creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000267050

2019년 2월
박사학위논문

C-band 기상레이더 최적 관측인자 도출 및 운영방안에 관한 연구

- 공군 강릉기지를 중심으로 -

조선대학교 대학원

지구과학과

문 종 빈

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

C-band 기상레이더 최적 관측인자 도출 및 운영방안에 관한 연구

- 공군 강릉기지를 중심으로 -

Optimal Observational Parameters and Operation plan for C-band Weather Radar at Gangneung station

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

지구과학과

문 종 빈

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

C-band 기상레이더 최적 관측인자 도출 및 운영방안에 관한 연구

- 공군 강릉기지를 중심으로 -

지도교수 : 박 두 선

이 논문을 이학 박사학위 신청 논문으로 제출함

2018년 12월

조선대학교 대학원

지구과학과

문 종 빈

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

문종빈의 박사학위 논문을 인준함

위원장	기상산업기술원	박 사	류 찬 수	(인)
위 원	기 상 청	박 사	이 종 호	(인)
위 원	전남대학교	박 사	박 태 원	(인)
위 원	조선대학교	박 사	박 근 영	(인)
위 원	조선대학교	박 사	박 두 선	(인)

2018년 12월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

그림 목차 iii
표 목차 iv
ABSTRACT v

Ⅰ. 서론 1
1.1. 연구배경 및 목적 1
1.2. 기상레이더 현황 2
1.2.1. 기상레이더 원리 2
1.2.2. 기상레이더 종류 및 재원 4
1.3. 기상레이더 관측전략 7
1.3.1. 기상레이더 위치선정 7
1.3.2. 기상레이더 관측 주요인자 10
1.3.3. 관측기법 17
1.4. 연구내용 및 범위 18

Ⅱ. 자료 및 연구방법 20
2.1. 대상지 선정 및 데이터 구축 20
2.1.1. 강릉기지 일반현황 20
2.1.2. 지형적 기후특성 및 강수량 20
2.2. 기상레이더 데이터 해석 22
2.2.1. 최적관측인자 설정 22
2.2.2. 지형클러터 시뮬레이션 22
2.2.3. S-band 및 C-band 레이더 특성 27
2.2.4. 빔차폐 지도작성 및 예측정확성 분석 29

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅲ. 결과 및 논의 ····· 40
3.1. 기상레이더 최적 관측인자 도출 ····· 40
3.1.1. 기상레이더 최저·최고 고도각 ····· 40
3.1.2. 기상레이더 최적고도각 ····· 43
3.2. 기상레이더 최적운영 방안 제시 ····· 47
3.2.1. 기상레이더 관측전략 ····· 47
3.2.2. 기상레이더 최적 관측전략 ····· 48
3.2.3. 레이더 관측결과 비교분석 (관측기법 미적용) ····· 50
3.2.4. 레이더 관측결과 비교분석 (CAPPI 적용) ····· 67
3.2.5. 소결론 ····· 82

Ⅳ. 결론 ····· 84

참고문헌 ····· 86
Appendix ····· 90

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림목차

그림. 1-1. 공군 기상레이더 배치현황 ····· 4
그림. 1-2. 기상청 기상레이더 배치현황 ····· 6
그림. 1-3. 다중 포착 에코 ····· 14
그림. 1-4. 방위각 분해능 ····· 15
그림. 1-5. 거리 분해능 ····· 16
그림. 1-6. 연구방법 흐름도 ····· 19
그림. 2-1. 공군 강릉기지 위치 ····· 20
그림. 2-2. 강릉기지 기상특성 ····· 21
그림. 2-3. 레이더 차폐 시뮬레이션 과정 ····· 22
그림. 2-4. 최저고도각 분포분석 ····· 23
그림. 2-5. 최저고도각 분석 ····· 24
그림. 2-6. 최저고도각 분석 시뮬레이션 ····· 26
그림. 2-7. 지형 클러터 결과(고도각 3.3°) ····· 26
그림. 2-8. 지형 클러터 결과(고도각 5.9°) ····· 27
그림. 3-1. 최저·최고 고도각 산정 ····· 40
그림. 3-2. 최적 고도각 산정 모식도 ····· 43
그림. 3-3. 기법 변화에 따른 관측 고도각 ····· 46
그림. 3-4. 기상 특성을 고려한 관측전략 ····· 48
그림. 3-5. 전국 기상레이더 합성화면 ····· 49
그림. 3-6. 기상청 일기도(2018.04.23) ····· 50
그림. 3-7. 기상청 보조일기도(2018.04.23) ····· 51
그림. 3-8. 위성영상 08시~12시(2018.04.23) ····· 52
그림. 3-9. 기상청(상), 공군(하) 기상레이더 에코 비교(08:00) ····· 55
그림. 3-10. 기상청(상), 공군(하) 기상레이더 에코 비교(09:40) ····· 56
그림. 3-11. 기상청 일기도(2018.07.01) ····· 58
그림. 3-12. 기상청 보조일기도(2018.07.01) ····· 59
그림. 3-13. 위성영상 08시~12시(2018.07.01) ····· 60
그림. 3-14. 기상청(상), 공군(하) 기상레이더 에코 비교(08:30) ····· 64
그림. 3-15. 기상청(상), 공군(하) 기상레이더 에코 비교(09:20) ····· 65

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림. 3-16. 기상청 일기도(2018.08.28) ····· 67
그림. 3-17. 기상청 보조일기도(2018.08.28) ····· 68
그림. 3-18. 위성영상 15시~21시(2018.08.28) ····· 69
그림. 3-19. 기상청(상), 공군(하) 기상레이더 에코 비교(20:00) ····· 72
그림. 3-20. 기상청(상), 공군(하) 기상레이더 에코 비교(20:30) ····· 73
그림. 3-21. 기상청 일기도(2018.08.29) ····· 74
그림. 3-22. 기상청 보조일기도(2018.08.29) ····· 75
그림. 3-23. 위성영상 15시~21시(2018.08.29) ····· 76
그림. 3-24. 기상청(좌), 공군(우) 기상레이더 에코 비교(15:30) ····· 80
그림. 3-25. 기상청(좌), 공군(우) 기상레이더 에코 비교(16:20) ····· 81
그림. 3-26. 관측전략 수정 전(좌), 후(우) : 동해(강릉으로부터 약 50km) ····· 82
그림. 3-27. 관측전략 수정 전(좌), 후(우) : 속초(강릉으로부터 약 70km) ····· 83
그림. 3-28. 관측전략 수정 전(좌), 후(우) : 거진(강릉으로부터 약 100km) ····· 83
그림. A-1. 레이더 시스템의 기본구조 ····· 89
그림. A-2. 레이더 파장의 변화 ····· 91
그림. A-3. 펄스의 특성 ····· 92
그림. A-4. 펄스 부피 ····· 93
그림. A-5. 레이더 빔 ····· 94
그림. A-6. Below beam effect ····· 96
그림. A-7. Cone of silence ····· 97
그림. A-8. 목표물의 운동 결정 ····· 98

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 목차

표. 1-1. 공군 기상레이더 재원 ····· 5
표. 1-2. 기상청 기상레이더 재원 ····· 6
표. 1-3. 관측전략 고려요소 ····· 11
표. 1-4. 강수형태별 Z-R 관계식 ····· 18
표. 2-1. 강릉기지 지형정보 ····· 24
표. 2-2. 거리 및 높이에 따른 고도각 ····· 25
표. 2-3. 기상레이더 주파수 ····· 28
표. 2-4. 강릉지역 강수량 데이터(18.01~10) ····· 30-39
표. 3-1. 공군기상레이더 관측전략(기존) ····· 47
표. 3-2. 공군기상레이더 관측전략(변경) ····· 47
표. 3-3. 고도각에 따른 거리별 최저관측고도 ····· 49
표. 3-4. 공군 및 기상청 AWS 누적강수량(2018.04.23) ····· 53
표. 3-5. 공군 및 기상청 레이더 에코 감도비교(2018.04.23) ····· 54
표. 3-6. 공군 및 기상청 AWS 누적강수량(2018.07.01) ····· 61
표. 3-7. 공군 및 기상청 레이더 에코 감도비교(2018.07.01) ····· 62
표. 3-8. 공군 및 기상청 AWS 누적강수량(2018.08.28) ····· 70
표. 3-9. 공군 및 기상청 레이더 에코 감도비교(2018.08.28) ····· 71
표. 3-10. 공군 및 기상청 레이더 에코 감도비교(2018.08.29) ····· 79
표. A-1. 레이더 주파수와 파장 ····· 91

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Optimal Observational Parameters and Operation plan for C-band Weather Radar at Gangneung station

Moon, Jongbin
Advisor : Prof. Park, Doo-Sun, Ph.D.
Department of Earth Sciences,
Graduate School of Chosun University

The purpose of this study is to investigate the best observational parameters and operation plan for the C-band weather radar at Gangneung station. The optimum critical parameters observation angles were determined as follows: 124km of observation radius, 15°/s of antenna rotation speed, 900-1200Hz of PRF, 5.0-65.2° of Cb, and 0.5-54.4° of ST. The derived hourly precipitation from the Gangneung radar is comparable to the AWS(Auto Weather System) data within Gangwon area for several chosen cases in accuracy. In order to detect the Cb castle precipitation in spring and summer, the high mountainous area (i.e., Taebaek mountains) was disregarded. The precipitation coming from 5° farer from the station was observed, which shortens observation and analysis time of radar. Hence, the observation is useful for immediate support of air force operations. In winter, it is effective to operate the weather radar within the range of 0.5~54° to track the heavy snowfall and low cloud intrusion from the East Sea.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅰ. 서론

1.1. 연구배경 및 목적

레이더는 목표물을 향해 전파를 발사한 후 목표물로부터 되돌아오는 전파의 강도와 목표물까지의 거리를 측정하는 장치이다. 목표물의 위치는 안테나의 방향과 고도각, 그리고 송신파와 반사파의 시간간격으로부터 파악할 수 있다. 강수를 관측하기 위한 기상레이더의 적용은 레이더가 사용되기 시작하면서부터 고려되어져 왔다. 기존 우량계가 한 지점에서만 강수를 측정하는 것과는 달리 레이더는 일정한 면적에 대한 강수를 관측할 수 있다는 장점 때문에 우리나라를 비롯하여 여러 나라에서 광범위하게 사용하고 있다. 레이더 강수관측은 시간 및 공간 해상도의 증가로 강수의 연속적인 표현이 가능하며, 모든 종류의 강수를 다룰 수 있다는 장점이 있다. 특히 기상레이더는 신속한 관측능력과 우수한 공간적, 시간적 강수 탐지라는 장점을 지니고 있다.

우리나라는 기상청에서 1968년 관악산에 S-band의 기상레이더를 처음 설치하면서 레이더 관측을 시작하였으며, 이후 제주 고산, 부산, 동해, 군산 등 11개 지점에 기상레이더를 설치함으로써 우리나라 전역의 악기상을 감시할 수 있는 기본적인 관측망을 완성하였다. 뿐만 아니라 공군의 경우에도 1977년 8월 예천에 WSR-74C 레이더를 도입한 이래 축적된 운영기술과 지식을 바탕으로 현재는 최신의 이중편파 레이더인 WRK-200을 도입하여 운영하고 있으며, 제반 작전에 제한을 주는 기상요소(폭설, 뇌우 등)를 조기에 탐측하여 작전부서에 최신 기상 정보를 제공해 주고 있다.

오늘날까지 국내에서는 강수량 예보의 질적 향상을 높이기 위하여 부단히 노력하고 있으나 아직도 그 성과는 만족할 만한 수준에 이르지 못하고 있다. 특히, 우리나라에 많은 영향을 미치는 국지성 강수는 여름철 단시간 내에 급격히 발달하고 지속시간이 짧은 대류운으로 공간적으로 강수구역이 작아 기존의 종관 관측체계로는 분석 및 예보에 많은 어려움이 따른다. 뿐만 아니라 항공기상에 가장 큰 영향을 미치는 강풍이 동반된 국지적인 악 기상 현상의 경우는 규모가 미비하고 단시간에 발생・소멸하므로 단편적인 정보만으로는 예측이 불가능하다. 따라서 공군에서는 기상레이더를 활용하여 강수 구름대의 위치, 이동 속도, 발달 가능성을 파악하기 위한 노력을 기울이고 있다. 그러나 지형 및 감쇠에 의해 기상레이더 관측 자료의 품질이 저하되는 문제가 발생하고 있으며, 이에 따라 부정확한 자료가 생산됨에 따라 정확한 에코 추적이 힘들

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

어진다. (문종빈, 2012)

기상레이더 데이터의 품질관리 향상을 위해서는 레이더 최적 관측전략 수립 및 시스템 변수 설정이 중요하다. 과거 군에서는 레이더 초기 설치 시 업체에서 지정해 준 관측전략을 수정하지 않고 계속적으로 사용하였다. 이에 따라 기상에코 비교 검증 시 레이더에서 표출되는 강수량과 AWS(Auto Weather System:실제량)에서 관측되는 강수량 간의 차이가 발생하였다. 반면, 기상청에서는 퍼지이론 등 다양한 연구를 통해 품질관리 기법 향상을 위한 관측전략을 수립하고 있다. 하지만 기상청의 관측전략은 대부분 S-band 기상레이더에 한정되어 공군에서 보유한 C-band 레이더 관측전략 적용에는 한계가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 저기압성 강우, 국지정보 등을 획득할 수 있는 C-band 기상레이더가 설치된 강릉공군기지를 대상으로 기상레이더의 위치특성을 고려한 지형클러스터를 효과적으로 제거하고, 여름철 Cb성 강수량의 특성을 이해하여 최적의 관측전략을 수립하고자 한다.

1.2. 기상레이더 현황

1.2.1. 기상레이더 원리

RADAR는 그 어원이 뜻하는 바와 같이 전파의 방사에 의하여 생긴 반사파를 이용하여 목표물의 위치와 그 거리를 탐지하기 위한 시스템이다. 레이더는 특정한 파형의 전파(예: 펄스, 변조된 사인파)를 송신하고 수신신호의 특성을 탐지한다. 따라서 레이더 탐지는 에너지를 가로막는 물체에 의해 레이더로 반사되거나 산란된 에너지에 의존한다. 이것은 시각 기관에 의한 물체의 탐지와 비슷하다. 즉, 우리 눈은 태양에 의해 복사된 빛 에너지와 물체에 의해 반사되거나 산란된 에너지에 의해 우리가 보게 되는 것이다. 표적이라는 말은 레이더에 의해 보이거나 탐지된 물체를 의미한다. 레이더 기상학에서 표적이라는 용어는 영구 잡음과 구별되며, 탐지 가능한 에너지를 가지고 레이더로 되돌아 와서 다양한 종류의 스코프 상에서 신호 또는 에코로 표시되는 대기나 그 경계에 있는 어떤 것을 의미한다. 일반적으로 기상레이더의 표적은 자연의 강우나 구름에서 볼 수 있는 빗방울, 우박, 눈 결정, 눈송이, 구름방울, 얼음, 구름입자 또는 이들의 혼합물로 이루어진다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기상학적으로 중요한 이들 현상 외에 지표면, 빌딩, 나무, 호수나 대양의 표면, 새, 곤충과 같은 딱딱한 물체 그리고 온도와 습도의 강한 구배(句配:기울기)가 존재하는 대기 중에 보이지 않는 영역들이 레이더의 표적이 될 수 있으며 쓸모없거나 방해가 되는 다양한 크기의 에코를 생성한다.

기상레이더는 광범위한 공간 내의 강수 위치나 강도를 즉시에 파악할 수 있으며, 또한 연속적으로 감시가 가능하여 강수의 변화나 이동 상태를 포착할 수 있는 특징을 가지고 있다. 기상레이더로부터 얻어지는 정보는 태풍, 집중호우, 뇌우 등 재해를 동반하는 기상현상의 발견과 추적, 또는 강수량의 단시간 예측 등에 매우 유효하다. 현재의 기상 예보는 종관 관측 체계에 의존하고 있기 때문에 단시간 내에 발생하는 중간 및 소규모 악 기상을 탐지 및 예측하는데 한계가 있다. 특히 우리나라와 같이 복잡한 지형 조건을 가지고 있으며 단시간에 급격히 발달, 소멸하는 국지현상이 빈발하는 곳에서는 기상레이더에 의한 관측 자료가 매우 중요하게 이용되고 있다.

우리나라에서 재해에 영향을 주는 강수는 여름철에 단시간 내에 급격히 발달하고 지속시간이 짧은 대류운으로 공간적으로 강수구역이 작아 기존의 종관 관측 체계로는 분석 및 예보에 많은 어려움이 따른다. 그러므로 공간적으로 관측 능력이 우수한 기상레이더 에코 자료로부터 강수 구역 패턴을 구하고 위성과 지상관측자료를 병행, 이용하여 보정하면 좀 더 적절한 강수 분석에 접근할 수 있을 것이다. (문종빈, 2012)

1.2.2. 기상레이더 종류 및 재원

(1) 공군

공군은 1977년 경북 예천에 미국 EEC사의 WSR-74S를 최초 도입하여 관측을 시작하였다. 그 후 1979년 충남 천안의 성거산에 WSR-74S를 설치하였다가 1983년 광주로 이전 설치하였다. 이후 공군 비행장에서 국지적 기상관측을 위해서는 S-band에 비해 C-band가 적합하다는 의견이 대두되어 1991년에는 수원, 강릉, 중원에 WSR-74C를 설치하였다.(그림. 1-1).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

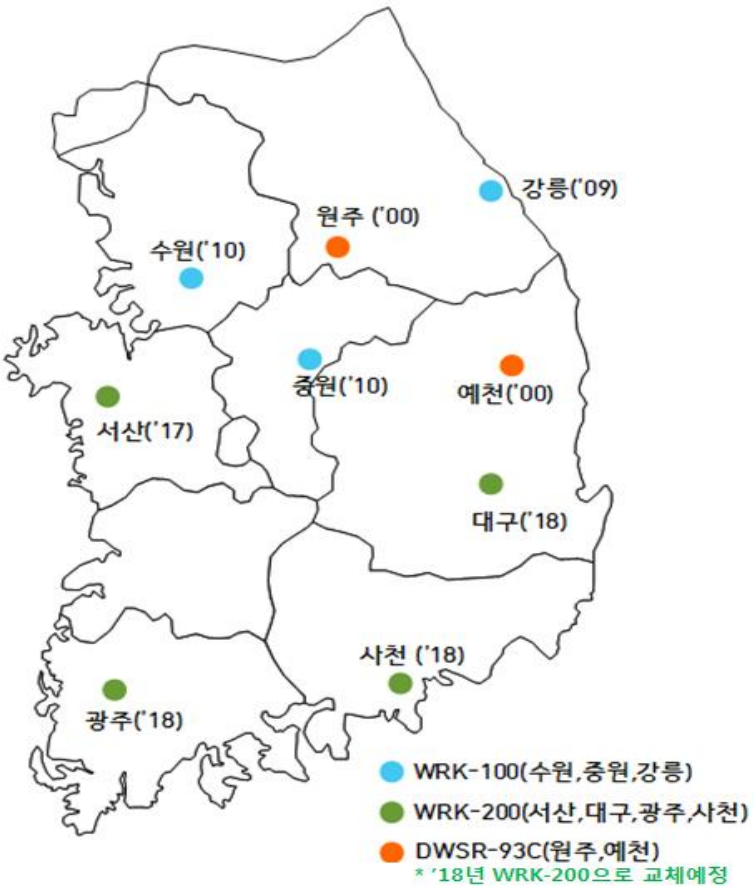


그림. 1-1. 공군 기상레이더 배치현황

또한 1998년 충남 서산에 독일 Gematronics의 METEOR-360AC를 도입・운용하였으며, 1999년부터 2000년 까지 노후 된 장비를 대체하기 위하여 미국 EEC사의 도플러 기능이 추가된 DWSR-93C를 대구, 광주, 예천, 원주, 사천에 총 5대를 도입하여 운영하였다. 그리고 1991년 강릉, 수원, 중원의 비 도플러 레이더인 WSR-74C를 대체하기 위하여 2010년부터 신 기상레이더 1차 사업이 시작되었으며, 2010년 핀란드 Vaisala의 Klystron 증폭관을 사용하는 도플러 레이더 WRK100으로 교체되었다. 이후 2016~2018년 서산, 대구를 시작으로 광주, 사천(2017년)에 이중편파 기상레이더 WRK-200를 설치하여 운영 중에 있으며, 2018년에 원주, 예천에 도입함으로서 2차 사업이 종료될 예정이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 1-1. 공군 기상레이더 재원

모델명	DWSR-93C	WRK100	WRK200
band	C-band	C-band	C-band
타입	Magnetron	Klystron	Klystron
최대출력	250kW	250kW	250kW
PRF	25~1200Hz	250~2125Hz	250~2125Hz
펄스폭	0.8~2.0μs	0.5~5.0μs	0.5~5.0μs
안테나 지름/이득	4.3m/45dB	4.5m/45dB	4.5m/45dB
빔 폭	1°	1°	1°
설치지역	예천, 원주	수원, 중원, 강릉	서산, 대구, 광주, 사천
도입년도	2000	2010	2016, 2017

※ DWSR-93C(예천, 원주) : 2018년 WRK200으로 교체예정

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(2) 기상청

기상청은 총 11대(백령도, 영종도, 관악산, 오성산, 진도, 고산, 성산, 구덕산, 면봉산, 강릉, 광덕산)의 기상레이더를 운영하고 있다 (시험용과 연구용은 제외). (그림. 1-2).

그림. 1-2. 기상청 기상레이더 배치현황

표. 1-2. 기상청 기상레이더 재원

분류	제작사	종류	안테나 고도(m)	안테나 직경(m)	관측반경 (km)	주파수 (MHz)
백령도	EEC	이중편파	185	8.5	240	2,870
영종도	MITSUBISHI	단일편파	142	7.0	130	5,637
관악산	EEC	이중편파	641	8.5	240	2,718
오성산	METSTAR	단일편파	231	8.5	240	2,735
진도	EEC	이중편파	500	8.5	240	2,890
고산	EEC	〃	103	8.5	240	2,825
성산	EEC	〃	500	8.5	240	2,890
구덕산	EEC	〃	549	8.5	240	2,712
면봉산	EEC	〃	1,136	8.5	285	2,727
강릉	METSTAR	단일편파	99	8.5	280	2,855
광덕산	EEC	이중편파	1,064	8.5	240	2,887

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.3. 기상레이더 관측전략

1.3.1. 기상레이더 위치선정

기상레이더를 설치할 적정한 장소를 찾는다는 것은 그 시스템이 강수탐지와 추적을 위한 기상목적으로만 사용된다 하더라도 항상 문제가 따른다. 이러한 문제점은 시스템을 이용하여 강수를 측정하고자 할 때 더욱 증가한다. 이는 강수측정을 위하여 운영자가 가능한 원거리로부터 정보를 얻고자 할 때와 강수의 강도와 범위 관측에 있어서 장소 선정의 문제시 최대거리확보 및 산존 에코 또는 장애물의 문제에 더 밀접하게 관련되어 있다. 즉, 설치장소 선정에는 어떤 확실한 규칙은 없으며, 완전한 장소는 실제적으로 알려져 있지 않기 때문에 설치장소 선정에 대한 사전 연구·검토가 필요하다.

일반적으로 레이더 설치장소 선정 시 고려할 사항은 다음과 같다.

(1) 레이더 관측 목적상의 고려사항

기상레이더의 관측 목적은 원활하고 안전한 항공작전의 수행은 물론 유사시 재해로부터의 피해를 최소화할 수 있도록 원거리 작전공역과 특히 항공기 이·착륙이 빈번한 모기지에 대해 24시간 신속·정확한 돌변기상을 탐지, 지원을 하는데 다음 2가지를 고려해야 한다.

① 기지에 이·착륙하는 항공기는 비행고도가 낮아 돌변 기상에 노출 시 심각한 상황에 처할 수 있다. 따라서 저고도에서 짧은 시간 동안 발생하여 영향을 주고 소멸되는 바람 shear(microburst, 요란), 소나기, 뇌우, 낙뢰를 동반하는 적란운, Low Ceiling, 안개(해무) 등이 관측될 수 있는 장소이어야 한다.

② 기지로부터 원거리 또는 지형장애로 관측되지 않는 공백지역을 최소화 할 수 있도록 적절히 배치하여야한다.

(2) 관측 환경상의 고려사항

기상레이더 설치장소 선정 시에는 기상특성(기류이동, 지역적인 기상특성) 및

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기지특성(지형영향, 인접기지와의 관측 범위 등)을 고려하여 지형장애로 인한 작전 운영지역 내의 레이더 관측 공백지역을 최소화할 수 있도록 배치해야 한다. 이를 위해 다음 사항이 고려되어야 한다.

① 수평 시계

기상레이더는 좋은 수평시계 확보를 위해 가능하면 높은 지점이 바람직하다. 그러나 레이더 빔의 특성상 대부분의 지상 구조물이나 산악 등이 주 방사부에 탐지될 뿐만 아니라 부 방사부에 의해 언덕의 낮은 능선이나 건물 등이 탐지되기 때문에 언덕과 인공물로 인해 생기는 지형에코가 증가하고 있다. 일반적으로 0° 이하의 지평면 시계 각도를 갖는 높은 지점은 가장 원거리 탐지능력을 보장한다. 레이더로 저기압을 추적하거나 관측 자료를 예보에 활용한다면 상존에코의 문제는 매우 중요하다. 따라서, 언덕이나 산의 능선이 레이더로부터 중간 거리에 위치하게 되는 장소는 바람직하지 않다. 현재 공군에서 운영 중인 레이더는 기지특성상 차이는 있지만, 통상 2° 까지의 고도각이 사용되지만 이는 전 방위각에 대해 좋은 관측 범위를 갖는 저 고도각에서 동작하는 것을 전제조건으로 한다.

② 상존 에코 및 파랑 에코

수평면과 장애물에 대한 시계각도가 360° 의 전 방위각에 대해, 또는 적어도 상당한 부분의 방위각에 대해 가능하면 안테나 고도각이 거의 0° 가 되는 지점을 찾는 것이 보통이다. 레이더 설치 부근의 나무나 건물이 빔의 차폐물로서의 역할을 할 수 없도록 안테나 높이를 설정하면 지형 에코를 없앨 수 있지만, 수평 아래 0.2° 이상의 고도각을 지닌 지점에서는 심각한 정도의 국지적인 에코인 지상장애물이 많이 생긴다. 한편, 수평면에서 0.3° 이상의 고도각을 갖은 지점은 하층강수, 저고도 바람 쉬어를 포착하지 못하는 경우가 빈번하며, 녹는 층으로의 빈번한 빔의 투과 등 좋지 않은 결과를 가져온다.

③ 요구되는 최대거리

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

레이더 시스템에서 안테나를 더 높은 고도각으로 작동시키면 많은 Clutter를 피할 수 있으나 최대 유효 거리는 상당히 제한된다. 정상적인 자료가 이론적으로는 400km 이상이지만 열대지방을 제외한 다른 곳에서 나타나는 기상 현상을 관측할 수 있는 거리는 통상 200~250km이며, 여기서 레이더 빔 하단의 높이는 안테나의 고도각이 0° 로 설정된다면 2.25~3.75km이다.

(3) 실제적인 측면의 고려사항

강수의 탐지와 추적을 위한 기상레이더 기존의 모든 설비 이용 및 좋은 수평시계 확보가 가능한 공항이나 그 근처, 또는 기상업무 부서에 설치 운영되고 있다. 다음은 레이더 시스템을 효율적으로 운영하고 관측을 할 수 있도록 하기 위해 레이더 설치 시 고려해야 할 사항이다.

① 전력, 도로, 건물 등과 같은 적절한 보조시설의 이용도

보통 레이더 시스템의 설치는 건물 옥상에 안테나를 설치하고 건물 최상층에는 주장비, 주표출기는 제어반과 함께 예보실에 설치하고 있다. 다만, 광범위한 수평시계의 확보를 위해 주장비로부터 충분히 떨어져 있는 탑이나 작은 건물을 이용하여 안테나를 설치할 수 있다.

② 레이더 안테나와 송신기, 송신기와 제어 표출기 사이의 허용 가능한 간격

제어반과 안테나가 원거리일 경우 안테나와 제어반 사이의 긴 케이블과 케이블 보호 Duct 시설로 인해 많은 비용이 소요된다는 단점이 있다. 더욱이 1,500m 이상의 거리에서는 케이블의 신호 손실 때문에 신호 강도를 유지하기 위해 선 중간에 booster의 설치가 필요하다. 그러므로 모든 자료를 디지털화 시킨 후 다중 전화형태의 회로나 마이크로 무선 중계기를 이용하는 것이 더 바람직하다.

안테나와 송신기 사이의 거리는 가능한 가까울수록 좋으며, 전자기 전력을 전달하는데 이용되는 도파관은 가격이 비쌀 뿐 아니라 재질에 따라 전기적인 손실을 초래한다. 이 손실은 한 방향에 대하여 보통 3cm 파장에서는 0.13dBm^{-1}이며, 5.6cm 파장에서는 0.06dBm^{-1}, 그리고 10cm 파장에서는 0.03dBm^{-1}이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

도파관의 길이는 최대 30m를 절대로 초과하지 않는 것이 좋다.

③ 인근의 다른 전자설비 또는 이 설비와의 전파 간섭의 가능성

레이더 안테나가 공항의 관제 및 통신 시설로부터 먼 곳에 있을수록 전파 간섭 가능성이 적다. 간섭을 받을 수 있는 거리는 레이더의 출력에 의해 결정되며, 출력이 250kw인 경우는 최소한 75m이상 이격되어야 한다. 기상레이더에 대한 타 무선설비로부터의 전파 간섭 현상은 바퀴의 살 같은 모양의 에코로 종종 나타난다.

