

강릉지역 산사태의 기하학적 특성과 절리특성에 관한 연구

조용찬*¹ · 장태우²

¹한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

²경북대학교 지질학과

The Geometric Characteristics of Landslides and Joint Characteristics in Gangneung Area

Yong-Chan Cho^{1*} and Tae Woo Chang²

¹Geological & Environmental Hazards Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Dept. of Geology, Kyungpook National University

2002년 태풍 '루사'로 인하여 집중호우가 내린 강릉지역에는 3,000개가 넘는 토석류 산사태가 발생하였다. 그 중에서도 산사태가 가장 집중적으로 발생한 강릉시 사천지역과 주문진-연곡지역의 산사태를 대상으로 야외조사를 통해 1,365개소의 산사태 자료를 수집하여 산사태 발생 원인과 기하학적 특징에 관해 분석하였다. 연구지역에 발생한 산사태의 평균 규모는 폭 10 m, 길이 30 m, 사면경사는 21°~35°로 분석되었고, 산사태의 평면형상은 사태의 상단부보다 하단부의 폭이 넓은 'A'형태가 50.5% 정도를 차지하고 있다. 그리고 사천면의 산불피해 지역은 산사태의 발생 빈도가 더 높게 나타나고 있다. 산사태가 발생한 사면의 방향은 일정한 경향을 보여주는데, 그 원인은 풍화에 의한 지형적 특징과 집중호우가 내릴 때 동반된 강한바람의 영향인 것으로 해석되었다. 연구지역에서 249개의 절리를 측정하여 방향성을 분석하였으며, 절리밀도를 산정하기 위하여 51개소에서 창틀 조사방법을 수행 하였으며, 그 결과 절리 밀도가 0.05~0.1 범위에 해당하는 지역에서 산사태가 많이 발생하였다.

주요어 : 산사태, 기하특성, 평면형상, 산불, 절리밀도

More than 3,000 landslides were occurred by torrential rains in Gangneung area due to the typhoon Rusa in 2002. In order to analyze the landslide origin and its geometric characteristics, 1,365 landslide data were collected from the field survey of Sacheon, Jumunjin, and Yeongok areas in which the intensive landslides took place. The average landslide size in the study area was composed of 10m width, 30m length, and 21°-35° slope angle, and the plane view of landslides A-type (i.e. wide shape of lower part) that contains approximately 50.5% of the landslides commonly occurred. In particular the area of Sacheon heavily damaged by mountain fires had more occurrence of landslides than other areas. The landslides of uniform tendency of slope direction were examined resulted from the contribution of topographic characteristics due to the weathering and wind direction during heavy rainfalls. In order to analyze the direction of joint, 249 orientation data were collected from the study area. The window method was employed to determine the characteristics of joint density in 51 locations of the study area. The results showed that many landslides occurred in the areas of joint density with the range of 0.05~0.1.

Key words : landslide, geometric characteristics, plane view type, mountain fire, joint density.

서 론

우리나라는 매년 여름철이면 태풍에 동반된 집중호우

로 인해서 많은 산사태가 발생하는데, 산사태로 인해서 발생하는 급격한 산지의 침식과 사태물질의 퇴적은 지형을 변화시키기도 하지만, 그 영역 내에 인간의 생활권

*Corresponding author: choych@kigam.re.kr

이 포함되기 때문에 자연재해로 규정하고 피해를 저감하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 기상이변 등으로 인해 산사태에 의해 발생하는 피해는 최근 10여년간 그 규모가 증가하는 추세에 있다(박덕근, 1999)

2002년 8월 30일 우리나라에 상륙한 태풍 '루사'는 우리나라 강우관측사상 일일 최대강우량(870.5 mm)을 기록하며 사상 그 유래를 찾을 수 없는 피해를 유발하였는데, 전국적 피해규모는 재산피해 5조 1,479억원, 인명피해 321명(사망 209, 실종 37 부상 75)에 달한다(심재현 외, 2002). 그리고 강릉지역은 이틀간 898 mm의 강우량을 기록하면서, 이로 인해 3,000개가 넘는 산사태가 발생하였는데, 특히 강릉시 사천면 지역은 2000년 4월에 발생한 대규모 산불로 인하여 넓은 지역의 산림이 황폐해지는 피해를 겪었던 지역이다.

강릉지역에 발생한 산사태의 발생현황, 원인 및 피해 규모에 대한 조사는 다른 연구자들에 의해서도 수행되었는데, 국립방재연구소는 태풍 '루사'에 의해 큰 피해를 입은 영동지방과 김천지방의 강우, 산사태, 홍수, 교량, 절개사면등에 대하여 광범위한 조사를 수행하여 피해현황과 대책에 대한 보고서를 발간하였고(심재현 외, 2002), 서흥석과 한성길(2003)은 강릉지역의 피해규모, 기상특성을 분석하고 11개 지점의 개별 산사태에 대한 특징을 기술하고 보강공법에 대한 의견을 제시하였다. 이명진 외(2004)는 GIS와 원격탐사 기법을 이용하여 산사태 발생 위치와 영향인자와의 상관관계 분석을 실시하였다. 그러나 본 연구는 기존에 수행된 방법과 달리 야외조사를 통해 1,300여개의 산사태에 대한 위치 및 기하양상을 조사·기재하고 이를 바탕으로 산사태의 기하학적 특성 분석을 실시하고, 구조지질학적 조사 및 분석을 통해 절리방향특성과 밀도를 산정하여 산사태 발생과의 관계를 파악해 보고자 한다.

지형 및 지질

강릉지역은 우리나라의 중추산맥에 해당하는 태백산맥의 동쪽인 영동지역의 중앙에 위치하고 있는데, 연구지역은 강릉지역 중에서 산사태의 발생이 집중된 사천지역과 주문진-연곡지역을 선정하였다(Fig. 1a). 사천지역의 지형적 특징은 동쪽은 전형적인 노년기 구릉지형을 보여주며 해발고도 150 m 이하에 해당하며, 서쪽으로 갈수록 오대산쪽에 가까워지면서 산세는 험준해지고 해발고도도 높아지면서 장년기 지형을 나타낸다. 이 지역의 수계는 동서 방향의 구라미천과 남서-북동 방향으

로 흐르는 사천천이 있으며, 사천천 주변은 평야 지역을 형성하고 있다. 주문진-연곡지역도 동쪽은 구릉지형을 나타내고 서쪽으로 갈수록 장년기 지형이 나타난다. 이 지역의 수계는 중심부에 신리천이 서에서 동으로 흐르고 있으며, 남쪽에는 연곡천이 같은 방향으로 흐르고 있다. 신리천과 연곡천은 동서방향의 비교적 넓은 폭의 직선형태의 계곡발달을 보여주고 있으며, 두 계곡 사이의 지역에서는 북북서-남남동 방향의 소계곡들이 평행하게 잘 발달하고 있다.

강릉지역일대의 지질은 선캠브리아기 편마암류와 쥐라기 화강암류로 구성되는데, 선캠브리아기 편마암류는 복잡한 변형 및 변성작용으로 층석적 분류가 불가능하여 경기편마암복합체로 분류되는 암석이며, 화강암은 연구지역 서쪽에 분포하고 있는 선캠브리아기 편마암류를 중생대 쥐라기에 관입한 대보화강암에 해당한다(김정찬 외, 2001). 야외조사에 의하면 연구지역의 화강암은 흑운모 화강암 보다는 복운모 화강암이 흔히 나타나고 있으며, 중립질 내지 거정질로서 암석의 풍화가 진행되는 곳에서는 거정의 백운모 광물들을 흔히 관찰할 수 있다. 따라서 연구지역은 대체로 우백질 화강암이 넓게 분포하고 있으며, 이 화강암에 대한 절대연령은 Rb-Sr 흑운모 연대로 173 ± 0.4 Ma, 175 ± 1.4 Ma가 보고된 바 있다(Jin *et al.*, 1984).

강우 특성

연구지역에 대한 야외조사를 실시하기에 앞서 강릉시 전체에서 발생한 산사태의 발생현황을 조사하였다(강릉시, 2002; 심재현 외, 2002). 강릉지역에서 태풍 '루사'로 인해 발생한 산사태는 3,033개소에 그 피해면적은 약 486ha에 달한다. 태풍으로 인한 피해규모는 금액으로는 8천억원이 넘으며, 인명피해도 68명에 이른다(강릉시, 2002). 연구지역이 위치하는 사천면, 연곡면, 주문진읍에 발생한 산사태만 해도 1,662개로 전체의 절반이 넘는 54.8%에 해당한다. 본 연구에서 야외조사를 실시하여 조사한 산사태 개소수는 사천지역이 525개소, 주문진-연곡지역의 840개소로서 모두 1,365개소에 달한다.

연구지역에서 산사태를 발생시킨 직접적인 원인은 태풍에 동반된 집중호우이기 때문에 연구지역에 대한 강우분석을 수행하였다. 이를 위해 강원도지역의 지방기상청과 자동기상관측시스템(AWS: Automatic Weather System) 자료를 조사하였으며(Table 1; 대전지방기상청, 2005), 이 자료를 바탕으로 강원도 지역 강우량의 등우

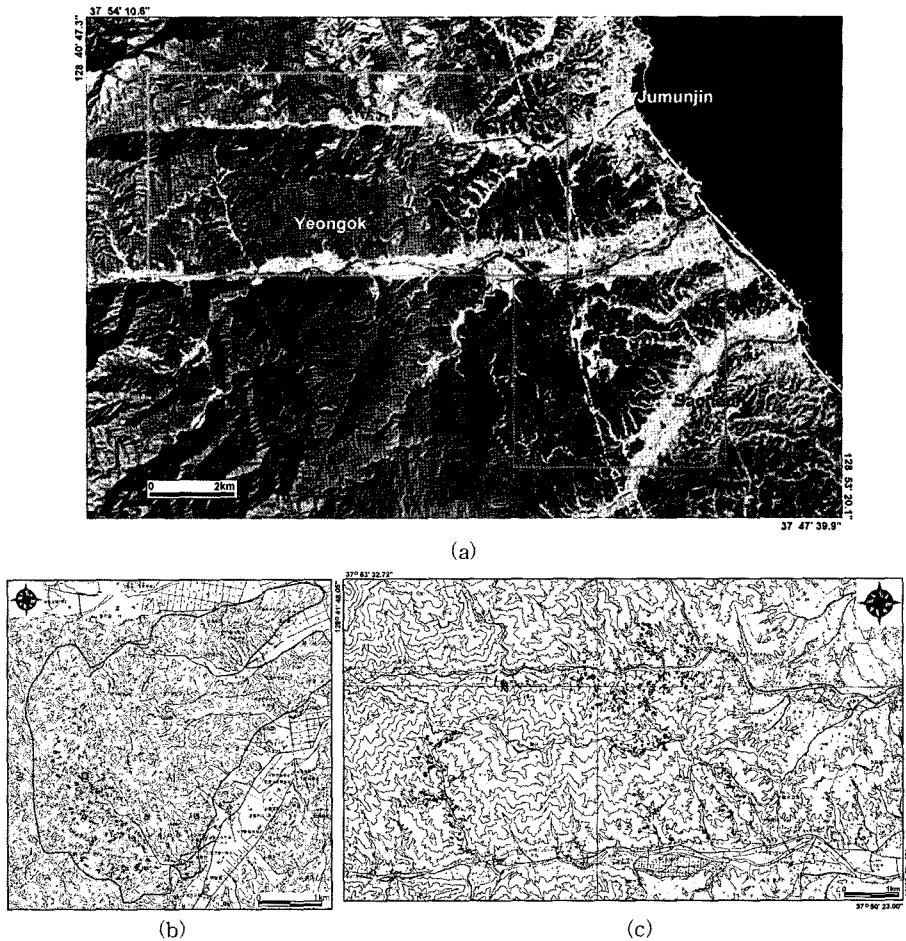


Fig. 1. Map of the study area (a) satellite image around Gangneung area (b) map of Sacheon area, (c) map of Jumunjin-Yeongok area (Black dots are location of landslides).

