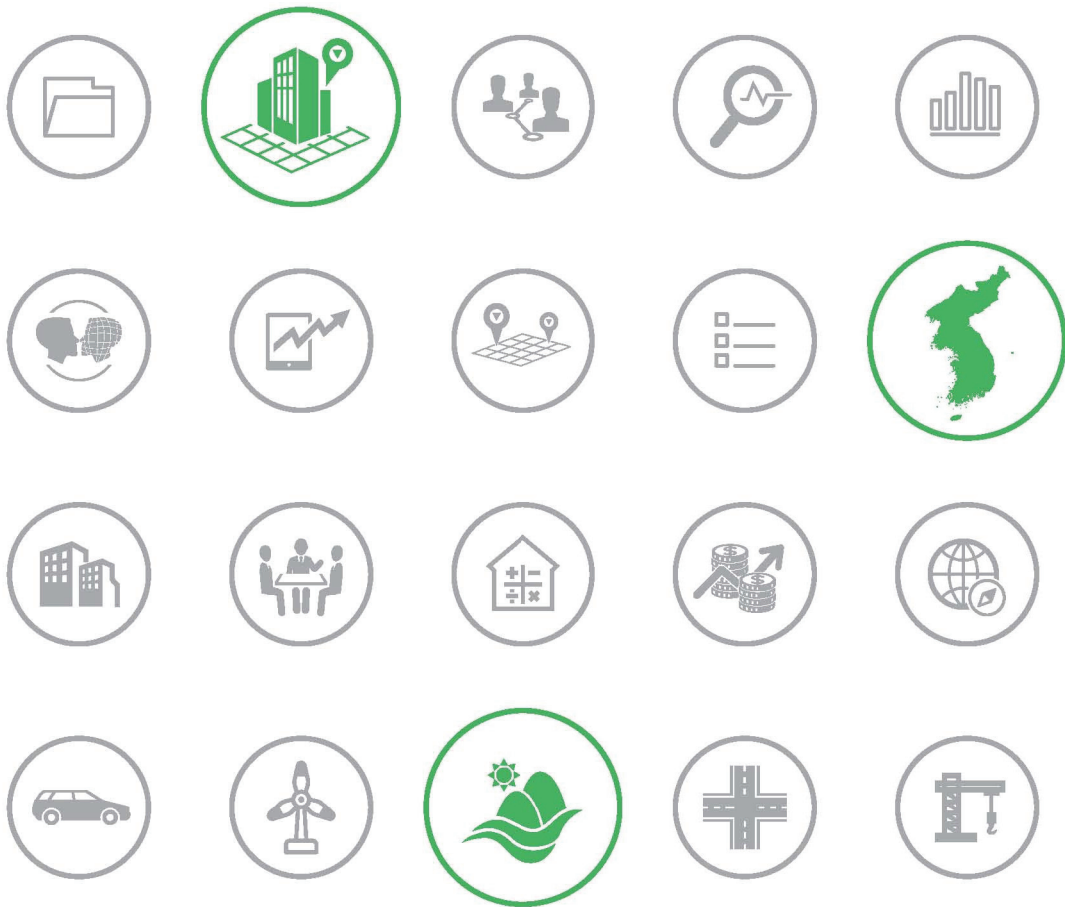




수시 | 21-08

국가 인프라의 효율적 관리를 위한 SAR 영상 활용 방향: 철도 인프라를 중심으로

Direction of using SAR imagery for efficient management of national infrastructure :
Focusing on railway infrastructure

서기환, 임륜혁, 이일화

수시 21-08

국가 인프라의 효율적 관리를 위한 SAR 영상 활용 방향: 철도 인프라를 중심으로

Direction of using SAR imagery for efficient management of
national infrastructure : Focusing on railway infrastructure

서기환, 임륜혁, 이일화

■ 저자

서기환, 임룡혁, 이일화

■ 연구진

서기환 국토연구원 연구위원(연구책임)

임룡혁 국토연구원 연구원

■ 외부연구진

이일화 한국철도기술연구원 첨단인프라연구팀장

■ 연구심의위원

김대종 국토연구원 공간정보사회연구본부장

이영주 국토연구원 국토모니터링연구센터장

윤서연 국토연구원 연구위원

허 용 국토연구원 부연구위원

주요 내용 및 정책제안

FINDINGS & SUGGESTIONS



본 연구보고서의 주요 내용

- 1 도로나 철도와 같은 국가 인프라의 관리주체에게 지반침하와 같은 시설물 운영의 안전을 위협하는 변화 모니터링은 매우 중요한 업무이며, 제도적으로 자격요건을 갖춘 기술자가 직접 현장에서 관리와 점검을 수행하도록 하고 있음
- 2 현장 측량기반의 침하 모니터링은 특정 지점(point)에 대한 측량으로 전체 선로 상태를 추정하고 있어 점검의 신뢰성 문제가 제기됨에 따라 전체 선로 구간을 (선형)공간단위로 계측할 수 있는 방법이 필요함
- 3 SAR 영상은 선로 전 구간에 대한 미소 변이(수 mm) 탐지가 가능하여 현장 조사에 소요 되는 시간과 인력, 비용 측면에서 상당 부분 절감이 가능할 것으로 판단됨
- 4 디지털 데이터 기반의 안전 점검 및 관리라는 측면에서 정부가 추진 중인 ‘SOC 디지털 화’를 촉진하고, 국민 안전과 효율성 제고를 위한 방향을 제시
- 5 아울러 디지털화와 신기술 발전에 따른 효율적 철도 인프라 점검 방식의 등장에도 불구하고, 아날로그 방식(현장점검)에 머물러 있는 관련 제도의 개선 방향을 제시

본 연구보고서의 정책제안

- 1 철도 인프라의 안전하고, 효율적인 운영·관리와 SOC 디지털화의 기반으로 SAR 영상을 활용한 철도 인프라 변이 모니터링체계를 구축, 철도재난과 재해 등에 즉시 대응 필요
- 2 인공지능 기반 지반침하 및 변위 발생을 자동으로 탐지 가능한 인프라 관리의 자동화 기술 등 연구 개발과 투자 필요
- 3 시설물 점검 및 관리에 센서로 취득한 데이터(SAR/광학 위성영상 등)를 활용할 수 있도록 철도 인프라 관리와 안전에 관한 주요 제도 중 관련성 높은 일부 법령과 하위 규정, 지침 등 개선 필요

차례

CONTENTS

주요 내용 및 정책제안	iii
--------------------	-----

제1장 연구개요

1. 배경 및 목적	3
2. 연구 범위 및 방법	5
3. 연구추진체계	7
4. 선행연구와의 차별성	8

제2장 SAR 영상 개요와 활용사례

1. 원격탐사 개요	13
2. 원격탐사 센서와 데이터	15
3. SAR 영상의 특성	24
4. SAR 영상 활용사례와 시사점	31

제3장 철도 인프라 관리현황과 문제점

1. 철도 인프라 관리현황	39
2. 철도 인프라 관리 문제와 시사점	48

제4장 SAR 영상을 활용한 철도 인프라 관리 방향

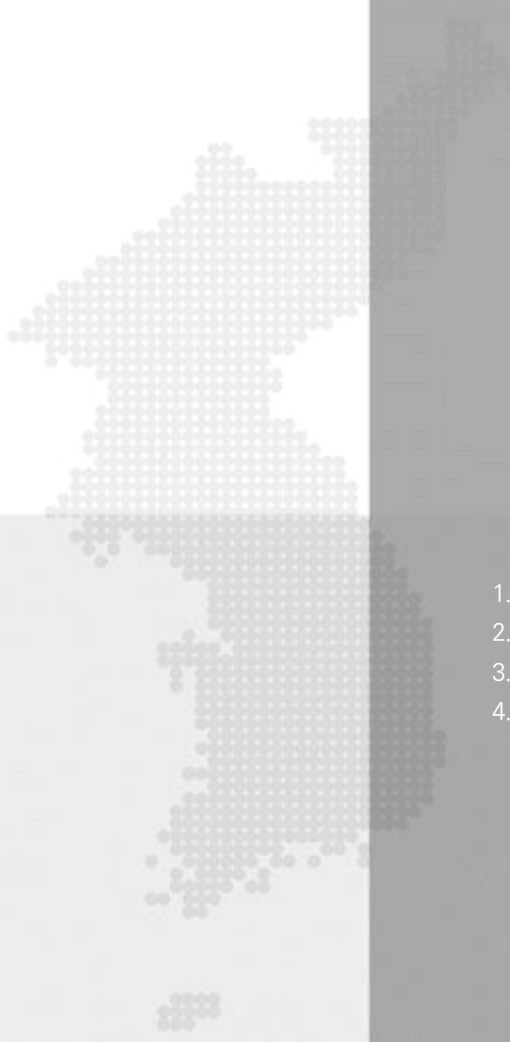
- 1. SAR 영상 활용 기본방향 53
- 2. SAR 영상을 활용한 철도 인프라 관리 방향 56

제5장 결론

- 1. 결론 및 기대효과 65
- 2. 연구의 한계 66

참고문헌 67

SUMMARY 75



CHAPTER 1

연구개요

1. 배경 및 목적	3
2. 연구 범위 및 방법	5
3. 연구추진체계	7
4. 선행연구와의 차별성	8

01 연구개요

1. 배경 및 목적

1) 연구 배경

□ 정부는 “한국판 뉴딜” 종합계획에서 “SOC 디지털화”를 10대 대표과제로 선정, 국민 생활의 안전과 편의를 제공하고, 4대 분야 핵심 인프라의 스마트 디지털 관리체계 구축을 통한 운영·관리와 서비스 효율화를 추진 중¹⁾

- 현재 철도나 교량 같은 국가 인프라는 관련 기술자가 직접 현장을 방문해 육안이나 점검기구를 사용해 유지관리 업무를 수행하도록 제도로 규정²⁾하고 있음
- 이러한 방식은 유지관리와 정기 점검에 많은 시간과 비용이 소요되고, 관리인력의 안전 문제가 제기됨에 따라 운영·관리의 효율성과 안전을 위한 개선이 요구됨
- 철도 분야의 ‘SOC 디지털화’는 모든 철도에 IoT 센서와 4세대 철도통합무선망을 설치하는 등 디지털 관리체계를 구축하는 방향으로 사업을 추진 중³⁾
- 이를 통해 철도 인프라의 상시 감시체계를 마련함으로써 유지관리 비용을 절감(25~35%)하고, 안전하고 신뢰성 높은 교통인프라 서비스를 제공하고자 함⁴⁾
- 그러나 IoT 센서 기반 디지털 관리체계의 구축에도 불구하고 수백 km에 이르는

1) 관계부처 합동, 2020, 「한국판 뉴딜」 종합계획.

2) 「철도의 건설 및 철도시설 유지관리에 관한 법률」에 따라 정기 점검은 경험과 기술을 갖춘 자가 육안이나 점검기구 등을 사용하여 안전성과 성능을 조사하도록 규정함

3) 관계부처 합동, 2020, 「한국판 뉴딜」 종합계획. 14p.

4) 국토교통부, 2021. SOC 디지털화

선로의 모니터링에는 여전히 한계가 있어 안전을 담보할 새로운 수단의 모색이 필요함

□ 최근 철도와 교량 등 선형 인프라에 대한 모니터링 방법으로 시계열 영상 레이더 (Synthetic Aperture Radar, SAR)의 활용 가능성을 검증하는 다양한 학술 연구가 진행

- 영상 레이더는 시계열 영상자료 분석으로 철도 교량, 지반, 사면 등의 변이(연간 수 mm~cm) 관측이 가능한 것으로 알려져 선형 인프라의 유지관리와 정기 점검을 위한 기존 방식의 일부를 대체하거나 보완할 수 있을 것으로 기대
- 아울러, 우리나라는 KOMPSAT 5(X-band SAR)를 운용 중이며, 2022년 고해상도 SAR 센서를 탑재한 KOMPSAT 6의 발사가 예정되어 있어 SAR 영상의 취득과 활용에 대한 기대가 높아지고 있음
- 특히, SAR 영상은 광학센서와 달리 기상 상황(주·야간, 악천후 등)에 무관하게 촬영 가능해 주로 첩보·정찰용으로 활용되었으나, 최근 과학연구와 인프라 모니터링 등 활용범위를 점차 넓혀가고 있음
- 따라서, SAR 영상의 장점을 활용해 SOC 운영·관리의 디지털화를 앞당기고, 안전하고, 효율적인 국가 인프라 관리의 가능성 확인과 정책 방향 제시가 필요함

2) 연구 목적

□ 디지털 뉴딜 시대에 현장 조사와 같은 아날로그 방식에 의한 철로, 철로 교량 등 선형 국가 인프라의 유지관리 문제점 해결을 위해 영상 레이더(SAR)를 활용해 현장 조사를 최소화함으로써 효율적인 인프라의 관리와 관련 제도개선 방향 제시를 목적으로 함

- SAR 영상 활용으로 철도 인프라의 정기 점검과 유지·관리 소요 시간과 비용을 절감하고, SOC 디지털화의 기반을 마련해 국민 안전을 제고 하고자 함
- 아울러, 철도 인프라 관리에 있어서 SAR 영상과 같은 새로운 기술이 실질적으로 도입이 될 수 있도록 제도적 측면에서 개선 방향을 제시하고자 함

2. 연구 범위 및 방법

1) 연구 범위

- 먼저, 영상 레이더(SAR)의 활용이라는 새로운 접근 방식을 도입하고 있어 독자들의 이해를 돕기 위해 위성 원격탐사에 대한 기본적인 배경과 이론을 소개
 - 특히, SAR 영상 제원(specification), 특징 및 활용사례를 통해 영상 레이더의 적용 분야와 방법, 영상 활용에 따른 장점과 적용 가능성을 검토
- 다음으로 국가 인프라 중 철도 및 교량과 같은 선형 인프라의 유지관리 및 점검 방식과 기존 방식의 한계를 밝히고, 이를 보완하기 위한 수단으로 SAR 영상 활용 방향 제시를 연구의 범위로 함
 - 연구의 주목적인 철도 인프라 적용 외에 문헌조사를 통해 영상 레이더가 활용될 수 있는 분야(화산/빙하 활동, 지반침하, 재난재해 등)를 간략히 소개하고자 함

2) 연구 방법

(1) 문헌조사

- 위성 원격탐사의 기초적인 특성과 활용 방법 등에 대해 일반인의 이해를 돕기 위해 원격탐사의 정의, 센서의 종류 및 데이터 특성 등 이론적 배경을 검토하고, 간략히 소개
 - 특히, 본 연구에서 활용하는 레이더(SAR) 영상의 종류와 영상 특성, 영상 특성에 따른 활용기법을 검토

(2) 선형 국가 인프라 관리 근거 및 관리실태 검토

- 주요 국가 인프라의 대부분은 법률이 정한 방식에 따라 정기 점검을 수행하고 있으므로 법제도 측면에서 철도 인프라 관리 근거 및 관리실태를 검토

-
- 본 연구의 주 대상인 철도, 교량과 같은 국가 인프라의 관리 근거로서 법률(『철도의 건설 및 철도시설 유지관리에 관한 법률』)이 정한 정기점검, 긴급점검, 정밀진단, 유지관리 등 철도 인프라의 관리방식과 문제점 도출
 - 특히, 도로와 같은 여타 선형 인프라와 달리 작은 변형 및 변이에도 대형 사고의 위험성이 있는 철도와 철도 교량을 중심으로 검토하고, 제도적 개선 방향 모색

(3) 자문회의 및 세미나 개최

☐ SAR 영상 활용 방법 및 사례에 대한 세미나 개최

- 관련 전문가의 경험 및 사례 공유, SAR 영상처리 기술 자문

☐ 한국철도기술연구원 전문가 자문

- 한국철도기술연구원 첨단인프라연구팀

☐ 상용 SAR 영상 공급 기업(AP위성)과 협업하여 활용방안 모색

- SAR 영상구매 단가 및 철로 전 구간 영상 활용에 따른 예상 소요 예산 검토

(4) 협동연구

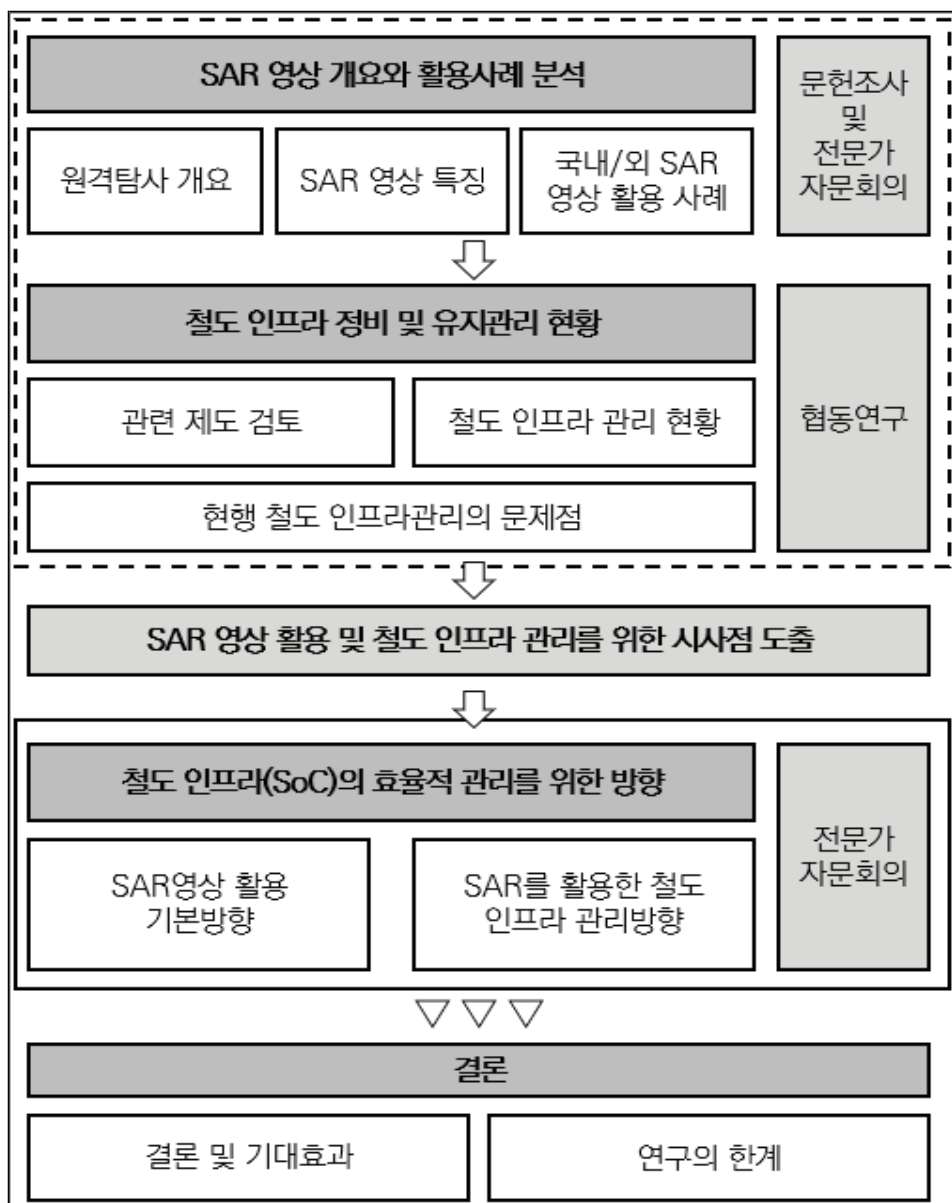
☐ 철도 인프라에 대한 전문적 지식을 보유한 전문가와 협업을 통해 철도 인프라 모니터링을 위한 계측 및 진단기술과 기존 방법의 문제점 도출

