

우주센터 기상 레이더 시스템에 관한 연구

국봉재*, 오창열**, 이효근***

A Study on Weather Radar System for Space Center

Bongjae Kuk*, Chang-Yul Oh**, Hyo-Keun Lee***

Abstract

In some cases, the launch vehicle is fatally affected by the change of weather condition. Thus the real time monitoring of weather condition is indispensable for successful launch campaign. This paper described general characteristics of weather radar for space center. The analysis of weather radar requirements has been carried out focusing on the transmitting power, gain of antenna, half power beam width, and minimum detectable signal.

초 록

대기의 기상 상태는 시, 공간적으로 매우 불규칙적으로 변화하여 경우에 따라서 위성 발사체에 치명적인 영향을 미치고 있다. 따라서 위성 발사체의 순조로운 발사를 위하여 기상 상태의 정확한 실시간 관측이 필수적이라 할 수 있다. 본 연구는 기상관측 시스템인 기상 레이더의 일반적인 제원을 소개하며, 우주센터용으로 적합한 기상 레이더 시스템의 운용개념 및 요구특성을 송신출력, 안테나 이득, 빔 폭 및 최소 감지신호 등을 종합적으로 고려하여 분석하였다.

키워드 : 기상 레이더(weather radar), 최소감지신호(minimum detectable signal), 기상발사기준(weather launch commit criteria)

1. 서 론

우주센터의 기상장비는 순조로운 발사 캠페인(Launch Campaign)을 돕기 위하여 구축되는 장비로서, 우주센터 주위 및 발사체 비행궤적의 기상환경을 관측하는 중요장비이다. 따라서 우주센터 기상장비는 최적의 상태로 설치, 운용되어야 하며 관측장비로부터 수집된 정보를 종합적으로 심도 있게 분석하는 제반업무가 반드시 필요하다. 우주센터는 구

축된 기상장비를 이용하여 발사 당일의 우주센터 및 발사체 예상 비행궤적의 기상 상태가 발사에 안전한지를 판단한다. 이를 위해서는 과거 수년간의 축적된 나로 우주센터의 기후특성을 면밀히 조사하여 우주센터의 기상학적인 특성을 파악하는 것이 선행되어야 한다. 또한 발사체의 동역학적인 설계특성과 과거 기후특성을 종합적으로 고려하여 나로 우주센터와 발사체(KSLV-1)에 적합한 기상발사기준(WLCC: Weather Launch Commit Criteria)을 설정

* 기술관리그룹/bjkuk@kari.re.kr

*** 기술관리그룹/hklee@kari.re.kr

** 기술관리그룹/ocy@kari.re.kr

해야 한다. 우주센터는 설정된 WLCC를 기준으로, 발사 시점의 기상상태가 WLCC를 위반(Violation) 하는지 판단해야 한다. 따라서 우주센터에서는 반드시 다양한 기상요소들을 실시간으로 정확하게 관측하고 예측해야 한다. 특히 낙뢰, 구름, 대기 전하량은 상호 연관적으로 발생하고 발사체의 전자장비에 치명적인 영향을 미치는 기상 요소이므로 정확한 관측과 예측이 필요하다. 낙뢰 및 구름 상태를 관측하기 위한 장비로서는 기상 레이더와 낙뢰 감지시스템이 가장 적합하며 특히 기상 레이더는 우주센터 인근 지역 뿐만 아니라 발사 궤적의 기상 상태를 높은 시, 공간 분해능을 가지고 관측할 수 있는 장비이다. 우주센터 발사작업을 지원하는 기상 레이더는 송수신특성, 안테나 이득, 최소감지신호 등을 비롯한 시스템 요구사항과 운용개념에 의해 결정된다.

