

전산유체역학(CFD)기술을 활용한 발전소 보일러 진단



백 세 현
KEPCO 전력연구원 선임연구원

1. 개요

최근 컴퓨터 성능의 괄목할만한 발전에 힘입어 여러 산업계에서 전산유체역학(Computational Fluid

Dynamics)을 활발히 활용하고 있다. 프로그램의 고도화 및 사용자 편리성이 뛰어난 인터페이스의 개발 덕분에 과거에 비해 CFD분야의 전문지식을 갖춘 전공자가 아니라도 비교적 원활하게 CFD Tool을 업무에 활용할 수

있게 되었다.

발전산업계에서도 보일러, 터빈, 가스터빈 및 보조기기 전반에 걸친 설계 검증 및 개선 분야에서 CFD를 활용하는 시도가 꾸준히 진행되어 왔으며, 해석결과의 신뢰도도 높아지고 있다.

아울러 발전설비의 진단 분야에서도 CFD는 유용한 도구로 활용되고 있다. 발전설비에 대한 진단 및 특성 분석은 실험과 해석의 두가지 방법으로 접근할 수 있다. 그중 실험적 방법의 경우 측정이 어려운 고온부나 접근이 불가능한 부위의 제약으로 어려움을 겪는 경우가 많으며, 의미 있는 데이터를 얻기 위해서 상당히 긴 시간의 측정이 필요할 때도 있다. 또한 가장 큰 문제점은 발전소의 운영 여건상 실제 대형설비에서 여러 가지의 변수에 대한 시험을 시행하기에는 경제적인 어려움과 함께 실험조건을 구현 하는데 많은 제약이 따른다는 것이다. 반면에 해석적 방법은 상대적으로 제약이 덜하면서 극단적인 운전 상황

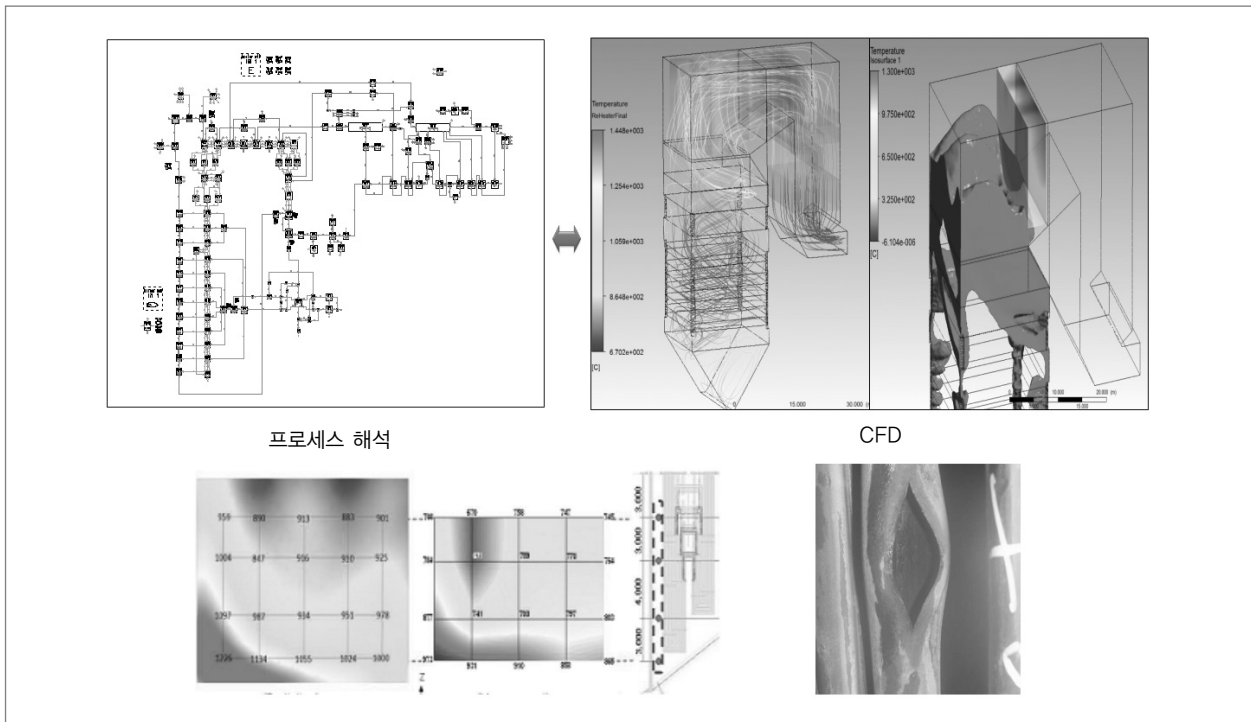
까지도 시뮬레이션 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 현 시점에서 해석적 접근 방법만으로는 신뢰도를 충족시키는데 다소 무리가 있을 수 있어 실험과 해석의 적절한 병행이 요청되고 있다.