- 협업대상: 한국철도기술연구원
- 협업내용: 기존 철도 관리 및 모니터링 방법 및 제도개선 요구사항 검토

☐ SOC 디지털화를 통해 철도 인프라 분야에서 추진하고 있는 IoT 센서 등을 활용한 진단 기술의 장단점을 검토하고, 계측기술을 보완하기 위한 SAR 영상의 역할을 도출

3. 연구추진체계

그림 1-1 | 연구추진체계



4. 선행연구와의 차별성

1) 선행연구 현황

□ Pietro Milillo(2019) 등은 2018년 이탈리아 제노아의 모란디(Ponte Morandi) 교의 붕괴를 계기로 기존에 촬영된 SAR 영상을 분석해 붕괴 전조현상을 밝혀냄

- 다수의 시계열 영상에서 붕괴 전 발생한 변위의 패턴을 발견함으로써 향후 유사한 교량에 대한 모니터링 기준으로 제시하였음
- 이 연구에서는 이탈리아가 운용 중인 코스모 스카이메드(COSMO-SkyMed)와 유럽 우주국(European Space Agency, ESA)의 센티넬(Sentinel 1A/B) SAR 영상을 활용

□ Jung Jungkyo(2019) 등은 장기간에 걸친 교량의 변이 파악을 통해 교량의 안정성 점검을 위한 InSAR 영상 활용 연구를 수행

- 교량 안전성 점검 대상으로 전남 무안과 목포 사이 섬을 연결하는 김대중 대교를 선정하고, 2013년에서 2017년 사이에 촬영된 InSAR 영상을 활용하여 변이 패턴을 파악
- 연구에 사용된 영상도 이탈리아 모란디교 사례와 마찬가지로 이탈리아가 운용 중인 코스모 스카이메드와 유럽 우주국(ESA)의 센티넬 1A/B 영상이 활용됨
- 이들 영상의 특징 중 하나는 군집위성(constellation)으로 동일 궤도를 지나는 위성에서 동일지역을 주기적으로 반복 촬영함으로써 시계열 데이터를 쉽게 얻을 수 있음

□ Jinghui Fan(2019) 등은 빙하의 미세한 이동 속도를 관측하기 위해 DInSAR 기법을 활용한 연구를 수행한 바 있음

- 지형측량용 레이저 스캐너를 이용해 지상에서의 빙하 이동 속도를 사전에 측정, 이를 참값(ground truth)으로 보고, 다중시기 SAR 영상을 분석해 빙하의 이동

속도 측정 가능성과 정확성을 평가하였음

- 이 연구에서는 참값으로 사용된 GPS와 지형측량용 레이저 스캐너가 기준점으로써 정확도가 낮아 SAR 영상 분석 결과와 비교하는 데 한계가 있음을 밝힘

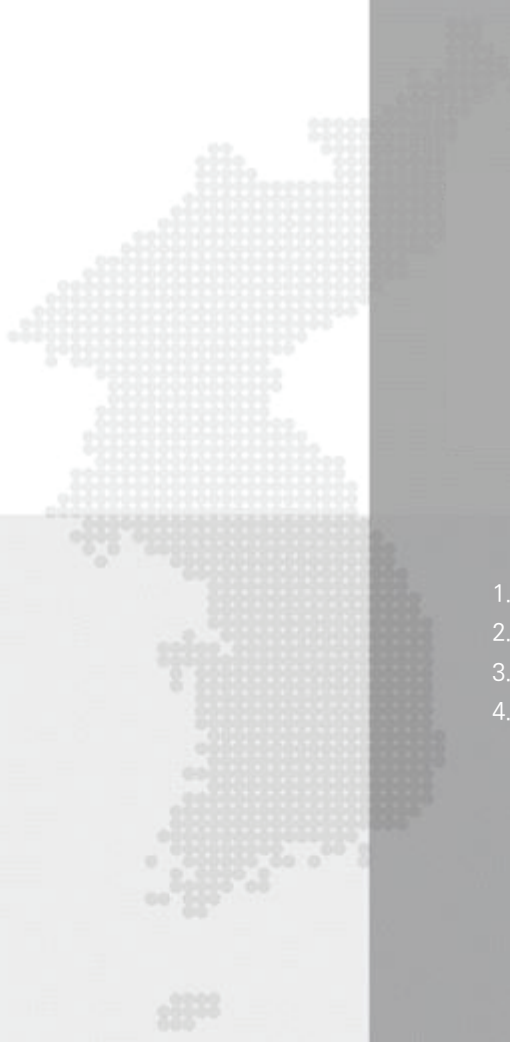
2) 선행연구와 본 연구와의 차별성

- 본 연구는 SAR 영상 활용 가능성을 실제 인프라 관리에 적용하기 위해 기존 방식의 한계와 SAR 영상 활용 가능성을 적시하고, 제도적으로 새로운 방식의 도입이 가능하도록 정책적 방향을 제시한다는 측면에서 차이가 있음
- 반면, 기존 연구들은 대부분 학술연구 수준에서 SAR 영상 활용 가능성을 확인하는 연구 수준에 머물고 있음

표 1-1 | 선행연구와의 차별성

구 분		선행연구와의 차별성		
		연구목적	연구방법	주요 연구내용
주요 선행 연구	1	Pietro Milillo etc(2019). SAR 영상을 활용해 이탈리아 모란디 다리 붕괴 전조현상을 파악하고, 이를 기반으로 SAR영상의 교량 관리 가능성을 제시	- 교량 붕괴전 촬영된 SAR영상 분석 - 사용영상: 이탈리아 군집위성인 COSMO-SkyMed와 유럽 우주국(ESA)의 Sentinel-1A/B 군집위성영상 활용	2018년 붕괴된 이탈리아 제노아의 모란디 교에 대해 2003~2011사이 촬영된 COSMO-SkyMed와 Sentinel-1A/B SAR영상을 활용, 전조증상 파악
	2	- Jung Jungkyo 등 (2019). 장기간에 걸친 교량의 변이/굴절 파악을 위한 InSAR 영상활용 - 주기적인 InSAR영상 관측에 의한 교량 변이 모니터링 가능성 파악	- 다중시기 InSAR영상 활용한 관측자료 분석 - 사용영상: 이탈리아 군집위성인 COSMO-SkyMed와 유럽 우주국(ESA)의 Sentinel-1A/B 군집위성영상 활용	- 장기간에 걸친 교량의 변이 파악을 통해 교량의 안정성 점검을 위한 InSAR영상 활용 연구 - 전남 김대중 대교에 대한 2013년~2017년 사이 촬영 영상활용
	3	Jinghui Fan etc (2019). DInSAR 영상을 활용한 빙하 이동 속도의 관측을 위한 연구	지상용 레이저 측량기구(terrestrial laser scanner)와 COSMO-SkyMed 다중시기 영상 활용한 비교	- 지형측량용 레이저 스캐너를 그라운드 트루스(Ground Truth)로 보고, 다중시기 SAR 영상의 빙하이동 속도를 측정, 정확성을 평가 - GPS와 지형측량용 레이저 스캐너의 기준점으로써의 정확도가 낮은 것이 연구의 한계로 지적
본 연구		SAR 영상을 활용하여 철로, 교량과 같은 선형 국가인프라 관리의 효율화 방안 마련 및 국민 안전성 확보	- 문헌조사 - 국내외 SAR영상 활용 사례조사 - 전문가 자문회의 - 한국철도기술연구원과 협업: 철도 및 교량 등 선형 국가인프라 관리실태와 문제점 도출	- 위성원격탐사 특성, SAR영상 제원 및 활용 특성 - SAR영상 활용사례와 성과 - 선형 국가인프라 관리방식과 문제점 - SAR를 활용한 선형 국가인프라 관리방안 제시

자료: 저자 재구성



CHAPTER 2

SAR 영상 개요와 활용사례

- 1. 원격탐사 개요 13
- 2. 원격탐사 센서와 데이터 15
- 3. SAR 영상의 특성 24
- 4. SAR 영상 활용사례와 시사점 31

02 SAR 영상 개요와 활용사례

1. 원격탐사 개요

1) 원격탐사의 정의

□ (개념 정의) 원격탐사(遠隔探査, Remote sensing)는 물리적인 접촉 없이 관심 있는 물체, 지역 또는 현상을 탐사 장비(영상센서)를 이용해 취득한 데이터를 분석하여 원하는 정보를 얻는 학문 또는 기법을 말함¹⁾

- 일반적으로 인공위성, 항공기, 드론에 탑재된 원격탐사용 센서를 활용하여 지표, 대기, 해양에서 전파된 신호(전자기 복사)를 탐지하고 분석하기 위한 기술을 통칭

□ (주요 특징) 원격탐사는 현장에 직접 방문하지 않고도 원거리에서 광범위한 지역 정보를 취득할 수 있어, 접근 불가능 지역에 대한 자료 수집이 가능하고, 센서의 특성(분광 및 방식)을 이용해 사람의 시각으로 볼 수 없는 정보의 수집과 분석도 가능함

- 원격탐사는 기본적으로 영상 촬영범위가 넓고, 필요에 따라 영상접합기법(mosaic)으로 광범위한 지역을 관측할 수 있어 현장 조사 대비 인력과 예산, 조사 기간을 절약할 수 있음
- 또한 위성영상은 정해진 궤도를 반복적으로 지나가면서 동일지역에 대한 영상을 일정 주기로 획득하여 시계열로 추적할 수 있으며, 정지궤도위성의 경우 항상

1) Thomas Lillesand, Ralph W. Kiefer, Jonathan Chipman. 2008. Remote Sensing and image interpretation(6th edition). p.1.

같은 위치에서 실시간으로 지표를 감시하는 것이 가능함

- 광학 영상(passive sensor)은 가시광선 대역뿐만 아니라 가시광선보다 파장이 짧은 자외선(ultra-violet)이나, 파장이 긴 적외선(infra-red) 신호를 영상데이터로 획득할 수 있어 특정 분야(예: 식생 활력도, 도시열섬 등)의 관측에 활용됨
- 영상 레이더(SAR)와 같은 능동형 센서(active sensor)를 위성에 탑재할 경우 기상 상태나 밤낮에 관련 없이 데이터의 취득이 가능하다는 장점이 있음

2) 원격탐사의 활용

□ 원격탐사 기술은 지구관측(earth observation)을 통해 지표의 변화(자연 및 인문환경)와 특성을 관측하기 위한 용도로 많이 활용됨

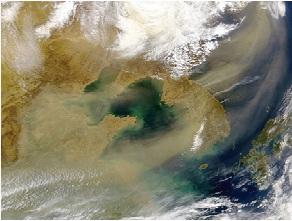
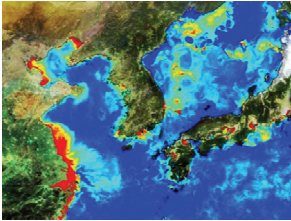
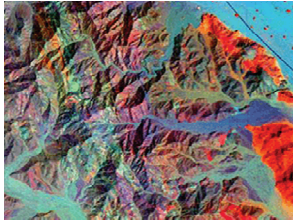
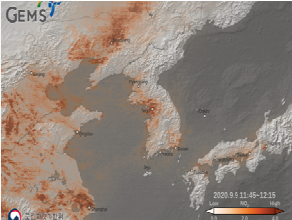
- 특히, 위성 원격탐사는 구름이나 황사의 이동 등과 같은 광역적 기상정보의 수집 및 분석, 수심측량, 해수 온도 관측 등 해양정보, 식생의 활력도, 수관 정보 등 산림·환경정보, 지질자원²⁾, 산불, 홍수, 지진과 같은 자연재해 등 광범위한 분야에서 활용되고 있음(<그림 2-1> 참고)

□ 공간정보와 관련해 수치지형도, 영상지도 등 각종 주제도 제작과 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM) 생성을 위한 기초 자료로 활용되고 있으며,

- 극한의 자연환경 또는 정치·군사적 이유로 접근이 어렵거나 불가능한 지역에 대한 관측과 정보 수집에 활용되고 있음
- 위성 원격탐사 기술의 발전은 미소 냉전 시대 첩보위성을 비롯한 우주개발 역사와 맥락을 같이하며, 적대국에 대한 정보 취득의 수단으로 활용되어왔음 (그림 2-1 참고)

2) 손영선, 김광은, 윤광중. 2015. 지질자원 탐사를 위한 원격탐사 영상의 처리기법 및 활용 검토. 한국자원공학회지. 52권 4호: 429-457.

그림 2-1 | 위성 원격탐사 활용 분야

기상정보	해양정보	지질탐사
		
황사 관측	적조현상	광물 탐지
환경분야	산불감시	감시정찰
		
대기중 이산화질소 농도	캘리포니아 산불	주요거점 감시

자료: 저자 재구성³⁾

2. 원격탐사 센서와 데이터

1) 원격탐사 센서의 종류

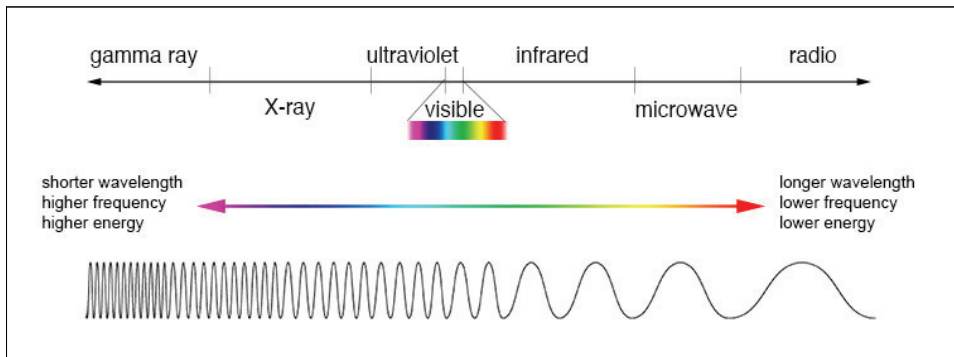
□ 원격탐사는 자연(태양광/우주) 혹은 인공적(발광 장치/통신장치 등)으로 발생한 전자기

3) 네이버캐스트. 황사. <https://terms.naver.com/entry.naver?cid=58947&docId=3577742> (2021년 4월 15일 검색)
고재원. 바닷 속 살피보는 '천리안 1호', 한반도 주변 지구온난화 영향 연구 시작. 동아사이언스. <https://www.donga.com/news/lt/article/all/20190509/95452921/1> (2019년 5월 9일 자)
Mining and geology, <http://argongra.es/en/business-areas/mining-geology> (2021년 4월 15일 검색)
국립환경과학원. 2020. “10년여 대장정의 결실” 환경위성, 아시아 대기질 영상 첫 공개. 보도자료.
우동명. 위성에서 본 캘리포니아 산불. 뉴스1. <https://www.news1.kr/photos/details/?2780098> (2017년 10월 19일 자)
38 North. Pyongyang's Space Launch in Pictures. <https://www.38north.org/2016/02/sohae020816/> (2021년 4월 15일 검색)

적 방사(electromagnetic radiation)가 물체에 반사되는 센서의 특성을 이용하여 데이터를 취득하고, 분석하는 과학기술임

- 전자기 방사는 에너지(energy), 파장(wavelength), 주파수(frequency) 등으로 나타내며, 파장이 짧을수록 에너지와 주파수는 증가하고, 파장이 길수록 에너지와 주파수는 감소해 이러한 특성을 정보 취득에 활용함(그림 2-2 참고)

그림 2-2 | 전자기파 대역(band)



자료: NASA. The Electromagnetic Spectrum.

