

레이다 간섭기법(SAR Interferometry)을 이용한 지형도 제작 (Topographic Mapping using SAR Interferometry Method)

정도찬* , 김병국**
(DoChan Jeong* , Byung-Guk Kim**)

요 약

위성영상을 이용하여 지형도를 제작하는 새로운 방법으로 레이다 간섭기법이 활발히 연구되고 있다. 레이다 간섭기법은 같은 지역에 대한 두 장의 SAR 영상을 이용하여 고도값을 추출하는 방법으로, 기존의 SPOT 과 같은 광학영상에 비하여 날씨나 시간의 제약을 받지 않고 지형정보를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 레이다 간섭기법을 이용하여 고도값을 추출하는 방법은 처리과정이 복잡하고 기복이 심한 지역에서의 수직위치 정확도가 떨어진다는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서 ERS-1과 ERS-2의 tandem 모드 SAR 영상을 사용하여 수치표고모형을 작성한 후 14개의 지상기준점에 대한 수직위치 정확도를 분석한 결과 14.06m의 오차를 보였다. 그러나 항공탑재 레이다 시스템의 영상을 사용하여 수치표고모형을 제작하면 2~5m의 수직위치 정확도를 얻을 수 있으므로 1/10,000이나 1/25,000

축척 지형도의 수정, 갱신에 활용할 수 있으리라 기대된다.

Recently, SAR Interferometry method is actively being studied as a new technic in topographic mapping using satellite imageries. it extract height values using two SAR imageries covering same areas. Unlike when using SPOT imageries, it isn't affected by atmospheric conditions and time. But it is difficult to process radar imageries and the height accuracy is very low where relief displacements are high. In this study, we produced DEM(Digital Elevation Model) using ERS-1, ERS-2 tandem data and analysed the height accuracy over 14 ground control points. The mean error in height was 14.06m. But when using airborne SAR data, it is expected that we can produce more accurate DEM which will be able to ue used in updating 1/10,000 or 1/25,000 map.

* 인하대학교 지리정보공학과 석사과정

** 인하대학교 지리정보공학과 부교수

키 워 드

SAR, Interferometry, SPOT, SLC, 수치표고모형, 상호좌표등록, Interferogram, 위성불구속화, 지상좌표등록, 지상기준점

1. 서 론

1.1 국가기본도 갱신현황

국립지리원에서 보급하고 있는 1/5,000, 1/25,000, 1/50,000 축척 국가 기본도는 예산과 시간 등 많은 이유로 인하여 갱신 성과가 저조한 실정이다. 축척별 갱신주기와 갱신현황을 보면(표1), 갱신에 10여 년이 소요될 뿐만 아니라 갱신을 하지 못한 도엽도 상당수에 이른다(국립지리원, 1999). 국가 기본도의 부적절한 갱신은 이를 기반으로 구축된 GIS의 신뢰성을 크게 상실시킬 수 있다는 점에서 그 문제점이 심각하다. 즉, GIS의 효율을 극대화하기 위해서는 기본자료인 국가 기본도에 대한 주기적인 갱신이 무엇보다 중요하다.

표 1. 1/5,000 및 1/25,000 지도 갱신현황

비 고		1/5,000	1/25,000	
갱신횟수	1 회	도엽수	11,706	264
		백분율	74.0	34.4
	2 회	도엽수	3,528	409
		백분율	22.3	53.3
갱신 없음	도엽수	581	95	
	백분율	3.7	12.3	
갱신주기	1회	9.0 년	12.6 년	
	2회	8.3 년	15.3 년	

1.2 지형도 제작방법

지형도를 제작하는 방법은 크게 지상측량을 이용하는 방법, 항공사진을 이용하는 방법, 위성영상을 이용하는 방법 세 가지로 나눌 수 있다. 지상측량을 이용하는 방법은 가장 정확한 실측자료를 얻을 수 있으나 비용과 시간이 많이 소요되며, 사람의 접근이 어려운 곳에서는 정보를 얻기가 어렵다는 단점이 있다. 따라서 좁은 지역에 대해서 높은 정확도를 필요로 할 때 주로 사용된다. 항공사진을 이용하는 방법은 지상측량 방법에 비해 정확도는 다소 떨어지나 비교적 넓은 지역에 대하여 적은 비용과 시간으로 관측할 수 있고, 사람의 접근이 불가능한 지역에 대해서도 관측할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 현재 종이지도에 대한 갱신은 모두 항공사진을 이용한 수정도화 방법에 의해 수행되고 있다.

