

지질조건에 따른 강우와 산사태의 특성분석

김경수*¹ · 송영석¹ · 조용찬¹ · 김원영¹ · 정교철²

¹한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

²안동대학교 지구환경과학과

Characteristics of Rainfall and Landslides according to the Geological Condition

Kyeong-Su Kim^{1*}, Young-Suk Song¹, Yong-Chan Cho¹,
Won-Young Kim¹, and Gyo-Cheol Jeong²

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

²Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

이 연구는 1998년 여름철에 지질조건이 서로 다른 경기도 장흥, 경북 상주 및 포항지역에서 산사태가 많이 발생된 곳의 강우자료와 산사태들을 조사하여 강우조건에 따른 산사태의 특성을 분석하였다. 연구지역들에서는 2~4일간에 걸친 집중호우로 인해 많은 산사태들이 발생되었다. 강우자료는 지역별로 산사태밀집지역을 중심으로 반경 약 50 km 내에 위치한 관측소들에서의 기록을 기초로 하였으며, 산사태자료는 현장조사를 통하여 직접 확인된 산사태만을 대상으로 하였다. 산사태를 유발하는 강우조건은 크게 누적강우량과 강우강도로 구분하고 산사태는 지질조건을 고려한 지역별 발생빈도 등으로 구별하여 이들의 관계를 통계적으로 분석하였다. 산사태들은 집중호우에 의해 발생되었고 국지적으로 밀집되는 양상을 보이는 등 강우와 산사태는 매우 밀접한 연관성을 보였다. 강우를 지배하는 여러 요소 즉, 누적강우량, 강우강도 및 강우지속시간 등이 지역별로 다른 양상을 보였으며, 그에 따른 산사태의 양상이나 발생빈도 또한 각기 다른 것으로 분석되었다. 누적강우량이 많은 지역에서만 산사태가 집중적으로 발생하였고 그 지역을 벗어난 바로 인근지역에서는 산사태가 거의 발생되지 않으므로써 강우가 산사태를 유발하는 매우 중요한 외적 요인으로 간주되고, 누적강우량과 산사태빈도는 서로 상관관계를 갖는 것으로 분석되었다.

주요어 : 지질조건, 집중호우, 누적강우량, 산사태, 발생빈도

To study the relationship between rainfall conditions and landslides according to a geological condition in landslides areas such as Jangheung Kyeonggi, Sangju and Pohang Kyoungbuk, the data of rainfall and landslides are investigated and analyzed. Many landslides occurred at these areas because of the heavy rainfall in two or four days of the summer 1998. The data of rainfall are collected in observatories within a 50km radius from landslides occurrence areas, and the data of landslides are investigated directly in landslides areas. The data of rainfall are the accumulative rainfall and the rainfall intensity, and the data of landslides are the occurrence frequency considering the geological condition. These data are analyzed statistically to know the relationship the rainfall and landslides. The landslides are concentrated in the heavy rainfall area from the analysis of these data. It knows that the landslides are triggered by the heavy rainfall. Meanwhile, the rainfall factors such as the accumulative rainfall, the rainfall intensity and the dropping time are different in each landslides area, and the shape and frequency of landslides are different respectively. The landslides have occurred in the area of high accumulative rainfall, while the landslides have not occurred around that area. Therefore, the rainfall is very important factor induced by the landslides, and the accumulative rainfall is really related to the frequency of landslides.

Key words : geological condition, heavy rainfall, accumulative rainfall, landslides, occurrence frequency

*Corresponding author: kks@kigam.re.kr

서 론

우리나라는 지리적으로 극동지역에 위치하여 온대성 기후지역으로서 6월에서 9월 사이에 호우가 집중되고 있을 뿐만 아니라 강우는 점차 국지성 집중호우의 양상을 보이기 때문에 이 시기에 많은 산사태가 발생되고 있다. 이러한 산사태는 많은 인명과 재산손실을 초래하며 최근 들어서는 그 피해가 더욱 급격하게 증가되는 추세에 있다.

집중호우로 인해 산사태가 많이 발생되었던 기록으로는 1991년 7월 20일부터 21일까지 277 mm의 집중호우로 인해 용인과 안성을 포함한 경기남부지역에서 670여개의 산사태가 발생하였으며, 1996년 7월 26일부터 27일까지 493 mm의 집중호우로 연천과 포천을 중심으로 한 경기북부지역에서 920여개의 산사태가 발생되었다(김원영 외, 2000). 1998년은 전국적으로 산사태가 많이 발생한 해로 기록되고 있는데, 포항을 포함한 경남지역에서는 7월 25~26일 양일간에 걸친 150 mm의 강우로 인해 약 500개의 산사태가 발생하였으며, 장흥을 중심으로 한 경기북부지역에서는 8월 5~6일까지 620 mm의 강우와 1,000여개의 산사태, 그리고 상주지역을 포함한 경북서부지역에서는 8월 11~12일에 걸쳐 515 mm의 강우와 1,000여개의 산사태가 발생되었다(김원영 외, 2000; 김경수, 2001; 김원영 외 2003). 또한, 최근의 기록으로는 2002년 8월 30일부터 9월 1일까지 3일간에 걸친 태풍 “루사(Rusa)”의 영향으로 강릉시를 중심으로 한 영동해안지역에서는 무려 898 mm의 집중호우를 기록하였는데, 특히 8월 31일에는 우리나라 강우관측사상 최다일강우량인 870.5 mm의 폭우가 쏟아졌으며 그로 인하여 총 3,033개소에서 크고 작은 산사태가 발생하였다. 그리고 그 피해면적은 486ha 정도였으며, 직접피해액 263억원과 282억원의 복구비가 소요되었다. 이때 전국적으로는 무려 5조1,479억원에 달하는 재산피해와 246명의 인명피해가 발생하였으며, 산사태로 인한 직접적 인명피해만도 65명으로 집계되었다(강릉시, 2002; 행정자치부, 2002). 이와 같이 여름철 태풍을 동반한 집중호우는 산사태의 발생확률을 높게 할 뿐만 아니라 인명과 재산손실을 야기하는 직접적 원인이 되고 있다.

우리나라의 산사태들은 대부분 집중호우에 의해 발생되고 있으며, 그 위치 또한 국지적으로 밀집되는 양상을 보이는 등 강우와 산사태는 매우 밀접한 연관성을 가지고 있다. 연구대상인 3개 지역에서도 2~4일간에 걸친 집중호우에 의해서 많은 산사태들이 발생되었다. 이 연

구는 조사된 강우자료와 산사태자료를 근거로 하여 강우와 산사태의 관계를 분석하였다. 강우자료는 지역별로 정밀조사구역을 중심으로 하여 반경 약 50 km까지를 집중호우의 영향권에 해당하는 것으로 간주하여 그 영역 내에 위치한 관측소들에서의 자료를 기초로 하였다. 강우자료는 기상청으로부터 수집된 것으로 각 관측소마다 집중호우가 시작되어 종료될 때까지를 포함하여 앞뒤로 15일정도 기간동안의 시간강우량과 일강우량을 조사하였다. 한편, 산사태자료는 개략적 조사방법으로 현장조사를 실시하여 직접 확인된 산사태만을 대상으로 하였다.

산사태를 유발하는 강우조건은 크게 누적강우량과 강우강도로 구분하고 산사태는 지질조건을 고려한 지역별 발생빈도 등으로 구별하여 이들의 관계를 통계적으로 분석하였다.

연구지역의 지질조건 및 산사태분포

장흥지역; 편마암류

장흥지역에서는 1998년 8월 4~7일 나흘간에 걸쳐 약 588 mm에 달하는 집중호우가 있었으며 이로 인하여 많은 산사태들이 발생되었다. 산사태의 현황파악을 위해 개략조사를 실시한 결과, 장흥지역에서는 총 511개의 산사태가 발생한 것으로 집계되었다. 개략조사의 결과를 근거로 하여 그 발생빈도가 높은 지역을 중심으로 정밀조사구역(detail survey area)을 설정하고 그 중에서 77개 산사태에 대한 정밀조사를 실시하였다.

Fig. 1은 장흥지역의 지질도를 기본도로 하여 정밀조사 대상구역과 개략조사에 의한 산사태위치를 나타낸 것이다. 장흥지역은 광역적으로 볼 때 의정부시를 중심으로 하여 남북으로 화강암이 분포되어 있으며, 그 양편으로 호상편마암 혹은 반상변정편마암 등이 넓게 분포하고 있다. 그리고 산사태는 넓은 지역에 걸쳐 발생되었으나 장흥면과 그 주변지역에서 더 높은 발생빈도를 보였다. 한편, 산사태는 모든 지질에서 발생한 것으로 조사되었으나 화강암지역보다는 주로 편마암지역에 밀집된 현상을 보였다. 따라서 정밀조사 대상지역은 편마암지역으로서 산사태가 밀집되어 발생한 장흥일대로만 설정하여 편마암류지역의 대표로 하였다.