본고에서 그동안 수행했던 업무 중 전산유체역학(CFD)기술을 활용한 발전설비 진단사례를 발췌하여 요약 하였다.

2. 발전설비 진단사례

가. 보일러 연소문제점 진단 및 예측

일반적으로 보일러 CFD 해석 시 화로 및 전열관군에서의 경계조건은 설계 데이터나 운전데이터를 참고한 후에 계산한다. 그러나 본 사례에서는 보다 정확한 해석을 위해 프로세스 해석을 활용한 물/증기(Steam/Water)



[그림 1] 'Y' 석탄화력 보일러 연소특성 분석을 위한 프로세스-CFD 연계 해석

사이클에 대한 열성능 해석과 벽면 온도 및 전열관군에서의 열흡수량 등의 결과를 CFD 해석과 주고받으며 연계(Coupled)하여 계산하는 기법을 시도하였다.

Y발전소 보일러에 대한 Coupled 해석을 시행하여 전열관군 표면온도, 최종과열기 전단 가스온도 및 복사강도 등의 불균형을 예측하였다. 그 결과 실제 운전 데이터(주요 전열관군의 증기 온도, 튜브 금속온도 및 주요 튜브 파열 발생위치 등)와 서로 일치하는 경향을 알아냈다. 또한 화로내의 미분탄 버너와 각종 공기 노즐의 수평, 수직 분사각도를 조정하여 최종과열기의 증기 온도 편차를 저감시키는 방안을 검토하였다.