위성영상은 항상 지구를 일정한 궤도로 회전하는 위성으로부터 데이터를 제공받는다. 따라서 지형정보를 취득하는 데 별도의 노력을 기울일 필요가 없을 뿐만 아니라 주기적인 데이터의 확보가 용이하게 되며, 한꺼번에 넓은 지역을 관측하므로 가장 경제적인 방법이다. 따라서 국가 기본도의 주기적인 갱신하는 방법으로 위성영상을 이용하는 방안이 폭넓게 연구되고 있다. 현재 지형도 제작을 위한 위성자료로 가장 많이 연구되는 것은 1986년에 발사된 SPOT 위성 영상이다. 두 장의 SPOT 위성 영상을 사용하

여 사진측량에서와 유사한 입체시 기법을 통해 지형정보를 취득한다. 그러나 SPOT 위성은 광학센서를 사용하므로 구름이나 비와 같은 날씨의 영향을 많이 받게 되며, 밤에는 자료취득이 곤란하다는 제약을 가지고 있다.

반면 레이더 위성은 긴 파장의 마이크로파를 발사하고 지표면에서 반사된 신호를 처리하여 영상을 생성하므로 날씨의 영향을 받지 않을 뿐만 아니라 밤에도 지형정보를 취득할 수 있다. 이러한 점은 위성영상의 안정적인 공급이라는 큰 장점으로 작용한다. 이에 힘입어 레이더 영상의 위상차를 이용하여 고도값을 추출하는 레이더 간섭기법이 최근 들어 활발히 연구되고 있다. 본 연구에서는 SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상을 이용하여 수치표고모형을 작성하고 그 정확도를 분석함으로써 지형도 제작에 대한 레이더 간섭기법의 타당성을 평가하고자 한다.

2. 연구개요

2.1 연구방법

본 연구에서는 두 장의 SAR 영상 자료로 레이더 간섭기법을 적용하여 지형정보를 취득하고, 이를 바탕으로 수치표고모형을 작성하였다. 수치표고모형의 정확도 평가는, 지상기준점을 선정하고 그에 대한 평균제곱근오차(Room Mean Square Error, RMSE)를 구하는 방법을 적용하였다. 부가적인 방법으로 연구지역에 대한 경사도와 사면도, 등고

선도를 작성하여 레이더 간섭기법의 장단점을 분석하고 연구결과를 종합적으로 평가하였다.

2.2 연구자료

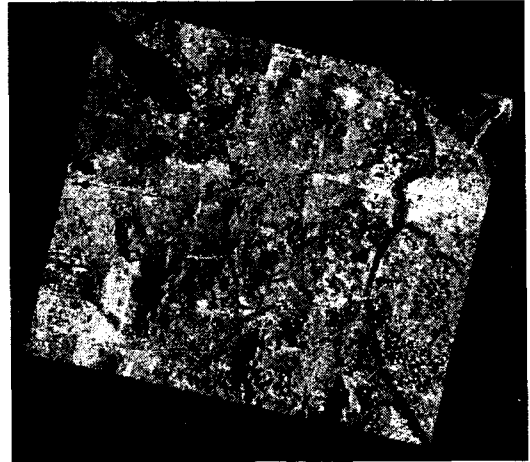


그림 1. 연구지역 (강도영상)

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. 연구지역은 서울서부와, 김포공항을 포함한 경기일부로 선정하였다(그림1). 프로세싱은 ATLANTIS Scientific사의 EVInSAR 1.2를 사용하였다.

