

대기 편광 측정을 위한 물리량 도출 및 대기 오염 물질과의 상관관계

박효건 · 윤형수 · 김은지 · 강동일*

창원과학고등학교, 641-500, 경상남도 창원시 의창구 평산로 159번길

Deriving Physical Quantity for Measurement of Atmospheric Polarization and Its Correlation with Air Pollutants

Hyogun Park, Hyeongsu Yoon, Eunji Kim, and Dongil Kang*

Changwon Science High School, Gyeongnam 641-500, Korea

Abstract: For the purpose of recording polarization of the earth's atmosphere, the entire sky was photographed using the all-sky camera when the Sun was just above the horizon. The ratio and width of polarization were defined using the photograph, and a method to measure them was developed. Time-series photography of the polarization ratio and its width enabled us to qualitatively analyze the polarization phenomena which changes depending on the weather conditions. Findings indicated that polarization was co-related with air pollutants in a meaningful way. The polarization phenomena of the Earth's atmosphere are influenced by air pollutants. The more air pollutants exist in the air, the lower polarization ratio and the bigger polarization width it has. It is suggested that air pollutants disperses more photons, which makes it possible to observe the polarization phenomena in the vast area of the sky.

Keywords: polarization, particulate matter

요약: 지구 대기에서의 편광 현상을 촬영하기 위해 태양이 지평선에 걸친 순간 편광필터와 전천 카메라를 이용하여 전천 사진을 촬영하였다. 사진으로부터 편광 현상에서의 편광비와 편광폭을 정의하고 이를 측정하는 방법을 개발하였다. 편광비와 편광폭의 시계열 촬영을 통해 기상 조건에 따라 매일 달라지는 편광 현상을 정량적으로 분석할 수 있게 되었고, 이것이 기상 요소 중 대기 오염 물질과 의미 있는 상관 관계를 보이고 있다는 것을 확인하였다. 대기 편광 현상은 대기 중 대기 오염 물질의 영향을 받는데 오염 물질이 많을수록 편광비는 작아지고 편광폭은 커지는 경향을 보였다. 이는 오염 물질이 광자를 더욱 산란시켜서 편광 현상을 관찰하는 하늘의 넓은 영역으로 퍼지게 하는 효과인 것으로 추측한다.

주요어: 편광, 미세먼지

서론

대기에서의 광학적 현상

지구의 대기는 ‘하늘색’이라는 고유의 색으로 명명되듯이 색으로 관찰되는 뚜렷한 특징이 있다. 맑은 날 낮의 청명한 하늘색은 눈부시게 아름답지만 맑은

날 낮이라 할지라도 기상 조건과 계절에 따라 하늘의 색감은 달라진다. 뿐만 아니라 아침과 저녁에 보이는 노을은 태양으로부터의 각거리와 고도에 따라서 저마다 다른 색을 보이며 태양이 저물어 감에 따라 시시각각으로 화려하게 달라진다. 이것은 우리에게 매우 익숙한 현상으로 지구 대기를 통과하는 태양광의 산란과 흡수로 어렵지 않게 설명될 수 있다. 아주 많은 공기 입자들로 구성된 지구 대기는 전기쌍극자로서의 성질 때문에 태양광을 흡수한 뒤에 다시 방출하는 산란을 하는데, 이 과정에서 파장이 긴 빨간색보다 파란색의 산란을 더 잘 일으킨다. 레일리 산란(Rayleigh scattering)이라고 하는 이 현상은 전기쌍극자가 산란시키는 빛의 평균 에너지를 $\langle I \rangle$ 라 할 때 다음과 같이 표현할 수 있다.

*Corresponding author: kang_dong_il@naver.com

Tel: +82-55-711-2376

Fax: +82-55-298-0263

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

$$\langle I \rangle \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

위 식은 파란색 빛이 잘 산란되고 따라서 다른 색깔에 비해 돋보이게 된다는 것으로 파란 색의 하늘을 잘 설명해 준다. 반면, 아침과 저녁에 대기를 통과하는 태양광의 광학적 경로가 길어지면 파란 색은 도중에 거의 산란되어 사라지고 보다 긴 경로를 전해 온 붉은 색을 관찰하게 될 확률이 높아져 붉은 노을을 보게 되는 것이다.