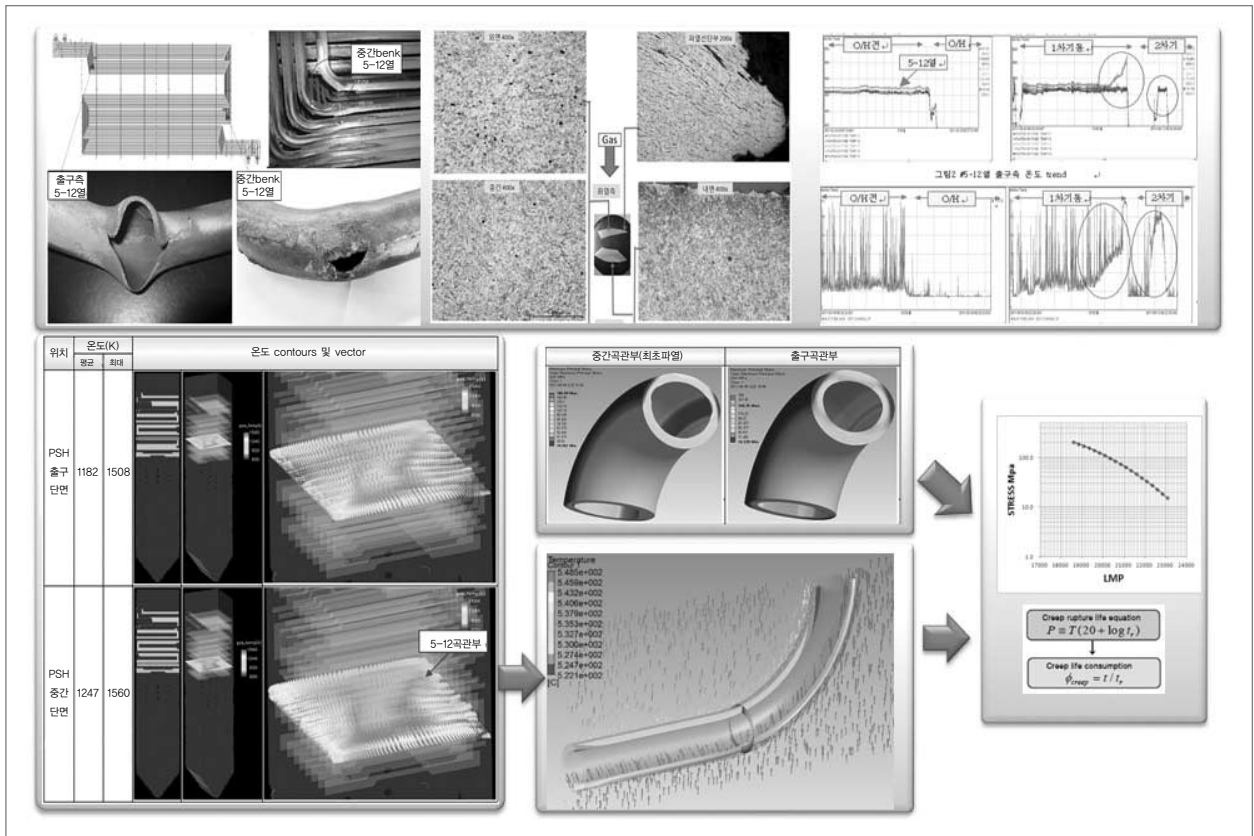
나. 보일러 해석적 수명예측 진단

최근 석탄화력 보일러에서 설계마진이 충분한 튜브

에서도 조기에 파열이 발생하는 사례가 빈번하였다(주로 곡관부 및 Heat Flux가 높은 부위).

보일러 튜브의 크리프 수명은 금속온도, 응력, 사용시간의 함수이지만 기존의 방법으로는 정확한 금속온도와 응력을 예측하는 것이 어렵다.

본 사례에서는 CFD 연소 해석과 프로세스 해석을 통해 얻은 가스온도 및 증기온도를 입력조건으로 Conjugated Heat Transfer 기법을 활용하여 정확한 튜브 금속온도를 예측하였다. 실제 튜브의 가공형상을 반영하여 응력 해석을 시행한 후 Larson Miller Parameter법에 의한 수명예측을 시행한 결과, 실제손상 경향과 유사한 결과가 도출되었으며, 그 결과를 정비계획 수립에 활용하였다.



[그림 2] 'B' 석탄화력 보일러 2차 과열기 튜브에 대한 해석적 수명 예측

다. Flow Accelerated Corrosion 분석

국내복합화력 발전소 배열회수보일러의 저온증발기에서 튜브 내면 측의 두께 감소에 의한 손상이 진행되었으며, 특히하게 이상(증기+물)조건인 출구 측은 물론 단상(물)인 입구연결배관 주변에서도 누설이 빈번하게 발생되었다.

