

## 저 NOx 가스터빈의 연소불안정 및 연소진동 저감

안달홍, 서석빈, 정재화, 박호영, 김종진  
한전 전력연구원

### Reduction of Combustion Oscillation of Dry Low NOx Combustor for Heavy Duty Gas Turbine

Dal-Hong Ahn, Suk-Bin Seo, Jae-Hwa Chung, Ho-Yung Park, Jong-Jin Kim  
Korea Electric Power Research Institute

#### 1. 서 론

국내에는 발전·열병합용 가스터빈이 약 100여기 운용되고있으며, 우리나라 총 발전설비 용량의 약 23%를 차지하고 있다. 따라서 이들 가스터빈의 안정적인 운전을 위하여 연소진동·관리 운영기술의 개발이 필요하며, 특히 발전설비의 대기오염물 배출기준이 점차 강화됨에 따라 가스터빈의 저NOx 연소 운영기술의 확보가 필수적이다. 국내에는 서인천복합, 신인천복합, 울산복합 및 보령복합 등의 발전소에 건식 저NOx 연소기가 설치되어 운영 중에 있으며 신규건설중인 부산복합발전소에도 설치될 예정이다. 특히 환경부의 대기환경기준치의 강화로 신규 건설되는 가스터빈은 모두 저NOx 연소기가 채용되어 향후 연소불안정 및 연소진동 저감기술이 더욱 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

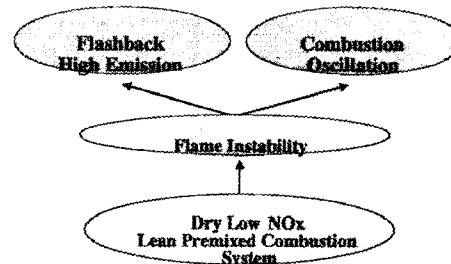
#### 2. 저NOx 가스터빈의 연소시 문제점

연소중 NOx 저감 방법은 ①연소온도를 낮추고, ②연소구역내 국부적인 고온부가 없도록 하며, ③반응체류시간을 짧게함으로써 달성할 수 있다.

재래식 확산화염 연소방식에서는 개발초기에 연소실에 공기를 다량으로 공급하여 화염온도를 낮추는 방법을 사용하였으나 낮은 화염온도와 짧은 체류시간으로 인하여 ①점화와 화염안정도가 낮아지고 ②CO와 UHC가 발생한다.

이를 보완하기 위하여 물분사(Water injection)에 의한 화염온도 저감방법을 사용하나 ①用水비용이 증가하고, ②열효율이 저하하며, ③고온재료의 수명단축 등 문제점이 발생하고있다.

최근 개발된 가스터빈 연소기술인 건식 저 NOx 연소기술(Dry Low NOx Combustion)의 핵심은 희박예혼합연소이다. 이 연소방식은 NOx를 획기적으로 저감하나 화염안정도가 낮아 연소진동(Combustion oscillation)으로 연소기가 손상되며, 역화(Flashback)로 버너 노즐 및 라이너가 손상되는 등 운용상의 문제점이 발생한다.



[Dry Low NOx 시스템의 문제점]

가스터빈의 연소진동은 연소시의 열방출량과 연소기내 압력변동 상호간의 피드백이 원인

##### 2.1 연소진동

건식 저NOx 연소방식은 예혼합연소(Lean pre-mixed combustion)를 채용함으로써 화염안정도(Flame stability)가 낮아 설계·운전조건에 따라 연소진동(Combustion oscillation)이 발생하거나 또는 화염역화(Flash back)가 발생한다. 이를 그림 1에 나타내었다.

가스터빈의 연소진동은 연소시의 열방출량과 연소기내 압력변동 상호간의 피드백이 원인

이다. 연소동압은 가스터빈의 연소상태를 판단하기 위하여 중요하며 이를 적정수준으로 관리하는 것이 매우 중요하다. 이와 함께 가스터빈의 연소상태는 연소동압, 연소음향, 질소산화물(NOx) 및 일산화탄소(CO)등을 측정하여 연소상태를 종합적으로 진단·관리한다.

