산사태 발생 예측을 위한 유발 강우기준 연구

Analysis of Landslide Triggering Rainfall Threshold for Prediction of Landslide Occurrence

오정림* · 박혁진**

Oh, Jeongrim*, Park, Hyuck Jin**

Abstract

Landslide occurs mostly during rainy seasons in Korea, and rainfall is the largest factor causing landslides. This study is intended to establish the rainfall standard to predict the risk of landslides, taking into account of regional / geological characteristics. To that end, historical data of landslides and rainfall data were investigated and analyzed. To predict the landslide risk using rainfall data, rainfall data which were related to causing landslide previously, was selected and analyzed to establish the rainfall standards and real-time rainfall approach was applied to establish the rainfall standards and determine the potential risk. Reliability in predicting the landslide risk using rainfall data, is heavily dependent on the spatial density of rainfall observatory stations and in this study the risk analysis using rainfall data focuses on predicting the time of landslide occurrences. In this study, rainfall standards by region are proposed using 250 landslide historic data and past rainfall data. Reliability of established rainfall standards was verified and rainfall standards would lead to reliable prediction of landslide occurrence time.

Key words : Landslide, Rainfall threshold, Slope stability, Slope susceptibility, Risk analysis

요 지

우리나라의 산사태는 주로 우기철에 발생하며 강우는 산사태를 유발하는 가장 큰 인자이다. 본 연구에서는 산사태 발생에 대한 위험예측을 위해 지역적/지질적 특성을 고려하여 강우기준을 설정하였다. 본 연구를 위해 산사태 발생이력과 강우 데이터를 축적하고 분석하였다. 강우자료를 활용한 산사태 발생 위험성은 과거 산사태를 유발한 강우데이터를 분석하여 강우기준을 설정하고, 설정된 강우기준에 실시간 실태강우의 접근정도를 분석하여 판단한다. 강우를 활용한 산사태 위험예측은 강우관측소의 밀집도에 따라 신뢰성이 크게 좌우되며, 강우를 활용한 위험성 분석은 산사태 발생 시간의 예측에 더욱 큰 의미가 있다. 본 연구에서는 약 250여개의 산사태 이력자료와 강우데이터를 활용하여, 5개의 권역별 강우기준을 제안하였다. 설정된 강우기준에 대한 신뢰성을 분석한 결과 산사태 위험시간 예측을 위한 강우기준의 활용은 적절할 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 산사태, 강우기준, 사면안정성, 사면 취약성, 위험성 평가

1. 서 론

현대사회에 있어서 재해와 재난은 불확실성과 대형화 등의 특성을 보이며 기후변화 등으로 재해위험이 증가하고 있다. 최근 우리나라에서는 국지성 집중호우, 폭염, 열대성 저기압의 대형화 등 극한 기후현상이 빈번해 지고 있으며 이에 따른 피해들이 속출하고 있다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)보고서에서는 기후변화에 대한 정책적 변화

없이 현재에 머무른다면, 전 세계적으로 기후 변화에 따른 극한 기후현상의 증가와 이로 인한 홍수와 가뭄 등 자연재난에 대한 위험이 증가될 것으로 전망하고 있다(UN IPCC, 2007).

우리나라의 경우 기후변화에 대한 영향과 더불어 산업화, 도시화로 인한 절개지 증가와 하천과 산지에 근접한 주거형태로 산사태에 의한 위험성은 날로 증가하고 있다(국립방재연구소, 2009). 특히 농어촌지역은 대부분 사면의 직하부에 가옥이 형성되어 있으며, 고령층의 거주비율이 높아 산사태에

*교신저자. 정회원. 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

더욱 취약하다. 지진이 많이 발생하지 않는 우리나라의 경우 산사태의 직접적인 유발요인은 강우이며, 6월~8월의 우기철이나 8월~9월의 태풍 내습기간에 산사태가 주로 발생한다. 이처럼 강우는 산사태의 가장 큰 영향인자이지만, 강우를 활용한 산사태 발생 위험성에 대한 예측 연구는 소규모 지역에 국한되어 연구목적으로 진행되고 있다.

강우를 활용한 산사태 위험성 예측은 간단하지만 가장 효과적으로 활용될 수 있다. 산사태를 유발한 강우분석을 통해 적절한 기준을 설정하고, 강우발생 시 위험성을 실시간으로 판단할 경우 산사태 발생에 대한 사전 대응이 가능하다. 산사태 발생에 대한 강우기준은 강우지속시간, 강우강도, 누적강우량 등 다양한 강우인자를 활용하여 설정할 수 있다.

