

지질구조자료를 이용한 산사태 취약성 분석 기법 개발 및 적용 연구

이사로* · 최위찬** · 장범수***

Development and Application of Landslide Analysis Technique Using Geological Structure

Sa-Ro Lee* · Uee-Chan Chawe** · Buhm-Soo Chang***

요 약

집중호우로 인한 산사태 발생으로 인명 및 재산 피해가 계속되고 있으며, 이러한 특히 댐, 교량, 도로, 터널, 공단 등 국가 주요 시설물에 대한 피해가 우려되고 있다. 따라서 이러한 지역에 대한 산사태 분석이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 기존의 산사태 취약성 분석 및 검증 결과를 이용하여 주요 시설물인 울산석유화학단지 및 금강철교 주변 지역에 대해 GIS를 이용한 광역적 산사태 취약성 평가 기법을 개발하고 이를 적용 하였다. 취약성 평가를 위해 산사태 발생에 중요한 요인인 지질구조 자료를 현장 조사하였고, 기존의 지형, 토양, 임상, 토지 이용 등 공간 자료를 이용하였다. 산사태 취약성 평가를 위해 사용된 요인은 지형 DB에서는 경사, 경사방향, 지형곡률 등을, 토양 DB에서는 토질, 모재, 배수, 유효토심 등을, 임상 DB에서는 임상종류, 영급, 경급, 밀도 등을, 토지이용 DB에서는 토지이용 등이다. 지질구조는 금강철교 주변 지역에서는 단층 밀도가 이용되었으며, 울산석유화학단지 주변지역에서는 지질구조선을 지형의 경사방향과 비교 분석하여 이용하였다. 산사태 취약성 평가는 이러한 각 요인의 등급 값을 모두 더해 최종 산사태 취약성도를 작성하였다. 이러한 결과는 시설물 보호를 위한 지반 안정성의 과학적이고 체계적이 평가에 활용될 수 있다.

주요어 : 지질구조, 시설물, 산사태, 취약성, GIS

* 한국지질자원연구원 국가지질자원정보센터(National Geoscience Information Center, Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) Taejeon, 305-350, Korea)

** 한국지질자원연구원 지질연구부(Department of Geology, Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) Taejeon, 305-350, Korea)

*** 시설안전기술공단 기술개발지원실(Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, 2311, Daehwadong, Ilsanku, Goyang, 411-410, Korea)

ABSTRACT : There are much damage of people and property because of heavy rain every year. Especially, there are problem to major facility such as dam, bridge, road, tunnel, and industrial complex in the ground stability. So the counter plan for landslide or ground failure must be necessary. In the study, the technique of regional landslide susceptibility assessment near the Ulsan petrochemical complex and Kumgang railway bridge was developed and applied using GIS. For the assessment, the geological structures such as bedding and fault were surveyed and the geological structure, topographic, soil, forest, and land use spatial database were constructed using GIS. Using the spatial database, the factors that influence landslide occurrence, such as slope, aspect, curvature and type of topography, texture, material, drainage and effective thickness of soil, type, age, diameter and density of forest, and land use were calculated or extracted from the spatial database. For application of geological structure, the geological structure line and fault density were calculated. Landslide susceptibility was analyzed using the landslide-occurrence factors by probability method that is summation of landslide occurrence probability values per each factors range or type. The landslide susceptibility map can be used to assess ground stability to protect major facility.

Keywords : Geological structure, facility, landslide susceptibility, GIS

1. 서 론

집중호우로 인한 산사태는 우리나라에서 매년 발생하고 있으며 그 재산 및 인명 피해 또한 막대하다. 따라서 산사태 발생에 대한 대책 수립이 필요하며 이를 위해서는 가장 먼저 산사태의 발생 원인이 될 수 있는 방대한 지형정보 자료를 과학적으로 종합 분석할 수 있는 지리정보시스템(GIS)을 이용하여 산사태 관련 요인을 공간 데이터베이스로 구축해야 한다. 그리고 이러한 공간 데이터베이스를 이용한 산사태 취약성 평가 기법이 개발되고 또한 적용되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 산사태 발생에 가장 중요한 요소 중에 하나인 지질구조를 이용한 산

사태 취약성 평가기법을 개발하였으며, 이를 울산 석유화학단지 및 금강 철교 등 시설물 주변 지역에 적용해 보았다.

본 연구에서는 먼저 연구 지역의 지질 구조 조사를 실시하였으며, 그리고 연구 지역의 지형, 토양, 임상, 토지이용, 지질 구조 등의 자료를 GIS를 이용하여 공간 데이터베이스로 구축하였다. 또한 지질구조를 활용하기 위해 현장 조사된 주향 및 경사와 단층 자료를 이용하여 지질구조선 및 단층 밀도를 작성 및 계산하여 각각 연구지역에 적용해 보았다. 그리고 이러한 공간 데이터베이스를 이용하여 산사태 자료를 활용한 기존의 용인(이사로 외, 2000) 및 장흥 지역(이사로 외, 2000)의 산사태 취약성 평가 결과 즉 각 요인별로 등급값을 적용하여 연구지역의 산사태 취

약성 평가를 실시하였다. 본 연구지역은 울산광역시 내에 위치하는 울산 석유화학단지 주변지역 및 대전광역시 및 청원군 지역에 위치하는 금강 철교 주변지역으로 하였고, 이러한 지역은 화학단지 및 철교 등 중요 국가 시설물들이 분포해서 연구 지역으로 선정하였다. 본 연구에 사용된 프로그램은 GIS 프로그램인 ArcView와 Arc/Info를 사용하였으며, 빠른 공간분석을 위해서 Arc/Info GRID 형태의 자료를 사용하였다.

