

폐광지역 침하방지를 위한 지반 및 구조물기초 보강

김도형¹⁾*, 최창립¹⁾, 김동현¹⁾, 이두화²⁾, 이백송³⁾, 제해찬³⁾

A Case Study on Reinforcement of Ground and Foundation against Subsidence in Abandoned Mining Area

Do-Hyung Kim, Chang-Rim Choi, Dong-Hyun Kim,
Du-Hwa Lee, Baek-Song Lee and Hae-Chan Je

Abstract As the mechanism and effect range of subsidence are altered according to the various conditions (the ground condition, the earth pressure, the geometric condition of underground cavity and the structure load), the analysis and prediction of subsidence in abandoned mining area are very difficult. Also, as the geological characteristics and the mining methods are differed in each mines, the application of the pre-existing reinforcements without improvement has a lot of difficulties and limits. In this study, the various underground investigation such as long-depth core drilling, seismic tomography and BIPS (borehole image processing system) were performed, the distribution of underground cavity and coal seam and rock relaxation condition were analyzed. And we predicted the type of subsidence and estimated the subsidence by theories of mining subsidence. With these results, we analyzed the mechanism of subsidence occurrence in the research object area. Finally, we improved existing methods which were applied to the abandoned mining area and also we established the rational reinforcement for the ground and structure foundation against each subsidence cause.

Key words Abandoned mining area, Underground cavity, Rock relaxation, Subsidence, Structure foundation, Reinforcement

초 록 폐광지역의 침하발생 메커니즘 및 영향범위는 현장의 지반조건, 지압분포, 채굴적의 기하학적인 조건, 상부 구조물의 하중 조건 등에 따라 달라지므로 이를 예측하기는 매우 어렵다. 또한 지질 및 지반 상태, 탄층의 발달 상태, 채굴방법 등이 채굴현장마다 다르므로 기존의 보강대책을 그대로 적용하는 데에는 한계가 있다. 본 연구에서는 국내 폐광지역에 대한 합리적인 보강대책 수립을 위해 광역 채굴현황조사를 바탕으로 채굴적의 분포를 파악하고, 대심도 시추조사, 탄성과 토모그래피, 시추공 영상촬영 등의 상세 지반조사를 수행하여 석탄층의 분포현황과 암반이완상태를 파악하였다. 이를 토대로 지반침하이론에 의해 침하발생 유형을 예측하고 지반침하량을 산정하였다. 또한, 연구대상 지역의 침하발생 메커니즘을 분석하였으며, 기존 폐광지역 보강사례를 분석하여 각 침하원인별로 대상지역의 지반특성에 부합되는 지반 및 구조물기초에 대한 보강대책을 수립하였다.

핵심어 폐광지역, 채굴적, 암반이완, 지반침하, 구조물기초, 보강대책

1. 서 론

최근 석탄광 폐광지역 개발사업의 일환으로 대규모 건설공사가 진행됨으로서 지반침하위험지역에 대한 지

반보강이 중요한 문제로 제기되고 있다. 그러나 폐광지역의 지하 채굴적으로 발생하는 지반침하는 채굴적 천단부가 붕락되면서 그 영향이 지표까지 발전하는 것으로 침하발생 메커니즘 및 영향범위가 현장의 지반조건, 지압분포, 채굴적의 기하학적인 조건, 상부 구조물의 하중 조건 등에 따라 달라지므로 이를 예측하기는 매우 어렵다. 여기서, 채굴적(採掘跡)이라 함은 채굴로 인해 발생하는 지하공동을 뜻한다. 국내 폐광지역의 지반 및 구조물의 보강에 대한 연구는 대부분 외국의 사례를 국내 탄

¹⁾ (주)삼보기술단 지반사업부

²⁾ (주)삼보기술단 회장

³⁾ (주)동부건설 토목사업부

* 교신저자 : shipdo@chol.com

접수일 : 2007년 7월 20일

심사 완료일 : 2007년 8월 20일

광에 적용시키는 방법으로 진행되었으며, 국내 폐광지역의 채굴방법 및 지반특성을 고려한 침하발생 메커니즘에 대한 분석과 보강대책에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 국내 폐광지역에 계획된 도로건설공사에서 지반침하 방지를 위하여 수립된 지반 및 구조물기초의 보강대책 사례를 소개하여 차후 폐광지역에서의 보강대책 수립에 도움이 되고자 하였다. 먼저 광역 채굴현황 분석에 의해 채굴적의 분포를 파악하고 상세 지반조사를 수행하여 석탄층의 분포현황과 암반이완상태를 분석하였다. 이를 토대로 지반침하이론에 의해 침하 발생 유형을 분석하고 지반침하량을 산정하였다. 또한, 연구대상 지역의 침하발생 메커니즘을 분석하였으며, 기존의 폐광지역 보강사례를 개선하여 각 침하원인별로 대상지역의 지반특성에 부합되는 지반 및 구조물 기초에 대한 합리적인 보강대책을 수립하였다.

2. 폐광지역에서의 지반침하

지하광체를 채굴한 후 공동이 형성되면 일정기간이 경과한 후에 천반이 붕락되고 붕락지역이 점차 상부로 발달되면서 지표까지 연결되어 지반침하 및 지표함몰이 발생한다. 폐광지역에서의 채굴적에 의한 지반침하는 채탄법과 지질구조에 따라 그 형태를 달리한다. 일반적으로 탄층 폭이 일정하고 지층경사가 완만하며 지질구조가 단순한 곳에서는 장벽식 채탄법(longwall mining method)과 중단붕락식 채탄법(sub level caving method), 주방식 채탄법(room and pillar method) 등이 적용되며, 이러한 채탄법이 주로 적용되어진 영국, 미국의 수평탄전지대에서는 지표의 넓은 지역에 걸쳐 완만한 침하형태를 가지는 트러프(trough)형 침하가 발생한다. 반면에 탄층의 폭과 경사변화가 심하고, 지질구조가 복잡한 국내

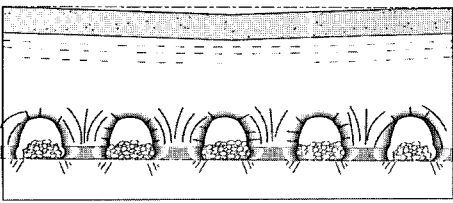
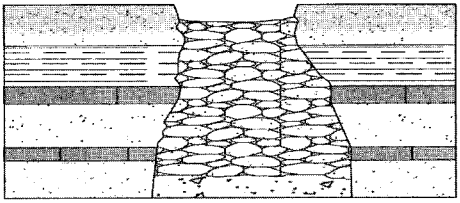
에서는 탄층의 경사방향을 따라 채탄 작업이 가능한 위경사승 붕락식 채탄법(slant chute block caving method)이 주로 적용되었다. 이러한 경우에는 채굴적의 형태가 불규칙하며, 정확한 채탄위치를 파악하기가 어려워 침하형태와 침하사기의 예측이 곤란하다. 트러프형 침하와 달리 복잡한 지질구조와 채굴적에 의해 예측이 곤란한 좁은 지역에 갑자기 지반침하가 발생하는 형태를 함몰형(sink hole) 침하라 한다. 함몰형 침하는 대체로 지표상으로부터 채굴적 심도가 낮은 지역에서 주로 발생하며, 침하발생시 인명과 구조물에 심각한 손상을 입힐 수 있다. 표 1은 채굴적의 지반침하 유형 및 특성을 나타낸다.

