연소설비 효율 최적화 및 배기가스 가상센서

고 성근
㈜테크다스 www.techdas.co.kr

보일러나 가열로 등의 연소설비에서 연료를 절감하고 대기오염물질을 줄이려면 연소효율을 최대로 유지는 것이 중요하다. 연소설비에 공기를 너무 많이 주입하면 배기가스 배출량이 많아져 효율이 저하되고, 너무 적게 공급해도 불완전 연소가 발생하여 효율이 저하된다. 공기를 최적으로 주입하면 아래 그림과 같이 배기가스의 O2, CO, NOx 의 배출 함량도 개선된다.

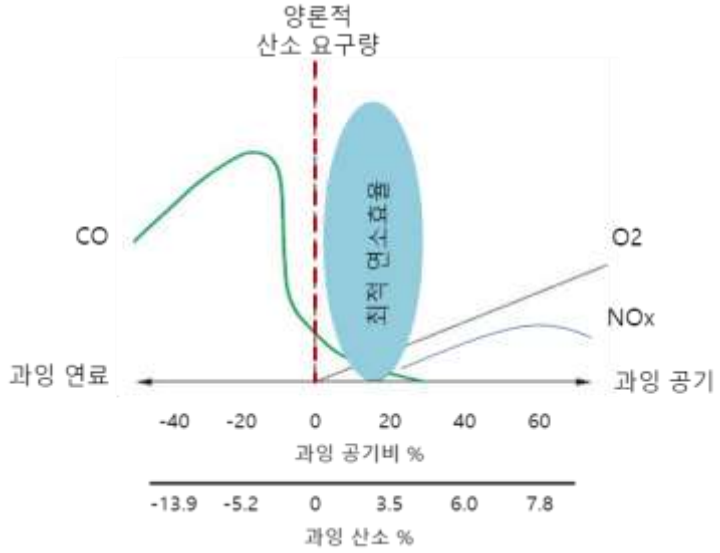

그림 1. 최적 연소효율을 위한 과잉 공기 범위

그림 2 는 LNG 보일러들의 배기가스 O2 농도와 굴뚝 온도 분포도이다. LNG 보일러는 보통 배기가스의 O2 농도가 0.8 ~ 1.5%가 적당한데, 그림에서는 대부분이 이보다 높다. 엄밀히 감시하는 대형 보일러가 이정도 수준이라면, 중·소형 보일러는 더 많이 연료 손실 영역에 속할 가능성이 높다.

Copyright 2019. TechDas Inc. All rights reserved.

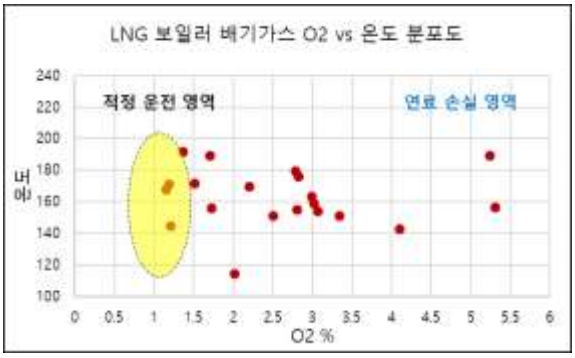

그림 2. LNG 보일러 배기가스 O2 와 온도 분포

1. 연소효율 계산

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

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

입출열법은 식이 간단한 반면에 연료의 발열량이나 유량 측정에 오차가 있으면 부정확하다. 열손실법은 열의 손실률을 파악하여 연소효율을 계산하는 방법으로 발열량이나 유량 측정의 오차에 영향을 덜 받는다. 열손실법에서는 열손실 항목을 8 가지로 정의하고 연소효율을 계산한다.

