

열음향학적 불안정성 검출에 대한 개선된 힐버트-후앙 변환의 적용

차지형* · 김영석** · 고상호***†

Applications of the improved Hilbert-Huang transform method to the detection of thermo-acoustic instabilities

Jihyeong Cha* · Youngseok Kim** · Sangho Ko***†

ABSTRACT

The Hilbert Huang Transform (HHT) technique with Empirical Mode Decomposition (EMD) is one of the time-frequency domain analysis methods and it has several advantages such that analyzing non-stationary and nonlinear signal is possible. However, there are shortcomings in detecting near-range of frequencies and added noise signals. In this paper, to analyze characteristics of each method, HHT and Short-Time Fourier Transform (STFT) effective in dealing with stationary signals are compared. And with thermoacoustic instabilities signals from a Rijke tube test, HHT and the improved HHT with Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) are compared. The results show that the improved HHT is more appropriate than the original HHT due to the relative insensitivity to noise. Therefore it will result in more accurate analysis.

초 록

Empirical Mode Decomposition(EMD)을 통한 Hilbert Huang Transform(HHT)은 시간-주파수 영역 분석 방법 중 하나로 기존의 다른 분석 방법에 비해 비선형, 비정상 신호를 해석 가능하다는 등 여러 가지 이점이 있다. 그러나 인접한 주파수를 분별하기 힘들고 잡음에 취약하다는 결점이 있다고 알려져 있다. 본 논문에서는 HHT와 정상신호 분석에 효과적인 Short-Time Fourier Transform(STFT)을 비교하여 각 방법의 장·단점을 분석하고 Rijke 튜브 실험에서 얻은 열음향학적 불안정 데이터에 적용하여 잡음에 취약한 점을 보완한 Improved HHT와 비교한다. 그 결과, EMD를 이용한 Original HHT보다 EEMD를 이용한 Improved HHT가 잡음의 영향을 적게 받아 보다 정확한 신호분석이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

Key Words: Thermo-acoustic instability(열-음향학적 불안정성), Short time fourier transform(단구간 푸리에 변환), Hilbert-Huang transform(힐버트-후앙 변환), Improved HHT(개선된 힐버트-후앙 변환)

* 학생회원, 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

** 학생회원, 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

*** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: sanghoko@kau.ac.kr

가스터빈, 로켓, 램제트 엔진 등 많은 연소 시스템에서는 종종 열-음향학적 불안정성(thermo-acoustic instability)이 발생한다. 연소 시스템에서 압력과 열방출률의 비정상 요소가 연동되어 위상(phase)이 동조함으로써 발생하는 이상 진동 현상이다. 이로 인해 연소 시스템에 구조적인 손상, 추력 감소 및 엔진 정지 등과 같은 문제점이 발생하기도 한다. 이 현상은 1930년대에 로켓개발 과정에서 발견되었으며, 고체로켓보다 액체로켓에서 그 문제점이 크게 발생하였고, 이를 제어하기 위한 연구는 1940년대 초부터 시작되었다[1, 2]. 이와 관련한 연구로 가스터빈에서 발생하는 연소불안정에 대한 연구는 1990년대 이후 실험적·수치적 접근방법이 활발히 진행되었으며, 이를 제어하기 위한 방법들이 제안되었다[3, 4]. 국내에서 진행된 연구로써 Tak[5]은 힐버트 및 웨이블릿 공간 변수를 이용하여 연소 불안정성을 검출하였고, Na[6]는 Rijke 튜브를 이용하여 열음향학적 불안정성을 검출하였다.

