

표 1. 붕괴 절토사면 현황조사 지역 및 현황

조사 지역		붕괴지 현황
강원도	강릉시, 삼척시, 정선군, 양양군	65 개소
경상남도	합천군, 거창군, 고성군, 마산시, 양산시, 울주군, 창녕군, 산청군	75 개소
경상북도	경주시, 포항시, 영덕군, 칠곡군, 군위군	56 개소
계		196 개소

현황조사는 사면의 붕괴 특성을 효과적으로 분석하기 위하여 붕괴형태, 사면의 구성물질, 사면의 유형, 지질특성, 사면의 규모 및 형상 등을 위주로 조사하였다. 이때 절토사면의 붕괴형태는 slide(원호파괴, 표층파괴), 평면/췌기파괴, 낙석, 표층유실(침식), 토석류 등으로 나누었으며, 사면의 유형은 구성물질에 따라 흙, 혼합, 암반사면으로, 지반조건 및 특성에 따라 토사사면, 연약암반사면, 파쇄암반사면, 절리암반사면으로 구분하였다. 표 2.는 본 연구에서 적용한 현황조사 항목을 나타낸 것이다.

표 2. 붕괴 절토사면 현황조사 항목

구 분	내 용
일반현황	위치, 날짜, 날씨, 도로현황
사면형상 및 지형	구성물질, 사면유형, 사면 규모(높이, 길이), 사면 경사, 종단 형상, 횡단 형상, 주변지형 특성
상부자연사면 현황	상부자연사면 경사, 토층심도, 인공구조물 현황
지질특성	암종, 풍화정도, 불연속면 분포특성, 암반형태
수리조건	지하수 누수상태 및 위치, 사면 내 집수지형
붕괴현황	붕괴형태, 붕괴규모(폭, 길이, 깊이, 높이)
기 타	추가붕괴 위험도, 시공현황, 식생상태

3. 사면붕괴 유형 및 특성

3.1 붕괴 절토사면의 유형 분석

사면은 그 지반 구성물질과 특성에 따라 작용하는 서로 다른 주요 파괴요인 및 파괴유형을 가진다. 따라서 본 연구에서는 보다 객관적이고 상세한 사면붕괴 특성을 분석하기 위하여 사면을 구성물질에 따라 토사사면, 혼합사면, 암사면으로 구분하였다. 또한 지반조건과 특성을 보다 세밀하게 분석하여 사면을 토사사면과 암반사면으로 크게 구분하고, 암반사면은 다시 절리암반사면, 파쇄암반사면, 연약암반사면으로 구분하였다(윤운상 외, 2002).

사면의 구성물질에 따른 분류에서 토사사면은 지반의 40% 이상이 흙으로 구성되어 있는 사면을 의미하며, 혼합사면은 지반이 흙과 암반이 함께 구성되어 있으며 흙의 차지하는 비율이 20~40% 내외인 사면을 말한다. 암사면은 지반에서 암반의 구성비율이 80% 이상인 사면으로서 국내에서 가장 많이 분포하는 사면 유형이다.

지반조건 및 특성에 따른 상세분류에서 토사사면은 사면 높이에 대한 토층 두께의 비인 토층심도율

(SR)이 0.4 이상인 사면으로 정의되며, 토층심도율이 0.4보다 작은 사면은 암반사면으로 분류된다. 이때 암반사면은 지반(암반) 강도가 10MPa 이하의 연약 암반일 경우 이를 연약암반사면으로 구분하고, 10MPa 이상일 경우 평균 절리 간격과 사면 높이의 비인 블록크기비(BR)가 0.01 이하인 사면을 파쇄암반사면으로, 0.01보다 큰 사면을 절리암반사면으로 분류하였다.

본 연구에서 분석된 집중강시 붕괴되는 절토사면의 유형분포는 그림 1과 그림 2와 같다. 분석결과를 살펴보면 먼저 지반구성물질에 따른 사면 유형에서는 혼합사면이(77개소) 39%로 가장 많이 붕괴되었으며 토사사면도(64개소) 33%의 높은 비율을 보였다. 반면 절토사면 중 가장 많은 분포를 보이는 암사면은(34개소) 17%로 토사사면이나 토사면에 비해 집중강우시 붕괴위험이 적은 것으로 나타났다. 이외에도 계곡부(21개소)에서 발생된 붕괴도 11%를 차지하였다.

