

## 淺層 山沙汰 발생에서의 물리 모델의 적용

김재수<sup>1)</sup> · 김남춘<sup>2)</sup> · 이현호<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>충북대학교 산림과학부 · <sup>2)</sup>단국대학교 생물자원과학부 · <sup>3)</sup>영남대학교 산림자원학과

## Application of a Physically Based Model to Shallow landsliding

Kim, Je-Su<sup>1)</sup>, Kim, Nam-Choon<sup>2)</sup> and Lee, Heon-Ho<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>School of Forest Resources, Chungbuk Univ., <sup>2)</sup>School of Bio-Resource Science,  
<sup>3)</sup>Dept. Forest Resources, Yeungnam Univ.

### ABSTRACT

Topography influences shallow landslide initiation through both concentration of subsurface flow and the gradient on slope stability. A model for the topographic influence on shallow landslide initiation developed by Montgomery et al (1994) is applied to 24 places with similar terrain and subsurface flow. The criterion of landslide prone areas developed by Korea Forestry Administration (1998) is likely to misinterpreted under the condition of heavy rainfall.

Soil saturation can be predicted by this model. This relative soil saturation can be used to analyze the stability of each topographic point in the case of cohesionless soils with spatially constant thickness and saturated conductivity. The three different stages of steady state rainfall predicting to cause instability in each topographic points provide a good measure of shallow landsliding possibility.

### 1. 서론

집중호우시 갑작스럽게 산지사면이 붕괴되면, 대부분 토석류를 유발하게 되며 이것은 유역 하단부에 재산과 인명에 대한 심각한 재해를 일으킨다. 토석류는 경사가 급한 유로의 기암 부위까지 토사를 휩쓸게 되며 하류지역에 토사를 운반하게 된다. 우리나라에서는 자연재해 중에서 천층 산사태와 토석류에 의한 인명재해가 가장 높다.

사면 모양이 포화되면서 모관력이 급격히 감소하면서 사면의 안전율도 감소한다. 또한 지표 유출수가 집중되어 구곡침식과 함께 사면파괴가 일어난다. 이러한 사면파괴의 물리적 특성을 반영하여 산사태 위험지를 도화하는 것이 최근의

연구 동향이다(이수곤, 1999; Pack, 1997).

본 논문에서는 기존의 산림청 산사태 위험지 판정 기준을 근간으로 새로이 제안된 물리 모델의 적용성에 대하여 검토하고자 한다. 산림청의 판정 기준은 이미 발생한 산사태지의 입지 상황을 통계적으로 분석하는 방법이며, 산사태 관련자료가 보다 많이 집약될수록 위험지의 판정에 유용한 도구라고 평가받고 있다. 이에 대하여 산사태 발생의 기작을 바탕으로 지형분석을 통하여 산지사면의 포화대를 찾아내고, 이러한 포화대를 산사태 위험지역으로 판정하는 물리적 접근법(Anbalagan, 1992; Montgomery, 1994; Montgomery et al, 1994; Pack, 1997)에 대하여 연구가 진행되고 있다. 산지 이용이 증가하면서

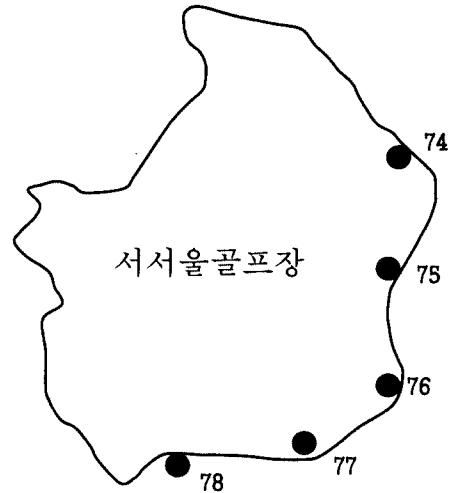


그림 1. 1998년 8월 5일 비구름대 위성 사진과 서서울 골프장의 한전 철탑 개략 위치도

하류지역에 대한 영향에 대하여 객관적인 평가 방법을 구명할 필요가 있다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 조사지역

경기 북부에서는 많은 산사태가 발생하였고, 파주시 광탄면 용미리 산 79-1, 산 80-4내에서도 산사태가 발생하였다. 이 지역 내에 있는 한국전력의 철탑은 5기이다(그림 1). 각 철탑의 주변부가 산사태의 시발점이 되었다. 인공구조물의 설치에 의하여, 집수 유역이 변경되었으며, 유수의 집중을 방지하는 배수로의 불량으로 산사태가 인공 구조물에서 시발된 곳도 있었다.

