



해외발전사업 기술지원 사례 (사우디아라비아 라빅 화력 연소진동 문제 해결)



김 태 형

KEPCO 전력연구원 그린에너지연구소 선임연구원

1. 개 황

KEPCO는 사우디아라비아 서쪽 홍해에 접하고 있는 대도시 제다로부터 약 150km 북쪽에 위치한 작은 도시

라빅에서 중유전소 화력발전소에 대한 건설 및 운영 사업을 진행하고 있다. 이 사업의 총 사업비는 25억 달러 이고 발주처는 사우디전력공사(SEC)로 KEPCO 40%, 사우디아라비아 민간 에너지 기업인 ACWA 40% 그리고

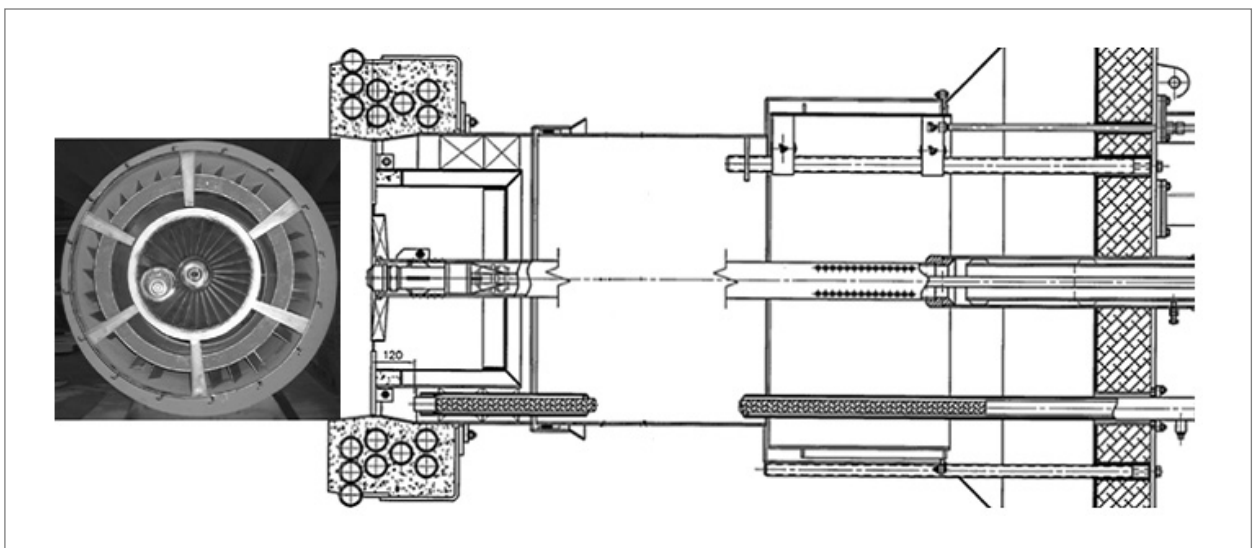
SEC 20%의 지분으로 2009년 착공되었으며, 중국기업인 SEPCOⅢ가 시공을 총괄하고 동광에서 주기기 제작을 맡고 있다.

발전소는 1, 2호기 각 660MWe(Gross)씩 총 1,320MWe의 설비용량이며, 1호기는 2012년 7월 1일 상업운전을 목표로 추진되었다. 보일러는 아임계의 자연 순환방식 드럼형으로서 연소방식은 보일러의 전면과 후면에 버너를 배열하여 연소하는 대향류 연소방식을 채택하고 있으며, 통풍은 평형통풍방식 기술로 설계되었다. 화로(Furnace)에는 연소되는 과정에서 발생하는 질소산화물(NOx)을 줄이기 위해 영국 Hamworthy사의 저 NOx 기술이 적용된 DFL755 모델 버너 48개가 배치되어 있고, 버너 상단에 Over Fire Air(OFA)를 주입하기 위해 전면과 후면에 각각 6개씩 총 12개의 OFA 포트를 구비한 다단 연소 기술을 적용함으로써 NOx와 CO 배출량을 규제치 이내로 맞출 수 있게 되어 있다.

