

# 날개통과온도 변화에 기반한 발전용 가스터빈의 운전관리 개선

이용일\*, 이재현\*\*†

\*한국동서발전(주), \*\*†한양대학교 기계공학부

## Improved Operation Criteria for a Power Generation Gas Turbine on the Blade Path Temperature Variations

Yong-Il Lee\*, Jae-Heon Lee\*\*†

\*Korea East-West Power Co., Ltd., Ulsan 44543, Korea

\*\*†School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received Aug. 30, 2020; Revised Sept. 6, 2020)

**ABSTRACT** : In this study, I discussed a way of the improved operation criteria to detect combustion instability in advance F-Class Gas Turbine, which adopts lean pre-mixed combustion system. The data of 16 blades path temperature thermocouple installed radially at the gas Turbine exit were collected to analyze the variation of individual blade path temperature. The cumulative variation in individual blade path temperature for one week under normal combustion conditions was confirmed to be up to 26°C. On the other hand, in the event of combustion instability, the symptoms of increased temperature variations in the individual thermocouple were mostly seen from a few days ago. Based on the results of this study, it is deemed appropriate to inspect and maintain in Ulsan Thermal Power Gas Turbine when the individual blade path temperature exceeds 50°C of the cumulative variation for 10 days.

**초록** : 본 연구에서는 희박예혼합 연소방식을 채택하고 있는 F급 가스터빈에서 연소불안정을 사전에 감지하기 위한 운전관리 개선방안에 대해 고찰했다. 가스터빈 출구에 방사형으로 설치된 16개의 날개통과온도 열전대 데이터를 수집하여 개별 날개통과온도 변화량을 분석하였다. 정상 연소상태 조건의 일주일간 개별 날개통과온도 누적변화량은 최대 26°C로 확인됐다. 반면 연소불안정 발생 시에는 대부분 수일 전부터 개별 열전대에서 온도변화량이 증가하는 전조증상을 확인할 수 있었다. 따라서 기존의 날개통과온도 최대편차 운전관리와 함께 개별 날개통과온도 변화량 감시방법을 추가하면 연소불안정을 조기에 인지할 수 있다. 본 연구결과를 바탕으로 개별 날개통과온도가 10일간 누적변화량 50°C 이상 초과 시에 점검 및 정비를 하는 것이 적절한 관리기준으로 판단된다.

**Key words** : 날개통과온도(blade path temperature, BPT)

-기호설명-

- $B_a$  : 평균 날개통과온도 (°C)
- $B_n$  : 최고 날개통과온도 (°C)
- $B_l$  : 최저 날개통과온도 (°C)
- $D_n$  : 온도편차 (°C)

- $D_{n-x-max}$  : 일정기간 데이터 중 최고온도편차 (°C)
- $D_{n-x-min}$  : 일정기간 데이터 중 최저온도편차 (°C)
- $S_B$  : 날개통과온도 최저온도와 평균온도차 (°C)
- $V_B$  : 날개통과온도 최고온도와 평균온도차 (°C)
- $V_n$  : 온도변화량 (°C)

† Corresponding Author, yongil0322@gmail.com

## 1. 서론

가스터빈 상태감시는 고온의 연소가스가 연소에서 생성되어 터빈에서 에너지변환에 직접 작용하므로 증기터빈에서와 같은 일반적인 상태감시기법인 회전체의 진동, 베어링 온도, 회전체 윤활유 열화관리 뿐만 아니라 연소상태 감시가 필수적으로 수반되어야 한다. 울산화력 2복합 가스터빈은 W501F 기종으로 TIT 1,300°C급의 복합효율 53%로 설계된 모델이다. 제작사는 연소상태 감시를 위해 가스터빈 최종날개를 통과한 직후의 가스온도를 측정하고 있는데 이 온도를 날개통과온도(Blade Path Temperature, BPT)라 한다. 가스터빈 운전 중 연소상태 변화에 의해 일정한 온도조건을 초과할 경우에 경보를 울리거나 자동으로 출력감발 또는 정지되도록 설계되어 있는데 이는 연소불안정이 장기간 정비를 초래하는 설비 파급사고로 확대되는 것을 방지하는데 그 목적이 있다. 본 연구에서는 울산화력 2복합 W501F 가스터빈에 대하여 정상 연소상태에서의 BPT 변화와 과거 연소불안정 사례 발생 시 BPT 변화 분석을 통해 제작사가 설정한 온도조건 도달 전에 이상 징후를 감별할 수 있는지를 확인하는데 있다.

정상 연소상태와 불안정 연소상태의 운전데이터를 취득하고, 취득된 데이터는 출력구간별 위치이동 특성을 반영하여 3개의 구간으로 구분하여 온도변화 분석에 사용하였다.

## 2. 가스터빈 연소불안정과 날개통과온도의 관계

### 2.1 연소불안정

최신 가스터빈은 발전효율을 향상시키고 질소산화물(NOx) 등의 공해물질 배출을 저감하기 위해 건식저

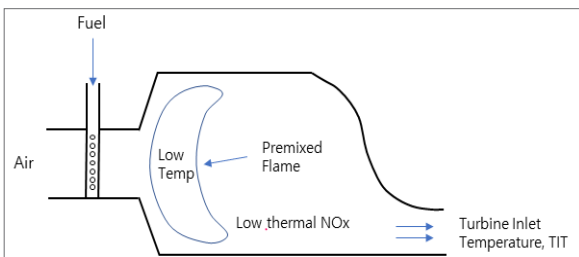


Fig. 1 Schematic of lean premixed combustor<sup>(1)</sup>

NOx(Dry Low NOx, DLN) 연소기술의 핵심인 희박예혼합 연소방식을 채택하고 있다. 그러나 희박예혼합 연소방식 기술은 당량비 0.6 근처의 희박연소로 화염이 불안정하여 연소진동이 발생하는 문제가 있어 안정적인 설비 운전에 장애를 초래하기도 한다. Fig. 1은 희박예혼합 저 NOx 연소기이다. 희박예혼합 연소기는 연료/공기 혼합물을 미리 혼합함으로써 화염의 최고치를 감소시켜 결과적으로 열적 NOx 생성을 감소시킨다. 이 기술의 기본적인 원리는 연소구역에 완전한 균질의 희박한 연료/공기 혼합물을 공급하는 것이다. 희박예혼합연소가 매우 낮은 NOx를 발생시키지만 이 방식은 희박 가연한계에 매우 가깝게 운전됨으로써 여러 가지 제약점을 가지고 있다. 이 연소방식은 화염소실, CO 과다발생 뿐만 아니라 연소진동 등 연소불안정을 유발한다. 이는 재래식 연소기와 달리 연소기 주위에 냉각용 공기 흡이 없어 연소 시 발생하는 연소 음향 에너지를 흡수하지 못해 연소진동이 발생하기 쉽다. 희박예혼합 방식에서 연소 불안정성이 열 방출, 음압 및 당량비 진동 사이의 피드백 과정으로 인한 것이라고도 설명되고 있다<sup>[2]</sup>.