지반조건 및 특성에 따른 사면유형에서는 토사사면이 33%로 가장 많이 붕괴되었으며, 파쇄암반사면이 21% 연약암반사면이 20% 절리암반사면이 15%로 분석되었다.

붕괴절토사면의 유형 분석결과를 종합해 볼 때 집중강우 발생시에는 암반사면 보다 토사사면이나 혼합사면이 더욱 불안정해짐을 알 수 있으며, 강우에 의한 사면불안정 요인이 암반보다는 토사에서 더 크게 작용함을 알 수 있다. 그러나 그림 2의 지반조건 및 특성에 의한 사면유형에 따른 붕괴 현황분석 결과를 보면 암반사면의 경우 연약암반사면이나 파쇄암반사면에서도 강우에 의한 붕괴가 비교적 많이 나타나고 있음 알 수 있다.

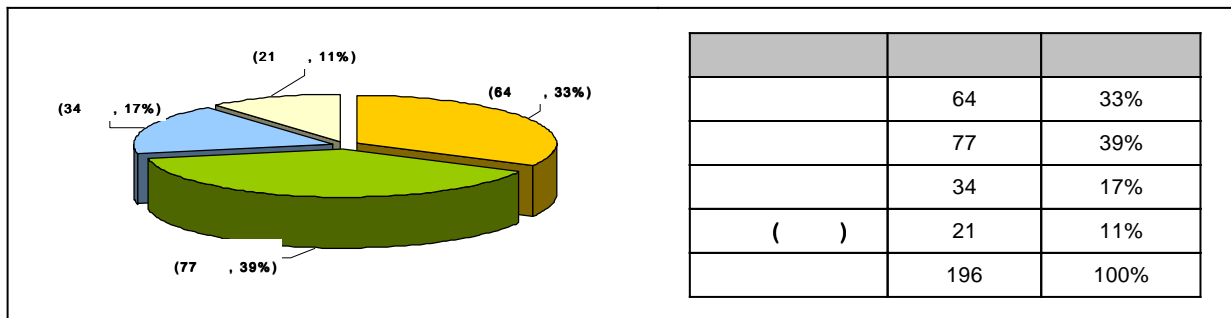


그림 1. 지반구성물질에 따른 현황조사 절토사면의 유형 분석결과

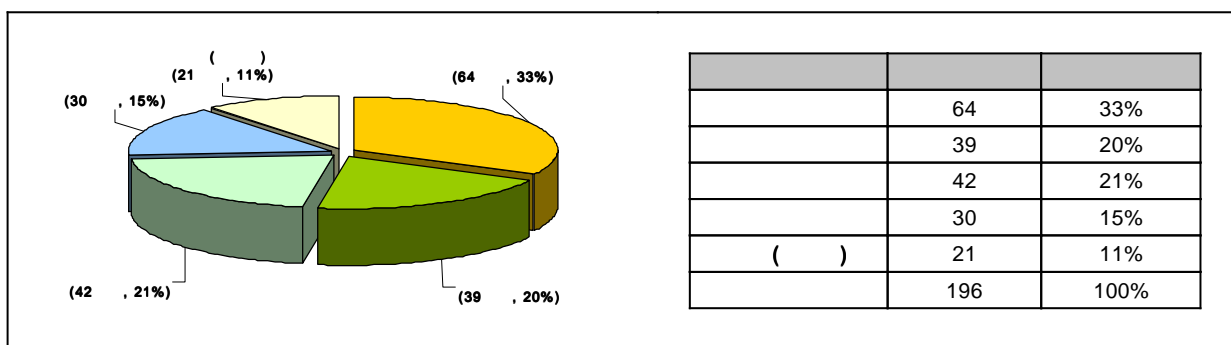


그림 2. 지반조건 및 특성에 따른 현황조사 절토사면의 유형 분석결과

3.2 붕괴유형 분석

사면붕괴의 특성을 분석하는데 있어서 붕괴유형(형태)을 분류하는 것은 매우 유용한 방법이다. 사면 붕괴는 지반의 특성, 사면의 기하학적 형상, 수리적 조건 등 여러 가지 요인이 복합되어 발생되므로 붕괴발생을 사전에 예측한다는 것은 매우 어렵다. 그러나 붕괴발생 후 그 형태를 통해 붕괴원인을 추정하는 것은 상대적으로 용이하므로 본 연구에서는 집중강시 발생하는 절토사면 붕괴의 특성 파악하기 위하여 붕괴절토사면에서 관찰되는 사면붕괴의 유형을 분석하였다.

