

## 대기오염 연구용 이동형 LIDAR 광학계 설계

홍 경 희

육군사관학교

(1996년 3월 11일 받음)

대기오염 연구용 이동형 라이다의 광계통을 설계하였다. 대기오염이나 오존층의 측정을 위해 라이다를 사용하며 군에서는 화생방 오염 측정에도 사용된다. 역 Cassegrain형의 시준기로 평행광을 만들어 평면경에 의해 전송하는 레이저광속과 수신 망원경의 광축이 일치하게 된다. 레이저광속은 대기로 향하여 전송되며 측정하고자 하는 물질에 의해 산란되어 수신 망원경으로 되돌아 온다. 주사반사경은 수직으로 60° 수평으로 180° 회전되며 주사한다. 주사반사경은 수신망원경과 분리되어 자동차 지붕위에 설치된다. 수신된 레이저광은 공간주파수 여과기에 의해 여과되고, fabri렌즈에 의해 평행광으로 되어 광속분리기에 의해 2개의 광속으로 나뉘어 검출된다. 각 레이저광은 PM관에 의해 검출되어 증폭되고 분석된다.

### I. 서 론

LIDAR란 Light Detection and Ranging의 준말로서 일명 Laser radar라고도 한다. 이 장치는 레이저의 강 대하고 집적된 고출력과 고도의 지향성을 이용하여 원 거리에 떨어져 있는 물체의 상태, 그의 거리, 크기, 형상, 속도, 밀도, 조성등 여러가지 정보를 측정하는데 사용된다.<sup>[1,2]</sup> LIDAR의 형태로는 DIAL(Differential Absorption Lidar)형태와 PDL(Pulsed Doppler Lidar) 형태가 있다. 대기에 떠 있는 기체 원자 또는 분자들의 양과 조성 등 대기오염이나 기상상태를 측정하는데는 DIAL system이 많이 이용되며 그것들의 이동속도, 즉 대기오염물질 또는 구름의 이동속도를 측정하는 데는 PDL형태를 많이 이용하고 있다.<sup>[3,4]</sup> 본 연구에서는 DIAL system을 개발하기 위한 것이다. DIAL system의 수신광학계는 그 규모가 주사반경의 직경이 수십 cm로부터 수 meter에 이르고 있다.<sup>[3,5]</sup> 송수신 광학계 설계변수는 LIDAR가 사용되는 목적과 레이저의 송수신 특성에 의해 결정되며 본 연구에서 설계된 수신 망원경은 대기오염을 측정하기 위해 측정거리를 10 km로 제한하고 Newtonian type으로 설계하였다. 송신광학계는 사용하는 파장에 구애없이 다양하게 사용할 수 있도록 반사경계 만으로 구성하였다. 검출기계통은 주로 본 연구에서는 오존층 측정에 초점을 두고 UV영역에서 사용하도록 굴절렌즈를 이용하여 구성하였다. 다른 파장영역에 사용하려면 검출기계통의 굴절렌즈와 검출기 만 교환하면 사용할 수 있도록 하

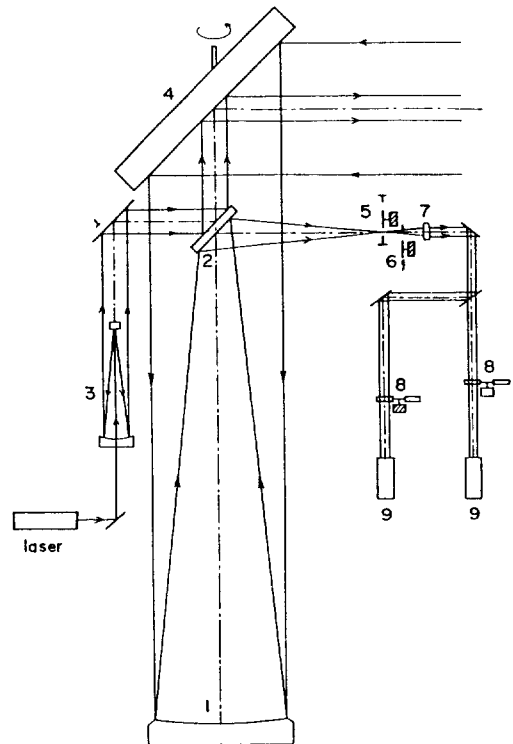


그림 1. 대기오염 연구용 이동형 LIDAR 광학계의 개략도.