연소진동은 가스터빈 연소기내의 연소중에 발생하는 열방출량  $\dot{Q}(t)$ 와 압력변동  $\dot{P}(t)$  간의 피드백이 원인이다. 열방출량  $\dot{Q}(t)$ 의 변동원인은 다양하며, 희박예혼합연소(LPM)의 경우에는 연료/공기량의 변화에 따라 아래 5가지 가능성이 있는 것으로 알려져있다. 이들을 열거하면 ①연료공급량 변동(variation in fuel flow), ②공기량변동(variation in air flow), ③공기/연료 혼합물 변동(variation in air/fuel mixture flow), ④스윙변동(variation in swirl), 파일로트화염변동(variation in pilot flow) 등이 있다. 그러나 이들 5가지 메카니즘이 복합적으로 나타나며, 또한 연소진동의 발생원인에는 대기온도 및 습도 등이 복합적으로 영향을 미치므로 연소진동의 규명이 어렵다. 연소기내 연소진동을 일으키는 음향손실 또는 음향이득은 연소기형상(Combustor Geometry)에 의존한다. 재래식 확산화염 연소기에서는 공기주입구가 많아 음향손실 발생하여 진동이 저감되며, 긴 확산화염으로 열발생( $\dot{Q}$ )이 분산됨으로써 음향발생이 줄어들며, 높은 당량비로 완전연소되어 화염이 안정화된다. 희박 예혼합(LPM) 연소기에서는 공기주입구가 적어 음향손실 작아 연소진동 발생하며, 짧은 화염으로 열발생( $\dot{Q}$ )의 변동이 집중되어 음향이 발생하며 낮은 당량비 희박화염으로 연소불안정이 발생하여 연소진동이 발생한다.

진동저감을 위하여 열방출량 및 압력변동 피드백의 타이밍이 연소진동 생성 메카니즘에서 중요한 역할을 한다. 열방출량( $\dot{Q}$ )와 압력변동( $\dot{P}$ )의 위상이 동상일 때 진동을 증폭시키고 역상일 때 상쇄시킨다.

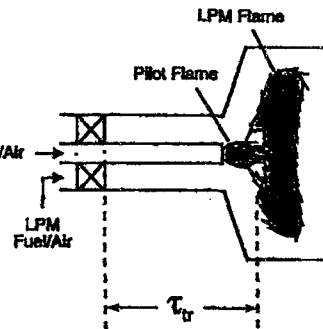
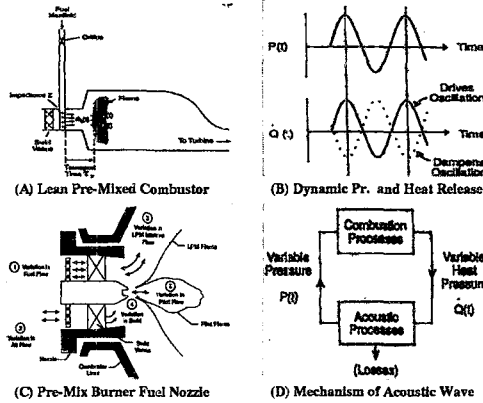
## 2.2 연소진동 저감 방법

### 파일롯트 화염안정(Pilot Flame Stabilization)

예혼합화염(LPM)을 안정시키는 일반적인 방법은 그림과 같은 파일롯트 화염을 사용하는 것이다. “파일롯트 화염”은 예혼합(LPM)화염이 소실(Blow-off) 되지않도록 고착(Anchor) 시키는 역할을 한다. 높은 당량비 연소나 확산화염(Diffusion flame)은 화염안정도를 향상 시키기 때문에 화염안정을 위하여 이를사용한다. 그러나 결점으로는 NOx 발생량이 많아지고, 연료조절 계통이 복잡해 진다는 단점이 있다.

