

# 대구달성지역 산사태 예측 및 예·경보시스템 구축



김용진  
나우이엔지(주) 대표이사  
(geosolv@hitel.net)



김영수  
경북대학교 토목공학과 교수



조우철  
나우이엔지(주) 전무이사

## 1. 서론

산사태 재해는 일차적으로 많은 인명피해와 이차적으로는 주택, 도로 및 농작물 파손 등의 재산피해와 같이 사회적으로 큰 경제적 손실을 야기하게 된다. 특히, 국지성 집중호우에 의해 발생하는 급경사지 붕괴 또는 토사 유출은 매년 큰 피해를 발생시키고 있으며, 사회문제로 확대되고 있는 실정이다. 산사태에 따른 인명 및 재산의 손실은 사전점검과 유지관리에 철저를 기한다면 산사태로 인한 피해는 최소화될 것이다.

본 연구는 2008년 7월 제정된 「급경사지 재해예방에 관한 법률」에서 급경사지의 정의, 재해위험도 평가 및 상시 계측관리에 대한 전반적인 사항을 제시하는데 그 목적이 있으며, 강우사상에 수반된 자연재해를 사전 예측하고, 대피를 유도하기 위한 방안으로 대구지역 일원의 다각적인 재해 이력을 분석하고 실시간 강우자료와 연계하

여, 그 지역에 적합한 대피표준 강우량 산정과 산사태 인명피해 저감을 위한 예·경보시스템의 시사점을 도출하며, 붕괴위험 사면에 대한 사전 예·경보 발령으로 인명 및 재산피해저감을 기대할 수 있으며 차후에는 사면 재해대응시스템 마련에 기여할 것으로 기대된다.

## 2. 대구달성지역 산사태 피해이력 조사 및 분석

대구 달성지역에서 발생하는 산사태 피해는 대부분이 장마철과 태풍이 발생하는 우기에 집중적으로 발생한다. 또한, 근래에 들어 강우의 형태는 예년과 달리 여름철 국지적인 집중호우로 인해 산사태 발생빈도가 증가하고 있는 추세이며, 재해 발생에 의한 사망자에서 급경사지 붕괴에 의한 사망자의 비율은 27% 정도로 증가추세에 있다.<sup>2)</sup>

1) 급경사지 재해예방에 관한 법률[(타)일부개정 2008.12.29 법률 제9276호], 제2조, 제6조, 제8조  
2) 국립방재연구소, 급경사지 인명피해저감을 위한 광역 예경보시스템 구축 기획연구, p.3

표 1. 피해이력 분석방법

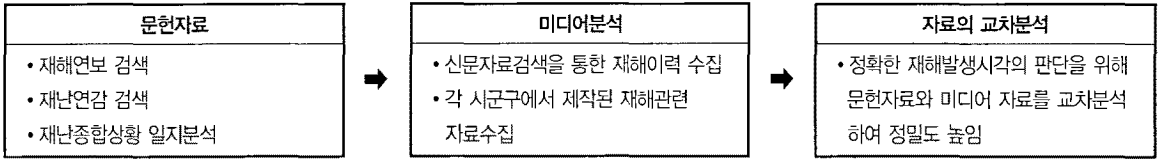


표 2. 대구인근지역 산사태 발생현황

발생년도	위치	피해현황	비고
1993.8.10	대구광역시 달성군 논공읍 북리 삼주아파트 사면	산사태	
2003.	대구광역시 달서구 송현동	토사유출	
2003.9.12	경상남도 창원군 창녕읍 송현리 도성암 요사채	산사태/사망	
2003.9.12	대구광역시 달성군 유가면 비슬산자연휴양림 일대	산사태	
2003.9.13	대구광역시 달성군 논공읍 북리 달성공단 정원산업	침수/매몰	그림 1
2003.9.12/13	대구광역시 달성군 가창면 정대리 산219 지구	산사태	
2003.9.12/13	대구광역시 달성군 논공읍 북리 803-4, 5	산사태	
2006.7.9	경상북도 경산시 상방동 경산노인전문병원	차량통제	
2006.7.9	경상북도 달성군 옥포면 본리리 국도5호선	산사태	

