Journal of the Korean Society of Remote Sensing, Vol. 7, No. 2, 1991

GIS(Geographic Information System)를 이용한 광역 지질재해(산사태) 분석 연구

김윤종* · 김원영* · 유일현* · 박수홍** · 백종학*** · 이현우***
* 한국자원연구소 환경지질연구실, ** 서울대학교 지리학과 대학원, *** 캐드랜드 GIS 연구부
(1991년 11월 1일 받음 ; 1991년 11월 10일 수리)

Analysis of Regional Geologic Hazards Using Geographic Information System

Youn-Jong Kim,* Won-Young Kim,* Il-Hyon Yu,*
Su-Hong Park,** Jong-Hak Baek*** and Hyun-Woo Lee***
* Environmental Geology Division, Korea Institute of Geology, Mining and Materials,
** Dept. of Geography, Seoul National University, *** GIS Division, Cadland Co.
(Received Nov. 1, 1991 ; Accepted Nov. 10, 1991)

Abstract

A geologic hazard map has been produced in the suburbs of Seoul using GIS technology to analyse the degree of geologic hazard, particularly landslides. Topographic, geologic and soil data were incorporated in a map through GIS, which enable to interpret, analyse and predict the regional geologic hazards. Potential elements causing a landslide are slope geometry, geology, groundwater table, soil property, rainfall and vegetation etc. These elements analysed in the study area were input into GIS system through cartographic simulation to produce the regional geologic hazard map. For this work, ARC/INFO(GIS) and ERDAS(IP) system were used.

1. 서 언

GIS(Geographic Information System)를 이용하여 지형과 지질 요소들을 잘 결합시키면 환

경지질 및 지질공학적 분석을 효과적으로 할 수 있다. 본 연구에서는 서울 근교지역(127° 05′, 37° 25′~127° 10′, 37° 20′)을 대상으로 GIS를 이용한 광역지질재해도(Regional geologic hazard map)를 작성하여 연구지역 내의 산사태 잠재력을 분석하고 지역개발계획시 전체적인 지면의 안정성을 파악, 개발정책에 활용할 뿐만 아니라 예측 가능한 자연재해에 대한 피해예방에 이용하고자 하였다.

일반적으로 산사태는 사면의 상부에 균열(이동물질방향과 수직)이 생성됨으로서 시작된다. 균열들은 물이 채워져 상부 토양을 약하게 하며, 동시에 그들을 아래쪽으로 이동시키는 응력을 증가시킨다. 이러한 결과로써 산사태가 일어나며(혹은 지진), 결국 토양층이나 암반층의 경계를 따라 상부층이 아래로 이동하는 전단파괴(Shear failure)의 결과이다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 광역조사시 산사태를 유발할 수 있는 주요소들을 분석하고 그들에 대하여 등급(Rating)과 가중치(Weight)를 설정한 후, GIS시스템을 이용한 지도모형연구(Cartographic simulation)를 통하여 새로운 광역지질재해도를 작성하였다. 지질재해 분석시 고려되어야 될 중요한 요소들은 지형경사(파괴사면의 활동력관련), 지질-파괴사면형태-물성(저항력관련), 공극수압(Seepage force), 강우량 등이며, 산사태 발생빈도(Landslide frequency)에 따른 지형형태, 식생분포, 토양특성(Soil texture)과 두께, 지하수면 위치 등은 상기 요소들의 가중치 및 등급 구분에 중요한 역할을 한다. 본 연구를 위하여 사용된 GIS시스템은 SUN4-390에 탑재된 ARC-INFO이며, TM(Thematic Mapper) 영상들로부터 산림의 밀도를 분석하기 위하여 ERDAS가 이용되었다.

2. 연구범위

본 연구는 GIS를 이용한 광역적 산사태 분석연구이며, 파괴사면들의 특성연구 및 수학적 모형연구(김윤종, 김원영, 1991)에 의한 안정성 분석 등은 본 연구에서 제외되었다. 광역적 분석시 가장 중요한 점은 넓은 지역에 대하여 전체적인 사면 안정성 평가를 빠른 시간에 경제적으로 분석하는 것이다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 산사태 발생의 광역적 요소들을 추출하고 GIS를 이용한 지도모형연구를 통하여 그들을 분석한 후 광역지질재해도를 작성하였다. 연구지역은 실재로 약 70Km^{2}이나 자료의 한계성으로 인하여 대상 자료층군이 형성된 지역만 추출, 분석되었다.

