

채굴적에 의한 지반침하 사례 분석을 통한 침하발생 범위의 추정에 관한 연구

김병렬, 이승중, 최성웅*

A Study on the Prediction of Surface Subsidence Zone through the Case Studies on Mined-out Area

Byung-Ryeol Kim, Seung-Joong Lee, Sung-Oong Choi*

Abstract Graphical method has been widely applied to the prediction of subsidence area, and is known to have advantages in analysis of trough subsidence which is common in horizontally seamed mine area. However, it is reported that most of the ore bodies in Korea are geologically inclined from sub-horizontal to steep, and therefore, the sinkhole subsidence is frequent in abandoned mine area. For these reasons, it is not to be desired that graphical method is applied for predicting the subsidence occurrence. This paper describes the results of subsidence zone prediction considering the dip direction and the opposite direction of inclined ore bodies from the case studies on the 163 subsidence occurrence regions. The results show also the assumed angle which can define the range of subsidence in the surface area. In conclusion, the limit of this angle is suggested after taking into account the comparison with graphical method and the application to the case histories.

Key words Subsidence zone, Graphical method, Trough, Sinkhole, Angle of assumption

초 록 폐광산에서의 지표침하의 영향범위를 추정하기 위하여 많이 적용되어 왔던 도식법은 수평탄층에서 흔히 발생하는 트러프형 침하의 영향범위를 추정하는데 그 적용성이 높은 것으로 알려져 왔다. 그러나 국내 광산의 광체들은 대부분 급경사이며, 침하 형태 또한 함몰형의 빈도가 상대적으로 높은 것으로 보고되고 있기 때문에, 국내 침하지에 도식법을 직접적으로 적용하는 것은 바람직하지 않다. 따라서 본 연구에서는 국내 폐광산 지역에서 발생한 총 163개의 지표침하 발생지에 대한 사례분석을 실시하여, 채굴적의 위치를 기준으로 광체의 경사방향 및 광체의 경사반대방향으로의 지표침하 발생범위를 규명하였다. 또한 이를 토대로 채굴적의 심도를 고려한 지표침하 발생범위에 대한 추정각을 산정하였으며, 기존의 도식법과의 비교분석 및 지표침하 발생 사례 적용 분석을 통해 최종적으로 이 추정각의 범위를 제안하였다.

핵심어 지표침하 발생범위, 도식법, 트러프형 침하, 함몰형 침하, 침하발생 추정각

1. 서 론

최근 국내 휴·폐광산에서의 지반침하 사례가 언론을

Received: Dec. 31, 2012

Revised: Feb. 5, 2013

Accepted: Feb. 5, 2013

*Corresponding Author: Sung-Oong Choi

Tel) +82332506253, Fax) +82332525550

E-Mail) choiso@kangwon.ac.kr

Dept. of Energy & Resource Engineering, Kangwon National University, 1 Kangwondahak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do, Korea

통해 보도되면서, 지반침하에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다. 최근 발생한 대표적인 지반침하 사례로는, 2012년 9월 충청북도 청원군 가덕면에서 발생한 지름 약 10 m, 깊이 약 20 m 규모의 함몰형 침하가 있으며, 같은 해 10월 충청북도 옥천군 청산면 농경지에서도 지름 약 5 m, 깊이 약 3 m 규모의 함몰형 침하가 발생한 바가 있다.

최근 발생한 두 침하사례 뿐만 아니라, 국내 휴·폐광산에서 발생한 침하형태는 대부분 함몰형 침하이며, 이러한 침하 형태의 경우, 침하발생 이전에 뚜렷한 징조

가 없어 발생시기를 예측하기가 어렵다. 또한 침하깊이가 비교적 얇은 트러프(trough)형 침하에 비해 함몰형 침하의 깊이는 수 m~수십 m에 달하기 때문에 도로, 철도, 주거지역 등에서 발생할 경우, 대규모의 재산 및 인명 피해를 초래할 수 있다. 따라서 지반침하에 의한 피해를 최소화하기 위해서는 주요 침하영향 인자들을 분석하여 침하발생 이전에 이를 예측하고 평가할 수 있는 능동적인 연구가 수행되어야 한다.

현재까지 국내외에서 수행되었던 지반침하에 관한 연구는 경도 및 채굴적에 의한 침하발생 메커니즘에 관한 연구를 시작으로 침하발생의 영향범위, 침하발생의 위험도 평가, 지반침하 예측평가에 이르기까지 다양하게 수행되어 왔다(김종우 외, 2004; Deb *et al.*, 2005; 최성웅 외, 2005a; 류동우 외, 2007; 한공창 외, 2007; 이희중 외, 2008; 이승중 외, 2008). 국외의 연구 사례로는 영국의 National Coal Board(1975)가 탄층의 경사, 채굴적의 높이, 채굴적의 폭을 이용하여 지표침하 영향범위를 산정하는 도식법을 제안한 바 있으며, Piggott & Eynon(1977)은 응력아치 이론을 지반침하 이론에 적용하여 채굴적 상부 암반의 붕락대의 형상과 암석의 체적 팽창률(bulking factor)로부터 붕락고를 계산할 수 있는 이론식을 제안한 바 있다. Goel & Page(1982)는 침하발생 지역의 현장조사 자료들을 이용하여 채굴심도와 채굴적의 높이가 유사한 지역에서의 침하발생 가능성을 평가하는 확률이론을 제안하였으며, Brady & Brown(1985)은 한계평형이론을 채굴에 의한 지반침하해석에 적용하여 침하에 대한 안전율을 구하고 한계 심도를 결정하고자 하였다. 이러한 연구들은 트러프형 침하 즉, 수평 또는 낮은 경사를 갖는 광체의 채굴적에서 주로 발생하는 침하형태를 대상으로 수행된 연구들이다. 하지만 국내 대부분의 광체는 극심한 지각변동을 받아 비교적 높은 경사각을 가지며 발달되었기 때문에 트러프형 침하보다는 함몰형 침하가 대부분 발생하는 것으로 보고되고 있다(최성웅 외, 2005b). 따라서 지질구조와 침하형태가 상이한 국외의 연구결과를 직접 국내 지반침하 예측평가에 적용하는 것은 바람직하지 않다.