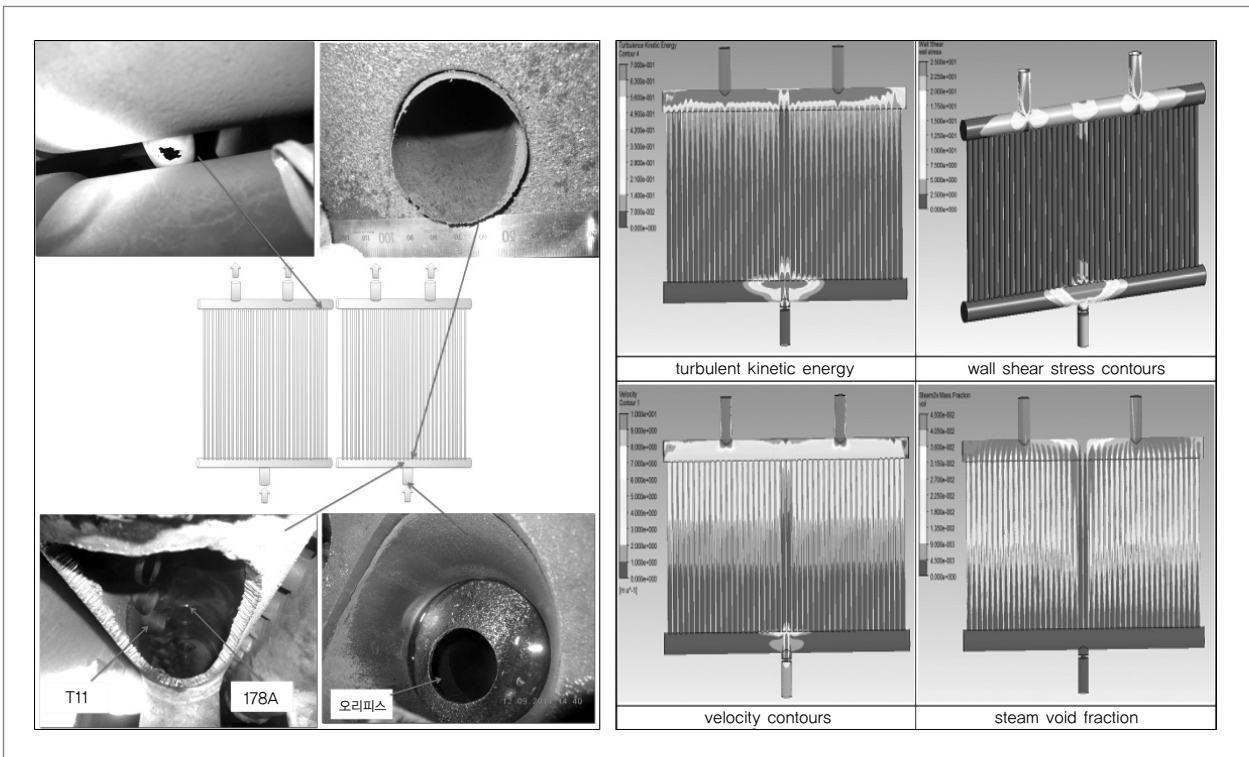
CFD 해석결과 높은 유속, 난류, 수처리조건의 영향에 의한 Flow Accelerated Corrosion이 주된 손상원인으로 규명되었다.

출구 측은 Steam Void Fraction의 증가에 따른 유속이 증가하고, 강한 난류가 발생하는 입구 측은 적정하지 못한 오리피스 설치조건에 의해 Flow Accelerated Corrosion취약환경이 조성되는 것을 확인하였다.

라. 표준화력 보일러 수냉벽 부식원인 진단

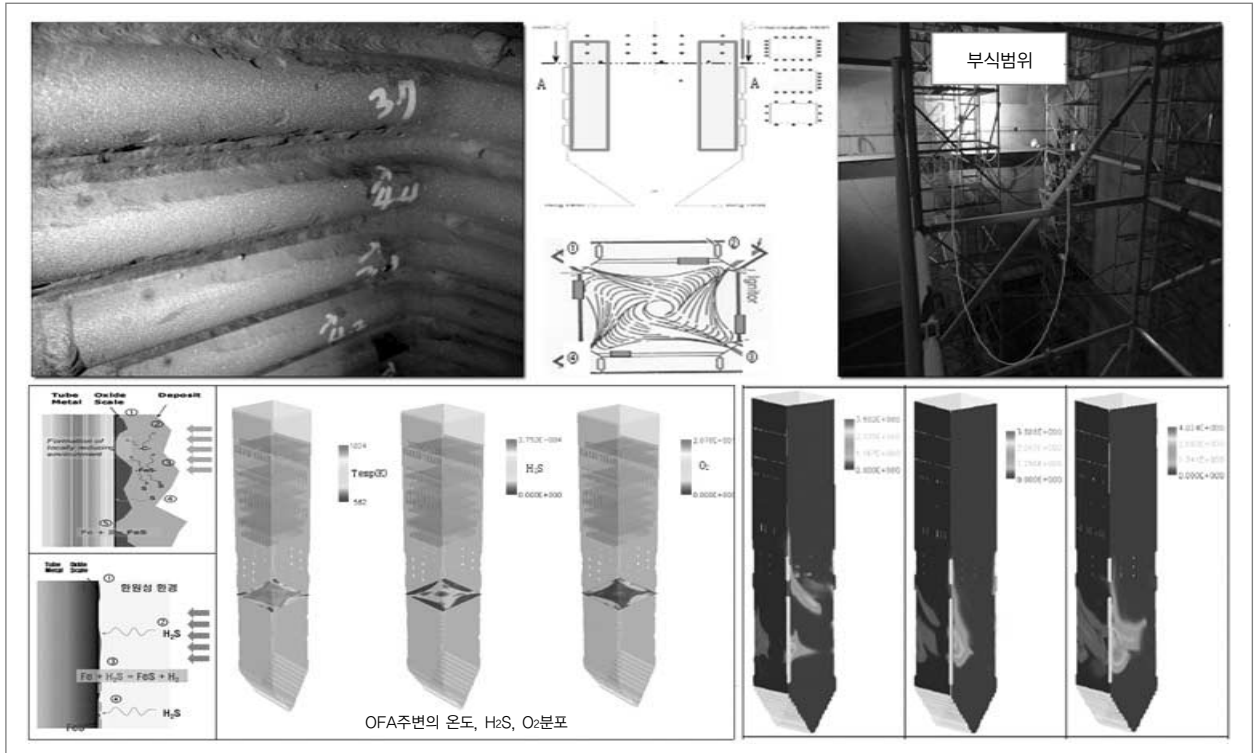
표준석탄화력 발전소의 증발기 튜브에 부식현상이 심하게 발생되고 있으며, 튜브누설에 의한 발전소 불시정지도 수차례 발생되었다.