라빅 1호기는 건설공정에 따라 2012년 4월 12일 오전, 계통병입을 개시한 이후 출력을 증가시키면서 시운전을

진행하고 있었으며, 4월 15일 낮에 부하가 420MWe 도달하였을 때 보일러에서 원인을 알 수 없는 심한 진동이 발생하였다. 그 즉시 출력 감발을 통해 진동이 사라지도록 조치를 취했다. 4월 15일 밤에, 공기유량을 줄이는 과정에서 진동이 다시 발생하기는 했지만 420MWe에서 500MWe까지 출력을 증발하는 과정에서는 진동이 발생하지 않았다.

하지만 부하가 545MWe에 도달했을 때 심각한 진동이 발생하여 연료의 압력을 낮추고 출력을 518MWe까지 감발하여 해결하였고, 이후에도 여러 출력에서 진동이 발생할 때마다 출력을 감발하는 방법으로 조치하였다. 보일러 제작사와 시공사에서는 진동의 주요 원인을 Karman Vortex로 판단하여 보일러를 정지한 후에 절탄기와 공기에열기 사이에 진동방지를 위한 보완작업을 수행하고 보일러를 재가동 하였지만 진동문제가 해결되지 않고 200MWe~400MWe 부하에서도 진동이 계속 발생하였다. 시공사와 제작사는 진동의 근본적인 원인을 파악하기 위한 여러 가지 방법을 다각도로 시도하였으나 명확한 원인을 규명할 수 없는 상황에서 시운전이 계획



[그림 1] 라빅 보일러에 적용된 저 NOx 버너

대로 진행되지 못함에 따라 심각한 건설 공기 지연이 발생되었다. 라빅 1호기는 2012년 7월에 시작되는 라마단 기간의 냉방부하 대응을 위해 긴급하게 건설이 추진되었기 때문에 진동문제가 해결되지 않으면 사우디 정부는 물론 KEPCO도 향후 사우디 전력시장 진출에 큰 장애요인이 될 수 있는 상황이었다. 이에 전력연구원의 연소 및 진동분야 전문가 3인이 문제 해결을 위한 긴급 기술 지원에 투입되었다.

2. 현황

가. 보일러 진동원인 규명

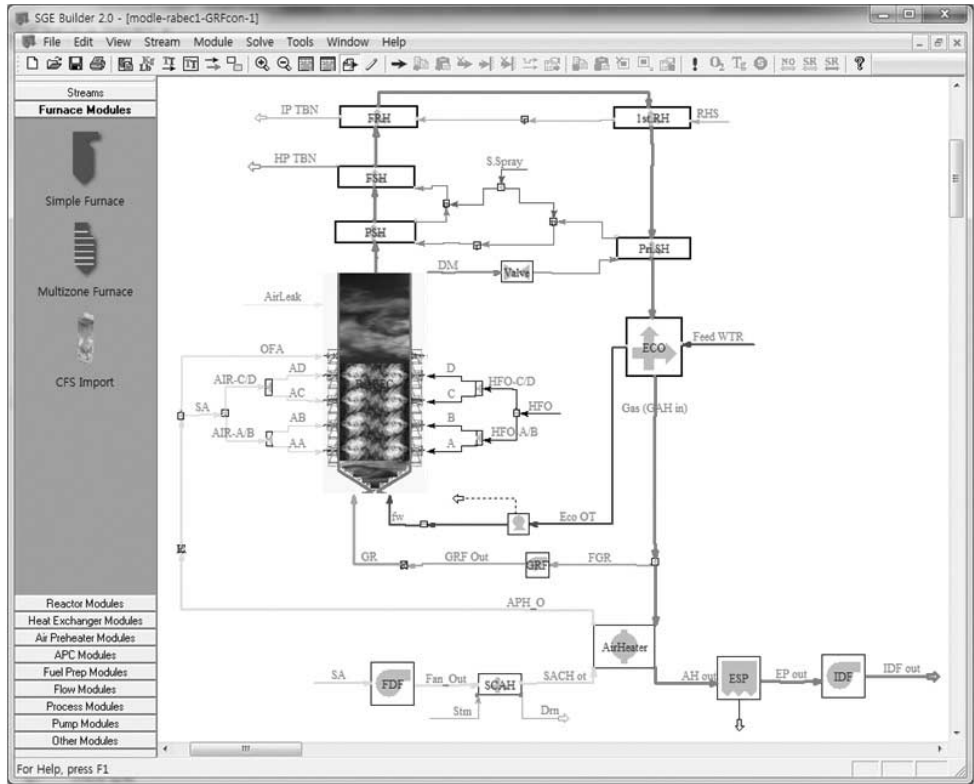
전력연구원 팀이 라빅발전소 현장에 도착한 5월 13일 까지 시공사와 제작사는 보일러에서 발생하는 진동의 원인파악과 문제 해결을 위해 무수히 많은 방법과 기술을 시도하고 있었다. 전력연구원 지원팀은 설계 자료와 현장 설비에 대한 점검, 시행이 완료된 방법에 대한 종합적인 검토와 진행 중인 시운전 과정 모니터링, 보일러 각부에 대한 진동측정 등의 업무를 체계적으로 진행하였다.

