

# 지하 암반 공동내 지보시스템의 구조적 안전성 평가 방법

## A Method for Assessing Structural Safety of Ground - Support Systems in Underground Rock Cavern

장 승 필 (Sung Pil, Chang)  
서 정 문 (Jeong Moon, Seo)

서울대학교 토목공학과  
원자력연구소 종합안전평가팀

### 요약/Abstract

NATM공법에 의한 지하 암반공동에서 슛크리트내의 불평형력이 지보시스템에 전달되는 하중 전달 메커니즘을 고려하여 지보시스템내의 응력 재분배 과정을 모델링하였으며, 그에 따른 지보시스템의 해석모델을 제안하고 슛크리트의 탄성거동에 관하여 고찰하였다. 응력 재분배 모델을 이용하여 설계변수가 변화함에 따라 지보시스템에 미치는 영향을 분석한 결과 슛크리트의 최대 압축응력은 현저히 감소되었다. 암반의 수평지압계수 및 탄성계수가 구조응답에 큰 영향을 미치나 지보시스템 자체의 특성 변화가 응답에 미치는 영향은 매우 적었다. 구조재의 안전율을 평가할 수 있는 상관식을 제시하였다. 본 연구결과를 이용하여 지하구조물의 안전성을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

A stress redistribution process in ground support system is modeled taking into consideration of load transfer mechanism of unbalanced load within shotcrete in a rock cavern constructed by NATM. The corresponding analysis model for ground support system is proposed and the elastic behavior of the shotcrete is studied. The effect on the support system due to variation of several design parameters is analysed with the proposed model. The suggested model yields considerably reduced maximum compressive stresses in shotcrete. Both the pressure coefficient in horizontal direction and the elastic modulus of rock mass govern overall responses, whereas the variation of the properties in support system shows a little difference in system responses. Interaction equations for evaluating safety factors for structural members are suggested. The result of this study can be used in the structural safety assessment of underground structures.

### 서 론

지하 원유비축시설, 방사성폐기물 영구처분장, 지하철과 같은 중요한 시설의 운영중 안전성 확보는

매우 중요하다. 그러나, 암반의 공학적 특성 평가의 어려움과 적절한 구조해석 도구의 확보 문제 및 설계기준의 미흡 등으로 인해 암반 및 지보시스템의 정량적인 안전성 평가가 사실상 어려운 실정이었다. 현재 지하 공간의 이용 증가 및 구조물의 대형화 추

세에 따라 정적 및 지진하중에 대한 지하 구조물의 안전성을 정량적으로 평가할 수 있는 기술의 개발이 시급한 과제로 대두되고 있으며, 일부 연구가 진행되어 왔다(서정문, 1996). 지하구조물의 내진해석 및 설계기술은 국내외적으로 현재까지 미정립된 상태이다.

본 연구에서는 대규모 지하공동에서 암반 및 지보시스템의 안전성을 평가할 수 있는 방법을 제시하였다. 구조물은 불연속면의 영향이 구조거동을 지배하지 않는 연속체역학에 의한 해석이 가능한 암반내에 NATM공법에 의해 건설된 것으로 가정하였다.

### 지보시스템의 응력 재분배 해석모델

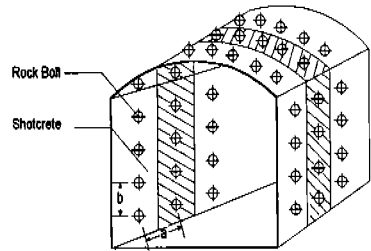
NATM공법에서 슛크리트와 록볼트 등에 작용하는 하중은 암반의 변위에 종속적이다. 정적하중 및 지진하중은 암반의 변형을 통하여 기계적 하중이 아닌 변위제한(Displacement Limited) 하중 형태로 지보시스템에 작용하게 된다. 과도 하중이 가해져서 슛크리트가 부분적으로 항복하거나 또는 시공중 발생하는 초기폭물이나 슛크리트 두께의 차이, 암반과 슛크리트의 접착 상실 등 여러 요인에 의해 슛크리트 또는 록볼트의 강성이 부분적으로 감소하게 되면 지보시스템내에는 불평형력이 발생하게 되고, 곧 여분의 하중이 주변 지보시스템에 재분배된다. 그리고, 지보시스템에는 일부 파쇄암의 자중 또는 일부 공극수압, 지진 가속도에 의한 관성력 등과 같은 등분포 하중이 슛크리트에 의해 지지된 후 암반에 전달된다.

