강원지역 사면재해 위험성 분석을 위한 강우기준 설정 연구

Establishment of Landslide Rainfall Threshold for Risk Assessment in Gangwon Area

오정림* · 박혁진**

Oh, Jeongrim · Park, Hyuck Jin

Abstract

Most of the slope failures and debris flows occur due to seasonal rain and typhoon in Korea. Rainfall is very important factors induced by the landslides. To study the establishment of landslide rainfall thresholds, the data of rainfall and landslides are investigated and analyzed. Landslide rainfall thresholds on landslide assessment are based on an empirical approach. It assumes that an area which experienced landslides with specific rainfall characteristics will experience similar landslides when similar rainfalls occur. If rainfall characteristics in a specific area can be observed in real time, it is possible to occur the landslide. The analyses focused on 50 historical landslide events and rainfall data. These data are analyzed to know the relationship the rainfall intensity-duration and landslides. The landslide rainfall thresholds using historical data are very effective method to predict the burst time of landslides.

Key words : Landslide, Rainfall threshold, Rainfall intensity-duration, Slope stability, Landslide history data.

요 지

우리나라 대부분의 산사태와 토석류 등은 여름철 장미기간과 태풍이 내습할 때 발생한다. 강우는 이와 같은 사면재해를 유발하는 가장 큰 인자 중 하나이다. 본 연구에서는 사면재해에 대한 사전 대응을 유도하기 위해 강우데이터를 활용하여 위험성을 평가하고자 한다. 이를 위해 강원지역에 대한 과거 산사태 이력자료와 강우데이터를 추적하였다. 과거 산사태가 발생했을 때의 강우자료를 분석하여 경험적인 방법에 의해 강원지역의 사면재해 발생 강우기준을 설정한다. 경험적 방법에 의해 설정된 강우기준은 우기철 강우발생 시 위험성을 판단할 수 있는 기준으로 활용되며, 본 연구에서는 강우강도-강우지속시간을 활용하여 강우기준을 설정하였다. 본 연구를 위해서 강원 지역의 약 50여개의 사면재해 이력자료를 활용하였다. 검증데이터를 활용하여 검증을 실시한 결과 실제 산사태가 발생하기 전 사면재해에 대한 위험성을 인지하였으며, 과거 이력자료를 활용한 강우기준의 경우 사면재해 발생 시간을 예측하는데 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 산사태, 강우기준, 강우강도-강우지속시간, 사면안정성, 산사태 이력

1. 서 론

우리나라는 산업화, 도시화로 인한 절개지 증가와 하천과 산지에 근접한 주거형태로 사면붕괴에 대한 위험성은 날로 증가하고 있다. 특히 농어촌지역은 대부분 사면의 직하부에 가옥이 형성되어 있으며, 고령층의 거주비율이 높아 사면붕괴에 취약한 경향이 높게 존재한다(국립방재연구소, 2009). 국내에서 발생하는 사면붕괴에 대한 연구를 살펴보면 붕괴 길이는 20~30 m, 폭 5~10, 깊이 1.5 m 내외 그리고 발생면적이 2,000 이하로 소규모의 붕괴가 많이 발생하는 것으로 보고되고 있다(국립방재연구소, 2007).

우리나라의 사면 붕괴로 인한 손실은 경제적 발전과 더불어

어 불안정한 비탈면의 개발로 점점 더 증가되고 있다. 2000년~2009년에 발생한 산사태 인명피해는 총 191명으로 연평균 약 19.1명이 산사태로 사망한 것으로 나타났다. 1998년에는 8월 발생한 집중호우 등으로 전국적으로 111명이 산사태로 사망하는 등 대규모 인명피해가 발생하였으며, 특히 강원지역에서는 2002년 태풍 ‘루사(Rusa)’ 등으로 인해 79명이 사망하였다. 강원지역은 지리적 특성과 태풍의 이동경로 등의 영향으로 사면붕괴가 발생할 가능성이 높게 존재한다.

