

CO₂에 의한 층류 확산화염의 소화기구에 관한 정량적 분석

문선여 · 황철홍 · 오창보* · 박원희**

대전대학교 소방방재학과, *부경대학교 안전공학과

**한국철도기술연구원 친환경연구실

A Quantitative Analysis on the Extinguishing Mechanism of Laminar Diffusion Flames by CO₂

Sun-Yeo Mun · Cheol-Hong Hwang · Chang Bo Oh* · Won-Hee Park**

Department of Fire & Disaster Prevention, Daejeon University

*Department of Safety Engineering, Pukyong National University

**Korea Railroad Research Institute

요 약

대표적 가스계 소화약제인 CO₂의 소화기구(Extinguishing mechanism)를 재조명하기 위하여, CH₄/air 저 신장율 대향류 확산화염을 대상으로 CO₂가 소화에 미치는 영향에 대한 수치해석이 수행되었다. 부력이 지배적인 화염의 소화현상은 복사 열손실에 의해 큰 영향을 받기 때문에, 소화농도 예측에 대한 복사모델의 성능평가가 우선적으로 이루어졌다. 주요 결과로서, 공기류에 첨가된 CO₂의 소화농도는 복사모델이 고려되지 않은 경우 과다 예측되는 반면에, 간략화된 광학적으로 얇은 근사(Optically thin approximation) 모델과 비교적 높은 정확도를 갖는 좁은 밴드(Statistical narrow band) 모델은 실험의 오차범위 내에서 큰 차이를 보이지 않았다. CO₂가 소화에 미치는 순수 희석효과, 희석에 의한 복사효과, 화학적 효과 및 열적효과를 정량적으로 분석하기 위하여 가상의 소화약제의 개념을 도입하였다. 이를 통해 화염의 총괄신장율에 따른 CO₂ 소화효과에 대한 구체적인 이해가 시도되었다.

1. 서 론

CO₂의 소염현상에 관한 초기 연구들은 연소공학적 관점에서 내연기관의 배기가스 재순환(EGR) 및 다양한 성분의 연료에 포함된 CO₂가 화염구조, 질소산화물(NOx)의 저감 및 높은 화염신장율에 의한 소염현상에 미치는 영향에 초점을 두고 있다. 이러한 해석방법은 최근 화재안전에 관한 증가된 관심과 함께, 부력에 의해 지배되는 낮은 신장율의 화염에서 CO₂의 소화현상 규명을 위해 확대·적용되고 있다. 연료/공기의 체류시간 감소 및 화염 수직방향의 전도 열손실 증가에 의한 높은 화염신장율에서의 소염과는 달리, 낮은 신장율에서의 소염은 주로 증가된 화염체적에 의한 복사 열손실에 의해 지배된다고 알려져 있다. 결과적으로 낮은 화염신장율에서 CO₂에 의한 소화는 화염 자체의 복사 열손실뿐만 아

나라 CO₂ 소화약제의 다양한 소화효과가 동시에 복합적으로 발생하는 현상을 보인다.

CO₂가 갖는 소화효과로는 반응물의 농도를 감소시키는 희석(Dilution)효과, 높은 열용량에 의한 온도(Thermal)효과, 높은 복사 흡수계수에 의한 복사(Radiation)효과로 구분될 수 있다. 추가로 CO₂+H→CO+H의 개시반응을 통한 H 라디칼의 소모로 기본 연쇄반응인 H+O₂→O+H의 반응속도를 감소시켜, 결국 소화를 촉진시키는 CO₂의 화학(Chemical)효과가 존재한다. 이들 CO₂의 소화효과는 본질적으로 분리되어 설명될 수 없으나, 최근 상세 반응기구를 이용한 수치해석의 적용을 통해 CO₂의 복사 및 화학효과가 소화에 미치는 상대적 역할에 관한 많은 연구들이 진행되고 있다(Park et al., 2009). 그러나 CO₂ 소화약제가 갖는 위의 4가지 소화효과에 대한 절대량 관점의 정량적 분석은 시도된 바 없다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 CH₄/air 대향류 확산화염을 대상으로 공기류에 첨가된 CO₂의 정확한 소화농도 예측을 위하여 복사모델의 성능평가를 수행하고, 가상의 소화약제(Surrogate agent) 개념을 도입하여 복잡한 CO₂의 소화효과에 대한 정량적 기여도 평가를 수행하고자 한다. 이는 CO₂에 의한 소화현상 규명뿐만 아니라 향후 혼합 청정소화약제의 효율적 개발에 매우 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

2. 수치해석방법

본 연구에서는 층류 확산화염에서 CO₂의 소화현상을 규명하기 위하여 그림 1과 같은 노즐간의 거리가 2.5 cm인 대향류 확산화염을 대상으로 하였다. 1차원 확산화염의 계산을 위하여 수정된 Oppdif code(Kee et al., 1988)가 사용되었으며, 상세반응기구는 GRI 3.0이 적용되었다. 연료(CH₄) 및 공기는 1 atm과 298 K의 조건에서 공급되었다. 낮은 화염신장율의 조건에서 중요시되는 복사 열손실 및 첨가된 CO₂의 추가적인 복사 열손실을 고려하기 위하여, 높은 정확도를 갖는 좁은 밴드(SNB) 모델과 광학적으로 얇은 근사 모델(OTM)이 비교·검토 되었다(Park, 2003).

