

광학 위성영상과 SAR 위성영상의 DEM 융합에 관한 연구

A Study on the Fusion of DEM Generated from Images of Optical Satellite and SAR

유복모* · 홍재민** · 진경혁** · 윤창락***

Yeu, Bock Mo · Hong, Jae Min · Jin, Kyeong Hyeok · Yoon, Chang Rak

要 旨

위성영상으로부터 수치고도모형(DEM:Digital Elevation Model)을 생성하는데 있어 입체 광학 위성영상을 이용하는 방법과 입체 SAR 위성영상을 이용한 레이더간섭 기법(SAR Interferometry)이 가장 널리 사용되고 있다. 이러한 기법들은 영상 취득 센서의 특성과 자료 처리의 한계를 가지고 있으며 이는 서로 다른 특성의 자료를 융합함으로써 극복될 수 있다. 본 연구는 SAR 위성영상과 광학 위성영상으로부터 생성된 DEM을 융합하여 고품질의 DEM을 생성하고자 함이 목적이다. DEM 융합은 SAR 위성영상의 DEM과 광학 위성영상의 DEM의 특성을 상호 보완하기 위해 다해상도 wavelet 변환(Multiresolution Wavelet Transform) 기법이 적용되었다. 다해상도 wavelet 변환 기법에 의한 DEM 융합은 오차의 영향을 받는 부분에 대해 다른 DEM 자료를 대체함으로써 수행되며 본 연구에서는 SPOT 위성영상과 ERS-1 위성영상을 이용하여 DEM을 생성하고 DEM 융합 기법을 적용하였다. DEM의 오차 분석은 1:5000 수치지형도를 이용하여 기준 DEM을 생성하여 비교하였으며, DEM 융합 결과 서로 다른 특성의 DEM을 융합함으로써 보다 향상된 DEM 제작 가능성을 타진하였다.

Abstract

The most widespread techniques for DEM generation are stereoscopy for optical sensor images and interferometry for SAR images. These techniques suffer from certain sensor and processing limitations, which can be overcome by the synergetic use of both sensors and DEMs respectively. In this paper, different strategies for fusing SAR and optical data are combined to derive high quality DEM products. The multiresolution wavelet transform, which take advantage of the complementary properties of SAR and stereo optical DEMs, will be applied for the fusion process. By taking advantage of the fact that errors of the DEMs are of different nature using the multiresolution wavelet transform, affected part are filtered and replaced by those of the counterpart and is tested with two sets of SPOT and ERS DEM, resulting in a remarkable improvement in DEM. For the analysis of results, the reference DEM is generated from digital base map(1:5000).

* (재)석곡관측과학기술연구원 원장

** (재)석곡관측과학기술연구원 연구원

*** 한국전자통신연구원 컴퓨터소프트웨어연구소 연구원

1. 서론

DEM은 지형표면에 대해 규칙적인 격자나 삼각형으로 연결된 임의의 고도점을 이용하여 지구 표면을 3차원 형태로 표현하는 것으로서 영상 데이터의 정사 보정, 등고선의 생성, 부피 계산, 범람 예측, 경사도 분석, 지형 모델링 등에 활용되고 있으며, 지형공간 정보체계(GSIS:Geo-Spatial Information System)에서 중요한 자료로 사용되고 있다. 위성영상으로부터 DEM을 생성하는 대표적인 방법으로는 입체 광학 위성영상을 이용하는 방법과 SAR 위성영상을 이용한 레이더 간섭기법이 있다. 이러한 DEM 생성 기법들은 서로 다른 방법에 의해 지형의 고도 정보를 추출하며 결과적으로 생성된 DEM의 특성 또한 서로 다르다.

광학 입체 위성영상을 이용하여 DEM을 생성하는 방법은 입체 위성영상에서 중복된 영역에 대해 영상 정합을 통해 고도 정보를 추출하며 SPOT 전정색(panchromatic) 위성영상의 경우 약 8-15m의 절대적인 정확도를 얻을 수 있다. 하지만, 광학 위성영상은 영상 자료 취득 시 기후 및 일조 조건에 많은 제약을 받기 때문에 촬영 시기가 다른 입체영상을 이용할 경우 영상 정합 과정에서 오차가 발생할 수 있다.