었다. 이를 포괄하는 이동형 LIDAR의 광학계의 개략도는 그림 1과 같다.

### II. 회전식 주사반사경

대형 회전식 주사 반사경은 레이저 복사선을 대기권으로 지향하고 또 산란되어 되돌아오는 복사선을 LIDAR의 수신광학계로 지향하도록 하는 역할을 담당한다. 주사반사경의 크기는 유효경이 장축 600 mm, 단축 300 mm인 타원으로 두께가 65 mm이며 수신망원경에 부착되어 있지 않다. 그것은 LIDAR가 위치하는 차량 지붕 위에 위치하며 수신 망원경은 주사반사경 바로 아래에 수직으로 설치되도록 하였다.

주사반사경 계통의 설계는 고도각이 0°부터 120°까지, 방위각은 0°에서 360°까지 주사할 수 있도록 하였다. 탐사방향에 일치하여 고도는 0°부터 60°까지, 방위각은 0°에서 360°까지 변화시키도록 하였다. 고도 및 방위의 주사는 1° 단위로 주사하도록 제작한다. 그보다 더 작은 단계는 송수신 광학계통의 미동나사의 조정을 통해서 가능하도록 한다. 주사 반사경의 회전과 고도각의 변화는 기계장치와 step motor에 의해 시행된다. 반사경의 평면도는  $\lambda/4$  정도면 충분할 것으로 판단된다.

### III. 송신부 광계통 설계

송신부에서는 레이저에서 출력되는 광속을 평행광속으로 확대하여 무한거리로 보낼 수 있어야 하며 송신하는 출력광속은 원형 단면으로서 60 mm의 직경을 가지도록 하였다. 광원으로서 excimer laser 발진기를 사용하며 작업공간과 레이저광의 발산을 충분히 고려하여 입력광속의 유효직경을 9 mm로 하였다. 될 수 있는 대로 레이저에서 나오는 광속을 손실 없이 송신하여야 하므로

표 1. 송신광학계의 설계제원 (단위 : mm)

| 면 번호 | 곡률반경    | 간격     | 유효경  | 재질    |
|------|---------|--------|------|-------|
| 1    | 150.0   | -425.0 | 9.0  | 석영    |
| 2    | 1,000.0 |        | 60.0 | 공기 석영 |

공간주파수필터를 사용하지 않고 대기오염물질 측정에 사용되는 모든 파장에 대하여 동일한 굴절능을 가져야 한다. 따라서 파장에 따른 색수차를 제거해야 한다. 이를 위해 역 Cassegrain 형태의 반사경계를 택하여 무초점계로 설계하였다.

송신부 광계통의 설계제원은 표 1과 같고 각수차(angular aberration) 특성과 광로차(optical path difference)를 차례대로 그림 2(a)와 (b)에 제시하였다. 여기서 그림의 scale이 각수차는 0.2 milli radian이고 광로차는 0.001 mm이다. 그림에서 보는 바와 같이 송신부 광계통에서 중요한 각수차 특성은 레이저 발진기에서부터 방출되는 레이저광의 발산각의 약 1/10에 해당하므로 요구조건을 충분히 만족한다.