#### 1) 조사지역의 집중호우

낮에는 구름이 끼다가 밤만 되면 집중호우가 쏟아지며, 또 하루씩 거르면서 좁은 지역에 수백mm의 폭우를 퍼붓고 빠지는 게릴라성 호우가 1998년 7월 하순부터 8월 중순까지 지속되었다. 폭우가 밤에 집중되는 것은 비구름과 공기간의

온도차로 강력한 비구름대가 밤중에 형성되기 때문에 낮에는 대기가 안정된 상태를 보이지만 밤에는 온도가 쉽게 떨어지는 공기와 달리 상대적으로 온도가 높은 비구름은 활발한 대류작용과 함께 복사열을 흡수하는 과정을 반복하면서 세력을 키워 대류성 폭우를 뿌리게 되었다. 1998년 8월 5일, 6일에 집중호우가 산발적으로 경기 북부에 내렸다. 그림 1의 위성사진은 8월 5일 밤부터 6일 오전까지 서울, 경기 북부지방에 게릴라성 집중호우를 보여 주고 있다. 이에 대한 비구름대의 시간대별 상황 사진에서 한반도 중간지역에 겹게 나타난 부분이 비구름대로 8월5일 오후 11시쯤 발달하기 시작, 6일 오전 3시부터 오전 8시까지 커지면서 폭우를 쏟아 부은 뒤 오전 10시쯤 갑자기 소멸되었다. 특히 경기도 북·서부 지방을 중심으로 500 mm 이상의 집중호우가 내려 170여명이 사망하거나 실종되었다(조선일보, 1998년 8월 7일). 전국적으로는 집중호우로 인하여 300명 이상의 인명 피해와 18만명에 달하는 이재민 그리고 1조5천억 원에 이르는 재산피해가 있었다. 일강우량 500 mm가 넘는 상황에서 이에 따른 자연적인 피해와 산

지사면을 개발하면서 안전공사의 부실에 의한 인위적인 재해도 같이 수반되고 있다(한국수자원학회, 1998; 이수근, 1999).

표 1. 경기 북부 주요 실측 일강수량  
(1998. 8. 4-6. 기상청 자동기상관측월보 8월)

지역	8월4일	8월5일	8월6일	계
고양	51.0	37.5	264.0	352.5
금촌	61.5	97.0	405.0	563.5
포천	94.5	135.0	174.0	403.5
광적	68.5	191.5	236.5	496.5
의정부	81.5	45.5	400.0	527.0

표 1에서 보는 바와 같이 피해 지역 인근 지역의 3일간 강수량이 350 - 530 mm로 많은 양을 보이고 있으며, 인접 지역임에도 불구하고 일자별로는 상당히 다른 양상을 보이고 있다. 조사 지역의 강수량은 최대 시간 강우량은 8월 6일 02시 - 03시에 110 mm, 2시간 최대 강우량은 189 mm, 일최대 강우량은 437 mm이었다(한국수자원학회, 1998).

## 2. 조사방법

14개소의 산사태 지발 지점에 대한 특성과 지표 형상이 비슷한 10개소의 특성을 조사하였다. 조사한 지점에 대하여 산림청의 위험지 판정기준(산림청, 1998)으로 평가하였고, Montgomery et al(1994)이 제안한 방법을 고려하여 산사태 발생위험지역을 평가하였다.

조사내용으로는 산사태 발생유무, 발생위치, 사면경사길이, 모암의 종류, 경사위치, 임상, 사면형, 토심, 사면경사도이었다. 철탑 주변부의 산사태에 대하여 자세히 기술하였다.

