

# 메탄/공기 대향류 비예혼합화염에서 $C_2HCl_3$ 의 영향

이 기 용\*

## The Influence of $C_2HCl_3$ on the $CH_4$ /Air Counterflow Nonpremixed Flames

Ki Yong Lee

Key Words: nonpremixed flame(비예혼합화염), critical strain rate(임계스트레인율), counterflow(대향류), chemical kinetic mechanism(화학반응 메카니즘)

### Abstract

Numerical simulations of nonpremixed  $CH_4/C_2HCl_3$ (Trichloroethylene, TCE)/Air flames are conducted at atmospheric pressure in order to understand the effect of hydrocarbon bound chlorine on methane/air flames. A chemical kinetic mechanism is employed, the adopted scheme involving 48 gas-phase species and 445 elementary reaction steps containing 223 backward reactions. The calculated temperature, velocity, and critical strain rate are compared with the experiments for the flame (16.1% TCE by Vol.) established at a strain rate of  $175s^{-1}$ . Whereas there is overall good agreement between predictions and the measurements, it appears that the critical strain rate is higher than measured, and some areas of further refinement in the kinetic mechanism are required.

### 1. 서론

산업 폐기물 중 연소시킬 수 있는 폐기물은 소각을 통해 처리할 때 가장 안전하며 여러 가지의 잇점도 가지고 있다 [1]. 최적의 설계로 만든 소각로를 잘 운전할 수만 있다면 소각을 통해서 모든 유기화합물을 이산화탄소와 수증기( $H_2O$ )

로 전환시킬 수 있고, 이 때 생성되는 소량의 유독가스(HCl, HF,  $SO_2$  등)는 세정과정(scrubbing process)을 통해 흡수시킴으로 대기 중에 방출되는 것을 억제할 수 있다. 소각 후 유독하지 않은 고체의 재들이 생성되는데 그것들의 양은 초기의 폐기물보다 훨씬 적고, 또한 소각과정 중 발생하는 에너지를 사용할 수 있으므로 경제적인 이득도 얻을 수 있다.

\* 안동대학교 기계공학부

일반적으로 소각로에서 폐기물을 소각할 때, 폐기물의 파괴 및 제거효율이 99.99%에 도달할 것을 요구하고 있다[2]. 폐기물 파괴에 있어서 그 효과와 제거효율은 어떤 조건으로 소각로를 설계 또는 운전하느냐에 따라 크게 달라질 수 있고, 따라서 원하지 않는 유해한 부산물의 생성을 감소시킬 수도 있다. 그러나 소각과정 중 이상적인 연소조건에서 벗어날 경우에는 소각 후 원하지 않는 유해한 부산물이 생성되거나 불완전하게 연소된 원래의 폐기물 등이 그대로 방출됨으로써 소각로의 배출량 기준에서 벗어날 수 있고, 이것은 공해문제 또는 사회문제를 야기시킬 수 있다.

소각과정 중 Cl 원자를 포함한 탄화수소 화합물(chlorinated hydrocarbons, CHCs)은 탄화수소의 연소를 방해하는 억제제(inhibitor) 역할을 하는 것으로 알려져 있다[3, 4]. 또한 이 화합물은 화염내에서 공해물질(CO, 고분자 화합물, 매연 등)과 소각로 내에서 유해물질(dibenzo-dioxins, dibenzo-furans 등)의 발생을 유발시키는 것으로 알려져 있다[5-7].

CHCs 중  $C_2HCl_3$ 는 자체로 연소되기 쉬운 물질이기 아니기 때문에 탄화수소 연소시 보조 연료로 사용되어 연소된다. 따라서 탄화수소 연소에서  $C_2HCl_3$ 의 역할에 대한 좀 더 완전한 연구가 필요하다. 현재  $C_2HCl_3$ 의 연소에 대한 기초 연구[8-10]가 진행되고 있으나 그 연구의 양은 많지 않다.

