

구름레이더를 이용한 대기 공기의 연직속도 추정연구

정은실*

경북대학교 건설방재공학부

(접수일: 2019년 1월 3일, 수정일: 2019년 2월 18일, 게재확정일: 2019년 3월 7일)

Study on the Retrieval of Vertical Air Motion from the Surface-Based and Airborne Cloud Radar

Eunsil Jung*

School of Disaster Prevention and Environmental Engineering, Kyungpook National University, Sangju, Korea

(Manuscript received 3 January 2019; revised 18 February 2019; accepted 7 March 2019)

Abstract Measurements of vertical air motion and microphysics are essential for improving our understanding of convective clouds. In this paper, the author reviews the current research on the retrieval of vertical air motions using the cloud radar. At radar wavelengths of 3 mm (W-band radar; 94-GHz radar; cloud radar), the raindrop backscattering cross-section (σ_b) varies between successive maxima and minima as a function of the raindrop diameter (D) that are well described by Mie theory. The first Mie minimum in the backscattering cross-section occurs at $D \sim 1.68$ mm, which translates to a raindrop terminal fall velocity of ~ 5.85 m s⁻¹ based on the Gunn and Kinzer relationship. Since raindrop diameters often exceed this size, the signal is captured in the radar Doppler spectrum, and thus, the location of the first Mie minimum can be used as a reference for retrieving the vertical air motion. The Mie technique is applied to radar Doppler spectra from the surface-based and airborne, upward pointing W-band radars. The contributions of aircraft motion to the vertical air motion are also described and further the first-order aircraft motion corrected equation is presented. The review also shows that the separate spectral peaks due to the cloud droplets can provide independent validation of the Mie technique retrieved vertical air motion using the cloud droplets as a tracer of vertical air motion.

Key words: Mie notch, Doppler spectrum, cloud radar, vertical velocity, aircraft motion

1. 서론

대류성 구름과 뇌우 등의 발달을 이해하기 위해서는 구름역학과 미세물리의 상호작용에 대한 이해가 필요하며, 따라서 공기입자의 연직운동에 대한 지식이 필요하다. 도플러 레이더를 이용하여 강수구름에서의 공기 연직속도를 구하고자 하는 노력은 1960년대부터 있어왔다(Probert-Jones and Harper, 1961;

Doviak and Zrnicek, 1993). 항공기에 도플러 레이더를 탑재하여 관측하는 방법은 강수구름에 대한 시간-고도 자료를 제공함으로써 구름과 강수구조에 대한 포괄적인 특성을 제공하지만 비행고도 이외의 고도에 대한 연직속도 및 구름 미세물리 특성은 입자크기분포와 관련된 여러 가지 가정들에 의존한다.

1980년대에는 윈드프로파일러로부터 브래그 산란을 이용하여 연직속도를 구하고자 노력하였다(Wakasugi et al., 1986; Gossard, 1988; Rogers et al., 1993). 하지만 낮은 주파수의 윈드프로파일러(예: VHF)를 사용할 경우, 사용 가능한 가장 낮은 고도가 지상 약 1.5 km 정도였으며(Wakasugi et al., 1986; May and Rajopadhyaya, 1996), 더욱이 중간에서 강한 강도의 강수현상이 있는

*Corresponding Author: Eunsil Jung, School of Disaster Prevention and Environmental Engineering, Kyungpook National University, 2559 Gyeongsang-daero, Sangju, Gyeongbuk 37224, Korea.
Phone: +82-54-530-1445, Fax: +82-54-530-1449
E-mail: eunsil.jung@knu.ac.kr

경우에만 적합하였다(May and Rajopadhyaya, 1996). UHF 레이더의 경우, 1.5~2 km 이하의 고도에서 발생하는 약한 강수에서만 사용 가능하였다(Gossard, 1988; Rajopadhyaya et al., 1998). 무엇보다 윈드프로파일러의 경우, 시-공간적 해상도가 낮고 유동성(mobility)이 제한되는 단점이 있다.

지난 세기 동안에는 미 산란 이론(Mie scattering theory)에 근거하여, 밀리미터(mm) 파장대를 가지는 레이더 즉, W-밴드 레이더를 이용하여 연직속도를 구하는 방법이 시도되었다(Lhermitte, 1988; Kollias et al., 2002, 2003, 2007; Giangrande et al., 2010). 이 리뷰 논문에서는 지상 및 항공용 W-밴드 레이더에서 공기의 연직속도를 구하는 방법에 대하여 기술한다. 특히, 연직속도를 구하는 기본 원리에 대해서는 Lhermitte (1988)와 Kollias et al. (1999, 2002, 2003, 2007) 논문을 주로 참조·인용하였으며, 항공용 도플러 레이더로부터 관측된 연직속도 성분에 영향을 주는 각 요소의 기여도에 대한 내용은 Heymsfield (1989), Lee et al. (1994), Fang et al. (2017) 연구결과를 주로 참조하였다. 관측된 연직속도 성분에 가장 큰 오차를 제공하는 최소 요소만을 고려하여 만든 1차 보정 방정식(first-order corrected equation)에 대해서는 Jung (2012)의 연구결과를 인용·참조하였다. 이 리뷰논문에서 다루는 W-밴드 레이더는, mm 대역의 파장을 사용하기 때문에 mm 레이더라고도 불리며, 주파수로는 94~95 GHz를 사용하므로 94-GHz 레이더 또는 95-GHz 레이더라고도 한다. 또한 주요 측정 대상이 구름입자 이므로 구름레이더라고도 부른다.