산사태 유발 강우기준 설정에 관한 연구는 Caine(1980)의 사면붕괴에 대한 강우강도-지속시간 기준 설정 연구를 시작으로 많은 해외 연구자에 의해 활발히 수행되고 있다(Finlay *et al.*, 1997; Glade *et al.*, 2000; Wieczorek *et al.*, 2000). Caine (1980)은 과거 얇은파괴와 토석류 이력자료를 기반으로 토석류에 대한 강우기준을 제시하였으며, Finlay *et al.* (1997)은 홍콩에서 발생한 산사태 자료와 강우자료를 분석하여 1~12시간의 강우지속시간에 대한 강우기준을 제시하였다. 산사태 발생에 대한 강우기준은 주로 강우강도와 지속시간의 방법(I-D method)을 활용하여 제안되었으며, I-D 방법은 강우지속시간에 따른 강우량의 변화를 종합적으로 판단할 수 있다. 강우지속시간이 짧은 단기강우영역에서는 높은 강우강도의 영향을, 강우지속시간이 긴 영역에서는 낮은 강우강도이지만 장기적인 강우발생의 영향을 고려할 수 있다. I-D방법은 비교적 해석 방법이 간단하지만 실제 강우강도, 강우지속시간,

누적강우량의 개념을 모두 포함하는 것으로, 강우지속시간에 따라 단기강우발생에 대한 특성에서부터 장기강우발생에 대한 특성까지 고려할 수 있다. 본 연구에서는 산사태 발생에 대한 위험성 예측을 위해 I-D 방법을 활용하여 산사태 유발 강우기준을 제안하고, 강우발생 시 산사태에 대한 실시간 위험성 예측 연구를 수행하고자 하였다.

2. 국내외 연구동향

산사태를 유발하는 강우특성에 대한 규명은 강우시 사면재해에 대한 조기경보체계 수립이나 사면재해 예방을 위한 대책공법의 설계 및 유지관리를 위해 매우 중요한 부분이다(윤찬영 등, 2010). 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). 산사태에 대한 강우기준의 도입은 Caine (1980)이 토석류를 유발하는 임계강우개념(critical rainfall threshold concept)을 제시한 이후 많은 연구자들에 의해 산사태 예보와 경보를 위한 강우기준 설정에 관한 연구가 수행되고 있다. 사면재해와 강우와의 상관관계를 파악하기 위해 활용되는 데이터는 강우강도, 강우지속시간, 총강우량, 24시간 연속강우, 선행강우량 등이 있으며, 지역별 강우데이터와 재해이력을 활용하여 산사태 예측을 위한 기준을 제시하고 있다.

국내에서도 산사태를 유발하는 강우기준에 대한 연구는 과거에 일부 수행된 바 있다. 최경(1989)은 연속강우량과 강우강도 개념을 이용하여 산사태를 유발하는 강우기준을 제시하

Table 1. Rainfall Threshold for Landslide Prediction

Proposer	Classification	Landslide watch	Landslide warning
Ministry of construction (1988)	cumulative rainfall on the landslide day	I area	90mm
		II area	75mm
		III area	55mm
Hong, <i>et al.</i> (1990)	small landslide		max. intensity > 10mm & 2day cumulative rainfall>40mm
	midium landslide		max. intensity > 15mm & 2day cumulative rainfall>80mm
	large landslide		max. intensity > 35mm & 2day cumulative rainfall>140mm
Lee, <i>et al.</i> (1991)			cumulative rainfall in 24hr > 200mm or avg. rainfall of cumulative rainfall over 24hr > 10mm
Korea forest service (1993)	continuous rainfall	100~200mm	200mm <
	intensity	20~30mm	30mm <
	1 day cumulative rainfall	80~150mm	150mm <
Kim (1994)	2 day cumulative rainfall	100mm	200mm
	intensity	15mm	30mm
	daily rainfall	80mm	140mm

였으며, 연속강우기준으로 200 mm이상, 최대시간강우량이 30 mm 이상이 되면 산사태 발생 위험이 있다고 보고하였다. 홍원표 등(1990)은 1977~1987년 사이의 주요 산사태와 강우 자료 분석을 통해 일강우량과 강우강도가 산사태 발생과 연관성이 있다는 연구결과를 도출하였으며, Table 1과 같이 강우특성에 따라 발생규모도 달라지는 것을 연구하였다.

1980년대 이후로 국내외적으로 한계 강우량(critical rainfall)을 이용한 토석류 및 사면붕괴 발생예측과 관련된 연구가 수행되고 있다. 한계 강우량은 산사태 발생과 관련한 예측 및 조기경보를 위한 중요한 자료로 활용되고 있으며, 상황에 따

Fig. 1. Antecedent Daily Rainfall Model (Glade et al, 2000).

라 소규모 유역 또는 광역지역을 대상으로 적용되고 있다.