표 2. ERS 위성 제원

	value
spatial resolution (m)	10-30
wavelength (m)	0.056
incidence angle (°)	23
altitude (km)	785
slant range (km)	860
tandem duration	1995. 8~1996. 6
swath (km)	100

2.3 레이더 간섭기법

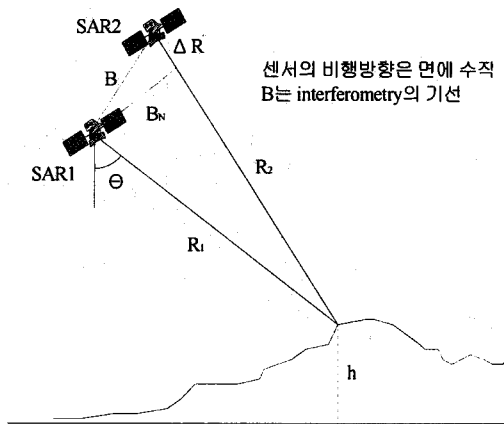


그림 2. InSAR configuration

R(range)은 대상물에서 안테나까지의 경사거리를 나타내며, B(baseline)는 안테나간의 거리(기선)이다. 기선이 크면 높이의 변화에 대한 관측이 용이하나 두 영상간의 상관성이 떨어지게 된다. 따라서 위성에 따라 적절한 기선길이의 선택이 중요하다. θ (incidence angle)는 입사각을 나타낸다. 레이더 간섭기법에 있어서 필요한 가장 기본적인 식은 다음과 같다.

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

$$\text{대상물높이} : h = H - R_1 \cos\theta, \quad H: \text{위성고도}$$

$$\text{높이대 위상의 민감도} : \frac{\partial\Delta\phi}{\partial h} = \frac{\Delta\phi B_N}{\lambda R \sin\theta}$$

3. 수치표고모형 제작

그림3은 레이더 간섭기법을 이용하여 수치표고모형을 제작하는 과정을 블록다이어그램으로 나타낸 것이다. 같은 지역에 대한 두 SLC 영상 중 하나를 주영상으로 하고 (일반적으로 먼저 촬영한 영상을 주영상으로 함), 부영상을 영상재배열하여 주영상에 상호좌표등록을 한다. 그리고 주영상의 복소수와 부영상의 공액복소수를 곱함으로써 Interferogram이라는, 위상차 정보를 반영한 새로운 영상을 생성한다. 이 값은 $-\pi$ 에서 π 범위로 구속되어 있으므로 위상불구속화 과정을 통해 상대적인 높이값을 갖는 높이영상을 만들고, 지상기준점을 통해 절대높이로 보정한다. 마지막으로 지상좌표등록을 통해 수치표고모형을 생성한다.

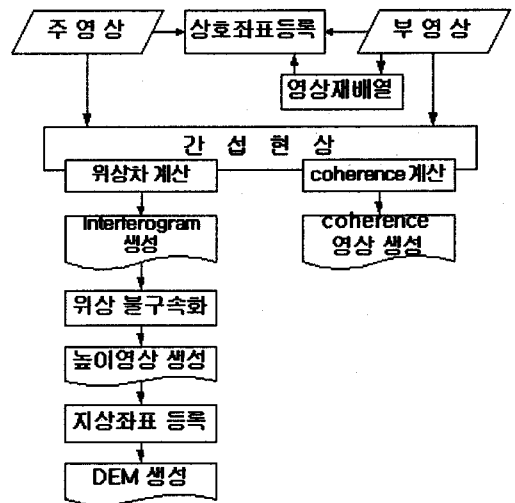


그림 3. 레이더 간섭기법을 이용한 수치표고모형 제작 과정

3.1 상호좌표등록

ERS 위성에서 취득한 두 영상은 거의 같은 궤도에서 촬영되기는 하나 촬영시기가 서로 다르므로 입사각과 궤도의 차이로 인하여 몇 픽셀 정도의 차이를 보이게 된다. 따라서 정확한 중첩을 위해서 영상 재배열을 통해 두 영상을 서로 맞춰주는 과정을 진행해야 한다. 이때 위성의 진행방향(azimuth 방향)과 경사거리방향(range 방향)으로 모두 영상 재배열을 수행해야 한다. 영상 재배열의 방법으로는 bilinear 보간법을 사용하였다.

