《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Volume 25, Number 1, February 2014
DOI: http://dx.doi.org/10.3807/KJOP.2014.25.1.001

Calculation of Multiple Scattering in Water Cloud and Application in Remote Measurement of Cloud Physical Properties

Dukhyeon Kim[1†], Sunho Park[2], and Sungcheol Choi[2]

[1]*Division of Cultural Studies, Hanbat National University, San 16-1, Dukmyung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-719, Korea*
[2]*SOLETOP Inc., 2nd Floor, 59-5, Hwaam-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-348, Korea*

(Received November 26, 2013; Revised manuscript December 5, 2013; Accepted December 12 2013)

Multiple scattering effects in cloud are important error sources of the Mie scattering Lidar inversion method, which should be measured to correct the Lidar equation in single wavelength Mie Lidar. We have calculated the multiple scattering effects in liquid water clouds by using a Monte Carlo method, and we have applied these multiple scattering effects in measuring water cloud effective size and LWC (Liquid Water Content). When cloud effective size is less than 2.5 μm, we can easily extract cloud effective size and LWC by using two wavelength Lidar such as extinction coefficients measured at 355nm and 1064nm. For a larger size cloud, we can find that saturated degree of linear polarization is strongly correlated with cloud effective size, LWC, and extinction coefficients. From these correlations we know that we can measure LWC and cloud effective size if we use single wavelength Rotational Raman Lidar and Mie scattering polarization Lidar.

Keywords: Multiple scattering, Water cloud, Lidar, Effective size, Liquid Water Content
OCIS codes: (010.1615) Clouds; (010.1310) Atmospheric scattering; (010.3640) Lidar; (010.7340) Water

구름에서의 다중산란효과 계산 및 이를 이용한 구름 물리변수 원격 추출 방법 연구

김덕현[1†] · 박선호[2] · 최성철[2]

[1]한밭대학교 교양학부
㊞ 305-719 대전광역시 유성구 덕명동 산 16-1번지

[2](주)솔탑
㊞ 305-348 대전광역시 유성구 화암동 59-5번지 2층

(2013년 11월 26일 받음, 2013년 12월 5일 수정본 받음, 2013년 12월 12일 게재 확정)

구름에서의 다중산란 효과는 Mie 산란현상을 이용하는 탄성산란 라이다에서 그 해를 구하는데 있어서, 매우 중요한 오차요인으로 작용하기 때문에 이 효과를 보정하는 것은 그 자체만으로도 매우 중요하다. 이를 위하여 구름에서 다중산란되는 현상을 Monte Carlo 방법으로 계산하였으며, 이 결과를 적용하여 물방울 구름의 총량과 유효입자크기를 추출하는 방법을 제안하였다. 구름의 유효입자 크기가 2.5 μm 이하일 경우엔 355 nm나 1064 nm에서 얻은 두 파장의 소광계수로 쉽게 그 값들을 구할 수 있음을 알 수 있었다. 크기가 큰 경우엔 라이다 신호의 안정화된 선형편광도가 유효입자크기, 총량, 그리고 소광계수와 관련이 있음을 알 수 있었으며, 이 관계를 통하여 큰 입자의 경우에도 라만 라이다와 편광 라이다를 이용한다면 유효입자크기와 총량을 구할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

Keywords: 다중산란, 물방울 구름, 라이다, 유효입자크기, 구름총량
OCIS codes: (010.1615) Clouds; (010.1310) Atmospheric scattering; (010.3640) Lidar; (010.7340) Water

I. 서 론

구름 고도, 구름 입자의 유효입자 크기($\langle r^3\rangle/\langle r^2\rangle$), 물방울 총량(LWC: Liquid Water Content)의 측정은 지구복사에너지 및 태양의 입사광을 차단하는 에너지 균형과 그 효과를 정확하게 산출하고 예측하는데 있어서 매우 중요하며, 또한 물의

†E-mail: dhkim7575@hanmail.net
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

상변화를 통한 물순환 메커니즘을 이해하는 데도 매우 중요한 요소이다. 특히 경계고도 근처에 존재하는 하층의 구름은 지구 복사 측면에서 고체각도(solid angle)가 크고 또 경계고도에서 구름 발생빈도가 잦다는 측면에서 그 중요성이 더욱 강조되고 있다[1].

공기의 오염으로 대기 중의 미세 입자의 수가 많아졌으며, 이는 에어로졸 자체의 산란에 의한 기후학적 영향뿐만 아니라 간접적으로는 구름입자의 크기를 감소시키고, 구름의 알베도를 증가시킨다[2, 3]. 이러한 이유로 구름의 광학적 깊이나, 구름의 입자 크기에 대해 전 지구적으로 많은 연구기관이 연합하여 그 관측이 이루어졌으며[4], LWP(Liquid Water Path)값은 구름에서 복사되는 전파와 태양광의 근적외선(NIR) 혹은 가시광의 반사를 인공위성에서 측정하여 그 값들을 구하고자 노력하였다.

저층 구름 특성을 측정하는 방법 중에서 라이다를 이용하는 방법이 가장 많이 사용되고 있으며, 특히 인공위성에서 측정하는 방법과 혼용하여 많이 사용되고 있다. 그러나 구름에서 다중 산란되는 신호는 라이다 신호를 결정하는 방정식을 복잡하게 만들어 잘 알려진 역산방법 중의 하나인 Klett[5] 알고리즘을 적용할 수 없게 만들고, Wandinger[6]에 따르면 방정식에 그 효과를 반드시 고려하여야 한다. 이러한 효과를 고려하기 위하여 많은 연구가 행하여 졌는데 그 중에서 편광도를 측정하여 그 효과를 보정하는 방법이 Hu[7] 등에 의하여 제안되었다.