이러한 이유로 국내 지질조건에 부합하는 지반침하 특성 분석을 위해, 최성웅 외(2005b)는 함몰형 침하 발생에 영향을 미치는 주요인자로 채굴적 공동의 폭, 상부 지반의 두께, 암종, 지하수 조건, 채굴작업이 중지된 이후의 시간, 광체의 경사 등을 제시하였으며, 이동길 외(2008)는 국내 96개 지역의 150개 침하개소에 대한 사례분석을 통하여 지반침하 발생요인과 특성을 분석하였다. 정용복 외(2008)는 채굴적을 갖는 경도의 심도만을 이용하여 지반침하위험도 평가기법을 제시하였고,

이를 영향함수법에 의한 결과와 비교분석하였다. 또한 최성웅 외(2009)는 폐광산 지역의 지반침하 발생 가능성을 예측하기 위해 퍼지추론기법을 이용하여 채굴적의 심도, 채굴적의 폭, 채굴적의 높이 등 주요 침하영향 인자들의 상관성을 분석하여 19개 퍼지법칙을 만들었으며, 이를 현장에 적용하여 침하발생 가능성을 예측한 바 있다.

이와 같은 국내의 선행 연구 중 도식법(Rom, 1964; NCB, 1975; Ren *et al.*, 1987)은 전문가가 아니라도 빠르고 간편하게 광체의 경사와 채굴적 심도를 이용하여 침하 한계각을 추정함으로써 지표에서의 영향범위를 예측할 수 있는 방법으로서 국내 지반조사 또는 지반안정성 평가시, 적용빈도가 매우 높다. 하지만 도식법에 의한 침하영향범위의 추정시, 광체의 경사가 60° 이상인 경우에는 그 적용성이 떨어진다고 보고된 바 있다(Ren *et al.*, 1989). 따라서 급경사 채굴적을 갖는 국내 폐광산에 이 방법을 적용할 경우 침하영향범위가 과대 또는 과소평가될 가능성이 매우 높다.

본 연구에서는 국내의 지질 및 지반조건에 적합한 지표침하의 발생범위를 추정하기 위하여, 도식법의 기초이론을 수정하여 이를 단순화하였고, 국내 지반침하 사례조사에 적용하여 기존의 조사결과를 재검토하였다. 또한 조사된 각 요인들의 상관성 분석을 실시하였으며, 이를 토대로 사례조사 자료에 근거한 지표침하의 최대 발생 범위를 산정하고, 이를 기존 도식법에서 제안된 한계각과 비교 및 분석하였다.

2. 지표침하 발생범위 추정을 위한 지반침하 사례분석

본 연구에서는 국내 지반침하 지역의 지표침하 발생범위 추정을 위해 한국광해관리공단에서 수행한 지반안정성 보고서 33권을 대상으로 침하지 163개소에 대한 지질 복합도와 침하지 단면을 분석하였다(MIRECO, 1997a~2009). 분석된 침하지 163개소는 침하지 단면과 광체의 방향성에 대한 정보가 비교적 양호하여 본 연구의 대상 지역으로 선정되었다.

선정된 침하지의 단면을 중심으로 광체의 경사, 채굴적 및 침하지의 위치를 조사하였으며, 국내 침하지의 지표침하 발생범위를 분석하기 위해 도식법의 기초이론을 수정 및 보완하여 본 연구에 활용하였다.

2.1 침하사례에 근거한 지표침하 발생범위의 조사방법

현재까지 널리 사용되고 있는 도식법(Rom, 1964; NCB, 1975; Ren *et al.*, 1987)은 주로 수평광체의 채굴에 의

해 발생되는 트러프형 침하지의 지표침하 발생범위를 추정하기 위해 제안된 방법으로서, 현장에서 취득이 용이한 기하학적 침하요소, 즉 채굴적의 심도, 광체의 경사, 침하지의 위치 등의 상관관계를 분석하여 통계식과 도표를 이용하여 지표침하의 발생범위를 추정한다.

이 이론에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 침하 발생지에서의 채굴적의 크기, 채굴적의 심도(D), 광체의 경사(θ)로부터 지표침하의 범위를 규정하는 한계각(ξ)의 개념을 제안하고 있으며, 따라서 이 한계각은 광체의 경사에 따라 다른 값을 가질 수 있는 것으로 정의하고 있다. 즉, 수평 광체의 경우 한 개의 한계각이 존재하나, 경사 광체의 경우 광체의 경사반대방향으로의 한계각(ξ_1)과 채굴적에서 침하지의 주향방향으로의 한계각(ξ_2), 그리고 광체의 경사방향으로의 한계각(ξ_3)이 존재하게 되며 이들 사이에는 $\xi_3 > \xi_2 > \xi_1$ 의 관계가 성립된다.

하지만 본 연구에서는 도식법으로부터 추정하고자 하는 지표침하의 영향범위가 아닌 국내 침하사례들에 근거한 지표침하의 발생범위를 추정하고자 Fig. 1의 도식

법 기초이론을 Fig. 2와 같이 단순화시켜 침하지 단면 분석에 활용하였다.

침하지 단면에 대한 조사항목은 총 6가지 항목으로서 Fig. 2에 나타난 바와 같이 채굴적의 심도(D), 채굴적의 직상부 지표면에서 광체의 경사방향으로의 침하지까지의 수평거리(H_d), 채굴적 직상부 지표면에서 광체의 경사반대방향으로의 침하지까지의 수평거리(H_u), H_d 를 정의하는 추정각(α_1), H_u 를 정의하는 추정각(α_3), 그리고 광체의 경사(θ)이다.

조사 항목 중 D 와 θ 는 침하지 단면의 축적과 각도를 이용하였으며, D 는 조사된 대부분의 보고서 상에 채굴적의 규모에 대한 정확한 정보를 포함하고 있지 않아 침하에 직접적으로 영향을 미치는 지표 인근 최상부 경도의 심도로 대체하였다. 또한 H_d 와 H_u 의 경우, 채굴적의 중심에서 지표방향으로의 수직연장선을 기준으로 조사하였다. 이때 지표면의 지형적인 조건은 분석 모델의 단순화를 위해 평평한 지표면으로 가정하였다. α_1 및 α_3 은 다음의 식 (1)과 식 (2)로부터 계산된다.

