

원격탐사를 이용한 하천 제방 변위량 측정과 취약지점 선별

방영준*, 김범준*, 정효준*, 이승오*

*홍익대학교 토목공학과

e-mail:seungoh.lee@hongik.ac.kr

Measurement of levee displacement using remote sensing and observation of vulnerable points

Young Jun, Bang*, Bum Jun, Kim*, Hyo Jun, Jung*, Seung Oh, Lee*

*Dept. of Civil Engineering, Hongik University

요약

하천 제방은 홍수 시 유수의 원활한 소통을 유지 시키고 제내지를 보호하기 위하여 하천을 따라 토질재료 등으로 축조한 중요한 국가적 구조물이다.[1] 최근에는 기후변화로 우리나라의 홍수사상이 변화함에 따라 하천 제방의 붕괴 및 범람 등 수재해 위험성이 증가하는 추세를 나타내고 있다. 본 연구는 위성영상을 이용한 하천 제방의 변위량을 산출하고 변위-상관 요인의 관계를 분석하여 하천 제방 건강상태 모니터링과 유지관리용 위험도 시스템을 제안하고 있다. 제방 붕괴를 발생시키는 수축과 팽창, 파이핑, 침하, 침식, 활동, 전도 등의 다양한 매커니즘에 의해 발생하는 변위를 LOS 방향 변위로 취급하고 지표의 변위량을 구하는데 사용되는 Interferometric SAR(InSAR) 중 가장 기본적인 Differential Interferometric(DInSAR)기법을 통해 대기, 지구 곡률, 노이즈 등에 의해 발생하는 오차를 제거하여 mm단위의 정밀한 지표 변위량을 산출하였다. 2020년 여름 발생한 남원 금곡교(섬진강) 인근의 제방 붕괴 지역을 대상으로 2020년 6월8일부터 2020년 08.07 제방 붕괴 전까지의 발생한 변위를 관찰하여 제방 붕괴 지역이 취약 지점 상태였던 것으로 관찰하였다. 산출한 변위와 유역의 지하수위, 기온, 수위, 토양도, 토양 수분함유도와 같은 수문학적 요인과의 상관관계를 분석하여 제시한 위험도와 모니터링 시스템이 실현 된다면 기존의 하천 제방 유지·보수 점검 시스템의 많은 한계점을 극복하고 초정밀, 자동화된 하천제방 유지관리 기술 고도화와 국가 재난관리 향상이 가능할 것으로 기대한다.

1. 서론

하천은 제방을 통해 제내지와 제외지를 구분할 수 있으며 치수(治水)의 관점에서 제내지로의 하천의 범람을 방어해주는 구조물이다. 이러한 제방이 붕괴되면 하천수가 제내지로 침투하여 침수로 인해 수 백억원의 경제적 피해와 인명 피해를 유발한다. 이러한 피해를 막기위해 국가 및 지자체에서는 하천의 등급을 구분하여 관리하고 지속적으로 하천 제방의 유지·보수 점검을 하고 있으며 추가적으로 하천개수계획을 수립하여 제방의 신설 또는 증축이 진행 중 이다[1]. 하지만 기후변화로 인해 우리나라 수문 및 기상현상이 변화하고 제방관리 인력의 부족으로 하천 제방의 붕괴 및 범람 등 수재해 위험은 지속적으로 증가 하고있다. 기존의 제방 점검은 하천 제방의 전체적인 점검과 다양한 양상의 변형을 파악하는데 한계가 존재하고 제방의 안정성을 평가할 때 그 주체가 지반 내에서의 변화를 측정하지 못하는 주관을 가진 사람(전문가)

에 의해 시행됨으로 객관적인 판단을 할 수 없다. 무엇보다 기존의 점검 방식은 많은 예산과 인력이 소모되어 비효율적으로 관리가 진행되고 있다. 이러한 비효율적 제방 관리의 결과를 보여주는 예로 이번 여름 홍수로 인해 붕괴 된 섬진강댐 하류인 남원시 금지면의 금곡교 인근 제방의 경우 제방의 점검과 보수의 실패로 야기된 필연적인 결과였다고 많은 전문가들은 주장한다. 실제로 섬진강권 하천 제방 정비율이 전국에서 가장 낮은 37%에 불과한 것으로 나타났다. 또한 2018년 말 기준 하천기본계획을 수립한지 10년을 넘겼거나 아예 없는 하천은 전체 47%(1800)개에 달했으며 이중 336개(9%) 하천은 하천기본계획을 수립하지 않은 것으로 밝혀졌다. 이러한 현실을 보았을 때 기존의 재래적인 점검의 많은 한계를 극복하기 위한 정밀한 모니터링과 예/경보 시스템 구축이 반드시 필요하며 본 연구는 원격탐사를 이용한 하천 제방 건강상태 모니터링 시스템 실현의 가능성을 보여준다.

