

< 논문 >

터널지보의 굽힘거동에 관한 연구

이동우* · 조석수** · 주원식†

(2007년 4월 9일 접수, 2007년 7월 9일 심사완료)

A Study on Bending Behavior of Tunnel Support

Dong Woo Lee, Seok Swoo Cho and Won Sik Joo

Key Words: Design of Experiment(실험계획법), Desirability Function(만족도 함수), Fish Plate(이음판), Stability(안정성), Tunnel Support(터널지보)

Abstract

The tunnel stability concerned with safety is very important in coal production process. The tunnel supports made by the GI beam has been used in domestic coal mine tunnels, and the GI beam was connected with another by the fish plate. It is necessary to analysis for the bending problems of the fish plate due to the rock pressure in some domestic mine tunnels. Therefore, this study proposes the application possibility of the optimization algorithms for the problem searching a load condition that bring about bending problem in tunnels. Consequently, in order to investigate the load conditions, desirability function as one of the optimization methods to study the bending behavior of tunnel supports was applied.

1. 서 론

국내의 석탄 산업은 1896년 러시아인이 함경북도 경원과 종성의 2곳에 대한 채광 허가를 얻어 시작한 이 후 계속되고 있다. 석탄 생산 공정에서 터널과 갱도의 설치는 중요하며, 특히 굴착 및 굴착 후 터널의 안정성(Stability)은 사람의 생명과 직결되는 문제로서 매우 중요하다고 할 수 있다.

국내 탄광의 터널에 사용되는 지보재의 대부분이 GI 빔(GI Beam)을 이용한 강지보(Steel support)를 많이 사용하고 있으며, 국내 탄광의 일부이지만 이러한 강지보가 설치된 탄광 중에서 GI 빔과 GI 빔을 연결하는 이음판(Fish plate) 부분이 지압을 견디지 못하고 굽힘을 받아 휘어지는 현상

이 발생하고 있어 이에 대한 원인분석과 문제해결이 요구되고 있다.

XX 탄광의 경우, 터널지보(Tunnel support)의 아치부가 일반적인 굽힘 거동이 아닌, 위쪽 방향으로 굽힘이 발생하고 있다.⁽¹⁾ 이러한 경우는 터널지보에 수직하중 이외에 수평하중이 과대하게 작용하는 경우로 볼 수 있으며 이러한 수평하중은 지하암반의 급격한 변화에 의한 암반의 이완 범위의 증가나 지하수의 누출 등으로 인한 수리학적 요인 등의 복합적인 문제가 작용하여 나타난다. 따라서 터널지보에 작용하는 수평하중의 크기를 파악하는 것은 상당히 복잡한 문제이다.

하지만 터널지보에 작용하는 수평하중을 추정하는 문제는 터널지보의 각 썩기에 작용하는 수평하중의 조건을 결정하는 문제로 정의할 수 있으며, 이러한 문제는 굽힘을 일으키는 최대응력을 목적함수로, 각 썩기에 작용하는 수평하중의 크기를 변수로 하는 최적화 문제로 볼 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 터널지보의 안정성을 평가하기 위하여 실험계획법의 하나인 먼중심 중

† 책임저자, 회원, 동아대학교 기계공학과
E-mail : wsjoo@donga.ac.kr
TEL : (051)200-7641 FAX : (051)200-7656

* 동아대학교 기계공학과
** 강원대학교 자동차공학과

심함성법을 이용하여 구조해석을 대신할 회귀식을 구한 후, 이를 최적화 방법 중 하나인 만족도 함수에 적용하여 위쪽 방향으로 굽힘을 일으키는 수평하중의 크기를 추정하여 터널지보의 굽힘거동을 규명하였으며, 이러한 경계조건을 찾는 문제에 최적화 알고리즘의 적용 가능성을 제시하였다.

2. 터널지보에 관한 기초적 연구

2.1 터널지보

Fig. 1은 터널지보의 형상 및 치수를 나타낸 것이고, 터널 지보의 구조는 그림에 나타낸 것과 같이 양쪽의 GI 빔을 이음판을 이용하여 연결하는 구조로 되어 있다. 또한 터널지보와 지하암반 사이에는 Fig. 1과 같이 일정 간격으로 썸기를 박음으로써 지하암반의 이완을 방지하고 지압을 균등하게 터널지보에 전달한다.