본 연구에서는 메탄을 주연료로 하고,  $C_2HCl_3$ (trichloroethylene, TCE)를 억제제로 첨가한 혼합기로부터 형성된  $CH_4/C_2HCl_3/Air$  대향류 비예혼합화염의 구조를 수치해석을 통해 조사했다. 이를 수행하기 위해  $CH_4/C_2HCl_3/Air$  대향류 비

예혼합화염에 대한 화학반응 메카니즘(chemical kinetic mechanism)을 정립했다. 구조적으로 잘 알려진  $CH_4/Air$  대향류 비예혼합화염에 TCE가 소량 첨가되어도 화염의 유동장에 큰 영향이 미치지 않는 점을 이용하여 안정된 화학종의 농도 분포를 통해 억제제로서 TCE의 화학적 반응 효과도 조사했다.

## 2. 수치해법

$CH_4/C_2HCl_3/Air$  대향류 비예혼합화염에 대한 수치 해석을 수행하기 위해 이미 개발된 수치해석 코드(RUN-IDL)[11, 12]를 사용했는데 이 코드는 1차원 층류 대향류 화염에 대한 구조를 해석하기 위해 개발된 것이다. 수행을 위해서는 화학반응 메카니즘과 사용된 화학종들의 열역학적 물성치 및 전달 물성치가 필요하다. 주어진 계산 구간 안에서 온도 및 화학종의 농도 분포가 급격히 변하므로 이들의 정확한 분포를 얻기 위해서는 구간을 조밀히 세분할 필요가 있고, 이를 위해 약 180-210 정도의 격자수를 사용하여 결과들을 얻었다.

### 2.1. 화학종의 열역학적 및 전달물성치

사용된 화학종의 열역학적 물성치는 생성열(heat of formation), 엔트로피와 온도 변화에 따른 비열값을 계산하는데 사용되었고, 여러 참고문헌[12, 13]을 통해 얻어졌다.

사용된 화학종의 전달 물성치는 점도계수(viscosity), 열전달계수와 확산계수(diffusion coefficient)를 계산하는데 사용되었으며, C/H/O로 구성된 화학종 및 Cl을 포함한 일부 화학종들( $COCl_2$ ,  $COCl$ ,  $HOCl$ ,  $ClO$ ,  $HCl$ ,  $Cl_2$  및  $Cl$ )의 전달 물성치는 여러 참고문헌[12-15]을 통해 얻어

졌다. 그러나 앞서 언급한 화학종을 제외한 Cl을 포함한 화학종( $C_2Cl_4$ ,  $C_2Cl_3$ ,  $C_2Cl_2$ ,  $C_2HCl$ ,  $CHCl$ ,  $CHCl_2$ ,  $CHCl_3$ ,  $CHCl_4$ ,  $CCl_3$ ,  $CCl_2$ ,  $C_2HCl_2$  및  $C_2HCl_3$ )들의 전달 물성치는 Ref. 14에 있는 식들을 이용해서 구하였다.

## 2.2 사용된 화학반응 메카니즘

메탄 연소 및  $C_2HCl_3$  연소를 포함한 화학반응 메카니즘을 개발하였다. 이 반응 메카니즘은 Mill와 Bowman[16]이 메탄 연소를 위해 만든 화학반응 메카니즘과 Chang과 Senkan[8]이  $C_2HCl_3$  연소를 위해 만든 화학반응 메카니즘을 근간으로 하고 Cl을 포함한 화학종의 화학반응 메카니즘들[9, 17-19]로부터 필요한 기초반응식(elementary reaction)들을 취하여 얻어진 화학반응 메카니즘으로 구성되었다.

언급한 여러 화학반응 메카니즘들에는 탄소원자를 3개 이상을 갖고 있는 화학종들이 존재하지만 이러한 화학종의 농도는  $C_1$  또는  $C_2$ 를 포함한 화학종의 농도와 비교하여 매우 낮기 때문에 본 화학반응 메카니즘에서는 이러한 화학종들을 제외시켰다. 결과로써  $CH_4/C_2HCl_3/Air$  대향류 비예혼합화염에 대한 수치 해석을 수행하기 위해 사용된 화학반응 메카니즘은 불활성 기체로서  $N_2$ 를 포함한 46개의 화학종과 445개의 순방향(forward) 및 역방향(backward) 기초반응식으로 구성되어 있고, Ref. 20에 소개되어 있다.

