

FHD(Flame Hydrolysis Deposition)공정으로 제작된 SiO₂ 광도파막의 분광학적 분석

김윤제 · 신동욱[†]

한양대학교 세라믹공학과

(2002년 8월 21일 접수; 2002년 9월 18일 승인)

Spectroscopical Analysis of SiO₂ Optical Film Fabricated by FHD(Flame Hydrolysis Deposition)

Yun Je Kim and Dong Wook Shin[†]

Department of Ceramic Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received August 21, 2002; Accepted September 18, 2002)

초 록

FHD(Flame Hydrolysis Deposition)공정은 화염 형성에 관여하는 장비의 조건들과 그에 따른 다양한 공정인자에 의하여 박막의 조성이 결정되며, 증착된 막을 치밀화하는 첨가물의 증발로 인해 열처리공정에서 조성이 변화되므로 공정인자로부터 최종적인 광도파막의 조성을 예측하는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서는 FHD 공정에서 첨가가스의 유량을 제어하여 박막의 조성 및 광학적 특성을 예측할 수 있는 공정 분석의 기초자료를 제공하기 위하여 FTIR(Fourier Transformation Infrared Spectroscopy)측정과 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry)측정을 통해 실리카 막의 조성분석에 대한 연구를 수행하였다. FTIR 흡수 스펙트럼을 통해 실리카 막에 존재하는 Si-O, B-O band를 측정하고 정성적 농도변화를 관찰 하였고, ICP-AES를 통해 Boron의 농도를 정량적으로 측정하였다. 이 두 결과로부터 FTIR을 이용한 정량적 조성분석의 기초자료인 B-O band의 흡광계수를 구하였다.

ABSTRACT

Since many process parameters of FHD(Flame Hydrolysis Deposition) are involved in forming multi-component amorphous silica film (SiO₂-B₂O₃-P₂O₅-GeO₂), it has not been easy to predict the optical, mechanical and thermal properties of deposited film from the simple process parameters, such as source flow rate. Furthermore, the prediction of final composition of film becomes even more difficult after sintering at high temperature due to the evaporation of volatile dopants. The motivation of the study was to clarify the quantitative relationship between simple process parameters such as the flow rate of source gases and resulting chemical composition of sintered film. Hence, the compositional analysis of silica soot by FTIR(Fourier Transformation Infrared Spectroscopy) and ICP-AES(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry) under the control of the amount of dopant was carried out to obtain the quantitative composition. By measuring spectrum of absorbance from FTIR, the compositional change of B-O, Si-O, OH(H₂O) in silica film was measured. The concentrations of these dopants were also measured by ICP-AES, which were compared with the FTIR result. The final quantitative relationship between simple process parameters and composition was deduced from the comparison between two results.

Key words : FHD, Silica film, FTIR, ICP-AES, Quantitative relationship

1. 서 론

FHD(Flame Hydrolysis Deposition)공정은 광통신에서 사용하는 수동형 집적광학소자를 제작하는 공정으로, SiCl₄, GeCl₄, POCl₃, BCl₃를 기상화시켜 고온의 화염 속에서 산화반응과 수화반응을 통해 산화물을 합성하는 방법으로 고순도 실리카 유리박막을 증착하는 공정이다.¹⁾ FHD 공정은

증착속도와 조성의 정교한 조절이 힘들고 증착된 막이 soot 형태의 입자이므로 추가적인 치밀화 공정이 필요하다는 단점이 있으나, 광도파로를 제조하기 위해 필요한 정도의 증착속도가 쉽게 달성된다는 점에서 선호되는 기술이다.^{2,3)}

FHD 공정을 이용해 광도파막을 제조하는 공정에서, 굴절율이나 열적특성을 조절하기 위하여 B, P, Ge 등의 첨가물이 사용된다. 이러한 첨가물의 농도를 제어하기 위해서는 운반 가스의 유량, 기화 챔버에 존재하는 원료의 온도, 산수소 화염의 온도, 산수소 화염 발생시키는 토치의 기하구조, 토치와 기관의 거리 및 각도, 배기 시스템의 구조 및 배기속도 등의 주요 공정변수들을 조절하여야 한