## 3. 적용 모델

본 연구에서 적용한 모델은 O'Loughlin(1986)의 수문 모델에 바탕을 두고 있다(Montgomery et al, 1994). 이 수문 모델은 집수면적, 토양투수도(soil transmissivity), 국지 사면경사를 바탕

으로 하여 일정한 강우시에 사면의 위치에 따른 토양의 수분 포화도를 나타낸 것이다. 이 모델에서는 소유역을 잘게 분할하여 지형요소(topographic element) 단위로 계산하고 있다. 증발산과 침층지하수로 되는 유출 성분을 제외한 순강우량(net rainfall)은 천층지하수를 형성한다. 모델 구성은 습윤지수(wetness index) W를 계산하는 과정으로 압축된다.

$$W = q a/b T \sin \theta \quad \text{식 (1)}$$

여기에서, q; 순강우량, a; 집수면적, b; 지형요소별 하단 길이, T; 포화시 토양투수도,  $\theta$ ; 국지 사면경사도이다. 습윤지수가 1이상이면 포화 지상류가 흐르게 된다. 이러한 곳은 붕괴위험성이 있게 된다. 토양투수도가 토양 깊이별로 일정하고, 유역내의 토층두께가 일정하다고 하면 습윤지수는 다음과 같다.

$$W = (\rho_s/\rho_w)[1 - (\tan \theta / \tan \phi)] \quad \text{식 (2)}$$

여기에서,  $\rho_s$ ; 젖은 상태의 토양 비중,  $\rho_w$ ; 물의 비중,  $\phi$ ; 안식각이다.

식 (1), 식 (2)로부터 단위길이당 집수면적 a/b이 식 (3) 이상인 곳에서는 불안정하다고 판단하게 된다.

$$a/b \geq (T/q) \sin \theta (\rho_s/\rho_w)[1 - (\tan \theta / \tan \phi)] \quad \text{식 (3)}$$

식(3)의 형태에는 지형에 관한 변수(a/b,  $\sin \theta$  와  $\tan \theta$ ), 수문변수(T, q)와 토양에 관한 변수( $\tan \theta$  and  $\rho_s$ )등이 기술되어 있다. 식(3)에서는 유역내의 토양깊이가 공간적으로 일정하다고 기술되어 있지는 않지만, 토양투수도가 변하지 않는 것으로 가정하였다.

각 지형요소의 안전성을 4단계로 정의하였다. 무조건 불안정, 불안정, 안정, 무조건 안정으로 구분하였다. 무조건 안정은 토양이 포화되더라도 안정된 것으로 사면 경사 20° 이하 지역이다. 즉  $\tan \theta \leq \tan \phi [1 - (\rho_w/\rho_s)]$ 인 지역이다. 식 (3)에 의하여 구분되는 지역을 불안정하다고 판정하며, 안정은 집수면적이 상대적으로 적은 곳이다. 무조건 불안정은 토양이 건조할지라도 위험하다고 판단되는 경사 45° 이상 지역이다. 이 지역은  $\tan \theta > \tan \phi$ 인 곳으로 표면에 토양이 없이 암반이 노출된 지역이다.

### Ⅲ. 결과 및 고찰

#### 1. 지점별 산사태 발생 원인 및 피해 상황 검토

철탑의 위치를 개략적으로 그림 1에 나타내었다. 철탑 주변부의 지형, 경사, 암반 위의 토층 상태, 지질학적 자료, 기암 특성, 수문학적 특성, 식생 상황에 대하여 조사하였다.

##### 1) 철탑 No 74 (S01, 표 2 참조)

산사태 규모는 깊이 0.6 m, 폭 11 m, 길이는 16 m이었다. 골프장 내 돌림 배수로를 파괴하고, 산사태 퇴적물이 골프장까지 퍼져 있었다. 가장 심하게 붕괴된 지점의 깊이는 0.83 m이었다. 발생지점의 사면 경사각은 상부 36도, 하부 39도이었다. 삼출수가 있어서 물이 집중되었음을 알 수 있다. 배수는 비교적 불완전하고, 계곡이 아닌 노출된 사면에서 산사태가 발생하였다. 인근 지역에서 과거 발생한 산사태 흔적을 볼 수 있으나, 이 지점에서는 산사태가 발생한 흔적은 없다. 하층식생이 울밀하지 않다. 첨부 도면에서 알 수 있듯이 지형의 형상을 보면 철탑 No. 74로부터 흐르는 물이 산사태 발생시작점을 통과하지 않는다고 판단된다. 이 지점의 산사태는 철탑 No. 74와는 관계가 적음을 알 수 있다.