## 2.3 대향류 비예혼합화염

대향류 비예혼합화염의 구조는 한쪽 덕트에서는 연료가 방출되고 마주보는 덕트에서는 산화제가 방출되면서 두 덕트 사이에 정체면이 형성된다. 정체면에서의 속도는 0이다. 방출된 연료는 확

산에 의해 산화제 쪽으로 이동하면서 산화제와 반응하여 산화제 쪽에 확산화염이 생성된다. 연료와 산화제가 덕트로부터 빠져나가기 때문에 대향류 화염은 스트레치된 상태에서 존재한다. 이러한 과정으로부터 얻어진 대향류 화염의 구조는 온도 및 농도에 대하여 안정적이고, 1차원이며, 수치해석상으로도 잘 해석되어진다. 최근까지 대향류 화염을 이용해서 여러 종류의 연료에 대한 화염구조 및 화염의 소염조건을 조사하는 실험과 수치해석 등이 많이 수행되어 왔다 [21-24].

## 3. 결과 및 논의

### 3.1 수치해석 결과와 실험결과의 비교

수치해석에서 얻어진 결과와 실험에서 얻어진 결과를 비교함으로써 제안된 화학반응 메카니즘을 검증했다. Yang과 Kennedy[10]가 스트레인율이  $175s^{-1}$ 이고 16.1%(체적비) TCE를 메탄과 혼합해서 형성된  $CH_4/C_2HCl_3/Air$  대향류 비예혼합화염에 대한 구조를 조사하기 위해 실험을 수행하였다. 이 실험 결과를 수치해석을 통해서 얻어진 결과들(화염 온도, 속도 및 임계스트레인율)과 비교하였다.

Fig. 1은 두 덕트 사이에서 수치해석을 통해 얻어진 온도 분포와 열전대에 의해 측정된 온도 분포를 보여준다. 실선은 수치해석을 통해 얻어진 온도분포이고 점들은 실험에서 얻어진 온도분포를 나타낸다. 이 두 결과는 비교적 잘 일치하고 있다. 최대화염 온도에서 실험값이 수치해석에서 얻어진 값들보다 낮게 나타나는데, 이는 실험값이 열전대 비드(thermocouple bead)에서의 복사열 손실을 고려치 않았기 때문이다. 이 손실을 고려한다면 실험값보다 최대로 약 200K

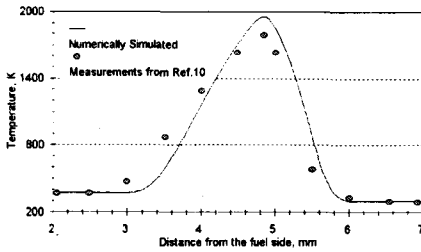


Fig.1 Measured and calculated temperature profiles for the  $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{HCl}_3/\text{Air}$  flame (16.1% TCE by Vol.).

정도의 온도가 증가하며[10], 이 화염온도는 수치해석에서 얻어진 최대 화염온도와 거의 일치한다. 상온에서 TCE는 액체상태로 존재하므로 TCE의 비등점( $87.1^\circ\text{C}$ ) 이상의 온도를 유지하기 위해 연료측의 출구온도는  $370\text{K}$ , 산화제측의 출구온도는  $300\text{K}$ 로 했다.

Fig. 2는 수치해석을 통해 계산된 두 덕트사이의 속도 분포와 LDV(laser doplar velocitimeter)로 측정된 속도 분포를 보여주고 있다. 실선은 수치해석을 통해 얻어진 속도분포이고 점들은 실험에서 얻어진 속도분포를 나타낸다. 여기서 화염들의 스트레인은  $175\text{s}^{-1}$ 이며, 스트레인은 산화제측에서의 속도 기울기( $a = -\Delta V/\Delta x$ )로 정의하였다. 속도가 0 이하 또는 0 근처인 부분(정체점으로부터 연료 덕트까지의 구간)에 대한 실험값이 없어서 화염 내부와 산화제(또는 공기)측 부근의 속도만 표시하였다. 화염이 존재하는 구간에서는 두 결과가 비교적 잘 일치하지만 산화제측 부근의 속도는 수치해석에서 얻어진 값이 실험값보다 약간 높게 나타났다.

