TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol. 23, No. 5, 2013, pp. 392-400
http://dx.doi.org/10.7474/TUS.2013.23.5.392
ISSN: 1225-1275(Print)
ISSN: 2287-1748(Online)

지반침하 발생지역에서의 절리군의 방향성과 침하발생 위치의 상관관계에 관한 연구

김병렬, 이승중, 최성웅*

A study on the Correlation Between Orientation of Joint Sets and Location of Subsidence Zone in Subsidence Area

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

Abstract Joint sets should be considered as an influence factor, when location of subsidence zone by stopes is predicted. And the mechanical properties and distribution patterns of joint set above stopes may be affecting subsidence occurrence. In this study, therefore, the orientation of joint sets is reanalyzed with the data from the previous research on prediction of defining the subsidence zone. From a correlated analysis, the influence of major joint set(J_1) on subsidence location was analyzed by comparing the angle of assumption with the angle of major joint set(J_1).

Key words Location of subsidence zone, Angle of assumption, Orientation of joint set

초 록 채굴적에 의한 지표에서의 지반침하발생 위치를 추정함에 있어, 절리군은 필수적으로 고려되어야하는 요소 중의 하나인 바, 각 절리군의 역학적 특성과 이들이 채굴적 상부 암반에 분포하는 양상은 지반침하발생을 가속시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 침하발생 범위의 추정에 관한 선행연구의 근거자료로 이용된 자료 중 절리군의 방향성에 대한 조사정보의 신뢰성이 비교적 양호한 자료들을 선별하여 절리군의 방향성을 중심으로 지반침하 발생위치와의 상관관계를 재검토하였으며, 추정각과 침하 지역에 분포하는 주절리군 J_1의 경사각을 비교하여 주절리군 J_1이 침하에 미치는 영향을 분석하였다.

핵심어 지반침하발생 위치, 추정각, 절리군의 방향성

1. 서 론

최근 지하자원의 가치가 중요시되고 있고 일부 국가들의 자원민족주의가 대두되면서, 전 세계적으로 광물자원의 자주개발에 대한 관심이 높아지고 있으며, 국내에서도 해외자원개발, 국내 폐광산의 재개광 등의 노력을 기울이고 있다.

그러나 국내 광산들의 광물의 보유량 감소 및 해외의 대규모 기업형 광산의 출현으로 인한 광산개발의 경제성 저하로 인하여 휴·폐광산들이 증가하고 있는 추세이다. 이런 휴・폐광산들은 휴·폐광 이후 미흡한 광산복원과 관리감독의 소홀 등으로 인하여, 광산지역에 심각한 지반침하를 야기하고 있다.

국내에서 발생되는 대부분의 침하형태는 함몰형 침하이며, 이러한 함몰형 침하는 발생 이전에 뚜렷한 징조가 없으며, 수 m ~ 수십 m의 깊이를 갖기 때문에, 도로, 철도 등의 교통시설과 주거지역에서 침하가 발생할 경우, 대규모의 재산 및 인명 피해를 초래할 수 있다. 따라서 함몰형 침하로 인한 피해를 최소화하기 위해서는, 침하발생에 영향을 미치는 주요 인자들을 분석하여 침

Received: Oct. 7, 2013
Revised: Otc. 28, 2013
Accepted: Oct. 28, 2013
***Corresponding Author:** Sung-Oong Choi
Tel) +82332506253, Fax) +82332556253
E-Mail) choiso@kangwon.ac.kr
Dept. of Energy & Resources Engineering, Kangwon National University, 1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do 200-701, Korea

하발생 이전에 이를 예측하고 위험도를 평가할 수 있는 능동적인 연구가 수행되어야 한다.

현재까지 국내외에서 수행되었던 지반침하에 관한 연구는 광산의 지하갱도 및 채굴적에 의한 침하발생 메커니즘에 관한 연구에서 침하발생의 영향요인, 침하발생의 영향범위, 침하발생의 위험도 평가, 지반침하 발생시기 및 지역의 예측에 이르기까지 다양하게 수행되어 왔다(National Coal Board, 1975; Piggott and Eynon, 1977; Brady and Brown, 1985; 김종우 외, 2004; 최성웅 외, 2005a; 류동우 외, 2007; 한공창 외, 2007; 이희중 외, 2008; 이승중 외, 2008).

이러한 연구사례들 중 국외의 사례들은 트러프형 침하를 예측하고 평가하기 위한 연구들이며, 국내와 상이한 지질구조를 갖는 지역을 연구 대상으로 하기 때문에, 함몰형 침하가 대부분 발생하는 것으로 보고되어있는 국내의 지반침하 예측평가에 직접적으로 적용하는 것은 바람직하지 않다(최성웅 외, 2005b).

이러한 이유로 국내 지질조건에 부합하는 함몰형 침하의 특성 분석을 위해, 최성웅 외(2005b)는 함몰형 침하발생에 영향을 미치는 주요인자를 제시하였으며, 정용복 외(2008)는 채굴적의 심도만을 이용하여 지반침하 위험도 평가기법을 제시하고, 영향함수법에 의한 결과와 비교분석하였다. 또한 최성웅 외(2009)는 퍼지추론기법을 이용하여 주요 침하영향 인자들의 상관성을 분석하여 19개 퍼지법칙을 만들고, 이를 현장에 적용하여 침하발생 가능성을 예측한 바 있으며, 김병렬 외(2013)는 도식법의 기초이론을 수정하여 국내 폐광산 지역의 침하지에 대한 사례분석을 실시하였으며, 이를 근거자료로 하여 최대 침하발생 범위를 추정하였다.

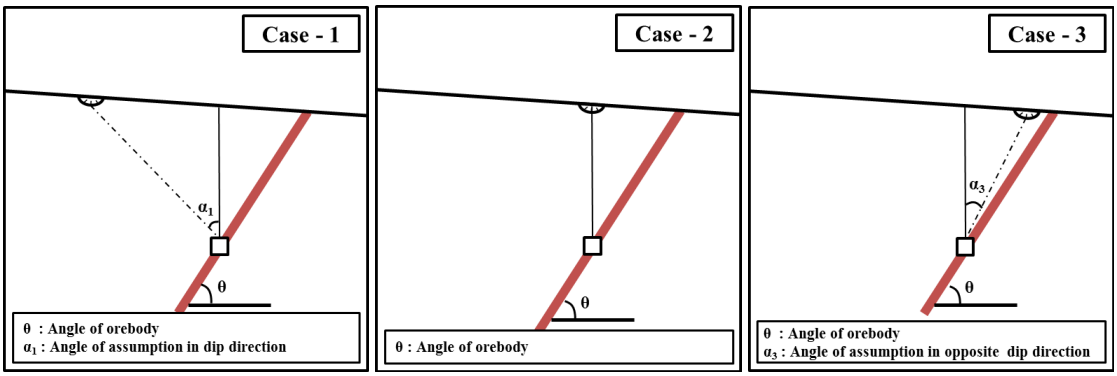
본 연구에서는 절리군의 방향성과 침하발생 위치의 상관관계를 분석하기 위하여, 김병렬 외(2013)의 최대 침하발생 범위 추정시 활용되었던 기초자료와 침하발생 위치를 정의하는 추정각(α)의 개념을 이용하였다. 선행연구의 기초자료 중 절리군의 방향성에 대한 조사정보의 신뢰도가 비교적 양호한 자료들을 선별하여 연구 목적에 맞게 재검토하였으며, 이를 추정각과 비교하여 주절리군 J_1의 경사각이 침하발생에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 지반침하사례조사 및 분석

침하발생 위치와 절리군의 방향성의 상관관계를 분석하기 위해 한국광해관리공단의 지반안정성 보고서 11개를 조사하였다(MIRECO, 1998~2009). 본 보고서들은 선행연구(김병렬 외, 2013)에서 활용되었던 33개 보고서 중 침하지역의 절리군에 대한 조사정보의 신뢰도가 비교적 양호한 보고서를 선별한 것이다.

선별된 총 11개의 지반안정성 보고서의 침하지는 75개소로서, ISRM(1978)에서 제안하고 있는 절리군의 정량적 기재에 관한 지침(절리군의 방향, 간격, 연속성, 거칠기, 벽면강도, 간극 충전물, 용수, 절리군의 수, 블록크기)을 준수하여 각 침하지 지역에 대한 절리군의 특성을 조사하고자 하였다. 그러나 지반안정성 보고서상에 기재되어있는 절리군에 대한 조사는 지표면상의 노두 또는 암반사면에 국한되어 조사된 자료들이 대부분이고, 지침에서 제시하고 있는 일부 조사항목들만이 조사되었기 때문에 전체 보고서에 대한 일관성 있는 자료취득이 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 자료의 형평성을 고려하여 대다수의 보고서상에 명확하게 제시되어 있는 절리군의 방향성만을 고려하여 지반침하발생 위치에 절리군이 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 침하발생 위치와 절리군의 방향성의



(a) Case-1 (b) Case-2 (c) Case-3

Fig. 1. Three case categories for location of subsidence occurrence (modified from Kim et al., 2013)

상관관계를 분석하기 위해, 침하발생 위치를 기준으로 세 가지 Case로 분류하였으며 침하지 단면상의 절리군에 대한 경사보정을 수행하였다.

Fig. 1과 같이 보고서 내의 침하지 단면을 이용하여 침하지를 3개의 Case로 분류하였다. 각각의 Case에서 확인할 수 있듯이, 채굴적의 직상부를 기준으로 광체의 경사방향에 존재하는 침하지(Case-1), 채굴적 직상부에 위치하는 침하지(Case-2), 광체의 경사반대방향에 존재하는 침하지(Case-3)로 정의된다.

