

## 지반침하 메커니즘 분석 및 평가 프로그램 개발

최성웅<sup>1)\*</sup>, 전양수<sup>1)</sup>, 박의섭<sup>1)</sup>, 정용복<sup>1)</sup>, 천대성<sup>2)</sup>

### Analysis of Subsidence Mechanism and Development of Evaluation Program

Sung O. Choi, Yang-Soo Jeon, Eu-Sup Park, Yong-Bok Jung, Dae-Sung Chun

**Abstract** Surface subsidence which occurs with several reasons, such as collapse of gangway, discharge of groundwater, compaction of weak rock mass, and tunnel excavation in shallow depth, gives rise to a serious problem in national infra-structures. In this study, therefore, the mechanism of subsidence has been examined numerically to overcome the passive approach on subsidence occurrence area. With many kinds of numerical studies, the major geotechnical parameters have been selected and the weighted values have been defined for each parameters. Also the authors developed the numerical program which can estimate the possibility of subsidence occurrence, and proposed the decision method for objective and quantitative guideline. It is anticipated that this research will be helpful to establish the hazard map on subsidence region.

**KeyWords** gangway, groundwater, weak rock mass, subsidence, hazard map

**초 록** 지하채굴적의 함몰, 지하수의 무분별한 양수, 연약지반의 압밀 및 얇은 심도에서의 지하굴착 등의 원인으로 기인하는 지반침하하는 국가 기간망에 심각한 안전문제를 야기하고 있다. 특히 인구밀집 지역에서는 가옥 및 기타 시설물의 붕괴요인으로 작용함에 따라 국민의 생활권을 위협하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지반침하가 발생한 이후 조사와 보강작업이 실시되는 기존의 수동적인 접근법을 탈피하고 지반침하를 예측하여 피해발생을 최소화하기 위해 사례분석을 통해 국내 지질조건에 부합하는 지반침하의 메커니즘을 규명하였으며, 지반침하에 영향을 미치는 제반 요인들을 수치해석적으로 분석하였다. 또한 이를 통해 각 요인들의 가중치를 점검, 합리적인 판단 기준을 제시코자 하였으며, 지반침하 발생여부를 파악할 수 있는 프로그램을 제작하여 이러한 가중치를 접목시킴으로써 지반침하 발생가능성에 대한 객관적인 판단과 정량적인 기준을 제시할 수 있도록 하였다. 이러한 연구결과를 통해, 지질학적 분포 현황과 같은 자연적인 조건과 지하채굴적 및 양수 현황 등과 같은 인공적인 조건들을 결부시켜 추후 전 국토에 대한 지반침하 재해 위험지도를 작성함으로써 지반침하발생 가능성을 억제하고 그 피해규모를 최소화할 수 있는 근간을 마련하였다.

**핵심어** 지하채굴적, 지하수 양수, 연약지반 압밀, 지반침하, 지반침하재해 위험지도

## 1. 서 론

광산의 지하갱도 및 지하채굴적의 함몰, 지하수의 양수에 따른 암반 지지력의 상실 및 공동의 형성, 미교결층과 같은 연약지반의 자연적인 압밀 현상 등에 의한 원인으로 발생하는 지반침하는, 도로 및 철도 등 국가 기간망의 안전성에 심각한 위험요소로 작용하고 있으며, 특히 인구가 밀집해 있는 지역에서는 가옥 및 시설물의 붕괴요인으로 작용함에 따라 국민의 생활 안전을 위협하고 있다.

이러한 지반침하의 발생에 대해 선진외국에서는 이미 지반침하의 유형별 분석과 대처, 지반침하 우려지역에 대한 재해위험지도 작성, 지반침하 발생가능성의 순위 평가 등을 통해 지반침하현상을 능동적으로 대처하고 있다. 우리나라의 경우는 비록 복잡한 지질구조를 가지고 있는 지질학적 특성상, 지반침하현상을 이론적으로 뚜렷이 규명하기는 힘들다 하더라도 지반침하현상이 발생한 지역에 대해 사례별 분석을 통한 지반보강사업에만 치중하고 있어, 재해가 발생한 뒤 보강 및 보수가 이루어지는 수동적인 대처가 이루어지고 있는 실정이다.

따라서 국내에서 발생하고 있는 지반침하의 사례를 분석하여 원인별, 현황별, 그리고 지역별로 분류를 실시하고, 이를 토대로 지반침하현상이 발생하였거나 발생하고 있는 지역에 대한 데이터베이스를 구축하여 통

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

<sup>2)</sup> 한국지질자원연구원 지반안전연구부 연구원

\* 교신저자 : choiso@kigam.re.kr

접수일: 2005년 4월 25일

심사 완료일: 2005년 6월 16일

계분석을 실시함으로써 지질구조특성 및 채굴적의 분포양상 등의 상호관계에 의한 지반침하 예측기술을 개발할 필요가 절실하다. 또한 궁극적으로 국토에 대한 재해위험지도를 작성함으로써 지반침하재해 발생 가능성을 최소화하고 지반침하 발생을 예지함으로써 국민의 기본 생활권을 보장해야 할 필요가 있다. 최종적으로는 인공위성 등을 통한 광역적이고 장기적인 지반 모니터링 기술을 개발하고, 국내 조건에 적합한 새로운 지반 보강 공법을 개발해야 할 것이다.

이와 같이 지반침하재해 저감을 위한 대책마련의 일환으로, 본 연구에서는 국내외 지반침하 발생현황에 대한 유형별, 사례별 분석 및 지반보강공사에 대한 조사 분석을 실시하였다. 또한 지하채굴적에 의한 지반침하를 중심으로 수치해석을 통한 지반침하의 과정을 규명하였으며, 이를 통해 지반침하를 분석하기 위해 핵심 지반정수의 산정 및 각 지반정수의 가중치를 분석, 최종적으로 지반침하 평가용 해석 프로그램을 개발한 내용을 다루고자 한다.

## 2. 지반침하의 유형 및 사례 분석

지반침하는 지반을 구성하는 물질의 이동에 의한 점차적인 안정화 현상이거나 갑작스런 함몰 현상으로 정의할 수 있다. 이의 원인으로는, 지하수 함양에 의한 함수층의 압밀, 유기토층의 유실, 지하채굴, 연약층의 압밀, 석고나 암염과 같은 용해되기 쉬운 암석들에 의한 싱크홀, 영구동결층의 용해 등이 있을 수 있다. 이들 중에서 지하채굴에 의한 지반침하는 점차적으로 감소하고 있는 광산 활동에 따라 감소하고 있는 추세이지만, 지하수 개발과 관련한 지반침하의 빈도는 오히려 증가되고 있는 사실을 외국 사례를 통해서도 잘 알 수 있다. 또한 도시화와 공업화가 가속화됨으로써 개발에 따른 높은 건물이나 공장 등의 증가로 지표에 가해지는 하중의 증가에 따라 연약지반의 압밀화에 의한 지반침하의 증가와 도심 내에서의 교통해결을 위한 지표천부에서 터널공사 등으로 연약암반에서의 지반침하가 증가되고 있는 실정이다. 지반침하를 일으키는 원인에 따라 침하의 유형을 살펴보면 다음과 같다.

### 2.1 지하채굴적에 의한 지반침하

석탄광을 개발한 후 발생하는 지반침하는 석탄층의 부존여건과 적용된 채탄법에 많은 영향을 받는 특징을 가지고 있다(이정인, 문현구 등, 1997; 장윤희 등, 1999).

석탄광의 지하 채굴적에 의한 지반침하는 지하에서 석탄층을 개발하고 난 이후에 채굴공동이 형성됨으로

써 채굴공동 상부의 상반이 연직 하향으로 이동하는 현상에 따라 발생하는 것으로서 이 때 일어나는 지반침하의 유형은 채굴조건에 의해 영향을 받는데, 일반적으로 연속 침하와 불연속 침하로 나뉜다.

연속 침하는 트러프(trough) 형태의 침하가 대표적인 형태이다. 이것은 넓은 지역에 걸쳐 연속적으로 완만한 지표 침하곡선을 발생시키며 오랜 기간에 걸쳐 지속적으로 발생되기 때문에 육안으로는 식별하기가 어려울 정도의 미약한 침하량을 보이기도 한다. 따라서 상부 시설물에 대한 위험도 또한 미미한 경우가 많다.

불연속 침하는 함몰에 의한 싱크홀(sinkhole) 형태의 침하로 나타나는 것이 대표적인 경우이다. 이 유형은 지표가 함몰하는 형태로 침하가 발생하기 때문에 침하량이 크고 예측하기가 어렵다. 또한 침하의 형태는 급경사를 이루는 원통형 혹은 원추형의 형태로서 침하량이 수 m로부터 수십 m에 달하기도 하며 채굴공동의 직상부 천반의 붕락에 의한 암석의 bulking 및 지하수의 유입에 의한 강도저하로 전이되는 형태로 이루어지기 때문에 그 규모는 작지만 인명 피해나 지표 구조물에 심각한 손상을 줄 수 있는 지반침하 유형이다.