<https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html> (access May 13, 2021)

□ 원격탐사는 서로 다른 전자기파의 대역(예: 가시광선, 적외선, 마이크로 웨이브 등)을 감지하는 센서를 통해 탐지를 원하는 대상물의 특징적인 정보를 취득하며, 센서의 종류에 따라 탐지 가능한 정보의 종류와 양이 달라짐(그림 2-3 참고)

- 원격탐사용 센서는 크게 능동형 센서(active sensor)⁴⁾와 수동형 센서(passive sensor)⁵⁾로 분류할 수 있음
- 능동형 센서의 종류에는 라이다(LiDAR), 영상 레이더(SAR), 음파탐지기(Sonar) 등이 있고, 수동형 센서에는 광학, 전자기파, 자외선, 적외선 센서 등이 있음

4) 인공위성 또는 항공기에서 신호(예: radar)를 방출하고, 물체에 의해 반사된 것을 다시 센서가 감지하는 것

5) 지표상의 객체에 태양 빛이 반사된 에너지를 센서가 감지하는 것

그림 2-3 | 능동형 센서와 수동형 센서의 종류



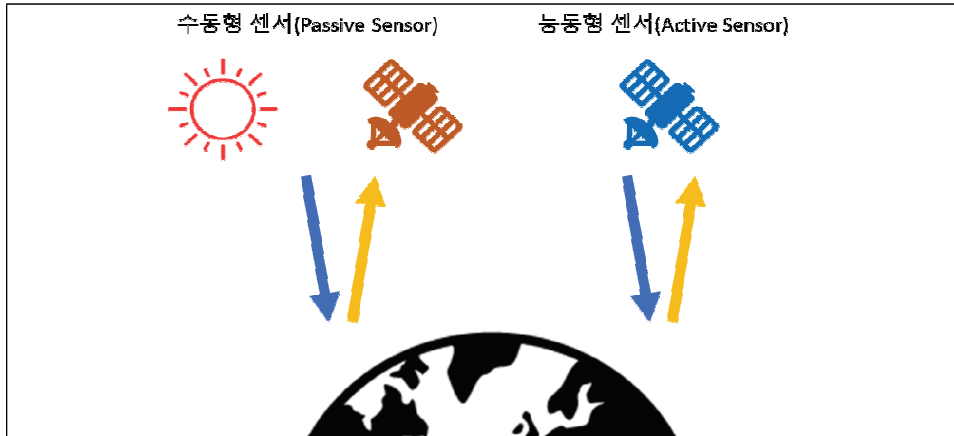
자료: 저자 작성

□ 일반적으로 수동형 센서는 태양광의 복사에너지(적외선, 가시광선, 자외선 등)를 탐지해 육안 분석과 영상 분석알고리즘을 이용해 정보를 추출하는 데 이용됨

- 반면, 능동형 센서는 태양광의 반사 에너지가 아니라 센서가 탑재된 플랫폼에서 라디오파(radio wave)나 마이크로파(microwave) 등을 방출하고, 물체에 반사되어 되돌아오는 신호를 측정하여 기록하는 방식임(그림 2-4 참고)
- 기존 원격탐사에서는 기상, 해양 및 대기 관측 분야를 제외하면 수동형 센서 기반의 광학 영상이 주로 활용되었으나, 근래 들어 능동형 센서의 이용 빈도가 급격히 증가하고 있음⁶⁾

6) 이영완. mm 단위까지 포착. 지구 감시하는 눈 '영상 레이더 위성'. 조선일보.
<https://news.v.daum.net/v/20210331080036431> (2021년 3월 31일자)

그림 2-4 | 능동형 센서와 수동형 센서의 차이점



자료: Geospatial World. What is Active and Passive Remote Sensing?
<https://www.geospatialworld.net/videos/active-and-passive-remote-sensing/> (2021년 4월 15일 접속)을 저자 재구성

□ 우리나라는 1992년 위성 제작기술 습득을 위한 과학위성인 ‘우리별 1호’를 처음 발사하였으며, ‘무궁화 위성’ 시리즈(1~5)와 다목적 실용위성인 ‘아리랑 위성’ 시리즈(1~5), 과학기술위성 및 통신·해양·군사 위성에 이르기까지 총 24기(2021년 4월 기준)의 위성을 운용하였거나 운영 중임(표 2-1 참고)

- 이중 광학 영상데이터를 생산하는 위성은 다목적실용위성(아리랑)과 정지 궤도위성(천리안), 차세대중형위성(국토위성) 등이 있음
- 광학센서를 탑재한 아리랑 위성 3A(KOMPSAT-3A)와 21년 3월 22일 발사한 국토위성(CAS-500)은 공간해상도 50cm급으로 4개 밴드(RGB+NIR)를 제공하고 있음
- 아리랑 5호(KOMPSAT-5)와 2022년 발사 예정인 아리랑 6호(KOMPSAT-6)는 영상 레이더(Synthetic Aperture Radar, SAR)를 탑재한 위성임
- 이 밖에도 대북 관측을 목적으로 국방과학연구소에서 영상 레이더(SAR) 기반 초소형 정찰위성 군(constellation)을 개발 중임⁷⁾

표 2-1 | 대한민국의 인공위성 운용 현황

구분	명칭(발사년도)
시험위성(우리별)	1호('92), 2호('93), 3호('99)
통신위성(무궁화)	1호('95), 2호('96), 3호('99), 5호('06), 5A호('17), 6호(=올레 1호)('10), 7호('17)
다목적실용위성(아리랑)	1호('99), 2호('06), 3호('12), 3A호('15), 5호('13), 6호('21 예정)
정지궤도위성(천리안)	1호('10), 2A호('18), 2B호('20)
과학기술위성	1호('03), 나로과학위성('13), 3호('13)
군통신위성(ANASIS)	ANASIS-I(=무궁화5호)('06), ANASIS-II('20)
차세대중형위성	1호('21)(=국토위성)

자료: 한국항공우주연구원⁸⁾ 자료를 저자 재구성

2) 원격탐사 데이터

□ 원격탐사에서는 일반적으로 광학센서와 같은 수동형 센서로 취득되는 래스터 영상(raster 또는 pixel) 데이터와 영상 레이더(SAR)나 LiDAR(Light Detection and Range)와 같은 능동형 센서가 취득하는 점군(point cloud) 데이터 형식이 있음

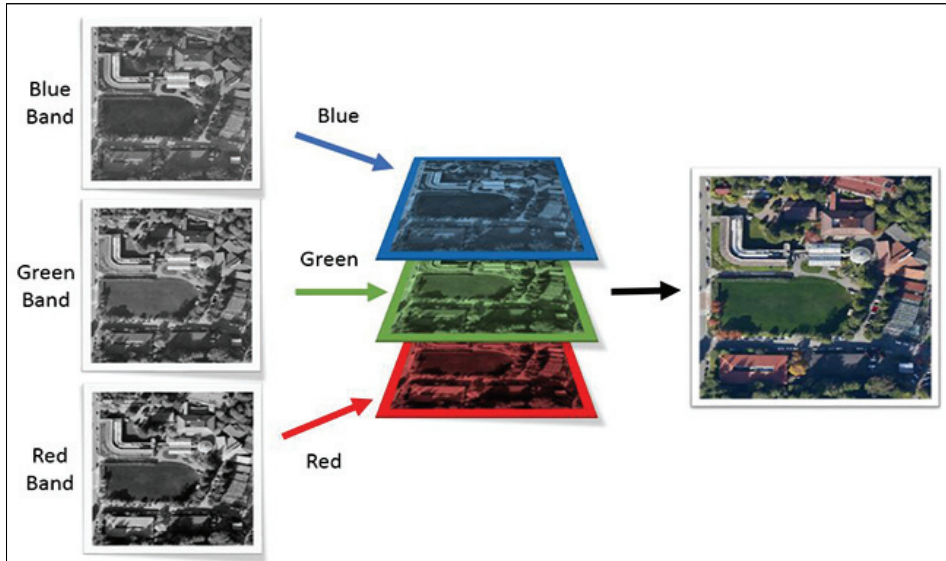
- 래스터 데이터는 직사각행렬($n \times m$)의 형태로 표현할 수 있으며 각 픽셀에 하나의 값(8~11bit)을 부여하여 데이터로 활용함
- 가시광선 대역은 빛의 삼원색인 빨간색(Red), 초록색(Green), 파란색(Blue)으로 나누어 각기 한 개의 밴드로 저장하고 있으며, 이 3개의 밴드를 합성하면 사람의 눈으로 인식하는 색상과 사물의 모습이 표현됨(그림 2-5 참고)
- 사람이 눈으로 볼 수 없는 적외선과 자외선 영상의 경우, 데이터에 기록된 값을 기반으로 시각화하여 분석에 이용하고 있으며(그림 2-6 참고), 영상 레이더(Imaging Radar)도 전자기파 신호를 영상으로 변환하여 분석에 이용하고 있음

7) 연합뉴스. 군, '초소형 위성' 개발한다...북한 이동식발사대 30분마다 정찰. 2020년 8월 5일자.

<https://www.yna.co.kr/view/AKR20200805040100504> (2021년 4월 15일 검색)

8) 한국항공우주연구원. 연구개발(인공위성). https://www.kari.re.kr/kor/sub03_02.do (2021년 4월 15일 검색)

그림 2-5 | Raster Data 밴드와 RGB 영상의 합성



자료: Humboldt State Geospatial Online - Image Bands. NASA.
https://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online (access April 15. 2021)

그림 2-6 | 강원도 산불지역 근적외선 합성 영상

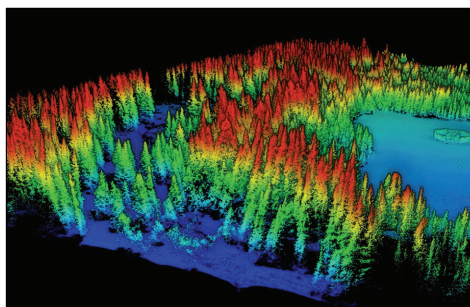


자료: 한국항공우주연구원 KARI TV. 강원도 대형 산불 위성 영상(강릉, 속초, 고성).
<https://www.youtube.com/watch?v=0YaAALVMdmw> (2021년 04월 15일 검색)

□ 능동형 센서의 한 종류인 라이다(LiDAR)의 경우, 레이저 신호를 통해 반사된 표면의 위치를 XYZ 좌표(Point)로 변환하여 저장

- 점군(point cloud) 데이터는 라이다 센서의 스캔을 통해 많은 점들을 수집·저장하는 방식이며, 좌표정보가 기록된 텍스트 파일 형태로 생성됨(그림 2-7, 2-8 참고)

그림 2-7 | 점군(point cloud) 데이터 예시



자료: GEODETICS. <https://geodetics.com/lidar-point-clouds/> (accessed April 15, 2021)

그림 2-8 | SAR 영상 예시



자료: SIIS. <https://www.si-imaging.com/gallery/kompsat-5> (accessed May 13, 2021)

3) 원격탐사 데이터의 해상도

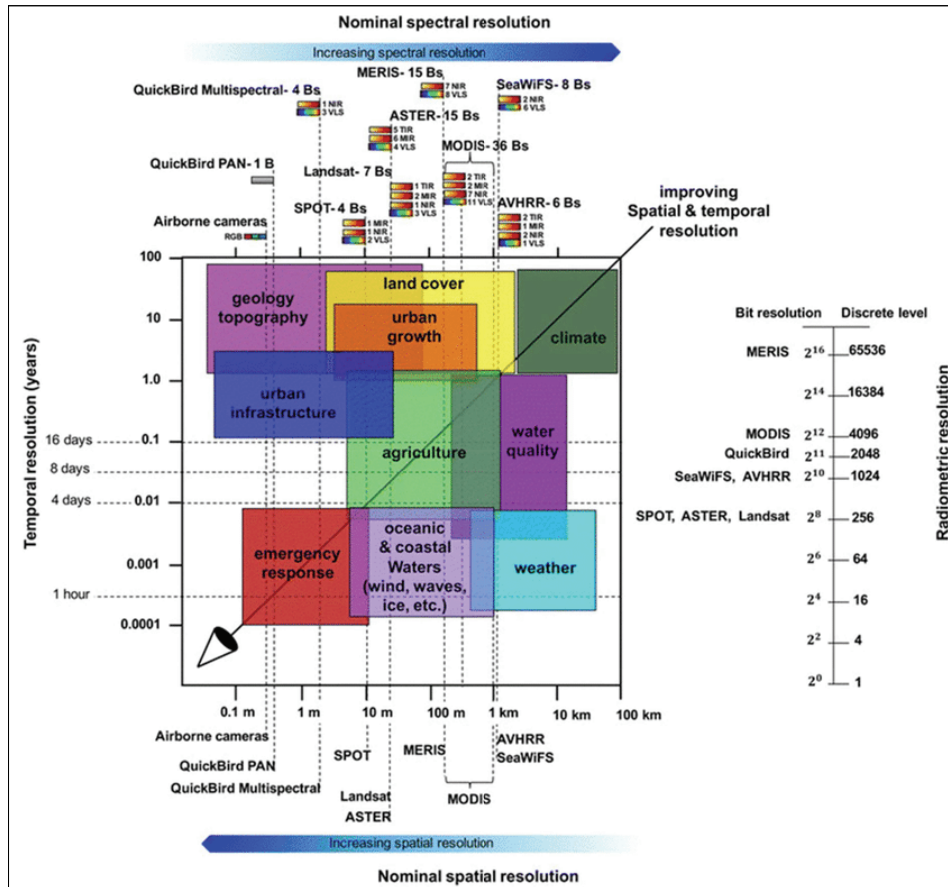
□ 관측대상의 특성을 정확하게 파악하기 위해서는 원격탐사자료의 품질이 중요하며, 특히 광학 영상자료의 품질은 공간(spatial), 분광(spectral), 방사(radiometric), 시간(temporal) 등의 해상도(resolution)로 표현됨

- 공간해상도(spatial resolution)는 영상에 기록되는 화소(pixel)의 크기를 말하며, 화소 한 변의 길이가 표현하는 실제 지표면의 거리를 말함
- 예를 들어 우리나라가 최근 발사한(2021. 03. 22.) 차세대 중형위성 1호기(국토위성)의 경우 하나의 픽셀이 가로세로 약 50cm의 지표를 커버하는 공간해상도를 가짐

-
- 분광해상도(spectral resolution)는 영상에 기록되는 태양광의 주파수 파장 대역(band)을 말하며, 센서가 감지할 수 있는 대역이 많을수록 분광해상도가 높아 인간의 시각(가시광)으로는 탐지할 수 없는 영역까지 자료의 수집과 분석이 가능
 - 예를 들어 아리랑 3A호기는 흑백(panchromatic) 영상과 4개 밴드(RGB+NIR)의 센서가 탑재된 반면, 미국이 운용 중인 Landsat 8의 센서는 흑백 영상을 포함해 9개의 밴드에서 영상정보를 취득할 수 있는 분광해상도를 가지고 있음⁹⁾
 - 방사 해상도(radiometric resolution)는 센서가 감지한 신호를 하나의 화소(픽셀)에 얼마나 자세하게 저장할 수 있는지를 이야기하며, 최근의 위성들은 대부분 11bit(2의 11승: 2048)로 영상데이터를 저장하고 있음
 - 시간해상도(spatial resolution)는 위성이 궤도를 돌면서 동일지역에 대한 정보를 얼마나 자주 취득하는지를 나타내며, 시간해상도가 높을수록 일정 기간 내에 데이터 취득량이 증가해 관측대상의 변화 추이를 정밀하게 파악할 수 있음
 - 현재 전세계에서 운용되고 있는 위성들은 운용 목적에 따라 4가지 해상도의 제원(specification)을 달리하고 있으며, <그림 2-9>는 다양한 위성들의 활용 영역을 4가지 해상도를 중심으로 도식화한 것임

9) USGS. Landsat Missions, <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8>
(2021년 4월 15일 검색)

그림 2-9 | 위성 종류에 따른 4가지 해상도 비교



자료: Dimitrios A. Kasampalis et al(2018)

3. SAR 영상의 특성

1) 레이더(Radar) 센서

□ 레이더(RADio Detection And Ranging, Radar)는 능동형 센서의 하나이며, 안테나를 통하여 마이크로파를 입사(incidence)시켜 물체로부터 후방 산란 된 신호(signal)를 포착하여 2차원적인 영상을 얻는 원격탐사 방법임¹⁰⁾

- 대표적인 영상 레이더(Imaging Radar) 센서로는 SAR(Synthetic Aperture Radar)와 RAR(Real Aperture Radar)가 있음
- 영상 레이더는 전자파를 이용하기 때문에, 눈, 비, 구름, 안개 등의 기상 조건이나 주야간 상관없이 영상을 획득할 수 있는 장점이 있음
- 반면 레이더 데이터에서 실제 영상을 얻기 위해 여러 단계의 복잡한 신호 처리 과정을 거쳐야 하는 단점과 광학 영상과 달리 탐지대상의 육안식별에는 한계가 있음

2) SAR와 RAR의 차이

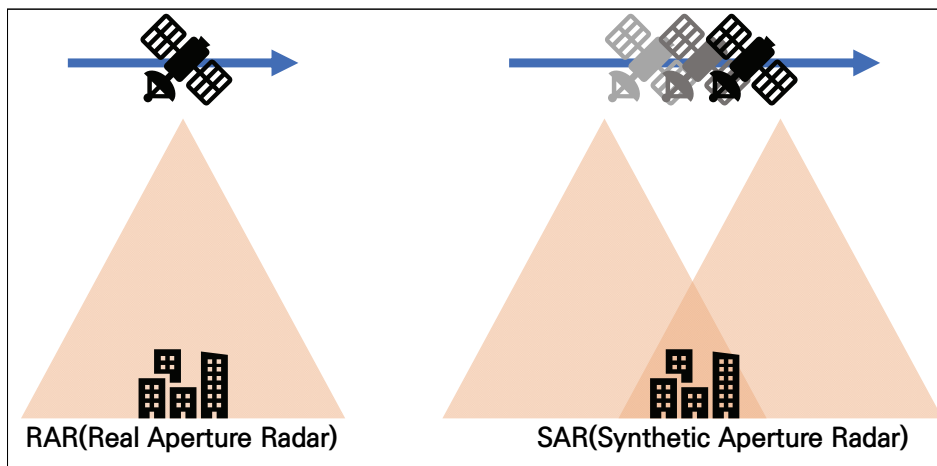
□ 영상 레이더 시스템으로부터 송·수신되는 전파의 전력은 거리의 제곱에 비례하여 감소하며, 이는 수신안테나의 크기가 레이더 영상의 해상도와 연관성이 있음을 의미함

- RAR는 센서가 가지고 있는 조리개(aperture)와 안테나가 단일형으로 동작하기 때문에, 위치변화에 따른 보정 없이 신호를 획득하는 형태로, 고해상도의 영상을 얻기 위해 안테나의 길이가 매우 길어져야 하는 한계가 있음
- SAR는 RAR에 비해 전파 신호의 파장이 길고 안테나 직경도 짧은 편이지만, 도플러효과(doppler effect)를 이용해 긴 안테나를 사용한 듯한 효과를 내는 기술을 활용

10) 박지호, 이대라, 이권철, 이훈열. 2017. Sentinel-1A/B 위성의 SAR 간섭영상을 활용한 지진 변위 분석. 대한 지질학회 추계학술대회: 409-409.

- 이를 통해 항공기나 위성이 이동한 거리만큼 레이더 안테나의 직경이 커지는 효과가 나타나게 되고, 중첩된 신호를 이용해 더 선명한 반사파를 수신할 수 있으며, 넓은 범위의 지상 관심 지역에 대한 고해상도 영상을 획득하는 데 효과적임¹¹⁾(그림 2-10 참고)

그림 2-10 | RAR과 SAR의 차이



자료: Laurent Ferro-Famil, Eric Pottier(2016)¹²⁾의 그림을 저자 재구성

3) SAR 영상 종류와 분석기법

(1) SAR 영상의 종류 및 촬영 방식

□ SAR 위성영상은 L-Band, S-Band, C-Band, X-Band 등 사용하는 전파의 파장 대역(band)에 따라 분류할 수 있으며 이들 파장 대역은 표준화된 대역을 사용하고 있음¹³⁾

- 그중 L-밴드는 타 파장대에 비해 높은 일관성(coherence)이 유지되기 때문에

11) 임룡혁. 2020. SAR(합성 개구 레이더) 외. 국토 제467호: 52-53.

12) Laurent Ferro-Famil, Eric Pottier. 2016. Microwave Remote Sensing of Land Surface, Elsevier. 1-65.

13) 이 외에도 Ka-band, Ku-band, S-band, P-band 등 다양한 대역이 있다.

