

팽창형 강관 록볼트의 암반 강성에 따른 정착 거동 특성

김경철¹ · 김호종² · 정영훈³ · 신중호^{4*}

¹비회원, 다산컨설팅 지반터널부 사원

²학생회원, 건국대학교 공과대학 인프라시스템공학과 박사과정

³비회원, 건국대학교 공과대학 인프라시스템공학과 석사과정

⁴정회원, 건국대학교 공과대학 인프라시스템공학과 정교수

Anchorage mechanism of inflatable steel pipe rockbolt depending on rock stiffness

Kyeong-Cheol Kim¹ · Ho-Jong Kim² · Young-Hoon Jung³ · Jong-Ho Shin^{4*}

¹Engineer, Geotechnical Engineering & Tunnel Dept., Dasan Consultants

²Ph. D Student, Dept. of Civil Engr., Konkuk University

³Graduate Student, Dept. of Civil Engr., Konkuk University

⁴Professor, Dept. of Civil Engr., Konkuk University

*Corresponding Author : Jong-Ho Shin, jhshin@konkuk.ac.kr

Abstract

The expansion behavior of inflatable steel pipe rockbolt shows geometric nonlinearity due to its Ω -shaped section. Previous studies on the anchoring behavior of inflatable steel pipe rockbolt were mainly performed using theoretical method. However, those studies oversimplified the actual behavior by assuming isotropic expansion of inflatable steel pipe rockbolt. In this study, the anchoring behavior of the inflatable steel pipe rockbolt were investigated by the numerical method considering the irregularity of pipe expansion and other influencing factors. The expansion of inflatable steel pipe rockbolt, the contact stress distribution and the change of the average contact stress and the contact area during installation were analyzed. The contact stresses were developed differently depending on the constitutive behavior of rocks. Small contact stresses occurred in steel pipes installed in elasto-plastic rock compared to steel pipes installed in elastic rock. Also, the anchoring behaviors of the inflatable steel pipe rockbolt were different according to the stiffness of the rock. The steel pipe was completely unfolded in the case of the stiffness smaller than 0.5 GPa, but it was not fully unfolded in the case of the stiffness larger than 0.5 GPa for the given analysis condition. When the steel pipe is completely unfolded, the contact stress increases as the rock stiffness increases. However, the contact stress decreases as the rock stiffness increases when the steel pipe is not fully expanded.

Keywords: Inflatable steel pipe rockbolt, Borehole, Contact stress, Pull-out resistance, Anchoring behavior

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
19(2)249-263(2017)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.2.249>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received March 14, 2017

Revised March 24, 2017

Accepted March 27, 2017



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2017, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

팽창형 강관 록볼트의 설치 전 단면 형상은 Ω 형이어서, 팽창 중 거동은 기하학적 비선형 특성을 보인다. 기존 팽창형 강관 록볼트의 정착 거동에 관한 연구는 주로 이론적 방법이었다. 하지만 이론적 방법은 팽창형 강관 록볼트의 등방 팽창을 가정하므로, 실제 거동을 지나치게 단순화하였다. 본 연구에서는 강관 팽창 거동의 비선형성과 다양한 영향 특성을 고려한 수치해석을 이용하여, 팽창형 강관 록볼트의 정착 거동을 모사하였다. 본 해석을 통해 강관의 팽창 과정, 접촉응력 분포, 평균 접촉 응력 및 접촉 면적의 변화를 분석하였다. 암반의 탄소성 조건에 따라 강관의 접촉응력이 다르게 나타났는데, 탄성 조건의 암반에 설치된 강관에 비해 탄소성 조건의 암반에 설치된 강관에서 작은 접촉응력이 발생했다. 또한 암반의 강성에 따라 팽창형 강관 록볼트의 정착 거동이 달라졌다. 주어진 해석 조건에서 암반 강성이 0.5 GPa 이하일 때 강관은 완전히 퍼지지만, 암반 강성이 0.5 GPa보다 클 때 완전히 퍼지지 않았다. 강관이 완전히 퍼진 경우 암반 강성이 증가함에 따라 접촉응력의 크기가 증가했지만, 강관이 완전히 퍼지지 않은 경우 암반 강성이 증가함에 따라 접촉응력의 크기가 감소했다.

주요어: 팽창형 강관, 록볼트, 천공홀, 접촉응력, 인발력, 정착 거동

1. 서론

팽창형 강관 록볼트는 강재로 만들어진 마찰형 록볼트이다. 팽창형 강관 록볼트의 단면은 Ω 형이며, 한 쪽 끝은 부싱으로 마감 처리가 되어 있고, 다른 쪽 끝은 물을 주입할 수 있도록 주입구가 있다. 설치시 강관의 단면이 Ω 형으로 접혀 있는 상태로 천공홀에 삽입되는데 이 때, 강관 내부에 수압을 가하면 강관이 팽창한다(Fig. 1(a)). 강관이 다 퍼진 후 수압을 제거하면 팽창된 강관과 그로 인해 변형되었던 암반이 구속이 없는 상태에서는 각각 Δu_b , Δu_r 만큼 수축하려 한다(Fig. 1(b)). 암반의 수축량이 강관의 수축량보다 더 크면, 암반 수축이 강관에 의해 억제된다. 그 결과 강관과 암반 사이에 접촉응력이 발생하는데, 이 접촉응력으로 인해 록볼트 인발력이 도입된다. 이와 같은 거동 특성으로 인해 팽창형 강관 록볼트는 주로 연암과 지하수 유입이 예상 되는 지역에서 사용된다(Kim et al, 2002; Jeong et al, 2007).

