Econ. Environ. Geol.
Vol. 33, No. 6 p. 557-563, 2000.

지반침하 피해도 분석을 위한 GIS 활용에 관한 연구

권광수 · 유명환 · 박형동

A Study on the Application of GIS for Analysis of Subsidence Hazard

Kwangsoo Kwon, Myong-Hwan Yu and Hyeong-Dong Park

ABSTRACT: Subsidence hazard has never been considered seriously until recent years in Korea, although its socioeconomic impact on Korea becomes more and more enormous. There have been a few studies for the application of GIS analysis technique to the prediction of subsidence hazard. For GIS analysis, several factors, which are represented by coverage, are considered and selected for building a GIS model. Numerical method was used to quantify the importance of each factor in GIS model and the result from numerical modeling using FLAC was compared with that from previous research based on empirical methods. Analysis in 3-D needs more computer resources (i.e. memory). Therefore that in 2.5-D was considered to overcome the problem. Not only maximum vertical subsidence but also maximum horizontal strain and maximum slope have been considered for the assessment of subsidence hazard. The model can be easily modified for the purpose of applications in any subsidence area, especially cavern or abandoned mines under thick soil layer.

Key words : subsidence, GIS, hazard assessment, numerical method, 2.5-D
주 요 어 : 지반침하, 지리정보시스템, 위험도 평가, 수치해석적 방법, 2.5차원

서 론

현재 우리나라에서 일어나고 있는 여러 가지 재해 중 지반침하는 여타의 다른 재해에 비해 크게 문제점으로 부각되고 있지는 않다. 여기에는 여러 가지 이유가 있겠지만 우선 비교적 지반침하가 주변에서 잘 발생하고 있지 않는다는 점, 두번째로는 지반침하의 진행속도가 매우 느리고 가시적인 현상이 보이기까지 상당한 시간이 걸린다는 점등을 지적할 수 있다.

최근 언론매체를 통해 보도된 자료를 살펴보면 지반침하는 더 이상 간과하기 힘든 재해중 하나라는 점을 쉽게 알 수 있다. 97년 하반기부터 99년 9월까지 신문에 보도된 국내의 지반침하 사례를 정리해 본 결과, 총 36건의 지반침하 문제가 신문지상을 통해 보도되었고 그 발생 원인을 종류별로 살펴보면 Table 1과 같다.

원인 중에 상당수를 차지하는 것은 폐광, 지하철과 같은 지하 구조물 건설, 매립지, 파일 등의 설계 잘못으로 인한 지반침하였다. 이중 폐광은 최근 들어 부각되고 있는 문제로서, 석탄 합리화 사업단의 활동으로

Table 1. Factor of subsidence reported in newspaper from July, 1997 to September, 1999.

Cause	Number of Subsidence	Percentage (%)
Abandoned mine	6	16
Underground construction	6	17
Landfill problem	5	14
Defective construction	5	14
Ground condition	2	6
Natural cavity	1	3
Extensive construction	1	3
Underground facility collapse	1	3
Groundwater level change	1	3
Unknown	8	21

* 한국자원연구소 탐사개발연구부 (Geophysical Exploration & Mining Research Division, Korea Institute of Geology, Mining & Materials)
** 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 (School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University)

밝혀진 사례가 대부분을 차지하고 있음을 볼 수 있다. 지하시설 건설로 인한 침하 역시 중요한 유형중의 하나로서 지하철 건설중 발생한 사고가 가장 큰 경우다. 또한 매립지에서 발생한 침하도 상당수를 차지하는데 매립 후 지반을 제대로 다지지 않았거나 말뚝 설치를 부실하게 하는 등의 원인으로 인해 발생한 경우다.

지반 침하와 같은 자연재해는 발생하는 요인이 다양하고 요인간의 관계 또한 복잡하기 때문에 모든 요인이 미치는 영향과 그들간의 상호작용을 종합적이고 체계적으로 분석할 수 있는 방법이 요구된다.

