

NATM 터널에서 경사 록볼트의 보강효과에 대한 3차원 해석

3D Numerical Study on the Reinforcing Effect of Inclined System Bolting in NATM Tunnel

허 준¹ Heo, June 김 병 일² Kim, Byoung-II
이 재 덕³ Lee, Jea-Dug 김 영 근⁴ Kim, Young-Geun

Abstract

It has been known that rockbolt is one of important supports improving the support capacity with shotcrete in NATM tunnel. Also, it is necessary for the inclined system bolting to enhance the efficiency of installation in case of a narrow space such as cross passage and enlargement tunnel. However, there is no profound technical study for the effect of inclined rockbolt of systematic installation on the support mechanism and ground behaviour in NATM tunnel. In this study, the effects of the length and installation angle of rockbolt on the characteristics of support and ground reinforcement were analyzed by using 3D finite element numerical study. Through the numerical results for the parametric modelling of inclined rockbolt, the characteristics of mechanical behaviors between the axial force of rockbolt and the effect of ground reinforcement in regard to the various factors of the length and installation angle of rockbolt were verified and reviewed thoroughly. Also, it was shown that the installation angle of rockbolt for enhancing the arching effect in NATM tunnel was 45°, and the difference of the reinforcing effect for support between the installation angles of 75° and 90° was insignificant. The additional numerical studies for various condition would be carried out for practical design guideline of inclined rockbolt.

요 지

NATM 공법에서 터널을 확대하거나 피난갱과 같이 좁은 단면에 록볼트를 설치하는 경우에는 록볼트를 경사지게 설치하거나 또는 짧은 볼트를 연결하여 시공할 수밖에 없다. 국내외에서 실시된 경사 록볼트에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이며 실제 현장에 적용하기 위해서는 경사 록볼트의 거동특성에 대한 연구가 필요하다고 사료된다. 본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 사용하여 경사 록볼트 시공 시 록볼트의 설치각도와 설치길이에 따른 최대 중립점 발생위치의 변화를 확인하고 이에 따른 록볼트에 의한 원지반 아치형성영역의 두께 변화를 비교 분석하여 지반보강효과에 대해 확인하였다. 해석결과 표준지보패턴(설치길이 4m)에선 설치각도가 감소할수록 터널 주변지반의 변형범위는 증가하여 지반보강효과가 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, 설치길이가 증가함에 따라 설치각도에 의한 영향을 적게 받은 것으로 나타났으며 설치각도 45° 이하에서는 설치길이의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과로

1 정희원, 경동엔지니어링 사원 (Member, Staff, Geotechnical and Tunnelling Dept. Kyongdong Eng.)
2 정희원, 명지대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Myongji Univ., Tel: +82-31-330-6415, Fax: +82-31-336-9705, bikim@mju.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)
3 정희원, 대원토질 기술연구소장 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg. Research Institute)
4 정희원, 건화엔지니어링 전무 (Member, Senior Managing Director, Geotechnical and Tunnelling Dept. Kunhwa Eng.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

부터 경사록볼트의 설치각도는 45°이상으로 하여 아칭영역을 확보하도록 하여야 하며, 설치각도 75°이상인 경우 직각으로 설치하는 경우와의 보강효과의 차이가 크지 않음을 확인하였다. 또한 추가적인 상세 검토를 통하여 NATM 터널에서의 경사록볼트 설계지침을 제시하고자 하였다.

Keywords : 3D Numerical analysis, Inclined rockbolt, Reinforcement effect, NATM tunnel

1. 서론

1980년대 국내에 최초로 도입된 NATM(New Austrian Tunneling Method) 공법은 최근까지 국내의 도로 및 철도 터널 설계 및 시공에 있어 많은 부분을 차지하고 있는 주요 터널 공법이다. 터널 굴착에 의하여 발생한 이완하중은 1차적으로 주변지반이 지지하게 되며 남은 이완하중을 지보재를 사용하여 지지함으로써 터널의 안정성을 확보하게 된다. 터널의 지보재는 록볼트와 슛크리트가 사용되는데 록볼트는 지반의 강도증진을 보조하며 슛크리트는 굴착면에 밀착되어 굴착면을 보호하고 암파열을 방지하게 된다(Lee, 2013).

일반적으로 터널의 굴착으로 인하여 이완된 영역에 설치되는 록볼트는 인장상태가 되는데 이는 슛크리트에 압축력을 가해 슛크리트를 파괴시킬 수 있으므로, 경제성과 시공성을 고려하여 적절한 길이와 개수가 설치되어야 한다. 하지만 교통흐름을 유지한 터널의 확대와 같이 터널 내부에 프로텍터(protector)가 설치되거나 피난갱과 같이 굴착 단면이 작은 경우에는 시공 여건상 기계화 시공의 운용이 어려워 짧은 볼트를 연결하여 시공하거나 경사지게 설치하게 된다. 짧은 볼트를 여러 개 사용하는 경우에는 볼트 두부의 설치비용이 많아져 경제성이 떨어지며 경사지게 설치하는 경우에는 록볼트에 의한 보강면적이 감소하여 지반보강효과가 감소하는 문제점을 가지고 있다(Baek, 2011).

