

난류 화염 구조 규명을 위한 조건 평균 측정법

허강열†

Conditional Sampling Measurement to Identify Flame Structures in Turbulent Combustion

Kang Y. Huh

Abstract. Conditional sampling measurement is required for conditional averages as well as unconditional Favre averages to resolve different flame structures of turbulent combustion. A Favre average can be obtained as an integral of conditional average and Favre PDF in terms of the mixture fraction, which is a preferred choice as a sampling variable in diffusion controlled turbulent combustion. MILD combustion data are presented as an example for a conditionally averaged data set and comparison with CMC calculation results.

Key Words : Conditional Averaging(조건 평균), Turbulent Combustion(난류 연소), Flame Structure(화염 구조)

1. 서 론

고온 화학반응인 연소 현상을 동반하는 압축성 난류 유동에서는 대류항 외에 비선형항으로서 화학반응에 의한 생성 혹은 소멸항과 복사열전달이 중요한 역할을 하게 된다. 난류 유동 및 연소에 대한 실험 측정 시 계속 요동하는 스칼라 및 벡터량을 나타내기 위해서는 하나의 순간값만으로는 정확한 정보가 될 수 없으며 또한 모든 순간값들에 대한 엄청난 양의 자료를 제공할 수도 없으므로 적절한 평균값과 확률분포로써 측정값을 나타내 주어야 한다. 무조건적 평균(unconditional average) 측정값으로서 시간 혹은 ensemble 평균에 해당하는 Reynolds 평균과 밀도의 변화를 고려하기 위한 밀도가중 평균으로서 Favre 평균이 있으며 대부분 국내에서의 공학적 목적의 측정 데이터는 단순히 이와 같은 무조건적 평균값만을 제시하고 있다. 그러나 난류 연소장을 정확히 이해하고 해석하기 위해서는 요동하는 주요 스칼라 및 벡터 변수의 평균값과 함께 각 변수의 변동 범위와 확률분포, 상

관 관계 등에 대한 상세 정보가 필요하며 이를 위한 가장 효율적인 방법 중의 하나가 적절한 샘플링 변수에 대한 관련 변수의 조건 평균(conditional average)과 샘플링 변수의 확률 분포(probability density function)로써 나타내는 것이다.

2. 조건 평균의 정의

조건 평균은 요동하는 변수의 실현 가능한 값들의 전체 집합에서 주어진 조건을 만족하는 부분집합의 평균으로서 주어진다. 예를 들어 난류확산 연소에서 i 번째 가스 성분의 농도를 나타내는 질량분율, Y_i 의 조건 평균은 다음과 같이 정의된다.⁽¹⁾

$$Q_i(\eta, \mathbf{x}, t) = \langle Y_i | \eta \rangle \equiv \langle Y_i(\mathbf{x}, t) | \xi(\mathbf{x}, t) = \eta \rangle \quad (1)$$

(1) 여기서 η 는 혼합분율 ξ 에 대한 샘플 공간에서의 독립적 조건 변수이다. 조건평균을 구하기 위해서는 식 (1)에 주어진 바와 같이 화염구조를 나타내는 주요 성분의 농도, 온도 혹은 속도 벡터 등과 혼합분율을 동시에 측정하여야 하며 혼합 분율의 구간을 적절히 나누어 각 구간에 해당하는 데이터에 대한 각각

†포항공과대학교 기계공학과
E-mail: huh@postech.ac.kr

의 평균을 취하게 된다. 무조건적 평균을 취할 경우에는 일반적으로 난류에 의한 요동이 너무 커서 닫힘 문제가 발생하는 반면 조건 평균을 취하게 되면 순간 데이터의 조건 평균에 대한 요동이 훨씬 적어지므로 이를 무시하거나 혹은 선형적 처리를 통해 비선형 화학 반응항에 대한 닫힘 문제를 해결할 수 있다.

