

대기오염 측정용 DIAL시스템의 오차해석

박 진화* · 이 용우**

*전남대학교 환경연구소, **도립담양대학 초고속정보통신공학부

Numerical Analysis of Differential Absorption Lidar for Measuring Atmospheric Pollutants

Jin Hwa Park* and Yong Woo Yi**

*Environmental Research Center, Chonnam National University,

**Dept. of Electronic Engineering, Provincial College of Damyang

요 약

본 논문은 차분흡수 라이다의 알고리즘을 구성하고, UV-Bank를 이용하여 파장에 대한 O₃, SO₂, NO₂의 흡수스펙트럼을 조사하고, 최적파장 모델을 설정하였다. 여기서, 선택된 파장들은 O₃에 대해 292.00(λ_{on}), 295.20(λ_{off}), SO₂에 대해 299.38 (λ_{on}), 300.05(λ_{off})이고 NO₂에 대해 448.00(λ_{on}), 449.85(λ_{off})이다. 특히, 차분흡수 라이다의 가상모델을 설정하고, 선택된 최적파장을 사용하여 거기에 대한 오차를 시뮬레이션 하였다. 망원경의 지름이 300 mm인 모델-I에서 레이저의 에너지를 3 mJ과 10000 shots을 송신했을 때, 10 %이내의 오차범위에서 최대 측정거리는 O₃의 경우 4 km이고, SO₂와 NO₂의 경우 5 km이다. 또한, 망원경의 지름이 600 mm인 모델-II에서 레이저의 에너지를 30 mJ과 10000 shots을 송신했을 때, 10 %이내의 오차범위에서 최대 측정거리는 SO₂와 NO₂의 경우 13 km이다.

ABSTRACT

In this study, we composed algorithm of DIAL(Differential Absorption Lidar). we investigated the absorption spectrum of O₃, SO₂ and NO₂ dependent on wavelengths using data base UV-Bank and determine the optimized wavelength model. Here, the selected optimal wavelengths are 292.00(λ_{on}), 295.20(λ_{off}) for O₃, 299.38(λ_{on}), 300.05(λ_{off}) for SO₂ and 448.00(λ_{on}), 449.85(λ_{off}) for NO₂. In particular, we established the supposed model of DIAL and simulated the error of measuring distance using the selected optimal wavelength. In the model-I with telescope of 300 mm diameter, laser energy of 3 mJ and transmission of 10000 shots, maximum distances are 4 km for O₃ measurement and 5 km for SO₂ and NO₂ measurements. Also, in the model-II with telescope of 600 mm diameter, laser energy of 30 mJ and transmission of 10000 shots, maximum distances are 13 km for SO₂ and NO₂ measurements.

KEY WORDS

DIAL, O₃, SO₂, NO₂, Absorption Spectrum, Laser energy

1. 서 론

최근 고도의 산업화와 공업화로 인하여 많은 나라들이 환경오염의 심각성에 대한 인식과 그 억제 대책에 부심하고 있다. 특히 대기오염은 수질오염과 함께 인간의 건강을 직접적으로 위협하고 있는

실정인데 우리 나라의 일부 대도시 지역에서의 대기오염도는 상위그룹으로 분류되어 있어서 이의 실태파악과 함께 억제대책의 수립은 시급한 실정이다.

대기오염물질의 농도를 파악하는 계측기술인 원격탐사 방법은 레이저광을 오염물질에 발사할 때 오염물질에서 산란되어 돌아오는 레이저광을 측정하여 그 농도를 파악한다. 따라서 대기오염물질의

분포가 시간적, 공간적으로 파악되므로 물질의 형태 및 형성기구의 해석은 물론 대기예측 모델의 적용도 가능하게 할 수 있다. 이 방법은 레이저광을 사용하여 원격 탐사하므로 라이다(LIDAR: Light Detection And Ranging)라고 통칭되는데 이는 레이저광의 강력한 펄스출력과 우수한 지향성을 이용하는 원리므로 원거리에 있는 물체의 형태 이외에 이의 거리, 방향, 크기, 속도 등의 정보를 동시에 원격적으로 측정할 수 있다. 라이다는 1963년에 Fiocco에 의해 처음으로 사용된 이후[1] 라이다 장치의 주변기술들이 현저하게 발전하여 현재 대기오염물질을 가장 능동적으로 관측할 수 있는 방법으로 인식되고 있다[2]. 시료 채취나 대기 중에 기구를 띄워 측정하는 화학적 분석방법은 시·공간적으로 매우 제한적이며 수동적이라 할 수 있다. 그러나 레이저광을 대기 중에 송수신하여 측정하는 방법은 이러한 문제점을 크게 개선할 수 있다.