2. 본 론

2.1 개요

2.1.1 기상 레이더 방정식

기상 레이더 안테나에서 방사된 전자파는 전파(傳播, propagation) 경로에 존재하는 임의의 기상 표적에 의해 산란되고 그 일부가 다시 레이더 안테나에 수신된다. 따라서 레이더 수신기에서 수신된 전력강도(P_r)는 송신전력(P_t), 송신파장(λ), 안테나의 이득(G_o), 기상표적과 레이더의 거리(r), 표적의 종류 및 크기에 의해 결정되며 수신 전력과 이들의 관계를 수식적으로 표현한 것을 기상 레이더 방정식이라고 한다. 일반적으로 기상 레이더 방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 \bar{P}_r &= \frac{P_t G_o^2 \lambda^2 h \theta_o^2}{2^{10} \ln 2 \cdot \pi^2 r^2} \sum \sigma \\
 &= \frac{P_t G_o^2 \lambda^2 h \theta_o^2}{2^{10} \ln 2 \cdot r^2 \lambda^2} \sum \left(\frac{\pi^5}{\lambda^4} |k|^2 D^6 \right) \\
 &= \frac{P_t G_o^2 h \theta_o^2 \pi^3 |k|^2}{2^{10} \ln 2 \cdot r^2 \lambda^2} \sum D^6 \\
 &= \frac{c}{r^2} \sum D^6
 \end{aligned} \tag{1}$$

Where, $c = \text{radar-constant}$

$$= \frac{P_t G_o^2 h \theta_o^2 \pi^3 |k|^2}{2^{10} \ln 2 \cdot \lambda^2}$$

\bar{P}_r : 평균 수신전력

P_t : 송신전력

G_o : 안테나 이득

λ : 송신파장

h : 펄스가 단위시간당 이동한 거리

θ_o : 반치각(HPBW)

r : 전자파의 이동거리

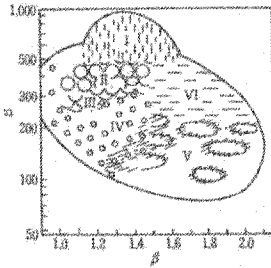
$|k|^2$: 유전계수

D : 기상표적의 입자 직경이다.

상수 C 는 기상 레이더의 성능을 표현하는 주요 설계인자이며 이를 레이더 상수라고 부른다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 평균 수신 전력의 세기는 빔방을 입자직경(D)의 6승에 비례하는 것을 알 수 있다. 따라서 $\sum D^6$ 을 레이더 반사인자(Radar Reflectivity Factor, Z)라고 한다. 레이더 반사인자(Z)와 강우강도($R[\text{mm/hr}]$)의 관계는 식 (2)와 같이 표현되며 이를 "Z-R 관계식"이라고 한다.

$$\begin{aligned}
 Z &= \sum D^6 \\
 &= B \cdot R^\beta
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 B 와 β 는 강수타입, 기상 레이더의 설치 위치 및 기후대, 지형의 영향, 관측 시 기상 패턴, 강우패턴 등에 따라 결정되는 상수로서 J.S. Marshall은 많은 관측 자료를 평균하여 $B=200$, $\beta=1.6$ 이라고 제시하였다. 하지만 B 와 β 는 위에서 언급된 여러 변수들에 의해 상당히 많은 차이를 보이고 있으므로 각 레이더의 설치 위치에서 여러 관측결과들과 비교 검토하여 각각의 상황에 맞는 상수 B 와 β 를 적용하여야 한다. 아래 그림 1은 뇌우, 대류성 강우, 층운형 강우, 국지성 강우 등의 강우형태에 의해서 서로 다른 B 와 β 의 분포를 나타내고 있다.



- I : 비우 에코의 확산 모양이 약간 두꺼운 부분, 또는 건조 대기 중에 많은 교란된 대우 에코(발발음의 총합이 크다)
- II : 비우 에코의 강한 중심부 또는 열악한 확산 모양을 나타내고 있는 강한 밀도의 모양의 에코
- III : 비우 에코의 발발 내지 성장 단계
- IV : 작고 같은 높이의 대우 에코에서 상반 상태 내지 전 모양으로 놓여 있는 에코
- V : 고르게 퍼진 총 모양의 에코 또는 약한 확산 모양의 에코
- VI : 비우에서 완전히 확산한 비저장 단계 또는 확산한 부분

