

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.9.773>

ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5234(Online)

## CFD를 이용한 희박 예혼합 연소기에서의 연소 응답 모델링<sup>§</sup>

김 대 식<sup>\*†</sup> · 이 정 원<sup>\*\*</sup>

\* 강릉원주대학교 기계자동차공학부, \*\* ANSYS Korea

### Flame Response Modeling for Lean Premixed Combustors Using CFD

Daesik Kim<sup>\*†</sup> and Jeongwon Lee<sup>\*\*</sup>

\* School of Mechanical and Automotive Engineering, Gangneung-Wonju Nat'l Univ., \*\* ANSYS Korea

(Received June 3, 2014 ; Revised July 17, 2014 ; Accepted July 17, 2014)

**Key Words:** Combustion Instability(연소 불안정), Gas Turbine Combustor(가스터빈 연소기), Flame Transfer Function(화염전달함수), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

**초록:** 가스터빈 희박 예혼합 연소기에서 발생하는 연소 불안정 현상을 모델링하기 위해서는 화염의 동특성에 대한 정량적, 정성적 분석이 필수적이다. 이를 위하여 화염전달함수가 전산유체역학을 통하여 모델링되었다. 기존 화염전달함수의 연구 결과로부터, 화염전달함수의 결과는 화염의 구조에 크게 의존하는 것으로 알려졌다. 본 연구에서는 실제 계측된 화염의 구조와 유사한 형상을 갖도록 열전달 조건을 최적화한 후, 동일 조건에서 화염전달함수가 모델링되었다. 화염의 형상을 정확하게 예측할 수 있다면, 이로부터 전달함수의 이득값과 위상차의 모델링 결과 역시 실험값과 유사한 거동을 확인할 수 있었다.

**Abstract:** A qualitative and quantitative analysis on flame dynamics is required to model combustion instability characteristics in gas turbine lean premixed combustors. The current paper shows the flame transfer function modeling results using CFD(Computational Fluid Dynamics) techniques for the flame dynamics study. It is generally known that flame shapes determine the basic characteristics of the flame transfer function. The comparisons of the modeled flame shapes with the measured ones were made using the optimized heat transfer conditions. Modeling results of the flame transfer function show the close behaviors to the measured data with a reasonable accuracy if the flame geometry can be exactly captured.

#### - 기호설명 -

$FTF$  : 화염전달함수

$k$  : 난류운동에너지

$n$  : 이득값

$p$  : 압력

$Q, q$  : 열발생율

$S$  : 면적

$t$  : 시간

$u$  : 속도

$z$  : 축방향거리

$\gamma$  : 비열비

$\delta_{ij}$  : 단위텐서

$\epsilon$  : 난류소산율

$\mu$  : 점성계수

$\phi$  : 위상차

$\rho$  : 밀도

$\tau$  : 지연시간

$\omega$  : 각진동수

#### 1. 서론

가스터빈 사용의 증가와 더불어, 강화되는 배출 가스 규제에 인하여 기존의 확산 화염 방식에서 배출되는 다량의 NOx는 큰 문제 중의 하나로 대두되어 왔다. 이로부터 연료와 공기를 완전히 혼합하여 얻은 균일한 혼합기를 연소기에 공급하

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 강원지회 춘계 학술대회(2014. 5. 16., 강원대) 발표논문임.

† Corresponding Author, [dkim@gwnu.ac.kr](mailto:dkim@gwnu.ac.kr)

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

고, 연료를 희박 한계 영역에 가깝게 유지하면서 화염의 온도를 낮추는 희박 예혼합 연소 시스템에 대한 관심과 적용이 크게 증가하는 추세이다.

