

화학증착용 천연가스버너 개발

유현석* · 이종성* · 한정옥*, 최동수*

Development of the Natural Gas Burner for Modified Chemical Deposition Processes

Hyunseok You, Joongseong Lee, Jeongok Han and Dongsoo Choi

Key Words : MCVD(modified chemical vapor deposition), Thermophoretic(열영동), Optic-fiber(광파이버), Flame force(화염력), Momentum ratio(운동량비)

Abstract

MCVD(modified chemical vapor deposition) used in making optical-fiber currently utilizes the hydrogen-oxygen burner as a energy supply source. To improve the productivity and to reduce the manufacturing cost of optical-fiber, a natural gas-oxygen burner has been developed. The manufacturing processes of optical-fiber consist of vapor deposition, collapse and drawing processes. Among these processes, the vapor deposition and the collapse processes are important in terms of improving the productivity and saving the production cost. The vapor deposition and collapse processes are performed by combustion heat and flame force supplied by a burner. So the flame force of the burner used in these processes is required to have an optimal and consistent value in order to allow uniform heating and collapse of quartz tube. In this regard, the momentum ratio of natural gas and oxygen has been optimally determined by modification of a burner and the inlet flow pass also has been modified.

1. 서론

최근 정보-통신분야의 급격한 발달로 관련 핵심 소재인 광파이버에 대한 수요

가 급증하고 있다. 광파이버 제조는 주로 산소화염과 같은 고출력을 이용한 화학증착(chemical vapor deposition)법이 이용되며, 제품의 품질 문제로 청정화염인 수소-산소화염을 사용하고 있다. 그러나 최근 급증하는 광파이버 수요와 제품의 품질 및 생산성 향상을 위해서 제조공정 개발에 대한 연구가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 수소보다 안전

* 한국가스공사 연구개발원
이용기기연구센터

하며 경제적인 천연가스를 이용하여 화학 증착용 버너에 대해 적용 가능성을 검토하고 실증실험을 통해 대체 가능성 및 기초 자료를 확보하고자 한다.

현재 광섬유 제조공정에서 사용중인 열원을 수소에서 천연가스로 전환할 경우, 연료비 절감 및 공정시간 단축 등 생산성 향상에 상당한 효과가 기대 된다. 그러나 전세계적으로 아직까지 이 분야에 대한 충분한 검증이 이루어지지 않은 상태이기 때문에 천연가스 전환시 예측되는 문제점들(연소 중간생성물, flame force 등)을 bench test를 통해 조사하고 증착성능을 비교하여 천연가스로의 전환가능성을 확인할 필요가 있다.

2. 광파이버

2.1. 광 파이버 제조

광 파이버는 광(0.8~1.6nm)을 전송시키기 위해서 전반사(total internal reflection)를 이용하며 기본적으로 코어(core)와 크래딩(cladding)이라는 두 개의 다른 굴절률을 가진 물질로 구성되어 있다. 이러한 광 파이버는 본질적으로 전송되는 광의 흡수와 산란 손실이 적어야 하며, 이런 특성을 만족시키기 위해서 광 파이버의 재료는 유리나 단결정체(monocrystalline) 구조를 가진 물질로 제한된다.

광 파이버 제조 공정은 크게 증착 및 응축 공정과 인출(drawing or pulling) 공정으로 구분되며 본 연구의 목적은 코어와 크래딩의 형성을 위한 증착 공정의 개선에 있으므로 이에 대해서 알아보겠다.

광 파이버 제조의 핵심 기술은 굴절률이 서로 다른 물질을 합성하는 것이다. 이를 위해서는 크래딩 역할을 하는 모봉

에 코어용 물질을 증착법(vapor-phase deposition techniques)을 사용하여 코팅하며 이때 증착과정에 화학반응에 의해 생성된 입자는 열영동 힘(thermophoretic force)에 의해 모봉의 표면에 부착되는 것이다. 이러한 증착법에는 OVPO(outside vapour-phase oxidation), VAD(vapour axial deposition), MCVD(modified chemical vapour deposition) 등이 있으며 현재 국내에서 적용되는 기술은 MCVD법이다.

2.2. 열영동(thermophoretic)

열영동(thermophoretic)이란 작은 입자가 온도구배가 존재하는 유체흐름속에 존재할 때 온도가 감소하는 방향으로 입자가 속도를 가지는 현상이다. 이 현상은 뜨거운 표면에 부착되어 있는 입자가 떨어져서 상대적으로 차가운 표면에 부착되는 현상을 야기 시킨다.

