

머신러닝 기술의 가상센서를 이용한 연소설비의 운전효율 최적화 시스템

우리나라에서 에너지를 가장 많이 사용하는 장치는 산업용 연소설비이다. 보일러, 가열로, 소각로, 열풍로, 고로, 전기로 등에서 우리나라 전체 에너지의 30%를 사용한다. 에너지 사용량이 큰 만큼 미세먼지도 많이 배출하여 전체의 50%를 차지한다.¹ 연소설비에서 발생하는 에너지 손실을 줄이고 환경오염물질 배출량을 저감하기 위하여 공정 설계에서부터 설비 제작, 건설, 연료 선정 및 운전까지 플랜트 전주기에 걸쳐 다양한 기술들이 개발되어 적용되고 있다.

연소설비의 운전 측면에서 연소효율에 가장 크게 영향을 미치는 변수는 연소용 공기 주입량이다. 연소용 공기를 많이 주입해서도 안되지만 적게 주입해서도 안된다. 많이 주입하면 배기가스 배출량이 많아져 효율이 저하된다. 반대로 공기를 적게 공급하면 불완전 연소가 발생하여 효율을 저하되고 연소실 내부 온도가 상승하여 튜브 표면에 코킹이 발생한다. 최고의 효율을 유지하려면 적정량의 연소용 공기 주입이 필요하다.

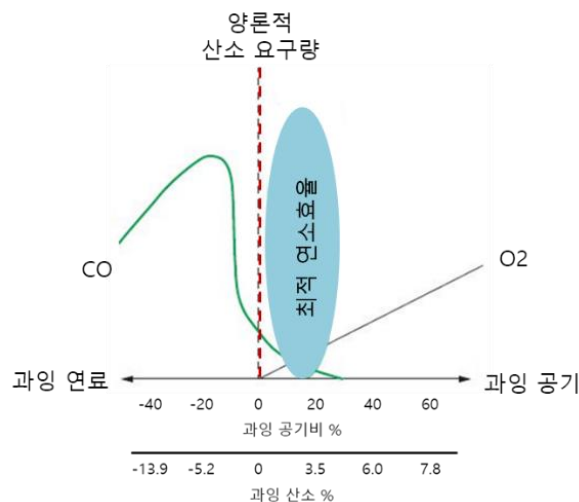


그림 1. 최적 연소효율을 위한 과잉 공기 범위

연소용 공기 주입량은 환경 문제에도 관련되는데 공기를 많이 공급하는 경우에는 미세먼지 전구물질인 NOx의

¹ 산업부문 39.5%와 발전부문 13.4%로 총 52.9% 배출, 미세먼지 관리 종합대책, 2017

배출량이 증가하고, 적게 공급하는 경우에는 환경오염물질인 일산화탄소나 탄화수소의 배출량이 증가한다. 게다가 불완전 연소로 인해 다량의 연소물질이 가스 상태로 존재하게 되면 외부 공기와 접촉 시 폭발(Deflagration) 위험도 있다. 따라서 연소용 공기 주입량은 에너지 비용뿐만 아니라 환경오염물질 저감과 안전성 증대까지 여러 면에서 매우 중요하다.

굴뚝에서 배출되는 배기가스의 산소, 일산화탄소, 미연소 연료 성분을 모니터링하면 연소용 공기의 주입량이 적절한지 가장 확실하게 판단할 수 있다. 하지만 배기가스를 측정하는 온라인 하드웨어 분석기는 가격이 비싸기 때문에 기업에게 부담이 된다. 그러한 이유로 배기가스 분석기 없이 블라인드 운전하는 경우가 많은데 대개 매년 발생을 억제하기 위하여 연소용 공기를 여유 있게 주입하며, 이로 인해 연소효율 손실이 발생한다.

아래 그림은 상업용 스팀 보일러에 대한 배기가스 산소 농도와 온도 분포도이다. 연료가 LNG 인 경우에는 배기가스의 산소 농도를 보통 08 ~ 15%로 유지하는데 아래 그림 대부분의 경우에 이보다 높게 운전되고 있다. 심지어는 5%가 넘는 경우도 있다. 배기가스의 과잉 산소 문제는 단지 사례에 해당하는 문제만이 아니라 산업 현장에서 일어나는 보편적인 현상이어서 이에 대한 대책이 필요하다.