Crozier(1986)는 선행 일강우량(antecedent daily rainfall)을 활용하여 시간에 따라 저감되는 선행강우 효과에 대해 감쇠계수(decay coefficient)를 적용하여 분석하였다. Fig. 1은 산사태를 유발한 유발 강우(검고 큰 점), 산사태를 유발할 가능성이 있는 강우(흰 원), 그리고 산사태를 유발하지 않은 비유발 강우(검고 작은 점)를 도시한 것으로 확률분석을 통해 확률적 신뢰도를 등고선으로 제안하고 산사태 위험을 예측하였다.

Jakob et al.(2003, 2006)은 캐나다 브리티쉬 콜롬비아 지역의 산사태 유발 강우자료에 대한 분석을 통해 수리·기후학적 경계기준을 결정하고 과거 산사태 거동과 관련된 기상학적 변수 등을 분석하였다. 이를 통해 산사태 발생 위험기준을 정립하고 강우 발생 시 산사태 위험성을 사전에 파악하고 산림 산업 종사자를 대피시키는데 활용하였다. Fig. 2는 BGC engineering Inc. (2005)의 연구결과로 산사태 발생초기의 강우지속시간과 강우강도를 도시하고 강우지속시간별 최소 강우강도를 기준으로 한계선을 제안한 것이다. 이 연구에서 제안한 한계선은 한계선 이상의 영역에서는 산사태가 발생할 가능성이 존재하며, 한계선 이하의 영역에서는 산사태가 발생하지 않음을 의미한다.

국외 많은 연구자에 의한 산사태 발생에 대한 강우강도와 지속시간과의 상관관계 도출을 위한 일련의 연구들은 지속적으로 추진되고 있다(Caine, 1980; Crosta and Frattini, 2001; Cannon and Gartner, 2005). Crozier (1986)는 사면붕괴를 유발하는 인자 중 선행강우(antecedent precipitation)와 토사의

Fig. 2. Rainfall Duration-intensity for Landslide Initiation with Worldwide Dataset (BGC Engineering Inc., 2005).

Fig. 3. Landslide Rainfall Threshold Using Empirical Method (Calcaterra *et al.*, 2000).

함수량(sediment moisture)을 활용하여 연구를 수행하였다. Calcaterra *et al.*(2000)은 강우량의 지속적인 모니터링에 필요한 수문학적 모델들을 기본으로 한 준 경험적 접근방법을 활용하여 산사태 발생에 대한 강우강도와 지속시간과의 관계를 Fig. 3과 같이 유도하였다.

Sanderson *et al.*(1996)은 기상 인자(rainfall, air-temperature, wind-speed and air-humidity)와 토석류, 낙석, 암석사태 등에 대한 상관관계 분석을 통해 사면의 안정성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. Lumb(1975)은 강우로 인한 침투가 사면파괴의 주요인으로 작용하며, 파괴당시의 일 강우량 뿐 아니라 선행강우량에 크게 영향을 받는다고 주장하였으며, Brand(1985)는 짧은 시간에 내리는 집중호우는 지질이나 수문지질의 조건에 관계없이 대규모 산사태를 일으킬 수 있는 주요 요인으로 작용한다고 주장하였다. 그리고 Yagi and Yatabe(1987)에 의하면 7일간의 선행누적강우량이 클 때에는 적은 강우일지라도 사면이 붕괴될 수 있으며, Olivier *et al.*(1994)에 의하면 일강우량이 연평균강우량의 20%를 초과할 경우 대규모 산사태가 발생할 수 있다.

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 사면 재해의 위험성이 커질 수 있다는 가능성을 내포하며 향후 체계적인 관리·감독 및 정기적인 위험성 분석이 필요하다는 것을 의미한다(국립방재연구원, 2012).

Fig. 4. Sites of Landslides Occurred During 1999~2012.

산사태 발생 강우기준 설정을 위해서는 과거 많은 재해이력 데이터가 축적되어야 한다. 강본 연구를 위해 활용한 재해이력은 현장조사를 통해 수집한 670여개 이상의 데이터 중 재해이력의 중복성(동일지역과 동일시간) 등을 배제한 250여개의 데이터를 활용하였다(Fig. 4).

우리나라 사면재해는 주로 산악지역으로 이루어진 강원권과 경상권에서 많이 발생하였다. Fig. 5는 지역별 재해발생 건수를 그래프로 나타냈으며, Fig. 6은 연도별 재해발생건수를 나타내었다. 1999년 이후에 발생한 재해이력에서 보면 지역적으로는 산악지역이 발달되고 지형적 조건과 태풍의 이동경로 상에 위치한 강원도 지역이 산사태가 가장 많이 발생하였

Fig. 5. Distribution of Regional Landslide Occurrences.

Fig. 6. Distribution of Annual Landslide Occurrences.

