

# 레이다 클러터 데이터 및 모델에 관한 연구 (Analysis of Radar Clutter Data and Models for Terrain and Sea)

이용택\* · 서한교\* · 김영수\*

(Yong-Taek Lee, Han-Kyo Seo, Young-Soo Kim)

## 요 약

본 논문에서는 레이더 클러터 자료와 실험적 또는 이론적 모델을 모아 분석하였다. 원격탐사에 대한 자료와 모델이 폭넓게 연구되었는데 이는 비교적 세부적인 목표물에 대한 자료가 풍부한 장점이 있기 때문이다. 실제 레이더 설계에는 원격탐사에 사용되는 입사각 보다 큰 영역(near grazing angle)의 클러터 자료 및 모델이 필요한데 이에 대한 연구는 더 계속되어야 한다.

## ABSTRACT

Available data for the radar clutter, and the empirical and the theoretical models for the radar clutter have been collected and analyzed. Data sets and models from the remote sensing field have been studied extensively. Although the grazing angles used in remote sensing is larger than the angles normally encountered in radar clutter application, remote sensing field has the merit of abundance of data in much more detailed target classes. The remote sensing model is also superior to the normally used clutter models in the sense that each target class has its own model, rather than being generally characterized by assumed roughness parameters.

## I. 서 론

레이더 클러터는 원하는 표적으로부터의 신호를 방해할 수 있는 모든 신호 또는 잡음 등을 일컫는 말로서, 레이더 시스템의 설계자는 클러터에 대한 충분한 정보를 가지고 있어야 적절한 기법을 도입하여 불필요한 신호를 제거하려고 노력할 수 있다.

그러나 대부분의 경우 클러터는 송신되는 전파가 자연환경 그 자체에 의해 반사 또는 산란되는 것이기 때문에 레이더가 설치되는 장소 및 시간에 따라 다양한 특성을 지니므로, 클러터를 예측하거나 또는 계산해 내는 것은 어려운 일이다. 따라서 레이더가 생긴 이래로 수많은 실제 측정이 수행되어 왔고, 또한 이를 토대로 한 모델식들이 발표되었다. 그러나 많은 실험결과들이 비밀로 분류되어 발표되지 않고 있으며, 발표된 일부 데이터들은 레이더 파라미터나 환경 조건들이 완전치 못하고, 또한 그 모델식들을 어느

---

\*포항공과대학 전자전기과

특정한 레이더 설계에 그대로 반영할 수 있는 지는 아직 미지수인 단계이다.

본 논문에서는 자연환경 자체를 표적으로하는 원격탐사(Remote Sensing) 분야의 데이터 및 모델들을 이용하여 클러스터 모델로의 적용 가능성을 타진하였다.

## II. 원격 탐사 데이터 및 모델

### 1. 자연 환경의 분류

자연 환경은 크게 해양, 호수, 강 등의 수자원과 기타 육지로 나눌 수 있는데 육지 지역은 또 여러가지로 세분될 수 있다. Ulaby는 원래 광선을 이용한 원격탐사용의 Anderson 분류방식을 약간 수정하여 초고주파(레이더) 원격탐사용으로 육지 지역을 세분하였다<sup>(1)</sup>. 이에 의하면 육지 지역은 (1) 식물이 없거나 아주 적은 땅(Barren and sparsely vegetated land), (2) 식물이 있는 땅(Vegetate land), (3) 도시 지역(Urban land), (4) 눈 덮인 땅(Snowcovered

land) 등으로 대별되며, 이 각각은 또 레이더 신호 특성에 주된 영향을 끼친다고 판단되는 표면거칠기, 경작물(식물)의 종류, 육지의 사용방법 및 표면 근처의 유전율에 따라 세분된다. 이러한 분류방식은 실제 지질학, 지리학, 또는 생태학적 분류방식과는 별 관계가 없으나, 레이더 클러스터 분류 목적으로는 별 무리 없이 적용될 수 있으리라 판단된다.

그림 (1)은 Ulaby의 기본 분류도를 보이고 있는데, 그림에 있는 숫자는 분류코드의 한 예로서, 식물이 없는 땅(Barren land : 코드 2100)의 평균 클러스터 특성은 Rocky soil (코드 2110), Bare soil (코드 2120) 및 Crop residue (코드 2130) 등의 평균으로 구할 수 있을 것이다.

### 2. 원격탐사 데이터베이스

일반적으로 원격탐사 데이터는  $\sigma_0$ 로 발표되는데, r은 수신되는 편향(polarization), t는 송신 안테나의 편향이고  $\sigma_0$ 는 단위면적당의 backscattering cross section 또는 간단히 backscattering coefficient로

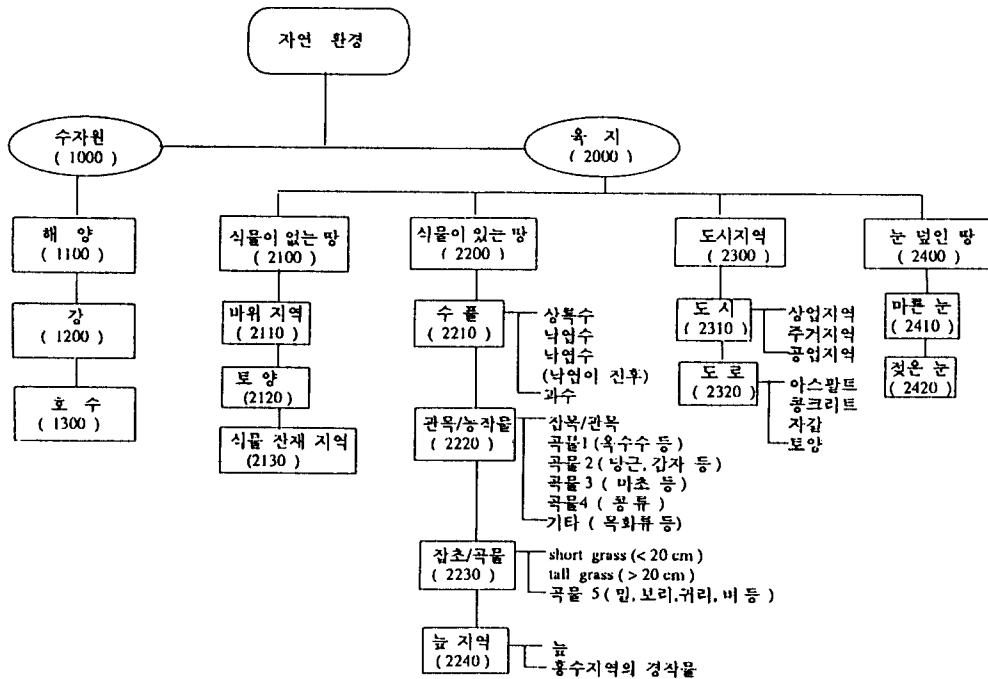


그림 1. 원격탐사용 자연환경 분류도

Fig.1 Classification of natural environment for remote sensing.

불리운다. 사용되는 레이더 시스템이 narrow beam 을 가지는 경우 다음과 같이 정의한다. 이때  $\sigma_{rt}$  = RCS in backscattering direction, A=관측면적 (illuminated area) 이다.

$$\sigma_{rt} \cong \sigma_{rt} / A$$

각종 지형지물의  $\sigma^0$ 가 광범위하게 측정되기 시작한 것은 1950년대 및 1960년대로, 미국 오하이오 주립대학(Ohio State University)에서는 트럭 탑재용 시스템을 사용하여 10GHz, 15.5GHz 및 35 GHz에서의 수많은  $\sigma^0$  데이터를 발표하였다. 비슷한 시기에 미 해군연구소(Naval Research Lab)에서도 항공기 탑재용 시스템으로 0.428GHz에서 8.8GHz까지의 데이터를 측정하였다. 1960년대 중반 미국 NASA에서는 13.3GHz의 도플러 scatterometer를 사용해서  $\sigma^0$ 를 측정하였다.