라이다는 레이저광과 물질의 상호작용에 따른 측정방법에 의해 몇 가지의 종류로 구분할 수 있는데, 오염물질의 농도계측에는 차분흡수 라이다(DIAL: Differential Absorption Lidar)가 일반적으로 사용되고 있다[2,3]. 차분흡수 라이다는 측정하고자 하는 오염물질 내에서 레이저광의 산란과 흡수작용을 동시에 이용하는 방식으로, 측정대상의 분자에 의한 흡수 단면적이 큰 파장과 적은 파장을 동시에 오염가스에 발사한 후, 후방으로 산란되는 두 파장의 광자 수를 측정하여 물질의 농도로 환산한다. 차분흡수 라이다는 두개의 파장으로 수신되는 후방산란 광자 비를 적합하게 정하고, 또한 후방산란계수의 파장 의존성과 에어로졸에 의한 레이저광의 감소를 억제하지만 이의 최적수준을 정하는 것은 첨단기술분야에 속하며 기술적으로 매우 어려운 문제를 가지고 있다. 따라서 최적의 파장을 선택하고, 우수한 출력에너지 및 스펙트럼 특성의 레이저 개발, 레이저빔의 발산 각에 적합한 구경의 망원경 제작, 동특성 영역이 넓은 PMT와 신호처리 시스템 개발 등은 차분흡수 라이다의 중요한 요소들이라 할 수 있다.

본 논문에서는 대기오염 물질 중 O₃, SO₂, NO₂의 흡수 스펙트럼을 조사하여 최적파장모델을 정립하여 대기분자에 대한 산란 및 감쇠계수와 에어로졸 밀도 등의 대기광학 파라미터를 설정하였다. 또한, 차분흡수 라이다의 시스템의 두 가지 모델의 파라미터를 설정하고, 선택된 O₃, SO₂와 NO₂의 측정거리에 대한 오차를 시뮬레이션 하여 두 모델을 비교 분석함으로써 최적의 차분흡수 라이다를 구성하는데 그 목적이 있다.

2. 차분흡수 라이다의 알고리즘 구성

차분흡수 라이다 방식으로 오염가스 SO₂, O₃, NO₂를 원격 측정하는데 적합한 파장을 선택하기 위한 수학적 모델의 알고리즘은 Fig. 1과 같다. 본 모델에서는 러시아의 사설연구소인 Eridan-1에서

작성한 UV 스펙트럼 데이터 베이스인 UV-Bank를 사용하였으며, 여기에는 65 종류의 가스에 대한 흡수 단면적의 정보가 수록되어 있다[4].

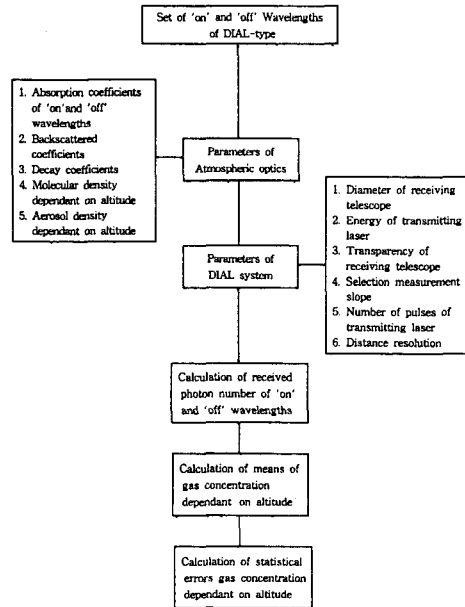


Fig. 1. Flowchart of optimal wavelength model.