3. 대상지역 광해현황 및 대책수립 방향

연구대상 지역은 강원도 태백지역으로 한국의 대표적 인 석탄광산 지역이다. 현재는 대부분의 탄광에서 채굴이 종료되고 일부탄광만이 가행되고 있으며, 오랜 기간 동안의 채굴로 인하여 넓은 범위의 트러프형 침하가 발생된 지역이다. 또한, 일부지역에서는 상부 구조물에 심각한 손상을 초래하는 함몰형 침하가 다수 발생하여 수차례에 걸친 지반보강공사가 수행되었다. 현장 광해현황조사결과 그림 1(a)에 보이는 바와 같이 기존 도계교와 도계육교에 침하발생으로 인한 교량구조물의 균열이 상당히 진행되었다. 또한, 인근지역의 측량 및 정밀측측 문 현조사결과 채굴이 종료된 이후 약 18 cm의 침하가 발생하였으며 현재까지도 지반침하가 진행 중인 것으로 파악되었다(그림 1(b)참조).

이와 같은 침하발생 위험지역에 대한 합리적인 보강 대책을 수립하기 위해서 광역 채굴현황분석을 통해 채굴적의 분포를 파악하고 대심도 시추조사 및 물리탐사

표 1. 채굴적의 지반침하 유형 및 특성

구 분	트러프형 침하 (trough)	함몰형 침하 (sink hole)
개 요 도		
범 위 (규모)	대체로 넓은 구역 (최소 10 m 이상)	대체로 적은 규모 (3 m 내외)
발생 원인	광주파괴와 광주편칭 등에 의한	채굴적 천정부의 파괴
채굴 심도	다양한 심도에서 발생	대체로 50 m 미만에서 발생
피해위험성	지상 구조물에 피해 가능	인명 및 시설물에 심각한 손상

등의 상세지반조사를 통해 대상지역의 탄층분포 및 지반이완상태 등을 분석하였다. 이러한 조사결과를 바탕으로 지반침하이론에 의해 침하유형을 예측하고, 지반침하량을 산정하였다. 이와 같은 조사결과와 분석결과로부터 대상지역의 지반침하 발생의 메커니즘을 분석하고 지반과 구조물기초의 합리적인 보강대책을 수립하여 신설되는 교량구조물의 안정성을 확보하고자 하였다.

4. 채굴적 분포 및 지반이완상태 파악

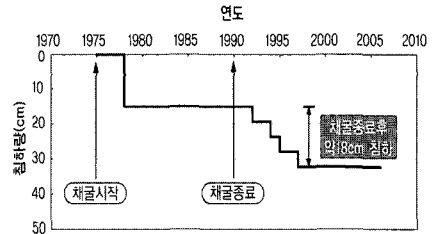
대상지역에 대한 광역 채굴현황 조사결과 석탄공사 도계광업소의 점리지구와 대방광업소, 삼마광업소의 영향을 받는 것으로 분석되었다. 그림 2는 신설되는 교량구간의 채굴적 분포현황을 나타내는 것으로 수평에 가까운 탄층을 개발한 연층의 채굴적이 다수 분포하고 있으며, 채굴적의 심도는 지표하 60~130 m로 분포하고 있다.

문헌 및 채굴기록에 의한 채굴적 분포조사와 더불어 실질적인 탄층 분포현황과 지반이완상태 분석을 위하여 대심도 시추조사, 대심도 탄성과 토모그래피, 시추공 영상촬영 등의 상세한 현장조사 및 물리탐사를 수행하였다(그림 3 참조).

그림 4에서 보듯이, 대심도 탄성과 토모그래피 탐사결과 저속도대가 연속적으로 나타났으며, 이러한 저속도대는 지표지질 조사와의 연계성 분석결과 탄층으로 추정되었다. 상부탄층 ㉠는 얕은 심도에서 경사를 가지고 분포하며, 본탄층으로 추정되는 ㉢는 탐사구간 전체에 걸쳐 수평하게 분포하는 양상을 나타내었다. 그림 5는 시추공 영상촬영에 의한 암반이완 상태를 분석한 것으로 지표하 0~30 m구간에는 이완흔적이 없는 양호한 암반상태를 나타내고, 30~40 m구간에는 변화구간이 존재하며, 60 m하부구간에서는 암반이완의 폭이 커지는 것을 알 수 있다.



