

발전용 가스터빈의 실시간 연소안정성 평가 소프트웨어 개발

Combustion Stability for Utility Gas Turbines : Development of a Real-Time Assessment Software

인병구(Byeung Goo In)¹, 송원준(Won Joon Song)², 차동진(Dong Jin Cha)^{3*}

¹한밭대학교 설비공학과 대학원, ²동신대학교 에너지기계설비전공, ³한밭대학교 설비공학과

¹Department of Building & Plant Engineering, Graduate School Hanbat National University, Daejeon, 34158, Republic of Korea

²Department of Mechanical Systems Engineering for Energy Convergence, Dongshin University, Naju, 58245, Republic of Korea

³Department of Building & Plant Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Republic of Korea

(Received November 14, 2016; revision received April 10, 2017; Accepted: April 24, 2017)

Abstract This study introduces a software for real-time assessment of combustion stability for utility gas turbines. The software was written with LabView, and implemented the time-domain kurtosis as a parameter to proactively access the instantaneous combustion stability during operation of the industrial gas turbine. The simple time-domain assessment algorithm incorporated in the software is advantageous over conventional frequency-domain signal processing of dynamic pressure signal since it reduces the computational cost, thereby making the algorithm more appropriate for real-time monitoring of combustion stability. Benchmark data obtained from a model gas turbine combustor were used for the reproducibility test of the software. The assessment obtained from the software agreed well with previously published results, indicating that incorporation of the software could enhance the performance of systems monitoring the combustion stability for gas turbines during power generation.

Key words Combustion stability assessment(연소안정성평가), Combustion dynamics(연소역학), Gas turbine(가스터빈), Health monitoring(건강성감시), Kurtosis(첨도)

† Corresponding author, E-mail: djcha@hanbat.ac.kr

1. 서 론

에너지 산업, 금속 및 비금속 제조산업 등의 플랜트 산업 그리고 주택 및 건축물 등 다양한 분야의 연소 설비에서 배출된 대기오염물질 중 질소산화물(NO_x)에 의한 환경오염은 광범위한 지역에 생태계 파괴, 스모그 현상 등의 피해를 유발한다. 따라서 질소산화물을 저감하기 위한 다양한 기술들이 제시, 개발 및 적용되고 있다. 이들 중 대표적인 기술이 희박 예혼합 기술(lean premixed combustion technology)이며, 질소산화물이 고온의 연소 반응에서 주로 생성되므로 반응온도를 낮추기 위해 당량비를 희박 가연 한계(lean blow out) 근처로 낮추어 질소산화물 배출을 줄이고 연료 효율을 높이게 된다.⁽¹⁾ 반면 희박 연소의 특성상 다양한 외부 교란에 의해 화염이 불안정해지는 연소불안정(combustion instability) 현상이 발생하는 단점이 있다.

연소불안정은 연소 과정에서 발생하는 열방출률(heat release rate)의 변동과 음향 과정의 음향장(acoustic field) 섭동의 상호작용에 의해 형성되는 피드백 루프에 기인하고, 이 두 과정의 위상이 일치하는 조건이 만족되는 경우 연소기의 음향 고유모드(eigenmode) 가진에 의해 발생하는 자발적인(self-excited) 현상이다.⁽²⁾ 일반적으로 이 현상은 연소시스템의 기계적인 진동(vibration)을 유발시켜 연소기 부품과 시스템의 손상을 초래할 수 있다.

연소설비의 운용적인 관점에서, 연소시스템의 불안정을 방지하기 위해 운전 중에 연소 안정성을 실시간으로

감시하고 불안정이 발생할 가능성을 대비해 사전에 경고함으로써 불안정 현상을 회피할 수 있도록 하는 것이 중요하다.

연소불안정이 발생하면 연소기 내 동압(dynamic pressure)의 격렬한 진동(oscillation)이 수반된다.⁽²⁾ 따라서, 발전용 가스터빈의 경우 연소과정의 특이 사항을 감지해내기 위해 연소동압을 상시 측정하고 있다.⁽³⁾ 이를 위해 고속 푸리에 변환(FFT)과 같은 주파수 영역의 신호 처리 기법이 활용된다. 즉 연소동압을 획득하여 FFT 처리한 후 주파수 성분의 크기 또는 실효치가 설정 값보다 클 경우 경고 신호를 발생시킨다. 이 때 주파수 대역을 구분하여, 경고 신호가 발생한 주파수 대역에 따라 연소불안정의 발생 원인을 추정하게 된다. 그러나 이 방법은 연소불안정 현상의 비선형성으로 인한 과도신호(transient signal)를 주파수영역으로 변환함에 있어 낮은 주파수 분해능으로 인해, 각각의 주파수 성분에 대한 시간적인 변화 특성을 밝혀내기 어렵다.⁽⁴⁾ 또한 주파수 영역 변환에 소요되는 연산의 양 때문에 실시간으로 연소 안정성을 감시하기는 어렵다. 이를 극복하기 위해, 최근 연소동압 데이터를 시간영역에서 분석하여 연소안정성을 평가하는 방법이 보고되었다.⁽⁵⁾ 통계인자들 중 하나인 시간첨도(temporal kurtosis)를 활용하는 기법으로, 연소동압 데이터의 시간첨도를 실시간으로 계산하고 분석하여 연소안정성에 관한 정보를 제공한다.

첨도는 주어진 신호의 통계적 분포를 나타내는 한 척도로⁽⁶⁾ 기계적인 부품의 손상을 검출하는 데 폭 넓게 사용되어 왔다.⁽⁷⁻¹¹⁾ 그러나 연소안정성을 평가하는데 사용된 사례는 없는 것으로 이해된다. 즉, 연소동압 데이터를 연소기의 안정성을 평가하는데 주로 사용하였고, 다만 예외적으로 연소불안정의 안정성 마진(stability margin)을 평가하기 위한 척도로 연소동압의 감쇠비를 계산한 사례가⁽¹²⁾ 있으나, 본 연구에서 사용하는 시간첨도의 결과와 비교할 때⁽⁵⁾ 연소안정성의 평가결과는 동등하나 감쇠비 계산에 보다 많은 시간이 소요되는 것으로 파악된다.