다. 산악지역의 경우 국지성 집중호우가 자주 발생하며, 지역별 강우량의 편차도 크게 나타난다. 또한, 2002년 태풍 루사, 2003년 태풍 매미 내습 시 많은 산사태가 발생하였으며, 2006년 집중호우 및 태풍 에위니아 내습 시에도 많은 피해가 발생하였다. 2011년에는 수도권 주거지 주변에 많은 피해가 발생하였으며, 우면산 및 춘천지역 토석류로 인해 도심지 등에 대규모 토사유출이 발생하였다.

산사태 발생건수를 암종별로 분석한 결과 화성암 지역과 변성암 지역에서 주로 발생하며, 점유면적이 넓은 규장질 화강암과 편마암 지역에서 대부분을 차지하였다(Fig. 7).

Fig. 7. Distribution of Rock Type for Landslide Occurrences.

3. 사면재해 강우데이터 분석

3.1 강우데이터 수집

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. 8과 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.

Fig. 8. Setting on Effective Range of AWS.

Fig. 9. Concept of a Series of Rain and the Antecedent Rain.

3.2 사면재해 유발강우 정의

강우가 시작되고 산사태가 발생할 때까지의 강우형태는 Fig. 9와 같다. 본 연구에서는 선행강우를 포함하여 14일 정도의 강우기간을 설정하여 산사태가 발생했을 당시의 짧은 발생기간을 유효강우 영역(기간)으로 보았다. 유효강우(Effective rainfall) 영역은 강우가 시작하여 산사태가 발생한 시점까지의 강우를 나타내며 실제 이 기간에 산사태가 가장 빈번하게 발생한다. Fig. 9에 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

4. 산사태 유발 강우기준

4.1 산사태 유발 강우기준 분석 절차

산사태 유발 강우기준 설정에 대한 절차를 간략하게 나타내면 Fig. 10과 같다. 산사태 유발강우기준 설정을 위해 재해이력 자료는 전국 약 250여개의 데이터를 활용하였으며, 강우자료의 경우 기상청의 자동우량시스템(AWS)의 관측자료를 활용하였다.

Fig. 10에 나타난 것과 같이 산사태 이력자료를 바탕으로 한 강우기준 설정을 위한 절차를 정리하면 아래와 같다.

- (1) 산사태 이력자료 구축
 - 과거 산사태 발생지역/일시/원인에 대한 자료 축적
- (2) 강우데이터 구축
 - 전국의 기상관측망을 기준으로 일정영역을 설정하여 지역별 대표강우 설정
- (3) 산사태 발생 일시의 강우데이터 분석
 - 산사태 발생 당시 강우를 중심으로 강우지속시간에 따른 강우강도 분석
 - 산사태 발생 강우영역의 유효시간과 유효강우량 분석

Fig. 10. Step of Setting on Landslide Rainfall Threshold.

(4) 해석 케이스 별 강우지속시간에 따른 강우 분석

- 방법 1: 전체 강우영역에 대해 강우지속시간별 평균 강우강도 분석
- 방법 2: 유효시간에 대한 평균 강우강도 도출
- 방법 3: 유효시간에 대한 유효누적강우량 도출

(5) 지역별 산사태 유발 강우기준 제안

- 지역별 강우기준 제시

(6) 지역으로 구분하여 제안한 강우기준 검증

- 과거 산사태 미발생 강우 적용을 통한 강우기준 검증
- 과거 산사태 발생 강우 적용을 통한 위험시간 예측 검증

방법 1)은 산사태 각각의 이벤트에 대해 강우지속시간별 평균강우강도를 산출하고(Fig. 11), 평균값을 활용한 평균 강우기준과 강우강도 값의 80%를 활용한 강우기준을 제시한다. 즉 강우지속시간별 강우강도 분포의 약 80%를 만족하는 강우강도에 대해서도 기준을 제안하였다. 이는 강우 발생 시 산사태 위험성을 예측하기 위해서는 산사태 유발강우의 최하단을 기준으로 평가하는 것이 바람직하지만, 그럴 경우 강우기준이 안정측으로 설정되어 잦은 경보가 발령될 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 산사태를 유발하는 일반적인 강우경향의 파악을 위해 평균을 활용하여 강우기준을 설정하였고, 예·경보 기준으로의 가능성을 평가하기 위해 80% 강우기준도 설정하여 비교하였다.

방법 2)와 방법 3)의 유효시간에 대한 강우강도 및 유효누적강우 기준은 방법 1)의 강우지속시간별로 강우강도를 도출하는 것과 달리 유효시간에 대한 하나의 값을 산출하여 제안하였다(Fig. 12). 즉 산사태 이벤트별 유효시간에 대한 하나의 강우강도 값과 누적강우량 값을 활용하였으며, 유효시간에 대한 강우기준도 방법 1)에서와 같이 평균 강우기준과 80% 강우기준으로 제시하였다. 80%의 강우기준은 평균강우 기준을 활용하여 추세선의 기울기는 동일하게 유지하고 강우량 값을 평균에 대해 30%씩 감소시켜 제안하였다.