(a) 기존교량 피해현황



(b) 지표침하발생이력

그림 1. 기존교량 피해현황 및 인근지역 침하발생이력

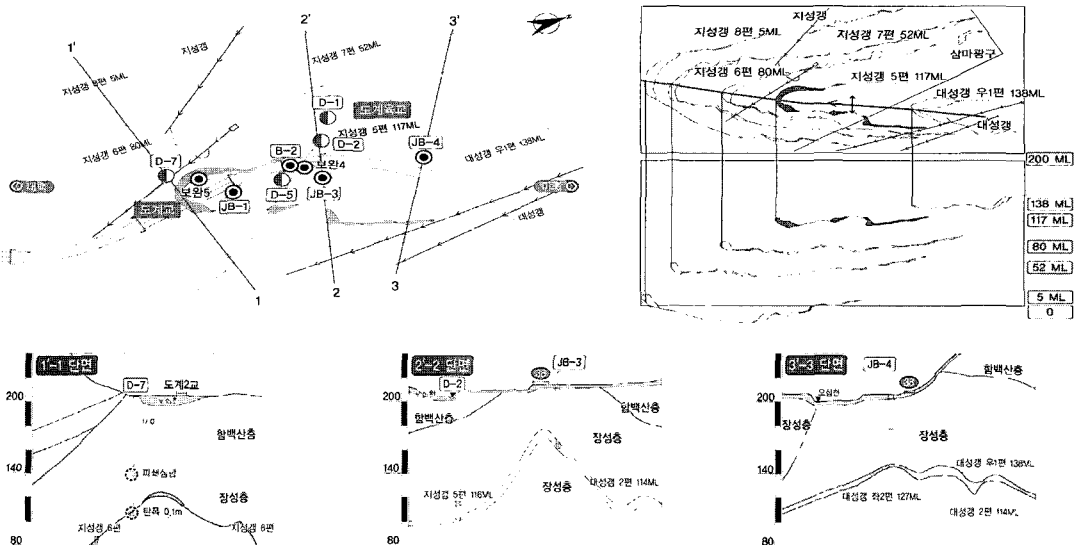


그림 2. 교량구간의 채굴적 분포현황

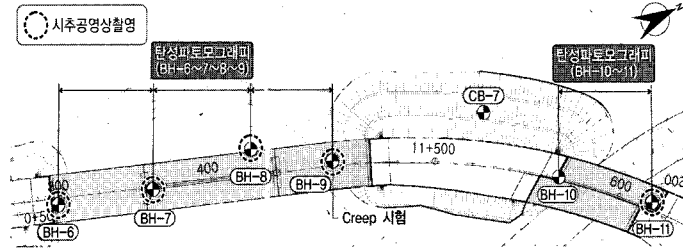


그림 3. 상세 지반조사 개요도

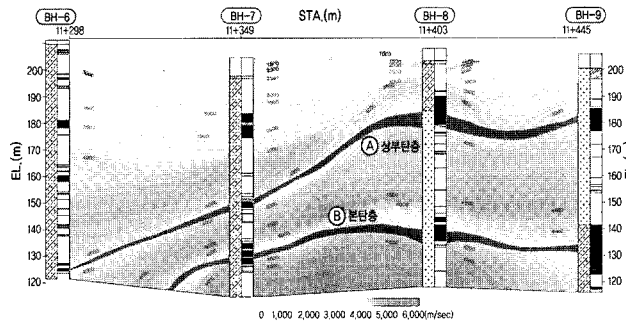


그림 4. 탄성과 토모그래피 결과

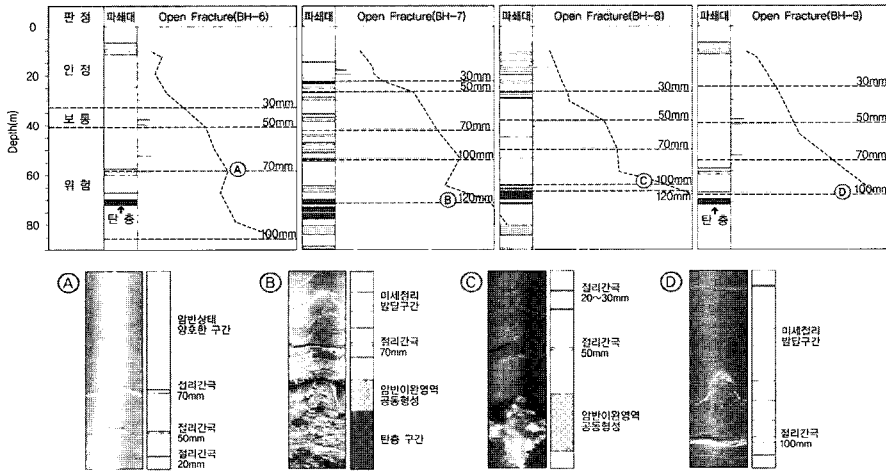


그림 5. 시추공 영상촬영 결과

위의 조사결과를 종합해보면 탄층 및 파쇄대의 층리면을 따라 발달된 암반이완대가 구조물의 직하부에 10~80 m의 심도를 가지고 발달하며, 하부 채굴적에 근접할수록 지반의 이완상태가 심해지는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 대심도로 갈수록 양호한 암반상태를 가지는 일반적인 현장과는 달리, 하부 채굴적의 점진적인 붕락으로 인하여 지반이완영역이 하부에서 지표면으로 점차 확대되고 있음을 보여주는 것이다(그림 6 참조).

5. 침하발생 유형분석 및 침하량 산정

앞 절에서 분석된 광역 채굴현황 분석과 상세 지반조사를 바탕으로 기존에 제안된 지반침하이론을 사용하여 대상지역의 침하발생 유형과 잔류침하량을 분석하였다. 본 연구에서는 도식법에 의해 트리프형 침하의 발생범위를 산정하고 응력아차-체적팽창 이론과 한계평형법을 이용하여 합몰형 침하에 대한 발생가능성을 평가하였

다. 또한, 영향함수법에 의해 침하의 이론적인 최대발생량을 산정하였다.

5.1 도식법(National Coal Board, 1975)

장벽식 채탄법을 주로 적용한 영국에서 경험적으로 침하범위를 예측하는데 사용된 것으로 트리프형 침하의 영향범위를 추정하는데 유용하며, 침하영향범위를 탄층경사와 한계각 사이의 관계를 도식적으로 표현하여 예측한다. 여기서 한계각이라 함은 채굴적 선단과 침하지역의 선단을 연결한 선이 수직면과 이루는 각을 의미한다. 그림 7은 도식법에 의한 트리프형 침하의 발생가능영역을 나타내며 침하영향범위 내에 도계교와 도계육교가 위치하는 것으로 분석되었다.

5.2 응력아치-체적팽창 이론(Karfakis, 1993)

응력아치-체적팽창 이론은 채굴적 봉락에 의한 체적 팽창과 채굴적 높이와의 관계를 분석하여 봉락예상 높이를 추정함으로써 채굴적 봉락에 의한 지표침하 영향심도를 예측하는 방법이다. 지하채굴로 공동이 형성되어 천반이 봉락될 경우 응력아치 형성에 의해 공동이 안정

화되거나 파쇄암의 체적팽창에 의해 채굴적이 채워질 때까지 봉락이 진전된다. 파쇄암의 체적팽창으로 채굴적이 채워지는 경우 파쇄암의 높이는 직상반의 강도, 파쇄암의 부피팽창률, 채굴공동의 크기에 의해 좌우된다. 파쇄암식의 체적팽창성은 지표침하량이 채굴고보다 적은 이유를 설명하는데 근거를 제공한다. 아치효과를 무시하고, 단지 체적 팽창률로부터 채굴고와 봉락고의 상관관계로부터 유도할 수 있다. 표 2는 응력아치-체적팽창 이론의 영향인자를 나타내며, 표 3은 체적팽창과 봉락고의 관계를 나타낸다. 그림 8은 응력아치-체적팽창 이론에 의한 대상지역의 위치별(그림 6 참조) 체적팽창률과 봉락고의 관계를 나타낸다.

