주 의
(편집순서 8)

(15 포인트
고딕계열)

↑
6cm
↓

2206001 InSAR를 이용한 광역지반침하 원격관측 기법에 관한 연구 II 강원대학교

2206001

InSAR를 이용한 광역 지반침하 원격관측 기법에 관한 연구 II

Study on remote sensing of land subsidence over large area using InSAR technique II

강 원 대 학 교

한국지질자원연구원

2206001

InSAR를 이용한 광역 지반침하 원격관측 기법에 관한 연구 II

Study on remote sensing of land subsidence over large area using InSAR technique II

강 원 대 학 교

한국지질자원연구원

제 출 문

한국지질자원연구원 원장 귀하

이 보고서를 “InSAR를 이용한 광역 지반침하 원격관측 기법에 관한 연구에 관한 연구 II” 과제의 보고서로 제출합니다.

2006. 4. 25.

위탁연구기관명 : 강원대학교

위탁연구책임자 : 이 훈 열

연 구 원 : 채 희 삼

〃 : 한 향 선

〃 : 전 경 미

〃 : 박 용 욱

〃 : 한 승 하

〃 : 김 준 수

보고서 초록

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>2206001</td><td>당해연도
연구기간</td><td>2006. 1. 1 -
2006. 4. 30</td><td>연차 구분</td><td>1년 차 / 총 1년</td></tr>
<tr><td>연구사업명</td><td colspan="5">기본연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>주관과제명</td><td colspan="4">지반침하 조사를 위한 복합 물리탐사 시스템 구축 연구</td></tr>
<tr><td>위탁과제명</td><td colspan="4">InSAR를 이용한 광역 지반침하 원격관측 기법에 관한 연구 II</td></tr>
<tr><td>연구책임자</td><td>이훈열</td><td>참여연구원수</td><td>총 : 7 명
내부 : 1 명
외부 : 6 명</td><td>연구비</td><td>10,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명
및
소속부서명</td><td colspan="2">강원대학교 지구물리학과</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>37</td></tr>
<tr><td colspan="6">○ 마이크로파 편광 산란계(polarimetric scatterometer)를 자동화를 통한 인공위성 DInSAR 자료의 검보정 기술 심화.

○ PolScat의 무인자동화 구축으로 자료의 균일화, 수동측정에 의한 잡음 발생 제거 및 안정성 확보.

○ PolScat 실내 실험 결과 토양 완전 건조 시 약 4mm의 마이크로파 침투에 의해 DInSAR에서 6mm의 수직침하로 오인될 수 있음을 증명.

○ 인공위성 InSAR를 통한 광역 연약지반 정밀 계측 시 토양 수분에 따른 마이크로파의 침투 현상을 반드시 보정해 주어야 함을 증명.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개
이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">합성구경레이더, 간섭 기법, 산란계, 침하, 갯벌</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">synthetic aperture radar, interferometry, scatterometer, subsidence, mudflat</td></tr>
</table>

목 차

제 1 장 위탁연구과제의 개요

1.1 연구개발의 목적

1.2 연구개발의 필요성

1.3 연구개발의 범위

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 위탁연구사업의 내용 및 결과

3.1 마이크로파 산란계 (PolScat) 자동화 구성

3.2 PolScat 시스템 안정성 평가

3.3 Radarsat-1 SAR 영상과 산란계 실내 실험을 통해 관찰된 조간대 갯벌 건조시 레이더 후방산란계수의 M형 변화

3.4 마이크로파 산란계 실험을 통한 개펄 건조시의 지반 침하와 마이크로파 침투 분석

3.5 PolScat 갯벌 현장 실험

3.6 결론

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 위탁연구과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

제 1 장 위탁연구과제의 개요

1.1 연구개발의 목적

이 연구는 인공위성 InSAR 기법을 이용하여 비교적 넓은 지역에서 점진적으로 일어나는 광역 연악지반 침하 현상을 정량적으로 관측한 내용을 마이크로파 편광 산란계(polarimetric scatterometer)를 이용한 현장 및 실내 실험을 통해 검증하고 보정하는 기술을 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위하여 산란계의 자동화를 이루고, 실내 실험을 보다 정교하게 구성하며, 현장 실험을 시도하였다.

1.2 연구개발의 필요성

선행 연구에서 경기도 화옹 간척지에서 축조된 방조제로 인하여 상시적으로 지표에 노출된 갯벌에서 토양의 건조 수축으로 일어나는 지반 침하 현상을 인공위성 영상레이더 간섭 기법을 이용하여 관측하였고(Lee and Chi, 2004) 마이크로파 산란계를 이용하여 실내실험을 통해 검증하였다(이훈열 외 2005). 그 결과, Radarsat-1 DInSAR, 화옹 간척지에서 2003년 9월 27과 10월 21일 사이에 건조 수축으로 인한 지반 침하가 최대 30mm 발생한 것으로 보이는 신호가 관측되었다. 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 있다고 결론지은바 있다. 이를 통하여 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 보여주었다.

그러나 마이크로파 산란계를 이용한 선행 실내 실험에서 오차가 많이 발생할 수 있는 소지가 다분하였다. 첫 째, 실험장소의 여유 공간이 협소하여 산란계 실험에 주변 오차가 개입되었을 여지가 있었다. 즉, 실험 대상인 샘플 이외에 주변의 다른 물체들에 의한 후방 산란 값이 포함될 수 있다는 것이다. 실험 당시 안테나 중심 최대 파워의 -3dB로 정의되는 footprint 영역이 샘플 속에 완전히 들어가도록 설계하였으나, 주변의 다른 물체들이 후방산란을 높게 일으킬 경우 이를 무시할 수 없다. 둘째, 실험 장소가 개방되어 있어 사람의 접근에 따른 잡음이 있었음이 우려되었다. 셋 째, 산란계의 측정이 매 회 사람에 의해 이루어짐으로서 일정한 간격의 자료획득이 어려웠으며, 특히 조작상의 실수로 자료가 손실되기도 하였다. 넷 째, 온전한 자료의 획득에 문제가 있었다. 이는 산란계 구성 후 자료 획득 프로그램을

개선하지 못하고 서둘러 장기적 실험을 해야 했던 것이 주요 원인이었다. 편광 산란계에서 얻어지는 모든 자료를 저장하지 못하였고, 실험 초기 갯벌샘플에서 가장 신호가 큰 지점을 range의 중심으로 생각하고 그 포인트 값만을 측정하였다. 따라서 range에 따른 신호의 변화, 혹은 이러한 중심 신호의 이동 등을 알아낼 수 없었다. 따라서 갯벌 표면의 구조적, 전기적 변화에 따른 다양한 마이크로파의 변화를 관측할 수 없었다. 따라서 이 연구에서는 이전에 실시했던 갯벌 실내 건조 실험은 문제점을 보완 하여 실내 실험을 다시 실시하였다.

1.3 연구개발의 범위

기존 실험의 문제점을 보완하여, 계측시스템의 자동화, 실험 장소 및 방법의 개선을 고려하였다. 실험 장소를 보다 규모가 큰 곳으로 하였으며, 사람의 출입이 없는 곳으로 택하였다. 갯벌샘플의 크기 또한 기존 실험보다 두 배 확장 하였다. 또한 컴퓨터를 이용하여 무인 자동 계측 시스템을 구성하여 일정간격으로 끊김 없이 획득하도록 하였다. 또한, 편광(HH, HV, VH, VV)의 amplitude와 phase 변화를 range의 샘플링 수만큼 측정하고 저장하여 자료 전체를 보존하였다. 위의 실험으로 갯벌 건조 시 마이크로파의 후방 산란 및 마이크로파의 개펄 침투에 대한 보다 정확한 검증을 할 수 있었다.

이러한 장기간 측정 시 마이크로파 산란계의 신호 안정성에 대한 실험을 실시하였으며, 조간대 갯벌 현장에 실내 실험과 유사한 편광 산란계를 통한 현장 실험을 실시하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

국내외적으로 간척지에서와 같이 광역적인 지반 침하에 대한 현장 모니터링 및 인공위성 SAR를 이용한 관측 노력이 지속적으로 이루어지고 있다. 현장에서 토양의 수분, 염도, 건조 수축에 의한 침하에 대한 관측 노력이 지속되어 오고 있으나(최광원 외 1999, 윤창진 외 1999, 김동주 외 1999), 현장 모니터링 자료는 지속적으로 얻기 매우 힘이 들다.

인공위성 SAR를 이용하여 토양 수분 및 지반침하 현상을 규명하기 위한 노력이 지속적으로 이루어지고 있으나(Bamler 외 1998, Borgeaud and Wegmuller, 1996 Ulaby and Whitt, 1990, Feigl 외 1995; Massonnet 외 1993, 1995, 1996, 1997; Massonnet and Feigl, 1995; Rignot and van Zyl, 1993; Rosen 외 1996; Roth 외 1997; Zebker 외 1994; Cloude and Papathanassiou, 1998; Papathanassiou and Cloud, 1997, 김상완 외 2001, 2002), 이 또한 지역적, 기후적 조건이 매우 까다로워서 아직까지 우리나라의 광역 지반 침하 현상에 실용적으로 적용할 만한 연구 사례가 국내외적으로 전무한 실정이다.

우리나라 서해안에서는 대규모 간척사업으로 인한 물막이 공사가 아직도 진행중이며, 길이 33km에 달하는 세계 최장의 새만금 방조제가 근래에 완성된 바 있다. 새롭게 대기에 노출된 갯벌의 경우 토양의 점성이 강하고 식생이 없기 때문에 안정적이고 높은 신호를 갖는 양질의 레이더 간섭 영상을 얻을 수 있으며, 인공위성 영상레이더 간섭기법을 성공적으로 적용하기에 매우 적합한 조건을 형성하고 있다.

제 3 장 위탁연구사업의 내용 및 결과

3.1. 마이크로파 산란계 (PolScat) 자동화 구성

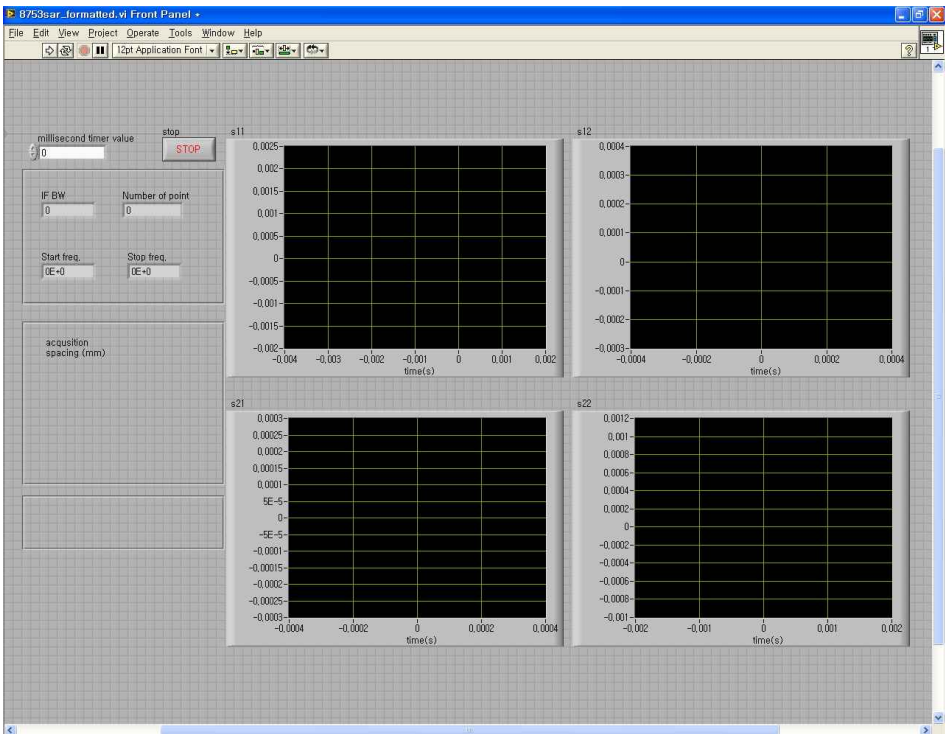
기존 실험에서의 PolScat은 네트워크분석기를 통해 자료를 측정하고 저장하기 위해선 측정시마다 직접 제어하고 버튼을 눌러야 했다. 이러한 측정방식으로 인해 측정간격을 일정하게 유지 할 수 없었으며, 사람의 실수에 의해 자료의 손실을 유발하였다. 이러한 문제점으로 자동측정 및 계측이 가능한 시스템이 필요하여, 컴퓨터에 의한 네트워크 분석기 및 사진 촬영의 제어를 모색하였다.

