

갱도의 심도 정보만을 고려한 지반침하위험도 평가법 개발

정용복¹⁾, 송원경^{2)*}, 강상수²⁾

Development of Subsidence Hazard Estimation Method Based on the Depth of Gangway

Yong-Bok Jung, Won-Kyong Song, Sang-Soo Kang

Abstract This paper describes the development of a simple and quantitative subsidence hazard estimation method appropriate to Korean coal mines using gangway depth information only. In spite of simpleness of estimation method, this new method gives good results close to those obtained using influence function method when applying to a virtual rectangular excavation model and to a closed mine where actual subsidence occurred. Therefore, this method can be effectively applied to the identification of zones liable to subsidence over closed coal mine in Korea where the shape of extraction is very complex and usually unknown.

Key words closed mine, subsidence, subsidence hazard estimation, depth of gangway

초 록 본 연구에서는 폐광산으로 인한 광산재해 중 기간 및 일반 시설물이나 인명의 피해를 초래하는 지반침하의 예측 및 평가를 위하여 국내에서 비교적 용이하게 확보할 수 있는 정보인 갱도심도를 사용하여 단순하면서도 국내 지질 및 채굴조건에 적합한 지반침하위험도 평가법을 개발하였다. 개발된 방법을 가상의 규칙적인 채굴적과 실제 침하현장에 대하여 적용한 결과 기존의 영향함수법에 의한 결과 및 현장 침하 사례와 유사한 결과를 얻었다. 따라서 본 연구에서 개발한 평가법은 복잡한 지질구조와 불규칙한 채굴적으로 대표되는 국내광산의 지반침하위험도평가 및 예측에 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 폐광산, 지반침하, 지반침하 위험도평가, 갱도심도

1. 서 론

석탄수요 감소로 인하여 석탄산업합리화 조치가 시작된 1989년부터 2005년까지 국내 346개 석탄광 중 338개가 폐광되었다. 이후 폐탄광 지역에서 지반침하, 지하수오염, 토양오염, 산림훼손 등의 광해가 발생하여 사회문제로 대두되어 왔다. 그러나 국내의 경우 폐광으로 인한 광해의 예측과 이에 따른 대책을 위한 연구는 아직 초기 단계에 머물러 있는 실정이다.

영국을 비롯한 유럽의 여러 국가에서는 탄광개발에 따른 침하예측을 위해 많은 노력을 하였으며 대표적인 방법으로는 프로파일(profile) 함수법과 영향함수(Influence

function)법이 있다. 또한 확률적 방법에 의한 침하예측도 일부 수행되었으며 국내에서도 적용된 사례가 있다 (Geol and Page, 1982, 김병찬과 문현구, 2001). 이 외에도 채굴 공동의 높이, 채굴폭, 탄층 경사도를 이용하여 지표침하의 영향범위를 예측하는 방법이 영국의 National Coal Board(1975)에 의해 제시된 바 있다. 그러나 이러한 방법들은 유럽지역에서 주로 사용하는 장벽식 채탄법에 의해 발생하는 연속(trough)형 침하 예측에 적합하다.

국내의 경우 복잡한 지질구조 및 다양한 폭과 경사를 갖는 불규칙한 탄층 분포로 인해 위경사승분락식 채탄법이나 중단분락식 채탄법을 주로 사용하였기 때문에 침하량이 크고 침하곡선이 불연속한 함몰(sinkhole) 형태의 침하가 주로 발생하며, 이에 따라 침하에 영향을 주는 요인도 다를 수 있다. 그러므로 국내 광산의 지반침하 위험도평가 및 예측방법도 국내실정에 맞도록 기존의 방법을 수정하거나 새롭게 개발하는 것이 타당하다.

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

²⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

* 교신저자 : songwk@kigam.re.kr

접수일 : 2008년 7월 18일

심사 완료일 : 2008년 8월 1일

게재 확정일 : 2008년 8월 1일

최종국 외(2007), Kim et al.(2006), 김기동 외 (2005)는 GIS 및 확률통계기법을 이용하여 강원도에 분포하는 탄광지역에 대한 지반침하예측지도 작성에 관한 연구를 수행하였다. 이들 연구에서는 지형 경사, 갱도 심도, 지하수위, RMR 등 7~8가지 요소들의 가중합을 통해 지반침하예측지도를 작성하였으며 실제 침하 사례와 비교함으로써 개발한 기법의 타당성을 검증하였다. 이러한 방법은 귀납적인 위험지도 작성법으로서 평가 인자가 많을수록 더 정확한 결과를 도출할 수 있다. 그러나 갱도 관련 자료 이외의 인자들은 공간적 불확실성이 상대적으로 크며 그러한 자료의 수집을 위해서는 추가적인 비용이 집행되어야 한다. 또한 갱도나 채굴적의 중첩(지표 단위 영역 하부에 심도를 달리하는 여러 개의 갱도 혹은 채굴적이 존재할 수 있음)에 대해서는 고려하지 않은 것으로 판단되며 이러한 방법들은 모두 기존의 침하사례를 목적값으로 하여 각 평가 요소의 가중치를 통계적으로 조정하는 형식을 취하기 때문에 적용한 침하사례 자료가 변경 또는 추가되면 해당 가중치들도 변하게 된다.

