

폐기물 열분해과정에서 발생된 합성가스의 연소 특성

안용수* · 황상순**† · 이성호* · 이협희***

Combustion Characteristics of Synthesis Gas Generated in Waste Pyrolysis Process

Yongsoo Ahn, Sangsoon Hwang, Sungho Lee, Hyuphee Lee

ABSTRACT

The synthesis gas generated in waste pyrolysis melting process which consists of pyrolysis of waste and melting process of ash is known to be an alternative fuel. Since the composition of synthesis gas is much different from other synthesis gases, the fundamental combustion characteristics are analyzed in this study. The radiation heat flux is used to estimate the heat flux from flames made by many combinations of fuel and oxidant supply. The results show that the synthesis gas needs much more amount of oxidant for equivalent heat flux to methane flame and the inverse diffusion flame type for synthesis gas burner is suitable for better radiation heat transfer.

Key Words : Synthesis Gas, Waste Pyrolysis Process, Soot, Inverse Diffusion Flame, Radiation Heat Flux

기 호 설 명

q''_{Rad} Radiation Heat Flux

AIDF Air Inverse Diffusion Flame

NDF Normal Diffusion Flame

1. 서 론

열분해 용융시스템은 유기물이 무 산소상태에서 간접가열된 후 천연가스로 생성되는 원리를 쓰레기 처리에 응용한 기술이다. 이 시스템의 주공정은 압축, 탈가스화, 고온가스화, 용융의 4단계로 구성된다.

폐기물을 고압으로 압축한 후 탈가스 채널에 압입, 600℃로 간접 가열하여 탈가스화 시켜 고온 반응로에 보내 고온 열분해하여 합성가스로 만든다. 이 가스는 발전용 열원 또는 자체 에너지로 재

사용 한다. 이 과정에서 생성된 탄화물과 무기물 들은 고온반응로 (High Temperature Reactor) 하 부에서 2000℃ 이상으로 용융처리하여 도로 포장 용 및 콘크리트용 골재 등으로 재활용 할 수 있는 기술이다.⁽¹⁻⁴⁾

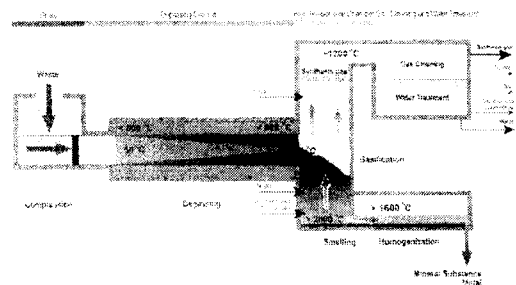


Fig.1 폐기물 열분해 용융 시스템

* 인천대학교 기계공학과 대학원

† Hwang@incheon.ac.kr

** 인천대학교 기계공학과

*** 대우건설

합성가스는 1200℃의 고온에서 처리함으로써 다이옥신을 비롯한 유해가스를 완전분해하고, 70℃ 이하로 급속 냉각시켜 문제시 되고 있는 다이옥신의 생성자체를 최대한 억제함으로써 권고 기준인 0.1ng/Nm³의 1/50수준인 0.002ng/Nm³ 이하로 제어할 수 있는 기술이다.

이러한 폐기물의 열분해 용융시스템(Waste Thermal Pyrolysis Melting Process)에서 생성되는 합성가스(Synthesis Gas)는 새로운 에너지원으로써 최근 주목을 받고 있다.

또 다른 합성가스의 종류인 LFG(Landfill Gas)가 있는데 LFG가스란 쓰레기 매립장에서 발생하는 가스로서, 발생 원리적으로는 유기성 폐기물 또는 바이오매스(Biomass)의 혐기성소화(Anaerobic Digest)에 의해 만들어지는 바이오 가스(Biogas)의 일종이다. 이 LFG가스의 조성은 연료성분인 CH₄ 이외의 CO₂, O₂, N₂로 구성되어 있으며⁽⁴⁾ 발열량이 약 3000~6000 kcal/m³ 정도의 저급연료 가스로서 이에 대한 연구는 많이 이루어 졌다.^(5~8)

그러나 가연성 가스인 CO와 H₂가 약 70% 정도의 조성비로 구성이 되어있는 열분해 용융과정에서 발생하는 합성가스의 기본연소 특성은 매우 다를 것으로 판단이 되며 이에 대한 연구가 현재 거의 없는 실정이다.

