

암반 터널에서의 시공단계를 고려한 암반-지보 거동특성 곡선적용에 관한 연구

Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses

이두화*¹, 추석연*², 임상빈*³, 박영진*³, 안성주*³

Lee, Du-Wha · Choo, Seok-Yean · Lim, Sang-Bin · Park, Young-Jin · Ahn, Sung-Joo

Abstract

Convergence Confinement Method (CCM) makes a more simple judgement in a ground-support reaction than numerical method. Also this method is good for the applicability of construction feedback and the analysis of field measurement. However, there has been little research with respect to the application of CCM in tunnel construction. One of the problems in CCM is a decision of the time to support installation. To decide a reasonable supporting installation time, support characteristic curve and displacement characteristic curve considering construction stage are proposed. In addition, to predict displacement distribution ratio and load distribution ratio, the time dependent support reaction curve is used. Finally, through a comparison of the result between CCM and numerical analysis, the trust of this study is proved and the practical application is proposed to control reasonable tunnel construction management.

Keywords: Convergence confinement method, time dependent, numerical analysis, displacement-load distribution ratio, tunnel construction management

요 지

암반-지보 반응곡선법 (CCM, Convergence Confinement Method)은 수치해석적 접근방법에 비해 암반과 지보 반응특성에 대한 판단이 용이하고, 분석과정에서 발생하는 계산량이 많지 않으므로 현장 계측결과 분석 및 시급성이 요구되는 시공 Feedback 적용성이 뛰어나다. 그러나 종래 연구의 대부분은 기초적인 터널공학의 이해 측면이 강조되어 수행되고 있어 터널 시공과정에서의 CCM 활용에 관한 연구가 부족한 실정이다. 이러한 배경에서 본 연구에서는 기존의 암반-지보 반응곡선법의 주요 문제점 중 하나인 지보설치시기의 결정에 대한 합리적인 접근방법으로서 슛크리트 강도발현과정을 고려한 지보특성곡선 작성 방법을 제시하여, 지보재 설치시기를 용이하게 판단할 수 있는 변위특성곡선과 굴착에 따른 응력해방율을 쉽게 평가할 수 있는 하중특성곡선을 제시하였다. 이어서 기존의 지보재 강성만을 고려한 지보특성곡선이 아닌 시간의존성 지보특성곡선을 제시하여, 시간-변위특성곡선에 의한 변위분담을 뿐만 아니라 시간-하중에 의한 하중분담을 예측 방법을 제안하였다. 최종적으로,

*1 정회원, (주)삼보기술단 대표이사

*2 정회원, (주)삼보기술단 부장

*3 정회원, (주)삼보기술단 대리

본 연구방법에 의한 CCM 결과와 2차원 수치해석 결과를 비교, 분석을 통해 연구결과의 신뢰성을 입증하는 동시에, 합리적인 터널 시공관리가 가능하도록 본 연구결과의 현장 활용 방안을 제시하였다.

주요어: 암반-지보반응곡선, 시간의존성, 수치해석, 변위-하중분담율, 터널시공관리

1. 서론

국내 터널굴착 공법은 대부분 NATM을 적용하고 있으며, 이 공법은 설계특성상 다양한 불확실성을 내포하고 있는 관계로 시공중 계측결과 의존도가 큰 공법이라 할 수 있다. 그러나 현실적으로 선행변위량 측정의 어려움과 계측데이터의 중요성에 대한 이해부족으로 인해 계측 결과의 적극적인 활용은 미비한 실정에 있다. 또한 터널 시공에 있어 지보재 설치시기와 지보량의 적정성에 대한 평가는 주로 막장관찰을 통한 경험적인 데이터에 의존하고 있으며, 이러한 현 실정은 NATM의 공학적 특성에 부정적인 영향을 미치고 있다 할 수 있다.

터널 현장에서 지보재 설치시기 및 지보량 선정 방법 가운데 이론해석에 의한 암반-지보 상호특성 곡선을 활용한 개략설계법은 수치해석법에 비해 계산방법이 간단하다는 장점으로 부터 현장 적용성 검토가 다수 수행된 바 있다 (Hoek et al., 1995; Carranza and Fairhurst, 2000). 그러나 대부분의 연구가 암반 거동 모델에 초점을 두고 있어 지보의 실제적인 거동을 규명한 현장 적용성 검토에 관한 연구는 미흡하다고 할 수 있으며, 시공관리 측면에서의 Panet (1995) 및 Hoek (1983)의 연구는 굴착에 따른 경험적인 변위특성 곡선에 국한되어 있다. 또한, 터널에서의 주지보부재인 숏크리트 강도는 시간의존성 특성을 보임에도 불구하고 최종강도에 의한 지보반력곡선으로만 검토되어 지보 부재력 변화를 제대로 반영하고 있지 않다.

본 연구에서는 시공과정을 고려한 암반-지보 반응곡선 작성시스템을 Hoek and Brown (1997) 이론식을 토대로 개발하는 것에 목적을 두고, 막장면 진행에 따른 터널 응력해방비, 변위특성을 반영할 수 있는 일반식을 제시한다. 또한, 터널 주요 지보부재인 숏크리트의 시간 의존성 경화 특성을 고려할 수 있는 지보반력식을 제시함과 동시에 종래의 2차원해석 결과와 비교 검토하여 최종적으로 간단하면서도 정량적인 터널 시공관리가 가능하

도록 본 시스템의 현장 활용 방법을 제시한다.

2. 굴진장을 고려한 암반-지보 거동 특성곡선

Hoek and Brown (1997)은 수직 및 수평응력의 크기가 동일하며, 취성의 탄소성 거동을 하는 암반의 원형 터널에서 암반-지보의 상호거동을 고려할 수 있는 이론식을 제시하였으며, 개략적인 수식은 표 1과 같다.