Fig. 3은 연료로서 사용된 메탄에 TCE

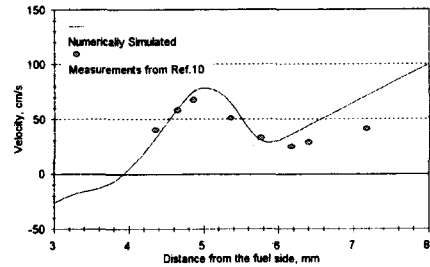


Fig.2 Measured and calculated velocity profiles for the  $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{HCl}_3/\text{Air}$  flame (16.1% TCE by Vol.).

의 첨가량을 증가시킬 경우 임계 스트레인율(critical strain rate)의 변화를 나타낸다. 점과 원은 각각 수치해석과 실험에서 얻어진 임계 스트레인율을 나타낸다. 일반적으로 스트레인율의 증가와 더불어 대항류 화염은 소멸(extinction)이 발생하고, 소멸이 발생하기 직전의 스트레인율을 임계 스트레인율로 정의한다. 수치해석을 수행하여 얻어진 임계 스트레인율은 임의의 스트레인율에서 화염이 존재하고, 그 값보다 스트레인율이 1 증가한 값에서 소멸이 발생(온도분포가 두 덕트의 초기 온도값으로 존재)할 때의 스트레인율로 나타낸다.

첨가된 TCE의 체적비가 0인 경우는 연료로서 메탄만을 사용해서 형성된 화염을 나타내며, 이 화염에 대하여 수치해석을 통해 얻어진 임계 스트레인율은  $335\text{s}^{-1}$ 이다. 이 값은 실험에서 대항류 화염에 대하여 소멸 직전 얻어진 스트레인율  $340\text{s}^{-1}$ [25]과 잘 일치한다. 그러므로 메탄 연소에 제안된 화학반응 메카니즘을 적용하여 메탄/공기 대항류 비예혼합 화염에 대한 화염구조를 해석할 수 있음을 보여준다.

수치해석 및 실험의 결과로써 연료측

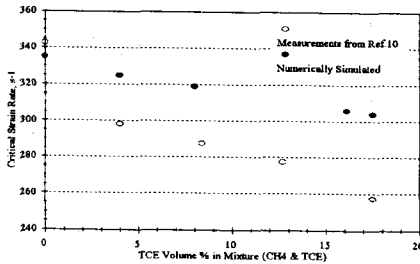


Fig.3 Measured and calculated critical strain rate at extinction for the flame burning methane and TCE as fuel.

에 TCE의 첨가량을 증가시키면 화염의 임계 스트레인율은 감소한다. TCE가 메탄에 첨가된 화염들의 경우, 수치해석에서 얻어진 임계 스트레인율은 실험에서 얻어진 값들보다 크다. 이것은 실험에서 얻어진 임계 스트레인율은 소염 직전이 기보다 소염에 다소 못미치는 조건에서 형성된 화염으로부터 측정된 값이기 때문이다[10]. TCE의 첨가량이 증가할수록 실험값과 수치해석에서 얻어진 값들과의 차이가 증가함을 알 수 있다. 상대적으로 TCE의 첨가량이 많은 상태에서 형성된 화염인 경우, TCE 연소와 관련된 화학반응 메커니즘이  $CH_4/C_2HCl_3$  혼합기의 연소 화학반응 메커니즘에 있어서 중요한 역할을 하게 된다. 수치해석과 실험과의 임계 스트레인율 차이는 CI를 포함한 화학종들의 전달 물성치의 부정확성, 화학반응 메커니즘에서 일부 화학종의 소비과정의 불규명[8] 등이 원인으로 사료된다. 또한 TCE 첨가량의 많은 상태에서 형성된 화염들은 불안정한 상태로 존재하는 것으로 알려졌다[10]. 앞으로 TCE 연소시 형성된 화염의 구조를 좀 더 정확히 규명하기 위하여 화학반응 메커니즘을 정립시킬 필요가 있고, 이를 위해

좀 더 많은 연구가 필요하다.

