

가스터빈 부분 예혼합 연소기에서 당량비 섭동에 대한 화염전달함수 모델링

김지환* · 김대식*[†]

Flame Transfer Function Modeling in a Gas Turbine Partially-premixed Combustor with Equivalence Ratio Modulation

Jihwan Kim and Daesik Kim

Key Words: Combustion instability(연소 불안정), Computational fluid dynamic(전산 유체 역학), Flame transfer function(화염전달함수), Partially premixed system(부분 예혼합 시스템)

Abstract

This study has investigated the relationship between heat release fluctuations and the flow perturbations in a partially pre-mixed gas turbine combustor using a commercial CFD code. Special focus of the current work is placed on the effect of equivalence ratio on the flame dynamics in a partially-premixed system. As the first step for this combustion dynamics study in the non-perfectly premixed combustor, flame behaviors are modeled and then compared with measured results under both steady and unsteady conditions. The calculated results of the flame transfer function with equivalence ratio fluctuation are found to well capture the main qualitative characteristics of the combustion dynamics for the partially-premixed flames.

기호설명

Q, q : 열 발생량 [W]
 u : 속도 [m/s]
 n : 이득값
 p : 압력 [kpa]
 S : 연소기 면적 [m²]
 T : 온도 [K]
 t : 시간 [s]
 C : 상수

1. 서 론

기존의 가스터빈은 운행시 당량비를 희박 가연 한계(Lean blow out)로 유지하기 때문에 연소실 내부의 화염은 작은 외부 유동 교란에도 쉽게 반응하게 된다. 이 현상은 연소실 내부의 열발생을 섭동으로 이어지고, 열발생율의 섭동은 시스템 내의 압력 진동을 초래하게 된다. 압력 진동은 상류 노즐로 피드백되어 혼합기의 속도 및 당량비와 같은 열역학적 상태량의 진폭을 가진시키게 된다. 이러한 현상을 연소 불안정(Combustion instability)이라고 하고, 연소 불안정 현상이 지속될 경우 시스템 내부의 주요 부품 또는 시스템 전체의 손상을 야기할 수 있다. 따라서 연소기 운행 시에 다양한 현상들의 분명한 이해, 정확한 제어 방법과 운전 영역 선택이 필요하다.

특히, 주어진 유동 섭동으로부터의 열발생 섭동에 대한 메커니즘이 이러한 연소불안정 현상에 대한 가장 중요한 인자로 여겨지고 있으며⁽¹⁻⁷⁾, 이는 화염전달함수

(Received: 23 Jan 2017, Received in revised form: 7 Mar 2017, Accepted: 8 Mar 2017)

*강릉원주대학교 기계자동차공학부

[†]책임저자, 회원

E-mail : dskim@gwnu.ac.kr

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

(Flame transfer function)로 정의될 수 있다. Eq. (1)과 (2)는 주어진 유동 섭동 중, 각각 속도 섭동에 대한 화염 전달함수(FTF_u)와 당량비 섭동이 존재할 때의 화염 전달함수(FTF_ϕ)를 표현한 것이다.

$$FTF_u(\omega) = \frac{\dot{Q}'/\bar{Q}}{u'/\bar{u}} = n_u(\omega)e^{i\omega\tau_u} \quad (1)$$

$$FTF_\phi(\omega) = \frac{\dot{Q}'/\bar{Q}}{\phi'/\bar{\phi}} = n_\phi(\omega)e^{i\omega\tau_\phi} \quad (2)$$

위의 식에서 ω 는 각진동수이며 화염전달함수는 주파수만의 함수임을 나타낸다. 식에서 n 은 화염전달함수의 이득값(Gain)을 나타내고 τ 는 시간지연(Time delay)을 의미한다. n 은 노즐의 섭동이 열발생 섭동에 미치는 영향을 크기로 나타낸 것이고, τ 는 노즐의 섭동과 열발생 섭동간의 시간지연을 나타낸다.