##### 2) 철탑 No 75 (S10)

산사태 규모는 깊이 1.2 m, 폭 6 m, 길이는 7 m이었다. 골프장 내 돌림 배수로를 파괴하고, 산사태 퇴적물이 산림 내 도로를 넘어 골프장까지 퍼져 있었다. 발생지점의 사면 경사각은 상부 29도이다. 산사태 흔적지에는 암반이 보이지 않는다. 점토질이 많은 불투수층이 있었다. 삼출수가 있어서 물이 집중되었음을 알 수 있다. 사면은 복합사면으로 산사태 발생위험도가 높은 지역이다. 배수는 비교적 불완전하고, 계곡 부위에서 산사태가 발생하였다. 하층식생은 울밀하다. 지형의 형상을 보면 철탑 No. 75로부터 흐르는 물이 산사태 발생시작점을 통과하지 않는다고 판단된다. 철탑 No. 75와 산사태 발생 시작점 사이는 평행사면으로 물이 집중되

지 않고 확산되었다고 생각된다. 우측 계곡의 집중된 물이 산사태를 일으켰다고 생각된다. 이 지점의 산사태는 철탑 No. 75와는 관계가 적음을 알 수 있다.

##### 3) 철탑 No 76 (S10)

산사태 규모는 깊이 1.0 m, 폭 10 m, 길이는 12 m이었다. 골프장 산림내 도로의 위측 단면에서 붕괴하여 도로를 차단하고 산사태 퇴적물이 하부 사면까지 퍼져 있었다. 발생지점의 사면 경사각은 상부 44도 이었다. 산사태 흔적지의 상부에 삼출수가 있어서 물이 집중되어 파이핑 현상을 볼 수 있었다. 배수는 비교적 불완전하고, 계곡이 아닌 노출된 사면에서 산사태가 발생하였다. 하층식생이 울밀하였다. 지형의 형상을 보면 평행사면이므로 철탑 No. 76으로부터 흐르는 물이 산사태 발생시작점을 통과한다고 판단된다. 이 지점의 산사태는 철탑 No. 76과 17 m 이격되고 그 사이 하층식생이 울밀하여 물이 집중되지 않고 확산되어 산사태의 발생에 직접적 원인으로 생각되지 않는다. 오히려 도로의 건설로 인한 지중수의 차단에 의하여 물이 정상적으로 배수되지 않은 것이 산사태 붕괴의 주된 원인으로 생각된다. 철탑 No. 76은 산사태와는 관계가 적음을 알 수 있다.

##### 4) 철탑 No 77 (S14, S15)

철탑 No 77의 주변부는 2개의 산사태가 발생하였다. 하나(S14)는 철탑 바로 하단부에서 발생하였고, 다른 하나(S15)는 1991년도 산사태 발생지를 복구한 인접부에서 발생하였다.

S14의 산사태 규모는 깊이 1.6 m, 폭 13 m이었다. S14은 토석류로 발전하여 골프장 내 돌림 배수로를 파괴하고, 산사태 퇴적물이 산림 내 도로를 넘어 골프장까지 퍼져 있었다. 발생지점의 사면 경사각은 상부 29도이다. 산사태 흔적지에는 명확한 불투수층이 보이지 않으나, 철탑공사시 성토된 것을 확인할 수 있었다. 산사태 시작점의 성토된 깊이는 0.6 m이고 원지반이 습윤한 상태로 각기 다른 토층을 구성하고 있었다. 또한 성토 공사시 벌도목을 제거하

지 않고 그 위에 성토하므로서 낙엽층과 벌도 목이 혼재한 위에 성토하고 있었다. 성토 공사 시에는 반드시 벌도목과 낙엽낙지를 제거하여 성토면의 침하와 활락을 방지하여야 한다. 이 층과 층 사이에 물이 쉽게 침투하여 산사태 발생의 시발점이 되었다고 생각된다. 철탑 밑의 하층식생은 억새와 잔디를 식재하여 울밀하다.