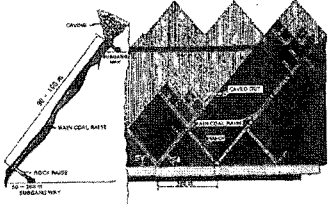
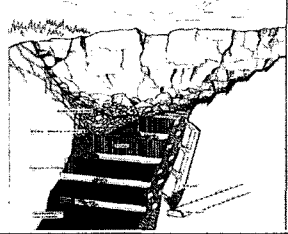
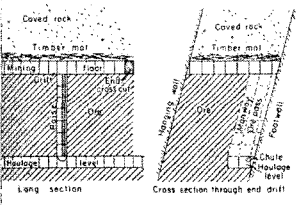
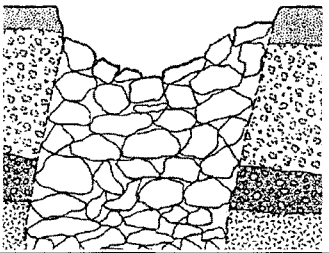
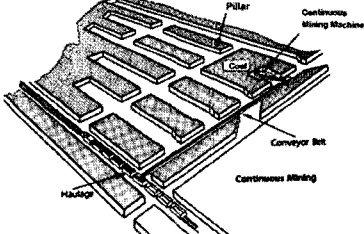
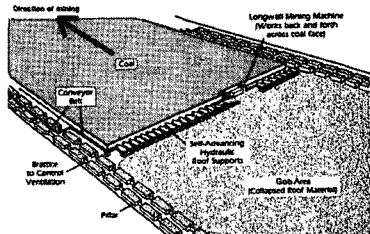
국내 탄층은 대부분 급경사를 이루며 불규칙하게 발달하고 있어 적용된 채탄법 역시 탄층 연장 중에 부광대에 해당하는 부분은 채굴을 하고 나머지 빈광대는 채굴을 하지 않고 남겨둠으로써 전체적으로 채굴적을 지지하는 광주 역할을 하게 되는 경우가 대부분이다. 국내에서 많이 적용된 채탄법을 중심으로 채탄법의 특징에 따라 발생하는 지반침하의 유형을 Table 1과 같이 정리할 수 있다(한국지질자원연구원, 2002).

### 2.2 지하수 양수에 의한 지반침하

지하수 양수에 의한 지반침하는 상당히 오랫동안 인식되지 못하고 있다가, 1928년 미국 지질조사소(USGS)의 E. Meinzer에 의해 대수층이 압축될 수 있다는 것이 처음으로 밝혀지고, 비슷한 시기에 Karl Terzaghi에 의해 일차원 압밀 이론이 개발되면서 문제의 심각성이 대두되기 시작하였다(Terzaghi, 1925). 이들 이론에 의하면 토양의 압밀은 응력을 받고 있는 점토층 내 공극수의 느린 방출과 점토 입자 구조로의 점진적인 응력의 전이로 인해 발생된다고 정의하고 있다.

일반적으로, 개발되지 않은 대수층은 Fig. 1과 같이 충전(recharge)과 방출(discharge)의 균형을 이루고 있지만, 인공적인 양수(pumping)를 통해 이러한 균형이 파괴되면서 침하를 유도하게 된다. 일정 두께를 가진 비교적 덜 압밀된 실트나 점토층을 함유한 충전 대수층 시스템에서 장기간의 지하수위의 하강은 지반침하를

Table 1. Surface subsidence trends according to the mining methods

Mining method & subsidence trends	Illustrations
<p><b>Slant chute caving;</b>                      very irregular sinkhole type subsidence, difficult to predict its occurrence</p>	
<p><b>Sub-level caving;</b>                      stair-type subsidence in surface, cracked zone accompanied by surface subsidence</p>	
<p><b>Top-slicing;</b>                      sequential subsidence from surface by tension crack, the range of subsidence is dependent on the properties of rock mass</p>	
<p><b>Block caving;</b>                      circular subsidence and sinkhole occurrence, the range of subsidence is dependent on the angle of draw</p>	
<p><b>Room and pillar;</b>                      sinkhole happens mainly above the intersection of room and room, saucer-shaped depression, possible to continue for several years</p>	
<p><b>Longwall mining;</b>                      trough in wide range, predictable subsidence in surface, relatively short in subsidence occurrence period</p>	

일으킬 수 있는 반대수층(aquitard)으로부터 방대한 압밀수의 방출을 초래한다. 이러한 물의 방출은 압밀된 반대수층내의 공극률을 크게 감소시키며, 이런 현상은 회복 불가능한 것으로서 결과적으로 전체적인 대수층의 지하수 함양 능력을 저하시킨다.

Fig. 2는 대수층의 유효응력이론과 대수층의 모식도를 보여주는 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 지하수

면 아래의 임의의 면에서 암반 자중과 지하수에 의한 전응력( $\sigma_T$ )은 공극수압( $\rho$ )과 유효응력( $\sigma_e$ )에 의해 균형을 이루고 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma_T = \sigma_e + \rho \tag{1}$$

결국 지하수의 무분별한 이용은, Eq. (1)에서의  $\rho$ 의 저하를 초래하게 될 것이며, 따라서 전응력  $\sigma_T$ 와 유효응력  $\sigma_e$ 의 균형이 상실되면서 지반침하에 결정적인 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있으며, 따라서 Fig. 3의 국내 지역별 지하수 이용현황에서 보는 바와 같이 지하수 이용량이 높은 지역에 대해서는 지반침하 발생 가능성에 대한 각별한 주의가 요구될 것이다(농어촌진흥공사, 1998).

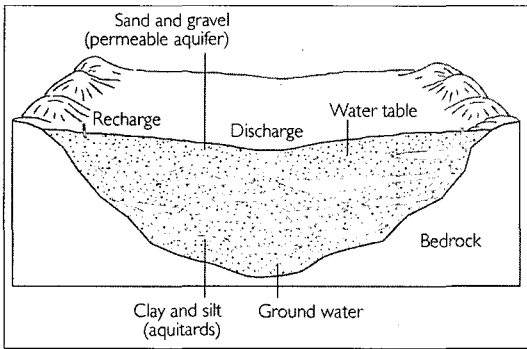


Fig. 1. Recharge and discharge of ground water (USGS, 1999)

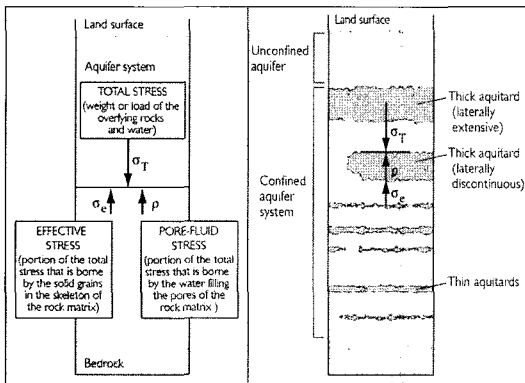


Fig. 2. Schematic diagram for aquifer system explaining the effective stress theory(USGS, 1999)

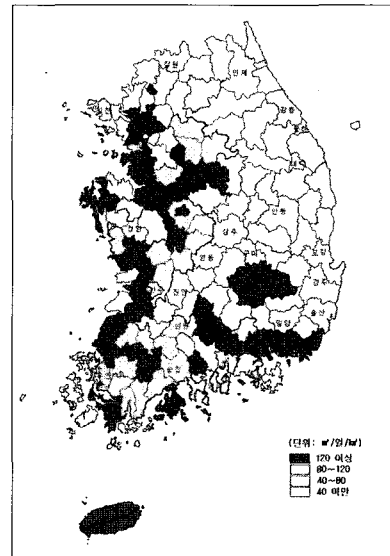


Fig. 3. Present states of utilization of ground water per unit land(KARICO, 1998)

Table 2. Decision of soft ground by the N values

Sandy soil		Clay		
N	relative density (%)	Uniaxial compressive strength, $q_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	N value	hardness
0 ~ 4	very loose (15)	< 0.25	< 2	very weak
4 ~ 10	loose (15~35)	0.25 ~ 0.5	2 ~ 4	weak
10 ~ 30	moderate (35~65)	0.5 ~ 1.0	4 ~ 8	moderate
30 ~ 50	fast (65~85)	1.0 ~ 2.0	8 ~ 15	hard
50 이상	very fast (85~100)	2.0 ~ 4.0	15 ~ 30	very hard
		> 4.0	> 30	extremely hard

### 2.3 연약지반의 압밀에 의한 지반침하

연약지반이란 보통 상부구조물을 지지할 때 문제가 유발될 수 있는 약한 지반을 말한다. 대표적으로 연약 점토층, 느슨한 사질토, 유기질토를 통칭 연약지반이라고 정의한다. 연약한 점성토나 유기질토로 구성된 지반 위에 도로, 교량, 건물 등이 그대로 놓여진다면 침하량이 과대하여지고, 지지력이 부족하여 안전상의 문제가 생긴다. 느슨한 사질토의 경우에는 지진이나 폭파와 같은 진동이 전달될 때 갑작스런 침하가 발생할 수 있다.

연약지반을 판정하는 기준은 사질토와 점토지반에 따라 다르다. 사질토에 대해서는 주로 N값을 기준으로 연약지반을 판정하게 되며, 점토지반일 경우에는 일축압축강도로서 연약지반을 판정하거나 또는 표준관입시험에 의한 N값으로 판정하기도 한다. Table 2에서는 사질토 및 점토지반에 대한 연약지반 판정기준을 정리하였다(한국토지공사, 1999; 한국지반공학회, 1997).

점토지반의 침하는 즉시침하, 압밀침하 및 2차 압밀침하의 3가지로 나눌 수 있다. 즉시침하는 하중이 가해짐과 동시에 발생하는 침하이며, 만약 재하면의 중심에서 발생하게 되면 횡방향으로 흙의 유동이 발생할 수 있다.

과잉간극수압이 소실되면서 발생하는 침하를 압밀침하라고 하는데, 이것은 시간에 의존하여 그 크기가 커지게 되며, 연약지반에서의 침하량의 대부분은 압밀침하로 기인된다. 2차 압밀침하는 과잉간극수압이 소실된 후에 일어나는 침하로서, 실제로는 1차 압밀이 진행되면서 동시에 일어나기도 한다.