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

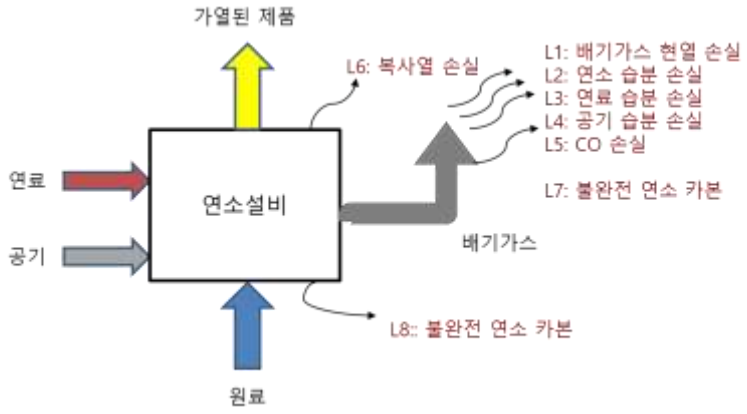

그림 3. 열손실법에 의한 8 가지 열손실 항목

미국은 기계협회의 ASME Standard PTC Code 4[1]에 우리나라는 KS B6205[2]에 산업용 보일러에 대한 효율 계산이 표준화되어 있다.

그림 4 는 화력발전의 효율을 입출열법과 열손실법으로 정산한 결과의 분포도이다. 좌측 그림에서는 입출열법으로 정산한 발전효율 분포도로 데이터가 추세선을 벗어나 있지만, 열손실법으로 정산한 우측 그림에서는 뚜렷하게 추세선에 근접해 있다. 입출열법에서는 연료의 발열량이나 유량의 측정 오차가 효율 정산에 영향을 미치기 때문이다.

[1] PTC-4 Power Test Code for Steam Generating Unit, ASME Standard, 2013

[2] 육상용 보일러의 열 정산 방식 KS B6205, 산업표준협회, 2014

Copyright 2019. TechDas Inc. All rights reserved.

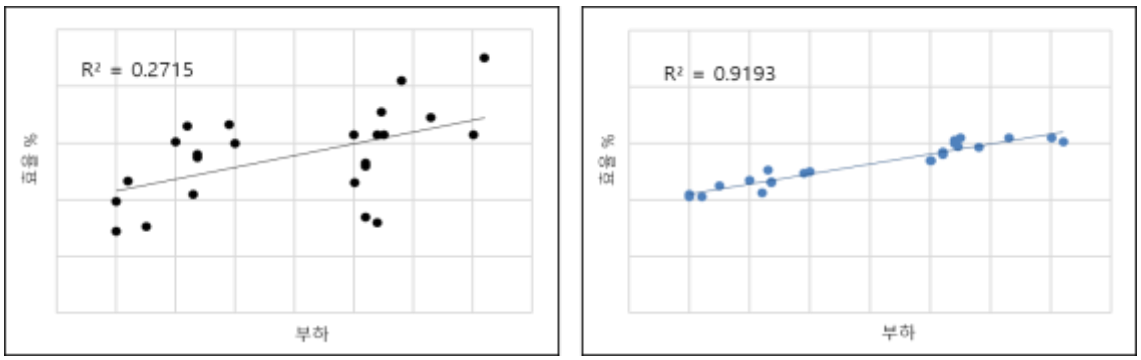

그림 4. 효율 산포도 및 추세선; (좌) 입출열법, (주) 열손실법

입출열법으로 효율을 모니터링하면 그림 5 와 같이 부하 대비 효율저하를 쉽게 식별하지 못하지만, 열손실법으로는 부하 대비 효율저하를 명확하게 구분할 수 있다.

