

## 레이다 간섭기법에서 고도민감도를 활용한 지형정보 복원

김병국\* · 정도찬\*\*

### The Reconstruction of topographical data using Height Sensitivity in SAR Interferometry

Byung-Guk Kim\* · Do-Chan Jeong\*\*

#### 요 약

위성영상을 이용하여 지형도를 제작하는 새로운 방법으로 레이다 간섭기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 레이다 간섭기법은 동일한 지역을 촬영한 두 장의 SAR 영상의 위상정보를 이용하여 표고값을 추출하는 기법으로, 기존의 SPOT과 같은 광학영상에 비하여 날씨나 시간의 제약을 받지 않고 지형정보를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 즉, 영상취득의 유연성이 뛰어나며 광범위한 면적에 대하여 저렴한 표고데이터 추출이 가능하여 GIS에서의 활용 가능성 또한 밝다고 할 수 있다. 그러나 레이다 간섭기법은 SAR 시스템에 따라 발생하는 기하학적 왜곡으로 인해 일부 지역에 대해서는 위상불구속화 알고리즘에 따라 표고값이 잘못 추정되거나 아예 그 값을 얻지 못하는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서 사용한 ERS 텐덤자료의 경우에는 산악지형에서의 수직위치 정확도가 가장 부정확했으며, 기하학적 왜곡으로는 ERS 위성의 짧은 입사각으로 인한 layover 현상이 주로 발생하였다. 위상불구속화 기법별로는 경로추적방식 알고리즘을 사용했을 경우, 산출된 표고값의 정확도는 최소 제품방식을 수행했을 경우보다 2~5m 가량 우수하였으나 기하학적 왜곡이 발생한 지역에서는 데이터를 얻지 못하는 결과를 보였다. 이 지역에 대해서 고도민감도를 이용하여 표고값을 추정한 결과 경로추적방식의 정확도를 유지하면서 전체 영상에 대하여 표고값을 갖는 DEM을 제작할 수 있었다.

**Abstract** : Nowadays, SAR Interferometry is actively being studied as a new technique in topographic mapping using satellite imagery. It extracts height values using phase information

\* 인하대학교 지리정보공학과 석사과정

\*\* 인하대학교 지리정보공학과 부교수

derived by two SAR imageries covering same areas. Unlike when using SPOT imagery, it is not affected by atmospheric conditions and time. So to speak, we can say that SAR Interferometry is flexible in imagery acquisitions and can get height data economically over wide area. So, it is expected that SAR Interferometry will be widely used in GIS applications. But, in some area occurring geometric distortion, height data are misjudged or not extracted depending on phase unwrapping algorithms. In the case of ERS tandem data, the accuracy of height data was worst in mountain area. It is the because of the short incidence angle resulted in layover effect. Of the phase unwrapping algorithms, path-following was better in height accuracy but could not get data in layover area. In this area, we could get height data using Height Sensitivity. In conclusion, we could get DEM that maintained the accuracy of path-following method and have overall data across imagery.

## 1. 서 론

### 1.1 연구배경

수치표고 데이터는 여러 가지 방법으로 취득될 수 있으며 각각 장단점을 가지고 있다. 대표적으로는 수치지형도를 이용하는 방법과 지상측량, 항공사진측량을 이용하는 방법이 가장 많이 사용되고 있으며, 최근에는 광학영상이나 레이더영상을 이용하는 방법이 활발히 연구되고 있다. 지상측량 또는 항공사진측량을 이용하는 방법은 취득된 표고데이터의 정확도 면에서 상당한 장점을 가지고 있으나, 데이터 취득영역이 협소하고 절차가 복잡하다는 면과 많은 전문인력과 비용, 시간을 필요로 한다는 단점을 가지고 있다. 따라서 이를 보완하는 방안으로, 광역의 표고데이터를 주기적이면서도 저렴하게 취득할 수 있는 위성영상을 이용하는 방법이 활발히 연구되고 있다.

그러나 광학영상은 영상 취득당시의 날씨에 따라 품질이 좌우되며 낮에만 데이터 취득이 가능하므로 필요한 시기에 영상을 확보하는데 어려움이 따른다. 최근에 활발히 연구되고 있는 레이더 간섭기법(SAR Interferometry)은 광역의 데이터를 시간, 날씨의 영향을 받지 않고 주기적으로 저렴하게 취득할 수 있는 레이더(Synthetic Aperture Radar : SAR) 영상을 이용하여 표고데이터를 추출함으로써 광학영상의 단점을 극복할 수 있으며, 추출되는 표고데이터의 정확도 또한 SAR 시스템의 진보로 인하여 계속 향상되고 있어 앞으로 DEM 제작에 많은 활용이 있으리라 기대된다.

