

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2012.36.6.663>

ISSN 1226-4881

석탄화력발전소 보일러 튜브 마모 문제에 관한 저온공기 속도 측정법 적용 및 검증[§]

유기수^{*†} · 정권석^{*}

* 한국남부발전 기술지원센터

Application and Verification of Cold Air Velocity Technique for Solving Tube Ash Erosion Problem in PC Boilers

Kisoo Yoo^{*†} and Kwon-Seok Jeong^{*}

*Technology Center, Korea Southern Power Corporation

(Received December 20, 2011 ; Revised February 29 2012 ; Accepted March 5 2012)

Key Words: Fly Ash Erosion(비산회 침식), CAVT(냉공기 속도 측정법), Pulverized Coal Boiler(석탄화력 보일러), Tube Failure(튜브 파손)

초록: 비산회에 의한 보일러 튜브 마모 문제는 석탄화력 보일러 튜브 파손에 주요한 요인이 된다. 때문에 튜브 보호막이나 다공판 등이 마모 문제 완화를 위하여 사용되고 있다. 그러나 비산회에 의한 튜브 마모 문제는 이런 방법을 통하여 완전히 해결될 수 없는데 이는 보일러 마다 유동 조건이 다를 뿐만 아니라 예상치 못한 위치에서 국부적으로 마모가 심화될 수 있기 때문이다. 문제는 보일러 내부 비대칭 유동과 국부적 유속 증가에서 기인함으로 튜브 마모 문제의 해결에 있어서 보일러 내부 유동을 명확히 파악하는 것이 무엇보다 중요하다 하겠다. 본 연구에서는 튜브 마모 문제에 해결을 위해 사용되는 Cold Air Velocity Technique(CAVT)에 대하여 고찰하고 하동화력 2호기 보일러에 대하여 CAVT를 실제 적용함으로써 석탄화력 보일러에 있어서 CAVT 적용 가능성을 검증하였다.

Abstract: Fly ash erosion is a leading cause of boiler tube failure in PC boilers. Therefore, shields or baffle plates are installed in specific areas to mitigate fly ash erosion and prevent boiler tube failure. However, the tube failure problems caused by fly ash erosion cannot be eliminated with this solution alone, because each PC boiler has a different flue-gas flow pattern and erosion can become severe in unexpected zones. This problem is caused by an asymmetric internal flow velocity and local growth of the flue gas velocity. For these reasons, clearly defining the flow pattern in PC boilers is important for solving the problem of tube failure caused by fly ash erosion. For this purpose, the cold air velocity technique (CAVT) can be applied to the fly ash erosion problem. In this study, CAVT was carried out on the Hadong #2 PC boiler and the feasibility of application of CAVT to conventional PC boilers was validated.

- 기호설명 -

A_B : 보일러 내부 단면적
 A_{oa} : 연소가스 통과면적
 A_t : 전열면적
 D : 보일러 깊이
 d : 튜브 직경

f_i : 혼성 비율
 k_i : 단탄종 성분비
 L : 튜브 길이
 N : 튜브 개수
 N : 혼합 단탄 종류
 $V_{n_{i,j}}$: 표준화 국부 속도
 V_{mer} : 최대 출력 시 단면평균 속도
 V_{avg} : 측정 단면의 평균 속도
 $V_{m_{i,j}}$: 각 측정 지점의 유속
 W : 보일러 너비
 σ : 혼성탄 성분비

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회 (2011. 11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, ksyoo@kaist.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

국내 표준석탄화력 보일러는 석탄을 연료로 하는 500MW급 용량의 보일러로 국내에만 20기 이상이 운전되고 있다. 표준 화력 보일러에서 발생하는 대표적인 문제점⁽¹⁻³⁾은 크링커 낙하에 의한 튜브 손상, 노내 화염부 및 산화물에 의한 튜브 부식, 장단기 과열에 의한 튜브 크립 피로 파괴, 비산회에 의한 튜브 마모 문제 등이 있다. 특히 최근 저열량탄 연소가 확대 되면서 비산회에 의한 튜브 마모 문제가 더욱 심화되고 있는 실정이다.

비산회에 의한 튜브 마모에 영향⁽⁴⁾을 미치는 요인은 보일러 내부 연소가스 속도, 비산회 성분(입도, 경질/연질), 연소가스에 의해 이송되는 회분 양 등이 있는데, 저열량탄 연소 확대에 의하여 연소가스 내에 포함된 회분 양이 증가되는 추세에 있으며 비산회 성분 또한 튜브 마모 문제를 심화시키는 방향으로 변화하고 있다.