연소진동 발생을 감소시키기 위한 방법으로 발전용 가스터빈에서는 일반적으로 희박예혼합 연소와 확산화염 연소를 혼합한 형태가 주로 사용되고 있다. 예를 들면 저부하 운전에서는 화염 안정을 위해 확산화염을 사용하고 고부하에서는 예혼합연소방식을 취하는 혼합형태를 취하고 있다<sup>[3]</sup>. 이러한 조치에도 불구하고 가스터빈 연소모드 전환시 연소진동이 발생하는 특성<sup>[4]</sup>과 설비운영 중에 생기는 경년 열화, 계획예방 정비 후 적절한 연소기 튜닝 실패 또는 오류 등 여러 가지 요인에 의해 연소불안정 현상이 발생하고 있다.

### 2.2 가스터빈 날개통과온도 관리

최신 가스터빈은 연소불안정 감시를 위해 연소 동압 모니터링 설비를 기본적으로 채택하고 있다. 엄격해진 NOx 발생량을 맞추기 위해 연소기는 3~4단계로 연료노즐을 세분화된 연소모드로 설계하는 추세다. 이러한 경향은 연소진동 측면에서는 더욱 가혹한 발생조건이 형성되기 때문에 가스터빈 설치 후 시운전 기간 중 연소기 튜닝 목적뿐만 아니라 운전 중에도 지속적으로 연소진동을 측정하고 관리하는 목적으로 연소 동압 모니터링 설비를 기본적으로 구비

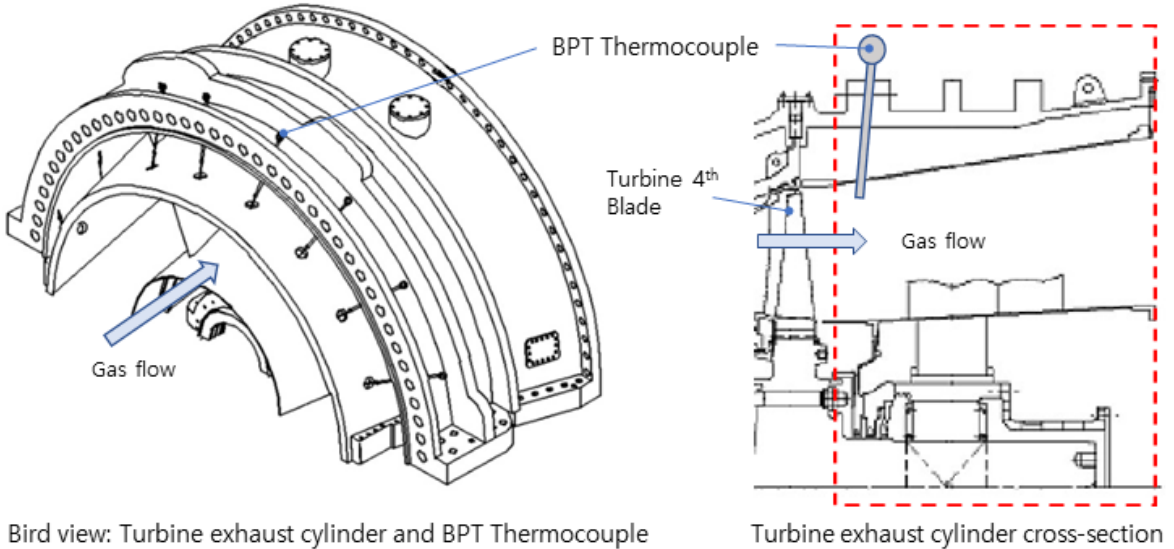


Fig. 2 BPT thermocouple configuration on W501F gas turbine exhaust cylinder

하고 있다. 울산화력 2복합 가스터빈에는 4개호기 중 한 개 호기에만 연소 동압 모니터링 설비를 시범적으로 설치하였으며 침두부하용으로 용도가 변경되면서 나머지 가스터빈에는 설치되는 않았다. 가스터빈 연소불안정 감시는 연소 동압 관리 이외에도 연소실내 온도분포를 통해 가능하다. 개별 연소실 온도 또는 TIT를 측정 할 수 있다면 연소상태를 용이하게 파악할 수 있겠다. 1,100~1,600℃의 높은 TIT를 직접 측정하는 기술은 아직까지 상용화되지 않았다. 일부 실험실에서 연소가스에 존재하는 이산화탄소 분자에 의해 방출되는 적외선 복사열을 활용한 비접촉식 터빈입구 온도 측정 연구<sup>6)</sup>가 진행되고 있기는 하지만 연소상태에 따라 이상 감지, 경보, 출력감발 및 비상정지 등의 설비보호 기능이 필수적인 발전용 가스터빈, 항공기 분야에서 위와 같은 측정방법이 상용화되기는 쉽지 않다.

가스터빈 연소온도를 직접 측정하는 대안으로 가스터빈 출구에서 BPT 감시를 통해 연소기 상태를 간접적으로 측정하고 운전 관리하는 방법이 일반적인 방법이다. Fig. 2는 울산화력 2복합 W501F 가스터빈 출구실린더에 구성되어 있는 BPT 열전대 설치위치를 보여주고 있다. 가스터빈 4단 날개를 통과한 위치에 방사형으로 16개의 BPT 열전대가 설치되어 있으며 이는 연소기 설치수량과 동일하며 축 방향으로 일치되어 있다.