④ 설치장소에 사람이 상주하는가의 여부

레이더 사이트의 선택은 운영자 상주 여부에 상당히 영향을 많이 받는다. 유인사이트는 운영자가 근처에 상주할 수 있는 주변 환경이 구비되어야 한다. 반면에 무인사이트는 관측범위가 최대로 확보될 수 있는 기점을 선택하기 때문에 넓은 관측범위를 확보하는데 유리할 수 있다. 운영자의 무인사이트 접근이 용이하고, 전력공급과 유지보수에 필요한 제반 설비가 사이트에 갖추어 있는 한 원거리의 무인사이트라도 그 유지, 관리가 가능하다.

⑤ 적절한 낙뢰방지장치 설비여부

번개는 레이더 안테나나 건물에 직접적으로 피해를 주거나 주변의 전원 및 신호케이블을 통해 간접적으로 상당한 피해를 줄 수 있다. 전산기의 회로기판이나 다른 시스템의 부품은 약한 낙뢰에 의해서도 피해를 입을 수 있으므로 별도의 보호 대책을 강구하여야 한다.

1.3.2. 기상레이더 관측 주요 인자

공군 레이더는 모두 기지 내에 위치하고 있어 주변 건물, 산지 등의 지형지물에 큰 영향을 받는다. 또한 10분 주기로 2분간의 장거리 관측, 8분간의 단거리 관측을 반복하는 관측을 수행하고 있다. 이러한 장거리, 단거리 관측의 구분은 관측 시 작은 수의 고도각 관측만을 허용하고, 이로 인하여 3차원 상에서 종합적인 입체관측에 한계를 보인다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

레이더 최적 최저관측 고도각을 결정하는데 고려될 사항은 다음과 같다.

- 최저고도각으로 관측 가능한 영역
- 0.5° 고도각 활용 가능성
- 240km 장거리 관측 가능성

레이더 최고관측 고도각은 레이더 위 관측 공백지역을 고려하여 결정한다. 최고관측 고도각이 높을수록 레이더 근처에서 높게 발달하는 대류성 강수의 관측에 유리하다. 그러나 주어진 시간 내에 자료의 정확도와 균일성을 유지하기 위해서는 관측고도각 수에 제한이 생겨 최고관측 고도각을 한없이 높일 수는 없다. 관측전략에는 관측고도각 수, 고도각의 결정, 펄스폭, 펄스반복주기, 샘플링 수, 안테나 회전속도 등의 요소가 복합적으로 고려되어야 한다.(표. 1-3).

표. 1-3. 관측전략 고려요소

항목	관련항목
관측 목적 및 관측 대상	펄스폭, 펄스반복주기, 관측 반경 고도각수, 최대관측시선속도
펄스폭	평균송신전력, 펄스반복주기, 거리 분해능 최대 관측 시선속도, 관측 반경
펄스반복주기(PRF)	평균송신전력, 거리 분해능, 최대관측시선속도 관측 반경, 샘플링 수, 안테나 회전속도
고도각 수	펄스반복주기, 안테나 회전속도, 샘플링 수
고도각	관측 대상, 고도각 수
게이트 크기	펄스폭, 거리 분해능

펄스폭은 시선방향 분해능에 영향을 미친다. 그리고 펄스반복주기와의 밀접한 관련성으로 인해 관측 반경, 최대관측시선속도 등에도 간접적인 영향을 준다. 짧은 시간 분해능으로 대류세포의 위치를 파악하고 추적하고자 할 때에는 짧은 펄스를 사용한다. 반대로 변동성이 적은 층운형 강수에는 긴 펄스를 사용한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

PRF는 단위 시간당 펄스 수로 펄스폭, 관측 반경, 최대관측시선속도 등 관측 전략 수립에 있어서 거의 모든 요소들과 직·간접적인 관련성을 가진다. 펄스길이가 길어질수록, 즉 레이더 빔을 발사하는데 소요되는 시간이 길어질수록 PRF는 낮아진다. PRF가 높을수록 관측 반경은 짧아진다.

도플러 레이더로 측정할 수 있는 최대도플러관측속도와 관측반경의 곱은 일정하며, 이로 인해 관측 가능한 시선속도의 범위를 크게 하면 관측 반경이 줄어들고, 관측 반경을 넓히면 관측 가능한 시선속도의 범위가 줄어드는 것을 Doppler Dilemma라고 한다. 항공기 이착륙 및 뇌우 등의 악기상 이동에 대한 관측이 중요하므로 관측 반경과 PRF의 균형을 찾을 필요가 있다.

샘플링 수는 동일한 방위각 방향에서의 자료 생산을 위한 표본추출횟수를 의미하는데, 샘플링 수가 많을수록 통계적 대표성이 증가해 신호처리기에서 신뢰도가 높은 자료를 얻을 수 있다. 다시 말해 샘플링 수가 많을수록 우수한 품질의 자료를 얻을 수 있다.

샘플링 수를 늘리려면 PRF를 높이거나 안테나 회전 속도를 늦춰야 한다. 안테나 회전 속도를 늦추면 최저고도각에서의 관측과 최고고도각에서의 관측 시간의 차가 커져 상하 에코간의 연관성이 낮아지고, 관측 수행 주기가 길어지는 단점이 발생한다.

$$PRF = \frac{1}{PRT} \tag{1}$$

$$R_{max} = \frac{c}{2 \cdot PRF} \quad (R_{max} : \text{관측반경, c: 전자기파 속도}) \tag{2}$$

$$Sample \leq \frac{PRF}{V_{az}} \quad (V_{az} : \text{안테나 회전속도}) \tag{3}$$

위의 고려사항들을 종합해 관측 전략을 수립하더라도 지형지물에 의한 심한 차폐, 레이더 노후화에 따른 기능 장애, 통신망의 한계, 레이더 기종 별 차이 등 문제점들에 의해 최적의 관측 전략 수립에 제한이 생긴다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(1) 펄스폭

펄스폭는 펄스가 공간을 진행하는 동안(그림. 1-3), 전단부(leading)에서 후단부(trailing)까지 거리이며, 펄스폭은 시간 단위로 계산될 수 있다.

펄스지속시간은 레이더가 하나의 펄스를 송신하는데 걸리는 시간으로 마이크로초(㎲) 단위로 표현된다. 펄스폭은 방출된 전자기파의 속도에는 영향을 주지 않지만, 목표물로부터 반사되는 전력량에는 영향을 준다. 만약 펄스폭이 10배 더 긴 펄스는 10배 더 많은 에너지를 갖는다. 펄스가 강할수록 레이더로 되돌아오는 신호의 세기도 강하다. 그러나 이것은 분해능을 감소시키며, 목표물의 특성을 파악하는 것을 불가능하게 만든다.

펄스폭은 레이더의 최소탐지거리, 즉 안테나로부터 얼마나 가까운 목표물을 탐지할 수 있는지 결정한다. 최소탐지거리는 펄스폭의 1/2이상이다. 다시 말하면, 안테나에서부터 1/2 펄스폭 보다 멀리 떨어져있는 목표물은 정확하게 처리되지만, 이보다 가까운 목표물은 탐지되지 않는다. 만약 안테나에서부터 1/2 펄스폭 안으로 목표물이 들어오면, 펄스의 전단부가 목표물에 부딪혀 레이더가 수신 모드로 전환되기 전에 안테나로 되돌아온다.

(2) 펄스 반복 주파수 (PRF)

PRF는 펄스가 방출되는 비율이며, 수신시간(listening time)의 조정을 통해 레이더 최대유효거리를 조정한다. PRF 속도의 증가는 목표물이 전자기파에 부딪히는 비율을 증가시키고 샘플링을 증가시키며, 그 결과 목표물이 더 자주 탐지되기 때문에 시스템 성능이 향상되며, 성능향상을 위해서는 상당한 비용이 든다.

① 수신시간

각 펄스의 송신 이후, 레이더는 반사신호를 기다리는 수신모드로 전환된다. 정해진 수신시간(listening time)동안 펄스가 반사신호를 보내지 않으면 레이더는 목표물이 없는 것으로 간주한다.

수신시간을 감소(PRF의 증가)시키면 펄스폭이 짧아지며 유효거리가 감소되어 더 짧은 거리를 탐지하게 된다. 예를 들어 수신시간이 50%감소되면 최대유효

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

거리가 반으로 줄어든다. 일반적으로 최대유효거리 안에 있는 목표물만이 탐지가 가능하다.

② 다중포착에코

레이더가 최대유효거리 이내에 있는 목표물만을 검출하는 것이 사실이지만, 예외인 경우가 있다. 때때로, 최대유효거리 밖의 목표물에 의해 반사된 펄스가 다음 펄스의 수신시간에 도달하는 경우가 있다. 그 결과가 **다중포착에코** (또는 **이중포착에코**)이다. 자료는 신뢰성을 가지고 있으며, 레이더 또한 이러한 운영상 속임이 추가된 것 외에 정상적인 기능을 보인다.(그림.1-3)

PRF의 증가(최대유효거리의 감소)는 다중에코발생 가능성을 높인다.

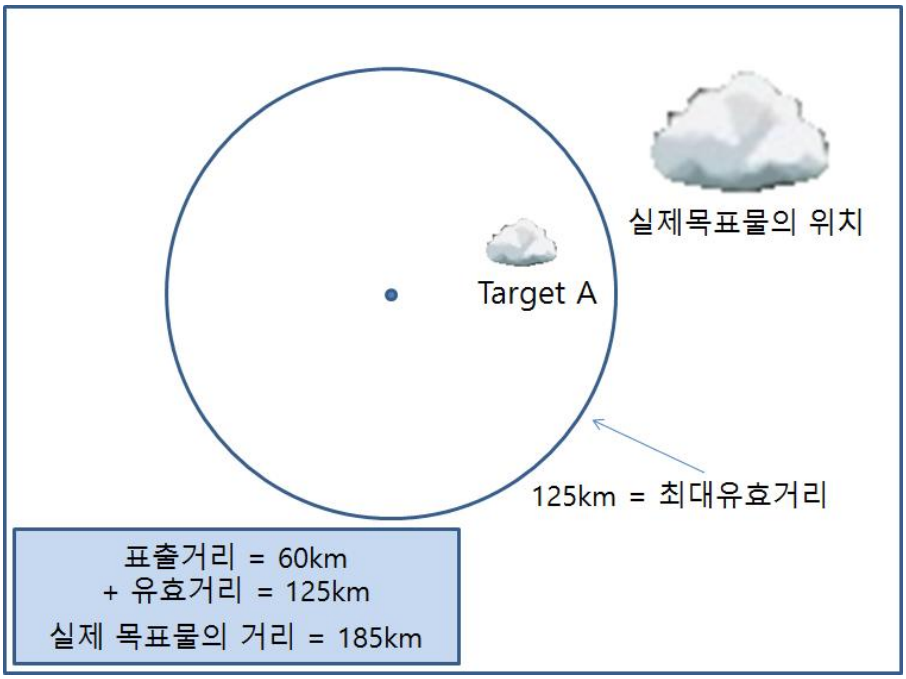


그림.1-3. 다중 포착 에코

(3) 분해능

분해능은 레이더가 목표물을 구분해서 탐지, 표출할 수 있는 능력이며, 분해능 한계에는 두 가지 종류가 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

① 방위각 분해능

방위각 분해능은 레이더로부터 방향은 다르지만 같은 거리에 있는 두 목표물을 구분해내는 능력이다. 방위각 분해능은 빔 폭에 의해 좌우되며, 빔 폭 보다 멀리 떨어져 있는 목표물들만이 각각 분리되어 표출된다. 목표물들이 너무 가까이 위치하면 중복된 빔의 영향을 받는다. 이런 경우 하나의 넓은 목표물로 표출되거나, 방위각 방향으로 확대되어 나타난다. 방위각 분해능은 빔 폭에 의해 좌우되므로, 안테나 근처의 목표물들은 멀리 있을 때 보다 더 작게 분리되어 개별적으로 분석된다.

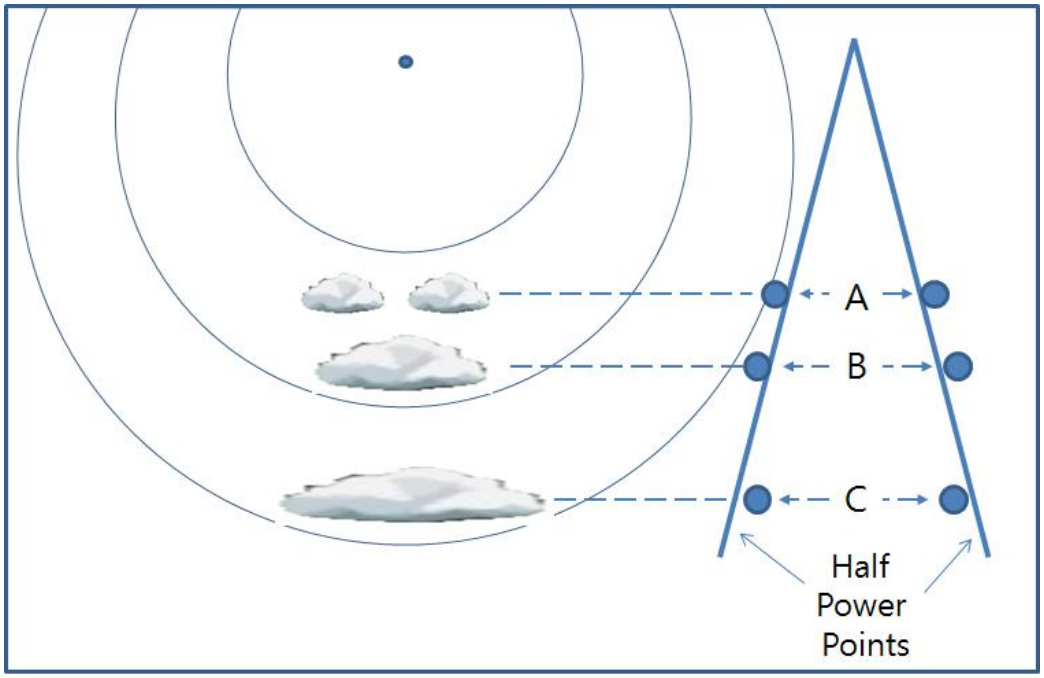


그림. 1-4. 방위각 분해능

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 1-4에서, A지점에 위치한 목표물들은 빔 폭 보다 멀리 떨어져있어 레이더가 분리된 2개의 에코로 정확하게 표출한다. B지점에 위치한 목표물들은 정확하게 1° 빔 폭 만큼 분리되어 있으며, 하나의 큰 에코로 표출된다.

② 거리분해능

거리분해능은 일렬로 늘어선 목표물을 분리해내는 능력이다. 목표물은 서로 1/2 펄스 길이 이상이 떨어져 있어야 구별이 가능하다. 그림 1-5와 아래 1~5단계에서 이 개념을 설명하고 있다.

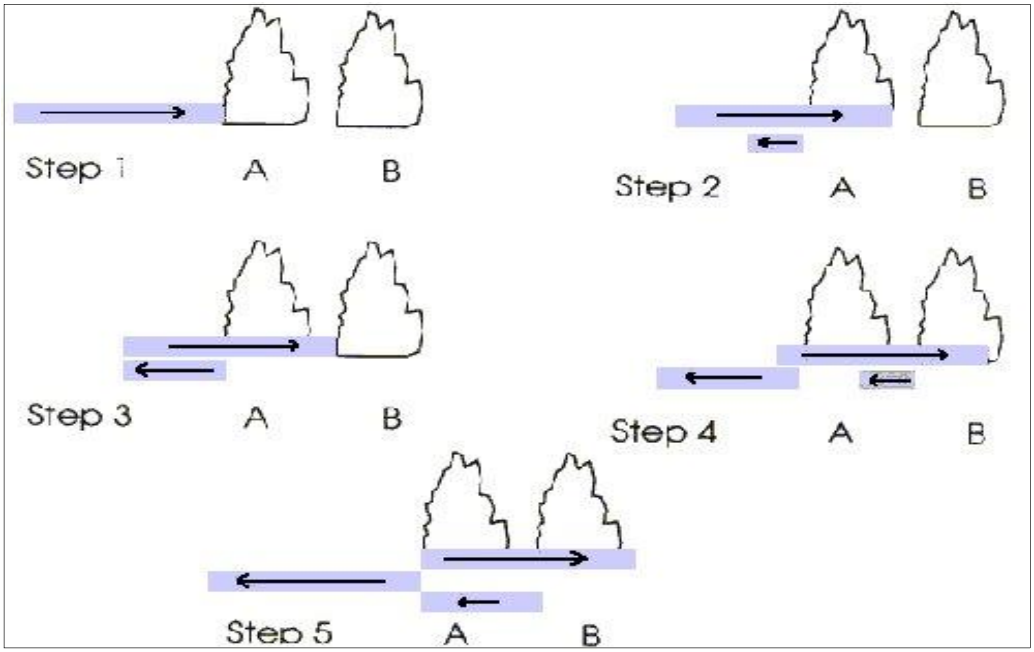


그림. 1-5. 거리 분해능

1단계 : 레이더 펄스가 목표물 A에 부딪힌다.

2단계 : A에 부딪힌 펄스의 일부는 레이더 쪽으로 후방산란을 일으킨다.

3단계 : 펄스가 목표물 B에 이제 막 도착하며, 그 동안 더 많은 에너지의 반사가 목표물 A에서 지속되고 있다.

4단계 : 펄스는 목표물 B에 부딪힌 후 후방으로 산란을 일으킨다.

5단계 : 목표물 A에서 반사된 에너지는 펄스가 레이더 방향으로 산란을 지속한

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 목표물 B에서 산란된 에너지는 펄스 길이의 1/2이다. 목표물 B에서 반사된 펄스의 전면부는 목표물 A에서 반사되는 펄스의 후면부와 일치한다. 그 결과 실제 두 개 존재하는 목표물이 하나로 인지된다. 만약 목표물이 1/2펄스폭보다 더 멀리 분리되어 있다면 두 에코 분리되어 나타났을 것이다.

1.3.3. 관측기법

기상레이더는 일반적으로 안테나를 일정 고도각에 고정시키고 360° 방위각으로 스캔한 후 다시 고도각을 올려 360° 방위각에 따라 스캔하는 것을 반복한다. 레이더별로 차이는 있으나 보통 8~16개 정도의 관측 고도각에 대해 관측을 수행하며, 관측 고도각별로 레이더로부터의 거리(range), 방위각(azimuth)에 따라 자료를 저장한다.

단일편파 도플러 레이더에서 관측하는 관측변수는 보정 전 반사도(DZ-reflectivity), 보정 후 반사도(CZ-corrected reflectivity), 시선속도(VR-radial velocity), 스펙트럼 폭(SW-spectrum width)이다.

이들 관측변수는 강수량, 풍향, 풍속과 같은 기상 요소가 아니므로 기상학적 물리량을 얻기 위해서는 기상변수로의 자료 변환과정이 필요하다. 또한 레이더 자료는 구면좌표계로 이루어져 있으므로, 이를 기하학적 좌표변환을 통해 직교좌표계로 변환하여 정보를 산출한다. 레이더 볼륨 관측 자료는 레이더가 고도각별로 관측한 자료를 저장한 것이다.

일정한 고도각에서 한 바퀴 회전하는 것을 sweep이라고 하며, 한 sweep에서 한 줄의 빔을 쏘는 것을 ray라고 한다. 한 ray 안에는 일정한 개수의 자료가 들어있고, 그 개개의 자료를 bin이라 한다. 볼륨 자료는 각 sweep에서 ray 순서대로 저장된다. 한 sweep에 360개의 ray가 있고, 각 ray 당 1,000개의 bin이 있다면, 4개의 요소를 관측하므로 고도각이 5개인 경우 데이터 자료의 수가 7,200,000개가 된다. 레이더 불륨(Volume) 관측 자료의 저장형식은 레이더 제작사마다 상이하며, 기상청의 경우 범용 형식인 UF(Universal Format)로 통일하여 사용하고 있다. (기상레이더센터, 2013)

강수량은 레이더에서 관측되는 반사도 자료를 강우량과의 경험적 관계식을 이

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

용하여 환산한 뒤 산출한다. 일반적으로 Z-R 관계식이라고 하며, 이는 레이더 반사도(Z)와 지상강우량(R)과의 경험적, 통계적인 관계식을 의미한다.(기상청 기상인력개발과, 2009)

$$Z(mm^6/m^3) = \alpha R^\beta$$

여기서 R은 지상강우량인 강우강도(mm/h)이며, α와 β는 경험에 의한 상수값을 의미한다. 과거 수많은 경험에 의해 다양한 α와 β 값이 산출되었으며, 강수형태별로 다양한 Z-R 관계식이 존재한다.

표. 1-4. 강수형태별 Z-R 관계식

강수형태	Z-R 관계식
층상형 비	$Z=200R^{1.6}$ (Marshall and Palmer, 1948)
뇌우성 비	$Z=486R^{1.37}$ (Jones, 1956)
지형성 비	$Z=31R^{1.71}$ (Blanchard, 1953)
안개 비	$Z=140R^{1.5}$ (Joss et al., 1970)
열대폭풍	$Z=250R^{1.2}$ (Jorgensen and Willis, 1981)
눈	$Z=2000R^{2.0}$ (Carlson and Marshall, 1972)

1.4. 연구내용 및 범위

본 논문구성은 Ⅱ.자료 및 연구방법에서는 실질적인 연구 대상지역인 강릉공군기지의 지형적 기후특성 및 강수량, 레이더를 통해 획득한 데이터를 해석하는 방법에 대해 서술하였다. Ⅲ.결과 및 논의에서는 기상레이더 최적 관측인자를 도출하고 최적운영 방안을 제시하였으며, 마지막으로 Ⅳ.결론에서는 이를 바탕으로 연구의 의의, 활용 및 기대효과에 대하여 정리하였다.

구체적인 추진방법은 그림. 1-6.에 나타내었다. 먼저 레이더 활용목적에 근거하

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

여 지형차폐시뮬레이션 결과를 분석하여 최저고도각을 결정하고, 관측하고자하는 강수계의 두께를 고려하여 레이더 사이트별 최고고도각을 결정하였으며, 최저·최고 고도각, 관측전략시간, 하드웨어 성능 등을 고려하여 고도각 개수를 결정하였다. 그 후 다양한 관측전략 수립방법을 적용·분석하였으며, 레이더 활용 목적 상 가장 중요한 강수 추정을 가장 잘 충족하도록 고도각들을 결정하였다. 또한 각 고도각별 최대관측거리(Rmax)에 따른 최대관측고도를 결정하고, 이에 따라 펄스 반복주기, Sampling 수 등 관측 변수가 계산하였다. 레이더로부터 자료를 획득하고 이들을 분석하여 최적의 관측 임계변수를 결정하였으며, 결정된 관측전략을 합성최저고도지도의 통계분석을 통하여 객관적인 평가를 수행하였다.

관측전략 수립
↓
기지선정
↓
최고·최저 고도각 결정
↓
관측인자 설정(관측주기, 안테나 회전속도, PRF 등)
↓
최적고도각 계산
↓
최전 관측전략 수립
↓
기상청 데이터 비교 분석
↓
C-band 레이더 최적 운영방안 제시

그림. 1-6. 연구방법 흐름도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2장 자료 및 연구방법

2.1. 대상지 선정 및 데이터 구축

2.1.1. 강릉기지 일반현황

한반도의 허리인 태백산맥 동쪽 중앙에 위치하고 있고 있으며, 동쪽은 동해 바다, 서쪽으로는 홍천군 내면, 평창군 진부면과 대관령면에 각각 접하고 있으며, 남쪽으로는 동해시 일원, 정선군 임계면과 북면에, 북쪽으로는 양양군 현북면과 현남면에 도내 5개 시군과 경계를 이루고 있다. (그림. 2-1).

그림. 2-1. 공군 강릉기지 위치

동해와 연접한 64.5km의 긴 해안선은 강원도 해안선 318km중 20.2%를 점유하고 있으며, 서측은 오대산, 대관령, 석병산 등 1000m이상의 높은 태백산맥에 접하고 있으며, 동측으로 2개의 산악축이 전개되고, 그 중앙에 남대천이 흐르고 있다. (국립방재연구원, 2011)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.1.2. 지형적 기후특성 및 강수량

강릉은 주로 해양성기후 특성을 나타낸다. 이러한 지리적 특성은 같은 위도선상의 타지방에 비해 겨울철은 온난하고, 여름철을 상대적으로 시원한 편이다. 따라서 기온의 연교차는 작은 편이다. 또한 장시간 북동기류의 유입 시 겨울철은 대설현상, 여름철은 지속적인 강우와 저온현상이 나타나기도 한다. 백두대간의 영향으로 겨울철과 봄철에는 타 지방에 비해 강풍현상이 자주 발생하고, 특히 산불 발생 시 건조한 봄철에는 대형 산불로 확대되기도 한다. 연평균기온은 13.1℃이고, 최고기온은 36.1℃, 최저기온은 -11.8℃, 연평균 강수량은 1018.7mm이다.

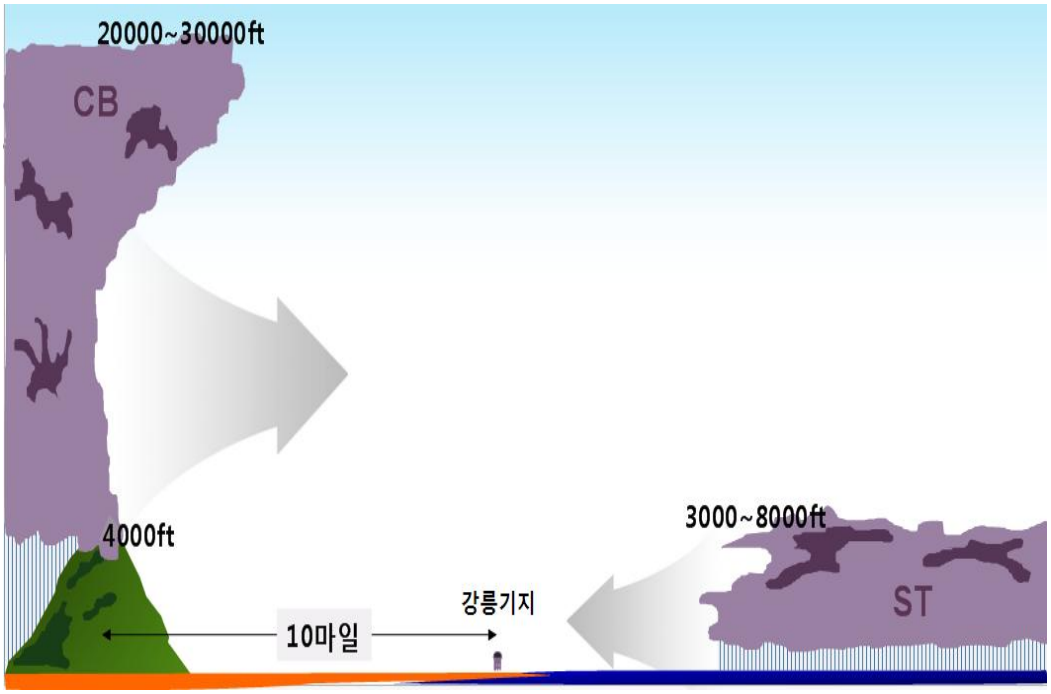


그림. 2-2. 강릉기지 기상특성

강릉기지의 기상특성으로는 기지 서쪽에 1.2km의 태백산맥이 위치하고 있고, 태백산맥과 기지 간 거리가 16km로 매우 인접하고 있다. 산맥에서 발달한 뇌우를 동반한 Cb 구름 유입 시 단시간 내 기지로 유입이 가능하다. 또한 기지 동쪽은 해안가가 바로 위치하고 있어 동해상에서 발생된 해무, 폭설 및 저고도 구름 유입 시 해상 기상관측 공백으로 예보가 어려운 상태이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2 기상레이더 데이터 해석

2.2.1. 최적관측인자 설정

기상청 S-band 기상레이더는 주로 산악지형에 설치되어 있고, 군 C-band 기상레이더는 비행장 내에 설치되어 있어 에코의 강도 추적 시 설치된 위치에 따른 지형적 및 주파수 band에 따른 감쇠가 존재할 수 있다. 이러한 감쇠를 상쇄하고자 현재 기상청에서 제공하는 기상레이더 합성영상은 융합행정에 따른 군·기상청 기상레이더 합성작업을 하고 있다.

S-band 기상레이더는 주로 강도에 대한 감쇠값이 적어 장거리 관측을 위해 설치되고, 지형적 감쇠를 상쇄하기 위해서 C-band 레이더에서 나오는 자료값을 사용한다. 따라서 S-band 기상레이더와 C-band 기상레이더를 직접적으로 비교하기 위해서는 설치된 위치가 같아야 한다.

2.2.2. 지형클러터 시뮬레이션

레이더 빔이 지형에 의해 차폐되는 정도를 분석하기 위하여 레이더 빔 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 레이더의 각 빈에 대한 차폐율을 계산하여 관측 가능한 최저고도각을 산출하였다. (그림. 2-3).

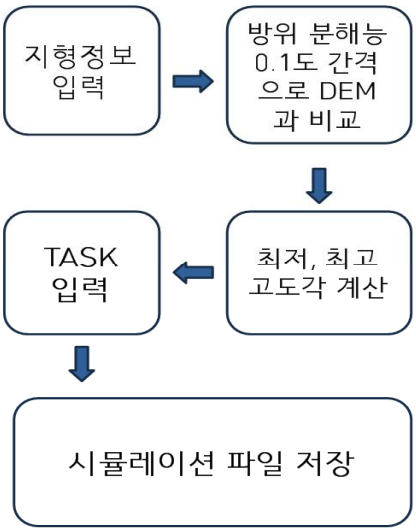


그림. 2-3. 레이더 차폐 시뮬레이션 과정

그림. 2-3은 레이더 차폐 시뮬레이션의 과정을 나타내는 모식도이다. 레이더에

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

서 관측 가능한 최저, 최고 관측고도각 분석을 위해서 레이더의 위도, 경도, 고도 및 관측 전략(빔폭(Beam Width), 분해능(Resolution), 빈(Bin) 등)을 이용하였다.

