

다공판 연소가스 유량제어를 통한 석탄화력발전소 보일러 성능 개선

김치호*, 문승재*†

*한양대학교 파워엔지니어링공학과, *†한양대학교 기계공학부

Improvement of Boiler Performance on 550 MW Coal Fired Thermal Power Plant via Baffle Plates

Chi Ho Kim*, Seung-Jae Moon*†

*School of Power Engineering, Hanyang University,

*†Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

(Received Aug. 30, 2020; Revised Sept. 6, 2020)

ABSTRACT : In order to increase power plant efficiency, the steam temperature was increased to 610 °C which deteriorates the durability of the boiler tube and as the use of low-calorie coal increases the post combustion and delayed combustion phenomenon, the overheating of the final reheater and the tube rupture are becoming frequent. In order to prevent overheating of the final reheater, desuperheater water injection was increased, leading to a decrease in boiler efficiency. In this study install a baffle plate at the back of some overheated tube groups, thereby reduce the temperature of the tube by reducing the amount of combustion gas, and the reduced combustion gas moves to an adjacent place to increase the temperature of other tubes. As a result of the study, the temperature deviation between tubes decreased 1.5. And the heat-reducing injection amount was reduced to 6,929 kg/h and the maximum tube temperature was reduced to 623.4°C which is 6.6°C more below than the control standard of 630°C.

초록 : 발전소 효율증대로 인해 610°C까지 높아진 증기온도는 보일러 튜브의 내구성을 저하시키고 있으며 여기에 저열량 탄 사용증가로 후부연소 및 지연연소 현상이 가중됨에 따라 최종재열기의 과열과 튜브 파열사고가 빈번해지고 있다. 최종 재열기 과열을 방지하고자 과열저감수 주입량이 늘어났으며 이는 보일러 효율저하로 이어지고 있다. 그동안 보일러 튜브 온도를 전체가 아닌 튜브 개별적으로 제어하기 위한 노력이 계속되어 왔지만 성공사례가 알려진 바가 없다. 이번 연구에서는 과열된 일부 튜브그룹에 다공판을 설치하여 가스흐름에 저항을 줌으로써 연소가스량을 저감시켜 튜브의 온도를 낮추고 저감된 연소가스는 인접한 곳으로 이동하여 다른 튜브의 온도를 높이는 것이다. 연구결과 튜브간 온도편차가 1.5°C 감소하였고 과열저감수 주입량이 6,929 kg/h 감소하였으며 튜브 최고온도를 623.4°C까지 경감하였다. 이는 관리기준온도인 630°C에 6.6°C 여유가 있는 수치이다.

Key words : Final Reheater Overheat(최종재열기 과열), Temperature Variation(온도 편차), Tube Metal Temperature(튜브 금속온도), Gas Flow Control(가스 유량조절)

Corresponding Author, smoon@hanyang.ac.kr

— 기호설명 —

Q : 튜브마모율 [g/S]
 V : 가스 유속 [m/s]
 ρ : 회입자 비중 [kg/m³]

S : 회입자 직경 [mm]
 η : 보일러 열효율 [%]
 σ : 표준편차
 P : 재열증기압력 [kgf/cm²]

제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라 경제성장과 함께 전력생산을 핵심을 담당해온 석탄화력발전소는 1930년 발전용량 10 MW인 당인리발전소 1호기를 시작으로 오늘의 1,000 MW급 초초입계압(USC : Ultra super critical) 발전소로 성장해 왔다. 초초입계압 발전소는 증기압력 265 kgf/cm², 증기온도 610°C, 44.1%의 고효율로 기존 발전소 대비 사용연료와 온실가스 배출량을 대폭 저감하였다. 석탄화력발전소의 성장배경은 점점 상승하는 석탄가격과 배출가스에 대해 높아지는 환경의식으로 동일한 석탄소비로 더 많은 전력을 생산하는 효율이 높은 발전소를 건설하고자 하는 노력과 더불어 고온·고압용 소재부품 기술의 개발도 그 발전 기반이 되어 왔다.

석탄화력발전소가 과거 기저부하에서 중간부하로써의 역할이 커짐에 따라 전력수요에 따른 출력변동이 심해지고 보일러내 화염의 특성이 시시각각 변하고 있다. 또한 역청탄 수요증가로 인한 가격상승으로 3개 탄종 이상의 혼탄연소 및 저열량탄 연소비중이 높아졌는데 저열량탄은 휘발성이 적고 불연물질의 비중이 많아 완전연소에 장시간이 소요되므로 후부연소 현상을 일으켜 최종재열기의 과열을 일으키며 보일러 원제작사가 제시하는 규정온도를 초과하는 경우가 자주 발생하고 있는 실정이다. 이러한 종합적인 원인들로 인해 열교환튜브의 일정한 온도 유지가 곤란해졌고 많은 문제가 발생하고 있다.

그중 하나가 고온부식(Fireside corrosion)이다. 보일러에서 전열면이 고온의 연소가스나 부착회에 의해서 부식을 일으키는 현상이다. 연소가스 중의 회(Ash)가 용융상에서 보일러 튜브에 부착 및 퇴적하여 재료의 보호피막인 산화크롬 등을 용해하여 산화를 촉진시키는 원리이다. [1] 그동안 실험실과 현장에서 수행된 시험을 바탕으로 2.25% Cr강과 18%Cr-8%Ni 스테인리스강에 대해 온도변화에 따른 고온부식 영향을 무게 감소율을 분석하면 튜브온도

가 약 630°C를 지나면서 그 영향이 급증한다고 보고되고 있다.

그 밖에 연소가스 온도 상승에 따라 재열기에서 결함이 자주 발생하고 있다. 스테인리스강 및 2.25~9% Cr강은 금속온도가 600°C 이상 올라가면 내면에 산화스케일이 생성되며 이 산화스케일은 취성특성을 가져 보일러 정지 및 기동시 열팽창률 차이로 인해 대량 박리되어 하부 곡관부를 막아 튜브가 과열되고 고온크리프로 튜브가 파열된다. 이때는 온도가 단시간에 700°C 근처까지 상승하므로 대처가 곤란하여 현장에서 가장 큰 문제가 되고 있다. 또한 튜브 금속온도 감소와 튜브 수명간에는 현저한 관계가 있다는 연구결과가 있다. 약 200,000시간을 운전한 튜브를 대상으로 하면 27,000시간 정도의 수명이 남아있으나 여기서 튜브 온도를 30°F(17°C) 저감시 그 기대수명은 75,000시간으로 늘어난다고 알려져 있다. [2]

화력발전소 보일러 튜브의 온도 관리를 위해 국내외로 다양한 연구가 진행되어 왔다. 보일러 운전정보와 유로망 해석을 이용하여 열유속을 계산하고 단시간에 튜브의 온도를 예측하여 고온손상을 감시하는 방법을 연구가 시행되었다. [3] 그리고 최근에는 바이오매스 혼소로 인해 더욱 부각되고 있는 보일러 과열문제를 향상된 전산처리로 튜브의 형상을 모델링하여 손상이 예상되는 지점을 예측하는 연구도 진행되었다. [4]