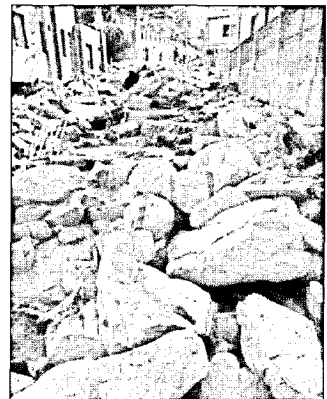
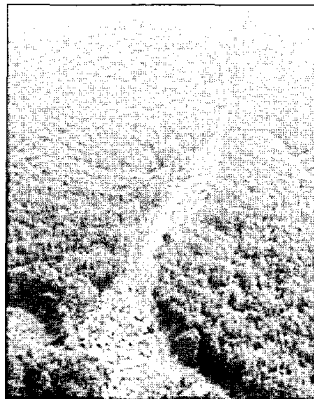
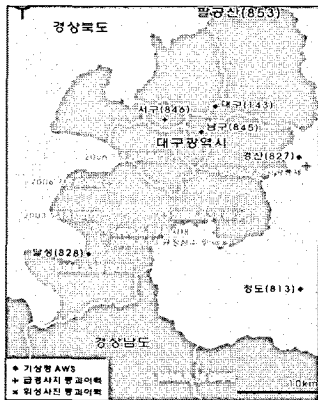


그림 1. 대구인근지역 산사태 발생현황

국지성 호우로 인한 급경사지 붕괴가 빈번하게 발생하는 상황에서, 산사태 재해 분석연구는 주로 시설물을 대상으로 한 시설물 유지관리 기술개발에 집중되고 있는 실정이다. 그러나 재해를 최소화하기 위해서는 재해가 발생할 가능성이 높은 지역을 선정하여 발생가능성이 있는 재해에 대한 적극적인 대처방안이 필요하다. 이에 인근 광역지역의 산사태 이력자료를 구축 및 분석하여 대상지역의 산사태 유발 및 비유발 강우에 대한 기준을 마련한다. 피해 이력의 조사는 대상지역인 달성군을 중심으로 인

접한 대구 및 경북지역의 산사태 발생현황과 피해사례를 조사하고, 강우특성과 산사태의 상관성을 도출하여 산사태 예·경보 발령을 위한 한계표준선, 대피표준선 산정을 위한 유발 및 비유발 강우량 구분의 기준이 되는 자료를 구축하는데 이용한다. 대구 달성지역의 인근에서는 발표된 자료로는 최근 9건의 산사태가 기록되어 있고, 이중 8건은 최근 10년에 걸쳐 발생한 태풍 매미와 국지성 강우에 의해 산사태가 발생된 것으로 조사되며, 특히 근래에 들어 산사태 발생빈도와 규모가 증가하는 추세에 있다.

### 3. 급경사지 재해위험도 평가

#### 3.1 GIS기반 재해위험도 작성<sup>3)</sup>

GIS(Geographic Information System)는 지리공간데이터를 분석 및 가공하여 지형관련 분야에 활용할 수 있는 시스템으로 개별적인 지형요소를 분석하여 강우시 한 시적으로 형성되는 미세 수계의 포화정도와 흐름의 방향을 제시할 수 있으며, 지형요소와 지표수의 수렴, 발산의 정도로 산정하여 지수지형의 범위와 형태를 제시하고, 집중호우 시 지표수의 흐름에 수반되는 재해의 범위를 사전에 예측할 수 있는 자료로 활용된다.

#### 3.2 대구달성지역의 재해위험도

대상지역의 유역을 기초로 범위를 선정한 후 국립지리정보원 1:5,000 축적의 수치지형도와 USGS의 수치고도 자료를 이용하여 고도 값을 갖는 자료 층을 추출하여 설정된 영역을 10m 단위격자의 크기로 구분하여, 대상지역의 격자를 가지는 수치고도모형(DEM)으로 작성한다.

##### (1) 지형요소 산정

지형을 표현하는 개별적인 인자들을 분석함으로써 재해위험도를 평가하는 기초자료로 활용하며, 암석의 안정성은 풍화작용과 직접적인 상관성이 있으며, 암석의 균열을 따라 이동하는 수분의 수렴, 발산, 포화 정도는 암석의 물리적, 화학적 풍화에 비례한다. 각 개별요소들에 대한

산정방법은 다음과 같다.

고도는 수치고도자료로부터 단위 격자의 고도자료를 추출하며 고도, 방위, 경사, 곡률은 Tapes-G 지형/수문 모델을 이용하여 산정한다. 경사도는 수치고도모형(DEM)에서 중심 격자에서 가장 가파른 방향에서의 고도의 변화율로써 중력이 물의 흐름을 발생 시키는 정도를 의미하며, 수치고도모형을 이용하여 유한차분 방법을 이용하여 경사도를 계산한다. 방위도는 수치고도모형을 이용하여 북쪽을 기준으로 시계방향으로 적용한다. 상부사면 기여면적은 흐름분배 알고리즘을 통해 상부지역으로부터 받을 수 있는 잠재적인 수렴 양을 나타내며, DEMON(Digital Elevation Model Net works) 알고리즘을 적용하여 실제 지형을 정확하게 반영하여 상부지역으로부터 받을 수 있는 잠재 흐름량의 측정치를 상부사면 기여면적으로 산정한다. 습윤지수는 국소지역의 포화정도로써 지형 특성을 반영하는 인자로 분포형 수문 모형의 입력변수와 사면의 수분 유출모의에도 널리 사용한다. 곡률반경의 역수인 지표곡률은 지표수의 수렴과 발산에서 중요한 변수로 등고선구배(Plan)곡률과 윤곽구배(Profile)곡률로 구분하며, 등고선구배 곡률은 등고선에 따른 면의 변화율로  $K_c$ 로 표현, 윤곽구배곡률은 흐름선 방향으로의 경사 기울기의 변화율로써  $K_p$ 로 표현한다. 등고선구배곡률은 지표수 흐름의 수렴, 발산을 평가하며, 윤곽구배곡률은 흐름속도와 침전이송과정의 변화를 지시하는 잠재구배율을 평가한다.

##### (2) 지반 불안정성 적용등급

표 3. 개별 지형요소에 대한 점수

등급	배점	묘사	경사도		방위도		상부사면 기여면적		점선구배 곡률		윤곽구배 곡률		습윤지수		선밀도	
			단위	배점	단위	배점	단위	배점	단위	배점	단위	배점	단위	배점	단위	배점
1	20~36	안정	1	4	1	4	1	2	1	2	1	2	1	2	1	4
2	36~52	거의 안정	2	8	2	8	2	4	2	4	2	4	2	4	2	8
3	52~68	약간 불안정	3	12	3	12	3	6	3	6	3	6	3	6	3	12
4	68~84	불안정	4	16	4	16	4	8	4	8	4	8	4	8	4	16
5	84~100	극히 불안정	5	20	5	20	5	10	5	10	5	10	5	10	5	20

3) 소방방재청, GIS기반 산사태 위험분석 시스템 개발

표 4. 개별 지형요소별 등급적용

단위	경사도	방위도	상부사면 기여면적	경사구배 곡률	윤곽구배 곡률	습윤지수	선밀도
1	<10	337.5~0 0~22.5	<5	-2.0~0.4	-0.4~0.4	<5	<20
2	10~20	22.5~67.5 292.5~337.5	5~7	0.4~0.8	-0.4~0.8 0.4~0.8	5~7	20~40
3	20~30	67.5~112.5 247.5~292.5	7~9	0.8~1.2	-0.8~1.2 0.8~1.2	7~9	40~60
4	30~40	112.5~157.5 202.5~247.5	9~11	1.2~1.6	-1.2~1.6 1.2~1.6	9~11	60~80
5	>40	157.5~202.5	>11	1.6~2.0	-1.6~2.0 1.6~2.0	>11	>80