본 연구에서는 선행연구에서^(5,13) 제안한 연소안정성 평가를 위한 시간첨도 기법을 발전용 가스터빈 환경에서 실시간으로 적용하기 위해 LabView 기반으로 소프트웨어를 작성하고 기 보고된 벤치마크 데이터로 재현성을 검증하고자 한다.

2. 연소안정성 평가용 시간첨도

2.1 연소불안정 신호의 확률적 분포 특성

전술한 바와 같이 연소불안정은 연소실 내 음향장과 열방출률의 상호작용으로 발생한다. 연소실 내 음향장의 특정 모드가 가진다는 점에서 음향공진 현상과 유사하며 따라서 특정 공진주파수 성분에 해당하는 연소동압 성분이 증폭된다.

안정영역에서 연소가 이루어질 때, 연소 동압은 특정 음향모드가 가진되지 않은 채 확률적으로 정규 분포(normal distribution)하는 랜덤노이즈(random noise)의 형태의 파형으로 나타난다.

연소실 음향장의 특정 공진 모드가 가진되면, 연소동압의 해당 공진주파수 성분이 점차적으로 증폭된다. 이 때 측정된 연소동압 신호는 상응하는 공진주파수를 갖는 진폭이 큰 정현파(sinusoid)와 낮은 레벨의 랜덤노이즈가 혼재된 형태로 변화하며, 신호값의 분포는 정규분포에서 쌍봉분포(bimodal distribution)로 변화하게 된다.

Fig. 1에는 전형적인 랜덤노이즈와 정현파에 대한 신호값 분포를 히스토그램을 통해 나타내었다. 여기서, 랜덤노이즈는 -1과 1사이 값을 갖도록 정규화 하였으며, 정현파는 진폭이 1이며 10 Hz의 주파수를 갖도록 하였다. 두 신호는 모두 10 kHz로 샘플링한 이산(discrete)신호이다. 그림에서 보는 같이 랜덤노이즈의 신호값 분포는 평균값 부근에 집중된 정규(normal) 분포에 가까운 단봉(unimodal) 분포를 이룬다. 정현파에 대해서는

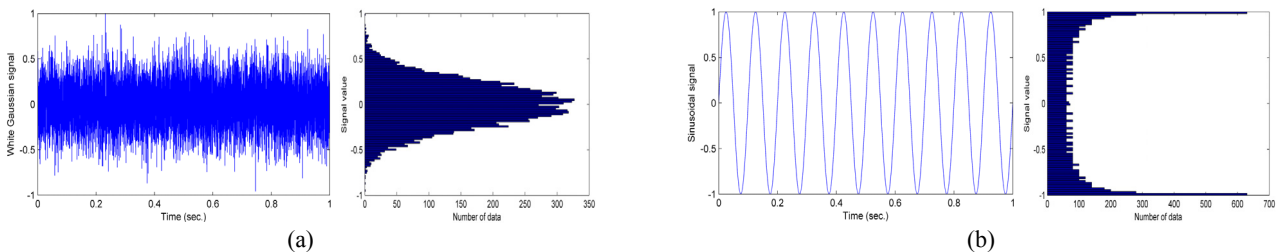


Fig. 1 Time evolution(left) and distribution(right) of a discrete signal : (a) Gaussian random noise, and (b) sinusoid.

신호값의 분포가 양 극단에 집중되면서 쌍봉(bimodal) 분포를 보인다.

첨도(kurtosis)는 주어진 연속적인 신호의 분포 형태가 평균값 근방에 얼마나 집중되어 있는가(peakedness)와 평균값으로부터 얼마나 넓게 분포하는가(tailedness)를 동시에 반영하여 나타내는 인자로서, 주어진 연속 신호 x 의 2차 모멘트의 제곱에 대한 4차 모멘트의 비율로 정의된다.^(6, 14)

$$K = \frac{E(x - \mu)^4}{[E(x - \mu)^2]^2} = \frac{\mu_4}{\sigma^4} \quad (1)$$

여기서 E 는 기대 연산자(expectation operator), μ 는 신호의 평균값, μ_4 는 평균값에 대한 4차 모멘트, 그리고 σ 는 표준편차이다. 일반적으로 랜덤노이즈의 첨도값은 3.0이며, 정현파의 첨도값은 1.5임이 알려져 있다.⁽¹⁴⁾ 첨도값을 변화시키는 간헐적인 충격파(impulse)나 이상신호(outlier)가 없다면, 랜덤노이즈와 정현파가 공존하는 혼합신호에 대한 이론적 첨도값은 1.5와 3.0사이에서 나타난다.

일반적으로 동압센서를 이용하여 측정된 이산신호(discrete signal) p 의 부분 데이터에 대한 시간첨도(TK)는 아래 식으로 주어진다.

$$TK = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^4}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \right]^2} \quad (2)$$

여기서 n 은 데이터의 갯수, p_i 는 i 번째 신호값, \bar{p} 는 주어진 부분 데이터에 대한 평균값이다.

2.2 시간첨도를 이용한 연소안정성 평가⁽⁵⁾

시간첨도를 활용한 연소안정성 평가 방법의 실효성을 검증하기 위해 모델 가스터빈 연소기에서 측정된, Fig. 2(a)의 연소동압 데이터를 활용하였다.⁽¹⁵⁾ 연소동압 신호는 안정 영역에서 천이 영역을 거쳐 불안정 영역의 한계사이클(limit cycle)에 도달하는 전형적인 연소안정성의 변화 과정을 보이고 있다.