이밖에 현업에서도 튜브과열을 예방하면서 효율을 높이기 위한 다양한 연구가 시도되었다. 주기적으로 연소튜닝을 통하여 화염의 특성을 안정화시키고 편류를 예방하는 방법, 버너의 분사각을 조절하는 방법, 제매기(Soot blower)의 최적운전을 통하여 파울링과 슬래깅을 효과적으로 제거하고 과열기와 재열기로 도달하는 화염의 온도를 낮추는 방법 등 다양한 연구가 있었으며 현재까지 계속 개선되어 오고 있다. [5]

한편 유량 제어용 오리피스 기능을 하는 SFC(Steam flow controller)를 튜브 입구에 삽입하여 각각의 튜브에 흐르는 증기량을 조절하는 방법도 알려져 있으나 튜브별로 정확한 유량측정이 불가능하여 설계가 용이하지 않고

튜브목(Throat)이 급격히 좁아져 내부에서 발생한 산화스케일에 의해 유로가 막혀 과열로 인한 파열사고 위험성이 있어 현업에서는 거의 쓰이지 않는다.

한편 가장 높은 튜브의 온도를 제어하기 위해서 과열저감수를 주입하게 되면 나머지 모든 번들의 튜브도 영향을 받아 같이 온도가 떨어진다. 규정치를 초과하는 단 한개의 튜브온도를 제어하고자 나머지 모든 튜브의 온도도 불필요하게 떨어지게 되고 여기서 튜브의 온도가 낮아진다는 것은 스팀의 온도가 낮아짐을 나타낸다. 즉 효율이 떨어진다는 것이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 보일러 효율을 떨어뜨리지 않으며 과열된 튜브의 온도를 낮추고 성능을 증대할 수 있는 방안에 대해 다루고자 한다.

1.2 연구내용 개요

석탄화력발전소의 설비 구조상 한 가지 특성이 존재한다. 과열기는 번들(Bundle)이란 하나의 묶음 단위로 연소실 가장자리부터 중간까지 수십개의 번들로 구성되어 있다. 일반적으로 가장자리에 위치한 번들의 온도는 가장 낮고 한 가장자리를 기준으로 약 30%, 70% 구간에 위치한 번들의 온도는 가장 높으며 일부 발전소는 이 온도차이가 100℃ 이상 벌어지기도 한다. 이 원인은 크게 세 가지에 기인한다.

첫째, 가장자리는 보일러 벽의 유동저항으로 연소가스의 속도가 느리다. 보일러 벽에는 각종 점검창(Manhole), 제매기(Soot blower), 온도측정장치(Thermocouple) 등 많은 설비가 부착되어 있어 유동저항이 발생하기 때문이다. 둘째, 보일러 벽에는 수냉벽이 위치하여 열교환이 일어나므로 연소가스가 과열기나 재열기로 이동했을 때 다른 구간보다 가스 온도가 낮아진 상태가 된다. 셋째, 통풍계통 시스템의 구조적인 원인 때문이다. 일반적으로 열교환이 완료된 연소가스는 2개 체인(Chain)을 통해 대기로 배출되는데 여기서 “체인”은 절탄기에서 열교환을 마친 연소가스가 보일러에서 나와 탈질설비, 공기에열기, 전기집진기, 유인송풍기, 탈황설비로 이어지는 일련의 배출통로를 의미한다. 이렇게 2곳의 배출통로로 연소가스가 집중되기 때문에 그 영향은 대류열전달이 일어나는 최종과열기, 최종재열기까지 영향을 미치며 그 결과 가장자리에서 30%,

70% 구간은 연소가스의 유량과 가스온도가 상대적으로 높기 때문에 튜브의 온도도 높게 나타나며 번들별 온도분포에 차이가 발생하는 주요 원인이 된다. 이 번들별 온도차이를 그래프로 나타내면 두 개의 산봉우리가 나란히 있는 형상과 닮았다고 하여 현업에서는 흔히 “쌍봉곡선”이라고 지칭하곤 한다.

이번 연구의 목적은 쌍봉곡선 형태로 나타나는 튜브간 온도차이를 줄이는데 있다. 정확히는 가장 높은 온도 구간의 일부 튜브들의 온도를 과열저감수 주입이 아닌 다른 방법을 통해 “선택적”으로 낮추는 것이다. 이러한 결과는 과열저감수 주입을 최소화하고 스팀온도를 상승시킬 수 있으며 이는 효율상승으로 이어진다. 또한 튜브의 과열로 인한 수명단축을 방지하는 효과를 기대할 수 있으므로 전체적으로 보일러 성능을 향상시키는 결과를 가져오게 된다.

앞에서 언급한 연구들은 모든 튜브의 온도를 전체적으로 제어하여 과열을 방지하는 개념이기 때문에 선택적인 튜브 온도제어의 이번 연구와는 차이가 있다. 또한 튜브에 흐르는 유량을 개별적으로 제어하여 온도편차를 완화시키는 연구나 성공사례는 알려져 있지 않기 때문에 본 연구를 시작하게 되었다. 이번 연구에서는 스팀 유량을 제어하는 것이 아니라 가스 유량을 제어하는 역발상을 적용하였다. 과열된 튜브 전면이나 후면에 일정 면적의 다공판(Baffle plate)을 설치하여 가스흐름에 저항을 주어 가스유량을 조절하는 것이다. 온도가 높은 패턴을 보이는 구간에 다공판을 설치하면 가스의 흐름이 적어지고 본래 가스의 일부는 온도가 낮은 구간으로 유입이 되기 때문에 가장자리 번들의 온도는 높아지고 “쌍봉” 구간의 온도는 낮아져 전체적으로 온도편차를 완화하는 효과를 거둘 수 있다.

다공판을 통한 가스 유량 제어방식의 최대 장점은 설치가 간편하고 시행착오를 반영할 수정이 용이하며 튜브 내부에서 흐르는 스팀유량을 제어하는 것이 아니기 때문에 기존 튜브를 절단할 필요가 없다는 것이다. 탄중변화와 미세먼지 저감을 위한 출력변화로 인하여 화염특성이 바뀌면 튜브 온도 특성을 주기적으로 관리하면서 다공판의 면적 및 설치위치를 변경해 주면 되는 용이함이 있다. 또한 다공판의 막힘이나 파손으로 인해서 튜브에 영향을 주지도 않는다는 점도 들 수 있다.

연구 데이터를 바탕으로 다음과 같은 결과 분석을 수행하였다. 첫째, 다공판설치 전·후 튜브 평균온도 변화 및

다공판 연소가스 유량제어를 통한 석탄화력발전소 보일러 성능 개선

번들간 온도편차 감소로 다공판의 직접적인 효과를 확인하였다. 그리고 일일 최고온도 변화를 분석하여 다공판으로 인해 튜브에 미치는 영향을 분석하였다.

둘째, 튜브 일일 온도 패턴 변화를 분석하여 온도 변동폭 감소가 튜브의 수명증대에 미치는 효과를 분석하였다.

