소가 철에 비해 지배적으로 많이 분포하고 있는 것을 재차 확인할 수 있다. 이러한 부식 실험 시편을 세척 과정을 통해 부식 생성물을 제거하게 되면 단면의 경

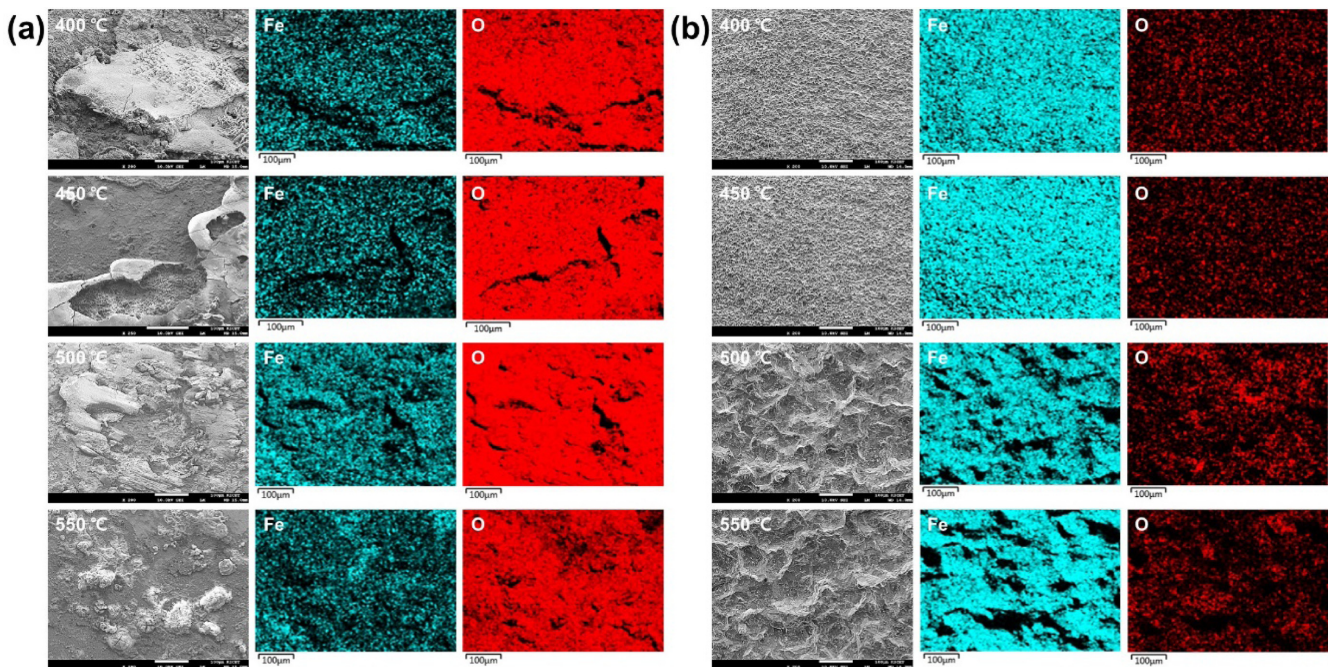


Fig. 3. Tube surface characteristics of SA213T12 before (a) and after (b) cleaning corrosion products.