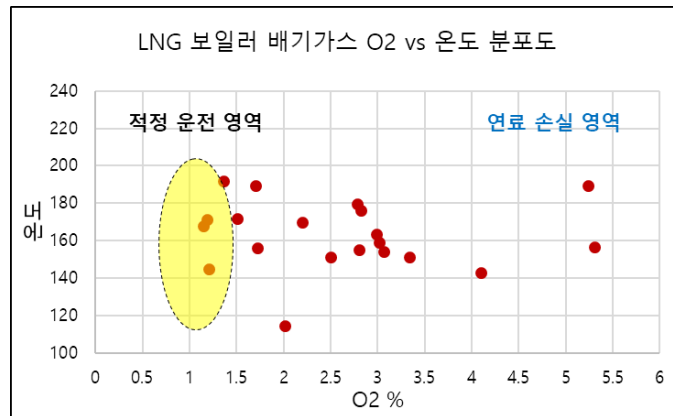


그림 2. LNG 보일러 배기가스 상태

연소용 공기를 최적화하는 기술은 설비 변경없이 소프트웨어적으로 효율을 개선하는 기술이다. 본 고에서 연소효율 계산 방법과 최적화 기술을 소개하며, 뒤 부분에서는 배기가스 성분 분석기를 대신할 수 있는 머신러닝 기법의 가상센서를 소개하며, 이를 이용하여 연소효율 최적화를 실행하는 방법을 소개하고자 한다.

1. 연소효율 산정

연소효율은 입출력법(In-Out Method)과 열손실법(Heat Loss Method)으로 산정한다. 입출력법은 연소설비에 투입한 열량 대비 회수한 열량의 비로 계산한다.

$$\text{연소효율(\%)} = (\text{제품 열량} / \text{투입 열량}) \times 100 \quad \text{식 (1)}$$

입출력법은 식이 간단하여 널리 사용되지만 연료의 발열량이나 유량 측정에 오차가 크면 부정확하다. 반면에 열손실법은 열의 손실률을 파악하여 연소효율을 계산하는 방법으로 발열량이나 연료 유량의 오차에 영향을 덜 받는다. 열손실법에서는 열손실 항목을 8가지로 분류하여 연소효율을 계산한다. 여기서 L7과 L8은 재(Flying Ash와 Bottom Ash) 속의 카본 손실로서 석탄이나 바이오매스 같은 고체연료를 사용하는 설비만 해당한다.

$$\text{연소효율(\%)} = 100 - (L1+L2+L3+L4+L5+L6+L7+L8) \quad \text{식 (2)}$$

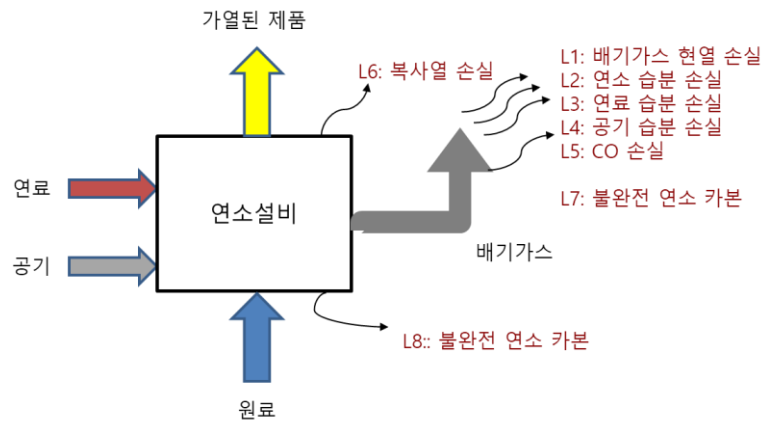


그림 3. 열손실법에 의한 8가지 열손실 항목

열손실법은 비슷한 계산 식들로 구성된 다양한 버전이 존재한다. 산업용 보일러의 경우에는 주로 미국 기계협회의 ASME Standard PTC Code 4²를 참고하며, 우리나라 산업표준인 KS B6205³를 참고하기도 한다