선행연구에서 검출된 열-음향학적 불안정성이 언제 발생되었는지를 정확히 식별하기 위해서는 신호의 주파수 특성과 시간의 정밀한 정보가 필요하다. Huang[7]이 제시한 Hilbert-Huang Transform(HHT)은 비선형, 비정상 신호를 잘 분석하는 특성을 가지고 있지만, 서로 다른 주파수 성분이 정수배의 관계를 가질 경우와 잡음이 발생할 경우에 신호를 잘 구별하지 못한다는 결점이 있다고 알려져 있으며, 정상신호일 때는 Short Time Fourier Transform(STFT)의 성능이 더 뛰어나다고 알려져 있다[8, 9]. 이에 본 연구에서는 HHT와 STFT의 특성이 잘 나타나는 경우를 비교하며, Empirical Mode Decomposition(EMD) 방법이 잡음에 취약하다는 것을 보완하여 새로이 개발된 Ensemble Empirical Mode Decomposition(EEMD) 방법을 이용한 Improved HHT를 소개하고자 한다.

2. EMD 방법과 STFT 방법 비교

시간-주파수 분석 방법은 신호를 크게 정상상

태와 비정상상태일 경우로 분류되며 대표적으로 STFT가 정상상태(stationary state)일 경우, EMD 방법을 통한 HHT는 비정상상태(non-stationary state)일 경우 많이 적용된다.

EMD 방법은 다음과 같은 조건이 맞추어져야 한다[7].

- 1) 데이터 세트에서 극값의 개수와 영점의 개수가 동일하거나 최대 하나의 차이가 있어야 한다.
- 2) 신호의 최대점들을 연결한선과 최소점들을 연결한선의 평균값이 모든 점에서 0이어야 한다.

신호 $x(t)$ 는 EMD를 사용하여 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n \quad (1)$$

c_j 는 $x(t)$ 의 j 번째 기본 모드 함수(IMF : Intrinsic Mode Function)이며, r_n 은 그 나머지 신호이다.

STFT는 시간에 따라 변하는 정보의 분석이 어려운 FFT의 단점을 보완하기 위하여 임의의 창 함수(Window Function; h^*)를 이용하여 세분화된 구간에서 푸리에 변환을 수행하는 방법이다. STFT는 다음과 같이 정의된다.

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h^*(\tau - t)x(\tau)e^{-j2\pi\tau}d\tau \quad (2)$$

STFT는 구간을 세분화함에 따라 시간변화에 따른 주파수 특성을 분석할 수 있게 되었지만, 하나의 구간에서는 일정한 주파수만 분석할 수 있고, 분석하고자 하는 데이터의 시간이 매우 짧은 경우에는 분석이 어렵다는 단점이 있다. 또한 창함수의 크기를 데이터에 맞추어 최적화해야 하는 문제가 있고, 각 창함수 사이의 경계선에서 주파수 정보의 왜곡이 발생할 수 있다는 단점도 가지고 있다[10].

2.1 SIFT 방법이 효과적인 경우

임의의 신호에서 서로 다른 주파수 성분이 정수배의 관계를 가지고 있을 때, HHT는 신호처

리가 어렵다. 다음은 임의의 신호를 가지고 STFT와 HHT를 비교한 경우이며 임의의 신호는 다음과 같다.

$$x(t) = 10\cos(100 \times 2\pi t) + 10\cos(133 \times 2\pi t) \quad (3)$$

Eq. 3과 같은 신호를 STFT 방법과 HHT 방법을 통해 신호분석을 하면 다음과 같다.