절토사면의 붕괴는 크게 slide(원호파괴, 표층파괴)와 같은 연속체적 붕괴와 평면/썰기파괴와 같은 단열구조에 의한 붕괴로 나눌 수 있다. 연속체적 붕괴는 주로 지반이 비교적 연약한 토층 지반에서 발생되며, 단열구조에 의한 붕괴는 절리나 단층과 같은 단열구조가 발달된 암반사면에 주로 발생된다. 본 연구에서는 현황조사시 절토사면의 붕괴유형을 slide, 표층유실, 평면/썰기파괴, 낙석, 토석류로 나누어 조사하였으며 각 붕괴유형의 정의는 다음과 같다.

- slide : 지반이 매우 약하거나 절리의 발달이 아주 심한 파쇄암반에서 원형 혹은 비원형의 경로를 따라 발생하는 연속체적 활동파괴 (원호파괴, 표층파괴 등)
- 표층유실 : 표층이 우수나 기타 풍화현상에 의해 침식, 박락되는 현상
- 평면/썰기파괴 : 사면경사방향과 동일한 방향을 가지고 있는 불연속면이나 두개의 불연속면 조합에 의해 발생하는 암반붕괴
- 낙석 : 전단력이 작용하지 않은 표면을 따라 흙 또는 암석이 이탈되는 현상
- 토석류 : 사면내부나 계곡부에서 공간적으로 연속적인 운동에 의해 발생하는 유동 형태의 붕괴

집중강우시 붕괴된 절토사면의 붕괴유형을 분석한 결과 slide 형태의 붕괴가 68%로 가장 많이 발생하였으며, 우수에 의한 침식현상인 표층유실이 12%, 계곡부에서의 토석류 발생이 12%로 그 다음을 이었다(그림 3). 반면 암반사면에서 주로 발생하는 평면파괴, 썰기파괴 등은 5%로 매우 낮은 발생분포를 보였다. 이는 붕괴사면중 토사 및 혼합사면이 차지하는 비중이 높은 것과 유사한 결과이며 강우에 의한 붕괴는 암반붕괴 보다는 토사붕괴가 많음을 알 수 있다.

