X-밴드 이중편파레이더에서 관측된 채프에코의 특성

서은경^{1,*} · 박소라¹ · 남경엽² · 허솔잎²

¹공주대학교 지구과학교육과, 314-701, 충청남도 공주시 공주대학로 56

²국립기상연구소 응용기상연구과, 156-720, 서울특별시 동작구 여의대방로 16길 61

Characteristics of Chaff Echoes Observed by X-band Dual Polarization Radar

Eun-Kyoung Seo^{1,*}, Sora Park¹, Kyung-Yeub Nam², and Sol-Ip Heo²

¹Department of Earth Science Education, Kongju National University, Chungnam 314-701, Korea

²Applied Meteorology Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research,
Seoul 156-720, Korea

Abstract: To effectively remove chaff echoes, which are often misidentified as precipitation echoes on weather radars, this study examines the relationship between the radar reflectivity and each of dual polarimetric parameters. The dual polarimetric parameters are collected only for the echo areas identified as chaff echoes on the NIMR X-band dual polarization radar. Overall, the polarimetric parameters (i.e., reflectivity, differential reflectivity, cross correlation coefficient, standard deviation of differential reflectivity and specific differential phase) for chaff echoes have a wider range of values than those for precipitation echoes and the chaff filaments tend to be horizontally oriented to radar beams. There appears to be a considerable overlap in the cross correlation coefficient range of chaff and precipitation echoes since some precipitation echoes have cross correlation coefficient lower than 0.8. Therefore, although the cross correlation coefficient is known to be a good variable in identifying and separating chaff echoes from precipitation echoes, it is suggested that additional care should be taken when using the cross correlation coefficient solely in removing chaff echoes.

Keywords: chaff echo, dual polarization radar, polarimetric parameters, X-band, precipitation echo

요 약: 채프에코는 기상레이더 영상에서 강수에코로 자주 오인된다. 본 연구에서는 채프에코를 효과적으로 제거하기 위하여 국립기상연구소 X-밴드 이중편파레이더에서 관측한 자료를 활용하여 채프에코의 반사도와 각각의 이중편파변수의 관계성을 분석하였다. 특히 본 연구는 채프에코 사례의 입체관측자료 영상에서 채프에코가 발생한 영역만을 선별하여 이중편파변수 자료들을 수집하였다. 전반적으로 이중편파변수(반사도, 차등반사도, 교차상관계수, 차등반사도 표준편차와 비차등위상차)에 대해 채프에코의 변수 값이 강수에코보다 넓은 범위를 차지하며, 채프 섬유의 공간적 배치는 레이더 빔에 대해 수평적으로 놓여있는 경향이 나타났다. 일부 강수에코의 교차상관계수는 0.8 이하의 값을 갖고 있기 때문에 채프에코 값과 상당한 중첩이 나타났다. 일반적으로 교차상관계수는 강수에코와 채프에코를 효과적으로 분리하는데 좋은 변수로 고려되고 있지만, 이 연구는 교차상관계수만을 이용하여 채프에코를 제거할 경우에 일부 강수에코가 제거될 가능성이 있음을 시사한다.

주요어: 채프에코, 이중편파레이더, 이중편파변수, X-밴드, 강수에코

*Corresponding author: ekseo@kongju.ac.kr

Tel: +82-41-850-8293

Fax: +82-41-850-8299

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.

서 론

기상레이더는 전파를 대기 중으로 송신한 후에 기상 목표물로부터 후방 산란된 전파를 수신하여 분석하는 원격탐사 장비이다. 기상레이더에는 기상 목표물만 관측되는 것이 아니라 비기상에코인 지형, 태양 섬광, 곤충, 새, 채프(chaff) 등에 의한 에코가 기상에

코와 함께 빈번히 관측되기 때문에 정확한 강수량 추정에 있어서 많은 어려움이 발생한다. 특히 우리나라에서는 공군의 비행 훈련이 빈번히 실시됨에 따라 채프에코가 자주 관측된다(e.g., NIMR, 2010; Han et al., 2011).

채프는 알루미늄으로 코팅된 얇은 섬유로 감시용 레이더로부터 군용기의 위치를 교란하기 위하여 대기 중에 살포된다. 일반적으로 채프는 후방 산란 단면적을 최대로 하기 위해 군사용 감시레이더 파장(3, 5, 10 cm)의 반 파장(1.5, 2.5, 5 cm)의 길이로 제작된다(Garbacz et al., 1975). 미국 서부에서는 이러한 채프에코가 자주 관측되는데 이들은 강수에코와 같은 영역에 공존하거나 또는 강수에코와는 분리되어 관측된다(e.g., Maddox et al., 1997). 한편 강한 반사도의 채프에코는 대류세포로 판별되는 등 강수량 추정에 오류를 야기시킨다(e.g., Brandt and Atkin, 1998; Ziegler et al., 2001; Vasiloff, 2002; Jung et al., 2011). 그 한 예로 미국의 국립기상연구소(NSSL, National Severe Storms Laboratory)의 우박탐지 알고리즘은 채프에코와 혼합된 대류세포에서 우박의 발생 확률을 60%로 과대 추정하였다(Vasiloff and Struthwolf, 1997).

