

UV 영역에서 벤젠의 흡수 단면적의 측정 Measurements of the Benzene Absorption Cross Section in the Range of Ultra Violet (UV)

이정순* · 류성윤 · 김현호 · 우진춘 · 김기복
한국표준과학원 삶의질 표준부 환경그룹
(2006년 2월 24일 접수, 2006년 7월 20일 채택)

J.-S. Lee,* S.-Y. Ryu, H.-H. Kim, J.-C. Woo and K.-B. Kim
*Environmental Metrology Group, Division of Metrology for Quality Life,
Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS)*

(Received 24 February 2006, accepted 20 July 2006)

Abstract

An absolute absorption cross section of benzene was measured with a spectrometer system including a monochromator and a grating in the wavelength region of 240~280 nm under the atmospheric pressure and room temperature in the laboratory. A certificated reference benzene gas (98 $\mu\text{mol/mol}$ in N_2) was used to measure its absorption cross section. A 710 mm cell with a quartz window and a 150 W Xe arc lamp were employed. The magnitude of absorption cross section of $1.41 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ was lower than that of the reference spectra ($2.5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$) of high resolution spectrometer. Total measurement uncertainty was estimated to be 4.0%.

Key words : Benzene, Absorption cross section, Ultra-violet, Absorption spectrum, Slit function, Uncertainty

1. 서 론

국가는 국민이 깨끗한 공기를 마실 수 있는 권리를 충족시키고 국민의 삶의 질을 향상시키기 위하여 현재 전국에 400여 개의 대기환경 자동측정망을 설치하여 운영하고 있다. 이렇게 설치된 자동측정망은 대기환경 기준 물질인 SO_2 , NO_2 , O_3 , CO , PM_{10} 등을 상시 측정하고 있다. 그러나, 도시 분화와 산업의 발달로 인하여, 복잡 다양화 된 대기오염물질이(예를

들면, 유해가스, 악취물질, 휘발성 탄화수소류 그리고 이들로부터 생성된 반응물) 추가로 발생하고 있으며, 이들을 기존의 측정망으로만 감당하기에는 다소 무리가 있다. 이에 따라 기존성 물질 이외의 물질을 측정하기 위한 특수 측정망을 운영하고 있지만 그 규모는 미흡한 실정이다. 그러므로, 새로운 물질의 측정과 발생원의 추적을 위하여 신기술의 개발과 도입이 시급하게 요청되고 있다.

한편, 미국을 비롯한 선진국들은 대기환경 감시를 위하여 다양하고 새로운 측정기술을 적용하고 있으며, 이와 동시에 기술과 장비들에 대한 성능 평가 기준을 마련하고 있다. 연구자들로부터 21세기 미래 환

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)42-868-5766, E-mail : leejs@kriss.re.kr

경 측정기술로서 주목을 받고 있는 주요분야중의 하나인 흡수분광학을 이용하면 극자외선 영역에서 적외선 영역에 걸친 다양한 광원과 광기술을 이용하여 한번에 여러 종의 오염 물질을 관측할 수 장점이 있다. 이 기술은 주로 장거리 혹은 원격 대기 탐사용으로 활용되고 있다. 대표적인 기술로서 LIDAR (Light Detection and Ranging), DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy), FTIR (Fourier Transform Infra Red), TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) 등을 들 수 있다. 실례로서, USEPA (미국 Environmental Protection Agency), 영국 NPL (National Physical Laboratory)을 비롯한 유럽연합 국가들은 국내에서도 상용되고 있는 대기환경 측정법 외에도 SO₂, NO₂, O₃ 물질에 대한 기준 측정법으로서 차등흡수분광법과 FTIR (Fourier transform Infra-Red)을 채택하고 있으며, 이들에 대한 성능평가에 대한 기준을 마련하여 관리하고 있다.

새로이 도입되는 선진 환경계측 기술과 기기의 성능평가를 위한 연구는 신기술과 장비에 대한 이해를 돕고 그 결과의 신뢰성을 부여하는데 중요한 자료를 제공할 수 있다. 그러나 우리의 실정은 현재 새로운 환경 측정기술을 도입하더라도, 이들 신 기술에 대하여 객관적이고 과학적으로 평가할 수 있는 자료가 미비하고 또한 그 체계가 확립되어 있지 않아, 외국의 산업체나 공공기관에서 발행한 기술평가 결과에 의존해야 하는 형편이다. 또한 국내 소수 연구그룹은 상용화된 측정장비와 비교실험 등을 연구하고 있지만 (Lee *et al.*, 2005a, b; Kim, 2004; Lee *et al.*, 2002; Kim and Kim, 2001; Kim *et al.*, 2001) 아직까지 성능평가에 대한 연구는 체계적으로 수행되지 못하고 있는 실정이다.