### 1.2 연구목적

레이더 간섭기법은 영상의 취득에 유연성을 갖는 SAR 영상을 사용하여 정확도 높은 표고값을 추출할 수 있는 기법이나 위상차 영상인 Interferogram에서 상대적인

고도값으로 변환하는 위상불구속화 과정에 따라 그 정확도에 많은 차이를 보인다. 위상의 불연속점을 연결하여 위상불구속화의 적분경로를 차단시키는 경로추적방식 알고리즘은 산출된 표고값의 정확도가 높다는 장점을 가지고 있으나, 일부 지역에서 위상불구속화를 수행하지 못하는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 서로 다른 성격의 위상불구속화 알고리즘을 사용하여 그 장단점을 비교하고, 위상불구속화가 수행되지 못하는 지역에 대한 지형상 특성을 분석하였다. 또한 이러한 지역에서의 표고값을 복원하는 방법으로 고도민감도를 활용하는 방안을 제시하였다. 고도민감도는 위상의 한 사이클에 해당하는 고도의 변화량으로, Interferogram을 통해 표고값을 추측할 수 있다. 본 연구에서는 고도민감도로 표고값을 추출하는 방법의 타당성을 확인하고, 반복경로방식의 위상불구속화를 수행한 DEM에 대하여 표고값을 수정한 후 다른 DEM과 정확도를 비교함으로써 그 유용성을 평가하고자 하였다.

## 2. 연구개요

### 2.1 연구방법

본 연구에서는 ERS-1, ERS-2 텐덤 영상을 사용하여 레이더 간섭기법으로 DEM을 제작하였다. 이 때, 서로 다른 위상불구속화 알고리즘을 사용하여 각각의 DEM을 제작한 후 수직위치 정확도를 서로 비교함으로써 위상불구속화 알고리즘 간의 장단점을 분석하였다. 레이더 간섭

기법으로 제작된 DEM의 정확도를 비교할 기준자료로는 해당지역의 1:5,000 수치지형도를 이용하여 제작한 DEM을 사용하였다.

반복경로방식의 위상불구속화 알고리즘을 수행했을 경우에 발생하는 표고값 미추출 지역에 대해서는 해당지역에 대한 경사도를 구함으로써 그 지형상 특성을 파악하였다. 이 지역에 대한 지형정보 복원은 고도민감도를 이용하여 해당위치의 표고값을 계산하는 방법을 사용하였다. 우선, 이미 알고 있는 표고값과 고도민감도로 추정된 표고값을 비교함으로써 고도민감도의 활용가능성을 확인하였다. 이와 같이 새로 수정된 DEM에 대한 유용성은 반복경로방식의 위상불구속화기법을 사용하여 제작한 DEM과 정확도를 비교하는 방식으로 평가하였다.

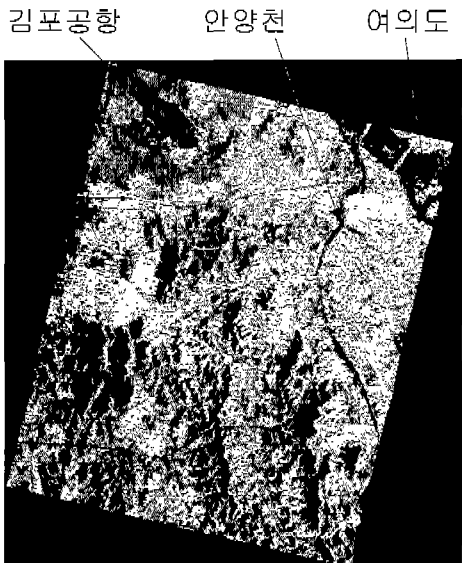
### 2.2 연구자료 및 연구지역

레이더 간섭기법을 적용하기 위한 영상자료로, 1995년 12월 21일과 22일에 촬영한 ERS-1, ERS-2 tandem 모드 데이터를 프로세싱한 SLC(Simple Look Complex) 영상을 이용하였다. SLC 영상은 복소수의 형태로 저장된 영상으로, 간섭기법에 필요한 위상의 정보를 손실 없이 보존하고 있다. 촬영당시 강우량은 없었다.

DEM을 제작할 대상지역으로는 [그림 1]과 같이 서울 영등포구, 양천구 일대를 포함하는 서부지역과 김포평야, 부천시, 안양시를 포함하는 지역을 선정함으로써 평야지형과 도시지형, 산악지형을 모두 포함하도록 하였다.

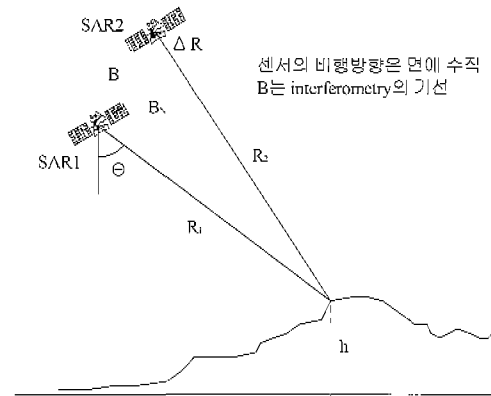
<표 1> ERS-1/-2 SLC 영상 (연구자료)