### 2.4 얇은 심도의 터널굴착에 의한 지반침하

일반적으로 지하구조물 설계시에는 구조물의 붕괴방지를 위한 대책으로 구조물 자체의 안정조건(stability condition)을 고려하는 방법과 주변 지반 변위를 최소화하는 변위조건(displacement condition)을 고려하는 방법이 있다. 주위에 건물 및 공공시설이 없는 경우에는 지하구조물 붕괴에 대한 안정만을 고려하여 안정조건을 주로 설계에 반영하게 되나, 도심지 터널굴착과 같이 지상 구조물 및 지하 매설관 등과 같은 지장물들을 고려해야 할 경우에는 변위조건을 설계에 반영하여야 한다.

지하굴착 작업에는 개착식 굴착, 터널굴착 및 광산굴착 등 크게 3 부분으로 나누어 볼 수 있으며, 이에 따라 발생하는 지반거동의 형태는 서로 다르다.

개착식 굴착은 주로 지하구조물의 시공 깊이가 비교적 얇거나 지표면에 구조물이 산재하여 있지 않는 경우에 일반적으로 사용된다. 통상 개착식 굴착에 의해 발생

되는 지반변위는 주로 굴착방향이 지표 아래쪽이기 때문에 옆방향으로의 거동에 의해 지배를 받게 된다. 터널 굴착은 내부지지력의 상실과 지반손실을 동반하여 큰 전단변형을 유발시키고, 이러한 영향들은 점차 지표까지 전달되어 침하를 발생시키게 된다. 터널이 굴착될 때 터널의 진행방향, 즉 종방향에서는 지표구조물이 이동 침하 하는 형태를 보여주며, 횡방향으로는 함몰침하의 형태를 보여준다. 이 때 구조물의 폭이 터널깊이와 유사하면 구조물은 침하 트러프의 크기와 비슷한 정도의 각비틀림(angular distortion)을 받게 되어 침하경사가 건물에 손상을 일으킬 수 있다(Boscardin *et al.*, 1978).

광산굴착시, 함몰에 기인한 비틀림은 개착식 굴착에서 관찰되는 규모의 거동을 보이지는 않는다. 이는 굴착심도와 굴착폭이 구조물의 폭에 비해 매우 크기 때문이다. 영국의 National Coal Board(1975)에 의하면 구조물의 손상은 구조물의 깊이와 측방변형률의 곱으로 표현되는 것으로 보고하였다. 큰 구조물을 따라 발생하는 변형률은 구조물의 국부 취약지역에 집중되며, 구조물의 폭이 넓어질수록 취약지점에서 변형률과 잠재적인 압축, 인장의 합이 커지게 된다.

### 2.5 지반침하의 사례분석

최근 수년 동안 국내에서 발생한 지반침하의 사례와 그에 따른 보강 대책을 각 원인별로 정리하면 Table 3과 같다(석탄산업합리화사업단 1995-a, 1995-b, 1996-a, 1996-b; 한국건설기술연구원 1985).

## 3. 지반침하의 메커니즘 분석

지반침하를 예측하기 위해 지반침하의 메커니즘을 정확히 규명하는 것은 매우 중요한데, 이를 위해 경험적인 방법(empirical method), 축소모델(physical model)에 의한 방법, 그리고 수치해석적인 방법(numerical method)이 적용될 수 있다. 이들 중에서 경험적인 방법은 기존의 침하에 대한 연구로부터 얻은 자료를 분석하여 향후의 침하를 예측하는 데 사용되지만, 계속된 자료를 바탕으로 도해적 확장을 통해 침하를 예측하기 때문에 일반적인 해법으로 사용하기에는 한계가 있으며, 축소모델에 의한 방법의 경우 석고와 같은 인공재료를 이용하여 만든 축소된 모형을 필요로 하므로 비용에 비해 지반침하의 메커니즘을 이해하는 데 큰 도움은 되지 않는다.

반면, 수치해석적인 방법은 지배방정식의 수치적 근사에 토대를 두고, 최종적으로 분석된 영역에서 유도된 변위와 응력을 계산하기 때문에 현재로서는 가장 정교한 지반침하 예측기법으로 여겨질 수 있다.

Table 3. Case histories on the surface subsidence and reinforcement

원인	침하 사례	보강 대책
지하채굴	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 가은지역</li> <li>- 지표근처까지 채굴 작업 수행</li> <li>- 우기시 채굴적을 따라 지표수가 유입되면서 지표함몰 발생</li> </ul>	- 기반암까지 시멘트 밀크 그라우팅 실시
	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 칠암지역</li> <li>- 영동선 직하부에 채굴적 존재</li> <li>- 상부면에서는 싱크홀이, 하부면에서는 트러프 형태의 침하발생 가능성이 제기됨</li> </ul>	- Micro Pile 및 충전 그라우팅 병행 실시
	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 화진지역</li> <li>- 싱크홀과 트러프 형태의 침하가 함께 나타남</li> </ul>	- TAM 그라우팅 및 저유동성 몰탈 그라우팅 병행 실시
	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 고사리지역</li> <li>- 싱크홀 형태의 침하발생</li> </ul>	- 고압충전 뿌리말뚝 및 시멘트몰탈 그라우팅 병행 실시
지하수양수	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 전남 무안군 무안읍</li> <li>- 2000년 5월 싱크홀 침하 발생</li> <li>- 재해위험지구로 지정</li> <li>- 원인: 지하수 과다사용 및 기반암인 석회암의 용식작용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2002년 4월 정부에서 “지하수개발 제한지구”로 지정</li> <li>- 1일 양수능력 30m<sup>3</sup> 이상 또는 토출관 직경 32 mm 이상인 지하수개발·이용 금지</li> </ul>
연약지반	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 운문댐</li> <li>- 1998년, 댐정상 중앙부에 직경 1.2 m, 깊이 2.5 m의 원통형 함몰 발생</li> </ul>	- 댐 중앙부분에 대한 compaction grouting 작업으로 보수
	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 김해 내외택지구 (59만평)</li> <li>- 1994년, 예상 침하량(34~38 cm) 외에 추가로 10 cm의 침하발생</li> </ul>	- 복토작업으로 보강
압밀	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 경인전철 간석역사</li> <li>- 대합실 내 14 cm 침하발생</li> <li>- 원인: 역사에서 5 m 떨어진 오피스텔의 신축과정에서 지하 침출수가 역사 밑으로 유입</li> </ul>	- 선로 옆 역사 기둥 사이에 철제 H빔 8개를 설치하여 보수

하지만 수치해석법에서 중요한 입력변수들인 지반의 특성을 구하기 위해서는 많은 노력이 요구된다. 초기에는 암반의 실제거동에 대한 불완전한 이해로 인하여 수치해석적 방법에서 다소간의 문제점이 있었으나 암반의 파괴 후 거동, 현지 초기응력의 측정 및 평가, 그리고 치수효과(scale effect) 등과 같은 암반의 실제 거동을 그대로 모사하고자 하는 많은 연구가 수행되면서 현재는 이러한 문제점을 대부분 극복한 상태이다.

3.1 수치해석 지반침하 분석 모델 설정

본 연구에서는 지반침하의 영향분석을 위해 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver.4.0)을 이용한 수치해석을 실시하였다. 해석에 사용된 모델은 수평채굴적의 형태를 단순화 시킨 Fig. 4와 같으며, 침하 영향요소는 Table 4에서 요약한 바와 같이 규정하였다. Table 5는 수치해석에서 사용된 입력자료이다. 여기서 지반 내 초기지압은 국내 여러 탄광에서 측정된 초기응력값을 이용하였으며 나머지 입력값은 암반을 불량-양호 상태로 간주하여 RMR값을 40, 50, 70으로 변경시

키면서 구해진 값을 이용하였다. 이와 같은 조건 하에서 FLAC에 의한 전산해석을 실시한 결과의 한 예를 Fig. 5에서 보여주고 있는데, 이는 채굴적 주변의 최대 및 최소주응력 분포양상을 나타내고 있다.

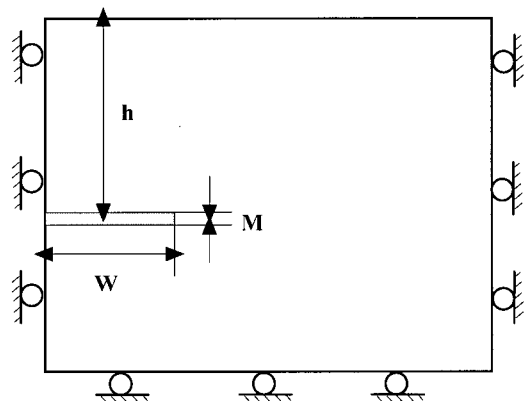


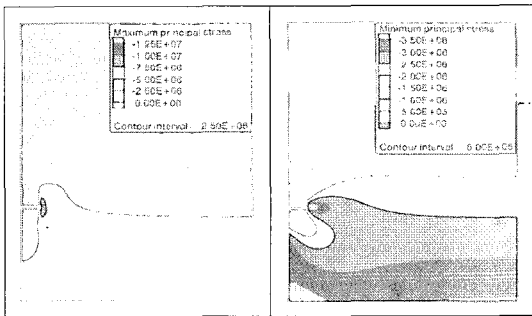
Fig. 4. Simplified horizontal opening model for numerical analysis

**Table 4.** Major factors affecting the surface subsidence

classification	shape of mine cavity	in-situ stress	rock mass properties	discontinuity	groundwater
influence factors	thickness of mine cavity(M)	magnitude of stress	elastic modulus ( $E_m$ )	normal stiffness ( $k_n$ )	groundwater level
	depth from surface(h)	K-value (K)	Poisson's ratio ( $\nu_m$ )	shear stiffness ( $k_s$ )	
	width of mine cavity(W)		cohesion ( $c_m$ )	cohesion ( $c_j$ )	
			friction angle ( $\phi_m$ )	friction angle ( $\phi_j$ )	
			density ( $\rho$ )		

