

다편광 산란계를 이용한 개펄 건조 실험 - 지반 침하와 마이크로파 침투

이훈열¹, 채희삼¹, 조성준²

Polarimetric Scatterometer Experiments on Drying Mud - Land Subsidence and Microwave Penetration

Hoonyol Lee, Heesam Chae, Seong-Jun Cho

¹ 강원대학교 지구물리학과

² 한국지질자원연구원 지반안전연구부 지반탐사연구실

ABSTRACT

In a newly reclaimed drying mudflat, land subsidence is accompanied by microwave penetration into a drying mud. Satellite DInSAR observation of land subsidence should consider the effect of penetration that occurs in the same direction simultaneously. For this purpose, we set up a microwave polarimetric scatterometer (PolScat) and performed a laboratory experiment on drying mud. Polscat is composed of 5.0-5.6GHz dual-polarization square horn antenna and Agilent 8753ES vector network analyzer. The measurement of phase change of drying mud sample (1m long, 2m wide, 11cm high) for two weeks have shown 4mm microwave penetration, which should be compensated for during satellite-based DInSAR subsidence study.

요약

간척지 갯벌이 건조 수축하면 지반 침하와 더불어 마이크로파의 침투 깊이가 증가한다. 따라서 인공위성 DInSAR를 이용하여 지반 침하량을 구하고자 할 때, 건조시 동시에 발생하는 마이크로파의 개펄 침투 현상을 규명하여 보정해 주어야 한다. 이를 위하여 다편광 산란계(PolScat)를 구성하여 건조 개펄에 대한 실내실험을 실시하였다. PolScat의 구성은 5.0-5.6GHz 대역의 dual-polarization square horn antenna를 사용하였으며 Agilent 8753ES 벡터 네트워크 분석기(Vector Network Analyzer, VNA)를 사용하였다. 길이 1m, 폭 2m, 높이 11cm의 개펄을 약 2주 동안 실내에서 건조시켜 실험한 결과 약 4mm의 마이크로파 투과현상이 발견되었으며, 인공위성 DInSAR 지반침하량 계산에 있어서 반드시 이를 보정해 주어야 함이 밝혀졌다.

1. 서론

인공위성을 이용한 다시기(multi-temporal) SAR 영상의 차분 간섭법(differential SAR interferometry)을 이용한 기술(DInSAR)은 자연적이고 인공적인 지표의 움직임을 센티미터 혹은 밀리미터 단위까지 광범위하게 모니터링 하는데 사용되어 왔다. 그러나 DInSAR 기술의 성공적인 적용 사례들은 지표의 변위가 파쇄적이지 않아야 하고 산란체들이 안정적으로 고정되어 있어야 한다는 조건이 항상 뒤따른다. 수풀이 우거지고 연중 강수량이 1300mm가 넘으며 중위도 몬순 지역에 속하는 우리나라는 현재의 SAR 인공위성의 시간적 해상도로 볼 때 성공적인 DInSAR 적용이 매우 제한적이라 할 수 있다.

Lee and Chi(2004)는 2002년 물막이 공사가 끝난 서해안 화옹 간척지에서 2003년 9월과 10월 사이에 건조 수축에 의한 최대 30mm의 지반침하로 보이는 DInSAR 신호를 보고한 바 있다. 그러나 간척지 갯벌에서 연중 건조기에 토양 건조 수축에 의한 지반침하와 더불어 마이크로파가 토양에 침투하는 현상이 공존할 수 있다. 토양 수분이 감소함에 따라 지반 침하와 마이크로파의 침투가 같은 방향으로 발생하기 때문에 위성 영상에서의 관측만으로는 이 두 신호를 분리해 낼 수 없다. 따라서 토양수분과 지반침하를 계측할 수 있는 상태에서 토양 내로의 마이크로파의 침투 깊이를 측정할 수 있는 실험이 반드시 수반되어야 한다.

이 논문에서는 다편광 산란계를 구성하고 간척지 갯벌 환경을 실내에서 모사하여 토양 수분과 지반침하량을 직접 측정하고 마이크로파의 침투 깊이를 측정한 실험을 소개하고자 한다. 먼저 다편광 산란계의 구성과 작동 원리 및 특징에 대하여 설명하고, 실내 실험의 구성 및 실험 방법을 소개하며, 실험 결과에 대해 기술하였다.