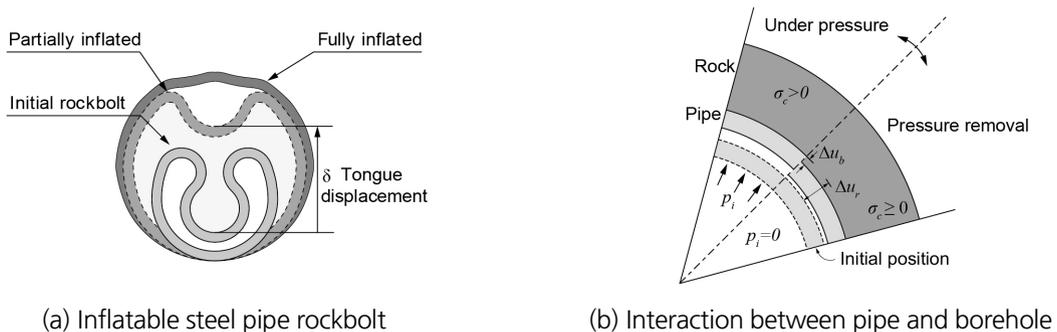


Fig. 1. Anchorage mechanism of inflatable steel pipe rockbolt

Li and Stillborg(1999)는 중립점(neutral point), 앵커 길이(anchor length), 픽업길이(pickup length) 개념을 사용하여 록볼트 인발력과 접촉응력 σ_b 및 마찰응력 τ_b 관계를 설명하였다. 픽업길이는 마찰형 록볼트와 암반과의 전단응력이 최대값을 갖는 구간 길이로(Freeman, 1978), 이 구간의 전단응력은 마찰형 록볼트가 암반으로부터 분리되거나 분리되기 직전에 발생하여 잔류 전단 응력이라고 한다. 중립점은 마찰형 록볼트의 단부에서부터 픽업 길이만큼 떨어진 지점을 나타내고, 앵커 길이는 중립점으로부터 전단응력이 서서히 감소하는 구간 길이를 나타낸다(Freeman, 1978). Fig. 2와 같이 전단응력 τ_b 는 x_2 (중립점)까지는 잔류 전단응력 상태를 유지하다가 록볼트 길이 구간에서는 지수적(exponentially)으로 감소한다. 축방향 응력 σ_b 는 단부에서 최대값을 보이며 선형으로 감소하다가 x_2 지점에서 지수적으로 감소한다. 마찰형 록볼트에 최대 인발력 P 가 작용하면 전 구간에 대해서 잔류 전단 응력만 존재하게 되는데, 이는 다음 식과 같이 표현할 수 있다. 단, 록볼트 주면 접촉응력 σ_c 는 전 주면에 대해 동일하다고 가정하였다(Fig. 3).

$$P = \tau_c \pi d L \tag{1}$$

$$\tau = \sigma_c \tan(\phi + i) \tag{2}$$

여기서 P 는 인발력, d 는 팽창형 강관 록볼트의 직경, τ_c 는 암반과 팽창형 강관 록볼트 사이의 마찰응력, L 은 팽창형 강관 록볼트의 길이, σ_c 는 암반과 팽창형 강관 록볼트 사이의 접촉 응력, ϕ 는 암반과 팽창형 강관 록볼트간의 마찰각, i 는 암반의 다일러턴시 각도이다.

접촉응력 σ_c 는 록볼트의 인발력을 결정하는 가장 중요한 인자로, 지금까지 많은 연구들이 이 접촉응력 σ_c 를 산정하는 데 기여해왔다. Wijk and Skogberg (1982)는 Swellex(팽창형 강관 록볼트)를 탄성 회복량이 없고 완전히 원형으로 퍼지는 것으로 가정하여 암반과의 평균 접촉응력 이론식을 다음과 같이 제시하였다.

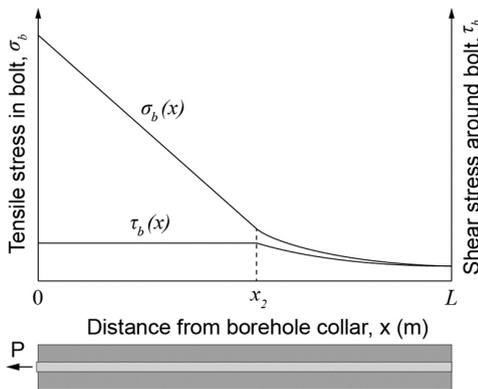


Fig. 2. Shear stress and axial load along frictional rockbolt

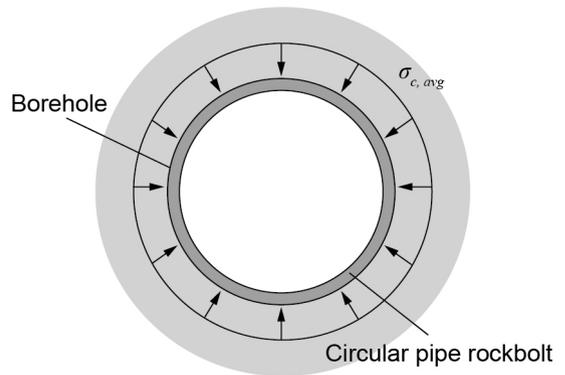


Fig. 3. Theoretical assumption on contact stress

$$\frac{q}{p_i} = \frac{1}{1 + \frac{r_i(1 + \nu_s^2)E_r}{t(1 + \nu_r)E_s}} \quad (3)$$

여기서 q 는 강관과 천공홀 사이의 접촉응력, p_i 는 강관 설치 중 천공홀에 가해진 내압, r_i 는 천공홀의 반경, t 는 강관의 두께, E_r 는 암반의 탄성계수, ν_r 는 암반의 포아슨 비, E_s 는 강관의 탄성계수, ν_s 는 강관의 포아슨 비이다.