레이더 간섭 기법은 동일 지역에 대해 경사방향으로 다른 위치에서 취득한 두 장 이상의 SAR 영상에서 발생하는 위상의 차이를 이용하여 고도 정보를 추출한다. 레이더 간섭 기법에는 두 영상에 대해 각 픽셀의 구속화된 위상에 위상 사이클의 정확한 정수를 더해 주는 위상 불구속화 과정이 필요하며 경로 추적(path-following) 방식과 최소제곱(least-square) 기법이 주로 사용된다. 또한 SAR 위성영상은 기후 및 일조 조건에 구속되지 않고 촬영이 가능하다는 것이 특징이다.

DEM 융합에 관한 국내외 연구로는 1999년 Honikel이 high-pass 필터링 기법과 low-pass 필터링 기법을 이용하여 SPOT 위성영상에 의한 DEM과 ERS 위성영상에 의한 DEM에 적용한 바 있으며, 국내에서는 이에 관한 연구는 미진한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 광학 입체 위성영상을 이용한 DEM과 SAR 위성영상을 이용한 DEM에 대해 그 특성을 분석하고 서로 융합함으로써 하나의 DEM을 다른 DEM에 의해 보완하여 지구 표면을 상세하게 표현할 수 있는 향상된 DEM를 생성하고자 한다.

2. 광학 위성영상 DEM과 SAR 위성영상 DEM의 특징

광학 입체 위성영상에 의해 생성된 DEM은 두 입체 위성영상의 중복 영역에 대해 일정 간격으로 영상 정합을 수행하여 고도 정보를 추출한 후 보간을 하기 때문에 지형을 상세하게 표현하지 못하며 영상의 전체 영역에 대해 영상 정합을 수행하여 고도 정보를 추출할 경우 공백점의 부정확한 정합에 의해 부분적으로 오차가 크게 발생할 수도 있다. 또한 두 위성영상의 촬영 시기가 다를 경우, 중복 영역에 대해 구름, 그림자 등에 의한 분광정보의 차이가 발생할 수 있으며 이로 인해 영상 정합 과정에서 오차가 크게 나타날 수 있다(Honikel, 1999).

반면 SAR 위성영상에 의해 생성된 DEM은 광학 위성영상에 의해 생성된 DEM에 비해 지형표면을 상세하게 표현한다. 정확도 측면에서 기준 DEM과 비교했을 때 상대적인 정확도는 정확하나 절대적인 정확도가 크게 나타나는 것이 특징이다. 그리고 촬영고도와 입사각에 따른 기하학적 왜곡에 의한 오차와 foreshortening, layover, shadowing 등에 오차가 발생한다.

3. DEM 융합

3.1 다해상도 Wavelet 분해

다해상도 wavelet 변환은 2차원 이산 자료를 다해상도로 분석하는 개념으로서 피라미드 알고리즘을 이용하여 트리 형태로 분할하게 된다. 또한 공간상의 방향을 구별하며, 이산 자료의 다해상도 표현은 자료를 효과적으로 분석하기 위한 계층적 구조를 제공한다 (Mallat, 1989)

2차원 이산 자료에 대한 다해상도 wavelet 변환은 원래의 자료를 scale 함수와 wavelet 함수를 이용하여 분해하며, 그 결과 원 자료의 대부분을 포함하고 있는 저주파 영역과 수직성분, 수평성분, 대각 성분의 고주파 영역으로 나뉘어진다. 함수 $f(x, y)$ 는 x 방향으로 필터링을 거쳐 저주파성분인 $f_L(x, y)$ 와 고주파 성분인 $f_H(x, y)$ 로 나누어지고 $f_L(x, y)$ 가 $f_H(x, y)$ 를 다시 y 방향으로 필터링 함으로써 $f_{LL}, f_{LH}, f_{HL}, f_{HH}$ 의 4개의 분해된 자료를 얻는다.

<그림 1>은 2차원 이산 자료에 다해상도 wavelet 분해를 적용함으로써 형성되는 피라미드 형태를 나타내고 있다. 피라미드의 최하위구조는 원 자료를 의미하며, 피라미드의 각 단계는 원 자료로부터 wavelet 변환을 통해 생성된 근사계수들이다. 피라미드의 상위단계로 갈수록 공간해상도가 점차 낮아지며, 근사계수들은 scale 함수에 의해 생성되고, 이러한 wavelet 변환은 연속되는 wavelet 분해단계에서 근사계수들 간의 차이 정보를 표현할 수 있다. 그리고 다해상도로 분해된 이산 자료를 wavelet 역 변환을 통해 원 자료로 정확하게 복원이 가능하다.