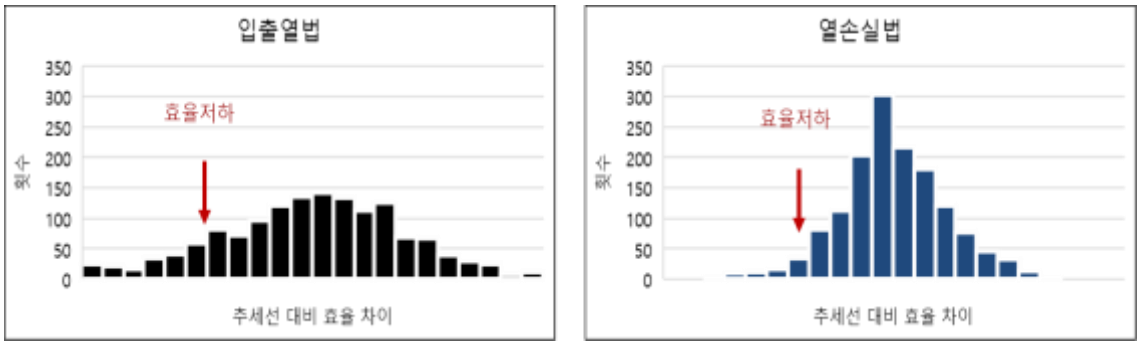

그림 5. 추세선 대비 효율 차이 분포도; (좌) 입출열법, (우) 열손실법

2. 배기가스 CO, NOx, 온도 예측

열손실법은 연료의 유량과 조건, 주입 공기의 유량과 조건 외에 운전 변수로는 배기가스 중 O2 와 CO 농도, 미 연소 연료 함량, 배기가스의 온도를 필요로 한다. 연소효율 최적화를 실시하려면 공기의 유량에 대해 배기가스 중 O2 와 CO 농도, 미 연소 연료 함량, 배기가스의 온도를 예측할 수 있어야 한다. 먼저 O2 농도는

$$O2\ 농도(\%) = 0.21 \times 과잉\ 공기비 / (1 + 과잉\ 공기비) \times 100 \quad (3)$$

이다. 여기서 과잉 공기비는 이론적으로 완전 연소에 필요한 공기 유량 대비 과잉으로 주입한 공기의 비율이다. O2 농도, 과잉 공기비, 공기 주입량은 산술적으로 쉽게 계산된다. 배기가스의 온도, CO 함량, 미연소 연료 함량은 시험운전(Test Run)으로 얻은 데이터를 회귀하여 구한 참조 모델(Reference Model)식을 이용하여 예측한다.

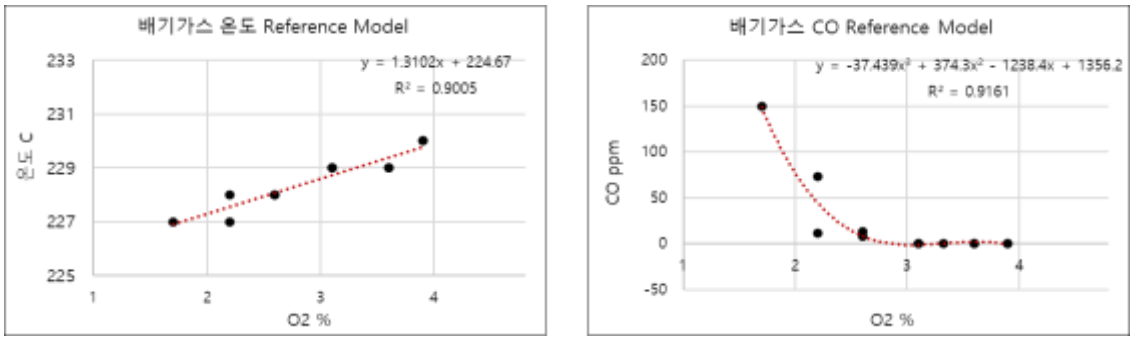

그림 6. 배기가스 O2%에 따른 변수 변화도: (좌) 온도 분포, (우) CO 함량 분포

Copyright 2019. TechDas Inc. All rights reserved.

배기가스 O2 농도에 대한 CO 함량의 시험 데이터의 참조 모델은 그림 6 의 왼쪽 그래프의 수식과 같고, 배기가스 온도의 시험 데이터의 참조 모델은 오른쪽 그래프의 수식과 같다.

배기가스 온도는 공기 주입량에 거의 선형적 상관관계를 형성하지만, CO 함량은 O2 농도에 대해 지수 함수로 표현된다. 특히 그림 7 의 왼쪽 그래프처럼 공기 주입량(또는 O2 농도)이 줄어들어 한계 지점(Break Through Point)에 도달하면 급격하게 증가하여 피크를 형성한다. 이 관계를 X-Y 좌표로 나타내면 오른 쪽 그래프와 같이 공기 공급량이 한계 지점 이하에서는 급격하게 증가한다.