3.2 위상 차와 coherence 계산

SAR interferogram은 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, ϕ : 위상

I는 새로운 이미지로서 위상값 만을 반영하며 이를 interferogram이라고 한다. 그림4는 ERS-1 영상을 주영상으로, ERS-2 영상을 부영상으로 계산한 Interferogram을 지상좌표로 등록한 영상이다. 위상차의 배열을 fringe라고 하는데 그림에서와 같이 띠무늬로 나타난다. 그림의 상부에 위치한 우장산 부근은 기복 변위가 심한 지역으로, 띠의 간격이 조밀하게 나타남을 볼 수 있다. 반면, 왼쪽의 김포평야 부근은 낮은 기복 변위로 인해 띠의 간격이 넓게 나타난다.

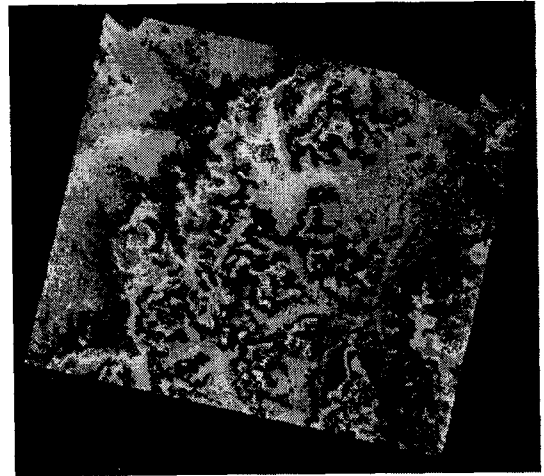


그림 4. Interferogram 영상

coherence γ 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 window 크기는 5로 하였다. coherence의 값은 0 부터 1 사이의 값을 갖는데, 이렇게 생성한 coherence 영상(그림 5)을 보면 밝은 지역이 1에 가까운 값을 가지며 두 영상간의 상관관계가 높은 곳임을 나타낸다. 한강의 상관성이 낮게 나타난 것은 물이 위성에서 발사한 마이크로신호를 반사시켜 위성으로 돌아간 신호가 적기 때문이다. 또한 우장산과 같은 산림지역은 높은 산란효과로 인해 상관성이 낮게 된다. coherence 영상은 앞으로 생성될 수치표고모형의 품질을 가늠할 수 있는 척도로 많이 사용된다.

