

교란성대기속에서 전파하는 벡토르레이자빔묶음의 편극도 및 퍼짐변화

조종현, 양상철

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《우리는 중요과학기술부문에 힘을 집중하면서 레이자를 비롯한 새로운 과학기술분야를 발전시키며 새로 건설하는 공장들과 기술개건대상들에 최신과학기술을 적극 받아들이도록 하여야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제15권 488페이지)

레이자빔묶음의 중요한 특성량들인 편극도와 빔묶음퍼짐에 대한 연구가 광범히 진행되어 주사식광학현미경검사기술과 레이자절단, 다중통신을 비롯한 여러 분야에서 널리 응용되고있다.[1-6, 12]

지난 시기 빔묶음간섭-편극행렬법(BPC)[2]이 제기되었을뿐만아니라 비근축근사를 리용하여 먼마당에서의 가우스빔묶음의 편극특성[3], 가우스-셸모형빔묶음의 전파방향에 대한 편극도변화[4], 교차스펙트르밀도함수를 리용한 부분간섭성가우스빔묶음의 편극도변화[5], 네꽃잎모양가우스빔묶음의 빔세기분포와 빔묶음퍼짐[7] 등 자유공간에서의 빛의 전파에 대한 이론적연구가 광범히 진행되었다.

또한 자유공간과 무질서한 매질속에서 빔묶음이 전파될 때 편극도변화를 밝힐수 있는 간섭 및 편극에 대한 일원화된 형식론[8]이 제기되었으며 분산 및 흡수매질속에서 부분적으로 편극된 가우스-셸모형빔묶음의 전파와 출력스펙트르에 대한 따다르스끼모형을 적용하여 교란성대기속에서 부분간섭성원천의 편극도변화특성도 밝혔다.[9] 이와 함께 교란성대기속으로 전파되는 부분간섭성빔묶음의 먼마당 편극도변화에 대한 이론적연구도 심화되었다.[10]

론문에서는 교란성대기속에서 벡토르레이자빔묶음세기의 공간분포특성[1]을 리용하여 교란성대기속에서 집초된 레이자빔묶음의 편극도와 빔묶음퍼짐에 대한 표현식을 얻고 그에 대한 해석을 진행하였다.

1. 편 극 도

근축근사의 경우 반경방향으로 편극된 레이자빔묶음의 전기마당벡토르는 다음과 같이 표시된다.[1]

$$E(x, y) = E_1 \mathbf{i} + E_2 \mathbf{j} = E_0 \exp\left[-\frac{ik}{2f} r^2\right] \left\{ \frac{x}{a} \exp\left[-\frac{r^2}{a}\right] \mathbf{i} + \frac{y}{a} \exp\left[-\frac{r^2}{a}\right] \mathbf{j} \right\} \quad (1)$$

여기서 E_0 은 전기마당진폭으로서 상수이며 f 는 집초거리, a 는 가우스빔묶음의 반경, $r^2 = x^2 + y^2$, \mathbf{i} , \mathbf{j} 는 각각 x , y 축방향의 단위벡토르이고 E_1 과 E_2 는 각각 x , y 축방향의 전기마당성분이다.

빛뭍음의 편극도를 계산하자면 다음과 같은 빛뭍음간섭-편극행렬을 계산하여야 한다.

$$\Gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = \begin{pmatrix} \Gamma_{11}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) & \Gamma_{12}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) \\ \Gamma_{21}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) & \Gamma_{22}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 $\Gamma_{\alpha\beta}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z)$ 는 임의의 목표점 z 에서 빛뭍음간섭-편극행렬로서 다음과 같다.

$$\Gamma_{\alpha\beta}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = \langle E_{\alpha}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) E_{\beta}^*(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) \rangle \quad (\alpha, \beta = 1, 2) \quad (3)$$

이 식은 후이겐스-프레넬의 적분공식으로 계산할수 있다.[1]