W501F 가스터빈은 연소상태를 감시하기 위해서 터빈을 지나 측정된 16개의 BPT 측정값을 활용하여 BPT평균값( $B_a$ )을 산출하고, 이를 기준으로 상하 최대온도차를 일정범위 내에서 운전되도록 관리하고 있다. 여기서 BPT평균값( $B_a$ )는 식(2-1)로 표현할 수 있다.

$$B_a = \sum_{n=1}^{16} B_n \div 16 \quad (2-1)$$

여기서,  $B_n$ 은 16개의 측정위치별 온도를 의미한다.  $B_a$  (BPT average)는 BPT 총합을 연소기 설치수량(16개)으로 나눈 값이다.

그리고 측정된 16개의 BPT 중에서 BPT최고온도( $B_h$ )와 BPT평균온도( $B_a$ )의 차이를 BPT배리언스( $V_B$ )라고 호칭하며 식(2-2)로 표현할 수 있다.

$$V_B = B_h - B_a \quad (2-2)$$

또한, 측정된 16개의 BPT 중에서 BPT최저온도( $B_l$ )와 BPT평균온도( $B_a$ )의 차이를 BPT스프레드( $S_B$ )라고 호칭하며 식(2-3)로 표현할 수 있다.

$$S_B = B_l - B_a \quad (2-3)$$

## 날개통과온도 변화에 기반한 발전용 가스터빈의 운전관리 개선

Table 1은 울산화력 2복합 W501F 가스터빈의 BPT 운전관리 기준이다. 표 좌측에는 설비보호를 위한 인터록 설정기준이 4단계(경보, 출력감발, 급감발, 비상정지)로 구분되어있으며, 우측에는 BPT배리언스와 BPT스프레드에 대한 각 인터록 단계별 설정온도를 보여주고 있다. 각 단계별 인터록 동작에 대한 설명은 다음과 같다. BPT배리언스의 경우  $V_B$ 가 50℃를 초과 할 경우 화면에 경보(Alarm)를 발생하고, 61℃를 초과할 경우에는 온도차가 61℃보다 줄어들 때까지 출력을 단계적으로 감발(Unload)시킨다. 72℃를 초과하는 경우에는 30 MW 까지 출력을 급격히 줄이도록(Dump) 설정되어 있다. BPT스프레드 경우에도 가 -50℃를 초과 할 경우 화면에 경보(Alarm)를 발생하고 -61℃를 초과할 경우에는 -61℃ 보다 온도차가 줄어들 때까지 출력을 단계적으로 감발(Unload)시키며 -72℃를 초과하는 경우에는 30 MW 까지 출력을 급격히 줄이도록(Dump) 설정되어 있다. BPT스프레드의 경우에는 -83℃ 이상 시에는 비상정지(Trip) 되도록 설정되어 있다. 이러한 BPT 최대온도차에 기반한 운전관리는 과도한 온도차이 발생 시 출력감발 또는 비상정비를 통해 가스터빈 고온부품 손상 등 파급사고로의 확대를 방지함에 목적이 있다.

Interlock Setting	BPT variance, $V_B$	BPT spread, $S_B$
Alarm	50℃	- 50℃
Unload	61℃	- 61℃
Dump	72℃	- 72℃
Trip	N/A	- 83℃

### 2.3 개별연소기 날개통과온도 변화 관리 필요성

BPT 최대온도차에 따른 운전관리 방법은 연소불안정 발생 시 터빈 고온부품 손상 등 파급사고로 확대되는 것을 방지하는 설비보호 기능에 초점을 맞추고 있다. 하지만 상하 최대온도차만으로 개별연소기의 연소상태 변화를 파악하기가 용의하지 않아 연소불안정 현상을 사전에 감지하고 이에 따른 불시정지를 예방하기에는 한계가 있다. 이는 현재의 BPT 관리 기준만으로는 개별 연소기에 대한 온도변화를 파악하기가 쉽지 않기 때문이다. 그 이유로 다음의 두 가지를 설명할 수 있겠다.

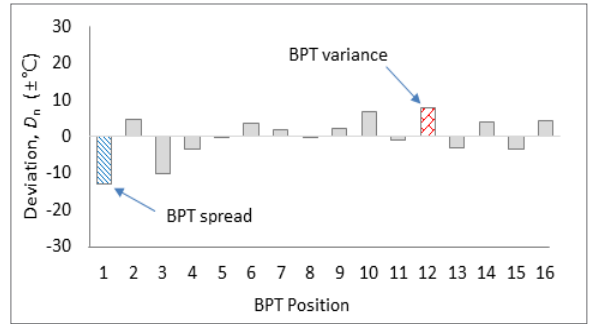


Fig. 3 BPT deviations of Unit #5 on 25th of October

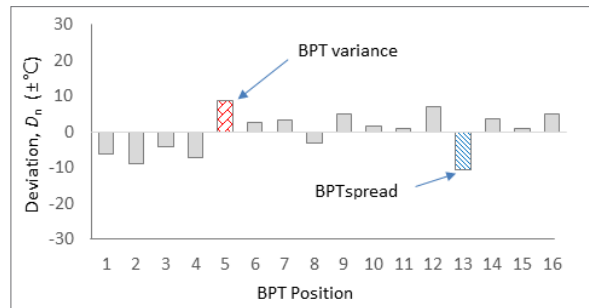


Fig. 4 BPT deviations of Unit #5 on 16th of December

첫 번째로 기존의 BPT배리언스, BPT스프레드 중심의 모니터링 방식으로는 개별 연소기 연소상태 변화를 감지하지 못하는 불감대가 존재한다는 것이다. Fig. 3과 Fig. 4는 5호기 가스터빈에 대하여 일정기간 차이를 두고 취득한 BPT 운전데이터 그래프다. BPT평균온도( $B_a$ )를 기준으로 16개의 각 위치별 온도편차(Deviation,  $D_n$ )를 확인했다. 여기서 각 위치별 온도편차( $D_n$ )는 식(2-4)로 표현할 수 있다.

$$D_n = B_n - B_a \quad (2-4)$$

Fig. 3은 10월25일 일일평균 BPT 데이터를 나타내고 있다. 종축에는 온도편차(Deviation)를 표시하고 있으며, 횡축에는 16개의 BPT 위치를 나타내고 있다. BPT평균값보다 8℃ 높은 BPT 12번 위치가 BPT배리언스에 당되고, BPT평균값보다 13℃ 낮은 BPT 1번 위치가 BPT스프레드에 해당된다. 상하모두 온도편차가 크지 않아 운전상태는 양호한 것으로 판단할 수 있겠다.

