

현대식 Rock TBM에서 가압형 링빔의 효과 연구 : I. 수치해석적 연구

곽윤석¹, 강기돈², 김도훈³, 이인모^{4*}

Effect of utilizing pressurized ring beam system in modern rock TBM : I. numerical study

Yun-Suk Kwak, Gi-Don Kang, Do-Hoon Kim, In-Mo Lee

ABSTRACT A Modern Rock TBM is a tunnel excavation method combining the conventional tunnelling method with the mechanized tunnelling method. It is a hybrid system that excavates a tunnel with TBM and supports the ground by ring beam, wire mesh, rock bolt, shotcrete, i.e., conventional tunnelling method. In the Modern Rock TBM, a ring beam is similar to a steel rib in NATM in the way that uses H-beam. But using a ring beam is more effective than a steel rib because it is installed in a closed-circle. Therefore, improving the performance of the ring beam is a key factor for achieving tunnel stability. In this respect, this study introduces a pressurized ring beam that might be functioning more effectively by confining convergence during tunnel excavation. In order to verify the effect of the pressurized ring beam, a three-dimensional numerical analysis was conducted. The numerical analysis confirms an increase in the minimum principal stress and reduction in the plastic strain that triggers excessive displacement. The analysis result also indicates a decrease in the relative displacement occurring after installing the ring beam, and expansion in spacing between the ring beams.

Keywords: Modern rock TBM, excavation and support concept, pressurized ring beam, numerical study

요약 현대식 Rock TBM공법은 TBM에 의한 굴착과 지반 타입에 따른 능동적인 지보가 어우러진 공법으로 세그먼트를 사용하지 않고 슛크리트, 링빔, 록볼트, 와이어매쉬 등의 지보재에 의해 터널을 지보한다. 현대식 Rock TBM에서 사용되는 링빔은 H-형강을 사용하여 NATM의 강지보재와 유사하나 원형으로 완전히 폐합되어 설치됨에 따라 강지보재보다 더 효과적이다. 따라서 현대식 Rock TBM에서 링빔은 터널의 안정성 향상에 기여하는 바가 크며, 본 연구에서 소개하는 가압형 링빔(Pressurized ring beam)은 그 효과를 더욱 향상시킬 수 있다. 가압형 링빔의 효과를 검증하기 위해 3차원 수치해석을 수행하였으며 그 결과 최소주응력 증가, 과대변위를 발생시키는 소성변형률의 감소, 링빔 설치 후 발생하는 변위인 상대변위감소 그리고 링빔 간격 증가 효과를 확인하였다.

주요어: 현대식 Rock TBM, 굴착 및 지보 개념, 가압형 링빔, 수치해석적 연구

접수일(2012.1.3), 수정일(2012.1.13), 게재확정일(2012.1.18)

¹정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정

²정회원, (주)대림산업 과장, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료

³정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료

⁴정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

*교신저자: 이인모 (E-mail: inmolee@korea.ac.kr)

1. 서 론

터널굴착 공법은 크게 NATM(New Austrian Tunnelling Method)으로 대표되는 재래식 터널공법(conventional tunnelling method)과 Open 및 Shield TBM(Tunnel Boring Machine) 공법으로 대표되는 기계화 터널공법(mechanized tunnelling method)으로 구분되나 최근 기계화 터널공법의 발전으로 다양한 개념의 터널굴착 공법이 제안되고 있다. 그 중 현대식 Rock TBM은 TBM에 의한 굴착과 지반 타입(type)에 따른 능동적인 지보를 접목한 공법으로 도심지 대심도 터널과 같은 암반터널에 매우 적합한 공법이다. 지금까지 국내에서 암반용 TBM에 대한 연구는 선형절삭(LCM, Linear Cutting Machine)시험을 통한 디스크커터(disc cutter) 설계가 주를 이루었으며 전석원 등(2008)은 수치해석으로부터 도출된 디스크 커터의 최적 간격 및 비에너지 결과를 LCM시험결과와 비교하였다.

현대식 Rock TBM에서 사용되는 링빔(ring beam)은 NATM에서 강지보재와 마찬가지로 H형강이 사용된다. 따라서 기존의 NATM 터널에서 강지보재의 연구결과는 현대식 Rock TBM에서 링빔의 지보성능 향상 방안에 대한 지표를 제시해 줄 수 있다. 일반적으로 NATM 터널에서는 강지보재를 설치한 후 슛크리트를 타설할 때 강지보재와 터널 벽면 사이에 슛크리트가 타설되지 않아 공동이 생겨 터널의 안정성에 문제가 되어 왔다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 유럽에서 격자지보(lattice girder)가 개발되어 사용되고 있다. 이는 기존의 강지보재로 사용되던 H형강 대신 원형강봉을 삼각 형태로 용접하여 만든 것으로 슛크리트와의 결합특성이 매우 우수하다. 이에 국내에서도 문흥득(1999)은 격자지보를 실제현장에 적용하여 이의 우수성을 검증하였으며, 김동규와 배규진(2008)은 격자지보의 공학적인 성능을 보다 객관적으로 판단하기 위한 실내성능평가기법을 제안하였다. 또한 강지보재와 슛크리트의 합성거동에 대한 연구가 국외에서 Carranza-Torres와 Diederichs(2009)에 의해 수행되었으며 이를 바탕으로 이종성(2010)은 수치해석을 통해 강지보의 효율을 고려한 슛크리트 최적두께 산정에 대해 검증하였다.

현대식 Rock TBM에서 사용되는 링빔은 원형으로 완전히 폐합되어 지보효과가 우수해 터널안정화에 미치는 영향이 크다. 강기돈 등(2011)은 해외 사례조사를 통해 현대식 Rock TBM의 굴착 및 지보 시스템을 소개하고 링빔의 지보성능을 향상시킨 가압형 링빔(pressurized ring beam)을 제안하였다. 본 연구에서는 강기돈 등(2011)의 연구를 확장하여 수치해석적 연구를 통해 일반 링빔에 축력을 가해 성능을 향상시킨 가압형 링빔의 효과에 대해 터널 주변 지반의 최소주응력, 변형률, 변위를 중심으로 분석하였다. 가압형 링빔의 효과를 검증하기 위한 수치해석적 연구는 두 개의 연속된 논문(companion Paper)의 전반부에 해당하며, 두 번째 논문에서는 실내 모형 시험을 통하여 적용성을 검토할 것이다.

2. 현대식 Rock TBM의 지보개념 소개

현대식 Rock TBM은 그림 1(a)와 같이 커터헤드(cutterhead), 디스크커터(disc cutter), 루프 서포트(roof support), 테일 핑거(tail finger) 등으로 구성되며, 커터헤드 바로 후방에서 지반 타입에 따라 능동적으로 터널을 지보한다. 주 지보재로는 링빔(ring beam), 와이어메쉬(wire mesh), 록볼트(rock bolt), 슛크리트(shotcrete)가 있으며 NATM과 다른 점은 자동화 장비를 통해 정확하게 지보를 설치하고, 지보 시간을 최대한 단축시켜 굴진율을 향상시킨다는 것이다. 현대식 Rock TBM의 지보는 그림 1(b)와 같이 L1 구간과 L2 구간으로 나뉘어 이루어진다. 양호한 암반의 경우 L1 구간에서 링빔, 록볼트, 와이어메쉬만 설치하고 L2 구간에서 슛크리트를 설치한다. 그러나 단층파쇄대와 같이 암질이 불량한 구간에서는 L1 구간에 슛크리트를 타설하여 지반불량 구간을 보강하고 그리퍼에 필요한 반력을 확보한다. 현대식 Rock TBM의 장비 구성 및 지보 시스템에 대한 자세한 사항은 강기돈 등(2011)을 참조하기 바란다.

현대식 Rock TBM 터널의 지보에는 NATM과 같은 개념의 지보재인 링빔, 와이어메쉬, 록볼트, 슛크리트 등이 사용되므로 지하구조물 건설에 따른 응력 재분배 효과를 표현한 아칭현상과 터널지보재의 적용원리의 근간을 이루는 내공변위제어법을 이용하여 현대식 Rock TBM의 굴착과 지보의 원리를 설명할 수 있다. 또한 NATM 터널에 적용되는 원형터널의 탄소성 해석방법을 현대식 Rock TBM에 적용하여 탄성 및 소성지반에서 원형 터널 굴착에 따른 응력 및 변위를 구할 수 있다. 현대식 Rock TBM에 의해 굴착된 터널은 원형이기 때문에 NATM터널의 경우보다 이론해에 의한 해석이 더욱 용이하다. 따라서 아칭효과, 내공변위제어법 그리고 원형터널의 탄소성 해석법을 통해 현대식 Rock TBM의 굴착 및 지보개념을 설명할 수 있다. 이에 대한 상세한 사항은 이인모(2001, 2004)를 참조하기 바란다.

