

액화석유가스와 코크스로가스의 표면연소 특성 (Surface Combustion Characteristics of LPG and Coke Oven Gas Using Metallic Fiber Burner)

*한건우, 조길원, 박오현, 이용국(포항산업과학연구원 성에너지연구팀)

요약

표면연소버너의 모재 중 최근 많은 관심을 끌고 있는 금속섬유를 이용한 LPG 및 COG의 연소특성을 파악하였다. 연소모드, 매트 표면온도분포, 공해물질 배출량, 버너 전후단 압력손실을 측정된 결과, COG 연소시가 더 넓은 범위의 적열영역을 얻을 수 있었고, 매트의 평균 표면온도도 높았다. NO_x 발생량은 100ppm 이하였고, 연소부하 $50\text{kcal}/\text{cm}^2\text{hr}$ 에서의 매트 전후단의 압력손실은 $30\text{mmH}_2\text{O}$ 로 압력손실은 거의 없었다. 적열범위나 표면온도분포 등이 가스별로 약간의 차이를 보였으나, 매트의 종류에 크게 상관없이 안정연소를 달성할 수 있어 가스 특성이 상이한 각종 가스의 연소에 표면연소기술의 적용이 가능할 것이다.

1. 서론

산업용 연소기는 연소열을 대류가열 및 부분적 가스복사열의 형태로 이용하는 것이 일반화되어 있다. 따라서, 연소부하에 따른 화염의 형태 및 화염내 온도분포 등 열적 구조는 연소기가 가지는 구조적 한계로 인하여 연소기의 국부과열에 의한 성능저하, 신속하고 균일한 피열물 가열의 어려움 등이 필연적으로 생기게 된다. 또한 경제, 사회적인 요구로 인하여 질소산화물 등 환경공해물질에 대한 규제도 갈수록 심화되는 실정이다. 그러므로, 연소기의 고효율성, 저공해성을 지향하는 실용성있는 새로운 개념의 연소기기술이 관심을 끌고 있다.

표면연소기술은 에너지 이용효율 향상, 질소산화물 배출 저감, 신속균일한 가열성능 등의 장점을 지니고 있어 최근 각광을 받고 있는 기술이다. 본 연구에서는 내열강인 FeCrAlloy로 제조된 금속섬유매트(metallic fiber mat)로 만든 표면연소버너를 이용하여 상용가스인 액화석유가스(LPG, Liquefied Petroleum Gas) 및 제철부생가스의 하나인 코크스로가스(COG, Coke Oven Gas)의 연소특성을 파악하여 표면연소기술의 응용가능성을 모색하고자 한다.

2. 실험

본 연구에 사용된 금속섬유매트는 벨기에의 Acotech 사 제품으로 그 화학성분 및 특성은 Table 1, 2 에 나타내었다.

Table 1. Composition of metallic fiber mat.

Element	Fecralloy Fraction
Cr	20.00%
Al	5.00%
Y	>0.10%
Si	0.30%
Mn	0.08%
Cu	0.03%
C	0.03%
Fe	Balance

Table 2. Typical characteristics of metallic fiber mat.

Item	Value
Fiber diameter	22 μ m
Mat thickness	2mm
Mass	1 ~ 5 kg/m ²
Porosity	80 ~ 85%

표면연소기의 모재는 크게 세라믹과 내열금속으로 나눌 수 있으며, 본 연구에 사용한 금속섬유매트는 가는 금속섬유(fine metallic fiber)를 소결 혹은 직조공정을 거쳐 다공성판넬 혹은 니트형재료(knitted material)의 형태로 제조한 것이다. 사용한 매트의 종류로는 판넬에 원형 천공이 된 원형천공판(AC200P1), 장방형 천공이 된 장방형천공판(AC200P2), 그리고 니트형매트(NIT100S, NIT200S)가 있다.

실험에 사용한 LPG 와 COG 의 주요 물성은 Table 3 에 나타내었다.

Table 3. Physical properties of gaseous fuel.

Properties	LPG	COG
Composition [vol. %]	C ₃ H ₈ 97.8, C _m H _n 0.8, C ₄ H ₁₀ 1.4	CH ₄ 26.6, C ₂ H ₄ 2.9, N ₂ 2.3, O ₂ 0.3, H ₂ 56.4, CO 8.4, CO ₂ 3.1
Heating value H/L [kcal/Nm ³]	24404/22387	4941/4389
Theoretical air [Nm ³ / Nm ³]	23.38	4.476
Specific gravity to air	1.524	0.369
Wobbe Index [kcal/ Nm ³]	19768	8133
Flame speed factor	16	44
Impurities		Tar 10 ~ 40mg/Nm ³ Naphthalene 0.18 ~ 0.26g/ Nm ³ H ₂ S 0.5~0.8g/ Nm ³ Ammonia 0.05~0.12g/ Nm ³ HCN ~1g/ Nm ³ Water : saturated

단위면적당 연소부하는 20 ~ 170kcal/cm²hr 범위에서 10kcal/cm²hr 씩 변화시키면서, 공기비는 0.7 ~ 1.5 범위에서 주로 1.0 ~ 1.5 사이에서 실험을 실시하였다. 연소안정성 및 연소모드를 육안관찰을 통하여 파악하였다. 또한, 매트 표면의 온도분포를 파악하고, 국부가열여부를 알아보기 위하여 Pyrometer(MINOLTA TR-630A)를 이용하여 매트의 9개 지점의 온도를 측정하였다. 배가스분석은 연소배가스분석기(Flue Gas Analyzer, Madur GA 60)를 이용하여 질소산화물의 배출 정도를 측정하였으며, 향후 버너설계를 위한 기초자료를 도출하기 위하여 버너 전후단의 압력차를 디지털마노미터(YOKOGAWA 2661 Precision Digital Manometer)를 이용하여 측정하였다. 표면연소버너의 구조를 Figure 1에 나타내었으며, 연료 및 공기의 공급계통은 Figure 2에 도시하였다.

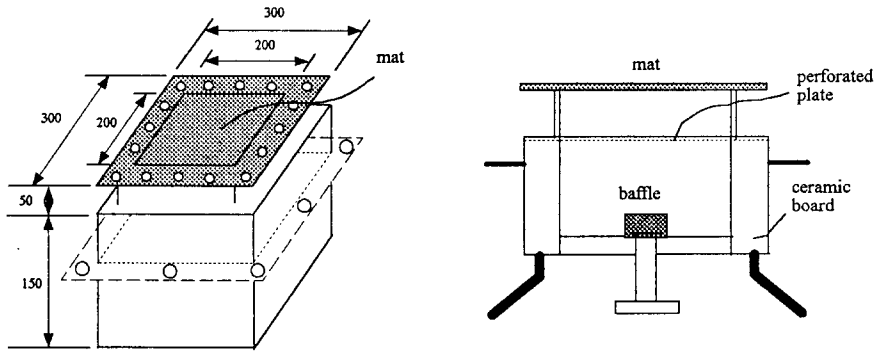


Figure 1. Structure and dimension of the experimental metallic fiber burner.

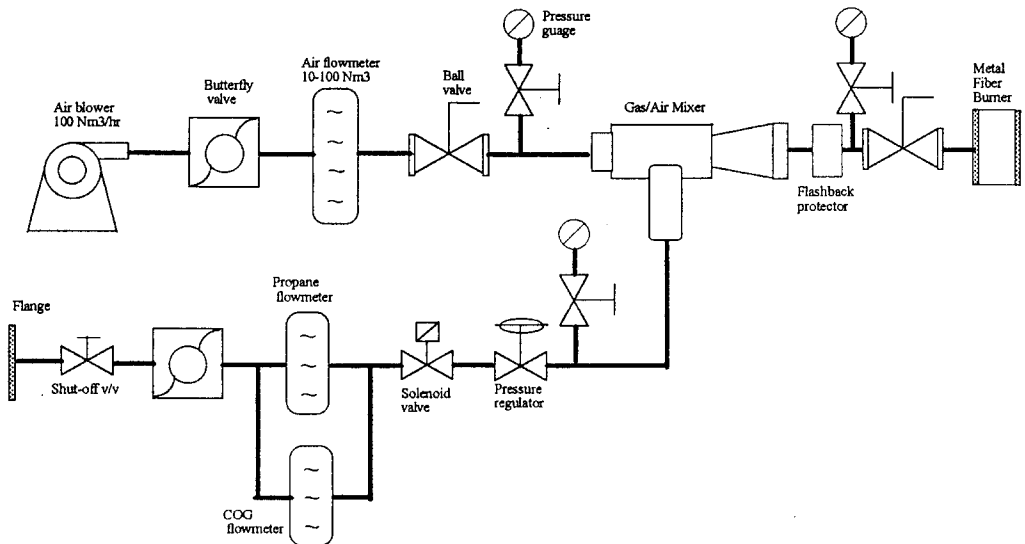


Figure 2. Fuel and air supply lines to MFB.

3. 결과 및 토론

3.1 연소모드

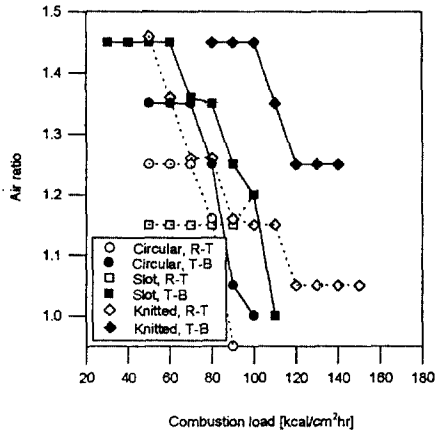


Figure 3. Combustion modes in case of LPG firing ; variations in mat type and air ratio.

전이영역 및 적열영역이 급격히 감소하고 있다. 이러한 현상은 보통 알려져 있는 연소부하에 따른 공기비의 관계와 유사하다.

COG를 연료로 사용하여 표면연소의 연소모드를 나타낸 그림이 Figure 4이다. 앞서 설명한 LPG 연소시와는 다른 경향의 연소모드를 보이고 있다. 즉, 세가지 종류의 매트 사용시 공히 연소부하가 증가하여도 각 연소모드의 영역은 그다지 크게 확장되거나 축소되지 않는다. 이러한 사실은 COG 연소시에는 LPG 연소시보다 더욱 넓은 연소부하 변화의 범위에서 적열 모드를 취할 수 있음을 시사하고 있다.

LPG와 COG 연소의 경우 연소 모드의 변화 성향이 이처럼 확연히 다른 것은 각 가스의 연소속도 및 분사속도 등의 차이에 의한 결과로 생각된다. 따라서, COG를 이용한 표면연소의 경우 광범위한 연소 부하에서 청염 상태를 일으키지 않고 복사 전열을 이루어 소기의 가열 효과를 얻을 수 있겠다. 각 가스별로 연소 특성이 다른 성향을 보여주는 그림이 Figure 5이다. 이 그림에서 보면 앞에서 설명한 두 가스의 서로 다른 연소 성향을 좀더 명확히 확인할 수 있다.

연소부하와 공기비의 변화에 따른 매트 종류별로의 적열모드(radiant mode), 전이영역모드 (transient region mode), 그리고 청염모드(blue flame mode)를 Figure 3, 4, 5에 나타내었다.

LPG 연소시를 살펴보면 각 모드를 나타내는 영역이(실선 혹은 점선의 위, 아래 부분) 점선 이하는 적열모드, 점선이상 실선 이하는 전이영역모드, 그리고 실선 이상은 청염모드를 나타낸다. 니트형 매트의 경우가 특히 청염영역이 좁아들을 알 수 있으며, 연소부하의 증가에 따라 각 매트의 경우 공히 청염영역이 확장되고

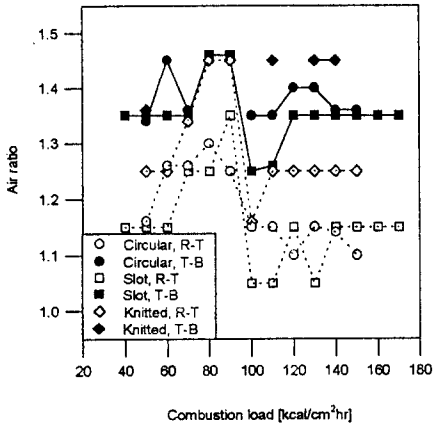


Figure 4. Combustion mode in case of COG firing ; variations in mat type and air ratio.

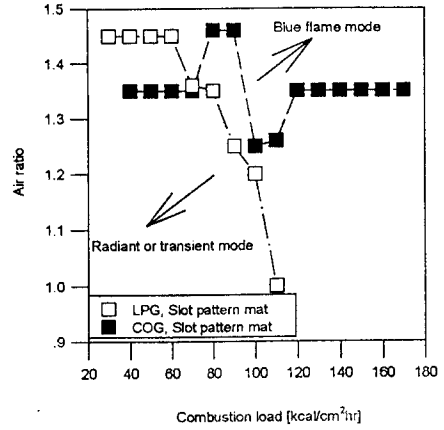


Figure 5. Comparison of combustion modes.

3.2 표면온도분포

연소 부하에 따른 LPG 연소시의 매트 표면의 평균온도분포를 나타내는 그림이 Figure 6 이다. 공기비의 증가에 따라 세가지 패턴의 매트 모두 피크온도(peak temperature)가 낮아짐을 알 수 있다. 이는 공기비의 증가로 인한 연소온도의 저하로 설명할 수 있다. 또한, 니트형 매트를 이용한 연소의 경우에는 다른 매트의 연소시보다 연소 부하가 증가함에 따라 매트표면온도의 감소가 상대적으로 덜 하였다. 이것은 니트형 매트를 사용하는 경우 연소 모드의 경우와 연관시켜 본다면 더 넓은 범위의 적열 모드를 갖는다는 사실로부터 유추할 수 있다. 즉, 고온의 복사 에너지를 방출하는 영역이 넓은 니트형 매트는 더 높은 평균온도분포를 갖는다고 생각할 수 있다. 가장 높은 피크온도를 갖는 경우는 세가지 실험용 매트 사용시 모두 공기비 1.0 근처였다.

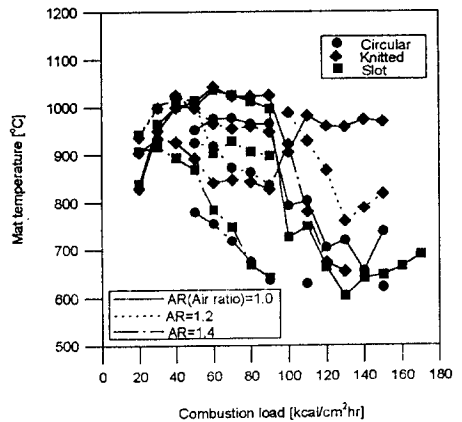


Figure 6. Mat temperature variations for LPG firing.

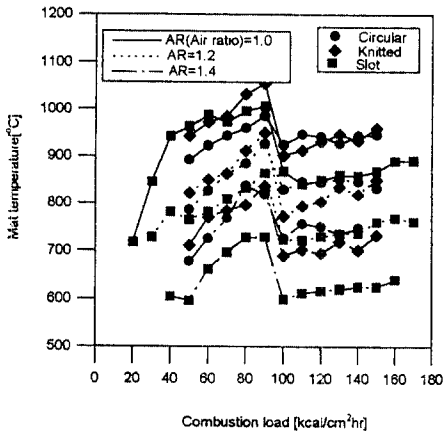


Figure 7. Mat temperature variations for COG firing

피크온도분포를 보이는 것은 연소 모드 실험시의 경우와 마찬가지로 두 가스가 화염속도계수, 발열량, 화학적 조성 등의 물성이 매우 다르다는 사실에서 기인한다. 즉, LPG는 COG보다 버너의 구조나 매트 종류, 연소조건 등에 상대적으로 민감한 가스라고 볼 수 있다.

3.3 배가스 분석

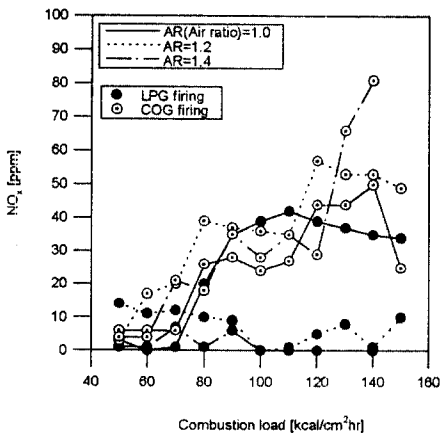


Figure 8. NO_x emissions in case of gas combustion.

COG 연소시 매트표면의 평균온도분포는 Figure 7에 나타나 있다. 앞의 LPG 연소시와 마찬가지로 평균온도는 공기비 1.0 근처에서 가장 높았다. 또한, COG 연소의 경우에는 LPG 연소시보다 더 높은 피크온도를 얻을 수 있었다. 그리고, 각 매트별로 80 ~ 100kcal/cm²hr의 연소부하 근처에서 피크온도를 보였다. 이 사실은 먼저 언급된 LPG 연소의 경우와는 사뭇 다른 양상이다. COG 연소의 경우에는 공기비의 증가에 따라 피크온도가 발생하는 연소부하가 점점 작아지고 있다.

위의 두 가지 가스 연소가 서로 상이한 위의 두 가지 가스 연소가 서로 상이한 피크온도분포를 보이는 것은 연소 모드 실험시의 경우와 마찬가지로 두 가스가 화염속도계수, 발열량, 화학적 조성 등의 물성이 매우 다르다는 사실에서 기인한다. 즉, LPG는 COG보다 버너의 구조나 매트 종류, 연소조건 등에 상대적으로 민감한 가스라고 볼 수 있다.

LPG 및 COG 연소시 각 매트별로 NO_x 발생량을 나타낸 그림이 Figure 8이다. NO_x 발생량의 경향은 COG 연소의 경우가 LPG 연소시보다는 약간 높게 나타났으며, 연소 부하가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 그러나, 실험 범위에서 100ppm 이하로 비교적 저 NO_x 연소가 가능함을 알 수 있다. CO 발생량은 전 실험 범위에서 300ppm 이하로 미미하여 불완전연소의 문제점은 거의 없었다.

3.4 압력 손실

LPG 및 COG 연소시 표면연소버너의 압력손실은 Figure 9, 10 에 각각 나타나 있다.

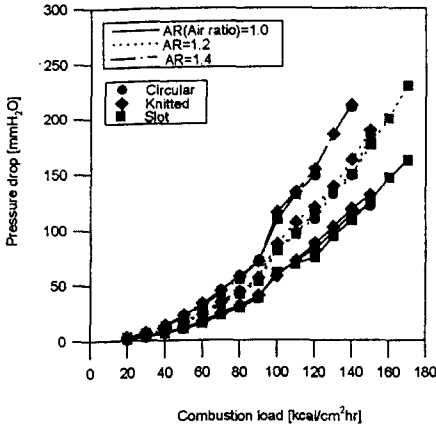


Figure 9. Pressure drop for LPG firing.

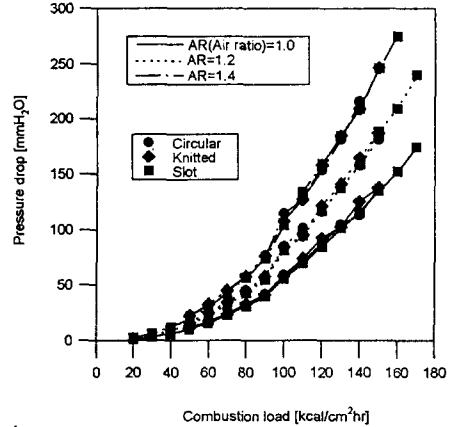


Figure 10. Pressure drop for COG firing.

LPG 와 COG 연소시 모두 연소용량 증가에 따라 압력 손실은 단조 증가하였다. 또한, 가스의 종류의 영향이 거의 없이 압력손실의 절대값은 비슷하였다. 이는 COG 와 LPG 연소시의 총유량은 각각 연료유량과 공기유량의 합이므로 COG 연소시의 총유량과 LPG 연소시의 총유량은 비슷하여 위와 같은 결과를 얻는 것으로 생각된다. 즉, LPG 의 발열량은 COG 발열량의 약 5 배이고, 이론공기량은 약 5 배로 큰 유량의 차이가 없어서 기인한다. 공기비의 증가에 따라서도 역시 연료 및 공기유량이 증가함에 따른 총유량의 증가로 매트 종류에 크게 상관없이 비슷하게 증가하였다. 전체적으로, 버너 전단의 압력손실은 실험시 최대 연소용량인 170kcal/cm²hr 의 경우에도 300mmH₂O 이하였고, 저과잉공기비 연소에서의 적열 상한으로 여겨지는 50kcal/cm²hr 의 연소 부하에서는 30mmH₂O 이하의 값으로 압력손실은 거의 무시할 만하다고 볼 수 있다.

4. 요약 및 결론

금속섬유매트가 다공성 매질로서 사용된 표면연소버너를 이용하여 상용가스인 LPG 및 제철 부생가스인 COG 를 연소시켜 그 연소특성을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) COG 연소의 경우 LPG 연소의 경우 보다 매트의 종류에 크게 구애되지 않고 보다 넓은 범위의 적열 및 전이영역을 얻을 수 있었으며, 그 범위는 COG 연소시 30 ~ 170kcal/cm²hr, LPG 연소시에는 30 ~ 100 kcal/cm²hr 정도였다.

- (2) LPG 연소의 경우 피크온도가 발생하는 연소부하가 공기비의 증가에 따라 고부하에서 저부하로 전이되나, COG 연소의 경우는 거의 같았다.
- (3) 연소부하의 증가에 따라 NO_x 발생량이 증가하였으나, 100ppm 이하로 저공해 연소를 달성할 수 있었다.
- (4) 연소부하의 증가에 따라 연료의 종류나 매트 종류에 관계없이 버너 전후단의 압력손실은 증가하였으나, 적열 모드를 얻을 수 있는 영역에서는 30mmH₂O 이하로 매우 적은 값을 보였다.
- (5) 금속섬유매트가 부착된 표면연소버너를 이용하여 물성이 상이한 액화석유가스와 코크스토가스를 연료로 하여 연소특성을 파악한 결과 열량 주입이나, 불완전연소, 공해물질 배출, 가열성능 등에 큰 문제점 없이 표면연소 기술의 적용이 가능하다.

참고문헌

- (1) 노동순 외, 1997, “저공해 표면연소 시스템의 화이버글라스 불소수지 코팅공정예의 시범 적용”, 한국에너지기술연구소
- (2) D. C. Strachan, 1991, “Metal fibre burners - A low-NO_x radiant heater technology”, GASWARME International, Vol. 40
- (3) 桑原 茂, 小澤 秀成, 1991, “메탈화이버버너의 개발과 연소특성”, 工業加熱, Vol.28, 23-31