3. 난류 연소 해석과 조건 평균

실제 연소기 설계에서 가장 중요한 Favre 평균은 다음과 같이 조건 평균과 확률밀도 함수의 적분 형태로 주어진다.

$$\bar{Y}_i(\mathbf{x}, t) = \int_{\eta=0}^{\eta=1} Q_i(\eta, \mathbf{x}, t) \bar{P}(\eta, \mathbf{x}, t) d\eta \quad (2)$$

여기서 확률밀도함수는 밀도 가중된 Favre PDF를 나타낸다. 난류 연소에서의 화염 구조는 샘플링 변수 공간에서의 연료, 산소, radical 등의 중간 생성물 농도와 온도 분포를 통해 나타내며 난류에 의한 혼합 시간 스케일에 비해 화학 반응의 특성 시간 스케일이 훨씬 짧을 경우에는 모든 스칼라량이 열역학적 평형에

근접하게 된다. Fig. 1에서 점선이 열역학적 평형 상태를 나타내며 측정 온도의 경우 평형값보다 조금 낮고 OH 농도는 생성 반응과 소멸 반응의 특성 시간 차이에 의해 superequilibrium 상태에 있음을 확인할 수 있다. 이와 같이 화학 반응의 특성 시간이 상대적으로 긴 경우, 혹은 OH radical과 같은 중간 생성물에 대해 난류 연소장을 정확히 기술하기 위해서는 스칼라 소산율(scalar dissipation rate, $N \equiv DV\xi g \nabla \xi$)로써 나타내지는 비평형 정도의 크기를 반드시 고려해야 한다. 특히 비평형도는 점화나 소멸 한계 혹은 NOx 등의 배기가스 생성 예측에 중요한 역할을 하게 된다. 스칼라 소산율은 일반적으로 혼합분율의 분산과 난류의 integral time scale의 비에 의해 모델링되며 난류 화염 구조를 결정하는 가장 중요한 파라미터로서 인식되고 있다.

확률밀도함수의 형태를 Gaussian, clipped Gaussian 혹은 beta function 등으로 미리 가정하여 혼합분율의 평균과 분산에 대한 천이방정식의 해로부터 모든 위치에서의 확률밀도함수를 구한다. 다차원 변수 공간에서 Monte Carlo 방법에 의해 직접 확률분포함수에 대한 천이 방정식의 해를 구하는 방법에 의해서도 비교적 단순한 난류화염에 대해 좋은 결과들이 발표되고 있다⁽³⁾. 조건평균을 구하기 위한 모델로서는 층류 화염면(Laminar Flamelet) 모델⁽⁴⁾과 조건평균닫힘(Conditional Moment Closure) 모델⁽¹⁾이 있으며 전자는 임의적인 층류화염면 가정에 기초하는 반면 후자는 관련 보존식에 대한 조건 평균을 취하는 엄밀한 수학적 유도 과정에 기초하고 있다. 실제로 공학적 계산에서 측정치와 비교할 때에 우선 측정된 평균치가 Reynolds 평균과 Favre 평균 중 어디에 더 가까운지에 대해서도 혼선이 있는 경우가 많이 있으며 계산값의 오류도 조건평균보다는 확률밀도함수에 기인하는 경우가 대부분이다. 확률밀도함수를 결정하는 혼합분율에 대한 천이방정식의 해의 오류는 주로 난류유동 모델인 k-e 모델의 부정확성에 기인하는 것이다⁽⁵⁾. 그러나 소멸 및 점화 한계와 부상 화염 등에서의 연소 반응과 난류 혼합의 상호 연계를 정량적으로 이해하기 위해 난류 화염 구조에 대한 적절한 기술이 반드시 전제되어야 한다.

4. 적용 사례 - MILD 연소기^{(6),(7)}

본 실험은 강한 난류 유동과 낮은 산소 농도를 통

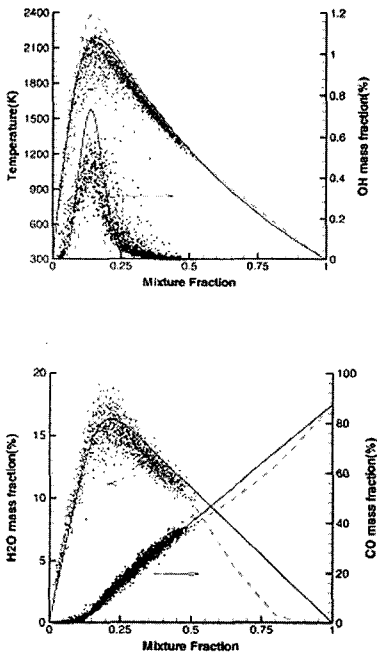


Fig. 1. Typical conditionally sampled data in terms of mixture fraction⁽²⁾.