현재 석탄 수급 상황⁽⁵⁾에 따라 저열량탄 확대 사용은 어쩔 수 없는 선택이며, 때문에 튜브 마모 문제에 있어서 유일한 통제 변인은 보일러 내부 연소가스 속도 제어이다. 물론 저열량탄 확대 사용에 의한 연소가스 유속 증가는 피할 수 없으나 다행스러운 것은 튜브 마모 문제는 연소가스 국부 속도와 관련이 있으며 이를 적절히 제어함으로써 튜브 마모 문제를 최소화 할 수 있다⁽⁶⁾는 점이다.

앞에서 언급한 것처럼 비산회에 의한 튜브 마모는 대개 국부적인 연소가스 유속 증가에 의하여 심화됨으로 튜브 마모 문제를 방지하기 위해서는 튜브 각각에 유입되는 연소가스 유속에 대한 정보가 필수적이다. 그러나 보일러 대류 전열면 근방의 연소가스 온도는 400~700℃이며 노내는 밀폐 구조이므로 운전 중 튜브 마모 예상지역의 연소가스 유속 데이터를 획득하기가 어렵기 때문에 유속 데이터를 획득하기 위한 특수한 방안이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 냉공기 속도 측정법(CAVT)⁽⁷⁾을 활용하여 보일러 내부 유동 데이터를 획득한 후 결과를 비산회에 의한 튜브 마모 양상과 비교하여 CAVT 적용 방안을 검증하였다.

2. 본론

2.1 CAVT 개요

CAVT(Cold Air Velocity Technique)는 높은 연

소 가스 온도로 인하여 보일러 내부 유동장 측정이 어려운 경우 사용되는 방법이다. 보일러 통풍계통 운전을 통하여 보일러 내부에 유동을 형성시키고 측정자가 유속을 직접 측정하여 보일러 내부 유동 데이터를 얻는다. 이렇게 얻어진 유동 데이터를 활용하여 보일러 전열튜브의 비산화마모 심각부위를 사전에 예측, 보일러 튜브 과열 사고를 방지할 수 있다.

2.2 유속 데이터 측정

상업 운전 중인 하동석탄화력 2호기 보일러에 대하여 예방정비 후 시험 기동시를 이용하여 유속 측정을 실시하였으며 데이터 수집 위치는 Fig. 1과 같다. 보일러 내부는 정지 후에도 잔류 회분이 많아 핫와이어 프로브를 사용하는 풍속계를 이용하여 실험자가 직접 유속 측정을 수행하였다. 본 연구에서는 유속 데이터 획득을 위하여 2명씩 2개조로 측정팀을 구성하여 보일러 단면 유속을 측정하였다.

2.3 유속 측정치 처리

CAVT는 보일러 통풍계통 운전 중에 보일러 내부 유속을 측정하는 것이기 때문에 유동 데이터를 실제 연소 시 보일러 내부 유속으로 변환할 필요가 있는데 이때 실제 보일러 내부 유속을 표준화(normalizing)한 속도 분포를 활용한다. 만약 보일러 유속 측정 단면의 연소 중 평균 유속을 알 수 있다면 표준화 유동 속도에 운전 시 단면