이러한 산사태 취약성 분석 결과는 주요 시설물의 광역적 지반 안정성 평가 및 시설물 확장 등에 사용될 수 있으며, 집중호우 및 지진 등에 대비하여 주요 시설물 주변 지역에 대한 지반 안정성 광역적 평가가 활용될 수 있다. 즉 산사태 취약성 분석 결과를 이용하여 사전에 과학적이고 체계적으로 산사태 즉 지반 붕괴에 대해 평가를 실시하고, 이를 토대로 주요 시설물 보호를 위한 대책을 마련할 수 있을 것이다.

2. 기존 연구

산사태 평가를 위해 현재 다양한 산사태 분석 기법이 개발되었고 개발되고 있다. 이 중 GIS를 이용한 산사태 취약성 평가 및 분석을 위한 국내외의 기존 연구를 살펴보면 다음과 같다. GIS를 이용한 광역적 중첩분석을 통한 산사태 분석의 경우 국내에서는 경사, 경사방향, 지질, 토질, 토지이용 등 5개 요인을 GIS를 이용하여 중첩 분석하여 청주지역에 대해

산사태 발생 가능성을 분석하였고(김윤중 외, 1994), 지질, 토양, 선구조 밀도 등을 요인으로 하고 전문가의 판단에 의해 가중치 및 등급을 정한 산사태 취약성도가 경상남도 지역에 대해 적용되었다(한대석 외, 1998). 이러한 예는 외국에서도 많이 찾아볼 수 있는데, 먼저 중첩 분석의 경우 지질도, 지형도, 수치지형모델 등을 이용하여 GIS 중첩 분석을 실시해 산사태 취약성도를 작성하였고(Baldelli et al. 1996), 침식율, 배수율, 구조, 사면 경사, 토지 이용 등을 이용하여 지도를 GIS 중첩 방법을 사용하였다(Turrini and Visintainer, 1998). 다른 예는 사면 안전율을 구하기 위한 분석과 GIS를 결합한 SLIDISP 과정을 들 수 있다(Liener et al., 1996). 각 암상 종류에 대해 암상의 수문학적 특성을 고려하면서 사면 임계각을 계산하였고, 토양도로부터 추출한 토양층의 자료를 사면각과 결합하여 안전율 값을 계산하여, 그 결과들을 암상, 사면각, 토양강도와 같이 중첩 분석하여 산사태 위험 지수도를 만들었으나, 가정이 너무 들어간다는 단점이 있다.

이와 같은 방법들은 입력 요인에 대해 분류를 하고 분류된 종류 및 값에 등급 값을 매겨 모두 더한 후 그 결과로 산사태 취약성도를 작성하였는데, 등급 및 가중치 산정이 과거의 산사태 관련 요인과 산사태와의 상관 관계 분석 자료가 부족하여 주로 전문가의 판단에 의해 등급 및 가중치가 결정되었다. 그래서 이러한 등급 및 가중치를 전문가의 주관적인 판단이 아닌 산사태 발생자료에 의해 객관적으로 제시하고자 하는 확률, 통계 방법이 국내외에서 적용되었는데, 국내에서는 용

인 및 장흥 지역에 대해 적용되었다(이사로, 2000). 이 방법은 집중 호우시 산사태 발생 위치를 조사하고 이를 경사, 경사방향, 지형곡률, 토질, 토양배수, 토양모재, 토양두께, 임상, 영급, 경급, 밀도, 토지이용, 지질구조 등과의 상관관계를 구해 이를 취약성도 작성이 필요한 등급 값으로 이용하였다.

외국의 경우에는 통계적인 기법에 의한 산사태 취약성 평가가 경사, 경사 방향, 유역 특성 등 각종 지형 특성 및 토지 이용, 암상 등을 이용하여 스페인에서 실시되었다(Baeza and Corominas, 1996). 여기서 사용된 통계 방법은 판별분석법이며, 이러한 판별분석을 위해서는 각 입력요인이 정규분포를 해야 하므로 이에 대한 검정도 실시하고 분석을 하였다. 이렇게 판별분석을 통해 나온 판별식을 이용하여 취약성도를 작성하였으나, GIS를 이용하지는 않았다. 판별분석의 또 다른 예는 토양, 사면 경사, 사면 길이, 사면 높이 등 총 9개의 요인을 사용하여 판별식을 유도하여 파괴 확률을 평가하였다.(Finlay et al., 1996). 여기서도 위와 마찬가지로 GIS를 사용하지 않았다. 산사태를 GIS를 이용한 확률 및 로지스틱 회귀 공식을 통해 분석하여 산사태 위험 구역을 표시하였는데(Mark and Ellen, 1995), 사용된 입력 요인은 사면각, 산사태 발생시 총강우량, 평균 강우량, 토양, 식생 등이었다. 이와 비슷하게 GIS를 이용하고, 확률 기법 및 통계 기법인 로지스틱 회귀 분석 및 판별분석을 사용하였는데(Carrara et al., 1995), 고려된 요인은 암상, 구조구, 단층대, 층리의 방향과 사면 방향/경사, 사면 경사,

사면 단면, 사면 길이, 토지이용 등이었다. 또 다른 통계 기법인 다중 회귀공식을 이용하여 분석한 경우도 있는데(Chung, et al., 1995), 입력 요인은 지질, 지형, 경사, 토지이용, 도로로부터의 거리, 계곡 정상으로부터의 거리, 단층으로부터의 거리 등을 이용하였다. GIS 및 절리의 방향 및 경사를 이용한 사면 안전율 및 경험론적 방법을 사용한 대축적 산사태 취약성 평가 방법이 청주 지역의 도로변을 따라 적용되었다(이사로, 김용성, 1997). 이 방법은 도로변에 있는 위험사면에 대해 현장 조사 후 사면 안전율을 계산하고, 경험론적 방법을 이용하여 위험 지수를 구한 후 이를 GIS를 이용하여 데이터베이스로 구축하였다.

