KEPCO Journal on Electric Power and Energy p-ISSN 2465-8111, e-ISSN 2466-0124 Volume 7, Number 1, June 2021, pp. 63-67 DOI 10.18770/KEPCO.2021.07.01.063

Engineering based on Simulation Technique for Overseas Power Plant Projects

시뮬레이션 기술 적용 해외발전사업 엔지니어링

Sehyun Baek 백세현

Abstract

해외 발전사업의 기술 경쟁력 우위 선점을 위해서는 발전시스템에 대한 최적설계기술 및 발전소 운영 기간 중 최소 비용으로 높은 신뢰도의 설비 관리, 최적 성능 유지를 할 수 있는 O&M 관리 기술이 필요하다. 전력연구원은 해외발전사업 전주기 기술지원을 위한 연구개발을 수행하고 있다.

Keywords: Heat & Mass Balance, Optimization, CFD

1. 개요

전의 해외발전사업은 회사의 미래가치 향상을 위한 성장동력으로서 2019년말 기준으로 전세계 28개국 50개 해외사업 프로젝트 (총 용량 29,204MW, 지분 9,477MW)를 수행하고 있으며, 한전 2030 중장기전략 (해외사업 매출 10조원) 달성을 위해 노력하고 있다. 한편 해외 IPP 시장은 전세계 developer 및 EPC 컨소시엄들의 치열한 전쟁터가 되고 있다. 이와 같은 구도에서 사업 수주를 성공하는 좁은 문에 들어가기 위해서는 타 경쟁사와는 차별화된 프로젝트관리역량, 엔지니어링 역량, 재원조달, 수주 전략 등사업 전 분야에 대한 기술, 가격 경쟁력 우위 선점이 필요하다.

기술 및 가격 경쟁력 우위 선점을 위한 전략들 중 하나는 발전시스템에 대한 configuration 조합과 heat & mass balance에 대한 최적 설계인데, 이는 발전소 개념/기본 설계, 주요 설비에 대한 용량 선정, 주요운전변수 확정, 성능보증기준 선정 및 EPC cost등 중요한 요건들에 대한 기준으로 활용되는 바 그 중요성이 매우 크다. 그리고 사업 수주에 성공하고 건설을 완료하게 되면 준공 후일정기간 발전소를 직접 운영하는데, 상기기간 중에 발전설비의 성능 degradation을 최소화하고 설비의 신뢰도를 양호하게 유지하기위해서 최적의 유지정비 기술을 적용하는 것이 필요하며, 고장 정지를 최소화하고 가동 율을 제고하여 서 수익성을 향상시켜야 한다. 이를 위해서는 현지 발전소 법인, 본사 및 기술지원 담당자의협력과 체계적인 0&M 지원이 필요하다.

전력연구원은 한전의 해외발전사업의 전체 주기에 대한 엔지

니어링 기술지원을 수행하고 있으며 최근에는 연소 열성능 및 열 유체 시뮬레이션 기법 및 툴을 개발하여 활용 중인데, 그 중 일부 내용을 소개하고자 한다.

II. 시뮬레이션 기술 활용사례

A. 신규발전사업 최적설계 지원

신규발전사업의 성공을 위해서는 기술성 및 경제성이 우수한 설계 안 도출이 필수적이다. 특히 발전사업 개발 및 입찰사업에서 Heat & mass Balance 설계는 발전소 개념/기본 설계, 주요 설비에 대한 용량 선정, 주요설계변수에 대한 민감도 분석 및 최적화, 성 능보증기준 선정 등 중요한 요건들에 대한 기초 기준으로 활용되 는 바 그 중요성이 크다.

기존의 일반적인 Heat & mass Balance 설계 절차는 설계담당자가 발전시스템 설계 용 프로그램을 경험 및 직관에 의존하여 활용하여 여러가지의 설계 case들을 비교 계산 후 최종안을 선정하는 방법이 적용되고 있다. 이와 같은 절차를 개선하기 위하여 최적화 알고리즘을 활용하였는데, 발전 시스템 설계 코드의 주요 입출력 변수를 엑셀로 연결하고 이를 및 수치해석 모델 및 최적화 프로그램에 연계한 후, 전체 프로그램의 실행을 자동제어 하면서 각종 설계 변수의 민감도를 분석하고 발전시스템의 Techno-Economical 측면을 고려한 최적의 설계를 도출하는 최적설계 자동화기법을 개발하였다.