Fig. 11. Rainfall Analysis for Duration-intensity Standard (Method 1).

Fig. 12. Rainfall Analysis for Duration-intensity Standard (Method 2 and Method 3).

4.2 지역별 산사태 유발 강우기준

가. 경기/수도권 강우기준

경기/수도권은 인구밀도가 높고 경기북부권의 경우에는 산지가 발달되어 산사태에 대한 위험성이 높은 지역이다. 과거 산사태 현황을 보면 서울의 도심지보다 경기도 지역에서 산사태가 많이 발생하였으나 최근 집중호우의 증가로 인해 도심지에서도 산사태의 위험성이 증가되고 있다. 경기/수도권에 대한 데이터를 강우지속시간과 강우강도의 형태로 나타낸 후 각 이벤트별 경향선을 도시하면 강우지속시간이 짧은 구간에서 데이터의 분산이 크게 나타났다. 이는 산사태 발생 시점의 강우강도가 산사태 이벤트 별로 많은 차이가 발생하는 것을 반영한 것으로, 앞서 분석했던 것과 같이 산사태 발생 시점의 강우강도가 최대일 때와 강우가 소강상태일 때의 특성이 반영된 결과라 판단된다. 이런 강우의 분산정도는 강우지속시간이 8~10시간 이후의 영역에서는 차츰 수렴되는 특성을 보이며(Fig. 13(a)), 이는 유효시간에 발생한 유효강우강도를 활용한 방법 2와 유사한 결과(Fig. 13(b))가 도출되는 이유라 판단

된다. 방법 3에 의한 유효시간에 대한 유효강우량 기준은 그 래프의 기울기가 급하지 않은 것으로 보아 강우강도는 약하지만 장기간에 발생하는 강우의 특성을 반영하는 것으로 판단된다(Fig. 13(c)).

나. 경상권 강우기준

경상권은 과거부터 사면재해가 지속적으로 발생하는 지역으로 주로 산악지역이 잘 발달되어 산사태에 대한 위험성이 크게 존재하는 지역이다. 경상권의 산사태 발생은 주로 토심이 깊은 곳에서 많이 발생하였으며, 이는 강우발생에 따라 불연속면을 중심으로 활동력이 증가하여 발생한 것으로 판단된다. 경상권의 경우 산사태별 강우 추세선의 흐름은 비슷한 경향을 나타내지만 지속시간별 강우강도의 분산은 크게 나타났다(Fig. 14(a)). 방법 2에 의한 강우기준은 방법 1의 강우기준과 유사하게 도출되었으며, 80% 강우기준에서는 대부분의 산사태 이력강우가 포함되어 정보 기준으로 활용하기에 적절할 것으로 판단되었다(Fig. 14(b)). 방법 3에 의한 강우기준은 유

(a) Result of method 1

(b) Result of method 2

(c) Result of method 3

Fig. 13. Landslide Triggering Rainfall Threshold in Gyeonggi/metropolitan Area.

효시간이 15시간~40시간에서 밀집도가 높게 나타났으며, 남부지방의 경우 비교적 강우지속시간이 긴 것을 알 수 있었다 (Fig. 14(c)).

다. 강원권 강우기준

강원권은 지형적으로 경사가 급한 지역이 많으며, 대부분의 지역이 규장질 화강암과 편마암으로 이루어져 있다. 그리고 강원 남부권에는 석회암으로 이루어진 지반이 많이 존재하며 산사태 발생 역시 석회암이 분포된 지역과 태백산맥의 동쪽부(강릉 일대)와 서쪽부(인제군 일대)에서 많이 발생하였다. 강원권의 경우에도 산사태 발생 강우분포가 경상권과 유사하

(a) Result of method 1

(b) Result of method 2

(c) Result of method 3

Fig. 14. Landslide Triggering Rainfall Threshold in Gyeongsang Area.

게 추세선의 기울기는 비슷하지만 모든 강우지속시간에서 데이터의 분산이 크게 나타났다. 그러나 80% 강우기준을 적용할 경우 15시간 이상의 강우지속시간에서는 대부분의 산사태 유발강우가 포함되어 정보 기준으로 활용하기에 적절할 것으로 판단되었다(Fig. 15(a)). 유효시간과 유효강우강도를 활용한 경우에는 강우지속시간에 따라 강우강도의 변화가 크게 도출되었다(Fig. 15(b)). 즉 방법 1에 비해 강우강도 절편값은 크게 도출되었지만 기울기도 급하게 형성되어 시간에 따른 강우의 변화가 컸다. 유효시간과 유효강우량을 활용한 강우기준에서는 강우지속시간에 따른 유효강우량이 산사태별로 차이가 크게 나타났다(Fig. 15(c)).