Kim et al.(2010)은 2차선 도로터널 표준단면에 대하여 록볼트 설치각도가 변화된 3차원 수치해석을 수행하였으며, 설치각도 75°이하에서 록볼트 축력이 급격히 감소하고 30° 이하에서는 압축력을 발휘하여 록볼트의 기능을 기대하기 어렵다는 연구결과를 보고하였다. Lee(2012)는 록볼트 보강지반을 단순보로 고려하여 록볼트 설치각도, 설치간격 및 록볼트 설치길이를 변수로 하는 모형시험을 실시하였다. 또한 Lee(2012)는 록볼트 설치에 의한 지반보강효과를 지반 강도정수 증가로 고려한 2차원 터널 수치해석을 수행하여 모형시험결과를 검증하

였다. 그리고 Heo(2016)는 3차원 터널 수치해석을 통하여 풍화암과 연암 조건에서의 경사 록볼트 축력과 터널 변형 등을 검토하여 지반보강 효과를 확인하였다. Kim et al.(2010)과 Lee(2012)의 연구결과에서는 록볼트 설치각도 변화에 따른 지반보강효과 발생경향이 상이하게 나타났으며, Kim et al.(2010)과 Heo(2016)의 연구에서는 록볼트 설치각도 변화에 따른 지반보강효과 발생경향이 유사하나 록볼트를 세밀하게 모형화하지 않아서 터널주변 지반과 록볼트의 상세한 거동을 분석하기에는 부족한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 경사 록볼트가 파이프 루프 또는 포어폴링 공법 등 굴진면 전방 보강공법의 타설 각도와 겹쳐 전단면 시스템 록볼트가 설치되지 못하는 경우를 제외하기 위해 지반조건을 연암으로 한정하고 충분한 보강효과를 발휘하기 위한 지보패턴 및 지반강도정수를 적용하였다. 그리고 3차원 유한요소해석을 수행하여 원지반 아치 형성의 주요 인자인 록볼트의 설치각도와 설치길이를 변화시켜 록볼트의 최대 축력과 중립점의 위치를 확인함으로써 록볼트의 거동특성을 보다 정량적으로 파악하고자 하였다. 또한 터널 내 발생하는 내공변위량, 천단침하량, 슛크리트 압축응력 등을 비교, 분석함으로써 경사 록볼트에 의한 지반보강효과에 대해 검증하고자 하였다. 이를 위하여 수치해석인자로서 록볼트의 설치각도는 일반적으로 설치되는 단면의 수직방향인 경우(90°)와 포어폴링의 일반적인 최대설치각도인 30°보다 큰 범위까지 15°씩 감소시켜 75°, 60°, 45° 인 경우를 비교하였으며, 록볼트의 길이는 4m 및 5m로 설치하는 경우에 대해 3차원 유한요소해석을 실시하였다.

2. 록볼트 보강효과

2.1 전면접착형 록볼트의 거동 특성

현재 가장 많이 사용되는 전면접착형 록볼트는 구성 성분들의 물성, 록볼트의 설치길이 및 직경, 선단 고정

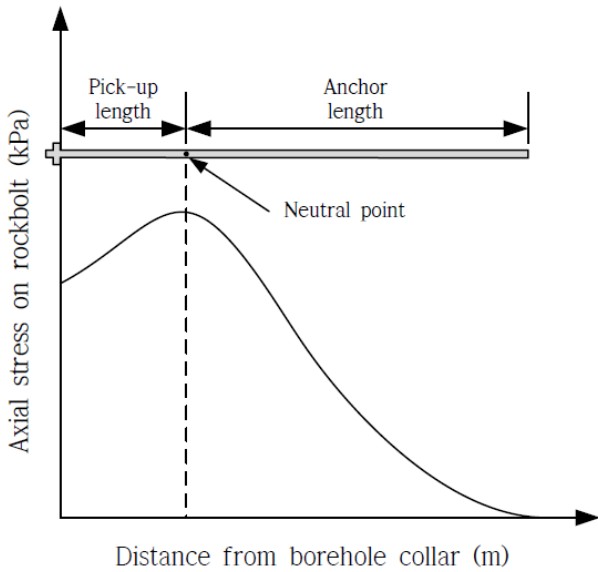


Fig. 1. Rockbolt axial force on the neutral point

판의 설치 유무에 따라 축응력과 전단응력 분포가 달라진다. Freeman(1978)은 록볼트와 설치되는 암반의 상대 변위 개념을 도입하여 Fig. 1과 같이 상대적인 변위가 0이 되는 중립점(neutral point)을 기준으로 형성되는 지지구간(pick-up length)과 고정구간(anchor length)을 정의하였다. 중립점에서는 록볼트의 축응력이 최대가 되며 지지구간은 터널 벽면 부근의 변형을 억제하기 위해 축력이 발휘되는 구간이고 고정구간은 록볼트의 뿌리 역할을 하게 된다(Freeman, 1978; Lee et al., 2010).