네트워크 분석기와 노트북을 National Instrument사의 GPIB-USB 커넥터로 연결하고 노트북에 설치된 LabView 프로그램을 통해 측정간격, 측정시간 그리고 자료저장을 제어하였다.

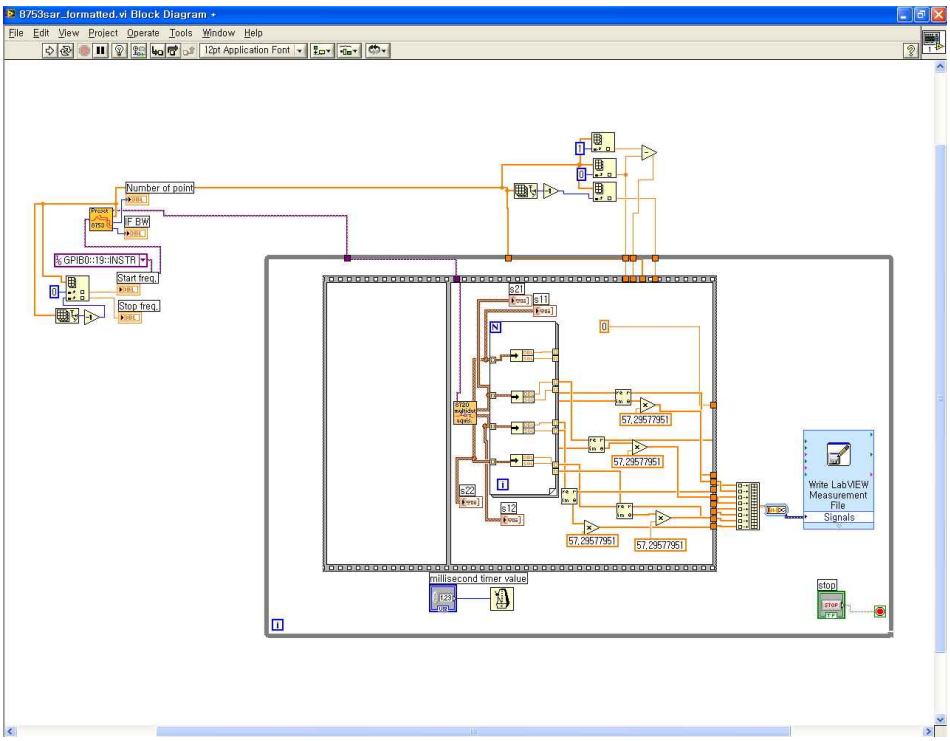
GPIB는 General Purpose Interface Bus의 약자로서 8 bits 통신을 하는 Bus이다. 이것은 계측장비와 컴퓨터 사이의 자료통신장치로서 호환성이 뛰어나다. GPIB에는 GPIB-PCI와 GPIB-USB 방식이 있으며, PolScat의 이동성을 고려하여 노트북에 연결이 용이하도록 GPIB-USB 방식으로 시스템을 구성하였다.

LabView는 아이콘을 이용하여 프로그램을 작성하고 실행하는 프로그램 언어이다. 사용자 환경(User interface)과 원시언어(source code)가 그래픽 환경으로 되어 있어 텍스트 기반의 다른 프로그램과 달리 직관적이고 사용이 쉬우며 빠른 시간에 프로그램을 작성할 수 있다. LabView의 GUI 환경에서 입력 값을 주고 윈도우의 아이콘과 같은 버튼을 누르면 실행이 되어 자료를 그래픽으로 화면에 보여 주고 저장할 수 있어 자동측정과 계측분야에 널리 사용되고 있다.

그림 1의 (a)는 LabView를 이용한 PolScat 자동측정 프로그램의 프론트 패널을 보여주고 있다. 프론트 패널은 측정간격을 조정하기 위한 콘트롤러 아이콘과 네트워크에서의 설정치인 bandwidth, 측정 포인트수, 주파수, 그리고 2개의 포트를 통해 획득된 자료를 그래프로 나타내도록 구성되어 있다. 그림 1 (b)의 블록다이어그램에서는 Agilent 8753ES의 기본적인 드라이버를 이용하여 다편광 자료의 amplitude와 phase 자료로 변환하기 위한 함수들을 이용하여 프로그래밍 하였다.



(a) Front Panel



(b) Block Diagram

그림 1. LabVIEW를 이용한 PolSCat 자동측정 프로그램

프로그램에서 측정된 자료는 모두 text형식으로 저장된다. 다음은 저장된 text 자료의 형식의 예이다.

LabVIEW Measurement

Writer_Version 0.92
Reader_Version 1
Separator Tab
Multi_Headings Yes
X_Columns No
Time_Pref Relative
Operator heesam
Date 2005/12/06
Time 20:25:12.111999
End_of_Header

Channels 8
Samples 101 101 101 101 101 101 101 101
Date 2005/12/06 2005/12/06 2005/12/06 2005/12/06 2005/12/06 2005/12/06 2005/12/06 2005/12/06
Time 20:25:12.111999 20:25:12.111999 20:25:12.111999 20:25:12.111999 20:25:12.111999
20:25:12.111999 20:25:12.111999 20:25:12.111999
X_Dimension Time Time Time Time Time Time Time
X0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0
0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0
Delta_X 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
End_of_Header

X_Value	Untitled	Untitled 1	Untitled 2	Untitled 3	Untitled 4	Untitled 5	Untitled 6	Untitled 7	Comment
	0.000740	178.971039	3.763290E-5	-0.053881	1.266250E-5	117.321739	0.000964	-65.636512	
	0.000728	173.744305	3.582358E-5	18.998317	1.130654E-5	142.229118	0.000842	-40.994711	
	0.000818	171.338262	3.361124E-5	38.347155	1.019040E-5	169.310864	0.000718	-17.049547	
	0.000929	177.827766	3.115986E-5	58.237677	9.562758E-6	-162.412959	0.000591	4.535669	
	0.000972	-170.798207	2.844437E-5	78.241582	9.256382E-6	-133.499749	0.000476	24.289574	
	0.000908	-156.239837	2.542831E-5	99.097322	9.382744E-6	-106.314119	0.000376	39.534599	
	0.000737	-140.546678	2.241845E-5	120.372258	9.617801E-6	-80.091653	0.000300	51.362179	
	0.000454	-127.140141	1.933913E-5	142.088716	9.729888E-6	-55.086155	0.000263	60.435730	
	0.000126	-141.157265	1.650070E-5	163.928006	9.495042E-6	-30.093413	0.000258	70.899229	
	0.000310	117.425335	1.360687E-5	-173.935675	9.220288E-6	-3.923983	0.000266	87.567517	
	0.000664	126.914099	1.100072E-5	-151.550585	8.750243E-6	23.164960	0.000275	108.026807	
	0.000955	143.727716	8.484632E-6	-129.817650	8.236579E-6	52.331275	0.000281	133.284762	
	0.001136	161.748499	6.167626E-6	-107.811829	7.802056E-6	83.712300	0.000283	160.220219	
	0.001204	-179.600071	3.984454E-6	-88.131448	7.746174E-6	116.538865	0.000283	-170.747314	
	0.001150	-161.333010	1.906596E-6	-72.622184	8.101405E-6	148.576211	0.000278	-143.958301	
	0.000983	-143.491718	3.332058E-7	-157.963939	8.825033E-6	177.020740	0.000266	-118.957518	
	0.000726	-128.012575	2.204740E-6	158.584545	9.432000E-6	-159.144661	0.000241	-98.338413	
	0.000423	-117.057398	4.178814E-6	173.319257	9.972859E-6	-138.771039	0.000204	-84.029943	
	0.000175	-141.619182	6.136600E-6	-170.958322	1.021781E-5	-122.305971	0.000178	-80.421148	
	0.000260	157.826436	7.987379E-6	-155.364605	1.038704E-5	-108.942625	0.000192	-88.260600	
	0.000467	159.301433	9.863044E-6	-139.331808	1.042631E-5	-99.503970	0.000259	-86.837339	
	0.000615	171.438608	1.163808E-5	-124.544653	1.068864E-5	-92.914260	0.000366	-77.244187	
	0.000686	-173.761757	1.327687E-5	-110.212652	1.138567E-5	-87.231445	0.000484	-61.086648	
	0.000696	-159.347716	1.464370E-5	-96.995525	1.219667E-5	-83.370164	0.000610	-42.134036	
	0.000660	-145.250682	1.579880E-5	-84.950820	1.343845E-5	-78.278116	0.000728	-21.683446	
	0.000600	-131.986683	1.694787E-5	-74.490552	1.512699E-5	-73.983619	0.000836	-0.365535	
	0.000552	-117.933750	1.833850E-5	-66.298979	1.732638E-5	-69.527220	0.000928	20.893016	
	0.000526	-99.956801	2.054681E-5	-58.920442	2.059274E-5	-64.715574	0.001002	42.707271	
	0.000526	-75.992115	2.410535E-5	-51.591873	2.522950E-5	-58.237865	0.001060	64.336580	
	0.000583	-45.857137	2.925377E-5	-42.512464	3.164617E-5	-49.493626	0.001103	86.252881	
	0.000715	-13.766938	3.612278E-5	-31.230270	3.971120E-5	-38.157830	0.001136	107.918750	
	0.000934	16.340246	4.455975E-5	-17.568481	4.947589E-5	-24.575523	0.001157	129.521379	
	0.001208	43.269744	5.437704E-5	-1.923733	6.062575E-5	-9.016646	0.001172	151.173505	
	0.001521	68.125228	6.517054E-5	15.163486	7.286861E-5	7.939964	0.001183	172.795128	
	0.001824	91.691291	7.660021E-5	33.376299	8.569135E-5	26.014758	0.001189	-165.558324	
	0.002081	114.307975	8.828581E-5	52.378194	9.870009E-5	44.928130	0.001190	-143.657948	
	0.002273	136.513138	9.971620E-5	71.942758	0.000111	64.493639	0.001182	-121.690586	
	0.002374	158.527686	0.000110	91.928331	0.000123	84.514175	0.001167	-99.206889	
	0.002378	-179.434127	0.000120	112.180547	0.000134	104.850432	0.001141	-76.553411	
	0.002292	-157.555031	0.000128	132.628367	0.000143	125.416323	0.001102	-53.393921	
	0.002134	-135.086009	0.000134	153.189884	0.000149	146.119321	0.001049	-29.895692	
	0.001922	-112.345150	0.000138	173.797887	0.000153	166.914925	0.000980	-5.995877	
	0.001685	-89.027227	0.000140	-165.608370	0.000155	-172.287081	0.000900	18.719331	
	0.001465	-64.391944	0.000139	-145.089824	0.000153	-151.488754	0.000808	43.722522	
	0.001261	-39.116446	0.000135	-124.693957	0.000149	-130.797198	0.000709	69.936868	
	0.001118	-13.180339	0.000129	-104.479973	0.000142	-110.262796	0.000606	96.495026	
	0.001038	12.437484	0.000122	-84.490820	0.000133	-89.855969	0.000508	124.298796	
	0.001002	37.240535	0.000112	-64.813356	0.000123	-69.741088	0.000418	152.870675	
	0.001021	59.420642	0.000102	-45.517235	0.000111	-49.920778	0.000338	-177.672021	
	0.001061	80.233996	9.012774E-5	-26.746159	9.780476E-5	-30.484687	0.000267	-147.058526	
	0.001099	100.302068	7.856054E-5	-8.587727	8.478617E-5	-11.621958	0.000212	-115.634676	
	0.001120	119.455750	6.732827E-5	8.790511	7.219417E-5	6.652320	0.000169	-83.545253	
	0.001098	138.652316	5.687269E-5	25.126516	6.048266E-5	23.939557	0.000138	-50.297214	
	0.001032	157.703921	4.761442E-5	40.344812	5.013956E-5	40.200736	0.000115	-18.485496	
	0.000902	176.101952	3.996675E-5	54.086101	4.138712E-5	55.039667	0.000109	12.443343	
	0.000718	-164.530349	3.387170E-5	66.606963	3.451839E-5	68.370253	0.000111	42.463075	
	0.000497	-146.599921	2.939606E-5	78.381060	2.943432E-5	80.945096	0.000127	68.944532	
	0.000246	-130.998506	2.631744E-5	90.176400	2.615616E-5	92.859349	0.000162	94.725018	