따라서 본 연구에서는 추가적인 조사나 불확실한 자료의 사용을 가능한 한 배제한 상태에서 비교적 용이하게 확보할 수 있는 갱도에 관한 정보만을 근거로 하여 지반침하 예측 및 대응을 위한 초기단계의 지반침하위험도 평가법을 개발하였다. 또한 개발된 방법의 타당성을 평가하기 위해 기존의 영향함수법(Whittaker & Reddish, 1989)에 의한 결과와 비교하였으며 현장적용도 실시하였다.

2. 국내 현실에 적합한 지반침하위험도 평가법

2.1 국내 광산 특성

국내 광산, 특히 석탄광의 경우 경사탄층 및 복잡한 지질구조로 인해 위경사승봉락법이라는 채탄법을 주로 사용하였으며 이로 인해 외국의 침하이론을 그대로 적용하기에는 많은 어려움이 있었다. 또한 폐광산의 경우 채굴적의 규모에 대한 자료가 거의 없는 경우가 대부분이며, 수작업에 의해 작성된 갱도자료는 대부분 확보가 가능하다. 이와 관련하여 광해방지사업단에서는 시범적으로 일부 폐광산에 대하여 과거 광산관련 자료 및 채증을 통하여 3차원 광산지리정보시스템(MGIS)을 구축하는 사업을 수행하고 있다(석탄합리화사업단, 2005).

따라서 지반침하에 가장 큰 영향을 미치는 채굴적 정보가 부정확한 국내 광산 특성을 고려할 때 비교적 단순한 정보를 사용하여 정량적인 지반침하위험도를 평가하는 방법의 개발이 요구된다. 이에 본 연구에서는 다양한 침하인자 중 가장 정량적이며 쉽게 확보할 수

있는 갱도 자료(심도)를 활용하여 지반침하위험도를 평가하는 방법을 개발하고자 하였다.

2.2 평가법 핵심 가정

기존의 여러 연구결과에 의하면 지반침하의 핵심인자는 채굴적 규모와 심도이며 이 외에 상반조건, 체적팽창계수, 지하수, 강우 등의 다양한 인자가 지반침하에 영향을 미친다(광해방지사업단, 2007). 그러나 국내 폐광산의 경우 이러한 중요 정보에 대한 정량적인 자료를 확보하기가 매우 어려운 실정이다. 국내에서 광산과 관련하여 비교적 용이하게 확보할 수 있는 정량적 자료 중 하나는 갱도 규격과 갱내도, 그리고 지형도가 있다.

본 연구에서는 지반침하위험도 평가법 개발과 관련하여 지표에서 갱도까지의 거리, 즉 1) 심도가 깊을수록 침하의 발생 가능성이 낮으며, 2) 일정 구역 내에 갱도(운반, 승강 등)가 많을수록 채굴적 규모가 크다는 두 가지 가정을 근거로 하여 평가법을 개발하였다.

먼저 갱도의 심도에 따른 위험도는 국내의 침하사례 수집 및 분석을 수행한 기존의 연구결과(광해방지사업단, 2007)와 Kalendra et al.(1997)이 정리한 외국의 사례를 참조하여 결정하였다. Fig. 1은 국내 석탄광 침하 사례 중 채굴적 심도에 따른 침하발생횟수를 표시한 것이다. 국내 석탄광의 경우 Fig. 1과 같이 200 m 이상의 심도에서도 일부 침하가 발생하였으나 대부분의 침하는 심도 100 m 이내에서 발생하는 것으로 나타났다. 또한 채굴적 심도가 증가함에 따라 발생횟수가 지수적으로 감소함을 알 수 있다. Fig. 1에서 50 m 이내의 경우는 오히려 침하 발생횟수가 상대적으로 적은데 이는 지표 부근의 천심도 채굴을 법적으로 제한하고 있기 때문에 침하사례가 적게 나타난 것으로 사료된다. 국외 자료의 경우도 이와 유사하며 함몰형태의 침하는 최소

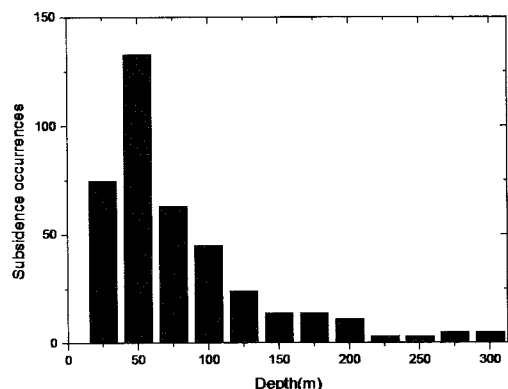


Fig. 1. Subsidence occurrences at different overburden thickness in Korean coal fields (after MIRECO, 2007).