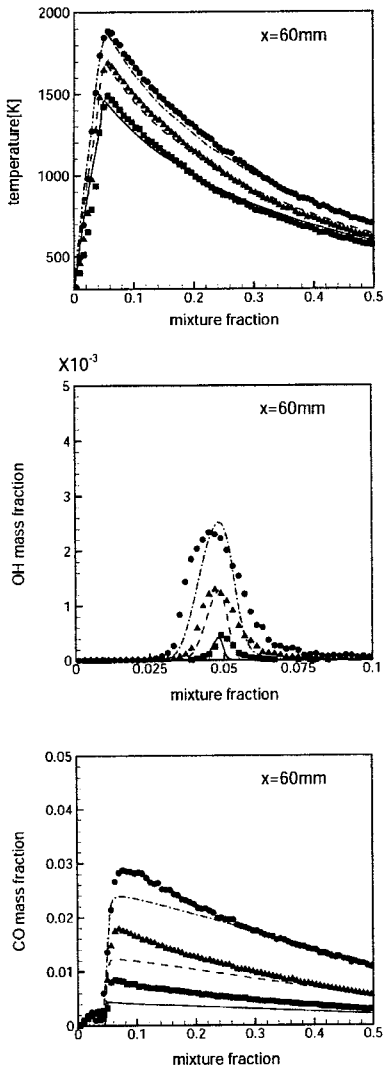


Fig. 2. Conditional mean temperature and mass fractions of OH and CO (squares: HM1 measurement, triangles: HM2 measurement, circles: HM3 measurement, solid line: HM1 prediction, dashed line: HM2 prediction, dashed dotted line: HM3 prediction).

해 높은 연소 효율과 낮은 NOx 배출. 구현하기 위한 MILD(Moderate and Intense Low oxygen Dilution) 연소기를 모사하고 있다. 단열된 중앙 연료 제트와 그 주위를 둘러싸고 있는 환형의 고온 연소가스 제트로 구성되어 있으며 연료 제트의 직경은 4.25 mm, 환형 제트의 내부 직경은 41 mm이다. 연료는 CH₄:H₂의 부피비가 1이며 환형의 2차 버너도 같은 연료 조성을 가진다. 산소 농도의 영향을 알아보기 위해 3%, 6%,

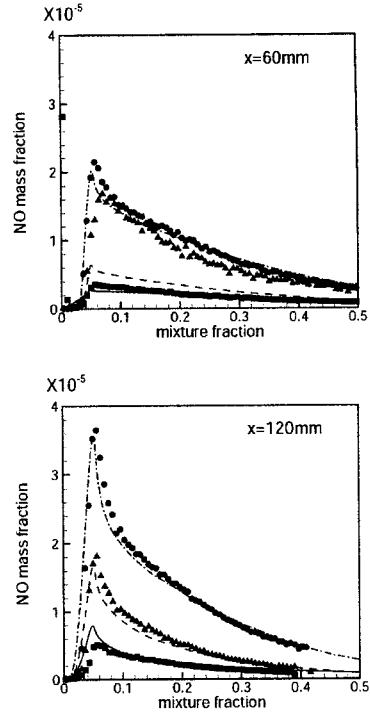


Fig. 3. Conditional mean NO mass fraction.

9%의 산소 농도를 갖도록 하였으며 질소 가스와의 혼합을 통해 온도를 1300 K로 유지하였다. 2차 버너로부터의 H₂O와 CO₂의 농도를 6.5%와 5.5%로 고정하였다. 한 점에서의 Raman/Rayleigh/LIF(Laser Induced Fluorescence)에 의해 MILD 연소 시의 화염 구조와 주요 연소 가스 및 NO, CO, OH 등의 농도를 측정하였다. 고온 환형 제트의 출구 속도는 3.7 m/s, 주변 공기 유동의 속도는 3.2 m/s이며 중앙 제트의 Reynolds 수는 9500이다. 기호 HM1, HM2 and HM3 은 각각 고온 환형 제트에서 O₂ 질량분율 3%, 6% and 9% 을 나타낸다. CMC 계산에서 화학반응 메카니즘은 277 요소 반응 스텝과 47 개의 성분 가스로 이루어진 GRI Mech 2.11을 사용하였다.

