

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C116607-03	해당 단계 연구 기간	2018.04.27. -2019.04.26	단계구분	3차년도/3차년도
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부과제명	InSAR 영상을 이용한 고속철도의 연약지반침하 분석 및 리스크평가			
연구책임자	윤홍식	해당단계 참여연구원 수	총: 19 명 내부: 11 명 외부: 8 명	해당단계 연구비	정부:365,000 천원 민간:122,000 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:487,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 26 명 내부: 16 명 외부: 10 명	총 연구비	정부:880,000 천원 민간:122,000 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:1,195,333 천원
연구기관명 및 소속 부서명	성균관대학교 산학협력단			참여기업명	주식회사 무림지앤아이
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음					

연구개발성과의 보안등급 및 사유	보안등급의 분류 : 일반 결정 사유 : '국토교통부소관 연구개발사업 운영규정' 제47조의 4(보안등급 분류기준)의 보안 과제 기준에 해당하지 않음
-------------------------	---

9대 성과 등록 · 기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신물질	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
성과 달성건수	3	3									

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설 · 장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약 - 본 연구는 원격탐사 기법 중 하나인 SAR 위성영상을 활용하여 호남선 고속철도 및 주변지역의 지표변위 시계열 데이터를 도출한 뒤, 해당 데이터를 바탕으로 지역사회의 리스크 평가를 수행하는 연구임 - 일반적으로 지표변위를 모니터링 하기위해서는 정밀수준측량, GNSS, 센서 등을 활용하지만 모두 한 점에 대해서 계측을 수행하기 때문에 광역적인 지표변위의 시계열 데이터를 분석할 수 없음 - 반면 SAR 위성영상을 활용하는 PS-InSAR 기법은 25장 이상의 영상을 활용하여 지표변위의 시계열 데이터를 도출할 수 있을 뿐만 아니라 기상조건(비, 눈)과 주 · 야간에 관계없이 분석을 수행할 수 있음 - 따라서 본 연구는 PS-InSAR 기법을 활용하여 호남선 고속철도 노선 및 주변지역(4km)의 지표변위 모니터링을 수행하였으며 시계열 자료를 통해서 리스크평가에 필요한 다양한 인자들을 도출하였음 - 도출된 인자들을 바탕으로 지역사회의 위험인자와 취약성인자를 세분화하여 리스크평가를 수행하였으며 도출된 리스크 맵을 기반으로 Case Study를 통해 높은 리스크 지역을 분석하였음 - 최종 성과물인 리스크 맵은 재난상황에서 의사결정권자로 하여금 신속하고 올바른 판단을 내릴 수 있는 기초자료가 될 것이며 상시상황에서도 철도의 신설, 노반 보강 등에 필요한 기초자료가 될 것임	보고서 면수 164 p
--	-----------------

<국문요약문>

연구의 목적 및 내용	○ 최종 목표: 지반침하에 취약한 고속철도의 유지관리 기술의 고도화를 통해 국가 중요시설을 관리하는 재난관리 기관으로서 고부가가치 시장인 고속철도 유지관리 분야에서의 재난저감 기술을 확보하는 것을 최종목표로 지향함 ○ 기술 목표: 세계 선도형 고속철도 유지관리 기술 확보를 통해 안전진단 등 고속철도 레일과 침묵 유지관리에 소요되는 보수비용을 30% 이상 저감이 가능한 기술 확보를 통해 향후 고부가가치 시장으로 전망되는 유지관리 분야에 진출하는 것을 세부 기술목표로 함 ○ 연구개발 목표: 호남고속철도를 대상으로 GIS기반의 재난 리스크 평가 및 관리 시스템을 구축하여 연약지반에서의 지반 침하량 평가 및 비용-편익 분석을 통한 재난관리를 통해 호남고속철도의 유지보수 비용을 저감하는 방안을 마련하는 것이 연구개발 목표임 ○ 연구내용: 본 연구과제는 3개의 세부과제로 구성되며, 각 세부과제들은 다음과 같은 내용으로 연구함
	■ 세부과제명 : 지반침하 리스크 맵 제작 - 고속철도 지반침하 리스크 평가 방법론 개발 - 고속철도 공간정보 DB모델 시범구축 - 고속철도 연약지반 리스크 평가기술 개발 ■ 세부과제명 : 지반침하 평가시스템 개발 - 고속철도 지반침하 원격탐사 방법론 개발 - 지반 침하량 분석 모델 개발 - 고속철도 연약지반 침하 평가시스템 개발 ■ 세부과제명 : 잠재 취약노선 관리 방안 수립 - 고속철도 구조물 변위 측량 방법론 개발 - 지상측량 결과와의 융복합 기술 개발 - 고속철도 지반침하 리스크 관리체계 수립 ○ InSAR를 이용한 고속철도 지반/구조물 변위량 평가 기술의 현장 적용성 및 장기기능성 평가의 해당 과제를 통해 2개의 핵심 성과물을 목표로 함 - 고속철도 지반 침하 리스크 맵 개발 - 위성영상 기반 지반 침하 평가시스템 개발

	○ 지진 또는 산사태로 인해 야기되는 지반침하 피해를 지도상에서 리스크 평가 및 관리를 위한 연구를 통해 2개의 핵심 성과물을 목표로 함 - 재난 유형별 GIS 기반의 리스크 평가기술 연구 - 고속철도 노선별 지반침하 리스크 평가기술 개발 ○ 국내·외 위성영상을 이용한 지반침하 추정 및 지상측량 결과와의 연계를 통한 구조물 관리시스템 개발을 통해 2개의 핵심 성과물을 목표로 함 - 연약지반 침하에 따른 철도/침목 변형 분석기술 - 고속철도 노선맞춤형 리스크 관리기술 개발
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 활용계획 : ■ 고속철도 구조물 유지 관리를 위한 기준 자료는 물론 지반침하 현지조사를 위한 기초 자료로서 활용 ■ InSAR 위성영상을 이용하여 계산한 지역별 연간 지반침하율은 철도 건설사업시 설계 인자로서 제공 ■ 고속철도의 지반침하 평가기술을 개발로 재난관리 단계별 구조물 유지보수비 저감 방안 마련 ■ 지반침하를 촉발하는 지진과 산사태의 리스크 평가기술 개발을 통해 철도 노선 설계 가이드라인 제공 ■ 갑작스런 지진 또는 산사태로 인한 2차적인 고속철도의 지반침하 발생과 피해를 평가하는 기준 제시 ■ 고속철도 지반침하 지표 개발과 평가기법을 체계화함으로써 구조물 변위에 대한 현지조사 기준 제시 ○ 기대효과 : ■ 기후변화에 따른 재난관리 단계별 유지관리 기술 개발을 통해 고속철도 분야 재난관리 기술 확보 ■ 지진, 산사태 등으로 인한 지반침하 발생시 긴급 InSAR 영상처리를 통한 최적화된 솔루션 제공으로 재난관리 대응 단계에서의 리스크 평가 기술 확보

	■ 평상시 주기적인 InSAR 영상처리를 통한 최적화된 솔루션 제공으로 재난관리 예방 단계에서의 리스크 관리 기술 확보 ■ 고속철도 유지관리 기술의 가장 큰 걸림돌이던 검측차량 유지관리 비용 저감을 통해 시장에서 기술경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대됨 ■ 재난관리를 위한 지반침하 리스크 평가시스템 구축 및 현장 적용 평가를 통한 기업 이미지 쇄신 ■ 고속철도 건설사업 설계 및 고효율 운영 관리 기술 확보를 확보하여 향후 고부가가치 시장으로 전망되는 재난관리 분야에 진출함으로써 고속철도 관련 기업들의 성장 유도 및 일자리 창출 기대 ■ 저에너지 고효율의 InSAR를 이용한 유지관리 기술 확보로 기존의 경제성장 패러다임을 환경친화적인 녹색 성장(Green Growth) 및 선도형 기술 확보를 통한 세계 기술 경쟁력 확보 ■ 지반침하 리스크 맵에 대한 기초 자료 구축 및 피드백을 통한 양질의 데이터베이스를 구축 후 홍보 및 판매가 가능하며, 과제의 연구성과 질을 높여 고 부가가치 기술 개발에 이바지 가능 ■ 2015년 호남고속철도 유지보수비 596억원에서 레일교환, 침목교환, 안전진단 등 보수비를 전체 유지보수 비용의 15%로 가정한다면, 본 연구의 성공적 결과 적용시 안전진단에 소요되는 비용을 30% 이상 저감할 것으로 기대 ■ 고속철도 구조물 유지관리 분야의 최적화된 표준 기술 확보를 통한 국가위상 제고 ■ 전량 국외 수입에 의존하고 있는 국내 검측차량에 대한 고속철도 검측업무의 안정적인 기술 확보 ■ 재난검측차량의 장기간 수리로 인한 검측업무 공백을 효율적으로 대체함으로써 국가 중요시설을 관리하는 재난관리 기관으로서의 재난관리 기술 확보				
핵심어 (5개 이내)	고속철도	지반 침하	유지보수	리스크 평가	비용편익분석

<Summary>

Purpose	○ Ultimate Goal: The ultimate goal of this project is to obtain disaster reduction technology in high-speed railroad maintenance area which is a high value market as a disaster management agency that manages national core facilities through the advancement of the maintenance technology for high-speed railroad which is vulnerable to land subsidence ○ Technology Goal: The detailed technology goal is to enter the maintenance market which is expected to become a high value market by acquiring world-leading high-speed railroad maintenance technology that can reduce the maintenance cost for high-speed rails and sleepers including safety diagnosis by at least 30%. ○ R&D Goal: The R&D goal is to build a GIS-based disaster risk assessment and management system for the Honam High-speed Railroad and develop a method for reducing the maintenance cost for the Honam High-speed Railroad by desalter management through the assessment of land subsidence amount and cost-benefit analysis.
Contents	○ Research Details: This research project consists of three detailed tasks as described below. ▪ Detailed task: Produce a land subsidence risk map - Develop a high-speed railroad land subsidence risk assessment methodology - Build a high-speed railroad spatial information DB model for demonstration - Develop high-speed railroad soft land risk assessment technology ▪ Detailed task: Develop a land subsidence assessment system - Develop a high-speed railroad land subsidence remote sensing methodology - Develop a land subsidence amount analysis model - Develop a high-speed railroad soft land subsidence assessment system ▪ Detailed task: Establish a potential vulnerable route management method - Develop a high-speed railroad structure displacement measurement methodology - Develop technology for convergence with land survey results. - Establish a high-speed railroad land subsidence risk management system
Development Results	○ The goal is to obtain two core outputs through the assessment of the field applicability and long-term performance of the high-speed railroad land/structure displacement assessment technology using InSAR.

	- Develop a high-speed railroad land subsidence risk map - Develop a land subsidence assessment system based on satellite images ○ The goal is to obtain two core outputs through the risk assessment and management on the map for land subsidence damages caused by earthquake or landslide. - Research GIS-based risk assessment technology by disaster type - Develop land subsidence risk assessment technology by high-speed railroad route ○ The goal is to obtain two core outputs through the development of a structure management system based on the estimation of land subsidence using domestic and overseas satellite images and connection with ground survey results. - Develop analysis technology for rail/sleeper deformation due to soft land subsidence - Develop risk management technology customized to high-speed railroad routes
Expected Contribution	○ Utilization Plan: ▪ Use as the basic data for land subsidence field survey as well as the basic data for the maintenance of high-speed railroad structures. ▪ Provide the annual land subsidence rate data by region which has been calculated using the InSAR satellite images as a design factor for railroad construction projects. ▪ Provide a method for reducing the structure maintenance cost for each disaster management stage by developing the land subsidence assessment technology for high-speed railroads. ▪ Provide railroad route design guidelines by developing risk assessment technology for earthquake and landslide which cause land subsidence. ▪ Present standards for assessing the occurrence and damages of secondary land subsidence of high-speed railroad due to unexpected earthquake or landslide. ▪ Present field survey standards for structure displacement by developing a high-speed railroad land subsidence index and systematizing the assessment technique. ○ Expected Effects: ▪ Acquire disaster management technology for high-speed railroad by developing maintenance technology for each disaster management stage associated with cli

	mate change. ▪ Acquire risk assessment technology for the response stage of disaster management by providing an optimized solution through emergency InSAR image processing in the event of land subsidence due to earthquake, landslide, etc. ▪ Acquire risk assessment technology for the prevention stage of disaster management by providing an optimized solution through periodic InSAR image processing at ordinary time. ▪ The reduction of survey vehicle maintenance cost which has been the greatest stumbling block to the high-speed railroad maintenance technology is expected to provide technological competitive edge in the market. ▪ Renovate corporate image through the development, field application, and assessment of a land subsidence risk assessment system for disaster management. ▪ Acquire high-speed railroad construction design and highly efficient operation and management technology and enter the disaster management field which is expected to become a high value market in the future, which will promote the growth of high-speed railroad-related companies and create jobs. ▪ Achieve global technological competitiveness by acquiring low-energy, highly-efficient maintenance technology using InSAR through environment-friendly green growth, leading-edge technology, instead of the conventional economic growth paradigm. ▪ Build, advertise, and sell high-quality databases through the development and feedback of basic data about the land subsidence risk map, and contribute to the development of high value-added technology by improving the quality of research outputs. ▪ Applying the successful results of this research is expected to reduce the safety diagnosis cost by at least 30%, assuming that the cost for rail replacement, sleeper replacement, and safety diagnosis as 15% of the total maintenance cost 59.6 billion won of the Honam high-speed railroad in 2015. ▪ Upgrade national status by acquiring standard technology optimized for the maintenance of high-speed railroad structures.
--	---

	▪ Obtain technology for stable high-speed railroad survey operations with domestic survey vehicles which are entirely imported from other countries. ▪ Acquire disaster management technology as a disaster management agency that manages national core facilities by efficiently replacing the void of survey operations due to long-term repair of disaster survey vehicles.				
Keywords	high-speed rails	land subsidence	maintenance technology	risk assessment	cost-benefit analysis

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	1
가. 연구의 배경 및 필요성	
나. 연구의 목적	
다. 연구내용 및 범위	
2. 연구수행내용 및 성과	13
가. PS-InSAR 기법을 통한 호남 고속철도 연약지반 분석	
(1) 원격탐사를 통한 지반침하 관측의 국 · 내외 연구현황	
(2) SAR 영상 및 Interferometry SAR의 개요	
(3) InSAR 기법 종류 및 연구사례	
(4) 호남 고속철도 연구지역 특성	
(5) 호남 고속철도 PS-InSAR 기법 수행	
(6) PS-InSAR 기법을 이용한 연구결과	
나. 호남 고속철도 지반침하 리스크 평가	
(1) 리스크평가 개요	
(2) 호남선 고속철도 리스크 평가의 연구흐름	
(3) 고속철도 노선의 리스크 평가	
(4) 지역사회 리스크 평가	
(5) Case Study를 통한 리스크 지역 분석	
다. 연구 수행 내용 결과	
라. 연구 개발 성과	

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	152
가. 연구의 최종목표	
나. 목표 달성여부	
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	157
가. 추가연구의 필요성	
나. 향후 연구 적용방안	
다. 기업화 추진방향	
붙임. 참고 문헌	169

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

<표 목차>

표 1.1 철도시설공단의 계측기 설치기준	3
표 2.1 SAR 시스템을 탑재한 위성	17
표 2.2 고정산란체 추출 기법에 관한 사전 연구	31
표 2.3 각 기법간의 비교	33
표 2.4 각 InSAR기법에 따른 연구사례	34
표 2.5 연구에 활용된 X 밴드 SAR 영상 종류 (Scene 1)	39
표 2.6 연구에 활용된 X 밴드 SAR 영상 종류 (Scene 2)	40
표 2.7 연구에 활용된 X 밴드 SAR 영상 종류 (Scene 3)	41
표 2.8 연구에 활용된 X 밴드 SAR 영상 종류 (Scene 4)	42
표 2.9 영상의 제원	53
표 2.10 분할된 Scene의 세부정보	77
표 2.11 면단위 데이터 검증에 활용한 점군 상세정보	97
표 2.12 GIS 기반의 리스크 평가 정의 (1997, IUGS:2004, UN-ISDR)	102
표 2.13 위험의 종류	104
표 2.14 지반침하에 대한 보수 및 보강 규정	112
표 2.15 자갈 궤도의 리스크 테이블	112
표 2.16 콘크리트 궤도의 리스크 테이블	113
표 2.17 콘크리트 및 자갈 궤도의 리스크 커브 식	114
표 2.18 AHP 기법의 전제조건	116
표 2.19 AHP 기법의 충족조건	118
표 2.20 AHP 기법을 위한 설문조사 예시	118
표 2.21 위험평가에 활용되는 AHP 매트릭스 예시	118
표 2.22 AHP 기법을 통해 결정된 위험성 평가와 취약성 평가 인자의 가중치	120
표 2.23 AHP 기법의 두 번째 계층 가중치	121
표 2.24 Case study 지역의 리스크 평가 결과	141

<그림 목차>

그림 1.1 지질학적 원인에 따른 철도사고의 발생 비율	2
그림 1.2 고속철도 재난관리를 위한 리스크 맵 작성 (예시)	4
그림 1.3 ISO 31000에 의한 고속철도 관리체계 작성(예시)	5
그림 1.4 InSAR를 활용한 지점에 대한 시계열적 분석 (예시)	5
그림 1.5 철도사고를 일으키는 위험요인의 분류	6
그림 1.6 지반침하 집중 지역 선정 관리의 (예시)	7
그림 1.7 InSAR영상을 활용한 고속철도 지반침하 평가 방안	8
그림 1.8 고속철도 지반침하에 따른 노선별 리스크 맵 제작 (예시)	8
그림 2.1 InSAR 기술을 활용한 지표면 변위 탐지	13
그림 2.2 지반침하에 의한 고속철도 성능저하	14
그림 2.3 밴드별 투과특성	16
그림 2.4 SAR의 3가지 촬영모드	18
그림 2.5 InSAR 간섭방식	18
그림 2.6 지표 변위 분석 연구흐름도	21
그림 2.7 중국 고속철도 모니터링 연구사례	23
그림 2.8 중국 고속철도 지반침하속도 지도제작 사례	23
그림 2.9 헝가리 부다페스트 도시 구조물 모니터링 연구사례	23
그림 2.10 InSAR의 원리	24
그림 2.11 레이더 전파 경로 및 레이더 위상	25
그림 2.12 고정산란체 사용시 위상의 분포	30
그림 2.13 청주 오송역~논산 지역	35
그림 2.14 논산~정읍 신태인 지역	35
그림 2.15 정읍 신태인 ~ 장성군 북이면	36
그림 2.16 장성군 북이면 ~ 광주 송정역	37
그림 2.17 각 Scene에 대한 세부 정보	43
그림 2.18 Scene 1의 상호정합 영상과 후방산란 영상(29장)	45
그림 2.19 Scene 2의 상호정합 영상과 후방산란 영상(29장)	46
그림 2.20 Scene 3의 상호정합 영상과 후방산란 영상(29장)	47
그림 2.21 Scene 4의 상호정합 영상과 후방산란 영상(29장)	48

그림 2.22 GCP(Ground Control Point) 선정 예시	49
그림 2.23 Kruscal MST 기법의 구동 예시	52
그림 2.24 Prim MST 기법의 구동 예시	52
그림 2.25 연구에 활용된 모든 노드와 간선의 경우의 수	54
그림 2.26 각 Scene의 Star Graph와 MST Graph	55
그림 2.27 Scene 1의 긴밀도 영상	56
그림 2.28 Scene 2의 긴밀도 영상	57
그림 2.29 Scene 3의 긴밀도 영상	58
그림 2.30 Scene 4의 긴밀도 영상	59
그림 2.31 Scene 1의 위상간섭영상 (28장)	61
그림 2.32 Scene 2의 위상간섭영상 (28장)	62
그림 2.33 Scene 3의 위상간섭영상 (28장)	63
그림 2.34 Scene 4의 위상간섭영상 (28장)	64
그림 2.35 Delaulay 방식과 FCN 방식의 삼각망 형성의 도식화 결과	66
그림 2.36 산악지역으로 인한 점군의 긴밀도와 연결강도 저하(Scene 4)	68
그림 2.37 분할 지역의 세부 내용 (Scene 1-1)	70
그림 2.38 분할 지역의 세부 내용 (Scene 1-2)	71
그림 2.39 분할 지역의 세부 내용 (Scene 2)	72
그림 2.40 분할 지역의 세부 내용 (Scene 3-1)	73
그림 2.41 분할 지역의 세부 내용 (Scene 3-2)	74
그림 2.42 분할 지역의 세부 내용 (Scene 4-1)	75
그림 2.43 분할 지역의 세부 내용 (Scene 4-2)	76
그림 2.44 Scene 1-1 최종 지표변위 영상	78
그림 2.45 Scene 1-2 최종 지표변위 영상	79
그림 2.46 Scene 2 최종 지표변위 영상	79
그림 2.47 Scene 3-1 최종 지표변위 영상	80
그림 2.48 Scene 3-2 최종 지표변위 영상	80
그림 2.49 Scene 4-1 최종 지표변위 영상	81
그림 2.50 Scene 4-2 최종 지표변위 영상	81
그림 2.51 좌표변환을 통해 실세계 좌표로 변환한 그림	82

그림 2.52 고정산란체의 정밀 분석을 위한 Excel 파일 형식으로의 변환	83
그림 2.53 ArcGIS를 통한 지표변위량 분석	84
그림 2.54 Google Earth 상에서의 시계열 지표변위량	84
그림 2.55 실제로 설치한 코너리플렉터의 모습	86
그림 2.56 고정산란체 설치 위치 및 경위도 위치	87
그림 2.57 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(1)	87
그림 2.58 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(2)	88
그림 2.59 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(3)	88
그림 2.60 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(4)	88
그림 2.61 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(5)	89
그림 2.62 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(6)	89
그림 2.63 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(7)	89
그림 2.64 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(8)	90
그림 2.65 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(9)	90
그림 2.66 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(10)	90
그림 2.67 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(11)	91
그림 2.68 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(12)	91
그림 2.69 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(13)	91
그림 2.70 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(14)	92
그림 2.71 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(15)	92
그림 2.72 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(16)	92
그림 2.73 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(17)	93
그림 2.74 선(Line) 단위의 PS-InSAR와 수준측량의 비교분석	94
그림 2.75 다중회귀분석을 통한 검증자료의 3차원 모델	95
그림 2.76 면(Plane) 단위의 데이터 검증을 위한 측량 지역 및 도근점 설치	96
그림 2.77 정읍 역 주변의 PS-InSAR 데이터 및 시계열 자료 예시	98
그림 2.78 다중 회귀분석을 통한 면 단위 측량 검증 데이터의 3차원 모델링	99
그림 2.79 리스크 평가의 개념	103
그림 2.80 리스크 평가의 연구흐름도	109
그림 2.81 고속철도 노선의 리스크평가 개념도	110

그림 2.82 고속철도 노선 위험평가에 활용되는 인자 (지반 침하량)	111
그림 2.83 궤도 종류에 따른 취약성 곡선	114
그림 2.84 고속철도 노선의 리스크 지도	115
그림 2.85 AHP 분석에 활용되는 인자	120
그림 2.86 위험 인자와 취약성 인자에 대한 종속성 가중치	123
그림 2.87 GIS 상에 표현한 지반침하 인자	124
그림 2.88 GIS 상에 표현한 지반침하 속도 인자	125
그림 2.89 GIS 상에 표현한 지하수 유출 인자	126
그림 2.90 GIS 상에 표현한 노선 유형 인자	127
그림 2.91 구간 속도 역산 과정	128
그림 2.92 GIS 상에 표현한 구간 속도 인자	129
그림 2.93 최종 위험 평가 지도	130
그림 2.94 지역사회 위험평가 지도 및 밀도분석 결과	130
그림 2.95 GIS 상에 도식한 인구 밀도	131
그림 2.96 GIS 상에 도식한 도시화 비율	132
그림 2.97 GIS 상에 도식한 GDP 인자	133
그림 2.98 GIS 상에 도식한 취약 계층	134
그림 2.99 GIS 상에 도식한 구호 시설 유무	135
그림 2.100 최종 지역사회 취약성 지도	136
그림 2.101 연구지역 내 위험 군으로 분류된 지역	137
그림 2.102 지역사회 리스크 평가를 통해 도출된 최종 리스크 지도	138
그림 2.103 공주지역의 리스크 지도	139
그림 2.104 익산지역의 리스크 지도	140
그림 2.105 정읍지역의 리스크 지도	140

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구의 배경 및 필요성

1) 고속철도 산업 구조물 운영 및 유지관리 현황

- 국가경제 구조가 선진화되어 가면서 신규 건설시장의 성장속도보다 유지관리 시장의 성장속도와 규모가 빠르게 증가할 것으로 예측됨에 따라 고속철도 구조물 관련 유지관리 기술의 효율성 확보가 중요함
- 고속철도 건설이 확충되면서 고속철도를 구성하는 터널, 사면, 교량과 같은 구조물이 증가함에 따라 InSAR를 이용한 고속철도 구조물 유지관리 기술 도입을 통한 유지보수비 절감이 요구됨

2) 연약지반 지반침하로 인한 호남고속철도 위험 증가

- 최근 호남고속철도 노선이 연약지반을 다수 통과함으로써 일부 구간에서 지반침하가 발생하는 등 안전 보완이 시급하다는 주장이 제기됨(출처 : 조선일보, 2015)
- ‘호남고속철도 개통 준비 및 토공 노반 현황 보고’에 따르면, 호남고속철도 182.3km(오송~광주 송정) 구간 중 지반 침하 현상이 발생한 곳은 16% 가량인 상·하행선 29km이며 최대 처짐은 5.6cm인 것으로 조사됨(출처 : 한국철도시설공단, 2015)
- 호남고속철도 구조물을 유지관리하는 철도공단은 연약지반이 넓게 분포하는 호남지역 평야지대 특성상 장기간에 걸쳐 지반이 안정화 될 때까지 지속적으로 지반이 침하되는 현상은 불가피한 것으로 발표함

3) InSAR 영상기술을 활용한 연약지반 침하 모니터링

- 우리나라 고속철도 구간의 광범위한 지역에서 연약지반이 존재하고 있어 장기적인 관점에서 연약지반 침하로 인한 고속철도의 취약성이 높음
- 고속철도 구간에 광범위하게 분포되어 있는 연약지반에서 기존의 계측방식으로 모니터링하는 것은 불가능하므로 위성영상과 같은 광범위한 지역을 모니터링 할 수 있는 기술에 대한 연구가 필요

- 최근 위성영상을 활용한 InSAR 기술을 통해 상대적으로 cm급 정밀도로 화산활동 등의 지표면 변화량을 정량적으로 모니터링하는 등 관련 연구가 활발히 진행 중임
- InSAR에는 동일한 지면 위치를 나타내는 두 개 이상의 레이더 이미지를 한 방식으로 결합하여 이미지를 얻은 곳 사이에서 발생하는 어떠한 지면의 움직임을 수 mm이하의 정밀 분석이 가능함(윤성효, 2014)

4) 지반침하로 인한 고속철도 재난발생 가능성 분석 및 리스크 맵 제작

- 철도사고 통계를 살펴보면 지반 침하로 인한 사고의 발생률이 9%를 차지함
- 따라서, 본 연구에서는 InSAR 위성영상을 활용하여 고속철도 구간의 지반침하량을 정밀하게 모니터링 할 수 있는 시스템을 개발함으로써 고속철도 운영의 안전성을 확보하는 것을 목적으로 함

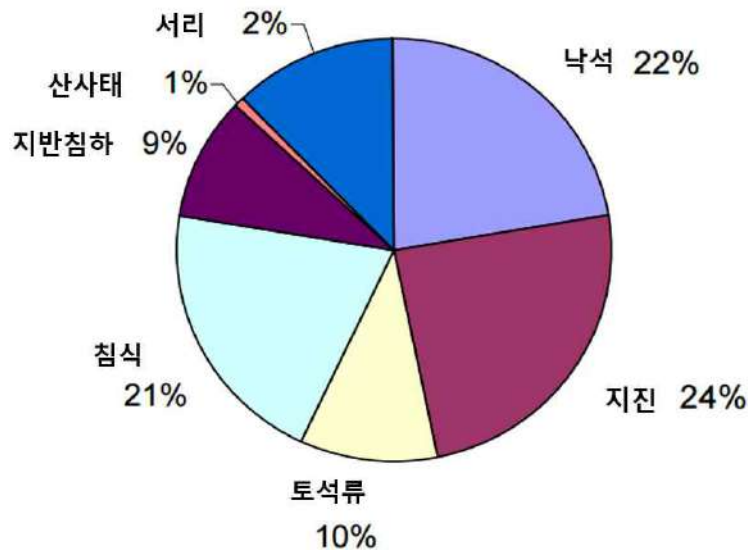


그림 1.1 지질학적 원인에 따른 철도사고의 발생 비율

자료: C. M. Bunce, 2006

5) 광범위한 지역의 변화를 측정 가능케 하는 원격탐사 기술의 효용성

- 철도시설공단은 지반의 침하정도를 정량적으로 확인하고 시공 관리 거동분석 및 예측 및 시공방법 개선 등의 자료로 활용하기 위하여 [철도시계지침 및 편람]에 의거하여 계측기를 설치하여 운영 중임
- InSAR를 이용한 지반침하 관측의 경우 긴급 재난발생시 또는 평상시에 광범위한 지역에서 저비용으로 고효율의 재난 리스크 관리에 적합함

표 1.1 철도시설공단의 계측기 설치기준

공종	계측기	설치위치 및 기준	설치목적
토공	지중경사계	성토선단부에 200m마다 1개소 설치	성토사면 하부의 수평변위 측정
	지하수위계	성토사면 측면에 200m마다 1개소 설치	지하수위 변화를 측정하여 압밀 여부를 판단
	간극수압계	층별 침하계 인접 위치	수압변동을 통해 연약지반의 압밀 여부 판정
	원지반침하계	성토부 중앙부에 100m마다 1개소 설치	대상지점의 전 침하량 산정
지반	층별침하계	연약지반 두께로 층별 침하 예상 위치	연약층 각층의 침하량 산정
	지중경사계	토류벽 또는 배면지반	지반의 심도별 수평변위량방향크기 등 측정
	지하수위계	토류벽 또는 배면지반	수위 및 수압의 변동 측정
	변형률계	스트리트, 락, 각종 강재	구조물에 발생하는 응력 측정
(가시설)	하중계	스트리트, 앵커	스트리트 및 이스앵커에 작용하는 축하중 측정
	지표침하계	토류벽 배면, 인접구조물 주변	지표면의 침하량 변화 측정
	천단침하계	터널의 천단에 20m 간격으로 설치	터널 내부의 변위 발생 여부 측정
	지표침하계	터널의 상부지표에 20m 간격으로 설치	터널굴착으로 인한 지표면의 침하 여부 판단
터널	내공변위계	터널의 내공	라이닝 타설시기 판단, 안정성 판단
	록볼트축력계	록볼트 설치지점	록볼트의 응력, 적정길이 판단 등
	자중변위계	터널의 주변 지반	지표면-터널 지반거동 심도별 측정
	쏿크리트응력계	터널 굴착면과 쏿크리트 사이	배면토압 및 부재응력 측정

자료: 감사원, 2013

6) 지반침하로 인한 고속철도 재난발생 가능성 분석 및 리스크 맵 제작

- 고속철도 사고의 발생원인은 지진, 산사태, 폭우 등 다양하기 때문에 위성영상을 이용한 지반침하 분석 기술을 확보하여 위험의 식별과 분석을 가능하게 하여 효율적 재난관리를 위한 토대를 마련함
- 지반침하에 대한 리스크를 줄이기 위한 모니터링기술의 개발과 지속적인 관찰을 위한 GIS를 활용한 고속철도 재난관리를 위한 시계열적 데이터 분석을 통한 리스크맵 제작이 필요함

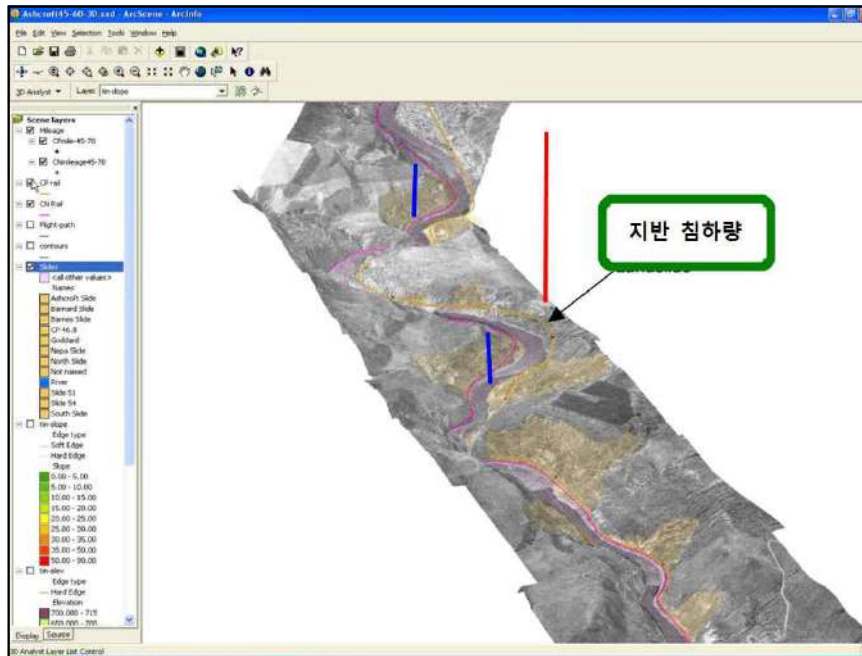


그림 1.2 고속철도 재난관리를 위한 리스크 맵 작성 (예시)

○ 지반침하로 인한 고속철도의 재난관리를 위하여 GIS를 활용한 고속철도의 리스크맵을 제작함. 제작된 리스크맵은 주요 정보를 포함하고 있으며(선로의 침하량, 선로의 침하에 영향을 미치는 주변 저수지 등) 위험영향 관계를 분석하여 리스크맵을 제작함

7) 지속적인 고속철도 리스크 관리를 위한 ISO 31000 벤치마킹

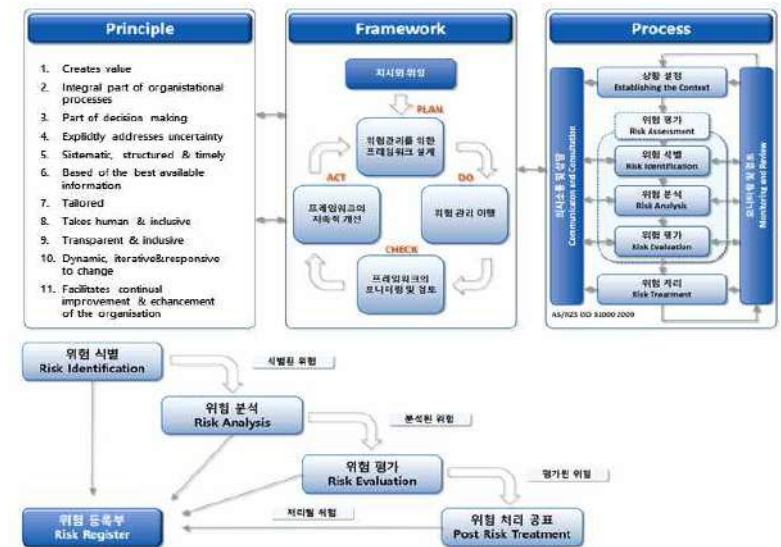


그림 1.3 ISO 31000에 의한 고속철도 관리체계 작성(예시)

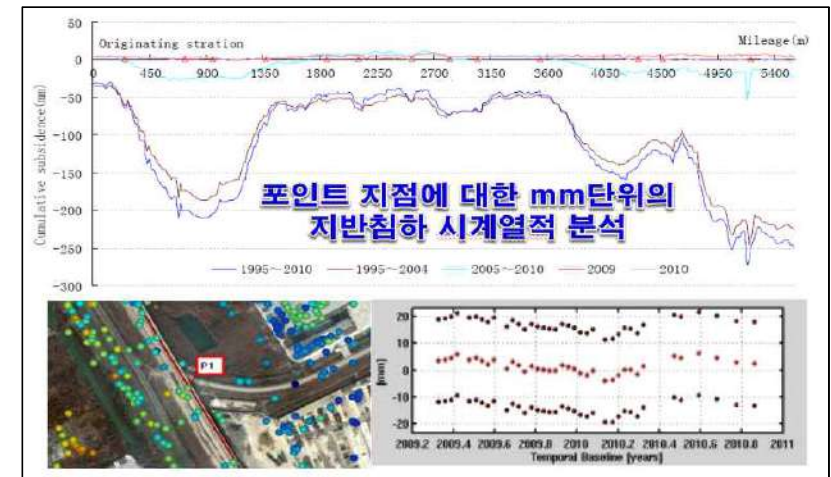


그림 1.4 InSAR를 활용한 지점에 대한 시계열적 분석 (예시)

자료: Qingli Luo, 2011

나. 연구의 목적

1) InSAR 기술을 활용한 지반침하 모니터링 연구개발

- 위성영상(KOMSAT-5와 6)을 이용한 정밀 지표면 변화탐지기술 개발을 통해 철도재난 방재기술의 고도화
- 연약지반 지표변위 관측의 객관성 및 효율성 증진을 통해 지반침하로 인한 인적, 경제적, 사회적 손실을 최소화하여 국토 및 고속철도 관련 재난관리에 공헌할 수 있음
- InSAR 기술을 활용한 지반침하 모니터링 연구를 활용하여 고속철도 전 구간에 분포하고 있는 연약지반 침하의 효과적인 관측과 분석을 통해 고속철도 유지관리 기술의 안전성 확보
- GIS 분석을 통해 작성된 연약지반 지반침하 취약성 고속철도 구간 추정 및 지반침하에 영향을 주는 주요 요소 추출 및 장기적인 안정성 평가를 수행하여 연구지역에서 발생하는 지표변위에 대한 통합 모델

2) 연약지반 고속철도 구간의 지표변형 특성 감지 및 평가절차의 최적화

- 국내 고속철도 구간의 연약지반에서의 지표변형 특성을 평가하기 위하여 새로운 기법을 이용하여 지표변형 특성을 감지하는 방법을 연구하고, 이러한 지표변형에 대한 대응기술을 개발하는 것을 목적으로 함
- 이와 더불어, 본 연구에서는 고속철도 구간의 연약지반 안정성 평가와 관련된 표준화 작업을 수행하기 위하여 연약지반을 비롯한 주변지형의 사면변화, 침하 침묵, 레일 변위해석 등의 지표변화로 인한 제반사항을 적절하게 감시하는 기술을 개발하고, 이와 관련된 적절한 조사기술을 정립하여 고속철도 연약지반의 평가절차를 최적화하는 방안을 수립하는 것을 목적으로 함
- 지진, 산사태, 지반침하 등 철도사고가 우려되는 지역에 대해서는 주기적인 영상 관측 및 리스크 평가를 통해 재난시와 평시 고속철도의 재난관리 시스템을 구축하여 체계적인 고속철도 관리 방안을 마련함
- 위험식별과 리스크의 측정을 통한 분석을 수행하여 평가를 통한 재난관리가 이루어짐

선로의 지질학적 위험의 분류

Railway Geotechnical Hazard Classification

Level I	Level II	Level III	Level IV	Abbrev
Geotechnical (rock, soil & water)	Landslides	Rock landslides	Rock fall	RF
			Rock topple-rock fall	RT-RF
			Rock topple-rock slide-rock fall	RT-RS-RF
			Rock slide-rock fall	RS-RF
			Rock topple	RT
			Rock slide	RS
			Rock topple-rock slide	RT-RS
		Debris landslides	Debris fall	DF
			Debris slide-debris fall	DS-DF
			Debris slide	DSL
			Debris flow	DFw
			Rock slide-debris flow	RS-DFw
	Earth landslides	Earth fall	Earth fall	EF
			Earth slide-earth fall	ES-EF
			Earth slide	ES
			Earth flow-earth slide	EF-ES
			Earth spread-earth slide	ESp-ES
		Earth flow	Earth flow	EFw
			Earth slide-earth flow	ES-EFw
			Earth spread	ESp
	Settlement	Collapse	Consolidation	Cn
			Compression	Cm
			Sub grade plastic deformation	SPD
			Sub grade dynamic liquefaction	SDL
			Piping or dissolution voids	PD
			Culvert failure	CF
			Timber deterioration	TD
			Voids in rock fill	VRF
			Liquefaction	L
			Other (animal borrowing, mining, etc.)	O(specific)

자반침하

선로의 지질학적 위험의 분류

Railway Geotechnical Hazard Classification (cont'd)

Level I	Level II	Level III	Level IV	Level V	Abbrev
Geotechnical (rock, soil & water)	Overland flow erosion	Slope wash			SW
			Gully erosion		GE
		Through flow erosion	Sewage erosion		SE
			Piping		P
			Cavitation		C
	Hydraulic Erosion	Channelized flow erosion	"River Erosion"	Channel aggradation	CA
				Channel degradation	CD
				Local scour	LS
				General scour	GS
				Ice & log jams	IL or LJ
Sub aqueous flow erosion	Enrichment	Bank erosion	BE		
		Avulsion	Av		
		Wave erosion	WE		

선로의 물과 얼음의 위험 분류

Railway Ice & Snow Hazard Classification

Level I	Level II	Level III	Abbrev		
Ice and snow (ice)	Snow avalanche	Slab avalanche	SA		
		Loose snow avalanche	LSA		
		Dry snow avalanche	DSA		
		Wet snow avalanche	WSA		
		Slush flow	SF		
	Icing	Frost heaves		FH	
			Surface icing	SI	

그림 1.5 철도사고를 일으키는 위험요인의 분류

선로의 지질학적 위험의 분류 (지속적)				
Railway Geotechnical Hazard Classification (cont'd)				
Level I	Level II	Level III	Level IV	Abbrev.
Geotechnical (rock, soil & water)	Overland flow erosion	Through flow erosion	Slope wash	SW
			Gully erosion	GE
			Seepage erosion	SE
			Piping	P
			Dissolution	D
	Sub aqueous flow erosion	"River Erosion"	Channel aggradation	CA
			Channel degradation	CAD
			Local scour	LS
			General scour	GS
			Ice & log jam	ILJ
Ice and snow (ice)	Snow avalanche	Icing	Encroachment	En
			Bank erosion	BE
			Avulsion	Av
			Wave erosion	WE
	Slab avalanche	Snow avalanche	Slab avalanche	SA
			Loose snow avalanche	LSA
			Dry snow avalanche	DSA
			Wet snow avalanche	WSA
			Slush flow	SF
	Frost heaves	Icing	Frost heaves	FH
			Surface icing	SI

선로의 눈과 얼음의 위험 분류				
Railway Ice & Snow Hazard Classification				
Level I		Level II		Abbrev.
Ice and snow (ice)	Snow avalanche	Slab avalanche		SA
		Loose snow avalanche		LSA
		Dry snow avalanche		DSA
		Wet snow avalanche		WSA
		Slush flow		SF
	Icing	Frost heaves		FH
		Surface icing		SI

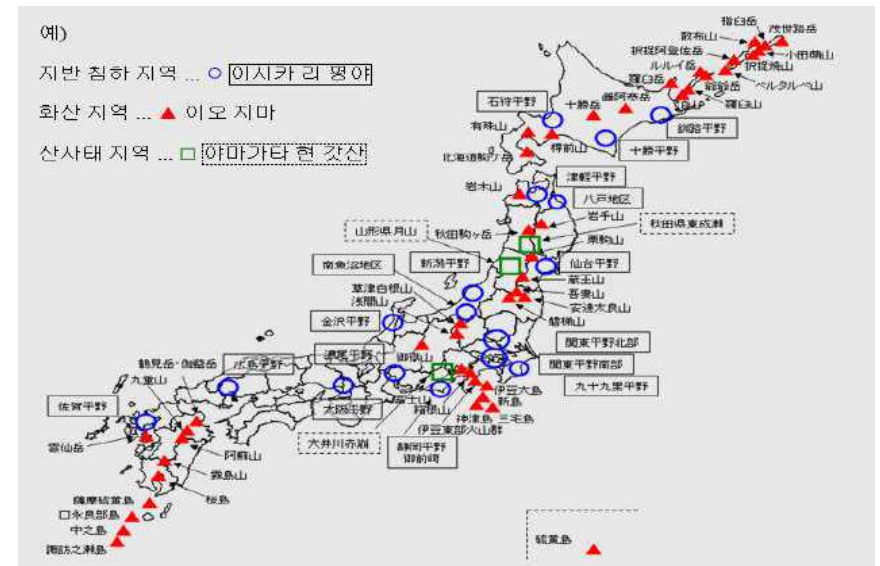


그림 1.6 지반침하 집중 지역 선정 관리의 (예시)

3) 공간정보시스템(GIS)를 활용한 고속철도 리스크 맵 제작

- 재난 리스크 평가에 필요한 재난 발생기록, 지역적/구조물 특성을 포함한 GIS를 이용한 재난정보 DB모델 개발을 통한 고속철도 재난관리 기술을 개발함
- GIS기반의 재난 리스크를 정량적·정성적으로 평가할 수 있는 리스크 맵 개발로 호남고속철도에 광범위하게 분포하는 연약지반의 효과적인 리스크 저감 대책을 마련할 수 있고, 재난발생으로 인한 피해를 저감

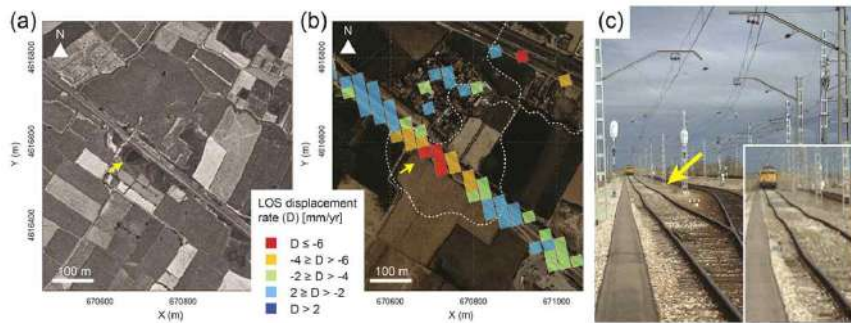


그림 1.7 InSAR영상을 활용한 고속철도 지반침하 평가 방안

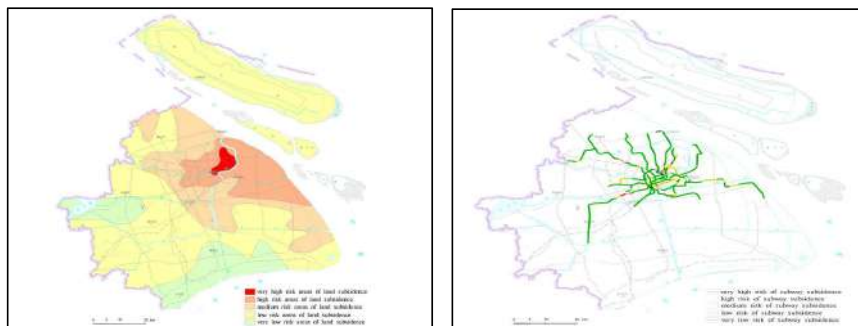


그림 1.8 고속철도 지반침하에 따른 노선별 리스크 맵 제작 (예시)

다. 연구내용 및 범위

1) 1차 연도

가) 개발 목표

- 주관연구기관(성균관대학교) :
 - (1) 고속철도 지반침하 원격탐사 방법론 개발
 - (2) 고속철도 지반침하 리스크 평가 방법론 개발
- 위탁연구기관((주)무림지엔아이) : 고속철도 구조물 변위 측량 방법론 개발

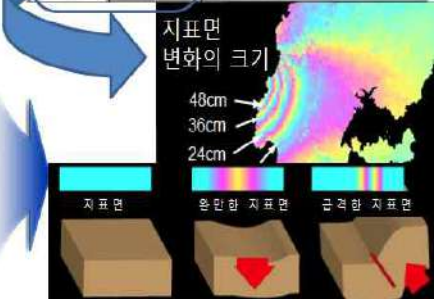
나) 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(성균관대학교) :
 - (1) 재난 유형별 지반침하 리스크 평가 사례조사 및 지반변위 탐지를 위한 영상처리 방법론 개발
 - (2) 지반침하 리스크 평가를 위한 공간정보 DB 모델 개발 사례조사 및 리스크맵 제작 방법론 개발