각 영역에서 동압 신호의 주파수 분포 특성의 변화를 관찰하기 위해 매 0.02초 마다 단시간 푸리에 변환(STFT)을 하여 도시한 것이 Fig. 2(b)이다. 진술한 바와 같이, 안정 영역에서는 뚜렷한 지배주파수가 없는 랜덤 노이즈의 특성이 나타나고 불안정 영역에서는 진폭이 큰 정현파의 특성이 나타남을 알 수 있다.

이러한 주파수 영역 분석, 즉 FFT를 이용한 분석은 사용되는 데이터 개수의 제공만큼의 복소수 연산이 필요하므로 한 번의 연소안정성 계산에 사용하는 데이터의 개수가 많을수록 소요되는 시간을 급격히 증가한다. STFT를 사용할 경우, 한 번 계산에 사용되는 데이터 개수가 적어 계산 속도는 향상되나 주파수 영역의 분해능(resolution)이 저하되는 단점이 있다. 주파수 분해능의 저하를 방지하기 위해 인위적으로 영채우기(zero padding)와 같은 방법을 사용하지만, 이 역시 데이터 개수 증가에 의한 급격한 계산량 증가를 막을 수 없으며 주파수 분석의 정확도를 향상시킬 수도 없다. 하지만, 본 논문에서 제안하는 시간첨도를 계산할 경우 식(1)에 보이는 바와 같이 단순 실수연산으로 처리가 가능하여, 한 번에 처리하는 데이터 개수가 증가하더라도 FFT 기법만큼의 급격한 연산량 증가를 동반하지 않는다.

동일한 부분 데이터에 대해 TK를 계산하여 Fig. 2(c)에 도시하였다. 그림에서 청색선은 랜덤노이즈의 TK 값인 3.0을, 적색선은 정현파의 TK 값인 1.5를 표시하며, 녹색선은 매 시간 주기마다 계산된 TK 값에 대한 곡선 접합(curve fitting)을 나타낸다. Fig. 2(c)에서 보는 바와 같이, 안정영역에서는 TK 값이 3.0 근처이지만 불안정 영역에 도달하면 1.5 근처에 근접하는 것을 확인할 수 있다. 특히 약 0.3초 시점에서 TK 값이 감소하기 시작하는데, 연소의 안정영역에서 불안정영역으로의 천이과정이 시작됨을 의미한다. 시간첨도의 감소는 음향장의 특정모드에 해당하는 공진주파수 성분을 갖는 정현파가 발현되고 있음을 알려준다.

TK를 사용하여 데이터를 처리하는 경우, 샘플링 주파수가 높을수록 유리한 것은 자명하다. 왜냐하면 샘플링 주파수가 높을수록 보다 정확한 랜덤노이즈나 정현파의 재현이 가능하기 때문이다. 즉, 동일 시간동안 더 많은 데이터를 확보할수록 데이터의 확률적 분포 형태를 더 정확히 파악하는데 유리하다. 또한, 데이터의 처리 주기는

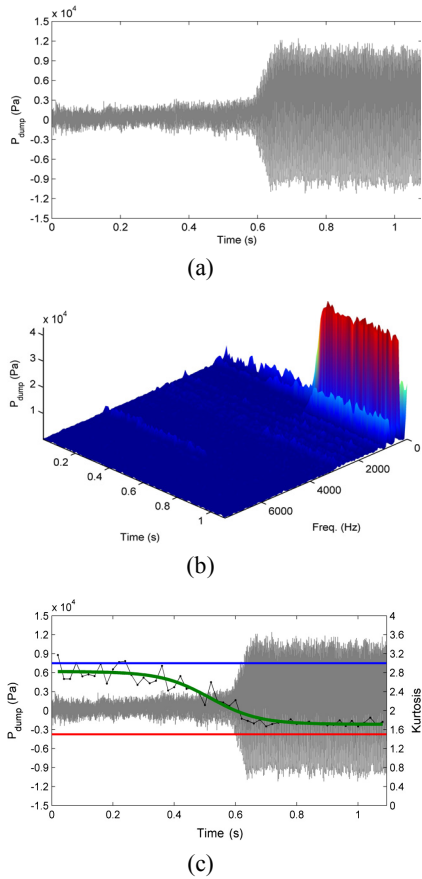


Fig. 2 Typical dynamic pressure data from a model gas turbine combustor experiencing combustion instability : (a) time trace, (b) waterfall of FFTs (c) variation of TKs. ⁽⁴⁾ All results have been processed with Matlab code.

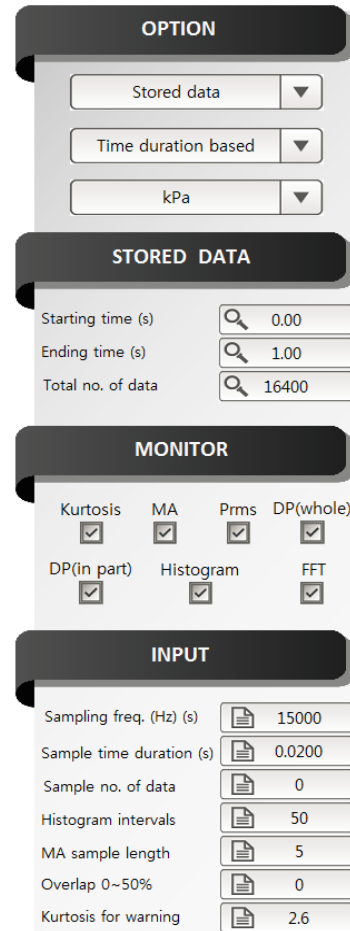


Fig. 3 GUI for user inputs and options of the developed LabView code.