[†]Corresponding author : Dong Wook Shin

E-mail : hexa7745@hanmail.net

Tel : +82-2-2290-0503 Fax : +82-2-2299-3851

다. 이들 여러 공정변수 중에서 원료가스의 유량을 조절하여 soot층의 조성을 조절하는 것이 가장 기초적이며 중요한 공정변수의 제어 방법이지만, soot층의 조성을 정확하고 간편하며 신속하게 파악하는 기술이 확립되어있지 않아 광도파로의 광학적, 열적 성질들을 이러한 공정변수들과 연관시키는 것이 어려운 과제였다. 또한 증착된 soot막을 치밀화하는 소결공정에서 B과 P와 같은 증기압이 상대적으로 높은 성분들이 휘발하므로 추가적인 조성변화가 발생하는데, 이러한 변화로 인해 실리카 막의 최종적인 조성을 공정변수와 연관시키는 것은 더욱 어려워진다.^{2,3)} 따라서 광통신용 PLC(Planar Lightwave Circuit) 수동소자를 제작하는 공정에서는 수많은 공정변수들을 하나씩 조절하면서 제조된 막의 굴절율을 측정함으로써 막의 상태나 특성을 간접적으로 분석하는 경험적인 접근법이 시행되는 형편이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 PLC 광소자 제조공정을 체계적으로 분석할 수 있는 기초 자료를 마련하기 위하여 제조된 막의 광학적, 열적, 기계적 성질에 가장 중요한 영향을 미치는 B의 조성을 분석하는 신속하고 신뢰성 있는 방법을 찾는 연구의 일환으로 수행되었다. B은 가벼운 원자질량으로 인해 건식 분석법에 의해 간편하게 정량분석하는 것이 매우 어려우므로, B의 조성분석을 위해 FTIR 분석과 ICP-AES 분석을 이용하였다. FTIR(Fourier Transformation Infrared Spectroscopy)을 이용한 실리카에 대한 연구는 상당히 진행되어 있으며, 분말형의 시편이나 박막형의 시편의 제작이 용이하고 분석과정도 상대적으로 간단하므로 공정 중에 신속히 조성분석을 행할 수 있는 방법이라 판단된다. 또한, B의 조성을 정량적으로 정밀하게 측정하고 FTIR의 결과로 정량분석이 가능하도록 하는 표준곡선을 구하기 위하여 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry) 분석을 채용하였다. 실리카 막의 첨가물인 B₂O₃의 FTIR 흡수스펙트럼과 ICP-AES 결과의 비교 분석을 통해 상관관계를 결정함으로써 실리카 유리박막에 첨가되는 B의 조성의 용이한 측정을 위한 인자인 흡광계수를 구하고자 하였다.

2. 실험 및 분석방법

분석을 위한 시편은 실리카 soot와 치밀화 공정을 거친 실리카 막을 사용하였다. FHD 공정을 이용하여 실리콘 기판에 실리카 soot를 증착하고 그 중 일부는 분말의 형태로 채취하여 soot 시편을 준비하였으며, 또 일부 시편은 기판과 함께 소결하여 투명하고 치밀화된 실리카 막을 제조하였다. 증착 시 원료가스의 유량은 각각 SiCl₄ 90; POCl₃ 40; BCl₃ 5, 8, 10, 13 [sccm]으로 하였으며 원료가스의 유량 이외의 증착조건은 동일하게 고정시켰다. 평면형 광증폭기 제조공정과 동일한 조건 하에서 시편을 제

조하기 위하여 소결은 예비소결, solution doping, 고온 소결의 순서로 행하였다. 예비 소결은 800~1000°C에서 행하였으며, solution doping은 에탄올에 예비 소결된 시편을 약 24시간 동안 함침한 후 건조함으로써 이루어졌다. 또 최종적으로 고온 소결 공정은 시편의 조성에 따라 1300~1350°C에서 이루어졌다.^{4,6)}

Soot 시편의 FTIR 측정을 위하여, soot 분말을 KBr과 혼합하여 분쇄한 후 시편을 몰드에 고르게 분포하여 5000 lbs/in²로 일축가압하여 두께 0.4~0.45 mm, 지름 12 mm의 원판형 시편을 제작하였다. 또한, 실리카 막 시편의 FTIR 측정을 위하여, 두께가 5 μm 정도인 실리카 막을 습식식각을 통하여 적정 두께인 1~2 μm로 조절하였다. 이는 두꺼운 시편의 경우 실리카의 주요 피크인 Si-O Asymmetric stretching band의 흡수도 측정이 불가능하기 때문에 Si-O의 흡수도를 측정 가능한 범위로 조절하기 위하여 행하였다. 습식식각은 10% HF와 2.5% H₂SO₄ 수용액에서 시행하였으며 순수한 실리카 유리에서의 식각속도에 대한 실험결과를 기준으로 식각시간을 결정하였다.⁷⁾ 식각 후 최종 두께는 실리콘 기판을 포함한 시편의 무게를 식각 전후에 0.1 mg의 정밀도로 측정하여 계산하였다. 이 경우 엄밀하게 보아 본 연구에서 사용한 실리카 막의 밀도가 순수한 실리카 유리와 다르나 앞으로 기술될 결과에서 보는 바와 같이 조성의 차이가 매우 작으므로 이러한 오차는 무시하였다. 사용된 FTIR 장비는 Nicolet Magna-IR 760 spectrometer이며, 측정조건으로는 Resolution: 4 cm⁻¹, Scan number: 64, Scan range: 4000~400 cm⁻¹로 하였다.

ICP-AES 측정을 위한 시편은 실리카 막의 습식식각을 위해 이미 사용하였던 식각용액을 사용하였으며, ICP-AES 측정용 용액은 산을 제거하기 위하여 증류수를 첨가하고 증발시키는 전처리 과정을 반복적으로 수행하여 충분히 희석하였다. 사용된 ICP-AES 장비는 JOVIN YVONJY 138 Ultrac에, 측정조건으로는 Spectral range: 160~800 nm, Resolution: 0.005 nm, Detection limit: ppb로 하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 1에서는 BCl₃의 유량을 변화시키면서 제조된 실리카 soot의 FTIR 흡수스펙트럼을 각 피크의 흡수중에 대한 정보와 함께 표시하였다. SiO₂의 주요 피크인 Si-O Asymmetric stretching band는 1110.81~1108.88 cm⁻¹, Si-O Symmetric stretching band는 815.75~813.82 cm⁻¹, Si-O Rocking motion band는 474.41~472.48 cm⁻¹에 위치하고 있으며, 광섬유 모재용 실리카 유리의 피크와 일치하나 위치가 정확하게 일치하지 않는 것은 실리카의 제조방법과 고온조건에 따라 가상온도(Fictive temperature)가 달라 밀도와 Si-O-Si 결합의 평균각도가 상이하기 때문이다.⁸⁻¹²⁾

Table 1에서 기존의 연구에서 보고된 순수한 실리카 유

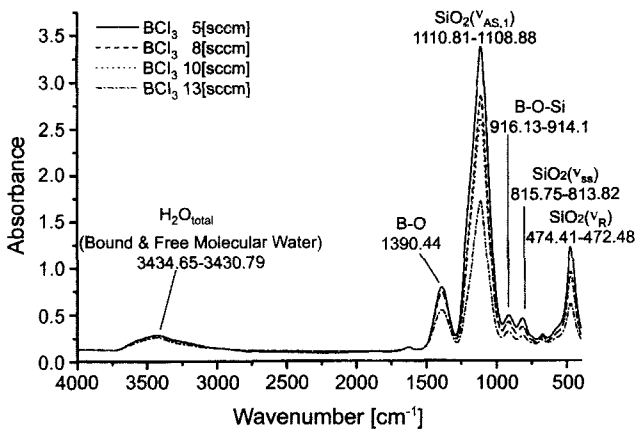


Fig. 1. FTIR absorption spectrum of FHD soot at various BCl₃ flow rate.

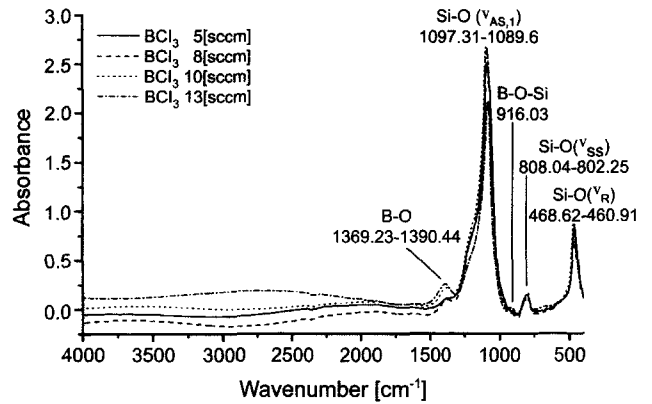


Fig. 2. FTIR absorption spectrum of FHD film at various BCl₃ flow rate after eliminating Si wafer.