정확한 비교를 위하여 레이더 관측지점으로부터 시선방향으로 수치고도모형(Digital Elevation Model)자료 분해능의 절반인 50m 간격으로 비교하였고, 방위각 방향으로 빔폭의 0.1° 간격으로 비교하였으며, 모든 레이더의 관측 반경은 120km로 제한하여 시뮬레이션을 수행하였다.

각 관측지점에서 차폐의 영향(빔의 하단부의 고도와 DEM의 고도와 비교)을 받지 않고 자료를 제공할 수 있는 최저고도각을 결정하고, 240km 내에서 최저고도각의 분포를 분석하였다. (그림.2-4).

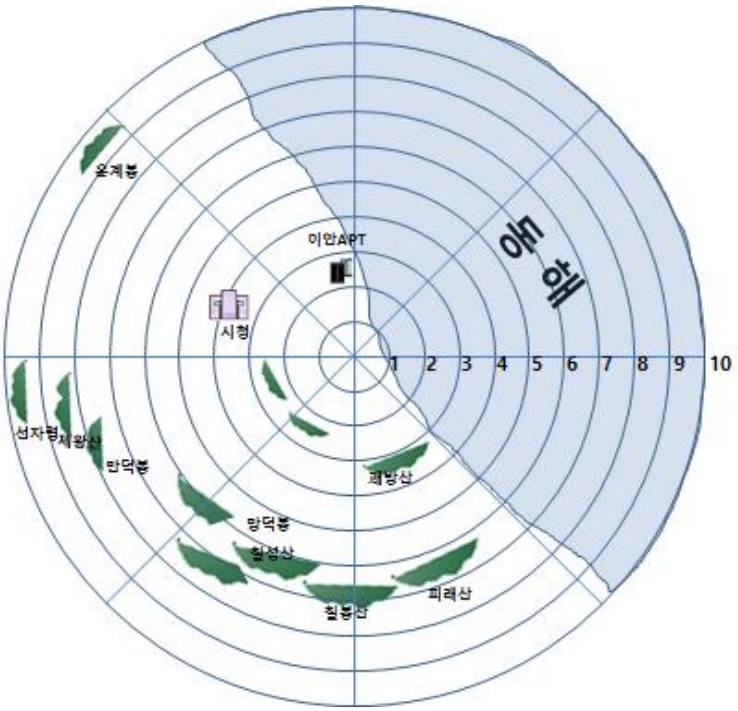


그림. 2-4. 최저고도각 분포분석

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(1) 강릉기지 지형정보

지형클러터 시뮬레이션을 위하여 강릉기지 기상영향을 주는 대표적인 산에 대한 지형정보가 필요하다. 기지 남서쪽 6.4km지점으로 높이 339m의 괘방산이 있으며, 이어서 남쪽으로 11.7km지점에 높이 754m의 피래산이있다. 망덕봉은 남서쪽으로 9.5km지점에 781m의 높이로 위치에 있으며, 강릉기지에 가장 중요한 기상영향을 미치는 선자령은 기지 서쪽으로 19km지점에 떨어져 있으며 높이는 1257m이다.

표. 2-1. 강릉기지 지형정보

주요산지	거리	높이
괘방산	6.4km	339m
피래산	11.7km	754m
망덕봉	9.5km	781m
만덕봉	15.8km	1032m
칠성산	9.7km	858m
제왕산	16km	840m
칠봉산	8.2km	370m
선자령	19km	1257m

(2) 최저고도각 분석

지형정보 입력후 강릉 기지를 중심으로 각 지형클러터(산)에 대한 최저고도각을 분석하였다. (그림. 2-5). 대표적으로 강릉기지에 영향을 주는 선자령은 최저고도각 3.73˚이며, 괘방산 및 피래산은 각각 3.02˚도, 3.65˚ 이다.

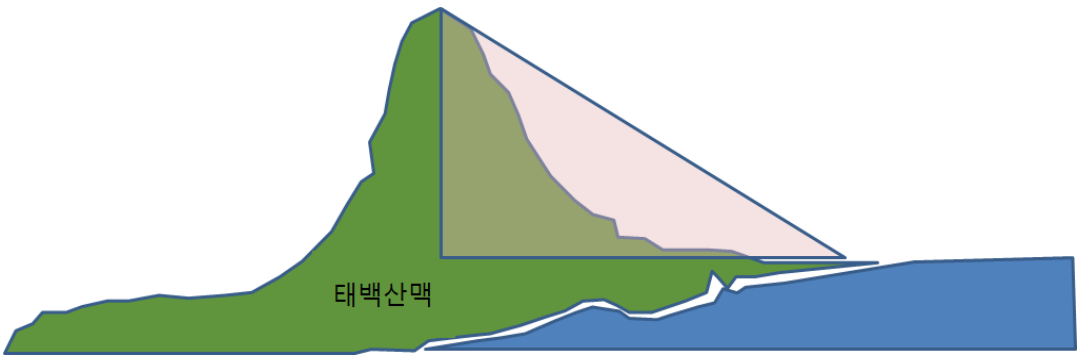


그림. 2-5 최저고도각 분석

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

또한 망덕봉과 만덕봉은 4.69° 3.73° 이다. 칠성산은 5.02°로 최저 고도각이 가장 높았으며, 칠봉산은 2.56°로 기지 주위의 산 중 가장 낮은 고도각이 산출되었다. (표. 2-2).

표. 2-2. 거리 및 높이에 따른 고도각

주요 산지	거리	높이	고도각(°)
괘방산	6.4km	339m	3.0221
피래산	11.7km	754m	3.6522
망덕봉	9.5km	781m	4.6937
만덕봉	15.8km	1032m	3.7369
칠성산	9.7km	858m	5.0286
제왕산	16km	840m	2.9866
칠봉산	8.2km	370m	2.5605
선자령	19km	1257m	3.7333

(3) 최저고도각 시뮬레이션

지형정보 입력후 각 지형클러터에 대한 최저고도각을 분석하여 시뮬레이션을 실시하였다. 그림 2-6은 고도각 0.5°로 설정 후 지형클러터를 확인한 결과이다. 예상한 대로 강릉기지 주위의 대부부의 산들이 강한 에코로 탐지 되고 있다.

그림 2-7은 고도각 3.3°로 설정 후 지형클러터를 확인한 결과이다. 이때 기지 남서쪽에 위치한 괘방산과 제왕산 칠봉산 등이 에코에서 없어짐을 확인할 수 있다. 그림. 2-8은 고도각을 5.9°로 설정 후 지형클러터를 확인한 결과 이다. 이때 기지 대부분의 지형클러터들이 삭제되고 약한 강우성 구름만 관측이 되고 있음을 확인할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

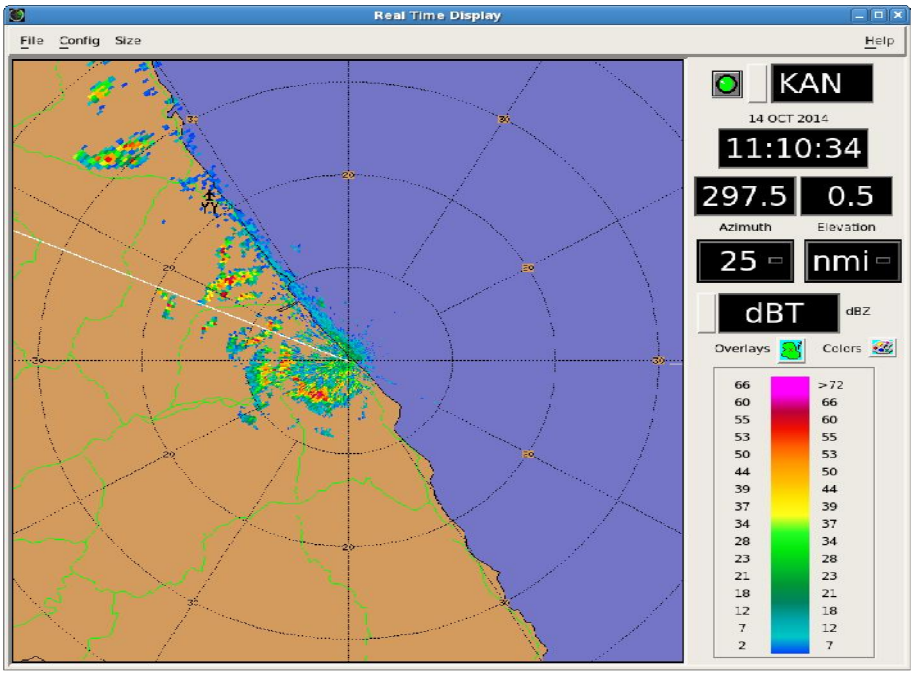


그림. 2-6. 최저고도각 분석 시뮬레이션

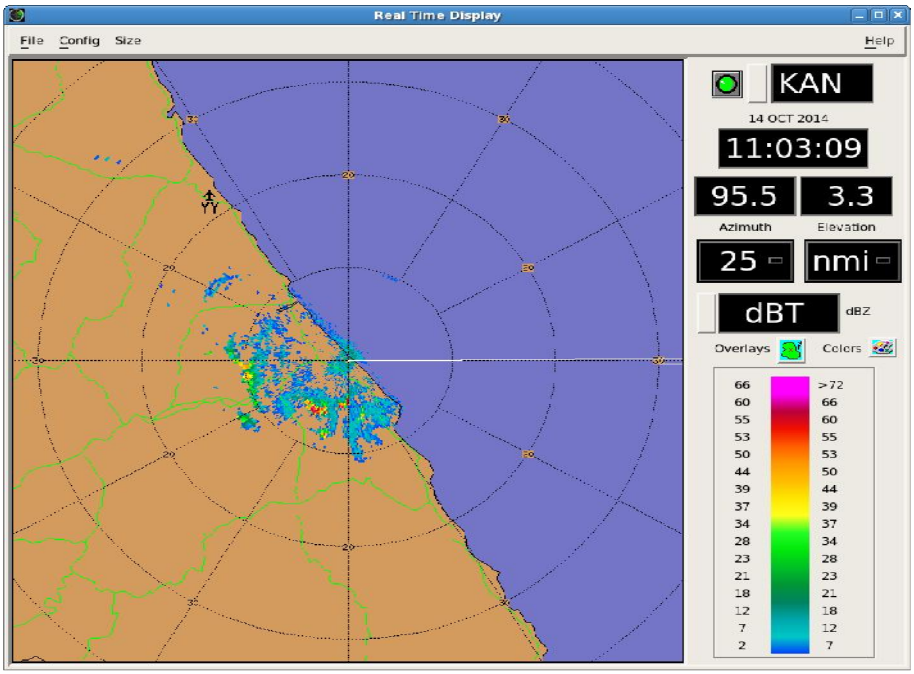


그림. 2-7. 지형 클러터 결과(고도각 3.3°)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

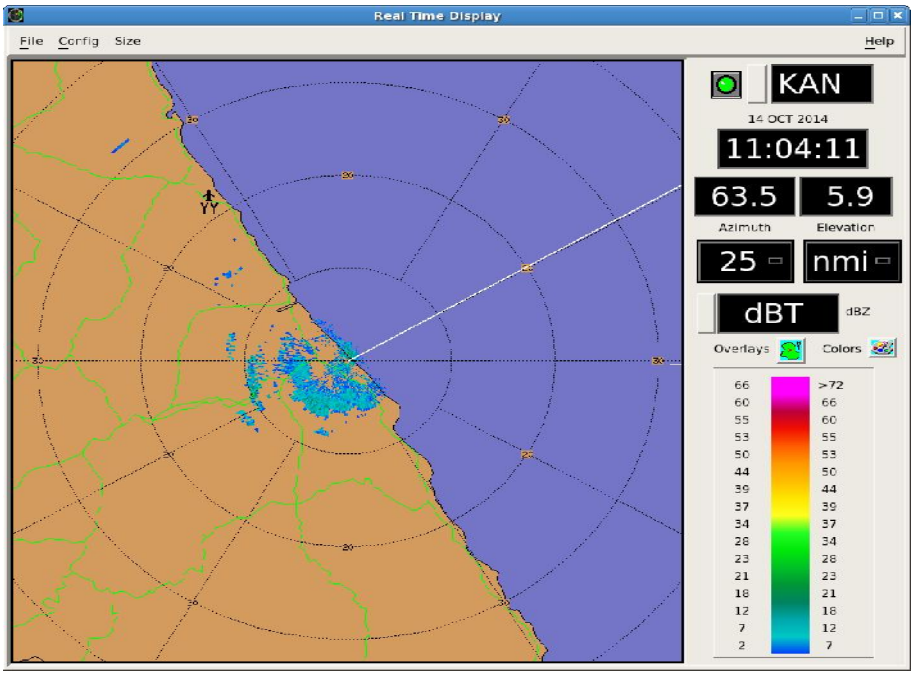


그림. 2-8. 지형 클러터 결과(고도각 5.9°)

2.2.3. S-band 및 C-band 레이더 특성

레이더의 주파수는 어떤 주파수 범위로 한정되어 구분되어 있지 않고 파장이 100m(단파대)부터 10~6μm(적외선대)에 이르기까지 광범위하게 사용할 수 있으나 대체로 400MHz부터 40GHz 사이의 마이크로파 대역을 많이 사용하고 있다. 기상레이더의 파장별 주파수에 따라서 band를 구분할 수 있으며, 이는 아래의 표. 2-3과 같다. 이 중 일반적으로 S-band와 C-band 레이더가 기상관측에 보편적으로 활용되고 있다.

S-band 레이더는 장거리 대공감시, 중거리 대공감시(공항감시 레이더, ASR), 원거리용 항공탑재 펄스 도플러 레이더(AWACS), 군용 3D 레이더 및 고도측정 레이더, 정확한 강우량 추정을 요구하는 기상레이더(NEXRADAR) 등에 활용이 가능하다. 고주파수에서 얻을 수 있는 지향 빔 폭 안테나로서 정밀한 각 정확도와 해상도를 지닌다. 또한 좁은 빔 폭의 사용으로 주빔에 대한 재밍(jamming)영향이 낮다. 하지만 고주파 사용에 따라 MTI 레이더에서 빈번한 blind speed가 발생하며, 비구름으로부

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

터의 반사신호에 의해 탐지거리가 현저하게 감소하는 단점을 지닌다.

C-band 레이더는 주로 중거리 기상레이더로 활용되고 있다. 이 밖에도 정확한 미사일 추적과 원거리에서 정밀한 값을 요구하는 레이더, 다기능 위상배열(phase array) 대공방어 레이더, 패트리어트 미사일시스템의 탐지추적 레이더, 함상용 MW-08 레이더에도 활용이 가능하다. 또한 S-band와 X-band 사이의 절충 역할을 하며, 정밀한 정보의 획득을 위해 주로 Pencil beam을 사용하는 특성을 지닌다. (전파연구소, 2008)

표. 2-3. 기상레이더 주파수

Radar band	Frequency	Wavelength	Nominal
UHF	300-1,000 MHz	1-0.3m	70cm
L	1,000-2,000 MHz	0.3-0.15m	20cm
S	2.000-4,000 MHz	15-7.5cm	10cm
C	4,000-8,000 MHz	7.5-3.75cm	5cm
X	8,000-12,500 MHz	3.75-2.4cm	3cm
K_u	12.5-18 GHz	2.4-1.66cm	1.50cm
K	18-26.5 GHz	1.66-1.13cm	1.25cm
K_a	26.5-40 GHz	1.13-0.75cm	0.86cm
W	94 GHz	0.30cm	0.30cm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2.4. 빔차폐 지도 작성 및 예측정확성 분석

기상레이더는 넓은 관측영역에 대해 높은 시공간 분해능의 관측자료를 제공하기 때문에 악기상(호우, 태풍 등)의 감시 및 예측에 매우 유용하다. 그러나 주변의 복잡한 지형은 낮은 고도각에서 빔차폐를 발생시켜 레이더 자료에 기반한 지상강우추정에 큰 오차를 유발한다. 따라서 빔차폐의 영향을 최소화하는 방법으로 주로 차폐 영역의 반사도를 보정하는 방법이 사용된다.

본 연구에서는 레이더 빔차폐(BBF : Beam Blockage Fraction) 지역을 판별하기 위해 빔차폐 지도를 작성하였다. 고도각별 BBF 모의를 위해 C GIAR-CSI(Consultative Group on International Agricultural Research-Consortium for Spatial Information)에서 제공하는 수평 분해능 3″(-90m) 및 고도 16m 이내의 수치고도모형(DEM : Digital Elevation Model)을 사용하였다. DEM의 오차와 모의방법의 불확실성을 고려하여 10% 미만으로 모의된 회색영역은 차폐가 없는 것으로 가정하였다. 또한 표준대기와 Gaussian beam 패턴을 가정하고, 강릉기지의 관측전략을 이용하여 모의하였다.

최적 관측전략을 바탕으로 강릉기지 기상레이더에서 관측한 강수강도의 정확성을 확인하기 위해 2018년 1월부터 10월까지 강릉 지역의 강수량(30mm 이상, 50mm 이상, 총강수량) 데이터를 수집하였으며, 실제 강우가 이루어진 날을 분류하였다. 동일한 시간대의 강릉지역 합성영상 및 기상청 강수강도 자료와 강릉기지 기상레이더 자료, AWS(Auto Weather System) 자료의 비교분석을 통해 실제 강수강도와의 유사성 검증을 통해 예측정확성을 분석하였다. 구체적으로 강수강도가 높았던 8월~10월 중 총 10일(8월: 6, 23, 24, 27, 28일; 9월: 3, 20일; 10월: 5, 6, 18일)을 대상으로 데이터별 평균강수량을 계산하고, 실제 강수량과의 표준편차를 도출하여 예측성을 정량적으로 분석하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 2-4. 강릉지역 강수량 데이터(2018년 1월~10월)

날짜	30mm 이상	50mm 이상	총강수량 (mm)
1월			
1	x	x	x
2	x	x	x
3	x	x	x
4	x	x	0.0
5	x	x	x
6	x	x	x
7	x	x	x
8	x	x	0.0
9	x	x	0.0
10	x	x	x
11	x	x	x
12	x	x	x
13	x	x	x
14	x	x	x
15	x	x	x
16	x	x	x
17	x	x	0.8
18	x	x	x
19	x	x	x
20	x	x	x
21	x	x	x
22	x	x	2.8
23	x	x	x
24	x	x	x
25	x	x	x
26	x	x	x
27	x	x	x
28	x	x	x
29	x	x	x
30	x	x	x
31	x	x	x

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 2-4. 강릉지역 강수량 데이터(2018년 1월~10월) 계속

2월			
1	x	x	x
2	x	x	0.0
3	x	x	x
4	x	x	x
5	x	x	x
6	x	x	x
7	x	x	x
8	x	x	x
9	x	x	x
10	x	x	x
11	x	x	x
12	x	x	x
13	x	x	x
14	x	x	x
15	x	x	x
16	x	x	x
17	x	x	x
18	x	x	x
19	x	x	x
20	x	x	x
21	x	x	x
22	x	x	x
23	x	x	x
24	x	x	0.1
25	x	x	0
26	x	x	x
27	x	x	x
28	o	x	48.3

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 2-4. 강릉지역 강수량 데이터(2018년 1월~10월) 계속

3월			
1	x	x	2.0
2	x	x	x
3	x	x	x
4	x	x	13.5
5	o	x	31.2
6	x	x	0.0
7	x	x	1.3
8	x	x	13.8
9	x	x	6.3
10	x	x	x
11	x	x	x
12	x	x	x
13	x	x	x
14	x	x	x
15	o	x	33.0
16	x	x	0.5
17	x	x	x
18	x	x	x
19	x	x	12.0
20	x	x	x
21	x	x	2.8
22	x	x	x
23	x	x	x
24	x	x	x
25	x	x	x
26	x	x	x
27	x	x	x
28	x	x	x
29	x	x	x
30	x	x	x
31	x	x	x

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 2-4. 강릉지역 강수량 데이터(2018년 1월~10월) 계속

4월			
1	x	x	x
2	x	x	x
3	x	x	0.3
4	x	x	24.0
5	x	x	5.3
6	x	x	7.8
7	x	x	0.0
8	x	x	0.8
9	x	x	0.2
10	x	x	0.0
11	x	x	0.5
12	x	x	x
13	x	x	x
14	x	x	26.2
15	x	x	0.0
16	x	x	x
17	x	x	x
18	x	x	x
19	x	x	x
20	x	x	x
21	x	x	x
22	x	x	4.8
23	o	o	51.5
24	x	x	21.8
25	x	x	x
26	x	x	x
27	x	x	x
28	x	x	x
29	x	x	x
30	x	x	x

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 2-4. 강릉지역 강수량 데이터(2018년 1월~10월) 계속

5월			
1	x	x	0.0
2	x	x	13.0
3	x	x	0.3
4	x	x	x
5	x	x	x
6	x	x	7.3
7	x	x	x
8	o	x	32.0
9	x	x	x
10	x	x	x
11	x	x	x
12	x	x	2.3
13	x	x	0.0
14	x	x	x
15	x	x	x
16	x	x	1.8
17	x	x	29.0
18	o	o	56.9
19	x	x	0.0
20	x	x	x
21	x	x	x
22	x	x	3.5
23	x	x	0.7
24	x	x	x
25	x	x	x
26	x	x	x
27	x	x	0.0
28	x	x	x
29	x	x	0.3
30	x	x	0.3
31	x	x	x

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 2-4. 강릉지역 강수량 데이터(2018년 1월~10월) 계속

6월			
1	x	x	x
2	x	x	x
3	x	x	x
4	x	x	x
5	x	x	0.0
6	x	x	x
7	x	x	x
8	x	x	x
9	x	x	0.0
10	x	x	0.8
11	x	x	0.0
12	x	x	x
13	x	x	0.0
14	x	x	x
15	x	x	0.0
16	x	x	x
17	x	x	x
18	x	x	x
19	x	x	x
20	x	x	x
21	x	x	x
22	x	x	x
23	x	x	x
24	x	x	x
25	x	x	x
26	x	x	18.0
27	x	x	0.0
28	x	x	19.5
29	x	x	x
30	x	x	0.0

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 2-4. 강릉지역 강수량 데이터(2018년 1월~10월) 계속

7월			
1	o	x	47.0
2	x	x	22.8
3	x	x	5.8
4	o	x	40.8
5	x	x	14.5
6	x	x	13.8
7	x	x	2.8
8	x	x	x
9	x	x	14.5
10	x	x	4.8
11	x	x	11.0
12	x	x	x
13	x	x	x
14	x	x	x
15	x	x	x
16	x	x	x
17	x	x	x
18	x	x	x
19	x	x	x
20	x	x	x
21	x	x	x
22	x	x	x
23	x	x	x
24	x	x	x
25	x	x	x
26	x	x	x
27	x	x	x
28	x	x	0.0
29	x	x	0.0
30	x	x	4.3
31	x	x	x

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 2-4. 강릉지역 강수량 데이터(2018년 1월~10월) 계속

8월			
1	x	x	x
2	x	x	x
3	x	x	x
4	x	x	x
5	x	x	x
6	o	o	234.5
7	x	x	0.0
8	x	x	0.0
9	x	x	1.5
10	x	x	9.5
11	x	x	x
12	x	x	x
13	x	x	x
14	x	x	0.3
15	x	x	x
16	x	x	26.5
17	x	x	0.0
18	x	x	x
19	x	x	x
20	x	x	x
21	x	x	0.0
22	x	x	x
23	x	x	1.8
24	x	x	39.0
25	x	x	0.0
26	x	x	1.3
27	x	x	60.0
28	x	x	40.1
29	x	x	37.0
30	x	x	2.0
31	x	x	0.8

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 2-4. 강릉지역 강수량 데이터(2018년 1월~10월) 계속

9월			
1	x	x	0.0
2	x	x	x
3	x	x	37.3
4	x	x	27.0
5	x	x	x
6	x	x	x
7	x	x	0.0
8	x	x	x
9	x	x	3.5
10	x	x	5.0
11	x	x	0.0
12	x	x	0.0
13	x	x	x
14	x	x	1.0
15	x	x	3.0
16	x	x	0.5
17	x	x	x
18	x	x	x
19	x	x	0.8
20	x	x	33.8
21	x	x	28.8
22	x	x	x
23	x	x	x
24	x	x	x
25	x	x	10.3
26	x	x	1.3
27	x	x	0.3
28	x	x	0.0
29	x	x	0.0
30	x	x	x

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 2-4. 강릉지역 강수량 데이터(2018년 1월~10월) 계속

10월			
1	x	x	x
2	x	x	x
3	x	x	x
4	x	x	3.8
5	o	o	56.0
6	o	o	138.5
7	x	x	x
8	x	x	x
9	x	x	x
10	x	x	x
11	x	x	x
12	x	x	x
13	x	x	x
14	x	x	x
15	x	x	x
16	x	x	12.3
17	x	x	6.0
18	o	x	37.5
19	x	x	x
20	x	x	x
21	x	x	x
22	x	x	x
23	x	x	0.8
24	x	x	x
25	x	x	x
26	x	x	0.0
27	x	x	x
28	x	x	2.0
29	x	x	x
30	x	x	x

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅲ. 결과 및 논의

3.1. 기상레이더 최적 관측인자 도출

3.1.1. 기상레이더 최저·최고 고도각

그림 3-1은 레이더로 수행한 차폐 시뮬레이션 결과를 합성하여 레이더 네트워크에서 차폐에 의한 영향을 분석하는 과정을 나타낸 것이다. 레이더 시뮬레이션 파일을 읽어 레이더 관측 범위를 분석하였다. 관측 가능한 레이더의 최저고도를 각 지형에 비교하여 가장 낮은 고도로 관측 할 수 있는 최저고도와 최저 고도각을 결정하였다. 이를 이용하여 각 CAPPI 고도에 대해 관측 가능한 고도각의 수를 결정하였다.

