

가스터빈 연소기에서 1D 열음향 모델을 이용한 연소불안정 예측

김진아* · 김대식*,†

Combustion Instability Prediction Using 1D Thermoacoustic Model in a Gas Turbine Combustor

Jin Ah Kim and Daesik Kim

Key Words: Combustion Instability(연소불안정), Thermoacoustic Model(열음향모델), Reflection Coefficient(반사계수), Fuel Composition(연료조성)

Abstract

The objective of the current study is to develop an 1D thermoacoustic model for predicting basic characteristics of combustion instability and to investigate effects of key parameters on the instabilities such as effects of flame geometry and acoustic boundary conditions. Another focus of the paper is placed on limit cycle prediction. In order to improve the model accuracy, the 1D model was modified considering the actual flame location and flame length (i.e. distribution of time delay). As a result, it is found that the reflection coefficients have a great effect on the growth rate of the instabilities. In addition, instability characteristics are shown to be strongly dependent upon the fuel compositions.

기호설명

A : 압력파의 복소 진폭
 c : 음속 [m/s]
 k : 파수 [1/m]
 L, l : 길이 [m]
 n : 이득값
 p : 압력 [kPa]
 Q, q : 열 발생량 [W]
 R : 반사 계수
 S : 연소기 면적 [m²]
 t : 시간 [s]

T : 온도 [K]

1. 서 론

현재 개발되는 가스터빈은 높은 연소 성능뿐만 아니라 강화되는 배출가스 기준에 대한 만족이 요구된다. 이것을 위해서 낮은 당량비 상태에서 연료와 공기를 미리 혼합하여 연소실로 공급하는 방식의 희박 예혼합 연소 시스템이 사용되고 있다. 이는 저온의 연소 온도를 유지할 수 있어 배출되는 NOx의 상당량을 줄일 수 있지만 화염의 민감도를 높여 연소불안정(combustion instability)이 생기게 한다.

연소불안정은 비정상 열방출과 압력과 섭동간의 상호작용으로 인하여 발생하게 된다. 희박예혼합 연소기는 당량비가 희박 가연 한계(lean blow out) 영역에서 운전되는데, 이때 화염은 연소기 입구에서 혼합기 속도나 당량비의 변화에 쉽게 영향을 받게 된다. 이를 통하여

(Received: 09 Dec 2015, Received in revised form: 22 Dec 2015, Accepted: 23 Dec 2015)

*강릉원주대학교 기계자동차공학부

†책임저자, 회원

E-mail : dkim@gwnu.ac.kr

TEL : (033)760-8728 FAX : (033)760-8721

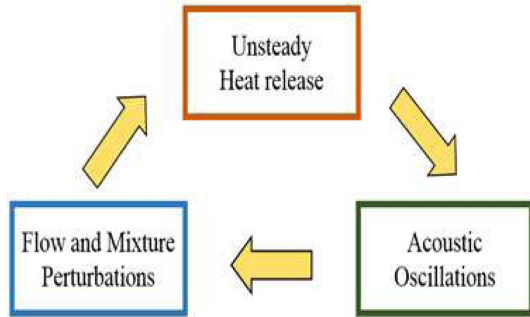


Fig. 1 Schematic of the feedback processes for a combustion instability

연소기 내부에서 비정상 열방출과가 생기고 이는 결과적으로 압력파의 섭동으로 이어져 결국 Fig. 1과 같은 피드백 관계를 형성하게 된다.

$$\int_V \int_T p'(x,t)q'(x,t)dt dV \geq \int_V \int_T L_i(x,t)dt dV \quad (1)$$

연소불안정이 발생할 수 있는 조건은 Rayleigh criterion인 식 (1)로 정리할 수 있다^(1,2). 연소실에서 발생하는 압력파와 열방출과의 위상차가 90도 이내가 되면, 서로의 진폭을 증폭하게 되고(식 (1)의 좌변), 이에 해당하는 적분값이 전체 시스템의 댐핑 에너지(식 (1)의 우변) 보다 커지게 되면 연소불안정이 발생하게 된다. 이것은 시스템의 구조적인 변형으로 인한 시스템의 성능 저하 및 수명 단축으로 이어지고, 또 소음을 발생시키는 등의 문제점을 야기시킨다⁽¹⁻⁷⁾.