절리군의 경사에 대한 보정은 침하지 단면을 중심으로 수행되었으며, 보고서상에 기록된 절리군의 진경사를 위경사로 변환하였다. 또한 채굴적 상부에 존재하는 단일 절리군이 지표에서 연장되어 채굴적을 관통하는 형상일 때 침하에 가장 큰 영향을 미치기 때문에 모든 채굴적 상부의 절리군이 채굴적을 관통하는 형상인 것으로 가정함으로써 분석상의 오차범위를 최소화하고자 하였다.

3. 침하발생 위치와 절리군의 방향성의 상관관계

절리군의 방향성과 침하발생 위치의 상관관계를 분석하기 위해 각 Case별로 침하지를 분류하였으며, 각 침하지역에 분포하고 있는 주절리군 중 가장 높은 집중도를 갖고 연속성이 우세한 주절리군 J_1을 분석에 이용하였다.

Table 1은 총 75개소에 대한 침하지를 각 Case 별로 주절리군 J_1과 광체의 경사방향에 대한 차이를 분석한 결과이다. 각 Case 중 Case-3에 해당하는 침하지는 50개소로서 전체 66.67%의 가장 큰 비율을 나타냈으며, Case-1, Case-2의 순으로 각각 21.33%, 12.00%의 침하발생 비율을 나타냈다.

광체의 경사반대방향에 침하지가 존재하는 Case-3의 침하지들의 경우, Case-1 및 Case-2의 침하지들과 달리 광체의 부존 특성에 큰 영향을 받는다. 즉 광체의 생성과정에서 형성되는 절리, 층리 등 지질학적 선구조에 의해 발생될 수 있는 침하형태와 지표까지 연장된 광체가 광체의 경사방향으로 미끄러져 발생되는 침하형태 등이 다른 Case 보다 많기 때문이다.

본 연구에 조사된 대부분의 침하지 단면은 광체의 주향을 기준으로 수직하게 자른 2차원적 단면이 대부분이기 때문에, Fig. 2와 같이 광체의 경사방향과 주절리군 J_1의 경사방향 차이를 비교하여 주절리군 J_1이 침하에 영향을 미칠 수 있는 지질학적 구조의 상관성을 분석하였다.

Table 1에 나타낸 바와 같이, 광체의 경사방향과 주절리군 J_1의 경사방향의 차이를 30° 간격으로 범위를 설정하여 각 Case 별로 조사하였다. Case-1의 경우 전체 침하지 16개소가 90° 이상의 경사방향 차이를 나타

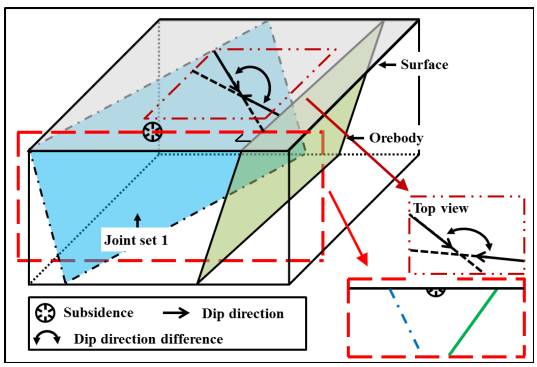


Fig. 2. Conceptual diagram for explaining the measurement of dip direction differences

Table 1. Subsidence occurrence rate in each case

Ore-joint dip direction difference (°)	Case-1		Case-2		Case-3		Total	
	Ns	Ds (%)	Ns	Ds (%)	Ns	Ds (%)	Ns	Ds (%)
0-30	0	0.00	2	2.67	32	42.67	34	45.34
31-60	0	0.00	1	1.33	6	8.00	7	9.33
61-90	0	0.00	2	2.67	8	10.66	10	13.33
91-120	6	8.00	2	2.67	2	2.67	10	13.33
121-150	8	10.66	2	2.67	2	2.67	12	16.00
151-180	2	2.67	0	0.00	0	0.00	2	2.67
Total	16	21.33	9	12.00	50	66.67	75	100.00

* Ns : Number of subsidence occurrence, Ds : Subsidence probability density.

내고 있기 때문에, 광체의 주향방향에 수직한 조사단면에서 주절리군 J_1은 광체의 경사반대방향의 위경사를 갖게 된다. 한편, Case-3의 경우 Case-1과는 반대로 침하지 4개소를 제외한 침하지 46개소가 90° 이하의 경사방향 차이를 보이고 있기 때문에, 주절리군 J_1은 침하지 조사단면에서 광체의 경사방향과 같은 위경사를 갖는다. 하지만, Case-2의 경우 Case-1과 Case-3과는 달리 두 경사방향의 차이가 뚜렷한 차이 없이 0°~150° 범위 내에 고르게 분포하는 것으로 조사되었다.

이상의 조사결과로부터 확인할 수 있듯이 각 Case에서 조사된 주절리군 J_1이 침하발생에 직·간접적인 영향을 미칠 수 있는 분포양상을 나타내고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 상관성 분석을 통해 각 Case에 해당하는 각 침하지의 주절리군 J_1의 경사각과 침하발생 위치를 나타내는 추정각과의 상관관계를 검토하였으며, 광체의 경사각에 따른 영향도 함께 분석하였다.

3.1 주절리군 J_1의 경사각(J_{1a})과 추정각(α)의 상관관계

채굴적에서 지표 침하지까지의 연장선으로부터 산정되는 추정각(α)과 침하지역을 대표하는 주절리군 J_1의 경사각(J_{1a})의 상관관계를 분석함으로써, 침하발생 위치에 주절리군 J_1의 경사각(J_{1a})이 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

일반적으로 절리 및 광체의 경사각은 수평선을 기준으로 측정하지만, α는 Fig. 3과 같이 채굴적에서 직상부까지 연결되는 수직선을 기준으로 침하지가 위치한 방향에 따라 α_1과 α_3으로 구분하여 측정된다(김병렬 외, 2013). 본 연구에서는 절리 및 광체의 경사각과 추정각의 상관관계를 분석하기 위해 각도의 측정기준을 통일하고자, 추정각을 수평선을 기준으로 각도를 변환하였다. 변환된 추정각은 90°-α로 계산되어지며, C_α (Converted alpha)로 정의하였다. 또한, Case-2의 침하지들은 앞서 언급한바와 같이, 채굴적 직상부에서 발생한 침하유형이기 때문에, 절리군의 방향성보다 다른 침하요인이 더 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단되어 본 해석에서는 제외하였다.

본 연구에서는 주절리군 J_1이 침하발생에 미치는 영향 정도를 판단하기 위해, 주절리군 J_1의 경사각과 변환 추정각의 비율(J_{1a}/C_α)로 그 영향 정도를 수치적으로 표현하였다. J_{1a}/C_α의 값이 1.0에 근접할수록 주절리군 J_1의 경사각과 변환 추정각이 유사한 값을 갖는 것을 뜻하며, 이는 지표면에 발생된 침하위치에 J_{1a}이 유리하게 작용한 것으로 분석할 수 있다.

Case-1에서의 J_{1a}와 C_α의 상관관계

Fig. 4와 Table 2는 Case-1에 해당하는 침하지 16개소에 대한 J_{1a}과 C_α의 상관관계를 분석한 결과이다. 침하지 16개소에서 조사된 J_{1a}는 50°에서 90°의 범위 내에 분포하고 있으며, 53° 이상의 급경사를 갖는 것으로 나타났다. 또한, 전체적으로 J_{1a}이 증가함에 따라 J_{1a}/C_α는 증가하는 양상을 나타냈다.

J_{1a}/C_α는 J_{1a}이 88° 와 57° 일 때, 최대값과 최소값을 갖는다. J_{1a}/C_α가 최대값을 갖는 침하지의 경우 J_{1a}과 C_α의 경사각의 차이는 37.81°, 최소값을 갖는 경우

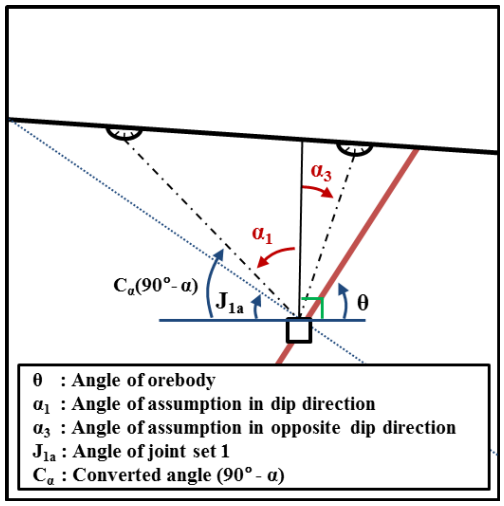


Fig. 3. Converted angle of assumption (Kim et al., 2013)

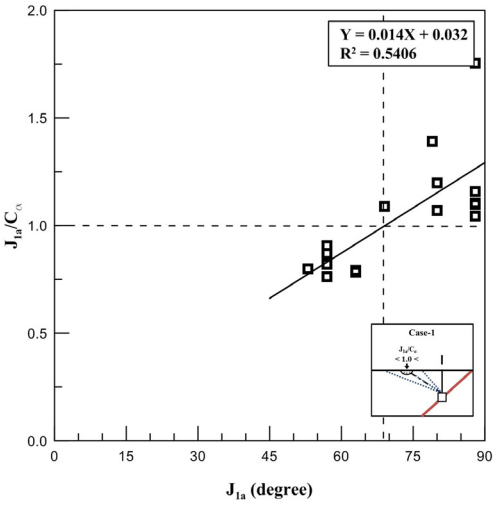


Fig. 4. Relationship between J_{1a} and J_{1a}/C_α ratio in case-1

Table 2. Result of survey in case-1

No.	Mine	θ	α_1	C_α	J_{1a}	J_{1a}/C_α ratio
1	Bongmyeong	71.00	23.56	66.44	53.51	0.80
2	Daibo	40.00	10.49	79.51	62.97	0.79
3	Daibo	40.00	9.46	80.54	62.97	0.78
4	DaiRyung	61.00	27.10	62.90	56.59	0.91
5	DaiRyung	54.00	24.44	65.56	56.59	0.87
6	DaiRyung	55.00	20.46	69.54	56.59	0.82
7	DaiRyung	69.00	15.12	74.88	56.55	0.76
8	Heungil	50.00	15.17	74.83	80.32	1.07
9	Heungil	50.00	23.20	66.80	80.78	1.20
10	Heungil	50.00	33.18	56.82	78.57	1.39
11	Sinsung	50.00	26.57	63.43	68.90	1.09
12	Waryong	60.00	5.71	84.29	87.98	1.04
13	Waryong	30.00	9.73	80.27	87.98	1.10
14	Waryong	30.00	10.30	79.70	87.99	1.10
15	Waryong	30.00	39.81	50.19	87.97	1.75
16	Waryong	60.00	14.04	75.96	87.97	1.16

* θ : Angle of orebody, α : Angle of assumption in dip direction of ore body, C_α : Converted angle, J_{1a} : Angle of joint set 1.

17.88°의 차이를 나타냈다. 이러한 결과는 단편적으로 J_{1a}가 커질수록 C_α와의 각도 차이가 증가하는 것으로 분석될 수 있으나, 해당 침하지의 경우 비교적 수직한 절리에 의해 채굴적이 붕괴되고, 이로 인해 광체의 경사 반대방향으로 지반이 밀리면서 형성된 인장균열에 의한 침하지로 조사되었다. 하지만, J_{1a}이 88°로 분포하는 다른 침하지들은 J_{1a}/C_α 가 1.04~1.16로서, J_{1a}와 C_α의 경사각의 차이가 비교적 작았으며, 보고서 조사결과 주절리군 J_1의 경사방향으로 침하가 발생된 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4의 선형 회귀분석으로부터 J_{1a}/C_α가 1.0의 값을 가질 때, J_{1a}은 69°로 분석되었다. 이러한 결과로부터 유추할 수 있듯이, Case-1의 경우 J_{1a}이 69° 일 때, 침하가 주절리군 J_1의 경사방향으로 유리하게 발생할 수 있음을 추정할 수 있다. 또한 J_{1a}/C_α의 값 1.0 전후의 값으로부터 침하발생 위치에 J_{1a}이 미치는 영향을 분석할 수 있다. J_{1a}/C_α이 1.0 이상인 경우, 앞서 언급한 바와 같이 채굴적의 붕괴와 동시에 발생하는 절리의 분리거동으로 인하여 침하가 유도될 수 있지만, 1.0 이하의 값을 갖는 경우 주절리군 J_1의 분리거동이 쉽게 발생될 수 없는 구조를 갖기 때문에 기타 절리군 또는 다른 침하요인들이 복합적으로 작용하여 침하가 발생된 것으로 판단된다.

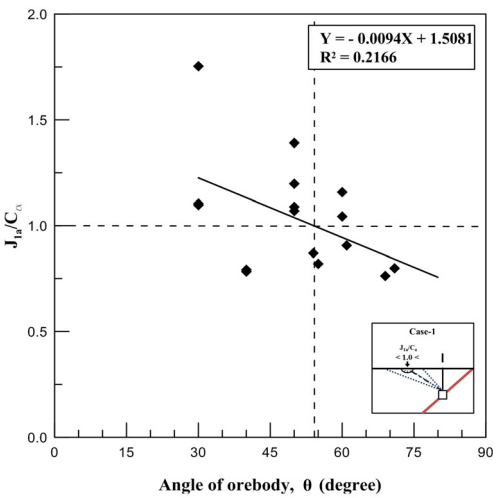


Fig. 5. Relationship between θ and J_{1a}/C_α ratio in case-1

Case-1에 해당하는 침하지의 경우, θ는 30°~75°의 범위 내에 분포하는 것으로 조사되었으며, 16개 침하지 중 θ가 45° 이상인 지역에서 발생한 침하지는 13개소이다. 이는 국내 광체의 부존특성, 즉 45° 이상의 급경사를 갖는 부존 특성으로 인하여, 조사된 침하지 중 대다수를 차지하는 것이다.

Table 3. Result of survey in case-3

No.	Mine	θ	α_3	C_α	J_{1a}	J_{1a}/C_α ratio
1	Danyang	65.00	32.62	57.38	56.70	0.99
2	Danyang	65.00	29.74	60.26	57.00	0.99
3	Danyang	65.00	42.27	47.73	56.64	1.19
4	Danyang	65.00	9.93	80.07	56.76	0.71
5	Dawon	62.00	10.57	79.43	79.00	0.99
6	Dawon	62.00	14.62	75.38	79.87	1.05
7	Heungil	50.00	17.10	72.90	75.49	1.03
8	Jiwon	35.00	37.57	52.43	53.53	1.03
9	Jiwon	40.00	24.78	65.22	56.55	0.87
10	Samsan	67.50	12.53	60.26	71.79	0.93
11	Samsan	67.50	23.96	60.26	71.79	1.09
12	Samsan	67.50	29.05	60.26	71.79	1.18
13	Samsan	67.50	29.74	77.47	47.55	0.80
14	Samsan	67.50	29.74	66.04	47.55	0.80
15	Samsan	67.50	29.74	60.95	47.55	0.80
16	Samsan	67.50	33.69	56.31	71.79	1.28
17	Sukgong	50.00	45.00	45.00	53.74	1.20
18	Waryong	30.00	25.20	64.80	87.99	1.36
19	Waryong	30.00	29.05	60.95	88.00	1.44
20	Waryong	30.00	30.96	59.04	88.00	1.49
21	Waryong	30.00	33.69	56.31	87.99	1.56

* θ : Angle of orebody, α : Angle of assumption in opposite dip direction of ore body, C_α : Converted angle, J_{1a} : Angle of joint set 1.

Fig. 5에서 확인할 수 있듯이, θ가 증가할수록 J_{1a}/C_α는 감소하는 경향을 나타냈다. 회귀분석 결과, J_{1a}/C_α가 1.0인 경우의 θ는 54°로 분석되었지만, 이는 어디까지나 한정된 조사 자료에 의한 수치적인 분석이며 공학적인 관점에서 볼 때, θ가 54°에서, J_{1a}와 C_α의 상관도가 반드시 좋을 수는 없다. 또한 Case-1은 광체의 경사방향으로 발생한 침하사례이기 때문에 광체의 경사각과 연계하여 분석한다는 것은 무리가 있다고 판단된다. 따라서 Case-1의 침하유형의 경우, θ에 따른 침하특성을 분석 시, 해당 지역의 지질구조적 특성과 기타 침하요인들 고려하여 종합적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

Case-3에서의 J_{1a}와 C_α의 상관관계

Case-3의 침하유형은 광체의 경사 반대방향에서 발생된 침하사례로서, 본 연구에서 조사된 75개 침하사례 중 50개소가 해당된다. 침하지 50개소에 대한 보고서 조사결과, 광체의 경사의 연장방향의 지표면에서 발생된 침하지는 29개소이고, 나머지 21개소는 연장방향의 좌우에서 발생된 사례들이다. 본 분석에서는 연장방향의 지표면에서 발생된 침하지는 J_{1a}에 의한 영향보다 광체가 주변암반보다 취약하여 채굴적이 존재하는 방향, 즉 광체의 경사방향으로 광체가 붕괴되어 발생된 침하사례로 간주할 수 있기 때문에, J_{1a}와의 상관성 분석에서는 제외하였으며, 나머지 21개소에 대한 분석결과는 Table 3과 같다.

Fig. 6은 침하지 21개소에 대한 J_{1a} 과 J_{1a}/C_α 의 관계를 나타낸 것이다. J_{1a} 은 45° ~ 90° 범위 내에 분포하는 것으로 나타났으며, J_{1a}이 증가함에 따라 J_{1a}/C_α이 증가하는 경향을 나타냈다. J_{1a}와 C_α이 일치하는 J_{1a}은 61° 로서 Case-1의 침하유형에 비해 8° 정도 낮은 것으로 분석되었다. Case-1의 침하사례에서 주절리군 J_1에 의한 침하영향만을 고려한다면, J_{1a}이 급경사를 이룰수록 침하발생이 유리하지만, Case-3의 경우에는 주절리군 J_1의 영향뿐만 아니라, 앞서 언급한 바와 같이 광체

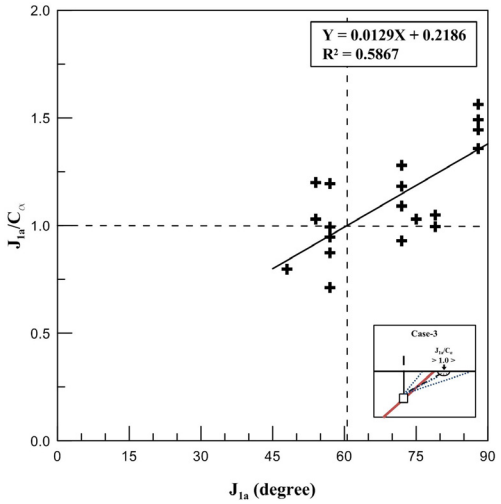


Fig. 6. Relationship between J_{1a} and J_{1a}/C_{α} ratio in case-3

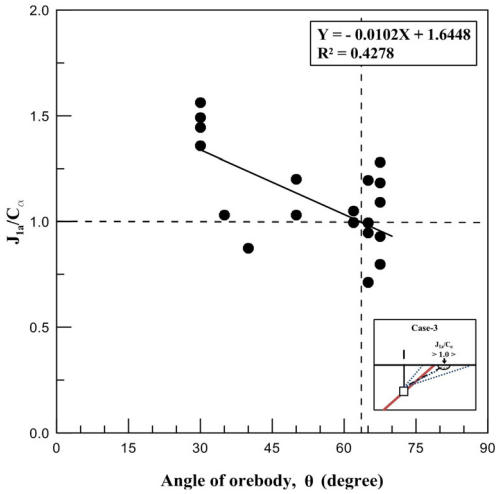


Fig. 7. Relationship between θ and J_{1a}/C_{α} ratio in case-3

의 역학적 취약성으로 인한 침하영향도 복합적으로 고려한다면, Case-1의 침하유형보다 비교적 낮은 경사각에서도 침하가 유리하게 발생될 수 있다.