이상과 같이 본 연구에서 제안한 화학반응 메커니즘은 소량의 TCE를 메탄과 혼합해서 형성된  $CH_4/C_2HCl_3/Air$  대항류 비예혼합화염의 구조를 연구하는데 사용될 수 있다.

### 3.2 TCE 첨가에 따른 화염구조의 변화

연소과정은 유동장과 화학반응이 결합된 상태로 존재한다. 화염 내의 화학반응에 의한 구조변화를 조사하기 위해서는 유동장을 일정하게 고정시킬 필요가 있다. 이를 위해 스트레인율을 일정하게 유지하면서 소량의 TCE 첨가량에 변화를 주어 화염의 구조를 조사하였다. 수치해석에 있어서 포텐셜 유동(potential flow)을 경계조건으로 사용하기 때문에 높은 스트레인율보다 낮은 스트레인율에서 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그래서 체적비가 각각 0(100% 메탄), 4, 8, 및 16.1 %인 TCE가 메탄에 첨가된 혼합기로부터 형성된 대항류 비예혼합 화염에 대하여 임계 스트레인율보다 작은 스트레인율  $175s^{-1}$ 를 갖는 화염들의 구조를 조사하였다.

Fig 4.는 연료측에 TCE의 첨가량에 변화를 주어 서로 다른 4 종류의 조건에서 형성된 화염들에 대한 온도분포를 나타낸다. TCE의 첨가량을 증가시킬 때 최대온도값은 1977K(0%)에서 1955K(16.1%)로 약간 감소했다. 이것은 TCE의 생성열(heat of formation,  $-16.74$  KJ/mole)이 메탄의 것( $-79.90$  KJ/mole) 보다 매우 낮기 때문이다. TCE 첨가량의 증가에 따라 최대온도의 위치는 연료측으로 이동하였고, 온도분포도 같이 연료측으로 이동한다. 또한 최대온도점을 중심으로 연료측의 온도분포 이동이 산화제측의 온도분포 이동보다 작아서 전체적인 온도분포

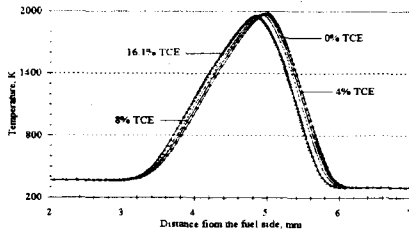


Fig.4 Calculated temperature profiles.

의 폭은 약간 감소한다.

Fig 5.는 4 종류의 조건에서 형성된 화염들에 대한 속도분포를 나타낸다. 계산된 속도는 화염 근처로 접근할수록 선형적으로 감소하다가 화염 내에서는 증가하며 다시 정체점 근처로 갈수록 감소한다. TCE의 첨가량을 증가시키면 화염 내에서 계산된 최고속도는 감소하며, 그것의 위치는 연료 측으로 이동한다. 이러한 특징은 화염의 최고 온도의 변화와 같다. 언급한 화염들에 대한 스트레인은  $175s^{-1}$ 로 고정하기 때문에 산화제 측의 속도 기울기는 일정하다.

Fig. 6은 각각 4%와 16.1%(체적비)의 TCE를 메탄과 혼합했을 때 형성된 화염에서 중요한 화학종(CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>)의 농도분포를 나타낸다. 화학종의 농도분포 그림에서 실선과 심볼은 각각 4%와

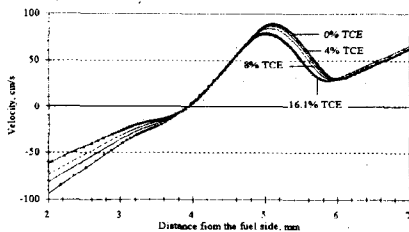


Fig.5 Calculated velocity profiles.

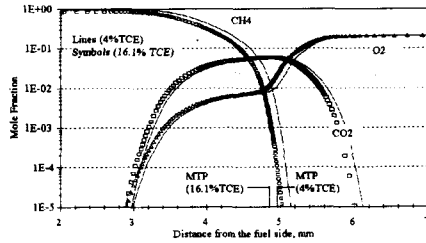


Fig.6 Species concentration profiles of the major species.

