

# 저속 항공기를 위한 35GHz 다기능 항행 레이더 설계

## The Design of 35GHz Multi-Purpose Navigation Radar For Lower Speed Aircraft

문상만, 김현경, 이상종, 김인규, 김태식, 이해창  
한국항공우주연구원

### 요약

민항기나 군용항공기의 경우 대부분 항행 안전성을 확보하기 위해 다양한 기능을 수행하는 레이더가 부착되어 있으나, 소형항공기 및 저가의 헬기의 경우 무게, 비용 등의 제약으로 항행 안전을 확보할 수 있는 레이더가 장착되어 있지 않는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 민항기 및 군용 항공기뿐만 아니라 헬기 및 소형항공기에 장착하여 충돌감지, 이착륙보조, 기상관측 등의 기능을 수행할 수 있는 레이더로 35GHz 밀리미터 대역의 항공기 탑재형 레이더의 적용에 대한 제반 요건과 필요성에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 제안된 레이더를 이용하면, 저속 항공기 및 헬기에서는 치명적인 사고를 유발시킬 수 있는 전력선 탐지가 가능함을 확인함으로써, 제안된 레이더가 항행 안전성을 높일 수 있음을 보임으로써 밀리미터 대역 레이더의 적용이 가능함을 확인하였다.

### I. 서론

현재 민항기에는 항행 안전성을 확보하기 위하여 다양한 기능의 레이더가 부착되어 있다. 이들 레이더는 기상레이더, 항행 레이더, 충돌방지 및 회피 레이더 등 그 기능에 따라 다양하게 분류되어 사용되어져 왔다. 그렇지만, 지금까지 소형기, 헬기, 무인항공기 등과 같은 소형항공기에는 공기역학적인 성능저하와 장착면적 부족, 가격의 상승 등의 이유로 인해 항행 레이더를 장착하는 것은 거의 불가능하였다. 그러나 근래에 와서 레이더를 소형화할 수 있는 밀리미터파 관련기술의 급격한 발달로 소형항공기에 장착하여 항행안정성을 높일 수 있는 밀리미터파 레이더 개발에 관심이 고조되고 있다. 그리고 이러한 레이더는 소형/경량이지만 다양한 기능을 수행할 수 있는 다기능 레이더로 점차 변화되고 있는 추세이어서 기능에 비해 가격이 저렴한 추세이다.

항행 안전에서 볼 때 우리가 흔히 뉴스를 통해 알 수 있듯이 대부분의 항공기 사고는 이착륙시의 저공비행시의 시계 불량 및 조종사의 실

수로 인해 발생되고 있음을 볼 수 있을 것이다. 이는 공항을 이용하는 민항기의 경우 관제시설로 ILS (Instrument Landing System)나 MLS(Microwave Landing System)를 채용하고 있음에도 불구하고, 예기치 못한 기상상태로 인한 시계불량에 의한 사고로 판단되고 있다. 또한, 공항을 이용하지 못하는 소형항공기, 무인항공기 및 헬기의 경우 항상 충돌위험에 항상 노출되어 있다. 특히, 저공비행 임무가 많은 헬기의 경우 더욱더 항행 안전성 증대가 요구되고 있고, 실제로 미국/캐나다의 헬기사고 통계에 따르면 지형지물에 의한 충돌사고가 무려 30%가 넘는 것으로 나타나고 있다[1]. 이렇듯, 헬기의 경우처럼 저공관측, 지형통제비행, EMS (Emergency Medical Service), SAR (Search and Rescue), 산불진화 등의 저공비행 상태에서 임무를 수행해야 하는 항공기들은 항상 충돌위험이 내재되어 있다. 이 외에도 전장의 전투기 및 헬기 역시 지형통제 비행 및 여타 요소에 의한 항행 안전에 위협받고 있는 현실이다.

따라서 본 논문에서는 헬기 및 소형항공기에 장착하여 충돌감지, 이착륙보조, 기상관측 모드

의 기능을 수행할 수 있는 35GHz 밀리미터 대역의 항공기 탑재형 레이더 시스템에 대한 검토에 대한 연구를 수행하였다. 검토를 위해 헬기와 같은 저속 항공기와 같은 기종에 가장 위협이 될 수 있는 것으로 위험물로 전력선을 들 수 있는데, 이는 탑재된 레이더에게는 주 표적이 된다. 뿐만 아니라, 지면, 강우에 대한 레이더 반사 단면적(RCS : Radar Cross Section)값을 예측하여 35GHz대역의 다기능 효용성에 대해 언급하고자 한다. 이를 바탕으로 설계된 레이더를 헬기 및 저속 항공기에 치명적인 사고를 유발시킬 수 있는 전력선 탐지 성능분석 및 시스템 설계를 통하여 제시된 시스템의 성능의 효용성을 입증하였다.

