

SAR 영상을 이용한 수치표고모형 추출기법의 비교 연구

A Comparison Study on the Techniques for DEM Extraction from SAR Imagery

서 병 준 *	김 용 일 **	어 양 담 ***	정 재 준 ****
Seo, Byoung-Jun	Kim, Yong-Il	Eo, Yang-Dam	Jeong, Jae-Joon

要 旨

SAR 센서는 자체의 에너지원으로 영상을 취득하는 능동센서이며, 대기중 투과효과가 매우 높으므로 기존의 광학센서로는 해결하지 못하였던 지역이나 상황의 분석에 그 가치가 매우 높다. 본 논문에서는 SAR 센서에 의해 취득된 영상들을 이용하여 수치표고모형을 추출하는 기법들의 이론적인 연구와 실제적인 적용을 통하여 그 문제점과 활용 가능성을 평가하여 보았다. 비교평가에 사용한 자료는 수치지도의 등고선 자료를 이용하였으며, 추출된 수치표고모형과 평균제곱근오차를 계산함으로써 추출 정확도를 평가하였다. 수치표고모형 추출에 이용된 기법은 기존의 광학 영상에 적용되어왔던 입체모델 형성을 통한 지형표고를 추출하는 기법과 레이더 간섭 효과를 통한 지형표고 추출 기법이었다. 본 논문의 결과를 토대로, 현재 한국내의 지형여건을 고려한다면 입체시 기법에 의한 DEM 추출이 가장 적절할 것이며 레이더 간섭을 이용한 DEM 추출은 시기적인 문제와 산림의 산란효과에 의한 비상관 문제가 해결되어야만 할 것으로 생각된다.

ABSTRACT

SAR is an active imaging sensor emitting its own energy source and can be operated in all weather conditions. Thus SAR provides data which can not be obtained by an optical sensor. In this study, the potentials and problems of the techniques for DEM extraction from the SAR imagery were evaluated through theoretical researches and practical experiments. And then the accuracy was tested by RMS error between the digitized map contour and the results from this experiment. Here, two types of DEM extraction method were evaluated. One was an analytical photogrammetric technique, and the other was a SAR interferometric processing. From the experiment, we found that the photogrammetric technique is currently the most suitable method considering topographic conditions of Korea. In the SAR interferometry technique, we also conclude that the problems caused by decorrelations due to the temporal reasons and due to the scattering effects from vegetation should be solved.

* 서울대학교 도시공학과 석사과정
*** 서울대학교 도시공학과 박사과정

* 서울대학교 도시공학과 조교수
**** 서울대학교 도시공학과 박사과정

1. 서 론

광학 센서를 이용한 영상에 비하여 SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상은 기상조건에 거의 영향을 받지 않으므로, 구름이 많은 지역이나 강우가 빈번한 지역 등에 매우 효용성이 높다고 할 수 있다. 또한, 거리를 측정하는 기구인 레이더의 원리를 이용하므로, 광학 영상과는 다른 측면의 정보도 취득할 수 있는 장점이 있다.

이러한 SAR 영상이 활용되는 분야들은 매우 다양하다. 본 연구에서는 SAR 영상의 여러 활용분야들 중의 하나인 DEM 추출 기법들의 이론적인 연구와 실제적인 적용을 통하여 그 활용 가능성을 평가해 보고자 하였다. SAR 영상을 이용한 DEM 추출기법은 크게 입체시의 원리를 이용하는 기법과 레이더 간섭을 통한 두 영상의 위상 정보를 이용하는 기법이 있다. 입체시 기법은 기존의 항공사진이나 광학 원격탐사 영상에 적용되었던 입체 모델 형성을 통한 DEM 추출 방식을 이용하는 것이다. 반면에, 레이더 간섭 기법(interferometry)은 동일한 지표면에 대하여 두 SAR 영상이 지니고 있는 위상정보의 차이값을 활용하는 것으로서, 이 기법은 DEM 추출 이외에도 빙하의 이동경로 탐지, 지표의 붕괴 및 변이 탐지, 화산의 관찰 등에도 쓰이고 있다.

기존의 수치표고모형은 항공사진촬영을 이용한 입체시 기법을 통하여 등고선의 형태로 추출된 데이터로 이용되거나, 이를 다시 디지털이정하여 수치표고모형으로 변환하는 과정을 거쳐 제작되었다. 최근 들어서는 항공사진의 해석과정에서 직접 수치표고모형을 추출하는 기법들도 이용되고 있다. 그러나, 이러한 항공사진의 촬영을 통한 수치표고모형의 추출기법은 고비용을 필요로 하며, 특히 기상조건에 심한 제약을 받으므로 주기적인 갱신에 어려움이 많다. 이러한 측면에서 SAR 영상을 이용한 수치표고모형의 추출 기법은 매우 큰 활용가능성을 지니고 있다고 할 수 있다.

그러므로, 본 논문에서는 입체시 기법과 레이더 간섭 기법을 SAR 영상에 적용하여 지표면에 대한 수치표고모형을 추출하고, 이렇게 추출된 DEM의 정확도

를 기존의 지도에 의한 DEM과 상호 평가함으로써 두 기법의 비교 평가를 수행하고자 한다.

본 연구에서는 "RADARSAT-1" 위성의 C 밴드 SAR 데이터에 입체시 기법과 레이더 간섭 기법을 적용하여 지상의 수치표고 모형(DEM)을 추출하였다.

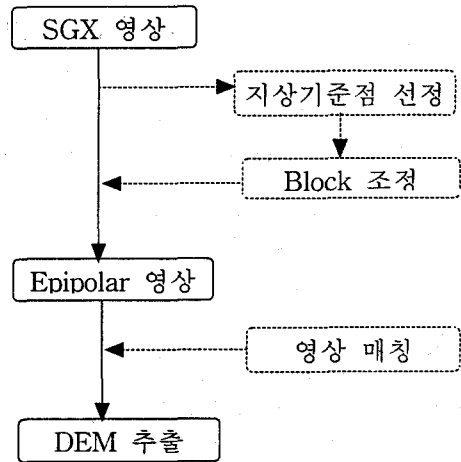


그림 1.1 입체시기법의 DEM추출 흐름도

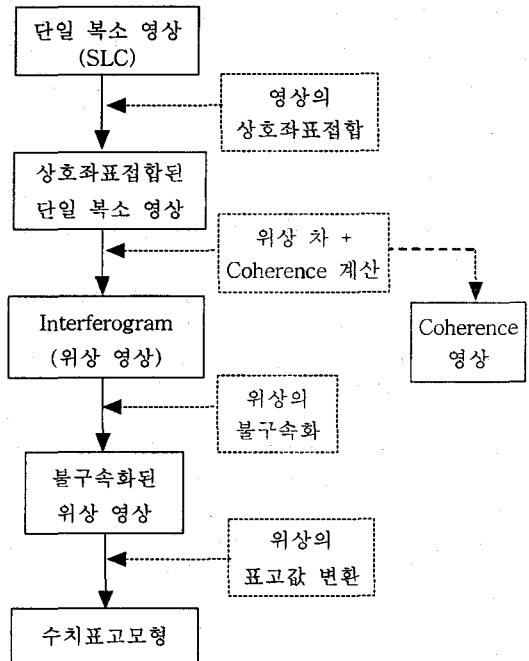


그림 1.2 레이더 간섭 기법의 DEM추출 흐름도

먼저 입체시 기법에 이용된 데이터는 SGX 영상으로서, 하루 간격의 Standard 2 빔 모드와 Standard 7 빔 모드로 거의 동일한 지역을 촬영한 두 영상을 이용하였으며, 입체 모델의 형성을 통하여 DEM을 추출하였다. 자료 처리에 이용된 소프트웨어는 PCI사의 Ortho Engine이었으며, 그 처리과정은 그림 1.1과 같다.

