

우리나라 자연사면 산사태지역의 강우, 지질 및 산사태 기하형상 고찰

김원영 · 채병곤*

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Characteristics of Rainfall, Geology and Failure Geometry of the Landslide Areas on Natural Terrains, Korea

Won-Young Kim and Byung-Gon Chae*

Geologic Environment Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

1990년 이후 우리나라의 자연사면에서 발생한 10개 대규모 산사태지역의 강우조건, 지질특성 및 기하형상에 대한 기존 자료를 재조명하였다. 이들 중 화강암 지역이 5곳, 화강암과 변성암류가 같이 분포하는 지역이 4곳이며, 나머지 1곳은 반려암이 분포한다. 총 3,435개의 산사태 중 1,992개는 화강암 분포지에서, 824개는 변성암 지역에서, 15개는 반려암에서, 그리고 나머지 604개의 산사태는 2개 지역에 부분적으로 분포하는 화산암, 퇴적암 등에서 발생하였다. 연구지역의 산사태는 강우기간 보다는 강우강도에 의하여 좌우되었다. 산사태지역의 강우자료를 Caine과 Olivier의 경험식에 적용하면 모두 Caine의 기준치(threshold)와 Olivier의 산사태반응지수(coefficient of final response)를 초과하여, 모든 지역의 강우조건이 산사태 발생조건을 충족하고 있다. 산사태의 형태와 발생 메카니즘은 기반암의 풍화특성에 따라 차이를 보이고 있다. 화강암 지역은 노두가 거의 없고 풍화심도가 깊게 분포하여 소규모의 슬라이드가 우세하다. 반면 변성암 지역은 지형이 다소 험준하고 노두가 능선과 산록에 발달하여 풍화노두가 토층과 함께 파괴, 유동하는 비교적 큰 규모의 토석류가 우세하다.

주요어 : 산사태, 강우강도, 강우기간, 기반암, 풍화특성, 기하형상

Large landslides occurred since 1990 on natural terrain, Korea were reviewed with the existing data to characterize them in terms of the condition of rainfall, geology and geometry. Ten landslide areas over the nationwide are selected for this study. Among them, five areas consist of granite basement, four areas of granite and metamorphic rocks and the remaining an area of gabbro. The basement lithology on which landslides most dominantly occurred is granite, on which 58% of landslides among the total 3,435 are taken place, the next dominant one is metamorphic rocks where 24% of landslides are occurred, and the remaining 18% are on the areas of volcanic and sedimentary rocks which are partly distributed in some areas. The landslide occurrences may depend on the rainfall intensities rather than durations. We applied the theories of Caine's threshold and Olivier's final response coefficient to the Korean cases. The rainfall conditions at the landslide areas were all satisfied enough with the landslide triggering conditions suggested by Caine and Olivier. The triggering mechanism and type of landslides may largely depend on the weathering and geomorphic characteristics of basement lithology. The granite areas are characterized by being relatively shallow but consistent weathering profiles and almost no outcrop, and therefore, shallow translational slides are dominant. Whereas metamorphic areas are characterized by consisting of steep slope, weathered outcrops on ridges and partly on flanks and irregular weathering profiles, and relatively large debris flows are dominant.

Key words : landslide, rainfall intensity, rainfall duration, basement, weathering, geometry

*Corresponding author: bgchae@kigam.re.kr

서 언

기상이변과 과도한 도시화로 인하여 1990년대부터 자연사면에서의 산사태가 급격히 증가하였다. 1991년부터 2000년까지 절개지를 제외한 자연사면의 산사태로 발생한 인명손실만 255명에 달하는데, 이는 같은 기간 절개지 붕괴에 의한 인명손실 23인에 비하여 10배가 넘는 숫자이다(박덕근, 2006). 1991년 7월 경기 남부의 용인-안성 지역에서는 2일간의 폭우로 2,600여개의 산사태가 발생하여 68명의 인명이 희생되었고 그 후 1996년과 1998년에 발생한 산사태로 인해 연천, 동두천, 의정부, 장흥 등 경기북부의 거의 전 지역이 피해를 보았다. 특히 1998년에는 산사태로만 111명의 인명피해가 발생하였다. 이와 같은 산사태는 모두 1-2일 간의 집중강우에 의해 발생하고 있음이 특징이다(김원영 외, 2000; 김원영 외, 2004; 박용원 외, 1993; 박덕근, 2006).

강우가 산사태의 직접원인임에도 불구하고 산사태를 발생시키는 절대 강우량을 산정하기는 매우 어렵다. 강렬한 집중강우에 의해서 발생한 1996년 경기북부의 산사태의 경우에서도 1 km² 당 평균 3.4개의 산사태만이 발생하고 있다(김원영 외, 2000). 즉, 산사태에 취약한 지역일지라도 실제 산사태에 의한 파괴면적은 전체면적의 0.1%에 불과하다. 이와 같은 사실은 강우가 산사태를 발생시키는 필요적 원인을 제공하지만, 강우의 영향권에 있는 모든 지역에 산사태가 발생하는 것은 아니다. 즉, 강우 외적 요인들도 산사태 발생에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

강우와 산사태 발생 관계에 관한 Caine(1980)의 논문은 현장의 경험을 통하여 강우강도와 누적강우 간의 관련성을 수식으로 제시하고 일정 기준(threshold)을 초과할 경우 산사태가 발생한다고 보고하였다. Caine의 이론은 많은 연구자들이 인용하였고 이후 이에 관한 추가 연구를 통하여 수정, 보완되어 왔다(Innes et al, 1983; Crosta and Frattini, 2001; Cannon and Gartner, 2005). 우리나라에서도 1990년 이후 강우와 산사태발생 간의 연관성에 관한 연구들이 여러 학자들에 의하여 보고되었다(홍원표 외, 1990; 김원영 외, 1998; 김경수 외, 2000; 한중근, 2001; 김경수 외, 2006).

자연사면 산사태에 관한 연구가 우리나라에서 활발히 진행되기 시작한 것은 1990년대 이후였다. 1991년의 경기도 남부지역에서 대규모 산사태가 발생한 이후 자연사면의 위험성이 절취사면보다 더 심각하다는 사실이 인식되었기 때문이었다. 1990년대 중반부터 10여년 이상에 이르는

기간에 발생한 우리나라 자연사면에서의 산사태 발생현황과 발생 메카니즘 및 발생 예측에 관한 연구는 한국 지질자원연구원에서 활발히 진행하였다(김원영 외, 2000; 김원영 외, 2004; 김원영 외, 2006; 채병곤 외, 2008). 이 기관에서는 1990년대 초반부터 지난 20여 년간 발생한 우리나라의 대규모 산사태에 관한 강우, 지질, 지형, 토질, 산사태 기하형상, 예측자료 등을 보고서에 수록하였고, 경기도 동두천, 의정부, 연천군, 강원도 철원군, 경상북도 상주, 포항, 강원도 강릉, 주문진, 속초와 경상남도 마천, 거창 등의 대규모 산사태지역이 포함되어 있다. 국립산림과학원도 우리나라의 대표적 산사태 연구기관으로서, 특히 최근에 대규모로 발생한 강릉, 평창 등의 자연사면 산사태에 관한 특성 및 예측연구를 활발히 진행하고 있다(서홍석과 한성길, 2003; 김기홍 외, 2008; 우충식 외, 2008; 마호섭 외, 2008).

본 논문에서는 여러 학자들에 의해서 보고된 산사태 자료들을 이용하여 우리나라에서 1990년 이후 자연사면에서 발생한 대규모 산사태들의 발생조건과 형태상의 특성을 조명하고자 하였다. 여기에는 강우와 산사태, 지질과 산사태의 연관성, 그리고 산사태 기하형상을 특징짓는 조건 등이 포함된다. 논문의 대상지역은 경기도의 용인-안성, 연천-철원, 장흥, 경상북도 상주, 강원도 강릉, 주문진, 속초, 경상남도 거창, 마천 그리고 전라북도 무주-장수 등 10개 지역이다. 이들 지역은 1991년부터 2005년까지 우리나라의 자연사면에서 대규모로 발생한 산사태 지역을 거의 모두 포함하고 있다.

강우와 지질은 산사태 발생 메카니즘의 직접 요인이다. 강우는 산사태의 직접원인 제공자이며, 지질은 그 풍화산물이 사태물질이므로 산사태발생과 연관성이 깊다. 산사태의 기하형상은 산사태의 발생인자에 관한 정보를 제공한다. 그러므로 기존에 발생한 산사태 정보는 미래에 있을지도 모를 산사태를 예측하는데 가장 필요하다. 따라서 이 논문에서 다루고자 하는 강우, 지질, 산사태 기하형상의 해석은 우리나라 자연사면의 산사태를 이해하고, 더 나아가 산사태 방재목적의 재해예측을 위한 중요 역할을 할 수 있을 것으로 생각한다.

지역별 산사태현황

용인-안성

1991년 7월 20일과 21일 양일간에 경기도 안성군과 용인군에 내린 집중호우로 많은 산사태가 발생하였다. 경기도 치산사업소, 용인군청과 안성군청에서 조사한 자료에 의

하면 양일간 내린 최대 강우량은 229 mm 이었으며, 이로 인하여 용인과 안성에서 발생한 산사태는 2,600여개에 이른다고 보고하였다(기상청, 1991; 박용원 외, 1993). 이 지역의 산사태는 선행강우량보다는 당일 내린 강우강도에 의하여 유발되었으며, 특히 일 강우량이 114 mm 이상이거나 최대 시우량 40 mm 이상인 지역 및 2일간 누적강우가 200 mm 이상인 지역에서 산사태가 발생한 것으로 보고되었다(박용원 외, 1993).