화력발전 플랜트의 효율계산을 통해 입출력법과 열손실법을 비교하고자 한다. 아래 그림의 왼쪽 그래프가 입출력법으로 계산한 발전효율 분포이고, 오른쪽 그래프가 열손실법으로 계산한 발전효율 분포이다. 그래프의 종축은 효율이고, 횡축은 부하이다. 입출력법으로 산정한 효율의 분포는 종축의 부하 변화에 대해 추세선을 따르지 않는데, 그 이유는 부생가스의 발열량을 엄밀하게 분석해내지 못하기 때문이다. 반면에 열손실법으로 산정한 효율의 분포는 연료의 발열량 오차에 크게 영향을 받지 않아 뚜렷하게 추세선을 형성한다.

따라서 연료의 발열량 오차가 큰 경우에는 열손실법을 통해 효율 산정하는 것이 바람직하다. 연료의 발열량을 실시간적으로 분석하지 못하는 석탄, 바이오매스 등의 고체연료를 사용하거나 발열량 변화가 심한 부생가스를 사용하는 연소설비가 해당된다.

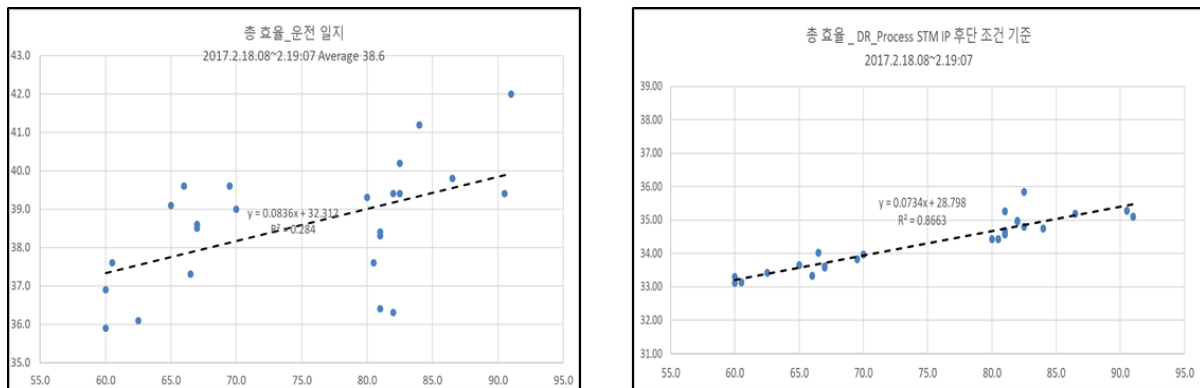


그림 4. 입출력법과 열손실법의 효율 분포 비교

2. 공정 모델

연소효율 최적화를 실시하려면 연소용 공기 주입량(또는 댐퍼 개도율이나 팬의 회전수)의 변화에 대해 연소효율의 변화를 계산할 수 있어야 한다. 열손실법은 연소용 공기 주입량 외에 배기가스의 온도, 산소 농도, 일산화탄소,

² PTC-4 Power Test Code for Steam Generating Unit, ASME Standard, 2013

³ 육상용 보일러의 열 정산 방식 KS B 6205, 산업표준협회, 2014

미 연소 연료 함량 등의 데이터를 필요로 한다. 먼저 배기가스의 산소 농도는 아래와 같이 정의한다.

$$\text{산소 농도(\%)} = 0.21 \times \text{과잉 공기비} / (1 + \text{과잉 공기비}) \times 100 \quad \text{식 (3)}$$

여기서 과잉 공기비는 완전 연소에서 배기가스 부피 대비 과잉 공기 비율이다. 산소 농도와는 다르게 배기가스 온도, 일산화탄소 함량, 미 연소 함량은 연소용 공기 주입량과의 상관관계 식으로 결정한다. 본 기술에서는 과거 운전 데이터를 통해 구한 참조 모델(Reference 모델)을 개발하고, 이를 기준으로 공정변수 값을 예측하는 공정 모델을 구성한다.