완전한 정현파의 경우 적어도 한 주기의 정현파 신호를 복원해 낼 수 있을 때 연소안정성 평가 결과에 대한 신뢰성을 확보할 수 있다. 데이터 처리 주기가 길면 길수록 확률분포 형태에 대한 판정의 정확도는 향상되나 실시간 연소안정성 평가의 측면에서는 불리하게 작용할 수 있다. 따라서 대부분의 현장에서 이루어지는 바와 같이 경험을 바탕으로 한 데이터 처리 주기에 대한 설정이 필요하다.

3. 연소안정성 평가 소프트웨어 개발

선행연구에서⁽⁵⁾ 제안한 연소안정성 평가를 위한 시간침도 기법을 발전용 가스터빈 환경에서 실시간으로 적용하기 위해 LabView 기반으로 소프트웨어를 작성하였다. 시간침도 계산 결과 외에도 FFT를 활용한 주파수 분석과 연소동압의 실효(root-mean-square)값을 계산하여 사용자가 선택적으로 활용할 수 있도록 함으로써 발전용 가스터빈이 운용되는 복합화력 플랜트의 운전자가 용이하게 사용할 수 있도록 설정 및 비교분석 기능을 강화하였다.

3.1 사용자 입력 및 선택 항목

Fig. 3은 연소안정성 평가 소프트웨어의 사용자 입력 및 선택 항목을 설정하기 위한 GUI(graphic user interface)를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 OPTION, STORED DATA, MONITOR, 및 INPUT의 설정에 따라 처리되어 사용자에게 결과를 표시하거나 출력해 준다.

OPTION에서는 (1) 실시간 데이터를 처리할 것인지 또는 기 저장된 데이터를 사용할 것인지, (2) 일정 주기 동안의 데이터를 처리할 것인지 또는 일정 개수의 데이터를 처리할 것인지, (3) 동압 데이터의 단위(kPa, Pa, bar, 또는 psi)를 선택한다. STORED DATA에서는 저장된 데이터에 대해 데이터 획득 시작 시간, 종료 시간 그리고 총 데이터 갯수를 입력한다. MONITOR에서는 GUI에 표시될 처리 결과를 선택한다. 현재 개발된 버전에서는 (1) 시간첨도, (2) 시간첨도의 이동평균값, (3) 실효치 동압, (4) 전 구간 동압신호, (5) 처리 주기 내의 동압신호, (6) 히스토그램, (7) STFT waterfall 플롯을 선택할 수 있다(Fig. 4 참조). 이 중에서, 시간첨도, 시간첨도의 이동평균값, 실효치 동압, 그리고 전 구간 동압신호는 중첩하여 표시할 수 있다(Fig. 5 참조). INPUT에서는 동압신호의 (1) 샘플링 주파수, (2) 부분 데이터의 처리 주기 또는 (3) 부분 데이터의 개수, (4) 히스토그램의 표시 주기, (5) 이동평균 계산을 위해 사용할 시간첨도 데이터 개수, (6) 시간첨도 계산을 위한 데이터의 중복도(overlap), (7) 연소불안정 발생 경고를 위한 시간첨도의 역치(threshold) 등을 입력한다. 중복도는 부분 데이터의 처리 주기 또는 처리할 부분 데이터 개수에 대해 0~50% 범위의 값으로 입력한다.

3.2 평가 결과 표시

전술한 바와 같이 LabView로 작성된 연소안정성 평가 소프트웨어의 현재 버전에서는 (1) 시간첨도, (2) 시간첨도의 이동평균값, (3) 실효치 동압, (4) 전 구간 내 동압, (5) 처리 시간주기 내 동압, (6) 히스토그램, (7) STFT waterfall 그래프를 표시할 수 있다. 여기서는 설명의 편의를 위해 저장된 동압데이터에 대한 처리 결과를 활용하고 있으나 실시간 데이터 처리 시에도 동등한 결과를 표시하게 됨을 인지하길 바란다.

우선 시간첨도는 주어진 각각의 부분 데이터에 대해 식(2)에 의해 계산된다. LabVIEW에서는 **Skewness and Kurtosis** 블록다이어그램을 통해 실행된다. Fig. 4(a)는 시간첨도 결과 표시의 한 예를 보인다. Fig. 2(c)와 마찬가지로 3.0과 1.5에 연소안정성에 대한 첨도 기준선을 도시하였다.

시간첨도의 변화 추이는 연소현상에 따라 변화폭이 다소 크므로, 운전자의 판단을 용이하게 하기 위해 이동평균한 결과를 중첩하여 도시한다. 그 한 예가 Fig. 4(b)에 나타나 있다. 이동평균은 **Average** 블록다이어그램으로 계산되는데, Fig. 3에 표시된 **MA sample length** 항목에서 지정한 개수만큼 시간첨도 데이터를 평균하여 표시해 주도록 구성되어 있다.

실제 상업운전 중인 가스터빈의 감시시스템에서는 실효치 또는 FFT 결과 주파수 성분의 크기가 운전 압력의 수 %에 도달하면 연소불안정 경고신호를 발생하게 된다.⁽³⁾ 이러한 기존의 연소안정성 평가 방법은 연소불안정 발생 판단 기준값을 주로 경험치에 의존하여 설정하는데 그 이유는 기준값 설정에 대한 이론치가 존재하지 않기 때문이다. 이에 반해, TK는 연소불안정 발생을 판단할 기준값을 설정하는데 있어 배경이 되는 이론치를 제공한다. 즉, TK를 사용하여 연소불안정 발생 기준값을 설정할 때에는 정현파에 대한 첨도의 이론치인 1.5 부근에서 연소불안정이 발생한다는 점과 현장에서 사용하는 연소시스템의 특성을 동시에 고려하여 보다 신뢰성 높게 설정할 수 있다.

연소동압 부분 데이터의 실효치를 식(3)으로 계산하여 Fig. 4(c)에 나타내었다.