산사태가 발생한 면적은 약 350 km² 에 이른다. 이곳은 흑운모편마암, 석영편암, 화강암 등 3종의 암석이 분포하는데 3종의 암석이 비슷한 분포 면적을 가지고 있다. 이 지역은 낮은 구릉지를 형성하고 있고 사면이 짧게 형성되어 있는 지형적 특징으로 인하여 산사태들은 비교적 소규모이다. 풍화심도도 0.5-1 m 내외의 심도를 보이고 있고 붕적층의 발달이 미약하여 사태물질의 구성비가 암편보다는 모래질이 우세하다.

철원-연천

1996년 7월 26일과 27일 경기도 북부에 내린 집중호우로 인하여 경기도 연천군과 강원도 철원군 일대의 약 1,400 km² 면적에서 916개의 산사태가 발생하였다. 산사태가 발생한 7월 26-27일 양일간의 강우량은 예년의 7월 한 달간 평균 강우량인 456 mm를 초과하는 493 mm를 기록하였고, 27일에는 6시간 동안 142 mm의 강우량을 보여 당일의 일 강우량인 268 mm의 53%를 차지하고 있다. 또한 시간당 최대 강우량은 45 mm로서 이는 최대 일 강우량의 17%에 해당한다. 그러므로 이 지역의 산사태가 27일 대부분 발생한 것은 단시간 동안의 집중된 강우에 기인되었을 것으로 보인다.

파괴물질은 거의 기반암 상부의 미고결 토층으로 붕적물질(colluvium), 풍화 잔류토(residual soil) 등이 혼재한다. 분석에 이용한 66개 산사태 중 붕적층과 잔류토양이 섞여서 복합적으로 진행된 경우가 전체의 64%인 42개로 가장 우세하며, 잔류토양이 주 구성물질인 산사태가 26%인 17개소이다.

장흥

이 지역의 행정구역은 경기도 의정부시에 속하며 의정부 시내로부터 서측에 위치한다. 이 지역에는 1998년 8월 4일부터 7일까지 4일에 걸쳐 588 mm에 달하는 강우량을 기록하고 있다. 산사태가 집중적으로 발생한 날은 8월 6일로서 이날 하루에만 405 mm의 폭우가 내려 총 511개의 산사태가 발생하였다.

산사태가 발생한 지역은 의정부시를 중심으로 남북으로 분포되어 있는 화강암지역의 서측이며, 호상편마암과 반상변정편마암이 분포하는 지역이다. 이들 편마암들은 주변 화강암이 분포하는 지역에 비하여 비교적 가파른 험준한 지형을 보이고 있으며, 산릉을 따라 노두의 발달상태가 양호한 편이고 산사면을 따라서도 곳곳에 노두가 있으나 규모가 작고 단열의 발달이 심한 블록형태를 띠고 있다. 대부분 노두가 발달하는 지역에서는 산사태가 발생하지 않지만 이곳은 특징적으로 분포하는 블록 형태의 풍화노두가 파괴되어 하루로 유동하는 산사태들이 많이 발생하였다.

상주

1998년 8월 2회에 걸쳐 총 약 500 mm의 집중호우가 상주와 보은군 지역에 내렸다. 8월 11일과 12일에 총 360 mm, 8월 15일에는 총 129 mm의 집중강우로 인하여 보은-상주 간 지역의 약 1,000개소에서 산사태가 발생하였다. 이 논문에서 언급한 산사태는 그중 발생빈도가 밀집한 지역인 상주시 화서면, 화남면, 외서면 및 외남면 등 4개면에 걸친 지역에서 발생한 500여 개의 산사태에 관한 자료이다.

이 지역은 주로 화강암과 석영반암으로 구성되어 있다. 화강암은 대체로 고른 풍화를 받고 저지대에 분포하고 있고, 신선한 암반 노두가 넓게 발달하는 석영반암은 조성광물이 풍화에 강한 관계로 암반으로 구성된 고지대를 형성하고 있어 산사태는 발생하지 않았다. 이 지역 산사태는 저지대를 형성하는 화강암 지역에서만 발생하였다.

강릉

2002년 8월 31일-9월1일 양일간에 걸쳐 한반도를 강타한 태풍 '루사'의 영향으로 강릉지역에 최대 900 mm의 폭우가 내려 강릉시 사천면과 양양읍 일대에 수백개의 산사태를 발생시켰다. 특히 산사태가 집중적으로 발생한 지역은 2000년 산불이 발생한 지역과 일치한다. 행정구역상으로는 강릉시 사천면 노동리와 석교리에서 가장 많이 발생하였는데, 이 지역에서만 525개의 산사태가 확인된다.

이 지역은 전역이 화강암으로 중립 내지 세립질의 결정질 암석이다. 이 화강암은 풍화심도는 앞이나 0.5-1 m 내외의 고른 풍화대를 형성하고 산사태를 일으키는 미고결 토층은 대부분이 풍화토인 모래질로 구성되어 있다. 산사태가 발생한 지점의 풍화정도는 완전풍화(completely weathered)에 해당하는 흩이고 사태가 발생한 후의 노출된 암반의 상태는 대부분이 높은 풍화 또는 그 보다 덜 풍화된 보

통풍화(moderately weathered) 암반이다. 따라서 이 지역은 완전풍화된 모래질의 흙이 기반암 경계를 따라서 침투된 강우에 의하여 발생한 산사태이며 사태물질은 암편이 거의 포함되지 않은 토사류(sediments flow)에 해당한다.

주문진

이 지역의 경우 사천지역과 마찬가지로 2002년 태풍 '루사'에 의해 산사태가 발생한 지역으로 강우계가 설치되지 않아 강우량이 확실치는 않으나 태풍 '루사'가 강릉에서 속초방향으로 진행한 점을 감안하면 속초의 315 mm 보다는 많고, 오히려 강릉과 유사한 강우량인 800 mm 정도를 보였을 것이라 생각된다. 이 지역도 산림의 훼손이 심하지만 강릉과는 달리 산불에 의한 소실이 아니라 숲길 흑파리 방제사업의 일환으로 인위적으로 벌목을 한 지역이다. 이 지역의 벌목은 광범위하게 행하여졌고, 산사태가 가장 집중적으로 발생한 지역도 벌목으로 산림이 훼손된 지역과 거의 일치하여 이 지역에서만 840개의 산사태가 발생하였다.

이 지역은 강릉과 동일한 화강암으로 구성되어 풍화상태도 매우 유사하여 0.5-1m 내외의 박층인 모래질 풍화토가 기반암을 피복하고 있고, 사태물질도 모래질이 우세하고 암편이 적게 섞인 토사류(sediments flow)에 해당된다.

속 초

속초시 일원에도 2002년 태풍 '루사' 기간 중 2일간 315 mm의 강우로 인하여 많은 산사태가 발생하였다. 그런데 다음 해인 2003년 9월 태풍 '매미'로 207 mm의 강우가 다시 내려 산사태 피해가 추가된 지역이기도 하다. 이 지역은 타 지역에 비하여 산사태 발생이 미약한 편으로 약 200여개가 발생하였는데 이는 강우의 강도가 집중되지 못한 이유 때문일 것이라 판단된다.

이곳도 강릉 및 주문진과 마찬가지로 산사태가 집중적으로 발생한 지역은 해발 300 m 이하의 비교적 낮은 구릉으로 형성되어 있는데, 특히 신흥리 지역은 전형적인 구릉지 지형으로 강릉과 주문진과 같은 화강암이 분포하고, 이곳에서 가장 많은 산사태가 발생하였다.

마 천

마천은 소백산맥의 남단인 지리산의 북측에 위치하고 있으며 험준한 지형을 이루고 있다. 이 지역에는 2002년 8월 31일과 9월 1일 사이에 태풍 '루사'가 지나면서 그 영향으로 대형 산사태들이 발생하였다. 이 지역의 산사태는 마천면 소재지를 중심으로 북측의 백운산 북측 사면과

마천면 남서부의 덕전리 남측사면에 집중적으로 발생되었고, 특히 가흥리 금대산 남서측에서 발생한 산사태로 인하여 봉적층의 커다란 암석들이 마천중학교 건물을 파손하여 학교 건물이 폐쇄되기도 하였다.

마천에서 직접 측정한 강우자료는 없으나 지리산 어리목 지역에서 측정한 바에 의하면 1일 최대 강수량 856 mm를 기록하였다. 이 지역과 가장 근접한 산청에서 측정한 자료에 의하면 286 mm를 기록하고 있어 아마도 최소한 500 mm 이상은 기록되었을 것으로 추정한다.

이 지역은 흑운모와 각섬석을 다량 함유한 염기성 반려암이 넓게 분포하는데, 해발 600m를 기준으로 상부에는 선캠브리아기 편마암이, 하부구간에는 염기성 반려암이 분포한다. 특이한 점은 반려암과 접촉하고 있는 주변의 편마암 지역에서는 달리 반려암 분포지역에 산사태가 집중되어 있을 뿐 아니라 과거에 발생하였던 산사태의 흔적이 여러 곳에서 관찰된다. 반려암 분포 지역에서 풍화에 취약한 특이한 지질구조는 관찰되지 않으나 절개지나 산사태 파괴면에서는 차별풍화의 산물인 핵석이 매우 잘 발달하고 있다.