Table 1. Mining depth data for reported sinkholes(after Kalendra et al., 1997).

Sl. No.	Location	Reference	Maximum depth(m)
1	Western Pennsylvania	Gray et al. (1978)	47.7
2	Hanna Area, Wyoming	Berg (1980)	73.2
3	Sheridan Area, Wyoming	Dunrud and Osterwald (1980)	77.0
4	Beulan Area, North Dakota	Dunrud and Osterwald (1980)	24.4
5	Illinois Coal Basin	Hunt (1980)	50.3
6	St David Area, Illinois	Wildanger et al. (1980)	50.3
7	Colorado Springs Area	Matheson and Pearson (1985)	45.7
8	Superior, Wyoming	Brown (1986)	30.5
9	Rock Springs, Wyoming	Colaizzi (1986)	101.5
10	Glenrock, Wyoming	Gormley (1986)	30.5
11	Handidhua and Deulbera mines	Singh (1986)	40.0
12	Humberside & Lincolnshire	Whittaker and Reddish (1989)	90.0
13	Mithapur Colliery, India	Anon. (1994)	25.0
14	Jamuna and Kotma Area, India	Singh and Dhar (1996)	43.0

24.4 m에서 최대 101.5 m까지 발생한 것으로 보고되고 있다(Table 1).

이상의 국내의 채굴적 심도와 관련된 지반침하 발생 사례를 근거로 하여 심도와 관련된 위험도 모델은 지수적으로 감소하는 함수($y = e^{-depth/a}$)로 결정하였으며 심도가 0 m이면 위험도(최대값)가 1, 심도가 100 m에서는 위험도가 0.5가 되도록 설정하였다. 즉, 심도가 0 m이면 침하가 무조건 발생한다는 의미이며 100 m 이내에서 대부분의 침하가 발생하므로 이 심도에서부터 침하가 발생할 가능성이 크다는 의미에서 0.5로 지정하였다. 위험도 0.5 이하는 침하발생 가능성이 없다는 쪽에 비중을 더 두는 것이며 위험도 0은 침하위험도가 전혀 없는 경우를 의미한다. 이러한 조건에서 상수 a는 144.3이라는 값으로 계산되나 본 연구에서는 일의 자리에서 반올림하여 a값으로 140을 사용하였다. 이로부터 단위 채굴적에 대하여 (1)과 같은 위험도 평가식을 도출하였다. 식 (1)의 경우 50 m의 경우 0.70, 100 m의 경우 0.49, 200 m의 경우 0.24의 위험도를 가지게 된다(Fig. 2).

$$Hazard = \text{Exp}(-depth/140) \tag{1}$$

다음으로 단위 구역당 갱도의 밀집도 평가는 분석방법을 통해서 자동으로 계산된다. 다만 알고리즘 구현과 계산 편의성을 위해 갱도를 일정간격의 점자료(x, y, depth)로 표현한 뒤 일정크기의 합산창 내에 포함되는 점자료의 개수를 계수하는 방식을 사용하였다. 즉, 합산창이 사각형이며 갱도는 점으로 표현되므로 갱도자료가 합산창 내부에 있는지를 판단하는 것이 간단해진다. 국내 광산과 같이 복잡한 채굴적 형상인 경우 영향함수

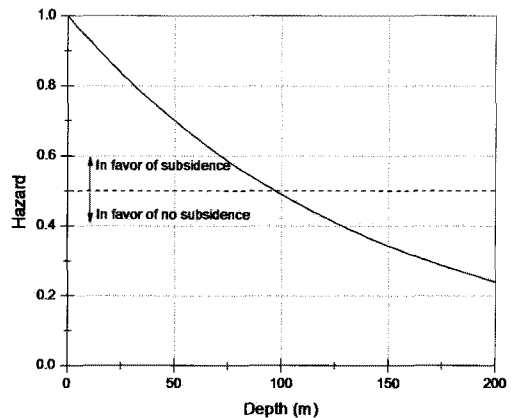


Fig. 2. Subsidence hazard model based on the depth of gangway.

법은 채굴적 형상을 페다각형 형태로 표시해야 하며 영향원이 이 페다각형 안에 포함되는지 여부를 판단하기 위해서는 페다각형을 표현하는 모든 점들을 사용한 계산이 필요하지만 개발된 방법의 경우 갱도나 채굴적 형상의 복잡성에 영향을 받지 않는다.