물방울 구름의 입자 크기, LWC, LWP등에 대한 정보를 얻기 위하여 많은 노력들이 행하여지고 있는데, 대부분의 경우 라이다와 레이더 즉, 레이더 파장과 광학 영역의 파장, 혹은 라디오메터를 이용하고[8, 9], 라이다 기술과 전파를 이용한 레이더 기술들을 혼용하고 있다. 즉 파장이 긴 레이더의 Rayleigh 산란은 입자의 크기의 6 승에 비례하는 물리량을, 가시광을 주로 이용하는 라이다는 2승에 비례한 소광계수(α:extinction coefficient)를 얻어 유효입자 크기를 환산한다. 또한 공간적인 측면에선, 레이더의 경우 운정에 가까운 곳, 라이다는 운저 부근의 정보를 활용한다[10]. 구름의 휘도(brightness temperature)는 LWP를 추출하는데 사용하고 있으나, 대부분의 경우 어떤 일정한 가정(assumption)에서 계산된 입자크기, 레이더 반사도, 소광계수 등으로 구성된 표(table)를 이용하고 있다[11].

탄성 라이다 시스템을 이용하는 경우, 주로 Klett[5]이 제시한 방법으로 입자 크기의 제곱에 비례하는 소광계수나 후방산란계수를 구하는데, 이때 입자의 크기에 관련된 라이다비(후방산란계수/소광계수)나 라이다 미분방정식의 경계값(boundary value)을 알 수 없기 때문에 곤란하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 NASA의 Whiteman[12, 13] 등의 경우는 라만 라이다 방법을 제시하고 있으며, Luc R. Bissonnette[14, 15] 등은 다중산란 방법을, E. Eloranta 등은 고분해능 라이다(HSRL:High Spectral Resolution Lidar)를 이용하는 방법[16]들을 제안하고 있다. 특히 Bissonnette 등이 제안한 방법은 라이다 신호를 여러 개의 FOV(Field of View) 라이다로 수신하는 비교적 저가의 간단한 장치를 제안하였다. Monte Carlo 계산에 의하면 구름의 특정 깊이에서 라이다 신호는 FOV에 따라 가우시안 형태를 취하게 되고 그 가우시안 함수의 상수값을 찾으면 입자의 크기를 알 수 있다고 제안하였다[17]. 그러나 FOV가 다른 라이다 신호를 시간적 간격(alternatively)을 두고 얻기 때문에 구름의 위치나 고도가 빠르게 변하면 FOV에 따라 다른 구름에 대한 정보를 얻게 되어 그것으로 가우시안 피팅을 하는 효과가 생겨 오차를 유발하는 단점이 있으며 회전하는 원판에 다른 크기의 구멍을 뚫어 그것을 망원경의 초점면에 두어 FOV를 조절하기 때문에 정렬에 의한 오차와 레이저의 램프 동작신호와 Q스위칭 시간을 고려하여 동기 신호 제어용 구멍을 뚫어야 하는 단점이 있다.

본 연구에서는 이러한 단점들을 극복하기 위하여 여러 개의 파장을 동시에 구름에 조사하여 그 특성을 조사함으로써 급변하는 구름에서도 그 특성을 얻고자 하였다. 특히 물방울 구름에서 후방 산란된 신호의 편광특성변화를 관측함으로 구름의 물리적 특성을 찾고자 하였다.

II. 물방울 구름에서의 다중 산란된 라이다 신호 계산

물방울 구름 속으로 진행하는 레이저 빔의 다중산란 효과 계산을 Monte Carlo 방법으로 계산하였다. 구름을 구성하고 있는 입자는 감마크기분포를 하고 있다고 가정하였으며, 그 LWC와 소광계수(α:extinction coefficient)는 아래 식으로 구해진다.

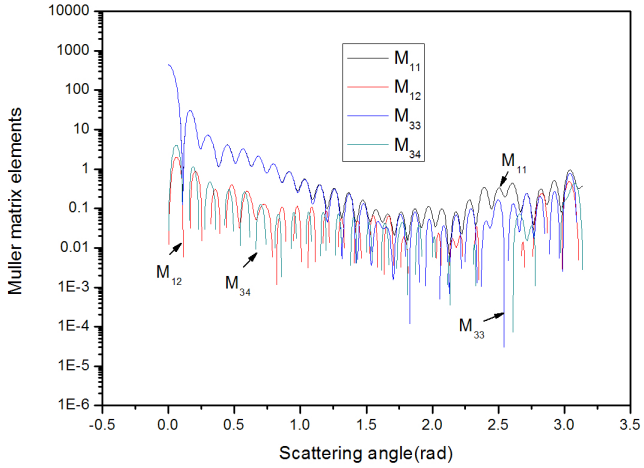
$$LWC = \int_0^\infty \rho_w n(r) \frac{4}{3}\pi r^3 dr = \int_0^\infty \rho_w N_0 r^a e^{-br} \frac{4}{3}\pi r^3 dr \quad (1)$$