엽리의 분석을 통해 절리의 경사 및 경사 방향을 추출하고 이를 지형의 경사 및 경사 방향과 비교 분석하여 산사태 취약성 분석이 경기도 장흥지역에 대해 실시되었다(이사로, 2000). 그리고 절리의 방향 및 경사와 지형의 방향 및 경사를 고려한 산사태 분석 방법이 충주지역에 대해 시도되었고(신현준, 1995), 사면 안전율 공식을 이용한 산사태 분석 방법이 금수산일대에 대해 적용되었다(배현철, 1997). 이러한 방법은 광역적인 지역에 대해 적용을 하였는데, 현장의 지질 구조의 주향 및 절리를 측정하고 로즈다이어그램 작성을 통한 구조구를 만들거나 보간법을 사용하여 지질 구조의 주향 및 절리 방향을 결정하고 이를 이용하여 사면 안정성 분석을 하였다. 그러나 여기서 가장 중요한 자료인 절리의 주향 및 경사를 한정된 지역의 현장 조사에만 의존하여 정확한 절

리의 주향 및 경사를 구할 수 없다는 문제점이 있었다.

3. 연구 지역 공간 DB

산사태 취약성, 가능성, 위험성 평가를 위하여 울산광역시 내에 위치하는 울산 석유화학단지 주변지역 및 대전광역시 및 청원군 지역에 위치하는 금강 철교 주변 지역에 대해 각종 공간 DB를 구축하였다 <Table 1>. 먼저 지형도의 경우 국립지리원의 1:50,000 지형도의 등고, 수계, 도로망 등을 공간 DB를 이용하였다. 이러한 지형도 공간 DB는 등고, 수계, 도로, 철도 등 총 4개의 공간 DB로 구성되며 각각 선 속성을 가진다. 이중 등고를 이용하여

DEM(Digital Elevation Model)을 작성하였다. 자료의 해상도 즉, 격자의 크기는 중축척은 30m x 30m이다. 지형경사도 공간 DB는 DEM(Digital Elevation Model)을 이용하여 지형 경사값을 계산하여 얻었다. 지형경사방향도 공간 DB는 DEM (Digital Elevation Model)을 이용하여 지형 경사방향값을 계산하여 얻었다. 지질도 공간DB의 경우 1:50,000과 1:250,000 지질도의 암상 정보를 공간DB를 이용하였다. 토양의 경우 농업과학기술원의 1:50,000 개략토양도의 토양 종류, 모재, 배수 지형, 유효토심 등의 공간DB를 이용하였다. 토양도는 종류, 모재, 배수, 유효토심, 지형 등의 정보를 가지고 있으며, 종류는 토양 분류 체계 및 특성에 따른 종류를 나타내며, 모재는 토양이 어떤 암상으로부터 형성되었는가를,

<Table 1> Constructed GIS layers in Ulsan city

Layer	Source data	Scale	Data type
Administrative District	Topographic Map	1:5,000	Coverage
Facility	Topographic Map	1:5,000	Coverage
Contour Line	Topographic Map	1:50,000	Coverage
Drainage	Topographic Map	1:50,000	Coverage
Road	Topographic Map	1:50,000	Coverage
Rail Road	Topographic Map	1:50,000	Coverage
DEM(Digital Elevation Model)	Contour of Topographic Map	1:50,000	GRID
Hillshaded Image	DEM	1:50,000	Image
Slope	DEM	1:50,000	GRID
Aspect	DEM	1:50,000	GRID
Geology	Geological Map	1:250,000	Coverage
Fault	Geological Map	1:250,000	Coverage
Soil	Soil Map	1:25,000	Coverage
Forest	Forest Map	1:25,000	Coverage
IRS Pan Image	IRS Pan Image	5m'5m	Image
LADNSAT TM Image	Landsat TM Image	30m'30m	Image
Land Use	Landsat TM Image	30m'30m	GRID

배수는 물의 얼마나 잘 배수되는가를, 유효토심은 토양의 유효 두께를, 지형은 토양이 분포한 지역의 지형을 각각 나타내 준다.

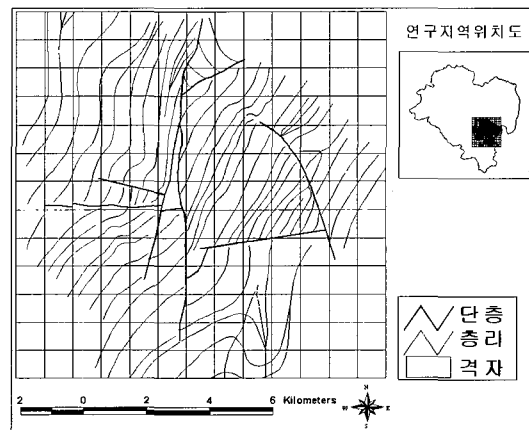
임상도의 경우 임업연구원의 1:25,000 임상도의 임상, 경급, 영급, 산림밀도 등의 공간 DB를 이용하였다. 임상도는 1:25,000 임상도 공간 DB를 이용하였다. 이러한 임상도는 임상구분, 경급, 영급, 밀도 등의 정보를 가지고 있다. 임상구분은 크게 임목지, 무림목지, 제지, 임간나지로 구분되어 수종 및 임상 등의 정보를 가지고 있다. 경급은 나무의 흉고직경의 길이를 나타내며, 영급은 수령을 나타낸다. 밀도 구분은 나무의 밀도에 나타낸다(임업연구원, 1998). 토지이용도 공간DB는 위성영상인 LANDSAT 영상을 기하학적으로 보정한 후 분류기법을 적용 영상 처리를 통해 구축하였다.