그러나 희박 예혼합 연소기는 운전이 희박 한계 영역의 매우 불안정한 상태에서 이루어지고, 이러한 영역에서의 화염은 외부 요소들의 작은 유동 섭동에 쉽게 영향을 받게 된다. 이러한 불안정 화염과 연소기 고유 압력파의 상호 작용에 의하여 나타나는 연소 불안정(combustion instability) 현상은 희박 예혼합 연소기의 운영을 어렵게 하는 가장 중요한 인자로 여겨지고 있다.<sup>(1-6)</sup>

이를 위하여 관련 연구 및 산업 기관에서는 연소 불안정 예측 기술 개발에 관한 많은 노력을 경주하고 있고, 이에 대한 새로운 기술들이 앞다투어 소개되고 있다. 저자의 이전 연구<sup>(7-9)</sup>에서는 연소시스템의 각 부분을 균일한 음향 요소들로 나누고 각 요소간의 경계에서 일치 조건을 통해 전체를 해석하는 1차원 열음향 네트워크 모델을 소개하였다. 또한, 이보다 더욱 고차원화된 방법으로 프랑스의 CERFACS<sup>(10)</sup> 및 국내의 항공우주연구원<sup>(11)</sup>에서는 Helmholtz 방정식에 기반을 둔 3차원 유한요소법 해석코드를 개발하여 소개한 바 있다. 그러나 이러한 연소 불안정 모델들은 모두 어느 정도의 범위 이내에서 음향장 세부 거동 분석에는 성공적인 예측 결과를 보였으나, 열 발생과의 상호 관계를 정량적으로 분석하는데는 한계를 드러내었다.

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

$$\frac{1}{\gamma p_0} \frac{\partial p'}{\partial t} + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} (S u') = \frac{\gamma - 1}{\gamma p_0} \dot{q}' \quad (2)$$

식 (1)과 (2)는 선형 음향 이론에 따른 음속과 음압 사이의 지배방정식을 나타낸 것이다. 특히 식 (2)에서 보이듯이, 열음향 시스템의 해를 구하기 위해서는 연소기에서 발생하는 전체 열발생율( $\dot{q}'$ )을 정량화하는 것이 매우 중요하다. 이를 위하여 가장 많이 적용되고 있는 방법이  $n-\tau$  모델<sup>(5-11)</sup>을 이용한 화염 전달 함수를 구하여 화염으로부터의 열발생율 변화를 예측하는 것이다. 입구 속도 진동에 대한 화염 응답 모델 또는 화염 전달 함수(FTF)의 결과들은 다음 식 (3)과 같은  $n-\tau$ 의 함수로 표현된다.

$$FTF(\omega) = \frac{q'/q_{mean}}{u'/u_{mean}} = n(\omega)e^{i\phi(\omega)} \quad (3)$$

기존의 연구에서는 화염전달함수를 얻기 위하여 실험적 방법에 의존하거나,<sup>(5,6)</sup> 매우 간단한 연소시스템을 가정하여 해석학적인 방법으로 화염 전달함수를 구한 후, 이를 연소모델링 코드에 확장하여 연소불안정을 해석한 결과를 소개하였었다.<sup>(12)</sup> 따라서 실험적으로 연소 동특성이 규명될 수 없었던 운전 조건 및 연료 조성에서는 연소 불안정 모델을 적용할 수가 없었고, 해석학적 모델의 경우, 실제 가스터빈처럼 복잡한 시스템에는 연소불안정 모델링의 검증이 제한적일 수밖에 없었다.

본 연구에서는 상용 CFD 코드를 이용하여 화염전달함수를 계산한 결과를 소개하고자 한다. 이는 실제 연소불안정이 계측된 연소기의 형상에서 화염전달함수 결과를 예측하고, 화염의 형상 모델링 결과를 연소불안정 코드에 적용 가능하게끔 한다. 이로부터, 실험적으로 측정된 화염전달함수의 비용 및 시간에 있어서의 한계를 극복할 수 있고, 비정상상태에서의 연소기 내부의 음속 분포 및 유동 속도 등 연소장의 세부 데이터 분석을 용이하게 한다. 본 연구에서는 이에 대한 초기 연구 결과로서, 기존에 실험적으로 규명된 산업용 가스터빈 노즐에서 화염전달함수를 모델링하고, 화염 형상을 비교하고자 한다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 해석 대상 연소기 및 해석 조건

Figure 1은 본 논문에서 해석 대상으로 선정한 연소기 및 노즐의 개략도이다. 본 연구에서는 Kim 등<sup>(5)</sup>의 연구에서 소개된 연소기를 해석 대상으로 선정하고, 실험 결과와의 비교를 통하여 모

