

지표면의 조건을 고려한 지반침하 분석용 GIS

권광수¹ · 이준용^{2*} · 박형동²

¹한국지질자원연구원 탐사개발연구부, ²서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부

GIS for Subsidence Analysis by Considering Surface Condition

Kwangsoo Kwon¹, Junyong Lee^{2*} and Hyeong-Dong Park²

¹Geophysical Exploration & Mining Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University

Recently, interests in subsidence hazard have been increased due to the underground construction such as subway construction and managements of abandoned mines. GIS analysis of subsidence hazard has a lot of advantages in handling of spatial data and managing database. For better result of GIS analysis, there are some necessities of modifying previous subsidence theory and model. To take surface profile into account allows the application of complicated topology. Furthermore, for 3-dimensional analysis, two subsidence profile curves that are perpendicular to each other should be considered simultaneously. Through these modifications, the model for subsidence analysis using GIS can be established. With ideal case of cavities and other conditions, GIS analysis was accomplished and meaningful results were produced. More realistic properties of cavity, soil layers, groundwater condition and topology will enable GIS analysis method to produce more reliable result and to widen the area of applications.

Key words : subsidence, GIS, topology, 3-dimensional profile, abandoned mine

최근 들어, 지하철공사나 폐광의 관리와 같은 지하공간의 공사에 의한 지반침하에 대한 관심이 높아지고 있다. GIS (Geographic Information System; 지리정보시스템)를 이용한 지반침하의 분석은 공간자료의 처리 및 데이터베이스의 구축 차원에서 장점을 지니고 있다. GIS를 이용한 분석에 있어, 보다 나은 결과를 위해서는 기존의 침하 이론이나 모델의 보완이 필요하다. 복잡한 지형을 고려하기 위해서는 표면의 지형 기복을 고려한 모델의 설정이 필요하며, 3차원 상의 분석을 위해서는 2개의 직교하는 2차원 침하곡선을 동시에 고려할 필요성이 있다. 이러한 보완을 통해서 GIS를 이용한 지반침하 분석 모델을 구축할 수 있으며, 이의 실제 적용 가능성의 판단을 위해 이상적인 경우의 지하공동과 지반조건에 대해 분석을 수행하였다. 공동의 특성, 토층의 특성, 지하수 조건 및 지형조건에 현실적인 입력변수로의 활용을 통해, 보다 더 신뢰성 있는 결과와 활용분야의 확대를 기대할 수 있다.

주요어 : 지반침하, 지리정보시스템, 지형기복, 3차원 침하곡선, 폐광

1. 서 론

지반침하는 다른 지질재해에 비해서 그 빈도가 낮으며, 진행속도가 상대적으로 느리며, 현상자체를 인지하기가 쉽지 않기 때문에 그 문제점이 크게 부각되지 않았다. 하지만 근래에 들어 폐광에 따른 지반침하가 사회적 문제로 대두되고, 지하철공사와 같은 지하구조물의 건설로 인해 그 빈도가 찾아지고 있는 실정이다.

기존의 연구에서 알려진 여러 침하이론은 주로 탄광 지역에서 개발된 이론으로서, 탄폭이 일정하고 채굴이 규칙적인 영국, 미국 등의 수평탄전지대에서 흔히 볼 수 있는 구유(trough)형 침하에 대한 이론이므로, 탄폭의 변화가 심하고 탄층의 발달이 불규칙적이며 지표의 지형이 불규칙적인 우리 나라에서는 적용의 한계를 가진다. 또한 피해 영역의 경우, 공동으로부터 갈매기 형태로 발생한다고 알려져 있지만, 대상 지역의 채광방식이 다르거나 탄전지대가 아닌 지역인 경우에도 적용의 어려움이 따른다. 하지만 실제 영향을 받는 부분인

*Corresponding author: gjunny2@snu.ac.kr

지표는 대개 어느 정도 두께의 토층을 포함하고 있기 때문에 이와 유사한 거동을 따를 것으로 예측되며, 불규칙적인 지표 지형의 고려를 통해 기존의 침하이론과 유사한 거동을 기대할 수 있다.