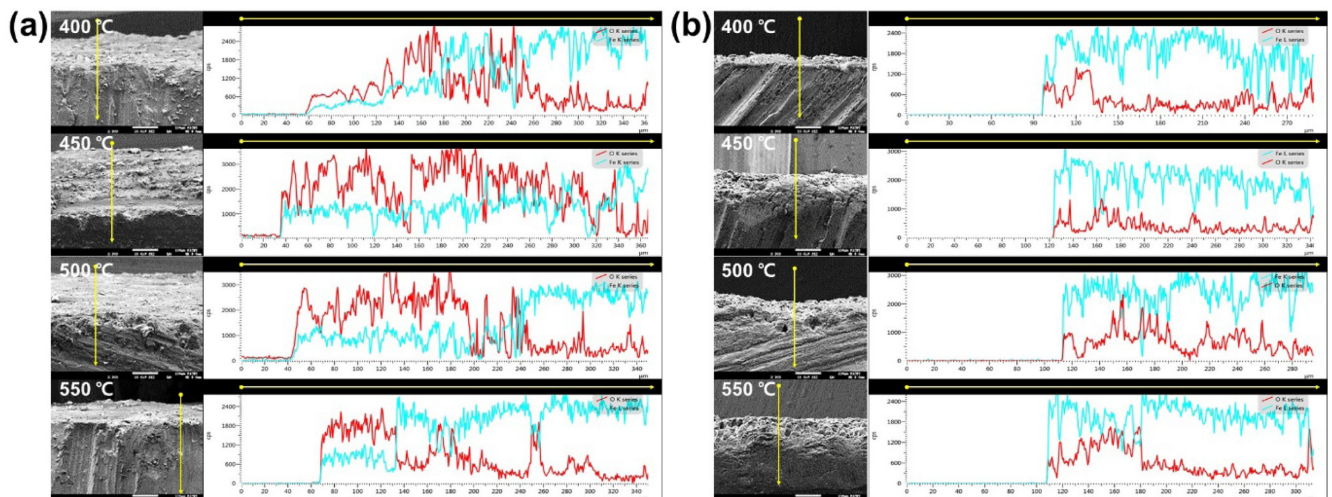


Fig. 4. Cross-sectional Characteristics of SA213T12 before (a) and after (b) cleaning corrosion products.

계 면을 기준으로 열교환기 튜브의 주요 구성 원소인 철이 산소보다 월등히 많이 분포하는 결과를 통해서도 세척 과정을 통해 부식 생성물이 말끔히 제거 되었음을 유추할 수 있다.

### 3-2. Tube weight loss

고온 부식 실험을 통해 열교환기 튜브 샘플에 부식 생성물이 생성되었음을 확인한 것과 동시에 세척 과정을 통해 부식 생성물이 제거되었음을 확인하였다. 이에 따라 고온 부식 실험 전의 열 교환기 튜브 시편(모제)의 무게와 고온 부식 실험 후에 부식 생성물을 최종적으로 제거한 시편의 무게를 측정한다면 고온 부식으로 인한 열교환기 튜브 시편의 무게 감량 값을 도출할 수 있다. 이는 고온 부식 실험을 통해서 생성된 부식으로 인한 모제의 두께 감속에 의한 무게 손실 값으로서, 이 값을 이용하면 소재별, 온도별 고온 부식 정도의 정량적 비교 분석이 가능해지는 것이다. 본 연구를 통해 상용 보일러 설비의 가동을 중단하거나 실제 사용되는 열교환기 튜브를 절단하지 않고도 실제 설비 가동 조건 내에서의 고온 부식 평가를 진행할 수 있었기 때문에 고온 부식을 통한 시편의 무게 감량 값을 신뢰성 있게 도출할 수 있다고 판단된다. Table 2에서는 본 연구에서 사용했던 세 강종에 대한 온도별 고온 부식 실험 진행 시간(고온 부식 환경 노출 시간) 및 부식으로 인한 무게 감량 값을 나타냈다. 각 시편들은 동일한 규격의 샘플에서 동일한 부분(샘플 말단으로부터 5 cm)을 동일한 길이(10 mm)로 잘라 얻어낸 것으로 부식 실험 전의 시편의 모제에 대한 무게를 부피 및 밀도를 통해 계산할 수 있으며 부식 생성물 세척 과정 후의 시편의 무게 값과의 차이를 통해 최종적으로 무게 감량 값을 도출할 수 있었다. 고온 부식 실험 결과 열교환기 튜브의 소재별(SA213T12/22/91) 무게 감량 값은 표면 온도가 400 °C일 때 각각 1.7463/1.6035/0.6874 g, 450 °C일 때 3.3605/4.1676/0.8695 g, 500 °C일 때 7.0686/4.7484/0.9952 g 이고, 550 °C일 때 4.1744/5.724/3.1122 g으로 도출되었다.

### 3-3. Wall thinning (MPY, milli-inch per year)

Table 2에서 볼 수 있듯이, 고온 부식 실험 장치를 설치한 실제 바이오매스 발전소의 가동 일정에 따라 고온 부식 실험 진행 시간이 일정하지 않기 때문에 단순히 고온 부식으로 인한 무게 감량값만으로는 소재별, 표면 온도별 조건에 다른 부식 정도를 비교 분석하는 것에는 한계가 있다. 뿐만 아니라 고온 부식으로 인한 열교환기 튜브 자체의 두께 감속 현상으로 인한 문제가 실제 설비 가동에 악영향을 끼치기 때문에 본 연구를 통해 최종적으로 분석해야 할 것은 각 조건별 부식으로 인한 무게 감량보다는 두께 감속에 미치는 영향이다. 따라서 고온 부식에 의한 무게 감량 값과 시편의 규격 및 밀도, 열교환기 튜브의 고온 부식 실험 진행 시간 등의 변수들을 이용한 관계식(식 (1)~(5))을 통해 최종적으로 고온 부식으로부터