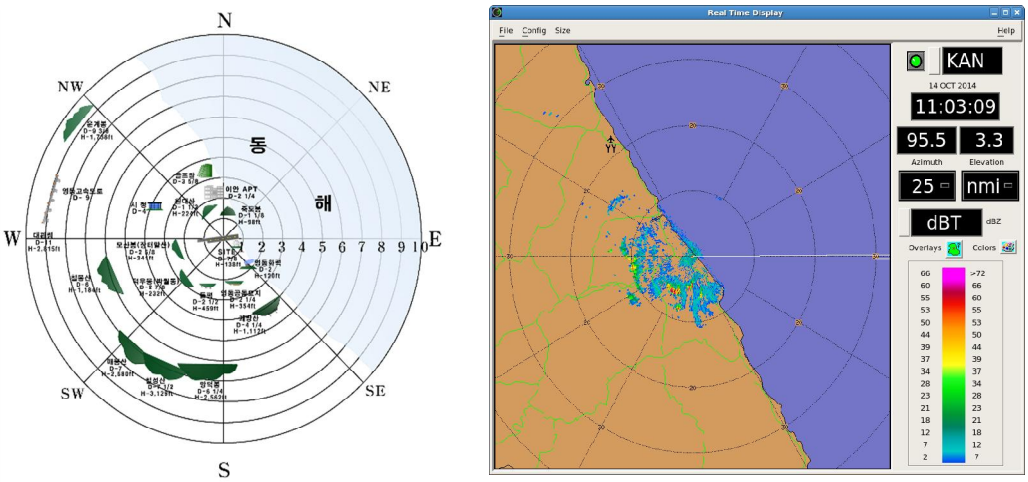


그림. 3-1. 최저·최고 고도각 산정

(1) 최저 고도각(Ø min)

- 봄 여름 철 대관령에서 넘어오는 Cb성 강수 에코를 관측 시 : 5.0°
- 겨울철 Estery로 인한 강한 눈을 관측 시 : 0.5°

(2) 최고 고도각(Ø max)

- 봄 여름 철 대관령에서 넘어오는 Cb성 강수 에코를 관측 시 : 65.2°
- 겨울철 Estery로 인한 강한 눈을 관측 시 : 54.4°

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(3) 관측 고도각의 결정

① 등고도각 간격(Arithmetic Progression : AP) 방법

AP방법은 고도각의 증가값이 일정한 간격을 가지거나 고도각의 tangent값이 일정한 간격을 가지도록 고도각을 설정하는 방법이다(Marshall and Ballantyne, 1975). 즉, 고도각을 다음의 식을 통해 계산한다.

$$\phi_i = \phi_{\min} + (i-1)\triangle\phi \tag{1}$$

$$\tan\phi_i = \tan\phi_{\min} + (i-1)\triangle\tan\phi \tag{2}$$

여기에서 ϕ_i은 최저 고도각(첫번째 고도각)이며 i=1, 2, 3, n은 고도각 증가와 관련된 상수값이다. 고도각을 결정하기 위하여 먼저 최저고도각, 최고고도각, 및 고도각 개수를 설정하였다. 이들 설정 값에서 고도각 증가 상수 값을 변형하여 아래의 식으로 구하였다.

$$\triangle\tan\phi = (\tan\phi_{\max} - \tan\phi_{\min})/(n-1) \tag{3}$$

구해진 상수값을 식 (3)에 대입하고 i값을 변화시키면서 n개의 고도각을 결정할 수 있다. 등고도각 간격 방법은 낮은 고도각에서 고도각의 증가가 크기 때문에 저층 관측이 어렵다. 특히 고도각의 수가 적을 경우 저층에서 1/2 빔 폭보다 더 큰 값으로 고도각을 증가시킬 수 있어 저층 대기에 대한 균질한 관측이 어렵다. 그러나 높은 고도각에서 세밀하게 고도각을 설정하면, 가까이에서 높게 발달하는 강수계의 관측에 유리할 수 있다.(기상청, 이규원, 2010)

② Geometric Progression (GP)

GP는 아래 식과 같이 고도각의 tangent값이 geometric progression을 따라 증가한다(Marshall and Ballantyne, 1975). 여기에서 ϕ_i은 최저 고도각(첫 번째 고도각)이며 i=1, 2, 3, n은 고도각 증가와 관련된 상수값이다. G는 앞 절에서 구해진 최저/최고고도각 값과 고도각 개수(n)를 이용하여 아래의 식으로 계산하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\tan\phi_i = \tan\phi_{\min} G^{i-1} \tag{4}$$

$$G = \left(\frac{\tan\phi_{\max}}{\tan\phi_{\min}}\right)^{\frac{1}{n-1}} \tag{5}$$

이렇게 구해진 G를 식 (5)에 대입하고 i=1~n로 바꾸면서 n개의 고도각을 결정하였다. 이때 최저고도각은 0° 보다 큰 값으로 설정하여야 한다. GP는 AP와는 반대로 저층에 많의 수의 고도각을 설정하고 고도각이 증가하면서 그 증가 값이 급격히 커지는 특징을 가진다. 따라서 지형이 복잡한 지역에서 지형에코가 빈번할 경우 저층에서 조밀한 관측은 강수량 추정 및 저층 기상현상의 관측에 큰 이점을 제공한다. 그러나 저층에서 여러 고도각의 빔 폭이 겹쳐 효율적인 관측이 어렵게 되며, 특히 높은 고도각에서 고도각이 급격하게 상승하는 경향이 있어 상층 강수계의 고 분해능 관측이 어렵다.(기상청, 이규원, 2010)

③ Equi-pressure Progression (PC)

본 연구에서는 AP의 개념을 활용하여 등압 간격으로 변화하는 압력좌표계에 적절한 고도각을 개발하여 다른 고도각 설정 방법과 비교하였다. 먼저 레이더에서 거리 40km 지점에서 레이더 빔의 높이를 계산하고 높이를 다음의 식으로 압력 값으로 전환하였다.

$$P = 1013e^{\frac{-h}{H_s}} \tag{6}$$

여기에서 H_s는 스케일 높이(=7.5km)이다. 구해진 $P_{\min}$, $P_{\max}$를 아래에 적용하여 값을 결정하였다. 최종적으로 구해진 P를 이용하여 i=1~n에 대한 40km 지점에서 n개의 입력값을 다음 식으로 결정하고 각각의 압력 높이에 해당하는 고도각 값을 산출하였다.

$$P_i = P_{\min} + (i-1)\triangle P \tag{7}$$

$$\triangle P = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{n-1} \tag{8}$$

PC는 압력에 따른 기상현상의 묘사에 적절하고 상대적으로 저층에서 GP보다는 밀도가 낮고 AP보다는 고분해능의 고도각을 제공한다. 그러나 고도각 수가 작을

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

경우 AP와 유사하게 저 고도각에서 1/2 빔 폭보다 더 큰 값으로 고도각이 증가할 수 있어 저층의 효율적인 관측을 위해서는 많은 수의 고도각이 필요하다. (기상청, 이규원, 2010)

3.1.2. 기상레이더 최적고도각

(1) CAPPI 기법

모든 고도각에 대해 특정 고도에 대한 고도 추정의 최대 오차를 일정한 범위로 제한하며 동일한 평균고도추정오차값을 가지는 관측전략 수립체계를 Brown et. al(2000)이 처음으로 제안하였다. Brown et al. (2000)은 위험기상을 동반한 대류운의 관측을 가정하여 고도 16km 등 고도면에 대해 레이더 관측고도의 과소추정을 정량적으로 분석하였다. 또한 기존의 고도각의 적절성을 조사하고 효율적인 새로운 관측 고도각을 제안하였다. Brown et al. (2000)이 제시한 관측고도의 과소추정을 정량적으로 분석하기 위한 모식도는 그림. 3-2와 같다. (기상청, 이규원, 2010)

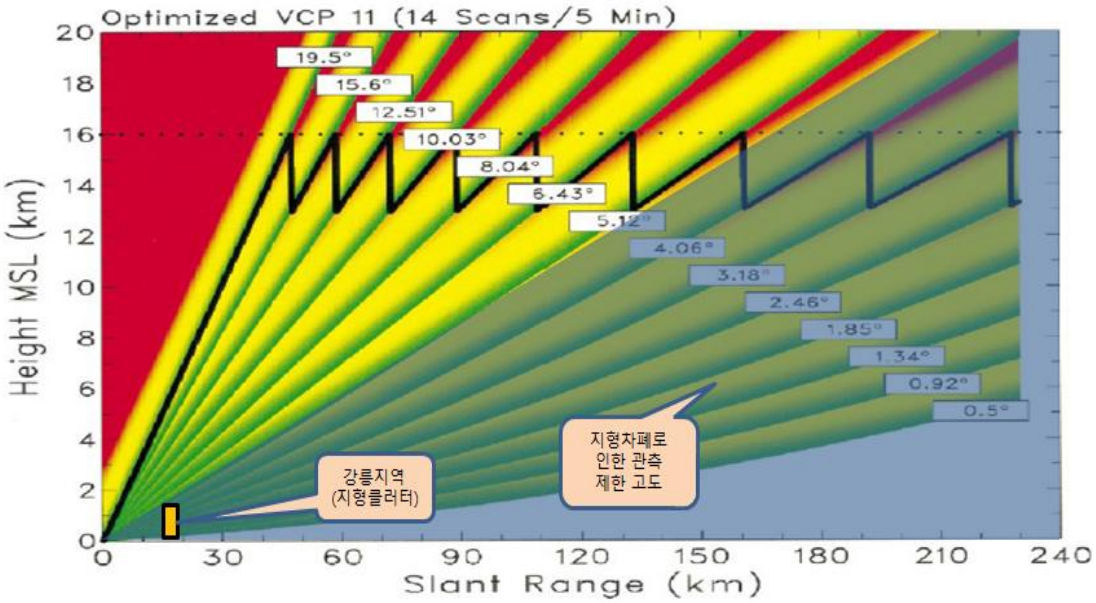


그림. 3-2. 최적 고도각 산정 모식도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Brown et al.(2000)은 식 (10)을 이용하여 레이더 빔 중심의 고도를 계산하고 주어진 특정 고도에서 그 차이를 특정 범위내로 제한하고자 하였다(Doviak and Zrnic, 1993).

$$h = [r^2 + R_e^2 + 2rR_e \sin\phi]^{1/2} - R_e \tag{9}$$

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{h}{r} - \frac{r}{2R_e}\right) \tag{10}$$

$$h = R_e\left[\frac{\cos\phi}{\cos(\phi + s/R_e)} - 1\right] \tag{11}$$

여기서 r은 경사거리, □Re는 표준대기를 가정한 유효지구곡률반경을 h는 관측고도각을 나타낸다. Brown et al.(2000)은 식 (10)의 해석적인 해를 구하고자 이항정리를 통하여 산출한 식 (11)을 이용하여 해당 조건을 만족하는 고도각을 추정하였으며, 고도 16km의 등고도면에 대해 고도추정오차가 일정한 고도각을 산출하였다. 이 과정에서 하층에서 레이더빔이 과도하게 중첩되는 것을 피하고자 빔 폭만큼 고도각 사이의 간격을 설정하였다.

본 연구에서는 Brown et al. (2000)이 사용한 16km 고도면이 아닌 여러 등고도도면에 대해 레이더 빔의 중심이 관측고도를 과소 추정하는 정도를 정량적으로 분석하여 고도각의 적절성을 조사하였다.

알고리즘 측면에서 보면 Brown et al.(2000)의 해석적 해의 경우 이항정리의 2차항 이하를 소거함으로써 오차가 발생하게 되며, 이때 지면 거리가 아닌 레이더 빔의 거리를 이용하였다.

본 연구에서는 실제 지면거리를 사용하는 식 (12)를 이용하였으며(Doviak and Zrnic, 1993) 해석적 해를 도출하는 과정에서 발생하는 오차를 줄이기 위하여 Newton-Rapson방법을 이용하여 수치적 해를 산출하여 최적 고도각을 도출하였다. 최저 및 최고도고각 범위에서 고도각의 개수가 주어지면 해당 고도각 범위내에 해당 고도각수를 만족시키며 평균고도추정오차가 일정한 고도각을 제시한다. (기상청, 이규원, 2010)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(2) 기법 비교

레이더 관측 고도각 결정에서 다음의 두 가지 목적을 모두 고려하였다.

- 대기의 균질한 관측을 통한 위험기상 감시 및 균질한 대기상태 정보 제공
- 저층의 효율적인 관측을 통한 최적 강수량 산정

공간상에서 균질한 관측을 위해서는 관측 고도각이 저층에 밀집되어 있지 않고, 대기 저층 및 고층에 고르게 분포하여야 한다. CAPPI의 경우 해발고도 1.5km에 최적화되었다. AP의 경우 고 고도각에 고도각들이 집적되어 나타나며 저층에서 고도각의 개수가 적어서 저층관측에 불리하다. 특히 최저고도각이 지형에코의 영향을 받거나 차폐되었을 경우 1/2 빔 폭보다 크게 떨어진 3곳 에서 자료를 획득하여 강수를 추정하여야 하므로 지표면 가까이의 관측이 어려워 강수 추정에 큰 오차를 야기할 수 있다. 또한 1.5km에서 고도오차(붉은선으로 표시)가 거리에 따라 증가하는 경향을 보인다. 따라서 한국처럼 복잡한 지형에서는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

GP는 많은 수의 고도각이 최저고도각과 중첩이 되거나(두 번째, 세 번째 고도각이 첫 번째 각과 빔이 중첩됨) 저층에 밀집되어 있다. 따라서 저층 관측이 유리하며 특히 지형에코가 강하게 나타나는 지역에서 지표면 가까이의 관측 자료를 획득하여 강수추정의 정확도를 향상할 수 있는 관측 전략이다. 그러나 상대적으로 대기 저층 및 고층에서 관측 자료를 제공할 수 있는 고도각의 수가 적고 거리에 따라 고도오차가 작아지는 경향을 보인다. 따라서 저층관측에 적합하지만 균일한 자료제공에는 불리한 위의 두 가지 목적을 만족하지 못하여 효율적인 저층관측을 유지하면서 균일한 관측을 하기 위해서는 저층에서 중첩되는 고도각을 높은 고도각으로 할당하는 것이 적절하다.

CAPPI의 경우 GP보다는 적은 수의 낮은고도각을 관측할수 있으며, AP 또는 PC보다는 적은 수의 고고도각이 설정되어 저층 관측뿐만 아니라 대기의 균일한 관측이 가능하다. 특히 저층에서 여러 고도각이 중첩되는 GP의 단점을 보완하면서도 여러 개의 저고도각을 할당하여 강수추정을 위한 저층관측을 담보하고 있다. (그림.3-3). (기상청, 이규원, 2010)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

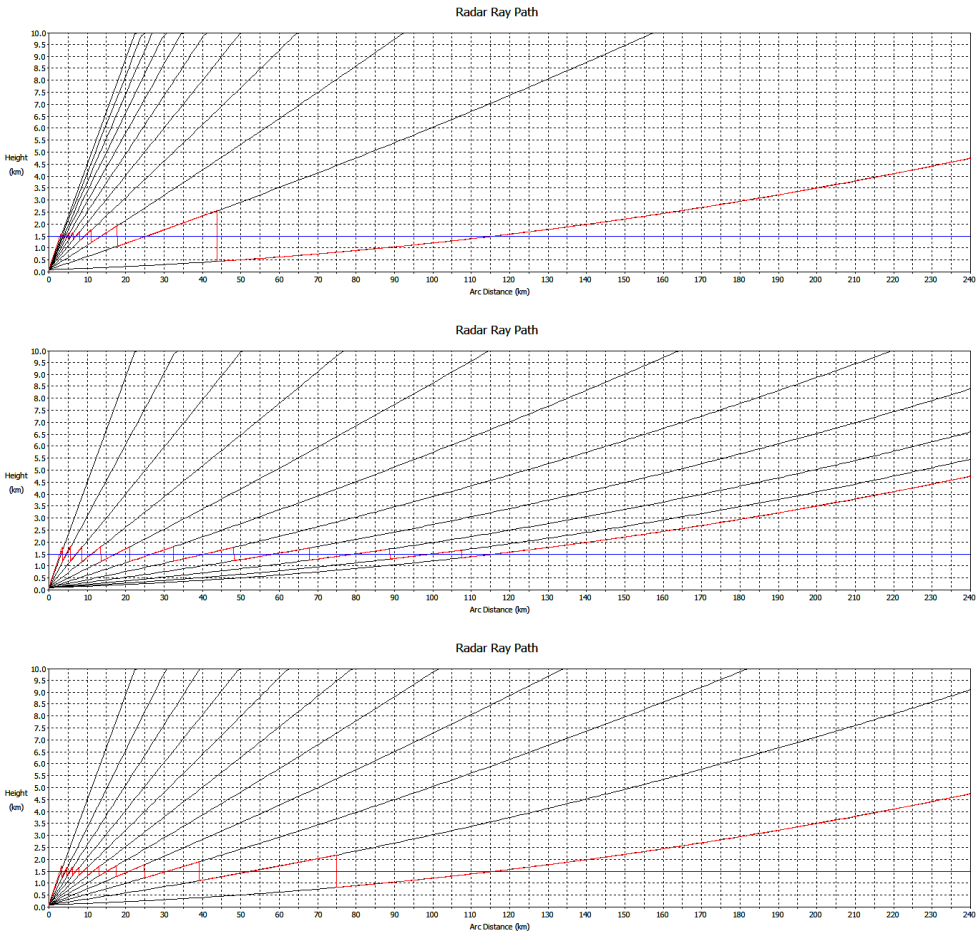


그림. 3-3. 기법 변화에 따른 관측 고도각

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.2. 기상레이더 최적 운영방안 제시

3.2.1. 기상레이더 관측전략

표. 3-1. 공군기상레이더 관측전략(기존)

	항목		Volume	Composite
기존	관측반경(km)		124	299.79
	안테나회전속도(°/s)		11	9
	샘플링 수		60	55
	펄스폭(μs)		0.82	2
	PRF(Hz)	#1	1200	500
		#2	900	
	Dual PRF 비		4:3	
	거리 분해능(m)		1000	500
	Range Average			
	방위각 분해능(°)		1	1
	방위각 수		Full Circle	Full Circle
	Nyquist Velocity(m/s)		48	6.7
	고도각 수		12	1
	고도각(°)		1.5 1.82 2.49 3.35 4.45 5.88 7.73 10.12 13.2 17.13 22.02 27.96	1.5
	볼륨 관측 시간		7분 9초	43초

표. 3-2 공군기상레이더 관측전략(변경)

	항목		Volume(여름철)	Volume(겨울철)
변경	관측반경(km)		124	124
	안테나회전속도(°/s)		17	17
	샘플링 수		75	75
	펄스폭(μs)		0.82	0.82
	PRF(Hz)	#1	1200	1200
		#2	900	900
	Dual PRF 비		4:3	4:3
	거리 분해능(m)		75	75
	Range Average			
	방위각 분해능(°)		1	1
	방위각 수		Full Circle	Full Circle
	Nyquist Velocity(m/s)		48	48
	고도각 수		9	9
	고도각(°)		5.0 1.05 13.1 17.20 24.90 28.50 35.90 47.30 65.20	0.5 1.0 1.6 2.6 5.3 10.5 17.2 42.9 54.4
	볼륨 관측 시간		4분 40초	4분 40초

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.2.2. 기상레이더 최적 관측전략

기존 강릉기지 관측전략에서 기지 기상특성을 고려하여 관측전략을 재설정하였다. 이는 스케줄 시간을 기존 10분에서 5분으로 단축함으로써 신속한 항공작전 지원이 가능하였다. 또한 에코 추적 정확성이 향상되어 피 지원 부서에 좀 더 정확한 자료를 제공할 수 있었다. 특히, 봄, 여름 철 Cb성 강수를 관측 및 추적하기 위하여 기존 5° 이하의 지형클러터(태백산맥)에 차폐된 지역을 삭제하고 5도 이상부터 기지 쪽으로 유입되는 강수를 짧은 시간 내에 관측할 수 있도록 관측전략을 수정하였다. 겨울철에는 동해상에서 발생된 폭설 및 저고도 구름 유입 시 이를 추적하기 위하여 0.5° 부터 54° 까지 9개의 각도로 설정하였다. (그림. 3-4)

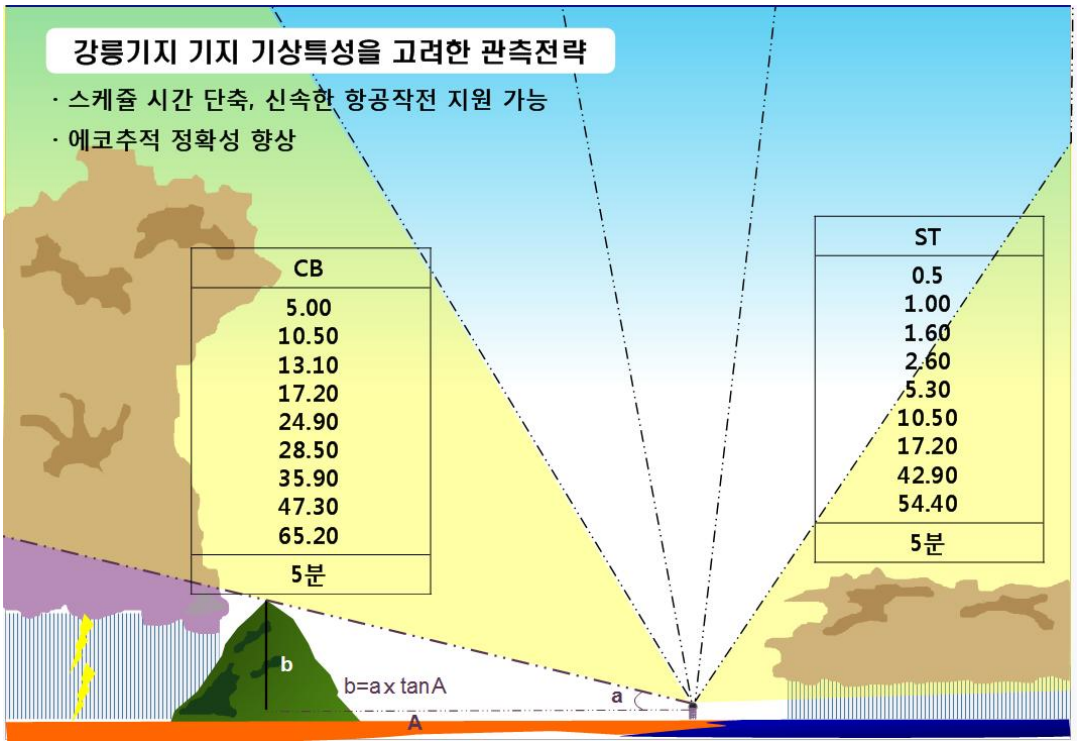


그림. 3-4. 기상 특성을 고려한 관측전략

따라서, 기지 선정의 중요한 요건은 같은 지형적 위치에 설치되어야 한다. 2개의 기상레이더를 비교하기 위해서는 같은 지형적 위치에서 설치하여 비교 관측하

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

여야 한다. 최적의 관측전략을 세우기 위해서는 같은 강수 에코를 추적 가능하여야 하는데, 이는 같은 위치에서에 관측하였을 시 가능하다.

표. 3-3. 고도각에 따른 거리별 최저관측고도

	Φ	tanΦ	높이			
			25마일	50마일	75마일	100마일
Composite Volume	1.5	0.02619	3,457	6,914	10,371	13,828
	0.5	0.00873	1,152	2,305	3,457	4,609
	0.86	0.01501	1,981	3,963	5,944	7,925
	1.29	0.02252	2,973	5,945	8,918	11,891
	1.82	0.03178	4,195	8,390	12,585	16,780
	2.49	0.04349	5,741	11,481	17,222	22,963

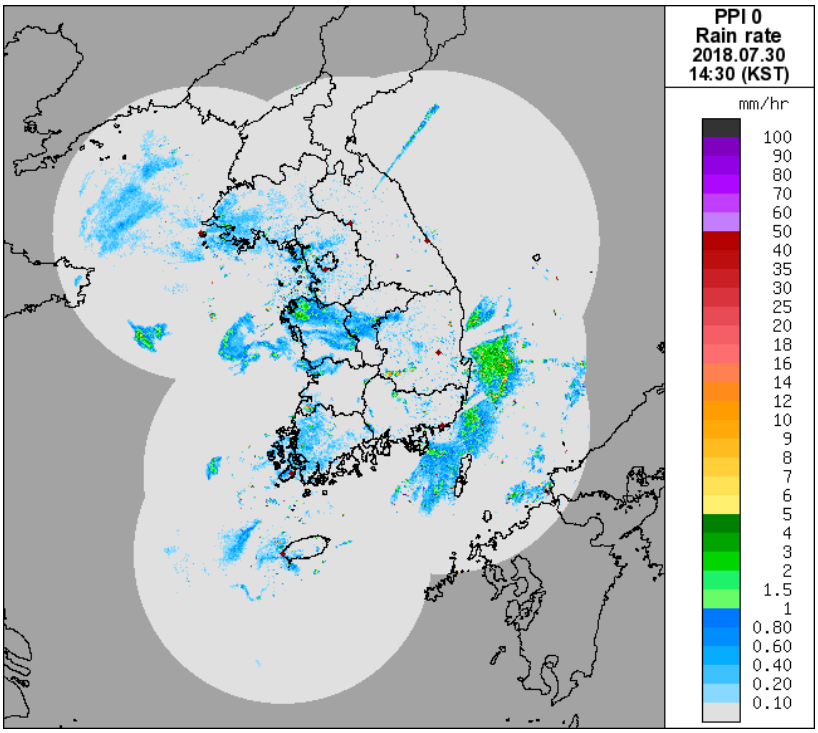


그림. 3-5. 전국 기상레이더 합성화면

Collection @ chosun

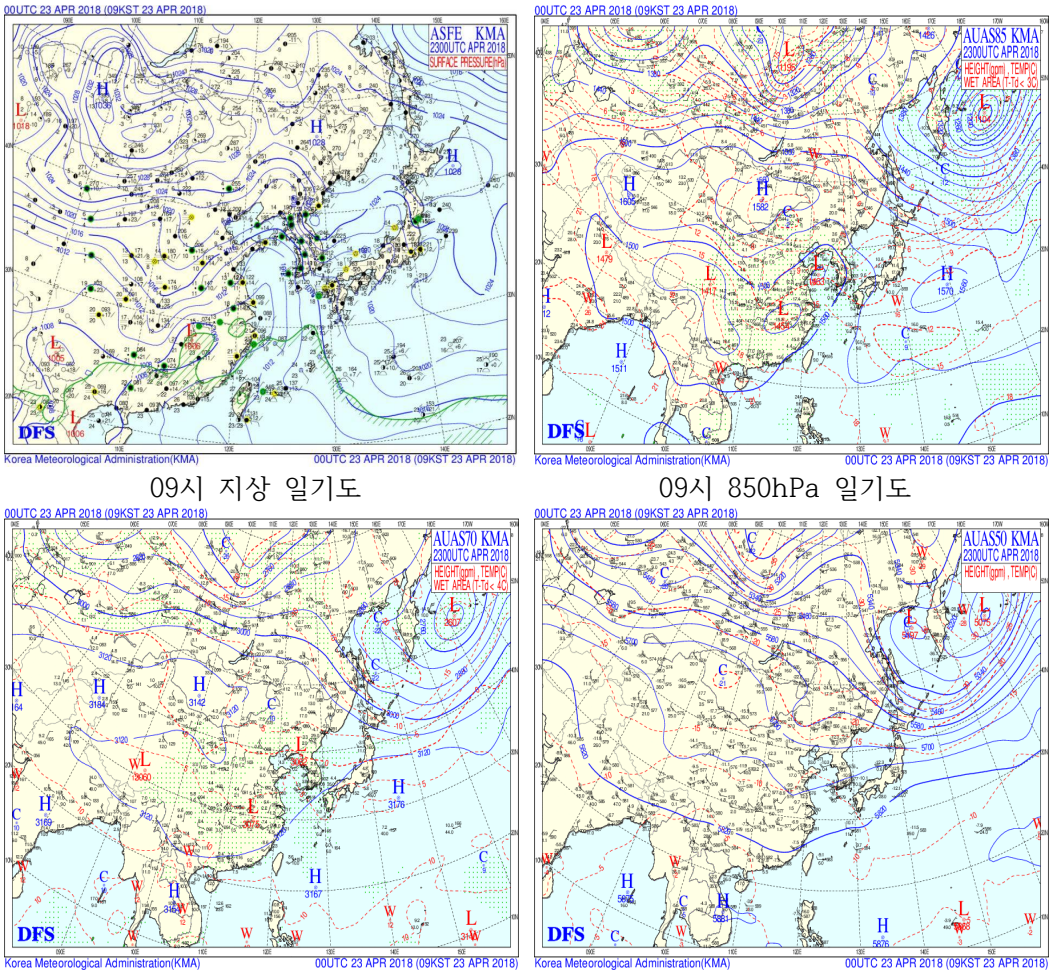
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.2.3. 레이더 관측결과 비교 (관측기법 기존)

(1) 4월 23일

① 일기도 분석

그림. 3-6은 2018년 4월 23일의 기상청 일기도 이며, 그림 3-7은 당일 보조일기도 이다. 여기서 모든 시간은 LST이다.



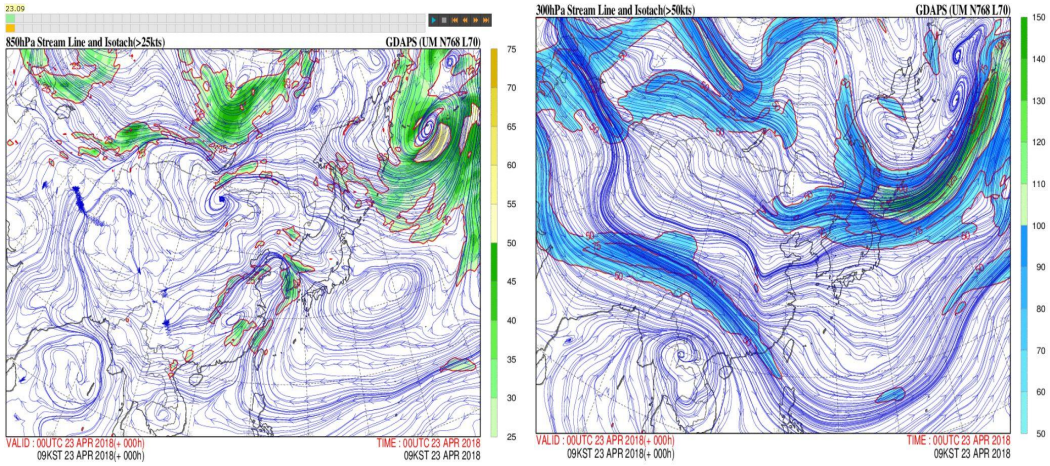
09시 지상 일기도 09시 850hPa 일기도

09시 700hPa 일기도 09시 500hPa 일기도

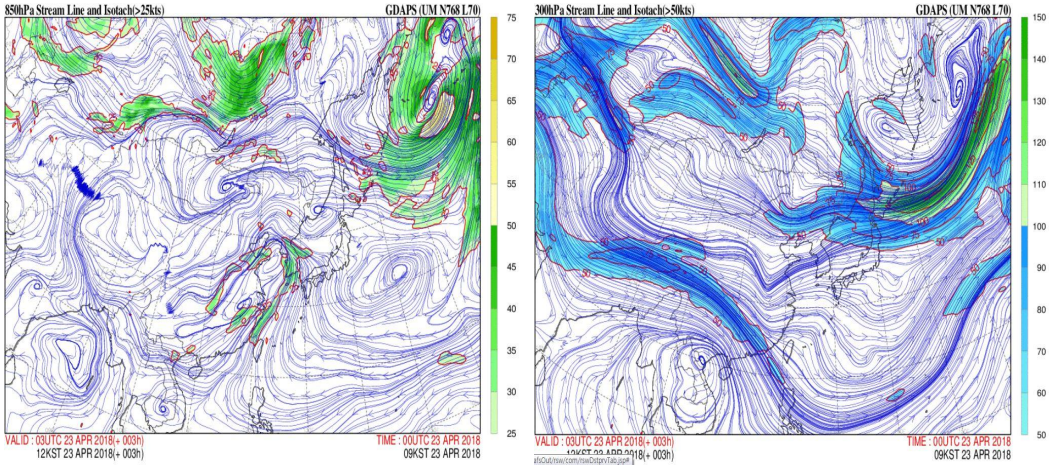
그림. 3-6. 기상청 일기도(2018.04.23)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



09시 850hPa 유선도　　09시300hPa 유선도



12시 850hPa 유선도　　12시 300hPa 유선도

그림. 3-7. 기상청 보조일기도(2018.04.23)

그림 3-6의 지상일기도에서는 저기압이 발달하는 모습을 볼 수 있다. 그림 3-7의 850hPa 유선도에서 한반도에는 25kts 이상의 하층제트가 분석되며, 300hPa 유선도에서 볼 때 한반도는 제트 발산구역이 위치한 것을 볼 수 있다. 하층제트가 나타나며 한반도에 발산구역이 위치할 때는 저기압 시스템의 발달이나 강수 구름대의 강한 발달을 주의해야 한다. 09~12시 사이 하층제트의 강도가 가장 강하게 나타나고 있으며, 12시 경에는 그 구역이 다소 줄어든 것을 볼 수 있다. 비슷한 다른 시스템에서 강수의 강도는 보통 하층제트의 강도에 따라 달라진다. 따라서 오후 보다 오전에 강수의 강도가 더 강했을 것이라 예측할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

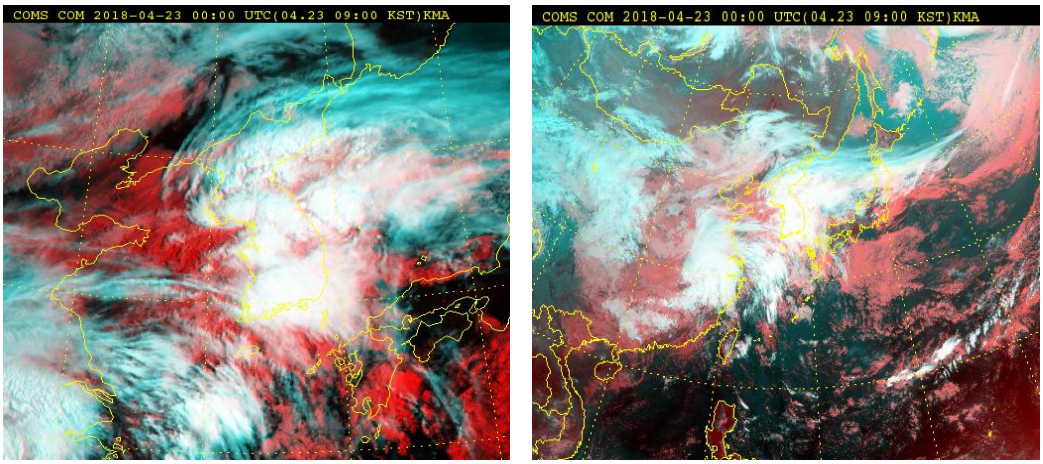


그림. 3-8. 위성영상 08시~12시(2018.04.23)

그림 3-8과 같이 08~12시 위성자료 사진을 살펴보면 상층 Blocking으로 인해 기압계의 정체가 발생되고 있다. 기압계의 경계에 한반도가 위치하고 있는 모습으로, 기압경도력이 강해지며 영동지역은 강한 동풍기류 영향을 받고 있다. 동풍기류 영향을 받으므로, 지형효과에 의해 단시간에 많은 비가 내릴 가능성이 높다. 게다가 찬 공기와 따뜻한 공기가 만나는 경계 지점에 위치함으로써 강수 구름 발달의 좋은 조건이 되기도 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

② 강릉기지 강수량

표 3-4는 2018년 4월 23일 공군 및 기상청의 AWS(Auto Weather System) 누적 강수량을 나타낸 것이다. 영동 지역을 중심으로 많은 강우량을 기록했으며, 강우 강도가 높은 08~12시 위주로 레이더를 비교분석 하였다.

