

# 연소설비 배기가스의 가상센서 계측

Machine Learning Based Virtual Sensor Measurement of Flue Gas in Industrial Combustion Plants

고 성근

(주)테크다스 www.techdas.co.kr

정부는 온실가스 감축 및 기후위기 적응대책을 강화하여 2030년 중장기 국가 온실가스 감축 목표(NDC)로 2018년 국가 온실가스 배출량 대비 40% 감축하고, 2050년에는 탄소중립을 달성하기로 하였다. 기업들은 기존의 에너지 설비의 개별 효율 향상의 한계를 극복하고 에너지 생산에서 소비까지 전주기를 통합하는 광의의 효율 개선 방안이 필요하게 되었다. 4차산업의 핵심 기술인 인공지능과 사물인터넷을 기반으로 하는 에너지 디지털화로의 전환도 하나의 대안으로 이루어지고 있다. 본 고를 통해 에너지 디지털 전환의 일환으로 빅데이터 기술을 이용하여 온실가스 배출량을 예측하는 가상센서(Virtual Sensor) 기술을 소개하고자 한다.

## 1. 서론

우리나라에서 에너지를 가장 많이 사용하는 장치는 보일러, 가열로, 소각로, 열풍로, 고로, 분해로 등의 산업용 연소설비로 전체 에너지의 30%를 사용한다. 미세먼지도 가장 많이 배출한다.<sup>1</sup> 단위 설비로서 에너지 및 환경오염의 영향도가 큰 만큼, 이를 감소시키기 위한 다양한 기술들이 제안되고 있다.

운전 관점에서 연소효율을 향상하려면 배기가스 성분의 농도를 실시간으로 측정하여 적절한 공기비를 유지하여야 한다. 그런데 배기가스 농도를 실시간 측정하는 분석기는 가격이 비싸고, 지속적인 유지보수를 필요로 하는 문제가 있다. 이를 극복할 수 있는 대안으로 그림 1과 같은 빅데이터 기반의 가상센서를 제안하며, 적용 사례를 통해 유용성을 소개하고자 한다.

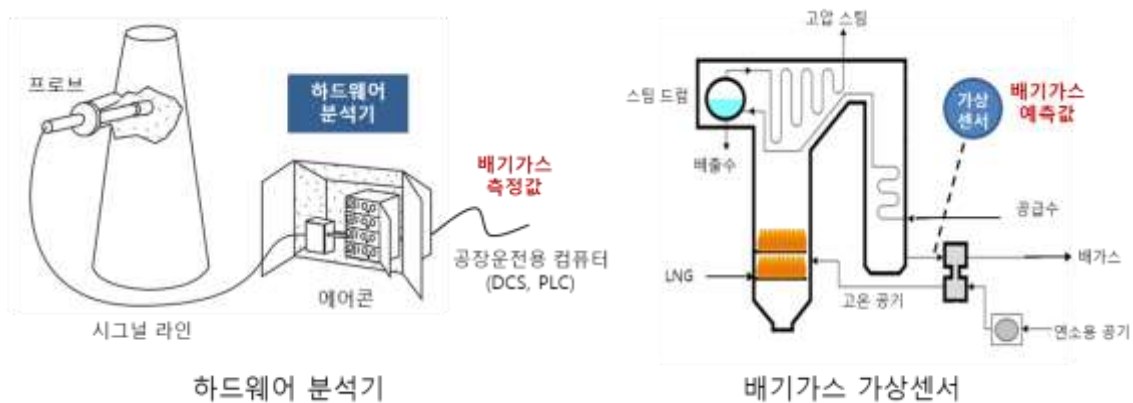


그림 1. 하드웨어 분석기 및 가상센서 개념도

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

## 2 배기가스 가상센서

가상센서란 실물센서를 대신하여 대상의 상태를 측정하는 가상적인 센서를 말하며, 공장에서는 온도, 유량, 압력과 같은 물리적 센서가 만들어낸 데이터를 머신러닝 알고리즘으로 결합해서 제품의 품질이나 환경오염물질 농도와 같은 이차적인 성질을 예측하는 소프트웨어 센서를 말한다. 가상센서는 온도, 유량, 압력을 입력변수로 하는 머신러닝 기법으로 구한 일종의 회귀식이다. 머신러닝 기법으로 인공신경망(Artificial Neural Network)과 잠재변수 모델(Latent Variable Model), XGBoost 등을 사용하는데, 노이즈 필터링이나 비선형성 문제에 대한 성능이 달라 장단점이 있다.