Fig. 4는 12월16일의 일일평균 BPT 데이터를 나타내고

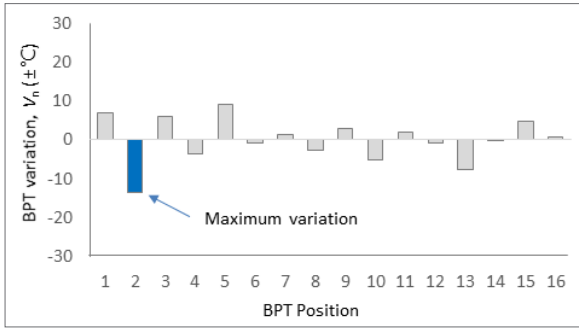


Fig. 5 BPT variations between 25h of October and 16th of December

있다. 종축에는 온도편차(Deviation)를 표시하고 있으며, 횡축에는 16개의 BPT 위치를 나타내고 있다. BPT평균값보다 9°C 높은 BPT 5번 위치가 BPT배리언스, BPT평균값보다 11°C 낮은 BPT 13번 위치가 BPT스프레드로 나타났다. 상하모두 온도편차가 크지 않아 운전상태는 양호한 것으로 판단할 수 있겠다.

Fig. 5는 Fig. 3과 Fig. 4 사이의 BPT 변화량을 나타낸 그래프다. 종축에는 Fig. 3의 온도편차를 기준으로 Fig. 4의 온도편차 값에 해당되는 온도변화량(Variation)을 표시했다. 횡축에는 16개의 BPT 위치를 나타내고 있다. 여기서 온도변화량( $V_n$ )는 식(2-5)로 표현할 수 있다.

$$V_n = D_{n1} - D_{n2} \quad (2-5)$$

여기서  $D_{n1}$ 은 Fig. 3의 10월25일에 산출된 개별 BPT 온도편차에 해당하고,  $D_{n2}$ 는 Fig. 4의 12월16일에 산출된 개별 BPT 온도편차에 해당된다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 각각 확인한 BPT배리언스, BPT스프레드와는 상관없이 Fig. 5에서는 2번 위치가 -14°C로 개별 BPT 변화가 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 BPT평균값을 기준으로 한 상하 최대편차를 관리하는 기존의 관리방안으로는 BPT배리언스와 BPT스프레드 범위 내에서 연소온도가 변화하는 연소기를 구별하기에는 부족한 것을 알 수 있겠다.

두 번째로는 가스터빈 출력변동에 따라 BPT 측정위치에 대응하는 연소기 위치가 변동하는 특징이다. 터빈을 통과하는 연소가스는 터빈의 시계방향 회전운동의 영향으로 동

일한 시계방향으로 와류가 형성된다. 이러한 연소가스 회전의 영향으로 연소기에서 발생한 연소가스가 터빈을 통과하면서 시계방향으로 이동하게 된다. 이러한 현상으로 연소상태가 측정되는 BPT는 열전대 위치와 실제 연소기 위치의 차이를 가지게 된다. 또한, 가스터빈은 정상 운전상태에서 3,600 rpm의 일정한 속도로 회전하는 반면 연소가스는 출력증감에 따라 유량이 변동되며 연소가스 속도의 증감으로 이어진다. 이러한 영향으로 가스터빈 운전 중 출력 구간별 BPT 측정위치에 대응하는 연소기 위치가 조금씩 변동되는 현상이 있다. 따라서 연소불안정을 일으키는 특정 원인에 의해 한 개 혹은 여러 개의 연소기 온도가 변화하는 것을 사전에 감지하기 위해서는 개별 BPT 변화량에 대한 별도의 관리방식이 요구된다. 이를 위해서 연소상태에 따른 BPT 변화 특성을 확인하고자 정상 운전상태와 연소 불안정상태에서의 개별 BPT 변화에 대한 운전데이터를 취득하여 분석하고자 한다.

### 3. 연소상태에 따른 날개통과온도 변화

#### 3.1 측정대상 및 분석방법

연소상태에 따른 날개통과온도 변화정도를 분석하기 위해 정상운전상태와 불안정 연소 사례의 운전데이터가 필요하였다. 본 연구는 20년 이상 가동되고 있는 W501F 가스터빈의 운전관리 개선에 대한 것임을 고려하여 최근 수행된 계획예방정비 이후의 운전데이터를 정상운전상태 조건으로 하였다. 울산화력본부에서 발간한 연소불안정 대응 매뉴얼<sup>[7]</sup>에 수록된 연소 불안정 사례와 매뉴얼 발간 이후에 기록된 정비사례를 대상으로 9건의 연소 불안정 사례를 연구대상 후보로 정하고 데이터 정확성 검증을 통해 총 6건의 불안정 연소사례를 대상으로 선정했다.

운전데이터는 울산화력 운전정보시스템 서버에 저장되어 있는 Historical 데이터를 활용하였으며 데이터 처리용량 및 분석의 신뢰성을 고려하여 취득하였다. 취합된 운전데이터는 BPT 측정값과 대응하는 연소기 위치가 출력구간별 시계방향으로 이동하는 특성을 고려하여 출력구간 30~80 MW, 80~120 MW, 그리고 120 MW이상 구간을 대상으로 3단계로 구분하여 개별 연소기의 BPT 변화를 분석하였다.