레이리 산란은 대체로 빛의 파장에 비해 훨씬 작은 공기나 에어로졸에 의한 산란을 설명하는데, 공기 중에는 빛의 파장과 비슷하거나 더 큰 에어로졸도 많이 분포한다. 이러한 입자들은 파장과 관계없이 거의 균일하게 빛을 산란시켜 하늘을 뿌옇게 보이게 한다. 이러한 현상을 미 산란(Mie scattering)이라 한다. 대기 중의 미세 먼지는 10 μm 보다 작은 것이 문제가 되는데 이런 경우에도 태양광의 파장 범위인 300-3000 nm에 비해서는 훨씬 크기 때문에 대기에서의 미 산란은 생활과 밀접한 관련이 있다.

대기의 광학현상은 이 뿐만 아니라 고도에 따라 달라지는 공기의 밀도와 이로 인한 굴절률 차이로 인해 신기루 현상이나 일몰과 일출 때의 태양의 모양을 납작하게 보이게 하기도 한다. 또 대기 중의 물 방울과 빙정은 아름다운 무지개를 만들기도 하고 그 외에도 권층운과 고층운 등의 구름이 있을 때 태양이나 달을 보면 그 주위를 둘러싸고 있는 듯한 고리로 관측되는 광환(光環, corona), 거대한 화산 분출에 의해 성층권에 유입된 화산성 황산 에어로솔에서 생기는 비숍고리(Bishop's ring)와 같은 현상도 가끔 관찰되기도 한다.

잘 관찰되지 않지만 높은 산에서 태양을 등지고 구름을 보았을 때 머리 주변 그림자에 보이는 광륜을 일컫는 브로켄 요괴(Brocken-specter)나, 얼음 결정에 의한 빛의 굴절로 나타나는 무리(halo), 그리고 해기둥(sun pillar), 무리달테(parhelic circle) 등 다양한 것들이 있다(Kim and Kim, 2002).

지구 대기에서 나타나는 태양광의 이러한 현상들은 하늘색과 노을만큼이나 빈번히 일어나는 것도 있고 무지개만큼 가끔 보이는 것들, 그리고 브로켄의 요괴 처럼 평생 한 번 볼까 말까 한 것까지 매우 다양하지만 이 모든 것이 지구 대기를 구성하는 공기와 에어로졸, 빙정 등이 태양광과 서로 상호작용하여 나타난 가시적인 효과이다.

대기에서의 편광 현상

반면에 실제로 일어나고 있지만 우리 눈으로는 관찰되지 않는 비가시적인 현상이 있는데 대표적인 것이 지구 대기의 편광 현상이다. 1669년, 덴마크의 내과 의사이기도 했던 과학자 바톨리누스는 아이슬란드의 섬광석(spar) 결정을 관찰하다가 처음으로 복굴절 현상을 발견하였다. 이후 프랑스의 물리학자 말뤼(Etienne Louis Malus)는 1808년에 복굴절을 하는 전기석 결정으로 창문에 반사된 태양을 관찰하던 중에 특정한 각도에서 태양이 보이지 않는 현상을 발견하고 편광에 대한 개념을 정립한다.

편광은 진행방향과 직각으로 진동하는 횡파로서의 전자기파인 빛이 특정한 방향으로만 진동이 제한되는 현상이다. 이듬해인 1809년에 프랑스의 천문학자 아라고(Francois Arago)는 이러한 편광 현상이 하늘에서도 일어난다는 것을 확인하였다. 이것은 쉽게 확인할 수 있는데 편광 필터를 눈에 가까이 대고 하늘을 보면서 천천히 회전시키면 필터가 회전함에 따라 특별한 각도에서 하늘의 일부분이 어두워진다. 이것은 그 부분의 태양 산란광이 편광되어 있어서 편광 필터에서 소광(extinction)되어 어둡게 보이는 것이다(Figs. 2 and 3). 이후의 관측을 통해 편광되는 부분이 태양과의 각거리가 90°인 부분이고 그 부분에서 대략 75% 정도가 편광된다는 것도 확인하였다(Jang, 2009). 이 사실은 역으로 편광 현상으로 인해 하늘에서 소광되는 부분을 찾으면 태양의 방향과 고도, 혹은 방위를 찾는 방법이 될 수 있다. 2차 세계대전 직후 환경학자 프리시(Karl von Frisch)는 꿀벌이 벌집으로 돌아올 때 동료에게 날아갈 방향을 알려주기 위해 '춤 언어'를 사용하고 여기에 하늘의 편광 형태를 알아 볼 수 있는 독특한 눈의 구조를 확인하여 1973년 노벨 생리의학상을 수상하기도 하였다(Jang, 2009). 대기의 편광을 감지하고 이를 활용하는 동물에 대한 연구는 최근까지도 많이 진행되고 있는데, 대표적인 것인 앞서 언급한 꿀벌과 같은 곤충들의 장거리 비행 메커니즘에 대한 연구(Mandyam, 2011), 혹은 갑오징어와 같은 어류의 편광 감광 능력에 대한 연구(Nadav et al., 1996) 등이 그것이다. 이러한 연구들은 최근의 고분해능 현미경을 이용해서 세포 수준에서의 해부학적 설명이 가능해졌다.