사면의 파괴는 지질, 지형, 수리, 토양 이용 등과 관련된 다양한 인자들의 영향으로 사면의 균형이 파괴되어 중력방향으로 움직임이 발생하는 것을 말한다. 사면의 파괴는 “지구 표면의 직접적이고 지각 가능한 변화 과정으로 중력적인

*교신저자. 정희원. 국립재난안전연구원(Tel: +82-2-2078-7831, Fax: +82-2-2078-7839, E-mail: jeongrim@korea.kr)

Corresponding Author: Member, Researcher, National Disaster Management Institute

**세종대학교 공간정보공학과 교수

Professor, Department of Geoinformation Engineering, Sejong University

Table 1. Rainfall thresholds for landslide prediction

Proposer	Classification	Landslide watch	Landslide warning
Hong, W. P. et al.	small landslide		max. intensity > 10mm & 2day cumulative rainfall>40mm
Hong, W. P. et al.	midium landslide		max. intensity > 15mm & 2day cumulative rainfall>80mm
Hong, W. P. et al.	large landslide		max. intensity > 35mm & 2day cumulative rainfall>140mm
Korea forest service	continuous rainfall	100~200mm	200mm <
	intensity	20~30mm	30mm <
	1 day cumulative rainfall	80~150mm	150mm <

움직임의 형태이다”라고 Thornbury(1954)는 정의하였다. Thornbury는 토사 및 암반사면의 움직임은 활동면에서 전단 파괴의 결과로 이루어진다고 기술하였다.

사면붕괴 및 강우와 관련한 연구는 홍콩에서 Lumb(1975)에 의한 누적강우량과의 관계, Brand(1984, 1985)에 의해 강우강도와와의 관계를 이용하는 등의 노력이 진행되어 왔다.

강우가 사면에 미치는 영향에 대한 연구는 사면의 안정성 확보 및 산사태 예방을 위해 많은 학자들에 의해 다각적인 방법으로 접근되어 왔다(Asch et al., 1999; Borga et al., 2002; Finlay et al., 1997; Lin and Jeng, 2000). 깊은 파괴(Deep seated landslide)의 경우 지하수위(Ground water table) 상승이나 침윤선의 확장으로 이루어진 주수위(Perched water table) 증가로 암반이나 토사의 경계부에 영향을 끼쳐 사면의 안정성을 저해한다. 반면 얇은 파괴(shallow landslide)는 강우발생시 토사 침식이나 지표유출의 영향과 단기적인 간극수압(transient pore pressure)의 변화에 지배받는다(Hengxing et al., 2003; Terlien, 1996). Sanderson et al. (1996)은 기상 인자(Rainfall, Air-temperature, wind-speed and air-humidity)와 토석류, 낙석, 암석사태 등에 대한 상관관계 연구를 수행하였으며, 초기 안정화된 사면에서 기상학적 인자의 영향에 대한 연구를 수행하였다. Jakob and Weatherly (2003)와 Chleborad(2003)에 의하면 누적강우량 또는 강우강도가 매우 클 때 산사태 발생초기 단계에서 토층의 함수비가 증가함으로 위험성이 커지며 1주에서 4주 사이의 강우자료 분석의 필요성을 언급하였다.

국내에서도 산사태를 유발하는 강우기준에 대한 연구는 과거에 일부 수행되었다. 최경(1989)은 연속강우량과 강우강도 개념을 이용하여 산사태를 유발하는 강우기준을 제시하였으며, 연속강우기준으로 200 mm이상, 최대시간강우량이 30 mm 이상이 되면 산사태 발생 위험이 있다고 보고하였다. 홍원표 외(1990)는 1977~1987년 사이의 주요 산사태와 강우자료 분석을 통해 일강우량, 강우강도와 산사태 발생과 연관성에 관한 연구를 수행하였으며 강우특성에 따른 산사태 발생규모에 관한 연구를 수행하였다.

김경석(2008)은 고속도로 피해를 유발한 48개소의 토석류 유발 강우를 활용하여 토석류를 유발 시킬 수 있는 지형과 강우특성을 분석하였다. 토석류는 집중호우 발생 시 약 29~55°의 지형경사를 갖는 자연사면에서 주로 발생하며 토석

류 유발강우의 경우 재현빈도 2년~5년의 강우에도 붕괴가 발생할 가능성이 존재할 수 있다고 분석하였다. 윤찬영 외(2010)는 강원지역 약 108개의 데이터베이스를 기반으로 산사태를 유발할 수 있는 강우조건에 대해 분석을 실시하였다. 강원지역 산불 발생지역과 미발생지역의 강우특성 차이를 분석하고 건설교통부 재현주기별 확률강우량과 비교하여, 산불 발생지역은 미발생지역에 비해 더 낮은 강우재현기간에 사면 재해가 발생한다는 것을 확인하였다.

산림청에서도 산사태를 유발할 수 있는 강우데이터를 강우강도, 일강우량, 누적강우량으로 정의하여 산사태 주의보와 경보 발령을 위해 활용하고 있다. 홍원표(1990)의 산사태 발생 기준과 산림청의 산사태 발생기준은 Table 1에 나타내었다.