그 결과 라빅 1호기 보일러에서는 절탄기 부위와 보일러 복사부에서 진동이 발생하고 있음을 알게 되었다. 절탄기 부위에서 발생하는 진동은 연소가스가 튜브 사이를 흐르면서 발생하는 Karman Vortex에 의한 진동이 그 부분의 음향 고유진동수와 일치하는 공진이 원인이었다. 이러한 와류에 의한 진동은 진동발생 부위에 대한 적절한 계산을 통해 Baffle Plate를 설치함으로써 비교적 쉽게 해결할 수 있다. 보일러의 복사부에서 발생하는 연소진동 현상의 원인을 찾기 위한 방법은 시공사와 제작사에서 시도했던 사항을 종합적으로 분석하는 것으로부터 출발하였으며, 이에 근거하여 연소진동 원인과 관계가 없는 것을 차례로 배제하는 방법을 사용하였다. 이후에는

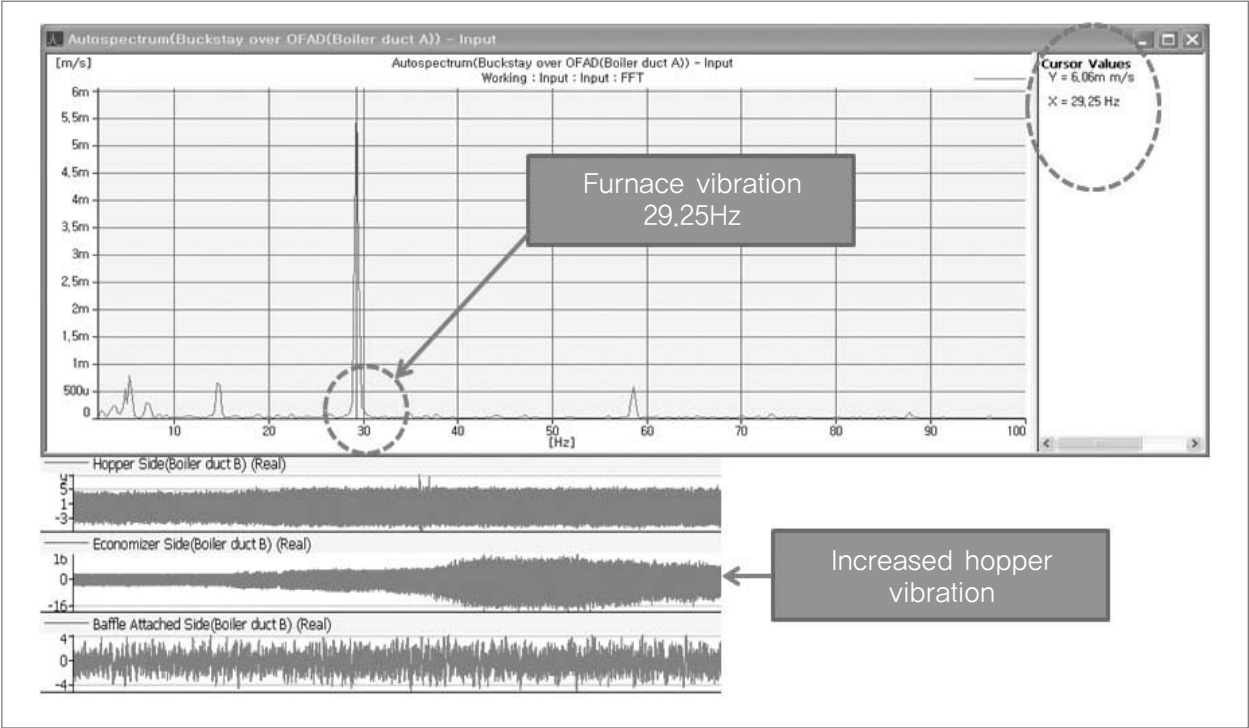
아직 테스트 되지 않은 실험방법으로 연료 또는 분무 스팀에 의한 맥동과 연소진동과의 상관성 유무를 확인하기 위한 실험과 함께 공기유속, 연소용 공기량, 연소 가스량 및 노내압력의 상관성에 대한 실험을 통해 이러한 것들이 복사부에서 발생하는 연소진동의 원인과 무관함을 확인하였다.

