

# 항공기 탑재 시험을 통한 지상 클러터 반사계수 추정

Estimation of Ground Clutter Reflectivity based on the CFT(Captive Flight Test)

손 창 희\*

Son, Chang-Hee

## ABSTRACT

The performance of a microwave missile seeker and radar operating in an air-to-air look-down mode is strongly influenced by the presence of ground clutter. In order to correctly account for the effects of ground clutter, it is required to develop a model capable of representing clutter characteristics as a function of range and/or frequency. In this paper, a program to estimate the clutter reflectivity for various ground conditions is developed, using the actually measured data and the data available from open literatures.

In addition, clutter characteristics measured for various ground conditions such as sea, agricultural area, urban city and industrial area through the captive flight tests are presented.

주요기술용어(주제어) : Clutter(클러터), Ground Clutter(지상 클러터), CFT(Captive Flight Test), Microwave Seeker(초고주파 탐색기)

## 1. 서론

유도탄에 장착되어 있는 초고주파 센서(탐색기)를 이용하여 표적을 탐지하고 추적하는 경우, 하방 표적에 대해서는 지면에서 반사되는 클러터 신호의 영향을 받는다. HPRF(High Pulse Repetition Frequency) 모드로 운용하는 경우, 다가오는(closing) 표적에 대해서는 클러터 신호가 없는 영역에서 표적 신호를 검출할 수 있지만, 달아나는(receding) 표적에 대해서는 클러터 신호의 간섭으로 인해 표적 신호가 클러터 신호와 경쟁하게 되며, 표적신호가 클러터 신호보다 클

경우에만 검출할 수 있다. 특히, 유도탄의 경우 운용 조건에 따른 클러터 신호의 세기를 예측할 수 있다면, 클러터 신호에 대한 표적 신호의 검출 여부를 판단할 수 있고, 클러터의 영향을 회피 또는 제거할 수 있도록 유도탄을 유도 조종함으로써 탐색기의 표적에 대한 탐지 및 추적 성능을 향상시킬 수 있다<sup>[1,2]</sup>.

그러나 클러터 신호의 특성은 안테나 패턴과 송신 주파수 대역 등의 탐색기 설계 조건과 지면의 종류 및 유도탄 자세각과 안테나 숙임각 등의 운용 환경 및 조건에 따라 달라진다. 실제 유도탄이 운용되는 조건에 대해 클러터의 영향을 확인하기 위해서는 각각의 운용환경에 따라 클러터의 세기를 직접 측정하여야 한다. 그러나 수없이 많은 조건에 대해 클러터 신호의 세기를 직접 측정하는 것은 불가능하며, 많은 비용이 소요된다. 따라서 다양한 지면 조건과 유도탄

† 2006년 4월 20일 접수~2006년 6월 20일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : chson@add.re.kr

운용 조건에 따른 클러터 신호의 세기를 예측할 수 있는 프로그램의 개발이 요구된다.

프로그램을 개발함에 있어 가장 중요한 변수는 탐색기 안테나의 송신 주파수 대역과 실제 운용되는 지면 조건에 대한 반사계수 모델이다. 국내외 여러 문헌에는 다양한 지면 조건에 대한 반사 계수 모델이 존재한다. 그러나 탐색기가 운용될 주요 지형 조건인 도시, 공단 등에 대한 지면 반사 계수의 측정 자료 및 모델은 전무한 실정이다. 따라서 이에 대한 지면 반사 계수 모델의 개발이 요구된다.

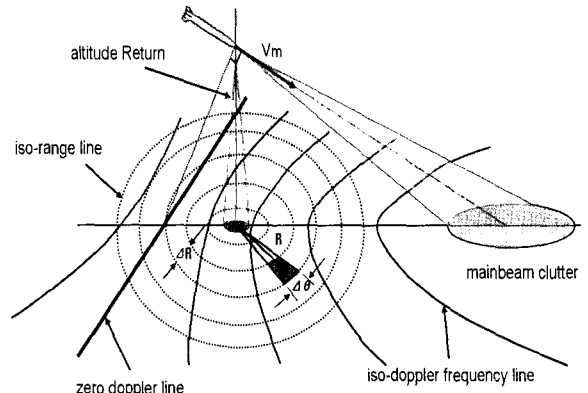
본 논문에서는 대공 유도탄용 탐색기를 이용한 항공기 탑재 시험(CFT)을 통하여 해면, 농지, 도시, 공단 등에 대한 주엽 클러터 전력을 측정하고 그 결과를 제시하였다. 그리고 측정 결과로부터 각각의 지면 조건에 대한 반사계수를 추정하였으며, 주요 지면 조건에 대한 지상 클러터 예측 프로그램을 개발하였다. 본 논문은 서론에 이어, 지면 클러터 예측 방법, 항공기 탑재 시험, 그리고 측정 결과 및 분석, 결론 순으로 구성 되어있다.