본 대상지역의 탄층(장성층)에 대한 체적팽창률(B)은 대한석탄공사에서 제시한 값인 0.40을 사용하였다. 표 4는 응력아치-체적팽창 이론에 의한 함몰형 침하 평가 결과를 나타낸다. 최대봉락고가 지반고보다 큰 구간은 직하부 채굴적이 봉락되었을 때 봉락대가 원뿔형 또는 썩기형을 형성할 경우에는 하부지반에 함몰형 침하가 발생할 가능성이 있는 구간이다. 도계교 교대 A1을 제외한 구간에서 국부적이지만 침하규모가 큰 함몰형 침

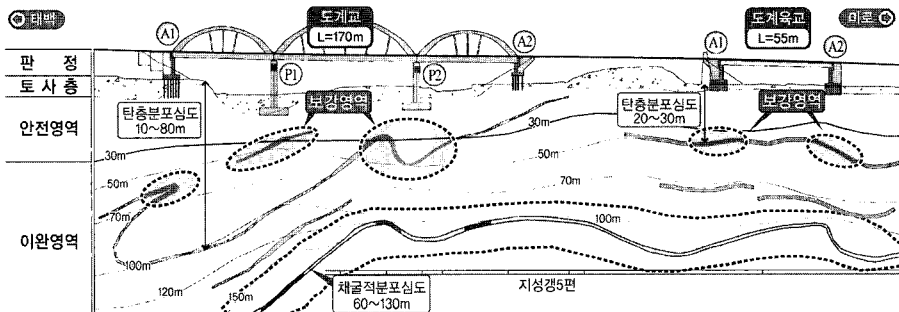
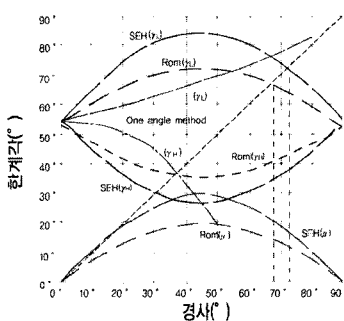
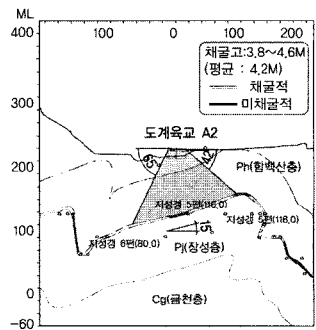
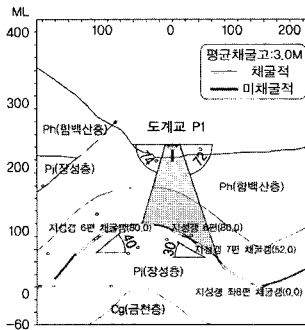


그림 6. 탄층 분포현황 및 지반이완상태



(a) 탄층경사와 한계각과의 관계



(b) 트리프형 침하의 발생가능영역

그림 7. 도식법에 의한 트리프형 침하평가

표 2. 응력아치-체적팽창 이론의 영향인자

영향인자	설명
체적팽창률 (B)	원지반 암석부피에 대한 굴착후 팽창된 암석부피의 비율
채굴적 경사 (θ)	채굴적이 수평면과 이루는 각
채굴적 폭 (w)	채굴적 경사방향 연장
채굴고 (t)	채굴적 수직고

표 3. 체적팽창과 붕락고의 관계

구분	관계식
직각기동형	$\frac{H}{t} = \frac{1}{B\cos\theta} + \frac{w \sin\theta}{t^2}$
타원형	$\frac{H}{t} = \frac{3}{2B\cos\theta} + \frac{w \ 3\sin\theta}{t \ 4}$
췘기형	$\frac{H}{t} = \frac{2}{B\cos\theta} + \frac{w}{t} \sin\theta$
원뿔형	$\frac{H}{t} = \frac{3}{B\cos\theta} + \frac{w \ 3\sin\theta}{t^2}$

표 4. 응력아치-체적팽창 이론에 의한 침하평가

구분	도계교				도계육교	
	A1	P1	P2	A2	A1	A2
채굴고 (t)	4.5 m	4.5 m	4.5 m	4.5 m	4.0 m	4.5 m
채굴적 폭 (w)	50 m	100 m	80 m	80 m	80 m	120 m
채굴적 경사 (θ)	40°	40°	50°	45°	45°	15°
지반고	100 m	100 m	70 m	70 m	70 m	80 m
최대붕락고	92 m	140 m	144 m	133 m	127 m	82 m
합몰형 침하	-	○	○	○	○	○

의 발생가능성이 있는 것으로 평가되므로 신설되는 교량구조물 직하부에 대한 보강대책 수립이 요구된다.

5.3 한계평형법(Brady and Brown, 1985)

Brady & Brown(1985)이 Atkinson(1981)의 한계평형이론을 광산지역의 침하해석에 적용하였으며 지반을 강체 거동하는 블록모델로 가정하여 침하에 대한 안전율을 구하고 한계심도를 결정하였다. 채굴적 상반블록의 거동에 있어서 상반블록의 자중에 의한 연직전단응력이 블록과 인접지반 사이의 경계면에 작용하는 전단강도를 초과하면 블록의 강체운동이 발생하며, 미끄러진 블록은 채굴 공동으로 함몰된다. 이 해석에서는 유효수직응력을 심도에 따른 자중 $\sigma_{zz} = \gamma \cdot z$ 로, 수평응력은 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = k \cdot \gamma \cdot z$ 로 가정한다. 여기서 k는 측압계수이며 전단강도는 Mohr-Coulomb의 법칙을 적용한다. 그림 9는 한계평형법의 개념도를 나타내며, 블록의 침하에 대한 안전율은 다음의 식 (1), 식 (2) 식 (3)에 의해 계산할 수 있다.