한편, 가스의 고유 흡수 단면적은 광의 흡수를 이용하여 대기중의 물질의 평균 농도를 측정하는 데 있어서 기준 자료이기 때문에 그 중요성을 인식하여, 연구 그룹들을 통하여 자외선 또는 적외선 영역에서 가스의 고유 흡수 계수를 측정하고자 하는 연구가 진행되어 온 바 있다 (Etzkorn *et al.*, 1999; Vandaele *et al.*, 1998, 1994; Trost *et al.*, 1997; Sprague and Joens, 1995). 미국 NIST (National Institute of Standards and Technology) 를 비롯한 연구기관은 이들의 가스의 고유 흡수 단면적 자료를 기준 인증 자료로서 관련된 측정 기술을 연구하고 있으며 또한 인증

된 자료를 필요한 사용자들에게 제공하고 있다.

본 연구는 현재 발암물질로서 광화학반응에도 중요한 역할을 하는 것으로 알려진 방향성물질 중의 하나인 벤젠의 흡수 단면적을 측정하고자 하였다. 측정을 위하여 표준과학연구원에서 제작한 벤젠 CRM 이 이용되었다. 측정 결과는 타 연구 그룹에서 발표한 결과값들과 비교되었다.

2. 이론적 배경

분광학을 이용하여 대기 중의 물질의 양이나 상태에 관한 연구는 대부분 해당 물질의 광학적인 특성 즉, 흡수 (absorption), 산란 (scattering), 방출 (emission) 을 이용한다. 그 중에서, 대기중의 물질의 분포나 농도를 측정하는 대부분의 장비들은 물질에 대한 빛의 산란과 흡수 특성을 대부분 이용하고 있다. 각각의 장비들의 특성에 따라서 물질의 양을 얻어내는 방법은 다르지만, 대개는 물질 고유의 흡수스펙트럼과 흡수도의 농도에 따른 선형성을 이용하여 농도를 결정한다.

만일 파장 λ 를 갖는 단색광이 빛을 흡수 및 산란하는 매질 속을 미소거리 dL 만큼 통과하는 사이에 그 빛의 세기가 I_λ 에서 $I_\lambda + dI_\lambda$ 로 변화하였다고 가정하면 변화량 dI_λ 는 Lambert-Beer의 법칙에 의해 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$dI(\lambda) = -I(\lambda)\rho(\lambda)NdL \quad (1)$$

위의 식(1)에서 N 은 경로내부의 물질의 수농도를, $\rho(\lambda)$ 는 물질의 산란이나 흡수와 같은 소멸계수를 I 는 광의 세기이다. 위의 식을 광을 흡수하는 매질만을 가정하여 다시 쓰면 식(2)와 같다 (Platt, 1994).

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)\exp(-\sigma(\lambda)NL) \quad (2)$$

L 은 광 경로길이, I_0 는 경로를 지나가기 전의 초기 광의 세기, 그리고 I 는 흡수도를 가지는 매질을 통과한 후의 광의 세기, 온도와 파장에 의존하는 흡수 단면적 (absorption cross section) σ 는 매질에 따라서 고유한 흡수 특성을 나타내며 흔히 실험실에서 측정하거나 계산을 통하여 얻어질 수 있다. 측정대상 가스의 고유 흡수 단면적을 측정하고자 한다면, 입사된 광과 측정된 광의 스펙트럼을 측정하면 된다. 한편 광

경로 내의 한가지의 가스만 있다고 한다면, 해당 가스의 농도는 식(3)으로부터 쉽게 얻어진다.

$$N = \frac{\ln(I_0(\lambda)/I(\lambda))}{\sigma(\lambda)L} = \frac{D}{\sigma(\lambda)L} \quad (3)$$

여기서, $D = \ln[I_0(\lambda)/I(\lambda)]$ 는 측정 전후의 스펙트럼의 비의 대수값이며, 광학적인 농도(optical density)라고 흔히 불린다.