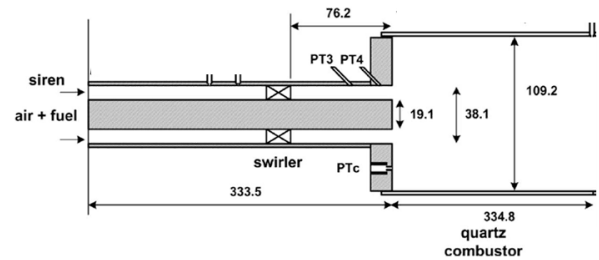


Fig. 1 Schematic of the model combustor, Dimensions in millimeters<sup>(5)</sup>

**Table 1** Selected test conditions for model validation

Inlet pressure	1atm
Inlet temperature	200℃
Mixture velocity	60m/s
Equivalence ratio	0.6
Fuel composition	100%CH <sub>4</sub>
Modulation frequency	100Hz
Modulation amplitude ( $u'/u_{mean}$ )	10%

델 검증을 시도하였다.

그림에서 보이듯이, 연소기 후방을 완전 개방하여 시스템 음향 특성을 배제할 수 있도록 고안되었다. 또한 사이렌 방식의 유동 변조 장치가 노즐 상류에 설치되어 관심 영역의 주파수 및 진폭을 갖는 비정상 유동이 노즐과 스윌러를 통하여 연소기로 유입되고, 화염 구조 및 열발생을 예측이 가능하도록 하기 위하여 109.2mm의 내경과 334.8mm의 길이를 갖는 석영 재질의 연소기가 사용되었다.

Table 1은 모델 개발을 위해 사용된 연소기의 운전 조건을 나타낸다. 당량비의 섭동이 없는 완전 예혼합 화염(perfectly premixed flame)의 경우로서, 100Hz의 입구 섭동이 평균 속도 60m/s에 대하여 10%인  $6m/s(u'/u_{mean} : 10\%)$ 로 주어졌을 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

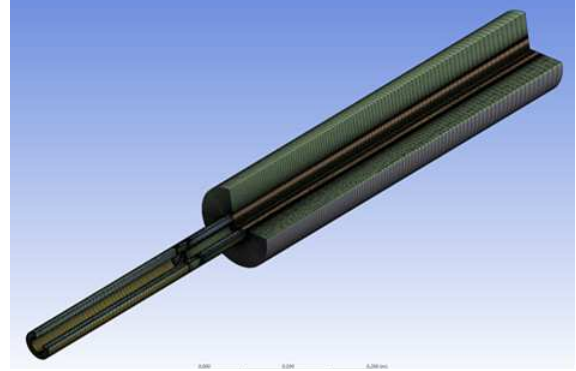
## 2.2 지배 방정식

유동장의 난류 유동 해석을 위해 필요한 질량 및 운동량 보존에 대한 지배방정식은 각각 식 (4)와 (5)에서 나타내었다.

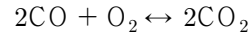
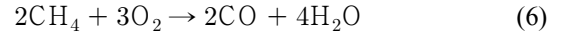
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (5) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u_i u_j}) \end{aligned}$$

주어진 조건의 유동범위에 대해 정확도가 높은 유동장 예측을 위하여 난류 모델은 realizable  $k-\epsilon$  model<sup>(13)</sup>을 사용하였다. 화학 반응을 위하여 최근 가스터빈 연소장과 같은 난류 연소 모델에 많이 적용되고 있는 FR/ED(Finite Rate/Eddy

**Fig. 2** Geometry of the computational domain

Dissipation)<sup>(14,15)</sup> 모델을 선택하였다. 메탄 화염의 화학 반응을 위하여, 공기-메탄 혼합기의 2단계 반응(2-step global reaction)을 채택하였고, 이에 대한 반응 메커니즘은 식 (6)과 같다.



## 2.3 격자계 생성 및 계산 조건

Figure 2는 Fig. 1에서 보여준 해석 대상 연소기를 위한 전처리 작업인 격자 생성 결과를 보여준다. 도면화 및 격자 생성을 위하여 ANSYS Meshing 15.0<sup>(14)</sup>이 적용되었으며, 연소기 입구 노즐 부분과 화염의 재순환이 이루어지는 연소기 입구 영역은 조밀한 격자를 사용하여 해상도를 높였으며, 연소기 하류 쪽은 계산 시간 단축을 위하여 상대적으로 성긴 격자를 사용하였다. Figure 2에서 보이는 격자계는 전체 67만개의 cell로 구성된다. 또한, 화염전달함수(unsteady) 해석의 경우에 노즐 입구에서는 완전히 혼합된 연료-공기 혼합기가 실험 조건에 맞는 주파수와 진폭으로 초킹되어 유입되는 것으로 해석하였고, 연소실 출구는 실제 실험조건과 동일하게 대기 중으로 완전히 열려있는 경계조건을 사용하였다.