연소설비의 배기가스 가상센서는 배기가스에 포함된 O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, 먼지의 함량을 예측한다. 배기가스 가상센서는 PEMS(Predictive Emission Monitoring System)에 기원을 두고 있으며, 우리나라에서는 생소한 기술이지만 미국이나 유럽의 여러 나라에서 굴뚝자동측정기기(TMS)의 분석기를 대체한다. 미국 환경보호국(EPA)의 성능표준 PS-16 조<sup>2</sup>, 유럽 표준협회(CEN)의 성능표준 TS 17198<sup>3</sup>, 네덜란드 기술규격의 NTA 7379<sup>4</sup>에 PEMS의 인증 규격이 제정되어 있다.

가상센서는 하드웨어 분석기의 고장을 감지하는 용도로도 사용된다. 하드웨어 분석기 측정값과 가상센서 예측값의 차이가 일정 기준치보다 크면 분석기에 고장이 있다고 판단하고, 가상센서가 분석기를 대신한다.

가상센서를 개발하려면 우선 머신러닝에 필요한 학습용 데이터를 수집하여야 한다. 가상센서를 하드웨어 분석기의 고장진단 목적으로 사용할 경우에는 과거 분석 데이터 중에서 양호한 데이터를 발췌하여 수집한다. 반면에 하드웨어 분석기 대신에 가상센서를 개발할 경우에는 학습 데이터가 수집을 위해서 연속측정 방식의 분석기를 임시로 설치하여 수집한다. 특별한 공정 변화가 없으면 보통 1~3 개월 동안의 데이터로 가상센서의 개발이 가능하다.

가상센서의 실용화에 있어서 가장 걸림돌이 되는 것은 정확성에 대한 확신이다. 머신러닝의 특성 상 외연보다는 내삽에 더 적합하므로, 학습에 사용했던 것과 다른 상태의 데이터가 입력되면 오차를 가질 가능성이 크다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 ㈜테크다스의 가상센서 프레임워크인 PTOP-Vsensor™는 자기진단 기능을 갖추어 가상센서의 정확성 정도를 사전에 예측할 수 있도록 하고 있다.