실험실에서 얻은 부식관련 상관식을 활용하여 CFD 해석을 시행한 결과와 예측된 부식 취약부와 실제 현장의 부식 발생부위가 일치함을 확인하였다. 부식 발생 메커니즘은 ▲미연분 퇴적에 의한 미연분내 황성분의 영향 ▲과도한 저과잉 공기운전에 의한 환원성 분위기 형성 ▲벽면 주변의 H₂S가스의 영향 ▲버너지역의 높은 열부하에 의한 부식반응성 증가로 판명되었다. 아울러 운전변수가 부식에 미치는 민감도 분석을 통하여 부식을 완화시킬 수 있는 공기배분 방안을 도출하였다.

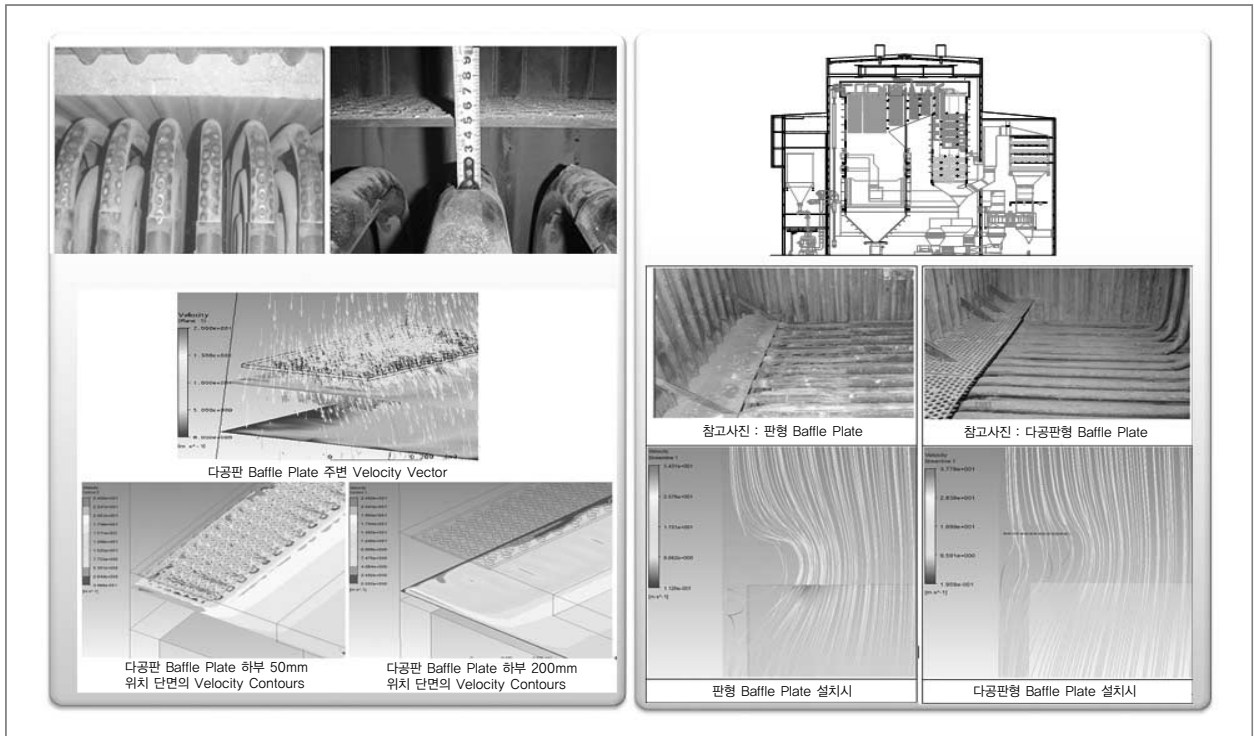


[그림 3] '1' 복합화력 배열회수보일러 손상관련 CFD 해석

☞ Flow Accelerated Corrosion Mechanism은 유체의 유동 특성과 부식 환경 등이 함께 작용하여, 탄소강이나 저합금강 재질로 설계된 HRSG 절탄기 및 증발기의 튜브, 배관, 드림의 벽 등에 두께감소를 발생시키는 손상기구이며, 주요영향인자는 형상조건, 수처리 조건, 재질, 유속, 난류강도, 온도 등이다.



[그림 4] 'B' 석탄화력 보일러 수냉벽튜브 부식관련 CFD 해석



[그림 5] 'D' 석탄화력 보일러튜브 마모원인 분석 및 개선을 위한 CFD 해석

마. 신규 석탄화력 보일러 튜브마모 원인분석 및 개선 방안 진단

석탄화력 보일러의 고질적인 문제점 중 하나는 ash 입자에 의한 보일러 튜브마모 발생이다. 이에 발전소에서는 계획예방정비 시 지속적인 보강을 시행하고 있으나 국부적인 마모 집중 현상에 의한 발전정지도 꾸준히 발생되고 있다. 신규 석탄화력 보일러에서도 설계 및 정비 방법 부적합에 의한 설비 손상이 발생되었다.