저자 **백 세 현** | 한국전력공사 전력연구원 발전기술연구소 전문기술센터

백세현 책임연구원은 전력연구원에서 화력발전관련 연구과제 및 기술지원을 수행하고 있으며, 관심분야는 연소열성능 시뮬레이션 및 발전시스템 최적설계이다

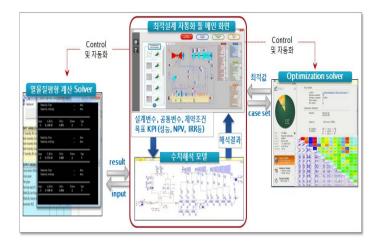


Fig. 1. Heat & mass balance 최적설계 자동화 툴 구조

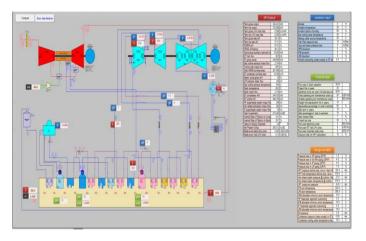


Fig. 2. 사용자 인터페이스 예시 (3P 복합화력)

이를 통해 설계자가 최적화 알고리즘에 대한 전문지식이 없어도 발전소 설계 변수들의 개별적인 민감도 특성을 고려하여 설계공간탐색, 최적화 시행 및 최적설계 성능 검토를 수행할 수 있도록 하였다. 여기서 최적 설계라 함은 최고 성능의 발전소를 도출하는 것이 아니고 RFP의 요건을 위배하지 않는 범위 내에서 군더더기를 잘라내어 가격경쟁력을 확보하면서도 적정한 성능을 확보하는 방법을 통해 수주경쟁력을 극대화하는 작업이다.

최적설계 알고리즘은 생물의 진화를 모방한 집단 기반의 확 률적 탐색 기법인 Genetic Algorithm, suboptimal solution을 빠르 게 찾는 알고리즘인 meta heuristics, gradient descent method, Response Surface Method 및 DOE 등이 많이 활용되고 있다. 설 계공간에서 최저점이 하나인 경우는 gradient method가 빠른 시간 안에 최적화를 수행할 수 있는 방법이다) 그러나 설계 공간에 여 러 개의 저점이 존재하는 경우는 경사도법의 경우 최저점이 아닌 local minimum에서 벗어나지 못하는 상황이 발생할 수 있다. 이런 경우에는 설계공간에서 global minimum을 찾아낼 수 있는 Generic Algorithm을 사용하는 것이 바람직하다. 하지만, Generic Algorithm은 탐색 시간이 길어서 gradient method 보다 시간이 오 랜 걸린다. 한편 하이브리드 방법론인 SHERPA 알고리즘은 유전자 법, 경사도법과 같은 다수의 탐색방법 들이 설계공간에 대한 정보 를 서로 교환하며 반독립적으로 탐색을 수행하여 제시된 목적함수 와 제한조건을 만족하도록 진행된다. 각각의 설계결과로부터 다음 최적화를 위한 방향성을 파악하기 위한 기여도를 평가하기 위해

설계 결과의 성능을 수치화 하고 성능이 높은 설계 결과를 위주로 선택하는 방식으로 최적화가 진행된다. 이때 목적 함수와 제한조건 을 반영하여 설계 결과의 적합도를 판단하기 위한 성능은 아래의 수식과 같이 정의된다.

$$P = \sum_{i=1}^{Nobj} \left[R1 \frac{f_{oi}}{|n_i|} + R2 \left(\frac{f_{oi}}{|n_i|} \right)^2 \right] - \sum_{i=1}^{Ncon} C \left[P1_i \left(\frac{|f_{ci} - t_i|}{|t_i|} \right) + P2_i \left(\frac{f_{ci} - t_i}{|t_i|} \right)^2 \right]$$