현재까지 채프에코에 대한 연구는 국내·외적으로 많지 않다. Warner and Bowen(1953)은 대기 중에 채프를 살포한 후 레이더로 채프에코를 추적하여 바람을 추정하는 방법을 제안하였다. Anderson and Hoehne(1956), Jessup(1972), Lee(2000)와 Kim et al. (2006)은 대기 중의 채프를 이용하여 상층 바람을 추정하거나 대기확산연구를 수행하였다. Martner et al. (1992)은 처음으로 원형편파레이더를 이용하여 채프에코를 탐지하였다. 한편 Zrnica and Ryzhkov(1999)는 S-밴드 이중편파레이더를 이용하여 채프에코와 강수에코의 이중편파변수를 관측하였으며, 일반적으로 채프에코는 강수에코보다 더 큰 차등반사도와 비차등위상차를 갖는 것으로 나타났다. Zrnica and Ryzhkov(2004)는 산란모델을 이용한 모의실험을 통하여 채프에코가 높은 차등반사도와 낮은 교차상관계수 값을 갖는 특성을 밝혔다. 국내에서는 MTSAT-1R (Multi-Functional Transport Satellite-1 Replacement) 적외영상의 밝기온도 색지수 임계값을 적용하여 단일편파레이더 합성장으로부터 채프에코를 제거하는 알고리즘이 개발되었다(Han et al., 2010, 2011). 또한 NIMR(2010)는 X-밴드 이중편파레이더를 이용하여 2009년

7월 1일부터 2009년 12월 31일까지 채프에코가 발생한 일수를 분석하였다. 이 분석 기간인 184일 중 73일에 해당하는 날 동안 채프에코가 관측되었는데 이는 약 40%에 해당하는 일수이다. Nam et al.(2010)과 NIMR(2010)는 채프에코의 특성을 살펴보기 위하여 채프에코, 채프-강우에코, 강설에코, 밝은 띠에코가 발생한 각 사례에 대해서 하나 또는 두 개의 입체관측만을 분석하여 이들의 이중편파변수 특성을 조사하였다. 그러나 이 연구들은 각각의 에코 특성을 분석하기에 자료의 크기가 충분치 않으며, 더욱이 채프 또는 기상 에코만을 선별하여 분석하지 않았기 때문에 서로 다른 에코들이 포함되어 있을 가능성이 많다.

따라서 본 연구는 채프에코의 이중편파변수 특성을 분석하기 위하여 국립기상연구소 X-밴드 이중편파레이더로 관측된 채프에코와 강수에코 각각의 사례들을 수집하고 채프에코와 강수에코가 관측된 영역만을 선별하였다. 이렇게 선별된 영역 내에 있는 채프에코와 강수에코의 이중편파변수 값의 범위 특성을 조사함으로써 채프 섬유가 갖는 편파변수 상의 물리적 특성을 살펴보았다. 국내·외적으로 채프에코에 관한 연구가 부족한 현실에서 이러한 채프에코 특성 연구는 채프에코를 강수에코로부터 효과적으로 제거할 수 있는 기틀을 마련하는데 기초 연구로 활용될 수 있을 것이다.

사용한 자료

국립기상연구소 X-밴드 이중편파레이더의 특성

본 연구에서 사용한 국립기상연구소 X-밴드 이중편파레이더는 고정 관측 및 이동 관측이 가능한 레이더이며(Table 1), 본 연구에서 사용한 자료의 기간 동안은 전라남도 무안군 해제면에서 관측을 수행하였다. 이 레이더는 9360 MHz의 주파수를 사용하며, 수평편파와 수직편파를 동시에 송신하고, 수평편파와 수직편파를 각각 수신한다. 안테나는 포물형으로 직경은 2.44 m, 빔폭은 1°, 최대 관측 시선속도는 32 ms⁻¹이다.

본 연구에서 사용하는 이중편파레이더에서 산출되는 9개의 관측변수는 지형에코 필터 적용 전 수평반사도(DZ), 지형에코 필터 적용 후 수평반사도(Z_{HI}), 시선속도(VR), 스펙트럼폭(SW), 지형에코 필터 적용 후 수직반사도(Z_V), 차등반사도(Z_{DR}), 차등위상차(Φ_{DP}), 교차상관계수(ρ_{HV})와 비차등위상차(K_{DP})이다. 이들 변

Table 1. The specifications of NIMR dual polarization radar

NIMR Radar	
Latitude	35°5'39"N
Longitude	126°17'6"E
Height	33 m
Wavelength	3.2 cm (9360 MHz, X-band)
Antenna diameter	2.44 m
Peak Power	180 kW (90 kW simultaneous H/V)
Beam Width	1.0° at 3 dB
Bin spacing	150 m
Range	66 km
Nyquist Velocity	32.0 ms ⁻¹
numbers of Elevation	7 (0.5-6°)
Scan interval	5 min

수 중 수직반사도, 차등반사도, 차등위상차, 교차상관계수, 비차등위상차는 이중편파레이더에서만 관측이 가능한 이중편파변수들이다. 특히 2009년 국립기상연구소 X-밴드 이중편파레이더에 의해 관측된 차등반사도 값은 음의 편향을 갖는 것으로 나타났다(NIMR, 2010). 이 음의 편향을 줄이기 위해 연직지향 관측 방법(e.g., Gorgucci et al., 1999)을 이용하여 얻은 보정값(1.5 dB)을 2009년 강수예코 사례의 차등반사도 값에 더하였다.

연구 사례 및 자료

우리나라에서 단일편파레이더에 의해 관측되는 채프에코의 날 수는 연중 231일로 약 63%에 해당한다(Han et al., 2011). 이렇게 빈번히 관측되는 채프에코는 강수예코로 오인되어 강수량 추정에 많은 오차를 가져올 수 있다.

Fig. 1은 한반도의 중부지방에 강수현상이 있었으며, 남부지방에 채프에코가 관측된 사례를 보여준다. 이 날 MTSAT-1R 가시영상은 호남지방에 얇은 상층 구름을 보이고 있으나(Fig. 1a), 자동기상관측시스템의 60분 누적강수량 분포는 이 지역에 강수현상이 없음을 나타냈다(Fig. 1b). 반면 레이더 합성영상을 보면 전라남도 일대에서 예코가 관측되었다(Fig. 1c). 이 날 레이더 합성영상에 보이는 채프에코는 강수에 코로 식별되어 강우강도를 만들어 냈다. 이 영상은 채프에코로 인하여 오인된 강수 현상이 예보자에게 커다란 혼란을 가져올 수 있음을 보여주는 좋은 예이다.