이 지역에서의 차별풍화 현상이 어떤 조건 하에서 형성되었는지는 보고된 바 없으나 이런 현상으로 인하여 이 지역의 풍화심도가 매우 불규칙하게 발달한다. 이 지역에서 최대 풍화도의 심도는 10m 이상으로 다른 연구지역의 풍화심도에 비하여 월등히 깊게 발달되어 있다. 또한 핵석을 포함하는 풍화대가 과거부터 지속적으로 붕괴되어 사면 중-하부에 깊은 봉적층을 형성하고 있는 것도 특징 중의 하나이다.

거 창

2003년 9월 12일~13일에 걸쳐 우리나라에 상륙한 태풍 '매미'의 영향으로 거창군 기북면 일대에 집중적으로 산사태가 발생하였는데, 특히 용암리의 송정마을과 중촌리의 다전마을에서 100여개의 산사태가 발생하였다. 강우량은 타 지역에 비하여 적은 편으로 161 mm를 기록하고 있으나 전체 강우량이 하루에 집중된 점이 특이하다.

지질은 선캠브리아기의 변성암류인 흑운모 편마암과 흑운모 대상편마암을 기반으로 하여 이를 관입한 중생대의 화성암류로 이루어져 있다. 산사태는 편마암 지대에서도 다소 발생했으나 집중적인 발생지는 화강암 분포지이다. 산사태가 발생한 지점은 대부분 능선과 가까운 지대로서 0.5m 내외의 얇은 슬라이드 형태를 보이고 있다. 이는 이 지역의 풍화상태가 고른 분포를 보이고 봉적층이 거의 발달하지 않아 산사태의 파괴가 기반암 상부의 얇은

풍화토층에서만 발생되었다. 산사태가 발생한 상부의 단애(scarp)에서는 약 0.5 m 정도의 나무뿌리 깊이로 파괴면이 형성되어 있다.

무주-장수

2005년 7월 1일~3일 사이에 최소 200 mm 이상 폭우로 인하여 무주군 안성면과 장수군 계곡면 등에서 적어도 300개 이상의 산사태가 발생하고 3명이 사망하는 피해가 발생했다. 이들 산사태는 많은 비와 더불어 이 지역 대표수종인 뿌리가 옆으로 퍼지는 천근성 침엽수와 낙엽송 등이 큰 역할을 하여 발생하였다.

무주-장수지역은 소백산맥의 주맥이 남서로 연계되면서 험준한 장년기 산지를 형성한다. 이 지역의 지질은 선캄브리아기의 편마암류와 중생대의 화강암류가 주류이며 국지적으로 퇴적암류가 분포한다. 편마암류는 흑운모편마암과 우백질 화강편마암이며 이들은 화강암화작용에 의하여 대부분 결정질화 되어 있다. 이곳의 화강암은 조립질 입상조직을 보이고 있어 석기나 광물학적으로 화강암과 유사하다.

강우와 산사태

서언에서 언급한 바와 같이 강우와 산사태 발생의 연관성은 Caine(1980)이 강우강도와 누적강우 간의 관련성을 제시한 이후 이에 관련된 많은 연구가 진행되었고(Innes et al, 1983; Olivier et al, Crosta and Frattini, 2001, Cannon and Gartner, 2005), 우리나라에서도 최근 20년 동안의 강우와 산사태발생 간의 연관성 규명을 위한 연구들이 진행되었다(홍원표 외, 1990; 김원영 외, 1998; 김경수 외, 2000; 한중근, 2001; 김경수 외, 2006).

Caine(1980)은 73개의 천층 슬라이드(shallow slide)와 토석류 산사태(debris flow)를 대상으로 강우기간과 강우강도가 산사태 발생에 미치는 영향을 분석하였다. 그에 의하면 산사태가 발생하기 위한 강우기간과 강우강도의 관계는 아래 식에 의하며 일정시간 내에 강우강도가 이를 상회하는 단계에서 산사태가 발생한다고 하였다.

$$I = 14.82 \times D^{-0.39}$$

여기서 I는 강우강도(rainfall intensity: mm/hour)

D는 강우기간(rainfall duration: hour)

예를 들어 일정 강우강도 하에서 산사태가 발생할 수 있는 강우기간은 위 식을 만족하는 시간보다 길어야하며, 반대로 일정 기간 내에서 산사태가 발생하려면 위 식을 만족하는 강우강도보다 커야한다고 하였다. Caine의 이론은

그 후 많은 학자들에 의하여 수정, 보완되어 왔으나(Siddle et al, 1985; Crosta and Frattini, 2001; Cannon and Gartner, 2005), 아직도 강우와 산사태의 연관성 해석에 직접적으로 인용되고 있다.

Siddle(1985)에 의하면 건조상태에 있는 박층의 미고결 지층이 파괴시점에 이르기 위해서는 완전히 포화되어야 하며, 이를 위해서는 최소한 2일 내에 125 mm의 강우가 필요하다고 하였다. Brand(1885)는 홍콩에서 발생한 산사태들을 대상으로 한 연구결과 산사태의 유발요인은 강우지속시간보다는 집중강우에 의한 것이라 하였고, Yagi and Yanabe(1987)는 7일 정도의 선행 강우량이 중요요소로서 그 기간의 선행강우량이 클 때는 집중강우가 없더라도 산사태가 발생할 수 있다고 하였다.

Olivier(1994)는 산사태를 일으킬 수 있는 산사태 반응지수는 연평균 강우, 누적강우 및 집중강우 등 3가지 요소와 관련된다고 하였다. 즉, 반응지수가 1을 초과할 때부터 발생하며 값이 커질수록 발생확률은 커진다고 하였다. 또한 집중강우량이 연평균 누적강우량의 20%를 초과할 경우 산사태가 발생한다고 보고하였다.

$$C_f = C_c + C_e$$

여기서 C_f 는 산사태반응지수(coefficient of final response)

$$C_c = CPR/MAP$$

$$C_e = PRE/MAP$$

CPR: 누적강우량(cumulative precipitation record)

PRE: 집중강우량(precipitation record of event)

MAP: 연평균 강우량(mean annual precipitation)

홍원표(1980)는 누적강우량과 강우강도 모두가 산사태 발생에 영향이 있다고 하였으나, 김원영(1998)과 한중근(2001)은 각각 경기북부의 산사태 자료와 부산지역의 산사태 자료를 분석한 결과를 근거로 누적강우량 보다는 강우강도에 의하여 산사태가 발생한다고 하였다.

위의 학자들 간에 약간의 차이점은 있으나 산사태 발생은 강우강도와 누적강우 등 2가지 요소와 공히 연관되어 있다고 보고하고 있으나 발생에 미치는 영향력은 강우강도가 주도하는 것으로 설명하고 있다.

Table 1은 10개 지역에서 산사태 발생 당시에 측정된 일강우자료이다. 이중 주문진에는 강우계가 설치되어있지 않아 자료가 없으나, 그 지역에 산사태를 일으킨 태풍 '루사'가 강릉에서 속초로 진행된 것을 감안하면 강우가 최소한 강릉보다는 적더라도 속초보다는 많을 것으로 생각된다. 위 도표에서 이들 중 일강우량이 100 mm 보다 적은

Table 1. Precipitation records associated with landslides occurrence of the landslide areas, Korea.

Event Location	First day		Second day		Precipitation for 2days(mm)
	Event day	Precipitation (mm)	Event day	Precipitation (mm)	
Y&A	Jul. 20, 1991	172	Jul. 21, 1991	229	401
Y&C	Jul. 26, 1996	224	Jul. 27, 1996	268	492
Jan	Aug. 5, 1998	97	Aug. 6, 1998	405	502
San	Aug.11, 1998	111	Aug.12, 1998	248	359
Gan	Aug.31, 2002	870	Sep. 1, 2002	14	884
Jum	Aug.31, 2002	N/A	Sep. 1, 2002	N/A	N/A
Sok	Aug.31, 2002	295	Sep. 1, 2002	120	315
Sok	Sep.12, 2003	118	Sep.12, 2003	89	207
Mac	Aug.31, 2002	285	Sep. 1, 2002	1	286
Geo	Sep.12, 2003	158	Sep.13, 2003	3	161
M&J	Jul. 1. 2005	126	Jul. 2. 2005	96	222

Y&A: Yongin-Ansung; Y&C: Yeonchon-Chulwon; Jan: Janghung; San: Sangju; Gan: Gangleung; Jum: Jumunjin; Sok: Sokcho; Mac: Machon; Geo: Geochang; M&J: Muju-Jangsoo

지역은 강릉, 속초, 마천, 거창, 무주-장수 등 5개 지역이 있으나 이 경우 나머지 하루의 일강우량이 상대적으로 많아 산사태를 발생시킬만한 강우량이 된 것으로 보인다.

Caine의 강우강도-강우기간 이론에 의하면 적어도 4.28 mm/h의 강우강도 이상으로 24시간 강우가 지속되거나 3.27 mm/h 이상으로 48시간 지속될 때 산사태가 발생한다. 이를 총 강우량으로 환산하였을 때 1일 강우량이 100 mm 이상, 또는 2일간 160 mm 이상의 강우량이 있을 때 산사태가 발생된다.

Fig. 1은 24시간과 48시간의 강우 기간동안 연구지역의 강우강도가 Caine의 산사태 발생기준(threshold)을 넘는 지를 보여준다. 그림에서 24시간을 기준으로 할 때 장흥과 속초(2003년)의 강우강도는 산사태 발생기준을 만족하지 못한다. 그러나 48시간의 강우강도는 위의 두 지역 모두 산사태를 발생시키기에 충분하다. 따라서 10개 지역 모두 Caine이 제시한 산사태 발생기준을 넘어 산사태 발생의 충분한 조건을 갖추고 있다. 단지 거창의 경우만 기준점과 같은 수준을 보인다.