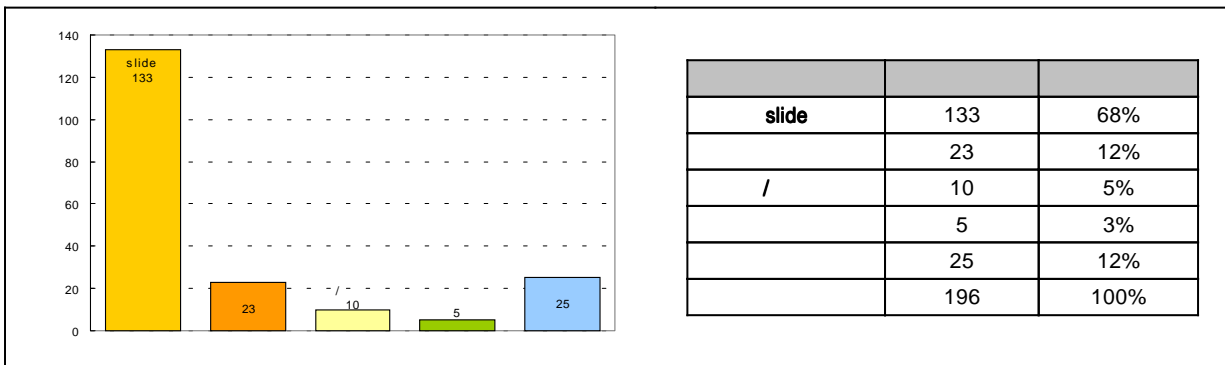
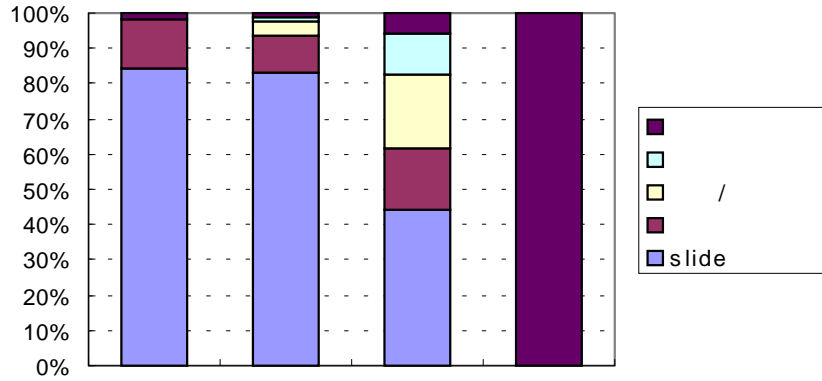
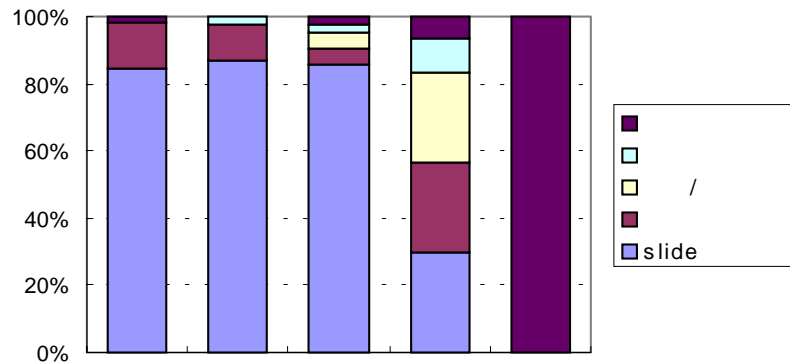


그림 3. 집중강우시 절토사면의 붕괴유형

본 연구에서는 집중강우에 의한 사면붕괴 특성을 보다 세부적으로 분석하기 위하여 각 절토사면 유형별로 붕괴유형을 분석하였다. 지반구성물질에 따른 사면유형에서의 붕괴형태를 분석한 결과 토사사면과 혼합사면에서는 slide 형태의 붕괴가 80% 이상의 비율로 가장이 나타났으며, 암사면에서도 토사사면이나 혼합사면에 비해 낮은 비율이지만 slide 형태의 붕괴가 40% 이상을 차지하여 집중강우시에는 slide 형태의 붕괴가 가장 많이 발생함을 알 수 있다. 또한 기타로 분류된 계곡부에서는 토석류만이 발생한 것을 알 수 있다(그림 4). 또한 지반조건 및 특성에 따른 사면유형에서의 붕괴형태를 분석한 결과 토사사면과 연약암반사면, 파쇄암반사면에서는 slide 형태의 붕괴가 80% 이상의 비율로 가장이 발생하였다(그림 5). 반면 절리암반사면의 경우 slide, 표층유실, 평면/썰기파괴가 각각 13% 내외로 비슷한 발생빈도를 보였다. 분석 결과를 통해 볼 때 집중강우시에는 암반사면이라 하더라도 지반이 매우 연약하거나 파쇄가 심할 경우 토사붕괴 같은 형태의 붕괴가 발생함을 알 수 있다. 반면 절리빈도가 낮고 지반의 강도가 비교적 높은 절리암반사면일 경우 집중강우시 다른 유형의 사면에 비해 비교적 붕괴확률이 낮으며 붕괴유형도 평면/썰기파괴, 낙석 등 단열구조에 의한 붕괴가 주로 발생함을 알 수 있다. 그러나 그림 5에서 볼 수 있듯이 절리암반사면이라 할지라도 사면 상부의 얇은 표토층이나 범면상에 시공되어 있는 식생공 등에서 slide, 표층유실 등의 붕괴도 많이 발생함을 알 수 있다.