2. 방법론

크기 매개변수(size parameter, $x = \pi D/\lambda$)가 1보다 작을 때, 구(sphere)에 의한 빛의 산란은 레일리 산란 근사(Rayleigh scattering approximation)에 의해 설명되며, 이때 후방산란 단면 σ_b (backscattering cross-section (mm^2), $\sigma_b \sim D^6/\lambda^4$)은 입자 직경(D)의 6승에 비례한다. 여기에서 후방산란 단면은 간단히 후방산란 전력(backscattering power)이라고도 하며, λ 는 파장을 의미한다. 입자크기에 따른 후방산란의 이러한 단조로운 증가는 미 산란 영역(Mie scattering regime, $\sim 0.1 < x < 100$)에서 붕괴된다. 미(Mie) 산란 영역에서 후방산란 단면 σ_b 는 연속적인 최대와 최소값으로 진동하는 모습으로 나타난다. 이때, 최대 및 최소가 발생하는 특징적인 빔방울 크기는 미 이론(Mie theory)에 의해 잘 정의되어 있다(Mie, 1908).

우리에게 친숙한 기상레이더를 예로 들어 설명하면, 파장 10 cm의 S-band 기상레이더를 이용하여 이슬비를 관측하는 경우(typical diameter ~ 2 mm), 크기 매개

Table 1. Terminal Fall speed as a function of drop size (equivalent spherical diameter) (from Gunn and Kinzer, 1949)

Diameter (mm)	Fall speed (m s^{-1})	Diameter (mm)	Fall speed (m s^{-1})
0.1	0.27	2.6	7.57
0.2	0.72	2.8	7.82
0.3	1.17	3.0	8.06
0.4	1.62	3.2	8.26
0.5	2.06	3.4	8.44
0.6	2.47	3.6	8.60
0.7	2.87	3.8	8.72
0.8	3.27	4.0	8.83
0.9	3.67	4.2	8.92
1.0	4.03	4.4	8.98
1.2	4.64	4.6	9.03
1.4	5.17	4.8	9.07
1.6	5.65	5.0	9.09
1.8	6.09	5.2	9.12
2.0	6.49	5.4	9.14
2.2	6.90	5.6	9.16
2.4	7.27	5.8	9.17

변수(x)는 약 0.06이다($x \ll 1$). 즉, 레일리 산란이 발생한다. 그러나, S-band 레이더를 이용하여 직경이 7 mm 정도의 큰 빔방울 또는 우박입자를 관측할 경우, 크기 매개변수는 약 0.2로써 미(Mie) 산란이 발생하게 된다. 이처럼 레이더에서 사용하는 파장의 길이와 관측하고자 하는 물체(target)의 크기에 따라서 레일리 산란이 발생하기도 하고 미(Mie) 산란이 발생하기도 한다. 구름레이더는 밀리미터(mm)파장대를 사용하는 W-band 레이더($\lambda = 3.2$ mm)로써, 구름레이더로부터 관측되는 빔방울은 Mie 산란을 일으킨다(예: 직경이 2 mm인 이슬비의 경우, 크기 매개변수는 약 1.96이다). 빔방울이 구형이라고 가정할 때, 94-GHz 구름레이더($\lambda = 3.2$ mm)에서 첫 번째 Mie 최고치는 물방울 직경이 약 0.8 mm에서 발생하고, 첫 번째 Mie 최저치(Mie minimum)는 물방울 직경이 약 1.67 mm (0°C) 또는 1.68 mm (20°C)에서 발생한다(Lhermitte, 1988; Kollias et al., 1999). 빔방울이 타원모양(oblate spheroid)이라고 가정할 때, 파장 3.2 mm에서, 첫 번째 Mie 최고치와 최저치는 물방울 직경이 약 1.1 mm와 1.7 mm에서 발생한다(Kollias et al., 2002, 2003, 2007; Giangrande et al., 2010).

지표로 낙하하는 물방울의 낙하속도와 입자 크기 사이에는 독특한 관계가 존재한다(Gunn and Kinzer, 1949; 이하 GK49; Table 1). 1988년 Lhermitte는 도플러 스펙트럼상에서 구름레이더로부터 관측된 첫 번째 미(Mie) 최소치와 GK49식(식1)을 이용하여 구름내부

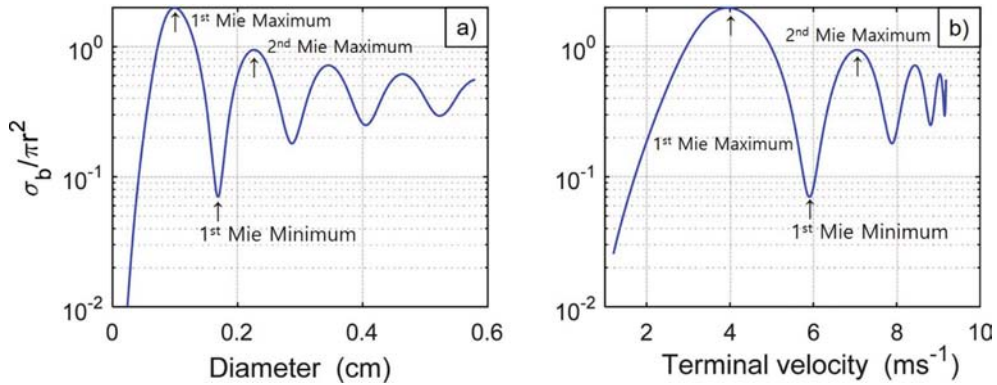


Fig. 1. Normalized backscattering cross-section as a function of raindrop's (a) diameter and (b) terminal speed for oblate spheroids at 94 GHz and vertical incident (modified Fig. 2 of Fang et al., 2017).