계산을 위하여 압력 기반 해석 모듈(pressure based solver)을 사용하였으며, 수렴 속도를 높이기 위하여 Coupled 알고리즘을 채택하였고, 수렴의 정확성을 위하여 second order upwind scheme을 사용하였으며, 범용 열유체 유동해석 코드인 ANSYS Fluent 15.0<sup>(14)</sup>을 이용하여 수치해석을 수행하였다.

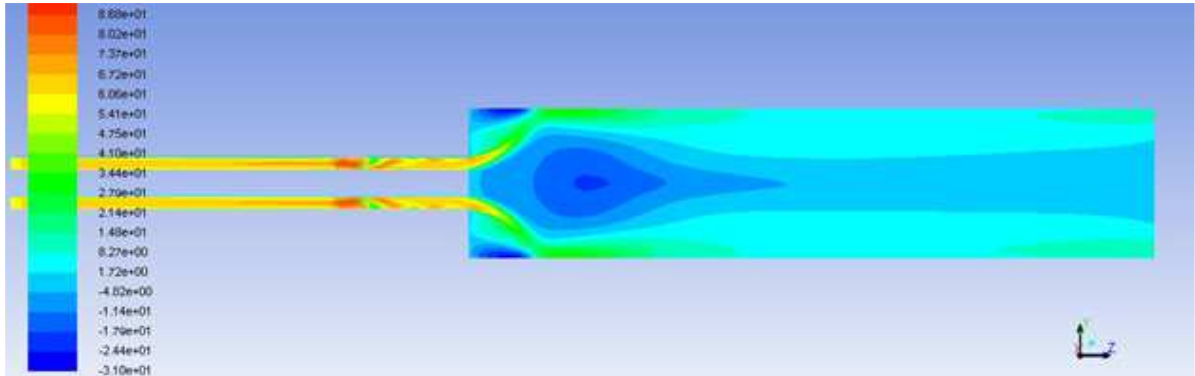
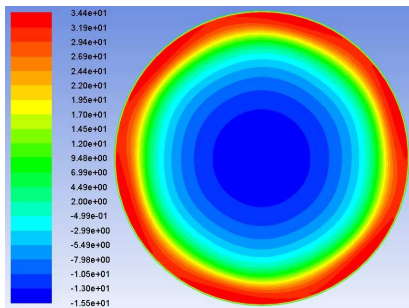
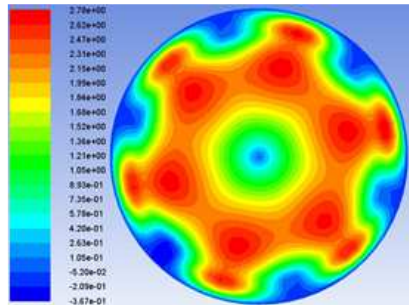


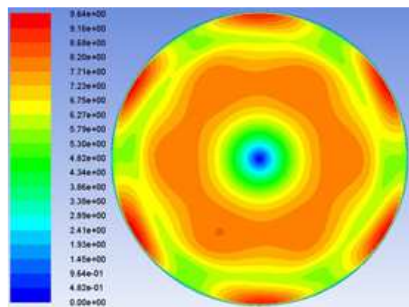
Fig. 3 Axial velocity distributions on y-z plane



(a) Axial velocity



(b) Radial velocity



(c) Tangential velocity

Fig. 4 Velocity components on cross-sectional plane (x-y plane)

### 3. 해석 결과

#### 3.1 유동 해석 결과

Figures 3과 4는 화염이 없는 정상상태에서

Table 1에서 언급된 조건에 대한 냉간 유동(cold flow) 해석 결과를 보여준 것이다. Figure 3은 연소기 길이 방향으로의 속도 분포를 계산한 것이고, Figure 4는 연소기 덤프면으로부터 63mm 하류에서 연소기 단면을 취했을 때 나타나는 속도 분포를 축(axial) 방향, 반경(radial) 방향, 접선(tangential) 방향 속도 성분을 분리하여 각각 도시한 것이다.