한편, 콘크리트 또는 숏크리트의 지보 강성 및 최대지보 압력, 록볼트 또는 케이블의 지보강성 및 최대지보 압력, 복합지보 시스템의 허용지보 곡선에 대한 계산과정 및 관계식은 생략하였으나, 지보곡선을 포함한 암반-지보 거동특성을 그림 1에 표시하였다.

터널굴착으로 인한 지반의 변형은(Ground Reac-

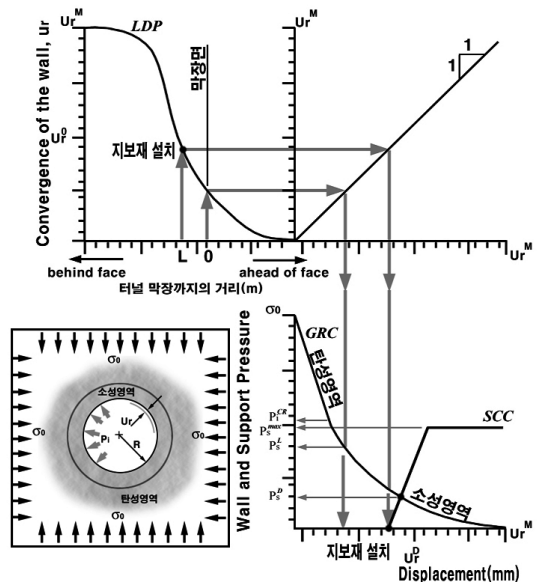


그림 3. Ground Structure Interaction 곡선

표 1. 암반터널의 하중-변형 곡선식

•Hoek-Brown의 파괴기준	$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_c [m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma'_c} + s]^{0.5}$
•재료상수	$\frac{m_b}{m_i} = \exp[-\frac{GSI-100}{28}], s = \exp[-\frac{GSI-100}{9}]$
•탄성변형(u_{ie})	$u_{ie} = \frac{r_0(1+\nu)}{E_m} (p_0 - p_i)$
•소성반경(r_p)	$r_p = r_0 \left[\frac{2(p_0(k-1) + \sigma_{cm})}{(1+k)((k-1)p_i + \sigma_{cm})} \right]^{\frac{1}{(k-1)}}$
•소성변형(u_{ip})	$u_{ip} = r_0 \frac{(1+\nu)}{E} \left[2(1-\nu)(p_0 - p_{cr}) \left(\frac{r_p}{r_0} \right)^2 - (1-2\nu)(p_0 - p_i) \right]$
• σ'_1 : 파괴면의 축응력 • σ'_3 : 구속압 • p_0 : 초기응력 • p_i : 내부압력 • 터널반경: r_0	

tion Curve, 이하 GRC로 부름) 항복점을 (P_{cr}) 지나 완전소성거동을 하게 되며 일정한 변위로 수렴하게 된다. 암반상태에 따라 수렴이 안될 수도 있으며, 수렴하더라도 변위가 과다하게 발생할 수도 있기 때문에 적절한 시기에 지보 설치가 무엇보다 중요하다.

그림 1에서 종방향 변위곡선 (Longitudinal Deformation Profile, 이하 LDP로 부름)을 이용하면 굴진장 (L)을 고려한 지보재 설치시기를 고려할 수 있으며, Panet (1995) 및 Hoek (1999)등은 현장 실측치를 바탕으로 식 (1)과 같은 경험치를 제안한 바 있다.

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(-\frac{x/R}{1.1}\right) \right]^{-1.7} \quad (1)$$

여기에서 x : 막장으로부터의 거리, u_r : 터널의 임의의 지점 x 에서 중심방향 변위, u_r^M : 중심방향 최대 수렴 변위, R : 원형터널의 반경이다. LDP는 현장데이터를 통해 작성하는 것을 원칙으로 하지만, 본 연구에서는 수치해석결과를 통해 얻은 결과를 활용하여 시간이력에 따른 변위곡선을 작성·제안하였다.

한편, 막장면 진행에 따른 암반-지보 반응곡선의 기본 개념은 그림 2와 같이 도시할 수 있다. 그림 2에서 관측점에서의 굴착면 진행에 따른 변위량 혹은 응력해방율을 고려한 암반-지보 반응곡선은 그림 2(b)와 같이 도시할 수 있다. 즉, 막장 위치에 따른 관측점에서의 지보압력은 각각의 막장위치에 대응하는 응력해방율을 곱한 값으로서 특성곡선을 도시할 수 있다.

이를 3차원 평면상에 시간이력을 Z축으로 하여 도시하면, 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 굴착이 진행됨에 따른 하중과 변위 변화는 그림에서 암반 반응곡선과 변위특성곡선으로 표현된다. 그림 3에서 굴착의 진행 방향이 시간의 진행방향이 되고 하중과 변위특성곡선은 관측점에서 시간에 따른 변화를 의미한다. 그리고 Hoek-