3. 연구방법 및 내용

3-1. 산사태의 광역적 분석

넓은 지역의 산사태를 정량적으로 분석하는 효과적인 방법은 1차적으로 산사태 발생지역의 분포도(Fig. 1, Inventory map of landslide deposits)와 그들의 발생빈도를 인식키 위한 Isopleth map(Fig. 2-C, Degraff, 1985, 김윤종, 1989)을 작성하는 것이다. 우선 항공사진(1987. 5)과 야외조사를 통하여 작성된 산사태 분포도로부터 단위 면적당(직경 2～2.5Cm인 원) 산사태 분포 면적비(%)를 산출한 후, 이들로부터 등고선 형태의 Isopleth map을 작성하게 되며, 그것은 산사태로 인한 1차 피해의 평가기준이 된다. Degraff는 그 기준을 Table 1과 같이 정의하였으나, 실제로 그것은 자연환경 특성에 따라 변화될 수 있다(Table 2). Fig. 3은 지형경사분류도와 Isopleth map을 중첩시킨 후, 각각의 속성값들을 통계 분석한 결과로써 이것으로 지형경사에 따른 산사태 발생빈도를 분석할 수 있다. 본 연구지역은 지형경사가 30°미만 지역에서 대부분의 산사태가 발생하였으며(Fig. 3-A), 지형이 가파른 곳(40°이상)은 본 지역의 지형 특성상 분포면적이 적으나(전체 면적의 약 10%) 산사태 발생 위험이 매우 높다(Fig. 3-B). 이러한 분석은 광역 지질재해분석 모형연구시 가장 중요한 요소인 지형경사의 합리적인 등급 설정(Rating)을 가능하게 하였다(3-2-1). 본 지역은 선캠브리아기의 흑운모 내지 화강암질 편마암(Granitic Gneiss)이 주로 분포하고 양토, 사양토(SM, SC)의 토성을 가지는 풍화대가 10～15미터 정도 발달하고 있다. 이러한 지질학적 특성상 이 지역에서 발생되는 산사태는 대규모적인 것은 거의 없고 소규모의 산사태가 많은 빈도를 나타내는 것이 특징이다. 이와 더불어 Slump-Earth flow, Debris slide 및 복합적(Complex)인 형태의 산사태를 보이기도 한다(Varnes classification system, 1978).

Table 1. Landslide susceptibility categories identified on Isopleth map(Degraff, 1985)

Landslide susceptibility categories	Area coverd by landslide deposits(in percent, %)	Evaluation guidelines
Negligible	1	* reference(Degraff)
Low	1～10	
Moderate	10～30	
High	30～50	
Very high	50～70	
Extreme	70	

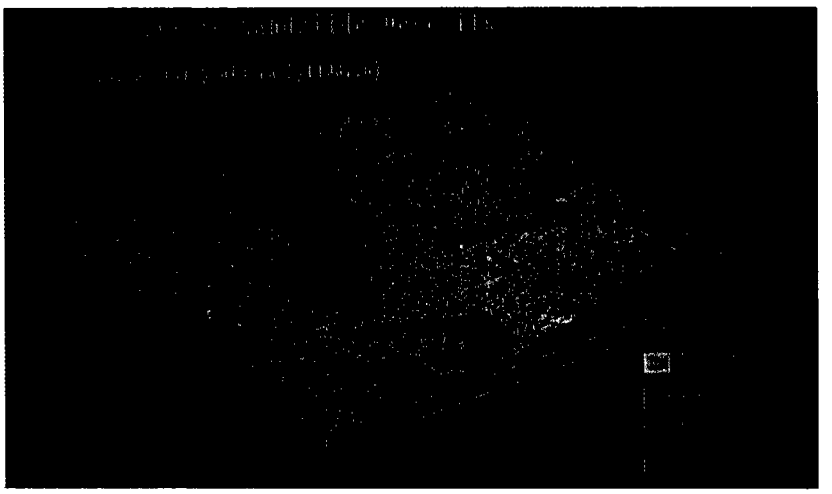


Fig. 1. Inventory map of landslide deposits.

