

## 산지토사재해 발생 예측을 위한 토양우량지수 적용가능성 검토

오채연\*, 전계원, 장창덕, 전병희\*\*

강우인자는 산사태와 같은 산지토사재해를 예측하기 위해서는 중요한 인자가 되며, 경보시스템 개발에도 필수적인 요소가 된다. 강우강도로 계산된 토양우량지수는 산사태나 토석류와 같은 산지토사재해의 경보시스템에 적용될 수 있다. 본 연구에서는 산지에서 토사재해발생을 예측하기 위하여 탱크모델을 이용한 토양우량지수를 도입하여 그 적용가능성을 검토하였다. 2001년에서 2009년 사이에 충북 제천시 일대의 강우자료를 조사하여 탱크모델에 적용하여 각 탱크에서의 저류량을 계산하여 토양우량지수를 결정하였다. 세 개의 탱크 중에서 두 번째 탱크에서의 저류량 (S2)과 전체 탱크에서의 저류량 (TS)을 이용하여 상위 5개 랭크된 이력순위를 분석한 결과, S2에서는 산사태가 발생한 2009년 이력이 3번째 높은 수준으로 기록되며, 산사태 미발생의 2007년 강우는 5번째로 기록되었다. 그리고 TS의 경우 2009년 강우가 2002년에 이어 3번째 높은 수준으로 기록되었으며, 2007년 강우는 9번째로 기록되었다. 이러한 결과를 볼 때 토양우량지수의 이력순위는 산지토사재해의 발생을 잘 반영하는 것으로 나타났으며, 향후 경보시스템에의 적용가능성이 높다고 판단되었다.

**주제어:** 산사태, 강우, 토양우량지수, 탱크모델

### I. 서론

우리나라에서 산지토사재해 예측에 관한 연구는 GIS를 이용한 위험도 판정에 관한 연구들(이승기 등, 2005; 김경태 등, 2005; 조남춘 등, 2006; 김기홍 등, 2008)이 주를 이루어 왔다. 최근 지형인자 뿐만 아니라 산지토사재해의 주요한 유발인자인 강우를 고려한 위험도 분석(윤홍식 외, 2009; 김경석, 2008)에 관한 연구가 주목을 받고 있다.

강우와 토사재해 사이의 관계를 분석하기 위한 연구를 크게 구분하면 토사재해의 발생자료 및 많은 강우자료의 통계적 방법과 사면의 변화를 실제적으로 관측하여 분석하는 방법으로 나눌 수 있다. 또한 토사재해에 대한 정보 및 대피를 위한 방법으로서 작용강우량(Working Rainfall)을 이용한 표준강우 선정, 다변량분석을 통한 표준강우 선정, 탱크모델(Tank Model)을 이용한 표준강우 선정 등의 방법이 있다.

\* 제1저자, \*\* 교신저자.

우리나라에서 많은 연구가 이루어진 것은 작용강우량을 이용한 방법이다(박덕근, 2008; 박덕근, 2009). 작용강우량은 선행강우량(Antecedent Rainfall)과 연속강우량(Continuous Rainfall)을 합한 누적강우량을 의미한다. 연속강우량은 최소 24시간 전후로 강우량이 없을 경우를 시작해서 비가 그칠 때까지의 강우량을 의미하며, 선행강우량은 연속강우가 시작되기 2주 전 동안 발생한 강우를 의미한다. 이렇게 수집된 작용강우량을 X축에 두고 강우강도(Rainfall Intensity, mm/h)를 Y축에 나타내면 토사재해가 발생한 경우와 발생하지 않은 경우를 구분하는 직선인 한계선(Critical Line)을 구할 수 있다. 어떤 강우가 이 한계선에 접근한다면 토사재해 발생위험성이 큰 것으로 보고 경보 및 대피지시를 내릴 수 있다. 이 방법은 비교적 간단하게 적용될 수 있는 장점이 있지만, 대상 유역이나 지역별로 토사재해 이력이 충분히 축적되어 있지 않으면 신뢰성 있는 한계선을 구하기 힘들며, 장마철과 같이 장기간의 비가 내리는 경우 쉽게 초과될 수도 있다는 단점이 있다.