Fig. 2는 48시간 동안의 강우강도를 강우량으로 환산하여 Caine의 산사태 발생 기준과 10개 지역에서 48시간 동안의 강우량과를 비교한 도표이다. 이 경우에도 Fig. 1에서와 마찬가지로 기준점을 크게 상회하고 있다. 여기서도 거창은 기준치와 비슷한 강우량을 보이고 있다.

Caine의 강우강도-강우기간의 관계식에 의하면 2일간 최소한 160 mm의 강우량이 필요하며 그보다 강우량이 적더라도 강우강도가 높으면 산사태가 발생한다고 설명하였다. 우리나라에서는 강우강도-강우기간과 산사태 발생의 관련성을 보고한 논문은 확인하지 못하였으나, 경기

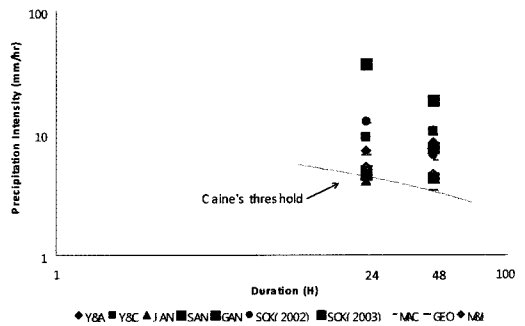


Fig. 1. Rainfall intensities during 24 hours and 48 hours measured in the study areas. The slightly curved line represents Caine's relationship of rainfall intensity threshold for landslide triggering. The rainfall intensities values of the study areas are plotted above the Caine's threshold line, indicating the condition of rainfall intensities are satisfied enough to trigger landslides.

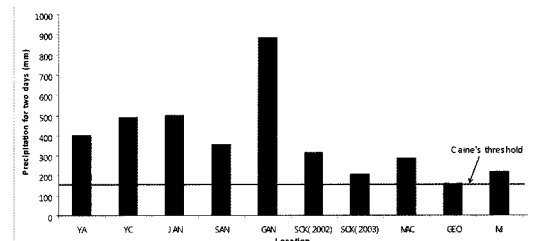


Fig. 2. Relationship between Caine's rainfall threshold and rainfall of the study areas. Rainfall amount of all areas are drawn above the Caine's threshold line.

도 일대의 산사태를 대상으로 한 연구에서 강우강도와 관계없이 48시간동안 200 mm의 강우량으로 산사태가 발생한다고 보고된 바 있다(김원영 외, 2000).

Table 2는 산사태 지역의 강우특성을 Olivier의 산사태 반응지수로 표시한 도표이다. 도표에서 우리나라의 연평균 강우량을 1,300 mm로 가정하고 산사태 지역을 그의 이론에 적용하면 모든 지역이 산사태의 발생조건을 충족하는 것으로 나타난다. 장흥과 강릉은 산사태 반응지수 2를 초과하고, 나머지 지역은 1 보다는 크고 2 보다는 작게 나타났다. 반응지수 2라는 개념은 산사태가 발생할 수 있는 강우조건 2배의 강우량 또는 강우강도를 의미하는 뜻이다. 장흥과 강릉에서의 산사태가 타 지역에서 보다 격렬하게 발생된 사실을 감안할 때 지역별 반응지수와 실제 상황과 잘 일치하고 있다.

산사태지역의 지질특성

연구대상인 10개 산사태 지역 중 7개 지역은 화강암이 분포하며 2개 지역은 화강암과 편마암 등의 변성암이, 그리고 나머지 1개 지역은 염기성 심성암인 반려암이 분포한다. 특정 암석이 분포하는 지역이 산사태에 특별히 취약한지에 관한 결론을 내릴 수는 없다. 예를 들어 연천-철원의 경우 328 km² 면적에서 화강암이 전체면적의 7%, 화산암이 18%, 변성암인 흑운모편마암이 75%를 차지하는데, 이 지역의 328개 산사태 중 전체의 22%인 73개가 화강암 분포지역에서, 24%인 77개가 화산암 지역에, 그리고 변성암 지역에서 54%인 178개가 분포하여 단위면적당 발생빈도는 화강암이 2개/km²로 가장 높고, 다음은 0.9개/km²인 화산암, 그리고 0.47개/km²인 변성암 순이다. 반면, 용인-안성지역에서 조사한 660개의 산사태 중 단위면적당 발생가능성은 편마암 지역이 45%, 편암이 32%, 화강암이 23%로서 편마암이 화강암에 비하여 2배 높다.

산사태가 발생한 10개 지역 중 2개 지역을 제외한 8개

지역에 화강암이 분포한다. 그 중 3개 지역은 화강암과 다른 암석이 복합적으로 분포하지만 5개 지역은 화강암으로만 구성되어 있다. 이 논문에서 이용한 3,435개의 산사태 중 58%인 2,011개의 산사태는 화강암 분포지에, 24%인 831개는 편마암류에서 발생하였고 18%인 593개는 화강암과 편마암류, 그리고 화산암류 등이 복합적으로 분포하는 지역에서 발생하였다(Fig. 3). 위 사실은 산사태 숫자만을 기준으로 해석하면 화강암이 다른 암석에 비하여 산사태에 보다 취약하다는 의미이다.

암석의 서로 다른 물리적 성질, 특히 풍화특성에 따라 산사태의 종류나 형태가 결정되는 것으로 판단된다. 화강암은 지질시대를 거치면서 상부의 지층이 삭박되면서 압력이 저하되고 이로 인하여 특징적으로 층상절리가 생성된다. 그런데 화강암은 석기가 균질하고 등방성이므로 층상절리의 간격과 방향이 비교적 일정하게 발달하고 있다. 따라서 생성 환경이나 암석 석기가 다른 변성암과는 달리 화강암의 풍화심도는 비교적 일정하게 발달되는 경향이

Percentage of landslide frequency in each lithology

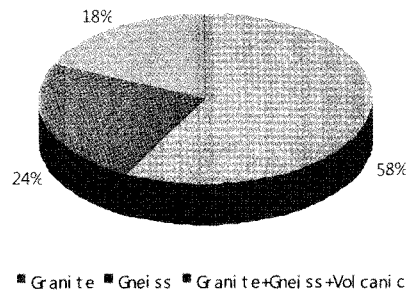


Fig. 3. Diagram shows numbers of landslide distributed in three different rock masses; granite, gneiss and others.

Table 2. Coefficient of final response of the landslides in the study areas after 2 days event precipitation.

	PRE (mm)	CPR (mm)	Cc	Ce	Cf
Y&A	401	1321	1.02	0.31	1.33
Y&C	492	1373	1.06	0.38	1.44
Jan	502	2349	1.81	0.39	2.20
San	359	2087	1.61	0.28	1.89
Gan	884	2068	1.59	0.68	2.27
Sok	315	1558	1.20	0.24	1.44
Mac	286	1449	1.12	0.23	1.35
Geo	161	1957	1.51	0.12	1.63
M&J	222	1431	1.10	0.17	1.27

MAP: mean annual precipitation, 1300 mm/y

PRE: precipitation record of event precipitation for 2 days

CPR: cumulative precipitation record for the event year

있다. 연구지역의 화강암 지역에서 산사태들이 일정한 심도의 풍화심도를 갖고 있어, 이로 인하여 화강암 지역에서는 평행이동 슬라이드(translational slide)가 우세한 것으로 해석하였다.

암종별 특성

화강암 : 화강암이 분포하는 지역은 연구대상 10지역 중 용인-안성, 연천-철원, 상주, 강릉, 주문진, 속초, 거창, 무주-장수 등 7개 지역이다. 이 중 상주, 강릉, 주문진, 속초, 거창 지역은 화강암으로만 분포되어 있고, 용인-안성, 연천-철원 및 무주-장수 등 3개 지역은 화강암과 변성암이 혼재 분포되어 있다.

산사태가 발생한 화강암 분포지의 가장 특징적 현상은 비교적 고른 풍화심도를 나타내고 노두가 거의 발달하지 않는다는 점이다. 이러한 지역에서는 강우가 지속되면서 산사태가 발생하면 최초의 산사태 발생지에서 계속 상부 쪽으로 파괴현상이 전파되어 능선 부근까지 발전되는 소위 후퇴성(retrogressive) 산사태가 흔히 발견된다. 화강암이 분포하는 연구지역에서도 산사태 발생지점은 대부분 능선에서 가까운 고지인데, 이는 후퇴성 연속파괴에 의한 결과로 해석된다. 또한 대부분 0.5~1m 내외의 파괴심도를 보이고 있는데 이는 화강암의 풍화상태가 고른 분포를 보이고 봉적층의 발달이 미약하여 산사태의 파괴가 기반암 상부의 얇은 풍화토층에서만 발생되었음을 의미한다. 이와 같은 풍화특성으로 인하여 화강암 분포지의 산사태는 박층의 슬라이드 형태를 띄는 경우가 많다.