기존 저자들은 완전 예혼합 시스템($\phi' = 0$)에서의 속도 섭동에 대한 화염의 동특성에 대한 모델링 및 응용 방법의 연구 결과⁽²⁻⁴⁾를 소개한 바가 있다. 그러나 희박 예혼합 시스템을 적용한 가스터빈 연소기라 하더라도 완전 예혼합 연소를 적용하는 것은 실질적으로 불가능하고, 부분 예혼합 화염의 방식을 갖는 것이 일반적이다⁽⁸⁻⁹⁾. 이러한 부분 예혼합 시스템에서는 속도 섭동과 더불어, 당량비 섭동이 공존하게 되고 속도 섭동에 대한 화염 전달함수(즉, FTF_u)의 연구 대비, 당량비 섭동에 대한 연소 특성(FTF_ϕ)의 세부 연구 결과는 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 Lab-scale로 제작된 부분 예혼합 모델 연소기^(8,9)를 모델링 대상으로 선정하여, 화염 구조를 실험 결과와 비교하고, 당량비 섭동에 의한 화염 전달함수 모델링 결과를 실험 결과로부터 검증하였고, 또한 본 모델링 기법에서의 한계점을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 해석 대상 연소기

Fig. 1은 본 연구에서 모델링 대상으로 선정한 연소기의 형상을 보여준다. Fig. 1(a)는 Yoon 등^(8,9)의 연구에서 사용한 부분 예혼합 연소기로서, 연소기의 형상은 상류 노즐부에 공기와 연료가 따로 공급되며 연료가 작은 관을 통해 스윌러로 유입되어 공기와 혼합된다. 이 공간에서부터 연소기 입구까지는 약 3 mm의 거리로서, 충분한 연료와 공기가 혼합되어 유입되는 완전 예혼합 방식과는 다르게 부분 예혼합 특성을 띄게 된다. 또한 유동

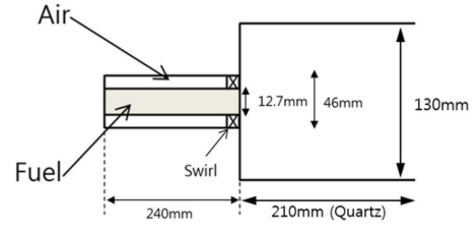


Fig. 1 Schematic of the model combustor, Dimension in millimeters^(8,9)

해석이 큰 영향을 미치는 스윌러는 각각 두께 3.7 mm와 45도 기울기를 갖는 16개의 베인으로 구성되어 있다. 연소실의 형상은 직경이 130 mm이며 연소기 후단은 대기 중으로 완전히 열린 경계를 사용하였다. 또한 Yoon 등^(8,9)은 부분 예혼합 화염에서의 화염 전달함수를 구하기 위하여, 공기는 정상 상태로 유입되는 반면에, 연료의 유량은 사이렌(siren) 방식의 유동 가진 장치를 이용하여 당량비 섭동에 대한 열발생 섭동을 측정하였고, 본 모델링 연구에서도 동일한 방법을 적용하였다.

2.2 해석 조건

Table 1은 본 연구에서 적용된 연소기의 운전 조건을 나타낸다. 연료 조성은 Yoon 등^(8,9)의 연구 조건 중에서, 수소함량 비율에 따라서 두 가지 케이스로 나누어 진행하였다. 표에서 나타난 H25는 수소 25%와 메탄 75%를 의미하고 H50은 수소 50%와 메탄 50%의 조성을 나타낸다. 부분 예혼합 화염의 경우에는 당량비 섭동(ϕ')을 평균 당량비의 10%로 유지한 후, 화염 전달함수를 구현하였다. 섭동 주파수는 200~600 Hz 구간에서 수행하였다.