지보시스템의 응력 재분배 해석을 위한 주요 가정은 (1) 지보시스템은 암반의 변형과 부합하는 변형을 한다. (2) 탄성한계 내의 암반영역에서 슛크리트는 암반과 접착되어 접촉면에서 미끄러짐이 발생하지 않는다. 그러나, 암반이 항복된 영역 또는 인장영역에서는 슛크리트와 암반의 접착은 상실된다. (3) 슛크리트 등 지보시스템은 탄성거동을 한다.

#### 해석모델 및 평형방정식

암반을 굴착하게 되면 굴착단면 주위의 암반에는 응력이 해방됨에 따라 초기응력이 재분배된다. 암반의 변형을 어느 정도 허용한 후 그림 1과 같이 구조물 축방향 및 둘레방향으로 일정하게 록볼트 및 슛크리트가 시공된 전형적인 지보시스템을 고려한다. 지하구조물은 평면변형도 상태에 있으므로 그림 1의 빗금친 부분과 같이 단면의 둘레방향으로 록볼트 간

격의 단위 스트립을 고려하고, 스트립내에서 록볼트 사이의 간격을 하나의 단위 판으로 고려한다.



a : rock bolt spacing in cavern axis direction  
b : rock bolt spacing in circumferential direction

Fig. 1 Typical arrangement of ground support system

단위 판에서 슛크리트 판의 스프링 상수를  $K_s$ , 슛크리트 판과 암반의 전단저항 접착스프링 상수를  $K_n$ , 록볼트의 전단스프링 상수를  $K_b$ 로 나타내면 지보시스템은 그림 2에서와 같이 이들 스프링으로 구성된 연속스프링시스템으로 이상화할 수 있다. 여기서, 상수  $K_b$ 는 실험에서 구할수 있으며,  $K_s$ 는 슛크리트의

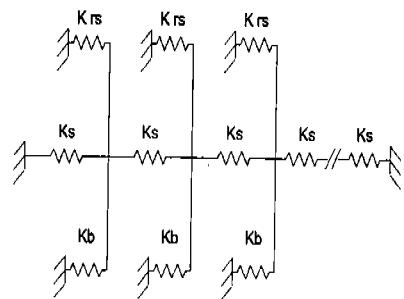


Fig. 2 Analytical model for ground support system

변형을 포물선으로 가정하여 변형에너지와 외력에 의한 일의 평형조건으로 부터 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$K_n = \frac{4}{5} \frac{ah}{b} E; E = \frac{E_c}{1 - \nu_c^2} \dots\dots\dots(1)$$

여기서,  $a$ 는 스트립의 폭으로서 동굴 축방향으로의 록볼트 간격,  $b$ 는 굴착 단면 둘레방향으로의 록볼트의 간격,  $h$ 는 슛크리트의 두께,  $E$ 는 슛크리트 판의 탄성 계수,  $E_c$ 는 슛크리트의 탄성계수,  $\nu_c$ 는 슛크리트의 포아슨비이다.

스�크리트와 암반의 접착스프링 상수,  $K_n$ 는 마찬가지로

지로 포물선 변형을 가정하면 식(2)와 같다.

$$K_n = \frac{2}{3} ka \dots\dots\dots(2)$$

여기서,  $k$ 는 단위 폭당 접착 스프링상수로서 실험에서 구할 수 있다.

다음에는 지보시스템의 응력 재분배 과정 및 힘의 평형을 고찰하기로 한다. 슛크리트 및 록볼트가 설치된 후 시멘트 모르타르가 양생됨에 따라 지보시스템 내에는 응력이 발생하기 시작한다. 지보시스템의 각 판넬에는 초기변형, 슛크리트의 두께 차이 등 여러 가지 요인에 의해 강성의 차이가 발생하며 이로 인해 불평형력이 발생한다. 이러한 불평형력은 최종적으로 지보시스템내에 재분배되고 평형을 이루게 된다. 지보시스템에 압축 막력이 작용하여 최종적으로 평형에 도달할 때까지의 과정을 그림 3에 보였다.

그림에서 하중이 재분배되기 전 임의의 절점  $n$ 에서의 힘의 평형을 고려하면 식 (3)과 같다.

$$F_n + S_n = F_{n+1} \dots\dots\dots(3)$$

여기서,  $F_n, F_{n+1}$ 은 각각  $n$ 번째 및  $n+1$ 번째 판넬에 작용하는 힘으로서 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