본 논문에서는 이러한 연소불안정 현상을 예측하는 열음향 해석 모델(thermoacoustic analysis model)을 사용하여 연소기의 길이 방향의 불안정 특성을 분석하고, 불안정 연소가 나타나는 조건을 예측하였다. 특히 현재의 연구에서는 저자들의 기존 연구들⁽³⁾을 통하여 연소 불안정 특성에 큰 영향을 미치는 인자들로 밝혀진 화염의 특성(즉, 연료 조성 변화) 및 연소기 음향 입출구 조건 변화에 따른 불안정 특성을 정량적으로 분석하였으며, 선형뿐만 아니라 비선형 모델링을 통하여 기존의 연소 불안정 주파수와 발생 조건뿐만 아니라, 한계 진폭(limit cycle amplitude)의 예측 결과도 함께 소개하고자 한다.

2. 1D 열음향 모델 및 해석 연소기

2.1 1D 열음향 모델

연소불안정 해석을 위하여 사용되고 있는 열음향 해

석 모델은 복잡한 실제 시스템을 간소화하여 정의한 후 음향장을 해석하는 방법이다. 먼저 화염을 연소기 길이에 비하여 무한히 짧다고 가정 할 때, 음속과 음압 사이의 지배방정식을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\rho \frac{\delta}{\delta t} u' = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\delta}{\delta x} p' \quad (2)$$

$$\frac{1}{\gamma p_0} \frac{\delta}{\delta t} p' = \frac{1}{S} \frac{\delta}{\delta x} (S u') = \frac{\gamma - 1}{\gamma p_0} \dot{q}'_T \quad (3)$$

화염의 길이가 매우 짧다고 가정하였으므로 이에 대한 음향 조건(acoustic jump condition)을 적용하면 식 (4)와 (5)를 구할 수 있다.

$$p'(x_l^+) = p'(x_l^-) \quad (4)$$

$$S(x_l^+)u'(x_l^+) - S(x_l^-)u'(x_l^-) = \frac{\gamma - 1}{\gamma p_0} \dot{Q}_T \quad (5)$$

상기 방정식을 풀기 위해서 열 발생을 변동에 대한 함수값이 필요한데, 이를 위해서 보편적으로 사용되는 방법이 $n-\gamma$ 모델로 표현 할 수 있는 화염 전달 함수(flame transfer function)이다.

$$FTF(\omega) = \frac{\hat{Q}/\bar{Q}}{u/\bar{u}} = n(\omega)e^{i\omega\tau} \quad (6)$$

특히 저자들은 일련의 관련 모델링 개발 논문⁽⁴⁻⁶⁾을 통하여 1D 열음향 모델의 주요 오차는 화염의 과도한 단순화로부터 기인한다고 하였고, 이를 해결하기 위한 노력의 일환으로 Fig. 2와 같이 화염의 위치를 덤프면 입구가 아닌 실제 화염이 존재하는 위치로 옮기는 열음향 모델을 개발하였다.

또한 화염의 두께를 고려하기 위하여 이를 지연 시간(τ)의 분포로 정의하고, 이를 반영한 수정된 형태의 화

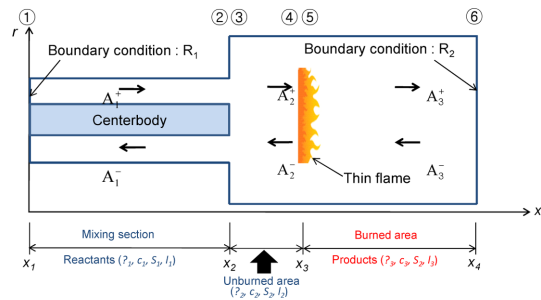


Fig. 2 TA model considering actual flame location⁽⁵⁾

염전달함수를 다음과 같이 제시하였다⁽⁵⁾.

$$FTF(\omega) = n(\omega) \frac{e^{i\omega(\tau+\nabla\tau)} - e^{i\omega(\tau-\nabla\tau)}}{i\omega 2\nabla\tau} \quad (7)$$

현재의 연구에서는 다양한 연소 불안정 인자들에 대하여 수정된 열음향 모델의 검증이 시도되었고, 주요 결과를 소개하고자 한다.