리(type III 실리카, Suprasil, Heraeus Co)에 대한 흡수밴드와 광섬유 모재용 실리카의 흡수밴드를 본 실험에서 BCl₃의 유량을 변화시키면서 제조된 실리카 soot와 실리카 막의 피크 위치를 비교한 자료를 정리하였다. 첨가된 B과 관련된 피크는 B-O(1390.44 cm⁻¹), B-O-Si (916.13~914.1 cm⁻¹), B-O overtone(673.04 cm⁻¹)의 총 3가지가 발견되었는데, B의 조성을 분석하기 위하여 실험에서 사용한 시편의 피크는 B-O(1390.44 cm⁻¹)였다. 또한 3434.65~3430.79 cm⁻¹에서의 H₂O(Bound & Free Molecular water) 피크가 발견되고 있으며 이 피크의 흡수도 변화가 실험에 사용된 BCl₃ 유량변화에 따라 변하는 것은 soot 증착 시 산수소 화염에서 유래된 수분이 B-OH의 형태로 화학흡착되거나 분자수(Molecular water)의 형태로 물리흡착된 수분 함유량의 변화에 의한 것으로 사료되며 이는 이미 보고된 바 있다.^{13,14} Table 1에서는 BCl₃의 유량을 변화시키면서 제조된 실리카 soot의 피크 위치를 정리하였다.

Fig. 2는 실리콘 기판의 스펙트럼을 제거 한 후의 실리카 막의 흡수 스펙트럼을 나타내고 있다. 높은 wavenumber 영역의 스펙트럼이 시편에 따라 변화하는 것은 실리콘 기판의 스펙트럼을 제거하는 과정에서 발생한 것으로 실리콘 기판의 스펙트럼에 시편마다 다소 변화하기 때문이다. 이 실리카 막의 흡수스펙트럼을 soot 시편의 흡수 스펙트럼과 비교하면, B-O(1390.44~1369.23 cm⁻¹), B-O-Si (916.03 cm⁻¹), B-O overtone등의 B에 관련된 피크가 대폭 줄어들었거나 거의 사라졌으며 3434.65~3430.79 cm⁻¹ 영역의 OH stretching band, H₂O(Bound & Free Molecular Water), H₂O(Free Molecular Water) band가 발견되지 않는데, 이는 고온의 소결과정 중에 이러한 화학종들이 증발되기 때문으로 사료된다.¹²⁾

Fig. 3에는 B의 농도를 측정하기 위하여 선택한 B-O band의 흡수스펙트럼과 흡수도가 BCl₃ 유량에 따라 변화하는 것을 soot 시편(a) 및 실리카 막 시편(b)에 대하여 보

Table 1. Comparison between Reference FTIR Data and Result of Experimental FTIR Data

Fundamental band	Silica glass [cm ⁻¹] ⁸⁻¹²⁾	Silica for optical fiber cladding [cm ⁻¹] ¹²⁾	FHD soot [cm ⁻¹]	FHD film [cm ⁻¹]
H ₂ O band	3410	3417.3	3434.65–3430.79	–
SiO ₂ (S,S**)band	850–800	794.54	815.75–813.82	808.04–802.25
SiO ₂ (R***)band	468–450	466.7	474.41–472.48	468.62–460.91
2v _{ss} (SiO ₂), v _{AS,2} (SiO ₂) + v _R (SiO ₂)*	1633	1627	–	–
v _{AS,1} (SiO ₂) + v _R (SiO ₂)*	1873	1870	–	–
v _{ss} (SiO ₂) + v _{AS,2} (SiO ₂)*	1990	1995	–	–
B-O-Si band	–	–	916.13–914.1	916.03
B-O Overtone band	–	–	673.04	–