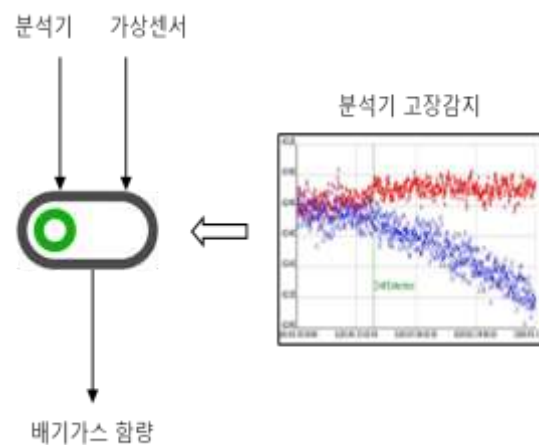


그림 2. 잔차분석법에 의한 하드웨어 분석기 고장감지

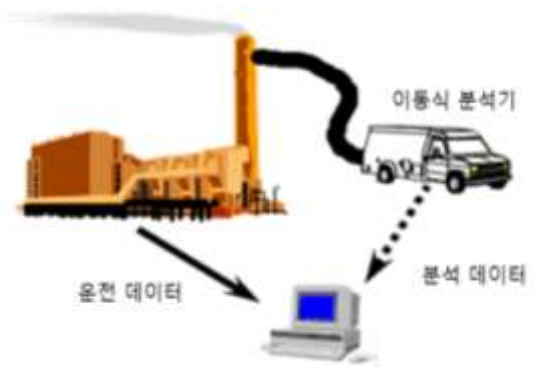


그림 3. 연속측정형 이동식 분석기를 이용한 데이터 수집

<sup>2</sup> 미국 환경보호국(EPA) 40 CFR Part 60 의 PS-16 조, 2017

<sup>4</sup> Netherlands Technical Agreement. NTA7379, 2014

<sup>3</sup> CEN/TS 17198, 2018

### 3. 적용 사례

#### 사례 1: LNG 복합발전

300MW 급 LNG 복합발전소 굴뚝에 하드웨어 분석기의 고장을 신속하게 감지하고, 고장 발생 시에 분석기를 대체하기 위하여 O<sub>2</sub> 가상센서를 개발하였다. 가상센서에 포함된 변수는 총 35 개의 측정변수 중에서 단 6 개로 구성되었다. 잠재변수의 개수는 3 개로 축약되었다.

그림 5에서 검정색 실선이 하드웨어 분석기의 O<sub>2</sub> 측정값이고, 붉은색 실선이 가상센서의 O<sub>2</sub> 예측값이다. 두 트렌드가 거의 겹치는 모습으로 가상센서가 매우 정확하게 배기가스 함량을 예측하였다.

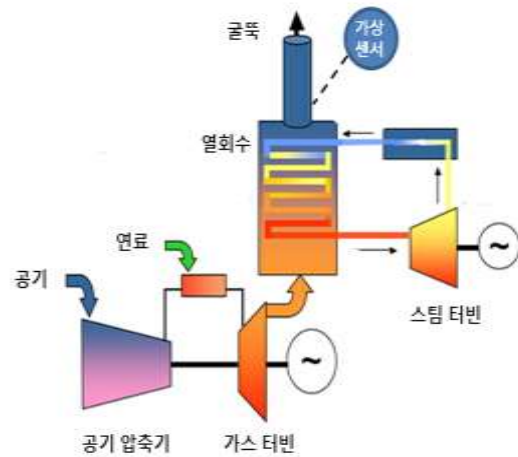


그림 4. LNG 복합발전 개략도 및 가상센서 위치

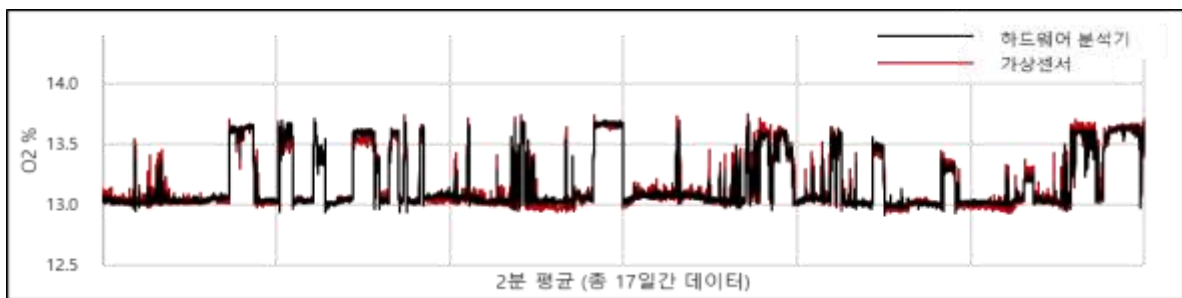


그림 5. 복합발전 배기가스 O<sub>2</sub> 가상센서 시계열 추이

LNG 복합발전은 연료의 조성이 일정하고, 외란이 거의 없어서 작은 개수의 변수로도 배기가스 가상센서가 매우 정확하였다. 본 사례는 미국 환경보호국(EPA)의 성능표준 PS-16 조의 규격을 모두 만족하였다. O<sub>2</sub>% 가상센서의 시험성적이 상대오차 0.27%로 EPA 규격인 10% 미만보다 훨씬 우수한 예측력을 보였다.

#### 사례 2: 부생가스 보일러

공장에서 생산되는 부생가스를 연료로 사용하는 시간 당 250톤 생산 용량의 스팀 보일러 사례이다. 공기예열기 전단의 배기가스 덕트의 직경이 커서 온도 차로 인해 농도가 다른 층이 형성되는 성층현상(Stratification)이 우려되어 세 곳에 O<sub>2</sub> 분석기를 설치하여 평균값으로 모니터링한다. 그림 6에서 검정색, 초록색, 파란색 실선이 각각 하드웨어 분석기 A, B, C의 측정값이다. 그림 7 처럼 성층현상으로 인해 세 개의 측정값이 모두 다를 수 있으며, 간혹 정 반대의 경향을 보이기도 한다.