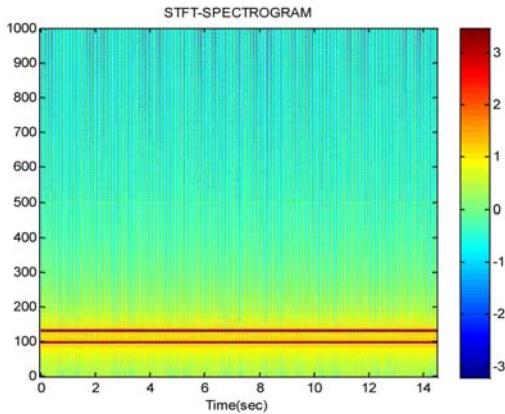


Fig. 1 Analysis of signal $x(t)$ with STFT

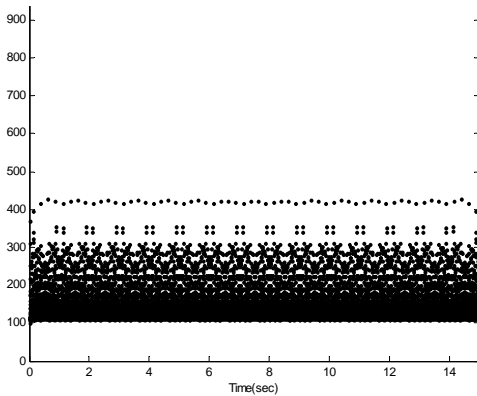


Fig. 2 Analysis of signal $x(t)$ with HHT

Fig. 1과 2를 통하여 정상상태일 경우와 배수의 주파수가 존재할 경우에는 HHT가 정확한 신호를 파악하는 것이 어렵다. 따라서, 정상상태의 신호일 경우, STFT가 신호처리에 더 효과적인 것을 알 수 있다.

2.2 HHT 방법이 효과적인 경우

STFT는 앞서서 언급했듯이 시간에 따라 임의의 창함수(Window Function; h^*)를 이용하여 세분화된 구간에서 푸리에 변환을 수행하는 방법이므로 시간에 따라 변화하는 비정상 신호에서는 정확한 시간을 알기 어렵다는 단점이 있다. 그에 반해, HHT는 비정상-비선형 신호에 대하여 효과적이다. 다음은 임의의 시점에서 변화하도록 설정한 신호를 가지고 STFT와 HHT를 비교한 것이며 임의의 신호는 다음과 같다.

$$y(t) = \begin{cases} \cos(34 \times 2\pi t) & (t \leq 5) \\ \cos(91 \times 2\pi t) & (t \geq 5) \end{cases} \quad (4)$$

Eq. 4과 같은 신호를 STFT 방법과 HHT 방법을 통해 신호분석을 하면 다음과 같다.

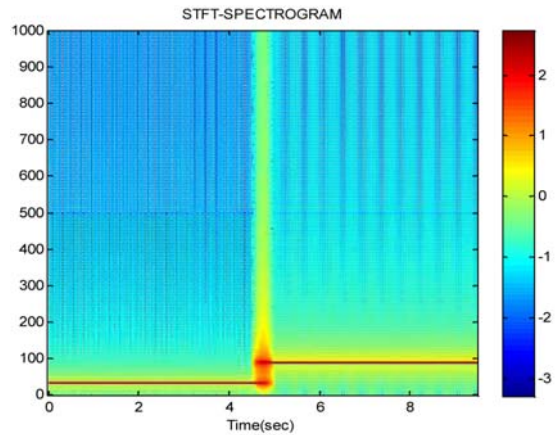


Fig. 3 Analysis of signal $y(t)$ with STFT

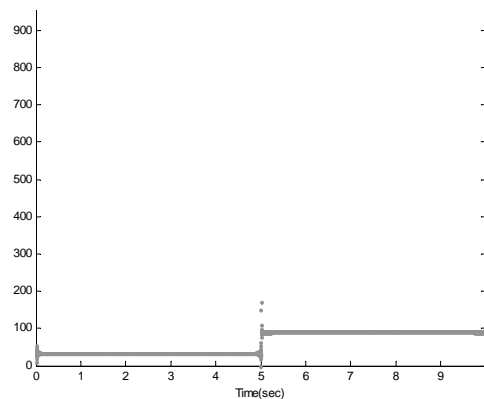


Fig. 4 Analysis of signal $y(t)$ with HHT

Eq. 4와 같이 임의의 신호를 5초일 때 주파수 변환하도록 하였다. STFT 방법은 주파수는 잘 나오지만 언제 변하는지 정확한 시점을 알기가 어렵다. 하지만 HHT 방법은 주파수가 변하는 시간을 정확히 표시되었다. 이와 같이 HHT는 비정상 신호에서 주파수가 변화되는 시간을 정확히 알 수 있다는 장점이 있다.