2. 다편광 산란계

2.1 장비 구성

실험을 위하여 네트워크분석기(Network Analyser)와 C-band 혼(horn)안테나를 이용한 다편광 산란계(Polarimetric Scatterometer)를 다음과 같이 구성하였다.

안테나와 고정 스탠드(최대 높이 3m)는 MTG Inc.(www.mtginc.co.kr)에서 설계 및 제작 후 특성 시험을 거쳐 납품되었다. 안테나는 dual-mode transducer를 이용한 정사각형 모양의 다편광 혼 안테나(dual-polarization square horn antenna)로서, 2개 포트에서 네 가지 편광 산란 측정값(HH, HV, VH, VV)을 거의 동시에 얻을 수 있다. 진동수 대역은 600MHz이고 중심 진동수가 5.3GHz로서 Radarsat-1, ERS-1/2, Envisat 등의 C-band를 사용하는 인공위성 SAR 시스템과 부합되도록 설계되었다. 구체적인 안테나

특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of the C-band dual-pol. square horn antenna (MTG Inc.)

Product	Item	Specification	Test result	
Dual-Polarimetric Square Horn Antenna	Frequency(GHz)	5.0~5.6	5.0~5.6	
	Beam Width	E-Plane(deg)	15(nominal)	12.1~13
		H-Plane(deg)	15(nominal)	15.5~17.5
	Gain(dBi)	20(nominal)	20.5 min.(20.5~21.8)	
	VSWR	1.5 max.	1.4 max.	
	Isolation	35dB 이하	50dB 이하	
	Weight(kg)	4 max.	3.1 max.	
	Input Impedance(Ω)	50	50	

벡터 네트워크 분석기(Vector Network Analyzer, VNA)는 30kHz-6GHz까지 작동하는 Agilent 8753ES를 사용하였다. Agilent 85032B Type N Calibration kit을 이용하여 시스템을 보정할 수 있으며, 자체적으로 Chirp-Z 알고리즘을 이용한 Fourier 변환을 통해 시간 영역에서 분석이 가능하다. 컴퓨터와 VNA를 GPIB-USB 커넥터로 연결하여 Labview 프로그램으로 자동 측정하는 시스템을 구축하였다.

2.2 측정 원리

VNA는 frequency sweep을 통하여 진동수 영역에서 자료를 얻은 후 이를 역 Fourier 변환을 통해, 마치 시간적으로 짧은 sinc 소스를 발사하여 되돌아오는 신호를 시간 영역에서 취득하는 레이더의 효과를 얻는다. 보다 자세한 측정의 원리는 다음과 같다.

아래와 같이 짧은 sinc 신호를 중심 주파수 f_c 로 변조하여 안테나를 통해 발사하는, 시간 영역에서 작동하는 레이더를 생각하자.

$$h(t) = \text{sinc}(B\pi t)\exp(j2\pi f_c t) \quad (1)$$

이 신호가 목표물과 반응 후 다시 안테나로 되돌아오는 신호 $s(t)$ 는, 목표물과 전자기과의 반응 정도를 나타내주는 후방산란계수(backscattering coefficient) 함수 $u(t)$ 와의 convolution으로 다음과 같이 표현된다.

$$s(t) = h(t) * u(t) \quad (2)$$

이것은 시간 영역에서 작동하는 레이더의 원리라 할 수 있다. 그러나 VNA는 진동

수 영역에서 작동하기 때문에 식(2)을 Fourier 변환하여 다음과 같이 진동수 영역에서 살펴볼 필요가 있다.

$$S(f) = H(f)U(f) \quad (3)$$

이 때, $H(f)$ 는 중심이 f_c 이고 밴드 폭이 B 인 상자함수(box function)이다. 즉, 안테나는 VNA가 만들어낸 특정 진동수인 f 를 연속파(continuous wave) 형태로 쏘아 보내고, 이 단일 진동수의 마이크로파가 목표물 전체에 반응하는 후방산란 계수 $U(f)$ 를, 다시 안테나에 돌아오는 신호를 통해 얻게 된다. VNA는 계속하여 진동수를 증가시키면서 주어진 진동수 영역에서 $U(f)$ 를 모두 얻게 된다(frequency sweep). 이 때, 보정(calibration)이 잘 된 VNA의 $H(f)$ 값은 주어진 밴드 폭에서 1의 값을 가지게 되므로, 위와 같은 frequency sweep을 통해 식(3)의 $S(f)$ 함수가 얻어지고, 이를 역푸리에 변환을 통해 시간 영역으로 변환시키면 식(2)와 같은 레이더의 작동의 원리가 구현된다.