## 날개통과온도 변화에 기반한 발전용 가스터빈의 운전관리 개선

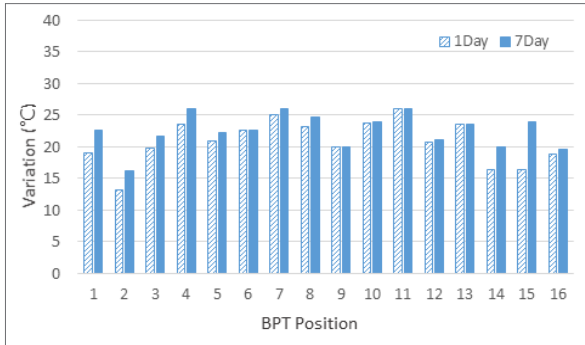


Fig. 6 BPT variations after gas turbine overhaul

### 3.2 안정 연소 시 날개통과온도 변화

Fig. 6은 2019년에 계획예방정비가 수행된 가스터빈 4개 호기에 대하여 정비 후 BPT 변화를 나타낸 것이다. 종축에는 온도변화를 나타낸다. 횡축에는 개별 연소기 BPT 위치를 나타내며 일일최대 변화량과 일주일누적최대 변화량을 보여주고있다. 계획예방정비 후 4개의 가스터빈 모두 유사한 온도범위에서 운전되었다. 개별연소기 BPT 변화는 일일 변화량 13~26°C, 일주일 누적 변화량으로는 최소 16°C, 최대 26°C로 유지되는 것으로 나타났다.

### 3.3 불안정 연소 시 날개통과온도 변화

선정된 6 건의 불안정 연소사례 중 유사사례를 제외하고 5건에 대하여 사례분석 자료를 정리했다. 기존의 관리기준인 이벤트 발생시점의 온도편차를 확인하였으며 이벤트 발생 전 전조증상의 유무를 확인하기 위해 온도변화량을 분석했다. 사례별로 이벤트발생 시점의 BPT평균온도( $B_n$ )를 기준으로 16개의 각 위치별 온도편차(Deviation,  $D_n$ )를 확인했다.

또한 불안정 연소 발생사례의 전조증상을 확인하기 위해 이벤트 발생 전 10일간을 기본대상으로 데이터취득횟수  $x$ 에 대해서 각 위치별 온도편차( $D_{nx}$ )를 산출했다. 여기서 데이터취득횟수  $x$ 는 데이터 분석을 위해 구분한 3개의 출력구간, 즉 30~80 MW 구간, 80~120 MW 구간, 120 MW 이상 구간 중에서 이벤트가 발생한 출력구간에 해당되는 데이터에 한하여 10일간 1분 간격으로 취득한 데이터개수다. 전조증상이 10일 이전부터 있는 사례는 좀 더 장기간의

데이터를 산출했으며, 사례2와 같이 데이터 개수가 적은 경우는 데이터개수가 많은 다른 출력구간의 데이터도 함께 비교하였다. 산출된  $x$ 개의 각 위치별 온도편차( $D_{nx}$ )를 활용하여 10일간의 온도변화량(Variation,  $V_{nx}$ )을 확인했다. 여기서  $V_{nx}$ 는 식(3-1)로 표현할 수 있다.

$$V_{nx} = D_{nx - \max} - D_{nx - \min} \quad (3-1)$$

여기서  $D_{nx - \max}$ 는 각 위치별로 취득된  $x$  개의 온도편차( $D_{nx}$ ) 중에서 최고온도를 나타내고, 반대로  $D_{nx - \min}$ 는 최저온도를 나타낸다.  $D_{nx - \max}$ 와  $D_{nx - \min}$ 의 차를 10일간의 온도변화량( $V_{nx}$ )으로 나타냈다.

#### 1) 사례분석 1 : 파이로트 노즐 손상에 의한 BPT스프레드 상승으로 기동실패

Fig. 7은 가스터빈 승속 중에 2번 BPT 온도가 감소하기 시작하면서 BPT스프레드 -276°C 까지 편차가 발생하여 비상 정지된 사례이다. Fig. 8은 기동실패 발생 전 30~80 MW 구간에서의 10일간 누적 BPT 온도변화를 나타낸 그래프다. 좌측의 종축에는 10일간 온도편차(Deviation) 중 최고온도( $D_{nx - \max}$ ) 최저온도( $D_{nx - \min}$ )를 표시하고 있으며, 횡축에는 개별 연소기 BPT 위치를 나타낸다. 우측의 종축에는 누적 변화량(Variation)을 나타냈다. 10일 간 누적기준 BPT배리언스는 1번 BPT 위치에서 54°C, BPT스프레드는 3번 BPT 위치에서 -43°C로 나타났다. 10일간 최대 온도변화량은 BPT 3번 위치에서 65°C, BPT 2번 위치에서 53°C로 확인됐다. 사고발생 전 10일 간 개별 BPT 변화를 확인한 결과 전반적으로 온도변화 범위가 큰 가운데 BPT 3번 위치를 중심으로 전조증상이 있었음을 알 수 있다.

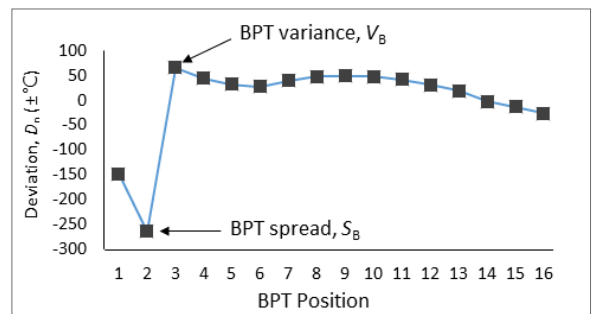


Fig. 7 BPT spread high trip during turbine start-up of case 1

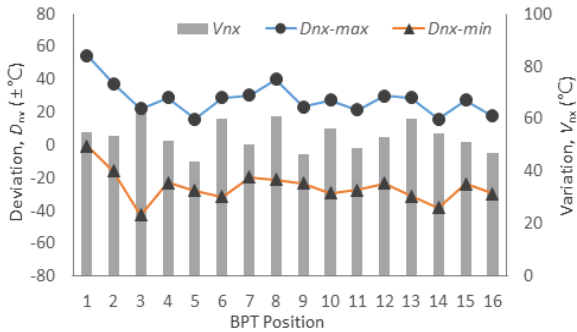


Fig. 8 Cumulative BPT data during 10 days before D-day on case 1

2) 사례분석 2 : 밀봉장치 틈새로 공기유입에 의한 BPT스프레드 경보 발생

Fig. 9는 가스터빈 출력 60 MW 부근에서 BPT스프레드 경보한계(-50°C) 이하까지 감소한 그래프다. 터빈 정지 후에 점검결과 터빈 상부 측 연소기 위치의 트랜지션피스 (Transition Piece)와 터빈 1단 고정익 사이를 밀봉시키는 트랜지션피스 밀봉장치(Transition Piece Seal)의 고정핀이 절손되며 틈이 발생했다. 발전소 주말정지를 통해 내부 점검 결과 상부에 위치한 밀봉장치들의 고정핀이 절손되고 양쪽으로 처지면서 16번, 1번 위치에서 증가된 틈새를 통해 연소기 챔버의 압축공기가 연소과정 없이 유입되어 연소온도를 낮추는 현상이었다. Fig. 10은 출력 30~80 MW 구간에서 사례발생 전 전조증상이 확인된 30일간의 누적데이터 그래프다. 좌측의 종축에는 30일간 온도편차 (Deviation) 중 최고온도( $D_{nx-max}$ ) 최저온도( $D_{nx-min}$ )를 표시하고 있으며, 횡축에는 개별 연소기 BPT 위치를 나