16.1%(체적비)의 TCE가 연료측에 첨가된 화염에서의 농도분포를 나타내며, MTP는 각 화염에서 최대온도의 위치이다. 메탄의 농도는 화염에 접근할수록 서서히 감소하다가 화염 근처에서 급격히 감소하며, 농도가  $1 \times 10^{-5}$ (몰분율)에 도달하는 지점은 TCE의 양이 증가할수록 연료측으로 이동한다. 메탄의 완전한 소비는 최고온도가 발생하는 지점이 아니라 그 지점을 지나 산화제측에서 이루어진다.

산소의 농도는 화염에 접근할수록 감소하지만 화염을 지나서도 일정한 농도 값을 유지하다 급격히 감소함을 알 수 있다. TCE 첨가량이 증가할수록 화염의 최고 온도점 근처에서 산소의 농도는  $1.08 \times 10^{-2}$ (4% TCE 화염)에서  $1.24 \times$

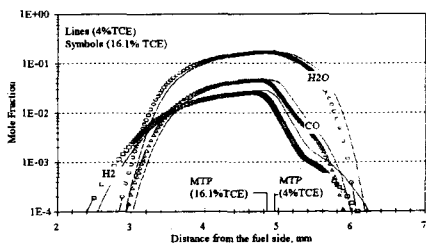


Fig.7 Species concentration profiles of the species.

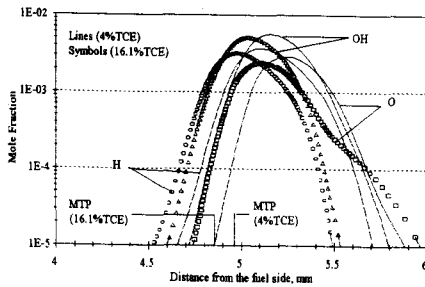


Fig.8 Species concentration profiles of the species.

10<sup>-2</sup>(16.1% TCE 화염)로 증가한다. 이것은 혼합기(CH<sub>4</sub>+TCE)를 완전 연소(생성물로서 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, HCl을 고려)시키는데 필요한 산소의 몰수가 1.99(4% TCE 화염)에서 1.96(16.1% TCE 화염)으로 감소하기 때문이다. 따라서 16% TCE 화염에서 화염을 지나 통과하는 산소의 양은 4% TCE 화염에서보다 더 많다. CO<sub>2</sub>의 농도 최고치는 약간 증가하고, 전체의 농도분포는 TCE 첨가량의 증가에 따라 연료측으로 이동한다.

Fig. 7은 2종류의 화염에서 H<sub>2</sub>O, CO, 및 H<sub>2</sub>의 농도분포를 나타낸다. 이러한 화학종의 농도 최고치는 TCE 첨가량의

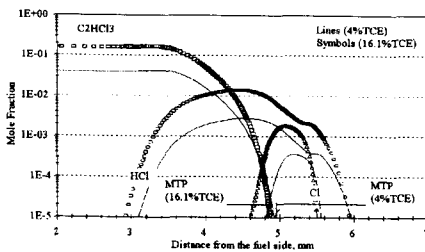


Fig.9 Species concentration profiles of the Cl containing species.

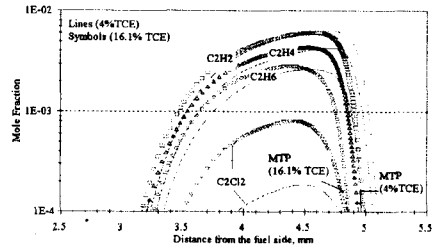


Fig.10 Species concentration profiles of the C<sub>2</sub> containing species.

증가에 따라 약간 감소하고, 그것의 위치는 연료측으로 이동한다. 또한 전체의 농도분포도 연료측으로 이동한다.

Fig. 8은 2종류의 화염에서 O, OH, 및 H의 농도분포를 나타낸다. 이러한 화학종의 농도는 화염의 최고온도를 기점으로 주로 산화제측에 넓게 분포되어있다. TCE의 첨가량을 증가시키면 이들의 최고 농도값은 약간의 감소하고, 그것의 위치와 전체의 농도분포는 연료측으로 이동한다. 그러나 연료측으로부터 5.7mm를 지나서 화학종 O의 분포는 TCE 첨가량의 증가에 따라 산화제측으로 이동한다.