흡수에 의한 빛의 소멸(extinction)은 기본적으로 식(2)로 단순화될 수 있으나 실제 대기를 측정할 경우 식(2)는 대기의 구성 물질에 의한 빛의 소멸을 가져오는 많은 요인을 고려하여야 한다. 실제 대기 중에서 빛은 경로 내의 다양한 물질에 의한 산란(Rayleigh 산란이나 Mie 산란, 흡수 등에 의한 감쇄 등이 그 대상이다. 그러나 실제 대기를 측정함에 있어서 식(2)의 초기의 광원의 세기 I_0 를 결정하는 것은 대기 중에 존재하는 많은 물질로 인하여 사실상 불가능하다. 사실 I_0 는 측정 경로를 통과하면서 대기 중의 공기를 포함한 다른 물질이 없을 때의 상태를 의미하기 때문이다. 그러므로 대기중의 가스의 농도를 측정하기 위해서 I_0 가 무시될 수 있거나 포함하지 않아도 되는 방법으로 해결책을 찾아야만 했다. 그 해결책들 중의 하나로서 차등흡수분광법(differential optical absorption spectroscopy)은 1980년대 이후에 많은 연구그룹의 관심을 받아왔다(Platt et al., 1979). 이 방법은 I_0 를 이용하지 않고 1만의 파장에 대한 변화율을 이용하여 변화의 크기로부터 관심 대상 물질의 농도를 추출해내는 방법이다.

그러나, 실험실에서 특정 가스의 흡수단면적을 측정하고자 한다면 실제 대기중의 많은 요인을 고려하지 않아도 되므로 식(2)를 이용하여 비교적 간단하게 결과를 얻을 수 있다. L 을 이미 알고 있으므로, 농도를 이미 알고 있는 가스셀을 이용하여 각각 I_0 와 I 를 측정하면 해당 가스의 흡수단면적은 얻어진다. 그리고 실제로 측정된 가스의 흡수 단면적은 측정에 사용한 분광기의 기기함수(F)를 반영하게 된다. 즉 분광기를 통하여 측정된 스펙트럼은 사실은 분광기라는 기기의 함수를 반영(convolution)한 결과, I' 이라 할 수 있다.

$$I'(\lambda) = F \cdot I = \int f(\lambda - \lambda') I(\lambda') d\lambda' \quad (4)$$

따라서 실제로 측정을 통하여 얻어진 값($I(\lambda')$)은 다

음 식(5)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$I(\lambda)' = F \cdot I_0(\lambda) \exp[-L\sigma(\lambda)N] \quad (5)$$

식(5)를 앞의 식(3)의 D 를 이용하여 다시 쓰면 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$D' = -\ln[I(\lambda)'/I_0(\lambda)'] \sim F \cdot (L\sigma(\lambda)N) \quad (6)$$

위의 식은 $L\sigma(\lambda)N \ll 1$ 이라는 가정하에 테일러 급수를 이용하여 근사하면 얻을 수 있다. 결국, N 과 L 은 상수이므로, 가스의 흡수 단면적은 다음의 식과 같이 분광기의 정밀도를 반영한 값을 측정하게 된다.

$$F \cdot \sigma(\lambda) \sim \frac{\ln[I_0(\lambda)'/I(\lambda)']}{LN} \quad (7)$$

그러므로 낮은 분해능을 가진 분광기일수록 이를 이용하여 측정된 스펙트럼은 실제와 다른 왜곡된 흡수 단면적이라는 것을 식(4)와 (7)은 말하고 있다.

3. 실험방법 및 고찰

3.1 실험 장치

실험 장치는 다음의 그림 1과 같이 구성하였다. 광원은 Xe 램프를 사용하였다. 측정하고자 하는 가스셀을 평행한 빛이 통과하도록 광학장치를 구성하였다. 파이버에 들어온 광은 스펙트로미터를 통하여 분광되어 검출기를 통하여 측정되었다.