2.2 록볼트에 의한 원지반 아치

Talobre(1957)은 터널 굴착으로 인해 지반이 이완되기 전에 굴착면을 슛크리트로 처리하고 록볼트를 규칙적으로 설치하면 록볼트의 설치길이에 해당하는 범위의 암반층을 접선 및 반경방향으로 조여주어 이로 인해 반경압축력이 커지면서 앵커작용에 의해 추가응력이 발생한다. 새롭게 발생된 응력은 Fig. 2와 같이 지반 내에서 새로운 원지반 아치를 형성하게 된다고 제안하였다(Lee, 2013). Fig. 3은 록볼트를 경사지게 설치하는 경우를 나타낸 그림이다.

록볼트를 경사지게 설치하는 경우에는 터널의 굴착면으로부터 록볼트 선단까지의 연직거리는 감소한다. Talobre(1957)의 이론에 의해 굴착면으로부터 록볼트 선단까지 인공압력대가 형성된다고 가정하였을 때 경사 록볼트에 의한 인공압력대의 두께는 설치각도가 감소

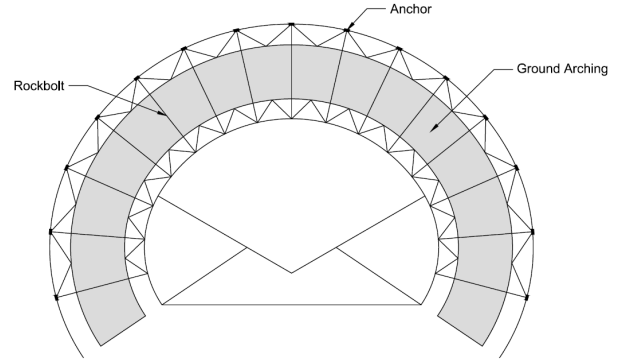


Fig. 2. Talobre's ground arching (Talobre, 1957)

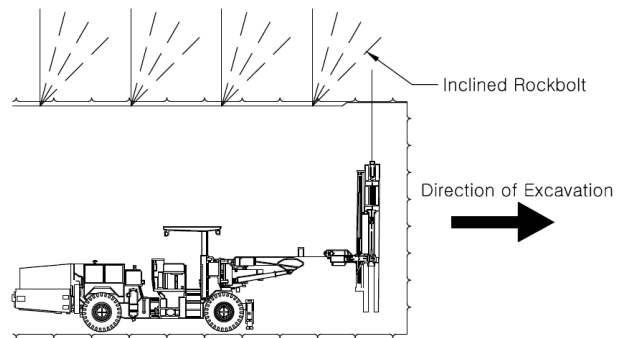


Fig. 3. Schematic view of installation of inclined rockbolt (Heo, 2016)

함에 따라 작아지며, 이에 따라 록볼트에 의한 지반보강 효과는 감소할 것으로 예상된다.

3. 3차원 유한요소해석

3.1 터널단면 및 해석영역 모델링

이 연구의 해석에 사용된 프로그램으로는 유한요소법에 기반을 두며 지반 및 터널 시스템의 상세해석을 위해 개발된 GTS NX를 사용하였다. 유한요소법은 일반적으로 지반을 연속체로 간주하여 가상의 유한개 요소로 분할하고 각각의 요소들은 절점이나 경계선에 의해 연결되어 있다는 가정에서 시작된다. 각 요소의 크기는 기하학적으로 정의되며 응력-변형률 관계는 구성방정식을 따르며 미지수는 미분방정식으로 공식화한 후 이에 대응하는 연립방정식을 풀어서 값을 구하게 된다.

터널에 대한 수치해석에서 해석영역은 터널 구조물 굴착에 따라 재분배 되는 응력에 영향을 미치지 않는 범위로 일반적인 해석에서는 굴착하고자 하는 터널구조물의 폭이나 높이의 3~5배 이상의 거리까지 해석영역

역을 설정하여야 한다(MLTMA, 2010). 본 연구에서는 해석영역을 Fig. 4와 같이 좌측, 우측 및 하부에 대하여 5D(D : 터널 환산직경)로 설정하였다.

해석에 사용된 단면은 Fig. 5와 같이 MLTMA(2010)에서 제시한 2차로 표준단면을 사용하였으며, 굴진장 및 슛크리트 두께 등은 Table 1과 같이 지보패턴-3에 해당되는 값을 적용하였다.