이와 같이 본 연구에서 안전운항에 취약한 소형항공기, 헬기, 무인기 등에 장착하고자 지형지물을 탐지를 이용하여 항공기의 운항 안전성을 획기적으로 증대시킬 수 있는 방법으로 항행용 밀리미터파 레이더를 제안하여 밀리미터 대역 레이더의 적용이 가능함을 확인하고자 한다.

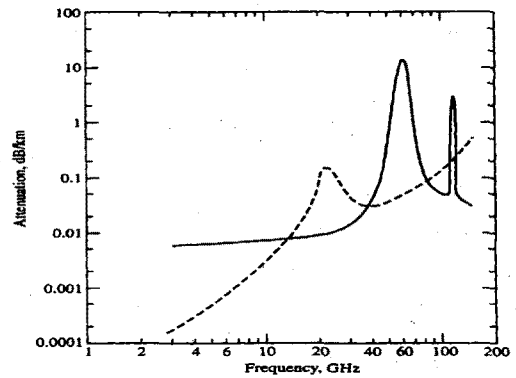
## II. 기능설계 및 RCS예측

### 1. 주파수 선택

비행기 탑재형 레이더는 크기와 중량에 큰 제약을 받는데, 이는 주로 안테나와 밀접한 관련이 있다. 특히, 일반적으로 개발대상인 레이더는 항공기에 선택적으로 장착할 수 있도록 설계를 하므로, 공기역학적인 성능에 크게 영향을 미치는 안테나를 최소화 시켜야 한다. 안테나의 크기를 줄이기 위해서는 아래 식(1)에서와 같이 파장을 줄여야 한다[2]. 따라서 소형항공기에 레이더를 장착하기 위해서는 파장이 짧은 주파수가 30GHz 대역 이상의 밀리미터파가 적합하다 사료된다.

$$A_e = \frac{G^2}{4\lambda} \tag{1}$$

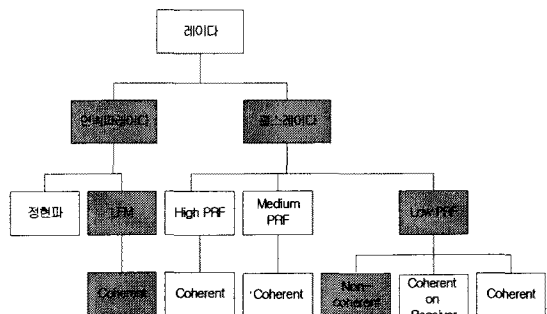
여기서,  $A_e$ 는 안테나 유효 개구경,  $\lambda$ 는 파장을 나타낸다.



<그림 403> 대기에 의한 전파의 감쇠 특성

그런데, 화창한 대기상태에서도 공기 중의 수분과 산소가 <그림 1>에서 보면 레이더의 에너지를 감쇠시키는 주 요인이 됨을 알 수 있다. 22.2GHz는 수분에 의한 전파공진에 의한 에너지 흡수로 최대 감쇠가 발생하며, 또한, 184GHz에서 공진이 발생한다. 22.2GHz에서 감쇠율은 약 0.2dB /Km정도이다. 그리고 산소분자에 의한 공진은 60GHz와 118GHz에서 발생하며 60GHz에서의 16dB/Km정도의 에너지 감쇠율을 가진다. 따라서 그림 2에서 살펴보면 밀리미터파에서 레이더에 적용하기 위한 가장 적절한 주파수는 35GHz와 94GHz대역임을 알 수 있다. 이와 더불어 지금까지의 레이더 구현을 위한 부품개발의 성숙도 및 기상측정을 위한 장거리운용을 감안하면 35GHz대역이 가장 적절하다.