$$\alpha = \int_0^\infty n(r) Q(r) \pi r^2 dr \quad (2)$$

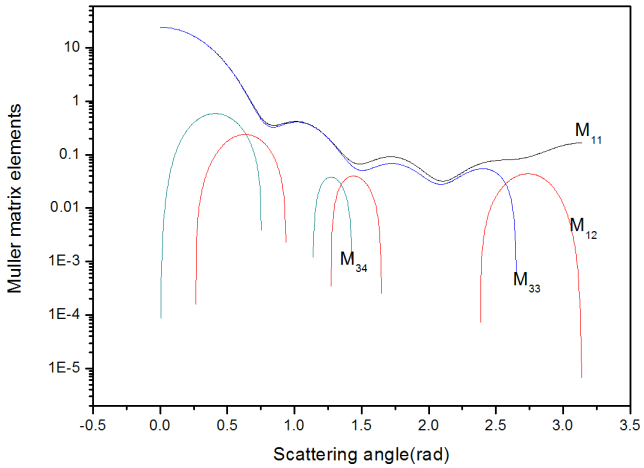
$$r_{eff} = \frac{\int_0^\infty n(r)\, r^3 dr}{\int_0^\infty n(r)\, r^2 dr} \quad (3)$$

여기서 r_{eff}, $n(r)$, $Q(r)$, ρ_w는 각각 유효입자크기, 수정된 감마입자크기분포(modified Gamma size distribution), 소광효율(extinction efficiency), 그리고 물의 밀도를 나타내며, 여기서 지수 값 a,b는 독립적이지 않다.

먼저 지표면에 있던 레이저의 각 광자(photon)가 연직방향으로 진행하는 과정에서 구름을 만나면 거기서부터는 산란이 일어나는데, 구름 표면에서 산란이 일어나 전까지 이동하는 평균이동거리(MPF:Mean free path)와 산란각은 각각 소광계수와 Mie 산란이론에 의하여 결정된다. 상세한 계산과정은 Kim[18], Platt[19], Winker[20], Kumkel[21]등에 의하여 상세히 다루어 졌으며, 그 계산법의 논리적 타당성이 인정되고 검증되었다. 산란이 일어난 빛은 라이다 시스템의 FOV 영역을 벗어나거나, 구름에서 완전히 벗어날 때까지 그 각산란



(a)



(b)

FIG. 1. Scattering angle dependent Muller Matrix characteristics in two different cloud effective size. (a) 0.8 um, (b) 5 um.

경로를 따라 위치와 세기가 추적되고 각 산란지점에서 원래 라이다 시스템이 있는 지점으로 산란될 확률이 계산된다. 이러한 과정이 여러 개의 광자에 대하여 수행되어 각 구름 속의 각 지점에서 산란된 신호가 정해지고 이 값이 라이다 신호의 값이 되며, 각 지점에서 산란된 빛은 그 광량과 함께 산란에 기여하는 Muller Matrix 즉, 편광에 대한 정보도 함께 얻어진다. 그림 1(a), (b)는 각각 532 nm의 파장을 사용하여 유효입자크기가 0.8 μm와 5 μm인 구형 구름 입자에서 산란되는 Muller 메트릭스 요소 M_{11}, M_{12}, M_{33} 그리고 M_{34}를 나타낸 것이다. 본 그림은 모든 유효입자크기가 0.8 μm과 5 μm인 모든 입자분포에 해당하는 모든 입자에서 그 산란 메트릭스를 계산하고, 또한 다중산란효과도 고려하여 합한 것이다. 한번 산란(single scattering)에 의하여 얻어지는 라이다 신호는 편광의 변화가 없으며, 편광은 다중산란에 의한 효과에 의해서 생긴다. 그림에서 4×4 행렬의 수가 제한적인 것은 구형의 경우 Jones 메트릭스에서 S_1, S_2만 0이 아니기 때문이다. 이 경우 $M_{22}=M_{11}$, $M_{33}=M_{44}$, $M_{34}=-M_{43}$, $M_{12}=M_{21}$ 이며 그리고 다른 행렬값은 0이다[22]. 그림에서 알 수 있듯이 입자의 크기가 큰 경우 대부분의 입자가 빛의 진행 방향에 대하여 0 rad 근처로 산란되며 입자가 작아질수록 그 각도가 넓은 범위에 존재하게 된다. 이러한 이유 때문에 다중 산란이 일어나는 경우 작은 입자는 빨리 퍼지게 되고 큰 입자의 경우는 대부분의 산란 빛이 진행방향으로 산란되는 특징이 있다. 각각의 경우 다른 FOV로 라이다 신호를 얻게 되면 다른 특성의 라이다 신호를 얻을 수 있다는 것을 보여준다.

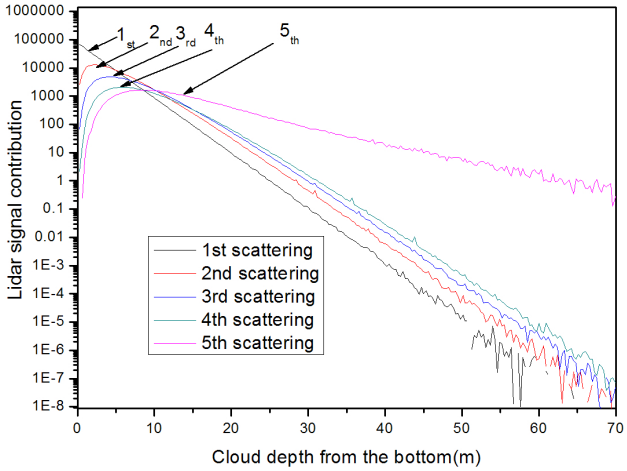


FIG. 2. Contribution of multiple scattering effects in Lidar signal.