4.



5.

3.3 붕괴규모 분석

IAEG 산사태 위원회(1990)는 사면의 붕괴규모에 대한 측정 기준을 정의하였다. 이에 의하면 파괴의 규모는 파괴면(surface of rupture)의 폭(Wr), 길이(Lr), 깊이(Dr)로 정의할 수 있다(그림 6). 본 연구에서는 하나의 사면에 발생한 n개의 붕괴에 대해 붕괴면의 폭(Wr), 길이(Lr), 깊이(Dr)를 곱한 것의 합으로 붕괴규모지수(failure dimension factor, Fd)를 아래 식(1)과 같이 정의하여 사용하였다.

$$\text{Failure dimension factor (Fd)} = \sum_{i=1}^n (Wr_i \cdot Lr_i \cdot Dr_i) \quad (1)$$

현황조사 자료를 분석한 결과 집중강우시 붕괴된 절토사면의 평균 규모는 길이 78.8m, 높이 17.4m, 경사 44.6°이고 표 3에서 볼 수 있듯이 토사사면의 경우 암반사면에 비해 규모가 다소 작으며 사면의 경사는 약 40°내외로 비교적 완만한 편이다. 또한 파쇄암반면과 연약암반사면의 경우도 사면의 경사가 45°내외이거나 그보다 작아 비교적 완만한 경사를 갖고 있다.

그러나 붕괴 규모의 경우 토사사면의 붕괴규모지수가 405정도로 전체 평균 366.5보다 높았으며 암반사면에 비해서는 3~5배정도 큰 것으로 분석되었다. 이같은 결과를 통해 볼 때 집중강우시 토사사면이 암반사면에 비해 붕괴발생 빈도뿐만 아니라 붕괴규모도 큼을 알 수 있다.

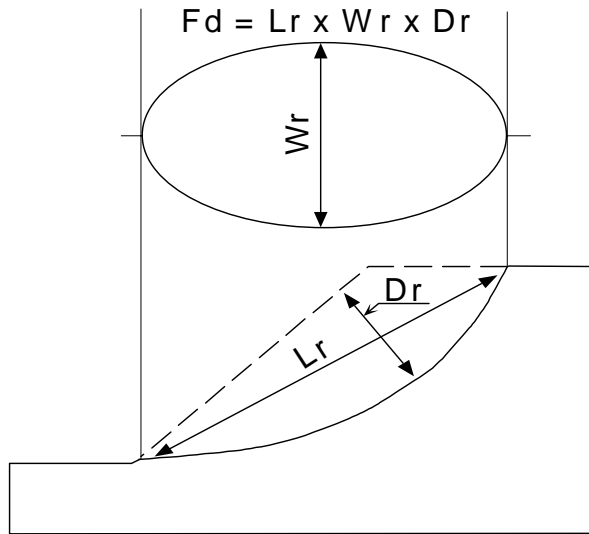


그림 6. 붕괴규모지수(Fd)의 정의(IAEG, 1990)
Lr : 붕괴 길이, Wr : 붕괴 폭, Dr : 붕괴 깊이

3.