4. 현장 지질구조 조사

산사태가 발생하는 사면은 일반적으로 절리(joint), 단층(fault), 층리(bedding plane) 등과 같은 불연속면 즉 지질구조를 포함한다. 이러한 지질구조 분포의 기하학적 특성 및 역학적 특성에 의해 사면의 안정성 여부가 결정된다. 이러한 지질구조 중 절리는 변형이 없는 암석내의 쪼개진 면을 나타내며, 단층은 쪼개짐에 평행한 다른 면에 상대적으로 변위가 있는 면을 따라 생기는 쪼개짐 혹은 쪼개지는 영역을 나타낸다. 그리고 층리는 주로 퇴적암에서 나타나며 퇴적 과정의 결과로부터 생

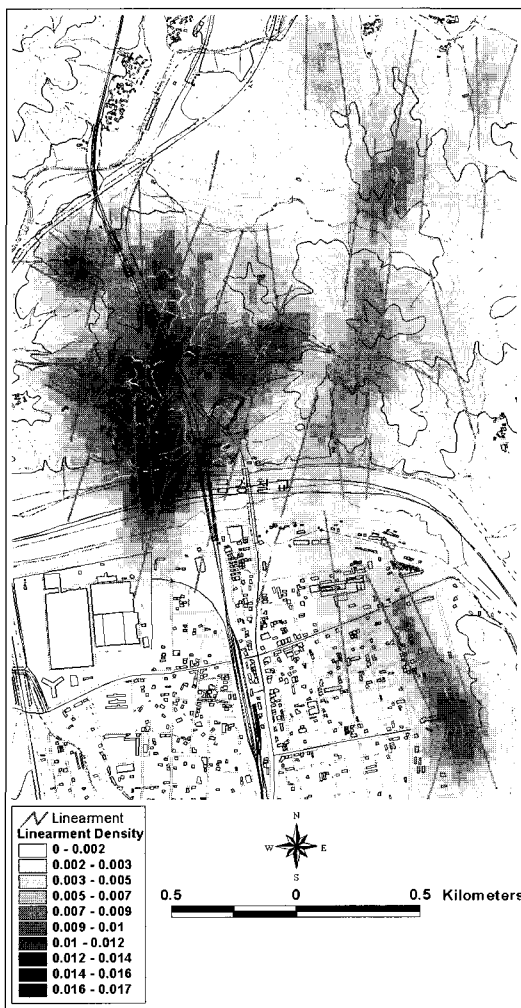
기는 다양한 두께와 특성을 가지는 암석의 배열 혹은 층을 나타낸다. 이러한 지질구조의 기하학적 형상은 경사와 경사방향(Dip and dip direction)으로 나타내는데, 경사는 지질구조 표면의 기울어진 각도를 나타내면, 경사방향은 경사각의 방향을 나타낸다. 이러한 절리, 단층, 층리 등의 지질구조는 물의 흐름 및 연약대 형성과 관련하여 산사태 발생에 영향을 미치게 된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 절리, 단층, 층리 같은 지질구조를 울산 석유화학단지 및 금강철교 주변지역을 중심으로 현장 조사를 하여 그 분포 양상을 파악하였고, 이를 토대로 지질구조선도를 작성하였다. 울산 석유화학단지 지역의 경우 층리의 주향 및 경사를 측정하였다. 현장 측정 위치확인을 위해 GPS를 사용하였으며, 측정된 층리의 주향 및 경사를 이용하여 울산 석유화학단지 주변지역의 지질구조선도를 작성하였다([Figure 1]). 그리고



[Figure 1] Geological structure map near Ulsan petrochemical complex.

금강철교 주변지역의 단층의 주향과 경사를 측정하여 이를 근거로 단층의 위치를 파악하였다. 그리고 이러한 단층선을 산사태 취약성 분석에 이용하여 위해 단층 밀도를 계산하여 단층 밀도 분포를 [Figure 2]와 같이 계산하였다.



[Figure 2] Fault and fault density map near Kumgang railway area.

울산 석유화학단지 지역의 경우 지질이 퇴적암이어서 층리의 주향 및 경사를 측정하여 지질구조선도를 작성하였으며, 금강철교 주변지역의 경우는 지질이 화성암이기 때문에 지질구조선작성이 불가능하여 단층을 조사하였다. 즉 변성암 및 퇴적암의 경우는 변성암의 엽리면과 퇴적암의 층리면을 이용하여 지질구조선도 작성이 가능하지만, 화성암의 경우 엽리면이나 층리면 같은 구조가 없기 때문에 지질구조선도 작성이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 단층 자료를 이용하여 밀도값을 계산하여 산사태 취약성 분석에 사용하였다.

이렇게 작성된 지질구조선도는 울산 석유화학단지 주변지역에 대해서는 지형의 경사방향과 비교 분석된 기존의 연구 결과(Lee et al, 2002)에 근거하여 산사태 취약성 평가에 한 요인으로서 이용되었고, 금강철교 주변지역에서는 지질구조선의 밀도를 구하여 산사태 취약성 평가에 역시 한 요인으로서 이용되었다.