■ P: 성능 ■ Nobjs: 목적함수의 개수

■ Ncon: 제한조건의 개수

R1i, R2i 설계결과의 만족도에 따른 성능 보상치의
1차 및 2차상수

P1i,P2i: 제한조건을 위반할 경우에 대한 페널티의
1 차 및 2차상수

• C: 제한조건 만족 여부 (만족시 0, 위반시 1)

위에서 제한조건이 만족되는 설계 변수는 목적 함수에 대한 보상이 적용되지만, 제한조건을 위반하면 보상이 감소하여 성능이 낮게 평가된다. 이와 같이 평가된 성능이 높아지는 방향으로 설계 변수의 방향이 결정되어 최적 값을 탐색하고, 탐색과정에서 설계 공간에 따라 local 탐색과 global 탐색에 적용된 가중치를 자동 조 정하며, 설계공간의 특성에 따라 적합한 최적화 기법을 자동으로 적용한다.

본 기술은 발전시스템의 techno-Economical 측면을 고려하여 Heat & mass balance를 자동으로 최적 설계하는 기법을 적용하였 다.

이를 위하여 Fig. 1 과 같이 상용 발전시스템 설계코드의 주요 입출력 변수를 엑셀로 연결하고 이를 수치해석 모델 및 최적화프로그램 연계한 후, 각종 설계변수, 제약조건, 목표 KPI 등에 대한 입출력 및 전체 프로그램의 실행을 자동제어 하면서 각종 설계변수의 민감도를 분석하고 최적의 설계안을 도출할 수 있도록 하였다.

최적설계 수행과정은 다음과 같다. 사용자가 다양한 형식의 발전소 형식별 GUI 화면에서 발전소 기준 설계조건, 입지조건 및 경제성 관련 입력변수, 제약조건 및 목표 KPI 입력하면, 값들은 발전소 형식별로 내장된 수치해석 모델에 자동 입력되고 solver에서 계산이 수행된다. 단위 기기별 열성능 계산결과는 비용요소의 계산결과와 함께 메인 GUI로 전송되고 이 때의 입출력 값들은 최적화 툴로 전송되며 최적화 알고리즘은 각각의 입출력 변수들에 대한 분석을 통해 목표조건 KPI를 최적화하는 입력 값을 찾는 작업을수행하며, 제약조건을 넘지 않는 범위 내에서 계산 case들을 생성하여 메인 GUI로 전송한다. 위와 같은 계산들을 반복하여 Heat & mass balance 최적설계를 자동으로 도출하게 된다.

Fig. 2 는 3pressure+ Reheat 형식의 가스터빈 복합화력 발전소에 대한 최적설계 사용자 인터페이스 예시이며, 사용자가 GUI에서 공통입력, Site 조건, 기본설계조건, 제약조건 및 최적화 변수의초기 값을 입력 후 compute 아이콘을 클릭하면 최적화 계산을 시작된다. 이때 LCOE, IRR, Efficiency 등 다수의 목표 KPI를 가중치를 부여하여 설정할 수 있으며 반복 계산을 통해 KPI 목표를 최대로 하는 설계 입력조건들을 찾아준다.

Fig. 3 은 SHERPA 알고리즘을 적용한 반복 계산을 수행하는 과정 중 설계 공간 내에서 최적 값을 탐색하는 최적화 Performance에 대한 history를 나타낸 예시이다.

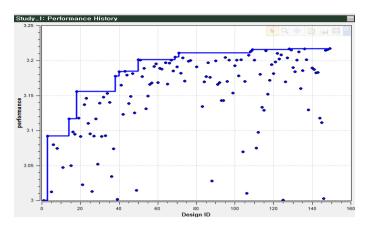


Fig. 3. 최적화 Performance history

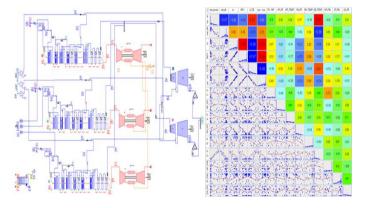


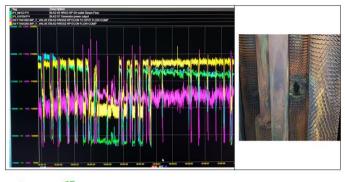
Fig. 4. Heat & mass balance 설계 및 설계변수별 민감도 예시

Fig. 4 는 최적설계 기법으로 도출한 Heat balance 설계 및 설계 변수별 민감도 분석 예시이다.