만약 목표물이 $t=t_0=2R/c$ 에 있으며 $u(t)=\delta(t-t_0)$, 즉 한 점(point target)이라면 레이더에서 얻어진 값은 식 (2)에 의하여 다음과 같이 된다.

$$s(t) = \text{sinc}[B\pi(t-t_0)]\exp[j2\pi f_c(t-t_0)] \quad (4)$$

따라서 NNA에서 시간 영역으로 변환된 측정값의 크기와 위상 ϕ 는 다음과 같다.

$$|s(t)| = |\text{sinc}[B\pi(t-t_0)]| = |\text{sinc}[B\pi(t-2R/c)]| \quad (5)$$

$$\phi = 2\pi f_c(t-t_0) = 2\pi f_c(t-2R/c) \quad (6)$$

즉, 위상은 안테나와 목표물간의 거리의 함수이다. 식(6)에 의하면 시스템에서 위상의 오차를 ϕ_{error} 라고 한다면, 거리 측정의 오차 R_{error} 는 다음과 같다.

$$R_{error} = \frac{\lambda}{4\pi} \phi_{error} \quad (7)$$

즉, 시스템과 목표물이 안정된 상태에서 수차례 위상을 측정했을 때 그 변화가 1도 정도라면 $\phi_{error} = 1^\circ$ 가 되고, 파장 $\lambda = 5.6\text{cm}$ 인 시스템에서 $R_{error} = 0.08\text{mm}$ 정도가 되어 매우 정밀한 slant range 값을 줄 수 있으며, 이것이 DInSAR의 정밀도를 주게 된다. 보통 위성 시스템에서는 위성체의 잡음이나 측정 시간에 따른 차이로 인하여 최악의 경우 $\phi_{error} = 10^\circ$ 로 보고 있으며, 그렇다 하더라도 $R_{error} = 0.8\text{mm}$ 가 되어 매우 정밀한 지표변위를 측정할 수 있는 이론적 근거가 마련된다.

이 실험에서는 $f_c = 5.3\text{GHz}$ 이고, $B = 600\text{MHz}$ 이다. 식 (1)의 sinc function의 최대 값에서 3dB 떨어지는 시간을 보통 레이더의 시간 해상도 δt 로 정의하며, 이는 다음과 같다.

$$\delta t = 1/B \quad (8)$$

따라서 이 시스템에서는 $\delta t = 1.67ns$ 이다. 이를 안테나와 목표물과의 왕복거리를 고려하면 거리 해상도(slant range resolution) δR 은 다음과 같다.

$$\delta R = c\delta t/2 = c/(2B) \quad (9)$$

이 시스템에서는 $\delta R = 25cm$ 에 해당한다. 즉, slant range 방향으로 25cm 떨어진 두 물체를 구별할 수 있는 해상도를 가진다고 할 수 있다. 이 레이더 시스템의 최대 거리 R_{max} 는 네트워크 분석기의 frequency sampling 수가 N 일 때, 다음과 같이 정의된다.

$$R_{max} = (N-1)\delta R \quad (10)$$

이 시스템에 사용된 Agilent 8753ES VNA의 최대 N 은 1601이며, 이때 $R_{max} = 400m$ 이다. 이러한 최대 거리는 frequency sweep 밴드 폭을 줄이면 식(8)-(10)에 의해 무한대까지 늘어날 수 있다. 그러나 VNA의 파워가 10dBm으로 제한되어 있기 때문에 최대 거리에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 신호증폭기를 추가하여 설치할 수 있으나, 발신기와 수신기가 하나의 안테나로 이루어지는 이 시스템에서는 신호증폭기의 설치가 불가하다. 따라서 이 시스템은 야외보다는 실내 실험, 목표물과 안테나가 수 백 미터를 넘지 않는 거리에서 사용하기 적합하다.

여기서 주의할 점은, VNA를 이용한 frequency sweep을 통해 한 번의 측정을 하는데 보통 0.1초에서 수 초, 혹은 수십 초가 걸리므로, 측정 시간 동안 시스템을 구성하는 안테나, 지지대, 그리고 목표물의 움직임이 심한 경우에는 시간영역에서 이루어지는 레이더 작동 원리를 구현할 수 없는 단점이 있다. 즉, 바람이 심하게 부는 때는 사용이 불가하다. 따라서 이 시스템을 이용한 실험은 안정된 실내에서 수행하는 것이 바람직하다 할 수 있겠으며, 야외에서의 경우에는 시스템의 특성을 조절하여 sweep time을 최소화하는 노력이 필요하다.