철탑 No. 77 주위의 91년도 산사태 복구 공사의 일환으로 만든 돌림 배수로에 의하여 좌단부 사면으로 물을 확산시키려 하였으나 배수로의 용량이 작고, 관리가 되지 않아 부식질과 토사에 의하여 매몰되어 그 기능을 상실하고 있었다. 오히려 월류되면서 물이 상대적으로 낮은 산사태 S14 시발점으로 집중적으로 모일 수 있도록 하였고, 돌림배수구가 이 부분에서 파괴됨에 따라 가속적으로 피해를 주게 되었다.

S14시발점으로부터 50 m 하단부에는 좌측의 자연사면으로부터의 산사태 발생 흔적을 확인할 수 있었다. 이 지점으로부터가 자연적인 산사태의 시발점으로 생각된다. 따라서 현 철탑 No. 77의 하단부에서 아래로 55 m 지점까지는 철탑설치 공사로 인한 인위적인 피해로 판단된다. 이에 대한 추가 붕괴량은  $13 \times 1.6 \times 55 \times 0.5 = 572.0 \text{ m}^3$ 이라고 판단된다.

S15 산사태의 규모는 길이 0.6 m, 폭 6 m, 길이는 15 m이었다. 발생지점의 사면 경사각은 상부가 38도 이었다. S14와 마찬가지로 성토한 부분이 원래의 지반을 미끄러짐 면으로 하여 산사태가 발생하였다. 성토한 사면을 피복한 식생은 죽제비 싸리로 울밀하다. 인접한 자연 식생인 신갈, 진달래가 울밀하였다. 인공식생과 자연식생의 경계 부위에서 S15 산사태가 발생하였다. 죽제비 싸리는 천근성으로 땅을 긴박하는 힘이 약하고, 깊게 뿌리를 뻗지 못하므로 성토면과 원지반을 연결하는 역할을 하지 못하고 있다. 이에 대한 토사 붕괴량은  $6 \times 0.6 \times 15 \times 0.5 = 27.0 \text{ m}^3$ 이라고 추정된다. 1991년도 산사태 복구 대책으로 콘크리트 옹벽을 설치하였다. 이번 산사태에 의하여 옹벽의 어깨 부분이 노출되었고, 또한 옹벽 하단부인 기초까지 심하게 노출되어 이를 보강하지 않는다면 옹벽 자체의

붕괴는 물론 윗 부분의 토사도 붕괴되어 큰 피해가 예상된다. 무너진 토사는 옹벽 하단부의 침식된 토사와 함께 쓸려 내려와서 골프장의 잔디에도 피해를 주었다.

## 2. 산림청 기준의 산사태 발생 위험지 판정

조사 지역 주변에는 용미리 공원 묘지 방향의 사면은 물론 서서울 골프장 내의 철탑이 없는 곳에도 산사태가 많이 발생하였다. 이 곳의 비교적 경사가 급한 지역이며, 토층이 얇아서 기암 또는 불투수층을 경계로 발생하는 淺層산사태로 분류되었다. 산림사면의 식생을 보면 상층림으로는 참나무림이 주종을 이루고, 하층 부위에는 진달래의 관목이 차지하고 있었다. 관목이 밀생한 지역에서는 산사태는 발생하지 않았으며, 상층림만이 있는 곳에서는 쉽게 산사태가 발생하는 것을 볼 수 있었다.

사면경사 길이, 모암, 경사위치, 임상, 사면형, 토심, 경사도의 7개 지형인자에 대한 가중치를 표 2에 나타내었다. 가중치 합계는 산사태 발생하지 않은 곳은 26 - 70의 범위, 산사태가 발생한 곳에서는 17 - 66의 범위를 보이고 있어서 그다지 큰 차이를 보이지 않고 있다.