 그림 1. 강우형태에 따른 B, β 분포

2.1.2 기상표적의 속도측정

일반적으로 기상 레이더는 강우 에코의 위치, 반사 강도, 강우의 이동과 발달 상황에 관한 기상 정보를 생성 할 뿐만 아니라 도플러 효과를 이용하여 강우 에코의 방향과 속도, 바람장에 관련된 기상 정보를 제공한다. 이동하는 기상 표적은 이동하는 속도에 비례하여 주파수를 변화시키기 때문에 이를 이용하여 기상표적의 이동속도를 정확히 측정할 수 있다. 기상 표적과 레이더의 거리가 r 일 때 기상표적의 시선속도(Radial Velocity)는 송수신 전파간의 위상차를 이용하여 아래 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$2\pi f = \frac{d\phi}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} V_r \quad (3)$$

$$V_r = \frac{\lambda \cdot f}{2}$$

기상 레이더가 측정 할 수 있는 최대 속도를 Nyquist 속도(V_N 또는 V_{max})라고 하며 이 속도는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$V_{max} = \frac{f_{max} \cdot \lambda}{2} = \frac{PRF \cdot \lambda}{4} \quad (4)$$

where,

$$f_{max} = \frac{PRF}{2}$$

$PRF = \text{Pulse Repetition Frequency}$

또한 기상 레이더가 탐지 할 수 있는 최대 거리를 r_{max} 은 아래 식 (5)와 같이 정리될 수 있다.

$$r_{max} = \frac{C \cdot T}{2} = \frac{C}{2 \cdot PRF} \quad (5)$$

where, $T = \frac{1}{PRF}$
 $C = \text{light speed}$

식 (4)와 식 (5)를 정리하면 식 (6)이 유도된다.

$$\frac{4 \cdot V_{max}}{\lambda} = PRF = \frac{C}{2 \cdot r_{max}} \quad (6)$$

$$\therefore V_{max} \cdot r_{max} = \frac{C \cdot \lambda}{8}$$

식 (6)은 최대 도플러 속도와 최대 탐지거리가 서로 반비례하는 것임을 알 수 있다. 한편 최대탐지거리도 크게 하고 동시에 최대 도플러 속도도 확보하기 위해서, 서로 다른 펄스반복주기(PRF)를 갖는 펄스를 순차적으로 방사한다.

2.2 설계인자

기상 레이더는 사용하는 주파수 대역에 따라서 S-band, C-band, X-band 레이더 시스템으로 구분된다. 또한 송신기의 종류에 의해서 마그네트론(Magnetron) 레이더 시스템 과 클라이스트론(Klystron) 레이더 시스템으로 구분하기도 한다. 일정 고형물을 추적하거나 탐지하는 추적 레이더 및 탐지 레이더와 달리 기상 레이더는 대기 중에 존재하는 기상표적으로부터 매우 미약한 신호를 수신하므로 매우 우수한 성능의 안테나, 수신기 및 처리시스템이 요구된다.

2.2.1 송신출력(Transmitting Power)

송신출력은 송신기의 종류에 따라 많은 차이가 있다. 마그네트론(Magnetron) 송신기는 초기에 비동기 레이더 시스템(Noncoherent Radar System)에 많

이 이용되었지만 현재 기술력이 발달하여 동기 레이더 시스템(Coherent Radar System)에도 이용되고 있다. 마그네트론 송신기는 500KW 미만의 저출력 송신에 주로 이용되며 크기가 작아서 비행기 탑재 레이더에 주로 이용된다. 반면 클라이스트론(Klystron) 송신기는 높은 침투 출력을 발생시킬 수 있고 매우 안정된 주파수 송신으로 동기 레이더 시스템에 이용되고 있다. 최근의 기상 레이더는 도플러 효과를 이용하여 바람에 관련된 정보를 산출하므로 안정된 주파수를 발생시킬 수 있는 클라이스트론 송신기를 많이 사용하고 있다.

기상 레이더의 송신 출력은 수신기의 최소감지신호(MDS: Minimum Detectable Sensitivity)의 $10^{17} \sim 10^{20}$ 의 세기로 송출하는 것이 일반적이다. 미국 NEXRAD의 경우, 500W ~ 500KW의 출력을 가진 기상 레이더를 운용하고 있다. 하지만 이러한 송신 출력은 기상 레이더의 운용목적, 설치장소의 기후조건, 이용 주파수, 탐지거리, 탐지 대상물, 수신기의 감도 등의 여러 변수에 따라 달라질 수 있으며 각각 적합한 송신 출력을 결정하여야 한다. 일반적으로 C-band의 기상 레이더는 250KW, S-band의 기상 레이더는 750KW의 최대송신출력을 갖도록 설계한다.