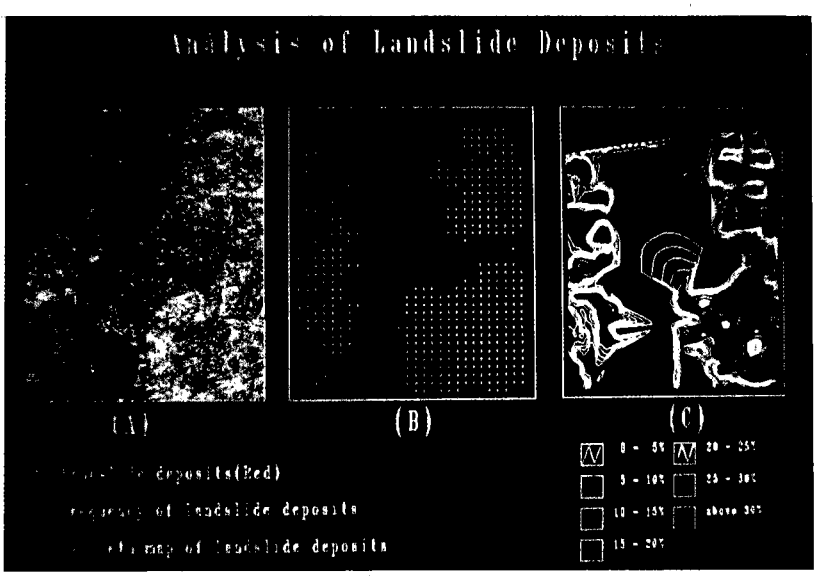
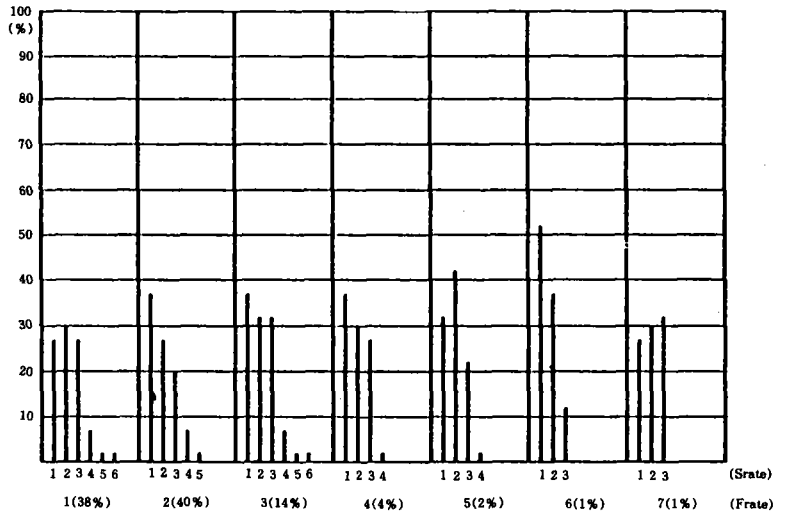


Fig. 2. Isopleth map of landslide deposites.

(A) Slope classification for the landslide frequency



(B) Landslide frequency for the slope classification

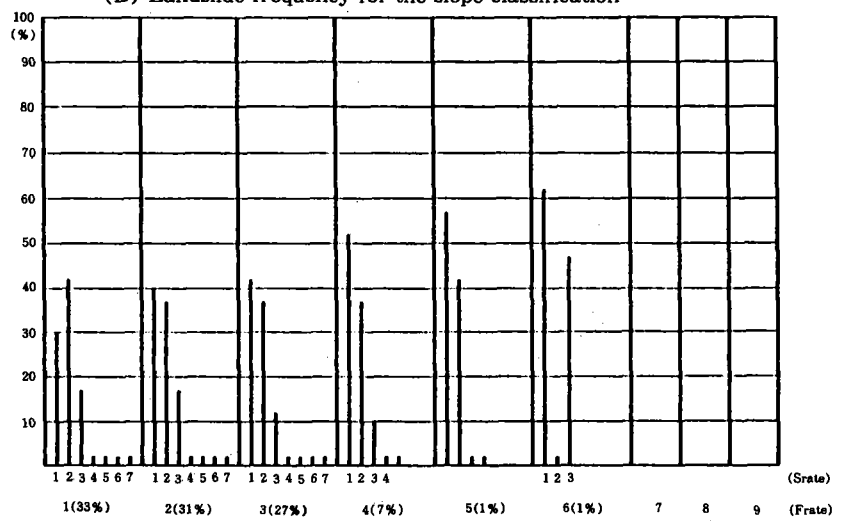


Fig. 3. Relationship between topographic slope and landslide frequency in the study area.