**Table 5.** Input parameters for numerical analysis in FLAC

factors	h	W	K	$E_m$	$c_m$	$\phi_m$	$\nu$	M
	(m)	(m)		(MPa)	(MPa)	(°)		(m)
input value	150	40	0.5	6,758	0.625	30	0.22	2.5
	200	60	1					
	400	80	1.5					
		100						



**Fig. 5.** Maximum and minimum principal stress distribution around horizontal gangway, obtained from FLAC analysis

**3.2 채굴적에 의한 침하영향 변수**

채굴적의 분포양상이 최대침하량( $S_{max}$ ) 및 침하영향 범위에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴보기 위해, 채굴적 두께(M)는 2.5 m로 고정시킨 가운데, 채굴적 폭 및 채굴 심도 등을 변화시키면서 해석을 수행하였다. Fig. 6은 채굴 심도(h)를 각각 150 m 및 300 m로 고려한 상태에서 채굴적의 폭에 대한 최대침하량의 변화양상을 보여주고 있으며, Fig. 7은 채굴적의 폭을 각각 40 m 및 100 m로 고려한 상태에서 채굴 심도에 대한 최대 침하량의 변화양상을 보여주고 있다. 또한 채굴적의 두

께(M) 자체가 침하에 미치는 영향권을 Fig. 8과 같이 살펴보았으며, 지반내 측압계수의 양상이 침하에 미치는 영향은 Fig. 9에 나타난 바와 같다.

이상의 FLAC에 의해 수행된 채굴적의 영향 분석과 함께, PFC-2D(Particle Flow Code in Two Dimensions, ver.3.0)에 의한 수치해석이 별도로 수행되었다. 개별요소프로그램의 일종인 PFC는 같은 개별요소프로그램인 UDEC이나 유한차분요소프로그램인 FLAC과 비교하여, 해석 모델 내의 변위의 크기에 제한이 없다는 점과, 블록 자체의 파괴 및 분리가 모델링 될 수 있다는 점, 그리고 채굴적 천반의 부분적 파괴 및 붕락 양상을 시각적으로 수치모사가 가능하다는 점에서 장점을 가지고 있는 프로그램이다(Cundall & Strack, 1979).

본 해석을 위해 Fig. 10과 단순화된 지반 및 채굴적 모델을 사용하였다. 채굴적의 심도는 5m, 10m, 15m, 20 m 및 30 m로 변화시켰으며, 채굴적의 형태는 10m(폭)×5 m(높이), 5 m×5m 및 5 m×10m의 3가지 경우에 대해 살펴보았다.

해석에 사용된 PFC 모델의 전체 해석영역은 60m×40m로 설정하였으며, 전체 지반 또한 단일 압반으로 구성된 것으로 가정하였다. 본 해석에서 요소 결합 형태는 contact bond model로 하였으며, 이 경우 해석에 필요한 입력자료는 밀도, 접촉 요소간의 마찰계수, 하중 변형에 관계되는 수직 및 전단 강성도, 그리고 파괴강

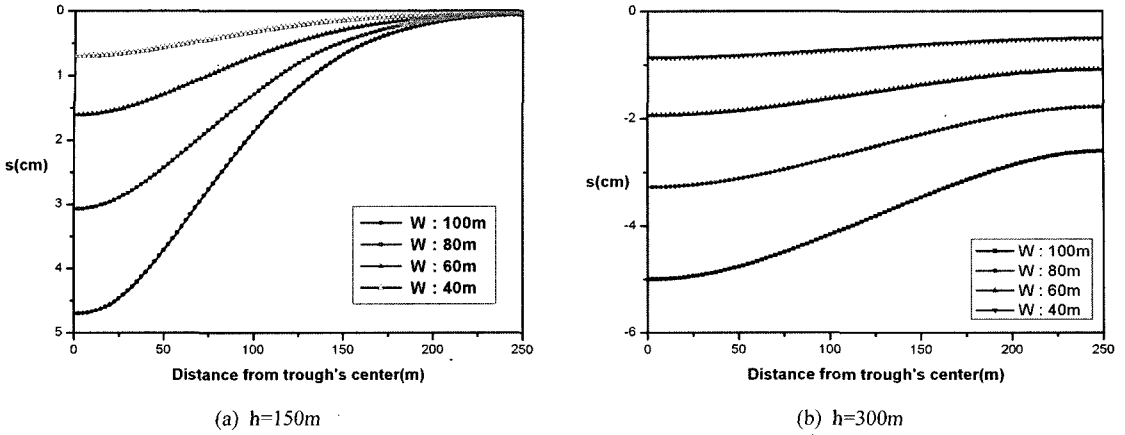


Fig. 6. Maximum subsidence developed with the change of gangway width

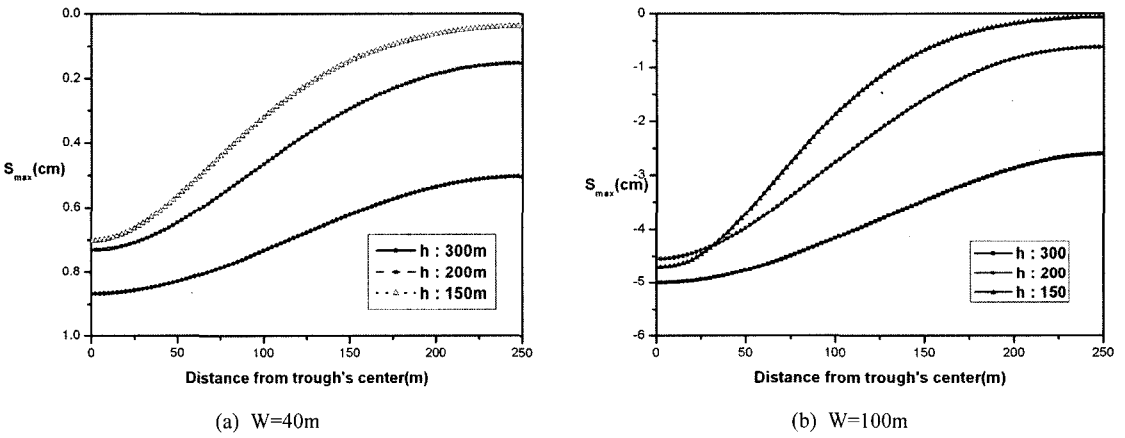


Fig. 7. Maximum subsidence developed with the change of overburden depth

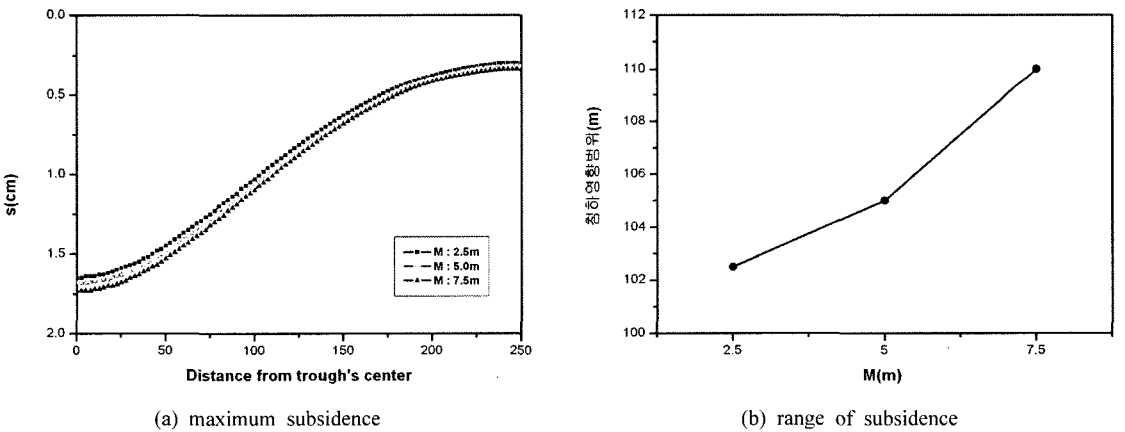


Fig. 8. Maximum subsidence developed with the change of gangway thickness



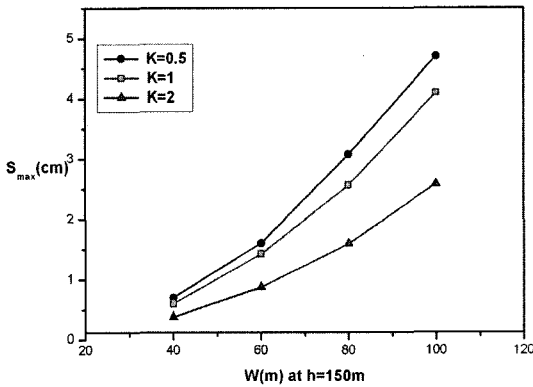
도조건에 관계되는 수직 및 전단결합강도이다. 이들 입력변수들의 값은 Table 6과 같이 결정하였으며, 또한 초기 지압은 모델 설정시의 초기 압밀을 통한 평형상태 형성과정에서 중력에 의한 하중분포상태를 초기상태로 설정하였다.