Table 1 Selected test conditions for model validation

Conditions		H25	H50
Fuel Composition [%]	H_2	25	50
	CH_4	75	50
Air velocity [m/s]		21.49	
Fuel velocity [m/s]		8.79	11.15
Equivalence ratio		0.57	0.56
Forcing frequency [Hz]		200~600	
Forcing amplitude		10%	
Forcing mode		Equivalence ratio modulation	

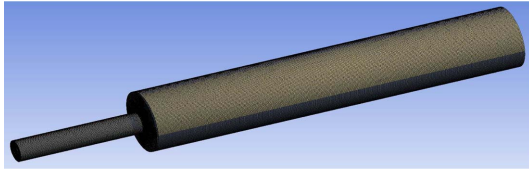


Fig. 2 Mesh of the model combustor

2.3 격자계 신뢰성 검증

격자계는 Fig. 2에서처럼, 복잡한 연소기의 형상을 고려하기 위하여 hybrid(hexahedral/prismatic/tetrahedral)로 구성하였다. 벽면은 복잡한 난류의 영향을 고려하여 y^+ 값을 30이하로 하여 경계층을 구성하였다. 격자계는 약 200만개, 350만개, 450만개의 3가지 격자계를 검토하였고 Fig. 3과 같이 격자 민감도 분석을 통해 결정하였다. 연소기 입구에서부터 축방향으로 각각 화염의 중심 영역과 축방향 속도가 가장 크게 분포하는 영역, 그리고 유동이 확장하여 벽면에 근접하게 되는 영역인 0.015 m, 0.030 m, 0.045 m에서 반경방향에 대한 축방향 속도(axial velocity)와 난류 운동 에너지(turbulent kinetic energy)의 분포를 확인하였다. 결과에서 보이듯이, 200만개와 350만개의 격자를 비교하면 Fig. 3의 (a)와 (b)에서 모두 큰 차이를 보이고 있으나, 350만개 이상의 격자를 구성할 경우 그 차이는 거의 사라지는 것으로 나타났고, 이러한 격자 민감도 해석 결과로부터 본 연구에서는 350만개의 격자계를 구성하여 모델링하였다.

2.4 수치해석 방법

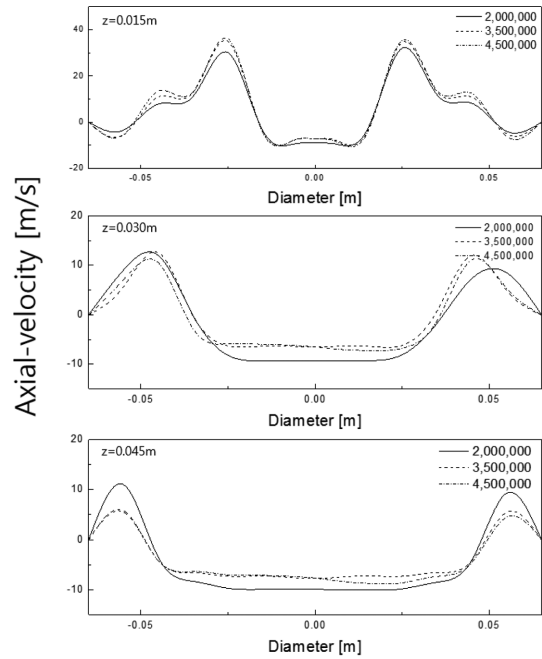
난류 유동 해석을 위해 필요한 지배 방정식인 질량 보존 방정식과 운동량 방정식을 Eq. (3)와 (4)에 나타냈다.