* Frate(Landslide frequency):

1 ; 0～5%, 2 ; 5～10%, 3 ; 10～15%, 4 ; 15～20%, 5 ; 20～25%, 6 ; 25～30%, 7 ; 30% 이상

* Srate(Slope angle);

1 ; 0～10°, 2 ; 10～20°, 3 ; 20～30°, 4 ; 30～40°, 5 ; 40～50°, 6 ; 50～60°, 7 ; 60～70°, 8 ; 70～80°, 9 ; 80～90°

3-2. GIS를 이용한 지질재해(산사태)분석

산사태분석을 위한 지도모형연구(Cartographic simulation)를 실행키 위해서는 우선 사면의 안정성에 영향을 미치는 주요인들을 분석하고 GIS시스템 내에서 그들의 합리적인 조합방법을 결정하여야 한다. 사면파괴는 많은 요소에 좌우되나 일반적으로 다음의 4가지 요소로 요약될 수 있다(Hunt, 1986). 즉 ① 지형(Slope inclination and height), ② 토질 및 암질(Material structure and strength), ③ 공극수압(Seepage forces)과 강우량(Rainfall), ④ 지진 등이다. 이러한 요소들을 기본으로 본 연구에서는 광역적 지질재해분석을 위한 9개의 주인자(Table 3)를 설정하였고, 환경지질 및 지질공학적 분석을 기초로 하여 등급과 중요도에 따른 가중치를 부여하였다.

3-2-1. 지형경사와 산사태 발생빈도

경사분류도와 산사태 발생빈도의 Isopleth map을 중첩시켜 산사태 발생가능성 단위를 정하게 되는데(Fig. 3), Degraff는 이를 10% 단위(Table 1)로 하였으나 본 지역에서는 지형분석에 적합한 5% 단위(Table 2)의 등급을 설정하였다(1~7). 그러나 실제로 산사태 발생빈도가 35% 이상 지역은 거의 보이지 않았다. 또한, 지형경사 등급은 1~6까지 10°단위(1 : 0°~10°, 2 : 10°~20°, 3 : 20°~30°, 4 : 30°~40, 5 : 40°~50°, 6 : 50°이상)로 구분하였으나, 본 역의 지형특성상 60°이상의 급경사지역은 나타나지 않았다(Fig. 3-B).

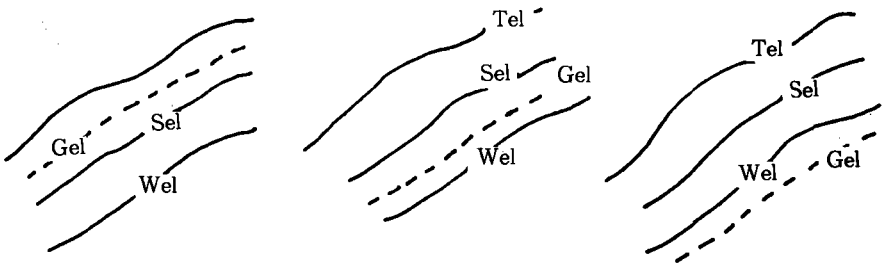
Table 2. Assigned rating for landslide frequency in this study area

Landslide frequency(%) (Percent of ispoleth map)	Landslide susceptibility categories	Rating
0~ 5	Negligible	1
5~10	Very low	2
10~15	Low	3
15~20	Moderate	4
20~25	High	5
25~30	Very high	6
30 이상	Extreme	7

3-2-2. 지하수면의 위치(Groundwater table)

지하수면 위치는 하부물질의 공극수압(Seepage force)을 좌우하며, 공극수압의 증가는 파괴사면의 저항력을 감소시켜 활동력을 증가시키게 된다. 지하수면은 위치에 따라서 Fig. 4에서와 같이 세 가지 형태의 등급으로 분류하였으며, 상부 토양층에 가까울수록 높은 등급(3)으로 되었다. 지하수위는 강우량과도 밀접한 관계가 있으나 전체적인 분석을 위하여 강우량을

하나의 독립된 요소(3-2-4항)로 구분하였다. Fig. 4의 분석을 위하여 ARC/INFO 내에서 TIN 자료구조로 변환되어진 각각의 자료들을 Raster 화일로 바꾼 후 IDRISI 소프트웨어와 Pascal로 작성된 프로그램을 이용, 재처리한 후 ARC/INFO Coverage로 다시 변환시켜 GIS시스템의 자료층군을 구성시켰다(Fig. 5). 토양과 풍화대 심도, 지하수면 위치 등의 자료들은 본 지역에 실시된 시추조사(271공 ; 1990, 한국토지개발공사, 1989, 철도청) 결과를 토대로 작성하였다.



