

# DB구축을 통한 강원지역 사면재해 유발강우특성 분석

## Analysis of Slope Hazard-Triggering Rainfall Characteristics in Gangwon Province by Database Construction

윤 찬 영 <sup>1</sup>	Yune, Chan-Young	전 경 재 <sup>2</sup>	Jun, Kyoung-Jea
김 경 석 <sup>3</sup>	Kim, Kyung-Suk	김 기 홍 <sup>4</sup>	Kim, Gi-Hong
이 승 우 <sup>5</sup>	Lee, Seung-Woo		

### Abstract

In every summer season, most of the slope failures and debris flows occur due to seasonal rain, typhoon, and localized extreme rainfall in Gangwon Province where 83% of the area is of mountain region. To investigate the slope-hazard triggering rainfall characteristics in Gangwon Province, slope hazard data, precipitation records, and forest fire data were collected and the DATABASE was constructed. Analysis results based on the DATABASE showed that many slope hazards occurred when there was little rainfall and the preceding rainfall had more effect on the slope hazard than the rainfall intensity at the day of hazard. It also showed that the burned area by forest fire was highly susceptible to slope hazard with low rainfall intensity, and the slope hazard in burned area showed highest frequency, especially, under the rainfall below 2-year return period.

### 요 지

산지가 약 83%의 면적을 차지하는 강원지역에서는 매년 하절기에 장마, 태풍, 집중호우에 기인한 산사태 및 토석류와 같은 사면재해로 인해 많은 피해가 발생하고 있다. 본 연구에서는 강원도 지역의 사면재해를 유발하는 강우의 특성 분석을 위해 사면재해자료, 강우자료, 산불발생자료를 수집하여 DATABASE를 구축하였다. 구축된 자료에 대한 분석결과, 사면재해는 강우가 거의 없는 시점에 발생하는 경우가 많았으며, 사면재해를 유발하는 강우는 재해발생일의 강우보다 선행강우가 더욱 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 또한 산불발생지역에서는 산불미발생지역에 비하여 더 작은 강우에서도 사면재해가 발생하고 있으며 특히 산불발생지역에서는 2년이하의 재현강우에서 재해 발생빈도가 가장 높은 것으로 나타났다.

**Keywords :** DATABASE, Forest fire, Gangwon province, Preceding rainfall, Rainfall characteristics, Return period, Slope hazard

### 1. 서 론

기복이 심한 산지가 약 83%의 면적을 차지하는 강원

지역에서는 매년 하절기에 장마, 태풍, 집중호우에 기인한 산사태 및 토석류와 같은 사면재해로 인해 많은 피해가 발생하고 있다. 강우에 기인한 사면재해는 건설

1 정회원, 강릉원주대학교 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Gangneung-Wonju National Univ., yune@gwnu.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 강릉원주대학교 박사과정 (Member, Ph.D Student, Dept. of Civil Engrg., Gangneung-Wonju National Univ.)

3 정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (Member, Researcher, Korea Expressway Corporation)

4 강릉원주대학교 조교수 (Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Gangneung-Wonju National Univ.)

5 정회원, 강릉원주대학교 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Gangneung-Wonju National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

로 인해 형성되는 절·성토사면에서 발생하는 것 이외에도 산불이나 벌목으로 인해 식생 상황이 변화된 자연산지에서도 많이 발생하는데, 강원지역에서는 과거부터 산지비탈면에 화전경작이 많이 이루어졌고 최근에는 크고 작은 산불이 빈번하게 발생한 사례가 있어 강우에 의한 사면 재해에 상대적으로 취약한 상황으로 볼 수 있다. 산불이 발생한 후에는 표층지반의 결속을 유지하던 초목이 훼손되고 강한 열에 노출된 표토 지반의 점착력이 감소하게 되므로 강우 시 지표면의 침식과 세굴, 표층유실이 쉽게 발생할 뿐만 아니라 산지수문학적 측면에서 총유출량과 침투유출량이 증가하게 되므로 자연적인 산사태와 토석류의 발생가능성이 한층 높아진다(박덕근, 2001). 국내 산불현황을 보면 1996년부터 2000년 사이에 연평균 472건이 발생한 것으로 나타나며 2000년 이후에는 연평균 700건 이상의 산불이 발생한 것으로 보고되고 있다. 특히 3월~4월 사이에 300ha 이상 규모의 대형 산불이 강원도 동해안 지역에 집중적으로 발생한 바 있는데 이와 같이 봄철에 발생하는 산불은 전체 산불발생지역 면적대비 99%로서 대부분을 차지하고 있어 6월부터 시작되는 우기시에는 이러한 산불지역에서 크고 작은 산사태와 토석류로 인해 대량의 토사가 유출되면서 사면재해를 유발할 가능성이 매우 높다(한국지질자원연구원, 2003).

사면재해를 유발하는 강우특성에 대한 규명은 강우 시 사면재해에 대한 조기경보체계 수립이나 사면재해 예방을 위한 대책공법의 설계 및 유지관리를 위해 매우 중요한 부분이다. 강우기준의 도입은 Caine(1980)이 토석류를 유발하는 임계강우개념(critical rainfall threshold concept)을 처음으로 제시한 이후 많은 연구자들이 산사태 예보와 경보를 위한 다양한 개념의 강우기준을 제시하는 연구가 수행된 바 있다(Crosta & Frattini, 2000; Wilson 등, 1995). 이들 연구에서는 사면재해와 연관을 짓기 위한 강우기준으로서 강우강도, 강우지속시간, 총강우량, 24시간 연속강우량, 선행강우량 등의 값을 이용하였으나 산사태나 토석류를 유발하는 강우기준은 단일 기준으로 제시하기 어렵고 지역적인 지형, 지질, 식생상황 및 기후특성에 의해 달라질 수 있으므로 지역적 특성이

반영되어야만 한다고 결론짓고 있다.

국내에서도 산사태를 유발하는 강우기준에 대한 연구가 수행된 바 있는데 최경(1989)은 연속강우량과 시간강우강도 개념을 이용하여 산사태를 유발하는 강우기준을 제시하였으며, 연속강우기준으로 200mm이상, 최대시간강우량이 30mm이상이 되면 산사태 발생 위험이 있다고 보고하고 있다. 홍원표 등(1990)은 1977~1987년 사이의 주요 산사태와 강우자료 분석을 통해 일강우량과 시간강우량이 산사태에 발생과 관련이 있고 강우특성에 따라 발생규모도 달라지는 것을 확인한 바 있다. 산사태 발생을 유발하는 강우 이전에 발생한 선행강우도 산사태 발생에 영향을 주는 것으로 알려져 있는데, 선행강우의 강우량과 지속시간, 산사태를 유발한 강우와의 시간차가 중요하지만 아직 국내에서는 선행강우가 산사태에 미치는 영향을 분석한 예는 없고 일본의 경우 학자별 의견이 상이하지만 일반적으로 산사태 발생 전 3일 또는 7일의 선행 강우량과 발생 당일의 강우강도가 산사태와 밀접한 관계가 있는 것으로 보고하고 있다. 국내에서 산사태 주의보나 경보를 발령하는 강우기준은 대체적으로 시간강우량(강우강도), 일강우량(24시간), 연속강우량을 사용하는데, 산림청에서는 1988년부터 산사태 주의보·경보 기준을 표 1과 같이 마련하여 활용하고 있다.

국내의 산사태 유발 강우에 대한 문헌에서는 전국적인 산사태 자료를 이용하는 경우가 많은데 이는 지역적인 지형특성이나 지질특성의 차이를 반영하지 못할 가능성이 높다. 특히 강원도 지역의 경우에는 산불이나 벌목과 같이 식생상황 변화에 의해 자연사면에서 발생하는 사면재해가 많은데 이러한 차이를 구분하여 강우기준을 설정할 필요가 있다. 또한, 산사태와 관계있는 강우 특성으로서 1시간, 24시간 또는 연속적인 강우량을 이용하고 있는데 이러한 값은 주의보나 경보발령을 위한 목적에서는 용이하게 사용할 수 있지만 재해대책을 위한 배수시설물의 해석이나 설계를 위해서는 산사태 유발강우의 재현주기로 결과를 제시하는 것이 필요하다.