상기한 데이터들은 주로 하나 또는 몇 개의 특정 주파수에서 측정한 것이므로 어느 특정한 표적의 주파수 특성을 나타내는데 적합치 않으므로 미국의 캔사스 대학 (University of Kansas)에서는 1GHz에서 18GHz까지 연속적인 데이터를 측정할 수 있는 트럭 탑재용 시스템(TRAMAS) 및 헬리콥터 탑재용 시스템(HELOSCAT)을 개발하여 1970년대에서 1980년대에 이르기까지 여러 지형지물에서 광범위한 데이터를 보고하고 있다. 또 최근 미시간대학(University of Michigan)에서는 1.6GHz, 5 GHz 및 10 GHz에서의 polarimetric scatterometer를 개발하여 지형지물의 편향과 특성을 조사, 발표하고 있으며, 기타 캐나다, 유럽, 일본, 중국 등지에서 비슷한 종류의 시스템들을 사용하여 측정을 계속하여 왔다.

이러한 수많은 측정이 수십년간 계속되어 왔고 현재에도 계속되고 있으나, 이것들을 하나의 거대한 데이터베이스로 만드는 작업은 아직 완성되지 않았다. 가장 큰 문제점은 각각의 시스템상의 캘리브레이션 차이점인데, Ulaby는 그 나름대로의 근거를 갖고 이 데이터들을 교정하여 하나의 책으로 엮어 냈다<sup>(1)</sup>. 이 책이 본 연구의 기본 데이터베이스라고 할 수 있고 또 캔사스 대학의 연구보고서들도 많은 데이터를 제공하고 있다. 또한 최초의 인공위성 프로그램이라고 할 수 있는 Skylab를 비롯한 여러 위성이 측정한 데이터도 사용되었으며, 기타 미 해군연구소, 미 오하이오 주립대학, Goodyear Aerospace Corporation

등의 데이터 및 모델들을 사용하였다.

### 3. 각 지형지물의 데이터 및 모델

원격탐사용  $\sigma^0$ 데이터 및 모델은 크게 두 가지로 대별된다. 하나는  $\sigma^0$ 를 데이터 파라미터(입사각, 주파수 및 편향)의 함수로 측정하고 모델화한 것이고, 또 하나는  $\sigma^0$ 를 관측하는 표적물의 특성(논의 깊이, 습기, 농작물의 상태, 지표면의 습기 등)등의 함수로 측정하고 모델화한 것이다. 원격탐사의 목적중 레이더 신호( $\sigma^0$ )로부터 특정 표적물의 특성을 추정해내는 데는 상기한 두 번째의 모델이 필요하고, 광범위한 지역을 관찰해서 이 지역을 큰 표적별로 분류(land use classification)해 내는 데는 상기한 첫 번째 모델이 유효하다.

레이더 클러터의 목적으로는  $\sigma^0$ 를 데이터 파라미터의 함수로 표시한 첫 번째 모델이 더 유효하리라 판단되지만, 관측하는 표적물이 가질 수 있는 특성(physical characteristics)의 범위내에서 가능한  $\sigma^0$ 의 범위를 추정해내는 데는 두 번째 모델이 유효하므로 상기 1절에서 분류한 표적의 종류에 따라 가용한 모든 데이터 및 통계학적인 모델들을 정리하였다.

#### 3.1 식물이 없는 땅(Barren Land : 분류기호 2100)

이 지형은 식물이 없는 것을 특성으로 하며, 바위 지역, 화산지역, 일반토양 및 경작물이 없는 농토를 총칭한다.

##### 3.1.1. 평균치 및 모델

X 밴드에서 HH, HV 및 VV 편향에서의 barren land의 평균  $\sigma^0$ 는 다음 그림(2)와 같다<sup>(1)</sup>. 이 평균치의 입사각에 따른 변화를 반복 최소자승법과 비선형 곡선근사법에 의해 표시하면 다음과 같은 파라미터 모델식을 얻는다.<sup>(1)</sup>

$$\sigma^0(\text{dB}) = P_1 + P_2 \exp(-P_3\theta) + P_4 \cos(P_5\theta + P_6)$$

여기서  $\theta$ 는 라디안으로 표시된 입사각이다. 또  $P_1$ 에서  $P_6$ 까지의 파라미터는 각 주파수 및 편향별로 다른 값을 갖는다. 이 파라미터 값들은 결론에서 다른 지형지물들의 값과 함께 요약하였다.

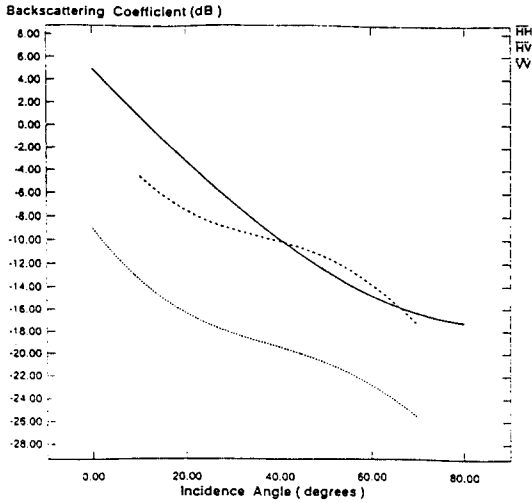


그림 2. X밴드에서 각 편향에 대한 Barren land의 평균  $\sigma^0$

Fig.2 Average  $\sigma^0$  of barren land at X-band.

### 3.1.2 표면거칠기에 따른 $\sigma^0$ 의 변화

식물이 없는 땅의  $\sigma^0$ 는 표면거칠기에 따라 매우 큰 변화를 갖는다. 다음 그림 (3)은 여러 주파수에서

표면거칠기에 따른  $\sigma^0$ 의 변화를 보여주고 있다<sup>(2)</sup>. 원래 이러한 측정은 표면거칠기가 아닌 다른 특성, 즉 습기 등을 측정하는데  $10^0$  정도의 입사각을 사용하면 표면거칠기에 상관없이 그 원하는 특성을 결정할 수 있다.

### 3.1.3 토양의 수분함량에 따른 $\sigma^0$ 의 변화

토양의 수분함량도 표면거칠기와 함께 토양의  $\sigma^0$ 를 결정하는 중요한 요소이다. 그림 (4)는 이 관계를 보여주고 있는데<sup>(2)</sup>, 수분함량과 표면거칠기는 완전히 독립적이지 아니므로 측정된  $\sigma^0$ 로부터 토양의 수분함량을 추정하는 것은 불가능하다(상기 3.1.2 절에서 논의된 경우를 제외하고).

### 3.2 수풀(Trees, 분류기호 2210)

이 지형에서는 상록수, 낙엽수 또는 낙엽이 떨어진 상태냐에 따라 다양한  $\sigma^0$ 를 가진다. 그러나 나무의 크기, 종류, 높이 및 일정 면적당, 나무의 수효에 따른  $\sigma^0$ 의 변화가 발표된 것은 아주 적다. X 밴드에서 HH, VV 및 HV 편향에서의 전체 평균  $\sigma^0$ 는 다음 그림 (4)와 같다<sup>(1)</sup>.