벤젠의 흡수셀을 통과하여 얻어진 빛을 분광하기 위하여 모노크로미터에 1,800 gr/mm의 holographic grating을 장착하여 사용하였다. 가스셀의 길이는

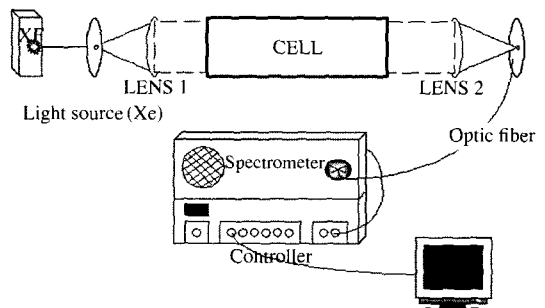


Fig. 1. Simple schematic of the optical experimental setup.

710 mm이며 빛이 통과하는 양끝의 렌즈는 fused silica 재질로 만든 윈도우를 사용하여 UV 빛의 손실을 최소화하고자 하였다. 벤젠 측정 파장 영역은 260 ± 20 nm이었다.

측정에 앞서 광원(Xe 램프)의 시간에 따른 광의 세기의 파장별 안정성과 광검출기의 암전류와 오프셋값을 확인하였다. 실험을 진행하는 동안 암전류와 오프셋 스펙트럼에 의한 영향을 제거하기 위하여, 먼저 측정된 스펙트럼으로부터 암전류와 오프셋 스펙트럼을 감해주었다. F(기기함수)의 값을 얻기 위하여 Hg lamp의 emission line을 측정하였다. 그리고, 분광기로부터 photo-diode array에 조사된 스펙트럼 신호를 파장별로 보정을 하기 위하여 Hg emission 피크들과 파장맵핑 관계를 유도하였다.

다음의 그림은 Hg 램프의 line emission spectrum 이다.

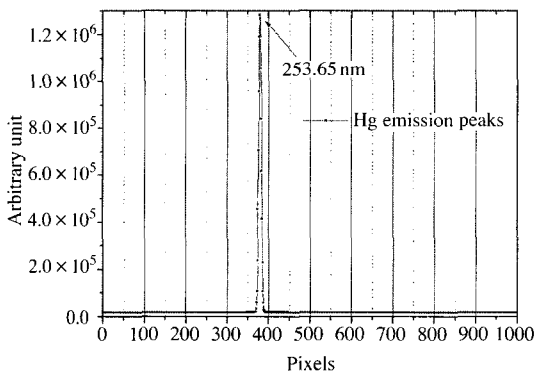


Fig. 2. UV emission line spectrum of Hg lamp.

그래프를 잘 살펴보면 전 측정 파장 영역을 통하여, 가장 큰 피크인 253.65 nm를 비롯하여 현재 그래프에서는 정확히 보이지는 않지만 248.2, 265.2, 275.28 nm 등의 다수의 Hg 피크가 있다. 이를 통하여 구한 픽셀 대 파장 맵핑 함수는 다음과 같다.

$$W = 238.53511 + 0.03967 Pi + 5.76843 \times 10^{-7} Pi^2 \quad (8)$$

식(7)에서 W는 파장을 Pi는 photo diode의 i번째 픽셀을 나타낸다. 위의 관계식에 있어서 Pi와 W는 거의 완전한(R²=1) 상관관계를 보였다.

분광기의 분해능을 FWHM(Full Width Half Maximum)라고 할 때, 분해능은 253.65 nm에서 0.35 nm

(1,800 gr/mm 그레이팅)이었다. 분광기의 분해능이 우수하여야 올바른 흡수단면적을 얻을 수 있으나, 본 실험의 F의 값은 표 1에서와 같이 다른 연구 그룹에서 사용한 값에 비하여 비교적 우수하지 못하였다.

측정에 사용된 가스는 소급성을 지닌 가스로서 KRISS (Korea Research Institute of Standards and Science)의 인증표준 물질(CRM: Certificated Reference Material)을 사용하였다. 관내의 다른 이물질 제거하기 위하여 실험을 할 때마다 0.1 torr 이하로 유지하였다. 셀과 관(tube)의 재료는 내부 벽과 가스 반응, 흡착, 흡수 등에 의한 영향을 최소한으로 줄일 수 있는 재질로서 전해연마(Electro-polishing) 처리된 스테인레스 스틸관이 선택되었다. 외부의 다른 광원의 방해로 피하기 위하여 실험은 암실에서 진행되었다.