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) = 0 \quad (3)$$

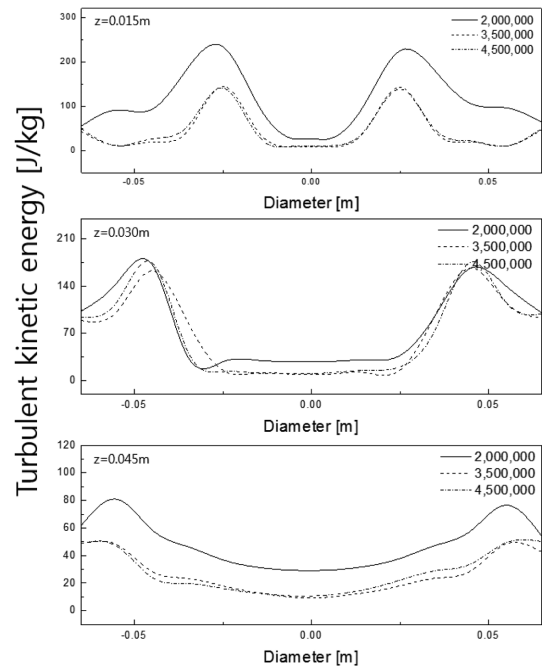
$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - 2 \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\bar{\rho} \tilde{u}_i u_i^*) \quad (4)$$

위 식에서 각각 ρ 는 밀도, t 는 시간, p , u 는 압력과 점성계수를 의미한다.

본 논문은 연소실 벽면의 난류영향을 고려하기 위하여 realizable $k-\varepsilon$ scalable wall function을 사용하였다. 이와 같은 난류 모델은 Shih *et al.* 등⁽¹¹⁾의 연구로 고안된 것으로 ‘realizable’은 난류 유동의 물리적 특성과 일치하는 레이놀즈 응력에서 특정한 수학적 제약을 만족한다는 것을 의미한다^(9,10).



(a) Axial velocity



(b) Turbulent kinetic energy

Fig. 3 Grid sensitivity test results

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{k}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{k} \tilde{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \tilde{\varepsilon} + Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{\epsilon}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{\epsilon} u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\tilde{\epsilon}}} \right) \frac{\partial \tilde{\epsilon}}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_{\tilde{\epsilon}} - \rho C_2 \frac{\tilde{\epsilon}^2}{k + \sqrt{v \tilde{\epsilon}}} + C_1 \tilde{\epsilon} \frac{\tilde{\epsilon}}{k} C_{3\tilde{\epsilon}} C_b + S_{\tilde{\epsilon}} \quad (6)$$

Eq. (5)과 (6)은 k 와 ϵ 에 대한 수송방정식을 나타내었다. G_k 와 G_b 는 평균 속도 구배와 부력으로 인한 난류 운동에너지의 생성을 의미하고, Y_M 은 압축성 난류의 섭동 확장의 원인을 의미한다. C_2 , $C_{1\epsilon}$ 은 상수이며, ρ_k , ρ_ϵ 은 k 와 ϵ 에 대한 난류 Prandtl number이다. 그리고 S_k , S_ϵ 은 생성항이다. 식의 C_1 은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\eta = S_{\tilde{\epsilon}}^k, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (7)$$

연소 모델(Combustion model)은 FR/ED (Finite-rate/Eddy dissipation)와 PPM(Partially premixed model)을 적용하였다.

복사 모델(Radiation model)은 복사 열전달 방정식을 풀기 위하여 DO(Discrete ordinates)모델을 사용하였다. 복사 열전달량은 Eq. (8)에 표현된 복사 강도(Radiation intensity)의 지배 방정식 Radiative transfer equation으로 계산되었다⁽¹²⁾.

$$\frac{\partial I(\vec{r}, \vec{s})}{\partial S} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = xn^2 \frac{T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\sigma_s} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \psi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (8)$$

해석은 상용 코드인 ANSYS Fluent 16.1을 사용하였고 Fig. 2의 격자계 형상을 적용하였다. 계산 시 압력 기반의 Coupled 알고리즘을 사용하였다. 화학반응은 CHEMKIN⁽¹³⁾을 도입하여 진행하였고, 정확한 계산을 위해 Solution method는 모두 Second order upwind를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 정상상태 유동장 모델링