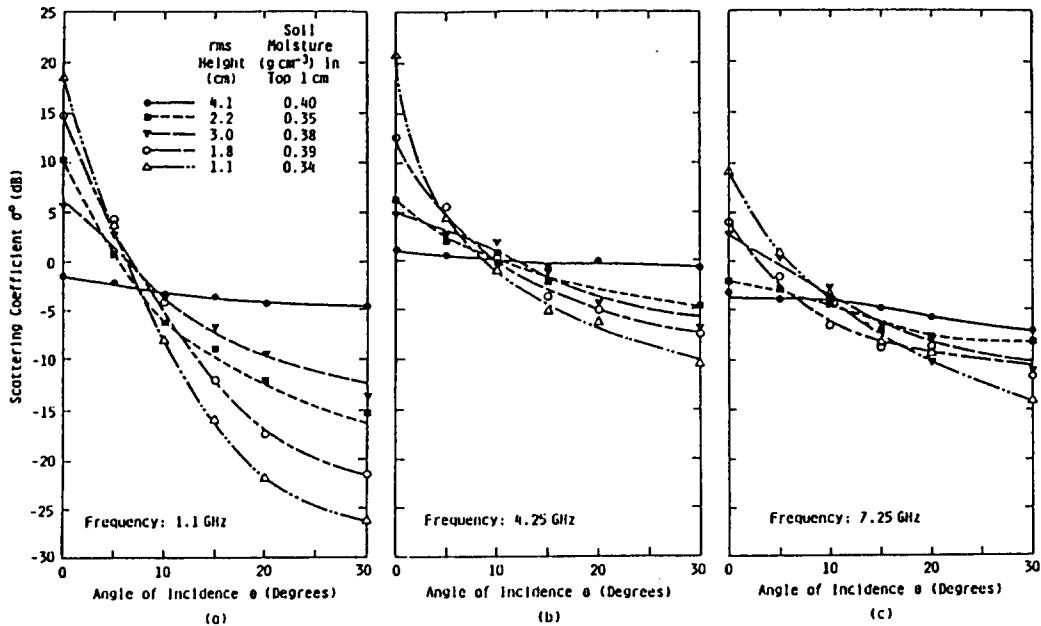


그림 3. (a) 1.1GHz (b) 4.25GHz (c) 7.25GHz일때  $\sigma^0$ 의 거칠기 효과

Fig.3 Effect of roughness in  $\sigma^0$  for (a) 1.1GHz, (b) 25GHz, (c) 7.25GHz

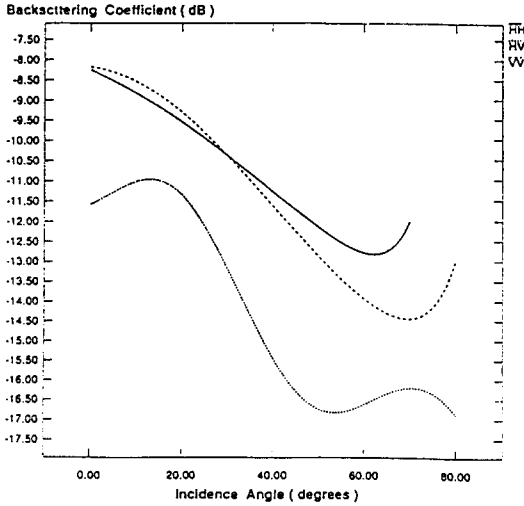


그림 4. X밴드에서 각 편향에 대한 수풀의 평균  $\sigma^0$   
 Fig.4 Average  $\sigma^0$  of trees at X-band for each polarization

수풀의  $\sigma^0$ 에 대한 모델 중 의미가 있다고 판단되는 것은, 수풀을 여러 크기와 위치를 가진 산란요소들(scatterers)의 random 분포로 보아서  $\sigma^0$ 의 입사각에 대한 변화가  $\cos\theta$ 일 것으로 가정하는 것이다.

$$\sigma^0(\theta) = K \cos \theta$$

$$\gamma(\theta) = \sigma^0(\theta) / \cos\theta = K = \text{const}$$

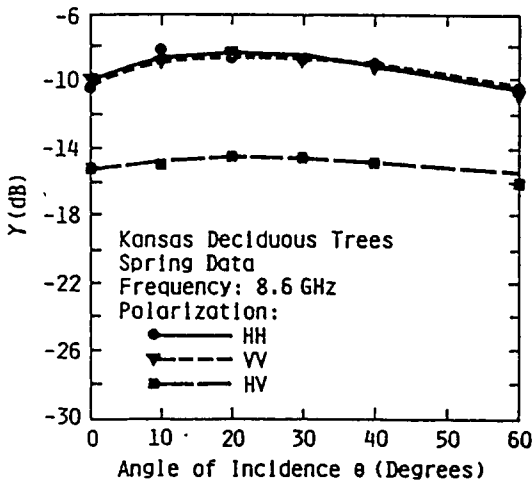


그림 5. 잎이 있는 낙엽수의  $\gamma(\theta)=K$  모델  
 Fig.5  $\gamma(\theta)=K$  model for deciduous trees with leaves.

실제 측정결과도 비슷한 결과를 보여주고 있다[그림 (5)]. 나무 또는 수풀의 종류에 대한  $\gamma(\theta)=K$  값들이 발표되어 있는 것은 거의 없으나 imaging radar (SLAR, SAR)들의 데이터에서 환산한 결과를 보면<sup>(2)</sup>, 나무의 종류에 따라 6~7 dB, 또 계절에 따라 1~2 dB의 변화를 보이고 있다. 또한 나무의 높이(수령)에 따라  $\sigma^0$ 가 일반적으로 증가한다는 관측도 있다<sup>(2)</sup>.

### 3.3 관목 및 농자물 (Shrubs and Bushy Plants, 분류기호 2220)

이 부류에 속하는 지형에는 그림 (1)에서 보는 바와 같이, 잡목, 관목등과 곡물 1(large grain : 옥수수, 마일로, 사탕수수 등), 곡물 2(root grain : 당근, 양파, 감자, 사탕무우 등), 곡물 3(forage crops : alfalfa 등) 그리고 곡물 4(legumes : 강낭콩, 완두콩 등) 등이 있다. 이 지형에서는 변함은 물론이고, 작물의 토양 습도 및 거칠기 조건에 따라 레이더 반사특성  $\sigma^0$ 가 크게 변함은 물론이고, 작물의 수확기에 이르는 동안 나타나는 기후 및 계절 변동에 따른 작물의 생태조건, 이를테면 잎의 단면적 크기 및 방향성, 줄기와 가지의 유무 그리고 단위 면적당 식물의 수효 밀도 등에 의해서도 크게 변화한다.