GIS(Geographic Information System; 지리정보시스템)를 이용한 지반침하 해석은 GIS의 특성상 공간과 연관성을 가진 공간자료 및 그들로 이루어진 데이터베이스의 체계적 구축 및 분석을 수행할 수 있게 하며, 추후의 정보에 대한 추가, 수정, 분석이 용이하다는 장점을 지니고 있다. 외국의 경우, 산사태나 지진 등의 여타 지질재해에 비해 그 사례가 많지는 않지만 최근 그 시도가 증가하는 추세에 있으며, 중국의 광산지역(Yang, 1996)과 카르스트 지형(Jiang et al., 1994)의 지반침하에 대한 분석이 GIS를 통해 이루어진 대표적인 사례이다. 국내에서는 권광수 등(2000)이 GIS를 이용한 종합적인 침하 위험성 분석을 위해 초기 데이터베이스 구축에 대한 프로토콜을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 국내외의 연구를 토대로, 지형기복 등 현실에 근접한 모델을 설정하고, 지반침하에 영향을 끼치는 필수 요소를 선정하고, GIS를 통해 위험의 정도를 정량적으로 분석하는 기법을 적용하는 것을 목적으로 한다.

2. 지반침하의 메커니즘

2.1. 최대가능수직침하량

최대가능수직침하량은 주어진 조건하에서 발생할 수 있는 최대 침하량을 의미하며, 이의 정량적 값은 영국의 National Coal Board에서 개발한 도해법(1975)을 통해 얻어질 수 있다. 이 방법은 많은 야외 관찰 결과를 토대로 하여 공동이 위치한 깊이와 공동의 폭을 이용해 최대가능수직침하량을 예측하는 방법으로서, 실제 영국지역의 탄광에서 발생한 많은 지반침하의 형태와 지하의 굴착상황과의 관계를 나타낸 그래프를 이용하는 방법이다. 그래프를 통해, 채굴 부분의 깊이와 채굴 공동의 폭을 이용하여 최대가능수직침하량과 탄층 두께의 비인 침하상수(S_{max}/m , subsidence factor)를 도출한 후, 침하상수에 탄층의 두께인 m 을 곱해서 최대가능수직침하량(S_{max})을 구해낸다.

2.2. 각 지점의 침하량

이렇게 구해진 최대가능수직침하량은 지표면의 수직 침하 정도를 의미하게 되고, 이러한 침하가 발생하게 될 때, 각 지점에서의 침하량을 파악하는 방법에는 침

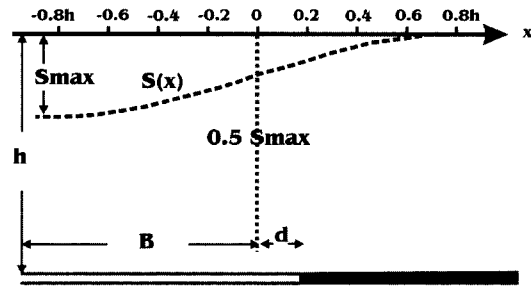


Fig. 1. Subsidence profile function.

하곡선함수를 통한 방법이 있다. Brauner(1973)에 따르면 각 지점의 침하량은 최대가능수직침하량(S_{max})과 쌍곡선 함수 그리고 B 값(최대침하 발생지점인 중심부와 $0.5S_{max}$ 의 침하가 발생하는 지점까지의 거리)으로 표현될 수 있으며 Fig. 1은 이에 대한 개략도이다.

$$S = \frac{1}{2} S_{max} \left[1 - \tanh\left(\frac{2x}{B}\right) \right] \quad (1)$$

2.3. 동등침하의 원리 및 중첩의 원리

Fig. 2는 임계지역(critical area)의 동등침하(equivalent subsidence)의 원리에 대한 그림이다. 이 원리에 따르면, 지표면의 한 점의 완전침하를 일으키는 작업지역으로 정의되는 임계지역은 공동의 폭과 깊이의 비와 관련이 있으며, 같은 값의 비를 가지는 경우는 같은 양의 침하를 보인다. Brauner(1973)의 중첩의 원리에 따르면 여러 개의 공동이 한 지점에 동시에 영향을 미치게 되는 경우의 침하량은, 각각의 공동에 의해 발생하게 되는 침하량의 산술 합으로써 구해질 수 있다(Fig. 3).