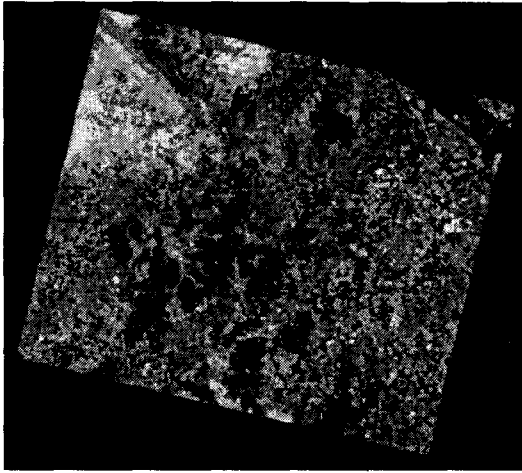


그림 5. coherence 영상

3.3 위상 불구속화

레이다 간섭기법으로 구한 위상은 $-\pi \sim \pi$ 범위 내로 구속되는 모호성을 가지고 있다. 이는 인접 픽셀간의 위상차를 적분함으로써 해결할 수 있다. 이러한 적분방식을 위상 불구속화라고 한다. 만약 인접하는 두 픽셀에서의 경사거리 차이가 파장길이의 반을 넘지 않는다면 이러한 적분을 수행하는데 아무런 문제가 없게 된다. 그러나 이러한 지형은 기복의 변화가 극히 적은 평지에만 국한되며 우리 나라와 같이 산지가 많은 지형에서는 이러한 단순경로의 적분을 수행하면 불연속점이 생기게 된다. 이러한 불연속점들의 문제를 해결할 수 있는 적절한 적분경로의 선택이 레이다 간섭기법에서 가장 중요하고 처리하기 어려운 부분이다. 과거 10여년간 적절한 적분경로를 찾기 위하여 수많은 학자들이 새로운 알고리즘들을 개발하였다(Goldstein, 1988, Ghiglia와 Romero,

1994, Flynn, 1996, Costantini, 1998, Hellwich, 1998, Zebker와 Chen, 1999). 그러나 아직 모든 경우에 적합한 알고리즘은 개발되지 못하였다. 본 연구에서는 Goldstein이 개발한 branch-cut 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘은 branch-cut으로 경계를 구분하고 서로 다른 적분경로로 위상 불구속화를 수행한다. 이 알고리즘은 그림 5에서 보이듯, coherence가 아주 낮은 지역에서는 위상 불구속화를 수행하지 못하게 된다.

3.4 지상좌표 등록

위상 불구속화 과정을 거친 후의 결과는 연구지역에 대한 상대적인 높이값이다. 이 값들을 우리가 필요로 하는 절대적인 고도값으로 변환하기 위해서는 지상기준점이 필요하다. 지상기준점은 강도영상에서 현저히 구별 가능한 지점(도림천 지류)으로 선정하였고 수치지도로부터 그 기준점의 고도값을 추출하였다. 절대고도값으로 변환한 영상을 TM(Transverse Mercator)좌표계로 투영하여 x, y 격자간격이 20m 인 수치표고모형을 생성하였다(그림 6).

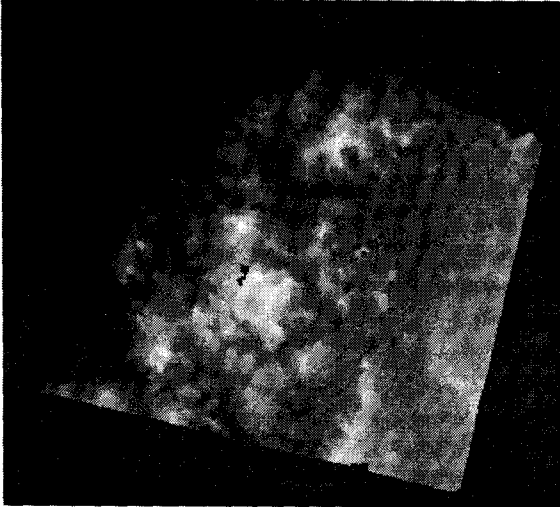


그림 6. 레이더 간섭기법을 적용한
수치표고모형

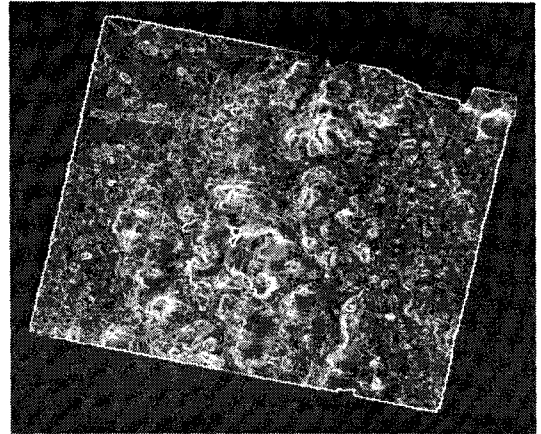


그림 7. 경사도 (slope)

4. 수치지형자료 제작

수치표고모형은 지형정보를 표현하는데 가장 널리 사용되는 자료로, 이를 이용하여 많은 수치지형자료를 제작할 수 있다.

4.1 경사도와 사면도

경사도(slope)와 사면도(aspect)는 지형의 기울기와 경사방향을 나타내는 지형자료로 수문이나 환경분야 등에서 많이 이용된다. 경사도는 주로 퍼센트나 각도로 표시되고, 사면도는 방위각으로 표시된다. 공간상의 이차원 평면을 $Z=a+bX+cY$ 로 나타내면 경사와 사면방향은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{경사(slope)} = \sqrt{b^2 + c^2},$$

$$\text{사면방향(aspect)} = \tan^{-1}\left(\frac{-c}{b}\right)$$

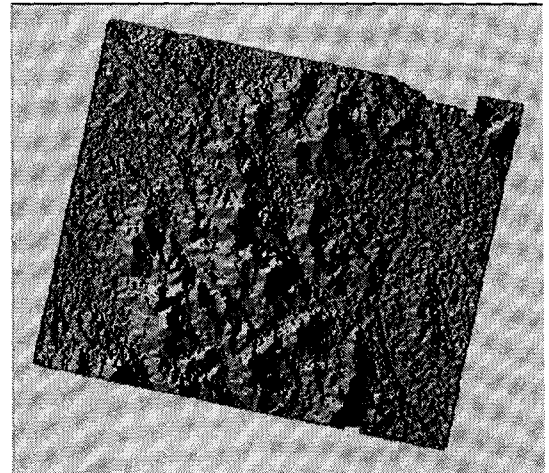


그림 8. 사면도 (aspect)

4.2 불규칙삼각망(TIN)

수치표고모형과 더불어 지형정보를 저장하는 대표적인 자료로 불규칙삼각망(Terrain Irregularity Network, TIN)이 있다. 수치표고모형이 일정한 크기의 격자로 정보를 저장함으로써 저장의 효율성이 떨어지는 반면, 불규칙삼각망은 지형에 따라 다른 크기의 삼각망으로 저장하므로 저장의 효율성이 높다.

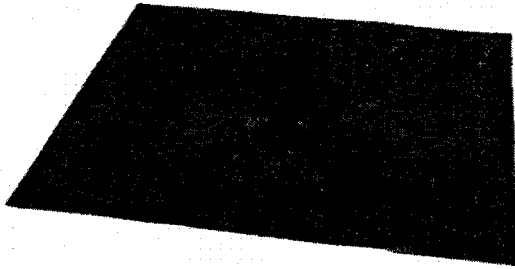


그림 9. 불규칙삼각망 (TIN)

4.3 등고선

지형도 제작의 근본 자료인 등고선은 같은 고도값을 갖는 지역을 선으로 연결함으로써 표현된다. 그림 10은 불규칙삼각망을 이용하여 제작한, 선 간격이 10m인 등고선이다.

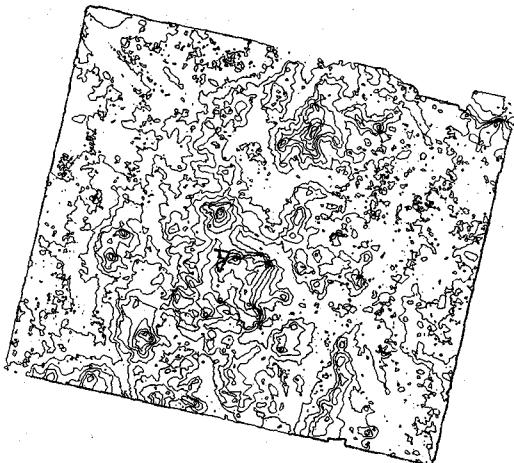


그림 10. 등고선

5. 정확도 분석

레이다 간섭기법을 적용하여 생성한 수치표고모형의 고도 정확도를 평가하기 위하여 지형의 식별이 용이한 14 개의 지상기준점을 선정하고(그림 11), 그 좌표와 고도값을 얻었다. 지상기준점의 기준자료는 수치지도에서 취득하였다. 표3은 기준점의 좌표와 기준 고도값, 실험 고도값을 나타낸다. 이 데이터를 자료로 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 계산하였을 때 14.06m의 고도오차를 보였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{ref} - Z_{exp})^2}{n-1}}$$

Z_{ref} : 수치지도 고도값,

Z_{exp} : 간섭기법으로 작성한 수치표고모형의 고도값

n : 취득한 기준점의 수

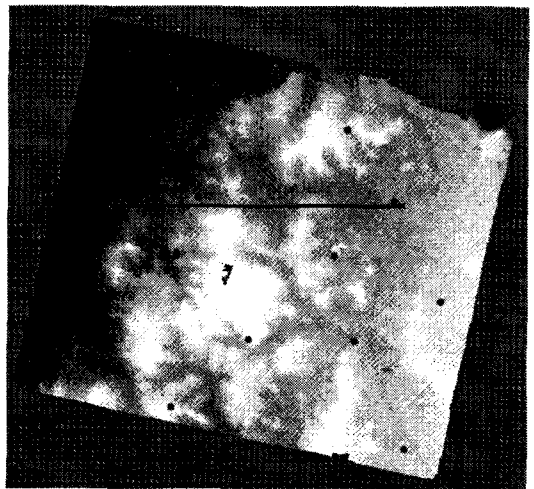


그림11. 기준점의 위치와 단면선

표 3. 지상기준점의 평면위치와 고도값

기준점	X	Y	Z _{ref}	Z _{exp}
1	183562	447204	22.5	29.4
2	182391	445725	19.5	32
3	181853	450532	20.5	16.7
4	180265	448930	18	54
5	179495	444770	20	27.6
6	185705	450748	9.25	14.5
7	187629	449207	36	29
8	188646	446341	27.5	39.7
9	190803	447420	13	9.5
10	190626	444585	35.5	31.1
11	182643	442326	16	24
12	185542	444562	31.5	18
13	192872	445387	23	17
14	192610	442121	11.5	19.4

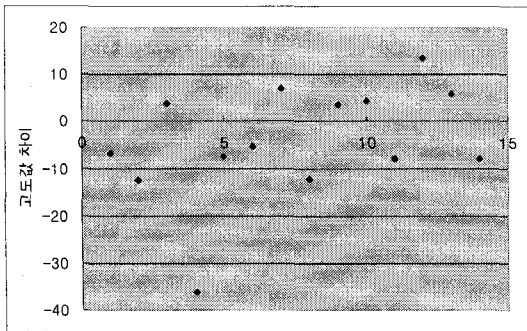


그림12. 고도값의 차이분포도

그림12는 수치지도에서의 고도값과 레이더 간섭기법을 적용하여 얻은 수치표고모형에서의 고도값의 차이를 나타낸다. 14개의 지상기준점 중 13개는 RMSE보다 작은 차이를 보이며 1개의 지상기준점에서 36m의 큰 차이를 보이고 있다. 이는 그 지점에서의 상관성이 상당히 낮은 것으로 추측된다. 상관성이 낮은 것은 수분의 함유량 변화, 높은 기복, 지표면의 변화 등 다양한 원인에 기인할 수 있다.

그림11에서의 단면선과 같이, 부천시 원종동

에서 신월 I.C.를 거쳐 목동에 이르는 직선 방향으로 단면도를 작성하였다(그림13). 이 지역에 대해서는 비교적 기복변화가 작음을 알 수 있다. 고도값의 범위(세로축)에 '0'보다 작은 음수가 있는 것은 레이더 간섭기법에 의한 고도값 추출에서 일부 잘못된 결과를 도출했음을 보여준다.

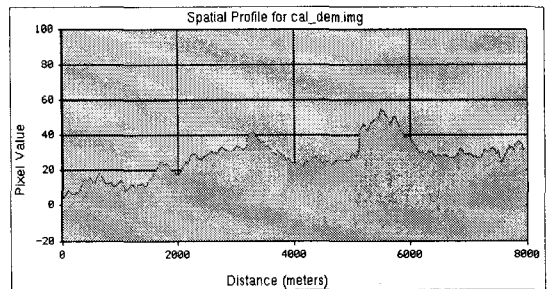


그림 13. 해당지역의 단면도

6. 결과 및 고찰

레이더 간섭기법을 적용하여 수치표고모형을 제작한 결과 수직위치 정확도는 14.06m였다. 기준자료가 지상측량을 통한 실측자료가 아니라 수치지도에서 추출한 데이터이므로 오차가 가중될 개연성이 있으나 ERS-1, ERS-2 tandem 모드의 자료를 사용했을 경우 얻을 수 있는 수직위치 정확도는 5~20m에 이른다고 알려져 있다[3]. 이처럼 실험결과가 높은 오차를 보이는 것은 크게 위성자료의 문제점과 레이더 간섭기법의 문제점으로 구분할 수 있다. ERS위성은 지구를 일정한 궤도로 회전하면서 하나의 안테나로 관측하므로 두 영상의 취득시기가 달라지게 된다. 따라서 두 영상간의 상관성이

낮게 되고 위성의 정확한 궤도정보를 얻는 것이 어렵게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 항공기에 두 개의 안테나를 장착한 항공기탑재 SAR 시스템을 사용하여 영상을 취득할 경우, 2~5m의 높은 수직위치 정확도를 갖는 수치표고모형 생성이 가능하다[4]. 이 정확도는 1/10,000 혹은 1/25,000 축척 지도의 정확도를 충족시키므로(국립지리원, 1999) 이러한 지도의 수정, 갱신에 레이다 간섭기법을 적용한 수치표고모형을 활용할 수 있으리라 기대된다. 그러나 실제 국가기본도의 수정, 갱신에 활용하기 위해서는 산림지역에서의 위상 불구속화 문제에 대한 연구가 더욱 필요하다고 생각된다.

참고문헌

[1] 국립지리원, "수치지도 정확도 제고를 위한 수정/ 갱신방안에 관한 연구", 1999.

[2] 서병준, "SAR 영상을 이용한 수치표고 모형의 추출기법에 관한 연구", 1999

[3] Giancarlo Rufino, Antonio Moccia, Salvatore Esposito, "DEM Generation by Means of ERS Tandem Data", IEEE Vol.36 No.6, 1998.

[4] A.Kleusberg, H.G.Klaedtke, "Accuracy Assessment of Digital Height Models Derived From Airborne Synthetic Aperture Radar", 1998.

[5] Schwabisch, M., "SAR Interferometrie Technik", Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 1997.

[6] R.M.Goldstein, H.A.Zebker, C.L.Werner, "Satellite radar interferometry: Two-dimensional Phase Unwrapping", radio Sci. vol.23 No.4, 1988, pp713-720.

[7] Ross s. Lunetta, Christopher D. Elvidge, "Remote Sensing Change Detection", Ann Arbor Press, 1998.

정 도 찬

1999년 인하대학교 산업공학과 졸업(공학사)

2000년-현재 인하대학교 대학원 지리정보공학과, 석사과정

관심분야 : 위성영상처리, 매핑시스템

김 병 국

1978년 서울대학교 토목공학과 졸업(공학사)

1986년 The University of Wisconsin-Madison 토목 환경공학과 (석사)

1989년 The University of Wisconsin-Madison 토목 환경공학과 (박사)

1996-현재 인하대학교 지리정보공학과 부교수

관심분야 : GPS, 항공사진, 토목, 측량, 매핑 시스템