## 2. 지면 클러터 예측

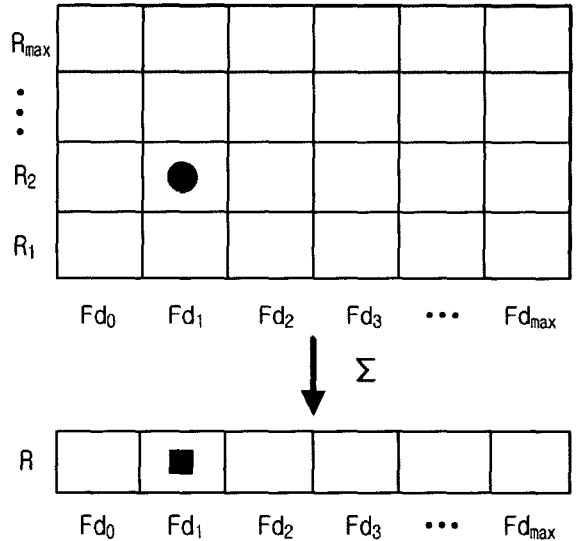
지면 클러터 신호는 초고주파 탐색기로부터 송신된 신호가 지면에 반사되어 안테나로 수신되는 신호이며, 그 세기는 유도탄의 비행 자세와 고도, 탐색기의 안테나 특성, 그리고 지면의 종류에 따른 반사계수 등에 따라 달라진다. 본 절에서는 지면 클러터 신호의 세기를 예측하기위한 방법에 대해 간략히 설명한다.

### 가. 지면 클러터 전력 계산 알고리즘

전체 지면에 대한 클러터 신호의 세기를 예측하기 위해, 안테나로부터 지면에 대해 수직인 점을 기준으로 하여 거리방향으로  $\Delta R$ , 방위각 방향으로  $\Delta \theta$ 씩 증가시켜 그림 1과 같이 전체 지면을 분할하여 단위 지면을 만든다. 그리고 그림 2와 같이 각각의 단위 지면에 대한 도플러 주파수와 클러터 전력을 계산하여 거리-도플러 맵(range-Doppler map)을 작성한다. HPRF를 적용하는 탐색기는 거리 게이트(range gate)



[그림 1] 지면 클러터 전력 계산



[그림 2] 거리-도플러 맵

가 하나이므로 거리 방향의 클러터 전력을 모두 더한 값이 각각의 도플러 주파수에 대한 클러터 전력 이 된다.

### 나. 단위 지면의 도플러 주파수

단위 지면에 대한 거리-도플러 맵을 만들기 위하여, 먼저 선택된 임의의 지면에 대한 도플러 주파수를 계산한다. 그림 3에서 속도  $V_m$ 으로 수평방향에 대해  $\delta$ 의 속임각으로 유도탄이 진행할 때, 단위 지면에 대한 도플러 주파수는 식 (1~6)과 같이 구해진다. 그림 3에서  $\beta$ 는 유도탄 속도 벡터와 유도탄과 단위

지면의 시선 사이의 각도이며, R은 유도탄과 단위 지면 사이의 거리이고,  $\psi$ 는 단위지면과 유도탄과 단위 지면의 시선이 이루는 각도이다. 그리고 식 (1~6)에서는  $V_{Patch}$ 는 유도탄 속도 벡터에 대한 단위 지면 방향의 속도 성분이며,  $\vec{u}_M$ 과  $\vec{u}_{Patch}$ 은 각각 유도탄 속도와 유도탄에서 단위 지면 방향의 단위 벡터이다. 그리고  $f_{dPatch}$ 는 단위 지면의 속도 성분에 의한 도플러 주파수이다.

$$V_{Patch} = V_M \cos \beta \tag{1}$$

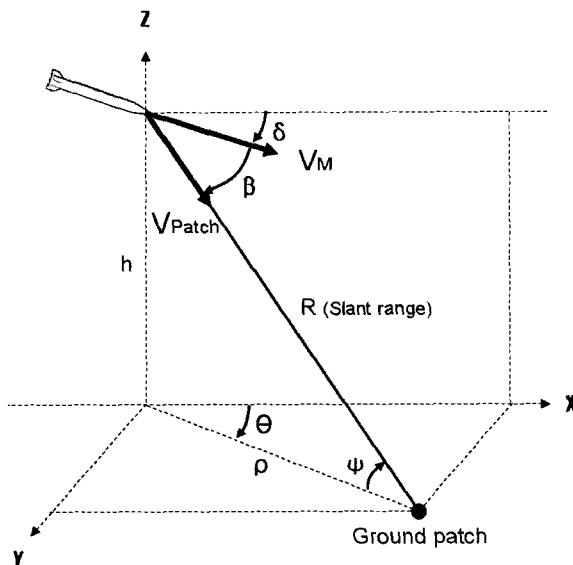
$$\cos \beta = \vec{u}_M \cdot \vec{u}_{Patch} \tag{2}$$

$$\vec{u}_M = (\cos \delta, 0, -\sin \delta) \tag{3}$$

$$\vec{u}_{Patch} = (\cos \psi \cos \theta, \cos \psi \sin \theta, -\sin \psi) \tag{4}$$

$$V_{Patch} = V_M (\cos \psi \cos \theta \cos \delta + \sin \psi \sin \delta) \tag{5}$$

$$f_{dPatch} = \frac{2 V_{Patch}}{\lambda} \tag{6}$$



[그림 3] 유도탄과 단위 지면의 기하관계

다. 단위 지면의 클러터 전력

임의의 단위 지면에 대한 클러터 전력은 식 (7)의 레이더 방정식으로부터 구해진다.