3.2 해석 물성

수치해석에 적용된 지반 및 지보재의 물성값은 Table

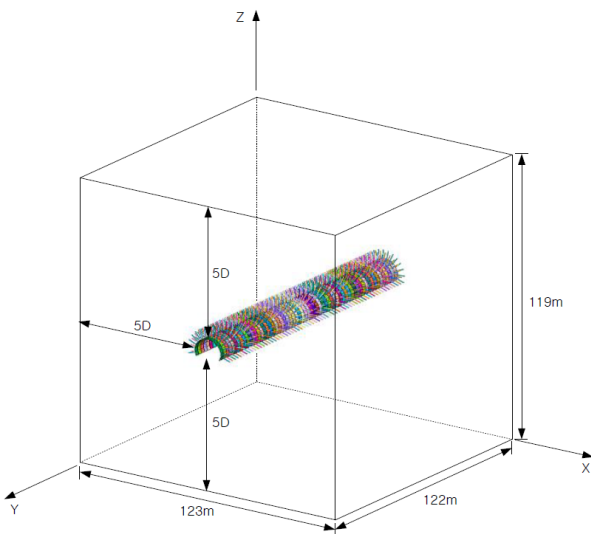


Fig. 4. 3D-numerical analysis boundary

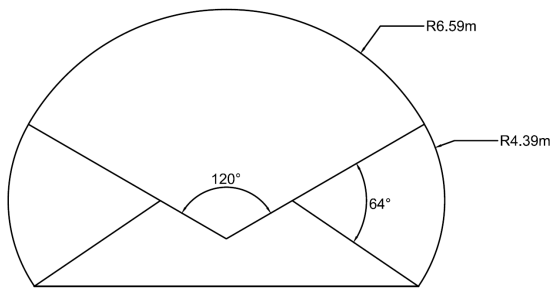


Fig. 5. Typical section of road tunnel with 2 lane

Table 1. Geometric condition of tunnel for the numerical analysis

Standard cross section		Supporting pattern-3
Excavation method		Full section
Excavation length(m)		2.0
Rockbolt	Number of installation (EA)	15
	Length of installation (m)	4.0 / 5.0
	Vertical C.T.C (m)	2.0
	Horizontal C.T.C (m)	1.5
Thickness of shotcrete (m)		0.08

2 및 Table 3과 같으며, KSGE(1997)에서 제시하는 물성값을 사용하였다. 지반조건의 모델링을 하기 위해서 적용된 해석모델은 재료의 변형을 탄성 및 소성변형으로 표현하는 탄소성 모델을 적용하였다. Mohr-Coulomb, Drucker-Prager의 항복규준을 적용한 탄소성 모델의 결과가 만족스러운 것으로 알려져 있으며, 이 연구에서는 일반적으로 가장 많이 사용되며 해석결과의 신뢰성이 있는 Mohr-Coulomb의 파괴모델을 적용하였다.

3.3 3차원 모형화 방법 및 터널 시공과정

3.3.1 터널 지보재 모형화 방법

터널 지보재를 수치해석에서 모형화하는 방법은 연속체 요소로 모형화하는 방법, 구조부재로 모형화하는 방법, 그리고 주변 지반의 공학적 특성을 변화시키는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 록볼트 및 슛크리트 부재를 구조부재로 모형화하는 방법을 사용하였다. 구조부재로 모형화하는 방법은 지보재의 부재력이 프로그램 내에서 자동으로 계산되며, 절점수와 요소수의 증가가 없어 해석시간을 단축시키는 장점이 있다.

록볼트는 터널 주변 암반의 이완을 감소시키고 지반을 보강하기 위해 사용되기 때문에 록볼트 자체의 항복 파괴와 주위 암반과의 결합파괴를 모두 고려해야 한다. 이에 대한 정확한 해석을 위해서는 록볼트를 보요소로 모형화하여 지반과의 절점을 공유해야 하며 지반과 록볼트 사이에 인터페이스 요소를 형성하여야 한다. 그러나 터널의 3차원 모형화에서 인터페이스 요소를 사용하면 모형화의 어려움이 존재하며 해석시간의 증가에 따

Table 2. Numerical properties for ground

	Soft rock
Unit weight, γ_t (kN/m ³)	24
Young's modulus, E (MPa)	5000
Poisson's ratio, ν	0.26
Internal friction angle, ϕ (°)	35
Cohesion, c (kPa)	100

Table 3. Numerical properties for tunnel support

	Soft shotcrete	Hard shotcrete	Rockbolt
Unit weight, γ_t (kN/m ³)	25	25	78.5
Young's modulus, E (MPa)	5,000	15,000	210,000
Poisson's ratio, ν	0.2	0.2	0.3

른 경제적인 문제가 발생하기 때문에 Truss요소를 사용하여 이와 같은 문제점을 일부 해결하고 있다. 따라서 이 연구에서도 록볼트를 Truss요소로 모형화 하였다.

록볼트의 축력 및 중립점 산정 시 정확도를 높이기 위해 록볼트 1개를 10개의 요소로 나눠 수치해석을 진행하였으며, 록볼트의 설치각도 및 설치길이를 변수로 하였다. 설치각도는 Lee(2012)와 Kim et al.(2010)의 연구결과를 참조하여 90°, 75°, 60°, 45°로 15°씩 감소시켜 가며 해석을 수행하였다(Fig. 6). Lee(2012)는 록볼트가 경사로 설치되는 경우에 록볼트 보강효과 감소되며, 록볼트의 설치간격 또는 설치길이를 증가시켜 통상적인 록볼트 보강효과를 확보할 수 있다고 제시하였다. 그러나 실제 터널 시공에서 록볼트의 종방향 설치간격을 좁히는 것은 현실적으로 어려운 것으로 판단하여 록볼트의 설치길이는 본 연구에서 참고한 표준지보패턴에서 제시된 4m와 설치길이를 연장한 5m로 변화시켰다.