Fig. 2는 x = 60mm에서 조건평균 온도와 CO, OH 질량분율을 나타낸다. 계산된 조건평균 온도는 세 가지 경우에 대해 모두 측정치와 잘 일치하고 있다. x = 30 mm에서 HM3의 최고온도는 1830 K 정도이며 HM1에서는 최고온도가 1480 K 정도이다. OH의 농도는 희박한 영역에서는 잘 일치하고 있으나 HM2, HM3의 경우 최고치는 다소 과도하게 예측되었다. 대체로 현재의 조건평균 모델은 산소 농도가 증가하면서 반응 영역의 두께가 증가하는 경향을 잘 재현하고

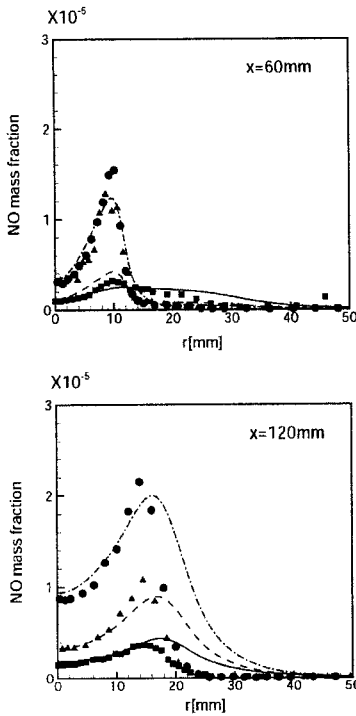


Fig. 4. Radial distributions of the Favre mean NO mass fractions.

있다. Fig. 3에서 NO의 조건평균 농도를 비교적 잘 예측하고 있으며 Fig. 4에서는 $x = 60 \text{ mm}$ 와 120 mm 에서 Favre 평균된 NO 농도의 반경 방향 분포를 나타내었다.

주어진 결과에 따르면 조건평균 난류연소모델이 산소 농도의 변화에 따른 MILD 연소의 화염 구조 변화와 NO 생성에 미치는 영향을 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있다. 조건 평균온도와 연소 생성 가스의 농도도 정확히 예측하였으며 OH와 NO에 대한 일부 차이는 GRI 2.11 화학반응 메커니즘의 저온에서의 부정확성에 일부 기인하는 것은 판단된다. 잘 알려진 바와 같이 GRI 2.11과 GRI 3.0 사이에서 NO 이외에는 별다른 결과의 차이가 없었으며 CO_2 와 H_2O 의 결과는 수소의 differential diffusion의 영향을 무시할 수 없음을 일부 보여주고 있다.

5. 결 론

국내 산업 현장이나 실험실에서 이루어지는 난류

연소장에 대한 실험 측정은 대부분 단순 평균인 무조건적 평균값에 국한되어 있어 난류 요동에 의한 화염 구조나 연소 진행 속도 등에 대한 구체적 정보가 결여되어 있다. 난류 연소장에 대한 좀더 정확한 이해와 예측을 위해서는 혼합분율과 같은 적절한 샘플링 변수와 온도, 농도 등의 관련 변수의 동시 측정을 통해 샘플링 변수 공간에서의 조건평균 분포와 확률 분포를 구하는 것이 반드시 필요하다. 한 예로서 최근 새로운 연소 기법으로서 관심의 대상이 되고 있는 MILD 연소기에서 현상의 정확한 이해와 설계 최적화를 위해 조건 평균 측정과 데이터 해석 기법이 요구되는 사례를 제시하였다.

참고문헌

- 1) Klimenko, A. Y. and Bilger, R. W., "Conditional moment closure for turbulent combustion", 1999, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 25, pp.595-687.
- 2) <http://www.ca.sandia.gov/tdf/Workshop.html>
- 3) Pope, S. B., "Pdf methods for turbulent reactive flows", 1985, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 11, pp.119-192.
- 4) Peters, N., "Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion", 1984, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 10, pp.319-340.
- 5) Kim, S. H. and Huh, K. Y., "Use of conditional moment closure model to predict NO formation in a turbulent CH_4/H_2 flame over a bluff-body", 2002, *Combustion and Flame*, Vol. 130, pp.94-111.
- 6) Dally, B. B., Karpetsis, A. N., Barlow, R. S., "Structure of turbulent non-premixed jet flames in a diluted hot coflow", 2002, *Proc. Combustion Institute*, Vol. 29, pp.1147-1154.
- 7) Kim, S. H., Huh, K. Y. and Dally, B., "Conditional moment closure of turbulent nonpremixed combustion in diluted hot coflow", 2004, *Proc. Combustion Institute*, Vol. 30 (in press).