먼저 축방향 속도 성분을 보면, 축대칭 유동의 전형적인 패턴을 보여주고 있으며, 반경 및 접선 방향 유동 분포로부터, 실험에 적용된 6개의 스윌러 베인에 의한 60도 주기의 유동 형상을 잘 나타내고 있다. 이러한 CFD를 통한 속도 분포의 해석은 실험에서 얻어질 수 없는 세부 화염전달 함수의 분석을 가능하게끔 한다. Kim 등<sup>(6,7)</sup>은 화염전달함수 측정시 실제 유동 속도와는 다른 유동 섭동 조건에 따라 다른 “convection velocity”가 존재한다고 하였고, 특히 주파수가 증가할수록 동일 입구속도에 대해서도 convection velocity는 감소한다고 발표하였다. 이러한 연소 응답 모델에서 지연시간의 변화는 연소 불안정의 발생 메커니즘에 영향을 미치게 된다. 이로부터, 화염전달함수에서 측정되는 지연시간은 연소기 입구로부터 화염면에 이르기까지의 지연 시간인 평균 유동에 따른 지연시간( $\tau_{conv}$ )과 화학반응 시간에 따른  $\tau_{chem}$ 의 합으로 측정되며, 식 (7)과 같이 표현된다. 따라서 실험을 통해서만 한계가 있는(실험으로는  $\tau_{total}$ 만이 얻어짐) 지연시간에 대한 세부적인 분석( $\tau_{conv}$ 과  $\tau_{chem}$ 의 분리)을 CFD는 가능하게 하고, 이는 연소 불안정 현상을 분석하는데 매우 유용한 자료가 될 것이다. 이에 대한 세부

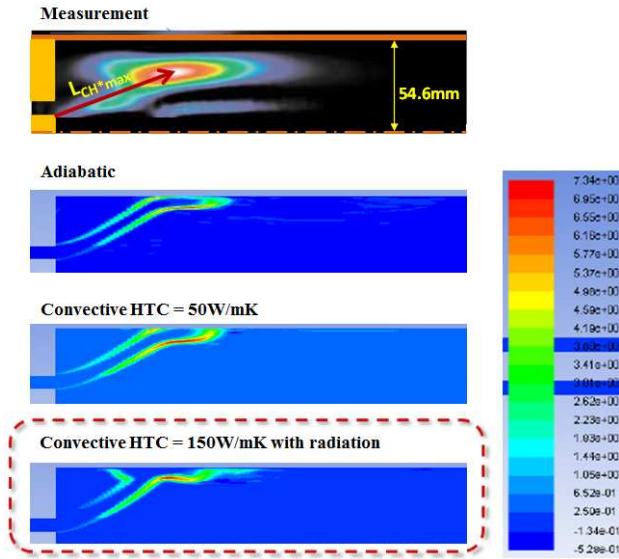


Fig. 5 Steady-state flame geometry under various wall heat transfer conditions

연구 내용은 추후 연구 결과의 발표를 통하여 소개될 예정이다.

$$\tau_{total} = \tau_{conv} + \tau_{chem} \quad (7)$$

### 3.2 연소 해석 결과

Figure 5는 Table 1의 운전 조건에 대하여 다양한 벽면 열전달 조건에서 계산된 정상상태(steady state)의 화염 구조를 동일한 조건에서 측정한 화염과 비교한 것이다. 해석에서는 화염의 형상을 얻어내기 위하여 heat release contour를 사용하였다. 먼저, 벽면 열전달 조건에 따라 화염의 구조가 크게 영향을 받는 것으로 드러났다. 실제 측에서도 연소기 벽면의 냉각을 위하여 많은 양의 냉각 공기가 적용되고 있다. 이로부터, 상대적으로 큰 열전달계수(150W/mK)와 더불어 복사열전달을 고려할 경우, 측정한 화염과 구조 및 크기에 있어서 매우 유사해짐을 알 수 있다. 기존의 연소 동특성에 대한 참고문헌들<sup>(5-7,15)</sup>로부터 화염의 구조는 연소불안정 특성에 크게 영향을 미치는 것으로 드러났다. 이는 동일한 음향 섭동 조건이라 하더라도, 화염의 형상에 따라 연소 동특성이 달라지며, 즉 연소 불안정 현상에 영향을 미치게 됨을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 상기한 바와 같이, 연소 모델 및 벽면 열전달 조건의 최적화를 통하여 실험으로부터 얻어진 화염의 형상과 가장 가까운 해석 조건을 찾고, 동일한 열전달 조건에서 화염전달함수 모델링이 수행되었다.

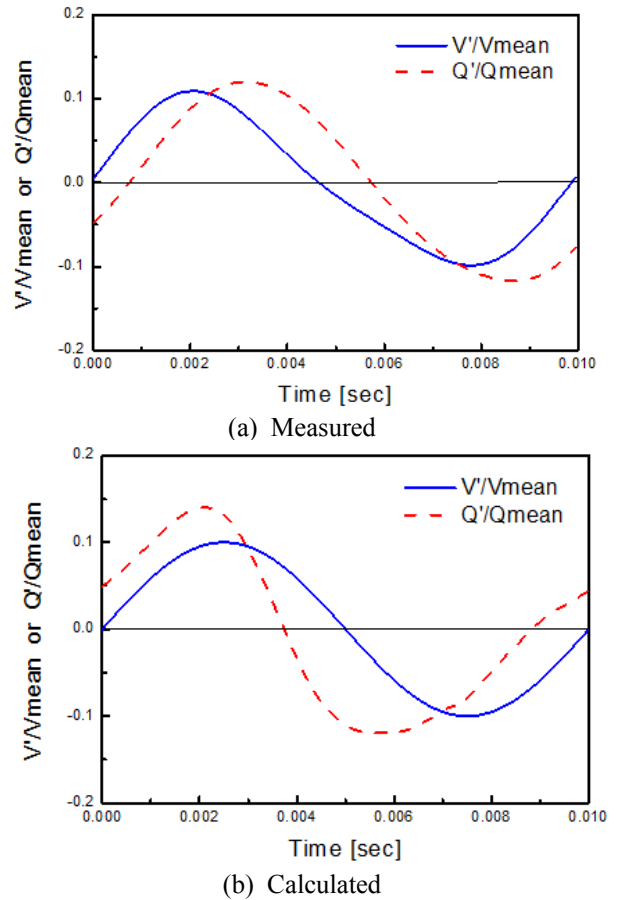


Fig. 6 Comparisons of calculation results for flame transfer function with measured data (100Hz, forcing,  $V' / V_{mean} = 0.1$ )

Figure 6은 Fig. 5와 동일한 운전조건 및 복사와 벽면 열전달을 고려한 상태에서 수행된 화염전달함수 모델링 결과를 참고문헌의 실험 결과와 비교한 것이다. 완전 예혼합 화염에 대하여 100Hz의 진동수로 입구 속도( $u_{mean}=60\text{m/s}$ )에 대하여 10%의 진폭이 연소기 입구에서 주어졌을 경우(즉,  $u' / u_{mean} = 0.1$ ), 연소기에서의 열발생 섭동을 나타내었고, Table 2는 Fig. 6에서 얻어진 결과를 요약한 것이다. 동일한 조건에서 측정된 값은 이득값이 1.2, 속도와 열발생 섭동간의 위상차가 29도였던 반면에, 계산 결과는 이득값이 1.4, 위상차는 -18도인 것으로 나타났다. 여기서, 위상차가 마이너스 부호를 갖는다는 것은 속도 섭동과 열방출과의 섭동 사이에 한 사이클 이상의 위상차가 발생한다는 것을 의미한다.<sup>(6)</sup> 좀 더 폭넓은 비교를 위해서는 더 다양한 진동수와 연료 조성 및 운전 조건에 대한 비교 평가가 필요하다. 이에 대한 연구가 현재 진행 중에 있으며, 향후 연구 결과 발표를 통하여 소개될 예정이다.