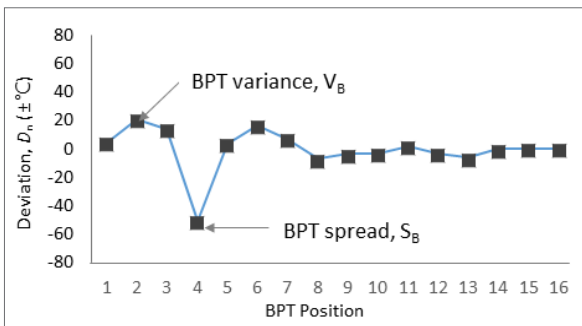


Fig. 9 BPT spread alarm caused by TP seal pin broken

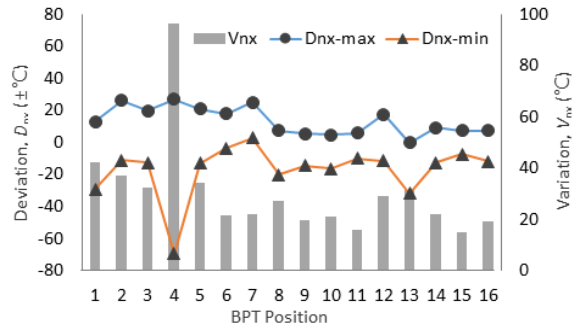


Fig. 10 Cumulative BPT data during 30 days before D-day on case 2

타낸다. 우측의 종축에는 30일간 누적 변화량(Variation)을 나타내고 있다. 4번 BPT는 30일 기간 중 BPT스프레드 -69°C, 최대변화량은 96°C로 확인됐다.

3) 사례분석 3 : 화염전파관 파손에 의한 BPT스프레드 발생으로 비상정지

Fig. 11은 가스터빈 승속 중에 7번 열전대 위치에서 BPT 스프레드가 -245°C까지 발생하여 가스터빈을 비상 정지시킨 사례이다. 연소기 주변을 점검결과 1, 2번 연소기바스켓 (Combustion Basket) 사이의 화염전파관이 탈락된 것을 발견했다. 이 곳을 통해 공기가 초과 유입되면서 화염이 소실되거나 연소온도를 크게 낮춘 것으로 추정된다.

Fig. 12는 출력 80~120 MW 구간에서 사례발생 전 10일간 누적데이터 그래프다. 연소불안정 발생일 10일 전까지 6~7번 BPT 위치에 대한 전조현상은 없었던 것으로 나타났다. 해당사례는 기동 시 연소진동에 위해 화염전파관

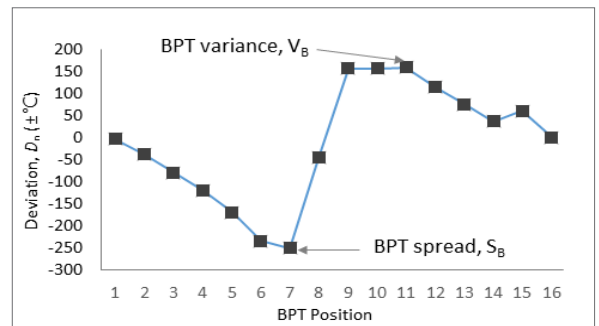


Fig. 11 BPT spread high trip during start-up on case 3

## 날개통과온도 변화에 기반한 발전용 가스터빈의 운전관리 개선

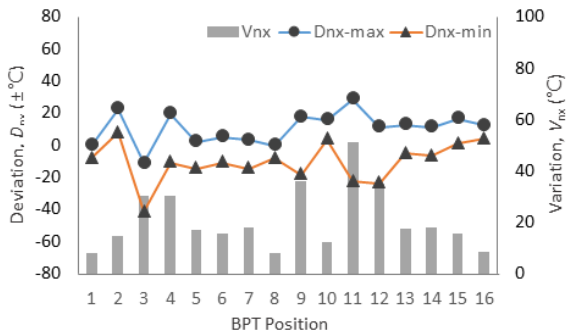


Fig. 12 Cumulative BPT data during 10 days before D-day on case 3

연결부위가 순간적으로 탈락된 것으로 보인다. 데이터 분석과정에서 3번 BPT 위치의 10일 간 누적변화량이 47°C 수준으로 높게 유지된 것이 확인됐다. 정비 후 7일간 운전 데이터 확인결과 7번 BPT 주변은 양호해졌으나 BPT 3번, 11번 변화량은 크게 유지되는 것을 볼 수 있다. 이벤트발생 10일전 운전데이터에도 BPT 변화량이 큰 위치였던 것을 볼 때 연료노즐 여과기 폐색 여부 등 점검이 필요했던 것으로 판단된다.