다변량분석을 통한 방법에서는 2003년부터 2009년의 기간에 우리나라에 영향을 끼친 태풍이나 집중호우 중 38개의 경우에 대해 판별분석을 실시하였다(전병희 외, 2010). 이 연구에서는 산사태를 일으킨 강우의 개시시간을 기준으로 1, 2, 6, 12, 48, 60 시간 내의 시간최대강우를 변수로 지정함과 동시에 선행강우의 효과를 평가하기 위해, 산사태 유발 강우의 개시시간을 기준으로 4주, 3주, 2주, 1주, 6일, 5일, 4일, 3일, 2일, 1일 기간 동안의 누적강우를 변수로 이용하였다. 그 결과 총 38개 강우에 대한 판별분석 결과 97.1%의 판별율을 보였다. 이 방법은 대상지역에서의 많은 자료가 축적되어야만 신뢰성 높은 판별식을 얻을 수 있으므로 향후 지속적인 연구가 필요하며, 발령된 경보를 취소하는 시점을 제공해 주지 못한다는 단점을 가지고 있다.

탱크모델을 이용한 표준강우 선정에 대한 국내의 연구사례는 매우 적다. 이창우 등(2009)이 산사태를 대상으로 저류관수법과 탱크모델에 의한 방법을 비교하고 있으나 일본 큐슈지방의 산사태 발생자료를 이용한 연구로서, 우리나라의 강우특성과 지형조건을 고려할 때 적용성에 한계가 있다고 판단된다.

우리나라의 경우 표 1과 같이 강우분석을 통하여 강우강도, 일강우량, 연속강우량 3가지 기준 중 강우가 2가지 이상 충족될 때 산사태 주의보 및 경보 발령하고 있다.

<표 1> 산사태 예·경보 기준

구분	산사태 경보	산사태 주의보
연속강우량	200mm 이상	100-200mm
시우량	30mm 이상	20-30mm
일강우량	150mm 이상	80-150mm

※ 자료: 산림청, 산사태위험지관리시스템(<http://sansatai.forest.go.kr>).

이런 3가지 기준을 이용함에 따라 지자체에서는 실제 예·경보를 발령하는데 어려움이 있으며, 지역적 특성도 전혀 반영되어 있지 않다는 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 산사태를 포함한 산지토사재해의 예·경보시스템을 개발하기 위한 기초적 연구로서 탱크모델을 이용한 토양우량지수의 적용가능성에 대해 검토하는 것을 목적으로 한다.

## II. 이론분석

### 1. 토양우량지수의 개념

강우에 의해 지표면에 공급된 수분 중에서 토양 중의 수분으로서 저장된 양(토양수분량)이 많을수록 산사태의 발생위험성은 높아지는 것으로 알려져 있다. 비가 내리면 일부는 지중에 스며든다. 강한 비에 의해 다량의 비가 지중에 스며들면 토석류나 산사태와 같은 토사재해의 위험성이 증가한다. 또한 지중에 스며든 비는 지하수가 되어 천천히 흘러가므로 토양 중에 포함되어 있는 수분량도 천천히 감소한다. 따라서 몇 일전에 내린 비에 의한 수분량이 영향을 미쳐 토사재해를 발생시키는 일도 있다. 이러한 이유로 비가 내릴 때 보다 비가 그친 직후에 위험성이 높은 것도 경험적으로 알려져 있다.

반면 기상청 시행령에 의한 호우주의보는 12시간 강우량이 80mm 이상 예상될 때이며, 호우경보는 12시간 강우량이 150mm로 예상될 때 발령된다. 이로 인해 장마철과 같이 수일간에 걸쳐 비가 내리거나, 몇 일전에 내린 비(선행강우)에 의해 지반이 약해져 있는 경우에 소량의 비에도 토사재해가 발생하는 경우가 있다. 또한 비가 그친 후에 발생하는 산사태 등에 대한 정확한 발생시기를 예측하는 것은 매우 어렵다.

이렇게 내린 비가 토양 중에 어느 정도 저장되어 있는가를 예상하여, 토사재해의 위험성을 나타낸 것이 토양우량지수이다. 토양우량지수는 강우에 의한 지반의 약해짐을 정량적으로 표시한 것으로서, 지수값이 높을수록 산사태 등의 발생위험성이 크게 된다. 그러나 같은 지수값을 나타낸 경우에도 평소에 강우량이 많은 지역보다 강우량이 적은 지역이 위험도가 높기 때문에 지수값만으로 위험성을 비교할 수는 없다.

따라서 토양우량지수에 이력순위라는 개념이 필요하다. 이것은 지수값의 절대값으로 위험성을 나타내는 것이 아니라, 대상 지역에서의 과거 강우에 의한 지수값과 비교를 하여 현재 강우에 의한 지수값이 과거 지수값의 몇 번째 정도의 높은 값에 상당하는가를 상대적 순위로 나타내는 것이다. 따라서 새로운 값이 과거의 가장 큰 값을 갱신한 경우, 이 값이 새롭게 1위의 순위를 가지게 되며, 이전의 1위는 2위가 된다.

지형, 지질, 식생 등이 산사태 발생에 영향을 주는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 그러나 이러한 자료들을 실측에 근거해 상세하게 조사하는 것은 사실상 불가능하며, 이렇게 불확실성이 존재하는 자료를 적당히 가정하여 이론적으로 발전시켜나가는 것도 실제적으로는 한계를 가질 수밖에 없다. 알 수 없는 것은 알 수 없다는 범주에 넣고 더 이상의 가정을 덧붙이지 않는 것이 합리적이다 라고 할 수 있

으며, 이러한 시각에서 토양오염지수를 다룰 필요가 있다.

## 2. 탱크모델의 구성과 계산

3단 탱크모델에서는 위로부터 제 1 탱크, 제 2 탱크, 제 3 탱크로 하여, 각각의 바닥에 있는 침투공 으로부터 침투가 발생한다. 제 1 탱크에서의 유출은 표면유출에 해당되고, 제 2 탱크에서의 유출은 표층침투유출, 제 3 탱크에서의 유출은 지하수 유출에 해당된다. 시간이 경과함에 따라 강우는 아래에 있는 탱크로 이동하며, 단위 시간당 이동량은 탱크내의 저류량(수심)에 비례한다. 또한 약한 비는 모두 침투되지만, 강한 비는 가로 벽에 붙어있는 구멍을 통해서도 유출된다.

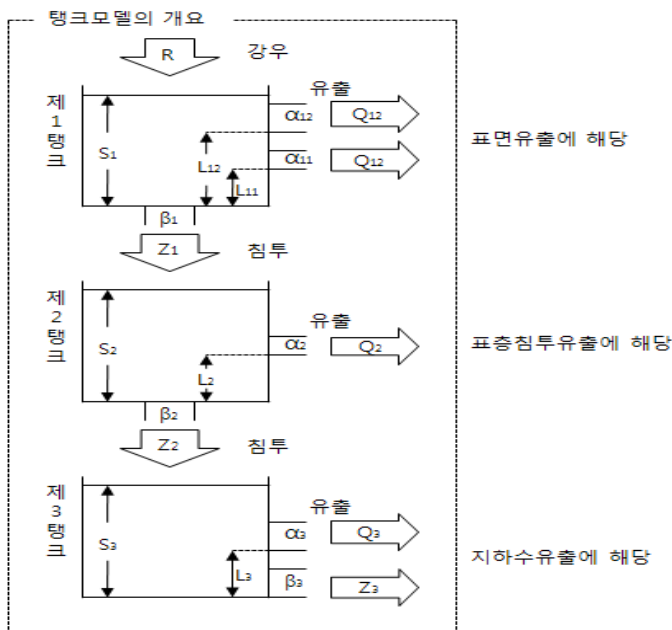
어떤 시간  $t$ 와  $\Delta t$  만큼 경과한 시간을  $t+\Delta t$  라고 할 때, 탱크모델에서 각 탱크내의 저류량( $S$ )는 아래 식과 같다.

$$S_1(t+\Delta t) = S_1(t) - [Q_{11}(t) + Q_{12}(t) + Z_1(t)] + R(t)$$

$$S_2(t+\Delta t) = S_2(t) - [Q_2(t) + Z_2(t)] + Z_1$$

$$S_3(t+\Delta t) = S_3(t) - [Q_3(t) + Z_3(t)] + Z_2$$

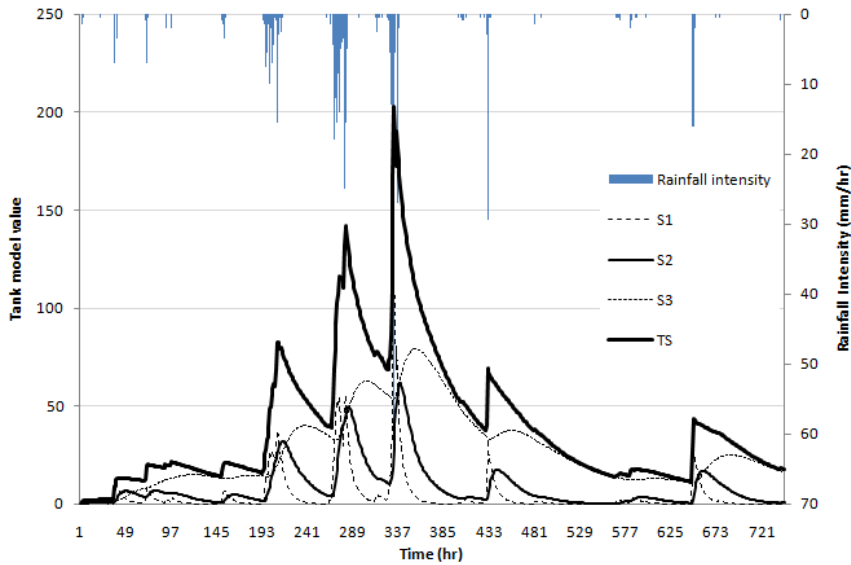
여기서 각 탱크에서 저류량의 합( $S_1(t+\Delta t) + S_2(t+\Delta t) + S_3(t+\Delta t)$ )을 토양오염지수로 한다. 이 때 토양오염지수는 단위를 가지지 않지만 mm에 상당한다고 볼 수 있다.



<그림 1> 탱크모델의 개념도

### III. 결과 및 고찰

연구대상으로서 비교적 최근에 산지토사재해가 발생한 충청북도 제천시지역을 선정하였다. 2009년 7월 14일 제천시 일대를 지나간 집중호우로 인해 제천시 일대에 다수의 토석류 피해가 발생하였다. 연구지역인 제천 시내에는 6곳의 기상관측소가 있으며, 그중 백운관측소에서 얻어진 강우자료를 그림 2에 나타내었다. 현지주민의 증언에 의하면 토석류가 집중적으로 발생한 것은 7월 14일 저녁 9시경이며, 이전에 2-3일 간격으로 2회의 사전강우가 있었으며, 세 번째 강우에서 일시적으로 강한 시간강우에 의해 다량의 토석류가 발생한 것으로 생각되었다. 백운관측소에서의 시간 최대 강우는 64mm/hr였으며, 누적강우는 455mm에 해당되었다.



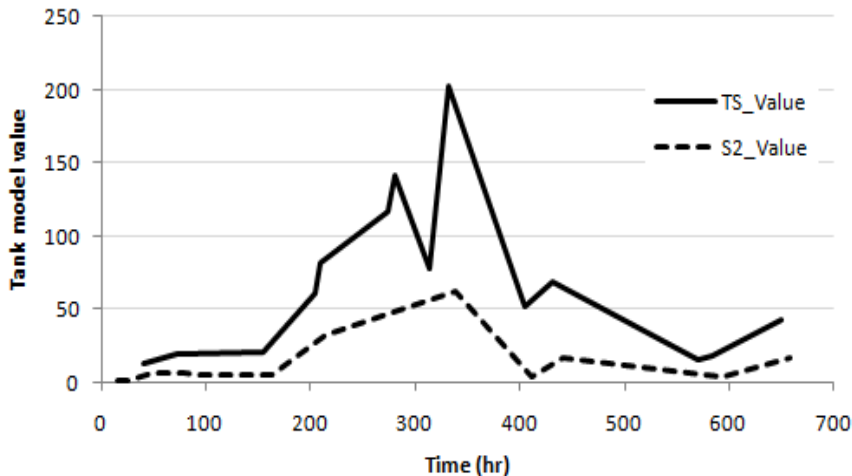
〈그림 2〉 2009년 7월에 제천시 백운관측소에 기록된 강우강도와 각 탱크의 저류량

〈그림 2〉에 백운관측소에서 기록된 강우강도(mm/hr)를 나타내었다. 그래프의 가로축은 2009년 7월 1일 0시를 기준으로 하여 7월 31일 24시까지 1시간 단위로 나타낸 것이다. 그래프의 상단에는 강우강도를 나타낸 것이며, 하단에는 첫 번째 탱크에서의 저류량(S1), 두 번째 탱크에서의 저류량(S2), 세 번째 탱크에서의 저류량(S3)과 각 탱크에서의 저류량의 합(TS)을 나타내었다. 여기서 TS가 토양우량지수에 해당되며, 표층에서의 저류량을 나타내는 S2를 집중적으로 검토하고자 한다.