이러한 물리적 현상은 공기 필터의 효율, 열교환기 표면의 오염, 석탄연소시 flay ash와 광파이버 제조 등 여러 응용 분야에 사용되고 있으며, 광파이버 제조에 대한 수치적 해석 연구가 활발히 수행되어 왔다.^{[1][2][3]}

열영동에 대한 수식적 표현은 표류속도(drift velocity)로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 정의된다.^[4]

$$V_p = -\frac{vK}{T} \nabla T \quad (1)$$

V_p 는 열영동입자속도이며 T 는 절대온도, v 는 가스의 동점성계수, K 는 열영동에 대한 무차원 상수이며 분자경로에 대한 입자의 상대크기, 유체와 입자의 열전도도 등에 영향을 받는다. 열영동 힘은 유체의 온도구배가 5K/mm의 order이고 입자의 크기가 10 μ m 정도로 될 때 중요해진다.

3. 실험장치 및 방법

3.1. 실험장치

버너의 모의 실험장치에 대한 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다. 석영관 가열실험을 위해 광파이버 제작공정에 사용되고 있는 장비와 유사하게 선반을 개조하였다. 선반은 버너의 좌우이송이 가능하며 이송속도를 조절할 수 있도록 제작하였으며 석영관을 회전시킬 수 있으며 이 시 회전수를 단속적으로 조절할 수 있다.

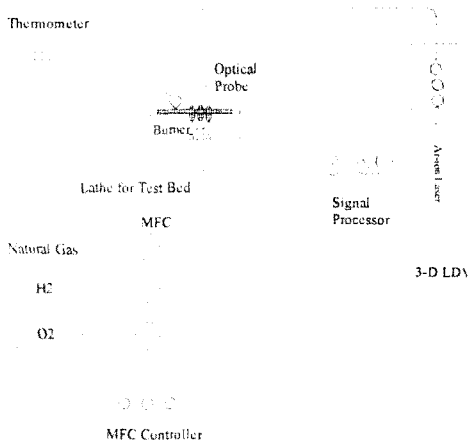


Fig.1 Schematic diagram of the estimation apparatus for the performance of NG burner for MCVD processes

화염의 flame force를 측정하기 위해 TSI사의 3D fiber optic LDV system을 사용하여 유속측정을 하였다. 신호처리에는 burst autocorrelation 방법에 의해 burst 신호를 감별한다. 도플러 신호는 후방산란법을 이용하여 취득하였으며 레이저는 5W Ar-Ion laser를 사용하였고 산란입자로는 0.22 μ m TiO₂를 사용하였다. 측정부의 크기는 직경0.165mm, 길이 3.4mm 이다.

석영관 표면온도 측정을 위해 공정에 사용되고 있는 적외선 온도계(Land사 System 4 Classic)를 사용하였다.

3.2. 실험방법

기존의 버너는 수소-산소화염의 역화 가능성 때문에 확산연소방식을 채택하고 있으므로 본 연구에서도 기존의 버너 형상을 그대로 사용하였으며 확산연소의 중요한 인자인 연료와 산화제의 운동량비를 최적화 시킬 필요가 있다. 운동량비 정의는 다음과 같이 하였다.

$$m = \frac{\dot{m}_{fuel} v_{fuel}}{\dot{m}_{oxy} v_{oxy}} \quad (2)$$

여기서 \dot{m} 은 단위면적당 질량유량, v 는 유속을 의미한다.

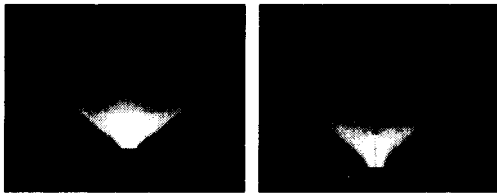
광파이버 제조에 있어 화염에 의해 발생하는 flame force는 석영관이 화염으로부터 받는 힘을 의미하여 다음과 같이 정의한다.

$$F = \dot{m} V_g \quad (3)$$

F 는 flame force, \dot{m} 는 단위면적당 질량유량, V_g 는 가스유속으로 정의된다. Flame force가 중요한 의미를 갖는 것은 증착공정에서 이 힘이 적어야 하기 때문이다. 이를 위해 화염분출력을 저감시키고 운동량비를 최적화하기 위해 노즐의 단면적을 변화시켰다. 화염내에서 가스 속도 측정위치는 석영관 표면의 위치($r=20\text{mm}$)에서 200°~340° 범위를 14°로 등분하였다. Flame force계산을 위해 가스의 속도성분은 석영관 표면에 수직방향으로 분사되는 동압(dynamic pressure)을 고려하였다. 이때 가스온도는 석영관 표면온도와 같다고 가정하였다.