장흥지역에서 발생한 산사태들의 파괴형태는 대부분 전이형슬라이드로 시작되어 사태물질이 사면하부로 이동되면서 유동성산사태로 변화되는 양상을 보였다. 즉, 비교적 평탄한 사면에서 전이형의 평면파괴가 일어나고

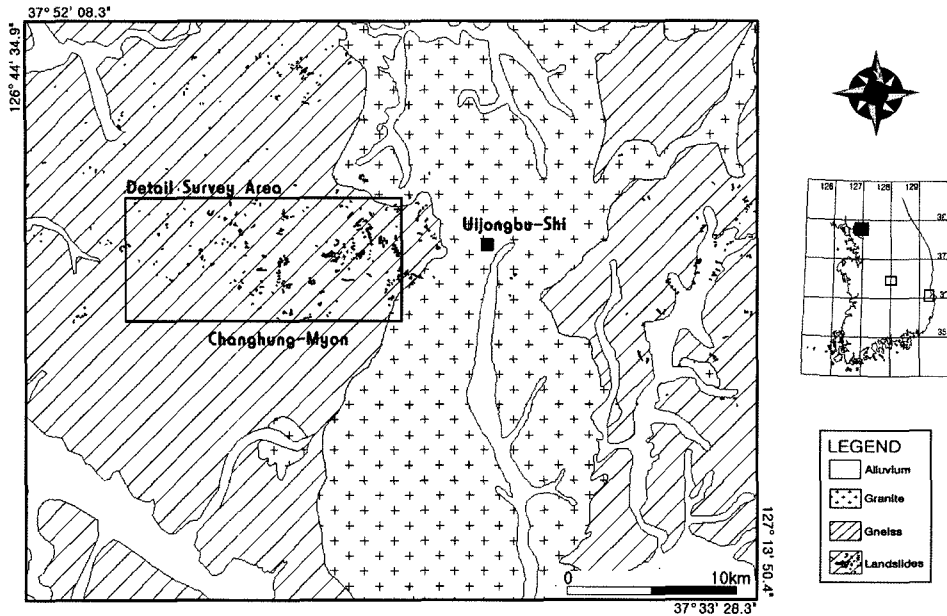


Fig. 1. Location of survey area and landslides on the geological map at Jangheung area(after geological map: Lee, Byung Joo et al., 1999).

파괴된 물질이 하부로 이동되면서 주위의 물질과 혼합되어 토석류의 형태로 변이되면서 V형 계곡을 따라 흘러내린 형태를 보이는 것으로 조사되었다. 그리고 잔류토나 붕적토로 구성된 토층이 기반암과의 경계면을 따라서 붕괴되었으며 그 깊이는 매우 얇은 것으로 조사되었다.

상주지역; 화강암류

상주지역에서는 1998년 8월 10~12일 사흘간에 걸쳐 약 522 mm에 달하는 집중호우가 있었으며 이로 인하여 많은 산사태들이 발생되었다. 산사태의 현황파악을 위해 개략조사를 실시한 결과, 상주지역에서는 총 788개의 산사태가 발생한 것으로 집계되었다. 개략조사의 결과를 근거로 하여 산사태가 밀집되어 발생한 지역을 중심으로 정밀조사 대상구역을 설정하였다. 그리고 그 중에서 99개소를 대상으로 정밀조사를 실시하였다. Fig. 2는 상주지역의 지질도를 기본도로 하여 정밀조사 대상구역과 개략조사에 의한 산사태위치를 나타낸 것이다. 상주지역의 지질은 광역적으로 볼 때, 화강암이 넓게 분포하고 있으며 일부 변성암류와 퇴적암류가 분포하고 있다. 화강암은 주라기의 보은화강암과 흑운모각섬석화강암 등이며 이들은 광물학적인 구성성분과 입도조성이 다소

른 암상을 보이고 있다. 그리고 연구지역 북부의 고지대는 석영반암이 분포하고 있으며 이들은 조성광물이 대체로 풍화에 강하여 주로 암반으로 구성되어 있기 때문에 산사태가 거의 발생하지 않았으나(김원영 외, 2003), 대체로 낮은 지형조건과 노두분포가 덜하여 상대적으로 토층분포비가 높은 화강암류지역에서는 산사태가 많이 발생한 것으로 나타났다. 산사태는 넓은 지역에 걸쳐서 발생되었으나 화서면을 중심으로 한 주변의 화강암지역에서 더 높은 발생빈도를 보였다. 따라서 정밀조사는 주로 화강암이 분포되어 있는 곳으로 산사태가 밀집되어 발생한 화서면일대로만 설정하여 화강암류지역의 대표로 하였다.

상주지역에서 발생한 산사태들은 시작지점에서의 파괴형태가 대부분 원호, 준원호 및 평면파괴에 의한 전이형 슬라이드로서 붕적토 및 잔류토로 구성된 상부토층이 기반암과의 경계부를 따라 붕괴됨으로써 심도는 대부분이 1m 이내로 비교적 얇은 파괴된 것으로 조사되었다. 그리고 이들은 사태물질이 사면의 하부로 이동되면서 유동성산사태로 변화되는 양상을 보였으며, 산사태의 양상은 전반적으로 장흥지역과 거의 유사한 경향성을 보였다.

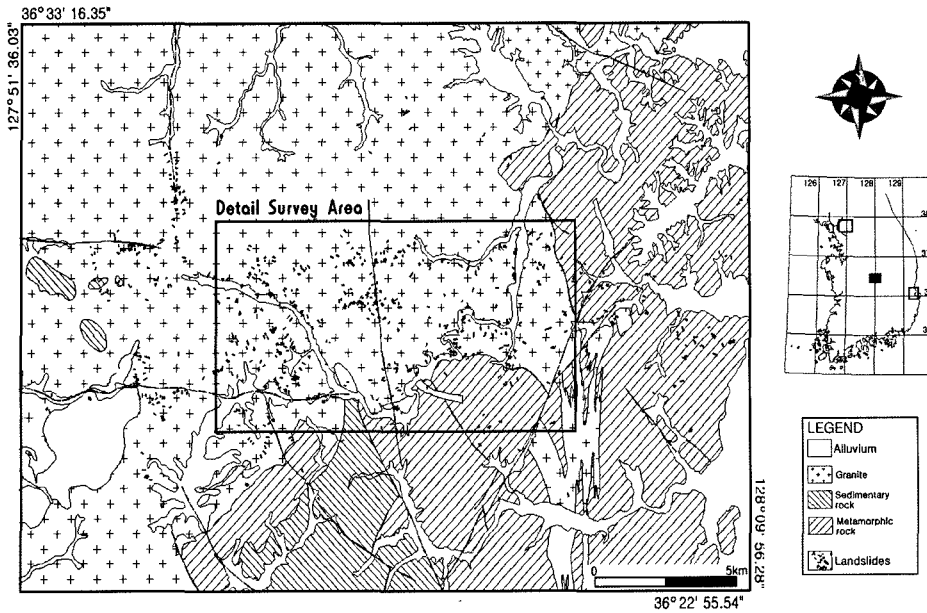


Fig. 2. Location of survey area and landslides on the geological map at Sangju area(after geological map: Kim, Dong Hak and Lee, Byung Joo, 1986).

포항지역; 제3기퇴적암류

포항지역에서는 1998년 7월 25~26일 이틀간에 걸쳐 약 150 mm에 달하는 집중호우가 발생되었으며, 이로 인하여 많은 산사태들이 발생되었다. 산사태의 현황 파악을 위해 개략조사를 실시한 결과, 포항지역에서는 총 283 개의 산사태가 발생한 것으로 집계되었으며, 이들 모두에 대해 정밀조사를 실시하였다.

Fig. 3은 포항지역의 지질도를 기본도로 하여 정밀조사 대상구역과 개략조사에 의한 산사태위치를 나타낸 것이다. 포항지역은 광역적으로 볼 때 포항시 서부의 일부 지역에 백악기퇴적암류가 분포하고, 포항시를 중심으로 제3기 화산암류와 제3기 퇴적암류가 넓게 분포하고 있다. 산사태는 비교적 좁은 면적에 밀집되어 발생되었으며 크게 보아 두 지역으로 분류되는데, 이들은 모두 제3기 퇴적암류지역에서 발생한 것으로 조사되었다. 따라서 정밀조사는 제3기 퇴적암류지역으로서 산사태가 밀집되어 발생한 두 곳을 설정하여 제3기 퇴적암류지역의 대표로 하였다.