#### 3.3.1 평균치 및 모델

그림 (6)은 X 밴드, HH, VV 및 HV편향에서의 곡물 1, 곡물 2, 곡물 3 그리고 곡물 4에 대한 전체 평균  $\sigma^0$ 를 보여주고 있다<sup>(1)</sup>. 그림 (6)은 플랜트로부터의 직접적인 backscattering, 땅으로부터의 직접적인 backscattering, 플랜트와 땅과의 다중 scattering등과 같은 산란 메카니즘을 통해 얻은 측정값의 평균으로 그 해석적 이론배경은 여러 문헌에서 언급되고 있으며 그 모델식은 radiative transfer model 또는 vegetation clutter model 이라고 부른다[2].

$$\sigma_{can}^0(\theta) = \sigma_v^0(\theta) + \gamma^2(\theta)\sigma_s^0 + \sigma_{sv}^0$$

$$\gamma^2(\theta) = \exp(-2\tau \sec \theta)$$

여기서  $\sigma_v^0$ ,  $\sigma_s^0$ ,  $\sigma_{sv}^0$ 는 각각 volume scattering, surface 그리고 surface-volume interaction scattering 성분이다. 또한  $\gamma^2(\theta)$ 는 식물의 이중 투과계수(two-way transmissivity)이고  $\tau$ 는 optical

thickness이다.  $\sigma_{sv}^0$ 은 무시할 경우 여러 입사각과 주파수에서  $\sigma^0$  응답특성을 측정하게 되면, 식물 또는 토양만의 반사특성을 보여주는 임계 입사각 및 임계 주파수 등을 결정할 수 있어서 표적으로부터 원하는 정보에 따라 경작물의 상태, 경작 토양의 조건 등을 추정해 낼 수 있다. 그러나 상기한 모델식은 식물의 canopy를 균일한 산란특성을 나타내는 단일층으로 파악했기 때문에 실험치와 일치하지 않는 측면도 있다.

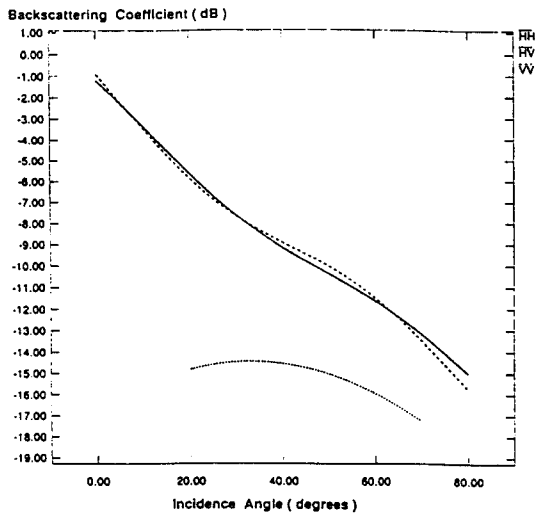


그림 6. X밴드에서 각 편향에 대한 관목 및 농작물의 평균  $\sigma^0$

Fig.6 Average  $\sigma^0$  of shrubs & bushy plants at X-band.

### 3.3.2 토양의 수분함량에 따른 $\sigma^0$ 의 변화

토양만의 반사특성  $\sigma_s^0$ 는 상기 3.1절에서 지적한 듯이 토양의 습도와 표면거칠기에 따라 변화하며 근사적 모델식은 다음과 같다.

$$\sigma_s^0(\theta) = C(\theta) m_s$$

여기서  $C(\theta)$ 는 입사각의 함수로 표면거칠기에 의한 상수항이고,  $m_s$ 는 토양의 단위 부피당 수분함량이다. 식물이 있는 땅에서 토양의 수분함량에 따른  $\sigma^0$ 의 전체 표현은 다음과 같다.

$$\sigma_{can}^0(\theta, m_t) = \sigma_v^0(\theta, m_t) + \gamma^2(\theta, m_t) \sigma_s^0(\theta, m_t)$$

여기서  $m_t$ 는 토양습도를 나타내는 임의 단위이며 각 항의 응답은 식물 및 기저토양의 생태학적 조건 및 레이더 파라미터에 의해 정해진다.

### 3.3.3 계절 변화에 따른 $\sigma^0$ 의 변화

그림 (7)은 17GHz, VV편향에서 1~2주 간격으로 작물의 성장단계(성장기, 성숙기, 수확기)에 걸친 계절 변화에 따른  $\sigma^0$ 의 변동을 기록한 것이다[Attema & Ulaby, 1978]. 그림 (7)에서 보듯이, 입사각  $0^\circ$ 에서  $\sigma^0$ 의 큰 변동은 토양의 거칠기 및 습기때문이며, 5월 말경과 6월 초순에서 볼 수 있는 12dB의 급격한 변화는 토양이 말랐기 때문이다.  $50^\circ$ 에서는 canopy에 의한 감쇠가 토양의 산란성분을 차단하고 있으며 크게 보아 계절별 변동은 8dB이상이다.

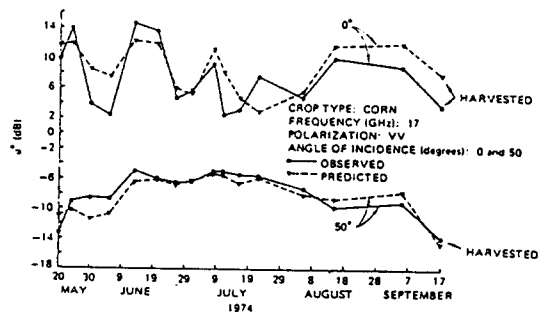


그림 7. 옥수수의 계절별 반사특성의 변화  
Fig.7  $\sigma^0$  of corn for each season.

큰 관점에서 보면 계절별  $\sigma^0$ 의 변동은 식물의 성장과정에 따른 생태조건(식물 자체의 canopy 변화, 식물 높이의 변화, 단위면적당 식물 밀도의 변화) 및 계절별 토양 습도 등의 파라미터 변화 때문에 나타난다고 할 수 있다. 한편 낮과 밤에 의한  $\sigma^0$ 의 변화는 작지만 유한한 값이 존재하는데 이는 식물 자체의 수분 변화 및 식물의 생태활동 등에 기인한다.<sup>(5)</sup>

### 3.4 잡초 및 곡물(Grasses, 분류기호 2230)

이 지형에는 자연목장, 목초, 건초 및 곡물 5(small cereal grain ; 보리, 밀, 귀리, 벼 등) 등이 속한다. 자연목장, 목초, 건초 등은 식물의 높이를 기준으로 하여 tall grass(>20cm), short grass(<20cm) 등으로 다시 세분할 수 있다. 곡물의 높이는 약 1m 정도 까지이며, 기저토양은 일반적으로 편평하다고 볼 수 있다.

### 3.4.1 평균치 및 모델

그림 (8)은 X밴드 HH, VV 그리고 HV 등에서 전체 평균  $\sigma^0$ 를 나타내고 있다.<sup>(1)</sup> 곡물 5(small grain canopy)는 uniform vegetation canopy model이 실험치와 잘 맞지 않는 지형에 속한다. 그 이유는 밀(기타 곡물 5)등의 경우 canopy의 상층부에 존재하는 이삭 또는 열매가 강한 반사 및 감쇠특성을 나타내기 때문이다[Story et al.,1970]. 그래서 canopy를 하층(줄기와 잎)과 상층(이삭 또는 열매)으로 나눈 two-layer model를 적용하면  $\sigma_{can}^0(\theta)$ 의 실험치와 예측모델의 결과가 잘 일치하였다[Hoekman et al., 1982].

$$\sigma_{can}^0(\theta) = \sigma_{st}^0(\theta) = \sigma_{st}^0(\theta) + \sigma_h^0(\theta) + \gamma^2(\theta) \sigma_s^0(\theta)$$

여기서  $\sigma_{st}^0(\theta)$ ,  $\sigma_h^0(\theta)$ ,  $\sigma_s^0(\theta)$ 은 각각 잎, 줄기, 토양 등의 반사성분을 의미하고,  $\sigma_h^0(\theta)$ 는 이삭 또는 열매의 반사성분이다.