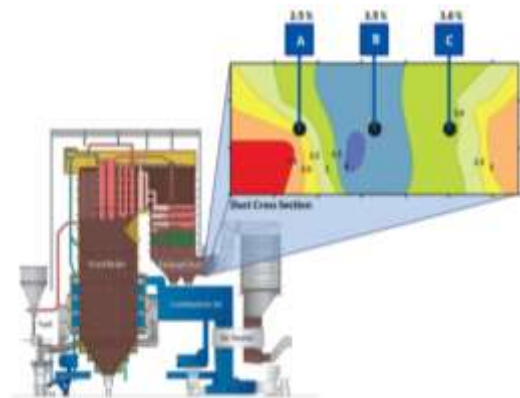


그림 6. 보일러 배기가스 성층화 현상

세 하드웨어 분석기 측정값의 평균값에 대해 가상센서를 개발하였다. 세 분석기의 평균값 가상센서가 안정적이어서 O2 제어의 입력변수로 사용하였다.

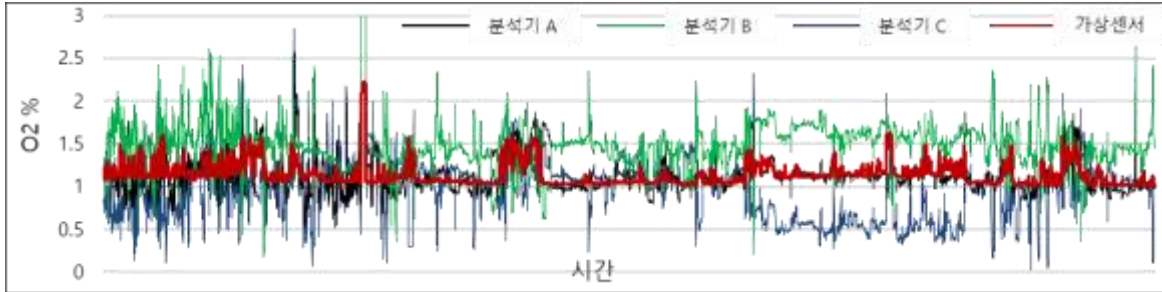


그림 7. 부생가스 보일러 O2 분석기 측정값과 가상센서 시계열 추이

### 사례 3: 석탄 유동층 보일러

열을 순환시켜 석탄을 완전 연소시키는 순환 유동층 (Circulating Fluidized Bed Combustion, CFBC) 보일러 사례이다. 석회를 석탄과 동시에 주입하여 유동 매체와 함께 순환 연소시킴으로써 대기오염물질의 배출을 줄인다. 탈황 및 탈질 공정의 규격 강화에 대비하여 정확한 배출량 제어를 위해 가상센서를 개발하였다.

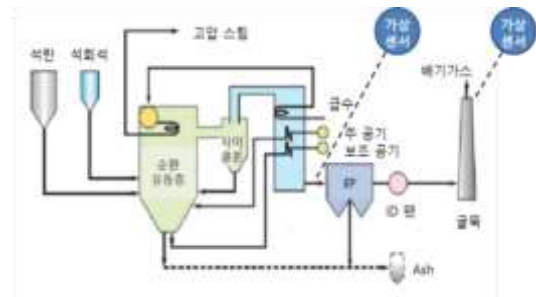


그림 8. 순환 유동층 보일러의 가상센서 위치

가상센서 결과는 아래 그림과 같다. 집진기 후단 O2(a)와 굴뚝 O2(b)는 가상센서와 측정값의 R<sup>2</sup>Y(상관계수)가 80% 이상으로 가상센서의 정확성이 높았지만, SOx(c)와 NOx(d)는 가상센서와 측정값의 R<sup>2</sup>Y가 30~40% 수준이었다. 하드웨어 분석기 모두 드리프트 (Drift) 현상의 고장은 없었지만 분석값에 노이즈가 많은 사례이다.