따라서 본 논문에서는 강원지역에서 발생한 사면붕괴이력 자료를 활용하여 분석을 수행하였으며, 강우자료는 산사태 발생 지점 주변의 기상청 강우관측소(AWS; Automatic weather system)의 데이터를 활용하였다. 강원 지역에서 발생한 사면 재해이력의 경우 국립방재연구원(현 국립재난안전연구원)에서 현장조사로 축적한 자료로 강원권의 모든 붕괴현황을 포함하지는 않는다. 그러나 본 연구에서는 활용한 현장조사 자료는 주로 인명피해가 발생하였거나 인가주변에 피해를 유발한 강우자료로 직접 현장조사를 통해 축적되었으므로 발생시간에 대한 비교적 정확한 데이터 구축이 가능하였다. 본 연구에서는 과거 발생한 유발강우를 중심으로 사면재해 발생에 대한 강우기준을 설정하고 검증데이터를 적용하여 강우기준의 효용성을 분석하였다.

2. 사면붕괴 현황 및 특성 분석

우리나라의 급경사지 재해는 주로 태풍내습 시 또는 장마기간의 집중호우 기간에 발생한다. 2012년 산림청에서 발표한 우리나라 산림비율은 약 63.7%로 과거에 비해 산림면적이 조금 줄어들긴 하였지만 여전히 산지가 많아 급경사지 재해의 위험성을 지니고 있다. 과거에 비해 줄어든 산림비율은 역으로 생각하면 도시화나 도로 건설 등으로 사면을 절개하고 변형시켰을 가능성이 크다는 것을 내포한다. 이는 도심지 사면재해의 위험성이 커질 수 있다는 가능성을 내포하며 향후 체계적인 관리·감독 및 정기적인 위험성 분석이 필요하다는 것을 의미한다(국립방재연구원, 2012).

산사태 발생 강우기준 설정을 위해서는 과거 많은 재해이력데이터가 축적되어야 한다. 강원 지역의 사면붕괴 건수는 1999년~2012년 동안 약 238건이다(Fig. 1).

강원지역의 재해이력 건수는 국립방재연구원에서 조사한 자료를 바탕으로 강원지역에서 발생한 모든 사면붕괴건수와 동일하지 않다. 강원 지역은 큰 산맥을 중심으로 산악지역이 발달한 지역이며, 태풍의 진로 등 지역적/지형적 조건이 복합적으로 작용하여 피해가 많이 발생하고 있다.

강원지역의 지질은 규장질화강암과 편마암이 가장 넓게 분포하고 있으며 동남부권에는 석회암의 분포면적이 컸다. Fig. 2의 지질도는 한국지질자원연구원에서 배포한 지질도를 기반으로 재정립한 것이다(국립방재연구원, 2010). 재해발생은 석

Fig. 1. Sites of landslides in Gangwon

Fig. 2. Engineering geological map

회암 지대가 많이 발달한 지역과 인제, 평창 지역과 강릉지역에 집중되어 발생되었다.

강원권 재해발생지역의 토심은 주로 얇은 지역에서 많이 발생하였으며, 이는 강원지역의 경우 산악지역이 잘 발달되어 급경사지로 이루어진 사면에서 붕괴가 많이 발생한 것을 의미한다.

3. 사면재해 강우데이터 분석

사면재해에 대한 강우기준 설정을 위해서는 과거 사면재해가 발생한 시점과 재해발생 당시 현장의 강우특성을 반영할 수 있는 신뢰성 높은 강우자료가 구축되어야 한다. 본 연구에서 활용한 강우자료는 Fig. 3과 같이 티센폴리곤(Thiessen polygon)을 활용하여 기상청의 자동강우관측소의 영향범위를 설정하여 영향범위 내에 발생한 재해이력에 대한 대표강우를 정의하였다. 신뢰성 높은 강우기준 설정을 위해서는 사면붕괴 발생지점별 측정 강우자료가 가장 효율적이지만 과거 재해이력에 대한 강우자료를 역추적하여 분석을 실시하는 한계로 인해 기상청의 강우데이터를 활용하였다.