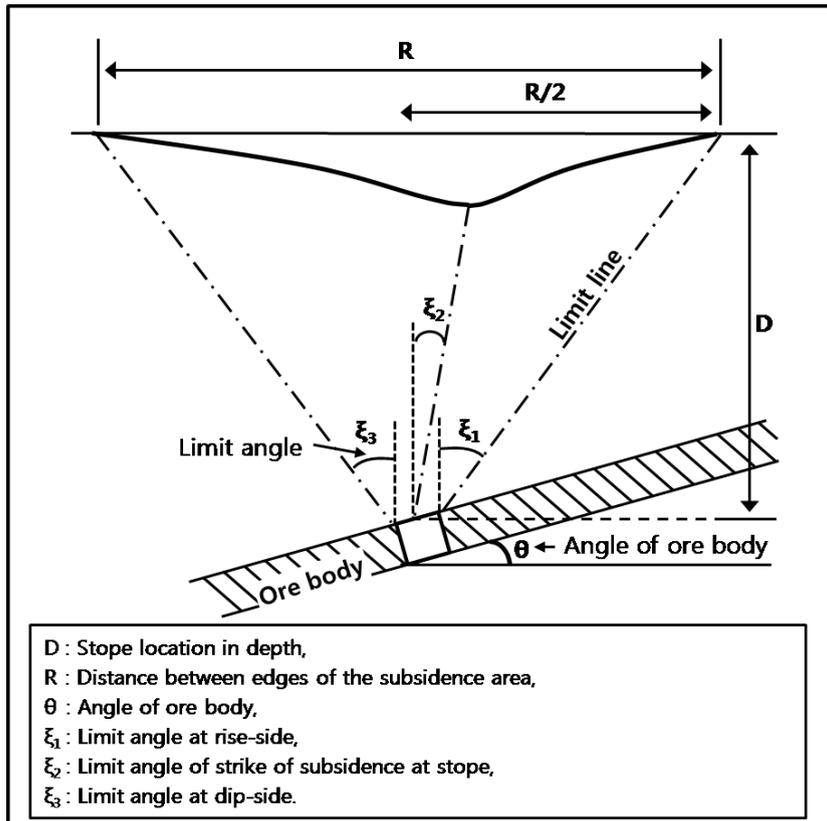


Fig. 1. Illustration of the concept for the limit angles in inclined ore body (Ren et al., 1989)

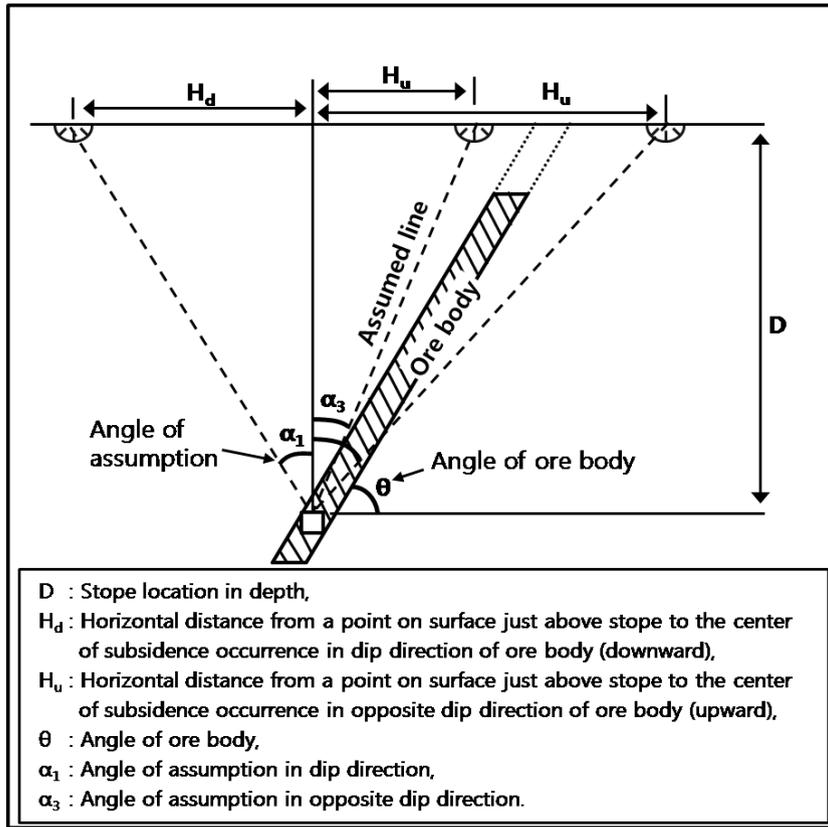


Fig. 2. Simplified conceptual model for explaining the angle of assumption in surface subsidence region

$$\alpha_{(1)} = \sin^{-1} \left(\frac{D}{\sqrt{D^2 + (H_d)^2}} \right) \quad (1)$$

$$\alpha_{(3)} = \sin^{-1} \left(\frac{D}{\sqrt{D^2 + (H_u)^2}} \right) \quad (2)$$

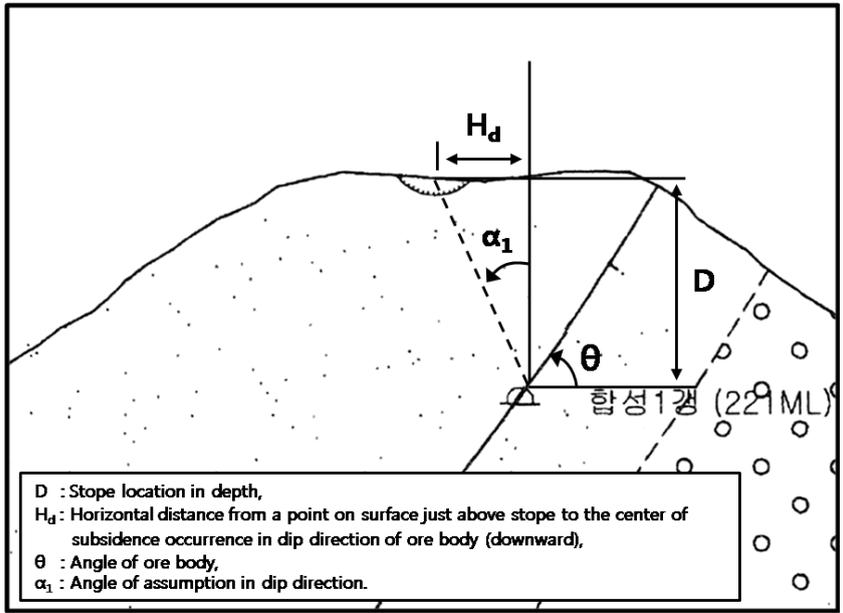
여기서 D 는 채굴적의 심도, θ 는 광체의 경사, α_1 는 채굴적의 중심에서 광체의 경사방향으로의 지표 침하지까지의 추정각, α_3 는 채굴적의 중심에서 광체의 경사 반대방향으로의 지표 침하지까지의 추정각이며, H_d 와 H_u 는 각각 α_1 및 α_3 에 의해 정의되는 지표면에서의 수평거리이다.