상주와 무주-장수의 경우는 지형조건이 강릉, 주문진, 속초지역과는 달리 부분적으로 고도가 높은 지역이 있으며, 이들 지역에서는 고도가 높아짐에 따라 부분적으로 사면의 경사가 급한 지형을 보이면서 고도에 따라 풍화심도가 다소 차이를 보이기도 한다. 이러한 지역에서는 봉적층도 구릉지에 비하여 다소 증가하는 경향이 있다. 봉적층은 풍화대보다 심도가 깊고 많은 암편을 함유하므로 파괴가 발생하면 토석류로 쉽게 변환되는 특성이 있다. 따라서 상주와 무주-장수의 화강암 분포지에서는 타 화강암 분포지와는 달리 사태물질 이동통로(track)가 다소 길게 발달한 소위 토석류 산사태가 부분적으로 발견되고 있다.

변성암 : 변성암 지역은 장흥의 전지역, 용인-안성의 일부지역, 그리고 연천-철원의 대부분 지역이 포함되며 흑운모 편마암이 변성암을 대표하는 암석이다. 장흥에서 산사태가 발생한 지역은 흑운모편마암, 호상편마암, 반상변정편마암 등 다양하게 명명된 암석들로 구성된다. 이들 편마암들은 화강암이 분포하는 장흥 동측의 의정부

지역에 비하여 비교적 가파르고 험준한 지형을 보이고 산릉을 따라서는 이들 편마암의 노두가 잘 발달하고 있다. 또한 산사면을 따라서도 곳곳에 노두가 발달하고 있으나 그 규모가 작고 단열의 발달이 심한 블록형태를 띄고 있다. 노두가 발달하는 지역은 산사태가 발생하지 않는다는 일반적 이론과는 달리, 이들 노두들은 강우에 의하여 주변 미고결 토층과 함께 파괴되었다. 따라서 이 곳의 산사태는 이 지역에 분포하는 블록 형태의 풍화노두가 파괴되어 암편을 다량 함유한 토석류(debris flow)로 특징 지을 수 있다. 무주-장수 지역의 편마암류는 흑운모편마암과 우백질 화강편마암이며 이들은 화강암화작용에 의하여 대부분 결정질화 되었다. 이 지역의 노두발달 상태도 블록 상태인 경우가 우세하며 장흥과 마찬가지로 균열이 많고 풍화 정도가 심한 노두가 부분적으로 파괴되어 토석류 산사태로 발전되는 경우가 많았다.

반려암 : 마천지역에는 흑운모와 각섬석을 다량 함유한 염기성 반려암이 넓게 분포하는데, 해발 600m를 기준으로 상부에는 선캄브리아기 편마암이, 하부구간에는 염기성 반려암이 분포한다. 특이한 점은 반려암과 접촉하고 있는 주변의 편마암 지역과는 달리 반려암 지역에 산사태가 집중되어 있을 뿐 아니라 과거에 발생하였던 산사태의 흔적이 여러 곳에서 관찰된다. 반려암 지역에서 풍화에 취약한 특이한 지질구조는 관찰되지 않으나 절개지나 산사태 파괴면에서는 차별풍화의 산물인 핵석이 매우 잘 발달하고 있다.

이 지역은 차별풍화현상으로 인하여 풍화심도가 매우 불규칙하게 발달한다. 최대 풍화도의 심도는 10m 이상으로 다른 연구지역의 풍화심도에 비하여 월등히 깊게 발달되어 있다. 또한 핵석을 포함하는 풍화대가 과거부터 지속적으로 붕괴되어 사면 중-하부에 깊은 봉적층을 형성하고 있는 것도 특징 중의 하나이다. 깊은 풍화와 봉적층의 발달로 인하여 이 곳의 산사태는 시작점부터 원호형태의 파괴형태를 보이고 사태물질에는 다량의 암편을 포함하고 있다. 또한 이 지역은 산사면이 길어 사태물질의 이동통로(track)가 매우 길게 발달되어 있다. 따라서 봉적층의 파괴에 의한 산사태는 이동통로를 따라 하강하면서 삭박과 퇴적을 반복하면서 토석류를 형성하고 있음이 특징이다.

산사태 기하형상

절취사면의 파괴해석은 특정 위치에서 정해진 규모를 대상으로 정량적 해석을 필요로 하지만, 자연사면에서의

산사태 발생 여부는 매우 광역적인 해석과 확률적 해석이 필요하므로 접근 방법이 서로 다르다. 즉, 자연사면에서는 절취사면과는 달리 파괴를 일으키는 파괴면의 마찰계수나 공극수압 등의 파괴상수를 구할 수 없고, 또한 어느 지점에서 얻을 수 있다고 하더라도 매우 어려운 절차가 필요하다. 따라서 자연사면에서는 파괴면에 관한 정보를 기존의 산사태 현장에서 획득하고, 획득한 정보를 이용하여 확률적 방법으로 산사태 발생인자와 발생 메카니즘을 해석하게 된다(김원영 외, 2000; 김원영 외, 2004). 따라서 기존 산사태의 기하형상 정보는 산사태 발생 메카니즘 해석을 위한 필수적 자료이며, 산사태 예방을 위한 예측 기술 개발을 위한 기본 자료로 활용될 수 있다.

형 태

자연사면의 산사태는 발생시점(source area)에서 어떤 형태(type)로 발생하였던 간에 사면 하부로 이동하면서 흙과 암편들이 다량의 물과 혼합되어 흘러내리는 경우가 흔하므로 형태를 구분하지 않고 토석류(debris flow)로 명명하는 경우가 많다. 토석류는 사태물질이 모래입자보다 큰 암편들이 무게 50% 이상 함유하면서 유동하는 산사태를 일컫는다. 따라서 토석류는 슬라이드와는 달리 명확한 파괴면이 형성되지 않는 경우가 많으며 불규칙한 침식면이 남는다(Vanes, 1978; Ikeya, 1989).

실제 산사태 현장에서는 슬라이드와 토석류가 복합적으로 나타나는 경우가 대부분이어서 특정형태로 산사태를 구분하기는 어렵다(김원영 외, 2000). 즉, 산사태의 시작점(source area)에서는 슬라이드 파괴가 발생하며 그 후 파괴물질이 사면 하부로 이동하는 이동통로에서 삭박작용이 추가로 발생하여, 초기의 슬라이드에 의한 파괴물질과

이동통로에서 추가된 파괴물질들이 합쳐져서 토석류로 유동하게 된다(Johnson and Rodine, 1984). 토석류는 시작점과 이동통로 및 하단 퇴적지(depositional toe) 등 3요소를 충족해야만 한다(Costa, 1984). 연구지역에서는 긴 이동통로를 갖는 산사태일 경우 흔히 토석류로 분류하였으며, 반대로 이동통로가 매우 짧은 경우에는 슬라이드로 분류하였는데, 산사면이 길고 험준한 지형에서는 전자의 경우가 많으며 낮은 구릉지 지형에서는 후자에 속하는 경우가 우세하다.

지난 90여 년간(1917~2005) 전 세계적으로 발생한 자연사면 산사태 2,626개를 분석한 바에 의하면 53%인 1,386개는 평행이동 슬라이드(shallow translational slide)로, 42%에 해당하는 1,109개는 토석류산사태(debris flow)로 분류하였다(Fausto et al, 2008, Fig. 4a). 반면 한국의 경우는 10개 지역의 3,435개 산사태 중 가장 높은 빈도는 평행이동 슬라이드로 전체의 45.9%인 1,575개이며, 다음으로 높은 빈도는 평행이동 슬라이드와 토석류가 동반하는 상태의 산사태이며 이들이 전체의 42.3%인 1,452개를 차지하고 토석류는 4.2%인 143개에 불과하다(Fig. 4b). 위의 두 자료에서 특징적인 차이점은 평행이동 슬라이드의 분포비율은 우리나라와 전 세계에서 수집한 자료와 비슷하나, 토석류의 경우 우리나라에서는 전체 산사태의 4.2%를 차지하는데 불과하나 전 세계 자료에서는 42.2%를 차지하고 있어 큰 차이를 보인다.

이러한 차이점이 어디서 비롯되었는지는 명확하지는 않으나, 아마도 분류상의 차이점일 것이라 생각한다. 우리나라에서 동반 산출되는 평행이동 슬라이드 및 토석류가 전체 산사태에서 차지하는 비율이 전 세계 산사태 중 토석류가 차지하는 비율과 거의 같은 값을 보이고 있다.

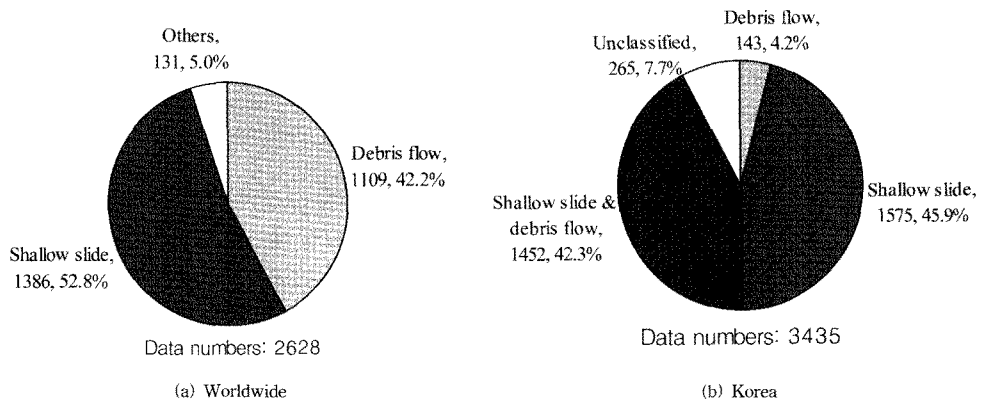


Fig. 4. (a) Diagram showing proportion of landslide types on natural terrains based on the global database of 2,626 worldwide landslide events, (b) Diagram showing proportion of landslide types in Korea. Data numbers are 3,435.

이와 같은 사실은 우리나라에서 평행이동 슬라이드 및 토석류로 분류한 산사태와 전 세계 산사태에서 분류한 토석류가 같은 종류의 산사태가 아닌가 하는 생각을 갖게 한다. 아마도 슬라이드로 시작하여 토석류로 변형되어 이동하는 산사태를 세계 산사태 통계에서는 토석류로 분류한 것으로 판단된다.

연구지역 중 장흥, 장수 및 마천에서는 토석류 산사태가 비교적 우세한 지역이다. 장흥과 장수지역은 산사태 시작점(source area)에 균열이 심하고 풍화된 편마암 노두들이 흔히 분포하는데, 이들 노두가 파괴되어 토석류를 발생시켰다. 반면 마천 산사태의 대부분은 거력을 다량 포함하고 있고 심도가 깊게 발달한 붕적층의 파괴에 의하여 발생되었다. 그런데 이 지역은 높은 산악지형으로 대부분 산사태들이 해발 444~624 m 정도에서 발생하여 사면경도가 긴 지형을 따라 흘러내려 그 과정에서 토석류의 발생을 증가시켰다(Fig. 5).

반면 지형의 고도가 낮고 구릉지로 발달한 화강암 분포지역인 용인-안성, 강릉, 주문진 등은 대체로 풍화심도가 얇고 고르게 발달하면서 활동사면도 짧은 편으로, 이와 같은 지역에서는 평행이동 슬라이드가 우세한 가운데 슬라이드와 토석류가 병존한다(Fig. 5). 그러나 10개 지역 중 거장은 분석에 이용된 자료의 수가 적어 Fig. 5에서 나타나는 현상만으로 그 지역의 산사태 전반을 대표하기는 어렵다.

규 모

산사태의 규모는 산사태 파괴면의 길이, 폭 및 심도에 의해 결정된다. 이 중 파괴면의 길이와 폭은 측정이 용이하나 심도는 파괴면 최상부의 단애에서만 측정이 가능하므로 파괴면(rupture surface) 전체에 대한 파괴심도는 측정하기 어렵다. 또한 자연사면에서는 파괴물질이 산사면이나 소계곡을 형성된 이동통로를 따라 사면 하부로

이동되므로 파괴면을 정확히 구별하여 측정하기 어렵다. 따라서 연구지역의 파괴심도는 추정치를 근거로 하였다. 산사태 조사지에 따라서는 파괴면과 이동거리를 합한 면적을 가지고 규모를 결정하기도 하며, 파괴면의 면적만을 가지고 규모를 결정하기도 한다. 그러나 산사태의 규모에 관한 정보를 제공할 때는 파괴면과 이동통로를 명확히 구분 설명할 필요가 있다.

연장이 긴 산사태는 장흥, 마천, 거창에 분포하고 있다(Fig. 6). 위 지역은 대부분 산사태의 형태상 토석류가 우세한 지역이다. 토석류 우세 지역은 우선 사면이 길기 때문에 파괴된 사태물질이 이동하는 통로(track)가 충분히 길고, 파괴 지점에 암편을 다량 함유한 붕적층 또는 풍화 노두가 존재하는 지역으로 확인되었다. 장흥과 마천은 위의 조건을 만족하는 지역이다. 장흥은 주변의 화강암 지역에 비하여 높은 지형을 형성하여 사면의 길이가 비교적 크고 파괴지점에 소규모 풍화 노두들이 발달하여 토석류가 생성된 지역이다. 마천은 사면의 규모가 크고 대규모 붕적층들이 산사태의 단애를 형성하고 있어 이들 붕적층의 파괴로 토석류가 생성된 것으로 해석하였다. 마천은 길이 200 m 이상의 산사태가 60%이고 100 m 이하의 소규모는 20%만을 차지할 뿐이다. 장흥도 토석류의 발생이 많아 상대적으로 길게 발달한 산사태의 비율이 높다.

이에 반하여 화강암이 분포하고 지형이 구릉지를 형성하는 지역의 산사태들은 길이가 매우 짧다. 대부분이 50 m 이하의 소규모인 점이 특징적이다. 용인-안성, 강릉, 주문진, 속초 등은 규모 면에서 매우 유사한 분포비율을 보이고 있다. 이들 지역에서는 길이 30 m 이하의 산사태들이 40-55%의 분포비율을 보이고, 50 m 이하가 전체의 75-85%를 차지하고 있어 매우 소규모이다. 이들 지역 중 용인-안성을 제외하면 모두 화강암 지역인 점이 특징이다. 용인-안성의 경우는 화강암과 편마암이 공존하지만 지형적으로 화강암 지역과 유사한 구릉지를 형성하고 있어 소규모 산사태가 발달되었다. 상주는 화강암이 분포하면

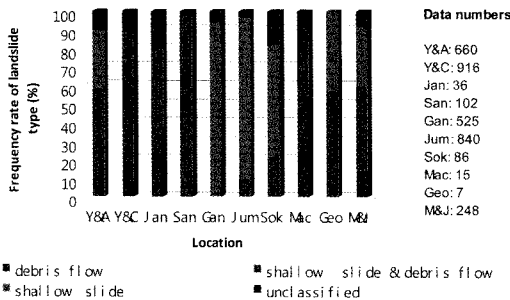


Fig. 5. Histogram showing proportion of landslide types in each study area.

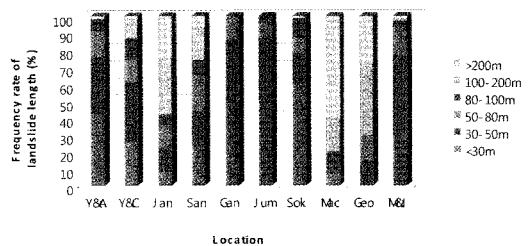


Fig. 6. Histogram showing proportion of landslide length in each study area.

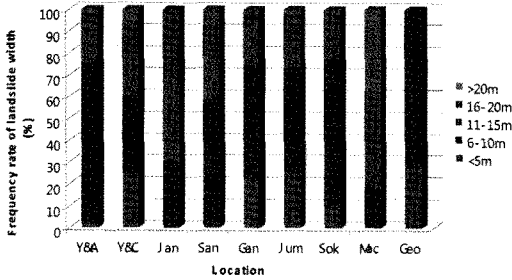


Fig. 7. Histogram showing proportion of landslide width in each study area.

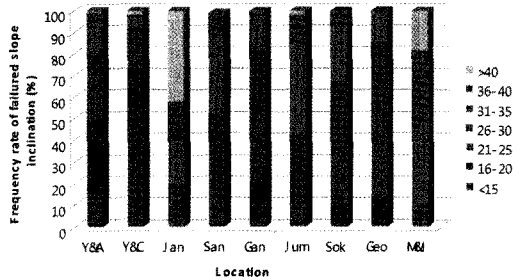


Fig. 8. Histogram showing slope angle versus landslide frequency in each study area.

서도 비교적 긴 산사태를 보이고 있는데 이는 아마도 이 지역에 발생한 토석류 때문일 것이라 생각한다.

채병곤(2005)에 의하면 자연사면 산사태에서 사면의 경사가 급해질수록 산사태의 폭은 좁아진다고 보고하고, 경사와 산사태 폭과의 관계에 대한 경험식을 유도하였다. 이러한 경우는 주로 산사태 이동통로에서 나타나는 현상을 언급한 것으로, 소규모 슬라이드의 경우에는 적용하기 어렵다.

그러나 연구지역의 산사태 시작점에서의 파괴면만을 대상으로 검토한 결과에 의하면(Fig. 7) 산사태의 폭은 지형적 조건에 크게 지배되지 않는 것으로 보인다. 대부분 지역의 슬라이드 산사태 폭은 6-15 m 사이에 집중되고 있다. 그러나 토석류가 발달한 장흥과 마천에서는 폭 15m 이상이 높은 비율을 차지하고 있고, 특히 대규모 산사태가 발생한 마천에서는 그 비율이 더욱 높아지고 있음을 고려하면 산사태의 폭도 산사태의 형태에 의해 좌우되고 있다.

발생위치의 경사

사면의 경사는 사면파괴의 가장 중요한 3대 요소 중 하나이다. 암반사면은 파괴면의 경사각이 높을수록 파괴되기 쉽다. 그러나 암반사면과는 달리 자연사면에서는 경사가 급한 지형에서 반드시 산사태가 많이 발생하지는 않는다. 우리나라 자연사면에서 발생하는 산사태는 거의 모두 기반암 상부의 미고결지층(regolith)이 파괴되어 발생하므로 암반사면의 파괴 메커니즘과는 차이를 보인다. 자연사면의 경사 40도 이상 급사면은 사면의 일부이든 전체이든 간에 암반노두가 발달되어 있는 경우가 흔하고, 암반이 분포하는 경우에는 심한 풍화암반이 아닌 경우를 제외하면 산사태가 발생하지 않는다. 또한 이와 같은 급사면은 미고결 물질이 지속적으로 삭박되어 산사태를 발생시킬 만큼의 충분한 토층(regolith)을 형성하지 못한다(김원영 외, 2000).

연구지역 중 2개 지역을 제외한 나머지 지역의 산사

태는 거의 모두 경사 40도 미만에서 발생하였고 26-35도 사이에 집중되어 있다(Fig. 8). 그런데 용인-안성과 연천-철원은 경사 20도 미만이 타 지역에 비하여 상대적으로 높은 비율을 차지한다. 특히 연천-철원은 경사 15도 미만이 50% 이상이고, 16-20도 경사에서의 산사태도 21%를 차지하여 이 지역에서 발생한 916개 중 3/4 정도가 20도 미만의 낮은 경사를 보이고 있다.

연천-철원 지역의 산사태 경사가 이와 같이 완만한 값을 보이는 것은 측정의 오류에서 비롯된 결과로 보인다. 산사태의 경사를 측정할 때는 발생 시작점의 파괴면만을 대상으로 하는 경우와, 시작점으로부터 사태물질 이동통로까지의 전 구간을 평균하여 측정하는 경우가 있는데 후자의 경우는 파괴사면의 경사로 볼 수 없다. 용인-안성과 연천-철원은 전 구간을 평균한 경사각이고, 나머지 8개 지역은 발생지의 파괴면만을 대상으로 측정한 자료로 확인되었다. 따라서 상기 2개 지역의 산사태 경사각은 실제보다 완만하게 처리되었다.

장흥과 무주-장수지역은 다수의 산사태가 36도 이상의 고각도 사면에서 발생하였다. 위의 두 지역은 편마암의 급사면에 풍화된 노두들이 블록으로 산출된다. 이 지역 산사태 중 다수는 이들 노두들이 파괴되어 토석류를 발생시킨 경우이다. 따라서 풍화 노두의 파괴에 의한 산사태들은 발생사면이 비교적 급사면을 형성한다.

반면 화강암 분포지역의 발생사면 경사각은 비교적 고르게 분포하는데, 대부분이 21~35도 사이에 집중 분포하고 있다. 화강암만 분포하는 상주, 강릉, 주문진, 속초, 거창 등 5개 지역에서 발생한 1,560개의 산사태를 대상으로 사면 경사각의 분포상태를 보면(Fig. 9), 81.7%에 해당하는 1,274개의 산사태가 21~35도 범위의 경사의 사면에서 발생하였다.

발생위치

산사태의 최초 발생위치는 평탄한 또는 약간 오목하게

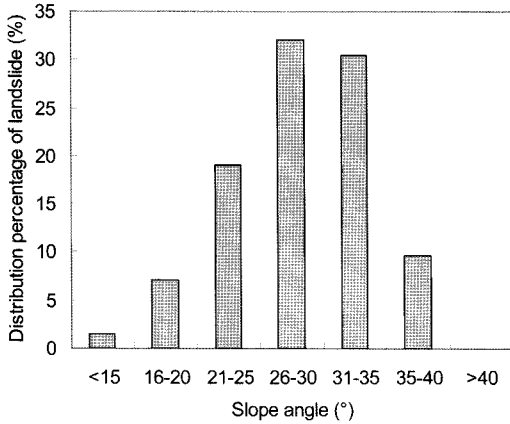


Fig. 9. Histogram showing distribution rate of failure angle of slopes in granite areas.

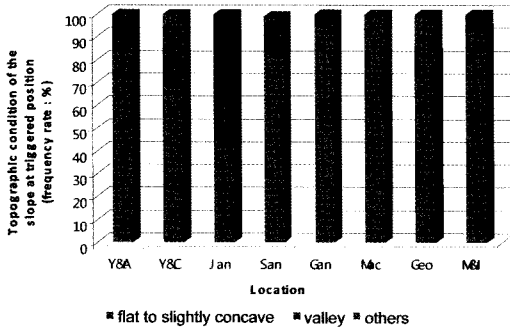


Fig. 10. Figure showing proportion of initially failed position of landslides in the study areas.

굴곡진 산사면이 대부분이고 드물지만 계곡에서 도랑형(gully)과 토석류가 발생되기도 한다(Fig. 10). 평탄면에서 발생하는 산사태의 초기형태는 형태가 평행이동이든 토석류이든 슬라이드로 시작된다. 평탄면에서 발생하는 산사태 최상부의 크라운(crown) 부근에는 수직 인장절리가 흔히 발견된다. 이는 현재의 단애 상부 쪽으로 추가 파괴가 발생할 가능성을 시사하는 증거이다. 즉, 자연사면에서는 슬라이드가 일단 발생후 후 계속해서 상부 쪽에 추가적인 파괴가 일어나는 소위 후퇴성파괴(retrogressive failure)가 생성되는 것으로 해석된다. 화강암 지역의 단애는 등고선 방향으로 명확히 발달하고 있지만 풍화심도가 침엽수의 나무뿌리 심도와 비슷한 0.5 m 내외로 매우 얇게 형성되어 있다.

토석류가 우세한 편마암 지역의 산사태는 소계곡에서 발생하는 비율이 상대적으로 높다. 장흥은 편마암 지역으로 계곡의 비율이 평탄사면보다 우세하다. 또한 편마암이 다른 암석과 같이 분포하는 용인-안성, 연천-철원, 무주-

장수 지역도 차이는 있지만 화강암 지역에 비하여 계곡에서의 산사태 발생률이 높은 편이다.

토 의

풍화대를 포함한 미고결층에 대한 폭 넓은 이해가 자연사면 산사태 연구에 매우 중요하다. 우리나라 산사태는 거의 기반암 상부의 미고결층의 파괴에 의해 생성되기 때문이다. 미고결층은 기반암의 풍화산물이므로 기반암에 관한 정보, 특히 기반암의 풍화특성은 산사태의 발생 메커니즘을 규명하는데 매우 중요하다. 연구지역에서 분포비율이 큰 화강암과 흑운모편마암은 풍화특성이 서로 달라 지형 형성에 차이가 있고, 따라서 산사태 형태나 규모에 차이점을 보인다.

화강암 지역은 노두가 거의 발달하지 않고 풍화심도가 비교적 크게 발달하므로 구릉지 지형이 많다. 따라서 파괴는 기반암 상부의 얇은 풍화토층에서 고른 심도로 발생되기 때문에 사체물질은 주로 모래로 구성된다. 이와 같은 풍화특성 때문에 화강암 분포지에는 얇은 평행이동 슬라이드(shallow translational slide) 형태의 소규모 산사태가 많이 발생한다. 반면 편마암류 분포지에는 노두가 발달되어 있는 경우가 흔하다. 능선에는 거의 노두가 있고 산사면에도 소규모 풍화노두들이 블록을 형성하고 있다. 풍화심도는 매우 불규칙하며 지형의 굴곡이 심하여 길이가 긴 소계곡들이 발달하므로, 산사태의 규모도 다양하게 산출된다. 특히 풍화노두가 부분적으로 파괴되어 토층과 함께 토석류를 형성하는 경우가 흔히 있다. 화강암지역의 산사태에 비하여 규모가 크며 파괴심도도 일정치 않으며 토석류 또는 슬라이드와 토석류의 복합적 형태 등 다양한 양상을 나타낸다. 지형도 비교적 가파르므로 산사태는 화강암지역에 비하여 5~10도 정도 더 가파른 사면에 집중되고 있다.

이 논문에 인용한 강우자료는 기상청 강우관측소로부터 획득하였다. 그러나 관측소와 산사태 현장과는 다소 차이가 있을 수 있어 산사태지역의 정확한 강우정보를 제공하기에는 부족하다. 그럼에도 일 강우강도에 관한 산사태 주변지역의 정보를 획득할 수 있었으므로 미흡하지만 외국의 강우사례와 비교할 수는 있었다.

우리나라 산사태지역 중 최저 강우량을 기록한 지역은 거창이다. 이곳에서는 최초 24시간동안 158 mm를 기록하였고, 그 후로는 강우가 거의 없었다. 따라서 이 지역의 산사태는 최초 24시간 동안의 강우에 의해서 발생한 것으로 해석된다. 이틀간 최저 연속강우량을 보인 지역은 속초이다. 이곳에서는 처음 24시간 동안 118 mm의 강우가

있었고 다음날 24시간동안 89mm의 비가 내려, 이들 동안 총 207mm의 강우량을 기록하고 있다. 즉, 우리나라 사례에서는 1일간 158mm, 2일간 207mm의 강우량을 기록한 지역이 최저 집중강우에 의한 산사태 발생지역이다.

뉴질랜드의 사례에서는 1일간 약 100mm, 2일간 약 160mm의 강우에 의해서 산사태가 발생하기 시작하였다는 보고에 비추어 우리나라의 사례에서 보여준 기록은 산사태가 발생하기에 충분한 강우량으로 생각한다. 그러나 강우에 의한 우리나라 산사태의 발생원인을 보다 정확히 규명하기 위해서는 시간당 강우강도 자료와 산사태 발생 시기에 대한 신뢰성 있는 정보가 필요하다.

산사태의 명칭을 정의할 때 주관적으로 명명하는 경우가 있다. 특히 자연사면의 산사태를 토석류로 일괄 처리하는 경우가 흔하다. 토석류는 토석의 발생지와 이동통로, 그리고 하단 퇴적지(depositional toe) 등 3가지 요소가 명확하여야 하며, 발생지의 파괴물질 중에서 모래 이하의 입경을 갖는 물질이 중량의 50% 이하이어야 한다(Costa, 1984, Ikeya, 1989). 그러므로 파괴 발생지로부터 퇴적된 하단까지의 면밀한 조사가 없이는 토석류의 여부를 판단하기 어렵다.

