

초 희박혼합기의 고온산화와 폐열회수에 관한 실험적 연구

이강주 · 정영식 · 이창언* · 김문철 · 임장순*

인하공업전문대학 기계과, *인하대학교 기계공학과

Experimental Study on High Temperature Oxidation of Ultra-Lean Mixture and Heat Recovery

Kang-Ju Lee, Young-Sik Jeong, Chang-Eon Lee*, Moon-Chull Kim
and Chang-Soon Yim*

Department of Mechanical Engineering, Inha Technical College

*Department of Mechanical Engineering, Inha University

요 약

산업분야의 여러공정에서 배출되는 휘발성 유기화합물은 1차적인 작업자에 대한 유해성뿐만이 아니라 대기중에 배출시의 제 2차 오염물질의 생성 때문에 최근 들어 이러한 물질의 처리에 큰 관심이 집중되고 있다. 본 연구에서는 휘발성 유기화합물로서 프로판을 사용하여 이러한 초 희박 혼합기의 제거를 위해 재생열산화법이 제안되었다. 실험장치에는 중앙에 연소실과 전기적 열량공급장치를 장착하였다. 초 희박 혼합기의 연소실에서의 산화과정과 열산화장치의 폐열회수특성을 연구하기 위하여 혼합기의 농도, 유속 및 연소실 최대온도와 같은 다양한 작동조건을 고려하였다. 그 결과, 재생열산화장치가 초 희박 혼합기의 산화에 적절하게 사용될 수 있음을 알았으며 최대 96%의 제거효율을 얻을 수 있었다. 산화과정중에 발생하여 배출되는 CO는 운전조건을 변화시킴으로써 그 농도를 낮출 수 있었으며 열적 NOx는 배출되지 않았다. 폐열회수효율은 전 운전영역에서 높게 나타났으며 그 값이 최대 98%에 이르렀다.

Abstract — The generation of secondary air pollution as well as first hurtfulness on workers has recently become serious due to the Volatile Organic Compounds emission from various industrial processes. In this study, regenerative thermal oxidization method is proposed for the destruction purpose of ultra-lean propane mixture as a VOC. The experimental apparatus includes central free chamber and electric heat supply system. The number of operating conditions such as mixture concentration, flow velocity and chamber maximum temperature are considered to investigate the oxidation process of ultra-lean mixture and heat recovery characteristics of thermal oxidizer. As the results, it is shown that regenerative thermal oxidizer is effectively utilized to oxidize ultra-lean mixture and has destruction efficiency of 96% as a maximum. CO generated in the oxidation process can be reduced with the modification of operating condition, and thermal NOx is not emitted at all. Heat recovery efficiency is maintained high with the maximum value of 98%.

1. 서 론

가정용 및 산업용의 여러 열기구에서 세라믹을 사용하고 이러한 장치에 산화과정을 적용하는 예가 상당수에 이르고 있다^[1]. 이와 같은 세라믹에서의 산화는 1000°C 이상의 비교적 고온에서의 초과엔탈피(excess enthalpy) 현상에 기초를 둔 복사열 발생과정이나, 또는 다양한 방법으로서 열을 재생하는 과정에서 이용된다. 그리고, 초

과엔탈피 연소에 관한 연구는 내부 열재순환(internal heat recirculation) 현상을 포함하고 있으며 상류측의 가스를 예열하여 단열화염온도보다 높은 온도를 나타내는 것이 이에 해당된다^{[2][6]}.

이러한 방법은 Weinberg 등에 의해 그 가능성이 제시된 이후 여러 분야에 응용이 되어 오고 있다^{[7][11]}. 특히, Echigo 등은 다공성물질에서의 연소현상에 대한 실험 및 그 결과를 꾸준히 발표하였었다. 최근에 와서는

이와 유사한 개념으로 열산화법(thermal oxidation)이 휘발성 유기화합물(VOC : Volatile Organic Compounds)의 혼합기를 이산화탄소와 수증기로 산화시키는데 효과적이기 때문에 각종산업공정에서 배출되는 가스의 청정화에 적용되고 있다^[12]. VOC 혼합기는 일반적으로 다량의 공기와 불활성가스의 혼합으로 인하여 매우 희박한 상태이므로 경우에 따라서는 외부에너지의 공급이 필요하다. 이러한 이유로 인하여 에너지의 유용한 활용을 목적으로 세라믹재료의 다공성물질의 사용이 제안될 수 있으며 배기가스를 통한 폐열을 최소화하고 혼합기를 예열하는 효과를 기대할 수 있다.

이와 같은 방법의 일환으로 메탄의 연소현상에 대한 기초연구가 다공성물질을 이용하는 왕복식 초단열 연소기에서 이루어졌다^[13]. 이 연구에서는 서로 다른 형태의 세라믹 물질이 충전되어 있는 연소기에서 당량비, 반주기, 유속, 광학 두께 및 최대온도와 같은 지배적인 변수들을 조절함으로써 탄화수소를 적절히 산화시킬 수 있다고 보고하고 있다. 그러나, 외부 열에너지의 공급이 필요없는 가연한계(flammable limit) 내에서의 연소만을 다루고 있으며 실제의 경우를 고려하면 이보다 희박한 상태의 혼합기 산화에 대한 연구가 필요한 것이 사실이다. 따라서, 본 연구에서는 희박 가연한계 이하의 초 희