- ① 지하수위가 채굴공동의 하부에 위치할 경우 ($d \geq h$)

$$F_1 = \frac{2c'(a+b \cos\alpha)}{\gamma a b \cos\alpha} + \frac{k \tan\psi}{(2h-b \sin\alpha)} \left\{ \frac{h^2 + (h-b \sin\alpha)^2}{b \cos\alpha} + \frac{2}{b} \left[h(h-b \sin\alpha) + \frac{b^2 \sin^2\alpha}{3} \right] \right\} \quad (1)$$

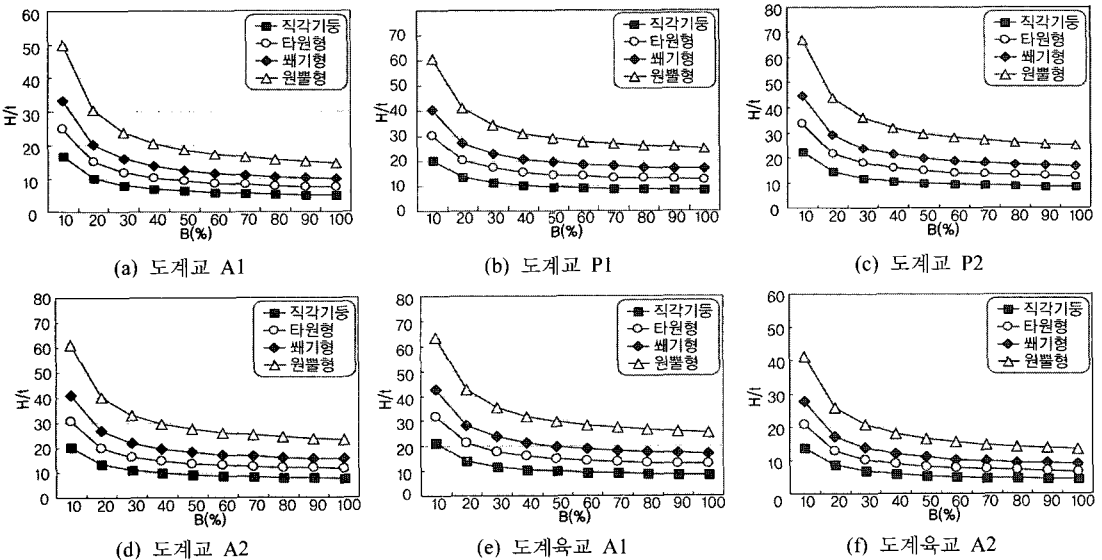


그림 8. 체적팽창률-붕락고 관계

② 지하수위가 채굴공동에 위치할 경우
 ($h \geq d \geq h - b\sin\alpha$)

$$F = F_1 - \frac{2\gamma_w(h-d)^2 \tan\psi}{3\gamma b(2h-b\sin\alpha)} \left[\sec\alpha + \frac{2(h-d)}{3a\sin\alpha} \right] \quad (2)$$

③ 지하수위가 채굴공동에 상부에 위치할 경우
 ($0 \leq d \leq h - b\sin\alpha$)

$$F = F_1 - \frac{2\gamma_w \tan\psi}{3\gamma(2h-b\sin\alpha)} \left\{ \frac{h^2 + (h-b\sin\alpha)^2 - 2d(2h-b\sin\alpha-d)}{b\cos\alpha} + \frac{2}{3a} \left[\frac{3h(h-b\sin\alpha)}{+b^2\sin^2\alpha - 3d(2h-b\sin\alpha-d)} \right] \right\} \quad (3)$$

표 5에서 보듯이, 한계평행법에 의한 침하평가 결과는 응력아차-체적팽창 이론의 결과와 유사하며 트러프형 침하와 함께 함몰형 침하의 발생가능성이 있는 것으로 평가되어 신설되는 교량구조물 직하부에 대한 보강 대책 수립이 요구되는 것으로 분석되었다. 여기서 채굴

적 폭은 위경사승 분락식으로 채굴된 대상현장의 채굴적 분포 특성을 반영한 값이다.

5.4 영향함수법(Knothe, 1957)

Knothe(1957)과 Litwinski(1957)은 미소요소의 굴착개념과 중첩원리를 이용한 침하예측 방법을 동시에 제안하였다. 침하 예측을 위한 영향함수법은 침하를 지표면의 점들에서 계산하는 방법으로 지표면의 한 점이 영향을 미치는 범위에서 무한소(無限小)의 요소를 제거하면 그 점 주위에 영향영역이 존재한다는 이론에 근거한다. 본고에서는 이러한 영향함수법에 의한 침하예측을 위해 SDPS(Surface Deformation Prediction System) 프로그램을 사용하였다. SDPS에서는 영향함수로 Bell 모양의 식 (4)와 같은 Gaussian function을 사용한다.

$$g(x,s) = \frac{S_o(x)}{r} \exp\left[-\pi \frac{(x-s)^2}{r^2}\right] \quad (4)$$

여기서,
 r : 주영향반경 = $h/\tan(\beta)$
 h : 토피고
 β : 주영향각

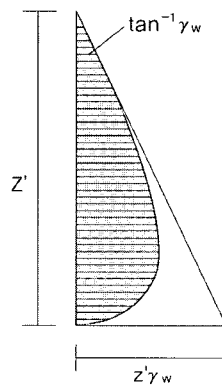
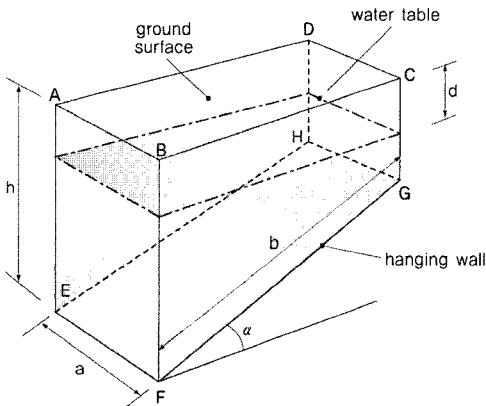
x : 굴착된 미소요소의 좌표
 s : 침하계산지점 P의 좌표
 $S_o(x)$: 굴착된 미소요소에서의 최대침하량

임의의 점 P에서 침하량은 다음의 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S(x,s) = \frac{1}{r} \int_{-\infty}^{+\infty} s_o(x) \exp\left[-\pi \frac{(x-r)^2}{r^2}\right] \quad (5)$$