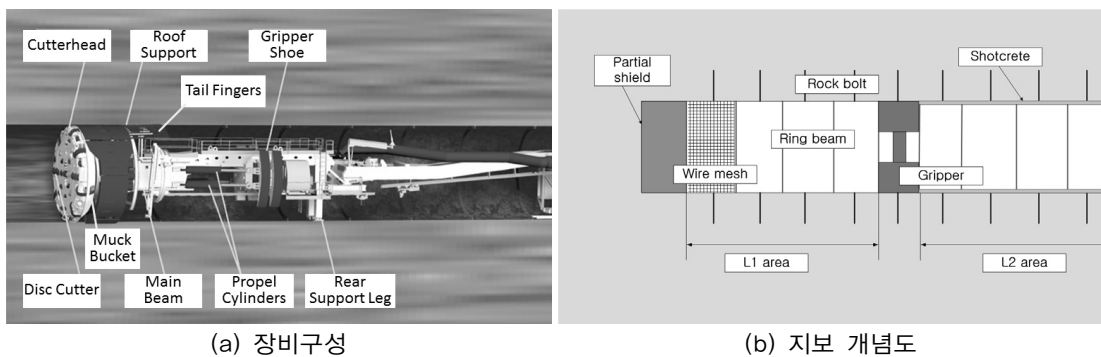


그림 1. 현대식 Rock TBM 개념도

3. 가압형 링빔을 적용한 터널의 3차원 수치 모델링

가압형 링빔이란 일반 링빔에 축력을 가하여 지보압을 증가시켜 링빔의 지보 성능을 향상시키는 공법이다. 그림 2(a) 같이 링빔에 축력을 가하게 되면 가해진 축력이 링빔을 보강하게 되고 더 큰 하중에 저항하게 된다. 가압형 링빔의 개념을 그림 2(b)와 같이 지반반응곡선(Ground Reaction Curve, GRC)과 지보재특성곡선(Support Characteristic Curve, SCC)을 이용하여 표현할 수 있다. 그림 2(b)에서 링빔을 설치 한 후 가압이 완료될 때 까지 변위가 발생하고 가압이 되면서 지보재가 링빔이 지반에 가하는 압력만큼 지보압 증가를 받게 되므로 SCC가 위로 올라가게 된다. 이때 강성 및 최대 지보압은 일반 링빔과 차이가 없다. 하지만 가압형 링빔의 적용을 통해 터널 굴착 후 발생 되는 변위를 억제할 수 있다.

3.1 수치 모델링 일반사항

3.1.1 해석 프로그램 및 해석 요소망

가압형 링빔의 효과 검증을 위한 수치모델은 (주)마이다스아이티에서 개발한 유한요소 해석 프로그램인 MIDAS/GTS를 이용하였다. 구성방정식으로는 탄성 완전소성모델(elastic perfectly plastic model)을 사용하였다. 탄소성모델은 지반재료의 항복을 표시하는 항복함수와 유동법칙으로 특정지어지는데 항복함수로는 Mohr-Coulomb 항복함수를 사용하였으며 유동법칙은 연합유동법칙을 적용하였다. 해석단면은 그림 3(a)의 현대식 Rock TBM의 설계단면을 바탕으로 철도터널에 대해 철

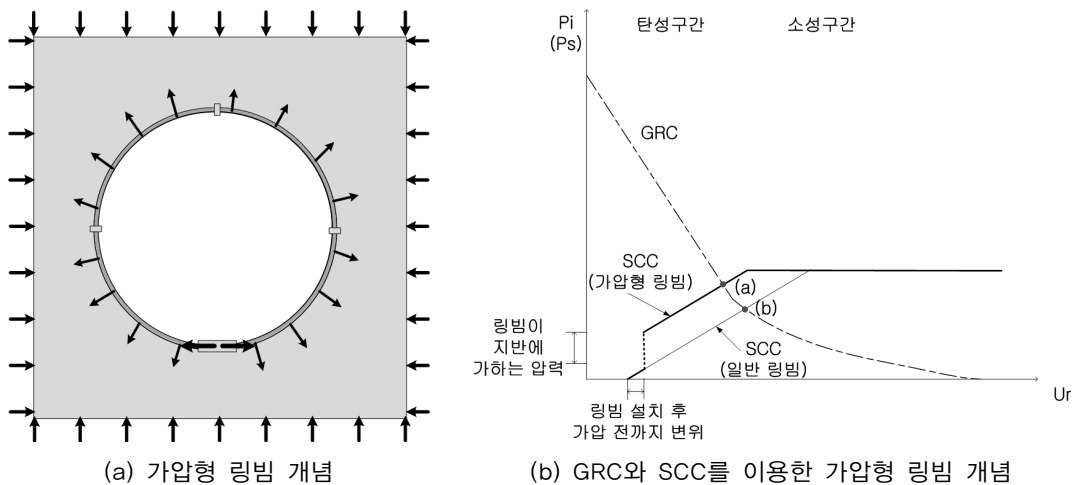


그림 2. 가압형 링빔

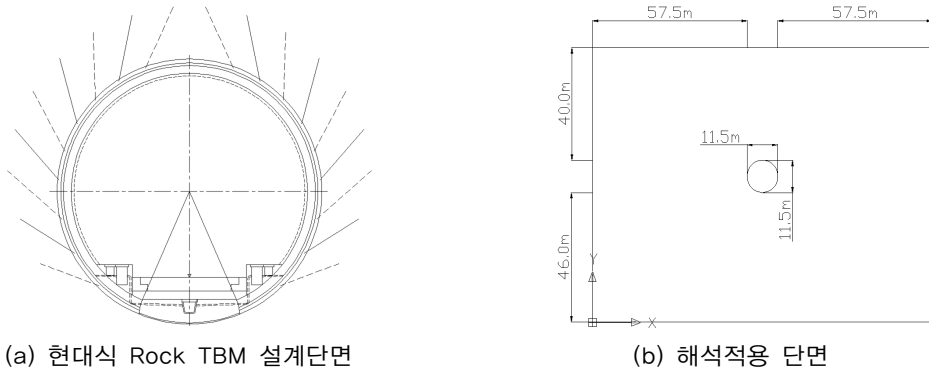


그림 3. 해석 단면

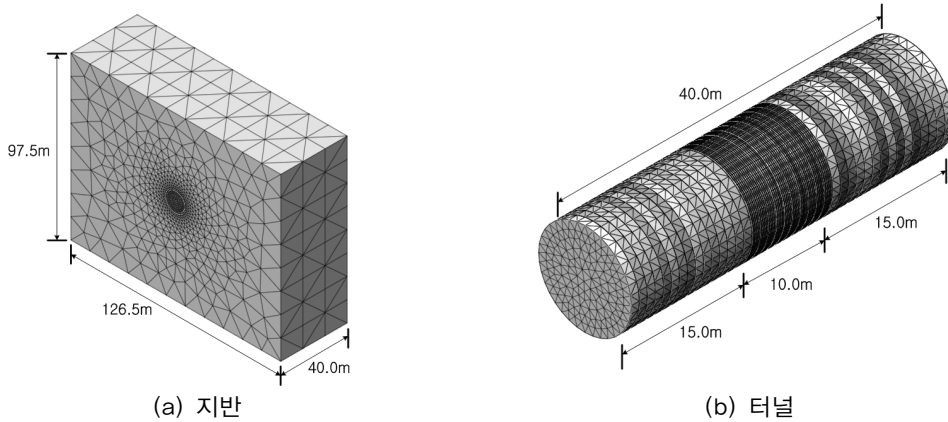


그림 4. 해석 요소망

도차량 통과구간과 관련 시설공간을 고려하여 그림 3(b)와 같이 직경 11.5 m인 터널을 산정하였다. 토피고는 도심지 대심도 터널에 해당하는 심도 40 m로 하였고 해석 시 경계조건의 영향을 무시하기 위해 터널 좌·우는 5D, 하부는 4D를 적용하였다. 해석요소망은 그림 4(a)와 같이 총 길이를 40 m로 하여 작성하였으며 터널은 그림 4(b)와 같이 총 40 m 중 가운데 10 m는 0.2 m 간격으로 작성하였으며 양 끝의 각 15 m 구간은 1 m 간격으로 작성하였다.

3.1.2 해석적용 지반정수 및 지보재 설계정수

현대식 Rock TBM의 적용 대상은 대심도 터널과 같이 암질이 좋은 지역으로 이를 고려하여 국내 사례 중 산악터널과 같이 암질이 좋은 구간의 설계사례와 한국도로공사(2001)의 「고속철도 시방서 지반 분류(안)」 및 서울특별시(2006)의 「서울지역의 지반별 지반정수의 적용범위」를 바탕으로 표 1과 같이 암반 설계적용정수를 산정하였다. 또한 탄성 및 소성영역에의 이론식과 비교하기

표 1. 암반 설계적용정수

암반등급	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	마찰각 (°)	변형계수 (MPa)	포아송비
I	27.0	3,000	43	25,000	0.20
II	25.0	1,500	42	13,000	0.23
III	24.0	800	38	6,500	0.25
IV	22.0	200	35	2,200	0.27
V	21.0	50	32	500	0.30
VI(파쇄대)	20.0	50	30	500	0.32

표 2. 지보재 설계정수

구 분	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	마찰각 (°)	탄성계수 (kPa)	포아송비
파설실드 (Partial shield)	78.5	N/A	N/A	210,000,000	0.3
링빔 (Ring beam)	78.5	N/A	N/A	210,000,000	0.3

위해 $K_0=1.0$ 을 적용하였다. 표 2는 수치해석에 사용되는 파설실드(partial shield)와 링빔의 적용 물성이다. 파설실드는 100 mm 두께의 강판(steel plate)으로, 링빔은 150 mm×150 mm 규격의 H형강으로 적용하였다.