2.4 HHT와 STFT 검토

앞서서 언급한 것처럼 STFT 방법과 HHT 방법 각각의 특성이 존재한다. 가장 적절한 방법은 각 프로젝트에 맞게 시간-주파수 분석 방법을 선택하는 것이다[11].

3. EMD 방법과 EEMD 방법

EMD 방법의 결점 중 하나는 Mode mixing의 출현이다. Mode mixing은 한 IMF에 다른 크기의 순간적인 진동을 포함하거나 2개 이상의 IMF에 같은 크기의 요소가 포함될 때를 정의한다. 이로 인하여 간헐신호가 나타난다. Huang에 따르면 간헐신호로 인하여 시간-주파수 분석법에서 잡음이 발생할 뿐만 아니라, IMF의 물리적 의미를 찾기 힘들게 한다[8].

3.1 EEMD(Ensemble Empirical Mode Decomposition)

EMD에서 Mode mixing 문제를 극복하기 위하여 Huang은 새로이 EEMD 방법을 제시하였다[8]. 이 방법은 최신에 행해졌던 백색잡음의 통계적 특성에 대한 연구를 기반으로 일정한 크기를 갖는 백색잡음을 다음과 같이 인위적으로 데이터에 더한다.

$$x_i(t) = x(t) + w_i(t) \quad (5)$$

Eq. 5에서 $x(t)$ 는 단일 성분의 데이터이고 $w_i(t)$ 는 i 번째 인위적인 백색잡음 성분이다. Eq. 5와 같은 과정을 거치면 EMD 방법이 효과적인 dyadic filter bank로 작용하여 잡음으로 손상된 dyadic 특성을 보완한다. 이와 같은 특성으로 EEMD는 다음과 같은 과정을 따른다.

- 1) 지정한 데이터에 백색잡음을 더한다.
- 2) 백색잡음을 더한 데이터를 IMF로 나눈다.
- 3) 1)과 2)을 반복하며 반복할 때마다 다른 백색잡음을 더한다.
- 4) 분해된 IMF의 의미를 파악하여 최종 결론을 얻는다.

3.2 EEMD 방법에서 파라미터 값

EEMD 방법에서는 앙상블 수와 추가하는 백색잡음의 진폭 값이 필요하며 이 두 파라미터에 따라 성능이 달라진다.

3.2.1 앙상블 수

앙상블 수, 추가되는 백색잡음의 진폭 값과 잡음의 관계는 다음과 같은 식을 만족한다[8].

$$e = \frac{a}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

Eq. 6에서 N 은 앙상블 수이며, a 는 추가되는 백색잡음의 진폭 값, e 는 에러의 표준편차 값으로 분석하는 신호와 부합되는 IMF에 따라 다르다.

EEMD 과정에서 추가하는 백색잡음의 진폭이 작을수록 에러 값이 작아지지만, 진폭이 너무 작으면 EEMD 방법이 의존하는 극값의 변화를 일으킬 수 없으므로 의미가 없어진다. 따라서, 추가하는 백색잡음의 진폭 값을 너무 작게 하면 안된다. 그러나 앙상블 수가 커지면 커질수록 에러 값이 작아져서 무시할 수 있는 수준이 된다. 일반적으로 앙상블 수를 수 백회로 지정하면 정확한 결과를 얻을 수 있다[12].

3.2.2 백색잡음의 진폭

백색잡음의 진폭이 커지면 앙상블 수도 커져야 한다. Huang에 의하면 백색잡음의 진폭은 실험 데이터 표준편차의 0.2배일 때, 가장 좋다고 제안하였다[8]. 하지만, 이 값은 항상 적용되지는 않으며 실험 데이터에 따라 다르다.