J_{1a}/C_{α}의 값이 1.0 이상인 경우 발생할 수 있는 침하양상을 분석해 보면, 채굴적 상부 광체의 채굴적 방향으로의 붕괴와 동시에 절리의 높은 경사각으로 인한 상반의 붕괴로 인하여 침하가 발생할 수 있다. 또한, 주절리군 J_1과 방향성이 유사한 기타 절리군이 교차하여 형성되는 암반블록의 붕괴로 인하여 침하가 발생될 수 있다. 하지만, J_{1a}가 C_{α}보다 작은 경우, 지질공학적 선구조 특성상 광체의 붕괴로 인한 침하영향 보다는 주절리군 J_1와 교차하는 타 절리들과의 상호작용에 의한 영향이 더 크다고 볼 수 있다.

Case-3에 해당하는 침하지의 경우, θ는 30°~70°의 범위 내에 분포하는 것으로 조사되었으며, 60°~70°의 경사각을 갖는 광체에서 침하가 집중되어 발생되었다(Fig. 7). 이는 Case-1에 대한 분석에서 설명한 바 있듯이 국내 광체의 부존특성으로 인하여 급경사를 갖는 θ에서 발생된 침하사례가 많은 것이다. 또한 Case-3의 침하지에서 조사된 J_{1a}는 45° 이상의 경사각을 갖기 때문에 해당 침하지역의 θ와 J_{1a}이 복합적으로 작용하여 침하가 발생된 것으로 볼 수 있다.

Fig. 7에서 30°의 θ를 갖는 침하지 4개소의 경우, 같은 지역에서 발생한 침하사례로서, 본 지역의 J_{1a}는 88°이고, C_{α}는 56°, 59°, 60°, 64°이다. 30°의 경사각은 광체의 붕괴 또는 미끄러짐에 의한 침하가 쉽게 발생할 수 없는 경사각이므로, 광체의 경사에 의한 영향보다는 J_{1a}과 다른 절리군 또는 기타 침하요인으로 인한 침하일 가능성이 높다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, Case-3의 침하유형에 해당하는 침하지에서는 Case-1 보다 θ와 그로 인한 광체의 역학적 붕괴거동에 의한 영향이 침하발생 위치에 더 크게 작용하는 것을 알 수 있다.

4. 고찰 및 토의

현실적으로 침하지역을 대표하는 주절리군만으로 침하에 미치는 영향을 분석하기엔 무리가 있다. 주절리군이 아니더라도 채굴적 상부를 관통하는 소수의 급경사 절리만으로도 침하가 발생할 수 있기 때문이다. 하지만, 침하지역의 특성상 침하지의 접근조사의 어려움과 갱내조사의 위험성으로 인하여 지표노두에서 관찰되는 절리만을 조사해야 하는 한계가 있기 때문에, 침하에 직접적으로 영향을 미친 절리를 조사한다는 것은 쉬운 일이 아니다.

이러한 이유로 본 연구에서는 지반안정성 보고서 상의 한정된 자료만으로 침하발생 위치와 주절리군 J_1의 방향성의 상관관계를 검토하고자 하였다. 분석된 결과로부터 확인할 수 있듯이 J_{1a}와 α는 밀접한 관련이 있으며, Case-1에서는 지질학적 구조상 급경사의 J_{1a}가 상부암반에서 절리의 분리거동에 유리하게 작용하며 침하를 유도하였다. 또한 Case-3의 경우에서는 45° 이상의 J_{1a}와 급경사를 갖는 광체의 부존특성에 따라 J_{1a}와 θ가 복합적으로 작용하여 침하가 발생하였으며, 상부 암반에 비해 역학적 취약성을 갖는 광체의 특성상

J_{1a}가 비교적 낮은 경사각에서도 유리하게 침하발생에 영향을 미치고 있었다.

하지만, 본 연구의 분석 결과는 2차원 조사단면으로 분석된 결과이기 때문에, 절리군에 의한 명확한 침하원인 규명을 위해서는 3차원 절리분석과 함께 상부 암반조건 등 기타 침하요인들을 고려하여 종합적으로 분석해야 한다.

