

태풍 '루사'에 의해 발생한 장덕리-삼교리 일대 산사태의 특징

조용찬	한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
이춘오	한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
김경수	한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
채병곤	한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
김원영	한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
송영석	한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

1. 서 언

우리나라는 최근 매년 여름이면 집중호우에 의해 크고 작은 산사태가 발생하였지만, 2002년 막바지 여름철에 태풍 '루사(Rusa)'가 몰고 온 사상 최악의 폭우는 국민에게 엄청난 수해의 고통과 함께 방재대책의 중요성을 뼈저리게 남겼다.

2002년 8월 31일과 9월 1일 사이 제15호 태풍 '루사'가 한반도의 중앙을 관통하면서 전국적으로 많은 비를 내렸다. 특히 강릉지역엔 기상관측 이래 하루 최대 강수량인 900mm에 가까운 살인적 폭우가 내려 도심 전체를 물에 잠기게 하였다. 태풍 '루사'의 피해규모는 전국적으로 재산피해가 5조원 이상, 인명피해가 250여명에 달한다.

특히 강원도 지역은 2000년 4월에 발생한 큰 산불로 인하여 많은 지역의 산림이 황폐해진 가운데 큰 폭우를 겪게 되어 더 많은 산사태가 발생하였다. 많은 산사태로 말미암아 사태물질이 계곡을 타고 하류로 흘러내림에 따라 가옥 및 농경지에 막대한 피해를 야기하였다. 특히 벌목한 나무들을 산에 방치함으로서 사태물질과 함께 이들이 하천으로 흘러들어 다리교각을 막아 일종의 댐 역할을 하여 하천이 범람하는데 기여를 하였다.

이 연구는 2002년 산사태가 집중적으로 발생한 지역들 중에 2000년도 산불지역이 아닌 지역으로서 많은 산사태가 발생한 지역에 대한 산사태의 특징에 관해 조사하여 보았다.

2. 지형 및 지질

연구지역(그림 1)은 강릉시 주문진읍 장덕리와 삼교리 일대로서 동쪽지역은 전형적인 노년기 구릉지형으로서 해발고도는 150m 이하에 해당하며, 중앙지역은 해발고도 400m내외로 동서 방향으로 주 능선이 발달하고 있으며, 서쪽으로 갈수록 점점 해발고도가 증가하고 있다. 연구지역의 중심에는 삼교저수지로부터 동해로 흘러가는 소하천이 위치하고 있으며, 남쪽에는 연곡천이 서쪽 오대산에서부터 발원하여 동해로 흘러가고 있다.

연구지역의 계곡의 발달 방향은 북북서-남남동 방향이 아주 우세하게 관찰된다. 특히 연구지역의 수치지형도를 이용하여 음영기복도를 작성하여 보면 이 방향의 계곡발달을 뚜렷히 확인할 수 있다.

연구지역의 지질은 대부분 화강암으로 구성되어 있는데 이 암석은 중생대 쥐라기에 관입한 대보화강암에 해당한다. 대보 화강암은 옥천대 북서쪽 경계부를 따라 북동-남서 방향으로 분포하는

저반형 화강암체에 해당한다. 이 지역의 화강암은 1:250,000 강릉-속초 지질도록 설명서(김정찬 외, 2001)에는 강릉-오대산 지역의 저반형 화강암류로 분류하고 있으며 주로 흑운모화강암과 복운모화강암으로 구성되어 있다. 흑운모화강암은 중립질의 등립질암으로 석영, 가리장석, 사장석, 흑운모 등이 주구성광물을 이루고 있고, 특징적으로 스피넬을 부수광물로 포함한다. 복운모화강암은 세립질의 등립질암으로 석영, 가리장석, 사장석, 운모 및 자철석, 스피넬, 각섬석, 모자나이트 등을 수반한다. 이 화강암에 대한 절대연령은 Rb-Sr 흑운모 연대로 173 ± 0.4 Ma, 175 ± 1.4 Ma(Jin et al., 1984)가 보고된 바 있다. 야외조사 시 관찰한 바에 의하면 석영과 장석이 거정질 결정을 보이며 발달하는 것을 흔히 관찰할 수 있으며, 때때로 수cm크기의 백운모 결정도 관찰된다.