한편 편극도는 다음과 같이 정의된다.[11]

$$P(\mathbf{r}, z) = \sqrt{1 - \frac{4 \det[\Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}, z)]}{\{\text{Tr}[\Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}, z)]\}^2}} \quad (4)$$

집초면 ($p=0$)에서 빛뭍음간섭-편극행렬원소들은 다음과 같다.

$$\Gamma_{11}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = \left(\frac{E_0}{aq} \right)^2 \left[\left(\frac{an}{2} \right)^2 + \frac{m^2}{q} x^2 \right] \exp \left(\frac{-2}{a^2 q} \mathbf{r}^2 \right) \quad (5)$$

$$\Gamma_{12}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = \Gamma_{21}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = \left(\frac{E_0}{aq^{3/2}} \right)^2 xy \exp \left(\frac{-2}{a^2 q} \mathbf{r}^2 \right) \quad (6)$$

$$\Gamma_{22}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = \left(\frac{E_0}{aq} \right)^2 \left[\left(\frac{an}{2} \right)^2 + \frac{m^2}{q} y^2 \right] \exp \left(\frac{-2}{a^2 q} \mathbf{r}^2 \right) \quad (7)$$

여기서 $p=1-z/f$, $m=2z/(ka^2)$, $n=2\sqrt{2}z/(ka\rho_0)$, $q=m^2+n^2+p^2$ 이다. 그리고 z 는 목표까지의 거리, $k=2\pi/\lambda$ 는 레이자빛파동의 파수, $\rho_0=(0.545c_n^2k^2z)^{-3/5}$ 은 구면파의 간섭길이, c_n^2 은 대기굴절률구조상수이다.

이로부터 빛뭍음간섭-편극행렬의 행렬식의 값을 계산하면 다음과 같다.

$$\det[\Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}, z)] = \frac{E_0^4}{a^4 q^4} \left(\frac{a^4 n^4}{16} + \frac{a^2 n^2}{4} \cdot \frac{m^2}{q} \mathbf{r}^2 \right) \cdot \exp \left(\frac{-4}{a^2 q} \mathbf{r}^2 \right) \quad (8)$$

한편 빛뭍음간섭-편극행렬에 대한 흔적은 다음과 같이 표시된다.

$$\text{Tr}[\Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}, z)] = \frac{E_0^2}{a^2 q^2} \left[\frac{a^2 n^2}{4} + \frac{m^2}{q} \mathbf{r}^2 \right] \exp \left(\frac{-2}{a^2 q} \mathbf{r}^2 \right) \quad (9)$$

식 (8)과 (9)를 식 (4)에 대입하면 다음과 같다.

$$P(\mathbf{r}, z) = \sqrt{1 - \frac{(a^4 n^4 / 4) + (a^2 m^2 n^2 / q) \mathbf{r}^2}{(a^4 n^4 / 4) + (a^2 m^2 n^2 / q) \mathbf{r}^2 + (m^4 / q^2) \mathbf{r}^4}} \quad (10)$$

2. 빛뭍음퍼짐

레이자빛뭍음의 평균세기와 2차뿌리평균2제곱빛뭍음너비, 전파결수 등을 비롯한 교란성대기속에서의 레이자빛뭍음의 2차통계적특성량들은 출력손실 및 수신기의 유효구멍 크기와 밀접히 관련되어있다. 따라서 이런 특성량들에 대한 연구는 실천응용과 관련하여 필수적으로 제기된다.

2차뿌리평균2제곱빛묶음너비는 유효빛묶음크기로서 빛묶음퍼짐을 특징짓는 량이며 그것은 다음과 같이 정의된다.[7]

$$W_j(z) = \sqrt{\frac{2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} j^2 I(x, y; z) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y; z) dx dy}} \quad (j = x, y) \quad (11)$$

교란성대기속에서 전파할 때 집초면에서 평균빛세기분포는 다음과 같다.[1]

$$I(x, y; z) = \left(\frac{E_0}{aq} \right)^2 \left[\frac{a^2 n^2}{2} + \frac{m^2}{q} (x^2 + y^2) \right] \exp \left[\frac{-2}{a^2 q} (x^2 + y^2) \right] \quad (12)$$