2.2.2 안테나 이득(G_A :Antenna Gain)

안테나 이득은 안테나가 임의의 방향으로 에너지를 집중하여 복사할 때, 레이더 안테나로부터 특정 방향으로 복사되는 정도를 표현하는 설계인자이다. 기상 레이더는 대기 중에 존재하는 기상 표적으로부터 산란된 미약한 신호를 수신하여 기상정보를 획득하는 시스템이다. 따라서 안테나 이득이 너무 낮으면 안테나에 수신된 미약한 신호를 제대로 처리할 수 없으며 일종의 잡음(Noise)으로 처리하게 된다. 일반적으로 기상 레이더 시스템에서는 20~45dB의 이득을 갖는 안테나를 이용한다. 안테나 이득은 이용 주파수, 안테나의 크기에 함수이다. C-band보다 낮은 주파수를 이용하는 S-band 레이더의 경우, 동일한 안테나 이득을 갖기 위해서는 더 큰 안테나가 필요하다. 안테나 이득은 안테나 크기 및 주파수의 함수이며 식 (7)과 같은 관계가 있다.

$$G_A = 20 \log F + 20 \log D + 17.8dB \quad (7)$$

여기서, G_A : 안테나 이득,
 F: 주파수[GHz],
 D: 안테나 크기[m]이다.

C-band(5.6GHz)의 4m 안테나의 경우는 식 (7)을 통해서 44.8dB의 안테나 이득을 가짐을 알 수 있다.

2.2.3 빔폭(HPBW:Half Power Beam Width)

빔폭은 안테나의 지향성을 표현하는 인자로서 주엽(Mainlobe)의 침예도를 의미한다. 빔폭은 주엽의 최대복사 방향에 대해 -3dB되는 두 방향 사이의 각을 의미하고 최대 복사방향을 기준으로 양쪽으로 1/2되는 파워지점간의 간격이므로 반치각(HPBW:Half Power Beam Width)이라고도 한다. 빔폭은 안테나 크기와 사용 주파수의 함수이다.

2.2.4 최소감지신호(MDS:Minimum Detectable Signal)

기상 레이더의 최소 감지 신호는 수신기의 성능을 표현하는 인자로서 이용되며 수신기의 잡음지수 및 대역폭(Bandwidth)등 여러 인자들의 함수이다. 기상 레이더 시스템은 대기 중에 존재하는 기상 표적에 의하여 반산되는 미약한 수신신호를 감지한다. 일반적으로 기상 레이더의 수신기는 -105dBm 정도인 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ watt의 수신 신호를 감지할 수 있어야 한다. 미국의 NEXRAD(Next Generation Radar)는 -113dBm 감도(5.0×10^{-15} watt)의 신호를 감지할 수 있는 수신기를 사용하고 있다.

2.2.5 잡음전력(Noise Power)

잡음전력은 수신기의 성능에 영향을 미치는 요인 중 하나로서 송수신 채널 내에 무작위 확률로 진입하거나 자체적으로 발생하기도 한다. 잡음과 신호정보가 혼합된 상태에서 신호를 추출하기 위해서는 신호가 잡음보다 항상 크지 않으면 검출할 수 없게 된다. 잡음에는 신호와 함께 안테나를 통하여 들어오

는 외래 잡음과 수신기 자체에서 발생하는 내부 잡음이 있다. 수신기의 설계 시 고려할 사항은 내부 잡음으로서 내부 잡음에는 열잡음(Thermal noise)과 산탄잡음(Shot noise)이 있다. 이 중에서 열잡음이 우세하게 나타되며 이는 전기회로내의 절대온도(Absolute temperature)에 의한 개개 전자의 자유운동에 의해 발생하는 잡음이다.

위의 2.2.1~2.2.5절에서 언급한 기상 레이더의 주요 설계인자의 일반적인 기준을 아래 표 1에 정리하였다.