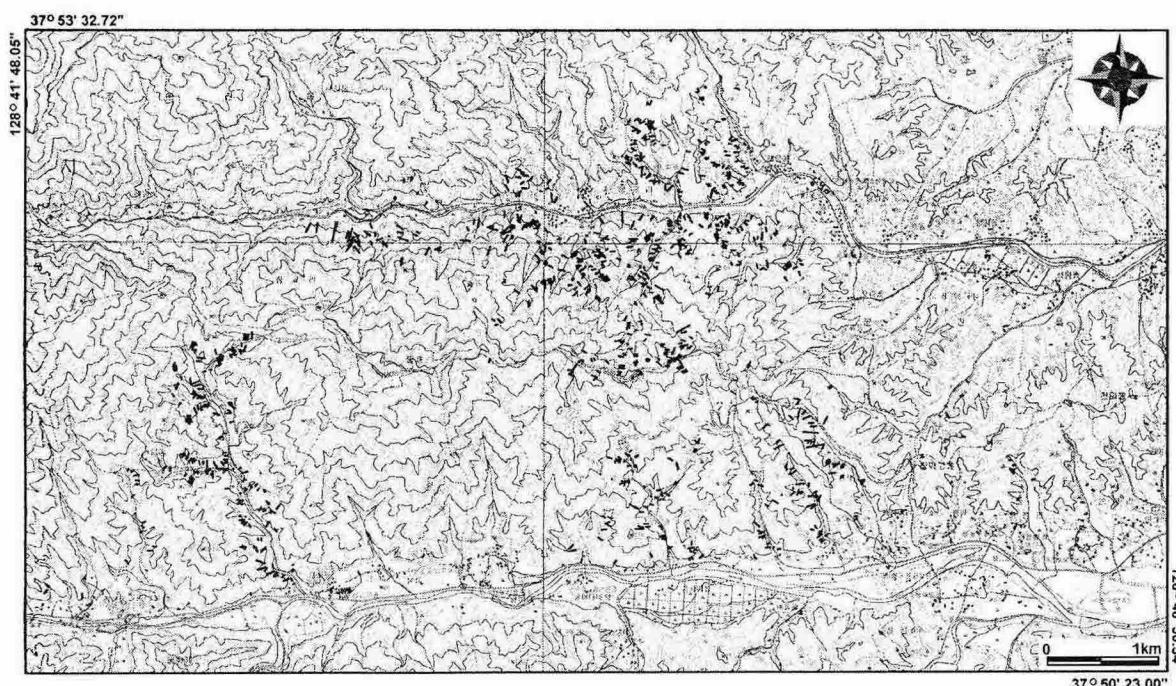


그림 1. 연구지역의 위치도.

3. 절리 조사

연구지역의 계곡의 발달 방향은 전 절에서 언급한바와 같이 북북서-남남동 방향이 우세하게 나타나고 있다. 이 계곡에는 대부분 소하천이 발달하고 있으며, 하천 바닥은 화강암 암반이 잘 노출되어 있다(그림 2a). 절리의 발달 상태를 확인하기 위하여 약 40여개소에서 절리를 측정하였다. 이때 측정한 절리는 규칙절리(systematic joint)의 형태를 보여주는 것들만을 대상으로 하였다.

그림 2b는 연구지역에서 측정한 74개의 절리 들을 등면적 하반구 입체투영망(equal area stereo net)에 투영하여 그 빈도를 알아보기 위하여 등고선그림(contour diagram)을 작성한 것이다. 저각의 절리의 경우는 방향이 북서-남동 주향과 북북동-남남서 방향이 가장 빈도가 높게 나타나며, 고각의 절리는 북북서-남남동 방향과 동서방향의 절리의 빈도가 높게 나타나고 있다. 연구지역은 계곡의 발달과 절리의 발달방향이 밀접한 관계가 있음을 알 수 있는데, 대부분의 규칙절리는 소하천이 흐르는 방향과 이를 가로지르는 방향으로 발달하고 있다.

4. 산사태 특징

연구지역에는 2002년 8월 31일 한반도에 태풍 '루사'가 접근할 때 일일 강우 900mm 이상의 기록적인 폭우가 내렸다. Olivier(1994)는 연 평균 강우량과 집중강우량을 이용해 산사태 반응지수(Cf)가 1 이상일 때부터 사태가 발생할 수 있고, 평균 강우량 보다 20%이상의 집중 강우량이 발생할 경우 대규모의 사태발생 가능성이 있을 수 있음을 보고하였는데, 연구지역의 900mm의 강우량은 대규모 산사태를 발생시킬 수 있는 강우량에 해당한다.