Fig. 1의 차분흡수 라이다의 알고리즘에 사용된 측정가스의 농도를 계산하는 주요 방정식은 아래 식(1)과 같이 구성할 수 있다[5].

$$\sum_{i=1}^k n_i(\Delta H) \Delta \sigma_i(\lambda_k^+, \lambda_k^-) = T_k - T_k' \quad (1)$$

여기서,

$$T_k = \frac{1}{2\Delta H} \ln \left[\frac{N_1(\lambda_k^+) N_2(\lambda_k^-)}{N_2(\lambda_k^+) N_1(\lambda_k^-)} \right]$$

$$T_k' = \frac{1}{2\Delta H} \ln \left[\frac{\sigma \pi_1(\lambda_k^+) \sigma \pi_2(\lambda_k^-)}{\sigma \pi_2(\lambda_k^+) \sigma \pi_1(\lambda_k^-)} \right]$$

- λ_k^+, λ_k^- : k번째 가스측정을 위해 선택된 파장
- $n_i(\Delta H)$: 스토브 신호 기간(ΔH) 중 i번째 가스 농도 평균
- N_1, N_2 : 두 연속 거리로부터 산란된 신호
- $\sigma \pi_1, \sigma \pi_2$: 전체 산란 계수 (분자와 에어로졸 산란 계수의 합)
- $\Delta \sigma$: 특정 파장에 대한 차분흡수 계수이다.

방정식을 단순하게 하기 위하여 식 (1)은 스트로브 수와 파장 차이에 의한 에어로졸 및 분자소거에 대한 계수보정과 가스들간의 간섭효과는 생략하였

는데 이는 협대역화 된 색소레이저의 사용을 가정했기 때문이다. 만약, 각 가스가 특정 파장만을 흡수한다면, 즉, $i \neq k$ 에서 Table Table 1. The Adsorption Profile of Optimum Wavelength[4]

Table 1. The Adsorption Profile of Optimum Wavelength[4]

Pollutants Wave-lengths[nm]	O ₃ [1/cm ³]	SO ₂ [1/cm ³]	NO ₂ [1/cm ³]
292.00	5.45×10 ⁻¹⁸	5.66×10 ⁻¹⁹	4.501×10 ⁻²⁰
295.20	4.00×10 ⁻¹⁸	9.58×10 ⁻¹⁹	5.73×10 ⁻²⁰
299.38	3.72×10 ⁻¹⁹	1.13×10 ⁻¹⁸	1.25×10 ⁻¹⁹
300.05	3.22×10 ⁻¹⁹	1.9×10 ⁻¹⁹	1.30×10 ⁻¹⁹
448.00	< 10 ⁻²³	< 10 ⁻²³	5.83×10 ⁻¹⁹
449.85	< 10 ⁻²³	< 10 ⁻²⁸	4.56×10 ⁻¹⁹

$\Delta\sigma(\lambda_k^+, \lambda_k^-) = 0$ 이라면, 방정식은 독립변수로 분리될 수 있고, 데이터 처리 알고리즘은 두 가지 파장에 의한 식으로 표현 될 수 있다. 이와 같이 파장가변형이며 동시에 두 파장을 발견하는 색소 레이저는 파장선택의 제한을 최소한으로 감소시키고, 두 가지 파장에 의한 식으로 데이터 처리를 할 수 있게 해주는 장점을 가지고 있다.

식 (1)에서 색소 레이저를 송신광원으로 사용할 경우 두 파장의 간격을 1 nm 이하로 근접하게 발견시킬 수 있기 때문에 두 파장의 간격을 수 nm 이상으로 발생시키는 엑시머 레이저와 라만 변환기를 사용하는 경우보다 큰 장점을 지니고 있다[6]. 협대역화 된 색소레이저를 사용하는 경우, UV-Bank에 따르면 SO₂의 차분 흡수 단면적이 O₃와 NO₂에 비해 100 배나 크며, 반면에 엑시머 레이저의 경우 4 배밖에 안됨을 보여준다. 식 (1)에서 오존 측정 정확도가 SO₂농도에 의존하지 않는다는 것과 O₃의 차분 흡수는 NO₂보다 60 배나 크다는 것을 보여준다. 일반적으로, 경제층에서 오존 농도는 NO₂보다 크다는 것을 고려할 때, Table 1에서 선택된 파장을 사용할 경우, 오존 측정 정확도는 NO₂ 농도에 어느 정도 의존한다.