(a) Case 1(R3) (b) Case 2(R2) (c) Case 3(R1)

Tel : Topographic contour Sel : Basal surface line of soil
Gel : Groundwater table Wel : Top surface line of bedrock

Fig. 4. Groundwater table(Seepage force)

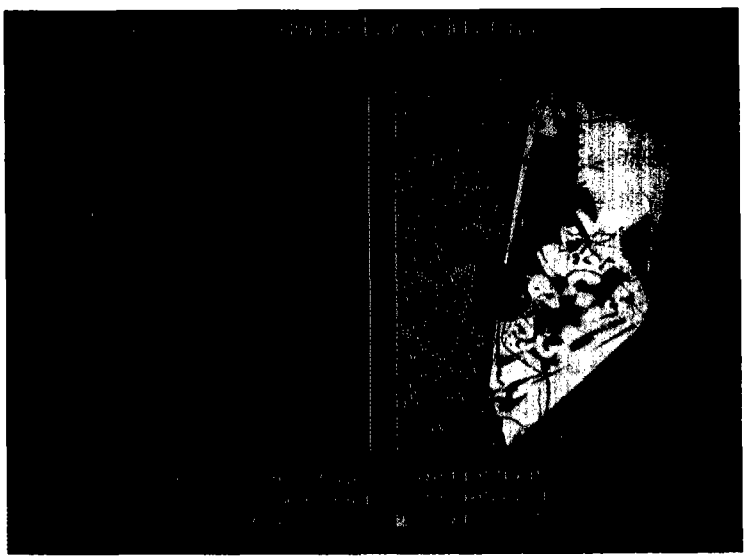


Fig. 5. Analysis of groundwater table

3-2-3. 식생(Vegetation)

나무 뿌리들은 토양의 전단강도(Shear strength)를 증가시키며 적당한 식생분포는 상부 토양에 대한 비, 바람 등의 직접적인 영향을 차단시킨다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 산림지역을 밀도(Density)에 따라 다음의 4가지로 분류하였다.

① 고밀도지역(Heavy vegetation) : 1(Rating)

② 중밀도지역(Light vegetation) : 2(Rating)

③ 저밀도지역(Grass.) : 3(Rating)

④ 나대지(No vegetation) : 4(Rating)

식생의 밀도분류를 위한 토지이용현황도(Land cover/use map)는 TM영상(1987. 10, 1988. 9)들을 PCA(Principal component analysis)와 Training-set를 이용한 감독분류기법(Supervised classification), Clustering을 이용한 비감독분류기법(Unsupervised classification)을 병행하여 작성하였으며, 항공사진(1987. 5) 판독자료에 의하여 부분적으로 수정 및 보완을 하였다(그늘지역, 수계, 도로). 본 현황도의 구분방법은 U.S.G.S의 연구내용(Land use and cover classification system with remote sensor data, 1976)을 기초하여 대분류(농경지, 산림, 인구밀집지역, 수계, 나대지)를 원칙으로 하였고, 산림지역만 등급설정을 위하여 세분하였다. 그러나 영상처리결과 나대지 및 저밀도지역은 농경지와 일부 중첩되는 이유로, 산림지역으로 분류된 지역 중에서 기작성된 지형경사도를 이용하여(중첩기법) 지형경사 약 10°이상 지역만을 다시 추출, 상기의 등급을 주었다.

3-2-4. 강우(Rainfall)

강우량은 ① 일정기간에 관찰된 강우의 기록, ② 한해의 총강우량, ③ 강우의 집중현상 등에 대하여 동시에 분석이 이루어져야 한다. Guidicini와 Iwasa(Geotechnical Engineering Investigation Manual, 1986, p. 745)는 40년간의 강우량과 산사태 발생빈도를 통계 분석하여 비교표를 작성하였는데, 이 표는 강우량에 따른 위험도(Danger level) 구분을 위하여 본 연구에서 이용하였다. 연구지역의 강우집중 현상이 6~9월인 점을 고려할 때 다음의 4등급으로 구분할 수 있다.

① 2,500mm/년 이상(zone A) : 4(Rating)

② 2,000~2,500mm(zone B) : 3(Rating)

③ 1,200~2,000mm(zone C) : 2(Rating)

④ 1,200mm 이하(zone D) : 1(Rating)

본 지역의 10년간(1978~1987년) 기상자료(환경영향평가서, 1989. 8)는 1년 평균강우량이 1,200~1,300mm(1,223mm)이며, 강우의 집중은 6~9월 사이에 820~830mm(전체의 68%), 24시간 최대 강우량은 190.5mm(1984. 9. 1)로 나타났다. 그 결과 본 지역은 zone-C(2등급)에 해당된다.