$$dP_{clutter}(R, f_{dpatch}) = \frac{P_a \cdot G_{patch}^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_{patch}}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \tag{7}$$

여기서  $P_a$ 는 평균 송신 전력이고,  $G_{patch}$ 는 단위 지면에 대한 안테나 이득을 나타내며,  $\lambda$ 는 송신 신호의 파장이다. 그리고 R은 안테나와 단위 지면 사이의 거리를 나타내며,  $\sigma_{patch}$ 는 단위 지면에 대한 RCS (Radar Cross-Section)이다. 식 (7)을 이용하여 단위 지면에 대한 클러터 전력을 계산할 때, 유도탄과 단위 지면의 기하 관계가 결정되면, 평균 송신 전력과 안테나 이득, 송신 신호의 파장, 상대거리는 상수가 된다. 그러나 클러터 RCS는 지면의 종류에 따라 달라지며, 지면 조건에 따라 클러터 신호의 세기가 달라지는 원인이 된다.

식 (6)과 (7)로부터 단위 지면에 대한 도플러 주파수와 클러터 전력을 구할 수 있고, 이로부터 거리-도플러 맵을 작성할 수 있으며, HPRF를 채택하는 경우에 대해 식 (8)과 같이 각각의 도플러주파수에 대해 거리방향의 클러터 전력을 모두 더하여 전체 지면에 대한 클러터 전력을 구할 수 있다.

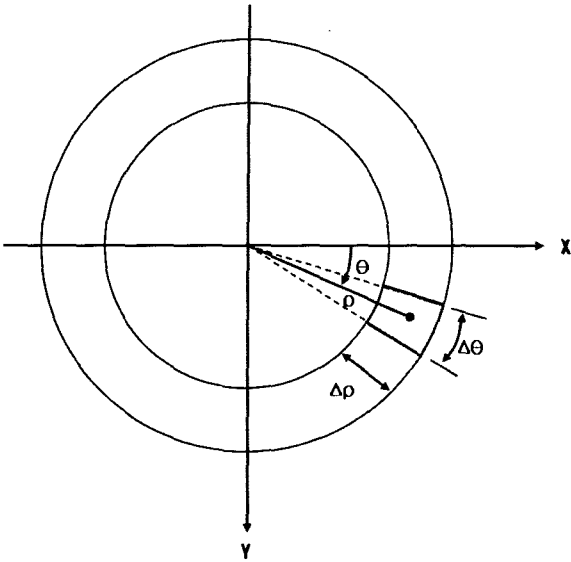
$$P_{clutter}(f_{dpatch}) = \sum_{R=0}^{\infty} dP_{clutter}(R, f_{dpatch}) \tag{8}$$

라. 지면 클러터 RCS( $\sigma_{patch}$ )

단위 지면의 클러터 RCS( $\sigma_{patch}$ )는 식 (9)와 같이 단위 지면의 면적과 반사계수의 곱으로 나타난다. 그리고 단위 지면의 면적은 그림 4와 식 (10)으로부터 구해지는데, 여기서  $\rho$ 는 안테나로부터 지면에 대해 수직인 점에서 단위 지면 사이의 거리이며,  $\Delta\rho$ 는 거리 방향의 증가분,  $\Delta\theta$ 는 방위각 방향의 증가분이다. 지면의 반사계수( $\sigma_0$ )는 다음 절에 자세히 기술하였다.

$$\sigma_{patch} = \sigma_0 \times \Delta A \tag{9}$$

$\sigma_0$  : 지면 반사계수(ground reflectivity)



[그림 4] 단위 지면의 면적

$$\Delta A = \frac{\Delta\theta}{2\pi} \{ \pi(\rho + \Delta\rho/2)^2 - \pi(\rho - \Delta\rho/2)^2 \} \quad (10)$$

$$= \rho\Delta\rho\Delta\theta$$

마. 지면 반사계수 ( $\sigma_0$ )

지면에 대한 반사계수는 지면의 종류, 송신 주파수, 편파의 종류, 숙임 각 등에 따라 달라진다. 앞선 연구자들에 의해 다양한 지면 조건에 대한 반사 계수가 측정되었고, 측정 결과로부터 반사계수 모델이 만들어졌다. 대표적으로 constant  $\gamma$  모델<sup>[1,2]</sup>, Ulaby 모델<sup>[3]</sup>, Morchin 모델<sup>[4,5]</sup> 등이 있으며, 본 논문에서는 시뮬레이션을 위해 Ulaby 모델과 Morchin 모델을 적용하였다.