### IV. 수신부 광계통 설계

수신부는 송신된 레이저광속이 대기오염층에 의해 반사 및 산란되어 되돌아오는 광속을 받아 그 강도를 측정하기 위한 것으로서 결상망원경 대물경 보다는 분해능이 떨어져도 무방하다. 가공의 편의성과 경제성을 고려하여 Newtonian형으로 설계하였고 평면경은 수신과 송신에 공통으로 사용할 수 있도록 배려하였다. 제1주 반사경은 구면만으로는 도저히 구면수차를 제거할 수 없으므로 포물경을 채택하였다. 많은 반사광을 받으려면 되도록 제 1주 반사경의 직경을 크게 할수록 좋겠지만 이동형 LIDAR의 전체적인 크기의 제한으로 유효경을 300 mm로 하였다. 광속은 평면경을 이용하여 검출기로 집속하였다. 이 때 평면경은 45° 각도로 위치하며 출력 광속을 원형으로 유지하기 위해 장축이 단축보다  $\sqrt{2}$ 배가 되는 타원형으로 사용한다. 따라서 차단되는 광속의 직경은 10.0 mm를 넘지 않도록 하였다. 이동형으로서 차량탑재를 염두에 두고 검출기의 작업공간과 제 2반사경의 크기를 고려할 때 주반사경의 초점거리가 1, 500 mm가 적합할 것으로 판단하였다. 그보다 짧은 경우에는 FOV(field of view) diaphragm 앞에 relay lens를 놓아야 하며 이렇게 되면 계통이 더욱 복잡해진다. 수신광학계의

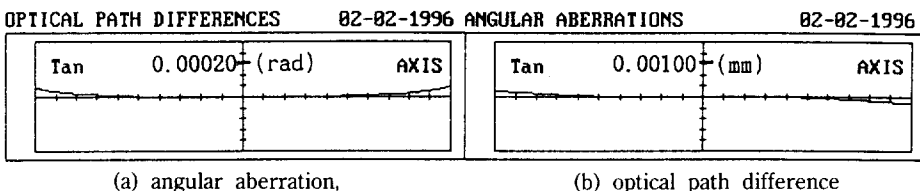
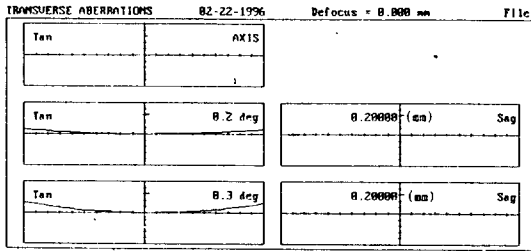
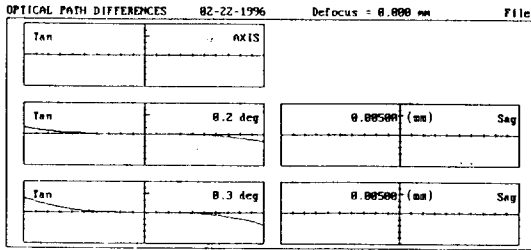


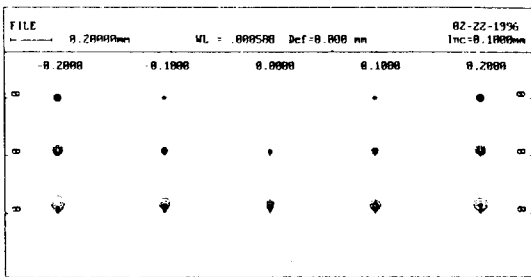
그림 2. 송신광학계의 수차특성.



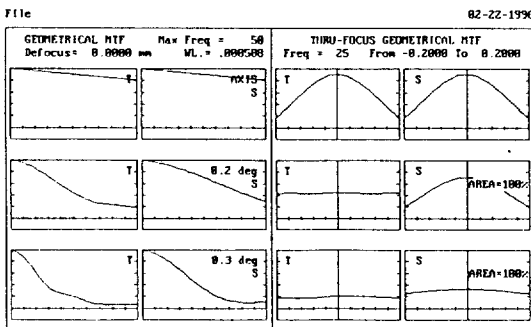
(a) transverse aberration,



(b) optical path difference,



(c) spot diagram,



(d) geometrical MTF

그림 3. 수신광학계의 특성.