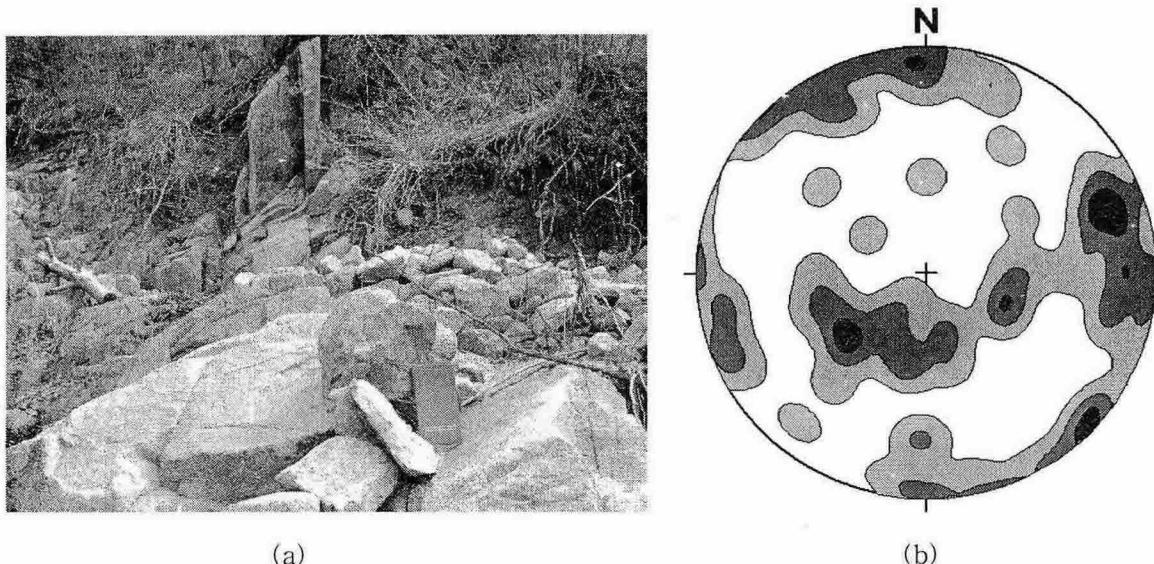


그림 2. 연구지역에 발달하는 절리(a)와 등면적 하반구 입체망에 투영한 절리(b)

연구지역은 강릉시 사천면과는 달리 2000년도 동해안 산불이 발생한 지역은 아니지만, 연구지역 대부분의 산림을 구성하는 소나무가 솔잎혹파리의 피해를 입어 대규모 벌목을 실시한 지역이다. 따라서 산불에 의한 산림훼손은 아니지만 벌목으로 인해 넓은 지역의 산림이 제거된 상태에서 집중호우가 내렸다. 집중호우 당시 사태물질도 하천으로 유입되었지만 산에 쌓아둔 벌목한 나무등 치들이 하천으로 유입되어 흘러가다가 다리교각에 걸려 물의 흐름을 방해하고 오히려 댐 역할을 하여 하천을 범람시키는데 더 기여하기도 하였다.

연구지역에서 산사태의 발생현황과 기하학적인 특성을 분석하기 위하여 야외조사를 실시하였으며, 조사시 사용한 지형도는 1:5,000지형도를 이용하였으며, 산사태가 가장 집중적으로 발생한 지역에서 840개의 산사태를 기재하였다.

연구지역에서 발생한 산사태는 그 유형은 강릉시 사천면 산불지역에 발생한 산사태와 비슷한 형태를 보여주는데(조용찬, 2003), 그림 3에서 보는바와 같이 대부분이 상단부의 토층이 붕괴되면서 시작하여 사태물질이 하류로 흘러가는 토석류(debris flow)의 형태를 나타내고 있었다. 따라서 사태의 깊이는 1m 이내의 얕게 나타나며, 집중된 위치는 그림 3에서 보는바와 같이 벌목을 해서 나무가 없는 지역에 산사태가 많이 발생하였음을 알 수 있다. 또한 연구지역의 지질이 대부분 화강암으로 구성되어있어 이 지역의 토층은 대부분이 화강암의 풍화토인 모래질로 구성되어 있다.

산사태가 발생한 지점의 풍화정도는 대부분이 MW와 HW정도의 경계면에 해당하였다. 사태가 발생한 후 노출된 암반의 상태는 대부분이 MW정도의 풍화상태를 보여주고 있다. 따라서 모래질이 많은 토층이 MW와 HW의 경계를 따라서 강우가 침투되면서 마찰력의 저하를 일으켜서 결국

전단응력이 감소하여 발생한 산사태로 추정된다.

발생한 산사태의 길이(그림 4a)는 21~30m가 약 30.2%로 가장 높은 빈도를 보여주며, 30m 이하는 49.6%로 전체 산사태의 절반에 해당하고 있다. 50m 이하는 전체의 73.9%, 60m 이하는 86.3%로 비교적 짧은 산사태임을 알 수 있다.

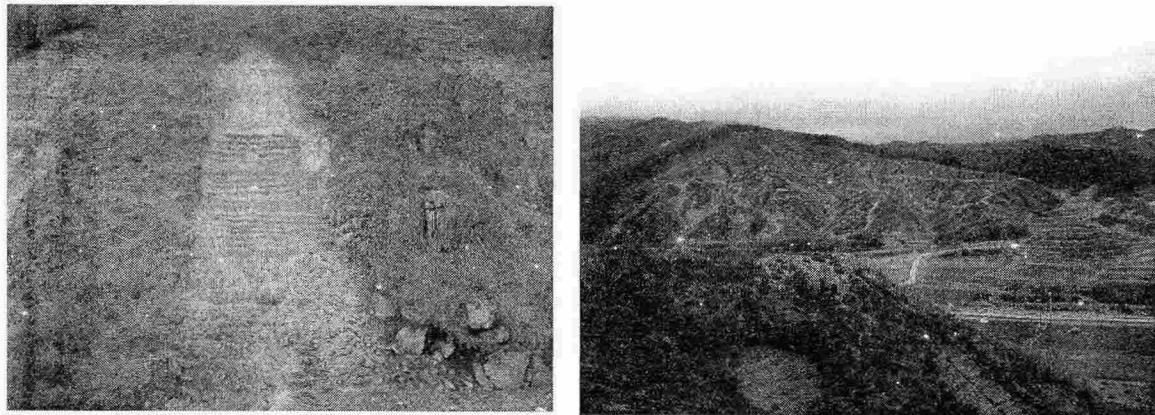


그림 3. 연구지역에 발생한 산사태 형태.

산사태가 발생한 지점의 사면경사(그림 4b)는 20° 이하는 거의 없으며, $26\sim35^{\circ}$ 의 경사가 전체의 74.1%로 삼분의 이에 해당하는 산사태가 이 사면 경사 범위에서 발생하였다. 이는 화강암 지역에서 표토층의 두께가 비교적 짧은 지질학적 특성이 반영된 것으로 판단된다.

발생한 산사태의 폭은 산사태가 시작한 상단부의 폭(그림 4c)과 산사태가 끝나는 하단부의 폭(그림 4d)으로 나누어 기재하였는데, 그림에서 보는 바와 같이 10m 이하가 75.2%정도로 가장 많은 빈도를 보여주고 있으며, 사태가 시작하여 하단부로 갈수록 폭이 소폭 넓어지는 경향을 보여주고 있다.

그림 4의 그래프들로 연구지역에서 발생한 산사태의 기하학적 평균 규모는 길이는 30m 내외, 폭은 10m 내외, 발생한 지점의 사면경사는 35° 내외임을 알 수 있다. 이러한 산사태의 규모는 사천지역과는 다소 비슷하지만, 강릉 분기점 부근의 산사태나 속초에서 발생한 산사태 보다는 비교적 작은 규모임을 알 수 있다.

이 지역에서 발생한 산사태의 특징 중에 주목할 만한 것은 사태가 발생한 사면의 경사 방향이다. 그림 5a에서 보는 바와 같이 사면방향에 따른 산사태가 발생한 빈도는 뚜렷한 차이가 있다. 북북동에서 동쪽 방향에 해당하는 방위각 $21\sim100^{\circ}$ 의 방향으로는 전체의 34.7%의 산사태가 발생하였지만, 남동에서 남남서 방향에 해당하는 방위각 $141\sim220^{\circ}$ 의 방향으로는 전체의 10.4%의 산사태만이 발생하였다. 이러한 양상을 보여주는 원인을 분석하기 위하여 연구지역 전체의 사면방향의 빈도를 구하여 보았다(그림 5b). 연구지역 전체의 사면방향 분석에서 북북동에서 동쪽방향에 해당하는 사면의 빈도는 약 17.4%, 남동에서 남남서에 해당하는 방향은 약 42.9%를 나타내고 있다. 사면의 빈도는 전자가 훨씬 적지만 산사태 발생빈도는 아주 높게 나타나고 있다. 이는 연구지역의 지질분포가 대부분 화강암으로 균질한 편에 속하면서 이러한 경향을 보여주고 있다.

이러한 경향은 사천지역(조용찬 외, 2003)의 경우와도 거의 일치하고 있다. 사천지역은 산불지역이면서 지리적으로도 아주 가깝게 위치하고 있으며, 구성암석도 연구지역과 동일한 화강암으로

구성되어 있다. 이러한 경향을 보여주는 데는 여러 가지 원인이 복합적으로 작용 할 수 있지만, 그중 중요한 원인으로는 비가 내릴 당시의 바람의 방향과 깊은 연관이 있을 것으로 추정 할 수 있으며, 연구지역의 경우는 지형적으로 북북서-남남동의 발달한 구조선들로 형성된 계곡이 많이 분포하고 있는 점도 주목할 점이다.

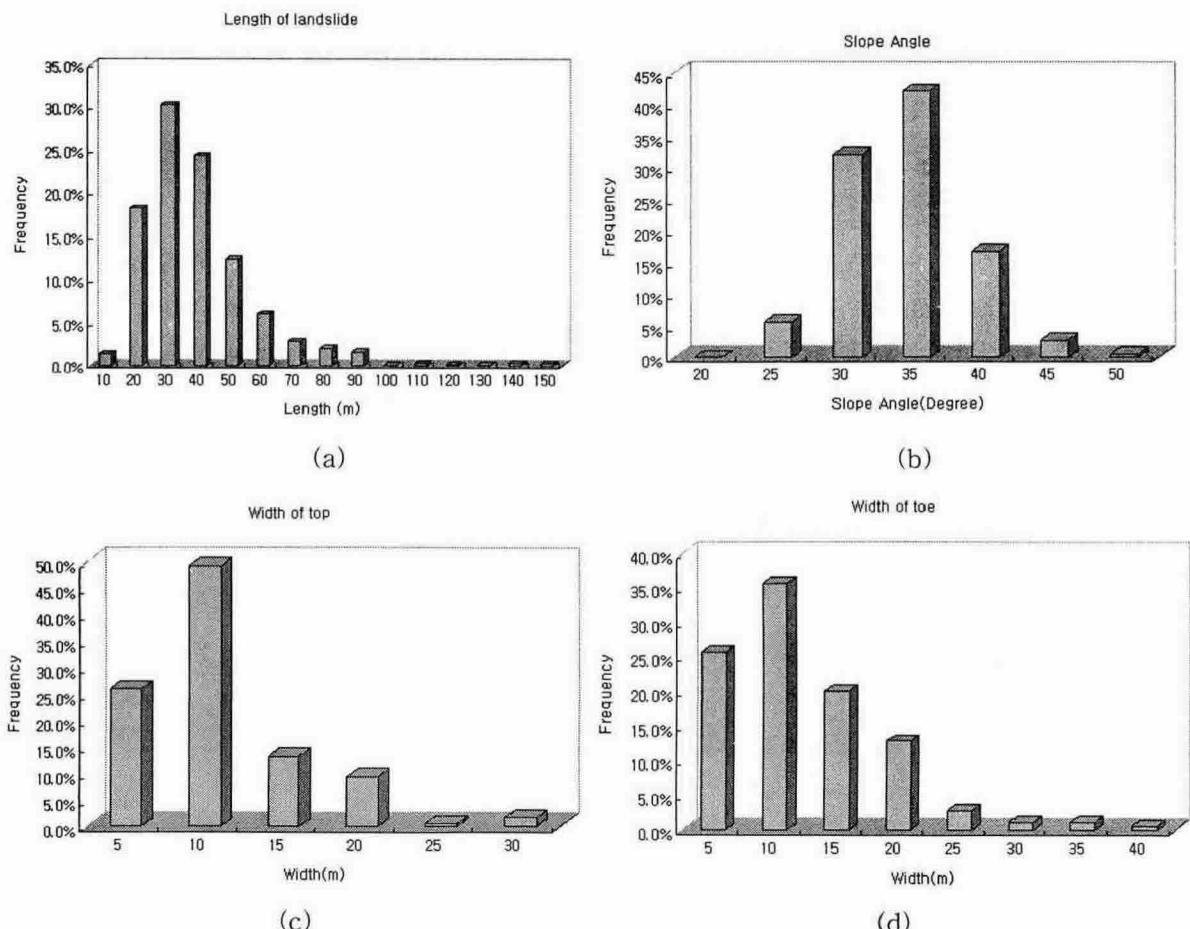


그림 4. 연구지역 산사태의 기하학적 특징. (a) 산사태의 길이, (b) 사태가 발생한 사면의 경사각, (c) 산사태 상단부의 폭, (d) 산사태 하단부의 폭

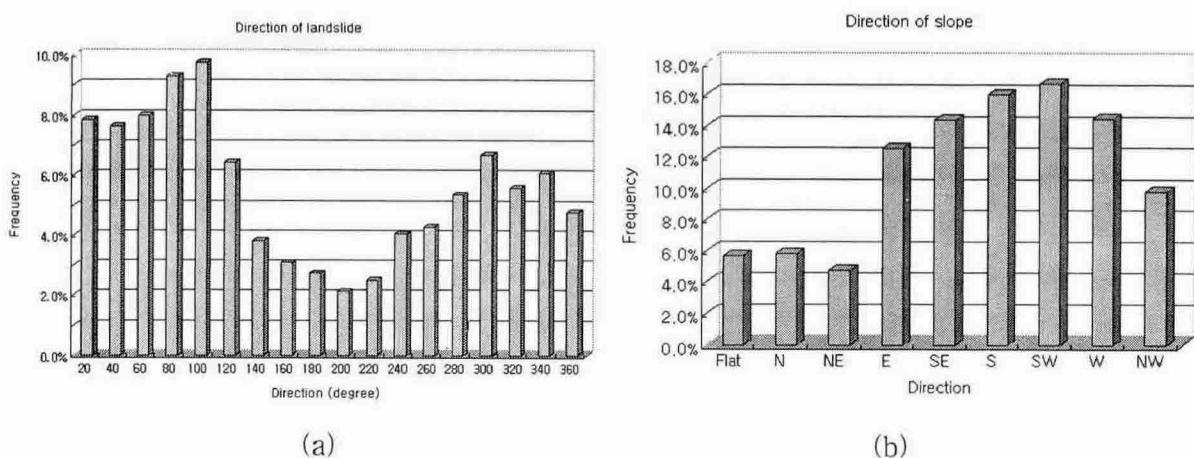


그림 5. 연구지역의 사면방향. (a) 산사태가 발생한 사면의 방향, (b) 연구지역 전체의 사면방향

5. 향후연구방향

하루 800mm 이상의 강우가 내린 연구지역에서 발생한 산사태는 발생 빈도에 있어서는 산불이 발생한 지역과 그렇지 않은 지역에서 뚜렷한 차이를 보여 주었는데(조용찬 외, 2003), 산불이 아니고 인위적인 별목을 실시한 지역에서도 그러한 경향은 같이 보여주고 있다. 이는 식생이 산사태와 관련해 기여하는 바에 대한 것을 추정할 수 있는 자료로 활용할 수 있다.

우리나라에서 산사태를 발생시키는 폭우의 경우 태풍과 함께 수반되는 경우가 많은데, 산사태가 발생할 때 강우량뿐만 아니라 바람의 방향과 세기 역시 산사태 발생에 영향이 있는 것으로 추정된다.

향후에는 산불이 난 지역, 별목을 하여 식생이 황폐해진 지역과 식생이 잘 보존된 지역 등에 대한 비교 분석을 통하여 식생이 산사태에 미치는 영향 및 산불로 인한 토질 특성의 변화가 산사태에 미치는 영향 등을 파악하고, 나아가 폭우가 내릴 당시의 바람의 방향이 산사태 발생에 기여하는 점 등에 대한 연구를 진행 할 계획으로 있다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 기본연구사업 '산사태 위험도 산정시스템 및 피해저감기술 개발' 과제의 일환으로 수행된 것이다.

참고문헌

- 김정찬, 고희재, 이승렬, 이창범, 최성자, 박기화, 2001, 1:250,000 강릉-속초 지질도록 설명서. 한국지질자원연구원, 76 p.
- 조용찬, 김경수, 이춘오, 채병곤, 김원영, 2003, 태풍‘루사’에 의해 발생한 강릉지역의 산사태의 특징, 대한지질공학회 정기총회 및 학술발표회, 21-26.
- Jin, M.S., Gleadow, A.J.W. and Lovering, J.F., 1984, Fission track dating of apatite from Jurassic and Cretaceous granites in South Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, 20, 257-265.
- Oliver, M., Bell, F.G. and Jemy, C.A., 1994, The effect of rainfall on slope failure, with examples from the Greater Durban area. Proceeding 7th intern. Cong. IAEG, 3, 1629-1636.