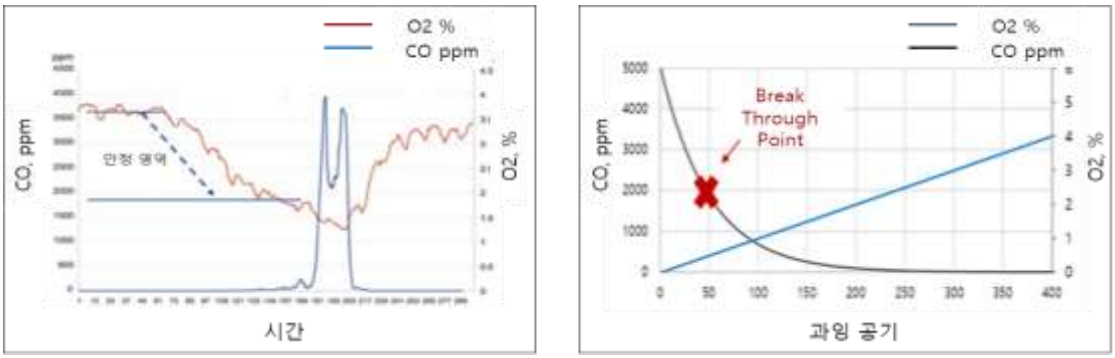

그림 7. 배기가스 CO 함량 변화 특성: (좌) O2 와 CO 시계열 트랜드, (우) O2 와 CO 변화도

배기가스 NOx 함량은 보통 O2 6~7%에서 정점을 형성한다. 대개의 경우 O2 가 이보다 낮은 영역에서 운전이 이루어지므로 O2%를 줄일수록 NOx 함량이 감소한다.

배기가스 측정값은 여러 요인에 의해 영향을 받으므로 항상 그림 6 의 참조 모델과 일치하지 않는다. 참조 모델을 기준으로 동일한 비율을 적용하여 예측한다. CO 함량을 예로 들자면, 어떤 O2% 값에서의 CO 함량은 a'/b'는 a/b 의 관계로 구한다.

$$CO\ 예측값 = CO\ 현재값 \times (b'/b) \quad (4)$$

여기서 b 는 참조 모델식에 현재값 O2%를 대입하여 구하고, b'는 예측하고자 하는 지점의 O2%를 대입하여 구한다.

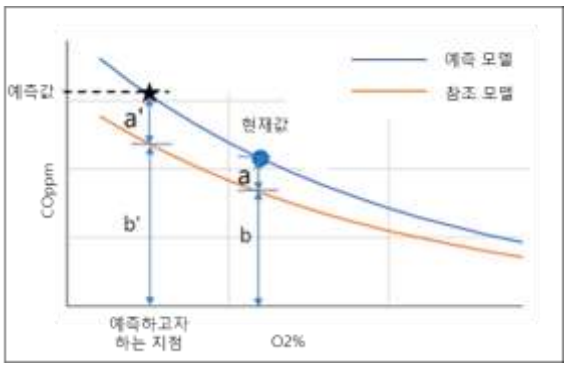

그림 8. 참조 모델을 이용한 CO 함량 예측값

배기가스 NOx 와 온도도 위와 같이 참조 모델 기준으로 일정 비율로 예측한다. 단지 참조 모델이 각각 다르다.

3. 연소효율 최적화

가장 우선적으로 안전운전을 고려해야 한다. 연소 과정에서 불완전 연소로 인해 CO 함량이 높아지면 폭발 위험이 커지므로 일정 함량 이하로 유지하여야 한다. 불완전 연소가 발생하면 순간적으로 피크를 형성하므로 CO 함량의 최대치가 폭발하한(Low Explosion Limit)의 25%를 초과하지 않도록 관리해야 한다. 순간적인 피크 발생을 고려하여

Copyright 2019. TechDas Inc. All rights reserved.

피크가 1,000ppm 을 초과하지 않도록 해야 한다. 그러나 보일러 용량이 작을수록 이보다 훨씬 낮아야 한다.

CO 함량 피크 최대값 1,000ppm 은 절대 지켜야 하므로 최적화 문제에서 강 제약조건(Hard Constraint)으로 설정한다. 강 제약조건은 최적화 과정에서 상관없이 항상 지켜야 한다는 의미이다. 정상 운전 상태에서의 최대값 100ppm 은 가능한 지켜야 하므로 약 제약조건(Soft Constraint)으로 설정한다. 최적화 문제에서 강 제약조건은 부등식 제약조건(Inequality Constraint)으로 구현되며, 약 제약조건은 목적함수에 벌칙함수(Penalty Function)로 구현한다.