레이다 간섭 기법에는 SLC 포맷의 영상 자료가 이용되었으며, 사용된 두 영상은 Fine 1 빔 모드로 24일 간격을 갖는 동일 위성 궤도 경로에서 촬영된 영상이다. 자료 처리에 이용된 소프트웨어는 Atlantis사의 Earthview InSAR이었으며, 그 처리과정은 그림 1.2와 같다.

이상의 두 기법으로 추출된 DEM 자료를 기존의 지도 등고선 자료를 기준 데이터로 하여 비교 평가하였다. 두 기법으로 처리된 자료가 동일 지역이 아니었으므로, 추출된 DEM의 상호평가는 불가능하였다.

2. 입체시 기법

2.1 개요

SAR 영상에 입체시 기법을 적용하여 수치표고모형을 추출하는 기법은 사진측정학에서 공선조건식에 기초한 변들조정기법을 이용하였다. 이 변들조정기법은 지상기준점(GCP)들과 위성궤도에 대한 보조적인 데이터를 이용하여 입체모델의 변수들을 최소제곱기법에 의하여 계산한다. 그러므로, 반복계산을 하지 않고도 영상좌표로부터 지도투영좌표를 계산하는 것이 가능하다. 더욱이 이 모델은 입체 레이더 영상의 처리도 가능하다.

이 기하보정 모델은 캐나다의 원격탐사센터(CCRS, Canada Center for Remote Sensing)에서 Guichard (1983)와 Toutin(1985)에 의해 SPOT 영상을 처리하기 위하여 연구되었다. 이 모델은 전체 영상이 하나의 초점을 갖는 항공사진이나 우주공간에서 촬영한 사진과는 달리 영상의 각 행이 서로 독립적이고 다른 초점을 갖는 SPOT과 같은 선형배열의 스캐너 영상의 기

하특성에 맞도록 공선조건식을 형성하여 적용한 것이다.¹⁾ 이 모델은 CCRS에 의해 Landsat-TM, MOS-MESSR, SEASAT-SAR 등에도 적용된 적이 있다.

2.2 공선조건식

공선조건식에 기초한 변들조정기법은 위성체의 운동, 센서, 그리고 지구에 대한 세 가지 모델을 형성하여 이를 조합함으로써 이루어지며 각 요소들의 정확도를 고려하여 동시 조정을 실시한다. 여기에 이용되는 좌표계는 영상에서의 좌표계, 매개 좌표계, 지도투영 좌표계의 세 가지이다. 이 식의 유도는 SPOT의 경우와 동일하며, 그 유도결과는 식(2.1~2.4)와 같다.²⁾

$$P \cdot p + y(1 + \delta v \cdot X) - \tau H - H_0 \cdot \Delta T^* = 0 \quad (2.1)$$

$$X + \theta \frac{H}{\cos x} + aq(Q + \theta x - \frac{H}{\cos x}) - Q \cdot \Delta R = 0 \quad (2.2)$$

여기에서,

$$X = (x - ay)(1 + \frac{h}{N_0}) + by^2 + cxy \quad (2.3)$$

$$H = h - \frac{x^2}{2N_0} \quad (2.4)$$

위 식의 각 변수들은 촬영에 관계된 기하특성에 따른 수학적식에 의해 구해지며 그 변수들은 다음과 같다.³⁾

- P, Q : 각각 Y 와 X 축에서의 축척계수
- τ, θ : 각각 Y 와 X 축에서의 수준각의 함수
- a : 지구자전의 함수 즉, skew의 함수
- H_0 : 중심 조망 라인의 항공기 고도
- N_0 : 타원체의 법선
- $x, \delta v, b, c$: 지구중심과 영상중심, 위성 사이의 기하특성의 함수인 기지의 2차 변수
- $\Delta T^*, \Delta R$: 자세에 있어서의 비선형 변화량

- p, q : 영상좌표
- x, y, h : 매개좌표계에서의 지상좌표

앞의 식(2.1~2.4)의 6개의 미지수 (P, Q, θ, τ, a, b)에 세 개의 미지수가 더해져야 한다. 이 세 개의 미지수는 이동 범위(X_0, Y_0)와 회전변환(v)에 관련된 것으로서 지상기준점의 지도변환좌표로 변환하는 과정에 필요하며, 식(2.1~2.4)을 역으로 계산하면 다음의 식(2.5~2.7)과 같다.

$$y = v(1 - \delta v u) + \tau H' \quad (2.5)$$

$$x = u(1 - \frac{h}{N_0}) + v(a - bv - cu) - \frac{H'}{\cos x}(\theta + \frac{1 + \theta^2}{Q} u) \quad (2.6)$$

식(2.5~2.6)에서,

$$u = \frac{-a q Q}{1 + \theta a q}; v = -P p; H' = h - \frac{u^2}{2N_0} \quad (2.7)$$

필요한 최소 지상기준점의 수는 SPOT의 경우에는 미지수가 8개($P, Q, \theta, \tau, a, X_0, Y_0, v$)이므로 4점이지만, SAR 영상의 경우에는 미지수가 9개($P, Q, \theta, \tau, a, b, X_0, Y_0, v$)이므로 최소한 5점 이상의 지상기준점이 필요하게 된다³⁾. 5점 이상의 지상기준점을 이용할 경우에는 최소제곱을 통하여 조절을 실시하게 되는데, 실제로 최소 기준점의 수보다 더 많은 지상 기준점들을 이용하여 오차영향을 최소화하고 외부표정요소와 위성체의 자세정보에 대한 최확치를 얻는 것이 일반적이다. 입체모델의 형성에 입력되는 정보는 영상의 정보파일에서 제공되는 위성자세 데이터와 영상좌표, 그리고 이에 대응하는 지상좌표(E, N, H)이다.

2.3 입체시 기법의 적용

먼저 지상기준점에 근거한 공간 후방교회법을 통하여 입체쌍을 구성하는 각 영상을 따로 조정한다. 그 다음으로 두 영상 중 하나의 영상을 나머지 영상에

기준하여 유사 epipolar 기하특성을 형성하도록 좌표를 조정하고 재배열을 실시하며, 이후 자동 영상 매칭 기법을 이용하여 각 영상에서의 밝기 값들을 비교함으로써 DEM을 생성한다. 여기에 이용되는 매칭 기법은 표준화 교차 상관계수(normalized cross correlation) 매칭 기법으로서 미리 정의된 검색 창 내의 통계를 이용하여 대응되는 화소를 검색하는 기법이다⁴⁾. 매칭은 인근화소들까지를 고려하여 검색 영역에서 가장 높은 상관계수를 가질 때까지 검색을 지속한다. 검색 창의 중심 위치와 매칭된 위치 사이의 차이는 지형 기복에 의해 발생하는 차이, 즉 시차차(parallax difference)를 나타낸다.