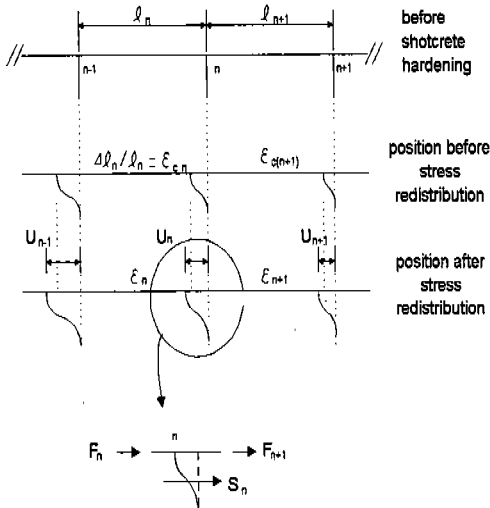


Fig. 3 Load transfer mechanism of ground support system

$$F_n = \epsilon_n E_n A_n = \epsilon_n C_n \dots\dots\dots(4)$$

여기서,  $\epsilon_n E_n A_n$ 은 각각  $n$ 번째 판넬의 최종변형도, 판넬의 탄성계수, 단면적을 나타낸다.  $S_n$ 은  $n$ 번째 절

점에 작용하는 절점력으로 식 (5)와 같이 정의된다.

$$S_n = K_n U_n; K_n = K_a + K_b + K_s \dots\dots\dots(5)$$

여기서,  $K_m, U_n$ 은 각각  $n$ 번째 절점의 스프링 상수 및 절점의 변위이다. 식 (4),(5)를 식 (3)에 대입 정리하면 식 (6)과 같다.

$$\epsilon_{n+1} = \frac{C_n \epsilon_n}{C_{n+1}} + \frac{K_n U_n}{C_{n+1}} \dots\dots\dots(6)$$

그런데

$$U_{n+1} - U_n = \{\epsilon_{n+1} - \epsilon_{cn}\} l_{n+1} \dots\dots\dots(7)$$

$$U_n - U_{n-1} = \{\epsilon_n - \epsilon_{cn}\} l_n$$

이므로 식 (6)에 식 (7)을 대입하여 정리하면 식 (8)과 같다.

$$a_1 U_{n-1} + a_2 U_n + a_3 U_{n+1} = R_n \dots\dots\dots(8)$$

여기서,  $a_1 = \frac{C_n}{l_n}$ ,

$$a_2 = -\left\{ \frac{C_n}{l_n} + K_n + \frac{C_{n+1}}{l_{n+1}} \right\}, a_3 = \frac{C_{n+1}}{l_{n+1}}$$

$R_n = C_n \epsilon_n - C_{n+1} \epsilon_{cn}$ 이다.

따라서 식 (8)로부터 양단이 고정된  $n$ 개의 연속된 판넬에 대한 평형방정식을 식 (9)와 같은 행렬식으로 표현할 수 있다. 이 식의 해  $u_i$ 는  $i$ 번째 절점의 전단변위로서 응력이 재분배된 후의 슛크리트의 응력은 판넬의 초기응력 및 절점의 전단 변위의 차로부터 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{(n-1)n} & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots(9)$$

**스utc리트의 탄성 안정성**

굴착단면의 대부분의 영역에서 슛크리트는 압축응력을 받게되며, 일부의 압축 파쇄된 암반 영역에서는 암반과 슛크리트의 접착은 상실될 것이다. 또한 시공 과정에서 슛크리트에는 부분적으로 굴착단면 내부 또는 외부로 시공오차에 의한 초기곡률이 발생한다. 따라서 대부분 얇은 두께로 시공되는 슛크리트의 좌굴에 대한 검토가 필요하다. 그러나, 천정부 및 벽체부 전체에 대한 좌굴은 고려할 필요가 없으며 록볼트 간격으로 이루어진 단위 판넬에 대한 국부 좌굴

만을 고려하면 된다.

**곡선 판넬의 국부 좌굴응력**

그림 4에서와 같이 4변이 고정된 곡선 판넬에 4변에서 막응력이 작용하는 경우를 고려한다. 판넬의 반경을 R, 중심각을  $\beta$ , 폭을  $2l_1$ 이라 하고, 경계조건을 만족하는  $x, y, z$  방향의 좌굴 변형함수를 식 (10)과 같이 가정한다.

$$\begin{aligned} u &= A \cos \frac{\pi x}{l_1} \sin \frac{2\pi\theta}{\beta} \\ v &= B \sin \frac{\pi x}{l_1} \cos \frac{2\pi\theta}{\beta} \dots\dots\dots(10) \\ w &= C(1 - \cos \frac{\pi x}{l_1})(1 - \cos \frac{2\pi\theta}{\beta}) \end{aligned}$$

여기서, A, B, C는 상수이다. 막응력이외의 모든 힘과 휨 및 비틀모멘트가 작고, 또한 이들과 각 변위 성분의 미분값과의 곱을 작다고 가정한 다음 힘의평형 조건을 이용하여 좌굴응력,  $\sigma_{x\alpha}$ 을 근사적으로 구하면 식 (11)과 같다.