셋째, 온도편차 완화에 따른 과열저감수량 감소를 확인하고 다공판의 영향을 분석하였다. 그리고 튜브 종류별 열흡수율 변화로 다공판이 열교환에 미치는 영향을 확인하였다. 마지막으로 과열저감수량과 스팀온도 변화가 효율 상승에 미치는 영향을 분석하고 보일러 성능시험 데이터와 비교하였으며 효율상승으로 인한 발전단가 이득을 분석하였다.

제 2 장 연구방법

2.1 연구대상 시설

본 연구의 대상은 550 MW급 석탄화력 발전소인 보령화력 7호기이고 과열기 출구압력 246 kgf/cm², 재열기 출구압력 53.7 kgf/cm², 주증기온도 569℃, 재열증기온도 596℃인 초임계압 발전소이다. Fig.1은 보령화력 7호기의 보일러 개략도이다. 제1차 전력수급계획에 의해 2008년 이후 전력수요에 대처하여 안정적인 전력공급을 위해 준공된 발전소로 2008년 6월에 상업운전을 시작하였다. 설계 및 주기기는 국내 사업자가 담당하였으며 국내 표준석탄화력의 후속 발전소로 1000 MW급 USC 발전소 기술의 기반이 되었고 당진, 태안, 보령, 하동 및 영흥에 이와 유사한 발전소가 총 12개 호기가 설치되어 있다. [6]

이 발전소는 공통적으로 준공 이후 최종재열기 튜브의 파열이 빈번히 발생하여 튜브의 재질격상, 신규품 교체 등 많은 사건이 발생하여 튜브관리가 타 발전소에 비해 엄격하게 진행되고 있다. 따라서 이번 연구의 결과가 보일러 성능개선에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 연구대상으로 선정하였다.

절탄기(Economizer)하부헤더로 유입된 보일러급수는 절탄기 출구헤더에 모여서 노(Furnace)하부에 있는 입구헤더로 흐르게 된다. 스파이럴 튜브로 구성된 수냉벽을 통해 가열된 급수는 상부의 출구헤더에 모여 기수분리기

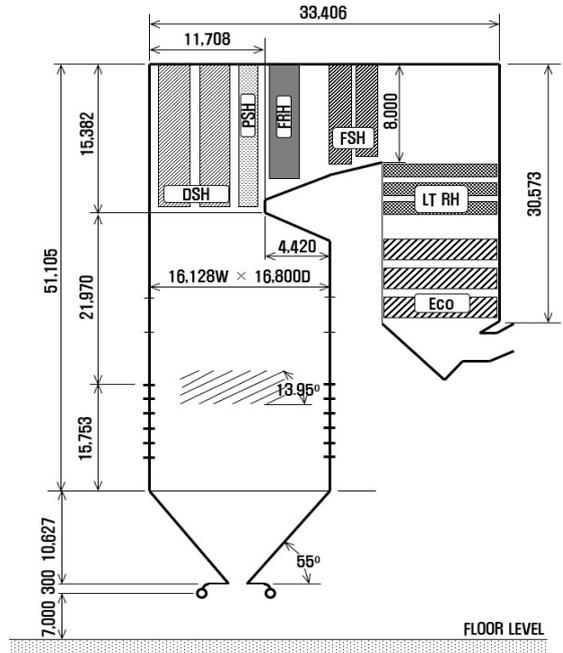


Fig.1 Boiler of Boryeong thermal power plant #7

(Separator)를 통과하고 백패스(Backpass) 및 사이드월(Extended-sidewall), 1차 과열기(Div. superheater), 2차 과열기(Platen superheater), 3차 과열기(Final superheater)로 흐른다. 재열증기는 백패스 하부측벽을 통하여 1차 재열기(LTRH, Low temperature reheater), 2차 재열기(Final reheater)로 흐른다. [7]

2.2 최종 재열기 튜브간 온도편차 고찰

보령 7호기 최종재열기(FRH : Final Reheater)는 1개 번들에 18열의 튜브로 구성되며 24개 번들로 튜브수량은 총 432개이다. Fig. 2.2는 최종재열기의 한 개 번들의 측면형상을 보여주고 있다.

화염부(Furnace)와 비화염부(Penthouse)로 구역이 구분되며 화염부는 연소가스와 열교환이 이루어지고 스팀은 비화염부에 위치한 헤더(Header)로 모여 터빈으로 보내어지게 된다.

각 튜브의 온도관리를 위한 열전대(Thermocouple)가 출구측에 설치되어 있는데 석탄재를 포함한 고온의 가스

에 의한 열전대 소손을 방지하기 위해 연소가스가 유동하는 노(Furnace)내와 내화격벽으로 차단이 되어 있는 비화염부에 설치가 되어 있다. 최종재열기 일부 번들의 온도가 관리기준을 초과하여 운전되고 있는 현상을 발견할 수 있다. 제작사가 제시한 관리온도는 630℃이며 이는 튜브 최종단에 설치된 열전대가 나타내는 수치이다. 실제 화염부에서의 최고 온도는 이보다 약 60~70℃넘게 나타나지만 열전대 소손으로 인해 화염부에서의 직접온도 측정이 불가능하기 때문에 비화염부에 설치되어 있는 열전대의 수치를 이용하여 튜브 온도관리를 간접적으로 측정하며 관리하고 있다.

일반적으로 보일러 과열기 및 재열기의 온도는 대부분 쌍봉곡선의 형태로 온도 불균등 현상을 보이고 있으며 해당 연구대상의 온도 분석으로 이러한 불균등 현상을 사전에 파악하였다.

연구대상 튜브위치는 각 번들의 FRH Out 1열로 Fig.2에서 왼쪽기준 첫번째에 위치한 튜브이다. 이 1열 튜브는 연소가스를 처음으로 만나는 구간이기 때문에 가장 고온의 화염과 우선적으로 열교환이 이루어진다. 그리고 최외곽에 위치하여 주변 튜브의 방해로 인한 가스유동의 분산이 없어 가스 접촉면적이 상대적으로 넓고 또한 튜브의 길이 가장 길기 때문에 열교환면적도 가장 크다. 이와 같은 이유로 인해 다른 위치의 튜브들보다 스팀의 과열도가 가장 높고 튜브의 온도도 가장 높게 나타나므로 연구대상으로 선정하였다.

데이터의 연속성 및 신뢰도를 높이기 위해 해당 위치의 15일간 튜브온도 데이터를 취득하였다. Fig.3는 총 24개 번들의 FRH Out 1열 튜브 15일 평균온도 데이터를 비교한 그래프이다. 매일 1분간 데이터를 취득하여 일일 평균온도를 구하고 다시 15일간 평균온도를 일별로 나열하였다. 결과를 분석하면 6번들과 15번들이 봉우리 형상을 하고 있는 쌍봉형태의 그래프를 나타내고 있으며 12~18번들 구간의 온도가 상대적으로 높게 기록되었다. 한편 튜브온도가 관리온도를 초과하는지 여부를 확인하기 위해 전 구간을 대상으로 일별 최고온도를 측정하였다. Fig.4은 15일간 분석한 튜브의 일별 최고온도 데이터이다. 총 4일에 걸쳐 관리온도인 630℃를 초과하였으며 이는 튜브 과열로 인한 수명감소로 직결되므로 매우 심각한 상황이라고 할 수 있다.