농도에 대한 측정오차는 주로 광자를 계수 할 때 발생하는 통계적 오차에 의한다. 색소 레이저를 사용할 때 가스에 대한 간섭이 없어 오차의 감소

Table 2. The Concentration Profile of SO₂, NO₂ and O₃ in the Boundary Layer[7]

Pollutants Parameters	SO ₂ [cm ⁻³]	NO ₂ [cm ⁻³]	O ₃ [cm ⁻³]
Background	1.35×10 ¹⁰	2.7×10 ¹⁰	2.0×10 ¹¹
10x Background	1.35×10 ¹¹	2.7×10 ¹¹	2.0×10 ¹²
Seoul Min.	2.4×10 ¹¹	1.62×10 ¹¹	1.7×10 ¹¹
Seoul Max.	2.8×10 ¹²	1.89×10 ¹²	8.1×10 ¹¹

Background: Northern Hemisphere background data
Seoul Min. : Minimal pollution in Seoul
Seoul Max. : Maximal pollution in Seoul

와 더불어 Table 1에 선정된 파장들은 T⁺ 와 T⁻의 의해 발생하는 오차를 감소시킨다. 색소 레이저를 사용할 경우 오차는 엑시머 레이저와 라만 변환기를 사용할 경우보다 O₃는 6 배, NO₂는 13배 적다. 이러한 이유는 통계적 오차만을 측정의 정확도 예측에 사용했기 때문이다. 식 (1)이 거의 독립적이라는 것을 고려할 때, 오차를 예측하기 위해서 다음의 식을 사용할 수 있다⁶⁾.

$$\frac{\Delta n(\Delta H)}{n(\Delta H)} = \frac{1}{2n(\Delta H) \Delta H \Delta \sigma(\lambda^+, \lambda^-)} \sqrt{\frac{1}{N_1^+} + \frac{1}{N_1^-} + \frac{1}{N_2^+} + \frac{1}{N_2^-}} \quad (2)$$

여기서,

$$N^+ = N(\lambda^+), \quad N^- = N(\lambda^-)$$

식 (2)에서 후방산란 신호는 차분흡수 라이다의 방정식으로부터 예측할 수 있으며²⁾, 시뮬레이션에 사용되는 변수들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Table 3. The Model Parameters of Continent Aerosol[8]

Composure		Dust	Sulfates	Soot
Size distribution function		$\phi(r) = \text{const} \frac{1}{r} \exp\left\{\frac{\ln^2(r/r_m)}{2 \ln^2(d)}\right\}$		
Distribution parameters		r _m = 0.5 μm d = 2.99	r _m = 0.001 μm d = 3.1	r _m =0.02 μm d=2.2
Concentration		0.39 cm ⁻³	1.61×10 ⁴ cm ⁻³	1.05×10 ⁴ cm ⁻³
Volume part		0.68	0.30	0.02
Complex refraction index	λ=0.285 μm	1.53-i×1.5×10 ⁻²	1.53-i×1.5×10 ⁻²	1.70-i×0.46
	λ=0.300 μm	1.53-i×8.0×10 ⁻³	1.52-i×8.0×10 ⁻²	1.74-i×0.47
	λ=0.440 μm	1.53-i×5.0×10 ⁻³	1.42-i×5.0×10 ⁻³	1.75-i×0.46

첫째, 대기광학 변수들은 분자 및 에어로졸 산란과 에어로졸 및 O₃, SO₂, NO₂의 흡수에 의해 결정된다.

둘째, 분자의 소거 및 후방 산란 계수는 Rayleigh 공식에 의해 계산한다.

셋째, 경계층에서의 O₃, SO₂, NO₂의 농도에 대한 profile은 ERIDAN-II의 데이터 베이스와 1992년 환경 연감을 기초로 하여 계산하였으며 그 값은 Table 2와 같다.

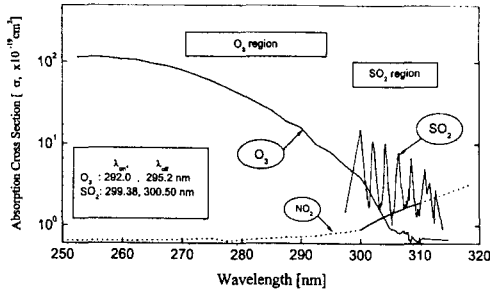


Fig. 2. Absorption spectra of O₃ and SO₂ in UV-region.