4. 실험결과

Photo 1은 연료와 산소의 혼합정도를 가시적으로 보기 위하여 연료(천연가스)와 산소에 각각 따로 발열체(TiO_2)를 공급하였을 때의 사진이다. 옅은 노란색을 띄는 영역이 발열체 부분이다. Photo 1.(b)의 가운데 파란색 영역이 산소의 분출영역으로 확실한 구분이 관찰되나 photo 1.(a)의 경우 photo 1.(b)와 같은 확실한 구분은 나타나지 않았으며 전체적으로 고르게 분포함을 볼 수 있다. 이는 산소와 연료의 운동량비가 1.0이하로 산소의 운동량이 지배적임을 나타내주는 결과이다. 즉, 연료보다는 산소가 이종가스의 혼합에 지배적 역할을 하고 있음을 관찰할 수 있다.



(a) TiO_2 in oxy. (b) TiO_2 in fuel

Photo 1 Luminous flame of separately supplied TiO_2 into oxygen and fuel

Fig. 2는 현재 사용중인 버너에 대해서 측정된 유속결과이다. 그림에서 관찰할 수 있는 것은 석영관 가열위치에서 전체에 걸쳐 속도분포가 일정하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 속도분포는 석영관 가열시 균일한 flame force를 얻기 곤란하므로 이에 대한 개선의 필요성이 있는 것으로 보인다. 이러한 속도분포의 결과가 나타난 원인을 추측해보면 노즐의 중심부인 $255^\circ \sim 285^\circ$

근처에서 최대유속을 나타내고 있으며 이는 연료와 산소의 유로도입부와 유사한 위치이다. 즉, 유로부의 공간이 충분

치 못하여 거리에 비례하는 유동저항특성 때문에 중심부의 속도가 증가하는 결과를 가져온 것으로 분석된다.

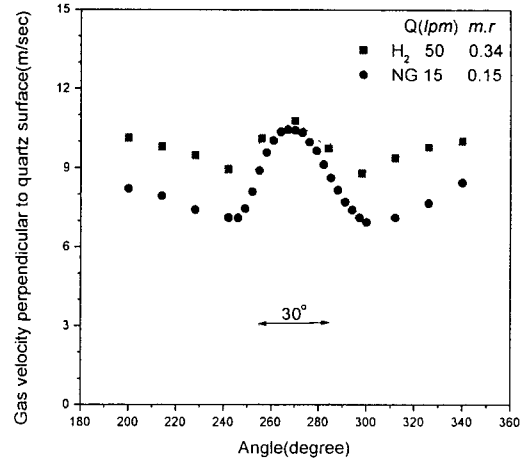


Fig. 2 Profiles of gas flame velocity perpendicular to quartz surface ($\Phi=1.0$, $r = 20mm$)

이러한 유동의 특성을 나타내는 곳이 연료부인지 산소부인지를 밝히기 위하여 연료와 산소부에 독립적으로 가스를 공급하여 유속을 측정된 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 여기서 가스를 독립적으로 공급한 이유는 동시에 가스를 공급하면 각 각의 유동특성에 대해 상호작용이 발생되어 불균일 분포를 유발시키는 가스 유로부를 정확히 판단하기 어렵기 때문이다. 결과에서 나타나는 것처럼 연료에만 공급하였을 때는 가열부의 전체에 균일한 분포를 얻을 수 있었으나, 산소만 공급할 경우 불균일 분포가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며 산소부의 유로에 대한 개선이 필요함을 알 수 있다.

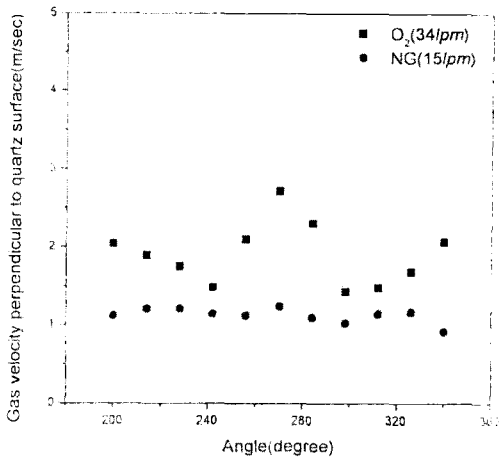


Fig. 3 Profiles of unburned gas velocity perpendicular to quartz surface ($\Phi=1.0$, $r = 20\text{mm}$)

수소와 천연가스를 연료로 한 화염조각에서 위치에 따른 유동장 변화가 Fig. 3에 나타나 있다.