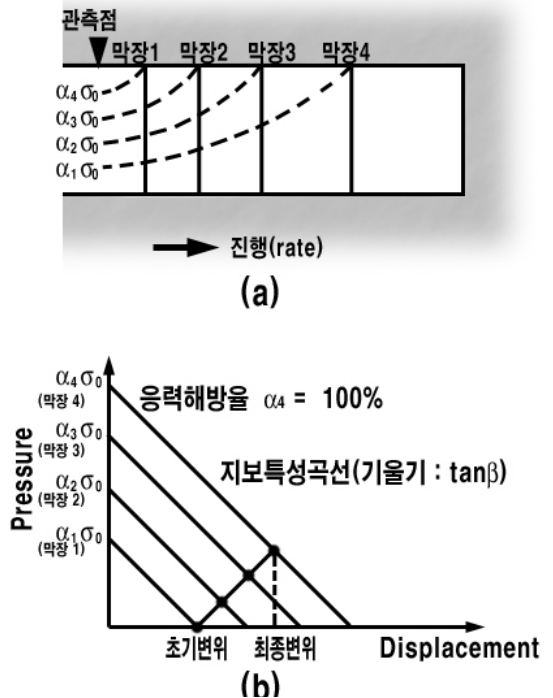


그림 4. 굴착에 따른 암반-지보 반응곡선

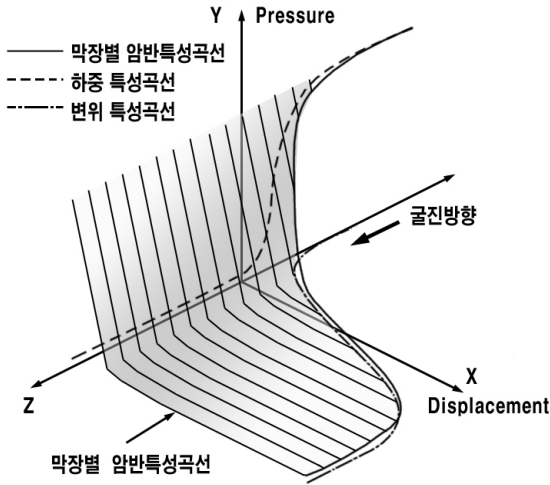


그림 6. 3차원 압반특성곡선 개념도

Brown의 파괴기준에 따른 압반의 반응곡선을 산정하여 X-축에 변위를 Y-축에 지보압력을 각각 표시하였다. X-Z 평면의 굴진장에 따른 변위곡선과 Y-Z평면의 지보압력곡선을 3차원 공간상에서 연결하여 3차원 압반반응곡선이 작성되었다. 3차원 공간상에서의 압반반응곡선을 Y-Z 평면에 투영하면 하중특성곡선을 구할 수 있으며, X-Z 평면에 투영하면 굴진에 따른 변위특성곡선을 구할 수 있다.

이와 같은 개념을 도입할 경우 서론에서 지적한 종래의 문제가 되었던 초기변위량 예측과 시공과정을 고려한 지보부재의 시간의존성 거동을 고려한 지반반력곡선을 도출할 수 있게 되는데 단, 이 경우 문제가 되는 것은 굴착진행에 따른 응력해방율의 크기를 사전 혹은 시공중 어떠한 방법으로 평가하느냐이다. 즉, 지보부재의 시간의존성 거동을 고려할 수 있는 평가방법이 중요하다. 3장에서는 이에 대한 구체적 도출방법과 그 결과 및 타당성에 대해 설명하기로 한다.

압반-지보 반응곡선 개념은 하중분담율을 산정하기 위해 활용가능한데, 하중분담율은 그림 4와 같이 표현될 수 있기 때문이다. 지보가 설치되는 지점 A에서의 지압 σ_1 과 초기 지압 σ_0 의 차인 $\sigma_0 - \sigma_1$ 이 지보 설치전 압반이 담당하는 압력이 될 것이며, 경화과정의 지보 (숏크리트를 의미)가 경화과정을 거침에 따라 평형상태에

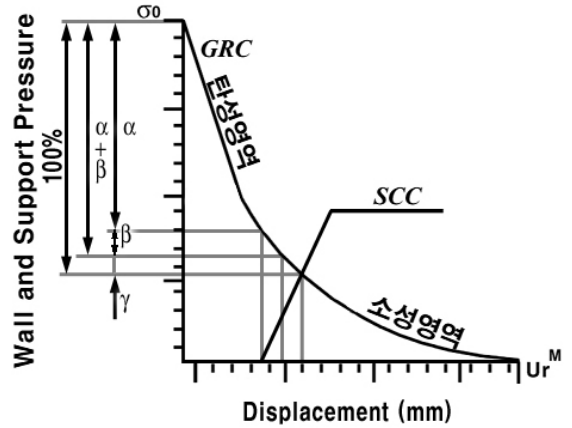


그림 6. CCM방법에 의한 하중분담율

도달되면, 이 때 평형지보압과 초기 지압의 차가 $\alpha + \beta + \gamma (=100\%)$ 가 될 것이다.

3. 시공단계를 고려한 압반-지보 반응곡선 작성

시공단계별 압반과 지보의 상호 거동특성을 규명하기 위하여 3차원 해석을 통한 압반등급별 종방향 변위곡선 식이 산출되었다. 또한, 시공관리 활용측면을 고려하여 막장면 위치를 cycle time과 결부시켜 시간의존성을 따르는 지보특성 곡선이 계산되었으며, 이 지보특성곡선의 경우 숏크리트의 재령에 따른 강도의 시간의존 (막장 진행)성이 반영된 특징이 있다.

시공단계를 고려하여 그림 3과 같이 막장면 진행에 따른 터널 굴착면 응력 및 변위를 3차원 공간에서 압반특성곡선을 표현함으로써, 막장위치-변위 특성곡선에 의한 변위분담율 뿐만아니라 막장위치-하중에 의한 하중분담율 또한 예측되었다.