다양한 CO₂의 소화효과에 대한 정량적 분석을 위하여 가상의 소화약제의 개념을 도입하여, 고정된 총괄신장율에서 4번의 계산을 반복하게 된다.: (1) 실제 CO₂를 첨가, (2) CO₂ 대신에 반응에 참여하지 않은 'T_CO₂'를 첨가(이때 열역학 물성치와 복사 물성치는 동일), (3) 반응에 참여하지 않고 비열(열용량)이 0인 'D_CO₂'를 첨가(이때 복사 물성치는 동일), (4) 복사 효과가 배제된 'D_CO₂ without Rad.'를 첨가. 위 모든 가상의 소화약제는 CO₂와 동일한 전달 물성치를 갖는다. 그 결과 'D_CO₂ without Rad.'는 열적효과, 복사효과 및 화학적 효과가 고려되지 않은 순수한 희석(Dilution)효과를 갖게 된다. 'D_CO₂ without Rad.'와 'D_CO₂'의 차이는 희석에 의한 복사효과를 의미하며, 'D_CO₂'와 'T_CO₂'의 차이는 복사 열손실을 제외한 열적효과 그리고 'T_CO₂'와 CO₂의 차이는 화학적 효과를 의미한다.

3. 결과 및 검토

CO₂ 소화농도의 검토 이전에 복사모델에 따른 화염온도 및 화염구조의 차이를 확인하기 위하여, 그림 2는 CH₄/air 대향류 확산화염의 총괄신장율(a_g) 변화에 따른 최대 화염온도를 도시한 것이다. 단열조건에서는 a_g 이 감소함에 따라 최대 화염온도는 점차적으로 증가하는 현상을 보여주고 있다. 반면에 복사모델이 고려되면 특정 a_g (약 20 s⁻¹)에서 복사

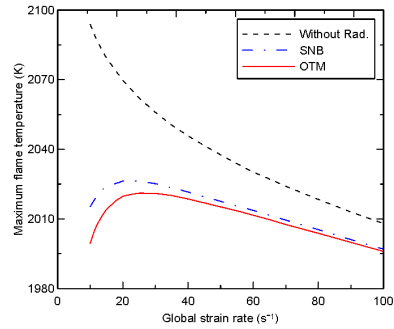
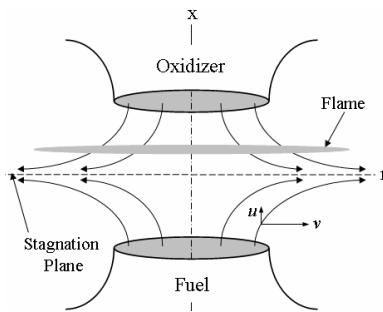


그림 1. 대향류 확산화염의 개략도. 그림 2. 총괄신장율에 따른 최대 화염온도.

열손실에 의해 화염온도가 감소된다. 가장 큰 변화를 보이는 $a_g = 10 \text{ s}^{-1}$ 의 결과를 살펴보면, SNB 모델을 기준(2,015 K)으로 최대 화염온도는 단일조건에서는 79 K의 과대 예측이 발생되며, OTM의 적용은 16 K 과소 예측 결과를 보여준다. 비록 본 논문에는 도시하지 않았지만, 주요 화학종인 CO_2 의 최대값은 SNB 모델 결과를 기준으로 단일조건은 19% 과소 예측, OTM은 5%의 과대 예측결과를 보였다. 이 결과로부터 화재에서와 같이 부력이 지배되는 낮은 유속의 확산화염에서 보다 정확한 화염구조를 예측하기 위해서는 예측 정확도가 높은 복사모델의 사용이 중요함을 확인할 수 있다.

