

산사태 위험 예측기술 개발 동향



정 관 수 |
충남대학교 토목공학과 교수
ksjung@cnu.ac.kr



이 기 하 |
충남대학교 국제수자원연구소 수석연구원
leegihha@gmail.com

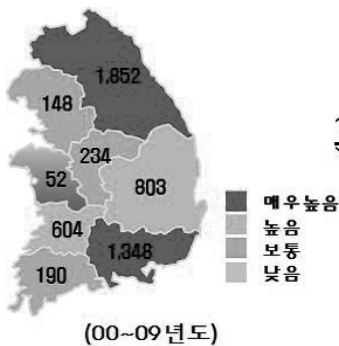


손 민 우 |
충남대학교 토목공학과 교수
mson@cnu.ac.kr

1. 산사태 위험 예측기술 개발의 필요성

2011년 하계 중부 지방에서 발생한 집중호우로 인해 서울시 서초구에 위치한 우면산 주위에 산사태가 발생하여 전원마을 등에서 18명의 사망자가 발생하였다. 사망자 중에는 사회 유명인사의 가족도 포함되어 있으며 수도의 남부 중심지에서 발생한 인명사고 자연재해라는 점에서 심각성이 증대되었다. 인명 뿐 아니라 수도 남부의 주요 도로가 매몰되어 교통이 통제되고 대형 주거 시설의 하부가 파괴되는 등 사회기간 시설도 큰 피해를 입었다. 우면산 산사태는 피해규모가 크고 대한민국의 수도에서 발생하였다는 점에서 충격을 주었다. 하지만 돌발호우 등의 영향으로 국내에서는 매년 산사태가 발생하고 있으며 연평균 60여 명의 인명피해와 수

지역별 산사태 발생면적 (ha)



산사태 발생면적 및 복구비의 연도별 변화

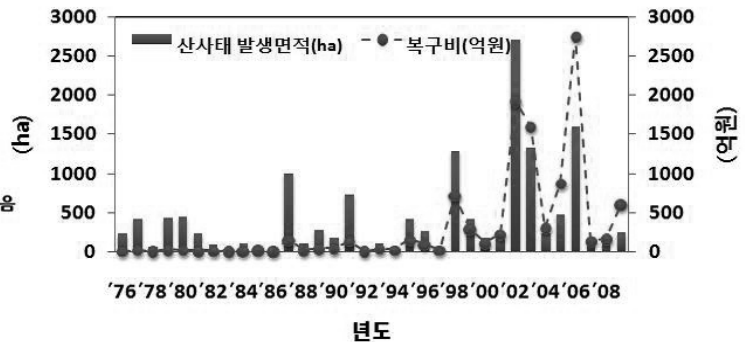


그림 1. 지역별, 연도별 산사태 발생 현황

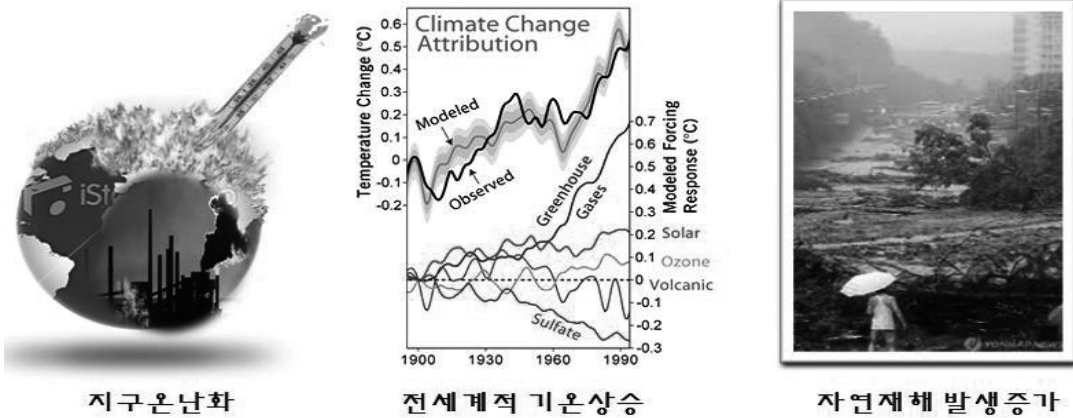


그림 2. 기후변화로 인한 자연재해의 증가(중앙하천관리위원회, 2010)