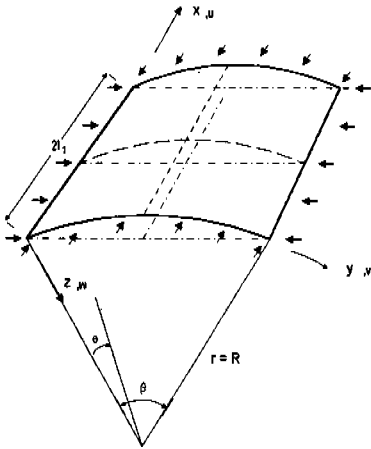


Fig. 4 Buckling of very flat curved shotcrete panel

$$\sigma_{x\alpha} = \frac{E_c h^2 \lambda \eta}{6(1 - \nu_c^2) R^2} \sqrt{2(1 - \nu_c)} \dots\dots\dots(11)$$

여기서,  $\lambda = \pi R / l_1$ ,  $\eta = 2\pi / \beta$ 로 정의된다. 만일 중심각이 매우 작고 반경의 크기가 증가하게 되면  $\lambda$ 가 증가하게 되고, 이때의 좌굴응력은 1변의 길이가 긴 구형 평판의 좌굴응력과 동일하다. 식 (11)에서 구해지는 곡선 판넬의 좌굴응력은 양변의 길이가 같거나 비슷한 경우와 중심각이 약  $28^\circ$  ( $1/2$  rad) 보다 작은 경우에 정확해와 비교적 잘 일치하나 중심각이 증가하게 되면 그 정도는 매우 저하된다.

**편평한 판넬의 국부 좌굴응력**

매우 큰 곡률 반경을 갖는 천정부 또는 벽체부에서의 곡선 판넬의 국부 좌굴 문제는 평판의 좌굴 문제로 근사화할 수 있으며, 이는 일반적으로 초기 곡률을 갖는 판넬의 좌굴문제를 비교적 용이하게 취급할 수 있다. 4변이 고정된 구형 슛크리트 평판에 두 적고 방향으로 크기가 비슷한 등 분포 압축 막응력이 작용할 경우 탄성한계 내에서 평판의 좌굴응력은 식 (12)와 같이 주어진다(Timoshenko and Gere, 1961).

$$\begin{aligned} &\left( \frac{\sigma_x}{1_1^2} + \frac{\sigma_y}{1_2^2} \right)_\alpha = \\ &\frac{1}{36} \frac{\pi^2 E_c h^2}{1 - \nu_c^2} \left( \frac{3}{1_1^4} + \frac{3}{1_2^4} + \frac{2}{1_1^2 1_2^2} \right) \dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

여기서,  $2l_1, 2l_2$ 는 각각 평판의 폭을 나타내며,  $\sigma_x, \sigma_y$ 는 막응력의 크기를 나타낸다.

초기 처짐,  $\delta_0$ 을 갖는 4변이 고정된 구형 평판에 막응력과 등분포 압력,  $p$ 가 동시에 작용할 경우, 막응력과 등분포 압력에 의한 처짐 및 모멘트는 외력에 의한 일과 변형 에너지로부터 구할 수 있다. 정사각형 판넬의 경우 판의 중앙에서 발생하는 최종 처짐량 및 최대 모멘트는 각각 식 (13) 및 식 (14)와 같다.

$$\delta = \frac{4l_1^4 p}{\pi^4 D} \frac{1}{1 - \gamma} + \delta_0 \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma} \dots\dots\dots(13)$$

$$M_l = \frac{2l_1^2 p}{\pi^2} \frac{1}{1 - \gamma} + \frac{\pi^2 \delta_0 D}{a^2} \frac{\gamma}{1 - \gamma} \dots\dots\dots(14)$$

여기서,  $D$ 는 평판의 강성을 나타내며,  $\gamma$ 는 임계응력에 대한 막응력의 비를 나타낸다. 판넬의 단위 스트립을 고려하여 슛크리트의 최종 변형도를 구하면 식 (15)와 같으며, 이때 판넬의 응력은 초기처짐,  $\delta_0$ 을 갖는 판넬의 실험 결과로부터 구할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\pi^2 \delta_0^2}{L^2} \frac{\gamma}{(1 - \gamma)^2} + \frac{\sigma}{E_c} \dots\dots\dots(15)$$

여기서,  $L$ 는 판넬의 폭이다.