InSAR¹⁴⁾의 적용에 유용한 것으로 알려져 있음

- L-Band는 파장이 길어 탐지거리는 길지만, 공간해상도가 떨어지는 단점¹⁵⁾이 있는 반면에 파장이 짧은 X-밴드는 공간해상도는 높지만, 탐지거리가 짧아지는 단점이 있음(표 2-2 참고)

표 2-2 | 레이더 표준 주파수 대역 중 L~X밴드에 대한 제원

밴드명	주파수	파장범위	설명
L 밴드	1-2 GHz	30-15cm	Long Band, ATC 레이더 등에 사용
S 밴드	2-4 GHz	15-7.5cm	Short Band
C 밴드	4-8 GHz	7.5-3.8cm	Compromise(S와 X사이라는 의미), 중거리(~60km) 주파수가 비교적 낮아 신호 효율이 좋음
X 밴드	8-12 GHz	3.8-2.5cm	단거리(~30km) 구름, 강수 관측, X-Band 레이더 등에 사용

자료: 521-1984-IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands. 1984. IEEE.

□ SAR 센서를 탑재한 위성에는 1978년 SEASAT(L-Band 센서 탑재)을 시작으로 ENVISAT, TerraSAR-X, Radarsat, ALOS, Sentinel 등 다양한 위성을 운용 중

- 우리나라는 2013년 KOMPSAT-5의 발사에 성공하면서 국산 SAR 영상(X-Band)을 확보하였고, 2022년에 KOMPSAT-6를 발사 예정(표 2-3 참고)

14) InSAR(Interferometric SAR)는 동일지역에 대한 스테레오 SAR 영상을 활용하여 지표정보와 위상차를 추출하고 입체적인 영상정보를 얻는 기법이다.

15) 송영선, 김기홍. 2013. Radargrammetry를 이용한 C-밴드 및 X-밴드 SAR 위성영상의 DEM 생성 평가. 대한공간정보학회지, 21권 4호: 109-116.

표 2-3 | SAR 위성 운용현황 및 개요

명칭	발사년도	촬영밴드	운용 기관 및 국가
Seasat	1978	L-Band(HH)	NASA, USA
ERS-1/2	1991/1995	C-Band(VV)	ESA, Europe
J-ERS-1	1992	L-Band(HH)	JAXA, Japan
SIR-C/X-SAR	1994	L-Band & C-Band/ X-Band(VV)	NASA/JPL, USA DLR, Germany/ASI, Italy
Radarsat-1	1995	C-Band(HH)	CSA, Canada
SRTM	2000	C-Band(HH+VV) & X-Band(VV)	NASA/JPL, USA DLR, Germany/ASI, Italy
ENVISAT/ASAR	2002/2012	C-Band(Dual)	ESA, Europe
ALOS/PaISAR	2006/2011	L-Band(Quad)	JAXA, Japan
TerraSAR-X/TanDEM-X	2007/2010	X-Band(Quad)	DLR/Astrium, Germany
Radarsat-2	2007	C-Band(Quad)	CSA, Canada
COSMO-SkyMed-1/4	2007/2010	X-Band(Dual)	ASI/MiD, Italy
RISAT-1	2012	C-Band(Quad)	ISRO, India
HJ-1C	2012	S-Band(VV)	CRESDA/CAST/NRSCC, China
Kompsat-5	2013	X-Band(Dual)	KARI, Korea
PAZ	2013	X-Band(Quad)	CDTI, Spain
ALOS-2	2013	L-Band(Quad)	JAXA, Japan
Sentinel-1a/1b	2013/2015	C-Band(Dual)	ESA, Europe
Radarsat Constellation-1/2/3	2017	C-Band(Quad)	CSA, Canada
SAOCOM-1/2	2014/2015	L-Band(Quad)	CONAE, Argentina

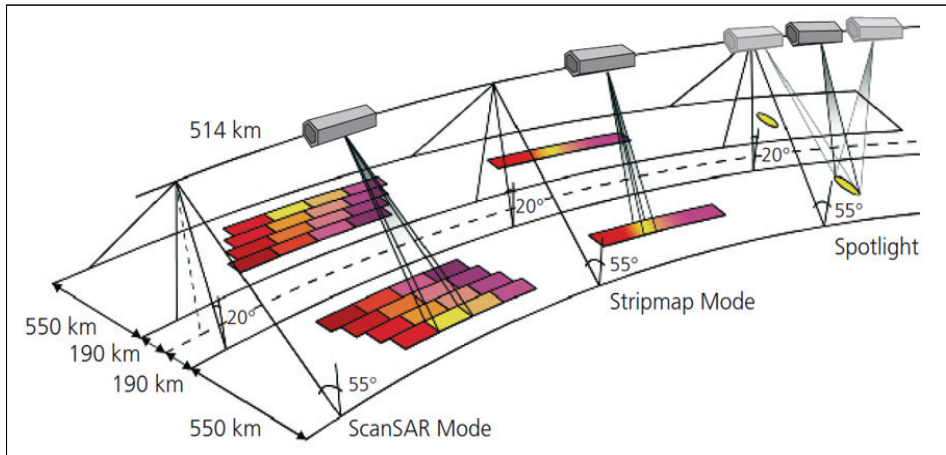
자료: Alberto Moreira, et al(2013)

□ SAR 영상을 촬영하는 방식은 기본적으로 스캔 모드(ScanSAR Mode), 스트립맵 모드 (Stripmap Mode), 스포트라이트 모드(Spotlight Mode)가 있으며, 고정된 안테나의 방향으로 인해 목표물의 위치와 위성의 위치에 따라 영상의 품질이 달라짐(그림 2-11 참고)

- 이를 개선하기 위해 안테나의 방향을 조정하여 동일한 표적에 대해 동일한 방향에서 관측이 될 수 있도록 하는 TOPS(Terrain Observation by Progressive

SAR)¹⁶⁾모드를 탑재한 SAR 위성이 개발되어 운용 중임(예: 유럽 우주국의 Sentinel-1)

그림 2-11 | 영상 레이더 촬영 방식



자료: Alberto Moreira, et al(2013)

(2) SAR 영상 분석기법 및 특성

□ SAR 영상을 활용하여 정보를 추출 및 분석하는 기법에는 InSAR, DInSAR, SBAS, PSInSAR, TCPIInSAR, MAI 등 다양한 방법이 있음

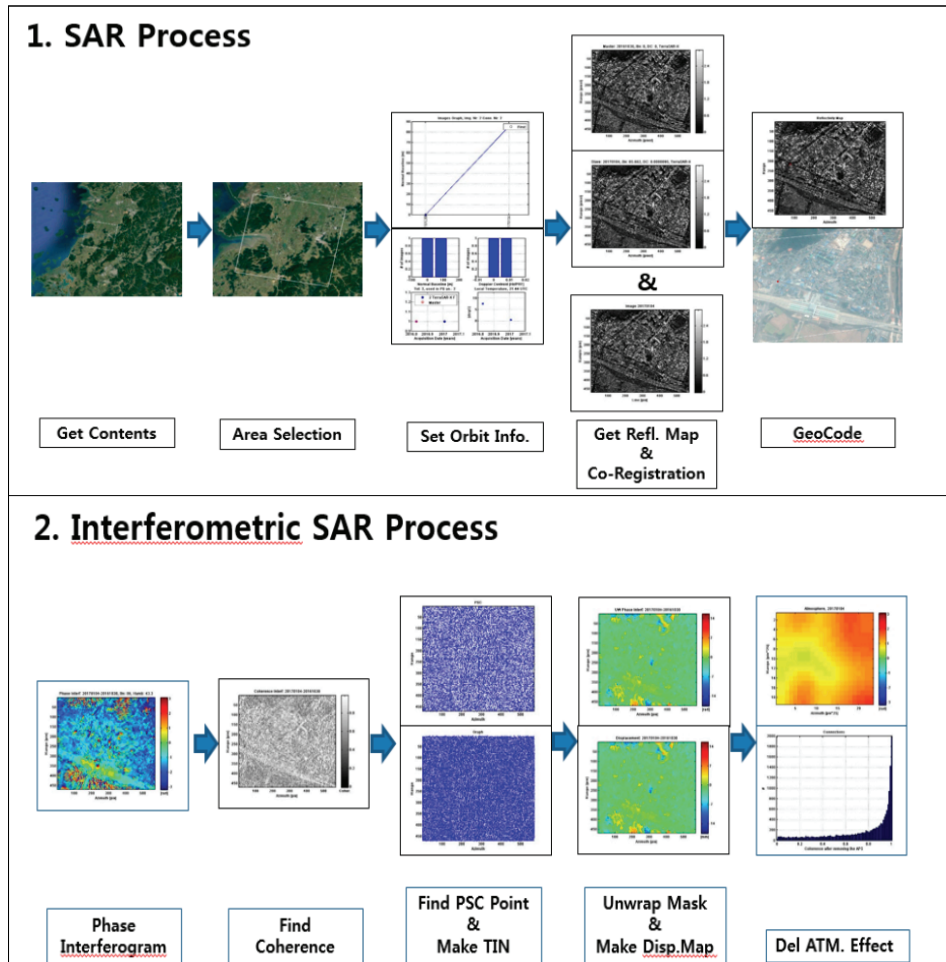
- InSAR(Interferometric SAR, SAR 간섭기법)는 동일지역에 대한 스테레오 SAR 영상(서로 다른 시기에 촬영)을 활용하여 지표정보와 위상차를 추출하고 입체적인 영상정보를 얻을 수 있는 기법으로, 두 영상 간의 미세한 위상차를 계산하여 활용하는 방법임¹⁷⁾
- 그림 2-12와 같이 SW를 이용해 좌표체계를 맞춘(rectified) 영상을 얻는 과정을 SAR

16) 강서리 외. 2014. TOPS 위성 SAR 모드 시스템 구현 및 성능 평가 연구. 통신위성 우주산업연구회 논문지. 9권 2호: 74-79.

17) 이원진. 2016. 미세지표변위 관측을 위한 향상된 다중시기 레이더간섭기법의 개발. 서울시립대학교 박사학위논문.

영상처리 단계라고 하며, phase interferogram이라는 위상 차분 간섭도와 긴밀도 (coherence)를 생성하고, 변위 지도 생성과 대기 영향을 제거하는 일련의 과정을 InSAR 영상처리라 함

그림 2-12 | SAR 영상처리와 InSAR 영상처리 절차



자료: 자료: Minkyoo Youm, et al(2017)¹⁸⁾

18) Minkyoo Youm, Hongsic Yun, Hanbual Kim, Woneung Lee, Kwangbae Kim.. 2017. A Study on Optimal D-InSAR Filtering Technique According to Landform Relief. The 5th International Symposium on Sensor Science Proceedings 1, no.8: 723.

-
- DInSAR(Differential SAR Interferometry, SAR 차분간섭기법)는 InSAR 기법을 이용해 얻어진 지형과 위상차 데이터에서 DEM을 이용하여 지표정보를 소거하고, 위상차만 남기는 방법을 DInSAR 기법이라고 함¹⁹⁾
 - DInSAR는 단어 그대로 지형을 제외한 위상의 변화(phase differential)를 관찰하는 방법이며, DEM의 해상도에 큰 영향 없이 지형의 위상차를 정밀하게 측정할 수 있는 특징이 있음
 - DInSAR가 주로 활용되는 분야는 지진으로 인한 지형변화, 철도, 교량 등 인프라의 미세한 변화 모니터링 등임
 - SBAS(Small BAseline Subset, 다영상 단기선 간섭기법)는 시계열로 구축된 SAR 영상들을 활용하는 DInSAR의 확장된 개념이라고 할 수 있음
 - 촬영 기선 거리가 짧은 영상을 주로 사용하기 때문에 최대한 많은 자료를 이용해 지표 변위를 관찰할 수 있으나, 계산 방식으로 인한 오차 발생 가능성이 높은 단점이 있음
 - PSInSAR(Persistent Scatterer SAR Interferometry, 고정산란체 간섭기법)는²⁰⁾ 고정산란체(위치가 변하지 않으면서 전파의 산란이 많이 일어나는 객체)를 활용하여 SAR 영상에서 발생하는 문제(잔상, 대기산란, 궤도 효과 등)를 효과적으로 제거하여 정밀한 지표 변위를 측정하는 방법임²¹⁾
 - PSInSAR는 최소 16장의 시계열 영상을 비교해 지표 변위를 얻는 방식으로 도심지에서는 효과적이지만, 고정산란체가 적은 자연 지형에서는 효과가 감소함
 - TCPIInSAR(Temporarily Coherence Point InSAR)는 PSInSAR와 SBAS의 단점을 개선하기 위해 고안된 방법임²²⁾

19) National Research Council of Italy. Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry.

http://www.irea.cnr.it/en/index.php?option=com_k2&view=item&id=77 (access April 28, 2021)

20) A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca. 2001. Permanent scatterers in sar interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.39(1): 8-20.

21) 김상완. 2011. SAR Interferometry 기술과 동향. 전자파기술, 22권 6호: 101-113.

4. SAR 영상 활용사례와 시사점

1) 국내 사례

□ 허준, 최시경(2010)은 문헌조사를 통해 SAR 영상 레이더로 탐지할 수 있는 활용 분야와 분석기술을 검토, 변위 측정에 특화된 SAR 영상이 다양한 지형변화 탐지에 폭넓게 활용되고 있음을 보여줌

- 주요 지형변화 탐지 사례로 산사태로 인한 지형변화, 지하수층에 의한 지반침식, 극지방의 빙하이동 등에 활용되고 있으며, 이 밖에 해양 및 대기 관측에도 활용²³⁾

□ 김상완 외(2005)는 목포시의 매립지 지반침하 현상을 정량적으로 관측하기 위해 JERS-1 SAR 영상을 이용하여 약 6년간 목포시에서 발생한 침하량을 측정

- 이 연구는 시계열 데이터 분석을 통해 목포시에 조성된 매립지가 연간 최대 4cm의 침하가 일어나고 있음을 확인하였음²⁴⁾

□ 김상완(2010)의 연구에서는 SBAS DInSAR와 PSInSAR 기법의 비교를 통해 DInSAR는 시계열 분석에 장점이 있고, PSInSAR는 좁은 지역의 분석에 특징점이 있음을 확인

- 반면, 지형 변이 분석의 정확도 측면에서 특정 분석기법이 변위 관측 정확도에 서 우위를 나타낸다고 할 수 없음을 확인하였음²⁵⁾

□ 홍승환 외(2013)의 연구에서는 시뮬레이션 분석을 통해 SAR 영상의 위치 정확도에 영향을 끼치는 변수로 센서 내 전자적 시간 지연, 활용 DEM의 정확도, 대기 지연 현상 등을 제시

- 그러나 이 연구는 단일 SAR 영상의 기하 위치 정확도 분석 연구이며, DInSAR

22) 조민지. 2013. 시계열 지표 변위 관측기법(TCPIInSAR와 SBAS)을 이용한 미국 알래스카 어거스틴 화산활동 감시. 대한원격탐사학회지. 29권 1호: 21-34.

23) 허준, 최시경. 2010. Interferometric Synthetic Aperture Radar(InSAR)의 활용. 방재연구지. 11권 3호: 108-118

24) 김상완, 김창오, 원종선, 김정우. 2005. 영상레이더를 이용한 목포 지반침하 관측. 자원환경지질 38권 4호: 381-394.

25) 김상완. (2010). 다중시기 SAR 영상을 이용한 시계열 변위 관측기법 비교 분석. 대한원격탐사학회지, 26(2), 143-151.

및 PSInSAR 기법을 활용한 분석 결과에서 DEM 정확도는 큰 영향이 없는 것으로 나타남²⁶⁾

□ 한향선 외(2015)는 남극의 테라노바만 지역을 14개월간 촬영한 COSMO- SkyMed SAR 영상을 이용하여 정착 해빙과 유빙에 대한 시공간적 변화를 관찰하였음

- 이 연구는 62장에 달하는 영상을 분석해 시간이 지남에 따라 해빙과 유빙의 면적이 계속해서 변화하는 양상을 확인하였음²⁷⁾

□ 박성재 외(2019)는 TerraSAR-X로 2년간 촬영된 백두산 천지 지역의 영상을 분석하여 얼음의 면적 및 기온의 변화를 관측하였음

- 이 연구에서는 칼데라 호수인 천지의 수온 변화(상승)의 분석을 통해 화산활동에 대한 모니터링 가능성을 제시하였음²⁸⁾

□ 김한별 외(2017)는 6개월 간 TerraSAR-X 위성이 촬영한 세종~광주 사이의 호남선 철도 구간 영상을 이용, 철로의 평균 지반 침하량을 추정하는 연구를 수행한 바 있음

- 이 연구는 연약지반의 침하에 따른 철도 인프라의 안전성 문제 모니터링 방법으로 SAR 영상 활용에 주목하였음
- 2015년 국회 교통위원회에서 확인된 호남선 고속철도 182.3km 구간의 약 16% (29.11km) 지역에서 3cm 이상의 지반침하를 확인하고, SAR 영상을 통해 침하량을 측정하고자 함
- 대상 지역은 전북 정읍시 하모동으로 25번 호남고속국도 인근의 고속철 구간이며, 국가지정 연약지반 지역으로 다른 지역보다 침하가 많이 발생하는 지역임
- PS-InSAR 방식을 이용하기에는 영상과 고정산란체의 수가 불충분(PS-InSAR는

26) 홍승환, 손홍규, 김상필, 장효선. "고해상도 SAR 영상의 기하 위치정확도 관련 중요변수 분석." 한국측량학회지 31.6-1 (2013): 447-454.

27) 한향선, 김연춘, 진효림, 이훈열. 2015. InSAR 긴밀도 영상을 이용한 남극 장보고기지 인근 정착해빙의 연간 변화 분석. 대한원격탐사학회지, 31권 6호: 501-512.

28) 박성재, 이슬기, 이창욱. 2019. TerraSAR-X 위성영상을 활용한 백두산 천지 얼음 면적 변화 모니터링. 대한원격탐사학회지 35권 2호: 327-336.

16장 이상의 시계열 영상 필요)하여 D-InSAR(Differential InSAR)를 적용

- 기존 유사 연구들이 L밴드 영상을 사용한 데 반해, 이 연구는 상대적으로 해상도가 높고, 파장이 짧은 Terra-SAR의 X밴드 영상을 사용하였음
- 2016년 8월과 2017년 1월 촬영된 두 영상을 비교한 결과 6개월 간 최대 약 7mm의 침하가 있는 것으로 분석되었으며,
- 철도가 지나가는 지역의 6개월 누적 침하량은 약 4.6mm로 나타나 SAR 영상을 이용한 철도 인프라의 침하량 모니터링 가능성을 확인하였음²⁹⁾

□ 기타 관련 연구로 한현경(2019), 염광영·김문철(2017) 등의 연구가 있음

- 한현경(2019) 등은 텍스트마이닝 기법을 적용하여 영상 레이더의 활용 방안을 도출하였으며, 토양수분 및 홍수감시 등에 특화된 영상 레이더 특성을 활용해 토지피복분류를 세분류할 수 있을 것으로 분석하였음³⁰⁾
- 염광영·김문철(2017)은 SAR 영상 내 객체 탐지/인식을 위한 딥러닝 기법을 설명하고, SAR 영상에 적용하여 차량, 인공구조물을 탐지해내는 기술에 대한 동향을 소개하였음³¹⁾

29) 김한별, 윤홍식, 염민교, 이원응. 2017. D-InSAR 기법을 이용한 호남선 고속철도 구간 지반 침하 분석. 대한공간정보학회지, 25권 3호: 35-41.

30) 한현경, 이명진. 2019. 차세대중형위성 5호 활용 확대를 위한 영상레이더의 환경분야 활용 방안 연구. 모니터링. 대한원격탐사학회지 35권 6호: 1251-1260.

31) 염광영, 김문철. 2017. 딥러닝을 이용한 SAR영상 목표물 인식 연구 동향. 한국통신학회지(정보와통신), 34권 7호: 31-39.

2) 국외 사례

- Abdulkadir Ozden et al(2016)은 교량의 침하와 변위, 도로 표면의 변형, 지리적 재해 및 싱크홀 감지 등 도로 및 인프라 모니터링 분야에서 SAR 영상의 활용 가능성을 확인
 - 도로 및 인프라 모니터링 체계의 전체적인 효율성을 개선하고 총비용을 절감하는 보완적 역할에 대해 제안하였음³²⁾
- Cascini, L et al(2013)은 중간해상도 ERS-ENVISAT 및 고해상도 COSMO- SkyMed 영상과 DInSAR 분석 방법을 이용해 이탈리아 남부지역의 지반침하 탐지를 수행
 - 중간해상도의 영상은 넓은 지역을 모니터링하며 지반침하를 사전 탐지하는데 유용하고, 고해상도 영상은 건물 손상탐지에 유용하다는 결과를 제시하였음³³⁾
- Bruckno et al(2013)은 InSAR 기법을 활용하여 싱크홀, 암석 경사면 등 지질학적 위험과 교량 등의 인프라 파손에 대한 조기 감지 가능성과 유용성을 파악하는 연구를 수행
 - 분석 결과의 확인을 위해 분석된 싱크홀의 위치를 GIS 소프트웨어를 이용해 지형도와 중첩 시켜 확인하는 방식으로 실제 현장의 침하 및 파손 부위를 검증³⁴⁾
- Biondi(2020) 등의 연구에서는 2019년 붕괴된 이탈리아의 모란디교(Morandi Bridge)의 사례 등을 통해 SAR 영상의 진폭정보를 활용하여 교량에 발생한 밀리미터(mm)단위의 균열을 탐지하는 방법을 제시
 - SAR 영상 분석을 통해 교량의 진동에너지 변화를 탐지하고 이상징후를 발견할 수 있음을 확인하였음³⁵⁾

32) Abdulkadir Ozden, Ardesir Faghri, Mingxin Li, Kaz Tabrizi. 2016. Evaluation of Synthetic Aperture Radar Satellite Remote Sensing for Pavement and Infrastructure Monitoring. Procedia Engineering. Vol.145: 752-759.

33) L. Cascini, D. Peduto, D. Reale, L. Arena, S. Ferlisi, S. Verde, G. Fornaro. 2013. Detection and monitoring of facilities exposed to subsidence phenomena via past and current generation SAR sensors. Journal of Geophysics and Engineering. Vol.10(6).

34) Bruckno, Brian S., Andrea Vaccari, E. Hoppe, W. Niemann and E. Campbell. 2013. Validation of Interferometric Synthetic Aperture Radar as a Tool for Identification of Geohazards and At-Risk Transportation Infrastructure. 63th Highway Geology Symposium.

-
- Zhu Wu(2019) 등은 ALOS-1(L-band) 및 COSMO-SkyMed(X-band) 영상을 사용하여 중국 쿤밍 지역에 대한 지반침하 여부를 InSAR 분석 방법을 활용해 수행
 - 축적된 시계열 영상을 이용해 연간 최대 35mm의 지반침하가 있었음을 확인 하였으며, 침하의 원인이 토양, 건물 하중, 지하수층 등에 의한 것임을 밝혀냄³⁶⁾

3) SAR 영상 활용 시사점

- 국내·외 연구사례에서 살펴본 바와 같이 SAR 분석기법은 수 mm ~ 수십 mm의 지반 변위 등의 측정이 가능하였으며, 시계열 영상을 활용해 상대 변위를 측정하는 것임
 - 철도 인프라의 변이 관측을 위한 영상 분석 방법으로는 PSInSAR와 DInSAR가 유력한 분석 방법으로 판단됨
 - PSInSAR 방식으로 지상의 변위를 정밀 측정하기 위해서는 영상좌표를 지상 실측자료(Ground Truth)를 이용해 절대좌표로 변환해야 함
 - PSInSAR 방식은 지상 실측자료 취득을 위해 고정산란체(Persistent Scatterer)에 해당하는 반사판 등을 지상(또는 건물의 옥상)에 설치하고 절대위치를 측량
 - 충분한 시계열 영상자료 취득이 어렵거나 고정산란체가 적어 PSInSAR 방식을 적용하기 어려운 경우 대안으로 DInSAR가 유력한 방법론임
 - DInSAR의 경우 항공측량에서 사용되는 지상기준점(Ground Control Point, GCP)에 의한 지리적 참조(Georeferencing)를 통해 지상 절대좌표 확보가 가능

35) Biondi F, Addabbo P, Ullo SL, Clemente C, Orlando D. 2020. Perspectives on the Structural Health Monitoring of Bridges by Synthetic Aperture Radar. Remote Sensing. 12(23).

36) Zhu W, Li W-L, Zhang Q, Yang Y, Zhang Y, Qu W, Wang C-S. 2019. A Decade of Ground Deformation in Kunming (China) Revealed by Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) Technique. Sensors. 19(20).

□ 선행연구에서 철도 인프라와 같이 선형의 광범위한 영역의 지반 변이 탐지에는 고해상도보다 중간해상도가 비용 측면에서 효율적인 것으로 나타나며, 영상 촬영 방식은 영상 취득 및 분석을 위한 비용과 관련이 있음

- Sentinel, COSMO-SkyMed, TerraSAR-X 등 무료로 공개하고 있는 SAR 영상을 활용하는 경우가 많으나, 대부분 기존에 촬영·저장된 데이터를 연구 목적에 맞게 활용하고 있음
- 특정 대상 또는 대상 지역에 대해 원하는 시기의 SAR 영상을 취득하기 위해서는 상업용 영상취득이 요구되며, 취득 영상의 해상도가 고해상도일수록 촬영 면적이 좁아 일반적으로 비용이 더 많이 소요된다는 점을 고려해야 함

□ 현재 우리나라는 SAR 영상 활용을 위한 전문인력이 매우 부족한 현실이며, 특히, 철도 인프라의 안전 점검 및 운영 관련 인력은 원격탐사에 대한 인식 자체가 없어 해당 분야에 대한 역량 강화와 기술전파가 요구됨

- 중장기적으로 SOC 디지털화를 위해 IoT 센서 도입에 따른 전문인력 양성뿐만 아니라 SAR와 같은 위성 원격탐사 전문인력 양성도 검토가 필요함



CHAPTER 3

철도 인프라 관리현황과 문제점

- 1. 철도 인프라 관리현황 39
- 2. 철도 인프라 관리 문제와 시사점 48

03 철도 인프라 관리현황과 문제점

1. 철도 인프라 관리현황

1) 철도 인프라 관리 및 안전에 관한 제도

- 우리나라는 철도망의 신속한 확충과 체계적인 관리를 위해 철도의 건설 및 철도시설 유지관리에 관한 사항을 법률로 규정하여 시민의 안전을 확보하고 복리를 증진하고자 함
 - 철도 인프라의 건설 및 유지관리에 관한 관계 법령에는 「철도의 건설 및 철도 시설 유지관리에 관한 법률」이 있음

- 또한, 국토교통부는 철도 안전 확보를 위해 필요한 사항을 규정하고, 철도 안전관리체계를 확립해 공공복리를 증진하고자 하는 목적으로 「철도안전법」을 제정하였음
 - 「철도안전법」의 주요 내용으로, 제5조(철도안전 종합계획)에 따라 국토교통부장관은 5년마다 철도 안전에 관한 종합계획을 수립해야 함
 - 철도 안전 종합계획에는 철도 안전에 관한 시설의 확충, 개량 및 점검 등에 관한 사항과 철도 안전에 관한 연구 및 기술개발에 관한 사항을 포함하고 있음
 - 이 밖에도 시설물의 안전 점검과 적정한 유지관리를 통해 재해와 재난 예방을 목적으로 제정된 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」이 있음(표 3-1 참고)

표 3-1 | 철도 인프라 관련 주요 법령

	법률	시행령	시행규칙
1	철도의 건설 및 철도시설 유지관리에 관한 법률	철도의 건설 및 철도시설 유지관리에 관한 법률 시행령	철도의 건설 및 철도시설 유지관리에 관한 법률 시행규칙
2	철도안전법	철도안전법 시행령	철도안전법 시행규칙
3	시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법	시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행령	시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행규칙

자료: 저자 작성

- 「철도의 건설 및 철도시설 유지관리에 관한 법률」은 주요 법령 중 철도시설 유지관리와 직접 관련성이 있으며, 국토교통부장관은 법 제29조(정기점검의 실시 등) 4항에 따라 「철도시설의 정기점검 및 성능평가에 관한 지침」을 제정하고 고시하여야 함
 - 정기 점검은 지침 제3조(정기점검 일반)에 따라 "경험과 기술을 갖춘 자가 육안이나 점검기구 등을 사용하여 철도시설의 안전성과 성능을 조사"하도록 점검 방법을 명시
 - 정기점검을 통해 구조물, 궤도시설, 건축물 등으로 분류되는 철도시설들에 대해 성능평가를 실시하고 있음
- 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」은 교량·터널·항만·댐·건축물 등 구조물과 부대시설을 시설물로 정의하고 있으며, 철도 인프라와 관련해 철도 교량과 터널 등에 대한 안전 및 유지관리 내용을 포함
 - 동법 제11조(안전점검의 실시), 제12조(정밀안전진단의 실시), 제13조(긴급안전점검의 실시) 및 시행령 제8조, 제10조 및 제28조에 따라 정기 점검 및 성능평가를 실시(표 3-2 참고)
 - 하위 훈령인 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 지침」에서는 정기안전점검, 정밀안전점검, 긴급안전점검 및 정밀안전진단, 성능평가의 실시방법·절차와 실시비용 산정기준, 평가 등에 필요한 사항을 정하고 있음
 - 타 법령과 유사하게 안전 점검은 관련 경험 및 기술을 가진 인원이 수행하도록 규정하고 있으며, 점검을 통해 안전 등급을 지정하고, 등급에 따라 성능평가의 시기를 결정

표 3-2 | 안전점검, 정밀안전진단 및 성능평가 시기

안전 등급	정기안전 점검	정밀안전점검		정밀안전진단	성능평가
		건축물	건축물 외 시설물		
A등급	반기에 1회 이상	4년에 1회 이상	3년에 1회 이상	6년에 1회 이상	5년에 1회 이상
B·C 등급		3년에 1회 이상	2년에 1회 이상	5년에 1회 이상	
D·E 등급	1년에 3회 이상	2년에 1회 이상	1년에 1회 이상	4년에 1회 이상	

자료: 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행령 [별표 3]

□ 앞서 살펴본 법령에서 철도와 같은 국가 인프라의 관리는 정기 점검 및 성능평가를 위한 자격요건을 갖춘 기술자가 관리주체의 유지관리계획에 따라 점검을 수행하고 있음

- 점검 방식은 현장 조사가 중심이 되며, 육안 및 계측장비를 통한 조사방식이 지침에 명시되어 있어 새로운 기술 도입을 통한 효율적인 점검 방식 도입을 위해서는 제도개선이 검토되어야 함

2) 철도 인프라 계측기술 및 점검 비용

(1) 철도 인프라의 현장계측 및 진단

□ (현장계측 일반) 철도 분야의 현장계측은 건설과 진단, 유지관리를 목적으로 단계별로 수행됨

- 건설단계에서는 선형 설계를 위한 기본 계측이 수행되고, 건설착수 시에는 본격적인 구조물 계측이 수행되며, 건설이 완료되는 시점까지 지속적으로 계측을 시행함
- 기본 계측장비로는 3차원 위치의 측량을 위해 토탈스테이션(totalstation)이 사용되며, 전문인력이 현장에서 수행하므로 정확도는 높으나 비용과 시간이 많이 소요됨

- 특히, 고속철도의 운영·관리단계에서는 안전을 확보하기 위해 선로의 침하를 주기적으로 측정하며, 지반침하를 계측하는 방법으로 토털스테이션을 이용한 정밀수준측량, 진동가속도계와 같은 센서 또는 궤도검측차 등의 방법이 사용됨

□ 정밀수준측량은 계측 정확도가 높고 고가의 센서를 선로에 매설할 필요가 없다는 장점이 있으나 특정 지점만 계측되기 때문에 광범위한 선로 모니터링에는 효용성이 떨어짐

- 현재 고속철도 호남선 구간 약 188km, 경부선 2단계 120km 구간이 현장 측량 기반으로 모니터링을 수행 중이며, 5~30m 간격으로 측정점을 설치하고 주기적으로 정밀수준측량(레벨측량)을 실시,
- 그러나 철도 운행이 없는 새벽 시간(하루 4~5시간)에만 현장 접근이 가능하다는 점을 고려할 때 현재 방식은 매우 비효율적임(그림 3-1 참고)
- 고속철도를 비롯한 철도선로 침하 등에 대한 모니터링은 점(point) 단위 계측보다 선로 전반에 대한 (선형)공간단위 계측이 필요함

그림 3-1 | 고속철도궤도의 침하측정



자료: 한국철도시설공단. 2012. 고속철도 콘크리트궤도 유지보수기준 정립방안 연구.

□ 진동가속도계(센서)는 지반변형에 따라 콘크리트 궤도와 지반 사이에 발생한 이격 또는 노반이 연약해지면서 열차 운행 시 궤도의 진동이 발생하는 현상을 이용하여 정상 지반

과의 비교를 통해 변형 여부를 모니터링 함

- 최근 SOC 디지털화의 일환으로 IoT 센서 기반의 원격 점검기술 도입이 시도되고 있으나 철도 인프라의 손상 및 결함평가를 위한 데이터로 활용하는 데는 한계가 있음¹⁾
- 이 밖에도 궤도검측차를 이용한 간접 조사 방법이 있으나, 운행이 지속됨에 따라 발생하는 거리오차 등의 문제로 현장 조사를 보완하는 방법으로 활용됨

그림 3-2 | 진동가속도계 부착 궤도



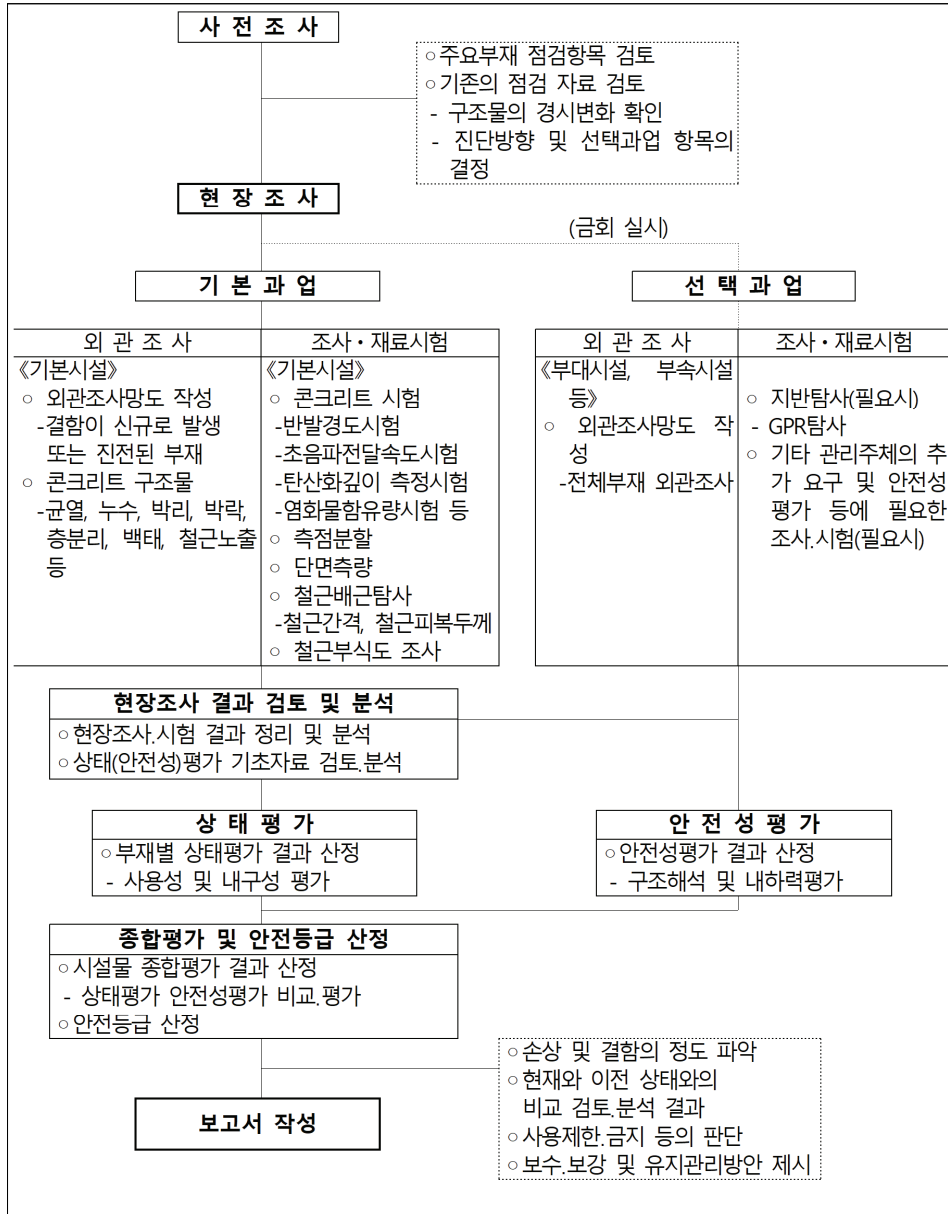
자료: 한국철도시설공단. 2012. 고속철도 콘크리트궤도 유지보수기준 정립방안 연구.

□ (구조물 진단 일반) 주요 구조물의 관리를 위한 현장계측은 『시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(안전점검·진단 편)(2019. 09, 국토교통부/한국시설안전공단)』에 의거 다음 (그림 3-3)의 절차에 따라 수행하고 있음

- 현장 조사가 중심이며, 외관 조사 및 재료시험에 따른 결과 검토 및 분석을 통해 철도구조물에 대한 진단계측을 수행함

1) 김현기. 2017. IoT 기반 철도재난 조기경보시스템. 국토안전관리원 시설안전지, 49호: 65-74.

그림 3-3 | 철도구조물 진단계측 절차(국토교통부, 2019)



자료: 국토안전관리원, 2019. 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침」[안전점검·진단 편]

□ (교량 구조물 모니터링) 국내에서는 거의 매년 교량 붕괴사고가 발생하고 있으며, 교량의 상판 유실, 교각 전도, 교대균열 등 일단 발생하면 막대한 재산피해와 복구시간이 요구됨

- 특히 철도교는 도로교와 달리 우회 노선을 이용하거나 부분적 복구가 불가능하므로 사고 발생 시 국가 물류대란을 비롯해 경제적인 측면에서 막대한 지장을 초래함
- 현재 교량 등의 구조물 변형 모니터링도 인력투입을 통한 현장계측에 의존하고 있으며, 계측 결과의 신뢰도가 매우 낮은 수준이며²⁾, 다음 <표 3-3>은 연도별 국내 교량의 붕괴 수를 나타냄

표 3-3 | 연도별 국내 교량의 붕괴 수

년 도	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	평균
붕괴교량수	37	255	51	112	89	162	89	90	28	140	105.30

자료: 여운광, 1995, 국내의 세굴에 의한 피해현황, 수자원학회지, 28권 6호: 35-40.

(2) 철도 인프라 안전 점검 비용

□ 국토교통부는 도로, 철도, 국가하천, 댐 등 소관 국가 인프라(SOC)의 안전 및 유지관리를 담당하며, 인프라 분야에 매년 수조 원의 예산을 집행하고 있음

- 2018년 기준으로 철도 분야의 안전 및 유지관리에는 약 8,600억 원의 예산이 수립됨(표 3-4 참고)

2) 이일화 외, 2020, CPM기반 손실정보 구축모델을 활용한 교각붕괴 진단기술 개발, 한국철도기술연구원.

표 3-4 | 국토교통부 소관 시설물 안전 및 유지관리 예산 현황(2017년 기준)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018 (안)
계	8,468	9,573	11,910	13,431	15,143	14,178	20,164	20,652	22,351	23,724
도로관리	5,323	6,070	6,539	6,791	7,810	7,164	11,459	11,972	13,100	13,622
철도관리	3,145	3,503	3,374	4,305	5,336	5,109	7,083	7,122	7,841	8,639
국가하천 유지보수	0	0	1,997	2,335	1,997	1,905	1,622	1,558	1,410	1,413
댐 안전성 강화	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50

자료: 국회예산정책처(2017), p.7 표 수정 요약

□ 2016년 「철도통계연보」에 따르면 2016년도 기준 호남고속철도 전체 구간의 침하계측 실적을 포함한 안전점검 예산은 약 11억 원임³⁾

- 호남고속철도 전체 구간인 183.8km를 고려하여 현장 조사를 수행할 때 1km당 약 600만 원의 점검 비용이 소요되는 것으로 추정됨

□ 2019년 「철도통계연보」에 따르면, 한국철도공사에서 집행한 시설 유지보수⁴⁾ 총액은 약 1,030억 원이며, 그중 선로를 포함한 토사면, 교량 등의 안전진단에만 약 308억 원이 소요됨

- 2019년 기준 우리나라의 철도 총연장이 4,274.2km인 것을 감안 하면, 철도 안전진단에 1km당 740만 원이 소요되는 것으로 추정

□ 철도시설의 유지보수 대상 항목은 다음 <표 3-5>에서 확인할 수 있으며, SAR 영상을 이용하여 변위 관측이 가능할 것으로 예상되는 대상 시설은 분류표에 “*”로 표기하였음

- SAR 영상으로 관측이 가능한 시설은 주로 토목 및 선로시설이며, 지반 변이로 인한 철도 운행의 안전성에 영향을 주는 시설이 중심임
- 토목 시설 중 터널은 위성에서 관측 불가능해 현장 조사가 불가피함

3) 국토교통부 철도산업정보센터. 2017. 2016년 철도통계연보. <http://www.kric.go.kr/jsp/handbook/sta/statisticsTechList.jsp> (2021년 8월 2일 검색)

4) 유지보수 내역에는 교량보수, 정기진단, 정밀안전진단, 정밀안전점검, 사면보수 및 점검 등이 포함됨

표 3-5 | 철도시설 유지보수를 위한 분류표

시설구분	시설 대분류	시설구분	시설 대분류	시설구분	시설 대분류
토목	교량*	건축	승강장	신호	선로전환기장치
	터널		편의시설		안전설비
	옹벽*		지원시설		기타 신호설비
	방음벽*		조경시설	통신	전송설비
	사면*	설비	환기설비		통신케이블
	울타리		배수설비		기타 통신설비
선로	레일*		자동제어설비	부대	기타부대시설
	침목*	전철전력	송변전설비		
	분기기		전차선로*		
	도상		전력설비		
	기타		-		

자료: 2016 철도통계연보(국토교통부 철도산업정보센터)

(3) 철도 인프라 점검 인력 현황

□ 한국시설안전공단이 2010년에 수행한 「시설물 관리주체 안전 및 유지관리 실태조사」에
서는 교량, 터널, 역사, 옹벽 등 철도시설물의 안전관리를 위해 단위 시설물 당 안전관리
인력 규모를 계산하였음

- 한국철도공사, 한국철도시설공단, 광역시 도시철도공사 등 관리기관 전체를
대상으로 시설물 규모별 안전관리 인력 규모를 비교하기 위해 각 관리주체의
시설물 규모당 인력수 및 투입인력 비중을 계산
 - 교량 10km 당 안전관리 인력은 평균 16.2명
 - 터널 10km 당 안전관리 인력은 평균 2.4명
 - 철도 역사 100㎡ 당 안전관리 인력은 평균 0.016명
 - 철도 옹벽 10km 당 안전관리 인력은 평균 2.7명
 - 1인당 철도 교량 관리개수는 평균 26.2개, 관리길이 평균 2,380.8m
 - 1인당 철도 터널 관리개수는 평균 6.6개, 관리길이 4,591.3m

- 국토교통부 철도안전정책관의 「철도안전 전문인력 수급·양성 계획(2017~2021)」에 따르면, 2016년 기준 철도교통 안전관리 인력은 전체 10,139명으로 파악됨
- 감사원의 「2019년 철도안전 관리실태 감사보고서」에 따르면, 2019년 2월 기준 철도시설 유지보수 인력 총원은 7,276명이며 그중 시설 분야 인력은 4,179명임(표 3-6 참고)

표 3-6 | 철도시설 유지보수 인력 현황(2019년 2월 기준)

구분	합계	시설분야	전기분야
계	7,276	4,179	3,097
본사(시설·전기 기술단)	115	58	57
지역본부 등 현업	7,161	4,121	3,040

자료: 감사원 「2019년 철도안전 관리실태 감사보고서」

2. 철도 인프라 관리 문제와 시사점

(1) 철도 인프라 관리 문제와 이슈

- 철도 인프라 관리현황을 통해 살펴본 문제점은 안전점검 방식과 그에 따른 비용(시간/인력)이 많이 소요된다는 점과 많은 비용의 지출에도 불구하고 안전진단의 신뢰성 확보가 어렵다는 점임
 - 좀 더 구체적으로 살펴보면 기존 안전점검(정기/긴급점검, 정밀진단) 방식은 기술자가 현장을 방문하여 육안과 점검기구(측량기구) 등을 사용하여 안전성과 성능을 조사하도록 제도적으로 규정
 - 2019년 현재 우리나라의 전국 철도망 총연장은 4,274.2km이며, 2030년까지 약 606km를 신설해 5,137.2km로 늘어날 전망이다⁵⁾

5) 한국교통연구원. 2021. 제4차 국가철도망 구축계획 수립연구. 공청회 자료.

- 이러한 점을 감안 할 때 현장 조사에 100% 의존하는 방식은 매우 비효율적이며, 철도 운행이 멈추는 야간에 작업을 해야 하는 시설점검 인력의 안전 문제도 이슈가 될 수 있음

□ 정부는 '20년 7월 발표한 한국판 뉴딜 종합계획에서 국민 안전을 위한 SOC 디지털화를 10대 대표과제로 선정, SOC 디지털화를 통해 안전하고 효율적인 SOC 관리를 추진 중임

- 그러나, 현장에서는 SAR 영상과 같이 완전히 새로운 접근과 디지털 전환에 대한 인식 부족, 제도적으로 규정된 인프라 관리방식으로 인해 디지털 전환이 더디게 진행

(2) 시사점

□ 문헌 조사와 기존 철도 인프라의 안전관리 현황 검토를 통해 기존 철도 인프라의 안전 및 관리방식의 문제점을 도출하고, 이를 보완하는 방법으로 SAR 영상의 활용 가능성을 살펴볼 수 있었음

- 안전점검 인력에 의한 현장 조사 중심의 철도 인프라 관리가 가진 비효율성과 낮은 신뢰도를 보완하기 위한 새로운 접근이 요구됨
- 아울러 정부가 추진 중인 'SOC 디지털화'를 가속화 하기 위해 센서 기반의 철도 인프라 관리와 더불어 특정 지점에 대한 계측이 아니라 철도망 전 구간에 대한 데이터 기반의 안전 점검 및 관리를 위한 효율적인 점검 방식이 제안될 필요가 있음

□ SAR 영상을 활용해 가능한 것과 기존 방식을 보완할 수 있는 부분은 다음의 몇 가지가 있으며, SAR 영상의 장점을 활용하기 위해 중장기적으로 제도개선 검토가 요구됨

- 첫째, 기존의 현장점검 방식이 수백~수천km에 달하는 선형 인프라인 철도노선과 시설물에 대해 전 구간을 점검하는 것이 아니라 특정 지점만을 선별적으로 점검하는 방식임에 반해 SAR 영상의 활용은 전 구간에 대한 미소 변이 탐지가 가능

-
- 둘째, 현장점검 방식은 철도 운행이 멈춘 새벽 시간(1일 4~5시간) 만 점검이 가능해 시간적 제약과 많은 인력 및 비용이 소요는 반면, SAR 영상은 주·야간, 기후조건에 영향을 받지 않고 데이터 취득과 분석을 통해 변이 분석 가능
 - 셋째, 정부가 추진 중인 SOC 디지털화의 궁극적인 지향점은 다양한 센서와 데이터 기반의 디지털 트윈으로 귀결될 가능성이 높음. 즉, 디지털 트윈으로 이행하는 과정에 전 구간 실시간 모니터링을 위해 IoT 기반 센서(진동가속도계) 뿐만 아니라 SAR와 같은 영상센서를 이용한 SOC 디지털화 지원방안도 고려할 필요가 있음

□ 다만, SAR 영상의 활용이 기존 현장점검 방식의 단점을 일부 보완할 수 있으나 현재 SAR 영상을 공급할 수 있는 위성의 수가 제한적이고, 신뢰성 있는 분석 방법에 대한 충분한 실증연구가 필요

- 원하는 목적과 분석에 적합한 영상의 수급에 한계가 있어 SAR를 활용하는 방식이 기존 방식을 대체하기 위해서는 중장기적인 관점에서 접근이 필요함
- 또한, 학술연구 수준의 방법론 연구가 아니라 실제 철도 전문기관의 전문가와 영상 전문가의 협업을 통해 현장에 적용 가능한 방법론 도출과 충분한 실증연구 수행이 필요함



CHAPTER 4

SAR 영상을 활용한 철도 인프라 관리 방향

- 1. SAR 영상 활용 기본방향 53
- 2. SAR 영상을 활용한 철도 인프라 관리 방향 56

04 SAR 영상을 활용한 철도 인프라 관리 방향

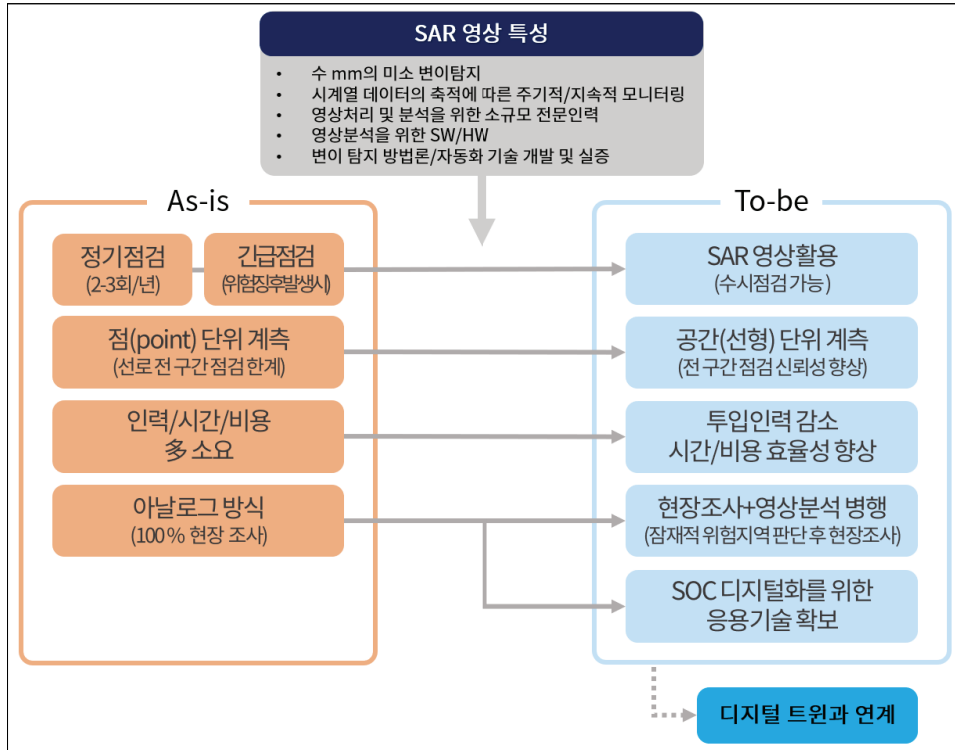
1. SAR 영상 활용 기본방향

1) SAR 영상 특성 활용

□ SAR 영상이 철도 인프라에 대한 현장 안전 점검을 대체할 수는 없으나 SAR 영상의 장점을 활용해 현장 조사의 문제점을 보완하는 것은 가능할 것임

- SAR 영상의 특징점은 수 mm의 미소 변이 탐지가 가능하고, 영상처리와 분석에 필요한 소규모 전문인력으로 광범위한 선형 인프라 모니터링이 가능(<그림 4-1> 참고)
- 기존 아날로그 방식으로 수행되던 정기점검, 긴급점검 등을 SAR 영상으로 전체 모니터링하고, 변이가 관측된 지점을 중심으로 현장점검을 수행, 점검에 필요한 시간과 인력 효율성을 향상하는 방향으로 철도 인프라를 관리
- 다만, 변이 탐지 방법론과 모니터링의 자동화에 관한 연구와 기술개발이 전제되어야 하며, 이러한 조건이 만족한다면 기존 방식 대비 현장 조사에 따른 소요 시간, 인력 및 비용 측면에서 상당 부분 절감이 가능할 것으로 판단
- 아울러 정기 및 긴급 점검 등의 수행 시 일부 지점이나 구간을 선택해서 조사하는 것이 아니라 선로 전 구간에 대한 점검으로 안전 점검의 신뢰성 향상에도 기여가 가능할 것임

그림 4-1 | SAR 영상 활용에 따른 철도 인프라 관리 As-is To-be



자료: 저자작성

2) SOC 디지털화 및 디지털 트윈과 연계

□ SOC 디지털화는 정부가 추진 중인 한국판 뉴딜 종합계획 10대 대표과제 중 하나이며, 4대 분야 핵심 인프라(도로/철도, 공항/항만, 수자원, 재난대응) 관리체계 구축을 목표로 하고 있음(그림 4-2 참고)

- 교통인프라 관리체계에 관한 세부 사업으로 C-ITS, 철도 통합무선망 구축, 철도 무인검측시스템, 교량/비탈면 IoT 상시 계측 및 관리시스템 구축 등이 있음
- 특히, 철도 인프라 관련 사업은 대부분 시설물에 IoT 기반의 계측 센서를 부착

하고 실시간 모니터링을 통해 국민의 안전과 편리한 생활 환경을 조성하고자 함

- 2025년까지 4대 핵심 인프라에 총사업비 14.8조 원을 투입할 예정으로 철도 전 구간에 IoT 센서와 4세대 철도무선망 구축에 수조 원이 투입될 예정임
- IoT 기반 상시 계측 및 관리시스템은 현장점검을 보완 또는 부분적으로 대체 하고 상시 관측이라는 장점이 있으나 초기 투자 비용과 시설설비 및 유지관리가 어렵고, 그에 따라 많은 추가예산이 소요될 것으로 추정됨

그림 4-2 | SOC 디지털화 추진 로드맵(발췌)



자료: 과학기술정보통신부 디지털 뉴딜 홍보사이트 발췌)

□ 그에 반해 위성 원격탐사 기반 안전 점검은 상대적으로 적은 비용으로 전체 철도망을 주기적으로 관측할 수 있는 장점이 있으며, 그 자체가 SOC 디지털화의 한 부분이면서 IoT 기반 SOC 디지털화와 연계 활용으로 시너지가 기대됨

- SOC 디지털화를 추진하는 많은 기관이 궁극적으로 도달하고자 하는 목표는 디지털 트윈과 연동한 SOC 상시 유지관리체계임
- IoT 센서 기반 SOC 디지털화의 상시모니터링 성과와 SAR 영상기반의 주기적 모니터링 방식이 디지털 트윈 기반 플랫폼에서 연계되면 더 효율적이고, 안전 하며, 신뢰성 높은 철도 인프라 관리체계가 마련될 것임

1) <https://digital.go.kr/front/promotion/policyView.do> (2021년 8월 3일 접속)

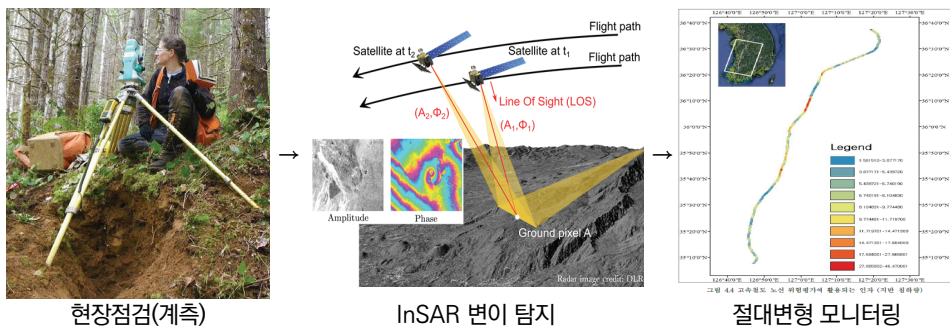
2. SAR 영상을 활용한 철도 인프라 관리 방향

1) SAR 영상을 활용한 변이 관측 적용성 실증

□ 철도 인프라의 안전하고, 효율적인 운영·관리와 SOC 디지털화의 기반으로 SAR 영상을 활용한 철도 인프라 변이 모니터링체계를 구축하고, 철도 관련 재난과 재해에 즉시 대응 필요

- 기존 현장점검과 InSAR 기법을 연계하여 선로 전 구간에 대한 미소 변이 탐지를 통해 절대 변형 모니터링을 수행(그림 4-3 참고)
- 이를 위해 PSInSAR, DInSAR, SBAS 등 선행연구에서 인프라 관리에 적합성이 높은 분석 방법 중 경제성과 효율성을 고려한 최적 기법을 선택하기 위한 실증연구 수행 필요
- 특히, PSInSAR 등 주요 방법론 적용을 위해 실제 철도 인프라 주변에 고정산란체를 설치할 통한 변이 탐지의 절대 정확성 확인 등 관련 연구수행 필요

그림 4-3 | 현장점검과 InSAR 기반 변이 모니터링 개념도



자료: 이일화, 김기현, 박정준, 여인호, 유민택, 윤희택. 2020. CPM기반 손실정보 구축모델을 활용한 교각붕괴 진단기술 개발. 한국철도기술연구원.

□ 철도를 비롯한 국가 시설물은 『시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법』에 따라 안전 등급(A~E) 별로 시설물의 정기 점검 횟수를 1년에 2~3회로 규정하고 있음

- 상시 이용자가 많고, 미소 변이에 의한 민감도가 높은 경부 및 호남 고속철도의 경우 약 600km에 달하는 선로시설에 대한 침하계측 등 현장 조사에만 연간 약 36억 원과 최소 600명의 시설점검 인력투입²⁾이 요구되는 것으로 추정됨

□ SAR 영상의 활용은 위성의 종류(예: Sentinel-1, COSMO-SkyMed, ICEYE 등)에 따라 다소 차이는 있으나, PSInSAR나 DInSAR의 적용에 적합한 중해상도(Strip Mode) 영상을 활용할 때 공간해상도 3~5m, 관측폭 30km × 80km로 촬영이 가능

- 경부 및 호남고속철도 약 600km의 선로시설에 대한 영상 촬영과 분석에 20장 내외의 영상이 소요될 것으로 추정되며, 상업용 SAR 영상(예: ICEYE)을 구입할 경우 약 3~4천만 원이 소요됨(그림 4-4 참고)
- 연간 2~3회의 정기 점검 횟수를 고려할 때 선로 전 구간에 대해 최소 3~4회 촬영이 필요하며, 약 0.9~1.6억 원이 소요될 것으로 추정
- 그 외에도 영상분석을 위한 1~2인의 전문인력과 영상분석용 SW/HW(약 1.5억 원)가 초기 투자 및 고정비용으로 소요될 수 있음

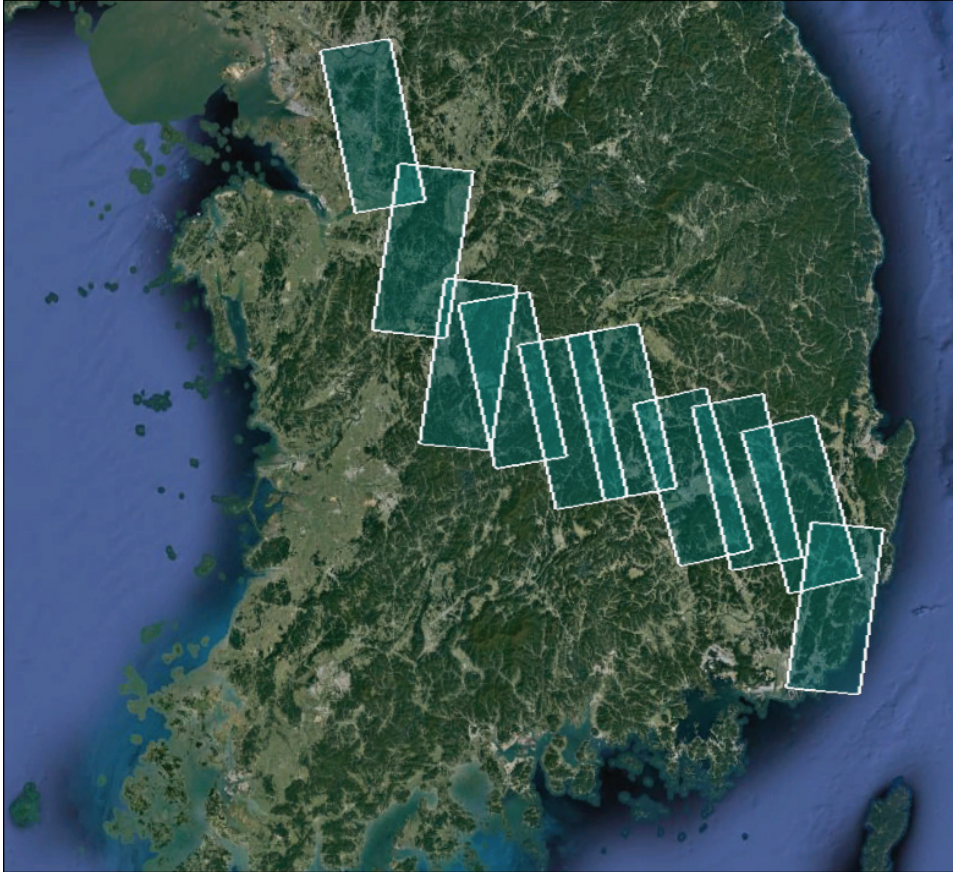
□ 우리나라는 우주개발 중장기 계획에 따라 고해상도의 SAR 위성 발사를 계획하고 있어 SAR 영상의 취득에 소요되는 비용은 향후 지속적으로 절감될 전망이다

- 이 외에도 미국과 EU를 비롯한 국제사회가 보유한 다양한 영상(Sentinel, COSMO-SkyMed 등)을 무상으로 이용할 수 있다면 영상 취득비용이 대폭 절감되기 때문에 International Charter, Sentinel Asia 등 국제협약체³⁾ 가입을 통해 안정적인 영상 자료공급원을 확보할 수 있음

2) 2019년 현재 전체 선로 구간 4,274km 대비 시설 분야 관리인력은 4,179명으로 철도1km 당 시설점검인력 약 1명을 대입하여 추산

3) International Charter와 Sentinel Asia는 미국, 유럽 등 선진국을 중심으로 재난·재해 현장을 주기적이고, 광역적으로 관측, 적시에 정보를 취득하고자 각 나라가 운용 중인 지구관측위성을 공동 활용하기 위해 구성된 국제협약체임

그림 4-4 | 경부고속철도 모니터링에 소요되는 SAR 영상소요(Strip Mode 30km × 50km)



자료: AP위성(주) 제공. 경부고속철도 구간의 ICEYE 위성 촬영 커버리지.

2) 철도 인프라 관리의 자동화 기술개발

□ 철도 인프라의 변이 관측에 적합한 분석방법론이 결정되면 이를 자동화하기 위해 관련 기술개발이 동반될 필요가 있음

- 먼저, SAR 영상기반 변이 상시모니터링시스템 개발을 위해 기초기술로 SAR 영상 처리자동화, 변이 분석 및 탐지 자동화 관련 기술개발이 필요(표 4-1 참고)

표 4-1 | 철도 분야 위성영상 활용 수준 및 기술개발 방향

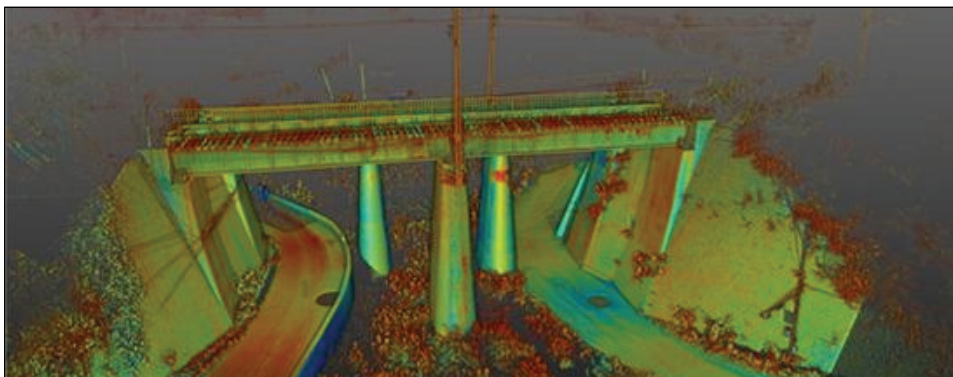
현재 국내 기술 수준	기술개발 방향
• 학술연구를 통해 SAR 위성정보 활용한 지표변형 탐지 가능성 연구수행 • 철도와 같은 선형 구조물에 적용하기 위한 위성정보 활용 및 방법론 연구 미흡	• 실험실 연구 수준을 넘어 상업 및 실제 활용 가능한 수mm 단위 변이의 측정 정확도 실증 • 인공지능(Deep Learning, Machine Learning)을 활용한 변이 탐지 자동화

자료: 저자 작성

□ 일반적으로 광학 영상을 활용하는 분야에서는 영상 분류(imagery classification), 객체 탐지(feature extraction), 변화 탐지(change detection)에 관한 방법론과 인공지능 기반 자동화 연구가 많이 수행되었으나, SAR 영상을 활용하는 분야는 아직 초기 단계임

- 아울러, 철도 교량 및 사면 등에 대한 3차원 LiDAR 스캐닝 기술 도입 등 SAR 영상의 취약점을 보완하는 기술개발도 함께 고려되어야 함(그림 4-5 참고)
- 이 밖에도 기존의 전문기술자가 현장에 직접 방문하여 조사 및 점검하는 방식의 취약점을 보완하고, SOC 디지털화를 앞당기기 위해 SAR 영상의 장점이 극대화 될 수 있도록 철도 인프라 분야 전문가가 참여하는 다양한 요소기술 개발이 요구됨

그림 4-5 | 3차원 LiDAR 스캔 측량과 드론 영상 융합 사례



자료: 한국철도기술연구원. 2020. GPS·3D 영상·드론을 활용한 철도시설물 진단기술 개발, 1월 29일. 보도자료.

3) 제도개선 방향

□ 3장에서 철도 인프라 관리와 안전에 관한 주요 법령과 지침을 검토한 결과 철도선로와 주변 시설물은 각각 별도 법률에서 정기점검과 안전점검 방식을 규정하고 있음

- 그러나 규정된 점검 방식은 “경험과 기술을 갖춘 인원이 육안 또는 점검기구(보통 수준측량 기구 사용) 등을 사용”하도록 규정하고 있음
- 우리나라는 일반적으로 포지티브(positive) 방식의 법률체계를 따르고 있어 법률과 제도가 규정한 방식 외에는 불법으로 간주함
- 따라서 신기술의 등장, SOC 디지털화와 디지털 트윈 등을 접목하기 위해 관련 법률과 하위 규정·지침 등이 새로운 방식을 쉽게 도입할 수 있도록 개선되어야 함

□ 본 연구에서 철도 인프라의 관리와 안전에 관한 법령, 지침 및 규칙 등을 모두 다루는 것은 연구의 범위를 넘어서므로 관련성 높은 일부 제도의 수정 방향을 제시하였음

- 주요 제도로는 「철도의 건설 및 철도시설 유지관리에 관한 법률」, 「철도시설의 정기점검 및 성능평가에 관한 지침」, 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」 및 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 지침」 등을 검토
- 주요 개정 방향은 <표 4-2>, <표 4-3>과 같이 센서(예: Tilt meter, IoT 등) 및 센서로 수집한 데이터(진동계측자료, SAR/광학 영상 등)의 분석 및 활용이 가능하도록 개정(안)을 제안

표 4-2 | 철도 안전관리 관련 제도개선 방향

철도의 건설 및 철도시설 유지관리에 관한 법률	
기존 제도	개선(안)
제2조(정의) 생략 9. “정기점검”이란 철도시설의 유지관리를 위하여 경험과 기술을 갖춘 자가 육안이나 점검기구 등을 사용하여 철도시설의 안전성과 성능을 조사하는 일상적인 활동을 말한다.	제2조(정의) 생략 9. “정기점검”이란 철도시설의 유지관리를 위하여 경험과 기술을 갖춘 자가 육안이나 점검기구, 센서 및 센서로 수집한 데이터 등을 사용하여 철도시설의 안전성과 성능을 조사하는 일상적인 활동을 말한다.
철도시설의 정기점검 및 성능평가에 관한 지침	
제3조(정기점검 일반) 생략 ① 정기점검의 목적은 경험과 기술을 갖춘 자가 육안이나 점검기구 등을 사용하여 철도시설의 안전성과 성능을 조사하는데 있다.	제3조(정기점검 일반) 생략 ① 정기점검의 목적은 경험과 기술을 갖춘 자가 육안이나 점검기구, 센서 및 센서로 수집한 데이터 등을 사용하여 철도시설의 안전성과 성능을 조사하는데 있다.

자료: 철도의 건설 및 철도시설 유지관리에 관한 법률/철도시설의 정기점검 및 성능평가에 관한 지침. 2021. 바탕으로 저자 작성

표 4-3 | 시설물 안전 및 유지관리 관련 제도개선 방향

시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법	
기존 제도	개선(안)
제2조(정의) 생략 ... 5. “안전점검”이란 경험과 기술을 갖춘 자가 육안이나 점검기구 등으로 검사하여 시설물에 내재(內在)되어 있는 위험요인을 조사하는 행위를 말하며, 점검목적 및 점검수준을 고려하여 국토교통부령으로 정하는 바에 따라 정기안전점검 및 정밀안전점검으로 구분한다.	제2조(정의) 생략 ... 5. “안전점검”이란 경험과 기술을 갖춘 자가 육안이나 점검기구, 센서 및 센서로 수집한 데이터 등으로 검사하여 시설물에 내재(內在)되어 있는 위험요인을 조사하는 행위를 말하며, 점검목적 및 점검수준을 고려하여 국토교통부령으로 정하는 바에 따라 정기안전점검 및 정밀안전점검으로 구분한다.
시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행규칙	
제18조(안전점검등에 관한 지침) 생략 1. 육안검사에 의한 결함의 종류, 보고방법 및 평가방법 등에 관한 사항 2. 결함부위의 확정방법에 관한 사항 3. 시설물의 결함원인 분석에 관한 사항 4. 시설물의 상태에 관한 평가기준 및 평가방법에 관한 사항 5. 시설물 하중내하력(荷重耐荷力)의 평가방법에 관한 사항 6. 시설물 관리대장의 작성에 관한 사항	제18조(안전점검등에 관한 지침) 생략 1. 육안 및 센서(사물인터넷, 위성영상 등) 에 의한 검사에 의한 결함의 종류, 보고방법 및 평가방법 등에 관한 사항 2. 결함부위의 확정방법에 관한 사항 3. 시설물의 결함원인 분석에 관한 사항 4. 시설물의 상태에 관한 평가기준 및 평가방법에 관한 사항 5. 시설물 하중내하력(荷重耐荷力)의 평가방법에 관한 사항 6. 시설물 관리대장의 작성에 관한 사항

자료: 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법/시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행규칙. 2021. 바탕으로 저자 작성



CHAPTER 5

결론

- 1. 결론 및 기대효과 65
- 2. 연구의 한계 66

05 결론

1. 결론 및 기대효과

□ 이 연구는 철도 인프라의 안전을 위한 정기점검 등 기존의 유지관리 방식이 가진 문제점을 완화하기 위해 SAR 영상 활용이라는 완전히 새로운 방식의 도입 가능성과 향후 방향(과제)을 제시하였음

- 국내외 문헌조사를 통해 SAR 영상의 특성을 알아보고, SAR 영상으로 어떤 것을 할 수 있는지, 또 철도 인프라에 활용하기 위해 어떤 분석 방법이 적합한지 살펴봄
- 또, 기존 철도 인프라의 안전에 영향을 미치는 요인으로 미소 변이의 형태와 기존 변이 계측 방법의 문제점과 한계를 밝히고 이를 보완하는 방법으로서 SAR 영상 활용 방향을 제시하였음
- 아울러 정부가 추진 중인 SOC 디지털화나 디지털 트윈과 연계를 위해 철도 인프라 관리 주체 및 관련 연구 기관이 추진할 실증과제를 제시하였음

□ 이 연구의 기대효과는 다음과 같음

- 첫째, 정부의 한국판 뉴딜 종합계획에 따른 “국민 안전 SOC 디지털화”를 위한 기초연구로 현장 중심의 아날로그 방식에서 첨단 영상 레이더(SAR) 기반의 국가 인프라 디지털화를 위한 새로운 기술 활용 가능성과 방향을 제시
- 둘째, 원격탐사 방식은 현장 작업자의 안전 향상과 시간 절약, 미소 변이에 대한 전역적 조사가 가능하다는 점에서 안전 점검의 신뢰도 향상과 정부의 예산 절감을 기대할 수 있음

- 셋째, 학술적 측면에서 국내외 문헌조사를 통한 메타분석 결과, 철도와 같은 선형 인프라의 안전관리에 적합한 SAR 영상(해상도 등) 및 분석방식을 도출
- 앞서 언급한 기대효과 외에 SAR 영상의 특징점을 활용하면 재난재해나 도시 문제 등 국토 관리 전반에 적용 가능성이 있음을 보여주는 기초연구임
- 무엇보다 아직은 SAR 영상의 안정적인 공급 등에 한계가 있으나 최근 SAR 영상의 활용에 대한 기대와 향후 위성군(constellation)이 점차 확대될 것을 고려해 대응 방향을 제시했다는 데에 의의가 있음

2. 연구의 한계

□ 이 연구는 문헌조사에 기반한 기초연구로써 실제 다중시기 SAR 영상의 취득과 분석을 통한 실증연구를 해 볼 수 없었다는 한계가 있음

- 철도 인프라의 안전 점검(미소 변이 계측)을 위해서는 특정 지점에 대해 다시 기 SAR 영상이 필요하며, 지상 실측자료 등 PSInSAR나 DInSAR 등 분석방법론 적용에 필요한 조건(지상에 고정산란체 설치 등)을 만족하는 영상확보가 필수 요건임
- 무료 제공 영상의 경우 원하는 지역의 아카이브(archive) 영상이 있어야 하며, 상업용 영상을 구매하는 경우 영상 촬영과 처리에 상당한 시간이 소요되고, 동일 센서의 과거 영상을 얻을 수 없어 실증연구에 한계가 있음
- 아울러, 영상분석에 필요한 소프트웨어와 영상처리 및 분석을 위한 전문적 지식이 요구되는 등 실증연구에 요구되는 다양한 조건의 한계로 SAR 영상의 도입과 적용을 위해 요구되는 과제와 방향만 도출했다는 점이 연구의 한계임

참고문헌

REFERENCE



【국내문헌】

- 감사원. 2019. 2019년 철도안전 관리실태 감사보고서.
- 강서리, 송정환, 김범승, 김현철, 이우경. 2014. TOPS 위성 SAR 모드 시스템 구현 및 성능 평가 연구. 통신위성우주산업연구회논문지. 9권 2호: 74-79.
- 관계부처 합동. 2020. 「한국판 뉴딜」 종합계획.
- 국립환경과학원. 2020. “10년여 대장정의 결실” 환경위성, 아시아 대기질 영상 첫 공개. 보도자료.
- 국토교통부. 2016. 철도안전 전문인력 수급·양성 계획(2017~2021).
- 국토안전관리원. 2019. 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침」(안전점검·진단 편).
- 국회예산정책처. 2017. 재난안전관리 현황과 주요 대책 분석-Ⅲ.
- 김상완. 2010. 다중시기 SAR 영상을 이용한 시계열 변위 관측기법 비교 분석. 대한원격탐사학회지, 26권, 2호: 143-151.
- 김상완, 김창오, 원중선, 김정우. 2005. 영상레이더를 이용한 목포 지반침하 관측. 자원환경지질 38권 4호: 381-394.
- 김상완. 2011. SAR Interferometry 기술과 동향. 전자과기술, 22권 6호: 101-113.
- 김한별, 윤홍식, 염민교, 이원웅. 2017. D-InSAR 기법을 이용한 호남선 고속철도 구간 지반 침하 분석. 대한공간정보학회지, 25권 3호: 35-41.
- 김현기. 2017. IoT 기반 철도재난 조기경보시스템. 국토안전관리원 시설안전지, 49호: 65-74.
- 박성재, 이슬기, 이창욱. 2019. TerraSAR-X 위성영상을 활용한 백두산 천지 얼음 면적 변화 모니터링. 대한원격탐사학회지 35권 2호: 327-336.
- 박지호, 이대라, 이권철, 이훈열. 2017. Sentinel-1A/B 위성의 SAR 간섭영상을 활용

-
- 한 지진 변위 분석. 대한지질학회 추계학술대회: 409-409.
- 손영선, 김광은, 윤광중. 2015. 지질자원 탐사를 위한 원격탐사 영상의 처리기법 및 활용 검토. 한국자원공학회지. 52권 4호: 429-457.
- 송영선, 김기홍. 2013. Radargrammetry를 이용한 C-밴드 및 X-밴드 SAR 위성영상의 DEM 생성 평가. 대한공간정보학회지, 21권 4호: 109-116.
- 여운광. 1995. 국내의 세굴에 의한 피해현황. 수자원학회지. 28권 6호: 35-40.
- 염광영, 김문철. 2017. 딥러닝을 이용한 SAR영상 목표물 인식 연구 동향. 한국통신학회지(정보와통신), 34권 7호: 31-39.
- 이원진. 2016. 미세지표변위 관측을 위한 향상된 다중시기 레이더간섭기법의 개발. 서울시립대학교 박사학위논문.
- 이일화, 김기현, 박정준, 여인호, 유민택, 윤희택. 2020. CPM기반 손실정보 구축모델을 활용한 교각붕괴 진단기술 개발. 한국철도기술연구원.
- 임룡혁. 2020. SAR(합성 개구 레이더) 외. 국토 제467호: 52-53.
- 조민지. 2013. 시계열 지표변위 관측기법(TCPIInSAR와 SBAS)을 이용한 미국 알라스카 어거스틴 화산활동 감시. 대한원격탐사학회지. 29권 1호: 21-34.
- 한국교통연구원. 2021. 제4차 국가철도망 구축계획 수립연구. 공청회 자료.
- 한국시설안전공단. 2010. 시설물 관리주체 안전 및 유지관리 실태조사.
- 한국철도기술연구원. 2020. GPS·3D 영상·드론을 활용한 철도시설물 진단기술 개발, 1월 29일. 보도자료.
- 한국철도시설공단. 2012. 고속철도 콘크리트궤도 유지보수기준 정립방안 연구.
- 한향선, 김연춘, 진효림, 이훈열. 2015. InSAR 긴밀도 영상을 이용한 남극 장보고기지 인근 정착해빙의 연간 변화 분석. 대한원격탐사학회지, 31권 6호: 501-512.
- 한현경, 이명진. 2019. 차세대중형위성 5호 활용 확대를 위한 영상레이더의 환경분야 활용 방안 연구. 모니터링. 대한원격탐사학회지 35권 6호: 1251-1260.
- 허준, 최시경. 2010. Interferometric Synthetic Aperture Radar(InSAR)의 활용. 방재연구지. 11권 3호: 108-118.

홍승환, 손흥규, 김상필, 장효선. 2013. 고해상도 SAR 영상의 기하 위치정확도 관련
중요변수 분석. 한국측량학회지 31권 6호: 447-454.

【국외문헌】

- 521-1984-IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands. 1984. IEEE.
- Alessandro Ferretti, Claudio Prati, Fabio Rocca. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39(1): 8-20.
- Alberto Moreira, Pau Prats-Iraola, Marwan Younis, Gerhard Krieger, Irena Hajnsek, Konstantinos P. Papathanassiou. 2013. A tutorial on synthetic aperture radar. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, vol. 1, no. 1, pp. 6-43.
- Abdulkadir Ozden, Ardeshtir Faghri, Mingxin Li, Kaz Tabrizi. 2016. Evaluation of Synthetic Aperture Radar Satellite Remote Sensing for Pavement and Infrastructure Monitoring. Procedia Engineering. Vol. 145: 752-759.
- Bruckno, Brian S., Andrea Vaccari, E. Hoppe, W. Niemann and E. Campbell. 2013. Validation of Interferometric Synthetic Aperture Radar as a Tool for Identification of Geohazards and At-Risk Transportation Infrastructure. 63th Highway Geology Symposium.
- Dimitrios A. Kasampalis, Thomas K. Alexandridis, Chetan Deva, Andrew Challinor, Dimitrios Moshou, Georgios Zalidis. 2018. Contribution of Remote Sensing on Crop Models: A Review. Journal of Imaging. 4(52).
- Filippo Biondi, Pia Addabbo, Silvia Liberata, Carmine Clemente, Danilo Orlando. 2020. Perspectives on the Structural Health Monitoring of Bridges by Synthetic Aperture Radar. Remote Sensing. 12(23).
- Jinghui Fan, Qun Wang, Guang Liu, Lu Zhang, Zhaocheng Guo, Liqiang Tong, Junhuan Peng, Weilin Yuan, Wei Zhou, Jin Yan, Zbigniew Perski, and Joaquim

-
- J. Sousa. 2019. Monitoring and Analyzing Mountain Glacier Surface Movement Using SAR Data and a Terrestrial Laser Scanner: A Case Study of the Himalayas North Slope Glacier Area. *Remote Sensing*. 11(6).
- Jungkyo Jung, Duk-jin Kim, Suresh Krishnan Palanisamy Vadivel, Sang-Ho Yun. . 2019. Long-Term Deflection Monitoring for Bridges Using X and C-Band Time-Series SAR Interferometry. *Remote Sensing*. 11(11).
- Laurent Ferro-Famil, Eric Pottier. 2016. *Microwave Remote Sensing of Land Surface*, Elsevier. 1–65.
- Leonardo Cascini, Dario Peduto, Diego Reale, Livia Arena, Settimio Ferlisi, Simona Verde, Gianfranco Fornaro. 2013. Detection and monitoring of facilities exposed to subsidence phenomena via past and current generation SAR sensors. *Journal of Geophysics and Engineering*. Vol.10(6).
- Minkyoo Youn, Hongsic Yun, Hanbual Kim, Woneung Lee, Kwangbae Kim. . 2017. A Study on Optimal D-InSAR Filtering Technique According to Landform Relief. *The 5th International Symposium on Sensor Science Proceedings 1*, no. 8: 723.
- Pietro Milillo, Giorgia Giardina, Daniele Perissin, Giovanni Milillo, Alessandro Coletta, Carlo Terranova. 2019. Pre-Collapse Space Geodetic Observations of Critical Infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy. *Remote Sensing*. 11(12).
- Seyed Alireza Khoshnevis, Seyed Ghorshi. 2020. A tutorial on tomographic synthetic aperture radar methods. *SN Appl. Sci.* 2, 1504.
- Thomas Lillesand, Ralph W. Kiefer, Jonathan Chipman. 2008. *Remote Sensing and image interpretation*(6th edition).
- Zhu W, Li W-L, Zhang Q, Yang Y, Zhang Y, Qu W, Wang C-S. 2019. A Decade of Ground Deformation in Kunming (China) Revealed by Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) Technique. *Sensors*. 19(20).

【법령 자료】

- 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법. 2020. 법률 제17551호(10월 20일 일부개정)
- 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행령. 2021. 대통령령 제31635호
(4월 2일 일부개정)
- 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행규칙. 2020. 국토교통부령 제914호
(12월 11일 타법개정)
- 시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 지침. 2020. 국토교통부고시 제2020-869호
(11월 27일 일부개정)
- 철도시설의 정기점검 및 성능평가에 관한 지침. 2019. 국토교통부고시 제2019-127호
(3월 14일 제정)
- 철도의 건설 및 철도시설 유지관리에 관한 법률. 2021. 법률 제17458호(6월 9일 일부개정)

【인터넷 자료】

- 국토교통부. SOC 디지털화. http://www.molit.go.kr/newdeal/sub/sub_3_1.jsp (2021년 4월 15일 검색)
- 국토교통부 철도산업정보센터. 2017. 2016년 철도통계연보. <http://www.kric.go.kr/jsp/handbook/sta/statisticsTechList.jsp> (2021년 8월 2일 검색)
- 국토교통부 철도산업정보센터. 2020. 2019년 철도통계연보. <http://www.kric.go.kr/jsp/handbook/sta/statisticsTechList.jsp> (2021년 8월 2일 검색)
- 과학기술정보통신부. 2020. 디지털 뉴딜 홍보 웹사이트.
<https://digital.go.kr/front/promotion/policyView.do> (2021년 8월 2일 검색)
- 네이버캐스트. 황사. <https://terms.naver.com/entry.naver?cid=58947&docId=3577742>
(2021년 4월 15일 검색)
- 뉴스1. 위성에서 본 캘리포니아 산불. 2017년 10월 19일자. <https://www.news1.kr/photos/details/?2780098> (2021년 8월 2일 검색)

동아사이언스. 바닷 속 살펴보는 ‘천리안 1호’, 한반도 주변 지구온난화 영향 연구 시작. 2019년 5월 9일 자. <https://www.donga.com/news/It/article/all/20190509/95452921/1> (2021년 8월 2일 검색)

연합뉴스. 군, '초소형 위성' 개발한다..북한 이동식발사대 30분마다 정찰. 2020년 8월 5일자. <https://www.yna.co.kr/view/AKR20200805040100504> (2021년 4월 15일 검색)

조선일보. mm 단위까지 포착. 지구 감시하는 눈 '영상 레이더 위성'. 2021년 3월 31일자. <https://news.v.daum.net/v/20210331080036431> (2021년 8월 2일 검색)

한국항공우주연구원 KARI TV. 강원도 대형 산불 위성 영상(강릉, 속초, 고성). <https://www.youtube.com/watch?v=0YaAALVMdmw> (2021년 04월 15일 검색)

한국항공우주연구원. 연구개발(인공위성). https://www.kari.re.kr/kor/sub03_02.do (2021년 4월 15일 검색)

38 North. Pyongyang's Space Launch in Pictures. <https://www.38north.org/2016/02/sohae020816/> (access April 15. 2021)

GEODETICS. <https://geodetics.com/lidar-point-clouds/> (access April 15. 2021)

Geospatial World. What is Active and Passive Remote Sensing? . <https://www.geospatialworld.net/videos/active-and-passive-remote-sensing/> (access April 15. 2021)

Humboldt State Geospatial Online – Image Bands. NASA. https://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online (access April 15. 2021)

Mining and geology. <http://argongra.es/en/business-areas/mining-geology> (access April 15. 2021)

NASA. The Electromagnetic Spectrum. <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html> (access May 13. 2021)

National Research Council of Italy. Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry. http://www.irea.cnr.it/en/index.php?option=com_k2&view=item&id=77 (access April 28. 2021)

PSInSAR, OpenEI, <https://openei.org/wiki/PSInSAR> (access April 26, 2021)
SIIS, <https://www.si-imaging.com/gallery/kompsat-5/> (access May 13, 2021)
USGS, Landsat Missions, <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8> (access April 15, 2021)

【기타자료】

AP위성(주), 2021, ICEYE 촬영 견적서, 내부자료.

SUMMARY



Direction of using SAR imagery for efficient management of national infrastructure: Focusing on railway infrastructure

Kihwan Seo, Ryunghyeok Im, Ilwha Lee

Key words: SAR, Railway Infrastructure, Management, Safety Inspection

The purpose of this study is to suggest a direction for the safe and efficient operation and management of linear national infrastructure such as railroads and bridges. Large-scale national infrastructure such as roads and railroads has inherent risks of ground subsidence due to its size and weight. Monitoring and managing this is one of the key roles of the management entity, and management and inspection are carried out by technicians with essential qualifications. Currently, in the high-speed rail section, technicians are directly sent to the site to survey the facility and monitor the subsidence, but there is a limitation that the site can only be accessed at dawn when there is no rail operation. Although such a safety inspection method involves a lot of cost (time/manpower), the reliability of safety diagnosis is not secured. A new approach is needed to improve the inefficiency and low reliability of monitoring and inspection of linear infrastructures such as high-speed railway. In addition, an efficient inspection method for data-driven safety inspection and

management of all sections of the railway network should be proposed to accelerate the government's 'SOC digitization'.

Imaging radar (SAR) is a type of remote sensing sensor that can measure displacement of several millimeters through analysis methods such as DInSAR and PSInSAR. The use of imaging radar (SAR) is expected to be able to detect minor changes on the surface of the entire railway section, and it is expected that some reductions in time, manpower, and cost required for on-site investigations to some extent. The safety inspection based on satellite remote sensing has the advantage of being able to periodically observe the entire railroad network at a relatively low cost, and synergy can be expected from the government's promotion of SOC digitization and linkage with digital twins.

In order to use SAR images for safe and efficient operation and management of railway infrastructure and digitization of SOC, it is necessary to prove the applicability of InSAR technology through experiments, and to use both on-site inspection methods and SAR images. In addition, improvement directions for some of the major laws related to railway infrastructure management and safety are suggested to be improved so that sensors (IoT) and data acquired by sensors (SAR/optical satellite images, etc.) can be utilized for infrastructure inspection and management.

수시 21-08

**국가 인프라의 효율적 관리를 위한 SAR 영상 활용 방향:
철도 인프라를 중심으로**

저 자 서기환, 임룡혁, 이일화

발 행 인 강현수

발 행 처 국토연구원

출판등록 제2021-08호

발 행 2021년 8월 11일

주 소 세종특별자치시 국책연구원로 5

전 화 044-960-0114

팩 스 044-211-4760

가 격 비매품

I S B N 979-11-5898-651-3

홈페이지 <http://www.krihs.re.kr>

© 2021, 국토연구원

이 연구보고서를 인용하실 때는 다음과 같은 사항을 기재해주시시오.

서기환, 임룡혁, 이일화. 2021. 국가 인프라의 효율적 관리를 위한 SAR 영상 활용방향: 철도인프라를 중심으로. 세종: 국토연구원.

이 연구보고서의 내용은 국토연구원의 자체 연구물로서 정부의 정책이나 견해와는 상관없습니다.

이 연구보고서는 한국출판인협회에서 제공한 KoPub 서체와 대한인쇄문화협회가 제공한 바른바탕체 등이 적용되어 있습니다.

수시 21-08

**국가 인프라의 효율적 관리를 위한 SAR 영상 활용 방향:
철도 인프라를 중심으로**

저 자 서기환, 임룡혁, 이일화

발 행 인 강현수

발 행 처 국토연구원

출판등록 제2021-08호

발 행 2021년 8월 11일

주 소 세종특별자치시 국책연구원로 5

전 화 044-960-0114

팩 스 044-211-4760

가 격 비매품

I S B N 979-11-5898-651-3

홈페이지 <http://www.krihs.re.kr>

© 2021, 국토연구원

이 연구보고서를 인용하실 때는 다음과 같은 사항을 기재해주시시오.

서기환, 임룡혁, 이일화. 2021. 국가 인프라의 효율적 관리를 위한 SAR 영상 활용방향: 철도인프라를 중심으로. 세종: 국토연구원.

이 연구보고서의 내용은 국토연구원의 자체 연구물로서 정부의 정책이나 견해와는 상관없습니다.

이 연구보고서는 한국출판인협회에서 제공한 KoPub 서체와 대한인쇄문화협회가 제공한 바른바탕체 등이 적용되어 있습니다.

국가 인프라의 효율적 관리를 위한 SAR 영상 활용 방향: 철도 인프라를 중심으로

Direction of using SAR imagery for efficient management of national infrastructure :
Focusing on railway infrastructure



제1장 연구개요

제2장 SAR 영상 개요와 활용사례

제3장 철도 인프라 관리현황과 문제점

제4장 SAR 영상을 활용한 철도 인프라 관리 방향

제5장 결론



(30147) 세종특별자치시 국책연구원로 5 (반곡동)
TEL (044) 960-0114 FAX (044) 211-4760

