



# 완전 혼합반응기(PSR)를 이용한 환기부족화재 조건에서 CO의 생성 특성

황해주 · 황철홍 · 박중화 · 오창보\*  
대전대학교 소방방재학과, \*부경대학교 안전공학과

## CO Formation Characteristics in Under-ventilated Fire Conditions using a PSR (Perfectly Stirred Reactor)

Hae-Joo Hwang · Cheol-Hong Hwang · Chung-Hwa Park · Chang Bo Oh  
Department of Fire & Disaster Prevention, Daejeon University  
\*Department of Safety Engineering, Pukyong National University

### 요 약

환기부족 구획화재에서 CO의 생성은 온도 및 조성에 큰 영향을 받으며, 구획 내의 체류 시간 및 이동경로에 따라 복잡한 현상을 경험하게 된다. 그 결과 구획 내부의 CO 생성특성을 실험을 통해 상세하게 규명하는 것은 많은 한계가 있다. 이러한 배경 하에 본 연구에서는 환기부족 구획화재의 조건에서 총괄당량비에 따른 CO의 생성특성에 관한 수치해석 연구를 수행하였다. PSR(완전혼합반응기) code와 헵탄연료의 상세화학반응기구가 사용되었다. 주요 변수로서 체류시간, 온도, 반응물과 생성물의 혼합정도 그리고 열손실 등이 CO의 생성에 미치는 독립적 영향을 검토하였다. 추가로 주요반응에 의한 CO의 몰 생성률 및 소모율과 CO의 반응경로 분석을 통해 환기부족 구획화재의 조건에서 구체적인 CO 생성특성에 관한 이해가 시도되었다.

### 1. 서론

CO 생성에 관한 초기 연구들은 구획 내부의 공간을 상부의 고온 연기층과 하부의 차가운 공기층 영역으로 구분하는 Zone 모델의 결과를 모사하기 위하여 주로 후드(Hood)실험을 통해 수행되었다. 특히 총괄당량비 개념을 이용한 CO의 정량화 및 상관식 도출 연구들은 다양한 연료 및 화재조건에서 CO의 생성특성을 이해하는데 매우 중요한 정보를 제공하였다.<sup>1)</sup> 그러나 후드실험을 통해 얻어진 CO의 생성특성은 매우 상이한 온도, 열손실 및 체류시간을 갖는 구획화재에 직접적으로 확대·적용하는 데는 많은 한계가 있다. 즉, 일반적으로 500~800K의 온도를 갖는 후드에서의 CO 관련 반응특성은 1400K 이상의 고온이 발생할 수 있는 구획화재의 경우와 비교할 때 정성적 및 정량적으로 큰 차이를 갖게 된다. 후드실험에서 총괄당량비에 따른 CO의 생성량을 살펴보면, 총괄당량비 0.5이상에서 발생되기 시작하여 점차적으로 증가하다가 2.0 이상에서는 낮은 온도로 인하여 CO 생성

반응이 동결되는 결과가 보고되었다.<sup>1)</sup> 그러나 실규모 ISO-9705 환기부족화재의 실험에서는 총괄당량비 2.0~3.0의 조건에서 최대의 CO량이 발생되며, 그 이상의 조건에서는 오히려 감소되는 실험결과를 확인할 수 있었다.<sup>2)</sup>

구획화재에서 CO 생성특성에 관한 실험적 연구는 측정상의 제약으로 주로 고온 상층부의 제한된 위치에서의 측정만이 이루어지기 때문에 구획 내부의 전반적인 CO 생성특성을 이해하는데 많은 어려움이 있다. 또한 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 이용한 CO 생성특성에 관한 연구 역시, 적용된 혼합분을 연소모델의 한계로 인하여 환기부족화재 조건에서 정성적 및 정량적 CO 생성예측에 많은 문제점을 노출하고 있다.<sup>3)</sup> 이러한 배경 하에 본 연구에서는 환기부족 구획화재에서 발생하는 CO의 생성특성을 이해하기 위하여, 체류시간, 온도, 반응물과 생성물의 혼합정도 그리고 열손실과 같은 주요 변수들이 CO의 생성에 미치는 독립적 영향을 상세반응을 이용한 수치해석을 통해 단계적으로 검토하였다. 이를 위해 화학반응기구를 고려한 PSR(Perfectly Stirred Reactor) code<sup>4)</sup>가 사용되었다.

## 2. 선행 실험결과 및 수치해석방법

### 2.1 선행 실험결과

선행된 실험연구<sup>2)</sup>에서는 ISO 9705 화재실의 출입구 폭이 0.1m로 축소되었으며, 구획 중앙에 헵탄(Heptane) 연료가 공급되었다. 구획 천장에서 온도 및 농도측정이 이루어졌으며, 총괄당량비의 산출을 위해 요구되는 공기 공급량은  $\dot{m}=0.52A_o\sqrt{h_o}$ 의 경험식을 통해 얻어졌다. Fig. 1의 하단 x축은 공급된 연료유량(이론 발열량)을 기준으로 산출된 총괄당량비이며, 상단의 x축은 산소소모열량계를 통해 측정된 발열량을 기준으로 산출된 값이다. 그림에서 CO는 이론 및 측정된 발열량 기준으로 각각 3.0과 2.0의 값에서 최대값을 보이며, 보다 과농한 조건에서는 오히려 감소되는 현상을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 당량비 2.0 이후에 균일한 CO 값을 갖는 후드실험 결과와 상이한 것이며, 기존의 구획실험에서는 총괄당량비 2.0 이후의 실험조건을 찾아보기 어렵다. 연료버너에서부터 기화된 가연성 연료는 구획 내의 유동흐름을 따라 매우 다양한 온도, 조성 및 체류시간의 조건을 경

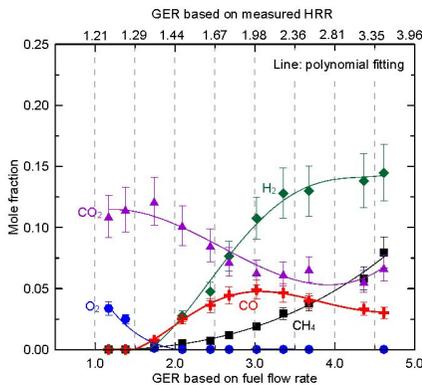


Fig. 1 Mole fractions of species in the underventilated fire conditions.

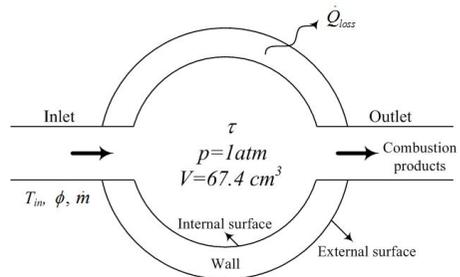


Fig. 2 Schematic of a perfectly stirred reactor (PSR).

협하게 되며, 그 과정에서 CO의 생성, 소멸 및 전달 현상이 발생된다. 따라서 이러한 복잡한 CO 생성특성을 단순히 천장에서 측정된 실험결과를 통해 분석하는 것은 많은 한계가 있으며, FDS를 이용한 방법 역시 매우 복잡한 CO의 생성 및 소멸반응을 구체적으로 고려하지 못하고 있다.

## 2.2 수치해석방법 및 조건

CO 생성특성은 체류시간, 온도, 반응물과 생성물의 혼합정도 그리고 열손실에 의해 크게 영향을 받게 된다. 환기부족화재의 조건에서 이들이 CO 생성에 미치는 독립적 영향을 분석하기 위하여 Fig. 2와 같은 PSR 계산이 수행되었다. PSR은 연료/공기(또는 연소생성물)의 혼합속도가 무한히 빠른 가정을 갖고 있으며, 당량비, 입구온도, 열손실 그리고 반응기 내의 체류시간에 따라 CO의 상세한 반응특성이 예측될 수 있다. 본 연구에서는 헵탄 연료의 상세한 산화과정의 모사가 가능한 UCSD 반응기구가 사용되었다.

## 3. 결과 및 검토

Fig. 3은 반응기 내의 체류시간( $\tau$ )이 1.0s와 10.0s로 변화될 때 당량비에 따른 주요 화학종 몰분율을 도시한 결과이다.  $\tau$ 가 증가함에 따라 당량비 1.5 이상에서 CO 및 H<sub>2</sub>의 농도는 증가하는 반면에 H<sub>2</sub>O의 농도는 감소하며 CO<sub>2</sub>의 농도는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 CO의 최대값이 발생하는 당량비에는 큰 변화가 없으며, 환기부족 구획화재에서 적용될 수 있는 10초 이상의  $\tau$  역시 당량비에 따른 조성변화에 큰 영향이 없음을 예측할 수 있다. Fig. 4는  $\tau=10$ s로 고정된 조건에서 온도에 따른 CO 변화를 도시한 것이다. 온도 증가에 따라 CO 생성량은 증가되며, 최대 CO가 발생하는 당량비는 보다 과농한 조건으로 이동함을 볼 수 있다. 이러한 현상은 CO의 최대값이 발생하는 당량비에서 CO와 UHC(Unburned hydrocarbon)의 몰생성률의 비교를 통해 해석될 수 있다. 즉, 당량비가 증가함에 따라 CO의 몰생성률은 지속적으로 증가하지만, UHC 등의 연료성분의 몰생성률 증가율은 더욱 급증하며, 그 결과 상대적인 개념의 CO 몰분율은 감소하게 된다.

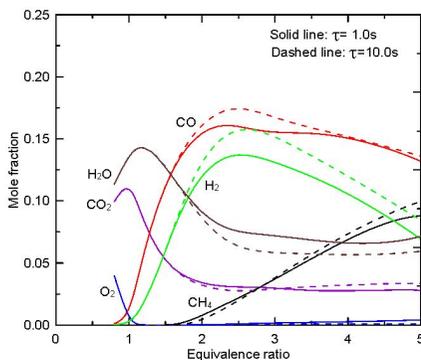


Fig. 3 CO profiles with equivalence ratio for different inlet temperatures.

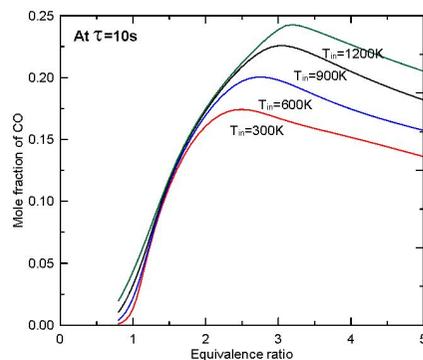


Fig. 4 CO with equivalence ratio for different inlet temperatures.

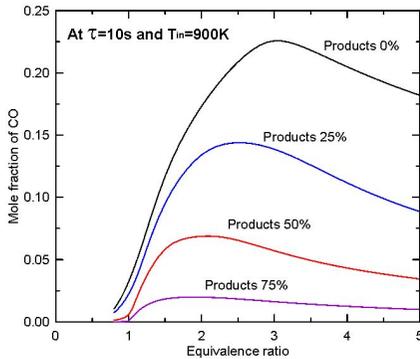


Fig. 5 CO profiles with equivalence ratio for different .

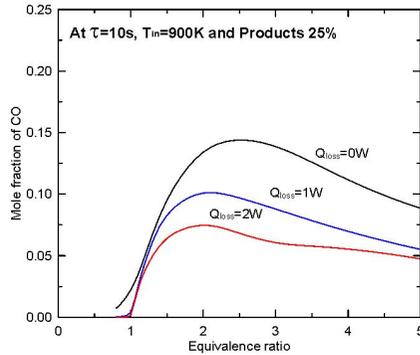


Fig. 6 CO profiles with equivalence ratio for different heat loss rate.

Fig. 5는 연료/공기 혼합물에 이론 당량비의 생성물이 포함되었을 때 당량비에 따른 CO 몰분율을 도시한 결과이다. 생성물의 혼합도가 증가함에 따라 CO 생성량은 급격히 감소되며, 최대의 CO가 발생하는 당량비 또한 감소하는 결과를 볼 수 있다. CO가 생성되는 반응과정에서의 열손실효과를 고려하기 위하여 Fig. 6은 열손실률에 따른 CO 몰분율을 도시한 것이다. 열손실률이 증가함에 따라 혼합물 첨가에 의한 효과와 동일하게 CO 발생량은 감소되며, 최대 CO가 발생하는 당량비 또한 감소하게 된다.

#### 4. 결론

환기부족 구획화재의 조건에서 매우 복잡한 CO 생성특성을 정량적으로 예측하는 것은 현 단계에서 많은 어려움이 있다. 그러나 상세반응기구를 이용한 PSR 수치해석을 통해 CO의 생성에 중요한 인자인 체류시간, 온도, 조성 그리고 열손실의 인자들이 당량비에 따른 CO 생성에 미치는 독립적인 영향을 체계적으로 검토할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 대전대학교 연구조성비로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. W.M. Pitts, "The global equivalence ratio concept and the formation mechanisms of carbon monoxide in enclosure fires", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 21, pp. 197-237 (1995).
2. 황철홍, "반밀폐된 구획에서 발열량 변화에 따른 비정상 화재특성", 한국화재소방학회 논문지, 인쇄 중 (2012).
3. C.H. Hwang, A. Lock, M. Bundy, E. Johnsson, G.H. Ko, "Studies on fire characteristics in over- and underventilated full-scale compartments", J. Fire Sci., Vol. 28, pp. 459-486 (2010).
4. P. Glarborg, R.J. Kee, J.F. Grear, J.A. Miller, "PSR: a fortran program for modelling well-stirred reactors", Sandia Report No. SAND86-8209 (1986).