1) Ulaby 모델

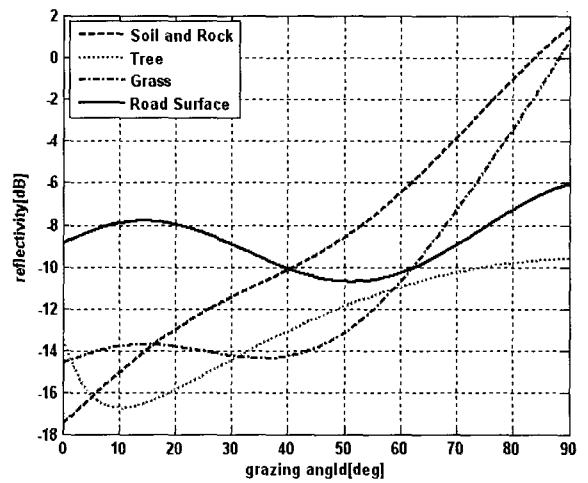
Ulaby 모델은 잔디, 나무, 눈(snow) 등의 단일 지면 조건에 대해 다양한 송신 주파수에 대한 반사계수를 측정하고 그 결과로부터 만들어진 모델이며 식 (11)과 같이 나타난다. 각각의 지면 조건 및 송신 주파수, 숙임각에 따라 계수( $P_1 \sim P_6$ )가 정의 되어 있다.

$$\sigma_0 = P_1 + P_2 \exp(-P_3\theta) + P_4 \cos(P_5\theta + P_6) \quad (11)$$

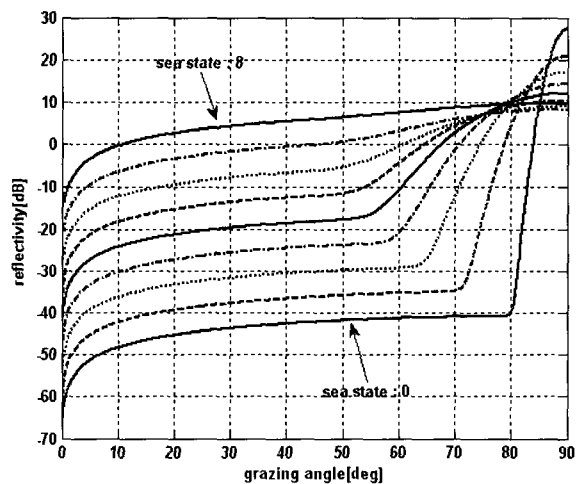
그림 5는 지면의 종류와 숙임각에 따른 반사 계수이다.

2) Morchin 모델

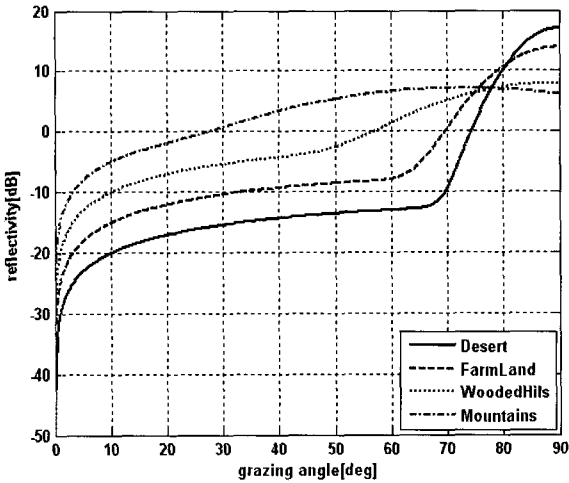
Morchin 모델은 해면의 상태에 따른 반사계수와 사막(desert), 농장(farm land), 나무로 덮힌 언덕(wooded hills), 산(mountain)에 대한 반사계수 모델이다. 그림 6은 해면의 상태에 따른 반사계수이며, 그림 7은 사막등의 지면 조건에 대한 반사계수이다.



[그림 5] 지면 종류에 따른 반사계수 [Ulaby 모델]



[그림 6] 해면 상태에 따른 반사계수 [Morchin 모델]



[그림 7] 지면 종류에 따른 반사계수 [Morchin 모델]

### 3. 항공기 탑재 비행 시험(CFT)

#### 가. 시험 시나리오

시험 시나리오는 항공기의 운행 속도와 운행 고도 그리고 비행 가능 시간 등의 항공기 자체의 제한 사항과 탐색기 운용시간 등의 탐색기와 관련된 제한 사항 그리고 조종사가 직접 탐색기를 통제 및 제어해야 하는 등의 제한 사항으로 인해 다음과 같이 설정하였다. 우선 시험 대상 지면은 측정결과와 반복 재현성이 좋은 평지(농지)와 넓고 편평한 구역을 쉽게 찾을 수 있는 해면과 많은 인공 구조물을 포함하는 도시와 공단 지역으로 결정하였다. 그리고 항공기의 비행 속도는 KT-1 기본 훈련기의 최고 비행속도로 결정하였으며, 고도는 3,000ft, 5,000ft, 6,500ft로 결정하였고, 안테나 숙임각은 20°로 설정하였다.