표. 3-4. 공군 및 기상청 AWS 누적강수량(2018.04.23)

(단위:mm)

시간	공군 AWS			기상청 AWS			
	거진	황병산	강릉	강릉	대관령	동해	속초
0800	7	9	11	5	4.5	3.5	4
0900	8.5	12	14	9	7.5	9.5	8.5
1000	10	15	19	13.5	11.5	12	14.5
1100	13	18.5	25	20.5	18	16	19.5
1200	14.5	22	31	27.5	24	21.5	24.5
1300	17	24	35.5	32.5	29	25.5	27
1400	20	25	38.5	35	31	28.5	31
1500	22.5	26.5	40	37	33	30.5	36
1600	25.5	26.5	41.5	38	34.5	33	40
1700	27	27	43	39.5	35.5	36	42
1800	29.5	28	45	41	37.5	37	43.5
1900	32	28.5	45.5	42.5	40	38	44.5
2000	32	29	46.5	43.5	41	40	45.5
2100	32.5	29	48	45	42	43	46.5

③ 레이더 비교분석

기상청 S-band와 공군 C-band 레이더의 에코감도를 지역별로 비교분석한 결과는 아래의 표 3-5와 같다. 강릉에서 46.33km에 위치한 동해의 경우 기상청과 공군 레이더의 에코 감도가 동일하거나 공군레이더의 감도가 기상청보다 우세한 경우는 총 25회의 측정 중 16회로 나타났다. 강릉에서 69.82km 떨어진 속초의 경우 에코 감도가 동일하거나 공군이 우세한 횟수가 동해와 비슷한 17회로 측정되었다. 하지만 강릉에서 103.26km 떨어진 거진에서는 기상청의 에코감도가 공

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

군보다 우세한 횟수가 24회로 공군의 레이더 감도가 떨어지는 것을 확인하였다. 즉, 측정거리가 멀어질수록 공군 레이더의 감도가 저하되는 것을 알 수 있다.

표. 3-5. 공군 및 기상청 레이더 에코 감도비교(2018.04.23)

순번	동해		속초		거진	
	기상청	공군	기상청	공군	기상청	공군
1	6	6	3	3	0.5	0
2	5	5	3	3	0.5	0
3	6	5	6	4	0.5	0
4	6	6	3	3	0.5	0
5	4	2	3	3	0.5	0
6	3	2	3	3	0.5	0.1
7	3	3	4	5	0.5	0.2
8	3	2	4	6	0.5	0.5
9	3	3	4	6	0.5	0
10	3	2	6	6	0.5	0.1
11	2	1	6	4	0.5	0.1
12	1	1	4	3	1	0.5
13	4	4	4	4	3	0.5
14	4	4	4	4	3	0.5
15	4	3	4	4	3	0.5
16	4	4	4	3	3	0.5
17	4	4	4	3	3	0.5
18	4	4	3	2	3	0.5
19	4	3	3	3	3	0.5
20	4	3	4	4	3	0.5
21	4	5	3	3	3	0.5
22	5	5	3	3	3	0
23	4	4	3	3	1	0.2
24	4	4	3	2	1	0.2
25	4	4	3	0.5	3	0.2
종합	. 기상청 우세 : 9회 . 공군 우세 : 1회 . 동일 : 15회		. 기상청 우세 : 8회 . 공군 우세 : 3회 . 동일 : 14회		. 기상청 우세 : 24회 . 공군 우세 : 0회 . 동일 : 1회	

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

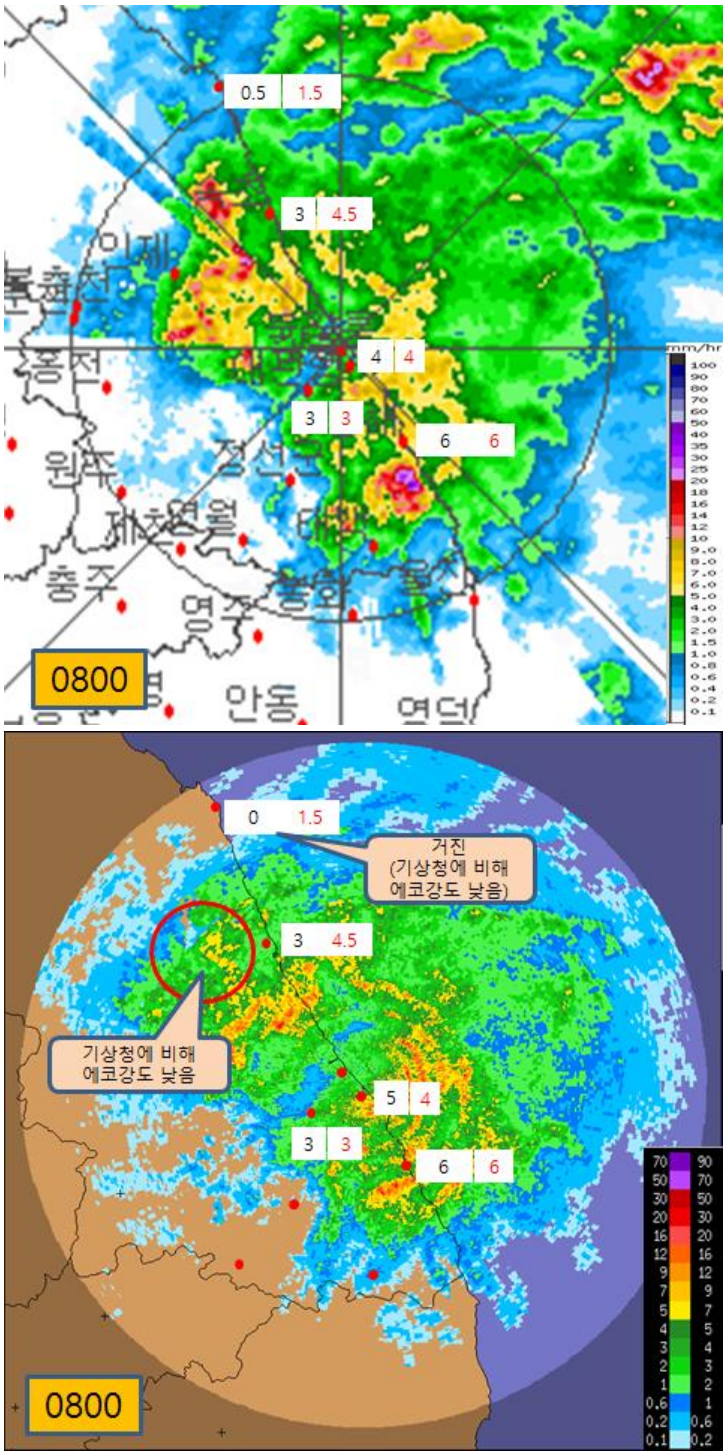


그림. 3-9. 기상청(상), 공군(하) 기상레이더 에코 비교(08:00)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

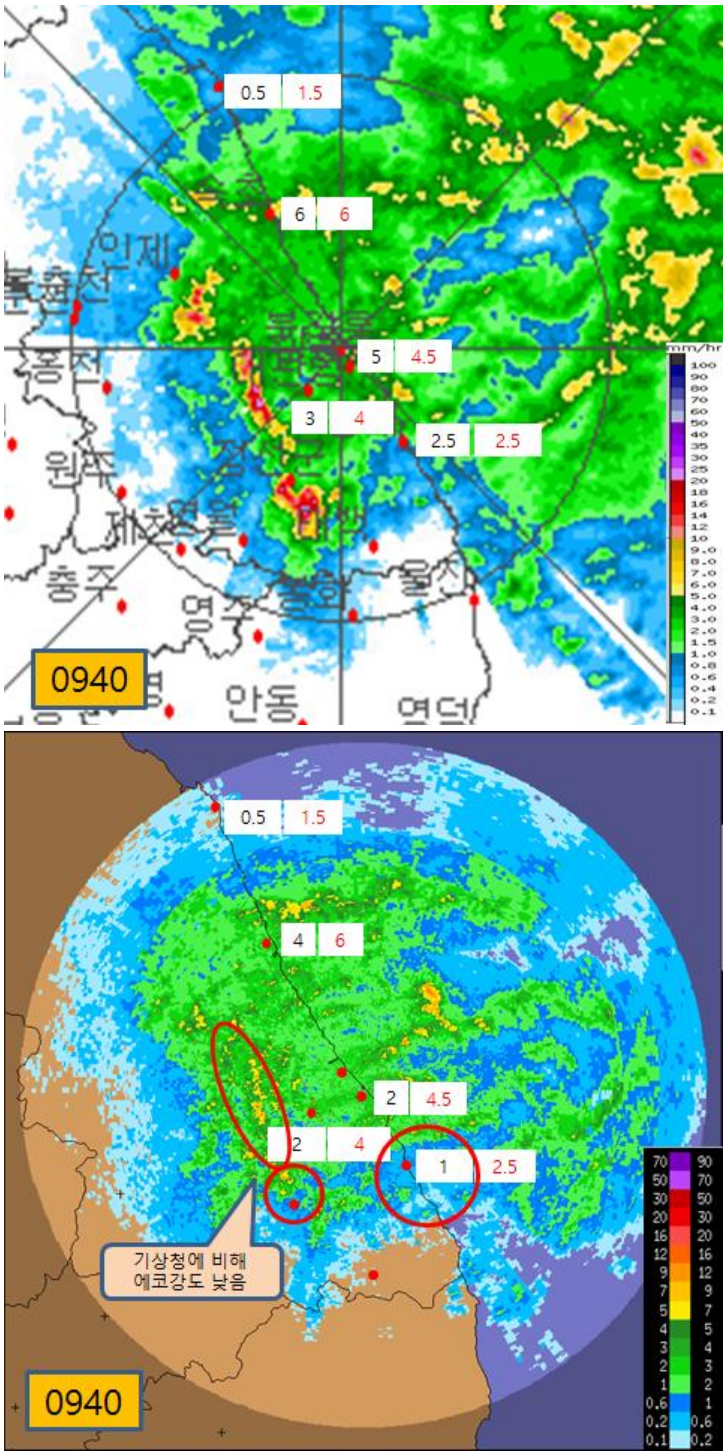


그림. 3-10. 기상청(상), 공군(하) 기상레이더 에코 비교(09:40)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-9의 08시 대관령, 강릉, 동해, 속초 지역은 에코강도가 유사하지만 인제 및 거진 지역은 기상청 레이더에 비해 공군레이더의 에코 강도가 약하며, 실제 강수량보다 적은 것을 확인하였다. 그림 3-10의 09시 40분경에는 대관령 서쪽으로 강한 에코가 관측되나 공군자료를 보면 강도가 기상청에 비해 약하게 나타난다. 또한 거진 지역에는 약한 강우량이 관측되었지만 실제 강수량 보다는 적은 것을 확인하였다.

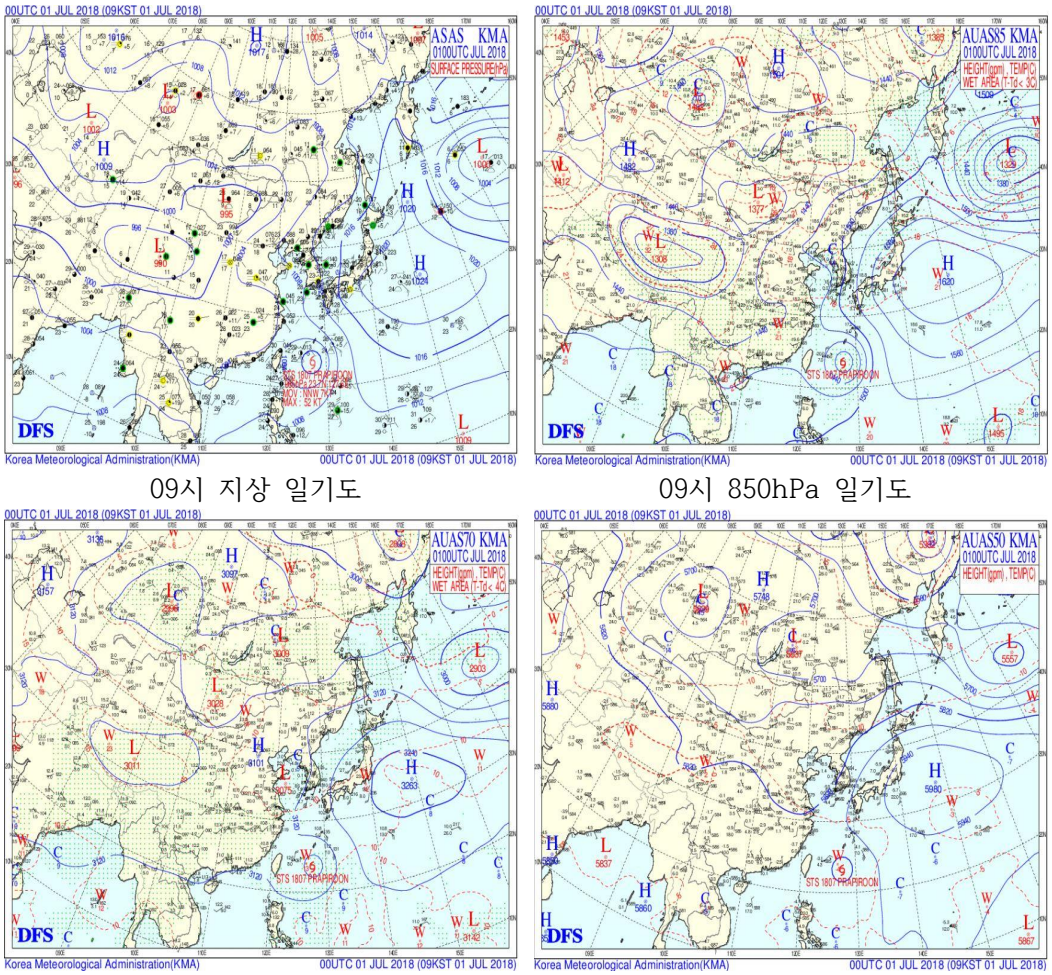
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(2) 7월 1일

① 일기도 분석

그림 3-11은 2018년 7월 1일의 기상청 일기도 이다. 그림 3-12은 당일 보조일기도 이다. 여기서 모든 시간은 LST이다.



09시 지상 일기도 09시 850hPa 일기도

09시 700hPa 일기도 09시 500hPa 일기도

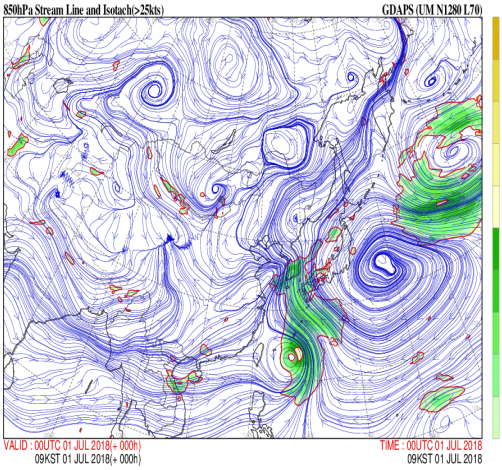
그림. 3-11. 기상청 일기도(2018.07.01)

그림 3-11의 지상 일기도에서 대만 동쪽으로 태풍 프라피룬(PRAPIROON)이 북상 중인 것을 확인할 수 있다. 한반도는 고기압 가장자리에 위치하며, 남서기류의 영향으로 온난 습윤한 공기 유입이 발생할 것으로 예측된다. 한반도에 습윤

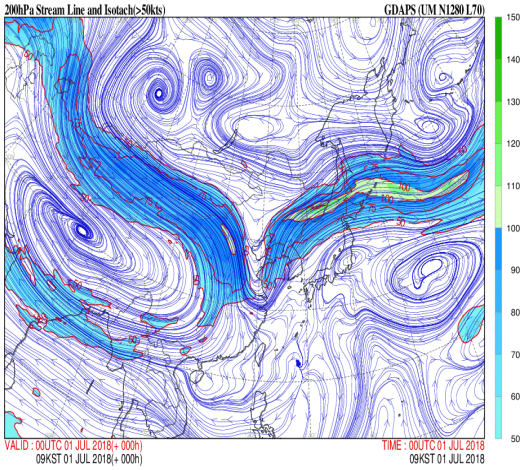
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

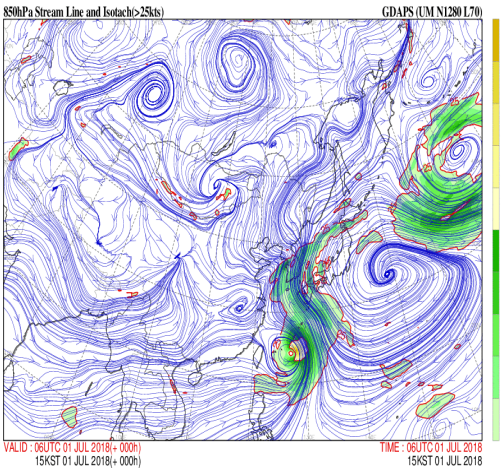
구역과 하층제트가 분석되고 있으며, 태풍 PRAPIROON으로부터 습윤공기가 유입 중인 것을 확인하였다. 700hPa 일기도에서 한반도에 습윤구역이 존재하는 것을 볼 수 있으며, 서해상에 저기압 중심이 분석되었다. 500hPa 일기도에서는 기단의 경계인 5820선이 한반도 중부부터 서해안까지 가리고, 이에 따라 남부 및 영동 지방 중심으로 대기 불안정이 나타날 가능성이 높다.



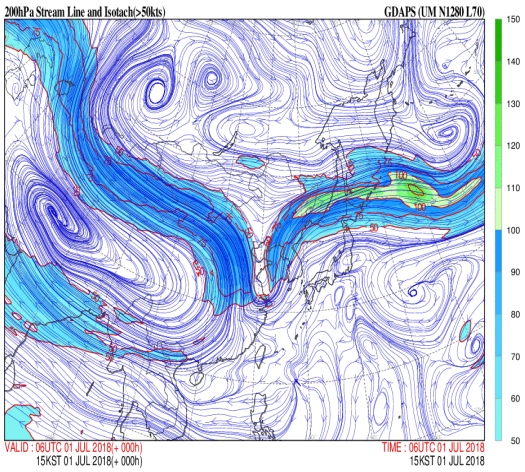
09시 850hPa



09시 200hPa



15시 850hPa



15시 200hPa

그림. 3-12 기상청 보조일기도(2018.07.01)

그림 3-12의 850hPa 유선, 풍속 예상도에서 남한 지역 하층제트와 온난 습윤한 공기 유입이 모의되고 있다. 수증기 영상에서 암역대(건조구역)가 산둥반도 부근에 위치하며, 성질이 다른 두 공기가 만나 대기 불안정이 가속되었다. 한반도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

는 제트 발산지역에 위치하며, 하층제트도 분석되고 있다. 따라서 제트 커플링이 발생 할 가능성이 높다. 700hPa 고상당온위 구역이 한반도에 유입되었으며, 850hPa 하층 제트가 분석되고 300hPa 제트 발산구역에 위치하여 제트 커플링이 일어날 수 있는 조건을 갖추었다. 건조공기와 습윤공기의 경계에 한반도가 위치함으로써 호우 발생 조건을 만족한 것을 확인할 수 있다. (그림. 3-13).

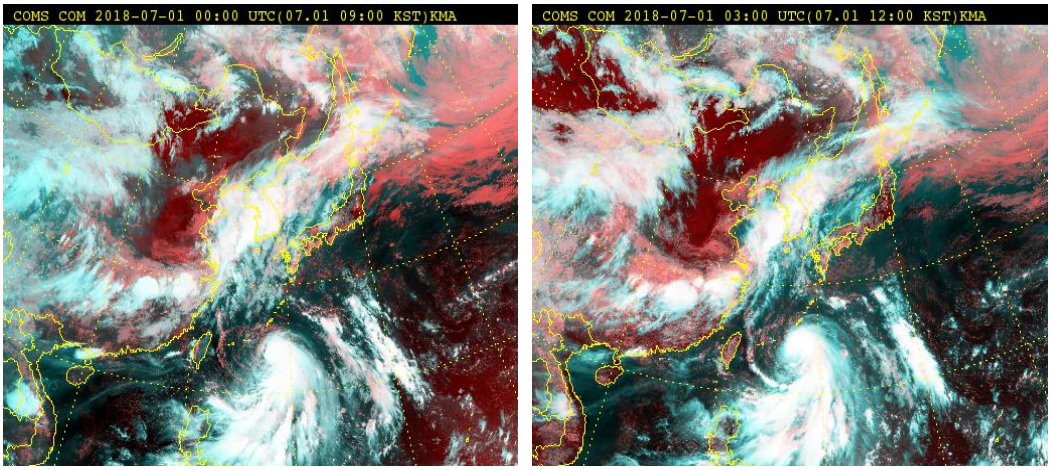


그림. 3-13. 위성영상 08시~12시(2018.07.01)

② 강릉기지 강수량

표 3-6은 2018년 7월 1일 공군 및 기상청 AWS의 누적 강수량이다. 한반도 충청 및 영동 지역을 중심으로 많은 강우량을 기록했으며, 강우 강도가 높은 08~12시 위주로 레이더를 비교분석 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 3-6. 공군 및 기상청 AWS 누적강수량(2018.07.01)

(단위:mm)

시간별	공군 AWS			기상청 AWS			
	거진	황병산	강릉	강릉	대관령	동해	속초
0800	1	10	4	2.5	10	3	1.5
0900	3.5	20	10	10	18.5	16	4
1000	5.5	29.5	17.5	17	24.5	31	10
1100	13	31	24	24.5	26.5	39	18.5
1200	24	31.5	28	28.5	29.5	47	30
1300	33.5	32.5	28.5	29	29.5	47.5	32
1400	38	33.5	31	30	31.5	50	35
1500	41	34	31	30.5	32.5	59	36
1600	42.5	37	35.5	35.5	33.5	59	43
1700	44.5	50.5	38.5	36.55	47	59	46
1800	48.5	51.5	42	41	49	59	50
1900	49	52.5	42	41	49.5	59	50.5
2000	49.5	53	43	41	51.5	59	51
2100	49.5	53	44.5	42.5	54	59.5	51.5

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

③ 레이더 비교분석

기상청 S-band와 공군 C-band 레이더의 에코감도를 지역별로 비교분석한 결과는 아래의 표. 3-7와 같다.

표. 3-7 공군 및 기상청 레이더 에코 감도비교(2018.07.01)

순번	동해		속초		거진	
	기상청	공군	기상청	공군	기상청	공군
1	4	4	4	4	3	3
2	4	4	3	3	3	3
3	5	4	3	2	3	1
4	5	4	2	2	3	1
5	13	13	2	2	3	1
6	15	15	3	3	3	1
7	15	13	4	4	2	1
8	15	7	4	1	2	1
9	15	7	6	2	2	1
10	4	4	3	2	2	1
11	5	5	3	3	1	1
12	5	4	5	3	3	1
13	6	4	4	3	3	1
14	8	5	5	3	5	2
15	8	5	8	6	5	1
16	8	8	8	6	6	3
17	5	4	8	5	5	1
18	13	13	10	7	4	1
19	8	8	4	3	4	1
20	8	3	3	1	3	1
21	5	3	5	3	4	1
22	5	2	10	3	5	1
23	3	2	4	1	4	2
24	0.5	0.5	5	2	5	3
종합	. 기상청 우세 : 14회 . 공군 우세 : 0회 . 동일 : 10회		. 기상청 우세 : 17회 . 공군 우세 : 0회 . 동일 : 7회		. 기상청 우세 : 21회 . 공군 우세 : 0회 . 동일 : 3회	

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

동해의 경우 기상청과 공군 레이더의 에코 감도가 동일한 경우는 총 24회의 측정 중 10회로 나타났으며, 기상청의 감도가 공군보다 우세한 경우는 14회였다. 속초의 경우 기상청의 에코 감도가 우세한 횟수가 17회로 증가하였으며, 강릉에서 거리가 가장 먼 거진에서는 21회로 대다수를 차지하였다. 모든 지역에서 공군의 에코감도가 기상청 보다 우세한 경우는 전무하였으며 앞서와 같이 측정거리가 멀어질수록 공군 레이더의 감도가 현저히 저하되는 것을 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

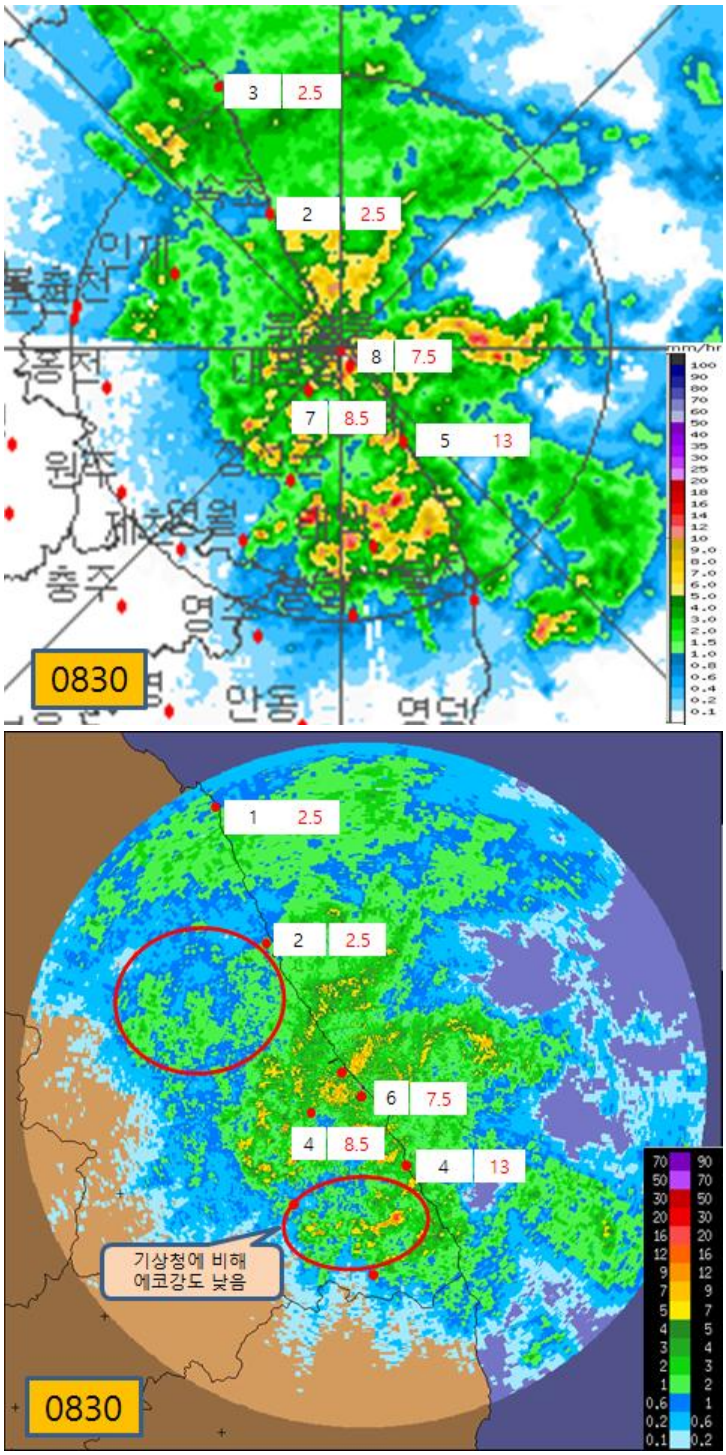


그림. 3-14. 기상청(상), 공군(하) 기상레이더 에코 비교(08:30)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

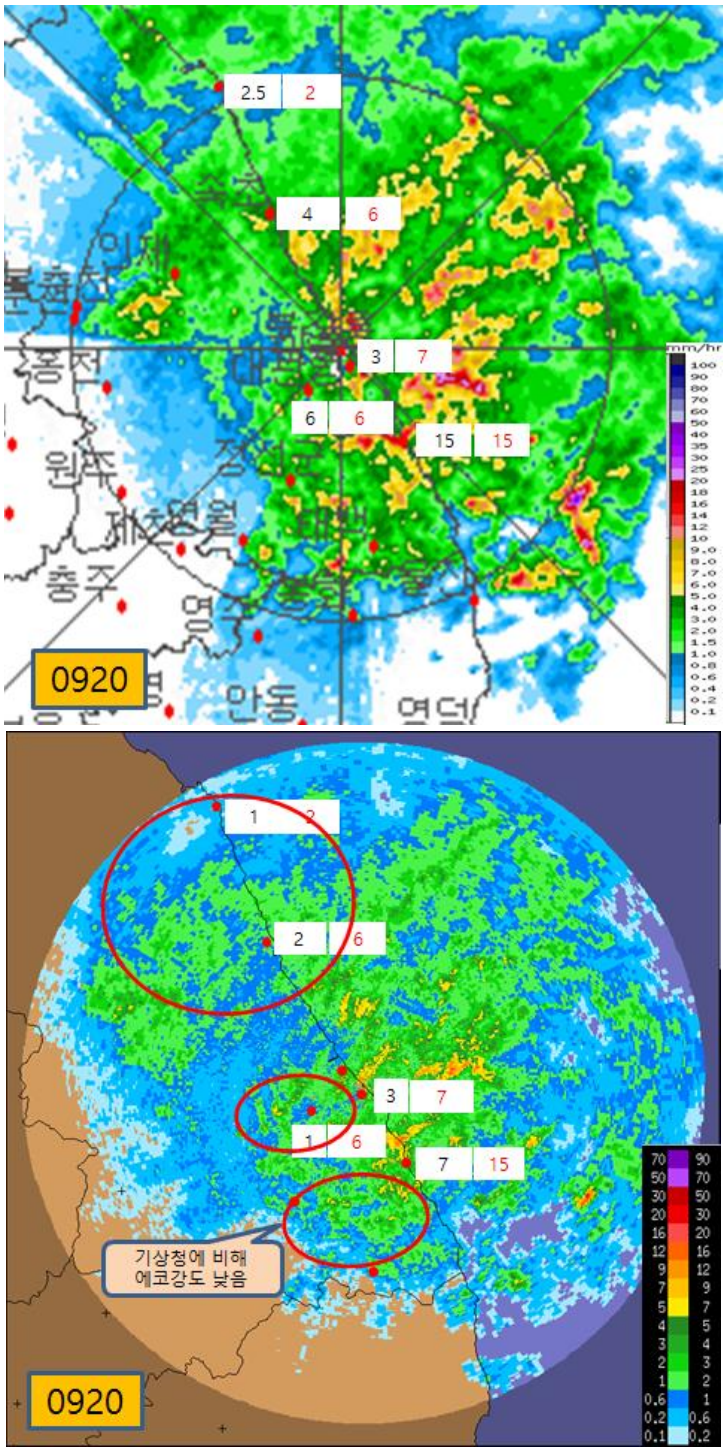


그림. 3-15. 기상청(상), 공군(하) 기상레이더 에코 비교(09:20)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-14의 08시 30분 강릉지역은 에코강도가 유사하였으나 대관령 및 태백, 인제 지역은 기상청 레이더에 비해 공군레이더의 에코강도가 약하게 나타났으며 실제 강수량보다 적은 것을 확인하였다. 그림 3-15에서 09시 20분 또한 강릉을 제외한 대관령, 동해, 태백지역으로 기상청 레이더에 비해 에코강도가 약하고 실제 강수량 보다 낮았다.