Fig. 9는 Cl을 포함한 중요한 화학종(HCl, Cl 및 C<sub>2</sub>HCl<sub>3</sub>)의 농도분포를 나타낸다. TCE의 농도분포는 메탄의 농도분포와 마찬가지로 화염 근처에서 급격히 감소하고, 농도가 1×10<sup>-5</sup>(몰분율)에 도달하는 지점에서는 TCE 첨가량이 증가함에 따라 연료측으로 이동한다. 그러나 TCE의 완전한 소비는 메탄의 완전한 소비와는 달리 화염의 최고온도 부근에서 이루어진다. 즉 TCE의 분해가 메탄의 분해보다도 빠르게 진행되기 때문에 두 물질의 농도가 1×10<sup>-5</sup>에 도달하는 위치는 TCE가 메탄보다 먼저 발생한다.

TCE 첨가량을 증가시키면 HCl의 최고 농도치는  $2.83 \times 10^{-3}$ 에서  $1.39 \times 10^{-2}$ 으로 약 5배 증가되며, 이 화학종의 농도는 연료 쪽으로 더 이동하며 더 넓게 분포한다. 연료측에 첨가된 TCE의 양이 약 4배정도 증가함에 따라 Cl의 농도분포는 HCl의 농도분포와 마찬가지로 되고, 이 화학종의 최고 농도치는  $3.58 \times 10^{-4}$ 에서  $1.82 \times 10^{-3}$ 으로 약 5배 정도 증가한다.

Fig. 10은  $C_2$ 를 포함한 화학종( $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ , 및  $C_2Cl_2$ )의 농도분포를 나타낸다. 이러한 화학종들의 농도는 화염의 최고온도를 기점으로 연료측에 넓게 분포되어 있고, 이들은 화염의 최고온도 부근에서 급격히 소비된다.  $C_2$  화학종들의 최대 농도값의 변화를 살펴보면 TCE 첨가량이 증가함에 따라 화학종  $C_2H_2$ 는 약간 감소하지만 화학종  $C_2H_6$ 와  $C_2H_4$ 는 약간 증가한다. 연료에서 염소원자(Cl)의 몰수가 증가하면  $C_2Cl_2$ 의 경우 최대 농도값은  $1.85 \times 10^{-4}$ 에서  $8.03 \times 10^{-4}$ 으로 크게 증가한다.

### 3. 결론

TCE의 첨가량 변화에 따른  $CH_4/C_2HCl_3/Air$  대향류 비에혼합화염의 구조 변화를 조사하기 위해 수치해석을 수행하였고, 각 경우에 대해 온도, 속도 및 안정된 화학종들의 농도 등의 변화를 조사하였다.

1) 본 연구에서 제안한  $CH_4/C_2HCl_3/Air$  대향류 비에혼합화염에 대한 화학반응 메카니즘을 갖고 수행한 수치해석 결과들은 Yang과 Kennedy가 스트레인을  $175s^{-1}$ 이고 16.1%(체적비) TCE를 메탄과 혼합해서 형성된 대향류 비에혼합화염에 대해 얻어진 실험의 결과들(온도, 속도 및 임계 스트레인율)과 비교하였고, 결

과적으로 어느정도 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 화학반응 메카니즘은 소량의 TCE를 메탄과 혼합해서 형성된  $CH_4/C_2HCl_3/Air$  대향류 비에혼합화염의 구조를 해석할 수 있는 기초 자료로 사용할 수 있다. 그러나 다량의 TCE를 메탄과 혼합해서 형성된 화염에 대한 구조를 해석하기 위해서는 TCE의 화학반응 메카니즘을 정립하기 위한 연구가 좀 더 필요하다.