3.3.2 시공단계 해석

터널 굴착 후 지보재의 설치 전에는 종방향 아칭에

의해 3차원 응력상태가 되며, 이로 인해 시공단계 및 경계조건을 고려한 3차원 수치해석을 수행하여 터널의 거동특성을 파악하여야 한다. 본 연구에서는 시공 단계가 진행됨에 따라 전 단계에서 해석을 수행한 후 해석결과에 누적하여 다음 단계의 해석을 수행하는 누적모델 개념을 사용하였으며, 해석에 사용된 시공단계는 굴진장간격을 2m로 정하여 총 터널 길이 122m를 분할하여 터널의 개별적인 거동이 가능하도록 모델링하였다.

4. 해석결과 및 분석

4.1 설치각도에 따른 중립점의 위치 평가

중립점 발생 위치를 분석하면 록볼트 보강효과에 의하여 터널 굴착면 주변에 형성되는 원지반 아치의 형성영역을 확인할 수 있다. 따라서 록볼트를 10개 부재로 모형화하여서 상세한 중립점 발생 위치를 확인하고자 하였다. 해석결과 록볼트의 최대 축력이 작용하는 지점은 Table 4와 같으며, 이를 도시하면 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다.

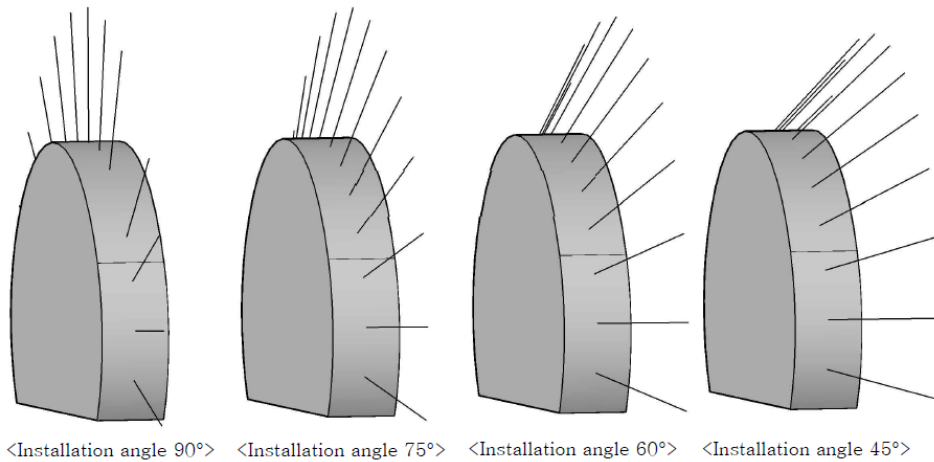


Fig. 6. Rockbolt installation angle from 90° to 45°

Table 4. Rockbolt axial force and position of neutral point according to installation angle

Rockbolt length (m)	Installation angle (°)	Position of neutral point on the rockbolt (m)	Vertical distance from excavation face to neutral point (m)	Rockbolt axial force (kN)
4	90	0.8~1.2	1.200	178.6
	75	1.2~1.6	1.545	182.2
	60	1.6~2.0	1.732	171.9
	45	1.6~2.0	1.414	129.5
5	90	1.0~1.5	1.500	169.8
	75	1.0~1.5	1.449	173.8
	60	1.0~1.5	1.299	154.4
	45	1.5~2.0	1.414	124.9

Hyett et al.(1996)은 록볼트의 중립점의 위치를 록볼트의 길이와 원형터널 반경의 함수이며, 동일 단면인 경우에 록볼트 길이가 증가하면 중립점의 위치도 증가되는 것으로 제시하였다. 본 연구의 결과에서도 설치각도 90°에서 록볼트 설치길이 4m에서 5m로 증가함에 따라서 록볼트 중립점의 위치가 0.3m 증가되는 것으로 나타났다. 그러나 설치각도 45°에서는 설치길이가 증가되어도 최대 중립점 발생위치는 터널 굴착면으로부터 최대 1.414m 위치에 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 록볼트 설치각도가 45° 이하인 경우에 록볼트 설치길이가 증가하여도 록볼트 보강에 의한 원지반 아치형성영역의 변화가 없으며, 경사 록볼트의 설치각도는 45° 이상으로 시공되어야 할 것으로 판단된다.