### 4) 사례분석 4 : 파이로트노즐 손상에 의한 BPT스프레드 발생

Fig. 13은 가스터빈 운전 중 BPT스프레드가 -88°C 이하 까지 발생한 그래프다. 종축에는 이벤트 발생 시점의 온도 편차(Deviation)를 표시하고 있으며, 횡축에는 16개의 BPT 위치를 나타내고 있다. 가스터빈 출력 60 MW 운전 중 11번 열전대에서 BPT스프레드가 -88°C 까지 발생하여

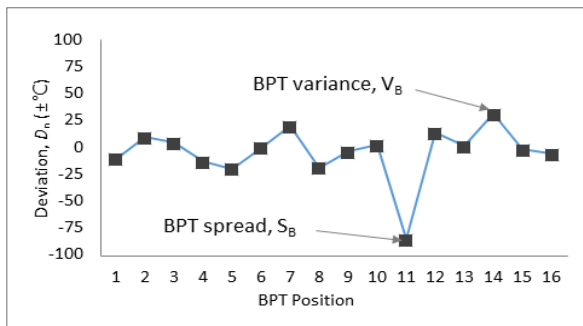


Fig. 13 BPT spread high trip by pilot nozzle tip broken

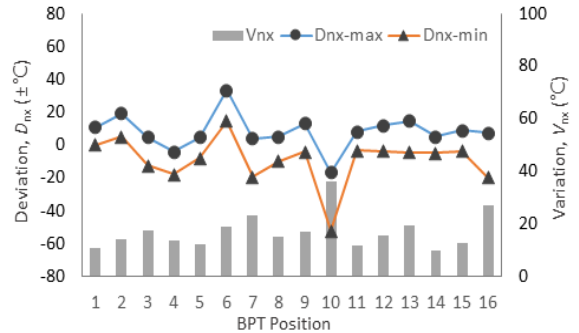


Fig. 14 Cumulative BPT data during 10 days before D-day on case 4

비상 정지됐다. 연소기 주변을 점검결과 7번 연소기 파이로트노즐팁이 손상되어 연료분사가 제대로 이뤄지지 않아 발생된 것으로 확인됐다. Fig. 14는 사례발생 전 10일간 누적데이터 그래프다. 분석대상 기간에 고출력으로 운전되어 30~120 MW 출력구간의 운전데이터가 충분치 않아 120 MW 이상 구간의 10번 BPT 변화를 분석했다. 11번 BPT의 경우 사례발생 5일 전 기준으로 최대 누적변화량은 42°C 수준이었으며 이 때 -43°C 까지 떨어지는 전조현상이 있었다. 120 MW 이상 구간에서 10번 BPT의 경우 일일 변화량은 크지 않았으나 5일 기준 누적변화량은 35°C 까지 증가한 것으로 확인됐다.

### 5) 사례분석 5 : 연료노즐여과기 폐색에 의한 BPT스프레드 발생

Fig. 15는 가스터빈 승속 중에 BPT 10번 위치에서 BPT 스프레드가 -104°C 까지 발생하여 수동으로 정지시킨 그

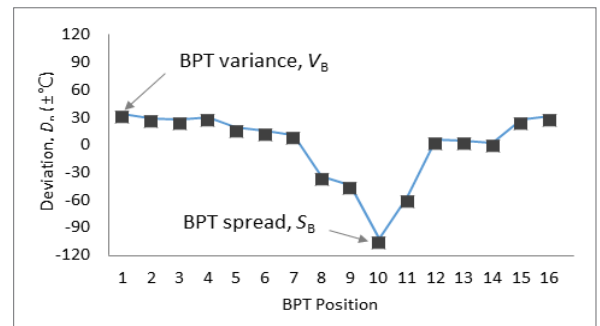


Fig. 15 BPT spread high trip caused by fuel nozzle strainer clogging



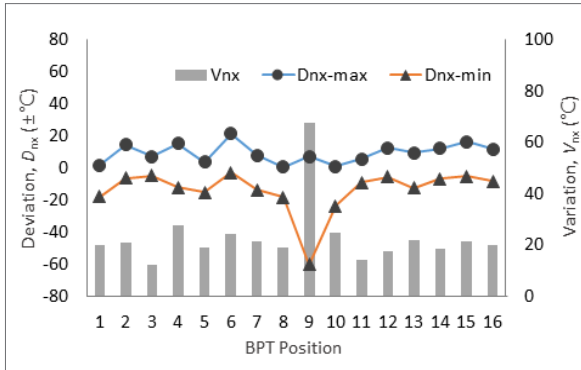


Fig. 16 Cumulative BPT data during 10 days before D-day on case 6

래프다. 정비기록을 살펴본 결과 가스터빈 수동정비 후에 야간시간을 활용하여 16개 연소기 전체 연료노즐여과기를 청소하고 재가동 한 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 16은 정비기록을 살펴본 결과 가스터빈 수동정비 후에 야간시간을 활용하여 16개 연소기 전체 연료노즐여과기를 청소하고 재가동 한 것을 확인 할 수 있었다.

### 3.4 결과 분석

Existed Criteria	BPT variance, $V_B$	BPT spread, $S_B$
Alarm	50°C	-50°C
Unload	61°C	-61°C
Dump	72°C	-72°C
Trip		-83°C
Additional Criteria	Monitoring on individual BPT variations	
Caution	Over $\pm 40^\circ\text{C}$ within 10 days	
Inspection	Over $\pm 50^\circ\text{C}$ within 10 days	

Fig. 17은 6건의 불안정 연소 운전사례 중 각 사례별로 문제가 발생했던 해당 연소기의 BPT변화량에 대하여 이벤트 발생 전 10일간의 일일 온도변화를 각 일자별로 최저, 평균, 최고온도를 나타낸 그래프다. 일일 온도변화 범위는 최소 11~22°C, 평균 22~37°C, 최대 33~58°C로 각각 나타났다. 일일 변화량 전체 변화범위는 11~58°C로써 온도변화가 큰 경우를 제외하면 전조증상을 판단하기는 쉽지 않