하지만 대기에서의 편광 현상이 정작 사람에게 관찰되지 않는 현상이라 우리의 입장에서는 그다지 중요하지 않게 치부되어 왔고, 편광 현상의 신비로움은

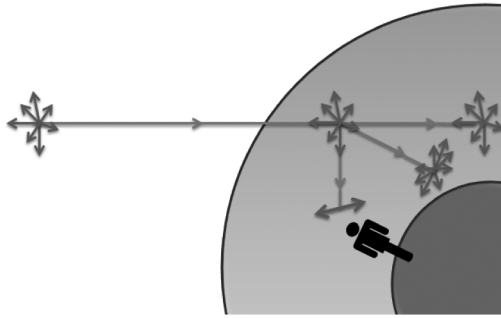


Fig. 1. The reason why we can see polarized sun light.

실험실에서만 다루어지는 것으로 인식되어 왔다.

대기에서 일어나고 있는 편광 현상을 연구자들은 편광 필터를 이용해서 이미 관찰하여 왔고 매일 조금씩 달라진다는 것을 경험적으로 알아왔다. 본 연구에서는 이러한 대기의 편광 현상을 좀 더 체계적으로 연구하고 측정해서 계량화 하자는 데에 그 목적이 있다. 우선 대기에서의 편광 현상이 발생하는 원리를 간단히 알아보자.

대기에서의 편광 현상의 물리적 과정은 다음 Fig. 1과 같이 설명된다. 지구에 입사하는 태양광은 모든 방향으로 진동하는 횡파로서의 전자기파이다. 이 전자기파가 대기 입사해서 공기 분자들과 만나게 되는데, 공기 분자들이 전기 쌍극자의 성질을 갖고 있으므로 공기 분자 하나에서 산란된 빛은 Fig. 1에서와 같이 한 방향으로만 진동하는 빛을 내어 놓는다. 이 빛을 원래 태양광 경로의 직각 방향에서 관찰하면 선형편광된 형태로 관찰되는 것이다(Kim and Lee, 2009). 물론 태양광 경로의 직각 방향으로부터 멀어질수록 편광 현상은 점점 줄어드는 것으로 관측된다.

대기에서의 편광 현상이 기하광학적으로 위와 같이 설명되지만 이러한 현상이 육안으로 직접 관찰되거나 우리 생활에 미치는 영향이 별로 없는 이유로 이에 대한 체계적인 연구는 진행되지 않았다. 단지 태양으로부터 90° 각거리에서 편광이 최대 일어나고 흐린 날보다는 맑은 날 편광 현상이 더 잘 일어난다는 정도의 설명만이 있을 뿐이다(Jang, 2009).

본 연구에서는 아직 정량적으로 측정된 바 없는 대기 편광현상을 체계적으로 연구할 수 있는 대기편광인자를 도출하고, 장기 관측을 통해 이 대기편광인자들이 어떤 변화의 패턴을 보이는지 확인하고자 하였다. 특히 이러한 대기 편광 현상을 지속적으로 관

찰해 보면 기상에 따라 체계적인 변화의 패턴을 볼 수 있었는데, 도출해 낸 대기편광인자와 기상학적 요소와의 상관관계를 알아내고자 하였다.

기기 및 사진 촬영

대기에서 일어나는 편광 현상을 관측하기 위해 전천(all sky)을 촬영할 수 있는 카메라를 이용하기로 했다. 이를 위해 Canon의 DSLR 카메라(EOS 5D mark-II)와 어안렌즈(EF 8mm F4L Fisheye USM), 편광 필터(HOYA CPL)를 준비하였다.

대기 편광 현상은 태양으로부터 90°되는 각거리에서 최대 일어나므로 이를 사진 촬영하기 위해서는 태양의 고도가 낮아야 한다. 또한 태양의 고도가 낮을수록 편광 현상이 보다 선명하게 관찰된다는 것을 이미 경험해 왔기 때문에 태양이 일정한 고도에 있을 때 촬영을 하도록 하였다. 여기에서는 역시(KASI, 2012; KASI, 2013)에서 촬영 지역의 일몰 시각을 확인하여 태양의 고도가 0°일 때 촬영하도록 하였다.