본 연구는 절리군의 방향성이 지표침하에 미치는 영향을 분석하기 위한 기초 연구결과로서, 향후 3차원적인 침하원인 규명시 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는, 침하발생 위치와 절리군의 방향성의 상관관계를 분석하기 위하여, 절리군에 대한 조사정보가 뚜렷한 지반안정성 보고서 11개의 침하지 75개소를 조사하였으며, 침하지 단면상의 침하발생 위치를 기준으로 세 가지 Case로 분류하였다. 이를 이용하여 주절리군 J_1과 광체의 경사방향 차이를 분석하였으며, 침하발생에 미치는 영향정도를 판단하기 위한 J_{1a}/C_{α}를 Case-1과 Case-3의 J_{1a}, θ와 비교 및 분석하였다.

본 연구에서 수행한 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Case-1과 Case-3의 침하지들은 광체와 주절리군 J_1의 뚜렷한 경사방향 차이를 가지며 광체의 주향방향에 수직한 조사단면에서 Case-1과 Case-3에 주절리군 J_1이 각각 광체의 경사반대방향과 경사방향에 위경사를 갖게 된다. 이는 주절리군 J_1이 침하에 직·간접적인 영향을 미칠 수 있는 분포양상을 나타낸다.
2. Case-1의 침하지들은 침하유형상 광체보다는 주절리군 J_1과의 연관성이 높은 것으로 분석되었으며, 69°의 J_{1a}에서 주절리군의 J_1의 경사방향으로 유리하게 침하가 발생할 수 있음을 추정하였다. 또한 J_{1a}가 C_{α}보다 높은 값을 가질 때 채굴적 붕괴와 동시에 절리의 분리거동으로 인한 침하가 유도되며, 그렇지 않은 경우에는 침하발생에 불리한 구조를 갖기 때문에, 기타 절리군 또는 다른 침하영향 요인들이 복합적으로 작용하여 침하가 발생된 것으로 판단된다.
3. Case-3의 경우 45° 이상의 급경사를 갖는 주절리군 J_1이외에 광체의 역학적 취약성으로 인한 침하영향이 복합적으로 고려되어 비교적 낮은 J_{1a}에서 침하가 유리하게 발생되었으며, 이는 Case-1보다 θ와 그로 인한 광체의 역학적 붕괴 거동에 의한 영향이 침하발생 위치에 더 크게 작용하는 것으로 분석된다.

이상의 분석결과들로부터, 지표면에서 나타나는 침하발생의 위치와 상부 지반 내에 분포하는 절리군의 방향성은 밀접한 상관관계를 갖는 것을 확인할 수 있었으며, Case-1과 Case-3의 침하발생에 영향을 미치는 요인을 분석할 수 있었다. 그러나 본 연구는 2차원 자료가 갖는 한계가 존재하기 때문에 침하발생 범위 추정시 연구결과를 직접적으로 사용하는 것은 다소 무리가 있을 것으로 판단되나, 침하발생의 원인규명에 관한 3차원적 분석시 효과적인 비교 검토를 위한 참고자료로 충분히 활용될 수 있을 것이다. 향후 본 연구에서 고려되지 않은 절리군의 역학적, 수리적 특성과 상부 지반의 강도특성, 그리고 지형 조건 등 지반침하 발생에 영향을 미칠 수 있는 제반 요소들을 고려한 심층연구를 통해 적용성과 신뢰도가 증대된 지반침하 발생위치 추정기법이 확립되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 2013년도 강원대학교 학술연구조성비(과제번호-C1009867-01-01)로 연구하였음.

References

1. Brady, B. H. G. and Brown, E. T., 1985, Rock mechanics for underground mining, George Allen & Unwin., 527.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. ISRM, 1978, Commission on Standardization of

Laboratory and Field Tests. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci., 15, 6, 319-368
8. 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.
9. Kim, B. R., Lee, S. J. and Choi, S. O., 2013, A study on the prediction of surface subsidence zone through the case studies on mined-out area, Tunnel & Underground Space, 23, 1, 33-41
10. 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.
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, 1998, Basic survey report of ground stability on Gangneung region.
14. MIRECO, 2000, Basic survey report of ground stability on Sinseong region.
15. MIRECO, 2005a, Basic survey report of ground stability on Oeeo and Jaesan region.
16. MIRECO, 2005b, Basic survey report of ground stability on Wangsan region.
17. MIRECO, 2006a, Basic survey report of ground stability on Hongsan region of Buyeo district.
18. MIRECO, 2006b, Basic survey report of ground stability on Ungcheon region of Boryeong city.
19. MIRECO, 2007a, Basic survey report of ground stability on Boryeong mine.
20. MIRECO, 2007b, Basic survey report of ground stability on Bukpyeong regoin of Jeongseon district.
21. MIRECO, 2007c, Basic survey report of ground stability on Gangdong region of Gangneung city.
22. MIRECO, 2007d, Basic survey report of ground stability on Deoksang region of Danyang district.
23. MIRECO, 2009, Detailed survey report of ground stability on Cheongseong region.
24. National Coal Board, 1975, Subsidence Engineer's Handbook, National Coal Board Mining Department, London, 111.
25. 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.
26. 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

최 성 웅

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

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 에너지·자원공학과 대학원 박사과정