3.1 사면재해 유발강우 정의

강우가 시작되고 산사태가 발생할 때까지의 강우형태는 Fig. 5와 같다. 본 연구에서는 선행강우를 포함하여 14일 정도의 강우기간을 설정하여 산사태가 발생했을 당시의 짧은 발생기간을 유효강우 영역(기간)으로 보았다. Fig. 4에서 나타난 붉은 색 영역은 산사태가 발생한 기간에 내린 강우(Series of rainfall)를 나타내며, 강우가 시작하여 산사태가 발생된 후 강우가 끝날 때 까지의 연속강우영역을 나타낸다. 유효강우(Effective rainfall) 영역은 강우가 시작하여 산사태

Fig. 3. Setting on effective range of AWS

Fig. 4. Concept of a series of rain and the antecedent rain

Fig. 5. Definition of series of rain

가 발생한 시점까지의 강우를 나타내며 실제 이 기간에 산사태가 가장 빈번하게 발생한다. Fig. 4에 대한 세부적인 강우 정의는 다음과 같다.

- 선행강우량(Antecedent rainfall) : 유효강우시작 전 발생한 강우량
- 유효강우량(Effective rainfall) : 선행강우 이후 산사태가 발생한 강우사상 중 산사태 발생까지의 단기강우량
- 유효누적강우량(Effective cumulative rainfall) : 유효강우 영역의 누적강우량
- 총 누적강우량(Total cumulative rainfall): 선행강우량과 유효강우량을 합한 강우량
- 유효시간(Effective time) : 유효강우량이 발생하는 시간

3.2 사면재해 예측 강우기준

국내에서도 과거 산사태 강우기준에 대한 연구는 일부 수행되어왔지만 산사태 발생시점을 중심으로 해석을 수행하기보다 산사태 발생일의 누적강우량과 최대강우강도를 활용하여 분석을 수행하였다. 산림청에서는 Table 1에서와 같이 산사태에 대한 주의보를 강우강도 20~30 mm/hr, 일강우량 80~150 mm, 누적강우 100~200 mm의 기준으로, 산사태 경보를 강우강도 30 mm/hr이상, 일강우량 150 mm이상, 누적강우량 200 mm이상의 기준을 적용하여 활용하고 있다.

실제 사면재해가 발생한 시점을 살펴보면, 최대강우강도가 발생했을 경우 파괴가 발생하기도 하지만, 최대강우 발생 후 강우가 소강상태일 때에도 붕괴가 발생한다. 따라서 산림청의 강우기준은 Table 2와 같이 전체 누적강우(Total

Table 2. Comparison cases of existing standards

Total cumulative rainfall	Max. intensity in rainfall series
	Intensity when landslide occurrence
	Max. intensity in rainfall series
Effective cumulative rainfall	Intensity when landslide occurrence

cumulative rainfall)와 유효시간내의 유효누적강우(Effective cumulative rainfall)를 기준으로, 전체 강우발생 기간 중 최대강우강도(Maximum intensity in rainfall series)와 산사태 발생 시점의 강우강도(Intensity when landslide occurrence)로 분류하여 분석하였다.

Fig. 6에서는 강원지역을 대상으로 유발 강우데이터를 산림

(a) Total cumulative rainfall

(b) Effective cumulative rainfall

Fig. 6. Application of Korea forest service standard(Gangwon area)

Table 3. Hit rate of existing standards

	Total cumulative rainfall		Effective cumulative rainfall	
	Max. intensity	Intensity (landslide)	Max. intensity	Intensity (landslide)
Hit rate of watching level	0.92	0.69	0.86	0.65
Hit rate of warning level	0.57	0.39	0.39	0.27

청의 강우기준을 적용하여 분석한 결과를 도시하였다. 산림청 산사태주의보(100mm & 20mm/hr)에 대한 강우기준의 경우 ‘전체누적강우-최대강우강도’를 적용한 경우 92%가 산림청 주의보기준에 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 ‘전체누적강우-산사태 발생 시의 강우강도’를 적용한 결과 69%의 만족율로 저감되었으며, 이는 사면붕괴가 최대강우 이후에 발생하여 강우소강상태의 특성을 반영한 결과로 판단된다. 주의보 기준에 대해 ‘유효누적강우-최대강우강도’를 적용한 결과 만족율이 86%로 전체누적강우를 적용한 경우보다 감소하였다. 그러나 산림청의 산사태경보(200 mm 이상 & 30 mm/hr이상)에 대한 강우기준을 적용한 경우 ‘유효누적강우-산사태 발생 시 강우강도’분석 결과 27%만이 산림청 강우기준을 만족하였다. Table 3과 같이 산림청의 강우기준을 적용한 결과 주의보의 경우에는 비교적 만족율이 높게 나왔지만 경보기준의 경우 낮은 만족율을 보였다.