국내 석탄광의 경우 갱도 폭은 거의 일정하므로 본 연구에서 폭 5 m 이내의 갱도인 경우 갱도종류에 관계 없이 일정한 것으로 가정하여 하나의 점으로 표현하였다.

2.3 지반침하위험도 평가 프로세스

제안된 평가법의 실제 적용을 위해서는 먼저 갱도 자료를 일정한 간격의 점(x, y, depth) 자료 형태로 표현한 뒤 분석하고자 하는 전체 영역을 일정한 간격의 격자로 분할하여 해당 격자점에서 적당한 크기의 합산창을 걸

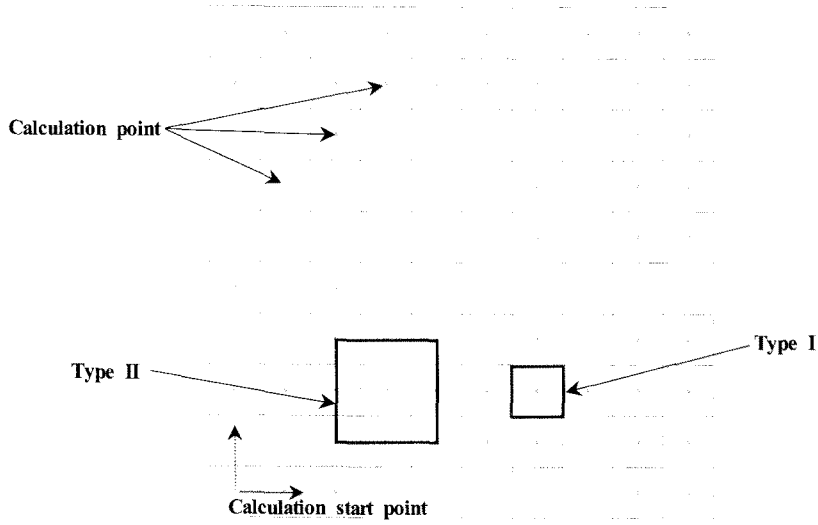


Fig. 3. Calculation process using two types of summation windows.

정한 뒤 해당 합산창 영역 내에 존재하는 모든 자료에 대하여 식 (1)을 적용하여 위험도를 합산한다(Fig. 3). 본 연구에서는 합산창의 크기가 계산을 위한 격자크기와 같은 경우(Type I)와 격자크기의 2배인 경우(Type II)에 대하여 각각 검토하였다. 모든 격자점에 대하여 계산이 끝나면 이를 등고선도 형태로 표시하여 해당영역의 침하위험도를 평가한다. 합산창 크기와 갱도자료의 점자료 변환간격이 같은 경우 합산된 위험도가 0.5 이상인 영역은 갱도가 100 m 이내에 존재하는 것과 등가로서 지반침하가능성이 존재하며 위험도 0.5이하의 영역에서는 침하가능성이 적은 것으로 판단할 수 있다.

3. 평가법 검증

검증을 위하여 가상의 채굴지역에 대하여 본 연구에서 개발한 평가법에 의한 결과와 기존 예측방법 중의 하나인 영향함수법으로 예측한 결과를 비교하였다. 가상채굴적은 Fig. 4에 표시한 바와 같이 지하 50 m 심도에 위치한 폭 20 m, 연장 40 m 규모의 판상형 채굴적이다. 본 연구에서 개발된 방법은 갱도를 일정간격의 점자료로 표현하기 때문에 Fig. 4와 같이 채굴적을 5 m 간격의 점자료로써 표현하였다.

위험도평가를 위한 계산용 격자 크기는 10x10 m이며 합산창의 크기는 Type I의 경우 10x10 m, Type II의 경우 20x20 m이다. 영향함수법을 이용한 계산에서는 일반적으로 사용하는 영향원 크기 공식($R = h \tan 35 = 0.7h$)을 적용하여 35 m 반경의 영향원을 사용하였다(Whittaker & Reddish, 1989).