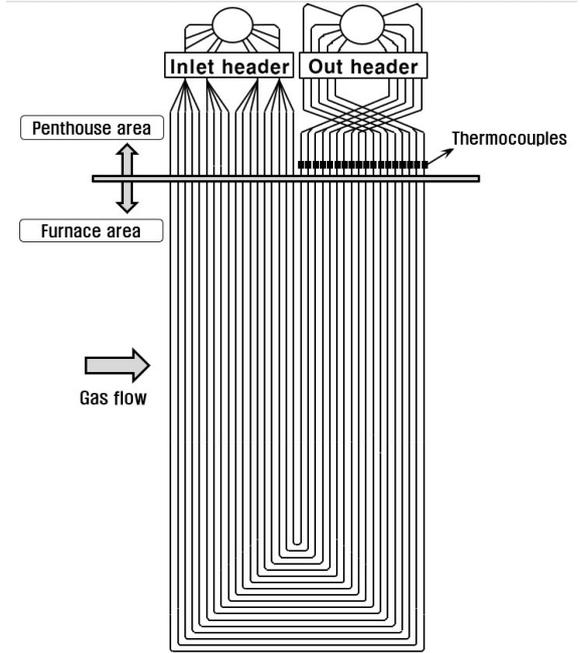


Fig.2 Side view of final reheater tube bundle

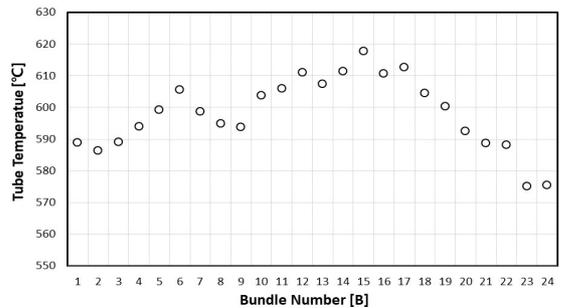


Fig. 3 Average temperature of final reheater tube

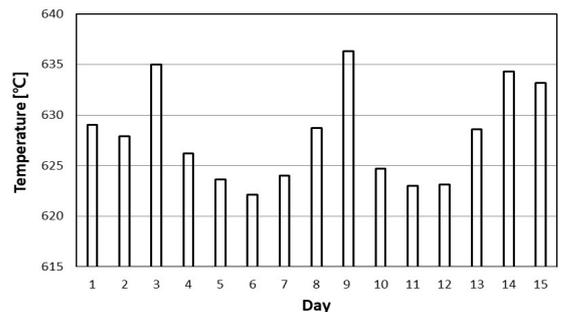


Fig.4 Peak temperature of final reheater tube

2.3 보일러 튜브 온도편차 균등화 및 분석방법

최종 재열기의 가스흐름을 제어하기 위해 튜브 번들 후면에 다공판을 설치하였다. 튜브 전면이 아닌 후면에 설치한 이유는 석탄회에 의한 튜브의 마모를 고려하였기 때문이다. 전면에 설치할 경우 다공판 후단에서 가스속도가 증가하고 와류로 인해 튜브의 침식이 가속화되기 때문이다. 튜브 마모율과 관계된 식은 다음과 같이 알려져 있다. [8]

$$Q = K \cdot V^{3.5} \left(\frac{\rho^3}{S^2} \right) \cdot C \cdot t \quad [g/S] \quad (2-1)$$

여기서 Q 는 튜브마모율(g/s), K 는 재료상수, V 는 가스 유속(m/s), ρ 은 회입자 비중(kg/m³), S 는 회입자 직경(mm), C 는 회입자 농도(g/m³), t 는 시간(sec)이다.

다양한 인자에 의해 영향을 받으나 그 중에서 가장 지배적인 인자는 3.5승에 비례하는 가스의 유속이다. 한편 이 식에서는 와류에 의한 영향은 제외되었으나 실제 제매기(Soot blower) 운전으로 인해 와류가 발생하는 구간에서는 와류와 석탄재에 의한 복합작용으로 튜브 마모가 가속화 된다는 점이 확인되었기 때문에 와류발생은 절대 피해야 할 부분이다.

최종재열기의 사양은 Table 2-1과 같다. 비화염부는 T12와 T23 재질, 노내 화염부는 TP347H과 SUPER304H 스테인리스강 등 다양한 재질을 사용하였는데 SUPER304H은 현재 상용화된 재질 중 가장 신뢰성이 입증되어 고온부인 1~6열에 설치되었지만 과열로 인해 계속 문제가 발생되고 있는 점이 특징이다. 입구 화염온도는 1,058℃, 가스속도는 9.5m/s 이며 출구 화염온도는 958℃, 가스속도는 8.8m/s이다.

Fig. 5와 같이 다공판 설치는 온도분석 결과 일일 평균온도가 가장 고온부인 12~18번들 후단에 설치되었다. 기본 치수는 가로 세로가 1,000mm인 정사각형이고 홀 지름이 25mm이다. 재질은 스테인리스강 중에서 고온 내구성이 매우 우수하여 보일러 내부구조물 및 익스펜션 조인트 등에 다양하게 활용되고 있는 STS310S인 다공판을 사용하였다. 다공판의 기본치수를 바탕으로 아래와 같이 타공률을 계산하였다.

$$\text{타공률} = \frac{N_1 \times N_2 \times \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2}{1,000 \times 1,000} \quad (2-2)$$

여기서 N_1 는 가로방향 홀의 수량 36개, N_2 는 세로방향 홀의 수량 41개, D 는 홀지름 25mm이다. 계산결과 타공률은 0.73이며 다공판 설치로 인한 최종재열기 유로폐쇄율은 아래와 같이 계산하였다.

$$\text{유로폐쇄율} = \frac{A_{B.P.} \times (1 - 0.73)}{A_{FRH}} \times 100 \quad (2-3)$$

여기서 $A_{B.P.}$ 는 다공판 면적으로 폭 4.6 m×높이 2.4 m = 11.0 m², A_{FRH} 는 최종재열기 걸면적으로 폭 16.8 m×높이 12.3 m = 206.6 m² 이다. 계산결과 1.44%로 산출된다. 다공판 설치에 의한 유로 폐쇄율은 전체면적의 약 1.44%로 미미하다. 한편 12~18번들 후단에 설치된 다공판으로 인하여 그 전단에서 유입되는 가스는 저항을 받게 되어 유량이 줄어들게 되며 모든 가스가 다공판을 통과하여 열교환에 이용되지 못한다. 다공판 저항으로 인해 반사된 연소가스는 상, 하, 좌, 우로 분산되어 타 튜브에서 열 흡수되므로 재열증기 온도 및 효율변화는 무시할 수 있다.