3.1.3 가압형 링빔 모델링

일반 링빔은 그림 5(a)와 같이 보(beam) 요소로 일정한 간격으로 모델링 하였다. 가압형 링빔은 실제 시공과정에서는 링빔에 축력을 가하는 방법으로 시공이 되지만 수치해석 프로그램 상에서 구현을 할 수 없어 축력(T)을 링빔이 지반에 가하는 압력(p_r)으로 환산하여 그림 5(b)와 같이 모델링 하였다. 현대식 Rock TBM에 의해 터널이 굴착 된 후 링빔을 설치하고 링빔에 축력을 가하게 되면 링빔은 주변지반에 의해 구속이 되어 있으므로 지반에 변위를 발생시키지 않고 그림 6과 같이 지반을 밀어 힘을 가하게 된다. 따라서 링빔에 가해진 축력(T)은 모두 링빔이 지반에 가하는 압력(p_r)으로 변환되며 그 기본 가정 및 관계식을 표 3에 나타냈다. 예를 들어 표 3의 관계식을 이용하여 폭(b)이 150 mm인 링빔이 지반에 가하는 압력 400 kPa을 얻기 위해서는 약 2170 kN의 축력이 필요하다. 본 연구에서는 링빔이 지반에 가하는 압력(p_r)을 주요 매개변수로 하여 연구를 수행하였으며 ‘400 kPa 가압형 링빔’은 링빔이 지반에 가하는 압력(p_r)이 400 kPa인 가압형 링빔을 의미한다. 가압형 링빔을 적용한 현대식 Rock TBM의 해석단계는 표 4와 같다.

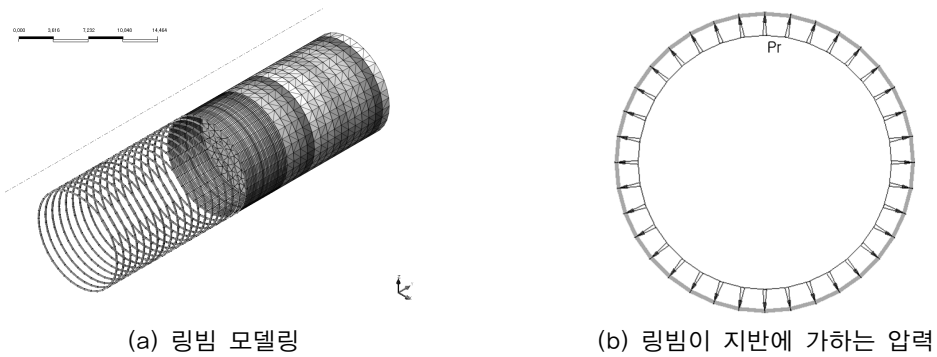


그림 5. 가압형 링빔 모델링

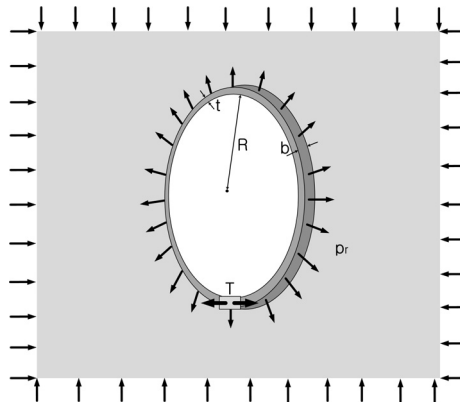


그림 6. 축력(T)을 링빔이 지반에 가하는 압력(p_r)으로 변환

표 3. 축력(T)과 링빔이 지반에 가하는 압력(p_r) 사이의 관계

(a) 기본 가정	(b) 관계식
(1) 링빔에 가해진 축력은 모두 링빔이 지반을 미는 힘으로 작용한다.	$2\pi R \times b \times p_r = T$ 여기서, T : 축력, R : 터널 반경 b : 링빔이 지반에 닿는 폭 p_r : 링빔이 지반에 가하는 압력
(2) 링빔의 주변 지반은 심도가 깊어 상재압이 강하여 링빔이 지반을 밀어도 변위 발생 없이 힘이 그대로 전달된다.	

표 4. 가압형 링빔을 적용한 현대식 Rock TBM 해석단계

STEP	해석내용
STEP 0	굴착 + 막장면 커터헤드 생성
STEP 1	막장 후방 5 m 까지 파설실드 설치
STEP 2	파설실드 바로 후방 링빔 설치
STEP 3	1 m 추가 굴착 후 링빔 가압
STEP 4 ~ n	굴착 및 지보 반복

표 5. 수치해석 수행 Case

링빔이 지반에 가하는 압력 (kPa)	지반 타입3		지반 타입4		지반 타입5	
	링빔 1 m 간격	링빔 2 m 간격	링빔 1 m 간격	링빔 2 m 간격	링빔 1 m 간격	링빔 2 m 간격
0	3_1_1	3_2_1	4_1_1	4_2_1	5_1_1	5_2_1
200	3_1_2	3_2_2	4_1_2	4_2_2	5_1_2	5_2_2
400	3_1_3	3_2_3	4_1_3	4_2_3	5_1_3	5_2_3
600	3_1_4	3_2_4	4_1_4	4_2_4	5_1_4	5_2_4
800	3_1_5	3_2_5	4_1_5	4_2_5	5_1_5	5_2_5

(단, 이 기준은 150 mm×150 mm 링빔을 이용해 직경 11.5 m 터널을 지보 했을 때에 한함)

3.2 수치해석 매개변수

가압형 링빔을 적용한 수치해석은 지반 타입, 링빔이 지반에 가하는 압력, 링빔 간격을 매개변수로 하여 표 5와 같이 수행하였으며 각 매개변수의 특성은 표 5 같다.

3.2.1 지반 타입

일반적으로 NATM 터널을 설계할 때 지반 타입에 따라 굴착 방법 및 지보 방법, 지보재 사용량을 달리하여 표준지보패턴을 작성하고 그것을 바탕으로 공사를 수행한다. 즉 지반 타입에 따라 같은 지보재를 사용했을 때 그 거동은 확연히 달라지므로 각 지반에 맞는 지보재를 설정해 주는 것이다. 따라서 가압형 링빔의 거동이 지반 타입에 따라 다를 것으로 판단되어 표 1의 암반 설계적용정수 중 지반 타입3, 4, 5에 대해서 분석을 수행하였다.

3.2.2 링빔이 지반에 가하는 압력

가압형 링빔을 실무에 적용할 때 링빔이 지반에 가하는 압력은 지반의 강도를 고려하여 산정하여야 한다. 암반은 압축에는 매우 강하지만 인장에는 약하여 링빔이 지반을 밀게 되면 인장파괴가 발생할 수 있다. 이에 대한 합리적인 가압크기를 산정하기 위해 그림 7과 같이 암반의 인장강도를 측정하는 방법의 하나인 수압파쇄법 이론을 적용하여 분석하였다.

$$\sigma_{\theta} = 3\sigma_{h0,\min} - \sigma_{h0,\max} - p = -\sigma_t \quad (1)$$

여기서, $\sigma_{h0,\min}$: 최소수평주응력, $\sigma_{h0,\max}$: 최대수평주응력

σ_{θ} : 접선응력, p : 내압, σ_t : 암석의 인장강도

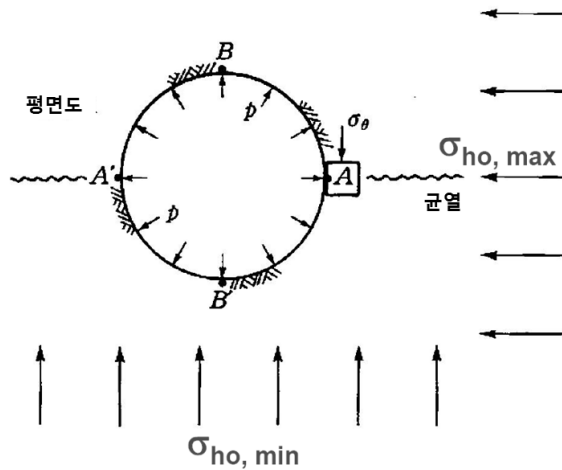


그림 7. 수압파쇄법 (이인모, 2001)

식 (1)과 같이 굴착공에 내압을 가했을 때 굴착공 주변의 접선응력이 인장강도 보다 같거나 크면 지반에 균열이 발생하게 된다. 이를 터널에 적용하여 $\sigma_{ho,max} = \sigma_{v0}$, $\sigma_{ho,min} = \sigma_{ho}$ 로 산정하고 $K_0 = 1.0$ 을 적용하면 Kirsh's solution의 결과와 같은 $\sigma_{\theta} = 2\sigma_{v0} - p$ 의 결과를 얻게 된다. 만약 터널의 심도가 40 m이고 단위중량을 20 kN/m³으로 산정했을 때, $\sigma_{v0} = 800$ kPa이고 내압(p) 1600 kPa을 적용하면 $\sigma_{\theta} = 2 \times 800 - 1600 = 0$ kPa이 된다. 따라서 링빔이 지반에 가하는 압력이 1600 kPa 이상 일 경우에는 수압파쇄(hydraulic fracturing)가 발생할 가능성이 있다. 또한 가압형 링빔은 좁은 면적에 응력이 집중되기 때문에 파쇄대와 같은 암질이 불량한 구간에서 국부적인 파괴가 발생할 위험이 따르므로 기본 해석에서 적용하는 링빔이 지반에 가하는 압력(p_r)의 크기는 토피고 40 m일 때 상재 압 정도인 800 kPa을 최대로 산정하여 해석을 수행하였다.

3.2.3 링빔 간격

링빔의 간격은 현대식 Rock TBM에서 시공속도 및 공사비에 있어서 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 현대식 Rock TBM에서는 지반 강도에 따라 지반이 연약할수록 링빔 간격을 더 촘촘히 배치하거나 단면적이 더 큰 링빔을 사용한다. 그러나 가압형 링빔을 적용할 경우 링빔의 지보성능이 향상되어 링빔의 설치간격을 현재보다 더 넓게 할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 링빔의 간격이 1 m와 2 m인 경우에 대해 해석을 수행하여 가압형 링빔의 효과에 대해 분석하였다.