3-2-5. 토성(Soil texture)

정밀토양도(농업진흥청, 1977)와 시료분석을 통하여 통일분류법(Unified Soil Classification System)에 맞추어 토양분류도(Fig. 6-A)가 작성되었다. 이에 의하면 본 지역은 대부분 양토-사양토(SM, SC)이며 Silt(29～43%)와 Clay(6～15%)를 포함한 세립-중립질의 사질토양이 우세하다. 하상 주변에 분포하는 범람지(Gravelly sands)는 투수계수(Estimated permeability)가 약 10^{-3}m/s로써 본 연구 목적상 불량토양(Higher hazard)으로 분류되나 분포지역이 지형경사 0～5% 지역에 국한되므로 가중치는 0(zero)이 부여되었다. 다른 토양들은 그들의 공학적 특성(Silt와 Clay의 함량, 투수계수, 물성)을 고려하여 다음과 같이 분류하였다.

① SM(Silty sands) : 1(Rating)

② SC(Clayey sands) : 2(Rating)

③ ML(Silts and very fine sands) : 3(Rating)

Fig. 6. Soil and Geology.

3-2-6. 지질

광역적 조사를 위한 지질 요소 중 가장 중요한 것은 암질, 절리, 파괴사면 위의 지층경사 등이다. 본 연구지역은 풍화대 발달이 깊은 혹운모 및 화강암질 편마암지역으로써 노두의 발달이 아주 불량하며 상부 암석들은 대부분 풍화암 내지 잔류토양으로 구성되어 있다(Fig. 6-B). 전장에서 언급된 요소(지형경사, 토양, 지하수) 분석에 이미 본역의 지질학적 특성이 고

려되었으므로 암질에 대한 등급(Hard rock-1, Soft rock-2)만 전체적으로 2등급에 분류하였다.

3-2-7. 광역 지질재해의 구분(Classification of stability rating)

상기 요소들에 대한 등급이 정하여진 후 그들의 중요도에 따른 가중치(weight)가 부여되었으며, 광역지질재해분석을 위한 최종평가치(SR)는 아래와 같이 계산한다(Table 3).

$$SR = Tw \times Tr + Lw \times Lr + Gw \times Gr + Vw \times Vr + Rw \times Rr + Sw \times Sr + Qw \times Qr + Bw \times Br + Cw \times Cr$$

SR : Stability rating

Tw, Tr : Table 3상의 개개 요소에 대한 가중치(Weight)와 등급(Rating)

본 연구에 사용된 ARC/INFO시스템은 새로 생성되는 도면의 속성표에 중첩되어지는 모든 도면들의 속성자료들을 유지함으로써 SR의 계산을 가능하게 하였으며, 실제 연구지역의 SR 범위는 4-46으로 나타났다. 최종재해등급을 구분하기 위하여 SR값(세로축)에 대한 면적(가로축)의 누적 분포도를 작성하였고, 그 분포곡선상에서 가장 두드러진 변화를 보이는 3개의 변곡점(Break point : SR=15, 20, 25)을 선정하여 4구분하였다(Fig. 7, 8).

Table 3. Summary of the Weight and Rating System for Regional Geologic Hazard Model

Factors	Weight	Rating
1. Topographic slope(Tw, Tr)	5	1~6
2. Landslide frequency(Lw, Lr) (correlation between topographic slope and frequency)	4	1~7
3. Position of Groundwater head(Gw, Gr) (Proximity to water table or springs)	3	1~3
4. Vegetation(Vw, Vr)	2	1~4
5. Rainfall(Rw, Rr)	2	1~4
6. Soil texture(Sw, Sr)	1	0~3
7. Rock quality(hard/soft, jointing)(Qw, Qr)	1	1~2
8. Bedding dips in the direction of potential failure(Bw, Br)	3	1~2
9. Condition of bedrock(Cw, Cr)	2	1~2

Stability Rating(SR):

* $SR = Tw \times Tr + Lw \times Lr + Gw \times Gr + Vw \times Vr + Rw \times Rr + Sw \times Sr + Qw \times Qr + Bw \times Br + Cw \times Cr$
  (Tw, Tr : Weight, Rating)
  ① Stable : 0~15
  ② Potentially unstable : 15~20
  ③ Unstable : 20~25
  ④ Very unstable : above 25

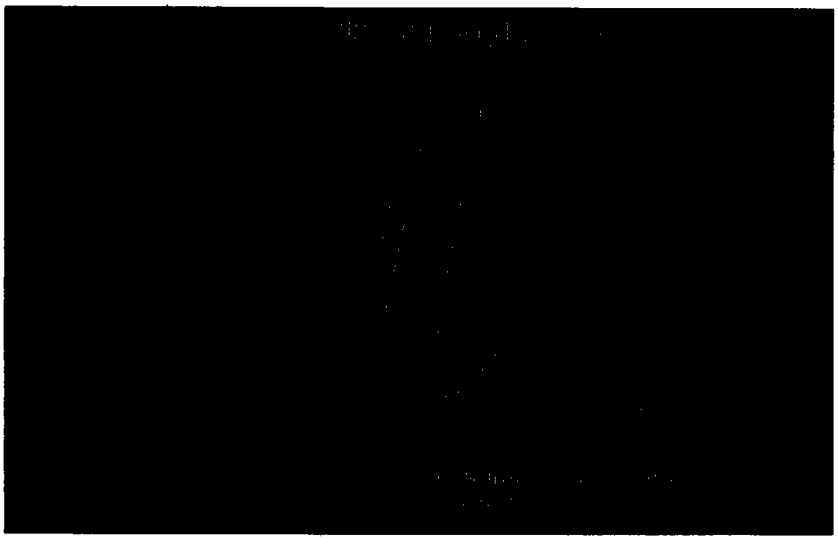


Fig. 7. Ovelaied process.

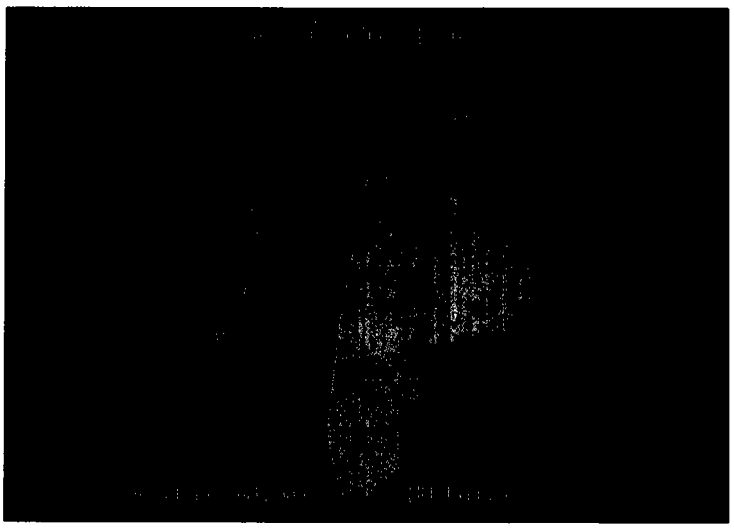


Fig. 8. Production of final map.

4. 수치화와 보정

본 연구를 위하여 작성된 초기 자료층(Data layer)들은 10개(Table 4)로써 Scanning, Digitization, Vectorizing, Editing 등의 과정을 통하여 ARC/INFO의 Coverage로 변환된 후 시스템으로 입력되었다. 기본도는 1/25,000 지형도가 이용되었으며, 다른 자료들은 모든 정보들을 기본도 위의 지리좌표계에 일치시킨 후 시스템 내에서 TM(Transverse Mercator Projection)도법에 등록하여 분석을 위한 속성값(면적, 길이)들이 계산되었다. DEM(Digital Elevation Model)은 등고선에서 추출된 Digital line data를 기본으로 하였으며 지형분석 등을 위해서는 TIN(Triangulated Irregular Network) 자료구조로 변환하여 처리하였다. DEM작성시 누적된 기계상(Hardware)의 최대오차는 0.0092인치로 만족할 만하였다. TM영상들은 기하보정(Geometric correction) 과정에서 TM도법에 등록 후 영상처리되었으며, 최종영상은 GIS시스템으로 전송되어 분석을 위한 자료층군을 구성시켰다.

Table 4. Data layers for the regional geologic hazard model

1. Topographic map : Topographic contours, Roads, streams(3 coverages)
2. Inventory map of landslide deposits
3. Landslide frequency map
4. Isopleth map of landslide deposits
5. Soil classification(Texture)
6. Soil depth
7. Land cover/use map
8. Geologic map
9. Boring data map : Sel, Wel, Gel, Sth, Wth, Th(6 coverages)
10. Point feature : wells, schools.

5. 지질재해도 분석 및 평가

최종적으로 만들어진 광역지질재해도(Fig. 9)는 모든 요소(3항)들의 자료가 중첩되는 지역만 추출되어 작성되었다. 그러나 지하 암반에 대한 새로운 자료가 추가될 경우 좀더 양질의 지질재해분석이 가능할 것으로 기대된다. 식생 밀도분석도 계절 및 자료(영상 및 항공사진)의 질에 따라 크게 좌우되기 때문에 이의 보완에 미흡한 점이 있다. 본 연구지역은 1, 2등급(Stable-Potential unstable)이 전체의 약 81%(1등급 : 57%, 2등급 : 24%)의 분포를 보이는

비교적 안정된 지역이며, 지형경사가 10°미만 지역에 분포하는 2등급 지역은 토양성분(ML : R3)과 지하수위(R3)의 높은 등급 때문이며, 이러한 현상들은 대상지역의 자연환경 특성을 고려한 가중치 변화에 따라 조정될 수 있다. 3, 4등급 지역(Unstable-very unstable, 3 : 12%, 4 : 7%)은 산사태의 높은 빈도율(20～30%)과 지형경사(약 30°)가 주원인으로 항공사진 분석결과 및 야외조사와 대체로 일치하였다.

Fig. 9. Regional geologic hazard map(3d).

6. 결론 및 토의

GIS의 지도모형연구를 이용하여 개발된 광역지질재해 분석모형을 이용할 경우 대상지역의 전체적인 지면 안정성을 빠른 시간에 경제적으로 분석할 수 있다. 그러한 재해분석은 지역개발정책에 직접적으로 공헌할 수 있음은 물론 예측 가능한 자연재해(산사태)를 즉각 인지함으로써 피해를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 연구지역은 대단위 규모의 거주지가 조성될 예정지로써 최종 생성된 지질재해도는 본역이 전체적으로 산사태에 대한 잠재력이 약하며, 지반이 안정된 지역으로 분석된다. 그러나 3, 4등급 지역에 도로건설 및 정지공사를 시행코자 할 때는 자세한 지하지반의 특성연구 및 사면 안정성 연구가 필요하다. 광역지질재해 분석모형을 위한 요소, 등급 및 가중치 결정은 사면파괴 원인을 분석하여 대상지역의 자연환경 특성에 따라 조절되어야 하며, 본 연구에서 입력 요소 중 가장 중요한 것은 지형경사, 산사태

발생빈도 및 지하수위였다. 또한, 수치 지형자료(Digital elevation model)의 취득과 지하물질 자료의 정확도는 실제로 GIS Map(광역지질재해도) 생성에 결정적 역할을 하였다. 본 연구는 앞으로 지질재해정보시스템(Geo-hazard Information System) 연구의 기초가 될 것이며, 환경지질연구를 위하여 그 활용성이 기대된다.

참고문헌

Anderson, J. R., et al., 1976. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data, *U.S.G.S Geological Survey Professional Paper*, 964.

Brabb, Earl E., 1987. Analyzing and portraying geologic and cartographic information for land-use planning, emergency response, and decisionmaking in San Mateo County, Caifornia, Second Annual International Conference, *Exhibits and Workshops on GIS*, pp. 362～374.

Degraff, J. V., 1985. Using isopleth amps of landslide deposits as a tool in timber sale planning. *Bull. Assoc. Eng. Geol.*, No. 22, pp. 445～453.

Hollenbaugh, Richard D., 1987. Site selection using Bechwel's Geographic Information System, Second Annual International Conference, *Exhibits and Workshops on GIS*, pp. 601～610.

Hunt, Roy E., 1986. *Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation*, McGraw-Hill Book Company, pp. 447～537.

Walker Bruce, F., 1987. Soil slope instability and stabilisation, A. A. Balkema, pp. 2～52.

Winterkirn, Hans F., and Fang, Hsai-Yang, 1985. *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Einhold Company, pp. 345～401.

김윤종, 김원영, 1991. Sarma 방법을 이용한 암반사면 안전성 분석연구, 한국지구과학학회지 제12권 1호, pp. 14～24.

김윤종, 유일현, 1989. Isopleth Mapping 기법에 의한 봉계지역의 Landslide 활동성 연구. 대한원격탐사학회지 제5권 2호, pp. 123～131.

복선전철 지반조사보고서, 1989. 철도청.

새도시개발사업 토질조사주상도, 1990. 한국토지개발공사.

정밀토양도(성남시 및 광주군), 1977. 농촌진흥청, 농업기술연구소.

환경영향평가서, 1989. 한국토지개발공사.