그림 2는 구름의 깊이에 따른 라이다 신호의 크기를 산란 횟수별로 나타낸 것이다. 그림은 구름의 고도가 1000 m, LWC가 0.04 g/m^3, r_{eff}은 5 μm, 라이다의 FOV가 5 mrad, 레이저의 발산각이 0.5 mrad인 경우에 532 nm 파장에서 얻은 신호이다. 그림에서 알 수 있듯이 구름의 깊이가 깊어짐에 따라 다중 산란된 신호가 점점 많아지며 본 예의 경우 10 m 이상만 되어도 5번 산란에 의한 라이다 신호가 그림 2의 신호는 한 펄스의 레이저에 의하여 산란된 신호를 나타낸 것으로 구름 깊이에 따른 신호의 세기를 고려할 때, 실제 라이다에 사용되는 신호 획득 장치가 12 bit ADC(Analogue Digital Convertor)를 사용하고 1000번 정도의 평균값을 취하여 얻게 된다면 그 측정 범위(dynamic range)는 이론적으로 $2^{12}\times\sqrt{1000}\approx 10^5$이 되므로 그림 2의 신호 크기를 고려할 때 실제 측정 깊이는 약 30 m 까지만 가능하다.

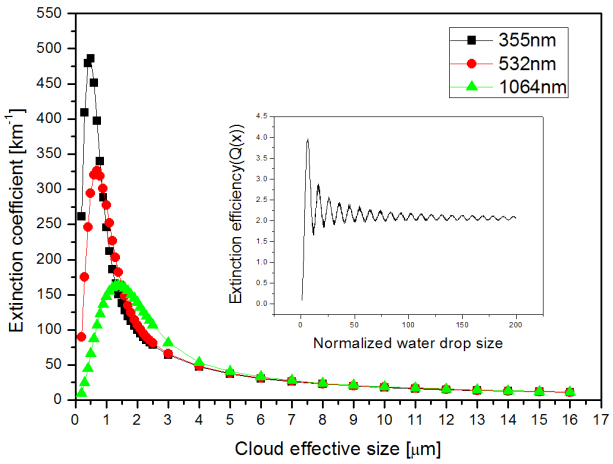
III. 입자 크기 측정을 위한 다중 산란 특성 분석 및 토의

입자의 크기와 총량을 얻을 수 있는 방안을 모색하기 위하여 다양한 조건에서 라이다 신호의 특징이 어떻게 변화하는지를 계산하였다. 먼저 파장에 따른 편광특성을 조사하였다. 그림 3은 흔히 사용되는 Nd:YAG레이저의 세 개의 파장에서 구름의 유효입자 크기에 따른 소광계수의 특징을 나타낸 것이다. 계산에서는 구름의 고도는 1000 m, 구름의 총량은 0.057 g/m^3 그리고 깊이 20 m에서 산란된 라이다 신호의 편광도를 계산한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 2.5 μm 이하의 입자인 경우 파장에 따라 다른 소광계수와 비편광도가 복

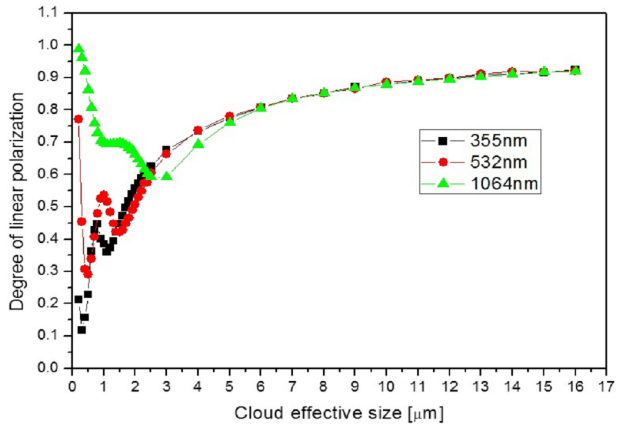
잡한 모양을 보이고 있음을 알 수 있다.

이러한 현상은 소광효율이 입자의 크기에 따라 달라지기는 하나, 입자의 크기가 커지면 일정해지는 효과 때문이다. 그림 3에서 작은 박스 속의 그림은 단일 입자의 규격화된 크기($x=2\pi r/\lambda$)에 따른 소광효율을 나타낸 것으로 식 (2)에서 입자의 크기가 파장보다 훨씬 더 커지면 소광효율이 입자의 크기에 관계없이 같아지게 되고 마찬가지로 소광계수도 파장이나 입자의 크기에 관계없이 모두 같아진다. 비편광도(P_{dp})의 경우 아래 식 (4)와 같이 편광을 나타내는 Stoke's 벡터의 I, Q, U, V 로 정의된 값을 그림에서 나타낼 수 있으며, 다시 이를 실험적으로 쉽게 측정되는 송신 빛과 평행한 방향의 라이다 신호(I_h)와 직각 방향의 편광판을 통하여 얻은 라이다 신호(I_V)의 크기로 선형비편광도(I_{dlp})를 나타낸 것이다. 비편광도는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{dp}=\frac{\sqrt{Q^2+U^2+V^2}}{I}\approx P_{dlp}=\frac{I_h-I_v}{I_h+I_v} \tag{4}$$



(a)



(b)

FIG. 3. Cloud effective size dependent polarization and extinction coefficient at three wavelength (355 nm, 532 nm and 1064 nm). (a) Extinction coefficient, (b) Degree of polarization.