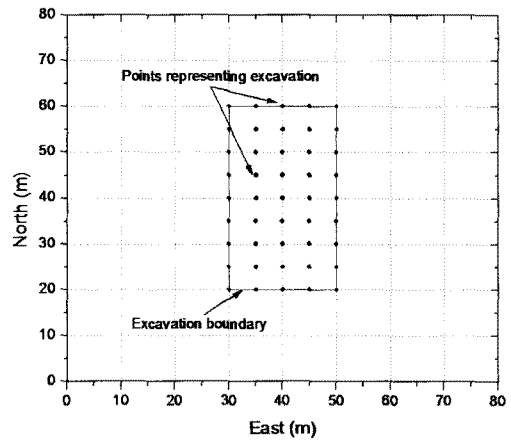
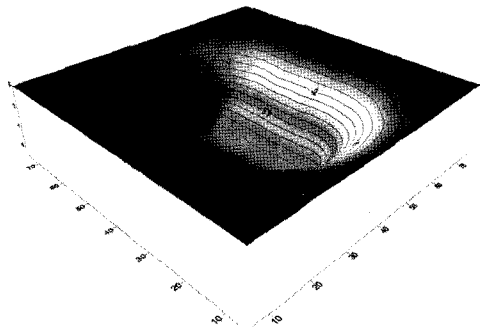
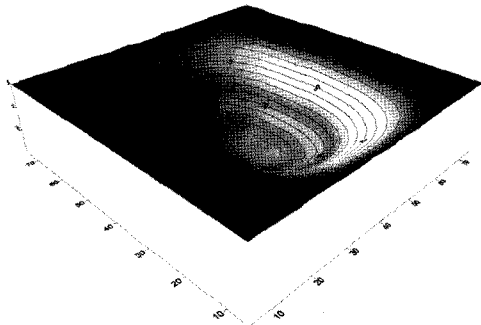


Fig. 4. Plan view of virtual excavation panel for comparison.

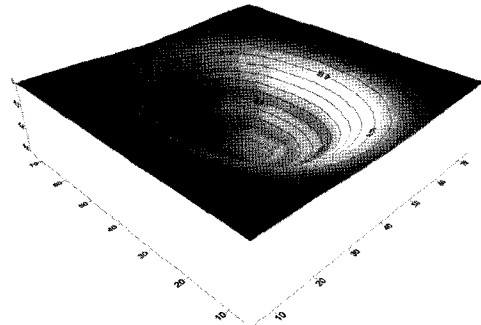
Fig. 5는 두 방법에 의한 평가 결과이다. Fig. 5(a)와 (b)는 본 연구에서 개발한 방법을 이용하여 구한 결과이며 Fig. 5(c)는 영향함수법으로 구한 결과이다. Fig. 5(d)는 X=35 m 단면에서 각 평가결과의 최대값으로 정규화한 침하프로파일 단면도이다. 영향함수의 경우 정규화된 침하량이며 본 연구에서 개발된 방법의 경우 침하위험도(비교를 위해 음수로 변환)이므로 직접 비교는 어렵지만 형태는 유사하게 나타남을 알 수 있다. Type I의 경우 합산창의 크기와 격자크기 및 갱도표시용 절점이 정확히 일치하는 극단적인 경우로서 Y=25 m에서 Y=55 m까지의 격자점은 모두 9개의 점자료를 동일하게 포함하므로 같은 위험도값을 가지게 된다. 따라서 갱도자료를 점자료로 변환할 때 사용한 간격보다는



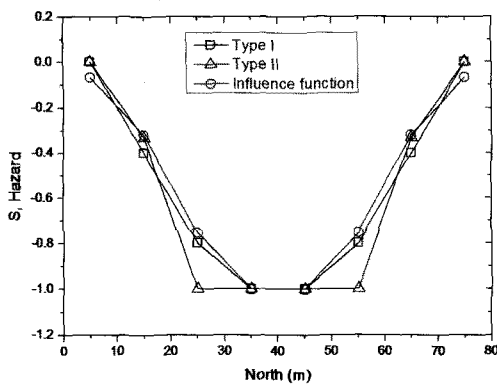
(a) Type I



(b) Type II



(c) Influence function



(d) Normalized profile at X=35 m

Fig. 5. Estimated subsidence hazard contours and profiles from three different methods for the virtual excavation panel.

큰 합산창을 사용하는 경우 좀 더 완만한 침하단면형태를 가지게 된다.

갱도자료의 점자료(x, y, depth) 변환간격은 5 m이며 합산창은 10x10 m이므로 Type I의 경우 위험도가 0.5x2=1 이상인 영역이(Fig. 5(a)의 외곽에서 두 번째 등고선), Type II의 경우 합산창이 20x20 m이므로 위험도가 0.5x4=2 이상인 영역(Fig. 5(b)의 외곽에서 두 번째 등고선)이 위험지역이라고 볼 수 있다.

4. 현장적용

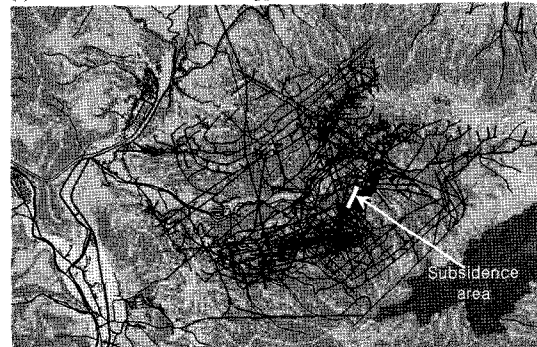
강원도 태백의 ○○탄광을 대상으로 본 연구에서 개발된 평가법을 적용하여 침하위험도를 평가하였으며 실제 발생한 침하지와 비교 분석을 실시하였다.