박 프로판 혼합기에 대한 연구를 수행하였다. 충분한 산화를 위하여 열산화장치의 중앙에 전기적 가열장치를 장착한 연소실을 설치하였다. 그리고, 혼합기의 당량비, 유속 및 연소실의 최고온도를 변화시켜 가며 열산화장치에서의 온도분포, 프로판의 제거효율 및 CO와 NOx의 배출특성을 살펴보았다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에서 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 세라믹이 충전되어 있는 열산화장치, 혼합기 공급장치, 전기적 가열장치, 측정 및 자료취득장치로 구성되어 있다. 실험에 사용된 혼합기는 스크롤압축기(scroll compressor)로부터 압축공기와 실린더로부터 공급되는 프로판을 충분히 혼합하여 형성하였다. 압축기 후단에는 서지탱크(surge tank)를 설치하여 가능한 한 압력변동을 최소화하였으며 공기는 이중으로 설치된 수분필터(water filter)와 압력조절기(pressure regulator)를 지나도록 하여 수분을 제거하고 장치로 유입되는 압력을 일정하게 하였다. 상온상태에서 열산화기에 유입되는 초 희박 혼합기는 일정시간 간격마다 유동의 방향을 바꾸어 좌측과 우측의 세라믹베드에 교대로 공급되도록

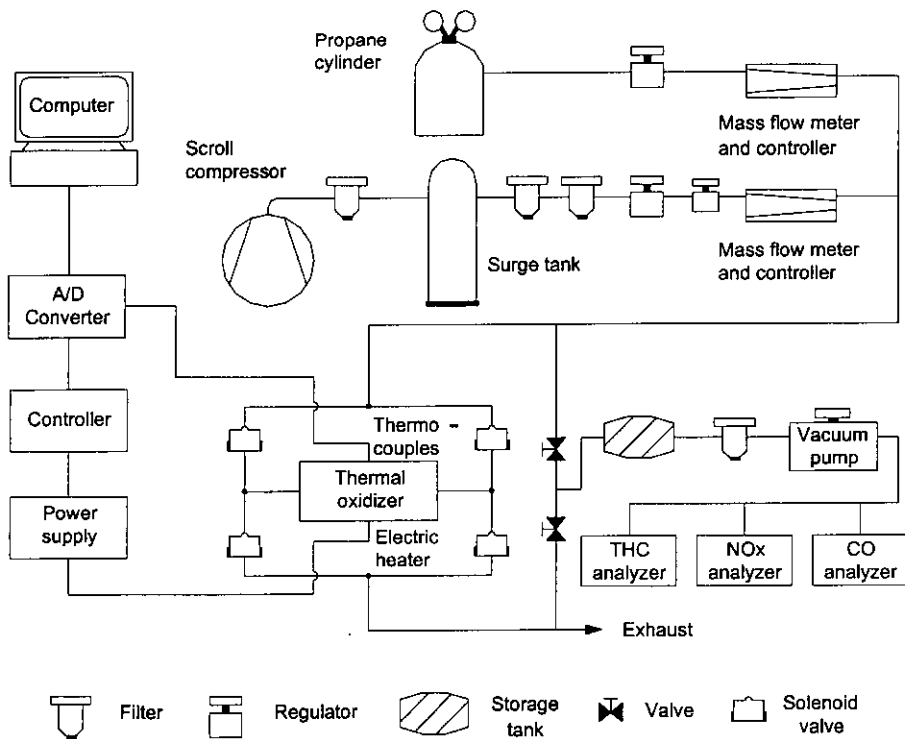


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

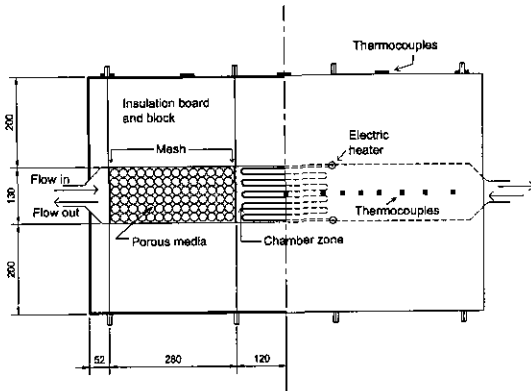


Fig. 2. Inside structure of thermal oxidizer.

하였다. 이와 같은 장치의 구성으로 혼합기는 세라믹베드를 통과하여 고온의 연소실에서 산화되고 다시 세라믹베드를 통과, 장치로부터 배출된다.

2-1. 열산화장치

본 실험에서 사용한 열산화장치를 Fig. 2에 나타내었다. 열산화장치는 폐열을 회수하고 혼합기를 산화시키는 부분으로 세라믹베드, 연소실, 전기가열장치, 단열층, 스크린(screen)과 외통(outer housing)으로 구성되어 있다. 열산화장치의 양단에 설치된 세라믹베드는 직경이 5 mm, 기공율(porosity)이 약 34%이고 99.5%의 산화알루미늄(Al₂O₃)와 0.15 %의 산화규소(SiO₂)로 이루어져 있는 구형세라믹으로 충전되어 있다. 그리고, 구형세라믹의 열전달면적과 열전도도는 각각 700 m²/m³, 14.6 kJ/mh°C이다. 각각의 세라믹베드는 130x130 mm의 단면적과 280 mm의 길이를 갖는다. 양쪽의 세라믹베드 사이에는 길이 240 mm의 연소실을 설치하였다.

