

연료종류 변화에 따른 표면연소 특성

한 건우, 조길원, 이용국
포항산업과학연구원

Effect of Fuel Change on the Surface Combustion Characteristics

Kunwoo Han, Kil Won Cho, Yong Kuk Lee
Research Institute of Industrial Science and Technology

1. 서론

표면연소는 모재의 고온복사열을 이용하여 신속균일한 가열성능, 공해물질 배출저감 등의 잇점을 갖고 있어 신연소기술의 하나로 각광받고 있다. 본 연구에서는 금속섬유(metallic fiber) 모재를 사용하여 액화석유가스(LPG, Liquefied Petroleum Gas)와 제철부생가스 중 하나인 코크스로가스(COG, Coke Oven Gas) 연소시 로내 온도분포, 연소모드 등을 고찰하여 가스의 기본적인 물성으로부터 표면연소의 특성을 파악할 수 있는 하나의 가능성을 제시하고자 한다.

2. 이론

표면연소는 고온의 표면모재(다공성 매질)에서 발생하는 복사열을 이용하여 피열물을 가열하는 연소기술이다. 표면모재로는 세라믹(ceramics)과 금속섬유매트가 주로 사용되고 있다. 표면연소를 특징지우는 가장 큰 인자는 표면의 연소부하에 따른 모드의 분류로, 적열 모드(radiant mode)와 청염 모드(blue flame mode)로 나눌 수 있다. 적열 모드에서는 매질 내에서 연소가 일어나면서 투과성 매질이 황금/적색을 이루면서 발광하고 주입에너지를 적열방사하는 모드이다. 청염 모드는 매질 표면위에서 파랑색의 불꽃이 매트 표면에 형성되면서, 에너지의 대부분을 대류의 형태로 방출하는 모드를 지칭한다. 적열 모드와 청염 모드가 어느 정도 공존하는 모드를 전이 모드(transient mode)라 칭한다.

표면 연소의 성능은 다공성 매질의 물리화학적 성질, 연소로의 조건, 연료의 물성 등에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 이 중 연료의 물성이 많은 영향을 미침에도 불구하고 LNG와 같은 상용 연료에 대한 제한적 연구만이 주로 이루어져 왔다. 그 결과로 20-80kcal/cm²hr의 연소부하에서만 적열 모드를 보이는 것으로 알려져 왔고, 연료 종류의 변화에 따른 깊이 있는 고찰이 이루어지지 않은 상태에 있다.

3. 실험

표면연소 버너 실험로는 상면이 개방된 직육면체의 형태이며, 버너는 실험로의 하면에 부착되어 위 방향으로 연소할 수 있도록 구성하였다. 표면의 모재는 소결된 Fecralloy 인 Acotech사의 금속섬유매트(AC200P1 등, Acotech, Belgium)를 사용하였다. 매트의 유효재원은 0.2m×0.2m(정방형)이며 두께는 0.002m이다. 연료의 종류를 변화시키면서 공기비 및 연소부하 변화에 따른 매트 표면온도를 광학 방

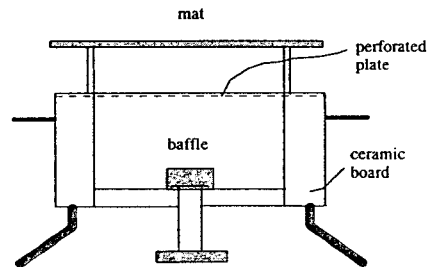


Figure 1. Structure of apparatus

사온도계(Minolta TR-630A, 복사율 0.7 유지)를 이용하여 측정하였고, 연소 모드는 육안으로 관찰하였다. 실험로 및 버너의 개략도를 Figure 1에 나타내었다. Table 1은 본 연구에서 사용한 가스의 물성을 나타낸 표이다.

Table 1. Properties of gases

Property	LPG	COG
Composition [vol.%]	C ₃ H ₈ 97.8 C ₄ H ₁₀ 1.4 C ₂ H ₆ 0.6 C ₃ H ₆ 0.2	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
Lower calorific value [kcal/Nm ³]	22,387	4,389
Theoretical air/fuel ratio	23.83	4.476
Specific gravity to air	1.524	0.369
Laminar flame speed [m/s]	0.45	0.82

4. 결과 및 토론

적열 모드의 변화

연소 모드는 연소부하 및 공기비의 변화에 따라 달라진다. 연소부하의 증가에 따라 적열 모드의 범위는 감소한다. 고정된 공기비에서 표면 부하의 증가에 따라 공기/연료 혼합 가스의 매트 통과하는 걸보기 속도(superficial velocity)는 증가한다. 연료의 분사속도와 연소속도가 균형을 이루는 지점에서 화염이 형성된다는 사실은 익히 알려져 있다. 화염면이 매트 내부나 표면위에 존재하는 한 연소 모드는 적열 상태를 유지할 수 있음을 알 수 있다.

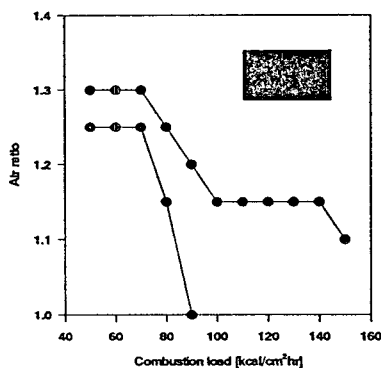


Figure 2. Combustion modes

화염면의 위치와 온도는 유체의 흐름, 열전달, 연소화학반응이 복합되어 이루어진 상호작용과 평형에 의해 지배된다. 연소에 의해 생성된 열은 전도, 대류, 복사를 통하여 매트와 그 주위, 공기/연료 혼합 가스에 열을 전달하게 되며, 따라서 매트에서의 온도는 단열화염온도(adiabatic flame temperature)보다는 매우 낮게 된다. 열 손실에 의해 형성된 매트에서의

온도가 자연착화 온도(auto-ignition temperature)보다 낮게 되면, 매트 는 적열될 수 없다. 단열화염온도는 COG의 경우 2281K, LPG의 경우 2267K로(공기비 1.0의 경우) 1%이내의 차이를 보이고 있으며, 열주입량에 대한 배가스의 부피도 2%이내의 차이가 난다. 따라서, 이와 같은 조건에서 표면연소의 적열 범위 변화는 혼합 가스의 속도 및 화염 속도가 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

동일한 표면부하에서 COG 연소시에는 LPG에 비하여 상대적으로 낮은 발열량 때문에 혼합 가스의 유속이 13% 정도 증가한다. 또한, 연소속도는 상온, 공기비 1.0에서 COG(0.82m/s)가 LPG(0.45m/s)보다 1.8배 정도 빠르다. 따라서, 동일한 표면부하에서 COG 연소시에는 LPG 연소시에 비하여 연소속도의 증가비가 혼합 가스의 분사속도 증가비보다 높아서 화염면이 매트 의 내부쪽(상류쪽)으로 더 침투함을 알 수 있다. 적열 상한에서 공기/연료 혼합 가스의 분사 속도는 LPG의 경우 0.27m/s, COG의 경우 0.57m/s였다. 이 때, 분사속도와 연소속도의 비는 COG, LPG의 경우 각각 0.69, 0.60이었다. 거시적 관점에서 적열 범위의 상한이나, 안정 화염 영역의 상한은 화염속도와 분사속도가 어느 정도 균형을 이루는 범위에서 형성되며, 이 범위에 대한 정량적 값은 추후 연구가 필요하다 하겠다.

적열 상한치의 이동은 공기비와 연관지어 생각할 수 있다. 과잉공기비가 증가하게 되면, 분사속도는 증가하게 되는 반면, 연소속도는 감소하게 된다. 매트 내부에 존재하는 화염면은 하류측으로 더욱 이동하게 되고, 과잉공기비가 더욱 증가함에 따라 적열 모드는 전이 모드를 거쳐 침염 모드로 이동하게 된다. 이 경계점에서 적열 모드의 상한치가 존재한다.

일반적으로 연료 종류의 변화는 연소속도, 화염온도, 혼합 가스량, 연소 가스량 등의 변화를 수반한다. 다공성 매질 내에서의 연소는 차가운 혼합 가스의 연소속도를 증가시키고, 연소속도의 증가분이 연료의 종류에 따라 달라질 수 있지만, 적열 모드의 범위는 상온에서의 종류 연소속도로 간접적인 비교자료를 제시해 준다. 즉, 연소속도의 증가는 적열 모드의 범위를 확장시킨다.