연계	자료형태	위성센서	
		가시선 · 적외선	InSAR
지진	도지이동	KOMSAT 3호 · 3A호	
	지반변위	일제영성	
	밀착형	KOMSAT 3호 · 3A호	
	인공	일제영성	KOMSAT 5호
	로컬도	KOMSAT 3호 · 3A호	
	중배	변형 수경	KOMSAT 5호
경감	피해 평가	KOMSAT 3호 · 3A호	
	관련 특성	KOMSAT 3호 · 3A호	KOMSAT 5호



국가	철도총연장 (기준연도)	철도관리기관
	228,218Km (2011)	Federal Railroad Administration
	84,249Km (2012)	Ministry of Transport
	66,298Km (2012)	Ministry of Transportation
	20,140Km (2011)	Ministry of Land, Infrastructure, Transport & Tourism



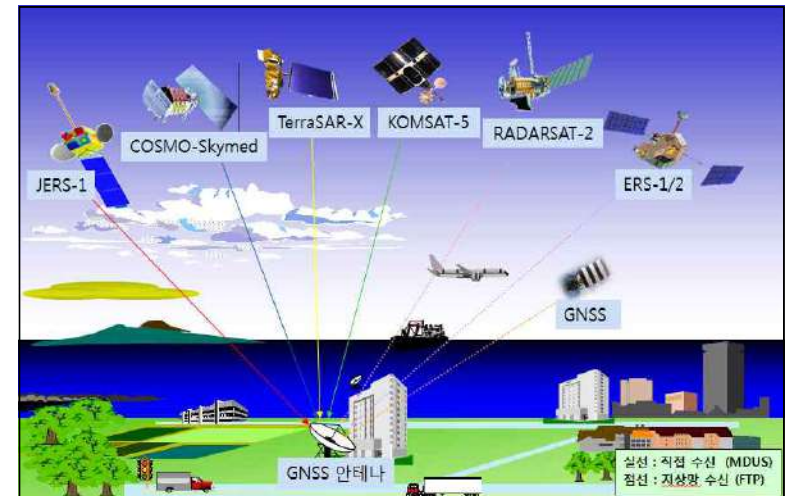
○ 위탁연구기관((주)무림지앤아이) : 고속철도 구조물의 지표면 변위 측량 및 분석 방법론 개발

- (1) 고속철도 구조물의 지표면 변위 측량 사례조사 및 구조물 비대칭 처짐 등 분석 방법론 개발
- (2) 고속철도 구조물의 변위에 대한 GNSS, 경사계, EDM 측량 및 분석 방법론 연구



○ 위탁연구기관((주)무림지앤아이):지상관측 결과와 원격탐사 기술간 연계를 위한 융복합 기술개발

- (1) 지상측량 결과와 원격탐사 간의 연계를 통한 지표면 변동량 분석 모델 개발



2) 2차 연도

가) 개발 목표

- 주관연구기관(성균관대학교) : 지반침하 리스크 평가를 위한 리스크맵 제작기술 개발
- 위탁연구기관((주)무림지앤아이) : 고속철도 구조물 변위 분석을 위한 관측결과 간 연계 기술 개발

나) 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(성균관대학교) :
 - (1) 지반침하 예상 지점과 강도 등을 분석하기 위한 공간정보 DB모델 시범구축
 - (2) 연약지반에서의 고속철도 구조물 침하량 추정 모델 개발

3) 3차 연도

가) 개발 목표

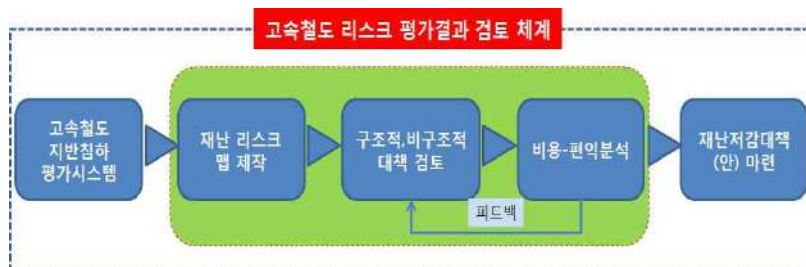
- 주관연구기관(성균관대학교) : 고속철도 연약지반 침하량 평가를 위한 시스템 개발
- 위탁연구기관((주)무림지앤아이) : 고속철도 지반침하 리스크 관리 방안 연구

나) 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(성균관대학교) : GIS기반의 고속철도 지반침하 평가시스템 개발
 - (1) 고속철도 노선별 지반침하 분석을 통한 리스크 평가기술 개발
 - (2) 연약지반 침하에 따른 고속철도 구조물 변형 분석기술 개발



- 위탁연구기관((주)무림지앤아이) : 고속철도 구조물의 지반침하 리스크 관리체계 수립
 - (1) 지반침하 관리 저감대책 수립을 위한 비용-편익분석 기술 연구
 - (2) 연약지반에서의 고속철도 구조물 유지보수/보강 대책 수립을 통한 선제적 대응역량연구



2. 연구수행내용 및 성과

가. PS-InSAR 기법을 통한 호남 고속철도 연약지반 분석

1) 원격탐사를 통한 지반침하 관측의 국·내외 연구현황

가) SAR 영상을 이용한 지표면 변위 감시

- SAR 센서는 반사 신호의 강도를 표현하는 진폭(Amplitude)정보와 상대적 거리를 나타내는 위상(Phase)정보를 제공하며, 특히 1970년 이후 위상차(Phase difference)를 사용하여 영상을 분석하는 레이더간섭(InSAR)기법이 폭넓게 도입됨
- 레이더간섭은 2개의 안테나를 통해 동일한 위치를 관측하고 되돌아오는 두 신호의 위상차를 이용하여 물체의 고도 정보를 얻어내는 3차원 정보 획득 기법으로서 해당 지역의 고도정보 뿐만 아니라 차분레이더간섭(D-InSAR) 기법을 사용할 경우 지형 변화 관측 등의 목적에 활용 가능함
- SAR 영상은 관측시간과 기상현상 등의 외부 환경 영향을 받지 않고 수시로 데이터 취득이 가능하며 광학영상보다 광범위한 관측 영역을 포함하기 때문에 두 이미지 사이의 변화량을 계산하는 InSAR(Interferometric SAR) 방식의 지표면 변위 탐지 기법은 큰 이점을 지님

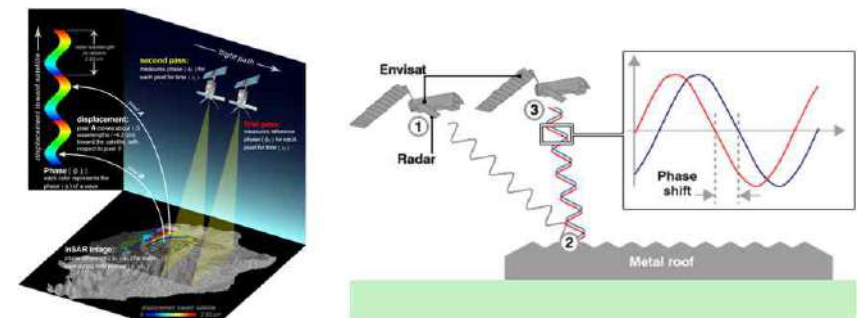


그림 2.1 InSAR 기술을 활용한 지표면 변위 탐지

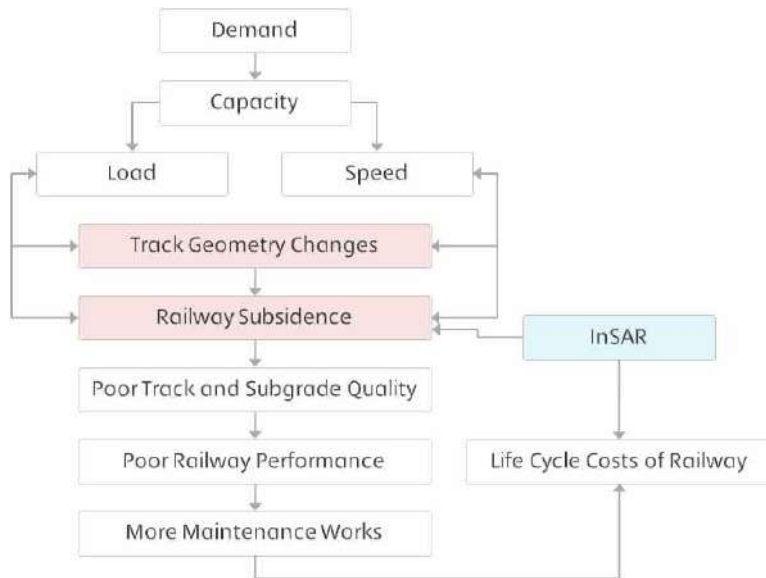


그림 2.2 지반침하에 의한 고속철도 성능저하

2) SAR 영상 및 Interferometry SAR의 개요

가) SAR영상의 특징

- (1) 영상레이더(Imaging Radar)기법은 안테나를 통하여 마이크로파를 입사시켜 물체로부터 후방 산란된 신호를 처리하는 기법이며 영상의 합성방법에 따라 다음과 같이 RAR(real aperture radar)와 SAR(synthetic aperture radar)로 나뉜다
 - RAR : 비행방향의 오른쪽에 거리방향으로 좁은 각의 빔을 송신하고 지표에서 반사된 신호를 처리하는 방식이며 주어진 안테나 크기에 제약이 있음
 - SAR : 합성빔 원리를 이용하여 실제 안테나 폭이 제공하는 것보다 더 높은 방위해상도를 얻을 수 있음 (Xiaobing Zhou, et al, 2009)
- (2) 마이크로웨이브파를 이용하는 영상레이더 기법은 다음과 같은 조건에서의 영상 획득에 장점이 있음
 - 대기 중의 수증기나 구름, 먼지 등 기상조건에 영향을 받지 않으며 날씨와 태양의 고도에 관계없이 영상을 획득할 수 있음
 - 바다와 호수 등 물 표면 작용들이 분석 가능하여 해양 연구에 적용될 수 있으며 광학센서와 달리 지형의 구조, 표면 거칠기, 토지에 함유된 수분량 등을 분석 가능함 (Andrew Hooper, et al, 2004)
- (3) 영상레이더의 해상도를 높이는 방법에는 다음과 같은 3가지 방법이 있음
 - 목표지역의 좁은 부분의 반사파만 수신하여 방위해상도를 높이는 방법
 - 영상레이더와 목표지점의 거리를 짧게 하여 거리해상도를 높이는 방법
 - 전자파의 굴절을 최소화 하기 위해 파장이 짧은 전파를 사용하여 해상도를 높이는 방법
- (4) 광범위한 지역을 관찰하기 위해서 위성에 탑재된 레이더의 경우 다음의 조건하에서 영상을 획득하는데 단점이 있음
 - 수신 받는 안테나의 직경이 클수록 방위해상도가 높아지지만 위성에 탑재할 수 있는 안테나의 크기가 제한적임
 - 거리해상도는 위성과 목표지점간의 거리를 줄여야 향상되지만 방법적으로 난해함
 - 전파의 파장을 짧게 할수록 전파의 감쇠가 심해져 영상 품질이 저하됨
- (5) 합성개구레이더(Synthetic Aperture Radar)는 인공위성에 수신레이더를 탑재한 채로 고속으로 이동하며 반사파를 연속으로 수신하는 방식을 채택했으며 이에 대한 특성은

다음과 같음

- 레이더가 움직이는 거리만큼 안테나의 직경이 넓어지는 것과 같은 합성법 효과를 갖게됨
 - 위성이 빠르게 이동하면서 반사파를 수신하게 되면 거리차이가 발생하게 되는데 이 거리차이 만큼 도플러 편이가 일어나게 되고 이 계수의 상대적인 편이 특성을 합성함 (O. Cavalié, et al, 2008)
- (6) SAR 영상의 정밀도는 파장 대역폭에 따라 X밴드, C밴드, L밴드로 나뉘며 각 밴드별 특성은 다음과 같음
- L밴드는 긴 파장을 갖고 있으며 투과율이 높아 수계지역, 농경지역 등에 있는 식생을 투과하여 지표면까지 파장이 전달됨
 - X밴드의 경우 철근 콘크리트건물, 교량 등 높은 반사강도를 가지고 있는 도심지역에서 높은 정확도를 보임
 - 아래의 그림 2.6은 상기한 밴드별 투과특성을 나타낸 것이며(Daniel Raucoules, et al, 2010) 각각의 SAR 센서를 탑재한 위성의 목록은 다음 표 2.1과 같음

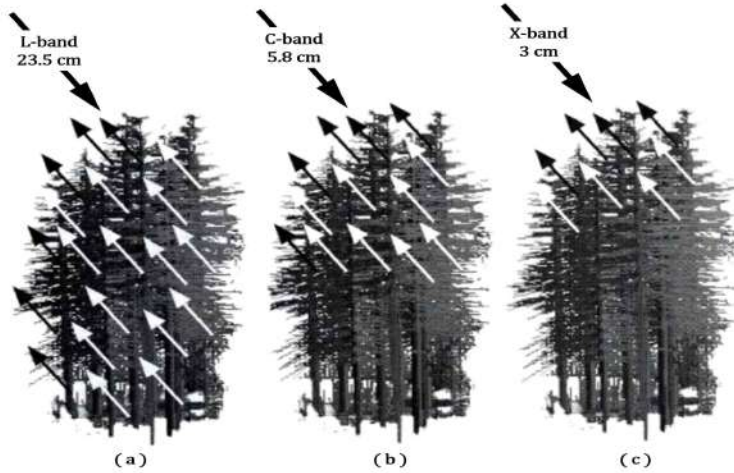


그림 2.3 밴드별 투과특성

표 2.1 SAR 시스템을 탑재한 위성

	Nation	Period	Band	Polarization	angle	Height	Resolution
SEASAT	USA	1978.06 ~ 1978.10	L	HH	20	795	25
ERS-1	EU	1991.07 ~ 2000. 02	C	VV	20	780	25
JERS-1	Japan	1992.02 ~ 1998.10	L	HH	38	570	25
ERS-2	EU	1995.04 ~ 2011.07	C	VV	20	780	25
Radarsat	Canada	1995.11 ~ now	C	HH	20-60	790-820	10-100
ALOS - PALSAR	Japan	2006.01 ~ 2011.01	L	Multi	8-60	692	10-100
COSMO-SkyMed	Italy	2007.06 ~ now	X	Multi	20-59	619	1-100
Terra SAR-X	Germany	2007.07 ~ now	X	Multi	15-60	514	1-16
Tan DEM-X	Germany	2010.06 ~ now	X	Multi	15-60	514	1-16

- (7) SAR 영상은 촬영모드에 따라 Strip-map 모드, Scan SAR모드, Spot-Light모드로 나뉨
- Strip-map 모드 : 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 모드로 SAR 위성의 각도를 고정된 뒤 위성의 진행방향을 따라서 연속적으로 촬영하는 방식, 한 촬영범위가 넓어짐에 따라 긴 지역의 영상정보를 획득할 수 있으며 적당한 해상도를 제공함
 - Scan SAR모드 : 안테나의 진행방향을 교차로 변화시키며 촬영하는 모드로 넓은 지역을 촬영할 수 있다는 장점이 있으나 3가지 모드 중에서 가장 낮은 해상도를 제공하는 단점이 있음
 - Spot-Light모드: 대상지역 및 목표물을 자세히 식별하기 위해서 좁은 영역에 안테나를 고정하여 촬영하는 모드로 대상면적이 좁다는 단점이 있으나 3가지 모드 중 가장 정밀한 해상도를 제공함 (Yuri Fialko, et al, 2001)

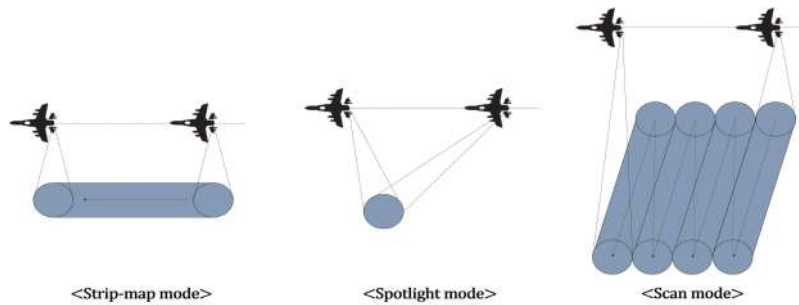


그림 2.4 SAR의 3가지 촬영모드

나) Interferometry SAR 특성

- (1) InSAR 데이터는 복소수데이터를 가진 두 장 이상의 SAR영상을 합성하여 정보를 추출하는 기법으로 데이터가 도플러 편이 통해 합성되어 복소수 형태로 저장(P. Tizzani, et al, 2013)되어 의미있는 정보 도출이 난해한 단일 SAR영상의 단점을 개선하였음
- (2) InSAR 간섭방식은 크게 다음과 같은 3가지 방식으로 나누어 설명할 수 있음
 - Along-Track Interferometry(ATI)방식 : 발사된 마이크로파를 두 개 이상의 위성이 동시에 수신하는 Along-Track Interferometry(ATI)방식으로 TerraSAR-X 위성이 이와 같은 방식을 사용함
 - Cross Track Interferometry(XTI)방식으로 : 위성보다 항공SAR에 많이 사용되는 방식으로 두 개의 다른 안테나를 사용하여 동시에 간섭시키는 방식을 의미함
 - Repeat Track Interferometry (RTI) 방식 : 궤도가 반복될 때 마다 동일지역을 촬영하는 방식으로 대부분의 위성이 이 방식을 사용함(M. Shirzaei, et al, 2013)

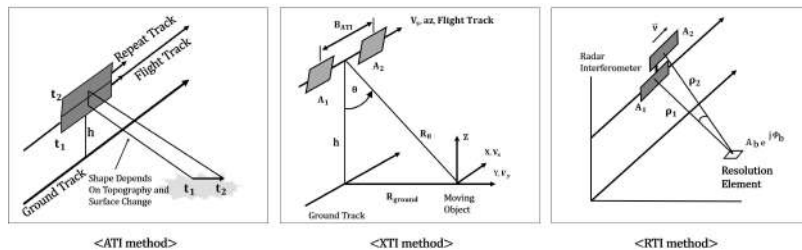


그림 2.5 InSAR 간섭방식

다) InSAR 기법을 이용한 연약지반침하 분석 방법론

- 본 연구에서 수행한 InSAR 기법의 흐름도는 아래 그림 2.9에 도식하였으며 해당 내용은 다음과 같이 세분화 되어 수행함

① 연구 대상지역 선정

- 본 연구는 호남선 고속철도 188km 구간을 대상으로 활용 위성의 촬영범위인 30*50km 기준 4개의 분할된 지역을 대상으로 연구를 수행함
- 4개의 지역은 청주 오송역-논산시, 논산시-정읍 신태인읍, 정읍 신태인읍-장성군 북이면, 장성군 북이면-광주 송정역으로 구성되어 있음
- 연구 대상지역이 각각 다른 지형특성을 띄고 있기 때문에 본 연구에서는 분석방법을 각 지형 특성에 맞게 차별화를 두어 분석을 수행함

② 후방산란 영상 취득 및 상호 정합

- 위성이 동일한 궤도를 통해 동일한 지점을 촬영 하더라도 위치상 정확히 일치하는 지점에서 촬영할 수 없으므로 획득된 영상간에 시간적, 공간적 이격이 발생하게 되며 이는 분석의 정확도에 영향을 미치게 됨
- 따라서 다른 위치에서 촬영된 25장 이상의 SAR 영상을 상호 정합하는 과정을 거쳐야 하며 이를 위해 후방산란 영상을 활용함
- 후방산란 영상은 Gray-Scale로 구성되어 있으며 영상이 백색에 가까울수록 반사강도가 높은 구조물을 의미, 흑색에 가까울수록 반사강도가 낮음을 의미함
- 일반적으로 상호 정합을 수행하기 위해 25장의 후방산란영상 중 하나를 주영상으로 선택한 뒤 나머지 영상들을 주영상 기준으로 정합을 수행하게 됨
- 따라서 선정된 주 영상은 시간적, 공간적 거리가 가장 중심에 있는 영상을 선정하게 되며 하나의 주영상에 나머지 부영상을 정합한 그래프를 일반적으로 Star-Graph라 함

③ 좌표변환

- 좌표변환은 영상의 좌표(Line, Sample)로 이루어진 데이터를 실세계 좌표(위도, 경도)로 변환하는 단계이며 이를 통해 다양한 영상처리 분석을 수행할 수 있음
- 일반적으로 상호 보정 단계에서 영상간의 시간적, 공간적 거리가 짧을수록 좌표변환에서 오류가

적으며 많은 영상을 상호정합 할수록 정확도가 높아짐

④ 위상 간섭 영상 생성

- 위상간섭 영상은 두장의 SAR 영상에서 각 픽셀의 공액복소수를 통해 얻어지는 데이터를 의미하며 간섭도 영상에 지구곡률보정, 지형보정 등 영상보정 등을 통해 오차 위상 성분들을 제거하여 위상 간섭 영상의 정확도를 보정함
- 해당 영상에서 나타나는 무늬는 Fringe라 하며 이는 기복변위와 반비례관계를 가지는데, 간격이 좁을수록 기복변위가 큰 산악지역을 의미하고 띠의 간격이 넓을수록 기복변위가 완만한 농경지, 도심지, 평야지등을 의미함

⑤ 긴밀도 영상 생성

- 긴밀도는 주영상과 부영상 간의 Co-registration을 통해 두 영상간의 긴밀도를 계산하며 SAR 이미지의 품질을 평가하는 지표로서 긴밀도가 높을수록 위상 간섭 영상의 품질이 높아짐
- 긴밀도는 각 영상간의 기하학적인 관계뿐만 아니라 영상간의 시,공간적 기선거리에도 영향을 받으며 이는 긴밀도저하를 일으키고 또한 위상 간섭 영상의 품질에도 영향을 미침

⑥ 고정산란체 추출

- PS-InSAR 기법에서 언급한 바와 같이 본 기법은 SAR 영상 촬영 지역 전체의 지표변위량을 산출하는 다른 기법들과 달리 높은 반사강도를 가지는 선별된 고정산란체의 지표변위만을 도출함
- 고정산란체를 추출하기 위해 모든 점군을 활용할 경우 프로세싱속도가 저하되며, 또한 불규칙삼각망(TIN)을 형성하는 과정에서 선별된 각 점군마다 긴밀도를 연결하고 전이됨으로 인해 낮은 긴밀도를 가진 점군이 높은 긴밀도를 가진 점군에 영향을 끼쳐 분석결과와 정확도를 저하시키는 현상을 막고자 영상 정확도와 밀접한 관계가 있는 긴밀도 영상을 선별하여 활용함
- 고정산란체 선별은 PS-InSAR 기법을 이용하여 지표변위량을 산정하는데 있어 가장 중요한 단계이며 고정산란체를 어떤 지수를 사용하여 어떻게 선별했는가에 따라서 선별되는 고정산란체의 개수와 정확도 및 각 점을 연결하는 불규칙 삼각망 형성 및 연결강도에도 영향을 미침

⑦ 위상 불구속화

- 위상 불구속화 과정이란 $\pm\pi$ 내에 구속되어 있는 데이터값의 구속된 위상을 풀어내는 과정을 의

미하며 영상 내 픽셀 데이터와 인접 픽셀간의 위상 차이를 적분하는 과정을 통해 데이터가 mm로 변환됨

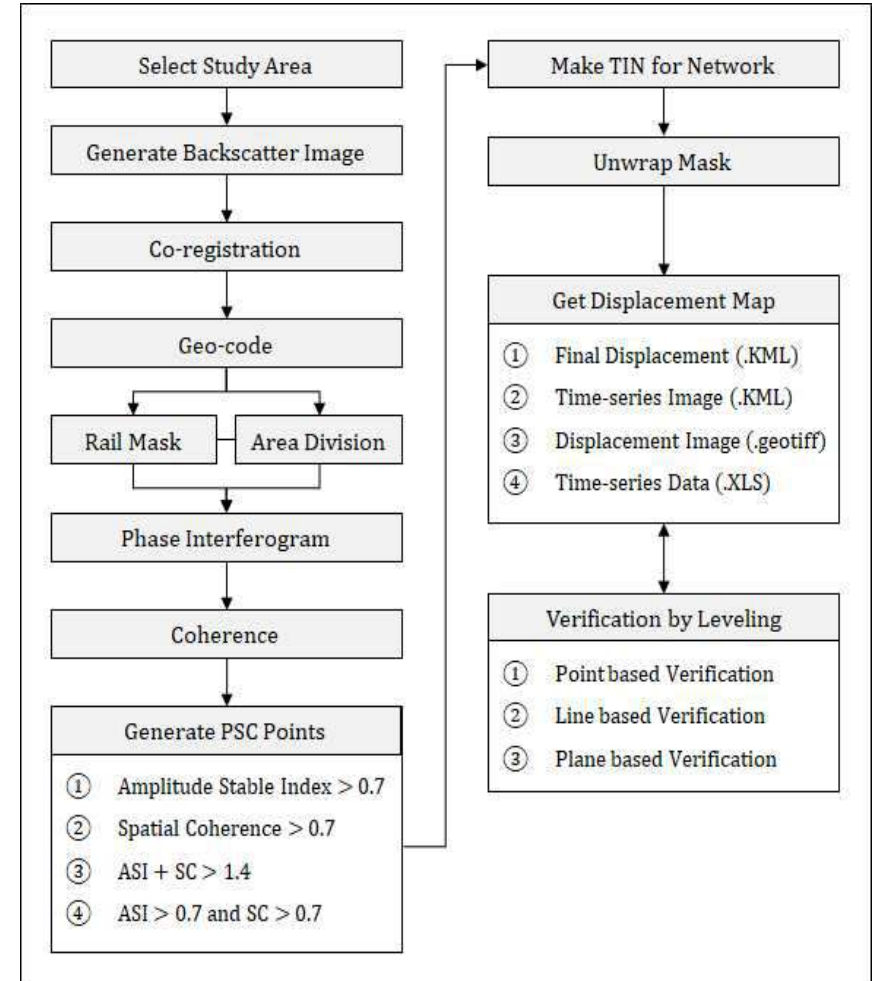


그림 2.6 지표 변위 분석 연구흐름도

라) 연구동향

(1) 국내연구현황

- ① 원격탐사를 이용한 새만금 조간대의 지형변화 연구 : 새만금 조간대 지역에 대한 1990년대 초반과 2000년대 초반 사이의 지형변화를 위성영상을 이용한 분석을 수행함
- ② X-band SAR 위성영상의 3차원 위치결정 : 2013년 우리나라 최초의 X-band SAR 위성인 KOMPSA T-5가 발사됨에 따라, KOMPSAT-5를 이용한 다양한 분야에서의 활용 가능성을 연구함
- ③ Differential InSAR기법을 활용한 백두산 지표변위 : 화산분화 가능성이 제기된 백두산 일원에서 SAR 위성을 이용한 영상처리로 지표변위 예측 및 재난 리스크 관리를 위한 연구를 수행 중임
- ④ InSAR기법을 활용한 재난관리 활용성 분석 : 경상북도와 강원도에서 수집한 SAR위성영상을 이용하여 산사태, 수해 등으로 피해를 입은 재난지역에서의 활용 가능성을 분석함
- ⑤ GPS를 이용한 지표변위 관측 및 지질공학적 수치 모델링 : GPS측량 결과를 이용하여 지표변위를 정밀 분석하고, 이를 지질공학적 수치모델링 및 GIS를 활용하여 장기간 역학적 거동을 분석함
- ⑥ InSAR를 이용한 목포 지반침하 관측 : 목포시는 약 70%가 바다를 매립하여 이루어진 연안도시로서 매립에 의한 지반침하 현상이 빈번하게 일어남에 따라 정량적인 관측을 실시하며 지표변위도를 작성하여 지반침하 모니터링 중에 있음
- ⑦ 다중시기 SAR 영상을 이용한 시계열 변위 관측기법 비교 분석 : 미국 라스베이거스 지역에서 1992년부터 2000년 동안 획득된 51개의 SAR영상을 각각 PS-InSAR 기법과 SBAS 기법에 적용하여 지표변위도를 구하였으며 이들 간의 비교분석을 통해 결과를 비교하였음

(2) 국외 연구사례

- ① 일본 지반침하 모니터링 : 재난시와 주기적으로 InSAR영상을 관측한 결과를 바탕으로 지진과 지반침하에 따른 지표면의 변동량을 상시 모니터링하고 있으며, 재난관리에 영상을 활용 중임
- ② 중국 고속철도 모니터링 : 중국 Wuguang 지역을 지나는 고속철도의 연간 지반침하율을 계산하고, 고속철도 주변 지역에서의 지반침하율 정도를 지도상에 시각화하여 표현한 지도를 제작함
- ③ 헝가리 구조물 모니터링 : 헝가리 부다페스트에서 건설 중인 도시철도 사업에 대한 지반침하 모니터링을 수행하고 있으며, InSAR를 이용한 연간 지반침하율 계산결과 10mm/year로 분석됨

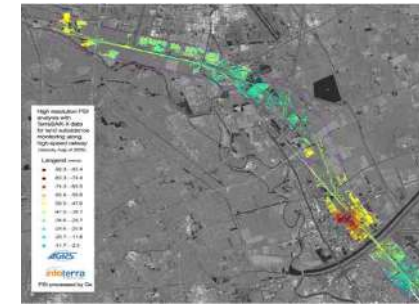


그림 2.7 중국 고속철도 모니터링 연구사례

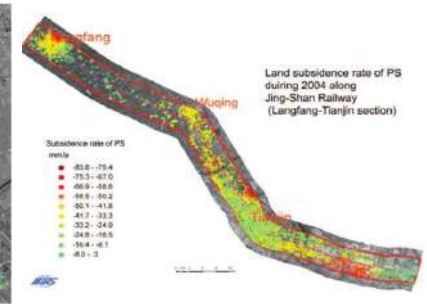


그림 2.8 중국 고속철도 지반침하속도 지도제작 사례



그림 2.9 헝가리 부다페스트 도시 구조물 모니터링 연구사례

마) Interferometry SAR 원리

- (1) 그림 2.10에서 지상의 한 점P에 레이더파장을 전송하고 P점으로부터 다른 신호를 수신함
- (2) SAR영상에서 레이더파장과 그 신호는 진폭과 위상 정보를 가진 복소수로 기록되며 S LC(Single Look Complex) 이미지의 픽셀로 나타낼 수 있음
- (3) SLC 이미지는 합성 개구면에서 생성된 SAR이미지를 가리킨다. A_1 은 처음으로 영상을 취득할 때의 안테나 위치이고, A_2 는 그 다음 촬영시의 안테나의 위치를 나타냄
- (4) A_1 과 대상의 위치 P점 사이의 거리를 R이라고 하며 궤도를 따라 이동하여 촬영된 A_2 와 대상 P점과의 거리는 $R + \Delta R$ 로 나타냄
- (5) 위성이 일정한 궤도를 따라서 회전하더라도 A_1 과 A_2 에는 위치차이가 존재하게 되는데 두 위치의 차이를 기선거리B라고 하며 이것은 두 장의 SAR영상에서 위상 차이를 야기한다. 기선거리B와 수평방향 사이의 각을 α 로 표현하며 안테나로부터 지표면까지의 거리를 H로 나타내며 위성고도 H와 대상점P의 사이 각은 θ_0 으로 나타냄
- (6) 다음 그림 2.10은 R 과 $R + \Delta R$ 가 일치하지 않음으로 인해 야기된 위상차이를 의미함 (Jun Hu, et al, 2012)

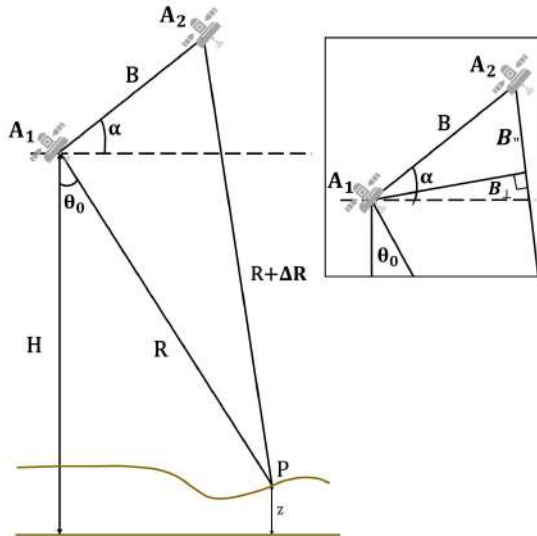


그림 2.10 InSAR의 원리

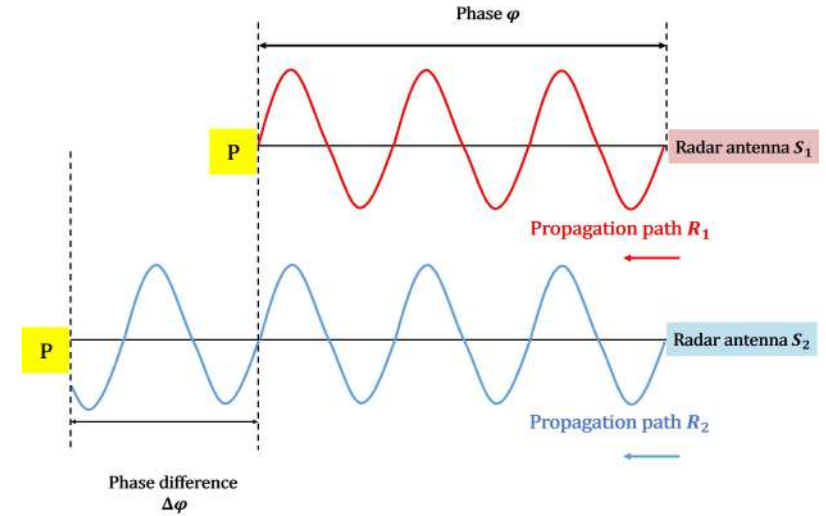


그림 2.11 레이더 전파 경로 및 레이더 위상

바) Interferometry SAR 계산식

- (1) 안테나 A_1 과 A_2 가 수신한 SAR 데이터는 S_1 과 S_2 로 나타내며 여기서 $S_1(R), S_2(R)$ 은 레이더 신호의 복소수이고 $\phi(R)$ 과 $\phi(R + \Delta R)$ 은 레이더 신호의 위상, $u_1(R)$ 과 $u_1(R + \Delta R)$ 은 레이더 신호의 진폭임

$$\begin{aligned} S_1(R) &= u_1(R) \exp(i\phi(R)) \\ S_2(R) &= u_2(R + \Delta R) \exp(i\phi(R + \Delta R)) \end{aligned} \quad (2-1)$$

- (2) 수신된 데이터는 중복궤도에 의해 얻어지는 위상자료와 노이즈, 산란 등에 의해서 발생하는 오차위상을 포함하고 있으며 $\arg\{u_1\}$ 과 $\arg\{u_2\}$ 는 산란, 노이즈에 의해서 발생하는 오차위상을 나타내고 기선거리 B만큼의 차이에 따라 입사각 차이가 존재하기 때문에 두 장의 SAR영상은 일치하지 않음

$$\begin{aligned}\psi_1 &= 2\frac{2\pi}{\lambda}R + \arg\{u_1\} \\ \psi_2 &= 2\frac{2\pi}{\lambda}(R + \Delta R) + \arg\{u_2\}\end{aligned}\quad (2-2)$$

- (3) 두 영상에 공역복소수를 곱하면 위상값을 실수로 가지고 있는 간섭영상, 즉 위상차 정보를 가지고 있는 위상영상을 얻을 수 있으며 이 때 두 영상의 불규칙적인 위상값이 같다고 가정하면, 간섭영상의 위상은 ΔR 에 의해서 결정됨

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R + 2\pi N \quad N=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2-3)$$

- (4) 간섭영상의 위상값은 절대 위상값과 잔존하는 노이즈의 값의 합으로 나타나며 절대위상을 구하기 위해서는 절대위상복원 단계를 거쳐 노이즈를 제거해야하며 이 식을 단순화 하기 위하여 ΔR^2 값을 제외한 식은 아래와 같음

$$\sin(\theta_0 - \alpha) = \frac{(R + \Delta R)^2 - R^2 - B^2}{2RB} \quad (2-4)$$

$$z = H - R\cos\theta_0 \quad (2-5)$$

- (5) 일반적으로 ΔR 값은 매우 작으며 따라서 ΔR^2 값은 무시할 수 있을 정도로 미미한 값이므로 생략가능하고 인공위성에 탑재된 SAR센서의 경우 안테나 사이의 기선거리인 B가 위성과 지표면의 대상 점과의 거리인 R에 비해 굉장히 작은 값이므로 $\frac{B^2}{2R} \simeq 0$ 으

$$\Delta R \approx B\sin(\theta_0 - \alpha) + \frac{B^2}{2R} \quad (2-6)$$

$$\Delta R \approx B\sin(\theta_0 - \alpha) \quad (2-7)$$

- (6) 그림 2.10에 나타난 기하학적 관계에서 기선B를 수평과 수직방향으로 분리하여 각각

$B_{\parallel}$ 과 $B_{\perp}$ 으로 표현할 수 있으며 이를 식 2-7에 적용시켜 따라서 최종 위상값을 구하는 식을 아래와 같이 표현함

$$\begin{aligned}B_{\parallel} &= B\sin(\theta_0 - \alpha) \\ B_{\perp} &= B\cos(\theta_0 - \alpha)\end{aligned}\quad (2-8)$$

$$\Delta R \approx B_{\parallel} \quad (2-9)$$

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda}B_{\parallel} \quad (2-10)$$

- (7) 최종위상값에는 인공위성과 지표면의 대상점의 높이정보를 포함하고 있으나 간섭영상의 최종 위상값에는 지표면위에 발생하는 지표변위에 발생하는 위상값 뿐만 아니라 여러 가지 오차를 포함하고 있으므로 이를 제거해야함

$$\begin{aligned}\phi_{\text{observation}} &= \phi_{\text{defo}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{orbit}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}} \\ \phi_{\text{defo}} &= \phi_{\text{observation}} - \phi_{\text{topo}} - \phi_{\text{orbit}} - \phi_{\text{atm}} - \phi_{\text{noise}}\end{aligned}\quad (2-11)$$

- (8) 식 2-11에서 ϕ_{obs} 는 간섭영상에서 가지고 있는 전체 위상오차를 나타내며 ϕ_{defo} 는 지표변위에 의해 발생하는 위상성분으로 ϕ_{topo} 는 지형에 의한 위상성분을 제거하기 위해 사용된 DEM오차, ϕ_{orbit} 은 위성의 궤도오차, ϕ_{atm} 은 대기상태에 따른 위상오차, ϕ_{noise} 는 노이즈에 의한 오차성분을 의미함

- (9) 그림 2.10(기하학적 관계)에서 나타난 DEM 생성의 기하학적인 구조에 따라서 나타난 위상은 지표면의 대상점 P의 고도를 구할 수 있으며 여기서 h는 대상점 P의 고도, H는 레이더 안테나 A_1 의 고도를 나타내게 되는데 이를 코사인법칙에 따라 다음과 같이 전개 할 수 있고 여기서 φ_p 는 두 레이더 신호의 위상차이를 의미함

$$h = H - R \cos \theta \quad (2-12)$$

$$(R \Delta R)^2 = R^2 + B^2 - 2RB \cos(\frac{\pi}{2} - \theta + \alpha) = R^2 + B^2 - 2RB \sin(\theta - \alpha) \quad (2-13)$$

$$\varphi_p = \frac{4\pi}{\lambda} (R_1 - R \Delta R) \quad (2-14)$$

$$R \Delta R = R - \frac{\varphi_p \lambda}{4\pi} \quad (2-15)$$

$$(R - \frac{\varphi_p \lambda}{4\pi})^2 = R^2 + B^2 - 2RB \cos(\frac{\pi}{2} - \theta + \alpha) = R^2 + B^2 - 2RB \sin(\theta - \alpha) \quad (2-16)$$

$$R^2 + \frac{\varphi_p \lambda}{4\pi^2} - 2 \frac{\varphi_p \lambda}{4\pi} R = R^2 + B^2 - 2RB \sin(\theta - \alpha) \quad (2-17)$$

$$R[2B \sin(\theta - \alpha) - (\frac{\varphi_p \lambda}{4\pi})] = B^2 - (\frac{\varphi_p \lambda}{4\pi})^2 \quad (2-18)$$

$$R = \frac{B^2 - (\frac{\varphi_p \lambda}{4\pi})^2}{2B \sin(\theta - \alpha) - (\frac{\varphi_p \lambda}{2\pi})} \quad (2-19)$$

(10) 최종적으로 고도 h는 다음 식과 같이 나타낼 수 있으며 만약 두 SAR 영상사이에 접지변형이 발생하지 않은 경우, 지표면의 대상점 P의 고도는 지형정보를 포함하며 대상 지역의 DEM은 촬영된 지역의 지형에 따라서 생성됨

$$h = H - R \cos \theta = H - \frac{B^2 - (\frac{\varphi_p \lambda}{4\pi})^2}{2B \sin(\theta - \alpha) - \frac{\varphi_p \lambda}{2\pi}} \cos \theta \quad (2-20)$$

3) InSAR의 기법 종류 및 연구사례

가) D-InSAR 기법

- (1) 차분 레이더 간섭기법 이라고도 하는 D-InSAR 기법은 간섭도로부터 지형기록의 위상을 제거함으로써 지형과 지표변위에 대한 두 가지 위상을 분리해 내는 기법임 (Jörn Hoffmann, et al, 2003)
- (2) 동일한 레이더 안테나에 의해 지표변위 전후로 촬영된 두 장의 SAR영상이 지형과 지표변위의 정보를 포함하는 하나의 인터페로그램을 생성하거나 레이더의 궤도 파라미터와 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)에 의해 생성된 DEM의 대상지역의 인터페로그램을 나타내는데 사용됨 (Estelle Chaussard, et al, 2014)
- (3) D-InSAR 기법을 SAR영상 개수를 기준으로 분류하면 2-pass방법, 3-pass방법, 4-pass방법등으로 구분할 수 있으며 지속적인 지반침하를 모니터링 하는데 있어서는 2-pass방법이 효과적이라 판단됨
 - ① 2-pass 방법 : 두 장의 SAR영상과 SRTM DEM을 이용하는 방법으로 Massonnet에 의해 개발되었음. 정밀한 DEM을 통해 지형 정보를 제거하고 지형위상 제거를 위해서 별도의 위상불구속화를 수행할 필요가 없으며 지속적인 지표변위 모니터링에 적용할 수 있는 장점이 있지만 DEM으로부터 제공되는 지형정보와 실제 촬영된 SAR영상간의 정합이 어려운 단점이 있음 (Zbigniew Perski, et al, 2009)
 - ② 3-pass방법 : Zebker 등 NASA JPL 그룹에서 주로 사용하는 방법이며 3장의 SAR 영상으로 D-InSAR 기법을 수행함. 위상불구속화가 진행되어야하며 대기효과 등에 의하여 해석이 어려운 단점이 있음
 - ③ 4-pass방법 : 4장의 SAR영상을 이용하며 두 개의 간섭도간의 co-registration을 수행해야함. D-InSAR 기법 중에서 가장 많은 SAR영상을 사용하기 때문에 다른 방법에 비해 더 많은 InSAR 간섭쌍을 활용할 수 있는 장점이 있으나 완전히 독립된 4개의 궤도를 이용하기 때문에 기하학적인 보정에 어려움을 겪는 단점이 있음 (Naomi Short, et al, 2013)

나) PS-InSAR 기법

- (1) PS-InSAR 기법은 1990년도 말에 이태리 POLIME (Prati of the Technical University of Milan) SAR 연구소의 Ferretti 등에 의해 개발된 기법으로 긴밀도가 높은 고정 산란체(PS point)를 이용한 기법임 (Tim J. Wright, et al, 2003)
- (2) 기존의 두 장의 영상을 간섭하여 지표변위를 도출하는 D-InSAR와 달리 PS-InSAR 기법은 최소 25장 이상의 영상을 정합하여 지표 변위를 도출하는 기법으로 D-InSAR와 비교했을 때 PS-InSAR 기법은 연구지역에서 획득된 거의 모든 SAR영상을 활용할 수 있고, 여러장의 SAR영상을 사용함으로써 지표변위의 시계열적인 분석이 가능함(Juliet Biggs, et al, 2009)
- (3) 여러 장의 간섭영상을 생성하여 DEM오차, 위성궤도 오차, 대기성분에 대한 오차 등을 효과적으로 제거하여 궤도의 기하학적, 시간적 제약에 비교적 자유로우며 정확한 DEM을 이용하면 계산시간이 단축되지만 D-InSAR기법에서와 같이 높은 정밀도의 DEM이 요구되지 않음
- (4) 안정된 위상 신호를 갖는 긴밀도가 높은 PS 포인트를 추출해 고정산란체에 대한 지표 변위량만을 구하는 방식으로(Rikke Pedersen, et al, 2003) 수십m 정도의 정확도를 가진 DEM을 이용하더라도 최종적으로 계산된 고정산란체의 지표변위량은 cm정확도로 추출가능하여 기존 D-InSAR 기법에 비해 정확한 지표변위량을 도출할 수 있는 장점이 있음 (Y. Kaneko, et al, 2014)

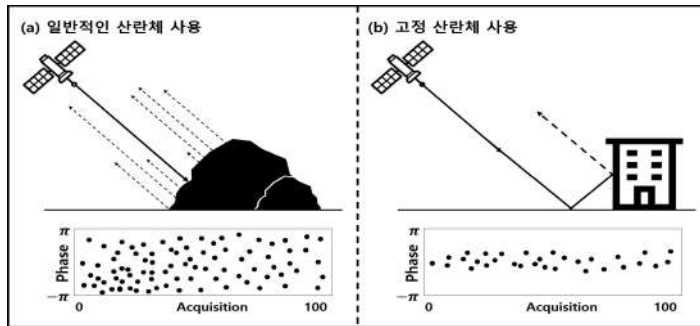


그림 2.12 고정산란체 사용시 위상의 분포

- (5) PS-InSAR 기법은 고정산란체에 대한 변위량만을 도출하기 때문에 고정산란체 추출

하는 기법이 매우 중요하며 이러한 고정산란체를 추출하는 기법은 다음의 표를 통해 알 수 있음

표 2.2 고정산란체 추출 기법에 관한 사전 연구

Paper	Method of PSC Extration
Ferretti et al. (2000, 2001)	Amplitude dispersion
Berardino et al. (2002)	Coherence
Mora et al. (2003)	Coherence
Schmidt and Bürgmann (2003)	Coherence
Werner et al. (2003)	Amplitude dispersion
Duro et al. (2003)	Amplitude dispersion, coherence
Kampes (2006)	Amplitude dispersion
Crosetto et al. (2005)	Coherence
Costantini et al. (2008)	Amplitude dispersion
López-Quiroz et al. (2009)	Coherence
Hetland et al. (2012)	Coherence
van Leijen (2014)	Amplitude dispersion
Devanthéry et al. (2014)	Amplitude dispersion

- (6) 고정산란체를 추출 가장 대표적인 기법인 Amplitude Stable Index 기법은 다음의 식과 같이 나타낼 수 있는데 여기서 σ 는 동일픽셀에 대한 표준편차를 의미하고 μ 는 동일픽셀에 대한 진폭의 평균을 의미하며 N 은 전체 영상의 개수, I 는 I 번째 영상, x_i 는 i 번째 영상의 진폭, e_i 는 i 번째 영상의 잔차를 의미함

$$Amplitude\ Stable\ Index = 1 - \frac{\sigma}{\mu} \quad (2-21)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N e_i^2}{n}} \quad (2-22)$$

- (7) 식 (2-22)를 식(2-21)에 대입하면 다음과 같이 표현 가능하며 표준편차의 개념을 사용

함으로써 1~2장에 포함되어있는 오류로 인해 진폭이 불안정하더라고 나머지 SAR영상들의 픽셀 진폭이 안정된 값을 가진다면 해당 픽셀을 고정산란체로 선별이 가능함

$$\therefore \text{Amplitude Stable Index} = 1 - \frac{\sigma}{\mu} = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \epsilon_i^2}}{\mu} \quad (2-23)$$

- (8) Amplitude Stable Index를 사용하면 일정 수준 이상의 진폭 안정성을 갖는 점을 선별할 수 있고, 1~2장에서 발생하는 오류에 대해서 영향을 받지 않기 때문에 보다 더 많은 고정산란체를 추출할 수 있는 장점이 있음
- (9) Amplitude Stable Index의 임계값은 경험식을 따르며 임계값은 관측기간이 길수록, 지표면위량이 많은 지역일수록 낮게 설정하고 그 반대의 경우일수록 임계값을 높게 설정하지만 위성의 신호 대비 잡음비가 낮은 경우는 Amplitude Stable Index를 단독으로 사용하기 어렵다는 연구가 진행되었으며 신호 대비 잡음비가 낮은 산악지역 또는 농경지역, 수계지역에서는 Amplitude Stable Index 기법에 Spatial Coherence 기법도 함께 사용하는 경우가 증가함
- (10) 이러한 지역에서 연구를 수행할 경우는 보통 $0 < \text{Amplitude Stable Index} + \text{Spatial Coherence} < 2$ 를 기준으로 임계값을 설정함. PS-InSAR 기법의 정밀도는 위성 간의 공간적 기선거리와 시간적 기선거리에 의해 영향을 받으며 두 기선거리가 멀어질수록 영상 간 상호정합 시 노이즈 발생 가능성이 증가함
- (11) 따라서 주영상과 부 영상을 선택하는데 있어서 최단거리의 기선거리를 갖도록 설정하며 주영상 촬영당시 비 또는 눈, 안개 등의 기상상황이 좋지 않은 경우는 주 영상으로 선택하지 않음

다) SBAS 기법

- (1) Berardino에 의해서 개발된 SBAS기법은 기존의 PS-InSAR의 공간적 decorrelation을 극복하기 위해서 비교적 짧은 기선을 지나는 차분간섭도만을 이용하여 시간에 따른 지표변위를 관측 할 수 있는 Small BAseline Subsets(SBAS) 알고리즘임 (P. Tizzani, et al, 2007)

- (2) SBAS 알고리즘은 시간적으로 연결되지 않는 차분간섭도로부터 시계열 지표면의 변위를 시계열적으로 모니터링하기 위해 singular value decomposition(SVD)을 이용한다. SBAS 기법은 decorrelation이 적은 간섭도를 사용하기 때문에 위상 불구속화를 수행하게 되며 이 과정에서 계산 오류를 범하기 쉽고, 계산이 까다로움
- (3) 잘못 계산된 간섭도를 SBAS 기법에 적용할 경우, 정확한 지표변위량 산출에 어려움을 겪는다는 단점이 있기에 Unwrapping 오차를 최소화하기 위하여 잔류 차분간섭도(residual D-InSAR interferograms)를 이용하며, 각 차분간섭도의 대기효과를 보정하기 위하여 공간적으로 저주파 필터와 시간적으로 고주파 필터를 적용함(Scott Baker, et al, 2012)
- (4) 그러나 이 방법은 초기 관측 시 시계열 지표 변위를 선형으로 가정하였기 때문에 각 차분간섭도의 위상불구속화 오차를 정확히 보정하기 어려웠을 뿐만 아니라 시계열 지표변위의 잡음 성분을 제거하기 힘들다는 단점이 있음

표 2.3 각 기법간의 비교

	D-InSAR	PS-InSAR	SBAS
Baseline	very small (<200m)	no limits	very small (<200m)
Atmospheric Effect	no reduction	highly reduced	Well reduced
DEM Resolution Demanded	Baseline depended >0.3 on several	100m	100m
Coherence	adjacent pixels	>0.7 on single pixel	>0.3 on several adjacent pixels
Image Demanded	>2	>25	

표 2.4 각 InSAR기법에 따른 연구사례

구분	사례
D-InSAR	○ 파리의 지반침하(Fruneau et al.2000)
	○ L-밴드 JERS-1 영상을 이용한 매립지 지반 침하 (Kim et al,2003)
	○ 백두산 및 부산지역의 지표면 변위 관측 (김상완, 2004)
PS-InSAR	○ 캘리포니아 Pomona 도심의 7년간의 침하량 측정 (Ferretti et al,2000)
	○ 산사태 및 구조운동에 의한 변위를 관측 (Colesanti et al,2003)
	○ L-밴드 JERS-1영상을 이용한 광산침하 (정한철 등, 2004)
SBAS	○ GPS와 인공위성 레이더 영상을 이용한 화산활동 감시(김수경 등 2014)
	○ SBAS 알고리즘을 적용한 목포시 지반침하 관측 (김명기, 2008)



그림 2.13 청주 오송역~논산 지역

4) 호남 고속철도 연구지역 특성

- 호남 고속철은 청주 오송역부터 광주 송정역까지 약 188km구간이 산지와 평야지역을 지나고 있으며 고속철도 노선이 호남평야를 비롯해 연약지반인 평야지역을 통과함으로써 일부 구간에서 지반침하가 발생하여 안정성 문제가 계속해서 야기됨
- ‘호남고속철도 개통 준비 및 토공 노반 현황 보고’에 따르면 호남고속철도 182.3km(오송~광주 송정) 구간 중 지반 침하 현상이 발생한 곳은 16% 가량인 상·하행선 29km이며 최대 처짐은 5.6cm인 것으로 조사됨
- 본 연구에서는 호남선 고속철도 188km 구간 및 주변지역의 지표변위를 PS-InSAR 기법을 이용하여 지속적인 지반침하 모니터링을 실시하였으며 연구지역이 철도 특성에 따라 좁고 긴 형태를 보이고 있어 총 4개의 영상으로 분할하여 연구를 수행함

가) 첫 번째 영상 (청주 오송역~논산) :

- 그림 2.13에 나타난 바와 같이 철도가 중간에 산악지역을 관통함으로써 터널을 통과하는 구간이라는 특징을 갖으며 산악지역을 제외한 도심이나 농경지역은 좌 상단에 위치한 오송역 및 역 주변지역과 우하단에 위치한 논산 성동면으로 나눌 수 있음에 따라 산악지역을 제외한 두 지역을 기준으로 영상을 재분할한 뒤 연구를 수행하였음

나) 두 번째 영상 (논산 ~ 정읍 신태인)

- 그림 2.14에 나타난 것과 같이 두 번째 영상에서는 산악지역과 수변지역이 없어 반사강도 및 긴밀도 저하가 발생하지 않는 이상적인 연구지역이나 PS-InSAR 분석을 수행하는데 있어 중요한 요소 중 하나인 PSC 점군분포가 익산시에 밀집해있으며 익산시를 제외한 나머지 지역은 농경지역으로 이루어져있음에 따라 익산시를 중심으로 PSC 점군을 생성한 뒤 나머지 지역의 점군 개수를 늘리는 Sparse Point Processing을 수행하였음



그림 2.14 논산~정읍 신태인 지역

다) 세 번째 영상 (정읍 신태인 ~ 장성군 북이면)

- 다음 그림 2.15에 나타난 것과 같이 두 번째 영상과 비슷한 지역특성을 보이지만 우측에 산악지역이 집중되어 있는 것이 특징으로 정읍시에 도심지가 집중되어 있으며 나머지는 거의 농경지역으로 이루어져 있음
- 본 영상에서는 산악지역을 분류하고 최대한 많은 PSC 점군을 추출하고자 마스킹 기법을 활용하여 산악지역 오른쪽에 포함되어있는 지역에 대한 분석도 별도로 실시하고 두 번째 영상과 동일하게 Sparse Point Processing을 적용하여 점군의 갯수를 늘리고 분포를 고르게 하였음



그림 2.15 정읍 신태인 ~ 장성군 북이면



그림 2.16 장성군 북이면 ~ 광주 송정역

라) 네 번째 영상 (장성군 북이면 ~ 광주 송정역)

- 그림 2.16에 나타난 것과 같이 위 지역은 나머지 영상에 비해서 대상지역의 대부분이 산악지역으로 이루어져있으며 우측에 위치해 있는 광주 송정역 부근만 도심지로 이루어져있다. 따라서 첫 번째 영상과 동일하게 산악지역으로 이루어져있는 장성지역과 광주 송정역을 기준으로 영상을 분할한 뒤 연구를 수행하였음
- 특히 장성군의 경우 산악지역으로 둘러 쌓여있어 신호 대 잡음비가 타 지역에 비해 나쁘기 때문에 Amplitude Stable Index를 단독으로 이용하지 않고 Amplitude Stable Index + Spatial Coherence를 이용하여 PSC점군을 보다 더 많이 추출하고자 하였음

5) 호남고속철도 PS-InSAR 기법 수행

다) 연구 기법 개요

○ 본 연구에서는 장기간에 걸쳐 발생하는 지표변위를 분석하기 위해 D-InSAR 기법이 아닌 PS-InSAR 기법으로 분석을 실시하였으며 PS-InSAR에 사용된 SAR영상은 철도 레일에 대한 지표변위 계측이 용이한 독일의 TerraSAR-X 와 TanDEM-X 위성영상을 사용함

(1) TerraSAR-X 위성

- TerraSAR-X 위성은 독일의 첫 번째 레이더 위성으로서 독일의 항공우주연구소와 유럽의 Astrium이 공동연구를 진행하여 발사된 위성으로 다음과 같은 세 가지 촬영모드를 지원함
 - Spotlight방식 : 최대 1m 해상도, 10km x 5km의 영상크기
 - Stripmap방식 : 최대 3m 해상도, 30km x 50km의 영상크기
 - ScanSAR방식 : 최대 16m 해상도, 100km x 150km의 영상크기
- 본 연구에서는 호남 고속철도 특성상 좁고 긴 형태를 보이고 있어 긴 거리를 관측하고 일정한 해상도를 확보할 수 있다는 점을 근거로 Stripmap방식을 통한 위성촬영을 시행하였음

(2) TanDEM-X 위성

- TanDEM-X위성은 TerraSAR-X 위성 발사 3년 후 발사된 쌍둥이 위성으로 고도는 약 514km, 경사는 97.44°으로 설정되어 있으며 위성의 재방문주기는 11일이고 위성의 궤도 진행방향의 우측 아래쪽을 향해 X밴드의 마이크로파를 송신하고 이를 안테나를 통해 수신함

○ 다음의 표 2.5에서 표 2.8은 본 연구에 사용된 TerraSAR-X 위성과 TanDEM-X 위성 영상의 세부내용이며 네 개의 영상 각각에 29장의 SAR영상을 사용하였음. 촬영기간은 2016년 8월부터 2018년 9월까지 약 25개월간 확보되었으며 영상의 촬영주기는 22일 또는 23일로 확보하였음. 영상 촬영기간중 국제 사회적 이슈로 인해 2017년 6월부터 2017년 10월까지의 위성영상은 획득할 수 없었음

표 2.5 연구에 활용된 X 밴드 SAR 영상 종류 (Scene 1)

Scene 1 : 29 Images (TerraSAR-X : 24 , TanDEM-X : 5)						
Image	Satellite	Date	Polarization	Baseline	Interval	Doppler
Slave	TerraSAR-X	20160809	HH	-65.3631	-440	-0.03895
Slave	TerraSAR-X	20160820	HH	-184.668	-429	-0.01011
Slave	TerraSAR-X	20160911	HH	-68.8057	-407	-0.01479
Slave	TerraSAR-X	20161025	HH	-20.0391	-363	-0.01932
Slave	TerraSAR-X	20161116	HH	-11.2495	-341	-0.00188
Slave	TerraSAR-X	20161230	HH	-65.8877	-297	-0.00235
Slave	TerraSAR-X	20170121	HH	105.2725	-275	0.007928
Slave	TerraSAR-X	20170212	HH	-15.54	-253	0.01236
Slave	TerraSAR-X	20170306	HH	68.68008	-231	-0.00118
Slave	TerraSAR-X	20170317	HH	130.595	-220	-0.00223
Slave	TerraSAR-X	20170328	HH	53.00705	-209	-0.00973
Slave	TerraSAR-X	20170419	HH	150.201	-187	-0.00322
Slave	TerraSAR-X	20170511	HH	-109.816	-165	-0.01308
Slave	TerraSAR-X	20170602	HH	17.77143	-143	-0.00789
Slave	TerraSAR-X	20170624	HH	23.69538	-121	-0.01849
Slave	TanDEM-X	20171001	HH	381.0312	-22	-0.01324
Master	TerraSAR-X	20171023	HH	0	0	-0.01263
Slave	TerraSAR-X	20171114	HH	-186.225	22	-0.00716
Slave	TerraSAR-X	20171206	HH	80.1367	44	-0.00214
Slave	TanDEM-X	20171228	HH	308.5899	66	-0.01603
Slave	TanDEM-X	20180130	HH	47.55249	99	-0.01462
Slave	TanDEM-X	20180304	HH	179.8259	132	-0.01146
Slave	TerraSAR-X	20180406	HH	160.1782	165	-0.00857
Slave	TerraSAR-X	20180428	HH	-238.003	187	-0.0307
Slave	TanDEM-X	20180520	HH	228.5573	209	-0.02224
Slave	TerraSAR-X	20180622	HH	-10.676	242	-0.01708
Slave	TerraSAR-X	20180725	HH	8.647546	275	-0.02195
Slave	TerraSAR-X	20180827	HH	-28.856	308	-0.00247
Slave	TerraSAR-X	20180929	HH	56.36056	341	0.001123

표 2.6 연구에 활용된 X 밴드 SAR 영상 종류 (Scene 2)

Scene 2 : 29 Images (TerraSAR-X : 24 , TanDEM-X : 5)						
Image	Satellite	Date	Polarization	Baseline	Interval	Doppler
Slave	TerraSAR-X	20160809	HH	-91.4334	-319	-0.03895
Slave	TerraSAR-X	20160820	HH	-210.844	-308	-0.01011
Slave	TerraSAR-X	20160911	HH	-94.8596	-286	-0.01479
Slave	TerraSAR-X	20161025	HH	-45.771	-242	-0.01932
Slave	TerraSAR-X	20161116	HH	-35.6862	-220	-0.00188
Slave	TerraSAR-X	20161230	HH	-90.1487	-176	-0.00235
Slave	TerraSAR-X	20170121	HH	80.70174	-154	0.007928
Slave	TerraSAR-X	20170212	HH	-40.5533	-132	0.01236
Slave	TerraSAR-X	20170306	HH	42.83211	-110	-0.00118
Slave	TerraSAR-X	20170317	HH	105.1081	-99	-0.00223
Slave	TerraSAR-X	20170328	HH	28.31367	-88	-0.00973
Slave	TerraSAR-X	20170419	HH	125.2578	-66	-0.00322
Slave	TerraSAR-X	20170511	HH	-134.051	-44	-0.01308
Slave	TerraSAR-X	20170602	HH	-7.39436	-22	-0.00789
Master	TerraSAR-X	20170624	HH	0	0	-0.01849
Slave	TanDEM-X	20171001	HH	355.9156	99	-0.01324
Slave	TerraSAR-X	20171023	HH	-24.9506	121	-0.01263
Slave	TerraSAR-X	20171114	HH	-211.436	143	-0.00716
Slave	TerraSAR-X	20171206	HH	56.67686	165	-0.00214
Slave	TanDEM-X	20171228	HH	284.7677	187	-0.01603
Slave	TanDEM-X	20180130	HH	22.77071	220	-0.01462
Slave	TanDEM-X	20180304	HH	154.5185	253	-0.01146
Slave	TerraSAR-X	20180406	HH	135.3632	286	-0.00857
Slave	TerraSAR-X	20180428	HH	-263.041	308	-0.0307
Slave	TanDEM-X	20180520	HH	204.1424	330	-0.02224
Slave	TerraSAR-X	20180622	HH	-35.0611	363	-0.01708
Slave	TerraSAR-X	20180725	HH	-15.1098	396	-0.02195
Slave	TerraSAR-X	20180827	HH	-52.7121	429	-0.00247
Slave	TerraSAR-X	20180929	HH	31.05214	462	0.001123

표 2.7 연구에 활용된 X 밴드 SAR 영상 종류 (Scene 3)

Scene 3 : 29 Images (TerraSAR-X : 25 , TanDEM-X : 4)						
Image	Satellite	Date	Polarization	Baseline	Interval	Doppler
Slave	TerraSAR-X	20160803	HH	-168.097	-451	-0.02134
Slave	TerraSAR-X	20160825	HH	-102.245	-429	-0.01147
Slave	TerraSAR-X	20160916	HH	-85.422	-407	-0.01441
Slave	TerraSAR-X	20161008	HH	-81.6386	-385	-0.02015
Slave	TerraSAR-X	20161030	HH	-275.201	-363	-0.01138
Slave	TerraSAR-X	20161121	HH	-88.9957	-341	-0.0067
Slave	TerraSAR-X	20161213	HH	-34.3649	-319	-0.00669
Slave	TerraSAR-X	20170104	HH	-189.509	-297	0.004638
Slave	TerraSAR-X	20170126	HH	-223.287	-275	0.008062
Slave	TerraSAR-X	20170217	HH	137.1766	-253	-0.01038
Slave	TerraSAR-X	20170311	HH	-52.2451	-231	-0.04463
Slave	TerraSAR-X	20170402	HH	132.1616	-209	-0.0249
Slave	TerraSAR-X	20170424	HH	-55.8083	-187	-0.0081
Slave	TerraSAR-X	20170516	HH	-63.8358	-165	-0.01862
Slave	TerraSAR-X	20170607	HH	32.58929	-143	-0.01333
Slave	TerraSAR-X	20170629	HH	-159.037	-121	-0.01161
Slave	TerraSAR-X	20170914	HH	-1.91879	-44	-0.01136
Slave	TanDEM-X	20171006	HH	174.375	-22	-0.00828
Master	TerraSAR-X	20171028	HH	0	0	0.000715
Slave	TerraSAR-X	20171119	HH	-341.748	22	0.000198
Slave	TerraSAR-X	20171211	HH	-189.382	44	-0.02149
Slave	TerraSAR-X	20180113	HH	-176.582	76	-0.02701
Slave	TerraSAR-X	20180215	HH	-72.0711	110	-0.0138
Slave	TerraSAR-X	20180320	HH	-69.0874	143	-0.00992
Slave	TanDEM-X	20180422	HH	297.2611	176	-0.00192
Slave	TanDEM-X	20180525	HH	226.9615	209	-0.0038
Slave	TerraSAR-X	20180627	HH	-222.357	242	-0.02135
Slave	TerraSAR-X	20180730	HH	-37.3414	275	-0.02406
Slave	TanDEM-X	20180901	HH	118.3237	308	-0.00499

표 2.8 연구에 활용된 X 밴드 SAR 영상 종류 (Scene 4)

Scene 4 : 29 Images (TerraSAR-X : 25 , TanDEM-X : 4)						
Image	Satellite	Date	Polarization	Baseline	Interval	Doppler
Slave	TerraSAR-X	20160803	HH	-104.485	-286	-0.02134
Slave	TerraSAR-X	20160825	HH	-39.3234	-264	-0.01147
Slave	TerraSAR-X	20160916	HH	-21.8271	-242	-0.01441
Slave	TerraSAR-X	20161008	HH	-19.1595	-220	-0.02015
Slave	TerraSAR-X	20161030	HH	-211.989	-198	-0.01138
Slave	TerraSAR-X	20161121	HH	-26.0299	-176	-0.0067
Slave	TerraSAR-X	20161213	HH	30.03268	-154	-0.00669
Slave	TerraSAR-X	20170104	HH	-126.541	-132	0.004638
Slave	TerraSAR-X	20170126	HH	-159.611	-110	0.008062
Slave	TerraSAR-X	20170217	HH	200.3253	-88	-0.01038
Slave	TerraSAR-X	20170311	HH	11.37803	-66	-0.04463
Slave	TerraSAR-X	20170402	HH	195.2449	-44	-0.0249
Slave	TerraSAR-X	20170424	HH	8.21256	-22	-0.0081
Master	TerraSAR-X	20170516	HH	0	0	-0.01862
Slave	TerraSAR-X	20170607	HH	96.97956	22	-0.01333
Slave	TerraSAR-X	20170629	HH	-95.744	44	-0.01161
Slave	TerraSAR-X	20170914	HH	61.11293	121	-0.01136
Slave	TanDEM-X	20171006	HH	237.993	143	-0.00828
Slave	TerraSAR-X	20171028	HH	62.80535	165	0.000715
Slave	TerraSAR-X	20171119	HH	-278.284	187	0.000198
Slave	TerraSAR-X	20171211	HH	-126.26	209	-0.02149
Slave	TerraSAR-X	20180113	HH	-112.882	242	-0.02701
Slave	TerraSAR-X	20180215	HH	-8.27112	275	-0.0138
Slave	TerraSAR-X	20180320	HH	-6.02228	308	-0.00992
Slave	TanDEM-X	20180422	HH	360.8435	341	-0.00192
Slave	TanDEM-X	20180525	HH	291.7482	374	-0.0038
Slave	TerraSAR-X	20180627	HH	-158.312	407	-0.02135
Slave	TerraSAR-X	20180730	HH	26.54346	440	-0.02406
Slave	TanDEM-X	20180901	HH	181.7141	473	-0.00499

다음 그림 2.17은 네 개의 영상에 대한 세부정보를 나타낸 것임

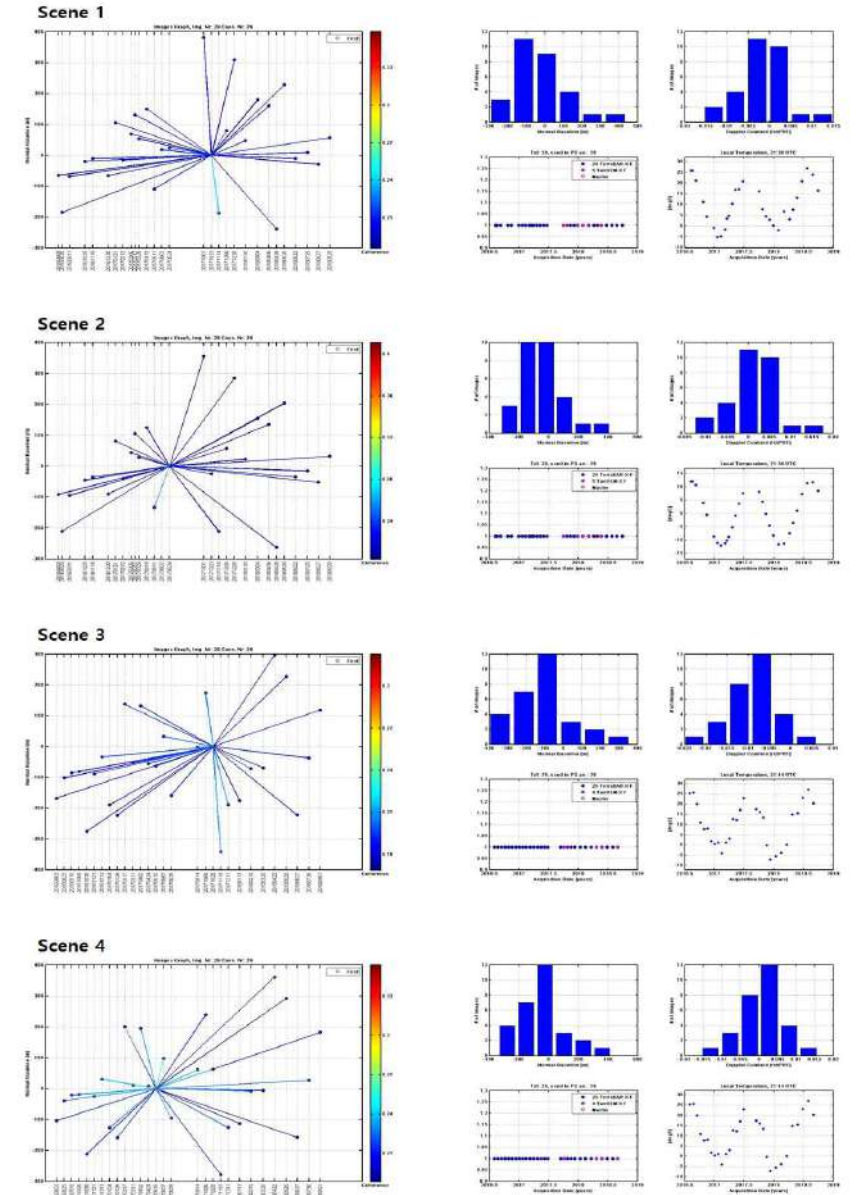


그림 2.17 각 Scene에 대한 세부 정보

라) PS-InSAR 프로세스 과정

(1) 후방산란영상 취득 및 Co-registration

- 위성이 동일한 궤도를 통해 동일한 지역을 촬영하더라도 정확하게 같은 지역을 촬영할 수는 없으므로 촬영된 SAR영상간에 시간적, 공간적 이격이 발생하게 되는데 이로 인해 두 영상들을 정합하는 Co-registration 과정을 거침
- 영상정합을 위해 후방산란영상인 backscatter map을 활용해야 하며 후방산란영상을 획득하기 위해서는 하나의 주영상과 나머지의 부영상을 정합해야함. 이를 위해 본 연구에서는 1장의 주영상과 28장의 부영상을 상호 정합하여 반사영상을 도출해냄
- 후방산란영상은 Gray-Scale로 얻어지며 영상이 백색에 가까울수록 반사강도가 높은 대상임을 의미하고 흑색에 가까울수록 반사강도가 낮음을 의미함
- 반사 대상물은 탑재된 SAR 위성의 밴드에 따라 달라지지만 일반적으로 철골구조물이나 콘크리트 건물 등에선 높은 반사강도를 농경지, 나대지, 산악지역, 수변지역은 낮은 반사강도를 갖으며 아스팔트의 경우 X밴드에서는 높은, L밴드 및 C밴드에서 낮은 반사강도를 갖게됨
- 본 연구를 진행하기 위하여 각 영상별로 상호정합을 실시한 결과의 도식화 자료는 다음 그림과 같이 나타남

Scene 1 : Co-Registered Refl.map

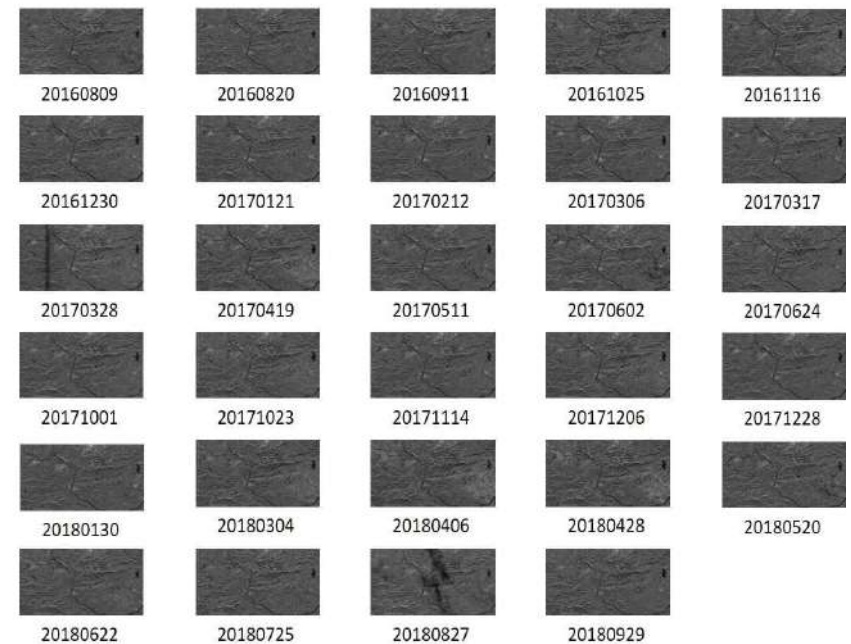
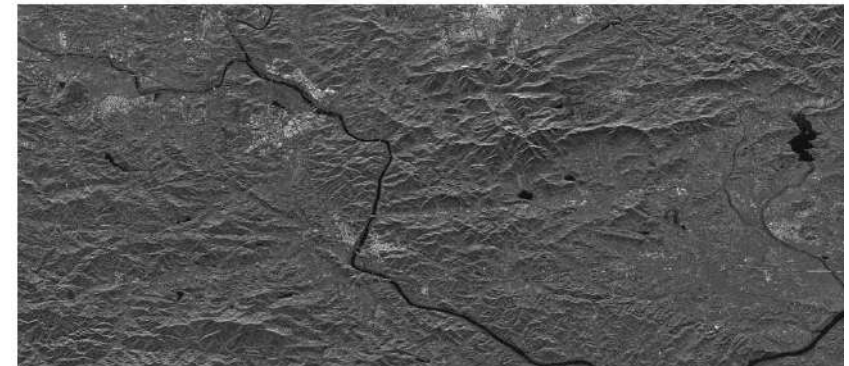


그림 2.18 Scene 1의 상호정합 영상과 후방산란 영상(29장)

Scene 2 : Co-Registered Refl.map

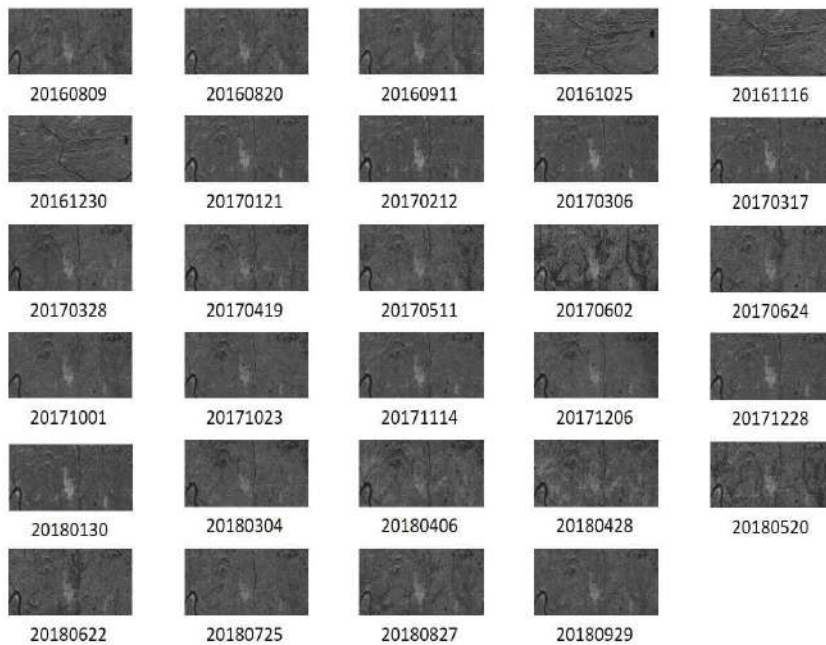
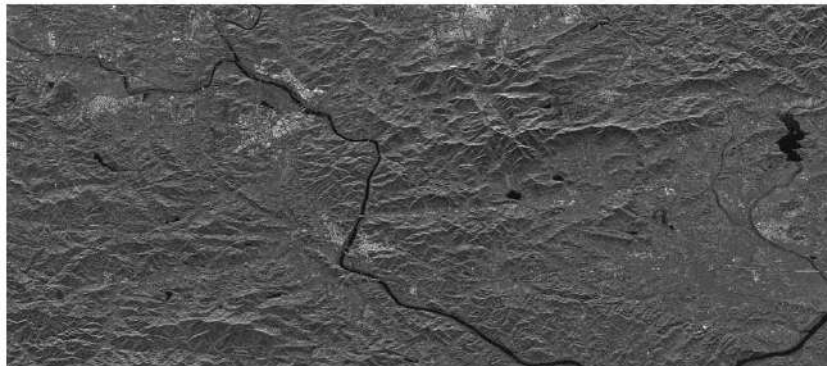


그림 2.19 Scene 2의 상호정합 영상과 후방산란 영상(29장)

Scene 3 : Co-Registered Refl.map

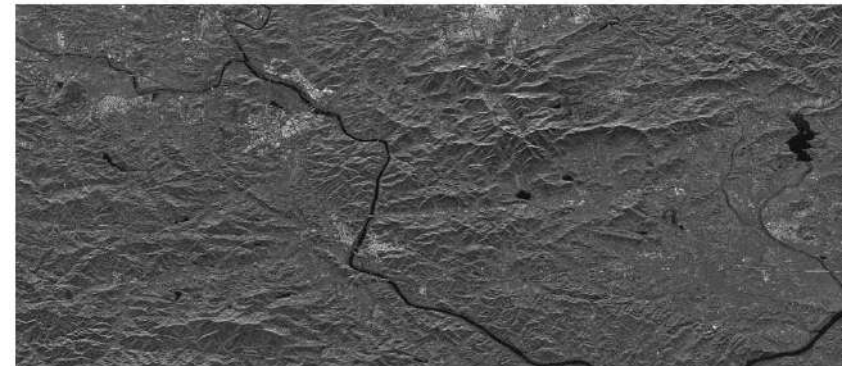


그림 2.20 Scene 3의 상호정합 영상과 후방산란 영상(29장)

Scene 4 : Co-Registered Refl.map

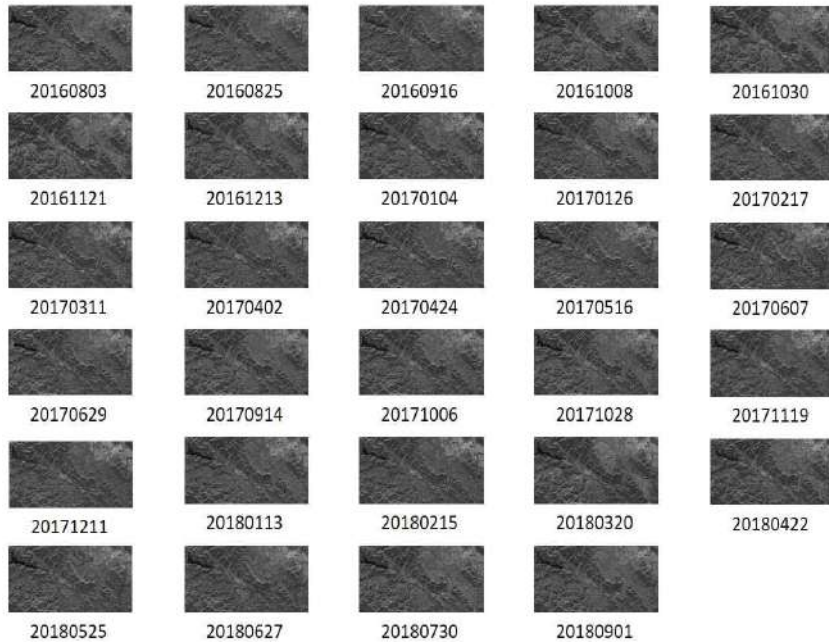
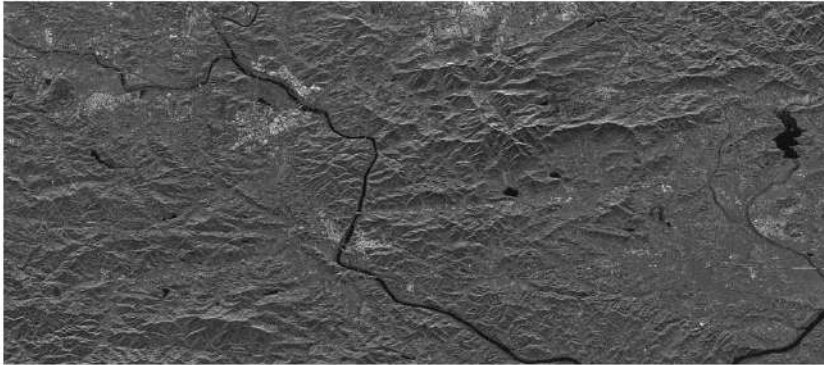


그림 2.21 Scene 4의 상호정합 영상과 후방산란 영상(29장)

(2) GCP 선정

- GCP (Ground Control Point)란 원격탐사에서 영상내의 좌표계(Line, Sample)와 지도상의 좌표계(Latitude, Longitude)사이의 좌표변환을 수행하기 위해 사용하는 기준점을 의미함
- GCP 선정을 통해 이후에 취득되는 간섭영상, 긴밀도 영상 등 영상좌표를 지도상의 좌표로 변환하여 다양한 영상 처리 작업을 수행할 수 있음
- 다음 그림 2.21은 첫 번째 영상을 예로 들어 GCP선정을 수행해 Co-registration된 반사영상을 지도상의 좌표계로 투영한 것이며 보통 Co-registration과정에서 영상간의 시,공간적 기선거리가 짧을수록 영상의 개수가 많을수록 정확도가 높아짐

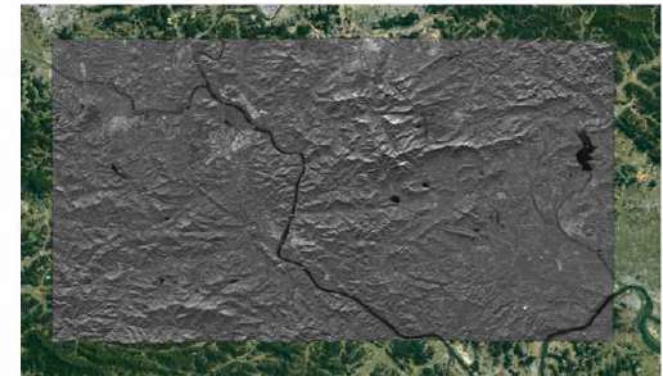
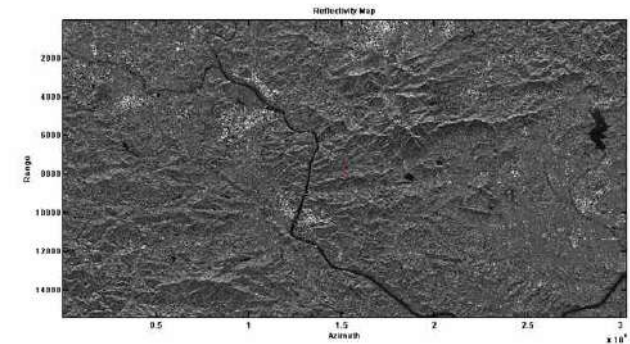


그림 2.22 GCP(Ground Control Point) 선정 예시

(3) 긴밀도 영상

- 긴밀도는 주영상과 부영상 간의 Co-registration을 통해 두 영상간의 긴밀도를 계산하며 SAR 이미지의 품질을 평가하는 지표로서 긴밀도가 높을수록 Interferogram의 품질이 높아짐, PS-InSAR 과정에서 긴밀도를 구하기 위해 먼저 주영상과 부영상의 반사영상을 제작하고 각 픽셀 별로 긴밀도를 계산하며 그 식은 다음과 같이 표현됨

$$\gamma = \left| \frac{E y_1 \times y_2}{\sqrt{E |y_1|^2} \times \sqrt{E |y_2|^2}} \right|, 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (2-24)$$

- 긴밀도(Decorrelation)는 각 영상간의 기하학적인 관계뿐만 아니라 영상간의 시,공간적 기선거리에도 영향을 받으며 이는 긴밀도저하를 일으키고 또한 interferogram의 품질에도 영향을 미침

$$\gamma_{total} = \gamma_{BL} \times \gamma_{dop} \times \gamma_{vol} \times \gamma_{themat} \times \gamma_{temp} \times \gamma_{proc} \quad (2-25)$$

- 위 식에서 BL은 두 위성간의 기선거리에 의한 Decorrelation이며, dop는 두 영상 자료간의 도플러 편위에 의한 Decorrelation, vol은 전자기파 굴절현상에 의한 것을 의미함. themat은 과거의 위성자체의 센서 변형오차이며 temporal은 두 영상간의 시간 이격으로 인한 Decorrelation, processing은 위상간섭처리 과정 중에 발생할 수 있는 Decorrelation를 뜻함
- 일반적으로 최근 발사된 고성능의 위성은 대부분의 Decorrelation을 제거할 수 있으며 이 중 공간적 차이인 γ_{BL} 과 시간적 차이인 $\gamma_{temporal}$ 을 제외한 나머지 Decorrelation요소를 무시함

마) MST 기법

(1) Minimum Spanning Tree 개요

- Spanning Tree란 그래프의 최소 연결부분 그래프로써 그래프 내에 존재하는 모든 노드들이 연결되어 있어야 하고 사이클을 포함해서는 안되며 Spanning Tree는 n개의 노드를 (n-1)개의 간선으로 연결함
- Minimum Spanning Tree는 사용된 간선들의 가중치 합이 최소인 트리를 의미하며 MST 기법이 탄생하게 된 배경으로는 각 간선의 가중치가 동일하지 않을 때 단순히 가장 적은 간선을 사용한다고 해서 최소 비용이 얻어지는 것은 아니기에 간선의 가중치를 고려하여 최소비용의 Spanning Tree를 선택하게됨.. 이러한 MST 기법을 구현하기 위한 알고리즘으로는 대표적으로 Kruskal MST 알고리즘과 Prim MST 알고리즘이 있음

(2) Kruskal MST 알고리즘

- Kruskal MST 알고리즘은 탐욕적인 방법(Greedy method)을 이용하여 네트워크에 모든 정점을 최소 비용으로 연결하는 최적 해답을 구하는 기법이며 다음의 구동방법을 따름
 - ① 그래프의 간선들을 가중치 오름차순으로 정렬
 - ② 정렬된 간선리스트에서 낮은 순서대로 선택
 - ③ 위 과정에서 사이클을 형성하는 간선의 경우 제외
- Kruskal 알고리즘은 간선선택을 기반으로 하는 알고리즘이며 이전에 만들어진 신장트리와는 상관없이 무조건 최소 간선만을 선택하는 방법을 택함

(3) Prim MST 알고리즘

- Prim 알고리즘은 시작 노드부터 출발하여 네트워크 집합을 단계적으로 확장해 나가는 기법으로 다음의 구동방법을 따름
 - ① 시작 노드를 지정
 - ② 노드에서 최소 비용으로 이루어진 간선을 선택하여 트리를 확장
 - ③ 위 과정을 트리가 (n-1)개의 간선을 가질 때까지 반복하며 사이클이 형성되는 경우 제외
- 즉 Prim 알고리즘은 정점선택을 기반으로 하는 알고리즘으로써 이전 단계에서 만들어진 신장트리를 최소비용 간선으로 연결하며 확장하는 방법을 택함

(4) MST 알고리즘 구동 예시

○ Kruskal 알고리즘의 구동은 다음 그림 2.23에 도식한 바와 같이 구동됨

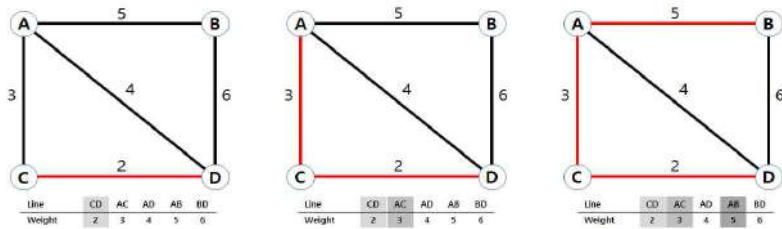


그림 2.23 Kruskal MST 기법의 구동 예시

○ 처음 간선선택 과정에서 비용이 가장 작은 CD 간선을 선택한 뒤 두 번째로 작은 AC 간선을 선택하며 이후 세 번째로 작은 간선인 AD를 선택할 경우 MST 기법에서 제거되는 사이클이 발생하기 때문에 차순위인 AB 간선을 선택함

○ Prim 알고리즘의 구동은 다음 그림 2.24에 도식한 바와 같이 구동됨

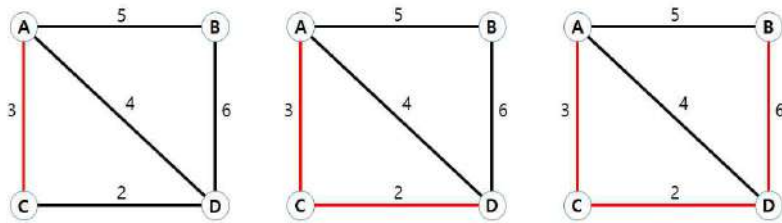


그림 2.24 Prim MST 기법의 구동 예시

○ A 노드에서 시작할 경우 AB 간선과 AC 간선 중 최소비용인 AC를 선택하며 이후 연결되는 CD 간선을 선택한 뒤 AD와 BD 간선 중 사이클이 생성되는 AD를 제거한 뒤 AB 간선을 선택함

○ 본 연구에서는 긴밀도 계산과정에서 영상정합방식은 기존의 주영상과 부영상을 간섭하는 Star Graph에서 시,공간적 기선거리를 최단으로 하는 MST (Minimum Spanning Tree) Graph로 변경하여 연구를 진행하였으며 MST Graph로 변경한 이유는 보다 더 짧은 시,공간적 기선거리를 가진 영상들을 간섭함으로써 Baseline Decorrelation과 Temporal Decorrelation을 줄일 수 있기 때문임

○ 총 28개월간의 TerraSAR-X 영상과 TanDEM-X 위성영상 총 29장을 사용하여 연구를 진행하였으며 다음의 표는 영상의 제원을 나타냄

표 2.9 영상의 제원

Satellite	Date	Polarization	Spatial	Temporal	Doppler
			Baseline(m)	Baseline(day)	Centroid
TerraSAR-X	20160809	HH	-91.4334	-319	-0.03895
TerraSAR-X	20160820	HH	-210.844	-308	-0.01011
TerraSAR-X	20160911	HH	-94.8596	-286	-0.01479
TerraSAR-X	20161025	HH	-45.771	-242	-0.01932
TerraSAR-X	20161116	HH	-35.6862	-220	-0.00188
TerraSAR-X	20161230	HH	-90.1487	-176	-0.00235
TerraSAR-X	20170121	HH	80.70174	-154	0.007928
TerraSAR-X	20170212	HH	-40.5533	-132	0.01236
TerraSAR-X	20170306	HH	42.83211	-110	-0.00118
TerraSAR-X	20170317	HH	105.1081	-99.0001	-0.00223
TerraSAR-X	20170328	HH	28.31367	-88	-0.00973
TerraSAR-X	20170419	HH	125.2578	-66	-0.00322
TerraSAR-X	20170511	HH	-134.051	-44	-0.01308
TerraSAR-X	20170602	HH	-7.39436	-22	-0.00789
TerraSAR-X	20170624	HH	0	0	-0.01849
TanDAM-X	20171001	HH	355.9156	99.00006	-0.01324
TerraSAR-X	20171023	HH	-24.9506	121.0001	-0.01263
TerraSAR-X	20171114	HH	-211.436	143.0001	-0.00716
TerraSAR-X	20171206	HH	56.67686	165.0001	-0.00214
TanDAM-X	20171228	HH	284.7677	187	-0.01603
TanDAM-X	20180130	HH	22.77071	220	-0.01462
TanDAM-X	20180304	HH	154.5185	253	-0.01146
TerraSAR-X	20180406	HH	135.3632	286	-0.00857
TerraSAR-X	20180428	HH	-263.041	308.0001	-0.0307
TanDAM-X	20180520	HH	204.1424	330.0001	-0.02224
TerraSAR-X	20180622	HH	-35.0611	363.0001	-0.01708
TerraSAR-X	20180725	HH	-15.1098	396.0001	-0.02195
TerraSAR-X	20180827	HH	-52.7121	429.0001	-0.00247
TerraSAR-X	20180929	HH	31.05214	462.0001	0.001123

○ 위와 같이 본 연구에서는 영상을 통해 총 29개의 노드를 획득하였고 406개의 간선을 생성하였으며 이를 그림 2.25에 도식함

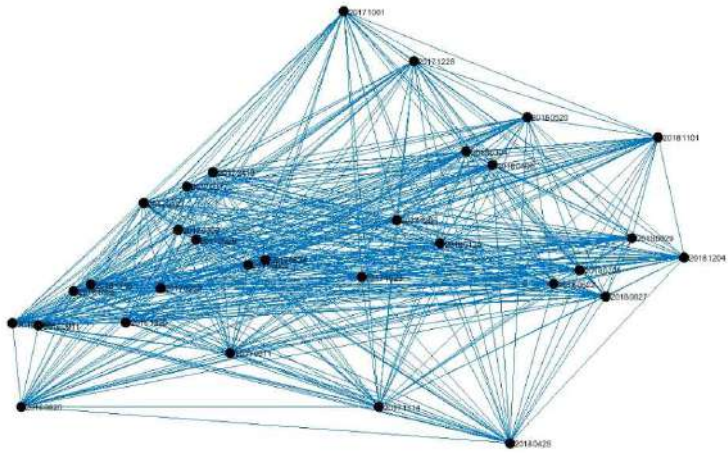


그림 2.25 연구에 활용된 모든 노드와 간선의 경우의 수

- 이후 각 간선들이 포함하고 있는 긴밀도의 값을 순차적으로 나열한 뒤 사이클이 형성되는 경우를 제외한 높은 긴밀도의 간선들을 28개 선정하여 연구들 수행하였으며, 이를 통해 일반적으로 PS-InSAR 기법에서 활용하는 Star-Graph에 비해 높은 긴밀도를 갖는 영상들을 활용함에 따라 연구 결과의 품질이 높아짐

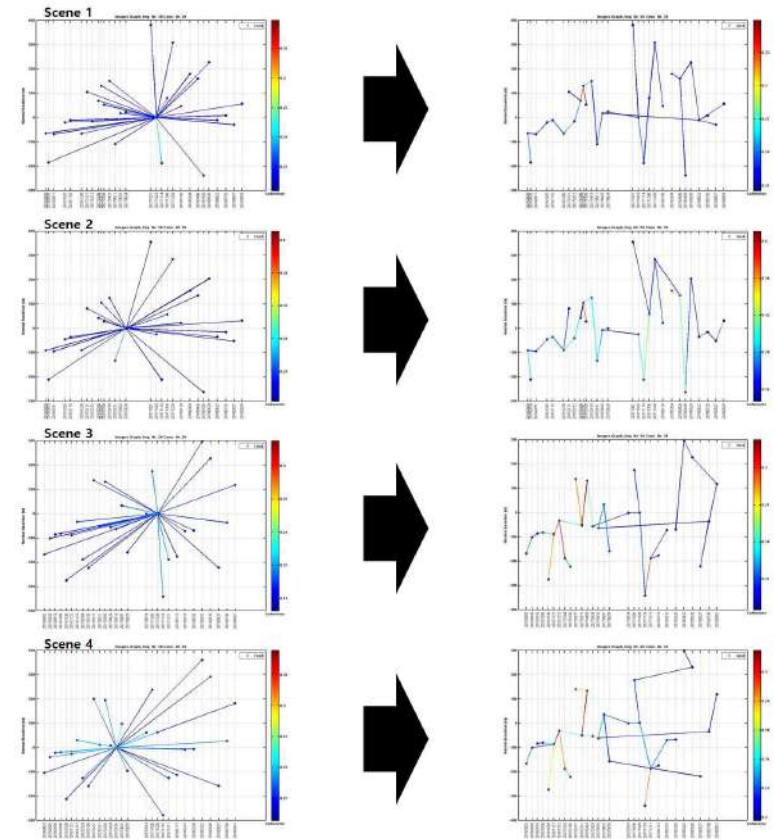


그림 2.26 각 Scene의 Star Graph와 MST Graph

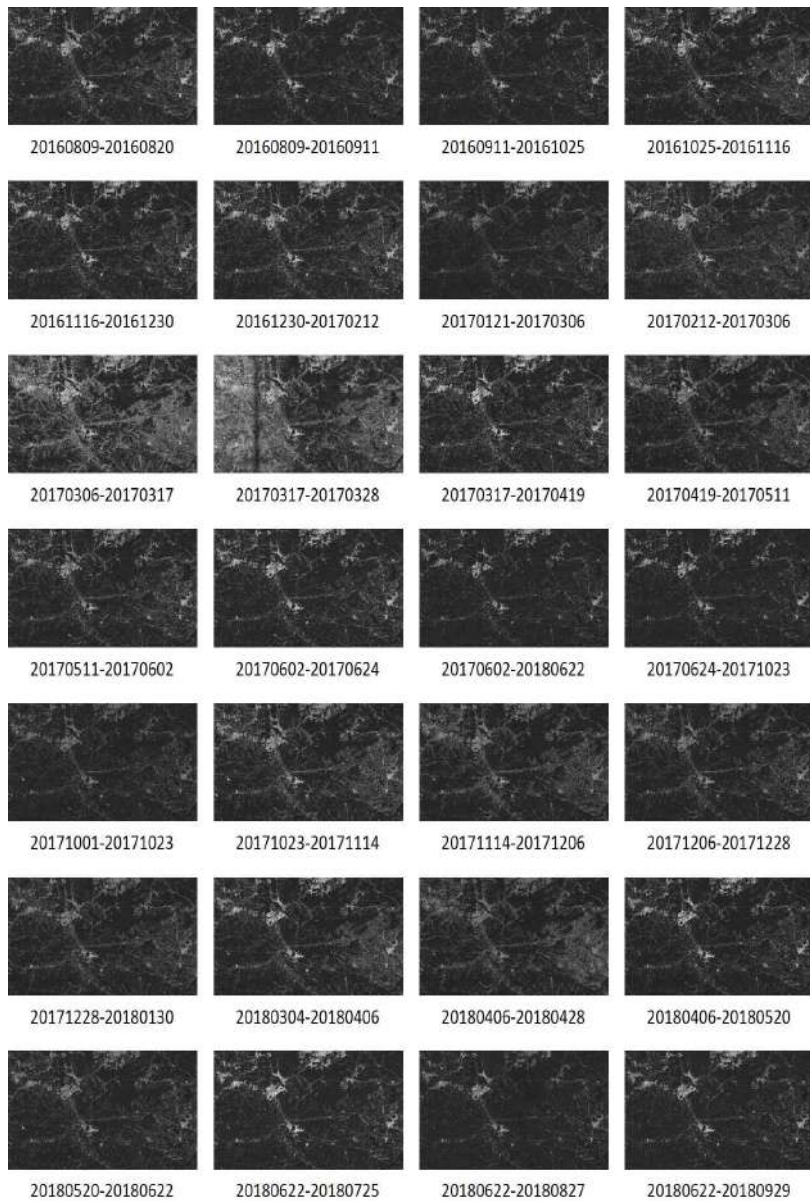


그림 2.27 Scene 1의 긴밀도 영상

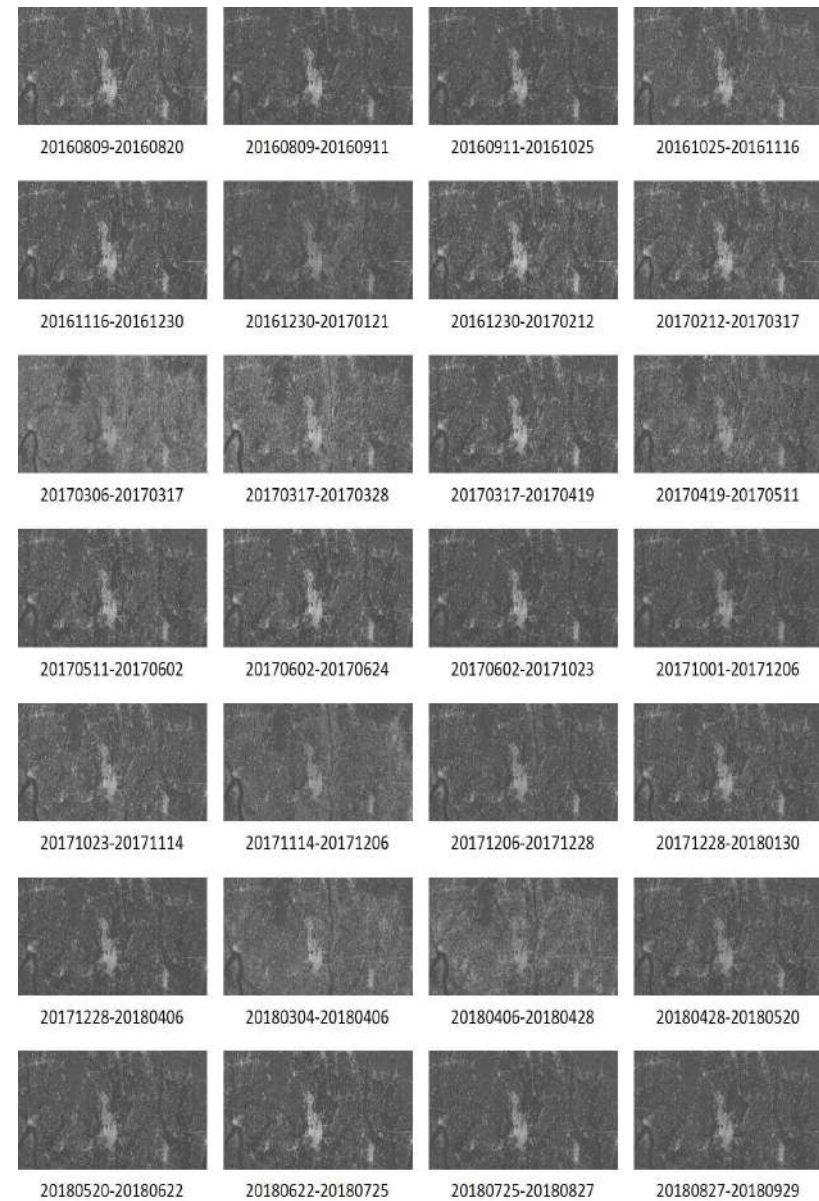


그림 2.28 Scene 2의 긴밀도 영상

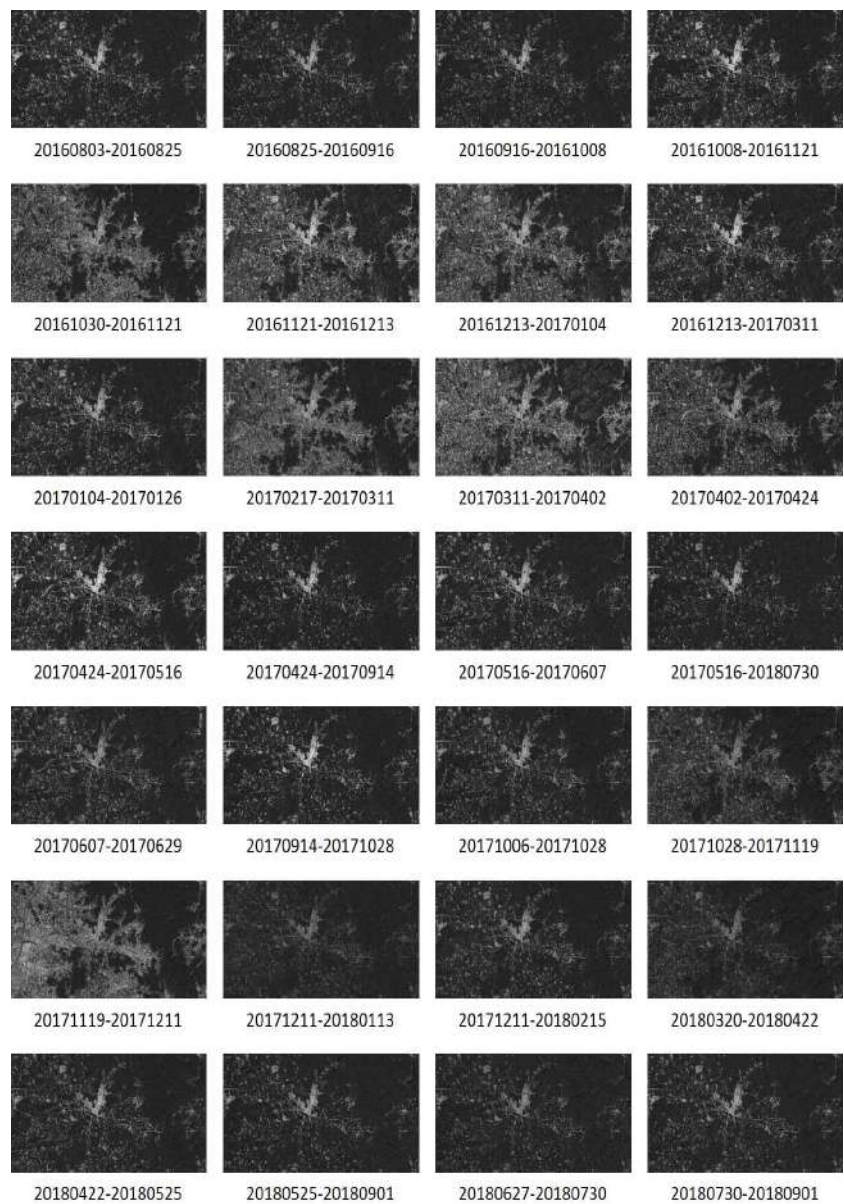


그림 2.29 Scene 3의 긴밀도 영상



그림 2.30 Scene 4의 긴밀도 영상

(5) 위상 간섭영상

- 위상 간섭영상은 두 장의 SAR영상에서 각 픽셀의 복소수끼리 곱하여 얻어지는 영상으로 간섭도 영상에 지구곡률보정, 지형보정 등 영상보정 등을 통해 오차 위상 성분들을 제거하여 위상 간섭 영상의 정확도를 보정함
- 위상간섭영상에서 나타나는 띠무늬는 Fringe라 하며 이는 기복변위와 반비례관계를 가지는데, 간격이 좁을수록 기복변위가 큰 산악지역을 의미하고 띠의 간격이 넓을수록 기복변위가 완전한 농경지, 도심지, 평야지등을 의미함
- 본 연구에서는 위상 간섭영상 또한 긴밀도영상과 같이 영상처리 과정에서 Star Graph 대신 M ST Graph를 사용하였으며 각 영상 당 위상 간섭영상은 다음 그림 2.31에서 그림 2.34와 같이 나타남

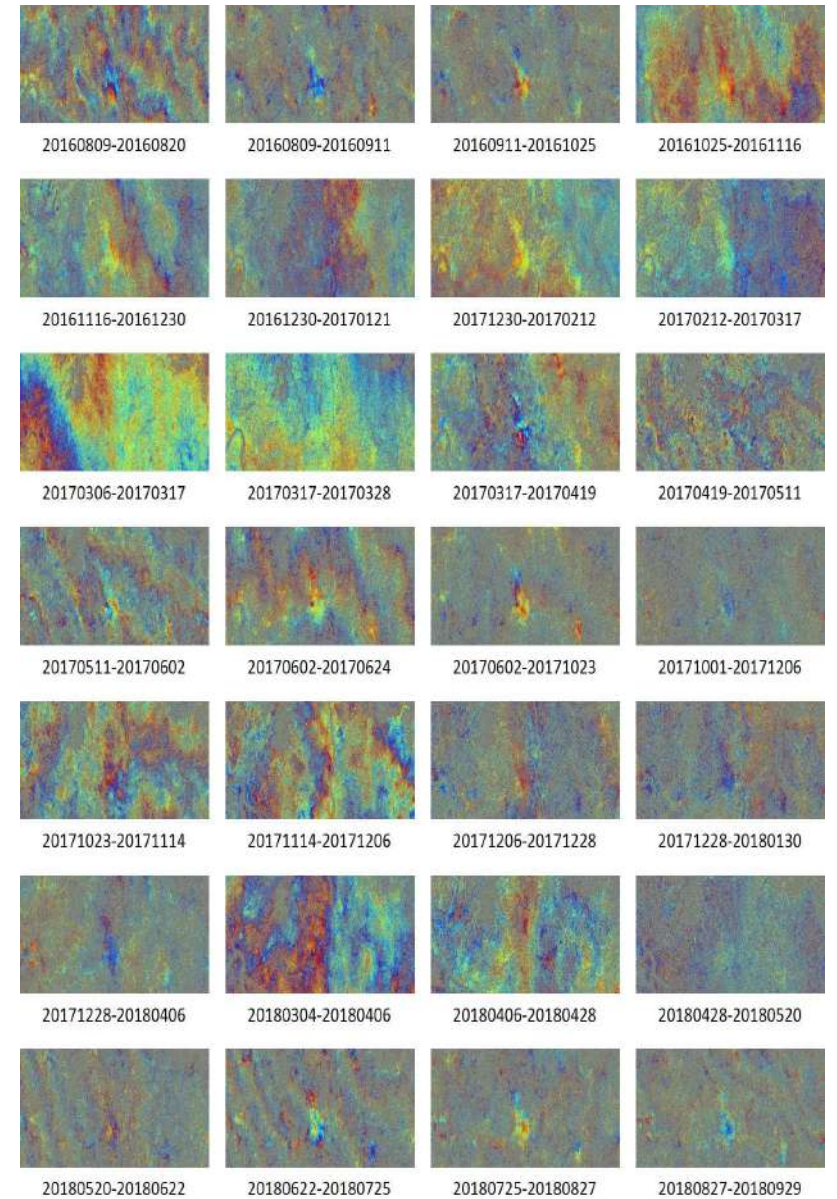


그림 2.31 Scene 1의 위상간섭영상 (28장)

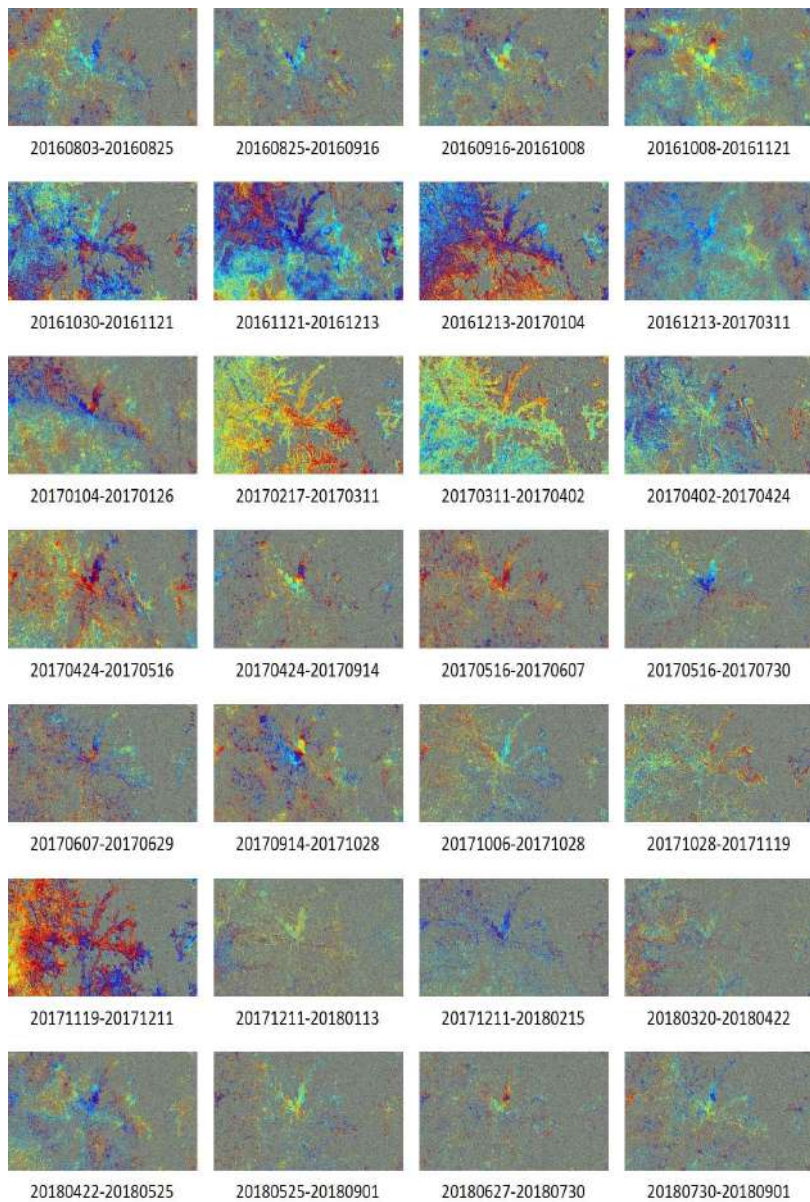


그림 2.32 Scene 2의 위상간섭영상 (28장)

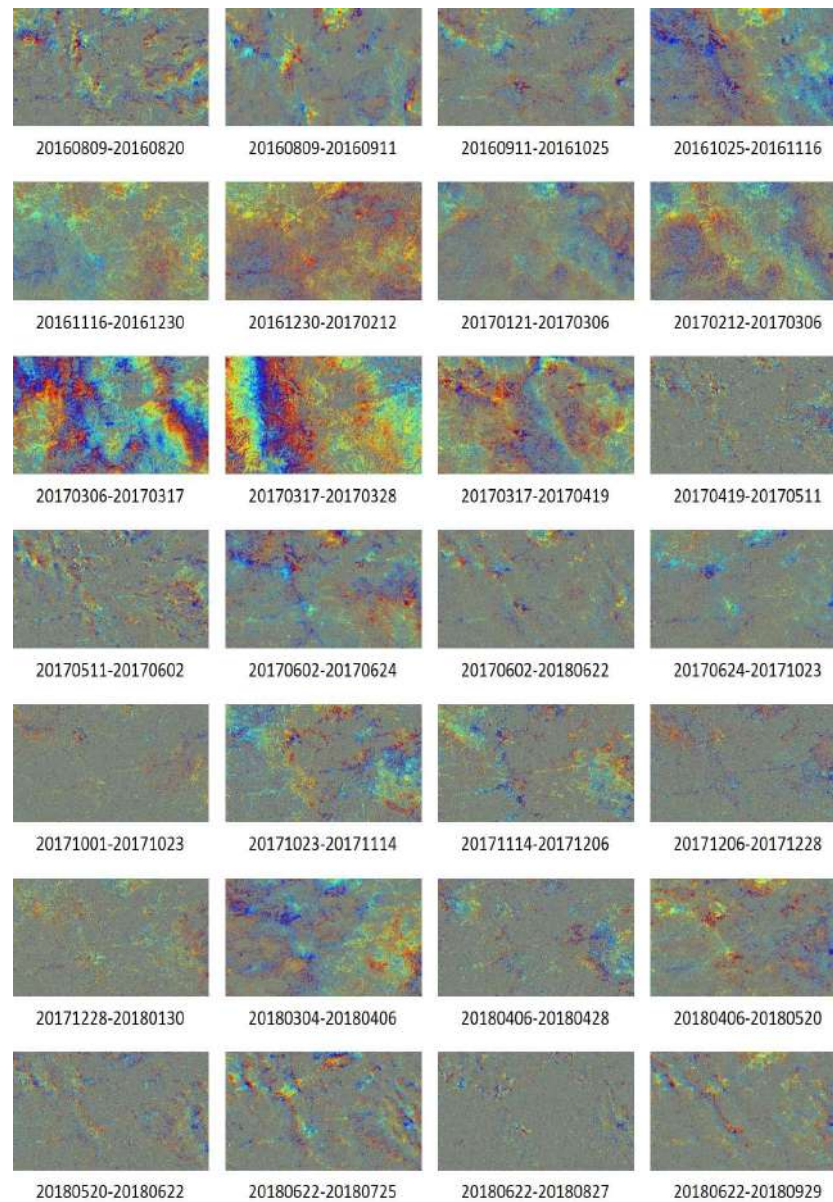


그림 2.33 Scene 3의 위상간섭영상 (28장)

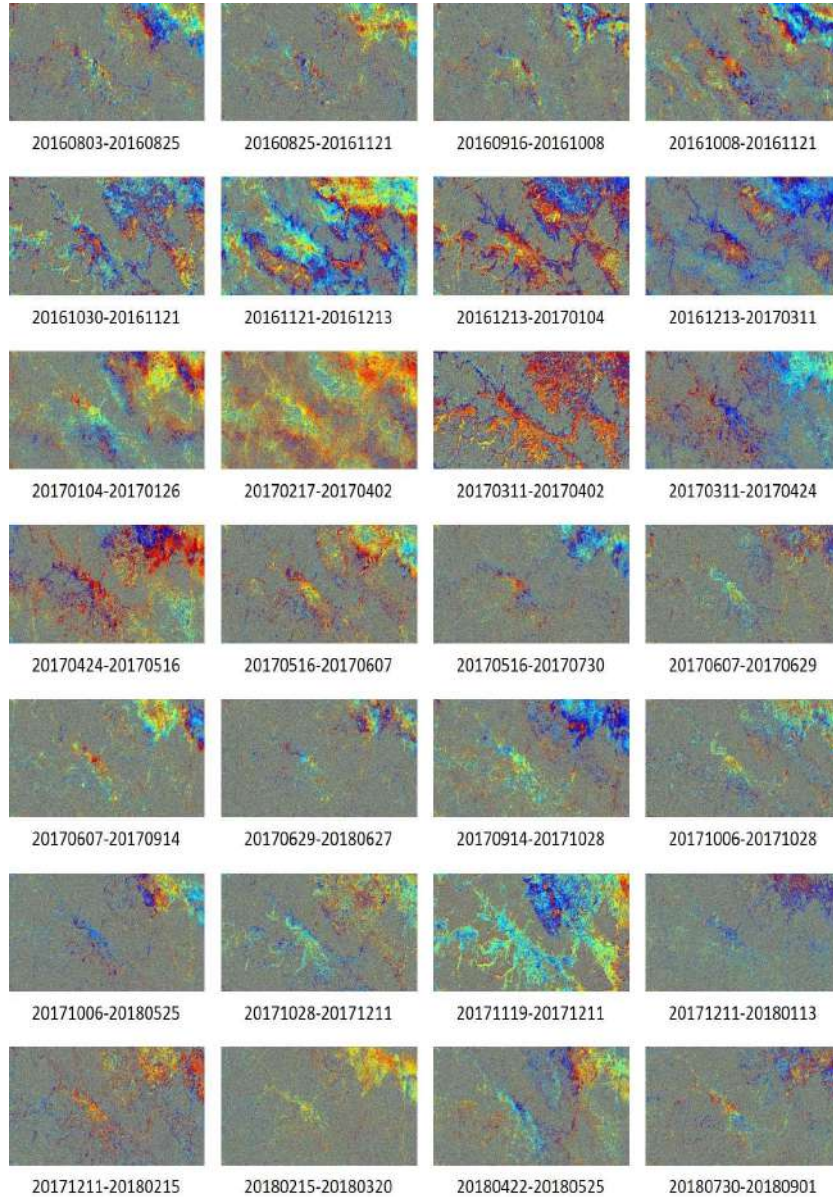


그림 2.34 Scene 4의 위상간섭영상 (28장)

(6) PSC Point 선정

- 앞의 PS-InSAR 기법에서 언급한것과 같이 본 기법은 SAR 영상 촬영 지역 전체의 지표변위를 산출하는 다른 기법들과 달리 높은 반사강도를 가지는 고정산란체를 선별해 선별된 고정산란체의 지표변위만을 도출함
- 고정산란체를 추출하기위해 모든 점군을 활용할 경우 프로세싱속도가 저하되며, 또한 불규칙 삼각망(TIN)을 형성하는 과정에서 선별된 각 점군마다 긴밀도를 연결하고 전이됨으로 인해 낮은 긴밀도를 가진 점군이 높은 긴밀도를 가진 점군에 영향을 끼쳐 분석결과와 정확도를 저하시키는 현상을 막고자 영상 정확도와 밀접한 관계가 있는 긴밀도 영상을 선별하여 활용함
- 고정산란체 선별은 먼저 모든 점군을 대상으로 앞서 설명한 Amplitude Stable Index와 긴밀도를 통한 선별을 거친 후 선별된 점군들에 대해서 불규칙삼각망(TIN)을 형성하여 진행함
- 일반적으로 불규칙 삼각망을 형성하는데 Delaunay 기법을 사용하며 선별된 점군의 분포가 일정하지 않거나 갯수가 너무 적을 경우에는 Flowered Tree 방식이나 FCN(Freely Connected Network)방식을 활용하기도 함
- 두 방식 모두 연결 개수를 증가시키는 장점이 있지만 낮은 긴밀도를 가지는 점군 또한 연결하는 특성을 가짐. 다음 그림 2.35는 Delaulay 방식과 FCN 방식의 삼각망 형성의 도식화 결과임

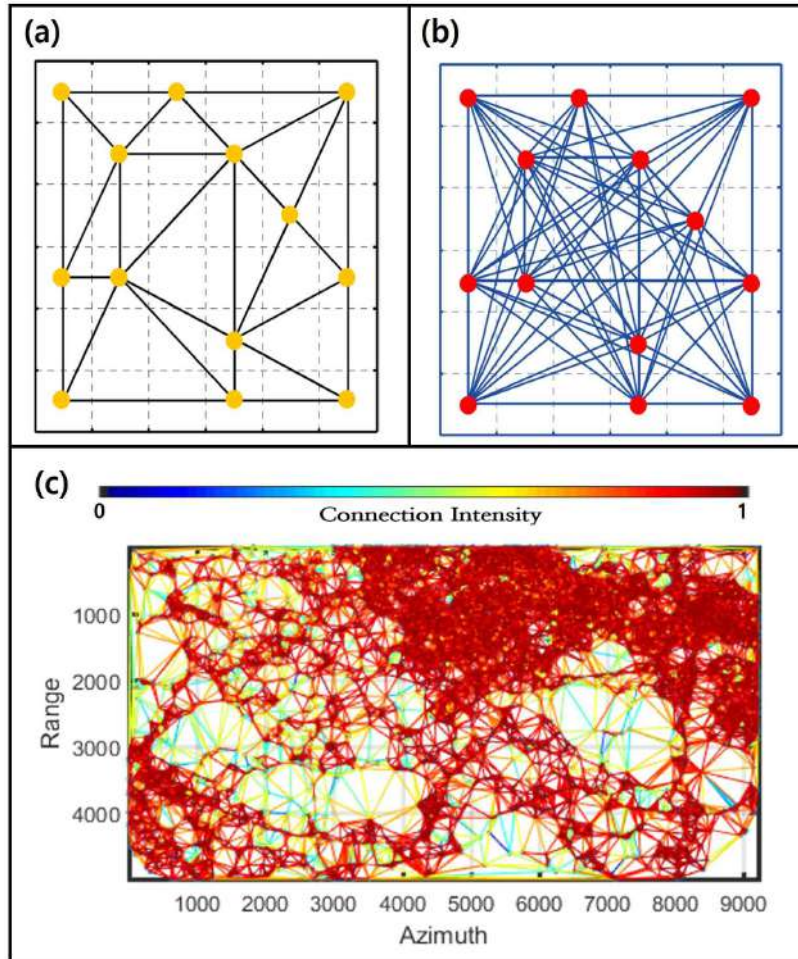


그림 2.35 Delaulay 방식과 FCN 방식의 삼각망 형성의 도식화 결과

- 앞서 언급한 바와 같이 고정산란체 선별은 PS-InSAR 기법을 이용하여 지표변위량을 산정하는데 있어 가장 중요한 작업이며 고정산란체를 어떤 지수를 사용하여 어떻게 선별했는가에 따라서 선별되는 고정산란체의 개수와 정확도 및 각 점을 연결하는 불규칙 삼각망 형성 및 연결강도에도 영향을 미침
- 본 연구에서는 고정산란체를 선별을 위하여, TerraSAR-X 와 TanDEM-X 영상을 취득기관인 AIRBUS Co.Ltd 연구원들과 협력하여, 각 연구 대상지역의 지형적 특성을 고려하여 고정산란체를 추출함
- 1번, 3번, 4번 영상의 경우 철도가 지나가는 레일 중간에 위치한 산악지역으로 인해 긴밀도 및 연결강도가 저하되는 현상이 발생하여 각 영상의 대상 지역을 두 개의 지역으로 분할하여 분석을 수행함. 이와 같은 산악지역으로 인한 긴밀도 및 연결강도 저하현상은 아래의 4번 영상의 예를 통하여 확인됨

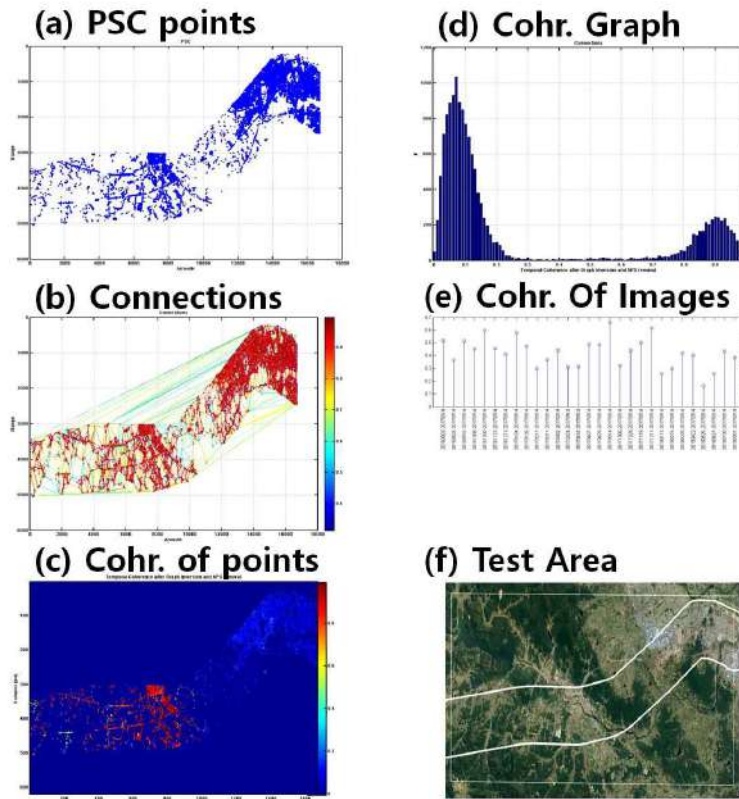


그림 2.36 산악지역으로 인한 점군의 긴밀도와 연결강도 저하(Scene 4)

- 4번 영상의 경우 광주 송정역 지역과 장성군 지역에서 고정산란체가 추출되며 장성군 지역은 높은 긴밀도를 보이고 있지만 광주 송정역 부근의 점군은 낮은 긴밀도를 보이고 있음
- 해당 영상의 경우 중간에 위치한 산악지역으로 인해 광주 송정역 부근 점군의 최종 지표면위지도 품질 저하됨은 물론 높은 긴밀도를 가지고 있는 장성군의 점군의 품질 역시 저하됨
- 위와 같은 이유로 해당 영상에 대하여 산지를 제외시킨 장성군 지역과 광주 송정역 지역에 대한 분할 영상처리를 진행시켜 두 지역에 대한 높은 긴밀도와 정확도를 갖는 결과물을 도출함
- 본 연구에서 진행한 각 영상에 대한 영상처리 작업은 다음과 같이 나타낼 수 있음
 - ① 첫 번째 영상의 1번 분할영상
 - 1-1번 영상의 지역적 위치는 청주 오송역부터 세종시 까지를 포함하고 있으며 이 지역은 산악지역이 많이 있는 관계로 철도가 지상을 통해가기 보다는 터널을 통과해 이동하는 경우가 더 많아 높은 긴밀도를 가진 점군을 추출하기 위해서 Sparse Point Processing을 수행함
 - 추출된 점군의 개수는 총 15565개이며 Amplitude Stable Index을 이용하여 0.75이상인 점군을 추출함. 총 점군의 연결개수는 155853개이며 연결방식은 Local Redundant를 사용함
 - 본 지역은 호남 고속철도의 시작지점이므로 철도레일이 직선 형태가 아닌 곡선 형태를 띄고 있어 점군간의 연결범위 파라미터를 다른 지역에 비해 낮게 설정하였고 분할영상 1-1에 대한 세부정보는 다음 그림 2.37과 같음

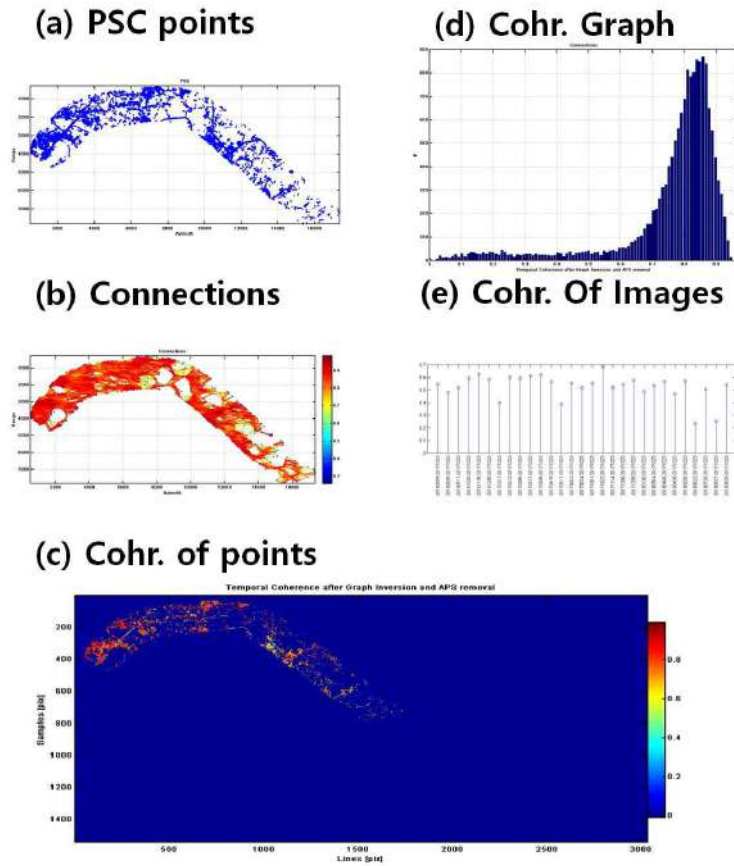


그림 2.37 분할 지역의 세부 내용 (Scene 1-1)

② 첫 번째 영상의 2번째 분할영상

- 1-2 영상의 위치는 산악지역 우측에 해당하는 지역이며 충남 부여시부터 논산시까지가 해당되며 이 구간의 경우 산지가 거의 존재하지 않지만 반사강도가 높은 도심지가 아닌 농경지역이 대부분을 이루고 있어 높은 긴밀도를 가지는 점군의 개수가 적음
- 따라서 Amplitude Stable Index와 Spatial Coherence를 합친 지수 $\text{Amplitude Stable Index} + \text{Spatial Coherence} > 1.5$ 를 사용하여 점군을 생성한 뒤 Sparse Point Processing을 수행하였으며 총 8290개의 점군을 추출함. 점군을 연결한 개수는 82900, 연결방식은 1-1영상과 동일한 Local Redundant를 사용함

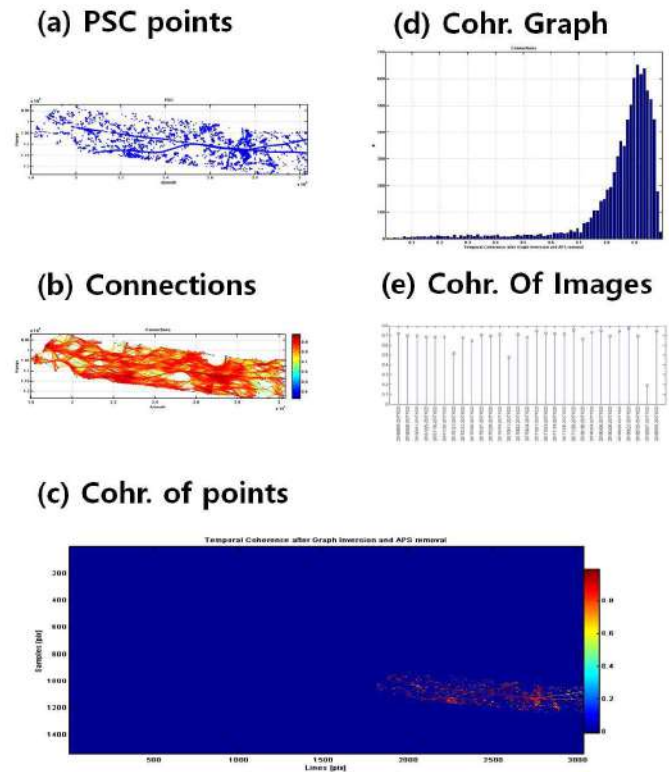


그림 2.38 분할 지역의 세부 내용 (Scene 1-2)

③ 두 번째 영상

- 두 번째 영상은 공주시에서 정읍 신태인지역을 대상으로 하며 영상 중앙에 위치한 도심지인 익산시와 이를 감싸는 농경지역으로 영상이 구성되어 산지가 적은 특성을 지님. 이러한 특성은 PS-InSAR 분석을 하는데 있어서 가장 이상적인 특성으로 이에 따라 본 영상은 4장의 영상중 유일하게 전체영상을 한번에 영상처리 가능하였음
- 추출된 점군의 개수는 25147개이며 Amplitude Stable Index를 단독으로 사용하였으며 Closest Local Redundant 방식을 활용하여 0.8이상의 높은 긴밀도를 가지는 점군을 선별하여 25146개의 연결 개수를 도출함

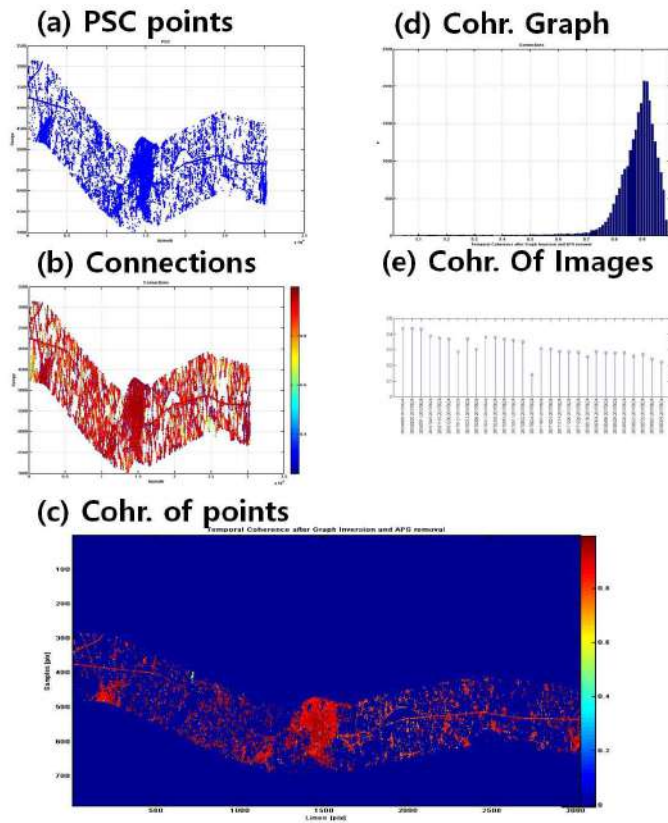


그림 2.39 분할 지역의 세부 내용 (Scene 2)

④ 세 번째 영상의 1번 분할 영상

- 세 번째 영상은 4개의 본연구 대상 영상 중 두 번째로 넓고 긴 지역임. 본 분할영상은 정읍 신태인부터 정읍도심지를 지나 고창군까지의 지역을 포함하며 두 번째 영상과 동일하게 중심에 정읍의 도심지가 있고, 우측에 위치한 산지를 제외하고는 대부분이 농경지역으로 이루어져있음
- 본 영상의 지역에서는 Amplitude Stable Index > 0.7을 기준으로 점군을 추출하였으며 추출된 점군은 21337개로 나타남. 다른 영상들과 동일한 Local Redundant 연결방식을 활용하였으며 점군을 연결한 개수는 213364개로 나타남

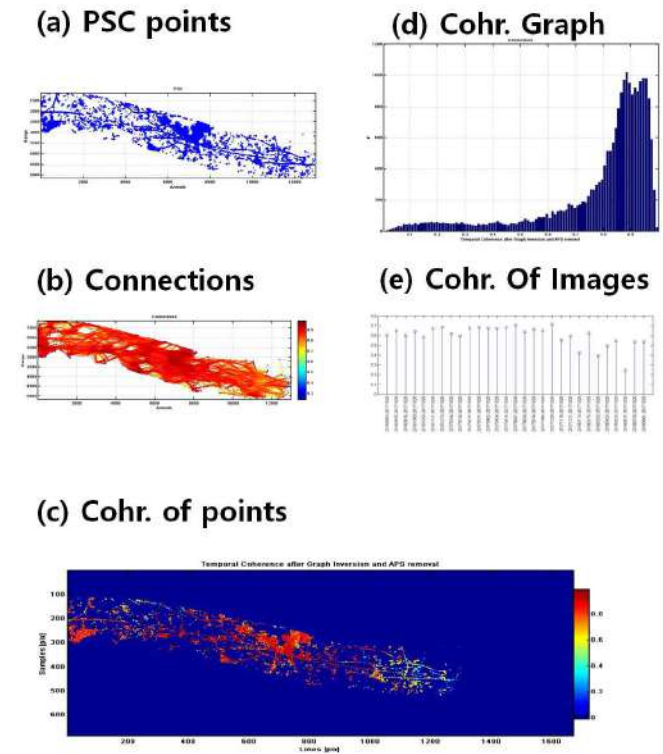


그림 2.40 분할 지역의 세부 내용 (Scene 3-1)

⑤ 세 번째 영상의 2번째 분할영상

- 본 영상은 장성군 북하면 주변지역의 영상으로 해당 지역의 경우 산지로 둘러 쌓여있는 분지형태로 도심지가 거의 존재하지 않음으로 인해 본 연구대상 지역 중 가장 낮은 긴밀도를 보이며 고정산란체 간의 연결강도가 낮아 최종 지표변위량의 정확도가 낮음
- 낮은 긴밀도를 가지고 있어 점군을 1567개의 적은 점군이 추출 되었으며 이로인해 연결 거리를 제한을 설정하는 Local Redundant 방식을 통해 연결을 수행할 경우 데이터의 품질이 저하가 예상되어 다른 지역과 달리 Delaunay방식을 통한 고정산란체간의 연결을 수행함
- Delaunay방식을 통해 도출된 연결개수는 총 4986개이며 그림 2.42에 본 영상의 세부정보를 나타내었음

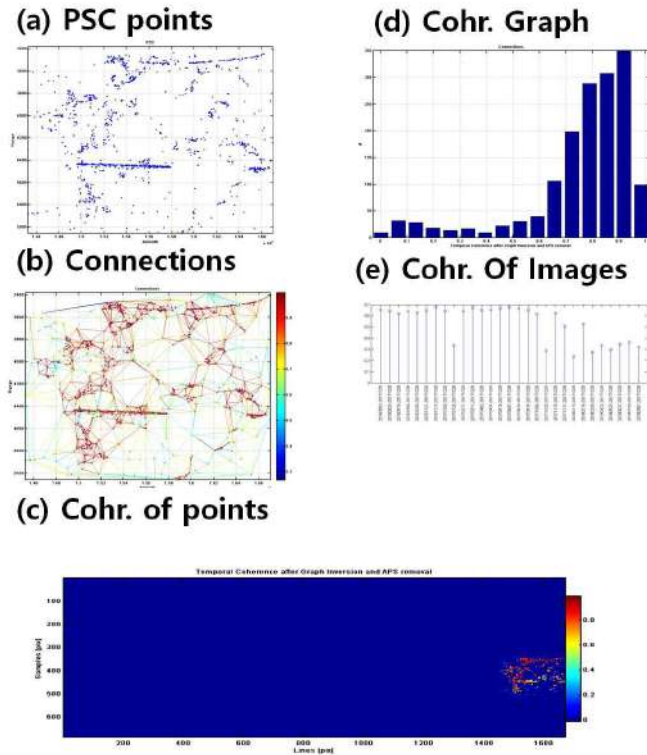


그림 2.41 분할 지역의 세부 내용 (Scene 3-2)

⑥ 네 번째 영상의 1번 분할영상

- 네 번째 영상의 1번 분할영상은 장성역 부근 지역이 해당되며 산지에 둘러 쌓여있는 분지의 형태를 이루고 있으나 3-2번 영상에 비해 도심지의 비중이 높아 긴밀도와 연결강도의 수치가 높게 나타남
- 본 영상은 두 가지의 기법, Amplitude Stable Index + Spatial Coherence > 1.5을 활용하여 점군을 추출하였고 연결선은 3-2번 영상과 마찬가지로 Delaunay방식을 통해 연결을 수행하였으며 이를 통해 총 12664개의 연결이 도출됨

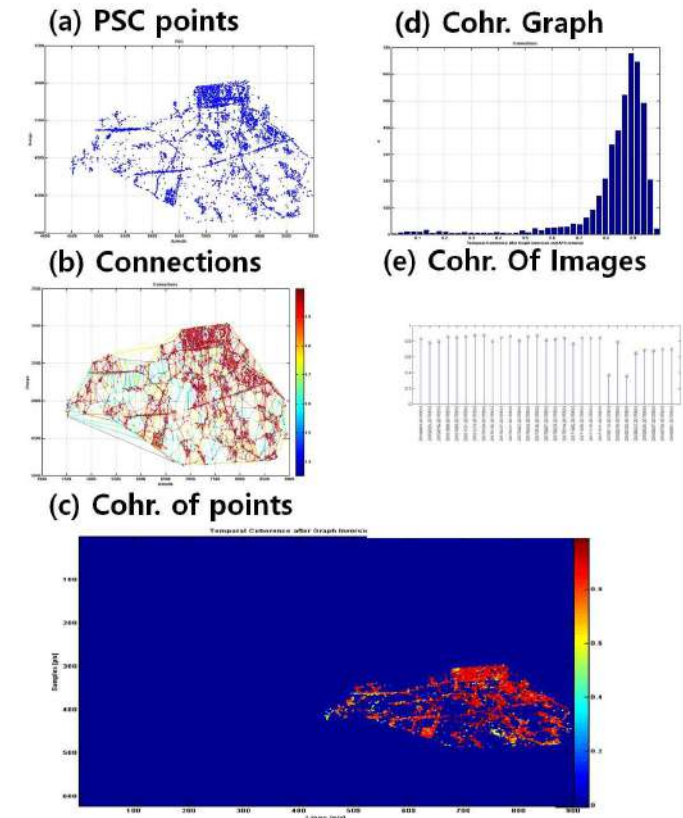


그림 2.42 분할 지역의 세부 내용 (Scene 4-1)

⑦ 네 번째 영상의 2번 분할영상

- 네 번째 영상의 2번 분할영상의 위치는 장성군 남이면부터 광주 송정역까지이며 좌측으로는 산지가 우측으로는 광주 송정역 부근의 도심지가 위치하여 도심지가 있는 송정역 부근으로 점군의 긴밀도와 점군분포가 나타남
- 고정산란체는 0.73이상의 Amplitude Stable Index를 갖는 9549개의 점이 추출되었으며 Delaunay 방식을 통해 총 28619개의 연결을 도출함

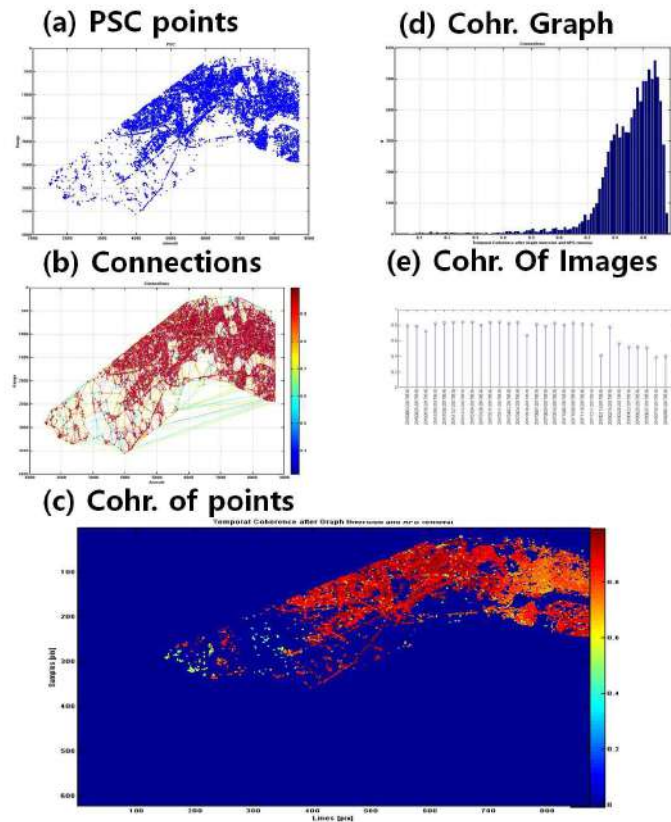


그림 2.43 분할 지역의 세부 내용 (Scene 4-2)

- 본 연구는 위와 같이 총 4개의 영상을 7개의 영상으로 세부분할하여 진행했으며 각 영상의 지형특성에 맞는 고정산란체와 연결방식을 통해 추출된 고정산란체는 위상 불구속화과정을 통해 지표변위영상에서 하나의 값을 가지는 픽셀로 변환됨
- 추출된 점군들은 본 연구에서 최종적으로 수행하고자 하는 호남선 KTX 고속철도 및 그 주변 지역의 지표변위량을 산출하는데 활용됨. 다음 표 2.10은 각 영상을 분석하는데 사용된 기법들과 추출된 고정산란체의 개수, 연결선의 개수를 나타냄

표 2.10 분할된 Scene의 세부정보

	1번 Scene		2번 Scene	3번 Scene		4번 Scene	
분할 Scene	1-1	1-2	2	3-1	3-2	4-1	4-2
고정산란체 개수	15586	8290	25147	21337	1567	4231	9549
추출 방식	ASI	ASI+SP	ASI	ASI+SP	ASI+SP	ASI+SP	ASI
연결 개수	155853	82900	251464	213364	4686	12664	28619
연결 방식	Local.R	Local.R	Local.R	Local.R	Dela.	Dela.	Dela.
평균 Cohr.	0.825	0.902	0.897	0.894	0.879	0.884	0.916

6) PS-InSAR 기법을 이용한 연구결과

- 최종 지표변위값을 도출하기 위해서는 위상 불구속화 과정을 수행하는데 위상 불구속화 과정이란, $-\pi$ 부터 π 까지 구속되어있는 데이터 값을 unwrap하여 불구속화된 위상값을 도출하는 과정을 의미함
- 구속된 위상은 $-\pi$ 부터 π 사이의 값으로 고정되어있는 값을 의미하며 이 픽셀과 인접 픽셀간의 위상차이를 적분함으로써 상대적인 값을 얻을 수 있는데 다음 적분방식을 위상 불구속화라고 함
- 앞서 도출한 불규칙삼각망을 이용하여 고정산체의 구속된 값을 다음 과정을 통해 하나의 의미 있는 불구속화된 값으로 도출함 다음 과정을 거친 불구속화된 영상은 위상의 단위인 Radian에서 지표변위값인 mm로 변환. 다음 그림 2.44에서 그림 2.50는 각 영상당 불구속화를 통해 생성된 지표변위지도임

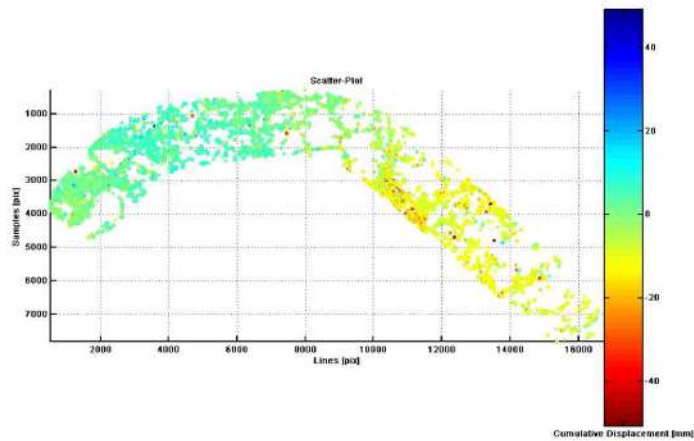


그림 2.44 Scene 1-1 최종 지표변위 영상

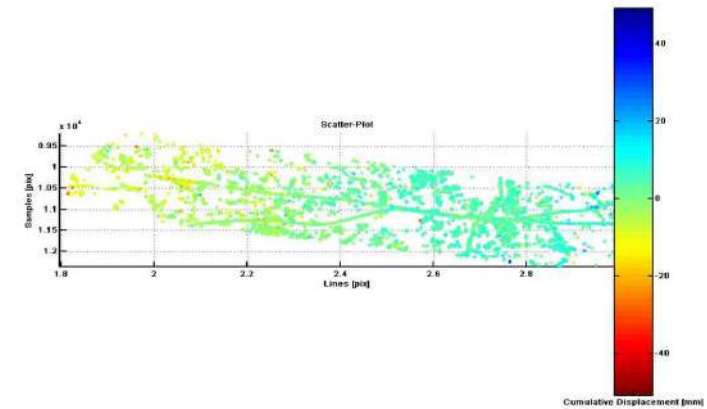


그림 2.45 Scene 1-2 최종 지표변위 영상

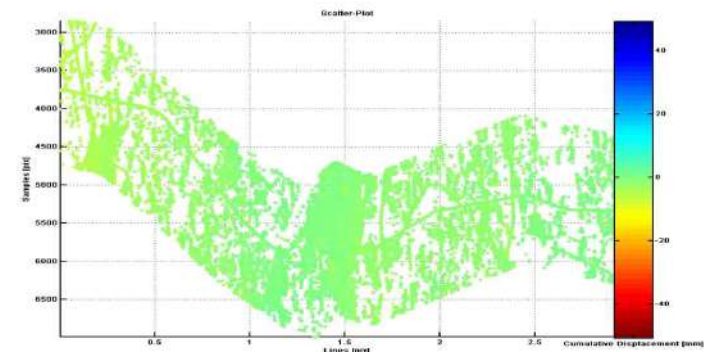


그림 2.46 Scene 2 최종 지표변위 영상

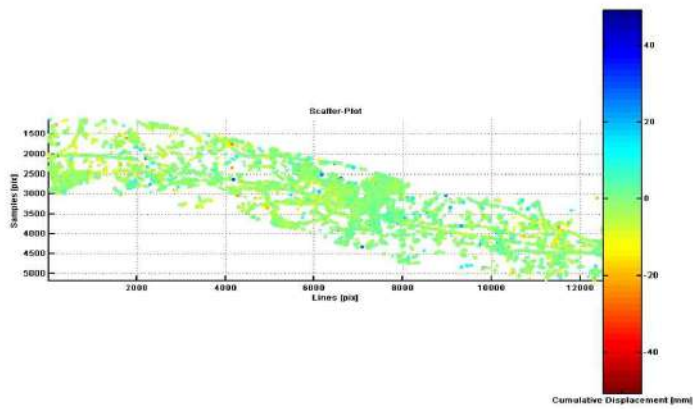


그림 2.47 Scene 3-1 최종 지표변위 영상

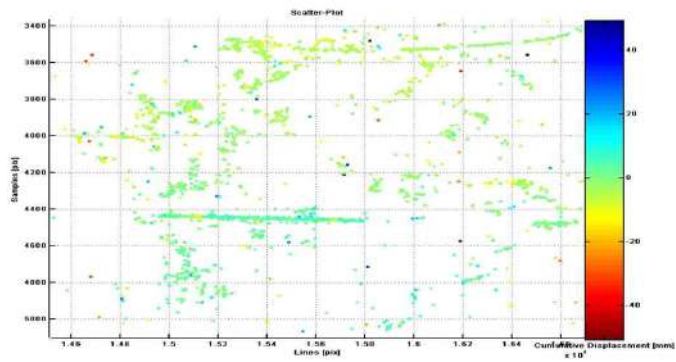


그림 2.48 Scene 3-2 최종 지표변위 영상

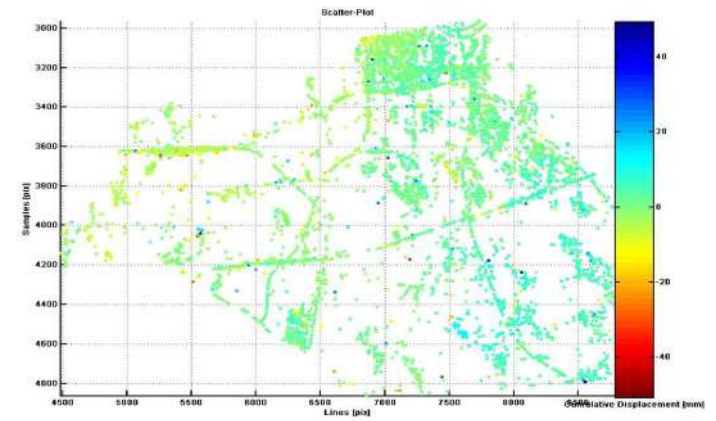


그림 2.49 Scene 4-1 최종 지표변위 영상

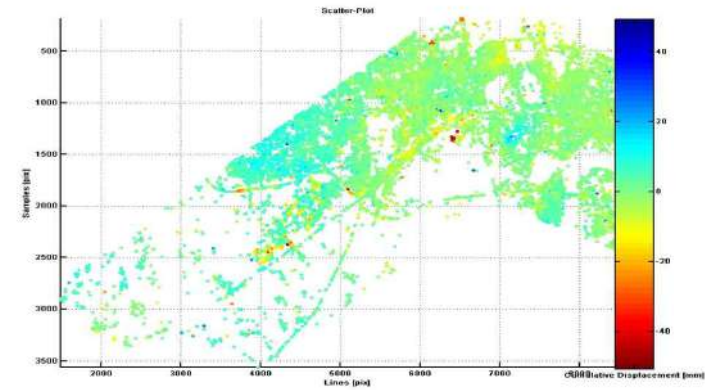


그림 2.50 Scene 4-2 최종 지표변위 영상

○ 위 그림과 같이 도출된 지표변위 지도를 좌표변환을 통해 실제계 좌표로 변환하였으며 이는 다음 그림 2.51을 통해 확인 가능함

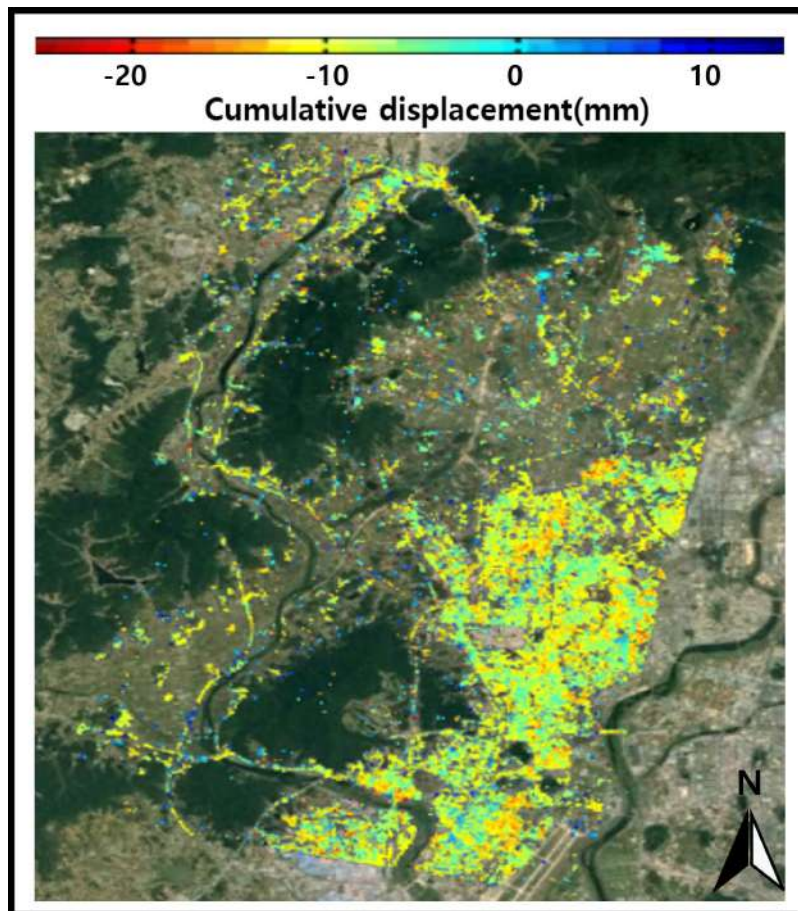


그림 2.51 좌표변환을 통해 실세계 좌표로 변환한 그림

가) 데이터 분석

○ SARProz 프로그램을 통해 도출된 최종 지표변위량을 보다 정량적으로 분석하고 호남선 고속철도에 대한 집중적 분석을 실시하기 위해 Geotiff 파일과 ASCII 및 CSV 파일로의 변환을 진행함.

○ 다음 그림 2.52은 고정산란체의 경도, 위도, 시계열 지표변위량, 긴밀도 등을 CSV파일로 변환한 것으로 변환한 CSV파일을 ArcGIS 프로그램을 통해 정밀한 공간분석을 실시하였으며 다음 그림 2.53은 지표변위도를 GIS 프로그램을 통해 분석한 내용이며 그림 2.54는 Google Earth 상에서의 시계열 지표변위량을 나타낸 내용임

[illegible]

그림 2.52 고정산란체의 정밀 분석을 위한 Excel 파일 형식으로의 변환

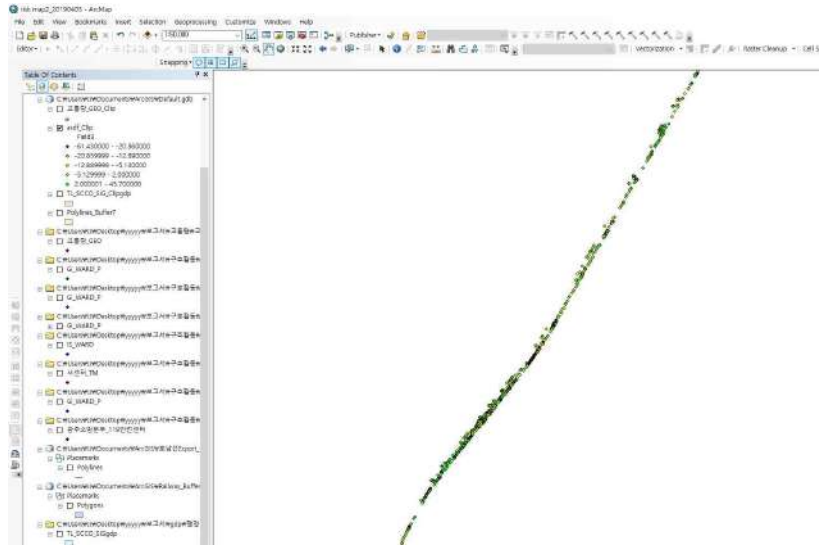


그림 2.53 ArcGIS를 통한 지표변위량 분석

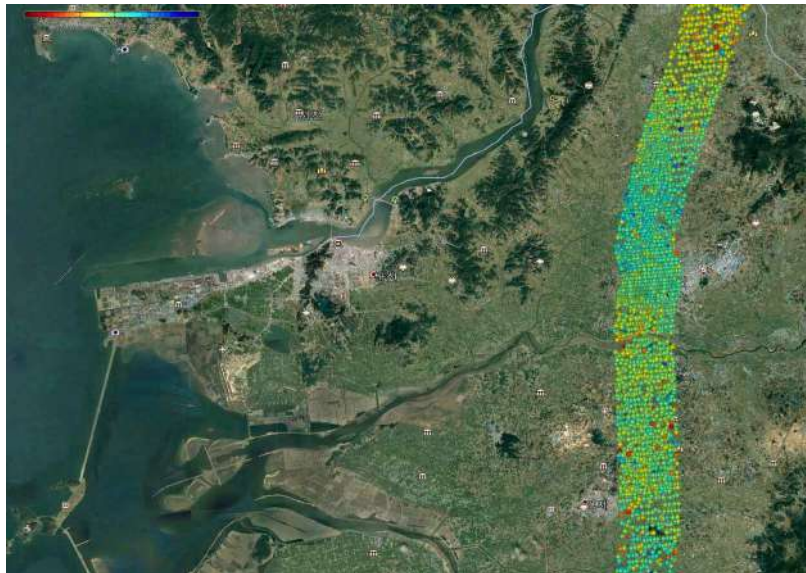


그림 2.54 Google Earth 상에서의 시계열 지표변위량

나) PS-InSAR 데이터 신뢰성 검증

(1) 점(Point) 단위의 데이터 검증

- PS-InSAR 기법을 이용하여 도출해낸 최종 지표변위 데이터의 신뢰성을 검증하는데 있어 최적의 방법은 철도레일에 부착된 계측기의 데이터와 직접 비교하는 것이나 계측기의 데이터를 획득하는데 어려움이 있어 직접 침하량을 비교하지 못하여 철도레일 근처에 임의의 철골 구조물인 연구용 고정산란체를 설치하여 이를 통한 신뢰성 검증을 진행함
- 본 연구에서 해당 고정산란체는 코너리플렉터라고 칭하며 설치한 코너리플렉터의 침하값을 PS-InSAR를 통해 도출하고 해당 점에 대해 레벨링을 실시해 두 값을 비교함으로써 PS-InSAR 기법의 최종 데이터의 신뢰성을 확보하고자 함. 이 과정을 통해 확보된 신뢰성을 바탕으로 전체 PS-InSAR의 전체 지표변위침하량 데이터에 대한 신뢰성에 적용하고자 함
- 코너리플렉터는 TerraSAR-X 위성과 TanDEM-X 위성의 안테나 개구 방향과 위성 진행방향을 고려하여 100.37° 로 설치하였고 전파의 이동 방해가 없는 지역을 선정하여 설치하였음
- 연구용 고정산란체는 반사율이 높은 철골구조물로 제작하여 높은 반사강도 및 긴밀도를 통해 안정적인 점군을 획득하고자 하였으며 실제로 PS-InSAR의 최종 지표변위량에서 연구용 고정산란체의 긴밀도는 0.91로 상당히 높은 긴밀도(≥ 0.9)를 보임
- 연구용 고정산란체를 설치한 지역은 그림 2.56에 도식하였으며 그림 2.55은 실제로 설치한 코너리플렉터의 모습을 나타냄

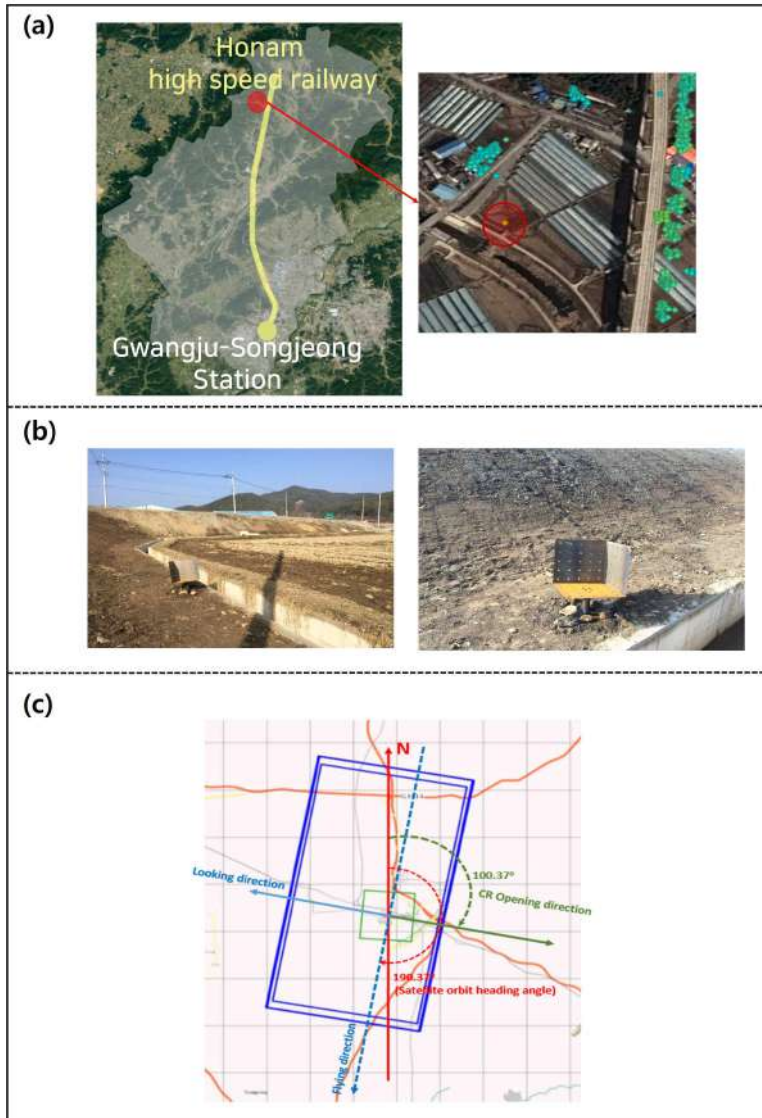


그림 2.55 실제로 설치한 코너리플렉터의 모습

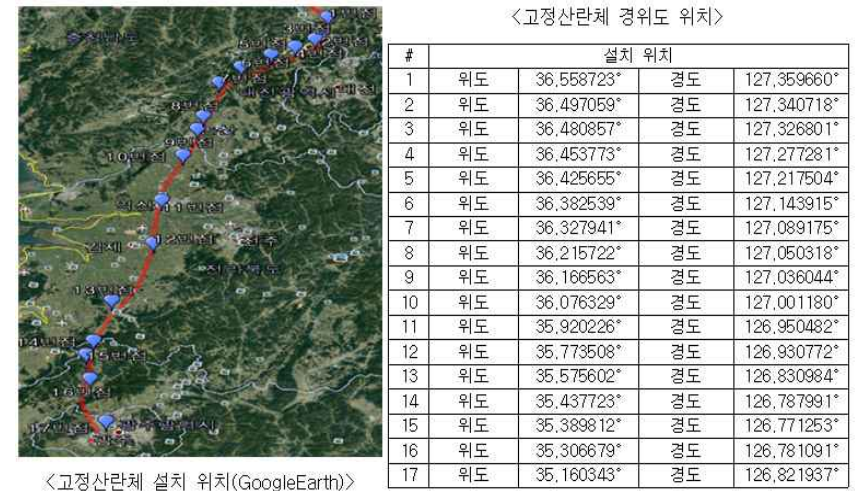


그림 2.56 고정산란체 설치 위치 및 경위도 위치

○ PS-InSAR 데이터의 신뢰성을 확보하고자 SAR 영상 취득 날짜를 고려하여 약 2달 간격으로 연구용 고정 산란체에 대한 1급 수준측량($2.5\sqrt{Lm}$, L:지점간 편도 거리)을 실시하였으며 그 결과는 다음 그림 2.57에서 그림 2.73와 같음

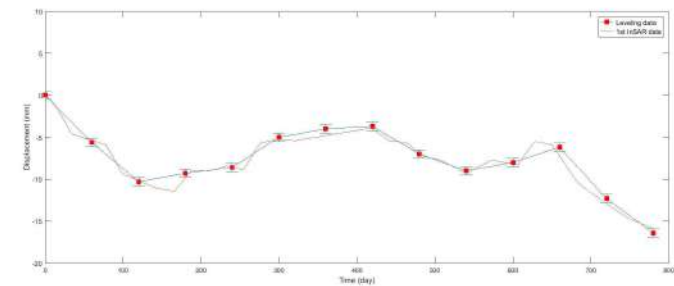


그림 2.57 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(1)

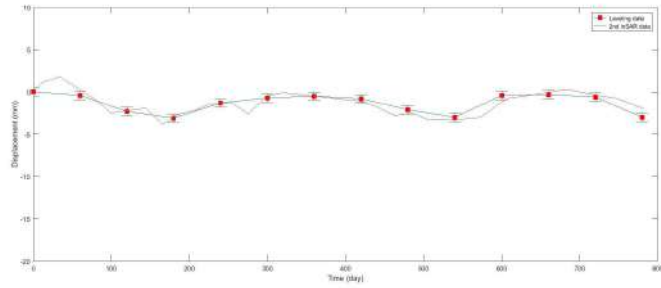


그림 2.58 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(2)

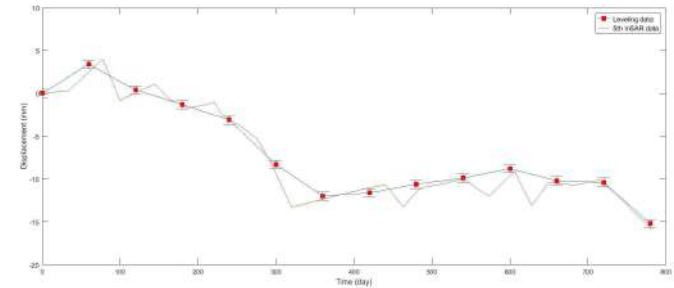


그림 2.61 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(5)

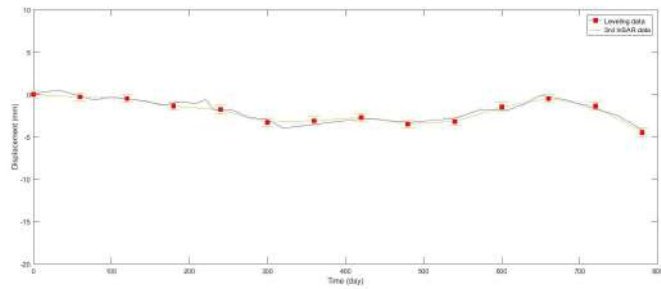


그림 2.59 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(3)

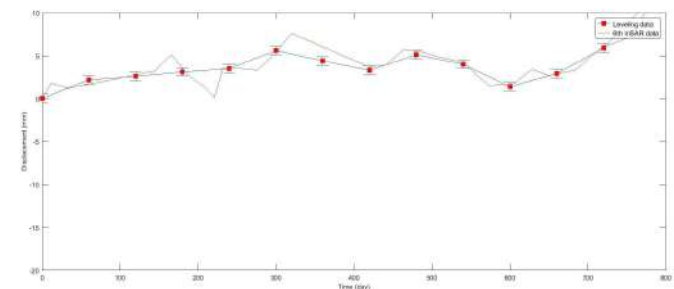


그림 2.62 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(6)

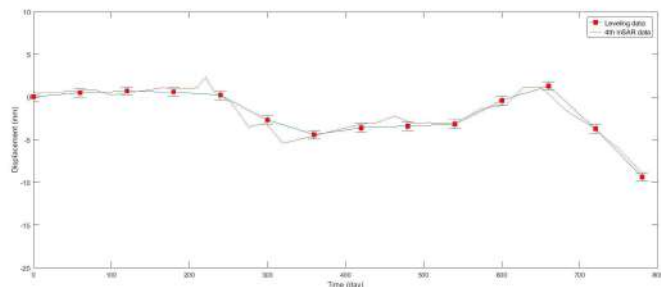


그림 2.60 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(4)

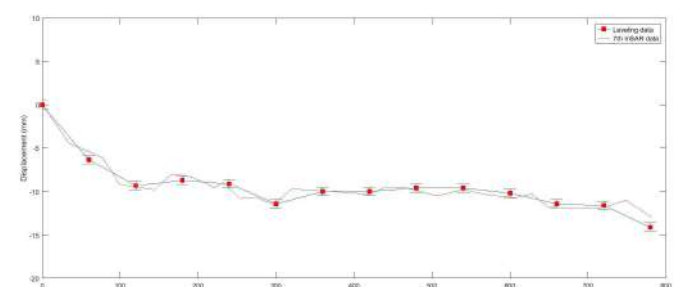


그림 2.63 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(7)

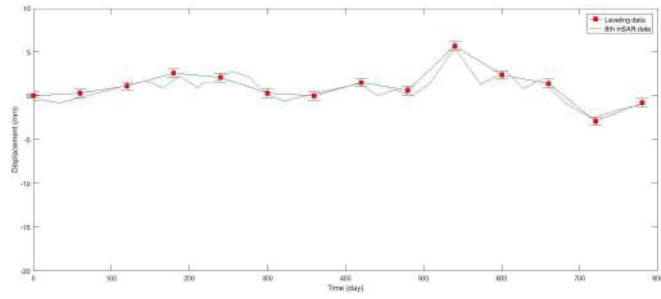


그림 2.64 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(8)

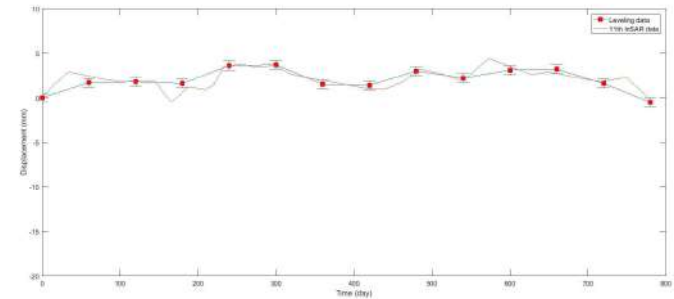


그림 2.67 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(11)

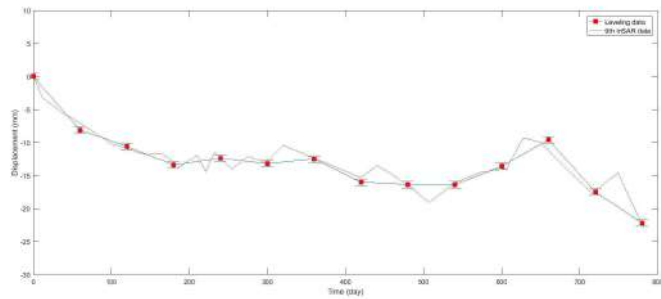


그림 2.65 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(9)

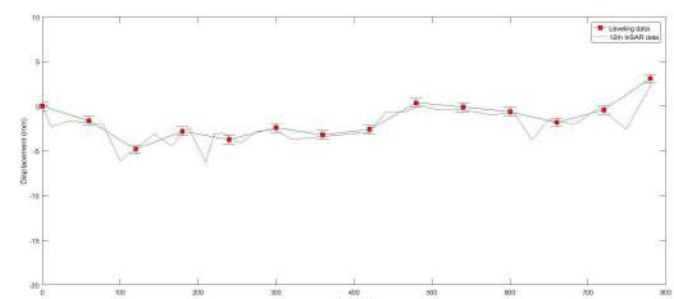


그림 2.68 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(12)

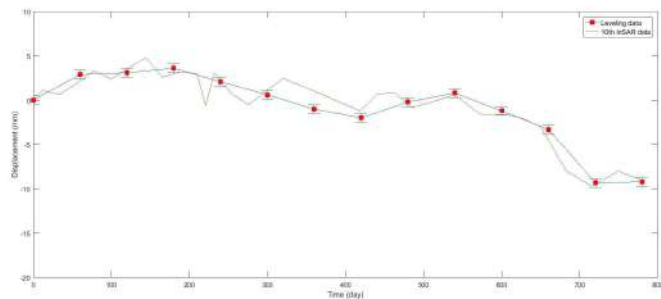


그림 2.66 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(10)

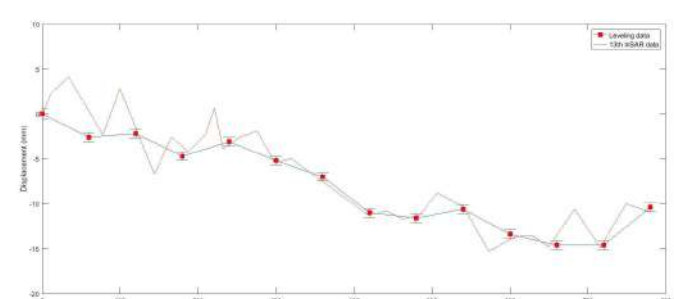


그림 2.69 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(13)

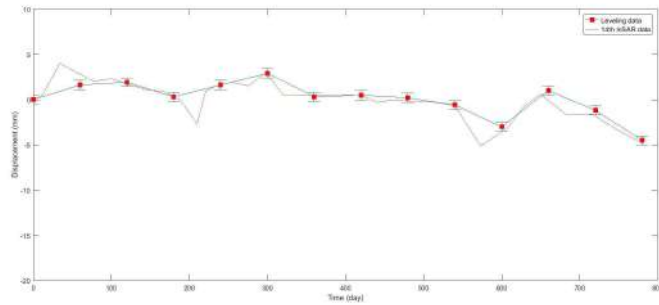


그림 2.70 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(14)

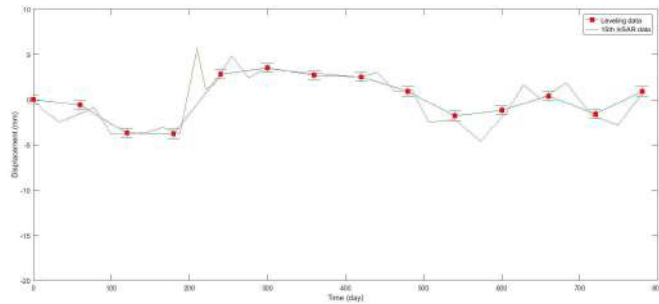


그림 2.71 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(15)

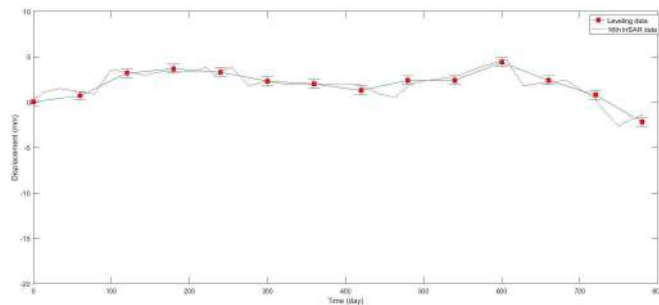


그림 2.72 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(16)

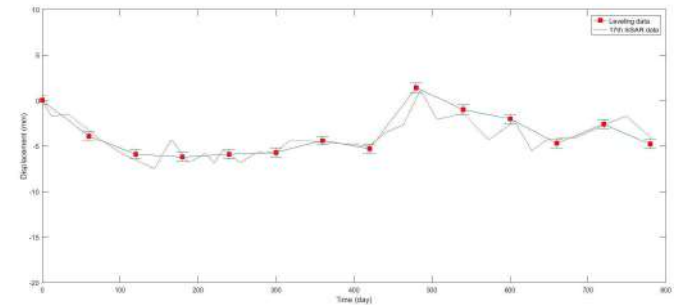


그림 2.73 고정 산란체의 정밀수준측량 결과 및 PS-InSAR 데이터의 검증(17)

- 그림 2.57에서 그림 2.73에 도식한 바와 같이 하나의 고정 산란체당 17회의 정밀수준측량을 실시하여 289개의 검증데이터를 확보함. 검증의 오차범위는 국토교통부 국토지리정보원이 고시한 1급 수준측량 오차범위에 따라 $\pm 2.5\text{mm}$ 를 활용 하였으며 전체 데이터 중 272개의 데이터(94.1%)가 1급 수준측량에 만족하는 것으로 확인되었음.
- 오차범위 내에 포함되지 않은 데이터 17개 모두 2급 수준측량 기준인 $\pm 5\text{mm}$ 를 만족함에 따라 PS-InSAR 기법을 활용한 데이터의 신뢰성을 확보함

(2) 선(Line) 단위의 데이터 검증

- 선 단위의 데이터 검증은 지속적인 침하를 보였던 정읍 신태인 지역을 대상으로 철도 아래의 지역에 약 350m의 이동식 정밀수준측량을 10회 실시하였으며 해당 라인에 있는 PS-InSAR의 점군을 임의로 10개를 추출하여 데이터를 확보하여 PS-InSAR 데이터를 시간, 거리, 지표 변위량을 각 축으로 하는 그래프 및 각 PS-InSAR데이터를 다중회귀분석을 통해 3차원 그래프를 제작하였음
- 그림 2.76에 도식한 바와 같이 (a), (b)는 열 개의 그래프로 표현되어 있고 평균값은 빨간색 실선으로 도출하였음. 또한 (c)에 나타난 바와 같이 두 개의 평균값을 비교분석함으로써 두 데이터의 일관성을 확인함. 그러나 선 단위의 데이터 검증 결과는 350m의 짧은 기선거리로 인하여 $\pm 2.96\text{mm}$ 오차수준의 2등 수준측량에 그침

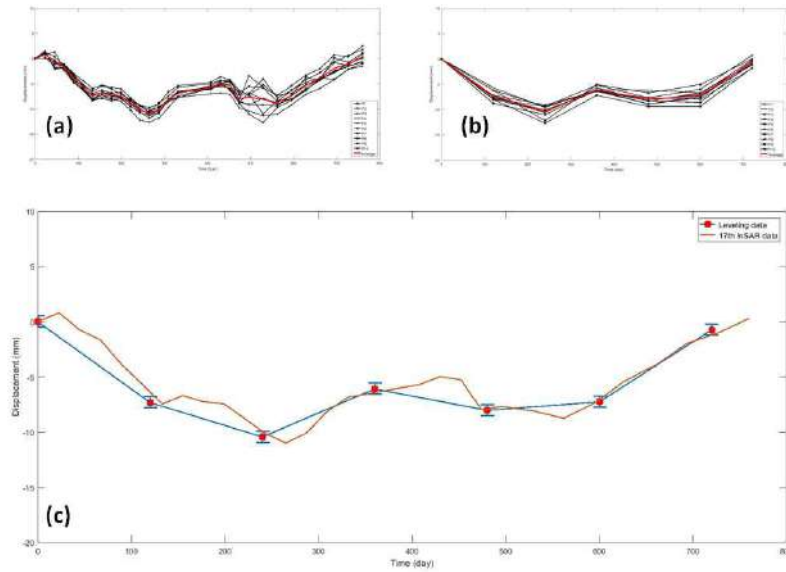


그림 2.74 선(Line) 단위의 PS-InSAR와 수준측량의 비교분석

- 이후 해당 데이터를 다중회귀분석을 통해 3차원으로 가시화 하였으며 그 내용은 다음 그림 2.75과 같으며 이를 통해 다음을 확인할 수 있음
- ① 그림 2.75 (a)에 도출한 바와 같이 시간-점군 그래프는 가로로 일정하게 띠무늬가 형성되어 있음을 확인할 수 있으며 이는 각 측량점이 유사한 거동을 보임을 나타냄
- ② (b)에 나타난 시간-침하 그래프는 시계열 거동이 유사함
- ③ (c)에 도출한 Quarter View에서 본 검증에서 도출한 최종 성과물을 확인함

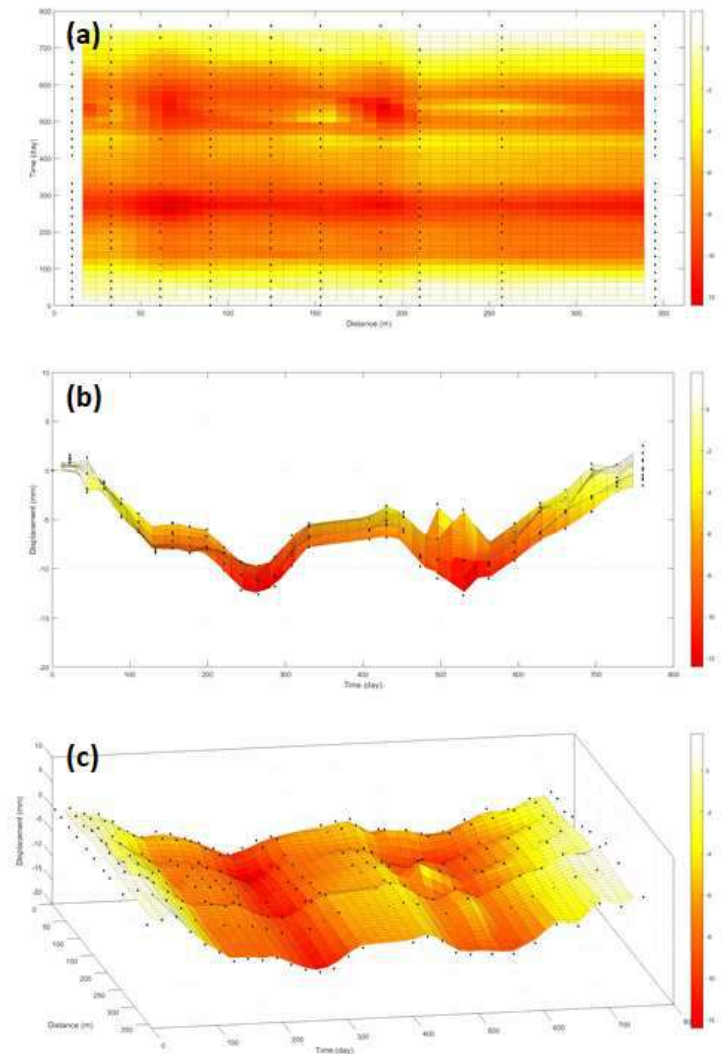


그림 2.75 다중회귀분석을 통한 검증자료의 3차원 모델

(3) 면(Plane) 단위의 데이터 검증

○ PS-InSAR를 이용한 지표변위 시계열 분석을 검증하기 위해 전라북도 정읍시 정읍역사 주변
이름 3km 둘레의 점군을 정밀수준측량을 통해 검증한 뒤 이를 PS-InSAR 기법을 통한 지표변
위 시계열 자료와 비교 분석하였음

○ 측량은 총 5회 진행하였으며 측량 성과의 일관성을 유지하기 위해 해당지점에 도근점 설치 후
이를 반복 측량하여 정확도를 확보함

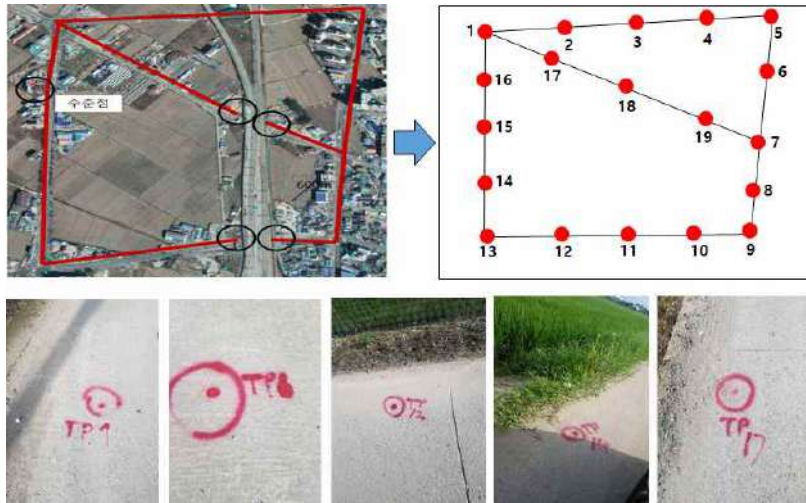


그림 2.76 면(Plane) 단위의 데이터 검증을 위한 측량 지역 및 도근점 설치

○ 이후 위 지점을 이동 측량하여 지표변위를 계측하였으며 이에 대한 내용은 다음 표 2.11과 같음

표 2.11 면단위 데이터 검증에 활용한 점군 상세정보

NO.	location		Date from first image(day)						
	X	Y	0	159	305	445	604	753	
1	35.58656	126.8446	0	3.0026	4.8315	-1.7646	-4.8698	1.622	
2	35.58581	126.8465	0	-2.3233	0.9689	1.668	-1.675	2.4835	
3	35.58506	126.8481	0	0.5475	-2.9385	-1.8763	0.297	0.8599	
4	35.58438	126.8499	0	-2.8125	-2.606	1.0106	0.6915	-0.3326	
5	35.58349	126.8519	0	1.6655	-0.5132	1.2945	-1.3004	2.5003	
6	35.58214	126.8504	0	0.3803	-0.9202	1.754	1.3841	-1.6747	
7	35.5809	126.8488	0	0.7581	1.69	1.1544	2.0334	-1.9457	
8	35.57939	126.8473	0	-2.3895	0.3537	0.6536	1.1649	0.8456	
9	35.57793	126.846	0	0.1598	-2.8251	-1.8182	2.2874	0.018	
10	35.57846	126.8447	0	-1.5147	-0.9301	-2.4122	-0.512	-2.2974	
11	35.57885	126.8438	0	0.139	2.6275	0.0304	1.7148	2.4231	
12	35.57953	126.8415	0	1.8791	-2.1614	-1.1963	2.2556	0.3771	
13	35.58027	126.8397	0	0.2627	-1.0206	2.69	-3.778	0.5074	
14	35.58175	126.8407	0	0.4557	-2.3362	-1.2982	1.5856	3.5232	
15	35.58358	126.8422	0	3.6104	0.5598	-2.5186	-2.518	0.735	
16	35.58505	126.8433	0	-0.8989	2.7349	-0.6854	-2.4238	-2.8741	
17	35.58473	126.8451	0	1.1822	3.4379	-0.2056	-3.9714	1.6173	
18	35.58271	126.846	0	-3.302	3.0034	-2.799	-0.4344	-2.0938	
19	35.58115	126.8469	0	-3.3358	-1.2821	3.9354	-2.4279	-0.6013	

- 위 측량 자료를 토대로 PS-InSAR 기법을 통한 지표변위 자료와 비교 분석을 진행함. 다만 3차원 단위의 시계열 분석의 비교는 측정하지 않은 지역들까지 회귀분석을 수행해야 하기 때문에 직접적인 분석이 어렵기에 본 단계에서는 전체적인 트렌드를 파악하는데 중점을 두고 비교 분석을 진행함



그림 2.77 정읍 역 주변의 PS-InSAR 데이터 및 시계열 자료 예시

- 그림 2.77에 도식한 바와 같이 정읍역사 주변은 3mm 편차 이내로 지표의 변화가 없는 지역으로 정밀 수준측량 결과 또한 큰 지표의 변화가 나타나지 않는다면 Ps-InSAR 기법을 통한 지표변위 관측의 신뢰성을 확보함

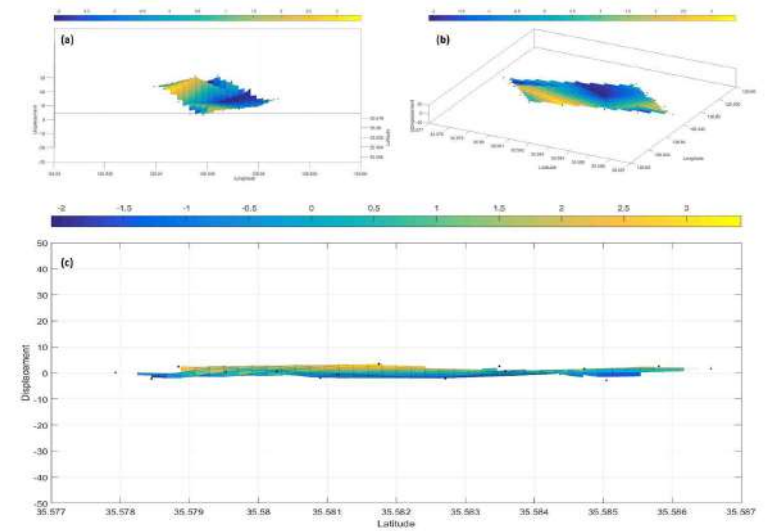


그림 2.78 다중 회귀분석을 통한 면 단위 측량 검증 데이터의 3차원 모델링

- 그림 2.78은 753일 동안 지표의 누적 변화량을 3차원으로 도식한 내용임
- 그래프의 범례에 나타난 바와 같이 평면 내에 위치 하고 있는 모든 점들이 -2mm~4mm 내에 분포 되어 있기 때문에 면단위의 데이터 검증 또한 신뢰성을 확보할 수 있음을 확인함
- 따라서 점, 선, 면단위의 검증을 통해 모두 1급에서 2급 수준측량의 정확도를 얻었으며 본 연구의 연약지반 침하 분석결과와 신뢰성을 확보할 수 있었음

(4) 연약지반 침하 분석 결과에 대한 신뢰성

- PS-InSAR 기법을 활용한 지표변위량 데이터의 신뢰성을 분석하기 위해 본 연구에서는 정밀 수준측량을 활용하여 비교 분석하였음
- 비교 분석 방법은 점 단위의 고전적인 측량방법, 선단위의 이동식 측량방법, 면 단위의 3차원 분석방법을 수행함
- 신뢰성의 기준은 국토교통부 국토지리정보원이 고시한 수준측량의 기준값을 적용하였으며 1급 수준측량($2.5\sqrt{L}$) 및 2급 수준측량($5\sqrt{L}$) 정확도와 비교하였음
- 점 단위 수준측량의 결과는 총 289개의 검증데이터 중 272개(94.1%)가 1급 수준측량을 만족함을 보였으며 나머지 17개의 데이터 역시 2급 수준측량 기준을 만족함에 따라 데이터의 정확도가 매우 높음을 확인할 수 있음
- 선 단위 수준측량의 결과는 10개의 점을 대상으로 이동식 수준측량을 통해 각 점당 변화한 평균값을 기준으로 측량 데이터와 비교 분석하였으며 그 결과 모든 점이 2등 수준측량에 만족함을 확인할 수 있음
- 면 단위 분석은 평면 내에 위치한 모든 점들이 -2mm~4mm 내의 결과를 보이고 있으며 측량 결과 역시 동일한 양상을 보이고 있음을 확인할 수 있지만 정확한 점, 선 검증과 같이 비교할 수 있는 대상이 3차원의 곡면 형태를 보이고 있기 때문에 직접적인 분석에 한계가 있음

나. 호남 고속철도 지반침하 리스크 평가

1) 리스크 평가 개요

가) 리스크 평가

- 리스크란 자연적, 인공적 재난과 취약조건간의 상호작용으로부터 얻어지는 해로운 결과 또는 예측되는 손실의 확률을 의미함. UN-ISDR은 리스크를 “손실의 확률”이라고 정의하고 있으며 이는 개념적으로 다음 식 2-26같이 표현되고, 개념적인 공식은 식 2-27과 같음

$$Risk = Hazard \circ Vulnerability \circ Amount \quad (2-26)$$

$$Risk = Hazard \circ Vulnerability / Capacity \quad (2-27)$$

- 식 2-26을 통해 물리적, 인구 및 경제적 손실을 중심으로 리스크를 정량화 할 수 있도록 GIS의 공간데이터를 사용하여 실질적으로 계산할 수 있음
- 식 2-27를 통해 위험과 취약성, 용량의 인자들을 결합할 수 있으며 공간적 다중기준 사정(Spatial Multi-Criteria Evaluation)을 사용하여 정량적인 위험관련 지표들로 활용됨
- UN-ISDR은 GIS 기반의 리스크 평가에 사용된 정의들을 다음 표 2.12와 같이 요약됨

표 2.12 GIS 기반의 리스크 평가 정의 (1997, IUGS;2004, UN-ISDR)

용어	정의
자연재난	생명 손실, 부상, 자산파괴, 사회적·경제적 피해, 환경피해 및 파괴를 잠재적으로 일으킬 수 있는 물리적인 사건, 현상 및 인간 활동을 의미함
리스크요인	어떤 분야에서 재난에 노출된 공공서비스 및 어떤 다른 정의된 가치들을 포함하는 인구, 자산, 경제적 활동. 또한 “자산”이라고 할 수 있음 리스크 요인들의 수량(건물, 인구 등). 금전적 가치(대체비용, 시장비용 등) 및 면적이나 인지(리스크요인으로서의 중요성)로써 정량화 될 수 있음
노출	노출은 위험요인들이 특정한 재난에 노출되는 정도를 의미함 위험요인들과 재난흔적간의 공간적인 상호작용은 리스크 지도상에 요인들로써 재난지도의 간단한 중첩을 통해 GIS에서 표시됨
취약성	재난의 영향에 사회공동체의 민감성을 증가시키는 물리적, 사회적, 경제적, 환경적 요인들 또는 프로세스로써 결정되는 조건들은 각각 취약성으로 세분화 됨
능력	재난에 직면하고 있는 개인, 가정 및 사회공동체의 긍정적인 관리능력을 의미함(인식고취, 조기경보 및 대피계획 등)
결과	해당 재난 시나리오의 결과로써 해당 지역에서 예측되는 손실임
리스크	해당지역과 기간내에 재난(자연적, 인공적)과 취약한 조건들간의 상화작용으로부터 얻어지는 해로운 결과나 예측되는 손실(사망, 부상, 자산손실, 생계, 경제활동의 지장 또는 환경피해)의 확률임

- 리스크 요인들은 많은 다양한 형태 및 방법으로 분류되어 리스크 요인들의 수를 기준으로 분류하는 방법은 리스크의 존재하는 방법을 정의하며 리스크와 재난 요인간의 상호작용은 리스크 요인들의 노출과 취약성을 정의함
- 리스크 요인의 노출은 리스크 요인들이 특정한 재난에 노출되는 정도를 의미하며 리스크 요인들과 재난흔적간의 공간적 상호작용은 GIS 기술로 리스크 지도에 요인들을 포함하고 있는 지도를 중첩시켜 표현됨
- 취약성은 재난의 영향에 대한 사회공동체의 민감성을 증가시키는 물리적, 사회적, 경제적, 환경적 요인들에 의하여 결정되는 인자로 나이, 성별, 수입원들과 같은 기준의 수가 있는 경우 이를 계산해서 얻어질 수 있지만, 재난의 강도와 리스크요인들이 결합되어 있는 경우는 두 형태 간의 상호관계를 나타내는 취약성 커브를 사용하여 수행됨
- 본 연구에서는 호남고속철도의 위험 평가와 지역사회의 취약성 평가를 실시하여 리스

크 맵을 작성했으며 리스크 평가의 방법을 도식화한 내용은 다음 그림 2.79와 같음

- 위험 평가는 호남고속철도 레일에 대해서만 실시하였으며, 지반침하에 대한 보수 및 보강 규정을 참고하여 리스크 테이블을 작성한 후 리스크 커브를 도출하여 GIS 기반 호남고속철도의 위험 지도를 작성하였음
- 취약성 평가는 호남 고속철도가 지나는 지역을 대상으로 하여 열차사고 시 사고의 규모를 키울 수 있는 인자를 설정하여 GIS 기반 취약성 지도를 작성하였음
- 리스크 평가는 위험 평가 및 취약성 평가 결과를 바탕으로 하여 GIS 상에서 두 레이어의 곱으로 표현하였음

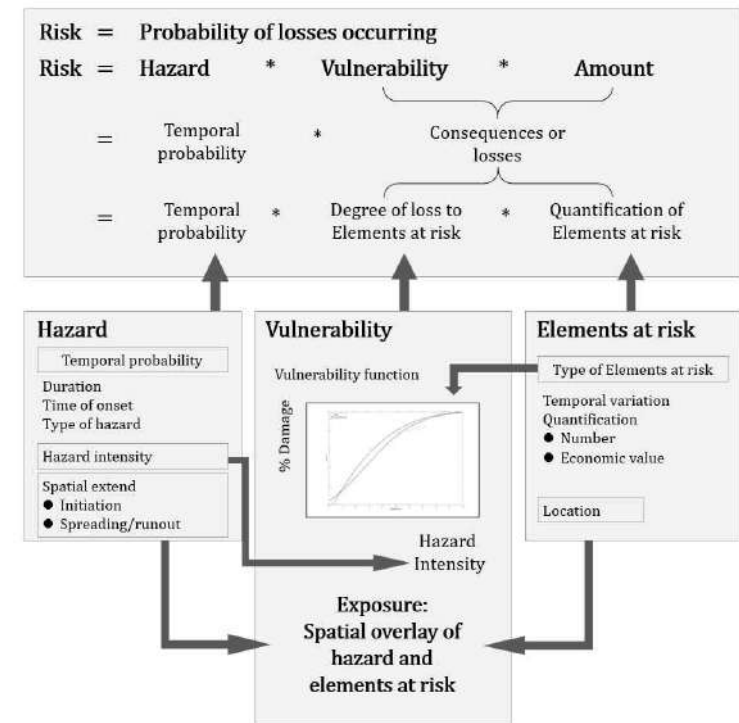


그림 2.79 리스크 평가의 개념

나) 위험 평가

- 위험은 생명손실, 부상, 자산파괴, 사회·경제적 혼란 및 환경악화를 일으킬 수 있는 잠재적 파괴력을 가진 물리적 사건, 현상 및 인간 활동이며 특정 기간 내에 특정 지역에서 발생할 확률 및 강도를 가지고 있다고 정의됨(UN-ISDR 2004)
- 위험의 종류는 많고 그 영향은 매우 광범위하기 때문에 수 많은 학자들이 이를 분류하고자 하였으며 Smith(1991) 등은 위험을 크게 3가지로 분류하였음

표 2.13 위험의 종류

자연적 위험(심각한 지구 물리학적, 생물학적 사건)	
지질학적	지진, 화산분출, 산사태, 눈사태
대기학적	태풍, 토네이도, 해일, 눈
수리학적	하천범람, 해안범람, 가뭄
생물학적	유행성, 들불
기술적 위험(주요 사건 및 사고)	
운송사고	항공기충돌, 열차충돌, 선박좌초
산업시설사고	폭발, 화재, 유독가스, 방사능물질 누출
불안정한 시설	구조적 붕괴, 화재
위험물질	저장, 운송, 오용
전 지구변화	
기후변화	해수면상승, 극심한 사건의 빈도수 변화
환경악화	산림파괴, 사막화, 자연자원의 손실
지역발전위험	광범위한도시화, 필수시설의 집중화
Super Hazard	대규모 지구변화, 우주 행성들의 영향 등

- 위험은 다음과 같은 중요한 4가지 특성을 가지고 있음
 - ① 위험은 확률로써 표현되는데 어떤 사건이 미래에 발생할 수 있는 가능성을 의미하며 언제, 어디서 얼마나 많은지는 불확실하지만 다른 지역보다 위험이 더 많이 발생할 가능성이 높은 지역을 확인 가능함
 - ② 위험에 대한 확률은 특정한 기간으로 제한되는데 보통 1년을 기준으로 산정하며, 연간 확률과 같은 빈도제한이 없는 확률적 표현은 의미가 없음
 - ③ 공간적 정보는 위험조건을 정의하는데 중요한 정보로서 취급되는데, 예를 들어 지진은 단층지대에서 일어나고 산사태는 사면에서 발생하며 홍수는 수원 근처에서 발생함

- ④ 생명의 손실이나 파괴를 일으킬 수 있는 사건은 규모로써 표현이 가능하며 사건에 의해 방출된 에너지나 운동량이 클수록 더 파괴적인 잠재력을 지님

- 위험의 정의에 대해 주의해야 할 중요한 관점은 파괴나 인명의 피해와 같이 손실을 일으킬 확률은 있지만 직결되지는 않음
- 위험과 관련된 연구를 위험평가라고 하며, 역사적 기록의 수집, 위험스러운 사건의 크기와 시간적 공간적 발생확률을 추정하기 위하여 지형적, 지질학적 및 수문학적 정보의 해석을 통해 현상의 물리적인 관점을 분석하는 것을 포함함

다) 취약성 평가

- 취약성의 일반적인 정의는 위험의 영향에 대한 공동체의 민감도가 증가하는 물리적, 사회적, 경제적, 환경적 요소들로부터 결정되는 조건임
- 취약성의 종류는 크게 물리적 취약성, 경제적 취약성, 사회적 취약성, 환경적 취약성으로 구분됨
- 물리적 취약성은 건축 환경과 인구에 대한 물리적인 영향에 대한 잠재력을 의미함. 일정한 규모의 자연현상이 발생하여 리스크 요인의 손실정도를 나타내며, 경제적 취약성은 경제적 자산과 과정들에 대한 위험들의 잠재적인 영향(사업 중단, 실직 등)임. 사회적 취약성의 경우 빈곤층, 장애인, 아동 및 노인들과 같은 사회적 약자 그룹들에 대한 위험들의 잠재적인 영향임. 환경적 취약성의 경우 환경에 대한 위험들의 잠재적인 영향을 의미함
- 취약성은 Chambers(1989)가 정의한 바와 같이 내적인 측면과 외적인 측면으로 나누어 볼 수 있음. 외적인 측면은 외부의 충격과 스트레스에 대한 노출과 관련이 있고 내적인 측면은 대처에 대한 무능력 및 무방비와 관련되어 있음. 외적 측면 중 외부 충격은 홍수, 지진 및 전염병과 같이 발생할 수 있는 사건을 의미하며 스트레스의 경우 자원의

감소등과 같은 부족과 관련이 있음

- 취약성은 다양한 방법으로 표현하거나 나타낼 수 있으며, 취약성지표를 기초로 한 취약성 지수는 대부분이 강한 위험강도와는 직접적인 관계가 없고 다양한 취약성을 표현하기 위해 사용됨
- 취약성 곡선은 위험강도와 피해 데이터 사이의 관계를 바탕으로 작성되며 높은 수준의 위험강도에 대한 피해의 증가량을 활용하여 관계를 곡선 형태로 제공함
- 위험의 강도가 동일하더라도 취약성이 다른 경우 피해수준이 다르게 도출됨
- 취약성 테이블의 경우 위험강도와 피해규모간의 관계를 표로 나타낼 때 활용되며 이 경우에 유연한 형태의 취약성곡선은 실제로 여러 종류의 위험강도로 나누어지고, 종류별로 해당하는 피해규모가 주어짐

바) GIS와 리스크 평가

- 리스크 평가(Risk assessment)는 자연환경을 파괴할 수 있는 다양한 관점들을 평가하고 리스크의 원인과 결과를 분석할 수 있는 방법들을 제시하는 것을 목적으로 하는 복잡한 과정을 통해 얻으며 사건의 발생 가능성 및 강도를 선정하기 위해 수학적 모델을 사용함 (Richa Bhattarai, et al, 2017)
- GIS 기술의 적용은 리스크의 확인, 정량화 및 평가의 중요한 과정으로 이를 통해 공간 정보를 시각화함으로써 명확하지 않은 데이터들 간의 관계, 패턴 및 경향들을 도출할 수 있음
- 리스크 분석과 모델링에서 가장 중요한 인자들과 그들의 관계는 대부분 공간적인 것이다. 따라서 GIS는 위험들을 확인하기 위해 리스크 평가 과정에 활용가능하며 이미 존재하고 있는 위험들을 중첩 및 분석하여 새로운 위험들을 결정하기 위해 활용될 수 있음

2) 호남선 고속철도 리스크 평가의 연구흐름

- 본 연구에서 수행하고자 하는 리스크 평가는 다음과 같이 나뉨

가) 고속철도 노선의 위험평가

- 고속철도 노선의 위험평가는 지반침하에 의해 철도노선이 얼마나 위험한지를 나타내는 분석중 하나로써 지반침하량을 위험인자로 정한 뒤 노선에 대한 취약성 분석을 수행하게 되며 이후 위험인자와 취약성을 통해 호남선 고속철도 노선의 리스크를 도출

나) 지역사회 리스크평가

- 도출된 호남선 고속철도 노선의 리스크 지도를 바탕으로 지역사회 리스크 평가를 수행함
- 위험인자 항목은 사고를 발생시킬 수 있는 인자로써 철도노선의 최대 침하량, 침하속도, 열차의 구간 운행속도, 철도 노선구간의 종류(터널, 교량, 사면 등), 지역의 지하수 유출로 세분화 하여 분석함
- 취약성은 사고가 발생했을 경우 지역이 얼마나 큰 피해를 입는가에 대한 척도로써 지역의 인구밀도, 소방서/구호자원의 유무, 지역의 도시화 비율, 지역의 GDP, 취약 계층으로 세분화 하였음
- 위험인자와 취약성인자들의 분석 단위가 다르고 경중이 다르기 때문에 1:1로 대응하기

어려운 문제에 직면하게 되는데 이에 따라 각 인자들의 가중치 선정을 통해 위험인자 또는 취약성 인자의 우선순위를 결정하는 과정이 수행되어야 하며 가중치를 결정하는 과정은 다음의 AHP기법을 통해 수행하게 됨

$$Hazard = H_1w_{a1} + H_2w_{a2} + H_3w_{a3} \cdots H_nw_{an} \quad (2-28)$$

$$Vulnerability = V_1w_{v1} + V_2w_{v2} + V_3w_{v3} \cdots V_nw_{vn}$$

- 선정된 인자들 중 상관 값이 큰 인자가 많을수록 데이터가 왜곡되는 현상을 해결하기 위해 각 인자의 상관관계를 유클리디안 거리 기반 k-Nearest Neighborhood 법을 통해 유사성을 분석하였으며 유사성에 비례하여 인자들 간의 종속성 가중치를 결정함

$$Hazard = H_1w_{d1} + H_2w_{d2} + H_3w_{d3} \cdots H_nw_{dn} \quad (2-29)$$

$$Vulnerability = V_1w_{v1} + V_2w_{v2} + V_3w_{v3} \cdots V_nw_{vn}$$

- 두 가지 방법의 가중치 적용을 통해 본 연구에서는 최종적인 인자들의 가중치 변환을 수행하였으며 그 식은 다음 식 2-30와 같음

$$WeightedHazard = \frac{1}{2} [H_1(w_{a1} + w_{d1}) + H_2(w_{a2} + w_{d2}) \cdots H_n(w_{an} + w_{dn})] \quad (2-30)$$

$$WeightedVulnerability = \frac{1}{2} [V_1(w_{v1} + w_{d1}) + V_2(w_{v2} + w_{d2}) \cdots V_n(w_{vn} + w_{dn})]$$

- 위 과정을 통해 도출된 위험인자와 취약성인자의 합을 활용하여 각 위험인자를 10단계로 세분화 한 뒤 단계를 기준으로 최종 리스크 지도를 결정하게 되며, 도출된 리스크 지도를 통해 고속철도 사고에 대한 시나리오를 생성하여 리스크 평가를 수행함

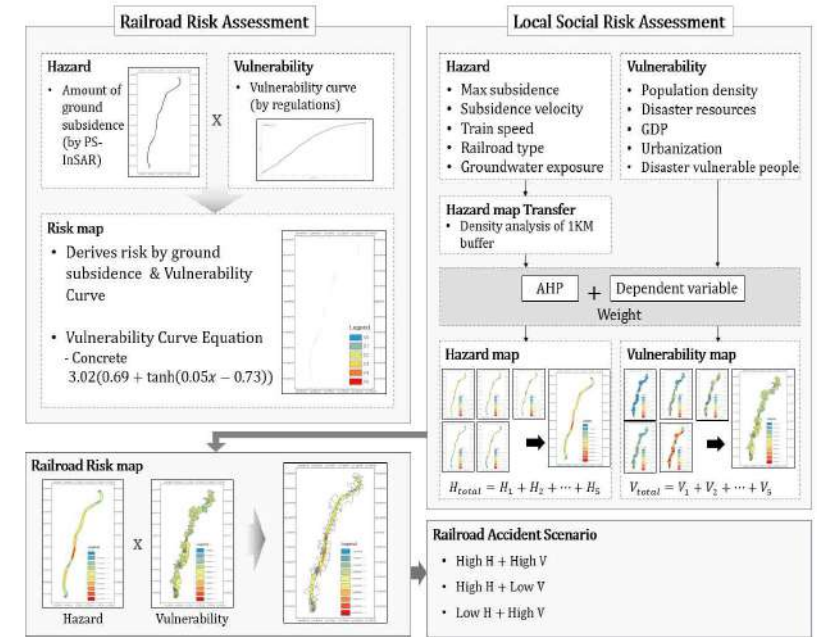


그림 2.80 리스크 평가의 연구흐름도

3) 고속철도 노선의 리스크 평가

가) 고속철도 노선 리스크 평가 개요

- 고속철도 노선 리스크 평가는 본 연구에서 수행하고자 하는 지역사회 리스크 평가의 기초자료로써 활용하기 위해 우선적으로 진행됨
- 이를 위해 위험 인자에 대한 분석과 이에 따른 취약선 곡선 산정이 우선적으로 수행되며 이를 바탕으로 리스크 평가를 수행하며 이러한 고속철도 노선의 리스크 평가 연구 흐름은 다음과 같이 정의됨

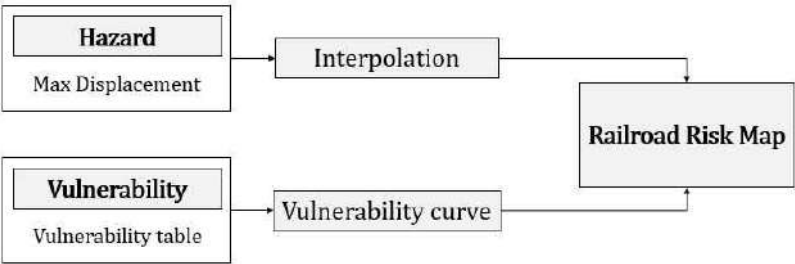


그림 2.81 고속철도 노선의 리스크평가 개념도

나) 고속철도 노선의 위험 평가

- 위험평가를 수행하기 위해 위험특성을 분석해야 하는 데 대표적인 위험특성으로는 촉발요인, 공간적 발생, 사건의 지속시간, 촉발시점, 규모, 빈도수 등이 있음
- 본 연구에서는 장기간의 지반침하에 의한 철도 노선의 위험을 평가하는데 목적을 두고 있으며 다음과 같은 이유로 위험특성 중 철도노선의 위험에 가장 큰 특성인 촉발요인만을 다룸
 - ① 철도 노선만을 대상으로 연구를 수행하기 때문에 공간적 발생여부는 철도 노선에 고정됨
 - ② 장기간에 걸쳐 서서히 침하되는 양상을 지니고 있는 지반침하에는 사건의 지속시간 개념이 포

함되어 있지 않음

- ③ 산사태, 화산폭발과 같이 사건이 발생하는 촉발 시점과도 관계가 없으며 태풍, 지진과 같이 규모 및 빈도수에도 영향을 받지 않음

○ 다음 그림 2.82는 청주 오송역부터 광주 송정역까지 188km 구간에 대한 지반침하량을 도식한 내용임

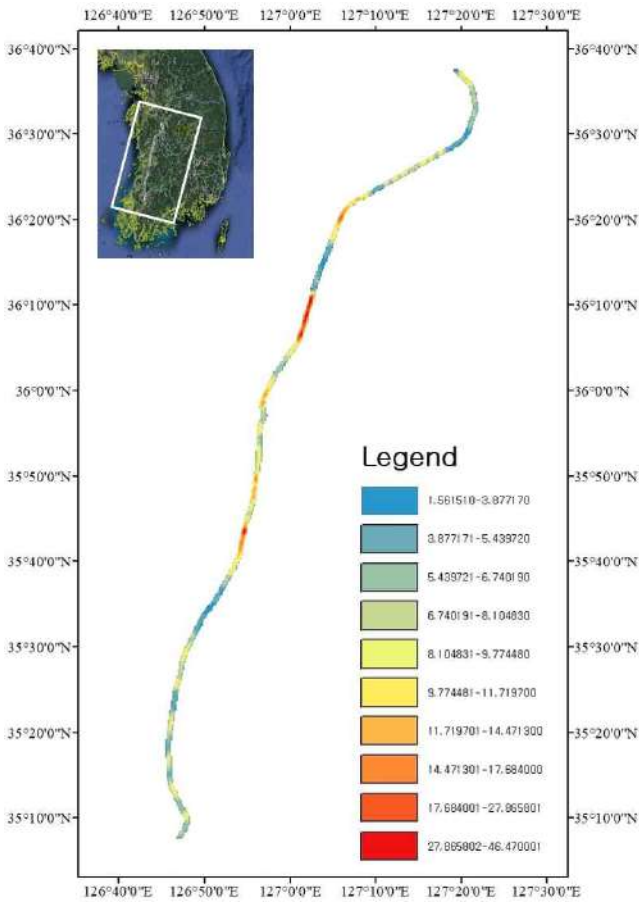


그림 2.82 고속철도 노선 위험평가에 활용되는 인자 (지반 침하량)

다) 고속철도 노선의 취약성 평가

- 취약성 평가는 취약선 테이블에 의해 정해진 취약선 곡선을 활용하여 나타냄
 - 취약선 곡선 : 위험강도와 피해 데이터 사이의 관계를 바탕으로 작성되며 이를 회귀 분석하여 곡선을 도출함
 - 취약성 테이블 : 위험강도와 피해규모 간의 관계를 표로 나타냄
- 본 사업에서 위험 강도는 크게 5단계로 선정하였으며 이는 다음 표 2.14과 같음

표 2.14 지반침하에 대한 보수 및 보강 규정

	피해 없음	정상보수		우선보수		시급보수		D4 허용침하량	D5 과피
		자갈	콘크리트	자갈	콘크리트	자갈	콘크리트		
수치(m m)	0	10	7	14	10	18	14	30	50
Damage	D0	D1		D2		D3		D4	D5

- 위 지침을 통해 리스크 테이블을 작성하였으며 노선 종류에 따라 자갈, 콘크리트 노선으로 세분화 하여 다음 표 2.15, 표 2.16과 같이 연구를 진행함

표 2.15 자갈 궤도의 리스크 테이블

자갈 노선	지반침하량 (mm)																
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51
D0	100	100	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D1	0	0	60	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D2	0	0	0	70	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D3	0	0	0	0	30	90	70	40	20	10	0	0	0	0	0	0	0
D4	0	0	0	0	0	10	30	60	80	90	100	80	60	10	0	0	0
D5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	40	90	100	100	100
ΣD	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
μD	0	0	0.6	1.7	2.3	3.1	3.3	3.6	3.8	3.9	4	4.2	4.4	4.9	5	5	5

표 2.16 콘크리트 궤도의 리스크 테이블

콘크리트 노선	지반침하량 (mm)																	
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	
D0	100	100	100	90	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
D1	0	0	0	10	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
D2	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
D3	0	0	0	0	0	10	100	70	30	0	0	0	0	0	0	0	0	
D4	0	0	0	0	0	0	0	30	70	100	80	60	10	0	0	0	0	
D5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	40	90	100	100	100	100	
ΣD	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
μD	0	0	0	0.1	0.6	2.1	3	3.3	3.7	4	4.2	4.4	4.9	5	5	5	5	

- 리스크 테이블을 바탕으로 리스크 커브를 작성하게 되며 이 과정에서 침하량에 대한 피해의 기댓값 μD가 도출됨

$$\mu D = \sum_0^5 (\frac{n \times D_n}{100}) = \frac{(1 \times D_1) + (2 \times D_2) + (3 \times D_3) + (4 \times D_4) + (5 \times D_5)}{100}$$

(2-31)

- 식 2-31에 의해 도출된 μD를 바탕으로 X축이 지반침하량, Y축이 테미지를 갖는 점군을 생성한 뒤 이를 회귀 분석하여 커브를 생성하는데 이를 취약성 곡선이라함

- 취약성 곡선은 saidi 등이 개발한 취약성 곡선의 개념식을 활용하여 수식화 하였으며 그 내용은 식 2-32과 같음

$$Vulnerability\ Curve = a[b + \tanh(cx + d)]$$

(2-32)

- 위와 같이 도출된 리스크 테이블과 식 2-32를 통해 리스크 커브 곡선을 작성하였으며 그 내용은 다음 그림 2.83와 표 2.17에 도식화함

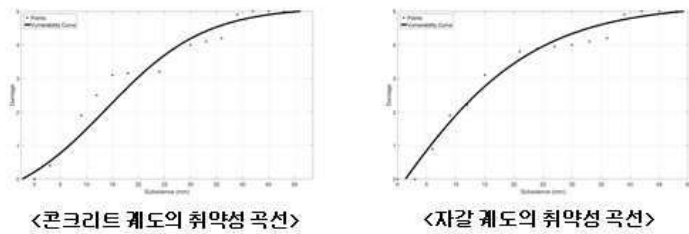


그림 2.83 궤도 종류에 따른 취약성 곡선

표 2.17 콘크리트 및 자갈 궤도의 리스크 커브 식

	콘크리트 궤도	자갈궤도
수식	$3.02(0.6945+\tanh(0.05283x-0.7344))$	$2.931(0.7331+\tanh(0.06827x-1.14))$
상관계수	0.9873	0.9778
조정상관계수	0.9687	0.9601

- 그림 2.83에 도식한 바와 같이 자갈궤도에 비하여 콘크리트 궤도가 취약성이 낮음을 확인하였으며 표 2.19를 통해 상관계수와 조정상관계수(R-Square) 모두 0.95 이상의 높은 값을 보임을 확인함
- 호남선 고속철도는 일반 열차와 같이 사용하는 일부 자갈궤도 노선을 제외한 대부분의 노선에서 콘크리트 궤도를 활용하고 있으며 이에 따라 본 연구는 콘크리트 궤도의 취약성 커브를 활용하여 리스크 평가를 수행함

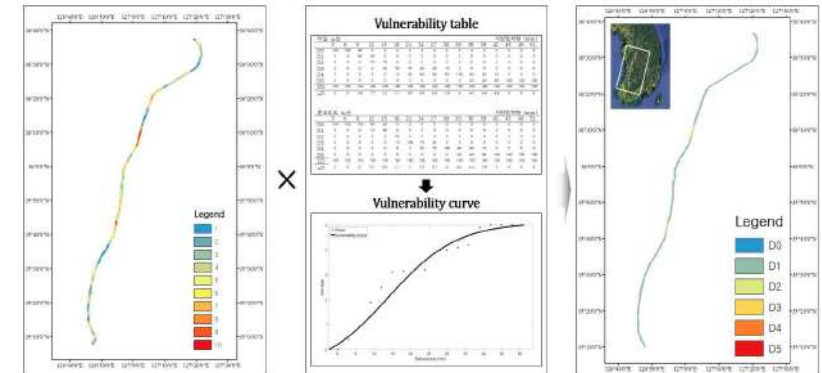


그림 2.84 고속철도 노선의 리스크 지도

4) 지역사회 리스크 평가

가) 지역사회 리스크 평가 개요

- 지역사회 리스크 평가단계에서는 사고가 발생했을 때 사고가 발생한 요인에 대한 리스크뿐만 아니라 사고로 인해 발생하는 2차 피해까지 다루며, 본 연구에서 수행하고 있는 호남선 KTX의 경우 철도 사고에 의한 리스크뿐만 아니라 주변지역에 미칠 영향까지 고려한다는 의미임
- 따라서 고속철도 노선 리스크 평가에 비해 그 규모가 크며 다양한 인자들이 고려됨. 지역사회 리스크 평가는 크게 기존단계에서 했던 철도 노선의 위험 평가 결과와 지역사회의 취약성 평가를 결합해서 도출됨
- 위험평가의 경우 최대지반침하량, 침하속도, 지하수 유출, 노선 유형, 구간속도의 인자를 통해 도출되며 취약성 평가는 인구밀도, GDP, 도시화비율, 취약계층, 구호 시설 인자를 통해 도출되나, 위 단계에서 두 평가의 범위가 상이하기 때문에(위험평가: 철도노선, 취약성평가: 지역사회) 10단계로 정량화 하여 각 인자에 대한 평가를 수행하였으며 AHP 분석과 중속변수를 통해 위험평가와 취약성평가의 가중치를 결정하였음

나) 다기준 의사결정 방법 (AHP)

○ 다기준 의사결정 방법기법

- 1970년 펜실베니아 대학의 Thomas saaty 교수가 미국 국무부의 무기통제 및 군비 축소국에서 협업을 하는 과정에서 의사결정 과정의 비능률을 개선하기 위해 개발된 의사결정 방법임
- 평가기준이 다수이며 복합적인 경우 상호적인 대안들의 체계적인 평가를 지원하는 의사결정지원 기법중 하나로써 정성적 요소를 포함하는 다기준(multi-criteria) 의사결정에 사용됨(Saman Aminbakhsh, et al, 2013)
- 불분명한 선택의 문제를 계층적으로 분석하여 평가할 수 있으며 인간의 사고체계와 유사한 방법으로 문제를 분석하고 분해하여 구조화한 모형을 활용하여 상대적인 중요도를 척도화 한 뒤 정량적인 판단 기준으로 평가함 (E. Cagno, et al, 2000)
- 그러나 많은 의사결정 문제가 해결방안의 단순화를 위하여 고려되는 인자들 간의 독립성을 전제하였지만 실제로 인자들 간의 수평적 상호관계와 수직/종속성이 존재하기 때문에 단순 계층화한 구조로 설명할 수 없는 경우가 존재함
- 또한 결정권자들의 주관적인 의견에 따라 문제의 상대적인 중요도를 결정하기 때문에 정성적인 평가가 이루어진다는 한계가 있음

표 2.18 AHP 기법의 전제조건

전제조건	설명
역수성 (Reciprocal)	비교 대상이 상호비교가 가능해야하며 중요성의 정도인 강도를 표현할 수 있어야 한다. 또한 강도는 역 조건이 성립해야 한다.
동질성 (Homogeneity)	중요성의 정도는 한정된 범위내의 척도에 의해 표현되어야 하며 비교대상 간에는 일정한 기준이 필요하다.
독립성 (Independence)	한 계층에서 여러 요소들은 인접한 상위계층에 요소에 대해 종속적인 성격을 가져야 하지만 하위계층의 요소끼리는 독립성이 확보되어야 한다.
기대성 (Expectation)	계층구조는 의사결정자들의 합리적 기대에 따라 의사결정하는 과정에서 발생하는 사항들을 완전하게 포함해야 한다.

- AHP 기법에서 의사결정요소의 상대적인 중요도 및 가중치를 추정하고 판단의 일관성을 측정하기 위해 행렬식을 도출함 (Erhan Sener, et al, 2013)

- 일반적으로 N가지 요소들의 가중치를 도출하기 위해선 $N(N-1)/2$ 번의 쌍대비교를 수행하게 되며 n개의 요소를 각각 A1, A2, An이라고 하고 요소들의 중요도를 W1, W2, Wn이라고 하면 쌍대비교로 얻어지는 결과는 다음 식 2-33과 같음

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} A_1 & A_2 & \dots & A_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{pmatrix} W_1/W_1 & W_1/W_2 & \dots & W_1/W_n \\ W_2/W_1 & W_2/W_2 & \dots & W_2/W_n \\ W_3/W_1 & W_3/W_2 & \dots & W_3/W_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & \dots & W_n/W_n \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (2-33)$$

- 쌍대비교를 수행한 뒤 아이겐 벨류법(Eigenvalue method)을 이용해 의사결정 요소들 간의 상대적 중요도를 산출하게 되는 반면 AHP 기법은 두 요소 사이에서만 중요도를 서로 비교하므로 제 3의 요소와의 관계에서 보면 주요한 순위크기가 반드시 일치한다고 볼 수 없음
- 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 일관성 측정법(CR)을 활용하여 설문지의 정확성을 검증하였음. Saaty에 의하면 $CR < 0.1$ 인 경우 합리적인 일관성이 있다고 판단되며 0.2 이내의 경우 용납할 수 있는 수준의 비일관성, 0.2 이상이면 일관성이 부족한 것으로 판단됨
- AHP 기법 분석을 수행하기 위해서는 전제조건에 부합하는 데이터 정리 및 쌍대비교 설문 작성이 필요하며 이를 수행하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 4가지 전제조건을 부합하는 기준을 통해 연구를 수행함

표 2.19 AHP 기법의 충족조건

전제조건	설명
역수성의 위배 (Reciprocal)	예매모호한 질문으로 인해 의사결정자가 질문을 이해하지 못할 때 발생함. 이를 해결하고자 모든 쌍대비교 질문을 '침하 인자A는 침하 인자B에 비해 얼마만큼 중요하다고 생각하는가?'로 통일하였음
동질성의 위배 (Homogeneity)	비교의 기준이 동일하지 못해 쌍대비교가 성립되지 않을 때 발생함. 이를 해결하고자 무차원의 10단계 분류로 재선정하였으며 이를 통해 쌍대비교를 수행하였음
독립성의 위배 (Independence)	특정선택에 유리한 가중치가 결정되어 쌍대 비교가 무의미해 질 때 발생함. 따라서 판단 기준을 서로가 상호보완이 가능한 인자들로 구성하였음.
기대성의 위배 (Expectation)	계층구조가 깊어질수록 발생하는 현상이며 이를 해결하기 위해 2단계의 단순한 가중치 비교를 통해 해결하였음

- AHP 기법을 통한 가중치 분석을 수행하기 위해 설문지 및 분석표를 도출하였으며 이에 대한 예시는 표 2.20과 표 2.21에 도식화함

표 2.20 AHP 기법을 위한 설문조사 예시

Question		3	2	1	1/2	1/3
1	How important do you think Factor. 1 than Factor. 2?					v
2	How important do you think Factor. 1 than Factor. 3?				v	
3	How important do you think Factor. 1 than Factor. 4?			v		
~	~	~	~	~	~	~
10	How important do you think Factor. 4 than Factor. 5?				v	

표 2.21 위험평가에 활용되는 AHP 매트릭스 예시

	Factor. 1	Factor. 2	Factor. 3	Factor. 4	Factor. 5
Factor. 1	1	0.33333	0.5	1	0.5
Factor. 2	3	1	2	2	1
Factor. 3	2	0.5	1	1	1
Factor. 4	1	0.5	1	1	0.5
Factor. 5	2	1	1	2	1

- 본 연구에서는 철도 노선에 위험 평가에 활용된 다섯 가지 인자(지반침하량, 침하속도, 지하수 유출량, 노선 유형, 구간 속도)와 지역사회 취약성평가에 활용된 다섯 가지 인자(인구밀도, GDP, 도시화 비율, 취약계층, 구호 시설 유무)들의 가중치 산정을 위해 AHP 기법을 도입하여 연구를 수행함
- 이 단계에서 10단계로 계층화를 진행할 수 없는 인자 (구간유형, 도시화 비율, 구호시설 유무)들은 하위 단계의 AHP 분석을 수행하여 연구를 진행함

(1) 구간유형

- ① 터널구간
- ② 교량구간
- ③ 사면구간

(2) 건물 종류

- ① 공업 지역
- ② 상업지역
- ③ 주거지역
- ④ 공공시설

(3) 구호시설

- ① 지역 분할의 지역 내에 소방서가 있고 인접지역에 2개가 있는 경우
- ② 지역 내에 소방서가 있고 인접지역에 1개가 있는 경우
- ③ 지역 내에 소방서가 있고 인접지역에 없는 경우
- ④ 지역 내에 소방서가 없고 인접지역에 1개가 있는 경우
- ⑤ 지역 내에 소방서가 없고 인접지역에 없는 경우

- 다음 그림 2.85은 AHP 분석에 활용되는 인자들과 그 계층별 단계를 도식화한 내용임

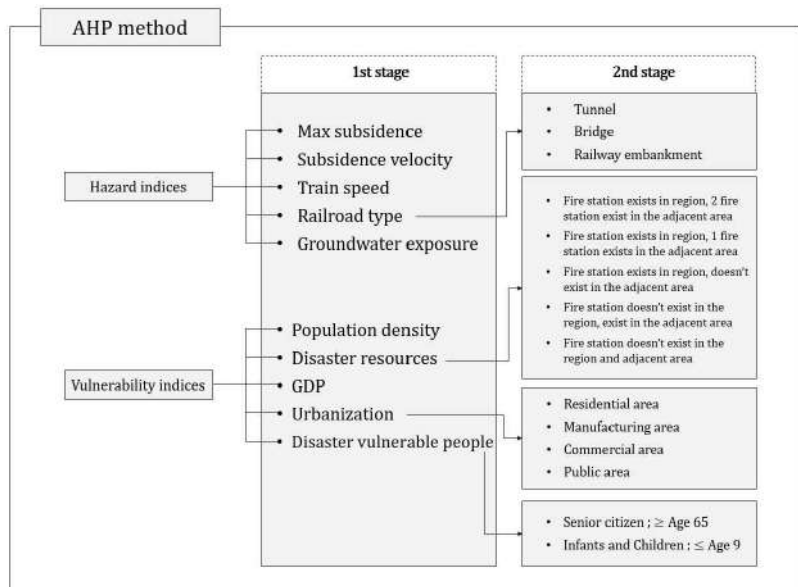


그림 2.85 AHP 분석에 활용되는 인자

- 설문 수행 대상은 재난 및 안전을 전공한 대학원생 20명을 대상으로 설문조사를 수행하였으며 이 과정에서 일관성 지수가 0.1 이상인 설문지는 본 결과에 포함하지 않음

표 2.22 AHP 기법을 통해 결정된 위험성 평가와 취약성 평가 인자의 가중치

위험성평가	지반침하량	침하속도	지하수 유출	노선유형	구간속도
가중치	0.207	0.318	0.245	0.126	0.104
랭크	3	1	2	4	5
취약성평가	인구밀도	GDP	도시화 비율	취약계층	구호시설
가중치	0.247	0.146	0.232	0.182	0.193
랭크	1	5	2	4	3

표 2.23 AHP 기법의 두 번째 계층 가중치

노선 유형	가중치	랭크
터널 구간	0.323	2
교량 구간	0.534	1
사면 구간	0.143	3
건물 유형	가중치	랭크
상업 시설	0.232	3
공업 시설	0.301	1
주거 시설	0.280	2
공공 시설	0.187	4
방호 시설 유무	가중치	랭크
지역 내에 소방서가 있고, 인접지역에 2개가 있는 경우	0.107	5
지역 내에 소방서가 있고, 인접지역에 1개가 있는 경우	0.133	4
지역 내에 소방서가 있고, 인접지역에 없는 경우	0.193	3
지역 내에 소방서가 없고, 인접지역에 1개가 있는 경우	0.254	2
지역 내에 소방서가 없고, 인접지역에 없는 경우	0.313	1

- AHP 기법의 한계에서 서술한 바와 같이 결정권자들의 주관적인 의견에 따라 가중치를 결정하기 때문에 설문조사 인원이 많을수록, 인원의 전문성이 높을수록 효과가 높음
- 그러나 본 연구에서는 방재안전공학을 전공하고 있는 학생 20명을 대상으로 분석을 수행했기 때문에 전문성이 부족할 수 있으며 설문조사 인원의 수도 많지 않기 때문에 데이터 품질의 한계가 존재함
- 또한 선정된 각 인자간의 종속성에 의해 데이터 왜곡이 발생할 수 있으며 이를 해결하기 위한 추가적인 가중치 결정방법이 요구됨

다) 인자들의 종속성 가중치 결정

- 본 연구에서는 다기준 결정방법인 AHP 분석을 통해 인자들의 가중치와 설문조사의 일관성을 제고하였지만 이 단계에서 각 인자간의 독립성과 종속성을 고려하지 않아 선정된 인자들 중 상관 값이 높은 인자가 많을수록 데이터가 왜곡되는 현상이 발생함
- 따라서 상관성이 있는 인자들 간의 상관계수를 분석해야 하여 이를 통해 각 인자의 가중치를 결정하는 작업을 수행함 (Gautam Ray, et al, 2003)
- 일반적으로 인자간의 상관계수를 결정하기 위해 유사도 측정법이 사용되고 있으며 본 연구에서는 유클리디안 거리를 활용하여 유사도를 측정하는 K-Nearest Neighbor 기법을 활용함 (Lulseged Ayalew, et al, 2005)

$$U_d = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 \dots (x_n - y_n)^2} \quad (2-34)$$

- 위 공식을 통해 두 인자(x_1, y_1), (x_2, y_2)간의 유사도를 확인할 수 있으며 이를 매트릭스로 표현하면 다음 식 2-35와 같이 삼각 행렬로 결정됨

$$Euclidian.similarity = \begin{vmatrix} u_{a,a} & u_{a,b} & u_{a,c} & u_{a,d} & u_{a,e} \\ & \vdots & u_{b,c} & u_{b,d} & u_{b,e} \\ & & \vdots & u_{c,d} & u_{c,e} \\ & & & \vdots & u_{d,e} \\ & & & & u_{e,e} \end{vmatrix} \quad (2-35)$$

- 여기서 $u_{a,b}$ 는 A인자와 B인자의 유클리디안 거리를 의미하며 이를 바탕으로 종속성에 의한 가중치 산정을 수행하게 됨
- 가중치 산정방법은 같은 인자간의 유클리디안 거리($u_{a,a}, u_{b,b}$ 등)를 제외한 네 개의 합이며 0에 가까울수록 일치도가 높으며 1에 가까울수록 일치도가 낮음

$$wu_a = u_{a,b} + u_{a,c} + u_{a,d} + u_{a,e} \quad (2-36)$$

- 식 2-36과 같은 방식을 통해 각 인자간의 유사성계수를 선정하였으며, 결정된 유사성계수의 합이 1이 될 수 있도록 이를 변환하여 최종적인 종속성에 대한 가중치 선정을 완료함

Hazard						
	A	B	C	D	E	
A	0	0.583	0.397	0.984	0.912	$\Rightarrow 2.876$
B	0.583	0	0.672	0.958	0.896	$\Rightarrow 3.109$
C	0.397	0.672	0	0.913	0.926	$\Rightarrow 2.908$
D	0.984	0.958	0.913	0	0.933	$\Rightarrow 3.788$
E	0.912	0.896	0.926	0.933	0	$\Rightarrow 3.667$
						$\Rightarrow 16.348$
						1
Vulnerability						
	A	B	C	D	E	
A	0	0.398	0.063	0.104	0.187	$\Rightarrow 0.752$
B	0.398	0	0.356	0.677	0.712	$\Rightarrow 2.143$
C	0.063	0.356	0	0.598	0.347	$\Rightarrow 1.364$
D	0.104	0.677	0.598	0	0.891	$\Rightarrow 2.270$
E	0.187	0.712	0.347	0.891	0	$\Rightarrow 2.137$
						$\Rightarrow 8.666$
						1

그림 2.86 위험 인자와 취약성 인자에 대한 종속성 가중치

라) 지역사회 위험 평가

- 지역사회 위험 평가를 위하여 기존에 수행하였던 철도 노선의 위험평가 연구에서 지반 침하량, 침하속도, 지하수 유출량, 노선유형, 구간속도 등을 평가 인자로 도출하여 이를 바탕으로 한 위험 평가를 수행함

(1) 최대 지반침하량

- 지반침하량은 PS-InSAR 기법을 활용하여 얻어진 시계열 자료 중 영상 촬영 기간 도중 최대의 음수 값을 기준으로 도출됨
- 지반침하량은 철도 노선 사고에 직접적인 영향을 주는 인자로써 사업 기간 내에 최대의 침하량으로써의 의미는 갖지만 침하의 급격함에 대한 침하 속도 정보는 나타낼 수 없음

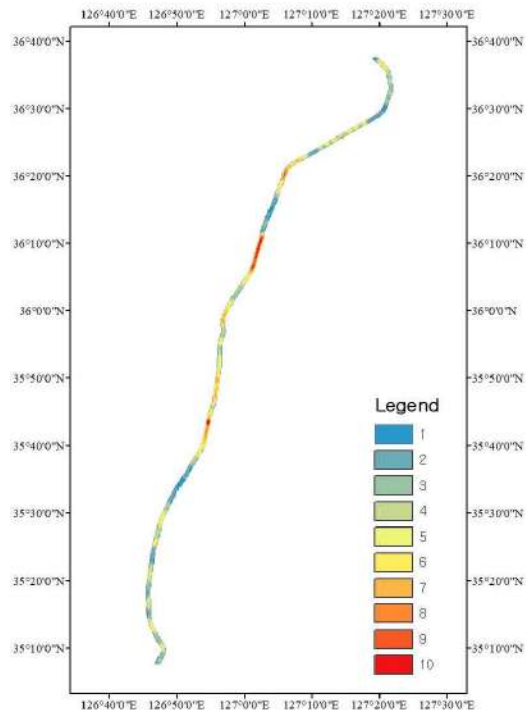


그림 2.87 GIS 상에 표현한 지반침하 인자

(2) 침하속도

- 침하속도는 최대 지반침하량 값을 도달까지의 시간으로 나눈 값으로써 지반침하가 얼마나 급격하게 이루어지는가를 나타내는 자료임

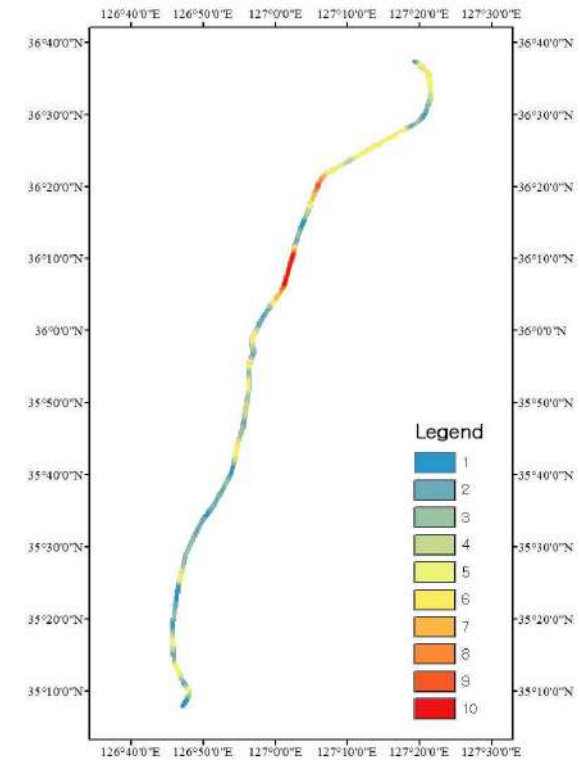


그림 2.88 GIS 상에 표현한 지반침하 속도 인자

(3) 지하수 유출

- 지하수 유출 인자는 해당 지역 내에 지하수의 최대 최솟값을 표현한 것으로 국가지하수정보센터 (<https://www.gims.go.kr>) 에서 해당 지역 지하수 수위 데이터를 제공받아 연구를 수행함

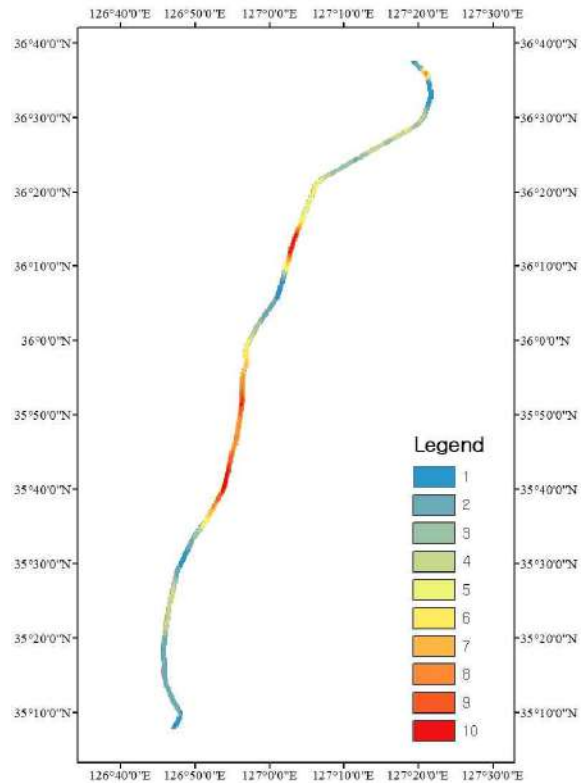


그림 2.89 GIS 상에 표현한 지하수 유출 인자

(4) 노선 유형

- 노선 유형은 AHP 단계에서 언급한 바와 같이 터널구간, 교량구간, 사면구간으로 나누어 도식 화함
- 10단계로 도식한 다른 인자들과는 달리 노선 유형은 AHP 가중치에 나타난 값을 적용 하여 3 단계로 도식하였으며 그 값은 교량구간 : 3.23, 터널구간 : 5.34, 사면구간 : 1.43을 적용하여 연구를 진행함

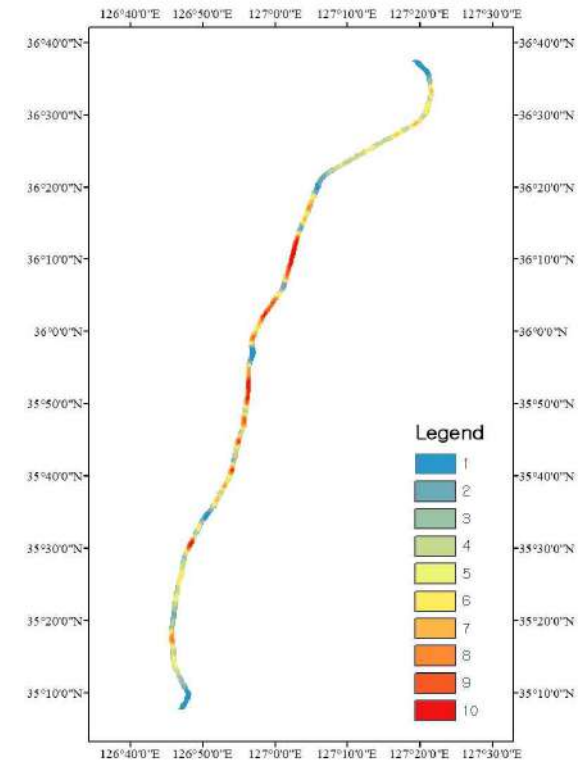


그림 2.90 GIS 상에 표현한 노선 유형 인자

(5) 구간 속도

- 구간 속도는 열차가 해당 노선을 지나는 순간의 속도를 GIS 상에 도식한 데이터로써 빠르게 달리는 열차일수록 사고가 발생했을 때 위험이 커지는 성격을 지님
- 실제 구간속도의 상세 데이터는 한국철도공사에서 제공하고 있지 않은 관계로 역산을 통해 연구를 수행하였으며 이를 위해 A역과 B역의 운행소요시간과 열차의 최대속도, 두 역 사이의 거리 데이터로써 각각 한국 철도공사에서 제공한 데이터를 활용함

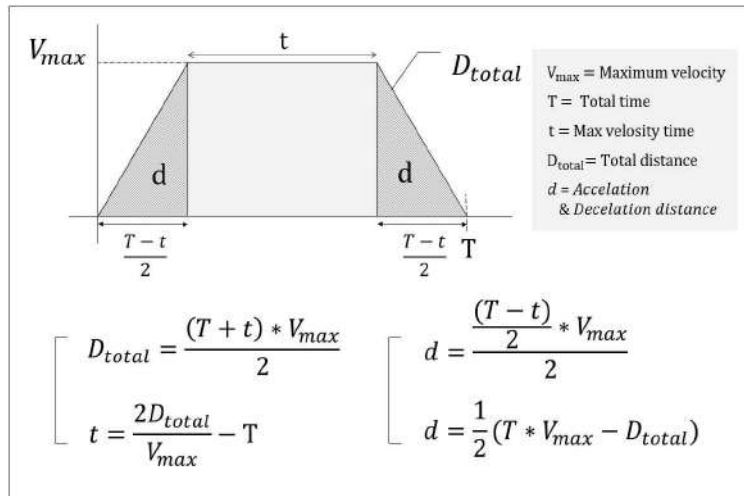


그림 2.91 구간 속도 역산 과정

- 가속과 감속이 동일한 가속도로 진행된다고 가정하면 그림 2.93에 나타낸 바와 같이 가속 및 감속중 이동거리는 d로 표현됨
- 열차는 d에 도달할 때까지 일정한 가속도로 가속을 진행하다가 d 이후부터 일정한 최고속도로 운행하게 되며 이후 d거리를 앞두고 다시 일정한 가속도로 감속을 한 뒤 정차한다고 가정함
- 위 식에서 D_{total} 은 총 이동거리, T는 운행 소요시간, t는 최고속도 유지시간이다. 또한 V_{max} 는 최고속도로써 한국철도공사에서 제공한 영업 최고속도인 305km/h를 적용함

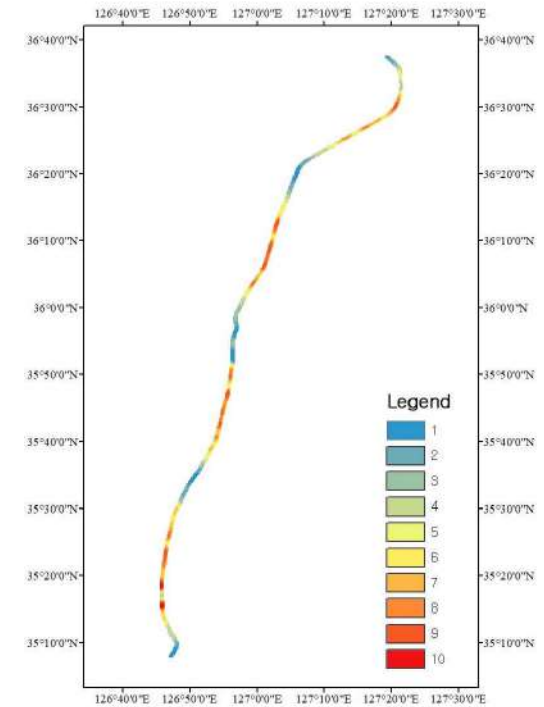


그림 2.92 GIS 상에 표현한 구간 속도 인자

- 철도 노선 위험 평가에 활용된 인자로는 지반침하량, 침하속도, 지하수 유출량, 노선 유형, 구간 속도로 나누어 연구를 수행하였지만 각 인자별 단위가 다르기 때문에 이를 계층화 하는 작업이 필요함
- 따라서 본 연구에서는 각 인자를 10단계로 나누어 연구를 수행하였으며 이를 AHP 분석을 통해 분석된 가중치와 종속성 가중치를 결합하여 최종 위험성 평가 맵을 도출함

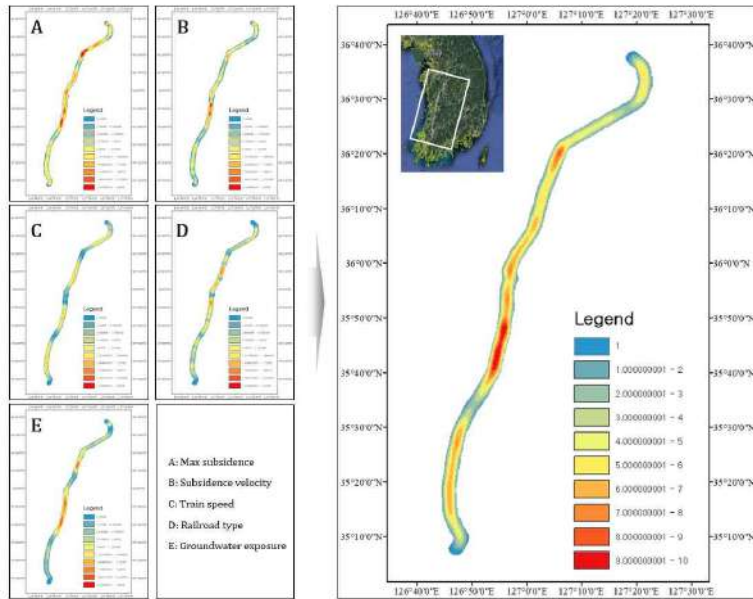


그림 2.93 최종 위험 평가 지도

- 위 그림에 도식한 바와 같이 철도 노선에 대한 위험성을 평가한 자료는 철도레일에 해당되는 선형 자료만을 다루기 때문에 지역사회에 얼마만큼 큰 영향을 미칠지는 나타나지 않음
- 따라서 위 결과를 바탕으로 철도레일 기준 1km를 사고 발생 시 영향을 줄 수 있는 지역으로 선정 후 이를 커널 밀도분석을 활용하여 지역사회 위험성 평가를 수행함

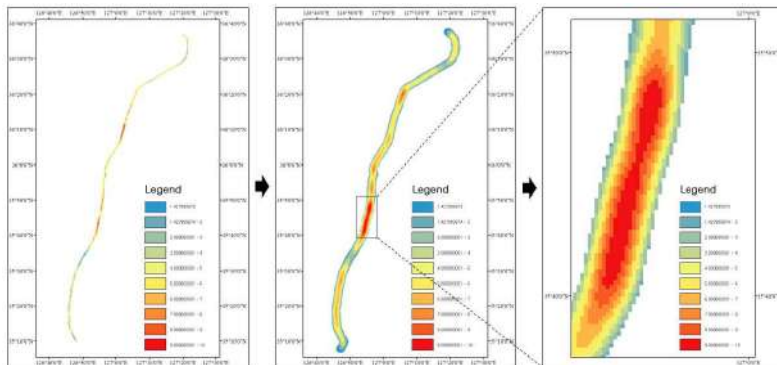


그림 2.94 지역사회 위험평가 지도 및 밀도분석 결과

마) 지역사회 취약성 평가

- 지역사회의 취약성 평가는 사고발생시 지역사회에 발생할 수 있는 피해의 척도로써 일반적으로 인구밀도 및 유동인구비율이 높고, 도시화 비율이 높을수록 피해가 증가하고 구호시설(소방서, 대형병원, 경찰서 등)이 많을수록 취약성이 떨어지는 현상에 따라 취약성을 분석함

(1) 인구 밀도

- 인구밀도의 경우 대한민국 국가통계포털(<http://kosis.kr>)에서 자료를 획득하였으며 2019년 2월을 기준으로 읍면동 단위의 인구밀도 통계자료를 GIS 변환가정을 거쳐 가시화 함

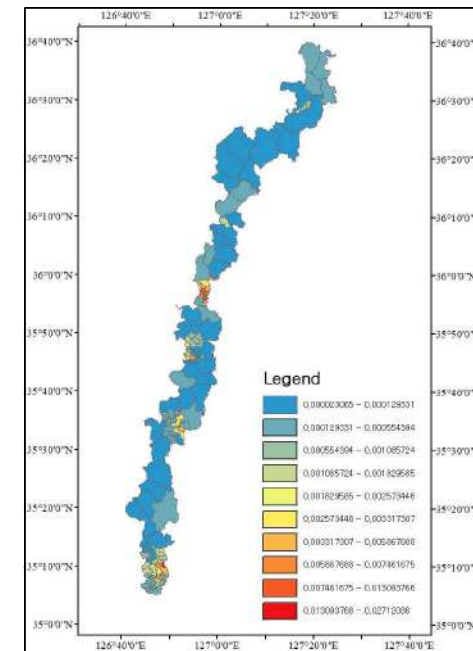


그림 2.95 GIS 상에 도식한 인구 밀도

(2) 도시화 비율

- 도시화 비율 데이터는 환경공간정보서비스(<https://egis.me.go.kr>) 에서 확보한 레이어들을 통해 건물을 크게 공업시설, 상업시설, 주거시설, 공공시설 4가지로 분류하고 AHP 기법과 종속성 가중치를 활용하여 세부 인자들의 가중치를 결정함

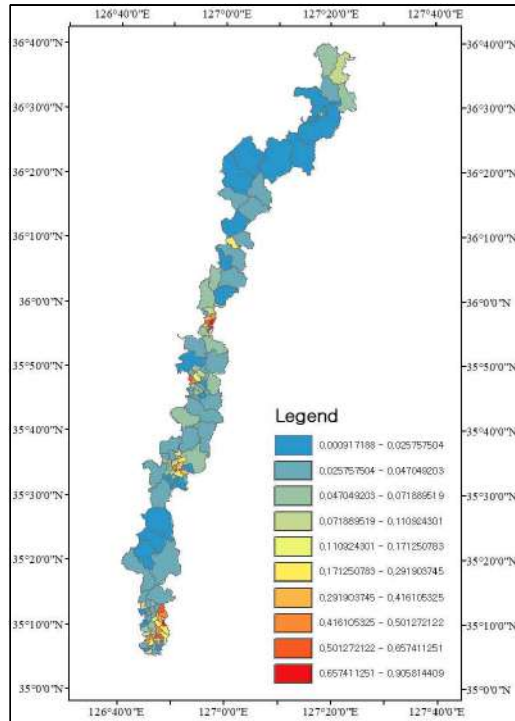


그림 2.96 GIS 상에 도식한 도시화 비율

(3) GDP

- GDP는 해당 지역의 경제력을 나타내는 대표적인 지표로써 재산 리스크를 상승시키는 인자임
- 아래의 데이터는 인구밀도와 마찬가지로 대한민국 국가통계포털을 통해 데이터를 취득했으나 읍/면/동 단위의 세분화 된 데이터를 얻을 수 없는 관계로 시/군/구 데이터를 활용하여 연구를 진행함

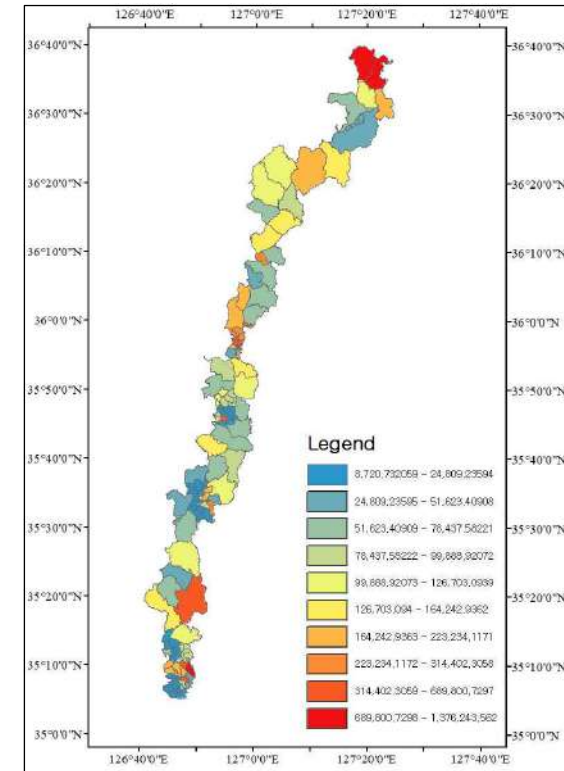


그림 2.97 GIS 상에 도식한 GDP 인자

(4) 취약계층

- 취약계층 인자는 사고 발생 시 보호가 신체적 결함으로 인해 대피를 정상적으로 하기 어려운 아동과 노약자를 표현함
- 본 연구에서는 취약계층을 선정하기 위해 대한민국 국가통계포털 내에서 0~9세 의 인구를 아동으로, 65~100세의 인구를 노약자로 분류하였으며 읍/면/동 단위의 세부적인 취약계층 인구를 도식화함

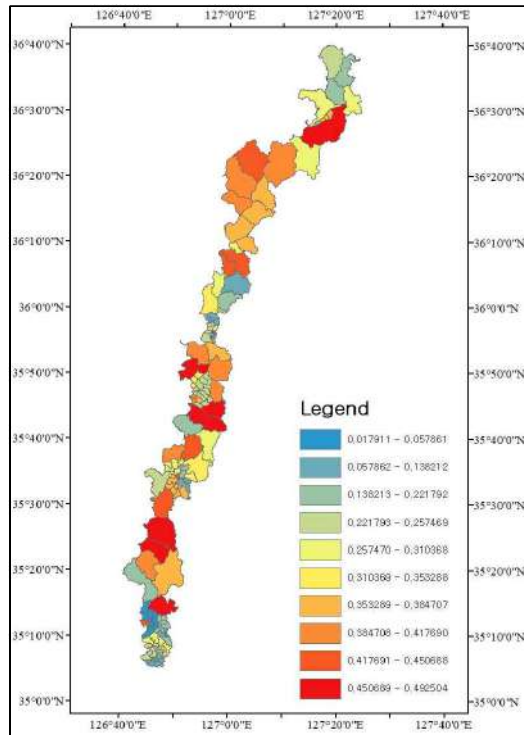


그림 2.98 GIS 상에 도식한 취약 계층

(5) 구호시설 유무

- 구호시설 유무는 사고 발생 시 대피 및 구호 활동을 수행하는 소방서 및 119 구조 센터를 기준으로 크게 다섯 가지로 나누어 분류하였으며 그 기준은 다음과 같음
- ① 해당지역에 소방서가 있으며 인접 2개 지역에 소방서가 존재하는 경우
 - ② 해당지역에 소방서가 있으며 인접 1개 지역에 소방서가 존재하는 경우
 - ③ 해당지역에 소방서는 있지만 인접지역에 없는 경우
 - ④ 해당지역에 소방서가 없지만 인접지역에 존재하는 경우
 - ⑤ 해당지역에 소방서가 없으며 인접지역에도 없는 경우

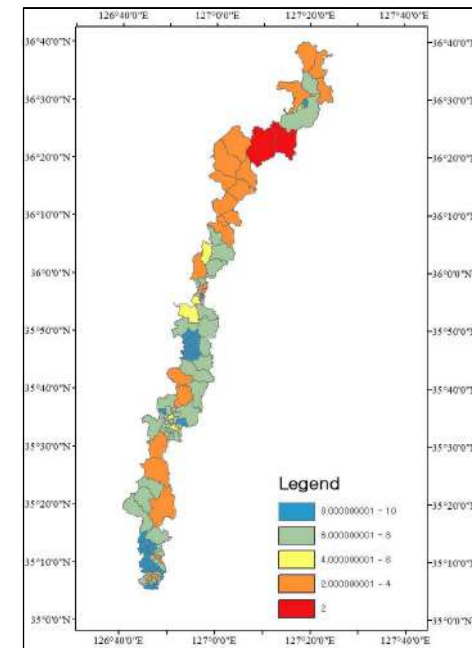


그림 2.99 GIS 상에 도식한 구호 시설 유무

- 위험평가와 마찬가지로 취약성 평가에 활용되는 인자를 인구밀도, 도시화 비율, GDP, 취약계층, 구호시설 유무로 설정하여 연구를 수행하였으며 지역사회 위험성 평가와 마찬가지로 10단계로 분류함
- 이후 AHP기법과 종속성 분석을 통해 도출된 가중치를 결합해 최종적인 취약성 지도를 다음과 같이 도출함

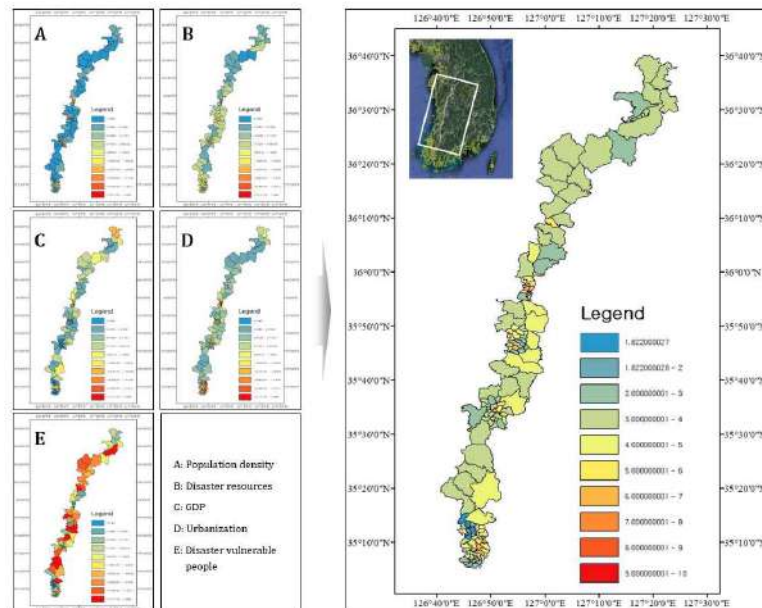


그림 2.100 최종 지역사회 취약성 지도

(6) 지역사회 리스크 평가

- 지역사회에 대한 리스크 평가는 기존에 수행되었던 위험평가와 취약성평가의 결합으로 도출됨
- 위험평가 : 철도 노선에 대한 위협의 확률로써 이를 분석하기 위해 최대 침하량, 침하속도, 지하수변화, 노선유형, 구간속도 인자를 사용함
- 취약성 평가는: 위협이 발생했을 때 지역사회가 받는 손실의 크기를 나타내는 지표로써 인구밀도, 도시화, GDP, 취약계층, 구호시설 인자를 활용함

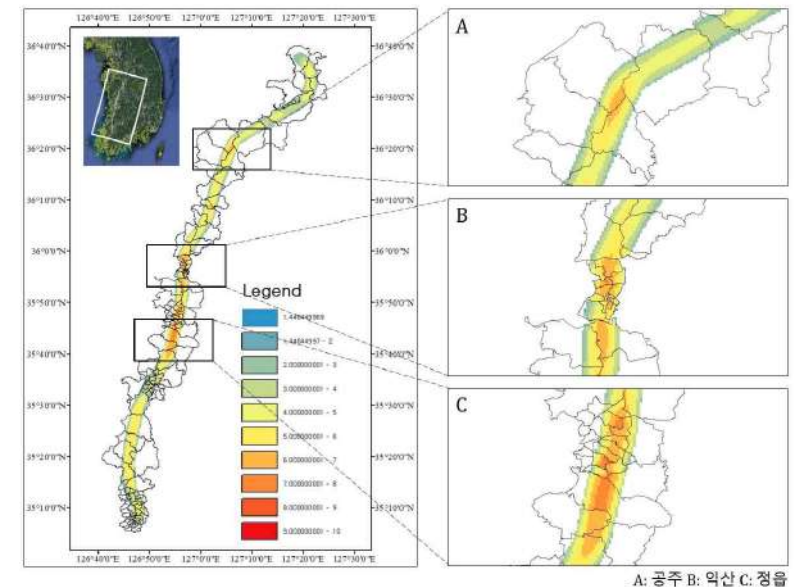


그림 2.101 연구지역 내 위험 군으로 분류된 지역

- 위 그림에 나타난 바와 같이 리스크의 강도는 위험평가와 취약성평가에서 활용한 10단계를 활용함
- 분석범위는 철도레일을 기준으로 1km 버퍼를 형성하였으며 본 연구의 특성상 좌우 폭에 비해 상하 폭의 비율이 매우 높기 때문에 (188km : 2km) 의 경우 2km 버퍼로 표현함
- 도출된 지역사회 리스크 지도에서 위험군(6 이상)으로 분류된 지역은 충청남도 공주역, 전라북도 익산도심, 전라북도 정읍 신대인 지역이며 다음 그림 2.101은 연구지역 내 위험 군으로 분류된 지역을 도식화한 내용임

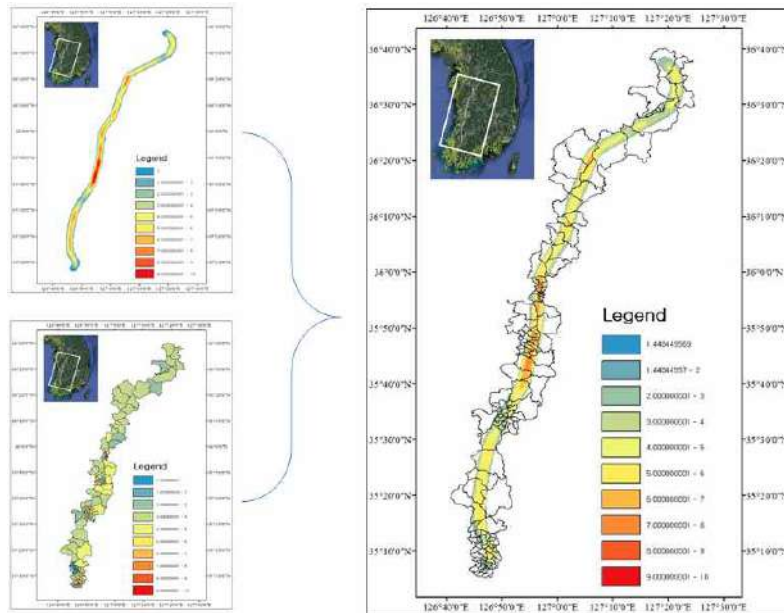


그림 2.102 지역사회 리스크 평가를 통해 도출된 최종 리스크 지도

5) Case Study를 통한 리스크 지역 분석

가) 충청남도 공주시 공주역

- 충청남도 공주시 공주역 주변지역은 산으로 둘러쌓여 있는 지역으로 공주 도심지역 기준 14km 남쪽 방향에 위치하고 있으며 위험평가에서 6-8단계 이상을 보이는 고 위험 군이지만 취약성 평가에서 중·저 취약성으로 분류된 3단계를 보임
- 이는 해당 지역이 최대지반침하량 및 침하속도에서 높은 위험군을 보이기 때문에 고 위험군으로 나타나지만, 해당지역은 타지역에 비해 인구 및 건물이 많이 없는 중·저 단계의 취약성을 보임
- 따라서 고위험군의 위험평가 결과와 중·저 취약성의 취약성 평가 결과의 결합체인 리스크 평가에서는 6단계로 나타남



그림 2.103 공주지역의 리스크 지도

나) 전라북도 익산시 도심지역

- 전라북도 익산시 도심은 지역의 특성상 인구 및 건물이 밀집되어 있는 지역으로써 취약성이 다른 지역에 비해 높은 5-6 단계를 보이는 것을 특징으로 함
- 해당 지역의 경우 위험평가에서 지하수 인자와 최대 침하량 인자의 높은 단계로 인해 5-6 단계의 위험을 보이며 중·고 단계의 위험과 취약성을 결합한 최종 리스크 평가 결과는 6 단계로 표현됨



그림 2.104 익산지역의 리스크 지도

다) 전라북도 정읍시 신태인읍

- 전라북도 정읍시 신태인 지역은 PS-InSAR 분석과정에서 언급한 바와 같이 농업용수 공급을 위한 무리한 지하수 유출로 인하여 지반침하가 발생하는 곳으로 위험평가에서 지하수 인자와 지반침하 인자, 침하속도 인자가 매우 높은 위험단계로 나타남
- 해당 지역의 경우 호남선 KTX 고속철도가 정차하지 않는 지역으로써 구간 속도 인자 또한 높게 나타남에 따라 위험평가 단계에서 해당지역은 매우 높은 수준의 위험(8~9단계)을 지님
- 반면 취약성 평가에서는 농업지역이 주를 이루고 있는 지역의 특성으로 인구 및 도시화 비율이 낮은 특성으로 인해 위험평가에 비해 다소 낮은 3~5 단계의 취약성을 보임

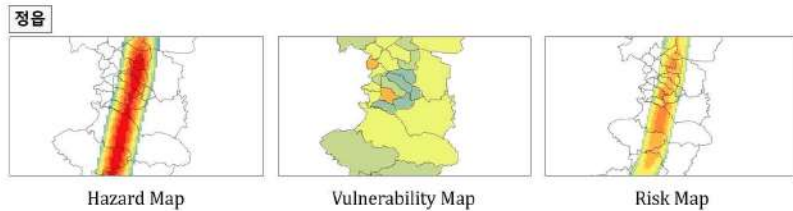


그림 2.105 정읍지역의 리스크 지도

라) Case study를 통한 리스크 지역 분석

- 본 연구에서 연구지역으로 분류한 188km 구간 중 리스크가 존재하는 대표적인 3개의 지역을 통해 리스크 평가를 수행함

표 2.24 Case study 지역의 리스크 평가 결과

연구지역	위험평가 결과	취약성 평가 결과	리스크 평가 결과
충청남도 공주시 공주역	6~8 단계	3 단계	6 단계
전라북도 익산시 도심지역	5~6 단계	5~6 단계	6 단계
전라북도 정읍시 신태인읍	8~9 단계	3~5 단계	7 단계
위험지역 평균	7 단계	4.2 단계	6.3 단계
해당 연구지역 평균	4.91단계	2.62 단계	3.25 단계

- 표 2.24에 나타낸 바와 같이 위험지역으로 분류한 세 개의 지역은 위험 평가 결과와 취약성 평가 결과가 상이하지만 리스크 평가 결과는 6단계 이상으로 분류되었으며 해당 위험지역의 위험 평가 결과 평균은 7단계, 취약성 평가 결과 평균은 4.2단계로써 위험 인자가 취약성 인자에 비해 높은 것이 확인됨

- 위와 같은 결과는 해당 지역이 높은 위험을 보이고는 있으나 상대적으로 취약성이 높지 않음을 의미하며 그 원인으로는 해당지역의 경우 50% 이상이 농업지역으로 이루어져 있기 때문에 지하수위 저하, 연약지반 등에 의한 지반침하 및 높은 침하속도를 보이지만 도심지역에 비해 상대적으로 인구 및 도시화 비율이 낮기 때문에 낮은 취약성을 보이는 것으로 나타남

- 호남선 KTX가 정차하는 역 중 공주역을 제외한 다른 역(익산역, 정읍역, 광주 송정역)의 경우 도심지 중심부에 위치해 있으며, 철도 운행의 특성상 정차를 위해 해당 지점에서는 속도가 매우 낮기 때문에 도심지에서는 낮은 위험을 보임

다. 연구수행내용 결과

- 본 연구는 고해상도 TerraSAR-X 위성 영상을 활용하여 광범위한 지역의 지표변위를 측정하고 이를 바탕으로 지역사회의 리스크 평가를 수행하는 것을 목적으로 함
- 이를 위해 연구의 방향을 크게 ‘영상 분석을 통해 지표변위를 검출’하는 공학적 연구와 ‘지표변위의 시계열 자료를 통해 지역사회 리스크 평가’를 수행하는 인문학적인 연구를 수행하여 다음과 같은 두 가지 연구의 분석결과를 도출함

1) ‘고해상도 SAR 영상을 통한 지표변위의 시계열 분석연구’의 결론

- ⑧ 고해상도 TerraSAR-X 영상을 활용한 지표변위 분석은 광범위한 지역을 모니터링 하는데 탁월한 성능을 보이며 신뢰도 또한 매우 높게 나타났으며 지표변위를 모니터링하기 위해 기존에 활용되었던 GNSS, 정밀수준측량, 센서 등은 점단위의 계측을 수행하는 한계성을 보이지만 본 연구에서 활용한 원격탐사 방법을 통해 공간 단위의 계측 수행이 가능함
- ⑨ PS-InSAR 기법을 활용한 지표변위 분석을 통해 높은 정확도의 시계열 자료를 도출하여 이를 활용한 다양한 분석을 수행함. 해당 분석을 위해 본 연구에서는 지역 특성에 맞는 매개변수들을 차별화 하여 활용함으로써 각 Scene에 대한 정확한 분석을 수행할 수 있었으며 신뢰성을 확보하기 위해 다양한 기법들을 적용함
- ⑩ 도출된 시계열 자료를 검증 하기위해 점 단위의 검증뿐만 아니라 선 단위, 면단위의 정밀수준측량을 실시하였으며 대부분 국토교통부 국토지리정보원이 고시한 정밀수준측량의 성과에 만족하는 것으로 확인함

2) ‘지표변위의 시계열 자료를 통한 지역사회 리스크 평가’ 연구의 결론

- ① 철도 노선의 리스크 평가를 통해 지역사회 리스크 평가 기초자료를 도출할 수 있었으며 이 과정에서 PS-InSAR 시계열 분석 자료를 위험 평가 자료로 활용하여 한국철도시설공단 선로유지보수 지침을 통해 신뢰성 있는 취약성 곡선을 도출함
- ② 지역사회 리스크 평가 단계에서 위험 평가와 취약성 평가에 활용되는 인자들을 다양화함으로써 리스크 평가의 신뢰성을 확보하였으며 또한 활용된 인자들의 가중치 결정 기법을 일반적인 쌍대비교 기법인 AHP 기법뿐만 아니라 종속성 가중치 결정기법을 도입하여 데이터의 왜곡을 보정함
- ③ 도출된 리스크 지도를 통해 철도 사고가 발생 시 리스크가 큰 지역을 도출할 수 있었으며 Case Study를 통해 해당 지역의 리스크 요인을 분석함
- ④ 전체 리스크 평가과정에서 GIS를 활용함으로써 공간데이터들을 효과적으로 분석 및 평가할 수 있었으며 GIS를 통해 다양한 인자들을 가공하여 연구에 필요한 데이터로 도출하고 이를 정량화 하여 데이터들 간의 비교 분석을 수행함. 이 과정에서 Kriging, Kernel density analysis, Raster calculation, Interpolation, Classification 등을 수행하였으며 이를 가시화함으로써 효율적인 리스크 분석 및 관리를 수행함

라. 연구 개발 성과

1) 연구개발 목표

가) 최종 목표

- 지반 침하에 취약한 고속철도를 유지·관리하는 분야에서 재난 저감 기술을 확보하는 것을 최종 목표로 함. 향후 고부가가치 시장으로 전망되는 유지 관리 분야에 진출하는 것을 기술 목표로 함.
- 호남 고속철도를 대상으로 GIS 기반의 재난 리스크평가 및 관리시스템을 구축하고, 연약지반에서의 지반 침하량의 비용-편익분석 평가를 통하여 호남 고속철도의 유지·보수비용을 저감하는 방안을 마련하고자 함.

나) 당해 연도 연구개발 목표 및 결과

구분(연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차년도 (2016)	지반침하 리스크 맵 제작	지반침하 리스크평가 방법론 개발	취약구조물 평가인자 연약지반 평가인자	성과증빙자료 1차년도 1번 항목 참조
	지반침하 평가시스템 개발	지반침하 원격탐사 방법론 개발	SAR 영상데이터 수집 기존 원격탐사 방법론 대비 신뢰성	성과증빙자료 1차년도 2번 항목 참조
	잠재취약 노선관리 방안 수립	구조물 변위 측량 방법론 개발	변위 측량 방법론	성과증빙자료 1차년도 3번 항목 참조
2차년도 (2017)	지반침하 리스크 맵 제작	공간정보 DB모델 시범 구축	고속철도 노선 DB 구축	성과증빙자료 2차년도 1번 항목 참조
	지반침하 평가시스템 개발	지반 침하량 분석 모델 개발	기존 분석 모델 대비 정확성 검증	성과증빙자료 2차년도 2번 항목 참조
	잠재취약 노선관리 방안 수립	지상측량 결과와 융·복합 기술 개발	연계 측량 방법론 개발	성과증빙자료 2차년도 3번 항목 참조

3차년도 (2018)	지반침하 리스크 맵 제작	연약지반 리스크 평가기술 개발	리스크 맵 제작	성과증빙자료 3차년도 1번 항목 참조
	지반침하 평가시스템 개발	연약지반 침하 관리시스템 개발	GIS기반 자동화 시뮬레이션 구현	성과증빙자료 3차년도 2번 항목 참조
	잠재취약 노선관리 방안 수립	고속철도 지반침하 리스크 관리체계 수립	잠재 취약노선 평가	성과증빙자료 3차년도 3번 항목 참조

○ 성과점검 기준표

[1차년도 성과점검 기준표]

구분	핵심 성과 (CTE)		단위 성과		성과 점검기준							양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기증치		
주관	1	지반침하 리스크 맵 제작	1-1	지반침하 리스크평가 방법론 개발	①	취약구조물 평가인자	5가지 이상	100	공간정보 DB목록	보고서	20	특허: 출원 <u>건</u> 등록 <u>건</u> 논문: <u>건</u> 시제품: <u>건</u> SW: <u>건</u>
					②	연약지반 평가인자	5가지 이상	100	공간정보 DB목록	보고서	20	
	2	지반침하 평가시스템 개발	2-1	지반침하 원격탐사 방법론 개발	①	SAR 영상데이터 수집	12개월 이상	75	데이터 확보	보고서	20	특허: 출원 <u>건</u> 등록 <u>건</u> 논문: <u>건</u> 시제품: <u>건</u> SW: <u>건</u>
					②	기존 원격탐사 방법론 대비 신뢰성	20% 향상	100	성능비교	보고서	20	
공동	3	잠재 취약 노선 관리 방안 수립	3-1	구조물 변위 측량 방법론 개발	①	변위 측량 방법론	3가지 이상	100	변위측량 결과 비교	현장시연	20	특허: 출원 <u>건</u> 등록 <u>건</u> 논문: <u>건</u> 시제품: <u>건</u> SW: <u>건</u>
계											100	특허: 출원 <u>건</u> 등록 <u>건</u> 논문: <u>건</u> 시제품: <u>건</u> SW: <u>건</u>

[2차년도 성과점검 기준표]

구분		핵심 성과 (CTE)	단위 성과		성과 점검기준							양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기중치		
주관	1	지반침하 리스크 맵 제작	1~2	공간정보 DB모델 시범 구축	①	고속철도 노선 DB구축	1건	20	DB설계 내역	보고서	40	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건
	2	지반침하 평가시스템 개발	2~2	지반 침하량 분석 모델 개발	①	기존 분석 모델 대비 정확성	20% 향상	50	성능비교	모델서연	20	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건
공동	3	잠재취약 노선 관리방안 수립	3~2	지상측량 결과와 융·복합 기술 개발	①	연계측량 방법론	3가지	50	연계측량 결과비교	현장서연	40	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건
계											100	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 2건 시제품: 1건 SW: 1건

[3차년도 성과점검 기준표]

구분	핵심 성과 (CTE)	단위 성과	성과 점검기준							양적 성과 건수			
			질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치					
주관	1	지반침하 리스크 맵 제작	1-3	연약지반 리스크 평가기술 개발	①	리스크 맵 제작	1건	-	지도	시제품	40	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	
	2	지반침하 평가시스템 개발	2-3	연약지반 침하 관리시스템 개발	①	GIS기반 자동화 시뮬레이션 구현	100%	-	시스템 구동	시스템 시연	40	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	
공동	3	잠재취약 노선 관리방안 수립	3-3	고속철도 지반침하 리스크 관리체계 수립	①	잠재 취약노선 평가	1건	-	비용편 의 분석표	보고서	20	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	
계												80	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건

2) 기존 기술대비 최종 연구성과의 차별성

가) 기술적 측면

- 기후변화에 따른 재난관리 단계별 유지관리 기술 개발을 통해 고속철도 분야 재난관리 및 지진, 산사태 등으로 인한 지반침하 발생 시 긴급 InSAR 영상처리를 통한 최적화된 솔루션 제공으로 재난관리 대응 단계에서의 리스크 평가기술 확보
- 평상시 주기적인 InSAR 영상처리를 통한 최적화된 솔루션 제공으로 재난관리 예방 단계에서의 리스크 관리기술 확보 및 주요 기술적 쟁점에 대한 통합 관리 및 특허, 신기술 인증 등의 기초자료로써 활용 가능하며 양질의 기술 개발의 토대가 됨
- 고속철도 구조물 유지관리 강화를 위한 핵심 요소기술들의 적용으로 기존 유지관리 공정의 기술적 한계를 극복하고 효율성과 기술적 역량을 제고함에 따라 선진국 기술의 의존 상태에서 벗어나 기존 방법과 차별성을 갖는 새로운 원천특허 기술을 독자적으로 개발하여 고속철도 구조물 유지관리 기술시장에서 경쟁력을 확보
- 고속철도 유지관리 기술의 가장 큰 걸림돌이던 검측차량 유지관리 비용 저감을 통해 시장에서 기술경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대됨

나) 경제적·산업적 측면

- 기후변화로 인해 고속철도 구조물의 유지관리 패러다임이 변하여 상대적으로 에너지 소모량이 적은 방식의 선호도가 높아지는 추세이며 시장 역시 위성영상에 대한 수요가 증가할 것으로 예상됨
- 국내외 고속철도 유지관리 전문가 그룹뿐만 아니라 건설사업, 과학자/기술자, 보험산업, 정보통신 등 다양한 분야의 연구자들과의 인적 교류를 통한 네트워크 구축 및 융복합 전문 연구 인력을 양성할 수 있음
- 고속철도 건설사업 설계 및 고효율 운영·관리 기술 확보를 확보하여 향후 고부가가치 시장으로 전망되는 재난관리 분야에 진출함으로써 고속철도 관련 기업들의 성장 유도 및 일자리 창출을 할 수 있음
- 저에너지 고효율의 InSAR를 이용한 유지관리 기술 확보로 기존의 경제성장 패러다임을 환경친화적인 녹색 성장(Green Growth) 및 선도형 기술 확보를 통한 세계 기술경쟁력을 확보함

3) 비용 편익 분석 결과

- 본 연구의 목표 중 하나인 호남 고속철도의 유지 보수 비영을 저감하는 방안 마련을 위해 비용편익 분석을 수행함
- 그러나 철도시설공단, 코레일 등에서 철도 유지보수에 대한 예산을 공개하지 않아 직접적인 비용편익 분석은 어려움
- 따라서 본 연구에서 수행한 원격탐사를 활용하는 방법, 정밀 수준측량을 활용하는 방법, 센서를 활용하는 방법으로 나누어 비용편익 분석을 수행하였으며 추산 금액인 관계로 정확한 금액은 도출할 수 없음
- 원격탐사를 활용하는 방법
 - 본 연구사업의 예산 중 주관기관 성균관 대학교와 공동연구기관 무림 지앤아이의 총 예산 합계 11억 7천만원을 기준으로 원격탐사 비용을 산정하였으며 총 3년간 188km의 호남선 고속철도 및 주변지역의 지반침하를 계속함
 - 연구 3차년도 기준 43.84%가 인건비로 활용되었으며 31.64%가 영상 구입비, 21.72%가 간접비로 책정됨에 따라 인건비 대비 영상구입비가 일정한 차이는 있으나 큰 차이를 보이지 않음을 확인할 수 있음
 - 원격탐사를 활용할 경우 호남선 고속철도 뿐만 아니라 200km*30km에 해당되는 광범위한 지역을 분석할 수 있으며 정확도 또한 점단위의 경우 대부분이 1급 수준측량을 만족함을 확인할 수 있음
- 정밀수준측량을 활용하는 방법
 - 188km의 철도 노선을 대상으로 1등 수준측량을 수행할 경우 해당되는 인건비는 2019 건설공사 표준 품셈에 따라 결정됨
 - 일반적으로 표준품셈 중 1등 수준측량의 경우 15km를 기준으로 수행하기 때문에 약 12.5번을 수행해야 하며 지형유형에 따른 계수와 작업량에 따른 계수는 일반적 계수를 활용함
 - 호남선 고속철도 정밀 수준측량에 따른 수량계산 결과는 다음과 같으며(15km 기준)단가는 2018년도 측량기술자 임금공표에 따라 적용함

구분	수량	단가	금액
특급기술자	1	230422	230,422
고급기술자	3.5	201702	705,957
중급기술자	13.5	176045	2,376,607.5
초급기술자	10	143071	1,430,710
초급기능사	10	128395	1,283,950
인부	10	128395	1,283,950
계			7,311,596.5

작업구분	일수	인원수											비고	
		1일당					합계							
		특급 기술자	고급 기술자	중급 기술자	초급 기술자	초급 기능사 (측량)	인 부	특급 기술자	고급 기술자	중급 기술자	초급 기술자	초급 기능사 (측량)		인 부
계획준비	(1)	(0.5)	(0.5)	(1)	-	-	-	(0.5)	(0.5)	(1)	-	-	-	()내는 내업을 표시함
답사선점	1	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	
관측	10	-	0.2	1	1	1	1	-	2	10	10	10	10	
계산	(1)	-	(0.5)	(0.5)	-	-	-	-	(0.5)	(0.5)	-	-	-	
정리점검	(1)	(0.5)	(0.5)	(1)	-	-	-	(0.5)	(0.5)	(1)	-	-	-	
계								- (1)	2 (1.5)	11 (2.5)	10 -	10 -	10 -	6

- 따라서 15km 기준 금액에 12.5회를 합산하여 188km 기준의 1급 수준측량 비용을 산정하면 약 9100만원이 산출되며, 이를 1달 간격으로 3년 동안 계속 시 소요되는 최종 비용은 32억 9천만원이 소요됨.
- 해당 금액은 노임단가만 해당되는 비용이며 작업에 필요한 장비의 가격 및 출장비용, 각종 소요 비용 등은 산정하지 않았음

- ⑦ 측량표의 설치 자재운반에 따르는 차량비 등은 실정에 따라 별도 계상한다.
- ⑧ 보상비, 재료비, 소모품비, 차량비 등은 실정에 따라 별도 계상한다.
- ⑨ 도해(하) 수준측량은 거리에 관계없이 1구간당 2~3시간 소요되는 것으로 보며, 이에 소요되는 측표, 재료비 및 용선료 등은 별도 계상한다.
- ⑩ 기지점과 작업지역을 연결하기 위한 측량은 별도 계상한다.
- ⑪ 본 품의 외업에 동원되는 기술인원에 대한 여비는 국토교통부장관이 고시한 측량구역대가기준에 따라 별도 계상한다.
- ⑫ 본 품에서 점검측량 및 성과심사에 소요되는 비용은 별도 계상한다. 다만, 성과심사비는 국토교통부장관이 고시한 공공측량 성과심사업무처리규정에 따른다.
- ⑬ 본 품에서 사용되는 측량기기의 상각비·정비비는 별도 계상한다.
- ⑭ 본 품에는 다음의 성과작성품이 포함된 것이다.
 - ㉠ 관측성과표 및 조정성과표 1부 ㉡ 관측성과 기록데이터1부
 - ㉢ 수준노선부 1부 ㉣ 계산부 1부
 - ㉤ 점의 조서1부
 - ㉥ 기타자료(정확도관리표, 점검측량부, 측량표의지상사진, 측량표설치위치통지서, 기준점 현황조서서)
- ⑮ 기본수준측량과 같은 정확도와 방식으로 시행할 때에는 “기본수준측량” 품을 적용하여야 한다.

○ 센서를 활용하는 방법

- 위 방법은 2015 고속철도 유지보수 기준을 근거로 비용편익 분석을 수행하였으며 계측에 필요한 센서의 계측 개소는 다음과 같이 선정함
- 유지보수단계에서의 레도에서의 계측개소 간격은 일반토공구간인 경우에는 50m를 표준으로 하고, 침하가 우려되는 개소에서는 10m마다 표준으로 선정 되었지만 비용편익 분석 단계에서는 50m를 기준으로 일괄적으로 적용하여 188km 기준 총 3760개의 계측 개소가 도출됨
- 센서의 구매비용을 50만원으로 책정했을 경우 총 센서 구입 및 설치비는 18억 8천만원이 도출되며 위 금액 내에는 설치 비용 및 유지관리 비용 인건비 등이 포함되지 않음
- 또한 센서를 설치하는 과정에서 필요한 전기 공사 비용 및 통합관리 모듈의 비용이 추가적으로 발생하게 되며 이를 포함할 경우 약 25억 이상이 소요될 것으로 추산됨

○ 비용편익 분석 비교 결과

- 원격탐사를 활용하는 방법은 3년 기준 11억 7천만원이 소요되며 계측 기간이 증가할 경우 고정적으로 영상 구매비가 소요되는 이유로 총 예산은 일정하게 증가 할 것으로 전망됨
- 정밀 수준측량을 활용하는 방법은 3년 기준 32억 9천만원이 소요되며 원격 탐사 기준 약 2.8배에

해당하는 금액으로 계측기간이 증가하더라도 고정적인 인건비 소요로 인하여 총 예산은 일정하게 증가 할 것으로 전망됨

- 센서를 활용하는 방법은 3년 기준 25억 이상이 소요될 것으로 판단되지만 추가적인 비용 산정에 어려움이 있어 직접적인 추산이 어려우며 계측기간이 증가하더라도 유지 관리 비용이 소요되기 때문에 총 예산 또한 일정하게 증가할 것으로 전망됨
- 결론적으로 원격탐사를 활용하는 방법은 3년 사업 기준 정밀수준측량 대비 약 35.5%, 센서 활용 대비 약 46.8%의 비용 절감을 추정할 수 있음
- 다만 원격탐사를 활용하는 경우 정밀 수준 측량 및 센서 활용에 비하여 광범위한 지역을 계측할 수 있을 뿐만 아니라 계측 기간이 길어 질수록 정확도가 높아지는 효과를 보임

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 연구의 최종목표

연 차	연구목표	주요 연구내용
1	• 고속철도 지반침하 리스크 평가 방법론 개발	- 재난 유형별 지반침하 리스크 평가기술 조사 - 지반침하 리스크 평가를 위한 공간 DB모델 개발
	• 고속철도 지반침하 원격탐사 방법론 개발	- InSAR 위성영상을 이용한 지반침하 추정 연구 - 지표면의 높낮이 변화에 대한 InSAR 영상처리 및 응용기술 개발
	• 고속철도 구조물 변위 측량 방법론 개발	- 레이 변위해석 기술(3D FEM 해석을 통한 3축 변위 해석기술) - 구조물 비대칭 처짐 위험성 평가 - 구조물 장기수명예측(LCC 분석을 통한 구조물 자산관리개념 적용)

연 차	연구목표	주요 연구내용
2	• 고속철도 공간정보 DB모델 시범구축	- 고속철도 노선의 지반과 구조물 특성에 따른 공간정보 DB모델 시범구축 - 고속철도 공간정보 DB모델과 고속철도 리스크 평가 결과의 연계를 통한 리스크맵 제작
	• 지반 침하량 분석 모델 개발	- InSAR를 이용한 지반 침하량 추정 기술 개발 - 장기간 축적한 위성영상을 이용한 연간 지반 침하율 계산
	• 지상측량 결과와의 융복합 기술 개발	지상측량 결과와의 융복합적인 처리과정을 통한 침하량 분석 모델 개발

연 차	연구목표	주요 연구내용
3	• 고속철도 연약지반 리스크 평가기술 개발	- 재난 유형별 GIS 기반의 리스크 평가기술 연구 - 고속철도 노선별 지반침하 리스크 평가기술 개발
	• 고속철도 연약지반 침하 관리시스템 개발	- 연약지반 침하에 따른 철도/침목 변형 분석기술 - 고속철도 노선맞춤형 리스크 관리기술 개발
	• 고속철도 지반침하 리스크 관리체계 수립	- 재난저감대책 수립을 위한 비용-편익분석 기술 - 지반침하 발생에 대비한 선제적 대응역량 연구

나. 목표 달성여부

성과 목표 (1차년도)		자체 평가
(1차년도 1-1) 지반침하 리스크 평가 방법론 개발	취약구조물 평가인자	구조물의 침하 취약성 평가 인자는 각 변위량, 허용각 변위, 구조물 구조형식, 기초형식, 침하형식 등이 있으며 이를 1)전체침하의 경우, 2)전도의 경우, 3)부등침하의 경우로 나누어 평가인자 분석하였음
	연약지반 평가인자	연약지반 평가인자는 구조물의 종류(도로, 고속도로, 철도, 고속철도, 건축, 저수지, 제방 등)와 지반상태(토질, 층두께, N값, 일축압축강도, 콘관입저지력, 장기허용지내력, 함수비)의 매트릭스로 구성되어 있음. 이 과정에서 지반상태의 토질정수를 구분하는 지반을 별도 구분하여 명시함(이탄토, 흑니, 유기질토, 화산회질점토, 실트, 점토, SM, SC, SP-SC, SW-SM)
(1차년도 2-1) 지반침하 원격탐사 방법론 개발	SAR 영상데이터 수집	- 고해상도 TerraSAR-X X-Band 영상데이터를 다음과 같이 수집함 * 1번 Strip : 충청도 지역 (29장) * 2번 Strip : 전라도 지역 (29장) - 각 데이터는 22일 간격으로 촬영되며 1번 Strip과 2번 Strip의 촬영 시간차는 6일임 - 8월부터 촬영을 수행하여 총 29장의 영상데이터를 통해 분석을 수행함 - 또한 해당 영상 취득과 동일하게 ESA의 Sentinel-1A 영상을 수집하여 비교 분석을 수행하였음
	기존 원격 탐사 방법론 대비 신뢰성	- 국내에서 연구된 SAR위성 영상을 이용한 원격탐사는 대부분 L-Band, C-Band 위성임(RadarSat, ERS-1, ERS-2, ENVISAT 등) - Band의 파장이 짧을 수록 반사율이 높아지고 길수록 투과율이 높아지기 때문에 긴파장을 사용하는것은 지표면의 변위관측에 불리할 수 있음 (L-Band : 15~30cm, C-Band : 3.75~7.5cm, X-Band : 2.4~3.75cm) - 이에 본 연구에서는 고해상도 TerraSAR-X의 X밴드 영상을 활용하기 때문에 기 제공되는 타 위성보다 높은 신뢰성을 가질것이라 예상됨

(1차년도 3-1) 구조물 변위 측량 방법론 개발	변위측량 방법론	- 본 연구에서 활용하는 변위측량 방법론은 다음과 같이 크게 세가지 방법으로 나뉨 * D-InSAR 분석법 : SAR영상을 두 장씩 비교하는 분석방법으로써 특정 기간사이의 변화량을 간단한 과정을 통해 알 수 있는 장점이 있으나 두장의 영상으로만 분석하는 특정 때문에 시계열 분석이 어려움 * PS-InSAR 분석법 : 1장의 주영상을 기준으로 약 15장 이상의 보조영상을 분석하는 기법으로, 분석의 과정이 복잡하고, 결과물이 대상지역 전체 픽셀이 아닌 포인트별로 측정되나 시계열 분석이 용이하며 정확도가 매우 높음 * 정밀 수준측량 : 영구히 변하지 않는 점을 기준으로 침하 예상지역에 관측점을 설치한 후 정밀 수준측량을 통해 관측점의 변위값을 도출해 내는 방법으로써, 많은 관측점을 분석하기에는 시간과 인력의 제한이 있지만 특정 관측점을 분석하여 원격탐사의 데이터와 비교하는 용도로 사용될 수 있음. 따라서 본 연구에서는 기 설치되어 있는 코너리플렉터를 대상으로 점단위의 측량을 실시하였으며, 정읍시 신태인 읍 고속철도 하단에 350m의 라인을 형성한 뒤 10개의 도근점을 설치하여 선단위의 측량을 실시하였음. 또한 정읍시 역사 주변 3km에 대하여 격자를 형성한 뒤 이를 수준측량하여 연구 결과의 신뢰성을 높이하고자 하였음
성과 목표 (2차년도)		
(2차년도 1-2) 공간정보 DB모델 시범구축	고속철도 노선 DB 구축	- 리스크 맵 제작 방법론에서 도출한 최적의 플랫폼을 통해 공간정보 데이터베이스를 시범 구축하였으며(전라남도 정읍시)이를 통해 철도의 지반 침하 변화량을 측정하였음 - 또한 시각화 및 데이터의 가독성을 향상시키기 위해 Google Earth 플랫폼을 기반으로 측정된 모든 데이터를 표현하였으며 호남선 KTX 188km 뿐만 아니라 노선을 중심으로 좌우 2km의 버퍼를 형성하여 주변지역의 지표변화를 측정하였음

(2차년도 2-2) 지반 침하량 분석 모델 개발	기존 분석 모델 대비 정확성	- 기존의 분석모델은 크게 상용프로그램과 오픈소스로 이루어져 있으며, 본 연구에서는 SAR-ProZ를 활용하고 있음 - 오픈소스의 경우 D-InSAR 분석은 용이할 수 있으나 PS-InSAR는 지원되지 않는 모델들이 대부분이며, 특히 고해상도 위성인 TerraSAR-X를 지원하지 않는 모델이 대부분임 - 또한 상용프로그램 모델의 경우 각 모델이 지니는 장점은 다를 수 있으나 장시간 넓은지역(호남선 오송역 ~ 송정역)을 관측하기 때문에 데이터 처리 용량이 크고 시계열 분석이 정확해야 함 - 이에 본 연구에서 활용중인 SAR-ProZ 프로그램은 CPU 클러스터링을 통한 병렬연결 및 PS-InSAR를 수행하는데 필요한 다양한 어플리케이션을 내장하고 있어서 본 연구에 적합한 것으로 사료됨
(2차년도 3-2) 지상측량 결과와 융복합 기술 개발	연계측량 방법론	- 본 연구에서는 구조물의 침하를 측정하는 3가지 방법을 제시하였으며 각각의 연계 내용은 다음과 같음 * D-InSAR와 PS-InSAR의 연계과정 : 두장의 영상을 활용하는 D-InSAR와 1장의 주영상과 나머지 보조영상을 활용하는 PS-InSAR의 구동 방식은 상이함. 이에 본 연구에서는 시계열 분석에 용이한 PS-InSAR 기법과 특정 시점 분석에 용이한 D-InSAR 기법을 비교하여 정확한 결과물을 도출할 것임 * PS-InSAR와 정밀 수준 측량의 연계과정 : PS-InSAR에 필수적인 기준점인 PS(Persistent Scatter) Point를 정밀 수준 측량을 통해 결과물을 수집하였으며 최종적인 지표변위 시계열 자료와 3가지의 검증 자료를 바탕으로 PS-inSAR의 정확성을 입증하였음
(3차년도 1-3) 연약지반 리스크 평가기술 개발	리스크 맵 제작	- 리스크 맵을 제작하기 위해 리스크평가를 수행하는 과정에서 위험 인자와 취약성 인자를 선정 하였으며 그 내용은 다음과 같음 - 위험 인자 : 최대침하량, 최대침하속도, 노선유형, 지하수 유출량, 구간별 열차속도 - 취약성 인자 : 인구밀도, GDP, 취약계층 분포, 도시화 비율, 구호시설 유무 - 해당 인자들을 평가하기 위해 정성적 방법인 다기준 의사결정방법(AHP)와 정량적 가중치 결정법인 종속변수 결정법을 활용하였음 - 이를 통해 도출된 최종 위험 맵과 취약성 맵을 결합하여 리스크 평가를 실시하였으며 최종적인 리스크 맵을 생성하였음

(3차년도 2-3) 연약지반 침하 관리시스템 개발	GIS 기반 자동화 시뮬레이션 구현	- 위험인자와 취약성 인자들을 취합 및 가공하는 과정에서 GIS를 활용하여 연구를 진행하였으며 자동화 시뮬레이션 도출을 위해 인자들의 기본정보들을 데이터 베이스화 하였음 - 이 과정에서 국가통계포털의 데이터들을 공간데이터화 하였으며 가공된 공간데이터들을 바탕으로 리스크 맵 제작에 활용하였음 - 이후 PS-InSAR 기법을 활용한 시계열 자료들(CSV)을 자동으로 구글 어스에서 활용할 수 있도록 KML파일로 변환 및 적용되며, 위 단계에서 최종 침하량이 자동으로 도출되도록 연구를 수행하였음
(3차년도 3-3) 연약지반 침하 관리시스템 개발	잠재취약노선 평가	- 지역사회 리스크 평가 뿐만 아니라 노선에 대한 고속철도에 대한 리스크 평가 또한 수행하였음 - 고속철도 리스크 평가에 활용되는 위험 평가와 취약성평가는 각각 노선의 최대침하량 인자와 취약선 곡선을 통해 도출하였음 - 취약선 커브는 한국철도시설공단 선로의 유지보수 지침에 의거하여 총 5단계의 데미지 레벨로 변환하였으며 침하량에 따라 데미지의 정도가 다른 것을 일반화 하여 정량적인 취약성 곡선을 도출하였음 - 이후 위험평가와 취약성 평가를 결합한 고속철도 노선의 리스크 평가를 수행하였으며 이를 통해 취약노선을 평가하였음

4. 연구개발성과의 활용 계획

가. 추가연구의 필요성

- 본 연구는 PS-InSAR를 활용하여 지표변위량의 시계열 분석자료를 도출하는 연구와 위 자료를 바탕으로 고속철도 및 주변지역의 리스크 평가를 수행하는 연구로 구성되어 있음
- 이 과정에서 PS-InSAR 기법은 최소 25장의 SAR 영상을 확보해야 하는 기법이며 25장이 충족되기 전까지는 D-InSAR 기법을 통해 연구를 수행하여야 함
- 그러나 본 연구 수행 절차와 같이 25장의 영상이 확보 되는 시점이 연구 수행 550일 이후인 08년 2월로써 3차년도 연구 수행 시점에 도달해야 PS-InSAR 기법을 통해 연구를 수행할 수 있었음
- PS-InSAR 기법은 영상이 누적될수록 그 효용성이 증가하지만 본 연구에서는 약 30장의 영상을 수집하는데 그쳤으며 이는 많은 자료를 활용해 분석할수록 데이터의 신뢰성이 높아지는 측면에서 볼 때 추가적인 연구의 당위성을 보여줌
- 후속 연구가 진행될 경우 현재 연구사업과 같이 영상을 확보하는데 소요되는 시간이 불필요하며 즉각적인 PS-InSAR 기법을 활용할 수 있기 때문에 연구의 질을 확보할 수 있음
- 또한 PS-InSAR를 통한 시계열자료를 검증하는 용도로 활용되며, 영상의 품질을 향상시키는 코너리플렉터 역시 지속적으로 활용할 수 있으며, 측량 데이터의 연속성을 확보할 수 있음
- 따라서 후속연구가 진행 될 경우 본 연구에서 수행되었던 대부분의 기초 작업들이 불필요하게 되며 즉각적으로 본 연구를 수행할 수 있음

나. 향후 연구 적용방안

1) 개발 성과품의 추후 적용성 확대방안

- 지방자치단체 단위의 지속적인 자체 재난관리 수행으로 재난발생으로 인한 인명 및 재산피해 최소화
 - 공간과 시설관리, 재난상황 파악 및 대처, 피해복구 등 재난관리업무의 대부분이 공간분포와 관련되어 있기 때문에 과거의 재난인력을 GIS DB로 구축하고, GIS 공간분석기법을 이용하여 위험도를 분석하며, GIS와 공간영상정보를 활용할 경우 피해지역이나 피해규모를 신속히 파악할 수 있음.
 - InSAR영상과 공간정보DB를 활용한 재난 리스크평가기술을 통해 예상되는 피해범위나 규모를 신속히 예측할 수 있기 때문에 신속한 재난대응과 주민대피가 가능해져 2차적인 피해를 최소화할 수 있음.
 - GIS를 이용하여 구조물자, 인력, 장비의 신속한 이동경로를 파악함으로써 자원을 효율적으로 배분할 수 있으며, 공간영상자료와 연계하면 피해 범위와 규모를 신속하고 정확하게 파악할 수 있기 때문에 재난으로 인한 손실을 평가하고, 피해복구 우선순위를 결정하거나 재원을 배분하는데도 효과적으로 활용될 수 있음.
- 리스크 맵 제작을 통해 시민 불안 감소와 민원 효율적 대치를 위한 출구전략으로 활용
 - 특정 지역에서 재난의 과급양상이나 피해범위를 지도상에 표시하여 재난교육이나 사이버 훈련에 있어서 리스크 시각화를 효과적으로 수행할 수 있음.
 - 리스크가 있는 요인들을 지도상에 중첩하여 경제적 또는 인구손실을 정량적 추정할 수 있고, 리스크 등급을 정성적으로 분류하여 나타낼 수 있음.
- 방재 분야의 공간정보 활용으로 국민의 생명과 재산 보호 및 지속 가능한 국가 발전에 기여함으로써 공간정보 및 방재 분야 융합을 위한 새로운 패러다임 제시
 - 리스크 평가기술은 공간과 비공간적인 위험요소들을 GIS를 이용하여 표시함으로써 잠재적인 파괴와 리스크들을 표출할 수 있다. 마지막으로 위험들로 인하여 발생할 수 있는 잠재적인 리스크 요인들을 GIS를 이용하여 출력함으로써 사업당사자, 지방당국의 기술자, 의사결정권자, NGO, 보험산업 분야를 지원할 수 있음.

2) 유지관리 방법 및 관리체계 방안 수립

- 일반적으로 철도 노선의 유지관리 방법은 기존 철도 시설의 현상 유지 및 성능향상을 위한 일상적인 활동으로 정의 되며 해당 시스템이 안전하고 신뢰성 있게 운영될 수 있도록 시스템을 유지관리 하는것을 목적으로 함
- 현재 철도 노선의 침하관련 유지관리는 예방 보수를 통해 노선의 침하 및 뒤틀림을 점검하고 이를 교체, 수리 하는 과정을 거치지만 예방 보수를 자주하게 되면 설비의 가동이 중단되거나 지장을 받게 되기 때문에 비용적인 손해가 발생함
- 따라서 고장으로 나타나는 영향이나 비용 대비 예방 유지관리 비용사이의 균형을 유지해야하며 이에 따른 많은 연구가 진행되고 있음
- 본 연구에서 제안한 원격탐사 기반의 노선 침하 계측은 예비 유지관리 단계에서 활용할 수 있으며 시스템의 지연 및 중단이 필요 없기 때문에 비용적인 절감 효과가 뛰어남
- 또한 일반 보수 및 긴급 보수등의 단순한 형태의 유지관리 측면에서도 원격탐사를 활용할 경우 시계열적으로 분석되는 데이터를 통해 효과적으로 보수 여부를 판단할 수 있으며 노선 뿐만아니라 사면구간, 토공구간 등 광범위한 분석을 수행할 수 있음
- 사회 경제적 파급효과가 큰 철도 사고를 미연에 방지하고 운행안정성을 통해 고속철도에 대한 안전 및 대국민 신뢰성을 확보할 수 있으며 수명주기 비용 최소화 및 최적화로 경제성을 극대화 시킬 수 있음
- 이를 위해 원격탐사를 활용한 고속철도 관리체계 방안 수립이 필수적이며 다음 SWOT 분석과 같이 결과를 도출할 수 있음

- 기회(O) : 고속철도 노선의 확장에 따라 노선의 침하 관리 표준화/자동화 요구 증가
- 위협(T) : 표준화 및 자동화의 경험이 부족하며 인력을 투입하여 유지 보수하는 방법에 머물러 있음
- 강점(S) : 원격탐사를 활용한 노선관리에 대한 기술력 증가 및 정확도 향상
- 약점(W) : 예산 부족 및 기술 개발 투자에 소극적임

○ 위 SWOT 분석에 대한 전략은 다음과 같음

- 전략(SO) : 원격탐사를 활용한 노선 관리 기술을 활용한 표준화/자동화 프로세스 구현
- 전략(ST) : 현행 유지되고 있는 유지보수 방법을 개선하여 인력 투입 없이 노선의 침하 계속 가능
- 전략(WO) : 국가 R&D 예산을 통한 적극적인 표준화 및 자동화 추진
- 전략(WT) : 자체 기술 확보를 통한 장기적인 비용절감 및 관리체계 방안 수립

다. 기업화 추진방향

1) 생산 계획

구분		(2020년) 개발 종료 후 1년	(2021년) 개발 종료 후 2년	(2022년) 개발 종료 후 3년
국 내	시장점유율(%)	1	5	10
	판매량(단위:개소)	1	2	4
	판매 단가(원)	100,000,000	200,000,000	400,000,000
	국내 매출액(백만원)	400	800	1,600
해 외	시장점유율(%)	1	5	10
	판매량(단위:)	1	2	4
	판매 단가(달러)	10,000	20,000	40,000
	해외 매출액(백만달러)	0.4	0.8	1.6
당사 생산 능력		100	100	100

2) 투자 계획

(단위: 백만원)

항목		(2020년) 개발 종료 후 1년	(2021년) 개발 종료 후 2년	(2022년) 개발 종료 후 3년
매출원가		100	200	400
판매관리비		50	100	200
자본적 지출	토지	0	0	0
	건물/구축물	0	0	0
	기계 장치 등	50	100	200
자본적 지출 합계		100	200	400

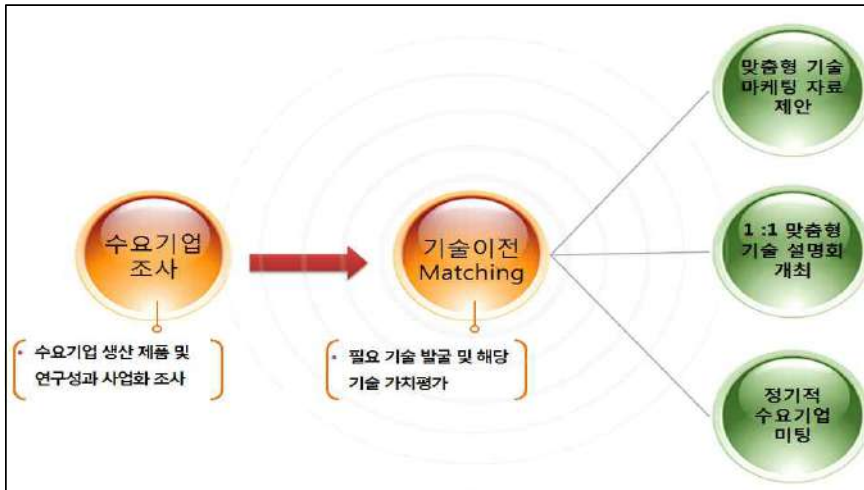
가) (주)무림지앤아이

구분	구체적인 내용
형태/규모	○ InSAR를 이용한 고속철도 구조물 유지관리 기술의 첨단화로 보다 다양한 부가가치 창출 및 경쟁력 강화 ○ 고속철도 구조물의 손상방지를 통한 사용자의 안정성을 확보하고 기타 시설물의 노후화 예방을 통한 사용연한을 연장할 수 있는 경제성 제고 ○ 최신 유지관리 기술과의 융합을 통하여 유지관리 산업에 도입함으로써 터널, 사면 및 교량 유지관리비 절감 및 대국민 홍보 등에 활용하고자 함
상용화 능력 및 자원 보유	○ 해당 업체는 실시간 영상계측시스템을 개발하여 한국도로공사 고속도로 현장에서 시범 구축하여 시설물 유지관리에 관한 노하우를 이미 확보 ○ 기술이전 대상 업체인 (주)무림지앤아이는 지상측량 장비를 이용한 측량 및 지도 제작 및 계측시스템을 구축한 기술을 바탕으로 InSAR를 이용한 터널, 사면, 교량 유지관리 시스템 개발에 주력 사업화를 통한 수익창출을 기대
상용화 계획 및 일정	○ 본 기술이전에 대해 (주)무림지앤아이 대표는“고속철도 유지관리 분야의 연구기술과 터널, 사면, 교량 유지관리 시스템 개발 기술을 이전받게 됨으로써 (주)무림지앤아이가 보유한 고속도로 구조물 유지관리 기술과 더불어 고속철도 산업으로의 영역 확대 기회”로 기대 ○ 재난 예방용 방재신기술 지정에 위해 구조물 변위 모니터링 방법 및 시스템 개발에 관한 특허와 신기술을 국민안전처에 신청할 계획 ○ 이와 더불어 기술이전을 한 성균관대학교도 중소기업과의 기술이전 및 사업화를 통해 국내외 고속철도 구조물 유지관리 시장으로의 적극적인 진출을 꾸준히 진행해 나갈 계획

3) 사업화 모형 제시

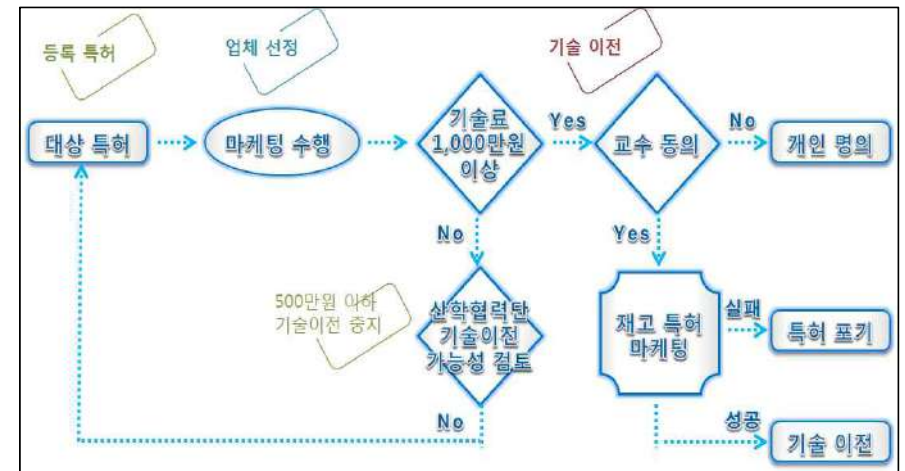
가) 사업화 모형 수립(BM) 배경

- 대학의 연구성과에 대한 기술이전 및 사업화와 그 실행방법에 대한 구체적이고 다양한 모델의 형성 부족
- 최근 아카데미 캐피탈리즘이 확산되면서 대학 연구자들의 관심이 학문적 성과에서 사업화로 인식 변화
- 연구성과에 대한 기술이전 및 사업화 추진을 위해 초기 연구개발 단계에서부터 구체적인 모형을 수립
- 본 연구에서는 국가 재난관리 책임기관인 한국철도공사에 대한 수요기업 맞춤형 모형을 바탕으로 수립
- 기업 맞춤형 사업화 모형은 특정 기업의 수요 조사결과를 바탕으로 맞춤형 사업화를 하는 것으로 업종별 세미나 등 모임의 참여를 통해 관련 기술리스트를 제공하고 기술을 소개함으로써 수요기업 맞춤형 마케팅을 수행



나) 사업화 모형의 목표 및 핵심 경쟁 요인

- 대학의 산학협력단과 연계하여 수요기술 발굴 → 수요기업 발굴 → 이전희망기술 이전 가능성 검토 → 검토 후 이전 전략 수립 중 추가기술 발굴로 패키지형 기술이전 추진 → 기술이전계약 체결 → 이전 후에도 지속적 연계로 다각적 지원책 마련
- 기술이전 후에도 이전된 기술의 발명자와 수요기업과의 지속적인 연계를 통해 Scale-up을 지원하고, 자금에 대해서도 향후 추가보증 및 산업은행 투자 연계 등 컨설팅을 통한 사업화 지원을 계획하며, 지식경제부·중소기업청 등 정부 지원사업을 통해서도 꾸준히 기술 업그레이드 방안을 제시하는 등 해당기술의 사업화를 지속적으로 지원
- 등록 4년차 이후 특허에 대한 조사 및 평가를 통해 등록 유지기술과 등록 포기기술을 선별 한 후 등록포기 기술은 중개 전문기관에 위탁하여 일괄 마케팅 수행하고 마케팅 실패 기술은 발명자 사전 통보 후 승계포기절차 수행



다) 목표 시장 구조

(1) 경쟁 기업 현황

○ 고속철도 차량의 2006년 이후 2013년까지 총 유지보수 비용을 보면 연평균 약 1,475억원이 소요됨

구분	2006~2008년	2009년	2010년	2011년	2012년	2013년
선로사용료	698,247	78,806	96,625	108,860	97,963	100,220

○ 철도산업정보센터 2015년 자료에 의하면 호남고속철도의 유지보수비는 596억원으로 40%를 차지함

○ 건설공사 중인 선로는 3곳, 계획 중인 선로는 1곳으로 건설투자 규모는 꾸준히 증가할 것으로 전망

상태	선로	구간	길이(km)	여객 취급 개시일
완공	경부고속선(1단계)	시흥연결선~대구북연결선	223.6	2004.04
완공	경부선(서울~대전)	서울역~대전역	166.3	2004.04
완공	경부선(동대구~부산)	동대구역~부산역	115.4	2004.04
완공	경의선	서울역~행신역	14.9	2004.04
완공	호남선(서대전~익산)	대전북연결선~서대전역~익산역	87.9	2004.04
완공	호남선(광주송정~목포)	광주송정역~목포역	66.8	2004.04
완공	경부고속선(2단계)	대구남연결선~부산연결선	122.8	2010.11
완공	경전선(미전~마산)	미전신호소[7]~마산역	42	2010.12
완공	전라선	익산역~여수엑스포역	180.4	2011.10
완공	경전선(마산~진주)	마산역~진주역	49.3	2012.12
완공	인천국제공항철도	수색직결선~인천국제공항역	45.3	2014.06
완공	호남고속선(1단계)	오송역~광주송정역	182.3	2015.04
완공	동해선	건천연결선~모량역~포항역	38.4	2015.04
완공	경부고속선	대전 도심 구간	18.2	2015.08
	(대전,대구도심구간)	대구 도심 구간	27.1	
공사 중	중앙선	청량리역~서원주역	86.4	2017.12(예상)
공사 중	원주~강릉선	서원주역~강릉역	120.3	2017.12(예상)
공사 중	서해선	평택연결선~홍성역	90.1	2020(예상)
계획 중	호남고속선(2단계)	광주송정역~임성리역	?	?

○ 고속철도 건설이 확충되면서 고속철도를 구성하는 터널, 사면, 교량과 같은 구조물이 증가함에 따라 InSAR를 이용한 고속철도 구조물 유지관리 분야의 효율성과 경제성을 제고하는 기술을 개발하고자 하며 유지관리 기술의 첨단화로 보다 다양한 부가가치 창출 및 경쟁력 강화

○ 일본 AKASHI KAIKYO 교량은 관리주체가 전체 교량의 모든 정보를 통합적으로 구축하여 유지관리에 관련된 계획을 합리적으로 수립할 수 있도록 유지관리시스템(BMS)을 개발하여 교량의 안전성을 확보

○ 일본은 터널의 지질, 시공법, 용수, 지반주입, 상태변화 등의 전 건설기록의 분석과 장기적인 주변지반의 변화, 지진 등으로 인한 변화를 충분히 점검, 계속하여 그 경향을 해석
· 파악하기 위해 유지관리시스템(TMS 및 SMS)을 개발하여 터널과 사면의 안정성을 확보

구 분		터널특징	계측항목	계측시스템	적용계측기술	특 정
프랑스 지하철	Bercy역	하부터널시공	변위	자동계측	광변형센서	동적자료 획득
	Chatalet역	신교노선통과	변위	자동계측	광변형센서	관리기준 15±5mm
일본 세이칸 터널		해저터널	내공변위 용수량	자동계측		지진방재시스템과 연계
홍콩 Eastern Harbor 터널		해저터널 인접터널굴착	변형율 (종방향/횡방향) 수직변위	자동계측	Strain Gage 침하게이지	3차원 변형측정

(2) 시장 진입 장벽

○ 고속철도 유지관리의 과학화, 첨단화를 위해 InSAR를 이용한 터널(TMS), 사면(CMS), 교량(BMS) 등 고속철도 첨단 유지관리시스템에 대한 과학적 유지관리 추진

○ 고속철도 유지보수는 철도공단이 철도공사로부터 위탁 받아 일반철도와 고속철도로 구분하여 시행

○ 선진국에서는 선로종류뿐만 아니라 선로속도 등에 따라서 점검주기 및 점검방법을 달리하고 있으므로 터널, 사면, 교량 등 InSAR를 이용한 구간별 다양한 유지보수 계획 수립 및 데이터 축적 마련 필요

○ 본 연구에서는 터널, 사면, 교량 등 구간별 시설물에 따른 체계화된 유지보수 계획 수립으로 레일교환, 침목교환, 안전진단 등에 대한 일체화된 시스템 개발로 해외시장 진출의 경쟁력 강화

구분		유지보수		개량사업
주제		일반철도	고속철도	
위/수탁 계약		-	철도공단	철도공단
계약근거		철도공단 ⇔ 철도공사(3년 단위)		
재원		철도산업발전기본법 제38조		한국철도시설공단법 22조
역 할	국토교통부	소유자 및 관리청 정책수립 및 시행 예산확보	소유자 및 관리청	
	철도공단	계획수립 및 총괄 관리 선로사용료 징수 및 유지보수 위탁관리	시설관리자 계획수립 및 총괄 관리 선로사용료 징수 및 유지보수 위탁관리	계획수립 및 총괄 관리 예산 확보
	철도공사	수탁시행		

자료: 박상구, 2013

국가 ⇔ 철도공사		철도공사 ⇔ 업체위탁	
1. 인건비	급료, 제수당, 복리후생비 등	1. 인건비	특급, 고급, 중급, 초급기술자
2. 경비	복리후생비, 여비, 차량비 등	2. 경비	재료비, 차량비, 안전관리비 등
3. 유지보수비	레일교환, 침목교환, 안전진단 등	3. 일반관리비	(재료비+노무비+경비)*4.10%
4. 매출부가세	부가가치세	4. 이윤	(노무비+경비+일반관리비)*15%
		5. 부가가치세	순용역원가*10%

자료: 박상구, 2013

라) 수익 확보 전략

(1) 주요 고객군

- 고속철도의 유지보수 업무는 자동화 계측시스템으로서의 기능을 추구하며 재원의 효율적 배분, 유지관리 업무의 비용절약, 시간단축, 기초자료 관리 및 원활한 정보교환이 가능하게 발전되고 있는 상태

- 현재 시공 중이거나 설계중인 고속철도 구간에 다수의 유지관리 계측시스템이 반영되어 있으며, 이미 건설이 완료되어 운영 중인 고속철도의 경우에도 유지관리계측 시스템이 구축된 사례가 많음

- 해외 건설프로젝트 수행시 InSAR를 이용한 유지관리 기술을 요구하는 사례들이 있으며, 국내에서도 각종 정보화 기술의 발전과 함께 기존 계측시스템의 실무적용 한계성으로 향후 낙관적인 시장 전망

(2) 사업화 모형(BM)을 통한 수익 창출 방안

- 국내의 경우, 고속철도 터널, 사면, 교량에 대한 계측설계 및 설치 기술 분야는 지반어건 및 암종별 지질공학적 특성을 고려한 계측설계기 미비한 실정

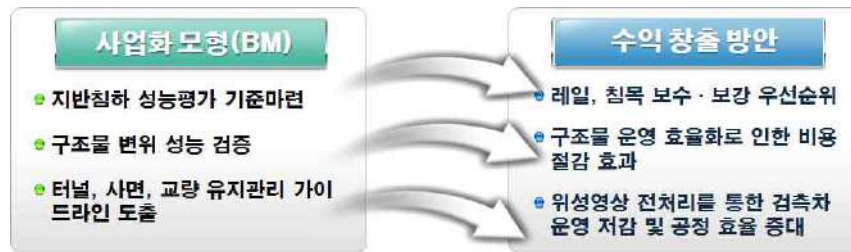
- 체계적인 유지관리를 위해서는 장기화된 지반의 문제도 인식할 필요성이 있으며, 과거의 문제이력을 고려하여 차등화된 고속철도 유지관리 방안 모색이 필요함

- 본 연구 결과로 인해 고속철도 구조물의 취약등급을 고려한 효과적인 유지·보수가 가능해 질 것이며, 기존 유지관리 시스템에 상태평가가 결합된 첨단기술로써 인정받게 될 것임

- 수동 및 자동화 계측시스템으로 분석된 구조물 상태 자료가 IT와 결합되어 위급상황시 사용자에게 정보가 전송되면 효과적인 실시간 유지관리 시스템을 구축할 바탕이 될 것임

- 제한된 계측 위치에서 InSAR를 이용한 지반침하의 상태평가가 성공적으로 이루어진다면 기존, 레이저변위계, 가속도계, 광파기 등을 이용하여 단순히 구조물의 변위를 파악하던 것에서 그 구조물의 지반까지 파악할 수 있기 때문에 구조물 유지관리 기술을 한 단계 진보시킬 수 있음

- 현재 다수의 고속철도 프로젝트가 진행되고 있는 상황에서 유지관리 계획 분야 평가기술의 확보로 기존의 계획시스템에도 접목이 가능하며, 지반의 거동 평가 정확도 향상을 통해서 구조물의 보수보강 비용의 효율화를 이룰 수 있으며, 구조물의 유지·관리·보수가 효과적으로 수행될 수 있음



붙임. 참고문헌

- (1) L-밴드 JERS-1영상을 이용한 광산침하, 정한철 외, 자원환경지질, 2004, vol.37
- (2) 백두산 및 부산지역의 지표면 변위 관측, 김상완, 2004
- (3) Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research, Xiaobing Zhou, et al, Sensors, 2009, vol.9
- (4) A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, Andrew Hooper, et al, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2004, vol.31
- (5) The complete (3D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw7.1 Hector Mine Earthquake, California, from space geodetic observations, Yuri Fialko, et al, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2001, vol.28
- (6) Source model for the Mw 6.7, 23 October 2002, Nenana Mountain Earthquake (Alaska) from InSAR, Tim J. Wright, et al, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2003, vol.30
- (7) RADARSAT-2 D-InSAR for ground displacement in permafrost terrain, validation from Iqaluit Airport, Baffin Island, Canada, Naomi Short, et al, REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 2013, vol.141
- (8) Measurement of interseismic strain across the Haiyuan fault (Gansu, China), by InSAR, O. Cavalié, et al, Earth and Planetary Science Letters, 2008, vol.275
- (9) New insights into the 2012 Emilia (Italy) seismic sequence through advanced numerical modeling of ground deformation InSAR measurements, P. Tizzani, et al, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2013, vol.40
- (10) Three-Dimensional Surface Displacements From InSAR and GPS Measurements With Variance Component Estimation, Jun Hu, et al, IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, 2012, vol.9
- (11) Time dependent model of creep on the Hayward fault from joint inversion of 18 years of InSAR and surface creep data, M. Shirzaei, et al, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: SOLID EARTH, 2013, vol.118
- (12) Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series, Estelle Chaussard, et al, Remote Sensing of Environment, 2014, vol.140
- (13) The postseismic response to the 2002 M 7.9 Denali Fault earthquake: constraints from InSAR 2003 - 2005, Juliet Biggs, et al, GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL, 2009, vol.176
- (14) Surface deformation of Long Valley caldera and Mono Basin, California, investigated with

the SBAS-InSAR approach, P. Tizzani et al, Remote Sensing of Environment, 2007, vol.108

(15) Prospecting for horizontal surface displacements in Antelope Valley, California, using satellite radar interferometry, Joern Hoffmann, et al, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 2003, vol.108

(16) Surface displacement of the Mw 7 Machaze earthquake (Mozambique): Complementary use of multiband InSAR and radar amplitude image correlation with elastic modelling, Daniel Raucoules, et al, Remote Sensing of Environment, 2010, vol.114

(17) Estimation of small surface displacements in the Upper Rhine Graben area from a combined analysis of PS-InSAR, levelling and GNSS data, T. Fuhrmann, et al, Geophysical Journal International, 2015, vol.203

(18) Top down inflation and deflation at the summit of Kilauea Volcano, Hawai'i observed with InSAR, Scott Baker, et al, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 2012, vol.117

(19) Fault slip distribution of two June 2000 MW6.5 earthquakes in South Iceland estimated from joint inversion of InSAR and GPS measurements, Rikke Pedersen, et al, 2003, Earth and Planetary Science Letters, vol.213

(20) InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine, Poland, Zbigniew Perski, et al, Engineering Geology, 2009, vol.106

(21) InSAR imaging of displacement on flexural slip faults triggered by the 2013 Mw 6.6 Lake Grassmere earthquake, central New Zealand, Y. Kaneko, et al, Geophysical Research Letters, 2014, vol.10

(22) Using AHP in determining the prior distributions on gas pipeline failures in a robust Bayesian approach, E. Cagno, et al, Reliability Engineering and System Safety, 2000, pp.275 - 284

(23) Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey), Erhan Sener, et al, Hydrogeology Journal, 2013, vol.21, pp.701 - 714

(24) Safety risk assessment using analytic hierarchy process (AHP) during planning and budgeting of construction projects, Saman Aminbakhsh, et al, Journal of Safety Research, 2013, vol.46

(25) Risk Assessment of Land Subsidence in Kathmandu Valley, Nepal, Using Remote Sensing and GIS, Richa Bhattarai, et al, Advances in Remote Sensing, 2017, vol.6

(26) Capabilities, business processes, and competitive advantage: choosing the dependent variable in empirical tests of the resource based view, Gautam Ray, et al, Strategic Management Journal, 2003

(27) The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakudayahiko Mountains, Central Japan, Lulseged Ayalew, et al, Geomorphology, 2005, vol.65

(28) Monitoring landslides and tectonic motions with the permanent scatterers technology, Colesanti, et al, Engineering Geology, 2003

(29) Persistent Scatterer Interferometry: A review, Michele Crosetto, et al, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, vol.115

(30) Fault slip in the 1997 Manyi, Tibet earthquake from linear elastic modelling of InSAR displacements, Gareth J. Funning, et al, GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL, 2007, vol.169

(31) Measuring ground displacements from SAR amplitude images: Application to the Landers Earthquake, R6mi Miche, et al, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 1999, vol.26

(32) Impacts of geoid height on large-scale crustal deformation mapping with InSAR observations, Val6rie Cayo, et al, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 1998, vol.25

(33) Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR, Tim J. Wright, et al, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2004, VOL. 31

(34) Emerging Applications of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) in Geomorphology and Hydrology, Laurence C. Smit, ANNALS OF THE ASSOCIATION OF AMERICAN GEOGRAPHERS, vol.92

(35) Displacement patterns of a landslide affected by human activities: insights from ground-based InSAR monitoring, Francesca Bozzano, et al, Natural Hazards, 2011, VOL.59

(36) Migration of fluids beneath Yellowstone caldera inferred from satellite radar interferometry, Charles Wicks Jr, et al, SCIENCE, 1998, vol.282

(37) InSAR surface displacement field and fault modelling for the 2003 Bam earthquake (southeastern Iran), . Stramondo, et al, Journal of Geodynamics, 2005, vol.40

(38) Measuring two dimensional movements using a single InSAR pair, Noa B. D. Bechor, et al, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2006, vol.33

(39) InSAR observations of low slip rates on the major faults of western Tibet, Tim J. Wright, et

- al, SCIENCE, 2004, vol.305
- (40) The ground-based InSAR monitoring system at Stromboli volcano: linking changes in displacement rate and intensity of persistent volcanic activity, Federico Di Traglia, et al, BULLETIN OF VOLCANOLOGY, 2014, vol.76
- (41) InSAR data as a field guide for mapping minor earthquake surface ruptures: Ground displacements along the Paganica Fault during the 6 April 2009 L'Aquila earthquake, L. Guerrieri, et al, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 2010, vol.115
- (42) Characterization of open and closed volcanic systems in Indonesia and Mexico using InSAR time series, E. Chaussard, et al, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 2013, vol.118
- (43) Magma sources involved in the 2002 Nyiragongo eruption, as inferred from an InSAR analysis, C. Wauthier, et al, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 2012, vol.117
- (44) Postseismic motion after the 2001 MW 7.8 Kokoxili earthquake in Tibet observed by InSAR time series, Yangmao Wen, et al, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 2012, vol.117
- (45) Landslide deformation monitoring with ALOS/PALSAR imagery: A D-InSAR geomorphological interpretation method, Romy Schlögel, et al, Geomorphology, 2015, vol.231
- (46) InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran, Maryam Dehghani, et al, GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL, 2009, vol.178
- (47) Constraints on magma chamber geometry at Sierra Negra Volcano, Galápagos Islands, based on InSAR observations, S. Yun, et al, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2006, vol.150
- (48) Retrieving three-dimensional displacement fields of mining areas from a single InSAR pair, Zefa Yang, et al, Remote Sensing, 2017, vol.10
- (49) Integration of GPS with InSAR to monitoring of the Jiayu landslide in Sichuan, China, Yueping Yin, et al, Landslides, 2010, vol.7
- (50) Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations, Paul Lundgren, et al, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2006, vol.33
- (51) Estimation of coseismic deformation and a fault model of the 2010 Yushu earthquake using PALSAR interferometry data, Mikio Tobita, et al, Earth and Planetary Science Letters, 2011, vol.307

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.