따라서 본 실험에서는 폐기물 열분해 과정에서 발생하는 합성가스의 연소특성을 알아보기 위하여 연료 및 산화제의 공급방식에 따른 여러 형태의 화염을 생성시켜 이에 대한 합성가스의 연소 및 열전달특성을 알아보았다. 특히 확산화염의 경우 복사 열전달은 전체 열전달의 상당부분을 차지하는 데⁽⁹⁾⁻⁽¹⁰⁾ 본 연구에서는 화염의 복사 열전달 특성을 중심으로 화염특성을 알아보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 버너

본 실험에 사용한 버너인 층류화염(Laminar Flame) 버너는 전체적인 화염의 크기와 층류화염 특성이 나타나는 범위 내에서 화염을 형성해야 하므로 이에 맞게 유동장을 결정하여 실험하였다⁽¹¹⁾.

버너의 노즐부는 Fig.2와 같이 3중 동심원 구조를 가지고 있으며 각각의 주입구에 메탄, 공기, Synthesis Gas를 주입하였으며 주입위치에 따라 여러 종류의 확산 화염을 구성하여 실험하였다.

버너의 길이는 층류가 충분히 발달이 된 후 노즐을 빠져나갈 수 있도록 길이를 선정하여 각각의 노즐의 특성에 따라 설계를 하였으며, 노즐에 사용된 파이프(pipe)는 seamless-pipe를 사용하여 seam에 의한 유동의 영향을 최대한 줄였다.

층류를 만들기 위하여 외곽 노즐부에는 직경 1.5~2mm의 Grass Bead를 일정 높이로 충전하였고, 환형부 노즐부와 중앙노즐에도 일정 높이의 Glass Bead를 충전하여 합성가스의 체류 시간을 증가시킴으로써 균일한 혼합을 유도하였다.

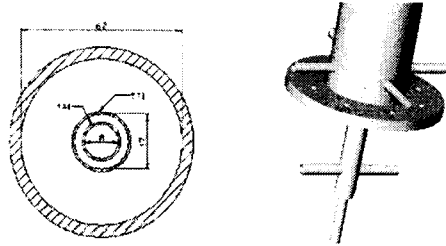


Fig.2 버너의 형상 및 Dimension

2.2. 실험장치

실험장치의 개략도는 Fig.3과 같고 실험장치는 크게 연료와 산화제의 공급부, 연료와 산화제의 조절부, 버너부와 측정부로 3가지로 나뉘었으며 연료와 산화제 조절부 경우 연료와 산화제(산소, 공기, 산소+공기)를 버너의 각각의 다른 주입구로 주입되고 각각의 위치를 변동할 수 있도록 하였다. 연료와 산화제의 유량 제어는 MFC를 이용하여 제어를 하였고 합성가스의 유량조절은 합성가스의 조성의 변화를 고려하여 합성가스의 구성요소인 CO, H₂, CO₂ 세 가지 가스정급은 각각의 질량유량계(MFC)를 이용하였다. 연료와 산화제의 유량은 Mass Flow Controller-Read Out 4 채널 Controller로 조절하였다. 연소기와 측정부의 경우 버너의 측정높이를 변화할 수 있도록 하였으며 측정부에서 주위의 영향을 최소화 할 수 있도록 보호막을 설치와 분리가 용이하도록 설계하였고 가시적 관찰과 화염형상 특성 파악을 위하여 카메라(NIKON F-90X)를 통하여 가시화하였다.

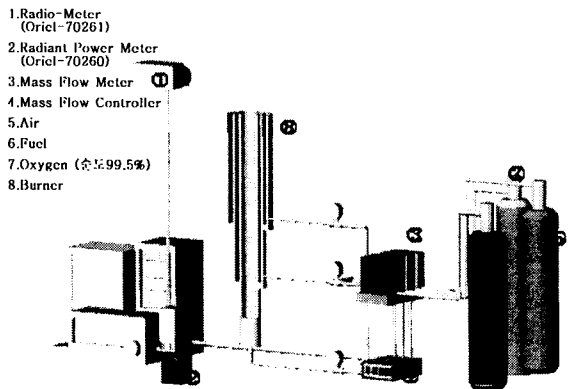


Fig.3 실험장치 개략도

- 1. Radio-Meter (Oriol-70261)
- 2. Radiant Power Meter (Oriol-70260)
- 3. Mass Flow Meter
- 4. Mass Flow Controller
- 5. Air
- 6. Fuel
- 7. Oxygen (순도 99.5%)
- 8. Burner