에서의 공기 연직속도 추정이 가능함을 제안하였다. 즉, 공기의 연직속도는 움직임이 없는 대기상태에서 첫번째 미(Mie) 최소치의 종단속도(terminal velocity)와 구름레이더로부터 실제 관측된 첫 번째 미(Mie) 최소치의 낙하속도와와의 차이로 구할 수 있다. 예를 들어, 구름레이더에서 첫번째 미(Mie) 최소치가 나타나는 크기가 1.68 mm인 구형의 물방울은, Beard (1985)가 GK49 자료를 fit하여 만든 식(1)에 의하여 온도 20°C, 공기밀도 1.2 g m⁻³에서 5.85 m s⁻¹의 낙하속도로 변환된다(Fig. 1).

$$V_0 \text{ (cm s}^{-1}\text{)} = \exp(5.984 + 0.8515x - 0.1554x^2 - 0.03274x^3) \quad (1)$$

식(1)에서 $x = \ln[D(\text{mm})]$ 에 해당한다. 식(1)은 직경 0.5 mm에서 6 mm 범위의 물방울 크기에 대하여 1% 미만의 제곱평균제곱근(rms, root mean square) 편차를 가진다(Kollias et al., 2003). GK49 자료는 공기의 움직임을 없다고 가정한 상태의 해수면에서의 값에 해당한다. 실제 대기 중에서는 고도에 따라 밀도가 달라진다. 따라서 각 고도에서의 V_0 는 Beard (1985) 공식(식2)을 사용하여 고도에 따른 낙하속도의 밀도보정을 해준다.

$$V_f = V_z = \left(\frac{\rho_0}{\rho_z}\right)^m V_0 \quad (2)$$

여기에서 아래 첨자 0과 z는 표준상태(즉 해수면)에서의 값과 고도 z에서의 값을 의미한다. 식(2)에서 $\rho_0 = 1.194 \text{ kg m}^{-3}$ 이고 계수 m 은 물방울 직경에 따라 변하는 값으로, $m = 0.375 + 0.025D \text{ [mm]}$ 으로 주어진다. 이 이후로 식(2)로부터 구한 V_f 를 밀도 보정된 낙하속도 또는 이론적인 낙하속도라 한다. 식(2)에서 Mie 최소치가 나타나는 물방울, 즉 $D_{1M} = 1.68 \text{ mm}$ 가 갖는 낙하속도(V_0)를 밀도보정한 낙하속도(V_f)를 $V_{f,1}$ 이라 한다.

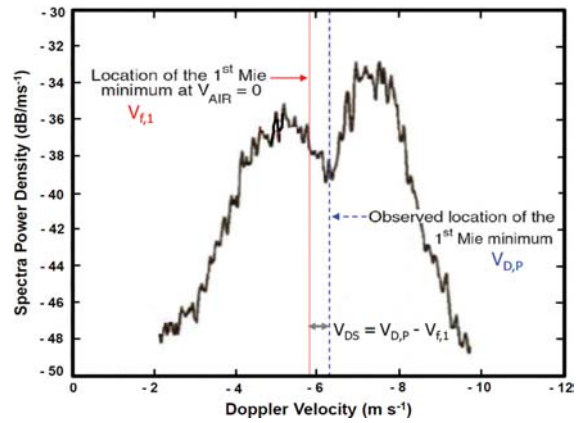


Fig. 2. An example of Doppler spectrum. Locations of the theoretical and observed 1st Mie minimum, shown as $V_{f,1}$ and $V_{D,P}$, respectively (modified Fig. 8b of Kollias et al., 2007).

구름레이더로부터 미(Mie) 산란 특징을 이용하여 공기의 연직속도를 추정하는 방법을 요약하면 다음과 같다. W-밴드 파장대를 사용하는 구름레이더에서는 물방울 직경 1.68 mm에서 Mie 최저치가 나타난다. GK49와 Beard (1985) 식을 이용하면 직경이 1.68 mm인 물방울이 이론적으로 가지게 되는 낙하속도를 알 수 있다($V_{f,1}$). 따라서, 실제 대기 중에서 첫번째 미(Mie) 최소치($D_{1M} = 1.68 \text{ mm}$)에 의해 관측된 낙하속도($V_{D,P}$)와 이론적인 계산으로 나온 낙하속도($V_{f,1} = 5.85 \text{ m s}^{-1}$)와의 차이가 공기의 연직속도가 된다. 예를 들어(Fig. 2), 실제 대기중에서 관측된 첫번째 미 최소치의 낙하속도($V_{D,P}$)가 6.38 m s⁻¹라면, 이때 실제 공기의 연직속도는 -0.53 m s^{-1} 로써, 0.53 m s⁻¹의 하강속도(downdraft)가 존재하는 것을 나타낸다($V_{DS} = V_{D,P} - V_{f,1} = (-6.38 \text{ m s}^{-1}) - (-5.85 \text{ m s}^{-1}) = -0.53 \text{ m s}^{-1}$).

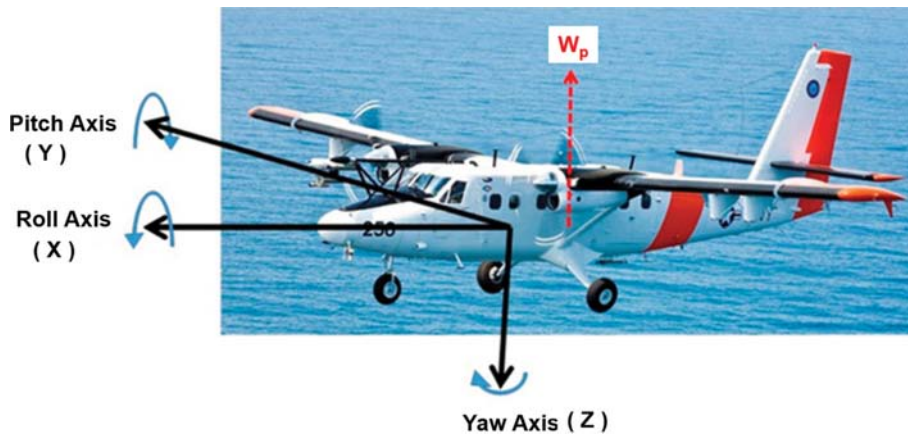


Fig. 3. Axes related to the aircraft rotations (modified Fig. 3 of Fang et al., 2017).

구름레이더로부터 연직속도를 추정하는 이 방법에서, 첫 번째 Mie 최고치, 첫 번째 Mie 최저치, 두 번째 Mie 최고치 중 어떤 것을 기준 값으로 사용하여도 무방하나, 첫 번째 Mie 최저치가 가장 뚜렷하게 나타나므로 일반적으로 첫 번째 Mie 최저치가 발생하는 $D_{1M} = 1.68 \text{ mm}$ 을 기준 값으로 사용한다.

2.2 항공용 구름레이더의 연직속도 추정

이 단락에서는 상향식 수직 빔 모드로 항공기 상단 몸체에 수평으로 탑재된 구름레이더로부터 관측한 연직속도 추정에 대한 내용을 다룬다. 항공기 회전 및 동작과 관련된 축들을 Fig. 3에 나타내었다. 레이더 빔이 X-Y 평면에 수직이기 때문에 레이더 빔이 기울어지면 레이더에서 관측되는 도플러 속도는 항공기 움직임에 의해 편향될 것이다. 따라서 항공기에 탑재된 구름레이더로부터 관측된 도플러 속도는 항공기의 움직임에 의한 바이어스를 포함한다. 항공용 기상레이더로부터 관측된 도플러 속도의 연직성분에 영향을 미치는 주요 요소는 수평바람, 항공기 상하 움직임, 항공기 자세(pitch angle, roll angle 등)이다. 이러한, 항공용 도플러 레이더에 의해서 관측된 시선속도 식은 Lee et al. (1994)과 Fang et al. (2017)에 자세히 기술되어 있다. 두 식의 차이는, Lee et al. (1994)의 경우 레이더 빔이 아래쪽을 향하고 있으며, Fang et al. (2017)의 경우, 레이더가 항공기 상단에 설치되어 레이더 빔이 위쪽을 향하고 있다. 선행연구에 따르면(예: Heymsfield, 1989; Fang et al., 2017), 항공기 움직임과 관련하여 항공기에 장착된 W-밴드 레이더에서 관측된 도플러 속도 연직성분에 가장 크게 기여하는 것은 피치 각(pitch angle)이다. 특히, Fang et al. (2017)에 따르면 피치 각의 기여도는 약 10%이다. 한편, 롤 각(roll angle, R)에 의한 영향의 경우, 항공기가 일정

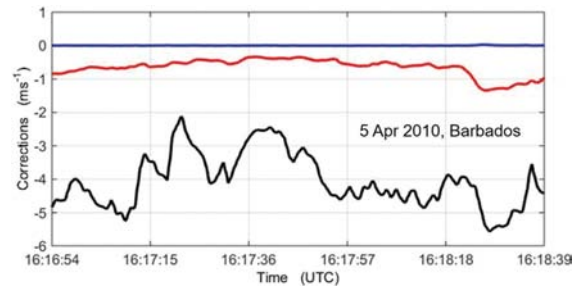


Fig. 4. A time series of correction terms at 228 m ARL (above radar level) related to aircraft motion (black), horizontal wind speed (red), and apparent rotational velocity (blue) for data obtained on 5 Apr 2010 over Barbados (modified Fig. 4 of Fang et al., 2017).

한 고도를 비행하면서 수평관측을 수행하는 경우 롤 각이 도플러 연직속도에 미치는 영향을 무시할 수 있다. Figure 3에서, 롤 각(R)의 변화는 도플러 속도상에서 $V_p \sin(R)$ 에 해당하는 변동성을 유발한다. 즉, 비록 10 m s^{-1} 의 측풍(cross-wind)이 존재하더라도 롤 각이 1° 변함으로써 발생하는 오차는 0.2 m s^{-1} 정도이다. 피치 각(α)이 도플러 연직속도 성분에 미치는 영향은 $V_p \sin(\alpha)$ 이다. 여기에서 V_p 는 항공기 비행속도(true air speed)로서 항공기가 구름장을 관측할 경우, 일반적으로 $50\sim 60 \text{ m s}^{-1}$ 의 속도로 비행하는 경우가 많다. 대서양 무역풍 지대에서 흔히 발생하는 키가 크지 않은 적운형 구름장을 관측한 바베이도스 에어로졸-구름관측 캠페인(BACEX)의 경우(Jung, 2012), 일정한 고도에서 수평비행으로 수집한 자료에서 평균 롤 각도는 -0.95° , 피치 각은 3.6° 이었다. 실제 BACEX 관측에서 수집한 항공용 도플러속도에 사용된 보정항의 예를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 항공기에 탑

채된 레이더로부터 관측한 연직속도의 오차 및 불확실성은 항공기의 움직임과 수평바람에 의해 발생할 수 있으나, 가장 크게 영향을 주는 요소는 항공기의 움직임 및 자세각이라는 것을 잘 보여준다.