**응력재분배 해석모델에 미치는 설계변수의 영향**

지하구조 물의 해석시 입력으로 사용되는 여러가지 변수의 값이 변화함에 따라 이들이 본 연구에서 제시한 지보시스템의 응력 재분배 해석모델의 해석 결과에 미치는 영향을 검토하였다. 시공중인 원형 터

널의 막장부에서의 하중분배율에 관한 연구결과, 주요 설계변수는 단면크기, 암반특성치, 슛크리트의 두께 등으로 밝혀졌다(정대열, 1993). 본 연구에서 고려된 변수는 암반의 수평지압계수 및 탄성계수, 슛크리트의 두께, 록볼트의 전단 스프링상수, 슛크리트-암반의 접착 스프링상수등이다.

**해석조건**

대상 구조물은 그림 5와 같이 폭 20m, 높이 13m인  $\cap$ 형 단면으로 지표에서 동굴저면까지의 깊이는 100m로 가정한다. 천정부의 곡률반경은 18m이며 변곡점은 동굴 저면으로부터 10m상단에 위치한다. 단면은 2단계로 나누어 굴착된다. 암반은 평균 RMR 값이 40인 보통의 등방성 응회암으로서 단위중량은  $25\text{KN/m}^3$ , 포아슨비는 0.15, 점착력은 5.5MPa, 내부마찰각은  $12^\circ$ , 일축 압축파괴강도는 20MPa로 가정한다. 록볼트는 동굴 축방향 및 단면의 둘레방향으로 벽체와 천정부에 직경 32mm, 길이 4.3m인 전면접착식 강봉을 2.5m간격으로 설치한다. 록볼트의 항복강도는 280MPa, 탄성계수는 200GPa을 사용한다. 전단면에 시공되는 슛크리트의 압축파괴강도는 35MPa, 탄성계수는 28GPa, 포아슨비는 0.15를 적용한다. 영향분석에 고려된 변수의 범위는 표 1과 같다. 표에서 밑줄은 다른 변수의 영향을 구할 때 고려된 값을 나타낸다.

전체적인 구조해석에는 범용 구조해석 코드인 ABAQUS를 이용하였다. 암반 및 슛크리트를 각각 2차원 고체요소 및 쉘요소로 모델하였으며 록볼트는 철근요소를 사용하여 모델하였다.

해석에는 재료의 비선형성만을 고려하여 암반에 대해서는 Mohr-Coulomb의 소성 및 Associ-ated Flow를 적용하였으며, 슛크리트 및 록볼트는 선형탄성으로 모델하였다. 굴착면으로부터 약 1m 깊이까지는 발파에 의한 암반의 손상이 발생하여 탄성계수가 감소하고 포아슨 비는 증가한다. 해석시 이를 고려하였으며 순차적 시공단계를 고려하였다. 지하수가 있는 경우에는 배수개념에 따라 슛크리트에 작용하는 수압이 달라지나 본 해석에서는 완전 배수개념을 적용하였다.

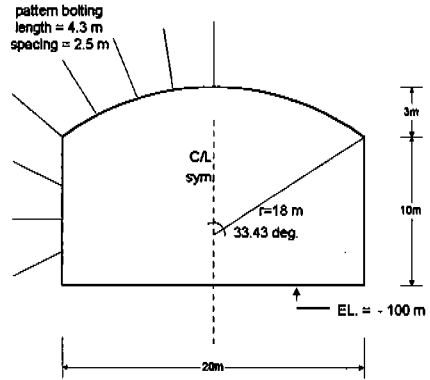


Fig. 5 Dimension of a cavern for parametric study

Table 1. Range of values for selected parameters for parametric study

Parameter	Unit	Value
Horizontal Pressure Coefficient of Rock Mass		0.5 / <u>1.0</u> / 2.0
Elastic Modulus of Rock Mass	GPa	3.85 / <u>5.62</u> / 8.22
Thickness of Shotcrete	m	0.05 / <u>0.10</u> / 0.15
Shear Spring Constants of Rock Bolt and Cohesion between Rock and Shotcrete	MN/m	17.9 / <u>179</u> / 358

**수평지압계수의 변화**

암반의 탄성계수 및 슛크리트의 두께가 일정하고 수평 지압계수만 변화하는 경우, 암반의 인장 균열 영역은 천정부, 벽체부 및 바닥부의 중앙에서 굴착 단면으로부터 1m 내외의 깊이로 형성되었다. 수평 지압계수가 증가할수록 인장균열 영역내 암반의 응력은 증가하였으나, 인장균열 영역의 범위는 반대로 감소하였다. 록볼트의 최대 인장응력은 표 2에서와 같이 수평 지압계수가 증가할수록 증가하여 k가 0.5에서 2.0으로 4배 증가함에 따라 천정부에서는 1.6배, 벽체부에서는 2.2배 증가하였다. 지보시스템의 응력이 재분배되기 전후의 슛크리트의 응력분포는 그림 6 및 7과 같다.