GIS (Geographic Information Systems; 지리 정보 시스템)는 공간상의 분포하고 있는 여러 요인을 분석하여 종합적으로 해석하고자 하는 모든 분야, 교통, 재해관리, 경영, 물류시스템등에 활용되고 있고 그 활용 범위 또한 점차로 확대되어 가고 있다. 이에 산사태를 비롯한 각종 자연재해를 GIS를 통해 분석하고자 하는 시도가 이루어진바 있고 최근들어 지반침하에 GIS를 이용하고자 하는 시도가 계속 이루어 지고 있다 (Yang, 1996).

통상적으로 지반침하라는 용어는 여러 가지 형태의 것을 모두 포함한 개념을 사용하기 때문에 본 연구에서는 지반침하의 중요한 요인을 선정하기에 앞서 지반침하에 대한 범위를 고려하였다. 일반적인 의미의 지반침하는 지표면이 어떠한 요인에 의해 중력방향이 작용하는 수직 방향으로 이동하는 것을 모두 일컫는다고 할 수 있고 그 이유로는, 지하내 공동의 붕괴, 지하수 및 지하 유체의 과도한 추출, 혹은 지반의 압밀현상등의 결과등을 생각할 수 있다. Waltham (1989)은 이외에도 지진 등 조산 운동으로 인한 지반침하까지 이러한 연구의 범위로 넣고 있다. 본 연구에서는 지하내 존재하는 공동이 붕괴됨으로 발생하는 지반침하에 대해서만 다루기로 하고 이외의 것에 대해서는 논외로 한다.

요인과 차원의 설정

GIS 구축은 요인을 선정하고 각 요인에 대해 등급을 나눈 후 그에 맞는 점수를 부여하는 과정을 거친다. Fig. 1에서와 같이 GIS모델을 만들기 위해서는 우선 모델에 필요한 요인을 선정한다. 지반침하에 영향을 줄 수 있는 여러 요인들을 하나의 요인으로 선정하여 각각의 개별적인 지도 위에 표시한다.

Fig. 1에서는 5가지의 요인을 선정하였다. 다음으로는 그 요인이 전체에서 차지하는 중요도를 고려하여 가중치를 결정한다. 마지막으로는 각 요인을 나타내는 각각의 지도에서 위치에 따른 지점의 값을 입력한다. 입력하는 데 있어서는 각각의 등급에 따라 점수를 다르게 주도록 한다. 전체에서 얼마만큼의 가중치를 얻게되고 그 안에서 얼마만큼의 등급을 받게 되는 지는 모델을 만드는 사람의 선택에 의한 것이고 모델을 제작하는 사람은 비교적 현실의 세계를 모델속에서 반영할 수 있도록 각 요인의 점수를 적절히 배분하고 요인중에서의 배점을 적절히 주게 된다.