표 1. 기상 레이더 주요 설계인자

	설계 인자
최소감지신호	-113dBm
송신출력	$10^{17} \sim 10^{20} \times \text{MDS}$ C-band 기상 레이더: 250Kw S-band 기상 레이더: 750Kw
안테나 이득	20~45[dB]
1st sidelobe	20dBc 이상
HPBW	0.55°(TDWR) 1.00°이하(NEXRAD)

2.3 우주센터 기상 레이더

2.3.1 주파수

현재 기상 레이더로 널리 사용되는 주파수 대역은 S-band (2.7~2.9GHz)와 C-band (5.6~5.65GHz)이다. 이용 주파수 대역은 기상 레이더의 운용목적, 탐지 대상 및 기상 레이더가 설치되는 지역의 기후 패턴 등에 따라 결정 된다. 그림 2에서 확인 할 수 있듯이, 발사체는 발사 100초 이내에 고도 30km를 통과하므로 나로 우주센터에서 사용되는 기상 레이더는 발사체 비행궤적을 중심으로 비교적 좁은 관측영역의 구름, 강우 및 바람장을 높은 감도로 관측할 필요가 있다. 강우감쇄 영향, 높은 signal-to-clutter ratio 필요, 가격 경쟁력 및 설치 용이성 등을 고려한바, C-band 대역의 기상 레이더가 적합할 것으로 판단 된다. 일반적인 S-band 기상 레이더와 C-band 기상 레이더를 표 2에 비교하였다.

표 2. C-band와 S-band 기상 레이더의 비교

	C-band	S-band
Frequency	5.60~5.65GHz	2.70~2.90GHz
Range	100~200km	200~400km
Sensitivity	Higher	Lower
Signal-to-Clutter Ratio	Better	Lower
Rain attenuation	크다	작다
Site	중위도	적도 강우성 지역
System size	작다	크다
Cost	낮다	높다

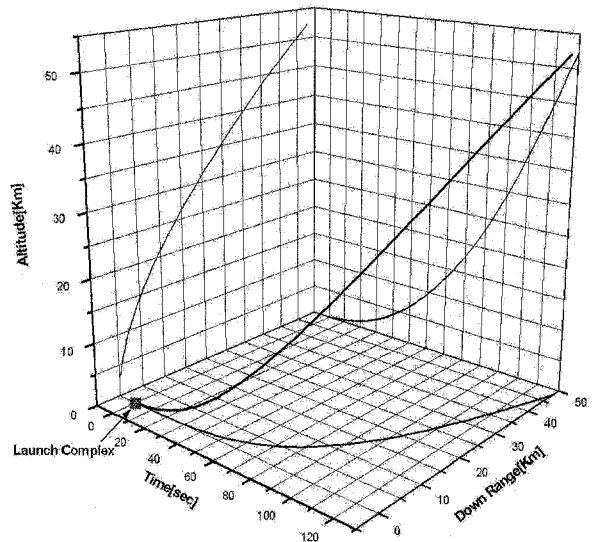


그림 2. 발사체(KSLV-1)의 예상 비행궤적

2.3.2 송신기(Transmitter)

마그네트론(Magnetron) 레이더 시스템은 일반적으로 수신기 부분에서만 동기화가 이루어지는 시스템인 반면 클라이스트론(Klystron) 레이더 시스템은

송신기 및 수신기 부분에서 동기화가 이루어지므로 보다 안정적으로 주파수를 발생하고 검파 할 수 있다. 최근의 기상 레이더는 도플러 효과를 이용하여 바람에 관련된 정보를 산출하므로 안정된 주파수를 발생시킬 수 있는 클라이스트론 송신기를 많이 사용하고 있는 추세이다. 표 3에서는 마그네트론 송신기와 클라이스트론 송신기의 일반적인 차이를 요약하였다. 우주센터의 기상 레이더는 구름, 강우, 낙뢰, 바람장(마이크로버스트) 등을 관측하는 중요한 용도로 이용되므로 안정적이고 높은 시스템 성능을 갖는 클라이스트론 송신기를 선택하여야 할 것으로 판단된다.