4.1 지반침하 현황

○ ○탄광 채굴적 상부 지표에 N15E 방향으로 함몰형 지반침하가 발생하였다. 그 연장은 약 150 m이며 2 m 정도의 단차와 수목의 기울어짐이 발생하였다(Fig. 6).



(a) Surface subsidence with stepped movement and tilting of trees.



(b) Gangway distribution and location of the subsidence

Fig. 6. Gangway and surface subsidence in the studied mine site.

침하위치는 530 ML인 3편 상부로서 갱도에서 지표까지의 거리는 약 270 m이다. 일반적으로 이 심도에서는 침하가 발생하기 어렵다고 알려져 있으나 본 현장은 화산암 계열의 연약대와 단층이 발달하여 침하가 발생한 것으로 추정된다.

현재 기존 침하지역 이외의 다른 지역에서는 지반침하 징후가 발견되지 않는다. 단지 기존침하지 주변의 개울이 건조로 변하여 지표수가 거의 흐르지 않고 있는데 이는 채굴적 붕락으로 인해 발생한 지층 균열을 따라 지표수가 채굴적 내로 유입되고 있기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 지반침하위험도 평가

Fig. 7은 개발된 평가법 적용을 위해 10 m 간격으로 샘플링한 갱도의 점 자료이다. 갱도자료는 (x,y,z)형태의 3차원 자료로서 동일한 (x,y)좌표의 지형도상 표고와의 차이를 계산하여 이를 심도값으로 저장하였다. 갱도심도 분포는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 전체적으로 400 m 심도에 위치하는 점들이 가장 많으며 100 m 이하의

심도에 위치하는 점 자료들도 1.8% 존재하는 것으로 나타났다.

다음으로 갱도가 존재하는 과업영역을 40x40 m 간격으로 분할한 뒤 모든 격자의 중심에서 40x40 m 정사각형의 합산창(Type I)과 80x80 m의 합산창(Type II)을 사용하여 격자 영역에 대한 위험도를 계산하였다. 즉, 갱도가 지표 하부에 2개가 존재한다면 두 갱도에 의한 위험도가 합해져서 최종적인 위험도가 결정된다.

Type I의 경우 합산창이 40 m이므로 10 m간격의 점 자료가 평균적으로 4개 포함될 수 있다. 따라서 0.5x4=2 이상의 위험도를 가지는 영역은 침하가능성이 존재하는 것으로 판단할 수 있다. 마찬가지로 Type II의 경우 0.5x8=4 이상의 위험도를 가지는 영역은 침하가능성이 있는 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 9는 이러한 과정을 통해 작성된 지반침하위험도 지도이다. 기존 침하지역도 지표까지의 거리만을 고려한 위험도 지도에서 위험지역으로 추정된 영역에 속하는 것으로 나타났으므로 본 위험도 지도는 일차적인 침하위험지역 판단에 사용할 수 있는 것으로 사료된다.

Type I의 경우 침하위험도 등고선이 Type II에 비하여 좁게 형성되며 모양도 다소 거칠게 나타났다. 이는 2절에서 살펴본 바와 같이 합산창의 크기가 작을 경우

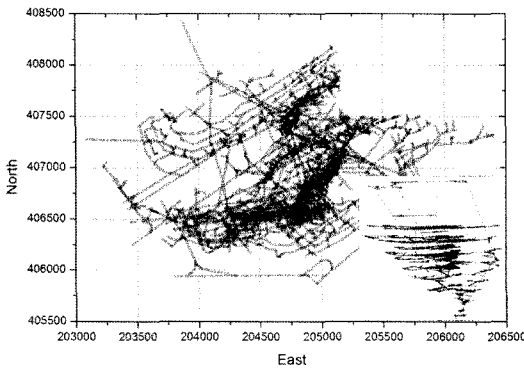


Fig. 7. Plan and perspective view of point data representing gangways.