본 연구에서 사용한 채프에코 자료는 2010년에 관측된 사례들로부터 수집되었다(Table 2). 채프에코 관측자료 수집을 위해 먼저 육안 관찰을 하여 90개의 입체관측 영상을 선택하였으며, 특히 빗차폐, 청천대기예코와 이상전파예코들이 포함되지 않는 채프에코만 존재하는 영역을 선별하였다. 또한 0 dBZ 이하의 반사도에는 잡음신호가 많이 포함된 것으로 판단되어 0 dBZ 이하의 반사도는 분석 자료에 포함시키지 않았다. 이들 채프에코 사례들은 7일의 입체관측 자료로 관측 고도각은 1.0, 2.0, 3.0과 4.0°이다. 강수예코 자료는 2009년과 2010년에 관측된 사례들이다(Table 2). 강수예코 사례는 총 10개 입체관측을 포함하며, 관측 고도각은 2.0, 3.0, 4.0과 5.0°이다. 일반적으로 X-밴드 레이더의 경우 40 dBZ 이상의 강한 반사도를 갖는 강수 영역의 후면에서 0.2 dBkm⁻¹ 정도의 감쇠가 나타난다(Doviak and Zrnicek, 1993). 따라서 40 dBZ 이상의 강한 반사도를 갖는 강수 영역 후면의

Fig. 1. (a) Visible image of MTSAT-1R at 1033 LST (0133 UTC) 16 June 2010, (b) 60 minute-accumulated rainfall amount (mm) distribution at 1025 LST (0125 UTC) 16 June 2010, and (c) radar composite image for the chaff case at 1020 LST (0120 UTC) 16 June 2010.

Table 2. The chaff and precipitation cases used in this study

	Date	Number of Volume	
		Number	Total
Cases	26 May 2010 0506-1015 UTC	28	90
	02 Jun. 2010 1608-1746 UTC	11	
	16 Jun. 2010 0056-0239 UTC	11	
	22 Jun. 2010 0510-0630 UTC	9	
	29 Jun. 2010 0320-0420 UTC	7	
	05 Jul. 2010 0500-0650 UTC	12	
	07 Jul. 2010 0300-0450 UTC	12	
Precipitation cases	20 Jul. 2009 1500 UTC	1	10
	16 Aug. 2010 0156-0319 UTC	9	

자료는 강수에코 자료에 포함되지 않았다.

각 유형에 해당하는 에코만을 수집하기 위하여 다음과 같이 수행하였다. (1) 이중편파레이더 영상을 육안 관찰하여 채프에코가 관측된 90개의 입체관측

자료와 강수에코가 관측된 10개의 입체관측 자료를 선정하였다. (2) 각 유형의 에코가 나타난 영역(Fig. 2에 나타난 부채꼴 영역들)을 방위각과 방사거리로 표현하여 표로 만들었다(Tables 3 and 4). (3) 이 표를 참조하여 선정된 영역 내부에 있는 이중편파변수 값들을 수집함으로써 분석 자료에 포함될 수 있는 잡음을 최소화하였다. 이러한 방법으로 수집된 채프 에코와 강수에코의 자료 수는 각각 44,393개와 74,599개 이다.

채프와 강수 에코 영상 비교

이 절은 반사도, 차등반사도, 교차상관계수의 평면 위치표시기(PPI, Plan Position Indicator) 영상을 살펴봄으로써 채프와 강수의 공간적 배치 특성과 이들 에코 유형들이 갖는 편파변수상의 물리적 특성에 대해서 논의할 것이다.

Table 3. Examples of the azimuth and range lists for the regions selected as chaff echoes in Fig. 2

Year	Month	Day	Hour	Min.	Elev.	Azimuth1 (°)	Azimuth2 (°)	Range1 (km)	Range2 (km)
2010	06	16	01	25	2.0	10	20	30	40
2010	06	16	01	25	2.0	30	55	60	75
2010	06	16	01	25	2.0	60	70	50	70
2010	06	16	01	25	2.0	280	300	60	75
2010	06	16	01	25	3.0	10	20	25	45
2010	06	16	01	25	3.0	35	50	60	70
2010	06	16	01	25	3.0	60	80	50	70
2010	06	16	01	25	3.0	280	310	50	70
2010	06	16	01	25	4.0	10	20	25	40
2010	06	16	01	25	4.0	35	75	25	60
2010	06	16	01	25	4.0	280	310	45	65

Table 4. Examples of the azimuth and range lists for the regions selected as precipitation echoes in Fig. 3

Year	Month	Day	Hour	Min.	Elev.	Azimuth1 (°)	Azimuth2 (°)	Range1 (km)	Range2 (km)
2009	07	20	15	00	3.0	0	30	0	50
2009	07	20	15	00	3.0	135	155	25	60
2009	07	20	15	00	3.0	210	245	0	25
2009	07	20	15	00	3.0	300	340	0	30
2009	07	20	15	00	4.0	10	30	0	50
2009	07	20	15	00	4.0	40	50	0	50
2009	07	20	15	00	4.0	140	150	0	50
2009	07	20	15	00	4.0	210	250	0	40
2009	07	20	15	00	4.0	308	320	0	40
2009	07	20	15	00	4.0	330	360	0	30
2009	07	20	15	00	5.0	10	20	0	50
2009	07	20	15	00	5.0	25	65	0	55
2009	07	20	15	00	5.0	140	155	0	50
2009	07	20	15	00	5.0	220	250	0	25
2009	07	20	15	00	5.0	305	320	0	25
2009	07	20	15	00	5.0	330	360	0	30

(a) 16 Jun 2010 01:25:51 UTC CZ Elev=4.0

(b) 16 Jun 2010 01:25:51 UTC ZD Elev=4.0

(c) 16 Jun 2010 01:25:51 UTC RH Elev=4.0

Fig. 2. PPI images of (a) radar reflectivity, (b) differential reflectivity and (c) cross correlation coefficient at the 4.0° elevation angle for the chaff case observed at 0125 UTC 16 June 2010.