매트 표면온도의 변화

LPG와 COG 연소시 매트 표면의 온도를 나타내는 그림이 Figure 3이다. 최고 화염온도는 두 가스의 경우 모두 비슷하나, 최고 화염온도를 보이는 표면부하는 가스의 종류에 따라 달라짐을 관찰할 수 있다. 공기비 1.0에서 LPG 연소시에는 60kcal/cm²hr, COG 연소시에는 90kcal/cm²hr 근처에서 최고 화염온도를 보이고 있다. 이 현상은 앞 절의 적열 모드 변화와 같은 이론적 배경을 지니고 있다. 연소속도가 빠른 COG 연소시 화염면은 매트 의 안쪽(가스 상류측)으로 더욱 깊이 침투하게 되고 이에 따라 연소 가스가 매트와 의 열전달에 의해 더 많은 열 손실을 유발하게 된다. 따라서, 동일한 표면부하에서 매트 의 온도는 낮아지게 되며, 연소속도가 빠른 연료(본 연구의 경우 COG)를 연소하게 되면 최고 화염온도가 나타나는 표면부하는 증가하게 된다. 즉, 일반적으로 불룩한 형태를 지니는 표면온도 분포는 연소속도가 빠른 COG의 경우에는 LPG보다 높은 연소부하 쪽으로 전체적인 곡선이 이동하면서, 80kcal/cm²hr 이하의 표면부하에서는 LPG 연소시 표면온도가 COG 연소시보다 비교적 높게 나타난다.

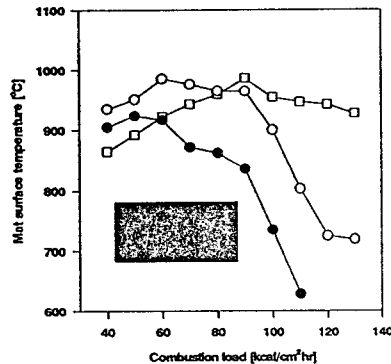


Figure 3. Surface temperature

5. 결론

표면온도와 적열 범위 등에 관한 연료 종류의 영향을 살펴본 결과, 연소속도가 표면연소 버너의 특성에 중요한 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 연소속도가 상대적으로 빠른 COG 연소시에 연소속도가 느린 LPG에 비하여 넓은 적열범위와 적열 상한치의 증가, 최고 화염 온도가 나타나는 연소부하의 증가를 관찰할 수 있었으며, 이는 연소속도와 분사속도의 상호 연관성에 의해 설명할 수 있었다.

6. 참고문헌

1. Bogaert,G.V., CADDET Newsletter, 1997, No. 4, 11
2. Viskanta,R., ASME/JSME Thermal Engineering Proceedings, 1991, 5, 161
3. Golombok,M., Prothero,A., Shirvill,L.C. and Small,L.M., Combust. Sci. and Tech., 1991, 77, 203
4. Sathe,S.B., Peck,R.E. and Tong,T.W., Int. J. Heat Mass Transfer, 1990, 33, 1339
5. Hanamura,K. and Echigo,R., Warme und Stoffubertragung, 1991, 26, 377
6. Sathe,S.B., Peck,R.E. and Tong,T.W., Combust. Sci. and Tech., 1990, 70, 93
7. Tada,T., Akiyama,S. and Nakamura,T., Industrial Heating, 1992, 29, 10
8. Perret,J.-P., Shell Recherche RA, Centre de Recherche de Grand-Couronne, Personal Communication, 1997
9. Kawaguchi,O. and Otoh,T., 23rd Symp.(Int'l) on Combustion, The Combustion Institute,1990, 1019
10. Acotech, 'Radiation Characteristics of the Metal Fibre Burner', Doc. 09/02 170593
11. Kuwabara,S. and Ozawa,H., Industrial Heating, 1991, 28, 23
12. 조길원,한건우,노동순, 연구보고서 96A124, 포항산업과학연구원, 1997
13. 이용국,박홍수,조길원, 연구보고서 8085A, 포항산업과학연구원, 1988
14. 노동순, 연구보고서 95-P-99-06, 한국에너지기술연구소, 1997
15. Williams,A., Woolley,R. and Lawes,M., Combustion and Flame, 1992, 89, 157
16. Strehlow,R.A., 'Combustion Fundamentals', McGraw-Hill, New York, 1984
17. Cho,K.W., Han,K., Park,H.S., Lee,Y.K. and Lee,K.-H., Fuel, 1998, 77, 1129
18. 한건우 외, '액화석유가스와 코크스로가스의 표면연소 특성', 한국에너지공학회 추계학술 발표대회 논문집, 1997