Fig. 4와 5는 연소가 진행되지 않는 냉간조건의 해석

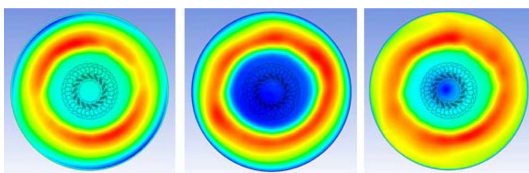


Fig. 4 Z = 27 mm view of cold flow calculations

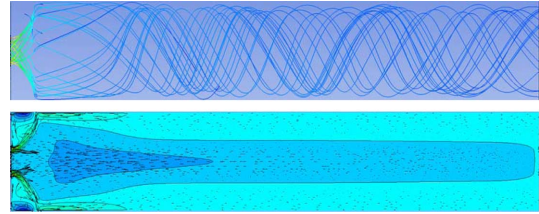


Fig. 5 Z-direction velocity and velocity streamline of cold flow calculations

결과를 나타내었다. Fig. 5의 유선(streamline) 결과를 통해서 스월에 의한 회전 유동을 확인할 수 있다. 또한 연소실 중심 단면의 축 방향 유동 결과는 흐름이 축대칭으로 나타나는 것을 확인하였다.

3.2 화염 구조 모델링

Fig. 6에 나타낸 그림은 두 가지 연료 조건 H25와 H50에 대하여 부분 예혼합 화염의 정상 상태 모델링 결과를 FR/ED와 PPM 연소 모델을 적용하였을 때의 구조를 실험상에서 측정된 결과와 비교한 것이다. 두 연료 조성 모두에서 나타나듯이 부분 예혼합 화염의 경우에 FR/ED 연소 모델 대비, PPM의 연소 모델이 화염 구조와 전체적인 길이를 비교할 때, 더욱 실제 측정 결과에 근접한 것으로 나타났으며, 이러한 정상 상태 화염 구조 모델링 결과로부터, 향후 화염전달함수 모델링시 PPM 연소 모델을 적용하였다.

Fig. 7은 H25 조건에서 200 Hz, $\phi/\phi = 0.1$ 의 상태로 입구 당량비 섭동이 주어질 때, 비정상 상태의 한주기동

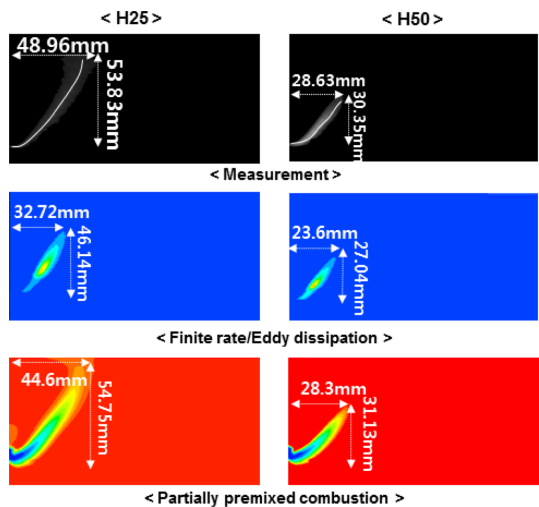


Fig. 6 Comparison of calculated steady-state flame images with measured result for H25 and H50 flames

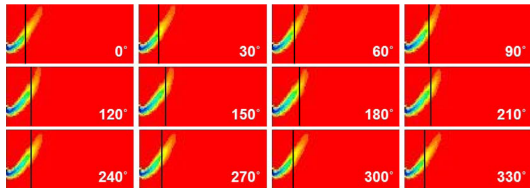


Fig. 7 Unsteady flame images during one forcing cycle for H25 under 200Hz equivalence ratio modulation