Table 1. Rainfall records measured at Gangwon province.

Location	Gangneung	Daegwanryung	Donghae	Jumunjin	Jinbu	Sogumgang	Ogye	Sacheon1*	Sacheon2*
Total	898	760	336	498	167	435	304	959	892
24hr	870.5	712.5	319.5	483	154.5	420	303	944.5	877
Max. of hour	98	60.5	57	58.5	20.5	41	90	107	88

*: measured by Shim *et al.*, 2002

선도를 작성하였다(Fig. 2).

강원도지역의 강우특성은 태백산맥을 기준으로 영동 지역인 강릉지역에 가장 많은 강우가 내렸으며, 영서지역으로 갈수록 강우량은 급격히 감소하는 양상을 나타내고 있다. 강우가 이러한 양상을 나타내는 이유는 영동 지역에서 해양성의 차가운 공기와 육지의 더운 공기가 만나 전선을 형성하였고, 태백산맥의 산록에 의하여 습윤 상승기류가 형성되어 지형성과 저기압성이 혼합되어

강릉 지역이 중심이 되면서 최대 강우량이 이곳에 정체되어 나타났다(심재현 외, 2002). Table 1에 제시된 지역 중 사천1과 사천2지역은 강릉대학교에서 운영하는 장비로서 강릉시 사천면 노동리 산불발생지역에 위치하고. 있는데, 사천지역의 경우 강릉지역보다 더 많은 959 mm의 강우량을 기록하고 있다.

연구지역에 인접한 주요지역에 대한 누적강우분포와 강릉지역의 시간별 강우량을 그래프로 작성하였다(Fig.

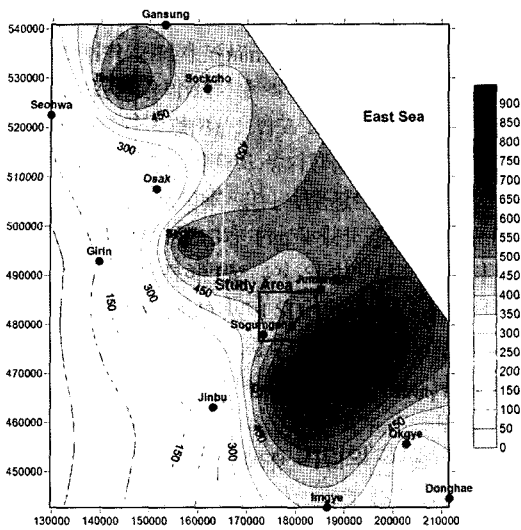


Fig. 2. Contour diagram of rainfall at Gangwon province.

3). 연구지역의 강우는 8월 30일 04시경부터 시간당 수 mm 내외의 적은 강우량을 기록하면서 시작하였다. 이후 31일 04시경부터는 시간당 19 mm 강우량을 기록하면서 본격적인 집중호우가 시작되었고, 당일 23시에 98 mm의 최대 시우량을 기록하면서 9월 1일 01시까지 이어졌는데, 이 기간 동안 내린 총 강우량은 898 mm에 달한다. 31일 18시~23시 사이의 5시간 동안은 평균 56~98 mm/h의 강우강도를 기록하면서 연구지역에 많은 산

사태를 발생 시켰다.

강릉지역 산사태의 기하특성

사천지역 산사태

강릉시 사천면 일대는 2000년 4월 발생한 동해안 산불의 주요 피해지역 중의 하나이다. 사천면 석교리에서 발생한 산불은 강풍을 타고 확산되어 약 1,447ha의 산림을 소실시켰다(동해안산불피해공동조사단, 2000). 그리고 산림이 황폐해진 지역이 미처 복원되기 이전인 2002년도에 태풍에 수반된 집중호우로 인하여 많은 산사태가 발생하였다. 따라서 사천지역에서 조사대상지역은 산불피해지역을 중심으로 하되, 산사태가 집중적으로 발생한 영역으로 한정하였다(Fig 1b). 조사대상지역의 지리좌표는 동경 128° 47' 59.7"에서 51' 29.3", 북위 37° 48' 06.3"에서 50' 54.8"에 해당하며, 이 지역에서 1:5,000 지형도를 이용하여 야외조사를 수행하여 직접 기재한 산사태는 모두 525개이다. 조사방법은 1:5,000 지형도에 산사태의 모양을 축척에 맞게 작도하고 주요 산사태에 대해서는 산사태조사시트를 작성하였다.

사천면 지역에서 발생한 산사태의 유형은 대부분 사면 상단부의 토층이 암반 경계부를 따라 붕괴되는 전이형 활동(translational slide)으로 시작되어 사태물질이 계곡부에 모여서 하류로 흘러가는 토류(earthflow)로 바뀌는 형태를 나타내고 있다(Fig. 4). 이 지역의 암층이 화

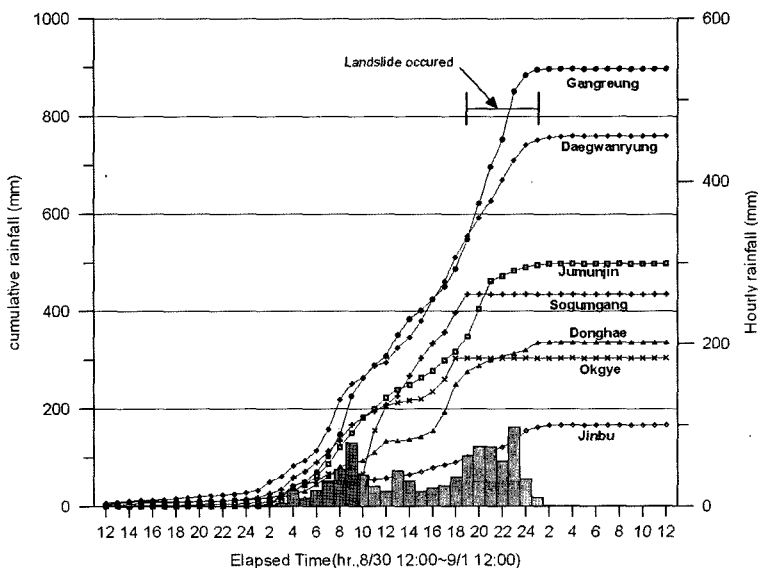


Fig. 3. Cumulative curves of the rainfall data at the study area.

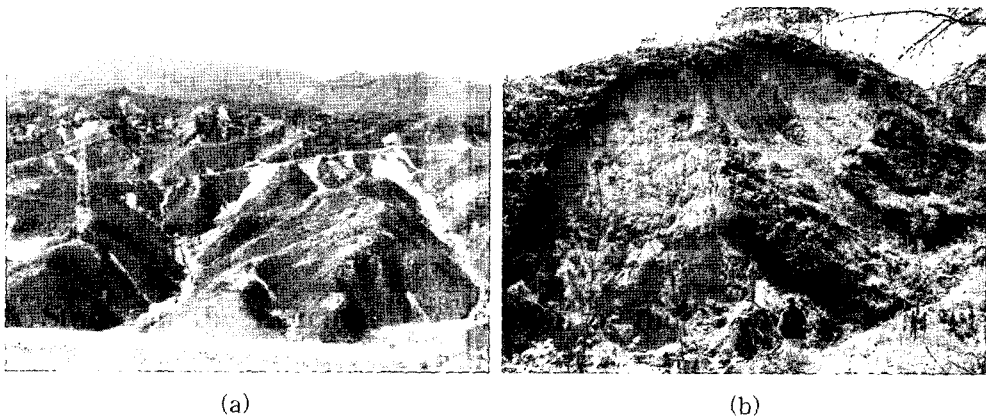


Fig. 4. Landslides occurred at Sacheon area (a) landslides at mountain fire area, (b) general type of landslide.

강암으로 구성되어 있어 이 지역의 토층은 대부분 화강암의 풍화산물인 모래와 실트질로 구성되어 있었는데, 산사태로 인하여 엄청난 규모의 모래질 사태물질이 하부로 이동하여 도로, 전담 및 가옥 등이 이것에 매몰되었다.

이 지역의 산사태는 표층에서부터 풍화도가 MW내지 HW정도 되는 기반암과의 경계면을 따라 붕괴가 시작되어 발생하였다. 이것은 표층에서부터 유입되는 강우가 MW정도의 풍화대를 만나면서 더 이상 침투하지 못하고 그 경계면을 따라 내부에서 유동이 발생하고 이에 따른 토층의 전단강도가 저하되며, 물의 하중이 가중된 표층의 무게를 감당하지 못하고 암반과의 경계를 따라서 발생한 산사태이다.