#### 나. 시험 장치 구성

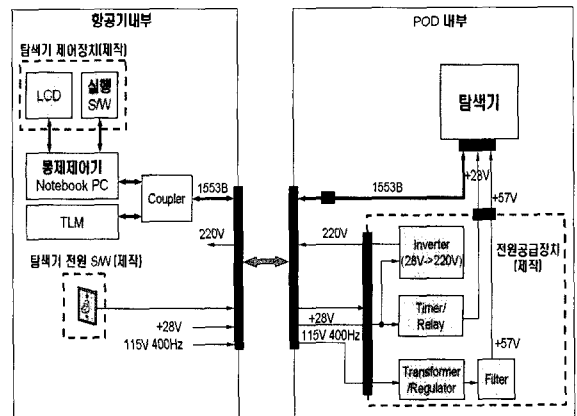
시험 장치는 그림 8과 같이 크게 항공기 내부 장치와 POD 내부 장치로 나뉘어 진다. 항공기 내부에는 탐색기 통제제어기, 전원 제어장치, 그리고 원격 측정 장치로 구성되며, POD 내부에는 탐색기와 전원 공급 장치로 구성된다. 한편, 그림 9의 CFT 시험 장면과 같이 공군 기본 훈련기의 주익 하방에 탐색기가 내장된 POD와 좌우 무게 중심을 맞추기 위한 더미 POD

를 장착하였다. 그리고 후방 조종석에 통제 장비(통제 컴퓨터, LCD모니터, 전원스위치)를 부착하여 부조종사가 탐색기를 통제하도록 하였다.

시험에 사용된 탐색기는 송신 주파수가 Ku 대역이고, 송수신 신호에 대해 모두 수직 편파 특성을 갖는 안테나를 채택하고 있으며, HPRF 모드로 운용되는 대공 유도탄용 초고주파 탐색기이다.

#### 다. 시험 내용

1회의 비행(1 sortie)으로 하나의 고도에 대해 해면, 농지, 공단, 도시 등 4종류의 지면 조건에 대한 클러터전력을 측정하였다. 총 6회의 비행 시험을 통하여 도시를 제외한 나머지 3종류의 지면 조건에 대해 2번씩 클러터 전력을 측정하였고, 도시에 대해서는 3,000ft와 6,500ft에서 각각 1회만 시험을 수행하였다.



[그림 8] 시험 장치 구성도



[그림 9] CFT 시험 장면

### 4. 측정 결과 및 분석

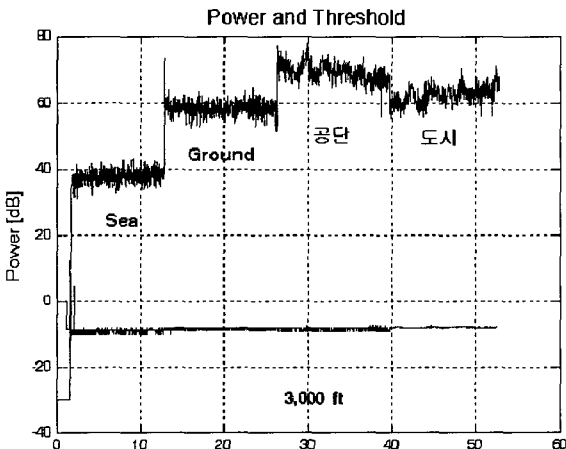
가. CFT를 통한 주엽 클러터 전력 측정 결과

그림 10은 고도 3,000ft에 대해 1회의 비행 시험을 통하여 탐색기의 임계값(threshold level)과 각각의 지면 조건에 대한 주엽 클러터 전력의 크기를 측정된 결과이다. 해면인 경우 주엽 클러터 전력이 가장 작게 나타났으며, 공단의 경우 상대적으로 가장 크게 나타났다.