도플러 속도의 연직성분에 대한 1차 보정(first-order correction)은 피치 각(α) (Heymsfield, 1989), 항공기 비행속도(V_p), 항공기의 상하 연직 움직임(up and downward motion, W_p)을 포함한다. 항공용 레이더로부터 관측된 도플러 속도는 연직속도 성분에 영향을 주는 주요 항(즉 first-order)만을 포함하여 아래와 같이 나타낼 수 있다(Jung, 2012).

$$V_{D,P} = [(W_a + V_{f,1}) - W_p] \cos \alpha + V_p \sin \alpha \quad (3)$$

여기에서 $V_{D,P}$ 는 도플러 스펙트럼 상에서 실제 관측된 첫 번째 미(Mie) 최소치가 갖는 낙하속도이며, α 는 피치 각, W_a 는 공기의 연직속도, $V_{f,1}$ 는 밀도가 보정된 첫 번째 미(Mie) 최소치가 갖는 (이론적인) 낙하속도로서, 지상에서 $V_{f,1} = 5.85 \text{ m s}^{-1}$ 에 해당한다. W_p 는 항공기 기체의 물리적인 상하 운동속도, V_p 는 항공기의 비행속도(true air speed: TAS)이다. 식(3)에서 양의 값은 위쪽방향으로의 운동을 나타낸다.

이 식에 표현된 피치 각과 항공기 기체의 물리적인 상하 운동(W_p) 요소 이외에도, 롤 각(roll angle) 또한 연직속도성분에 영향을 줄 수 있다. 그러나 그 효과는 앞에서 보았듯이 크지 않다. Jung (2012)에 따르면, 대서양 무역풍 지대에서 흔히 발생하는 키가 크지 않은 적운형 구름장을 비행할 경우, 피치 각에 의한 오차가 1.0 m s^{-1} 인데 반하여 롤 각에 의한 오차는 -0.02 m s^{-1} 라고 밝혔다. 공기의 연직속도는 식(3)을 재배열하여 아래 식에 의하여 구한다.

$$W_a = \frac{V_{D,P}}{\cos \alpha} + W_p - V_p \tan \alpha - V_{f,1} \quad (4)$$

2.3 Mie 기법을 이용한 연직속도 추정의 불확실성

미 기법(Mie technique)을 이용하여 공기의 연직속도를 구하는 방법에는 몇 가지 불확실성이 있다. 이 불확실성에 대해서는 Fang et al. (2017)에 자세히 설명되어 있으나 여기에서 간략히 소개한다. 연직속도 추정에 관련된 불확실성에는 항공기의 자세 각도와 항공기 속도와 관련하여 발생하는 불확실성(Heymsfield, 1989; Kalogiros and Wang, 2002; Papoulis and Pallai, 2004; Fang et al., 2017), 레이더 빔 포인팅 각도와 관련된 불확실성(Haimov and Rodi, 2013), Mie 최소치 위치선정의 부정확성에 의해 발생하는 불확실성(Lhermitte, 2002), 도플러속도 분해능(Fang et al., 2017)과 물방울을 구형이라고 가정함으로써 유발되는 불확실성(Kollias et al., 2002), 도플러 빔 확대(beam

broadening)에 기인한 불확실성(Fang et al., 2017) 등이 있다.

항공기에 탑재된 레이더로부터 관측한 연직속도의 오차 및 불확실성은, 항공기의 움직임과 수평바람에 의해 발생할 수 있으나, 주로 항공기의 움직임에 기인한다(Heymsfield, 1989; Fig. 4 of Fang et al., 2017). Heymsfield (1989)는 와이오밍 대학 구름레이더에서 항공기 자세각의 오차로 인한 항공기 연직속도 불확실성이 0.5 m s^{-1} 라고 밝혔다. Fang et al. (2017)은 미 해군 Twin Otter (TO)에서 항공기 자세각의 불확실성은 0.18° 보다 작고, 그로 인한 항공기 연직속도의 불확실성은 약 0.05 m s^{-1} 라고 밝혔다. 또 다른 연구에 따르면(예: Papoulis and Pallai, 2004), TO 항공기의 자세 각으로부터 발생하는 오차는 0.1° 미만이며, 항공기의 수평 및 연직속도에 의한 오차는 0.07 m s^{-1} 로 나타났다. 또한, TO의 수평속도 불확실성은 0.01 m s^{-1} 로 보고되었다(Kalogiros and Wang, 2002).