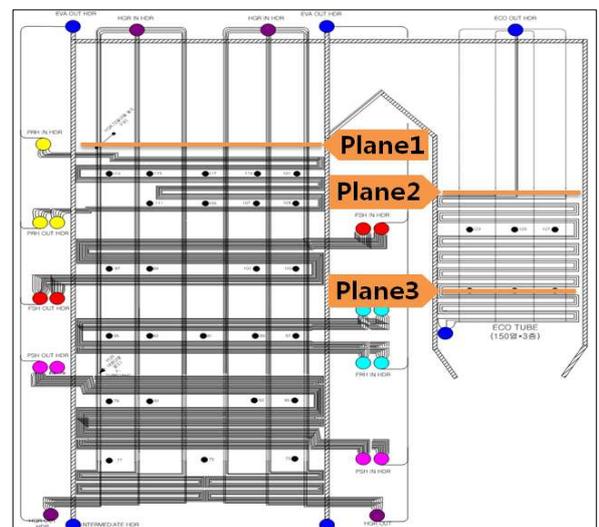


Fig. 1 Planes of velocity measurement in CAVT

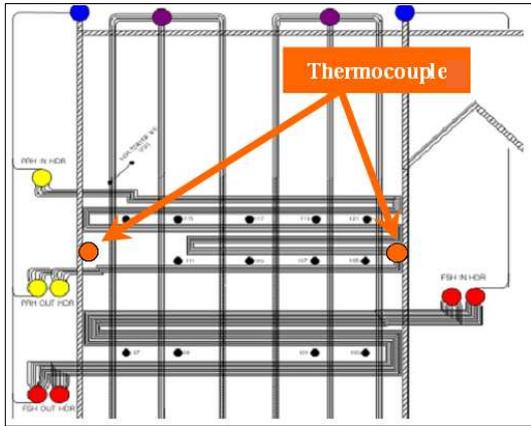


Fig. 2 The position of thermocouples in the pulverized coal boiler

평균속도를 곱해 줌으로써 실제 유속 데이터를 예측할 수 있다. 다음은 최대 출력시 단면 평균 속도와 측정지점 유속과의 관계식이다.

$$V_{mcr,i,j} = V_{n,i,j} \times V_{mcr} \quad (1)$$

여기에서 표준화 국부속도는 실제 측정 유속으로부터 얻어지는데 면적 평균값을 이용하여 정규화 한다.

$$V_{n,i,j} = V_{m,i,j} / V_{avg} \quad (2)$$

$$V_{avg} = \sum(V_{m,i,j} \times A_{i,j}) / A_t \quad (3)$$

2.4 단면 평균속도

보일러 운전 중 연소가스 유속은 CAVT에 의한 실측 속도 보다 더 높다고 볼 수 있다. 때문에 정규화 된 속도 분포를 실제 운전 중 보일러 내부 속도 분포로 변환 하여야 하는데 이를 위해서는 보일러 운전 중 측정단면 평균 유속을 알아야 한다. 운전 중 보일러 단면의 유속은 연소탄의 성상, 연소 생성물, 배기가스 밀도, 연소가스 유효 관통 면적에 의하여 좌우된다.

2.4.1 유효 단면

연소가스 통과면적은 보일러 내부 단면적에서 전열튜브가 차지하는 면적을 제외한 면적이 되는데 전열튜브 면적(A_B)은 $d \times L \times N$ 로 보일러 내부 단면적(A_t)은 $D \times W$ 로 계산 된다.

$$A_{oa} = D \times W - (d \times L \times N) \quad (4)$$

Table 1 Proportion of chemical element in the coal used by Hadong #2 Power Plant boiler in 2010 [unit : %]

C	H	O	N	S	Ash
68.31	4.45	14.99	2.24	0.92	12.42

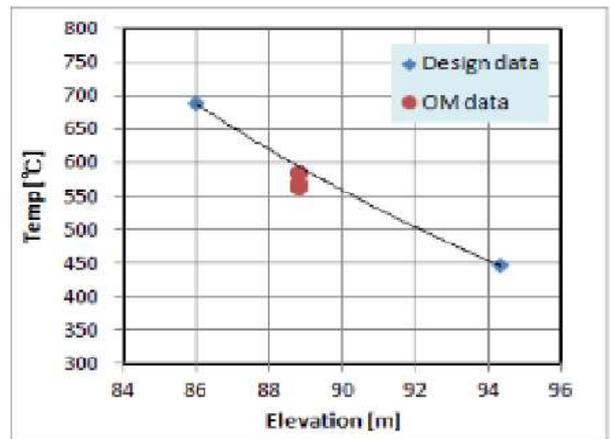


Fig. 3 Validation of boiler design data with temperatures which are gained from thermocouple near the primary reheat

2.4.2 연소탄 성분

보일러 단면을 통과하는 질량 유량 및 밀도를 알기 위해서는 우선 연소가스의 성상을 알아야 한다. 상업운전을 하는 화력발전소의 보일러는 경제성 및 연소성을 고려하여 혼탄 연소를 시행함으로써 단탄종 성분으로부터 혼탄 성분을 도출 한다. 혼탄 성분비는 질량비로 계산한다.

$$\sigma = \sum_{i=1}^N (k_i \times f_i) \quad (5)$$

질량 평균을 통하여 2010년 하동 석탄화력 2호기의 다탄종의 성분비를 얻었으며 그 결과는 Table 1과 같다.