2.4. 지반침하와 관련된 변수

침하의 영향 범위에 대한 변수로서는 영향각이 있는

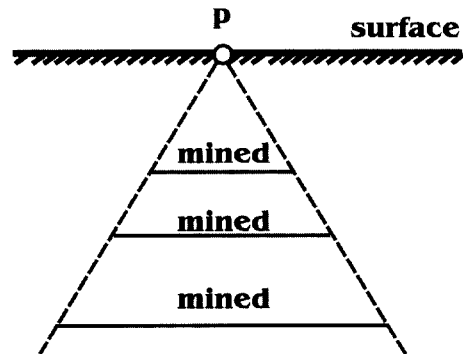


Fig. 2. Principle of equivalent subsidence.

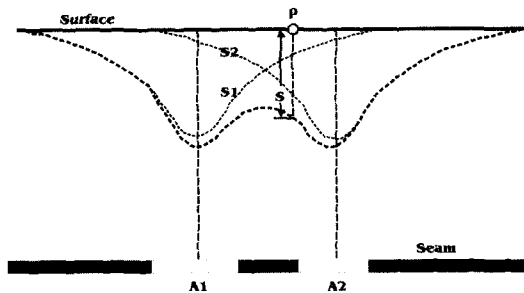


Fig. 3. Principle of superposition.

데 이는 장벽식 채탄법의 경우 지하 작업장의 끝부분과 침하지역의 끝부분을 연결하는 선이 수평면과 이루는 경사각을 의미한다. 이 값은 그 지역의 조건에 따라 8°에서 45°까지 다양한 값을 가지게 되는데 본 연구에서는 35°의 값으로 고정시켜 적용하였다. 35°의 영향각 값은 지표가 공동과 나란할 경우 영향범위가 공동 심부깊이의 약 0.7배가 됨을 의미하게 되며 이 수치는 위의 침하곡선함수의 값이 0으로 근사됨을 통해서 유의함을 확인할 수 있다.

또한 최대가능수직침하량, 최대수평변형률, 최대경사각이 중요한 변수로 작용하는데, 각각의 정의는 다음과 같다.

최대가능수직침하량(S_{max})은 위에서 언급한 바대로 임계채굴시 수직 방향으로의 최대 변위를 의미하며, 이 부분의 건물은 붕괴가 발생할 가능성이 있다. 하지만 균등침하의 경우 구조물의 자체에는 피해가 상대적으로 작다. 최대수평변형률(ϵ_{max})은 임계지역 채굴에 따라 일어나는 한 점의 최대수평이동을 의미한다. 특히 인장변형률이 최대로 발생하는 지역은, 대개의 구조물이 인장강도가 약한 재료로 이루어져 있기 때문에, 상대적으로 큰 피해가 예상되는 지역이다. 최대경사각(θ_{max})은 침하곡선 상에서 그 기울기가 가장 급한 곳으로 불균등침하를 발생시켜 건물의 균열 및 붕괴를 초래할 수 있는 요인이다.

본 연구에서는 구조물의 안정성을 저해하는 더 중요한 요인인 최대수평변형률과 최대경사각에 대해서는 아직까지 정량적인 관찰 및 해석에 대한 연구가 부족하므로 본 연구에서는 최대수직침하량만을 고려하였다.

3. GIS를 이용한 지반침하 해석의 모델 설정

3.1. 가상대상지역

본 지역은 어느 정도의 지형기복을 가지고 있으며,

주거지 및 하천을 함께 포함하고 있는 지역으로 국내 광산지역의 상황과 유사하다. 우선 지형도에 나타나 있는 등고선의 수치화 작업을 통해 수치표고모형(DEM: Digital Elevation Model)을 작성하였다. 또한 나머지 지형정보(주택, 하천, 저수지 등)를 디지털화하여 벡터파일의 형태로 작성하였다. 그 다음, 채굴로 인해 생긴 공동의 편의상 직사각형 형태의 폴리곤으로 입력하였다. 공동의 위치, 규모, 심도 등은 실제의 경우와 유사한 범위 내에서 임의로 선정하였다. 입력된 공동은 채굴로 인한 공동 외에도 자연발생적인 공동의 경우도 함께 포함하고 있다.