먼저 참조 모델을 개발하는 방법을 설명하고자 한다. 참조 모델은 운전 데이터를 가장 잘 근사하는 함수이다. 예를 들어서 공기 주입량에 대한 배기가스의 일산화탄소 함량의 참조 모델은 아래 그림의 왼쪽 그래프의 붉은색 실선이고, 배기가스 온도의 모델은 오른쪽 그래프의 붉은색 실선이다.

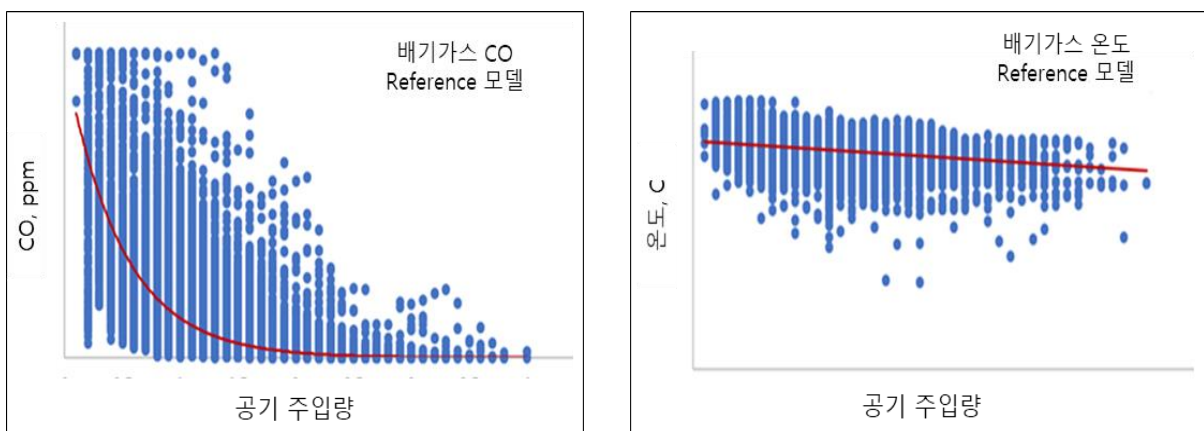


그림 5. 일산화탄소 및 배기가스 온도 참조 모델

배기가스 일산화탄소 함량은 아래 그림의 왼쪽 그래프처럼 공기 주입량이 한계 지점(Break Through Point)에 이르면 급격하게 증가하는 경향이 있다. 따라서 일산화탄소 함량의 참조 모델은 아래 그림의 오른쪽 그래프처럼 공기 주입량에 대해 지수 함수가 적합하다.

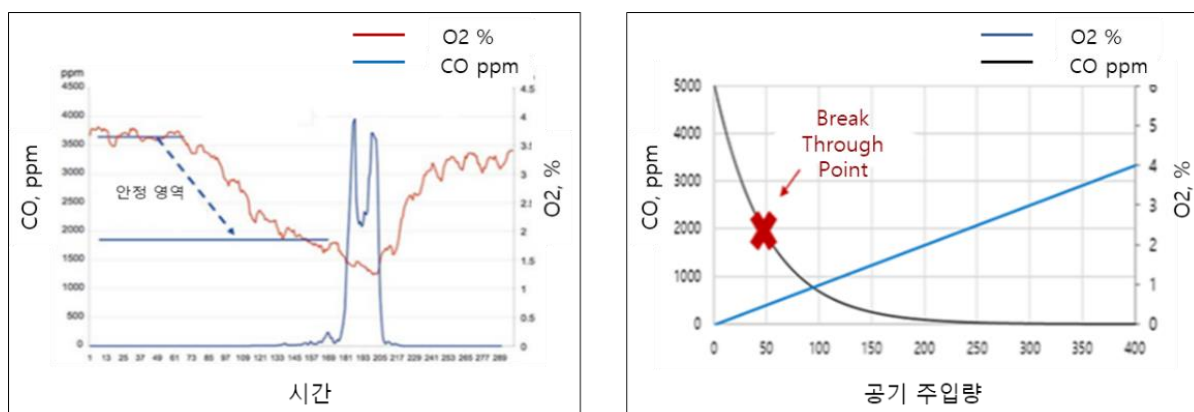


그림 6. 배기가스 산소 농도와 일산화탄소 함량 관계

이에 비하여 배기가스 온도는 공기 주입량에 거의 선형적 상관관계를 형성하므로 참조 모델로는 선형식이 적합하다.