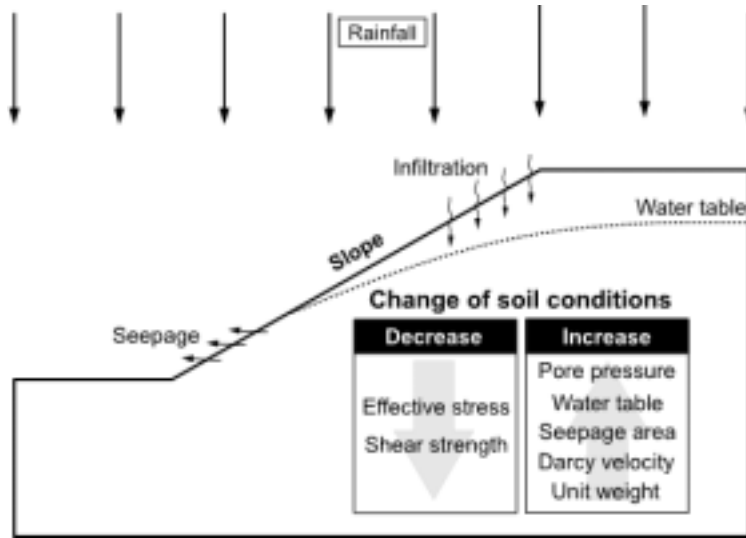
절토사면의 유형		사면의 규모			붕괴 규모			붕괴규모 지수(Fd)
		길이(m)	높이(m)	경사(°)	폭(m)	길이(m)	깊이(m)	
전 체		78.8	17.4	44.6	9.8	18.7	2.0	366.5
지반구성물질에 따른 사면유형	토사사면	58.8	14.8	40.7	9.0	18.0	2.5	405.0
	혼합사면	73.8	19.2	47.8	10.4	16.5	1.8	308.9
	암사면	104.2	17.4	67.6	5.2	11.8	1.3	79.8
지반조건 및 특성에 따른 사면유형	토사사면	58.8	14.8	40.7	9.0	18.0	2.5	405.0
	연약암반사면	95	17.5	43.5	10.2	15.0	2.0	306.0
	과쇄암반사면	103.3	15.0	45.5	7.5	15.0	1.3	146.3
	절리암반사면	101.1	18.6	59	7.2	14.5	1.2	125.3

4. 집중강우시 발생하는 절토사면 붕괴 요인 고찰

집중강우에 의한 유수의 침투량 증가는 사면 내의 간극수압의 증가와 지하수면 상승, 지반의 단위중량 증가를 유발시키고, 이는 유효응력과 지반의 전단강도를 감소시키게 된다. 이뿐만 아니라 지하수의 유출(seepage)면적이 증대되고 지반내의 지하수 유동속도의 증가를 초래한다. 특히, 전단강도의 감소는 사면의 안정성에 가장 큰 영향을 미치며, 극한의 유수침투는 전단강도를 현저히 감소시킬 뿐만 아니라 지반의 상태를 액상화시키는 것으로 판단된다. 그림 7은 강우에 의한 지반상태의 변화를 모식화한 것이다(김준모 2002).

또한 계곡부에서의 토석류나 2002년 태풍 루사에 의한 강릉지역 산사태의 경우 산불과 같은 산림 훼손에 따라 수목이 제공하는 사면안정 기여 효과(pile 효과, net 효과)가 상실되었기 때문으로 판단된다.

또한 현장조사를 통해 토석류가 주로 암반사면 분포지역에 발생되는 것으로 조사되었는데 이러한 점을 통해 볼 때 암반층위에 얇은 토층이 놓여져 있을 경우 암반층을 따른 유동성 파괴도 토석류 발생의 원인으로 작용된 것으로 판단된다.



7.