3.1 해석 조건

본 연구에 적용된 물성치는 기존 적용사례 (Goodman,

표 2. 해석에 사용된 지반물성치

	보통암	풍화암
$E(t/m^2)$	800,000	70,000
단위중량(t/m^3)	2.3	2.2
포아송비	0.26	0.3
점착력(t/m^2)	30	10
ϕ	35	25
GSI	50	15
m	5.8687	1.441
s	0.00387	7.91E-05

표 3. 슛크리트 물성치

	$E(t/m^2)$		두께 (m)	포아 송비
	Soft Shotcrete	Hard Shotcrete		
보통암	146,202	212,132	0.1	0.2
풍화암	141,509	212,132	0.2	0.2

표 4. 해석단면 조건

대상 암반	굴착 방법	굴착단 면적(m^2)	환산터널 반경(m)	굴진장 (m)
보통암	전단면 굴착	92.08	5.4	2.0
풍화암	반단면 굴착	59.74	4.3	1.0









1980)와 기존문헌 (Hisatake, 1989)을 토대로 선정하였으며 지반물성치와 슛크리트 물성치는 표 2와 표 3에 각각 나타내었다.

한편, 해석에서의 굴착단면조건은 표 4와 같으며 시공 단계는 표 5에 나타내었다.

굴착단계별 종방향 변위산정을 위해 Pentagon-3D 프로그램을 이용하여 Hoek-Brown 모델을 사용한 3차원 해석을 실시하였다.

모델은 2차로 도로터널 (반경 약5.4m)이 균질한 암반에 굴착되는 것으로 가정하였으며, 시공단계를 고려하여 보통암 및 풍화암에 대해 각각 해석을 실시하였다. 경계 조건은 터널 직경의 10배 이상으로 설정하였으며, 해석 모델은 그림 5와 같다.

표 5. 해석 단계별 굴착 및 지보설치 순서

Step	시공개요도	
	보통암	풍화암
0		
	초기	초기
1		
	굴착(전단면)	굴착(상부반단면)
2		
	Soft S/C	Soft S/C
3		
	Hard S/C	Hard S/C

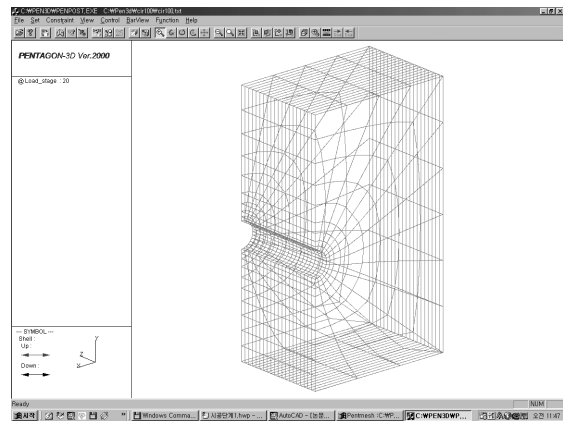
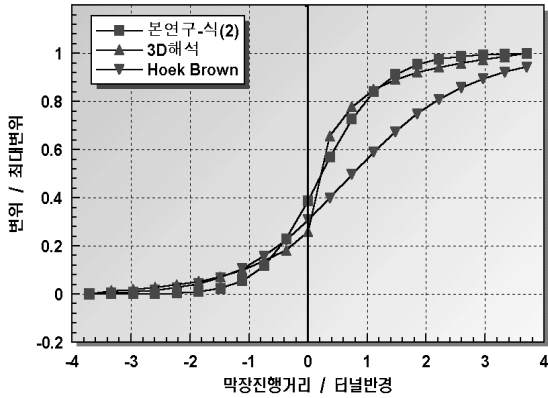


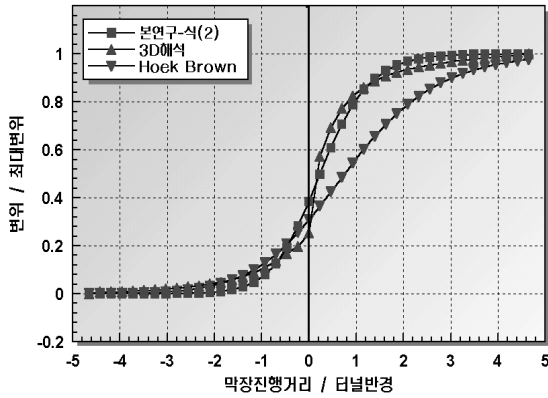
그림 8. 해석에 사용된 터널 및 지반 Mesh

3.2 3차원 해석을 통한 시간이력이 고려된 변위특성곡선 산정

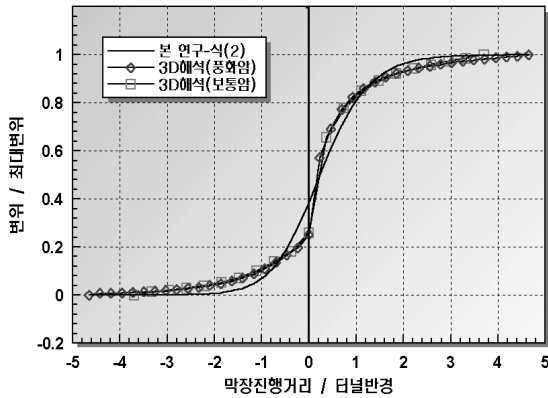
3차원 해석을 통해 막장위치에 따른 변위를 파악한 후, 심도 및 암반등급과 관계없는 하나의 식으로 표현하기 위해 정규화 시켰으며, 이를 회귀분석하여 식 (2)와 같은 굴진장과 연관된 종방향 변위 곡선식을 산출하였다.