궁극적으로는 버너와 보일러의 형상에 따라 Rijke와 Sondhauss 이론에 의해 발생하는 열 음향 주파수와 보일러의 고유진동수가 공진하여 발생하는 열 음향에 의한 연소진동에 주목하기에 이르렀고, 관련된 해석을 진행하였다. 열 음향 진동은 열의 흐름과 열전달의 상호작용으로 발생하며, 결과가 진동주파수로 나타나는 현상인데 대표적인 열 음향 현상에는 양쪽이 열린 관에서 흐르는 기체가 가열 또는 냉각할 때 발생하는 Rijke 진동과 한쪽 또는 양쪽이 막힌 관에서 온도 편차가 클 때 발생하는 Sondhauss 진동이 있다. 열 음향 진동이 발생하지 않기 위해서는 화로의 음향주파수(고유진동수)와 열 음향주파수가 유사하지 않도록 하여야 하고(설계 가이드 1), 열 음향모델에 의한 계산결과가 열 음향 안정성 그래프의 진동발생 영역에 위치하지 않도록 설계(설계 가이드 2) 되어야 한다. 라빅 보일러에 대한 열 음향 진동 해석결과 설계가이드 1은 통과하였으나 설계가이드 2를 만족시키지 못하는 것으로 나타나 복사부에서 발생하는 연소진동 원인이 열 음향 진동임을 제시하였다.