2.2 해석 대상 연소기 및 해석 조건

Figure 3은 본 논문에서 해석 대상으로 선정한 연소기 및 노즐의 개략도이다. 본 연구에서는 Kim 등^(8,9)의 연구에서 소개된 연소기를 해석 대상으로 선정하고, 실험 결과와의 비교를 통하여 모델 검증을 시도하였다. 그림에서 보이듯이, 연소 불안정 발생 조건을 계측하기 위하여 덤프면으로부터 762~1,524 mm까지 길이를 변화시킬 수 있는 가변 신장 연소기로 구성되었다. 또한 화염 전달 함수 측정 시에는 석영 연소기 후방을 완전 개방하여 시스템 음향 특성을 배제할 수 있도록 고안되었다. Table 1은 모델 개발을 위해 사용된 연소기의 운전 조건을 나타낸다. 해당 연소기의 구조 및 측정 기법에 대한 더 많은 정보는 이전의 참고 문헌을 통하여 확인할 수 있다^(8,9).

또한, 기존의 기초 연구들^(7,10)로부터 열음향 모델링시, 연소기 입출구 반사계수의 정의가 모델의 정확도에 큰

영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 저자들의 기존 1D 열음향 해석 연구⁽⁴⁻⁶⁾에서는 임의로 정의된 하나의 열음향 반사계수를 사용하였고, 이에 대한 정량적인 분석이 이루어지지 못하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 다음의 식 (8), (9)와 같이 연소기 입구와 출구의 반사계수를 정의하였고, 다양한 값의 입구 반사계수를 고려하여 연소불안정 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 다만, 본 연구에서 출구 음향 경계 조건은 완전히 초경되어 있으므로, $R_2=1.0$ 으로 선정하였다.

$$\frac{A_1^+}{A_1^-} = R_1 \quad (8)$$

$$\frac{A_2^+}{A_2^-} = e^{2ik_2l_2} = R_2 \quad (9)$$

3. 해석 결과 및 분석

3.1 반사계수의 영향

이전의 1D 열음향 해석에 대한 저자들의 연구⁽⁴⁻⁶⁾에서 적용되었던 반사계수는 참고문헌^(8,9)에서 임의의 조건에서 계측된 값($R_1 = 0.2292-0.1894i$)이 적용되었다. 그러나, 측정 원리 및 조건에 대한 세부적인 정보가 제시되어 있지 못하고, 또한 반사계수는 주파수 및 매질의 특성에 크게 의존하는 것으로 나타나, 반사계수의 변화가 연소불안정 특성에 미치는 영향에 대한 정량적인 평가는 매우 중요한 정보가 될 수 있다. 특히, 반사계수의 실수부는 음향파의 진폭 결정에 영향을 미치며, 허수부는 위상차를 결정하는 요소이므로, 실수부와 허수부에 있어서 모두 신중한 선택이 필요하다.

Figures 4와 5는 연료 조성이 100% CH₄(H00)와 55% CH₄ + 45% H₂(H45)일 때, 연소기 길이 변화에 따른 연소불안정 성장률을 반사계수를 변화시켜 가며 나타낸 것이다. 본 결과에서 성장률이 0보다 큰 양수의 값을 갖는다는 것은 시스템이 불안정하다(즉, 연소불안정 발생 조건임)는 것을 의미하고, 0보다 작은 음의 값의 성장률은 시스템이 안정한 상태(즉, 연소불안정이 발생하지 않는 조건)임을 의미한다⁽⁴⁻¹⁰⁾. 해석 대상 연소기의 계측 결과 본 조건에서 연소불안정이 발생하는 연소기 길이는 0.98~1.15 m인 것으로 나타났다.

먼저 Fig. 4는 반사계수의 허수부를 참고논문에서 소개된 기준값 -0.1894i로 고정하고 실수부를 변화시킨 결과이며, Fig. 5는 실수부를 기준값 0.2292로 고정하고 허

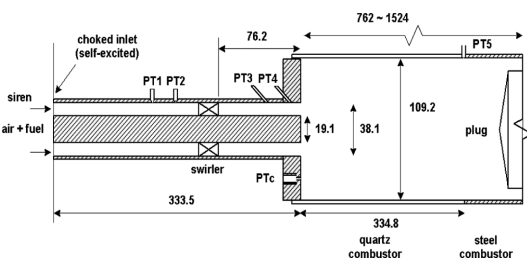


Fig. 3 Schematic of the model combustor, Dimensions in millimeters^(8,9)

Table 1 Selected test conditions for model validation

Inlet pressure	1atm
Inlet temperature	200°C
Mixture velocity	60 m/s
Equivalence ratio	0.6
Fuel composition (in vol.)	100%CH ₄ (H00), 55%CH ₄ + 45%H ₂ (H45)