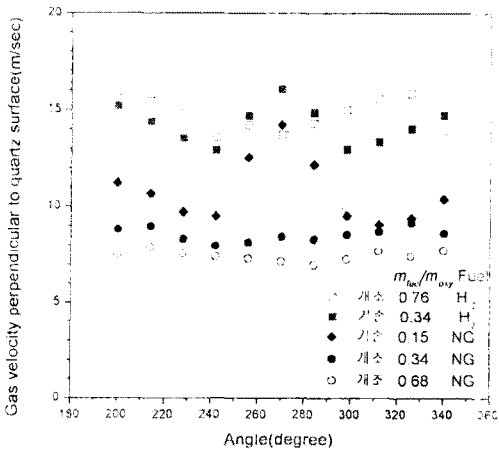


Fig. 4 Various profiles of gas flame velocity perpendicular to quartz surface ($\Phi=1.0$, $r = 20\text{mm}$)

공급부하는 석영관 가열 모의실험에서 확인한 1800~1900°C의 중착온도를 나타내는 조건으로 약 8,000kcal/h(저위발열

량)이다.

기준버너와 개조버너를 비교해 보면 개조버너는 산소 유로부의 확대로 인해 유속의 불균일 분포가 제거되었다.

천연가스-산소화염의 유속분포를 보면 기존 운동량비 0.15에 비하여 운동량비 0.34의 개조버너의 중심부 유속분포 절대값이 현저히 저감된 것을 볼 수 있으며 이는 산소 노즐의 단면적 증가에 기인하는 것이며 천연가스-산소의 혼합가스 분출속도를 저감하기 위해서는 산소 노즐단면적의 확대가 효과적임을 알 수 있다.

반면 수소-산소화염의 경우는 유속의 불균일 분포가 개선되었으나 유속의 절대값은 큰 차이가 없다. 이는 천연가스와는 달리 수소-산소의 혼합가스는 수소의 유량이 산소의 2배로 공급되기 때문에 산소의 유속 저감은 전체 혼합가스의 유속을 저감시키는데는 효과적이지 못하기 때문이다.

또한 개조버너에서 수소화염은 천연가스와는 달리 중심부 부근에서 속도가 다소 감소하는 현상이 나타났다. 이것은 기존 버너와는 반대되는 현상으로, 기존 버너에서 연료가 노즐로 균일하게 분출되게 하기 위해서 연료 분출 유로부와 가까운 중심부 노즐의 길이를 주변 노즐 길이보다 길게 하였기 때문에 유동저항으로 인한 중심부의 속도 저하 현상이라 사료된다. 그러나 수소화염의 경우 기존 버너의 운동량비 조건(0.34)에서는 산소 유동의 지배적인 성향으로 이러한 연료 노즐측의 분포는 나타나지 않을 것으로 사료된다.

앞에서 고찰했듯이 광파이버의 코어(core) 생성을 위해 석영관 내부에 부유하는 입자를 내벽에 효과적으로 부착시키기 위해서는 연영동력(thermophoretic

force)을 최대로 할 필요가 있다. 이를 위해서는 식(1)에서 알 수 있듯이 온도구배를 크게 유지해야 하며 이는 광파이버 제작 공정에서 버너의 이송속도에 따라 변하게 된다. 따라서 본 연구에서 개조된 NG-산소버너에 대한 최적의 이송속도를 검토해볼 필요가 있다.

Fig. 5는 NG-산소버너의 이송속도를 달리 했을 때 석영관 표면온도의 분포를 나타낸 것이다.

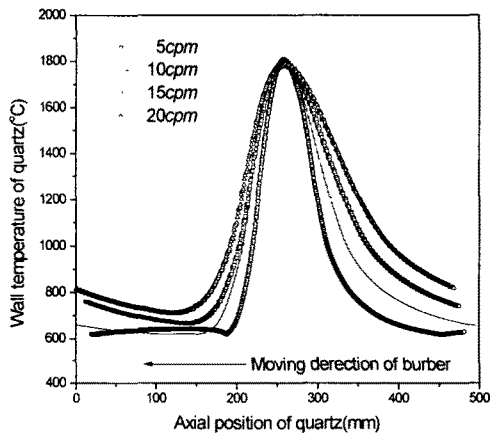


Fig. 5 Various temperature profile of quartz surface along the longitudinal position of quartz tube

실제 광파이버의 제작시에 석영관 내부로 공급되는 반응물질의 이동방향은 버너 이송방향과 동일하다. 석영관을 처음 가열할 때와 여러 번 가열한 후의 온도분포를 비교한 결과 거의 유사하게 나타났다. 따라서 본 결과는 모든 조건이 동일하게 두 번째 가열시의 온도분포를 나타낸 것이다. 결과를 보면 이송속도가 느릴수록 온도구배는 커지는 경향을 나타내고 있으며 버너의 가열 후 온도분포를 보면 이송속도가 느릴수록 온도가 낮게 나타나고 있는데 증착반응물질

이 충분한 에너지를 얻어 입자화되기 위해서는 충분한 가열을 필요로 하므로 이 부위의 온도가 너무 낮아지면 입자 생성률이 떨어지게 된다.

따라서 실험에서 적용된 이송속도에 의한 온도구배는 15K/mm 이상이므로 열영동 효과는 모두 있으나 가열 후의 온도를 고려할 필요가 있으므로 이는 실 공정적용을 통하여 최적화할 필요가 있다.

Fig. 6은 이상의 실험결과를 종합하여 계산된 flame force의 경향을 운동량비에 따라 나타낸 것이다.

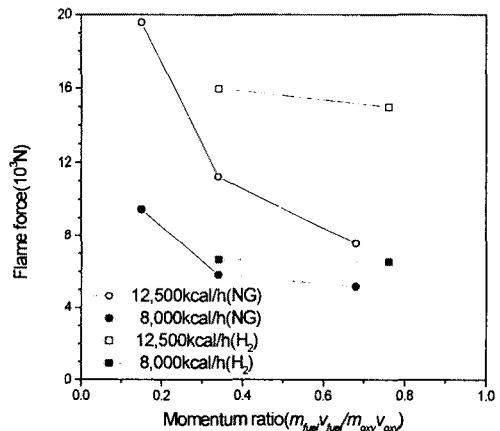


Fig. 6 Comparison the flame force of hydrogen and NG-oxygen by the momentum ratio

분석결과는 운동량비의 증가에 따라 flame force는 감소하는 경향을 나타냈는데, 운동량비 1.0이하에서는 산소의 유동에 지배적인 영향을 받으므로 상대적으로 많은 유량이 공급되는 산소의 유속을 저감시키는 것이 flame force를 감소시키는데 효과적임을 알 수 있다. 이러한 관점에서 천연가스가 유리함을 알 수 있다.

부하의 증가에 따라서 같은 운동량비 조건에서 수소화염과 천연가스화염의 flame force가 커지는 것을 볼 수 있으며 실제로 기존 버너에 수소연료를 사용할 경우에 비해 천연가스 개조버너를 사용할 경우 12,500 kcal/h조건에서 약 30% 감소하는 것으로 나타났다. 이 결과로부터 천연가스연료 사용시 화염력 증대에서도 상당한 효과가 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

- (1) 연료보다 산소속의 상대적으로 큰 운동량비 조건($m < 1.0$)에서는 화염이 산소유동특성에 지배됨을 확인할 수 있었다.
- (2) 개조버너의 산소유로 개선을 통한 유동공간 증대는 산소유로내의 정압을 균일하게 유지시켜 균일한 유속분포장을 형성할 수 있었다.
- (3) 기존버너의 형태를 그대로 유지하고 연료만 대체할 경우 발열량차이에 의한 천연가스 유량 감소를 고려하여도 밀도가 수소에 비해 크므로 flame force는 증가하지만 버너개조를 통한 운동량비를 증가시킬 경우 산소 분출속도의 높은 저감율로 인해 flame force는 약 40~50% 감소됐다.
- (4) 이상의 운동량비에 따른 flame force 영향에 대한 결과, 증착공정과 수축공정간의 버너를 달리하여 증착공정에서는 flame force를 최저로 유지하고 수축공정에서는 최대로 유지시키는 것이 생산성을 극대화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

후기

이 연구는 삼성전자의 연구비 지원에 의해 수행된 결과의 일부이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) G.K.Batchelor, C.Shen, Journal of Colloid and Interface Science, Vol.107, No.1, September, p21~37, 1985
- (2) M.K.Alam, G.Graham, V. Janakiraman, J.Greaves, Numerical Heat Transfer, HTD-Vol.130, ASME, p67-72, 1990
- (3) Vijay K.Garg, S.Jayaraj, International Journal of Engineering Fluid Mechanics, 3(2), p175~196, 1990
- (4) F.T.Geyling, K.L.Walker, Journal of Colloid and Interface Science, Vol.83, No.2, p495~501, October, 1981