표 5. 한계평행법에 의한 침하평가

구 분	도계교			도계육교		
	A1	P1	P2	A2	A1	A2
채굴적 폭 (m)	50	100	80	80	80	120
채굴적 연장 (m)	100	70	120	90	120	120
채굴적 심도 (m)	100	100	70	70	70	80
채굴적 경사 (°)	40	40	50	45	45	15
건기시 안전율	3.21	1.41	1.47	1.36	1.36	0.79
우기시 안전율	2.84	1.19	1.29	1.19	1.20	0.68
함몰형 침하	-	○	○	○	○	○



h : 채굴적 심도
 a : 채굴적 폭
 b : 채굴적 연장
 d : 지하수위
 α : 채굴적 경사

그림 9. 한계평행법의 개념도

여기서,

$$s_o = m(s) \cdot a(x)$$

$m(s)$: 채굴 폭

$a(x)$: 최대 침하율

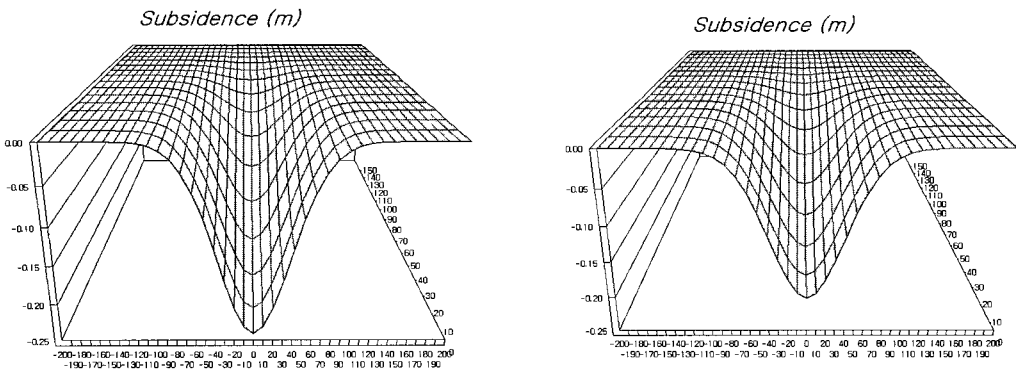
연구대상지역의 실제 보강대책 수립과정에서는 지반 침하이론에 의한 침하량 분석과 함께 수치해석과 원심 모형시험을 수행하여 대상지역에서 예상되어지는 최대 발생 침하량을 산정하였으나 본고에서는 지반침하이론에 대한 내용만을 언급하였다. 대상지역 채굴적의 영향각, 변형계수, 채굴적 상부의 견고한 암반비율, 채굴고, 채굴깊이, 채탄비율 등의 입력 자료를 가지고 영향함수법을 사용하여 지반침하량을 산정한 결과, 도계교와 도계육교에서 각각 24 cm와 20 cm의 지반침하량이 산정되었다(그림 10 참조). 침하량 산정결과 현재까지 지반 침하가 진행 중인 것으로 판단되므로 장래의 잔류침하량과 신설되는 교량으로 인한 추가적인 침하량을 고려한 보강대책 수립이 요구되었다.

6. 침하방지 대책 수립

앞 절에서 언급된 대상지역의 상세지반조사와 침하평가 결과를 바탕으로 신설되는 교량의 안정성 확보를 위한 침하방지 대책수립에 대하여 설명하고자 한다. 먼저, 기존에 폐광지역에서 수행된 지반보강 사례를 분석하여 그 적용성 여부를 판단하고 본 연구대상지역의 현장여건에 맞는 합리적인 보강대책을 수립하고자 하였다. 폐광지역에 대한 기존의 지반보강은 주로 구조물의 보강을 위해 대심도의 뿌리말뚝(마이크로파일)을 적용하여 지반과의 강체거동을 유도하는 개념의 보강설계가 이루어졌으며, 보강재는 주로 강관 및 철근을 사용하고 중

전재로는 시멘트 밀크 또는 시멘트 몰탈을 사용하였다. 또한 전체적인 트립프형 침하에 대한 억제를 위해 채굴적 채움 보강을 적용하였으며 시멘트 몰탈을 이용한 그라우트 충전법이 주로 적용되었다. 그러나 이러한 기존 폐광지역에서의 지반보강 사례들은 채굴적의 심도가 지표하 50 m미만의 비교적 얕은 지역에 사용된 것으로서 채굴적이 지표하 130 m의 대심도까지 분포하는 연구대상 지역에서 채굴적이 분포하는 심도까지 마이크로파일을 시공하여 지반과의 강체거동을 유도하는 것은 경제적으로 비합리적인 것으로 판단되었다. 또한, 시추조사를 통하여 대심도에 분포하는 채굴적의 분포를 확인하는 것이 어려우며, 구조물 기초 직하부의 상태가 양호한 암반에 과다한 천공을 통해 구조물 기초의 지지층을 약하게 만드는 보강대책 역시 비합리적인 것으로 판단되었다. 따라서 연구대상지역의 채굴적 및 탄층 분포현황과 대심도의 채굴적으로 접근할수록 이완영역이 커지는 지반상태를 종합적으로 고려하여 침하발생 메커니즘을 분석하였다.

연구 대상지역의 침하발생에 대한 메커니즘과 침하발생 방지대책을 분석한 결과를 정리하면 표 6과 같다. 먼저, 채굴적의 초기 붕괴가 발생한 후 그 붕괴가 상부로 점진적으로 진행되어 지표면까지 발생하게 된다. 이러한 분석은 그림 6의 지반이완상태 분석결과에서 볼 수 있듯이 채굴적 붕괴로 인하여 채굴적 근접부의 암반이완이 크게 발생하고, 상부로 점점 전이되고 있는 양상을 가진다. 즉, 초기의 채굴적 붕괴로 인한 암반이완이 점진적으로 상부로 진행되고 있으므로 추가적인 붕락방지를 위하여 채굴적에 대한 채움이 필요하다. 또한, 지표면과 채굴적 사이에 존재하는 연약한 탄층으로 인해 이완영역의 확대가 진행되는 것으로 분석되었다. 이는 그림 4와 그림 5에서 볼 수 있듯이 탄층이 존재하는 부



(a) 도계교 지반침하량 (b) 도계육교 지반침하량

그림 10. 영향함수법에 의한 지반침하량 산정

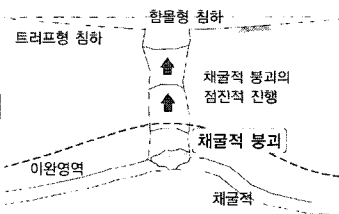
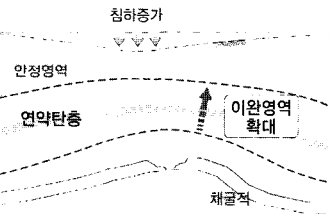
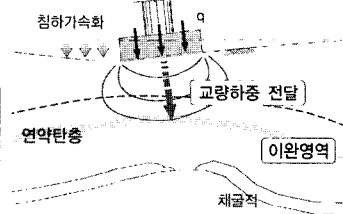
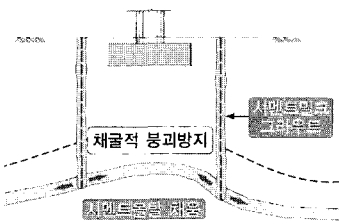
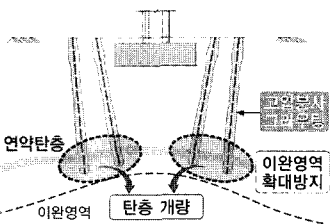
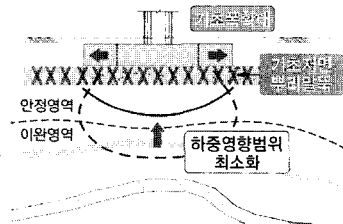
분에서 암반이완의 상태가 더욱 커진 결과로부터 추정할 수 있다. 마지막으로 교량구조물의 하중이 하부의 이완영역으로 전달되어 침하가 가속화되는 것으로 분석되었다. 이러한 침하발생 메커니즘 분석을 토대로 침하 원인별 보강대책을 수립하였다. 먼저 채굴적 초기 붕괴 방지를 위해 채굴적 그라우트 채움 공법을 적용하였으며, 연약탄층에 대한 개량을 위해 고압분사 그라우팅을 적용하여 이완영역의 확대를 방지하였다. 또한, 교량하중 전달의 최소화를 위해 기초폭을 확대시키고 기초저면을 뿌리말뚝으로 보강하였다.