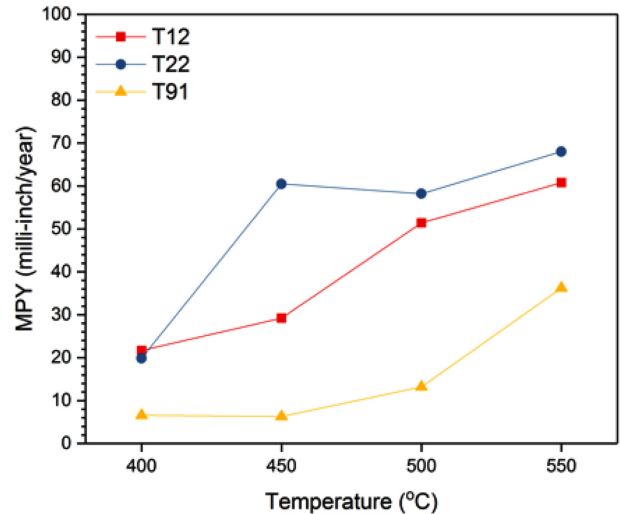


Fig. 5. Tube wall thinning rate (MPY) according to temperature by tube type.

발생하는 열교환기 튜브의 고온 부식 환경 노출 시간에 따른 평균 두께 감속값(x) 및 평균 두께 감속 속도(MPY, milli-inch per year)를 도출했다. 이 관계식은 본 연구에서 사용하는 열교환기 튜브 샘플은 완전한 구형이며, 부식으로 인한 두께 감속은 동일 평면상에서 동일한 속도로 진행된다고 가정할 모델로서 실제 부식으로 인한 편향 구조(특정 부분이 집중해서 부식 현상으로 인한 두께 감속 현상)와 같은 경우는 해당하지 않지만, 평균적인 두께 감속값 및 속도를 도출해낼 수 있으며 각 조건별 실험결과에 대해서 정량적으로 비교 분석하는 것으로는 적합하다고 판단된다. 이 관계식을 통해 Fig. 5에서처럼 최종적으로 열교환기 튜브의 소재별, 온도별 고온 부식으로 인한 평균 두께 감속 속도를 도출했다. 열교환기 튜브 표면의 온도가 400 °C 일때의 평균 두께 감속 속도는 SA213T12/22/91 순으로 각각 21.714/19.853/6.601 g이며, 450 °C일때는 29.211/60.504/6.291 g, 500 °C 일때는 51.042/58.208/13.221 g이고, 550 °C 일때는 60.814/68.033/36.219 g 이었다.

이 결과들을 통해 크게 세 가지를 유추할 수 있다. 첫째, 이미 알려진 바와 같이 열교환기 튜브의 소재와는 상관없이 표면 온도가 증가하면 고온 부식 현상은 급격하게 진행된다. 이는 SA213T12/91 결과에서 두드러지게 나타나는데, 특히 450 °C 보다 높은 온도 조건에서 더욱 그렇다. 둘째, 고온 내식 효과가 우수하다고 알려진 크롬(Cr), 니켈(Ni)의 구성 함량이 높을수록 부식으로 인한 평균 두께 감속 속도가 저하된다. 이는 SA213T12/22와 SA213T91을 비교했을 때 크롬 및 니켈의 함량이 SA213T12/22에 비해 월등히 높은 SA213T91의 평균 두께 감속 속도가 각 온도 조건에서 현저하게 낮은

Table 2. Weight loss of tube specimen and exposure time

Temp. [°C]	SA213T12			SA213T22			SA213T91		
	Weight Loss [g]	Exposure time [h]	Normalized Weight Loss [mg/h]	Weight loss [g]	Exposure time [h]	Normalized Weight Loss [mg/h]	Weight loss [g]	Exposure time [h]	Normalized Weight Loss [mg/h]
400	1.7463	334.5	5.2206	1.6035	336.0	4.7723	0.6874	433.1	1.5872
450	3.3605	478.5	7.0230	4.1676	286.5	14.5466	0.8695	574.9	1.5124
500	7.0686	576.0	12.2719	4.7484	339.3	13.9947	0.9952	313.1	3.1785
550	4.1744	285.5	14.6214	5.7249	350.0	16.3569	3.1122	357.4	8.7079