정밀조사 대상지역은 제3기 퇴적암류 중에서도 주로 이암이 폭넓게 분포하고 있다. 일반적으로 이암은 풍화에 취약하고 특히, 층리가 잘 발달되어 있으며 수분을 흡수하면 잘게 부서지는 특성을 갖고 있기 때문에 산사

태에 매우 취약하다(김원영 외, 2003). 이진수 외(2002)에 의하면, 풍화에 민감한 이암은 강우, 강설 등의 외적 조건에 의해 비화작용(slaking) 및 팽윤현상(swelling)이 발생하여 공학적 성질에 영향을 주는데 특히, 강도와 압축특성에 변화를 가져오며, 이러한 지역에서는 강우로 인하여 산사태가 많이 발생할 수 있음을 보고하였다.

포항지역에서 발생한 산사태들의 파괴형태는 다른 지역과 유사하게 주로 전이형 슬라이드로 시작되어 하부로 진행하면서 유동성산사태로 변화되는 양상을 보였다. 그러나 다른 두 지역에 비해 사면길이가 길지 않고 대부분 평탄사면에서 발생하여 산사태의 길이가 짧고 사태 물질 또한 계곡보다는 주로 사면을 따라 흘러내려 평지에 쌓이는 형태를 보였다. 한편, 토층의 두께는 대부분이 50 cm 미만으로서 변성암류나 화강암류가 분포한 다른 두 지역에 비해서 더 얇은 것으로 나타났는데, 이는 이 지역의 풍화 및 강우특성의 영향으로 잔류토나 붕적토로 구성된 토층이 쉽게 침식을 받았기 때문이다.

산사태지역의 강우특성

강우와 산사태

1904년 이후 80년간의 주요 재해통계에 의하면 일강

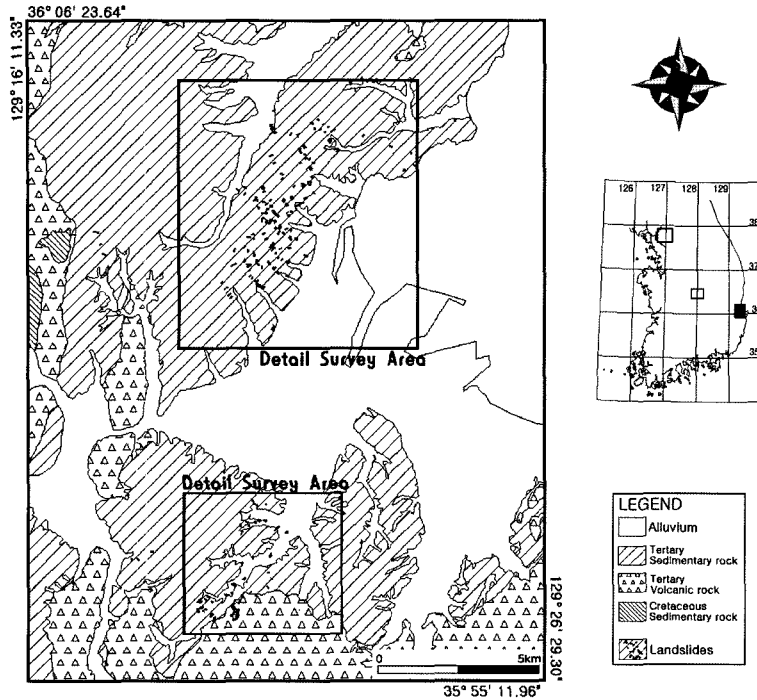


Fig. 3. Location of survey area and landslides on the geological map at Pohang area(after geological map: Um, Sang Ho *et al.*, 1964).

우량이 80 mm 이상 될 때 총 호우발생의 80% 이상이 6~9월에 발생하고 있으며(김 승, 1996), 산사태를 강우와 관련지어 연구한 결과(강위평, 1981; 홍원표 외, 1990; 김원영 외, 1998; 한중근, 2001)에서도 우리나라에서 발생한 산사태는 대부분 이 시기에 발생한 것으로 보고되었다. 즉, 지형적이나 토질적인 특성이 지역에 따라 다름에도 불구하고 이 시기에 대부분의 산사태가 발생되고 있어 강우가 산사태발생에 가장 중요한 요인으로 작용된다는 추측이 가능한데, 1일 80 mm 이상 되는 호우빈도는 거의 90% 정도가 6~9월에 발생하고, 특히 7~8월에 60% 정도가 발생(김영록·장석완, 2000)하여 이 시기에 호우가 집중되고 있으며 산사태 발생시기 또한 일치하고 있음이 이를 단적으로 보여주고 있다.

강우시에는 지중침투수에 의한 간극수압의 상승, 표면유수에 의한 침식, 토층의 포화로 인한 활동토층의 단위중량 증가 등에 의해 사면을 붕괴시키려는 활동력은 증가되고, 사면붕괴에 저항하려는 저항력은 감소되어 사면의 안정성이 극도로 저하된다(Fredlund, 1981). 이처럼 강우가 산사태를 야기하는 중요한 요인으로 작용한다는 사실은 이론의 여지가 없지만 누적강우량, 강우강도, 강

우지속시간 및 선행강우량 등 실제로 강우를 지배하는 여러 요소들이 산사태에 어떻게 관련되는지는 명확하게 규명되어 있지 못하다. Nilson and Tumor(1975)는 캘리포니아 contra costa country 지방에서 1959~1971년까지 25 mm 이상의 집중호우시 강우량과 그 이전의 선행강우량과의 관계로부터 사면파괴 회수에 밀접한 관계가 있음을 규명하였다. 홍콩의 경우, 강우와 산사태의 관계에 있어 과거에는 Lumb(1975)의 보고에서와 같이 강우로 인한 직접적인 침투가 파괴의 주요인으로 작용하고, 파괴당시의 일강우량 뿐만 아니라 선행강우량에 크게 영향을 받는다고 하는 선행강우량 개념의 해석이 지배적이었으나, 그 후 Brand(1985)는 짧은 시간에 내리는 집중호우는 지질이나 수문지질의 조건에 관계없이 대규모 산사태를 일으킬 수 있으며, 산사태 발생당시의 강우강도가 산사태를 유발하는 지배적인 조건임을 밝혔다. 일본의 경우, Yagi and Yatabe(1987)는 7일간의 선행 누적강우량이 클 때에는 적은 강우일지라도 사면이 붕괴될 수 있다고 보고하였다. 또한, Olivier *et al.* (1994)는 일강우량이 연평균강우량의 20%를 초과할 경우 대규모 산사태가 발생할 수 있다고 보고한 바 있다.

지형, 지질 및 토질특성은 물론이거니와 강우특성 또한 각 나라마다 서로 다르기 때문에 우리나라에서의 강우와 산사태자료를 이용하여 강우가 산사태에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다. 우리나라에서는 강위평(1981)이 진해지역을 대상으로 집중호우에 의한 산사태를 연구한 바 있으며, 홍원표 외(1990)는 전국을 대상으로 지역별 산사태자료를 분석하여 누적강우량, 파괴당일의 강우량 및 강우강도 등이 산사태에 미치는 영향에 관한 연구를 통해 산사태가 누적강우량과 강우강도 모두에 영향을 받는다고 보고하였다. 김원영 외(1998)는 연천·철원지역을 대상으로 한 산사태유형과 취약성 연구에서 누적강우량보다는 집중호우에 의해 산사태가 발생하였음을 밝혔다. 그리고 김영복과 장석환(2000)은 대전·충남지역을 대상으로 강우특성과 산사태를 해안과 내륙으로 나누어 분석한 결과, 위치, 지형 및 지질조건이 다르더라도 동일한 강우특성을 보이는 것으로 해석하였으며, 최대 시간강우량이 25 mm를 넘거나 파괴당일의 강우량이 180 mm 이상이면 대규모 산사태가 발생한다고 하였다. 또한, 한중근(2001)은 부산지역을 대상으로 한 강우와 산사태연구에서 최대 강우강도가 기록된 후 3시간 이내에 90% 이상의 산사태가 발생하는 것으로 보고한 바 있다.

강우에 의한 산사태를 연구함에 있어 산사태가 지형 조건 및 토질특성과 함께 강우특성 등 다양한 인자의 영향을 받기 때문에 우선적으로 그 대상지역과 기간의 설정이 중요하다. 특히, 강우에 의한 과거의 산사태를 통계적인 방법으로 해석하기 위해서는 정확한 자료의 확보가 필수적인데, 이는 실제로 장기간에 걸친 강우기록을 볼 때 강우강도 뿐만 아니라 일강우량, 월강우량 및 연평균강우량 등이 큰 폭의 변화를 보이기 때문이다. 이러한 사항들을 고려하여 이 연구에서는 거의 동일한 시기인 1998년 7월말부터 8월 중순까지 3개 지역 즉, 장흥, 상주 및 포항지역에서 집중호우에 의해 발생되었던 산사태들을 대상으로 강우특성과 산사태간의 상관성을 분석하였다. 이 연구에서는 강우특성과 산사태 발생빈도, 그리고 연구지역간의 상관성분석 등을 위해 기존의 연구들과 대비가 필요한 경우에는 주로 홍원표 외(1990)에 의해 제안된 연구결과를 토대로 하여 산사태와 강우특성을 비교분석하였다.

지역별 강우특성

우리나라는 온대성기후에 사계절이 뚜렷하며 계절별로 그 특성이 완전히 다르다. 또한, 연평균강우량이

1,274 mm로 다우지역에 속하며, 온난 다습한 북태평양고기압인 남동몬순의 영향으로 강우량이 많은 우기와 북서몬순의 건조한 시베리아기압의 영향을 받아 건기의 구별이 뚜렷하다. 이러한 기후특성으로 열대성저기압 및 이동성고기압, 그리고 북태평양고기압과 오호츠크고기압에 의한 전선성강우의 형성이 우리나라에 영향을 미치는 강우특성이라 할 수 있다(한중근, 2001). 특히, 여름철에는 기압골의 형성에 의한 호우와 태풍으로 인해 많은 강우가 발생하는데, 이러한 집중호우의 요인으로는 대체로 강한 기압골의 형성, 남서풍에 의해 유입되는 난기류와 강우전선을 활성화시키는 한기류의 존재, 지형적인 영향, 기압골의 장시간 정체 등을 들 수 있다. 홍원표 외(1990)는 이와 같은 강우특성을 근거로 하여 우리나라를 강우특성별로 크게 3개 권역으로 구분하여 제시한 바 있다. 즉, 주로 기압골의 영향에 의한 호우지역인 경기도와 충청도 및 전라북도의 북부로 구성되는 중부지역, 태풍의 영향을 많이 받는 지역인 경상도와 전라남도 및 전라북도의 남부로 구성되는 영호남지역, 그리고 상부 태백산맥의 산악지대로서 강우량이 비교적 적은 지역인 강원도 중심의 영동지역으로 구분하였다. 이에 의하면, 장흥지역은 중부권의 호우지역에 해당하며, 상주 및 포항지역은 영호남권의 태풍이 많은 지역에 속한다.

Table 1~3은 산사태가 발생하였을 당시 연구지역에서의 강우기록을 나타낸 것이다. 주로 기압골의 영향을 받아 호우지역으로 분류되는 장흥지역에서는 Table 1에서 보는 바와 같이 1998년 8월 4일부터 7일까지 최고 588.5 mm에 달하는 집중호우가 내렸으며, 이로 인해 많은 산사태가 발생되었다. 한편, 이 때 연구지역에 인접한 강화에서도 747.5 mm의 폭우가 쏟아져 많은 산사태들이 발생되었다. 태풍의 영향을 주로 받는 상주지역에서는 Table 2에서 보는 바와 같이 1998년 8월 10일부터 12일까지 최고 522 mm의 집중호우가 있었으며, 특히 12일 오전에는 시간당 최고 92 mm에 달하는 강우가

Table 1. Rainfall records measured at 3 rain gauge stations of the Jangheung area in 4~7 August, 1998(after Korea Meteorological Administration).

| Date | Rainfall (mm) | | |
|----------------|--------------------------------|-----------|--------|
| | Rain gauge station Keumchon | Euijungbu | Goyang |
| 4 August, 1998 | 61.5 | 81.5 | 51.0 |
| 5 August, 1998 | 97.0 | 45.5 | 37.5 |
| 6 August, 1998 | 405.0 | 400.0 | 264.0 |
| 7 August, 1998 | 25.0 | 56.0 | 15.5 |
| Total | 588.5 | 583 | 368 |

Table 2. Rainfall records measured at 3 raingauge stations of the Sangju area in 10~12 August, 1998 (after Korea Meteorological Administration).

| Date | Raingauge station | Rainfall (mm) | | |
|-----------------|-------------------|---------------|--------|-------|
| | | Boeun | Hwaseo | Angye |
| 10 August, 1998 | | 6.5 | 15.0 | 0.0 |
| 11 August, 1998 | | 108.0 | 114.0 | 23.0 |
| 12 August, 1998 | | 407.5 | 89.0 | 147.5 |
| Total | | 522 | 218 | 170.5 |

집중적으로 쏟아졌으며, 이로 인해 많은 산사태가 발생되었다. 역시 태풍의 영향을 많이 받는 포항지역에서는 Table 3에서 보는 바와 같이 1998년 7월 25일부터 26일까지 강풍을 동반한 최고 150.3 mm의 집중호우가 내렸으며, 이로 인하여 많은 산사태가 발생되었다. 한편, 이 때 인근지역인 울진에서는 최고 250.2 mm의 폭우가 쏟아졌으며 역시 많은 산사태들이 발생되었다. 이처럼 모든 연구지역에서 많은 양의 강우가 이틀에서 나흘까지의 단기간에 걸쳐서 집중적으로 내리는 현상을 보였다. 그리고 지형과 지질조건 및 토질구성이 서로 다른 이들 연구지역에서 많은 산사태가 밀집되어 발생되었던 사실은 다른 요건들에 비해서 강우가 산사태발생을 야기하는 주요 요인임을 반증하는 결과이기도 하다.

3개 지역에서 집중적으로 산사태가 발생되었던 산사태밀집지역의 주변에 위치한 관측소들에서의 강우기록을 시간당 누적강우량으로 나타내면 Fig. 4와 같이 표현된다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 지역들에서 크고 작은 집중호우가 두 차례씩 있었으며, 처음보다는 나중에 더 큰 강우강도와 다량의 집중호우가 발생되었음을 알 수 있다. Fig. 4(a)는 장흥지역의 산사태밀집지역에 인접한 금천, 의정부 및 고양관측소에서의 강우기록을 표현한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 장흥지역은 나흘간에 걸쳐 강우가 지속됨으로써 다른 두 지역에 비해 가장 긴 강우지속시간을 보였다. 강우기간 중에서도 비가 시작된 후 약 7시간째부터 10시간째까지 세 시간동안, 그리고 50시간째부터 56시간째까지인 6시간동안 두 차례의 집중호우가 있었으며, 특히 두 번째의 경우에 호

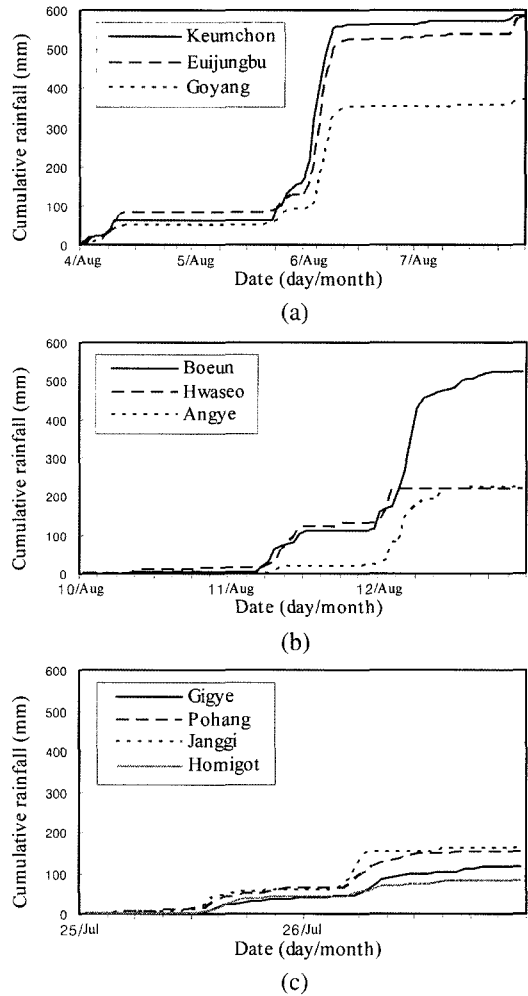


Fig. 4. Hourly cumulative rainfall distribution during 2~4 days at the raingauge stations of study areas: (a) Jangheung area; (b) Sangju area; (c) Pohang area.

우가 집중되었다. 이때의 시간당강우량은 각각 10~18 mm 및 42~63 mm의 범위로서 평균은 각각 13 mm 및 56 mm 정도였고, 최대강우강도는 무려 111.5 mm/hr에 달하는 것으로 나타났다. 그리고 누적강우량 또한 다른 두 지역에 비해 상대적으로 더 많았다.

Table 3. Rainfall records measured at 4 raingauge stations of the Pohang area in 25~26 July, 1998 (after Korea Meteorological Administration).

| Date | Raingauge station | Rainfall (mm) | | | |
|---------------|-------------------|---------------|--------|--------|---------|
| | | Gigyae | Pohang | Janggi | Homigot |
| 25 July, 1998 | | 38.0 | 60.3 | 57.0 | 40.0 |
| 26 July, 1998 | | 77.5 | 90.0 | 103.5 | 40.0 |
| Total | | 115.5 | 150.3 | 160.5 | 80 |

Fig. 4(b)는 상주지역의 산사태밀집지역에 인접한 보은, 화서 및 안계관측소에서 기록한 강우기록을 표현한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 상주지역은 사흘간에 걸쳐 강우가 지속됨으로써 장흥지역에 비해서는 짧은 편이나 포항지역보다는 더 긴 강우지속시간을 보였다. 집중호우가 내린 시간은 비가 내리기 시작한 후 23시간째부터 28시간째까지인 5시간동안, 그리고 41시간째부터 48시간째까지인 8시간동안 두 차례에 걸쳐 진행되었다. 이때의 시간당강우량은 각각 6~20 mm 및 18~43 mm로서 평균은 각각 13 mm 및 30 mm 정도였으며, 최대강우강도는 95 mm/hr에 달하였다.

Fig. 4(c)는 포항지역의 산사태밀집지역에 인접한 기계, 포항, 장기 및 호미곶 관측소에서 기록한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 포항지역은 이틀간에 걸쳐 비가 내림으로써 가장 짧은 강우지속시간을 보였다. 그리고 강우기간 중에서도 비가 시작된 후 두 차례 즉, 4시간째부터 약 두 시간동안과 25시간째부터 약 세 시간동안에 걸쳐 강우가 집중된 양상을 보였다. 이때의 시간당강우량은 각각 9~18 mm 및 6~29 mm의 범위로서 평균은 각각 16 mm 및 22 mm 정도였으며, 최대강우강도는 49.5 mm/hr로서 강우강도가 다른 두 지역에 비해 상대적으로 작았다. 누적강우량 또한 대략적으로 보더라도 장흥지역에 비해서는 3분의 1에도 못미치고 상주지역에 비해서는 절반정도에 불과하여 다른 두 지역에 비해서 훨씬 적은 양을 기록하였다.

강우와 산사태의 관계

강우량과 산사태빈도

강우량과 산사태빈도의 관계를 분석하기 위해 기상청으로부터 수집된 강우자료 중에서 시간강우량 및 일강우량 등을 분석하여 지역별로 산사태가 발생된 당시의 누적강우량을 산정하였다. 그리고 현장조사를 통해 산사태가 집중적으로 발생하였던 지역의 산사태위치를 중첩하여 강우량과 산사태빈도의 관계를 살펴보았다. 이를 위해 지역별로 산사태밀집지역을 중심으로 강우량의 차별성을 평가할 수 있는 영역 내에 위치한 강우관측소에서의 기록을 정리하여 그 누적강우량 분포를 등강우도로 표현하였다.

Fig. 5는 집중호우시 누적강우량의 분포와 산사태밀집지역을 나타낸 등강우도인데, 언뜻 보아도 누적강우량이 많거나 그 주변지역에서 산사태가 밀집되어 발생함으로써 강우량이 산사태를 초래하는 주요 인자임을 쉽게 알

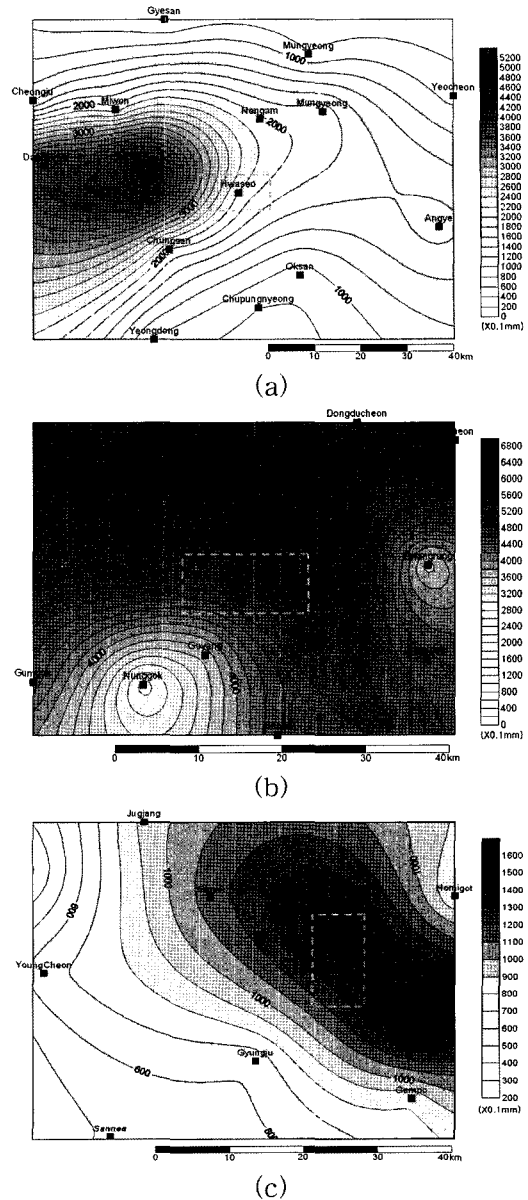


Fig. 5. Contour diagram according to relationship between landslide frequency and localized torrential rainfall in the study areas: □, landslides site; (a), Jangheung area; (b), Sangju area; (c), Pohang area.

수 있다. Fig. 5(a)는 4일간에 걸쳐 비가 내린 장흥지역의 경우로서 산사태밀집지역을 중심으로 약 25 km 이내에 위치한 총 12개 관측소에서의 기록을 나타낸 것이다. 첫날은 산사태밀집지역에 60 mm 정도로 적은 양의 비가 내렸고 동남쪽에 인접한 서울이나 구리 및 광릉지역에 150 mm 내외의 강우가 있었다. 그리고 이들

까지도 누적강우량은 증가하였으나 이러한 강우양상이 비슷한 경향으로 계속되었다. 그러다가 사흘째는 산사태 밀집지역에만 400 mm 정도의 강우가 집중되었으나 그로부터 다소 떨어진 주변지역은 150~300 mm로서 상대적으로 적은 강우량을 기록하였으며, 이때까지 산사태밀집지역의 누적강우량 또한 500 mm 정도로서 주변지역에 비해 100 mm 이상의 차이를 보였다. 따라서 주로 이 시점에서 산사태가 발생하였을 것으로 추정된다. 한편, 마지막 날인 나흘째는 대부분이 40 mm 안팎의 강우를 기록하였으나 산사태밀집지역으로부터 다소 먼 거리에 위치한 포천지역에 많은 양의 집중호우가 있었으며, 그 때 연구지역과 직접 연결되지 않은 또 다른 산사태들이 집중호우지역에서 많이 발생되었다(김원영 외, 2000). 이러한 현상들은 누적강우량이 산사태빈도에 관계됨을 지시하는 결과이다.

Fig. 5(b)는 3일간에 걸쳐 집중호우가 발생한 상주지역으로서 산사태밀집지역을 중심으로 약 40 km 이내에 위치한 총 15개 관측소에서의 기록을 나타낸 것이다. 첫날에 내린 비의 양은 불과 10 mm 정도에 불과하였다. 그러나 동편지역은 비가 내리지 않았으며 서쪽으로 다소 먼 거리의 청주지역에 20 mm 정도의 강우가 있었다. 그리고 이틀까지 강우양상이 비슷한 경향으로 계속되어 산사태밀집지역을 중심으로 하여 동서방향으로 길게 늘인 모양의 130 mm 내외의 누적강우량을 기록하였다. 그러다가 마지막 날인 사흘째는 산사태밀집지역과 인접한 보은지역에 90~410 mm에 달하는 강우가 집중되어 대부분의 산사태들이 이 시점에서 발생되었을 것으로 추정된다. 이때까지 산사태밀집지역의 누적강우량은 200 mm를 웃돌고 인근의 보은지역은 520 mm 정도에 달하여 주변지역보다 적게는 100 mm에서 400 mm 이상이나 더 많이 내렸던 점, 연구지역에는 포함되지 않았으나 같은 시기 3일간의 누적강우량이 522 mm를 기록하였던 바로 인근의 보은지역에서도 157개의 산사태가 집중적으로 발생(김경수 외, 2000)된 것으로 보고되었던 점, 그리고 누적강우량이 150 mm 미만인 주변지역에서는 산사태발생빈도가 현저히 낮거나 아예 발생되지도 않았던 점 등으로 미루어 볼 때, 강우가 산사태에 영향을 미치는 주요 요소임을 알 수 있다. 또한, 누적강우량과 산사태빈도와는 서로 상관성이 있다.

Fig. 5(c)는 2일간에 걸쳐 비가 내린 포항지역의 경우로서 산사태밀집지역을 중심으로 약 40 km 이내에 위치한 총 9개 관측소에서의 기록을 나타낸 것이다. 첫날은 산사태 밀집지역에 60 mm 정도로 비교적 적은 양의 비

가 내렸고 그로부터 거리가 멀어질 수록 강우량이 더 적어져서 영천지역은 10 mm 정도에 불과하였다. 이틀째도 비슷한 강우양상을 보였으나 비의 양은 전날보다 더 많은 80~110 mm가 내림으로써 산사태밀집지역은 150 mm 내외의 누적강우량을 기록하였다.

이 시기에 그로부터 약간 떨어진 주변지역은 100 mm 미만으로서 더 적은 누적강우량을 기록하였다. 따라서 포항지역은 이틀째 되는 날에 산사태가 발생되었을 것으로 추정하였는데, 그 이유로는 두 차례에 걸친 짧은 시간동안의 강우강도가 특별히 크지 않았으며, 첫날의 일강우량 60 mm 정도는 산사태를 유발시키기에 다소 부족한 양 등을 들 수 있다. 그러므로 강우가 이틀째 계속되어 150 mm 가까이에 달한 시점에서 산사태가 발생한 것으로 보는 것이 타당하다고 판단하였다. 한편, 포항지역은 누적강우량만으로 볼 때 다른 두 지역에 비해 훨씬 적은 양에 불과하다. 하지만, 두 지역과 마찬가지로 누적강우량이 많은 지역에서만 산사태가 집중적으로 발생하였을 뿐, 그 지역을 벗어난 바로 인근지역에서는 산사태가 거의 발생되지 않았다. 따라서 강우는 산사태를 유발하는 매우 중요한 요인으로 간주될 수 있으며, 누적강우량과 산사태빈도는 서로 상관관계를 가지는 것으로 평가되는데, 모든 지질조건에서 거의 동일하게 나타나는 이러한 현상들이 이를 반증하고 있다.

한편, 홍원표 외(1990)에 의해 제시되었던 것을 바탕으로 하여 3개 지역에서의 산사태와 선형누적강우량의 상관성을 검토하기 위해 산사태가 발생되기 이전의 누적강우량과 발생된 날의 일강우량을 비교하였다. 이 때 누적강우량은 산사태발생일과 발생일 이전의 1일, 3일 및 7일간에 걸친 누적강우량으로 구분하였다. 단, 많은 수의 산사태들의 발생시기를 일일이 그리고 정확하게 확인할 수 없었기 때문에 지역별 산사태 발생시기는 앞에서 여러 현상과 결과들로부터 추정하였던 시점으로 간주하였으며, 강우자료는 산사태밀집지역에 인접한 3~4개 관측소에서의 기록을 대상으로 한정하였다. 따라서 장흥지역은 강우가 시작되고 3일째인 8월 6일, 상주지역은 3일째인 8월 12일, 포항지역은 이틀째인 7월 26일에 산사태가 발생한 것으로 간주하였다. 그리고 이때의 강우자료로 장흥지역은 금천, 의정부 및 고양관측소, 상주지역은 보은, 화서 및 안계관측소, 포항지역은 기계, 포항, 장기 및 호미곶 관측소의 기록을 이용하여 산사태와 누적강우량과의 상관성을 분석하였다.

Fig. 6은 지역별로 산사태발생일 이전의 누적강우량과 발생당일의 강우량을 대비하여 나타낸 것이다. 종축에는

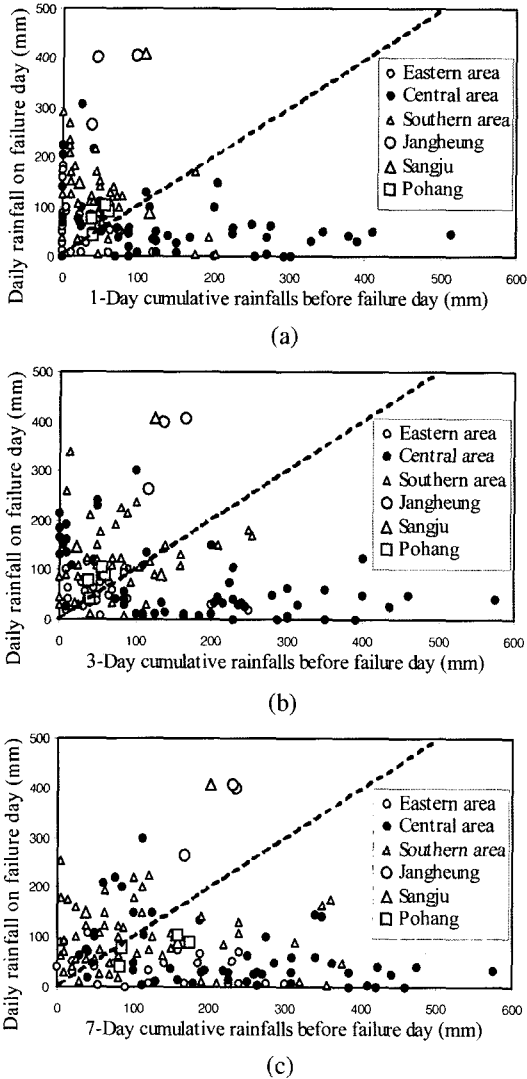


Fig. 6. 1-day, 3-day, and 7-day cumulative rainfalls before landslide occurrence day in the study areas: (a), 1-day cumulative rainfalls; (b), 3-day cumulative rainfalls; (c), 7-day cumulative rainfalls.

산사태발생일로 추정된 날의 강우량을, 그리고 횡축에는 선행누적강우량을 표시하였다. 여기서 선행누적강우량이란 산사태 발생당일의 강우량은 포함하지 않고 그 이전 1일간, 3일간 및 7일간의 누적강우량을 의미한다. Fig. 6(a), (b) 및 (c)는 이들 세 경우의 누적강우량들을 나타낸 것이다. 홍원표 외(1990)는 점선으로 표시된 45° 중앙경계선을 기준으로 상부영역에 점시되면 당일강우량에 영향을 받아 산사태가 발생한 것으로 보았으며, 반대로 하부영역에 점시되면 누적강우량에 영향을 받은 것

으로 보았다. 이러한 판단기준을 적용하여 지역별로 산사태와 누적강우량의 관계를 살펴보면, 장흥지역은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 3개 관측소의 강우기록 모두가 세 경우의 중앙경계선 상부영역에 점시됨으로써 누적강우보다는 주로 당일강우량에 영향을 받았다.

상주지역 역시 Fig. 6에서 보는 바와 같이 강우량이 많았던 2개 관측소의 기록은 중앙경계선을 기준으로 상부영역에 점시되고, 강우량이 적었던 1개 관측소의 기록은 중앙경계선 바로 하부에 점시되었다. 따라서 상주지역 역시 누적강우량보다는 당일강우량의 영향을 더 크게 받았으며, 일부는 당일강우량에 좌우되었다.

한편, 포항지역은 장흥 및 상주지역과는 다른 양상이 관찰된다. 우선, Fig. 6(a) 및 (b)에서와 보는 같이 1일과 3일 선행누적강우량은 4개 관측소의 강우기록 모두 중앙경계선의 상부영역에 점시되었으나 거의 선상에 근접하였다. 반면, Fig. 6(c)에서와 같이 7일 선행누적강우량은 4개 관측소의 강우기록 모두 중앙경계선의 하부영역에 점시되었으며 역시 선상에서 크게 벗어나지 않은 위치에 점시됨을 알 수 있다. 따라서 포항지역은 당일강우량과 누적강우량의 영향을 동시에 받았다.

강우강도와 산사태

산사태발생에 있어서 강우강도는 산사태가 발생되기 전까지의 선행강우량 못지않게 중요한 요소라고 할 수 있다. 따라서 3개 지역을 대상으로 하여 집중호우로 인해 산사태가 발생되었던 시기에 강우가 지속되었던 기간의 강우자료로부터 시간당 강우강도를 검토하였는데, 이때의 강우자료는 산사태발생지역으로부터 가장 가까이 위치한 한개 관측소만의 기록을 이용하였다. 한편, 산사태 발생시기는 앞에서 추정하였던 날을 기준으로 강우강도에 따른 산사태특성을 분석하였다.

Fig. 7은 강우강도와 산사태의 관계를 검토하기 위해 지역별로 시간당 강우강도와 누적강우 및 산사태 발생일을 표현한 것이다. 그림에서 종축의 왼쪽은 시간당강우량을 막대로 표시하였고, 오른쪽은 누적강우량을 실선으로 나타내었다. 장흥지역은 산사태발생지역과 가장 인접한 의정부관측소의 강우기록을 비교대상으로 하였다. 장흥지역에서는 Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 발생일로 추정되는 1998년 8월 6일에 511개 산사태가 발생되었다. 산사태가 발생한 당일의 최대 시간당강우량이 111.5 mm를 나타내었으며, 무려 405 mm에 달하는 일강우량이 6시간동안에 집중되었다. 이처럼 누적강우곡선이 산사태가 발생한 날에 급격하게 상승되고 있는 점으로

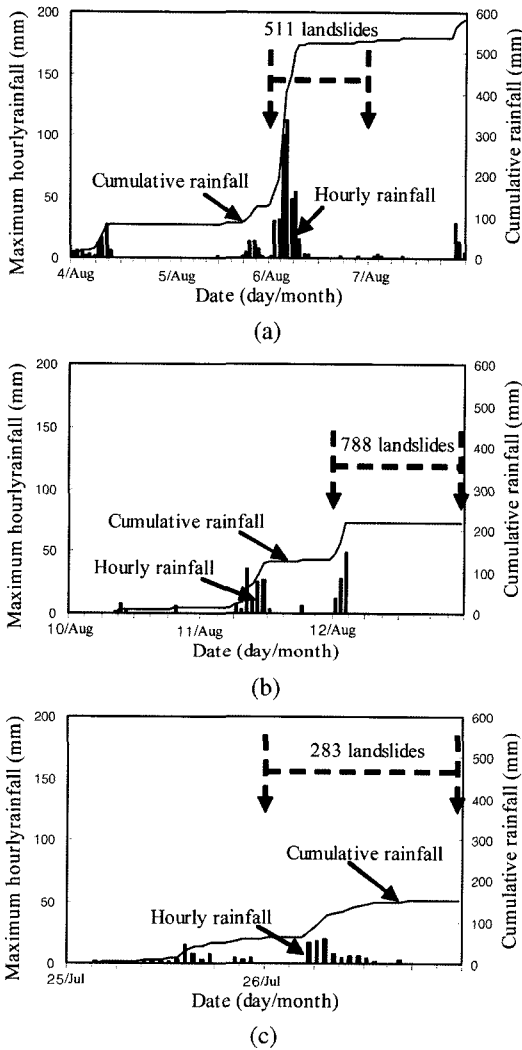


Fig. 7. Hourly and cumulative rainfalls with landslide triggered day in the study areas: (a), Uijeongbu station of Jangheung area in 4~7 August 1998; (b), Hwaseo station of Sangju area in 10~12 August 1998; (c), Pohang station of Pohang area in 25~26 July 1998.

보아 장흥지역은 누적강우보다는 집중강우에 영향을 받았으며, 특히 최대시간강우량이 크게 작용된 것으로 판단된다.

상주지역은 주변에 위치한 보은과 화서관측소의 강우 기록이 누적강우량만으로도 두 배 이상 차이가 나는 등 큰 차이를 보였는데, 여기에서는 누적강우량과 시간강우량이 작기는 하나 산사태밀집지역 내에 위치해 있는 화서지역의 강우기록을 비교대상으로 하였다. 상주지역에서는 Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 발생일로 추정되는

1998년 8월 12일에 788개 산사태가 발생되었다. 발생당일의 강우량은 89 mm이었고 최대시간강우량은 49.5 mm를 기록하였다. 그런데 누적강우곡선이 부분적으로 상승하고는 있으나 큰 강도로 급격하게 변화되지 않은 점으로 보아 주로 일강우량이나 누적강우량에 더 영향을 받았을 것으로 판단된다.

한편, 포항지역은 산사태밀집지역과 가장 인접한 포항관측소의 강우기록을 비교대상으로 하였다. 포항지역에서는 Fig. 7(c)에서 보는 바와 같이 발생일로 추정되는 1998년 7월 26일에 283개 산사태가 발생되었다. 산사태가 발생되기 전 60 mm 정도의 누적강우량이 있었고 당일에는 90 mm의 강우량을 보임으로써 누적강우량과 발생당일의 일강우량 모두의 지배를 받은 것으로 볼 수 있다. 그러나 일강우량의 대부분이 세 시간에 집중되었을 뿐만 아니라 이 때 최대 시간강우량이 18.9 mm이었던 것으로 보아 집중강우와 최대시간강우에 의한 영향도 함께 받았을 것으로 판단된다.

이상과 같이 강우량 및 강우강도라는 두 가지 경우로 나누어 산사태와의 상관성을 검토해 본 결과, 두 경우 모두에서 거의 일치하는 경향성이 관찰되었다. 즉, 장흥 지역 및 상주지역은 단기간에 집중되는 많은 양의 강우로 인해 산사태가 발생되었는데, 누적강우량보다는 집중강우 및 강우강도에 큰 영향을 받았을 것으로 분석된 반면, 포항지역은 누적강우량과 집중강우 및 강우강도에 도 영향을 받았다.

강우조건과 산사태규모

앞에서 분석한 바와 같이 3개 지역에서의 산사태는 누적강우량, 일강우량과 강우강도 모두에 영향을 받았다. 따라서 이들 요소들을 함께 고려하여 산사태를 평가할 필요가 있으며, 특히 산사태를 예측하기 위해서는 무엇보다도 지역적 특성에 따른 선행누적강우량, 산사태가 발생된 날의 일강우량 및 시간강우량 등이 고려되어야 할 사항이다. 그리고 강우조건만을 고려하여 산사태를 예측하기 위해서는 산사태지역에서의 누적강우량과 최대 시간강우량에 따른 산사태규모의 고찰을 통하여 적절한 발생규모의 구분 또한 필요할 것이다. 한편, 산사태의 규모는 산사태가 발생된 길이나 체적으로 구별하는 방법과 발생건수로 구별하는 방법이 있다. 그런데 앞의 기하학적 특성에서 이미 길이를 기준으로 한 산사태 규모를 분석하였고, 우리나라는 산사태길이가 500m 이상이거나 또는 수 km에 이르는 대규모산사태가 거의 발생되지 않은 것으로 보고되어지고 있기 때문에 여기서

는 발생건수를 기준으로 산사태규모를 살펴보았다.

홍원표 외(1990)는 Lumb(1975)의 방법에 의해 전국에서 발생한 산사태를 발생회수에 따라 소규모(minor), 중규모(severe) 및 대규모(disaster)로 구분하여 제시한 바 있다. Lumb(1975)과 홍원표 외(1990) 등은 모두 소규모산사태는 동일한 축축소 주변지역에서 동일한 날에 산사태가 1~3개소에서 발생한 경우, 중규모산사태는 4~19개소, 그리고 대규모산사태는 20개소 이상에서 발생한 경우로 구분하였다. 3개 지역의 산사태는 수 백개의 산사태가 밀집되어 발생되었고 1개 관측소를 기준으로 하였을 때도 최소 20개 이상씩 발생하였으므로 모두 대규모산사태에 해당됨을 우선적으로 단정할 수 있다. 따라서 반드시 이 방법으로 산사태규모를 구분할 필요는 없으나, 기존에 제시되었던 방법을 적용하여 그 합리성여부를 살펴봄으로써 검토사항들이 앞으로 이들 지역에서 산사태예측을 위한 객관적 강우자료로 적절히 활용될 수 있다는 점에 그 의미를 두었다.

홍원표 외(1990)는 우리나라의 소규모산사태는 최대 시간강우강도와 누적강우량이 각각 10 mm 및 40 mm를 초과하면 발생되기 시작하고, 중규모산사태는 각각 15 mm 및 80 mm를 초과하는 경우, 그리고 대규모산사태는 최대시간강우강도 35 mm와 누적강우량 140 mm를 초과하면 발생된다고 보고하였다. Fig. 8은 홍원표 외(1990)의 연구결과를 바탕으로 하여 3개 지역에서의 강우기록을 대비하여 나타낸 것으로 누적강우량은 산사태 발생당일과 전일의 2일간에 걸친 누적강우량을 나타내고 있다. 이들 구분방법에 따르면, 장흥지역은 3개관측소 중에서 최소강우량을 기록한 고양관측소에서의 강우 조건만을 보더라도 산사태 발생당일의 최대시간강우강도가 72 mm이고 누적강우량은 301.5 mm로서 대규모산사태가 발생할 조건에 부합되었던 것으로 나타났다. 상주지역 역시 3개 관측소 중에서 최소강우량인 화서관측소에서 발생당일의 최대시간강우강도가 49.5 mm와 안계관측소에서의 누적강우량이 170.5 mm로서 대규모산사태가 발생할 조건을 모두 충족하였다. 그러나 포항지역은 이들 두 지역과는 다른 강우특성을 보여 최대시간강우강도가 조건에 다소 미흡하였음에도 많은 산사태들이 발생하였던 것으로 분석되었다. 즉, 최소강우량을 대상으로 하였던 장흥 및 상주지역과는 반대로 포항지역은 최대강우량을 대상으로 살펴보았는데, 최대강우량지역인 포항 및 장기관측소에서의 최대시간강우강도와 누적강우량이 각각 150.3 mm와 18.9 mm이고 160.5 mm와 49.5 mm로서 누적강우량은 대규모산사태가 발생할

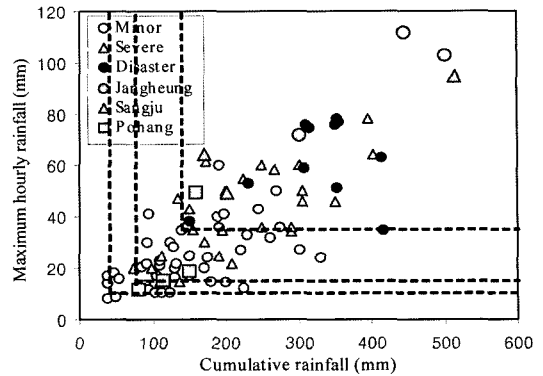


Fig. 8. Relationship between maximum hourly rainfall and cumulative rainfall considering the landslides magnitude (modified after Hong *et al.*, 1990).

조건에 부합되었으나, 포항관측소에서처럼 최대시간강우강도는 대규모산사태가 발생할 조건에 미흡하였다. 따라서 포항지역의 경우는 대규모산사태가 발생할 조건 중에서 최대시간강우강도의 기준치를 다소 하향조정할 필요가 있는 것으로 판단된다.

이러한 결과들을 종합해 보면, 산사태 발생건수로 산사태규모를 구분하는 기존의 방법이 전반적으로는 합리성을 가지는 것으로 분석되었다. 그러나 최근들어 특정 지역에 짧은 시간동안 호우가 집중적으로 쏟아지는 우리나라의 국지성 강우특성, 그리고 이들 지역에서 많은 산사태들이 집중적으로 발생함으로써 발생빈도가 매우 높은 산사태양상 등을 반영하여 산사태발생건수로 산사태규모를 구분하는 기준설정을 계속 개선하여야 할 필요성이 있다.

결론

산사태들은 집중호우에 의해 발생되었고 국지적으로 밀집되는 양상을 보이는 등 강우와 산사태는 매우 밀접한 연관성을 가지며, 지질이나 지형조건 및 토질특성 등이 지역에 따라 다름에도 불구하고 이 시기에 대부분의 산사태가 발생됨으로써 강우가 산사태발생에 매우 중요한 외적 요인으로 작용되고 있음을 짐작케 한다. 강우를 지배하는 여러 요소 즉, 누적강우량, 강우강도, 강우지속시간, 선행강우량 등이 지역별로 다른 양상을 보였으며, 그에 따른 산사태의 양상이나 발생빈도 또한 각기 다른 것으로 조사되었다. 연구결과는 다음과 같이 요약된다.

1) 연구지역들에서는 2~4일간에 걸쳐 150.3~588.5 mm에 달하는 집중호우가 내렸으며, 지역별로 차이는 있

나 3~8시간동안에 강우가 집중되었고 이때의 최대 시간당강우량은 42~63 mm, 최대강우강도는 무려 111.5 mm/hr에 달하는 호우가 국지적으로 집중되는 양상을 보였다.

2) 누적강우량이 많은 지역에서만 산사태가 집중적으로 발생하였고 그 지역을 벗어난 바로 인근지역에서는 산사태가 거의 발생되지 않음으로써 강우가 산사태를 유발하는 매우 중요한 외적 요인으로 작용하였으며, 누적강우량과 산사태빈도는 서로 상관관계를 갖는다.

3) 편마암류인 장흥지역과 화강암류인 상주지역은 단기간에 집중된 많은 양의 강우로 인해 산사태가 발생되었으며, 누적강우량보다는 집중강우 및 강우강도의 영향을 더 크게 받은 것으로 분석되었다. 그러나 제3기 퇴적암류인 포항지역은 집중호우의 지속시간이 짧고 그 양 또한 훨씬 적은 양이었음에도 편마암류 및 화강암류와 다른 지질조건 및 토질특성으로 인해 높은 산사태 발생빈도와 함께 다른 두 지질조건과는 달리 누적강우량과 집중강우 및 강우강도 모두에 영향을 받았다.

4) 홍원표 외(1990)의 기준에 의하면, 편마암류인 장흥지역은 발생당일 최대시간강우강도와 누적강우량 모두 대규모산사태가 발생할 조건에 부합되었으며, 화강암류인 상주지역 역시 대규모산사태 발생조건을 모두 충족하였다. 그러나 제3기 퇴적암류인 포항지역은 이들 두 지역과는 다른 강우특성을 보여 최대시간강우강도가 조건에 다소 미흡하였음에도 많은 산사태들이 발생됨으로써 대규모산사태가 발생할 조건 중에서 최대시간강우강도의 기준치를 다소 하향조정할 필요가 있다.

5) 강우 및 산사태자료를 바탕으로 한 강우특성을 종합해 볼 때, 산사태 발생건수로 산사태규모를 구분하는 기존의 방법은 전반적으로는 합리성을 가진다. 그러나 특정지역에 짧은 시간동안 호우가 집중적으로 쏟아지는 국지성 강우특성과 발생빈도가 매우 높은 산사태양상을 반영하여 산사태발생건수로 산사태규모를 구분하는 기준설정은 계속 개선할 필요성이 요구된다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본연구사업인 ‘산사태위험도 산정시스템 및 피해저감기술 개발’ 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

강릉시, 2002, 제15호 태풍 “루사” 피해복구계획, 강릉

- 시.
 강위평, 1981, 1979년 8월 집중호우에 의한 진해지구의 산사태에 관한 연구, 한림지, 52, 72-78.
 김경수, 2001, 지형 및 토질특성을 고려한 산사태 예측, 한국지질자원연구원 논문집, 5, 4, 29-41.
 김경수, 김원영, 채병곤, 조용찬, 2000, 강우에 의한 산사태의 지질공학적 특성 -충청북도 보은지역-, 대한지질공학회지, 10, 2, 163-174.
 김 승, 1996, 우리나라 호우의 특징과 예보현황, 대한토목학회지, 44, 9, 17-21.
 김영복, 장석완, 2000, 대전-충남지역의 강우특성에 의한 산사태에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 20, 4C, 341-355.
 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, 최영섭, 이사로, 이봉주, 2000, 산사태 예측 및 방지기술연구, 한국자원연구소, KR-00-(T)-09, 642p.
 김원영, 채병곤, 김경수, 조용찬, 최영섭, 이춘우, 이철우, 김구영, 김정환, 김준모, 2003, 산사태 예측 및 방지기술연구, 과학기술부, KR-03-(T)-03, 339p.
 이진수, 이강일, 김경완, 2002, 이암 퇴적토의 slaking에 따른 전단 및 압축 특성, 대한토목학회논문집, 22, 4C, 453-460.
 한중근, 2001, 부산지역에서의 강우와 산사태의 특성분석, 한국환경복원녹화기술학회지, 4, 1, 24-31.
 행정자치부, 2002, 재해연보, 행정자치부.
 홍원표, 김윤일, 김상규, 한중근, 김마리아, 1990, 강우로 기인되는 우리나라 사면활동의 예측, 대한토질공학회지, 6, 2, 159-167.
 Brand, E. W., 1985, Predicting the Performance of Residual Soil Slopes Proc., 11th ICSMFE, San Francisco, 2541-2573.
 Fredlund, D. G., 1981, The Shear Strength of Unsaturated Soil and Its Relationship to Slope Stability Problems in Hong Kong, Hong Kong Engineering, 37-45.
 Lumb, P., 1975, Slope Failures in Hong Kong, Quarterly Journal of Engineering Geology, London, 8, 31-65.
 Nilson, T. H, and Tumor, B. L., 1975, Influence of Rainfall and Ancient Landslide Deposit on Recent Landslides (1959-1971) in Urban Area of Contra Costa County, Col USGS Bull., 1388, 1-18.
 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.
 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.

2006년 5월 19일 원고접수, 2006년 6월 22일 게재승인

김경수

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel : 042-868-3054
Fax : 042-861-9723
e-mail : kks@kigam.re.kr

송영석

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel : 042-868-3035
Fax : 042-861-9723
e-mail : yssong@kigam.re.kr

조용찬

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel : 042-868-3059
Fax : 042-861-9723
e-mail : choych@kigam.re.kr

김원영

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel : 042-868-3345
Fax : 042-861-9723
e-mail : kwy@kigam.re.kr

정교철

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-823-1627
e-mail: jeong@andong.ac.kr