2)  $175s^{-1}$ 의 스트레인을 갖는 화염에서 TCE의 첨가량을 증가시켰을 경우, 온도 분포를 조사하면 TCE의 생성열이 메탄의 것보다 매우 낮기 때문에 최대 온도값은 약간 감소하고, 그 위치는 연료측으로 이동한다. 속도 분포에서도 화염 내에서 최고 속도는 약간 감소하며, 그것의 위치도 연료측으로 이동한다. 화학종들의 농도분포를 보면 TCE의 첨가량이 증가함에 따라 TCE가 메탄보다도 화염에 앞서서 먼저 분해되고 소비되어지며, Cl을 포함한 화학종(HCl, Cl,  $C_2Cl_2$ )과  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ 들의 농도는 증가하는 반면  $H_2O$ , CO,  $H_2$ 의 농도는 감소한다. 또한 화학종 H, OH, O,  $C_2H_2$ 의 농도도 감소하며, 이들의 최대 농도값의 위치도 연료측으로 이동한다.

### 후기

본 연구는 1997년도 안동대학교 학술 연구조성비의 지원 하에 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Tanner, R.K. (1979), Prog. Energy



- Combust. Sci., 5, p. 245.
2. Oppelt, E.T. (1987), JAPCA, 37, p. 558.
  3. Wilson, W.E., O'Donovan, J.T., and Fristron, R.M. (1969), Twelfth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, p. 929.
  4. Westbrook, C. K. (1982), Nineteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, p. 127.
  5. Senkan, S.M., Robinson, J.M., and Gupta, A.K. (1983), Combust. Flame, 49, p. 305.
  6. Karra, S.B. and Senkan, S.M. (1987), Combust. Sci. Tech., 54, p. 333.
  7. Karra, S.B., Gutman, D., and Senkan, S.M. (1988), Combust. Sci. Technol., 60, p. 45.
  8. Chang, W.D. and Senkan, S.M. (1989), Environ. Sci. Technol., 23, p.442.
  9. Chang, W.D., Karra, S.B., and Senkan, S.M. (1986), Combust. Sci. Technol., 49, p. 107.
  10. Yang, G. and Kennedy, I.M. (1993) Combust. Flame, 92, p. 87.
  11. Rogg, B. (1993), "RUN-1DL: The Cambridge Universal Laminar Flamelet Computer Code," in: Reduced Kinetic Mechanism for Applications in Combustion Systems, Appendix C, N. Peters and B. Rogg (Eds.), Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
  12. Rogg, B. (1994), "RUN-1DL: The Universal Laminar Flame and Flamelet Computer Code," User Manual 1994.
  13. Linstrom P.J., "CKMech: Mechanism generation and data base program," Developed to NIST specification.
  14. Reid, R.C., Prausnitz, J.M., Sherwood, T.K. (1977), The Properties of Gases and Liquids, 3rd ed., McGraw Hill, New York.
  15. Hirschfelder, J. O., Curtiss, C.F., and Bird, R.B. (1954), Molecular Theory of Gases and Liquids, John Wiley, New York.
  16. Miller, J.A. and Bowman, C.T. (1989), Prog. Energy Combust. Sci., 15, p. 287.
  17. Lee, K.Y. (1995), Flame Structure Studies Applied to Inhibition, Extinction, and Pollutant Formation, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Chicago.
  18. Bose, D. and Senkan, S. M. (1983), Combust. Sci. Technol., 35, p. 187.
  19. Wang, H., Hahn, T.O., Sung, C.J., and Law, C.K. (1996), Combust. Flame, 105, p. 291.
  20. 이기용, (1998), "탄화수소 화염의 구조에서  $C_2HCl_3$ 의 영향에 대한 수치 해석의 연구," 보고서, 안동대학교.
  21. Dixon-Lewis, G., David, T., Gaskell, P.H., Fukutani, S., Jinno, H., Miller, J.A., Kee, R.J., Smooke, M.D., Peters, N., Effelsburg, E., Warnatz, J., and Behrendt, F. (1984), Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, p. 1893.
  22. Smooke, M.D., Puri, I.K., and Sechadri, K (1986), Twinty-First Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, p. 1783.

23. Rogg, B. (1988), *Combust. Flame*, 73, p. 45.
24. Lee, K.Y., Yang, M.H., and Puri, I.K. (1993), *Combust. Flame*, 92, p. 419.
25. Tsuji, H. and Yamaoka, I. (1971), *Thirteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh*, p. 723.