그리고 Fig. 2는 터널지보에 사용된 GI 빔과 이음판의 단면 나타낸 것으로 규격은 100×80 GI 빔이다.⁽¹⁾

2.2 터널지보의 굽힘 현상

국내 탄광의 일부이지만 H형강 또는 GI 빔의

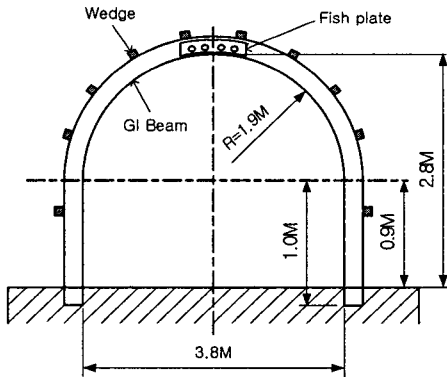


Fig. 1 Schematic illustration for structure of tunnel support

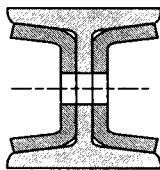


Fig. 2 Section of tunnel support

터널지보가 설치 된 탄광 중에서 GI 빔과 GI 빔을 연결하는 이음판 부분이 지압을 견디지 못하고 굽힘을 받아 휘어지는 현상이 발생하고 있다.

일반적으로 터널지보의 하중지지능력을 평가하는데 있어서 "지보의 가장 극단적인 지지조건은 슛크리트가 타설되기 직전의 상태에서 터널 천단부에 수직하중이 작용"하는 경우이며⁽²⁾ 따라서, 터널의 천단부 아치에서 최대굽힘모멘트가 발생되므로 보통의 경우 Fig. 3(a)에 나타낸 것과 같이 터널지보의 아치부가 아래 방향으로 굽힘이 일어나는 것이 보통이나, Fig. 3(b)와 같이 터널지보의 아치부가 위 방향으로 굽힘이 발생하고 있다.

Fig. 4는 XX 탄광의 터널지보로써 지압을 견디지 못하고 이음판 부분이 굽혀진 것을 나타낸 것이다. 이러한 터널지보 이음판 부분의 굽힘 현상은 보통 100개중 1개 또는 2개 정도로 발생하고 있어,⁽¹⁾ 터널지보의 교체 비용 발생 뿐 아니라 심각한 사고로 이어질 수 있어 이에 대한 원인분석 및 문제해결이 필요한 실정이다.

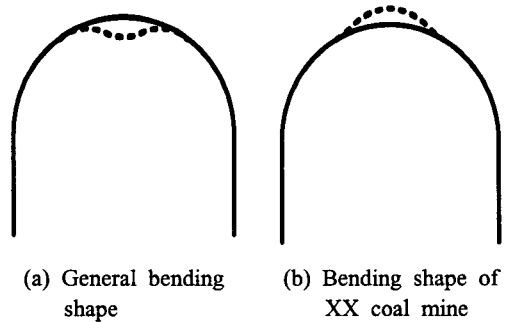


Fig. 3 Schematic illustration for bending shape of tunnel support



Fig. 4 Photograph for bending of tunnel support

3. 터널지보의 굽힘거동 해석

3.1 재료 시험

터널 지보로 사용하고 있는 GI 빔과 이음판의 기계적 성질을 구하기 위하여 980 kN인 만능재료시험기(Shimadzu, UH-F100A)를 이용하여 시험을 수행하였다. Table 1은 인장시험 결과를 나타낸 것이다.

3.2 터널지보의 유한요소해석

3.2.1 유한요소모델

터널지보에 대한 구조해석은 CATIA V5R14에 내장되어 있는 선형해석 프로그램을 이용하였다.⁽³⁾ 터널지보의 구조가 대칭인 점을 이용하여 터널지보의 1/2만 모델링하였다. 모델에 사용된 요소는 CATIA에서 지원하는 솔리드 10절점 4면체 요소(3-D Ten-node tetrahedron element)이며, 요소수는 39,231개, 절점수는 69,289개이다.

GI 빔의 재료는 열간압연 형강이고, 이음판의 재료는 일반구조용 압연강재로 각각의 재료물성치는 Table 1의 값을 사용하였다.