transverse aberration, optical path difference, spot diagram 그리고 geometric MTF 등을 그림 3(a), (b), (c) 및 (d)에 각각 제시하였다. 반사경과 rotator로 수신부 광학계 전체를 조정할 수 있으므로 순수하게 수신부 광학계가 어느 고정된 위치에서의 시계각은 크지 않아도 되기 때문에 본 연구에서는 0', 1', 2', 5' 그리고 10', 20'에 대하여 살펴보았다. 그림에서는 0', 10', 그리고 20'에 대해서만 제시하였으나 10'과 20'이 각도로는 0.1666667°, 0.3333333°이므로 소수점 2자리에서 반올림 되어 0.2°, 0.3°으로 표기 되었으며, 모든 단위는 milli meter이다. 그림에서 보는 바와 같이 수직 평행으로 또는 20' 이내의 시계각을 가지며 평행하게 입사하는 광속이 적어도 직경 0.1 mm 이내로 집중되어 회절한계 약 0.2 μm에는 미치지 못하지만 결상계가 아닌 집중기로서는 매우 우수한 수 차특성을 가진다. disk for FOV diaphragms 상의 pin hole의 크기는 시계각에 따라서 직경 0.1 mm, 0.44 mm, 0.88 mm, 2.2 mm 그리고 4.4 mm, 8.8 mm로 제작한다.

### V. 검출기 광학계

대기오염물질 측정에 사용되는 레이저광의 파장은 O<sub>3</sub>에 대하여는 276.0 nm와 280.0 nm, SO<sub>2</sub>에 대하여는 300.05 nm와 301.44 nm 그리고 NO<sub>2</sub>에 대하여는 448.1 nm와 453.6 nm를 사용한다. 따라서 자외선 영역에서 투과율이 좋고 렌즈로서 가공의 편의성이나 내구성 등을 고려하여 소재를 선택하였다. fused silica, MgF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub>, LiF, sapphire 등이 있지만 그 중에서도 국내에서 가공 경험이 많고 사용에도 편리하다고 알려진 fused silica와 sapphire에 관해 조사하였다. 대기오염물질 측정에 사용되는 파장을 포함하여 더 여유있게 색수차를 보정하고자 265.204 nm부터 467.816 nm까지 대표적인 자외선 spectrum선에 대한 굴절률을 분산방정식으로부터 계산하였다. 위 두 물질의 자외선 영역에서의 분산방정식은 다음과 같고 상수는 표 2와 같다. 이 때 파장의 단위는 micrometer이다.

$$n^2 - 1 = A_1 * \lambda^2 / (\lambda^2 - \lambda_1^2) + A_2 * \lambda^2 / (\lambda^2 - \lambda_2^2) + A_3 * \lambda^2 / (\lambda^2 - \lambda_3^2) \quad (3)$$

표 2. 분산방정식의 계수

| 초자명          | A1        | A2        | A3        | 1          | 2         | 3        |
|--------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|----------|
| fused silica | 0.6961663 | 0.4079426 | 0.8974794 | 0.0684043  | 0.1162414 | 9.896161 |
| sapphire     | 1.023798  | 1.058264  | 5.280792  | 0.00377588 | 0.0122544 | 321.3616 |

표 3. fused silica의 굴절률

| 파 장     | 굴절률      | 파 장     | 굴절률      | 파 장           | 굴절률      |
|---------|----------|---------|----------|---------------|----------|
| 265.204 | 1.500029 | 300.050 | 1.487779 | 365.105       | 1.474526 |
| 269.885 | 1.498047 | 301.440 | 1.487390 | 404.656       | 1.469617 |
| 275.278 | 1.495913 | 302.150 | 1.487194 | 435.835       | 1.466693 |
| 276.000 | 1.495639 | 330.259 | 1.480539 | 448.100       | 1.465711 |
| 280.200 | 1.494092 | 334.148 | 1.479763 | 453.600       | 1.464296 |
| 280.347 | 1.494039 | 340.365 | 1.478584 | 467.816       | 1.464292 |
| 289.360 | 1.490990 | 346.620 | 1.477468 | Abbe constant |          |
| 296.728 | 1.488734 | 361.051 | 1.475219 | = 42.8        |          |