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n}(p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i^2} \quad (3)$$

Fig. 4(d)와 Fig. 4(e)는 각각 전 구간 그리고 부분 데이터 구간의 동압신호를 **XY graph** 블록다이어그램을 이용해서 나타낸다. Fig. 4(f)는 부분 데이터 구간 동압 데이터의 히스토그램을 표시한다. 연소안정성 변화에 따라 동압 신호의 분포 특성이 단봉 형태에서 쌍봉 형태로 천이 되므로 히스토그램을 통하여 이를 관찰하여 연소안정성 변화를 개략적으로 판단할 수 있다. LabVIEW 내에 **Histogram** 블록다이어그램으로 그려지며, 구간은 **Histogram intervals**에서 설정하게 된다.

Fig. 4(g)는 매 부분 데이터에 대해 STFT 연산 수행 하여 그 결과를 waterfall 그래프로 도시한 것이다. Fig. 2(b)에서 설명한 바와 같이 시간변화에 따른 지배주파수와 지배주파수 성분 크기의 변화를 관찰함으로써 연소안정성을 개략적으로 파악할 수 있다. 이 결과는 LabView에서 **3D waterfall** 블록다이어그램으로 그려진다.

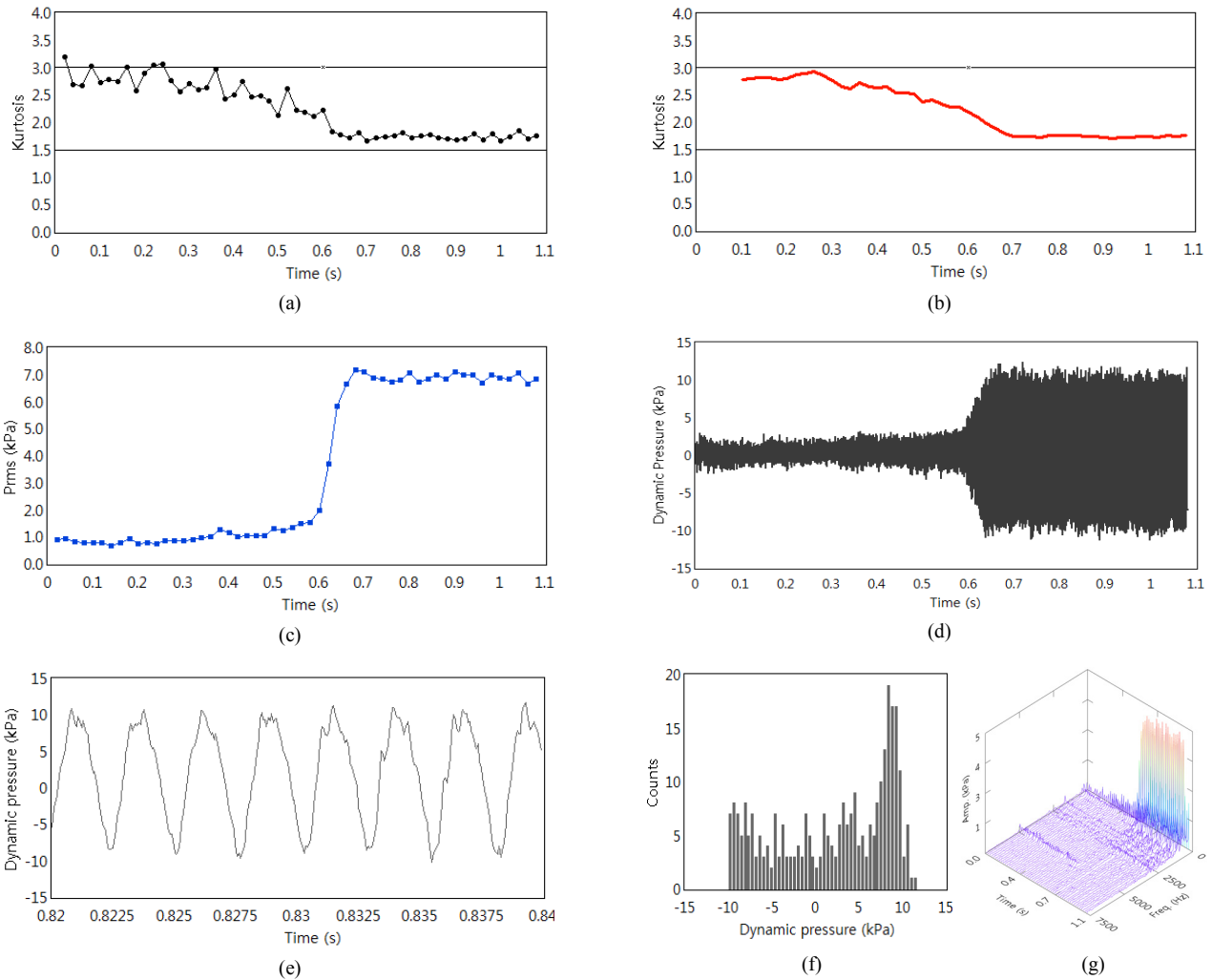


Fig. 4 Displays of the developed LabView code : (a) kurtosis, (b) moving average for TKs, (c) Prms, (d) whole dynamic pressure, (e) dynamic pressure in part, (f) histogram, and (g) FFT waterfall.

Fig. 5는 개발한 실시간 연소안정성 평가를 위한 소프트웨어의 주 화면을 보이고 있다. Fig. 4에서 소개한 디스플레이 중 시간점도, 시간점도의 이동평균값, 동압의 실효치, 그리고 동압 신호를 중첩하여 표시하도록 구성하였다. 동압 데이터는 시작 시간부터 매 샘플마다 표시되고, 지정한 만큼의 부분 데이터를 이용하여 시간점도 및 실효치를 계산한 후 중첩하여 표시한다. 디스플레이 하단에 최신의 시간점도 값이 수치로 표시되며 설정한 시간점도 역치에 도달하면 연소불안정이 예측됨에 따라 화면 우측하단의 경고표시 버튼이 녹색에서 적색으로 바뀌도록 제작되었다. 또한, 사용자 선택에 따라 결과 값을 별도의 파일로 저장할 수 있도록 제작하였다.