3. 레이다 간섭 기법

3.1 개요

전형적인 레이다 영상은 진폭 데이터만을 나타내지만 SAR의 가장 중요한 측면은 이것이 데이터 취득과 후속 처리 과정에서 레이다 반향파의 진폭과 위상 정보를 보유하고 있는 일관적인 영상화 시스템이라는 것이다. SAR 간섭 기법은 이런 상호 일치성(coherence)을 이용한다. 즉, 위상을 측정하여 둘 또는 그 이상의 같은 표면의 SAR 영상에 있어서의 차분(differential) 경사거리와 경사거리의 변화를 추론한다.

레이다 간섭은 공간적으로 떨어져 있는 두 개의 레이다 안테나들로부터 받은 신호를 상호 연관시킴으로써 형성된다. 여기에서, 두 안테나 사이의 거리를 기선(baseline)이라고 한다. 이 두 개의 안테나는 보통의 항공기 탑재 시스템의 경우와 같이 하나의 플랫폼에 탑재될 수도 있지만, 거의 일치하는 반복 궤도에서 하나의 위성에 탑재된 하나의 안테나를 활용함으로써 합성 간섭기가 실현될 수도 있다. 레이다 간섭 시스템의 성능은 레이다 기기 변수들, 궤도 변수들, 데이터 처리와 후처리 작업에 의해 도입되는 오차들에 따라 달라진다. 특히 반복궤도의 경우에는 시기적인 비상관(temporal decorrelation)이 레이다를 이용한 지형도

제작에 중요한 오차원인을 만들어낸다.

3.2 두 영상간의 상호좌표등록

3.2.1 궤도 정보를 이용한 상호좌표등록

궤도 위치정보를 이용하여 영상 좌표점합에 필요한 대략의 화소 이동 추정치를 계산할 수 있다. 그림 3.1의 위치벡터 P_1, P_2, T 를 통해 대략적인 경사거리 방향의 이동량 계산의 기하특성을 알 수 있으며, 그 이동량은 다음과 같이 계산된다.

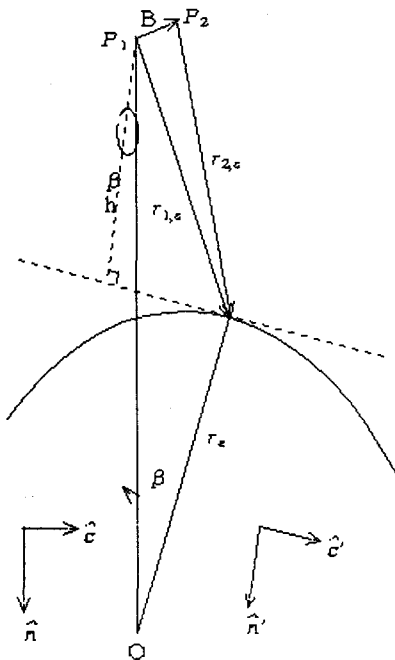


그림 3.1 레이다 간섭 기법의 접평면 기하특성

먼저 영상 중앙의 경·위도로부터 Cartesian 위치벡터 $T(x,y,z)$ 가 계산된다. 다음으로 목표점의 위치벡터 (Target position vector) $T(x,y,z)$ 로부터 각각의 위성의 위치를 뺌으로써 각 궤도에 대한 그 점의 경사거리 조명 벡터(look vector)가 계산된다.

$$r_{n,c}(x,y,z) = T(x,y,z) - P_i(x,y,z) \quad (3.1)$$

마지막으로, 다음의 식을 통해 대략적인 경사거리

방향의 화소 이동량 c_r 이 계산된다.

$$c_r = (|r_{2,c}| - |r_{1,c}|) / R_r \quad (3.2)$$

여기에서, R_r : 경사거리의 화소 간격

그림 3.2는 두 영상에 대한 시각 기준 프레임들을 보여준다. 비행 방향의 이동량은 다음과 같이 계산된다. 기선의 계산으로부터 두 번째 궤도의 기준 프레임에서의 시간이 검색되고, 이를 두 번째 영상의 첫 번째 경사거리 방향 라인의 시간과 비교한다. 이 때 이 두 시간은 모두 두 번째 영상의 시각 기준 프레임에서의 시간이다. 그러면, 두 영상간의 대략적인 비행 방향의 화소 이동량 c_a 는 다음과 같다.

$$c_a = PRF \times (t_2 - t_{2START}) \quad (3.3)$$

여기에서, PRF는 single look이라고 가정하였을 때의 레이다의 펄스 반복 주기를 의미한다.

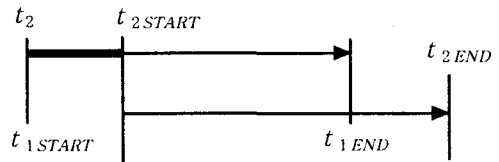


그림 3.2 한 쌍의 영상에 대한 시각 기준 프레임

3.2.2 세부 상호좌표등록

레이다에 의해 영상화되는 지상 면적의 띠(swath)는 궤도에 평행하다. 레이다 간섭에 이용된 두 궤도가 $2a$ 만큼 서로 기울어져 있다면, 이 두 궤도로부터 취득된 두 영상에서는 서로 같은 지역이라 할지라도 경사거리(y) 방향으로의 재배열을 실시하지 않는다면 두 영상의 중첩은 불가능하다. 더욱이, 서로 평행이 아닌 궤도에서는 지형 표고의 변화(z)가 비행 방향으로 작은 이동을 발생하게 된다. 즉, 높은 표고의 지형지물은 높이가 0인 지형지물에 비하여 상대적으로 비행 방향으로 이동되어 나타난다. 예를 들어, SIR-B의 경

우에는 800m의 기복변위가 약 15화소 정도의 비행방향의 이동에 해당된다는 실험결과가 있었다. 결과적으로, 전체적인 중첩을 위해서는 한 영상이 비행 방향(x)으로도 재배열 되어야 한다.

경사거리 방향의 왜곡은 계통적인 반면에, 비행 방향의 이동은 지형의 기복에 영향을 받게된다. 영상의 각 화소의 경사거리와 비행 방향에 대한 정확한 이동량을 알아내는 것은 매우 중요하다.