### 능동제어(Active Control)

연소진동 피드백타이밍(Oscillation Feed Back Timing)은 연소조건에 의존한다. 따라서 화염조건(Flame condition)의 주기변화로 연소진동을 피할 수 있다. 열방출량( $\dot{Q}$ )와 압력변동( $\dot{P}$ )의 위상을 인위적으로 역상으로 공급하여 이들을 상호간에 상쇄시킴으로써 연소



진동을 저감한다. 그러나 불규칙적인 진동에는 효과가 없다. 이러한 방법은 큰 개조 없이 즉각적으로 시행할 수 있으며, 제어시스템과 관련 없다는 장점이 있다.

### 3 연소진동특성 분석 결과 및 고찰

GE7F 가스터빈의 연소모드 전환시 발생하는 연소진동의 특성을 파악하기 위해 현장 시험을 수행하였으며 그 결과 연소진동이 발생하는 시점 및 연소진동 발생에 미치는 주요인자들을 파악할 수 있었다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

#### [연소모드별 연소진동 비교]

가스터빈 연소모드에 따라 연소진동이 상당한 차이를 보이는 것을 확인하였다. Lean Lean Mode 에서는 연소동압이 약 0.5 psi 로 유지가 되었으며 연소모드 변환시 급격히 상승한 후 Premix mode로 전환되면 다시 안정되어 약 1 psi 로 유지 되는 것으로 나타났다. Lean Lean Mode 운전은 확산화염으로 연소가 안정되어 연소진동이 낮게 유지되며, Premix Mode 운전은 예혼합방식으로 연소안정영역이 적기 때문에 연소진동이 다소 높게 나타난 것으로 판단된다.

#### [연소진동 발생시기 분석]

연소모드 전환시 연소진동이 상승되는 것을 좀더 자세히 분석하기 위해 연소기 내부 동압과 연료밸브의 개도, 베어링 진동, TBN Exhaust spread temperature, NOx 발생량 등을 동일 시간대에서 측정하여 분석한 결과, 연소진동이 출력이 감소하면서 premix mode에서 Lean Lean Mode 로 전환할 때보다 Lean Lean Mode에서 Premix mode로 전환할 때 연소진동이 크게 상승하는 것을 알 수 있었다. 따라서 연소진동저감은 출력 증발시 발생하는 연소진동을 저감하는데 초점을 맞추는 것이 필요한 것으로 분석되었다.

출력증발시 연소모드 전환시 초기에 Primary valve 가 닫히고 Transfer valve 가 열리는 과정에서 1차로 연소진동이 상승되며 Primary valve가 다시 열려 100% 에 도달하는 시점에서 2차로 연소진동이 상승되는 것으로 나타났다.

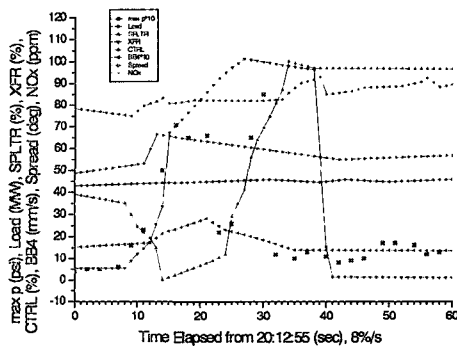
#### [연소진동 주파수 분석]

연소기 내부에서 발생하는 연소동압의 주파수는 170Hz이하, 170~500Hz 대, 500Hz 이상으로 3가지의 주파수대로 관

찰할 수 있으며 그중 170Hz 이하 band에서 동압이 가장 크게 나타나고 있으며 연소모드 전환시 동압이 크게 변동하는 것도 이 주파수대에서만 관찰이 되었다. 또한 최대 연소진동이 발생하는 주파수대는 대부분의 가스터빈에서 유사하게 나타났으며 1차 연소진동은 약 50Hz, 2차 연소진동은 약 43Hz 인 것으로 나타났다. 이는 연소기에서 1차와 2차 연소진동이 발생하는 위치가 상이한 것으로 분석될 수 있으며 연소진동저감을 위해 이 주파수대의 연소진동의 변화를 면밀히 관찰할 필요가 있음을 알 수 있었다.