(a) Result of method 1

(b) Result of method 2

(c) Result of method 3

Fig. 15. Landslide Triggering Rainfall Threshold in Gangwon Area

라. 전라권 강우기준

전라권의 경우 강원권/경상권에 비해 산사태 발생 강우 데이터가 적게 분포하였다. 이는 타 지역에 비해 산사태가 적게 발생되었음을 의미하며, 전라도 지역의 경우 덕유산 주변과 남부 해안가에서 산사태가 많이 발생하였다. 전라권의 강우기준은 강우강도-강우지속시간의 관계로 나타낸 방법 1과 방법 2의 결과값의 차이가 많이 나타났다. 방법 1의 경우 평균 강우기준을 활용한 경우에도 단기지속시간 영역에서 많은 산사태 유발 강우를 포함하였으며, 80% 강우기준에서는 전 강우지속시간에서 산사태 유발강우를 포함하여 다소 안정측으로 강우기준이 설정되었다(Fig. 16(a)). 방법 2를 활용한 경우 강

(a) Result of method 1

(b) Result of method 2

(c) Result of method 3

Fig. 16. Landslide Triggering Rainfall Threshold in Jeolla Area.

우강도 절편값은 작았지만 기울기도 작아 강우강도 값의 변화는 크지 않았다. 그러나 방법 2의 기준을 적용할 경우, 단기 강우지속시간 영역에서 강우기준을 초과할 가능성이 크게 존재하였다(Fig. 16(b)). 유효시간에 대한 유효강우량을 활용한 경우에는 강원권의 강우기준과 비교하여 유효강우 절편값은 작지만 기울기는 급하게 형성되어 강우지속시간에 따른 강우량이 변화가 크게 도출되었다. 유효강우를 활용한 강우기준 역시 단기지속시간 영역에서 강우기준을 초과할 가능성이 크며, 자칫 잦은 경보를 유발할 가능성이 크게 존재하였다(Fig. 16(c)).

다. 충청권 강우기준

충청권의 강우기준은 전라권의 강우기준과 유사하게 강우강도-강우지속시간을 활용한 방법 1과 방법 2의 결과에서도 강우강도 절편값, 기울기에서 차이가 다소 발생하였다. 방법 1의 80% 강우기준이 방법 2의 평균 강우기준과 강우강도 절편값이 거의 유사하게 도출되었으며, 방법 2의 경우 강우기준이 안정적으로 설정되어 잦은 정보가 발령될 가능성이 크게 존재하였다(Fig. 17(a), (b)). 유효강우량을 활용한 강우기준에서도 단기 지속시간영역에서 강우기준을 초과할 가능성이 크게 존재하였다(Fig. 17(c)). 그러나 유효시간을 활용한 강우기준은 유효시간이 대부분 6시간 이상 지속되는 경우의 강우량을 활용하여 기준을 설정하였으므로 실행 강우데이터의 적용 역시 강우지속시간이 6시간 이후 일 때 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 이는 이후 검증 데이터를 통해 분석하였다.

5. 사면재해 유발강우기준 검증

본 연구에서 제안한 우리나라 산사태 강우기준에 대한 신뢰성 검증을 위해 본 절에서는 2000년~2010년까지의 산사태 미발생 강우를 활용하였다. 검증을 위해 활용된 데이터는 경기/수도권에서는 동두천 지역(강우지점 98)을, 강원권에서는 태백지역(강우지점 216)을, 경상권에서는 밀양지역(강우지점

288)을, 전라권에서는 임실지역(강우지점 244)을, 그리고 충청권에서는 충주지역(강우지점 127)의 관측값을 이용하였다. 각 지역별 강우지점은 기상청의 강우자료 수집 지점을 의미하며, 산사태 미발생 강우데이터의 적용은 산사태가 유발되었을 때의 강우량을 제외하고 6월~9월에 발생한 데이터를 활용하였다. 본 연구에서 3가지 방법으로 제안한 강우기준에 대해 산사태 미발생 강우데이터를 적용하여 설정된 강우기준에 대한 초과 데이터 수와 비율을 제시하였다(Table 2). 산사태 미발생 강우데이터를 적용하여 3가지 방법으로 제시한 기준에 대해 초과되는 데이터의 비율을 분석한 결과 방법 2와 방법 3에 의해 도출된 기준이 방법 1에 비해 신뢰성이 더 높게 도출되었다. 강우기준은 Table 2에 제시한 것과 같이 데이터의 평균을 활용한 기준(I)과 데이터의 80%를 만족하는 기준(I_{80})을 적용하였으며, 방법 2에 대한 평균 강우기준의 신뢰성은 모든 지역에서 1%내외의 에러(경보발령)를 나타내 정확성이 높게 나타났다. 그러나 방법 2에 대해 80% 기준을 적용할 경우 모든 지역에서 7%~13%의 에러가 발생하여 평균기준에 비해 정확도가 낮았다(Fig. 18~Fig. 22). 이는 위험사면에 대한 사전 대응을 유도하기 위해 평균값에서 안정적으로 강우기준을 하향시켰기 때문에 나타나는 결과로 10%내외의 에러는 자연현상에 기초하여 위험성을 예측하는 불확실성을 고려할 때 만족할 만한 결과라 판단된다.