이 연구에서는 강원도 지역의 사면재해를 유발하는 강우의 특성 분석을 위해 사면재해자료, 강우자료, 산불

표 1. 산림청의 산사태 예보 기준치

구분	최대시간강우량	1일강우량	연속강우량
산사태 주의보	20~30mm	80~150mm	100~200mm
산사태 경보	30mm	150mm	200mm

발생자료를 수집하여 DATABASE를 구축하였으며 강우량의 관점, 지속되는 강우에서 산사태가 발생하는 시점, 그리고 배수시설물의 설계에 사용하는 강우의 재현 주기의 관점에서 강우특성을 분석하고자 하였다. 특히 강원도 지역에 산불발생 지역이 많은 것을 감안하여 산불발생지역과 미발생지역에서 산사태 유발 강우특성의 차이를 분석해 보았다.

## 2. 자료수집 및 DATABASE의 구축

### 2.1 사면재해 자료

강원도 지역에서 발생한 사면 재해와 관련하여 수집된 기초자료는 국토관리사무소에서 관리하는 도로재해대장 446개, 기존 문헌(국립방재연구소, 2002) 및 신문 보도자료 49개소를 포함한 총 495개이며, 대부분 최근 강원지역에 많은 피해를 유발한 2002년, 2003년, 2006년의 자료이다(그림 1).

도로재해대장의 자료에는 다양한 피해 유형이 혼재되어 있었는데 446개 자료를 분석한 결과 도로피해 311개소, 사면피해 242개소, 수충부피해 78개소, 배수로피해 106개소로 분류되었으며(그림 2), 이들 피해개소의 총 합이 446개를 넘는 것은 동일현장에 2, 3가지 피해가 중복하여 발생한 경우가 있기 때문이다. 총 446개 자료 중 사면피해가 발생한 곳은 54.3%로서 강원도 지역의 도로에 발생하고 있는 피해의 상당부분이 사면재해에 기인하고 있다는 사실을 확인할 수 있다.

사면재해와 강우특성의 관계를 분석하기 위해서는

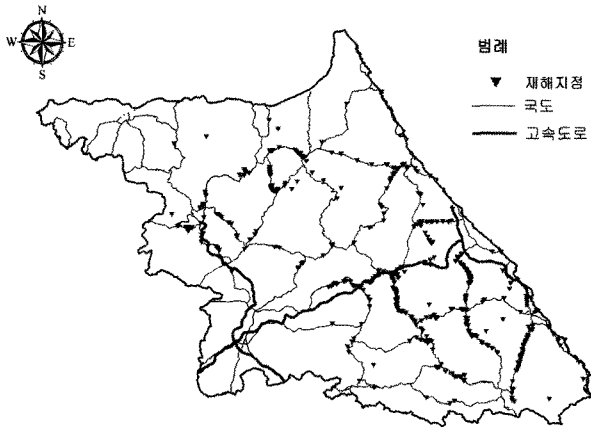
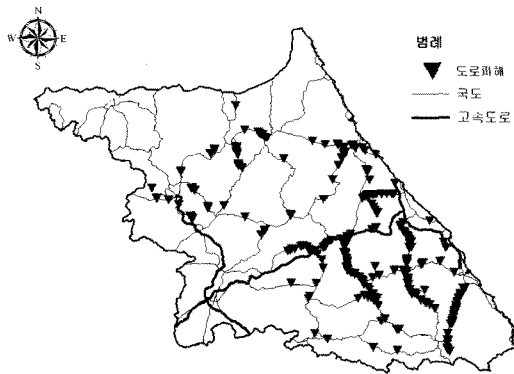
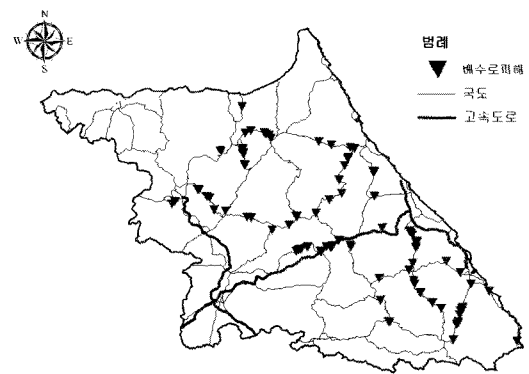


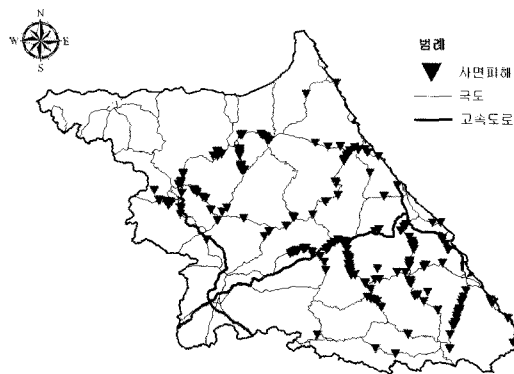
그림 1. 사면재해의 분포현황(495개소)



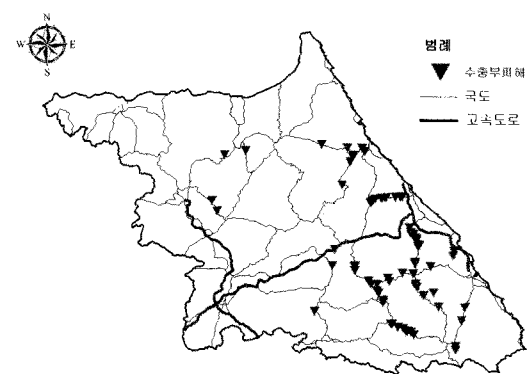
(a) 도로피해(311개소)



(b) 배수로피해(106개소)



(c) 사면피해(242개소)



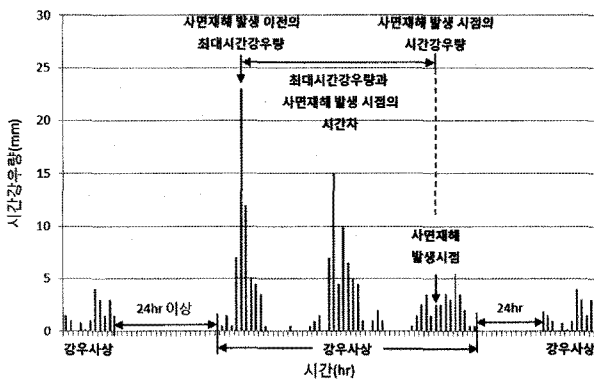
(d) 수충부피해(78개소)

그림 2. 도로재해대장을 이용한 재해유형별 분포현황

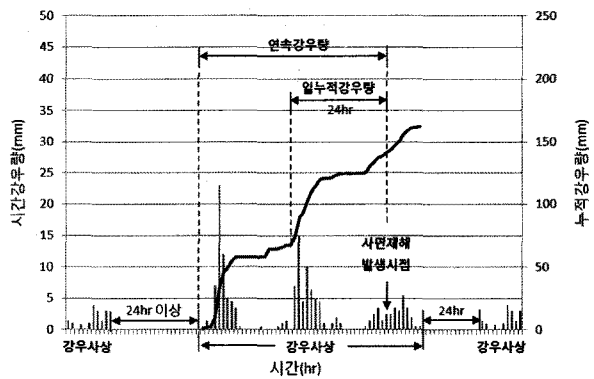
정확한 재해 발생시점과 재해발생 당시의 강우기록이 필요한데, 기존문헌 및 신문보도자료 49개소와 합쳐 총 291개소의 사면재해 자료 중 재해발생시각이 정확히 기록되지 않은 자료와 재해 발생당시 기상장비의 오류 등으로 강우자료를 확인할 수 없는 위치는 분석에서 제외하였으며, 최종적으로는 2002년 6개소, 2003년 36개소, 2006년 66개소의 총 108개 자료를 분석대상 사면재해 DATABASE로 구축하였다. 사면재해 DATABASE에 포함되는 내용은 재해발생일, 발생위치, 발생당시의 시간 강우량 및 일강우량, 피해유형, 복구내용, 피해액, 복구액 등이다.