Collection @ chosun

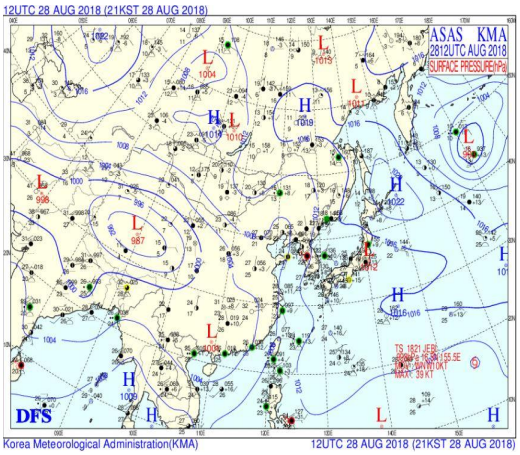
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.2.4. 레이더 관측결과 비교 (CAPPI 적용)

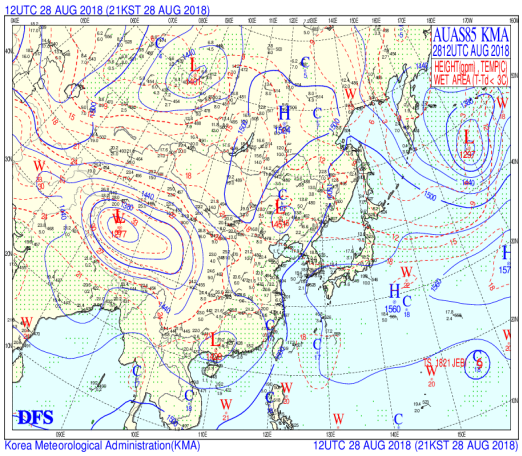
(1) 8월 28일

① 일기도 분석

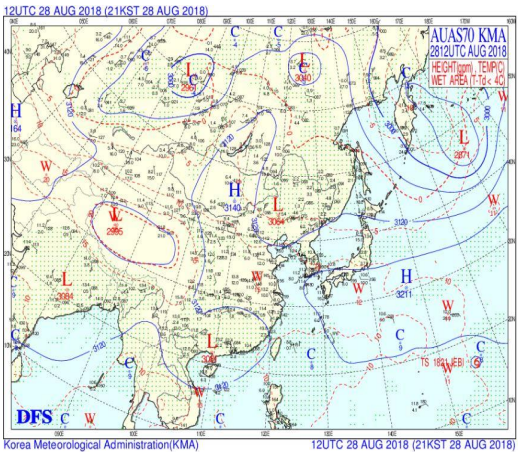
그림 3-16은 2018년 8월 28일의 기상청 일기도 이다. 그림 3-17은 당일 보조 일기도 이다. 여기서 모든 시간은 LST이다.



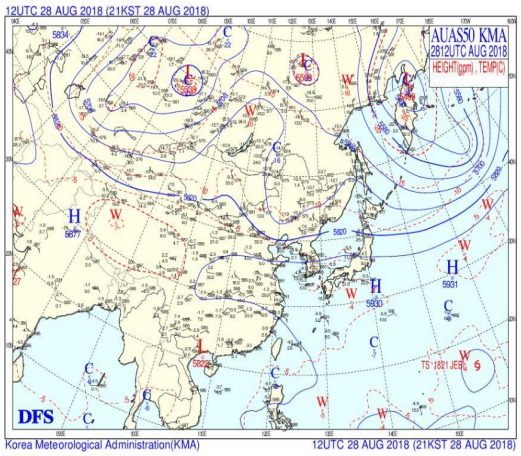
21시 지상 일기도



21시 850hPa 일기도



21시 700hPa 일기도



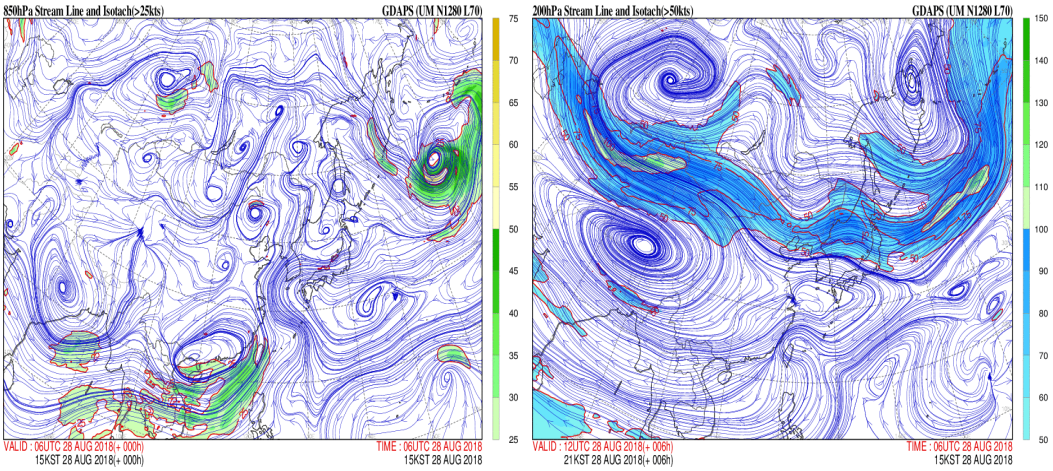
21시 500hPa 일기도

그림. 3-16. 기상청 일기도(2018.08.28)

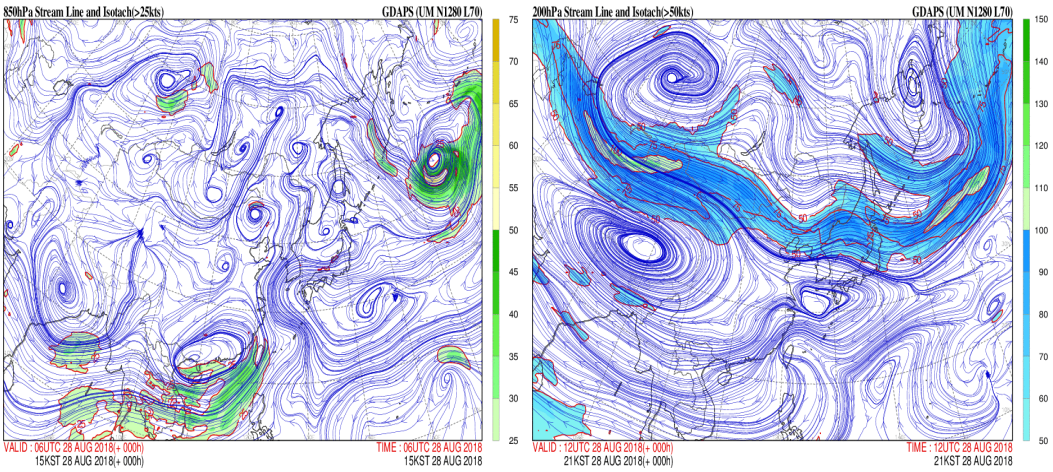
그림 3-16의 지상일기도에서 한반도는 안장부에 위치해 있는 것을 확인할 수 있다. 700hPa 일기도에서 중부지역과 영동지역으로 습윤 구역이 분석되고 있으며, 500hPa 일기도에서 한반도는 해양성 기단의 영향권 안에 들어있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



15시 850hPa　　15시 200hPa



21시 850hPa　　21시 200hPa

그림. 3-17. 기상청 보조일기도(2018.08.28)

그림 3-17의 700hPa 유선도를 보면, 고 상당온위 구역이 한반도 중부지역과 영동지역을 중심으로 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 고 상당온위 구역이 분포한다는 것은 한반도로 온난 습윤 공기가 유입된다는 것을 의미한다. 이 때 수증기 암역이 존재하는 부근을 찾으면 강수구역을 예측할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

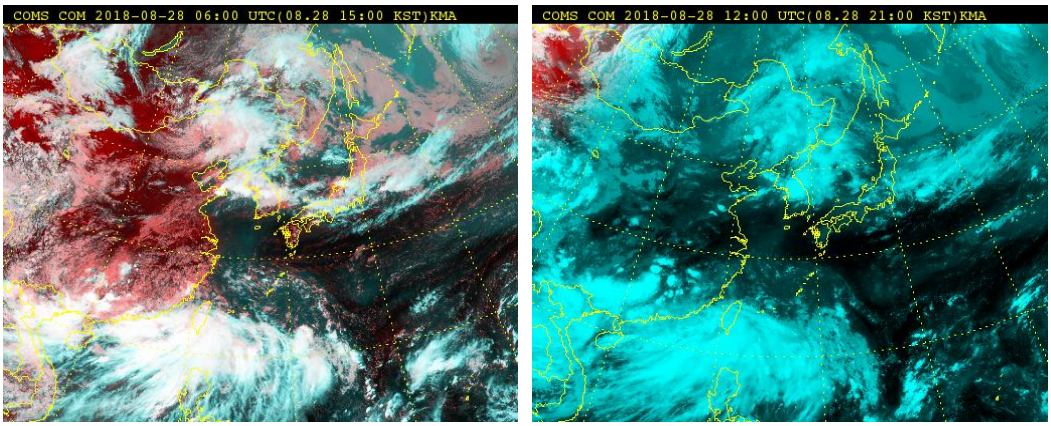


그림. 3-18. 위성영상 15시~21시(2018.08.28)

그림 3-18의 위성영상을 살펴보면 발해만 부근으로 수증기 암역이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 또한 한반도 경기, 영동 지역을 중심으로 성질이 다른 두 공기가 만나 대기 불안정이 발생하였다. 강한 강수 구역이 발생할 수 있는 조건을 만족하면서 영동 지역 중심으로 짧은 시간에 다소 많은 양의 강수가 발생함을 알 수 있다.

② 강릉기지 강수량

표 3-8은 2018년 8월 28일 강릉기지 공군 및 기상청 AWS(Auto Weather System) 누적강수량이다. 17시부터 강수가 시작되어 19~21시 사이에 주 강수대를 보였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 3-8. 공군 및 기상청 AWS 누적강수량(2018.08.28)

(단위:mm)

시간별	공군 AWS			기상청 AWS			
	거진	황병산	강릉	강릉	대관령	동해	속초
0800	0	0	0	0	0	0	0
0900	0	0	0	0	0	0	0
1000	0	0	0	0	0	0	0
1100	0	0	0	0	0	0	0
1200	0	0	0	0	0	0	0
1300	0	0	0	0	0	0	0
1400	0	0	0	0	0	2	0
1500	0	0	0	0	0	4.5	0
1600	0	0	0	0	0.5	5.5	0
1700	0	0.5	0	0.5	1	7.5	0
1800	0	1.5	0.5	1	1.5	10	0
1900	0.5	3.5	1	1	3	10.5	0
2000	1.5	5	2	2	3.5	11.5	1.5
2100	4	11.5	6	7	20	13.5	6.5

③ 레이더 비교분석

기상청 S-band와 공군 C-band 레이더의 에코감도를 지역별로 비교분석한 결과는 아래의 표 3-9와 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 3-9. 공군 및 기상청 레이더 에코 감도비교(2018.08.28)

순번	동해		속초		거진	
	기상청	공군	기상청	공군	기상청	공군
1	2	2	4	4	1	2
2	2	2	5	5	2.5	2.5
3	2	2	4	6	2.5	2.5
4	2	2	6	7	0.5	2.5
5	2	2	6	7	2.5	2.5
6	2	2	6	6	4	3
7	1	1	5	5	4	3
8	0	0	4	4	4	3
9	0	0	4	4	4	3
10	1	1	5	5	4	3
11	1	1	5	6	3	1
12	1	1	4	4	1	1
종합	. 기상청 우세 : 0회 . 공군 우세 : 0회 . 동일 : 12회		. 기상청 우세 : 0회 . 공군 우세 : 4회 . 동일 : 8회		. 기상청 우세 : 6회 . 공군 우세 : 2회 . 동일 : 4회	

CAPPI를 적용하여 공군레이더의 관측전략을 개선한 결과 개선 전에 비해 공군레이더의 에코감도가 모든 지역에서 향상된 것을 확인할 수 있었다. 동해의 경우 총 12회의 측정 결과 모두 기상청과 공군 레이더의 에코 감도가 동일한 것으로 나타났다. 속초의 경우 에코 감도가 동일한 경우는 8회, 공군이 우세한 경우는 4회로 괄목할 만한 결과를 보였다. 공군레이더에서 거리가 가장 먼 거진에서는 공군의 에코감도가 기상청과 동일하거나 우세한 경우가 6회로 감소하였으나, CAPPI 적용 전과 비교하면 공군 레이더의 정확도와 신뢰성이 크게 향상된 것을 확인할 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

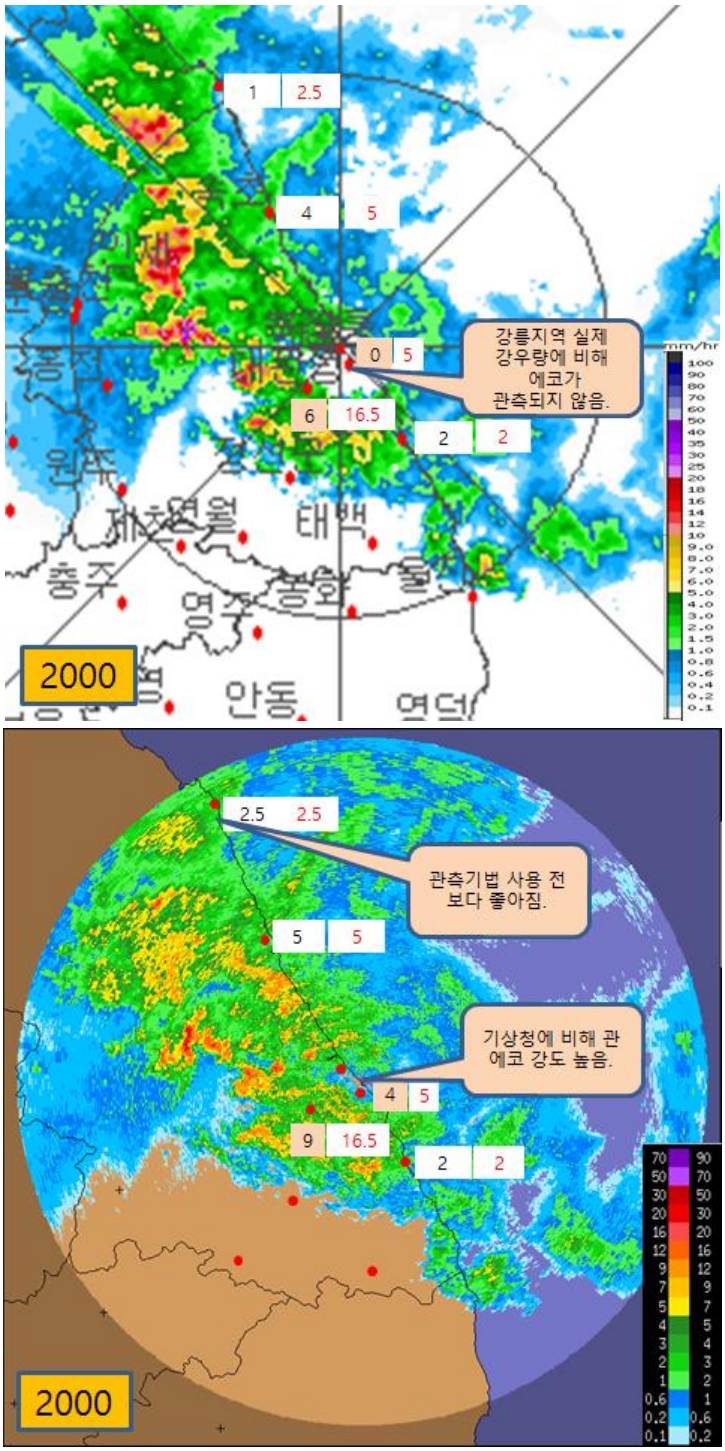


그림. 3-19. 기상청(좌), 공군(우) 기상레이더 에코 비교(20:00)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

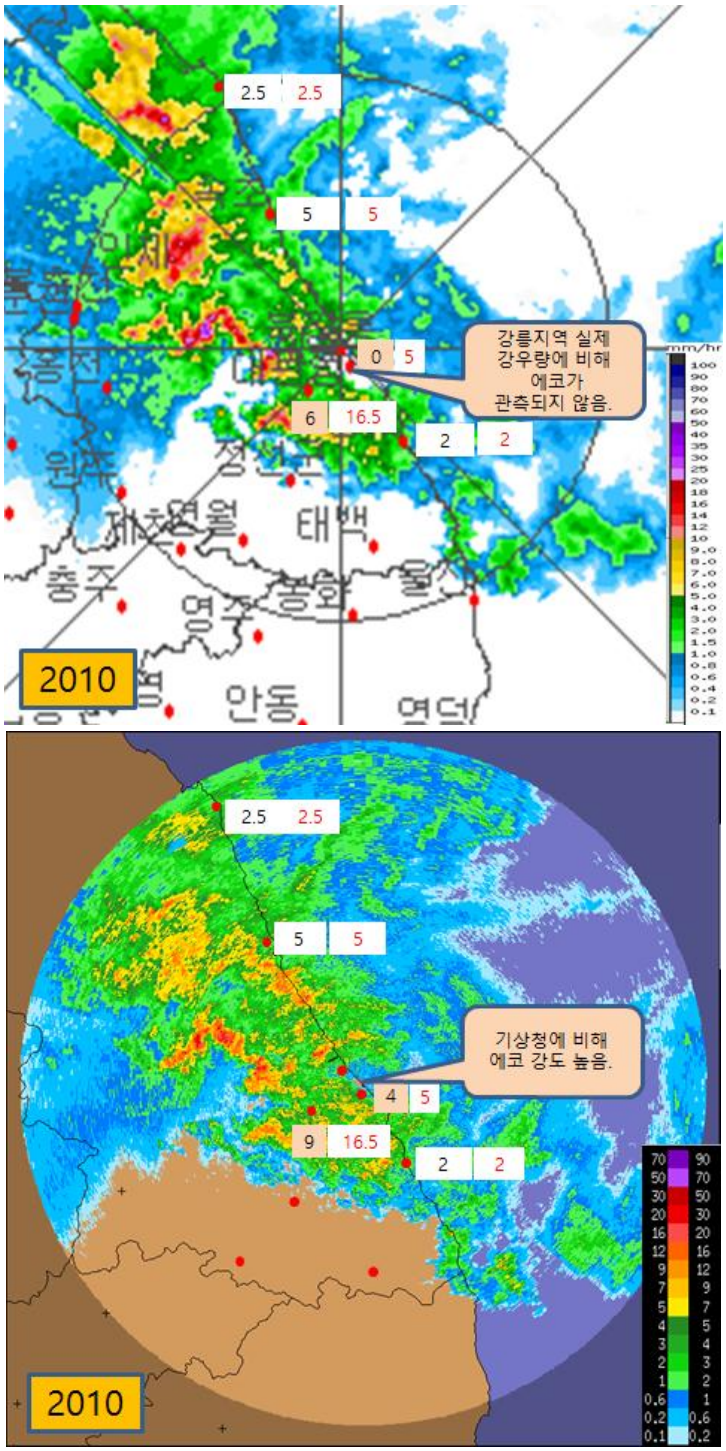


그림. 3-20. 기상청(좌), 공군(우) 기상레이더 에코 비교(20:10)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-19의 20시 자료에서 거진, 속초, 동해 지역의 에코 강도가 유사함을 볼 수 있다. 특히 거진 지역은 관측전략 사용 전에 비해 관측자료의 정확도가 높아짐을 확인 할 수 있다. 기상청 자료에서는 강릉지역의 에코가 없는 것으로 나타나고 있으나, 공군은 시간당 강수량 4mm의 에코강도를 보이고 있다.

그림 3-20에서도 거진, 동해, 속초 지역의 에코 강도는 유사하였으나, 강릉, 대관령 지역은 기상청에 비해 공군의 에코강도가 강하고 실제 강수량과 유사하다.

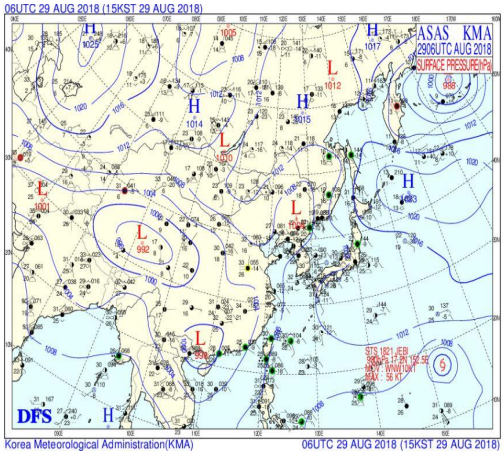
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

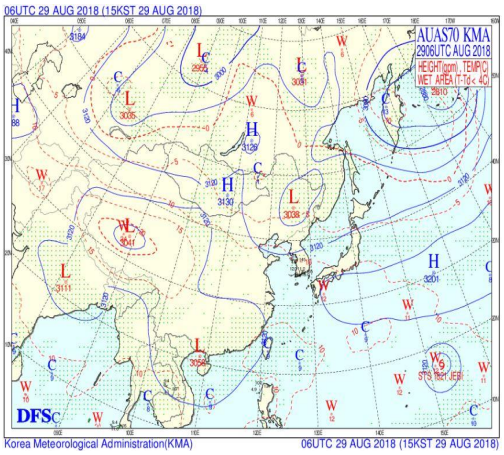
(2) 8월 29일

① 일기도 분석

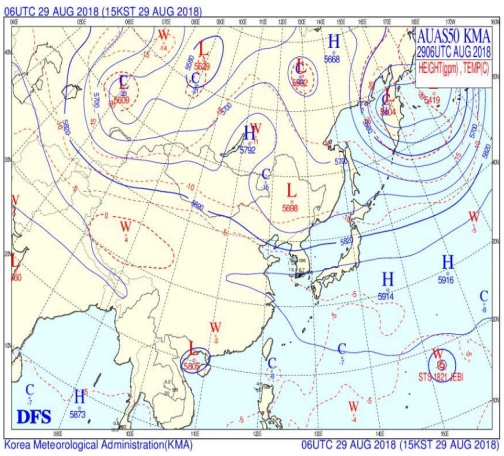
그림 3-21은 2018년 8월 29일의 기상청 일기도 이다. 그림 3-22은 당일 보조 일기도 이다. 여기서 모든 시간은 LST이다.



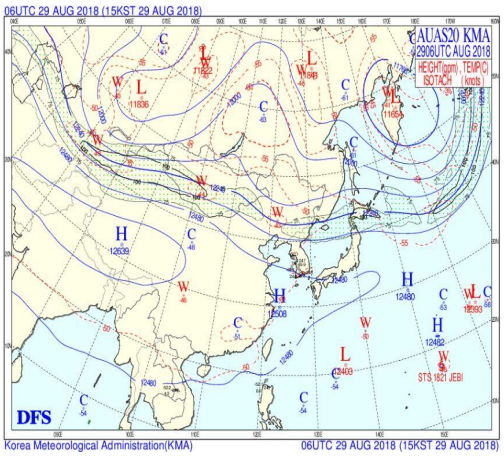
15시 지상 일기도



15시 700hPa 일기도



15시 500hPa 일기도



15시 200hPa 일기도

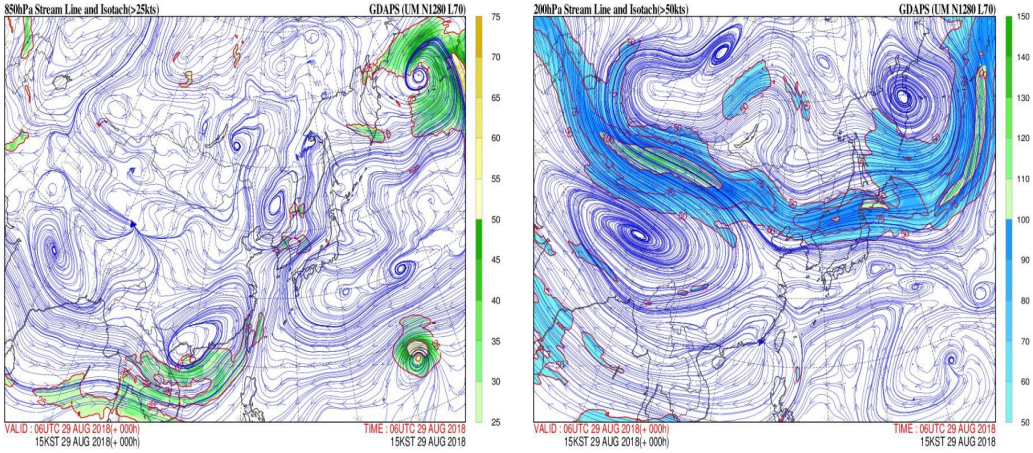
그림. 3-21. 기상청 일기도(2018.08.29)

그림 3-21의 지상 일기도에서 만주부근에 저기압 중심이 분석되고 있다. 700hPa 일기도에서는 한반도 경기, 영동 지역을 중심으로 습윤 구역이 분포한 것을 확인할 수 있다.

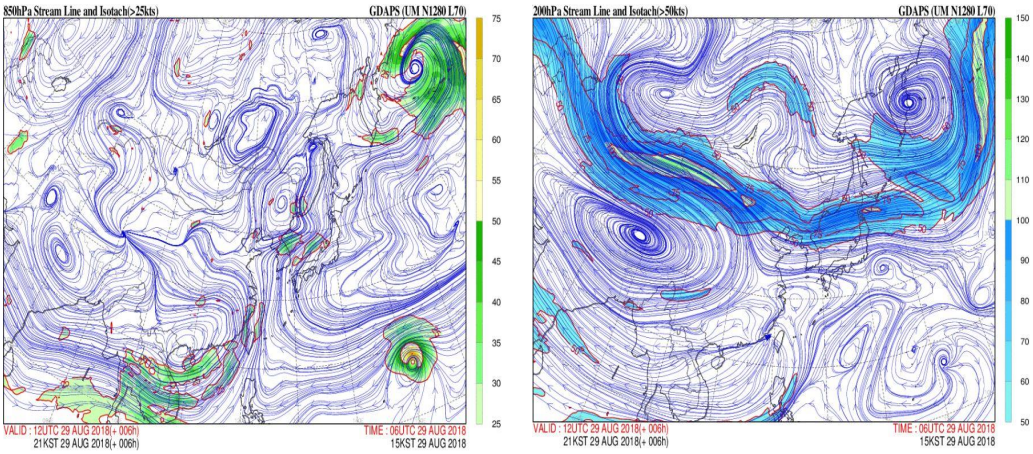
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

500hPa 일기도에서 한반도는 기단의 경계에 위치해 있는 모습이며, 200hPa 일기도에서 한반도 경기, 영동 지역 부근으로 약한 제트 발산구역이 존재하는 것을 알 수 있다.