카메라는 창원과학고등학교의 과학동 옥상의 고정된 자리에서 사진의 중심이 천정(zenith)을 향하도록 하여 어안렌즈를 통해 전천을 촬영하였다. 하지만 지평선 부근은 촬영지 주변의 건물과 산에 가려서 촬영한 사진에 태양이 찍히지는 않았다. 이후에 설명될 자료처리 과정에서 태양의 위치를 알아야 하므로 사진에는 나오지 않지만 촬영된 사진에서 태양이 항상 아래 부분에 위치하도록 하기 위해 매 촬영시 태양의 방위각을 확인하고 카메라가 그 방향을 향하도록 하였다.

촬영시 편광 필터의 편광 방향이 대기의 편광 방향과 직교할 때 편광 현상이 가장 최대를 보이고, 이 각도로부터 90°를 회전하면 편광이 관측되지 않는다. 우리는 최대 소광된 사진과 소광이 되지 않은 사진을 동시에 촬영하고 이 두 사진으로부터 편광에 의해 소광된 정도를 알아내고자 하였다. 편광 필터가 최대 소광을 보이는 방향은 육안으로 최초 확인하였고, 이 때 편광 필터에 대한 태양의 방향을 카메라에 표시해 두었다. 이후로 카메라에 표시해 둔 태양 방향이 태양을 향하도록 하고 사진 촬영을 하여 최대 소광을 보이는 각도를 육안으로 확인할 때의 오차가 없도록 하였다.

Fig. 2는 대기의 편광 방향과 편광 필터의 방향이 직교하고 있는 것으로 태양으로부터 90° 부근 하늘이 가장 많이 소광되어 보이는 반면, Fig. 3에서는 대기

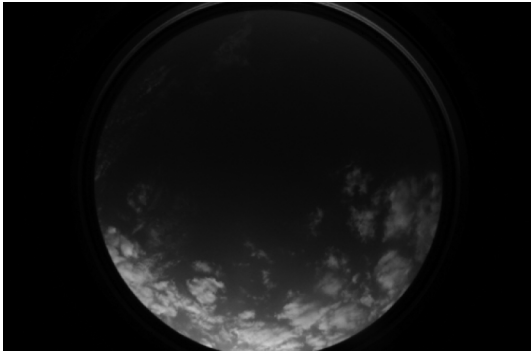


Fig. 2. Maximum polarized all sky image.

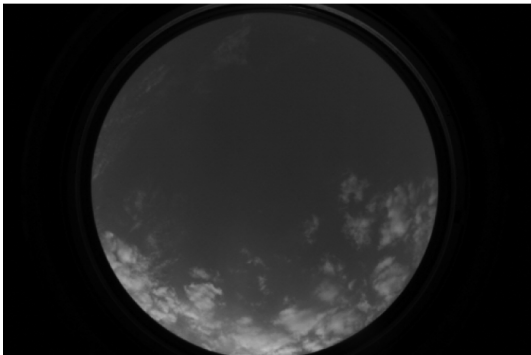


Fig. 3. Minimum polarized all sky image.

의 편광 방향과 편광 필터의 편광 방향이 나란하므로 전혀 소광 현상이 관찰되지 않고 있다. 편이상 이후로 Fig. 2와 같이 촬영한 사진을 O(orthogonal, 직교) 이미지, Fig. 3과 같이 촬영한 사진을 P(parallel, 평행) 이미지라 부르기로 한다.

촬영한 사진은 천정을 향하고 있고 태양은 사진 아래쪽 고도 0°인 곳에 위치하고 있다. 어안렌즈의 실제 화각이 140° 정도이므로 사진의 둥근 테두리는 천정으로부터 각거리 70° 정도 되는 고도, 즉 지평선으로부터 고도 20°인 하늘이다.

촬영은 맑은 날 일출과 일몰시에 하였으며 O 이미지를 찍은 직후에 시간차가 거의 없도록 곧바로 P 이미지를 찍는다. 촬영기간은 2012년 10월부터 2013년 4월에 이르는 기간 동안 50일 정도 촬영하였으며 기상 상태가 좋지 않았던 날을 제외하고 약 30쌍(O, P) 정도의 사진을 확보 하였다. 촬영 기록은 부록에 표로 정리해 두었다.

다음 장에서는 한 쌍의 O-P 이미지로부터 대기의 편광 여부를 정량적으로 다루는 자료처리 방법을 설명한다.