다공판의 설치 개요는 Fig.6과 같다. 튜브외경과 치수가 정확히 일치하는 유볼트로 연결하여 작은 틈의 발생을 방지하였다. 대류열전달 구간인 재열기 부근의 연소가스는 미세한 연소재가 함께 섞여서 유동하므로 조그마한 틈이 생기면 연소재와 함께 가스가 집중적으로 통과하게 되고 이때 연소재의 감마작용으로 인해 튜브 마모가 가속화되기 때문이다.

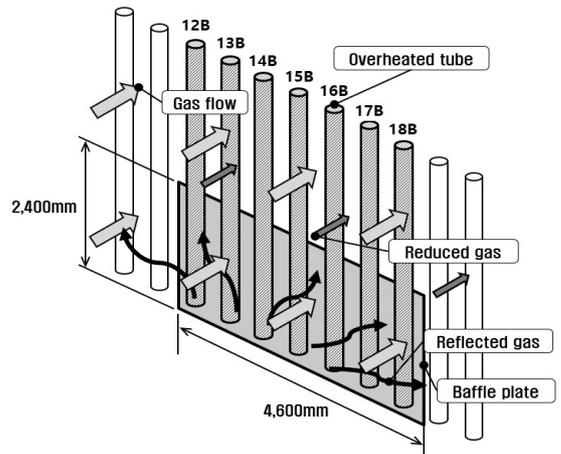


Fig. 5 Installing baffle plate behind the bundle

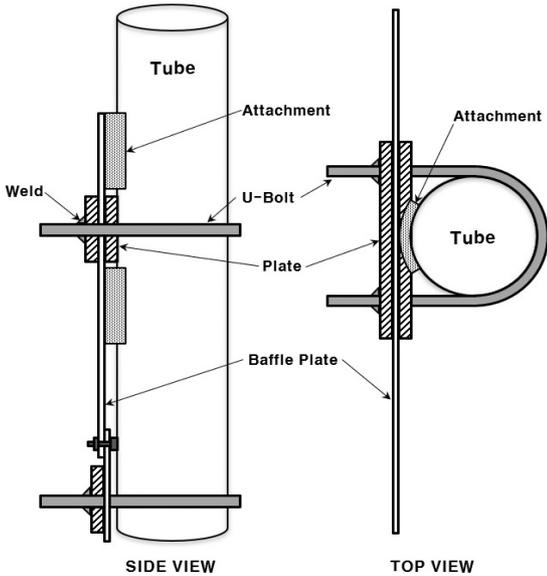


Fig. 6 Attaching baffle plate on tube

너트 조립부는 가스 유동으로 인한 미세한 진동에 의해 탈락되지 않도록 용접으로 단단히 고정하였다. 특히 마찰에 의한 튜브감속을 방지하고 다공판 진동에 의한 변들 전체의 흔들림을 방지하기 위하여 튜브 외경치수로 라운딩된 중간판을 삽입하여 다공판과 튜브를 단단히 밀착시켰다. 다공판 설치 전·후 튜브 온도편차 분석은 아래의 수식으로 계산하였다. [9]

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-4)$$

여기서 σ 는 표준편차, N 은 변들 수, x_i 는 변들의 개별 온도, \bar{x} 는 평균온도이다.

설치 후 온도데이터는 설치 전과 동일하게 15일 동안 1분 간격 데이터를 추출하여 일일 평균온도를 산출하였다. 또한 일일 최고온도도 설치 전과 동일하게 15일간의 온도를 분석하여 일별 최고온도를 기록하였다. 한편, 보일러 효율 산정기준은 입출력법(Input-output method)과 열손실법(Heat loss method)이 있다. 일반적으로 열손실법이 오차가 적고 신뢰성이 좋으나 스팀의 온도와 과열저감수량 변화에 따른 효율변화는 입출력법으로 쉽게 산출이 가능하다. 입출력법을 이용하여 과열저감수량과 재열증기 온

도변화에 따른 보일러 효율이 어떻게 변하는지 알아보았다. [10]

$$\eta = \frac{Q_{OUT}}{Q_{IN}} \quad (2-5)$$

여기서 η 은 보일러 열효율(%), Q_{OUT} 은 보일러 출력총합, Q_{IN} 은 보일러 입력총합이다. 그리고 재열증기 과열저감수량은 성능시험 데이터를 통하여 취득하였으며 데이터 값은 2시간 평균값을 적용하였다. 성능시험은 연구전·후 모두 Governor free off, Load limit mode, 계통 격리 상태에서 2시간 동안 진행되었고 시험탄종은 GLENCORE-A + VITOL-A + GLENCORE-I 탄을 6.0 : 2.2 : 1.8의 비율로 혼탄하였다.

제 3 장 결과 및 고찰

3.1 다공판 설치 전후 튜브 온도 분석

3.1.1 튜브 평균온도 변화 분석

다공판 설치 후 운전을 실시하고 15일간 온도 데이터를 추출한 후 평균온도를 구하였다. Fig. 7은 다공판 설치 및 미설치 구간별로 평균온도 변화를 나타낸 것이다. 목표로 설정했던 12~18번들 구간의 온도가 대폭 하락하여 예상과 부합하였다. 이 구간의 온도는 평균 3.8℃ 하락하여 전체적으로 온도가 균등화된 모습을 보여주고 있다. 가장 높았던 15번들의 온도가 617.7℃에서 609.6℃로 8.1℃ 하락하여 다공판의 직접적인 영향을 가장 많이 받았다고 볼 수 있다. 다공판이 설치되지 않은 1~11번들의 평균온도는 0.4℃ 소폭 상승하였다. 이러한 온도 상승은 다공판에 의한 가스흐름의 분산으로 12~18번들의 가스 일부가 섞이면서 나타난 결과로 연구의 긍정적인 효과이다. 한편 반대구간인 19~24번들 구간의 평균온도는 거의 변화가 없었다. 이 원인을 정확히 알 수 없으나 소용돌이 화염의 특성상 한쪽 으로부터 영향이 작았다고 추정할 수 있다.

Fig.8은 다공판 설치 전·후 15일간 온도평균 값을 비교한 그래프이다. 설치 전·후 온도변화 패턴을 쉽게 비교할 수 있도록 그래프에는 전후 데이터를 모두 나타내었다. 시험 전 6번들과 15번들을 중심으로 명확하게 쌍봉형태를 보

다공판 연소가스 유량제어를 통한 석탄화력발전소 보일러 성능 개선

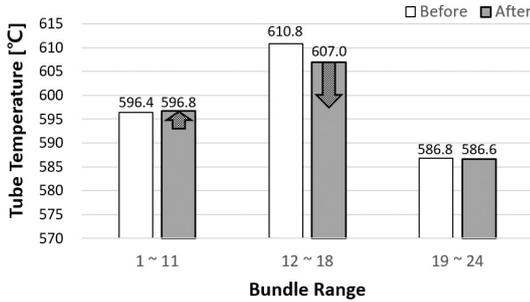


Fig. 7 Average tube temperature change by baffle plate

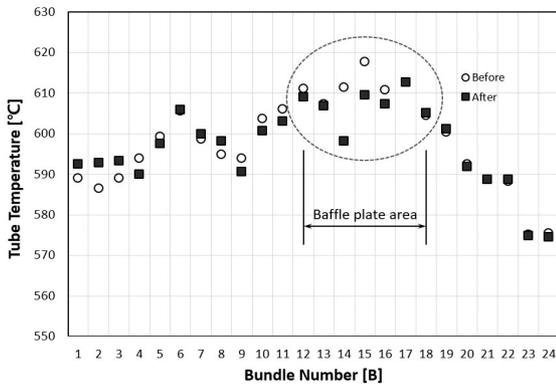


Fig.8 Effect of baffle plate on average temperature

이런 패턴이 상당히 완화되었음을 알 수 있다.