본 사례에서는 마모방지를 위해 설치하는 다공판형 Baffle Plate의 설치위치가 튜브와 근접할 경우 다공판의 Hole이 Nozzle 역할을 하게되어 ash 집중에 의한 심한 마모 현상이 발생됨을 규명하였고, 적절한 Baffle Plate의 형식과 설치방법을 제시하였다.

3. 전망

본고에서 소개한 내용은 발전용 보일러의 진단 분야와 관련된 CFD 활용 사례의 극히 일부분이고, 실제 발전 현장에서의 활용 사례 및 향후 잠재 가능성은 무한히 많을 것이다. 현 시점에서 적용가능한 발전용 보일러 관련 CFD 분야는 다음과 같다.

- **혼탄 평가** : 탄종별 연소 특성분석 및 최적 혼탄 비율(경제성 및 설비영향성 고려)
- **연소/전열특성 진단 및 운전최적화** : 실운전 Data를 활용한 해석, 운전변수별 민감도 및 최적의 운전 가이드 도출
- **손상원인 분석** : 연소와 관련된 보일러 튜브 손상 해석
- **유지정비 기준제공** : 샘플링위치 선정, 설비수명 관리/신뢰도평가 포인트 결정
- **설계검증 평가 및 개선** : 화로, 과열기, 재열기, 헤더 등의 설계검증 및 설비개선
- **고질적 문제점 원인 분석 및 해결** : 잔류선회유동 감쇄, 열관군내 온도 불균형 등

CFD Tool 자체가 모든 답을 풀어줄 수는 없으며, 일반적인 워드프로세서나 스프레드시트 프로그램과 마찬가지로 결과물을 도출해내는 하나의 편리한 도구일 뿐이다. 궁극적으로 CFD가 현장에서 실효성 있게 활용되기 위해서는 해석대상물 자체에 대한 높은 기술적 이해와 각각의 CFD 해석목적에 맞는 최적의 모사기법 적용이 수반되어야 할 것이다. KEA