3.3 Rijke 튜브 실험

Rijke 튜브는 그 내부에 발생하는 유체역학적인 섭동 현상을 최소화시킨 장치이다. 실제로 열적인 시스템의 구조적인 형상으로 인해 튜브 내

선회 구조가 형성될 수 있으며 그에 따른 열해리가 규칙적으로 발생시킬 수 있다. 그러나 Rijke 튜브는 이러한 가능성을 구조적인 단순함을 통해 해소시킴으로써 열-음향학적 불안정성의 메커니즘을 이해하기 위한 기초적인 실험장비로 현재까지 많이 사용되고 있다. 본 연구는 다음과 같은 실험 장치를 이용하여 얻은 데이터를 이용하였다[6].

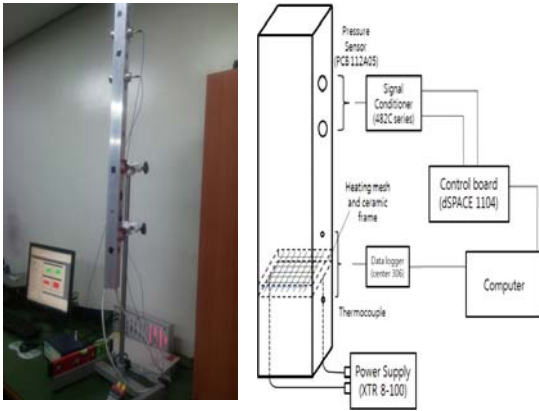


Fig. 5 Experimental apparatus and configuration

3.4 EMD 방법과 EEMD 방법의 비교

EMD 방법과 EEMD 방법을 비교하기 위하여 Rijke 튜브 실험[6]에서 얻은 데이터를 이용하여 비교하였다. 데이터의 샘플링 비율(sampling rate)은 2000Hz로 획득한 데이터 중 안정에서 불안정으로 변하는 것이 뚜렷한 데이터를 선정하였다. Fig. 6는 시간에 따른 압력 변화 양상 그래프이다.

Fig. 6에서 나타난 신호가 어떤 성분의 주파수 성분이 있는지를 알기 위하여 다음과 같이 FFT를 이용하여 Fig. 7에 나타냈다.

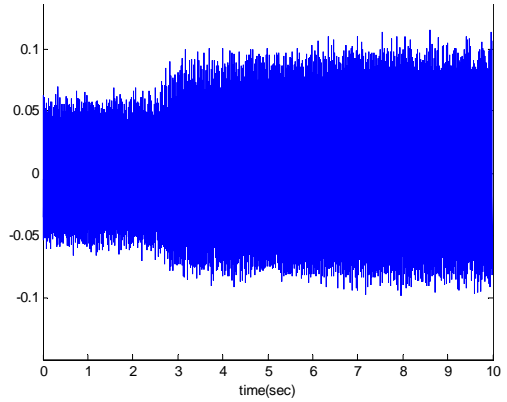


Fig. 6 Pressure signal from stable state to unstable state

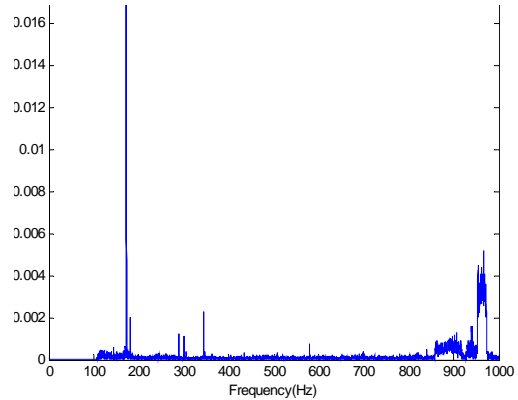
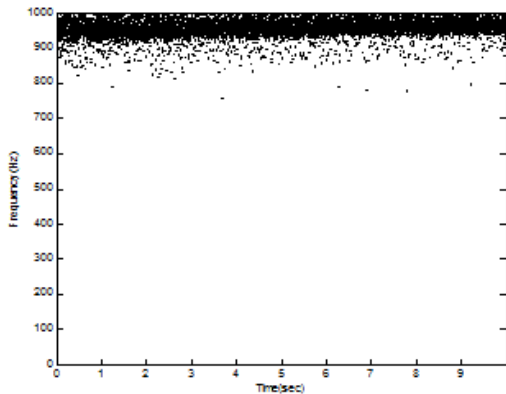
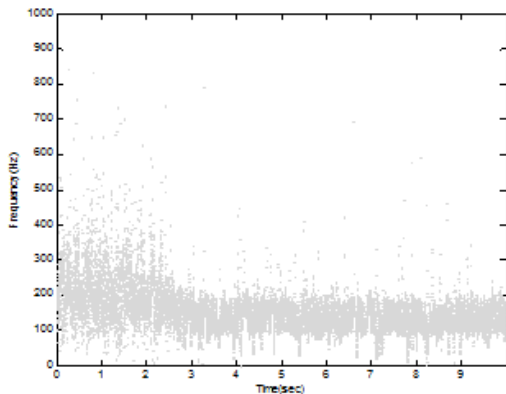