하지만 실제 팽창형 강관 록볼트는 완전히 원형으로 퍼지지 않고, 탄성회복량도 존재하기 때문에 제시한 이론식으로는 인발력을 제대로 산정할 수 없다. 이러한 점을 들어 다른 연구자들은 Swellex의 평균 접촉 응력에 대한 이론식 수정이 필요함을 언급했다(Håkansson and Li, 1997; Li and Håkansson, 1999). 이에 Li (2016)는 Swellex의 탄성회복량과 굴곡부(tongue) 영향을 고려한 새로운 이론식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\frac{q}{p_i} = \frac{K_{bq} K_{bp} - \lambda K_r}{K_{bp} K_{bq} + K_r} \quad (4)$$

여기서, q 는 강관과 천공홀 사이의 접촉응력, p_i 는 강관 설치 중 천공홀에 가해진 내압, λ 는 회복계수, K_r 은 암반의 반경 방향 탄성계수, K_{bq} 는 설치 후 강관의 반경 방향 탄성 계수, K_{bp} 는 설치 중 강관의 반경 방향 탄성 계수이다.

식(4)는 회복 탄성 계수와 강관이 퍼졌을 때 최종 형상 및 강관의 등방 팽창을 가정하고 있기 때문에, 실제 팽창형 강관 록볼트에서 발생하는 비선형 거동 특성을 반영하는 데에 한계가 있다. 또한 팽창형 강관 록볼트의 접촉응력은 천공홀 주면을 따라 불규칙하게 나타나고, 경우에 따라 특정 부분에 응력 집중이 발생하는데, 이론식은 이러한 거동을 나타낼 수 없다.

실제 팽창형 강관 록볼트의 정착 거동을 정확하게 분석하기 위해서는 강관이 가지고 있는 재료 비선형성, 기하 비선형성과 암반과의 상호작용 등을 고려해야 한다. 이러한 거동 특성들은 이론적인 방법으로 분석하기 어렵다.

본 연구에서는 강관 팽창 거동의 비선형성과 강관과 암반의 상호 접촉 거동을 모두 고려할 수 있는 수치해석을 수행하였다. 영향 인자로 암반의 탄소성 조건과 강성을 고려하였다. 이를 통해 팽창형 강관 록볼트의 팽창 과정, 접촉응력 분포, 접촉 면적 및 평균 접촉응력의 변화 등을 분석하였다.

2. 수치해석에 의한 팽창형 강관 록볼트 모델링

2.1 접촉 거동의 수치해석적 고려

두 물체가 응력변화에 따라 서로 접촉 및 분리되는 현상은 구조물에서 흔히 발생하는 거동으로서 이를 접촉문제로 한다. 접촉문제는 최초 접촉이 이루어진 후 그 접촉 부위에서 마찰저항, 미끄럼 발생 및 재 분리되는 현상을 포함하며, 변형이 작고 탄성거동을 가정하더라도 기하학적 비선형 특성이 나타날 수 있다.

팽창형 강관의 정착거동은 강관과 암반 간의 상호작용으로, 이질 재료 간 비선형 접촉문제에 해당한다. 특히 강관과 암반 모두 탄소성 재료로서 비선형 탄소성 접촉문제라 할 수 있다. 접촉문제는 접촉거동의 전개, 제약조건, 그리고 구성방정식에 따라 다양한 접근 방법이 존재한다.

접촉 문제의 지배방정식은 물체 표면간 거리(gap)를 고려함으로써 공식화할 수 있다(Fig. 4). 물체간 표면 거리는 접촉 거동을 전개해 가는 과정뿐만 아니라, 접촉응력, 마찰 거동을 정의하는 데 필요하다. 접촉응력 σ_c 는 물체간 표면 거리 h_c 를 통해 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_c = f(h_c) \tag{5}$$

여기서, $\sigma_c = 0 (h_c < 0)$

$$\sigma_c > 0 (h_c = 0)$$

Fig. 4(b)는 이를 나타낸 것인데, 물체 간에 틈이 존재할 때($h_c < 0$)는 접촉응력이 작용하지 않지만, 물체의 표면이 만나는 순간($h_c = 0$)부터 접촉응력이 작용한다.

접촉 후 물체간 마찰 거동은 쿨롱(Coulomb)의 마찰 법칙을 이용하여 정의할 수 있다.

$$\sigma_t - \mu\sigma_c \leq 0 \tag{6}$$

여기서, σ_t 는 접촉면의 접선응력, μ 는 마찰 계수이다.

마찰 거동은 접촉면의 접선응력 σ_t 와 마찰응력 μ 와의 상대적인 크기에 따라 고정된 상태 또는 미끄러지는 상

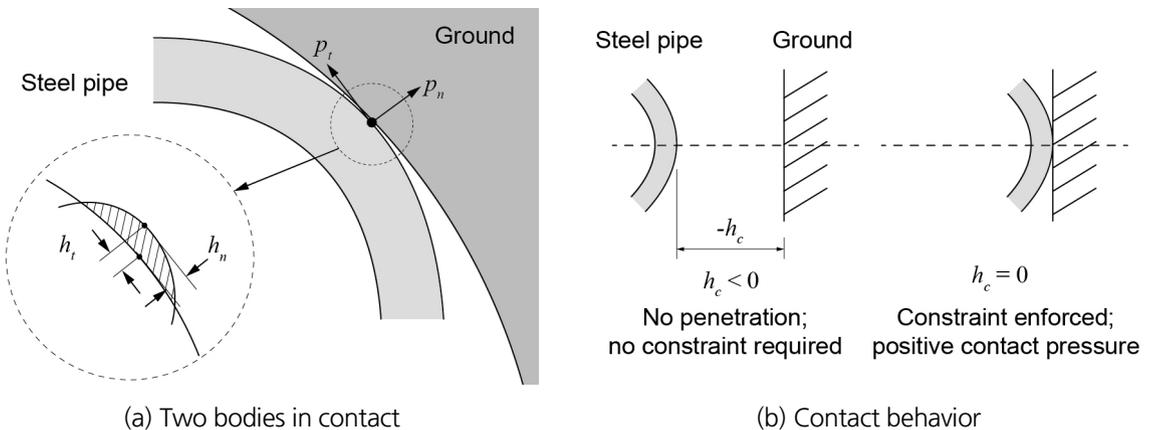


Fig. 4. Contact problem

태가 되며, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{접촉 조건} \quad : h_t = 0 (\sigma_t \leq \mu\sigma_c) \tag{7}$$

$$\text{미끄러짐 조건} \quad : h_t > 0 (\sigma_t > \mu\sigma_c) \tag{8}$$

여기서, h_t 는 접선 방향 변위이다.