먼저 채굴적의 심도가 침하 메커니즘에 미치는 영향을 파악하고자, 채굴적 폭(10 m)의 0.5, 1.0, 1.5, 2.0배에 해당되는 심도에 채굴적이 존재하는 것으로 모델을

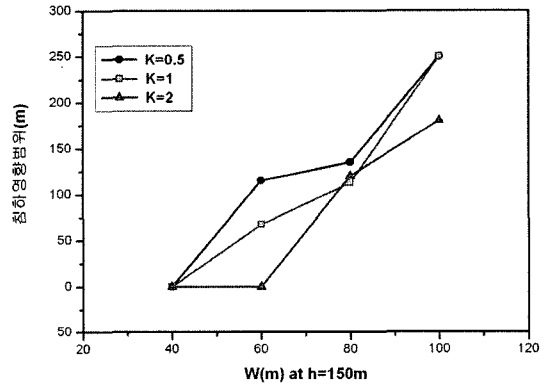
구성하였다. 다른 변수들의 영향을 배제하기 위하여 불연속면의 특성(수평 절리군의 간격; 3 m, 45°경사 절리군의 간격; 2 m) 및 채굴적의 규모(폭 10 m×높이 5 m)는 모두 동일한 것으로 가정하였다.

Fig. 11은 채굴적의 심도를 달리하여 해석한 결과 구해진 집속력의 분포양상 및 채굴공동의 붕괴양상이며, 이 해석결과는 Table 7과 같이 요약할 수 있다.

다음으로 채굴적의 형태가 침하 메커니즘에 미치는

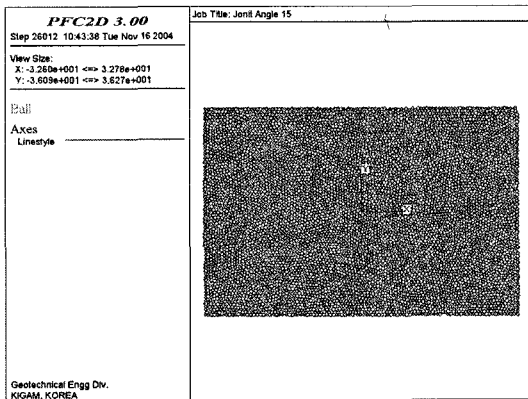


(a) maximum subsidence

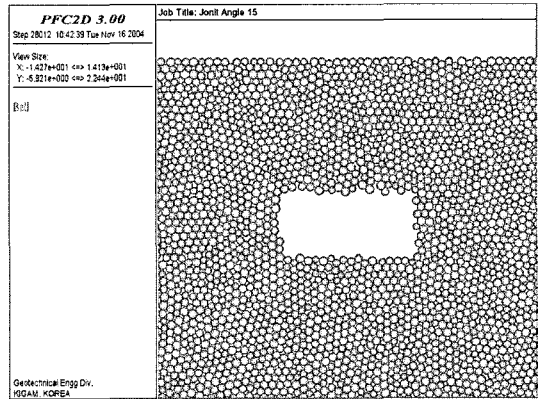


(b) range of subsidence

Fig. 9. Maximum subsidence developed with the change of K-value



(a) Entire model



(b) Zoom-in for mine cavity

Fig. 10. Basic model for PFC analysis

Table 6. Input data for PFC analysis

	density (kg/m <sup>3</sup> )	friction coeff.	normal stiffness (N/m)	shear stiffness (N/m)	normal bonding strength (N)	shear bonding strength (N)
rock mass	2700	0.7	1.0e8	1.0e9	1.0e7	1.0e8
discontinuity	-	0.0	-	-	1.0e3	1.0e3

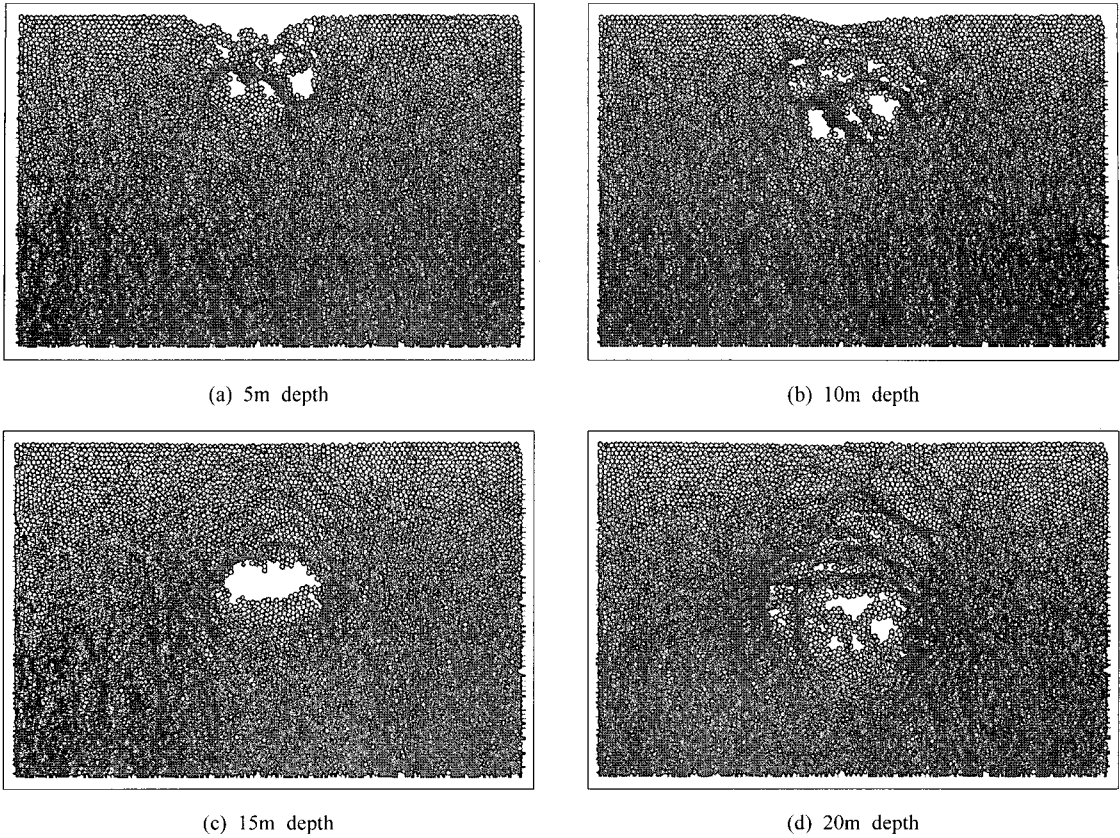


Fig. 11. Distribution of contact force and trend of gangway collapse with its different depth

Table 7. Surface subsidence trends for different depth of mine cavity

Case	effect on surface	subsidence trend	hanging wall
5m depth	very severe	sinkhole	collapse
10m depth	severe	sinkhole+trough	collapse
15m depth	weak	trough	partially collapse
20m depth	weak	trough	partially split

영향을 파악하고자, 채굴적의 심도를 10 m로 고정하면서, 채굴적의 규모를 10 m×5 m, 5 m×5 m 및 5 m×10 m의 세 가지 경우로 구분하면서 해석하였다. 전술한 채굴적 심도의 영향 분석에서와 마찬가지로 채굴적 형태 이외의 다른 변수들의 영향을 배제하기 위하여 불연속면의 특성(수평 절리군의 간격; 3 m, 45°경사 절리군의 간격; 2 m) 및 채굴적의 심도(10 m)는 모두 동일한 것으로 가정하였다.

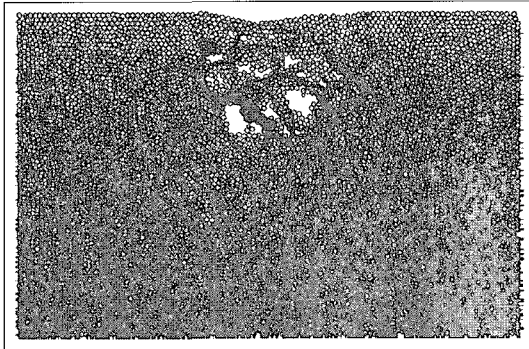
Fig. 12는 채굴적의 심도를 동일하게 유지한 채, 채굴적의 폭과 높이가 달라져서 해석한 결과 구해진 접촉력

의 분포양상 및 채굴공동의 붕괴양상이며, 이 해석결과 는 Table 8에서와 같이 요약될 수 있다.

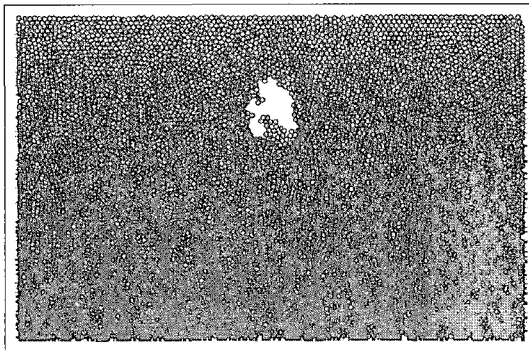
이상의 PFC 해석 결과, 채굴적의 심도는 지표침하에 직접적인 영향을 미치는 것으로 판명되었으며, 특히 채굴적 심도가 얕을수록 싱크홀 형태의 지표침하가 발생할 가능성이 높으며, 채굴적의 심도가 깊어질수록 지표에서의 침하 형태는 싱크홀형에서 트러프형으로 바뀌는 경향이 있음이 밝혀졌다. 또한 채굴적의 심도가 깊어질수록 채굴적 주변 암반 내로 압축권이 형성되면서 채굴적의 안정성을 보완해주는 것으로 분석되었으며,

**Table 8.** Surface subsidence trends for different shape of mine cavity

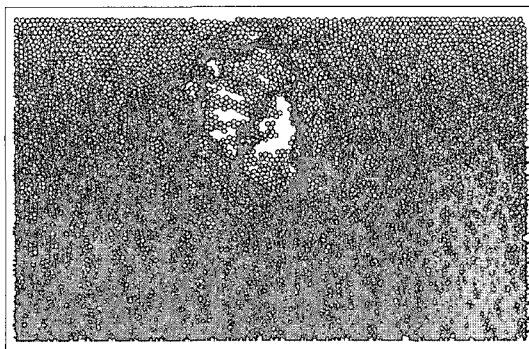
Case	effect on surface	subsidence trend	hanging wall
10m×5m	severe	sinkhole+trough	collapse
5m×5m	weak	possibly trough	partially collapse
5m×10m	moderate	possibly trough and sinkhole	severely collapse



(a) 10m × 5m



(b) 5m × 5m



(c) 5m × 10m

**Fig. 12.** Distribution of contact force and trend of gangway collapse with its different shape

채굴적의 형태의 경우 채굴적의 높이 보다는 채굴적의 폭이 지표 침하에 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다.