3. 2 실험 방법 및 토의

가스의 흡수 단면적은 환경과 기후를 연구하는 그룹과 고전적으로 원자/분자 스펙트럼을 연구해온 그룹에서 측정과 계산을 통하여 꾸준히 연구된 분야이다. 본 연구에서 측정된 흡수단면적의 정량적인 평가는 다른 연구그룹에서 측정한 값과 비교를 통하여 이루어졌다.

실험하는 동안 흡수단면적 측정은 다음과 같이 진행되었다.

첫째 가스셀 내부를 0.1 torr 이하의 진공 상태로 만들었다. 셀과 연결관 내부의 공기와 불순물, 그리고 방해물질을 제거하기 위함이었다. 둘째 N₂ 가스(99.99999% 순도)로 셀 내부를 대기압까지 채운 후 N₂를 비롯한 셀의 스펙트럼을 측정하였다(배경 스펙트럼의 측정: I₀). 셋째, N₂ 가스로 채워진 셀의 상태를 다시 비우기 위하여 0.1 torr 이하의 진공으로 만들었다. 넷째, C₆H₆ 가스와 N₂ 혼합가스(C₆H₆ 98 μmol/mol)를 역시 N₂ 가스를 측정할 때와 같은 방법으로 측정하였다(가스측정 스펙트럼: I). 측정이 진행되는 동안 온도는 25.0 ± 0.5°C이었으며 압력은 대기압(760 ± 4 torr)이었다.

다음 각각의 그림 3은 I₀와 I의 스펙트럼이다.

위의 스펙트럼으로부터 식(7)에 의하여 벤젠 가스의 흡수 단면적을 결정하였다. 결과는 다음과 같다. 그림 4(a)와 (b)의 흡수밴드를 살펴 보면, 참고문헌(Etzkorn *et al.*, 1999)에 비하여 다소 낮은 최대 흡수

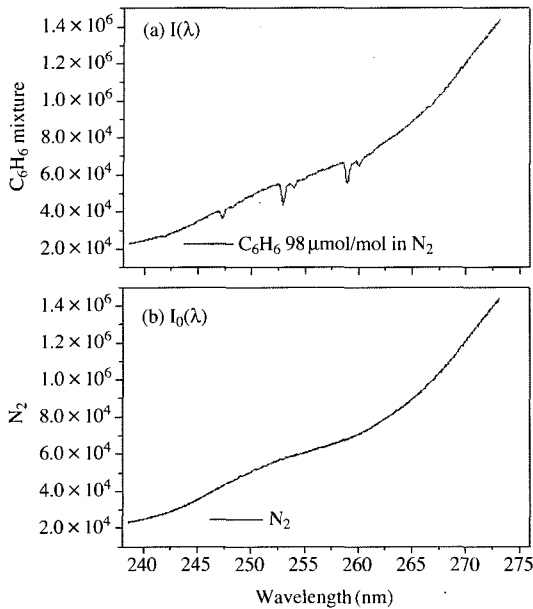


Fig. 3. Measured spectra. (a) $I(\lambda)$: Benzene in N_2 gas spectrum ($98 \mu\text{mol/mol}$). (b) $I_0(\lambda)$: N_2 gas spectrum.

값과 넓어진 밴드의 흡수 단면적을 볼 수 있다. 이는 기기함수의 차이 즉, 분해능의 차이로부터 비롯된 것이며, 참고문헌에서 사용한 분광기의 분해능은 0.11 nm이고 본 실험에서 사용된 기기는 0.35 nm이었다.

본 실험으로부터 얻어진 흡수단면적 스펙트럼의 값을 신뢰할 수 있는 값인지 비교를 하기 위하여 다음과 같은 방법을 이용하였다. 즉, 추출된 F 함수(그림 2의 253.65 nm의 라인)와 직접 참고문헌으로부터 얻어진 흡수단면적과 식 (4)를 이용하여 반영(convolution)시켰다. 이로부터 얻어진 흡수 스펙트럼은 그림 4를 통하여 비교되었다.

위의 그림 4의 (b)는 참고 흡수 단면적(그림 4(a))을 기기함수를 식 (4)를 이용하여 반영(convolution)시켰을 때의 결과(실선)와 실제 측정 결과(사각형 표시)를 함께 보여주고 있다. 기기함수에 의하여 적용된 흡수단면적(실선)은 실제 측정을 통하여 얻은 흡수 단면적(사각형표시)과 거의 일치함을 보여주고 있다.