(a) 보통암



(b) 풍화암



(c) 보통암 및 풍화암 비교

그림 6. 시간이력을 고려한 변위 특성곡선 비교

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(-\frac{x/R}{0.56}\right) \right]^{-1.38} \quad (2)$$

Hoek-Brown의 이론식(표 1)에 의한 결과와 3차원 해석 결과를 최대변위로 정규화시켜 그림 6에 나타내었다. 그림에서와 같이 심도 및 암반등급과 관계없이 잘 일치하고 있으며, 동일한 식으로 표현할 수 있음을 알 수 있다. 동 그림에는 식(1)에 의한 결과(▼)도 함께 도시하였는데 전자와 상이함을 알 수 있다. 이는 Hoek-Brown 제안식이 연구대상 지반과는 다른 암반조건 및 굴착조건에 대한 계측치로부터 산정되었기 때문인 것으로 사료된다.

3.3 암반특성곡선

암반-지보 상호특성곡선은 변위의 증가에 따른 암반 하중의 이완과 지보압의 증가를 의미한다. 그림 3과 같이 암반-지보 반응곡선을 시간이력을 Z축으로 고려한 3차원 공간상에 도시하면, 굴착이 진행됨에 따라 하중 특성곡선과 변위 특성곡선이 산정된다. 변위 특성곡선은 3.2절의 종방향 변위곡선식(식 2)과 일치하며, 하중 특성곡선은 그림 7과 같이 보통암과 풍화암에 대해 산정 가능하다.

3.4 시공단계(시간의존성)를 고려한 지보특성곡선

암반반응곡선(GRC)은 종방향 곡선식을 통해 굴진장을 고려할 수 있으며, 이를 한 막장당 소요되는 시공시간(Cycle Time)과 연관시키면 시간의존식으로 변형시킬 수 있다.

보통암의 경우 보통 1막장 굴진장은 2m로 시공시간(cycle time)은 평균 18시간이 소요되며, 풍화암의 경우는 1막장 굴진장이 1m일 경우 평균 15시간이 소요된다. 이를 고려하여 종방향 곡선식과 결부시키면 보통암과 풍화암에 대해 각각 다음 식(3), (4)를 얻을 수 있다. 여기서 t 는 시공시간(hr)을 의미한다.

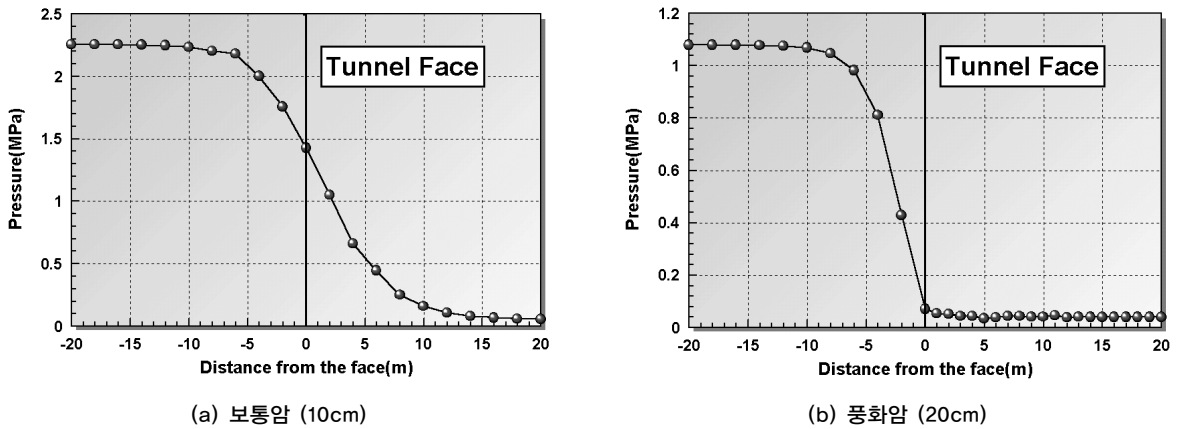


그림 7. 시간이력을 고려한 하중 특성곡선

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(-\frac{t/R}{9 \times 0.56}\right) \right]^{-1.38} \quad (3)$$

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(-\frac{t/R}{15 \times 0.56}\right) \right]^{-1.38} \quad (4)$$

즉, 막장면 위치 혹은 시공시간을 고려한 지보재 타설 시의 초기 변위량예측이 (3), (4)식으로부터 쉽게 산출될 수 있다.

한편, 지보 특성곡선의 경우 슛크리트 강성이 지배적이고 상대적으로 록볼트 혹은 강지보공에 의한 복합 지보 반력은 그 영향이 미비하므로 본 연구에서의 시간의 존성 지보반력특성곡선은 슛크리트만을 고려하도록 하였다. 슛크리트의 최대지보 압력 산정식 및 강성에 관한

식은 다음 식 (5)와 식 (6)과 같다.

$$P_s^{\max} = \frac{\sigma_{cc}(t)}{2} \left[\frac{1 - (R - t_c)^2}{R^2} \right] \quad (5)$$

$$K_s = \frac{E_c(t)}{(1 - \nu_c(t))R} \frac{R^2 - (R - t_c)^2}{(1 - 2\nu_c(t))R^2 + (R - t_c)^2} \quad (6)$$

여기서, $\sigma_{cc}(t)$ 는 재령시간 변화에 따른 슛크리트의 압축강도[MPa], $E_c(t)$ 는 재령시간 변화에 따른 슛크리트의 Young's Modulus[MPa], $\nu_c(t)$ 는 재령시간 변화에 따른 Poisson's ratio, t_c 는 라이닝 두께[m]를 의미한다. 슛크리트의 재령 시간별 일축압축강도의 변화를 고려한 식 (5) 및 식 (6)을 이용하면 재령별 지보압력 곡선을 산