. SiO₂(A,S) : Asymmetric Stretching band

*. SiO₂(S,S**)band : Symmetric Stretching band

*. SiO₂(R***)band : Rocking Motion band

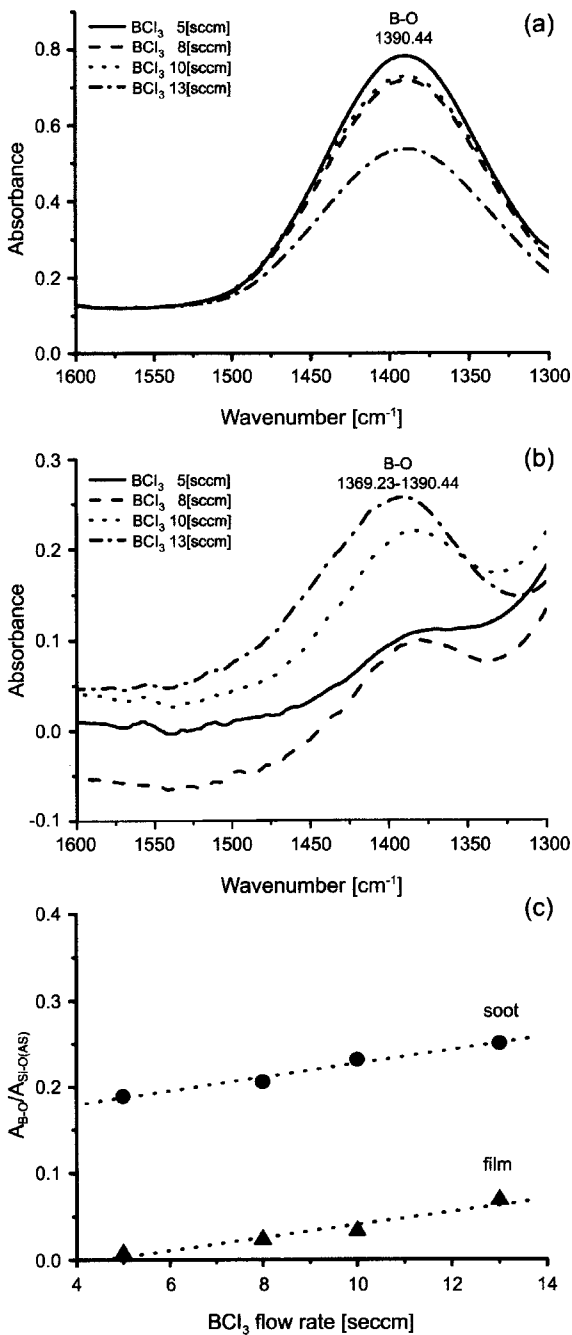


Fig. 3. Absorption spectrum and absorbance of B-O stretching band at the various BCl₃ flow rate.
 (a) B-O band absorption spectrum of soot (b) B-O band absorption spectrum of sintered film (c) Normalized B-O stretching band absorbance of soot and sintered film.

여주고 있다. Fig. 3(a), (b)에서는 BCl₃ 유량에 따라서 흡수도의 증가 형태가 일정하게 비례하지 않는 것처럼 보이나, 이는 FTIR 흡수스펙트럼이 시편의 두께와 함유된 성분의 농도에 따라 흡수도가 변하게 될 뿐만 아니라, 적외선이 시편을 통과할 때에 발생할 수 있는 산란이나 시

편의 배치, 측정 장치의 습도 조건과 같은 여러 가지 요인으로 인해 피크의 높이가 변화하는 것을 보여주고 있다. 따라서, Fig. 3(c)에서는 이러한 에러를 보정하여 각 시편에서 측정된 피크의 크기를 정량적으로 비교하기 위하여, Fig. 4에서 보여주는 Si-O(Asymmetric stretching band)의 흡수도를 기준으로 각 피크의 흡수도를 나누어 줌으로써 보정하였다. Fig. 3(c)는 Si-O(Asymmetric stretching band)의 흡수도로 보정된 실리카 soot와 실리카 막의 각각의 B-O band의 흡수도를 나타내고 있다. 이 경우 BCl₃

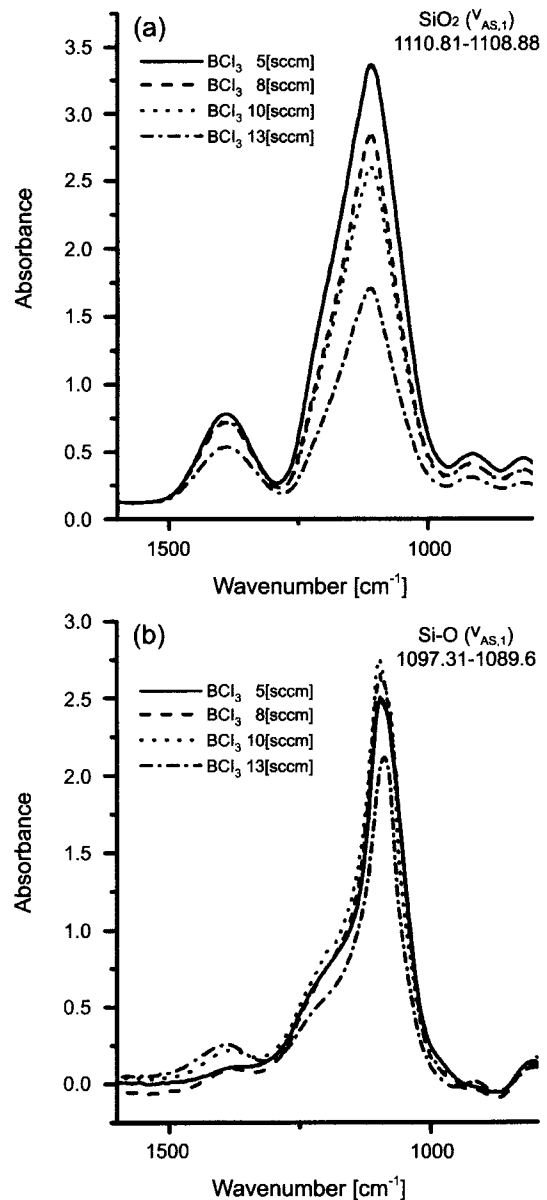


Fig. 4. Absorption spectrum of Si-O Asymmetric stretching band at the various BCl₃ flow rate.
 (a) Si-O Asymmetric stretching band spectrum of soot (b) Si-O Asymmetric stretching band spectrum of sintered film.