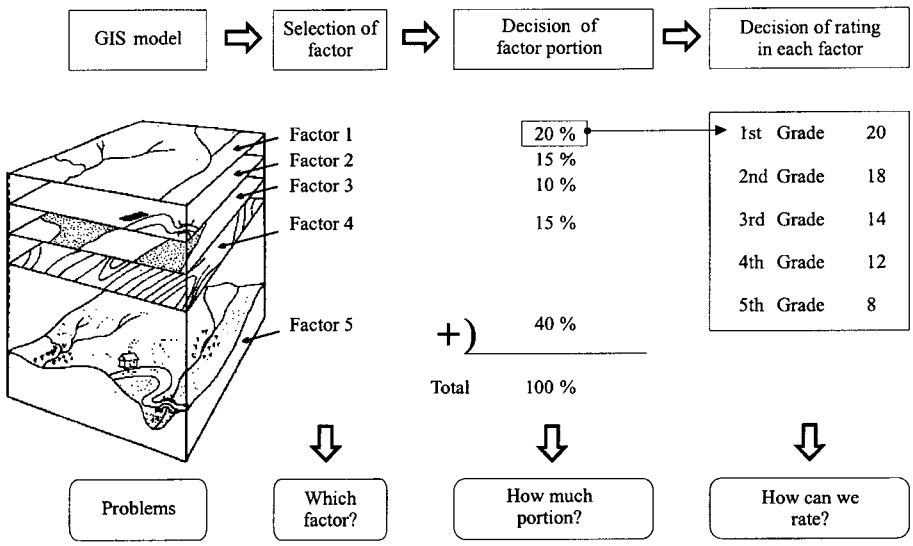

Fig. 1. GIS modeling procedure and problems involved in each step (modified from Yoo, 1992).

요인별 영향의 정량화 기법

요인은 GIS에 있어 커버리지 (coverage)에 표시된다. 선택된 여러 커버리지는 적절한 연산과정을 거쳐, 하나의 GIS모델로 완성되게 된다. 지반침하에 있어 중요한 요인은 암반의 성질, 공동의 크기, 공동까지의 깊이, 지하수 상태 등이다.

본 연구에서는 실제 광산 지역에서의 침하형태를 파악하기 위해 수치해석 및 경험적 방법을 비교하여 보았다. 이런 모사과정을 통해 얻은 결과와 실제 광산 지역의 사례를 통해 얻어진 통계적 결과를 비교하여 수치해석을 통한 결과와 비교하였는데 이런 시도는 수치해석의 방법을 통해 침하의 형태를 예측하고 예측된 형태를 통해 얻을 수 있는 위험도의 등급을 나누기 위함이다. 이에 비해 경험적인 기법은 과거의 지반침하 사례 및 피해규모를 역해석하여 각 요인별 영향을 정량화하는 추정기법으로 GIS와 직접적으로 연결되어 응용이 가능하다 (Yang, 1996).

지반침하에 영향을 미치는 요인을 크게 지하 광체의 두께 (m) 및 너비 (w)와 광체가 존재하는 부분까지의 깊이 (h) 세가지로 간주하고 이를 이용하여 실제의 모습을 Fig. 2와 같이 단순화한 후, 수치해석기법을 사용하여 분석하였다. 주어진 데이터는 광체의 두께 (m) 1.4 m, 너비 (w) 160 m, 깊이 (h) 400 m로 설정하였다. 또한 각 층에 대한 정보는 밀도, 마찰각, 점착력 등과 같은 것으로서, 본 연구에 있어서는 공동위에 4개의 퇴적층이 존재하며 그에 따른 지반 정수를 사용하였다. 여기서 사용된 각 지반의 물성치는 Barton (1973)이 제시한 일반적인 값을 이용하였다. 경계조건으로는 좌, 우는 측방향으로 고정하였으며 바닥은 수직방향과 측방향으로 고정을 하였다. 수치해석의 방법으로는 유한차분법 (FDM)을 사용한 상용프로그램인 FLAC을 이용하였다. FLAC은 다른 상용프로그램에 비해 해석에 있어 신뢰성이 높은 프로그램으로 현재 국내외에서 많이 사용하고 있는 프로그램이다. FLAC을 이용한 모사에서 지반의 조건으로서 통계적, 경험적 결과에서 이용된 퇴적층 조건과 흡사한 데이터를 사용하여 분석하여 수직방향의 변위를 구하였다.

경험적 자료는 영국의 NCB (1975)에서 연구되어 발표된 자료를 이용하였다. 이 자료는 실제 영국지역의 탄광에서 발생한 많은 자료를 근거로 하고 있다.

