

수소화염과 상호작용하는 탄화수소화염의 연소특성

오창보* · 이의주* · 최병일**

*부경대학교, **한국기계연구원

Combustion Characteristics of a Hydrogen Flame Interacting with a Hydrocarbon Flame

Oh, Chang Bo* · Lee, Eui Ju* · Choi, Byung-il**

*Pukyong National University, **KIMM

요 약

Numerical simulations were performed for the prediction of the flame structure of a hydrocarbon flame interacting with a hydrogen flame. Methane was used as a hydrocarbon fuel in this study. The interaction of two 1D premixed flames established in counterflow geometry was investigated. The temperature of the flame interacting with each other was much higher and the flame thickness was wider at a global strain of 1000 s^{-1} than normal methane flame.

1. 서 론

최근 에너지 문제가 대두되면서 신재생 에너지의 활용에 대한 기대가 증가되고 있으며, 신재생 에너지 후보 중에서도 수소연료에 대한 기대가치가 매우 높아지고 있다. 그러나 수소는 모든 원자 중 그 크기가 가장 작고 확산속도가 크며 점화에너지가 작은 특징을 가지고 있다. 또한, 산소와의 반응성이 강하여 폭발범위가 넓고 화염전파속도가 매우 큰 가연성 가스이기 때문에 수소의 제조, 수송, 저장 및 이용단계에 있어서 누출, 확산, 점화 및 폭발과 관련된 안전상의 위험이 상존하고 있다.

수소 취급과정에서 사고의 시초는 저장용기의 결함으로 용기에서 대기 중으로 수소가스가 직접 누설되거나 저온의 액체수소가 누설된 후 대기 중에서 증발하면서 증기운을 형성하는 것으로 볼 수 있다. 이렇게 확산된 수소가스는 누적된 후 주위의 고온 점화원에 의해서 점화가 된다면 폭발과 같은 매우 위험한 상황이 연출될 수 있지만, 만약 수소확산 초기단계에서 점화가 이루어진다면 수소화재가 발생할 수도 있으며, 수소가스 폭발 이후 단계에서도 수소화재가 발생할 수 있다. 만약 실내공간에서 수소화재가 발생한다면 이 화재는 주위의 탄화수소 가연물로 전파되어 결국 수소화재와 탄화수소화재가 상호작용하는 형세가 될 가능성이 높다[1]. 수소화재의 특징은 가시적으로 잘 보이지 않으며 화염온도는 높지만 복사열량이 적고 본질적으로 CO와 CO₂가 발생하지 않는다. 반면에 통상의 가연물인 탄화수소계 연료의 화재는 적염의 성질을 보이며 화염온도는 수소화재보다 상대적으로 낮지만 복사열량이 크고 CO 및 연기 발생량 또한 많다. 이렇게 특징이 상이한 두개의 화

제가 실내공간에서 상호작용하게 되면 현재까지 알려진 통상의 화재와는 매우 다른 양상을 보일 가능성이 높다.

따라서 본 연구에서는 수소화재와 탄화수소계 연료 화재가 상호작용하는 경우의 연소 특성을 검토하기 위해 두개의 화염이 존재하는 1차원 대향류화염에 대한 수치계산을 수행하였다. 여기서 얻어지는 결과를 통해 향후 본격적으로 진행될 수소화재-탄화수소화재 상호작용 연구의 방향과 문제점을 검토하고자 한다.

2. 수치계산방법

2.1 대향류화염

수치계산에는 수소화재와 탄화수소 화재간의 상호작용을 그림 1에서 보는 바와 같이 두개의 화염이 근접한 1차원 화염으로 근사하여 계산을 수행하였다. 실제의 화재는 확산 화염 또는 공기 부족 시는 부분예혼합화염(Partially premixed flame)의 형태를 일부 보이지만 본 연구에서는 우선 당량비가 1.0인 수소화염과 메탄화염이 상호작용하는 것으로 가정하였다. 이 조건은 수소화재와 탄화수소화재의 상호작용을 정확히 모사한다고 할 수는 없지만 확산화염의 반응대는 양론혼합비의 조건을 갖는다는 점과, 향후 수행될 부분예혼합화염 계산의 방향을 제시해 줄 수 있다는 점에서 가장 먼저 수행되었다. 참고로 그림 2는 Sung 연구그룹에 의해서 가시화된 대향류 쌍둥이 예혼합화염 사진이다[2]. 수치계산에는 OPPDIF 코드[3]와 GRI-3.0 반응기구[4]를 사용하였다.

2.2 계산조건

본 연구에서 탄화수소화염은 반응기구가 비교적 잘 알려진 탄화수소 연료인 메탄연료를 이용하여 형성하였다. 두개의 화염을 형성시키기 위한 대향류 노즐간의 간격은 20 mm로 하였다. 두개의 화염간의 상호작용 정도는 두개 화염면간의 거리를 조절하여 가능하게 하였으며, 상호작용 정도를 나타내는 파라메타로서 아래 식 (1)과 같이 정의되는 총괄 스트레인을(Global strain rate; a_g)을 이용하였다. 본 계산에서는 아직 복사효과는 검토하지 않았지만, 향후 광학적으로 얇은 모델(Optically-thin model)과 Narrow-Band 모델의 일종

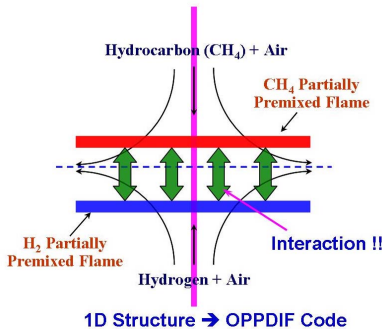


그림 2. 대향류 수소예혼합화염-메탄예혼합화염 상호작용에 관한 개요도

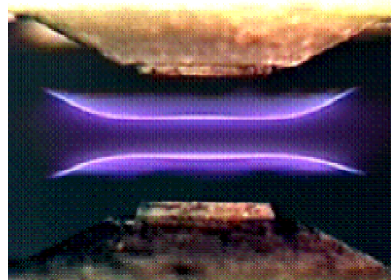


그림 2. 대향류 쌍둥이 옥탄-공기 예혼합화염 사진[2]

인 WSGGM 모델을 사용하여 복사효과를 검토할 예정이다.

$$a_g = \frac{2V_O}{L} \left(1 + \frac{V_F \sqrt{\rho_F}}{V_O \sqrt{\rho_O}} \right) = \frac{2V_r V_F}{L} \left(1 + \frac{1}{V_r} \frac{\sqrt{\rho_F}}{\sqrt{\rho_O}} \right) \quad (1)$$

여기서 V 는 혼합기의 유속, ρ 는 혼합기의 밀도, L 은 노즐사이의 간격을 의미하며, 아래첨자 F 와 O 는 각각 메탄혼합기 및 수소혼합기를 나타낸다. 또한 V_r 은 두개의 혼합기 유속간의 비로서 V_O/V_F 와 같이 정의된다.

총괄 스트레인을 높이게 되면 혼합기의 유속은 증가하게 되므로 두개의 화염면 사이의 간격은 가까워지게 되어 화염 상호작용 효과는 커지게 된다.

3. 결과 및 검토

그림 3과 4는 $a_g=1000 \text{ s}^{-1}$, $V_r=1.5$ 인 조건에 대해서 수치계산을 통해 얻은 화염구조이다. 그림 3에서 두개의 수직 화살표는 그림 4에서 보이는 메탄화염과 수소화염의 열발생을 최고점 위치를 나타내는 것으로서 본 연구에서는 열발생을 최고점 위치를 화염면으로 정의하였다. $a_g=1000 \text{ s}^{-1}$, $V_r=1.5$ 인 조건의 화염 최고온도는 2344 K으로서 통상의 메탄화염보다는 높게 나타나고 있으며 고온영역도 통상의 확산화염보다 매우 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 연료와 산화제인 O_2 의 분포를 살펴보면 메탄은 반응대에서 전부 산화되어 존재하고 있지 않지만 수소는 일부가 메탄연료의 화염면 근처까지 전달되고 있음을 알 수 있다. 그림 3의 온도분포와 그림 4의 열발생률을 비교해보면 메탄화염의 열발생률은 수소화염의 열발생률보다 훨씬 적게 나타나고 있지만 화염 최고온도의 위치는 메탄화염면 가까이 형성되어 있음을 알 수 있다. 또한 각 화염면은 정체면을 기준으로 상류쪽에 위치하고 있어서 상류로 전파되는 예혼합화염의 특징을 잘 보여주고 있다.

그림 5와 6은 $a_g=5000 \text{ s}^{-1}$, $V_r=1.5$ 인 조건에 대한 화염구조이다. 이 조건은 화염면 사이의 간격은 줄어들었지만(그림 6) 총괄 스트레인이 증가하였기 때문에 그림 5에서 보는 바와 같이 화염폭이 매우 좁아져서 통상의 확산화염과 유사한 분포를 보이고 있다. 또한

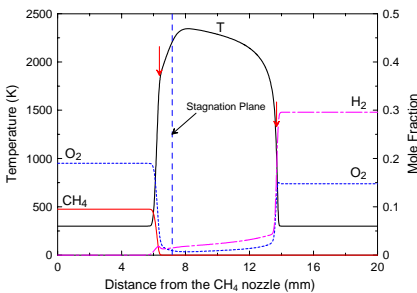


그림 4. 화염온도 및 주요화학종 농도분포($a_g = 1000 \text{ s}^{-1}$, $V_r=1.5$)

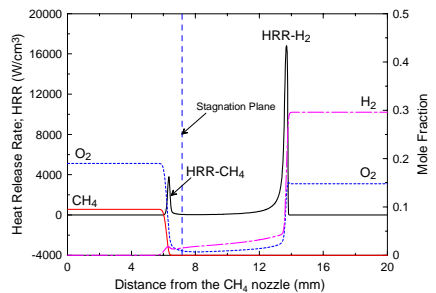


그림 5. 열발생률 및 주요화학종 농도분포($a_g = 1000 \text{ s}^{-1}$, $V_r=1.5$)

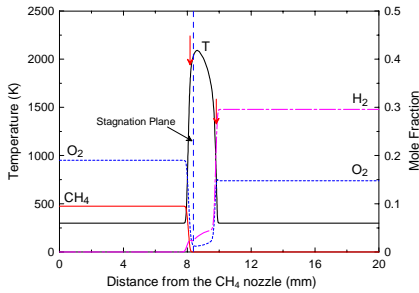


그림 6. 화염온도 및 주요화학종 농도분포($a_g = 5000 \text{ s}^{-1}$, $V_r=1.5$)

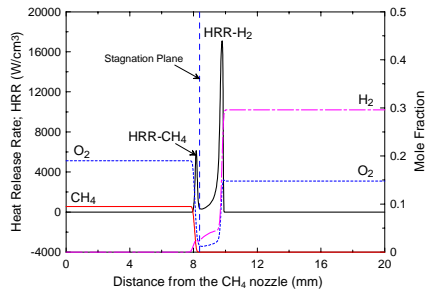


그림 7. 열발생률 및 주요화학종 농도분포($a_g = 5000 \text{ s}^{-1}$, $V_r=1.5$)

그림 5과 6은 $a_g=5000 \text{ s}^{-1}$, $V_r=1.5$ 인 조건에 대한 화염구조이다. 이 조건은 화염면 사이의 간격은 줄어들었지만(그림 6) 총괄 스트레인이 증가하였기 때문에 그림 5에서 보는 바와 같이 화염폭이 매우 좁아져서 통상의 확산화염과 유사한 분포를 보이고 있다. 또한 화염 최고온도는 2091 K으로 $a_g=1000 \text{ s}^{-1}$ 인 조건보다 많이 낮아졌음을 알 수 있다. 한가지 주목할만한 점은 총괄 스트레인이 증가하면서 메탄화염의 열발생률은 증가하였지만 수소화염의 열발생률은 큰 변화가 없는 점을 알 수 있다.

4. 결론

수소예혼합화염과 상호작용하는 메탄예혼합화염에 대해 OPPDIF 코드와 상세반응기구를 적용한 수치계산을 수행하였다. 메탄화염과 수소화염이 동시에 존재할 경우에는 수소화염의 영향으로 통상의 메탄화염 자체만 있을 경우보다 훨씬 온도가 높아지게 되며, 화염폭도 두꺼워지게 되어 화염강도가 매우 강화되었음을 알 수 있었다. 또한 총괄 스트레인을 증가시켜 두 화염면 사이의 거리를 줄이면 메탄화염의 열발생률은 증가하지만 수소화염의 열발생률에는 큰 변화가 없는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었습니다(KRF-2008-331-D00067). 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Anthony, H. (2007). Private communication.
2. Sung, C. J. (2008). www.mae.case.edu/facilities/cdl/facilities/cflow.
3. Jutz, A. E., Kee, R. J., Grcar, J. F., Rupley, F. M. (1997). "A Fortran Program for Computing Opposed-flow Diffusion Flames," Sandia Report, SAND96-8243.
4. Bowman, C. T., Hanson, R. K., Davidson, D. F., Gardiner, W. C. Jr., Lissianski, V., Smith, G. P., Golden, D. M., Frenklach, M. and Goldenberg, M. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech.