

# 과농조건인 CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl 예혼합화염에서 산소부화가 PAH 생성에 미치는 효과

이기용\*\*

## The Effect of the Oxygen-Enrichment on the PAH Production in Fuel-Rich CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl Premixed Flames

Ki Yong Lee

### ABSTRACT

Numerical simulations of freely propagating fuel-rich CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl premixed flames were performed at atmospheric pressure in order to understand the effect of the oxygen enrichment on the production of PAH. A chemical kinetic mechanism was used, which involved 157 gas-phase species and 1693 forward reactions. The calculated flame speeds were compared with the experiments for the flames established on the equivalence ratios of 1~1.6, the results of which were in good agreement. As the level of oxygen enrichment was increased, the concentrations of one or four ring aromatic hydrocarbons were decreased. This might cause the fact that the contribution of PAH species to soot was weakened.

**Key Words** : Oxygen-enrichment, Chlorinated hydrocarbons, Polycyclic aromatic hydrocarbon, Flame speed, Radical, Premixed flame

### 1. 서론

폐기물은 일상생활 및 산업활동을 통해 필연적으로 생성되고 있고, 이를 처리하기 위해 다양한 방법들을 적용하고 있다. 그 중에서 소각 방법은 유기 화합물을 포함한 폐기물 처리에 다음과 같은 3 가지 장점을 갖고 있다[1]. 소각이 최적 조건에서 운영될 경우 모든 유기 화합물을 분해할 수 있고, 매우 적게 생성된 독성가스는 세정방법을 통해 제거가 가능하다. 둘째 연소 후 생성된 슬래그 또는 재는 독성을 거의 갖지 않고 또한 초기 폐기물의 체적에 비해 매우 적은 양이 된다. 셋째 연소과정을 통해 생성된 열을 폐기물 에너지로 활용이 가능하다.

유기 화합물을 포함한 폐기물 중 염화 탄화수소 화합물(chlorinated hydrocarbons, CHCs)은 공업용 물질로서 다양한 분야에서 많이 사용되고 있다. 염화 탄화수소 화합물이 탄화수소 연소에 첨가될 경우 화합물에 포함된 염소원자로 인해 탄화수소 연소를 억제하고, 화염 내에서 이산화탄소, 고분자 화합물, PAH(polycyclic aromatic hydrocarbon), 매연(soot) 등

의 생성에 기여한다[2]. 즉 소각로에서 방향족 염화 탄화수소 화합물, 다이옥신, 퓨란 등의 생성과 관련이 있고, 이들 중 일부는 독성이 매우 강한 물질이다.

Karra and Senkan[3]은 매연이 발생하는 조건에서 CH<sub>3</sub>Cl/CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 예혼합화염의 온도와 화학종 농도 측정을 통해 염소원자가 화염 내에서 화학반응에 상당한 영향을 미치는 것으로 판정하였다. 특히 CH<sub>3</sub>Cl을 첨가한 화염의 경우 C<sub>2</sub> 화학반응 메커니즘의 강화를 통해 CO, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 및 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>의 농도가 크게 증가함을 보여주었다. Steblev and Frolov[4]는 탄화수소-염소 화염에 대하여 초기온도 및 불활성 첨가제가 매연 생성에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 화염 내 불활성 첨가제의 첨가 및 예열이 매연 생성을 억제하므로 매연 생성 과정을 제어할 수 있다고 제안하였다. Karra et al.[2]은 과농 조건의 CH<sub>3</sub>Cl/CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/Ar 평면 예혼합 화염에 근거하여 CH<sub>3</sub>Cl 연소에 대한 상세한 화학반응 메커니즘을 제안하였고, 수치해석 결과는 화염으로부터 측정된 농도 결과와 비교함으로써 만족할 만한 결과를 얻었다. 반응 메커니즘 분석을 통해 CH<sub>3</sub>Cl이 화염에서 매연을 촉진시키는 메커니즘에 대한 이해를 얻었고, 메탄과 CH<sub>3</sub>Cl의 반응 경로를 입증하였다. McKinnon and Howard[5]는 열해리, 비예혼합 화염, 예혼합 화염 및

\* 안동대학교 기계공학과

† 연락저자, kylee@andong.ac.kr

완전 혼합 연소 조건에서 염화수소가 매연 생성에 미치는 효과에 대하여 조사하였고, 염화수소는 매연 생성량에 크게 영향을 미친다고 하였다. Marr et al. [6]은 완전 혼합 반응기 및 관유동 반응기를 사용하여 과농조건에서 염소원자가 PAH, 매연 및 타르(tar) 생성에 미치는 영향을 조사하였다. 반응기의 거주 시간이 증가함에 따라  $\text{CH}_3\text{Cl}$ 의 첨가는 PAH와 매연의 농도 증가를 가져오는 반면 타르는 거주 시간에 따라 변화됨을 보여주었다. Shin and Lee[7]은 산소부화된  $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{O}_2/\text{N}_2$  예혼합 화염에 대하여 실험과 수치해석을 통해  $\text{CH}_3\text{Cl}$ 이 화염구조에 미치는 영향을 조사하였다.  $\text{CH}_3\text{Cl}$ 의 첨가는 중요한 활성기들의 농도를 저감시킴으로 탄화수소 화염에서 열 방출에 중요한 기초반응식의 반응을 억제시키며, 또한 산소부화율이 높아질수록 활성기 농도 감소율이 낮아짐으로 탄화수소 화염에서  $\text{CH}_3\text{Cl}$ 의 억제제 역할은 감소함을 보여주었다.

산소부화연소는 산화제로 공기를 사용할 때 보다 더 높은 화염 온도 및 더 적은 배기가스량의 특징 [8]을 갖고 있어 폐기물 소각 처리에 있어 많은 장점을 갖고 있다. 따라서 폐기물 소각에 산소부화연소를 적용할 경우, 폐기물의 파괴-제거 효율(Destruction-and-Removal Efficiency, DRE) 증대, 더 높은 에너지 활용, 더 빠른 연소반응 등을 가져옴으로 시스템 안정화, 유지비 저감, 보일러 효율 증대 등을 얻을 수 있다[8]. 예로서 염화 탄화수소 화합물 소각시 산화제로 공기를 사용할 때 보다 2차 오염물질의 발생을 저감시키는 것으로 알려져 있다[8].

본 연구는 과농조건에서 형성된  $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}$  예혼합 화염을 통해 산소부화 조건이 화염 내 PAH 생성에 미치는 영향을 조사하였다. 일반적으로 PAH는 매연 생성에 커다란 영향을 미치는 물질로 인식되고 있고, 독성이 강한 2차 오염물질의 형성에 기여하고 있다. 수치해석을 위해  $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}$  예혼합 화염에 대한 상세한 화학반응 메카니즘을 사용하였고, 이를 통해 산소부화조건에서  $\text{CH}_3\text{Cl}$ 이 PAH 생성에 미치는 효과를 살펴보았다.

## 2. 수치해석 방법

자유롭게 전파하는 과농 조건의  $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}$  예혼합 화염에 대한 수치해석을 수행하기 위해 RUN-1DL[9]을 사용하였다. 수치해석을 수행하기 위해 입력 데이터로 화학반응 메카니즘, 메카니즘에 있는 화학종의 열역학 및 전달 물성치가 요구된다. 이러한 물성치는 Shin and Lee[7]와 Appel et al.[10]에서 사용한 것을 이용하였다. 주어진 계산 구간 안에서 온도와 화학종 농도가 급격히 변하므로 이들의 정확한 분포를 얻기 위해 약 200~260개 정도의 격자

수를 사용하여 결과를 도출하였다. 초기조건으로 Ar 농도를 0으로 하고, 초기가스 온도는 300K, 압력은 1기압, 당량비는 1~1.6 범위를 갖는 화염에 대하여 수치해석을 수행하였다.

$\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}$  예혼합 화염에 적용한 상세한 화학반응 메카니즘은 크게 2부분으로 나누어져 있다. 첫 번째는 산소부화 조건에서  $\text{CH}_4$ 와  $\text{CH}_3\text{Cl}$ 의 산화과정을 잘 정립한 반응 메카니즘으로 Shin and Lee[7]이 사용한 것이다. 이 메카니즘은  $\text{C}_1$ 과  $\text{C}_2$  메카니즘으로 구성되어 있어  $\text{C}_3$  이상을 갖는 화학종들에 대한 반응을 포함하고 있지 않다. 두 번째는  $\text{C}_3$  이상의 화학종을 포함한 반응 메카니즘으로 Appel et al. [10]이 사용한 것이다. 이 메카니즘은  $\text{C}_6$ 까지의 선형 탄화수소, 탄소고리를 1개(benzene)에서 4개(pyrene)까지 갖고 있는 PAH 생성 과정을 포함하고 있다. 화학종들은 탄소, 수소 및 산소 원자로 구성되어 있어, 염소원자를 포함한 화합물의 기초반응식은 포함하고 있지 않다.

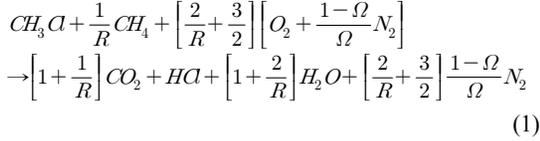
염소원자를 포함한 화합물의 기초반응식을 살펴보면  $\text{C}_2$  메카니즘까지는 매우 잘 확립되어 있지만,  $\text{C}_3$  이상을 갖는 염화 탄화수소 화학종에 대한 반응식은 특정 화학종만 소수 발표되고 있고 아직까지 정립되어 있지 않다[11]. 이것은 염화 탄화수소 화학종에 대한 반응식 연구가 주로 낮은 온도에서 수행되고 있어 이러한 결과를 높은 온도의 화염에 적용하는데 어려움이 있기 때문이다. 즉 반응물 또는 생성물인 염화 탄화수소 화학종은 고온조건에서 빠르게 열적 분해되는 특징을 갖고 있다. 추가적으로 이성질체(isomer) 반응물에 대한 반응을 정보도 부족하여 염화 탄화수소 반응식의 정립을 지연시킨다[11]. 고분자 염화 탄화수소 화학종의 기초반응식에 대한 정보 부족을 갖고 있지만, 활성기의 농도 변화가 PAH 또는 매연 생성에 커다란 역할을 하며[5], 이들의 농도 분포는  $\text{C}_1$ 과  $\text{C}_2$  반응 메카니즘을 통해 잘 예측됨으로 제한한 반응 메카니즘을 통해 PAH 생성 특성을 살필 수 있다.

사용한 상세한 반응 메카니즘은 불활성 기체로 아르곤(Ar)을 포함한 157개 화학종으로 구성되어 있고, 1,693개의 정방향 기초반응식을 포함하고 있으며, <http://mech.andong.ac.kr/~combustion/research-mech.htm>에서 얻을 수 있다.

## 3. 결과 및 논의

염화 탄화수소 화합물의 반응식에서 반응물의 H/Cl 비는 중요한 인자로 고려되고 있고, 그 값의 조건에 따라 생성물에서 고려해야 할 화학종이 달라진다. 즉 H/Cl 비가 1보다 큰 조건에서는 생성물로 염화수소(HCl)가 첨가되는 반면 H/Cl 비가 1보다 작

은 조건에서는 생성물로 Cl<sub>2</sub>를 추가해야 한다[12]. 메틸클로라이드(CH<sub>3</sub>Cl)의 연소에 메탄의 첨가는 H/Cl > 1을 만족시킴으로 생성물에 염화수소를 고려하였고, 당량비 1인 CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl 예혼합 화염의 반응식은 다음과 같이 표현된다.



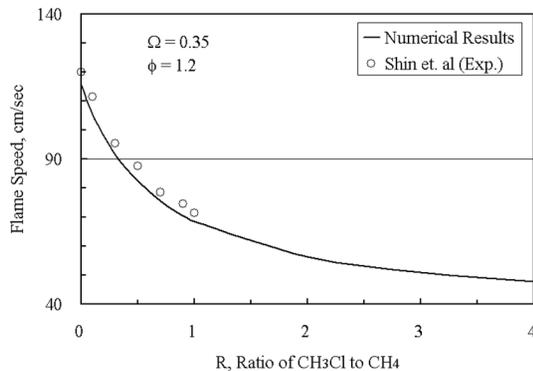
여기서 R은 CH<sub>3</sub>Cl/CH<sub>4</sub>의 몰 비, Ω는 산소부화율이다. 산소부화율은  $\frac{X_{O_2}}{X_{O_2} + X_{N_2}}$ 로 정의하였고, X<sub>O<sub>2</sub></sub>와 X<sub>N<sub>2</sub></sub>는 각각 산소와 질소의 몰수이다. 연료로서 CH<sub>4</sub>과 CH<sub>3</sub>Cl를 혼합한 화염은 0 이상의 R값을 갖고, 산소부화율은 0.21과 1사이의 범위에서 존재한다.

CH<sub>3</sub>Cl과 CH<sub>4</sub>의 완전 연소를 위해 요구되는 산소량은 탄소가 CO<sub>2</sub>, 염소원자가 HCl, 수소가 H<sub>2</sub>O로 변환되는 순서로 요구되는 산소량의 합으로 계산된다. 혼합물의 당량비(φ)는(실제 연료/산소 비)/(당량비 1에서 연료/산소 비)로 정의됨으로 그 결과는 다음과 같다[12].

$$\phi = [2/R + 3/2] / [\text{실제 사용된 산소 몰 수}] \quad (2)$$

### 3.1. 화염속도의 결과 비교

산소부화율 0.21과 0.35 조건에서 개발한 화학반응 메커니즘을 사용하여 자유롭게 전파하는 과농 CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl 예혼합 화염에 대한 화염속도 결과를 Figs. 1~3에 나타냈다. Fig. 1은 산소부화율 0.35 및 당량비 1.2인 조건에서 CH<sub>3</sub>Cl/CH<sub>4</sub> 몰비에 대한 화염속도를 보여준다. Shin et al.[13]의 실험결과는 노즐 형



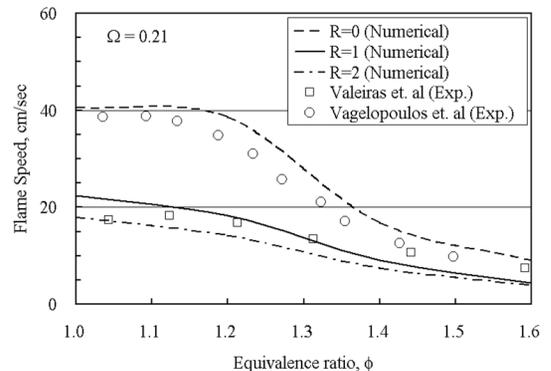
**Fig. 1.** A comparison of flame speeds for CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl premixed flames with respect to CH<sub>3</sub>Cl/CH<sub>4</sub> molar ratio.

태를 갖는 버너에 형성된 화염으로부터 셀리렌 이미지의 분석을 통해 얻어진 것이다. CH<sub>3</sub>Cl의 첨가량이 증가할수록 화염속도는 감소되는 경향을 보여주고 있고, 수치해석 결과가 실험 결과보다 약간 낮게 예측하고 있지만 두 결과는 전반적으로 매우 잘 일치한다.

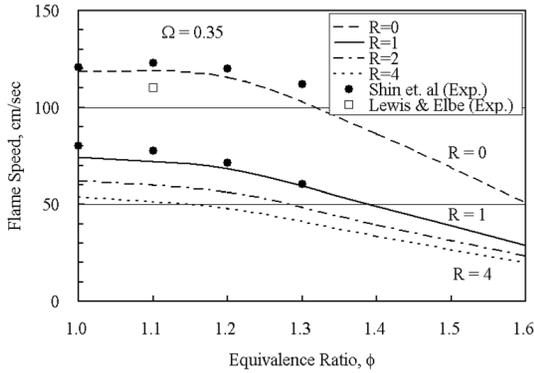
Fig. 2는 산소부화율 0.21(산화제로 공기 사용) 조건에서 당량비를 1~1.6까지 변화시키면서 계산된 화염속도 결과를 보여준다. 메탄 화염(R=0)에 대한 화염속도는 Vagelopoulous et al.[14]이 대항류 화염 측정법을 통해 얻어진 것이다. 화염속도는 당량비 1.2까지 완만하게 감소하다가 이후 급격히 감소함을 보여주며, 수치해석 결과는 비교적 잘 화염속도를 예측하고 있다.

R=1에 대한 화염속도는 Valeiras et al.[12]이 분젠 화염에 대하여 카메라로 찍은 화염을 화염 이미지 면적에 근거하여 측정하였기에 그 화염속도 결과는 낮게 예측된다. 수치해석과 실험결과를 비교하면, 당량비 1.2를 기준으로 낮은 영역에서 수치해석 결과는 약간 높게 나타나고, 높은 영역에서 약간 낮게 나타난다. 그러나 이러한 차이는 분젠화염의 화염대 굴곡에 따른 스트레치 효과, 정확한 화염면 측정 등에 기인[15,16]할 수 있다. CH<sub>3</sub>Cl의 첨가는 과농영역에서 화염속도의 저감을 가져오며, 낮은 R값에서 그 영향이 크게 나타난다.

Fig. 3은 산소부화율 0.35 조건에서 당량비를 1~1.6까지 변화시키면서 계산된 화염속도 결과를 보여준다. Shin et al.[13] 및 Lewis and Elbe[17]의 실험 결과를 그림에 나타냈고, 수치해석 결과는 실험 결과와 잘 일치한다. 산소부화율 0.21 조건에서의 결과와 마찬가지로 낮은 R값에서 화염속도 감소가 크게 나타난다. 다만 Ω=0.21인 경우, 화염속도가 낮음으로 인해 R값을 증가시키는데 제한을 갖고 있는 반면 Ω=0.35인 경우 좀 더 큰 R값에 대하여도 연소



**Fig. 2.** A comparison of flame speeds for CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl premixed flames at Ω=0.21 with respect to equivalence ratio.



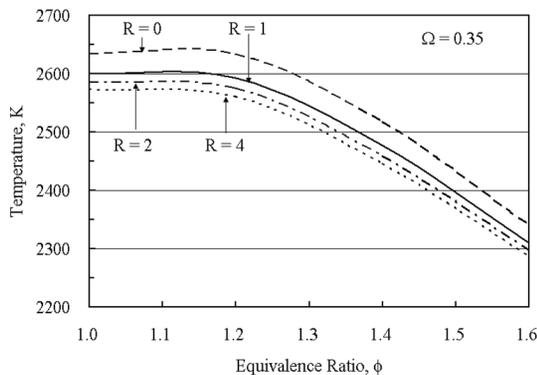
**Fig. 3.** A comparison of flame speeds for CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl premixed flames at  $\Omega=0.35$  with respect to equivalence ratio.

가 가능함을 보여준다.

화염속도는 층류 예혼합 화염에서 기초적 변수이면서 실제적으로 화염 전파의 중요한 요소이다. 산소부화된 CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl 예혼합 화염에 대한 이러한 인자는 제안한 반응 메커니즘을 통해 잘 예측하고 있다.

**3.2. 화염온도 분포**

Fig. 4는 계산한 화염 조건에서 최대 화염온도를 보여준다. 당량비 1.2 이후 화염온도는 비교적 급격하게 감소하고, CH<sub>3</sub>Cl의 첨가 비율이 증가할수록 최대 화염온도는 점점 감소한다. 두 연료의 생성 엔탈피(CH<sub>4</sub>: -74.9 kJ/mole, CH<sub>3</sub>Cl: -84.1 kJ/mol)[11] 차이는 크지 않으며, EQUIL 프로그램에서 계산한 단위 열화염온도 차이는 10K 미만[7]이고, 따라서 산소부화율이 0.21인 경우 R값이 2까지 증가하여도 최대 화염온도의 감소는 매우 미미하다. Fig. 4에 나타난 것처럼 산소부화율이 0.35인 경우 R값에 따라 최대 화염온도는 영향을 받는다. 이것은 염소원자의 양



**Fig. 4.** Maximum temperature values for CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl premixed flames at  $\Omega=0.35$  with respect to equivalence ratio.

이 증가할수록 화염 내 중요한 활성기인 H, OH 및 O의 농도 저감과 관련 있다. 특히 염소원자의 존재는 열방출률과 관련된 기초반응식(R368) OH+H<sub>2</sub>→H+H<sub>2</sub>O의 영향을 감소시키는 반면 (R812) OH+HCl→Cl+H<sub>2</sub>O의 영향을 증가[7]시킴으로 화염에서 CH<sub>3</sub>Cl 비율 증가는 온도 감소를 가져온다.

**3.3. PAH 농도 분포**

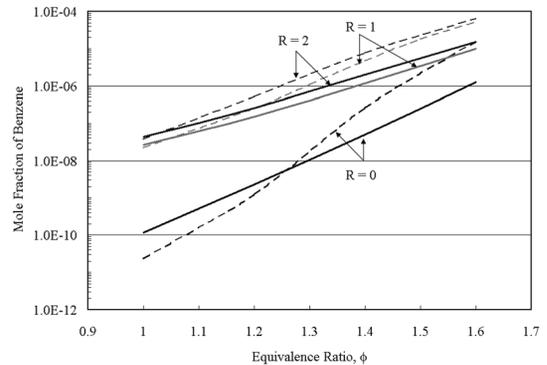
CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl 예혼합 화염에서 중요한 방향족 화합물 벤젠(benzene)과 피렌(pyrene)의 최대 농도를 Figs. 5와 6에 나타냈다. 점선은 산소부화율 0.21, 실선은 산소부화율 0.35의 결과이다. 과농조건에서 산소부화율 조건에 상관없이 벤젠과 피렌의 농도는 당량비가 증가함에 따라 증가한다. 그러나 산소부화율이 0.21에서 0.35로 증가함에 따라 매연 발생에 중요한 전구물질인 벤젠과 피렌의 최대 농도는 감소한다. 산소부화연소는 폐기물의 소각과정에서 발생 가능한 PAH의 생성을 억제하므로 이러한 물질을 통해 생성되는 2차 오염물질을 저감시킬 것으로 사료된다.

Fig. 5에서 보여주는 것처럼 낮은 산소부화율에서 당량비의 증가는 벤젠의 생성에 크게 영향을 미치는 반면 높은 산소부화율에서 그 영향은 감소한다. 과농조건에서 CH<sub>3</sub>Cl 첨가량의 증가는 벤젠 농도를 증가시키며, 소량의 첨가가 벤젠 생성에 더 큰 영향을 미친다.

기초반응식에 근거하여 벤젠 소비를 살펴보면, 다음처럼 중요한 활성기와 반응을 통해 이루어진다.



R값이 증가할수록 활성기의 농도는 감소함으로 벤젠의 소비율은 줄어든다. 반면 산소부화율의 증가는 화염온도를 높여줌으로 다음처럼 온도에 기인한 벤젠 소비 경로가 추가되기 때문에 산소부화율 0.21



**Fig. 5.** Maximum mole fraction of benzene with respect to equivalence ratio.

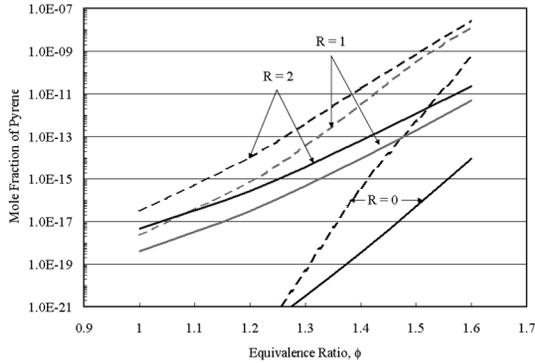
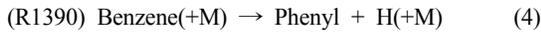


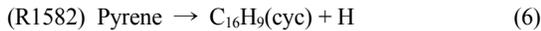
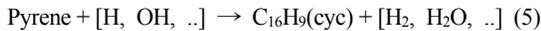
Fig. 6. Maximum mole fraction of pyrene with respect to equivalence ratio.

보다 산소부화율 0.35에서 낮은 벤젠 최대농도를 갖는다.



변수인 R값과 당량비 변화에 대한 피렌의 생성 경향은 벤젠의 생성과 비슷하다. 피렌의 최대 농도는 벤젠의 최대 농도보다 매우 낮은 값을 갖고 있지만, 당량비가 증가함에 따라 피렌의 생성량은 매우 급격히 증가한다.

피렌의 소비는 다음과 같은 반응식들을 통해 이루어진다.



피렌 소비 반응 경로는 벤젠의 경우와 같지만, 활성기의 농도보다 화염온도에 더 큰 영향을 받는다. 즉 산소부화율 0.35인 경우, 2번째 반응식이 1번째 반응식보다 더 큰 피렌 소비 경로가 된다.

#### 4. 결론

과농조건에서 형성된 CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl 예혼합 화염을 통해 산소부화 조건이 화염 내 PAH 생성에 미치는 영향을 조사하였다. 수치해석을 위해 CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl 예혼합 화염에 대한 상세한 화학반응 메커니즘을 사용하였고, 이를 통해 산소부화조건에서 PAH 생성에 CH<sub>3</sub>Cl의 역할을 살펴보았다.

연구에서 개발한 상세한 반응 메커니즘을 사용하여 과농조건에 CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl 예혼합 화염의 화염속도를 계산하였다. 그 결과는 다른 연구자들의 실험 결과와 비교되었고, 계산된 당량비 조건에서 잘 일치하였다.  $\Omega=0.21$ 인 경우, 화염속도가 낮음으로 인해

R값을 증가시키는데 제한을 갖고 있는 반면  $\Omega=0.35$ 인 경우, 좀 더 큰 R값에 대하여도 연소가 가능함을 보여준다.

과농조건에서 매연 발생에 중요한 전구물질인 벤젠과 피렌의 농도는 당량비가 증가함에 따라 증가함을 보여준다. 그러나 산소부화율을 증가시킬 경우, 화염 내에서 벤젠과 피렌의 최대 농도는 감소하므로 염화탄화수소 화합물의 소각과정에서 발생 가능한 PAH의 생성을 억제할 수 있고, 이러한 물질을 통해 생성되는 2차 오염물질을 저감시킬 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] Tanner, R.K., "Incineration of Industrial Waste", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 5, 1979, pp. 245-252
- [2] Karra, S.B., Gutman, D. and Senkan, S.M., "Chemical Kinetic Modeling of Fuel-Rich CH<sub>3</sub>Cl/CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/Ar Flames", Combust. Sci. Technol., Vol. 60, 1988, pp. 45-62
- [3] Karra S.B. and Senkan, S.M., "Chemical structures of sooting CH<sub>3</sub>Cl/CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/Ar and CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/Ar flames", Combust. Sci. Technol., Vol. 54, 1987, pp. 333-347
- [4] Steblev, A.V. and Frolov, Yu.E., "Soot formation in chlorine-hydrocarbon flames", Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 23, 1988, pp. 199-201
- [5] McKinnon, J.T. and Howard J.B., "Application of soot formation model: effects of chlorine", Combust. Sci. Technol., Vol. 74, 1990, pp. 175-197
- [6] Marr, J.A., Allison, D.M., Gilvane, L.M., Yerkey, L.A., Monchamp, P., Longwell, J.P., and Howard, J.B., "The effect of chlorine on PAH, soot, and tar yields from a Jet stirred/Plug flow reactor system", Combust. Sci. Technol., Vol. 85, 1992, pp. 65-76
- [7] Shin, S.S. and Lee, K.Y., "The influence of CH<sub>3</sub>Cl on CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> premixed flames under the O<sub>2</sub> enrichment", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 29, 2005, pp. 255-262
- [8] Baukal, C.E. Oxygen-Enhanced Combustion, CRC Press, 1998
- [9] Rogg, B., RUN-1DS: A Computer Program for the Simulation of One-dimensional Chemically Reacting Flows. University of Cambridge, 1991
- [10] Appel, J., Bockhorn, H., and Frenklach, M., "Ki-

- netic Modeling of Soot Formation with Detailed Chemistry and Physics: Laminar Premixed Flames of C<sub>2</sub> Hydrocarbons”, *Combust. Flame*, Vol. 121, 2000, pp. 122-136
- [11] Senkan, S.M., “Survey of Rate Coefficients in the C-H-Cl-O System”, Gardiner, Jr. W.C., (Ed), *Gas-phase Combustion Chemistry*, Springer, 2000
- [12] Valeiras, H., Gupta, A.K. and Senkan, S.M., “Laminar Burning Velocities of Chlorinated Hydrocarbon-Methane-Air Flames”, *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 36, 1987, pp. 123-133
- [13] Shin, S.S., Vega, E.W. and Lee, K.Y., “Experimental and numerical study of CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub>Cl/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> premixed flames under oxygen enrichment”, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 42, 2006, pp. 715-722
- [14] Vagelopoulos C.M., Egolfopoulos, F.N. and Law, C.K., “Further considerations on the determination of laminar flame speeds with the counter-flow twin-flame technique”, 25th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1994, pp. 1341-1347
- [15] Leylegian, J.C., Zhu, D.L., Law, C.K., and Wang, H., “Experiments and numerical simulation on the laminar flame speeds of dichloromethane and trichloromethane”, *Combust. Flame*, Vol. 114, 1998, p. 285
- [16] Wu, C.K. and Law, C.K., “On the determination of laminar flame speeds from stretched flames”, Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1984, p. 1941
- [17] Lewis, B. and Elbe G., *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, 3rd Ed. Academic Press, 1987

---

접수일 : 2010. 09. 03  
심사완료일 : 2010. 11. 17