지난 90여 년간 전 세계의 산사태 2,626개와 한국의 3,435개를 이용하여 산사태의 형태를 분류한 바에 의하면, 평행이동 슬라이드의 분포비율은 우리나라와 전 세계에서 수집한 자료와 비슷하다. 그러나 토석류의 경우 우리나라에서는 전체 산사태의 4.2%를 차지하는데 불과하나 전 세계 자료에서는 42.2%를 차지하고 있어 큰 차이를 보이고 있다. 우리나라에서는 '슬라이드 및 토석류'로 분류한 산사태가 약 42%를 차지하여 전 세계 자료 중 토석류의 분포비율과 거의 같다. 즉, 전 세계자료에서 토석류로 분류한 산사태와 같은 종류의 산사태를 우리나라에서는 '토석류 및 슬라이드'로 분류한 것 같다. 이는 분류의 관점이 서로 차이가 있음을 시사하며, 분류기준에 대한 연구가 더 필요한 시점이다. 따라서 산사태 형태의 정확한 분류를 위해서는 산사태 시작점과 이동통로 및 하단 퇴적지를 현장에서 구별하고 각 부위별로 제반 기하형태와 지형, 지질특성을 기재해야 할 것이다.

결 론

1990년 이후 우리나라의 자연사면에서 발생한 대규모 산사태 지역인 용인-안성, 연천-철원, 장흥, 상주, 강릉, 주문진, 속초, 마천, 거창, 무주-장수 등 10개 지역의 기존 자료를 분석하여 산사태 발생현황, 강우조건, 지질특성

및 기하형상을 검토하였다. 이들 중 화강암지역이 5곳, 화강암과 변성암류가 같이 분포하는 지역이 4곳이며, 나머지 한 지역은 반려암이 분포한다.

총 3,435개의 산사태 중 1,992개는 화강암 분포지에서, 824개는 변성암 지역에서, 15개는 반려암에서, 그리고 나머지 604개는 연천-철원과 무주-장수에 부분적으로 분포하는 화산암 및 퇴적암 등에서 발생하였다.

연구지역의 2일간의 강우량은 207mm에서 884mm까지 다양하다. 연구지역의 사례를 보면 1일간 강우량이 최소 150mm 이상일 때 또는 2일간 강우량이 최소 200mm 이상일 때 산사태가 발생할 수 있다. 이것은 Caine이 제시한 기준(threshold)인 1일 100mm와 2일 160mm에 비하여 다소 높은 수치이다. 또한 연구지역의 강우조건을 Olivier의 산사태반응지수에 적용할 경우에도 모든 연구지역이 산사태를 발생시킬 충분한 강우조건을 갖추고 있는 것으로 확인되었다. 따라서 외국의 사례와 비교할 때 우리나라 산사태지역의 강우조건은 산사태발생 조건을 충족하고 있다.

산사태의 형태와 발생 메카니즘은 기반암의 풍화특성에 따라 차이를 보이고 있다. 화강암 지역은 노두가 거의 없고 풍화심도가 고르게 분포하고 형태상 소규모의 슬라이드가 우세하다. 반면 변성암 지역은 풍화심도가 불규칙하여 지형의 기복이 심하고 노두가 능선과 산록에 발달하는 경우가 많다. 형태상으로는 풍화노두가 토층과 함께 파괴, 이동하는 비교적 큰 규모의 토석류가 우세하다. 화강암지역의 발생위치 경사각이 변성암지역에 비하여 5~10도 정도 완만한 이유도 두 암체의 노두와 지형발달 상태와 연관되어 있다.

형태상으로 천층의 평행이동 슬라이드로(shallow translational slide) 분류되는 산사태가 전체의 45.9%인 1,575개이며, 평행이동슬라이드와 토석류(debris flow)의 복합적 산사태가 42.3%인 1,452개인데 반하여 토석류로 분류되는 산사태는 4.2%인 143개에 불과하다.

상기 자료는 산사태 시작점의 파괴면에서 88% 이상의 산사태가 천층의 평행이동 슬라이드 형태로 발생하고 있음을 의미한다. 즉, 우리나라 산사태는 다른 암석에 비하여 화강암 풍화대와 더 많이 연관되어 있음을 시사한다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본사업의 하나인 "금경사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술 개발" 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김경수, 김원영, 채병곤, 조용찬, 2000, 강우에 의한 산사태의 지질공학적 특성 -충청북도 보은지역-, 대한지질공학회지, 10(2), 163-174.
- 김경수, 송영석, 조용찬, 김원영, 정교철, 2006, 지질조건에 따른 강우와 산사태의 특성분석, 대한지질공학회지, 16(2), 201-214.
- 김기홍, 원상연, 윤준희, 송영선, 2008, 강릉지역 국도의 재해위험성 평가, 한국지형공간정보학회지, 16(4), 33-39.
- 기상청, 1991, 예보사례분석집, 경기남부지방(수원, 용인) 집중호우-1991년 7월21일, 73-109.
- 김원영, 이사로, 김경수, 채병곤, 1998, 지형 특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성 -연천 철원지역을 대상으로, 대한지질공학회지, 8(2), 115-130.
- 김원영, 채병곤, 김경수, 기원서, 조용찬, 이사로, 김정환, 윤운상, 2000, 산사태 예측 및 방지기술 연구, 한국지질자원연구원, 315.
- 김원영, 채병곤, 조용찬, 김경수, 이춘오, 최영섭, 2004, 산사태 예측 및 방지기술 연구, 한국지질자원연구원, 315.
- 김원영, 채병곤, 이춘오, 김경수, 조용찬, 송영석, 최영섭, 서용석, 2006, 산사태 위험도 산정시스템 및 피해저감기술 개발, 한국지질자원연구원, 360.
- 내무부 중앙재해대책본부, 1991, 재해년보.
- 마호섭, 정원욱, 박진원, 2008, 국립공원의 산사태 발생 위험지역 예측기법 개발, 한국입학회지, 97(3), 326-331.
- 박덕근, 2006, 우리나라 지반재해와 방재정책, 2006년 지질공학 심포지움 발표논문집, 41-49.
- 박용원, 김갑래, 여운광, 1993, 1991년 용인-안성지역 산사태 연구, 한국지반공학회지, 9(4), 103-116.
- 서용석, 한성길, 2003, 2002년 강릉지역에서 발생한 산사태의 특성에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, 19(4), 107-119.
- 우충식, 이창우, 정용호, 2008, 산사태 발생지 예측을 위한 Topographic Position Index의 적용성 연구, 한국환경복원녹화기술학회지, 11(2), 1-9.
- 채병곤, 김원영, 이춘오, 김경수, 조용찬, 송영석, 2005, 지질조건에 따른 사태물질 이동특성 고찰, 대한지질공학회지, 15(2), 185-199.
- 채병곤, 조용찬, 송영석, 김경수, 이춘오, 이병주, 김만일, 2008, 산사태 피해규모 정량화 및 최적피해저감기술 개발, 한국지질자원연구원, 566.
- 한중근, 2001, 부산지역에서의 강우와 산사태의 특성분석, 한국환경복원녹화기술학회지, 4(1), 24-31.
- 홍원표, 김윤일, 김상규, 한중근, 김마리아, 1990, 강우로 기인되는 우리나라 사면활동의 예측, 대한토질공학회지, 6(2), 159-167.
- Brand, E. W., 1985, Predicting the performance of the residual soil slopes, Proc., 11th ICSMFE, San Francisco, 2541-2573.
- Brunsdon, D., 1985, Landslide types, mechanism, recognition, identification. In Landslides in the South Wales Coalfield, Proceedings Symposium, 1-3 April, 1985. The Poly. of Wales, 19-28.
- Caine, N., 1980, The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows, Geografiska Annaler, 62A, 23-27.
- Cannon, S. H. and Gartner J. E., 2005, Wildfire-related debris flow from a hazard prospective, Springer, Berlin, 363-385.
- Costa, J. E., 1984, Physical geomorphology of debris flows. In developments and Applications of Geomorphology (Eds J. E. Costa and P. J. Fleisher). Springer-Verlag, 268-317
- Crosta, G. B., and Frattini P., 2001, Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow, Proceedings of the 2nd EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms, Italy, 463-487.
- Fausto, G., Silvia P., Mauro R., and Colin P. S., 2008, The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. Landslides 5(1), 3-17.
- Ikeya, H., 1989, Debris flow and its countermeasures in Japan, Bull. of the IAEG, 40, 15-33.
- Innes, J. L., 1983, Debris flows, Prog. Physical Geography, 7, 469-501.
- Johnson, A. M., and Rodine, J. R., 1984, Debris flows, In Slope Instability (Eds D. Brunsdon and D. Prior), 257-361.
- Olivier, M., Bell, F. G., and Jemy, C. A., 1994, The effect of rainfall on slope failure, with examples from the Greater Durban area, Proceedings 7th intern. Cong. IAEG, 3, 1629-1636.
- Siddle, R. C., Pierce, A. J., and O'Loughin, C. O., 1985, Hillslope stability and landuse, Am. Geophys. Un. Water Resource Monograph, 11, 1-140.
- Varnes, D. J., 1978, Slope movement types and process, National Academy of Science, Washington, D. C., Special report, 2, 11-33.
- Yagi, N., and Yatabe, R., 1987, Prediction model of slope failure in sandy soil due to rainfall, Proc., 8th Asian Regional Conf., Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1, 217-220.

2009년 8월 21일 원고접수, 2009년 9월 17일 게재승인

김원영

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
350-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3345
Fax: 042-868-3414
E-mail: kwy@kigam.re.kr

채병곤

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
350-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3052
Fax: 042-868-3414
E-mail: bgchae@kigam.re.kr