Fig. 3은 국내 지반침하 사례 중 충청남도 보령시 웅천읍 대룡탄광과 경상북도 봉화군 재산면 일월탄광의 침하지 단면에 대하여 Fig. 2에서 제시한 바와 같이 각 항목들을 분석한 예이다. 즉 Fig. 3(a)의 대룡탄광 침하지 단면은 채굴적을 기준으로 광체의 경사방향으로의 지표면에 침하지가 나타나고 있어 단면으로부터 측정된 H_d 와 D 값을 식 (1)에 대입하여 α_1 의 값을 산정할 수 있

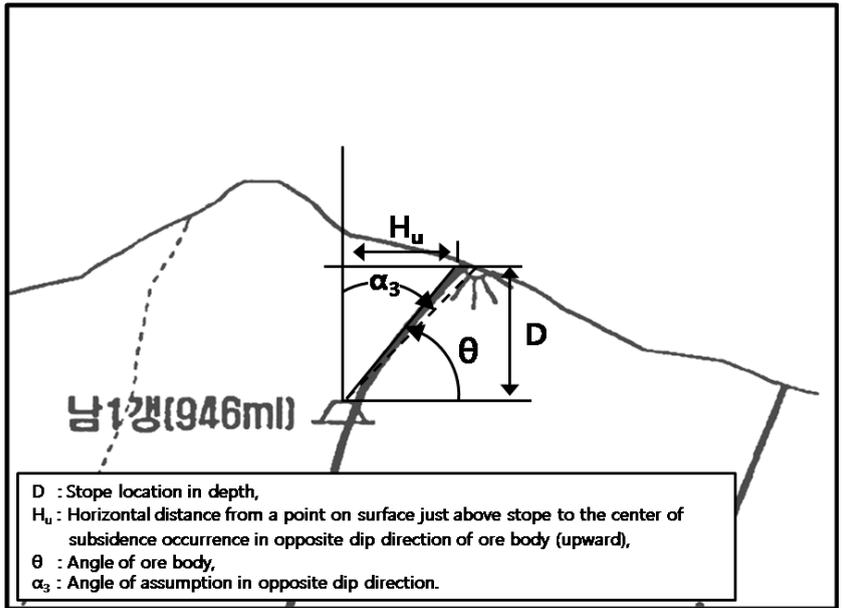
Table 1. Subsidence parameter obtained from the cross section analysis

	Dae-ryung coal mine	Il-wol coal mine
D (m)	60	75
H_d (m)	60	-
H_u (m)	-	20
θ (°)	50	32
α_1 (°)	45	-
α_3 (°)	-	15

* D : Stope location in depth,
 H_d : Horizontal distance from a point on surface just above stope to the center of subsidence occurrence in dip direction of ore body (downward),
 H_u : Horizontal distance from a point on surface just above stope to the center of subsidence occurrence in opposite dip direction of ore body (upward),
 θ : Angle of ore body,
 α_1 : Angle of assumption in dip direction of ore body,
 α_3 : Angle of assumption in opposite dip direction of ore body.



(a) Dae-ryung coal mine (MIRECO, 2006c)



(b) Il-wol coal mine (MIRECO, 2005d)

Fig. 3. Examples of cross-sectional view on the subsidence occurrence area

다. 반면 채굴적을 기준으로 광체의 경사반대방향으로의 지표면에 침하지가 나타나는 일월탄광의 경우에는 Fig. 3(b)에서와 같이 H_u 와 D 를 이용하여 식 (2)로부터 α_3 를 산정할 수 있을 것이다. 본 연구에서 단면 분석의

예시로 사용된 대룡탄광과 일월탄광의 침하지 단면 분석 결과는 Table 1에서와 같이 요약할 수 있으며 동일한 방법으로 33개의 국내 지반안정성 조사보고서를 분석하여 총 163개소의 침하지에 대한 단면 분석을 수행하였다.

2.2 조사 및 분석 결과

침하지 163개소에 대한 분석 결과는 각 침하발생 위치별 침하발생 빈도와 각 침하지의 위치에 따라 계산되는 지표침하 발생범위에 대한 $\alpha(\alpha_1, \alpha_3)$ 를 중심으로 다음과 같이 정리하였다.

2.2.1 지표침하 발생 위치에 따른 침하발생 빈도

Table 2는 지표침하 발생위치에 따른 침하발생 빈도를 채굴적 직상부를 기준으로 하여 수평거리 20 m 간격으로 정리한 것이다. 채굴적의 직상부에서 발생한 침하의 수평거리 범위는 반경 5 m 범위로 정하였으며, 이

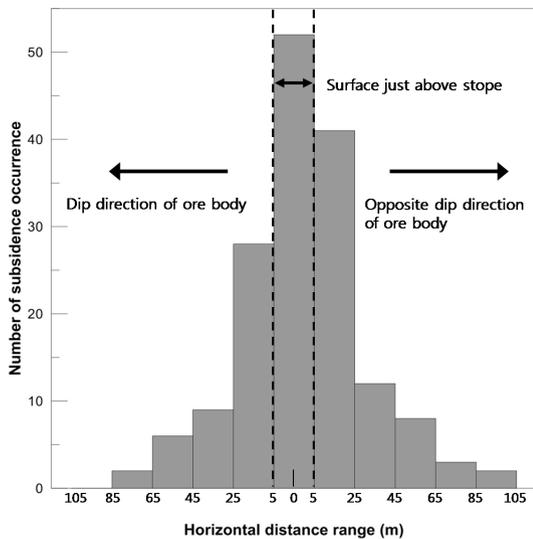


Fig. 4. Distribution pattern of subsidence occurrence with respect to horizontal distance range

를 기준으로 광체의 경사방향으로의 지표면에서 발생한 침하지와 광체의 경사 반대방향으로의 지표면에서 발생한 침하지로 구분하였다.