천억 원 이상의 재산피해가 발생하고 있다(그림 1). 세계적인 기후변화와 이에 따른 집중호우나 대형 태풍의 발생 빈도 및 강도의 증가에 따라 산사태 발생 가능성이 높아지고 있다(그림 2). 또한 산업화 및 도시화에 따른 도시 주변부와 전원공간 개발이 활발히 진행되고 있지만 정밀한 공학적 안정성 평가 과정이 미비한 상태로 이루어지고 있는 실정에 지형 및 지질학적 특성과 무관하게 산사태 발생 위험성이 증가할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 산사태에 의한 피해를 저감하고, 궁극적으로, 산사태 예방 및 효율적인 유역관리를 위해서는 산사태 재해 방재와 관련된 기술의 선진화가 요구된다. 본 기

사는 산사태 위험 예측기술의 개발 동향을 살펴보고 보다 과학적인 기술개발을 통한 재해관리기술 및 대책 마련의 필요성을 되짚어 보고자 한다.

2. 산사태 위험 예측기술 연구개발 동향

산사태의 위험성 평가 및 예측과 관련된 연구는 크게 체험적 해석기법(Heuristic Analysis), 통계적 해석기법(Statistical Analysis), 결정론적 해석기법(Deterministic Analysis)로 분류할 수 있다 (표 1 참고).

표 1. 산사태 위험성 평가 및 예측기법의 종류와 특성(Wang et al., 2005)

Type of analysis	Technique	Scale of use recommended			Advantages	Disadvantages
		Regional	Medium	Large		
Heuristic analysis	Qualitative map combination	Yes	Yes	No	The degree of hazard is determined rapidly after the fieldwork on the basis of a detailed geomorphological map taking into account a large number of factors as attribute database.	The length of operations involved. The problem of subjectivity in attributing weighted values.

표 1. 산사태 위험성 평가 및 예측기법의 종류와 특성(Wang et al., 2005) (계속)

Type of analysis	Technique	Scale of use recommended			Advantages	Disadvantages
		Regional	Medium	Large		
Deterministic analysis	Safety factor analysis	No	No	Yes	To permit quantitative factors of safety to be calculated.	Data requirements for deterministic models can be prohibitive, and frequently it is impossible to acquire the input data necessary to use the models effectively
	Probability of failure	No	No	Yes	External existing models can be used without losing time in programming the model algorithms in a GIS. Encourage investigation and measurement of geotechnical parameters in detail.	

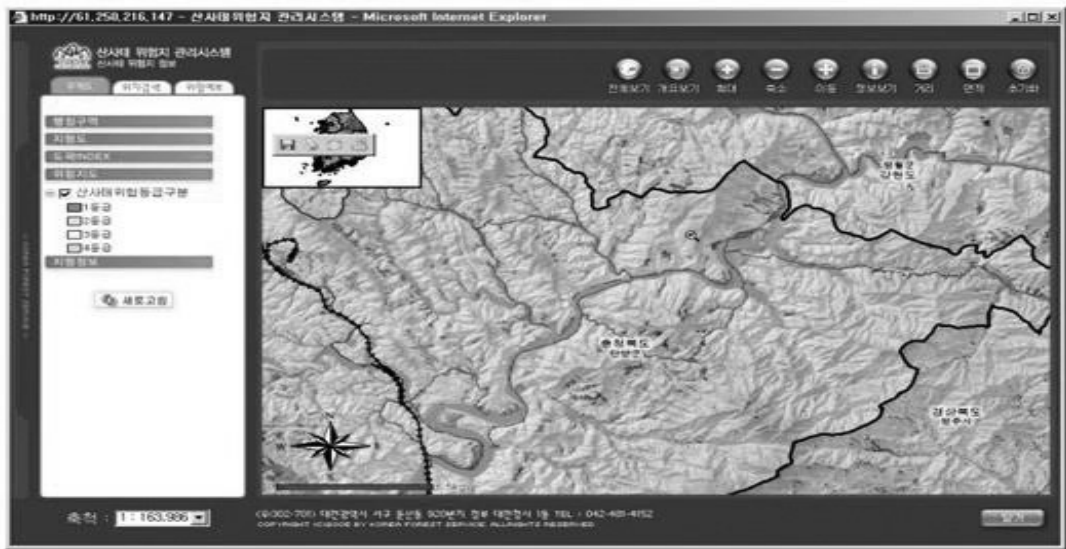


그림 3. 산사태위험지관리시스템(산림청, <http://sansatai.foa.go.kr/webgis.do>)

체험적 해석기법은 실제 산사태 현장정보를 기반으로 하여 발생요인에 인위적 가중치를 부여하는 방법으로 현재 산림청에서 운영 중인 '산사태위험지관리시스템'에서 이용되고 있다(그림 3 참고). 하지만 이 방법은 가중치에 대한 객관성이 결여될 수 있으며 산사태 발생의 물리적 메커니즘을 반영하기 어렵다는 단점을 가진다.