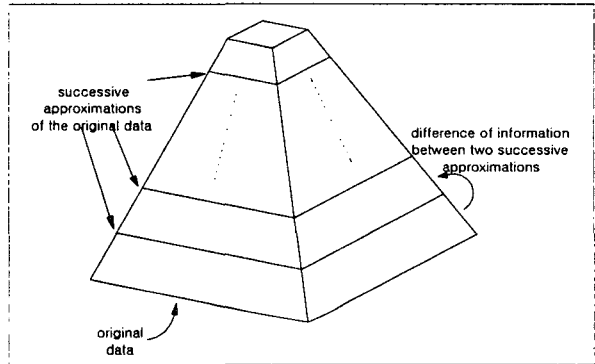


그림 1 다해상도 wavelet 분해의 구조

3.2 DEM 융합

DEM 융합은 고해상 전정색 위성 영상과 저해상 다중 분광 위성영상을 융합하는 영상 융합과 비슷한 개념으로 수행된다. SAR 위성영상에 의해 생성된 DEM과 광학 위성영상으로부터 생성된 DEM을 래스터 형태의 DEM으로 변환한 후 각 DEM에 다해상도 wavelet 변환 기법을 적용한다. 그리고 SAR DEM의 세부계수와 광학 DEM의 근사계수를 이용하여 역

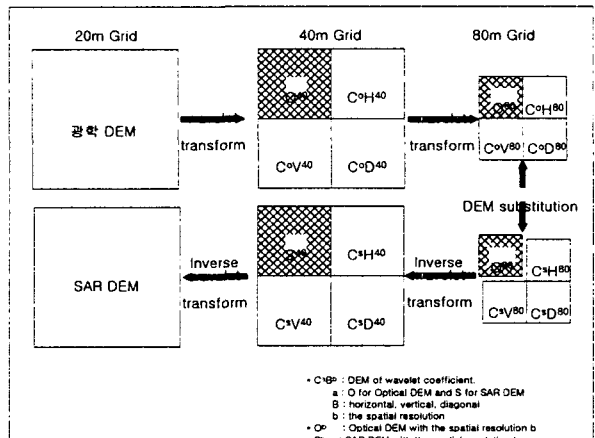


그림 2 Wavelet 변환 기법의 DEM 융합

wavelet 변환을 적용함으로써 융합 DEM이 생성된다. SAR DEM은 지형표면을 상세하게 표현하므로 인접 격자간의 고도차를 유지하면서 절대 정확도가 정확한 광학 DEM의 근사계수를 SAR DEM의 근사계수와 교체한 후 역 변환을 통해 DEM을 융합하게 된다. <그림 2>는 20m 격자 간격의 광학 DEM과 SAR DEM을 융합하는 과정을 도시한 것이다.

식(1)은 DEM의 각 격자에 wavelet 필터를 적용하여 분해할 때 그 계산방식을 나타내고 있으며, 이러한 연산 방식은 일정하지 않으며 분해와 복원의 관계를 고려하여 변경될 수 있다. <표 1>과 <표 2>는 본 연구에서 사용한 wavelet 변환 필터 계수를 나타낸 것이다(Daubechies 1992).

$$\text{new value of height} = H[3]f(x-2, y) + H[2]f(x-1, y) + H[1]f(x, y) + H[0]f(x+1, y) \quad (1)$$

표 1 Wavelet 분해 필터 계수

n	H 필터	G 필터
0	-0.129409522551	-0.482962913145
1	0.224143868042	0.836516303738
2	0.836516303738	-0.224143868042
3	0.482962913145	-0.129409522551

표 2 Wavelet 복원 필터 계수

n	H [~] 필터	G [~] 필터
0	0.482962913145	-0.129409522551
1	0.836516303738	-0.224143868042
2	0.224143868042	0.836516303738
3	-0.129409522551	-0.482962913145

4. DEM 생성 및 결과분석

4.1 연구 대상 및 DEM 생성

본 연구에서는 ERDAS IMAGINE 8.5 상용 S/W를 이용하여 40m 격자 간격의 광학 DEM과 SAR DEM을 생성하였다. 광학 DEM 생성을 위해 사용한 영상 자료는 SPOT 전정색(panchromatic) 위성영상으로 1997년 11월 15일 촬영된 것과 1999년 11월 2일 촬영된 입체 영상이며, SAR DEM은 ERS-1 SLC 영상으로 1996년 1월 22일과 23일 촬영된 입체 영상을 이용하여 생성하였다. 그리고 DEM 융합 알고리즘은 Visual C++ 6.0 프로그램을 이용하여 구현하였다. 오차분석을 위한 기준 DEM은 1/5000 수치지형도로부터 추출하여 40m 격자 간격으로 생성하였다. <그림 3>은 연구지역 I에 대한 기준 DEM을 3차원 형태로 표현한 것이며, <그림 4>와 <그림 5>는 연구지역 I에 대해 각각 SPOT DEM과 ERS SAR DEM을 3차원으로 표현한 것이다. <그림 4>에서 보듯이 광학 위성 영상에 의해 DEM을 생성하는 알고리즘의 특성상 영상 전체에 대해 영상 정합을 수행하여 고도값을 추출하는 것이 아니라 일정 간격을 두고 영상 정합을 수행하여 최종적으로 보간하기 때문에 지형을 개략적으로 표현하고 있다. <그림 5>의 ERS SAR DEM은 절대적 오차는 크게 나타나지만 지형을 표현하는데 있어 SPOT DEM보다 상세하게 표현하고 있다. 하지만, SAR 위성영상의 기하학적 왜곡에 의해 부분적으로 인접 격자들에 비해 돌출되어 나타나는 것을 알 수 있었다.

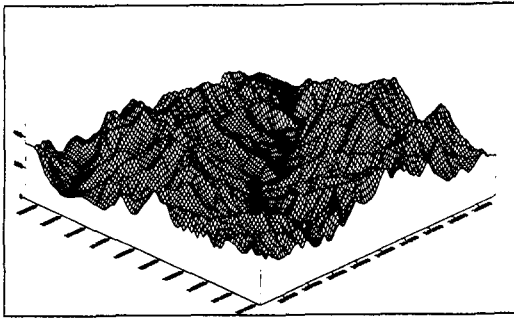


그림 3 기준 DEM

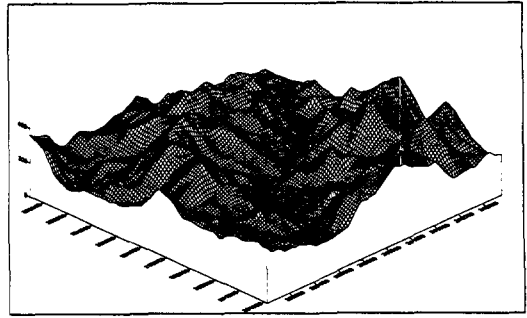


그림 4 SPOT DEM

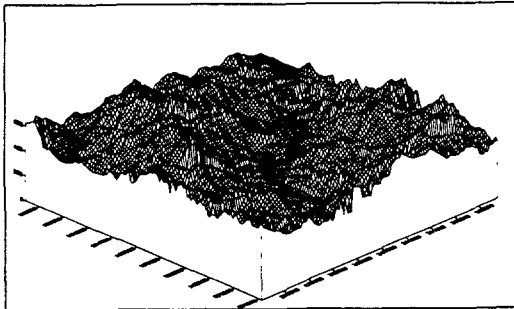


그림 5 ERS SAR DEM

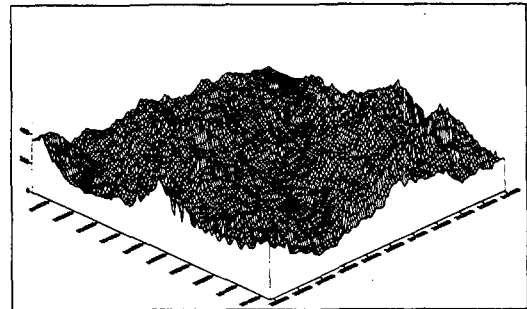


그림 6 융합 DEM

<그림 6>은 SPOT DEM과 ERS SAR DEM을 서로 융합한 결과를 나타낸 것으로 SPOT DEM의 절대적인 정확도를 유지하면서 ERS SAR DEM의 특성을 보완함으로써 ERS SAR DEM의 절대 정확도가 향상되고 SPOT DEM에 비해 지형을 상세하게 표현하고 있다. 하지만, ERS SAR DEM의 인접 고도값들에 비해 돌출되어 나타나는 현상이 그대로 유지되고 있는 것을 볼 수 있으며, 이는 ERS SAR DEM을 생성할 때 부정확한 영상 기준점 선정, 영상 취득 간격의 차이로 인해 발생하는 영상 간의 시기적인 비상관성 문제 등에 의한 영향으로 생각된다.

4.2 결과분석

본 연구에서는 기준 DEM에 대한 SPOT DEM과 ERS SAR DEM, 그리고 융합 DEM의 결과분석을 위해 통계적 수치를 이용하여 비교하는 방법과 DEM의 격자에 대한 고도값의 공간적 분포 특성을 표현하는 semivariogram을 이용하여 비교분석하였다.

1) 통계적 비교분석

통계적 수치를 이용하여 비교하는 방법으로 본 연구에서는 각 DEM의 평균, 표준편차 그리고 기준 DEM에 대한 평균제곱근오차(Root Mean Square Error) 등을 이용하여 결과를 비교분석하였다. <표 3>은 각각의 DEM에 대한 통계적 수치를 비교하여 나타낸 것이다.

표 3 각 DEM에 대한 통계적 비교분석

	DEM	평균(m)	표준편차(m)	RMSE(m)
연구 지역 I	기준 DEM	274.893	86.146	-
	SPOT DEM	255.112	78.221	34.650
	SAR DEM	474.713	90.294	212.977
	융합 DEM	255.049	80.445	39.933
	융합 DEM의 저역통과 공간필터	255.057	78.055	36.218
연구 지역 II	기준 DEM	188.158	72.740	-
	SPOT DEM	191.332	71.996	16.223
	SAR DEM	504.144	72.572	316.887
	단순융합	191.238	72.673	18.027
	융합 DEM의 저역통과 공간필터	191.239	71.843	16.396

SPOT DEM의 경우 기준 DEM과 비교했을 때, 평균과 표준편차가 비슷한 결과를 나타내었으며, ERS SAR DEM은 기준 DEM에 비해 평균값의 차이가 크게 나타났지만, 표준편차는 유사하게 나타났다. 그리고 SPOT DEM과 ERS SAR DEM을 융합한 결과, 각 격자에 대한 고도값의 평균과 표준편차는 SPOT DEM과 거의 유사하게 나타났으며 연구지역 I에 대해서는 SPOT DEM에 비해 기준 DEM의 표준편차에 근접함을 알 수 있었다.

기준 DEM에 대한 SPOT DEM의 평균제곱근오차는 연구지역 I에서 약 33m로 나타났으나 연구지역 II에서는 약 16m로 오차가 작게 나타났으며, ERS SAR DEM은 연구지역 I에서 평균제곱근오차는 약 217m로 나타났으나 연구지역 II에 대한 평균제곱근오차는 약 317m로 평균제곱근오차가 증가하였다. 각 DEM의 평균제곱근오차를 비교했을 때, 기준 DEM에 대한 SPOT DEM의 평균제곱근오차가 가장 적게 나타났으며 융합 DEM의 평균제곱근오차는 SPOT DEM에 비해 연구지역 I에서는 약 6m, 연구지역 II에 대해서는 약 2m 정도로 증가하였다.

<그림 6>의 융합 DEM을 보면, ERS SAR DEM의 특성을 유지하면서 SPOT DEM의 평균과 표준편차에 근접함을 알 수 있다. 하지만 <그림 5>의 ERS SAR DEM에 알 수 있듯이 부분적으로 고도값이 돌출되는 잡음(noise)이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 융합 DEM에서도 그대로 나타나고 있다. 본 연구에서는 이러한 잡음들을 제거하기 위해 평활화 공간 필터 처리 기법 중 하나인 저역통과 공간 필터(low-pass filter)를 적용하였다.

<그림 7>은 융합 DEM에 저역통과 공간 필터 처리 기법을 적용한 결과를 나타낸 것이다. <그림 7>에서 알 수 있듯이 <그림 6>의 융합 DEM에 비해 잡음이 감소된 것을 알 수 있으며, 통계적 비교에서도 평균제곱근오차가 감소한 것을 알 수 있었다. 또한 DEM의 3차원적인

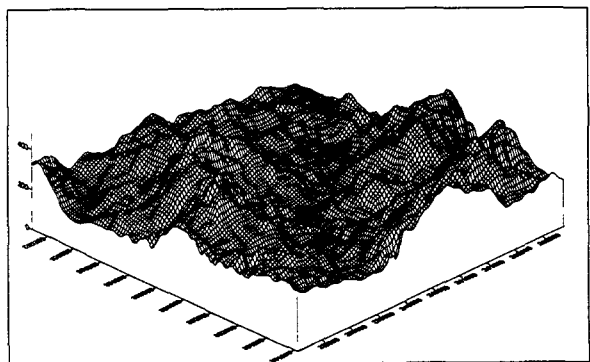


그림 7 융합 DEM의 저역통과 공간 필터 처리

표현에서 시각적으로 볼 때 기준 DEM과 유사하게 나타나는 것을 알 수 있었다.

2) 공간정보 분포 특성 비교분석

DEM의 수평 및 수직 격자에 대한 고도값의 공간적 분포 특성을 비교하기 위해 본 연구에서는 semivariogram을 이용하였다. 일반적으로 semivariogram은 일정간격에 따라 분리되어 있는 모든 쌍의 자료값에 대한 반분산(semivariance)을 이격거리(lag-distance)에 따라 표시한 그래프로서 이산 자료의 공간적 구조와 인접 자료값간의 변이를 파악할 수 있다(Brown 외 1인, 1994).

<그림 8>은 연구지역 I의 각각의 DEM에서 수평방향에 대한 반분산을 표현한 것으로 융합 DEM의 곡선형태가 기준 DEM과 유사한 것을 볼 수 있었으며, 융합 DEM에 저역 통과 필터 처리를 한 결과는 SPOT DEM의 곡선과 거의 일치하는 것을 볼 수 있었다. <그림 9>는 수직방향에 대한 semivariance를 나타낸 것으로 기준 DEM과 ERS SAR DEM이 거의 유사한 특성을 가지고 있으며, <그림 8>과 마찬가지로 융합 DEM의 곡선 형태가 기준 DEM에 유사한 형태로 변한 것을 알 수 있다. <그림 10>과 <그림 11>은 연구지역 II의 각 DEM에 대한 semivariance를 나타낸 것으로 연구지역 I에 비해 모든 DEM의 곡선 형태가 비슷함을 알 수 있다.

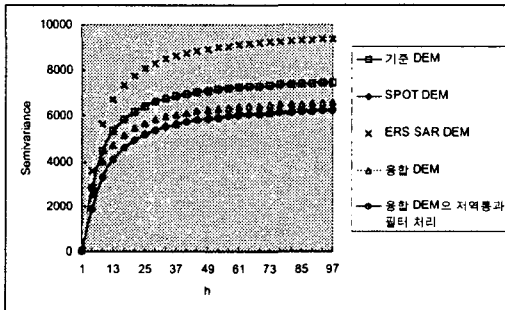


그림 8 수평방향 semivariance(연구지역 I)

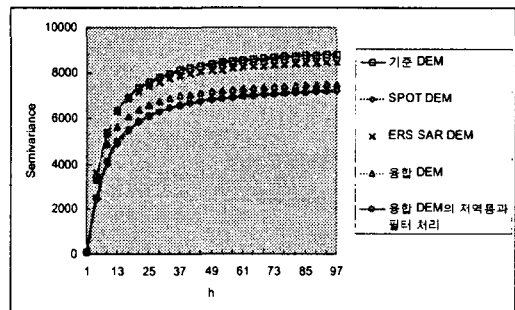


그림 9 수직방향 semivariance(연구지역 I)

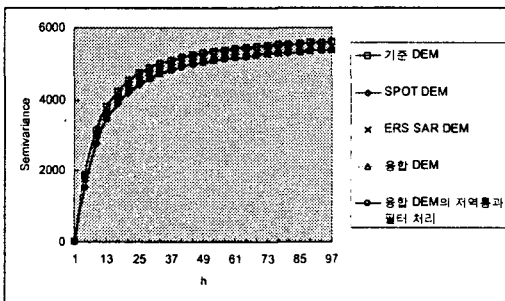


그림 10 수평방향 semivariance(연구지역 II)

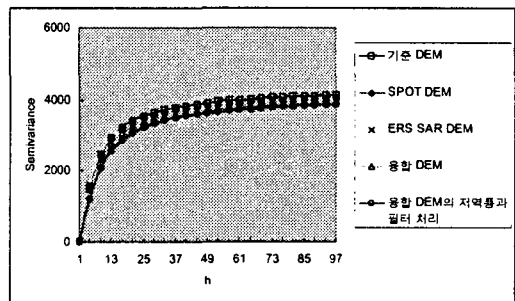


그림 11 수직방향 semivariance(연구지역 II)

5. 결론

본 연구에서 wavelet 변환 기법을 기반으로 하는 다해상도 wavelet 분해 기법을 적용

하여 SPOT 광학 위성영상으로부터 생성된 DEM과 ERS SAR 위성영상으로부터 생성된 DEM을 융합한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SPOT 광학 위성영상 DEM은 절대적 정확도면에서 우수하다고 할 수 있으나, 지형의 고도값을 추출하는 알고리즘의 특성에 의해 지형표면을 개략적으로 표현하였으며, 이에 반해 ERS SAR 위성영상으로부터 생성된 DEM은 절대적인 정확도는 떨어지지만 상대적으로 지구표면을 상세하게 표현하였다.

2. SPOT DEM과 ERS SAR DEM에 대해 다해상도 wavelet 융합 기법을 적용하여 각 DEM의 장점을 취합한 결과 SPOT DEM의 절대적인 정확도는 그대로 유지하면서 ERS SAR DEM의 공간분포 특성을 표현함으로써 기존 DEM 특성에 근접함을 알 수 있었다.

3. DEM 융합 결과 ERS SAR DEM의 잡음에 의해 기존 DEM에 대한 평균제곱오차가 융합 전보다 다소 크게 나타났지만 지역통과 필터 처리를 함으로써 평균제곱오차와 융합 DEM의 잡음이 감소하는 것을 볼 수 있었다.

4. 향후 공간해상도가 향상된 SAR 위성영상을 이용한 레이더 간섭기법에 의해 보다 정확한 DEM 생성이 가능할 경우, 광학 위성영상에 의한 DEM과 융합하여 보완함으로써 실제 지형에 가까운 DEM 생성이 가능할 것이며, 정확도 또한 향상될 것으로 사료된다.

6. 참고문헌

1. 정도찬, 김병국, 2001. 레이더 간섭기법으로 제작한 수치표고모형의 정확도 분석. **대한토목학회논문집**, 제21권, 제2-D호, pp. 237-246.
2. 서병준, 김용일, 어양담, 정재준, 1998. SAR 영상을 이용한 수치표고모형 추출 기법의 비교 연구, **한국지형공간정보학회**, 제6권, 제2호, pp. 21-34, . 12.
3. Honikel, M., 1999. Strategies and methods for the fusion of digital elevation models from optical and SAR data. **IAPRS**, Vol. 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, pp. 83-89
4. Daubechies, I., 1992. **Ten Lecture on Wavelets**. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pennsylvania. pp. 195-196.
5. Brown, D. and Bara, T. (1994), Recognition and Reduction of Systematic Error in Elevation and Derivative Surfaces from 7.5-Minute DEMs, **PE & RS**, Vol. 60, No. 2, p. 189-194.
6. Mallat. S.G., 1989. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. **IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell**, Vol. 11. No. 7. pp. 674-693.
7. Ranchin, T., L. Wald, 2000. Fusion of High Spatial and Spectral Resolution Images: The ARSIS Concept and Its Implementation. **PE & RS**, Vol. 66. No. 1. pp. 49-61.
8. Al-Rousan, N., P. Cheng., G. Petrie., Th. Toutin, and M.J. Valadan Zoeji., 1997. Automated DEM Extraction and Orthoimage Generation from SPOT Level 1B Imagery. **PE & RS**, Vol. 63, No. 8, pp. 965-974.