5. 광역적 지반 안정 취약성 분석

산사태 평가는 취약성(Susceptibility), 가능성(Possibility), 위험성(Risk) 평가를 실시하였다. 산사태 취약성은 강우, 지진 등 산사태를 직접적으로 유발시키는 요인이 생겼을 때 그 지역이 얼마나 산사태 발생에 취약한가를 평가한 것이고, 산사태 가능성은 어떤 지역의 산사태 취약성에 강우, 지진 등 산사태 유발 요인의 발생 가능성을 더해 그 지역에서 산사태가 얼마

나 잘 일어날 수 있는가는 평가한 것이다. 여기서 이러한 산사태 유발요인을 가정한 후 산사태 가능성을 예측할 수 있다. 그리고 산사태 위험성은 산사태 취약성 혹은 가능성에 인명, 시설물 등 피해요소를 같이 고려한 것으로 산사태로 인해 인명 및 시설물의 피해 가능성이 얼마인가를 평가한 것이다. 즉 아래와 같은 식으로 표현될 수 있다(Einstein, 1988, 이사로 외, 2000).

$$\text{Susceptibility} = f(\text{Landslide, Landslide related factors}) \quad (1)$$

$$\text{Possibility} = f(\text{Susceptibility, Impact factors}) \quad (2)$$

$$\text{Risk} = f(\text{Possibility, Damageable objects}) \quad (3)$$

본 연구에서는 이 중 취약성 평가만을 실시하였으며, 이를 위해 먼저 울산 석유화학단지 주변지역 및 금강 철교 주변지역에 대해 산사태 취약성 분석을 실시하였다. 취약성 분석 방법은 격자를 30m로 한 중축척의 확률 기법을 이용하였다. 중축척은 입력 자료의 축척이 1:25,000 - 1:50,000인 경우이고(Turner and Schuster, 1996), 이러한 확률 기법은 용인지역에서 적용해 본 결과 다른 기법에 비해 여러 가지 장점이 있어 선택하였다(이사로, 2000). 본 연구에 사용된 확률기법은 각 요인에 확률에 근거한 등급값을 주고, 이 등급값을 모두 더하고, 그 결과를 이용하여 분석을 하는 기법이다.

본 연구에서 분석에 이용된 요인은 경사, 경사방향, 곡률 등 지형자료, 토질, 배

수, 유효토심, 모재, 지형 등 토양자료, 임상, 경급, 영급, 밀도 등 임상자료, 토지이용 자료 등이다. 분석에 있어서 가중치는 1로 모두 같게 주었으며, 등급값은 용인지역 연구결과(이사로, 민경덕, 2000, Lee and Min, 2001)를 기본으로 하여 <Table 2>와 같이 주었는데, 암상 자료는 기존의 용인 및 장흥 지역에서의 분석 자료가 부족하여 본 분석에서는 고려하지 못했고, 토양의 토질의 경우는 1:50,000 축척의 자료를 적용하여 기존 용인지역의 1:25,000과 분류체계가 달라 기존의 연구결과를 이용하였다(김원영 외, 2000). 이러한 등급값 산정은 확률의 교차분석(Crosstabulation)법을 이용하여 각 요인의 종류 혹은 범위별로 산사태 발생 유무에 대한 면적 비율을 구한 후, 이렇게 구해진 각 요인의 종류 혹은 범위별 면적 비율을 산사태 발생 면적 비율을 각 요인의 같은 범위 혹은 종류의 분포 면적 비율로 나눈 값으로 등급값을 구하였다(이사로, 2000). 예를 들어 지질도에 나타난 화강암 면적의 합과 화강암이 분포하는 지역에서 발생한 산사태 면적의 비율을 구하여 그 비율을 화강암의 산사태 등급값으로 추정하였다. 즉 이러한 등급값은 용인지역(이사로, 2000)에서 산사태와 각 관련 요인들 간에 상관관계 분석을 통해 계산되었으며, 이러한 상관관계 분석은 각 요인의 등급별 산사태 발생 면적 비율을 각 요인 등급이 전체 면적에서 차지하는 비율로 나눈 것이므로, 이 값이 1이면 평균을 의미하며 1보다 클수록 산사태 발생과 높은 상관관계를, 1보다 작을수록 산사태 발생과 낮은 상관관계를 나타낸다.

그리고 현장조사결과를 분석한 지질구조선을 한 요인으로 추가하여 시설물 주변지역의 산사태 취약성을 추가로 분석하였다. 이러한 지질구조는 울산 석유화학단지 지질구조선[Figure 1]을 추가하여 취약성을 평가하였고 금강철교 주변지역은 단층 밀도도[Figure 2]를 추가하여 취약성을 평가하였다. 이러한 지질구조의 등급은 울산 석유화학단지 주변지역의 경우 경사 방향과 지형 방향과의 관계를 산사태 자료를 이용하여 분석한 장흥지역 연구결과(이사로 외, 2000, Lee et al, 2002)를 이용하여 <Table 3>과 같이 주었다. 그리고 금강철교 주변지역의 경우 단층 밀도값을 이용하여 <Table 4>와 같이 주었다. 기존의 장흥지역 연구(Lee et al, 2002)에서는 지질 구조를 이용한 사면의 광역적 산사태 취약성 평가를 위해 전체 지형의 경사 방향과 절리의 경사 방향 및 지형의 경사각과 절리의 경사각을 비교하고, 산사태 발생지역의 지형 방향과 절리의 경사 방향 및 지형의 경사각과 절리의

경사각을 비교하였다. 즉 야외에서 산사태를 구조지질학적으로 분류할 때, 편마암의 엽리와 지형의 기하학적인 상관관계를 기준으로 하여, 산사태를 발생시킨 절리의 특성을 파악하였고, 이러한 결과를 본 연구에서 이용하였다.

광역적 산사태 취약성 분석을 위해 산사태 취약성 지수(LIS: Landslide susceptibility index)를 계산하였는데 이 지수는 상관관계 분석을 통해 구해진 각 요인에 등급값을 식 (4)과 같이 각 요인에 대해 가중치를 1로 같이 주고 모두 더한 값이다.

$$LSI = \sum Fir \text{ (Fir : 각 요인의 종류별 등 급값)} \quad (4)$$

격자별로 이렇게 계산된 산사태 취약성 지수값을 등면적으로 분류한 울산 석유화학단지 주변 지역 산사태 취약성도는 [Figure 3]과 같고, 금강철교 주변지역의 산사태 취약성도는 [Figure 4]와 같다.