## 2.2 사면재해 유발 강우 자료

사면재해 DB에 구축된 총 108개 지역에 대하여 각각의 위치에 가장 가까운 기상청의 자동기상관측소(AWS, Automatic weather system) 강우기록으로부터 해당 사면재해 발생 시점을 포함하는 연간 강우기록을 시간단위 강우로 수집하였으며, 재해발생 시점은 대부분 집중호우가 주로 발생하는 시기인 6월~9월 사이에 집중되는



(a) TIME-HOURLY RAINFALL



(b) TIME-CUMULATIVE RAINFALL

그림 3. 연구에 사용한 강우특성의 정의

것으로 나타났다.

수집된 시간단위 강우자료는 강우특성의 분석을 위해 사면재해 발생시점의 시간강우량, 일강우량, 사면재해 발생이전의 최대시간강우량, 일누적강우량, 연속강우량, 최대시간강우량 발생시간과 사면재해발생시간과의 시차 등으로 정리하여 DB로 구축하였다. 구축된 강우자료는 사면재해 발생 시점이 비교적 정확히 확인된 자료로서 일누적강우량은 사면재해 발생시점부터 24시간 이전까지의 총강우량으로 정의하고, 연속강우량은 사면재해 발생시점 이전의 연속된 강우량으로 정의하였다. 단, 하나의 연속강우 사상에서 24시간 미만의 짧은 강우중단 기간이 있는 경우에는 그 이전 강우가 후속강우와 연관성을 가지고 사면재해에 영향을 미치므로 연속적인 강우가 진행 중인 것으로 보고 연속강우량 산정에 포함하였다.

## 2.3 산불발생 자료

산불 발생자료는 산불 발생 후 식생이 회복되기까지는 상당한 시간이 소요되는 점을 감안하여 1998~2007년까지 10년간 강원도 지역에서 발생한 623개의 산불자료를 수집하였다. 수집된 자료는 산불발생지역의 위치, 발생일시, 진화일시, 소요시간, 발생원인, 피해면적 등을 포함하고 있다. 강원도 지역의 10년간 산불발생 추이를 보면(그림 4), 1999년부터 2001년까지 3년간 전체 산불발생횟수의 64.7%인 403회가 발생하였으며 2002년 이후부터는 연평균 32회 정도의 산불이 발생하고 있다. 산불발생지역의 위치를 지도상에 나타낸 결과(그림 5), 산불은 전반적으로 도시 또는 도로와 인접한 지역에서 상대적으로 발생빈도가 높게 나타나고 있는데, 이는 강우에 기인한 사면재해가 산불지역에서 발생하는 경우

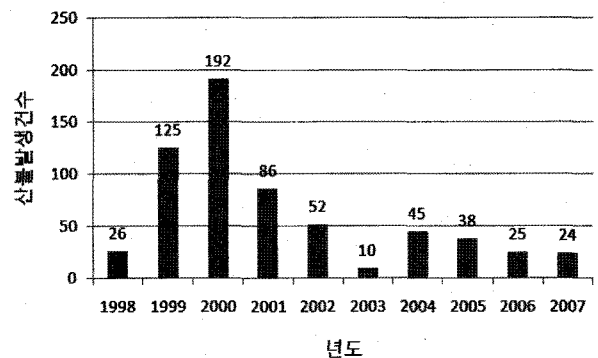


그림 4. 강원지역의 년도별 산불발생건수 추이

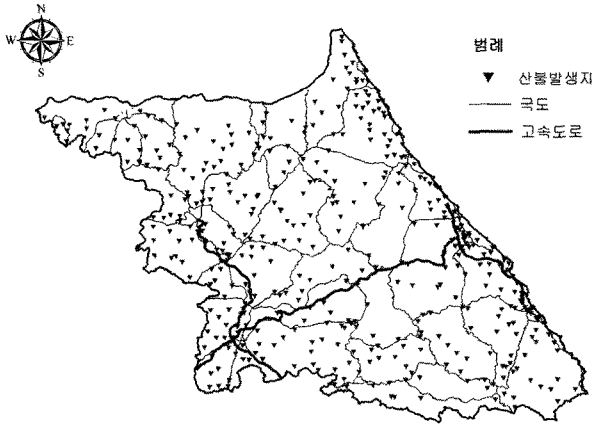


그림 5. 강원도의 산불발생 지역(1998~2007년)

상대적으로 도시나 도로 인근이 시설물 및 재산상의 피해가 많을 수 있음을 나타낸다.

#### 2.4 DATABASE의 구축

수집된 사면재해자료, 강우자료, 그리고 산불발생지역의 자료가 상호연관성을 가질 수 있도록 사면재해위치를 기준으로 산불발생지역의 자료를 선별하여 최종적으로 DATABASE를 구축하였다. 구축된 자료의 총 개수

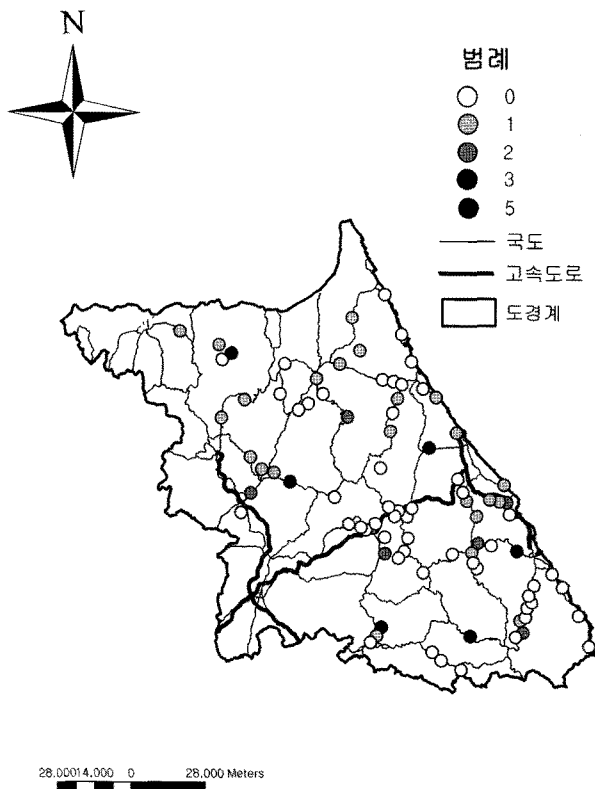


그림 6. DATABASE에 구축된 강원도의 사면재해발생 지역과 산불발생이력

는 108개이며 그림 6에 자료가 구축된 위치를 나타내었다. 사면재해가 발생한 위치에는 산불이 여러 번 발생한 경우도 있었는데 그림 6에는 산불발생횟수를 구분하여 나타내었다. 최종적인 DATABASE에서는 산불미발생 지역에서 사면재해가 발생한 곳은 64개소, 산불발생 지역에서 사면재해가 발생한 곳은 44개소로 나타났다.