록볼트의 설치길이 4m인 조건에서 설치각도가 90°인 경우에 최대 중립점은 1.2m에서 발생하였다. 이 후 설치각도가 75°와 60°로 감소하는 경우 각각 1.545m와 1.732m로 굴착면에서 멀어져서 발생하는 것으로 나타

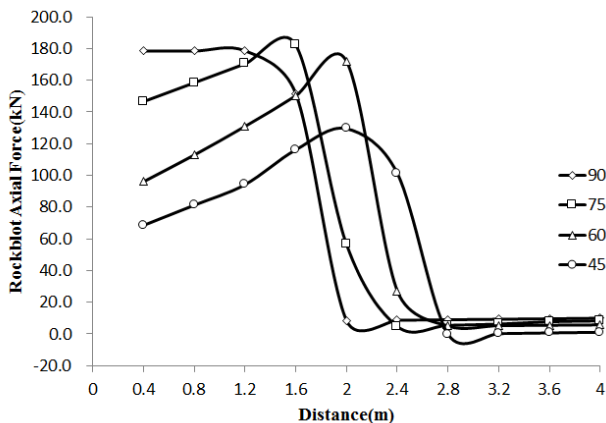


Fig. 7. Rockbolt axial force and neutral point according to installation angle (rockbolt length 4 m)

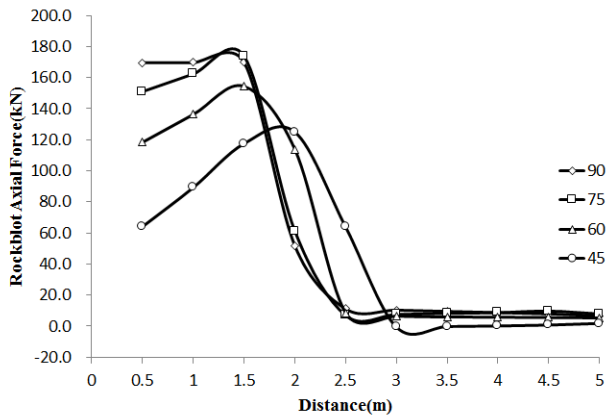


Fig. 8. Rockbolt axial force and neutral point according to installation angle (rockbolt length 5 m)

났다. 반면에 록볼트의 설치길이 5m인 조건에서 최대 중립점은 설치각도가 90°인 경우 1.5m에서 발생하였으며 설치각도 75°와 60°에서는 각각 1.449m와 1.299m에서 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같이 설치각도 및 설치길이가 변화된 경우에 중립점의 위치가 상이하게 나타난 이유는 터널 종방향으로 발생하는 거동에 의한 것으로 판단되며, 경사 록볼트 설치 시 록볼트 설치길이가 증가되면 터널 종방향 구속력이 증가되어 터널 안정성 확보에 유리한 것을 확인할 수 있었다.

본 해석결과를 Kim et al.(2010)의 연구와 Heo(2016)의 연구결과를 비교해보면, 록볼트 설치각도 75°에서 최대 록볼트 축력이 발생하는 것으로 나타났으나 록볼트 설치각도 90°에서의 축력치와의 차이는 매우 작음을 볼 수 있다. 이는 록볼트 설치각도가 75°이상인 경우에는 록볼트 축력에 미치는 영향이 크지 않음을 나타내는 것으로 경사 록볼트의 거동을 정량적으로 평가하기에는 한계가 있으므로, 추가적인 검토를 통하여 록볼트에 작용하는 전단응력의 값과 록볼트의 변위를 확인하여 중립점의 위치를 분석해야 할 필요가 있다고 판단된다.

4.2 록볼트 축력 및 슛크리트 압축응력 특성 분석

록볼트의 설치길이 4m 및 5m인 경우 발생한 최대 축력 및 슛크리트 압축응력은 Table 5, Fig. 9 및 Fig. 10과 같다. 록볼트의 최대축력은 록볼트 설치각도 75°인 경우에서 최대로 나타났으며, 그 이후 설치각도가 감소함에 따라 록볼트에 작용하는 축력도 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 슛크리트 압축응력의 경우에는 록볼트와 상반되는 결과를 나타냈는데 이는 Kim et al.(2010)의 연구와 Lee(2012)의 연구와 매우 유사한 경향을 보이는 것으로 판단된다.

Table 5. Rockbolt axial force according to installation angle

Rockbolt length (m)	Installation angle (°)	Rockbolt axial force (kN)	Shotcrete compression stress (MPa)
4	90	178.6	9.6
	75	182.2	9.8
	60	171.9	10.2
	45	129.5	10.8
5	90	169.8	9.2
	75	173.8	9.3
	60	154.4	9.7
	45	124.9	10.2