식 (12)와 대칭구간에서 짝함수와 홀함수의 적의 적분이 령이라는것, $\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha \xi^2} d\xi = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}$,

$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha \xi^2} \xi^2 d\xi = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \alpha^{-3/2}$ 을 리용하여 식 (11)을 계산하면 다음의 식을 얻는다.

$$W_x(z) = W_y(z) = \sqrt{\frac{2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^2 I(x, y; z) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y; z) dx dy}} = \left(1 + \frac{m^2}{q} \right) a^2 q \quad (13)$$

3. 수값결과와 해석

교란성대기의 영향을 연구하기 위하여 빛묶음의 반경 $a=3\text{cm}$, 파장 $\lambda=1.33\mu\text{m}$, 대기 굴절률구조상수 $c_n^2=10^{-15}\text{m}^{-2/3}$ 으로 설정하고 거리에 따르는 집초된 벡토르레이자빛묶음의 편극도변화를 평가하였다.(그림 1)

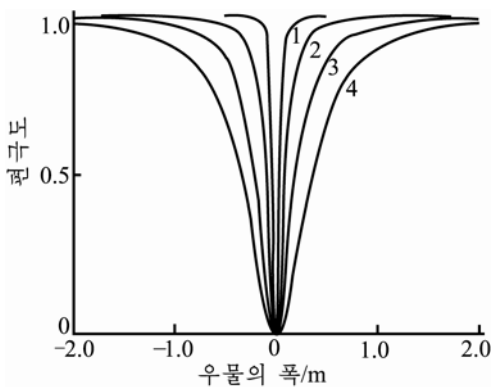


그림 1. 거리에 따르는 편극도변화
1-4는 거리가 각각 2 000, 5 000, 10 000,
15 000m인 경우

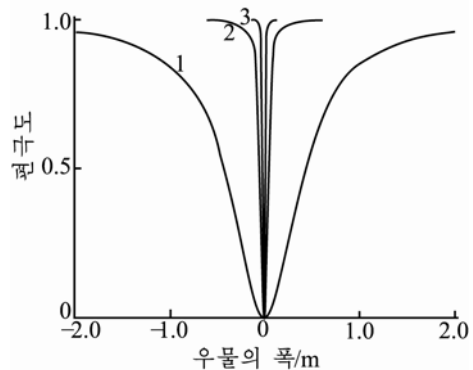


그림 2. 대기굴절률구조상수에 따르는 편극도변화
1-3은 대기굴절률구조상수가 각각
 10^{-13} , 10^{-14} , 10^{-15} 인 경우

그림 1에서 보는바와 같이 빛뭉음이 교란성대기속으로 전파되어나가는 과정에 그것의 영향으로 편극도분포는 우물모양을 가진다. 또한 전파거리가 증가함에 따라 빛뭉음중심근방에서 편극구조가 변하여 우물의 폭이 점차 넓어진다. 이것은 거리가 증가할수록 대기교란효과가 그만큼 커져 편극특성이 나빠진다는것을 보여준다.

또한 $z=2\,000\text{m}$ 에서 대기굴절률구조상수에 따르는 편극도변화를 고찰하였다.(그림 2) 일반적으로 대기굴절률구조상수 c_n^2 은 대기의 온도, 습도, 바람속도 지어는 빛흐름량 및 기액교질립자의 작용 등 대기교란의 영향이 종합적으로 반영된다.

그림 2에서 보는바와 같이 전파거리가 증가할 때와 같이 대기굴절률구조상수가 클수록 편극도분포에서 우물의 폭이 점차 넓어지는 경향이 나타난다. 이것은 대기굴절률구조상수가 클수록 대기교란이 커져 편극특성이 나빠진다는것을 보여준다.

그림 1의 $15\,000\text{m}$ 에서의 편극도변화가 그림 2의 $2\,000\text{m}$ 에서의 편극도변화 ($c_n^2=10^{-13}\text{m}^{-2/3}$,

$a=3\text{cm}$ 의 경우)와 류사한데 이것은 전파거리가 작아도 대기교란의 영향을 심하게 받는다는것을 보여준다.

다음으로 대기굴절률구조상수가 각이할 때 레이자빛뭉음의 전파거리에 따르는 빛뭉음너비변화를 고찰하였다.(그림 3)

그림 3에서 보는바와 같이 전파거리가 증가함에 따라 빛뭉음너비도 증가하는데 이것은 선행연구[13]결과와 일치한다. 전파거리에 따라 빛뭉음너비가 증가하는 현상은 대기굴절률구조상수가 클수록 더 심하게 나타난다. 그것은 빛뭉음의 전파거리가 증가할수록, 대기굴절률구조상수가 클수록 대기교란의 영향이 커지기때문이다.

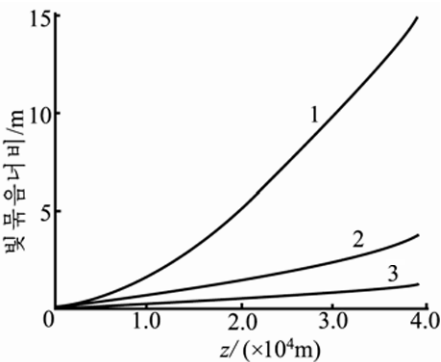


그림 3. 대기굴절률구조상수가 각이할 때 전파거리에 따르는 빛뭉음너비변화
1-3은 대기굴절률구조상수가 각각 10^{-13} , 10^{-14} , 10^{-15} 인 경우

맺는 말

빛뭉음간섭-편극행렬과 확장된 후이젠스-프레넬의 원리로부터 유도한 집초된 벡토르 레이자빛뭉음의 평균빛세기를 리용하여 벡토르레이자빛뭉음의 편극도와 빛뭉음크기에 대한 표현식을 유도하였다.

결과 전파거리가 클수록, 대기굴절률구조상수가 클수록 편극특성이 더 나빠지며 빛뭉음너비도 증가한다는것을 알수 있다.

참고 문헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 63, 5, 45, 주체106(2017).
- [2] F. Gori; Opt. Lett., 3, 241, 1998.
- [3] K. Duan et al.; Opt. Lett., 30, 308, 2005.
- [4] G. Piquero et al.; Opt. Commun., 208, 9, 2002.
- [5] G. P. Agrawal et al.; J. Opt. Soc. Am., A 17, 2019, 2000.

- [6] Fei Wang et al.; Progress in Electromagnetics Research, **150**, 123, 2015.
- [7] J. Li et al.; Progress in Electromagnetics Research, **B 24**, 24, 2010.
- [8] Tatarskii et al.; Radiophys. Quantum Electron., **15**, 1187, 1972.
- [9] E. Wolf; Opt. Lett., **28**, 1078, 2003.
- [10] O. Korotkoba et al.; Opt. Commun., **233**, 225, 2004.
- [11] H. T. Eyyuboglu et al.; Appl. Phys., **B 89**, 91, 2007.
- [12] Yuqian Wu et al.; Progress in Electromagnetics Research, **47**, 141, 2016.
- [13] F. D. Kashani et al.; Proceedings of The 2008 IJAC-IJME International Conference ISBN 978-1-60643-379-9

주제 106(2017)년 12월 5일 원고접수

Variation of the Degree of Polarization and Spreading of Vector Laser Beam Propagating in Turbulent Atmosphere

Jo Jong Hyon, Yang Sang Chol

We obtained the explicit expressions for the degree of polarization and spreading of vector laser beam by using the averaged intensity of the focused vector laser beam derived from the beam coherence-polarization matrix and the extended Huygens-Fresnel principle.

The numerical results show that the larger the propagation distance and the refractive index structure constant of atmosphere is, the more the polarization is degraded and the larger the beam width is increased.

Key words: degree of polarization, beam spreading, vector laser