통계적 해석기법은, 체험적 해석기법과 유사하

게, 실제 산사태 현장정보에 기초하여 발생 요인에 대한 상관관계를 통계적 기법으로 해석하며 사면 안정성을 파괴확률로 제시한다. 한국지질자원연구원에서 수행한 '산사태재해 예측 및 저감기술 개발'의 연구성과인 산사태 재해위험지도가 이 기법을 기반으로 산사태 위험정보를 제공한다(그림 4 참고). 이 방법 역시 산사태 발생의 물리적 메커니즘을 반영하기 어려우며, 임의 대상 지역의 산사태

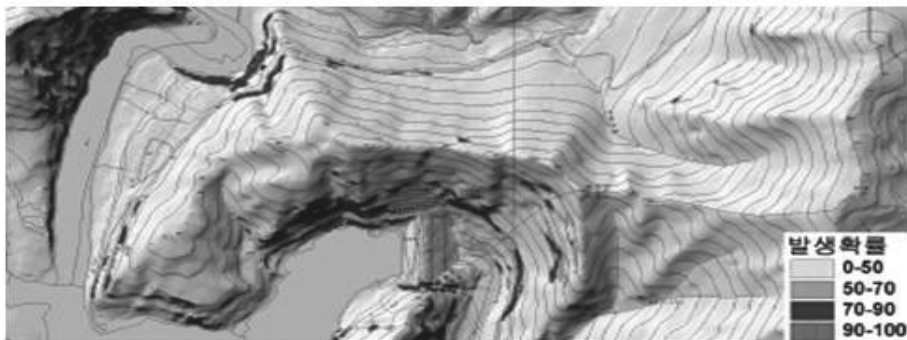
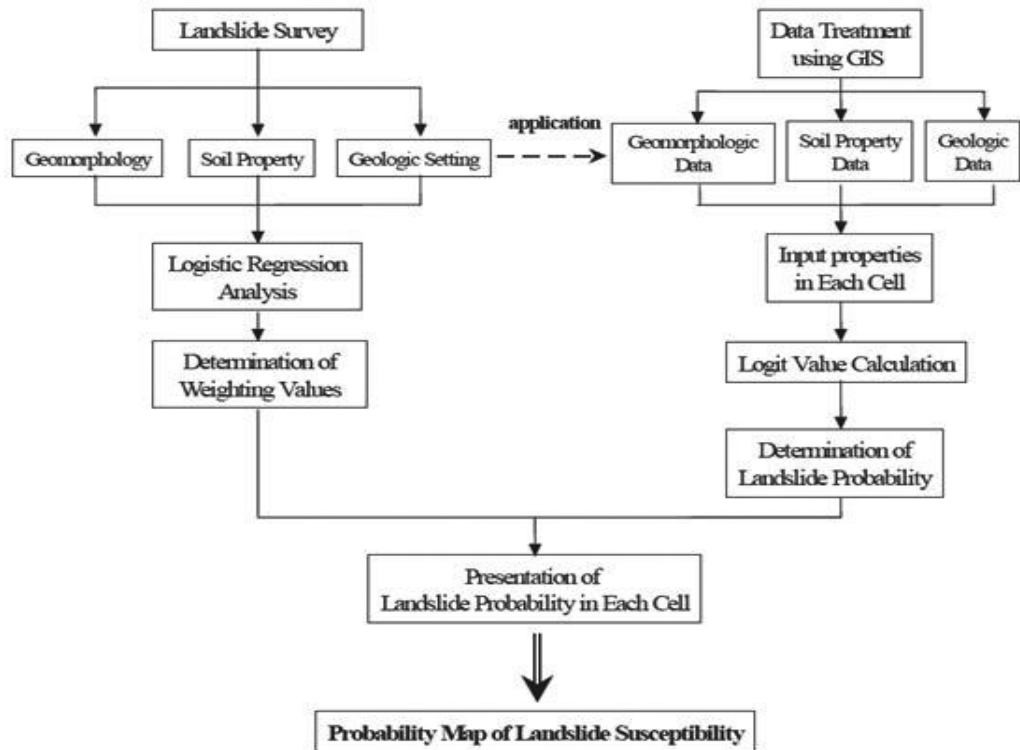


그림 4. 산사태 재해위험지도(한국지질자원연구원, 2009)

발생 인자들의 통계적 특성을 반영하는 식을 사용하기 때문에 타 지역에서의 직접적 적용에서 한계를 가진다.