**Table 2** Summary of calculated results for flame transfer function

	Measurement	Calculation
Frequency	100Hz	100Hz
$u'/u_{mean}$	0.1	0.1
$q'/q_{mean}$	0.12	0.14
Gain	1.2	1.4
Phase	29deg	-18deg

#### 4. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 가스터빈 회박 예혼합 연소기에서 발생하는 연소불안정 현상을 모델링하기 위하여 요구되는 화염전달함수를 CFD 기법을 통하여 계산하였고, 실험적으로 얻어진 기존 연구 결과와 비교하였다. 실험으로부터 얻어진 화염의 형상과 유사한 화염 구조를 갖는 대류 및 복사 열전달 조건을 설정하였으며, 동일한 조건에서 화염전달함수를 계산한 결과 측정된 값과 유사한 거동을 보이는 것으로 확인되었다. 향후 연구를 통하여 다양한 운전 조건 및 연료 조성에서 동일한 계산을 수행하여 화염전달함수 계산 결과를 검증하여 나갈 계획이다. 또한, 기존의 선형 열음향 해석 코드 및 3차원 유한요소해석 모델과 같은 연소불안정 예측 모델에 본 해석 결과를 적용하여 계산 결과의 타당성을 확보할 예정이다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

(References)

- (1) Cha, D. J., Kim, J. H. and Joo, Y. J., 2009, "Analysis of the Combustion Instability of a Model Gas Turbine Combustor by the Transfer Matrix Method," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 6, pp. 1602~1612.
- (2) Seo, S. B., Ahn, D. H. and Cha, D. J., 2012, "Analysis of the Combustion Oscillation in a Silo-Type Gas Turbine Combustor and Its Suppression," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 4, pp. 1235~1240.
- (3) Lee, D., Park, J., Jin, J. and Lee, M., 2011, "A Simulation for Prediction of Nitrogen Oxide Emissions in Lean Premixed Combustor," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 7, pp. 1871~1878.
- (4) Kang, S., Kim, Y. and Lee, K., 2009, "Numerical Simulation of Structure and NO Formation of Turbulent Lean-Premixed Flames in Gas Turbine Conditions," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 12, pp. 3424~3435.
- (5) Kim, K. and Santavicca, D., 2009, "Linear Stability Analysis of aAcoustically Driven Pressure Oscillations in a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 12, pp. 3436~3447.
- (6) Kim, D., Lee, J., Quay, B., Santavicca, D., Kim, K. and Srinivasan, S., 2010, "Effect of Flame Structure on the Flame Transfer Function in a Premixed Gas Turbine Combustor," *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 132, No. 2, 021502.
- (7) Kim, D., 2011, "Introduction to Flame Transfer Function in a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 9, pp. 975~979.
- (8) Kim, D. and Kim, K., 2014,, "Improved Thermoacoustic Model Considering Heat Release Distribution," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, under publication.
- (9) Kim, D., 2012, "Linear Stability Analysis in a Gas Turbine Combustor Using Thermoacoustic Models," *Journal of the Korean Society of Combustion*, Vol. 17, No. 2, pp. 17~23.
- (10) Nicoud, F., Benoit, L., Sensiau, C. and Poinot, T., 2007, "Acoustic Modes in Combustors with Complex Impedances and Multidimensional Active Flames," *AIAA Journal*, Vol. 45, No. 2, pp. 426~441.
- (11) Kim, S. K., Choi, H. S. and Cha, D. J., 2010, "Development of Helmholtz Solver for Thermo-Acoustic Instability Within Combustion Devices," *Journal of the Korean Society for*

- Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 38, No. 5, pp. 445~455.
- (12) Truffin, K. and Poinso, T., 2005, "Comparison and Extension of Methods for Acoustic Identification of Burners," *Combustion and Flame*, Vol. 142, No. 4, pp. 388~400.
- (13) Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J., 1995, "A New  $k-\epsilon$  Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows," *Computers and fluids*, Vol. 24, No. 3, pp. 227~238.
- (14) ANSYS Fluent 15.0 Users Guide, ANSYS Inc., 2014.
- (15) Abdelgayed, H. M., Abdelghaffar, W. A. and Shorbagy, K. E., 2013, "Flame Vortex Interactions in a Lean Premixed Swirl Stabilized Gas Turbine Combustor - Numerical Computations," *American Journal of Scientific and Industrial Research*, Vol. 4, No. 5, pp. 449~467.