15시 850hPa 유선도 15시 200hPa 유선도



21시 850hPa 유선도 21시 200hPa 유선도

그림. 3-22. 기상청 보조일기도(2018.08.29)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-22의 15시 기준 850hPa 고도에 25~30kts의 하층제트가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 같은 시각 200hPa 유선도에서 경기, 영동 지역으로 제트 발산 구역이 위치한다. 하층제트와 상층 발산구역이 만나 제트 커플링이 이루어지며, 대류운 발달 가속으로 인해 단 시간에 많은 비가 내릴 가능성이 높은 것을 알 수 있다. 850hPa 21시 기준 30kts 정도의 하층제트가 유지되나 200hPa 21시 발산 구역이 동진하고 건조한 기단이 남하함에 따라 강수 구역도 남하하였다. 이후 점차 강수 강도가 약해지며 강릉지역 강수는 종료되었다. (그림. 3-23).

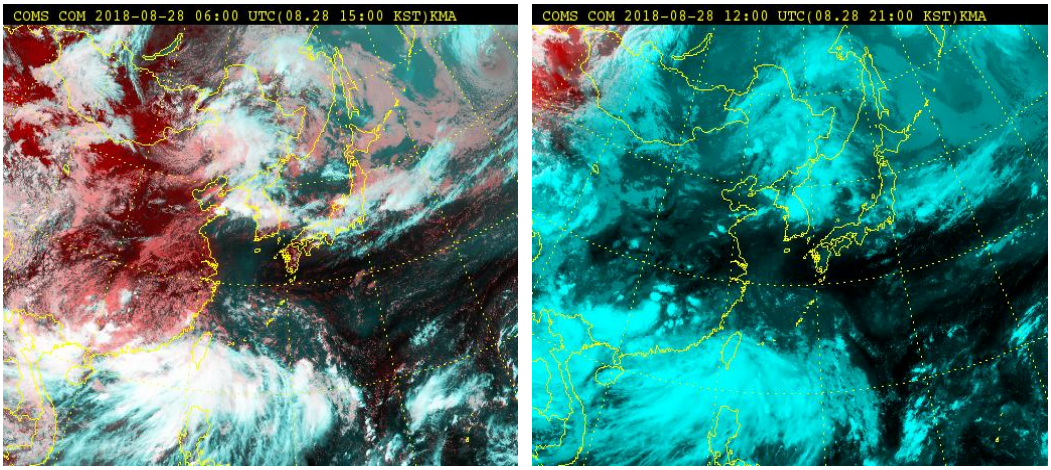


그림. 3-23. 위성영상 15시(좌)~21(우)시(2018.08.29)

③ 레이더 비교분석

2018년 8월 29일 기상청 S-band와 공군 C-band 레이더의 에코감도를 지역별로 비교분석한 결과는 아래의 표 3-10과 같다. CAPPI를 적용하여 공군레이더의 관측전략을 개선한 결과 개선 전에 비해 공군레이더의 에코감도가 모든 지역에서 향상된 것을 확인할 수 있었다. 동해의 경우 총 24회의 측정 결과 모두 기상청과 공군 레이더의 에코 감도가 동일한 것으로 나타났다. 속초의 경우 에코감도가 동일한 경우는 14회, 공군이 우세한 경우는 10회로 앞선 8월 28일 데이터에 비해 에코감도가 향상된 것을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 공군레이더에

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

서 거리가 가장 먼 거진에서도 공군의 에코감도가 기상청과 동일한 경우 11회, 우세한 경우가 12회로 기상청 레이더에 비해 감도가 높은 것을 확인할 수 있었다. 향후 계속적인 연구를 통해 C-band 레이더 최적 관측전략을 도출하고 활용한다면 단시간 내에 발생하는 중간 및 소규모 악 기상의 탐지•예측을 통해 효과적인 강우분석이 가능해 질 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표. 3-10. 공군 및 기상청 레이더 에코 감도비교(2018.08.29)

순번	동해		속초		거진	
	기상청	공군	기상청	공군	기상청	공군
1	0	0	12	12	5	5
2	0	0	12	12	5	4
3	0	0	12	12	3	3
4	0	0	4	4	3	3
5	0	0	4	4	4	5
6	0	0	5	5	4	4
7	0	0	7	7	3	3
8	0	0	4	5	1	1
9	0	0	4	4	0	1
10	0	0	4	4	0	1
11	0	0	4	4	0	1
12	0	0	5	7	0	1
13	0	0	4	6	0	1
14	0	0	4	6	0	1
15	0	0	4	7	0	1
16	0	0	4	7	0	1
17	0	0	5	6	0	1
18	0	0	4	5	0	1
19	0	0	4	6	0	1
20	0	0	4	7	0	0
21	0	0	7	7	0	0
22	0	0	4	4	0	0
23	0	0	4	4	0	0
24	0	0	4	4	0	0
종합	. 기상청 우세 : 0회 . 공군 우세 : 0회 . 동일 : 24회		. 기상청 우세 : 0회 . 공군 우세 : 10회 . 동일 : 14회		. 기상청 우세 : 1회 . 공군 우세 : 12회 . 동일 : 11회	

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

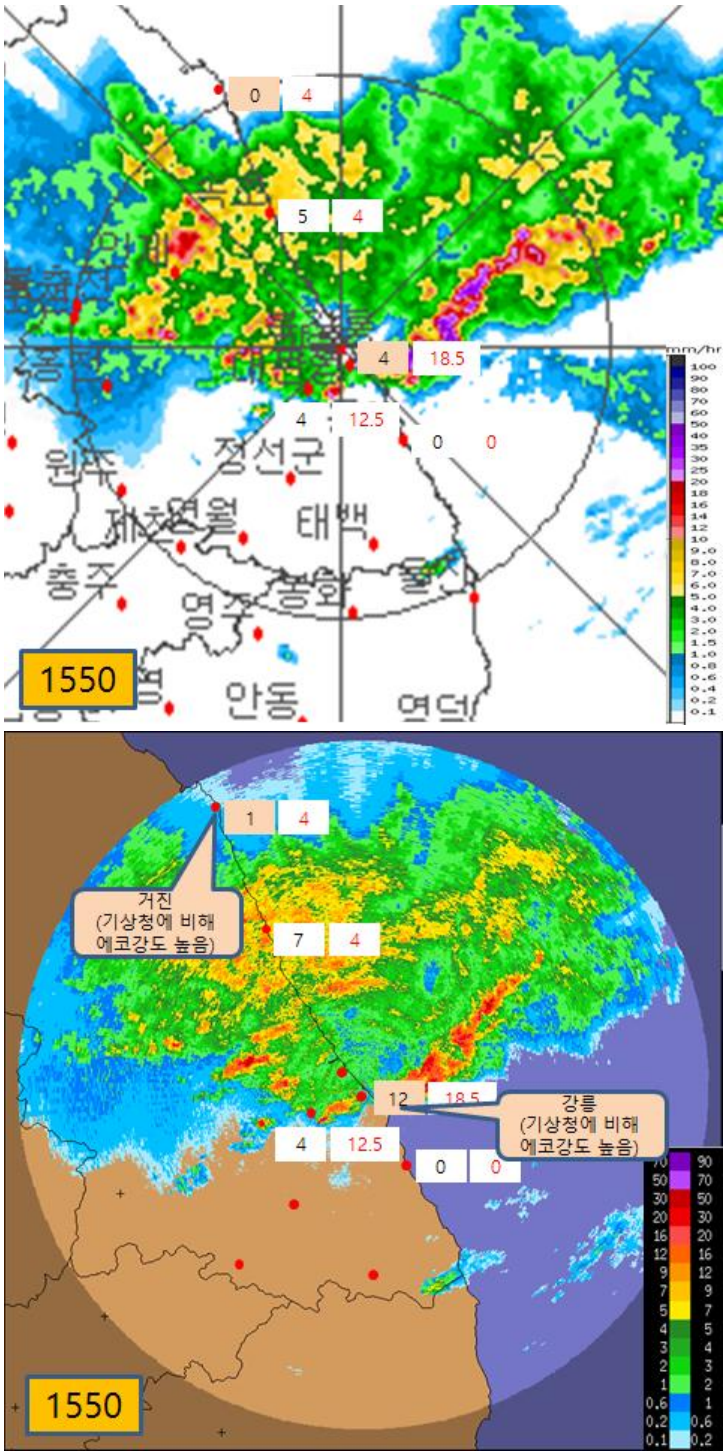


그림. 3-24. 기상청(상), 공군(하) 기상레이더 에코 비교(15:50)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

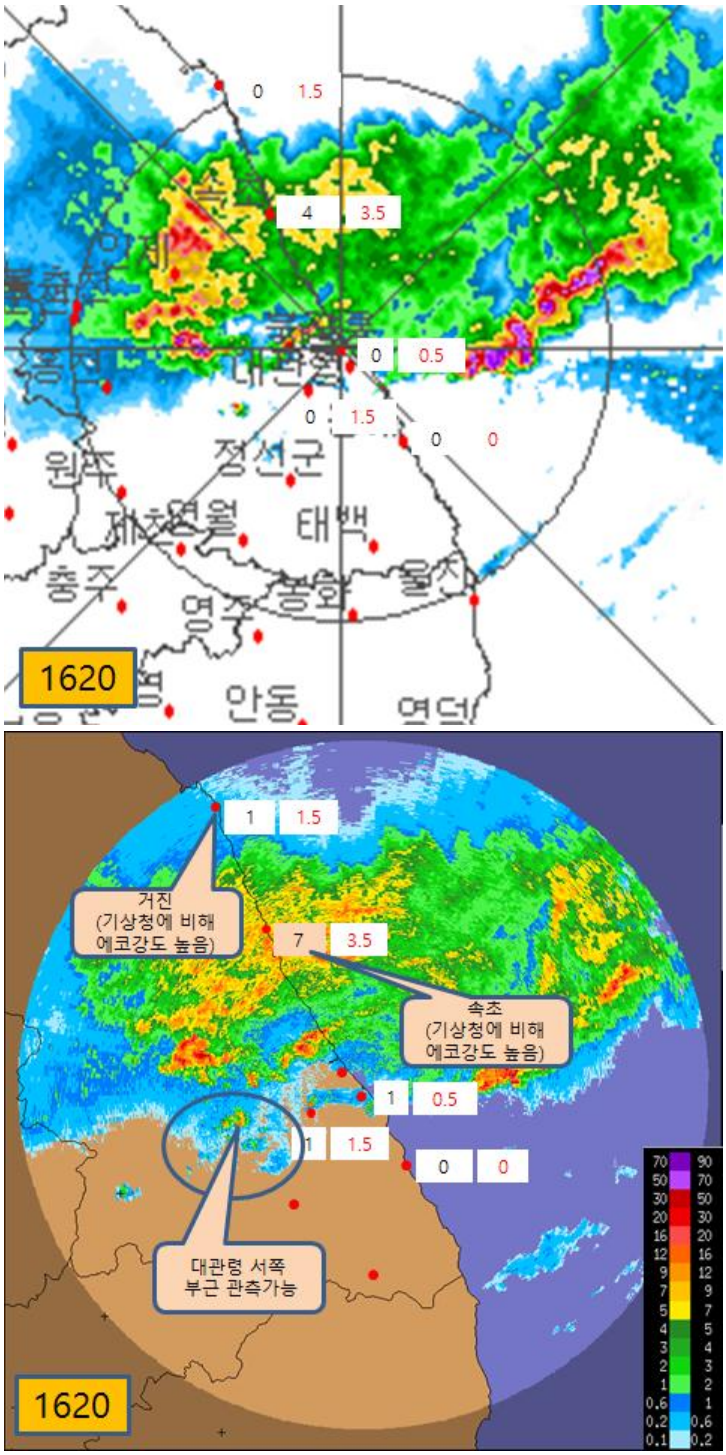


그림. 3-25. 기상청(상), 공군(하) 기상레이더 에코 비교(16:20)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-24에서 15시 50분 거진 지역의 실제 시간 당 강수량은 4mm로 관측되었으나, 기상청 레이더는 강수량을 전혀 감지하지 못하였다. 반면, 공군 레이더에서 1mm 정도의 에코 강도가 관측되었다. 또한 강릉지역에서는 기상청에 비해 공군의 에코강도가 높은 것을 확인할 수 있었다. 기타 다른 지역은 기상청 레이더와 큰 차이가 없는 것을 확인하였다.

그림 3-25의 16시 20분 기상청 레이더자료에서 거진 지역은 계속해서 관측하지 못하고 있으며, 속초 지역 또한 공군 레이더의 강도가 높은 것을 확인할 수 있다. 특히, 대관령 지역 서쪽으로 들어오는 에코를 기상청에서는 감지하지 못했으나 공군 레이더에서는 감지하고 있음을 알 수 있다.

3.2.5. 소결론

본 논문에서는 1~10월까지 내린 강수량을 토대로 강릉지역의 공군과 기상청 기상레이더 관측전략을 분석하였으며, 그림 2-26~28은 8월을 기점으로 공군 기상레이다 관측전략 수정 전,후의 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

그림 3-26은 강릉으로부터 약 50km 떨어져 있는 동해 지역의 기상레이더 관측전략 수정 전후를 비교한 그래프이다.

관측전략 수정 전에는 기상청 레이더에 비해 공군레이더의 에코강도가 2~7mm 가량 차이를 나타내었으나, 관측전략 수정 후에는 기상청레이더와 동일한 강도를 보이는 것을 확인하였다.

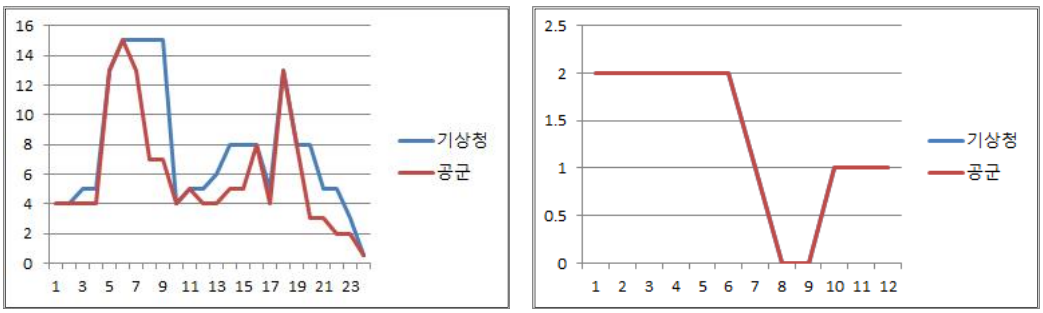


그림. 3-26. 관측전략 수정 전(좌), 후(우) : 동해(강릉으로부터 약 50km)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

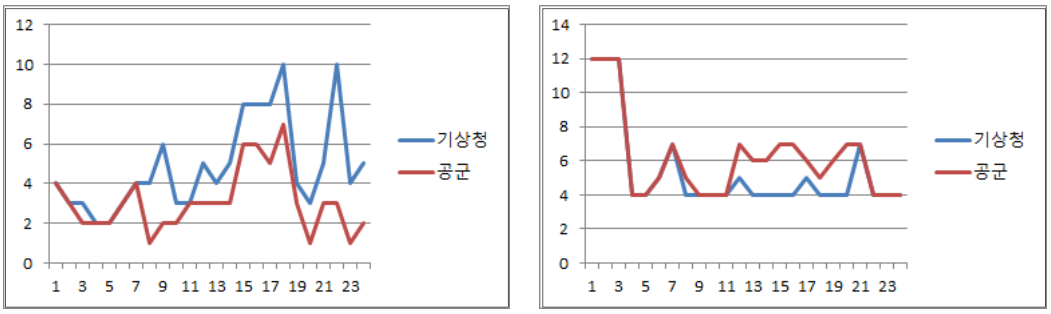


그림. 3-27. 관측전략 수정 전(좌), 후(우) : 속초(강릉으로부터 약 70km)

그림 3-27은 강릉으로부터 약 70km 떨어져 있는 속초 지역의 기상레이더 관측전략 수정 전후 비교 결과이다.

수정 전에는 기상청레이더와 1~5mm 정도 차이를 보였으나, 수정 후 오차는 0~2mm 수준으로 현저히 차이가 감소하였다.

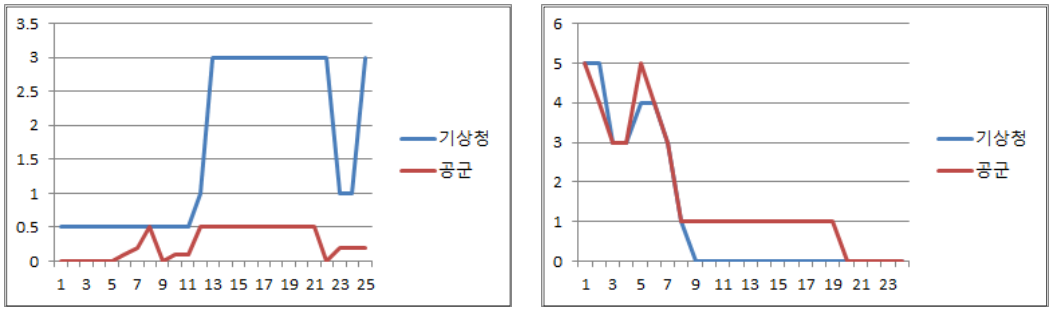


그림. 3-28. 관측전략 수정 전(좌), 후(우) : 거진(강릉으로부터 약 100km)

그림 3-28은 강릉으로부터 약 100km 떨어져 있는 거진 지역의 기상레이더 관측전략 수정 전후 비교 결과를 나타낸다.

관측전략 수정 전에는 강도의 차이가 0.5~3mm 정도였으나, 수정 후에는 공군의 강도가 기상청보다 1mm 정도 우세하게 나타났다. 기존에는 1mm 이하의 강수 에코 발생 시 기상청레이더에 비해 공군 레이더의 거진 지역 감지능력이 현저히 낮았으나, 관측전략 수정 후에는 정확성이 향상된 것을 검증할 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅳ. 결론

국내 강수유무 및 강수량 예보의 질적 향상을 도모하기 위해 지금까지 지속적으로 노력하고 있으나 아직도 그 성과는 만족할 만한 수준에 도달하지 못하고 있다. 특히, 지구온난화에 의한 수문기상의 환경변화에 따라 최근 빈번히 발생하는 게릴라성 집중호우와 같은 단기성, 국지성 양상을 가진 호우현상과 태풍은 관측 및 예측이 용이하지 않다. 뿐만 아니라 수치예보 모델링을 통한 발생시점 및 지속시간의 예측에는 한계가 있다. 우리나라는 산악지형이 국토의 70%를 차지하고 있어 지형적인 효과가 중요하게 작용한다. 더불어, 해양과 육지의 온도차, 대기의 안정도 등 다양한 환경적 요인에 의해 국지적으로 강하게 발생하는 집중호우는 치수관리에 많은 어려움을 유발한다. 또한, 급속한 도시화로 인한 도달시간 감소로 돌발홍수의 발생빈도 및 피해규모가 증가하면서 상세한 강우관측 및 정보생산에 대한 중요도가 높아지고 있다. 이처럼 예측이 어려운 국지성 집중호우와 낙뢰 등의 위험기상에 신속하게 대응하고 기상예보의 정확도를 높이기 위해서는 고해상도 레이더 강우자료가 필수적이다.(김태정 외, 2017)

이에 기상청에서는 기상레이더 데이터의 품질관리 향상을 위해 레이더 최적 스캔전략 수립 및 시스템 변수 설정 등 관측전략의 수립에 활발한 연구가 진행 중이다. 또한 기상청에서는 FUSSY이론에 이어 HSR 등 다양한 연구를 수행하며 품질관리 기법 향상을 위해 노력하고 있다. 반면, 공군에서는 레이더 초기 설치 시 업체에서 지정해준 관측전략을 수정하지 않고 계속적으로 사용해왔다. 이에 따라 레이더에서 표출되는 강수량과 AWS에서 관측되는 실제 강수량 간의 차이가 빈번히 발생하였으며, 연구인력 및 장비부족에 따라 품질관리 향상도 미진하였다.

본 연구에서는 기상청 S-band 타입의 기상레이더 관측전략을 공군에서 보유한 C-band 레이더에 적용하고 결과를 비교검증 하여 공군에 특화된 관측기법 및 품질관리를 설정하고자 하였다. 구체적으로 저기압성 강우, 국지정보 등을 획득할 수 있는 C-band 기상레이더가 설치된 강릉공군기지를 대상으로 기상레이더의 위치특성을 고려한 지형클러스터를 효과적으로 제거하고, 여름철 Cb성 강수량의 특성을 이해하였으며, 최적의 관측인자(관측주기, 펄스반복주기, 관측고도각 등) 도출을 통해 기상레이더 최적 운영에 대한 전략을 수립하였다.

또한, 최적 운영 전략을 수립하여 공군 강릉기지의 C-band 기상레이더와 기상청

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

S-band 레이더의 에코감도를 비교분석 한 결과 강우 예측 반경이 확대됨은 물론 예측의 신뢰도와 정확성이 향상된 것을 확인할 수 있었다.

계속적인 연구를 통해 C-band 레이더 관측기법을 계속적으로 개선하고 활용한다면, 단시간 내에 발생하는 중간 및 소규모 악 기상의 탐지·예측을 통해 효과적인 강우분석이 가능해 질 것으로 판단된다.

향후 공군에서는 이동형 기상레이더인 X-band 기상레이더를 도입할 예정이다. X-band 기상레이더는 기상청 기상레이더와 공군기상레이더의 중간에서 지형적으로 차폐되는 지역의 국지성 호우를 관측하는 것이 주요 임무가 될 것이다.

본 연구를 통해 수립된 기상레이더 최적 관측전략이 X-band 기상레이더 운용 및 활용에도 적용될 수 있을 것으로 판단되며, 향후 기상예보의 신뢰도 및 정확성 향상에도 효과적으로 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

강릉시, 2009, 강릉시 통계연보.2008(제48회). pp. 11.

고혜영, 남경엽, 이철규, 정현숙, 2013, 공간보정기법을 이용한 정량적 레이더 강수량 추정. 한국기상학회지 10권(호), pp.518-519.

국립방재연구원, 2011, 지진해일 범람특성 분석을 통한 침수예상도 작성=Tsunami hazard mapping through characteristic analysis of inundation.2, pp. 71.

권세웅, 이종현, 권양원, 이기원, 김한생, 선웅, 2014, 장거리 다기능 레이더에서 기상에 의한 고도 탐지 정확도 영향 분석연구. 한국전파학회지 1권(호), pp.123-129.

기상레이더센터, 2013, 예보관 교육용 레이더 분석 교재, pp. 2-3.

기상청 web, 대기분석 및 예보와 대기 물리. 기상청, 예보관훈련용 기술서, pp.118-129.

기상청, 2014, 손에 잡히는 예보기술. 기상청. pp. 86-87.

기상청, 2010, 최적의 레이더 스캔전략과 레이더시스템 변수 운영방안연구, pp.18-24

기상청 기상인력개발과[편], 2009, (2009년도) 동네예보 실무과정, 기상청 기상인력개발과.

김경익, 김영섭, 김해룡, 류찬수, 서경환, 서명석, 오재호, 전종갑, 하경자, 2011, 환경대기과학. 동화기술, pp.142-145, pp.162-165.

김종달, 2008, 기상레이더 운용방법 개선에 관한 연구, 진주산업대학교 산업대학원, pp. 1-43.

김태정, 이동률, 유민석, 권현한, 2017, Bayesian Partial Pooling 기법을 활

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

용한 기상레이더 강수량 편의보정 Factor 산정 및 불확실성 정량화. 대한토목학회지 10권(호), pp.78-79.

김태정, 이동률, 유민석, 권현한, 2017, 수문기상학적 활용을 위한 강우자료 생산(Ⅰ): 편의보정 및 오차분포 산정, Vol.50, No.1, 통권 294호, pp. 1-15

류근수, 정성화, 권수현, 박흥목, 이규원, 석미경, 2015, HSR(Hybrid Surface Rainfall) 기반 레이더 합성강우 추정, 한국기상학회지 4권(호), pp.100-101.

문종빈, 2012, 기상레이더 신호처리 알고리즘 분석 연구, 전남대학교 산업대학원, pp.1,6

박근영, 이순환, 류찬수, 2005, 레이더 관측자료를 이용한 호남지방의 국지강수변화에 관한 수치모의, 한국지구과학회 학술발표논문집, pp. 182-187.

박노원, 이경재, 2011, 기상관측.예보기술의 동향 및 시사점, 한국과학기술기획평가원. pp. 1-24.

박흥목, 정성화, 예보영, 이규원, 2015, 레이더 시선속도 복원과 퍼지기법을 활용한 레이더 품질관리. 한국기상학회 4권(호), pp.86-87.

송재인, 박기준, 김기훈, 박성화, 최규용, 이윤상, 주상원, 2018, 구름레이더 관측자료 품질관리 기법 개발과 구름계 발생 빈도 분석. 한국기상학회지 10권(호), pp.67.

안중배, 김준, 류찬수, 박선기, 서명석, 이화운, 정일웅, 정형빈, 2016, 대기과학. 시그마프레스, pp.203-205, pp.338-340.

양진관, 박종서, 김성헌, 차주완, 2012, 기상청 기상레이더센터 현황 및 발전방안, 한국기상학회지 4권(호), pp.7.

예보영, 이규원, 하종철, 2014, Ka-밴드 구름레이더 관측자료 품질관리, 한국

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기상학회지 10권(호), pp.846-847.

이규원, 2010, 최적의 레이더 스캔저략과 레이더시스템 변수 운영방안 연구, pp.18-24

이재경, 2015, 정량적 레이더 강우추정의 불확실성 분석, 한국기상학회지 10권(호), pp.274-275.

이종호, 류찬수, 2009, 레이다 기상학, 시그마프레스, pp.26-27.

이혁진, 신애경, 2018, 강원도 강릉의 문화관강콘텐츠 활용방향에 관한 연구 -주요 역사인물과 관련장소를 중심으로-, pp.63

장봉주, 김현정, 임상훈, 김원, 2017, 기상/강우/수문 레이터 활용성 증대를 위한 레이더 자료 압축 및 포맷 표준화에 관한 연구, 대한토목학회지 10권(호), pp.102-103.

장봉주, 임상훈, 노희성, 김현정, 이건행, 한명숙, 2016, 저고도 기상에코 추적 및 예측을 위한 기상레이더 반사도 보정 기법, 한국기상학회지 4권(호), pp. 45-46.

전파연구소, 2008, 레이더 스펙트럼 및 전파간섭 영향 연구, pp. 226-227.

조병훈, 박경훈, 최철민, 2011, 군 작전운용을 위한 기상레이더 활용과 운용조건, 한국기상학회 10권(호), pp.284-285.

최성진, 지준범, 이규태, 임은하, 이승범, 2010, 강릉레이더 자료 활용에 따른 강원국지수치예보시스템의 바람장 및 강수량 변화, 한국기상학회지 10권(호), pp.276-277.

한국건설기술연구원, 초소형 레이더 우량계 및 강우량 분석기술 개발 기획 최종보고서, 건설교통연구기획사업, 2014. pp. 1-156.

한국기상산업기술원, 2017, 기상레이더 운영과 활용방안 동향 분석, 기상산업기술원, pp. 1-13.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

한국수자원공사, 레이더강우연계 분포형모형 안정화 및 통합 GUI 시스템 구축, 2009. pp. 1-144.

허택산, 강봉수, 김흥수, 2004, 기상레이더에서의 이상에코에 관한 연구, 대한전자공학회지 8, pp. 657-663.

Donald W. McCann, 2001, Gravity wave, unbalanced flow, and aircraft clear-air turbulence. Nat. Weather Digest. Vol. 25, pp.3-6.

Dutton, J., and H. A. Panofsky, 1970, Clear-air turbulence: A mystery may be unfolding. Science. 167, pp.937-994.

Ellrod, G. P. and Knapp, D. L., 1992, An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use. Weather Forecasting. 7. pp.150-165.

Francis J. A. and Natasa Skific, 2015, Evidence linking rapid Arctic warming to mid-latitude weather pattern. Math. Physical & Engineering Sci., Vol. 373, issue 2045, p.20140170.

Francis J. A. and Vavrus. S. J., 2012, Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. Geophys. Res. Lett. 39L06801.

Francis J. A. and Vavrus. S. J., 2015, Evidence for a wavier jet-stream in response to rapid arctic warming. Environ. Res. Lett. 10(2). pp.2-9.