의 유량이 증가함에 따라 B-O stretching band의 흡수도는 일정한 기울기를 가지며 거의 선형적인 증가를 보이는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 3(c)에서는 보이는 바와 같이 soot 시편과 실리카 막 시편 모두 BCl₃의 유량이 증가함에 따라 Normalized B-O band의 흡수도의 경향은 절대적인 양의 차이는 있으나 BCl₃의 유량증가에 따라 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 이를 통해 FHD 공정 시에 증착된 soot의 B의 조성이 예비소결과 고온소결 공정을 거쳐 막으로 제조되는 과정에서 상당량이 증발되어도 그 농도는 원료 가스 유량에 대한 선형적인 비례 관계를 유지한다는 것을 보여준다.

본 실험에서 FTIR 흡수스펙트럼은 시편의 두께와 함유된 성분의 농도에 따라 흡수도가 변하게 될 뿐만 아니라, 적외선이 시편을 통과할 때에 발생할 수 있는 산란이나 시편의 배치, 측정 장치의 습도 조건과 같은 여러 가지 요인으로 인해 피크의 높이가 변화할 수 있으므로 이러한 에러를 보정하여 각 시편에서 측정된 피크의 크기를 정량적으로 비교하기 위하여 Si-O(Asymmetric stretching band)의 흡수도를 기준으로 각 피크를 보정하고자 하였다.^{12,13} 흡수도 A는 Beer-Lambert의 법칙에 따라 식(1)과 같이 나타난다.

$$A = \epsilon \cdot C \cdot L \tag{1}$$

여기서 ϵ 는 흡광계수(Extinction coefficient), C는 흡수를 일으키는 흡수원의 농도, L은 적외선이 지나는 경로의 길이(시편의 두께)이다. 본 연구에서와 같이 기준으로 정한 피크로 측정된 피크를 보정하는 경우에는 식(2)와 같이 변형될 수 있다.

$$\frac{A_{B-O}}{A_{Si-O}} = \frac{\epsilon_{B-O}}{\epsilon_{Si-O}} \cdot \frac{C_{B-O}}{C_{Si-O}} \cong \epsilon_{B-O}^* \cdot M_B \tag{2}$$

여기서 A, ϵ , C는 각각 식(1)에서와 같은 의미이며, 첨자는 흡수피크를 유발하는 흡수종을 지칭한다. 또 ϵ_{B-O}^* 는 보정흡광계수(Normalized extinction coefficient)이며, M_B 은 B의 몰분율이다. 식(2)에서는 몰분율 M_B 이 근사치로 사용되었는데 Si의 농도에 비해 B의 농도가 매우 낮을 경우 위의 근사식은 실험적 오차범위 내에서 적용될 수 있다. 또 Si-O(Asymmetric stretching band)의 크기는 첨가되는 B의 양에 따라 변화하나 본 연구의 경우 첨가된 B의 양이 이후 설명할 ICP-AES의 결과에서 볼 수 있듯이 매우 작으므로, 이 변화는 무시하였다. Table 2에는 BCl₃ 유량에 따른 시편들의 B-O stretching band, Si-O(Asymmetric stretching) band의 Two-point baseline method를 이용하여 구한 FTIR 흡수도를 나타내고 있다.

Fig. 5에서는 ICP-AES를 이용하여 측정된 B의 농도를 보여주고 있다. 농도의 변화는 BCl₃의 유량이 증가함에 따라서 B의 농도도 증가하는 경향을 보인다.

Table 2. Absorbance of B-O Band, Si-O Asymmetric Stretching Band and Normalized B-O Band Absorbance in FHD Film Measured by Two-point Base Line Method

BCl ₃ flow rate [sccm]	B-O Absorbance	Si-O Absorbance	B-O Absorbance /Si-O Absorbance
5	0.0177	2.4647	0.007181
8	0.0608	2.6405	0.023026
10	0.0874	2.6747	0.032677
13	0.1416	2.0747	0.068251