<Table 2> Range and rating of topographic, soil, forest and land use.

T o p o g r a p h y	Slope (degree)	Rating	Curvature	Rating	Soil drainage		Rating
	0 - 5	0.10	< -9	2.08	Rock		0.00
	6 - 9	0.27	-8	3.00	Very poorly drained		0.01
	10 - 13	0.79	-7	2.14	Poorly or very poorly		0.06
	14 - 17	1.32	-6	2.55	Poorly drained		0.10
	18 - 23	1.72	-5	2.21	Somewhat poorly or poorly drained Moderately well or poorly drained		0.13
	24 - 29	2.09	-4	1.97			
	30 - 37	2.15	-3	1.69	Somewhat poorly drained Moderately well or somewhat poorly drained		0.15
	38 - 86	1.51	-2	1.16			
	Aspect	Rating	-1	0.99	Moderately well or well drained		0.59
Flat Area	0.13	0	0.55	Somewhat poor or well drained		0.94	
S	0.70	1	0.86	Moderately well or excessively drained		0.94	
SE	0.74	2	0.87	Well drained		1.02	
SW	1.01	3	1.04				

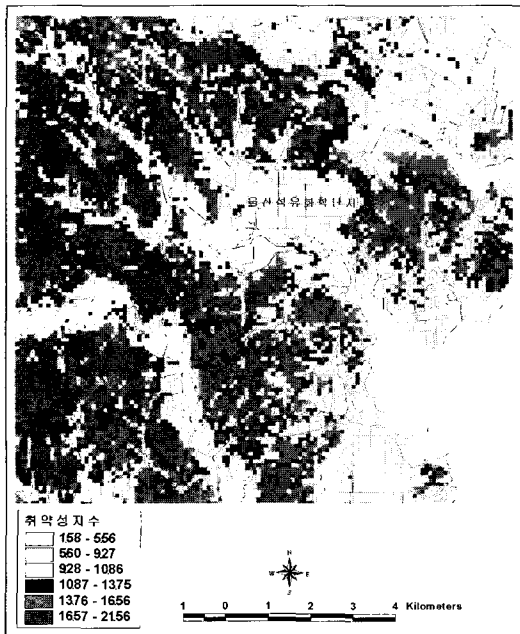
T o p o g r a p h y	W	1.08	4	1.03	S o i l	Well or excessively drained	1.37	
	NW	1.13	5	0.90		Excessively drained	1.72	
	E	1.16	6	0.77		Soil material	Rating	
	N	1.39	> 7	0.83		Diluvium, Alluvium	0.02	
	NE	1.71				Fluvial and marine alluvium	0.04	
	Topographic Type					Rating	Fluvial alluvium	0.20
	Plateau, Tidal flat, Alluvium fan, Dune, River and sea flood area, Plain					0.00	Valley alluvium	0.36
	Lower hilly plateau					0.05	Alluvial colluvium, Limestone colluvium, Acidic rocks colluvium and sediment, Sedimentary rock colluvium and sediment, Neutral or basic rock colluvium and sediment	1.58
	Piedmont slope area, Mountainous piedmont slope area					0.22	Acidic rock, Limestone residuum, Metamorphic sedimentary rock and schist residuum, Diluvium, Acidic, neutral, basic and sedimentary rock residuum, Neutral or basic rock residuum	
	Hilly area					1.00	Soil texture	Rating
	Mountainous area					1.33	Sand dune, Saline soil, Tidal flat, Rock	0.00
	Mountainous and hilly valley alluvium, Lower hilly valley alluvium					1.90	Low humic gley soil and alluvial soil	0.41
	Rock					2.00	Alluvial soil, Flood plain	0.57
	Lower hilly area					2.25	Regosols	1.00
	F o r e s t	Forest type				Rating	Lihosols and red-yellow podzolic soil	1.16
Pine, Field				0.00	Lithosols, Acidic brown forest soil	1.54		
Cultivated land				0.02	Regosols and red-yellow podzolic soil	4.00		
Non-forest				0.14	Effective thickness	Rating		
Larch				0.44	Tidal flat, Rock	0.00		
Mixed broad leaf tree, Needle and broad leaf tree				1.32	> 150cm	0.10		
Rigida pine				1.64	100 - 150 cm or > 150cm	0.22		
Coulter's pine				2.61	100 - 150 cm	0.33		
Artificial chestnut tree				5.00	50 - 100 cm or 100 - 150 cm	0.59		
Wood diameter				Rating	50 - 100 cm	0.84		
Medium diameter				0.00	20 - 50 cm or 50 - 100cm	1.23		
Non-forest				0.13	20 - 50 cm	1.62		
Small diameter				1.42	0 - 20 cm	2.00		
Very small diameter				2.15	Land use	Rating		
Wood age				Rating	No data	0.00		
4th age				0.00	Urban	0.11		
Non-forest				0.13	Water	0.12		
3rd age				1.13	Rice field	0.14		
2nd age				1.47	Industrial Complex	0.22		
1st age				2.15	Grass	0.37		
wood density				Rating	Barren	0.42		
Non-forest				0.59	Forest(loose)	1.11		
Loose				1.23	Forest(dense)	1.57		
Dense				1.44				
Moderate				1.50				

<Table 3> Range and rating of geological structure.