체험적, 통계적 해석기법과 달리 결정론적 해석 기법은 산사태와 관련된 내·외적 발생요인의 상호작용을 고려한 알고리즘을 이용하며 GIS 기반의 수문·지형·지질 정보를 활용하여 산사태 위험성 평

가 및 예측에 활용된다. 최근 GIS 및 Remote Sensing 기술과 컴퓨터 성능의 비약적 발전에 따라 국외에서는 이 방법을 이용하여 다양한 산사태 해석 모형 및 시스템이 개발되고 있다(그림 5 참고). 국외에서 개발된 모형의 명칭, 특성, 개발자, 개발년도 등에 관한 사항은 표 2에서 보여진다. 표에서 보여지는 모형들은 지표하 흐름을 정상상태로

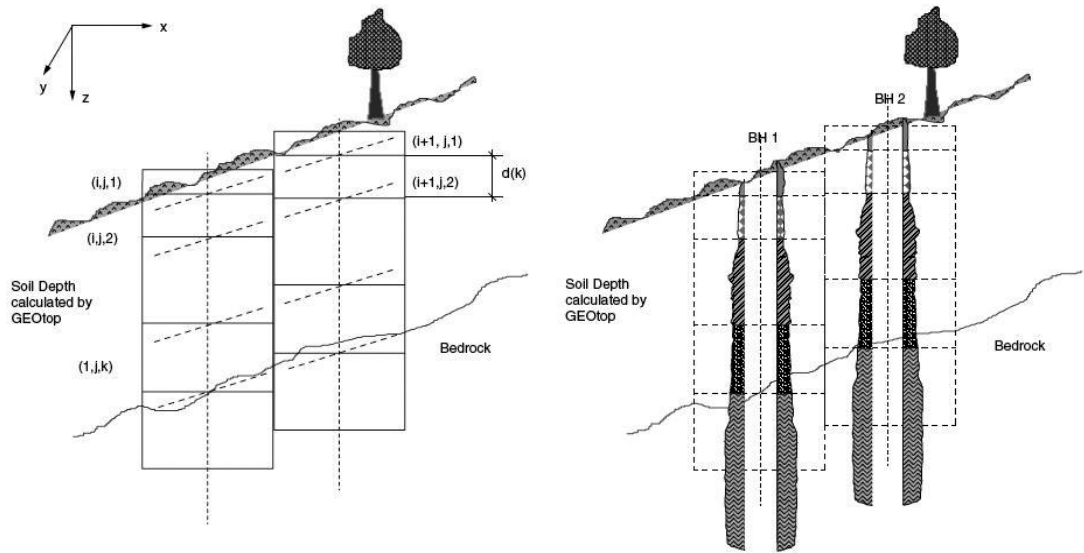


그림 5. GEOtop-FS 모형의 모식도(Simoni et al., 2008)

표 2. 물리적 기반의 결정론적 산사태위험해석 모형 (Safaei et al., 2011)

Model	Description	Developer	Year
CHASM	Combined Hydrology And Stability Model	Anderson and Lloyd	1991
LISA	Level I Stability Analysis	Hammond et al.	1992
SHALSTAB	Shallow Landsliding Stability Model	Montgomery and Dietrich	1994
SMORPH	Slope MORPHology	Shaw and Johnson	1995
dSLAM/IDSSM	Distributed Shallow Landslide Model / Integrated Dynamic Slope Stability Shallow Landslide Model	Wu and Sidle	1997
SINMAP	Stability Index Mapping	Pack et al.	1998
SHETRAN	System Hydrology European TRANsport	Ewen et al.	2000
TRIGRS	The Transient Rainfall Infiltration and Grid based Regional Slope-stability	Iverson	2000
PROBSTAB	PROBability of STABILITY PCRaster GIS package	Van Beek	2002
PISA	Probabilistic infinite slope analysis.	Haneberg	2004
SUSHI	(Saturated Unsaturated Simulation for Hill slope Instability) model	Capparelli et al.	2006
GEOtop-FS	combines the hydrological distributed model GEOtop and an infinite slope geotechnical model	Simoni et al.	2008