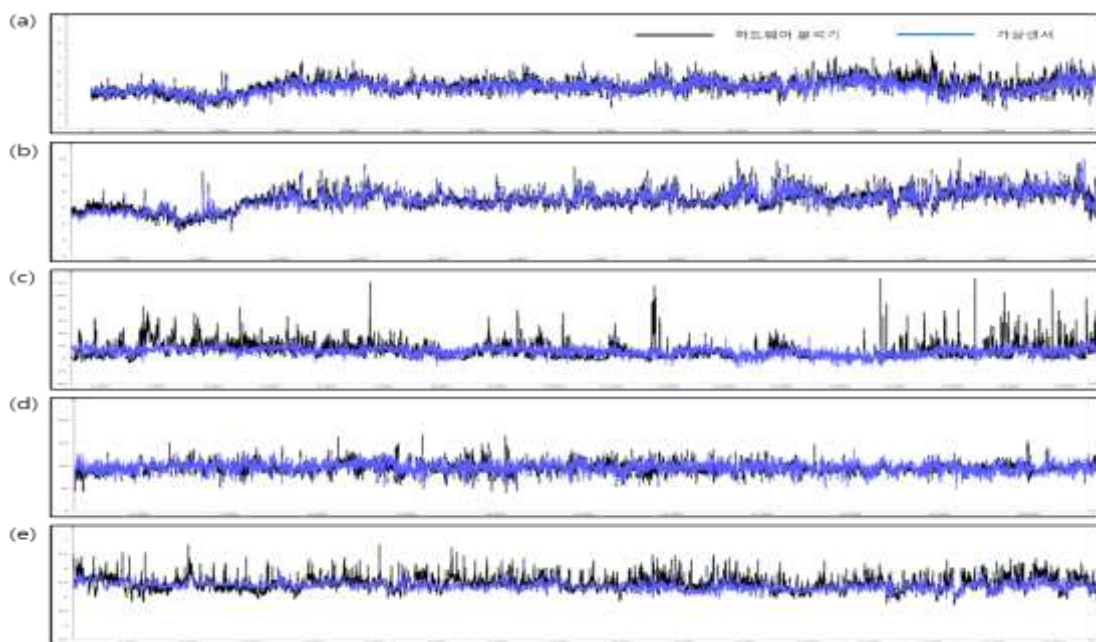


그림 9. 측정값과 가상센서 시계열 추이: (a) 집진기 후단 O2, (b) 굴뚝 O2, (c) 굴뚝 SOx, (d) 굴뚝 NOx, (e) 굴뚝 먼지

#### 사례 4: 제철소 가열로

제철소에서 슬라브(Slab)를 가열하는 가열로는 예열대, 가열대, 균열대로 나뉘며 슬라브의 종류에 따라 각기 다른 온도로 가열된다. 슬라브의 온도 제어와 함께 공기비 제어와 O<sub>2</sub> 트림 제어를 실시한다. O<sub>2</sub> 트림 제어의 설정값은 CO 함량이 100ppm을 초과하지 않는 선에서 결정한다. 그러나 제철소 가열로는 강판이 가열로에 장입되거나 추출될 때마다 외부로부터 공기가 유입되어 측정값에 노이즈가 포함된다. 노이즈를 필터링하여 제어 성능을 향상하고자 가상센서를 설치하였다.

각 대별 상하부 O<sub>2</sub> 가상센서 6 개와 예열대 상부 CO 가상센서 1 개로 총 7개의 가상센서를 개발하였다. 그림 11 에서 검정색 실선이 예열대 상부의 O<sub>2</sub> 하드웨어 분석기의 측정값이고, 붉은색 실선이 가상센서 예측값이다. 그림에서 보는 바와 같이 가상센서는 피크 형태의 노이즈가 완화되었다. 나머지 5 개의 O<sub>2</sub> 가상센서도 예열대 상부 O<sub>2</sub> 가상센서와 유사한 결과를 보였다.