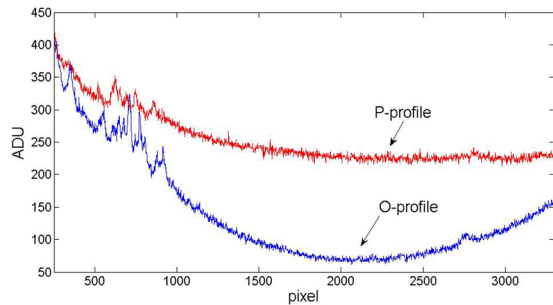


Fig. 4. Line profiles cut from image O and P.

자료처리

등근 하늘 이미지(Figs. 2 and 3)의 맨 아래 부분은 태양이 있는 방향의 고도 20° 부근이고 가운데가 천정이다. 이 이미지를 세로 방향으로 자른 단면을 그래프로 나타내면 Fig. 4와 같다. 이미지를 세로로 자른 것은 태양과 천정, 그리고 반대편 지평선을 가로지르는 단면을 통해 태양으로부터의 각거리에 따른 편광 현상을 조사하기 위한 것이다.

Fig. 4의 P-profile은 P 이미지로부터 잘라낸 단면 그래프이고, O-profile은 O 이미지로부터 잘라낸 것이다. 그래프의 가로축은 화소(pixel)인데 왼쪽이 태양이 있는 방향이고 전체 화소(3300 pixel)의 절반인 1650번째 화소가 천정 방향이고 커질수록 태양의 반대편 지평선 방향이다.

그래프의 세로축은 ADU(analog to digital unit)로서 이미지 화소에 기록된 피사체의 세기 값(intensity)을 의미한다. 즉 이 값이 클수록 하늘은 밝다.

태양이 비추고 있는 하늘은 천정 방향이 더 밝을 것으로 생각되지만 태양 부근을 제외하고는 지평선에 가까울수록 하늘은 더 밝다. 이것은 태양광이 산란되어서 보이는 대기의 투과대기량이 더 많은 지평선일수록 더 많은 태양광이 산란되어서 우리 시선에 들어오기 때문이다. 따라서 Fig. 4와 같이 하늘을 가로지르는 방향의 세기를 나타내는 그림은 일반적으로 아래로 오목한 모양이 되고 지평선 중에서는 태양이 있는 쪽이 좀 더 밝다.

Fig. 4의 두 단면 그래프는 지평선 부근에서 천정으로 갈수록 밝기의 차이가 커지고 있다. 동일한 편광 필터를 통과한 태양 산란광임에도 불구하고 세기가 차이 나는 것이 그 방향에서의 편광에 의한 효과이다. 이 편광된 값이 원래 하늘 밝기에서의 비율을 계산하기 위해서 O-profile을 P-profile로 화소대 화소로 나눈 값을 1에서 빼고 이를 D-profile (divided

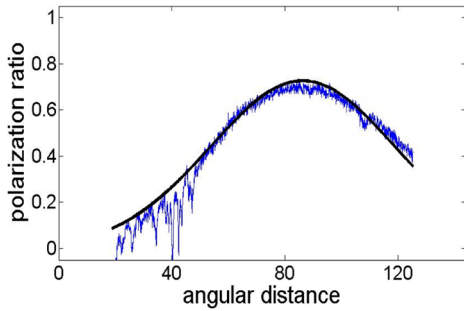


Fig. 5. Divided profile of O-profile by P-profile. Solid curve: Gaussian fitted curve of divided profile.

profile) 이라 하자.

$$D_{prof}(i) = 1 - \frac{O_{prof}(i)}{P_{prof}(i)}, \quad i = 1 \sim 3300$$

D-profile의 정의에서 보듯이 이 값은 해당 화소에서 하늘의 밝기에 대해 얼마나 편광되었는지를 나타내는 지표로 삼을 수 있다. 이 값은 본 연구에서 새로 정의한 주요한 물리량으로 지금부터는 이를 ‘편광비(polarization ratio)’라는 용어로 부르기로 한다.

Fig. 5에 D-profile, 즉 편광비의 그래프를 그렸다. 한편, 여기서 화소단위의 가로축은 특별한 의미가 없기 때문에 화소대 각거리(angular distance)를 측정하여 가로축을 태양으로부터의 각거리로 환산하였다. 세로축은 O, P 한 쌍의 사진과 앞에서 정의한 편광비이다.

그림에서 편광비의 최대값이 대략 0.7 정도인데 이것은 원래 하늘의 밝기에 대해 70% 정도가 편광되었음을 의미한다. 만일 이 값이 1이라면 그 부분은 편광 필터로 촬영했을 때 완전히 어둡게 보일 것이다.