4. 가압형 링빔의 적용 효과 분석

4.1 가압형 링빔의 지반 보강 메커니즘

터널을 굴착 한 후 지보재를 설치하면 지반에 구속압을 가해 최소주응력인 반경방향응력을 증가시키는 효과가 있다. 링빔은 터널 전 구간에서 설치되는 것이 아니라 일정한 간격으로 좁은 폭에 설치되기 때문에 링빔 사이의 무지보 구간에서 안정성에 대한 문제가 발생할 수 있다. 그러나 그림 8(a) 같이 국지적인 아칭효과에 의해 링빔 설치구간 뿐만 아니라 링빔 사이의 무지보 구간도 보강이 된다. 즉 종방향 아칭에 의해 막장 전방으로 전이되었던 하중이 추가 굴착과 함께 터널에 지보재가 설치됨에 따라 돌아올 때 상대적으로 안정한 링빔 쪽으로 하중이 더 많이 전달되어 링빔 사이의 무지보 구간은 하중을 덜 받게 된다.

가압형 링빔을 적용한 경우에는 이러한 효과를 더욱 증가시킬 수 있다. 가압형 링빔의 가압 효과가 커질수록 가압부에서 받아주는 하중이 증가하게 되고 그에 따라 링빔 사이의 무지보 구간에서는 무가압 링빔을 사용했을 때 보다 더 작은 하중을 받게 되어 지반이 안정화 되게 된다. 즉, 가압형 링빔에 의한 지반보강 메커니즘은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫 번째로 가압부에서는 링빔 가압에 따른 내압증가로 인한 최소주응력이 증가 하고, 두 번째로 링빔 사이의 무지보 구간에서는 가압부가 더 많은 하중을 받아주게 되어 국지적인 아칭효과로 인해 최소주응력이 증가하게 된다. 이러한 효과를 확인하기 위해 그림 8(b)와 같이 1 m 간격인 링빔 사이구간을 5구간으로 나누어 최소주응력을 산출하였다.

분석 결과 각 지반에 대해 무가압 링빔과 800 kPa 가압형 링빔을 적용한 경우 최소주응력의 변화를 그림 9~11에 나타냈다. 그 결과 지반 타입5는 연약한 지반 강도로 가압형 링빔의 영향범위가

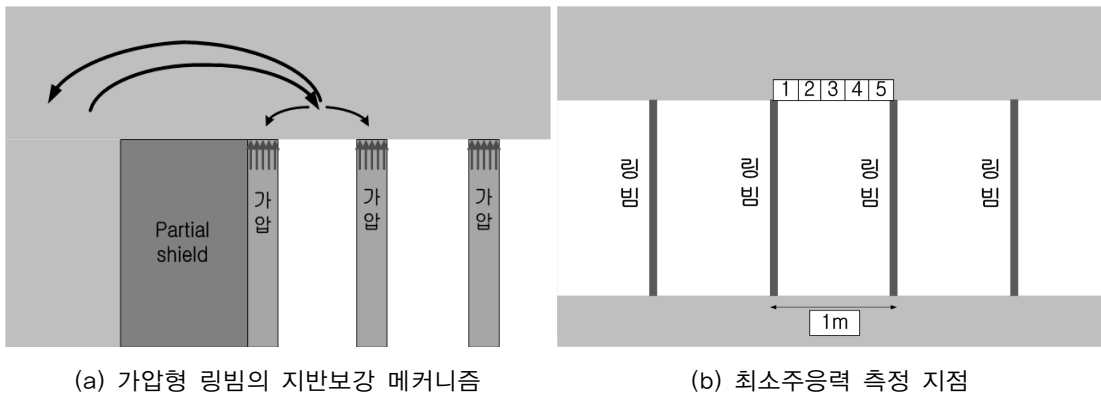


그림 8. 가압형 링빔 적용에 따른 최소주응력 효과 검증

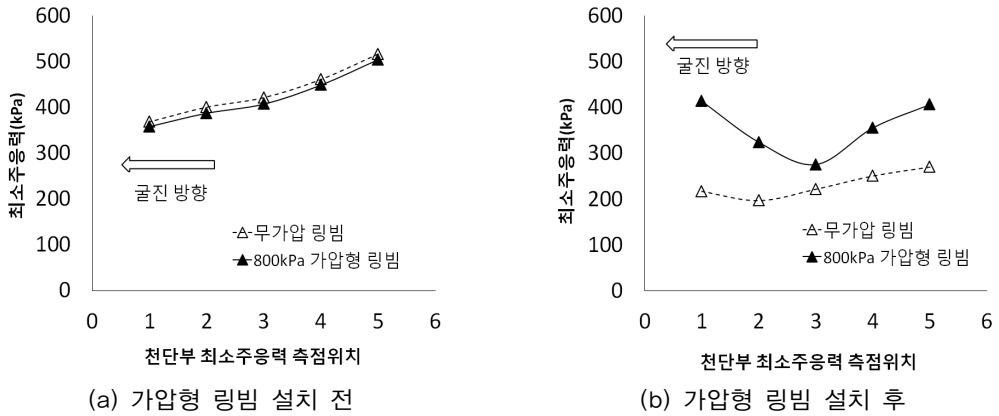


그림 9. 터널 천단부의 최소주응력 변화경향(지반 타입3)

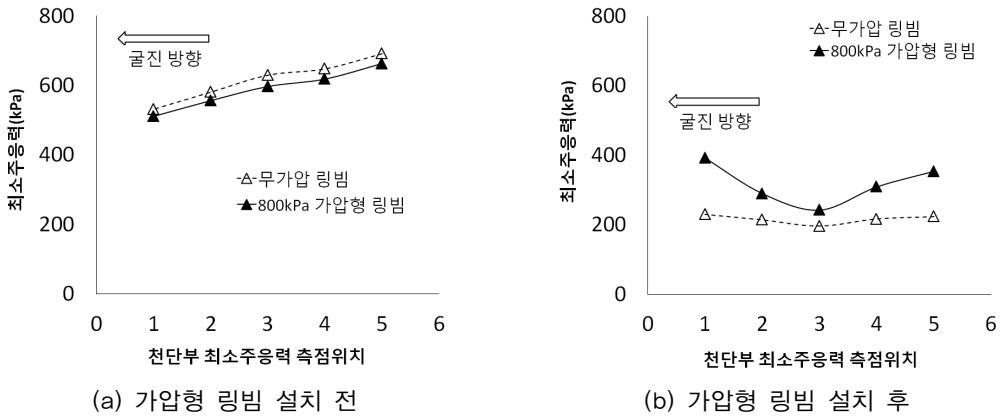


그림 10. 터널 천단부의 최소주응력 변화경향(지반 타입4)

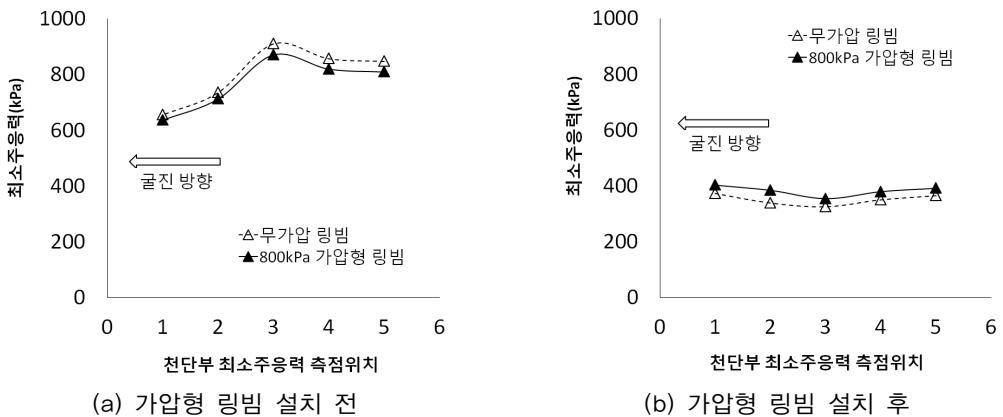


그림 11. 터널 천단부의 최소주응력 변화경향(지반 타입5)

www.kci.go.kr

작아 타입 3과 4에 비해 최소주응력 증가 효과가 작게 나타났으나 전반적으로 모든 지반 타입에서 800 kPa 가압형 링빔을 적용한 경우 측정 1~5에서 최소주응력이 증가하였다. 이를 통해 가압형 링빔의 적용으로 지반이 더 안정화되었음을 확인 하였다. 특히 가압부인 측정 1과 5 뿐만 아니라 링빔 사이의 무지보 구간인 측정 2~4에서도 최소주응력이 증가하여 국지적인 아칭효과에 의해 전반적인 지반보강 효과가 발현됨을 확인 할 수 있었다.

4.2 가압형 링빔 적용에 따른 지반 변형 억제

현대의 터널이론은 붕괴역학에 근거하지 않고 탄소성으로 새로운 평형상태에 이르도록 하는 탄소성평형이론에 근거하여, 터널주위가 소성상태에 이르게 될 가능성이 있을 때, 지보재를 통해 내압을 가해 소성영역을 최소화 한다. 현대식 Rock TBM에서도 소성영역 발생으로 인한 과대변위는 터널의 안정성에 큰 영향을 준다. 따라서 적절한 지보재 설치를 통해 터널의 소성변형을 억제 시켜야 하며 가압형 링빔은 무가압 링빔에 비해 소성변형 억제 효과가 우수할 것으로 판단된다. 또한 4.1절에서 가압부 뿐만 아니라 링빔 사이의 무지보 구간에서도 최소주응력이 증가한 것으로 보아 소성변형을 또한 가압부와 링빔 사이의 무지보 구간 모두에서 효과가 있을 것으로 판단된다. 따라서 그림 12와 같이 가압부인 측정1과 링빔 사이의 무지보 구간인 측정2 두 지점에 대한 변형률 분석을 통해 가압형 링빔의 효과를 분석하였다.