3.1.2 튜브 평균온도 편차 분석

Fig.9은 다공판에 의한 튜브 평균온도와 표준편차의 변화를 보여주고 있다. 전체 평균온도는 1.0℃ 소폭 감소하였고 표준편차는 시험 전 11.4℃에서 시험 후 9.9℃로 1.5℃ 감소되었다. 기존 온도가 높았던 12~18번들 구간이 낮아지고 반대로 1~3번들처럼 온도가 낮았던 구간이 높아지면서 튜브간 온도편차가 완화되었음을 알 수 있다.

가장 이상적인 현상은 모든 튜브의 온도가 평균온도 즉 표준편차가 0으로 수렴하는 것이나 이를 위해서는 새로운 개념으로 설계가 이루어져야 하고 그에 수반되는 비용과 제약사항은 매우 클 것이며 현재와 같은 설비개념으로는 현실적으로 불가능하다. 그러나 다공판을 이용해 연소가스 흐름을 일부 제어하여 편차가 감소했다는 점은 매우 의미가 있다.

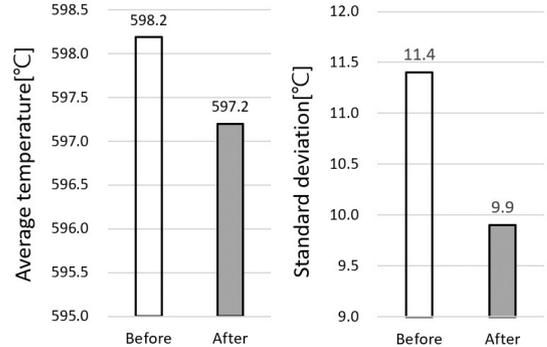


Fig.9 Average and standard deviation of temperature

3.1.3 튜브 일일 최고온도 분석

일일 최고온도도 설치 전과 동일한 기간과 방법으로 산출되었다. Fig.10은 15일간 분석한 튜브의 일별 최고온도이며 설치 전·후 비교가 용이하도록 그래프에는 전·후 데이터를 모두 나타내었다. 다공판 설치 후 일일 최고 온도는 모든 튜브를 대상으로 하여도 15일간 630℃ 이하를 유지하고 있다. 일일 최고온도 기준으로 15개 번들은 평균 7.62℃ 하락하였다. 동일 출력조건에서 튜브 최고온도가 낮아지고 관리 온도 이하로 유지되는 이 결과도 매우 고무적이다. 이번 연구의 가장 중요한 부분인 15일간 최고온도는 시험 전 9번들 튜브의 636.0℃에서 시험 후 5번들 튜브의 623.4℃로 12.6℃ 하락하였다. 효율증대 및 튜브 수명 감소 측면에서 매우 긍정적인 결과라고 할 수 있다.

3.2 튜브 일일 온도 패턴 변화와 튜브에 미치는 영향

다공판 설치 전·후 일일 온도변화를 살펴보았다. Fig. 11는 온도가 높았던 12~18번들 총 7개 번들의 15일간 최고온도와 최저온도의 차이값을 나타낸 그래프이다. 다공판 설치 전 평균 38.4℃에서 설치 후 평균 11.0℃로 온도변화가 현저히 낮아졌음을 알 수 있다. 거의 모든 번들의 튜브온도가 40℃가까이 큰 폭의 변동을 보였던 것에 비해 다공판 설치 후에는 온도가 낮아졌음을 물론이고 온도 변동폭이 10℃ 내외로 매우 작았다.

튜브 온도 변동폭 감소는 과열저감수 주입량이 감소했을 때 나타나는 직접적인 효과이다. 과열저감수는 튜브 온도

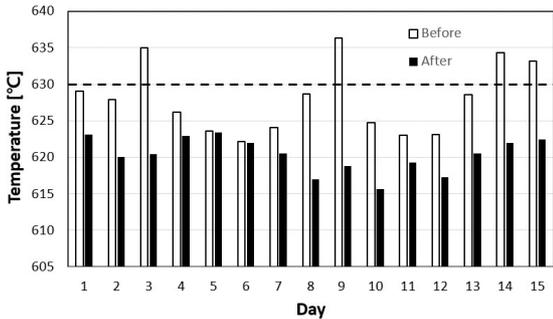


Fig. 10 Effect of baffle plate on peak temperature

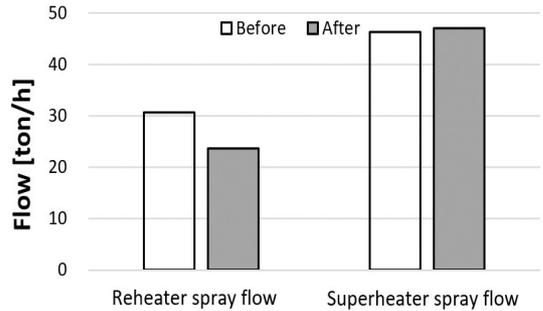


Fig. 12 Spray flow change

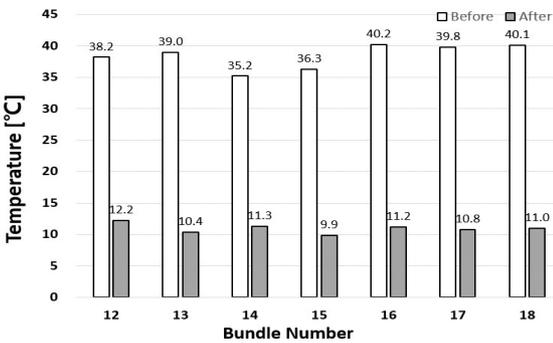


Fig. 11 Tube temperature variation during 15 days

설정치를 기준으로 주입량이 조절되고 있으며 과도한 저감수의 주입은 일정한 양의 주입형태보다는 On-Off 형태로 주입되면서 튜브에 심각한 열적 응력손상을 줄 수 있다. 또한 튜브의 온도 변동폭이 과도할 경우 튜브는 과도한 수축 팽창을 반복하며 곡관부 및 구속부위에 응력이 반복적으로 작용하여 파손으로 이어질 수 있으므로 튜브의 일정한 온도유지는 튜브 관리측면에서 매우 중요하기 때문에 온도 변동폭 감소는 성능 개선에 효과가 있다.