먼저 계통적인 왜곡을 갖는 경사거리 방향의 이동량은 위치결정 알고리즘⁵⁾을 이용하여 결정한다. 이 위치결정 알고리즘은 각 영상에서 대략적으로 같은 영역(속성,feature)으로부터 작은 8×8의 격자 표본과 이와 인접한 8개의 화소들을 함께 추출한다. 즉, 32×32의 격자를 추출하여, 적(product) 영상을 만든다. 이 영상은 레이더 간섭에 의한 fringe를 나타내게 되므로, Fast Fourier Transform(FFT)를 적용하여 경계의 상대적인 질을 평가하여 최적의 이동량을 계산하는 것이다. 경사거리 방향의 화소 이동량은 계통적으로 변화하기 때문에 이를 선형식에 근사시켜서 정확한 이동량을 결정하고, 인접한 화소들에 대하여 2차(3 점) 내삽을 수행하여 주 영상을 부 영상 방향으로 재배열을 실시한다.

비행 방향의 재배열은 먼저 앞의 위치선정 알고리즘을 이용하여 주 영상과 경사거리(y) 방향으로 재배열이 이루어진 부 영상에 대하여 x 이동량의 집합들을 계산함으로써 시작된다. 앞에서와 마찬가지로 경사거리와 비행 방향의 8화소들에 대하여 x 이동량을 계산한다.

아무리 먼저의 위치선정 알고리즘이 정확하다 할지라도, 영상이 낮은 신호 수준을 갖거나 지형의 layover 현상들이 나타나는 영역에서는 계산된 이동량들이 부정확할 수 있다. 일반적으로, 위치선정 알고리즘에서 낮은 스펙트럼 SNR을 갖는 지역에서는 부정확한 값이 나타난다. 그러므로, 좋지 않은 이동치들의 영향을 최소화하기 위해 각 이동량 값을 그에 해당하는 스펙트럼 SNR로 가중치를 준다. 그런 다음에 이동량을 low pass filtering 함으로써 결과를 평활화한다. 그 식은 다음과 같다.

$$x'_{off}(i,j) = \frac{\sum_k filt(k) SNR^2(i+k,j) x_{off}(i+k,j)}{\sum_k filt(k) SNR^2(i+k,j)} \quad (3.4)$$

여기에서, x'_{off} 는 격자내의 점들에 대한 새로운 화소 이동량, x_{off} 는 이전의 화소 이동량, $filt(k)$ 는 $k=5$ 점들 위의 코사인 함수로 되는 low pass 필터를 나타낸다.

다음으로, 영상내의 어떤 화소에 해당되는 이동량에 가장 가까운 네 개의 동일(tie)점들로 2차원 내삽을 수행함으로써 계산한다. 동일점에 해당하는 이동량(x'_{off})을 화소로부터의 표준화된 직교좌표계에서의 거리의 역으로 가중치를 준다. 즉, 화소로부터 대각 거리가 11, 12, 13, 14, 인 네 개의 가장 가까운 동일점들이 있고, x 이동량들이 x_1, x_2, x_3, x_4 이면, 그 화소에 대한 이동량은 다음의 식(3.5)와 같다.

$$\frac{x_1/l_1+x_2/l_2+x_3/l_3+x_4/l_4}{1/l_1+1/l_2+1/l_3+1/l_4} \quad (3.5)$$

이 계산은 계속되는 근호계산을 피하고 몇몇의 발생 가능한 대각 거리들에 대한 look-up table을 이용함으로써 계산의 효율성을 높인다. 이렇게, x 이동량들을 각 화소에 대하여 구하면 3점(quadratic) 재배열을 이미 경사거리(y) 방향으로 재배열된 영상에 대하여 x방향으로 적용할 수 있다.

3.3 Coherence 계산과 Interferogram 작성

3.3.1 Coherence

Coherence ν 수치는 SAR Interferogram의 유용성에 대한 근본적인 정보를 제공하는 정량적인 척도이며, coherence 수치는 0(incoherence)과 1(완전한 coherence) 사이에 있다. Coherence 수치가 높으면 두 SAR 영상에서 관측되는 speckle 패턴이 유사하다는 것을 의미하며, 낮은 coherence 수치는 간섭 경계들에 많은 위상 노이즈가 첨가되어 있다는 것을 의미한다.

두 복소(complex) SAR 영상 Z1과 Z2의 coherence ν 는 복소 상관계수의 절대값으로 정의되며, 다음의

식(3.6)과 같다⁶⁾.

$$v = \left| \frac{E[Z_1 Z_2^*]}{\sqrt{E[|Z_1|^2] E[|Z_2|^2]}} \right| \quad (3.6)$$

여기에서, v : coherence

Z_1, Z_2 : 복소 SAR 영상

$E[\]$: 기대값 연산자

* : 공액 복소수

Coherence는 신호대잡음비 SNR의 함수로도 표현이 가능하다.

$$v = \frac{1}{1 + SNR^{-1}} \quad (3.7)$$

Coherence 수치가 너무 작으면, interferogram에 노이즈가 너무 많아 실제적으로 레이다 간섭의 목적으로는 완전히 사용될 수 없다는 것을 의미한다.

3.3.2 Interferogram

SAR interferogram은 두 복소 SAR 영상에서, 상호 영상좌표등록이 끝난 후에 한 영상의 복소수와 다른 나머지 한 영상의 공액 복소수를 곱함으로써 얻어진다. 두 영상이 화소 이하의 정확도까지 상호좌표등록이 이루어져야만 간섭 패턴 즉, 간섭 경계를 생성할 수 있다.

적정하게 상호좌표등록된 복소 SAR 영상들 Z_1 과 Z_2 는 다음과 같은 방식으로 화소단위로 곱해진다.

$$Z_{int} \equiv Z_1 Z_2^* \equiv I_1 I_2 e^{i(\phi_1 - \phi_2)} \equiv I_{int} e^{i\phi_{int}} \quad (3.8)$$

여기에서 Z_{int} : SAR interferogram

Z_1, Z_2 : 복소 SAR 영상

I_1, I_2 : SAR 강도 영상

ϕ_1, ϕ_2 : SAR 위상 영상

I_{int} : 간섭 강도(interferometric intensity)

ϕ_{int} : 간섭 위상(interferometric phase)

앞의 식(3.8)에서, SAR interferogram에서 간섭 강도 I_{int} 는 강도 영상들의 적(product)이고, 간섭 위상 ϕ_{int} 는 위상의 차이라는 것을 알 수 있다.

3.4 위상 불구속화

구속된 위상(wrapped phase)이란 절대 위상치가 $(-\pi, \pi)$ 구간의 값으로 구속된 위상값을 의미한다. 실제의 전자기 신호에 수학식을 적용함으로써 구속된 위상을 얻어낸다. 그러나, 이 구속(wrapping)에 적용되는 과정이 비선형적이라는 데 그 문제점이 있으며, 수학적으로 알 수 없는 위상함수 φ 는 다음의 식을 통하여 구간 $(-\pi, \pi)$ 로 구속된다.

$$\Psi(t) = \varphi(t) + 2\pi k(t) \quad (3.9)$$

여기에서, $k(t)$ 는 Ψ 가 $-\pi < \Psi \leq \pi$ 로 되도록 하는 정수함수이다.