항공용 레이더에서, 전자기파를 방출하고 수신하는 레이더 안테나가 X축을 따라 정확하게 정렬되어 있고 레이더 빔이 항공기 좌표에서 X-Y 평면에 정확히 수직이라고 가정한다. 그러나 이러한 가정이 반드시 유효하지 않을 수 있다. 또한, 비록 이러한 가정이 정적인 공기에서는 사실이라 할지라도, 공기 역학이나 항공기의 진동 등으로 인해 유효하지 않을 수 있다. Haimov and Rodi (2013)는 고 정밀 GPS와 레이더를 사용하여 레이더 빔 포인팅 각도의 RMS 오차가 0.038보다 작고, 항공용 와이오밍 구름레이더로부터 관측한 도플러 속도 추정오차는 0.05 m s^{-1} 보다 작다고 밝혔다.

구름레이더를 이용하여 강수구름으로부터 공기의 연직속도를 추정하기 위해서는, Mie 노치 즉, 첫번째 Mie 최소값의 위치에 대한 정보가 필요하다. 따라서 도플러 스펙트럼에서 Mie 노치의 부정확한 위치는 연직속도 추정의 오차를 초래한다. Lhermitte (2002)는 3차 다항식을 이용하여 Mie 최소값 위치를 결정할 때 표준 편차는 약 0.066 m s^{-1} 라고 밝혔다.

도플러 스펙트럼은, 바베이도스(Barbados) 자료의 경우 0.1563 m s^{-1} , 키 웨스트(key West) 자료의 경우 0.3938 m s^{-1} 의 분해능으로 속도자료를 생성하며, 이와 관련된 속도추정의 불확실성은 각각 0.045 m s^{-1} 와 0.114 m s^{-1} 이다(Fang et al., 2017).

구름레이더로부터 Mie 기법을 이용하여 공기의 연직속도를 추정할 때, 빗방울이 구형이라고 가정하였다. 빗방울이 편평한 회전 타원체인 경우, T-매트릭스를 사용하면 첫 번째 Mie 최소치 위치는 약 1.71 mm 에서 나타나며, 이로 인한 연직속도 추정의 불확실성은 0.046 m s^{-1} 이다(Kollias et al., 2002). 이밖에 TO의 경우 도플러 빔 확대(Doppler beam broadening)에 의

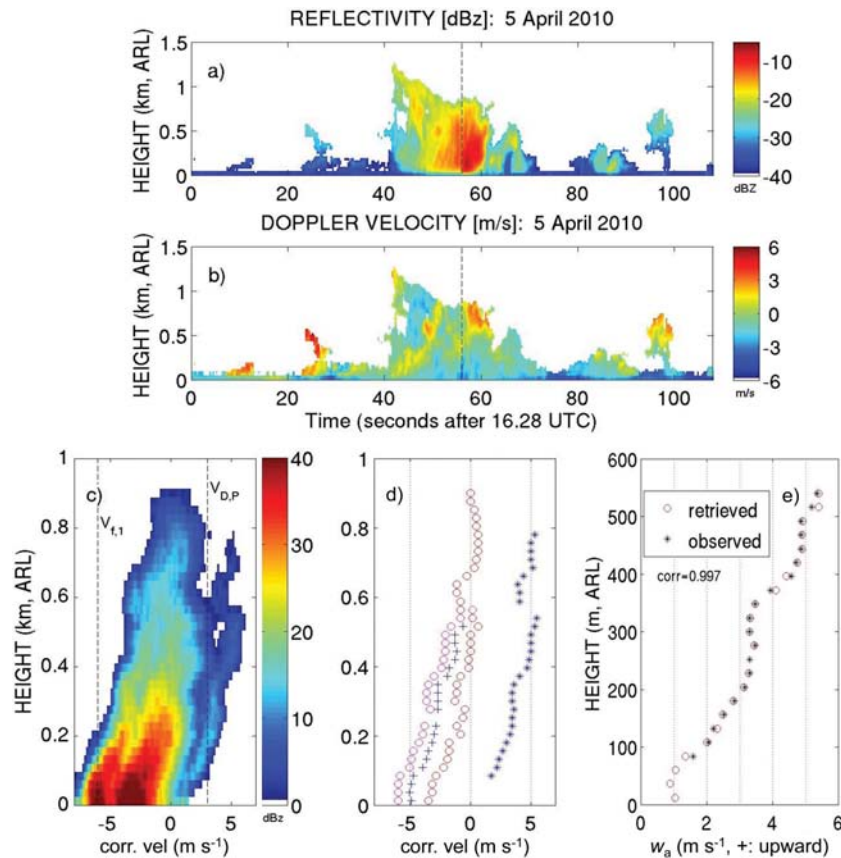


Fig. 5. A time-height cross-section of (a) radar reflectivity and (b) motion corrected Doppler velocity (+: upward) in the precipitating cloud on 5 April 2010 during BACEX from 16.28 (16:16:48) to 16.31 (16:18:36) UTC. The reported height is above the Airborne Radar Level (ARL). Zero height corresponds to 768 m above sea level. Dashed line indicates a specific time for the Doppler spectra in Fig. 5c. (c) Doppler power spectra observed on 16:17:45 UTC 5 April 2010, which is denoted as a dashed line in Figs. 5a, b. The vertical lines in (c) correspond to the $V_{t,1}$ and $V_{D,P}$. (d) Vertical profiles of peaks and valleys of motion corrected Doppler spectra, corresponding to Fig. 5c. Red (magenta) circles and blue crosses indicate 1st (2nd) maximum and 1st minimum location in the Doppler spectra due to the Mie oscillation. Blue asterisks represent peaks due to the cloud droplets. (e) Vertical air motions with height, retrieved from the Mie technique (circles) and obtained from the Doppler velocity of cloud droplets (asterisks) on 16:17:45 on 5 April 2010, denoted as dashed line in Figs. 5a, b.

한 오차는 0.22 m s^{-1} 이고, 이로 인해 발생하는 속도 추정 불확실성은 0.1 m s^{-1} 미만이다. 위에서 언급한 각 항목의 불확실성을 모두 고려한, 전체 불확실성은 바베이도스 자료에 대해서는 0.16 m s^{-1} , 키 웨스트 자료에 대해서는 0.19 m s^{-1} 로 알려진다(Fang et al., 2017).

3. 관측결과: 활용 및 검증

아프리카 대륙에서 대서양 지역으로 주기적으로 수송되는 에어로졸(먼지)이 무역풍 지역에서 발생하는 구름에 미치는 영향을 조사하기 위하여 2010년 3월

16일에서 4월 15일 사이에 바베이도스 에어로졸-구름 관측 캠페인(BACEX)이 실시되었다. 관측을 위한 주요 플랫폼은 Twin Otter (TO) 연구용 기상항공기로써, 이 연구용 항공기에는 온도, 습도, 가 강수량 등과 같은 기본 기상요소를 관측할 수 있는 각종 센서와 구름 미세물리과정을 관측할 수 있는 구름레이더, 그리고 에어로졸 입자크기에서 강수입자크기까지 관측할 수 있는 각종 관측장비(probe)들이 탑재되어 있었다.

관측 캠페인 기간 중, 강수구름에서 관측된 레이더 반사도 및 도플러 속도의 한 예를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 대부분의 구름에서 강수와 관련된 낙하 속도를 보인다(Fig. 5b). 그러나 구름내부에서 상승과

하강속도가 교차적으로 나타나는 부분이 눈에 띄며, 이는 큰 물방울로의 성장을 도울 수 있는, 구름내부에서의 재순환 가능성을 보여준다. Figures 5a, b에서 실선으로 표시된 특정시간에 관측된 도플러 스펙트럼을 살펴보면(Fig. 5c), 크기가 1.68 mm보다 큰 물방울로부터 미 신호(Mie signature)가 관측된 것을 알 수 있다. 앞에서 기술한 Mie 기법에 의해서 추정된 공기의 연직속도는 구름입자로부터 직접 관측된 연직속도와 비교할 수 있다. 구름입자로부터 후방산란되어 탐지된 스펙트럼 피크(spectral peak)는 공기의 연직속도로 간주될 수 있다. 이것은 구름입자는 크기가 매우 작아서 구름입자의 낙하속도는 무시할 수 있으며, 공기의 움직임을 따라 움직이기 때문이다. Figure 5e에서 Mie 기법으로부터 구한 공기의 연직속도와 구름입자로부터 직접 구한 연직속도 간의 차이는 0.1~0.2 m s⁻¹ 미만이며, 이 둘 사이의 상관관계는 0.997이다.

이와 같이 구름레이더에서는, 강수현상이 있을 경우에는 크기가 큰 강수입자로부터 수신되는 미(Mie) 산란 신호를 이용하여 공기의 연직속도를 구할 수 있으며, 강수현상이 없는 비 강수 구름에서는 구름내부의 구름입자로부터 수신되는 도플러 스펙트럼 피크를 관측하여 공기의 연직속도를 구할 수 있다.

최근 Fang et al. (2017)은 미(Mie) 기법으로부터 구한 공기의 연직속도를 항공기 운항시스템(aircraft motion sensing and INS)으로부터 구한 연직속도와 비교하였다. 비교에 사용된 사례는 2011년 5월 7일 미국 플로리다 주 키 웨스트 해상에서 관측된 얇은 해양성 적운이었으며, 비교결과 레이더로부터 구한 연직속도는 1.3 ± 0.5 m s⁻¹이었으며, 항공기 운항시스템으로부터 구한 연직속도는 0.6 ± 0.6 m s⁻¹로, Mie 기법으로부터 추정된 연직속도가 0.5~1 m s⁻¹ 강하게 나타났다. 이 연구에서 이러한 차이는, 레이더에서 관측한 자료가 항공기 운항시스템에서 수집한 자료보다 약 50 m 상공에서 관측되었기 때문이거나, 고도가 증가함에 따라 상승속도가 증가하는 경향 때문일 수도 있는 것으로 추정하였다. 또한 바베이도스에서 관측한 구름의 경우, Mie 기법으로 구한 연직속도는 항공기 운항시스템으로부터 관측한 속도와 0.1~0.2 m s⁻¹ 차이를 보였다(Jung, 2012).

4. 요약

대기 중에 지름이 약 1.68 mm 이상인 물방울이 존재하는 경우, 연직방향으로 주사하는 구름레이더에서 미(Mie) 기법을 사용하여 공기의 연직속도를 구할 수 있다. 이 리뷰논문에서는 강수가 있는 작은 적운 구름에서 구름레이더를 사용하여 공기의 연직속도를 구할 수 있는 방법을 정리하였다. 공기의 연직속도는 첫