최적화 문제의 목적함수 Φ 는 열손실법의 열손실에 벌칙함수를 추가하여 표현되며, 최적화에서 이를 최소로 하는 공기 주입량을 결정한다.

$$\text{Min } \Phi = w_1 \times \text{열손실} + w_2 \times \text{벌칙함수} \quad (5)$$

여기서 w_1과 w_2는 열손실과 벌칙함수의 상대적인 비중을 표현하는 비중인자이다.

CO 함량이 1,000ppm 일 때 과잉공기%(또는 O2%)를 찾아 강 제약조건의 경계를 설정한다. 그리고 CO 함량 100ppm 일 때 과잉공기%를 찾아 제약조건의 구간을 설정한다. 그리고 CO 함량이 이보다 작은 값이 되지 않도록 최소값으로 또 다른 약 제약조건을 설정한다. 아래 그림에서는 CO 함량이 강 제약조건 1,000ppm 일 때 과잉공기는 2%, 약 제약조건 100ppm 일 때 4%, 또 다른 약 제약조건 10ppm 일 때 7%이다.

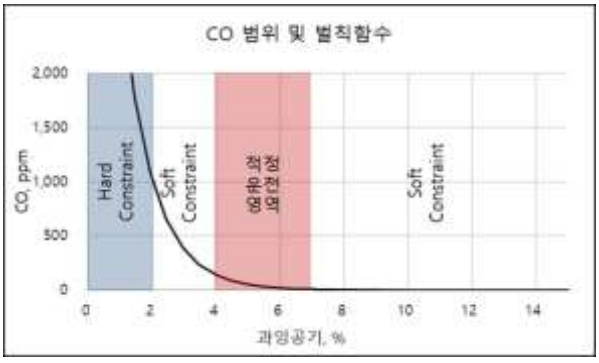

그림 9. CO 함량에 따른 제약조건

강 제약조건 경계인 과잉공기 2% 이하에서는 수학적으로 제한을 두어 최적화의 해를 허용하지 않는다. 반면에 약 제약조건은 해가 경계 밖에 존재할 수는 있지만, 벌칙 값을 부여하여 수학적으로 가능한 회피하도록 한다. 이 때 벌칙 값은 그림 10 에서와 같이 과잉공기 4 ~ 7%의 경계로부터 멀어질수록 선형으로 증가하도록 한다.

식 (5)의 열손실과 벌칙 값을 합한 값으로 최적화의 목적함수를 작성한다. 위의 예에서는 벌칙 값이 0 인 과잉공기 4 %에 최적값이 존재할 가능성이 높으며, 예상되는 배기가스의 과잉공기 O2 농도는 0.8%이다.

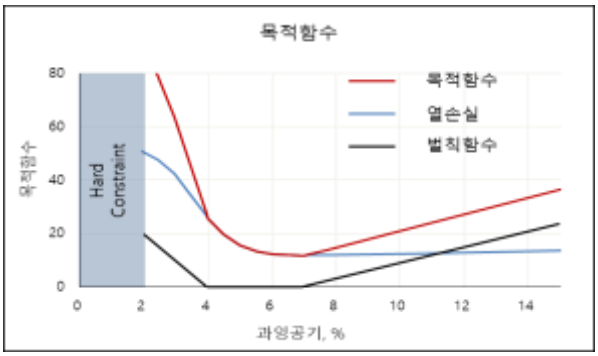

그림 10. 열손실과 벌칙함수를 포함한 최적화 목적함수

Copyright 2019. TechDas Inc. All rights reserved.

4. 배기가스 성분 예측 가상센서

연소효율 최적화는 배기가스의 O2 와 CO 농도의 실시간 측정을 필요로 한다. 이를 위해서는 배기가스 계통에 온라인 하드웨어 분석기가 설치되어 있어야 한다. 하지만 일부 대형 시설 이외에는 하드웨어 분석기가 설치되어 있지 않아서 연소효율 최적화를 구현하는데 하드웨어 분석기의 설치 비용이 추가로 필요하다.

분석기의 설치 비용 부담을 덜기 위하여 배기가스 O2, CO, NOx, SOx, 먼지를 분석하는 가상센서(Virtual Sensor)[3] PTOP-Vsensor™를 제안한다. PTOP-Vsensor™는 배기가스 성분의 함량을 인공지능 머신러닝 기술로 예측하는 소프트웨어 센서로 하드웨어 분석기보다 훨씬 저렴하게 설치할 수 있다.