본 해석에서는 별도의 변수 도입이 없는 페널티 방법(Penalty method)을 사용하였다. 페널티 방법은 기존의 퍼텐셜 에너지 범함수에 페널티 항을 추가함으로써 접촉 거동을 고려하는 방법으로 다음과 같이 표현된다.

$$\Pi_p = \frac{1}{2} \{u\}^T [K] \{u\} - \{u\}^T [P] + \frac{1}{2} \{T\}^T [a] \{T\} \tag{9}$$

여기서, $\{u\}$ 는 변위 벡터, $[P]$ 는 하중 벡터, $[K]$ 는 강성 행렬, $\{T\}$ 는 제한 조건 벡터, $[a]$ 는 페널티 행렬이다.

$\frac{1}{2} \{T\}^T [a] \{T\}$ 은 페널티 항이며, 제한 조건 벡터 $\{T\}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\{T\} = [C] \{u\} - \{Q\} \tag{10}$$

여기서, $[C]$ 는 상수 행렬, $\{Q\}$ 는 상수 벡터이다.

$\{T\}$ 이면 페널티 항이 0이므로 접촉이 발생하지 않은 경우이고, $\{T\} \neq 0$ 이면, 접촉이 이루어진 경우에 해당한다. $[a]$ 는 penalty parameter로서 $[a] = 0$ 이면 제한조건이 무시된다. $[a]$ 가 증가하면 변위 $\{u\}$ 가 제한조건을 만족하는 방향으로 변해가지만, $[a]$ 가 너무 커지면 점차적으로 정확도가 떨어지므로, 이의 적정값 고려가 중요하다. 최소포텐셜 에너지 법칙에 따라 $\frac{\partial \Pi_p}{\partial u} = \frac{\partial \Pi_p}{\partial P} = 0$ 을 통해 평형방정식을 구하면 다음과 같다.

$$[K + C^T a C] \{u\} = \{P\} + [C]^T [a] \{Q\} \tag{11}$$

2.2 해석 모델링

본 해석은 Fig. 5에 있는 터널 어깨부에 설치된 팽창형 강관 록볼트를 모사하였다. 팽창형 강관 록볼트는 중심을 지나는 종축에 대해서 대칭이고, 단면은 평면 변형률 상태에 있으므로, Fig. 6의 반단면 2D 조건으로 모델링하

였다. 암반의 범위는 영향 범위를 고려하여 강관 직경의 20배로 하였고(Kim, 2017), 해석 프로그램으로는 ABAQUS를 사용하였다.

강관이 충분히 팽창하여 지보 효과를 발휘하기 위해 일반적으로 가해지는 내압의 크기는 25 MPa에서 최대 30 MPa이다(Son et al., 2011). 본 해석에서 강관에 가해지는 내압의 최대 크기를 30 MPa로 설정하였고, 자중, 배수 조건과 초기 응력은 고려하지 않았다. 암반은 반무한 연속체로 가정하여 암반 경계부를 각 면에 대해 수직 방향 변위가 없도록 구속하였다.

강관의 거동은 탄소성으로 고려하였고, 연암의 거동은 탄성, 풍화암은 Mohr-Coulomb 탄소성으로 고려하였다(Park and Kim, 2007; Kim, 2017).

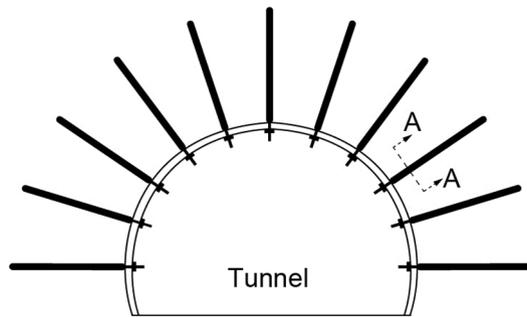


Fig. 5. Tunnel and inflatable steel pipe rockbolt

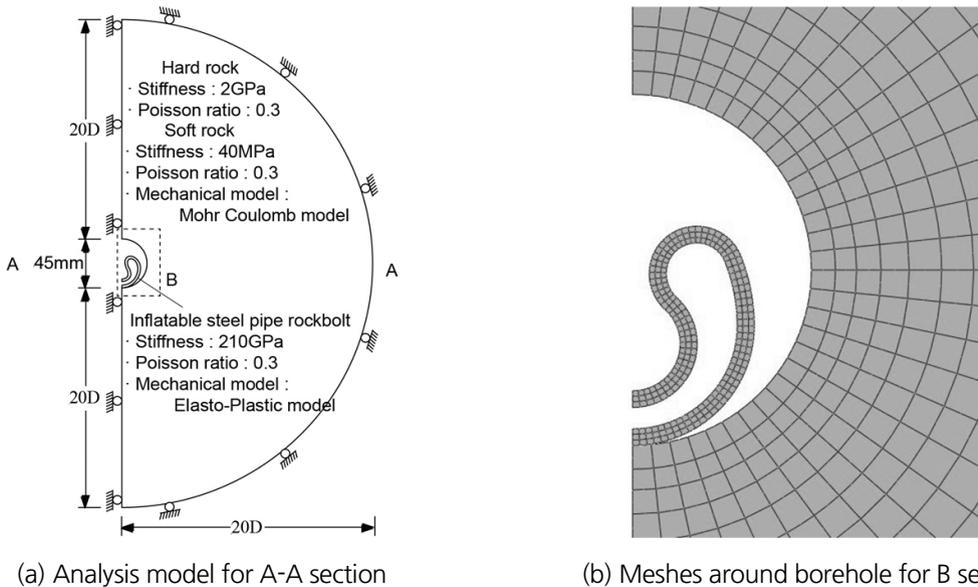


Fig. 6. Analysis model of inflatable steel pipe rockbolt

3. 암반에 따른 팽창형 강관 록볼트의 거동 특성

팽창형 강관 록볼트의 정착 거동에 대한 수치해석을 통해 tongue 변위, 천공홀 주변에 따른 접촉 응력 분포를 조사하였다. tongue 변위와 천공홀 주변 각도는 Fig. 7에 나타내었다.

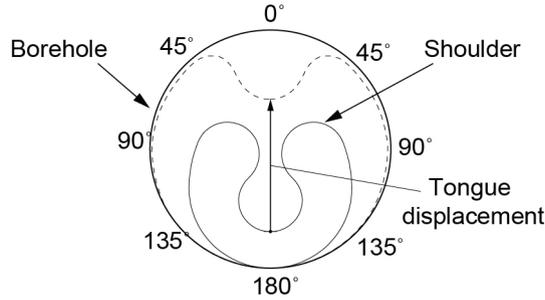


Fig. 7. Tongue displacement and borehole surface angle

3.1 연암에 설치된 팽창형 강관 록볼트의 정착 거동 특성

연암에 설치된 팽창형 강관 록볼트의 정착거동 특성결과를 Fig. 8, 9 및 10에 나타냈다. Fig. 8은 내압에 따른 강관의 tongue 변위를 나타낸 것이다. 초기 강관에 11 MPa 보다 작은 내압을 가했을 때 강관의 모든 요소가 탄성 상태이어서 tongue 변위가 크게 증가하지 않았다. 그러나 내압이 약 11 MPa이 되면 강관 어깨부가 항복하기 시작하여 tongue 변위가 급격하게 증가했다. 이후 tongue 변위의 크기가 약 17 mm보다 커지면 강관 어깨부가 경화 되면서 tongue 변위의 증가 속도가 감소했다.

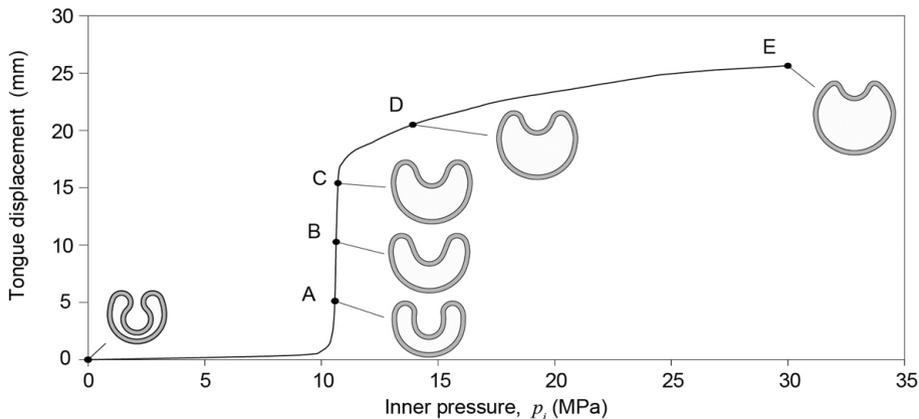


Fig. 8. Tongue displacement during installation in hard rock

Fig. 8의 A, B, C, D, E 상태일 때, 천공홀 주면 각도에 따른 접촉응력 분포를 Fig. 9에 나타내었다. 초기 강관이 퍼지기 시작하는 A에서는 접촉응력이 없지만, B 상태가 되면 천공홀 주면 각도가 약 65 ~ 85° 및 125 ~ 135°에서 접촉응력이 발생했다. 강관이 팽창하면 암반과의 최대 접촉응력 발생 위치가 강관의 어깨부로 옮겨가면서, 천공홀 주면 각도가 37°인 위치에서 최대접촉응력이 발생했다. 강관 팽창시 강관 어깨부에 소성 힌지로 인한 돌출부가 형성되는데, 이 위치와 최대 접촉응력이 발생 위치가 같았다.

Fig. 10은 내압을 제거 후 천공홀 주면 각도에 따른 강관의 접촉응력 분포를 나타낸 것이다. 내압을 제거하면 암반의 수축이 강관에 의해 억제되는데, 연암의 경우 강관이 완전히 퍼지지 않아 내압 제거 후 강관의 수축량이 커서 암반의 구속효과가 감소한다. 그 결과 내압을 제거하기 전에 비해 평균 접촉응력의 크기가 약 60% 감소하였다. 또한 응력 분포는 비교적 균등하게 나타났으며, 최대 접촉응력은 천공홀 각도 30 ~ 50° 부근에 위치하였다.

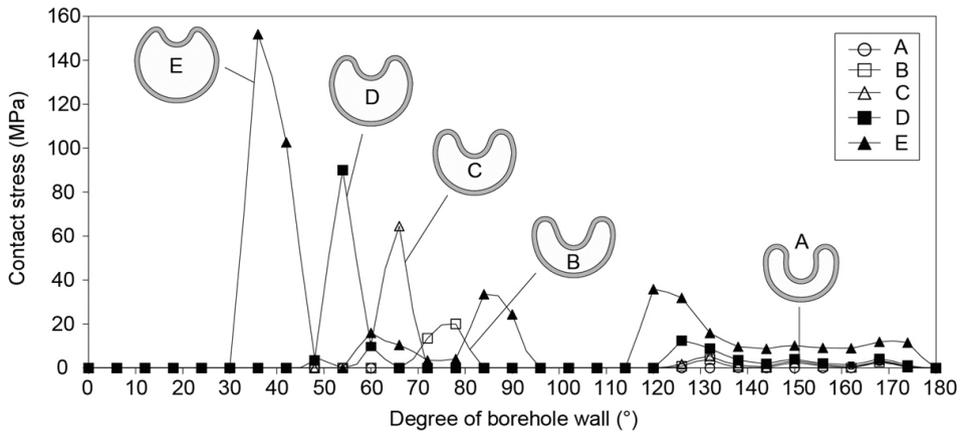


Fig. 9. Distribution of contact stress during installation in hard rock

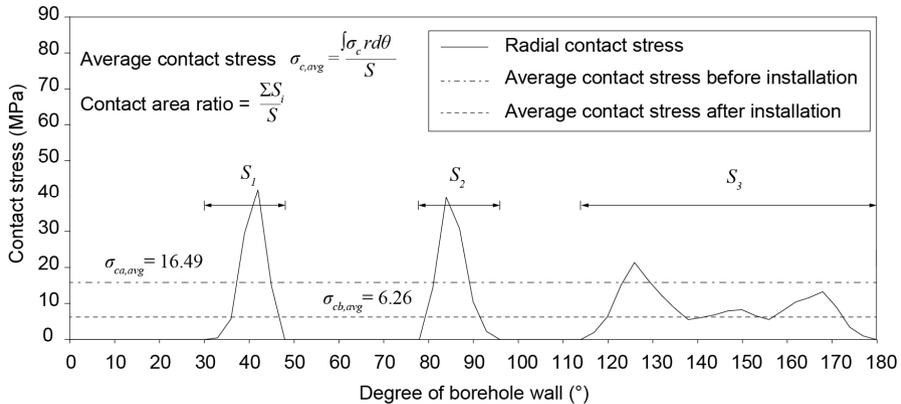


Fig. 10. Evaluation of average contact stress and contact area

3.2 풍화암에 설치된 팽창형 강관 록볼트의 정착 거동 특성

풍화암에 설치된 팽창형 강관 록볼트의 정착 거동 특성 결과를 Fig. 11과 12에 나타내었다. Fig. 11은 내압에 따른 팽창형 강관 록볼트의 tongue 변위를 나타낸 것이다. 내압에 따른 tongue 변위는 연암의 경우와 유사한 경향을 보였지만, 풍화암의 경우 암반 강성이 매우 작아 내압이 11 MPa일 때 tongue 변위의 증가량이 더 크게 발생했다.

Fig. 12는 Fig. 11의 A, B, C, D, E 일 때, 강관과 암반 사이의 접촉응력을 나타낸 것이다. 강관이 퍼지기 시작할 때는 접촉응력이 발생하지 않지만, B 상태가 되면서 어깨부가 돌출하여 주면각도가 약 50 ~ 90°인 위치에서 응력 집중이 일어났다. 강관이 C상태로 퍼지면 강관 어깨부의 돌출이 진전되면서 응력 집중은 더 심화되었다. 이후 D 상태가 되면 오히려 풍화암의 탄소성 거동으로 인해 강관 어깨부의 응력 집중이 완화되었고, E 상태가 되었을 때 응력 집중이 사라졌다.

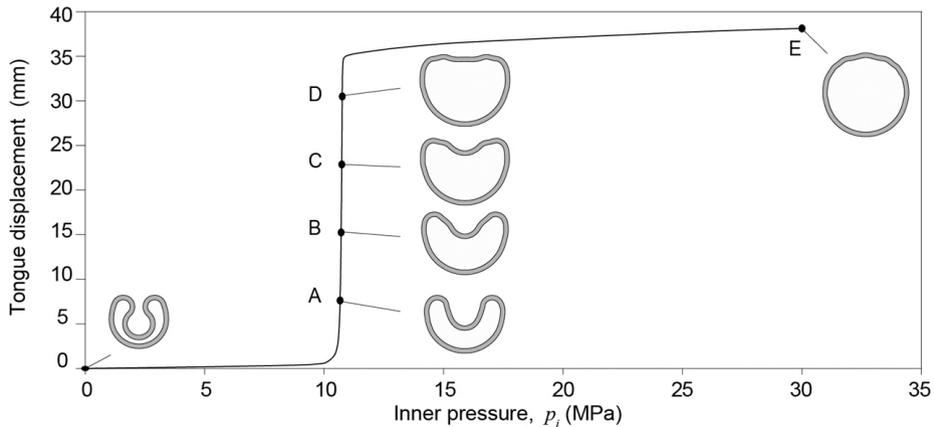


Fig. 11. Tongue displacement during installation in soft rock

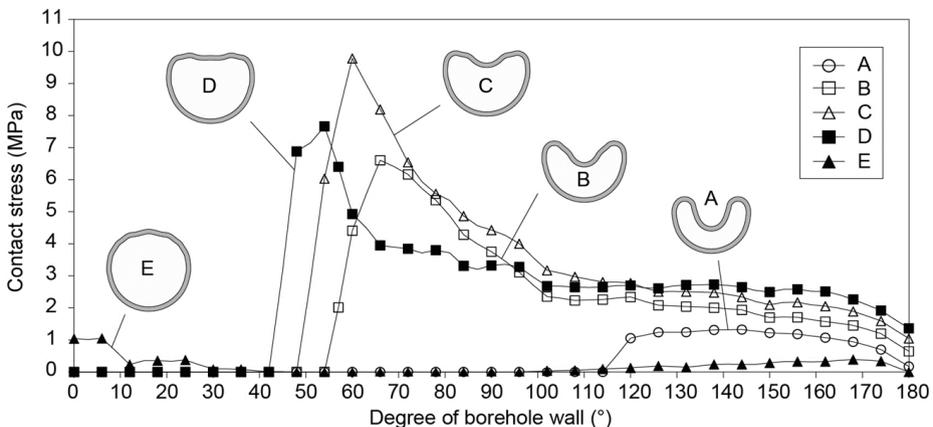


Fig. 12. Distribution of contact stress during installation in soft rock

3.3 암반 유형별 팽창형 강관 록볼트의 정착 거동 특성

연암과 풍화암에 설치된 팽창형 강관 록볼트의 접촉 면적과 평균 접촉 응력을 내압에 따라 Fig. 13에 나타내었다. 내압에 따른 접촉 면적 그래프는 풍화암과 연암 모두에서 유사한 경향을 보였다. 다만 연암에 설치된 강관은 내압이 증가할수록 접촉면적이 지속적으로 증가하였지만 풍화암의 경우 초기 팽창이 발생하는 부분에서 큰 접촉 면적이 나타나고, 이후 풍화암의 탄소성 거동으로 인해 암반에 의한 구속효과가 작아지면서 접촉면적이 약 20% 감소하였다. 접촉 응력의 경우 연암에 설치된 팽창형 강관 록볼트의 평균 접촉 응력은 내압이 12 MPa 이후에도 지속적으로 증가하였지만, 풍화암에 설치된 팽창형 강관 록볼트의 평균 접촉 응력은 내압이 11 MPa 일 때를 제외하고 내압에 관계없이 매우 낮은 분포를 나타냈다.

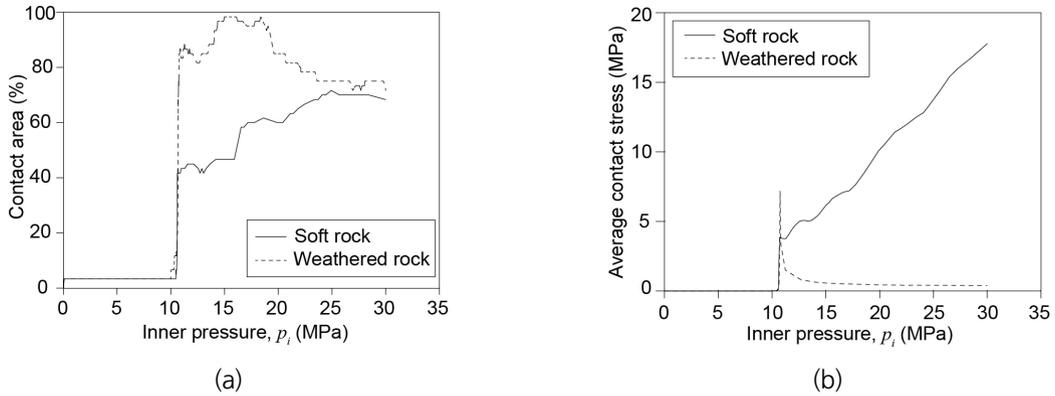


Fig. 13. Contact area (a) and average contact stress (b) during installation of rockbolt in soft and weathered rock

4. 암반 강성에 따른 팽창형 강관 록볼트의 거동 특성

4.1 팽창형 강관 록볼트의 정착 거동에 대한 암반 강성 영향

팽창형 강관 록볼트의 정착 거동에 대한 암반 강성 영향을 분석하기 위해, 내압에 따른 강관 tongue 변위 및 평균 접촉 응력을 Fig. 14 및 Fig. 15에 나타내었다. 암반 거동은 탄성으로 가정하였다. Fig. 14로부터 암반 강성이 클수록 강관의 최종 tongue 변위가 작아짐을 알 수 있다. 그러나 암반 강성이 0.5 GPa 이하인 경우 강관의 최종 tongue 변위는 약 39 mm로 동일하였다. 이는 강관이 완전히 퍼졌음을 의미하는데, 이 과정에서 팽창은 2단계로 일어난다. 1단계 팽창은 강관 어깨부가 항복하면서 발생하였고, 2단계 팽창은 강관의 tongue 안쪽이 외측으로 항복하면서 발생하였다. 암반 강성이 0.5 GPa보다 큰 경우 1단계 팽창만 발생하였고, 암반 강성이 증가함에 따라 최종 tongue 변위가 감소하였다. 다만 본 해석은 공경비(천공홀과 강관 직경의 비)를 0.98로 가정하였기 때문에 공경비가 달라지면 강관이 완전히 퍼지는 암반 강성의 범위도 달라질 수 있다(Soni, 2000).

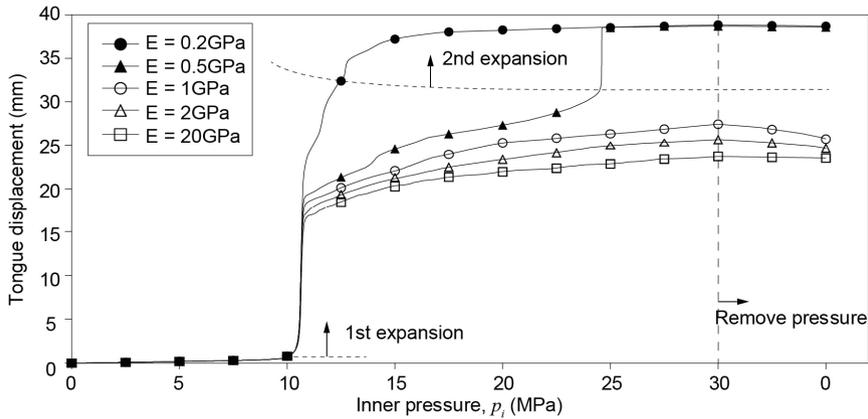


Fig. 14. Tongue displacement during installation of rockbolt for various elastic modulus of rock

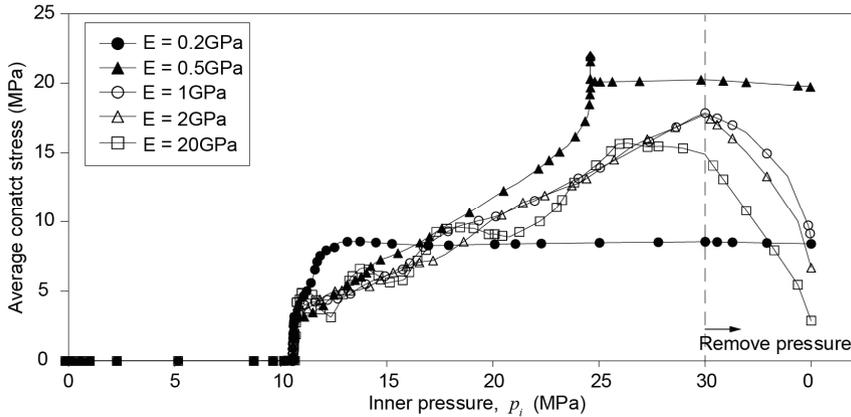


Fig. 15. Average contact stress during installation of rockbolt for various elastic modulus of rock