4. 개발된 소프트웨어의 재현성 검증

본 논문에서 소개하는 소프트웨어는 실제 연소기의 연소 동압 신호를 실시간으로 처리할 수 있도록 제작되었다. 원칙적으로 실측 시스템과의 연동을 통해 성능에 대한 검증을 수행하여야 하지만, 기 측정하여 저장된 연소 동압 데이터를 사용하여 재현성을 평가하는 것으로 대신하였다. LabView 기반으로 개발한 실시간 연소안정성 평가 소프트웨어의 재현성을 검증하기 위해 MATLAB 기반으로 연소안정성 평가 코드를 작성하여 수행한 선행연구⁽⁵⁾의 결과들과 비교하였다(Table 1 참조).

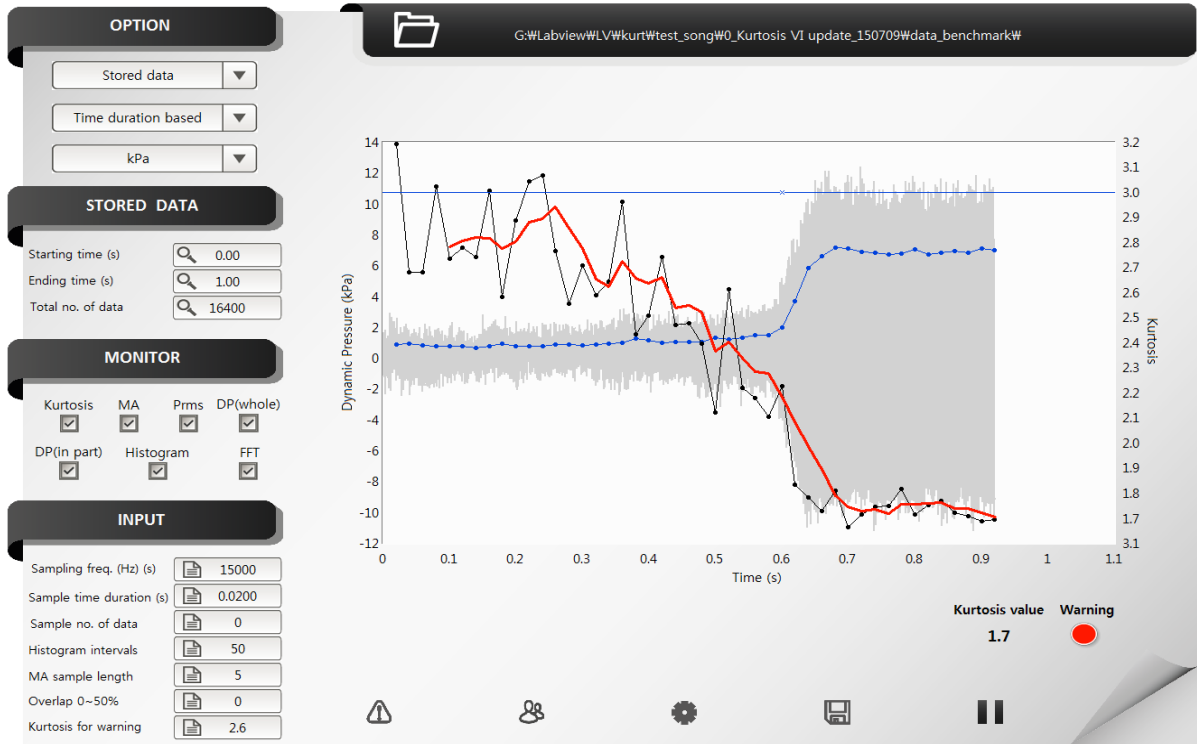


Fig. 5 Typical display for real-time combustion stability assessment.

Table 1. Three benchmark cases and their major conditions

Benchmark case	Sampling rate(kHz)	Major conditions	Remarks
Industrial gas turbine	15	Inlet velocity of 5.5 m/s; equivalence ratio of 0.82	Ref. 15
Gas generator in a rocket engine	50	Chamber pressure of 14.4 bar; O/F ratio of 2.43	Ref. 16
Aero engine combustor	8	Equivalence ratio of about 2.5	Ref. 5

우선 연소불안정이 발생한 모델 가스터빈 연소기에서 측정된 동압 신호를 대상으로 재현성을 조사하였다.⁽¹⁵⁾ 희박 예혼합 조건이어서 당량비는 약 0.82로 유지되었고 연료-공기 혼합기의 입구속도는 약 5.5 m/s이었다. Fig. 6(a)에 1.08초 동안 15 kHz로 샘플링된 동압신호를 보이고 있고, 동시에 계산된 시간첨도 및 시간첨도의 이동평균값을 중첩하여 도시하였다. 또한, Fig. 6(b)에는 시간첨도 및 시간첨도의 이동평균값과 연소동압의 실효값을 중첩하여 표시하였다.

Fig. 6(a)의 결과에서 연소동압 데이터는 약 0.6초 시점에서 동압의 진폭이 한계사이클(limit cycle)에 도달하고 있음을 보이고 있다. 발전용 가스터빈의 경우 위험하다고 판단하는 임계 실효값은 운전압력의 2% 전후이다.⁽³⁾ 따라서 Fig. 6(b)의 실효 연소동압을 토대로 판단할 때 약 0.6초 시점에서 연소불안정 발생을 경고할 것으로 예상된다.