가정하여 산사태 위험성을 해석하는 모형 (SHALATAB, SINMAP 등)과 토양 침투특성의 시·공간적 변동성을 고려한 지표하 흐름 해석 기반의 모형(CHASM, TRIGRS, GEOtop-FS 등)으로 구분할 수 있다. 두 가지 모형 모두 산사태 위험 정도의 공간적 분포를 나타낼 수 있지만 전자의 경우 산사태의 발생 시기에 관한 해석이 불가능하다. 국내에서는 현재까지 이 방법을 이용한 개발사례가 없는 실정이며 산사태가 집중호우나 우기시 집중되는 국내의 자연조건을 고려할 때 강우에 의한 토양 포화도의 변화와 지표하 흐름의 동적특성을 반영할 수 있는 산사태 위험해석 모형 및 이에 기반한 조기 예·경보 시스템의 개발이 필요하다.

3. 국내외 관련 기술산업 동향

3.1 국내 동향

국내의 경우 각 기관의 담당 분야에 따라 독자적으로 자연사면 또는 절취사면에 대한 고유업무를 수행하고 있으며 사면재해 관련기관으로는 한국지

질자원연구원, 한국건설기술연구원, 산림청, 국립방재연구소, 한국도로공사 등이 있다(표 3 참고). 표 3에서 보이는 것과 같이 한국지질자원연구원을 제외하고 산사태에 관련한 연구를 실시하는 기관은 한국건설기술연구원, 국립방재연구소, 국립산림과학원 등이 있으며, 이 기관들은 각기 소속된 상위 기관의 특성에 따라 산사태에 관한 연구를 부분적으로 수행한다. 국립방재연구소는 실무기술적 측면의 연구보다는 국가 방재 차원의 재해대책 수립에 관한 연구에 초점을 두고 있다. 국립산림과학원은 산림자원의 보존 차원에서 산사태 조사연구를 수행하며 최근 계곡부를 중심으로 토석류 산사태에 대한 연구를 일부 수행하고 있다. 한국건설기술연구원의 경우 사회기반시설과 인접해 있는 절취사면의 안정성 평가 및 모니터링 시스템 구축에 관한 연구를 수행하였다.

산사태 재해 관련 연구는 1996년 과기부의 예산 지원으로 ‘지질재해 관측 및 방지기술 개발사업’이 착수되어 국가규모의 체계적인 연구가 수행되고 있다. 현재 한국지질자원연구원 주관으로 ‘산사태 예측 및 방지기술 개발’ 과제가 수행되고 있으며, 주요 연구성과로는 확률론적 기법을 적용한 산사태

표 3. 자연사면 및 절취사면 관련 연구에 대한 기관별 연구/업무분야(황영철, 2007)

기관 구분	연구분야 / 업무분야	비 고
한국지질자원연구원	산사태 및 절취사면 연구	산사태 발생예측 및 위험도산정(QRA) 기술, 토석류 산사태 모니터링 기술 개발, 도시사면 관리시스템 개발, 유연성의 원리를 이용한 피해저감공법 적용
한국건설기술연구원	일반국도 절취사면의 안정성 해석 및 대책 연구와 유지관리시스템 개발	일반국도의 보강대상 사면에 대한 투자우선순위를 결정하여 국도유지사무소에 정보제공
국립산림과학원	산사태 재해의 예지 및 예방과 산림훼손지의 자연친화적 복구·녹화기술 개발 관련 연구 수행	GIS를 이용한 산사태 위험지도 작성 일부 수행
국립방재연구소	산사태 등의 지반재해에 대해서 국가적 차원의 종합대책 수립을 위한 연구 수행	산불로 인한 사면붕괴조사, 산사태의 현장조사기법, 안정성 해석방법에 대한 기본적 연구 수행
건설교통부 국토관리청	일반국도의 유지보수사업계획 수립 총괄	한국건설기술연구원의 연구결과로부터 얻어진 위험사면에 대한 투자우선 순위에 따라 절취사면에 대한 보강실시
한국도로공사	고속도로 구간 절취사면의 구배결정 기준확립 및 유지·관리시스템 구축을 위한 연구	암석특성에 따른 절취사면 구배결정 기준 및 암절토부 녹화방법 연구
소방방재청	산사태 및 사면붕괴를 포함한 국내 자연재해 전반에 대한 대책, 복구 등을 총괄	‘경경사지 안전관리 및 재해저감에 관한 법률’ 제정

학술/기술기사

예측도 작성과 사면 불안정성 예측기술의 개발, 산사태 발생시 사태물질의 이동거리 및 확산범위 예측 기술, 재해위험지도 시범제작, 토석류 산사태 실시간 모니터링 센서 및 시스템 개발, 토석류 산사태 시뮬레이션 기술의 적용 등이 있다.