이 지역의 산림은 산림청 산사태 발생 위험지 판정표 기준으로는 3 - 4급으로 판정되어 산사태 발생이 경미한 지역으로 판단되나 실제적으로는 산사태가 많이 발생되었다. 산림청 기준은 합계점수 60점 이하 지역을 산사태 발생 가능성이 없는 지역으로 판단하고 있다. 산림청 산사태 판정표는 산사태 발생 피해 면적을 기준으로 작성하였기 때문에 산사태 발생 여부와는 크게 다른 양상을 보이는 것이라고 생각된다. 또한 산사태 발생 위험지에 대한 상대적인 기준을 제시하고 있을 뿐, 개개의 산사태 발생에 대한 기작을 완전히 고려하지 못하는 단점이 있다고 생각된다. 즉 산사태의 직접적인 원인에 대한 유수의 집중 자체에 대하여는 고려하지만, 집중 호우에 의한 유수의 집중되는 양을 직접적으로 고려하지 않아서 예상외의 강한 집중 호우에 의한 산사태 발생시에는 위험개소를 판별할 수 없는 단점이 있다(산림청, 1998).

표 2. 산림청 기준 산사태 판정 결과  
(항목별 수치는 산사태 발생에 영향을 미치는 가중치임)

조사 번호	발생 유무	위치좌표	경사 길이	모암	경사 위치	임상	사면형	토심	경사도	합계	판정 구분
S02	무	N37° 43' 52E126° 54' 17	0	5	26.0	0	0.0	7.0	16.0	54.0	4
S03	무	N37° 43' 53E126° 54' 16	0	5	9.0	0	0.0	7.0	9.0	30.0	4
S06	무	N37° 43' 51E126° 54' 20	0	5	9.0	0	5.0	7.0	0.0	26.0	4
S07	무	N37° 43' 48E126° 54' 18	0	5	26.0	0	5.0	7.0	9.0	52.0	4
S09	무	N37° 43' 46E126° 54' 15	0	5	26.0	0	12.0	7.0	9.0	59.0	4
S18	무	N37° 43' 31E126° 54' 09	0	5	26.0	0	23.0	7.0	9.0	70.0	3
S19	무	N37° 43' 33E126° 54' 08	0	5	26.0	0	12.0	7.0	9.0	59.0	4
S20	무	N37° 43' 32E126° 54' 12	0	5	26.0	0	0.0	7.0	9.0	47.0	4
S21	무	N37° 43' 31E126° 54' 16	0	5	26.0	0	5.0	7.0	9.0	52.0	4
S22	무	N37° 43' 25E126° 54' 05	0	5	26.0	0	12.0	7.0	9.0	59.0	4
평    균			0	5	22.6	0	7.4	7.0	8.8	50.8	
S01	유	N37° 43' 55E126° 54' 15	0	5	26.0	0	0.0	7.0	9.0	47.0	4
S04	유	N37° 44' 06E126° 54' 17	0	5	26.0	0	12.0	7.0	9.0	59.0	4
S05	유	N37° 43' 50E126° 54' 17	0	5	0.0	0	5.0	7.0	9.0	26.0	4
S08	유	N37° 43' 49E126° 54' 21	0	5	9.0	0	12.0	7.0	9.0	42.0	4
S10	유	N37° 43' 50E126° 54' 11	0	5	0.0	0	23.0	21.0	9.0	58.0	4
S11	유	N37° 43' 50E126° 54' 14	0	5	0.0	0	23.0	7.0	9.0	44.0	4
S12	유	N37° 43' 50E126° 54' 14	0	5	26.0	0	12.0	7.0	0.0	50.0	4
S13	유	N37° 43' 27E126° 54' 13	0	5	0.0	0	5.0	7.0	0.0	17.0	4
S14	유	N37° 43' 28E126° 54' 06	0	5	26.0	0	5.0	21.0	9.0	66.0	3
S15	유	N37° 43' 26E126° 54' 07	0	5	26.0	0	5.0	7.0	9.0	52.0	4
S17	유	N37° 43' 26E126° 54' 10	0	5	9.0	0	5.0	7.0	9.0	35.0	4
S23	유	N37° 43' 27E126° 54' 00	0	5	26.0	0	12.0	7.0	9.0	59.0	4
S24	유	N37° 43' 25E126° 54' 01	0	5	26.0	0	12.0	7.0	9.0	59.0	4
S25	유	N37° 43' 26E126° 53' 48	0	5	26.0	0	5.0	7.0	9.0	52.0	4
평    균			0	5	16.1	0	9.7	9.0	7.7	47.6	

특히 이수곤(1999)이 지적한 바와 같이 인위적으로 산지 사면을 훼손한 곳에서의 판정은 더욱 어려워지게 된다.