본 연구에서 제안하는 시간첨도값은 시험 개시 후 0.3초 간 약 3.0의 근처에서 변화하다가 0.6초 시점까지 3.0 이하에서 감소하며 이후엔 1.7수준을 유지한다. 0.6초 이후의 시간영역 첨도값은 1.5에 거의 근접한 것으로 보아 연소동압 신호의 한계사이클 특성이 0.6초 근방에서 시작됨을 알 수 있다. 시간첨도의 값을 토대로 판단해보면, 약 0.3초 시점에서부터 점차 감소하는 것으로 보아, 한계사이클에 도달하기 약 0.3초 전에 미리 연소불안정 발생을 경고할 수 있다.

Fig. 6(a) 및 Fig. 6(b)는 각각 참고문헌 5의 Fig. 7 및 Fig. 10(a)과 동등한 결과이다. 다만, 참고문헌의 결과에서는 시간첨도의 곡선접합 결과를 보이는 반면 본 논문의 결과는 시간첨도의 이동평균값을 나타내고 있다. 본 연구에서 작성한 소프트웨어는 실시간 적용을 목적으로 제작되었기 때문에 곡선접합 결과를 표시하지는

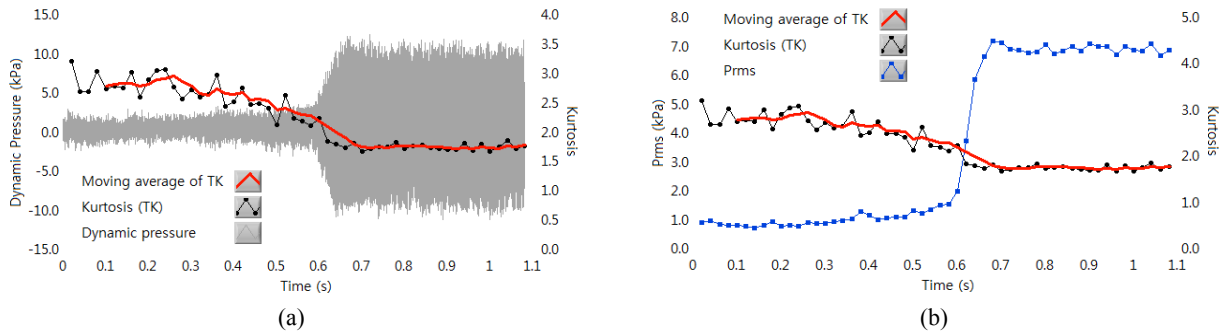


Fig. 6 LabView display for time history of TKs evaluated for every 0.02 s and their moving averages for a model gas turbine combustor; superimposed with (a) time trace of dynamic pressure and (b) P_{rms} .

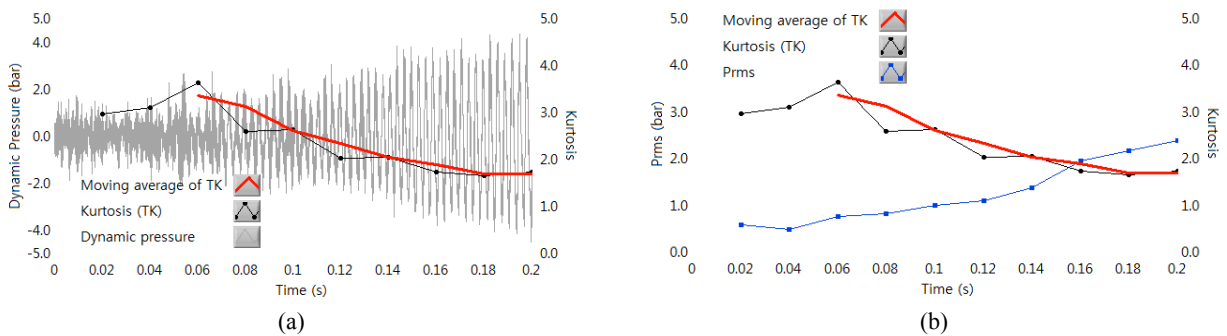


Fig. 7 LabView display for time history of TKs and their moving averages for a gas generator in a rocket; superimposed with (a) time trace of dynamic pressure and (b) P_{rms} .

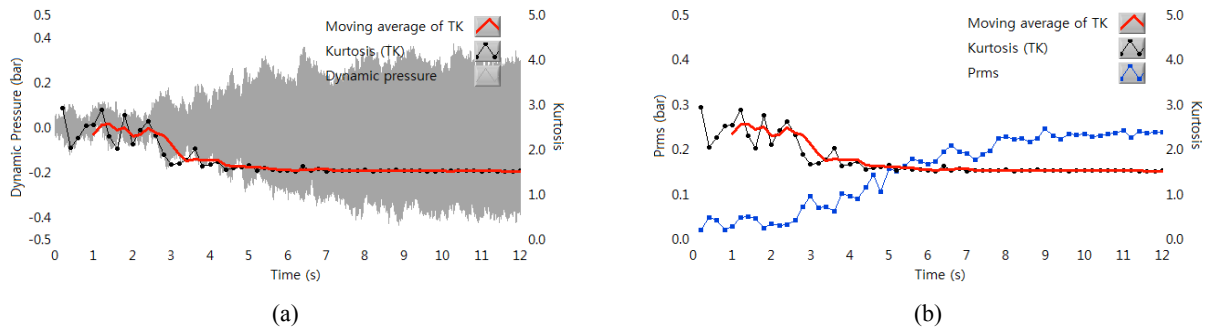


Fig. 8 LabView display for time history of TKs and their moving averages for a model aero engine; superimposed with (a) time trace of dynamic pressure and (b) P_{rms} .

불가능하다.

두 번째로 추진 로켓엔진에 탑재되는 가스발생기에서 측정된 연소동압 데이터⁽¹⁶⁾를 통해 재현성을 검증하였다. Fig. 7(a) 및 Fig. 7(b)는 각각 참고문헌 5의 Fig. 4 및 Fig. 5와 동등한 결과이다. Fig. 7(a)에서 보듯이 0.2초간 샘플링 주파수 50 kHz로 측정된 비교적 짧은 연소동압 데이터이지만 0.15초 이후 연소불안정 구간에 진입했다고 판단할 수 있다.