연소용 공기의 변화에 대한 산소 농도, 일산화탄소의 함량, 배기가스 온도 등의 공정변수의 변화는 이들 간의 관계

를 표현하는 공정 모델을 이용하여 예측한다. 공정 모델을 참조 모델을 기준으로 작성한다. 아래 그림의 X-Y 좌표에서 현재값 즉 현재의 공기 주입량과 현재의 공정변수 값을 표시하고, 이를 통과하는 곡선을 구한다. 이 때 참조 모델 대비 비율(a/b)과 같은 $a'/b'=a/b$ 의 곡선이 공정 모델이다.

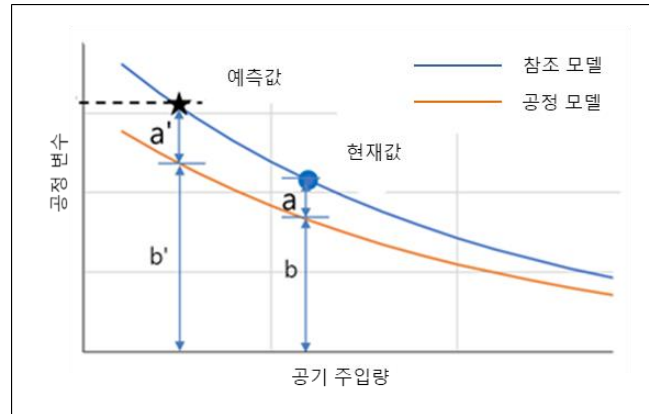


그림 7. 참조 모델을 기준의 공정 모델 구축

3. 연소효율 최적화

연소 과정에서 불완전 연소가 발생하여 일산화탄소 함량이 높아지면 폭발 위험이 있으므로 이를 방지하기 위하여 여유 있게 공기를 주입하여야 한다. 보통 일산화탄소가 폭발하한(Low Explosion Limit) 값의 25%를 초과하지 않도록 하여야 한다. 불완전 연소는 일산화탄소 함량의 피크를 생성하는데 이로 인해 순간적으로 폭발하한 값의 25%를 초과할 수 있다. 따라서 피크 최대치를 1,000ppm로 관리하는 것이 좋다. 정상적인 운전 상태에서는 100ppm 이하로 유지하도록 하여야 한다.

연소효율 최적화는 비선형최적화 문제로서 일산화탄소 함량의 허용 범위 내에서 최대의 효율을 나타내는 공기 주입량을 찾는 문제이다. 비정상상태에서의 일산화탄소 피크 최대치인 1,000ppm은 폭발 위험 때문에 절대 피해야 하므로 강 제약조건(Hard Constraint)으로 설정하며, 정상 운전 상태에서의 최대치인 100ppm은 효율 증대를 위해서 가능한 지켜야 하므로 약 제약조건(Soft Constraint)으로 설정한다. 강 제약조건은 부등식 제약조건(inequality Constraint)으로 구현되며, 약 제약조건은 목적함수에 벌칙함수(Penalty Function)로 표현된다.

최적화 문제의 목적함수 Φ 는 열손실법의 열손실에 벌칙함수를 추가하여 표현되며, 이를 최소화 하는 최적화 문제를 구성한다.

$$\text{Min } \Phi = \text{열손실} + \text{벌칙함수} \quad \text{식 (4)}$$

일산화탄소의 참조 모델에 대해 강 제약조건으로 일산화탄소 함량을 1,000ppm, 약 제약조건으로 일산화탄소 함량을 30 ~ 100ppm으로 설정한 경우를 예로 들어보자. 일산화탄소 함량이 1,000ppm일 때 공정모델에 의해서 과잉공기가 2%에 해당한다면 강 제약조건은 과잉공기 2% 이상이다. 일산화탄소 함량 100ppm일 때 과잉공기는 4%이고, 30ppm일 때 과잉공기가 7%라면 약 제약조건으로 과잉공기 4 ~ 7% 구간 밖에 목적함수에 벌칙 값을 부여한다. 따라서 최적화 결과는 과잉공기 4 ~ 7% 구간 내에 존재하게 된다.