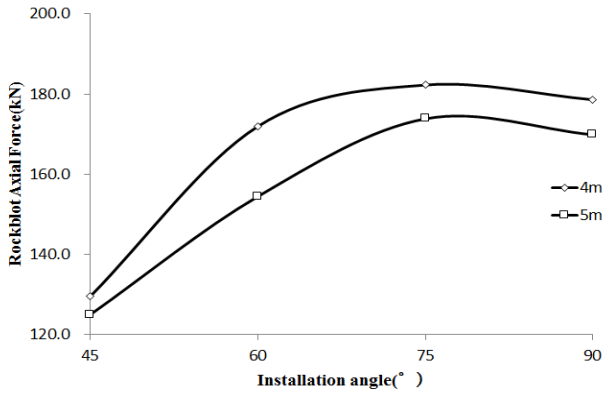


Fig. 9. Rockbolt axial force according to installation angle

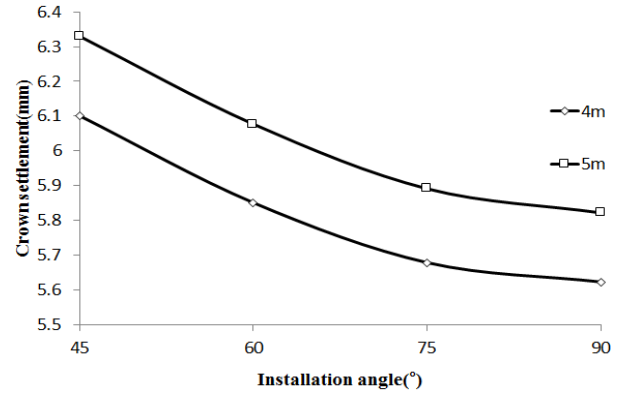


Fig. 11. Crown settlement of tunnel according to installation angle

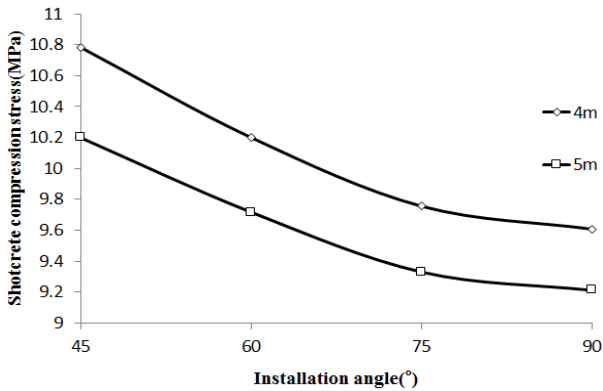


Fig. 10. Shotcrete compression stress according to installation angle

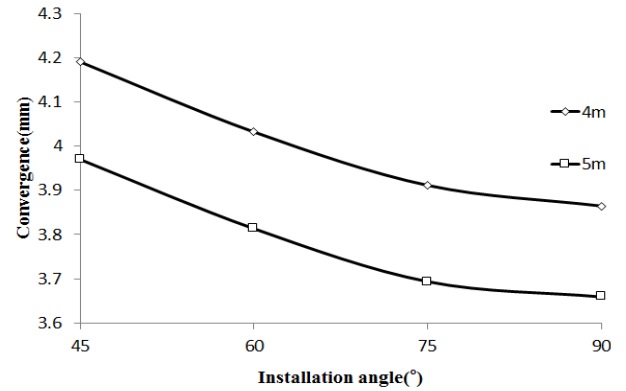


Fig. 12. Convergence of tunnel according to installation angle

4.3 천단변위량 및 내공변위량 비교분석

Table 6과 Fig. 11 및 Fig. 12은 설치각도의 변화에 따른 단면 내 발생하는 천단침하량과 내공변위량을 비교한 값이다. 록볼트 설치길이가 4m와 5m인 경우 모두 록볼트 설치각도의 감소에 따라 발생하는 천단 침하량과 내공변위량은 설치각도가 45°인 경우에서 가장 크게 발생하였다. 일반적으로 터널이 탄성변형을 하는 경우 터널 내 천단침하량은 연직방향으로 줄어들지만 내공

변위는 확대하는 경향을 나타낸다(Lee, 2013). 설치길이가 4m인 경우가 5m인 경우보다 천단침하량의 발생량이 상대적으로 적게 발생하였기 때문에 터널의 안쪽방향으로 억제하려는 힘이 작게 발생되며 이에 따라 내공변위량은 록볼트 설치길이가 5m인 경우보다 크게 발생하는 것으로 나타났다.

하지만 설치길이가 4m와 5m일 때 발생한 변위의 차이는 설치각도에 따라 최대 0.2mm로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 록볼트의 길이가 4m인 경우에도 충분히 보강효과를 나타낼 수 있다고 판단된다.

Table 6. Crown settlement according to installation angle

Rockbolt length (m)	Installation angle (°)	Crown settlement (mm)	Convergence (mm)
4	90	5.6	3.9
	75	5.7	3.9
	60	5.9	4.0
	45	6.1	4.2
5	90	5.8	3.7
	75	5.9	3.7
	60	6.1	3.8
	45	6.3	4.0

5. 결론

본 연구에서는 NATM 터널에서 경사록볼트를 설치에 따른 보강효과를 검증하기 위하여, 록볼트의 설치각도를 감소시킴에 따라 록볼트의 중립점의 변화 및 인공압력대의 두께 변화로 인한 지반보강효과 차이에 대한 3차원 수치해석을 수행하였다. 록볼트 설치각도는 15°씩 변화시켜 90°, 75°, 60°, 45°에 대한 경우와 록볼트 설치길이를 4m 및 5m로 변화시켜, 각각의 경우에 대한

터널 지보재에 발생하는 응력 및 변형거동을 비교분석하였다. 이를 통하여 얻는 결론은 다음과 같다.