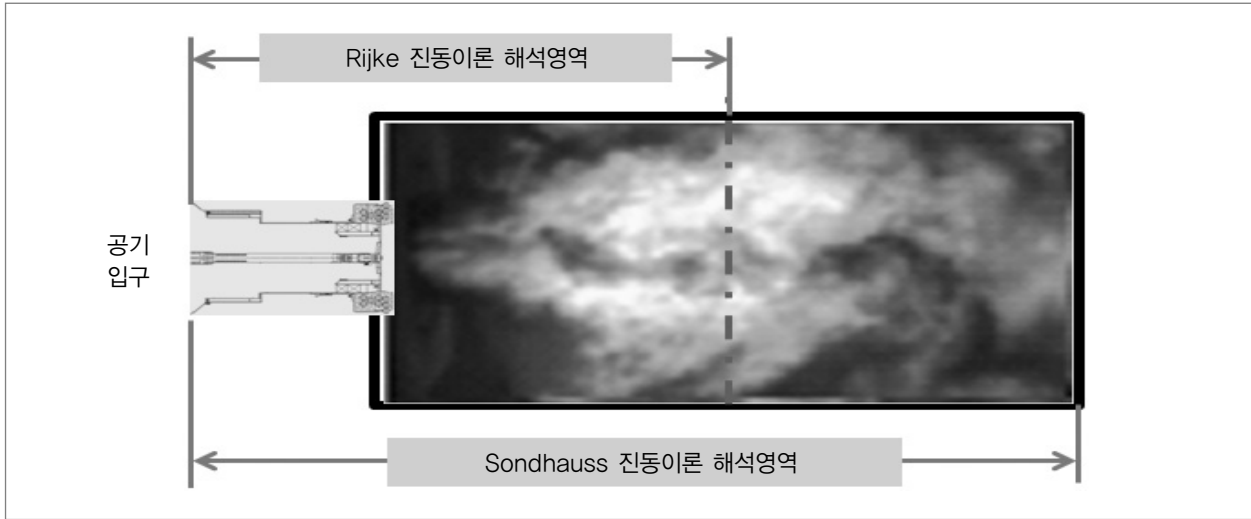
열 음향 진동을 회피하기 위한 현장테스트 방법으로 노내압력 변경을 통한 열 음향모드 변경 가능성을 평가하기 위해 노내압력을 상승시켜 연소진동 해소방안을 테스트한 결과 효과가 없었다. 연소 지연 및 분무특성 변화를 통한 열 음향모드 변경 가능성을 평가하기 위해 연료와 연소용 공기온도 저하 테스트를 제안하였으나 시공사로부터 수용이 거부되어 더 이상의 현장테스트를