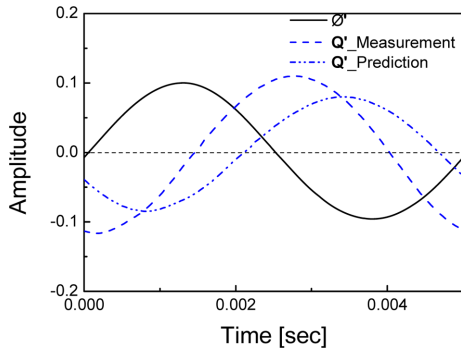


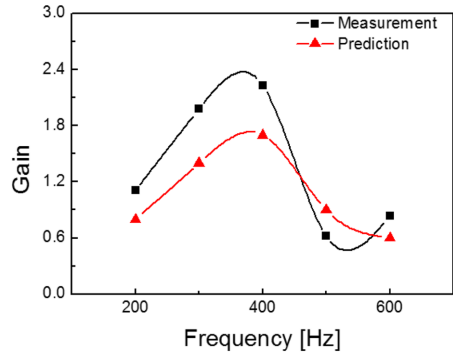
Fig. 8 Comparison of calculated results for equivalence ratio with measured data under H25

안의 화염 형상의 변화를 나타낸 것이다. 이러한 화염의 변화 현상은 한주기 동안의 열발생을 섭동에 영향을 미치게 되고 열발생을 섭동에 의해서 연소 불안정 현상이 크게 영향을 받게 된다. 이에 대한 세부 내용은 다음 결과에서 확인할 수 있다.

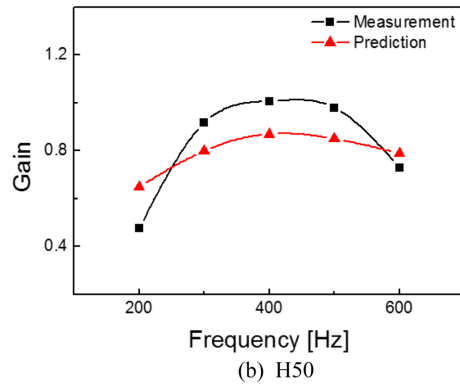
Fig. 8은 Fig. 7과 같은 조건에서 노즐에서의 당량비 섭동($\phi/\bar{\phi}$)과 연소실 전체에서 측정 또는 모델링된 열 발생 섭동(Q'/\bar{Q})을 한 그래프에 도시한 것이다. 실험값에서는 주어진 당량비 섭동 진폭($\phi/\bar{\phi}=0.1$)에 대하여 Q'/\bar{Q} 의 값이 0.11이고, 위상차는 1.4 msec인 것으로 나타났으나, 반면에 모델링 결과에서는 Q'/\bar{Q} 의 값이 0.08이고, 위상차는 1.8 msec로 계산되었다.

이와 유사한 오차가 예혼합 시스템에서의 화염전달함수 모델링 연구에 대한 저자들의 이전 연구 결과^(2,4)에서도 보고된 바가 있는데, 이는 본 연구에서 적용된 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 기반의 소산해(dissipative solution)의 특징이 연소 불안정 해석에 다소 불리한 조건으로 작용할 수 있기 때문에 나타나는 오차로 여겨진다.

Fig. 9와 10은 본 해석을 더욱 넓은 주파수 영역으로 확장하여 부분 예혼합 화염에 대하여 주어진 당량비 섭동에 따른 이득값(gain)과 위상차(phase)를 두 가지 서로 다른 연료 조성에 대하여 주파수의 함수로 나타낸 것이



(a) H25



(b) H50

Fig. 9 Comparison of calculated gain for flame transfer function with measured data (H25 and H50)