### 2. 레이더 구조



<그림 404> 송수신 방식에 따른 레이더의 분류  
송수신 방식 구조에 따른 분류는 <그림 2>와 같이 분류할 수 있다. 레이더는 주파수, 송수신

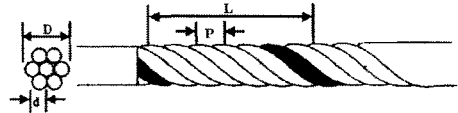
방식, 빔 스캔 방식, 적용분야 등에 따라 분류할 수 있으며 특히, 레이더의 성능은 송수신 방식에 따라 크게 차이가 난다. 연속파 레이더는 표적의 속도(Target Radial Velocity)를 정확하게 측정할 수 있지만 송수신단의 분리가 어렵다. 하지만, 펄스레이더도 신호처리기술의 발달로 정확한 표적의 속도를 구할 수 있게 되어 근래에 개발되는 대부분의 레이더는 펄스 방식을 이용하고 있다. 이는 찾고자하는 표적 성능에 따라 레이더 방식을 선택하면 된다.

본 과제의 주요 개발대상 레이더의 주요 임무는 소형항공기, 헬기 등에 장착하여 항행보조시스템으로 활용되는 장비로 이/착륙시에는 근접경보, 항행시에는 비행경로에 있는 충돌물체 탐지 및 기상측정의 주요임무를 수행하여야 한다. 이러한 주요 임무 중에서 설계의 주안점은 저공항행시의 충돌물체를 탐지하는 것으로 이러한 충돌물체 중 RCS가 비교적 작은 전력선 탐지를 목표로 모든 설계 파라미터를 여기에 역점을 두고 설계한다면 임무를 수행 할 수 있다.

항공기 탐재 레이더는 안테나에서 송출되는 좁은 빔이 항공기의 진동에 의해 표적에 정확히 조사할 수 없으므로 순진 전력의 포인팅 손실(Pointing Loss)가 크게 발생되어 탐지 확률이 급격하게 감소된다. 따라서 이를 방지하기 위해서는 항공기에 탐재되는 광학센서의 안정화 시스템과 유사한 안테나 안정화 시스템이 필수적이다. 이러한 안테나 안정화 시스템은 전자 기계 장치(Electro-Mechanical System)로 지상 및 선박용 레이더에는 적용되지 않으며, 이로 인해 항공기 탐재 레이더의 개발의 주요 어려움에 하나다. 본 개발품과 관련하여 적용가능성이 있는 방식으로는 LFM(Linear Frequency Modulation) 연속파 레이더와 넌코히어런트(Non-coherent) 펄스 방식을 개념연구에서 선정하여 연구를 수행하였으나 연속파 레이더는 송수신 분리를 위해 안테나를 두개 사용하여야 함으로 본 개발에 적합하지 않아 제외시켰다. 넌코히어런트 레이더는 부피/무게가 작은 마그네트론 전력증폭기를 사용할 수 있고, 이를 이용하여 고출력 전력을 방사할 수 있어 탐지거리를 늘릴 수 있는 장점이 있다.

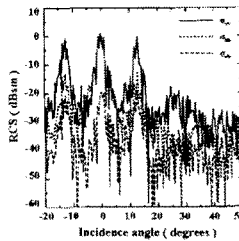
### 3. RCS 예측

레이더는 탐지하고자 하는 표적에 따라 다양한 설계 변수가 따른다. 본 연구에서 제안된 레이더는 다중 모드를 수행하는 것으로 각 모드에 대한 주 표적을 설정하고 이에 대한 RCS값을 예측하여 설계의 기본 파라미터 값으로 활용한다. 따라서 정확한 RCS값 예측은 시스템 설계시 매우 중요한 것으로 이를 정확하게 예측하지 못하면 시스템의 성능이 과하거나 미달되어 개발하고자 하는 시스템을 설계할 수 없을 가능성이 있다. 본 레이더 시스템의 주 표적은 충돌물체로 전력선, 지면을 설정하였고, 환경 및 기상 표적으로 강우를 설정하였으며 이에 대한 RCS값은 <표 1>과 같이 계산하였다. 그런데 전력선의 경우 <그림 3>과 같은 구조를 가지며 이에 대한 RCS도 <그림 4>와 같이 원통에 비해 상당히 복잡하게 예측된다[4~5].