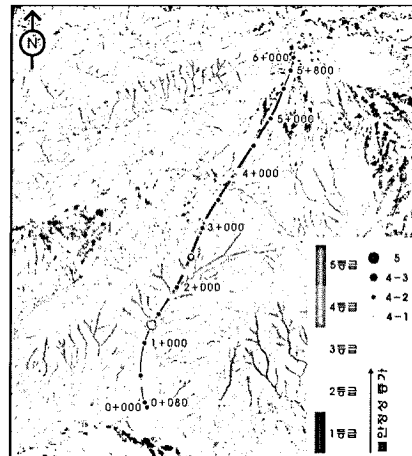
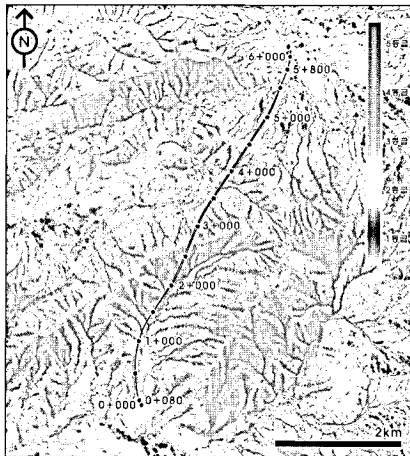


그림 2. 대구달성지역의 재해위험도와 등급분포도

GIS기반으로 지형을 구성하는 개별요소의 안정성 등급을 10m 크기의 단위격자별로 할당한 후 지구통계학적 공간보간법을 이용하여 표 3과 표 4에 의해 재해위험도를 작성한다.

### (3) 재해위험도 작성

상기와 같이 해당지역의 개별적인 지형요소에 대한 분석을 하여 대구달성지역에 대한 재해 위험도를 그림 2와 같이 작성하였다.

### (4) Tapes-G를 이용한 산사태의 이동경로 예측

산사태에 의한 토석류의 흐름은 일반적으로 중력방향

으로 이동하게 된다. 이는 결국 지표수흐름의 방향과도 일치하게 되므로 이러한 원리를 이용하여 이동경로를 예측할 수 있게 된다.

작성한 재해위험도를 기반으로 대구달성지역에서 붕괴위험지역의 지표수의 수렴 및 발산에 따른 Tapes-G 3차원 모델링에 의해서 산사태의 이동경로와 규모를 예측하여 보면 그림 3과 같다. 각 화살표들은 해당지역의 지표수의 이동방향과 크기를 나타내는 벡터양으로 표현된다.

모델링에 의해서 고위험구간을 선정할 수 있으며, 이를 이용하여 토석류 및 산사태 방지시설의 설치할 위치나 공법종류를 선정하는데 참고할 수 있다.

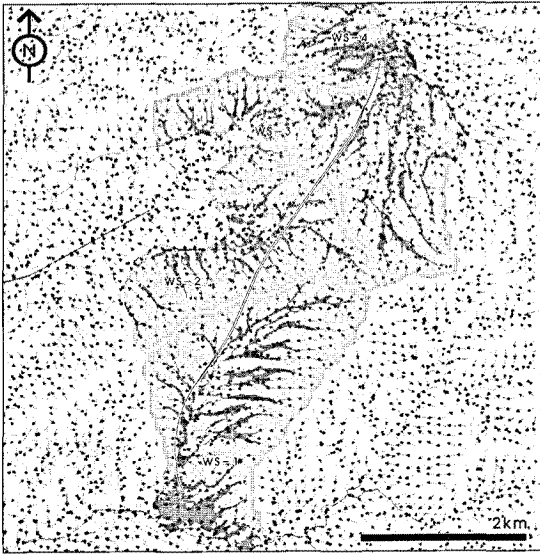


그림 3. Tapes-G 모델링에 의한 산사태 이동경로예측

#### 4. 지침C를 이용한 대구지역 대피표준선 설정<sup>4)</sup>

국립방재연구소의 지침C에 의한 경보선 및 대피선 설정을 위한 표준강우강도의 설정 및 적용을 위한 지역조건은 다음과 같다.