반사도

채프에코는 확산 초기에 좁은 영역에서 높은 반사도로 관측되며, 시간이 지나면서 풍향을 따라 길게 확산되는 특성을 가지고 있다. 이 연구에 사용된 90 개의 채프 사례들 중에서 대표적인 채프에코 사례의 PPI 영상을 Fig. 2에 나타내었다. 이 날에 레이더로부터 방사거리 25 km 이내에 매우 낮은 반사도를 갖는 청천대기예코가 동시에 관측되었다. 이 영상에 채프에코로 판단된 3개의 영역에 C1, C2, C3로 표시하였다(Fig. 2a). 선정된 3개의 영역에서 채프에코의 반사도는 음의 값부터 20 dBZ 정도까지의 범위를 보였

다. 특히 C1 영역에서의 채프에코는 채프 섬유의 확산이 시작된 지 얼마 지나지 않았기 때문에 20 dBZ에 가까운 높은 반사도를 가지며, 점 모양의 에코가 풍하측을 따라 띠 모양으로 변화하는 모습을 보인다. 또한 다른 영역들(C2와 C3)에서 관측된 채프에코들은 시간에 따라 채프 섬유가 풍하측으로 확산하면서 약화하고 있는 것으로 보인다.

Fig. 3a는 강수 사례로 레이더를 중심으로 북쪽과 서쪽으로 강수예코가 넓게 분포하고 있다. X-밴드 레이더 반사도에서 강한 강수에 의한 감쇠 영향을 제외하기 위하여 40 dBZ 이상의 강한 강수의 후면에

(a) 20 Jul 2009 15:00:03 UTC CZ Elev=3.0

(b) 20 Jul 2009 15:00:03 UTC ZD Elev=3.0

(c) 20 Jul 2009 15:00:03 UTC RH Elev=3.0

Fig. 3. PPI images of (a) radar reflectivity, (b) differential reflectivity and (c) cross correlation coefficient at the 3.0° elevation angle for the precipitation case observed at 1500 UTC 20 July 2009.

있는 레이더 반사도를 분석 자료에 포함하지 않도록 4개의 영역(P1-P4)을 설정하였다(Fig. 3a).

차등반사도

차등반사도는 수직반사도에 대한 수평반사도의 비를 나타내는 변수로서 대기수상체의 크기, 형태, 방향과 강도에 따라 달라지며, 수상체의 형태를 파악할 수 있어 특히 우박감지에 유용하게 사용된다(e.g., Rinehart, 2010). 따라서 차등반사도는 수상체의 수평과 수직의 비를 통하여 수상체의 모양을 추정할 수

있기 때문에 채프에코의 이동 또는 확산 시 채프 섬유의 공간적 배치 분포를 알 수 있다. 일반적으로 채프 섬유는 수평바람의 방향과 나란하게 배치되는 경향이 있다. 이는 공기의 저항을 최소화하기 위해서이다. 더욱이 대기 중의 풍속은 수평성분이 연직성분에 비하여 훨씬 크므로 대부분의 채프 섬유들은 수평으로 누워서 분포하게 된다. 반면에 연직으로 서있는 채프 섬유는 상승류가 강할 때 가능하다.

채프에코의 영상에서 채프에코의 차등반사도는 주로 2.5 dB 이상을 보이며, 때로는 -2.5 dB 이하의 음

의 값도 보인다. 일부 좁은 영역에서는 차등반사도의 값이 -2.5에서 2.5 dB까지 급격히 변화했다(Fig. 2b). 특히 영역 C2에서 레이더 중심에 가까운 채프에코는 0 dB 이하의 값들을 가지며 레이더에서 멀수록 양의 값을 나타내는 특징을 보인다. 10 dB 이상의 높은 차등반사도 값을 갖는 채프 섬유는 그 장축이 수평으로 누워서 비교적 천천히 낙하함으로써 좀 더 높은 고도에 위치하고 있는 것으로 생각된다. 레이더 중심에 가까운 음의 차등반사도는 채프 섬유의 장축이 연직방향으로 놓여 빠르게 낙하함으로써 낮은 고도에 먼저 도달했음을 시사하고 있다. 그러나 음의 차등반사도가 뚜렷한 영역에서의 반사도는 매우 낮은 값을 보이고 있기 때문에 수직반사도가 노이즈 레벨에서 관측되었을 가능성이 크다. 또한 이 곳은 채프 섬유가 연직방향으로 놓여 있을 만큼의 강한 상승기류가 존재하지 않았을 가능성이 크다. 따라서 음의 차등반사도가 분포하는 영역에서 채프 섬유들이 연직으로 놓여 낙하한다고 보기는 어렵다.

강수에코의 차등반사도는 전반적으로 0 dB 이상의 값을 보이며, 강수에코의 가장자리 또는 레이더로부터 먼 거리에 위치한 영역에서 음의 값을 나타냈다(Fig. 3b). 차등반사도 값이 2.5 dB 이상인 영역에서의 반사도 값은 주로 35 dBZ 이상인 것으로 나타났다. 반사도가 큰 곳에서는 비교적 큰 강우입자가 낙하하면서 수평적으로 좀 더 긴 장축을 갖는 편구(oblate)의 모양이므로 양의 값의 차등반사도를 나타낸 것으로 사료된다.