발생한 산사태의 폭은 대체로 3~30 m의 범위를 보여 주지만 10 m 내외가 51.2%로 절반이상의 빈도를 보여 준다(Fig. 5a). 산사태의 길이는 10~120 m의 범위를 보여 주지만 21~40 m가 60%로 많은 빈도를 나타내고 있다(Fig. 5b). 이러한 기하적인 양상을 볼 때 사천면 지역에 발생한 산사태의 크기는 대체로 10 m 정도의 폭에 30 m 내외의 길이를 가지는 규모가 가장 많이 분포하고 있다. 산사태가 발생한 사면의 경사각은 10°~50°의 범위를 보여 주지만, 21°~25°인 경우가 33.1%로 가장 빈번하게 나타나고 있다(Fig. 5c). 사면의 경사각이 21°~35°인 경우에 발생한 산사태는 93.3%로서 대다수의 산사태가 이 정도의 경사에서 발생하였다. 이것은 우리나라에서 발생하는 산사태의 많은 수가 이 정도의 경사에서 발생하는 것과도 일치한다(김경수 2005). 산사태가 발생한 지점을 분석해 보면 52.2%의 산사태가 해발고도 40~120 m에 해당하는 곳에서 발생하였다(Fig. 5d).

이 지역의 해발고도가 다소 낮은 것은 전술한 이 지역의 지형적 특징 때문이다. 그러나, 산사태가 발생한 지점을 능선부에 대한 상대고도로 파악하면 능선의 7부 내지 9부 지점에 해당하는 곳에서 대부분 발생되었다. 이러한 양상은 사면 경사각의 변화와 관련이 있다. 실제 사면경사는 능선부에서 사면 하부로 가면서 수평에서 시작하여 점진적으로 증가한다. 따라서, 대체적으로 사면의 9부 능선에서부터 사면의 경사각이 20° 이상으로 변하기 때문이다.

사천지역에서 발생한 산사태의 특징 중 특이한 점은 산사태가 발생한 사면 방향의 경향성이 있다. Fig. 5.9(a)에서와 같이 사면의 경사방향에 따라 산사태가 발생한 빈도가 뚜렷한 차이를 나타내고 있는데, 340~020° 방향의 사면에서는 130개 24.7%의 산사태가 발생하였지만 이와 거의 반대되는 160~260° 방향의 사면에는 단지 15개 2%의 산사태만 발생하였다. 사면의 방향성을 구분하기 쉽게 표현하기 위하여 장미그림을 작성하였는데(Fig. 6), 분석 간격은 20°로 하되 그림으로 표현은 10°만 나타내었다(즉 0°~20°에 해당하는 값을 10°~20°의 막대로 표현). 산사태가 발생한 사면방향의 장미그림(Fig. 6a)을 보면 북동방향의 사면에서는 발생 빈도가 높지만, 남서방향의 사면에서는 거의 발생하지 않았다. 이러한 원인이 연구지역 전체사면방향의 특이성에 의한 것인지를 확인하기 위하여 전체사면방향을 분석해 보았다(Fig. 6b). 연구지역 전체사면방향의 분포는 동쪽방향의 사면이 가장 많이 분포하기는 하지만, 대체로 모든 방향에 대해서 고루 분포하고 있다고 평가할 수 있다. 따라서 연구지역은 전체가 화강암이 분포하는 지역이면서 지질학적 변동의 기록이 없는 지역이기 때

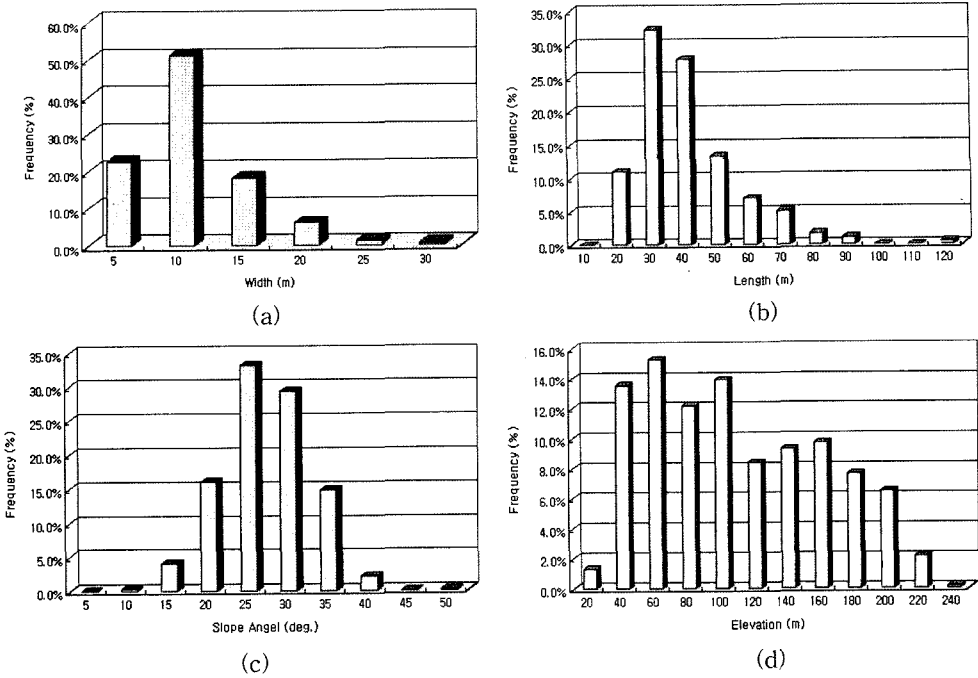


Fig. 5. Distribution of landslide geometry at Sacheon area (a) width of landslide, (b) length of landslide, (c) slope angle at triggering point, (d) elevation at triggering point.

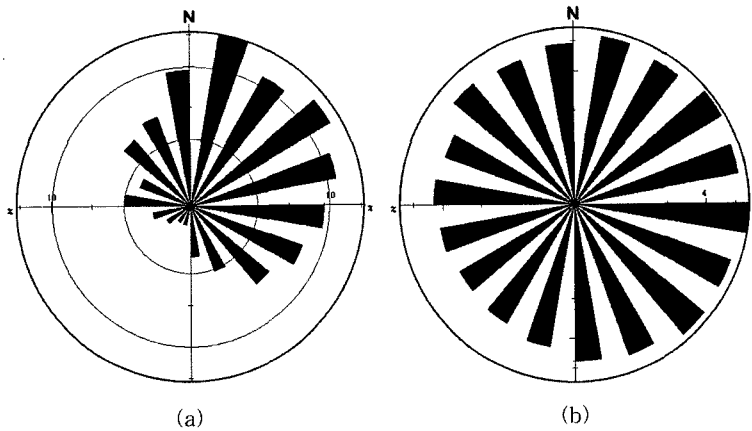


Fig. 6. Rose diagram of slope direction at Sacheon area (a) direction of landslide, (b) direction of the whole mountain slope.

문에, 이런 현상의 원인은 지질의 차이에서 기인한 것은 아니고 다른 요인이 작용한 것으로 판단된다. 이와 관련한 내용은 토의에서 다시 다루도록 하겠다.

주문진-연곡지역 산사태

주문진-연곡지역은 전술한 사천지역의 북쪽에 위치하고 있으며 지리좌표로는 동경 128° 41' 48.01"~48'

50.3", 북위 37° 50' 23.0"~53' 32.7"에 해당한다. 이 지역은 산불피해지역은 아니지만 중심지역에 대규모 벌목지역이 위치하고 있다. 이 벌목은 2002년 이전에 수행되었으며, 당시 우리나라 동해안 소나무에 큰 피해를 주며 전파되는 솔잎혹파리를 방재하기 위함이었다.

주문진-연곡지역도 사천지역과 동일한 방법으로 정밀 조사를 실시하였으며, 840여개의 산사태를 기재하였다

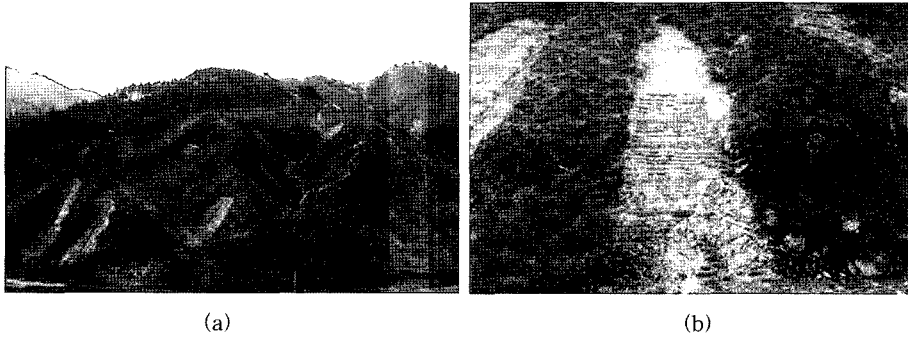


Fig. 7. Landslides occurred at Jumunjin-Yeongok area (a) landslides at felling area, (b) general type of landslide.

(Fig. 1c). 이 지역도 산림이 제거된 벌목지역에서 산사태 발생빈도가 더 높게 나타나고 있으며(Fig. 7a), 발생한 산사태의 유형도 사천지역에 발생한 산사태와 유사하게 산사면의 상단부에서 전이형 활동으로 발생하여 계곡부를 따라 토류로 변하는 유형이 대부분이다(Fig. 7b).

주문진-연곡지역에서 발생한 산사태의 길이는 21~30 m가 전체의 30.2%로 가장 높은 빈도를 보여주며 30 m 이하를 모두 합하면 49.9%로 절반의 산사태가 포함된다. 길이가 50 m 이하는 전체의 86.5%, 60 m 이하는 92.6%로 사천면 지역의 사태보다는 다소 더 긴 것들이 분포하고 있다(Fig. 8a). 산사태가 발생한 지점의 사면경사는 20° 이하는 거의 없으며, 31°~35°의 경사가 42.1%로 가장 많은 빈도를 나타내고 있다. 사면경사가 26°~35°의 경우는 전체의 74.1%의 빈도를 보여주고 있으나 36°이상은 20.3%에 불과하다(Fig. 8b). 이 지역의 사면경사는 사천면 지역보다 최고 빈도의 구간이 다소 더 큰 경사각을 보여준다. 발생한 산사태의 폭은 산사태의 평면적 모양을 분류하기 위하여 사태가 시작한 상단부의 폭(Fig. 8c)과 사태가 끝나는 하단부의 폭(Fig. 8d)으로 구분하여 조사하였다. 상단부와 하단부의 폭은 10 m 이하가 각각 75.2%, 61.5%로 가장 많은 빈도를 보여주고 있으며, 상단부 보다는 하단부의 폭이 다소 더 넓은 경향을 보여주고 있다.

주문진읍-연곡면 지역에서 발생한 산사태의 최빈값의 규모는 길이 30 m, 폭 10 m, 발생한 지점의 사면경사는 35° 정도에 해당한다. 이 정도 규모는 사천지역과 최대 빈도값으로는 다소 비슷하지만 최대값으로 비교하면 이 지역의 산사태가 사천면 지역보다 길이는 다소 더 길고 경사는 조금 더 급하게 분석되었다.

이 지역에 발생한 산사태도 사천지역과 유사하게 산사태가 발생한 사면방향이 일정한 경향성을 나타내고 있

다. 사면방향에 따른 산사태 발생 빈도는 뚜렷한 경향성을 보여주고 있는데, 산사태가 발생한 사면의 방향을 장미그림으로 그려보면 북북동에서 동쪽 방향에 해당하는 방위각 21°~100°의 방향으로는 전체의 34.7%의 산사태가 발생하였지만, 남동에서 남남서 방향에 해당하는 방위각 141°~220°의 방향으로는 전체의 10.4%의 산사태만이 발생하여(Fig. 9a), 북동방향의 사면에서 발생빈도가 높고, 남서방향의 사면에서 발생빈도가 가장 낮은 것을 알 수 있다. 이 장미그림도 앞의 사천지역과 마찬가지로 20°간격으로 분석한 것을 10°간격으로만 표현하였다. 이러한 양상은 사천지역과 방위각은 조금 차이가 있지만 북동방향에서 빈도가 높고 남서방향에서 빈도가 낮은 경향은 동일하다고 할 수 있다. 따라서 이 지역에 대해서도 전체사면방향을 분석해 보았다(Fig. 5.13b). 이 지역 전체사면방향의 분포는 방위각 161°~180° 방향인 남향 사면이 6.8%로 가장 높은 빈도를, 281°~300° 방향의 사면이 3.3%로 가장 낮은 빈도를 나타내며 다소 기복이 나타나지만, 이 차이의 크기는 이 지역 전체면적에 대해서 약 3%에 해당하는 것이다. Fig. 5.13의 두 장미그림을 비교해보면 산사태 발생빈도가 가장 낮은 방향인 남남서 방향이 가장 빈도가 높고 북서 방향의 사면이 빈도나 낮은 것으로 분석되고 있다. 따라서 전술한 사천지역과 이 지역 전체사면방향의 분포는 차이가 있는데 반해, 산사태가 발생한 사면방향은 유사한 형태를 나타내고 있다. 이 지역 역시 사천지역과 동일한 화강암이 분포하는 지역이어서 사천지역과 동일한 어떤 요인에 의한 영향으로 이러한 양상을 나타내는 것으로 판단된다.

산사태의 형태

산사태의 형태중 평면형상은 폭이 좁고 길이가 긴 것이 일반적이다. 그러나 모든 산사태의 형상이 이러한지

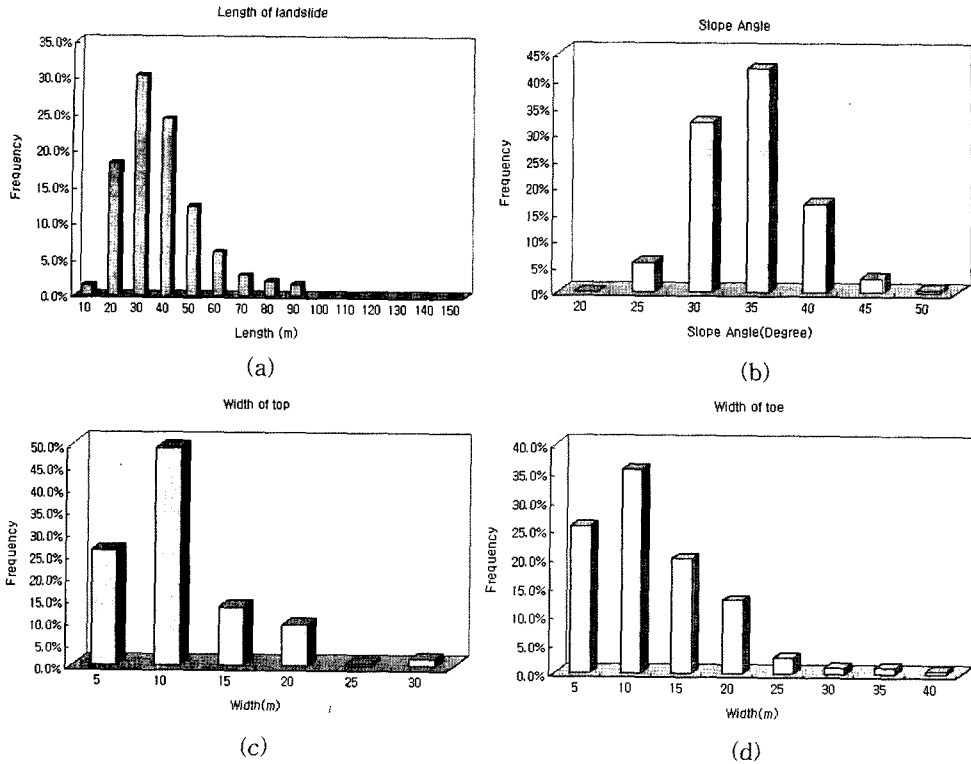


Fig. 8. Distribution of landslide geometry at Jumunjin-Yeongok area (a) length of landslide, (b) slope angle at triggering point, (c) width of landslide at head part, (d) width of landslide at toe part.

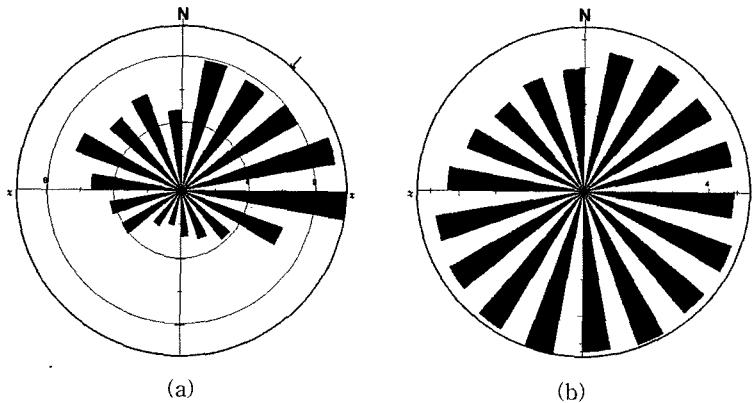


Fig. 9. Rose diagram of slope direction at Jumunjin-Yeongok area (a) direction of landslide, (b) direction of whole mountain slope.

는 않기 때문에 산사태의 평면형상에 대한 조사를 실시하였다. 산사태의 평면형상에 대해서는 일본의 국토개발기술연구센터(2003)에서는 길이에 대한 폭의 비를 이용해 각각 마제형(馬蹄形), 각형(角形), 락형(濼形) 및 병목형의 4가지로 구분 하였다. 가로 축을 산사태 길

이, 세로 축을 산사태의 폭으로 하여 그래프를 작성하여, 대각선(L/W=1)에 접시되면 길이와 폭이 비슷한 정사각형 모양의 각형(角形), 폭에 대한 길이 비가 0.8~1.5의 영역에 접시되면 마제형(馬蹄形), 그리고 1.5~5이상 되는 영역에 접시되면 락형(濼形)으로 분류

할 수 있다. 각형과 마제형의 경우는 암반이나 풍화암 지역에서 흔한 형태이고, 탁형의 경우는 붕적토 지역에서, 병목형은 점토질 토층에서 흔한 형태이다. 연구 지역에서 조사한 산사태의 길이와 폭을 이용하여 그래프를 작성하였다(Fig. 10). 연구지역의 산사태는 대부분이 폭보다 길이가 긴 우하단 영역에 점시되어 탁형의 모양으로 나타나고 있으나, 사태의 길이가 25 m 이하에서는 마제형과 각형의 영역에도 일부 점시 되고

있다. 그리고 산사태의 길이와 폭의 관계는 길이가 길어질수록 폭이 비례적으로 증가 하는 양상이 아니라, 길이는 사면길이에 따라 길어 질수 있으나 산사태의 폭은 대체적으로 40 m 이상을 넘지 못하고 있다.

산사태의 평면형상은 상부와 하부의 폭을 이용해서도 분류해볼 수 있다. 본 논문에서는 상·하부의 폭을 이용하여 산사태의 평면형상을 다음의 세 가지로 정의 하고자 한다(Fig. 11). 첫 번째로 산사태 상부의 폭이 좁고

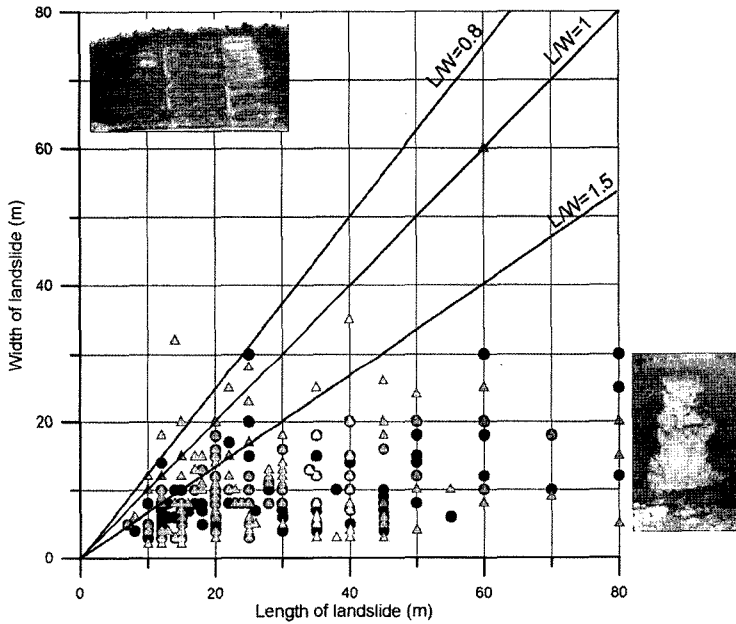


Fig. 10. Diagram of landslide length vs width (triangles; width at upper part, dots; width at lower part).

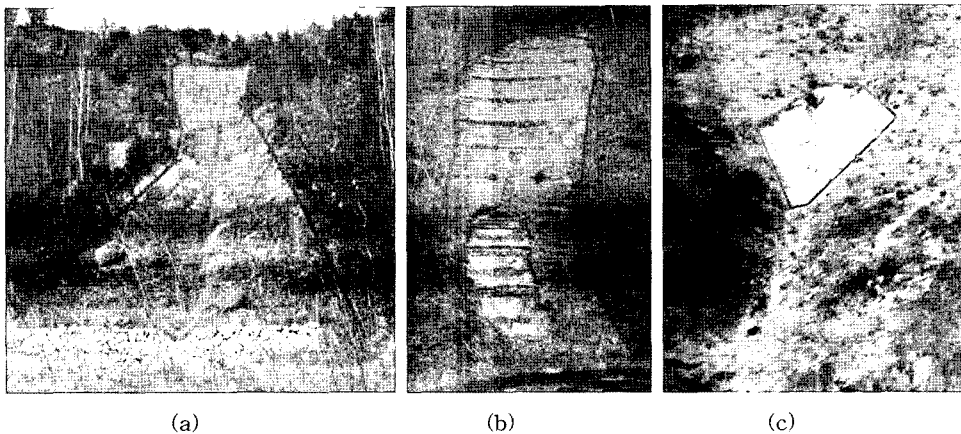


Fig. 11. Types of landslide in plane view (a) A-type(opening downward), (b) H-type (identical width), (c) V-type (closing downward).