- 1) 해당지역의 강우강도 데이터 집적을 위해 강우량 관측소가 있어야 한다.
- 2) 산사태를 일으키는 유발강우 및 산사태가 발생하지 않은 비유발강우에 대한 특성조사를 위해 과거 강우

데이터가 집적되어 있어야 한다.

#### 4.1 용어정의

강우와 산사태와의 상관관계를 알아보기 위해서는 산사태가 발생할 당시의 발생지역에 대한 강우자료를 수집하여 강우자료가 강우량과 시간과의 관계규명에 어떠한 역할을 할 것인지를 먼저 파악할 필요가 있다. 강우자료 분석을 위해 필요한 용어와 기능을 파악하면 그림 4와 같다.

#### 4.2 반감기와 반감계수 (국립방재연구소, 2005)

산사태의 발생은 연속강우 외에 선행강우에 영향을 받게 된다. 강우가 내리기 시작하여 지표면이 포화되어 지표 하로 흐르는 특성을 나타내기 위해 15시간 반감기를 사용하며, 지표 하로 스며드는 강우에 의해 지반의 지하수위 면이 변화하는 특성을 나타내기 위해 72시간 반감기를 사용한다. 연속강우와 선행강우 사이의 시간적인 간격이 클수록 선행강우의 영향은 줄어들기 때문에 선행 작용강우량(Antecedent Working Rainfall)을 정의할 때에는 감소계수(decrease coefficient,  $\alpha$ )를 연속강우 시작 전까지의 24시간 강우량( $dt$ )과 곱하여 합한 강우량으로 표현하게 되며, 감소계수는 강우량이 반으로 줄어드는 일수(반감기,  $T$ )를 이용한다.

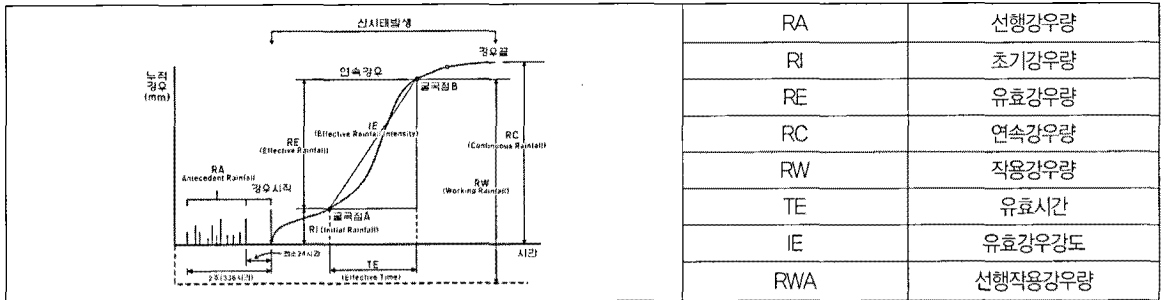


그림 4. 강우자료에 대한 용어정의

4) 국립방재연구소, 급경사지 인명피해저감을 위한 광역 예경보시스템 구축 기획 연구, p.119

$$RWA = \sum_{t=1}^{14} \alpha_t \times d_t, \alpha_t = 0.5^{tT} \quad (1)$$

여기서, RWA : 선행작용강우량,  
 $\alpha_t$  : 감소계수, T : 반감기  
 $d_t$  : 연속강우 시작 전까지의 24시간 강우량(dt)

반감기에 따라 감소계수  $\alpha_t$ 는 아래의 표 5와 같이 계산되며, 감소계수가 0.004보다 작은 경우(음영부분)는 작용강우량에 큰 영향을 미치지 못하게 되므로 무시하며, 그 시간은 1.5시간 반감기일 때는 12시간, 72시간 반감기일 때는 574시간(24일) 정도이다.