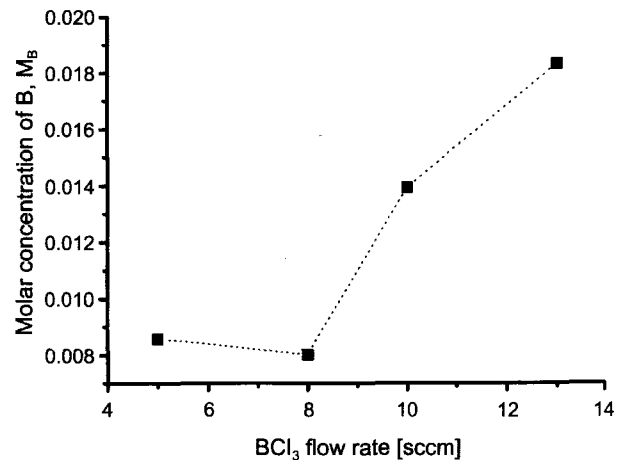


Fig. 5. Boron concentration of sintered films measured by ICP-AES as a function of BCl₃ flow rate (Line is a guide for eye and has no scientific meaning).

앞서 설명한 바와 같이 FTIR 분석 결과에서 B-O Stretching band에 대한 흡수도를 구하며, 또한 ICP-AES 분석 결과로부터 통하여 B의 절대적 농도를 구할 수 있었다. 실리카 막에 첨가된 성분인 B의 농도를 구하는 것은 ICP-AES로 분석 가능하나, 전처리 과정이 복잡하여 신속하게 데이터를 얻는 것이 어렵고 실리카 막의 경우 시편을 용해시켜 용액 형태의 시편을 준비하여야 하므로 첨가물의 농도를 간편하게 파악하는데는 어려움이 있다고 할 수 있다. 따라서 FTIR 측정에서 B-O Stretching band의 흡수도와 ICP-AES 측정에서 얻어진 흡수종의 농도 결과로부터 FTIR을 측정하여 얻어진 흡수피크를 이용하여 B의 농도를 간접적으로 측정할 수 있는 표준곡선을 작성하였으며, 이 표준곡선이 Fig. 6에 나타나 있다.

B-O band의 normalized absorbance 데이터와 몰분율 데이터를 식(2)에 적용하여, 실험에서 얻어진 FHD film의 보정흡광계수 ϵ_{B-O}^* 는 4.93이다. Fig. 6에서 보이듯이 보정흡광계수 ϵ_{B-O}^* 는 두 데이터의 기울기 값이 되며, 유량변화에 따른 시편의 수량이 늘어날수록 더욱 정밀한 보정흡광계수 ϵ_{B-O}^* 를 구할 수 있다는 것도 알 수 있다. 실리카 막의 제작 공정이 표준화되어 일관된 유량 조절이 가능한 조건

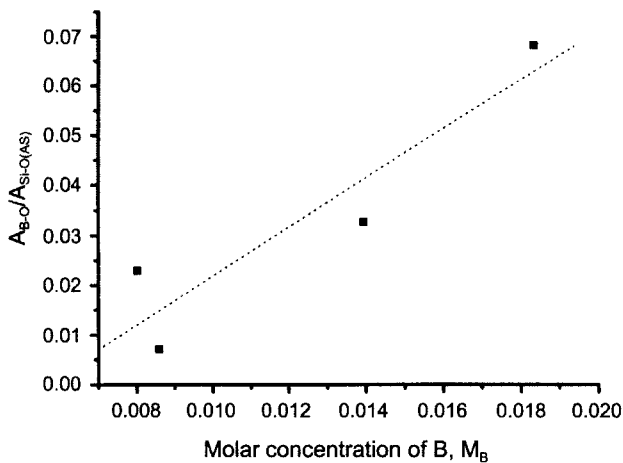


Fig. 6. Normalized absorbance of B-O band at various mole fraction for normalized extinction coefficient.

이 만족된다면, 실험적으로 미리 계산된 보정흡광계수를 이용하여 FTIR 측정을 통해 구해진 보정흡수도를 이용하여 소결 후의 FHD 공정으로 제작된 실리카 막 내의 B의 농도를 용이하게 구할 수 있는 방법을 제공한다.

한편, FHD 공정에서 첨가되는 P 성분은 첨가되는 양이 매우 작아 전체 스펙트럼 내에서 구별해내기 어려운 점이 있으며, 굴절율을 결정하는 Ge는 IR의 흡수대역이 Si와 유사하여¹⁵⁻¹⁷⁾ 흡수피크를 관찰할 수 없어 이와 같은 첨가물은 FTIR법으로 분석이 불가능한 것으로 이미 보고되었으므로¹²⁾ 다른 방법으로 분석하여야 할 것으로 사료된다. 그러나 이와 같은 첨가물은 건식기기분석법에 의해서도 분석이 가능하므로 본 연구에서와 같은 방법을 동원하지 않더라도 가능할 것으로 사료되며 이와 같은 예는 문헌에서 찾아볼 수 있다.