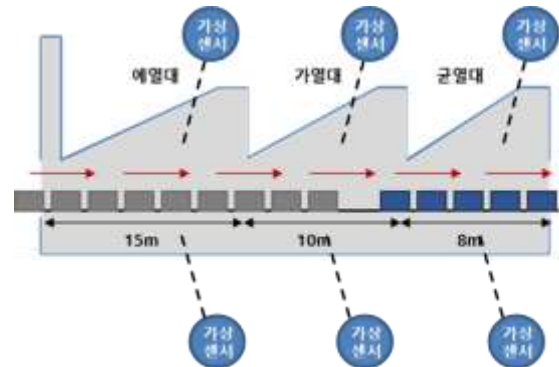


그림 10. 제철소 열연 가열로 개략도 및 가상센서 위치

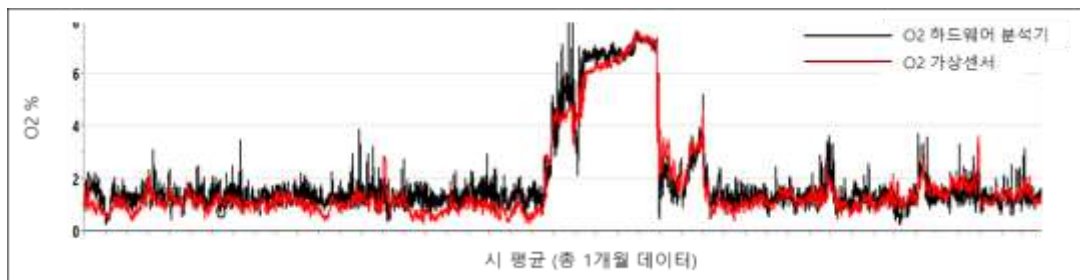


그림 11. 제철소 가열로 예열대 상부 O<sub>2</sub> 가상센서 시계열 추이

다음 그림에서 검정색 실선이 예열대 상부의 CO 하드웨어 분석기의 측정값이고, 붉은색 실선이 가상센서 예측값이다. CO 가상센서는 큰 크기의 피크를 필터링할 수 있었다. 필터링 목적 이외에도 가상센서를 통해 분석기의 고장을 감지하는 용도로도 사용하고 있다.

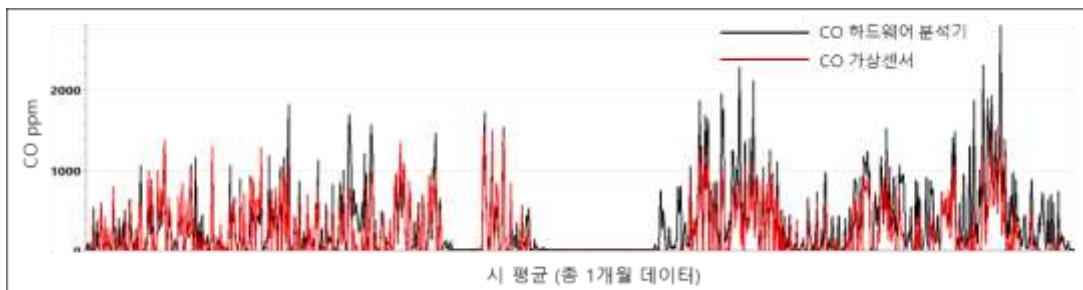


그림 12. 제철소 가열로 예열대 상부 CO 가상센서 시계열 추이

#### 사례 5: 납사분해공정 분해로

납사분해공정은 원유를 정제할 때 나오는 납사를 분해해 에틸렌과 프로필렌 등 기초 석유화학제품을 생산하는 공정이다. 다수의 분해로에서 800~900°C의 고온에서 납사를 가열 분해해 에틸렌과 프로필렌을 생산한다.

대상 납사분해공정은 분해로가 모두 12개이며, 분해로마다 O2와 CO 분석기가 설치되어 있다. 연소제어를 안정적으로 실시하기 위하여 분석기의 고장을 감시하는 용도로 가상센서를 개발하였다. 연료성분으로 데이터를 군집화하고, 각 군집별로 가상센서를 개발하였다. 특히 머신러닝 기법의 하나인 잠재변수 모델은 데이터를 군집화하는데 매우 편리한 기능이 있다. 오른쪽 그림처럼 총 7개로 군집을 나누어 가상센서를 개발하였다.