산사태 재해와 관련된 국내의 특허 동향을 살펴보면 대부분 사면안정 및 사면붕괴에 의한 피해방지를 목적으로 한 지반 관련 구조적 기술개발에 중점을 두고 있다는 것을 알 수 있다. 경사면의 보호 및 복구를 목적으로 경사면을 수직으로 시공하는 보강토공법, 토압을 지지하는 콘크리트 옹벽공법, 사면 강화를 위한 녹화공법, 경사면 고정을 위한 앵커공법, 낙석방지공법 등에서의 특허출원은 1998년 101건에서 2001년 510건으로 급증하였다(표 4 참고). 하지만 붕괴사면의 해석기술 및 사전예보기술의 특허출원은 2000년부터 이루어져 2002년까지 4건만 출원되었다(표 5 참고). 현재 한국건설기술연구원, 한국지질자원연구원 등에서 이 분야에 대한 연구를 수행 중이므로 향후 특허출원이 증가할 수 있지만 미국, 일본, 홍콩, 대만 등과 비교하여 국내의 기술력이 약 70% 수준이라는

표 4. 1998년에서 2002년 간 경사면보강공법의 특허출원 동향

구 분	1998	1999	2000	2001	2002	계
보 강 토 블 록	42	85	145	192	110	574
콘크리트 옹 벽	17	33	42	80	49	221
녹 화 식 생	15	31	56	69	49	220
앵 커 소 일 네 일	11	22	42	64	42	181
철 망 낙 석 방 지	10	14	35	46	31	136
돌 망 태 (개 비 온)	6	11	17	59	29	122
계	101	196	337	510	310	1454

표 5. 산사태 예보기술 관련 특허출원 동향

구 분	2000	2001	2002	계
경사면 해석기술	2	1	-	3
예 보 기 술	-	-	1	1
계	2	1	1	4

사실을 감안할 때 보다 집중적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

표 6. 국내 산사태 및 절토사면 관련 법률

법 률	주 요 내 용	제정기관
시설물의 안전관리에 관한 특별법	<ul style="list-style-type: none"> • 옹벽 높이 5.0 m 이상 · 길이 100 m 이상 • 절토사면 높이 50 m 이상 · 길이 200 m 이상을 2종 시설물로 규정 • 대부분의 사면이 관리대상에서 제외 • 05년 말 현재 전국 급경사지(17,452개소)의 2.6%(455개소) 수준에 불과 	국토해양부
국토의 계획 및 이용에 관한 법률	<ul style="list-style-type: none"> • 풍수해 · 산사태 · 지반붕괴 · 지진 그 밖에 재해예방에 장애가 된다고 판단되는 경우 • 법률에 따라 방재지구로 지정 • 도시계획조례로 정하는 건축물의 건축 제한 	국토해양부
산지관리법	<ul style="list-style-type: none"> • 산사태 등 재해발생이 우려되는 지역을 산지전용 제한지역으로 지정하여 보전토록 규정하고 있음 • 전국적으로 100개소 지정 · 관리 • 산기술에 취약이 형성되어 있는 경우 대책 미흡 	산림청
급경사지재해 예방에 관한 법률	<ul style="list-style-type: none"> • 자연사면/인공사면을 통합한 사면재해 저감을 위한 목적으로 제정 • 고속도로, 시북법의 2종 시설물을 제외한 나머지 급경사지 대상 • 지방자치 단체장이 해당 급경사지의 관리 주체 • 급경사지 재해예측지도, 계측시스템 구축 	소방방재청