3. 개별 실험

3.1 실험 구성

Fig. 1은 PolScat을 이용한 개별 실내 실험의 구성을 나타내고 있다. 안테나의 입사각은 40도로 유지하였으며 안테나 Port 1까지의 높이는 205cm이다. 개펄은 서해안에서 자연 갯벌에서 채취한 것으로서, 최초 질량은 약 350kg 이다. 마이크로파를 대부분 통과시키는 스티로폼을 이용하여 세로 1.8m, 가로 1.1m, 높이 20cm의 실험대를 만들었으며, 개펄을 높이 약 11cm 정도로 채웠다. 여기에 물을 일정량 공급하고 잘 개어서 평탄한 상태로 만들었으며, 개펄을 침전시키자 약 1cm의 맑은 물이 개펄 위에 떠올랐다. 개펄 속에 숨어있던 고동과 게가 밖으로 나와 숨을 쉬고 먹이를 찾아 이동하기 시작하자 생물

교란 흔적이 생겨 자연 상태와 매우 흡사한 개펄이 조성되었다. 에어컨과 선풍기, 선풍기 형 히터, 그리고 갯벌 바닥에 열선 코일을 깔아서 건조한 환경을 만들어 실내 온도는 약 25도, 습도는 40%를 유지하였다.

개펄은 마이크로파의 왕복 시간으로 14-22ns 사이에 있으며 시간 샘플링 간격은 $\delta t = 1.67ns$ 로서, 거리 해상도 $\delta R = 25cm$ 이다. 실내 실험의 특성상 최대 거리가 멀지 않아도 되며 빠른 측정을 위하여 $N = 801$ 로 하였고, 이때 $R_{max} = 200m$ 이다. 개펄이 마르면서 건조 수축에 의한 amplitude 와 phase 변화를 HH, HV, VH, VV 편광모드로 거의 동시에 측정하였으며, 이와 함께 수직적 지반 침하를 간단한 자를 이용하여 3곳에서 계측하였다. 매회 측정 시 1-2초 간격으로 10회 이상 측정했을 때 phase가 2도 이하로 변화하여 매우 안정된 측정이 이루어졌기 때문에 이론상 $R_{error} = 0.16mm$ 로서, 밀리미터 이하의 정확도로 지반 침하 및 마이크로파의 침투 현상을 측정할 수 있었다.

3.2 측정 결과 및 해석

개펄을 건조시키면서 안테나에서 개펄을 바라보며 사진을 연속적으로 촬영하여 개펄 표면의 상태를 관찰하였다. 개펄 위의 맑은 물이 모두 증발하자 생물교란이 멈추었고, 표면 구조는 매우 안정된 상태로 남게 되었다. 이 때 부터 측정을 시작하여 약 3 주 동안 2-3시간 단위로 계속하여 측정하였다. 표면 구조와 수분을 어느 정도 유지한 채 건조 수축에 의한 수직 침하가 가장 심하게 관측되었으며, 약 7mm정도 까지 수직 침하가 발생한 이후 침하가 멈추었다. 곧이어 건열이 발생하기 시작하였고, 건열이 충분히 발달한 후 멈추었으며, 개펄 표면에 소금기가 등장하기 시작하여 완전히 흰 색으로 뒤덮여 안정화 되었다. 이 시기 부터는 건조 수축에 의한 수직 침하 혹은 건열은 발생되지 않았고, 미세한 수분 변화에 따른 마이크로파의 침투가 본격적으로 진행되었다. 이 상태로 약 10일 동안 계속해서 측정하였으며, 이 때 발생한 마이크로파의 침투량의 변화가 이 실험에서 가장 중요한 측정 목표가 된다.

실험 마지막 날에는 스프레이를 이용하여 개펄 표면에 수분을 일정하게 공급하면서 측정을 계속하였다. 먼저 스프레이를 일정량 뿌린 후 표면 수분이 완전히 흡수되어 광택이 사라질 때까지 안정화 된 상태에서 측정을 하였다. 이는 개펄이 건조된 후 표면 구조는 그대로 두면서 수분의 변화를 주었을 때를 모사하기 위한 것으로 약 3시간 동안 40회 측정했다.