교차상관계수

교차상관계수는 수평편파신호와 수직편파신호 사이의 상관관계를 나타내는 이중편파변수로 경사각(canting angles), 불규칙한 모양과 이심률, 빙정과 액상 수상체의 혼합의 유무에 의해 영향을 받는다. 완벽하게 구형인 물질은 교차상관계수가 1.0이고, 강우의 경우는 전형적으로 0.97 이상의 값을 갖는다. 반면 불규칙한 모양을 갖는 강수입자는 0.8에서 0.95의 교차상관계수를 갖게 되어 강수와 비강수를 구분하는데 유리하게 사용된다(e.g., Rinehart, 2010). 이러한 교차상관계수의 성질을 이용하여 채프에코와 강수에코의 특성을 분석하였다(Figs. 2c and 3c). Fig. 2c에서 선정된 3개의 채프에코 영역은 대부분 0.8 이하의 낮은 교차상관계수를 보이지만 C2와 C3 영역에서 0.9 이상의 값도 나타났다. 낮은 교차상관계수는 채프 섬유의

공간적 배치가 다양하기 때문에 채프에코의 수직 반사도와 수평반사도 간의 상관도가 낮게 나타난 것으로 사료된다. 하지만 일부 영역에서 높은 교차상관계수도 가질 수 있음을 보이고 있다. Fig. 3c에 선정된 4곳의 강수에코 영역은 채프에코와 비교하여 0.98 이상의 높은 교차상관계수를 나타낸다. 반면 P1 영역의 가장자리에서 교차상관계수는 0.90 이하의 낮은 값을 보이며, 0.40-0.90의 범위에 있다. 강수에코 영역에서의 교차상관계수가 높은 이유는 강수입자들이 균질하게 분포하고 있어서 수평반사도와 수직반사도 사이의 상관도가 좋기 때문이다. 한편 강수에코 가장자리에서의 낮은 교차상관계수는 이들 게이트(레이더 시선방향에서의 공간적 분해능 간격을 갖는 격자)내에 대기수상체가 비균질적으로 분포하기 때문일 것이다. 또한 일반적으로 융해층을 통과한 빔은 강설입자들에 대해서 보다 낮은 교차상관계수를 보이는 경향이 있다.

채프와 강수 에코의 이중편파변수 빈도분포

이 절에서는 채프 또는 강수에코만 해당하는 에코의 반사도와 특정 이중편파변수의 빈도분포 특성을 분석함으로써 채프에코가 강수에코로부터 분리 가능한지를 논의할 것이다.

반사도와 차등반사도의 빈도분포

두 변수들 사이의 빈도분포를 살펴보기 위하여 각 사례 영상에서 선별된 영역들 내의 게이트들이 갖는 반사도와 차등반사도의 쌍들을 수집하였으며, 반사도와 차등반사도를 각각 x축과 y축으로 하는 2차원 공간에 이들의 빈도를 나타냈다(Figs. 4a and 4b). 채프에코의 경우에 반사도와 차등반사도는 각각 0-30 dBZ와 -8-23 dB의 범위를 가졌다(Fig. 4a). 한편 선행 연구에서 채프에코의 차등반사도 범위는 S-밴드 이중편파레이더에서 0-6 dB였으며(Zrnich and Ryzhkov, 2004), 본 연구와 동일한 X-밴드 이중편파레이더에서는 -10-30 dB였다(NIMR, 2010). 본 연구의 차등반사도는 S-밴드 이중편파레이더의 값보다 더 넓은 동적 범위를 보였다. 이렇게 변수 값의 범위가 다르게 보이는 것은 연구에 사용된 이중편파레이더의 파장과 입체관측 자료의 표본 크기가 관련되어 있을 것으로 사료된다. 즉 Zrnich and Ryzhkov(2004)와 NIMR(2010)는 각각

Fig. 4. The frequency distribution in the 2-dimensional space with the axes of reflectivity (Z_H) vs. (a, b) differential reflectivity (Z_{DR}), (c, d) cross correlation coefficient (ρ_{HV}), (e, f) standard deviation of differential reflectivity ($STD(Z_{DR})$), and (g, h) specific differential phase (K_{DP}) for the observed echoes of chaff and precipitation. The bin sizes for Z_H , Z_{DR} , ρ_{HV} , $STD(Z_{DR})$ and K_{DP} are 1.6, 1.2, 0.2, 0.3 and 1.2, respectively.

1-2개의 입체관측 자료만을 사용하였으며, 특히 전자의 반사도 영상에 나타난 채프에코의 반사도가 비교적 큰 값을 갖는 것으로 보아 채프 섬유의 확산이 시작된 지 얼마 되지 않은 시점 인 것으로 보인다. NIMR(2010)는 두 개의 입체관측 자료만을 사용하였다. 따라서 이 두 연구들에서 사용한 자료는 채프의 다양한 특성을 포함하기에는 충분치 않은 자료 표본 크기이다.

채프에코의 최대 빈도분포는 각각 1-5 dBZ와 7 dB의 반사도와 차등반사도에서 나타났다. 채프에코의 차등반사도는 대부분 0 dB 이상의 값을 보였으며 일부는 음의 값도 나타났다. 이는 대기 중에서 대부분의 채프 섬유가 수평적으로 누워있는 분포를 하고 있음을 의미한다. 음의 차등반사도 값을 갖는 채프 섬유는 연직적으로 서있을 가능성이 크다. 하지만 이러한 공간적 배치 분포는 빈도분포를 볼 때 매우 낮다.

강수에코의 빈도분포 범위와 최대 빈도의 영역은 채프에코와 매우 다른 모습을 나타냈다. 강수에코의 빈도분포를 통해 강수입자들은 0-49 dBZ의 반사도와 -2-9 dB의 차등반사도 범위를 가지며, 최대 빈도분포는 1-28 dBZ의 반사도와 3 dB의 차등반사도에서 나타났다(Fig. 4b). 본 연구의 강수에코 사례는 강수입자와 빙정입자를 모두 포함할 수 있는 고도를 갖도록 의도하였지만 실제로는 강수입자에 의한 에코가 대부분을 차지하고 있다. 따라서 차등반사도의 최대 빈도는 3 dB 주변에 집중하는데, 이는 낙하하는 강수입자의 편구 모양을 잘 반영하고 있다. 한편 강수에코의 차등반사도가 0 dB 이하의 값과 4 dB 이상의 높은 값을 갖는 것은 각각 빙정과 융해층의 녹는 입자에 의한 것으로 보인다.