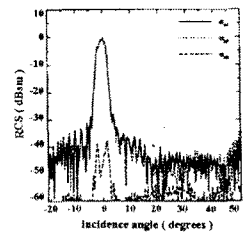


- d : strand conductor diameter
- D : overall outside diameter
- L : spacing between surfaces
- P : Spacing between turns

<그림 405> 전력선의 구조



(a) 지름 41mm 전력선



(b) 지름39mm의 원통

<그림 406> 길이 1.2m 전력선 RCS분포(1431MCM)

<표 1> 35 GHz에 대한 RCS 예측값

구분	조건	평균RCS	비고
전력선	빔폭 : 2deg 관측거리 : 2Km 전력선 단면적 : 800mm <sup>2</sup> 전파입사각 : ±20[deg]	5dBsm	첨두 RCS : 19dBsm
지면	빔폭 : 2deg 관측거리 : 7.5Km 지면의 종류 : 숲 Grazing Angle : 45deg	29.3dBsm	
강우	빔폭 : 2deg 관측거리 : 75Km 강우율 : 10mm/hr	73.7dBsm	

### III. 시스템 설계

#### 1. 레이더 파라미터

앞에서 설명한 바와 같이 레이더 송수신 방식은 마그네트론을 이용한 년코히어런트 펄스 레이더로 설정하였다. 따라서 펄스 레이더의 주요 파라미터를 설정하여야 하며 이는 펄스의 주파수(PRF)와 펄스폭을 설정하는 것으로부터 시작된다. 펄스폭은 탐지거리와 관련이 있으므로 아래식과 같이 비모호성 거리(Unambiguous Range)로부터 계산할 수 있다.

$$R_u = c \frac{T}{2} = \frac{c}{2f_r} > R \quad (2)$$

여기서,  $R_u$ 는 비모호성 거리,  $T$ 는 펄스의 주기,  $f_r$ 는 PRF(Pulse Repetition Frequency)이다. 따라서 충돌감지모드의 탐지거리가 7.5 Km이고, 기상모드의 탐지거리가 75 Km이므로 PRF는 충돌감지모드 시는 20KHz, 기상모드 시는 2 KHz이상 되어야 한다. 그런데 PRF가 너무 크면 전 펄스에 의한 허상이 나타나 오경보 확률이 높아지므로 충분한 마진이 필요하다. 따라서

기상모드는 1~1.5KHz정도 충돌감지모드는 기상모드는 4~6KHz가 적절하다.

펄스폭은 아래식과 같이 PRF와 마그네트론의 Duty Cycle로부터 구할 수 있으며, 일반적인 마그네트론의 Duty Cycle은 0.1%정도이다. 따라서 충돌감지모드의 펄스폭은 167~250nsec 이하, 기상모드는 667~1000nsec 이하에서 선택하면 된다. 그래서 충돌감지모드 시에는 150nsec, 기상모드 시에는 600nsec 정도로 설정하면 앞에서 선정한 PRF에 상관없이 사용이 가능하다. 이때, 거리해상도는 각각 22.5m, 90m가 된다. 그리고 거리정밀도는 Gate Interval과 관련 있고 이는 A/D변환기의 샘플링주파수와 관련이 있다. 5m 오차를 만족시키기 위해서는 30MHz 샘플링이면 되지만 저역통과필터 및 매치필터 등에 의해 수신신호가 허물어진다. 따라서 이를 보상하기 위해서는 A/D 샘플링 주파수를 60MHz 이상으로 하여야 한다. 기상모드의 경우 거리오차가 중요하지 않으므로 15MHz 정도이면 충분하다. 여기서, B는 레이더 운용 대역폭으로 레이더적분시간(Radar Integration Time)의 역수이다. 즉, B는 A/D변환기의 샘플링 주파수와 같다고 볼 수 있다. 만약 항공기의 이/착륙 시간을 5분으로 보면 오경보율은 약 10-10정도 된다. 그리고 탐지확률을 일반적으로 사용하는 90%정도 설정하면 하나의 펄스에 요구되는 SNR은 15[dB]이다.

본 개발대상의 레이더는 년코히어런트 적분을 수행함으로써 실험적으로 유도된 아래식과 같은 개선인자( $I(n_p)$ )를 얻을 수 있다.

$$[I(n_p)]_{dB} = 6.79(1 + 0.235P_D) \left(1 + \frac{\log(1/P_{fa})}{46.6}\right) \log(n_p) (1 - 0.14\log(n_p) + 0.018310(\log(n_p))^2) \quad (3)$$

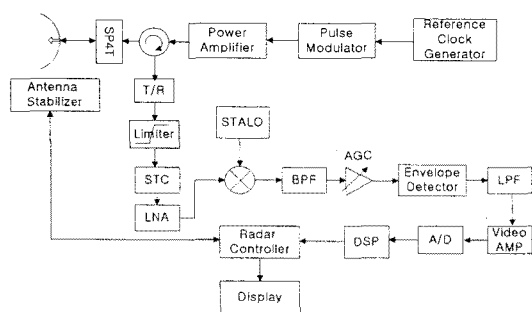
윗 식으로부터 적분개선인자를 구하면 (16) = 10.32[dB]정도로 SNR이 개선된다. 따라서 레이더식에서 요구되는  $(SNR)_{16}$ 은 4.48[dB]이다.