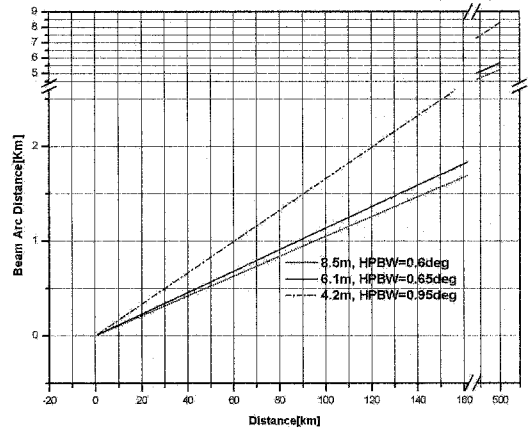
표 3. 마그네트론 및 클라이스트론 송신기 비교

	마그네트론	클라이스트론
동기화	수신기 동기	송, 수신기 동기
필스간 안정도	45dB	55~60dB
전력소모	작다	크다
장점	경량, 소형 긴 수명	높은 출력 필스간 저잡음
단점	PLL 필요 내재적인 주파수 강하	좁은 대역폭 높은전압필요 대형 시스템

2.3.3 반치각(HPBW)

그림 3에서는 반치각(HPBW: Half Power Beam Width)이 0.6°, 0.65°, 0.95°인 빔이 전파(propagation)될 때, 거리별 Beam arc distance를 표현하였다. Beam arc distance는 데이터의 공간 해상도에 결정적으로 영향을 미친다. 따라서 국지적인 기상현상을 정확하고 높은 분해능으로 관측하기 위해서는 작은 고도각 간격으로 빔을 방사하도록 레이더를 운용하는 것이 필요하며 또한 작은 반치각을 갖는 큰 안테

나를 사용하는 것이 유리하다.


그림 3. 거리 및 HPBW에 따른 Beam Arc Distance

2.3.4 빔고도(Beam Height)

Beam arc distance와 함께 일정거리를 전파(propagation)중인 빔의 고도를 충분히 고려하여야 한다. 일정거리를 전파(propagation)한 빔의 고도는 안테나 고각(Elevation angle), 지구의 곡률반경, 전파의 대기 중 굴절률 및 대기 중에 존재하는 수분 함량 등에 크게 영향을 받는다. 따라서 기상 레이더 운용 시에는 일정거리를 전파한 빔의 고도를 고려하여 운용하여야 하며, 기상 레이더로부터 추출된 기상 자료를 기상학적으로 해석 및 분석하는 데 있어서 반드시 빔의 고도를 고려해야 한다. 아래 식 (8)은 빔의 고도를 계산하는 식이며, 그림 4는 안테나 고각별로 거리에 따른 빔의 고도를 표현한 것이다.

$$H = \sqrt{r^2 + R_e^2 + 2rR_e \sin\theta_e} - R_e \quad (8)$$

여기서, H: 빔 고도,

r: Range,

R_e: 지구유효곡률반경,

θ_e: 안테나 고도각 이다.

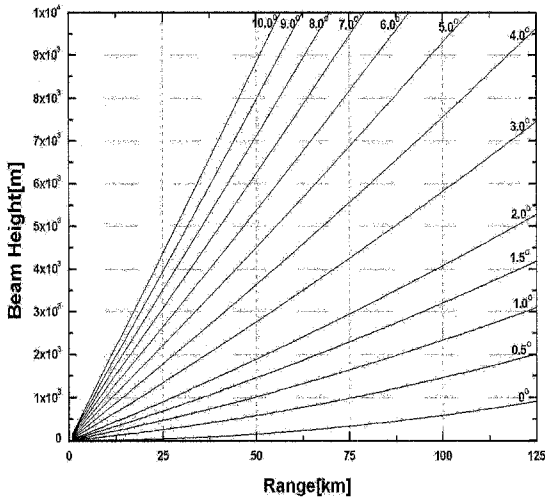


그림 4. 거리 및 고도각에 따른 Beam Height

2.3.5 수신감도(Sensitivity)