Fig. 7 FFT spectrum of the pressure signal

FFT를 이용하여 얻은 Fig. 7을 통하여 압력신호를 구성하는 주파수 성분을 알 수 있다. 주파수 분포를 통하여 크게 두 개의 주파수가 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 그 주파수는 각각 $f_1 = 172.5Hz$, $f_2 = 967.2Hz$ 이다. Fig. 5의 신호를 각각 EMD 방법을 통한 주파수 분석은 다음과 같다.



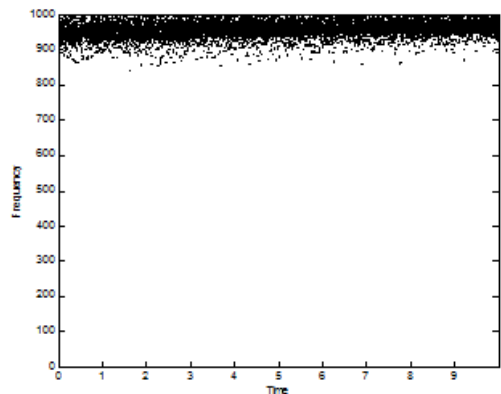
(a) IMF components (967.2Hz)



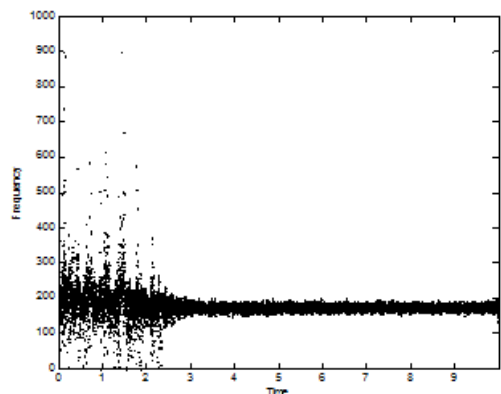
(b) IMF components (172.5Hz)

Fig. 8 IMF of pressure signal with EMD

Fig. 8의 (a)는 Fig. 7에서 나타난 f_2 성분으로 967.2Hz 성분이며 시간에 따른 변화가 없으므로 이 신호는 안정 상태와 불안정 상태의 관계없이 항상 존재함을 알 수 있다. Fig. 8의 (b)는 Fig. 7에서 나타난 f_1 성분으로 약 3초부터 일정하게 나타나는 것이 나타나짐에 따라 f_1 인 172.5Hz가 불안정할 때 나타나는 성분임을 알 수 있다. 다음은 백색잡음 진폭을 40%, 앙상블 수를 500회로 하여 EEMD 방법을 통한 주파수 분석한 것이다.