반사도와 교차상관계수의 빈도분포

반사도와 차등반사도의 빈도분포와 유사하게 채프에코와 강수에코에 대해 반사도와 교차상관계수의 빈도분포를 분석하였다. 채프에코의 교차상관계수는 주로 0-1.0에 걸쳐 넓게 분포하며 대부분의 채프에코는 0.15과 0.4 사이의 값을 갖는다(Fig. 4c). 한편 선행 연구에서 채프에코의 교차상관계수는 S-밴드 이중편파레이더에서 0.2-0.6의 범위(Zmic and Ryzhkov, 2004)와 X-밴드 이중편파레이더 관측에서 0.1-0.8의 범위를 가졌다(NIMR, 2010). 이는 본 연구의 교차상관계수 범위와 비슷한 결과이다. 채프에코가 강수에코와 비교하여 낮은 교차상관계수를 갖는 이유로는 (1) 채프

섬유들이 낙하하는 형태의 다양성, (2) 낙하 시 섭동 등으로 인하여 수평과 수직으로 수신된 전파신호 사이의 상관관계가 낮기 때문일 것이다. 한편 NIMR(2010)의 연구에서 채프에코의 교차상관계수가 0.8 이상에서도 관측되었다. 본 연구에서도 10 dBZ 이상의 반사도에서 0.95 이상의 값을 갖는 교차상관계수가 매우 낮은 빈도로 분포한다. 따라서 채프에코가 때때로 높은 교차상관계수를 나타내기 때문에 교차상관계수만으로 채프에코가 제거될 수 없음을 시사한다.

강수에코의 교차상관계수는 0.7-1.0 범위에 넓게 분포하였고, 반사도가 5-30 dBZ 범위에 있을 때 교차상관계수는 약 0.95에서 최대 빈도분포를 보인다(Fig. 4d). 이 영역에 있는 강수입자들은 일정한 모양으로 분포하여 수평반사도와 수직반사도 사이에 높은 상관관계가 있는 것으로 보인다. 일부의 강수입자들은 0.8이하의 낮은 교차상관계수를 갖는다. 이러한 낮은 교차상관계수는 (1) 강수에코 영역의 가장자리에 위치한 게이트 내부의 부분 빔필링(*beamfilling*)으로 인한 비균질성, (2) 일부 게이트들은 강우, 빙정, 융해층에서의 액상과 빙정의 혼합 입자들로 인한 비균질성 등으로 설명할 수 있다(e.g., Doviak and Zmic, 1993). 특히 융해층의 교차상관계수는 균질적 분포를 지닌 강우나 빙정층과 비교하여 0.97 이하의 값을 가지며, 때때로 0.6 정도의 값이 관측되기도 한다(Illingworth and Caylor, 1989; Balakrishnan and Zmic, 1990).

반사도와 교차상관계수의 빈도분포 분석은 채프에코와 강수에코가 교차상관계수에 의해 비교적 잘 분리될 수 있음을 보여준다. 그러나 일부의 강수에코는 0.8 이하의 낮은 값을 갖기 때문에 교차상관계수만으로 채프에코를 효과적으로 제거하기에는 어려움이 있으며, 특히 융해층과 강수에코의 가장자리 부분이 제거될 가능성이 높다.

반사도와 차등반사도 표준편차의 빈도분포

강수에코와 비교하여 채프에코의 차등반사도 값은 비균질적으로 분포하며(Fig. 2b), 또한 넓은 동적 범위를 나타냈다(Figs. 4a and 4b). 따라서 차등반사도의 표준편차가 채프에코와 강수에코의 특성을 구분하는데 좋은 후보 변수가 될 것이라 예상하여 반사도와 차등반사도 표준편차의 빈도분포를 분석하였다(Figs. 4e and 4f). 차등반사도 표준편차는 각 게이트의 좌표에서 방위각에 대해 양 방향으로 1개씩과 방

사거리에 대해 전후방으로 3개씩의 게이트를 추출하여 총 21개의 게이트 표본을 확보한 후 중심 게이트와 주변 게이트들과의 차등반사도의 표준편차를 구하였다. 따라서 주어진 방위각 a 와 방사거리 b 에서의 차등반사도의 표준편차 식은 다음과 같다.

$$STD(Z_{DR}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-3}^3 (Z_{DR_{a,b}} - Z_{DR_{a+i,b+j}})^2}{3 \times 7}}$$

채프에코와 강수에코의 반사도와 차등반사도 표준편차 빈도분포를 살펴보면 채프에코의 차등반사도 표준편차가 매우 넓은 범위인 1-9 dB를 가지며, 강수에코는 0-3 dB의 범위를 갖는다. 채프에코의 최대 빈도는 2-8 dBZ의 반사도와 3-5 dB의 차등반사도 표준편차에 나타났다. 이를 통해 채프 섬유는 3차원의 공간적 입자 배치가 비균질적으로 분포하여 레이더가 바라보는 산란단면이 매우 다양한 반면에 강수입자들은 상당히 균질적 분포를 하고 있음을 시사한다.

반사도와 비차등위상차의 빈도분포

전자기파가 매질을 통과하는 동안 진행속도의 감소로 인하여 위상이 지연되며, 이 때 수평편파와 수직편파 사이의 위상 차이를 차등위상차라 한다. 이 차등위상차의 크기는 강우강도, 수상체의 방향성과 목표물까지의 총 경로 길이에 의존한다. 한편 거리에 따른 차등위상차의 변화율은 비차등위상차로 정의되며, 이 변수의 값은 수상체의 크기, 모양, 방향성과 굴절지수 등에 의존한다(e.g., Rinehart, 2010). 이 비차등위상차는 채프에코와 강수에코의 특성을 살펴볼 수 있는 좋은 변수로 고려되어 채프에코와 강수에코에 대한 반사도와 비차등위상차의 빈도분포를 분석하였다.