기상 레이더 방정식과 일반적인 기상 레이더 규격을 이용하여 기상 레이더가 감지할 수 있는 수신감도를 분석하였다. 기상 레이더 수신기의 신호가 최소 수신신호(MDS)일 때, 반사도는 최소 수신감도가 되며 거리별 최소 수신감도는 아래 식 (9)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\bar{P}_r = MDS = 10 \log \left(\frac{P_t G_o^2 h \theta_o^2 \pi^3 |k|^2 L}{2^{10} \ln 2 \cdot r^2 \lambda^2} Z_{\min}(r) \right)$$

$$\therefore dBZ_{\min}(r) = MDS - 10 \log \left(\frac{P_t G_o^2 h \theta_o^2 \pi^3 |k|^2 L}{2^{10} \ln 2 \cdot r^2 \lambda^2} \right) \quad (9)$$

아래 표 4는 기상 레이더로부터 50km 떨어진 기상표적으로부터 반사되어 안테나에 수신되는 최소신호감도를 각각의 파라미터를 통해 계산하였다. 또한 그림 5는 거리에 따른 최소 수신감도를 안테나 이득에 영향을 주는 안테나 크기(4.2m, 6.1m, 8.5m)별로 나타내었다.

표 4. 최소 수신감도(6.1m 안테나, 50km)

Parameter			단위
Constant	$\frac{\pi^3 k ^2 C}{2^{10} \cdot \ln 2}$	-70.9	dBsm ⁻¹
Dimension	mm ⁶ /m ³	180	dBm ⁻³
Wavelength	0.055m[λ ²]	-25.2	dBm ²
Peak Power	250Kw[P_t]	-84	dBmW ₁
Pulse Width	2μs[τ]	57	dBs ⁻¹
Beam width	0.65[θ]	38.9	dB
Antenna Gain	47.5[G]	-95	dB
MDS	-113.2dBm	-113.2	dBmW
Losses	Atmospheric	3	dB
	Tx path		
	Rx path		
Slant range	50km[r]	94	dBm ²
Sensitivity		-15.4	dBz

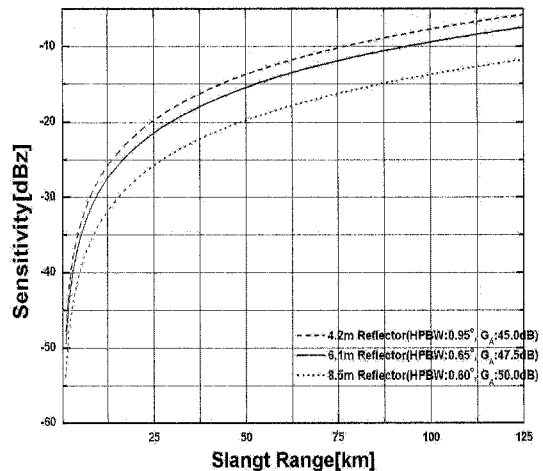


그림 5. 거리별 최소 수신감도

3. 결 론

기상 레이더는 발사체의 순조로운 발사를 지원하기 위하여 현재의 기상상태 또는 단기예측(Nowcasting)을 가능케 하는 유용한 기상관측 장비이다. 우주센터 기상장비는 발사대 주위 반경 50km와 발사체 비행경로 주위의 기상상태를 정확하게 관측하고 예측해야 한다. 본 연구에서는 기상 레이더 시스템과 관련된 기상 레이더 방정식과 도플러 속도 측정식의 의미를 기술 하였으며, 일반적인 기상 레이더의 주요설계 인자인 운용주파수, 송신출력, 안테나 이득, 최소 감지 신호, 잡음전력을 살펴보았다. 또한 우주센터에서 도입하고자 하는 기상 레이더의 설계인자를 분석하고 거리에 따른 최소수신감도 분석 하였다.

참 고 문 헌

1. 이상철외 1인, "레이더 공학", 보성문화사, 1995.
2. Ronald E. Rinehart, "Radar for Meteorologists", Rinehart Publications, 1997.
3. 국봉재, 오창열, 이효근, "우주센터 기상 레이더 시스템에 관한 연구", KARI-SC(LOD)-TM-2003-002, 한국항공우주연구원, 2003.
4. Henri Sauvageot, "Radar Meteorology", Artech House, 1992.