(a) IMF components (967.2Hz)



(b) IMF components (172.5Hz)

Fig. 9 IMF of pressure signal with EEMD

Fig. 9는 Fig. 8과 같이 f_2 성분은 시간에 따른 변화가 없고, f_1 성분이 약 3초부터 일정하게 나타난다. 하지만, 해상도와 가독성에서 EEMD 방법에 의한 Improved HHT가 Original HHT보다 좋다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 임의의 신호를 가지고 STFT와 HHT를 비교하였으며 Rijke 튜브 실험을 통해 얻은 데이터를 가지고 EMD 방법을 통한 Original HHT와 EEMD 방법을 통한 Improved HHT

를 비교하였다. STFT와 HHT의 비교에서는 각 신호분석 방법마다 각각의 특성이 있으므로 분석할 신호에 맞는 신호분석법 선정해야 한다. Rijke 튜브 실험 데이터를 EMD 방법과 EEMD 방법을 이용하여 행해진 신호분석에서는 잡음에 취약한 EMD 방법에 인위적인 백색잡음의 추가를 통하여 더 좋은 해상도와 가독성을 얻을 수 있다. 하지만, EEMD 방법에서 최적의 양상불 수와 백색잡음 진폭을 구하는 것이 이론적이 아닌 실험적이므로 최적의 값을 구하는 것에 어려움이 있으며 EEMD를 행하는 과정에서 많은 시간이 요구된다는 단점이 있다.

따라서, 향후 연구 방향으로 다음과 같이 하고자 한다.

- 1) HHT 이론적 배경에 대한 연구
- 2) 실시간 EEMD Computation algorithm에 대한 연구
- 3) Rijke 튜브 실험에서 얻은 데이터에 대한 정상상태 판별

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구 사업의 결과임(2011-0013998).

참 고 문 헌

1. F. E. C. Culick, "Unsteady motions in combustion chambers for propulsion system", RTO AGARDograph, AG-AVT-0396, 2006
2. 김태욱, 임지혁, 윤영빈, "액체로켓엔진의 연소불안정 현상", 한국추진공학회, 제11권, 제1호, 2007, pp.71-84
3. 오정석, 윤영빈, "가스터빈에서의 연소불안정 현상", 한국추진공학회, 제12권, 제4호, 2008, pp.63-77
4. Hyun-Gull Yoon, John Peddieson, Kenneth R. Purdy, "Non-linear response of a generalized Rijke tube", International Journal of Engineering Science, 2001, pp.1707-1723
5. 박익수, 윤현걸, 박정우, 탁민제, "힐버트 및 웨이블릿 공간 변수를 이용한 신경회로망 기반의 연소 불안정 검출", 한국항공우주학회 춘계학술발표회, 2008
6. 나선화, "Rijke 튜브의 열음향학적 불안정성의 능동 제어에 대한 연구:기초 실험", 학위논문(석사), 2011
7. Norden E. Huang, Zheng. Shen, Steven R. Long, Manli C. Wu, Hsing H. Shih, Quanan. Zheng, Nai-Chyuan. Yen, Chi Chao. Tung, Henry H. Liu, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis", Proceedings of the Royal Society of London, vol 454, 1988, pp.903-995
8. Zhaohua Wu, Norden E. Huang, "Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method", AADA, Vol. 1, No. 1, 2009, pp.1-41
9. Kasula, V. D. K, "Classification of power quality disturbance signals using FFT, STFT, Wavelet Transforms and Neural Networks - A comparative analysis", Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications, Vol. 1, 2007, pp. 335 - 340
10. 이승목, 최연선, "HHT를 이용한 간극이 있는 회전체의 고장진단", 한국소음진동학회 추계학술대회, 2007
11. Liu Lu, Lin Jianhui, "The comparison of time-frequency analysis on the feature extraction of Maglev' Track long-wave irregularity", Electronic Measurement and Instruments, 2007, pp. 4-315 - 4-319
12. Yaguo Lei, Zhengjia He, Yanyang Zi, "Application of the EEMD method to rotor fault diagnosis of rotating machinery", Mechanical Systems and Signal Processing, Volume: 23, Issue: 4, 2009, pp. 1327-1338