현재는 미지의 가스 농도를 구하고자 할 때, 먼저

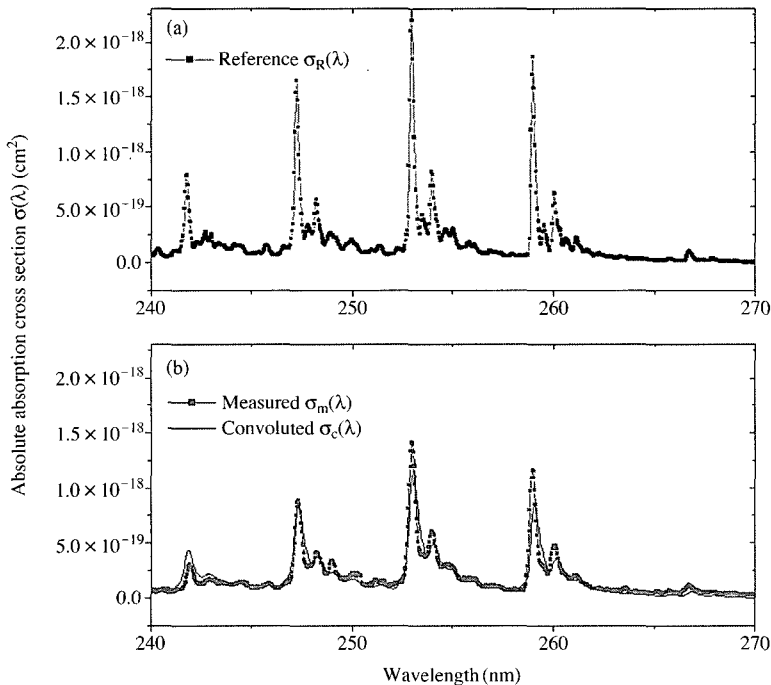


Fig. 4. Absolute absorption cross section measurement result. (a) Reference absolute absorption cross section (Etzkorn *et al.*, 1999), (b) Measured absolute absorption cross section (square) and convoluted absolute absorption cross section (line) (by instrument function : F) from referred spectrum (Etzkorn *et al.*, 1999).

참고자료의 흡수 단면적을 식(4)를 이용하여 기기흡수를 적용시켜 추출한 흡수 단면적을 마치 본 기기로 측정하여 얻은 스펙트럼인 것처럼 실제 농도 계산식(식(3))에 적용하는 것이 보편적이다. 측정하고자 하는 가스들의 흡수 단면적을 일일이 측정하여 흡수 단면적을 확보하기란 현실적으로 어렵기 때문이다. 그러나, 그림 4의 (b)에서 보듯 기기흡수를 적용하여 얻어진 흡수 단면적은 선택한 참고자료의 흡수 단면적에 의존하며, 또한 실제 측정 기기를 이용하여 측정한 스펙트럼과는 약간의 차이가 있다. 다만, 좀더 실제의 가스 흡수 단면적과 더 많이 접근하도록 분해능이 높은 기기흡수로 측정된 흡수 단면적 스펙트럼을 이용한다면, 결과적으로 식(3)의 미지의 가스의 농도의 정확도를 높일 수 있다.

다음의 표 1은 C₆H₆의 가장 강한 흡수 단면적 값을 참고문헌과 비교 결과이다. 표에서 위첨자 M_xa는 분해능 0.11 nm의 기기로 측정되었을 때 벤젠의 최대 흡수선의 크기를 의미하고, M_xb는 분해능 0.32 nm의 기기로 측정되었을 때 최대 흡수선의 크기를 의미한다. 마찬가지로 위첨자 M_x는 벤젠의 최대 흡수선의 크기를 의미한다. 결국 위의 그림 4와 표 1을 살펴보면, 우수한 분해능을 지닌 기기를 사용하게 되면 측정 장비가 측정할 수 있는 최저 검출 한계가 상대적으로 낮아짐을 확인할 수 있다.

표 1의 비교 결과를 보면 본 측정에서 실시된 흡수 단면적의 크기가 가장 작다. 그러나 분광능력이 비슷한 경우, 다소 비슷한 수준을 크기를 보이는 것을 Trost *et al.* (1997) (1.3 × 10⁻¹⁸@0.32^b nm)의 결과를 통하여 확인할 수 있었다.