세라믹베드와 연소실은 총 200 mm의 벽들과 판의 조합으로 구성된 단열층으로 둘러 쌓여 있으며 벽면을 통한 열손실을 최소화할 뿐만 아니라 열산화장치의 사각형 유로를 형성하여 준다. 스텐레스스틸 스크린이 세라믹베드와 연소실 사이에 설치되어 있으며 장치 양단에는 역화의 방지와 균일한 속도장을 형성하기 위하여 보다 조밀한 스크린을 설치하였다.

2-2. 제어 및 측정장치

세라믹베드와 연소실에서의 온도분포를 측정하기 위하여 각각 0.5 mm 직경의 R type(Pt-Pt/13% Rh)과 K type(Chromel Alumel) 열전대를 장치의 길이 방향으로 설치하였다. 그리고, 이러한 열전대를 세라믹베드와 연소실의 15지점에 설치하여 온도를 측정하였다. 특히, 열산화장치의 출구에서의 배기가스온도와 연소실에서 측

정한 온도를 이용하여 폐열회수효율을 계산하였다. 본 연구에서는 폐열회수효율을 다음과 같이 정의하였다.

$$\eta_{HR} = 1 - \frac{Q_{EX}}{Q_{CCT}} \times 100, [\%]$$

여기에서, η_{HR} 은 폐열회수효율을, Q_{EX} 와 Q_{CCT} 는 각각 배기가스의 열량과 연소실의 온도까지 높이는 데 공급된 열량을 나타낸다.

초 회박혼합기를 형성하기 위한 공기와 프로판의 유량은 질량유량계(Model UFC-1100A, Unit Instruments, Inc)를 사용하여 측정하였으며 컨트롤러에 의해 미리 설정된 유량이 0.1%의 분해능으로 정밀하게 제어되도록 하였다. 열전대와 유량계로부터의 출력신호는 자료취득장치(PCL-812PG A/D converter, Advantech Co. Ltd)로 전송되어 적절히 증폭된 후 전기가열장치의 제어를 위하여 사용되거나 모니터에 출력된다.

장치로부터 배출되는 배기가스는 가스필터를 지나면서 가스중에 포함되어 있는 먼지와 분진이 걸리지며 진공펌프를 거쳐서 가스분석기로 보내진다. 배기가스중의 질소산화물은 열적 효과를 고찰하기 위하여 측정하였으며 측정에는 화학발광식 질소산화물 분석기(Chemiluminescence NOx analyzer, Moel 300 CLD, California Analytical Instruments)를 사용하였다. 배기가스중의 일산화탄소를 측정하기 위하여 비분산 적외방식 분석기(Non-dispersive infrared CO analyzer, ZRH California Analytical Instruments)를 열산화장치 출구에 설치하였다. 그리고, 프로판의 농도를 측정하기 위해서는 전 탄화수소 분석기(Total Hydrocarbon analyzer, Model 300 FID, CAI)가 사용되었다. 이 분석기를 사용하여 열산화장치의 입·출구에서 농도를 측정한 후 다음의 계산식을 이용하여 프로판의 제거효율을 산정하였다.

$$\eta_D = 1 - \frac{C_{out}}{C_{in}} \times 100, [\%]$$

여기에서, η_D 는 프로판의 제거효율을 나타내며, C_{in} 과 C_{out} 은 각각 열산화장치의 전·후단에서의 프로판의 농도를 나타낸 것이다.

2-3. 유로변경 및 열량공급장치

회박 가연한계 이하의 초 회박혼합기는 그 자체의 발열량이 적고 상대적외외부의 열손실이 크기 때문에 외부로부터의 에너지 공급없이 산화반응을 유도하는 것이 불가능하다. 따라서, 이와 같은 조건에서 혼합기의 산화를 위해서는 열량공급장치가 필요하며 본 연구에서는 이와 같은 목적으로 열산화장치의 중앙에 전기적외가열장치를 설치하였다. 가열장치는 최대 5 kW의 전력

을 가지고 있으며 전기적인 릴레이와 컨트롤장치에 의해 그 작동이 제어되어 열산화장치의 중심부 온도를 최대 1000°C까지 유지할 수 있도록 설계되었다. 장치의 유로변경은 Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 2쌍의 전자식 솔레노이드 밸브에 의하여 제어된다. 4개의 솔레노이드 밸브는 대각선 방향의 2개가 한쌍을 이루고 그 개폐가 되어 예혼합된 혼합기의 유동방향이 바뀌게 된다. 이러한 개폐동작에 의해 전 사이클에서 입구가 다음 사이클의 출구가 된다. 전자식 솔레노이드 밸브는 컨트롤장치와 프로그램에 의해서 일정한 시간 간격으로 작동되도록 구성하였다.