지반침하에 영향을 미치는 요인으로서의 하부에 존재하는 인공 혹은 자연적인 공동, 지하수 개발 및 자연적인 원인으로 발생하는 지하수면의 하강, 집토층의 압밀 현상, 기반암의 용해, 건축시 설계상의 문제 및 건물의 증축 등을 들 수 있다. 이외에도 지진운동도 지반침하의 원인으로 보기도 한다(Waltham, 1994). 본 연구에서는 하부에 존재하는 공동, 지하수면의 변화량 및 해당 연구지역을 덮고 있는 토층의 심도와 종류만을 주된 요인으로 선정하였다. 즉 공동에 의해 침하되는 경우와 지하수면의 하강으로 인해 토층이 침하되는 경우의 두 가지 측면에 대해서 살펴보았다.

3.2. 공동에 의한 침하

지형도를 토대로 연구지역을 선정 한 후, 가상의 지하공동을 5군데 설정하였다. 이들의 규모 및 심도 등은 장벽식 채탄법에 의해 발생하는 실제 규모를 고려하여 임의로 부여하였다. 부여된 데이터와 앞서 언급한 영국의 National Coal Board에서 개발한 도해법(1975)을 이용하여 각 공동에 의해 발생하는 최대가능수직침하량을 도출하였다. 자료 및 최대가능수직침하량은 Table 1과 같다.

이 수치는 2차원상의 하나의 침하곡선에 관련된 정보이므로, 3차원상에서 발생하는 침하량과 침하영역을 계산하기에 어려움이 따르므로, 2개의 침하곡선을 동시

Table 1. Properties of cavities.

구분	깊이, d (m)	두께, t (m)	폭, W (m)	침하상수, S_{max}/t	최대가능수직침하량, S_{max} (m)
공동 1	200	0.8	180	0.8	0.64
공동 2	300	0.7	150	0.49	0.34
공동 3	400	1	160	0.37	0.37
공동 4	350	1.5	110	0.22	0.33
공동 5	100	1	100	0.73	0.73

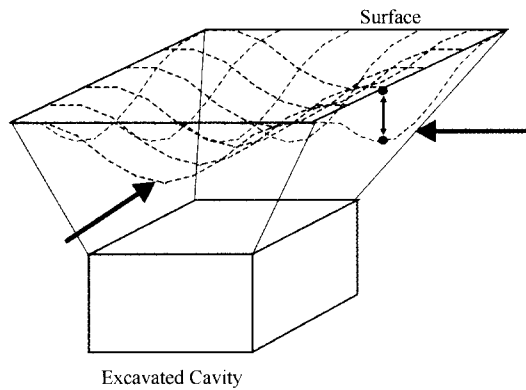


Fig. 4. The case that two profiles of subsidence are taken into account simultaneously.

에 고려할 필요가 있다. 다시 말해서, 기존의 연구는 수직단면도상의 일차원적인 침하량만을 고려하거나, 평면상의 침하영역만을 고려했다. 그러나, 보다 나은 해석을 위해서는 침하량의 부분과 침하영역에 대한 분석이 3차원적으로 동시에 이루어져야 한다. 이를 위해서는 해석된 수직단면도 이외에 공간상으로 수직을 이루는 또 다른 수직단면도상에서의 해석이 동시에 이루어져야 한다. Fig. 4는 두 개의 서로 다른 수직단면도가 각각 다른 침하량을 보이게 되는 현상을 나타낸 그림이다.

이 경우 각각의 단면도상에서 나타나는 침하량이 서로 차이를 보이기 때문에 침하곡선함수의 수식을 바로 적용시키기에는 어려움이 따른다. 따라서 공동의 수직상부는 최대가능수직침하량을 보인다고 가정하고, 나머지 영역인 35°의 영향각으로부터 얻어진 영역(이 영역의 끝부분 침하량은 0이 된다)에 대해서는 보간법을 통해 침하량을 산출하였다. 이 결과는 다분히 보수적인 값을 보이게 된다. 또한 이러한 가정은 침하에 영향을 미치는 폭이 초과임계폭(supercritical width)일 때의 경우를 모사한다는 의미도 포함하게 된다.