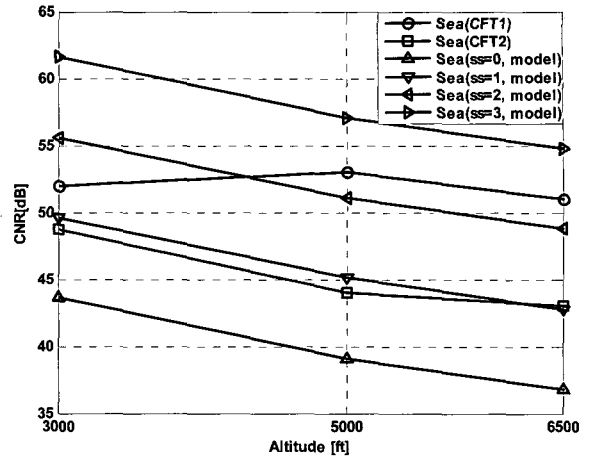
나. 고도 및 지면 조건에 따른 클러터 전력 비교

CFT 결과로부터 각각의 지면 조건에 대한 고도별 잡음 전력 대 주엽 클러터 전력비(CNR : Clutter to Noise Ratio)를 구하고 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 그림 11은 해면에 대한 고도별 CNR을 구한 결과이다.

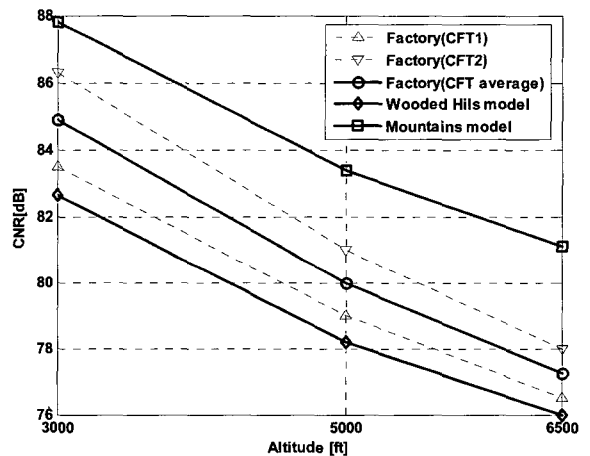
해면 조건에 대한 2회의 CFT 결과가 다소 차이나는 것은 시험 당시 해면 상태의 차이로 인한 것으로 판단된다. 첫 번째 CFT(CFT1)에서 해면 상태는 약 2와 3사이로 판단되며, 두 번째 CFT(CFT2) 당시 해면 상태는 0과 1사이이며 1에 가까웠던 것으로 판단된다. 한편 공단에 대한 CNR은 2번의 시험 결과가 비슷하게 나타났으며, Morchin 모델의 'Wooded Hills'와 'Mountains' 모델 사이 값으로 나타났다. 도시에 대한 CNR은 3,000ft와 6,500ft에 대한 1회의 실험 결과에 의하면, Ulaby 모델의 'Trees'와 'Grass'사이의



[그림 10] 주엽 클러터 전력 측정 결과



[그림 11] '해면'에 대한 CNR

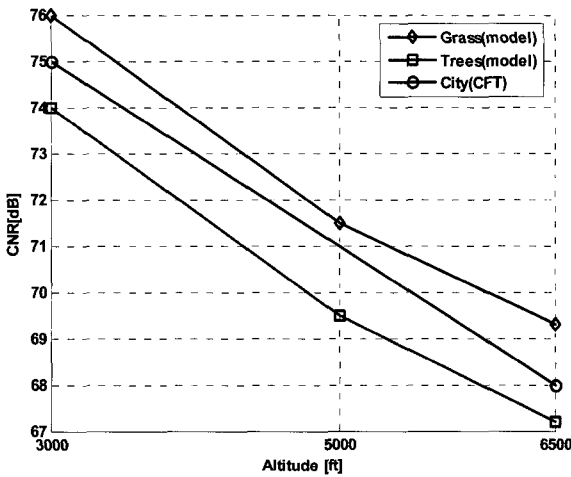


[그림 12] '공단'에 대한 CNR

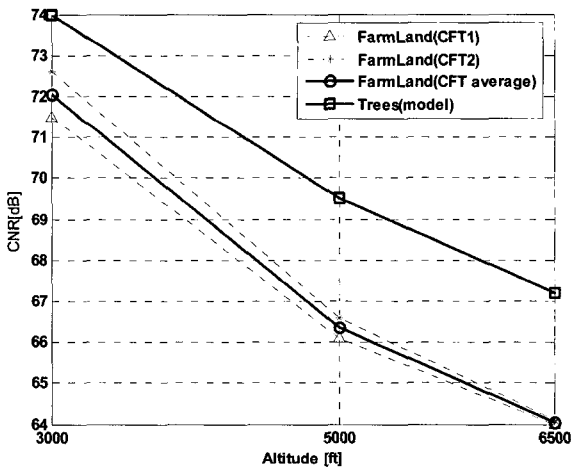
[표 1] 잡음 전력 대 주엽 클러터 전력비(CNR)[dB]

지역		해면	농지	공단	도시			
고도 (ft)	3,000	52.0	48.7	71.5	72.6	83.5	86.3	75.0
	5,000	53.0	44.0	66.1	66.6	79.0	81.0	-
	6,500	51.0	43.0	64.0	64.1	76.5	78.0	68.0

값을 갖는 것으로 나타났다. 농장에 대한 CNR은 2회의 CFT 결과가 거의 비슷하게 나타났고, Ulaby 모델의 'trees'보다 작게 나타났다. 표 1은 CFT 결과로부터 4종류의 지면 조건에 대해 고도별 CNR을 구한



[그림 13] '도시'에 대한 CNR



[그림 14] '농장'에 대한 CNR

결과이다. 공단에 대한 CNR이 가장 크게 나타났고, 해변일 때 CNR이 가장 작았다.

다. 4가지 지면 조건에 대한 반사계수 추정

주엽 클러터 신호 전력으로부터 반사계수를 추정하였다. 그림 15에서 수평방향의 유도탄 진행 방향에 대해 안테나는 20°의 숙임각을 가지며, 도플러 셀의 주파수 해상도를 고려할 때 주엽 클러터 신호의 최대값은 식 (12)로부터 안테나 숙임각에 대해 2.5°의 빔폭에 해당되는 송신 신호가 지면에 의해 반사되어 수신 되는 것으로 가정하였다.

$$\Delta f_d = \frac{2V_M}{\lambda} [\cos(20^\circ - \Delta\theta) - \cos(20^\circ + \Delta\theta)] \quad (12)$$

한편 안테나의 주빔이 지면과 이루는 영역은 장축의 길이가 a, 단축의 길이가 b인 타원으로 가정하였고, 따라서 면적 A는  $\pi \cdot a \cdot b$ 로 구해진다.

탐색기로 수신된 클러터 전력은 식 (13)으로 표현되고, 식 (14)로부터 클러터 RCS를 구할 수 있다. 그리고 식 (15)와 (16)을 통하여 지면의 반사계수를 구할 수 있다.

$$P_{clutter} = \frac{P_a \cdot G_{patch}^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_{patch}}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \quad (13)$$

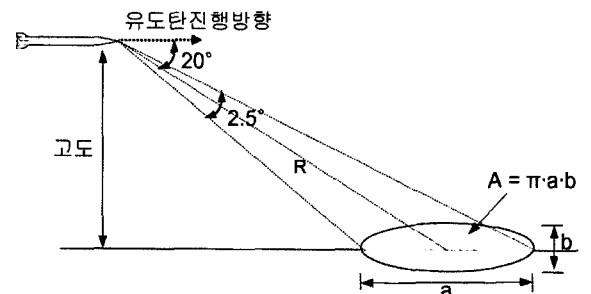
$$\sigma_{patch} = \frac{P_{clutter} \cdot (4\pi)^3 \cdot R^4}{P_a \cdot G_{patch}^2 \cdot \lambda^2} \quad (14)$$

$$\sigma_{patch} = \sigma_0 \times A \quad (15)$$

A : 주빔이 지면과 이루는 영역의 면적

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{patch}}{A} \quad (16)$$

표 2는 CFT 결과로부터 추정된 반사계수이다. '해면'을 제외한 '농지', '공단' 그리고 '도시'에 대해 추정된 반사계수는 고도의 변화에 따라 크게 차이가 나지 않았다. 그러나 '해면'의 경우에는 고도에 따라 반사계수가 다르게 추정되었는데, 이것은 각각의 실험을 수행할 당시 '해면'의 상태가 동일하지 않았기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 즉, 고도 3,000ft에 대한

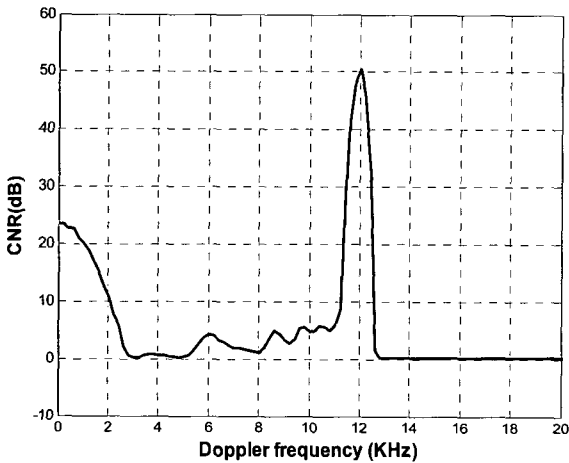


[그림 15] 지면에 대한 반사계수 추정

[표 2] CFT 결과로부터 추정된 반사계수(속임각 20°)

고도(ft)	추정된 반사계수 (dB)			
	해면	농지	공단	도시
3,000	-43.5	-24.0	-12.0	-20.5
5,000	-37.2	-24.1	-11.2	-
6,500	-37.0	-24.0	-11.5	-20.0

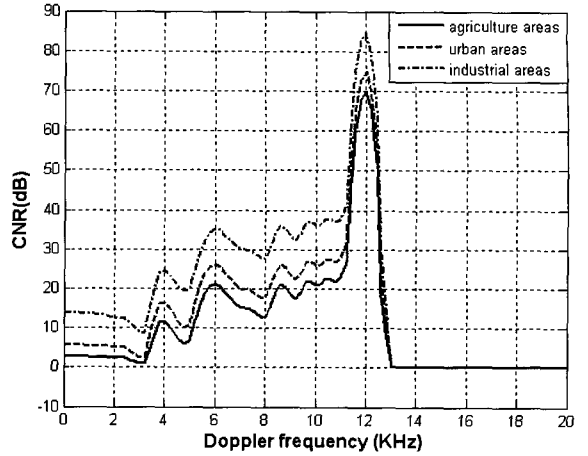
\* 고도 5,000ft, 도시에 대한 실험 결과 없음.



[그림 16] '해면'에 대해 예측된 CNR

실험 결과로부터 추정된 반사계수는 -43.5dB로 해면의 상태가 0인 경우의 반사계수와 1인 경우의 '해면' 모델에 대한 반사계수의 차이 값으로 나타났으며, 5,000ft와 6,500ft에 대한 실험 결과로부터 추정된 반사계수는 약 -37dB이며, 이는 해면 상태가 1과 2사이인 경우의 반사 계수 값이다.

CFT 시험 결과로부터 안테나 속임각이 20°일때, 해면에 대한 반사계수는 Morchin의 '해면' 모델과 비슷하게 나타났다. 그러므로 다른 안테나 속임각에 대해서도 Morchin의 '해면' 모델과 유사하게 나타날 것으로 가정 하고, 클러터 예측 프로그램에서 해면에 대한 반사계 수 모델은 Morchin 모델을 적용하였다. 한편 농지에 대해서는 Ulaby의 'Trees'모델과 'Grass' 모델의 평균값에 대해 5dB 작은 값을 반사계수 모델로 가정하였으며, '공단'에 대해서는 Ulaby의 'Road surface'모델과 Morchin의 'Desert'모델의 평균값으로



[그림 17] 예측된 CNR(농지, 도시, 공단)

가정하였다. 마지막으로 '도시'에 대해서는 Ulaby의 'Trees'모델과 'Grass'모델의 평균값을 반사계수로 가정하였다. 그림 16은 '해면'에 대해 예측 프로그램을 통해 구해진 CNR이며, 그림 17은 '농지', '공단', '도시'에 대해 예측된 CNR이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 대공 유도탄용 탐색기를 이용한 항공기 탑재 시험(CFT)을 통하여 해면, 농지, 도시, 공단 등에 대한 주엽 클러터 전력을 측정하고 그 결과를 제시하였다. 그리고 측정 결과로부터 각각의 지면 조건에 대한 반사계수를 추정하였으며, 탐색기가 주로 운용될 지면 조건에 대한 클러터 예측 프로그램을 개발하였다.

예측 프로그램은 국외 문헌을 참고로 하여 개발하였고, CFT는 수평 비행하는 항공기에 탐색기를 탑재하고 안테나 속임각을 20°로 고정 한 후, 고도를 3,000ft, 5,000ft, 6,500ft로 달리하며 지면에 대한 주엽 클러터 전력을 측정하였다. 측정 결과 해면의 경우 주엽 클러터 전력이 가장 작고, 공단의 경우에 가장 크게 나타났다. 그리고 주엽 클러터 전력으로부터 각각의 지면에 대한 반사계수를 추정하였는데, 해면의 경우 반사계수는 해면의 상태에 따라 약 -37dB와 -43.5dB로 약 7dB 차이가 났으며, 농지에 대한 반사 계수는



약 -24dB, 공단은 약 -11.5dB, 도시는 약 -20dB로 나타났다.

본 연구에서는 탐색기가 실제 운용될 국내 여러 가지 지면 조건에 대해 고도를 달리하며, 클러터 전력을 측정하였고, 측정 결과로부터 각각의 지면 조건에 대한 반사계수를 추정하였다. 그러나 항공기 탑재 시험을 위한 비행 횟수의 제한으로 인해, 다양한 안테나 수직각에 대한 클러터 전력은 측정할 수 없었다. 앞으로 많은 비행 시험을 통하여 보다 다양한 지면 조건과 비행 고도, 그리고 전체 수직각에 대한 지면 반사 계수 모델의 개발이 요구된다. 또한 개발된 지면 반사 계수 모델과 예측 프로그램을 통해 실제 탐색기가 운용될 국내 여러 가지 지면 조건에 대한 클러터의 영향을 분석 할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] G. W. Stimson, Introduction to Airborne Radar 2nd ed., Artech House, 1998.
- [2] G. Morris, L. Harkness, Airborne pulsed doppler radar 2nd ed., Artech House, 1996.
- [3] F. T. Ulaby, M. C. Dobson, Handbook of radar scattering statistics for terrain, Artech House, 1989.
- [4] Byron Edde, Radar : principles, technology, applications, Prentice Hall, 1993.
- [5] W. C. Morchin, Airborne Early Warning Radar, Artech House, 1990.