이와 같은 발전시스템 최적설계 및 시뮬레이션 기술은 사우디, UAE, 카타르, 우즈벡 등의 발전 입찰 사업 및 베트남 및 인도네시아의 신규 발전 개발사업에 대한 지원에 활용을 하였다. 그리고 베트남의 석탄화력건설 사업 및 멕시코 노르떼, 필리핀 일리한, 요르단 IPP3 등 운영발전소에 대한 설계 분석과 운전 최적화 기술지원에 활용하였으며 향후 지속적으로 기술 완성도를 향상시킬 예정이다.

B. 운영 발전소에 대한 최적 정비지원 사례

운영 발전소의 설비에 대한 진단 및 특성 분석은 실험과 해석의 두가지 방법으로 접근할 수 있다. 그중 실험적 방법의 경우측정이 어려운 고온 부위나 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 발전 설비에서 여러가지의 변수에 대한시험을 시행하기에는 경제적인 어려움과 함께 실험 조건을 구현하는데 많은 제약이 따른다는 것이다. 반면에 해석적 방법은 상대적으로 제약이 덜하면서 극단적인 운전 상황 까지도 시뮬레이션 할수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 현 시점에서 해석적 접근방법만으로는 신뢰도를 충족시키는데 다소 무리가 있을 수 있어실험과 해석의 적절한 병행이 필요하여 CFD를 활용하는 시도가꾸준히 진행되어 왔으며, 해석 결과의 신뢰도도 높아지고 있다.



green: ST power,
sky blue: HPSH outlet flow,
yellow: HP eco Inlet flow,
purple: HPSH spray water,

Fig. 5. 누설부위 탐지를 위한 Trend 분석 및 실제 누설부 사진

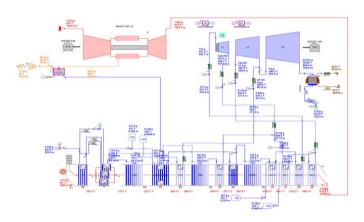


Fig. 6. 누설분석을 위한 운전 data 평가용 수치해석 모델

전력연구원은 발전용 가스터빈 HRSG 터빈, 보일러 및 보조기기들에 대한 설비 검증, 손상 원인 분석, 정비 방법 선정들에 CFD 해석 기술을 활용하고 있다. 다음의 내용은 해외에서 운영증인 00발전소에 HRSG에 대한 정비지원 예시로서, HRSG HP Evaporator tube 손상원인 분석, 여건상 접근이 불가한 부위에 대한 손상 범위에 예측, 점검 정비 범위 선정들을 CFD 시뮬레이션을 활용하여 수행한 사례이다.

상기 발전소는 보충 수의 유량이 점차 증가되는 상황이 감지 되었는데, 현지 전력수급 여건상 발전소 정지 점검이 불가능하여 아래와 같이 운전 trend 및 Heat balance 분석을 통해, 누설이 발 생된 unit 및 전열 면 위치를 예측하였는데, 손상 파급 가능성 여 부를 분석하여 즉시 발전소 정지를 하지 않고 일정 기간 후 전력 수급이 여유 있는 시점에 정지하였다.

HRSG 내부 점검결과 누설 위치는 당초 예측한 위치와 동일한 것으로 확인되었으며, 손상 원인은 Under deposit Corrosion인데 해당 메커니즘의 특성상 누설이 발생된 튜브 외에도 광범위한부위에 손상이 진행된 것으로 추정되었다.