최종적으로 FLAC 및 PFC에 의한 수치해석 결과를 토대로, 침하에 영향을 미치는 요소의 중요도는, [채굴적의 폭(W)] > [측압계수(K)] > [채굴적의 심도(h)] > [채굴적의 높이(M)] 순서로 정의할 수 있을 것이다.

하지만, 이는 단순한 수평채굴적 모델에 대해 채굴적의 형상(h, W, M) 및 측압계수만을 변화시키면서 구한 결과이므로, 보다 세밀한 분석이 추가로 요망된다.

#### 4. 핵심 지반정수 산정 및 가중치 분석

지반 침하량 및 침하범위에 영향을 미치는 요소는 앞에서 언급한 채굴적 형상 및 측압계수 외에 채굴적을 포함한 대상 지반의 특성을 거론할 수 있다. 지반 특성으로는 암반의 변형계수와 암반강도정수가 포함되며, 지반 내에 존재하는 불연속면의 특성과 관련해서 불연속면의 점착력 및 마찰각, 그리고 수직강성과 전단강성을 들 수 있다. 또한 지반내의 지하수 상태 역시 침하에 영향을 미치는 요소이다.

일반적으로 유한차분법을 이용한 연속체 암반 모델링의 경우엔 지반물성치가 가장 중요한 입력요소이므로, 지반물성치의 변화에 따른 지반침하량 및 침하영향범위가 일정한 경향을 나타내는 반면, 개별요소법을 이용한 불연속체 암반모델링의 경우엔 지반물성치 외에 불연속면 등의 불연속면의 분포상태 또한 중요한 입력요소이므로, 지반침하 모델링을 통하여 침하량 및 침하영향범위를 파악하는 것보다는 주로 채굴적으로 인한 암반블록의 국부적인 미끄러짐 또는 붕락 거동을 파악하는데 널리 사용되고 있다.

따라서, 연속체 및 불연속체의 지반정수가 침하량뿐만 아니라 침하거동에 미치는 영향을 파악하고자, 일반적인 기하형상을 갖는 대표 채굴적에 대해 연속체 해석 코드인 FLAC과 불연속체 해석코드인 UDEC(Universal Distinct Element Code, Ver.3.1)을 사용하여 전산해석을 수행하였다.

일반적으로 침하모델링에서 침하량 및 침하범위 등에

영향을 미치는 지반물성과 관련된 변수는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- a) 암반의 변형계수 ( $E_m$ )
- b) 암반의 포아송 비( $\nu_m$ )
- c) 암반의 점착력( $c_m$ )
- d) 암반의 내부마찰각( $\phi_m$ )
- e) 암반 밀도( $\rho$ )
- f) 암반 내 지하수위
- g) 불연속면의 점착력( $c_i$ )
- h) 불연속면의 마찰각( $\phi_i$ )
- i) 불연속면의 수직강성( $k_n$ )
- j) 불연속면의 전단강성( $k_s$ )

이들 영향 요소 중 암반 밀도의 경우 대부분 암반 상태에 상관없이 큰 차이가 없는 점을 고려하여  $2,400 \text{ kg/cm}^3$ 으로 고정하였으며, 암반의 변형계수, 포아송비, 내부마찰각, 점착력 및 암반 내 지하수위는 연속체 해석코드인 FLAC에서, 불연속면의 점착력, 마찰각, 수직강성 및 전단강성은 불연속체 해석코드인 UDEC에서 일반적인 채굴적 형상을 대상으로 각 영향요소별로 변수 값을 변화시켜며 전산해석을 수행하였다. 이러한 영향요소별 민감도해석을 통하여 각 요소들이 침하거동에 미치는 영향정도를 검토하였다.

**4.1 연속체 해석**

연속체 해석시 사용되는 암반물성이 침하량 및 침하 범위에 미치는 영향을 파악하기 위해 Fig. 4에서와 같이 단순화된 수평 채굴적을 모델로 설정하였다. 해석영역은 수직방향의 변위를 충분히 반영할 수 있도록 채굴

적에 대해 대칭형상으로 폭 250 m, 높이는 300 m의 요소망으로 구성하였으며, 채굴적 높이는 2.5 m, 채굴적의 상부토피는 200 m, 즉압계수(K)는 1.0을 사용하였다. 해석에 사용된 입력자료는 Table 9와 같이 요약할 수 있다.

이와 같이 각 영향변수를 변화시켜 가면서 최대침하량을 예측한 결과 Fig. 13과 같은 결과를 수치해석적으로 얻을 수 있다. 즉 암반의 탄성계수와 점착강도는 침하량과 반비례하되 지수적으로 감소하는 양상을 나타내며, 포아송 비와 내부마찰각은 선형적으로 반비례하는 양상을 띠고 있음을 알 수 있다. 또한 지하수위는 침하량에 대해 선형적으로 비례하는 양상을 보이고 있다.

**4.2 불연속체 해석**

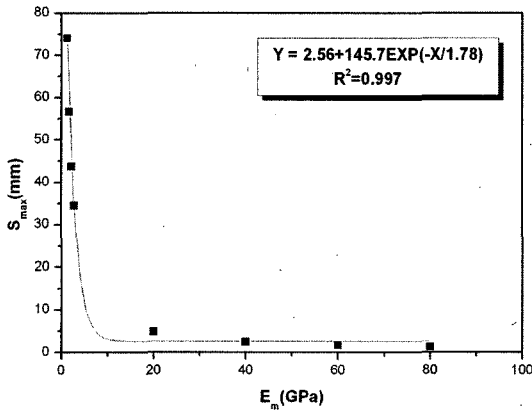
불연속체 해석을 위한 UDEC 해석에서 요구되는 역학적 물성은 크게 암반 자체의 물성 및 불연속면의 물성으로 나눌 수 있다. 암반 자체의 물성은 연속체 해석에서와 동일한 값을 사용하였으므로 여기서는 이에 대한 민감도 분석은 제외하는 것으로 하였다. 불연속체 해석에서 특히 중요한 불연속면의 물성은 크게 불연속면의 강성(수직 및 전단)과 불연속면의 파괴기준에 사용되는 입력 자료인 점착력과 내부마찰각 등이다.

불연속체 해석에서의 입력물성이 불연속체 암반의 침하거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 불연속면 형상은 일정하게 유지하기 위하여 2개의 연속적인 불연속면( $45^\circ$ 와  $135^\circ$ )이 10 m 간격으로 암반 내에 존재하는 것으로 가정하였다.

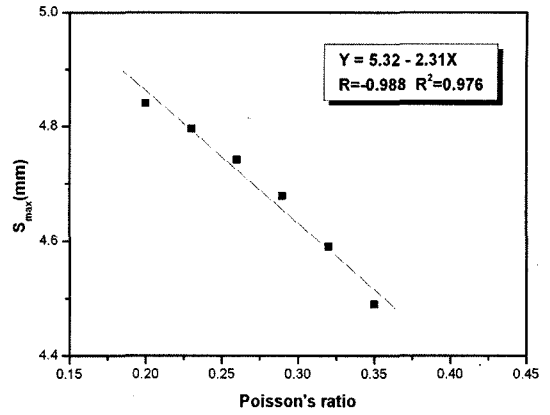
Table 10은 불연속체 해석에 사용된 불연속면의 물성을 나타낸 것이며, Table 11은 이러한 입력변수를 사용하여 불연속체 해석을 실시한 결과, 각 변수의 변화에 따른 최대침하량을 정리한 것이다.