(a) Result of method 1

(b) Result of method 2

(c) Result of method 3

Fig. 17. Landslide Triggering Rainfall Threshold in Chungcheong Area.

Table 2. Verification of Landslide Rainfall Thresholds Using Non-triggering Rainfall Data

Region	Number of data	Frequency of warning issuance using non-triggering rainfall data		
		Method 1	Method 2	Method 3
Gyeonggi/ Metropolitan area	1,927	$I=71.42D^{-0.66}$	$I = 63.88D^{-0.55}$	$ER = 63.30D^{0.438}$
		93(4.8%)	17(0.9%)	27(1.4%)
		$I_{80}=42.85D^{-0.66}$	$I_{80} = 38.00D^{-0.55}$	$ER_{80} = 38.88D^{0.438}$
		392(20.3%)	136(7.1%)	143(7.4%)
Gyeong sang area	1,515	$I=54.13D^{-0.68}$	$I = 50.52D^{-0.60}$	$ER = 51.65D^{0.391}$
		41(2.7%)	17(1.1%)	21(1.4%)
		$I_{80}=32.48D^{-0.68}$	$I_{80} = 30.00D^{-0.60}$	$ER_{80} = 30.99D^{0.391}$
		183(12.1%)	138(9.1%)	138(9.1%)
Gangwon area	1,833	$I=58.75D^{-0.64}$	$I = 74.36D^{-0.68}$	$ER = 75.69D^{0.308}$
		144(7.9%)	90(4.9%)	117(6.4%)
		$I_{80}=35.25D^{-0.64}$	$I_{80} = 44.00D^{-0.68}$	$ER_{80} = 45.41D^{0.308}$
		302(16.5%)	255(13.9%)	257(14.0%)
Jeolla area	2,180	$I=59.20D^{-0.68}$	$I = 31.10D^{-0.43}$	$ER = 31.87D^{0.56}$
		96(4.4%)	38(1.7%)	41(1.9%)
		$I_{80}=35.52D^{-0.68}$	$I_{80} = 21.77D^{-0.43}$	$ER_{80} = 22.30D^{0.56}$
		553(25.4%)	177(8.1%)	182(8.3%)
Chungcheong area	1,419	$I=50.97D^{-0.69}$	$I = 28.58D^{-0.51}$	$ER = 28.95D^{0.48}$
		17(1.2%)	19(1.3%)	20(1.4%)
		$I_{80}=30.58D^{-0.69}$	$I_{80} = 20.00D^{-0.51}$	$ER_{80} = 20.26D^{0.48}$
		311(21.9%)	110(7.7%)	119(8.4%)

(a) Verification result of method 1

(b) Verification result of method 2

(c) Verification result of method 3

Fig. 18. Verification Using Non-triggering Rainfall Data(Gyeonggi/Metropolitan Area).

(a) Verification result of method 1

(b) Verification result of method 2

(c) Verification result of method 3

Fig. 19. Verification Using Non-triggering Rainfall Data(Gyeongsang Area).

(a) Verification result of method 1

(b) Verification result of method 2

(c) Verification result of method 3

Fig. 20. Verification Using Non-triggering Rainfall Data (Gangwon Area)

(a) Verification result of method 1

(b) Verification result of method 2

(c) Verification result of method 3

Fig. 21. Verification Using Non-triggering Rainfall Data(Jeolla Area)

(a) Verification result of method 1

(b) Verification result of method 2

(c) Verification result of method 3

Fig. 22. Verification Using Non-triggering Rainfall Data(Chungcheong Area)

6. 결 론

본 장에서는 산사태 발생 위험성의 사전 예측을 위한 강우 기준 설정에 관한 연구를 수행하였다. 산사태가 발생했을 때의 강우데이터를 활용하여 3가지 분석방법에 의한 지역별/암종별 강우기준을 설정하였다.