$\varphi(t)$ 는 레이다 간섭 기법에서 지표면의 기복과 관련되어 있으며, 물리적인 신호로부터 추출이 가능한 매우 비선형적인 $\Psi(t)$ 가 유용한 정보를 제공할 수 있지만, 더 많은 이용을 위해서는 불구속화 과정을 거쳐서 처리되어야만 한다.

간단히 말하면, 위상 불구속화의 문제는 구속된 함수(wrapped function) $\Psi(t)$ 로부터 위상 $\varphi(t)$ 에 대한 추정치 $\phi(t)$ 를 구하는 것이다. 그러므로, 지형의 기복 또는 다른 물리적인 특성과 관련된 양인 $\varphi(t)$ 를 추정하기 위해 구속된 수치들이 불구속화 되어야만 한다.

본 논문에서 이용된 위상불구속화 알고리즘은 Goldstein 등에 의해 제시된 "Branch Cut" 알고리즘이다.

3.5 높이 영상의 생성

3.5.1 위상정보의 표고 전환

위성의 안테나에서 각각 수신된 위상정보 (propagation 부분)는 다음과 같이 정의된다.

$$\Phi_{1p} = \frac{2\pi \cdot 2R_1}{\lambda}, \Phi_{2p} = \frac{2\pi \cdot 2R_2}{\lambda} \quad (3.10)$$

그리고, 간섭 위상, 즉 위상차(phase difference)는 다음과 같다.

$$\Phi_p = \Phi_{1p} - \Phi_{2p} = \frac{4\pi(R_1 - R_2)}{\lambda} = \frac{4\pi\delta}{\lambda} \quad (3.11)$$

위의 식의 미분식은,

$$\partial \Phi_p = \frac{4\pi}{\lambda} \partial \delta \quad (3.12)$$

이다.

그림 3.2에서, 경로 길이의 차이 δ 는,

$$\delta = B \sin \phi \quad (3.13)$$

여기에서, $\phi = \theta - \alpha$

$$\delta = B \sin(\theta - \alpha) \quad (3.14)$$

이 식의 미분식은 다음과 같다.

$$\partial \delta = B \cos(\theta - \alpha) \partial \theta \quad (3.15)$$

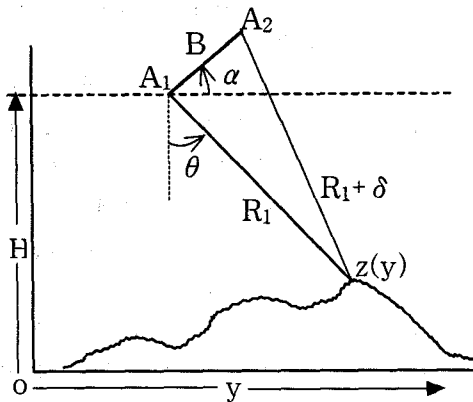


그림 3.3 위상 정보의 표고 전환

앞의 식들을 결합하면 위상차의 변화와 입사각 θ 의 작은 변화에 대한 관계식을 세울 수 있다.

$$\partial \Phi_p = \frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta - \alpha) \partial \theta \quad (3.16)$$

$$\partial \theta = \frac{\lambda}{4\pi B \cos(\theta - \alpha)} \partial \Phi_p \quad (3.17)$$

기준면으로부터 위성의 높이는,

$$H = R_1 \cos \theta \quad (3.18)$$

여기에서, R_1 을 상수로 생각하면, 위 식의 미분식은 높이의 변화 ∂H 에 따른 입사각 θ 의 변화의 관계를 나타낸다.

$$\partial H = \frac{(-)R_1 \sin \theta}{h} \partial \theta \quad (3.19)$$

앞의 과정들을 이용하여 그림 3.6에서 기준면상의 실제높이 h , 즉, 높이의 변화 ∂H 와의 관계를 유도할 수 있다.

$$h = \partial H = \frac{\lambda R_1 \sin \theta}{4\pi B \cos(\theta - \alpha)} \partial \Phi_p \quad (3.20)$$

이 식을 다시 쓰면,

$$h = \frac{\lambda R_1 \sin \theta}{4\pi B^+} \partial \Phi_p \quad (3.21)$$

여기에서, $B^+ = B \cos(\theta - \alpha)$

앞의 식(3.12)과 식(3.16)을 이용하여 지형과 지표의 변화가 위상차에 미치는 영향을 결합하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$\partial \Phi_p = \frac{4\pi}{\lambda} \partial \delta + \frac{4\pi B^+}{\lambda R_1 \sin \theta} \partial H \quad (3.22)$$

3.5.2 기선 보정⁹⁾

현재 가장 높은 궤도 정확도를 갖는 표준 ERS-1 궤도 위치 벡터의 경우에도 높이로의 변환 과정에서

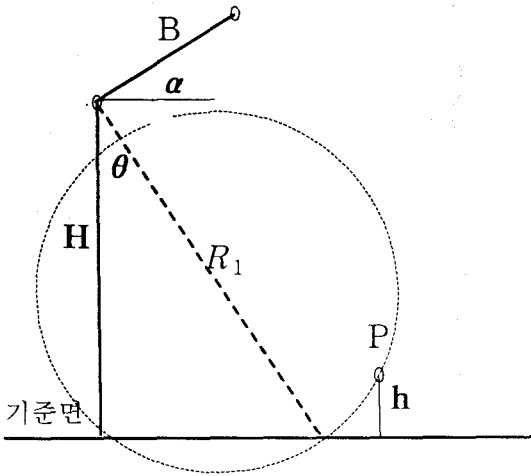


그림 3.4 실제 표고의 계산

충분한 정도의 정확도를 갖지는 못한다. 그러므로, 영상에서 그 높이를 알고 있는 기지의 몇 점이 간섭 위상에서 지형 표고로의 변환을 조정하는데 이용된다. 기선과 경사거리 벡터 B_i 와 r_i 는 TCN 좌표계에서 각 점 i 에 대해 다음과 같은 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} B_i &= B_{ni} \hat{n} + (B_{ci} + a t_i) \hat{c} \\ r_i &= r_{ni} \hat{n} + r_{ci} \hat{c} \end{aligned} \quad (3.23)$$

여기에서, t_i 는 영상 중간부에 대해서 그 점이 획득된 시각이며, a 는 평행이 아닌 궤도에 의해 발생되는 기선의 across track 방향의 비행 수렴을 모델링하는데 이용되는 계수이다.

위상 불구속화 과정에서 간섭 위상 ϕ_i 에서 미지 상수 ϕ_c 까지를 제공한다. 경사거리의 차이 δ_i 와 대응하는 간섭 위상은 다음과 같다.

$$\delta_i = |r_{2,i}| - |r_{1,i}| = -\frac{\lambda}{4\pi} (\phi_i + \phi_c) \quad (3.24)$$

$$\phi_i = -\frac{4\pi}{\lambda} \left\{ \sqrt{|r_{1,i}|^2 + |B_i|^2 - (2r_{1,i} \cdot B_i) - |r_{1,i}|} \right\} - \phi_c \quad (3.25)$$

식(3.25)으로부터 전개 근사를 이용하여 위상 차이

에 대한 선형 모델을 만들 수 있다.

$$\phi_i = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{r_{1,i} B_i}{|r_{1,i}|} - \phi_c \quad (3.26)$$

조망벡터와 기선에 관한 식(3.13)을 이용하면,

$$\phi_i - \frac{4\pi}{\lambda} \hat{r}_{ni} B_{ni} - \left[\frac{4\pi}{\lambda} \hat{r}_{ci} - \frac{4\pi}{\lambda} \hat{r}_{ci} t_i - 1.0 \right] \begin{bmatrix} B_c \\ a \\ \phi_c \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

세 개의 동일점(tiepoint)들로 연립방정식을 형성하고 이를 역변환하여 모델 변수들에 대한 해를 구할 수 있다. 연립 방정식의 풀이에 이용되는 세 동일점들은 특이성(singularities)을 피하기 위해 영상 전체에 잘 분포되어 있어야 한다. 더 많은 동일점들을 이용하면, 반복 Levenberg-Marquadt 알고리즘을 이용한 비선형 최소제곱 적합을 수행하여 향상된 정확도를 얻을 수 있다.

4. 수치표고 모형 추출과 기준 데이터

4.1 입체시 기법

입체시 기법에 이용된 영상은 SGX 영상으로서 RADARSAT-1의 Standard 빔 모드의 2번과 7번으로 촬영된 데이터이다. Standard 빔 모드의 공간 해상력은 약 30m×30m이며, Standard 2 빔 모드의 영상을 주 영상으로 하고 Standard 7 빔 모드의 데이터를 부 영상으로 하여 입체모형을 형성하였다.

전체 영상 내에서 1:50,000 축척의 공주지역 지형도에 해당되는 영역을 DEM 추출 대상지역으로 결정하였고, 이 지역내의 1:25,000 축척의 4개 도엽의 지형도를 이용하여 산의 최정상 부분을 지상기준점으로 선정하였으며, 그 지상기준점들의 수평위치는 지도의 디지털이징을 통하여 얻었다. 높이정보는 지도의 등고선과 수준점 및 삼각점 측량 성과를 이용하였다. 지상기

준점 이외에 두 영상에서 동일한 점 20쌍을 영상 전체에 대하여 고루 선정하였으며, 이는 지상기준점과 더불어 두 영상의 상호좌표점합 과정에 이용된다.

지상기준점의 선정 후에, 모델 형성에 의해 계산된 높이와 입력된 높이와의 차이값은 표 4.1과 같다.

그 후에 2번 Standard 빔 모드로 촬영된 영상을 기준영상으로 하여 7번 빔 모드의 영상이 epipolar 기하 조건을 만족하도록 재배열 하였다. 그 결과 부 영상의 epipolar 영상은 그림 4.1과 같다.

표 4.1 입체시 모델형성에 의한 계산높이와 입력높이

기준점 번호	영상좌표		입력 높이	계산된 높이	차이
	열	행			
1	3016	1809	121.0	99.0	22.0
2	2626	1913	308.2	427.0	-118.8
3	3063	1648	239.0	184.0	55.0
4	3302	1789	130.0	66.0	64.0
5	3768	1942	110.2	98.0	12.2
6	3222	1931	312.6	245.0	67.6
7	3247	2355	355.0	287.0	68.0
8	3631	2788	353.0	392.0	-39.0
9	2958	2905	348.0	338.0	10.0
10	3209	2628	306.5	260.0	46.5
11	3335	2475	324.0	262.0	62.0
12	3044	1869	274.0	218.0	56.0
13	3663	2225	392.0	328.0	64.0
14	2606	2053	125.0	248.0	-123.0
15	3578	1899	267.0	204.0	63.0
16	3410	2836	508.0	454.0	54.0
17	3374	2989	574.0	438.0	136.0
18	3231	2449	152.0	126.0	26.0
19	2806	2895	186.0	230.0	-44.0
20	3835	1786	145.0	57.0	88.0

높이 오차	평균	평균제곱근오차	최소	최대
		28.5m	63.5m	-123.0

Epipolar 영상을 형성한 후에, 검색 창을 이용하여 두 영상의 상관계수를 계산하고 최고값을 갖는 점을 찾아 매칭하는 상관계수 매칭기법을 이용하여 수치표고모형을 추출하게 된다. DEM 추출대상지는 앞에서 설명한 대로 1:50,000 축척의 단일 도엽에 포함되는 영역을 선택하였다.

4.2 레이더 간섭 기법

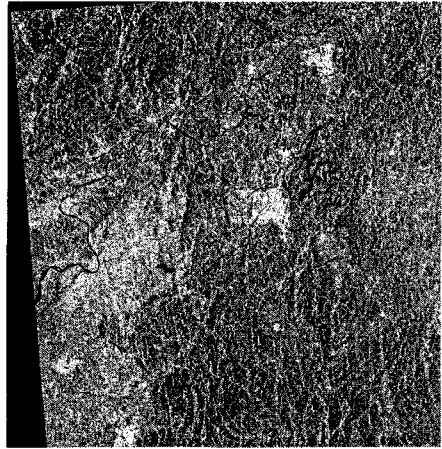


그림 4.1 입체시 기법의 부 영상의 Epipolar 영상

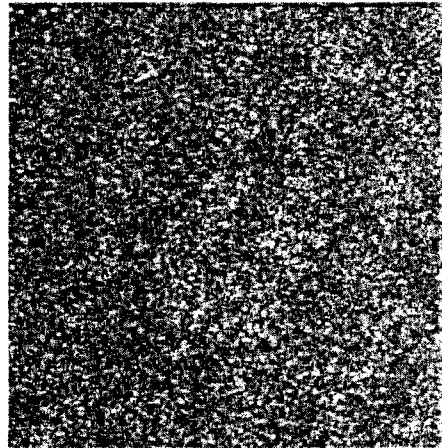


그림 4.2 레이더 간섭 기법의 coherence 영상

레이더 간섭 기법에 이용된 영상은 시기적으로 먼저 촬영된 영상을 주 영상으로 하고 24일 후에 촬영된 영상을 부 영상으로 채택하였다. 사용된 영상은 Fine 빔 모드로서 지상 해상력은 약 10m×10m이다.

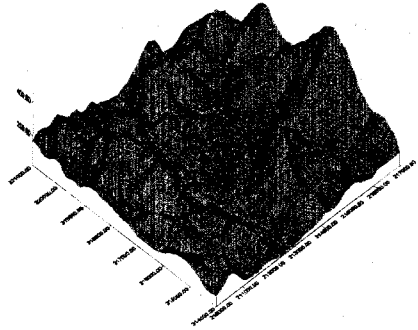
전체 영상 영역은 약 50km×50km 정도의 수도권 일대 지역이며, 이 중 DEM 추출 대상 지역을 약 6km×6km로 정하였고, 이에 따라 대상지역을 포함하는 영상영역을 잘라내어 이용하였다.

앞에서 설명한 대로 상호 좌표 점합을 거쳐 표고를 추출하기 이전에 두 영상의 상호 일치성을 검사하기 위하여 일치성에 관한 coherence 영상을 생성한다. 생성된 coherence 영상은 위의 그림 4.2와 같다. 여기에

서 볼 수 있듯이 두 영상 사이의 일치성은 거의 잡음 효과로 볼 수 있다.

4.3 기준 데이터

먼저 입체시 기법에 이용된 기준데이터로는 지도등고선을 디지털화한 수치등고선 벡터 자료를 이용하였으며, 이를 다시 25m 간격의 격자로 변환하였다. 25m의 격자간격은 입체시 기법을 이용하여 추출된 DEM과의 비교를 위하여 설정한 것이다. 레이더 간섭 기법에 이용된 기준데이터도 입체시 기법과 마찬가지로의 수치등고선 자료를 이용하였으며, 격자 간격은 20m로 설정하였다.



(b) 입체시 기법의 추출 DEM

그림 51 입체시 기법의 기준 DEM과 추출 DEM(3차원 표현)

5. 정확도 평가 및 결과 분석

5.1 입체시 기법

입체시 기법을 이용한 DEM 추출결과는 그림 5.1과 5.2에서 보이는 것과 같이 기준 데이터에 비하여 평활화(smoothing) 효과가 나타나 있는 것을 알 수 있다. 이러한 평활화 효과는 자동 매칭 기법의 적용 과정에서 의 오차와 영상의 해상도에 의한 지상기준점 선정의 오차의 영향에 기인한다고 할 수 있다. 입체시 기법에 의하여 추출된 DEM의 시각적인 비교를 위하여 그림 5.1에서는 3차원으로 표현하여 보았고, 그림 5.2에서는 강도 영상으로 표현하여 보았다.

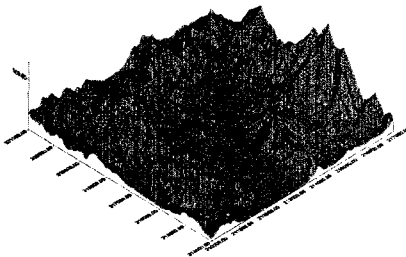


(a) 입체시 기법의 기준 DEM



(b) 입체시 기법의 추출 DEM

그림 52 입체시 기법의 기준 DEM과 추출 DEM(강도 영상)

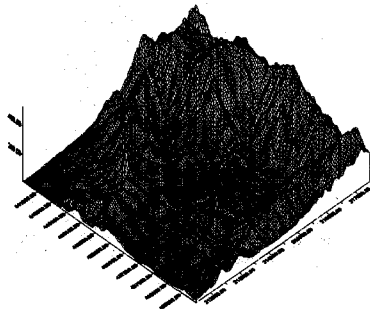


(a) 입체시 기법의 기준 DEM

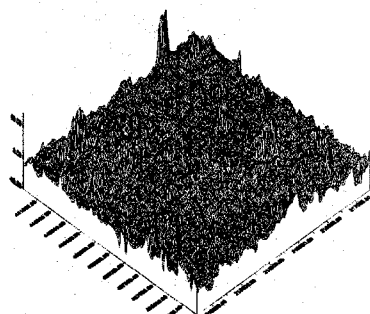
5.2 레이더 간섭 기법

레이더 간섭 기법을 이용한 DEM 추출결과는 다음의 그림 5.3, 5.4와 같으며, 앞에서 설명한 낮은 coherence, 즉 잡음의 영향으로 인한 매우 불규칙적인 모습을 볼 수 있다. 대상 지역이 주로 산악 지역이었으므로, 삼림에 의한 난반사와 수목의 체적에 의한 산란(volume scattering)의 영향이 매우 컸다고 할 수 있으며, 또한 24일 주기의 영상을 사용함으로써 그 동안의 지표 특성의 변화에 의해 많은 비상관이 발생하였을 것이다. 참고로 레이더 간섭 기법에 이용된 영상은 10월과 11월의 영상으로서 늦가을의 낙엽 현상에 의한 삼림 특성의 변화가 컸을 것으로 여겨진다.

그림 5.3에서는 기준 DEM과 상대적인 높이값으로 추출된 레이더 간섭 기법의 DEM 결과를 3차원으로



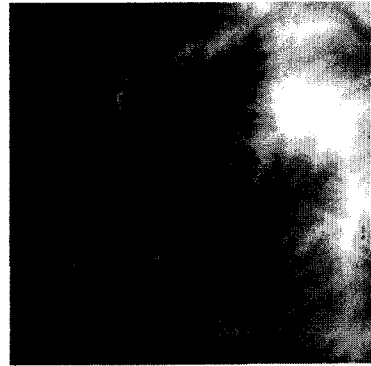
(a) 레이더 간섭 기법의 기준 DEM



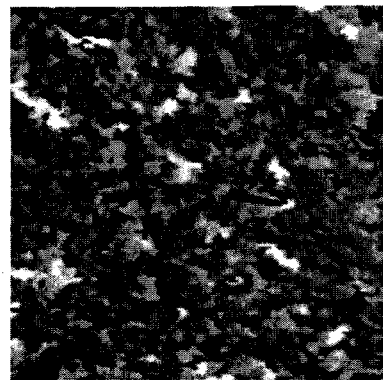
(b) 레이더 간섭 기법의 추출 DEM (상대높이)

그림 5.3 레이더 간섭 기법의 기준 DEM과 추출 DEM(3차원 표현)

표현하여 보았다. 또한, 그림 5.4에서는 DEM 추출결과를 강도 영상으로 나타내었다.



(a) 레이더 간섭 기법의 기준 DEM



(b) 레이더 간섭 기법의 추출 DEM(상대높이)

그림 5.4 레이더 간섭 기법의 기준 DEM과 추출DEM (강도 영상)

5.3 결과 분석

먼저 입체시 기법을 이용하여 추출된 DEM을 기준 DEM과 비교한 결과는 다음의 표 5.1과 같다. 추출된 DEM과 기준 DEM을 사용 영상의 해상도를 고려하여 25m로 추출한 뒤에 이를 다시 40m와 80m의 격자 DEM으로 재생성하여 그 결과를 비교하였다. 그 이유는 25m의 추출결과에서 나타날 수 있는 노이즈의 영향을 제거하기 위한 것이었으나, 그 결과 평균계급근 오차는 약 26m로 격자의 해상도에 전혀 영향을 받지 않았으며, 이는 영상의 해상도보다 높은 결과 정확도

이다.

표 5.1 입체시 기법의 추출 DEM과 기준 DEM의 평균제곱근오차 비교

격자 간격	25m		40m		80m	
	기준	추출	기준	추출	기준	추출
높이 평균(m)	132.63	132.62	132.74	132.70	132.41	132.44
RMSE(m)	26.21		26.24		26.19	

그러므로, 본 논문에서 이용된 Standard 빔 모드의 약 30m의 해상력보다 더 높은 약 10m정도의 지상해상력을 갖는 Fine 빔 모드를 이용하는 경우에는 지상 기준점의 선정 과정에서 더욱 명확한 위치 결정에 따른 더 나은 정확도를 갖는 결과를 얻는 것이 가능할 것으로 보인다. 또한 양방향 입체시의 경우가 단방향 입체시의 경우보다 입체모델이 더 견고하므로, 양방향 입체시에 따른 정확도 향상도 기대할 수 있다.

한편, 레이더 간섭 기법을 이용한 DEM 추출 성과는 잡음에 의한 영향이 매우 커서 기준 DEM과의 비교가 불가능하였다. 두 영상간의 coherence가 낮은 원인은 앞에서 설명된 여러 가지의 경우가 함께 존재하지만, 본 연구에 사용된 데이터의 비상관은 주로 시기적인 비상관, 즉 24일 주기 동안의 삼림의 변화와 수목에 의한 산란 효과 등이 주요한 원인일 것으로 생각되며, 또한 사용된 영상의 빔 모드가 Fine 1 빔 모드이기 때문에 낮은 입사각으로 인한 지형의 기복 변화가 매우 심하였을 것으로 생각된다. 이전의 연구에 따르면, 레이더 간섭 기법의 적용에 가장 적절한 RADARSAT의 빔 모드는 해상도가 높은 Fine 빔 모드 중에서 그 입사각이 가장 큰 Fine 5 빔인 것으로 알려져 있다.

이 일치성 영상에 대한 일치성 값의 분포는 그림 5.5와 같다. 레이더 간섭에 이용된 두 영상 사이의 coherence는 거의 0.1이하의 영역에 분포하였다. 앞에서 설명된 대로 coherence 값은 이후에 생성되는 interferogram의 양호한 정도에 대한 척도로서 낮은 coherence는 interferogram의 질이 낮으며, 잡음의 효과가 매우 크다는 것을 의미한다.

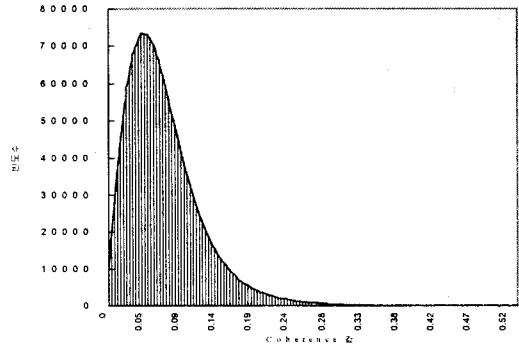


그림 5.5. Coherence값의 분포
(전체 화소 수 : 1,818,738 화소)

6. 결 론

광학센서에 의한 원격탐사 데이터로부터 DEM을 추출하는 방법들에 비하여 SAR 영상을 이용한 DEM 추출 기법은 많은 장점을 갖는다. 본 연구에서는 RADARSAT 위성의 SAR 데이터를 이용하였으며, 일반적인 SAR 데이터의 DEM 추출 기법인 입체시 기법과 레이더 간섭 기법을 적용하여 지형의 높이 정보를 추출하여 보았다. 본 논문의 결론은 다음과 같이 정리될 수 있다.

첫째, 입체시 기법을 이용한 DEM 추출 기법은 사용된 영상의 지상해상력 약30m보다 좋은 약 26m의 평균제곱근오차의 결과를 얻음으로서 지형도 제작에 관한 가능성을 확인할 수 있었다.

둘째, 레이더 간섭 기법을 이용한 DEM 추출 결과는 데이터의 시기적인 비상관, 궤도 정확도, 산림지역에 의한 난반사 효과, 그리고 입사각의 부적절성으로 인하여 약 10m의 해상력에도 불구하고 적용에 어려움이 많았다.

셋째, 입체시 기법의 경우에서 주된 오차가 지상기준점의 선정과 영상 해상력에 관계된 것이므로 더 나은 해상력의 데이터를 이용하여 지상기준점을 설정하고 GPS 데이터를 이용한 기준점의 정확한 위치파악 등이 이루어진다면 높은 정확도를 기대할 수 있을 것으로 보인다. 항공기 탑재 SAR 센서를 이용하면 해상

도는 물론, 대공표지에 의한 지상기준점 선정이 가능하며, 센서 위치를 GPS 및 관성항법장치에 의해 결정함으로써 정확도를 훨씬 더 높일 수 있을 것으로 예상된다

넷째, 레이더 간섭 기법의 경우에는 일치성에 의한 문제가 매우 크게 작용하므로 주원인인 수목에 의한 난반사 효과를 최소화하는 매개체적인 기법이 반드시 필요하며, 적절한 시기의 선정도 또한 매우 중요한 것으로 볼 수 있다. 예를 들어, 현재 ERS 위성의 경우에는 하루 주기의 데이터 제공이 가능하며, RADAR-SAT의 경우보다 높은 정확도의 궤도 정보를 갖는다.

다섯째, 현재 한국 지형에 적용 가능한 SAR 영상을 이용한 DEM 추출 기법은 아직은 입체시 기법이 적절하며, 레이더 간섭 기법은 앞으로 산림에 의한 영향을 보정할 수 있는 중간 기법들이 추가적으로 연구되어야 한다. 우리나라의 지형은 그 대부분이 산림 지역이므로 산림에 의한 영향을 고려하지 않고 레이더 간섭 기법을 적용하는 것은 부적절할 것이라 사료된다.

참 고 문 헌

1. N. Al-rousan, P. Cheng, G. Pertie, Th. Toutin, and M.J. Valadan Zoej, Automated DEM Extraction and Orthoimage Generation from SPOT Level 1B Imagery, PE&RS, v.63, no. 8, August 1997, pp.965-974.
2. Toutin, Th., 1983. Analyse mathématique des possibilités cartographiques du satellite SPOT;

Mémoire du Diplôme d'Etudes Approfondies, Ecole Nationale des Sciences Géodésiques; Institut Géographique National, Paris, France, pp 1-74.

3. Toutin, Th., and Y. Carboneau, 1990. Multi Stereoscropy for the Correction of SPOTHRV Images, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, v.28, no.4, pp.298-313.
4. Gonzalez, R.C. and P. Wintz, 1987, Digital Image Processing, 2nd ed. Addison Wesley, pp.425-427.
5. Gabriel, A.K. and Goldstein, R.M., 1998. Crossed Orbit Interferometry : Theory and Experimental Result from SIR-B, International Journal of Remote Sensing, vol.9, no.5, pp. 857-872.
6. Prati, C., Rocca, F., and Monti Guarnieri, A., 1992. SAR Interferometry Experiments with ERS-1, Proceedings of the First ERS-1 Symposium, Cannes, France, pp. 211-218.
7. Engdahl, E.E., Phase Unwrapping in SAR Interferometry Using Instantaneous Frequency Estimation, Master's Thesis in Helsinki Univ. of Technology, p. 20.
8. Ghiglia, D.C. and Pritt, M.D., 1998., Two Dimensional Phase Unwrapping : Theory, Algorithms, and Software, pp. 103-121.
9. Small, D., Werner, C., and Nuesch, D., 1993. Baseline Modelling for ERS-1 SAR Interferometry, Proceedings of IEEE-IGARSS'93, Tokyo, Japan, pp. 1204-1206.