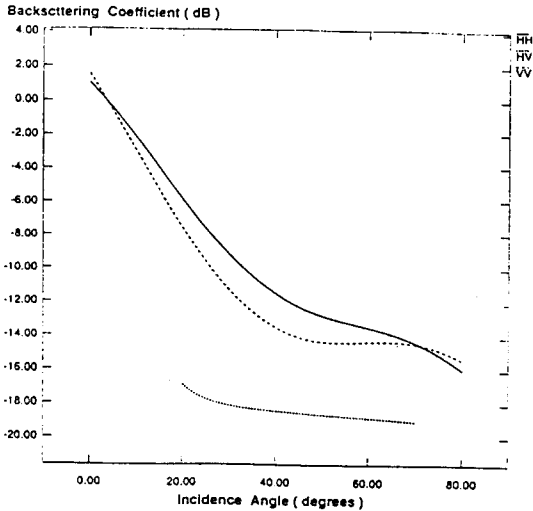


그림 8. X밴드에서 각 편향에 대한 잡초 및 곡물의 평균  $\sigma^0$   
 Fig.8 Average  $\sigma^0$  of grasses at X-band for each polarization

식물높이가 38cm이고 이삭이 핀 tall grass의 반사특성을 X, Ku, Ka밴드, VV 편향에서 측정한 결과  $\gamma(\theta)=K$  모델로 잘 나타내 주는 데이터도 발표된 적이 있다.<sup>(3)</sup>

### 3.4.2 계절 변화에 따른 $\sigma^0$ 의 변화

프랑스 밀밭을 봄철에 측정한 결과에 의하면 [LeToan et al., 1983], 겨울철에 측정한 밀밭과 반사특성이 유사하며 겨울철보다 약 12dB정도 크다. 이런 차이는 밀의 계절별 기하구조 및 생태조건의 변화에 기인할 수도 있고 시스템 calibration 문제로 발생할 수도 있다.

기타 식물이 있는 땅으로는 늪 지역이 있는데, 여기 속하는 지형은 늪(marshes), 습기(swamps), 홍수지역의 경작물(flooded crops)등이 있다. 발표된 자료가 빈약한 관계로 평균치 및 모델을 수집하지 못하였다.

### 3.5 도시지역(Urban lands, 분류기호 2300)

이 지형은 인공구조물이 설치된 도시(상업지역, 주거지역, 공업지역 등, 분류기호 2310), 도로(아스팔트, 콘크리트, 자갈 등, 분류기호 2320) 등이 속한다. 이 지형에서는 건축물의 재질에 따라 반사특성이 예민하게 달라진다.

#### 3.5.1 평균치 및 모델

그림(9)은 X 밴드, HH, VV 편향에서 도로의 전체 평균  $\sigma^0$ 를 그린 것이다. 건물, 탑 등 인공구조물이 설치된 도시지역에서는 상기 3.2, 3.3, 3.4 절에서 논의한 수풀, 관목, 잡초 등보다 반사특성이 건물에 의

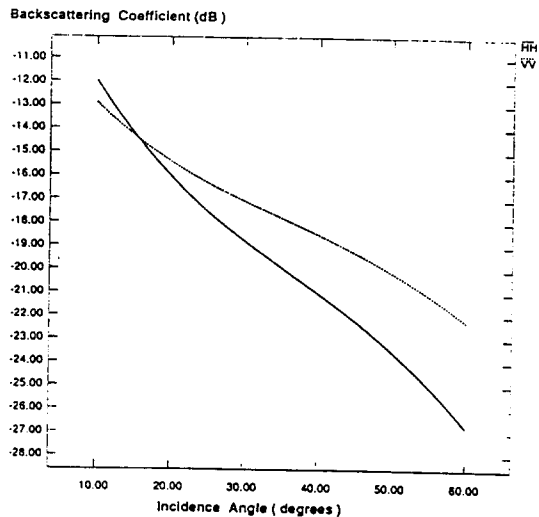


그림 9. X 밴드에서 각 편향에 대한 도로의 평균  $\sigma^0$   
 Fig.9 Average  $\sigma^0$  of road at X-band for each polarization.

한 corner reflector 효과 때문에 더욱 강하게 나타난다.

### 3.5.2 도로의 거칠기에 따른 $\sigma^0$ 의 변화

콘크리트와 아스팔트 도로, 자갈 또는 석탄재가 깔린 도로의  $\sigma^0$ 의 변화를 보면[4], 도로의 자재에 따른 변화는 대략 3-5dB인 반면 거칠기에 의한 변화는 1dB 정도이다.

한편 말라 있는 도로와 젖어 있는 도로는 반사특성이 5dB 차이가 나고 있음이 발표된 적도 있다.[4]

### 3.6 눈(Snow, 분류기호 2400)

이 부류의 지형은 눈으로 덮인 식물 토양, 암석, 도로 등을 포함한다. 눈이 덮인 인공구조물은 제외하고 있으며 다만 눈층의 수분함량에 따라 마른 눈과 젖은 눈으로 나누고 있다. 눈은 주 산란메카니즘이 volume scattering이라고 볼 수 있고, 눈이 덮인 땅은 대부분의 산란체가 기저토양이라기 보다는 불과 수 cm 정도의 눈에 의한 것이다[Currie et al., 1988]. 또한 이 지형의 특징은 눈 자체의 밀도, 결정 크기, 모양에 따라 표면거칠기와 수직단층면이 크게 변하고, 주야간의 수분함량의 변화, 눈의 최소 또는 최대 깊이에 따라서 반사특성이 크게 변한다는 것이다.

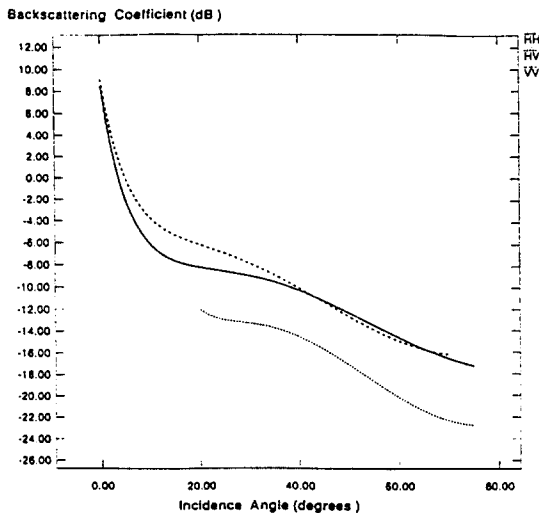


그림 10. X 밴드에서 각 편향에 대한 마른 눈의 평균  $\sigma^0$   
Fig.10 Average  $\sigma^0$  of road at X-band for each polarization.

### 3.6.1 마른 눈 (Dry snow, 분기호 2410)

그림 (10)은 X 밴드, HH, VV 및 HV 편향의 경우 전체 평균  $\sigma^0$ 를 그린 것이다. 마른 눈의 경우 volume scattering 현상이 크게 일어나 상기 3.3.1 절에서 언급한 radiative transfer model로 해석이 가능하다. 또한 마른 눈은  $\epsilon_r$ 이 아주 작기 때문에 표면 거칠기의 영향을 무시할 정도이다.

그림 (11)은 X 밴드, HH, VV 및 HV 편향의 경우 전체 평균  $\sigma^0$ 를 그린 것이다. 젖은 눈은 마른 눈과는 달리 거칠기 효과에 따라  $\sigma^0$ 가 크게 변한다. 따라서 젖은 눈과 마른 눈은 눈의 상층부를 달리 모델해야 한다.

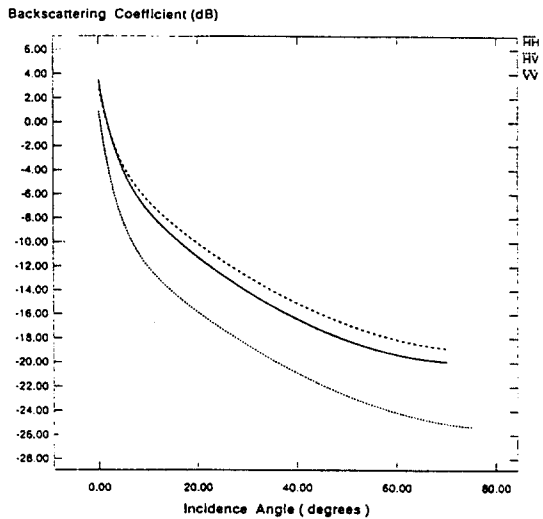


그림 11. X 밴드에서 각 편향에 대한 젖은 눈의 평균  $\sigma^0$   
Fig.11 Average  $\sigma^0$  of wet snow at X-band for each polarization.

일반적으로 주파수가 증가하면 수분함량에 대한  $\sigma^0$ 의 민감도(sensitivity)가 커진다. 그러나 주파수가 증가할수록 수분함량을 추정할 수 있는 선형영역은 좁아진다. 즉 수분함량이 천천히 증가하면  $\sigma^0$ 가 선형관계로 감소하지만 어느 임계값 이상에서는 포화상태에 이른다.

### 3.6.3 시간에 따른 $\sigma^0$ 의 변화

주야간에 눈의  $\sigma^0$ 는 크게 변동하는데 이는 태양광선에 의해 눈의 상층부위가 녹아서 수분함량이 변하기 때문이다[Stiles et al., 1980]. 그림 (12)은 주야



간에 변동하는  $\sigma^0$ 가 높은 주파수에서 감쇠가 크며 그 변동폭 또한 큼을 보여주고 있다(4.6GHz에서 2dB, 35.6GHz에서 15dB). 주야간의  $\sigma^0$ 의 측정자료는 눈의 수분함량을 정확히 추정하고 싶을 때 유용하다.

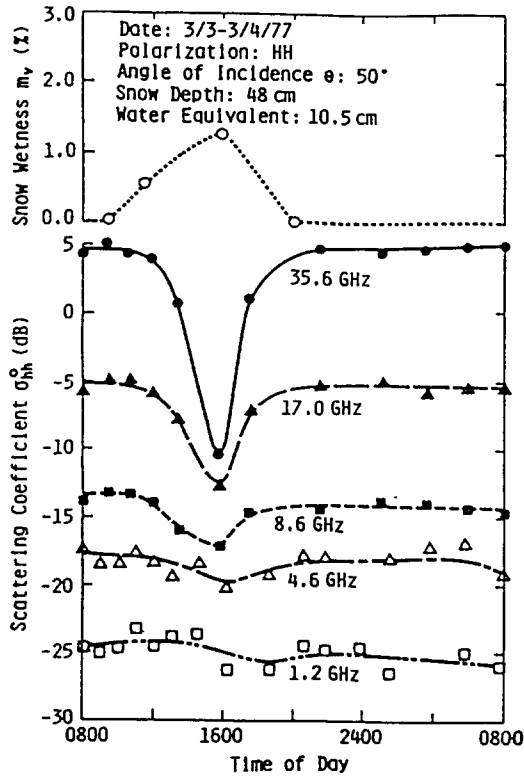


그림 12. 주야간의 수분함량에 따른 반사특성의 변화  
Fig.12  $\sigma^0$  for liquid water content of day & night.

### 3.6.4 눈의 길이에 따른 $\sigma^0$ 의 변화

다른 눈의 경우 vegetation model(cloud model)이 잘 적용되므로 이를 이용해 눈의 깊이에 따른  $\sigma^0$ 의 변화를 예측할 수가 있고, 또 역으로  $\sigma^0$ 에서 부터 쌓인 눈의 깊이를 추정할 수도 있다[Ulaby & Stiles, 1980].

$$\sigma^0 = A - B \exp(-C \times \text{depth})$$

여기서 A,B,C는 주파수, 눈의 특성 등의 함수인데 9GHz에서 A=0.162, B=0.146, C=1.99\* (눈의 밀도)이다. 그림 (13)는 이 모델과 실제 측정치를 보여

주고 있다.

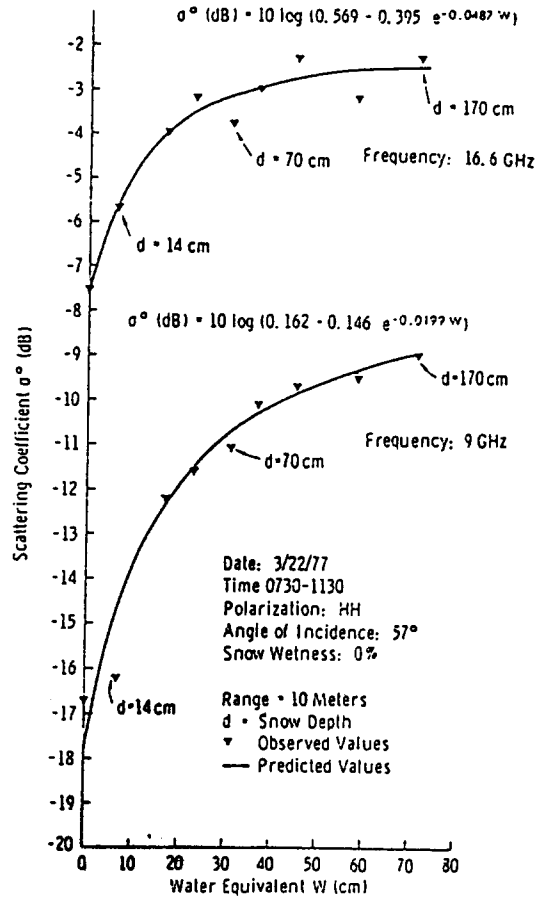


그림 13. 눈의 깊이에 따른 반사특성의 변화.  
Fig.13  $\sigma^0$  for snow depth

### 3.7 해양(Sea, 분류기호 1100)

해양은 지리적 조건이 균일하기 때문에 레이다 반사특성이 잘 알려져 있으며, 다만 국부적으로 달라 타나나는 환경조건(풍향, 풍속 등)에 따라 변할 뿐이다. 해양상태를 기준으로한 레이다 반사특성을 이해하려는 노력은 표적을 방해하려는 레이다 클러터를 조사하기 위해 군사목적을 띠고 시작되었으나, 점차 해양 그 자체의 정보(풍속 및 풍향 벡터의 유도, 파도의 유도 메카니즘 해석 등) 등을 수집하기 위해 Skylab S-193, AAFE RADSAT등의 위성 프로그램 및 aircraft 등을 통해 해양에서의 실험이 수없이 이루어졌다.

3.7.1 평균치

다음 3.7.2 절에서 보이는 것과 같이 해양에서의  $\sigma$ 는 풍속의 강력한 함수이기 때문에, 육지의 표적들과 같이 평균  $\sigma$ 를 설명 또는 모델화 하기 쉽지 않다. Moore와 Fung[1979]은 Skylab scatterometer의 데이터를 평균하여 각 편향에서 다음 모델을 제시하였다.

$$\sigma = A \exp(-\theta/\theta_0)$$

그림 (14)는 13.9GHz에서의 결과를 보여 주는데, e-folding angle  $\theta_0$ 는 여름에는 5-6° 정도로 변화가 작은데, 바람이 강한 겨울에는 7°에서 18°까지 심한 변화를 보여 풍속의 해양  $\sigma$ 에 대한 중요성을 보여 주고 있다.

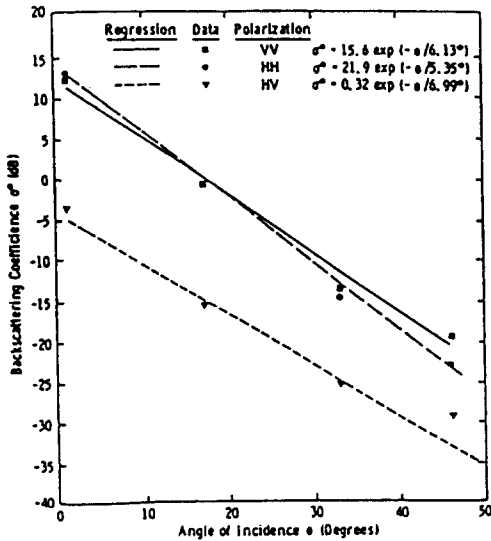


그림 14. 1973년 여름철의 해양의 반사특성  
Fig.14  $\sigma^0$  of ocean in summer 1973

3.7.2 풍속에 따른  $\sigma^0$ 의 변화

미 해군연구소의 자료에 의하면 풍속이 6m/sec 이하에서 풍속에 따라  $\sigma^0$ 가 증가하다가 포화현상을 보이고 있으나[Daley et al., 1973], 사실 이와 같은 포화현상 대신 풍속이 증가하면  $\sigma^0$ 도 계속 증가하는 경우가 더 많이 발표되었다.

그림 (15)은 순풍일때 풍속에 따른  $\sigma^0$ 의 측정값을 보여주고 있다[de STaerke, 1981]. 그러나 수직입사

의 경우 풍속이 증가하면 표면거칠기가 증가하기 때문에  $\sigma^0$ 가 감소하는 경우도 있다.

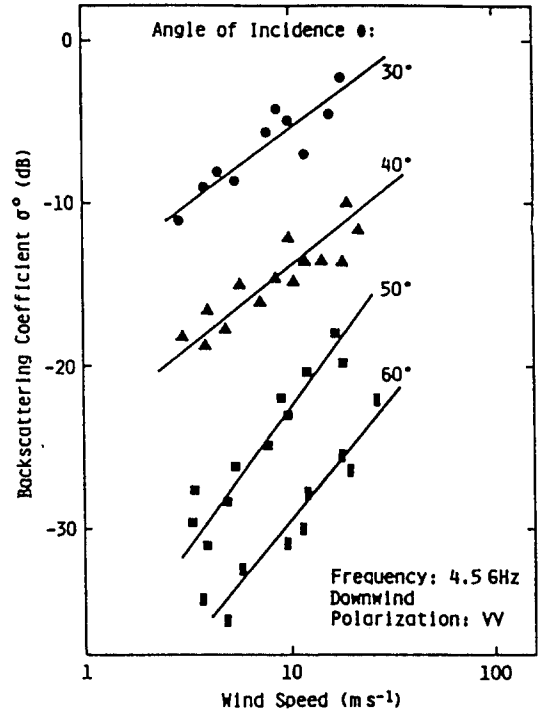


그림 15. 순풍일때 풍속에 따른  $\sigma^0$ 의 변화  
Fig.15  $\sigma^0$  for wind velocity when a fair wind.

3.7.3 풍향에 따른  $\sigma^0$ 의 변화

보통 풍향에 대한 정보는 불확실하기 때문에 비행체를 원형궤도로 운전하면서  $\sigma^0$ 를 측정하면 풍향의 완전한 azimuth 응답을 구할 수 있고 그 실험식은 다음과 같다[Moore & Fung, 1979].

$$\sigma^0 = A + B \cos \phi + C \cos 2\phi$$

여기서 A,B,C는 실험상수이고  $\phi$ 는 azimuth 각도(degrees)이다. 실제 측정결과와 비교하면 crosswind( $\phi=90^\circ, 270^\circ$ )에서 반사특성이 가장 작지만 정확히 최소를 나타내지는 의문이다. 순풍( $\phi=180^\circ$ )과 역풍( $\phi=0^\circ, 360^\circ$ )의 경우 crosswind 보다도  $\sigma^0$ 가 크다.

그림 (16)은 풍속 15노트, grazing angle 45°에서  $\sigma^0$ 의 azimuth 변화를 그린 것이다[Moore et al., 1978].

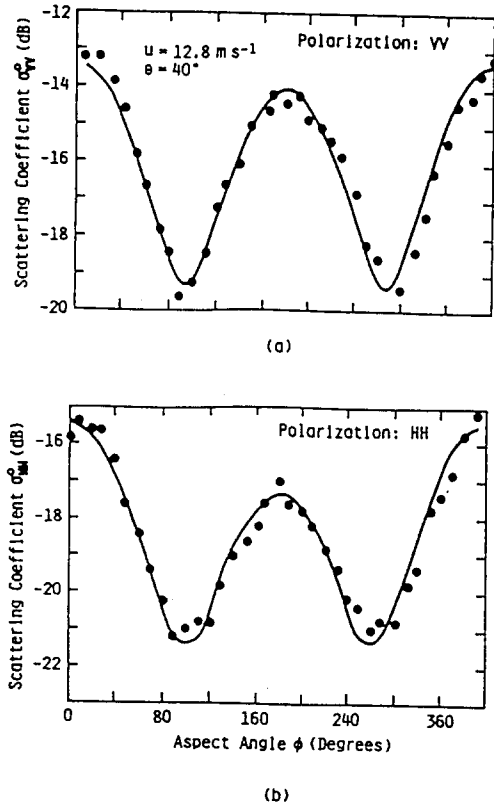


그림 16. 13.9GHz에서 풍향에 따른  $\sigma^0$ 의 azimuth 변화  
 Fig.16 Azimuth variation of  $\sigma^0$  at 13.9GHz for wind direction

### 3.8 데이터가 없거나 거의 희박한 지형지물

본 절에서는 발표된 데이터가 최소하거나 거의 없는 여러 지형지물들에 대해서 언급하고자 한다. 그림 (1)의 원격탐사의 지형분류도를 참고하면 강(분류기호 1200), 호수(분류기호 1300) 등은 육지(분류기호 2000) 안에 있으나 수자원(분류기호 1000)으로 분류되어 있고, 나아가 해양(분류기호 1100)과 같이 넓은 지역에 걸쳐 지리적 균일성을 찾아볼 수가 없다. 이러한 지형에서 레이다 반사특성은 주위 지형의 불규칙한 영향권 안에 속해 있어, 해양과 같은 수자원의 일반적 고찰결과와는 다소 거리가 있을 것 같다.

또한 농작물 중에서 벼(rice)등은 다른 작물 만큼 측정데이터가 많지 않다. 상기 3.4와 3.5절에서 언급한 것과 같이 늪 지역 및 도시지역에서도 불충분하다.

### III. 결 언

상기한 각종 지형지물 중에서 육지(분류기호 2000) 지역을 구성하는 식물이 없거나 아주 적은 땅(분류기호 2100), 식물이 있는 땅(분류기호 2200), 도시지역(분류기호 2300), 눈 덮인 땅(분류기호 2400) 등의 전체 평균  $\sigma^0$ 이 파라미터 값을 X밴드, HH편향에서 요약, 제시하면 표(1)과 같다<sup>(1)</sup>. 표 (1)에서 세부분류역에 대한  $\sigma^0$ 의 평균치는 그림 (17)이고 육지지역의 대 분류별 평균  $\sigma^0$ 는 그림 (18)이다.

표 1. 각종 지형지물에 대한 파라미터 값들(Ulaby model)  
 Table.1 Parameter values for each terrain.

육지 지역	세부 분류지역	$P_1$	$P_2$	$F_3$	$F_4$	$P_5$	$P_6$
식물이 없는 땅 (2100)		4.34	6.67	-0.11	-29.71	0.86	-1.37
식물이 있는 땅 (2200)	수풀 (2210)	-12.08	0.00	-10.00	4.57	1.17	0.58
	관목/농작물 (2220)	-99.0	97.28	0.11	-0.54	5.0	-2.69
	잡초/곡물 (2230)	-33.29	32.98	0.51	-1.34	4.87	-3.14
	늪 지역 (2240)	데이터 불충분					
도시 지역 (2300)	도시 (2310)	데이터 불충분					
	도로 (2320)	-94.47	99.00	0.89	30.0	1.56	-1.92
눈이 덮인 지형 (2400)	마른 눈 (2410)	-13.30	20.05	10.00	4.53	2.93	-1.17
	젖은 눈 (2420)	10.02	7.91	15.0	30.0	0.83	2.07

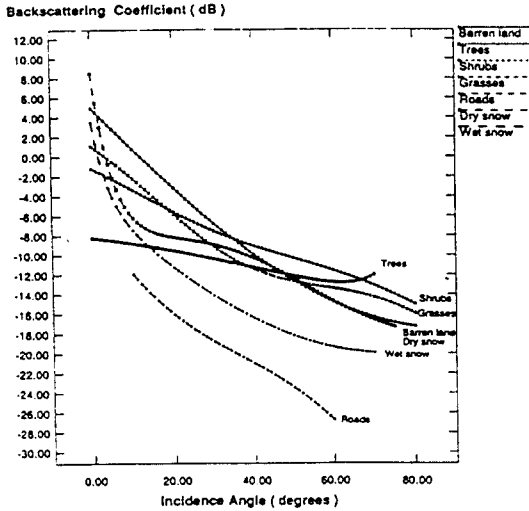


그림 17. 세부 분류지형에서  $\sigma^{\circ}$ 의 변화  
Fig.17 Average  $\sigma^{\circ}$  of terrain classified in to small groups.

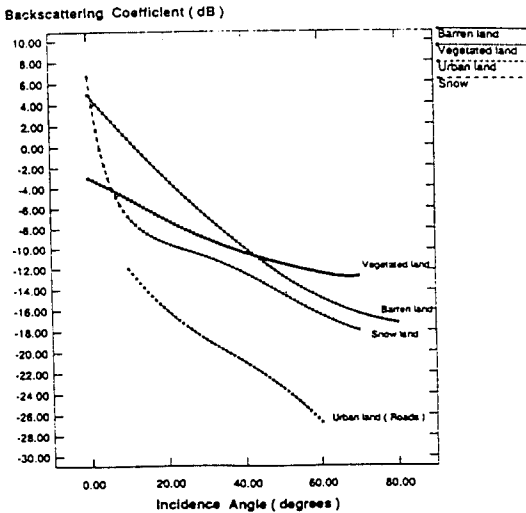


그림 18. 대 분류지형에서의 평균  $\sigma^{\circ}$ 의 변화  
Fig.18 Average  $\sigma^{\circ}$  of terrain classified in to large groups

상기 II.3 절에서 언급한 두 가지 원격탐사 모델 중  $\sigma^{\circ}$ 를 레이다 파라미터 (주로 입사각)의 함수로 표시한 모델들을 요약하면 다음 표 (2)와 같다.

원격탐사 자료는 관련된 기초 이론 및 여러 원리를 동원하여 입사각이 10°에서 80°까지의 범위에서 다양

표 2. 주요 원격탐사 모델들.  
Table.2 Principal remote sensing models.

모 델	적용지역	이론적 근거
1. $\sigma^{\circ}(dB) = P_1 + P_2 \exp(-P_3\theta) + P_4 \cos(P_3\theta + P_4)$ θ in radians	전반	없 음 (data fit)
2. $\sigma^{\circ}(\theta) = K \cos \theta$ 또는 $\gamma(\theta) = \sigma^{\circ}(\theta) / \cos \theta = K = const$	술 농작물	산란체의 random 분포
3. $\sigma_{tot}^{\circ}(\theta) = \sigma_v^{\circ}(\theta) + \gamma^2(\theta)\sigma_s^{\circ} + \sigma_{nr}^{\circ}$ $\sigma_v^{\circ}(\theta) = \frac{\sigma_v \cos \theta}{2K_s} [1 - \gamma^2(\theta)]$ $\gamma^2(\theta) = \exp(-2\tau \sec \theta)$ τ = optical thickness	농작물 논	Radiative Transfer
4. $\sigma^{\circ} = A - B \exp(-C \times depth)$	논	모델 3
5. $\sigma^{\circ} = A \exp(-\theta / \theta_0)$	해양, 일반	없 음 (data fit)
6. $\sigma^{\circ} = A + B \cos \phi + C \cos 2\phi$ A = au $\tau_s(\theta)$ B = bu $\tau_s(\theta)$ C = cu $\tau_s(\theta)$ φ =Azimuth Angle u=wind speed	해양	없 음

한 환경조건 속에서 측정된 데이터를 여러 실험식과 모델식으로 분석하고 있다. 그래서 레이다 클러터 자료보다도 구체적이고 자세한 정보를 설명해 주고 있다. 표적에 관한 주파수 응답 및 편향특성을 기대한 자연환경 속에서 조사한 자료일 뿐만 아니라, 특히 환경조건 및 표면거칠기, 수분함량, 주야간 및 계절별로 장기적인 반사특성을 고찰하고 있다. 전반적으로 레이다 응용으로의 가능성을 한층 높여주는 자료로 볼 수 있다. 그러나 측정지역과 생태계가 다른 지형 및 지역에서도 원격탐사 데이터 및 모델 자체를 유효하게 적용할 수 있을지는 미지수이다.

원격탐사 데이터 및 모델은 표적의 분류 또는 표적의 특성을 추정하거나 사진을 합성하는 등 그 자료의 사용목적상 각종 지형지물에 대하여 만족할 만한 수준의 데이터베이스를 보유하고 있지만, 레이다 클러터 분석 및 시스템 디자인을 위해서는 레이다 응용목적으로 새로이 가공하거나 변형시켜야만 하는 과제도 안고 있다.

### 참 고 문 헌

1. F.T.Ulaby & M.C.Dobson, Handbook of Radar Scattering Statics for Terrain, Norwood, MA, Artech House, 1989
2. F.T.Ulaby & R.K.Moore & A.K.Fung, Microwave Remote Sensing : Active and

Passive-From Theory to Application, vol. III,  
Dedham, MA : Artech House, 1986.

3. M.I.Skolnik, Fadar Handbook, 2nd Ed., New  
York : McGraw-Hill, 1990.
4. Cosgriff, R.L., W.H.Peake and R.C.Taylor,  
“Terrain Scattering Properties for Sensor  
System Design” (Terrain Handbook II), Engin-  
eering Experiment Station Bulletin, Ohio State  
University, 1960