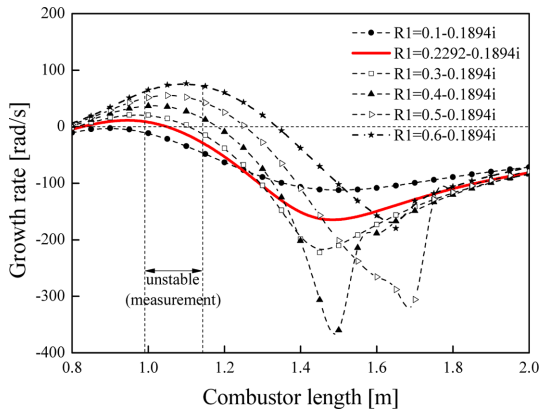


Fig. 4 Effects of real part of reflection coefficient on the instability growth rate (H45)

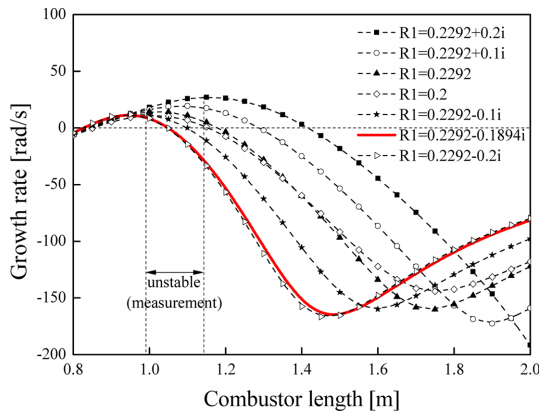


Fig. 5 Effects of imaginary part of reflection coefficient on the instability growth rate (H45)

수부를 변화시켜 해석한 결과이다. 결과에서 굵은 실선으로 표시된 반사계 수는 모두 참고문헌상에서 제시된 기준 반사계수($R1 = 0.2292 - 0.1894i$)로써, 해석 결과 연소불안정 발생 구간(0.98~1.15 m)의 일부 영역에서는 연소불안정이 발생하지 않는(즉, 성장률이 음수의 값을 갖는) 조건이 포함됨을 알 수 있다. 그러나 Figs. 4, 5에서 보이듯이, 반사계수의 실수부와 허수부의 미소한 변화가 연소불안정 발생 구간 예측에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 즉 음향 경계조건이 연소 불안정이 발생할 때 초기 인자들의 성장률 결정에 있어서 중요한 변수가 된다는 것을 확인하였고, 이는 모델링시 신중한 검토가 필요함을 의미한다.

3.2 연료 조성 변화의 영향

Figure 6은 두 가지 연료 조성에 대하여 불안정 주파

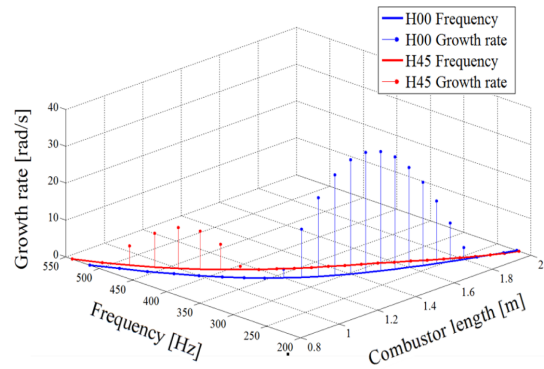


Fig. 6 TA modeling results

수 및 성장률에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 연료 조성의 변화는 화염의 구조와 화염 전파 속도에 영향을 미치게 되고⁽³⁾, 다시 이는 화염전달함수의 열발생 섭동에 큰 영향을 미치게 된다. 현재의 연구 결과, 연료 조성에 대하여 주파수의 변화는 크지 않았고, 이는 주로 연소기 길이에 대한 함수로 나타났다. 그러나 성장률 변화에 있어서, 연료 조성이 바뀌면서 성장률이 0보다 큰 양수를 갖는 구간(즉, 연소불안정이 발생하는 연소기 길이)이 크게 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 즉, 실제 가스 터빈 연소기에서 주어진 연소기 형상(또는 길이)에 대하여 연료 조성이 바뀌게 되면, 연소불안정 발생 여부도 영향을 받게 된다. 이는 연소불안정 제어와 모니터링 시에 연료 조성 변화는 반드시 고려되어야 할 인자임을 의미한다.