대기 편광 현상은 태양으로부터 각거리 90° 부근에서 최대이고 이로부터 멀어질수록 점점 줄어들기 때문에 편광비 그래프의 개형은 다음과 같이 종모양의 가우스 함수가 된다.

$$D(\theta) = \alpha \exp \left\{ - \left(\frac{\theta - \beta}{\sigma} \right)^2 \right\}$$

위 식에서 보듯이 α 값은 편광비 함수 중심값으로서 편광이 최대로 일어나고 있는 지점의 편광비이다. 이를 ‘최대 편광비(maximum polarization ratio)’라고 정의한다. 한편 β 는 최대 편광비를 보이는 곳의 태양과의 각거리이다. 그리고 σ 는 편광비 함수의 폭으로서 여기에서는 이를 ‘편광폭(polarization width)’으

로 정의한다. 실제로 관측해 보면 α, β, σ 의 값이 기상 조건에 따라서 조금씩 달라지는 것을 경험적으로 확인한 바 있다. 본 연구에서는 세 물리량 중에서 α, σ 즉 최대편광비와 편광폭의 변화 양상에 대해서만 다루기로 하였다.

이제 우리는 대기에서의 편광 현상을 정량적으로 다룰 수 있게 되었다. 우리의 경험에 의하면 기상에 따라서 위 변수들이 체계적인 변화를 보여 왔다. 그러므로 매일 태양의 고도가 0°일 때 최대편광비와 편광폭 값이 대기 오염 물질이나 기상요소와 어떤 상관관계를 보이는지 확인해 보고자 한다.

우리는 대기 편광에 의한 물리량과 동시에 획득한 대기 오염 정보와 기상요소의 상관관계를 확인하였다. 관측 자료는 창원과학고등학교에 설치된 자동기상관측 시스템의 관측 결과, 창원기상대의 관측 자료, 그리고 한국환경공단의 대기오염측정망으로부터 얻은 자료를 활용하였다. 다음 장에서는 최대 편광비와 편광폭이 대기 오염 물질에 대해 보이는 상관관계를 제시한다.

대기 오염물질과의 상관관계

Fig. 6은 창원기상대로부터 얻은 시정(가시거리, visibility) 자료와 한국환경공단의 대기오염측정망으로부터 얻은 대기 오염 물질 중, 미세먼지(PM10)에 따른 최대 편광비와 편광폭의 변화량을 나타낸 그래프이다.

그래프 A는 가시거리(visibility)에 대한 최대 편광비의 변화를 나타낸 것이다. 가시거리는 기상대에서 일정한 시각에 측정된 시정을 km 단위로 나타낸 것으로 이 값이 클수록 대기가 맑아서 멀리 볼 수 있음을 뜻한다. 그래프에서 볼 수 있듯이 최대 편광비는 가시거리가 멀수록 대체로 증가하였다. 촬영 기간 중 가장 맑은 날의 경우에는 최대 편광비가 0.63으로 편광 필터를 통해 바라 본 하늘의 밝기가 63% 소광되어서 어둡게 보였다.

B는 가시거리에 대한 편광 폭을 나타낸 것으로, 여기서 편광폭은 위 가우스 함수식에서의 σ 에 해당하는 값으로 단위는 도(°)이다. 가시거리가 멀수록 편광폭이 좁아지는 것을 볼 수 있다. 즉, 대기가 깨끗하고 맑을수록 편광은 좁은 영역에서 또렷하게 나타난다.