4.187542E-5	126.701183	2.416568E-5	102.898127	2.410109E-5	105.739809	0.000209	118.289016
0.000277	104.713809	2.271661E-5	117.011516	2.298978E-5	119.971742	0.000268	142.531153
0.000491	120.841573	2.156292E-5	132.339276	2.241147E-5	135.399015	0.000338	165.683840
0.000641	140.527177	2.049767E-5	148.670147	2.206131E-5	151.772144	0.000412	-171.092981
0.000723	160.660268	1.963926E-5	165.415476	2.183445E-5	168.562578	0.000492	-148.401250
0.000734	-179.374210	1.878683E-5	-177.849363	2.163562E-5	-174.925032	0.000570	-125.480744
0.000681	-158.452705	1.813037E-5	-161.450573	2.156305E-5	-158.942590	0.000639	-102.605654
0.000563	-135.959217	1.769882E-5	-145.750092	2.158490E-5	-143.956814	0.000696	-80.060947
0.000406	-111.086260	1.761937E-5	-130.780651	2.182487E-5	-129.941746	0.000738	-57.645257
0.000236	-79.245549	1.788446E-5	-116.202112	2.239606E-5	-116.633245	0.000759	-35.522767
0.000111	-7.152901	1.853198E-5	-101.828895	2.332230E-5	-103.511841	0.000767	-13.564988
0.000191	75.252108	1.952424E-5	-86.641885	2.458414E-5	-90.071628	0.000755	8.386803
0.000307	105.845465	2.078821E-5	-70.663194	2.606321E-5	-75.757684	0.000734	29.839781
0.000399	127.388877	2.217163E-5	-53.157058	2.764711E-5	-60.295816	0.000703	51.774846
0.000459	145.174980	2.348104E-5	-34.413018	2.910316E-5	-43.602250	0.000662	73.716384
0.000488	161.070724	2.462401E-5	-14.694811	3.030475E-5	-25.592495	0.000620	95.427663
0.000495	175.785532	2.555244E-5	6.395078	3.088909E-5	-6.676331	0.000572	117.695312
0.000487	-170.425251	2.616967E-5	28.057974	3.101554E-5	13.363169	0.000532	139.532420
0.000455	-157.619151	2.647008E-5	50.715557	3.065412E-5	34.280536	0.000489	162.249802
0.000422	-142.529756	2.641745E-5	74.112592	2.980813E-5	56.397812	0.000452	-175.007335
0.000382	-124.699258	2.621867E-5	98.232280	2.858299E-5	79.328968	0.000416	-151.941508
0.000341	-102.241385	2.586018E-5	122.926032	2.706858E-5	103.386471	0.000382	-128.005442
0.000292	-72.713731	2.530125E-5	147.948564	2.540217E-5	128.201824	0.000345	-103.485155
0.000266	-36.055758	2.457856E-5	173.378820	2.375882E-5	154.020532	0.000307	-80.506579
0.000292	6.380297	2.387388E-5	-161.160048	2.214317E-5	-179.886739	0.000264	-55.498485
0.000345	42.952028	2.293681E-5	-135.692576	2.067802E-5	-152.909844	0.000221	-31.044753
0.000419	73.614599	2.195932E-5	-110.195697	1.920862E-5	-126.278181	0.000175	-5.895044
0.000481	98.724300	2.079862E-5	-84.485722	1.785031E-5	-99.513924	0.000128	20.305350
0.000501	119.976127	1.964629E-5	-58.942151	1.666775E-5	-72.388149	8.572712E-5	46.690378
0.000482	140.240961	1.839510E-5	-32.711697	1.539388E-5	-46.137382	4.959187E-5	82.294150
0.000437	156.872262	1.714247E-5	-6.081347	1.406105E-5	-19.004390	2.777092E-5	158.658163
0.000366	169.518977	1.597510E-5	21.477937	1.282072E-5	8.964188	3.776280E-5	-134.053734
0.000295	175.916030	1.494368E-5	49.485075	1.169230E-5	37.271968	5.722064E-5	-87.261003
0.000240	174.188675	1.418651E-5	78.223119	1.073212E-5	66.521656	6.563023E-5	-65.758316
0.000234	166.211037	1.378183E-5	107.263136	1.006102E-5	96.684584	7.494563E-5	-47.023306
0.000255	165.054376	1.368116E-5	135.652267	9.660002E-6	126.563872	6.807801E-5	-33.113968
0.000285	173.222076	1.388242E-5	163.462197	9.534360E-6	156.119056	6.743410E-5	-26.413590
0.000290	-171.458322	1.419469E-5	-169.505853	9.531750E-6	-175.904212	7.310330E-5	-23.093544
0.000253	-152.261075	1.447568E-5	-143.453756	9.508994E-6	-148.396725	8.448435E-5	-17.633600
0.000191	-125.354402	1.461296E-5	-118.431958	9.406531E-6	-121.827696	9.839580E-5	-4.109881
0.000105	-81.367084	1.462496E-5	-93.903389	9.161903E-6	-96.305782	0.000115	11.863978
0.000103	8.036676	1.443782E-5	-69.880642	8.658039E-6	-70.550564	0.000130	31.053333
0.000195	60.682614	1.405820E-5	-46.019963	7.987089E-6	-44.537033	0.000141	51.896147

Channels	8							
Samples	101	101	101	101	101	101	101	101	
Date	2005/12/06	2005/12/06	2005/12/06	2005/12/06	2005/12/06	2005/12/06	2005/12/06	2005/12/06	
Time	20:30:18.382999		20:30:18.382999		20:30:18.382999		20:30:18.382999		20:30:18.382999
	20:30:18.382999		20:30:18.382999		20:30:18.382999				
X_Dimension		Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time
X0	0.00000000000000000E+0		0.00000000000000000E+0		0.00000000000000000E+0		0.00000000000000000E+0		0.00000000000000000E+0
	0.00000000000000000E+0		0.00000000000000000E+0		0.00000000000000000E+0				
Delta_X	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
End_of_Header									
X_Value	Untitled	Untitled 1	Untitled 2	Untitled 3	Untitled 4	Untitled 5	Untitled 6	Untitled 7	Comment
	0.000741	176.612169	3.746002E-5	3.926075	8.367053E-6	113.737469	0.000851	-68.146411	
	0.000735	171.560435	3.560177E-5	22.800647	6.509478E-6	138.092455	0.000740	-43.686219	
	0.000835	169.531176	3.336376E-5	41.802354	4.929892E-6	166.159990	0.000624	-20.266606	

.

.

파일에 저장되는 자료구성은 크게 메인헤더와 헤더 그리고 데이터부분으로 되어 있다. 메인헤더는 네트워크 자동측정 실행 시 한번만 기록되며 측정이 실시된 날짜와 시각을 기록한다. 다음은 헤더부분으로서 네트워크 분석기 1, 2 포트에서의 샘플링수와 측정시각 등을 기록한다. 마지막 부분은 실직적인 데이터이다. 데이터는 1, 2 포트에 의해 HH, HV, VH, VV 편광모드로 획득되어지며 각각의 모드에 amplitude와 phase가 열 방향으로 기록된다. 또한 행으로는 샘플링 수 (예: 101개) 만큼의 자료가 기록된다. 측정간격에 의한 연속 측정 시에는 헤더부분과 데이터부분이 연속적으로 기록되어 진다.

저장된 데이터는 Microsoft의 excel프로그램을 이용하여 amplitude와 phase의 변화 그래프로 분석된다. 그래프로 도시화하기 위해서는 저장된 파일 중 헤더 부분

을 제거하고 Excel 방식에 적당한 데이터만을 추출하고 정렬하는 작업이 필요하다. 아래 C언어로 작성한 프로그램으로 불필요한 헤더부분을 제거하였으며, 데이터의 순서를 정렬하였다.

```
#include <stdio.h>

main()
{
    FILE *input, *output1, *output2, *output3, *output4, *output5, *output6, *output7, *output8;

    double HHam, HHph, HVam, HVph, VHam, VHph, VVam, VVph;
        int i;
        char dummy[80], mtime[80], mday[80];

    input=fopen("data.in","r");

    output1=fopen("VV_amp.out", "w");

    output2=fopen("VV_pha.out", "w");

        output3=fopen("VH_amp.out", "w");

    output4=fopen("VH_pha.out", "w");

        output5=fopen("HV_amp.out", "w");

    output6=fopen("HV_pha.out", "w");

        output7=fopen("HH_amp.out", "w");

    output8=fopen("HH_pha.out", "w");

        /* remove first header */
        for(i=0; i<21; i++)
        {
                fscanf(input, "%s", dummy);
                printf("%s ", dummy);
        }


  while(fscanf(input, "%s", dummy)!=EOF)
        {

                /* read header */
                for(i=0; i<18; i++)
                {
                        fscanf(input, "%s", dummy);
                /*      printf("%s ", dummy); */
                }
                 /* output time */
                fscanf(input, "%s", mday);
                fscanf(input, "%s", dummy);
                fscanf(input, "%s", mtime);
                printf("%s ,%s", mday, mtime);


                for(i=0; i<52; i++)
                {
                        fscanf(input, "%s", dummy);
                /*      printf("%s ", dummy); */
                }


    fprintf(output1, "%s %s,", mday, mtime);
    fprintf(output2, "%s %s,", mday, mtime);
    fprintf(output3, "%s %s,", mday, mtime);
    fprintf(output4, "%s %s,", mday, mtime);
    fprintf(output5, "%s %s,", mday, mtime);
    fprintf(output6, "%s %s,", mday, mtime);
    fprintf(output7, "%s %s,", mday, mtime);
    fprintf(output8, "%s %s,", mday, mtime);
```

```
                                        /* read and write data */
                for(i=0; i<101; i++)
                {
                        fscanf(input, "%lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf", &HHam, &HHph, &HVam, &HVph, &VHam,
&VHph, &VVam, &VVph);
                        fprintf(output1, "%lf,", HHam);
                        /*printf("%lf \n", HHam);*/

                        fprintf(output2, "%lf,", HHph);
                        /* printf("%lf \n", HHph); */

                        fprintf(output3, "%lf,", HVam);
                        /*printf("%lf \n", HHph);*/

                        fprintf(output4, "%lf,", HVph);
                        /*printf("%lf \n", HHph); */

                        fprintf(output5, "%lf,", VHam);
                        /*printf("%lf \n", HHph); */

                        fprintf(output6, "%lf,", VHph);
                        /*printf("%lf \n", HHph); */

                        fprintf(output7, "%lf,", VVam);
                        /* printf("%lf \n", HHph); */

                        fprintf(output8, "%lf,", VVph);
                        /*printf("%lf \n", HHph); */
                }
    fprintf(output1, "\n");
    fprintf(output2, "\n");
    fprintf(output3, "\n");
    fprintf(output4, "\n");
    fprintf(output5, "\n");
    fprintf(output6, "\n");
    fprintf(output7, "\n");
    fprintf(output8, "\n");
 }

    fclose(input);
        fclose(output1);
        fclose(output2);
        fclose(output3);
        fclose(output4);
        fclose(output5);
}
```

실내 및 현장 실험에서 사진을 측정함에 있어서도 노트북 컴퓨터를 이용하여 자동 측정이 이루어지도록 시스템을 구성하였다. 노트북과 디지털 카메라를 USB로 연결하였고, 카메라 제작사에서 제공되는 소프트웨어를 이용하여 최대 1시간 간격으로 연속적으로 촬영하도록 하였다. 이로서 수동 촬영시의 손 떨림 현상을 없앴고 장기간 관측시 영상간 정합 과정이 필요 없을 정도로 정확한 사진들을 얻을 수 있었기 때문에 동영상의 제작에 바로 사용될 수 있었다.