해당부위에 대한 본격적인 정비 작업은 차기 Overhaul 기간에 시행하였는데, 발전소의 잔여 운영기간이 많이 남지 않음을 고려하여 대규모의 투자비가 지출되지 않도록 최소한의 점검 정비범위를 선정하는 것이 관건이었다. 또한 계획예방 정비 기간이 촉박하여, 점검 정비에 선택과 집중이 필요한 상황이었다. 그러나 HRSG의 HP evaporator는 설비 특성상 사람이 직접 접근하여 점검가능한 범위가 맨 첫 열 및 마지막 열 부위에 불과하며, 튜브

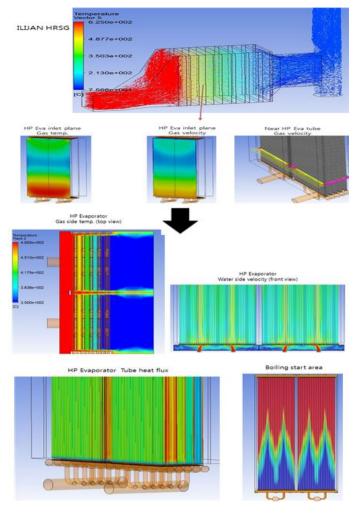


Fig. 7. Under deposit Corrosion 점검정비 선정을 위한 CFD 해석

외면에는 Fin이 부착되어 있기 때문에 비파괴적인 방법으로는 내면의 상태를 진단하기가 어렵다.

따라서 CFD 시뮬레이션을 통해 Under deposit Corrosion 발생위험성이 높은 부위를 예측하고, 해당 부위에 대하여 선별적으로 튜브를 절단하여 내시경 검사 및 손상 부위에 대한 정비작업을 시행하였다.

CFD 시뮬레이션의 신뢰도 확보를 위하여 발전소 운전 data 및 ID process 해석을 활용하여 경계조건을 설정하고 스팀측과 가스측의 연계해석 (Coupled) 기법을 적용하였다.

Fig. 8 은 CFD 시뮬레이션을 통해 선정한 Under deposit Corrosion 취약부위에 대한 내시경 점검 정비 결과이며 최소비용으로 제한된 기간에 최적정비를 시행하는데 도움이 되었다.

최근 선진국들을 중심으로 탈 석탄 정책이 확산되고 있으나 개발도상국인 베트남의 경우 아직까지는 석탄 발전이 현실적으로 불가피한 상황인 바, 세계 최고수준의 친환경적이고 고 신뢰성 기 술을 보유한 평판을 가진 한전이 사업자로 선택되어 000 및 00 발전소의 건설 및 운영을 수행하게 되었다.

한편 상기발전소들은 현지 여건상 매우 낮은 열량의 연료를 연소할 예정이며, 한전에서 파견된 소수의 관리자가 현지 인력들을 교육하여 연료 조달, 발전소 운전 및 유지 정비 등 발전소의 모든

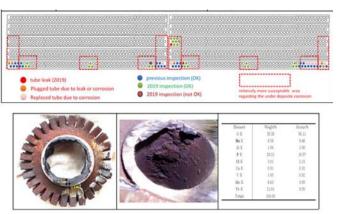


Fig. 8. HP evaporator 점검 및 정비 결과

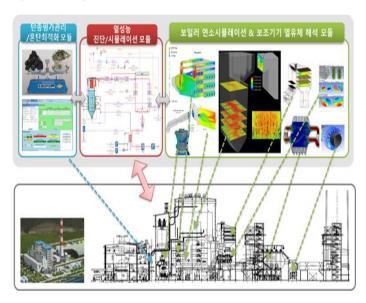


Fig. 9. 발전소 맞춤형 연료연소열성능 최적화 툴 시스템

운영 업무를 수행해야 되기 때문에, 높은 수준의 운전/정비 관리 기술지원 도구가 필요하다.

따라서 이를 위하여 실제 발전소의 설계와 특징을 수치해석으로 모사하는 가상의 발전시스템을 구축하여 진단 및 시뮬레이션에 활용할 수 있도록 '20년 9월에 연구개발을 착수하였다. Fig. 9는 발전소 맞춤형 연료연소열성능 최적화 툴 시스템의 개념도 이다.

현시점에서는 ① 석탄평가/최적혼탄모듈 ② 열성능진단및 시뮬레이션모듈 ③ 보일러 연소시뮬레이션 모듈 ④ 보조기기 열 유체해석 모듈등에 대한 프로그램 시험판을 개발하여 테스트 및 기능 보완 작업을 하고 있다.