하부로 내려 갈수록 폭이 점점 넓어지는 ‘A’ 형태(A-type)이며, 두 번째는 상부와 하부의 폭이 일정한 ‘H’ 형태(H-type)이며, 마지막으로 상부의 폭이 넓고 하부로 갈수록 폭이 좁아지는 ‘V’ 형태(V-type)이다. 산사태의 평면형상을 이렇게 구분할 수 있는 것은 각각의 형태에 따라 다른 특징을 나타내기 때문이다. ‘A’ 형태의 경우는 연구지역에서 발생한 산사태 중 50.55%의 비율로 가장 흔한 형태이며 이 모양은 산사태의 길이가 계곡부를 만날 때 까지 연장되면서 사태물질도 많이 형성시킨다. ‘H’ 형태의 경우는 연구지역에서 17.58%의 비율로 분포하고 있으며 그 특징은 ‘A’ 형태와 비슷하게 관찰된다. 두 가지 형태 모두 계곡이 잘 발달하는 곳의 양측사면에서 발생하면서 산사면의 기저부에서 부터 중·상부 지역까지 관찰되고 있다. 이에 반해서 ‘V’ 형태는 31.87%의 비율로 분포하고 있는데, 그 특징은 주로 해발고도가 높은 지역이거나 지형적으로 약간 오목한 지점에서 관찰되고 있으며, 산사태의 깊이(depth)가 전술한 두 경우 보다는 얇게 나타나고 있다. 따라서 산사태의 연장이 계곡의 바닥까지 연장되기 보다는 사면 중간에서 끝이 나는 경우가 대부분이며 일부의 산사태는 사태 말단부에서 사태물질의 이동경로 조차 관찰되지 않는 경우도 있었다. 이 형태는 병목형과 비슷하기는 하지만, 병목형은 점토질이 많은 토층에서 발생하고, 하부로 사태물질이 넓게 확산되는 형태이기 때문에 ‘V’ 형태와는 다른 형태로 판단된다. 각각의 형태에 대한 사태의 평균 경사각과 평균 깊이의 경우도 다소간의 차이를 나타내고 있는데(표 2), 사면 경사각은 29.7°~31.8°의 범위를 보여주는데 ‘V’ 형태가 근소하나마 큰 경사각을 나타내고 있으며, 산사태의 깊이는 36.5~66.3 cm의 범위에서 ‘A’ 형태가 가장 깊은 것으로 조사되었다. 따라

Table 2. Types of landslide in plane view at Jumunjin-Yeongok area.

Plane view type	Landslide (%)	Mean depth (cm)	Mean slope angle (deg.)
V-type	31.87	36.5	31.8
H-type	17.58	46.1	29.7
A-type	50.55	66.3	31.5

서 ‘V’ 형태의 산사태는 사태물질화 될 수 있는 표토층의 두께가 얇은 지점에서 발생하는 산사태 형태이며, 발생빈도는 전체 산사태의 삼분의 일 정도에 해당함을 알 수 있다.

절리 특성

절리의 방향

연구지역 중에서 주문진-연곡지역은 암석노두가 잘 발달하고 있고 임도가 잘 개설되어 있어 이 지역을 대상으로 절리조사를 실시하였다. 절리의 측정은 사태가 발생하여 기반암이 노출된 지역과 도로를 개설하면서 만든 절취사면 및 계곡을 따라 흐르는 소하천의 바닥노두를 주 대상으로 하였으며 절리의 방향과 간격, 틈 등을 기재하였다. 절리를 측정한 지점은 모두 94개소이며, 측정한 절리의 방향은 249개이다. 절리를 조사할 때는 신장절리이면서 규칙절리를 주 대상으로 하였고 비교적 연장이 좋은 전단절리도 포함하였다.

연구지역에서 측정한 249개의 절리를 등면적 하반구 입체투영망(equal area stereo net)에 투영하고, 빈도를 알아보기 위하여 등고선그림(contour diagram)을 작성하였다(Fig. 12a). 등고선 그림에서는 북북서-남남동 방향과 동서 방향의 2개 방향의 집중도를 보여주고 있으나

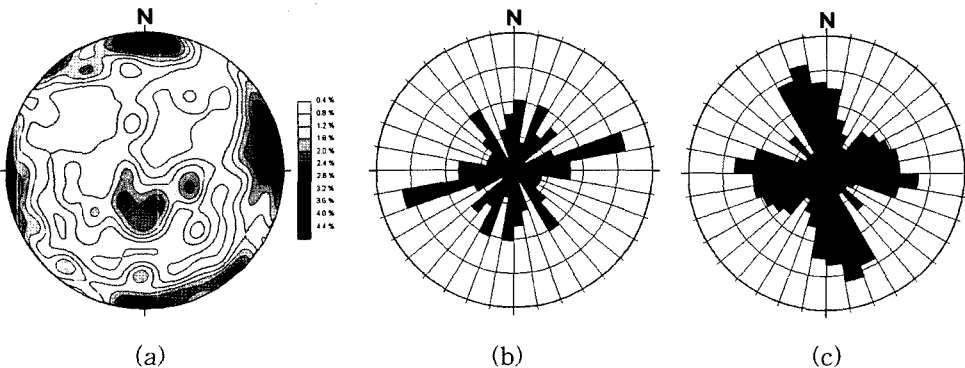


Fig. 12. Contour diagram and rose diagram of joints (a) all joints, (b) joints of low angle, (c) joints of high angle.

저각 절리의 경우는 대체로 판상절리들로서 방향의 집중성이 뚜렷하게 나타나지 않는다. 절리의 방향성을 뚜렷하게 구분해 보기 위하여 절리의 방향을 저각절리(경사각 45° 이하)와 고각절리(경사각 45° 초과)로 나누어서 장미그림(rose diagram)을 작성하였다(Fig. 12b & c). 장미그림에서 저각절리는 주로 화강암에 발달하는 판상절리로서 동북동-서남서 방향이 약간 우세하지만 대체로 골고루 발달하는 경향을 보여주고 있으며, 고각절리는 대부분 신장절리로서 동-서 방향과 북북서-남남동 방향이 우세한 경향을 보여주고 있다.

절리의 지역별 분포 특성을 분석하기 위하여 연구지역을 5개의 소구역으로 나누었다(Fig. 13). 지역을 나누는 기준은 산사태가 집중된 지역을 중심으로 하되, 사면 방향등의 지형적 위치 관계도 고려하였다. Rj-1, Rj-4, 그리고 Rj-5 번 지역은 남향 사면지역, Rj-2번 지역은 북향 사면지역, Rj-3은 능선부 지역에 해당한다. 그리고 Rj-5번은 풍화가 많이 진행된 낮은 고도의 구릉지형이 주를 이루는 곳에 해당한다.

Rj-1 지역에서는 42개의 절리를 측정하였다. 경사각이 수직에 가까운 고각의 절리들이 많으며, 판상절리라고 판단되는 저각의 절리들도 존재하고 있다. 절리의 방향은 고각의 경우는 북북서-남남동 및 동서 방향의 절리가 많이 관찰되고 있다. 저각의 절리는 동서 내지 북동-남서 방향으로 발달하고 있다. 이 지역은 주 계곡의 발달 방향이 북북서-남남동 방향이기 때문에 주 계곡과 평행한 방향과 이를 가로지르는 방향으로 발달하는 절리들이 관찰되고 있다. Rj-2 지역에서는 137개의 절리를

측정하였다. 이 지역 절리의 경사각도 Rj-1 지역과 마찬가지로 고각의 절리와 저각의 절리로 나뉘고 있다. 고각의 절리의 방향 역시 북북서-남남동 방향과 동서 방향이 가장 우세하게 발달하고 있다. 저각의 경우는 여러 방향으로 고루 나타나고 있지만, 북북서-남남동과 동북동-서남서 방향이 다소 우세하게 발달하고 있다. 이 지역 역시 Rj-1 지역과 마찬가지로 절리의 방향은 지형과 관련되어 나타나고 있다. Rj-3 지역에서는 산 정상에 능선부로서 주능선은 동-서 방향으로 발달하고 있다. 이 지역에서는 17개의 절리를 측정하였는데 저각의 절리는 북서-남동 방향, 고각의 절리는 동북동-서남서 방향 및 남북 방향으로 발달하고 있다. Rj-4 지역에서는 39개의 절리를 측정하였으며, 동서방향의 고각 절리와 북서-남동 방향의 저각절리가 우세하게 발달하고 있는 지역이다. Rj-5 지역에서는 27개의 절리를 측정하였으며, 동북동-서남서방향 및 북북서-남남동 방향의 고각 절리와 북서-남동 방향 및 남북방향의 절리가 잘 발달하고 있다.

절리방향의 분포를 5지역으로 나누어 분석해 보았을 때 동서 방향과 북북서-남남동 방향은 모든 지역에 고루 분포하고 있는데, 이것은 이지역의 지형적 특징인 동서 방향의 주계곡의 발달과 북북서-남남동 방향의 소계곡의 발달 방향과 일치하고 있다.

절리의 밀도

연구지역 절리의 밀도를 측정하기 위하여 51개소 지역에 대해서 가로와 세로의 길이가 각 1m인 정사각형 창틀을 이용한 절리밀도 조사방법을 실시하였다. 창틀을

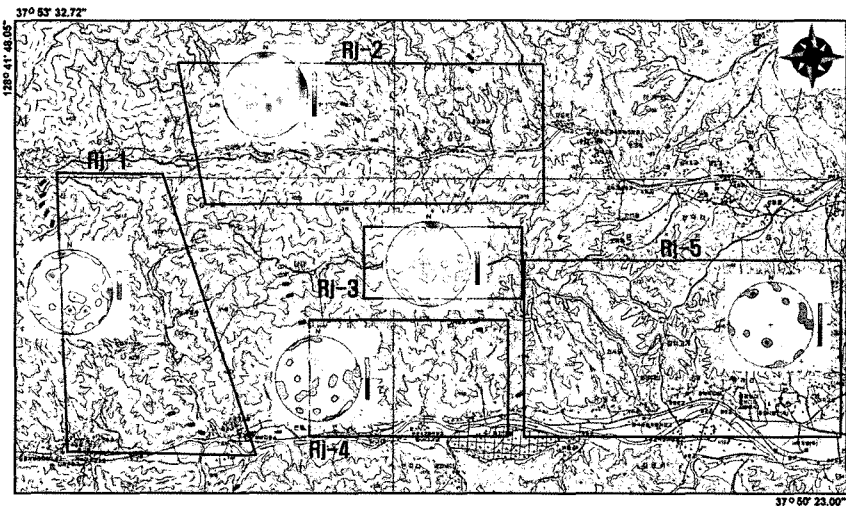


Fig. 13. Stereo net projection of joints at 5 regions.

놓는 위치는 각 노두에서 가장 대표성을 띄는 곳으로 하였다. 측정방법은 먼저 창틀 내의 절리들에 대해서 대략적인 스케치를 실시한 후 그 방향을 측정하여 기재하였다. 절리 연장의 측정은 현장에서 실시한 정밀 스케치를 바탕으로 하는 것이 보통이나 이럴 경우 많은 시간이 소요된다. 따라서, 이 연구에서는 고해상도 디지털 카메라를 이용하여 노두를 촬영한 후 실내에서 보정작업을 실시하여 보정된 사진 위에 벡터 선으로 디지털라이징(digitizing) 하고, 이 그림을 다시 가로와 세로의 길이가 1m가 되도록 재 변형하여 최종 산출된 각 변의 길이가 1m에 달하는 정확한 정사각형 창틀을 만들고, 그 내부에 존재하는 절리의 길이를 측정하였다. 그러나, 이 방법은 약간의 오차를 가질 수 있다. 창틀의 외형은 정사각형을 만들었지만 내부의 격자들은 일부 왜곡이 될 수 있기 때문이다. 그러나, 창틀 전체를 가로 질러서 발달하는 절리의 길이는 거의 차이가 나지 않기 때문에 이 정도의 오차는 수용할 수 있는 것으로 판단된다. 이렇게 해서 계산된 창틀 내 절리의 길이를 모두 더한 후 면적으로 나누어 주면 절리의 밀도를 계산 할 수 있다. 이와 같은 방법으로 연구지역 51개 지점에 대한 절리 밀도를 계산하였다. 연구지역에서 계산된 절리의 밀도는 최저 0.028에서 최고 0.178사이로 분포하며, 절리밀도 0.04~0.06에 해당하는 지점이 가장 많이 분포하고 있으며, 평균은 0.078 표준편차는 0.0329에 해당한다(Fig. 14).

절리밀도의 지역적 특성과 산사태 발생과의 상관성을 분석하기 위하여 등밀도 분포도를 작성하고 산사태 발생위치를 중첩시켜 보았다(Fig. 15). 절리밀도 값과 산사태 발생 위치를 비교하기 위하여 밀도 분포도에서 절리

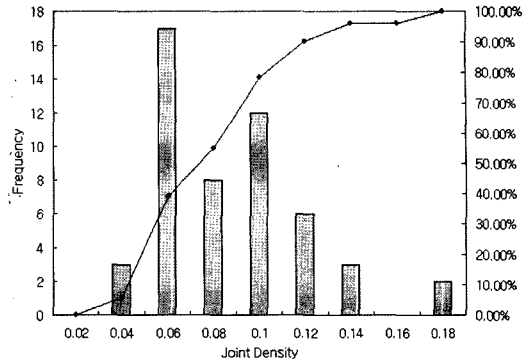


Fig. 14. Histogram of joint density (line: accumulation curve).

밀도 값이 0.1 이상인 지역만 회색으로 표시 하였다.

연구지역의 산사태 발생 위치와 절리밀도의 관계를 지역별로 살펴보면 서쪽 지역(Rj-1)은 노두의 분포가 북북서 방향의 계곡을 따라 존재하고 있어 이 방향을 따른 밀도 분포도를 나타내는데 산사태 발생위치는 대부분이 절리 밀도가 0.04~0.08인 지역이며 북쪽으로 갈수록 절리 밀도는 급격히 증가하지만 이곳에서 발생한 산사태는 거의 없는 것으로 조사되었다. 북쪽 지역(Rj-2)은 북서 지역과 중앙 지역이 절리밀도가 비교적 높은 지역에 해당하며 산사태 발생 위치는 절리밀도가 0.07~0.1에 해당 하는 지역에 산사태 발생이 집중되는 양상을 보여주고 있다. 마지막으로 남쪽 지역(Rj-3,4,5)은 전체 지역이 절리 밀도가 0.1 이하인 지역이다. 이곳은 지형적 특징으로 노두가 분포하는 지역이 많지 않으며, 절리 밀도가 가장 낮은 곳도 이 지역에 위치하고

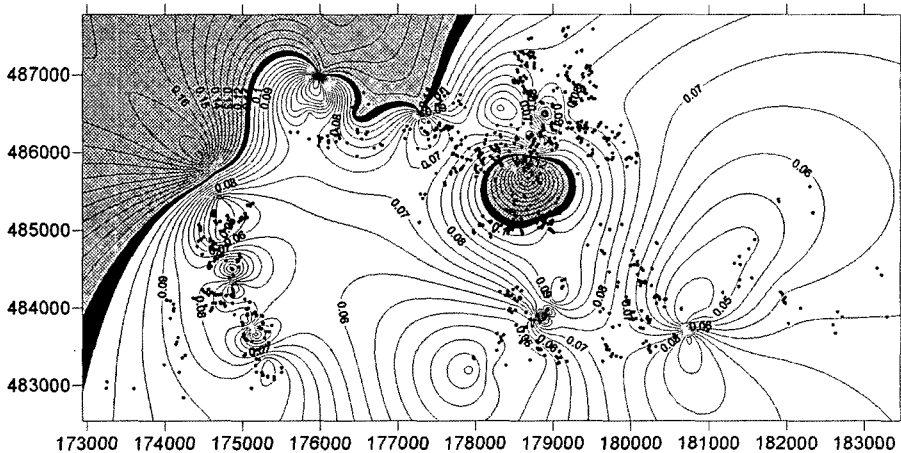


Fig. 15. Contour map of joint density and landslide position.

있다. 이 지역에서 산사태는 절리밀도가 0.04 이상인 지역에 많이 점시되고 있다. 따라서 연구지역 전체에서 산사태가 발생한 지점은 절리밀도 값이 대체로 0.04~0.1에 해당하는 지역에 대부분의 산사태 발생위치가 점시되고 있다. 절리밀도가 0.1 이상인 지역 중에서 북서쪽 지역은 산사태가 거의 발생하지 않았고, 중앙부 지역에 일부 발생하고 있다.

고찰 및 토의

태풍 ‘루사’에 의해 발생한 강릉지역의 산사태에 관한 조사 및 연구는 그 초점이 산사태 피해에 맞춰져 있거나(심재현 외, 2002), 대표적 개별 산사태의 사례 연구에 맞춰져 있는 경우(서홍석과 한성길, 2003), 또는 원격탐사자료를 이용하여 산사태의 위치를 파악하고 개발된 여러 주제도에 중첩하여 발생 원인을 분석하고 있다(이명진 외, 2004). 그러나 본 연구는 야외정밀조사를 통하여 대부분의 산사태를 도면에 기재하고 주요 산사태에 대해서는 산사태조사시트를 작성하여 통계처리를 통한 산사태의 특성을 파악해 보고자 하는 것이다. 특정 지역에 발생한 산사태를 조사하기 위하여 야외조사를 실시하는것은 많은 시간과 비용이 소요되어, 위성영상을 이용하여 발생위치를 조사하는 경우가 있다. 그러나 이 방법도 단점은 있다. 이명진 외(2004)는 아리랑 1호 영상을 이용한 변화탐지 기법으로 산사태 위치를 파악하였는데, 연구지역의 범위가 본 연구와 비슷한 면적이지만 탐지한 산사태는 604개로 이 연구에서 조사한 1,300여개와는 많은 차이가 나고 있다. 이러한 차이는 이 지역에 산불지역이 위치하면서, 발생한 산사태의 규모가 소규모적이고, 하나의 사면에 불과 3~5m 간격으로 수개의 산사태가 연속적으로 발생한 경우가 많이 있어 산사태 발생위치가 주위 경관과의 구별이 쉽지 않아서 발생한 것으로 판단된다. 따라서 위성영상을 이용한 산사태의 탐지는 1차적인 자료로 이용하고 반드시 야외조사에 따른 위치 확인을 수행하여야 한다.

강우량을 근간으로 산사태를 예보하는 기준은 여러 학자들에 의해 제시되고 있는데, Olivier(1994)는 연 평균강우량과 집중강우량을 이용해 산출하는 산사태 반응지수가 1 이상일 때 산사태가 발생할 가능성이 있고, 평균 강우량 보다 20% 이상의 집중 강우량이 발생할 경우는 대규모 산사태의 발생 가능성이 있음을 보고하였다. 홍원표 외(1990)는 우리나라에서 소규모 산사태는 최대 시우량과 누적강우량이 각각 10 mm 및 40 mm를

초과 했을때 발생하기 시작하고, 중규모 산사태는 각각 15 mm 및 90 mm를, 대규모 산사태는 각각 35 mm 및 140 mm를 초과하면 발생 된다고 보고하였으며, 산림청(1993)과 김상규(1994)등도 연속강우량, 시우량 및 일강우량을 기준으로 하여 산사태를 예보할 수 있는 기준을 제시하고 있는데, 연구지역의 강우량은 연속강우량 898 mm, 최대 시간강우량 98 mm, 일강우량 870 mm로 기 제시된 모든 발생기준치를 훨씬 초과하고 있다. 따라서 연구지역에 발생한 1,300여개 산사태의 발생원인은 집중강우이다.

심재현 외(2002)는 강릉시 지역에서 발생한 산사태를 산불이 발행한 지역과 그렇지 않은 지역으로 구분하여 조사하였는데, 산사태 발생 개소는 산불지역이 1,558 개소, 산불지역이 1,454개소 지역으로 발생 건수는 다소 비슷하지만, 두 지역의 면적은 831.72 km²와 17.48 km²로 약 47배의 차이를 나타내고 있다. 산사태 발생 개소수를 단위면적으로 환산하면 산불지역은 1.87개/km², 산불지역은 83.18개/km²로 약 44배의 차이가 있으며, 산사태가 발생한 면적의 비율은 각각 0.57과 6.42로 약 11.2배의 차이가 있다. 본 연구에서 사천지역을 대상으로 조사한 산사태를 산불과 관련하여 분석해보면(표 3), 사천지역 전체면적이 26.6 km²에 산불 발생지역의 면적은 13.9 km²로 면적대비 약 52.2%에 해당한다. 이 지역에서 조사한 산사태는 모두 525개이며 이중 산불 발생 지역이 495개로 전체의 94.2%에 해당한다. 단위면적당 산사태의 개수도 35.6개와 2.36개로 산불 발생 지역이 약 15배의 차이를 보여주고 있다. 이결과는 전술한 국립방재연구소의 자료와 수치상에서는 다소간의 차이를 보여주고 있으나, 산불발생지역에서 산사태가 훨씬 더 많이 발생하고 있음은 설명하고 있다.

산불지역에 산사태가 많이 발생하는 이유는 산불로 인해 토층의 성질이 변하고 산림이 황폐해지기 때문인데, 다수의 토질은 불에 타고나면, 물을 흡수하지 않는 속성(water repellent)을 나타내어 산불발생 직후의 토질 표면은 비록 단단하고 치밀하게 보이며 물을 함유하지만, 지하로 몇 mm만 들어가도 물을 함유할 수 없는 소

Table 3. The status of landslide at mountain fire area.

	Area (km ²)	Number of Landslide	Number of landslide per unit area(1 km ²)
Whole area	26.6	525	19.7
Damaged area	13.9	495	35.6
Not-damaged area	12.7	30	2.36

수층(hydrophobic)이 형성된다(Debano, 1980). 이 불투수층이 형성되는 이유는 유기물이 타면서 생기 왁스분자들이 토양 알갱이를 감싸기 때문에 발생하는데 토양의 이런 성질은 200°C에서 생성되기 시작하여 370°C에서 최대가 되며(Debano et. al., 1967), 그 이상의 온도에서는 파괴가 되기 때문에, 이 불투수층의 두께는 산불의 강도와 지속시간에 따라 다르게 된다. 토층의 투수능력이 감소하면 수분감소로 일시적으로 산사태가 감소할 수도 있으나, 지하 나무뿌리 등이 썩는 2-3년 후에는 다시 증가하게 된다(박덕근 외, 2000). 이처럼 산불은 토양을 산사태에 취약한 상태로 변형시키고, 산림을 황폐하게 하여 산림이 산불을 예방하는 순기능을 마비시켜 비산불지역에 비해 더 많은 산사태가 발생할수 있다.

산사태의 평면형상은 야외조사에서도 그 특성이 일부 구분이 되었지만 산사태의 활동력을 수치해석으로 계산할 때도 그 차이가 구분이 된다. 서용석과 윤운상(2004)은 사면안정성 해석과 관련해 2차원 해석과 3차원 해석의 차이에 대해서 서술하였는데, 일반적으로 2차원 모델이 3차원 모델보다 활동력이 과잉 계산 되고 있다. 3차원 해석에서도 이 연구에서 제시한 것과 유사한 말단 형상에 따라 활동력 및 필요역지력의 값이 차이를 나타내고 있는데, 'A' 형태의 경우가 가장 활동력이 크고, 'V' 형태가 활동력이 가장 작게 계산되어 이 연구에서 제시하는 것과 동일한 결과를 나타내고 있다. 따라서, 산사태 조사를 할 때는 산사태의 평면모양과 상부와 하부의 폭

을 측정하여 함께 기재하는 것이 산사태를 해석하거나 수치모사(simulation)할 때 이용할 수 있는 자료가 된다.

연구지역의 산사태의 발생 특징 중에서 가장 특이한 것은 산사태가 발생한 사면의 방향이다. 사천지역과 주문진-연곡지역에서 산사태가 발생한 사면의 방향은 비슷한 경향을 나타내지만, 두 지역 전체사면의 경사방향 분포는 차이가 있다. 지형적 특징도 주문진-연곡지역은 동서 방향의 주계곡 사이에 북북서-남남동 방향의 소계곡이 잘 발달하고, 사천지역은 북동-남서방향의 주계곡과 구릉지형이 발달하고 있어 서로 다른 특징을 나타내고 있다. 따라서 지형의 차이에도 불구하고 산사태가 발생한 사면의 방향이 동일한 경향을 나타내는 것은 다른 요인이 작용 했을 것으로 추정된다. 그 요인은 사면방향에 따른 사면 경사각의 차이로 판단된다. 연구지역에서 북동방향과 남서방향의 사면만을 대상으로 사면경사를 분석하면 경사 25°이하의 사면은 남서방향의 사면이 더 많이 분포하지만, 25°이상의 사면경사는 북동 방향의 사면에 더 많이 분포하고 있다. 사면경사가 이러한 경향을 나타내는 것은 화가암의 풍화특성과 관련이 있다. 일반적으로 햇빛이 잘 드는 남향사면이 더 북향사면에 비해 더 높은 온도의 영향으로 풍화가 더 빨리 진행된다(Lee, 1993). 이런 차이로 인해 현재는 남향사면이 북향사면에 비해 경사가 더 완만하고 사면상부의 토층 두께도 얇아지게 된다. Fig. 16은 연구지역 사면의 경사방향 분포와 산사태 발생위치를 중첩시킨 그림이다. 그림에서 적색의

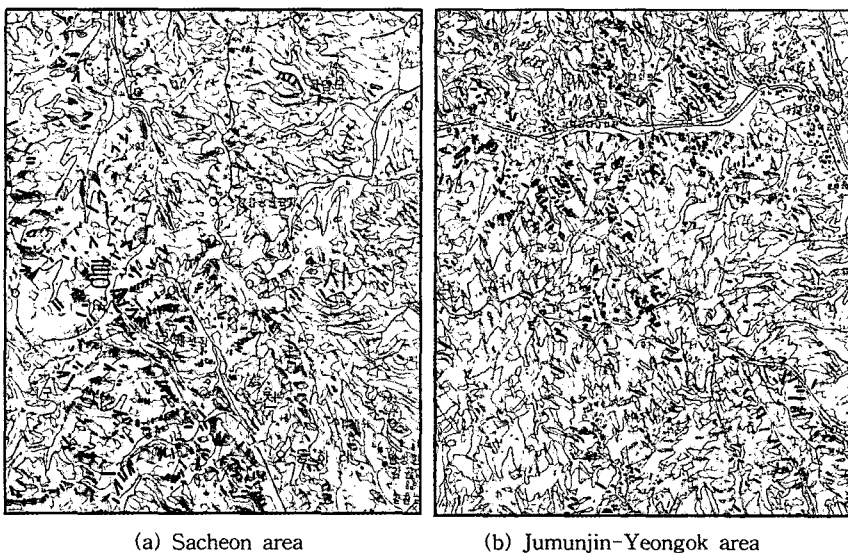


Fig. 16. Distribution map of slope direction and locations of landslides (red: slope of SW direction, green: slope of NE direction, color depth: gradient of slope, black line: landslides).

남서방향의 사면보다 녹색의 북동방향의 사면에 대부분의 산사태가 발생한 것을 알 수 있다. 또 다른 요인은 바람의 영향으로 추정된다. 서홍석과 한성길(2003)은 태풍 '루사'의 영향이 있을 당시의 강릉지역의 풍향에 대해서 조사하였는데, 8월 31일 강릉의 풍향은 북서와 서북서 방향이 주를 이루었고, 태풍발생 기간 중 최대 풍속은 8월 31일 22시에 측정된 7.7 m/sec 였으며, 당일 평균풍속은 4.2 m/sec에 해당하였다. 일반적으로 태풍으로 인해 평상시 보다 큰 풍속은 식생이 양호한 사면에서 지반을 교란시켜 지하수를 침투시키는 유로를 형성하고 전단강도를 저하시킬 가능성이 커지게 할 수 있는 것이다(건설부, 1988; 박용원 외, 1993). 풍속으로 인하여 지반의 나무에 유발되는 전단응력 사이의 관계는 Hsi and Nath(1970)가 실험을 실시하여 식으로 제시하기도 하였다. 그러나 사천지역의 경우는 산불에 의해 산림이 황폐해져 바람에 의한 식생의 교란작용 보다는 강한바람에 의해 경사지게 내리는 큰 강우강도의 집중호우가 표토층을 직접 교란 시키는 작용이 강하게 발생할 수 있는 조건이 된다. Table 4는 8월 31일 강릉지역의 풍향자료인데, 이때 연구지역에 작용하지 않은 바람은 남에서 불어오는 남풍이며, 산사태 발생 빈도가 가장 낮은 방향도 남서방향이다. 따라서 이러한 점을 고려할때 태풍에 수반된 강한바람도 산사태 발생에 영향을 미칠

수 있는 인자로 판단된다.

주문진읍-연곡면 지역의 절리의 방향은 고각의 절리가 북북서-남남동 방향과 동서 방향이 우세하게 나타나는데 이것은 Fig. 17에서 보는 바와 같이 연구지역의 지형적 특징과 잘 일치하고 있다. 연구지역의 음영기복도(shade relief map)를 보면 동서방향의 연곡천과 신리천이 잘 나타나고 있으며 그 사이를 북북서-남남동 방향의 소계곡들이 잘 발달하고 있음을 알 수 있다. 또한 연구지역 수계의 방향을 같이 기중치를 주어 장미그림을 그려보면 이 역시 계곡의 발달방향을 잘 설명하고 있다. 이 두 가지 지형적 요소와 절리의 방향성이 일치하고 있어 절리의 발달이 지형의 발달에 영향을 주었음을 시사하고 있다.

절리는 기반암의 풍화과정에 영향을 줘서 지형적 특징을 나타내게 하지만 화강암에 발달하는 판상절리의 경우 이 절리면을 따라 산사태가 발생하기도 한다. 이것은 판상절리가 지표면과 평행하게 또는 아평행하게 발달하기 때문에 기반암이 풍화될 때 절리면이 상부의 투수성이 좋은 풍화물질과 하부의 투수성이 없는 기반암의 경계면이 되어, 집중호우가 내릴 때 상부의 물질은 포화되어 단위중량이 증가하고, 하부로 침투하던 물은 절리면 하부의 기반암으로는 침투하지 못하고 절리면을 따라 흐르게 되어 절리면의 전단강도를 저하시켜 산사태가 발생하게 되는 것이다(Chigira, 2001 & 2002). 연구지역에 발생한 산사태 중에서도 붕괴면이 판상절리인 곳이 많이 조사 되었다.

연구지역에서 절리밀도와 산사태 발생위치의 관계는 기반암의 특징인 절리밀도와 표토층에서 발생하는 산사태를 직접 비교하는 것으로, 비교대상이 다름으로 인해 무리가 있을 수 있으나, 절리가 기반암의 풍화에 영향을 주고, 표토층을 구성하는 물질이 기반암의 풍화산물이라

Table 4. The direction of wind at Gangneung city.

Direction of wind	Duration time(hr)
NW	10
WNW	6
WSW	3
NNW	3
N	1
E	1

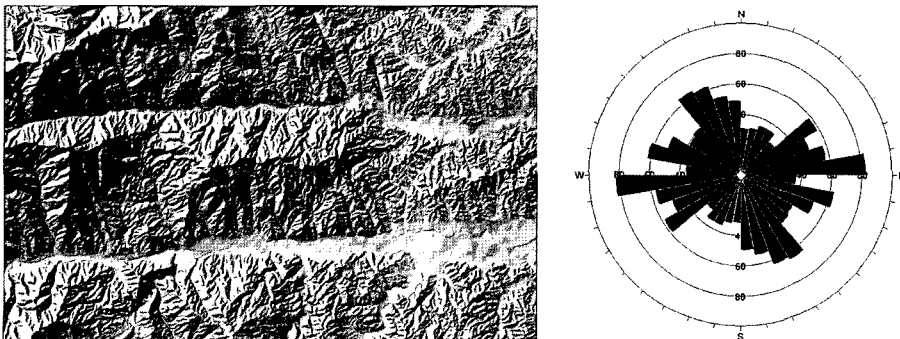


Fig. 17. Shade relief map and rose diagram of drainage direction(length weighted) at Jumunjin-Yeongok area.

는 점을 고려하면 두 요소간의 연관성을 분석해볼 필요가 있다. 연구지역에서 풍화가 많이 진행된 노두는 대체로 절리밀도가 0.1 내외에 해당하고, 풍화등급이 CW인 노두의 절리밀도는 0.04~0.1 정도로 한정되는 분포하고 있다. 이런점을 감안했을때 절리밀도가 0.04~0.1 정도를 나타내는 지역은 풍화가 많이 진행된 지역이라 할 수 있으며, 결국 산사태가 발생할 사태물질이 많이 분포하고 있는 지역에 해당한다는 의미가 된다. 연구지역에서 절리밀도가 0.1보다 큰 값을 나타내는 지역은 암반 노두의 발달이 우세하면서 절리의 발달 빈도가 높은 지역이며, 이러한 지역은 사면경사도 급하여 표토층의 발달이 미약한 지역에 해당하고, 0.04이하의 지역은 절리의 발달이 없는 신선한 암반이 노출되는 지역에 해당하는 경우가 많기 때문에 이러한 지역에서 산사태 발생빈도가 낮은 것으로 판단된다.

따라서 산사태는 적절한 사면경사(25°~35°)와 그 위에 퇴적된 적당량의 토층이 분포하는 지역에서 외부 조건의 변화(집중호우)에 따른 내부물질의 물성변화(전단강도의 저하 및 하중의 증가)로 발생하게 된다고 할 수 있다.

결 론

이 연구는 2002년 태풍 ‘루사’로 인해 강릉지역에 발생한 산사태의 발생원인, 기하학적 특성 및 절리와의 관계를 파악하기 위하여 수행되었으며, 조사 분석한 결론은 다음과 같다.

연구지역은 중생대 쥐라기에 관입한 대보화강암이 분포하는 사천지역과 주문진-연곡지역이며, 연구지역에서 야외조사를 통하여 모두 1,365개소(사천지역 525개소, 주문진-연곡지역 840개소)의 산사태에 대하여 형상 및 주요 기하양상을 조사·기재 하였다. 연구지역에 발생한 산사태의 유형은 산 사면에서는 전이형 활동으로 시작하여 사태물질이 계곡부에 모여 하류로 이동하는 토류의 유형이 대부분이다. 연구지역 모두에서 발생한 산사태의 평균 규모는 폭 10 m, 길이 30 m, 사면경사 21°~35°로서 두 지역 비슷한 양상이지만, 주문진-연곡 지역의 산사태가 길이가 조금 더 길고, 경사가 더 급한 것으로 분석되었다. 산사태의 평면모양은 ‘A’ 형태, ‘H’ 형태, 그리고 ‘V’ 형태의 세 가지로 분류되며, 이것에 따라 사태의 활동력이 차이가 난다. 연구지역의 산사태는 ‘V’ 형태가 31.87%, ‘H’ 형태가 17.58% 를 나타내고 있으며, ‘A’ 형태가 50.55% 로서 가장 흔한 형태

로 관찰된다.

연구지역의 절리의 방향은 저각절리의 경우는 판상절리로서 대체로 집중된 방향 없이 여러 방향으로 측정되었으나, 고각절리의 경우는 동서 방향과 북북서-남남동 방향이 가장 우세하게 관측되었다. 이것은 이 지역의 주계곡 및 소계곡의 방향성과 잘 일치하고 있으며, 절리 밀도는 51개소 지역에서 측정하였는데 그 계산 값은 0.028에서 0.178의 범위를 보여준다. 산사태 발생 빈도가 집중되는 지역은 절리 밀도가 대체로 0.04~0.1의 값을 가지는 곳으로 분석되었다.

연구지역에서 발생한 산사태의 큰 특징은 산불지역에 발생한 산사태와 산사태가 발생한 사면의 방향이다. 산불지역의 산사태는 산불로 인해 토층의 성질이 산사태에 취약한 상태로 변하고, 산림이 황폐해져 비산불지역에 비해 더 많은 산사태가 발생하였고, 산사태가 발생한 사면의 경사방향은 북동방향이 빈도가 높고, 남서방향이 빈도가 아주 낮게 나타났는데, 이러한 원인은 사면방향에 따른 기반암의 풍화특성이 다름으로 인해 야기된 지형적 특성 때문인데, 햇빛의 영향을 더 많이 받는 남서방향의 사면이 북동방향의 사면보다 풍화가 더 빨리 진행되어 현재는 더 완만한 사면경사와 얇은 표토층을 형성하고 있는 점과, 이에 부가해서 태풍에 수반된 집중호우시에 작용한 강한바람의 영향도 일부 작용하였으리라 판단된다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본연구사업인 ‘산사태 위험도 산정시스템 및 피해저감기술 개발’과제의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 강릉시, 2002, 제15호 태풍 “루사” 피해 복구 계획.
 건설부, 1988, 방재종합대책 중장기계획 보고서(3권), 건설부, pp.359-701
 김경수, 2005, 국내 자연사면 산사태의 조사 및 해석 기법. 안동대학교 이학박사학위논문, 321p.
 김상규, 1994, 한국에서 발생하는 지반활동, East Asia Symposium and field Workshop on Landslides and Debris Flow, Seoul, Korea, pp.75-99.
 김정찬, 고희재, 이승렬, 이창범, 최성자, 박기화, 2001, 1:250,000 강릉-속초 지질도폭 설명서, 한국지질자원연구원, 76p
 대전지방기상청, 2005, 기상자료제공 <전산처리정보>, 자료량 90Kbyte.
 동해안산불피해지 공동조사단, 2000, 산불피해지의 진단

- 한 자연생태계 복원 및 항구적인 산림복구계획 수립을 위한 동해안 산불지역 정밀조사 보고서 I. 동해안 산불지역의 건전한 자연생태계 복원 및 항구적인 산림복구계획 수립을 위한 민·관 공동조사단, 533p
- 박덕근, 1999, 우리나라 사면붕괴의 현황과 대책. 제4회 방재행정세미나, pp.175-214.
- 박덕근, 심재현, 김윤태, 2000, 산불로 인한 동해안의 사면붕괴 위험성 및 2000년 7월 호우로 인한 산사태 현장조사. 대한토목학회 2000년도 학술발표회 논문집 (II) 터널/토질 및 기초, pp.159-162.
- 박용원, 김감래, 여운광, 1993, 1991년 용인-안성지역 산사태 연구, 한국지반공학회 논문집, 제9권, 제4호, pp.103-116.
- 산림청, 1993, 산사태 위험지 조사 판명 요령
- 서용석, 윤운상, 2004, 3차원 사면안정해석에 관한 소고, 지질공학, 제14권, 제2호, pp.235-241.
- 서홍석, 한성길, 2003, 2002년 강릉지역에서 발생한 산사태의 특성에 관한 연구, 한국지반공학회 논문집, 제19권, 제4호, pp.107-119
- 심재현, 백민호, 박덕근, 이호준, 박병철, 김태훈, 박상덕, 장상규, 조남준, 윤정성, 2002, 2002 태풍 루사 피해 현장조사 보고서 - 8.30~9.1 -, 국립방재연구소(NIDP-2002-02), 257p
- 이명진, 이사로, 원중선, 2004, GIS와 원격탐사를 이용한 강릉지역 산사태 연구(I)-산사태 발생위치와 영향인자와의 상관관계 분석. 자연환경지질, 제37권, 제4호, pp.425-436.
- 홍원표, 김윤일, 김상규, 한중근, 김마리아, 1990, 강우로 기인되는 우리나라 사면활동의 예측, 대한토질공학회지, 제6권, 제2호, pp.159-167
- 國土開發技術研究センター, 2003, 貯水池周邊の地すべり調査と對策, 山海堂, pp.7-9.
- Debano, L. F., 1980, Water repellent soils : a state-of-the-art, Pacific Southwest Forest & Range Experiment Station General Technical Report PSW-46, Forest Service, U.S. DOA, 21p.
- Debano, L. F., Osborn, J. F., Krammes, J. S., Letey, J., 1967, Soil wettability and wetting agents...our current knowledge of the problem, Pacific Southwest Forest & Range Experiment Station General Technical Report PSW-43, Forest Service, 13p.
- Hsi, G. and Nath, J.H., 1970, Wind drag within a simulated forest, Journal of Applied Meteorology, v.9, pp.592-602.
- 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, v.20, pp.257-265.
- Lee, S.G., 1993, Weathering of granite. Jour. Geol. Soc. Korea, v.29, n.4, pp.396-413.
- 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, pp.1629-1636.

2006년 11월 10일 원고접수, 2006년 12월 18일 게재승인

조용찬

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

305-350 대전시 유성구 가정동 30

Tel: 042-868-3059

Fax: 042-861-9723

E-mail: choych@kigam.re.kr

장태우

경북대학교 자연과학대학 지질학과

702-701 대구 북구 산격동 1370

Tel: 053-950-5361

Fax: 053-950-5362

E-mail: twchang@knu.ac.kr