참고로 PTOV-Vsensor™ 는 인공신경망(Artificial Neural Network)과 잠재변수 모델(Latent Variable Model), XGBoost 를 지원하는데 이 중에서 잠재변수 모델의 하나인 부분최소자승법(Partial Least Square)을 사용하였으며, 주 요인분석법(Principal Component Analysis)으로 군집을 구분하였다.

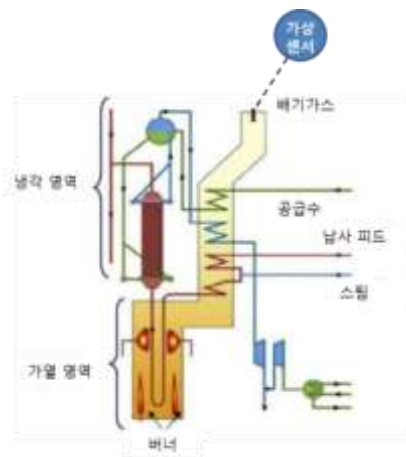


그림 13. 납사분해공정 분해로 단순도 및 가상센서

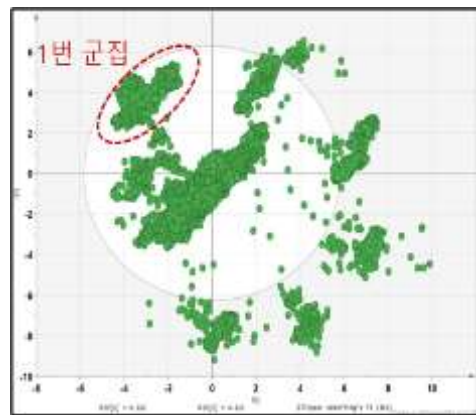


그림 14. 납사분해공정 가상센서 군집 구분

전체를 하나의 모델로 개발했을 때는 그림 15와 같이 피크를 예측하지 못했으나, 각 군집 별로 개발했을 때는 그림 16과 같이 피크를 예측할 수 있다. 가상센서를 통해 O2 제어의 신뢰도를 높일 수 있었다.