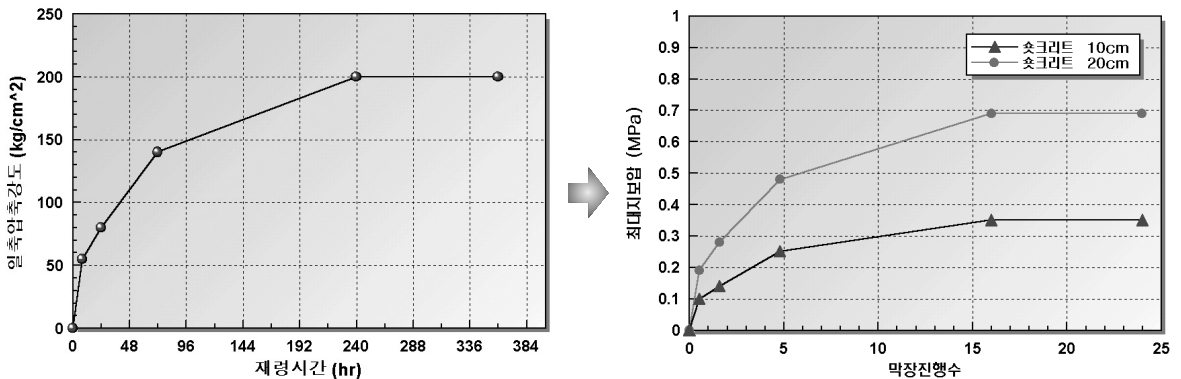
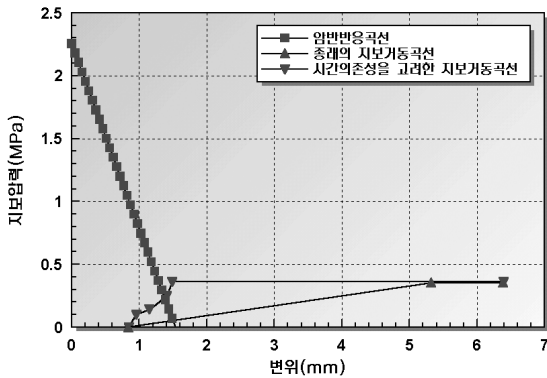
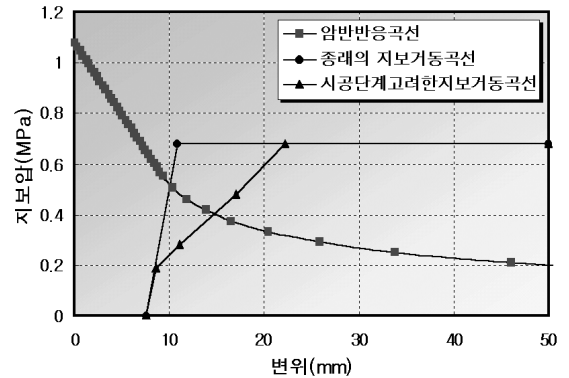


그림 8. 재령시간에 따른 최대지보압력곡선



(a) 보통압 (10cm)



(b) 풍화암 (20cm)

그림 9. 숏크리트의 강도변화를 고려한 암반 - 지보 반응곡선

정할 수 있다. 즉 한 막장당 소요시간이 고려된 숏크리트 강성을 막장진행거리로 환산하면 그림 8과 같이 숏크리트 두께가 각각 10cm (보통압), 20cm (풍화암)에 대한 막장진행에 따른 지보압력 변화곡선을 산정할 수 있다.

굴착으로 인한 지반의 변위가 숏크리트의 변위와 같다고 가정하면 (숏크리트 크립변형 무시), 식 (3) 및 식 (4)을 이용하여 숏크리트 재령시간별 변위를 산출할 수 있다. 이들 일련의 과정을 통해 숏크리트의 시간의존성 지보특성곡선을 작성할 수 있으며 그 결과는 그림 9와 같다.

3.5 하중분담율의 산정

암반-지보 반응곡선법에 따라 산정된 평형지보압을 이용하여 굴착과 연화숏크리트, 경화 숏크리트의 시공단계 (막장면 위치)에 대한 하중분담율을 구하도록 하였다.

표 6으로부터 보통암의 경우 변위와 하중에 의한 시공

단계별 응력해방율 (변위발생율)은 큰 차이를 보이지 않으나, 풍화암의 경우에는 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 풍화암 굴착단계에서의 변위발생율은 39%인 것에 비해 응력해방은 63.4%가 진행되어 20% 이상의 응력해방이 발생한 것으로 분석되었다. 이는 풍화암의 암반 특성곡선이 보통암과 비교하여 상대적으로 민감하기 때문인데, 암반 특성곡선의 작성시 중요한 결정변수인 일축압축강도 등과 해석입력 물성치와의 차이에서 기인하는 것으로 사료된다. 한편, 위 결과로부터 풍화암과 같이 강성이 작은 암반의 경우에는 암반-지보 상호 특성곡선을 작성할 때 어떤것을 기준으로 적용할 것인가에 대해서 세심한 주의가 요구된다.

4. 2차원 수치해석을 통한 검증

4.1 해석개요

본 장에서는 2차원 수치해석을 수행하여 본 연구에서 제안한 지보특성 곡선식에 의한 결과값과 비교, 분석하여 본 연구 제안식을 검증하였다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 암반-지보 반응곡선에 의한 시공관리에 활용할 경우 비교적 간편한 변위분담율을 적용할 것인가 아니면 응력해방율을 적용할 것인가를 정량적으로 비교, 분석하기 위함이다.