수치해석을 통한 결과와 경험적 자료를 통한 해석과의 비교에서 수직방향 변위와 수평방향 변위를 살펴볼 때, 수직방향으로의 변위는 수치해석을 이용할 경우 대략 20 cm정도의 값이 나오고 경험적인 결과에 의하면 대략 50 cm정도의 값이 나온다. 또한 수평방향은 수치해석의 경우 250 m 정도가 나온다. 수직방향으로의 변위에 관련된 부분은 경험적으로 얻어진 결과와 비교할 때 다소 차이를 보이지만 수평방향의 영향범위는 경험적 방법으로 볼 때 좌우로 광체까지의 깊이 (h)의 0.7배까지 영향을 미친다는 점에 있어서 양쪽 측면으로 280 m까지 영향을 미칠 것이므로 수치해석상 결과가 경험상 자료와 근사한 결과를 보였다. 이를 통해 실제 지반의 상태를 좀 더 복잡한 격자망을 통해 분석하고 정확한 현장 데이터를 활용하면 GIS 구축시 필요한 위험도의 등급에 대한 적절한 근거를 제시해 줄 수 있을 것으로 기대된다.

3차원 해석의 문제

지반에서 일어나는 현상은 3차원 상에 존재하는 여러 요인들에 의해서 나타난다. 그러므로 커버리지를 2차원이 아닌 3차원으로 꾸며야하는 어려움이 있다 (Fig. 3). 하지만 이러한 것은 컴퓨터의 자원을 낭비하는 결과를 가져오게 되고 문제를 더욱 복잡하게 만든다. 그러므로 본 연구에서는 2.5차원이라는 개념을 도입하여 모델을 수행할 것이다.

2.5차원 (Fig. 4)은 공간상에 존재하는 하나의 커버리지 공간을 높이 (z축)에 따라 여러 개의 다른 커버리지로 나눈다. 예를 들어 지반침하에 대한 GIS모델을 만들고자 한다면 공간상에 여러개의 갱도가 존재하는

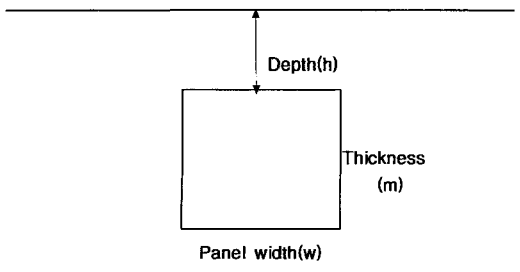

Fig. 2. Simplified model used in analysis of subsidence.

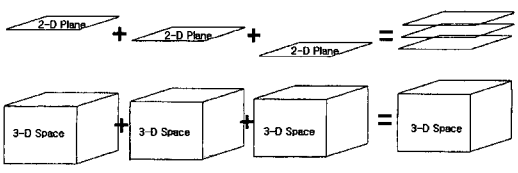

Fig. 3. 2-Dimension vs 3-Dimension.

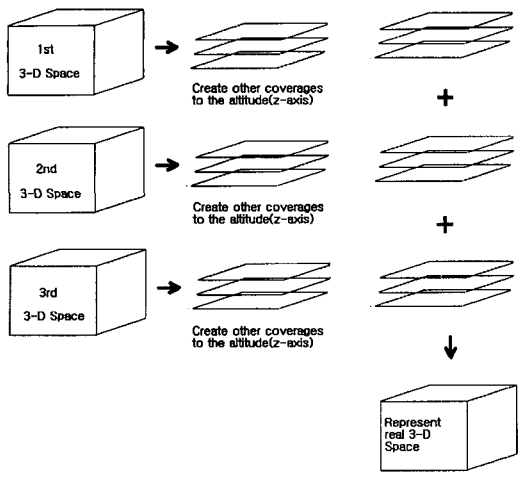

Fig. 4. 2.5-Dimesion GIS modeling.

데 천부에 있는 갱도는 심부에 있는 갱도에 비해 지표에 더욱 큰 영향을 미칠 것이므로 공간상의 갱도에 대한 커버리지를 여러개의 커버리지로 분해 할 때 천부의 갱도에 대해 더 높은 가중치를 부여함으로 2차원 프로그램으로 얼마든지 3차원 해석을 할 수 있게 한다.