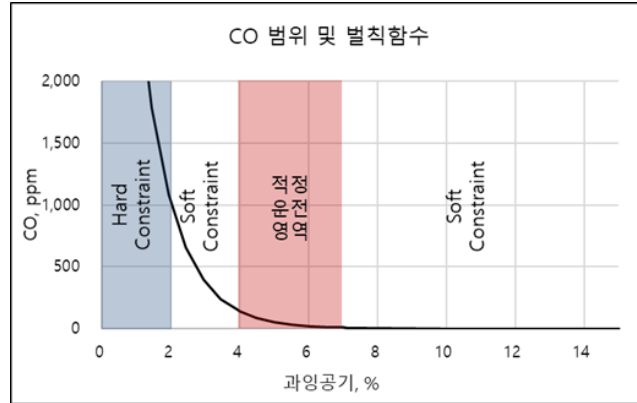


그림 8. CO 함량에 따른 제약조건

강 제약조건과 약 제약조건을 포함하여 목적함수 분포를 그림으로 나타내면 아래와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 목적함수가 최소인 지점은 과잉공기가 4 ~ 7%의 범위에 존재하며, 벌칙함수를 포함하지 않는 구간이다. 이 때 예상되는 배기가스의 산소 농도는 08 ~ 14%이다.

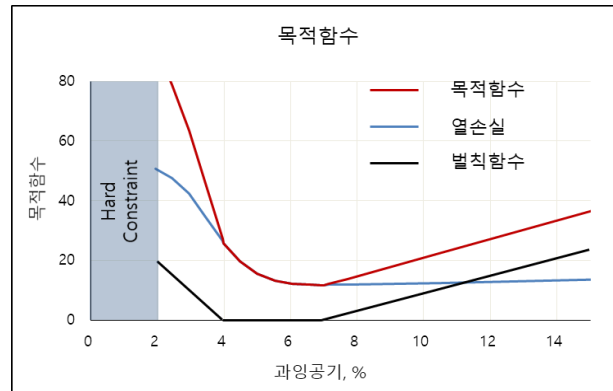


그림 9. 열손실과 벌칙함수를 포함한 최적화 목적함수

PTOP-Opt™는 연소효율 최적화를 수행하는 최적화 솔루션⁴이다. PTOPT-Opt™는 컴퓨터 네트워크 상의 다양한 소스로부터 데이터를 수집하고, 역공학을 통해 실제 플랜트와 동일한 거동의 디지털 트윈을 구축하고, 최적화 기법을 통해 이익 최대의 운전조건을 찾는다. 비선형계획법(Non-linear Programming) 기법으로 파이썬(Python)에서 제공하는 SLSQP⁵를 적용한다.

4. 배기가스 성분 예측 가상센서

실시간으로 최적화를 실행하려면 배기가스의 산소와 일산화탄소 농도를 실시간으로 측정해야 한다. 이를 위해서는 배기가스 계통에 하드웨어 분석기를 고정하여 측정하는 온라인 분석기가 필요하다. 하지만 온라인 하드웨어 분석기는 고장이 잦고 신호에 노이즈가 많아 연소효율 최적화에 사용하는데 문제가 발생하기도 한다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 배기가스 산소, 일산화탄소, 질소화합물, 황화합물, 먼지를 분석하는 머신러닝 기

⁴ 디지털 트윈을 이용한 플랜트 실시간 운전 최적화 PTOPT-Opt™, 김아름과 이종현, No5, 월간제어계측, 2020

⁵ Sequential Least Squares Programming의 약자로 1988년 Dieter Kraft가 제안하였으며, 제약조건과 상하한선이 있는 비선형 최적화 문제를 풀 때 사용하고 목적함수를 2차방정식에 근사하여 문제를 단순화하는 것이 특징이다.