마찬가지로 Fig. 7(b)에는 시간첨도 및 시간첨도의 이동평균값과 연소동압의 실효값을 중첩하여 나타내었다. 약 0.1초 시점까지 시간첨도값은 3.0 안팎으로 머물고 있다. 이후 약 1.5 근방의 값으로 0.2초까지 지속적으로 접근하는 것을 볼 수 있다. 해당 데이터에서는 한계사이클 현상의 발생을 볼 수는 없지만, 시간첨도를 통해 연소안정성의 천이 현상을 실시간으로 포착하였다. 위에서 언급한 발전용 가스터빈 연소기의 경우와 마찬가지로 실효 연소동압값 보다는 시간첨도값이 연소불안정성 발생에 대해 보다 신속하게 감지해 낸다고 볼 수 있다.

마지막으로 항공용 가스터빈 엔진의 연소불안정 동압 데이터⁽⁵⁾를 활용하였다. Fig. 8(a) 및 Fig. 8(b)는 각각 참고문헌 5의 Fig. 12 및 Fig. 11과 동등한 결과이다. Fig. 8(a)는 12초간 샘플링 주파수 8 kHz로 측정된 연소동압 데이터를 토대로 작성되었고, Fig. 8(b)에는 연소동압의 실효값이 추가되었다. 실효값은 약 5초 이후에서도 여전히 증가하는 경향을 보이고 있으며, 약 7초 시점에 한계사이클에 도달했다고 볼 수 있다. 시간첨도값은 약 5초 이후부터 연소불안정 현상이 발생했다고 볼 수 있는 1.5근처에서 유지되었다. 이 경우에도 연소동압 실효치를 통해 연소불안정을 판단하는 것 보다 시간첨도를 이용하는 것이 더 빠른 판단을 할 수 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

선행연구⁽⁵⁾에서 개발한 연소불안정 평가용 시간첨도 인자를 발전용 가스터빈 환경에 실시간으로 효과적으로 적용할 수 있도록 LabView 기반 소프트웨어를 개발하였다. 기존의 유사 시스템에서 채택하는 연소동압 실효값 및 FFT 분석 기능도 포함시켰다. 사용자 입력 및 선택 항목, 평가 결과 표시 등을 사용자가 편리하게 선택하여 사용할 수 있도록 GUI를 제작하였다.

선행연구에서 제시한 발전용 가스터빈, 추진 로켓, 그리고 항공용 가스터빈 환경의 연소안정성 평가 결과와 동등한 결과를 재현함으로써 개발한 소프트웨어의 타당성을 검증하였다. 현재 본 연구에서 개발한 LabView 소프트웨어를 장착한 발전용 가스터빈 연소진단 시스템이 별도 연구를 통해 제작되고 있다. 실증테스트가 완료 되는대로 그 결과를 보고할 예정이다.

후 기

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2011951010001C).

References

1. Turns, S. R., 2000, *An Introduction to Combustion*, McGraw Hill.
2. Lieuwen, T. C. and Yang, V., 2005, *Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines : Operational Experience, Fundamental Mechanisms and Modeling*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA.
3. Angello, L., 2005, *Tuning Approaches for DLN Combustor Performance and Reliability*, EPRI, Palo Alto, CA, USA.
4. Gotoda, H., Nikimoto, H., Miyano, T., and Tachibana, S., 2011, Dynamic properties of combustion instability in a lean premixed gas-turbine combustor, *Chaos*, Vol. 21, No. 1, 013124.
5. Song, W. J. and Cha, D. J., 2016, Temporal kurtosis of dynamic pressure signal as a quantitative measure of combustion instability, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 104, pp. 577-586.
6. DeCarlo, L. T., 1997, On the meaning and use of kurtosis, *Psychological Methods*, Vol. 2, No. 3, pp. 292-307.
7. Jemielniak, K. and Otman, O., 1998, Tool failure detection based on analysis of acoustic emission signals, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 76, No. 1-3, pp. 192-197.
8. Hadjileontiadis, L. J., Douka, E., and Trochidis, A., 2005, Crack detection in beams using kurtosis, *Computers & Structures*, Vol. 83, No. 12-13, pp. 909-919.
9. Barszcz, T. and Randall, R. B., 2009, Application of spectral kurtosis for detection of a tooth crack in the planetary gear of a wind turbine, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 23, No. 4, pp. 1352-1365.
10. Zakrajsek, J. J., Townsend, D. P., and Decker, H. J., 1993, *An analysis of gear fault detection methods as applied to pitting fatigue failure data*, National Aeronautics and Space Administration, Lewis Research Center, Cleveland, OH, USA, p. 12.

11. Williams, T., Ribadeneira, X., Billington, S., and Kurfess, T., 2001, Rolling element bearing diagnostics in run-to-failure lifetime testing, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15, No. 5, pp. 979-993.
12. Lieuwen, T., 2005, Online combustor stability margin assessment using dynamic pressure data, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 127, pp. 478-482.
13. In, B. G., Song, W. J., and Cha, D. J., 2015, Development of LabView-based software for real-time assessment of combustion stability, *Proceeding of the SAREK, 2015 Winter Annual Conference*.
14. Brandt, A., 2011, *Noise and Vibration Analysis : Signal Analysis and Experimental Procedures*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, pp. 63-86.
15. Lee, B. J., Lee, J. G., and Santavicca, D. A., 2004, Detection of the onset of unstable combustion in lean premixed combustors, *AIAA Paper*, 2004-457.
16. Seo, S., Kim, S. K., and Choi, H. S., 2010, Combustion dynamics and stability of a fuel-rich gas generator, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 26, No. 2, pp. 259-266.