2.4. 실험방법 및 조건

양방향유동을 갖는 열산화장치에서 운전조건이 안정되기 위해서는 작동초기에 전기적인 가열 혹은 상대적으로 농후한 혼합기에 의한 열량공급이 필요하다. 이러한 장치의 초기운전조건은 혼합기의 농도에 따라 달라질 수 있으며 크게 자활영역과 비자활영역으로 구분하여 그 방법을 달리할 수 있다. 자활영역(self-sustainable region)에서의 예열과정은 유동이 없는 상태에서 세라믹 베드 및 연소실의 온도를 높이기 위한 연속적인 전기가열로 시작된다. 열량공급은 혼합기가 충분히 산화될 수 있는 온도까지 진행되며 예열이 된 후에는 당량비 1.0 근방의 혼합기를 한 방향으로 산화장치에 공급하여 안정적인 점화를 유도할 수 있다. 그리고, 점화가 되고 안정적인 온도변화를 나타내면 열량공급을 차단하고 솔레노이드 밸브를 작동시켜 양방향유동을 하게 한다.

이와는 달리 본 연구에서의 실험 영역인 비자활영역(non self-sustainable)에 있어서는 그 예열과정이 자활영역과 동일하게 수행되며 혼합기 자체의 열량부족으로 일정한 중심부온도를 유지하여 주기 위하여 지속적인 열량공급 및 온도제어장치가 작동하게 된다.

실제로 산업공정에서 배출되는 초 희박혼합기의 농도를 고려하여 100 ppm에서 2100 ppm에 해당되는 당량비 범위를 실험대상으로 하였다. 그리고, 혼합기의 유속은 압축기가 공급할 수 있는 범위의 제한으로 0.41 m/s에서 0.63 m/s까지 변화시켰으며 이와 동시에 열적 유동에 대한 영향을 살펴볼 수 있는 조건에서 반주기(half period)를 30초로 일정하게 하여 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 열산화장치의 작동영역

열산화장치의 최소 작동영역, 즉 희박 가연한계를 Fig. 3에 나타내었다. 낮은 당량비에서의 희박 가연한계선은 일반적으로 유사한 경향을 나타낸다. 이는 지속적인 화

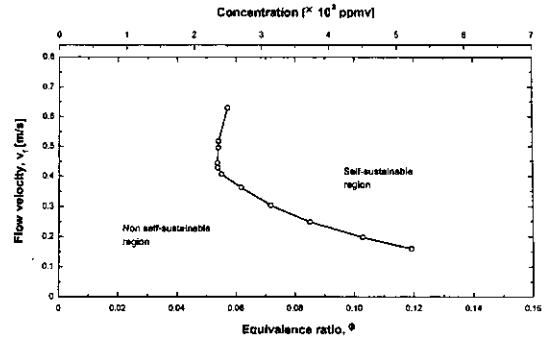


Fig. 3. Lower flammable limit (operation region) of regenerative othermal oxidizer.

염형성과 관련된 열손실에 기인하기 때문이다. 희박 가연한계에는 최소 당량비를 보이는 유속이 존재하며 이를 기준으로 높은 유속의 경우에는 희박 가연한계가 최소 당량비보다 큰 영역에서 나타난다. 이와 같은 경향은 유속증가에 따른 공급열량 증가로 인하여 외부로의 열손실이 동시에 증가하기 때문에 나타난다. 한편, 낮은 유속에서는 산화장치를 일정한 온도로 유지하기 위해 공급되는 열량에 비해 열소산의 증가로 높은 당량비에서 그 한계선이 나타난다.

희박 가연한계에 있어서 중요한 특성중의 하나는 안정적인 화염형성을 가능하게 하는 최소 당량비이며 본 연구에서는 0.054의 상당히 낮은 당량비에서 화염의 형성이 가능하였다. 따라서, 본 연구에서는 희박 가연한계선이하, 즉 당량비가 0.054 보다 적은 극히 희박한 상태의 혼합기를 실험대상으로 하였다.

3-2. 열산화장치 내부의 온도분포 변화

Fig. 4는 당량비 ψ, 혼합기유속 v_i 및 연소실 최고온도분화 t에 따른 온도분포를 보여주고 있다. 당량비는 각각 0.003, 0.012, 0.024, 0.051이며 혼합기중의 프로판 농도로 환산하면, 각각 100, 500, 1000, 2130 ppmv에 해당한다. 이와 같은 실험조건은 실제 산업공정에서 배출될 수 있는 가연성가스의 농도범위를 고려한 것이다. 그림에서 당량비가 변화하는 경우에도 연소실의 최고온도는 전기적인 열량공급조절로 인하여 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있으며 세라믹이 충전되어 있는 베드에서는 당량비가 클수록 단위시간당의 공급열량의 증가로 온도가 다소 높게 나타났다. 유속변화에 따라라도 온도분포는 거의 일정하게 유지되었으며 당량비 증가의 경우와 유사하게, 유속이 증가함에 따라서 세라믹베드에서의 온도가 다소 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 경향은 유속증가와 함께 대류 열전달량이 증가하는데 기인한 것이다. 그리고, 연소실 최고온도상승에 따라 열산

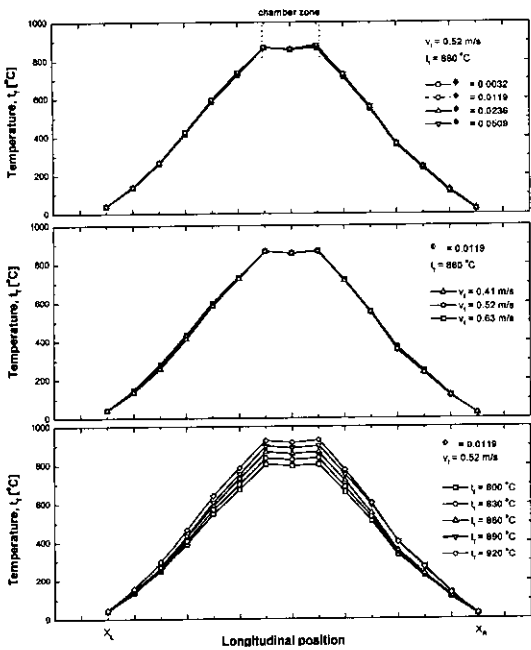


Fig. 4. Temperature distributions according to the change of equivalence ratio, flow velocity and combustion chamber temperature in the regenerative thermal oxidizer.