종합적 지반침하 분석을 위한 요인 선정

지반침하 위험도에 관해 그동안 국내외 연구에서는 단순히 암질, 불연속면, 갱도 폭만을 요인으로 하여 지반침하 위험 지역을 추정하는데 그쳤을 (Madden, 1996)뿐, 구체적인 침하형태나 규모까지는 도출하지 못하였다. 또한 최종적인 위험도를 고려함에 있어 수직침하량만을 위주로 산정되고 있다 (Holzer, 1984).

오히려 건물의 균열에 영향을 주는 최대 수평변형률, 최대 경사각등의 변수는 고려되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 5과 같은 지반침하곡선에 기인하여 지질요인으로 지역에 따라 값을 달리하는 angle of draw 및 angle of break를 광산요인으로 갱도의 폭 (critical width) 뿐만 아니라 갱도까지 심도로 나누어 고려해 보았다. 원래 지반침하 곡선은 장벽식 채탄법과 직접 관련되나 국내의 지반침하 패턴에도 적용가능하다.

그리고 결과에서는 단순히 지반침하 위험 예상지역 뿐만 아니라 그 침하 및 비해 형태와 관련된 세가지 중요한 요소로서 최대 수직침하, 최대 수평변형률, 최대 경사치등을 같이 얻어내고자 하였다. 이 세가지는 침하형태를 결정짓는 중요한 요소이며, 이에 따라 그

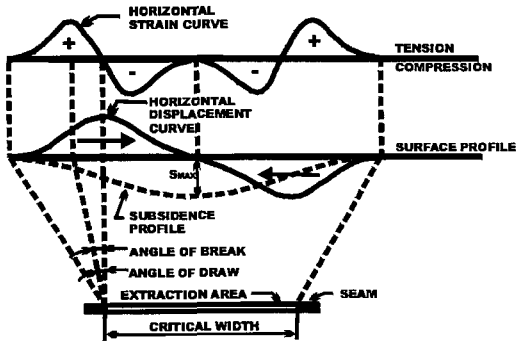

Fig. 5. Typical profiles of subsidence, horizontal strain and displacement curve over a mine (Waltham, 1989).

피해의 형태도 달라지게된다. 이를 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 최대수직침하 (S_{max}) : 수직침하가 최대로 발생하는 지점으로 부근에 건물이 위치하는 경우 제기능을 다하지 못하고 붕괴의 우려도 있게 된다. 단, 균등한 침하발생시 구조물 자체 피해는 적을 수 있다.

2) 최대수평변형률 (ε_{max}) : 인장변형률이 최대인 지점으로 일반적인 건물이나 구조물이 압축보다 인장에 약한 재료로 있다는 점에서 이 지점에 건물이 위치하는 경우 인장균열이 발생되는 등 매우 위험하다.

3) 최대경사치 (θ_{max}) : 침하곡선 상에서 그 경사가 가장 급한 곳으로 최대 수직침하보다 침하량은 적으나 불균등 침하로 인해 건물에 균열 발생 및 붕괴위험을 가져다 준다.

여기서 angle of draw는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 심도와 함께 지반침하의 규모, 다시 말해 영향범위를 결정 짓는 매우 중요한 요인이다. 이와 함께 angle of break 또한 최대 수평변형률 발생지점을 알려주는 중요한 요인이다. 그러나 angle of draw나 angle of break는 일정한 값을 가지는 것이 아니라 지역 및 지질에 따라 통계적, 경험적으로 다른 범위에 놓인다.

GIS를 이용한 종합적인 침하 위험성 분석

초기데이터 베이스 구축 프로토콜

침하요인은 기존의 국내외 연구에서 알려진 것들을 중심으로 선정하여 GIS S/W에서 제공되는 Database Workshop을 통해 입력시킨다(Fig. 6).