3.2.2 경계조건

터널지보는 GI 빔과 이음재로 구성되어 있으며 이 사이를 둥근머리 볼트와 너트로 체결하는 구조로 이루어져 있으나, 터널지보의 굽힘현상이 이음판에서만 발생하고 있어 본 연구에서는 해석의 효율성을 위하여 볼트체결은 적용하지 않고, GI 빔과 이음재 사이는 하나의 바디로 인식하여 두 접촉면에 선형접촉 조건을 적용하였다.

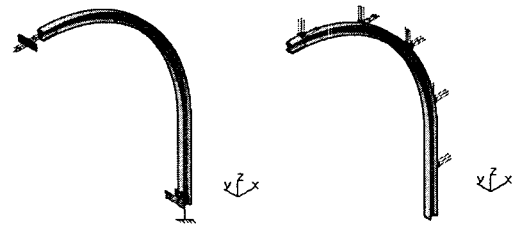
터널지보의 구조가 대칭인 점을 이용하여 터널지보의 1/2 대칭면은 x 방향만 구속하였으며, 터널 지지부는 x와 y 방향을 구속하였으며 지지부의 아래면은 모든 방향을 구속하였다. 그리고 Fig. 5(a)는 터널지보의 경계조건을 나타낸 것이다.

3.2.3 하중조건

터널지보에 작용하는 하중은 Table 3에 나타낸 면중심 중심합성 설계에 의하여 구한 조건에 따라 하중을 부하하였다. Fig. 5(b)는 터널지보의 하중조건을 나타낸 것으로 터널지보와 지하암반 사이의 썩기 면적에 해당하는 부분에 수평하중과 수직하중으로 부하하였다.

Table 1 Material properties of steel arch tunnel support

Materials	GI Beam	Fish plate
Tensile Strength, σ_t (MPa)	578.2	531.1
Yield Strength, σ_y (MPa)	386.4	370.0
Young's modulus (GPa)	210	200
Poisson's ratio	0.267	0.266
Elongation (%)	35	26



(a) Boundary conditions (b) Load conditions

Fig. 5 Boundary and load conditions of tunnel support

3.3 터널지보의 안정성 평가

2.1절에서 서술한 것과 같이 XX 탄광의 경우, 터널지보의 아치부가 일반적인 굽힘 거동이 아닌, 위쪽 방향으로 굽힘이 발생하고 있다. 이러한 경우는 터널지보에 수직하중 이외에 수평하중이 과대하게 작용하는 경우로 볼 수 있으며 이러한 수평하중은 지하암반의 급격한 변화에 의한 암반의 이완범위의 증가나 지하수의 누출 등으로 인한 수리학적인 요인 등의 복합적인 문제가 작용하여 나타난다. 따라서 터널지보에 작용하는 수평하중의 크기를 파악하는 것은 상당히 복잡한 문제이다.

하지만 터널지보에 작용하는 수평하중의 크기를 추정하는 문제는 터널지보의 굽힘을 발생시키는 경계조건을 결정하는 문제로 정의할 수 있으며, 이러한 문제는 굽힘을 일으키는 최대응력을 목적함수로, 터널지보의 각 썩기에 작용하는 수평하중을 변수로 하는 최적화 문제로 볼 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 터널지보의 굽힘 거동을

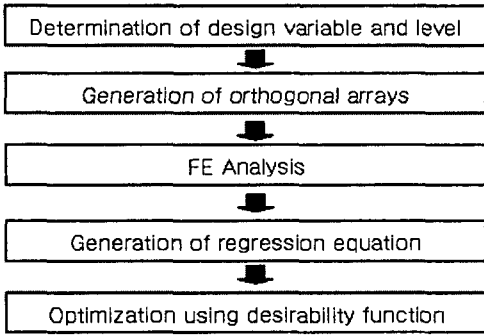


Fig. 6 Flow chart of optimization

최적화 문제로 변환하여 터널지보의 위쪽 방향으로 굽힘을 일으키는 수평하중의 크기를 추정하여 터널지보의 굽힘 거동을 규명하였다.

Fig. 6은 터널지보의 안정성을 평가하기 위한 터널지보에 작용하는 수평하중을 추정하기 위한 흐름도를 나타낸 것이다. 첫번째, Terzaghi가 제안한 암반분류법에 따라 하중의 크기를 결정한 후, 이를 기초로 실험계획법의 하나인 면중심 중심합성법을 이용하여 직교배열표를 구성한다. 두번째, 직교배열표에 따라 터널지보에 작용하는 최대응력과 최대변위를 구한 후, 이를 이용하여 터널지보에 작용하는 하중에 대한 최대응력과 최대변위에 대한 회귀식을 구한다. 마지막으로 앞에서 구한 회귀식을 최적화 방법 중 하나인 만족도 함수에 적용하여 위쪽 방향으로 굽힘을 일으키는 수평하중의 크기를 추정한다.

3.3.1 터널지보의 하중 결정

터널지보에 작용하는 하중은 지하 암반의 굴착시에 발생하는 암반의 이완에 의하여 발생하며, 이러한 이완하중은 일반적으로 Terzaghi가 제안한 암반분류법에 의하여 하중을 계산한다.⁽⁴⁾ Terzaghi가 제안한 이완하중은 지하암반의 지질조건에 따라 수직하중만 고려하는 경우, 수직하중과 수평하중을 동시에 고려하는 경우로 나뉘어 진다.

본 연구에서는 Rose가 수정한 Terzaghi의 암반분류에 의하여 터널지보에 부과되는 하중을 계산하였다.⁽⁴⁾ XX 탄광의 경우, 지하암반이 대부분이 파쇄사암과 층상셰일로 구성되어 있으므로, 기존의 연구들을 참고하여, 5와 6등급으로 암반하중을 결정하였다.⁽⁵⁻⁷⁾

Table 2는 Terzaghi의 암반하중을 기초로 하여

Table 2 Load conditions of tunnel support

Rock condition	Rock load		
	H _p (m)	p _v (Pa)	p _h (Pa)
5. Very blocky and seamy	2.31	61122.6	-
6. Completely crushed and chemically intact	7.26	192099.6	68743.1

H_p : Rock load, p_v: Vertical load, p_h : Horizontal load

터널지보에 작용하는 하중을 계산한 것이며, 지하암반의 비중량(γ)은 26.46 kN/m'이고, 터널의 높이(H_t)는 3.8 m, 폭(B)은 2.8 m이다.

Table 2의 하중을 기초로 터널지보의 유한요소 해석을 수행한 결과, 암반조건이 5인 경우는 최대응력이 163 MPa로 터널지보의 항복강도를 넘지 않으므로 안정성에는 문제가 없음을 알 수 있으나 암반조건이 6인 경우는 최대응력이 345 MPa로 항복강도를 초과하지는 않지만 항복강도에 근접한 값을 가지므로 주의가 요구된다.

암반 조건 5와 6의 경우와 터널지보의 굽힘 방향을 기초로, 터널지보의 굽힘현상은 시간의 경과에 따른 암반의 이완에 의한 수평하중의 증가에 기인한다고 볼 수 있다.

3.3.2 면중심 중심합성법에 의한 회귀식 추정

수평하중의 변화에 따른 터널지보에 발생하는 응력은 유한요소해석으로 구할 수 있으나 유한요소해석의 경우는 비용과 해석에 많은 시간을 요구하기 때문에 많은 수의 해석을 요구하는 문제에서 적합하지 않다.

따라서 본 연구에서는 해석 시간을 단축시키기 위하여 반응표면법의 하나인 면중심 중심합성법을 이용하여 수평하중의 변화에 따른 터널지보에 발생하는 최대응력과의 관계를 회귀식으로 추정하였다.

해석에 사용된 수직하중은 터널지보의 굽힘현상을 고려하여 일정하게 작용하는 것으로 가정하였으며 Table 2의 암반조건 6의 값을 사용하였다. 수평하중의 수준은 4427.06, 16621, 28814.94 N의 3수준으로 Table 2의 암반조건 6의 값을 기초로 결정하였다. 그리고 수직하중과 수평하중은 터널지보의 썩기에 작용하는 값으로 Fig. 7에 나타나 있었다.

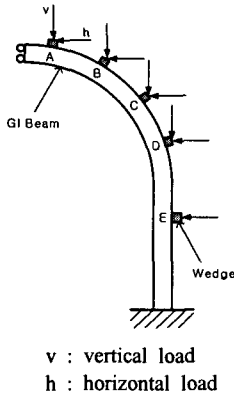


Fig. 7 Schematic illustration for factor

Table 3은 회귀식을 구하기 위하여 수평하중을 인자로 터널지보의 최대응력과 최대변위를 반응치로 하여 실험계획과 그 결과를 나타낸 것이다.

Table 3을 이용하여 추정한 회귀식은 식 (1)과 (2)(유의수준 0.05)와 같으며, 식 (1)은 최대응력에 대한 것으로 결정계수 R²값과 수정 결정계수 R²_{adj} 값은 각각 98.6과 98.0이고, 식 (2)는 최대변위에 대한 것으로 결정계수 R²값과 수정 결정계수 R²_{adj} 값은 각각 99.7과 99.6이다.

$$\begin{aligned} \sigma_{max} = & -664.437872-0.002909A+0.01091B \\ & +0.022556C+0.015812D+0.005788E \\ & -0.0000001AD-0.0000001BE \\ & -0.0000002CD \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \delta_{max} = & -8.30787-0.000012A+0.000077B \\ & +0.00027C+0.00026D+0.000087E \end{aligned} \quad (2)$$

3.3 회귀식과 만족도 함수를 이용한 부하하중 추정

터널지보의 굽힘현상을 규명하는 것은 각 쉐기에 작용하는 수평하중의 크기를 결정하는 문제로 정의할 수 있으며, 이러한 문제는 터널지보에 발생하는 최대응력과 그 때의 최대변위를 목적함수로, 터널지보의 각 쉐기에 작용하는 수평하중을 변수로 하는 최적화 문제로 볼 수 있다. 따라서 굽힘을 일으키는 수평하중의 경계조건을 찾는 최적화 문제로 변화하여 터널지보의 굽힘거동을 해석하였다.

Table 3 Experiment design and results for tunnel support

Exp. No.	Factors					Responses	
	A	B	C	D	E	σ_{max} (MPa)	δ_{max} (mm)
1	4427.1	4427.1	4427.1	4427.1	28814.9	-301.034	-3.37
2	28814.9	4427.1	4427.1	4427.1	4427.1	-454.503	-5.39
3	4427.1	28814.9	4427.1	4427.1	4427.1	-191.204	-3.33
4	28814.9	28814.9	4427.1	4427.1	28814.9	-206.681	-1.67
5	4427.1	4427.1	28814.9	4427.1	4427.1	95.2	1.35
6	28814.9	4427.1	28814.9	4427.1	28814.9	137	2.85
7	4427.1	28814.9	28814.9	4427.1	28814.9	394.189	4.91
8	28814.9	28814.9	28814.9	4427.1	4427.1	295.669	2.89
9	4427.1	4427.1	4427.1	28814.9	4427.1	-106	-2.13
10	28814.9	4427.1	4427.1	28814.9	28814.9	121	3.84
11	4427.1	28814.9	4427.1	28814.9	28814.9	275.274	4.67
12	28814.9	28814.9	4427.1	28814.9	4427.1	176.754	2.76
13	4427.1	4427.1	28814.9	28814.9	28814.9	442.9	9.18
14	28814.9	4427.1	28814.9	28814.9	4427.1	344.379	7.17
15	4427.1	28814.9	28814.9	28814.9	4427.1	598.88	9.22
16	28814.9	28814.9	28814.9	28814.9	28814.9	643.368	10.9
17	4427.1	16621	16621	16621	16621	185.237	2.93
18	28814.9	16621	16621	16621	16621	158.221	2.75
19	16621	4427.1	16621	16621	16621	50	2.18
20	16621	28814.9	16621	16621	16621	285.471	3.78
21	16621	16621	4427.1	16621	16621	-156.858	-0.886
22	16621	16621	28814.9	16621	16621	369.284	6.04
23	16621	16621	16621	4427.1	16621	-106.481	-0.385
24	16621	16621	16621	28814.9	16621	309.827	5.92
25	16621	16621	16621	16621	4427.1	135.977	1.92
26	16621	16621	16621	16621	28814.9	207.481	3.76
27	16621	16621	16621	16621	16621	171.729	2.84