본 해석에서 적용한 Mohr-Coulomb 항복함수에서는 Mohr circle이 Mohr-Coulomb 파괴포락선에 닿은 이후에 발생하는 변형률을 소성변형률로 분류하고 그 전에 발생한 변형률을 탄성변형률로 나타낸다. 또한 소성변형률과 탄성변형률을 합친 것을 변형률이라 한다.

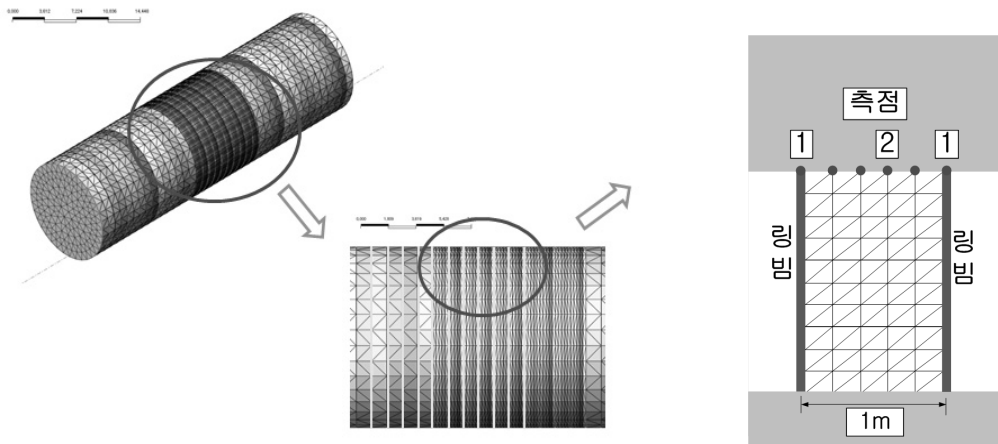


그림 12. 변형률 측정 지점

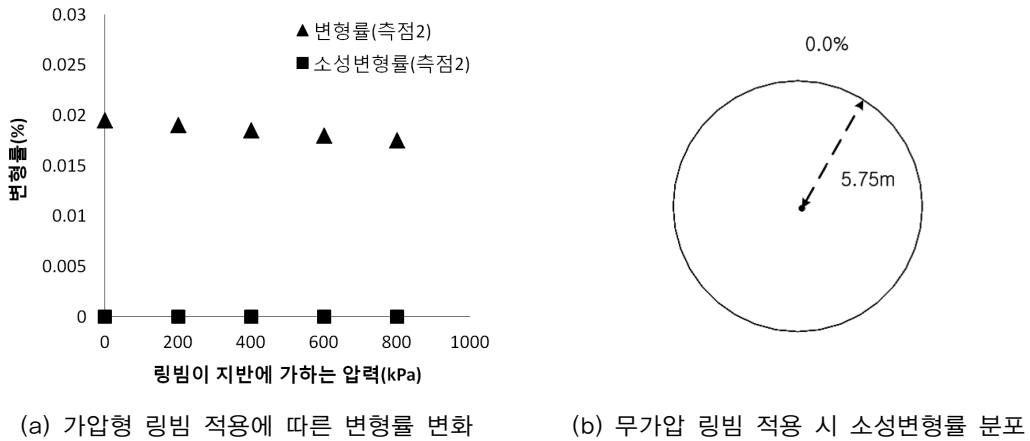


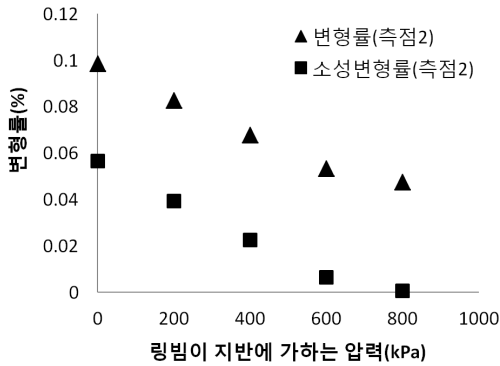
그림 13. 지반 타입3 변형률 변화(측점2)

지반 타입3에 대해 링빔 사이의 무지보 구간인 측점2에서 변형률과 소성변형률을 측정하였다. 그림 13(a)와 같이 지반 타입3은 기본적으로 안정된 지반으로 굴착 후 링빔만 설치했을 때 소성변형률이 0%로 탄성상태로 평형상태를 이뤄 안정된 지반임을 확인할 수 있다. 가압형 링빔을 적용한 결과 전반적으로 변형률이 감소하는 경향을 보였지만 변화가 크지는 않았다. 그림 13(b)는 무지보 구간인 측점2에서 무가압 링빔 적용 시 터널 주변의 소성영역 분포로 천단 뿐 아니라 터널 주변 전반에 걸쳐 소성영역이 발생하지 않았다. 이와 같이 지반 타입3에서는 소성변형률이 발생하지 않아 가압형 링빔의 적용에 따른 변형률 감소 효과는 크지 않다.

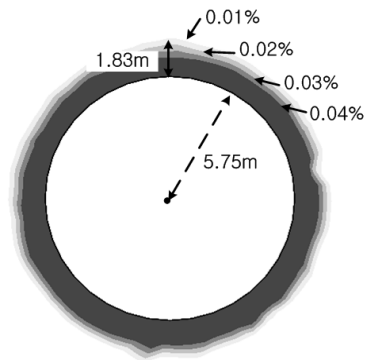
그림 14(a)는 지반 타입4에 대해 링빔 사이의 무지보 구간인 측점2에서 링빔이 지반에 가하는 압력에 따른 변형률과 소성변형률을 나타냈다. 무가압 링빔을 적용했을 때 변형률이 천단에서 0.1% 정도 발생하였으며, 이 중 탄성변형률은 약 0.04% 정도로 가압크기 증가에 따라 탄성변형률은 감소하지 않고 소성변형률만 감소하였다. 즉 가압형 링빔의 적용을 통해 소성변형률 억제 효과가 나타난 것이다. 일반적으로 터널에 과대변위를 발생시키는 변형률은 소성변형률이므로 소성변형률의 감소를 통해 지반을 안정화 시킬 수 있다.

그림 14(b)~14(d)는 링빔 사이의 무지보 구간인 측점2에서 가압의 증가에 따른 터널 주변의 소성변형률의 분포를 나타냈다. 탄소성이론에 따르면 터널 굴착 후 내압이 증가함에 따라 소성영역의 범위가 줄어들게 된다. 그림 14(b)~14(d)의 가압형 링빔의 적용 결과에서는 0.01%의 소성변형률이 발생한 선을 통해 그 효과를 확인 할 수 있으며 0.01%선을 기준으로 터널 천단에서 소성영역의 크기를 소성 두께로 표현하였다. 여기서 소성 두께란 터널 벽면에서 소성영역이 발생한 곳까지의 거리이다. 그 결과 링빔 사이의 무지보 구간인 측점2에서 0.01% 소성변형률 선에 대한 소성 두께가

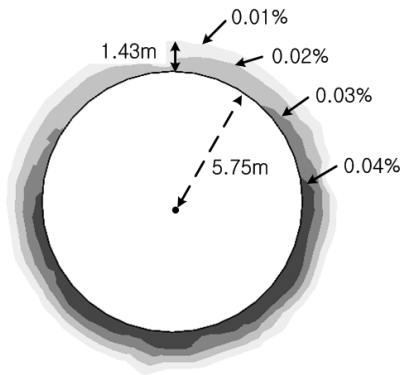
터널 천단에서 1.83 m였던 것이 800 kPa의 가압형 링빔을 적용함에 따라 터널 천단에서는 나타나지 않았다. 이와 같이 가압형 링빔의 적용을 통해 소성영역의 크기가 감소하고 같은 지점에서의 소성변형률이 작아지게 된다. 표 6에는 가압부인 측점1과 링빔 사이의 무지보 구간인 측점2의 소성 두께를 나타냈다. 링빔 사이의 무지보 구간인 측점2에서 소성 두께가 약간 크게 나왔으나 큰 차이는 보이지 않았다.