선형편광도가 0에서 1까지 변하는데, 1은 완전편광, 0은 편광도가 50:50 인 경우에 해당한다. 비편광도 값은 앞서 언급한 것과 같이 소광계수가 MFP를 결정하는 과정에서 중요한 변수로 작용하고, 그림 1과 같은 Mie 산란이론에 의하여 결정되기 때문에 소광계수와 유사하게 역시 유효 입자 크기가 2.5 μm 이상에서는 매우 단순한 모양을 지닌다. 즉 크기가 2.5 μm 이하의 입자는 각 파장에 따른 차이로 그 입자 크기를 정할 수 있으나 입자의 크기가 커지면 파장에 따른 입자의 산란 특성만으로는 불가능하다는 것을 알 수 있다.

그림 4는 355 nm 파장에서 얻어지는 소광계수를 1064 nm의 파장에서 얻어지는 소광계수로 규격화시킨 경우와 355 nm 파장에서 얻어지는 비편광도를 1064 nm의 파장에서 얻어지는 비편광도로 규격화시킨 경우를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 소광계수를 1064 nm로 규격화시킨 경우에는 1:1 관계가 확연히 나타난다는 것을 알 수 있으나 비편광도를 규격화한 경우엔 이러한 1:1 대응 관계를 찾을 수 없다. 그리고 본 논문에서는 보여지지 않으나, 355 nm 파장을 532 nm의 파장으로 규격화 한 경우에도 역시 두 경우 모두 1:1 관계가 보여지지 않고 있다. 소광계수의 경우 규격화된 값은 식 (2)에서 N값이 규격화되어 LWC의 값에 관계없이 항상 성립한다. 즉, 두 파장에서 얻은 소광계수, 특히 1064 nm와 355 nm에서 얻은 소광계수를 이용하여 얻은 규격화된 소광계수는 입자군을 만드는 입자의 유효입자 크기에만 의존한다. 두 파장에서 얻은 소광계수를 이용하여 구름의 유효입자 크기를 알 수 있다면, 주어진 유효입자 크기에서 얻어지는 소광계수 자체 값은 LWC값에 정비례하기 때문에 LWC의 양도 쉽게 얻을 수 있다.

그러나 대부분의 저층 구름은 초기 발달 단계를 제외하고 그 유효입자크기가 3.5 μm부터 10 μm이상까지 주로 큰 영역의 입자 크기 분포를 보인다. 그러므로 큰 유효입자 크기에 대하여 입자 크기와 LWC양을 측정할 수 있는 방법을 찾을 필요가 있다. 그러나 그림 1에서 알 수 있듯이 큰 입자의 경우 비편광도와 소광계수 모두 파장에 따라 그 값이 유사한

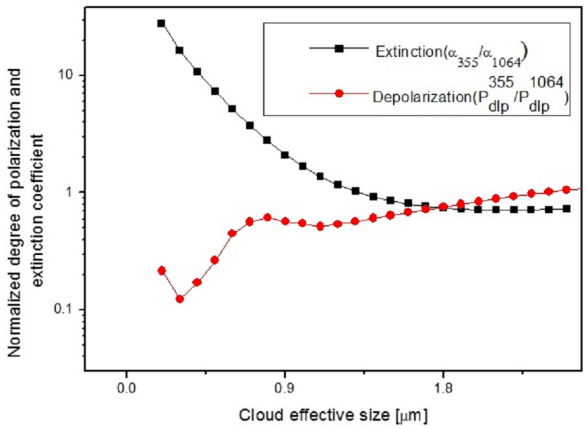
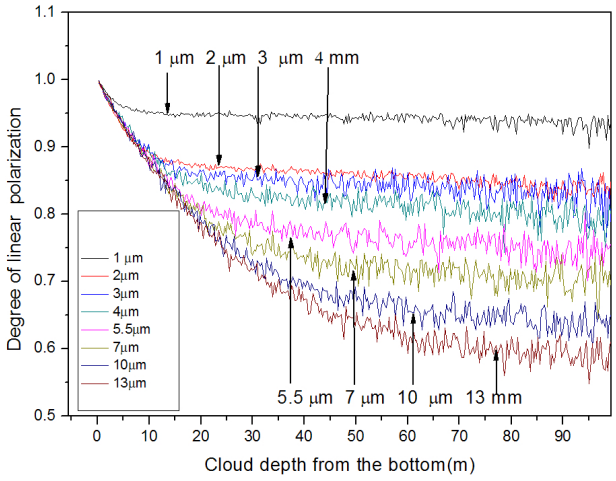


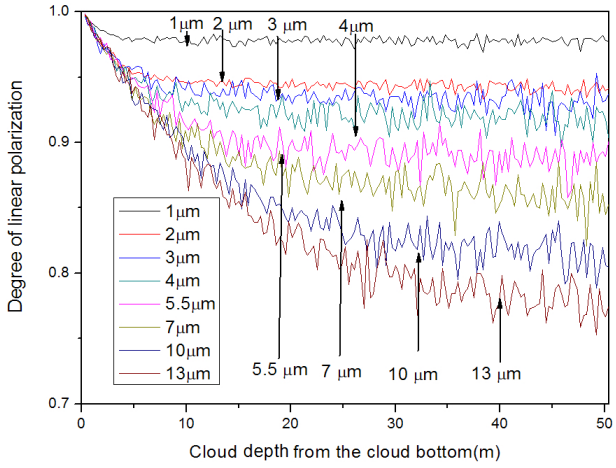
FIG. 4. Extinction coefficient and degree of polarization of the liquid water cloud at the short wavelength (355 nm) when normalized by other wavelength (1064 nm) extinction and degree of polarization.