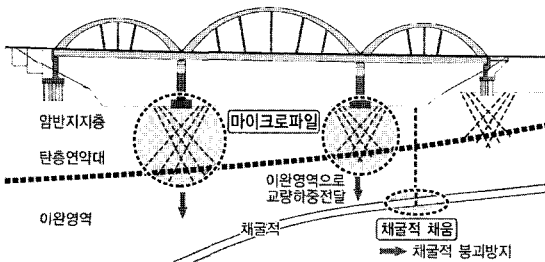
그러나 기존의 보강사례를 본 연구대상 지역에 적용할 경우에는 그림 11(a)에 보이는 바와 같이 마이크로파일의 말뚝효과로 인해 교량구조물의 하중이 하부 이완

영역으로 전달되어 침하가 가속화될 우려가 있는 것으로 판단되었다. 따라서 그림 11(b)과 같이 교량구조물 하중의 전달을 최소화하기 위하여 기초폭을 확대시키고 이완영역의 확대방지를 위해 고압분사 그라우팅을 통해 연약한 탄층대를 개량하는 보강대책으로 개선하였다. 또한, 교량기초 직하부의 양호한 암반에 대한 천공작업을 최소화하여 지지층으로서 암반의 강도가 충분히 발휘되도록 하였다.

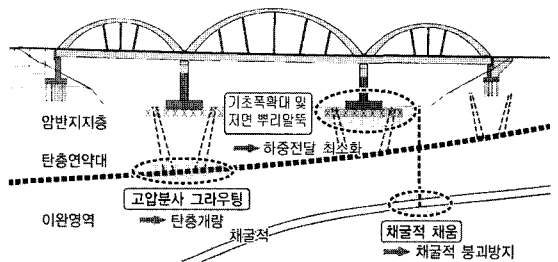
이러한 보강대책에 대한 검증용 위해 2차원 수치해석과 원심모형 시험을 수행하였다. 채굴적 그라우트 채움보강과 탄층부 고압분사 그라우팅을 통한 지반개량 효과를 수치해석을 통해 분석한 결과 최대침하량이 약 40%가 감소되는 것으로 분석되었다. 또한 기초폭 면적을 구조

표 6. 침하발생 메커니즘 분석 및 대책수립

구분	채굴적 붕괴 ⇒ 지표면침하	연약탄층 ⇒ 이완영역확대	교량하중전달 ⇒ 침하가속화
침하 발생 메커니즘	 <ul style="list-style-type: none"> • 채굴적 초기 붕괴의 점진적 진행으로 지표면 침하발생 	 <ul style="list-style-type: none"> • 연약탄층에 의한 지반이완영역의 확대 	 <ul style="list-style-type: none"> • 교량하중의 하부 이완영역 전달로 침하가속화 발생
침하 발생 방지 대책	 <ul style="list-style-type: none"> • 채굴적 그라우트 채움 채굴적 붕괴방지 	 <ul style="list-style-type: none"> • 고압분사 그라우팅 (RJP) 연약탄층 지반개량 	 <ul style="list-style-type: none"> • 기초폭 확대 / 저면보강 하중영향범위 최소화



(a) 기존 보강사례 적용시의 문제점



(b) 대상지역 보강대책 개선

그림 11. 기존사례 적용시의 문제점 및 보강설계 개선

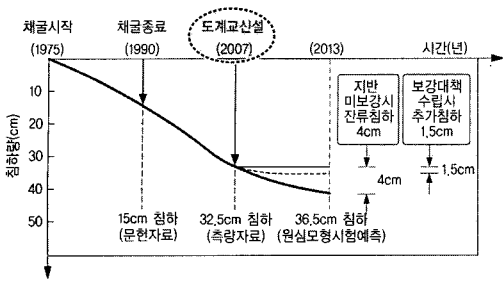
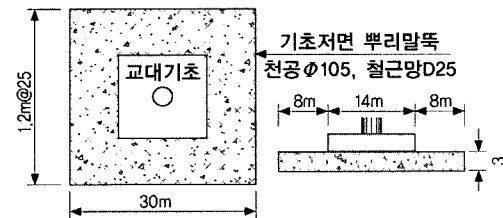
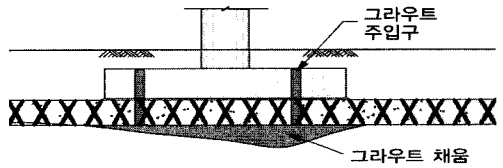


그림 12. 보강대책 후 예상침하량



(a) 기초폭 확대 / 저면 뿌리말뚝



(b) 기초저면 그라우트 주입구 설치

그림 13. 장기적 기초안정성 확보방안

적으로 최대한 확대시켰을 경우(3배 확대)의 잔류침하량이 약 30% 감소되는 것을 원심모형시험을 수행하여 확인하였다. 따라서 본 연구대상지역의 경우에는 위에서 언급된 보강대책 수립시 교량구조물의 침하량 설계기준 2.0 cm를 만족시키는 것으로 분석되었다(그림 12 참조).

또한, 운영중의 장기적 침하에 대한 안정성 확보를 위해 그림 13(a)와 같이 당초설계에 비해 기초면적을 3배로 확대하고 기초저면에 뿌리말뚝보강을 적용하였다. 또한, 침하발생시의 신속한 복구를 위해 그림 13(b)와 같이 그라우트 주입구를 설치하여 유지관리가 가능하도록 하였다.