#### 2. 시스템 개발 요구조건 및 설계 파라미터

지금까지 기술한 내용을 종합하여 시스템을 구현하면 <그림 5>와 같은 기능으로 구성되는 시스템으로 설계할 수 있다. 이 시스템의 성능도를 바탕으로 개발목표를 달성할 수 있는 최소 개발요구조건을 설정하였다. 이러한 개발요구조건과 설계 파라미터를 정리하면 <표 2>와 같으며 여기에 정리된 값들 중에는 앞에서 설명되지 않은 예측 값들도 있다.

$$(SNR)_{n_e} = \frac{P_t G^2 \lambda^4 I(\eta_p)}{(4\pi)^3 R^4 K T_e F L L_{at} L_o} \quad (4)$$

여기서,  $P_t$ 는 침투송신전력, G는 안테나 이득,  $\lambda$ 는 레이다 반사 단면적,  $K(=1.38 \times 10^{-23})$ 는 볼츠만상수 [ $J/^{\circ}K$ ],  $I(\eta_p)$ 는 네킨하이러트적분에 따른 효율,  $T_e$ 는 유효잡음온도 [ $^{\circ}K$ ],  $L$ 은 안테나와 RF 프론트엔드간의 연관 손실,  $L_{at}$ 는 대기중의 가스에 의한 손실,  $L_o$ 는 비, 분, 안개 등을 포함하는 기타 손실의 합계를 나타낸다.



<그림 407> 35GHz 항행 레이다 기능 블록도

<표 2> 레이다식을 이용한 전력선 탐지 분석

항목	파라미터 값	계산식	값[dB]
1	송신전력	$P_t=2.5Kw$	Pt 34
2	펄스폭	$\tau=150 \times 10^{-9}$	$\tau$ -68.24
3	안테나 이득	$G=35[dBi]$	G2 70
4	반송파 파장	$\lambda=0.00857[m]$	$\lambda_2$ -41.34
5	전력선 평균 RCS	$\sigma=5[dBsm]$	$\sigma$ 5
6	상수	$4\pi$	$(4\pi)^{-3}$ -33
7	탐지거리	$R=2000[m]$	$R^{-4}$ -132
8	온도잡음 밀도	$k=1.38 \times 10^{-23}[J/^{\circ}K]$ $T_e=300[^{\circ}K]$	$(kT_e)^{-1}$ 203.8
9	수신단 잡음지수	$F=4[dB]$	F-1 -4
10	도파관 손실	$L=1[dB]$	L-1 -1
11	대기손실(습도=40%)	$L_{att}=0.09293[dB/Km] \times 2[Km]$	Latt-1 -0.19
12	강우손실 (강우율=10mm/hr)	$L_o=2.684[dB/Km] \times 2[Km]$	Lo-1 -5.368
13	레이다식 계산결과	Single Pulse SNR	27.662
14	적분개선인자	$I(16)=10.32[dB]$	I(np) 10.32
15	요구 SNR	15[dB]	-15
16	SNR 마진		22.982

#### IV. 성능 분석

지금까지 설계된 레이다의 개발목표성능 만족 여부는 아래식과 같은 레이다 방정식으로부터 역으로 판단할 수 있다.

<표 3> 35 GHz에 대한 대기가스 전자파 감쇠율

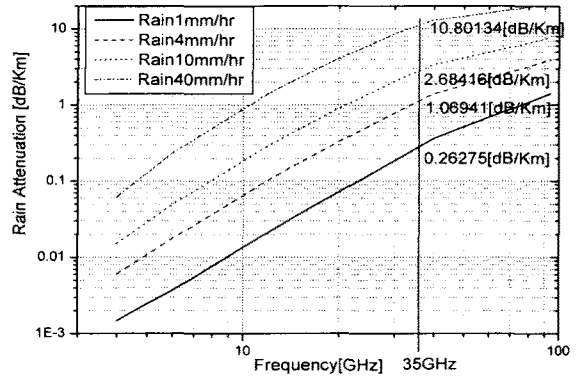
구분	상대습도 10%	상대습도 40%	상대습도 60%
수분함량	0.001 g/m <sup>3</sup>	7.5 g/m <sup>3</sup>	18.0 g/m <sup>3</sup>
감쇠율	0.01719dB/Km	0.09233dB/Km	0.19897dB/Km

<표 4> 개발 요구조건 및 설계 파라미터 종합

구분		개발 요구조건
레이다 방식		네킨하이러트 펄스
주파수		35 GHz
운용모드		이착륙, 충돌감지, 기상
탐지거리	충돌감지 모드	전력선 2 Km 이상 지면 7.5 Km 이상
	이착륙모드	7.5 Km
	기상모드	75 Km
거리정밀도	이착륙, 충돌감지모드	평균오차 5m이하
	기상모드	평균오차 20m이하
안테나	크기	28 cm 이하
	이득	35 dBi이상
	3dB 빔폭	2 deg 이하
첨두 송신전력		부엽 억압 30 dBc 이상
첨두 송신전력		2.5 Kw 이상
수신단	송수신 분리	2.5 Kw 이상
	잡음지수	30 dB 이상
	검파방식	4 dB 이하
PRF	이착륙, 충돌감지	포락선 검출 4.8 KHz
	기상모드	1.2 KHz
펄스폭	이착륙, 충돌감지	150±10nsec
	기상모드	600±20nsec
안테나 안정화	운용범위	AZ: ±90deg 이상, EL: -85 ~ 25deg 이상
	최대 가속도	150deg/sec 이상
	안정화 Jitter	0.1deg rms 이하
탐지 확률		90%이상
오경보 확률		10 <sup>-10</sup> 이하
A/D	이착륙, 충돌감지	60MHz이상
	기상모드	15MHz이상

레이다 방정식을 계산하기 전에 먼저 표적의 RCS 예측과 대기가스 및 강우에 대한 감쇠율 분석이 선행되어야 한다. 대기 및 강우에 대한 감쇠율 분석결과는 <표 3>, 그림 6과 같다.

환경변수로는 전력선에 대해서 비교적 강한 비가 올 경우로 10mm/hr 강우율을 적용하였으며 습도는 비교적 쾌적한 40% 정도의 상대습도에 대해서 레이다식을 적용하여 SNR을 계산하면 <표 4>와 같으며 SNR마진이 약 23dB로 구현시의 제작오차, 부품의 성능저하 등을 감안하더라도 충분히 구현이 가능할 것으로 판단된다.



<그림 408> 주파수 대비 강우에 의한 전자파 감쇠율

## V. 결 론

본 연구에서는 헬기 및 소형항공기에 장착하여 충돌감지, 이착륙보조, 기상관측 등의 기능을 수행할 수 있는 35GHz대역의 항공기 탑재형 항행 레이다 개발을 위한 시스템 설계를 수행하였다. 시스템 설계를 통해 상기의 기능을 수행할 수 있는 레이다 방식을 제시하고 세부 기능선도를 설계하였다. 이를 바탕으로 목표 성능을 만족시킬 수 있는 개발요구조건을 유도하고 설계 파라미터를 설정하였다. 설계된 레이다의 적용 타당성을 판정하기 위하여 헬기 운용에 가장 치명적인 전력선에 대한 RCS를 예측하였으며 이를 기준으로 성능을 분석하였다. 분석 결과를 통해 설계된 레이다는 충분한 SNR마진이 있어, 구현시의 제작오차, 부품의 성능저하 등을 감안하더라도 충분히 구현이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구를 토대로 여타 항공기에도 각 운항목적에 맞는 레이다 시스템을 고려하여 설계한다면, 밀리미터 대역의 레이다가 적용 가능할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] "Helicopter accident statistics", <http://www.amphitech.com/oasys/story.html>
- [2] Bassem R. Mahafza, "Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB," Chapman&Hall/CRC, 2000.
- [3] 이상철, 강정수, 레이다 공학, 보성문화사, 1995.
- [4] Kamal Sarabandi, Moonsoo Park "Millimeter-wave radar phenomenology of power lines a polarimetric detection algorithm" IEEE Transaction on antennas and Propagation, Vol. 47, No.12, December 1999
- [5] M. Park, and K. Sarabandi, "A high frequency RCS model for power lines", IEEE, 1999.
- [6] Rodger E. Ziemer, Roger L. Peterson' "Introduction to Digital Communication", Prentice Hall, January 2000