본 연구에서 활용한 인공위성은 Radar 위성인 Sentinel-1 위성으로 유럽우주국(European Space Agency) Sentinel series의 첫 번째 위성으로 Sentinel-1 위성은 Sentinel-1A 위성과

Sentinel-1B 위성 두 대의 위성이 12일 주기로 동일 궤도를 180°의 위상차로 비행한다. 두 위성을 함께 활용하는 경구 반복주기는 6일이다. Sentinel-1 위성은 전천후에도 영상을 얻을 수 있는 C-band SAR(5.405GHz)를 탑재하여 날씨에 상관없이 홍수기 때에도 효과적으로 영상을 얻을 수 있으며 무상으로 위성 자료를 얻을 수 있어 활용도가 매우 높다.

레이더 간섭기법(Interferometric synthetic aperture radar: InSAR)은 서로 다른 시기의 동일한 지역을 촬영한 두 개의 SAR영상으로부터 작성된 간섭도에 포함되어 있는 위상 정보를 이용하여 LOS(Line of Sight) 방향의 지표변위를 관측하는 기술이다. LOS 방향은 위성 레이더와 관측 지표점 사이의 방향을 말한다.[5] 식(1)에서 Φ 는 위상의 구성을 나타내고 있으며, 지형과 지구곡률으로 발생하는 간섭을 제거하면 변위가 산출된다.

$$\Phi = \Phi_{\text{지형}} + \Phi_{\text{지구곡률}} + \Phi_{\text{변위}} + \Phi_{\text{대기}} + \Phi_{\text{잡음}} \quad (1)$$

$$\Phi_{\text{변위}} = \Phi - \Phi_{\text{지형}} - \Phi_{\text{지구곡률}}$$

본 연구는 유럽우주국(ESA)의 SNAP 소프트웨어와 위상 불구속화(unwrap)단계를 위한 외부 소프트웨어 SNAPHU(Statistical-cost Network-flow Algorithm for PHase Unwrapping)를 이용하여 영상의 불필요한 노이즈를 제거하며 위치 보정 및 필터링, 간섭, 위상 변위화(phase to displacement) 과정과 같은 영상 분석 기법을 이용하였다. InSAR기법 중 고정 산란체 간섭기법(Persistent Scatterer InSAR : PSI)을 이용하면 더욱 높은 신뢰도의 시계열 변위를 얻을 수 있으나 본 연구에서는 제방 붕괴 직전의 제방 전조 증상 포착에 초점을 두고 Digital Elevation Model(DEM)을 이용하여 interferogram에서 대기 지연과 지형의 위상을 제거함으로써 지형과 변위에 대한 두 가지의 위상효과를 분리하는 차분간섭기법 DInSAR 기법을 이용하여 변위를 산출하였다. [2,4]

2. 연구 범위 및 방법

2.1 연구 범위

이번 여름 태풍과 많은 비로 낙동강과 섬진강 유역의 제방이 붕괴되면서 전남에서만 사망 11명 이재민 5,090 명 주택 2,401 동 농경지 7,957 ha 등 약 2,800 억 원의 피해가 발생하였다. 본 연구는 섬진강 유역의 요천 하류 지역인 금지면 귀곡리 금곡교 제방 붕괴의 변위 전조 증상을 관찰하기 위하여 겨울에 해당하는

2019년 12월~ 2020년 2월, 여름에 해당하는 2020년 6월~8월의 계절별 6개의 각 지역을 포함하는 영상 자료를 사용하였다. 자료는 Sentinel-1 영상의 VV-편파 자료와 ascending, descending 중 같은 궤도의 영상을 사용하였다. 이 자료는 파장이 약 5.6cm 의 전자기파를 사용하는 자료이며, 인공위성과 지표면 사이의 거리 정보 획득을 위해 Single Look Complex(SLC)레벨의 자료를 활용하였다.

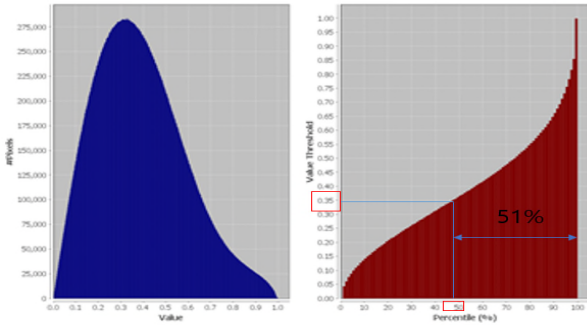
2.2 연구 방법

연구에서 SNAP을 이용한 자료처리 과정은 [그림 2] 과 같다. Sentinel-1 위성이 위성 영상을 수집하는 모드는 SM,IW,EW,WV 네가지 모드가 있고 본 연구에서 사용한 Interferometric Wide swath(IW)모드는 육지 관측 시 가장 기본적으로 사용되는 획득 모드로 250km의 넓은 관측 폭(swath width)에서 5m x 20m 의 공간해상도로 영상을 획득한다. Sentinel-1 위성 영상은 초기에 수집된 원본 자료 그대로 제공되지 않고 Level-0, Level-1, Level-2의 세 가지 단계로 나뉘어 처리된 후 제공된다. 본 연구에서 사용한 단일복소영상(SLC: Single Look Complex)은 Level-1단계로 전체 전송 신호 대역폭을 사용하는 각 차원에 대한 단일 시야(single look)을 포함하며 진폭 및 위상 정보를 모두 포함한다. SLC는 세 개의 sub swath와 한 개의 swath에 10개의 띠(burst)로 구분되어 있다[3].

수치 표고 모델 및 지표 변위를 추출하기 위한 일련의 자료 처리 과정으로 두 개의 SAR영상 간의 정합, 부 영상의 재배열, 간섭도 필터링, 위상 불구속화(phase unwrapping), 위상 변위화 등 주요 처리단계가 있다. ESA의 open hub에서 조사 기간의 관측 대상지를 포함한 영상(SLC, IW)을 획득하고 두 영상 씩 영상자료를 해석한다. 먼저 조사 대상지로 두 개의 영상을 분리(Split)하고 궤도 정보를 입력한 후, 영상복원 과정과 각 영상의 비행궤적 차를 고려해 부 영상(slave image)을 기준 영상(master image)에 정합 단계를 거친다. 다음으로 긴밀도 계산과 간섭도를 생성하는 단계를 통해 지구 곡률과 지형적 위상 정보를 상쇄시킨다. Interferogram을 실행하면 영상의 신뢰도에 중요한 긴밀도(Coherence)가 표출되는데 이 때 긴밀도가[그림 1] 같이 0.35인 값은 타당한 값이며 전체 영상 중 긴밀도 0.35 이상인 픽셀이 분포가 40% 이상인 경우의 데이터를 사용하였다.[6]

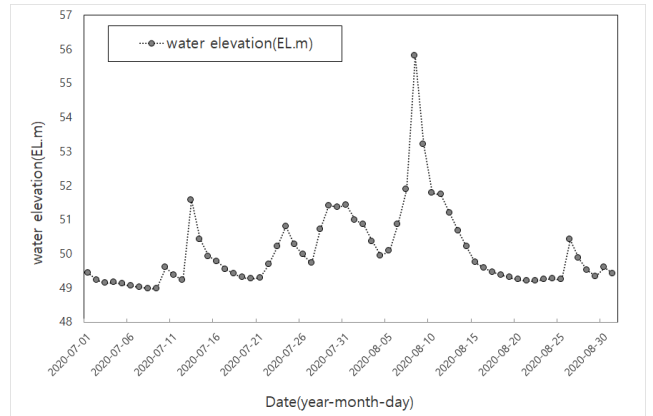
3. 연구 결과

하천 제방 붕괴를 발생시키는 수축과 팽창, 파이핑, 침하, 침식, 활동, 전도와 같은 다양한 매커니즘에 의해 발생하는 변위들을 LOS 방향 변위로 취급하였고 이러한 변위가 상승하거나 침하 할 때 양의 값과 음의 값 모두를 고려하여 절댓값의 합산으로 제방 총 누적변위량의 크기를 나타냈다.



[그림 1] coherence statics

위상 불구속화 단계에서 파장을 변위로 변환하기 위해 $0\sim 2\pi$ 의 주기로 해석되는 파장의 최댓값의 범위를 연장했다. 불구속화 데이터를 변위로 Line Of Sight(LOS)방향으로 변환 시켜 지형 보정을 통해 이미지 좌표체계를 WGS84 좌표계로 변환시키고 보정하여 지형변화와 위성 센서의 기울기에 대한 왜곡을 보정하였다. SNAP에서 최종 처리한 데이터를 Geotiff 파일로 추출하여 GIS software(Arc GIS)를 활용해 하천 제방선 위에 10m 폭 으로 침하(-)와 상승(+) 변위량 자료를 추출하여 절댓값을 합산하여 결과를 도출하였다.



[그림 3] 금곡교 일수위

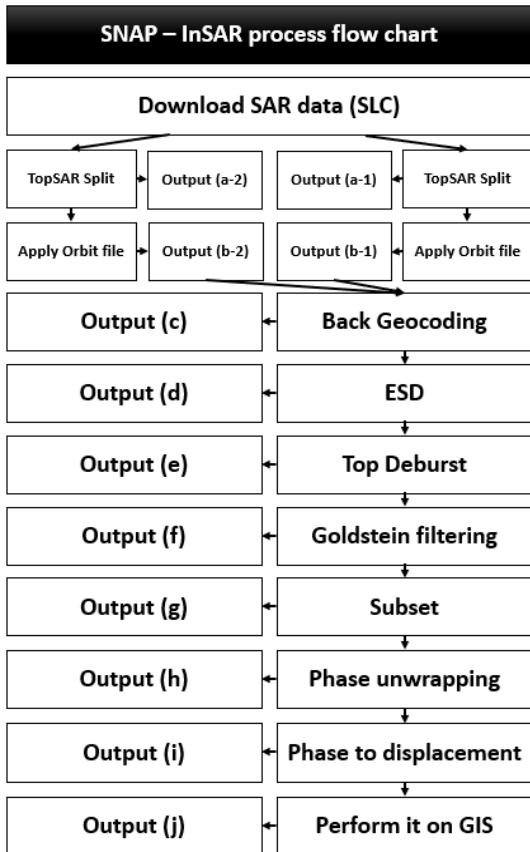
[그림 3]는 금곡교에서 관측된 일수위를 나타내고 있는데 최대수위가 발생하였으며 제방이 붕괴된 시점에서 최대수위가 발생한(2020.8.08)까지 금곡교 인근 제방의 여름(6월~8월)에 해당하는 영상 6개<표 1>를 해석하여 [그림 4]과 같이 제방위치별 변위량을 영상별로 산출하였다. 식(2)와 같이 각 영상에서 산출된 변위량의 합산한 결과 제방 붕괴의 주 원인이 되는 특히 [그림 5]처럼 제방 붕괴가 발생한 제 1금곡교 좌측 100 m 지점에서 다른 제방 보다 약 5 cm의 절대 변위가 더 발생한 전조 증상을 관찰하였다.

$$d_t = \sum |a| + |b| + |c| + |d| + |e| \quad (2)$$

여기서, a부터 e는 두 영상 사이 산출된 변위량

[표 1] 해석 위성영상의 변위 측정 기간

변 위	a	b	c	d	e
기 간	06.08~ 06.20	06.20~ 07.02	07.02~ 07.14	07.14~ 07.26	07.26~ 08.07



[그림 2] SNAP 처리 과정

감사의글

본 결과물은 교육부의 재원으로 홍익대학교의 대학혁신지원사업(UROP)의 지원을 받아 연구되었으며, 자문을 주신 산업체 전문가 제갈선동 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 국토교통부, “하천 유지보수매뉴얼” pp53 , 2016년.
- [2] 김창오, “영상 레이더 간섭기법 및 차분간섭기법을 이용한 수치고도모델 생성과 정확도 평가, 한국측량학회지, pp147-150, 2005년.
- [3] 서민지, ”합성개구레이더 인공위성 영상을 활용한 하천 유량 추정“ ,2019년
- [4] Hanssen, Ramon F. "Subsidence monitoring using contiguous and PS-InSAR: Quality assessment based on precision and reliability." Proc. 11th FIG Sym. Def. Measur., Santorini, Grecia, 2003.
- [5] P. A. Rosen, S. Hensley, I. R. Joughin, F. K. Li, S. N. Madsen, E. Rodriguez and R. M. Goldstein, “ Synthetic Aperture Radar Interferometry,” Proceedings of the IEEE, vol. 88, no. 3, pp. 333-382, 2000.
- [6] Ullo, Silvia Liberata, et al. "Application of DInSAR technique to high coherence Sentinel-1 images for dam monitoring and result validation through in situ measurements." IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 12.3 (2019): 875-890



[그림 4] 금곡교 제방 변위량 산출결과



[그림 5] 금곡교 제방 붕괴 지역

4. 결론

인공위성을 이용하여 관찰한 붕괴 전 금곡교 인근 제방 취약지점과 2020년 8월 7일에 발생한 극한 강우로 인한 제방 붕괴를 고려해보면 본 연구결과에서 제시한 제방의 변위량을 통해 제방 붕괴의 가능성이 높았던 것으로 나타났다. 제방이 위치한 곳에 따라 변위량의 위험도가 차이가 존재하지만 차후 연구를 통해 이를 보완하여 상대적인 비교 등급을 제시할 예정이다. 본 연구의 가치는 기초적인 분석을 통해 원격탐사를 이용한 제방 건강상태 모니터링의 실현 가능성을 확인하였다. 향후 연구과제로 변위와 상관관계가 있는 유역의 기온, 수위, 토양도, 지하수위, 수분함양도 등 수문학적 요인과 결합을 통해 제방유지관리를 위한 실시간 위험도 제시하는 것이다. 실시간으로 관측되는 제방 모니터링 시스템이 구축된다면 제방관리에 투입되는 예산과 인력을 절약하여 경제적으로 효율적인 제방관리가 될 것으로 기대된다.