다. 모델링 이득값을 실험 결과와 비교할 때, 두 가지 연료 조성에서 모두 주파수 변화에 따른 정성적인 거동은 유사하게 예측하였다. 예로써, H25의 화염에서 300~400 Hz 근처에서 이득값의 최대치가 나타나고 이후 주파수의 증가에 따라 이득값이 감소하는 것으로 나타났다. 한편 위상차의 모델링 및 실험 결과에서는 두 연료 조성에서 모두 주파수 증가와 더불어 선형적인 위상차의 증가가 발견되었다. 즉, 이전 저자들의 연구⁽²⁾에서 나타난 것과 같이 위상차-주파수의 선형 관계 그래프로부터 유동 섭동 인자가 화염면에 전달되어 열발생 섭동으로 나타나는 시간 지연(τ)을 유추할 수 있게 된다. 그림들에서 보이듯이 부분 예혼합 화염의 화염전달함수 모델링 결과, 정량적인 측면에서는 실험값과 어느 정도의 오차가 있는 것으로 나타났다. 이러한 오차는 이러한 오차 원인 중의 하나는 본 연구에서 적용하고 있는 RANS 기반의 CFD 기법의 한계로부터 기인하였을 것으로 생각된다. 특히 화염 구조 및 화학 반응의 변화(예, 연료 조성의 변화)와 유동 섭동의 변화(예, 주파수 응답 특성)에 따라

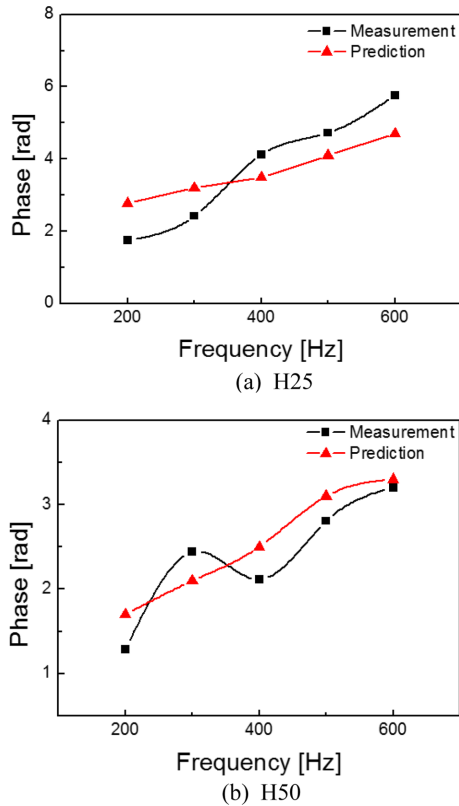


Fig. 10 Comparison of calculated phase for flame transfer function with measured data (H25 and H50)

이러한 오차의 절대값은 조건별로 상이한 것으로 나타났다. 이러한 단점을 개선하고자, LES(Large Eddy Simulation)를 이용한 연소불안정 예측 기술⁽¹⁴⁾이 시도되고 있으나, 현재의 발달된 컴퓨터 하드웨어 시스템으로도 많은 시간과 비용이 발생되고 있어서 본 연구와 같이 다양한 조건에서의 간편한 모델링 적용이 쉽지 않은 실정이다. 그러나, 본 연구에서 전술하였던 결과와 더불어 저자들의 이전 연구 결과^(2,7)에서 보이듯이, 연소 모델과 냉각 조건 및 경계 조건의 최적화를 통하여 화염 구조를 계측 결과와 근접하게 예측하는데 성공할 경우, RANS 기반의 해석으로도 충분히 연소 동특성을 정성적으로 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결론 및 향후 계획

부분 예혼합 시스템에서의 연소 불안정 현상은 당량비 진동에 따른 열발생 섭동이 주요한 원인 중의 하나

로 여겨지고 있다. 그러나, 완전 예혼합 화염에서의 속도 섭동에 대한 화염전달함수를 구하는 노력은 다양하게 이루어지고 있는 반면에 당량비 섭동에 대한 화염의 진동에 대한 연구는 아직 미미한 실정이다. 본 연구에서는 당량비 섭동에 대한 열발생 섭동을 구하여 부분 예혼합 화염에서의 화염전달함수 모델링 기법을 소개하였다.