4. 결 론

FHD 공정으로 제작된 실리카 막의 FTIR 분석과 ICP-AES 분석을 통해서 실리카 soot와 치밀화 된 실리카 막 내에 존재하고 있는 B의 농도를 BCl₃의 유량의 함수로 분석하였고, Beer-Lambert 법칙을 변형하여 보정흡광계수를 계산하였다. 이는 실리카 막을 이용하여 광통신용 수동소자를 제조하는 FHD 공정에 있어서 공정이 표준화되어 일관된 공정이 가능한 조건이 만족된다면, 실험적으로 미리 계산된 ϵ^*_{B-O} (보정흡광계수)를 이용하여 광도파막의 열적, 기계적, 광학적 특성을 결정하는 광도파막의 첨가 가스의 유량에 따른 B의 농도를 간단하면서도 신속하게 구할 수 있는 방법이 될 수 있을 것이다.

REFERENCES

1. M. Kawachi, "Silica Waveguide on Silicon and their Application to Integrated Optic Components," *Optical and Quantum Electronics*, **22** 391-416 (1990).
2. J. K. Sim, Y. H. Lee, H. K. Sung and T. G. Choy, "The Effective P₂O₅ Doping into B₂O₃-P₂O₅-SiO₂ Silica Layer Fabrication by Flame Hydrolysis Deposition," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **35** [4] 364-70 (1998).
3. J. K. Sim, T. H. Kim, J. U. Shin, S. H. Park, D. J. Kim and H. K. Sung, "Fabrication of Low Silica Slab Waveguide by Flame Hydrolysis Deposition," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **37** [6] 524-29 (2000).
4. G. W. Scherer and T. Garino, "Vitreous Sintering on a Rigid Substrate," *J. Am. Ceram. Soc.*, **68** [4] 216-20 (1985).
5. J. S. Kim, "The Fabrication of Er-doped Silica Film for Optical Amplifier," *Kor. J. of Materials Research.*, **11** [5] 385-92 (2000).
6. S. I. Ro, J. S. Kim, Y. S. Jung, D. W. Shin and K. H. Song, "The Fabrication of Er/Al Co-doped Silica Films for 1.55 m Optical Amplifier," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [12] 1144-49 (2001).
7. H. Wakabayashi and M. Tomozawa, "Diffusion of Water into Silica Glass at Low Temperature," *J. Am. Ceram. Soc.*, **72** [10] 1850-55 (1989).
8. E. R. Lippincott, A. V. Valkenburg, C. E. Weir and E. N. Bunting, "Infrared Studies on Polymorphs of Silicon Dioxide and Germanium Dioxide," *J. Res. Nat. Bureau. Standards.*, **61** [1] 61-70 (1958).
9. I. Simon, "Infrared Studies of Glass in Modern Aspects of the Vitreous State," *Vol.1, Ed. J. D. Mackenzie* (Washington: Butterworth Inc.), 120-51 (1960).
10. R. J. Bell, N. F. Bird and P. Dean, "The Vibrational Spectra of Vitreous Spectra, Germania and Beryllium Flouride," *J. Phys. C*, **1** [2] 299-303 (1968).
11. F. L. Galeener, "Band Limits and the Vibrational Spectra of Tetrahedral Glasses," *Phys. Review. B*, **8** [19] 4292-97 (1979).
12. H. R. Ryu, J. S. Kim and D. W. Shin, "Spectroscopic Analysis of Silica Soot for Planar Waveguide by FHD(Flame Hydrolysis Deposition)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [1] 74-83 (2001).
13. W. Kern, "Infrared Spectroscopic Method for Compositional Determination of Vapor-deposited Borosilicate Glass Films and Results of its Application," *RCA Review.*, **32** 429-46 (1971).
14. J. L. Parsons and M. E. Milberg, "Vibrational Spectra of Vitreous B₂O₅·xH₂O," *J. Am. Ceram. Soc.*, **43** [6] 323-30 (1960).
15. P. Y. Shin, S. W. Yung and T. S. Chin, "FTIR and XPS Studies of P₂O₅-Na₂O-CuO Glasses," *J. Non. Cryst. Sol.*, **244** 211-22 (1999).
16. J. J. Hudggen and S. W. Martin, "Glass Transition and Infrared Spectra of Low-alkali, Anhydrous Lithium Phosphate Glass," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76** [6] 1691-96 (1983).
17. F. L. Galeener and G. Lucovsky, "Longitudinal Optical Vibration in Glass: GeO₂ and SiO₂," *Phys. Review Lett.*, **37** 1475-77 (1976).