가로축의 시간에서 100시간이전에는 시간당 10mm이하의 약한 강우가 2-3일 간격으로 내리면서 S2 값은 큰 누적을 보이지 않으나 세 번째 탱크에서 포화가 시작되어 TS는 작은 값으로 누적되기 시작

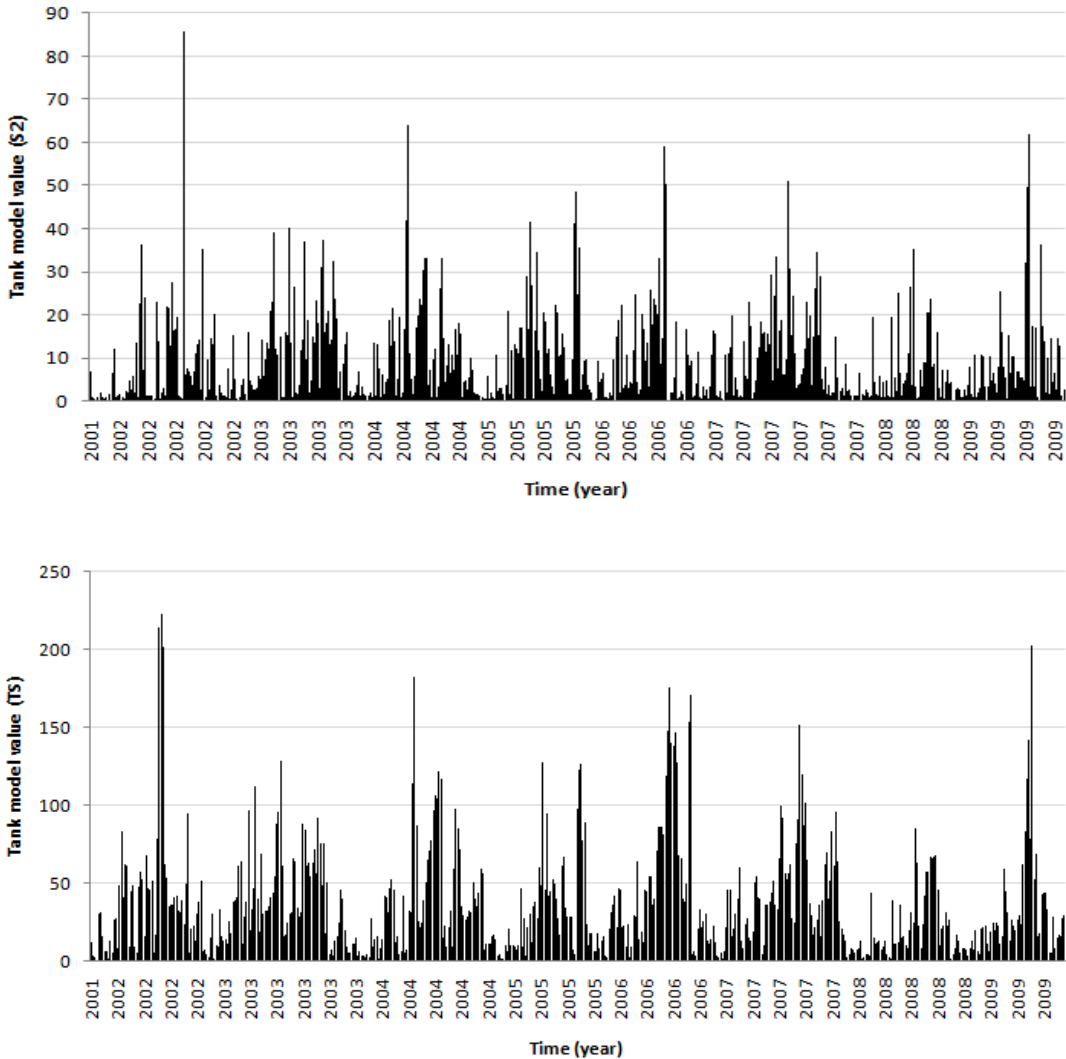
하였다. 이후 190 시간대에 3일 간격으로 강한 강우가 내려 S2와 TS가 큰 폭으로 증가하기 시작하였다. TS기준으로 보면, 200시간에서 최고치를 나타낸 후 3일 후 다시 최고치를 갱신하고 다시 3일 뒤 다시 최고치를 나타내면서 337시간에서 대량의 토석류가 발생하였다. 이후 433시간에 다시 시간당 30mm의 비가 오지만 TS값은 크게 상승하지는 않아 새로운 기록갱신은 보이지 않았다. 이렇게 토양우량지수(TS)는 선행강우에 의한 토양의 수분포화를 잘 반영하여 산사태나 토석류와 같은 산지토사재해의 발생을 잘 예측할 수 있을 것으로 판단되었다.

토양우량지수는 이력순위를 통해서 위험도를 평가한다. 그림 3은 그림 2에서 나타낸 2009년 7월 자료에서 S2와 TS의 피크점을 추출하여 이력순위를 정리한 것이다. 그래프의 가로축은 그림 2와 같이 2009년 7월 1일 0시를 기준으로 하여 7월 31일 24시까지 1시간 단위로 나타낸 것이다. TS와 S2는 유사한 경향을 가지면서 변화하고 있으며, 토석류 발생 시각인 337시간에서 최고이력을 보이고 있다. 제천지역에서 S2는 60이상에서 TS는 200이상에서 토석류가 발생하였다. S2는 비교적 기록이 없는 반면, 모든 탱크의 저류량의 합인 TS는 강우강도의 변화에 대해 민감하게 영향을 받는 것으로 보였다. 이러한 특징은 강우의 변화를 잘 반영한다는 장점이 있지만, 이력순위 평가 시 과도한 이력갱신의 가능성이 있으므로 주의가 필요하다고 판단되었다. 좀 더 많은 사례연구가 필요하겠지만, 산지토사재해의 발생시점 예측에는 TS와 S2가 유사하게 유효하다고 판단되었다. 그러나 비가 그친 후 위험한 상태를 벗어났다고 판단되는 기준은 3개의 탱크 중 가운데에 있는 탱크의 저류량(S2)이 피크를 벗어나면 토사재해의 위험성이 감소한다고 생각된다.



<그림 3> 2009년 7월의 TS와 S2의 이력순위

이러한 모델을 이용하여 2001년부터 2009년까지의 강우자료로부터 두 번째 탱크에서의 저류량 값 (S2)과 전체적인 저류량(TS)의 변화를 구하여 <그림 4>에 나타내었다.



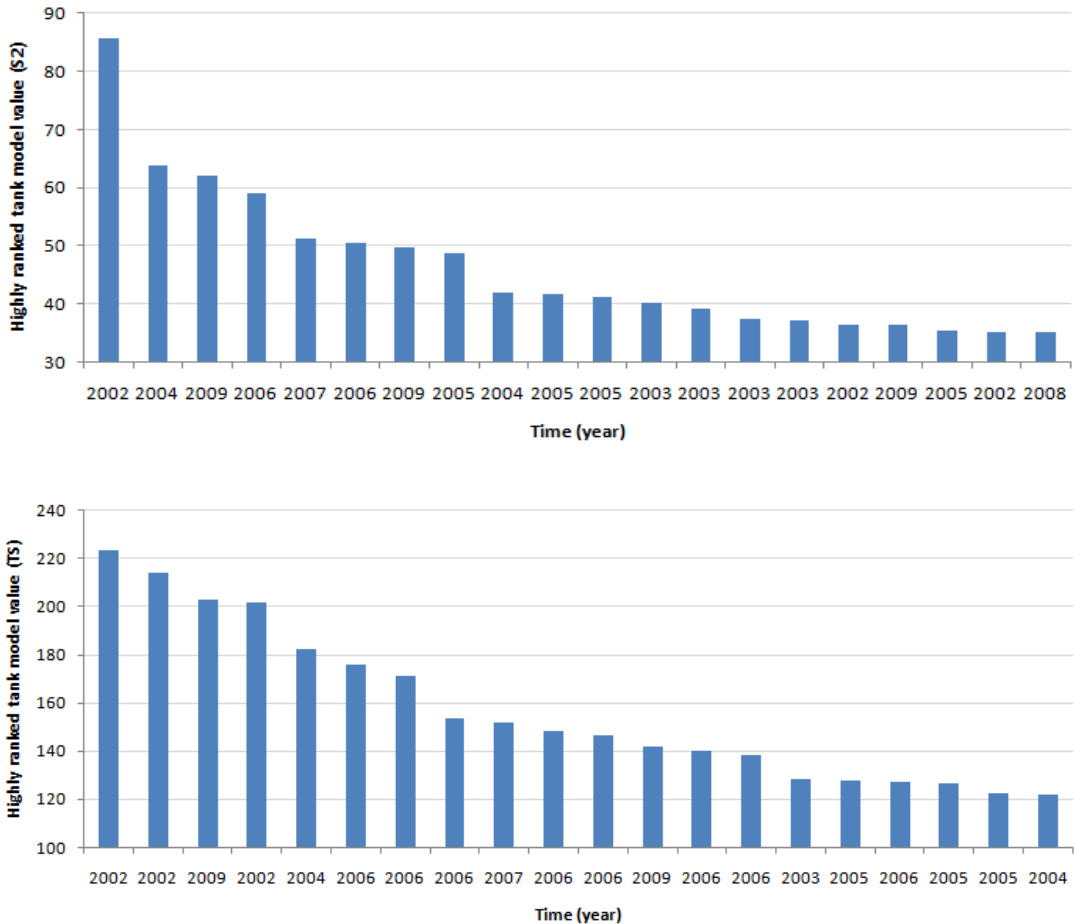
<그림 4> 2001년부터 2009년까지 S2(위)와 TS(아래)의 변화