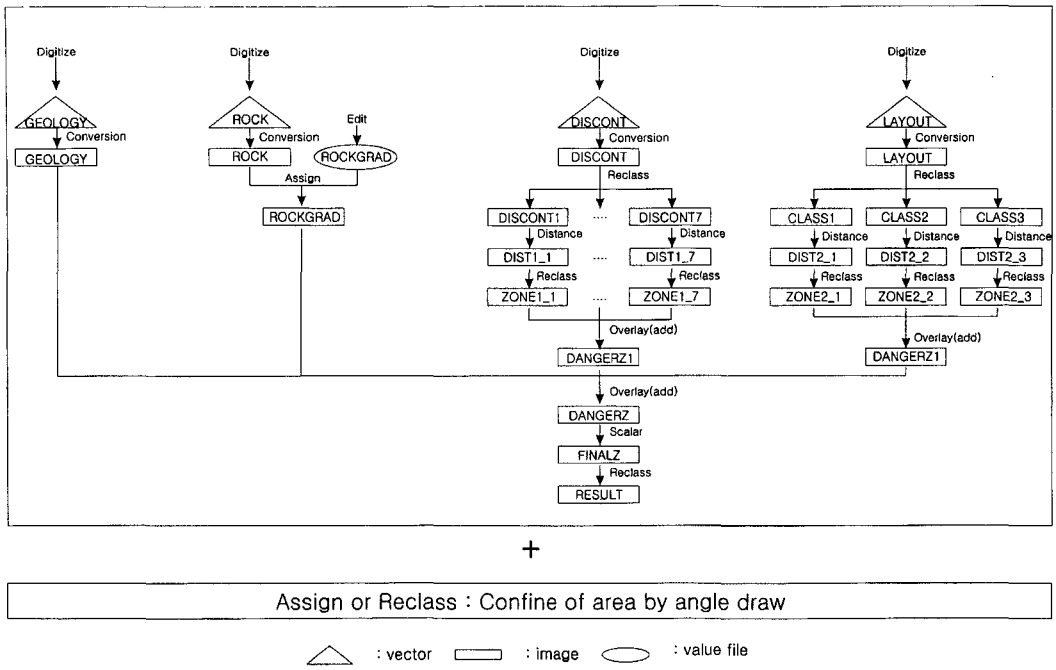

Fig. 6. Concept of GIS procedure for calculation of maximum possible subsidence.

최대수직침하량 연산

이는 기존의 연구방법을 중심으로 한 결과 외의 불필요한 지역이 Display되는 것을 방지하기 위하여 최종적으로 영역제한을 위해 Assign 또는 Reclass의 작업 (또는 Subtract모듈이용)을 첨가한다.

최대수평변형률 연산

이는 기존의 연구에서 거의 다루어진 적이 없는 부분으로 다음의 연산과정을 이용하였다. 우선 기존의 변수 (angle of break, 갱도 위, 폭, 심도 등)를 이용하여 최대치 발생지점을 계산하고, 이를 중심으로 양쪽 방향으로 Buffering (또는 Distance) 작업을 거쳐 피해등급을 구역별로 연산한다. 피해구역은 갱도위치, angle of draw에 의해 제한되어 나타나므로 이를 고려하기 위한 Overlay (또는 Subtraction)을 실시한다. 이후 최대수직침하량, 최대경사치 분석 이미지와 함께 Overlay 연산등을 거쳐 종합적 위험지도를 작성한다 (Fig. 7).

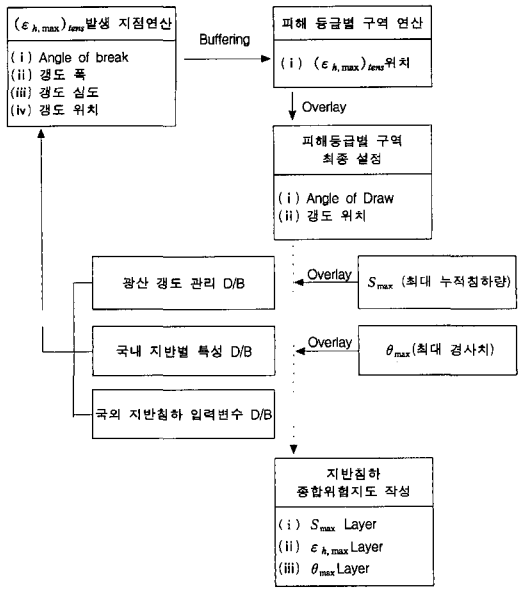

Fig. 7. Concept of GIS procedure for calculation of maximum horizontal strain.