구분	ERS-1 영상	ERS-2 영상
궤도/트랙/ 프레임번호	23180/146/2853	3507/146/2853
촬영시기 (년/월/일,시간)	1995/12/21, 02:16:14	1995/12/22, 02:16:16
영상 중심	위도 : 37.401, 경도 : 126.591	위도 : 37.405, 경도 : 126.595
영상의 중복지역 (위도,경도)	북서 : 37.95, 126.20 북동 : 37.76, 127.30 남서 : 37.01, 125.96 남동 : 36.83, 127.04	
픽셀 간격	7.904 m	
경사방향 해상도	10 m	
비행방향 해상도	5 m	
영상 길이	105.789 km	
영상 폭	38.7296 km	
수평기선	100 m	
수직기선	270.518 m	



[그림 1] 연구대상 지역

### 2.3 레이다 간섭기법의 원리



[그림 2] 레이다 간섭기법 원리

[그림 2]에서 R(range)은 대상물에서 안테나까지의 경사거리를 나타내며,  $\theta$  (incidence angle)는 입사각, B(baseline)는 안테나간의 거리(기선)를 말한다. 기선이 크면 높이의 변화에 대한 정밀한 관측이 용이하나 일정크기를 벗어나면 두 영상간의 상관성이 떨어지게 되어 레이다 간섭기법을 적용할 수 없게 된다. 따라서 위성 시스템의 종류에 따라 적절한 기선길이의 선택이 중요하다. 레이다 간섭기법에 있어서 표고값을 추출하는데 필요한 위상차는 다음과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1), \lambda: \text{파장}$$

SAR 영상을 취득하는 방법은 [그림 2]에서와 같이 일정한 궤도를 회전하는 위성이 같은 지점을 반복해서 지나갈 때 영상을 취득하는 반복경로방식이 있으며, 하나의 탑재체에 두 개의 센서를 탑재하

여 두 장의 영상을 동시에 얻는 단일경로 방식이 있다. 반복경로방식으로 취득된 두 장의 SAR 영상은 취득시기가 다름에 따라 발생하는 영상간 비상관성으로 인해 단일경로방식의 SAR 영상에 비해 레이다 간섭기법에 제약을 받게 된다. 본 연구에서 사용한 영상은 ERS-1과 ERS-2 위성이 반복경로방식으로 취득된 영상이며, 하루를 간격으로 같은 지역을 촬영하였다. 영상의 포맷은 위상정보를 가장 원 상태로 보존하고 있는 SLC (Single Look Complex) 를 사용하였다.

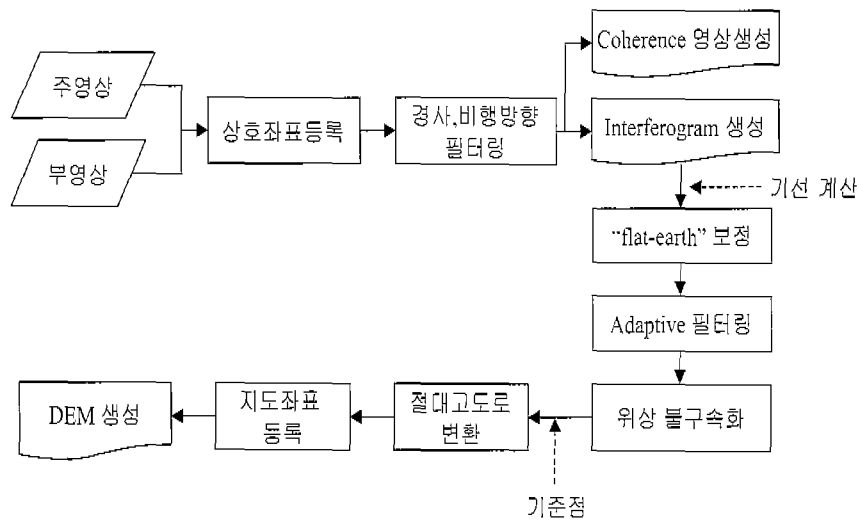
### 3. DEM 제작과정

[그림 3]은 레이다 간섭기법을 이용하여 DEM을 제작하는 과정을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 이러한 프로세싱을 위하여 EVInSAR 3.2 소프트웨어를 사용하였다. 같은 지역에 대한 두 SLC 영상 중

하나를 주영상으로 하고(일반적으로 먼저 촬영한 영상을 주영상으로 함), 부영상을 주영상에 상호좌표등록을 한다. 경사, 비행방향 필터링을 통해 두 영상의 중복지역을 선정하고, 주영상의 복소수와 부영상의 공액복소수를 곱함으로써 Interferogram 이라는, 위상차 정보를 반영한 새로운 영상을 생성한다. Interferogram에 대해선 지구곡률의 영향을 고려하는 “flat-earth”보정과 위상의 해상력을 높이는 adaptive 필터링을 수행한다. Interferogram은  $-\pi$ 에서  $\pi$  범위로 구속되어 있으므로 위상불구속화 과정을 통해 상대적인 높이값을 갖는 높이영상을 만들고, 지상기준점을 통해 절대높이로 보정한다. 마지막으로 지상좌표등록을 통해 DEM을 생성한다.

#### 3.1 상호좌표등록

ERS 위성에서 취득한 두 영상은 거의



[그림 3] 레이다간섭기법을 이용한 DEM 제작과정

같은 궤도에서 촬영되기는 하나 촬영시기가 서로 다르므로 입사각과 궤도의 차이로 인하여 몇 픽셀 정도의 차이를 보이게 된다. 따라서 정확한 중첩을 위해서는 영상 재배열을 통해 두 영상을 서로 맞춰주는 과정을 선행해야 한다. 이때 위성의 진행방향(azimuth 방향)과 경사거리방향(range 방향)으로 모두 영상 재배열을 수행해야 한다. 영상 재배열의 방법으로는 공일차 내삽법을 사용하였다.

### 3.2 coherence 영상과 Interferogram 생성

#### 1) coherence 영상

coherence는 주영상과 부영상 사이의 상관관계를 나타내는 것으로, 두 영상의 촬영조건이 동일할수록 높은 수치를 나타내며 이는 앞으로 생성하고자 하는 DEM의 품질을 가늠하는 척도가 된다. coherence  $\gamma$ 는 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$\gamma = \frac{E[V_1 \cdot V_2^*]}{\sqrt{E[|V_1|^2] \cdot E[|V_2|^2]}}$$

$E[ ]$ 는 기대치 연산자, \*는 공액복소수

여기서 coherence를 계산하는 탐색창의 크기는 5로 하였다. coherence의 값은 0 부터 1 사이의 값을 갖는데, 이렇게 생성한 coherence 영상(그림 4)을 보면 두 영상간의 상관관계가 높은 김포평야지역이 가장 밝게 나타남을 볼 수 있다. 반면 우장산을 비롯한 산악지역이 가장 어둡게 나타나는 것으로 보아 이 지역의 수직위치 정확도가 낮으리라고 추측할 수 있다.

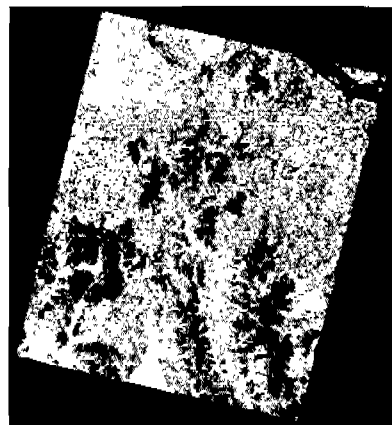
#### 2) Interferogram

Interferogram은 주영상과 부영상의 위상차를 반영하여 새로 제작된 영상으로, 주영상의 복소수와 부영상의 공액복소수를 곱함으로써 얻는다.

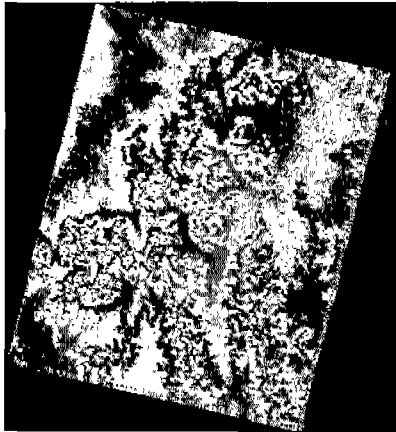
$$I = V_1 \cdot V_2^* = |V_1| \cdot |V_2| \cdot e^{j(\phi_1 - \phi_2)}$$

$I$  : Interferogram,  $V_1$  : 주영상의 복소수,  $V_2$  : 부영상의 공액복소수,  $\phi$  : 위상

[그림 5]는 ERS-1 영상을 주영상으로, ERS-2 영상을 부영상으로 하여 생성한 Interferogram을 adaptive filtering 과정을 거친, 강화된 Interferogram이다. 위상차의 배열을 fringe라고 하는데 그림에서와 같이 등고선과 같은 띠무늬 형태로 나타난다. 띠의 간격이 조밀하게 나타나는 지역은 기복변위가 크다는 것을 보여주는 것으로 이 지역이 산악지형임을 알 수 있다. 반면, 평야부근은 낮은 기복변위로 인해 띠의 간격이 넓게 나타난다.



[그림 4] coherence 영상



[그림 5] Interferogram

### 3.3 위상 불구속화

Interferogram의 위상은  $-\pi \sim \pi$  범위 내로 구속화되는 모호성을 가지고 있다. 이는 인접 픽셀간의 위상차를 적분함으로써 상대적인 표고값을 얻을 수 있는데 이러한 적분방식을 위상불구속화라고 한다. 만약 인접하는 두 픽셀에서의 경사거리 차이가 파장길이의 반을 넘지 않는다면 단순 적분방식으로 문제를 해결할 수 있다. 그러나 이러한 경우는 기록의 변화가 극히 적은 평지에만 국한되며, 산지가 많은 지형에서는 위상의 불연속이 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하며 위상불구속화를 시키는 방법으로, 크게 경로추적 방식과 최소제곱방식이 사용되고 있다.

경로추적방식은 위상의 불연속점들을 연결하여 적분경로에서 차단함으로써 오차의 전파를 방지하는 기법으로, 위상불구속화가 수행된 지역에서는 높은 정확도를 보이거나 coherence가 낮은 지역에서는 표고값을 추출하지 못하는 단점을 가지고

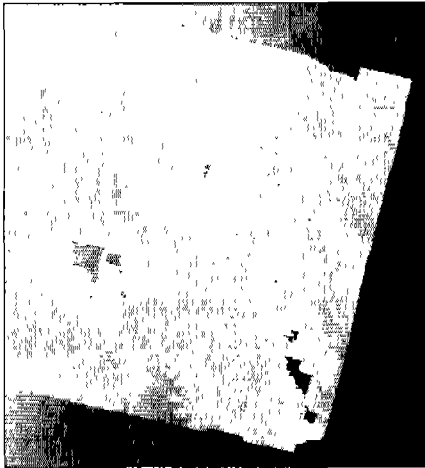
있다. 경로추적방식의 위상불구속화 알고리즘으로는 Branch Cut 기법(Goldstein, Zebker, Werner, 1988), Mask Cut 기법(Flynn, 1996), Minimum Discontinuity 접근법(Flynn, 1997) 등이 있다. 본 연구에서는 IDM 기법을 사용하였다.

최소제곱방식은 구속화된 위상의 부분도함수와 불구속화된 위상의 부분도함수의 차이를 최소제곱방식으로 최소화하는 기법으로, 영상 전 지역에 대하여 표고값을 산출할 수 있으나 지역적인 오차가 다른 지역으로 전파되는 약점을 가지고 있다. 최소제곱 방식의 위상불구속화 알고리즘으로는 PCG(preconditioned conjugate gradient) 기법(Ghiglia, Romero, 1994)과 Minimum Lp-norm 기법(Ghiglia, Romero, 1996) 등이 있다. 본 연구에서는 Multigrid 기법을 사용하였다.

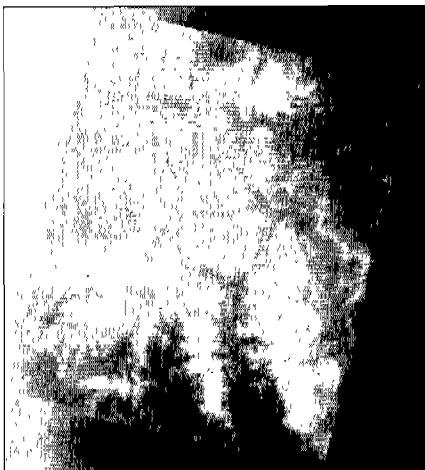
### 3.4 DEM 생성

위상 불구속화 과정을 거친 후의 결과는 연구지역에 대한 상대적인 높이값이다. 따라서 우리가 필요로 하는 절대적인 표고값을 얻기 위해서는 최소한 한 점 이상의 지상기준점이 필요하다. 지상기준점은 강도영상에서 현저히 구별 가능한 지점(신월 I.C.)으로 선정하였다. 마지막으로 지도좌표로 등록하는 과정으로, 본 연구에서는 TM(Transverse Mercator)좌표계를 사용하여 격자간격이 20m 인 DEM을 생성하였다. [그림 6]과 [그림 7]은 서로 다른 위상불구속화 기법을 사용하여 제작한 DEM을 나타낸다. 그림에서 보듯, IDM 기법을 사용했을 때는 영상의 coherence가

낮은 산악지형과 강에서 데이터를 얻지 못하는 결과를 보였다.



[그림 6] DEM  
(IDM 기법 사용시)



[그림 7] DEM  
(Multigrid기법 사용시)

이의 지형을 나타낸다. Interferogram에서 위상등고선은 360도를 한 사이클로 하며 하나의 칼라셋으로 나타난다. 고도민감도 (height sensitivity)란 위상사이클에 대한 고도의 변화량을 나타내는 것으로, 고도민감도의 계산은 아래의 식과 같이 4개의 인자로부터 계산된다.

$$\frac{\Delta h}{\Delta \phi} = \frac{\lambda \cdot R_1 \cdot \sin \theta_i}{2 \cdot B_N} \text{ (meters/phasecycle)}$$

여기서,  $\lambda$  : 파장,  
 $R_1$  : 경사거리,  
 $\theta$  : 입사각,  
 $B_N$  : 수직기선

여기서 입사각과 경사거리는 전체 영상에서 미세하게 변하므로 고도민감도에 미치는 영향은 미미하다. 즉, 고도민감도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 수직기선으로, 고도민감도는 수직기선에 반비례한다. 즉, 큰 수직기선에서는  $\frac{\Delta h}{\Delta \phi}$  수치가 작아지며, 이는 미세한 고도변화량을 감지할 수 있게 하므로 고도민감도가 민감하다고 말한다. 일반적으로 큰 수직기선이 좋다고 할 수 있으나, 너무 크게 되면 두 영상의 상관관계가 떨어지므로 적절한 수직기선의 선택이 중요하다. ERS 텐덤자료의 경우, 영상 중 약 72%가 레이더 간섭기법에 적합한 50~300m의 수직기선을 갖는다.

#### 4. 고도민감도 (Height Sensitivity)

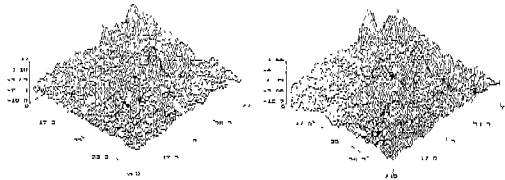
Interferogram에서 위상등고선은 같은 높



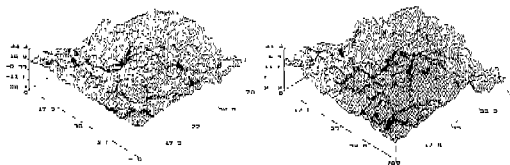
## 5. 위상불구속화 기법간 비교

### 5.1 기준데이터와의 표고차 분석

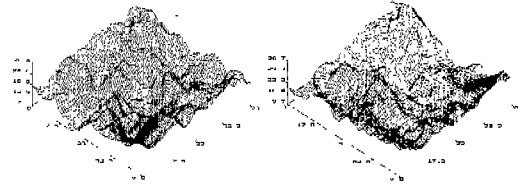
서로 다른 위상불구속화 기법을 사용하여 제작한 DEM의 지형에 따른 정확도를 분석하기 위하여, 연구대상지역에서 평야지역과 도시지역, 산악지역을 선정 후 수치지형도로 제작한 DEM과의 고도차 영상을 제작하였다[그림 8-10]. <표 2>는 지형별, 위상불구속화 기법별로 수직위치 정확도의 차이를 나타낸다.



(a) 수치지도-IDM기법 (b) 수치지도-Multigrid기법  
[그림 8] 기준데이터와의 고도차 영상 (평야지역)



(a) 수치지도-IDM기법 (b) 수치지도-Multigrid기법  
[그림 9] 기준데이터와의 고도차 영상 (도시지역)



(a) 수치지도-IDM기법 (b) 수치지도-Multigrid기법  
[그림 10] 기준데이터와의 고도차 영상 (산악지역)

<표 2> 지형별/위상불구속화 기법별 정확도 분석

기법		평야 지역	도시 지역	산악 지역	전체
IDM 기법	평균	12.51	21.42	79.37	*46.82
	수치지도 - IDM 기법	-5.75	9.13	17.84	*15.83
	고도차의 표준편차	2.03	6.85	13.50	*14.25
Multigrid 기법	평균	16.75	19.19	71.03	44.25
	수치지도 - Multigrid기법	-8.10	12.61	21.50	17.40
	고도차의 표준편차	3.58	7.85	15.77	14.56
coherence		0.565	0.381	0.238	0.275

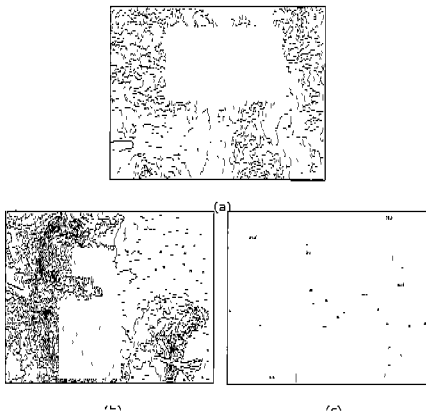
\* : 위상불구속화 미수행지역에 의해 실제값보다 작은 수치를 보임

기준데이터와의 고도차의 표준편차를 보면, 전 지형에서 IDM 기법이 Multigrid 기법보다 정확도면에서 우수함을 알 수 있다. 지형별로는 평야지역이 2~4m의 표준편차로 가장 높은 정확도를 보였으며, 산악지역이 13~16m 정도의 표준편차로 가장 낮은 정확도를 보였다. 평야지역에서의 정확도가 가장 우수하게 나타난 것은 평야지형이 다른 지형에 비해 지형지물의 영향을 가장 적게 받았기 때문이며, 촬영시기가 추수가 끝난 후인 12월이라는

점도 정확도가 높은 원인이 되었다. 도시 지역에서는 건물에 의한 corner reflector 현상이 정확도를 떨어뜨리는 결과를 가져왔으며, 산악지역에서는 나무에 의한 volume scattering이 정확도 저하의 원인이 되었다. 특히, ERS 위성에서 사용하는 C 밴드는 비교적 투과능력이 적은 짧은 파장으로, 지면까지 도달하는 신호가 적다는 점도 높은 오차를 보이는 원인이 되었다. 두 SAR 영상의 상관관계를 나타내는 coherence 수치 또한 평야지역과 도시지역, 산악지역 순서로 높은 값을 나타내었다.

### 5.2 위상불구속화 미수행 지역

IDM 기법을 사용했을 경우 위상불구속화가 수행되지 못하는 지역은 [그림 11]에서와 같이 SAR 센서를 마주보고 있는, 경사가 가파른 산악지형에서 주로 발생하였다. 이와 같은 layover 현상은 ERS 위성의 작은 입사각 (23도)에 의한 것으로, 위상불구속화가 이루어지지 않은 지역에서의 경사도를 구해본 결과 26°에서 43° 사이의 경사도를 보였다.



[그림 11] 위상불구속화 미수행 지역

## 6. 지형정보 복원

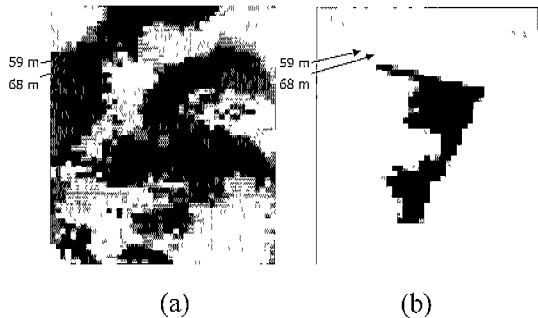
### 6.1 고도민감도를 이용한 지형정보 복원

Interferogram에서 한 사이클에 대한 고도의 변화량을 나타내는 고도민감도를 이용하여 표고값을 산출하지 못한 지역에서 그 값을 추정할 수 있다. 본 연구에서 사용한 영상의 각 인자를 토대로 고도민감도를 구해보면 다음의 식과 같다.

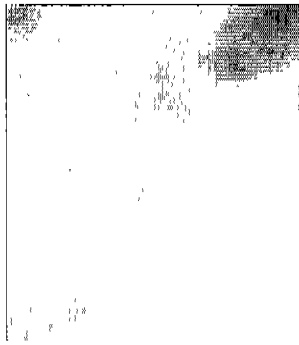
$$\frac{\Delta h}{\Delta \phi} = \frac{\lambda \cdot R_1 \cdot \sin \theta_1}{2 \cdot B_N} = \frac{0.05656 \cdot 842500 \cdot \sin(21.80)}{2 \cdot 270.518} = 32.71(m/cycle)$$

즉, 이와 같은 고도민감도는 한 사이클이 변하는 동안 32.71m의 고도변화가 생긴다는 것을 의미한다.

[그림 12]은 Interferogram에서 1/3사이클의 차이를 보이는 지점[그림 12(a)]에서 실제 표고값이 9m의 차이[그림 12(b)]를 보여주고 있다. 고도민감도가 32.71m이므로 1/3사이클에서의 고도변화량인 10.9m와 유사한 결과를 나타내고 있다.



[그림 12] 1/3 사이클에서의 고도변화량



[그림 13] DEM 수정

따라서 [그림 12(a)]과 같은 Interferogram에서 위상의 칼라셋을 고려하여 위상의 변화량을 결정한 후, 그에 해당하는 고도민감도를 적용하여 새롭게 고도정보를 추출하면 [그림 13]과 같이 경로추적방식에서 추출해지 못했던 표고값을 얻을 수 있다.

이와 같이 고도민감도를 이용한 표고값의 추정은 비록 실제 지형에 대한 정확한 표고값의 추출은 어려우나 해당지역에 대한 정확한 표고자료가 없을 경우에 그에 대한 대안으로서 충분한 활용가치가 있다고 판단된다.

## 6.2 고도민감도의 유용성 평가

경로추적방식으로 위상불구속화를 수행한 DEM에서 추출하지 못한 표고값을 6.1에서와 같은 방법으로 추정한 결과 [그림 14]와 같이 수정된 DEM을 얻었다. 이와 같이 수정된 DEM은 기준데이터와의 평균 고도차가 14.73m로, 경로추적방식의 IDM 기법을 사용해서 제작한 DEM 보다 0.9m 향상된 수직정확도를 보였으며, 최소제곱방식인 Multigrid 기법을 사용했을

경우보다도 2.67m가 향상되었다. 또한 기준데이터의 차이에 대한 표준편차 역시 감소되는 결과를 가져왔다. 따라서 고도민감도를 이용하여 손실된 고도정보를 복원할 경우 정확도가 높은 경로추적방식의 장점을 살리면서도 영상 전반에 대하여 고도정보를 추출하는 최소제곱방식의 장점도 살릴 수 있으므로 레이더 간섭기법으로 제작한 DEM의 유용성을 높일 수 있으리라 생각된다.



[그림 14] 고도민감도를 이용하여 표고값을 복원한 DEM

<표 3> 고도민감도로 수정된 DEM의 정확도

구 분	Multigrid기법을 사용한 DEM	IDM 기법을 사용한 DEM	고도민감도로 수정된 DEM
고도 평균	44.25 m	46.82 m	47.91 m
기준데이터와의 고도차	17.40 m	15.83 m	14.73 m
고도차의 표준편차	14.56 m	14.25 m	12.08 m

## 7. 결과 및 고찰

본 연구에서는 ERS-1/2 텐덤자료를 사용하여 레이더 간섭기법으로 DEM을 제작하였다. 표고값의 정확도는 평야지형에서 가장 우수하였으며 산악지형에서 가장 부정확하였다. 산악지형에서의 표고데이터 오차는 산림의 volume scattering과 같은 산란현상이 원인이 되기도 하였으나 특히 위성시스템의 작은 입사각으로 인한 layover 현상이 가장 큰 영향을 미쳤다. layover 현상은 센서를 마주보며 경사도가 26~43도에 이르는 가파른 산악지형에서 주로 발생하였으며, 이러한 기하학적 왜곡이 발생한 지역에 대한 표고값 또한 위상불구속화 알고리즘에 따라 왜곡된 결과를 보였다. 최소제곱방식 알고리즘을 사용했을 경우에는 왜곡이 발생한 지역에 대한 표고값을 얻을 수 있었으나 다른 지역에 대한 표고값의 정확도가 떨어지는 결과를 보였으며, 경로추적방식 알고리즘을 사용했을 경우에는 이 지역에 대하여 표고값을 얻지 못하였으나 위상불구속화가 수행된 다른 지역에 대해서는 정확도가 높았다.

경로추적방식에서 추출하지 못한 표고데이터를 추정하는 방안으로, 위상의 사이클당 고도변화량을 나타내는 고도민감도를 이용하였다. Interferogram에서 고도민감도를 이용하여 표고값을 추정한 결과, 넓은 면적에 대해서는 추정오차가 다소 크게 나타났으나, 좁은 면적에 대해서는 실제 표고값과 거의 유사한 결과를 보였다. 해당지역에 대한 정확한 고도자료가 없을 경우에는 이와 같이 고도민감도를

이용하여 표고값을 추정하는 방법이 경제적인 면에서 고려할 만 하다고 할 수 있다. 이와 같은 방식으로 경로추적방식으로 제작한 DEM의 표고값을 보완한 결과 기준데이터와의 표준편차가 2m정도 줄어드는 새로운 DEM을 얻을 수 있었다.

## 참고 문헌

- 1) 국립지리원, "수치지도 정확도 제고를 위한 수정/갱신방안에 관한 연구", 1999.
- 2) 서병준, "SAR 영상을 이용한 수치표고 모형의 추출기법에 관한 연구", 1999
- 3) Richard M. Goldstein, Howard A. Zebker, and Charles L. Werner, "Satellite radar interferometry : Two-dimensional phase unwrapping", Radio Science, Vol.23, no.4, 1988, pp.713-720
- 4) A. Gabriel and R. Goldstein, "Crossed orbits interferometry : Theory and experimental results from SIR-B", Int. J. Remote Sens., Vol.9, no.5, 1988, pp.857-872
- 5) Zebker, H. A. and J. Villasenor, "Decorrelation in Interferometric Radar Echoes.", IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol.30, no.5, 1992, pp.950-959
- 6) Neng H. Ching, Dov Roneule, and Michael Braun, "Two-Dimensional Phase Unwrapping Using a Minimum Spanning Tree Algorithm", IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol.1, no.3, 1992, pp.355-365
- 7) Massonet, D., and Rabaute, T., "Radar

- Interferometry: Limits and potential", IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol.30, 1993, pp.455-464
- 8) D. C. Ghiglia and L. A. Romero, "Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods", J. Opt. Soc. Amer. A, vol.11, No.1, 1994, pp.107-117
- 9) Howard A. Zebker and Charles. L. Werner, "Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar", IEEE Trans. Geoscience and Remote Sens., Vol.32, no.4, 1994, pp.823-836
- 10) T. J. Flynn, "Consistent 2-D phase unwrapping and absolute values information", Proc. IGARSS, Lincoln, 1996, pp.2057-2059
- 11) Mark D. Pritt, "Phase Unwrapping by Means of Multigrid Techniques for Interferometric SAR", IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol.34, no.3, 1996, pp.728-738
- 12) D. C. Ghiglia and L. A. Romero, "Minimum Lp-norm two-dimensional phase unwrapping", J. Opt. Soc. Amer. A, Vol.13, 1996, pp.1-15
- 14) Nuri AL-NAKIB, "Mapping of large areas in tropical countries by using high resolution Airborne Interferometric Radar", ISPRS, Vol.33, part B1, 2000
- 15) Pu-Huai CHEN and Ian DOWMAN. "SAR Image Geocoding using a Stereo-SAR DEM and Automatically Generation GCPs", ISPRS, Vol.33, part B1, 2000
- 16) Michele Grosetto, Bruno Crippa, "Quality Assessment of Interferometric SAR DEMs", ISPRS, Vol.33, part B1, 2000