채프에코의 반사도와 비차등위상차의 빈도분포를 보면 채프에코는 0-30 dBZ를 갖는 반사도와 -16 ~ 17° km^{-1} 의 비차등위상차 범위에 분포하고 있다(Fig. 4g). 특히 반사도와 비차등위상차가 각각 1-7 dBZ와 0° km^{-1} 에서 최대 빈도를 보인다. 0° km^{-1} 의 비차등위상차를 갖는 물체는 이 물체가 무작위적인 방향성을 가지거나 그 모양이 구형에 가까운 것이며, 음수 값의 비차등위상차는 수평보다는 연직으로 긴 장축을 갖는 물체의 모양을 의미한다(Rinehart, 2010). 채프에코의 비차등위상차 빈도분포는 0° km^{-1} 값을 기준으로 대칭적으로 분포하고 있다. 이는 채프 섬유들이

수평으로 누워서 분포하는 것과 연직으로 서서 배치된 것들이 고르게 분포함을 의미한다. 하지만 반사도와 차등반사도 빈도분포에서 채프에코는 대부분 양의 차등반사도 값을 가지고 있어서 채프 섬유들이 3차원 공간에서 수평적으로 누워서 배치되었음을 논하였다. 따라서 본 연구에서 사용된 X-밴드 이중편파레이더의 비차등위상차 값은 다소 안정된 관측 값이 아니며, 따라서 체계적 편향이 있을 것으로 사료된다.

강수에코의 반사도 범위인 0-49 dBZ에 대해서 비차등위상차는 -12 ~ 10° km^{-1} 의 범위에 존재하고 있다. 특히 0-30 dBZ의 반사도를 갖는 강수입자들의 비차등위상차는 약 0° km^{-1} 근처에 집중되어 있다(Fig. 4h). 일반적으로 순수한 강수입자들로 이루어진 경우에 비차등위상차가 0° km^{-1} 이상의 값을 갖는 것으로 알려져 있다(e.g., Rinehart, 2010). 하지만 본 연구에서는 상당수의 강수에코의 비차등위상차가 0° km^{-1} 이하에 나타나고 있다. 이들 중의 일부는 용해층의 영향으로 볼 수 있지만 사용한 자료에서 용해층이 차지하는 비율은 작다. 따라서 채프에코와 강수에코의 비차등위상차 값에 따르면 본 연구에서 사용한 X-밴드 이중편파레이더는 차등위상차에 대해 불안정성을 보이며, 이로 인해 비차등위상차에 영향을 준 것으로 사료된다.

요약 및 결론

일반적으로 채프는 군에서 감시레이더를 교란시키기 위한 목적으로 군용기에서 살포되는 물질이다. 이러한 채프에코는 우리나라에서 기상레이더에 자주 관측되기 때문에 기상레이더를 이용한 강수량 추정에 큰 영향을 초래할 수 있다. 즉 단일편파레이더에서 관측되는 반사도 만으로는 채프에코를 식별하는데 한계가 있기 때문에 레이더 자료의 품질관리에 큰 영향을 주어왔다. 한편 국립기상연구소의 X-밴드 이중편파레이더를 비롯하여 기상청에 도입 예정인 이중편파레이더의 자료 품질관리를 위하여 채프에코의 이중편파변수 특성을 사전에 파악하는 것은 매우 중요한 일이다. 이를 위하여 본 연구는 기존의 연구와는 달리 관측기간 동안 채프에코가 나타난 관측 사례 날의 레이더 PPI 영상에서 채프에코를 육안으로 판단하고 채프에코가 나타난 영역만을 선정하여 수집한 후, 이들의 이중편파변수 특성을 분석하였다. 또한 채프에코와의 비교를 위하여 동일 레이더에서 관측한

강수에코 사례에 대해서 같은 방법을 적용하여 분석하였다.

레이더 PPI 영상에서 채프에코는 확산 초기에 강한 점 에코로 관측되다가 시간이 지남에 따라 풍하측으로 기울고 길게 분포하는 특징을 가졌다. 확산 초기의 채프에코 반사도는 20 dBZ 정도의 값도 나타났다. 반사도의 축에 대한 차등반사도, 교차상관계수, 차등반사도 표준편차와 비차등위상차를 축으로 하는 2차원 평면에서 채프에코와 강수에코의 빈도분포의 특성을 분석하였다. 강수에코와 비교하여 채프에코의 차등반사도는 -8-23 dB의 넓은 범위에 분포하였으며, 대부분의 채프에코는 양의 차등반사도를 보였다. 이는 채프 섬유가 3차원 공간에서 다양하게 배치됨으로써 차등반사도가 비교적 넓은 범위에 나타나며, 이와 관련되어 채프에코의 차등반사도 표준편차도 큰 값을 나타냈다. 채프에코의 교차상관계수는 대부분 0.8 이하의 낮은 값을 가졌으며, 이는 대기 중에서 채프의 다양한 또는 균질하지 못한 배열에 의한 것으로 사료된다. 비차등위상차는 0° km^{-1} 에서 최대 빈도분포를 나타내며 이 값을 기준으로 대칭적으로 분포했다. 이는 채프 섬유가 3차원 공간에서 수평적인 입자배치와 연직적인 입자배치가 고르게 분포함을 의미한다. 하지만 이러한 결과는 차등반사도의 빈도분포 분석과 다른 결과이며, 이를 통해 차등위상차의 관측 값들이 안정되지 못함을 유추할 수 있다.

이러한 2차원 평면에 반사도와 그 밖의 주요 이중편파변수 관측 값들의 빈도분포를 볼 때 교차상관계수는 채프에코를 식별하고 제거하는데 효과적인 변수로 고려될 수 있다. 하지만 일부 채프에코의 교차상관계수 값이 0.95 근처에 분포하며, 융해층을 비롯한 강수에코의 가장자리 부분은 0.8 이하의 낮은 교차상관계수를 보였다. 이에 따라 강수에코의 교차상관계수가 0.8 이하인 영역은 채프에코의 교차상관계수 영역과 상당히 중첩된다. 따라서 채프에코의 제거를 위해 교차상관계수 이외에도 다른 이중편파변수들이 고려되어야 함을 시사한다. 이와 관련하여 차등반사도 표준편차는 이러한 목적을 위해 또 다른 좋은 후보 변수로 보여진다.