Forecasting Clear Air Turbulence for Aviation, 2016, The COMET program../ http://comet.uscr.edu/

(강릉시 홈페이지) https://www.gn.go.kr/www/contents.do?key=691

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Appendix

• 레이더 시스템의 구조

하나의 레이더 시스템은 여러 가지의 기능을 수행하는 부분품으로 구성되어 있다. 일반적으로 사용되고 있는 기본적인 기상레이더 시스템의 기본구조는 그림 A-1과 같이 안테나(Antenna), 도파관(Waveguide), 변조기(Modulator), 송신기(Transmitter), 수신기 스위치(Transmit/Receiver Switch), 수신기(receiver) 및 표출 시스템(Display)으로 구성된다. 안테나는 에너지를 방사한 후 수신되는 신호를 받는 역할을 한다. 송신기는 레이더에서 필요한 고출력(250~750kw)의 전력을 만든다. 송수신 스위치는 전파가 발사되는 동안에는 안테나를 송신기에, 수신시간에는 수신기에 접속시키는 역할을 한다. 수신기는 수신된 신호를 탐지하여 증폭시키고 비디오 신호를 검출한다. 표출 시스템은 수신된 신호를 에코의 형태로 컴퓨터 모니터에 표출시키는 역할을 한다. (박근영, 2005)

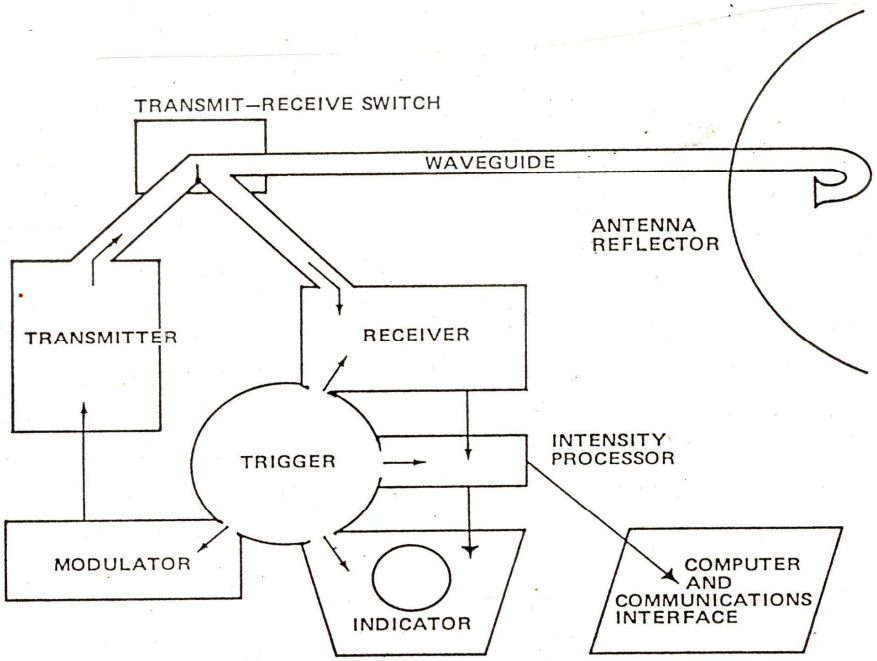


그림. A-1. 레이더 시스템의 기본구조

그림 A-1은 레이더 시스템을 구성하고 있는 부품들의 기본구조이다. 이러한 레이더 시스템의 하드웨어 분야에 대한 장비운용과 정비는 공군의 기상장비 정비

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

사에 의해서 수행되고 있다.

• **기상레이더의 기능 및 문제점**

기상레이더는 악 기상에 대한 경보를 제공하여 인명을 구조하고, 손실을 최소화하는데 도움을 주지만 운용상의 한계는 존재한다. 전자기파에 대한 이해는 운영자에게 레이더의 한계를 인식시키고 산출물 분석 능력 향상에 도움을 줄 것이다.

(1) 라디오파

가시광선처럼 라디오파도 전자기에너지이다. 레이더 장비는 비, 눈, 뇌우 등과 같은 기상학적 목표물의 강도와 위치를 표출하도록 설계되어 있다. 레이더는 파를 만들어 안테나를 통해 송신한다. 송신된 파는 대기를 통과해 물체에 부딪힌 후 파의 일부를 안테나 쪽으로 반사시킨다. 이 과정을 통해 레이더는 기상학적 목표물의 위치와 이동을 알려준다. 또한 안테나로 반사되어 되돌아온 에너지량을 통해 강수의 강도를 판별할 수 있다. 따라서, 안테나로 되돌아온 파형 에너지의 작은 부분일지라도, 운영자에게 많은 정보를 제공한다. 만약 라디오파를 볼 수 있다면, 그것은 그림. A-2에 나타난 것처럼 곡과 마루의 연속으로 이루어진 사인파 형태로 나타날 것이다. 파의 기본적인 3가지 특성은 파장, 주파수, 진폭이다.

① 파장

파의 진행방향을 따라 마루에서 마루사이(곡에서 곡사이)의 거리를 파장이라 한다. (그림. A-2). 각각은 하나의 완전한 파 혹은 사이클을 구성한다. 파장은 산란체를 인식하는 레이더의 능력에 있어 매우 중요한 역할을 한다. 짧은 파장은 작은 물방울을 검출하는 반면, 긴 파장은 소나기나 뇌우와 같은 강한 강수 검출에 유용하다.

② 진폭

파의 진폭은 마루의 정상이나 골의 바닥과 0의 값을 가지는 중간선과의 차이이다. (그림. A-2). 진폭은 에너지의 양, 혹은 파의 세기에 비례한다. 즉 더 큰 진폭은 더 강한 세기를 나타낸다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

③ 주파수

규칙적인 시간 간격으로 나타나는 것이다. 레이더 주파수는 매 초당 생성된 완전한 파(사이클)의 수이다. 주파수는 파장에 반비례한다. 예를 들면 주파수가 2배 높아지면 파장은 절반으로 줄어든다.

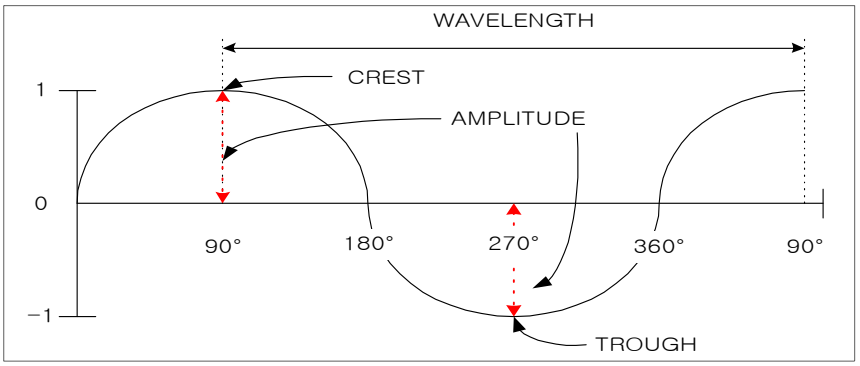


그림. A-2. 레이더 파장의 변화

표. A-1. 레이더 주파수와 파장

레이더(모델)	파장(cm)	주파수(MHz)	비고
DWSR-88C	5.5	5,340	기상청
DWSR-93C	5.5	5,625	공군
WRK-200	5.5	5608	공군
DWSR-8501S/K	10.1	2,750	기상청
WF2	3.2	9,375	호주
WF100	5.3	5,625	호주
WSR81C	5.3	5,625	미국
WF44	10.4	2,880	호주

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(2) 펄스 특성

레이더는 자동화기에서 탄환이 나가는 것처럼, 안테나에서 펄스라고 불리는 짧고 강력한 에너지를 방출한다. 이 펄스는 빔이라 부르는 집중된 경로를 따라 이동하며 이것은 공간상에서 특정한 영역을 차지한다. 수신시간(Silent period)은 각 펄스를 분리하고 반사된 파를 수신하기 위한 안테나 시간(=listening time)을 허용한다. 반사된 펄스는 탐지된 목표물의 크기, 강도, 위치 등과 같은 중요한 정보를 제공한다.

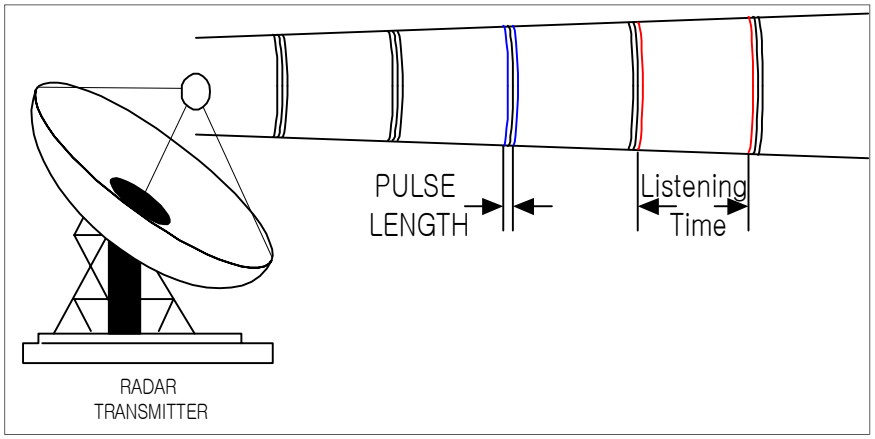


그림. A-3. 펄스의 특성

펄스는 다른 전자기 에너지처럼 빛의 속도로 이동한다. 레이더는 펄스의 송신에서 수신까지 경과된 시간을 측정함으로써 왕복거리를 계산한다. 왕복거리의 절반이 안테나에서 목표물까지 거리이다. 펄스형태로 방출된 에너지가 기본개념이다. 뿐만 아니라, 펄스는 레이더 성능에 다양한 영향을 미친다. 이 특성을 조정하여 한 가지 특성을 향상시키면, 다른 특성은 감소한다. 그래서, 레이더 시스템의 설계는 이러한 여러 특성들 간의 균형점을 찾는 것이라고 할 수 있다. 일반적으로, 사용자의 요구를 만족시키기 위해 레이더의 단점보다는 장점에 더 중요성을 둔다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(3) 펄스 부피

레이더 펄스가 실제로는 3차원이라는 사실을 고려해야만 한다. 펄스가 진행할 때 이것은 꼭지가 잘려 나간 콘과 같은 형태로 나타난다(그림. A-4). 펄스 부피는 매 시간에 빔이 차지하는 공간이다. 펄스 길이와는 달리 펄스 부피는 일정하지 않다. 펄스 부피는 레이더 빔이 넓어짐에 따라 증가한다. 펄스 안에 있는 전력량은 펄스폭에 의해 결정되며 일정하게 유지되지만, 전력 밀도는 펄스가 진행함에 따라 펄스 부피가 증가하기 때문에 감소한다. 그러나, 더 먼 거리에서 빔은 더 많은 목표물을 탐지할 수 있다. 만약 빔이 목표물로 가득 채워져 있으면, 실제 반사되어 되돌아오는 전력량은 일정하다.

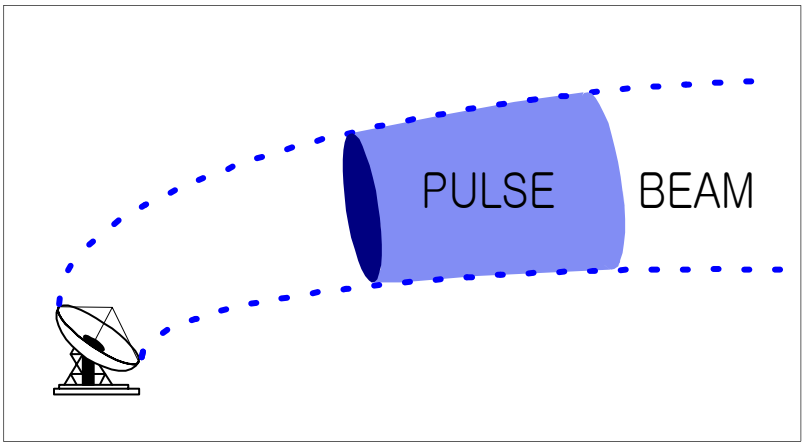


그림. A-4. 펄스 부피

(4) 빔의 특성

레이더 파는 자동차의 헤드라이트처럼 한 방향으로 집중시킬 수 있으며 조절이 가능하다. 잘 설계된 안테나는 파동을 빔의 형태로 집중시킬 수 있으며 파의 진행을 조정한다. 대기 중으로 방출된 에너지는 빔 축으로 집중되어 있다. 전력밀도는 빔 축에서 바깥쪽으로 멀어질수록 감소하며, 빔 축이 가지는 전력량의 0.5가 될 때까지 점진적으로 감소한다. 이 반 전력점은 빔의 주위를 완벽하게 감싸고 있으며 높이, 폭, 또는 경계영역이라는 용어로 그 형태를 정의한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

빔은 이 반 전력점의 안쪽 영역으로 정의되어지며 레이더 총 에너지의 약 80% 정도를 가지고 있다.

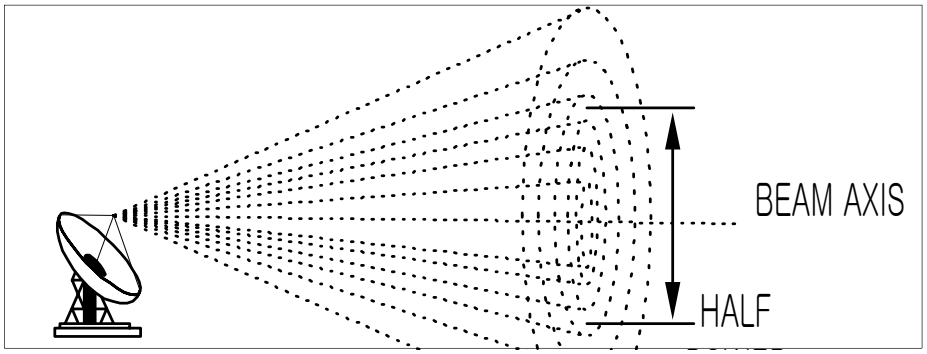


그림. A-5. 레이더 빔

① 대기굴절

레이더 빔에 대한 일반적인 오해는 빔이 직진한다는 것이다. 실제로는 기압, 기온, 수증기량의 수직적 변화(기울기)로 인해 대기 중의 빔은 휘거나 굴절된다. 표준대기상태에서의 빔의 곡률은 지구의 곡률 보다 약간 작다. 수평(고도각 0°)으로 방사된 레이더 빔은 거리에 따라 점차 고도가 높아진다. 이 경우, 이 빔은 표준 또는 정상 굴절을 일으키는 것이다. 다시 말하면, 비정상 굴절 또는 이상전파는 대기 요소의 변화가 비정상이며, 과대 또는 과소 굴절이 일어날 때 발생한다.

② 표준굴절

표준대기상태에서 온도와 수증기량은 고도가 증가함에 따라 점차 감소한다. 거의 수평으로 진행하는 빔의 곡률반경은 지구곡률 반경의 3배 정도이다.

③ 과소굴절

과소굴절은 고도가 증가함에 따라 기온이 표준보다 빠르게 감소하거나 수증기량이 증가할 때 나타난다. 과소 굴절이 일어난 빔은 표준보다 적게 휘거나 하늘을 향하여 급격하게 치솟는다. 레이더에서 일정거리 떨어진 곳에서, 그 빔은 표준상태에서보다 높으며, 레이더는 목표물을 실제보다 더 낮은 고도에 표출하게

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

된다(즉, 에코의 고도를 낮게 표출하게 된다). (김종달, 2008)

④ 과대굴절

아열대 고기압권이나 일출 전 고요한 아침에 강한 대기 역전이 발생할 때 나타나며, 표준 경로 아래로 레이더 빔을 휘게 한다. 레이더 빔의 높이가 표준굴절보다 낮기 때문에 레이더는 실제 고도 보다 높은 고도에 목표물을 표출한다. (즉, 에코의 고도를 높게 표출하게 된다.)

⑤ Ducting

Ducting은 빔이 역전층 아래에 갇혔을 때 발생하며, 비정상적으로 긴 거리를 진행한다. Ducting이 일어날 때, 반사되어 되돌아온 펄스는 일반적으로 탐지되지 않는 수 백 마일 밖의 낮은 목표물을 표출하기도 한다. 이는 다중 포착 에코와 비슷하며, 거짓이나 과장된 에코들은 기상학적 목표물이 없을 때 나타난다.

⑥ 지형 클러터와 빔차폐

지형 클러터는 레이더 오염의 한 형태이다. 지형 클러터는 건물, 나무, 지형 등의 고정된 물체가 빔의 진행을 방해하여 생성되며, 비기상학적 에코를 발생시킨다. 지형 클러터로 인한 에코는 크기, 강도 등이 과장되어 나타난다. 일반적으로, 클러터는 지면에 가까운 안테나 부근에서 나타난다. 그러나, 어떤 환경에서는 클러터가 원거리에 위치할 수도 있다.(예를 들면, 산맥 근처에 위치한 레이더의 경우) 안테나 가까이 있는 물체에 의한 레이더 빔의 방해(보통 지형 클러터)는 빔차폐를 발생시킨다. 보통 차폐현상은 과대굴절이나 ducting상태를 제외한 가까운 거리에서 나타나는 문제이다. 주된 관심사는 빔차폐가 레이더의 유효 송신 파워를 감소시킨다는 것이다. 따라서 차폐를 일으키는 물체 뒤에 위치한 목표물에는 더 작은 에너지가 도달하게 된다.

⑦ 부분 빔채움

부분 빔채움은 목표물이 레이더 빔의 일부분을 채울 때 나타나는 현상이다. 레

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이더 빔이 안테나로부터 멀리 진행할수록, 레이더 빔의 폭은 증가한다. 따라서 목표물이 빔의 일부분만을 채우게 된다. 예를 들면, 100nm 거리에서 빔의 폭은 거의 2nm이다. 레이더 빔의 낮은 분해능으로 인해 이 거리에서 토네이도와 같은 소규모 기상현상을 탐지하는 것은 거의 불가능하다.

⑧ Below Beam Effect

Below Beam Effect는 비나 소규모 뇌우 셀이 레이더 기지로부터 먼 곳에서 발생하여, 레이더 빔이 그 셀의 상공을 지날 때 발생한다. 빔의 최소 고도각 0.5°에서도 레이더 빔의 중심은 레이더로부터 100nm 거리에서 12000피트 고도에 위치한다. 이 빔 아래에서 발생하는 셀은 탐지되지 않는다. 그로 인해 레이더 에코에 대한 해석의 정확성이 감소한다. 그림 A-6은 Below Beam Effect를 보여주고 있다. 최대 반사도를 보이는 영역은 레이더 빔의 아래에 위치하고 있다. 레이더는 강수현상이 거의 없거나 전혀 없는 것처럼 나타내지만, 사실상 지상관측에서는 강한 강수율이 나타난다.

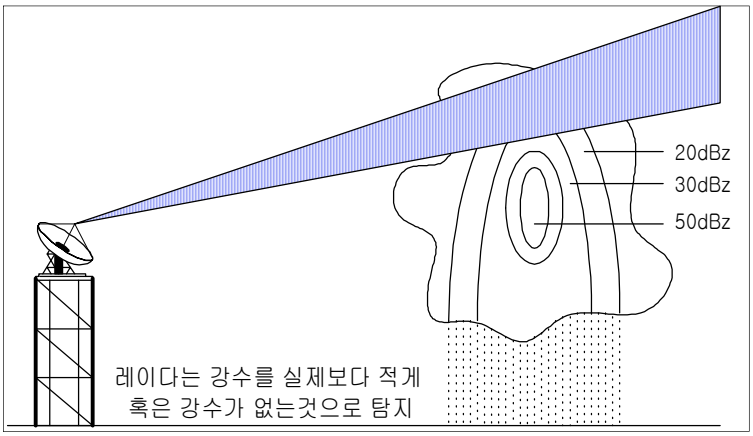


그림. A-6. Below beam effect

⑨ Cone of silence

안테나의 최대 관측 고도각 한계로 인해 레이더가 탐지하지 못하는 레이더 수직상방 영역을 Cone of silence라 한다. 이 레이더는 높은 고도각을 탐지하도록

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

설계되어 있지 않다. 그림 A-7은 레이더 안테나가 기지로부터 충분히 먼 곳에 설치되어 기지 상공의 기상 에코가 레이더의 Cone of Silence 영역에 위치해, 에코를 탐지하지 못하는 일이 일어나지 않도록 해야 한다는 점을 보여주고 있다.

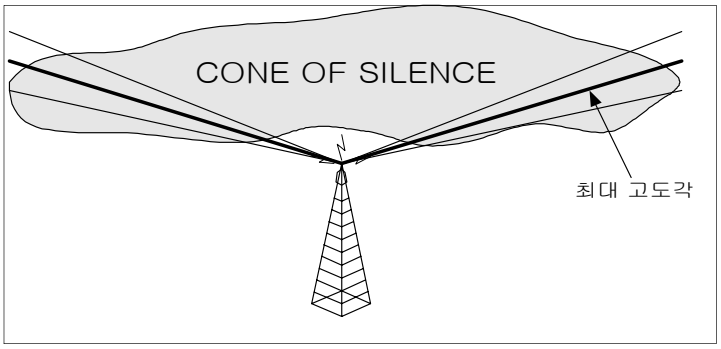


그림. A-7. Cone of silence

(5) 도플러 원리

DWSR-93C, METEOR-360AC, WRK100은 목표물의 운동을 탐지하고, 폭풍 내부 구조를 연구하며 바람을 측정하기 위해 도플러 원리를 이용한다.

① 도플러 레이더

1842년, 오스트리아 물리학자 Johann Christian Doppler가 처음으로 소리의 운동과 주파수 변화와의 관계를 “도플러 편이”라고 부르는 수학적 공식으로 설명했다. 기관차가 경적을 울리며 청음자를 지나갈 때 이 효과를 느낄 수 있다. 기관차가 청음자를 통과한 후, 멀어질 때 경적의 음조는 감소한다. 음조의 변화는 기관차 속도가 소리 속도의 약 10%에 이를 때 쉽게 감지된다. 움직이는 물체 역시 전자기파의 주파수를 변화시킨다. 그러나, 파의 속도가 매우 빠르기 때문에, 주파수 변화는 매우 작다. 풍속이 시간당 50마일인 매우 강한 바람도 그 속도가 광속의 0.000001%에도 미치지 못한다. 이러한 이유로 도플러 변이는 매우 작은 값을 가진다.

② 주파수 편이

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

레이더파의 주파수는 수십 억 헤르츠(Hz)의 값을 가진다. 이것은 초당 수십 억 개의 레이더파가 목표물에 부딪히는 것을 의미한다. 길이가 1㎲인 펄스에는 수천 개의 파장이 포함되어 있다. 이것은 레이더가 반사파의 주파수를 검출하기에 충분하다. 레이더는 송신신호와 수신신호를 서로 비교하기 위해 송신신호를 기억해 둔다. 만약 두 신호가 일치하면(마루와 마루, 골과 골), 위상이 서로 같다. 반대로, 일치하지 않으면, 위상이 서로 다르다. 두 신호가 서로 골과 마루, 마루와 골이 정렬되면 위상차이가 180°이다.

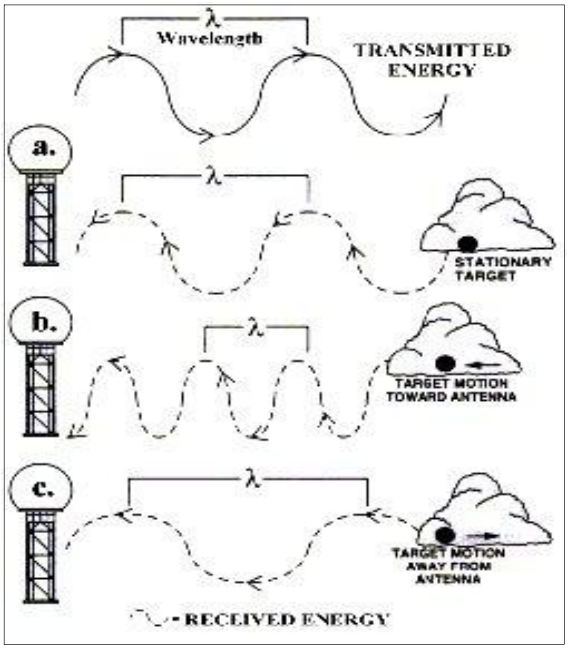


그림. A-8. 목표물의 운동 결정

수신신호와 내부 신호 사이의 위상관계 변화는 반사되어 되돌아오는 신호가 원래 송신된 신호와는 다른 주파수를 가진다는 것을 나타낸다. 만약 송신된 신호와 반사되어 되돌아오는 신호의 위상이 같다면, 도플러 변이는 0의 값을 가지며, 레이더와 비교해 목표물이 상대적으로 움직이지 않음을 의미한다. 목표물이 안테나로부터 가까워지거나 멀어지면, 도플러 변이 값은 0이 아니다. 양(+)의 변화는 반사되어 되돌아오는 파의 주파수가 송신된 파의 주파수 보다 높다는 것을 의미하며, 목표물이 안테나 쪽으로 움직이고 있다는 것을 의미한다. 이와 유사하게, 차

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이가 음(−)의 값이면, 반사되어 되돌아오는 주파수가 송신된 주파수보다 낮다는 것을 의미하며, 목표물이 안테나로부터 멀어지고 있다는 것을 의미한다.

③ 시선속도

레이더는 안테나로 직선으로 되돌아오는 신호만을 검출하기 때문에, 위상 변화도 그 변화가 빔 방향(시선방향)으로 발생할 때만 탐지 할 수 있다. 도플러 레이더는 목표물의 움직임 중 단지 시선 방향의 움직임만을 탐지할 수 있다. 레이더로 다가오는 움직임은 양(+)의 위상변화를 가져오며, 레이더에서부터 멀어지는 움직임은 음(−)의 위상변화를 가져온다.

− 시선방향 운동

입자가 안테나로부터 직선으로 가까워지거나 멀어진다면(그림.1−15a), 이 움직임은 시선축(빔축)에 평행하다. 이 평행한 운동은 레이더에서 각 파의 위상 변화를 완전히 탐지할 수 있도록 해준다. 이 결과 입자의 실제 속도와 동일한 속도를 표출한다.

− 시선방향에 비슷한 운동 (사선)

입자의 움직임이 시선축에 대해 사선일 때, 레이더는 위상 변화의 일부를 탐지할 뿐이며 입자의 속도를 과소 평가하여 표출하게 된다. 오류의 정도는 시선축을 가로질러 이동하는 입자의 경로와 시선축이 이루는 각도에 좌우된다.

− 시선방향에 수직인 경우

레이더 안테나가 360°회전하기 때문에, 시선방향을 기준으로 목표물의 방향은 계속 변한다. 어떤 지점에서는 목표물의 운동이 시선축에 수직이 되며, 이 때 안테나 방향 성분은 속도가 0이다. 레이더의 관측각이 수직이므로, 위상 변화가 탐지되지 않고 목표물이 정지한 것처럼 나타난다. 입자의 실제 속도는 탐지되지 않으며 속도는 0으로 표출된다.

• 기상레이더의 운용

① 기상레이더는 다음과 같은 운용 원칙 사항을 고려하여 배치 운용 될 수 있도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

록 하여야 한다.

○ 지형장애로 인한 작전운용지역내의 레이더 관측 공백지역 최소화 원칙

○ 효과적인 후방지원과 지휘관리를 위한 공군부대내에 배치/운용 원칙

○ 기상특성(기류이동, 지역적인 기상 특성) 및 기지특성(지형 영향, 인접 기지와의 관측 범위) 고려한 운용 원칙

② 레이더 관측은 악기상의 조기 탐지 및 24시간 기상 감시를 위해 무중단 운영을 원칙으로 하되 사유 발생 시 제한적으로 운영할 수 있으며, 예보판단의 보조 자료로 활용한다.

③ 레이더 설치는 이·착륙 항공기의 비행안전과 기류이동(저고도 바람시어, 마이크로버스트)의 조기 탐지 및 기지 기상 제한치를 고려한 관측(예: 저고도 및 단거리 기상현상)이 가능하여야 한다.

④ 공군 및 유관기관(기상청, 수자원공사 등)의 레이더 기상관측 자료를 종합하여 공백지역을 최소화하기 위한 레이더 배치 및 영상합성 처리 체계를 구축 활용한다.

⑤ 기상 연구 활동의 증대를 위해 기상레이더 관측 자료를 수집/보관하여 기상 이론 개발, 사후 분석자료 및 평가 자료로 활용한다.

• 항공 기상레이더 기상 감시

레이더 기상 감시란 레이더를 이용하여 악기상의 유무와 발달 정도 및 강도 등의 모든 기상현상을 파악하는 것을 말한다. 항공기 운항의 관점에서도 우적의 공간분포를 안다는 것은 매우 중요하다. 큰 우적이 형성되기 위해서는 강한 상승기류가 필요하며, 이곳에는 심한 난기류 발생한다. 레이더를 통하여 이 위치를 파악할 수 있으며 이는 항공기 운항에 매우 중요하다. 따라서, 기상레이더를 운용하고 있는 모든 부대는 레이더에 의한 지상 및 상층의 기상관측을 통하여 얻은 자료로 기상현상에 대한 객관적인 분석을 하여 단기예보 생산에 활용할 수 있도록 레이더 기상관측을 실시하여야 한다. 또한 관측된 모든 자료를 가장 신속한 통신수단을 이용하여 각 기상대로 전파될 수 있도록 적절한 조치를 취하여야 한다. 기상레이더는 지상에 설치되거나 항공기에 탑재되어 있으며, 전자를 기지 레이더, 후자를 항공기 탑재 레이더라고 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

• **기지 레이더의 필요성**

① 혼잡한 공역의 항공로에 위험한 적란운이 발생했을 경우, 공중 근무자 스스로의 판단만으로는 피항이 허락되지는 않는다. 관제관의 적절한 관제에 의해서만 피항이 가능하며, 이에 대한 정보의 습득은 기지 레이더를 통해서만 가능하다.

② 악기상을 동반한 적란운은 운정이 높으므로 항공기의 경우 키가 큰 적란운만 피하면 된다. 그러나 항공기 탑재 레이더로는 운정을 측정할 수 없으므로 이 적란운이 어느 정도 위험한가 알 수 없다. 이 정보는 기지 레이더에 의존해야 한다.

③ 기지상공 및 인근의 발생에서 소멸까지의 시간이 매우 짧은 적란운의 발생, 이동 및 발달과 저고도 기상 현상에 대한 예측을 가능하게 해준다.

• **항공기 탑재 레이더의 필요성**

적란운이 밀집한 부근의 항공기에 대한 적절하고 정확한 회피로를 지시하는 것은 레이더 자체의 오차외 항공기의 위치를 정할 때의 오차로 기술적인 어려움이 있으며, 적란운은 30분 정도의 짧은 시간 동안에 크게 변하므로 비행 중인 항공기가 적란운의 어느 부분을 통과할 것인가를 결정하기 위해서는 탑재레이더가 필요하다.

Collection @ chosun