조사된 전체 침하지의 분포 특성을 분석해 보면 Fig. 4에 나타난 바와 같이 채굴적 직상부 지표면에서 수평거리가 멀어질수록 침하발생 빈도가 낮아지는 것으로 분석되었다. 또한 채굴적의 직상부 인근 지표면에서 반경 25 m 범위 내에 121개소에서 침하가 발생된 것으로 분석되었으며, 이는 과반수 이상인 74.23%의 비율을 차지한다.

각 침하위치별 침하 발생 비율은 광체의 경사반대방향으로의 지표지, 채굴적 직상부의 지표지, 광체의 경사방향으로의 지표지 순으로 각각 40.49%, 31.90%, 27.61%의 비율을 나타내었다. 광체의 경사반대방향으로의 지표지에서 침하발생 비율이 가장 높게 나타나는 이유는 국내 광체의 부존 특성, 즉 45° 이상의 급경사를 갖는 부존 특성으로 인하여 채굴에 의해 취약해진 상반 혹은 지표까지 연장된 광체가 광체경사의 반대방향 지표면에서 채굴적 방향으로 광체의 경사를 따라 발생된 침하가 대부분이기 때문인 것으로 사료된다. 또한 조사된 침하지 163개소 중 15개소의 침하지를 제외한 나머지 138개소의 침하지는 모두 석탄광에서 발생된 것으로서 퇴적 광상의 성인 특성상 탄층과 주변 지층 간의 분리가 쉽게 발생되어 지표면에서 채굴적 방향, 즉 탄층의 경사방향으로 발생하는 침하에 유리하게 작용했을 것으로 판단된다.

2.2.2 α_1 과 θ 의 관계

θ 에 따른 지표침하 발생범위 α 는 앞서 조사방법에서 서술한 바 있듯이 α_1 과 α_3 로 구분하여 분석하였다.

먼저 α_1 과 θ 의 관계를 분석해 보면 침하지 163개소에서 조사된 θ 는 30~80°의 범위에 분포하며, 이에 따른

Table 2. Subsidence occurrence rates in each surface area

Horizontal distance range (m)	in dip direction (downward) of ore body		at a point on surface just above stope		in opposite dip direction (upward) of ore body		Total	
	N_s	D_s (%)	N_s	D_s (%)	N_s	D_s (%)	N_s	D_s (%)
≤ 5	-	-	52	31.90	-	-	52	31.90
6 ~ 25	28	17.18	-	-	41	25.15	69	42.33
26 ~ 45	9	5.52	-	-	12	7.36	21	12.88
46 ~ 65	6	3.68	-	-	8	4.91	14	8.59
66 ~ 85	2	1.23	-	-	3	1.84	5	3.07
86 ~ 105	0	0.00	-	-	2	1.23	2	1.23
Total	45	27.61	52	31.90	66	40.49	163	100.00

* N_s : Number of subsidence occurrence,
 D_s : Subsidence probability density.

α_1 의 범위는 약 5~45°까지 분포하는 것으로 나타났다.

α_1 을 θ 에 따라 Table 3에서와 같이 구간별로 분석해 보면 광체 경사각 0~45°의 범위 내에서는 θ 를 따라 α_1 의 분산도가 크게 나타나 뚜렷한 경향을 보이지 않지만(Fig. 5의 ①), 45° 이상의 범위에서는 α_1 의 분산도가 작게 나타나 θ 값이 90°가 되면 0°에 가깝게 수렴하는 경향을 보임을 알 수 있다(Fig. 5의 ②). 이는 각 구간별로 조사된 침하지 표본의 양적인 문제일 수도 있지만 도식법 이론의 지표침하 영향범위와 비교해 볼 때, θ 가 45° 이상인 경우 θ 가 커질수록 ξ_3 는 작아지며 이로 인해 지표침하 영향범위

가 작게 분석되는 것과 유사한 결과를 보여준다.

결과적으로 국내 지표침하 발생범위 중 채굴적 중심에서 광체 경사방향의 지표면까지 발생하는 α_1 의 범위는 Fig. 5와 같으며, 본 연구의 목적인 함몰형 침하의 최대 발생범위를 추정하고자 각 광체의 경사각에서 분석된 α_1 의 최대값들을 포함할 수 있는 이차함수의 상한 포물선으로 그 범위를 제한하였다.

2.2.3 α_3 와 θ 의 관계

α_3 와 θ 의 관계를 정리하면 Table 4에 나타낸 바와 같

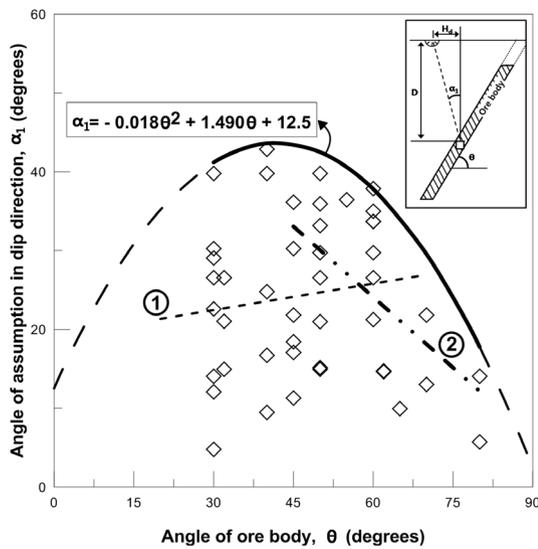


Fig. 5. Relationship between θ and α_1 in dip direction of ore body

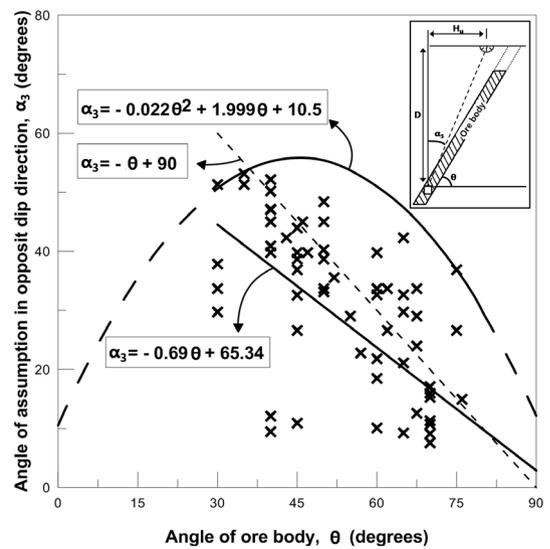


Fig. 6. Relationship between θ and α_3 in opposite dip direction of ore body

Table 3. Distribution of assumption angle in dip direction with respect to ore body angle