Table 2. Max. rock bolt stress for varying horizontal pressure coefficient

Pressure coefficient	Max. rock bolt stress (MPa)	
	Crown	Wall
k=0.5	133.	127.
k=1.0	160.	192.
k=2.0	213.	280.

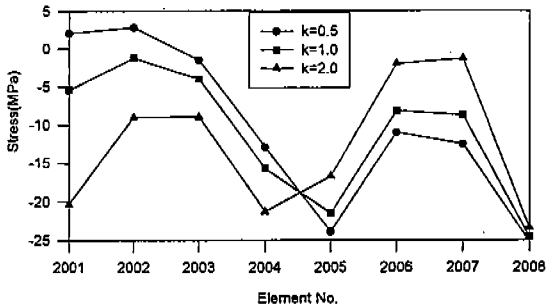


Fig. 6. Shotcrete stress before stress redistribution with varying horizontal pressure coefficient

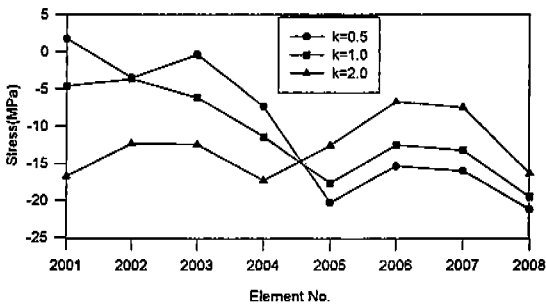


Fig. 7. Shotcrete stress after stress redistribution with varying horizontal pressure coefficient

그림에서 응력 재분배 후의 응력분포는 재분배 전과 동일한 분포양상을 보이나 압축응력의 크기는 현저하게 감소되었으며 요소간의 응력차가 축소됨을 알 수 있다. 그림의 요소 2001은 천정의 중앙부, 2005는 벽체 상단부, 2008은 벽체 하단부를 나타낸다.

암반 탄성계수의 변화

수평지압계수 및 슛크리트의 두께가 일정하고 암반의 탄성계수만 변화하는 경우, 암반의 인장균열 영역은 탄성계수의 변화에도 불구하고 변화가 매우 적었다. 록볼트의 최대 인장응력은 표 3에서와 같이

Table 3. Max. rock bolt stress for varying elastic modulus of rock mass

Elastic modulus	Max. rock bolt stress (MPa)	
	Crown	Wall
E=3.85GPa	235.	280.
E=5.62GPa	160.	192.
E=8.22GPa	108.	130.

암반의 탄성계수가 증가할수록 감소하여 E=3.85GPa에서 E=8.22GPa로 2.1배 증가할 경우 천정부 및 벽체부에서 0.46배로 감소하였다. 지보시스템의 응력 재분배전 슛크리트의 응력은 그림 8에서 보인 바와 같이 암반의 탄성계수가 증가할수록 슛크리트의 응력은 감소하는 경향을 보인다. 응력 재분배 후의 슛크리트의 응력은 그림 9에서와 같이 재분배 전과 유사한 분포를 보이나 압축응력의 크기는 응력 재분배 전에 비해 현저하게 감소하였다. 최대 압축응력은 벽체 하단부에서 E=8.22GPa인 경우 최대 21%까지

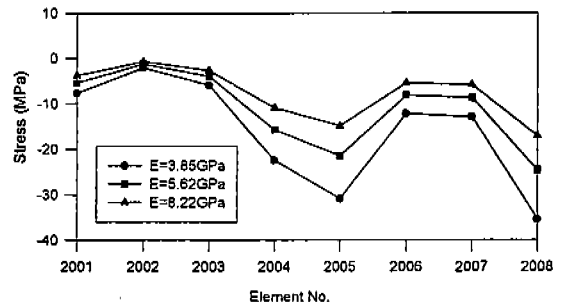


Fig. 8. Shotcrete stress before stress redistribution with varying elastic modulus of rock mass

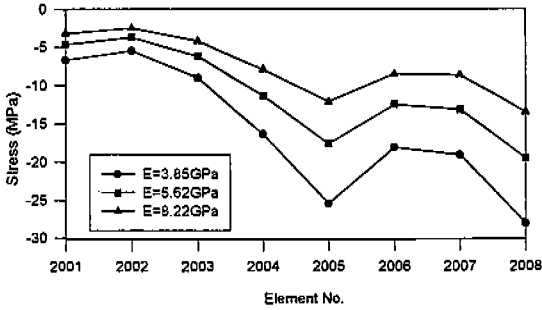


Fig. 9. Shotcrete stress after stress redistribution with varying elastic modulus of rock mass

감소되었으며 최소 압축응력은 천정부에서 241%까지 증가하였다.

#### -shotcrete의 두께 변화

수평지압계수 및 암반의 탄성계수가 일정하고 shotcrete의 두께가 변화하는 경우, 암반의 인장균열 영역은 전항에서 보인 것과 매우 유사한 분포를 보였다. 록볼트의 최대 인장응력은 표 4에서와 같이 shotcrete의 두께가 증가함에 따라서 증가하지만 그 비율은 매우 적어서 t=5cm에서 t=15cm로 증가함에 따라 록볼트의 응력은 천정부에서 1.07배, 벽체부에서 1.09배 증가하였다.

Table 4. Max. rock bolt stress for varying shotcrete thickness

Shotcrete thickness	Max. rock bolt stress (MPa)	
	Crown	Wall
t= 5 cm	156.	184.
t=10 cm	160.	192.
t=15 cm	167.	200.

지보시스템의 응력 재분배 전 shotcrete의 응력은 그림 10에서 보인 바와 같이 shotcrete의 두께와 응력의 크기는 뚜렷한 상관관계를 보이지 않고 위치에 따라 변화하는 경향을 보인다. 그리고 t=10cm까지는 응력에 큰 차이를 보이지 않지만 t=15cm에서는 다소 다른 경향을 보인다. 응력 재분배 후의 shotcrete

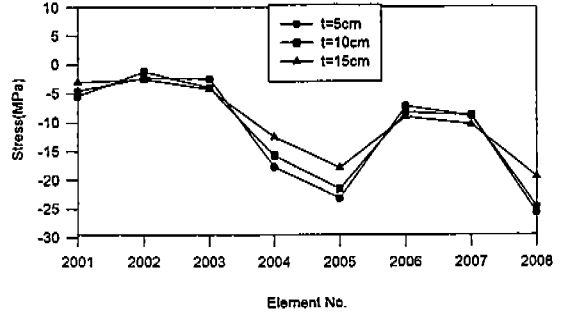


Fig. 10. Shotcrete stress before stress redistribution with varying shotcrete stress

트의 응력은 그림 11에 보인 바와 같이 압축응력의 크기는 전반적으로 감소하였으며, shotcrete의 두께가 증가할수록 응력의 크기는 감소하는 경향을 보인다. 최대압축 응력은 t=5cm인 경우 벽체 하단부에서 최대 20%까지 감소하였으며, 최소 압축응력은 t=10cm인 경우 207%까지 증가하였다.

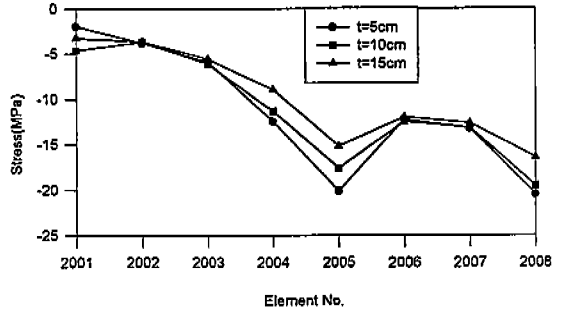


Fig. 11. Shotcrete stress after stress redistribution with varying shotcrete thickness

#### 스프링상수의 변화

록볼트의 전단 스프링상수 및 암반-shotcrete 접촉 스프링상수 값이 지보시스템의 응력 재분배에 미치는 영향은 스프링상수 값의 변화폭에 비해 매우 적었다. 그림 12는 응력 재분배 후 shotcrete의 응력을 보인다.

#### 분석결과에 대한 검토

굴착단면 주위의 암반 및 shotcrete의 인장영역의 범위를 결정하는 주요 요소는 단면의 형상과 크기 및 수평 지압계수로 판단되었다. 또한 지보시스템의 해석결과에 큰 영향을 주는 것은 수평지압계수 및

암반의 탄성계수이며 슛크리트의 두께는 상대적으로 영향이 적었다. 특히 슛크리트의 두께가 어느 한계값까지는 슛크리트에 발생하는 응력의 크기가 일정한 경향을 보였다.

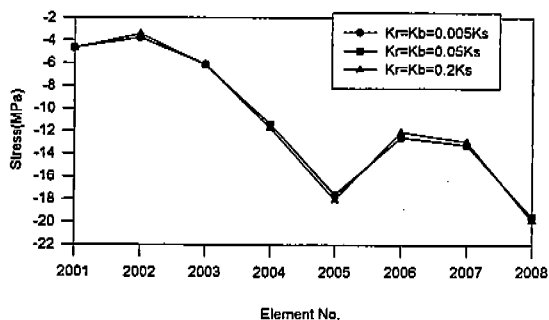


Fig. 12. Shotcrete stress after stress redistribution with varying spring constants

지보시스템의 응력 재분배를 고려할 경우 이를 고려하지 않는 경우에 비해 슛크리트의 최대 압축응력이 현저하게 감소되었으며 요소간의 응력차가 감소되었다. 록볼트의 전단 스프링 상수와 암반-스�크리트 사이의 접촉 스프링 상수의 영향은 응력 재분배에 미치는 영향이 무시할 정도로 작았다. 일부 슛크리트 판넬에서의 좌굴 또는 인장균열은 인접 슛크리트의 연속적인 인장균열을 초래할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해서는 록볼트 간격, 슛크리트 두께 또는 단면의 크기 및 형상 등을 조정하여야 한다.

### 구조재의 안전계수

암반과 지보재의 안전성을 평가하기 위해서 안전계수,  $F_s$ 를 부재력에 대한 극한강도의 비로서 정의한다.

암반의 경우에는 Mohr-Coulomb의 파괴포락선으로부터 정의되는 안정성지수 개념을 적용할 수 있다 (장승필·서정분, 1996).

축력 또는 축력과 휨을 동시에 받는 슛크리트의 안전계수는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{F_s P}{SF_P P_{ult}}\right)^2 + \left(\frac{F_s M}{SF_M M_{ult}}\right)^2 = 1.0 \dots\dots\dots(16)$$

여기서,  $P$  및  $M$ 은 슛크리트에 작용하는 축력 및 모멘트,  $P_{ult}$ ,  $M_{ult}$ 는 부재의 극한 축력 및 모멘트 내력을 나타낸다.  $SF_P$ ,  $SF_M$ 는 축력 및 모멘트에 대한 내력 감소계수를 나타내며 ACI코드(ACI 318-95,

1995)에서는 0.7을 사용한다.

인장과 전단력을 동시에 받는 록볼트의 경우 안전계수는 식 (17)과 같이 주어지는 상관식으로 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{F_s \delta_s}{SF_s \delta_{ult(s)}}\right)^2 + \left(\frac{F_s \delta_p}{SF_p \delta_{ult(p)}}\right)^2 = 1.0 \dots\dots\dots(17)$$

여기서,  $\delta_s$ 는 볼트의 전단변위를 나타내며,  $\delta_p$ 는 볼트의 축변위를 나타낸다.  $SF_s$ ,  $SF_p$ 는 각각 전단 및 인장에 대한 내력 감소계수,  $\delta_{ult(s)}$  및  $\delta_{ult(p)}$ 는 각각 볼트의 극한 전단 및 인장 변형이다. AISC코드(AISC, 1989)의 경우 전단 및 인장에 대한 내력 감소계수는 각각 0.4 및 0.6을 사용한다.

### 결론

NATM 공법에 의해 건설되는 지하 암반공동의 구조적 안전성을 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 제시하였다. 해석 예를 통하여 각 설계변수의 영향을 검토하였다. 수평 지압계수의 영향이 구조에 큰 영향을 미치나 슛크리트 두께의 영향은 적은 것으로 밝혀졌다. 본 연구에서 제안한 응력 재분배 모델을 이용할 경우 슛크리트의 최대 응력을 현저히 감소시킬 수 있었으며, 스프링상수가 슛크리트의 응력재분배에 미치는 영향은 매우 적었다. 향후 본 연구에서 제안한 방법에 대한 실험적 연구가 수행되어야 할 것이다.

### 참고 문헌

서정분, 1996, 대규모 지하구조물의 지진취약도 해석, 서울대학교 토목공학과, 박사학위논문  
 장승필, 서정분, 1996, "방사성폐기물 처분동굴의 지진 취약도 해석", 한국원자력학회, '96 춘계학술 발표회 논문집(인쇄중)  
 정대열, 1993, 터널 막장 주위의 3차원적 영향을 모사하는 2차원 해석모델의 하중분배율에 관한 연구, 서울대학교 토목공학과, 박사학위논문  
 ACI Committee 318, 1995, Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-95), American Concrete Institute, Detroit  
 American Institute of Steel Construction, 1989, Manual of Steel Construction, Allowable Stress Design, Ninth Ed. Chicago  
 Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., 1961, Theory of



Elastic Stability, McGraw-Hill

---

장승필 :

서울대학교 공과대학 토목공학과

서울특별시 관악구 신림동 산 56번지

151-742

TEL : (02)880-7346

FAX : (02)887-0349

서정문 :

한국원자력연구소 종합안전평가팀

대전시 유성구 덕진동 150,

유성우체국 사서함 105

350-600

TEL : (042)868-8371

FAX : (042)868-8374