**Table 9.** Input parameters for continuum analysis

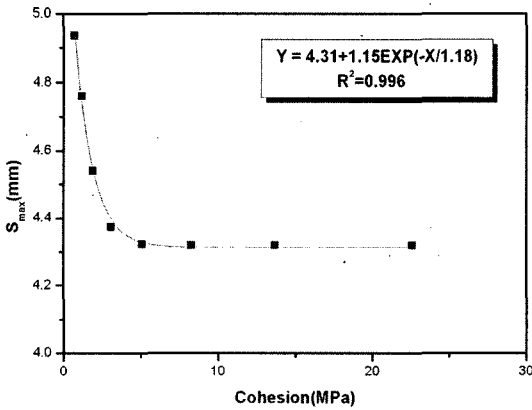
factors	$E_m$ (GPa)	$\nu$	$c_m$ (MPa)	$\phi_m$ ( $^\circ$ )	groundwater (m)
basic model	20	0.22	1	30	-
input values	80	0.2	22.6	50	0
	60	0.23	13.7	45	-50
	40	0.26	8.3	40	-100
	20	0.29	5.1	35	-150
	2.8	0.32	3.1	30	-200
	2.2	0.35	1.9	25	-250
	1.7		1.2		
	1.3		0.7		



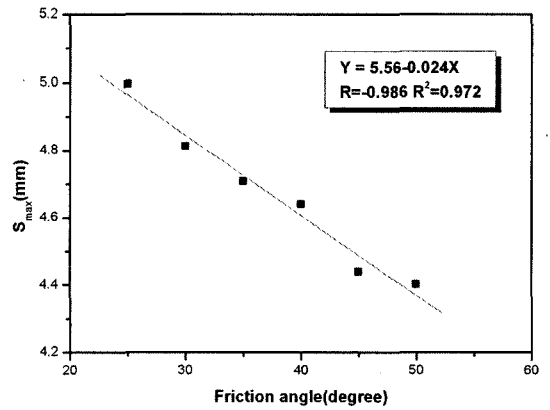
(a) elastic modulus



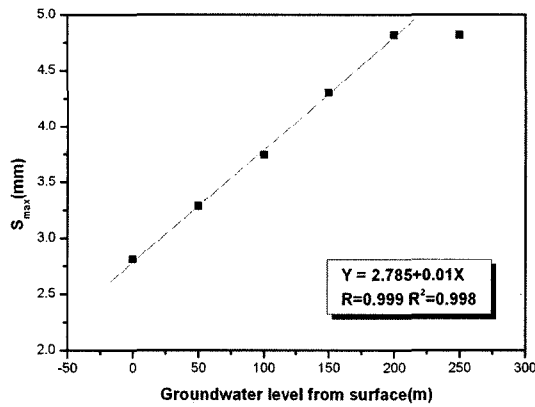
(b) Poisson's ratio



(c) cohesion



(d) friction angle



(e) groundwater level

Fig. 13. Maximum subsidence developed with the change of each parameters

4.3 가중치 분석

이상의 연속체 및 불연속체 해석 결과, 침하영향 변수들의 중요도는 Table 12와 같음을 알 수 있다. 또한 정규화된 곡선을 이용하여 연속체 해석에서의 변수들의 가중치를 산정하였다(한국지질자원연구원, 2004). 그러나 불연속체 해석에서는 이를 산정할 수 없었는데, 이는 불연속면의 기하학적 형상에 의해 물성의 변화에 대한 침하거동이 민감하게 이루어지지 못하였기 때문인 것으로 사료된다. 또한 Table 12의 결과를 통해, 가중치가 높은 침하영향 변수에 대해서는 지반조사 및 각종 시험분석을 통해 정확한 산정이 필수적일 것으로 판단된다.

Table 10. Input parameters for discontinuum analysis

parameters	value
cohesion (J_cohesion)	0.1 MPa
friction angle (J_friction)	30 °
normal stiffness (JKN)	1.0e10 N/m
shear stiffness (JKS)	1.0e10 N/m

5. 지반침하 예측 및 평가 프로그램 개발

앞서 언급한 지반침하 거동 분석을 위한 수치해석결과 및 영향변수 선정과 각 변수별 가중치 산정 결과를 토대로 지반침하를 예측하고 평가할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 인공지능망 이론을 적용하여 Visual Basic 6.0을 이용하여 개발하였는데(Pao, 1989), 이 인공지능망 이론은 기존의 컴퓨터로는 해결이 힘든 패턴인식 문제를 효율적으로 해결하는데 매우 적합한 이론으로 알려져 있기 때문이다.

Fig. 14는 본 연구에서 개발된 지반침하 예측 프로그램

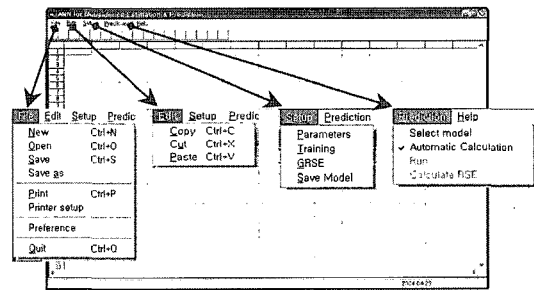


Fig. 14. Structure of program SEPA

Table 11. Maximum subsidence developed with the change of each parameters for discontinuity

JKN (N/m)	1e10	5e10	10e10	50e10	
max. subsidence (m)	0.3254	0.0958	0.0963	0.01436	
JKS (N/m)	1e10	5e10	10e10	50e10	
max. subsidence (m)	0.3254	0.0958	0.0963	0.01436	
J_cohesion (MPa)	0.1	1	10	100	
max. subsidence (m)	0.3254	0.3186	0.2016	0.1902	
J_friction (deg)	30	40	50	60	70
max. subsidence (m)	0.3254	0.3484	0.3568	0.3556	0.2391
J_spacing (m)	10	15	20	30	
max. subsidence (m)	0.3254	0.2144	0.3033	0.2057	

Table 12. Sequence of major input parameters in subsidence, and its weighted value

analysis method	weighted value	
continuum analysis	[elastic modulus] > [groundwater] > [cohesion & friction angle] > [Poisson's ration]	
	weighted value	- cohesion & friction angle: 0.75, - Poisson's ratio: 0.38, - groundwater: 4.12, - elastic modulus: 93.38
discontinuum analysis	[normal/shear stiffness of discontinuity] > [cohesion] > [friction angle]	

램인 SEPA(Subsidence Estimation & Prediction using ANN)의 메인 및 메뉴구조를 나타내고 있다.

**5.1 입출력 변수 설정**

신경망 이론을 적용한 지반침하 추정에서 입출력 변수의 설정 및 학습자료의 선정은 매우 중요하며, 따라서 신뢰성 있는 자료의 수집 및 분석을 통해서 모델을 일반화해야 한다. 본 연구에서는 우선 모델예측법의 하나인 수치해석결과를 이용하여 신경망 모델을 구축하였다. 총 72개의 탄소성 수치해석 결과자료 중 60개를 임의로 선정하여 학습 자료로 사용하였으며 나머지 12개를 학습 완료 후 신경망 모델의 예측능력 검증에 사용하였다. 수치해석에서와 동일한 9개의 입력변수와 최대침하량 및 침하범위로 주어지는 2개의 출력변수는 Table 13에 정리한 바와 같다.

**5.2 인공 신경망 모델 설계**

인공신경망은 학습율과 학습 상수, 입출력층 뉴런의 수 및 은닉층 구조에 따라 학습능력 및 예측능력의 차이를 보이게 되므로, 이러한 매개변수의 변화에 따른 신경망의 학습 및 예측능력을 사전에 점검해야 한다. Fig. 15는 선정된 모델을 사용하여 학습한 결과를 도시한 것으로서 목표값과 예측값이 잘 일치함을 알 수 있다.

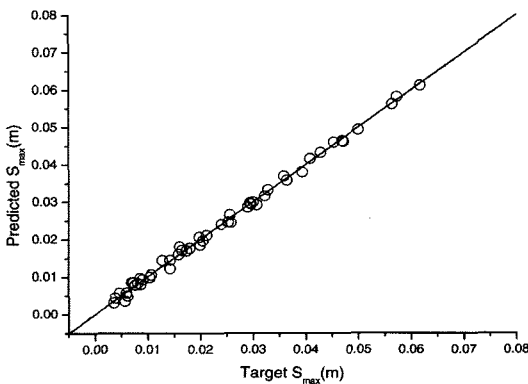
**5.3 예측능력 검증**

암반물성 예측에 사용된 인공신경망의 예측 능력을 검증하기 위해 학습에 사용되지 않은 10개의 자료를 학습된 신경망에 적용하였다.

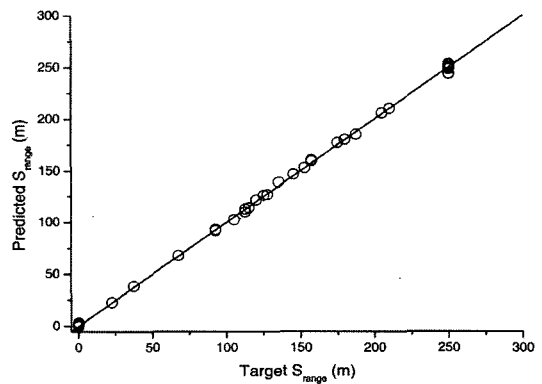
Table 14는 본 연구에서 적용된 신경망 모델을 사용하여 예측한 결과로서, 최대침하량의 경우 RMSE(Root mean square error)는 0.00179 m로서 평균 오차범위

**Table 13.** Input and output parameters for SEPA

Parameter		Description	Range	Unit
Input	X1	Overburden height, z	0 ~ 1000	m
	X2	Width of cavern, W	0 ~ 1000	m
	X3	Height of cavern, h	0 ~ 100	m
	X4	K-ratio, k	0 ~ 5	-
	X5	RMR	0 ~ 100	-
	X6	Shear modulus(G)	0 ~ 10000	MPa
	X7	Bulk modulus(K)	0 ~ 10000	MPa
	X8	Cohesion, c	0 ~ 10	MPa
	X9	Friction angle, f	0 ~ 90	degree
Output	Y1	Maximum subsidence, s	0 ~ 1	m
	Y2	Subsidence width, sw	0 ~ 5000	m



(a) max. subsidence



(b) subsidence range

**Fig. 15.** Results of studies on maximum subsidence as well as its range

0.002 m 이내의 예측정확도를 가짐을 알 수 있다. 침하 범위의 경우 최대침하량보다 RMSE가 다소 큰 24.84 m이다. 침하범위의 오차가 큰 이유는 수치해석상에서 침하범위가 250 m를 초과하는 경우 절삭하여 250 m로 정했기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 16은 측정치와 신경망의 출력치를 표시한 것으로서 2가지 출력변수 모두 상관계수 0.9 이상으로 나타나 양호한 결과를 보여줌을 알 수 있다. 최대침하량의 경우 회귀식의 기울기가 1 보다 크기 때문에 평균적으로 측정치보다 약간 작게 예측을 하고 있으며 침하범위의 경우는 직선 회귀식의 기울기가 1보다 작으므로 측정치에 비해 침하범위를 약간 크게 평가하는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 침하량 및 범위를 평가하는데 있