전반적으로 높은 피크값을 보인 것은 2002년, 2004년, 2006년, 2009년으로 보인다. 이러한 저류량의 이력순위를 이용하여 산지토사재해의 발생 위험도를 예측할 수 있다. 2002년은 태풍 루사의 영향으로 매우 큰 수치를 보이고 있으며, 이 시기에 충북지역은 많은 태풍피해를 입은 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 S2의 경우 80이상의 높은 값을 가지는 단일 피크를 보였음에 반해, TS는 200이상의 값이 연속하여 나타나고 있었다. 이것은 앞에서 서술한 것과 같이 동일한 하나의 강우 이벤트임에도 TS가 강우의 변화를 좀 더 세밀하게 반영한 결과로 판단되었다.

2004년과 2006년의 피해상황에 대해서는 좀 더 자세한 조사를 할 필요가 있다. 2007년 8월에도 시간당 44mm, 누적강우 334mm의 강우가 기록되어 있어 산사태경보발령 조건에 해당되나, 이 강우에

대한 피해는 없는 것으로 조사되었다.

2001년부터 2009년까지의 토양오염지수 중 상위 20개의 이력을 정리하여 그림 5에 나타내었다. 그림의 가로축은 발생한 해당년도를 나타내며, 세로축은 S2와 전체의 저류량을 나타내어서 토양오염지수를 표시하였다. 여기에서는 2009년의 발생이력과 2007년의 미발생 이력이 어떻게 반영되어 나타나는가를 검토하고자 한다. 먼저 S2에서는 2009년 이력이 3번째 높은 수준으로 기록되며, 2007년 경우는 5번째로 기록되었다. 그리고 TS의 경우 2009년 경우가 2002년에 이어 3번째 높은 수준으로 기록되었으며, 2007년 경우는 9번째로 기록되었다. 이러한 결과를 볼 때 토양오염지수의 이력순위를 통한 산지토사재해의 위험성 평가는 유효하다고 판단되었다. 그리고 이력순위가 높을수록 토사재해 발생의 위험도가 높아지므로 각 지역별로 위험도를 평가할 수 있다.



<그림 5> 2001년부터 2009년까지 상위 20개의 S2(위)와 TS(아래)의 분포

## IV. 결론

본 연구에서는 토양우량지수를 이용한 산지토사재해의 발생위험도 예측의 적용가능성에 대해 검토해 보았다. 기존의 산지토사재해의 발생가능성을 평가할 때 지형적 조건과 토양조건 등이 주된 영향인자로서 고려되었으나, 강우조건에 대한 정량적 고려는 적었다. 본 연구에서는 그런 한계를 극복하고자 하였으며, 지리정보시스템에 토양우량지수를 도입하여 수문상황을 고려한 산지토사재해 위험도 예측에 활용될 수 있다고 예상된다. 또한 토양우량지수는 선행강우에 의한 지반의 연약화를 정량적으로 평가할 수 있기 때문에 적절한 시간에 토사재해의 위험도를 발표할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 토양우량지수에 이용되는 해석우량이 상당한 크기의 격자단위의 정보이므로 토양우량지수도 면적으로 이 이상 상세한 정보를 만들 수는 없다. 즉, 각각의 비탈면 등의 위험성을 나타내는 것은 아니다. 따라서 토양우량지수와 기존의 지리정보를 동시에 이용한 위험도 평가가 필요하다고 생각된다. 본 연구에서 아직 많은 사례연구가 이루어지지 않는 않지만, 적용가능성은 있다고 판단되었으며 향후에 더욱 세밀한 자료조사와 풍부한 사례연구를 통해 우리나라의 특성에 맞는 지수개발을 하고자 한다.