넷째, 배경 에어로졸의 모델변수들은 소거 및 후방 산란은 Mie 공식에 의해 계산하며, Table 3에 나타난 바와 같다.

3. SO₂, NO₂ 및 O₃ 가스의 최적파장 설정

Fig. 2와 Fig. 3은 SO₂, NO₂, O₃ 가스의 흡수 단면적에 대한 파장 의존성을 나타낸 것인데 각 가스에 대한 최적파장의 쌍은 그림에서 제시된 데이터에서 선택되어야 하는데 SO₂와 NO₂의 흡수 단면적에 대한 파장 의존성은 290~320 nm 과 400~470 nm에서 최고값을 나타내며, 주기적인 진동 곡선으로 표현되고 있다. SO₂와 NO₂ 가스의 측정을 위하여 차분흡수 방식에서 파장 간격을 두는 것은 인접한 파장을 선택하는 경우보다 차분흡수 단면적을 크게 하는데 목적이 있다.

Fig. 2에서 O₃에 대한 흡수단면적의 파장 의존성은 260~320 nm에서 보다 완만하다. UV-Bank를 이용하여 수치적인 추정을 하면 276~295 nm 의 선택이 가장 적합하며 이의 주된 이유는 다음과 같다. 첫째, 파장에 대한 흡수단면적의 편차가 260~300 nm 에서 가장 크며, 선택한 스펙트럼 영역이 이에 속한다. 짧은 파장을 선택할수록 최대 측정거리가 짧아지는 반면 긴 파장 쪽을 선택할수록 차분흡수 단면적이 적기 때문에 감도가 떨어진다. 둘째, 300 nm보다 긴 파장에서, SO₂의 흡수 단면적은 O₃의 흡수 단면적보다 크므로 대기가 SO₂로 오염되어 있다면, O₃의 측정 정확도는 떨어지게 된다. 셋째, 278~290 nm 영역은 290~300 nm와 인접해 있어 O₃와 SO₂를 측정할 때 같은 색소를 사

용할 수 있다.

SO₂와 O₃가스의 296~313 nm와 252.5~310 nm 영역에서 흡수단면적은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 431~556 nm 범위에서는 SO₂와 O₃의 흡수를 무시할 수 있으며, Fig. 3에서는 보다 강력한 NO₂에 대한 흡수를 나타내고 있다.

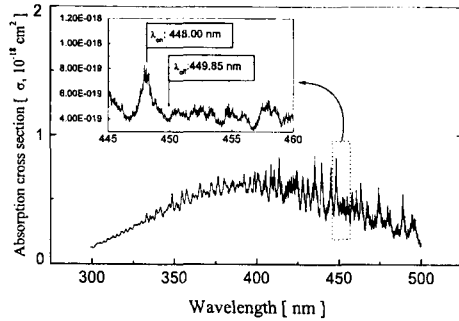


Fig. 3. Absorption spectrum of NO₂.

Fig. 2와 Fig. 3의 데이터를 기초로 하여 각 가스의 측정에 적합한 세 가지 파장 쌍들을 Table 1에서 O₃의 경우는 292.00(λ_{on}), 295.20(λ_{off}), SO₂의 경우는 299.38(λ_{on}), 300.05(λ_{off}), NO₂의 경우는 448.00(λ_{on}), 449.85(λ_{off})를 설정하였는데, 가장 고려해야 할 것은 측정하고자 하는 가스에 대해서 최대 차분 흡수 값을 가져야 하며, 다른 가스들에 대해서는 최소의 흡수 값을 갖는 파장을 선택하는 것이다.

4. 모의실험에 의한 측정오차 해석

앞에서 설정한 최적파장과 차분흡수 라이다에 대한 모의실험 결과를 얻기 위해 입력한 차분흡수 라이다의 각 변수는 Table 4와 같으며 Fig. 4는 모델-I의 하드웨어를 사용하여 설정된 최적파장, 즉, O₃에서는 292.00(λ_{on}), 295.20(λ_{off}), SO₂에서는 299.38(λ_{on}), 300.05(λ_{off}), NO₂에서는 448.00(λ_{on}), 449.85(λ_{off})를 설정하였을 때 측정거리에 대한 오차를 시뮬레이션 한 결과이다. O₃, SO₂와 NO₂의 측정 오차는 식 (2)를 사용하여 계산하였다. 10,000 shot을 수행했을 때 오차가 10 %보다 적은 경우는 O₃가 4.0 km 이고, SO₂와 NO₂가 5.0 km 이다. 1,000 shot에서 오차가 10 %보다 적은 경우는 O₃가 3.0 이고, NO₂는 2.5 km이다. 이때 10,000 shot과 1,000 shot의 관측시간은 각각 200 초와 20 초이다.