국내 산사태 및 절토사면 관련 제도는 국토해양부, 산림청, 소방방재청에서 주관하고 있으며 법률에 관한 주요내용은 표 6에서 정리되었다. 미국 재난관리체계는 모든 시스템이 FEMA를 중심으로 운영되고 있으며 주정부는 FEMA의 방침을 받아 대응을 취하는 것을 원칙적으로 한다. 재난 발생 시 주정부의 책임 하에 대응이 이루어지지만 재난 재해의 상황이 연방정부가 개입하여야 할 경우에는 효율적 운영을 위해 FEMA가 미국 전역을 10개 광역구역(Section)으로 구분, 각 구역에 지역사무소(Regional Office)를 설치하여 지역의 요구를 수렴하고 지역 특성에 따라 차별화된 활동을 수행하고 있다. 반면, 국내에서는 재난 관련 업무가 중복 수행되는데 따른 문제점을 해소하기 위한 재난관리 전담기구로서 2004년 6월 1일 소방방재청이 설립되었지만 국가재난 관리 기구로 소방방재청 이외에 대통령 직속 NSC와 위기 관리팀, 총리실의 비상기획 위원회, 행자부의 안전정책관 등이 설치되어 있고, 13개 부처 72개 법령이 현재까지 존재하여 소방방재청의 조정, 총괄 기능을 기대할 수 없는 실정이다.

3.2 국외 동향

산사태 재해와 관련된 선진국의 주요 연구내용을 살펴보면 산사태 취약성 평가, 잠재위험지역 DB 구축, 상시 모니터링 시스템 구축, 조기경보 시스템의 개발 등 다양한 분야의 연구가 다분야의 협력체계 아래 진행 중에 있는 것을 알 수 있다. 특히 2006년 UNESCO 주도하에 국제 산사태 컨소시엄(International Consortium on Landslides, ICL; <http://www.iplhq.org>)이 구성되었으며, 국제적 연구공조를 위해서 IPL(International Program on Landslides) 프로젝트가 수행 중인 점은 시사하는 바가 크다.

미국의 경우 Public Law 106-113에 근거하여 USGS가 주관기관으로서 산사태 재해프로그램을

운영하고 있으며, 주요 연구내용으로는 산사태 진행 과정 및 발생 원인 연구, 산사태 발생 가능지역에 대한 재해도 작성 및 평가, 실시간 경보시스템 구축, 국가 산사태재해 저감전략 조정 등에 관한 연구 등을 수행하고 있다.

홍콩은 자치정부 내 토목공정처 주관 하에 산사태 방지대책 프로그램을 운영하고 있다. 1995년부터 10여 년간 24조원의 예산을 투자해 홍콩 내 54,000개 사면의 DB를 구축하고 보강 및 복구를 수행하였으며 2010년까지 5,500개 주요사면을 추가로 등록하여 관리하고 있다. 이 프로그램은 사면 붕괴에 따른 인명과 재산 피해 저감, 한정된 영역에서의 도시개발 극대화를 위한 지반 안정성 확보, 사면 안정성 평가 및 보강을 위한 방법을 표준화하는 것을 주목적으로 수행되고 있다.

일본은 교토대학 방재연구소, 일본지질조사소, 방재과학기술연구소를 중심으로 일본 내 산사태 분포를 파악하고, 이를 토대로, 강우 및 지진에 의해 유발되는 산사태 취약성 해석연구를 수행 중이다. 또한 자국 내의 산사태 뿐 아니라 UNESCO와 공동으로 IGC-425 프로그램을 수행하고 ICL을 주도하며 산사태에 대한 국제공동 연구를 수행 중이다.

산사태 재해가 빈번한 대만은 정부의 주도로 1983년부터 1997년까지 4년 간격으로 3단계에 걸쳐 재해저감 프로그램을 수행하였고, 1999년부터 2007년까지는 2단계에 걸친 재해저감 국가과학기술 프로그램을 실시하였다. 그리고 그 결과를 이용하여 대만 전역에서 발생하는 산사태, 지진 등의 재해를 저감하기 위한 체계적인 연구개발을 수행 중이다. 특히 산사태 재해 저감을 위해 전국을 285개 토석류 하천의 권역으로 구분하고 위험등급을 부여하여 관리하는 시스템을 국가재해저감과학기술센터와 수토보호국 주관으로 시행하고 있다.

이상에서 살펴본 선진국의 산사태 관련 주요 연구내용은 표 7에서 정리하였다.