법의 가상센서(Virtual Sensor)⁶ PTOPI-Sensor™를 제안한다. PTOPI-Sensor™는 현장에 설치된 온라인 하드웨어 분석기의 고장을 진단하고, 고장 시에 하드웨어 분석기를 백업하며, 노이즈를 필터링하는데 사용된다. 가장 이상적으로는 머신러닝에 필요한 배기가스 성분의 함량 데이터를 수집할 수 있다면, 값비싼 고정식 온라인 하드웨어 분석기를 대신할 수 있다.

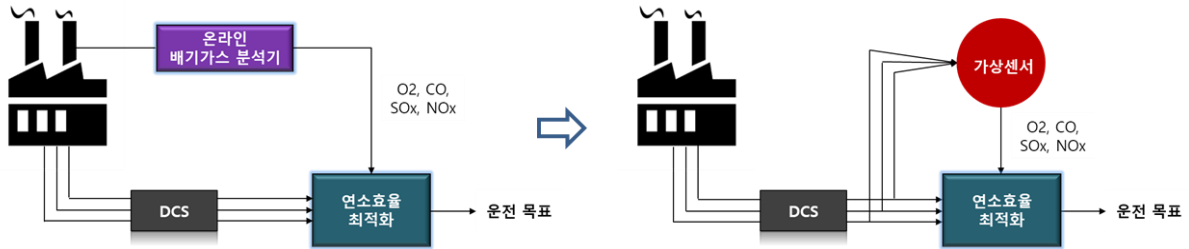


그림 10. 실시간 연소효율 최적화 시스템

5. 사례 연구

시간 당 280 톤의 고압증기를 생산하는 보일러에 대한 사례이다. 배기가스의 온라인 하드웨어 분석기가 고장이 잦고, 노이즈도 커서 보일러 운전자는 피드백 제어 루프를 끊고 연료 공급량에 대한 공기비 제어만 실시하고 있다. 보통 배기가스의 산소 농도를 0.5 ~ 1.0%으로, 일산화탄소 함량은 1,000ppm 정도로 높게 운전했다. 일산화탄소는 변화 폭이 커서 수시로 2,000ppm 을 상회하였다.

PTOP-Sensor™를 적용하여 배기가스 가상센서를 개발하고, PTOPI-Opt™ 를 이용하여 연소효율 최적화를 실시하였다. 최적화 결과에 따라 연소용 공기를 증가시켰으며, 그 결과 산소 농도가 1.0~1.5%로 상승하고, 일산화탄소는 거의 전부 연소하여 10ppm 이하로 낮아졌다. 이로 인해 연소효율이 평균 87.6%로 최적화 이전 대비 0.7% 증가하였고, 연간 5 억원의 수익을 달성하였다.