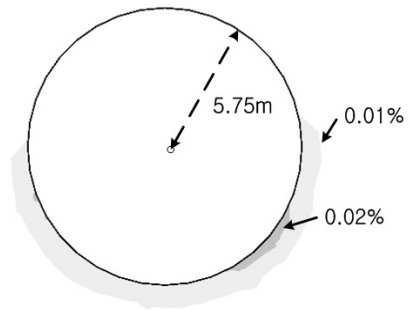
(a) 가압형 링빔 적용에 따른 변형률 변화



(b) 무가압 링빔 적용 시 소성변형률 분포



(c) 400 kPa 가압형 링빔 적용 시 소성변형률 분포



(d) 800 kPa 가압형 링빔 적용 시 소성변형률 분포

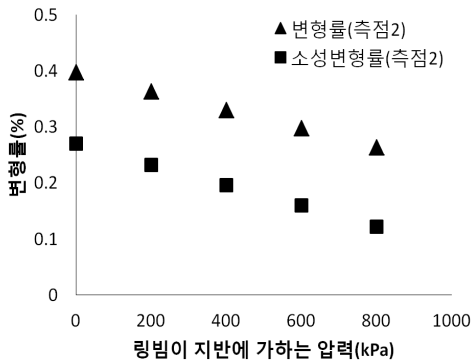
그림 14. 지반 타입4 변형률 변화(측점2)

표 6. 지반 타입4 소성 두께 감소(0.01% 소성변형률 선 기준, 천단)

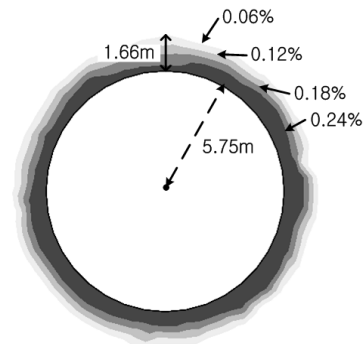
	소성 두께(m)	
	측점1	측점2
무가압 링빔	1.74	1.83
400 kPa 가압형 링빔	1.39	1.43
800 kPa 가압형 링빔	0	0

그림 15(a)는 지반 타입5에 대해 링빔 사이의 무지보 구간인 측점2에서 링빔이 지반에 가하는 압력에 따른 변형률과 소성변형률을 나타냈다. 지반 타입4와 마찬가지로 가압형 링빔을 적용함에 따라 탄성변형률의 변화는 거의 없이 소성변형률만 감소하여 터널의 과대변형을 억제할 수 있다.

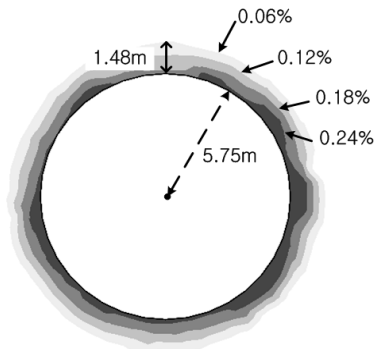
그림 15(b)~15(d)는 링빔 사이의 무지보 구간인 측점2에서의 가압크기 증가에 따른 터널 주변의 소성변형률의 분포를 나타냈다. 0.06%의 소성변형률이 발생한 선을 통해 내압이 증가함에 따라 소성영역 범위가 줄어드는 것을 확인 할 수 있으며 링빔 사이의 무지보 구간인 측점2에서 0.06% 소성변형률 선에 대한 소성 두께가 터널 천단에서 1.66 m이었던 것이 800 kPa의 가압형 링빔을 적용함에 따라 터널 천단에서 1.13 m로 감소하였다. 이와 같이 지반 타입5에서도 지반 타입4와 마찬가지로 가압형 링빔의 적용을 통해 소성영역의 크기가 감소하고 같은 지점에서의 소성변형률이 작아지게 된다. 표 7에는 지반 타입5에 대해 가압부인 측점1과 링빔 사이의 무지보 구간인 측점2의 소성 두께를 나타냈다. 링빔 사이의 무지보 구간인 측점2에서 소성 두께가 약간 크게 나타났으나 큰 차이는 보이지 않았다.



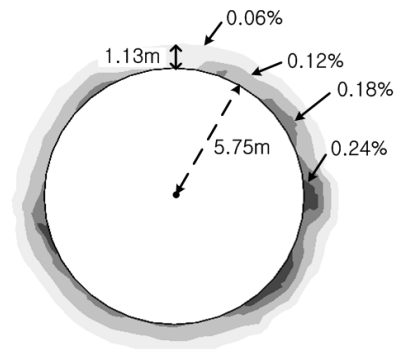
(a) 가압형 링빔 적용에 따른 변형률 변화



(b) 무가압 링빔 적용 시 소성변형률 분포



(c) 400kPa 가압형 링빔 적용 시 소성변형률 분포



(d) 800kPa 가압형 링빔 적용 시 소성변형률 분포

그림 15. 지반 타입5 변형률 변화(측점2)

표 7. 지반 타입5 소성 두께 감소(0.06% 소성변형률 선 기준, 천단)

	소성 두께(m)	
	측점1	측점2
무가압 링빔	1.66	1.66
400 kPa 가압형 링빔	1.48	1.48
800 kPa 가압형 링빔	1.05	1.13

4.3 가압형 링빔 적용에 따른 변위 감소 메커니즘

그림 2(b)의 가압형 링빔의 정의와 같이 가압형 링빔을 적용하게 되면 변위가 감소하게 되며 그 구체적인 경향을 파악하기 위해 지반 타입3, 4, 5에 대해 가압의 크기를 증가시켜 가며 그때 발생하는 변위경향을 분석하였다. 관측대상 지점은 터널의 중앙지점에서 링빔 가압부와 링빔 사이의 무지보 구간의 전반적인 변위경향을 확인하기 위해 그림 16과 같이 측점1~6에 대해서 최종 수렴변위를 측정하였다.

해석 결과 그림 17과 같이 모든 지반 타입에서 가압부에 위치한 측점1과 6에서 변위가 작게 나오고 상대적으로 링빔 사이의 무지보 구간인 측점2~5 구간에서 변위가 크게 나왔으나 그 차이는 크지 않았다. 즉 국지적인 아칭 효과에 의해 가압부가 아닌 링빔 사이의 무지보 구간에서도 변위감소 효과가 동일하다. 그림 17(a)~17(c)에서 볼 수 있듯이 가압의 크기가 커짐에 따라 모든 지반에서 변위가 감소하였으나 타입3에서는 800 kPa 가압형 링빔을 적용했을 때 변위 감소량이 0.1 mm 내외로 그 효과가 크지 않았다. 이에 반해 타입5에서는 800 kPa 가압형 링빔 적용에 따라 변위가 2~3 mm 감소하여 변위감소 효과가 가장 탁월한 지반으로 판단되었다.

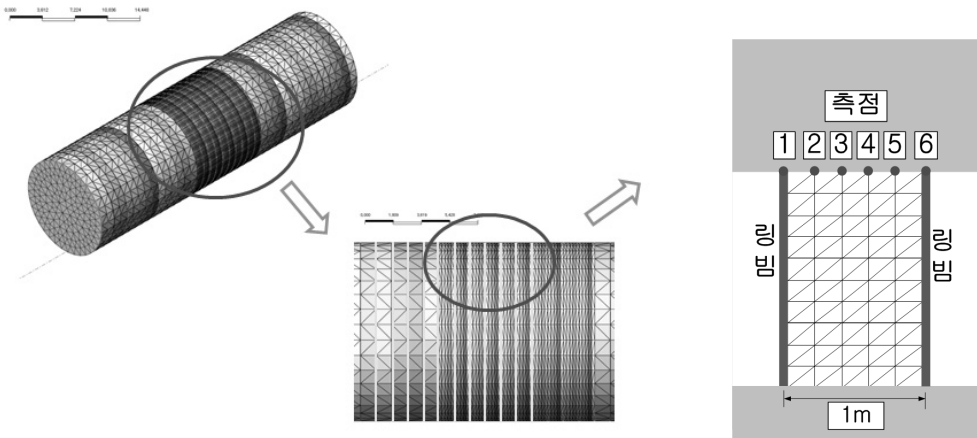


그림 16. 변위 측정 지점

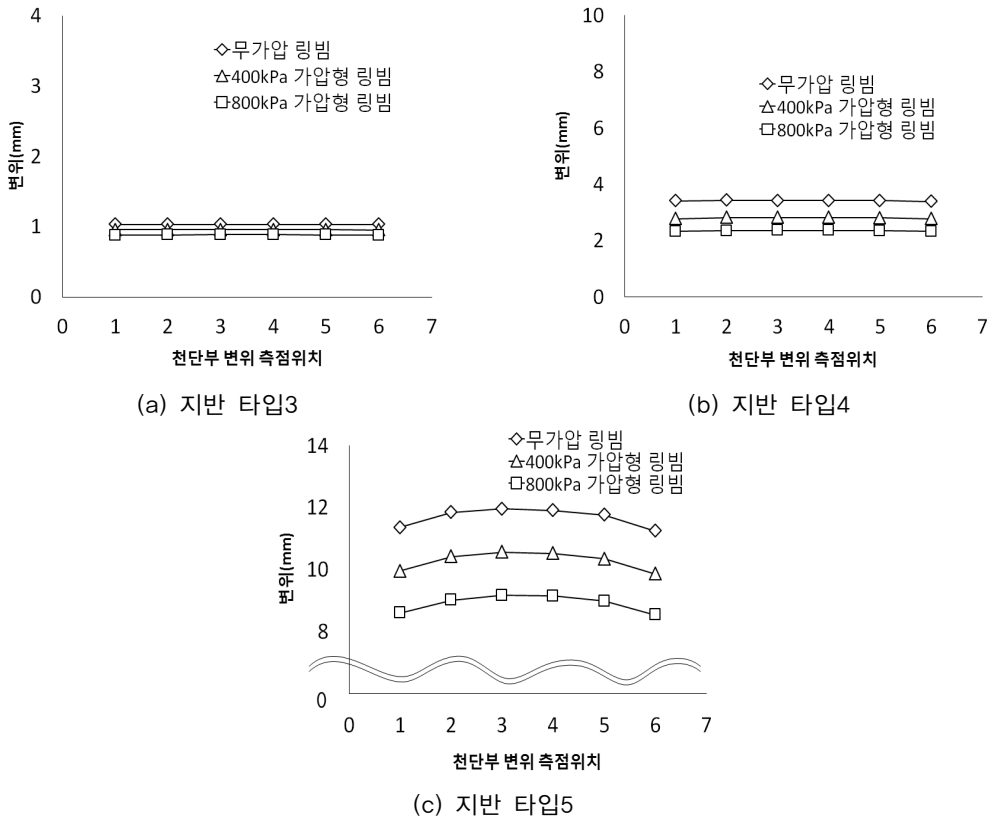
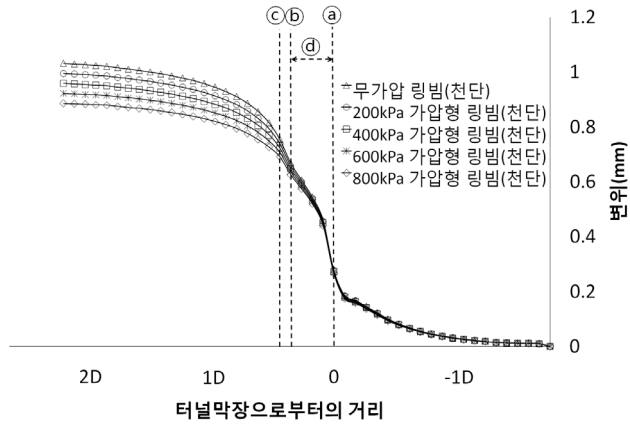