C는 한국환경공단의 대기오염측정망으로부터 확인한 PM10(particulate matter 10)에 대한 최대 편광비

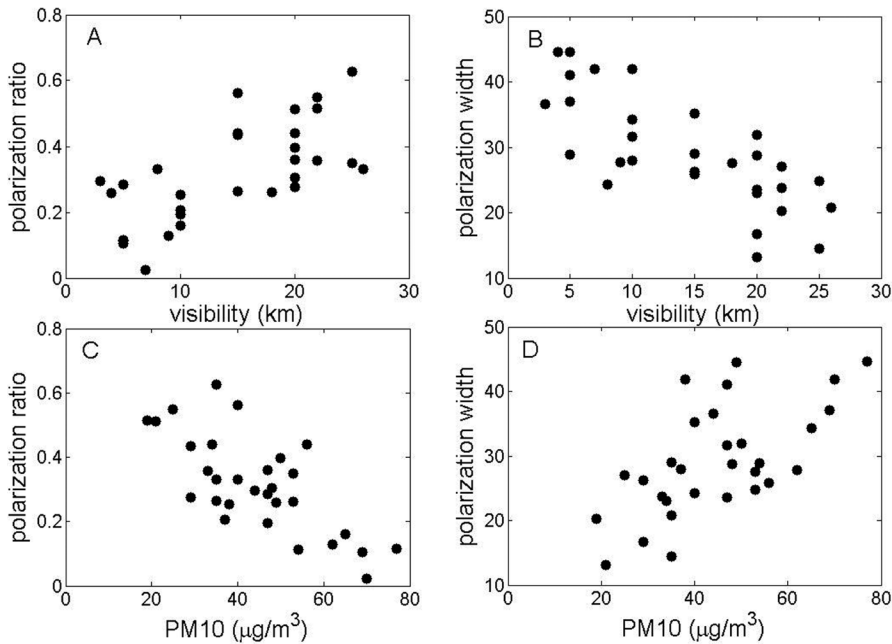


Fig. 6. Variation of polarization ratio and polarization width according to visibility and PM 10.

그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 대기 중 미세먼지의 양이 증가할수록 대기 편광 현상은 약해지는 것을 볼 수 있다.

D는 미세먼지 PM10에 대한 편광폭 그래프이다. 대기 오염 물질 중 미세먼지가 증가할수록 대기 편광폭이 넓어지는 것을 볼 수 있다.

위 결과는 이 연구를 시작하는 계기가 되었던 우리의 관찰 결과와 잘 일치하고 있다. 사진 촬영 장소였던 창원과학고등학교의 옥상에서 편광 필터를 통해서 바라본 하늘은 편광 필터의 회전 방향에 따라서 소광의 정도가 달랐으며, 최대 소광량은 그 날의 날씨에 따라서 눈으로도 직접 확인할 수 있을 정도로 확연히 달라 보였다. Fig. 6의 결과와 같이 청명한 날씨가 될수록 대기 편광 현상은 대단히 뚜렷하게 나타났는데, 그것은 편광의 정도가 강할 뿐 아니라 좁은 영역에서 선명하게 확인할 수 있는 것이었다. 즉 본 연구에서 정의한 물리량을 이용해서 설명하자면, 가시거리가 멀고 대기 중에 오염 물질이 적게 포함되어 있을수록 최대 편광비는 크고 편광폭은 좁아지는 것으로 관찰되는 것이다.

그 외에도 편광비와 편광폭이 다른 기상요소와 갖는 상관관계를 확인하기 위해서 창원과학고등학교의 AWS 관측 기록과 일일이 대조해 보았다. 그러나 기

온, 습도, 기압 등의 다른 기상요소와의 상관관계에서는 뚜렷한 경향성을 발견할 수 없었다.

결론 및 고찰

본 연구는 경험적으로 체득하였던 대기의 편광 현상이 대기 오염 정도와 기상에 따라 세기가 다르게 관찰되는 사실로부터 대기의 편광 현상을 정량적으로 다룰 수 있는 물리량을 정의하고, 대기를 촬영한 사진으로부터 이 물리량들을 추출하여 대기 오염 물질 및 기상요소와 비교, 분석함으로써 대기의 편광 현상이 어떤 상관관계를 갖는지 알아보고자 하는 데에 그 목적이 있었다.

7개월에 걸친 촬영 결과 30개의 최대 편광비, 편광폭 값을 구했고 이를 대기의 가시거리 및 대기 오염 물질 중 미세먼지인 PM10과 비교하여 체계적인 변화가 있다는 것을 확인하였다. 대기의 편광 현상은 거의 매일 관찰되는 현상이지만 기상에 따라서 그 정도가 많이 달랐는데, 대기 중의 미세먼지가 적고 가시거리가 멀수록 그 순간의 대기 편광 현상은 선명하고 강하게 일어난다는 사실을 확인하였다. 그 외에 편광비와 편광폭이 다른 기상요소와 의미 있는 상관 관계를 확인하지는 못했다.

편광비와 편광폭이 미세먼지에 대해서 보이는 변화의 패턴은 평소 편광 필터를 통한 육안관찰의 결과와도 잘 일치하지만 이러한 현상이 일어나는 물리적인 과정은 아직 좀 더 연구가 필요하다. 지구 대기에 입사한 광자는 Fig. 1과 같이 단 한 번의 산란으로 우리에게 관측되는 것이 아니고 두꺼운 대기를 지나는데 동안 수 없이 많은 산란 과정을 거쳐 오게 된다. 이 과정에서 미세 먼지가 없이 맑은 날에는 좁은 영역에서 강하게 일어났던 편광 현상이 미세 먼지가 많을 때는 약해지면서 그 폭도 넓어지게 되는 것으로 추정한다. 이것은 대기 중에 더욱 많이 포함된 미세 먼지가 광자를 더욱 산란시켜서 편광 현상을 관찰하는 하늘의 보다 넓은 영역으로 퍼지게 하는 효과인 것으로 조심스레 추측한다. 이러한 내용은 이어지는 연구를 통해서 좀 더 진행해 보고자 한다.