3.3 한계 진폭의 예측

전술하였던 불안정 주파수와 성장률은 선형 시스템 해석을 통하여 예측되었다. 그러나 한계 진폭(limit cycle amplitude)과 같이 시스템의 비선형성에 영향을 받는 인자들은 선형 해석을 통하여는 계산될 수 없는 변수이다⁽⁶⁾. 이를 위하여 선형 열음향 해석 모델에서 적용된 주파수만의 함수로 표현되었던 화염 전달 함수(식 6)를 주파수와 속도 섭동 진폭의 함수로 표현하는 화염 묘사 함수(flame describing function)로 식 (8)과 같이 새롭게 정의하고 열음향 해석 모델에 적용하여 비선형 연소 불안정 현상을 해석할 수 있다.

Figures 7과 8은 식 8을 적용하여 비선형 동특성을 해석한 결과이다. 먼저 Fig. 7은 연소기 길이와 속도 섭동 진폭에 따른 불안정 주파수 변화를 나타낸 것이다.

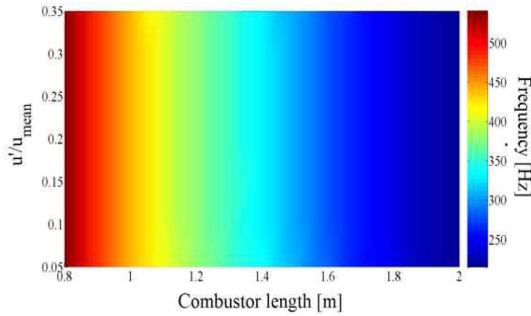


Fig. 7 Instability frequency prediction results as a function of combustor length and amplitude

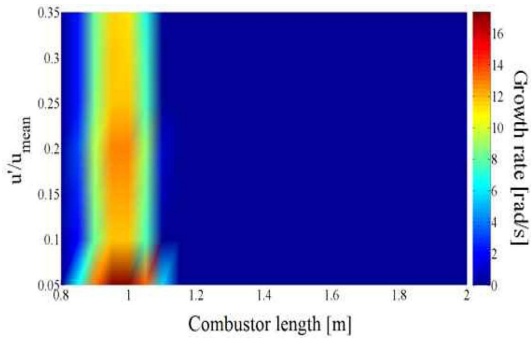


Fig. 8 Instability growth rate prediction results as a function of combustor length and amplitude

$$FDF(\omega, u'/u_{mean}) = \frac{\hat{Q}/\bar{Q}}{u'/\bar{u}} = n(\omega, u'/u_{mean}) e^{i\phi(\omega, u'/u_{mean})} \quad (8)$$

결과에서 보이듯이 불안정 주파수는 속도 섭동의 진폭보다는 연소기 길이 변화에 크게 의존하는 것으로 나타났다, 이는 타 연소불안정 모델⁽⁶⁾과도 일치하는 결과이다. 반면에 Fig. 8은 성장률이 양수인 조건만을 강조하여 진폭과 연소기 길이에 따른 그래프로 나타낸 것으로서, 성장률이 연소기 길이에 크게 의존하게 되지만, 특정 조건과 연소기 길이에 있어서는 속도 진폭에 대해서도 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이에 대한 더욱 정확한 비교는 Fig. 9에서 이루어졌다. Fig. 9는 본 조건에서 연소 불안정이 가장 크게 발생하는 연소기 길이 중 하나인 1.1 m 경우에 속도 섭동 진폭과 연소기 길이에 따른 주파수와 성장률을 예측한 것이다. 그림에서 보이듯이, 연소기 길이가 고정될 경우에 속도 진폭에 따른 주파수의 변화는 미미하나, 성장률의 경우에 속도 진폭이 매우 작은 영역에서도 성장률은 큰 양수의 값(즉, 연

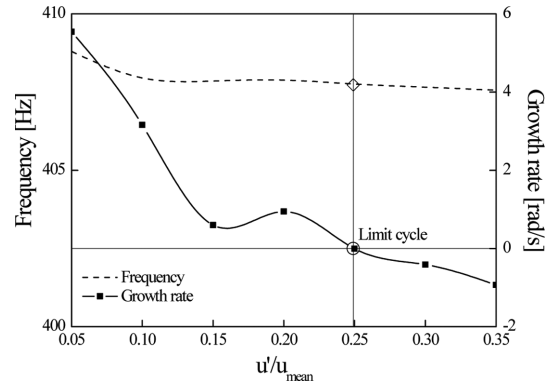


Fig. 9 Amplitude of velocity perturbation at limit cycle (for combustor length of 1.1 m)