### 3. 사면재해 유발 강우 분석

#### 3.1 예·경보를 위한 사면재해 유발 강우량

기존 국내 연구에서는 산사태 발생시각이 아닌 발생 일만을 확인하여 산사태 발생시점 전후를 포함하는 산사태 발생일의 24시간 일강우량 혹은 발생시점 전후를 포함하는 연속강우량을 이용하여 분석을 수행하고 있는데, 산사태 주의보 및 경보발령은 발령 시점 이전의 강우량만이 의미를 가지므로 사면재해를 유발하는 강우기준의 설정을 위해서는 사면재해 발생시각이 명확히 확인된 자료의 확보가 매우 중요하다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서 구축된 자료는 발생 시간이 포함된 자료이므로, 사면재해 발생시각을 기준으로 일 누적강우량은 발생시점 이전의 24시간 강우량으로, 연속강우량은 발생시점 이전의 연속적인 강우량으로 정의하였다.

구축된 강우 자료를 이용하여 산림청의 산사태 주의보·경보기준과 유사하게 사면재해 발생시점의 시간강우량·일누적강우량, 시간강우량·연속강우량으로 나타내어 보았다(그림 7). 그 결과 시간강우량·일누적강우량으로 정리한 경우는 65개소(60.2%), 시간강우량·연속강우량으로 정리한 경우에는 64개소(59.3%)에서 산사태 발생시의 강우량이 표 1의 산림청 산사태 주의보 기준에도 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이는 현재의 산림청 기준으로는 사면재해 발생시점의 정확한 예측이 어려움을 의미한다. 특히 사면재해 발생시의 시간강우량이 산림청의 산사태주의보 기준인 20mm/hr를 미달하는 64개소의 자료 중에서 27개소(42.2%)가 산사태 발생시 시우량이 2mm/hr 미만인 것으로 나타나 상당수의 사면재해가 비가 오지 않는 시점에서 발생하고 있다는 사실을 확인할 수 있다.

동일한 자료에 대하여 가로축을 사면재해가 발생한 시각이전의 최대시간강우량으로 정리하여 일누적강우량과 함께 도시하여 보았다(그림 8). 최대시간강우량으로

바꾼 경우 산림청의 산사태주의보 기준에 미달하는 자료는 앞서 65개소에서 27개소(25%)로 줄어드는 것으로 나타났다. 이러한 사실은 산림청의 산사태주의보 발령 시점과 실제 산사태 발생시각에 사이에 시차가 있다는 것을 의미한다. 즉, 산림청의 산사태주의보는 최대시간강우량을 근거로 주의보 발령을 내게 되는데 실제 사면재해는 시간강우강도가 약해진 시점에서 발생할 수도 있는 것이다. 하지만 여전히 27개소(25%)에 대해서는 산림청의 산사태예보 기준으로 예측이 불가능한 것으로 나타나는데 여러 가지 이유가 있겠지만 현재 자료상으로는 산발발생과 미발생지역을 구분하지 않은데 기인하는 것으로 볼 수 있다. 이에 대한 분석은 3.3절에서 제시하였다.

정확한 사면재해 발생 시각을 근거로 강우자료를 분석한 결과 사면재해는 강우가 거의 없는 시점에 발생하는 경우가 전체 108개소 중 27개소(25%)로 나타났으며 최대시간강우량 발생시간과 사면재해 발생시간이 일치하지 않는 경우가 많았다. 이는 기존의 최대시간강우량으로 결정된 산사태 예보기준으로는 산사태 발생시점을 정확히 예측하기가 매우 어렵다는 것을 의미한다.

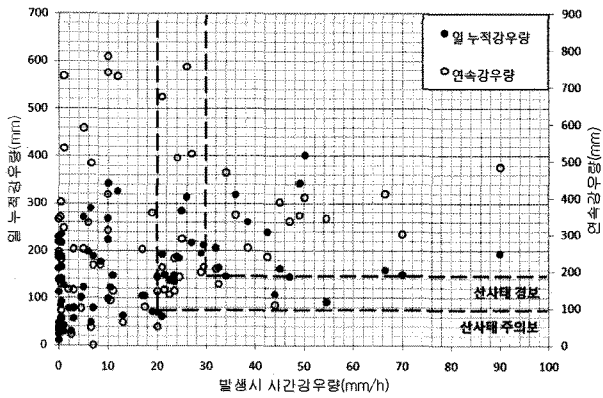


그림 7. 사면재해 발생시 시간강우량-일누적강우량, 연속강우량 관계

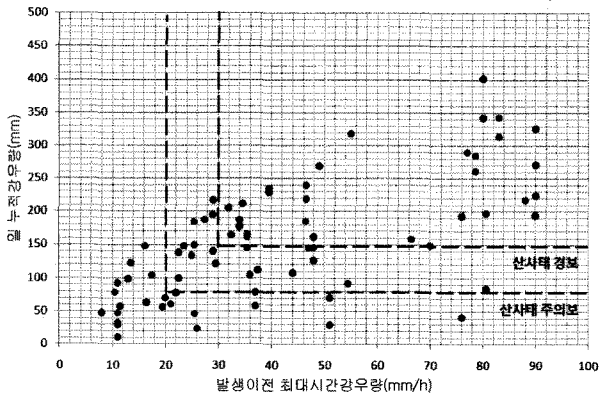
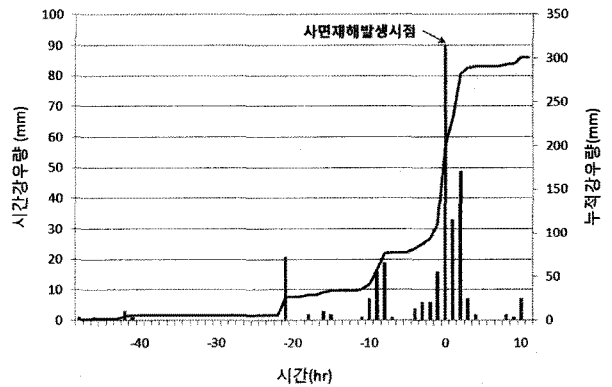


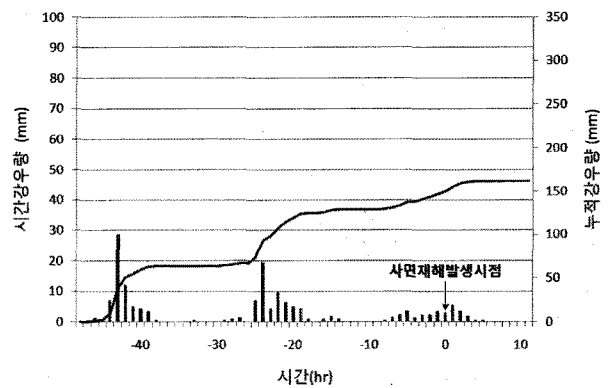
그림 8. 사면재해 발생이전 최대시간강우량-일누적강우량 관계

### 3.2 최대시간강우량과 사면재해 발생시점의 차이

3.1절의 분석결과 산림청의 산사태주의보 발령시점과 사면재해 발생시점간의 시차가 있다는 것을 확인할 수 있었는데, 이러한 차이를 잘 보여줄 수 있는 대표적인 2개의 사면 재해 자료를 시간에 따른 시우량 및 누적강우량으로 정리하여 그림 9에 나타내었다. 그림에서는 사면재해 발생시각을 기준으로 재해발생 전을 (-), 재해 발생 후를 (+)로 표시하였다. 그림 9(a)는 2006년 평창군 진부면 송정리의 경우로서 산사태 경보기준을 초과하는 최대시간강우량이 발생했을 때 사면재해도 발생하였으며 산사태 발생시의 최대시간강우강도가 산사태 발생에 중요한 역할을 하는 것으로 볼 수 있다. 반면 그림 9(b)는 2006년 고성군 죽왕면 가진리의 경우로서 최대시간강우량 기준으로는 산사태주의보 발령 후 43시간이 지나 약 5mm/hr이하의 매우 작은 시간강우량 하에서 산사태가 발생하고 있으며 이는 사면재해 발생 2일 전에 내린 강우, 즉 선행강우가 산사태 발생에 매우 중요한 역할을 했다는 것을 의미한다.



(a) 2006년도 평창군 진부면 송정리의 시간강우량과 재해발생시점



(b) 2006년도 고성군 죽왕면 가진리의 시간강우량과 재해발생시점

그림 9. 사면재해 전·후 대표적인 시간강우량 및 누적강우량 분포양상

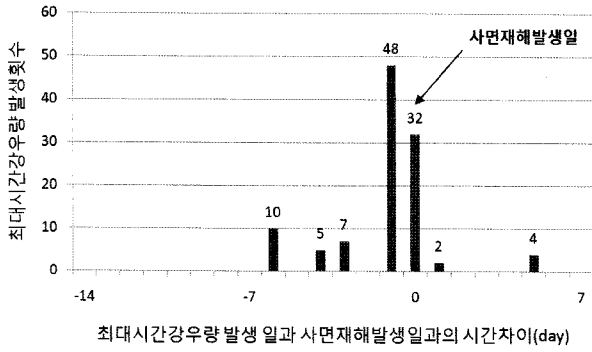


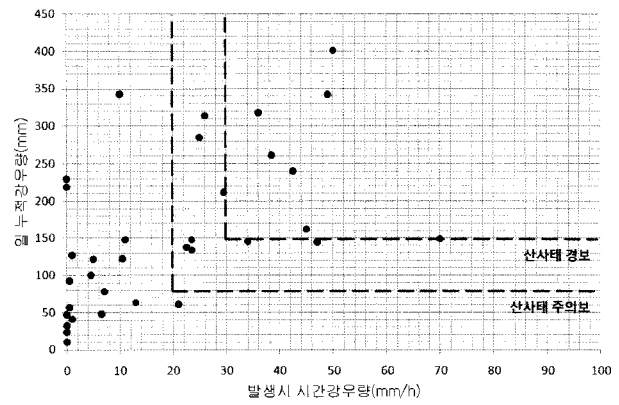
그림 10. 사면재해발생일 기준 최대시간강우량 발생일별 발생횟수

동일한 방법으로 DATABASE로 구축된 108개의 자료에 대하여 사면재해 발생 시점을 전후로 하여 최대시간강우량이 나타난 시점과 산사태 발생시점과의 차이를 분석하여 보았다(그림 10). 최대시간강우량이 발생한 날에 사면재해가 발생한 경우는 32회(29.6%)이고 사면재해 발생이전에 최대시간강우량이 발생한 경우는 70회(64.8%)로 나타난 반면 사면재해발생 이후에 최대시간강우량이 나타난 경우는 6회(5.6%)로 매우 적게 나타났다. 사면재해 발생이전에 최대시간강우량이 발생한 70개 자료 중 24시간 이내에 최대시간강우량이 발생한 경우가 48회(68.6%)로 가장 많았으며 6일전에 최대시간강우량이 나타난 경우가 10회(14.3%)로서 2번째로 빈도가 높다는 것은 특이할 만한 사항이다.

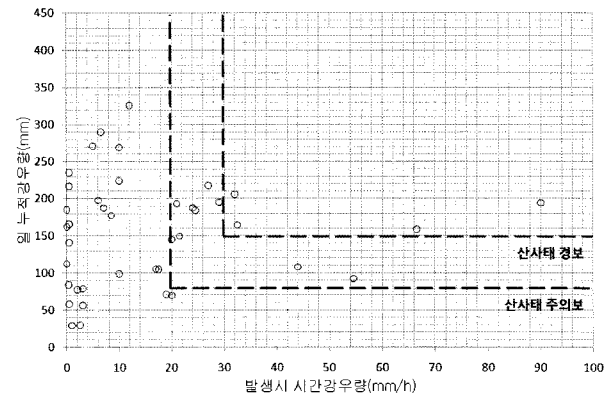
이러한 분석결과로부터 사면재해를 유발하는 강우특성과 관련하여 재해발생일의 강우량(시간강우량, 일누적강우량)도 중요하지만 그 이전에 발생했던 선행강우도 매우 중요한 역할을 한다는 사실을 확인할 수 있다. 이러한 사실은 최대시간강우 기준을 이용하여 발령된 주의보나 경보에 의해 대피하거나 주의태세를 갖추었다가 이후에 큰 비가 그치고 집으로 돌아오거나 주의태세가 해제되었을 때에 사면재해 발생으로 피해가 발생할 가능성이 있음을 의미한다. 따라서 산사태 주의보나 경보기준은 발령시점의 강우특성뿐만 아니라 이후의 강우특성에 따라라도 발령된 주의보나 경보를 해제하지 않고 유지할 필요가 있을 것이다. 산사태 주의보나 경보가 발령되었을 경우 그 지속기간을 결정하는 방법에 대해서는 앞으로 추가적 분석과 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.3 산불발생지역과 미발생 지역의 강우특성 차이

앞서 그림 7과 그림 8에서는 사면재해 발생 시의 강



(a) 산불 발생지



(b) 산불 미 발생지

그림 11. 산불발생여부에 따른 사면재해 유발 시간강우량-일누적강우량 관계

우량이 산림청 산사태주의보 기준에도 미치지 못할 정도로 작은 경우가 많았는데, 이와 같이 낮은 강우강도에서 사면재해가 발생하는 주요 원인 중 하나는 산불발생으로 인한 것이다. 실제로 산불지역의 경우 산불미발생지역에 비해 유출과 토양침식량이 각각 2배, 25배 증가한 실험사례가 있으며(Johansen, 2001), 산불발생지역의 경우 시간 경과에 따라 토양침식량이 줄긴 하지만 미발생지역에 비해 산불발생당해년도는 토양침식량이 약 11.2배에 달하며 10년이 경과한 후에도 약 1.3배가 높은 연구결과(마호섭과 정원옥, 2008)가 있다. 본 연구대상 지역에 포함되는 강릉시 사천지역 역시 2000년 대규모 산불 발생 후 2002년 발생한 태풍 루사로 인하여 산불 미발생 지역에 비해 11.3배나 많은 면적에서 산사태가 발생한 사례(신승숙 등, 2008)가 있음을 볼 때 산불발생 지역은 미발생지역보다 강우에 의한 사면재해에 취약하다는 것을 알 수 있다.

이 연구에서는 수집된 사면재해 자료와 강우자료를 산불발생지역과 산불미발생지역으로 나누어 사면재해 유발강우특성을 분석하여 보았다. 총 108개 자료 중 산

불이력이 있는 지역은 44개, 산불이력이 없는 지역은 64개로 나타났으며, 각각의 자료를 사면재해 발생 시점에서의 시간강우량 일강우량으로 나타내었다(그림 11). 산불발생지역 중 사면재해 발생시점의 시간강우량이 산사태주의보 기준에 미치지 못한 것으로 나타난 지역은 22개소(50%)였으며, 산불미발생지역 중 사면재해 발생시점의 시간강우량이 산사태주의보 기준에 미치지 못하는 지역은 40개소(62.5%)로 나타나, 산불발생지역이 조금 더 취약한 것으로 볼 수 있지만 산불발생 여부와 상관없이 사면재해 발생시점의 시간강우량이 산사태주의보 이하로 나타난 경우가 많은 것으로 나타났다.

동일한 자료를 산사태 발생이전의 최대시간강우량에 대하여 산불발생지와 산불미발생지로 구분하여 그림 12에 도시하였다. 그 결과 산불발생이력이 있는 지역은 15개소(34.1%)가 산사태주의보 기준에도 미치지 못하는 것으로 나타났으며, 산불발생이력이 없는 지역은 11개소(17.2%)가 산사태주의보 기준 이하로 나타났다. 따라서 산불발생이력이 있는 지역에서 더 적은 선행강우

에서 산사태가 발생하고 있으며 이로 인하여 산불발생지역이 산불미발생 지역보다 산사태 발생을 예보하지 못하는 경우가 약 2배나 더 많은 것으로 나타났다. 또한 산사태주의보 기준 이하에서 발생한 재해만으로 한정해서 살펴보면 산불이력이 있는 지역에서는 발생이전 최대시간강우량이 12mm 이하로 산사태주의보에도 훨씬 미치지 못하는 낮은 강우에서도 15개 자료 중 8개소(53%)에서 급경사지 재해가 발생한 반면, 산불이력이 없는 지역에서 발생이전 최대시간강우량이 12mm이하인 경우는 1개소로 대부분의 경우 산사태주의보 기준에 근접한 강우에서 급경사지 재해가 발생하였다.

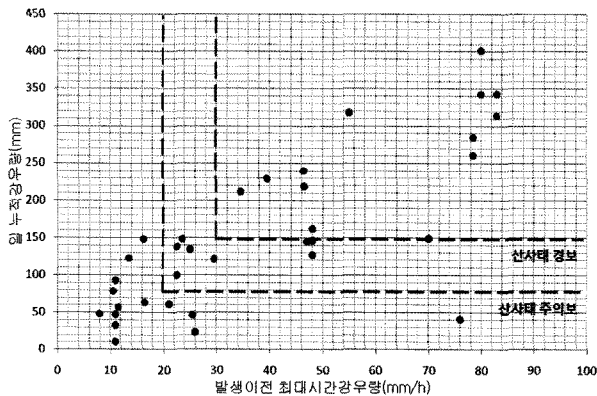
이러한 분석결과로부터 산불발생지역에서는 산불미발생지역에 비하여 더 작은 강우에서도 사면재해가 발생할 수 있으며 산불발생여부가 산사태 발생에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 산불지역에 대해서는 사면재해에 대한 차별적 연구가 필요하다는 결론을 얻을 수 있다. 또한 산불발생이력이 있는 지역에 대해서는 산불발생이력이 없는 지역과 비교하여 향후 독립적인 예보기준 확립이 필요할 것으로 판단된다.

### 3.4 사면재해 유발강우의 재현 주기

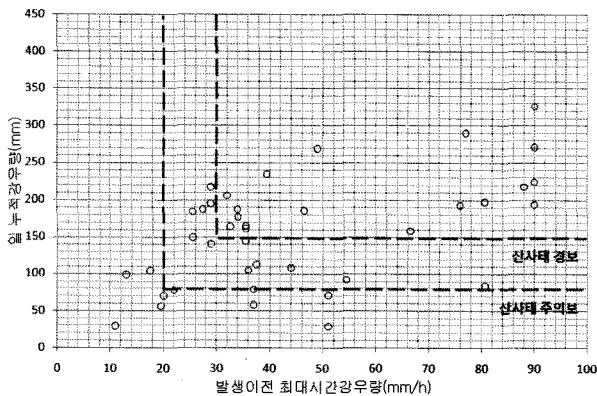
사면재해를 유발하는 강우에 대한 일부 연구사례가 있지만 지역별 강우재현주기와 함께 분석한 사례는 일부(김경석, 2008)를 제외하고 찾아보기 어렵다. 사면재해를 유발하는 강우특성을 지역별로 강우강도-지속시간-재현주기 형태로 분석하면 지역별 강우특성에 따른 재해민감도를 확인할 수 있고 산사태나 토석류와 같은 사면재해 대책 구조물 등을 설계할 때에도 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

이 연구에서는 DATABASE에 구축된 강우를 이용하여 도시한 강우강도-지속시간 곡선을 건설교통부(1999)에서 제시한 국내 주요 지점별 강우강도-지속시간-재현주기곡선(Intensity-Duration-Frequency Curve, IDF곡선)과 함께 나타냄으로서 사면재해를 유발한 강우의 재현주기를 간접적으로 추정하고자 하였다. 실측강우로부터 강우강도-지속시간 곡선을 구하는 방법은 그림 13과 같이 연속되는 강우에 대하여 일정지속시간( $dT$ )의 강우량( $R$ )을 지속시간으로 나눈 시간강우량의 최대값( $I$ , mm/hr)과 그 때의 지속시간관계를 도시함으로써 구할 수 있다.

건설교통부(1999)에서는 강원도의 9개 지역(강릉, 속



(a) 산불 발생지



(b) 산불 미 발생지

그림 12. 산불발생여부에 따른 사면재해유발 최대시간강우량 - 일 누적강우량 관계



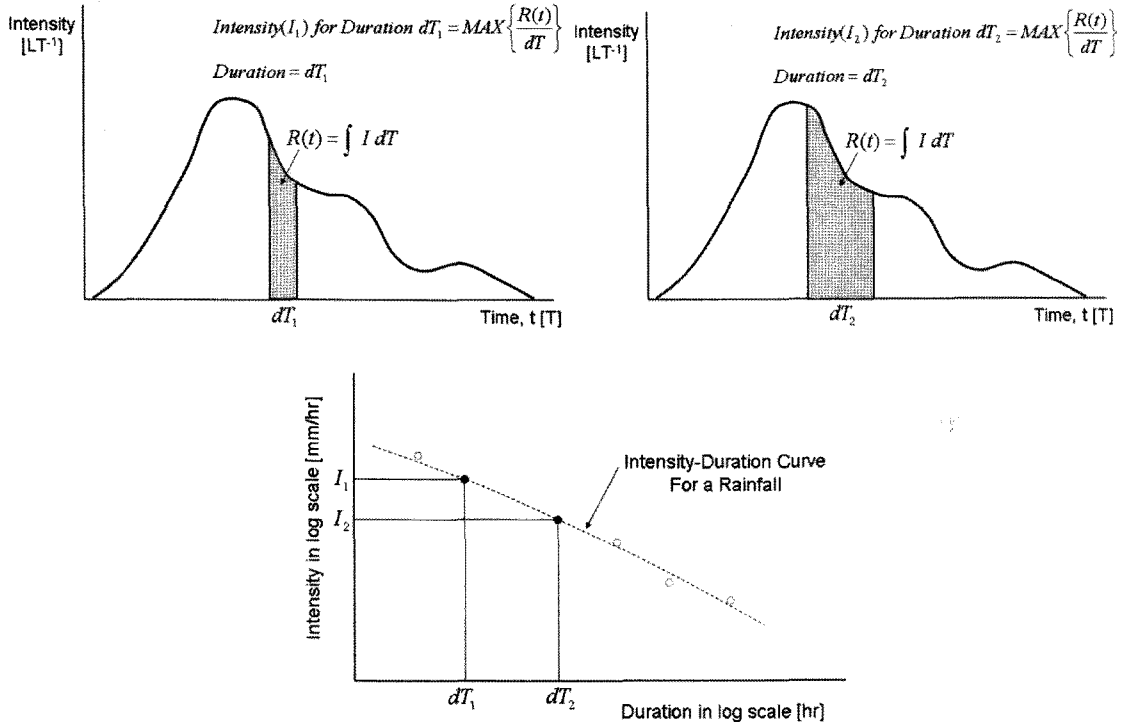
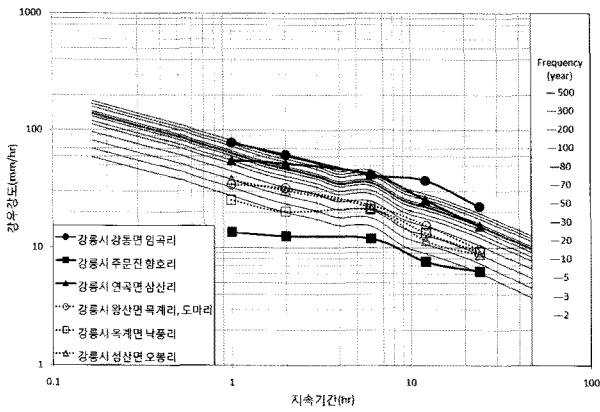
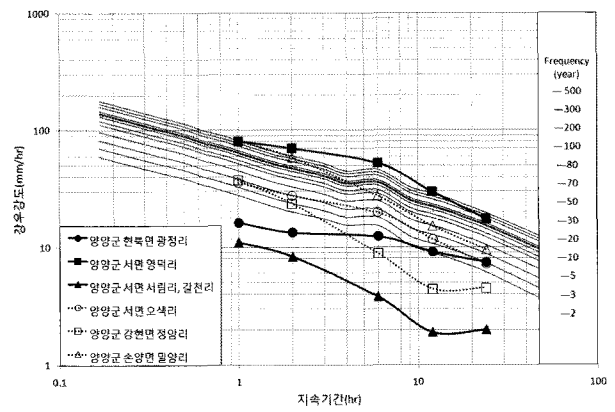


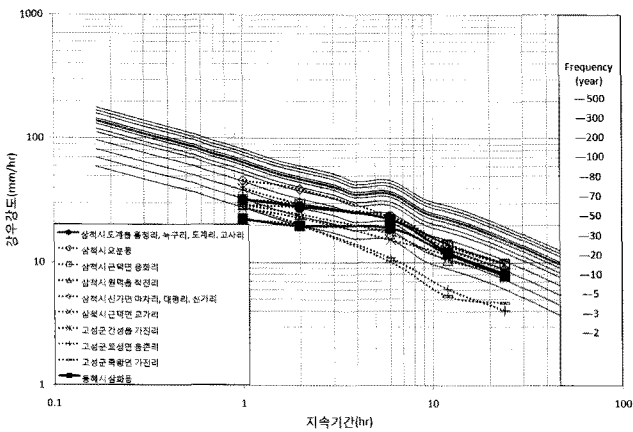
그림 13. 실측강우에서 지속시간별 강우강도를 산정하는 방법(김경석, 2008)



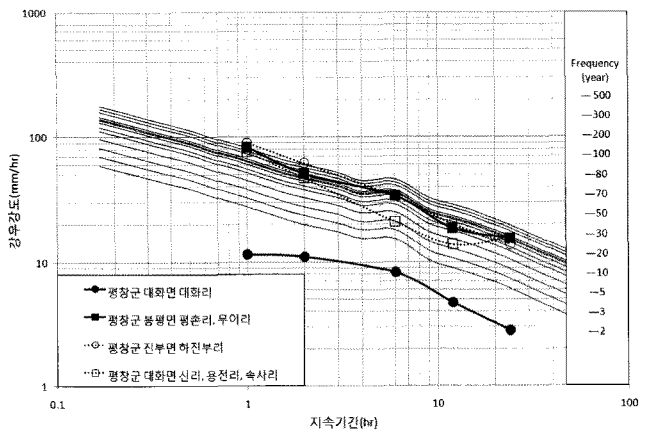
(a) 강릉지역



(b) 양양지역

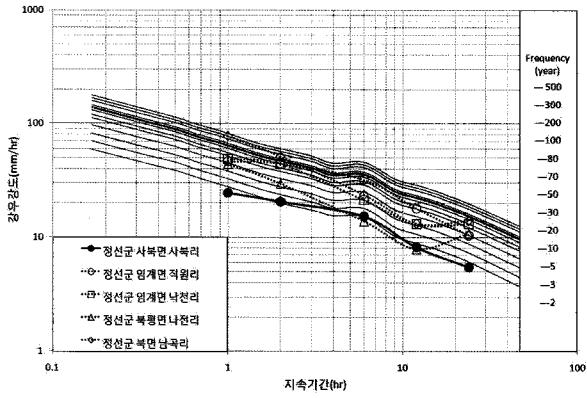


(c) 삼척, 고성, 동해지역

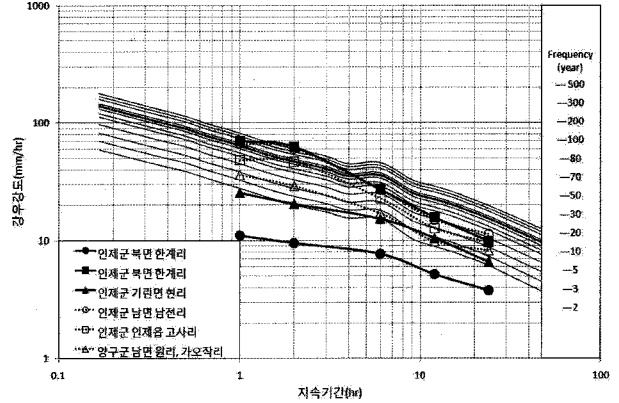


(d) 평창지역

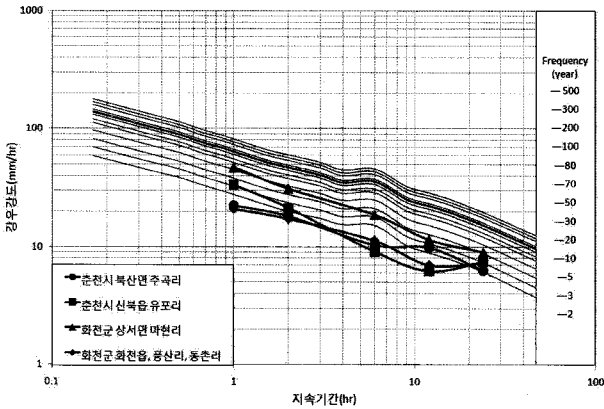
그림 14. 지역별 산발발생 여부에 따른 사면재해 유발 강우의 재현기간 비교 (계속)



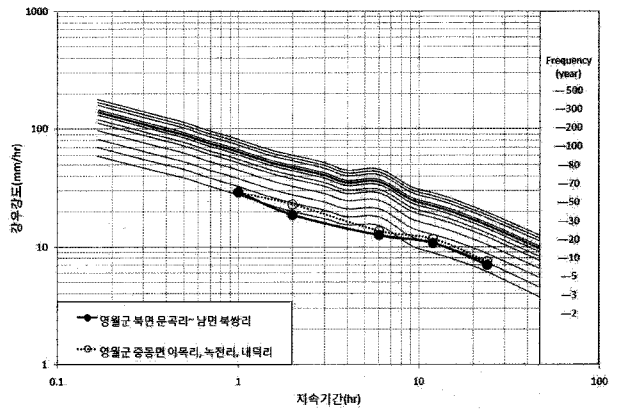
(e) 정선지역



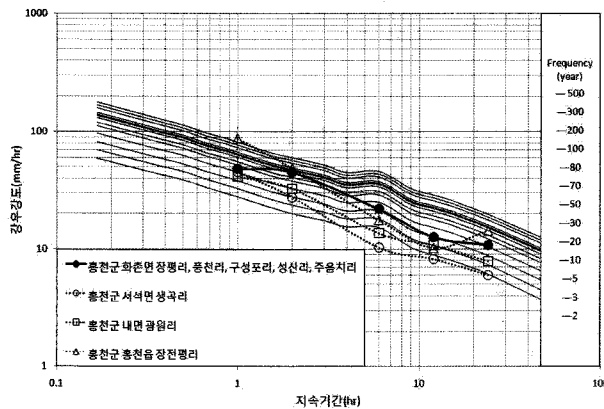
(f) 인제, 양구지역



(g) 춘천, 화천지역



(h) 영월지역



(i) 홍천지역

그림 14. 지역별 산불발생 여부에 따른 사면재해 유발 강우의 재현기간 비교

초, 철원, 대관령, 춘천, 원주, 인제, 홍천, 태백)에 대하여 강우강도-지속시간-재현주기곡선(IDF곡선)을 제시하고 있는데 이 연구에서는 DATABASE의 수집된 자료 각각에 대하여 가장 가까운 지역의 IDF곡선과 비교하는 것으로 하였다(그림 14).

그림 14에서 산불발생이력이 있는 지역은 실선으로 나타내고, 산불발생이력이 없는 지역은 점선으로 도시하였다. 발생지 간의 거리가 가까워 실제 다수의 사면재

해가 발생하였지만 동일한 자동기상관측소(AWS)의 자료를 사용하는 경우가 있기 때문에 전체 108개의 재해 자료는 산불발생 이력이 있는 경우에 대하여 총 20개, 산불발생 이력이 없는 경우에 대하여 총 27개의 IDF 곡선으로 정리되었다.

산불발생이력이 있는 지역의 경우 재현빈도 50년 이상의 강우에서 사면재해가 발생한 지역이 5개(25.0%)였고, 2년에서 50년 정도의 재현빈도에서는 6개(30.0%),

재현빈도 2년 이하의 낮은 강우강도에서는 9개(45.0%) 지역에서 사면재해가 발생하는 것으로 나타났다. 산불 발생이력이 없는 경우에는 사면재해를 유발한 강우강도가 재현빈도 50년 이상에서 6개(22.2%), 2년에서 50년 정도의 재현빈도에서 17개(63.0%), 2년이하의 재현빈도에서 4개(14.8%)로 나타났다.

평균적으로 산불발생지역이 미발생지역에 비하여 더 낮은 강우재현기간에서 사면재해가 발생하고 있다는 사실을 확인할 수 있으며, 특히 산불발생지역은 재현빈도 2년 이하의 강우강도에서도 많은 사면재해가 발생(9건, 45%)하고 있다는 것은 주목할 만한 사실이다. 산불미발생지역의 경우에는 대부분 강우재현빈도 2년에서 50년의 강우에서 주로 재해가 발생하고 있지만 일부지역(양양, 고성, 영월)에서는 2년 이하의 강우재현빈도에서도 사면재해가 발생하기도 하였다.

이러한 분석결과로부터 산불발생지역은 낮은 재현주기를 갖는 강우에서도 사면재해가 발생할 수 있다는 것을 확인할 수 있으며, 사면재해 예방을 위한 대책구조물 등의 설계에서는 낮은 강우재현빈도에서도 사면재해로 인한 피해가 발생할 수 있음을 고려해야 할 것이다. 또한, 현재는 산불미발생 지역이라고 할지라도 추후 산불 발생시에는 2년 이하의 강우재현빈도에서도 사면재해로 인한 피해가능성이 있으므로 강우가 발생하기 전에 예방적인 차원에서 대책구조물을 적용하는 것도 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 강원도 지역의 사면재해를 유발하는 강우의 특성 분석을 위해 사면재해자료, 강우자료, 산불 발생자료를 수집하여 DATABASE를 구축하였다. 구축된 자료를 사면재해 예·경보를 위한 유발 강우특성, 재해발생과 선행강우의 관계, 산불발생지역과 미발생지역에 대한 재해유발 특성, 배수시설 및 대책구조물의 설계에 사용하는 강우의 재현주기 등의 관점에서 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 발생 시각을 근거로 강우자료를 분석한 결과, 사면재해는 강우가 거의 없는 시점에 발생하는 경우가 많았으며 산사태 예보기준이 되는 최대시간강우량 발생시간과 실제 사면재해 발생시간이 일치하지 않는 경우가 많아, 기존의 산사태 예보기준으로는 산

사태 발생시점을 정확히 예측하기가 매우 어렵다는 것을 확인할 수 있었다.

- (2) 사면재해 발생시점과 최대시간강우량 발생시점을 비교·분석한 결과, 사면재해 발생이전에 최대시간강우량이 나타난 경우가 64.8%로 가장 많았으며, 사면재해 발생당일에 최대시간강우량이 나타난 경우가 29.6%, 사면재해 발생 이후 최대시간강우량이 나타난 경우가 5.6%로 나타나, 사면재해를 유발하는 강우는 재해발생일의 강우도 중요하지만 그 이전에 발생했던 선행강우가 더욱 중요한 역할을 하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 산사태 주의보나 경보를 발령한 후에도 이후의 강우특성에 따라서 발령된 주의보나 경보를 해제하지 않고 상당시간 유지할 필요가 있는 것으로 판단된다.
- (3) 산불발생지역에서는 산불미발생지역에 비하여 더 작은 강우에서도 사면재해가 발생하고 있으며, 이로 인하여 산사태 발생을 예보하지 못하는 경우가 산불미발생지역에 비하여 2배나 높은 것으로 나타났다. 따라서, 산불발생지역에 대해서는 사면재해에 대한 차별적 연구가 필요하며, 산불발생이력이 없는 지역과 비교하여 향후 독립적인 예보기준도 마련할 필요가 있을 것으로 판단된다.
- (4) 사면재해를 유발하는 강우의 지역별 재현주기 분석을 실시한 결과, 산불발생지역은 강우재현빈도 2년 이하에서 대부분(45.0%)의 재해가 발생하고 있으며, 산불미발생지역에서는 강우재현빈도 2년에서 50년 사이에 대부분(63.0%)의 재해가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 산불발생지역은 낮은 재현주기를 갖는 강우에서도 사면재해가 발생할 수 있으므로 사면재해 예방을 위한 대책구조물 등의 설계에서도 이를 고려해야 할 것이다. 또한, 현재는 산불미발생 지역이라고 할지라도 추후 산불 발생시에는 2년 이하의 강우재현빈도에서도 사면재해로 인한 피해가능성이 있으므로 강우가 발생하기 전에 예방적인 차원에서 대책구조물을 적용하는 것도 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원('08지역기술혁신 B01-01)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부 (1999), *수자원 관리기법 개발연구조사 제1권* : 한국 확률강우량도 작성.
2. 국립방재연구소 (2002), *사면붕괴의 유형별 원인과 저감대책연구*.
3. 김경석 (2008), “토석류 발생 지형과 유발 강우 특성 분석”, *대한토목학회논문집*, 제28권 제5C호, pp.263-271.
4. 마호섭, 정원옥 (2008), “산불 피해지 토양침식량의 장기적인 변화에 관한 연구”, *한국임학회지*, Vol.97, No.4, pp.363-367.
5. 박덕근 (2001), “연약지반의 침하와 지반동역학적 특성파악:호우 및 산불로 인한 사면붕괴 조사와 지반 내진대책을 중심으로”, *방재환경* 제3권 제4호, pp.97-107.
6. 신승숙, 박상덕, 조재웅, 이규송 (2008), “양양 산불지역 지표유출 및 토양침식에 대한 식생회복의 영향”, *대한토목학회논문집*, 제28권, 4B호, pp.393-403.
7. 최경 (1989), “산사태 예지방법과 예방대책”, *임업연구원 연구정보*, No.27, pp.1-3.
8. 한국지질자원연구원 (2003), *자연재해방재기술개발사업 - 2차 산림피해 방지기술개발*.
9. 홍원표, 김상규, 김마리아, 김윤원, 한정근 (1990), “강우로 기인되는 우리나라 사면 활동의 예측”, *대한토질공학회지*, 제6권, 제2호, pp.55-63.
10. Caine, N. (1980), “The rainfall intensity: Duration control of shallow landslides and debris flow”, *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, Vol.62, pp.23-27.
11. Crosta, G. B. and Frattini, P. (2000), “Rainfall threshold for triggering soil slips and debris flow”, *Mediterranean Storms: Proceedings of the EGS 2nd Plinius Conference*, Siena, Italy, pp.463-487.
12. Johansen, M, P., Hakonson, T.E., and Breshears, D.D. (2001), “Post-fire runoff and erosion from rainfall simulation: contrasting forests with shrublands and grasslands”. *Hydrological Processes*, Vol.15, pp.2953-2965.
13. Wilson, R. C. and Wiczeoreak, G. F. (1995) “Rainfall threshold for the initiation of debris flow at La Honda”, California, *Environmental and Engineering Geoscience*, Vol.1, No.1, pp.11-27.

(접수일자 2010. 5. 25. 심사완료일 2010. 10. 14)