### 3. 집수면적과 경사도의 영향

산림청의 산사태 판정표에서는 강우강도에 대한 고려를 하지 않고 있다. 24개 지점의 조사 내에서는 모암, 경사위치, 임상, 사면형, 토심은 거의 같으므로 사면길이에 의한 배수면적과 사면경사도에 대하여 강우강도를 고려하여 보았다. 그림 2에서 폭선의 위치에 따라 사면의 안정 여부를 판단하고 있다. 점착성이 없는 조사 지역의 토양에서 천층산사태 발생의 최소면적

의 수문매개변수( $T/q$ )에 따라 3개의 선을 그었다. 강우강도가 높아짐에 따라 수문매개변수( $T/q$ )는 작아지며, 그에 따라 불안정한 사면이 점차 늘어나고 있다(Montgomery, 1994; Montgomery et al, 1994; Pack, 1997).

철탑74, 철탑75, 철탑76지역은 비교적 약한 강우에도 쉽게 붕괴위험지역에 포함되지만 철탑77 지점은 낮은 수문 매개변수에 의하여 위험지역으로 판단되고 있다. 즉 철탑77 지역은 지형과 경사를 고려하였을 때는 다른 4개의 철탑(철탑 78 포함)과 비교하면 가장 안전한 지점으로, 산사태가 가장 발생하기 어려운 지점이라고 할 수 있다.

조사지역의  $T$ 는  $65 \text{ m}^2/\text{d}$ 이므로 광탄면의 최대 강우강도  $110 \text{ mm/hr}$ 일 때의 천층산사태 발생 최소 면적은  $65/0.110 \times \sin 30 \times 2 \times (1 - \tan 30) = 250 \text{ m}^2$ 이다. 철탑77의 배수면적은  $312.5 \text{ m}^2$ 이지만 사면이 평행하여 물이 확산된다면 단위 등고선의 배수면적은 이보다 작아지므로 천층산사태의 발생 소지는 없다고 할 수 있다. 그러나, 철탑 주변부에 돌림배수로를 설치하여 한 곳으로 배수가 집중되도록 되어 이 지점으로부터 산사태가 시발하고 있음을 알 수 있었다.

O'Loughlin(1986)을 시작으로 지형분석을 통하여 산지사면의 포화대를 찾아내고, 이러한 포화대는 직접적으로 산사태 발생에 영향을 미치므로 이를 이용하여 강우강도별로 산사태 위험지역 구분에 이용하게 되었다(Anbalagan, 1992; Montgomery, 1994; Montgomery et al., 1994; Pack, 1997). 이것은 국지적인 지형에 의하여 사면경사와 천층지하수가 집중되는 지역을 묘사할 수 있다. 사면안정에 영향을 미치는 여러 가지 요인들의 공간적 변이에 대하여 정확히 알지 못하는 곳에서 적용성이 높은 것으로 생각된다.

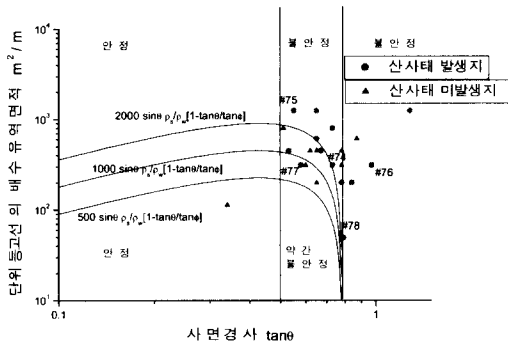


그림 2. 사면안정에 관여하는 면적 - 경사도 관계  $\rho_s/\rho_w=2, \tan \phi=1, T/q=500,1000,2000$  수분 매개변수 투수도  $T(\text{m}^2/\text{d})$ , 강우강도  $q(\text{m}/\text{d})$

#### IV. 결 론

1998년 8월 5일, 6일에 집중호우가 산발적으로 경기 북부에 내렸다. 피해 지역 인근 지역의 3일간 강수량이  $350 - 530 \text{ mm}$ 으로 많은 양을 보이고 있으며, 인접 지역임에도 불구하고 일

자별로는 상당히 다른 양상을 보이고 있다. 사건 지역의 강수량은 최대 시간 강수량은 8월 6일 02시 - 03시에  $110 \text{ mm}$ , 2시간 최대 강수량은  $189 \text{ mm}$ , 일최대 강수량은  $437 \text{ mm}$ 이었다.