최대경사치 연산

최대경사치는 기존의 연구에서 역시 거의 다루어진 적이 없는 부분으로 다음의 연산과정을 이용하였다. 우선 기존의 변수 (angle of draw, 갱도 위, 폭, 심도 등)를 이용하여 최대치 발생지점을 계산하되, 인장 및

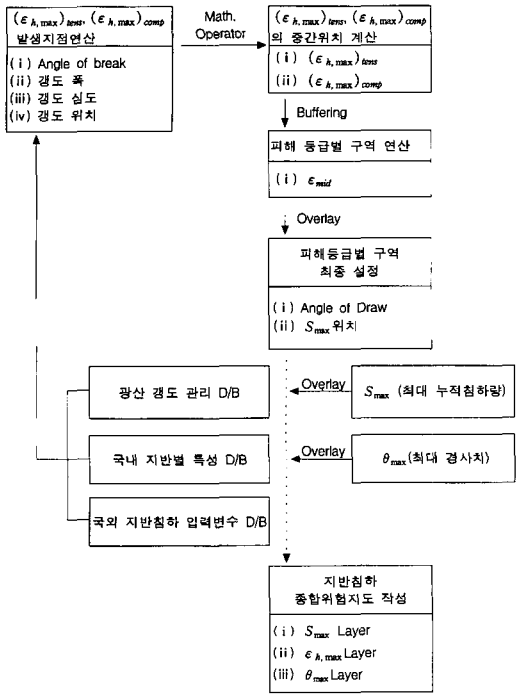

Fig. 8. Concept of GIS procedure for calculation of maximum slope.

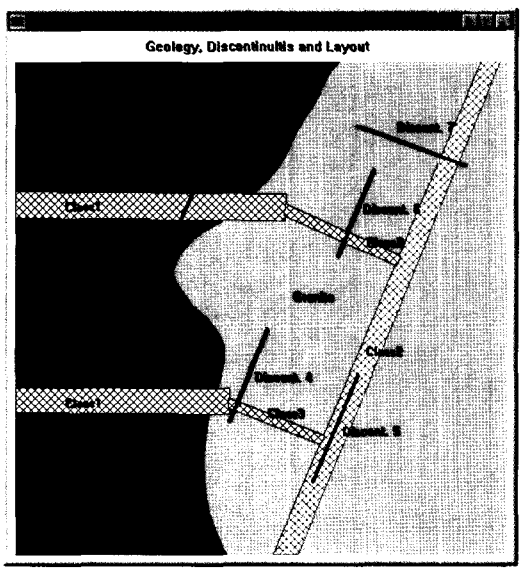

Fig. 9. Geology and feature of assumed area.

압축 최대치 지점을 함께 계산한다. 이를 Math. Operator를 이용하여 중간위치에 해당되는 ε_{mid}를 계산한다. 이를 중심으로 양쪽방향으로 Buffering (또는 Distance)작업을 거쳐 피해등급을 구역별로 연산한다.

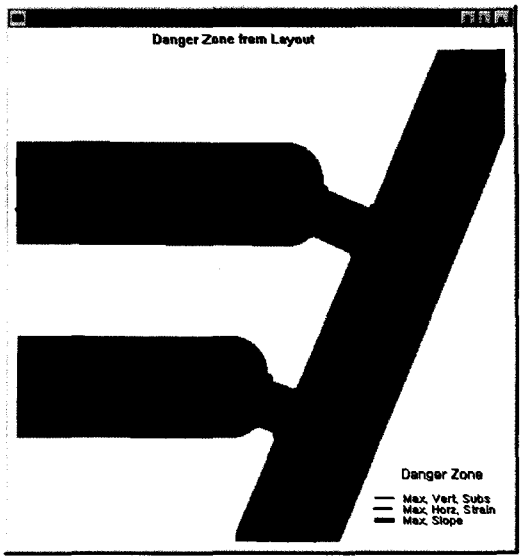

Fig. 10. Result of analysis.