Topographic aspect	Rating	Topographic aspect	Rating
No data	0.83	dir+ 90 ≡ aspect < dir+ 95	0.13
dir-90 ≡ aspect < dir-85	0.28	dir+ 95 ≡ aspect < dir+100	0.92
dir-85 ≡ aspect < dir-80	1.14	dir+100 ≡ aspect < dir+105	0.68
dir-80 ≡ aspect < dir-75	0.91	dir+105 ≡ aspect < dir+110	0.37
dir-75 ≡ aspect < dir-70	1.74	dir+110 ≡ aspect < dir+115	0.13
dir-70 ≡ aspect < dir-65	1.38	dir+115 ≡ aspect < dir+120	0.70
dir-65 ≡ aspect < dir-60	1.17	dir+120 ≡ aspect < dir+125	1.00
dir-60 ≡ aspect < dir-55	0.74	dir+125 ≡ aspect < dir+130	0.98
dir-55 ≡ aspect < dir-50	0.93	dir+130 ≡ aspect < dir+135	0.48
dir-50 ≡ aspect < dir-45	0.47	dir+135 ≡ aspect < dir+140	1.41
dir-45 ≡ aspect < dir-40	0.34	dir+140 ≡ aspect < dir+145	1.11
dir-40 ≡ aspect < dir-35	0.57	dir+145 ≡ aspect < dir+150	1.29
dir-35 ≡ aspect < dir-30	1.17	dir+150 ≡ aspect < dir+155	1.56
dir-30 ≡ aspect < dir-25	0.18	dir+155 ≡ aspect < dir+160	0.68
dir-25 ≡ aspect < dir-20	1.11	dir+160 ≡ aspect < dir+165	1.38
dir-20 ≡ aspect < dir-15	0.58	dir+165 ≡ aspect < dir+170	2.03
dir-15 ≡ aspect < dir-10	1.75	dir+170 ≡ aspect < dir+175	1.01
dir-10 ≡ aspect < dir- 5	1.60	dir+175 ≡ aspect < dir+180	1.06
dir- 5 ≡ aspect < dir	1.83	dir-180 ≡ aspect < dir-175	0.87
dir ≡ aspect < dir+ 5	1.36	dir-175 ≡ aspect < dir-170	1.30
dir+ 5 ≡ aspect < dir+10	0.85	dir-170 ≡ aspect < dir-165	1.19
dir+10 ≡ aspect < dir+15	2.04	dir-165 ≡ aspect < dir-160	2.52
dir+15 ≡ aspect < dir+20	1.26	dir-160 ≡ aspect < dir-155	1.86
dir+20 ≡ aspect < dir+25	1.25	dir-155 ≡ aspect < dir-150	0.50
dir+25 ≡ aspect < dir+30	0.98	dir-150 ≡ aspect < dir-145	0.46
dir+30 ≡ aspect < dir+35	1.42	dir-145 ≡ aspect < dir-140	0.73
dir+35 ≡ aspect < dir+40	2.07	dir-140 ≡ aspect < dir-135	0.72
dir+40 ≡ aspect < dir+45	1.91	dir-135 ≡ aspect < dir-130	0.42
dir+45 ≡ aspect < dir+50	0.97	dir-130 ≡ aspect < dir-125	0.50
dir+50 ≡ aspect < dir+55	1.46	dir-125 ≡ aspect < dir-120	1.03
dir+55 ≡ aspect < dir+60	0.87	dir-120 ≡ aspect < dir-115	0.91
dir+60 ≡ aspect < dir+65	1.53	dir-115 ≡ aspect < dir-110	0.93
dir+65 ≡ aspect < dir+70	0.13	dir-110 ≡ aspect < dir-105	0.54
dir+70 ≡ aspect < dir+75	0.53	dir-105 ≡ aspect < dir-100	1.59
dir+75 ≡ aspect < dir+80	1.04	dir-100 ≡ aspect < dir- 95	0.79
dir+80 ≡ aspect < dir+85	0.63	dir- 95 ≡ aspect < dir- 90	0.00
dir+85 ≡ aspect < dir+90	1.29		

<Table 4> Range and rating of fault density.

Range	Rating
0.000 - 0.002	0.20
0.002 - 0.003	0.40
0.003 - 0.005	0.60
0.005 - 0.007	0.80
0.009 - 0.010	1.00
0.010 - 0.012	1.20
0.012 - 0.014	1.40
0.014 - 0.016	1.60
0.016 - 0.017	1.80



[Figure 3] Landslide susceptibility map near the petrochemical complex.



[Figure 4] Landslide susceptibility map near the Kumgang railway bridge.

6. 결론 및 토의

본 연구에서는 지형, 토양, 임상, 토지 이용 등 기존에 구축된 자료 뿐 아니라 좀 더 정확한 분석을 위해 현장 조사된 지질구조자료를 활용하여 울산 석유화학단지 및 금강철교 주변지역에 대해 광역적 산사태 취약성을 분석하였다. 이러한

지질구조자료는 지질특성에 맞게 울산 석유화학단지에서는 퇴적암의 층리자료를 사용하였고, 금강철교 주변 지역에서는 화성암의 단층자료를 사용하였다. 그리고 이러한 자료를 지형과 층리와 관계 및 단층 밀도도로 분석하여 이 결과를 산사태 취약성 분석에 한 요인으로 사용하였다. 분석된 결과는 두 연구지역 모두 지형에 따라 평지일수록 값이 적게 그리고 산악지형일수록 값이 높게 나타났다. 울산 석유화학단지 주변 지역은 석유화학단지 지역은 산사태 취약성 지수 값이 비교적 낮게 나타났으나, 석유화학단지 주변지역으로는 취약성 지수 값이 비교적 높게 나타났다. 즉 울산 석유화학단지는 산사태에 안전한 지역으로 평가되지만 그 주변 지역은 안전한 지역으로 평가되지 않으므로 시설 확장 등 주변 지역의 토지이용 시 주의를 요한다. 그리고 금강철교 주변 지역은 금강철교 역시 금강 위에 위치하여 취약성 지수가 높지 않으나 철교 좌우측 부분의 산악지역이 취약성 지수값이 높아 만약 이 지역의 대규모 산사태 발생 시 금강 철교 지역에 영향을 끼칠 수도 있다.