7. 결 론

본 연구에서는 국내 폐광 지역내 침하발생 위험구간에 신설되는 교량구조물의 안정성 확보를 위해 수행된 침하방지 대책에 대하여 소개하였다. 광역 채굴현황 분석을 통해 채굴적 분포를 파악하고 대심도 시추조사,

탄성과 토모그래피, 시추공 영상촬영 등의 상세지반조사를 수행하였다. 조사결과 하루 채굴적에 근접할수록 지반이완상태가 심해지는 지층상태를 파악하였으며, 지표와 채굴적 사이에 연약한 탄층이 분포하는 것을 파악하였다. 또한, 침하이론에 의해 침하발생 유형을 분석한 결과 트러프형 침하와 함께 함몰형 침하의 발생위험이 있는 것으로 분석되었으며 침하량 산정결과 현재까지 잔류침하가 진행 중인 것으로 분석되었다. 따라서 트러프형 침하발생의 억제를 위한 채굴적에 대한 전반적인 보강대책과 함께 구조물기초 직하부의 함몰형 파괴에 대한 보강대책 수립이 요구되는 것으로 판단되었다.

폐광지역에서 수행된 기존의 보강대책은 채굴적이 비교적 얇은 심도에 분포하는 지역에 적용된 것으로서 주로 대심도의 뿌리말뚝(마이크로파일)을 채굴적 심도까지 적용하여 지반과의 강체거동을 유도하는 보강설계가 이루어 졌으나, 연구대상 지역의 경우에는 채굴적이 지표하 130 m의 대심도까지 분포하고 있어 채굴적 심도까지 마이크로파일을 시공하는 것은 경제적으로 불합리한 것으로 판단되었다. 또한, 구조물기초 부근의 일정심도까지 마이크로 파일을 적용할 경우에는 마이크로파일의 말뚝효과로 인해 상부의 교량구조물의 하중이 하부의 이완영역으로 전달되어 침하가 더욱 가속화될 우려가 있는 것으로 분석되었다. 이러한 분석으로부터 대상구간의 지반조건과 탄층분포 현황을 고려한 침하발생 원인별 합리적인 침하방지 대책을 수립하였다. 대상지역의 신설되는 교량의 안정성 확보를 위하여 기초폭을 확대하고 기초저면부에 뿌리말뚝을 적용하여 교량하중이 하부의 이완영역으로 전달되는 것을 최소화하였다. 또한 연약한 탄층으로 인한 이완영역의 확대를 방지하기 위해 고압분사 그라우팅을 적용하여 탄층부를 개량하였으며 또한 채굴적의 추가적인 붕락을 방지하기 위해 시멘트몰탈 채움을 적용하였다.

참고문헌

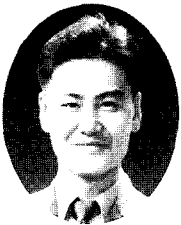
1. 김도형, 최창림, 김동현, 이두화, 이선복, 제해찬, 2007, 폐광지역 침하위험도 분석을 통한 채굴적 및 구조물기초 보강사례, 한국암반공학회 춘계학술발표회 논문집, 393-04.
2. 김병찬, 문현구, 2001, 광산침하 기구 및 침하 예측에 관한 이론적 연구, 한국자원공학회지 38.3, 188-201.
3. 김중우, 전석원, 서영호, 2004, 지하채굴적이 지표 구조물의 안정성에 미치는 영향에 관한 모형실험 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 14.1, 43-53.
4. 방기문, 전효택, 2004, 폐탄광 지역내 침하방지 지반보강공법 연구, 한국지구시스템공학회지 41.4, 319-326.
5. 지정배, 김중우, 2002, 원형공동의 점진적 붕락에 따른 지표침하특성, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 10, 33-44.
6. 동부건설(주), 2007, 태백-미로 2-1공구 도로건설공사 토

질조사보고서.

7. 동부건설(주), 2007, 태백~미로 2-1공구 도로건설공사 설계보고서.
8. (주)산하이앤씨, 2007, 폐광지역 지반침하 특성 분석 및 침하안정성 평가.
9. 석탄합리화사업단, 1995, 지하채굴에 따른 지반안정성 평가.
10. 석탄합리화사업단, 1999, 고사리지역 지반보강공사 실시설계보고서.
11. 석탄합리화사업단, 1999, 고사리지역 3차 정밀계측조사.

12. 석탄합리화사업단, 2003, 점리지역 지반안정성 정밀조사 보고서.
13. Atkinson, J.H., 1981, Foundations and Slopes, John Wiley and Sons.
14. Brady, B. H. G. & Brown, E. T., 1985, Rock Mechanics for underground Mining, George Allen & Unwin.
15. Knothe S., 1957, Observation of surface movements under influence of mining and their theoretical interpretation, Proc. Eur. Congr., Ground Movement, U.K., pp. 210-218.

김도형



1999년 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 공학사
2001년 고려대학교 대학원 토목환경공학과 공학석사

Tel: 02-3433-3380
E-mail: shipdo@chol.com
현재 (주)삼보기술단 지반사업부 과장

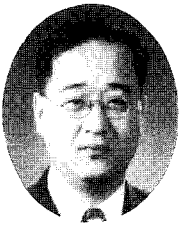
최창립



1993년 한양대학교 공과대학 토목공학과 공학사
1998년 한양대학교 대학원 토목공학과 공학석사

Tel: 02-3433-3046
E-mail: ccr12424@hanmail.net
현재 (주)삼보기술단 지반사업부 부장

김동현



1990년 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 공학사
1992년 고려대학교 대학원 토목환경공학과 공학석사
1996년 고려대학교 대학원 토목환경공학과 공학박사

Tel: 02-3433-3041
E-mail: k7419@chol.com
현재 (주)삼보기술단 지반사업부 이사

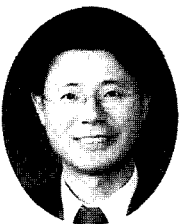
이두화



1976년 한양대학교 공과대학 토목공학과 공학사
1994년 한양대학교 대학원 토목공학과 공학석사
2005년 한양대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel: 02-3433-3027
E-mail: samboeng@chol.com
현재 (주)삼보기술단 회장

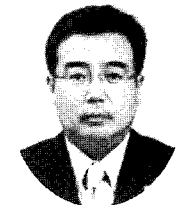
이백송



1980년 서울대학교 공과대학 토목공학과 공학사
2003년 경희대학교 대학원 토목공학과 공학석사

Tel: 02-3484-2290
E-mail: bslee@dongbu.co.kr
현재 (주)동부건설 토목설계팀 팀장

제해찬



1979년 서울대학교 공과대학 토목공학과 공학사

Tel: 02-3484-2150
E-mail: jhc@dongbu.co.kr
현재 (주)동부건설 토목사업부 상무