후속 연구에서는 좀 더 장기간의 촬영을 통해 미세먼지와 편광 현상과의 상관관계를 좀 더 뚜렷이 확인하고 통계적인 오차도 줄여서 두 물리량 사이의 관계를 설명하는 함수를 도출하고자 한다. 이것이 가능하다면 대기 편광 촬영만으로 상층 대기의 미세 먼지 농도를 추정할 수 있는 근거로 삼을 수도 있을 것으로 기대한다. 그리고 봄철 우리나라에 영향을 미치는 황사에 대한 기존의 연구 방법에 추가하여 보다 입체적인 연구로도 접근할 수 있는 관측 방법이

될 수도 있을 것으로 생각한다.

한편으로는 좀 더 엄밀하고 세밀한 관측으로, 이미 연구되고 있는 곤충과 어류의 장거리 이동과 방향 설정의 근거가 되는 대기 편광 현상에 대한 연구 활동과 연계하여서 진행할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- Korea Astronomy and Space Science Institute, 2012, The almanac, Daejeon, Korea, 229 p. (in Korean)
- Korea Astronomy and Space Science Institute, 2013, The almanac, Daejeon, Korea, 229 p. (in Korean)
- Jung, G.A., 2009, Why is the sky blue?, Ichi, Seoul, Korea, 414 p. (in Korean)
- Kim, H.J. and Lee, H.J., 2009, Theory of physical optics, Daehaksurim, Seoul, Korea, 326 p. (in Korean)
- Kim, Y.S. and Kim, G.I., 2002, Atmospheric optics and Radiation, Sigma Press, Seoul, Korea, 186 p. (in Korean)
- Mandyam, V. Srinivasan, 2011, Honeybees as a model for the study of visually guided flight, navigation, and biologically inspired robotics. *Physiol Rev*, 91, 413-460.
- Nadav Sharshar, Phillip S. Rutledge, and Thomas W. Cronin, 1996, Polarization vision in cuttlefish-A concealed communication channel? *The Journal of Experimental Biology*, 199, 2077-2084.

2013년 5월 17일 접수
2013년 5월 29일 수정원고 접수
2013년 6월 14일 채택

Appendix. Physical quantity and meteorological elements of observed day.

Date	Polarization ratio	Elongation to the sun (°)	Polarization width (°)	Visual range (km)	Humidity (%)	Particulate matter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2012.10.08	0.5122	104.8	13.16	20	53	21
2012.10.15	0.3056	92.45	28.76	20	59	48
2012.10.29	0.6268	96.02	14.48	25	51	35
2012.10.31	0.5629	86.63	35.2	15	38	40
2012.11.17	0.2853	86.2	41.08	5	42	47
2012.11.19	0.2635	85.22	28.97	15	29	35
2012.11.27	0.5491	101	27	22	47	25
2012.11.29	0.2529	87.8	41.92	10	22	38
2012.12.04-1	0.3972	96.26	31.95	20	41	50
2012.12.04-2	0.3306	91.46	20.75	26	24	35
2012.12.06	0.3589	97.02	23.54	20	63	47
2012.12.07	0.1941	107.6	31.67	10	59	47
2012.12.24-1	0.4395	93.2	25.87	15	49	56
2012.12.25	0.3565	94.34	23.75	22	32	33
2013.01.07	0.5154	89.3	20.24	22	41	19
2013.01.08	0.4351	92.83	26.29	15	40	29
2013.01.10	0.3495	91.27	24.83	25	22	53
2013.01.14-1	0.2953	87.17	36.61	3	77	44
2013.01.14-2	0.3299	92.41	24.29	8	37	40
2013.01.15	0.2584	96.66	44.52	4	67	49
2013.01.25	0.2757	96.87	16.75	20	26	29
2013.01.28	0.4394	95.46	23.03	20	54	34
2013.01.29	0.129	89.11	27.77	9	67	62
2014.02.25	0.2614	97.79	27.57	18	50	53
2013.03.11	0.2054	102.1	27.91	10	37	37
2013.03.21	0.1599	103.5	34.27	10	45	65
2013.03.21-2	0.1123	94.57	28.94	5	15	54
2013.03.22-2	0.1056	100.3	37.02	5	33	69
2013.04.01	0.02379	90.37	41.92	7	79	70
2013.04.08	0.115	116.1	44.61	5	48	77