- 1) 산사태 강우지속시간을 고려한 강우기준 정립을 위해 본 연구에서는 3가지의 분석방법을 활용하였다. 강우발생 전체 시간에 대해 강우지속시간별 지속성을 고려한 강우강도-지속시간 강우기준(방법 1), 유효시간에 대한 유효강우강도-유효지속시간 강우기준(방법 2) 그리고 유효시간에 대한 유효누적-지속시간 강우기준(방법 3)을 적용하였다. 방법 1과 방법 2를 적용하여 제시한 강우강도-지속시간의 강우기준은 경기/수도권 지역이 가장 높게 설정되었으며, 충청권지역의 강우기준이 가장 낮게 설정되었다. 유효시간에 대한 유효강우량을 활용한 방법 3의 경우에서도 경기/수도권 지역의 강우기준이 가장 높게, 충청권의 강우기준이 가장 낮게 설정되었다.
- 2) 본 연구에서 도출된 강우기준에 대한 신뢰성 검증은 지역별 대표지역을 선정하여 산사태 미발생 강우를 적용하여 분석하였다. 시간 예측의 신뢰성 검증을 위해 경기/수도권의 경우 포천시 강우, 강원권의 경우 태백시 강우, 경상권의 경우 밀양시 강우, 전라권의 경우 임실군 강우, 그리고 충청권의 경우 서천군의 강우를 활용하였다. 미발생 강우를 활용한 강우기준의 신뢰성을 분석한 결과, 방법 2에 대한 평균 강우기준의 신뢰성은 모든 지역에서 1%내외의 에러(경보발령)를 나타내 정확성이 높게 평가되었다. 반면에 80% 강우기준을 적용할 경우 모든 지역에서 7%~13%의 에러가 발생하여 평균 강우기준에 비해 정확도가 낮았다. 그러나 80% 강우기준에 대한 10% 내외의 에러는 자연현상에 기초하여 위험성을 예측하는 불확실성을 고려할 때 만족할 만한 결과라 판단된다.
- 3) 본 연구에서 제안한 강우기준 설정 방법 중 방법 2와 방법 3의 결과가 방법 1에 비해 타당성이 높게 평가되었으며, 80%의 강우기준은 산사태 발생에 대한 사전대응을 위한 기준으로 활용 가능할 것으로 판단되었다.

References

- 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 Disaster Management Institute (2012) Development of the Steep-slope Collapse Judgement System by the GIS base(I), Research Report, NDMI-pr-2012-13-02, 184.
- Yune, C.-Y., Jun K.-J., Kim, K.-S., Kim, G.-H., and 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.
- Choi, Kyeong (1989) Landslide Prediction methods and Prevention, KFRI Research Information Report, No. 27, 1-3.
- Hong, W.-P.O., 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.
- 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.
- BGC Engineering Inc. (2005), *Hydro-meteorological thresholds for landslide initiation and forest operations shutdowns in the Kalum and North Coast forest districts*, BGC Engineering, File No. 17010-30/FR05RNI004, Final Report, Project No. 0275-003-03.
- 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.
- Calcaterra, D., Cappelletti, P., Carta, L., de' Gennaro, M., and Langella, V. (2000) Use of local building stones in the architecture of historical towns: some case histories from Southern Italy, *Proceedings of 2nd International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin*, Elsevier, France, pp. 741-744.
- Caine, N. (1980) Rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows, *Geografiska Annaler Series A, Physical Geography*, Vol. 62, pp. 23-27.
- Cannon, S.H. and Gartner, J.E. (2005) Wildfire-related Debris Flow from a Hazards Perspective, In: Jakob, M., Hungr, O. (eds.), *Debris-flow hazards and related phenomena*, Praxis, Springer Berlin, pp. 363-385.
- Crosta, G. and Frattini, P. (2001) Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow, In *Proceedings 2nd Plinius Conference on Mediterranean Storms*, pp. 463-488.
- Crozier, M.J. (1986) Landslides; causes, consequences and environment, *Journal of the Royal Society of New Zealand*, Vol. 18, No. 3, pp. 343.
- 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.
- Glade, T., Crozier, M.J., and Smith, P. (2000) Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical antecedent daily rainfall model, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 157, No. 8, pp. 1059-1079.
- IPCC (2007) Climate Change, The Physical Science Basis. Contributions of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt B, Tignor M, Miller HL (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996p.
- 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), pp. 137-156.
- Jakob, M., Holm, K., Lange, O., and Schwab, J.W. (2006) Hydro-meteorological thresholds for landslide initiation and forest operation shutdowns on the North coast of British Columbia,

- Landslides*, Vol. 3, pp. 228-238.
- 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, pp. 191-207.
- Lumb, P. (1975) Slope Failures in Hong Kong, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 8, pp. 31-65.
- 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 of the 7th International Congress IAEG*, Vol. 3, pp. 1629-1636.
- 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, *Proceedings 7th international symposium on landslides*, Vol. 201, pp. 97-114.
- Wieczorek, G.F. (1987) Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in Central Santa Cruz Mountains, California, In: Crosta, G., and Wieczorek, G.F. (eds.), *Debris Flows/Avalanches: Processes, Recognition and Mitigation*, Reviews in Engineering Geology, Vol. 7, pp. 23-104.
- 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*, Vol. 1, pp. 217-220.

Received ■ January 15, 2014

Revised ■ January 16, 2014

Accepted ■ March 3, 2014