번째 미(Mie) 최소치가 이론적으로 가지는 낙하속도와 스펙트럼상에서 첫 번째 미(Mie) 최소치가 실제로 관측된 시선속도와의 차이로 추정할 수 있다. 구름레이더가 항공기에 탑재된 경우에는, 항공기의 운동 및 자세각이, 관측된 도플러속도의 연직성분에 영향을 미치므로 이 항들을 보정하여 공기의 연직속도를 구할 수 있다. 항공용 도플러 레이더의 경우, 미(Mie)기법으로 구한 공기의 연직속도는 구름입자로부터 직접 후방산란 되어 관측된 연직속도 및 항공기 운항시스템으로부터 구한 연직속도와 잘 일치하는 결과를 보여주었다. 구름 레이더로부터 미(Mie) 산란 특징을 이용하여 연직속도를 추정하는 이 기술은 강수 및 비 강수 구름시스템에서의 연직속도장 매핑(mapping)에 응용할 수 있다. 또한 여러 고도에서의 항공기 관측을 통하여, 연직속도의 총체적인 구조뿐만 아니라 폭풍우의 성장, 발달, 소멸 주기(life cycle)를 재구성할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 「기상지진See-At기술개발연구」(KMI2018-06810)의 지원으로 수행되었습니다. 본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원님께 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Beard, K. V., 1985: Simple altitude adjustments to rain-drop velocities for Doppler radar analysis. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **2**, 468-471.
- Doviak, R. J., and D. S. Zrnić, 1993: *Doppler Radar and Weather Observations. 2nd ed.* Academic Press, 562 pp.
- Fang, M., B. Albrecht, E. Jung, P. Kollias, H. Jonsson, and I. PopStefanija, 2017: Retrieval of vertical air motion in precipitating clouds using Mie scattering and comparison with in situ measurements. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **56**, 537-553, doi:10.1175/JAMC-D-16-0158.1.
- Gossard, E. E., 1988: Measuring drop size distributions in clouds with a clear-air-sensing Doppler radar. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **5**, 640-649.
- Giangrande, S. E., E. P. Luke, and P. Kollias, 2010: Automated retrievals of precipitation parameters using non-rayleigh scattering at 95 GHz. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **27**, 1490-1503, doi:10.1175/2010JTECHA1343.1.
- Gunn, R., and G. D. Kinzer, 1949: The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *J. Meteor.*, **6**, 243-248.
- Haimov, S., and A. Rodi, 2013: Fixed-antenna pointing-

- angle calibration of airborne Doppler cloud radar. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **30**, 2320-2335, doi:10.1175/JTECH-D-12-00262.1.
- Heymsfield, G. M., 1989: Accuracy of vertical air motions from nadir-viewing Doppler airborne radars. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **6**, 1079-1082.
- Jung, E., 2012: Aerosol-cloud-precipitation interactions in the trade wind boundary layer, Ph.D. dissertation, University of Miami, 184 pp.
- Kalogiros, J. A., and Q. Wang, 2002: Calibration of a radome-differential GPS system on a Twin Otter research aircraft for turbulence measurements. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **19**, 159-171.
- Kollias, P., R. Lhermitte, and B. A. Albrecht, 1999: Vertical air motion and raindrop size distributions in convective systems using a 94 GHz radar. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3109-3112.
- _____, B. A. Albrecht, and F. Marks Jr., 2002: Why Mie?: Accurate observations of vertical air velocities and raindrops using a cloud radar. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1471-1483.
- _____, _____, and _____, 2003: Cloud radar observations of vertical drafts and microphysics in convective rain. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4053, doi:10.1029/2001JD002033.
- _____, E. E. Clothiaux, M. A. Miller, B. A. Albrecht, G. L. Stephens, and T. P. Ackerman, 2007: Millimeter-wavelength radars: new frontier in atmospheric cloud and precipitation research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **88**, 1608-1624. doi: 10.1175/BAMS-88-10-1608.
- Lee, W.-C., P. Dodge, F. D. Marks Jr., and P. H. Hildebrand, 1994: Mapping of airborne Doppler radar data. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **11**, 572-578.
- Lhermitte, R. M., 1988: Observations of rain at vertical incidence with a 94 GHz Doppler radar: An insight on Mie scattering. *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 1125-1128.
- _____, 2002: *Centimeter and Millimeter Wavelength Radars in Meteorology*. A&A Printing, 550 pp.
- May, P. T., and D. K. Rajopadhyaya, 1996: Wind profiler observations of vertical motion and precipitation microphysics of a tropical squall line. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 621-633.
- Mie, G., 1908: Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Ann. Phys.*, **330**, 377-445.
- Papoulis, A., and S. U. Pallai, 2004: *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. McGraw Hill, 852 pp.
- Probert-Jones, J. R., and W. G. Harper, 1961: Vertical air motion in showers as revealed by Doppler radar. *Proc. Ninth Weather Radar Conf.*, Kansas City, MO, Amer. Meteor. Soc., 23-26.
- Rajopadhyaya, D. K., P. T. May, R. C. Cifelli, S. K. Avery, C. R. Williams, W. L. Ecklund, and K. S. Gage, 1998: The effect of vertical air motions on rain rates and median volume diameter determined from combined UHF and VHF wind profiler measurements and comparisons with rain gauge measurements. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **15**, 1306-1319.
- Rogers, R. R., D. Baumgardner, S. A. Ether, D. A. Carter, and W. L. Ecklund, 1993: Comparison of raindrop size distributions measured by radar wind profiler and by airplane. *J. Appl. Meteor.*, **32**, 694-699.
- Wakasugi, K., A. Mizutani, M. Matsuo, S. Fukao, and S. Kato, 1986: A direct method for deriving drop-size distributions and vertical air velocities from VHF Doppler radar spectra. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **3**, 623-629.