- (1) 록볼트 설치각도가 45°인 경우 설치길이가 증가하여도 록볼트의 중립점의 위치가 터널 굴착면으로부터 동일한 위치에 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 록볼트 설치각도가 45°인 경우에 록볼트 설치길이 증가와 관계없이 터널 붕락을 방지하는 원지반 아치의 형성영역이 동일하여 경사 록볼트에 의한 원지반 보강효과가 작은 것으로 판단된다.
- (2) 본 연구에서 참고한 표준지보패턴에 의한 록볼트 설치길이 4m의 설치각도 75°와 60°에서 록볼트 중립점의 위치는 설치각도 90°와 비교하여 터널 굴착면에서 멀어지는 것으로 나타났다. 이는 경사 록볼트의 설치에 의하여 터널 주변지반의 변형범위가 증가되는 것으로 판단된다.
- (3) 록볼트 설치각도 75°와 60°에서 록볼트 설치길이를 5m로 증가시킨 경우 록볼트 중립점의 위치가 설치길이 4m와 비교하여 터널 굴착면과 가까운 것으로 나타났다. 이는 경사 록볼트 시공 시 록볼트 설치길이 증가되면 터널 주변지반의 변형범위가 감소되어 효과적인 것으로 판단된다.
- (4) 터널 내 발생하는 천단침하량과 내공변위량 및 슛크리트 응력은 록볼트의 설치각도가 감소함에 따라 값이 커지는 경향을 나타냈으며, 록볼트 길이에 따른 발생 변위량 및 슛크리트 응력의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 록볼트 길이보다는 록볼트 설치각도가 터널거동에 영향을 주는 주요한 영향인자임을 확인할 수 있었다.
- (5) 경사볼트의 설치각도와 길이에 대한 수치해석을 통하여 록볼트 축력, 중립점 발생위치, 천단침하량, 내공변위량 및 슛크리트 응력을 비교 검토한 결과, 록볼트 설치각도를 45°인 이상으로 하여 아칭형성영역을 확보하도록 하여야 하며, 록볼트 설치각도가 75°인 이상인 경우가 직각으로 설치하는 경우와 보강효과 차이가 크지 않음을 확인하였다.

본 연구는 NATM 터널 시공 시 발생 가능한 경사 록볼트에 대한 정량적인 거동을 분석한 것으로, 경사록볼트 설치구간에 대한 지보타입설계(록볼트 길이 및 설치각도)와 안정성 평가를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구는 한정된 모델에 대한 해석결과를 바탕으로 수행된 것이므로 포어폴링 또는 파이프로프 등 굴진면 전방보강을 고려한 해석모델 등의 추가적용과 다양한 지반조건 및 지보타입에서의 해석을 실시하여 보다 구체적인 설계지침을 제시하도록 할 예정이다.

참고문헌 (References)

1. Baek, K.H. (2011), "Ground Behavior Analysis and Protector Design during the Enlargement of a Tunnel in Operation", Inha University, pp.1-3.
2. MLTMA (2010), "The Revision of the Road-Design Guideline-6th Tunnel", Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, pp. 605.2-606.4.
3. Freeman, T.J. (1978), "The Behaviour of Fully-bonded Rock Bolts in Kielder Experimental Tunnel", Tunnel & Tunnelling, pp.37-40.
4. Heo, J. (2016), "A 3D Numerical Analysis on the Reinforcing Effect of Inclined System Bolting", Master Dissertation, Myongji University, pp.13-25.
5. Hyett, A.J., Moosavi, M., and Bawden, W.F. (1996), "Load Distribution along Fully Grouted Bolts, with Emphasis on Cable Bolt Reinforcement", Int. J. Numer. & Anal. Meth. Geomech, Vol.20, pp.517-544.
6. Kim, U.G., Baek, K.H., Seo, K.W., Kim, D.K., and Woo, S.B. (2010), "Numerical Study on Effect of Ground Reinforcement with Installation Angle of Rockbolt", Korean Society for Rock Mechanics Conference, pp.199-204.
7. KSGE (1997), "Geotechnical Engineering Series-7th", Goomi Publisher, p.663.
8. Lee, J.D. (2012), "Effect of Installation Angle on Ground Reinforcement in System Bolting", Ph.D. Dissertation, Myongji University, pp.1-119.
9. Lee, S.D. (2013), "Tunnel Mechanics", CIR Publisher, pp.387-480.
10. Lee, Y.K., Song, W.K., Park, C.W., and Choi, B.H. (2010), "Numerical Study on the Behavior of Fully Grouted Rock Bolts with Different Boundary Conditions", Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol.20, No.4 pp.267-276.
11. Talobre, J. (1957), "La Mécanique des Roches : Appliquée aux travaux publics", Dunod.

Received : December 1st, 2016

Revised : February 6th, 2017

Accepted : March 2nd, 2017