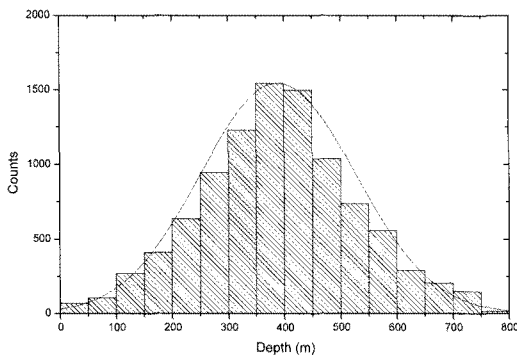
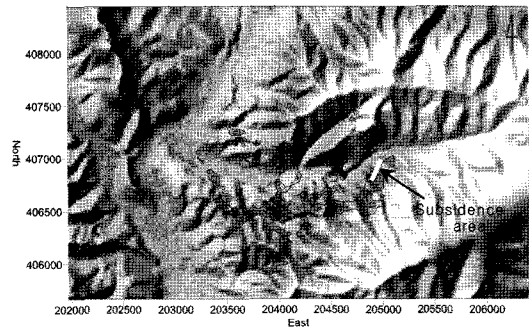
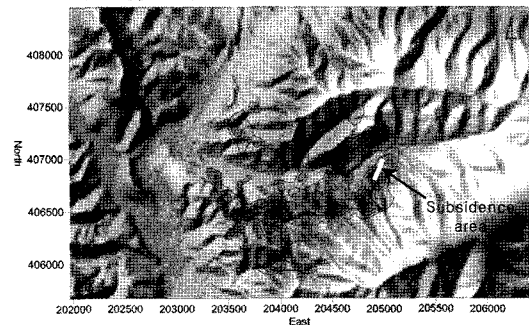


Fig. 8. Histogram of the depth of gangways.



(a) Type I (40x40 m summation window)



(b) Type II (80x80 m summation window)

Fig. 9. Subsidence hazard maps using different summation windows.

주변의 영향을 전부 반영하지 못하기 때문이다. 따라서 침하위험도를 평가할 때 채굴적의 영향범위(영향함수법의 경우 영향원의 크기)를 적절하게 결정하는 것이 중요하다. 현재 연구 결과에 의하면 80x80 m (격자크기의 2배) 합산창을 사용하는 경우 합리적인 결과를 얻는 것으로 나타났다.

이상의 침하위험도 평가결과와 갱도 분포를 중첩시켜서 최종적으로 4개의 침하위험구역을 설정하였다. 이러한 자료는 후속의 지반침하 대책 선정시 기초자료로서 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 설정된 구역은 Fig. 10과 같으며 이 구역 중 A는 실제로 갱구부이기 때문에 갱도 심도가 낮아서 위험도가 상대적으로 높게 나타난 구역이므로 위험구역에서 제외하였다.

4개소의 위험지역 중 B구역은 건물 및 사람의 통행이 예상되는 지역이므로 주의해야 하며 C구역은 D구역과 연결성이 있을 수 있으나 후속조치 우선순위는 낮은 지역이며 D구역은 기존 침하지이다. E구역의 경우 위험도가 매우 높고 경작지 및 통행로가 있는 지역이므로 타 지역에 비하여 우선적인 후속조치가 필요한 것으로 판단된다.

위험도평가 결과 D구역보다 다른 구역들의 위험도가

더 높지만 다른 구역에서는 육안으로 관찰할 수 있는 침하 현상은 아직 발생하지 않았다. 즉, 갱도 자료만으로 모든 침하현상을 설명할 수는 없으나 개발된 평가법의 경우 일차적으로 침하가능성이 높은 지역을 정량적으로 평가할 수 있다는데 의미를 둘 수 있다. 이러한 단점에 대한 보완은 갱도와 채굴적 분포에 대한 새로운 가정을 사용하는 연구와 갱도자료 외에 광체 분포나 상반의 지질조건을 고려하는 방식으로 접근할 수 있으며 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 갱도의 심도 정보만을 근거로 하여 지반침하위험도를 개략적으로 평가하는 방법을 개발하였다. 가상의 채굴적에 대하여 침하위험도를 평가한 결과 기존의 영향함수법을 이용하여 얻은 결과와 유사한 값을 얻었다. 본 방법을 실제 광산에 적용하여 위험도를 평가한 결과 지반침하 우려구역으로 분류된 4개의 위험구역 중에 실제로 지표침하가 발생한 지역이 포함되는 결과를 도출하였다. 따라서 본 연구로부터 개발된 방법은 불규칙한 채광, 채굴적 규모나 상반 조건 등의 부재