표 4. sapphire의 굴절률

| 파 장     | 굴절률      | 파 장     | 굴절률      | 파 장           | 굴절률      |
|---------|----------|---------|----------|---------------|----------|
| 265.204 | 1.756283 | 300.050 | 1.756129 | 365.105       | 1.755949 |
| 269.885 | 1.756259 | 301.440 | 1.756124 | 404.656       | 1.755880 |
| 275.278 | 1.756232 | 302.150 | 1.756121 | 435.835       | 1.755838 |
| 276.000 | 1.756229 | 330.259 | 1.756032 | 448.100       | 1.755824 |
| 280.200 | 1.756210 | 334.148 | 1.756022 | 453.600       | 1.755818 |
| 280.347 | 1.756209 | 340.365 | 1.756006 | 467.816       | 1.755803 |
| 289.360 | 1.756170 | 346.620 | 1.755990 | Abbe constant |          |
| 296.728 | 1.756141 | 361.051 | 1.755958 | = 3658.59     |          |

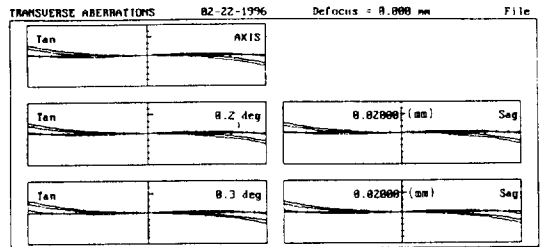
표 5. UV 렌즈의 설계제원 (단위 : mm)

| 면 번호 | 곡률반경  | 간격  | 유효경  | 재질       |
|------|-------|-----|------|----------|
| 1    | 무한대   | 5.0 | 18.0 | sapphire |
| 2    | 226.8 |     |      |          |

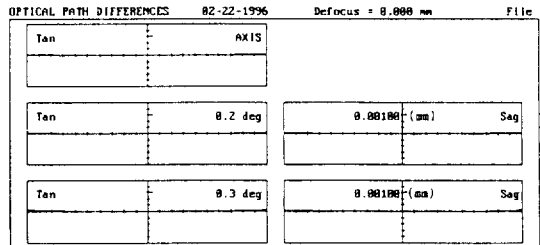
또한 Abbe constant는 301.44 nm일 때의 굴절률에서 1.0을 감하고 이것을 dispersion인 265.204 nm일 때의 굴절률과 467.816 nm일 때의 굴절률차로 나눈 값이다. fused silica의 굴절률을 식 (1)의 분산방정식을 이용하여 계산한 결과와 Abbe constant는 표 3과 같다.

sapphire의 굴절률을 식(1)의 분산방정식을 이용하여 계산한 결과와 Abbe constant는 표 4와 같다.

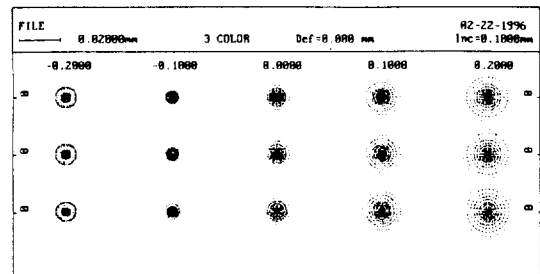
단일 검출기는 photomultiplier로서 유효경이 25 mm의 Na<sub>2</sub>KSbCs 검출기를 사용한다. 수신광학계의 시야각을 조정하는 diaphragm의 위에 굴절렌즈를 사용하여 평행 광을 이루도록하였고 광속분리기를 이용하여 동일한 형태의 두개의 검출기로 분할하였다. 이 때 사용되는 렌즈는 색수차를 고려하여 이중접합렌즈로 설계하려 하였으나 sapphire의 색분산이 매우 작기 때문에 단일 렌즈의 형태로 하여도 앞에서 언급한 UV영역에서 사용하는 데



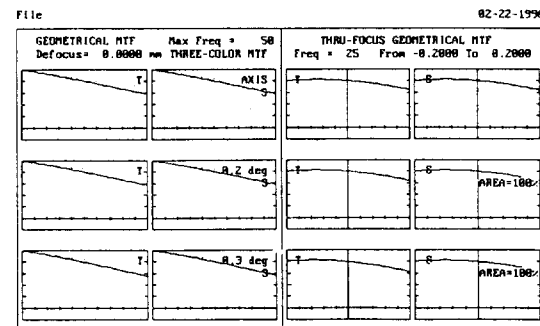
(a) transverse aberration,



(b) optical path difference,



(c) spot diagram,



(d) geometrical MTF

그림 4. 검출기 광학계의 특성.

에 아무 문제가 없다고 판단하였다. 구면수차특성과 제작의 편의성을 고려하여 볼록평렌즈로 하였고, 작업공간과 검출기의 유효경내에 가급적이면 많은 광을 집속하기 위해 초점거리를 가능하면 길게하여 300.0 mm 그리고 유효경을 18.0 mm로 하였다. 렌즈의 제원은 표 5와 같고 광학적 특성은 그림 4와 같다.

그림에서 보는 바와 같이 광선수차가 시계각 20'에서도 0.02 mm 이하이며 파면수차는 0.0002 mm 이하이다. 따라서 FOV diaphragm으로부터 입사하는 수광 레이저광을 검출기에 집속시키는 렌즈의 유효경 18 mm와 시계각 20'일 때의 상의 크기가 4.4 mm이라 할 때 검출기 유효경 25 mm 이내에 집속되므로 전혀 문제가 없다. disk for interference filter에는 필요에 따라서 해당 파장을 투과시키는 간섭필터를 교환하여 사용하도록 설계하였다. 색수차도 transverse aberration과 spot diagram이 파장 265.204 nm, 301.440 nm, 그리고 467.816 nm에 대하여 도시한 것으로 매우 작기 때문에 전혀 문제가 되지 않는다.

### VI. 결 론

본 연구결과 우리나라에서 대기오염측정이나 오존층 측정을 위한 이동형 DIAL system의 LIDAR 개발에 필요한 광학계통의 설계기술이 확립되었고 국내 생산이 가능하게 되었다.

### 감사의 말씀

본 연구는 한국과학재단에서 지원하는 특정기초연구로

수행한 결과이며 본 연구를 위해 물심양면으로 한국과학재단과 경희대학교 레이저공학센터에 감사한다.

### 참 고 문 헌

- [1] E. D. Hinkley ed.: Topics in Applied Physics, vol. 14, Laser Monitoring of the Atmosphere, Springer-Verlag (1975).
- [2] 日本氣象學會編, 氣象研究 노트 115號 라이트(レーザー)と 氣象觀測, 日本氣象學會(1973).
- [3] D. K. Killinger and A. Mooradian ed.: Springer series in Optical Science vol. 39, Optical and Laser Remote Sensing, Springer-Verlag (1983).
- [4] Madison J. Post and Richard E. Cupp, Appl. Opt. 29, 4145-4158(1990).
- [5] 有賀規, 板部敏化, 石津美津雄, 廣本宣久, 高部政雄, 吉門 信, 鈴木良昭, 有本好徳, 高橋鐵雄, 鹿谷元一, レーザ-研究, 17, 102-104, 平成元年 4月

## Optical System Design of a Mobile LIDAR for Air Pollution Research

Kyung Hee Hong

Korea Military Academy, Seoul 139-799, Korea

(Received: March 11, 1996)

A optical system of a mobile LIDAR is designed for air pollution research. After the inverse Cassegrain type collimator, the laser beam falls on the mirror which serve for coinciding optical axis of laser beam and the receiving telescope. Then, it is directed into the atmosphere and back scattered radiation back to the receiving telescope by the scanning mirror. The unit of scanning mirror allows to rotate the mirror along the altitude  $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ , and the azimuth  $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ . The scanning mirror is not connected with the receiving telescope but placed on the roof of the mobile. The received beam is spatial filtered by a spatial filter and collimated by a fabri lens. Thereafter, the beam is divided into 2 channel for registration by a beam splitter. Each laser beam is transformed into an electrical signal by means of the photomultiplier and then processed to be analyzed.