Fig. 15로부터 암반 강성에 따라 강관의 평균 접촉 응력 발생 경향이 달라짐을 알 수 있다. 암반 강성이 0.5 GPa 이하인 경우 암반 강성이 증가할수록 최종 평균 접촉 응력이 증가하였으나, 암반 강성이 0.5 GPa보다 큰 경우 암반 강성이 증가할수록 최종 평균 접촉 응력이 감소하였다. 그런데 본 해석조건에서는 암반 강성이 0.5 GPa이하인 경우는 강관이 완전히 퍼졌고, 암반 강성이 0.5 GPa보다 큰 경우는 강관이 완전히 퍼지지 않았다. 즉, 강관이 완전히 퍼지는 경우 암반 강성이 증가할수록 내압 제거 시 강관의 수축량 증가에 비해 암반의 수축량 증가가 커서 암반의 구속효과가 증가한다. 그러나 강관이 완전히 퍼지지 않는 경우 암반 강성이 증가할수록 암반의 수축량 증가만큼이나 강관의 수축량 증가도 커서 암반의 구속효과가 증가하지 않는다.

4.2 팽창형 강관 록볼트의 성능 평가

Fig. 16에는 암반 강성에 따른 팽창형 강관 록볼트의 단위 길이당 인발력을 나타내었다. 암반 강성이 0.5 GPa 이하인 경우 암반 강성이 증가할수록 록볼트의 인발력이 증가하였다. 그러나 암반 강성이 0.5 GPa 보다 큰 경우 암반 강성이 증가할수록 록볼트의 인발력이 감소하였다. 위 결과를 통해 주어진 해석 조건에서는 암반 강성이 0.1 GPa에서 1 GPa 에 있는 경우, 팽창형 강관 록볼트의 인발력 효율이 높음을 알 수 있다.

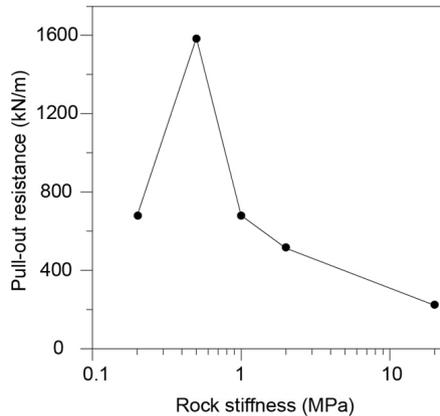


Fig. 16. Pull-out resistance of rockbolt according to elastic modulus of rockbolt

5. 결론

본 논문에서는 수치해석을 이용하여 팽창형 강관 록볼트의 정착 거동을 조사하였다. 팽창형 강관 록볼트의 정착 거동에 대한 영향 인자로 암반의 거동 상태와 강성을 선정하여, 내압에 따른 강관의 단면 형상, 접촉 응력 분포, 평균 접촉 응력, 접촉 면적 등을 분석하였다.

연암에 설치된 팽창형 강관 록볼트에 최대 내압을 가했을 때, 강관은 완전히 퍼지지 않았고, 천공홀 주면 각도 30 ~ 50° 부근의 강관 어깨부에서 응력 집중이 발생하였다. 그런데 내압을 제거하면 내압을 제거하기 전에 비해 응력 분포가 비교적 고르게 나타났고, 평균 접촉 응력이 약 60% 감소했다. 그러나 여전히 최대 접촉 응력은 강관의 어깨부에서 발생했다.

풍화암에 설치된 팽창형 강관 록볼트에 최대 내압을 가했을 때, 강관은 완전히 퍼졌지만 그 과정에서 평균 접촉 응력이 0에 가깝게 감소하였다.

암반의 강성에 따라 강관이 펼쳐지는 형상과 강관의 접촉 응력이 발생하는 경향이 달라졌다. 주어진 해석 조건에서는 암반 강성이 0.5 GPa이하 일 때 강관이 완전히 퍼졌는데, 이 경우 암반 강성이 증가할수록 평균 접촉 응력이 증가하였다. 그러나 암반 강성이 0.5 GPa보다 큰 경우 강관은 완전히 퍼지지 않았고, 암반 강성이 증가할수록 평균 접촉 응력이 감소하였다.

본 연구를 통해서 암반의 거동 상태 및 강성에 따른 팽창형 강관 록볼트의 정착 거동 특성에 대해 알아보았다. 그러나 본 연구는 수치해석에 국한되었기 때문에, 이를 검증하기 위한 실험 데이터가 필요할 것으로 생각된다. 이는 콘크리트를 사용해 암반과 천공홀을 모사하고 팽창형 강관 록볼트를 제작된 천공홀에 설치하여 실제 팽창 거동을 확인함으로써 가능할 것이다. 또한 Li (2016)가 언급하였듯이, 접촉 응력은 암반 강성 이외의 다른 영향 요인에도 영향을 받으므로 향후 연구에서는 천공홀의 크기, 토압계수 및 초기 암반 상태 등 다양한 영향 요인에 대한 분석도 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 16SCIP-B066321-04)과 National Research Foundation of Korea under Research Project 2015R1A2A1A05001627의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Freeman, T.J. (1978), "The behaviour of fully-bonded rock bolts in the Kielder experimental tunnel", *Tunnels & Tunnelling International*, Vol. 10, No. 5, pp. 37-40.
2. