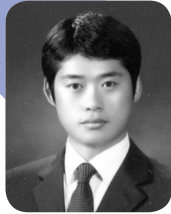


산지재해 피해저감을 위한 국내외 모니터링 사례분석



장창덕

주식회사 씨앤디 대표
/ 강원대학교 겸임교수
cdjagn79@gmail.com



전계원

강원대학교 방재전문대학원
교수
kwjun@kangwon.ac.kr

1. 머리말

국내의 산지는 일제시대에서의 산림수탈과 1950년 6.25전쟁까지 겪은 후 매우 황폐화되어 별거숭이 민둥산이 된 아픔을 겪은 후, 지속적인 산림녹화 사업과 시간이라는 힘으로 현재의 풍성하고 아름다운 모습을 갖추게 되었다. 우리나라는 국토에서 산지의 비중이 높아 국토개발이 산지인근에서 많이 이루어지고 있다. 아울러 국민소득의 증가는 여가활동에 대한 수요로 이어져 산지의 이용이 날로 증가하고 있다.

한편, 산지에서의 재해는 지구온난화로 인한 기후변화의 영향으로 점차 피해가 증가하고 있는데

표 1. 산사태 피해 및 복구비 현황(e-나라지표, 2015)

구분	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
산림분야 총 복구비 (백만원)	275,106	13,935	15,887	59,937	31,872	147,650	97,274	60,365	14,467	
피해현황	산사태 (ha)	1597	73	102	250	206	824	491	312	70
	계류 (km)	84	3	4	6	11	13	7	2	1
	인명피해 [사망](명)	9	-	-	5	1	43	1	3	0

산지에서의 재해는 산사태, 낙석, 돌발홍수 등 매우 다양하지만 최근 2011년 우면산 산사태 이후 산사태에 대한 국민들의 관심이 커지고 있다.

국민들은 산사태와 같은 재해위험의 정보를 직접 확인하기를 원하고 있으며 이러한 요구는 기존의 자료형태가 아닌 보다 능동적인 자료이어야 할 것이다. 또한 연구자들은 발생의 규모, 위치 및 발생시기 등을 정확하게 예측하기 어려운 산사태의 특성으로 인해 연구를 위한 실측데이터가 부족하여 자료확보를 위한 모니터링 수행이 필요한 실정이다.

본 고에서는 산지재해 중 특히 최근 이슈가 되고 있는 산사태재해에 대한 각 국의 모니터링사례를 소개하고 효과적인 모니터링을 위해 우리가 고민해야 하는 방향을 제시하고자 한다.

2. 산사태 모니터링

산사태는 지형, 지질과 같은 내적인 요인과 강우, 지진, 개발과 같은 자연적 또는 인위적인 외적 요인에 의해 발생하게 된다. 산사태 모니터링은 크게 발생위험을 예측하기 위한 정보의 획득과 발생 시 산사태의 특성을 파악하기 위한 정보의 획득으로 그 목적을 구분할 수 있다. <표 2>는 산사태의 발생원인을 구분한 것이다.

표 2. 산사태 발생원인

산사태의 발생원인	내적요인	자연적 요인	임상: 임종, 수중, 경급, 영급
			토질: 입도분포, 토성
			지형: 경사도, 경사향, 고도
			지질: 지질구조, 암석
	외적요인	자연적 요인	강우: 강우강도, 강우량, 선행강우
			지진: 지진강도, 진폭
			하천 및 해안 침식
	인위적 요인	절성토, 개발활동	

산사태를 모니터링하기 위해서는 산사태가 발생요인인 내적인 요인의 변화와 외적인 요인의 변화 또는 발생시점을 계측하고 발생된 산사태의 특성을 알아내기 위한 유속, 규모 등을 계측할 수 있어야 한다. 유럽연합의 연구보고서에 따르면 현장에서 조사되고 있는 산사태의 핵심인자로 지표변위, 기상기후, 물, 사면경사 및 지진활동을 제시한바 있으며 산사태의 원인은 대부분이 물과 관련된 요인으로 분석되었다. 인간활동에 의한 산사태발생도 직·간접적으로 17%에 달해 중요한 요인으로 지목할 수 있을 것이다.

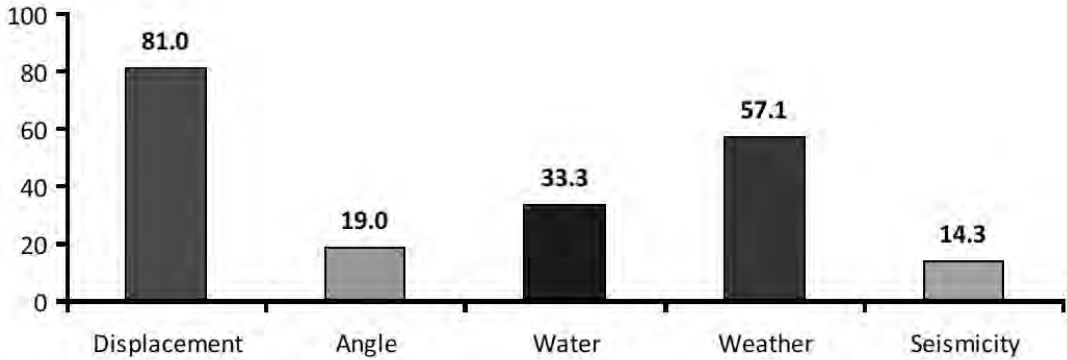


그림 1. 유럽 산사태 위험지 21개소의 핵심 모니터링 인자 설정

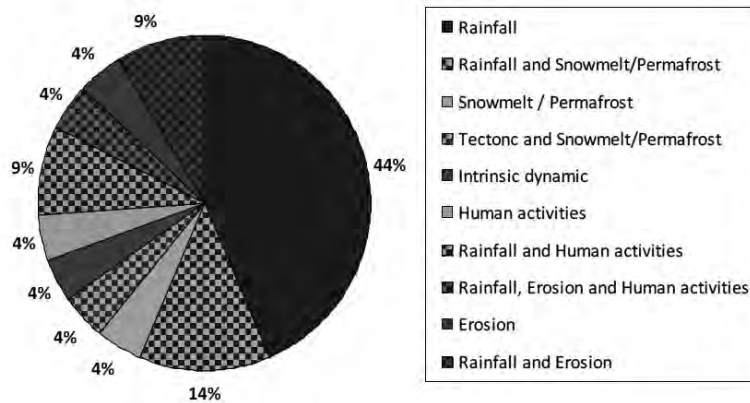


그림 2. 유럽 산사태 재해의 원인 분석결과

국내외 연구진은 각 국이 가지고 있는 자연적·사회적 환경에 따라 다양한 방식으로 산사태모니터링을 진행하고 있다. 산사태모니터링은 지상 또는 공중에서 우량계, 경사계, 인장계, 합성개구레이더, GPS, 지상라이다, 수위계, 유속계 등의 장비를 복합적으로 사용하여 모니터링 시스템을 구축하고 유·무선으로 모니터링 결과를 수집·분석하는 것이다. 따라서 계측기법 외에도 자료의 전송 및 운영기법에 대한 연구도 중요하다 할 수 있다. <표 3>은 모니터링 대상인 산사태 요인에 따른 계측기의 형식과 항목을 일부 정리한 것이다.

2.1 국내·외 산사태 모니터링 사례

- 대만

대만은 산사태 재해저감을 위해 전국을 대상으로 산사태 DB를 구축하고 국가재해저감과학기술

표 3. 계측항목별 적용 계측 센터

계측대상	계측기기 형식	계측항목	계측대상	계측기기 형식	계측항목		
지표면변동 (변형, 변위)	지표면 신축계	지반신축변위	내부응력	변형게이지, 변형계	변형		
	지반 경사계	지반경사변위		구조물표면 변위계	구조물 표면의 변형		
	전도 스위치	전도, 회전					
	검지선식 낙석검지기	낙석 검지	지표 이동	변위, 변형	구조물표면 경사계	구조물 구체의 경동량	
					광파측거법		
					삽입형 지중경사계	강관 말뚝 등의 처짐	
					균열 게이지	균열폭, 진행속도량	
	지중변동 (변형, 변위)	파이프 변형계			활동면 위치	지하수 변동 수압 변동	지하수위계
지중 경사계		활동면 위치 활동 압괴 이동			간극수압계		활동면 간극수압변동
지중 신축계					함수량계		함수량
지중 변위계		지중 용기, 침하, 이동			기상자료	우/설량계	누적유량, 우량강도, 실효우량, 용설량
작용외력	토압계	작용하는 토압	지하수배제 효과	유량계 유속계 수위계	배수량의 변화		
	로드셀	앵커에 작용하는 장력	붕괴발생 감지	와이어 센서	붕괴발생 직접감지		
				진동센서, 음향센서	붕괴발생 전조감지		

센터(NCDR; National Science and Technology Center)와 수도보호국(SWCB; Soil and Water Conservation Bureau)을 중심으로 관리하고 있다. 산사태위험지역 중 고위험지역 13개소에는 토석류 산사태 모니터링 시스템을 구축하고 관찰을 실시하고 있는데 경보발령의 정확도를 위해 고정식과 이동식 모니터링 시스템을 구축하여 운영하고 있다. 계측된 자료는 유무선 통신망을 이용해 이동식/고정식 관측소로 보내지고 다시 인공위성을 통해 GIS연구센터 및 중앙재해운영센터(CEOC; Central Emergency Operation Center)로 보내진다. 위성통신이 원활하지 않았을 때를 대비하

Figure 15. Design of the spatial sensor network to be deployed at the Taziping landslide.

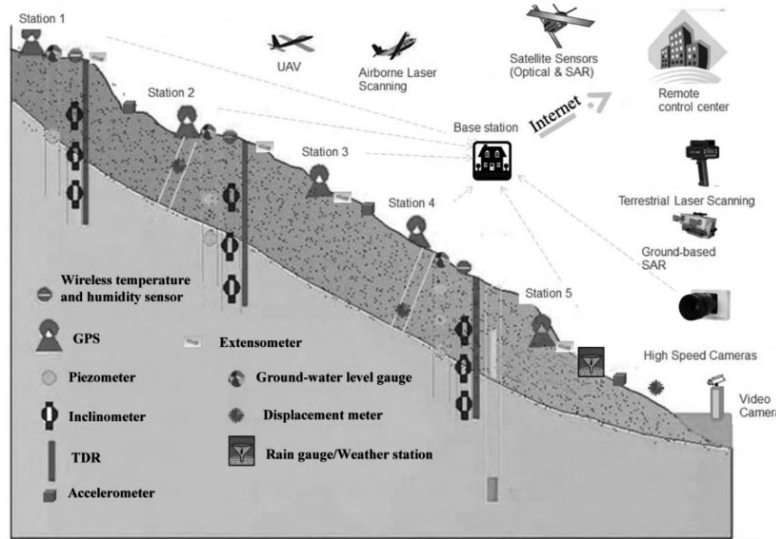


그림 3. 산사태 모니터링 시스템 구축 개념도(Remote Sense, 2013)

여 보조적인 수단으로 ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line), GSM(Global System for Mobile Communications), GPRS(General Packet Radio Service)를 적용하고 있어 실시간 산사태 모니터링 정보를 매우 안정적으로 확인할 수 있다. 분석된 위험정보는 모바일기기 또는 인터넷을 통해 국민들에게 전파하게 된다. 사용되는 계측장비로는 기상관측장비, 간극수압계, 지오폰, 초음파수위계, 와이어센서, 적외선 카메라 등이 있으며 2대의 컴퓨터와 전원공급장치 및 안정적인 전원공급을 위한 UPS와 제너레이터를 구비하고 있다. 대만의 경우 비상시 차선의 방법에 대한 강구가 철저하며 위성을 적극적으로 이용하고 있다. <그림 4>는 고정된 위치에 구축된 관측소와 이동할 수 있게 차량에 탑재된 토석류 산사태 모니터링 관측소를 나타낸다.

- 스위스

스위스에서는 “alpEWAS project(development and testing of an integrative 3D early warning system for instable alpine slopes)”가 수행되었다. 이 프로젝트는 TDR(Time Domain Reflectometer), TPS(Terrestrial Positioning System) 및 GNSS(low cost Global Navigation Satellite System)를 중심으로 기타 다른 센서들과 결합하여 WebGIS 환경에서 모든 데이터를 실시간에 가깝게 접속할 수 있도록 조기경보 시스템을 구축하는 것이다. <그림 6>은 스위스 Randa과 Aggenalm 산사태 위험지역의 조기경보시스템 구축 개념도이다. TDR은 지중에 동축케이블 또는 광케이블을 매설하여 초기 참고신호 대비 변화된 신호를 계측하는 방법으로 지형의 변위를 계측하

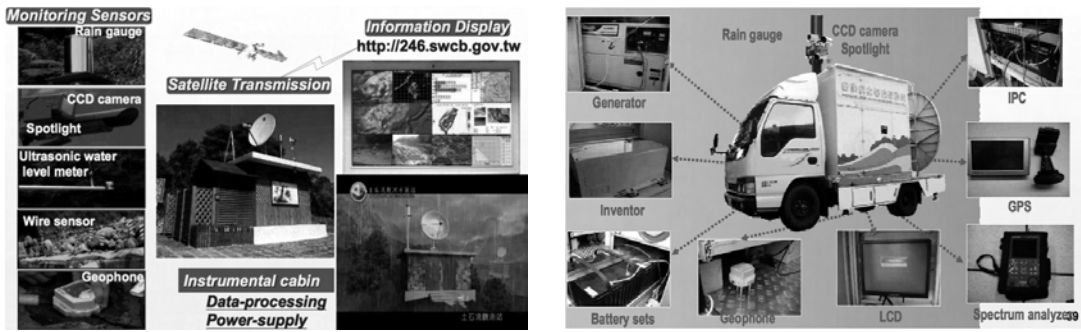


그림 4. 토석류 산사태 모니터링 고정 관측소/ 이동 관측소



그림 5. 산사태 모니터링 및 통보 시스템(Liu and Chen, 2006)

는 기술이다. TPS는 안정되어 고정된 지점에서 관심 지점의 상대적인 변위를 계측하는 기술로 여기서는 Reflectorless video tacheometry 기술을 직접 개발하여 사용하였다. TPS기술은 넓은 지역에 대한 정밀도 높은 자료를 적은 비용으로 취득할 수 있는 장점이 있지만 지형에 피복상태에 따라 제약사항이 따른다.

- 이탈리아

이탈리아도 대만과 마찬가지로 인공위성을 적극 활용하여 공중관측 시스템 도입을 도입하고 지표의 변화를 관측하는 기술이 발달하고 있다. 산사태 재해가 자주 발생하는 이탈리아는 다양한 센서를 설치한 지상관측 외에도 인공위성을 이용한 합성개구레이더(SAR; Synthetic Aperture Radar)로 지표변위에 대한 모니터링을 수행하고 있다. 간섭기법(InSAR; SAR Interferometry)은 지표의 변위에 대한 위상변화를 밀리미터단위까지 관측할 수 있는 최신기술로 첫 번째와 두 번째 SAR영상의 위상변화를 관측한다. 하지만 산림지역에는 제한이 있어 국내에서 활용하는 데에는 많은 제약이 따른다. <그림 7>은 InSAR 기법에서 반사강도가 좋은 고정 산란체 PS(Permanent Scatterers)와 분포 산란체 DS(Distrivuted Scatterers)의 개념을 나타낸 것이다. 최근 SqueeSAR 기법이 개발되면서 PS에서 뿐만 아니라 DS에서도 정확한 지표변위정보를 추출할 수 있게 되었다.

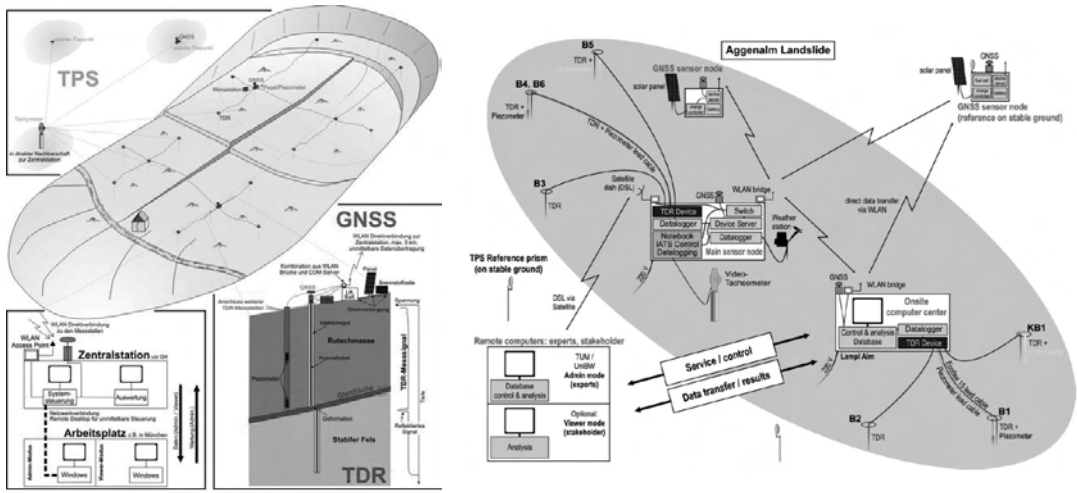


그림 6. 스위스 Randa(좌) 및 Aggenalm(우) 지역의 산사태 모니터링 시스템

〈그림 8〉은 이탈리아 북부 Santo Stefano d'Aveto 마을을 대상으로 PS-InSAR기법을 이용한 산사태 모니터링을 수행하여 활동사면(active), 휴면사면(Dormant), 비활동사면(Inactive)으로 확인할 수 있었으며 사면의 변위는 -42 ~ 5mm/yr로 나타났다.

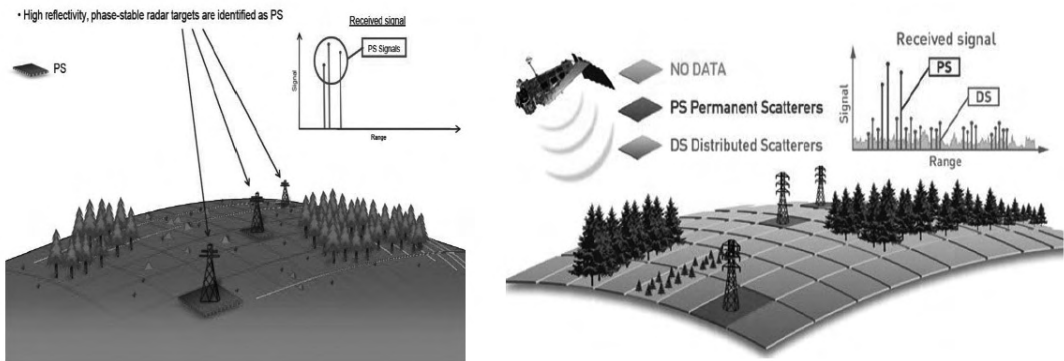


그림 7. 위성영상을 이용하는 InSAR기법을 적용한 최신 산사태모니터링 기

또한 이탈리아에서는 최근 DMS(Differenrial Multiparameteric system)산사태 모니터링 시스템을 개발하여 적용하고 있다. DMS는 변위에 따라 하나이상의 측정값을 동시에 계측할 수 있는 장비로 여러 개의 피에조미터로 압력을 측정하고 가속도, 온도, 변형을 동시에 계측할 수 있다. DMS는 다양한 기능이 있는 센서를 하나의 통합된 시스템으로 구축하여 모니터링할 수 있다는 장점이 있으며 형태와 활용사례를 〈그림 9〉에 나타내었다. DMS 시스템은 관절이 있는 원형강관모듈을 DMS의 회전가능한 틀에 연결하여 경사지에도 설치가 가능한 장점도 가지고 있다.

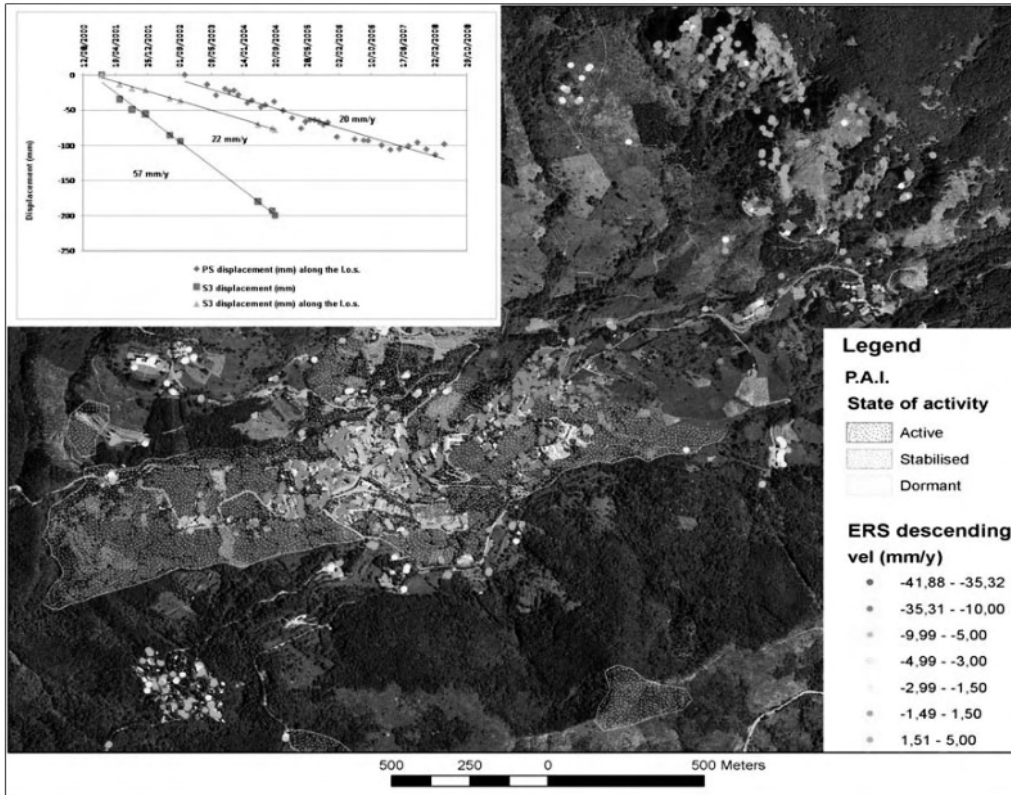


그림 8. 원위치 측정장치와 PS-InSAR기법 비교에 의한 산사태 모니터링

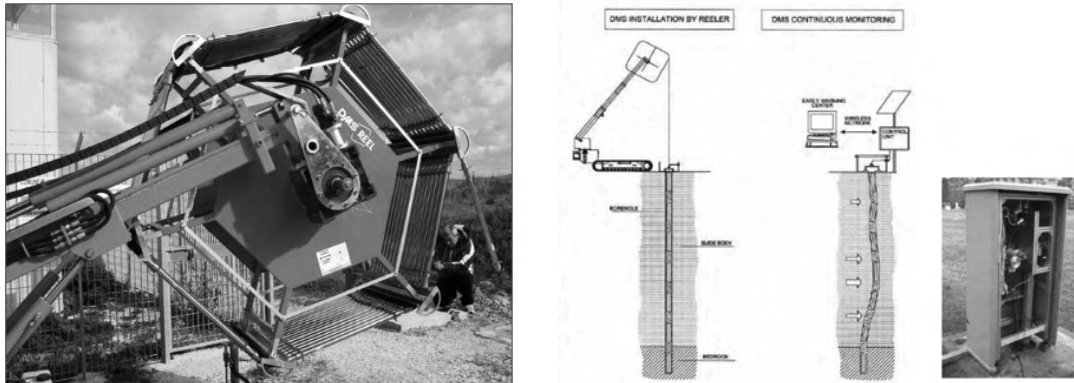


그림 9. DMS 산사태 모니터링 활용 사례

- 프랑스

프랑스 남부 알프스지역에서는 광학카메라를 이용한 저비용의 모니터링 기술을 적용하여 사면의 활동과 변위를 모니터링하였다. <그림 10>은 프랑스 남부 Super-Sauze 지역에 대한 모니터

링 시스템 적용사례이다. 다년간 촬영한 이미지를 보정·분석하여 지표면의 변위를 산출할 수 있는데 기상, 명암, 장비의 미세한 흔들림 등에 따른 영향을 고려해야하는 단점이 있다. 최근에는 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)에 광학카메라를 장착하여 동일한 방법의 모니터링에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

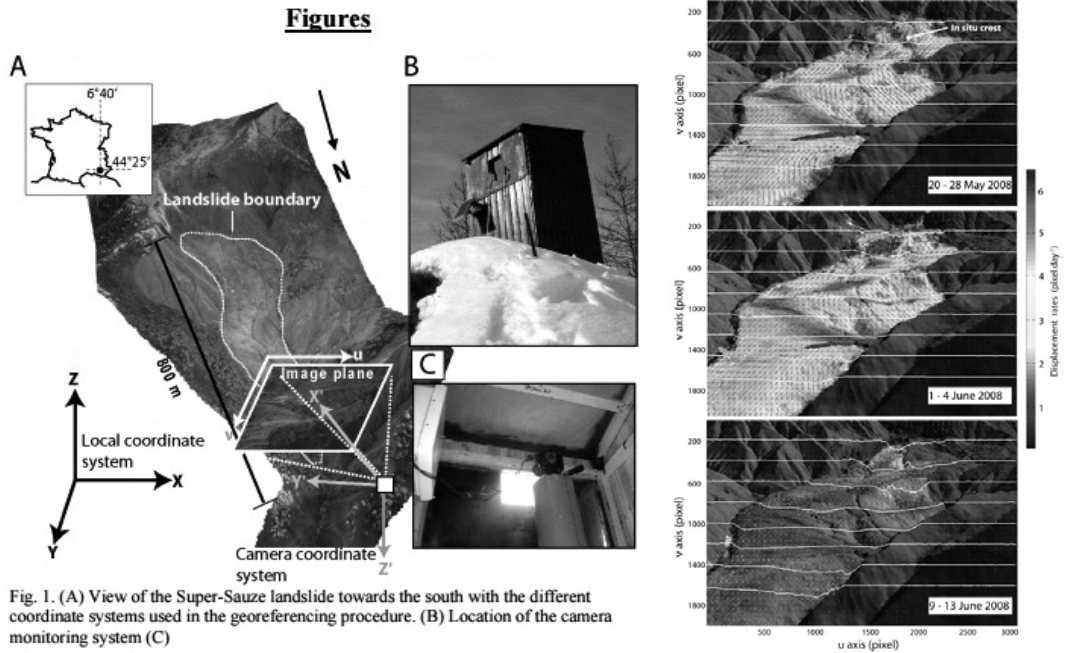


Fig. 1. (A) View of the Super-Sauze landslide towards the south with the different coordinate systems used in the georeferencing procedure. (B) Location of the camera monitoring system (C)

그림 10. 광학카메라를 이용한 산사태 모니터링

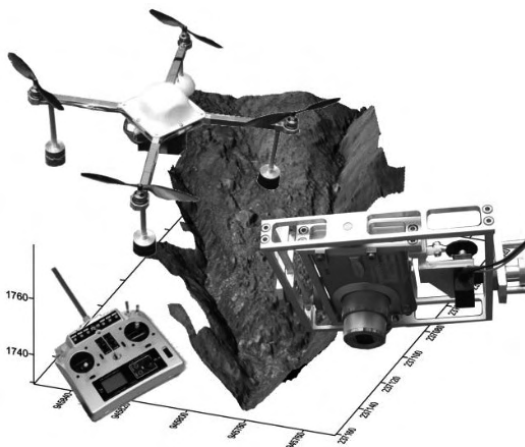


그림 11. UAV를 활용한 광학 카메라를 이용한 산사태 모니터링

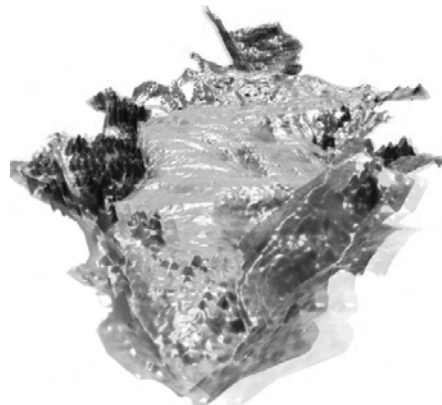


Figure 12. Virtual 3D anaglyph of the Super-Sauze landslide (red/cyan glasses are required for full 3D impression)

－ 국내

국내의 산사태 모니터링 시스템 구축은 자연사면의 경우 산사태 발생 시점을 포착하고 발생에 따른 특성을 분석하기 위해 계측기 설치하고 CCTV통해 영상정보를 획득하는 방식이 주를 이루고 있다. 인공사면의 경우 도로비탈면을 중심으로 발생위험 지역에 대한 모니터링을 TDS, TPS, GNSS와 같은 기술을 이용하여 구축하고 있다. 한국지질자원연구원(2014)에서는 강원도 인제군 산지계류에 토석류 발생을 관측하기 위해 wire 센서, 함수량계, 경사계, 지오폰 등의 계측기를 설치하여 모니터링 시스템을 <그림 12>와 같이 구축한 바 있다.

또한 국립산림과학원(2014)에서는 특정 지점에 대한 지표면의 변위를 지상 라이다를 이용하여 지형을 3D 이미지로 연속 측정하여, 중첩된 지형자료를 분석하는 방법으로 정량적인 지표면의 변화를 도출하는 형태로 산사태 모니터링을 위해 활용하기도 하였다<그림 13>.

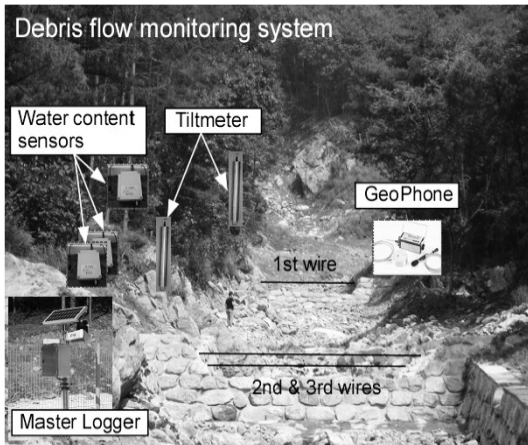


그림 12. 강원도 인제군 산사태 모니터링 시스템(한국지질자원연구원, 2014)

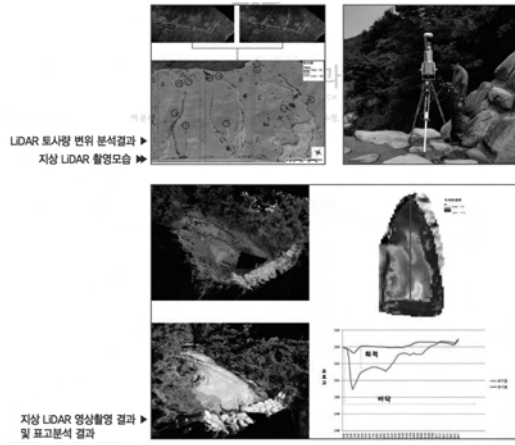


그림 13. 지상 라이다를 이용한 지형 변화 모니터링(국립산림과학원, 2014)

3. 산지재해 모니터링에서의 시사점

최근 국내에서는 산사태 모니터링 시스템 구축을 위해 다양한 연구가 시도되고 있다. 이러한 시점에서 앞서서 기술한 국내외의 산사태 모니터링 시스템의 구축사례를 통해 우리가 고민해야 하는 점은 어떤 것일까? 아래의 <그림 14>는 Travelletti and Malet(2012)이 제시한 개념도로 우리가 산사태를 모니터링 하고자 할 때 어떠한 사항을 고려해야하는 가를 잘 나타내고 있다.

예상되는 산사태의 형태와 규모는 어떻게 되는지, 모니터링 대상지역의 지리적 접근성이 양호한지, 모니터링 지역의 식생상태와 모니터링 기간은 장기적으로 수행할 것인지 단기적인 것인지 또한

어느 정도의 정밀도를 요구하는 지에 대한 고민이 충분이 되어야 할 것이다. 물론 이러한 시스템을 구축하기 위한 예산의 규모에 따라라도 모니터링 시스템의 구축방향은 달라질 것이다.

대만의 경우 통신 및 안정적인 전원확보를 위해 다양한 루트를 마련하고 있어 비상상황에 대한 대응이 철저했으며, 프랑스의 경우 저예산으로 넓은 지역의 모니터링을 구축할 수 있는 방법으로 광학 카메라를 활용하고 있다. 이탈리아의 경우 발달한 위성기술을 이용하여 산사태 모니터링을 수행하여 자국의 장점을 잘 살리고 있었다. 국내의 경우에도 발달한 IT, ICT기술을 활용하여 효과적인 모니터링 전략을 구축해야 할 것이다.

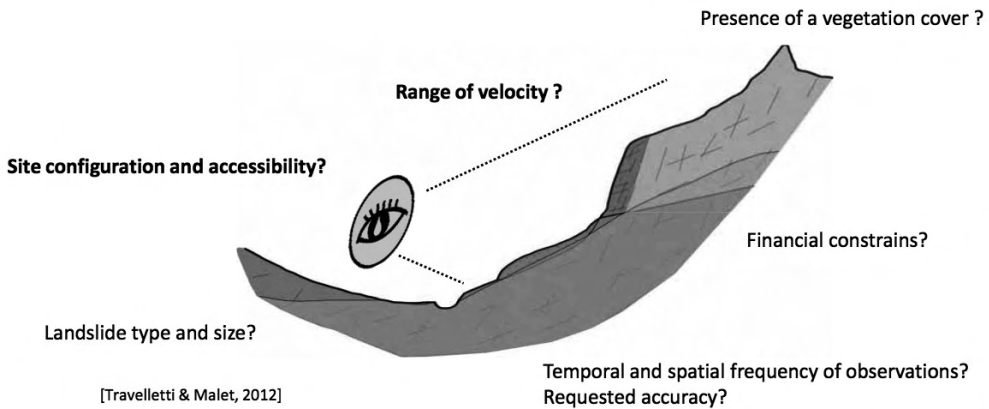


그림 14. 산사태 모니터링을 시스템 구축을 위한 전략

효과적인 전략수립이 전제된다면 <그림 15>에서 나타내는 바와 같이 산사태 모니터링에 필요한 운동학적, 수문-기상학적 접근방법을 명확히 결정되고 이에 따른 효과적인 모니터링 시스템이 구축방법이 도출될 것이다. 또한 <그림 15>의 주요 관측 항목에서 나타나는 바와 같이 산사태 모니터링을 위해서는 수리수문학, 지질지반, 지형학, 기상학, 원격탐측 등의 다양한 분야의 연구영역이 공존하기 때문에 특정 학문에서의 접근이 용이하지 않다. 따라서 다양한 분야의 전문가들에 의한 융합적인 연구가 수행되어야 효과적인 산사태 모니터링 시스템을 구축할 수 있을 것이다.

또한 산사태 모니터링은 장기간에 걸친 자료가 축적되었을 때 그 자료의 효용이 발생하게 된다. 따라서 관련 정부부처의 지속적인 관심에 의한 예산확보가 선행되어야 할 것이며 관련분야의 연구인력의 양성 및 전문화가 전제되어야 선진 모니터링 시스템을 보유한 안전한 나라의 지위를 이어갈 수 있을 것이다.

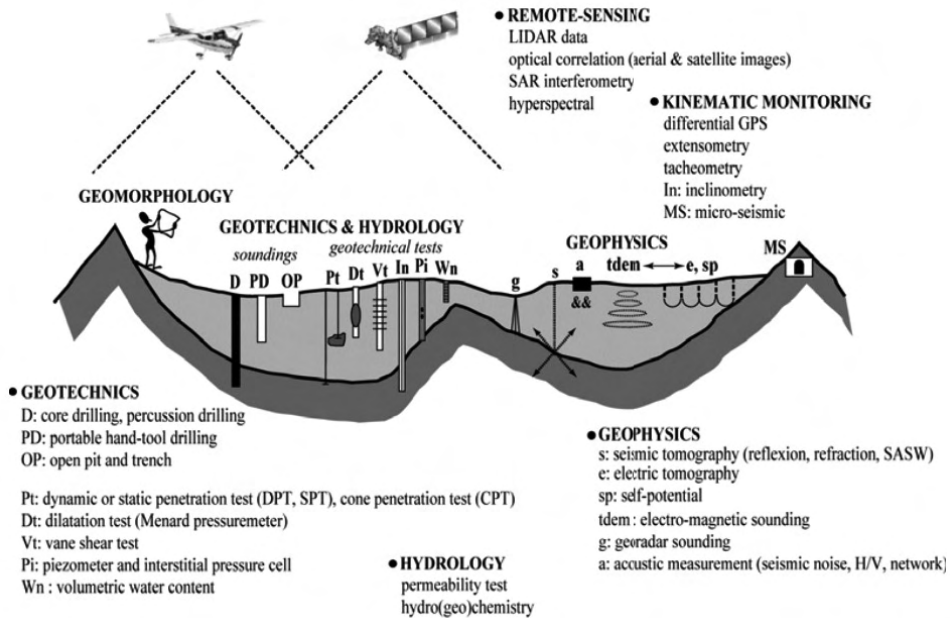


그림 15. 산사태 모니터링의 주요 관측 항목 분류(Malet and Stumpf, 2014)

참고문헌

1. 김정섭 (2013), “급경사지 붕괴예측을 위한 USN기반 모니터링시스템 구축에 관한 연구”, 박사학위논문, 강원대학교 방재전문대학원
2. 국립산림과학원 (2014), “국민안전과 국토보전을 위한 산사태 바로알기”, 연구자료 제584호, 국립산림과학원
3. 산림청 (2013), “산사태 발생 위험지의 통합관리 방안 연구”, 연구보고서
4. 한국지질자원연구원 (2014), “실시간 모니터링 기반의 산사태 조기탐지 융합시스템 개발”, 연구보고서 GP2014-007-2014(1)
5. A. Stumpf (2013), “Landslide recognition and monitoring with remotely sensed data from passive optical sensors”, PhD Thesis, University of Strasbourg, France
6. e-나라지표 (2015), <http://www.index.go.kr>
7. Gang Qiao, Ping Lu, Marco Scaioi, Shuying Xu, Xiaohua Tong, Tiantian Feng, Jangbin Wu, Wen Chen, Yixiang Tian, Weian Wang and Rongxing Li (2013), “Landslide Investigation with Remote Sensing and Sensor Network: From Susceptibility Mapping and Scaled-down Simulation towards in situ Sensor Network Design”, Remote Sens

- 2013, Vol.5, pp. 4319–4346
8. GSA (2010), “Landslide Monitoring Technologies & Early Warning Systems”, book of extended abstracts, Open Workshop within frame of the EU FP7 “SafeLand” Project
 9. Hsiao–Yuan Yin (2012), “Debris Flow Monitoring and Warning in Taiwan”, 2012 International Workshop, SWCB
 10. K. Thuro, T. Wunderlich, O. Heunecke, J. Singer, S. Schuhbäck, P. Wasmeier, J. Glabsch, J. Festl (2009), “Low cost 3D early warning system for instable alpine slopes – the Aggenalm Landslide monitoring system”, *Geomechanik und Tunnelbau*, Vol.2(3), pp.221–237
 11. Ko–Fei Liu and Chien–Yuan Chen (2006), “Introduction to Slope land disaster mitigation in Taiwan”, 2006 slope land report
 12. U. Niethammer, S. Rothmund, U. Schwaderer, J. Zeman, M. Joswig (2011), “Open Source Image–Processing Tools for Low–Cost UAV–based Landslide Investigations”, *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.38–1/C22 UAV–g 2011, Conf. on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland