

CASE STUDY

강건설계를 이용한 층서두께 배열과 루프볼트 지보설계에 관한 연구

장명환*

한국광물자원공사 자원개발기술팀

A Study on the Stratum Thickness Arrangement and Roof Bolt Support Design using Robust Design

Myoung Hwan Jang*

Mining & Geotechnical Team, Korea Resources Corporation

*Corresponding author: mhjang@kores.or.kr

Received: March 9, 2018

Revised: April 9, 2018

Accepted: April 10, 2018

ABSTRACT

The OO mine has irregularly developed stratum around the ore body. The purpose of this study is to array irregular stratum thickness systematically for effective roof bolting and to implement a supporting system corresponding to it. The number of 81 cases combined with stratum thicknesses was limited to 9 cases by robust design. For each case, the load height which can act as a roof load was determined by the characteristics of stratum and RMR. The load range due to the load height is calculated assuming block shaped and arch shape. The support load of the roof bolt was considered as the average load of the two methods. Numerical analysis results of the support design showed that the cable bolt was more effective for the roof supporting fully grouted than the anchoring type. As a result of the construction, it was possible to control the roof, but all of the roof was gradually sinking downward due to the deformation of the side wall of the mine tunnel.

Keywords: Roof bolt, Stratum thickness, Robust design, Roof load, Fully grouted

초록

OO광산은 광체주변에 미고결된 층서가 불규칙하게 발달되어 있다. 본 연구는 효율적인 루프볼트(roof bolt) 시공을 위하여 불규칙한 층서의 두께를 체계적으로 배열하고 이에 대응하는 지보시스템을 제시한 것이다. 층서별 두께를 조합한 81개의 경우의 수를 강건설계에 의하여 9개의 사례로 한정하여 지보설계를 하였다. 각 사례에 대하여 천반하중으로 작용할 수 있는 하중고를 층서의 특성과 RMR에 의하여 결정하였다. 하중고에 의한 하중범위를 블록형상과 아치형상으로 가정하여 계산하였다. 두 방법의 평균하중으로 루프볼트의 지보력을 감안한 지보설계를 하였다. 지보설계에 대한 수치해석 결과 케이블 볼트는 선단정착 방식보다 전면접착 방식이 천반유지에 더 효과적인 것으로 분석되었다. 시공결과 천반의 컨트롤은 가능하였으나 갱도측벽의 변형으로 천반 전체가 하루로 조금씩 침강하는 현상을 보였다.

핵심어: 루프볼트, 층서두께, 강건설계, 천반하중, 전면접착



서론

OO광산은 연약한 4개의 주요한 층서가 각기 다른 두께를 가지고 불규칙하게 발달되어 있을 뿐만아니라 함수율이 최대 40% 까지 높다. 이러한 임반의 특성으로 굴진시 반팽(heaving), 팽윤압(swelling pressure)등과 같은 현상으로(Klein, 2001) 체계적인 지보계획을 수립하는 데에 어려움이 있다. 이러한 지층구조를 극복하기 위하여 층서의 두께를 몇 개의 패턴으로 분류하여 지보계획을 세우고자 강건설계(robust design)를 적용하였다.

강건설계는 다꾸치법(Taguchi method)의 발전된 형태로서 공학실험에서 많은 수의 인자가 있을 때 중요한 인자를 선별하기 위하여 적용하는 실험계획법이다(Madhav, 1989). 본 연구에서는 층서별 두께를 조합한 81개 경우의 수를 강건설계에 의하여 9개의 사례로 최소화 하였다. 각 사례에 대하여 천반하중으로 작용할 수 있는 하중고를 층서특성과 RMR로부터 계산하여 결정하였다.

작용하중을 산정하기 위하여 하중범위를 Longwall gate등에 적용한(Dennis et al., 2000) 블록형상과 아치형상의 평균하중으로 계산하고 루프볼트의 지보력을 감안한 지보량을 산정한 후 수치해석에 의하여 지보설계를 검토하였다.

강건설계에 의한 층서두께 배열

직교배열

강건설계는 적은 수의 실험으로 많은 수의 인자들 중 최적의 인자를 결정하기 위해 직교배열(orthogonal arrays, OAs)의 수학적 방법을 사용한다. 실험계획에서 직교란 임의의 인자가 어떤수준에 대해서나 다른 인자의 수준이 같은 횟수로 나타나는 상태를 의미한다. 이 경우 기여가 같다고 하며 기여가 제로(0)라 하기도 한다. 이와 같이 A는 B로부터 기여가 제로(0), 그리고 B는 A로부터 기여가 제로(0)인 경우 A와 B는 서로 직교한다고 정의한다.

직교배열표는 $L_n(b^a)$ 형태로 표시하는데, n은 필요한 실험의 수이고 a는 실험에 사용되는 인자(factor)의 수, 그리고 b는 인자가 변화하는 수준(level)의 수이며, n회 실험 수행으로 b^a 회만큼의 실험효과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 직교배열표는 표본으로 만들어진 것을 사용해도 되고 해석에 알맞은 것이 없을 때는 실험 목적에 맞게 만들어도 된다. 2수준계와 3수준계의 표준형 직교배열은 식 (1), 식 (2)와 같고, 식에서 m은 자유도(degree of freedom)로서 수준에서 1을 뺀 값이다. 몇 가지 직교배열(OAs)은 Fig. 1과 같으며(Simpson, 2001), 본 연구에서는 Fig.1(c)를 적용하였다.

$$L_{2^m}(2^{2^m-1}) \quad (1)$$

$$L_{3^m}(3^{(3^m-1)/2}) \quad (2)$$

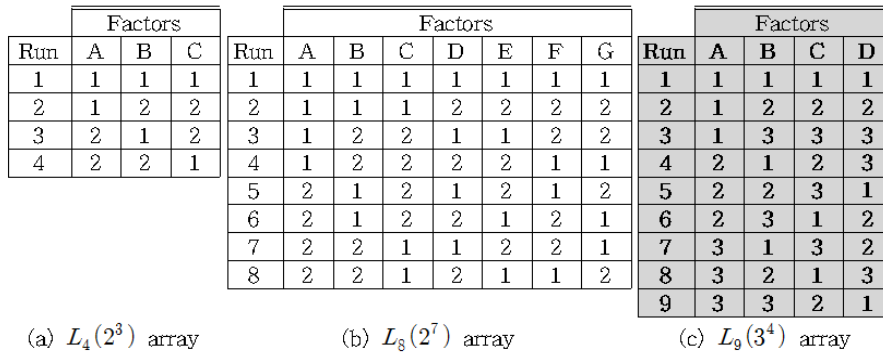


Fig. 1. Some commonly used orthogonal arrays

층서 두께 현황

OO광산의 주요층서는 Table 1과 같으며, 이중 사암층은 광체 최상부에, 역암층은 광체 직하부의 괴상암반(massive rock)인 연암 수준으로 굴착시 갱도변형에 대한 영향이 적다. 갱도 굴착시 영향을 미치는 주요한 층들은 (상부, 하부)응회암, 광체층으로서 Manto(M3, M3a)의 4개의 연약층이다. 이들 층의 두께는 매우 불규칙하여 층서두께 변화에 의한 체계적인 지보계획을 세우기 위해서는 경우의 수를 만들어 층서두께에 의한 물성변화와 이에 대응하는 지보시스템을 구축할 필요가 있다.

Table 1. Status of stratum of OO mine

Classification	Thickness			Remark
	Min.	Average	Max.	
Sandstone		4.0 m over		Massive rock
Factor levels	Fl (1)	Fl (2)	Fl (3)	
Upper tuff	3.0 m	6.0 m	9.0 m	Weak rock
M3a (Manto3a)	0.5 m	1.5 m	2.5 m	Interburden, soft rock
Lower tuff	1.8 m	3.0 m	4.2 m	Interburden, weak rock
M3 (Manto3)	1.5 m	3.0 m	4.5 m	Swelling, moisture, soft rock
Conglomerate		15.0 m over		Massive rock

강건설계에 의한 층서두께 배열

본 연구에서는 층서두께 변화에 따른 효율적인 지보시스템을 구현하고자 층서의 두께변화에 대한 경우의 수를 최소화하여 루프볼트 설계를 하였다. 갱도굴진과 채광에 영향을 미치는 층서는 광체와 광체주변의 연약층으로 하부로부터 M3, 하부응회암(lower tuff), M3a, 상부응회암(upper tuff) 등의 4개 층상이다.

Table 2는 층서두께 분석을 위한 인자수준으로 Level 1은 각층의 최소두께, Level 2는 각층의 평균두께, Level 3는 각층의 최대 두께를 나타낸 것으로 M3는 1.5~4.5 m, 하부응회암은 1.8~4.2 m, M3a는 0.5~2.5 m, 상부응회암은 3.0~9.0 m 이다. 따라서 인자의 수는 층상 개수로서 4이고, 인자가 변화할 수 있는 수준은 층상별 두께의 최소, 평균, 최댓값의 3개 수준으로 $L_9(3^4)$ 의 직교배열이 된다.

Table 3은 지층변화에 따른 지보량을 결정하기 위해 Fig. 1(c)의 3수준계인 $L_9(3^4)$ 의 직교배열을 사용하여 9개의 사례로 최소화한 직교배열에 Table 2의 인자수준들을 대응시킨 것이다.

Table 4는 직교배열에 의한 층서두께 배열과 층서두께에 따른 사례별 암반의 GSI와 루프볼트의 선단정착층(anchoring)에 대한 GSI를 산정한 것이다.

Table 2. Factor levels for array of stratum thickness

Factor levels	M3	Lower tuff	M3a	Upper tuff	Remark
1	1.5 m	1.8 m	0.5 m	3.0 m	Minimum
2	3.0 m	3.0 m	1.5 m	6.0 m	Average
3	4.5 m	4.2 m	2.5 m	9.0 m	Maximum

Table 3. Orthogonal arrays to stratum thickness

CASE NO.	Factors			
	M3	Lower tuff	M3a	Upper tuff
	Factor(1)	Factor(2)	Factor(3)	Factor(4)
1	OAs(1), 1.5 m	OAs(1), 1.8 m	OAs(1), 0.5 m	OAs(1), 3.0 m
2	OAs(1), 1.5 m	OAs(2), 3.0 m	OAs(2), 1.5 m	OAs(2), 6.0 m
3	OAs(1), 1.5 m	OAs(3), 4.2 m	OAs(3), 2.5 m	OAs(3), 9.0 m
4	OAs(2), 3.0 m	OAs(1), 1.8 m	OAs(2), 1.5 m	OAs(3), 9.0 m
5	OAs(2), 3.0 m	OAs(2), 3.0 m	OAs(3), 2.5 m	OAs(1), 3.0 m
6	OAs(2), 3.0 m	OAs(3), 4.2 m	OAs(1), 0.5 m	OAs(2), 6.0 m
7	OAs(3), 4.5 m	OAs(1), 1.8 m	OAs(3), 2.5 m	OAs(2), 6.0 m
8	OAs(3), 4.5 m	OAs(2), 3.0 m	OAs(1), 0.5 m	OAs(3), 9.0 m
9	OAs(3), 4.5 m	OAs(3), 4.2 m	OAs(2), 1.5 m	OAs(1), 3.0 m

Table 4. Arrangement of stratum thickness and rock properties by orthogonal array

Classification	Case (1)	Case (2)	Case (3)	Case (4)	Case (5)	Case (6)	Case (7)	Case (8)	Case (9)	GSI
Upper tuff (m)	3.0,(1)	6.0,(2)	9.0,(3)	9.0,(3)	3.0,(1)	6.0,(2)	6.0,(2)	9.0,(3)	3.0,(1)	30
M3a (m)	0.5,(1)	1.5,(2)	2.5,(3)	1.5,(2)	2.5,(3)	0.5,(1)	2.5,(3)	0.5,(1)	1.5,(2)	15
Lower tuff (m)	1.8,(1)	3.0,(2)	4.2,(3)	1.8,(1)	3.0,(2)	4.2,(3)	1.8,(1)	3.0,(2)	4.2,(3)	20
M3 (m)	1.5,(1)	1.5,(1)	1.5,(1)	3.0,(2)	3.0,(2)	3.0,(2)	4.5,(3)	4.5,(3)	4.5,(3)	15
GSI (case)	23	24	24	24	20	23	22	24	20	
GSI (anchoring)	23	20	20	19	19	19	15	15	15	
RMR (anchoring)	28	25	25	24	24	24	20	20	20	

사례별 GSI(case)는 층서의 GSI를 층서 두께에 대하여 가중평균(weighted average)을 적용하여 평가 하였다. 사례별 RMR(anchoring)은 층서별 GSI와 사례별 록볼트 정착 위치에 대한 층서 GSI의 가중 평균값 중 작은 값으로 식 (3)을 이용하여 RMR을 산정하였다(Ceballos et al., 2014). 이때 RMR값은 사례별로 20~28정도로 분석되었다.

$$RMR = GSI + 5 \tag{3}$$

실제 암반에서 RMR 20 이라는 평가치를 가지고 지보계획을 세우기는 어렵다. 본 광산의 경우 미고결 층이라는 특성으로 인하여 낮은 RMR 값에도 불구하고 단기간 갱도유지를 하면서 후퇴식 채광을 실시해야하기 때문에 루프볼트 등에 의한 지보시스템을 구축할 필요가 있다.

실제 시공중 M3층은 광체로서 재채굴 구역을 포함하며, 재채굴 구역인 경우 M3a층에 작은 공동 등이 형성되는 경우가 있다. 이러한 경우에는 강지보 등을 적용하였다.

루프볼트 설계

천반하중

본 광산에서 상부응회암 이하는 블록 또는 아치형태로 이완될 수 있는 것으로 가정하였다. 이완영역의 하중을 상부의 상부응회암(upper tuff)이나 사암층에 케이블 볼트 등으로 고정하기 위한 하중계산에 Longwall gate에 적용한 모델을 응용하였다. 블록형태의 암반하중은 Table 5의 개념으로, 아치형태로 하중이 가해질 때는 Table 6의 개념으로 계산하였다(modification from Dennis et al., 2000).

Table 5. Detached block of failed roof supported by cables (Dennis et al., 2000)

	$F_w = W_e H_p \gamma \tag{4}$ <p>where</p> <ul style="list-style-type: none"> F_w = weight of rock per line length, kN/m W_e = effective width of opening, m H_p = distance from roof to parting plane, m γ = rock density, 18.0 kN/m³
--	---

Table 6. Formation of pressure arch of failed mine roof material(Dennis et al., 2000)

	$F_a = \frac{\pi}{4} W_e H_a \gamma \tag{5}$ <p>where</p> <ul style="list-style-type: none"> F_a = weight of rock under pressure arch per line, kN/m H_a = height of pressure arch, m
--	---

식 (4)와 식 (5)에서 H_p 와 H_a 에는 RMR을 이용하여 암반하중고를 계산하기 위하여 식 (6)을 적용하였다(Ünal, 1984). 이상의 결과를 종합하여 RMR에 따른 면압권(trompeter zone) 높이와 하중범위에 따라서 천반하중을 식 (6)으로 계산할 수 있다. 식에서 H_p , H_a 는 식 (4), 식 (5)의 변수와 같다.

$$H_p = H_a = h_t = B \left[\frac{100 - RMR}{100} \right] \tag{6}$$

루프볼트 설계

루프볼트 설계를 위하여 갱도폭당 면압권의 높이와 암반하중을 계산하고 케이블 볼트와 록볼트의 인발하중을 이용하여 1열당 볼트 소요 개수를 산정하였다. 블록형태의 모델일 때 갱도폭 4.5 m에서 RMR 20일 경우 하중고는 식(6)에 의하여 3.6 m이고 단위 중량 18.0 kN/m³를 적용하면 단위 하중은 64.8 kN/m이 됨으로 갱도폭 4.5 m의 하중은 292 kN이 된다.

루프볼트 수는 갱도너비 3.0 m에서는 5개, 4.5 m에서는 6개를 기본으로 하고, 필요시 케이블볼트 1개를 추가 시공하는 것으로 설계를 하였다. 록볼트는 이완블록에서 압축대를 형성하고 케이블볼트는 응회암층 상부에 정착되어 하중을 지지하는 것으로 안전을 계산에 적용하였다.

채광갱도

채광갱도의 루프볼트 설계를 위한 층서조건은 M3층에서 굴진이나 후퇴식 채광(retreat mining)을 하는 것으로 하고 반팽을 최소화하기 위하여 갱도하부는 역암층으로 고정하였다. 채광갱도의 규격은 3.0×2.5 m로 록볼트 길이 2.1 m, 케이블 볼트 길이 4.2 m로 하여 안전율을 기준으로 루프볼트의 지보량을 산정하였다.

Table 7은 강건설계를 이용하여 9가지 사례로 최소화한 지보패턴과 지보량을 산정한 것이다. 분석결과 천반에서 하중으로 전달될 수 있는 하중고는 2.2~2.4 m이며, 작용하중은 RMR 20일 때 갱도 단위폭당 하중은 102~130 kN 이고, RMR 25일 때 갱도 단위 폭당 하중은 96~122 kN으로 분석 되었다. 각 사례별로 케이블 볼트 1개와 록볼트 4개를 산정하였다. 이때 케이블 볼트가 천반의 하중을 지지하고 록볼트는 천반의 면압권에서 압축대를 형성하게 된다. 각 사례별 평균안전율은 1.75~1.94 정도이다. 사례 (7)~사례 (9)는 필요시 추가적으로 케이블 볼트를 시공하는 것으로 하였다.

Table 7. Roof bolt design for mining gateway (width=3.0 m)

Classification	Case(1)	Case(2)	Case(3)	Case(4)	Case(5)	Case(6)	Case(7)	Case(8)	Case(9)
Sandstone (m)	Upper stratum is more than thickness of 4 m								
Upper tuff (m)	3.0	6.0	9.0	9.0	3.0	6.0	6.0	9.0	3.0
M3a (m)	0.5	1.5	2.5	1.5	2.5	2.5	2.5	0.5	1.5
Lower tuff (m)	1.8	3.0	4.2	1.8	3.0	4.2	1.8	3.0	4.2
M3 (m)	1.5	1.5	1.5	3.0	3.0	3.0	4.5	4.5	4.5
Conglomerate (m)	Lower stratum is more than thickness of 10 m								
Support condition	Span-3.0 m, Height-2.5								
RMR	28	25	25	24	24	24	20	20	20
Load height (m)	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
Arch load (kN)	92	96	96	97	97	97	102	102	102
Block load (kN)	117	122	122	123	123	123	130	130	130

Table 7. Continued

Classification	Case(1)	Case(2)	Case(3)	Case(4)	Case(5)	Case(6)	Case(7)	Case(8)	Case(9)
Anchoring position									
M3-Anchoring (m)				0.5	0.5	0.5	2.0	2.0	2.0
Lower tuff-Anchoring (m)	0.8	2.1	2.1	1.6	1.6	1.6	0.1	0.1	0.1
M3a-Anchoring (m)	0.5								
Upper tuff-Anchoring (m)	0.8								
(Cable, Rock) bolts	C1,R4	C1R4	C1,R4	C1,R4	C1,R4	C1,R4	C1,R4	C1,R4	C1,R4
Safety factor (arch)	2.17	2.08	2.08	2.06	2.06	2.06	1.96	1.96	1.96
Safety factor (block)	1.71	1.64	1.64	1.63	1.63	1.63	1.54	1.54	1.54
Safety factor (avg.)	1.94	1.86	1.86	1.84	1.84	1.84	1.75	1.75	1.75
Additional bolt							C1	C1	C1
Cable truss (1/2 m)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	- Rock bolt=4 ea, rock bolt length=2.1 m, pull-out strength=100 kN								
Bolt pattern	- Cable bolt-2 ea or 3 ea, cable bolt length=4.2 m, pullout strength=200 kN								
	- If need, 1 set of cable truss install								
Side wall(M3, M3a)	R2	R2	R2	R2	R2	R2	R2	R2	R2
At (cable, rock) bolt, Cn : number of cable bolt ; Rn : number of rock bolt									

운반갱도

운반갱도의 규격은 4.5×2.5 m이며 루프볼트 설계요건은 채광갱도와 동일하며 그 결과는 Table 8과 같다. 이때 천반에서 하중으로 전달될 수 있는 하중고는 3.2~3.6 m이며, 작용하중은 RMR 20일 때 단위 폭당 229~292 kN, RMR 25일 때 단위 폭당 215~274 kN 정도이다.

설계는 각 사례별로 케이블 볼트 2개와 록볼트 4개를 산정하였다. 사례별 평균안전율은 1.56~1.73 정도이다. 사례(7)~사례(9)는 추가적으로 케이블 볼트를 시공할 수도 있다. 갱도규격 4.5 m에서 케이블 트러스(cable truss)는 천반의 하중을 갱도측벽의 필러 상에서 지지하고 변형거동을 억제하기 위해 1개(2 m) 시공하는 것으로 하였다.

Table 8. Roof bolt design for mine tunnel (width=4.5 m)

Classification	Case(1)	Case(2)	Case(3)	Case(4)	Case(5)	Case(6)	Case(7)	Case(8)	Case(9)
Sandstone (m)	Upper stratum is more than thickness of 4 m								
Upper tuff (m)	3.0	6.0	9.0	9.0	3.0	6.0	6.0	9.0	3.0
M3a (m)	0.5	1.5	2.5	1.5	2.5	2.5	2.5	0.5	1.5
Lower tuff (m)	1.8	3.0	4.2	1.8	3.0	4.2	1.8	3.0	4.2
M3 (m)	1.5	1.5	1.5	3.0	3.0	3.0	4.5	4.5	4.5
Conglomerate (m)	Lower stratum is more than thickness of 10 m								
Support condition	Span-4.5m, Height-2.5								
RMR	28	25	25	24	24	24	20	20	20
Load height (m)	3.2	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.6	3.6	3.6
Arch load (kN)	207	215	215	218	218	218	229	229	229
Block load (kN)	263	274	274	277	277	277	292	292	292
Anchoring position									
M3-Anchoring (m)				0.5	0.5	0.5	2.0	2.0	2.0
Lower tuff-Anchoring (m)	0.8	2.1	2.1	1.6	1.6	1.6	0.1	0.1	0.1
M3a-Anchoring (m)	0.5								
Upper tuff-Anchoring (m)	0.8								
(Cable, Rock) bolts	C2,R4	C2,R4	C2,R4	C2,R4	C2,R4	C2,R4	C2,R4	C2,R4	C2,R4
Safety factor (arch)	1.93	1.86	1.86	1.83	1.83	1.83	1.75	1.75	1.75
Safety factor (block)	1.52	1.46	1.46	1.44	1.44	1.44	1.37	1.37	1.37

Table 8. Continued

Classification	Case(1)	Case(2)	Case(3)	Case(4)	Case(5)	Case(6)	Case(7)	Case(8)	Case(9)
Safety factor (avg.)	1.73	1.66	1.66	1.64	1.64	1.64	1.56	1.56	1.56
Additional bolt							C1	C1	C1
Cable truss (1/2 m)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bolt pattern	- Rock bolt=4 ea, rock bolt length=2.1 m, pull-out strength=100 kN - Cable bolt=2 ea or 3 ea, cable bolt length=4.2 m, pullout strength=200 kN - Cable truss, space of installation=2.0 m								
Side wall (M3, M3a)	R2	R2	R2	R2	R2	R2	R2	R2	R2

At (cable, rock) bolt, **Cn** : number of cable bolt ; **Rn** : number of rock bolt

지보설계에 대한 층서두께의 영향

층서두께 배열에 따른 지보량을 설정하고 지보효과에 대한 안전율을 계산하여 안전율에 따른 영향인자(signal/noise ratio, S/N 비)를 추출하여 지보설계 효과에 대한 층서의 영향을 분석하였다. S/N 비가 클수록 제어인자(signal)에 의한 응답특성이 좋으며 잡음인자(noise)에 의한 영향이 적은 설계를 할 수 있다(Simpson, 1989). 잡음인자는 제어할 수 없는 인자로서 층서조건이 되며, 신호인자는 루프볼트 설계에 의한 안전율이 된다. 강건설계에서 S/N 비 η_i 는 식 (7)에 안전율을 대입하여 산출한다.

$$\eta_i = 10 \times \log(SF) \tag{7}$$

S/N비의 전체 총 제곱합은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 평균분석(ANOM, analysis of means)을 이용하여 각 설계 인자별(층서) S/N비에 대한 인자수준별(factor level) 평균 $m_1 \sim m_3$ 을 산정한다. 식 (8)에서 $M_{(S/N)}$ 은 S/N 비의 평균을 나타낸다.

$$\sum_{i=1}^9 \eta_i^2 = 3(m_1 - M_{(S/N)})^2 + 3(m_2 - M_{(S/N)})^2 + 3(m_3 - M_{(S/N)})^2 \tag{8}$$

Table 9는 각 사례에 대하여 안전율에 대한 S/N 비를 분석한 것으로 사례 (7)~사례 (9)가 지보력에 대하여 안전율이 가장 낮은 것과 같이 S/N 비도 가장 낮은 것으로 분석되었다. Table 10은 각 수준과 층서두께에 대한 S/N 비의 평균을 나타낸 것으로 S/N 비의 편차가 M3층에서 매우 큰 것으로 분석되었다. 편차가 크다는 것은 그 층의 영향이 크다는 것을 의미하며, 이는 안전률에 가장 영향을 크게 미치는 층이 M3층임을 의미하기도 한다. 제곱값의 평균은 제곱값의 합을 자유도로 나눈 것이며 기여율(contribution rate)은 해당 인자의 제곱평균을 총 제곱평균으로 나눈 값이다.

Table 9. S/N ratio by safety factor (SF) of each case

CASE	M3 (m)	Lower tuff (m)	M3a (m)	Upper tuff (m)	Span [3 m]		Span [4.5 m]	
					SF	S/N ratio	SF	S/N ratio
1	1.5	1.8	0.5	3.0	1.94	2.88	1.73	2.38
2	1.5	3.0	1.5	6.0	1.86	2.70	1.66	2.20
3	1.5	4.2	2.5	9.0	1.86	2.70	1.66	2.20
4	3.0	1.8	1.5	9.0	1.84	2.65	1.64	2.15
5	3.0	3.0	2.5	3.0	1.84	2.65	1.64	2.15
6	3.0	4.2	0.5	6.0	1.84	2.65	1.64	2.15
7	4.5	1.8	2.5	6.0	1.75	2.43	1.56	1.93
8	4.5	3.0	0.5	9.0	1.75	2.43	1.56	1.93
9	4.5	4.2	1.5	3.0	1.75	2.43	1.56	1.93

Table 10. Average of S/N ratio by levels and stratum

Level	Span [3 m]				Span [4.5]			
	M3	Lower tuff (m)	M3a	Upper tuff (m)	M3	Lower tuff (m)	M3a	Upper tuff (m)
1	2.76	2.65	2.65	2.65	2.26	2.15	2.15	2.15
2	2.65	2.59	2.59	2.59	2.15	2.09	2.09	2.09
3	2.43	2.59	2.59	2.59	1.93	2.09	2.09	2.09
Deviation	0.33	0.06	0.06	0.06	0.33	0.06	0.06	0.06

Table 11은 층서별 지보시공시 안전율에 가장 큰 영향을 미치는 층을 분석하기 위하여 기여율을 분석한 것이다. 기여율은 Table 10의 수준과 층서의 S/N 비의 평균값들로 계산된다. 기여율은 M3층이 제일 컸으며 갱도폭 3 m일 때 88.1%와 갱도폭 4.5 m일 때 88.7%로 유사하였다. 이는 지보설계를 안전율 기준으로 갱도규격 3.0 m일 때 1.75~1.94, 갱도규격 4.5 m일 때 1.56~1.73 정도로 설계하였기 때문에 기여율은 갱도규격에 대해서는 큰 차이가 없는 것으로 분석된다.

Table 11. Contribution rate by stratum condition

Factors	Degree of freedom		Sum of square		Mean of square		Rate of contribution(%)	
	[3 m]	[4.5 m]	[3 m]	[4.5 m]	[3 m]	[4.5 m]	[3 m]	[4.5 m]
Span								
M3(ore)	2	2	0.17	0.17	0.083	0.084	88.1	88.7
Lower tuff	2	2	0.01	0.01	0.004	0.004	4.0	3.8
M3a	2	2	0.01	0.01	0.004	0.004	4.0	3.8
Upper tuff	2	2	0.01	0.01	0.004	0.004	4.0	3.8

설계검토

루프볼트

OO광산의 갱도 폭에 대한 루프볼트의 효과를 분석하고자 수치해석을 실시하였다. 본 연구에서는 갱도폭 4.5 m에 대한 해석결과만을 수록하였다. 층서조건은 가장 불리한 조건으로 판단되는 사례 (7)을 적용하였으며 해석을 위한 입력자료는 Table 12와 같다.

Table 12. Input data for numerical analysis

Rock Type	ρ (kg/m ³)	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ (°)	σ_{tm} (kPa)
Sandstone (roof)	1900	162	0.30	301	17.8	-20
Manto 3a (M3a)	1600	36	0.35	175	11.4	-2
Tuff	1800	99	0.35	217	13.4	-10
Manto 3 (M3)	1700	54	0.35	210	13.1	-4
Conglomerate (floor)	2100	495	0.30	546	27.5	-130

해석모델은 Fig. 2와 같이 굴착에 의한 주응력 교란이 없도록 좌우측 및 하부로 갱도크기의 10배, 상부는 지표까지 100 m로 경계

를 정하였다. 주응력 측정은 천반, 벽면의 센터 1.0 m 지점에서 실시하였다.

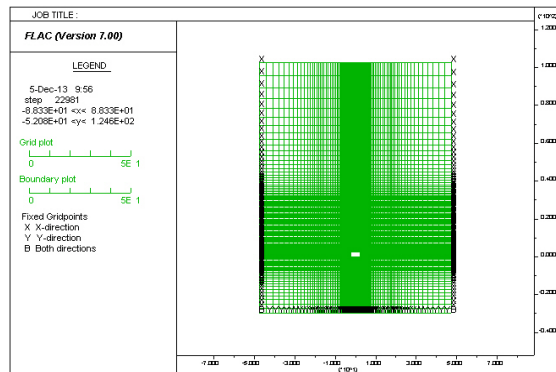


Fig. 2. Model for numerical analysis

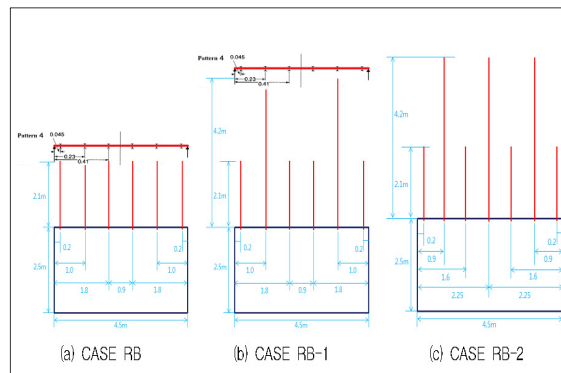


Fig. 3. Cases by roof bolt pattern

해석 사례는 Fig. 3, Table 13과 같이 케이블 볼트와 록볼트를 조합하여 해석하였으며 록볼트는 전면접착형, 케이블 볼트는 전면 접착형과 선단정착형 두 가지 방식에 대해 해석하였다. 기본패턴은 Fig. 3(a)와 같으며, 루프볼트 설계는 록볼트 4개와 케이블 볼트 2개의 조합이며, 필요시 추가적으로 록볼트 4개와 케이블 볼트 3개를 조합하였다. 사례 RB-3은 RB-1과, RB-4는 RB-2와 같은 패턴으로 해석하였다.

Table 13. Cases for roof bolt pattern

Classification		Roof bolt array methods	
Number of roof bolt	Rock bolt 4 ea	Cable bolt 2 ea	Cable bolt 3 ea
Installation method	Anchoring	CASE RB-1	CASE RB-2
	Fully grouted	CASE RB-3	CASE RB-4

Table 14. Comparison of displacement and rock bolt axial force against cases

CASE	Roof disp. [mm] (a)	Roof disp. Ratio [a/b]	Wall Disp. [mm]	Floor disp. [mm]	Axial force RB [kN]	Axial force CB [kN]	Remark
RB	375	-	422	39	54.76	-	
RB-1	367 (b)	1.0	419	39	54.74	45.35	Anchoring
RB-2	361	1.0	418	39	54.28	45.35	Anchoring
RB-3	358	1.0	420	39	54.71	97.87	Fully grouted
RB-4	344	0.9	416	39	54.73	97.97	Fully grouted

Table 14, Fig. 4의 해석결과와 같이 케이블 볼트 3개를 전면접착형으로 시공한 사례 RB-4가 천반 컨트롤 효과가 가장 양호하였다. RB-4를 제외한 3가지 사례는 유사한 결과를 보였으며, 측벽 및 바닥에 대한 영향 또한 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. Table 14에서 전면접착형 록볼트 길이 2.1 m 6개로 지보한 사례 RB와 록볼트 4개 및 케이블 볼트 2개를 조합하여 총 6개의 전면접착형 볼트로 지보한 사례 RB-2의 결과를 비교했을 때 RB-2의 지보효과가 더 양호한 것으로 나타났다. 케이블 볼트가 선단정착형으로 시공되더라도 볼트의 선단이 M3층 상부의 응회암층에 정착될 때 보다 좋은 지보효과를 발휘하는 것으로 판단된다.

이러한 층서조건으로 볼 때 루프볼트가 좀 더 상부지층에 정착되어 매달림 효과를 얻어야 할 경우에는 케이블 볼트가 더 유효하며 루프볼트는 선단 지지방식보다는 전면 접착방식이 천반지보에 더 효과적인 것으로 분석되었다.

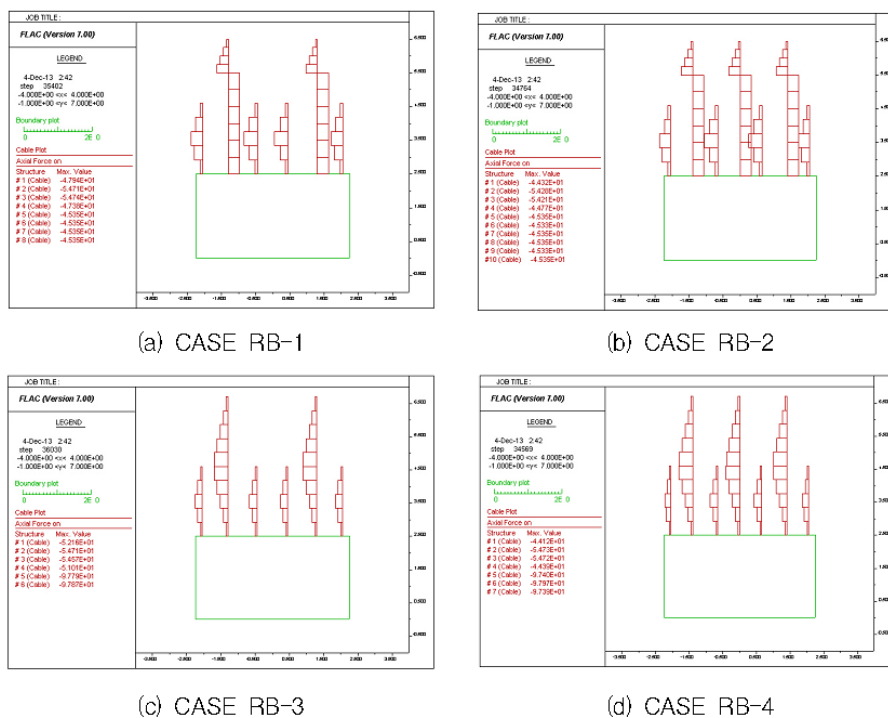
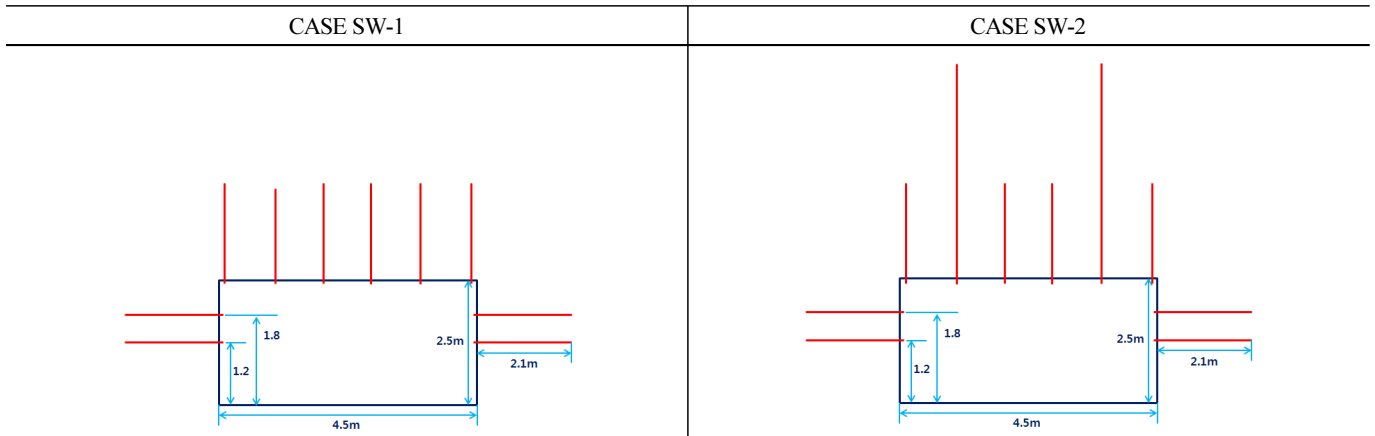


Fig. 4. Axial force analysis of rock bolt and cable bolt by cases

측벽보강

팽윤압(swelling pressure)에 의한 측벽의 변형거동을 억제하기 위하여 측벽에 록볼트를 시공하였다. 측벽에 대한 록볼트 시공 간격은 여러 가지 사례에 대한 수치해석을 실시하여 최적의 기본패턴을 Table 15와 같이 도출하였다.

Table 15. Rock bolt design for sidewall swelling pressure control



측벽의 천반 및 측벽에 설치되는 록볼트는 모두 2.1 m 길이의 전면 접촉형이며, SW-2와 SW-3은 동일한 패턴이지만 SW-2의 케이블 볼트는 4.2 m 길이의 선단정착형이고 SW-3의 케이블 볼트는 4.2 m 길이의 전면접착형이다.

Table 16. Comparison of displacements by cases

Classification		Roof disp. [mm]	Wall disp. (a) [mm]	Wall disp. Ratio [a/b]	Floor Disp. [mm]
No sidewall rock bolt	SW-1	375	422 (b)	1.00	39
	SW-2	367	419	-	39
	SW-3	358	420	-	39
Sidewall rock bolt	SW-1	370	372	0.88	38
	SW-2	363	372	0.88	38
	SW-3	356	369	0.87	38

Table 16의 해석결과와 같이 측벽에 록볼트를 미시공하였을 경우와 시공후의 측벽의 변위량은 약 13%의 감소효과를 나타내었다. 천반변위 또한 측벽의 록볼팅 시공을 통해서 약 5 mm 정도의 변위 감소효과가 나타났다. 이러한 변위 감소효과는 초기의 변형거동을 억제하여 갱도의 단면이 급격하게 축소되는 것을 지연시킬 수 있을 것으로 판단된다.

시공결과

재채굴 지역이 아닌 곳에서 갱도규격 4.5×2.5 m 경우 루프볼트에 의하여 처음 몇 달간은 천반컨트롤이 가능 하였지만 시간이 경

과할 수록 반팽(heaving)과 팽윤압(swelling pressure)등으로 Fig. 5와 같이 단면축소가 크게 되고 천반 전체가 서서히 침강되는 현상이 발생하였다.

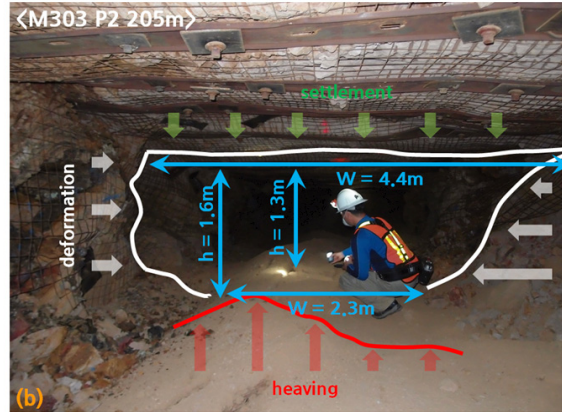


Fig. 5. Deformation of mine tunnel by swelling pressure and heaving



Fig. 6. Control of mine tunnel deformation by sidewall rock bolting

반팽부분을 편평하게 재 굴착하여도 지속적으로 반팽현상이 발생하였다. 따라서 바닥면을 광체 하부의 역암층으로 고정하여 굴착을 함으로써 반팽현상은 현저하게 감소시킬 수 있었다. Fig. 5에서 갱도 높이 부분의 최대 변형률은 48% $((2.5\text{ m}-1.3\text{ m})/2.5\text{ m})$ 정도가 되었다.

따라서 루프볼트와 함께 측벽에 대한 팽윤압을 억제하기 위하여 Fig. 6과 같이 측벽에서의 록볼트를 시공하여 초기 측벽변형을 억제함으로써 천반의 변형을 억제할 수 있었다.

결과검토

OO광산에 대한 효율적인 채광을 위한 체계적인 지보설계를 위하여 강건설계를 이용한 층서두께 배열과 이에따른 루프볼트의 설계를 실시하고 수치해석에 의한 검토, 시공에 의한 평가를 실시한 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구대상 광산에서 강건설계의 인자는 갱도굴진에 영향이 큰 4개의 층서이며, 인자가 변화할 수 있는 요소수준은 층서별 최소, 평균, 최댓값의 3개 수준으로 $L_9(3^4)$ 의 직교배열을 선택하여 81개의 경우의 수를 9개의 사례로 최소화하였다. 요소수준으로 M3층의 두께는 1.5~4.5 m, 하부응회암은 1.8~4.2 m, M3a는 0.5~2.5 m, 상부응회암은 3.0~9.0 m 이다. 직교배열에 의한 층서 두께 배열과 사례별 암반의 GSI를 평가하여 RMR을 분석한 결과 20~28정도로 산정되었다.
2. 채광갱도(3.0×2.5 m)의 하중고는 2.2~2.4 m이며, RMR 25일 때 단위 폭당 하중은 96~122 kN이고 평균안전율은 1.75~1.94, 운반갱도(4.5×2.5 m)의 하중고는 3.2~3.6 m로 RMR 25일 때 단위 폭당 하중은 215~274 kN, 평균안전율은 1.56~1.73으로 설계하였다.
3. 층서배열에 따른 지보량을 설정하고 안전율에 따른 영향인자(S/N 비)를 추출하여 층서에 대한 지보설계의 효과를 분석한 결과 안전율에 가장 영향을 크게 미치는 층은 M3층으로 분석되었다. 기어울 또한 M3층에서 제일 컸으며 갱도너비 3 m일 때 88.1%, 갱도너비 4.5 m일 때 88.7%로 유사하였다.
4. 수치해석결과 케이블 볼트 3개를 전면접착형으로 시공했을 때 천반 컨트롤 효과가 가장 양호하였으며, 록볼트 4개와 케이블 볼트 2개를 조합하였을 때 지보효과가 제일 양호하였다. 케이블 볼트가 선단 정착형으로 시공되더라도 볼트의 선단이 응회암층에 정착되면 더 좋은 지보효과를 발현하는 것으로 분석되었다.
5. 수치해석결과에서 측벽에 록볼트를 시공하였을 경우 측벽의 변위량은 미시공사와 비교하여 약 13%의 감소효과를 보였다. 이러한 감소효과는 초기의 변형거동을 억제하여 갱도의 단면이 급속하게 축소되는 것을 지연시킬 수 있을 것으로 판단된다.
6. 루프볼트 시공결과 재채굴 지역이 아닌 곳에서는 단기간의 천반컨트롤이 가능하였지만 시간이 경과할수록 반팽과 팽윤압 등으로 단면 축소현상이 크게 나타났다. 또한 천반 전체가 서서히 침강되는 현상이 발생하였으나 측벽에 록볼트를 시공하는 경우 초기 측벽변형을 억제하는 효과로 인하여 천반의 변형을 감소시킬 수 있었다.

사사

본 연구는 한국광물자원공사의 자체 연구과제인 “OO 광산 연약암반에 적합한 지보시스템 개발”의 일환으로 수행되었으며 현장 조사를 수행한 개발기술팀 직원들에게 감사드립니다.

REFERENCES

- Klein, S., 2001, An Approach to the classification of weak rock for tunnel projects, 2001 RETC proceedings, 793-805.
- Madhav S. P., 1989, Quality Engineering Using Robust Design, 334p.
- Dennis R. Dolinar I and Lewis A. Martin, 2000, Cable Support in Longwall Gate Roads; Proceedings; New Technology for Coal Mine Roof Support, CDC Stacks, 165-191.
- Simpson T.W., 2001, Taguchi's Robust Design Method, IE 466-Concurrent Engineering, 9p.
- Ceballos F., Olalla C., Jiménez R., 2014, Relationship between RMR and GSI based on in situ data, EUROCK 2014, 375-380.
- Ünal E., 1984, Empirical approach to calculate rock loads in coal mine roadways, Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, 232-246.