피해구역은 최대수직침하량 발생위험, angle of draw에 의해 제한되어 나타나므로 이를 고려하기 위한 Overlay (또는 Subtraction)을 실시한다. 이후 최대수직침하량, 최대경사치분석 이미지와 함께 Overlay 연산 등을 거쳐 종합적 위험지도를 작성하게 된다 (Fig. 8).

이를 바탕으로 가상의 지역을 설정 (Fig. 9)하여 분석을 수행하였다. Fig. 9와 같이 갱도 (격자 무늬)가 위치하고 있는 지역의 지질과 불연속면이 존재한다고 했을 때 분석을 통해 Fig. 10과 같은 몇 개의 지역으로 구분할 수 있고 이를 통해 위에서 제안된 종합적인 침하 위험성 분석을 수행 할 수 있다.

결론 및 제안

본 연구에서는 GIS를 이용한 지반침하 위험도의 종합적 평가를 위한 방법 및 구축기술을 새로이 제시하고자 기존의 연구의 고찰과 GIS연산과정의 개발등을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 전통적으로 알려진 지반침하 곡선에서 제시하는 침하 형태는 다른 침하에서도 유사한 형태로 나타나므로 GIS입력변수의 영향을 정량화하는데 이용할 수 있다.

2. 수치해석을 이용하여 이를 경험적 방법으로 얻은 결론과 비교한 결과 변수의 영향을 정량화하는 데 수치해석을 이용하는 방법은 좋은 연구결과를 도출할 수 있을 것으로 평가되었다.

3. 기존의 지반침하 GIS 분석 기법에서는 수직침하량만 다루고 있으나 지상의 구조물에 영향을 줄수 있는 최대수평인장변형률, 최대경사치 등도 위험도 평가에 있어 중요한 기준으로 사용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전세계적으로 다루고 있는 것과는 달리 세 요소를 모두를 고려한 새로운 GIS 연산과정을 개발하였고, 이를 통해 종합적 지반침하 위험지도를 작성할 수 있을 것으로 판단된다. 이 방법은 원래 장벽식 채탄 방법을 사용한 광산에 적용하기 위해 개발되었으나 폐광지역이나 지하 공동이 발달된 지역에서 상부에 토사층이 잘 발달되어있는 경우일 때 적용가능할 것으로 판단된다.

4. 이후의 연구를 통해 입력변수를 연동적으로 변화시켜가며 이를 Feed-back 시키는 연산과정 개발이 필요하며, 이를 통해 시간영역에서의 분석을 하여 보다 정확한 위험도를 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

유근배 (1992) 지리정보론, 상조사, 351p.

Barton, N. R. (1973) Review of a New Shear Strength Criterion for Rock, Engineering Geology, v. 7, p. 287-332.

Holzer, T.L. (ed) (1984) Man-Induced Land Subsidence, The Geological Society of America, 222p.

Madden, B.J. (1996) Effects on surface structures due to collapsed bord and pillar workings, In Banla (ed.) *Eurock '96*, p. 1283-1290.

NCB (National Coal Board) (1975) Subsidence engineers handbook 2nd (ed.), National Coal Board Mining Department, 111p.

Waltham, A. C. (1989) Ground Subsidence, Blackie, 202p.

Yang, G. (1996) Some aspects to GIS modeling of environmental problems caused by mining-With special reference to China, Mining science and technology : Proceedings of the 96 International Symposium on Mining Science and Technology.

2000년 8월 5일 원고접수, 2000년 12월 1일 게재승인.