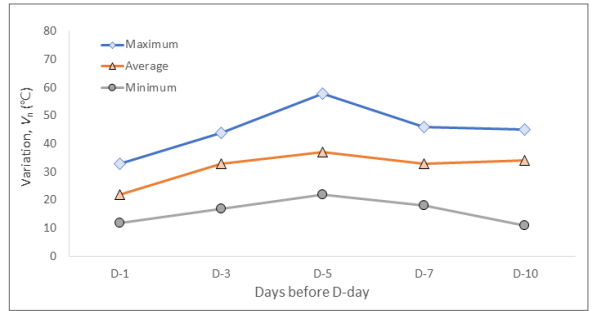


Fig. 17 Daily BPT variations before abnormal events

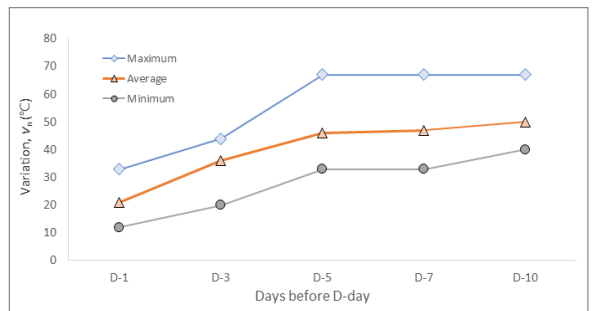


Fig. 18 Cumulative BPT variations before abnormal events

음을 알 수 있다. Fig. 18은 10일 동안 각 일자 기준으로 누적변화량에 대해서 최저, 평균, 최고온도를 나타낸 그래프다. 10일간 누적 온도변화 범위는 최소 40°C, 평균 50°C, 최대 67°C로 각각 나타났다. 일일 변화에서는 변화범위가 작아 확인할 수 없었던 사례도 10일 누적 변화에서는 최소 40°C 이상의 변화를 확인할 수 있었다. 이상으로 특정 연소기에서 불안정 연소상황 발생 시 원인 및 불안정 정도에 따라 온도변화 크기 및 속도차이는 있으나 시간의 경과에 따라 온도변화가 증가되는 것을 확인 할 수 있었다. BPT스프레드 또는 BPT배리언스 경보 값을 초과하는 인터록 동작 전이라도 연소불안정을 유발시킨 해당연소기의 개별 BPT 누적변화량이 점진적으로 증가한 것으로 분석됐다.

### 3.5 운전관리 개선방안

사례연구를 통해 확인된 결과를 바탕으로 개별 BPT 변화량이 반영된 운전관리 개선방안을 제안하고자 한다. 기존의 BPT 최대편차에 의한 관리방식에 추가하여 가스터빈 비계획정지 발생을 예방을 목적으로 관리기준의 선정이 필

## 날개통과온도 변화에 기반한 발전용 가스터빈의 운전관리 개선

요하겠다. 선정기준은 정상 연소상태에서의 최대 변화량인 26℃를 초과하며 빈번한 정비를 회피할 수 있는 수준을 고려하였다. 일일 변화량은 10일간 누적변화 관리를 통해서도 확인이 가능하므로 결과 분석을 통해 확인한 최소 누적 변화량 40℃와 누적평균 50℃를 기준으로 하는 것이 적절할 것으로 판단된다. Table 2는 개별연소기 BPT 변화량을 추가한 운전관리 기준이다. 관리기준으로는 주의와 설비점검 단계로 나뉘었다. 주의단계로는 10일 누적 변화량이 40℃ 이상일 경우에 해당된다. 설비점검단계로는 10일 누적 변화량이 50℃ 이상일 경우에 해당된다. 연소불안정 사례가 저출력에서 자주 발생하는 것으로 나타나므로 출력구간별로 변화량을 모니터링 할 수 있도록 별도의 데이터처리 및 디스플레이가 필요하겠다. 최근 제작사에서 인공지능 머신러닝을 활용한 가스터빈 연소불안정 분석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[8]</sup>. 본 연구과정을 통해 BPT 변화량 감시가 운전관리 개선뿐만 아니라 정비품질 향상에도 활용이 가능할 것으로 보인다.

### 4. 결론

본 연구는 울산화력발전소 2복합 F급 가스터빈의 개별연소기 BPT 변화량에 기반한 설비고장 조기예측에 관한 내용이다. 제작사의 가스터빈 연소상태 감시는 BPT 평균기준 최대 온도편차 발생 시 출력 감발 또는 비상정지를 통해 설비 파급사고를 막는데 중점을 두고 있다. 하지만 국내 전력시장에서는 설비 사고뿐만 아니라 비계획정지 또한 중요 관리 대상이다. 이러한 배경으로 가스터빈 연소불안정 사례를 바탕으로 BPT 변화량 감시를 통한 좀 더 예비적인 진단방법을 고찰하였으며 본 연구로부터 도출된 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 가스터빈 정상운전 상태의 BPT 분석결과 개별 연소기에서 최대 26℃ 내에서 위치변동 및 온도변화가 있는 것을 확인됐다. 연소불안정 사례 분석결과 제작사 관리기준인 최대편차 도달 이전부터 개별 연소기에서 변화량이 40℃ 이상 증가되는 전조증상이 있는 것으로 확인되어 개별 BPT 온도변화량 모니터링을 통해 설비 고장예측이 가능한

것으로 파악되었다.

2) 기존의 BPT 최대편차 관리기준과 함께 BPT 연소기 개별 BPT 변화량에 대해 운전관리를 추가하여 일일 또는 10일 누적변화량 기준 각각 40℃와 50℃를 초과하는 경우 주의 및 설비점검이 필요하다고 판단된다.

### 참고문헌

- [1] 정재모, 안달홍, 박정규, 2004, 발전용 저 NO<sub>x</sub> 가스터빈의 연소불안정 안정화에 관한 연구, 한국에너지공학회 제13권 제2호, pp 144-151,
- [2] Lieuwen, T., Torres, H., Johnson, C. and Zinn, B.T., A Mechanism of Combustion Instability in Lean Premixed Gas Turbine Combustors, J of Engineering for Gas Turbine and Power, 123, pp 183 (2001)
- [3] Richards, G.A. and Janus, M.C., Characterization of Oscillations During Premix Gas Turbine Combustion, J of Engineering for Gas Turbine and Power, 120, pp 294, (1998)
- [4] 안달홍, 서석빈, 정재화, 박호영, 김종진, 2001, 저 NO<sub>x</sub> 가스터빈의 연소불안정 및 연소진동 저감, 한국에너지공학회 학술발표회, pp 105-108
- [5] E. Golinelli, S. Musazzi, U. Perini, F. Barberis, IR sensor for gas turbine inlet temperature (TIT) measurements: preliminary result on test rig, Photonica AEIT Photonics Technologies conference, Italy, pp 1-3 (2014)
- [6] 울산화력본부, 1997, 울산화력 2복합 가스터빈 운전절차서
- [7] 울산화력본부, 2014, 울산 2복합 가스터빈 연소불안 대응 매뉴얼
- [8] Weizhong Yan and Lijie Yu, 2019, On Accurate and Reliable Anomaly Detection for Gas Turbine Combustors: A Deep Learning Approach, PHM 2015 컨퍼런스 (KIPEC)