본 연구에서는 통계처리 프로그램인 미니탭 13(Minitab 13)에서 지원되는 반응 최적화(Response optimizer)의 만족도 함수를 적용하여 최적화를 수행하였다.⁽⁸⁾ 미니탭의 반응 최적화 절차는 우선, 각각의 목적함수에 대한 개별 만족도를 구한 후, 개별 만족도를 결합하여 합성된 만족도를 구하고, 끝으로 합성된 만족도를 최대화 하는 인자의 최적치를 결정한다. 그리고 반응 최적화의 합성된 만족도는 개별 만족도에 대하여 가중치하평균을 적용하여 구한다.⁽⁹⁾

Fig. 8은 목적함수가 목표값을 가지는 경우에 대한 반응 최적화의 만족도 함수를 나타낸 것이다.⁽⁹⁾ 각 목적함수에 대하여 가중치(Weight)를 부여할 수 있으며 이 가중치에 의하여 만족도 함수가 변화한다. 가중치는 0.1에서 10까지 이며, 목적

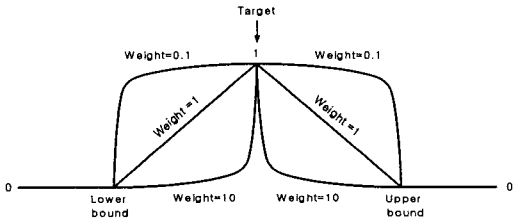


Fig. 8 Schematic illustration of desirability function for target value



Fig. 9 Dimension of bending point

함수의 중요도가 동일할 경우 1로 설정한다.

본 연구에서는 2 가지의 경우에 대하여 최적화를 수행하였다. 첫째, 터널지보의 안정성은 재료의 항복강도를 기준으로 결정하므로 터널지보의 최대응력이 항복강도와 같아지는 수평하중 조건에 대하여 수행하였으며, 둘째는 실제 굽힘이 발생한 터널지보에서 실제 변위를 측정하여 이러한 변위를 발생시키는 수평하중 조건을 결정하는 것에 대하여 수행하였다. Fig. 9는 실제 굽힘현상이 발생한 터널지보를 나타내며 측정된 실제 변위는 9.3 mm이다.

Fig. 10과 Table 4는 미니탭을 이용한 두 경우에 대한 최적화 결과를, Fig. 11과 12는 각 경우에 대한 유한요소해석 결과를 나타낸 것이다. Table 4에 나타난 것과 같이 Case I의 경우는 전체 수평하중이 100196.65 N 작용하는 경우 터널지보가 불안정해 지며, Case II의 경우는 전체 수평하중이 117486.50 N 작용할 때 발생한다는 것을 알 수 있다.

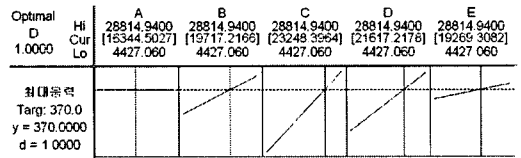
4. 결론

실험계획법과 최적설계 알고리즘을 적용하여 터널지보의 굽힘거동을 규명하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

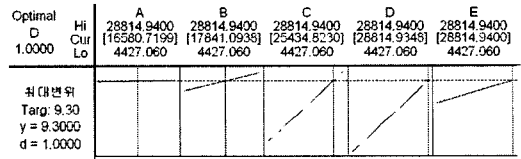
Table 4 Analysis results of boundary conditions for bending shape of tunnel support

Case	Factors					Responses		Remark
	A (N)	B (N)	C (N)	D (N)	E (N)	σ_{max} (MPa)	δ_{max} (mm)	
I	16344	19717	23248	21617	19269	370.0	6.04	R
	.50	.22	.40	.22	.31	372.6	6.28	F
II	16580	17841	25434	28814	28814	508.4	9.3	R
	.72	.09	.82	.93	.94	499.8	9.24	F

R : Regression, F : FE Analysis

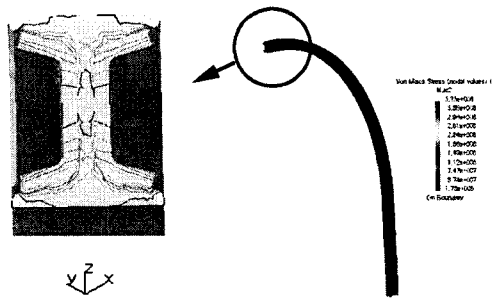


(a) Case I

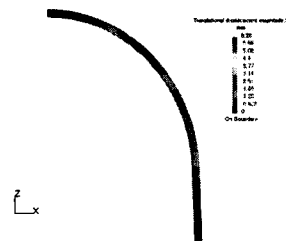


(b) Case II

Fig. 10 Optimization results of tunnel support using MINITAB

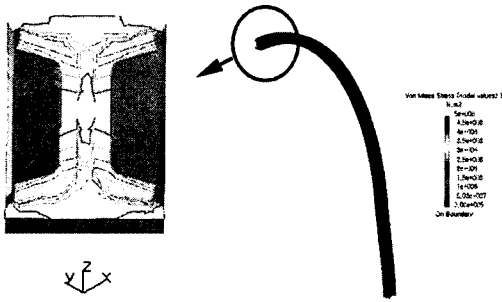


(a) Maximum stress ($\sigma_{max} = 372.6$ MPa)

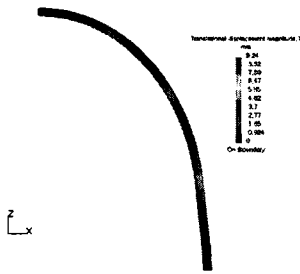


(b) Maximum displacement ($\delta_{max} = 6.28$ mm)

Fig. 11 FEM results of tunnel support for Case I



(a) Maximum stress ($\sigma_{max} = 499.8 \text{ MPa}$)



(b) Maximum displacement ($\delta_{max} = 9.24 \text{ mm}$)

Fig. 12 FEM results of tunnel support for Case II

(1) 터널지보의 굽힘현상에 대하여, 터널지보에 발생하는 최대응력을 목적함수로, 각 쉐기에 작용하는 수평하중의 크기를 변수로 하는 최적화 문제로 변환하여, 터널지보의 위쪽 방향으로 굽힘을 일으키는 수평하중의 크기를 추정하여 터널지보의 굽힘거동을 규명하였다.

(2) 터널지보의 굽힘을 발생시키는 수평하중의 크기는 Case I의 경우는 100.2 kN, Case II의 경우는 117.5 kN으로 추정되었다.

(3) 터널지보에 작용하는 수평하중과 같이 복잡한 경계조건을 가지는 문제에 대하여, 실험계획법과 최적화 알고리즘을 이용하여 그 경계조건을 결정할 수 있었다.

참고문헌

- (1) XX Coal Mine Co., 2001, "Maintenance of Tunnel Support".
- (2) Chung Sik Yoo, Yeon Jung Kim, Gyu Jin Bae and Hong Deuk Moon, 1997, "An Exerimental Study on Load Bearing Capacity of Lattice Girder as a Steel Support in Tunnelling," *Korean Geotechnical Society*, Vol. 13, No. 8, pp.163~175.
- (3) Dassault system Inc., "CATIA Generative Structure Analysis," CATIA V5R14.
- (4) Terzaghi K., 1946, "Rock defects and loads on tunnel supports in rock tunneling with steel support," *R. V. proctor and T. white Eds, Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown*, pp.15~99.
- (5) Jong Wook Kim, Young Geun Kim, Chung In Lee, 2002, "Numerical Analysis of Tunnel Stability for Excavation near Coal Mine," *Proceedings of the KSRM 2002 Spring Annual Meeting*, pp.27~36.
- (6) Yong Il Kim, Young Hoon Yoon, Sang Kook Cho, Jong Hwa Yang, Nai Yong Lee, 2002, "A Case Study on Construction of Long Tunnel in the Youngdong Railroad (Mt. Dongbaek - Dokye)," *Proceedings of the KSRM 2002 Fall Annual Meeting*, pp.16~30.
- (7) Tai No Lee and Han Uk Lim, 1993, "The Case Study on Application of SWELLEX & SWELLEX Cable Bolt to Support Drifts in Soft Rock of the Coal Mine," *Korea Society for Rock Mechanics*, Vol 3, pp.1~10.
- (8) Minitab Inc., "MINITAB Response Optimizer," Minitab R13.
- (9) Eretec Inc., 2000, "MINITAB Practical Affairs," Eretec, pp.16~27.