TDR 방식의 토양 수분계는 염분이 많은 개펄과 같은 토양에서는 사용이 불가능하다. 따라서 필요에 따라 건조 중인 개펄 샘플을 채취하여 질량을 측정하고, 이를 오븐에 넣어 충분히 건조시킨 후 질량을 다시 측정하는 방식으로 중량식 토양수분(gravimetric soil moisture)을 구하였다. 이를 개략적인 밀도로 환산하여 용적식 토양수분(volumetric soil moisture)으로 전환하였다. 초기에 수분이 포화된 상태의 용적식 토양수분은 약

50%이며 스프레이 실험 전 건조 개펄은 약 25%로 계산되었다.

Fig. 2와 Fig. 3은 개펄을 건조시키면서 개펄 중심부인 18ns에서 측정한 amplitude와 phase의 시간에 따른 측정의 결과이다. 제시된 다편광 자료 중에서 특히 HH 편광 자료는 Radarsat-1의 편광 모드와 일치한다.

먼저 amplitude의 변화를 살펴보면(Fig. 2) VV 편광의 변화가 가장 두드러졌다. 특히 건열이 시작되면서부터 amplitude가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 수직적인 건열 구조가 VV 편광에 특히 큰 영향을 끼치기 때문이다. 또한 스프레이 실험에서도 VV 편광이 가장 큰 amplitude 증가를 보였다. HH편광은 VV보다 변화의 폭이 심하지 않다. 건열이 완전히 생성된 후 10일간의 amplitude 변화를 살펴보면, VV는 약간 감소하고 있으나 HH는 변화가 거의 없다. 실험 전반에 걸쳐 개펄 표면 수분의 변화로 인하여 지반 침하 및 건열이 매우 복잡한 구조적 변화를 일으키며 진행되기 때문에, 실험에서 얻어진 amplitude의 변화를 보다 구체적으로 이해하기 위해서는 수치실험을 통한 모델링이 함께 병행되어야 하겠으며, 이는 향후 연구의 방향이 될 수 있다.

개펄 건조 실험에서 위상(phase)의 변화 역시 모든 편광에서 일어났으나(Fig. 3), 매우 복잡한 변화 양상을 모두 이해하기는 어려웠다. VV 편광은 오히려 위상이 20도 정도 감소하는 것으로 관측되었다. 이와 같은 위상의 감소는 산란체와 안테나의 거리가 짧아졌다는 의미로서, 개펄 건조로 인한 마이크로파의 침투 방향과는 반대이다. 이는 VV 편광이 건열의 수직적 단면과 반응을 많이 하기 때문에 발생한 것으로 추측되나, 보다 정확한 원인은 수치모델을 통해 증명할 필요가 있다.

Radarsat-1과 같은 편광을 가지는 HH에서는, 건열 진행이 중단되고 개펄 전체가 소금으로 덮여 구조적으로 안정된 후 약 10일 동안의 관측에서, 위상이 점차적으로 50도 정도 증가하였다. 수직적 침하 현상이 전혀 없는 상태에서 이러한 위상의 변화는 약 4mm의 침투 현상으로 설명될 수 있다. HH는 건열의 수직적 균열과 반응을 VV 만큼 크게 하지 않기 때문에 마이크로파의 침투 현상이 포착된 것으로 여겨지나, 이 또한 수치모델을 통한 실험으로 증명될 필요가 있다.

스프레이 실험을 시작하자 위상이 감소하는 양상을 보여주고 있으며, 실험 중단 시까지 약 30도의 위상 감소가 일어났다. 이는 개펄에 토양 수분이 증가하자 18ns에서의 산란 중심이 점차 개펄의 표면으로 다시 2.4mm 상승한 것으로 해석될 수 있어서, HH 위상이 마이크로파의 침투 효과를 나타내 주는 것으로 여겨진다.

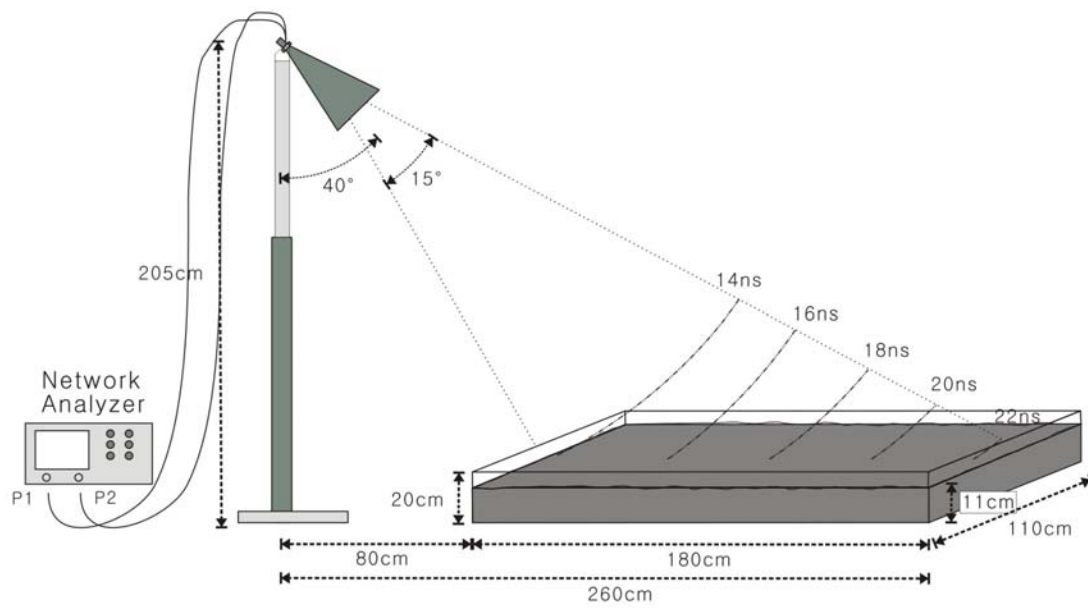


Fig. 1. Diagram of a laboratory experiment

Amplitude at 18ns

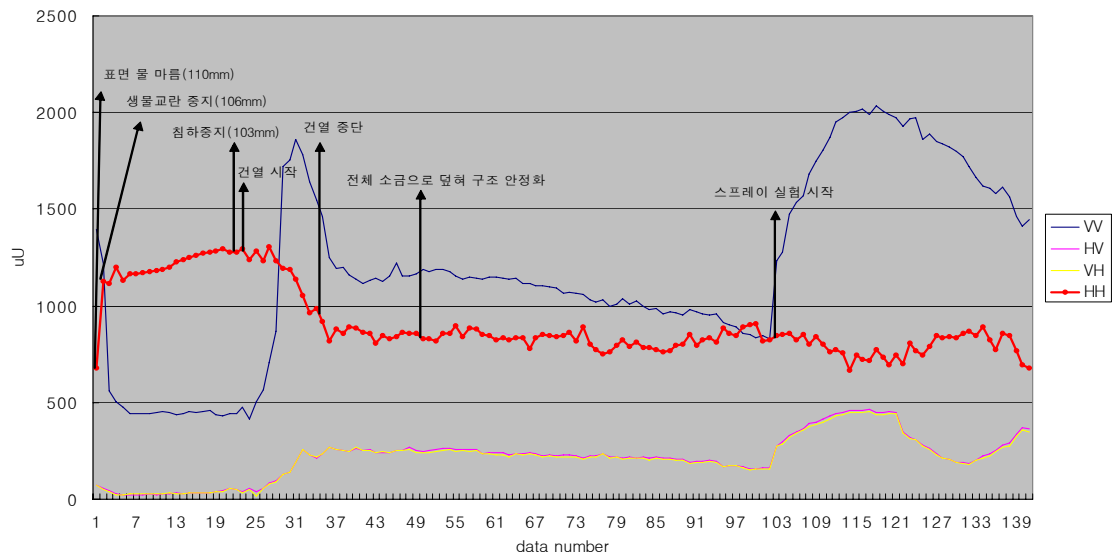


Fig. 2. Amplitude change of drying mud.

Phase at 18ns

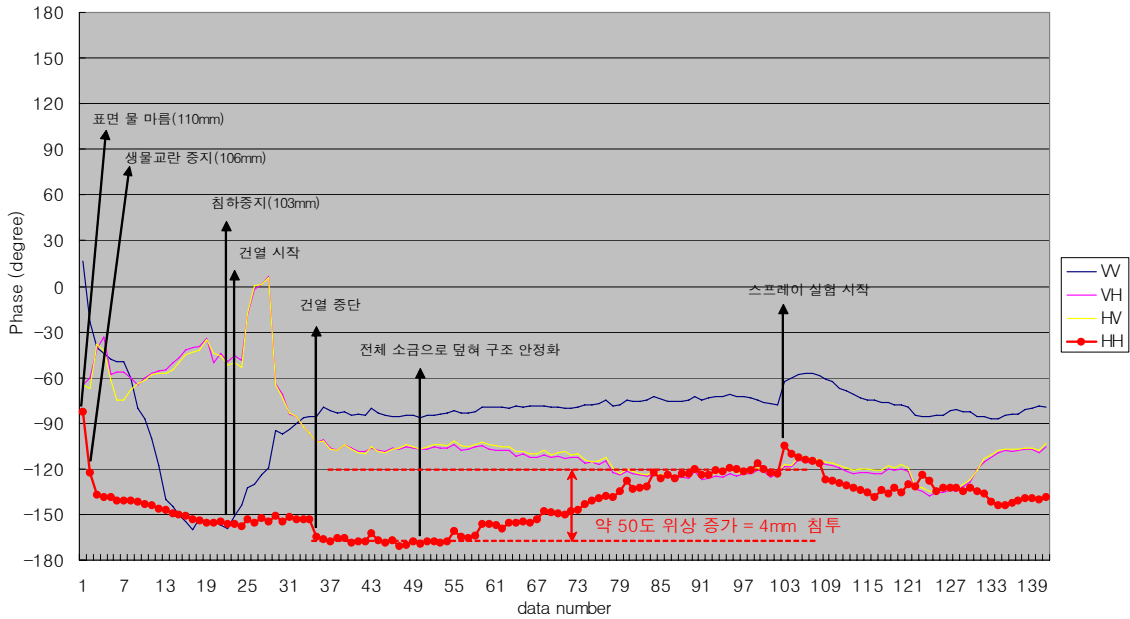


Fig. 3. Phase change of drying mud.

4. 결론

Radarsat-1 DInSAR 일차 분석 결과, 화용 간척지에서 2003년 9월 27과 10월 21 일 사이에 건조 수축으로 인한 지반 침하가 최대 30mm 발생한 것으로 보이는 신호가 관측된 바 있다(Lee and Chi, 2004). 그러나 마이크로파 산란계를 이용한 실내 실험 결과, 연구지역 토양이 자연 상태에서 최대 건조 상태라 할 수 있는 토양 부피 수분 25%에 있을 때, 약 4mm의 마이크로파 침투가 있는 것으로 나타났다. 따라서 연구지역에서도 이와 비슷한 상황을 가정할 때, 최대 30mm의 침하량 가운데 약 26mm만이 실제 최대 침하량이라고 할 수 있겠다.

화용 간척지 내에서 침하량의 지역적 변화는 갯벌의 조성과 깊이, 지하수 및 지표수의 공급, 기반암의 구조 등 매우 다양한 원인으로 추정된다. 이 연구는 인공위성 InSAR를 통한 연약지반 정밀 계측시 토양 특성에 따른 마이크로파의 침투 현상을 반드시 고려해야 함을 증명하였고, 마이크로파 산란계를 이용한 현장 및 실내 실험으로 이를 보정할 수 있음을 보여주고 있다.

사사

이 연구는 2005년도 한국지질자원연구원 기본사업인 “지반침하 조사를 위한 복합 물리탐사 시스템 구축연구”의 위탁 연구로서 수행되었습니다. 연구에 많은 조언을 주시고 여러 장비를 사용하도록 흔쾌히 허락해 주신 김정호 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

윤창진 외 1999, 간척지반의 자연 침하 현상 해석, *농어촌진흥공사 연구보고서*.

이훈열, 2005. 교육용 합성구경레이더 프로세서(eSAR Processor)의 개발과 공개, *대한 원격탐사학회지*, 21권, 2호, pp. 163-171.

Agilent Technologies, 2005. *Agilent PNA Microwave Network Analyzers for Pulsed-RF Measurements - Configuration Guide*. www.agilent.com.

Lee, H. and Chi, K. H., 2004. Contraction of a newly reclaimed mudflat detected by differential SAR interferometry, *International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2004, Jeju, Korea*.

Ulaby, F. T. and Whitt, M. W., 1990. AVNA-Based Polarimetric Scatterometers, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 1, pp. 6-17.