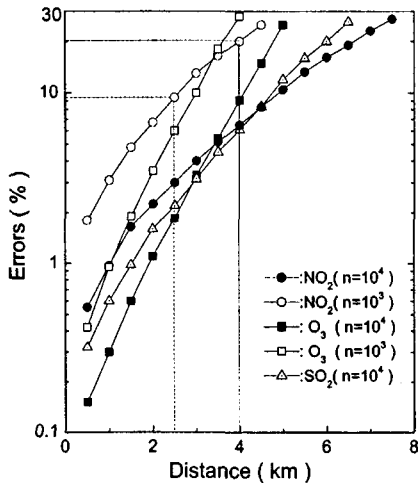
차분흡수 라이다 모델-II에 입력된 파라미터에 의한 O₃, SO₂, NO₂의 측정 오차는 Fig. 5에 나타난 바와 같다. 측정 오차가 10 %보다 적은 경우는 10,000 shot일 때 NO₂는 13 km, SO₂는 12 km 이내이며 100 shot일 때 NO₂가 6 km, SO₂는 7km 이내이다. 이때 관측시간은 100초와 10초이다.

Table 4. Input Parameters of DIAL System.

Parameter of DIAL system	Model-I	Model-II
Diameter of telescope	30 cm	60 cm
Transparency of telescope	0.8	0.8
Transparency of analyzer	0.4	0.4
Transparency of filters	0.3	0.3
Quantum efficiency of receiver	0.1	0.1
Pulse energy of each wavelength	3.0 mJ	30 mJ
Pulse repetition rate	50 Hz	100 Hz
Space resolution	500 m	1,000 m
Number of shots	1,000 and 10,000 shots	100 and 10,000 shots

이러한 수치적 실험으로 차분흡수 라이다 방식

략 $8 \times 10^{15} \text{ W} \cdot \text{cm} \cdot \text{nm}^{-1}$ 이기 때문이다[9].

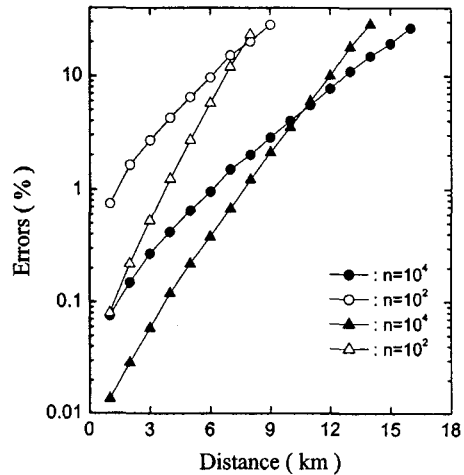


$\text{SO}_2 = 2.8\text{E}+12$, $\text{NO}_2 = 1.89\text{E}+12$, $\text{O}_3 = 8.1\text{E}+11$
 [Diameter=30 cm, Energy= 3 mJ, dL=500 m]

Fig. 4. Error rates dependent on measuring distance of SO₂, NO₂, and O₃ (Model-I).

의 일반적인 성능을 평가할 수 있었는데 이는 의도적으로 일반적인 차분흡수 라이다의 변수들만을 고려하였기 때문이다. 측정 거리에 따른 정확도는 측정 시간의 증가와 라이다 변수 증가에 따라 개선이 가능하다.

측정 오차를 계산할 때 장치의 잡음을 무시하였다. 상대적으로 측정 오차가 10% 이내일 때, 측정신호의 세기는 수백 kHz로서 광 증배관이나 증폭기 및 다른 장치들의 내부 잡음에 의한 것보다 큰 값이므로, 유일하게 남은 잡음의 원인은 태양광이 된다. 그러나 Uchiu 등[3]이 제시한 305~308 nm보다 짧은 파장의 태양광은 성층권 오존층에 의하여 흡수되므로, 장치에 의한 오차를 무시할 때 O₃와 SO₂의 측정 정확도에는 크게 영향을 미치지 못하므로 주간 및 야간의 측정이 가능하다. 하지만, 태양광에 의한 잡음은 NO₂ 측정할 때는 무시할 수 없는데 지표면에서 천칭각이 40°일 때, 440 nm 근처의 태양광 스펙트럼 세기는 대



$\text{NO}_2 = 1.89 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $\text{SO}_2 = 2.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
 [Diameter=60 cm, Energy=30 mJ, dL=1 km]

Fig. 5. Error rates dependent on measuring distance of SO₂ and NO₂(Model-II).