표 7. 사면재해 선진국의 산사태관련 주요 연구내용

국가명	기관명	총기간	사업명 또는 주요내용
미국	미국지질 조사소 (USGS)	1990-현재	<ul style="list-style-type: none"> - 재해정보 네트워크 구축(DIN) 프로그램 <ul style="list-style-type: none"> • 지질재해 정보 네트워크 구축 • 지질재해 조기경보 체제 구축 - 산사태 재해(LHA)프로그램 <ul style="list-style-type: none"> • 산사태 재해 평가 연구 • 실시간 산사태 모니터링 연구 • 산사태 예측 기법 및 예측체제 확립 • 미국 전역에 산사태 재해 대응체제 구축 연구 - 산사태 피해저감공법 연구 <ul style="list-style-type: none"> • 실물모형실험을 통한 다양한 방호시스템 효능 검증 • 토석류 산사태 방지를 위한 최적의 시스템 개발 및 적용 • 토석류 위험평가기술의 현황파악 및 방호시스템 개발 (미국해양대기관리처(NOAA)와 공동수행)
캐나다	캐나다 지질조사소 (GSC)	1994-현재	<ul style="list-style-type: none"> - 지질재해 및 지지로환경(GHEG)프로그램 <ul style="list-style-type: none"> • 자연재해 종합 프로그램 • 주요산맥 지질재해 연구 • 캐나다 동부 산사태 연구 • 산사태 발생 예측 연구 • 영구동토재해연구
홍콩	홍콩자치정부 (CED/GEO)	1995-2010	<ul style="list-style-type: none"> - 산사태 방지대책(LPM) 프로그램 <ul style="list-style-type: none"> • 홍콩 전역 사면분포 현황 · 조사 • 산사태 위험등급도 작성 • 주요 사면에 대한 산사태 상시 감시 및 사후 관리 • 분기별 사면조사 보고서 작성 및 DB 구축
일본	방재과학 기술연구소 (NIED)	1963-현재	<ul style="list-style-type: none"> • 종합방재 관련연구 • 방재기반 과학기술연구 • 설해방재 관련연구 • 방재연구정보센터
	교토대 방재연구소 (DPRI)	1951-현재	<ul style="list-style-type: none"> • 종합방재연구 • 지반재해연구 • 수재해연구
호주	호주 지질조사소 (AGSO)	1997-현재	<ul style="list-style-type: none"> - 도시지역 자연재해 취약성평가 과제 (NGVUC) <ul style="list-style-type: none"> • 도시주변 산사태 위험도 평가 연구 • 호주 전역 산사태 DB 구축 연구
스위스	스위스 연방연구소 (WSL-SLF)	2005-현재	<ul style="list-style-type: none"> - 유연성 방호시스템의 수치해석 연구 <ul style="list-style-type: none"> • 유연성 방호시스템과 산사태의 상호작용 연구 • 토석류 방호시스템을 위한 수치해석 프로그램 개발

5. 맺음말

이 기사에서는 산사태 위험 예측기술의 개발 동향이 소개되었다. 국내에서도 많은 인명 및 재산 피

해를 야기하는 산사태에 대한 보다 과학적이고 선진화된 기술 개발이 요구되며 이에 대한 방재 및 수자원 분야 전문가의 관심이 필요하다고 생각된다. 산사태 위험에 대한 예측 및 대비는 현재 문제가 되

고 있는 기후변화 및 유역개발의 영향에서 독립적일 수 없다. 따라서 현재의 상황에 부합하는, 그리고 미래의 변화에 대비하는 수문 및 지질 관련 기술

개발과 유기적 협력연구 체계를 구축하여 다제학적 연구 방향 정립, 첨단 기술의 융·복합이 이루어질 때 보다 효율적으로 접근할 수 있을 것이다. ☞

참고문헌

1. 산림청, 산사태위험지 관리시스템 (<http://sansatai.foa.go.kr/webgis.do>)
2. 중앙하천관리위원회 (2010), 기후변화 대응 미래 수자원전략(안)
3. 한국지질자원연구원 (2009), 산사태 피해규모 정량화 및 최적 피해저감기술 개발
4. 황영철 (2007), 최근의 산사태 피해와 예방, 한국지반환경공학회지, 제8권, 제3호, 한국지반환경공학회, pp. 11-17.
5. Safaei, M., Omar, H., Huat, B.K. Yousof, Z.B.M. and Ghiasi, V. (2011) Deterministic Rainfall Induced Landslide Approaches, Advantage and Limitation, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 16, pp. 1619-1650.
6. Simoni, S., Zanotti, F., Bertoldi, G. and Rigon, R. (2008) Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOTop-FS, Hydrological Process, 22, pp. 532-545.
7. Wang, H., Liu, G., Xu, W. and Wang, G. (2005) GIS-based landslide hazard assessment: an overview, Progress in Physical Geography, 29(4) pp. 548-567.