산림청의 강우기준은 자칫 선행강우 기간을 길게 적용할 경우 산사태 경보 및 주의보가 과도하게 적용될 경우가 발생할 수 있다. 그리고 단기간 집중호우에 의한 산사태 발생에 대해서는 누적강우량이 기준에 미치지 못해 위험성을 판단할 수 없는 경우가 발생하며, 역으로 장기간의 적은 강우강도로 인한 산사태 발생 위험성을 감지하지 못하는 경우가 발생할

수 있다. 즉 산림청의 강우기준을 적용할 경우 사면붕괴 시점에 대한 예측에는 한계가 존재할 수 있으며 이에 대한 보완책 마련이 필요하다.

4. 사면재해 유발강우기준 설정

4.1 사면재해 유발강우 해석 방법

산사태 발생은 강우발생 특성과 밀접한 관계가 존재한다. 강우발생에 따라 지반이 포화되고 지속적인 강우발생으로 유효응력이 감소되며 전단응력이 증가하면서 사면이 파괴된다. 우리나라에서 인명피해를 유발하는 급경사지 재해를 살펴보면 크게 2가지 형태로 분류할 수 있다. 첫 번째는 강우지속 시간이 증가하면서 포화대가 깊게 형성되어 주거지 주변의 소규모 사면이 원호파괴를 일으켜 주로 취약계층이 거주하는 주택에서 피해가 발생한다. 두 번째는 단기간에 발생하는 집중호우로 사면의 얇은파괴를 유발 토석류로 발전하여 계곡부를 따라 대규모의 흐름이 발생하는 경우이다. 우리나라는 대부분 우기철에 사면재해가 발생하므로 기본적으로 지반이 어느 정도 이상의 수분을 지니고 있으나 토석류와 같은 경우는 단기간의 강우 특성에 더 민감하게 반응한다.

산사태를 유발하는 강우 기준 선정 시 재해가 발생하는 형태를 반영할 수 있도록 단기간의 강우와 장기간의 강우로 분류하여 해석을 수행하는 것이 신뢰성을 높일 수 있으며, 본 연구에서도 강우 발생기간에 따른 강우기준을 분류하여 제안하고자 한다.

산사태 발생 강우기준 설정의 해석은 Fig. 7과 같이 연속 강우에 대해 일정지속시간(dt)의 누적강우량(R)을 지속시간으로 나눈 시간강우량의 최대값(I, mm/hr)과 그 때의 지속시간(D, hr)을 표기함으로서 도출할 수 있다(윤찬영 외, 2010). 즉, 산사태가 발생한 시점을 중심으로 지속시간에 대한 최대 강우

Fig. 7. Analytical methods of rainfall threshold(modified from Kim, 2008)

Fig. 8. Analytical zone of rainfall threshold

량 값을 나누어 시간에 따른 강우강도의 변화를 도시한다.

실제 산사태가 발생했을 때의 강우량을 분석하면, 유효시간 내의 단기강우 영향으로 산사태가 유발되는 경우와, 적은 강우지만 지속시간이 길어짐에 따라 발생하는 장기강우로 인한 영향으로 구분할 수 있다. 본 연구에서도 Fig. 8과 같이 3가지 영역을 나누어 강우기준을 설정하려 한다.

단기영역(Short term zone, Effective zone)은 산사태 발생 시점을 기준으로 12시간까지의 강우영역을 나타내며, 장기영역(Long term zone)의 경우 36시간 이상의 지속시간을 갖는 누적강우량을 중심으로 해석하였다. 중간영역의 경우는 단기영역과 장기영역을 연결하는 구간으로 12시간~36시간 사이의 영역을 의미한다.

집중호우와 같이 단기간에 발생한 강우로 인한 산사태의 경우 사면파괴는 주로 최대강우가 발생한 시점이나 그 이후 3~6시간 내에 발생하는 경우가 많다. 2011년 우면산의 강우 패턴이나 2012년 군산지역의 강우 패턴에서 보듯이 산사태에 영향을 미치는 유효강우시간은 3~6시간 정도이다. 따라서 본 연구에서는 최대강우발생 전 6시간의 강우 변화량과 최대강우발생 후 6시간 정도의 강우변화량의 범위를 고려하여 단기강우영역을 12시간으로 제한하였다.