복사모델의 정확도 차이가 소화농도에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 그림 3은 a_g 변화에 따른 소화농도 결과를 비교·도시한 것이다. 우선, 중력장에서 수행된 실험결과(Bundy et al., 2003)를 살펴보면 a_g 가 감소함에 따라 소화농도는 증가하다가 특정 a_g 에서 전환점이 발생하는 C-curve 결과를 보여주고 있다. 최근 수행된 2차원 직접수치모사(DNS)의 결과(Oh et al., 2008)를 살펴보면, 한정된 직경의 연료/공기 노즐에 의한 측면의 진도 열손실과 부력에 의한 곡률효과에 의해 보다 큰 a_g 에서 전환점이 발생되며, 순수 복사 열손실에 의해 발생하는 전환점은 매우 낮은 a_g 에서 존재한다고 보고되었다. 그 결과 $a_g < 30 \text{ s}^{-1}$ 의 조건에서 실험결과와 1차원의 계산결과를 직접 비교하는 것은 다소 한계가 있다. 그러나 $a_g > 30 \text{ s}^{-1}$ 에서 단일조건은 CO_2 소화농도를 과대 예측하지만, SNB 모델과 OTM의 결과는 실험의 측정오차 범위 내에서 소화농도를 매우 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 위 결과로부터 안정된 화염구조의 예측에 있어서 OTM은 SNB 모델에 비해 다소 낮은 정확도를 제공하지만, 화염강도 및 두께가 크게 감소되는 소염점 근처에서는 복사효과가 큰 CO_2 가 다량 포함되더라도 소화농도 및 소화온도의 예측 관점에서 매우 타당한 결과를 제시함을 확인할 수 있다. 특히 본 계산에서 SNB 모델의 적용 시 OTM에 비해 약 100배 이상의 전체 계산시간(Cpu time)이 요구됨을 고려할 때, 소화농도의 예측을 위해 OTM의 적용은 충분한 당위성을 갖게 된다.

그림 4는 CO_2 의 희석, 복사, 열 및 화학적 소화효과를 정량적으로 분석하기 위하여 가상의 소화약제들을 고려한 결과를 도시한 것이다. 먼저 소화약제의 첨가에 따른 CH_4/air 반응물의 농도 감소를 유발하는 순수한 희석효과는 약 90%의 소화농도를 요구하며, a_g 증가에 따라 점차적으로 감소함을 볼 수 있다. 본질적으로 복사효과가 고려되지 않은

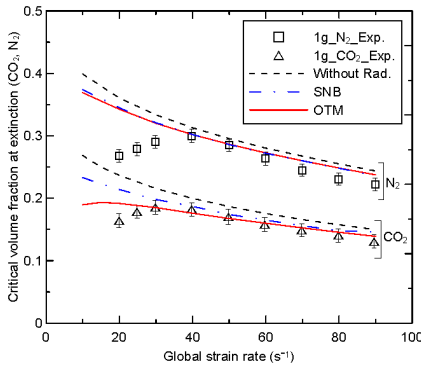


그림 3. CO₂와 N₂의 소화농도.

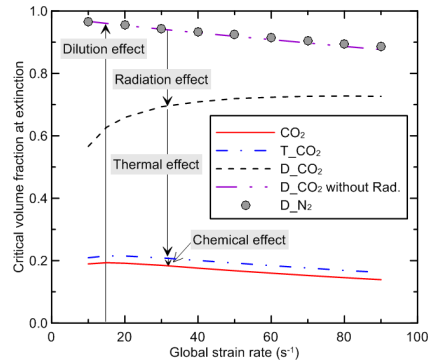


그림 4. CO₂ 소화효과의 정량적 분석.

D_{N₂}의 결과와 비교할 때 'D_{CO₂} without Rad.'의 결과는 일치하고 있으며, 이는 첨가된 CO₂ 및 N₂가 소화에 미치는 순수 희석효과는 동일하며, 전달 물성치의 차이에 따른 소화 효과는 매우 작음을 의미한다. CO₂ 첨가에 의한 순수한 복사효과를 살펴보면 a_g 의 감소에 따라 복사 열손실의 증가로 소화농도는 점차적으로 감소함을 볼 수 있다. 마지막으로 Cup 버너에서의 소화농도와 유사한 값을 보여주는 $a_g=50 \text{ s}^{-1}$ 에서의 결과를 살펴보면, 순수 희석효과를 기준으로 CO₂의 복사효과는 20%의 소화농도 감소를 발생시키며, 열적효과는 52% 그리고 화학적 효과는 3%의 소화농도 감소효과를 발생시킴을 확인할 수 있다.

4. 결론

CH₄/air 대항류 확산화염에서 CO₂ 소화농도에 대한 정확한 예측을 위하여 복사모델의 성능을 검토한 결과, 소염농도의 예측 정확도 및 계산 비용을 고려할 때 SNB 모델에 비해 간략한 OTM의 적용이 효율적임을 확인하였다. 가상 소화약제의 개념을 이용한 CO₂ 소화농도 분석을 통해 총괄신장율에 따른 순수 희석효과, 희석에 의한 복사효과, 열용량에 의한 열적효과 그리고 CO₂의 연쇄반응 억제를 통한 화학적 효과의 정량적 기여도를 구체적으로 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2011년 지식경제부의 지식경제 기술혁신사업(에너지기술개발사업)에 의해 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bundy, M. et al. (2003). Combust. Flame, Vol. 133, pp. 299-310.
2. Kee, R.J. et al. (1988). Proc. Combustion Inst., Vol. 22, pp. 1479-1494.
3. Oh, C.B., et al. (2008). Combustion Theory and Modeling, Vol. 12, No. 2, pp. 283-302.
4. Park, J. et al. (2009). Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 8756-8762.
5. Park, W.-H. (2003). Ph.D. Dissertation, Chung-Ang University.