C₆H₆ 가스셀의 측정 결과에 대한 불확도 값을 계

Table 1. Comparison of the absorption cross sections to literature values.

	Absorption cross section [10 ⁻¹⁸ cm ²]	Temperature pressure	Resolution
Trost <i>et al.</i> (1997)	2.5 ^{M_xa} @252.9 nm 1.3 ^{M_xb} @252.9 nm	@20.5 ± 1°C @vapor pressure	0.11 ^a nm 0.32 ^b nm
Etzkorn <i>et al.</i> (1999)	1.65@247.223 nm 2.43 ^{M_x} @252.940 nm 1.86@258.968 nm	@25 ± 3°C @vapor pressure	0.146 nm
This work	0.89@247.330 nm 1.41 ^{M_x} @252.971 nm 1.16@258.957 nm	@25.0 ± 0.5°C @ATM	0.35 nm

Table 2. Estimated uncertainties of two absorption cross section measurements (Benzene).

Uncertainty factors	Relative uncertainty[± 1σ: %]
Light path length	1.4
Pressure	1
Temperature	2
Uncertainty of CRM (C ₆ H ₆)	1.5
Stability of light source	1
Absorbance	2.4 (242~262 nm)
Total	4.0

산하였다. 불확도 요인과 각각 요인에 의한 불확도 값은 표 2에 정리되어 있다. 표 2의 각각의 불확도는 3회 측정된 값의 표준편차로 하였으며, 총 불확도는 각 요인의 불확도 값의 제곱의 합의 제곱근으로 결정하였다 (Vandeale *et al.*, 1998, 1994; Sprague and Joens, 1995). 단파장(UV) 영역에서 이루어진 C₆H₆의 흡수도 즉, absorbance (D) 요인이 총 불확도에 대한 공헌도가 가장 높았으며, 온도가 그 뒤를 이었다. 이로써 총 불확도 값은 4.0%를 보였다.

4. 결 론

휘발성 유기화합물(VOC)을 포함하여 미량으로 존재하는 100여 종의 대기 중의 인위적 자연발생적인 오염물질과 대기화학과정에서 중요한 영향인자로 작용하고 있는 radical 등, 대기 중에 미량으로 존재하는 가스들의 양을 정확히 측정하는 작업은 일차적인 오염요인에 대한 연구 뿐만이 아니라 더 나아가 대기환경과 관련된 이차적인 연구를 수행하는 데 중요하다. 이와 같은 연구를 수행하는 데 있어서 대기 중의 미량의 가스의 절대 흡수 단면적을 정확하게 측정하는 일은 정확한 대기 미량가스의 측정을 위한 기초적인 자료의 생산과 측정 기술의 개발이라는 임무와 닿아있다.

본 연구는 UV 영역에서 분광기법을 이용하여 대기미량물질 측정하는 장비를 이용할 때 반드시 필요한 자료인 가스의 흡수 단면적을 측정하고자 하였다. 이 연구의 목적은 대기 중의 미량가스의 UV 흡수성을 이용하여 그 농도를 측정하고자 하는 측정장비의 성능평가를 위한 기초를 제공하기 위하여 이루어졌다. 본 연구의 내용은 가스셀의 제작과, 가스의 흡수 단면

적 스펙트럼의 측정 그리고 그 결과를 포함하고 있다. C_6H_6 가스셀을 이용한 가스의 절대 흡수단면적 스펙트럼의 측정은 비교적 낮은 분해능을 가진 분광기를 이용하였으므로 좋은 결과를 얻을 수는 없었다. 이 때의 불확도는 온도, 압력, 광경로의 길이, 광원의 안정도, 가스의 순도, 흡수도 등의 요인에 의하여 결정되었다. C_6H_6 의 절대흡수단면적 측정에 대한 상대 불확도는 4.0%이었다. 좀 더 고 분해능을 지닌 장비를 이용한다면 파장 대 흡수선을 좀더 실제에 가깝게 측정할 수 있었을 것이라 생각된다. 따라서 장차 본 실험 장치보다 고분해능의 장비와, 온도와 압력에 대한 정밀도를 높이고, 혼합가스가 아닌 순수가스를 이용하여 가스혼합비에서 비롯되는 불확도를 줄인다면, 소급성을 갖춘 인증된 흡수단면적 자료로서 그 가치는 높아지리라 사료된다. 이와 같이 축적된 자료는 향후 대기 중의 미량가스를 측정하여 그 농도 값을 추출하기 위한 원격 측정장치를 위한 기본 데이터뱅크로 활용될 수 있으리라 기대된다.