3.3 재열증기 과열저감수량 및 튜브 열흡수율 변화

3.3.1 과열저감수량 변화 분석

다공판설치 전·후 보일러 성능시험을 수행하여 과열저감수량 비교분석을 하였다. 앞에서 튜브 일일 최고 온도가 하락하였다는 결과를 얻었지만 과열저감수량이 증가하여 반영된 결과라면 이 연구는 아무 의미가 없어지기 때문에 성능시험을 통한 데이터 측정은 매우 중요하다. 보일러 성

능시험은 연구 전·후 모두 동일한 조건에서 2시간 동안 시행하였고 데이터는 2시간 평균값을 적용하여 취득하였다.

재열증기 과열저감수 주입량은 Fig.12와 같이 다공판 설치 전 30,651 kg/h에서 설치 후 23,722 kg/h으로 6,929 kg/h 감소하였다. 연구대상이 아니었던 과열증기 과열저감수 주입량이 46,413 kg/h에서 47,170 kg/h으로 757 kg/h 증가하였는데 이는 지연연소 현상이 더 가중되었다는 것을 나타내고 있으나 재열증기 과열저감수량이 오히려 감소했다는 결과는 다공판이 일부 튜브의 과열을 방지할 것이라는 연구의 결과가 작용했다고 판단할 수 있다.

3.3.2 튜브 열흡수율 변화 분석

각 튜브별로 열흡수율 변화를 분석하였다. 열흡수율은 유체유량과 유체 입구와 출구 엔탈피의 차이를 곱하여 각 구간별 열흡수량을 구하고 보일러 전체 입열량과의 비율을 계산하여 튜브별 열흡수율을 백분율로 나타낸 것이다. 다공판 설치로 인한 재열기 성능 및 보일러 열흡수율에 미치는 영향을 알아보았으며 열흡수율 계산은 아래와 같이 수행되었다.

$$Q_{IN} = Q_F + Q_{BE} \quad (3-1)$$

여기서 Q_{IN} 는 보일러 입열량의 합계, Q_F 는 연소되는 연료 열량, Q_{BE} 는 무화스팀, 보조기기 공급열량 등 연소를 위해 수반되는 기타물질의 열량 총합이다.

$$H_{ECO} = \frac{F_{FW} \times (E_{ECO OUT} - E_{ECO IN})}{Q_{IN}} \quad (3-2)$$

여기서 H_{ECO} 는 절탄기(Economizer)의 열흡수율,

다공판 연소가스 유량제어를 통한 석탄화력발전소 보일러 성능 개선

F_{FW} 는 최종급수(Final feedwater)의 유량, E_{ECOOUT} 는 절탄기 출구 급수의 엔탈피, E_{ECOIN} 는 절탄기 입구 급수의 엔탈피이다.

$$H_{WW} = \frac{F_{FW} \times (E_{SEPARATOR} - E_{ECO OUT})}{Q_{IN}} \quad (3-3)$$

여기서 H_{WW} 는 수냉벽(Water wall)의 열흡수율, F_{FW} 는 최종급수의 유량, $E_{SEPARATOR}$ 는 기수분리기(Separator)의 증기 엔탈피, E_{ECOOUT} 는 절탄기 출구 급수의 엔탈피이다.

$$H_{SH} = \frac{F_{MS} \times (E_{MS} - E_{PSH OUT})}{Q_{IN}} \quad (3-4)$$

여기서 H_{SH} 는 과열기(Superheater)의 열흡수율, F_{MS} 는 주증기(Main steam)의 유량, E_{MS} 는 주증기의 엔탈피, E_{PSHOUT} 는 2차 과열기(Platen superheater)의 엔탈피이다.

$$H_{RH} = \frac{F_{RHIN} \times (E_{RH OUT} - E_{RHIN})}{Q_{IN}} \quad (3-5)$$

여기서 H_{RH} 는 재열기(Reheater)의 열흡수율, F_{RHIN} 는 재열기 스팀의 유량, $E_{RH OUT}$ 는 재열기 출구 스팀의 엔탈피, E_{RHIN} 는 재열기 입구 스팀의 엔탈피이다.

Fig.12은 시험 전·후 각 튜브별로 열흡수율 차이를 비교한 그래프이다. 재열기 열흡수율이 0.1% 감소하였으나 비

슷한 위치에 설치된 과열기 열흡수율 감소 0.4%와 비교하였을 때 그 값이 매우 작으므로 다공판으로 인한 영향은 없다고 판단할 수 있다. 재열기와 과열기 열흡수율이 동시에 저하된 원인은 연소실에 위치한 수냉벽(Water wall)의 열흡수율이 증가되었기 때문이고 이는 시험 전·후 제매기(Soot Blower) 운전상태 차이로 인한 결과라고 볼 수 있다. 한편 가장 후단에 있는 절탄기(Economizer)의 열흡수율은 0.2% 상승하였는데 이 값이 매우 작아 재열기에서 흡수되지 못한 열이 절탄기에서 흡수되었다고 보기에 어렵고 전체 열흡수율은 0.3% 상승하여 종합적으로 다공판으로 인하여 튜브 열교환에 장애를 일으킨 점은 보이지 않는다.

3.4 효율 및 발전단가에 미치는 영향

3.4.1 과열저감수량, 재열증기 온도변화와 보일러 효율의 상관관계

입출력법에 의한 효율산정식에 의거하여 과열저감수량과 재열증기 온도변화에 따른 효율변화 값을 계산하기 위해 아래의 식을 적용하였다.

$$\eta = \frac{Q_{MS} + Q_{HRS} + Q_{AX} + Q_{BCL} + Q_{BCP} - Q_{CRS} - Q_{FW} - Q_{RP} - Q_{CP}}{Q_F + Q_{BE}} \quad (3-6)$$

여기서 η 는 보일러 열효율(%), Q_{MS} 는 주증기 열량, Q_{HRS} 는 재열증기후단 열량, Q_{AX} 는 보조증기 열량, Q_{BCL} 은 보일러 사이클손실 열량, Q_{BCP} 는 보일러샘플링 열량, Q_{CRS} 는 재열증기전단 열량, Q_{FW} 는 최종급수 열량, Q_{RP} 는 재열기과열저감수 열량, Q_{CP} 는 과열기 과열저감수 열량, Q_F 는 연소되는 연료 열량, Q_{BE} 는 연료 연소를 위해 수반되는 기타물질의 열량이다.