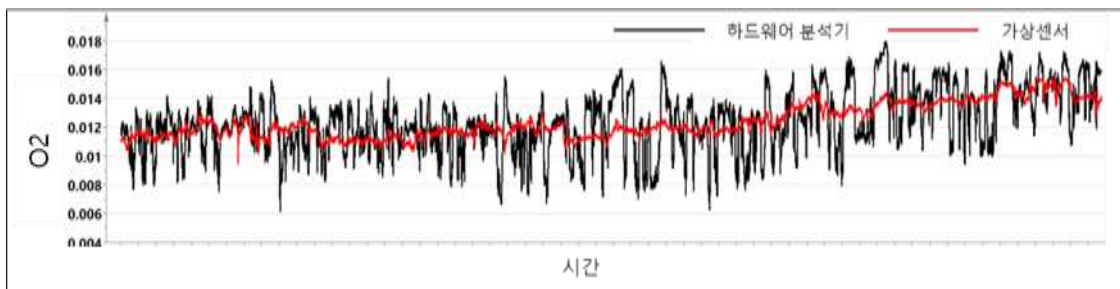


그림 15. 납사분해공정 분해로 O2 측정값과 하나의 모델로 개발한 가상센서 시계열 추이

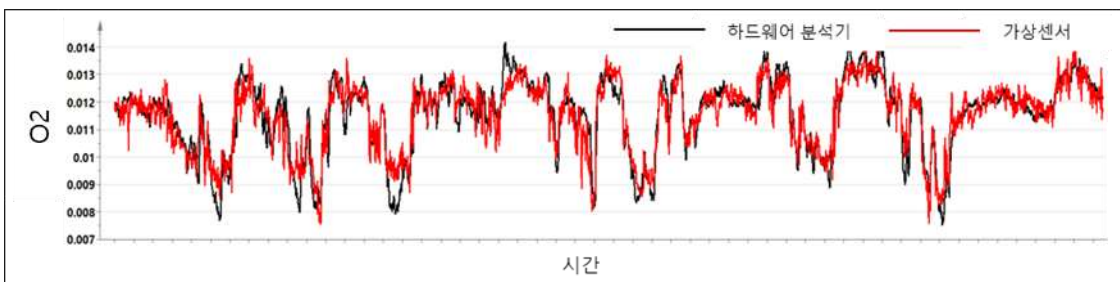


그림 16. 납사분해공정 분해로 O2 측정값과 군집으로 구분하여 개발한 1번 군집의 가상센서 시계열 추이

#### 4. 시스템 특징

PTOP-Vsensor 는 자기진단 기능과 측정값 보정 기능을 갖추고 있는 가상센서 프레임워크이다. 자기진단 기능을 통해 가상센서 결과가 정확한지 부정확한지의 정보를 같이 제공하여 신뢰성을 높인다. 그리고 가상센서 모델의 입력변수, 즉 온도나 유량 등의 센서 고장을 감시하고, 고장 시에 측정값을 보정하는 기능을 갖추어 가상센서의 가동률을 높인다.

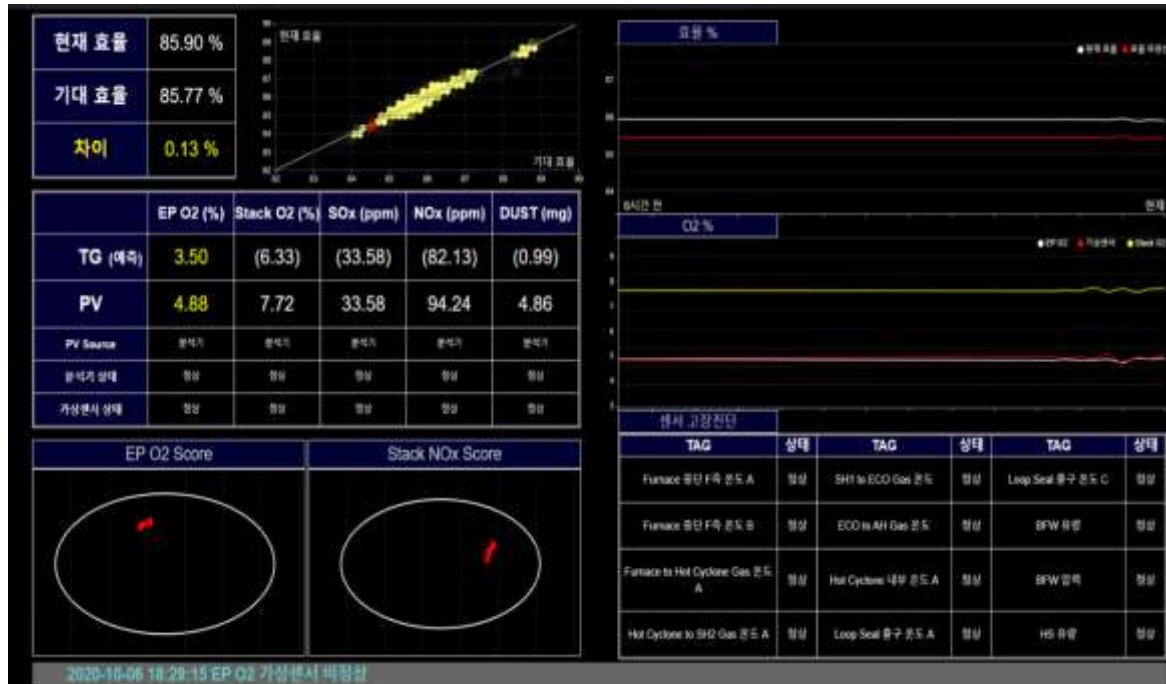


그림 17. 배기가스 가상센서 HMI 예시

고 성근 [tjdrms5591@techdas.co.kr](mailto:tjdrms5591@techdas.co.kr)

(주)테크다스 [www.techdas.co.kr](http://www.techdas.co.kr)

서울특별시 금천구 디지털1로 204, 510 호 (가산동, 가산반도아이비밸리) (우편번호: 08502)

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