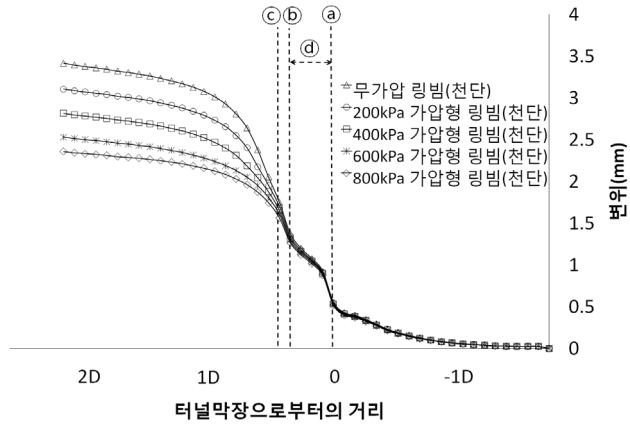
그림 17. 가압형 링빔 적용에 따른 변위 경향

또한 가압형 링빔을 적용할 때 시공단계에 따른 변위경향을 확인하기 위해 측점1~6 중 변위가 상대적으로 큰 링빔 사이의 무지보 구간에 위치한 측점4에 대해서 내공변위곡선을 그림 18에 나타냈다. 그래프에서 막장면을 0으로 막장에서 전방으로 터널직경(D) 만큼 떨어진 지점을 -1D, 막장에서 후방으로 터널직경(D) 만큼 떨어진 지점을 1D로 나타냈다. 또한 이 곡선들은 ㉠에서 굴착이 이루어져 초기에는 ㉡구간에서 파설샐드에 의한 지보구간을 지나 ㉢에서 파설샐드 바로 뒤에 링빔이 설치되는 단계로 시공단계가 적용되었다. 그 후 1 m 후방인 ㉣에서 가압이 완료되어 가압형 링빔에 의한 지보가 이루어지게 된다. 링빔이 설치되어 가압이 완료되기 전 단계인 ㉢~㉣구간의 변위는 수치해석에서는 1 m 후방에 가압이 이루어지는 것으로 모사를 하였지만 만약 실제 시공에서 더 빠른 시간 안에 지보가 된다면 이 구간에서 발생하는 변위가 감소할 것이다.

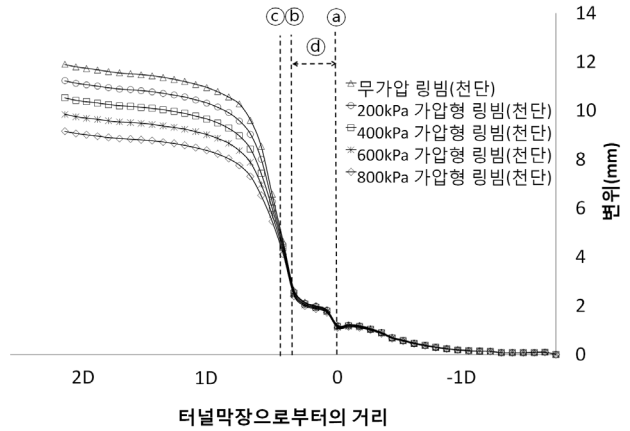
그림 18(a)~(c)에서 변위경향을 살펴보면 가압형 링빔의 적용으로 링빔이 설치된 이후의 변위인 상대변위의 감소효과가 탁월하다. 지반 타입3에서는 800 kPa 가압형 링빔 적용을 통해 약 0.1 mm 정도의 상대변위 감소효과가 나타났고, 지반 타입4에서는 약 1 mm 정도의 상대변위 감소효과가



(a) 지반 타입3



(b) 지반 타입4



(c) 지반 타입5

그림 18. 가압형 링빔 적용에 따른 내공변위곡선(축점4)

www.kci.go.kr

나타났다. 지반 타입5에서는 800 kPa 가압형 링빔 적용에 의한 변위감소 효과가 2.5 mm 정도로 가장 크게 나타났다. 이와 같이 지반 타입5에서 상대변위 감소량이 가장 크게 나타나 가압형 링빔의 적용을 통한 변위억제 효과가 가장 우수한 것으로 판단된다.

4.4 링빔 간격에 따른 가압형 링빔 효과 분석

터널에서 지보재의 양을 경감시키는 것은 공법의 경제성에 있어 매우 중요한 요소이다. 현대식 Rock TBM에서도 링빔 지보재의 사용량 감소는 경제성 향상으로 이어져 공법의 경쟁력을 더욱 향상시킬 수 있다. 앞의 4.3절에서 가압형 링빔을 적용할 경우 내공변위가 감소하는 결과를 확인하였다. 이와 같이 가압형 링빔은 변위감소 효과가 우수하므로 링빔의 간격을 넓게 하여 가압형 링빔을 적용했을 때도 변위감소효과가 발현될 것으로 판단된다. 따라서 동일한 목표 내공변위에 대해서 가압형 링빔을 적용할 경우 무가압 링빔을 적용 했을 때 보다 링빔 간격을 더 넓게 할 수 있을 것으로 예상된다. 본 절에서는 각 지반 타입에 대한 링빔 간격 1 m와 2 m일 때의 변위해석 결과를 바탕으로 가압형 링빔의 설치간격 증가 효과에 대해 분석하도록 한다. 측정 대상 지점은 그림 19와 같이 링빔 1 m와 2 m 간격에 대해 가압부인 측정1과 링빔 사이의 무지보 구간인 측정2에서 수행하였다.

지반 타입3의 경우 안정된 지반으로 무가압 링빔을 적용 했을 때도 그림 20(a)와 같이 변위가 1 mm 정도로 매우 작게 발생한다. 링빔 간격에 대한 영향을 분석하기 위해 링빔 간격을 2 m로 하여 무가압 링빔을 적용 했을 때도 링빔 간격 1 m일 때 보다 변위가 조금 증가 할 뿐 큰 차이가 없다. 링빔 간격 1 m와 2 m에 대해 둘 다 가압형 링빔을 적용했을 때 변위 감소효과는 발생 하였으나 변위 감소량이 0.1 mm 내외로 변위감소 측면에서는 가압형 링빔의 적용성이 떨어진다.

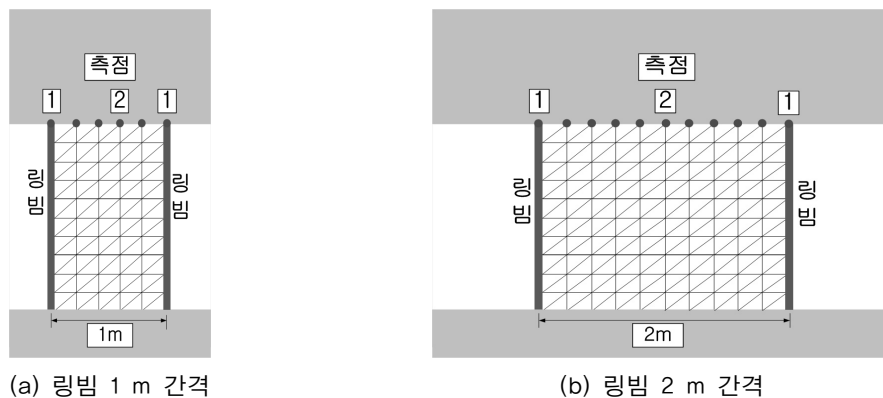
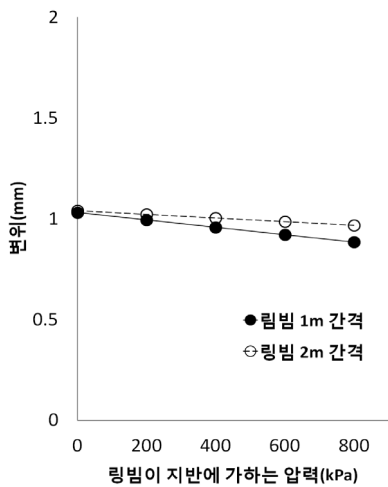
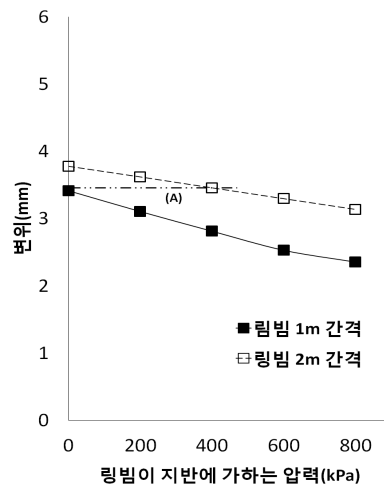