가스 분광기술은 장거리에 걸쳐 대기 중의 가스의 정량적인 양을 어떤 간섭이나 전·후 처리 없이 측정할 수 있으므로, 복잡하게 변화해가고 있는 대기 환경의 상태에 대한 정보를 실시간으로 제공할 수 있다. 현재 분광학을 응용한 측정기술과 분석기술 등은 대기오염 측정 기술로서 뿐만 아니라, 미래의 기술로서 각국의 연구기관에서 활발하게 연구 중에 있으므로 그 활용 분야가 점점 확대되리라 예상된다.

참고 문헌

- Etzkorn, T., B. Klotz, S. Soerensen, I.V. Patroescu, I. Barnes, K.H. Becker, and U. Platt (1999) Gas-Phase absorption cross sections of 24 monocyclic aromatic hydrocarbons in the UV and IR spectral ranges, *Atmos. Env.*, 33, 523-540.
- Kim, K.-H. (2004) Comparison of BTX measurements using a commercial differential optical absorption spectroscopy and an on-line gas chromatography system, *Environ. Eng. Sci.*, 21(2), 181-194.
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim (2001) Comparison of an open path differential optical absorption spectroscopy system and a conventional in situ monitoring system on the basis of long term measurements of SO_2 , NO_2 , and O_3 , *Atmos. Environ.*, 35, 4059-4072.
- Kim, S.-W., J.-G. Won, K.-H. Park, S.-C. Yoon, C.-S. Hong, Y.-J. Kim, and G.-S. Huh (2001) Monitoring and analysis of air pollutant using differential optical absorption spectroscopy, *J. of Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 17(5), 375-385.
- Lee, J.S., Y. Kim, B.J. Kuk, A. Geyer, and U. Platt (2005a) Simultaneous Measurements of Atmospheric Pollutants and Visibility with a Long-Path DOAS System in Urban Areas, *Environmental Monitoring and Assessment*, 104, 281-293.
- Lee, C., Y.J. Choi, J.S. Jung, J.S. Lee, K.H. Kim, and Y.J. Kim (2005b) Measurement of atmospheric monoaromatic hydrocarbons using differential optical absorption spectroscopy: Comparison with on-line gas chromatography measurements in urban air, *Atmos. Env.*, 39, 2225-2234.
- Lee, J.S., B. Kuk, and Y.J. Kim (2002) Development of differential optical absorption spectroscopy (DOAS) system for detection of atmospheric species; NO_2 , SO_2 , and O_3 , *J. Kor. Phys. Soc.*, 41(5), 693-698.
- Platt, U. (1994) Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS), *Air Monitoring by Spectroscopic Techniques: Chemical Analysis Series*, ed. Markus W. Sigrist, 127, 27-84.
- Platt, U., D. Perner, and H.W. Pätz (1979) Simultaneous measurement of atmospheric CH_2O , O_3 and NO_2 by Differential Optical Absorption, *J. Geophys. Res.*, 84, 6329-6335.
- Sprague, K.E. and J.A. Joens (1995) SO_2 absorption cross section measurements from 320 to 405 nm, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 53(4), 349-352.
- Trost, B., J. Stutz, and U. Platt (1997) UV-absorption cross sections of a series of monocyclic aromatic compounds, *Atmos. Env.*, 31, 3999-4008.
- Vandeale, A.C., C. Hermans, P.C. Simon, M. Catleer, R. Colin, S. Fally, M.F. Merienne, A. Jenouvrier, and B. Coquart (1998) Measurements of the NO_2 absorption cross section from 42000 cm^{-1} to $10,000\text{ cm}^{-1}$ (238~1,000 nm) at 220 K and 294 K, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 59(3-5), 171-184.
- Vandeale, A.C., P.C. Simon, J.M. Guilmet, M. Carleer, and R. Colin (1994) SO_2 absorption cross section measurement in the UV using the Fourier transform spectrometer, *Journal of the Geophysical Research*, 99(D12), 25599-26605.