Range of ore body angle (°)	Range of assumption angle in dip direction (°)			Total
	0 ~ 15	16 ~ 30	31 ~ 45	
0 ~ 45	6	10	6	22
46 ~ 90	7	8	8	23
Total	13	18	14	45

Table 4. Distribution of assumption angle in opposite dip direction with respect to ore body angle

Range of ore body angle (°)	Range of assumption angle in opposite dip direction (°)				Total
	0 ~ 15	16 ~ 30	31 ~ 45	45 ~ 60	
0 ~ 45	3	2	13	8	26
46 ~ 90	9	13	17	1	40
Total	12	15	30	9	66

은데 여기서 α_3 은 Fig. 6에서와 같이 조사된 θ 의 범위 내에서 약 5~55°의 범위를 나타내는 것으로 분석되었다. θ 에 따라 뚜렷한 경향이 없었던 α_1 과는 달리 α_3 은 θ 가 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 직선 추세선의 연장선을 보아 알 수 있듯이 θ 가 90°로 수렴할 때 α_3 은 약 3°, 즉 채굴적 직상부 인근 지표면에서 침하가 발생하는 것을 나타내고 있다. 이는 광맥 자체가 중력이나 지층의 분리현상으로 인하여 채굴적의 수직 방향으로 밀려 내려가는 전형적인 함몰형 침하가 발생하는 경우로 볼 수 있다.

Fig. 6 내의 개념도에서 보듯이 광체의 경사각, θ 와 침하발생범위의 추정각, α_3 의 합은 90°를 넘을 수 없는 기하학적 형상을 나타내고 있지만 점선으로 표현된 직선의 추세선의 상부영역은 그 이상의 범위, 즉 광체의 상반에서 발생한 지표침하가 아닌 하반에서 발생한 것을 확인할 수 있다. 이러한 양상은 본 연구에서 고려하고 있지 않은 불연속면의 방향성에 의한 것으로 판단된다. 침하에 직접적인 영향을 미치는 단층 및 절리군 등의 불연속면이 지하 채굴적까지 연결될 경우, 광체의 경사각에 의한 영향보다 불연속면을 따라 침하가 발생할 확률이 높기 때문이다. 따라서 정확한 지표침하 발생범위 추정을 위해서는 본 연구에서 분석된 α_3 와 함께 해당 침하지에서의 불연속면의 분포특성에 관한 조사가 추가로 필요할 것이라 사료된다.

결과적으로 침하지 66개소에 의해 분석된 α_3 의 최대 범위는 Fig. 6에서와 같이 상한 포물선으로 제한할 수 있다.

2.2.4 국내 지표침하 발생범위 산정을 위한 추정각의 범위

국내 지표침하 발생범위 산정을 위해 분석된 α_1 과 α_3 은 30~80° 범위의 광체의 경사각에 대해 식 (3)과 식

Table 5. $\alpha_{1,max}$ and $\alpha_{3,max}$ with ore body angle

Angle of ore body (°)	$\alpha_{1,max}$ (°)	$\alpha_{3,max}$ (°)
30	41.18	50.65
40	43.62	53.49
50	42.50	55.24
60	40.61	55.42
70	29.58	47.45
80	17.18	29.57

* $\alpha_{1,max}$: Maximum angle of assumption in dip direction
 $\alpha_{3,max}$: Maximum angle of assumption in opposite dip direction

(4)로부터 각각 산정할 수 있으며, 각 광체의 경사각에 따른 두 추정각의 최대 범위는 Table 5에 제시한 바와 같다. 정확한 지표침하 발생범위를 추정하기 위하여 추가적인 침하사례 분석이 수행된다면 α_1 과 α_3 의 최대 범위를 더욱 명확히 규명할 수 있을 것이다.

$$\alpha_1 = -0.0178\theta^2 + 1.49\theta + 12.5 \tag{3}$$

$$\alpha_3 = -0.022\theta^2 + 1.9984\theta + 10.5 \tag{4}$$

여기서 α_1 과 α_3 , 그리고 θ 의 단위는 degree이다.

3. 고찰 및 토의

Fig. 7 및 Fig. 8은 트러프형 침하의 지표침하 영향범위 추정에 이용되는 도식법의 $\xi(\xi_3, \xi_1)$ 와 국내 함몰형 침하지로부터 분석된 지표침하 발생범위 $\alpha(\alpha_1, \alpha_3)$ 를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 7 및 Fig. 8로부터 알 수 있듯이 도식법의 ξ_3 와 비교할 수 있는 α_1 은 유사한 형태의 포물선 추세선을 나타내고 있지만 두 각은 최대 약 20°정도의 차이를 나타낸다(Fig. 7). 하지만 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 ξ_1 과 α_3 의 최대 범위를 나타내는 상한 포물선은 서로 역전된 형태를 보이고 있다. 이러한 양상은 두 방법의 접근법에 차이가 있기 때문에 나타난 결과로 설명될 수 있을 것이다. 즉, 도식법은 본래 침하가 발생된 중심을 기준으로 침하지의 좌우측의