### 4.3 한계선, 대피선, 경보선의 설정 방법

지침C는 강우자료나 사면파괴형상에 대한 자료가 충분하지 않아도 사용이 가능하다. 이는 하루단위의 강우자료를 이용하는 지침A, 지침B의 방법과는 작용강우를 계산하는 방법이 다르다. 즉, 산사태 발생 1시간 전의 강우는 선행강우량에 의해 가정되어진다. 이런 작용강우는 감소계수를 사용하여 추정하게 되며, 비유발강우시에는 연속강우가 발생할 때 최대시우량의 시간을 계산하여 추정하게 된다.

$$RW = \sum \alpha_i \times R_i \quad (2)$$

표 5. 반감기와 감소계수

강우시작 전 기간(일)	반감기	강우시작 전 기간(일)	반감기
	1.5시간		3일(72시간)
1	0.6300	1	0.79370
2	0.3969	2	0.62996
3	0.2500	3	0.50000
4	0.1575	4	0.39685
5	0.0992	5	0.31498
6	0.0625	6	0.25000
7	0.0394	7	0.19843
8	0.0248	8	0.15749
9	0.0156	9	0.12500
10	0.0098	10	0.09921
11	0.0062	11	0.07875
12	0.0039	12	0.06250
13	0.0025	13	0.04961
14	0.0015	14	0.03937
15	0.0010	15	0.03125
16	0.0006	16	0.02480
17	0.0004	17	0.01969
18	0.0002	18	0.01563
19	0.0002	19	0.01240
20	0.0001	20	0.00984
21	0.0001	21	0.00781
22	0.0001	22	0.00620
23	0.0001	23	0.00492
24	0.0000	24	0.00391

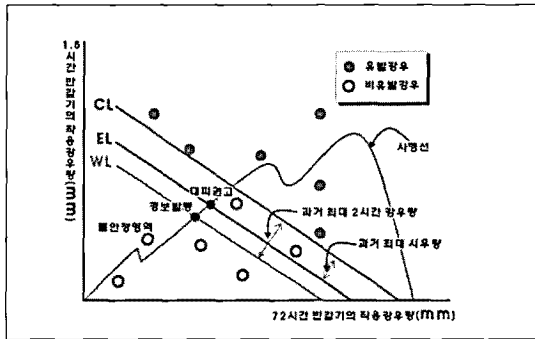


그림 5. 한계선, 대피선, 경보선의 설정방법

여기서, RW:작용강우,  $\alpha_i$ : i시간 전의 감소계수  
 $\alpha_i = 0.5^{i/T}$ , R1i: i시간 전의 1시간 강우강도,  
 T: 반감기(시간)

한계선(CL, Critical Line)은 2개의 작용강우(1.5시간, 72시간 반감기일 때)로 설정되며, 그림 5와 같이 파괴발생 1시간 전의 작용강우와 파괴 시의 작용강우를 이용하여 설정하게 된다.

대피선(EL, Evacuation Line)은 사행선(Snake Line)

이 한계선(CL)에 도달하기 전 주민들이 대피소로 피하기 위한 적절한 시간이 필요한데 산사태가 일어나기 전 주민들의 안전한 대피를 위한 적절한 시간을 유지하기 위해 대피선(EL)이 설정된다.

경보선(WL, Warning Line)은 작용강우로 그려지는 사행선이 한계선(CL)에 접근하기 전 대피를 위한 시간이 필요하게 되며, 사행선이 한계선(CL)에 접근하기 전 대피를 위한 시간이 필요하게 되며, 사행선이 대피선(EL)에 도달하기 전 대피를 위한 정비 및 준비를 위한 시간이 필요하게 된다. 이를 종합하여 나타내면 그림 5와 같다.

#### 4.4 대구달성지역의 한계선, 대피선, 경보선 설정

조사지역의 지역적인 강우특성을 고려한 한계선을 도출하기 위해 기상청의 과거 자동기상관측자료(AWS-경산, 달성관측소)를 이용하여 유발강우량을 산정하고, 강우자료에 의해 산정된 유발 및 비유발강우를 이용(표 6, 표 7)하여 한계선을 설정한다.