것으로 확인된다. 셋째, 각각의 튜브를 해당 온도 조건에서 실제 바이오매스 발전소 설비에 적용할 경우 대략적인 교체 주기(수명)는 SA213T12/22/91 순으로 400 °C일 때는 7/8/24개월, 450 °C일 때는 5/2/25개월, 500 °C일 때는 3/2/12개월, 550 °C일 때는 2/2/4개월이다. 이는 해당 고온 부식 샘플의 규격(두께: 3.38 mm)과 평균 두께 감량 속도를 이용하여 계산 결과이다. 결국 고효율 에너지 생산을 위해 발전소의 스팀 발생 온도를 증가시켜 본 연구에서 적용한 소재들로 이루어진 열교환기 튜브 내의 온도 및 압력을 증가시킬 경우 최소 2~3개월에 한번씩은 고온 부식 현상으로 인한 관 수리 및 교체가 필요할 것이라고 유추할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 실험실 규모에서는 구현할 수 없는 실제 바이오매스 발전소의 고온 부식 환경 조건에서 3 종의 상용 열교환기 튜브를 대상으로 고온 부식 특성을 분석하였다. 온도에 따라 튜브 표면에서 발생하는 고온 부식 현상을 확인하고 분석하기 위한 고온 부식 평가 장치를 설계하였으며, 상용 바이오매스 발전소에 적용하여 고온 부식 실험들을 진행했다. 또한 열교환기 튜브 부식의 객관적인 평가 및 분석을 위하여 국제표준에 입각한 부식 생성물 제거 방식을 적용하였으며, 고온 부식으로 인한 무게 감량 변화 및 FE-SEM, EDS 분석법을 활용한 표면 및 단면 변화를 분석하였다. 결과적으로 고온 부식으로 인한 평균 두께 감량 속도 값을 도출하였으며, 열교환기 튜브의 재질과 온도 조건에 따른 고온 부식 특성 분석 결과를 바탕으로 열교환기 튜브의 수명(교체 주기)을 유추할 수 있었다.

#### References

- Kim, K., "Bioenergy Crop Production and Research Trends," *J Plant Biotechnol*, **34**, 103-109(2007).
- Antunes, R. A. and de Oliveira, M. C. L., "Corrosion in Biomass Combustion: A Materials Selection Analysis and Its Interaction with Corrosion Mechanisms and Mitigation Strategies," *Corrosion Science*, **76**, 6-26(2013).
- Niu, Y. and Tan, H., "Ash-related Issues During Biomass Combustion: Alkali-induced Slagging, Silicate Melt-induced Slagging (ash fusion), Agglomeration, Corrosion, Ash Utilization, and Related Countermeasures," *Progress in Energy and Combustion Science*, **52**, 1-61(2016).
- Sandberg, J., Fdhila, R. B., Dahlquist, E. and Avelin, A., "Dynamic Simulation of Fouling in a Circulating Fluidized Biomass-fired Boiler," *Applied Energy*, **88**(5), 1813-1824(2011).
- Vainio, E., Kinnunen, H., Laurén, T., Brink, A., Yrjas, P., DeMartini, N. and Hupa, M., "Low-temperature Corrosion in co-combustion of Biomass and Solid Recovered Fuels," *Fuel*, **184**, 957-965(2016).
- Lee, S. H., Themelis, N. J. and Castaldi, M. J., "High-temperature Corrosion in Waste-to-energy Boilers," *Journal of Thermal Spray Technology*, **16**, 104-110(2007).
- Choi, Y., Jun, H., Shin, J. S., Han, K. H., Bae, D. H., Hwang, B. W., Kim, H. J. and Shun, D., "Effects of Boron Compounds on Decomposition of Chlorides to Control Clinkers Under Solid Refuse Fuel Combustion Conditions," *Energy*, **210**, 118607(2020).
- Enestam, S., Bankiewicz, D., Tuiremo, J., Mäkelä, K. and Hupa, M., "Are NaCl and KCl Equally Corrosive on Superheater Materials of Steam Boilers?," *Fuel*, **104**, 294-306(2013).
- Imran, M., "Effect of Corrosion on Heat Transfer Through Boiler Tube and Estimating Overheating," *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, **4**(6), 629-638(2014).
- Kinnunen, H., Hedman, M., Engblom, M., Lindberg, D., Uusitalo, M., Enestam, S. and Yrjas, P., "The Influence of Flue Gas Temperature on Lead Chloride Induced High Temperature Corrosion," *Fuel*, **196**, 241-251(2017).
- Lindberg, D., Backman, R., Chartrand, P. and Hupa, M., "Towards a Comprehensive Thermodynamic Database for Ash-forming Elements in Biomass and Waste Combustion - Current Situation and Future Developments," *Fuel Processing Technology*, **105**, 129-141(2013).
- Skrifvars, B. J., Backman, R., Hupa, M., Salmenoja, K. and Vakkilainen, E., "Corrosion of Superheater Steel Materials Under Alkali Salt Deposits Part 1: The Effect of Salt Deposit Composition and Temperature," *Corrosion Science*, **50**(5), 1274-1282(2008).
- Skrifvars, B. J., Westén-Karlsson, M., Hupa, M. and Salmenoja, K., "Corrosion of Super-heater Steel Materials Under Alkali Salt Deposits. Part 2: SEM Analyses of Different Steel Materials," *Corrosion Science*, **52**(3), 1011-1019(2010).
- Viklund, P., Hjörnhede, A., Henderson, P., Stålenheim, A. and Pettersson, R., "Corrosion of Superheater Materials in a Waste-to-energy Plant," *Fuel Processing Technology*, **105**, 106-112(2013).
- Xin, Y. A. N. G., HUANG, J. J., FANG, Y. T. and Yang, W. A. N. G., "Slagging Characteristics of Fly Ash from Anthracite Gasification in Fluidized Bed," *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, **41**(1), 1-8(2013).
- Bang, J., Kim, Y., Kim, S. R., Shin, D., Cho, K. and Kwon, W., "High Temperature Corrosion Properties of Heating Surface in Waste-to-energy Boiler Tube," *J. Korea Soc Waste Manag*, **34**, 27-33(2017).
- Chatha, S. S., Sidhu, H. S. and Sidhu, B. S., "High Temperature Hot Corrosion Behaviour of NiCr and Cr3C2-NiCr Coatings on T91 Boiler Steel in An Aggressive Environment at 750 °C," *Surface and Coatings Technology*, **206**(19-20), 3839-3850(2012).
- Fantozzi, D., Matikainen, V., Uusitalo, M., Koivuluoto, H. and Vuoristo, P., "Chlorine-induced High Temperature Corrosion of Inconel 625 Sprayed Coatings Deposited with Different Thermal Spray Techniques," *Surface and Coatings Technology*, **318**, 233-243(2017).
- Okoro, S. C., Montgomery, M., Frandsen, F. J. and Pantleon, K., "Influence of Preoxidation on High Temperature Corrosion of a Ni-based Alloy Under Conditions Relevant to Biomass Firing," *Surface and Coatings Technology*, **319**, 76-87(2017).
- Oksa, M., Auerkari, P., Salonen, J. and Varis, T., "Nickel-based HVOF Coatings Promoting High Temperature Corrosion Resistance of Biomass-fired Power Plant Boilers," *Fuel Processing Technology*, **125**, 236-245(2014).
- Oksa, M., Tuurna, S. and Varis, T., "Increased Lifetime for Biomass and Waste to Energy Power Plant Boilers with HVOF Coatings: High Temperature Corrosion Testing Under Chlorine-containing Molten Salt," *Journal of Thermal Spray Technology*, **22**, 783-796(2013).
- Shukla, V. N., Jayaganthan, R. and Tewari, V. K., "Degradation

- Behavior of HVOF-sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25% NiCr Cermet Coatings Exposed to High Temperature Environment,” *Materials Today: Proceedings*, **2**(4-5), 1805-1813(2015).
23. Varis, T., Bankiewicz, D., Yrjas, P., Oksa, M., Suhonen, T., Tuurna, S., Ruusuuvuori K. and Holmström, S., “High Temperature Corrosion of Thermally Sprayed NiCr and FeCr Coatings Covered with a KCl-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Salt Mixture,” *Surface and Coatings Technology*, **265**, 235-243(2015).
  24. Zhou, W., Zhou, K., Deng, C., Zeng, K. and Li, Y., “Hot Corrosion Behaviour of HVOF-sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCrMoNbAl Coating,” *Surface and Coatings Technology*, **309**, 849-859(2017).
  25. Dudziak, T., Hussain, T., Simms, N. J., Syed, A. U. and Oakey,

J. E., “Fireside Corrosion Degradation of Ferritic Alloys at 600 C in Oxy-fired Conditions,” *Corrosion Science*, **79**, 184-191(2014).

#### Authors

**Yujin Choi:** Engineer, Greenhouse Gas Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Korea; yjinchoi1@kier.re.kr

**Dal-hee Bae:** Principal Engineer, Greenhouse Gas Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Korea; dalbae@kier.re.kr

**Doyeon Lee:** Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University, Daejeon 34158, Korea; dylee82@hanbat.ac.kr