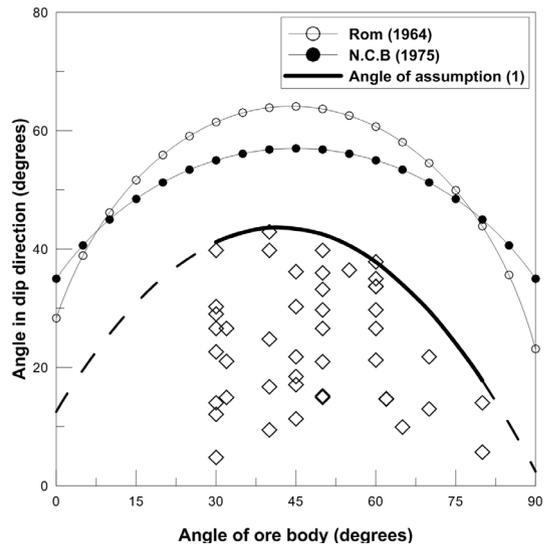


Fig. 7. Comparison between ξ_3 and α_1 with respect to θ

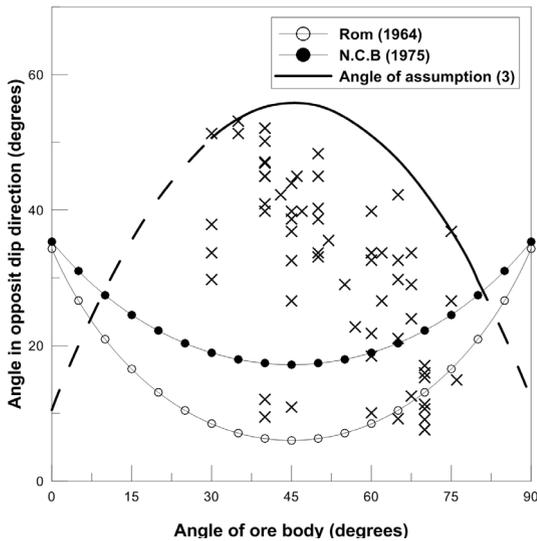


Fig. 8. Comparison between ξ_1 and α_3 with respect to θ

영향범위를 산정하기 위해 제안된 방법이지만, 본 연구에서는 이 도식법을 응용하여 침하영향범위가 아닌 국내에서 발생한 함몰형 침하 발생범위를 규명하기 위해 채굴적의 중심에서 함몰형 침하가 발생한 위치를 조사하여 α 를 도출하였기 때문이다. 결과적으로 본 연구의 접근 방법은 함몰형 침하의 발생범위 추정을 위한 방법으로서 기존 도식법의 산출방식과 차이가 있기 때문에 특정 지역의 침하지에 대한 분석시 유의할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 지표침하 발생범위의 추정을 위하여 지표침하 영향범위 추정시 사용빈도가 높은 도식법의 기초이론을 연구 목적에 맞게 수정 및 단순화하였으며, 한국광해관리공단에서 발표한 총 33개의 지반침하 보고서를 표본조사하여 전체 163개소의 침하발생 지점에 적용하여 침하사례 조사를 실시하였다. 침하사례 조사 결과에 대하여 침하위치별 침하발생빈도와 $\alpha(\alpha_1, \alpha_3), \theta$ 를 중심으로 분석을 수행하였으며, 본 연구에서 기초이론을 활용한 도식법과 분석결과를 비교하였다.

본 연구에서 수행한 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 채굴적의 직상부에서 수평거리가 멀어질수록 침하 발생빈도가 낮아지며 채굴적 직상부 인근 지표면의 반경 25 m 범위 내에서 전체 침하지 중 74.21%의

침하가 발생하는 것을 확인하였다. 또한 채굴적 직상부 인근이나 θ 방향에 비해 θ 반대방향에서 높은 침하발생 비율을 나타내고 있으며, 이는 채굴에 의해 취약해진 상반 혹은 지표까지 연장된 광체의 영향인 것으로 분석되었다.