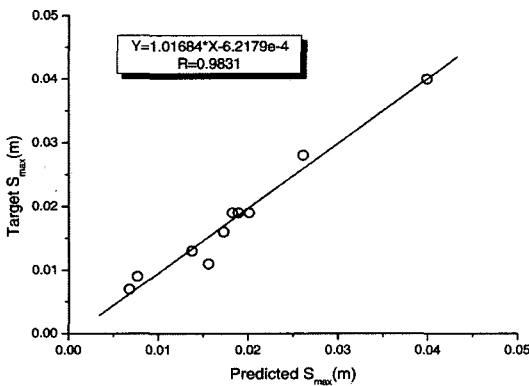
어서 신경망의 적용성을 확인할 수 있었다. 추후 추가 자료 적용 및 다양한 조건의 현장 적용을 통해서 지반 침하평가를 위한 신경망 모델을 좀 더 일반화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

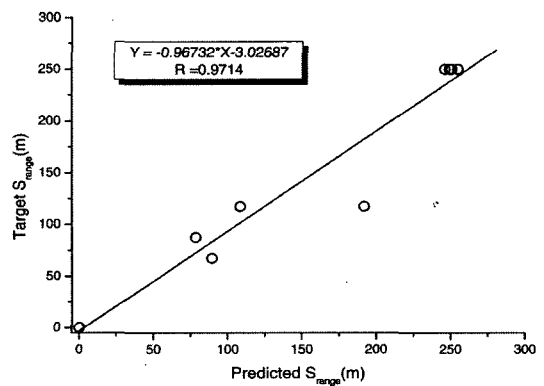
본 연구에서는 지하채굴적의 함몰, 지하수의 양수, 연약지반의 압밀 등 여러 가지 원인에 의해 발생하는 지반침하를 사전에 예측하고 그 피해를 최소화하는 능동적인 대처를 통해 국가 기간망의 안전을 확립하고 국민 생활권을 보호코자 지반침하 평가 및 예측을 위한 핵심 요소 기술 개발을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

Table 14. Comparison between the targeted value and the predicted value

No	Target		ANN Output	
	Smax (m)	Srange (m)	Smax (m)	Srange (m)
1	0.019	250.0	0.0201	246.2
2	0.007	0.0	0.00672	0.0068
3	0.028	250.0	0.02611	249.3
4	0.016	250.0	0.01724	254.8
5	0.009	0.0	0.00763	0.021
6	0.013	117.5	0.01372	191.6
7	0.040	250.0	0.03994	250.6
8	0.011	67.5	0.01556	89.19
9	0.019	117.5	0.01889	108.3
10	0.019	87.5	0.01821	78.24
		<b>RMSE =</b>	<b>0.00179</b>	<b>24.84</b>



(a) max. subsidence



(b) subsidence range

Fig. 16. Results of prediction on maximum subsidence as well as its range



- 1) 완만한 형태의 연속침하(트리프 형)와 급격한 형태의 불연속침하(싱크홀 형)로 대별되는 침하양상은, 지하채굴적의 함몰에 의한 지반침하일 경우, 광산에 적용된 채탄법과 직접적인 관계가 있음을 알았으며, 따라서 위경사승 붕락식, 중단붕락식, 블록케이빙 및 주방식 채탄법이 적용된 광산지역에서는 싱크홀 형태의 지반침하가 발생할 가능성이 큰 것으로 밝혀졌다.
- 2) 지하수의 과다한 양수에 의한 지반침하 발생가능성은 지하채굴적의 함몰에 의한 경우보다 오히려 증가할 것으로 예견되므로 이에 관한 대책 마련이 시급히 요구된다.
- 3) 지하채굴적에 의한 지반침하문제에 국한할 경우, 지반침하의 발생 및 그 영향범위에 대한 위험요소는 ①채굴적의 폭, ②지반내 측압계수, ③채굴적의 심도, 그리고 ④채굴적 높이의 순으로 나열할 수 있으므로, 직접적인 현장 계측에 의해서만 얻어질 수 있는 지반 내 측압계수의 산정에 유의해야 한다.
- 4) 지반침하 해석프로그램에서 입력 변수로 사용되는 항목 중에서, 암반의 경우 변형계수 및 지하수위 등이 점착력이나 내부마찰각, 또는 포아송비에 비해 가중치가 높은 것으로 수치해석결과 밝혀졌으며, 불연속면의 경우 절리면의 수직 및 전단 강성이 절리면의 점착강도 및 마찰각보다 가중치가 높은 것으로 밝혀졌다. 따라서, 향후 지반침하를 분석하기 위해 수치해석을 실시할 경우, 암반의 변형계수(deformation moduli) 또는 절리면의 강성(stiffness)에 관한 입력 변수 산정에 더욱 유의하여야 함을 알았다.
- 5) 인공신경망 이론을 적용하여 비주얼 베이직을 이용해서 개발한 지반침하예측 프로그램 SEPA(Subsidence Estimation & Prediction using ANN)는 기존의 수치해석결과와의 비교를 통해 매우 뛰어난 학습능력을 보여주었으며, 이를 통해 지반침하 양상을 예측한 결과, 최대침하량의 경우 평균 오차범위 2 mm 이내의 예측정확도를 가짐을 알 수 있었다. 또한 신경망 학습분석을 통해 지반침하의 주 영향인자는 RMR 및 측압계수, 그리고 채굴적의 심도 및 폭임을 알 수 있었으며, 이들 중에서 채굴적의 심도 및 폭이 더욱 주된 영향인자인 것으로 밝혀졌다.

이상의 연구결과를 바탕으로, 지반침하 예측 프로그램의 발전을 위해 신경망 모델 재구성에 필요한 정량적 지반침하사례 분석과, 복잡하고 현실적인 수치해석 모델의 구성을 통한 수치해석결과의 정밀도 향상이 추후

연구과제로 기대되는 바이며, 이를 통해 지반침하재해 위험지도의 작성이 가능할 것으로 판단된다.

## 사 사

이 연구는 공공기술연구회의 지원으로 수행된 기본사업과제(과제번호: KR-04-13-5)의 일부임을 밝힙니다.

## 참고문헌

1. 농어촌진흥공사, 1998, 지하수환경재해 사례집, 188p.
2. 이정인, 문현구 외, 1997, 탄광지역 지반침하 메카니즘 및 침하 방지공법에 관한 연구, 석탄산업합리화사업단 연구보고서, 292p.
3. 장윤호 외, 1999, 삼척탄전 지반침하 실태 분석 및 향후 대책, 석탄산업합리화사업단 연구보고서, 257p.
4. 석탄산업합리화사업단, 1995, 가은지역 지반침하 조사 및 보강공사 보고서 95-03.
5. 석탄산업합리화사업단, 1995, 철암지역 지반침하 조사 및 보강공사 보고서 95-04.
6. 석탄산업합리화사업단, 1996, 화전지역 지반안정성 조사 96-04.
7. 석탄산업합리화사업단, 1996, 고사리지역 지반안정성 조사 96-02.
8. 한국건설기술연구원, 1985, 지반침하 방지공법에 관한 연구, pp. 1-70.
9. 한국지반공학회, 1997, 지반공학시리즈 6 - 연약지반, 구미서관, 521p.
10. 한국지질자원연구원, 2002, 지반침하 방지 및 폐갱도 활용 기술 개발연구, KR-02(C)-15.
11. 한국지질자원연구원, 2004, 지반침하재해저감기술개발, 국책연구개발사업 보고서.
12. 한국토지공사, 1999, 연약지반의 압밀특성에 관한 연구, 935p.
13. Boscardin, M. D., Cording, E. J. and O'Rourke, T. D., 1978, Case studies of building behavior in response to adjacent excavation, US Department of Transportation, pp. 1-3~3-32.
14. Cundall, P.A. and Strack, O.D.L., 1979, A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, 29:47-65.
15. NCB, 1965-1975, Subsidence engineer's handbook, National Coal Board, London.
16. Pao Y. H., 1989, Adaptive pattern recognition and neural networks, Addition-Wesley.
17. Terzaghi, K., 1925, Principles of soil mechanics, IV-Settlement and consolidation of clay: Engineering News-Record, 95(3), p. 874-878.
18. USGS, 1999, Land Subsidence in the United states-USGS Circular 1182, 177p.



### 최성웅

1987년 서울대학교 공과대학  
자원공학과, 공학사  
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과,  
공학석사  
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과,  
공학박사

Tel: 042-868-3243  
E-mail: choiso@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원  
지반안전연구부 선임연구원



### 전양수

1996년 전남대학교 공과대학  
자원공학과, 공학사  
1998년 전남대학교 대학원 자원공학과,  
공학석사  
2002년 전남대학교 대학원 자원공학과,  
공학박사

Tel: 042-868-3249  
E-mail: ysjeon@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원  
지반안전연구부 선임연구원



### 박의섭

1989년 서울대학교 공과대학  
자원공학과, 공학사  
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과,  
공학석사  
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과,  
공학박사

Tel: 042-868-3098  
E-mail: espark@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원  
지반안전연구부 선임연구원



### 정용복

1994년 서울대학교 공과대학  
자원공학과, 공학사  
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과,  
공학석사  
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과,  
공학박사

Tel: 042-868-3097  
E-mail: ybjung@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원  
지반안전연구부 선임연구원



### 천대성

1997년 서울대학교 공과대학  
자원공학과, 공학사  
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과,  
공학석사

Tel: 042-868-3248  
E-mail: ecdds@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원  
지반안전연구부 연구원