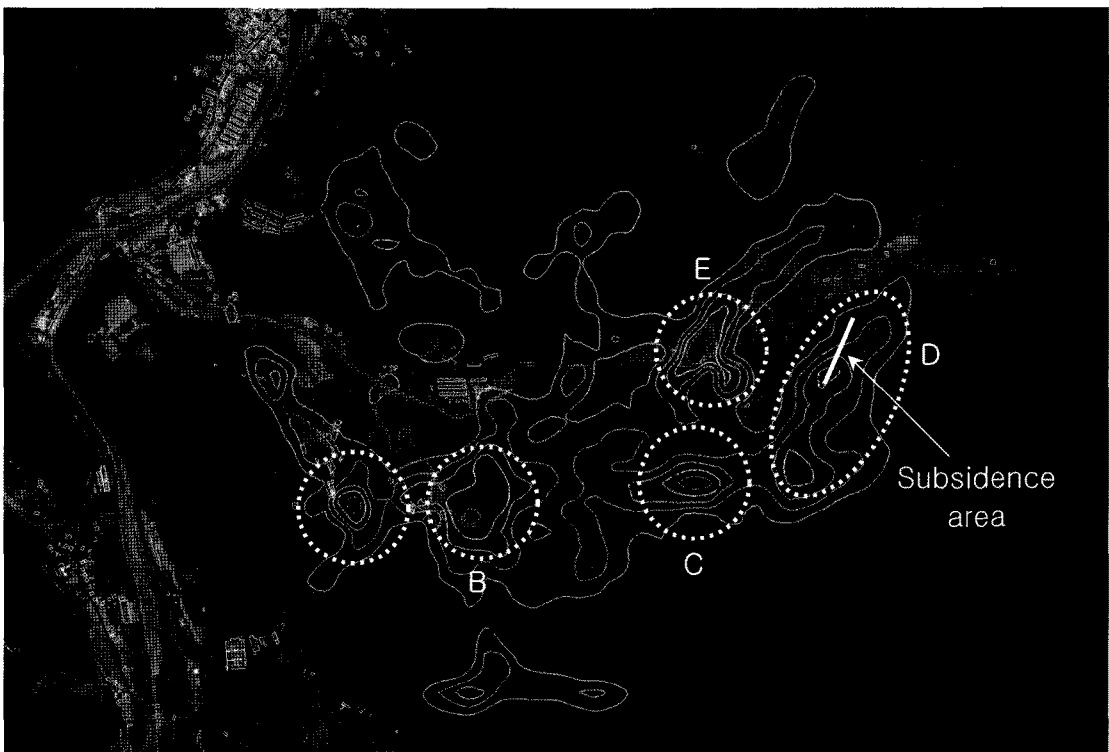


Fig. 10. Estimated unstable areas based on the results from the Type II method (A : portal area, B~E : unstable area).

및 자료의 부정확성과 같은 국내 여건을 고려할 때 매우 단순하면서도 효과적인 지반침하위험도 평가법이라고 판단된다.

현재 연구단계에서는 신속한 자료 확보 문제로 갱도의 심도자료만을 사용하였으며 갱도 분포와 채굴적분포에 대한 단순한 가정에서 출발하였다. 예측정밀도 향상을 위해서 갱도와 채굴적 분포에 대한 새로운 가정을 도출하는 방법과 갱도자료 외에 상부 지질(단층, 절리, 강도 특성 등) 및 광체에 대한 정보를 사용하는 방법에 대한 추가 연구를 수행할 예정이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘지질재해 피해평가기술 및 대응기술 실용화사업’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 광해방지사업단(MIRECO), 2007, 한국형 광산지역 지반침하의 안정성 평가기법 및 소프트웨어 개발, p.18-33.
2. 김기동, 이사로, 오현주, 원중선, 2005, GIS와 확률, 통계기법을 이용한 강원도 고사리 폐탄광 주변 지역의 지반침하 예측도 작성연구, 2005 대한지질학회 추계학술발표회 9-94.
3. 김병찬, 문현구, 2001, 광산침하기구 및 침하 예측에 관한 이론적 연구, 한국자원공학회지, 38(3), p.188-201
4. 석탄합리화사업단, 2005, 폐탄광지리정보시스템 구축사업 구축보고서, 2005-03, pp. 285-299.
5. 최종국, 김기동, 이사로, 김일수, 원중선, 2007, GIS 및 확률모델을 이용한 폐탄광 지역의 지반침하 위험 예측, 자원환경지질, 40(3), p.295-306.
6. Goel, S.C. & Page, C.H., 1982, An empirical method for predicting the probability of chimney cave occurrence over a mining area, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 19, pp.325-337
7. Kalendra B. Singh & Bharat B. Dhar, 1997, Sinkhole subsidence due to mining, Geotechnical & Geological Engineering, 15, pp.327-341
8. Kim, K.D., Lee, S., Oh, H.J., Choi, J.K., Won, J.S., 2006, Assessment of ground subsidence hazard near an abandoned underground coal mine using GIS, Environ Geol., 50, p.1183-1191.
9. NCB, 1975, Subsidence Engineer's Handbook, National Coal Board, London, 111pp.
10. Whittaker B.N. & Reddish, D.J., 1989, Subsidence Occurrence, Prediction and Control, Elsevier, p.528.

강 상 수



1980년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1987년 인하대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1999년 동아대학교 대학원 자원공학과 공학박사
Tel: 02-868-3255
E-mail: kss@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

정 용 복



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템 공학부 공학박사
Tel: 042-868-3097
E-mail: ybjung@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

송 원 경



1982년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1986년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1966년 프랑스 에콜데민 지질공학과 공학박사
Tel: 042-868-3247
E-mail: songwk@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 책임연구원