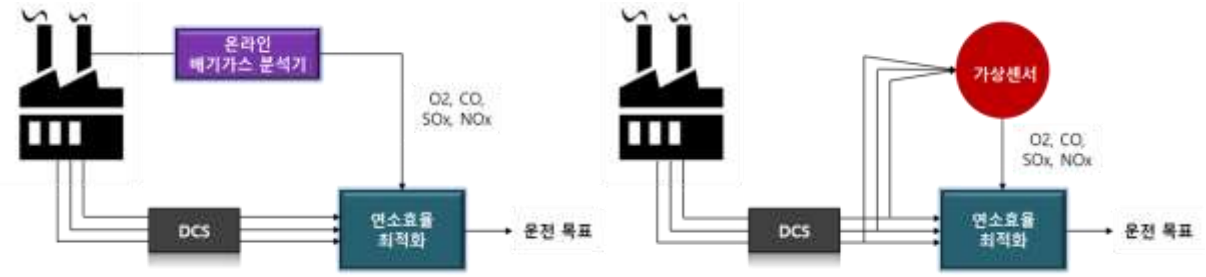

그림 11. 실시간 연소효율 최적화 시스템; (좌) 온라인 하드웨어 분석기 이용, (우) 가상센서 이용

5. 사례 연구

사례 1: 연소용 공기를 과잉으로 공급하는 증기 75 톤 보일러 사례

평균적으로 배기가스 O2 가 5%로 높아 CO 는 배출되지 않는 사례이다. PTOP-Vsensor™를 적용하여 배기가스 가상센서를 개발하고, 연소효율 최적화를 실시한 결과, 그림 12 와 같이 연소용 공기를 줄여서 배기가스 O2 를 2%로 낮추고 CO 를 5~10ppm 유지하였다. 이를 통해 연소효율이 평균 86.35%에서 87.48%로 1.13% 증가하여 연간 2 억원의 연료를 절감할 수 있었다.

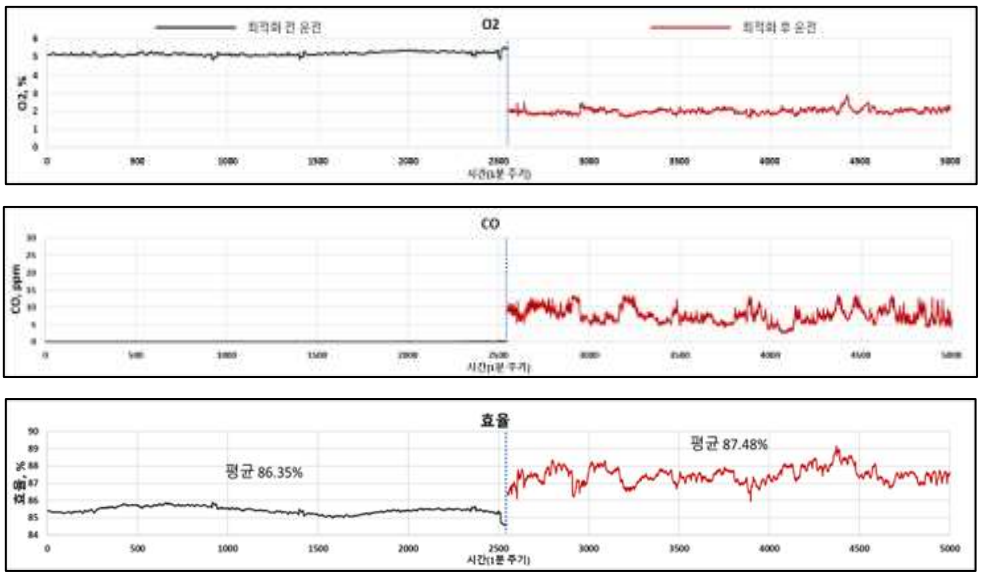

그림 12. 75 톤 보일러 연소효율 최적화 전과 후의 트랜드; (위) O2 트랜드, (가운데) CO 트랜드, (아래) 효율 트랜드

[3] 가상센서 계측 및 제어 솔루션 PTOP Sensor™, 고홍철, No.1, 월간제어계측, 2020

Copyright 2019. TechDas Inc. All rights reserved.