소불안정이 발생하는 조건)을 가지다가, 진폭이 증가함에 따라 성장률은 조금씩 감소하게 되어 음수의 값을 가지게 된다. 이 때 성장률이 양수에서 음수의 값으로 바뀌게 되는 진폭을 한계 진폭이라고 하며, 본 비선형 해석 모델을 통하여 얻어진 본 조건에서의 한계 진폭은 0.249인 것으로 나타났다. 현재의 연구에서는 계산된 한계 진폭은 속도 섭동에 대한 값인 관계로, 압력 섭동에 대하여 주어진 계측 결과와 직접적인 비교가 이루어지지 않았으나, 향후 연구에서는 이에 대한 평가를 통하여 본 모델의 비선형 예측 결과의 타당성을 검증할 계획이다.

4. 결 론

본 연구에서는 가스터빈 회박 예혼합 연소기에서 연소불안정 현상을 예측하기 위한 1D 열음향 모델이 개발되었다. 기존의 단순화된 열음향 모델의 오차를 개선하기 위하여 수정된 열음향 모델이 적용되었으며, 이를 위하여 화염의 위치가 고려되었고, 지연시간의 분포를 반영하기 위하여 화염의 두께를 모델에 반영할 수 있도록 수정되었다. 특히 수정된 모델의 각종 불안정 인자들에 대한 정량적 평가가 이루어졌다.

해석 결과, 연소기 입출구의 반사계수는 모델의 정확도에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 반사계수의 정의에 따라 연소불안정 발생 여부가 달라질 수도 있다. 또한, 연료 조성의 변화는 열발생 섭동에 영향을 미치게 되어, 결국에는 불안정 특성을 결정하는 주요 인자임을 알 수 있었다. 또한, 화염 묘사 함수를 도입하여

비선형 예측 모델이 제시되었으며, 이를 통한 한계 진폭 예측 기법이 개발되었다. 향후 연구를 통하여 비선형 해석에 대한 추가 검증이 이루어질 계획이다.

후 기

이 논문은 강릉원주대학교 전일제대학원생장학금 지원 및 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2013R1A1A2A10009253).

참고문헌

- (1) D. Durox, T. Schuller, N. Noiray, A.L. Birbaud, and S. Candel, "Rayleigh criterion and acoustic energy balance in unconfined self-sustained oscillating flames", *Combustion and Flame*, Vol. 156, Iss. 1, 2009, pp. 106~119.
- (2) T. Liewwen and K. McManus, "Introduction: Combustion dynamics in lean-premixed prevaporized(LPP) gas turbines", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 5, 2003, pp. 721.
- (3) J. Kim and D. Kim, "Effects of fuel composition on flame transfer function in lean premixed combustor", *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 20, No. 3, 2015, pp. 135~140.
- (4) D. Kim, "Linear stability analysis in a gas turbine combustor using thermoacoustic models", *Journal of the Korea Society of Combustion*, Vol. 17, 2012, pp. 17~23.
- (5) D. Kim and K. Kim, "Improved thermoacoustic model considering heat release distribution", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 38, No. 6, 2014, pp. 443~449.
- (6) D. Kim and K. Kim, "Thermoacoustic analysis model for combustion instability prediction - Part 2 : Nonlinear instability analysis", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 16, No. 9, 2012, pp. 41~47.
- (7) J. Lim, D. Kim, K. Kim and D. Cha, "Effect of acoustic boundary conditions on combustion instabilities in a gas turbine combustor", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 19, No. 4, 2015, pp. 15~23.
- (8) K. Kim, J. Lee, H. Lee, B. Quay and D. Santavicca, "Characterization of forced flame response of swirl-stabilized turbulent lean premixed flames in a gas turbine combustor", *Journal of Engineering of Gas Turbine and Power*, Vol. 132, Iss. 4, 2010, pp. 1~8.
- (9) K. Kim, J. Lee, B. Quay and D. Santavicca, "Spatially distributed flame transfer functions for predicting combustion dynamics in lean premixed gas turbine combustors", *Combustion and Flame*, Vol. 157, No. 9, 2010, pp. 1718~1730.
- (10) W. Krebs, P. Flohr, B. Prade and S. Hoffmann, "Thermoacoustic stability chart for high-intensity gas turbine combustion system", *Combustion Science and Technology*, Vol. 174, No. 7, 2002, pp. 99~128.