2. α_1 은 $0 \sim 45^\circ$ 의 θ 의 범위에서 큰 분산도를 나타내며 뚜렷한 경향을 보이지 못했으나 45° 이상의 범위에서는 θ 가 90° 일 때 작은 분산도를 보이며 0° 에 가깝게 수렴하는 경향을 보인다. 이는 본 연구에서 기초이론을 활용한 도식법의 ξ_3 의 경향과 일치하는 결과이다.
3. α_3 는 θ 의 증가에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 나타내고 있으며 θ 와 α_3 의 합이 90° 이상인 하반에서 발생한 침하의 경우 본 연구에서 고려하지 않은 불연속면이 채굴적에 직접적인 영향을 미쳤기 때문이라 분석된다.
4. 국내 166개소의 침하사례 분석결과를 근거로 한 α_1, α_3 의 최대 범위는 θ 가 $30 \sim 80^\circ$ 의 범위 내에 있을 경우 $\alpha_1 = -0.018\theta^2 + 14.9\theta + 12.5$ 및 $\alpha_3 = -0.022\theta^2 + 1.998\theta + 10.5$ 로부터 구해질 수 있다.
5. α_1, α_3 의 침하발생 최대 범위를 나타내는 포물선 추세선과 Rom(1964), N.C.B(1975)의 ξ_3, ξ_1 과 비교분석해 본 결과, α_1 의 포물선 추세선과 ξ_3 는 유사한 형상이지만 약 20° 의 차이를 나타내며 α_3 과 ξ_1 는 서로 역전된 형태를 보임을 알 수 있다. 이러한 양상은 도식법과 본 연구의 방법은 분석 대상이 다르고 접근 방법에 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 분석결과를 이용하여 국내 석탄광 지역에서의 함몰형 침하의 발생범위를 추정할 경우, 도식법을 비롯한 국외의 지표영향 범위를 추정하는 방법들에 비해 국내의 광체부존특성에 더 잘 부합하는 결과를 산출할 것으로 사료된다. 본 연구는 국내 지표침하 발생범위에 관한 기초 연구로서 불연속면, 지표지형 등에 대한 고려가 생략되었고 조사된 침하지의 90% 이상이 석탄광이었기 때문에 복잡한 지표지형과 불연속면이 분포되어있는 지역 또는 광상이 맥(vein)의 형태가 아닌 광산에 적용할 때, 본 연구의 추정각을 이용하여 침하 발생범위를 추정할 경우 높은 적용성을 기대하기 힘들다. 그러나 향후 다양한 광종의 침하지에 대한 추가적인 사례연구와 불연속면, 지표지형 등의 지질학적인 요인들에 대한 종합적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Brady, B. H. G. & Brown, E. T., 1985, Rock mechanics for underground mining, George Allen & Unwin., 527.
2. Kim, J. W., Jeon, S. W. and Suh, Y. H., 2004, A study on the effect of underground openings on the stability of surface structures using scaled model tests, Tunnel & Underground Space, 14, 1, 43-53.
3. Choi, S. O., Kim, J. D. and Choi, G. S., 2009, Application of fuzzy reasoning method for prediction of subsidence occurrences in abandoned mine area, Tunnel & Underground Space, 19, 5, 463-472.
4. Choi, S. O., Jeon, Y. S., Park, E. S., Jung, Y. B. and Chun, D. S., 2005a, Analysis of subsidence mechanism and development of evaluation program, Tunnel & Underground Space, 15, 3, 195-212.
5. Choi, S. O., Shin, H. S. and Deb D., 2005b, Possibility analysis of sinkhole occurrences over abandoned mine area using fuzzy reasoning techniques, Symposium of ground subsidence survey, design and construction, Korea Institute of Geoscience, and Mineral Resources, 113-125.
6. Deb, D., Choi, S. O. and Shin, H. S., 2004, Analysis of sinkhole formation over abandoned mine using active-passive-active finite elements, Tunnel & Underground Space, 14, 6, 411-422.
7. Goel, S. C. and Page, C. H., 1982, An empirical method for predicting the probability of chimney cave occurrence over a mining area, Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. & Geomech. Abst., 19, 6, 325-337.
8. Han, K. C., Cheon, D. S., Ryu, D. W. and Park, S. G., 2007, Analysis of ground subsidence on Gyochon residential region of Muan city, Tunnel & Underground Space, 17, 1, 66-74.
9. Jung, Y. B., Song, W. K. and Kang, S. S., 2008, Development of subsidence hazard estimation method based on the depth of gangway, Tunnel & Underground Space, 18, 4, 272-279.
10. Lee, D. K., Jo, Y. D., Jung, Y. B. and Song, W. K., 2008, Characteristics analysis of mine subsidence in Korea by case investigation, KIGAM Bulletin, 12, 1, 1-10.
11. Lee, H. J., Jung, Y. B. and Choi, S. O., 2008, An experimental study on the bulking factor of rock mass for subsidence behavior analysis, Tunnel & Underground Space, 18, 1, 33-43.
12. Lee, S. J., Jung, Y. B. and Choi, S. O., 2008, A study on the volumetric expansion ratio of rock mass for subsidence behavior analysis II, Tunnel & Underground Space, 18, 6, 436-446.
13. MIRECO, 1997a, Basic survey report of ground stability on Jeomchon region.
14. MIRECO, 1997b, Basic survey report of ground stability on Simpo-ri region.
15. MIRECO, 1998, Basic survey report of ground stability on Gangneung region.
16. MIRECO, 1999, Detailed survey report of ground stability on Simpo-ri region.
17. MIRECO, 2000a, Basic survey report of ground stability on Samsu region.
18. MIRECO, 2000b, Basic survey report of ground stability on Sinseong region.
19. MIRECO, 2001a, Basic survey report of ground stability on Hwadong region.
20. MIRECO, 2001b, Basic survey report of ground stability on Oesan region.
21. MIRECO, 2002a, Basic survey report of ground stability on Hoge region.
22. MIRECO, 2002b, Basic survey report of ground stability on Nongam region.
23. MIRECO, 2003, Basic survey report of ground stability on Goyo region.
24. MIRECO, 2004a, Basic survey report of ground stability on Buk-myeon region.
25. MIRECO, 2004b, Basic survey report of ground stability on Jeongam region.
26. MIRECO, 2004c, Basic survey report of ground stability on Mitan region of Jungdong district.
27. MIRECO, 2005a, Basic survey report of ground stability on Macha region of Yeongwol distirct.
28. MIRECO, 2005b, Basic survey report of ground stability on Misan region.
29. MIRECO, 2005c, Basic survey report of ground stability on Mungok region.
30. MIRECO, 2005d, Basic survey report of ground stability on Oeoo and Jaesan region.
31. MIRECO, 2005e, Basic survey report of ground stability on Wangsan region.
32. MIRECO, 2006a, Basic survey report of ground stability on Buljeong region of Mungyeong city.
33. MIRECO, 2006b, Basic survey report of ground stability on Hongsan region of Buyeo district.
34. MIRECO, 2006c, Basic survey report of ground stability on Ungcheon region of Boryeong city.
35. MIRECO, 2006d, Detailed survey report of ground stability on Buk-myeon region of Jeongseon district.
36. MIRECO, 2007a, Basic survey report of ground stability on Boryeong mine.
37. MIRECO, 2007b, Basic survey report of ground stability on Bukpyeong region of Jeongseon district.
38. MIRECO, 2007c, Basic survey report of ground stability on Dojik region of Gangneung city.
39. MIRECO, 2007d, Basic survey report of ground stability on Gangdong region of Gangneung city.
40. MIRECO, 2007e, Basic survey report of ground stability on Hadong region of Yeongwol district.
41. MIRECO, 2007f, Basic survey report of ground stability on Nam-myeon region of Jeongseon district.
42. MIRECO, 2007g, Basic survey report of ground stability on Nawon region of Boryeong city.
43. MIRECO, 2007h, Basic survey report of ground stability on Yeonsu copper mine.
44. MIRECO, 2007i, Basic survey report of ground stability on Deoksang region of Danyang district.

45. MIRECO, 2008, Basic survey report of ground stability on Cheongyang mine.

46. MIRECO, 2009, detailed survey report of ground stability on Cheongseong region.

47. National Coal Board, 1975, Subsidence Engineer's Handbook, National Coal Board Mining Department, London, 111.

48. Piggott, R. T. and Eynon, P., 1977, Ground movements arising from the presence of shallow abandoned mine workings, In Large Ground Movements & Structures, Pentech, 749-780.

49. Ren, G., Reddish, D. J. and Whittaker, B. N., 1987, Mining subsidence and displacement prediction using influence function methods, Mining Science and Technology, 5, 89-104.

50. Ren, G., Reddish, D. J. and Whittaker, B. N., 1989, Mining subsidence and displacement prediction using influence function methods for steep seams, Mining Science and Technology, 8, 235-252.

51. Rom, H., 1964, A limit angle system, Mitt. Markscheidew., 71, 197-199.

52. Ryu, D. W., Synn, J. H., Song, W. K., Kim, T. K. and Park, J. Y., 2007, A study on the evaluation method of subsidence hazard by a diffusion equation and its application, Tunnel & Underground Space, 17, 5, 372-380.

김 병 렬

2012년 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 공학사



Tel: 033-255-6253
E-mail: shingcore@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 에너지·자원공학과 대학원 석사과정

이 승 중

2007년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사
2009년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학석사



Tel: 033-255-6253
E-mail: lhj3601@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 박사과정

최 성 응

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



Tel: 033-250-6253
E-mail: choiso@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 교수