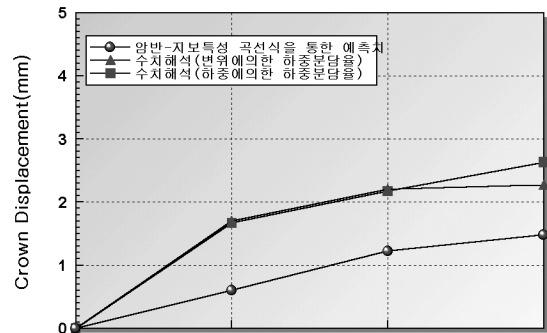
표 6. 시공단계별 변위발생율 및 응력해방율

구 분		변위에 의한 산정결과		하중에 의한 산정결과	
해석 단계	시공 단계	보통암	풍화암	보통암	풍화암
1단계	굴착	39%	39%	37%	63.4%
2단계	Soft	22%	33%	33%	24.4%
3단계	hard	39%	28%	30%	12.2%

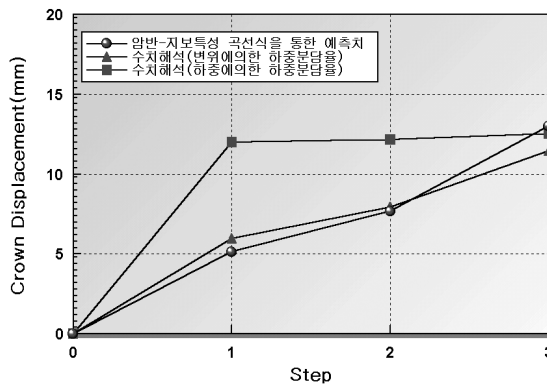
해석에 사용된 암반 및 지보재 물성치는 3차원해석과 같이 표 2 및 표 3와 같으며, 해석단면은 원형단면으로 제원도 동일하다. 해석심도는 보통암에서 100m, 풍화암에서 50m로 모델링 하였다. 해석영역은 터널굴착에 의한 주변지반의 거동을 정확히 파악하기 위하여 좌·우 경계는 터널중심으로부터 4D (D, 터널직경), 하부경계는 3D로 하였다. 한편 2차원 수치해석에 사용된 하중분담율은 표 6과 같이 변위에 의한 하중분담율과 하중에 의한 하중분담율을 사용하여 해석을 수행하였으며 이를 비교하여 어느 것에 의한 하중분담율이 암반-지보특성 곡선식을 통한 예측치와 유사한지를 비교하였다.

4.2 해석결과

해석결과 천단침하결과 및 슛크리트 응력검토 결과는 표 7 및 표 8과 같으며 시공단계별로 그림에 나타내었다.



(a) 보통암



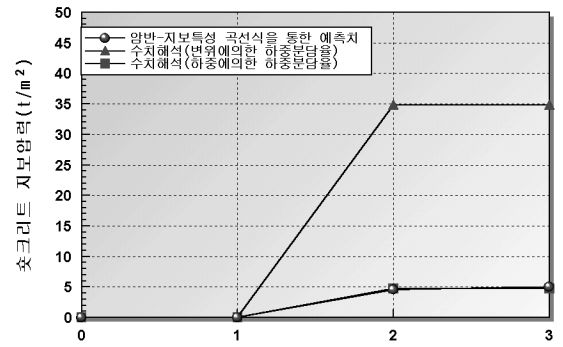
(b) 풍화암

그림 10. 천단침하결과 비교

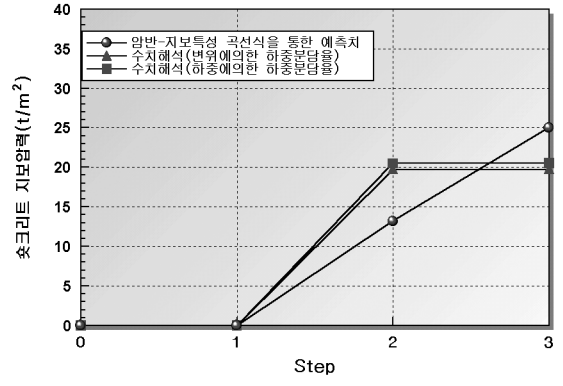
해석결과 보통암에서 변위 예측치는 1.5mm이고 변위에 의한 하중분담율과 하중에 의한 하중분담율을 사용한 수치해석 결과치는 각각 2.3mm, 2.6mm로 약간 크게 나타났으며, 슛크리트 지보압력은 예측치가 25t/m²이고 변위에 의한 하중분담율을 사용한 경우 19.74t/m², 하중에 의한 하중분담율을 사용한 경우 20.50 t/m²로 하중에 의한 하중분담율이 암반-지보특성 곡선에의한 예측치와 더 근접하게 나타났다. 한편 풍화암의 경우에도 변위와 슛크리트 지보압력이 하중에 의한 하중분담율을 적용한 결과와 비슷하게 나타났다.

5. 시공단계를 고려한 암반-지보 반응곡선 현장활용 방법

이상의 결과에 대한 현장에서의 적용방법을 흐름도로



(a) 보통암



(b) 풍화암

그림 11. 슛크리트 응력결과 비교

표 7. 천단침하결과 (mm)

적용된 예측기법	해석단계	1단계	2단계	3단계
	시공단계	굴착	Soft S/C	Hard S/C
암반-지보	풍화암	5.13	7.66	13.00
특성곡선식	보통암	0.60	1.22	1.48
수치해석 (변위)	풍화암	5.95	7.94	11.46
	보통암	1.70	2.20	2.27
수치해석 (하중)	풍화암	11.98	12.16	12.53
	보통암	1.67	2.17	2.63

도시하면 다음 그림 12와 같다. 즉 사전해석 혹은 계측 결과로부터 그림 2와 같이 막장면 진행속도를 고려한 시공단계별 응력해방을 결정하고 (α 값) 초기변위값 및 지보부재 타설시 변위량을 계산한다. 이어서 슛크리트의 경화 특성을 고려하여 암반-지보반응 곡선을 통한 지보부재력 및 터널변위량이 허용치 이내여부를 평가한다. 그리고 지보량의 증감을 결정하여 시공에 반영한다. 이는 몇몇의 간단한 수식만으로 신속한 시공관리가 가능하므로 현장에서도 쉽게 적용 가능하다.

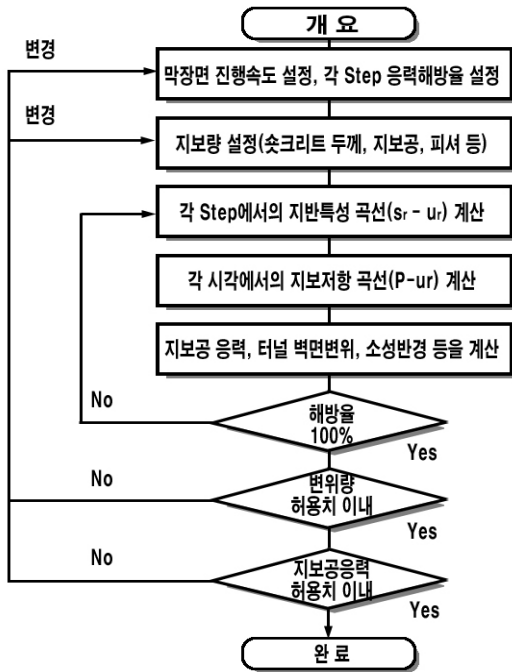


그림 12. 암반지보반응곡선법의 현장활용흐름도

표 8. 슛크리트 응력검토 결과 (t/m²)

적용된 예측기법	해석단계	1단계	2단계	3단계
	시공단계	굴착	Soft S/C	Hard S/C
암반-지보	풍화암	-	4.56	5.00
특성곡선식	보통암	-	13.20	25.00
수치해석 (변위)	풍화암	-	34.82	34.82
	보통암	-	19.73	19.74
수치해석 (하중)	풍화암	-	4.73	4.73
	보통암	-	20.49	20.50

6. 결론 및 제언

본 연구성과를 정리하면 다음과 같다.

1. Hoek-Brown모형을 사용한 3차원 해석을 통해 암종별 막장의 진행에 따른 종방향 변위곡선을 구할 수 있었으며, 이를 정규화하여 회귀분석한 식 (2)와 같은 하나의 대표식으로 나타낼 수 있었다. 각 지보타입별 굴진장이 정해질 경우 간단, 신속하게 암반-지보반응곡선 작성이 가능하며 정량적인 지보재 설치시기를 산정할 수 있다.
 2. 지보특성곡선상에서 지배적인 역할을 하는 슛크리트의 두께 및 슛크리트의 시간의존성 거동을 반영할 수 있는 지보반응곡선으로부터 시공단계를 고려한 지보압력 및 변위를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.
 3. 본 연구에서 제시한 암반-지보 특성곡선에 의한 시공관리 방법의 적정성을 검증하고, 현장에서는 수행 곤란한 수치해석결과와의 비교를 위해 2차원 FDM 해석을 수행한 결과, 예측값과 해석결과는 비교적 일치하는 것으로 나타났다.
 4. 또한, 2차원 해석결과 보통암에서는 변위에 의한 하중분담을 해석결과가 풍화암에서는 하중에 의한 하중분담율이 상대적으로 양호한 일치성을 보이고 있다. 풍화암의 경우 사전 보강없이 터널 굴착이 곤란한 연약층이라는 점과 해석입력과 암반지보반응곡선법의 입력물성치의 상대적 민감도가 그 원인으로 사료된다.
- 한편, 본 연구에서는 보통암과 풍화암에 국한되어 Hoek-Brown 모델만을 사용하였으나 다양한 암반조건과 현장조건 및 다양한 암반모델을 통해 database를 구

축한다면, 간단한 예비해석만을 통해 시공단계별 지보압력 및 변위를 예측할 수 있을 것으로 보이며 이를 통한 지보재 설치시기와 평형지보압, 그리고 최종변위에 의한 터널 시공관리에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Carranza, T. C. and Fairhurst, C. (2000) "Application of the Convergence - Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion", Tunneling and Underground Space Technology Vol.15, No.2, pp.187-204.
2. Goodman, R. E. (1980), "Introduction to Rock Mechanics", New York: Wiley and Sons.
3. Hisatake, M., Ito, T. and Sakurai, S. (1989), "Behavior of Primary Tunnel Lining in Highly Time Dependent Soft Rock." 土木工學會論文集 제 412호/III-12 12월, pp.153-160.
4. Hoek, E. (1983), "Strength of jointed rock masses, Rankine Lecture," Geotechnique 33(3), pp.187-223.
5. Hoek, E. and Brown, E. T. (1997), "Underground Excavations in Rock," London: The Institute of Mining and Metallurgy.
6. Hoek, E., Kaiser, P. K., and Bawden, W. F. (1995), "Support of Underground Excavations in Hard Rock", A. A. BALKEMA/ROTTER-DAM/BROOKFIELD
7. Panet, M. (1995) "Calculdes Tunnels Parla Methodede Convergence - Confinement, Paris: Press de ledole Nationale des Ponts et Chaussees,ions in Rock", Institution of Mining and Metallurgy.



이두화

(주)삼보기술단 대표이사
sbege@chollian.net



추석연

(주)삼보기술단 부장
sbege@chollian.net



임상빈

(주)삼보기술단 대리
sbege@chollian.net



박영진

(주)삼보기술단 대리
sbege@chollian.net



안성주

(주)삼보기술단 대리
sbege@chollian.net