산사태 분석 단계에는 취약성(susceptibility), 가능성(possibility), 위험성(risk) 분석 등 3가지 단계가 있다(Einstein, 1988). 산사태 취약성은 강우, 지진 등 산사태를 직접적으로 유발시키는 요인이 생겼을 때 그 지역이 얼마나 산사태 발생에 취약한가를 분석한 것이고, 산사태 가능성은 어떤 지역의 산사태 취약성에 강우, 지진 등 산사태 유발요인의 발생 가능성을 더해 그 지역에서 산사태가 얼마나 잘 일어

날 수 있는가는 분석한 것이다. 여기서 이러한 산사태 유발요인을 가정한 후 산사태 가능성을 예측할 수 있다. 그리고 산사태 위험성은 산사태 취약성 혹은 가능성에 인명, 시설물 등 피해요소를 같이 고려한 것으로 산사태로 인해 인명 및 시설물의 피해 가능성이 얼마인가를 분석한 것이다.

본 연구는 이러한 산사태 분석 단계 중 첫 번째 단계인 산사태 취약성 분석으로, 좀 더 정확하게 체계적인 산사태 평가를 위해서는 산사태 가능성 및 위험성 분석이 실시되어야 할 것이다. 그리고 본 연구는 1:50,000 축척의 자료를 사용하여 중축척 분석을 실시하였는데, 좀 더 정확한 분석을 위해서는 1:25,000 혹은 1:5,000 축척의 자료의 사용이 요구된다. 본 연구에서 개발된 기법 및 적용 결과는 시설물 주변 지역의 안정성 평가에 활용될 수 있으며, 토지 이용 및 건설 계획에 있어 기초자료로 활용될 수 있다.

참고문헌

- 김원영, 채병곤, 김경수, 기원서, 조용찬, 최영섭, 이사로, 이봉주 외, 2000, "산사태 예측 및 방지기술 연구", 과학기술부, pp. 52-76.
- 김윤중, 김원영, 유일현, 이사로, 민경덕, 1994, "지질 피해예상 및 절취 난이도 분석을 위한 GIS 응용연구", 지질공학회지, Vol. 4, No. 1, pp. 43-55.
- 배현철, 1997, "지구정보시스템(GIS)을 이용한 금수산일대의 암반사면 안정성평

- 가”, 연세대학교 석사학위 논문, pp. 37-49.
- 신현준, 1995, “원격탐사와 GIS를 이용한 충주지역의 사면 안정 평가”, 연세대학교 석사학위 논문, pp. 5-11.
- 이사로, 김용성, 1997, “GIS를 이용한 청주 지역 도로사면 붕괴위험의 정량적 분석”, 대한자원환경지질학회 제30차 학술발표회 요약집, pp. 98-113.
- 이사로, 2000, “지리정보시스템(GIS)를 이용한 산사태 취약성 분석 기법 개발 및 적용 연구”, 연세대학교 학사학위 논문.
- 이사로, 민경덕, 2000, “공간 데이터베이스를 이용한 1991년 용인지역 산사태 분석”, 환경지질학회지, Vol. 33, No. 4, pp. 321-332.
- 이사로, 최위찬, 민경덕, 2000, “산사태 발생 자료 분석에 의한 장흥지역의 전단 단열계 연구”, 환경지질학회지, Vo. 33, No. 4, pp. 547-556.
- 한대석, 이사로, 김경수, 최영섭, 유일현, 1998, “GIS를 이용한 한국 동남부지역의 상대적 사면안정성 분류도 작성”, 한국GIS학회지, Vol. 6, No. 1, pp. 25-33.
- Baeza, C. and Corominas, J., 1996, Assessment of shallow landslide susceptibility by means of statistical techniques, Proceedings of the seventh international symposium on landslides, pp. 147-152.
- Baldelli, P., Aleotti, P. and Polloni, G., 1996, Landslide-susceptibility numerical at the Messina Straits crossing site, Italy, Proceedings of the seventh international symposium on landslides, pp. 153-158.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 1995, GIS Technology in mapping landslide hazard, in Geographical Information systems in Assessing Natural Hazards, Kluwer Academic Publishers, pp. 135-175.
- Chung, C. F., Fabbri, A. G., and Van Westen, C. J., 1995, Multivariate Regression Analysis for Landslide Hazard Zonation, in Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards, Kluwer Academic Publishers, pp. 107-133.
- Einstein, H. H., 1988, Landslide risk assessment procedure, Proceedings of the fifth international symposium on landslide, Vol. 2, pp. 1075-1090.
- Finlay, P. J., Mostyn, G. and Martin, R. P., 1996, Use of discriminant functions in assessing the probability of slope failure, Proceedings of the seventh international symposium on landslides, pp. 209-214.
- Lee S., Min K., 2001, "Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea", Environmental Geology 40, pp. 1095-1113.
- Lee S., Chawe U., Min. K., 2002, "Landslide-susceptibility mapping by correlation between topography and geological structure", Geomorphology 46, pp. 149-162.
- Liener, S., Kienholz, H., Liniger, M. Krummenacher, B., 1996, SLIDISP-A procedure to locate landslide prone area, Proceedings of the seventh international symposium on landslides, pp. 279-284.

- Mark, R. K. and Ellen, S. D., Statistical and simulation models for mapping debris-flow hazard, in Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards, Kluwer Academic Publishers, pp. 93-106.
- Turner, K. A. and Schuster, R. L., 1996, Transportation research board, National research council, Landslides investigation and mitigation, Special report 247.
- Turrini, C. M. and Visintainer, P. 1998, "Proposal of a method to define areas of landslide hazard and application to an area of the Dolomites, Italy", Engineering Geology 50, pp. 255-265.