그리고 현재 건설중인 000 발전소의 현안 및 시운전관련 사항 등에 대하여 중간성과물을 활용하여 수시 기술지원도 수행하고 있다.

Fig. 10 은 660MWe 발전소 맞춤형 열성능 진단 및 시뮬레이션 프로그램 의 메인 화면이다. 이 프로그램은 발전소의 운전 data를 연결하여 발전 시스템 전체 계통의 연소 열역학 열전달 특성을 분석하고 보일러, 터빈 및 각각의 보조기기들의 성능을 평가하는 기능을 포함하고 있다. 그리고 연료성상 변화 및 운전변수 변화에 따른 발전소 성능 및 운전특성을 시뮬레이션 할 수 있다. 이를 통하여실제 운전 Data를 기반으로 열성능 해석, 연료/운전 변수별 민감도 분석 및 최적의 운전 가이드를 도출하는데 활용 가능하다.

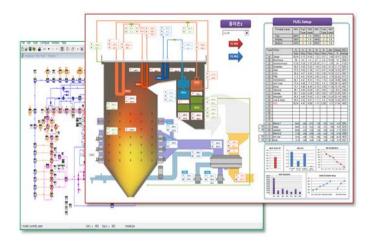


Fig. 10. 발전소 열성능진단-시뮬레이션 프로그램

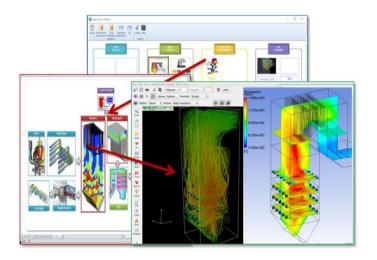


Fig. 11. 저열량탄 660MWe 발전소 맞춤형 보일러 연료시뮬레이터

발전용 보일러 내부는 워낙 고온이라 계측기 설치가 불가하고, 육안점검도 불가하므로 얻을 수 있는 정보는 매우 제한적이고, 정량적으로 평가하기는 어려움이 있는 바, Fig. 10 과 같이 저열량 탄 660MWe 발전소 대향류 보일러 맞춤형 보일러 연소 시뮬레이터 프로그램을 개발하고 있다.

연소시뮬레이터는 보일러 화로내부에서의 연소, 복사, 열전달, 입자유동, 가스유동 및 화학종 분포의 상태를 계산해 주며, 환경배 출물의 생성 및 소멸 경향도 예측이 가능하다. 이에 대한 신뢰도 제고를 위해서 고급 탈휘발, 최산화 모델 및 가스측-스템측 연계계 산 기법을 적용하였다.

그리고 본 연소시뮬레이터는 전산유체역학 전공자가 아닌 일 반 발전소 엔지니어도 쉽게 사용할 수 있도록 설계되어 있으므로, 0&M 업무 수행 중 연료성상 및 운전변수 특성별 보일러 화로 내 부의 상태를 민감도를 시뮬레이션 하거나 연소관련 문제해결 및 최적화업무에 활용 가능하다.

연구개발의 최종 성과물은 베트남 000 및 00 발전소에 대한 25년간의 운영 기간 중 최적연소관리, 경제성과 기술성을 고려한 연료 혼소, 열성능/운전 최적화 진단을 위한 현장 기술지원 도구로 활용될 예정이며, 이를 통해 발전설비의 설비신뢰도 제고 및 친환경적인 운영에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

Ⅲ. 향후 계획

기업연구소의 궁극적인 목표와 가치는 회사의 비즈니스에 기여할 수 있는 실질적인 기술을 개발하고 실제 현장에 활용하는 것이라 생각한다.

전력연구원은 지속적으로 현장 밀착형 연구과제 수행을 통해 발전분야의 엔지니어링 역량을 축적할 예정이며, 이를 회사의 해외 발전사업 지원에 적극 활용함으로써 세계 발전사업 시장에서 한전 의 기술경쟁력 우위 선점에 기여하고자 한다.