4.2 강원 지역 사면재해 강우기준 분석

사면재해 이력을 바탕으로 한 강우기준 설정을 위해 먼저 재해자료를 축적하였다. 본 연구에서는 230여개 자료 중 동일지역/동일시간에 발생한 재해이력의 중복성을 배제하고 강우데이터의 신뢰성을 비교하여 약50여개의 데이터를 활용하여 해석을 수행하였다. 해석에 활용된 강원지역의 강우이력데이터는 1999년~2011년까지 발생한 인명 및 사회기반시설에 영향을 끼친 산사태 발생 시점의 데이터이다. 본 연구에서 활용한 데이터의 강원지역 내 분포현황과 연도별 발생현황은 Fig. 9와 같다. 강원지역에서 발생한 산사태는 2002년과 2006년에 가장 많은 피해를 유발하였으며, 인제지역의 발생 횟수가 가장 높았다. 이는 산사태에 대한 조사가 주로 인명 피해를 많이 유발한 현장을 중심으로 수행하였기에 도출된 결과로 판단된다.

재해이벤트별 대표강우는 강원지역 내에 분포한 기상청 기상관측소(AWS)의 영역범위를 고려하여 선정하였으며, 각 사면붕괴 이벤트 별 강우데이터를 분석하여 강우강도-강우지속시간을 두 축으로 데이터를 도시하고 각 이벤트별 추세선을

(a) Landslide occurrence by year

(b) Landslide occurrence by region

Fig. 9. Landslide data in Gangwon area

도출하였다. 각 사면재해 이벤트별 추세선을 기준으로 3개의 영역별(단기영역, 중간영역, 장기영역)강우기준을 제시하여 강원지역의 대표 강우기준을 정립하였다. 사면재해 위험성 분석을 위한 강우기준 설정 절차는 Fig. 10과 같으며, 세부사항은 아래와 같다.

(1) 사면재해 이력자료 구축

- 과거 사면재해 발생지역/일시/원인에 대한 자료 축적

(2) 강우데이터 구축

- AWS 관측소를 기준으로 일정영역을 설정하여 대표강우 분석

(3) 사면재해 발생 일시의 강우데이터 분석

- 사면재해 발생 당시 강우를 중심으로 강우지속시간에 따른 강우강도 분석
- 각 사면재해별 강우지속시간-강우강도 경향선(거듭제곱법) 도시

(4) 단기강우 및 장기강우 영향 권역 구분을 위한 강우강도 기준치 선정

- 산사태별 강우경향선이 Y축과 접하는 최고 강우강도 조건을 50 mm/hr 가정
- 50 mm/hr를 기준으로 상부 경향선을 중심으로 단기강우 기준설정
- 50mm/hr를 기준으로 하부 경향선을 중심으로 장기강우 기준 설정
- 단기강우기준과 장기강우기준 사이를 중간영역의 강우 기준으로 설정

(5) 사면재해 유발 강우기준 제안

Fig. 10. Step of setting on landslide rainfall threshold

강우강도축과 접하는 최대 강우강도 축값에 대한 기준은 최대강우강도 발생 빈도를 분석하여 도출하였다. 사면붕괴 발생 때 까지의 최대강우강도에 대한 빈도분석 결과, 평균 (Mean)은 약 42 mm/hr이며, 데이터의 중앙값(Median)의 그룹은 50~60mm/hr의 범위에 속하였다. 따라서 사면재해 강우기준 설정을 위해 강우지속시간과 최대강우강도 축값을 적용하여 데이터를 재배열하고 3개의 영역별 강우기준을 제시하였다.

4.3 강원지역 사면재해 강우기준 설정

강원지역의 산사태 발생 시 50여 개의 강우이벤트에 대한 추세선을 도시하면, Fig. 11(a)와 같이 데이터의 분산도가 크게 나타난다. 강우이벤트별 추세선을 앞에서 기술한 기준으로 재배열하면 단기강우영역(Fig. 11(b))과 장기강우영역(Fig. 11(c))으로 구분할 수 있으며 이를 기준으로 각 영역별 강우기준을 제시하였다. 사면재해가 발생했을 때의 강우데이터를 도시하면 단기강우 영역과 장기강우 영역 모두 분산이 크게

나타지만 50 mm/hr의 기준을 적용하여 분류한 결과 단기강우 영역에서의 변동폭은 축소되었으며, 밀집도가 높은 영역의 하단부를 기준으로 강원권의 강우기준을 제안하였다. 장기강우 영역의 경우 데이터의 분산이 크게 나타났으며 밀집도가 높은 부분의 하위 영역을 중심으로 제안하였다. 각 영역별 강우기준식은 아래와 같다. 영역별 강우기준을 보면 단기영역과 장기영역의 기준차이가 크게 발생하였으며, 이에 따라 중간영역의 변동폭이 크게 나타났다.

$$\text{단기영역권} : I = 70.0 D^{-0.7}$$

$$\text{중간영역권} : I = 300.1 D^{-1.28}$$

$$\text{장기영역권} : I = 20.0 D^{-0.53}$$

5. 사면재해 유발강우기준 검증

본 장에서는 강원지역 사면재해에 대한 강우기준에 대한 신뢰성을 검증하기 위해 과거 강원지역에서 발생한 사면재해 시의 강우데이터를 적용하여 분석하였다. 신뢰성 검증을 위해 활용한 데이터는 춘천과 태백지역의 강우량을 적용하여 분석을 수행하였다. 춘천지역의 검증데이터는 2011년 7월 26일~27일 발생한 강우데이터(Fig. 12(a))를 활용하였으며, 사면재해 2011년 7월 27일 8시에 발생하였다. 태백지역의 검증자료는 2010. 9. 21~22일 발생한 강우데이터(Fig. 13(a))를 적용하였으며, 재해는 2010년 9월 22일 5시에 발생하였다.

검증데이터를 적용하여 분석을 수행한 결과 춘천지역의 경우 Fig. 12(b)에서와 같이 산사태 발생 2시간 전(Chuncheon-072623)에 설정된 강우기준을 넘어 위험성을 인지하였으며 신뢰성 있는 결과가 도출되었다. 태백지역의 경우도 Fig. 13(b)와 같이 3시간 전에 산사태 위험성을 판단하였으며 이 지역 역시 신뢰성 높은 결과가 도출되었다.

(a) Trend lines of landslide rainfall

(b) Rainfall threshold of short term zone

(c) Rainfall threshold of long term zone

(d) Landslide rainfall threshold in Gangwon area

Fig. 11. Landslide rainfall threshold in Gangwon area

(a) Rainfall data in Chuncheon(2011. 7. 26~27)

(b) Verification using Chuncheon rainfall data

Fig. 12. Verification of landslide rainfall threshold(Chuncheon)

(a) Rainfall data in Taebak(2010. 9. 21~22)

(b) Verification using Taebak rainfall data

Fig. 13. Verification of landslide rainfall threshold(Taebak)

6. 결 론

본 연구에서는 강원지역의 사면재해 이력데이터와 재해발생 시의 강우데이터를 활용하여 강원지역의 강우기준을 설정하였다. 사면재해가 발생했을 때의 강우데이터를 활용하여 경험적인 방법에 의해 강원지역을 대상으로 사면재해 강우기준을 제시하였다. 설정된 강우기준은 사면붕괴에 대한 위험성을 사전에 인지하는데 유용하게 활용 될 수 있을 것이라 판단되며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 강원지역의 사면재해 강우기준 설정을 위해 약 50여개의 산사태 이력자료와 강우데이터를 추적하였다. 사면붕괴 시의 강우데이터를 분석해 보면 기존의 강우기준에서 제시하고 있는 최대강우강도, 최대누적강우량 등은 붕괴 발생시점을 예측하는데 한계가 존재하는 것을 볼 수 있었다. 산림청의 강우기준 역시 산사태 주의보에 대해 최대강우강도-전체 누적강우량을 적용하면 신뢰성이 높게 도출되었지만 사면붕괴 당시의 강우강도를 적용할 경우 주의보 기준에 미달되어 산사태 발생 시간을 예측하는데는 한계가 있었음을 확인하였다.
- 2) 사면붕괴에 대한 강우기준 설정은 단기강우가 집중되는 단기영역과 강우발생시간이 긴 장기영역, 두 영역을 연결하는 중간영역으로 구분하여 제시하였다. 단기영역에서는 최대강우강도 축값을 50 mm/hr이상의 기준을 적용하여 단기간에 발생한 강우량에 대한 기준을 설정하였으며, 장기영역의 경우 적은 강우지만 지속시간이 길게 형

성될 경우 위험성을 판단하기 위해 설정하였다.

- 3) 강원지역 사면재해 강우기준은 과거 사면재해 발생 강우 이벤트별 추세선을 도시하고 영역별로 기준을 제시하였다. 영역별 강우기준은 집중호우와 같은 단기강우의 발생과 적은 강우이지만 장기간에 걸쳐 내린 강우의 영향을 기준에 비해 현실적으로 분석하고 붕괴를 사전에 예측할 수 있을 것으로 판단되었다.
- 4) 강원지역의 사면재해 강우기준의 신뢰성 검증을 위해 과거 춘천, 태백 지역의 사면재해 발생 시의 강우데이터를 활용하여 분석을 실시하였다. 두 검증데이터를 활용하여 분석을 실시한 결과 설정된 강우기준을 기반으로 재해발생 전 1~3시간 전에 위험성을 인지하여 제안한 강우기준은 강원지역의 강우발생 시 사면붕괴위험성 판단을 위해 적용 가능할 것이라 판단된다.

References

- Asch, T.W.J.V., Buma, J., and Beek, L.P.H.V. (1999) A view on some hydrological triggering systems in landslides, *Geomorphology*, Vol. 30, 25-32.
- Borga, M., Fontana, G.D., and Cazorzi, F. (2002) Analysis of topographic and climatic control on rainfall-triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness index, *Journal of Hydrology*, Vol. 268, 56-71.
- Brand, E.W. (1985) Prediction the performance of residual soil slopes proc., *11th ICSMFE*, Sanfrancisco, 2541-2573.
- Brand, E.W., Premchitt, J., and Phillipson, H.B. (1984) Relationship

- between rainfall and landslide in Hong Kong, *Proceedings of the 4th international symposium on landslides*, Vol. I, Toronto, 377-384.
- Chleborad, A.F. (2003) Preliminary Evaluation of a precipitation threshold for anticipation the occurrence of landslides in the Seattle, Washington, U.S. geological Survey Open-File Report 03-463.
- Choi, K. (1989) Landslide Prediction methods and Prevention, KFRI Research Information Report, No. 27, 1-3.
- Finlay, P.J., Fell, R., and Maguire, P.K. (1997) The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall, *Can. Geotech journal*, Vol. 34, 811-824.
- Hengxing, L., Chenghu, Z. Lee, C.F. Sijing, W., and Faquan, W. (2003) Rainfall-induced landslide stability analysis in response to transient pore pressure, A case study natural terrain landslide in Hong Kong, *Science in China Ser. E Technological Sciences*, Vol. 46, 52-68.
- Hong, W.-P., Kim, S.-K., Kim, M., Kim, Y.-W., Han, J.-G. (1990) Prediction of Rainfall-triggered Landslides in Korea, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 6, No. 22, 55-63.
- Jakob, M. and Weatherly, H. (2003) A hydroclimatic threshold for landslide initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia, *Geomorphology*, Vol. 54(3/4), 137-156.
- Kim, K.-S. (2008) Characteristics of Basic Topography and Rainfall Triggering Debris Flow, *Journal of Civil Engineering*, Vol. 28, No. 5C, 263-271.
- Lin, M.L. and Jeng, F.S. (2000) Characteristics of hazards induced by extremely heavy rainfall in Central Taiwan-Typhoon Herb, *Engineering Geology*, Vol. 58, 191-207.
- Lumb, P. (1975) Slope Failures in Hong Kong, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 8, 31-65.
- National Disaster Management Institute (2012) Development of the Steep-slope Collapse Judgement System by the GIS base(I), Research Report, NDMI-2012-13-02, 184.
- National Institute for Disaster Prevention (2007) A study on the Early Warning System for Damage Mitigation of Geotechnical Disasters, Research Report, NIDP-2007-01, 168.
- National Institute for Disaster Prevention (2009) Study on the Steep-slope Early Warning and Evacuation System using Rainfall Data(II), Research Report, NIDP-2009-07-02, 266.
- National Institute for Disaster Prevention (2010) Study on the Steep-slope Early Warning and Evacuation System using Rainfall Data(III), Research Report, NIDP-2010-01-02, 304.
- Sanderson, F., Bakkehoi, S., Hestenes, E., and Lied, K. (1996) The influence of meteorological factor on the initiation of debris flows, rockfalls, rockslides and rockmass stability, *Landslides, Proceedings 7th international symposium on landslides*, edited by Senneker, K., A.A. Balkema.
- Terlien, M.T.J. (1996) Modelling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides; Ph.D thesis, ITC, Netherland, Enschede, Netherlands, 253.
- Thornbury, W.D. (1954) Principles of Geomorphology, 573.
- Yune, C.-Y., Jun, K.-J., Kim, K.-S., Kim, G.-H., Lee, S.-W. (2010) Analysis of Slope Hazard-Triggering Rainfall Characteristics in Gangwon Province by Database Construction, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 10, 27-38.

© Received April 19, 2013

© Revised April 22, 2013

© Accepted May 8, 2013