2.5 연소가스

단면 유속을 알기 위해서는 보일러 연소가스의 열적 상태량에 대한 정보가 필요하다. 그중에서도 보일러 단면의 연소가스 온도가 중요한데 이를 알기 위해서는 실측이 가장 정확하나 보일러 구조상 단면부의 연소 가스 온도를 실측하는 것

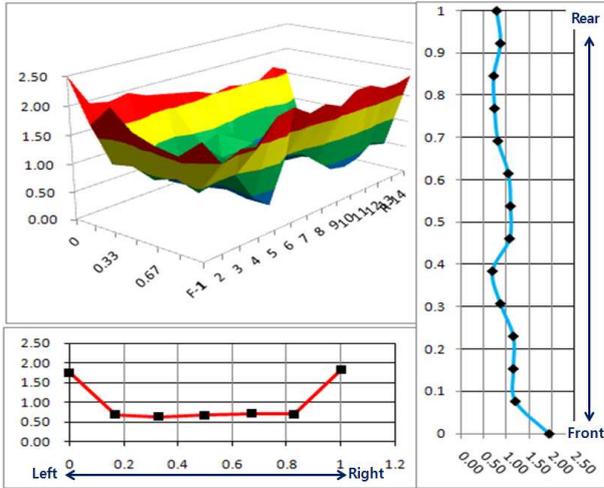


Fig. 4 Normalized velocity profile at the Plane-1

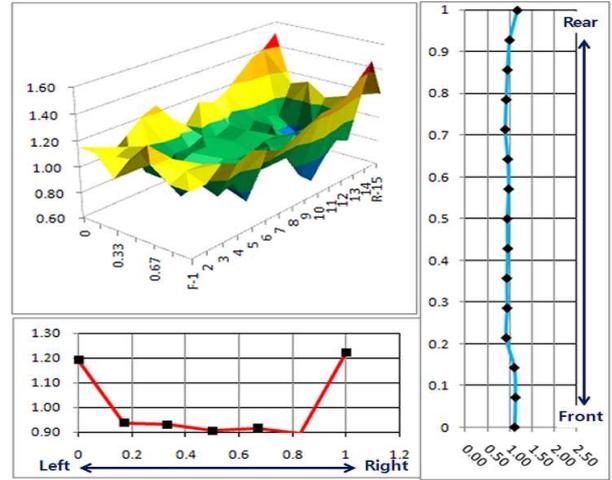


Fig. 6 Normalized velocity profile at the Plane-3

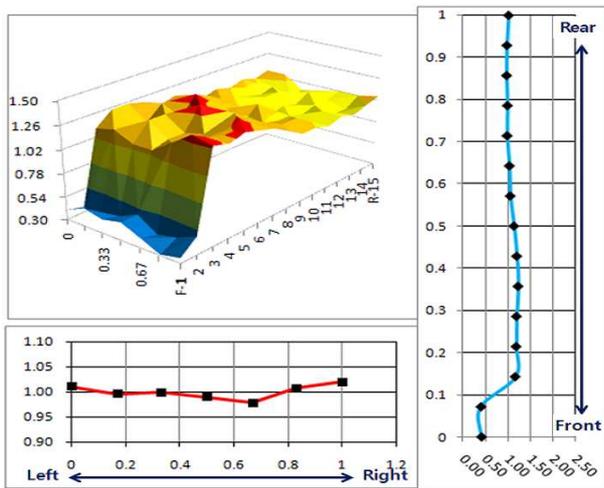


Fig. 5 Normalized velocity profile at the Plane-2

은 불가능하다. 그러나 열전대가 설치된 일부 단면의 실측 온도를 이용하여 제작사에서 제공하는 설계 데이터를 검증하면, 설계 데이터를 실제 연소가스 온도 데이터로 활용한다 하여도 큰 무리는 없을 것이다. 하동 석탄화력 2호기 보일러에는 Fig. 2와 같이 1차 재열기 각 4면에 열전대가 설치되어 온도 데이터를 측정하고 있다. 운전 온도와 설계 데이터를 비교해본 결과를 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 1차 재열기를 통과하는 연소가스 온도가 NR(Normal Rating) 기준으로 1차 재열기 입구 688℃에서 출구 446℃로 선형적으로 감소한다고 할 때 Fig. 3과 같이 실제 가스 온도가 해당 범위 근처에서 5% 오차로 존재한다. 이로 보아 설계 데이터를 보일러 내부 온도 데이터로 활용



Fig. 7 Fly ash erosion on the primary reheat tube

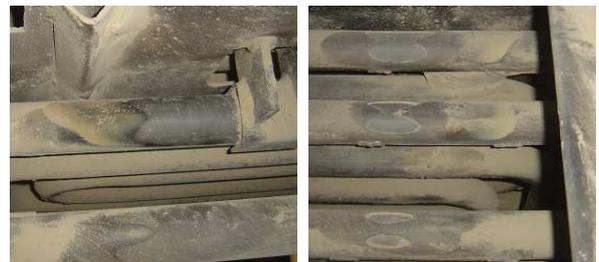


Fig. 8 Fly ash erosion on the economizer tube

하는데 큰 무리가 없다고 할 수 있다.

2.6 표준 속도 분포

1차 재열기에서 표준화 국부속도 분포는 Fig. 4와 같다. 전반적으로 전면이 후면에 비하여 연소가스 표준화 속도가 높으며 특히 전면 측 벽면에서의 표준화 속도가 1.95 정도로 후면측의 0.77에 비하여 150% 정도 높은 경향을 보인다. 이와는 반대로 좌우벽면에서는 연소가스 속도차가 거의 나타나지 않고 있다. 보일러 좌·우면의 속도차는 없지만 전반적으로 중앙에 비하여 좌·우 Casing

Table 2 Data of economizer tube thickness where fly ash erosion is severely arisen [initial tube thickness : 6.3 mm]

Tube position	Measurement thickness	Thickness degradation
#2 bank rear upper right Side #1~3 column	4.5 mm	1.8 mm
#3 bank rear upper right/left Side 1 column	3.5 mm	2.8 mm
#4 bank rear upper right side #1~3 column	4.2 mm	2.1 mm

연소가스 유속이 중앙부에 비하여 약간 더 빠른 경향을 보인다. Plane 2에서는 좌우 벽면의 유속이 중앙에 비하여 크게 빠르지 않으나 Plane 3에서는 표준속도 기준으로 중앙에 비하여 30% 정도 벽면 근처의 연소가스 유속이 빠른 것을 볼 수 있다. 벽면 근처의 유속 증가는 튜브와 벽면 틈에서 발달하는 유동과 관련이 있는데, Plane 3 이전 절탄기 튜브에 의하여 벽면 근처 유동의 충분한 발달이 유속 증가의 원인이 되었다고 볼 수 있다. Plane 2 이전에는 벽 근처 유동을 발달 시킬만한 튜브가 배치되어 있지 않아 유속 증가가 없는 것으로 판단할 수 있다.

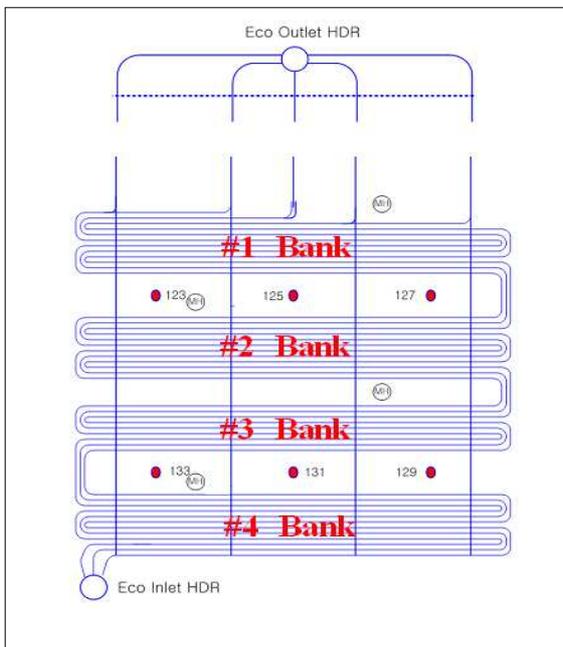


Fig. 9 Designation of economizer tube bundles

부위에서 연소가스 속도가 높은 것을 알 수 있다.

절탄기에서 표준화 국부속도 분포는 Fig. 5 및 6과 같다. Plane 3에서는 전후면의 속도 분포가 큰 차이가 없으나 Plane 2에서는 전면 측 벽 근처 연소가스 표준유속이 현저히 낮다. 이는 연소가스가 노에서 절탄기 쪽으로 넘어오는 사면에 위치하여 유동이 발달하지 못하여 나타는 현상으로 판단되며 연소가스가 충분히 발달된 Plane 3에서 전후면의 연소가스 속도 차이가 적은 것을 보면 더욱 확실해 진다. 또한 절탄기 튜브와 벽면 사이의 틈을 따라 연소가스 흐름이 더욱 발달하기 때문에 Plane 3의 전후면 측 벽면 근처에서

2.7 비산회 마모

CAVT 결과 1차 절탄기 측의 Plane 1 코너부에서는 국부적으로 유속이 20 m/s 이상 될 것으로 보인다. 또한 절탄기 측에서도 Plane 2, Plane 3 코너부에서 국부적으로 15~16 m/s 연소가스 흐름이 발생할 것으로 예측할 수 있다. 이러한 결과에 따라 유속이 비정상적으로 큰 부분의 전열튜브 마모 상태를 확인해보았다.

Fig. 7 및 8에 나타난 것처럼 1차 재열기 및 절탄기의 유속이 높은 부분이 그렇지 않은 부분에 비해 마모가 빠르게 진행되는 것을 확인 할 수 있다. 특히 Fig. 9의 절탄기 각 튜브 번들 코너부는 Table 2 에 나타난 것처럼 비산회 마모가 극히 심해 튜브 교체를 실시하였다.

3. 결론

본 연구를 통하여 석탄화력발전소 보일러 튜브 마모 방지를 위한 CAVT 적용 가능성을 확인하였다. 1차 재열기 및 절탄기 전열 튜브에 CAVT를 실시한 결과 보일러 벽면과 인접한 전열 튜브 전/후/좌/우면에서 비산회 마모가 가장 심각할 것으로 예측 되었다. 특히 절탄기는 후면 코너부에 국부적인 유속 증가가 두드러지게 나타났다. 실제 튜브 마모상태를 점검한 결과 CAVT에 의한 마모 예측 결과와 1차 재열기 및 절탄기 전열 튜브의 마모 양상이 일치하는 경향을 보였다. 특히 절탄기 튜브의 경우에는 비산회 마모에 의한 두께 감소가 코너부에서 특히 심각하였으며 튜브 교체 기준점까지 두께 감소 양상을 보였다. 이러한 결과를 보아 CAVT가 석탄화력보일러 튜브

마모 문제 예측 및 해결에 효과적인 기법임을 알 수 있다. 또한 CAVT 적용을 위한 보일러 설계 온도-압력 데이터 및 혼탄 정상분석법의 활용 가능성이 확인되었다.

후 기

CAVT 기법은 비산회에 의한 튜브 마모 문제 저감에 있어서 마모 근본 원인을 찾아내는 방법으로 튜브 마모 손상 문제 해결에 매우 유용한 방법이다. 본 연구에서는 표준화력 보일러에 해당 기법을 적용하였으나 실제로는 신규화력 또는 유동층 보일러 문제에 있어서 CAVT 기법이 특히 유용하다고 할 수 있다. 신규 화력은 튜브 편류 현상이 심각하고 유동층 보일러에서는 유동화 입자가 튜브 마모를 심화시킴으로 CAVT의 적용 효과가 더 크다. 따라서 이후에 신규 화력 및 유동층 보일러에 CAVT를 확대 적용함으로써 비산회에 의한 보일러 튜브 마모 문제 해결에 도움을 줄 수 있을 것으로 보인다.

끝으로 본 연구를 위하여 촉박한 보일러 정비 일정에도 불구하고 CAVT 실측에 도움을 준 하동화력본부에 감사의 말씀을 전하고 싶다.

참고문헌

(1) Doolye, R.B. and McNaughton, W.P., 2007,

"Boiler and Heat Recovery Steam Generator Tube Failures : Theory and Practice Volume 1 Fundamentals," *EPRI TR-1012757*.

(2) Doolye, R.B. and McNaughton, W.P., 2007, "Boiler and Heat Recovery Steam Generator Tube Failures : Theory and Practice Volume 1 Water Touched Tubes," *EPRI TR-1012757*.

(3) Doolye, R.B. and W.P., McNaughton, 2007, "Boiler and Heat Recovery Steam Generator Tube Failures : Theory and Practice Volume 1 Steam Touched Tubes," *EPRI TR-1012757*.

(4) Tabkoff, W., Kotwal, R. and Hamend, A., 1979, "Erosion Study of Different Materials Affected by Coal Ash Particles,, *Journal of WEAR*, Volume 52, Issue 1, pp. 161~173.

(5) Ellerman, A. D., 1995, "The World Price Of Coal," *Energy Policy*, Volume 23, Issue 6, pp. 499~506.

(6) Drennen, J.F. and Kratian, P., 1994, "Guidelines for the Control and Prevention of Fly Ash Erosion in Fossil Fired Power Plants," *EPRI TR-102432*

(7) Doolye, R.B., 2004, "Demonstration of the Cold Air Velocity Technique to Control Fly Ash Erosion at a National Thermal Power Corporation(NTPC) Plant," *EPRI, Palo Alto, 1010542*.