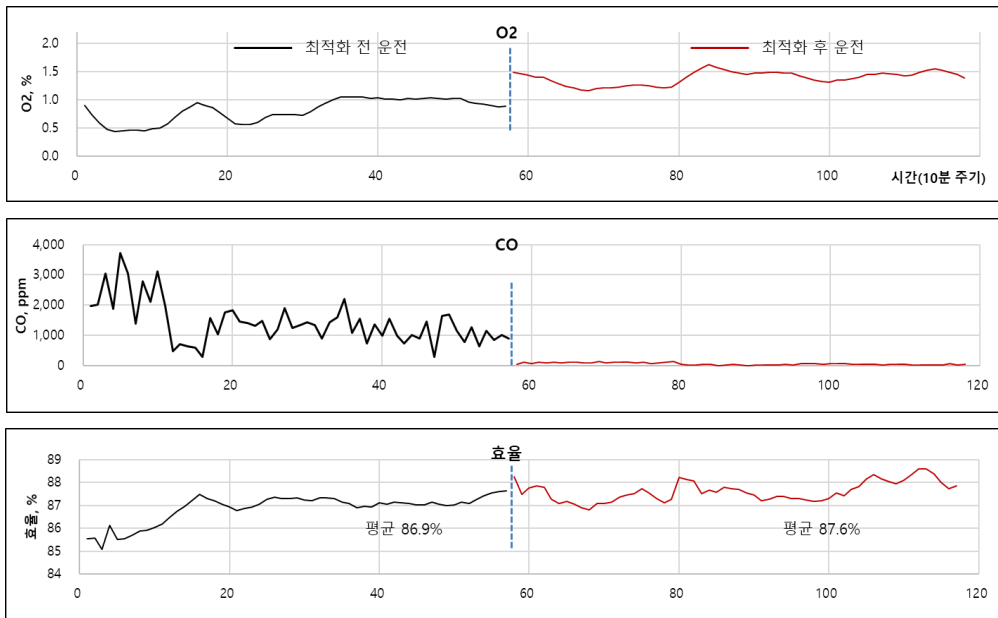


그림 11. 연소효율 최적화 전과 후의 O2, CO, 효율 변화

⁶ 가상센서 계측 및 제어 솔루션 PTOPI-Sensor™, 고흥철, No.1, 월간제어계측, 2020

HMI는 운전원의 편의성을 위하여 가급적 GUI 화면 수를 줄여서 구성하며, 운전자가 상시 모니터링하는 화면은 아래 그림과 같다. 범용 PC의 MS 윈도우 또는 리눅스 환경에서 파이썬(Python)을 이용하여 프로그래밍하였다. 참고로 PTOPT-Opt™는 최적화 결과를 csv, my SQL, MS SQL을 이용하여 PID 또는 MPC로 구성한 자동 제어 시스템에 전달 가능하다.

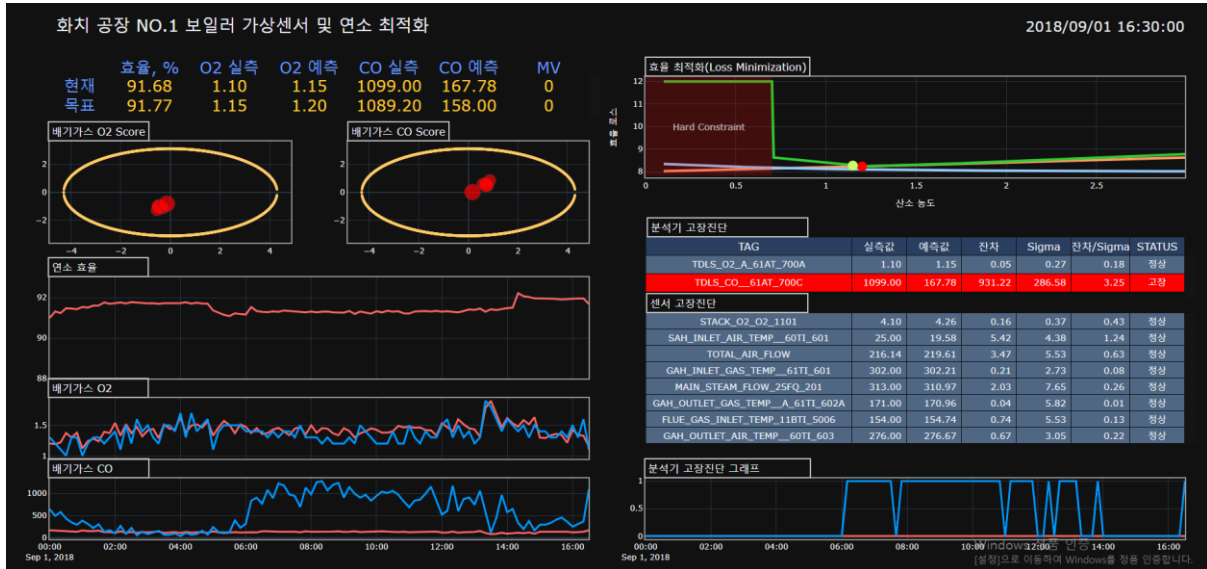


그림 12. 연소효율 최적화 시스템의 HMI 예시

고 성근

tjdrms5591@techdas.co.kr

(주)테크다스 www.techdas.co.kr

서울특별시 금천구 디지털 1로 171,410호 (가산동, 가산 SKV1 센터) (우편번호: 08503)

Tel. 82 (0)2 865 1313 Fax. 82 (0)2 865 1311