사례 2: 연소용 공기가 부족하여 불완전 연소가 발생하는 280 톤 보일러 사례

평균적으로 배기가스 O2 가 0.5 ~ 1.0% 낮고, CO 가 1,000ppm 정도로 높게 배출되는 사례이다. 피크로 인해 수시로 2,000ppm 을 상회하였다. PTOP-Vsensor™ 를 적용하여 배기가스 가상센서를 개발하고, 연소효율 최적화를 실시한 결과, 그림 13 과 같이 연소용 공기를 증가시켜서 O2 농도를 1.0~1.5%로 높이고, CO 를 10ppm 이하로 낮추었다. 이를 통해 연소효율이 평균 86.9%에서 87.6%로 0.7% 증가하여 연간 5 억원의 수익을 달성하였다.

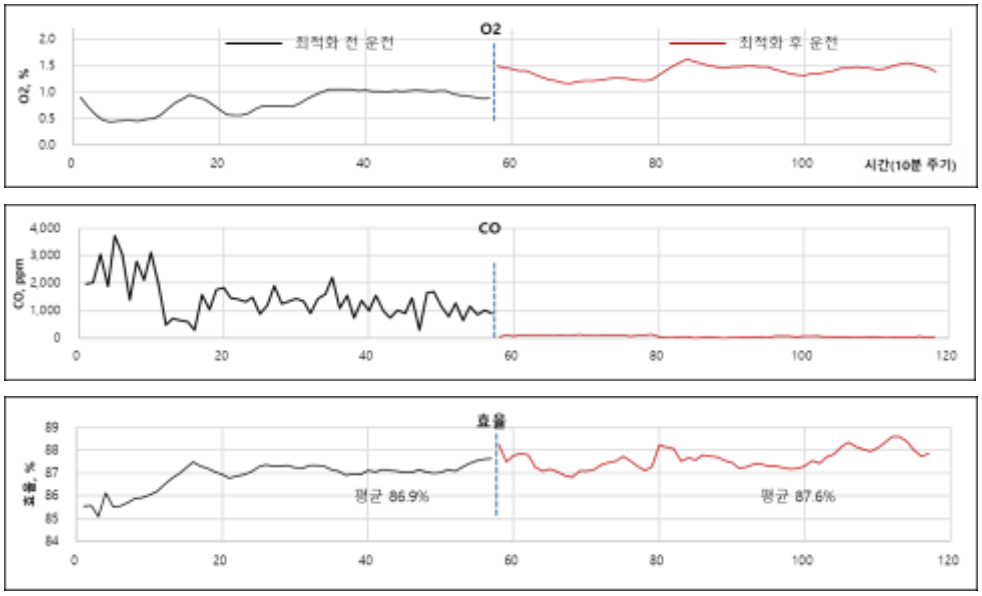

그림 13. 280 톤 보일러 연소효율 최적화 전과 후의 트랜드; (위) O2 트랜드, (가운데) CO 트랜드, (아래) 효율 트랜드

범용 PC 의 MS 윈도우 환경에서 파이선을 이용하여 프로그래밍하였으며, 모니터링 화면은 아래 그림과 같다.

그림 13. 연소효율 최적화 시스템의 HMI 예시

6. 검토

1) 연소설비 효율 최적화를 통해 연료의 과잉 사용을 줄이는데 있어서 연소효율 계산이 정확할수록 더 많은 개선 기회를 가질 수 있다. 이러한 관점에서 정확성이 떨어지는 입출열법보다는 열손실법이 바람직하다.

2) ASME Standard PTC Code 4 와 KS B6205 의 표준화된 식은 수계산을 위해 제안된 식이다. 발열량 계산이

Copyright 2019. TechDas Inc. All rights reserved.

연료의 성분 개수에 비례하여 복잡하고, 온도와 압력 변화에 대해 하나의 대표값을 사용하므로 오차가 발생한다. HYSYS 나 DWSIM 과 같은 공정 시뮬레이션을 이용하면 물성 데이터를 입력할 필요도 없고, 온도 변화에 따라 열용량 변화를 사용자가 고려할 필요가 없으므로, 더 정확하고, 간단히 효율을 계산할 수 있다.