연구 결과, RANS 모델링 기반의 해석으로부터 당량비 섭동에 대한 주요 화염의 동특성인 이득값과 위상차의 정확한 정량적인 데이터를 얻는데는 한계가 있는 것으로 나타났다. 그러나, 최적화된 연소 모델과 냉각 및 경계 조건을 고려하였을 경우, 정성적인 연소 동특성의 모델링 결과를 얻는 데는 본 연구에서 시도한 RANS 기반의 CFD 모델링 연구가 유용한 도구가 될 수 있는 것으로 확인되었다.

본 연구는 가스터빈 연소기에서 부분 예혼합 연소 특성에 대한 기초 연구 결과로서, 향후 속도 섭동과 당량비 섭동이 모두 존재하는 시스템에 대한 모델링 연구가 진행될 계획이다. 이로부터 실제 시스템에서 발생하는 연소불안정 현상에 대한 더욱 구체적인 유동 섭동-열발생 간의 메커니즘을 이해할 수 있는 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2015R1D1A1A01058410)의 지원을 받아 수행된 결과입니다. 또한, 본 연구의 실험 데이터를 제공해 주신 서울대학교 RPL(Rocket Propulsion Lab.)의 윤영빈 교수님과 관련 연구원들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 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 for Gas Turbines and Power*, Vol. 132, No. 4, 2010, pp. 0742-4795.
- (2) Y. Pyo, J. Kim, and D. Kim, "Time Lag Analysis Using Phase of Flame Transfer Function", *Journal of the ILASS-Korea*, Vol. 21, No. 2, 2016, pp. 104-110.

- (3) D. Kim, "Introduction to Thermoacoustic Models for Combustion Instability Prediction Using Flame Transfer Function", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 15, No. 6, 2011, pp. 98-106.
- (4) D. Kim and J. Lee, "Flame Response Modeling for Lean Premixed Combustors Using CFD", *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 38, No. 9, 2014, pp.773-779.
- (5) D. Kim, Y. Jin, G. Hwang and S. Min, "Review on the Gas Turbine Combustor Sizing Methodologies using Fuel Atomization and Evaporation Characteristics", *Journal of the ILASS-Korea*, Vol. 19, No. 3, 2014, pp. 101-108.
- (6) J. Kim, J. Kim and D. Kim, "Limit cycle amplitude prediction using results of flame describing function modeling", *Journal of the Korea Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 6, 2016, pp. 46-53.
- (7) J. Kim and D. Kim, "Combustion Instability Prediction Using 1D Thermoacoustic Model in a Gas Turbine Combustor", *Journal of the ILASS-Korea*, Vol. 20, No. 4, 2015, pp. 241-246.
- (8) J. Yoon, M. Kim, J. Hwang, J. Lee, and Y. Yoon, "Effect of Fuel-Air Mixture Velocity on Combustion Instability of a Model Gas Turbine Combustor", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 54, No. 1, 2013, pp. 92-101.
- (9) S. Joo, J. Yoon, J. Kim, M. Lee, and Y. Yoon, "NOx Emissions Characteristics of the Partially Premixed Combustion of H₂/CO/CH₄ Syngas Using Artificial Neural Networks", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 80, 2015, pp. 436-444.
- (10) Y. Eldrainy, M. Jaafar, and T. Lazim, "Cold Flow Investigation of Primary Zone Characteristics in Combustor Utilizing Axial Air Swirler", *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, Vol. 5, No. 2, 2011, pp. 812-818.
- (11) T. Shih, W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu, "A new k-ε Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows", *Computers and fluids*, Vol. 24, No. 3, 1995, pp. 227-238.
- (12) ANSYS Fluent 16.1 Users Guide, ANSYS inc., 2014.
- (13) R. Sankaran, E. Hawkes, J. Chen, T. LU and C. Law, "Structure of a spatially developing turbulent lean methane-air Bunsen flame", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, No. 1, 2007, pp. 1291-1298.
- (14) P. Wolf, R. Balakrishnan, G. Staffelbach, L. Gicquel and T. Poinsot, "Using LES to study Reacting Flows and Instabilities in Annular Combustion Chambers", *Journal of the Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 88, No. 1-2, pp. 191-206.