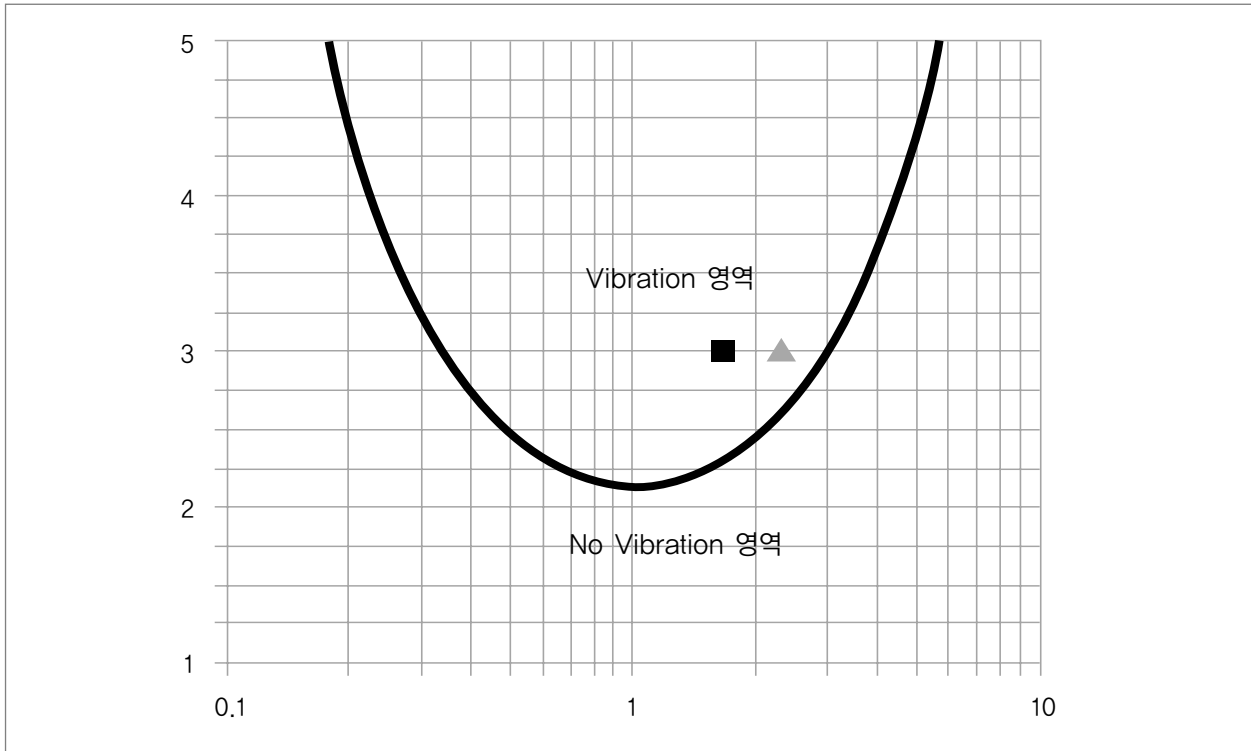
[그림 2] 설계자료 검증을 위한 공정해석



[그림 3] 보일러 고 진동발생 시 측정된 진동데이터



[그림 4] 열 음향 진동이론 해석영역



[그림 5] 라빅 보일러 열 음향진동 안정성 평가

진행할 수 없었다. 라빅 보일러의 복사부에서 발생하는 연소진동은 하드웨어 변경 방법을 통해 해결하고, 연소 장치의 설계를 변경하거나 보일러의 폭과 깊이를 변경하여 측정된 주파수로부터 안정된 주파수 영역을 벗어

나도록 강구되어야 했다. 이를 위해서는 연소기를 개선하는 방법이 보일러 본체를 변경하는 것보다 상대적으로 용이하므로 Rijke과 Sondhauss 이론에 근거한 연소기 개선을 제안하였다.

나. 보일러 진동원인 해결

시공사와 제작사에서는 전력연구원 지원팀이 제안한 사항을 일부분만 수용하여 버너의 외통에 다수의 홀을 뚫어 개조작업을 진행하였다. 개조된 버너에 대한 효과를 검증하기 위한 현장 테스트가 진행되었고, 전력연구원 팀도 추가적인 기술지원을 위해 2차로 현장에 투입되었다. 버너 1차 개조의 현장테스트 결과 효과가 미미하여 연소진동은 계속적으로 발생하였다.

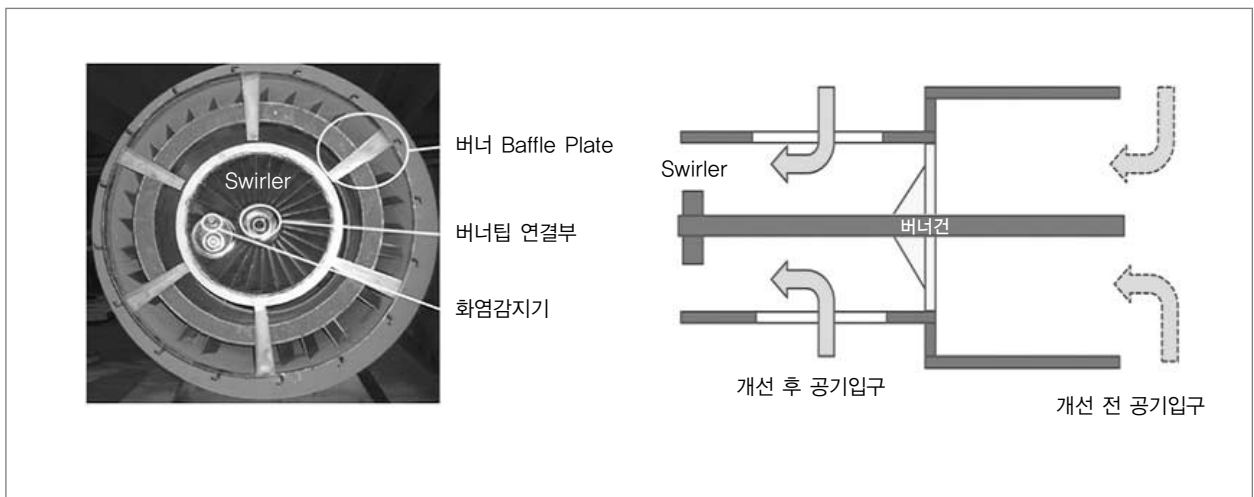
이러한 결과에 대해 시공사와 제작사는 연소진동의 원인이 열 음향 진동이 아니었다고 강력히 주장하였고, 전력연구원 팀은 체계적인 검증테스트를 통해 열 음향 진동이 맞지만 전적으로 전력연구원의 제안이 수용되지 않았기 때문에 효과가 미흡한 것이라는 의견을 제시하였다.