본 연구를 통해 특정한 변수만을 이용하여 강수에코로부터 채프에코를 성공적으로 분리하는 데는 한계가 있음을 알 수 있었다. 따라서 채프에코와 강수에코로 선정되어 수집된 모든 편파변수들을 사용하여 이들의 동시 상관관계의 특성을 지닌 다변수 분석을

통해 채프에코의 식별 및 제거를 위한 알고리즘을 설계할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상연구소 “관측지진 기술 지원 및 활용 연구” 사업의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- Anderson, A.D. and Hoehne, W.E., 1956, Experiments using window to measure high altitude winds. *Bulletin of American Meteorology Society*, 37, 454-457.
- Balakrishnan, N. and Zrnica, D.S., 1990, Use of polarization to characterize precipitation and discriminate large hail. *Journal of Atmospheric Sciences*, 47, 1525-1540.
- Brandt, M.B. and Atkin, D.V., 1998, Chaff in the vicinity of thunderstorms in Southern California on 6 June 1997. *NWS Western Region Technical Attachments*, 98, Available online at <http://www.wr.noaa.gov/wr/98TAs/9804/index.html> (November 5th 2012).
- Doviak, R.J. and Zrnica, D.S., 1993, *Doppler radar and weather observations*. Academic Press, New York, USA, 562 p.
- Garbacz, R.J., Cable, V., Wickliff, R., Caldecott, R., Buk, J., Lam, D., Demarest, K., and Yee, A., 1975, Advanced radar reflector studies. The Ohio State University Electro Science Laboratory, Department of Electrical Engineering; prepared under Contract F33615-72-C-1435 for Aeronautical Systems Division, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio (AFAL-TR-75-219).
- Gorgucci, E.D., Scarchilli, G., and Chandrasekar, V., 1999, A procedure to calibrate multiparameter weather radar data using the properties of the rain medium. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37, 269-276.
- Han, H.-Y., Heo, B.-H., Kim, W.G., You, C.-H., Gu, J.-Y., and Lee, J.-H., 2010, Chaff echo identification and removal algorithm. *Proceeding of the Autumn meeting of KMS 2010*, p. 262-263. (in Korean)
- Han, H.-Y., Heo, B.-H., Jung, S.-H., Lee, G.W., You, C.-H., and Lee, J.-H., 2011, Elimination of chaff echoes in reflectivity composite from an operational weather radar network using infrared satellite data. *Atmosphere*, 21, 285-301. (in Korean)
- Illingworth, A.J. and Caylor, I.J., 1989, Cross polar observations of the bright band. *Preprints, 24th Conference on Radar Meteorology*, Tallahassee, American Meteorological Society, 323-327.
- Jessup, E.A., 1972, Interpretations of chaff trajectories near a severe thunderstorm. *Monthly Weather Review*, 100,

- 653-661.
- Jung, S.-H., Lee, G.W., Kim, H.-W., and Kuk, B.J., 2011, Development of convective cell identification and tracking algorithm using 3-dimensional radar reflectivity fields. *Atmosphere*, 21, 243-256. (in Korean)
- Kim, D.S., Lee, D.I., Kim, P.K., and Rinehart, R.E., 2006, An experiment of chaff diffusion in clear sky using a WSR-88D radar. *Journal of Korean Meteorological Society*, 42, 225-236.
- Lee, D.I., 2000, A WSR-88D radar observation of chaff transport and diffusion in clear sky. *Bulletin of Korean Environmental Sciences Society*, 4, 263-271.
- Maddox, R.A., Howard, K.W., and Dempsey, C.L., 1997, Intense convective storms with little or no lightning over central Arizona: A case of inadvertent weather modification? *Journal of Applied Meteorology*, 36, 302-314.
- Martner, B., Marwitz, J.D., and Kropfli, R.A., 1992, Radar observations of transport and diffusion in clouds and precipitation using TRACIR. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 9, 226-241.
- Nam, K.-Y., Jang, K.H., Choi, Y.J., and Ryu, S.B., 2010, Analysis of chaff echoes using dual polarimetric radar. *Proceedings of the Autumn meeting of KMS 2010*, p. 416-417. (in Korean)
- National Institute of Meteorological Research (NIMR), 2010, Research for the meteorological observation technology and its application (II). 308 p. (in Korean)
- Rinehart, R.E., 2010, Radar for meteorologists. Rinehart Publications, Nevada Missouri, USA, 482 p.
- Vasiloff, S. and Struthwolf, M., 1997, Chaff mixed with radar weather echoes. *NWS Western Region Technical Attachment*, 97-02, 10 p.
- Vasiloff, S., 2002, Chaff and the WSR-88D precipitation processing system. *NWS Western Region Technical Attachment*, 02-09, Available online at <http://www.wrh.noaa.gov/wrh/02TAs/0209/> (November 11th 2012).
- Warner, J. and Bowen, E.G., 1953, A new method of studying the fine structure of air movements in the free atmosphere. *Tellus*, 5, 36-41.
- Ziegler, C.L., Rasmussen, E.N., Shepherd, T.R., Watson, A.I., and Straka, J.M., 2001, Evolution of low-level rotation in the 29 May 1994 Newcastle-Graham, Texas, storm complex during VORTEX. *Monthly Weather Review*, 129, 1339-1368.
- Zmic, D.S. and Ryzhkov, A.V., 1999, Polarimetry for weather surveillance radar. *Bulletin of American Meteorology Society*, 80, 389-406.
- Zmic, D.S. and Ryzhkov, A.V., 2004, Polarimetric properties of chaff. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21, 1017-1024.

2012년 10월 9일 접수
2012년 11월 19일 수정원고 접수
2012년 12월 20일 채택