그림 19. 링빔 간격 1 m와 2 m에서 변위 측정 지점

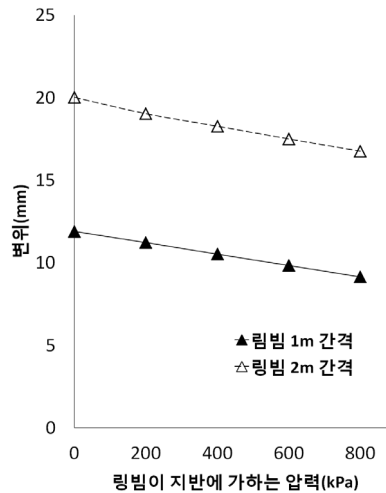
지반 타입4는 그림 20(b)와 같이 무가압 링빔을 적용 했을 때 링빔 간격 1 m에서는 변위가 3.5 mm 정도 발생하였으며, 링빔 간격 2 m에서는 4 mm 정도 발생 하였다. 링빔 간격 1 m와 2 m 모두 가압형 링빔을 적용하여 가압의 크기를 증가시켜 감에 따라 변위가 감소하였다. 그림 20(b)에 서 주목해야 할 점은 링빔 간격 1 m일 때 무가압 링빔을 적용한 경우 발생한 변위와 링빔 간격 2 m일 때 약 400 kPa의 가압형 링빔을 적용한 경우 발생하는 변위가 같다는 것이다. 즉, 약 400 kPa의 가압형 링빔을 사용할 경우 링빔 간격을 1 m에서 2 m로 넓게 하여 지보재 사용량을 경감할 수 있다(그림 20(b)의 (A)선).



(a) 지반 타입3 (측점2)



(b) 지반 타입4 (측점2)



(c) 지반 타입5 (측점2)

그림 20. 가압형 링빔 적용 시 링빔 간격에 따른 변위 분석

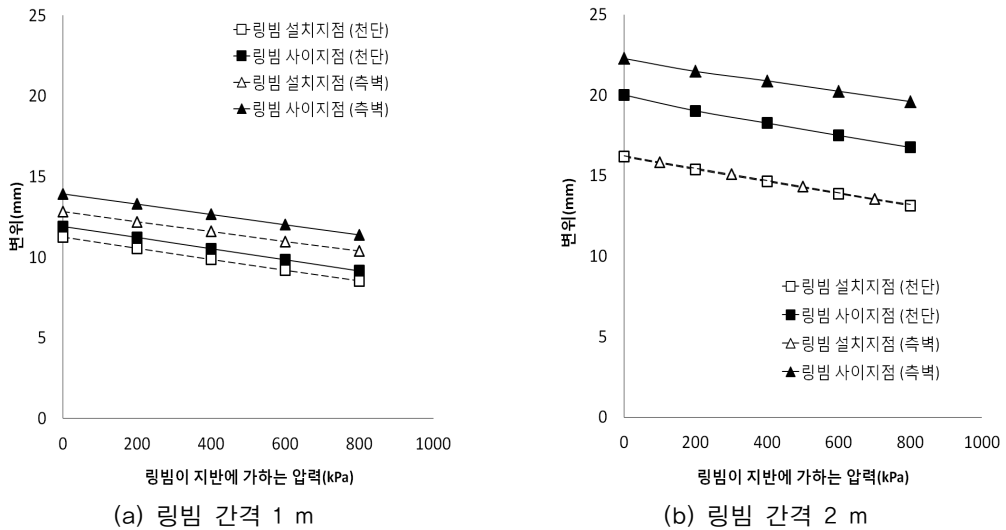


그림 21. 링빔 간격에 따른 링빔 설치지점과 링빔 사이지점 변위비교(지반 타입5)

지반 타입5의 경우 그림 20(c)와 같이 링빔 간격을 2 m로 했을 때도 가압 크기 증가에 따라 변위가 감소하였지만 링빔 간격 1 m 일 때 보다 변위가 2배 가까이 크게 발생하였다. 다른 지반 타입과 달리 이렇게 큰 변위가 발생한 이유는 지반이 연약하여 링빔 간격이 멀어짐에 따라 가압부 쪽으로 야칭현상이 발생되지 않았기 때문이다. 따라서 지반이 연약한 경우에는 과대변위가 발생하지 않도록 링빔 간격을 적절히 조절할 필요가 있다.

지반 타입5에서 링빔 간격에 따른 변위차이의 원인을 분석하기 위해 링빔 간격 1 m와 2 m에서 가압부인 측정점1과 링빔 사이의 무지보 구간인 측정점2를 비교하여 그림 21에 나타냈다. 그 결과 링빔 1 m 간격일 때는 측정점1과 2의 변위 차이가 크지 않았지만 링빔 2 m 간격일 때는 측정점1과 2의 변위가 천단과 측벽 모두에서 약 20~25% 정도 발생했다. 이와 같이 지반 타입5에서 링빔 간격이 2 m일 때 과대변위가 발생한 것은 국지적인 야칭효과가 발현이 잘 안된 결과로 판단된다. 즉 타입5와 같이 지반이 연약한 경우에는 국지적인 야칭효과가 발현될 수 있도록 적절한 링빔 간격을 고려해 줘야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 링빔의 성능을 향상시킨 가압형 링빔의 효과를 검증하기 위해 3차원 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 가압형 링빔의 지보 개념은 NATM의 지보와 같은 개념인 아칭효과와 내공변위 제어법으로 설명할 수 있다. 가압형 링빔을 적용할 경우 가압시점에서 지보압이 상승하여 지보재특성곡선(SCC)이 위로 올라가게 되며 그로 인하여 변위 감소 효과를 얻을 수 있다. 이때 감소되는 변위의 크기는 적용지반과 가압크기에 따라 다르다.
2. 터널에 지보재를 설치하면 지반에 구속압을 가해 최소주응력을 증가시키는 효과가 있다. 가압형 링빔도 무가압 링빔 보다 더 큰 구속압을 가하게 되므로 최소주응력을 증가시키게 된다. 지반 타입3, 타입4, 타입5에 대해 시공단계에 따라 최소주응력의 변화 양상을 분석한 결과 가압형 링빔을 적용할 경우 국지적인 아칭효과에 의해 가압부 뿐만 아니라 링빔 사이의 무지보 구간도 보강되는 효과가 발생한다.
3. 가압형 링빔이 발현하는 터널의 내압증가 효과를 통해 터널의 변형을 억제할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 과대변위를 발생시키는 소성변형률의 억제 효과가 크게 나타나 굴착대상 지반의 안정화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.
4. 가압형 링빔의 적용으로 최소주응력 증가, 변형률 감소 등의 효과가 나타나며 이로 인해 발생하는 변위가 감소하게 된다. 특히 링빔이 설치된 이후 발생하는 상대변위의 감소 효과가 크며 지반 타입5에서 그 효과가 가장 크게 나타났다.
5. 가압형 링빔의 적용으로 링빔 간격을 조절하여 터널 굴착의 경제성을 확보할 수 있다. 과대변위가 발생할 경우 링빔 간격을 좁히는 것이 아닌 현재의 링빔 간격을 유지한 상태로 가압을 적용하여 변위를 감소시킬 수 있다. 또한 가압형 링빔의 적용을 통해 같은 변위를 유지하면서 링빔 사이 간격을 더 넓게 하여 지보재 사용량을 경감시킬 수 있다. 단 지반이 연약한 경우에는 링빔 사이 간격에 제약을 받는다.

감사의 글

본 논문은 제12차 터널 기계화 시공기술 국제 심포지엄 논문집에 발표된 논문을 보완하여 작성되었음을 밝힙니다.

본 연구는 대림산업(주)의 연구지원에 의해 고려대학교에서 ‘한국형 대심도터널 고속 기계화시공 기술개발’이라는 주제로 수행되었으며, 대림산업(주) 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 강기돈, 곽윤석, 김도훈, 정경환, 이인모(2011), “현대식 Rock TBM의 소개 및 지보 시스템 연구”, 제12차 터널 기계화 시공기술 국제 심포지엄 논문집, pp. 89-105.
2. 김동규, 배규진(2008), “격자지보재(Lattice Girder)의 실내성능평가기법 개발”, 한국터널공학회논문집, Vol. 10, No. 4, pp. 371-382.
3. 문흥득(1999), “격자지보의 터널지보재로서의 현장 적용성 평가”, 한국암반공학회지, Vol. 9, pp. 204-213.
4. 서울특별시(2006), “지반조사편람”, 서울특별시, pp. 1-4.
5. 이인모(2001), “암반역학의 원리”, 도서출판 새론.
6. 이인모(2004), “터널의 지반 공학적 원리”, 도서출판 새론.
7. 이종성(2010), “강지보 효율을 고려한 슛크리트 최적두께 산정의 수치해석적 연구”, 한양대학교 석사학위 논문.
8. 전석원, 장수호, 조정우(2008), “TBM 암석절삭의 수치해석 모사기법”, 제9차 터널 기계화 시공기술 국제 심포지엄 논문집, pp. 109-128.
9. 한국도로공사(2001), “도로설계요령”, 제4권, 제5권 : 터널, 포장 / 2차개정, 한국도로공사, pp. 77-78.
10. Carranza-Torres, C. and Diederichs, M. (2009), “Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 24, pp. 506-532.