진동감소 효과의 미미함에 실망한 ACWA 회장은 세계 모든 전문가를 불러서 문제를 해결하라고 현지 법인인 RABEC에 지시함으로써 사우디 라빅발전소 연소진동 문제는 세계엔지니어링 시장에 널리 알려졌다. 8개국 10개 전문기관에서 정확한 진동의 근본원인과 대책수립을

위해 참여하였으며, 다양한 의견제시와 함께 열띤 토론이 이어졌다. 대부분의 참여 기관들은 전력연구원 팀이 제시한 연소진동 원인분석 결과에 대하여 회의적인 의견을 제시하였지만, 전력연구원 팀의 체계적이고 논리적인 주장이 현장에서 발생되고 있는 현상과 점차 부합됨에 따라 RABEC의 오너스 엔지니어링 회사인 B&V에서 전력연구원 팀의 의견을 받아들이게 되면서 전력연구원 팀의 개조방안이 적극 수용될 수 있게 되었다.

2차 연소장치 개선 후에 진행된 테스트 과정에서 출력 570MWe에 도달하였을 때 연소진동이 발생하였으나, 크기는 7~8mm/s로 이전의 60mm/s와 비교하여 크게 낮았고, 곧바로 전력연구원 팀에서 제안한 중유온도 조정 등 여러 운전 변수조정이 이루어져 추가적인 연소진동 발생 없이 시운전 개시 후 거의 3개월 만에 660MWe에 도달할 수 있었다.

이러한 결과를 바탕으로 전력연구원 지원팀은 현재의 설비상태 조건으로 사우디의 하계피크 전력공급 기간 중에 적용할 수 있는 운전 시나리오 5가지에 대한 설비 건전성을 확률적으로 제시하고, 현지의 전력사정과 설비의



[그림 6] 연소진동 방지를 위한 버너 설비 개선사항

상태를 고려하여 피크시간대는 100% 출력으로 운전하고 기타시간은 85% 출력운전을 추천하였다.

또한, 증유 가열온도는 동점도 기준으로 30~35cSt, 보일러 하부 3개 층은 연료 증가 및 최상부 1개 층은 연료 감소 운전, 연소가스 재순환 가스량과 OFA는 설계 값 준수, 주기적인 Soot Blowing 실시, 운전 마진 확보를 위해 연소튜닝 실시 등 세세한 기술적 사항들을 제시하였다.

운전 주의사항으로는 '최 하단 버너에 과잉연료량을 공급하는 운전방법은 하부튜브를 과열시키므로 시도하지 말 것', '과도한 CO₂발생 운전은 공기에열기와 전기집진기의 화재 발생이 우려되므로 피할 것', '재열기의 과열저감수 공급량이 과도하게 공급되고 있어 튜브 과열 및 파손 우려가 있으므로 대책을 강구할 것' 등에 대해 제안하고 기술지원을 완료하였다.

3. 향후 계획

전력연구원 지원팀에서 수행한 이번 기술지원의 최우선 목적은 라빅 1호기가 2012년 사우디의 하계피크 기간 중에 정상범위 출력조건으로 원활한 전력공급이 가능하도록 연소진동 문제를 해결하는 것이었다. 이에 맞추어 사우디 라빅 1호기의 연소진동 문제 해결에 필요한 한시적인 대책이 수립되었기 때문에 위기는 극복하였으나 설비준공에 필요한 모든 조건을 충족하기 위해서는 문제 해결에 필요한 충분한 지식을 바탕으로 시간과 노력을 투입하여 근본적인 해결책이 마련되어야 한다. 동 사업은 일괄수주방식으로 발주되었기 때문에 시공사나 제작사에 문제해결의 우선 책임이 있지만 지속적인 모니터링과 지원을 지속하여 연소진동을 포함한 전반적인 문제가 완전히 해결되어 안정적 설비운영이 가능하기까지 최선을 다할 것이며, 현지 기술지원이 필요할 경우에는 적극 수용할 예정이다. KEA