표 6. 비유발강우량

일시	72시간 반감기	1.5시간 반감기
2006. 07. 16. 17:00	41.00	20.00
2006. 07. 26. 18:00	40.00	3.00
2006. 08. 20. 5:00	35.00	1.00
2006. 08. 27. 9:00	47.00	24.00
2006. 09. 18. 2:00	46.00	7.00

표 7. 유발강우량

지역	인접 관측소	발생일시	피해현황	72시간 반감기	1.5시간 반감기
		보정일시			
화왕산 기슭 묘사체	달성	2003.09.12 20:40	산사태 2인 사망	170.10	21.24
		2003.09.12 21:00			
경산노인전문병원인근	경산	2006.07.09 14:50	산사태 차량통제	96.51	23.69
		2006.07.09 15:00			
옥포면 화원방향 (5번국도)	달성	2006.07.09 14:56	산사태	125.23	23.07
		2006.07.09 15:00			
옥포면 본리리	달성	2006.07.09 12:00	산사태	102.00	39.00
		2006.07.09 12:00			

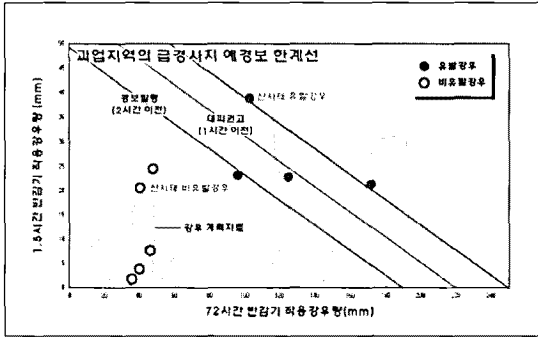


그림 6. 한계선, 대피선, 경보선 설정

상기의 도출된 유발 및 비유발 강우량을 이용하여 한계선(CL)을 설정하고 대피선(EL)과 경보선(WL) 설정을 위해 과거 2시간 및 1시간의 최대 연속강우량 데이터를 DB 시스템으로부터 산정한 결과 대피선(EL) 설정을 위한 과거 1시간 최대 연속강우량은 50.0mm로, 경보선(WL) 설정을 위한 과거 2시간 최대 연속강우량은 65.5mm로 나타났다. 이 값은 사행선 그래프에서 한계선과의 이격에 사용되어, 향후 예·경보를 위한 기준으로 활용된다.

상기에 검토한 재해이력과 유발 및 비유발 강우량과 실시간 강우자료 분석을 통해 대구달성지역의 한계선, 대피선, 경보선을 설정하면 그림 6과 같다.

## 5. 예·경보 시스템 구축방안

### 5.1 개요

산사태 예·경보시스템은 「급경사지 재해예방에 관한 법률(일부개정 2008.3.2)」에서 정하는 상시계측관리에 해당된다고 할 수 있다. 해당 지역을 대표할 수 있는 최적의 위치를 선정하여 시스템을 효율적으로 운영함으로써 예·경보 시스템 구축의 기반을 마련하여, 발생이전에 지역주민들에게 적절한 정보 제공을 통해 인명피해를 최소화하고, 실시간 계측의 경우 강우량과 별도로 경사계, 변위계, 토양함수비 측정기 등의 계측시스템을 연동하여

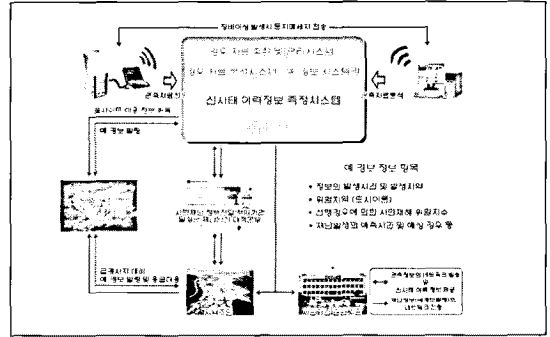


그림 7. 산사태 예·경보시스템 설치 운용계획

중장기적인 산사태에 대한 저감대책을 마련하는데 그 목적이 있다.

### 5.2 예·경보시스템 운용계획

강우량계나 기타의 계측시설 등을 설치할 위치를 선정함에 있어 대구 달성지역을 대표할 수 있으며, 붕괴 발생 빈도가 높고, 붕괴발생 시 영향 범위 내에 들어 있는 주거 시설 및 공장에 예·경보를 발령할 수 있는 최적의 지점을 선정하여야 한다.

강우량계 등의 계측시스템은 무선원격계측이 가능하며, 각 계측시스템 간에 연동하여 단기 및 중장기적인 급경사지의 관리에 활용하도록 계획한다. 측정된 계측데이터는 해당지역의 관리기관(예. 달성군 재난관리대책본부)이 운영하고 있는 관리시스템(웹사이트)에 전송되어 관측 자료를 자동으로 분석하는 프로그램 분석에 의해 위험상황발생 이전에 도로를 차단하고 주민을 대피시킬 수 있는 통합적인 관리시스템을 구축한다.<sup>5)</sup>

구축된 시스템을 국가기관(예. 소방방재청 등)의 시스템과 연계하여 활용한다면 재해에 대해 보다 신속한 대처와 복구에 효율적으로 활용할 수 있다. 그림 7에 예·경보 시스템의 운용계획을 나타낸 모식도이다.

## 6. 결론

5) 소방방재청, 유비쿼터스 기반 산사태 모니터링 시스템 개발, p.42



전 세계적으로 재해예방에 대한 관심이 고조되고 있으며, 이에 대한 국가 차원의 대책 방안을 마련하여 국민의 안정성 확보와 함께 대국민 신뢰성을 구축하고 있다. 최근 전국적으로 이상 기후 등으로 인한 대규모 재해가 잇달아 발생하고 있으며, 발생빈도나 그 규모 또한 증가하고 있는 추세이다. 이에 따라 피해조사 및 복구에 대한 작업이 날로 증가할 것으로 예상된다. 따라서 피해조사를 효율적으로 처리하기 위해서는 피해정보 수집방법, 수집 범위 및 피해정보의 표준화 등은 필수적이며, 신속하고 과학적으로 처리할 수 있는 장비 개발 및 첨단화와 이를 제도화 하는 방안이 대두되고 있다.

본 연구는 강우자료를 활용하여 지역 특성에 맞는 표준 강우량을 선정하여 산사태에 대해 효율적으로 인명피해와 국고손실의 저감을 위한 예·경보시스템 도입에 관한 연구로서 국토개발사업에 따른 환경훼손으로 가속화될 수 있는 자연재해에 의해 야기되는 인명 및 재산피해에 대비할 수 있는 전국적인 규모의 방재시스템의 일환으로

계획적이고 체계적으로 강우데이터와 피해조사데이터의 집적과 지역마다 특성을 분석하여 앞으로의 재해에 대한 예방을 할 수 있는 국가 차원의 예·경보시스템 구축이 필요하다고 할 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. 국립방재연구소, 급경사지 인명피해저감을 위한 광역 예·경보시스템 구축 기획연구, 연구보고서 2007.12, 2007
2. 소방방재청, 유비쿼터스 기반 산사태 모니터링 시스템 개발, 연구보고서 NEMA-06-NH-04, 2009
3. 소방방재청, GIS기반 산사태 위험분석 시스템 개발, 연구보고서 NEMA-06-NH-04, 2009
4. 소방방재청, 급경사지 재해예방에 관한 법률(타)일부개정 2008.12.29 법률 제9276호, 2008

## 한국지반공학회-카자흐스탄지반공학회 세미나 안내

1. 일시 : 2010. 7. 19(월) ~ 2010. 7. 24(토)
2. 장소 : 카자흐스탄 유라시안 국립대학교 국제회의실
3. 주제 : Geotechnics in Megacities and New Capitals
4. 논문 : 2010. 4. 30 (초록마감)  
2010. 6. 1 (전문마감) / 논문작성법 홈페이지 참조
5. 발표분야 :

- Construction in restrained urban areas.
- Preservation of existing structures taking into account soil-structure interaction.
- Urban environmental geotechnic.

※ 세미나 일정 및 논문작성법 등 자세한 사항은 홈페이지([www.kgshome.or.kr](http://www.kgshome.or.kr))를 참조하시기 바랍니다.