Q_{RP} 에서 재열증기 과열저감수량을 1 ton/h 감소하면 효율은 0.006% 상승하고 Q_{HRS} 에서 재열증기 온도를 1℃ 상승하면 효율은 0.01% 증가한다는 결과가 도출된다. 한편 시험 후 데이터에서 가장 높은 온도를 기록한 5번들 튜브의 623.4℃를 기준으로 보면 630℃까지 추가 과열저감수 주입 없이 6.6℃의 재열증기 온도 상승여력이 있다. 다음은 이 두가지 이점을 바탕으로 보일러 효율상승을 분석하였다. 재열증기 과열저감수량 6,929 kg/h 저감으로

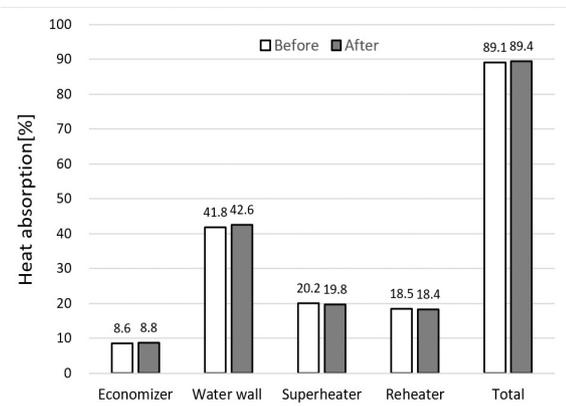


Fig. 13 Tube heat absorption change

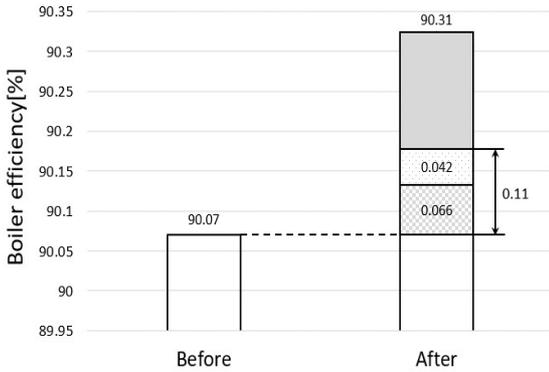


Fig.14 Boiler efficiency improvement

0.042%, 재열증기 온도상승 6.6℃로 0.066% 총 0.11%의 보일러효율 상승이 가능하다는 결과를 도출할 수 있다

Fig.13에서와 같이 보일러효율은 90.07%에서 90.31%로 0.24% 상승하였다. 단 열손실, 공기에열기 성능 등 다양한 인자에 의해 변하기 때문에 재열증기 온도와 과열저감수량에 의한 효율변화가 직접적으로 연관되는지 파악하기는 어렵다.

3.4.2 발전단가 절감 분석

앞에서 도출된 0.11%의 보일러효율 상승을 통해 발전단가 절감에 미치는 영향을 분석하였다. 전력량과 석탄열량의 상관관계인 1kWh = 860kcal의 기본관계식을 바탕으로 효율이 0.11% 상승하였을 때 원가 절감액을 구할 수 있는 식을 아래와 같이 도출하였다.

$$Cost = \left[\frac{\left(\frac{860 \times 100}{E - 0.11} - \frac{860 \times 100}{E} \right) \times W}{Q \times 1000} \right] \times 500,000 \times U \times 0.01 \times 24 \times 365 \quad (3-7)$$

여기서 Cost는 연간 절감액(원), E는 발전소효율 41.89%, W는 2020년 1분기 기준 석탄단가 65,880 원/ton, Q는 성능시험시의 석탄발열량 5,672 kcal/kg, 는 설비이용률 95.15%이다.

계산결과 재열증기 과열저감수량 감소로 99,733,285 원, 재열증기 온도상승으로 156,813,667 원 연간 총 256,546,952 원의 절감효과를 거둘 수 있다.

제 4 장 결 론

본 연구에서는 관리 기준온도를 초과하는 최종재열기 튜브의 온도를 다공판을 이용한 연소가스 유량제어로 선택적으로 낮추는 방법과 튜브의 온도편차 완화가 보일러 성능증대와 어떤 관련이 있는지 연구하였다. 튜브의 온도를 낮추는 방법은 여러 가지가 있으나 일부 튜브온도만 낮추어 온도편차를 줄이는 방법은 기술적 어려움 때문에 거의 시행되지 않고 있다. 본 연구는 다공판으로 연소가스에 저항을 주어 해당튜브의 온도를 낮출 수 있는 방법을 고안 및 실증하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 튜브변들 후면에 설치된 다공판은 일부구간의 연소가스 유량을 조절하는데 효과가 있었으며 온도가 높은 구간은 낮추고 반대로 온도가 낮은 구간은 소폭 올림으로써 튜브온도 편차를 11.4에서 9.9로 감소시켰다.
2. 최종재열기 중 과열이 가장 심했던 15번들 튜브의 평균 온도를 609.6℃까지 낮추었으며 전체튜브 기준으로 가장 높은 순간온도는 623.4℃로 튜브관리기준 630℃까지 6.6℃의 재열증기 온도 상승여분을 확보하였다.
3. 재열증기 과열저감수량 저감 6,929 kg/h으로 0.042%, 재열증기 온도 상승 6.6℃로 0.066% 총 0.11%의 보일러효율 상승이 가능하다는 결과를 도출할 수 있고 연간 총 256,546,952 원의 발전단가 절감효과가 있다. 튜브수명관리 측면으로 볼 때 튜브온도의 일일 변동폭이 40℃에서 약 10℃로 크게 감소하여 과열저감수로 인한 열충격방지, 과도한 수축팽창으로 인한 균열방지로 튜브수명증대 효과를 기대할 수 있다.
4. 향후 관련 연구는 튜브온도 편차를 9.9에서 더욱 줄일 수 방향으로 진행되어야 하고 연소가스 유동해석을 통한 시뮬레이션으로 다공판 설치 효과를 수치적으로 검증하는 후속 연구가 필요해 보인다.

참 고 문 헌

- (1) Korea Power Learning Institute, 2009, Boiler technology, pp. 67~68, pp. 89~93
- (2) EPRI, 2007, Boiler and Heat Recovery Steam

다공판 연소가스 유량제어를 통한 석탄화력발전소 보일러 성능 개선

- Generator Tube Failures: Theory and Practice
Volume 3: Steam-Touched Tubes, pp. 50~51,
pp. 69~74
- (3) Bum Shin Kim, Song Gee Wook and Seong
Yeon Yoo, 2012, Temperature Prediction
Method for Superheater and Reheater Tubes
of Fossil Power Plant Boiler During
Operation, The Korean Society of Mechanical
Engineers A, volume36, pp. 563~569
- (4) Yun Min Nam, Bum Shin Kim, 2018, Damage
Prediction of Heat Exchanger Tube in Boiler
by Combustion Gas Temperature Distribution,
The Korean Society of Mechanical Engineers,
pp. 51~52
- (5) Simkyun Yook, Sungho Kim, Haewon Jung,
Changho Cho, 2003, A Study on Operation of
Soot Blower for an Optimal Operation of
Power Utility Boilers, The Korean Society of
Mechanical Engineers, pp. 104~111
- (6) KOMIPO, 2009, Construction record,
Boryeong Thermal Power Generation
#7~8(Volume I), pp. 10~17
- (7) KOPEC, 2008, Boryeong Thermal Power
Generation #7~8 Operation Guide Book(I),
pp. 2~34
- (8) Korea Power Learning Institute, 2012, Boiler
Operation, pp. 157, pp. 237~239
- (9) Yeoung-ji publisher, 2000, Introduction of
Statistics, pp. 55
- (10) KOMIPO, 2009, Thermal Power and
Combined Power Generation Performance
Test Guidelines, pp. 74 