화장치의 온도가 전체적으로 증가하는 것을 볼 때 전기적인 열량공급 및 제어가 원활하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

3-3. 열산화장치로의 전기적인 공급열량 변화

Fig. 5는 당량비, 유속 및 연소실 최고온도변화에 따른 공급열량을 나타낸 것이다. 우선, 당량비의 증가함에 따라 혼합기가 가지고 있는 열량이 증가하므로 열산화장치에 공급되는 열량은 감소하는 경향을 나타낸다. 또한, 유속증가에 따른 공급열량을 살펴보면 Fig. 3에서 설명한 바와 같이 대류열전달의 촉진으로 인하여 열산화장치로부터 배기가스를 통한 열량방출이 증가하여 높아짐을 알 수 있다. 그리고, 연소실의 최고온도가 증가함에 따라 유속증가의 경우와 마찬가지로 공급열량이 증가함을 알 수 있다. 공급열량의 변화를 유발하는 세가지 변수를 살펴볼 때 그 증가 혹은 감소비율은 연소실 온도 변화에 있어서가 가장 크고 당량비 변화에 의한 영향이 가장 적은 것으로 나타났다. 이는 열산화장치의 연소실과 분위기와의 온도차이가 가장 큰 열손실을 유발하는 것을 말하며, 혼합기의 열량이 매우 적기 때문에 당량비 변화가 공급열량에 미치는 영향은 크지 않은 것을 알 수 있다.

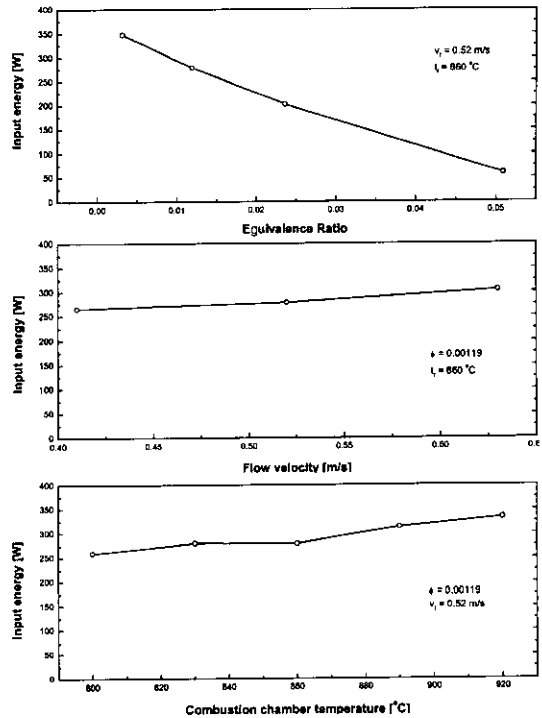


Fig. 5. Input energy according to the change of equivalence ratio, flow velocity and combustion chamber temperature.

3-4. 열산화장치에서의 프로판 제거효율

프로판의 제거효율에 대한 당량비, 유속 및 연소실 최고온도의 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 제거효율이 나타내는 경향은 일반적으로 온도, 체류시간 및 난류에 의한 혼합정도로부터 예측할 수 있다. 본 연구에 있어서 혼합기는 장치에 유입되기 전에 충분히 혼합되기 때문에 연소실에서 일어나는 프로판과 산소의 산화반응은 전 영역에서 균일하다고 할 수 있겠다. 따라서, 난류의 정도가 제거효율에 미치는 영향은 무시할 수 있으며 온도와 체류시간의 영향만을 고려하는 것이 가능하다. 그림에서 보는 바와 같이 우선 유속 및 연소실 최고온도가 동일한 경우에 당량비 변화에 따른 프로판의 제거효율은 약 95%로 거의 일정함을 알 수 있다. 이는 당량비 변화에 따라 달라지는 혼합기의 보유열량에 상관없이 연소실의 최고 온도값을 이용하여 전기적 공급열량을 조절하기 때문에 열산화장치의 온도구배가 거의 일정하기 때문에 나타나는 결과이다. 다음으로 혼합기 유속이 증가함에 따라 프로판의 제거효율은 점진적으로 감소하는 경향을 나타내나 본 연구의 실험범위에서는 그 변화폭은 적은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 일정한 당량비와 연소실 최고온도 조건에서 유속의 증가는 고온영

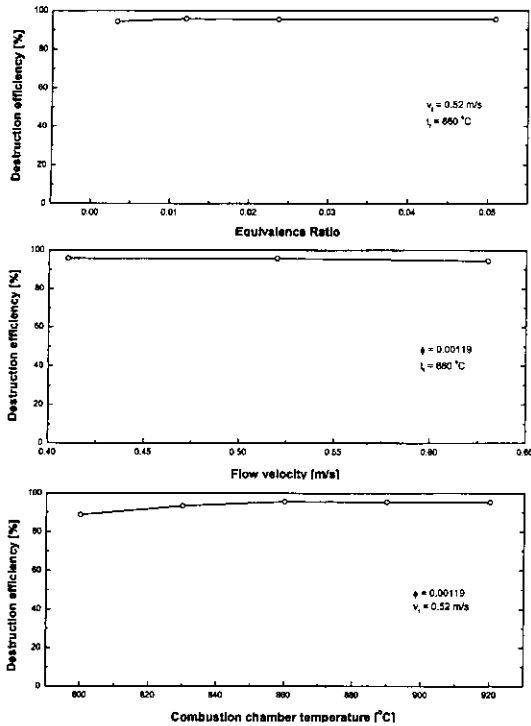


Fig. 6. Destruction efficiency of propane according to the change of equivalence ratio, flow velocity and combustion chamber temperature.

역에서의 체류시간이 감소하는 것을 의미하며 따라서, 반응시간이 충분하지 못하기 때문에 제거효율이 감소하게 되므로 나타나는 것이다. 그리고, 연소실의 최고온도 변화에 따른 제거효율의 경향을 살펴봐도 유사한 결과를 얻을 수 있다. 당량비와 유속이 일정한 실험조건에서 연소실의 최고온도를 증가시키는 경우에, 프로판의 제거효율은 일정온도까지는 증가하고 다시 감소하는 경향을 나타낸다. 일반적으로 온도는 반응을 활성화시켜 반응율을 높이기 때문에 반응에 필요한 시간이 단축된다. 따라서, 본 연구에 있어서는 연소실의 최고온도가 약 860°C까지는 이러한 이유로 인하여 프로판의 제거효율이 증가한다. 그러나, 보다 높은 온도에서는 반응은 활성화되나 고온화에 의한 팽창으로 연소실을 통과하는 가스의 유속이 증가, 결과적으로 체류시간을 단축시키기 때문에 제거효율이 오히려 감소함을 알 수 있다. 이와 같이 프로판의 제거효율은 온도와 체류시간의 변화에 따라 달라지며 높은 제거효율을 얻기 위해서는 충분한 온도와 체류시간이 필요한 것을 알 수 있다. Fig. 7은 온도와 체류시간이 프로판의 제거효율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이 결과는 관유동반응기(Plug-flow reactor)에서의 실험을 통하여 얻어진 것으로 프로판이 99.9%

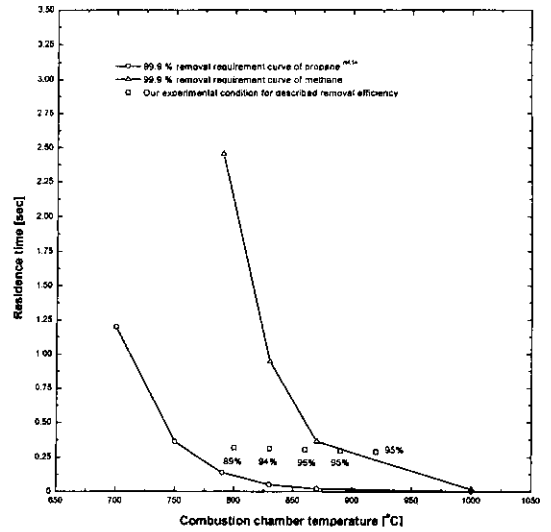


Fig. 7. Relations curve between removal efficiency of propane and residence time and combustion chamber temperature.

제거되기 위해 필요한 온도와 체류시간을 나타내고 있다¹⁴⁾. 그림에서 알 수 있듯이 연소온도가 증가하면 반응시간의 단축으로 가스가 체류하는데 필요한 시간은 지수적으로 감소, 산화에 대한 온도의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 또한, 그림에는 본 연구에서의 온도 및 체류시간 조건과 그때의 제거효율을 나타내었다. 그림에서 체류시간은 연소실의 최고온도를 기준으로 계산하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 본 연구에서 얻은 제거효율은 99.9%의 제거효율을 보이는 관유동 반응기 경우보다 온도와 체류시간이 충분히 큼에도 불구하고 최고 96%로 낮게 나타났다. 이와 같은 차이는 실제 조건에서는 프로판의 산화과정이 화학적시간, 체류시간 및 온도뿐만이 아니라 이차원적인 유동 및 반응이 제거효율에 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미하며 높은 제거효율을 얻기 위해서는 플러그유동의 경우보다 충분한 체류시간과 온도가 필요하다는 것을 알 수 있다.

3-5. CO 배출특성

Fig. 8은 당량비, 유속 및 연소실 최고온도를 변화시켜 가며 CO의 배출농도를 나타낸 것으로 그 값이 당량비 증가에 따라 점차적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 일반적으로 연소과정중에서의 CO는 혼합기가 비교적 희박한 경우에 적게 배출되며 당량비가 농후해 질수록 그 배출농도가 증가하게 되는데, 본 연구에서의 이와 상이한 결과가 나타났다. 이러한 경향을 설명하기 위해서는 실제로 복잡한 CO의 발생 및 산화과정을 고려하여야 하

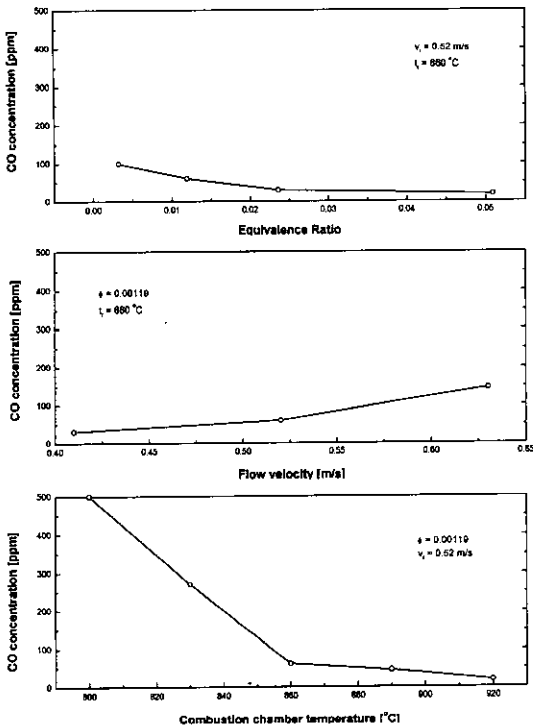


Fig. 8. Carbon monoxide emission according to the change of equivalence ratio, flow velocity and combustion chamber temperature.

나 경우에 따라서는 다음의 지배적인 세가지 반응판으로도 그 설명이 가능하다^[15].



이중에서 식(3)의 반응은 그 반응속도가 매우 느린 것으로 알려져 있으며, 따라서 CO의 산화반응에 기여도가 크지 않을 것으로 보인다. 반면, OH와 HO₂ 라디칼의 CO 산화반응에 대한 기여도는 큰 것으로 알려져 있어^[16] 본 연구에서 나타난 당량비 증가에 따른 CO 배출농도의 감소가 이 두 반응의 영향에 기인한 것으로 볼 수 있다. 특히 식(1)에 대한 반응상수 K_1 는 종전의 연구 결과에 의하면 730°C 이상에서 급격하게 증가하는 경향을 나타내고 있어 CO의 산화반응이 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 그리고, 식(2)의 반응에 대한 K_2 는 온도가 약 430°C 이상에서 큰 값을 보여 역시 CO의 산화반응에 역할을 하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 고온영역이 넓어질수록 CO에서 CO₂로 전환되는 비율은 커지게 되며 Fig. 4에서 당량비가 증가함에 따라 고온영

역이 확장되는 경우, 이 비율은 높아지게 되는 것이다.

한편, CO는 혼합기의 유속이 증가함에 따라 배출농도가 증가하여 고온영역에서의 체류시간이 CO의 산화에 중요한 인자임을 나타내고 있다. 마지막으로 연소실 최고온도가 높아짐에 따라 고온영역에서 발생한 CO는 이의 산화반응이 활성화되어 920°C에 이르러서는 20 ppm 미만으로 크게 낮아짐을 볼 수 있다. 본 연구에서는 연소실의 최고온도가 1000°C 미만인 조건에서 실험이 수행되어 열적 NOx(thermal NOx)는 1 ppm 미만으로 거의 배출되지 않았다.

3-6. 열산화장치에서의 배기가스온도와 폐열회수효율 변화

Fig. 9는 당량비, 혼합기의 유속과 연소실의 최고온도 변화에 따라 열산화장치로부터 배출되는 배기가스의 온도와 폐열회수효율을 나타낸 것이다. 당량비 변화에 따른 배기가스 온도의 변화를 보면 Fig. 4의 온도분포에서 알 수 있듯이 당량비 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 나타내고 있으나 그 증가폭은 아주 적은 것으로 나타났다. 이에 따라 폐열회수효율의 변화는 무시할 만 하여 거의 일정함을 보였다. 그리고, 혼합기의 유속이 증

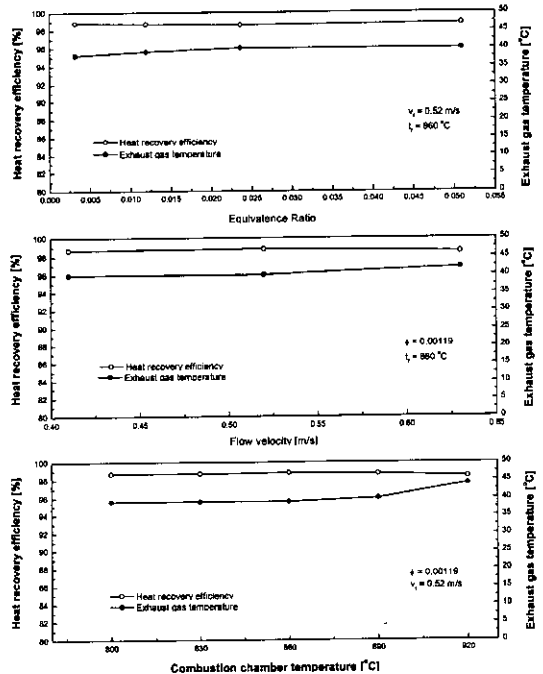


Fig. 9. Exhaust gas temperature and heat recovery efficiency according to the change of equivalence ratio, flow velocity and combustion chamber temperature.

가함에 따라 배기가스 온도는 대류 열전달량의 증가로 인하여 다소 증가하는 경향을 나타내었으며 이에 따라 폐열회수효율이 다소 증가함을 알 수 있었다. 연소실의 최고온도가 변화하는 경우에 있어서도 배기가스온도의 변화는 그리 크지 않았으며 단지 920°C의 경우에 있어서 다소 증가하는 경향을 나타냈다. 폐열회수효율은 배기가스온도의 증가에 의해 920°C에서 다소 감소하는 경향을 나타내었으나 전반적인 실험조건에서 98% 이상의 높은 값을 보였다.

4. 결 론

본 연구에서 다공성물질로 채워져 있는 유로변경식 열산화장치에서 프로판과 공기의 초 회박혼합기를 이용하여 산화과정과 폐열회수에 대하여 살펴보았다. 당량비, 혼합기 유속 및 연소실 최고온도를 변수로 하여 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 초 회박 프로판 혼합기의 산화를 목적으로 전기적 가열장치를 설치하여 높은 제거효율을 얻을 수 있는 온도 분포를 얻을 수 있었으며 연소실의 온도와 길이를 증가 시킴으로써 그 제거효율의 향상을 기대할 수 있음을 알았다.

2. 초 회박 혼합기의 산화과정 중 발생한 CO는 당량비 혹은 연소실 최고온도가 증가함에 따라 급격하게 감소하였으며 유속증가에 따라서는 오히려 증가하였다. 따라서, 열산화장치를 설계할 때에 CO발생 및 배출을 최소화하는 운전조건을 설정해야 함을 알았다.

3. 본 연구에서의 실험조건에서는 혼합기의 당량비 및 유속변화에 상관없이 거의 일정한 제거효율을 얻을 수 있었으며 연소실 최고온도 증가에 따라서는 다소 증가함을 알았다. 그리고, 프로판의 제거효율은 최고 96%까지 이르렀다.

4. 열산화장치의 폐열회수효율은 당량비보다는 유속 및 연소실 최고온도의 변화에 상대적으로 큰 영향을 받는 것으로 나타났으나 그 차이는 적었으며 본 실험에서의 최대 폐열회수효율은 약 98%로 매우 우수한 성능을 나타내었다.

후 기

이 연구는 1999년도 인하공업전문대학의 교내연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

기호설명

D : Destruction

EX : Exhaust

HR : Heat recovery

CC : Combustion chamber

CCT : Combustion chamber temperature

ψ : Equivalence ratio

v_f : Flow velocity of mixture [m/s]

t_{cc} : Combustion chamber temperature [°C]

참고문헌

1. Min, D.K. and Shin, H.D.: "Laminar premixed flame stabilized inside a honeycomb ceramics", International Journal of Heat and Mass Transfer, 34, pp. 341-355 (1991).
2. Takeno, T. and Sato, K.: "An excess enthalpy flame theory", Oxidation Science and Technology, 20, pp. 73-84 (1979).
3. Takeno, T., Sato, K. and Hase, K.: "A theoretical study on an excess enthalpy flame", Eighteenth Symposium (International) on oxidation, The oxidation Institute, pp. 465-477 (1981).
4. Kotani, Y., Behbahani, H.F. and Takeno, T.: "An excess enthalpy flame oxidation for extended flow ranges", Twentieth Symposium (International) on oxidation, The oxidation Institute, pp. 2025-2033 (1984).
5. Babkin, V.S., Kokzhavin, A.A. and Bunen, V.A.: "Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media", Oxidation and Flames, 87, pp. 182-190 (1991).
6. Hanamura, K., Yoshizawa, Y. and Echigo, R.: "Analytical and experimental studies on radiative propagation in porous media with internal heat generation", Proceeding of the 8th International Heat Transfer Conference, San Francisco, 2, pp. 827-832 (1984).
7. Hanamura, K., Adachi, M. and Echigo, R.: "Superadiabatic combustion with reciprocating flow in porous media", Journal of Japanese Society of Mechanical Engineers, 62(596), pp. 1629-1637 (1996).
8. Weinberg, F.J.: "Oxidation temperature: The future?", Nature, 233, pp. 239-241 (1971).
9. Felix, J. and Weinberg, F.J.: "Advanced oxidation method", Academic press, London, pp. 232-237 (1986).
10. Lloyd, S.A. and Weinberg, F.J.: "A burner for mixtures of very low heat content", Nature, 251, pp. 47-49 (1974).
11. Echigo, R.: "Effective energy conversion method between gas enthalpy and thermal radiation and application to industrial furnaces", 17th International Heat

- Transfer Conference, 6, pp. 361-365 (1982).
12. 이강주, 정영식, 채재우: "초단열 연소현상을 이용한 VOC 제거에 관한 연구", 대한환경공학회지논문집, 21(1), pp. 109-117 (1999).
 13. Hoffmann, J.G., Echigo, R., Yoshida, H. and Tada, S.: "Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system", Combustion and Flame, pp. 32-46 (1997).
 14. C. David Cooper, and Alley, F.C.: "Air Pollution Control", Waveland press, Inc., pp. 346-347 (1994).
 15. Stephen R. Turns: "An Introduction to Combustion", McGraw-hill, p. 132 (1996).
 16. Craig T. Bowman: "Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in combustion", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 1, pp. 33-45 (1975).