값을 보이고 있어 파장에 따른 소광계수나 비편광도를 이용하는 경우 불가능하다는 것을 알 수 있다.

그림 5(a)는 선형편광도가 구름의 깊이에 따라 어떻게 달라지는지를 보여준다. 그림5는 소광계수가 40 km^{-1}로 일정하고, 라이다 시스템의 FOV가 1.5 mrad, 레이저의 빔 발산각이 0.5 mrad으로 일정한 경우에 다양한 유효입자 크기에서 그 선형편광도를 보인 것으로, 그림에서 알 수 있듯이 입자의 크기가 클수록 선형편광도가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 일정한 LWC에서 실제 입자의 크기가 커지면 소광계수가 커지기 때문에 같은 소광계수 조건에서 구한 그림 5(a)의 경우는 실제 입자의 크기에 따라 다른 LWC 양을 나타낸다. 실제로 1 μm, 2 μm, 3 μm, 7 μm, 10 μm, 13 μm 크기에서 각각 0.0082 g/m^3, 0.0213 g/m^3. 0.0344 g/m^3. 0.0855 g/m^3, 0.1245 g/m^3, 0.1636 g/m^3의 LWC를 나타낸다. 그러므로 그림 5는 물의 총량에 따른 선형편광도를 나타낸 것이라 할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 깊이에 따른 소광계수의 변화



(a)



(b)

FIG. 5. Degree of linear polarization as a function cloud depth for different water cloud effective sizes with different FOV. (a) 1.5 mrad Lidar FOV, (b) 0.5 mrad Lidar FOV.

즉 기울기는 거의 일정하나, 일정 깊이에서 선형편광도가 일정해지는 것을 알 수 있다. 즉, 포화선형편광도(SDLP)값은 입자의 크기 혹은 LWC에 대한 정보를 가지고 있다.

그림 5(b)은 같은 조건에서 다른 FOV(0.5mrad)에서 얻은 선형편광도를 보인다. 그림에서 보듯이 라이다 시스템의 FOV가 작아져도 깊이에 따른 선형편광도의 기울기가 LWC(혹은 소광계수나 입자의 크기라 하여도 무방함)에 따라 크게 달라지지 않고 다만 구름의 일정 깊이까지 진행하면 그 값이 일정해진다는 것을 알 수 있다. 또한 포화선형편광이 되는데 필요한 구름의 깊이는 그림에서 알 수 있듯이 같은 소광계수에서 입자의 크기가 클수록 즉 입자의 총량이 많을수록 커진다는 것을 알 수 있다. 그림 6은 소광계수에 따른 선형비편광도의 특성을 나타낸 것으로 소광계수가 커질수록 그 기울기가 커진다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 이러한 선형편광도가 그림 5(a), (b)와 같은 상태에서 얻은 SDLP값을 입자의 크기에 따라 그린 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 구름의 소광계수를 알 수 있다면 주어진 라이다 장치의 FOV값에서 얻어진 SDLP은 구름의 유효 입자 크기와 직접적인 관계가 있고, 이는 1:1 관계에 있으며,

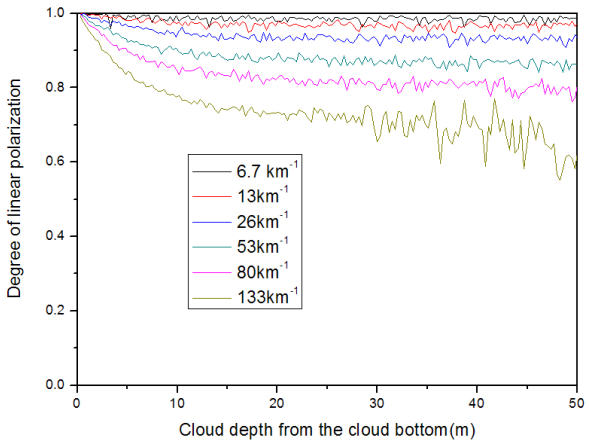


FIG. 6. Degree of linear polarization as a function cloud depth for different extinction coefficients.

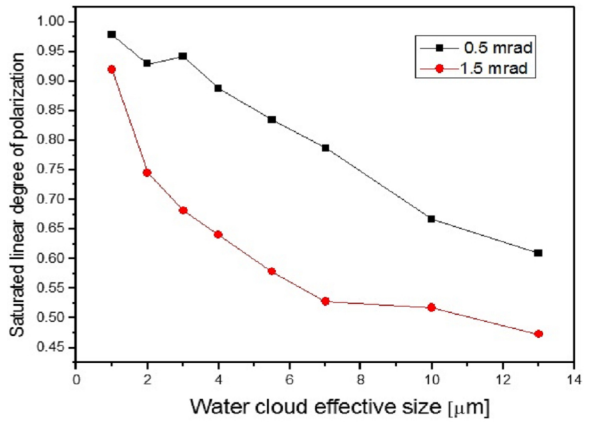


FIG. 7. Saturated degree of linear polarization as a function of water cloud effective size for a given Lidar FOV.

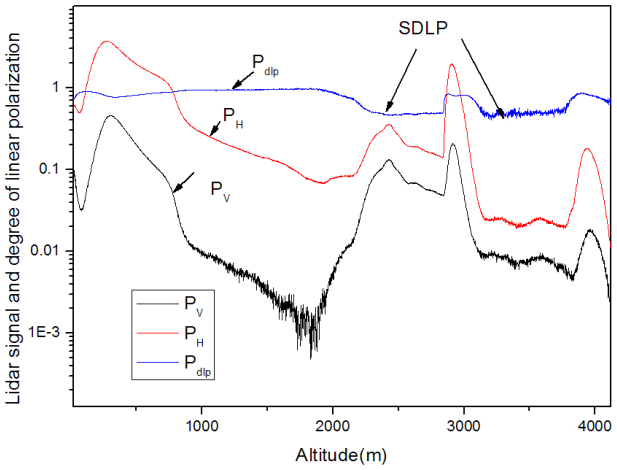


FIG. 8. The characteristics of Lidar signals and its degree of linear polarization.

이러한 SDLP측정을 통하여 구름의 유효입자크기와 LWC를 알 수 있다. 이것은 구름의 유효입자 크기와 소광계수를 알면 식 (1)과 (2)에서 LWC는 정해지기 때문이다.

구름의 소광계수는 질소의 진동 라만 신호나 회전 라만 신호를 이용할 경우 쉽게 그 소광 계수를 구할 수 있으며, 지금까지 많은 연구가들에 의하여 다양하게 수행되었다. 즉 구름의 소광계수는 사용하고자 하는 레이저의 파장에서 쉽게 얻을 수 있으며, 소광계수가 정해지면, 주어진 FOV에서 얻어지는 SDLP값은 입자의 크기에 따라 다르기 때문에 우리가 원하는 입자의 크기를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 방법은 기존의 다양한 FOV에서 얻어진 각 고도의 라이다 신호를 이론적으로 구한 값과 비교하여 얻어지는 입자크기 측정법에 비하여, 레이저의 세기나, 구름에 도달하기 전에 존재하는 각종 대기 입자나 공기 분자에 의한 레이저 빔의 세기 변화 등에 무관하기 때문에 입자의 크기 구별에 더 용이하게 활용이 가능하다.

그림 8은 구름에서 다중 산란된 신호의 탄성산란 신호 크기와 선형편광도가 어떻게 변하는지를 보여주는 간단한 예이다. 2.5 km, 3 km, 4 km에 구름이 존재하는 라이다 신호의 예를 보여주는 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 구름을 지난 후 선형편광도는 일정 깊이에서 안정적인 값을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 즉 간단한 편광신호의 획득만으로도 물방울 구름의 다중산란 효과를 알 수 있으며, 이러한 편광신호는 구름의 소광계수, 총량, 그리고 입자의 크기에 관련이 있어서 이러한 물리량을 추출하는데 활용을 할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 구름에서 다중 산란된 빛의 편광이 어떻게 달라지는지 이론적으로 계산하고 이를 이용하여 구름의 물리적 변수 특히 구름의 유효입자크기와 총량을 구하는 방법을 연구하였다.

유효입자의 크기가 작은 경우 두 파장에서 얻은 소광계수만 이용하여도 구름의 총량과 유효 입자의 크기를 알 수 있으나 대부분 구름의 유효입자크기가 3.5 μm 이상임을 감안한다면[23] 본 방법은 구름이 성장하는 초기 단계에 적용이 가능하다.

구형의 구름에서 한번 후방산란된 신호는 편광을 유지하나 여러 번 다중 산란된 후 후방산란 된 라이다 신호는 편광이 변하게 된다. 선형편광도는 구름의 총량과 입자크기에 관련되며 소광계수도 역시 입자의 크기와 총량에 관계된다. 소광계수는 많은 기상학자들에 의하여 관심의 대상이 되었으며 측정되었다. 즉 소광계수는 회전 라만 라이다나, 진동 라만 라이다를 이용하여 알 수 있으므로 편광신호를 얻게 된다면 두 가지 미지수인 입자크기와 총량에 대한 정보를 얻을 수 있다[24]. 특히 그림 5, 6, 7은 주어진 소광계수에서 유효입자크기에 따른 포화선형편광도(SDLP)값과 주어진 입자크기에서 소광계수에 따른 선형편광도의 기울기를 보여주는 것으로 편광라이다 시스템을 라만 라이다 시스템과 혼용하여 운영한다면, 구름 물리에서 가장 중요한 입자 크기와 소광계수 즉, 구름의 총량을 구할 수 있다는 것을 보여준다. 본 논문에서는 그림 8에서 보여준 간단한 예를 제외하곤 실험적으로 입증하지는 못하였지만, 앞으로 이러한 시스템을 구축하여 물방울 구름의 입자 크기와 총량을 측정하는데 이론적인 근거를 만들고 있으며, 시스템 설계 시 좋은 자료로 활용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-6170)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. R. Chen, F. Chang, Z. Li, Z. Weng, R. Ferraro, and F. Weng, “Impact of the vertical variation of cloud droplet size on the estimation of cloud liquid water path and rain detection,” J. Atmos. Sci. **64**, 3843-3853 (2007).
2. Q. Han, W. B. Rossow, J. Chou, and R. M. Welch, “Global survey of the relationships of cloud albedo and liquid water path with droplet size using ISCCP,” J. Climate **11**, 1516-1528 (1998).
3. C. H. Twohy, M. D. Petters, J. R. Snider, B. Stevens, W. Tahnk, M. Wetzel, L. Russell, and F. Burnet, “Evaluation of the aerosol indirect effect in marine stratocumulus clouds: Droplet number, size, liquid water path, and radiative impact,” J. Geophy. Res. Atmos. **110**, D08203, doi:10.1029/2004JD005116 (2005).
4. Y. Hu, M. Vaughan, C. McClain, M. Behrenfeld, H. Maring, D. Anderson, S. Sun-Mack, D. Flittner, J. Huang, B. Wielicki, P. Minnis, C. Weimer, C. Trepte, and R. Kuehn, “Global statistics of liquid water content and effective

number concentration of water clouds over ocean derived from combined CALIPSO and MODIS measurements," Atmos. Chem. Phys. **7**, 3353-3359 (2007).
5. J. D. Klett, "Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios," Appl. Opt. **24**, 1638-1643 (1985).
6. U. Wandinger, "Multiple-scattering influence on extinction and backscatter-coefficient measurements with raman and high-spectral-resolution Lidars," Appl. Opt. **37**, 417-427 (1998).
7. Y. Hu, Z. Liu, D. Winker, M. Vaughan, V. Noel, L. Bissonnette, G. Roy, and M. McGill, "Simple relation between Lidar multiple scattering and depolarization for water clouds," Opt. Lett. **31**, 1809-1811 (2006).
8. D. P. Donovan, A. C. A. P. van Lammerren, R. J. Hogan, H. W. J. Ruschenberg, A. Apituey, P. Francis, P. Francis, J. Testud, J. Pelon, M. Quante, and J. Goddard, "Cloud effective particle size and water content profile retrievals using combined Lidar and radar observations: 2. Comparison with IR radiometer and in situ measurements of ice clouds," J. Geophy. Res. Atmos. **106**, 22449-27464 (2001).
9. D. P. Donovan and A. C. A. P. van Lammeren, "Cloud effective particle size and water content profile retrievals using combined Lidar and radar observations: 1. Theory and examples," J. Geophy. Res. Atmos. **106**, 27425-27448 (2001).
10. R. Boers, H. Russchenberg, J. Erkelens, V. Venema, A. van Lammeren, A. Apituley, and S. Jongen, "Ground-based remote sensing of stratocumulus properties during CLARA, 1996," J. Appl. Meteor. **39**, 169-181 (2000).
11. R. T. Austin, G. L. Stephens, and Q.-L. Min, "Retrieval of liquid water path and effective drop size using radar data and shortwave optical depth," in *Proc. Ninth ARM Science Team Meeting Proceedings* (San Antonio, Texas, USA, March 1999).
12. D. N. Whiteman and S. H. Melfi, "Cloud liquid water, mean droplet radius, and number density measurements using a Raman Lidar," J. Geoph. Res. **104**, 411-419 (1999).
13. T. Sakai, D. N. Whiteman, F. Russo, D. D. Turner, I. Veselovskii, S. H. Melfi, T. Nagai, and Y. Mano, "Liquid water cloud measurements using the Raman Lidar technique: current understanding and future research needs," J. Atmos. Oceanic Technol. **30**, 1337-1353 (2013).
14. L. R. Bissonnette, G. Roy, G. Vallee, and S. Cantin, "Retrieval of cloud liquid water content and effective droplet diameter from multiply scattered Lidar returns," Proc. SPIE **4087**, Applications of Photonic Technology **4**, 939-946 (2000).
15. L. R. Bissonnette, G. Roy, L. Poutier, S. G. Cober, and G. A. Isaac, "Multiple-scattering Lidar retrieval method: tests on Monte Carlo simulations and comparisons with in situ measurements," Appl. Opt. **41**, 6307-6324 (2002).
16. G. de Boer and E. Eloranta, "Lidar-based retrievals of the microphysical properties of mixed-phase arctic stratus clouds and precipitation," in *Proc. 23rd International Laser Radar Conference* (Albuquerque, 2006).
17. R. J. Hogan, "Fast approximate calculation of multiply scattered Lidar returns," Appl. Opt. **45**, 5984-5992 (2006).
18. D. Kim, H. D. Cheong, Y. Kim, S. Volkov, and J. Lee, "Optical depth and multiple scattering depolarization in liquid clouds," Opt. Rev. **17**, 509-512 (2010).
19. C. M. R. Platt, "Remote sounding of high clouds. III: Monte Carlo calculations of multiple-scattered Lidar returns," J. Atmos. Sci. **38**, 156-167 (1981).
20. D. M. Winker and L. R. Poole, "Monte-Carlo calculations of cloud returens for ground-based and space based LIDARS," Appl. Phys. B **60**, 341-344 (1995).
21. K. E. Kunkel and J. A. Weinman, "Monte Carlo analysis of multiple scattered Lidar returns," J. Atmos. Sci. **33**, 1772-1782 (1976)
22. C. F. Bohren and D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particle* (A Wiley-Interscience Publications, 1983).
23. Y. Liu and P. H. Daum, "Spectral dispersion of cloud droplet size distributions and the parameterization of cloud droplet effective radius," Geophy. Res. Lett. **27**, 1903-1906 (2000)
24. D. Kim and H. Cha, "Suggestion for qualitative Lidar identification of different types of aerosol using the twowavelength rotational raman and elastic Lidar," Opt. lett. **31**, 2915-2917 (2006).