#### [대기온도의 영향]

서인천복합 가스터빈의 연소진동에 영향을 미치는 인자로서 대기온도가 주요인자의 하나라는 것을 시험을 통해 확인할 수 있었다. Table 4-16은 호기별 대기온도와 연소기 내부 동압



9/8

을 비교한 것으로, 표과 같이 연소동압은 대기온도가 낮을수록 증대되는 것을 알 수 있다. 따라서 서인천복합의 연소진동저감은 주로 겨울에 발생하는 연소진동을 저감하는데 초점을 맞추는 것이 필요한 것으로 분석되었다.

## 5. 결 론

발전용 GE7F 가스터빈 연소기에서 발생하고있는 연소불안정 및 연소진동을 저감하기 위해 연소진동측정장치를 개발하고 연소진동을 측정·분석 및 연소조정시험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 가스터빈의 연소모드에 따라 연소진동이 상당한 차이를 보여 희박예혼합연소(Lean Lean Mode)에서는 연소동압이 약 0.5psi로 유지가 되었으며, 연소모드 변환시 연소진동이 급격히 상승(7~14 psi) 한 후 예혼합연소모드(Premix mode)로 전환되면 다시 안정되어 약 1psi 수준으로 유지되는 것으로 나타났다.

2. 연소진동은 가스터빈의 출력증·감발시 연소모드 전환중에 발생되며 출력증발시 Lean Lean Mode에서 Premix mode 로 전환할 때 연소진동이 크게 상승하는 것을 알 수 있었다. 또한 출력증발시 연소모드전환 중에는 연소진동이 2차례 발생하는 것을 알 수 있었다.

3. 연소동압의 주파수는 3가지 주파수대역(170Hz이하, 170~500Hz 대, 500Hz 이상)으로 측정하였으며 그중 170Hz이하 band에서 동압이 가장 크게 나타나고 있다. 연소모드전환시 동압이 크게 변동하는 것도 이 주파수대에서만 관찰되었다. 또한 최대 연소진동이 발생하는 주파수는 1차 연소진동은 약 50Hz, 2차 연소진동은 약 43Hz 인 저주파로서 화염의 소실과 관련이 높은 저주파로 나타났다.

4. 서인천복합 가스터빈의 연소진동에 영향을 미치는 인자로서 대기온도가 주요인자의 하나라는 것을 시험을 통해 확인할 수 있었다. 연소동압은 대기온도가 낮을수록 증대되는 것을 알 수 있다.

## 6. 참고문헌

1. 안달홍 외, "가스터빈 연소기의 이상 연소/열유동 안정화 및 연소진동 저감", 2001년 년차 보고서
2. Bragg, S. L., "Combustion Noise," *Journal of the Institute of Fuel*, pp. 12-16, Jan. 1963.
3. Thomas, A., and Williams, G. T., "Flame Noise: Sound Emission From Spark-Ignited Bubbles of Combustible Gas," *Proceedings of the Royal Society, London, Series A*, Vol. 294, No. 1439, pp. 449-466, 1966.
4. Ballal, D. R., and Lefebvre, A. H., "Turbulence Effects on Enclosed Flame," *Acta Astronaut.*, Vol. 1, pp. 471-483, 1974.
5. Ballal, D. R., and Lefebvre, A. H., "The Structure and Propagation of Turbulent Flames," *Proceeding of the Royal Society, London, Series A*, Vol. 344, pp. 217-234, 1975.
6. Strahle, W. C., "Some Results in Combustion Generated Noise," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 23, No. 1. pp. 113-125, 1972.
7. Strahle, W. C., and Muthkrishnnan, M., "Correlation of Combustor Rig Sound Power Data and Theoretical Basis of Results," *AIAA Journal*, Vol. 18, No. 3 pp. 269-274, 1980.