조사 지역 주변에는 용미리 공원 묘지 방향의 사면은 물론 서서울 골프장 내의 철탑이 없는 곳에도 산사태가 많이 발생하였다. 이 곳은 비교적 경사가 급한 지역이며, 토층이 얇아서 기암 또는 불투수층을 경계로 발생하는 淺層산사태로 분류되었다. 산림사면의 식생을 보면 상층림으로는 참나무림이 주종을 이루고, 하층부 위에는 진달래의 관목이 차지하고 있었다. 관목이 밀생한 지역에서는 산사태는 발생하지 않았으며, 상층림만이 있는 곳에서는 쉽게 산사태가 발생하는 것을 볼 수 있었다.

조사 지역내에 사면의 경사와 면적이 비슷한 24지점을 선정하여 조사하였다. 이 중 산사태가 발생한 곳은 14개소, 발생하지 않은 곳은 10개소를 조사하였다. 사면경사 길이, 모암, 경사 위치, 임상, 사면형, 토심, 경사도의 7개 지형인자에 대한 가중치를 표에 나타내었다. 가중치 합계는 산사태 발생하지 않은 곳은 26 - 70의 범위, 산사태가 발생한 곳에서는 17 - 66의 범위를 보이고 있어서 그다지 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이 지역의 산림은 산림청 산사태 발생 위험지 판정표 기준으로 3 - 4급으로 판정되어 산사태 발생이 경미한 지역으로 판단되나 실제적으로는 산사태가 많이 발생되었다. 산림청 기준은 합계점수 60점 이하 지역을 산사태 발생가능성이 없는 지역으로 판단하고 있다. 산림청 산사태 판정표와는 다르게 양상을 보이는 것은 예상외의 강한 집중 호우에 의한 원인이라고도 판단할 수 있다.

지형분석과 물리 모델을 이용하여 산지사면의 포화대를 찾아내었다. 이러한 포화대는 직접적으로 산사태 발생에 영향을 미치므로 이를 이용하여 강우강도별로 산사태 위험지역 구분에 이용하게 되었다. 이것은 국지적인 지형에 의하여 사면경사와 천층지하수가 집중되는 지역을 반영하며, 사면안정에 영향을 미치는 여러 가지 요인들의 공간적 변이에 대하여 정확

히 알지 못하는 곳에서 강우강도별로 위험성을 판별할 수 있어서 적용성이 높은 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

- 김상규. 1997. 산사태의 안전도 평가 및 대책공법. 현대건설 96GEO01.
- 산림청. 1998. 사방기술교본.
- 이수곤. 1999. 부산지역의 산사태 위험 연구. 한국환경복원녹화 2(2) : 9-23.
- 한국수자원학회. 1998. '98대홍수의 특성과 홍수 피해 조사.
- 현대건설기술연구소. 1997. 산사태의 안전도 평가 및 대책 공법.
- Anbalagan, R.. 1992. Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. Eng. Geol. 32 : 269-277.
- Pack, R. T. 1997. New developments in terrain stability mapping in B.C. Forestry Geotechnique and resource engineering. Proc. 11th Vancouver Geotech. Soc. Symposium. pp 3-16.
- Montgomery D. R. 1994. Road surface drainage, channel initiation, and slope instability. WRR 30(6) : 1925-1932.
- Montgomery D. R. and W. E. Dietrich. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. WRR 30(4) : 1153-1171.
- O'Loughlin, E. M. 1986. Prediction of surface saturation zones in natural catchment by topographic analysis. WRR 22(5) : 794-804.

接受 2000年 3月 20日