3) 연소효율 최적화를 위해서는 배기가스 O2% 변화에 따른 CO, NOx, 온도 변화를 예측할 수 있어야 한다. 간혹 운전 데이터의 산포를 통해 회귀식을 만들고 이를 이용하여 배기가스 CO, NOx, 온도 변화를 예측하기도 하는데 이는 틀린 방법이다.

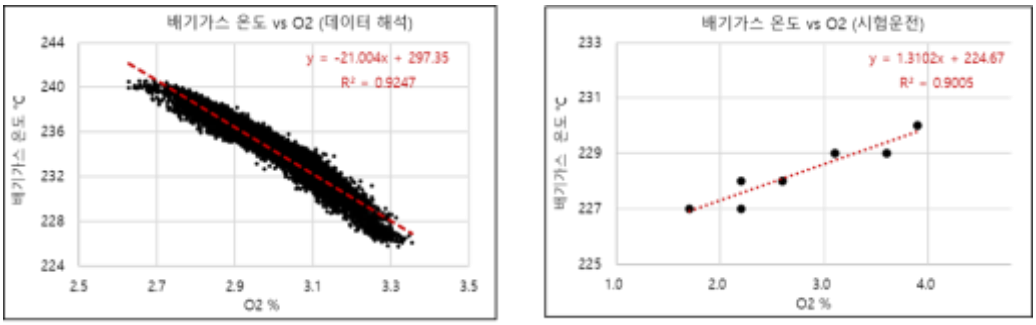

그림 14. 배기가스 O2% 변화에 따른 온도 변화, (좌) 과거 운전 데이터의 산포도, (우) 시험운전 데이터

위의 그림에서 좌측 데이터의 산포에 의하면 배기가스 O2%가 증가할수록 온도는 감소한다. 그런데 위그림의 우측 시험 운전에 의하면 배기가스 O2%가 증가할 수록 온도는 증가한다.

그 이유는 다음과 같다. 그림 15 의 좌측 산포도에 의하면 배기가스 온도와 연료 유량은 비례 관계이고, 우측 산포도에 의하면 연료 유량과 O2%는 반비례 관계이다. 따라서 배기가스 온도와 O2%는 그림 14 의 죄측 그림처럼 반비례 관계이다. 즉, 배기가스 온도와 O2%의 관계에는 숨어있는 매개변수 연료 유량이 있다. 따라서 통계적으로 구한 회귀식을 변수 간의 인과관계로 판단하지 말아야 한다.

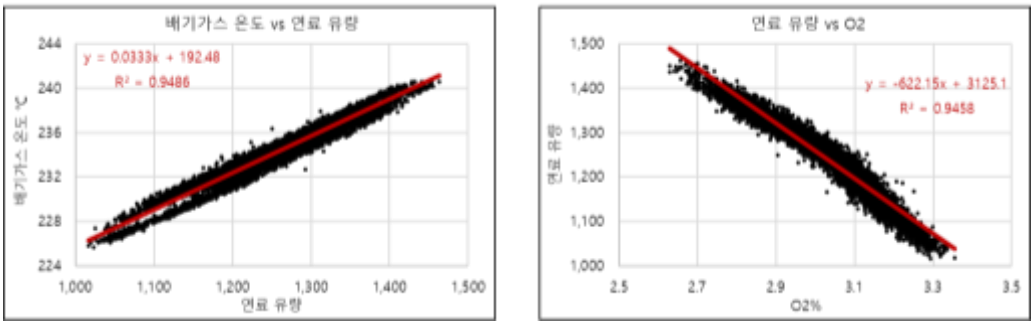

그림 15. (좌) 배기가스 온도와 연료 유량 산포도, (우) 연료 유량과 배기가스 O2% 산포도

고 성근

010-6600-5591 / tjdrms5591@techdas.co.kr
㈜테크다스 www.techdas.co.kr
서울특별시 금천구 디지털 1 로 204, 510 호 (가산동, 가산반도아이비밸리) (우편번호: 08502)
Tel. 82 (0)2 865 1313 Fax. 82 (0)2 865 1311

Copyright 2019. TechDas Inc. All rights reserved.