3.3. 지형기록 조건을 고려한 침하량 산정

위에서 언급한 지표면의 침하곡선은 지표면 자체가 수평하다는 전제를 포함하고 있다. 실제 지형의 기록을 고려하게 되면 침하의 피해가 예상되는 영역이 수평 가정하의 지반침하 결과와는 차이를 보이게 된다. Fig. 5는 이와 관련하여 생기는 차이를 나타낸 모식도이다. 일정한 영향각을 이용하여 분석할 때, 지표면이 수평이면 침하의 영향을 받는 부분이 양쪽 대칭의 형태로 나타나게 되지만 영향각을 나타내는 가상선이 지표면과 만나는 부분의 고도가 좌우 서로 다른 경우는

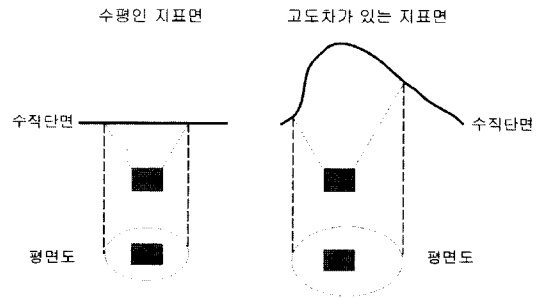


Fig. 5. Difference in subsidence area due to the surface profile.

평면도상에서 나타나는 형태는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 좌우 비대칭으로 나타나게 된다. 이러한 영향은 지반침하 피해예상지역 선정에 현저한 차이를 나타내게 된다. 따라서 분석과정에 있어 수직표고모형을 통해 지형의 고도정보를 함께 사용하여 이러한 영향을 가미하였다.

3.4. 지하수면 하강에 의한 침하

지하수면의 하강에 따라서 생기게 되는 침하의 경우, 토층의 종류 및 깊이가 주된 변수로 작용하게 된다. 본 연구에서는 토층의 종류를 입자의 크기별로 3개로 나누고 각 종류에 따라서 지하수면 하강에 따르는 침하의 정도가 차이를 보인다는 가정 하에 각각의 종류에 대해 다른 가중치를 부여하였다. 토층의 종류 및 가중치와 사용한 레이어는 아래의 Table 2와 같다. 이렇게 분류된 토층의 두께와 지하수면의 하강폭은 100개의 입의 관측지점을 선정하여 부여하였으며 나머지 부분에 대한 값은 보간법을 이용하였다. 이때 토층의 침하량은 지하수면의 하강 및 토층의 깊이와 비례한다고 가정하였다. 실제로 지하수면의 변화량과 침하량의 비례관계는 여러 실험을 통해 알려진 바 있다(Waltham, 1994).

3.5. GIS를 이용한 지반침하 위험도 분석

GIS를 이용한 지반침하 분석에 있어 본 연구는 상용 GIS 프로그램인 IDRISI 32와 CartaLinx를 사용하였다. IDRISI 32는 지구통계기법모듈이 강조된 GIS 분석 프로그램이며, CartaLinx는 자료 입력 및 백터방식 기본 연산이 가능한 상용프로그램이다.

Table 2. Weight according to soil types.

구 분	Sand	Silt	Clay
weighting factor	0.3	0.4	0.5

3.6. 공동 위치에 따른 지반침하

CartaLinx에서 임의로 선정한 공동의 위치를 폴리곤으로 디지털화하여 벡터 파일을 만들어준다. 각 공동의 깊이, 규모가 다르기 때문에 이후의 연산과정이 개별적으로 이루어져야 하므로 하나의 공동에 대해 하나의 파일을 만든다. 이 파일들을 IDRISI의 벡터 파일로 EXPORT 모듈을 수행한 후 다시 래스터형식으로 바꾸어준다. 이 래스터파일에서는 공동의 영역이 1로 그 이외의 부분이 0으로 저장되며, 래스터 이미지에서 0이 아닌 부분으로부터의 각 픽셀까지의 거리를 구해주는 DISTANCE 모듈을 이용하면 공동으로부터 각 픽셀까지의 거리를 구할 수 있다.

본 연구에서는 공동이 원인이 되는 지반침하의 경우 영향각을 35°로 하였는데, 이 경우 공동의 경계부로부터의 수평거리(d)와 공동과 지표면의 고도차(h)를 이용해 침하가 일어나는 부분과 그렇지 않은 부분을 구분하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{h} > \tan 30^\circ \approx 0.7 : \text{침하가 일어나지 않는 영역}$$