## 참고문헌

- 김경석. 2008. 토석류 발생 지형과 유발 강우 특성 분석. 대한토목학회지. 28(5C): 263-271.
- 김경태·정성관·박준훈·오정학. 2005. GIS 및 RS기법을 활용한 산사태 취약성 평가. 한국지리정보학회지. 8(1): 75-87.
- 김기홍·원상연·윤준희·송영선. 2008. 강릉지역 국도의 재해위험성 평가. 한국지형공간정보학회지. 16(4): 33-39.
- 박덕근. 2009. 한계선 설정 국내지침 개발 연구. 국립방재연구소.
- 박덕근. 2008. 강우자료를 활용한 예경보시스템 국내 적용성 연구. 국립방재연구소.
- 윤홍식·이동하·서용철. 2009. GIS 기법 및 발생자료 분석을 이용한 산사태 위험지도 작성. 한국지리정보학회지. 12(4): 59-73.
- 이승기·이병두·정주상. 2005. GIS를 이용한 산사태 위험지 판정 모델의 개발. 한국지리정보학회지. 8(4): 81-90.
- 이창우·윤호중·우충식. 2009. Tank Model을 이용한 산지토사재해 경계피난 기준우량 산정법 개발 및 검토. 한국임학회지. 98(3): 272-278.
- 전병희·김남균. 2010. 강우자료의 통계적 해석을 통한 산사태 발생 분류. 한국위기관리논집. 6(3): 103-112.
- 조남춘·최철웅·전성우·한경수. 2006. RS와 GIS 기법을 활용한 산사태 위험성의 검증. 한국지리정보학

회지. 9(2): 54-66.

---

**吳采妍:** 강원대학교에서 공학석사 학위(논문제목 : “GIS기법을 활용한 산악지역 돌발홍수 경보발령 기준 설정에 관한 연구”, 2007년 2월)를 취득하고 현재 강원대학교 방재전문대학원에서 박사과정을 수료하였다. 산지재해, 토석류재해, 피해예측지도(Hazard map), GIS 분야에 관심을 두고 연구 중이다(cyoh@kangwon.ac.kr).

**全桂元:** 충북대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 홍수유출과 수질예측을 위한 Web기반 시스템의 개발, 2004. 2), 현재 강원대학교 방재전문대학원에서 부교수로 재직중이다. 관심분야는 풍수해 방재, 산지재해 방재, 자연재해관리 등이며, 자연재해란 무엇인가?(공저, 2008) 등의 저서와 주요 논문으로 “산악지역돌발홍수 기준우량 결정에 관한 기초연구(2010)”, “지상 LiDAR를 이용한 토석류 발생량 추정에 관한 기초연구(2010)” 등이 있다(kwjun@kangwon.ac.kr).

**張昌德:** 충북대학교에서 수공학석사 학위(논문제목 : “충상 해안대수층에서 해수침투 특성에 대한 정성적 고찰”, 2008년 2월)를 취득하고 현재 강원대학교 방재전문대학원에서 박사과정으로 재학중에 있다. 해안재해, 토석류재해, 재해 수치모형 분야에 관심을 두고 연구 중이다(cdjang79@kangwon.ac.kr).

**田炳熙:** 동경공업대학에서 “Study on Porous Carrier and Membrane Hybrid Process for Nitrogen Removal in Wastewater”로 공학박사학위를 취득하였으며 (2000.3), 현재는 강원대학교 삼척캠퍼스 소방방재학부 조교수로 재직중이다. 주 연구분야는 폐턴분류를 이용한 수처리장치 고장진단과 산지재해 분야이며, 현재 방재학회 회원 등으로 활동 중이다(bhjun@kangwon.ac.kr).

투 고 일: 2011년 05월 14일

수 정 일: 2011년 06월 05일

게재확정일: 2011년 06월 10일

## Verifying of Soil Water Index for Sediment Disaster Triggering in Mountainous Area

Chae Yeon Oh, Kye Won Jun, Chang Deok Jang, Byong Hee Jun

The rainfall factor is an important subject for a better understanding of landslide activity and is essential for developing warning system. The soil water index has been identified as one of the essential variable in sediment disaster such landslide and debris flow warning system. In this paper, we conducted the verifying of the soil water index, which was used for predicting the triggering time of sediment disaster in mountainous area. We investigated the adeption possibility of tank model for validation of soil water index. We calculated storage amount rainfall by tank model with rainfall data obtained from 2001 to 2009 in Jecheon Area. Using the tank model, the storage amounts in three tanks were calculated in time series and the second tank storage amount (S2) and total storage amount (TS) were applied in verifying. The high ranked S2 and TS showed good matching for the debris flow occurrence. These results show the possibility of prediction tool for the landslide occurring.

**Key words:** landslide, rainfall, soil Water index, tank model