3.2. PolScat 시스템 안정성 평가

이 연구에서 측정되는 PolScat 신호의 크기(amplitide)와 위상(phase)은 매우 정밀한 값을 수 주에 걸쳐 장기간 관측하여야 하기 때문에 시스템의 안정성과 자료의 정밀성에 대한 실험이 반드시 수행되어야 한다. 벡터 네트워크 분석기는 Calibration kit을 이용하여 시스템을 보정할 수 있도록 되어 있으나 이것만으로는

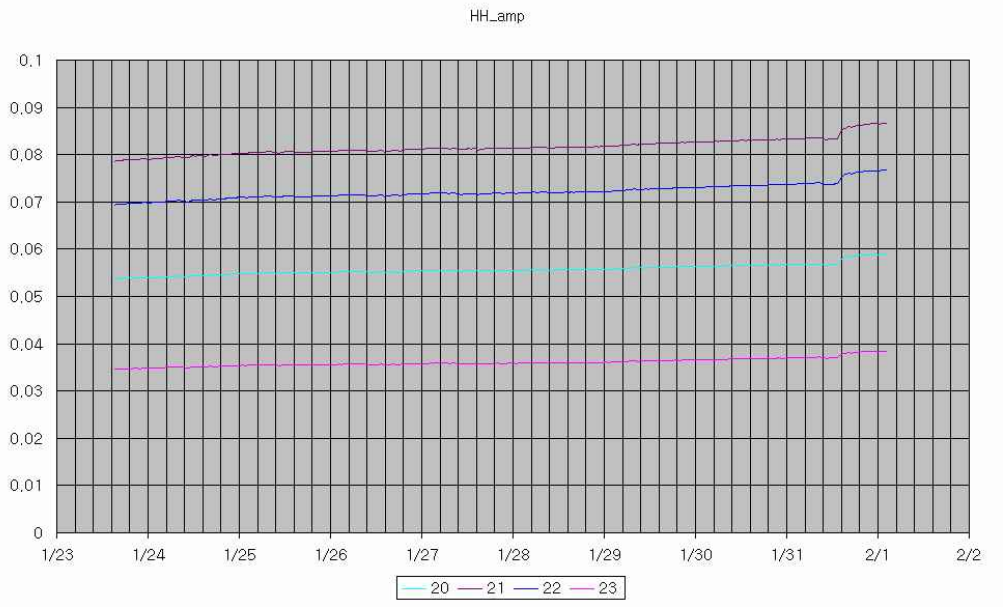
장기 관측시 신호의 미세 변화 특성을 알아낼 수 없다. 이러한 장기 관측의 경우 신호의 미세한 편향 현상을 보이는 원인을 분석함으로서, 여러 환경적 요인에 대응하는 시스템의 특성을 알아내고, 그 요인을 회피하는 지표로 사용될 수 있다.

PolScat의 안정성 평가를 위해서는 구조적, 전기적 변화가 없는 대상체(target)가 필요하며, 사람에 의한 잡음을 최소화할 필요가 있다. 대상체는 한 변이 50cm인 trihedral corner reflector를 사용하였다. 실험 장소는 갯벌건조 실험을 했던 곳과 비슷한 장소로 하였으며, 사람의 출입이 없도록 무인 자동측정 하였다. 안테나의 look angle은 갯벌 건조 실험 때와 마찬가지로 45°로 하였다. HH, HV, VH, VV 편광의 amplitude와 phase의 변화를 30분 간격으로 10일간 측정하였다.

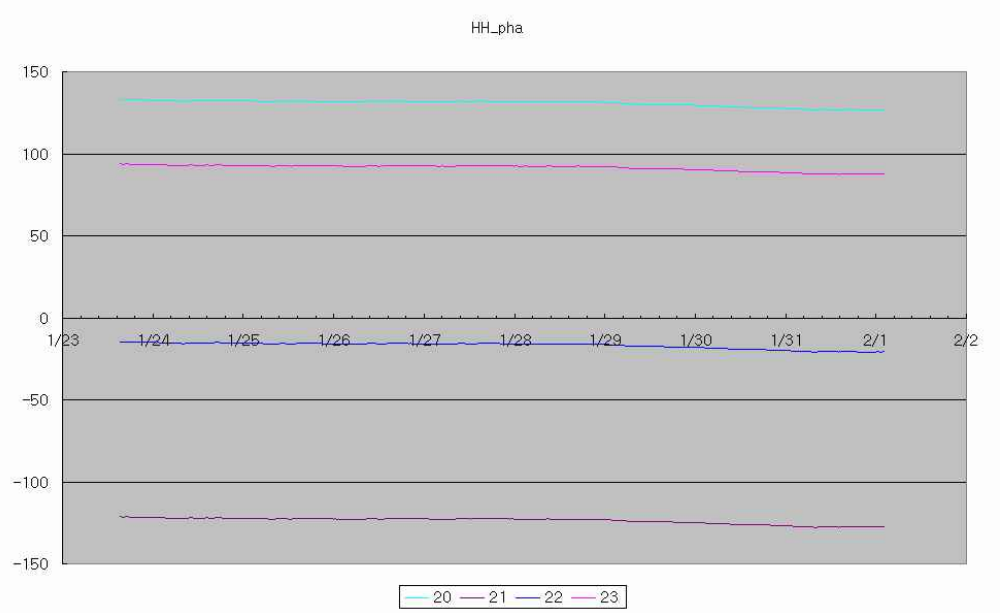
그림 2는 10일간 측정된 HH 편광에서의 (a) amplitude, (b)phase 변화를 나타낸 결과로서, 다른 편광의 자료에서도 이와 유사한 패턴을 보여주었다. 먼저 amplitude의 변화를 보면 시간이 지남에 따라 점차 증가하는 양상을 보이고 있으나 증가폭이 최대 후방산란계수의 0.1 unit 중에서 0.005 unit 이하로서 약 5% 미만의 변화를 보이고 있다. 이러한 변화는 측정 기간 중 온도와 습도의 미세한 변화가 있음이 확인되었으나, 이를 정량화하여 밝힐 자료를 얻지는 못했다. 실험 마지막 날인 1월 31일 오후에는 실험실에 무단 출입자가 있었고 신호에 큰 폭의 변화를 보이고 있으나, 어떠한 영향에 의한 것인지는 밝혀낼 수 없었다. 다만, 바람에 의한 corner reflector 위치 및 각도의 미세한 변화, 안테나와 네트워크분석기를 연결하는 케이블의 위치 변화, 안테나의 미세한 위치 변화 등이 신호에 큰 오차를 줄 수 있다는 것을 인지하였고, 향후 실험에서 이를 배제해야 함을 알 수 있었다.

phase의 변화양상에서는 실험 시작 후 6일 동안에는 약 1°의 위상 감소가 나타나는데, 이는 거의 일정하다고 할 수 있다. $\phi = 1^\circ$ 인 경우 파장 $\lambda = 5.6cm$인 시스템에서 $R = 0.08mm$ 정도로 기기의 오차 정도로서 매우 안정화 되어있다고 볼 수 있다. 그러나 6일 이후인 1월 29일 이후에는 감소의 폭이 심화되어 실험 종료 시기인 2월 1일 오전까지 약 6°의 차이를 보이는데, 이것은 실험실을 일정한 온도와 습도를 유지하지 않은 상태에서 측정하였기 때문인 것으로 여겨진다. 실제로 춘천지역의 일평균 기온과 습도를 살펴보면(그림 3) 1월 29일부터 영상의 날씨를 보여주고 있다. 그러나 실내 실험 장소에서의 온도 습도 자료를 얻지 못하여 보다 자세한 연관성을 찾을 수 없었다.

결론적으로, 장기간의 실내 실험에서는 온도와 습도의 유지 및 시스템의 안정성을 확보하기 위하여 무인 관측을 실행해야하며, 시스템의 주변 환경에 변화를 최소화하는 각별한 노력을 기울여야 하는 것으로 밝혀졌다.



(a) HH amplitude 변화 (y축은 unit, x축은 2006년 월/일)



(b) HH Phase 변화 (y 축은 degree, x축은 2006년 월/일)

그림 2. PolScat 안정성 실험 결과.

그림 3. PolScat 안정성 실험 당시 춘천지방 일평균 기온 및 습도 (기상청 http://www.kma.go.kr)

3.3. Radarsat-1 SAR 영상과 산란계 실내 실험을 통해 관찰된 조간대 갯벌 건조시 레이더 후방산란계수의 M형 변화

1) 서론

우리나라의 갯벌은 총 28,000㎢에 달하며 대부분 펄과 모래로 이루어졌다(고철환, 2001). 조간대 갯벌에서는 약 12시간 25분을 주기로 조석간만이 발생하며, 특히 썰물시 해수면위로 노출된 조간대에서는 배수, 증발, 건열, 생물체 교란 등이 일어나면서 갯벌의 구조적, 전기적 성질에 변화를 일으키게 된다. 이 연구에서는 조간대 갯벌이 건조될 때 유전율(dielectric constant)과 거칠기(roughness)의 변화로 인한 레이더 후방산란계수(σ°)의 변화를 살펴보기 위하여 Radarsat-1 SAR 영상 분석과 다편광 산란계(polarimetric scatterometer)를 이용한 실내실험을 수행하여 비교 분석하였다.

2) SAR 영상 분석

연구지역은 경기도 화성시 서신면 제부도 일대의 조간대 갯벌을 대상으로 하였다. 건조에 따른 조간대 갯벌의 후방산란을 분석하기위해 Radarsat-1 SAR

영상, 조위자료, 증발자료를 이용하였다.

Radarsat-1 SAR 영상은 2001년 1개, 2003년~2004년 14개를 사용하였다(표 1). 이 영상들은 S5 ascending 모드로 대략 18시 30분에 획득되었다. 이 시각은 12.42시간의 조석간만주기에 따라 주로 낮 시간 동안 일어나는 갯벌표면의 건조를 관측할 수 있는 이상적인 시각이라 할 수 있다. 각각의 SAR 영상은 후방산란계수로 변환되었으며, 연구지역에서 노출시간이 최대가 되는 상부조간대 영역들을 설정하여 값을 추출하였다(그림 4).

후방산란계수와 갯벌의 수분함량의 관계를 분석하기 위해서는 영상 획득 당시현장에서 계측된 수분함량 자료가 필요하지만, 이러한 자료는 전무하다. 따라서 이 논문에서는 갯벌의 '노출시간'과 일일 '증발량'이 토양 수분함량과 반비례한다고 가정하였다.

연구지역 갯벌의 '노출시간'을 계산하기 위해서는 조간대 고도 자료(DEM)가 필요하다. DEM은 15개 SAR 영상의 water-line을 추출하고 검조기록부 상의 조위를 통해 구축하였다. 제부도 일대의 경우 조위관측소가 없는 관계로 남동방향으로 25km 떨어진 평택조위관측소의 검조기록부를 바탕으로 하여 보정하여 사용하였다. 각 영상이 획득될 당시 water-line 조위와 연구지역 고도의 차이를 이용하여 조위 곡선에 따라 갯벌의 노출시간을 계산하였다. 노출 시간에 따른 후방산란계수의 변화는 그림 5와 같다. 노출 시간에 따라 일정한 경향성 없이 매우 복잡한 양상을 보이고 있다. 여기서 각 날짜의 증발량을 무시하고 노출 시간에 따른 유기적인 변화 양상을 기대할 수 없기 때문에, 다음과 같이 증발량을 자료분석에 사용하였다.

연구지역의 '증발량'은 인천 기상대에서 매일 측정된 증발량을 사용하였다. 2001년에서 2005년까지 증발량의 최대치인 8.5mm를 기준으로 영상획득일의 증

표 1. Radarsat-1 SAR 영상, 평택조위관측소 조위자료, 인천 기상대 증발량 자료.

번호	영상획득일	조위(cm)	증발량(mm)
1	20010703	443	1.2
2	20030506	702.5	1.0
3	20030530	629	4.9
4	20030623	310	1.5
5	20030717	781.5	1.1
6	20030810	451	1.1
7	20030927	908	2.8
8	20031021	301.5	0.9
9	20040218	595.5	2.3
10	20040711	287.5	0.9
11	20040804	828	6.5
12	20040828	507	3.0
13	20040921	583	2.5
14	20041015	875	2.8
15	20041108	310	0.9

발량을 정규화 하여 [0,1]로 나타내었다. 이 값에 노출시간에 곱하여 '증발시간'을 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{증발시간} = \text{노출시간} \times \text{정규증발량} \quad (1)$$

즉, 증발시간은 갯벌의 노출시간과 증발량을 함께 고려한 것으로서, 영상획득 당시의 갯벌 수분함량의 지표로 사용되었다. 그림 6은 증발시간에 따른 후방산란계수를 그래프로 도시한 결과이다. 일반적으로 토양수분함량이 작아지면 유전율의 감소로 인하여 마이크로파의 후반산란이 작아지는 것으로 알려져 왔다(Ulaby *et al.*, 1981). 그러나 분석 결과, 증발시간에 따른 후방산란계수의 변화가 단조로운 감소 형태를 보이지 않고 있음을 알 수 있다. 대신, 증발시간 초기에는 후방산란이 증가하였다가(AB) 감소하고(BC), 다시 증가하는(CD) 다소 복잡한 양상을 보이고 있다.

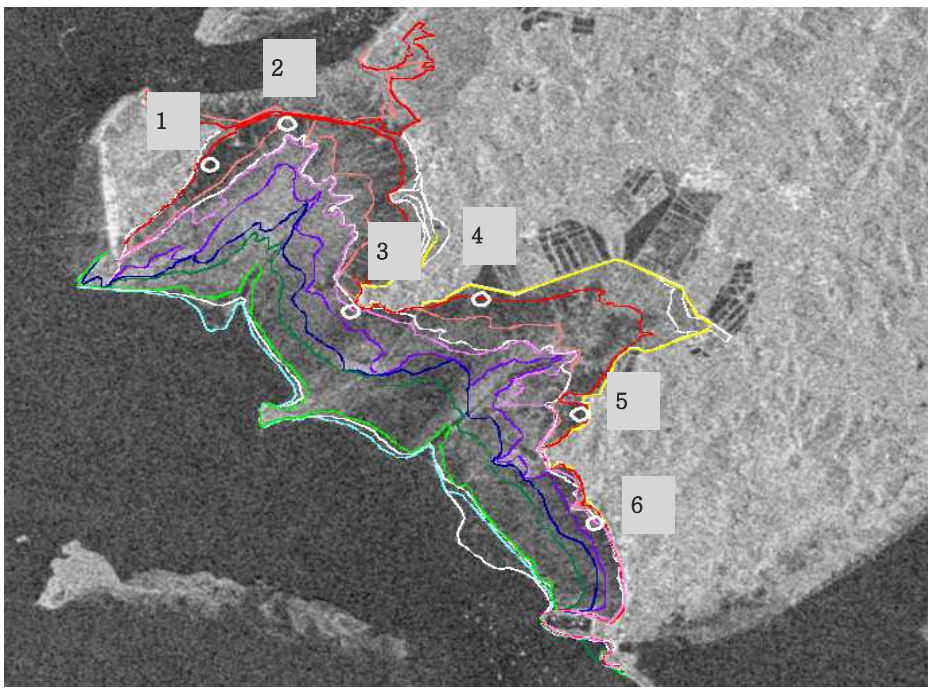


그림 4. Water line 방법에 의한 DEM 및 후방산란계수 추출 지역(1-6).

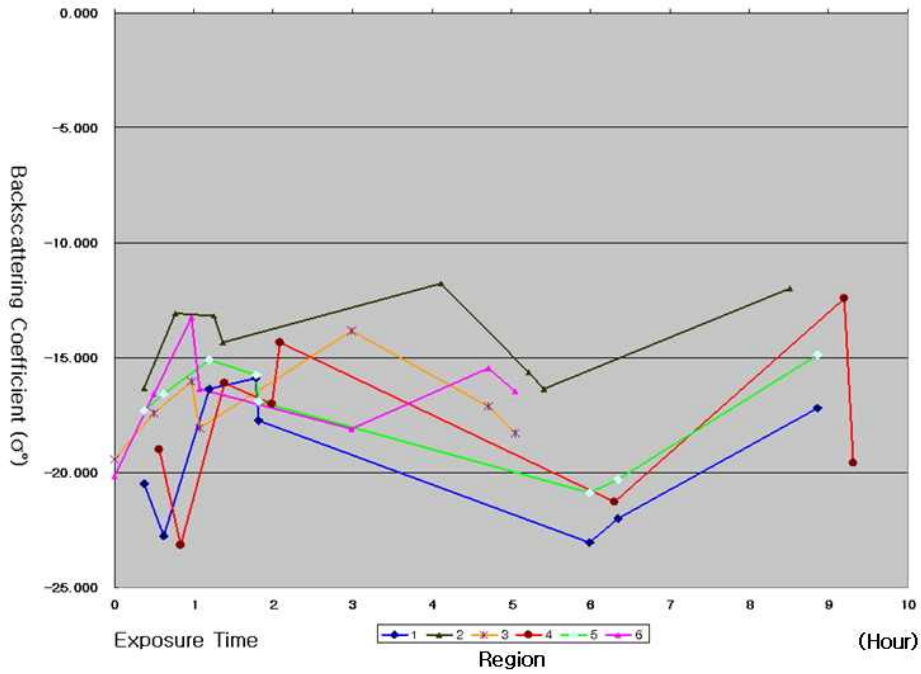


그림 5. Radarsat-1 SAR 조간대 영상에서 노출시간에 따른 후방산란계수.

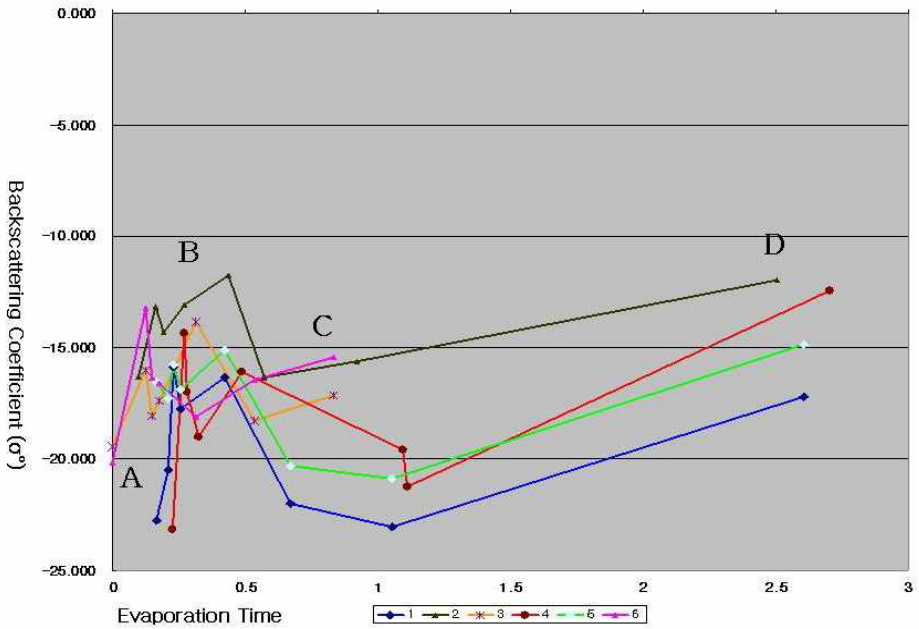


그림 6. Radarsat-1 SAR 조간대 영상에서 증발시간에 따른 후방산란계수.

3) 산란계 실내 개펄 건조실험

위에서 살펴본 Radarsat-1 SAR 영상의 증발시간에 따른 후방산란 관계를 해석하기 위해 네트워크 분석기와 마이크로파 안테나를 이용한 다편광 산란계를 구성하여 실내 갯벌 건조실험을 하였다(그림 7, 8). 중심주파수가 Radarsat-1과 같은 5.3GHz인 Dual-Polarization Square Horn 안테나를 사용하였으며, 대역은 600MHz로서 거리해상도는 25cm이고, 빔폭은 15°이다. 벡터 네트워크 분석기는 Agilent사의 8753ES를 사용하였다. 2005년 여름에 실시한 실내 실험(이훈열외 2005)에서는 세로 1.8m, 가로 1.1m, 높이 0.2m 크기의 스티로폼 틀을 이용하였으나, 안테나의 빔 폭 비해 비교적 작은 틀의 영향으로 갯벌의 특성을 안정적으로 획득할 수 없었다. 본 실험에서는 조금 더 큰 크기인 가로 2m, 세로 2m, 높이 0.2m의 스티로폼 틀에 기존의 갯벌과 제부도에서 추가적으로 채취한 개펄을 혼합하여 넣었다. 개펄은 약 15cm 정도의 두께로 채워졌으며 약 1톤의 무게에 달한다. 바닥에서 안테나까지의 높이는 205cm로 하였고, 안테나의 look angle은 45°로 하였다. 안테나 스탠드와 갯벌샘플까지의 거리는 1m이다.

갯벌의 샘플과 안테나와의 거리는 마이크로파의 왕복거리로 전면부 15ns, 중앙부 19ns, 후면부 25ns이다. 측정은 10ns에서 30ns의 범위로 하였고 샘플링 수는 101개로 하여 갯벌의 건조에 의한 후방 산란값의 amplitude와 phase의 변화를 HH, HV, VH, VV편광으로 획득하였다. 기존 갯벌의 건조실험에서는 네트워크 분석기의 계측이 매 측정시마다 사람에 의해 수동으로 이루어 졌으나, 이 실험에서는 노트북에 의한 네트워크 분석기의 제어로 무인 자동 계측이 이루어졌다. 실험과정에서의 사진기록을 위해 디지털카메라를 사용하였다. 이 디지털카메라를 USB 커넥터로 노트북에 연결하였고, 카메라의 제어 전용프로그램으로 원격촬영과 인터벌 촬영을 실행하여 자동촬영 하도록 하였다. PolScat 측정 자료와 사진촬영 자료는 네트워크를 통해 실험실 외부에서 접근할 수 있어 장비와 자료획득의 이상 유무를 원거리에서 확인할 수 있다. 이로서 실험실의 완전 무인화를 실현하여 사람의 접근에 의한 노이즈를 최소화 할 수 있었다. 갯벌 건조 과정의 amplitude와 phase의 변화를 편광 모드로 10분 간격으로 계측하였으며, 사진기록은 1시간 간격으로 자동촬영이 이루어졌다.

갯벌건조 실험은 2005년 12월 6일부터 2006년 1월 20일까지 44일간 실시되었다. 2005년 여름에 시행되었던 실험이 비슷한 건조과정을 보이기까지 약 3주간 기간이 소요된 것에 비하면, 상당히 오랫동안 실험이 실시되었다. 이는 이전 실험이 실내온도가 평균 25℃에 달하는 고온의 환경이었던 것에 반해, 평균 18℃ 정도에 머무르는 겨울철의 실내 온도에 의한 것이라 할 수 있다.

밀물과 썰물에 의해 갯벌이 노출되기 직전의 갯벌을 모사하기 위해 샘플에 물을 채웠다. 물을 채우고 몇 시간이 흐른 뒤 개펄이 침전되면서 표면이 1cm 정도의 맑

은 물로 덮이게 되었다. 이후 펄 속에 숨어있던 고동이 밖으로 나와 교란을 일으킴으로써 표면이 더욱 자연 갯벌 상태에 가깝게 되었다. 실험실이 지하이고 겨울에 실험이 이루어진 관계로 증발을 가속화하기 위하여 라디에이터를 사용하여 실내 온도를 20℃로 유지하였으며, 겨울철의 건조한 기후조건 덕분에 습도는 30%를 유지할 수 있었다.

그림 9는 갯벌 건조 실험 과정을 촬영한 사진 중 중요한 장면을 도시한 것이다. 당초 물이 고여 있는 상태에서 물의 순수한 증발에 의한 갯벌의 변화를 보고자 하였으나, 스티로폼 틀에 구멍에 생겨 물이 빠져 나가기 시작하였다(그림 9a). 그러나 이것은 오히려 썰물에 의해 갯벌표면의 물이 배수되는 자연현상을 모사하게 되는 계기가 되었다. 물이 배수된 후 개벌표면에는 웅덩이에 의해 배수가 안 된 물이 부분적으로 고여 있었다(그림 9b). 증발에 의해 갯벌샘플이 건조되면서 부피가 감소하여 수직 침하가 일어나기 시작하였으며, 수직 침하가 거의 끝난 시점에서 체적수축에 의해 수평적인 수축이 발생하기 시작하였다. 이와 동시에 개펄의 건조가 심화 되면서 샘플의 후면부에서부터 건열이 발생하기 시작하였다. 먼저 개펄 샘플의 far range인 21ns에서 건열이 시작되었고(그림 9c), 점차적으로 샘플의 중심부분이자 mid range인 19ns로 건열이 확대되었다(그림 9d). 흥미로운 것은 샘플의 바닥에 비닐을 깔려 있었는데, 이것이 미끄럼 작용을 하여 샘플 전체에서 수평적인 수축이 매우 원활하게 일어나 기존 실험에서보다 건열이 심하게 발생하지 않았다. 이후 건열은 더 이상 발달하지 않고 구조적으로 안정화 되었으며(그림 9e), 지속적인 건조가 이루어지면서 소금기가 올라오기 시작 하였고(그림 9f) 갯벌 샘플의 침하 또한 안정화 되었다. 이 상태로 일주일간 방치하였으나, 실내 온도가 낮아 2005년 여름에 보았던 완전 건조의 진행이 매우 더디었다. 따라서 실험 기간을 단축하고자 실험 실험시작 30일 후(06년 1월 5일) 온풍기와 선풍기를 가동하여 실내 온도를 약 28℃, 습도 약 20%로 유지하여 건조를 가속화하였다. 표면에 소금기가 전체적으로 올라 왔으나 구조적인 큰 변화는 없었다(그림 9g). 이처럼 표면에 구조적 변화가 없는 상태에서 토양 수분변화로 인한 마이크로파의 침투 현상을 보는 것 또한 이 실험의 중요한 목표가 된다.

실험 마지막에는 이전 실험과 같이 분무기를 이용하여 갯벌 표면에 수분을 일정하게 공급하여 측정을 하였다(그림 9h). 이는 갯벌의 건조 후 표면의 변화 없이 수분의 변화를 주었을 때를 보기 위함이다. 표면에 수분을 공급할 때마다 1분 간격으로 5회 측정하였으며, 5회 측정자료 중 표면이 안정화된 마지막 자료만을 취하였다. 총 4시간에 걸쳐 45회 측정하였으며 이 중 13개의 자료를 사용하였다.

토양의 수분 측정을 위해 TDR 방식의 토양수분계를 사용하려 하였으나 염분에 의해 측정이 불가하였다. 토양의 수분은 필요에 따라 샘플을 채취하여 초기질량을 측정하고 오븐에 넣어 건조시킨 후 건조 질량을 측정하여 계산하는 방식으로 하였다.

중량식 토양수분함량 = (초기질량/건조질량-1)× 100% (2)

수분이 포화된 초기의 중량식 토양수분함량은 약 60%, 실험이 시작된 지 2주후 온풍기 가동 직전은 15%, 온풍기 가동 후 완전 건조 시에는 5%까지 낮아진 것으로 측정되었다. 그 후 스프레이 실험을 통하여 다시 토양 수분은 50%까지 점진적으로 높아졌다.

갯벌샘플은 안테나로부터 마이크로파의 왕복거리 10ns에서 30ns 사이에 존재한다. 이 중에서 개펄 샘플의 중심부를 대표할 수 있는 지점을 찾아내어 장기간 지속적인 관측 자료를 해석하는 것이 중요하다. 이 전의 실험에서는 실험초기의 신호의 세기가 가장 큰 곳을 샘플의 중심으로 하여 자료로 획득하였으나, 그림 10과 같이 실험초기에 신호의 크기가 커서 샘플의 중심이라 생각했던 지점이 시간이 지남에 따라 서서히 이동하여 19ns에서 신호가 크게 나타났다. 이는 실험 초기에 개펄 샘플의 중심부에서는 고인 물의 특성상 amplitude가 매우 약하고 샘플 주변부에서 수분이 많이 존재하여 후방산란계수가 매우 큰 값을 보이는 것이다. 그 후 주변부 수분이 빠르게 건조하고 개펄에 배수와 증발이 일어나면서 19ns로 신호의 중심이 이동하여 개펄의 후방 산란 값을 대표하고 있음이 밝혀졌다. 따라서 온전한 자료의 보전으로 인하여 개펄의 중심부를 정확하게 찾아낼 수 있었다.

획득된 자료 중에서 Radarsat-1과 같은 HH 편광 자료를 살펴보면 갯벌이 건조해짐에 따라 후방산란계수는 단순한 증가나 감소를 보이지 않고 유전율과 표면 거칠기의 변화에 따라 그림 11과 같이 다소 복잡한 형태를 보이고 있다. 개펄 중앙부인 19ns의 후방 산란 변화 양상을 살펴보면, 실험 초기에는 개펄이 물로 가득 차 있어 전반사를 일으켜 후방산란계수가 아주 낮았다(그림 11A, 그림 9a). 그 후 물이 빠지자 표면 거칠기가 증가하여 후방산란이 증가하였다(그림 11A-B, 그림 9a-b). 표면에 고여 있던 물기가 완전히 사라진 후 건조가 시작되면서는 개펄의 유전율 감소로 후방산란 또한 감소하였다(그림11B-C, 그림 9b-c). 시간이 지나 갯벌 샘플이 충분히 건조되면서 건열이 발생하기 시작하였다(그림 11C, 그림 9c). 건열로 인한 표면 거칠기가 계속 증가하면서 후방산란도 증가하였다(그림 11C-D, 그림 9c-d-e). 건열이 충분히 발달하고 구조적으로 안정된 후(그림 11D, 그림9e)에는 건조가 계속해서 일어남으로써 유전율이 감소하여 후방산란도 감소하였다(그림 11D-E, 그림 9e-f).

실험 후반부에 건조를 증대시키고자 온풍기와 선풍기를 가동하여 실내 온도 28℃, 습도 20%로 유지시키자 후방산란계수의 감소 양상이 두드러지게 나타났다(그림 11E 이후, 그림 9f-g).

결과적으로, 썰물시 갯벌의 후방산란계수는 초기 배수에 따라 증가(AB), 증발에 따른 감소(BC), 건열발생에 따른 증가(CD), 그리고 지속적 증발에 따른 감소(DE)의 M형 변화를 보인다고 할 수 있다.

한편, 그림 11의 A-B 중간에 후방산란계수가 잠시 감소하였다. 이것은 갯벌 샘플 전면부의 바닥과 스티로폼에 있던 수분이 증발한 영향으로서, 자연 상태에서는 볼 수 없는 실내실험의 경계효과이다. 이는 샘플의 전반부인 17ns에서 후방산란이 특히 급격하게 감소하는 것으로 확인할 수 있다. 또한, 건열이 샘플 후면부에서 먼저 발달하기 시작하였는데, 이는 21ns에서 후방산란 증가가 19ns 보다 먼저 일어나는 것으로 확인할 수 있다(그림 11C′).

그림 7. PolScat을 이용한 실내 갯벌 건조실험 현장.

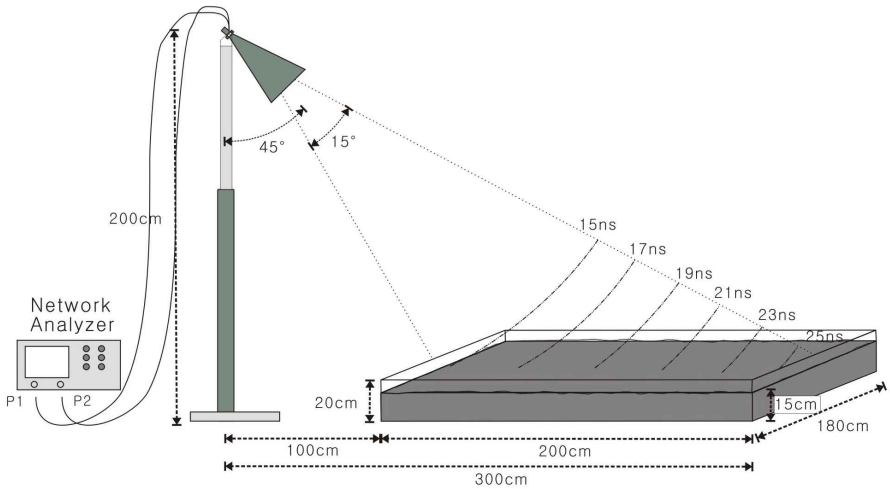


그림 8. 산란계를 이용한 실내 갯벌 건조실험 모식도.

(a) 실험 초기(표면 flooding)

(b) 배수 후 증발 시작

(c) 21ns 건열시작

(d) 19ns 건열시작

(e) 건열완료 후 증발

(f) 지속적 건조

(g) 갯벌 실내 건조실험 종료

(h) 분무기를 이용한 수분 공급 실험

그림 9. 갯벌 건조실험 과정

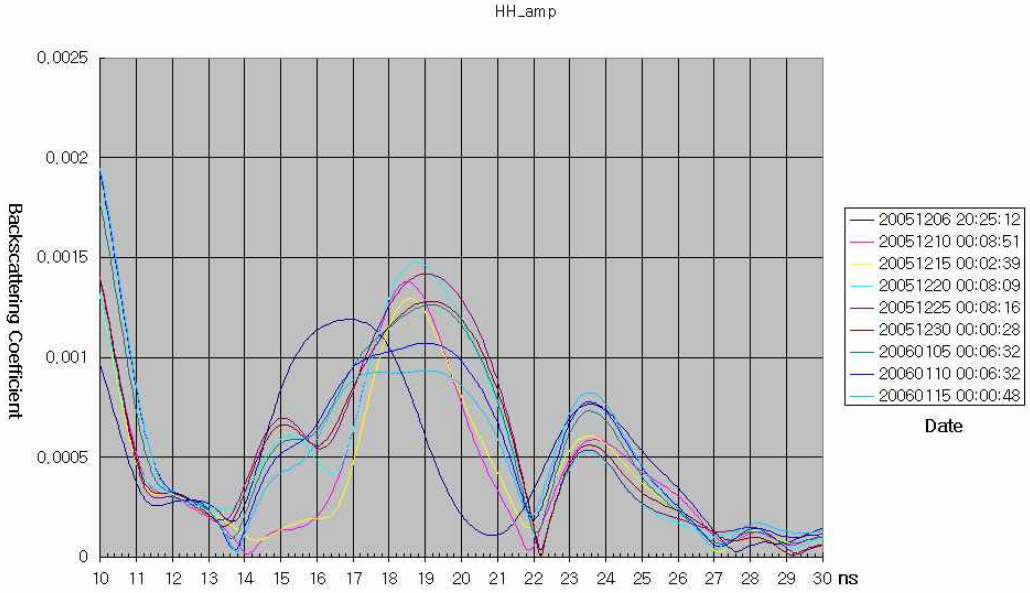


그림 10. 갯벌건조에 따른 amplitude의 range 중심 이동.

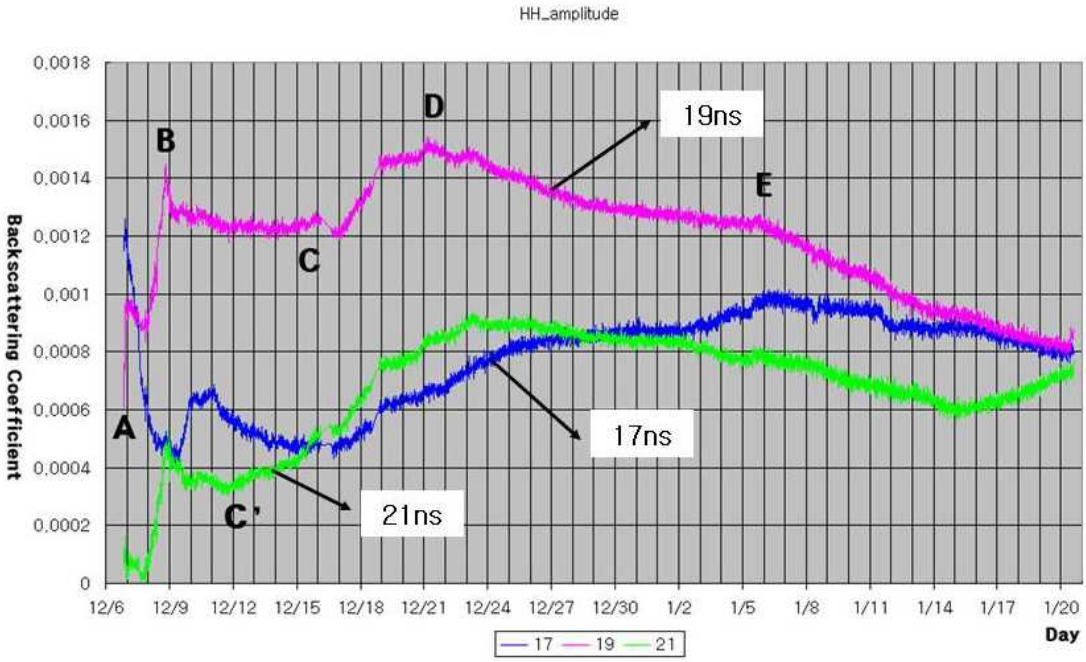


그림 11. 산란계를 이용한 개펄실내 건조실험에서 시간에 따른 개펄 후방산란계수 변화.

3.4 마이크로파 산란계 실험을 통한 개펄 건조시의 지반 침하와 마이크로파 침투 분석

1) 서론

인공위성을 이용한 다시기 SAR 영상의 차분 간섭법 기술(DInSAR)은 자연적이고 인공적인 지표의 움직임을 센티미터 혹은 밀리미터 단위까지 광범위하게 모니터링 하는데 사용되어 왔다. Lee and Chi(2004)는 2002년 물막이 공사가 끝난 서해안 화옹 간척지에서 2003년 9월과 10월 사이에 건조 수축에 의한 최대 30mm의 수직 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 수반되어야한다.

이 장에서는 마이크로파 산란계를 구성하고 간척지 갯벌 환경을 실내에서 모사하여 토양 수분과 지반침하량을 직접 측정하고 마이크로파의 침투 깊이를 측정한 실험을 소개하고자 한다. 실험의 구성과 형식은 위의 실험 내용과 동일하나, 여기서는 위상 자료를 분석하여 수직적 지반침하 및 마이크로파의 개펄 침투 현상을 분석하였다.

2) 실내 개펄 건조실험 위상 자료 해석

개펄은 초기 침전이 완전히 일어나고 배수가 된 후 표면에 고인 물이 모두 증발한 시점인 그림 9(b)의 상태에서 완전 건조시까지 약 11mm의 수직 침하를 일으킨 것으로 실측되었다. 건열이 충분히 발생하여 구조적으로 안정된 이후에는 수직 침하가 거의 일어나지 않았다. 그러나 Radarsat-1과 같은 편광을 가지는 HH에서는 (그림 12), 실험 초기 위상의 최고점에서부터 실험 종료시까지 약 155(±5)도의 위상이 감소하였다. 이는 약 12mm의 range 증가를 뜻하며, 이를 수직 방향의 변위로 환산하면 17mm의 지반침하 혹은 마이크로파의 침투에 의한 산란 중심의 변화라고 할 수 있다. 이 값에서 실측된 11mm의 지반침하를 제외하면 대략 6mm의 값이 마이크로파 침투에 의한 산란 중심의 하강으로서, 침투를 고려하지 않았을 때 수직 침하량으로 오인될 수 있다.

건열 진행이 중단되고 개펄 전체가 소금으로 덮여 구조적으로 안정된 후 위상은 그림 12에서 보듯이 약 50도 정도 감소한 것으로 나타난다. 수직적 침하 현상이 전

혀 없는 상태에서 이러한 위상의 변화는 안테나와 개펄 샘플 사이에 약 4mm의 거리 변화를 의미하며, 이는 수직적으로는 약 5.6mm의 수직 침하량으로 오인될 수 있다. 위 값은 실측 침하량을 이용하여 앞서 계산된 6mm의 오인량과도 비슷한 결과를 보여주고 있다.

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 30여회 측정했다. 스프레이 실험을 시작하자 위상이 급격히 증가하는 양상을 보여주고 있으며, 실험 중단 시까지 다시 약 50도의 위상 증가가 일어났다. 이는 개펄에 토양 수분이 증가하자 19ns에서의 산란 중심이 점차 개펄의 표면으로 다시 상승한 것으로 해석될 수 있어서, 마이크로파의 침투 효과를 반증해 주었다.

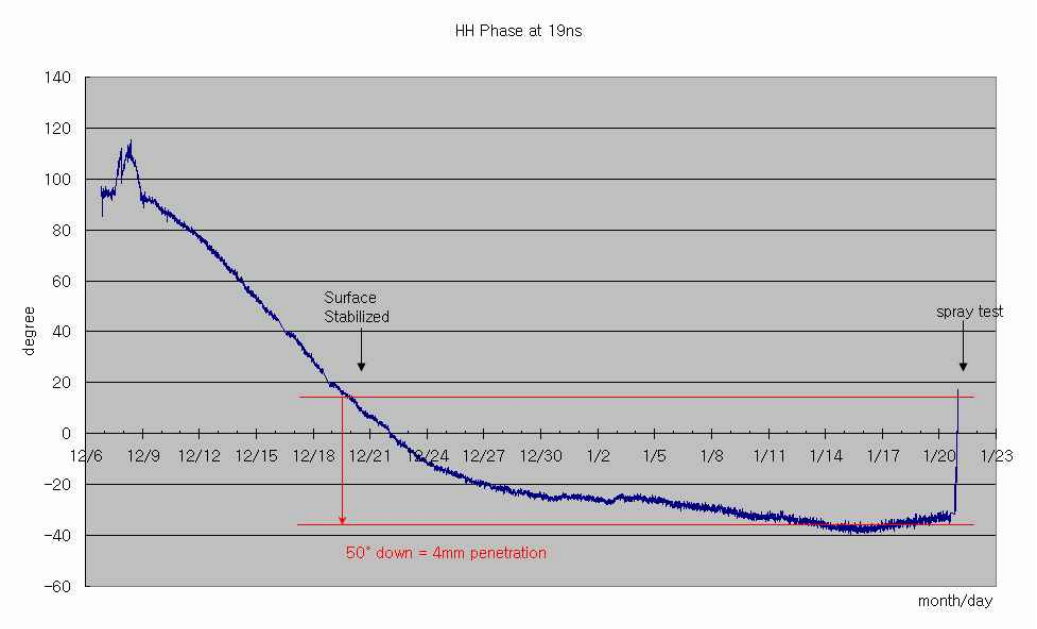


그림 12. HH 편광에서의 갯벌 건조에 따른 phase 변화(19ns).

3.5 PolScat 갯벌 현장 실험

자연 상태의 갯벌에 대하여 건조시 후방산란의 변화를 보기 위하여 현장실험을 실시하였다. 실험지역은 경기도 화성시 서신면 제부도의 조간대 갯벌로 하였으며, 2005년 11월 9일 실시하였다. PolScat 시스템을 갯벌 중심을 관통하는 도로에 설치하여 갯벌의 특성을 잘 살펴볼 수 있었다(그림 13).

안테나의 look angle은 45° 고정하였고, 안테나의 높이는 3m로 하였다. 현장실험 당시 PolScat 시스템은 컴퓨터 제어에 의한 자동 측정이 이루어지기 전 단계였기에 사람에 의해 수동으로 측정이 이루어졌다. HH, HV, VH, VV 편광의 amplituede와 phase의 변화를 5분 간격으로 측정하였다. 사진 촬영은 1시간 간격으로 이루어졌다. 썰물시 낮 동안의 증발에 의한 변화를 관측하는 것이 목적이었기에 측정은 썰물 직후에서 밀물 직전까지 약 7시간 동안 이루어졌다. 그림 14는 낮 동안 조간대 갯벌의 변화 모습을 촬영한 것이다. 이 실험에 앞서 5월과 9월에 현장을 사전 답사하였을 때에는 썰물 뒤 갯벌이 증발에 의해 건열이 발생하는 등 건조가 상당히 진행되어 있으나, 이번 실험에서는 날씨는 좋았으나 11월인 관계로 최고 온도가 섭씨 18도로서 낮아 기대만큼 증발이 일어나지는 못하였다.

그림 15는 현장실험에서 얻어진 range별 amplitude와 phase를 시간 변화에 따라 그래프로 나타낸 것으로서, 실내건조 실험과 같이 HH편광을 도시하였다. range의 중심부인 35ns를 보면, 측정 당시에는 후방산란이 증가하였다 감소하는 양상을 보여 해석상의 어려움이 따랐으나, 이번 실내 건조 실험이후 이것이 썰물에 의한 배수로 인해 구조적으로 서서히 거칠어지면서 후방산란이 증가하였고, 배수가 끝난 후에는 증발에 의해 감소하였다는 것으로 해석할 수 있었다.

현장 실험결과 phase의 변화는 배수, 증발에 의한 표면 거칠기는 증가 하였으나, 갯벌의 건조가 수직 침하와 같은 구조적 변형이 일어날 정도로 증발이 일어나지는 않았다. 결과적으로 range의 중심부인 35ns를 보면, 위상차가 거의 일어나지 않음을 알 수 있다.

이 현장 실험에서는, 실내 실험을 이용한 갯벌의 건조 특성을 사전에 이해하는 것이 매우 중요함을 보여주었다. 그러나 현장 실험 결과 만족할만한 갯벌의 건조에 따른 변화를 관측하기는 어려웠다. 이에, 앞으로 연중 증발량이 가장 많은 5~6월에 PolScat을 이용한 현장 실험을 실시하여 갯벌의 구조적, 전기적 성질의 변화에 따른 밝기와 위상의 변화를 보고자 한다.

그림 13. PolScat을 이용한 제부도 갯벌 변화 관측 실험 현장.

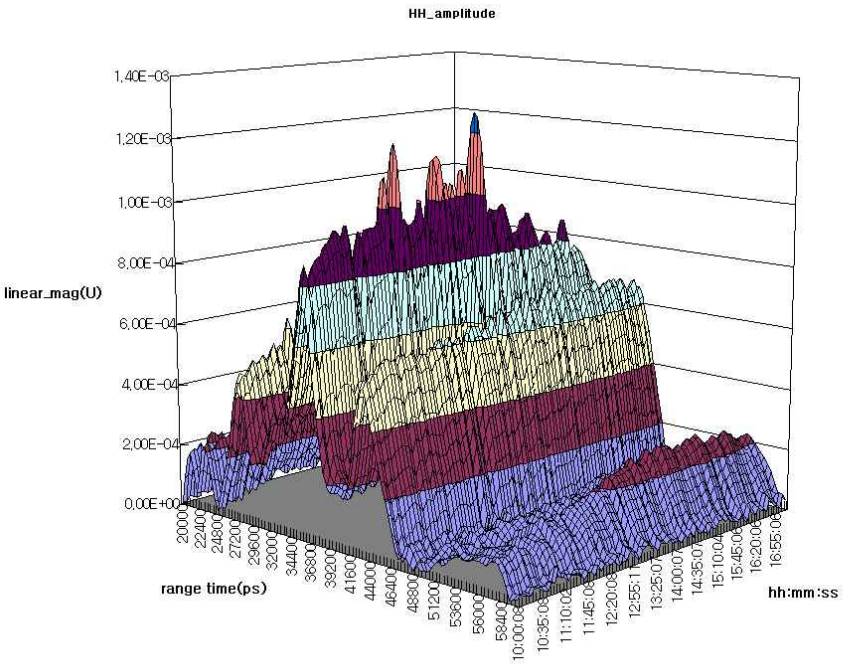
(a) 썰물직후 배수 (10:00)

(b) 배수. 표면 거칠기 증가 (12:00)

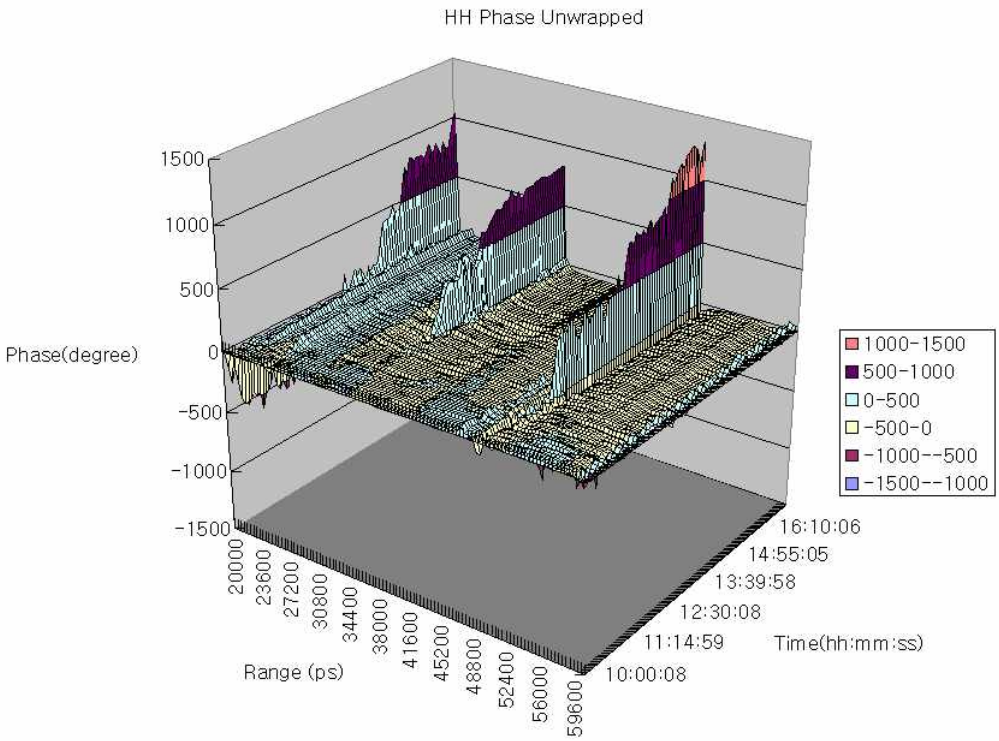
(c) 갯벌의 수분 증발 (15:00)

(d) 현장 실험 종료 (17:00)

그림 14. 현장 실험 사진



(a) 후방산란 변화



(b)위상변화(unwrapped phase)

그림 15. 현장 실험에서 후방산란과 위상 변화

3.6. 결론

조간대 갯벌에서 증발시간에 따른 마이크로파 후방산란계수의 변화를 관찰하기 위하여 15개 Radarsat-1 SAR 영상을 이용한 분석과 산란계 실내 갯벌 건조실험을 수행한 결과, 후방산란계수가 증발시간에 따라 단순한 감소를 보이지 않았으며, 갯벌의 배수, 증발, 건열, 건조에 따르는 M자 형태(증가-감소-증가-감소)의 변화를 나타내었다. 단, SAR 영상 분석 결과에서는 자료 부족으로 초기의 증가-감소-증가 형태만이 관측되었으며, 이는 앞으로 보다 많은 자료의 축적을 통해 온전한 M형 변화를 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

또한, Radarsat-1 DInSAR 일차 분석 결과, 화옹 간척지에서 2003년 9월 27과 10월 21일 사이에 건조 수축으로 인한 수직 지반 침하가 최대 30mm 발생한 것으로 보이는 신호가 관측된 바 있다. 마이크로파 산란계를 이용한 실내 실험 결과, 155도의 위상 감소가 일어났으며, 이는 총 17mm의 침하량 중에서 11mm의 실제 수직 침하량을 제외한 6mm가 마이크로파의 토양 침투로 인한 것임이 밝혀졌다. 즉, 갯벌이 완전 건조시 마이크로파가 45도로 입사할 때 약 50도의 위상 감소에 해당하는 4mm의 마이크로파 토양 침투가 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 약 6mm의 수직침하량으로 오인될 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 인공위성 DInSAR를 통한 연약지반 정밀 계측시 토양 특성에 따른 마이크로파의 침투 현상을 반드시 고려해야 함을 증명하였고, 마이크로파 산란계를 이용한 현장 및 실내 실험으로 이를 보정할 수 있을 것이다.

현장에서 조간대 갯벌의 건조에 따른 후방산란계수를 측정하는 것은 위의 실험 자료와 인공위성 자료에서의 결과를 확증할 수 있는 좋은 방법이다. 기존 실험 한 차례에서는 여러 조건이 맞지 않아서 갯벌 건조의 전 과정을 관측할 수 없었으나, 한반도에서 온도, 습도, 풍향 등을 고려한 년 중 증발량이 가장 많은 5월-6월에 조석 주기와 날씨를 고려하여 현장 자료를 획득할 계획에 있다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

인공위성 InSAR 기법을 이용하여 비교적 넓은 지역에서 점진적으로 일어나는 광역 연악지반 침하 현상을 관측하는데 있어서, 마이크로파의 토양 침투에 의한 오차를 검보정 하기 위해 마이크로파 산란계를 구성하여 자동화 하였다.

이를 바탕으로 보다 정밀한 실내 개펄 실험을 성공적으로 진행하였으며, 개펄 건조시의 여러 가지 환경적 영향을 고려한 후방 산란 계수의 반응을 살펴볼 수 있었다. 이 연구에서 마련된 자동화 PolScat 실험 장치와 운용 기술을 토대로, 향후 SAR 자료를 현장 및 실내 실험을 통해 검증하고 보정하는데 기여할 수 있다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

이 연구의 결과로 얻어진 기술을 통하여 DInSAR를 이용한 연약지반 침하량에 대한 2차원적 광역 정밀 자료를 검증을 통해 제시할 수 있고, 미세 지반 침하 가능 지역의 사전 포착 및 연약지반 안정화 사업에 기초자료로서 활용될 수 있다.

향후 보다 정밀한 관측 결과를 얻기 위해서는 보다 많은 SAR 자료를 이용한 연약지반 침하 지속관측 필요하며, 침하가 일어날 가능성이 있는 곳에 PolScat을 포함한 현장 물리량 상시관측소를 설치하여 위성자료를 검보정하는 노력이 필요하다.

제 6 장 위탁연구과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구에서는 안테나 하나를 이용하여 마이크로파를 CW 방식으로 송신함과 동시에 수신을 하고 있기 때문에 co-pol에서 잡음이 많이 첨가된다. 이러한 잡음을 없애기 위해서는 수신 안테나와 송신 안테나를 따로 두는 dual-antenna 모드를 구성할 수 있으나, 두 안테나 사이의 기하학적인 거리 때문에 실내 실험용으로는 적합하지 않다. Agilent 사의 PNA Microwave Network Analyzer 시리즈 중에서 Pulsed-RF Measurement Option을 선택하면 single antenna configuration의 약점인 co-pol에서 약 10dB 이상 노이즈 감소 효과가 있기 때문에(Agilent Technologies, 2005; Liepa et. al, 1989), 측정 거리를 백여 미터로 멀리 둘 수 있을 것이며, 현장 실험 구성에 많은 도움이 되겠다.

마이크로파 RF 레이더 시스템에서 안테나의 역할은 매우 중요하다. 좋은 안테나 특성을 얻기 위한 많은 연구가 진행되고 있으며, 국내외 전문 회사도 다양하여 향후 다양한 산란계 및 복사계 시스템을 구성할 수 있다. 이번 실험에서 사용된 Orthogonal Transducer를 이용한 Dual-Polarization Horn Antenna 역시 안테나 특성이 매우 좋은 것으로, 제작 회사의 실험 결과 나타났다. 실험에 사용할 수 있는 안테나의 종류도 매우 다양하여, 1-12GHz, 혹은 1-18GHz에 이르는 광대역 Horn Antenna의 확보도 용이할 것으로 판단된다. 이 외에도 실험 목적에 따라 여러 가지 다양한 안테나를 선택적으로 주문 제작 및 구입할 수 있는 넓은 시장이 존재한다.

이 연구에서 구성된 산란계 시스템 역시 수평의 안정된 움직임을 얻을 수 있는 레일이나 스캐닝 장비를 사용하면 GB-SAR(Ground-Based SAR) 시스템으로 발전시킬 수 있다. 현재 이러한 GB-SAR는 영국(SCEOS, 2005), 이탈리아(Noferini et. al., 2005), 일본(Hamasaki et. al., 2004) 등을 비롯한 전 세계적 연구실에서 갖추어 운영 중에 있다. GB-SAR 시스템 역시 사면 안정과 같은 인공 구조물의 안정성을 장기간 측정하는데 여러 가지 용도로 사용되고 있으며, 그 기술이 한창 개발 단계에 있다. 이러한 GB-SAR 시스템은 SAR의 영상 기법에 더욱 근접하기 때문에 조속한 시일에 개발이 요구된다.

제 7 장 참고문헌

고철환, 2001. 한국의 갯벌, 서울대학교 출판부, pp. 3-21.

김동주, 백두성, 박민수, 1999. TDR을 이용한 사질토양에서의 중금속 이동 측정, 한국토양환경학회지, 4권 1호, pp. 109~118.

김상완, 이창욱, 원중선, 2002. JERS-1 L-band SAR interferometry를 이용한 연안 매립지 지반침하 관측, 자원환경지질.

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

이훈열, 채희삼, 한향선, 전경미, 안영진, 2005. InSAR를 이용한 광역 지반침하 원격관측 기법에 관한 연구, 한국지질자원연구원 위탁연구 결과 보고서, 10월 15일.

이훈열, 채희삼, 조성준, 2006. 다편광 산란계 실험을 통한 개펄 건조시의 지반 침하와 마이크로파 침투 분석, 대한원격탐사학회 춘계학술대회 논문집, 대전, 3월 31일, pp. 145-148.

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

채희삼, 이훈열, 조성준, 박노욱, 2006. Radarsat-1 SAR 영상과 산란계 실내 실험을 통해 관찰된 조간대 갯벌 건조시 레이더 후방산란계수의 M형 변화, 대한원격탐사학회 춘계학술대회 논문집, 대전, 3월 31일, pp. 75-78.

최강원 외 1999. 간척지 개발과 갯벌상태의 경제성 비교 분석에 관한 연구, 농어촌진흥공사 연구보고서.

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

Bamler, R. and Hartl, P., 1998. Topical review synthetic aperture radar interferometry. Inverse Problems, vol. 14, pp. R1 - R54.

Borgeaud, M. and Wegmuller, U., 1996. On the use of ERS SAR interferometry for the retrieval of geo- and bio-physical information. Workshop on Applications of ERS SAR Interferometry (FRINGE96), Zurich, http://www.geo.unizh.ch/rsl/ fringe96/

Cloude, S. R. and Papathanassiou, K. P., 1998. Polarimetric SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, no. 5, pp. 1551 1565.

Feigl, K., Sergaent, A., and Jacq, D., 1995. Estimation of an earthquake focal

mechanism from a satellite radar interferogram: application to the December 4, 1992 Landers aftershock. Geophysical Research Letters, vol. 22, pp. 1037-1048.

Hamasaki, T. Zhou, Z., and Sato, M., 2004. Development and Applications of an Interferometric Ground-Based SAR System, http://earth.esa.int/workshops/ceos_sar_2004/, accessed on 12 Oct. 2005.

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.

Lee, H. and J. G. Liu, 2001. Analysis of Topographic Decorrelation in SAR Interferometry using Ratio Coherence Imagery, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 39(2), 223-232.

Liepa, V. V., Sarabandi, K., and Tassoudji, M. A., 1989. A Pulsed Network Analyzer Based Scatterometer, IGARSS'89, pp. 1826-1828.

Madsen, S. N., Zebker, H. A., and Martin, J., 1993. Topographic mapping using radar interferometry: Processing techniques. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 31, pp. 246-256.

Massonnet, D., Briole, P., and Arnaud, A., 1995. Deflation of mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. Nature, vol. 375, pp. 567-570.

Massonnet, D. and Feigl, K., 1995. Satellite radar interferometric map of the coseismic deformation field of the M=6.1 Eureka Valley California earthquake of May 17, 1993. Geophysical Research Letters, vol. 22, pp. 1541-1544.

Massonnet, D., Holzer, T., and Vadon, H., 1997. Land subsidence caused by the East Mesa geothermal field, California, observed using SAR interferometry. Geophysical Research Letters, vol. 24, pp. 901-904.

Massonnet, D., Rossi, M.,Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., and Rabaute, T., 1993. The displacement field of the Landers earthquakes mapped by radar interferometry. Nature, vol. 364, pp. 138-142.

Massonnet, D., Thatcher, W., and Vadon, H., 1996a. Detection of postseismic fault zone collapse following the Landers earthquake. Nature, vol. 382, pp. 612-616.

Noferini, L., Pieraccini, M., Mecatti, D., Luzi, G., Atzeni, C., Tamburini, A., and Broccolato M., 2005. Permanent Scatters Analaysis for Atmospheric Correction in Ground-Based SAR Interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and

Remote Sensing, vol. 43, no. 7, pp. 1459-1471.

Papathanassiou, K. P. and Cloude, S. R., 1997. Polarimetric effects in repeat-pass SAR interferometry. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote SensingSymposium (IGARSS'97), Singapore, pp. 1926-1928.

Rignot, E. J. M. and van Zyl, J. J., 1993. Change detection techniques for ERS-1 SAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 31, no. 4, pp. 896-906.

Rosen, P. A., Hensley, S., Zebker, H. A., Webb, F. H., and Fielding, E. J., 1996. Surface deformation and coherence measurements of Kilauea volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry. Journal of Geophysical Research, vol. 23, pp. 109-125.

Roth, A., Adam, N., Schwäbisch, M., Müschen, B., Böhm, C., and Lang, O., 1997. Observation of the effects of the subglacial volcano eruption underneath the Vatnajöküll glacier in Iceland with ERS-SAR data. 3rd ERS Workshop (Florence'97), Florence, Italy, http://earth.esa.int//florence/papers/.

SCEOS, 2005. Ground-based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) Research, http://www.shef.ac.uk/~sceos/environmental/gbsar/ , accessed on 12 Oct 2005.

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.

Zebker, H. A. and Goldstein, R. M., 1986. Topographic mapping from interferometry Synthetic Aperture Radar observations. Journal of Geophysical Research, vol. 91, pp. 4993-4999.

Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A., and Werner, C. L., 1994. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. Journal of Geophysical Research, vol. 99, no. B10, pp. 19617-19634.

Zebker, H. A., Madsen, S. N., Martin, J., Sheeler, K. B., Miller, T., Lou, Y., Alberti, G., Vetrella, S., and Cucci, A., 1992. The TOPSAR interferometric radar topographic mapping instrument. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, pp. 933-940.

Zebker, H. A. and Villasenor, J., 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, no. 5, pp. 950-959.

주 의

1. 이 보고서는 한국지질자원연구원에서 과학기술부 기본연구사업으로 수행하는 과제의 위탁연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 한국지질자원연구원에서 수행한 기본연구사업의 위탁연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.