$$\frac{d}{h} < \tan 30^\circ \approx 0.7 : \text{침하가 일어나는 영역}$$

RECLASS 모듈을 이용해서 위의 이미지에서 값이 0보다 작은 지역(침하의 위험이 있는 지역)을 1, 값이 0보다 큰 지역(침하 위험 영역에 들어가지 않은 지역)을 0으로 하는 래스터 이미지를 만들어낸다. 이 이미지에 공동이 있는 영역을 1, 그 외의 부분을 0으로 가지는 이미지의 값을 더해주는 연산을 수행한다. 여기에 POLYVEC 모듈을 이용해 각 영역의 경계를 아크(arc)로 만들어준다. 이 때 경계부를 아크로 저장하기 위해서는 아크와 폴리곤 로케이터(polygon locator)를 따로 저장하는 옵션을 선택하고 아크를 저장한 파일만 CartaLinx에서 불러들인다. 그리고, 지반침하가 일어나지 않는 영역은 연산에 쓰이지 않으므로 값을 0으로 가지는 배경 부분은 이 과정에서 제외시킨다.

CartaLinx에서는 침하가 일어나는 영역의 경계인 아크에는 NumericUserID를 1로, 공동의 경계부가 되는 아크에는 NumericUserID를 S_{max}+1로 입력해 등침하 곡선을 만들고(cm 단위) 다시 IDRISI로 보낸다. 이 벡터 파일을 LINERAS 모듈을 이용해 래스터 이미지로 바꾸어주고 래스터 이미지에 대해 INTERCON 모듈을 실행해 공동 하나에 의한 침하량에 1을 더한 양을 값으로 가지는 레이어(layer)를 만들어낸다. 이 이미지의 값에서 1을 빼면 공동 하나에 의한 침하량을 픽

셀값으로 가지는 래스터 이미지를 만들 수 있다.

위와 같은 과정을 각각의 공동(공동 2-5)에 대해 똑같이 실행하여 침하량을 나타내는 레이어를 만들어내고 중첩의 원리에 의해 모든 결과치를 더해 최종 침하량 레이어를 만든다.

3.7. 지하수위 하강에 의한 지반침하

대상지역의 토층 분포에 관한 정보를 래스터 이미지로 작성한다. 이 이미지의 값을 각 토양의 단위 지하수위 하강량당 단위 두께의 침하량으로 바꾸어준다. 지하수위 하강에 의한 침하량은 지하수위 하강량과 토층 깊이, 각 토층의 하강 상수의 곱으로 나타낼 수 있다.

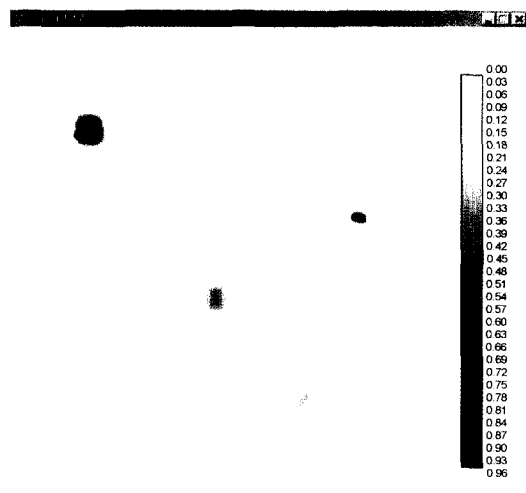


Fig. 6. Predicted subsidence.

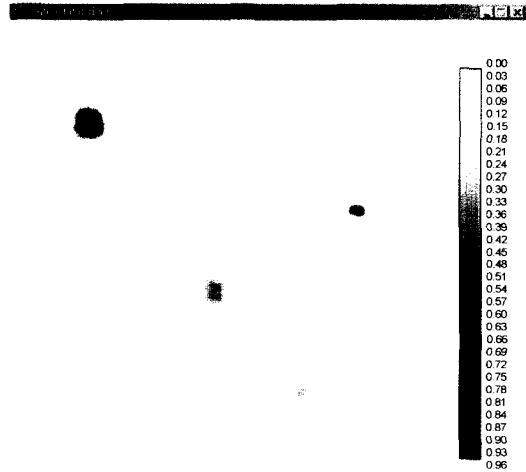


Fig. 7. Predicted subsidence excluding stream and reservoirs.

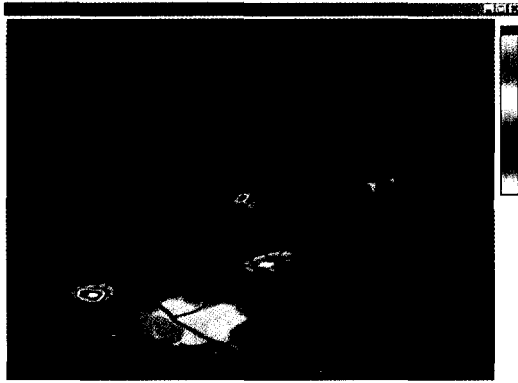


Fig. 8. Draped predicted subsidence on the DEM image.