이와 같은 차분흡수 라이다의 변수들을 가정할 때, 수신 망원경의 시계(field of view)는 3 mrad 이어야 하고, 필터의 대역폭은 1 nm 일 때 1400 MHz의 배경 에너지를 발생한다. 이 값은 관측 간격을 훨씬 넘어선다. 레이저 펄스 반복율이 83 Hz 일 때, 최대 거리 15km에서 기록시간은 펄스 발생 후 100 μsec 이고, 광 증배관의 이득은 5×10^6 (PMT-140의 평균 값)이며, 배경 에너지는 평균 전류인 10^5 A이다. 이때, 평균전류는 최대 광증배관의 전류인 PMT-140의 2×10^5 A 에 상응한다. 그러므로, NO₂의 농도측정은 저녁 시간에만 하거나, 또는 협대역 필터로서 그 레이팅 필터(grating filter)를 사용하였을 때에는 주간에도 측정할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 O₃, SO₂, NO₂의 흡수 스펙트럼을

조사하여 상호관계에 의한 최적파장을 정립하고, 차분흡수 라이다에 대한 두 가지 모델을 설정하여 선택된 O₃, SO₂ 와 NO₂의 최적파장에 대한 측정거리에 대한 오차를 시뮬레이션 하였다. 이때, 선택된 최적파장은 O₃에서 292.00(λ_{on}), 295.20(λ_{off}), SO₂에서 299.38(λ_{on}), 300.05(λ_{off}), NO₂에서 448.00(λ_{on}), 449.85(λ_{off})이다. 시뮬레이션의 결과로써, 망원경의 지름이 300 mm인 모델-I에서 레이저의 에너지를 3 mJ과 10000 shots를 송신했을 때, 10 % 이내의 오차범위에서 최대 측정거리는 O₃의 경우 4 km이고, SO₂와 NO₂의 경우 5 km이다. 또한, 망원경의 지름이 600 mm인 모델-II에서 레이저의 에너지를 30 mJ과 10000 shots를 송신했을 때, 10 % 이내의 오차범위에서 최대 측정거리는 SO₂와 NO₂의 경우 13km이다.

본 연구에서 차분흡수 라이다의 각 모델에 대한 모의실험을 통해 각 파라미터를 제시하였으며, 요구되는 송신광의 에너지와 최대 측정거리 및 오차를 예측할 수 있어 최적의 장치를 구성할 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. Fiocco, G. and Smullin, L. D., "Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60-140 km) by optical radar," *Nature*, 199, 1275~1278(1963).
2. Sunesson, Y. A. and Swart, D. P. Y., "Development of a DIAL system for troposphere ozone measurements", *Fifteenth International Laser Radar Conference, Abstracts of papers. Part II*, pp. 271(1990).
3. Uchiumi, M., Shibata, T. and Maeda, M., "A compact UV solar-blind lidar for detection of the lower tropospheric ozone layer", *Fifteenth International Laser Radar Conference, Abstracts of papers. Part II* pp. 264~270 (1990).
4. "UV-Bank" database, SC "Eridan-1"(1993).
5. Technical report, SC "Eridan-1", Part I pp. 33~38(1992).
6. 경희대학교 레이저공학연구소 기술보고서 part I. pp. 8~26(1994).
7. 한국 환경처, 1992년도 한국환경연감, pp. 36~83 (1992).
8. Report of the experts meeting on aerosols and their climatic effects, Williamsburg, 28 ~30 march 1983, World Climate Programme, World Meteorol. Organiz. 1, N, pp. 55~108(1983).
9. Bittar, A. and McKenzie, R. L., "Spectral ultraviolet intensity measurements at 45 S: 1980 and 1988", *J. Geophys. Res.* 95(D5), 5597~5603(1990).