5. 결론 및 제언

집중강우에 의해 발생하는 절토사면의 붕괴 특성을 파악하기 위해 본 연구에서는 강원도, 경상남북도를 중심으로 집중강우로 인해 붕괴된 196개 절토사면에 대한 현황조사를 실시하였고 사면의 유형과 붕괴유형을 체계적으로 분류하여 조사자료를 통계학적으로 분석하였다. 붕괴된 사면의 유형 분석 결과 붕괴사면의 72%가 암반에 비해 흙의 구성비율이 높은 토사사면이나 혼합사면이었으며, 암반사면의 경우에는 연약암반사면과 과쇄암반사면에서 주로 붕괴가 발생된 것으로 분석되었다. 이외에도 계곡부에서의 토석류 발생도 11%를 차지하였다. 붕괴절토사면의 유형 분석결과를 종합해 볼 때 집중강우 발생시에는 암반사면 보다 토사사면이나 혼합사면이 더욱 불안정해짐을 알 수 있다. 붕괴유형(형태)에 대한 분석 결과 slide 형태의 붕괴가 68%로 가장 많이 발생하였으며, 암반사면에서 주로 발생하는 평면파괴, 썩기파괴 등은 5%로 매우 낮은 발생분포를 보였다. 이는 붕괴사면 중 토사 및 혼합사면이 차지하는 비중이 높은 것과 유사한 결과이며 강우에 의한 붕괴는 암반붕괴 보다는 토사붕괴가 많음을 알 수 있다. 붕괴된 절토사면의 평균 규모는 길이 78.8m, 높이 17.4m, 경사 44.6°이고 토사사면 규모가 암반사면에 비해 다소 작으며 사면의 경사는 약 40°내외로 비교적 완만한 편이다. 붕괴규모의 경우 토사사면의 붕괴규모지수가 405정도로 전체 평균 366.5보다 높았으며 암반사면에 비해서는 3~5배정도 큰 것으로 분석되었다. 이 같은 결과를 통해 볼 때 집중강우시 토사사면이 암반사면에 비해 붕괴발생 빈도뿐만 아니라 붕괴규모도 큼을 알 수 있다.

절토사면의 붕괴는 응력의 불균형을 균형적으로 복원하려는 자연적인 현상으로 그 메카니즘과 요인은 매우 다양하고 복잡적이다. 따라서 사면붕괴를 인간의 힘으로 완전히 제어한다는 것은 불가능하다고 해도 과언은 아닐 것이다. 결국 사면붕괴를 최소화하고 이로 인한 피해를 줄이려는 노력이 앞으로도 지속적으로 수행되어야 할 것이다. 특히, 근래에 자주 발생되고 있는 집중강우는 사면붕괴의 가장 큰 원인으로 대두되고 있으며, 그 피해도 매년 증가하고 있는 추세이다. 집중강우시의 사면붕괴는 예년의 사면붕괴와 상이한 양상을 보이므로 이에 대한 방재대책이나 사면보강방안도 다른 차원에서 접근해야 하겠다. 본 연구를 통해 볼 때 집중강우에 대비한 사면안정화 대책으로는 언론에서 제기하고 나온 사면의 경사도 완화와 같은 대책보다는 효과적인 표면보호시설 및 배수시설을 통한 slide 및 표층파괴, 유

실의 예방과 토석류 발생위험이 있는 계곡부에 대한 사방시설의 확충이 필요할 것으로 판단된다.

또한 현재까지 국내에서는 사면재해에 대비한 정책적인 뒷받침이나 연구가 아직 미흡한 실정이고 사면재해 관련법은 사방사업법과 자연재해대책법으로 사면 재해를 포함한 모든 자연재해에 대한 포괄적인 내용을 담고 있어 사면재해와 관련된 구체적인 내용이 미흡한 실정이다. 따라서 매년 반복되는 사면붕괴에 의한 국민의 피해를 경감시키기 위해서는 보다 구체적이고 효율적인 사면재해 방지 시스템 및 법규를 정립할 필요가 있으며, 위험 절토사면이나 집중강우에 취약한 토사사면에 대한 정기적인 점검 및 안정화가 이루어져야 하겠다.

참고문헌

1. 국립방재연구소(2002), “사면붕괴의 유형별 원인과 저감대책 연구”, pp.1~5
2. 윤운상, 정의진(2002), “거동 특성에 따른 사면 파괴 지수 시스템 : SFi-system”, 한국지반공학회논문집 제18권 2호, pp.23~37
3. 김준모, “사면 내의 지하수 유동과 사면의 안정성에 대한 강수 영향의 완전 연동된 수리지질학적 수치 해석”, 한국지반공학회논문집 제18권 6호, pp.5~16
4. IAEG Commission on Landslides(1990), “Suggested Nomenclature for Landslides”, Bull. Int. Asso. Eng. Geol., No.41, pp.13~16.