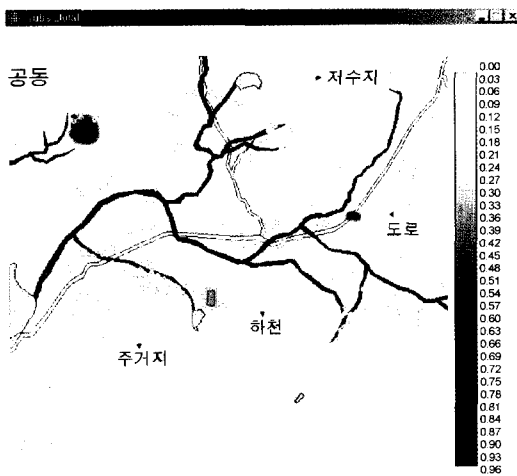


Fig. 9. Subsidence susceptibility overlaid on the landuse image.

3.8. 최종 예상 침하량

공동에 의한 침하량과 지하수위 하강에 의한 침하량을 합하면 Fig. 6과 같이 나타난다. 하천이나 저수지와 같이 실제로 침하가 일어나지 않거나 침하가 일어나더라도 피해를 일으키지 않는 지역을 제외하면 Fig. 7과 같은 결과를 얻는다. Fig. 8은 예상 침하량을 지형 표고모형에 드레이프(drape)를 시킨 이미지이다. 예상 침하량을 하천, 저수지, 도로, 주거지 등과 함께 Fig. 9에 도시하였다.

4. 결론 및 제언

본 연구를 통해 다음과 같은 결론과 제안을 얻을 수 있었다.

1. 지반침하의 해석은 공간적으로 이루어져야 한다. 기존의 연구는 하나의 단면만을 통해서 분석을 수행하였기 때문에 공간적인 3차원의 개념에서 다른 단면을 고려하게 되면, 2차원적인 해석에서보다 복잡한 양상을 띠게 된다. 따라서 기존의 2차원적인 해석을 기반으로 하여 3차원적인 침하곡선함수의 필요성이 대두되며, 본 연구에서는 국내에서 처음으로 3차원 지반침하를 고려하는 GIS를 설계하였다.

2. 최대수직침하량 및 지반침하영역은 공동 자체의 형상에만 영향을 받는 것이 아니라, 공동위의 지형, 토층의 종류 및 분포 양상, 지하수 조건 등에도 영향을 받는다. 이에 본 연구에서는 지형기복, 토층분포, 공동위치조건, 지하수 강하 등의 지반의 실제 조건에 부합되는 변수들을 고려한 지반침하 GIS 모델을 개발하였다. 본 연구에 사용된 여러 변수들 및 가정들과 관련하여, 국내 광산현장의 조건을 분석하여, 정량화된 데이터를 입력하면 정밀한 지반침하 위험도 작성이 이루어질 수 있다. 이를 위해 광산지역의 지형정보를 관리하는 데이터베이스관리시스템(DBMS)의 개발이 필요하다.

참고문헌

- 권광수, 유명환, 박형동 (2000) 지반침하 피해도 분석을 위한 GIS 활용에 관한 연구, 자원환경지질, 33권 6호, p. 557-563.
- Brauner, G. (1973) Subsidence Due to Underground Mining : I. Theory and Practices in Predicting Surface Deformation. U. S. Bureau of Mines, 56p.
- Jiang, X., Lei, M. and Li, Y., (1994) The application of GIS to the evaluation of karst collapse. Proceedings 7th International IAEG Congress, Balkema, p. 4575-4579.
- U. K. National Coal Board (1975) Subsidence Engineer's Handbook. Mining Dept., 111p.
- Waltham, A. C. (1994) Foundation of Engineering Geology. Blackie Academic & Professional, 88p.
- Yang, G. (1996) Some aspects to GIS modeling of environmental problems caused by mining-With special reference to China. Mining science and technology, Balkema, p. 443-447.

2001년 9월 23일 원고접수, 2001년 12월 19일 게재승인.