2.3 복사 열유속 측정

복사 열 유속(q''_{Rad})을 측정하기 위해 라디오미터(Radio-Meter)는 Oriol사의 모델 70261을 사용하였다. 라디오미터에서 나오는 신호는 Oriol사의 모델 70260을 사용하여 계측하였으며, 화염에서 복사 열 유속을 point measurement하기 위해 Oriol사의 모델 43240 광학렌즈 2개를 사용하였고, 이송장치로써는 x-축 오차 0.2mm y-축 오차 0.2mm Z축 오차 0.5mm의 3차원 이송장치(기계적 밀링머신)를 사용하여 측정하였다.

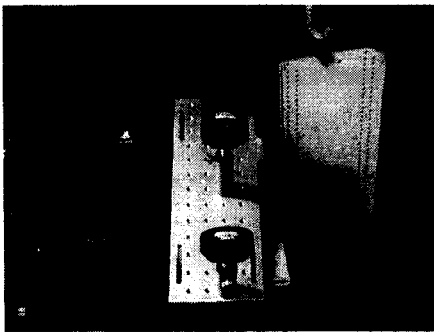
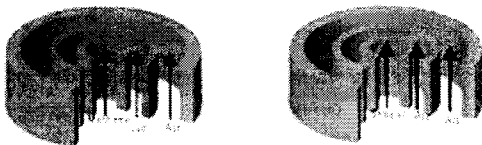


Fig.4 복사열유속 측정장치

2.3 화염 형성

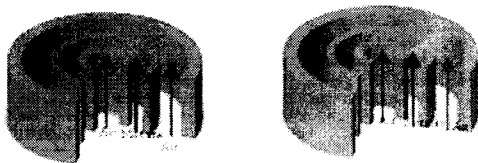
화염의 형성은 중앙노즐에 연료를 공급하는 정상확산화염(NDF:Normal Diffusion Flame)과 환형부 노즐에 연료를 공급하는 역확산화염(IDF:Inverse Diffusion Flame)으로 구분하여 연료의 공급위치를 변화시켜 다음과 같은 화염을 형성하였다.



(Methane)

(Syngas)

Fig.5 NDF



(Methane)

(Syngas)

Fig.6 IDF

또한 화염의 형성은 메탄화염을 같은 발열량 조건으로 하여 실험을 하여 합성가스와 메탄가스의 화염 및 복사 열 유속을 비교하였다.

3. 합성가스의 조성 및 기본연소특성

본 실험에서 사용한 합성가스의 조성은 스위스 Thermostelect사의 측정자료를 근거하여 실험을 수행하였다.

Table.1 Thermostelect

Component (%)	March '93	May '93	June/july '94	September '94
CO	>34.0	39.0	38.0	35.0
H ₂	32.0	35.7	34.0	35.0
CO ₂	25.0	22.5	23.0	27.0
N ₂	3.0	2.8	3.7	2.8
CH ₄	n.d.	<0.006	<0.1	<0.1
C _n H _m	n.d.	0.013	<0.1	<0.1

Table.1의 합성가스 조성에서 본 실험에 기준이 된 합성가스의 조성은 94년9월에 측정된 값을 기본조성으로 정하였으며 N₂, CH₄, C_nH_m의 미량 조성은 불활성 가스인 CO₂로 취급하였다. 또한 합성가스의 측정지에서 나타난 것과 같이 조성의 변화하므로 가연성가스인 CO와 H₂를 각각 ±10%씩 변화를 주어 다음과 같이 세가지 합성가스의 조성을 정하였다.

Case1 CO:25% CO₂:30% H₂:45%

Case2 CO:35% CO₂:30% H₂:35%

Case3 CO:45% CO₂:30% H₂:25%

합성가스의 Case별로 기본연소특성이 되는 발열량은 Table 2.에 나타나 있다.

Table.2 합성가스의 발열량

	메탄	Case1	Case2	Case3
발열량(MJ/m ³)	35.8	8.002	8.19	8.378
메탄대비 발열량	1	0.224	0.229	0.234
동일발열량을 내기 위한 필요연료유량비율(배)	1	4.47	4.37	4.27

Table.2에서 합성가스의 발열량은 메탄에 비하여 약 1/4정도의 발열량을 가지는 가스임을 알 수가 있다.

정확한 단열화염온도를 알아보기 위하여 몇 개의 반응식과 몇 개의 추가 화학종을 삽입하여 단열화

염온도를 계산하기 위하여 CFD프로그램인 FLUENT의 모듈인 Pre-PDF4.0을 이용하여 각각의 단열화염온도를 계산하면 다음과 같다.

Table.3 단열화염온도

25-45-30(Case1)	2120K
35-35-30(Case2)	2135K
45-25-30(Case3)	2154K
CH ₄	2240K

4. 결과 및 고찰

실험에 앞서 증류화염에서 가장 중요한 화염의 안정성을 확보하고자 외곽노즐에 공기의 양을 결정하는 실험을 수행하였다. 외곽노즐에 공기의 유량이 부족한 경우 화염의 Tip이 심하게 떨리는 현상이 관찰되었으므로 화염의 안정화 조건으로 외곽 공기의 유량에 대한 실험을 선행하였다.

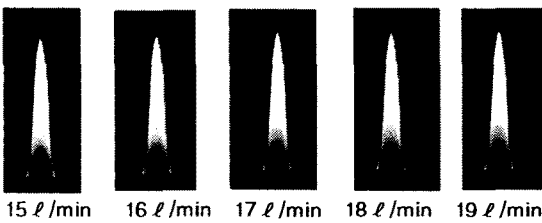


Fig.7 메탄연료 30cc/min에 대한 주위공기유량의 영향비교 사진

Fig.7에서 보이는 것과 같이 화염이 안정화 되는 유량이상에서는 화염의 변화가 거의 없이 일정한 형상을 가짐을 볼 수가 있어 화염의 안정화 되는 공기의 유량을 증류화염 실험에서 연료의 유량의 최대치인 30cc/min에서 안정화 되는 15 l/min 이상으로 공급을 하였다.

이후의 결과분석은 화염을 NDF화염과 IDF화염을 구분하여 각각의 화염형성 방법에 따른 합성가스의 연소특성을 살펴보고 NDF화염과 IDF화염의 비교를 통하여 보다 우수한 복사 열 전달 화염형성방법을 검토하였다,

4.1 정상확산화염 (NDF화염)

NDF화염이란 중앙에 연료가 공급이 되고 환형부 노즐 및 외곽노즐에서 공기가 분사되는 경우의 화염을 말하며 가장 일반적인 분젠화염의 형태를 나타내고 있는 화염이다.

NDF화염에서의 특징은 합성가스의 길이가 메탄화염에 비하여 작은 것을 볼 수가 있다. 이러한 이유로써는 동일 발열량을 내기 위해서는 합

성가스의 유량이 메탄에 비하여 4배 이상의 유량이 공급이 되지만 합성가스의 조성 중 연소속도가 빠른 H₂의 영향으로 화염의 길이가 짧은 것으로 예측된다.

이러한 NDF화염에서의 연료 유량에 따른 화염의 길이를 나타내면 Fig.8과 같다.

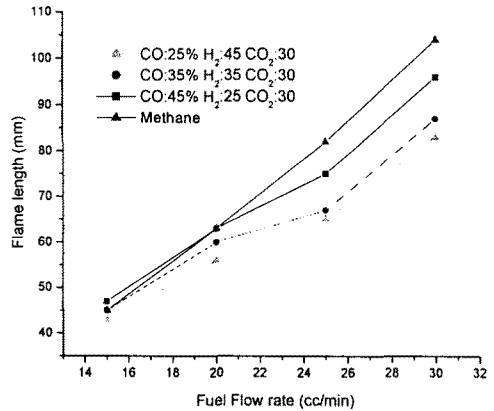
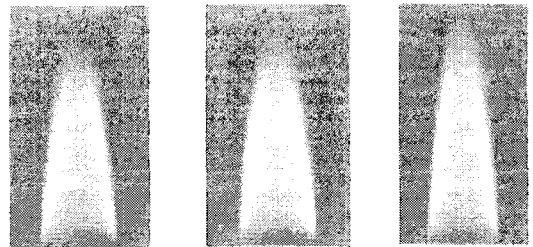


Fig.8 Flame length of NDF (합성가스)

Fig.8에서 보듯이 CO의 조성이 커질수록 화염의 길이가 길어지고 메탄화염에 비하여 화염의 길이가 전체적으로 짧음을 알 수가 있었다.



Case1 Case2 Case3
Fig.9 조성에 따른 합성가스의 화염 (11.93W)

Fig.9는 합성가스조성에 따른 화염을 보여주는 것으로 합성가스의 황색의 메탄에 비해 전체적으로 청염을 나타내고 있다.

Fig. 10은 합성가스과 메탄화염에서의 복사 열 유속을 알아보기 위하여 화염 길이방향으로의 복사열유속 분포를 나타내고 있다.

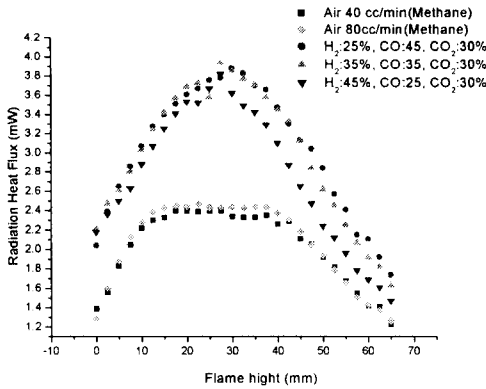


Fig.10 Radiation Heat Flux of NDF (11.93W)

Fig.10에서 보는 바와 같이 NDF화염에서는 합성가스의 복사 열 유속이 메탄의 복사 열 유속보다 우수한 경향을 나타내고 있다.

이러한 이유로써는 합성가스와 메탄이 동일 발열량을 내기 위해서는 합성가스의 연료량이 약 4 배정도가 많이 필요하므로 같은 발열량 조건하에서 합성가스의 연료량 증가에 따른 분자복사의 증가에 기인한다.

또한 메탄화염에서 합성가스에서는 관찰되지 않은 복사열유속이 거의 일정한 구간이 나타나는데 이러한 구간이 발생하는 원인으로서는 Soot에 의한 흑체복사 영역으로 해석이 된다.

4.2 역확산화염 (IDF화염)

IDF화염은 NDF화염과 달리 환형부 노즐에 연료를 공급하고 중앙과 외곽에 산화제인 공기를 공급하는 연소방식을 IDF화염이라 하는데 이러한 IDF화염의 경우 다음과 같은 연소 메카니즘과 특징이 있다.

연료제트를 동축 산화제 제트 유동이 둘러싸고 있는 형태의 NDF화염과 달리 중심부의 제트로부터 연료 대신 산화제가 공급되고 그 주위에 연료가 공급되어 연료가 둘러싸는 형태가 된다.

NDF화염의 경우는 화염대 안쪽인 연료측에서 매연 기본입자가 주로생성이 되고 생성된 매연 기본입자들이 유동을 따라 하류로 이동하면서 성장하여 기본 입자들의 평균 크기가 증가하거나 입자간의 결합을 통하여 마치 포도송이와 같은 형태를 이루게 된다. 하지만 매연 입자가 화염면을 통과하면서 급격히 산화되어 소멸을 하지만 IDF화염의 경우 화염대를 기준으로 연료 쪽에서 매연 입자가 발생하고 형성된 매연입자는 화염대를 통과하지 않게 되므로 상당히 긴 시간 동안 매연 입자

가 소멸되지 않아서 매연입자에 의한 복사 열 전달이 커지게 되므로 복사 열 전달 향상에 매우 큰 잇점을 가지고 있는 연소 형태인 것이다.

우선 메탄의 IDF화염의 특징을 Fig.11에 나타내었다.

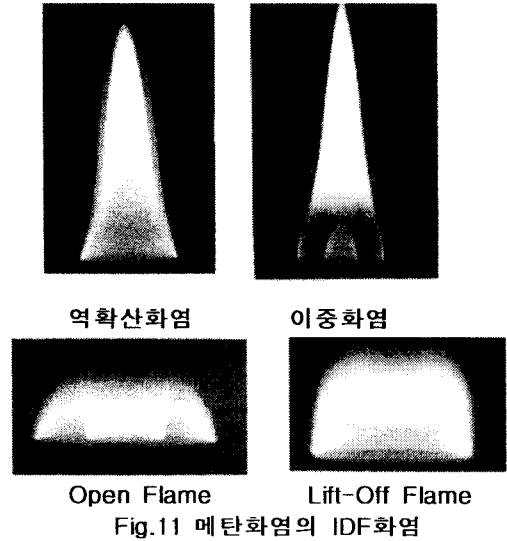


Fig.11에서 보듯이 메탄의 IDF화염은 중앙의 공기의 유속에 따라 화염의 형상은 크게 네 가지 경우로 나눌 수가 있다. 처음의 중앙의 공기가 공급이 하지 않는 경우와 유사한 역확산화염의 형태, 그리고 중앙에 화염이 하나 더 생기는 이중화염 형태, 그리고 중앙의 화염이 외곽화염을 통과하고 나간 오픈화염. 그리고 마지막으로 중앙의 이중화염이 외곽화염을 통과하고 Lift-off된 상태의 Lift-off 이중화염의 형태로 나눌 수 있다.

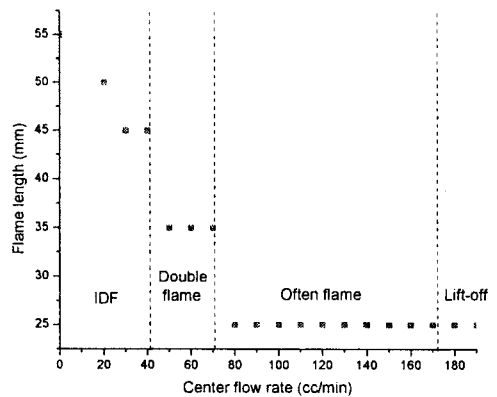


Fig.12 중앙공기유량에 따른 화염의 형상 (Methane-11.93W)

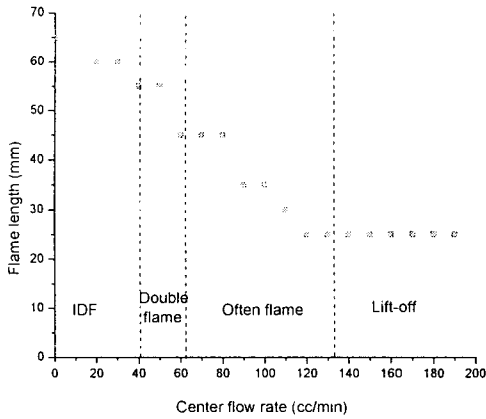


Fig.13 중앙공기유량에 따른 화염의 형상 (Methane-14.92W)

Fig.12~13에서 보듯이 각각의 연료유량에 따라 중앙의 공기 유량이 증가하면 화염은 IDF화염 → Double-Flame(이중화염) → Open-Flame → Lift-off 화염 형태가 나타나고 화염의 길이가 작아지고 Lift-off가 발생을 하면 화염의 길이는 거의 변화가 없는 것을 알 수가 있다.

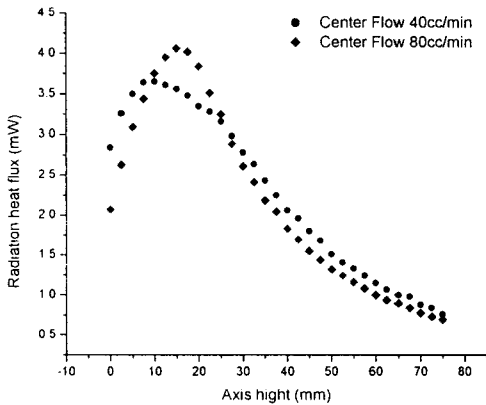
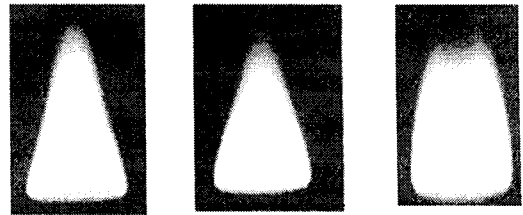


Fig.14 IDF화염의 Radiation Heat Flux At Axis (Methane-11.93W)

Fig.14는 중앙의 공기 유량에 따른 복사 열 유속의 분포를 보여주는 그림으로써 중앙의 공기의 유량이 많을수록 즉 이중화염의 형태보다는 Open-Flame의 경우가 복사 열 유속의 세기가 강하게 나타나는 것을 볼 수가 있는데 이것은 공기가 많이 공급됨으로 인한 분자복사의 증가로 중앙의 공기 유량이 증가할수록 복사 열 유속의 세기가 강해지는 것으로 예측된다.



역확산화염 이중화염 Open Flame
Fig.15 합성가스화염의 IDF화염

Fig. 15는 합성가스의 IDF화염을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 메탄의 IDF화염과 유사하게 중앙의 공기 유량이 증가할수록 화염의 형태가 변화하는데 단지 합성가스의 경우 메탄화염과 달리 Lift-off화염이 본 실험 영역에서는 발생을 하지 않은 것으로 나타났다. 그래서 합성가스의 IDF화염의 대표적인 화염은 역확산화염, 이중화염, Open-Flame 세 가지로 구분할 수가 있다. 또한 합성가스의 IDF화염에서도 NDF화염에의 합성가스와 같이 황염은 관찰이 되지 않았다.

연료량을 달리하여 화염영역을 나타낸 Fig.16~17에서 알 수 있듯이 합성가스화염의 경우 이중화염이나 Open Flame이 나타나는 중앙 공기의 유량은 메탄 화염과 비교하면 보다 많은 유량을 공급시 나타남을 볼 수가 있었다. 이러한 이유는 합성가스의 경우 발열량을 메탄의 발열량에 맞추어 실험을 수행하였으므로 약 4.2배의 유량의 증가가 원인이다.

또한 Lift-off가 발생을 하지 않는 이유는 합성가스의 조성 중 수소(H₂)의 연소속도가 메탄과 비교시 상당히 빠른 연소속도를 가지고 있기 때문에 화염의 안정성이 우수하므로 메탄화염에서 나타났던 Lift-off가 중앙공기의 빠른 유속에서도 발생하지 않은 것으로 생각된다.

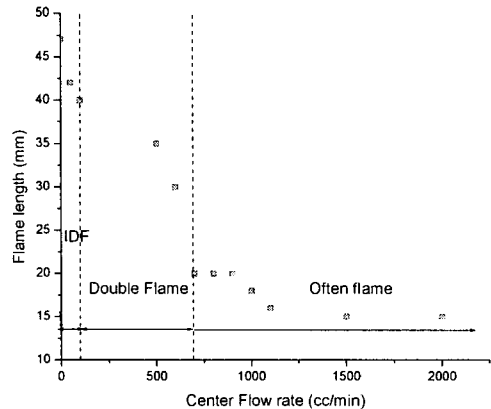


Fig.16 중앙공기유량에 따른 화염의 형상 (합성가스-11.93W)

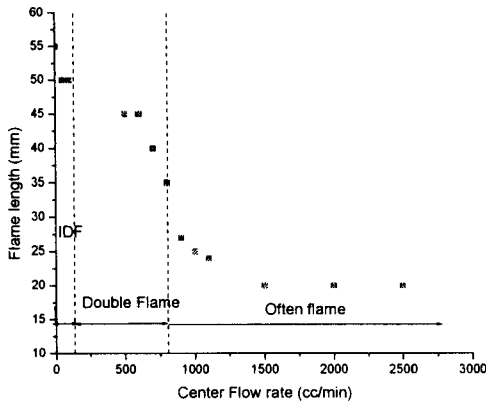


Fig.17 중앙공기유량에 따른 화염의 형상
(합성가스-14.92W)

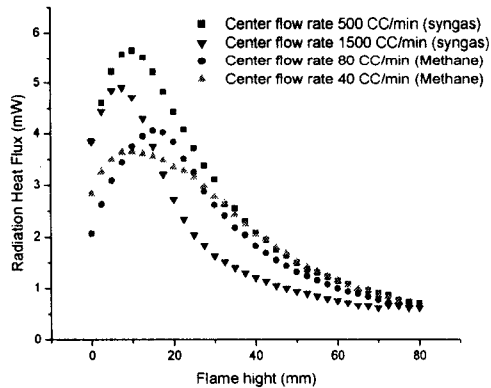


Fig.18 Axial Radiation Heat Flux of IDF
(11.93W)

NDF화염에서와 같이 IDF에서도 합성가스의 복사열유속이 메탄화염의 복사 열 유속의 값보다 더 우수한 것을 Fig.18을 통하여 알 수 있다. 이러한 이유는 앞서 언급했듯이 합성가스의 유량 증가에 따른 복사 열 유속의 증대에 기인한 것으로 생각된다.

4.3 NDF화염과 IDF화염 복사 열유속 비교

합성가스를 사용하는 경우 가장 우수한 복사 열 전달을 보이는 화염의 형성 방법에 대하여 알아보기 위하여 합성가스의 NDF과 IDF화염의 복사 열 유속을 비교하면 Fig.19에서와 같다.

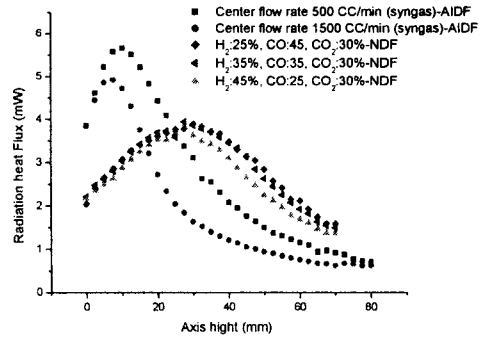


Fig.19 Radiation Heat Flux At Axis
(11.93W)

그림에서 보듯이 합성가스의 연소방법에 있어서 최적의 복사 열 전달을 할 수 있는 화염형성방법은 IDF화염으로 NDF화염에 비하여 복사 열 유속이 더 우수한 화염 형성 방법임을 알 수가 있었다.

4. 결론

- 1) 같은 발열량을 내는 연료의 유량에서는 공기를 산화제로 사용한 경우 메탄에 비하여 합성가스의 복사 열 유속이 더 우수한 이유는 공기유량의 증가로 인한 생성물의 증가에 따른 분자 복사의 증가에 기인된 것으로 판단된다. 그리고 합성가스의 경우는 조성 중 CO의 조성이 많을수록 복사 열 유속의 강도가 강하게 나타내는데 이러한 이유는 CO의 조성이 많을수록 단열화염온도의 증가에 의한 분자복사의 증가 때문이다.
- 2) 중앙노즐에 연료를 공급하는 방식보다는 환형노즐에 연료를 공급하는 역확산화염의 연소 방식이 복사 열 전달에 유리한 연소 방식임을 알 수가 있었다.
- 3) 공기 역확산화염(AIDF) 화염에서는 메탄의 화염의 경우 중앙 공기의 유량이 증가함에 따라 화염의 형상은 역확산화염 → 이중화염 → open-flame → lift-off 화염의 형태로 바뀌지만 합성가스의 경우는 역확산화염 → 이중화염 → open-flame의 형태로 메탄에서 보여주었던 중앙화염의 lift-off는 발생을 하지 않는다. 이러한 이유는 합성가스의 조성 중 수소(H₂)의 연소속도가 빨라 lift-off가 발생을 하지 않는 것을 알 수가 있다.

참고문헌

- [1] K. J. TOMÉ-KOZMIENSKY, processes for the Degasification And Gasification Wastes-Part1 : Basic Principles. Waste Management Journal, Vol.5, No.9(1993),pp670~681
- [2] G. KISS, German Patent DE 4,130,416 C1/U.S. 5,252,431, et. al
- [3] G. HABIG, professional Society for Thermal Processing and Waste Technology, VDMA, March,1992
- [4] 매립가스 처리시설 설치효율을 분석 조사 연구 용역 보고서, 수도권 매립지 운영관리조합, 1997
- [5] themoselect사 Energy &Rae Material Recovery System
- [6] 김선호, 오창보, 이창언, 이인대. "LFG 혼합 연료의 화염 안정화 특성", 제19회Kosco Symposium, pp165~172. 1998
- [7] 정태준, 이창언, 오수철, 이인대. "LFG 혼합가스의 연소 특성에 관한 연구", 대한기계학회 추계 학술대회논문집 B권, pp354~359. 1998
- [8] 이창언, 오준석, 정익산, 오창보, 이인대. "LFG(Landfill Gas)활용을 위한 연소특성 검토", 제18회 Kosco Symposium. pp21~29. 1999
- [9] S. S. Hwang, J. P. Gore. "Combustion and Radiation Characteristic of Oxygen-Enhanced Inverse Diffusion Flame", KSME International Journal, Vol.16, No.9, pp.1156~1165. 2002
- [10] S. S. Hwang, J. P. Gore. "Characteristic of Combustion and Radiation Heat Transfer of an Oxygen-Enhanced Flame Burner" Prog. Energy Combust. Sci.
- [11] 정중수, 이교우, "이중 동축 확산화염의 형상 및 배출 특성"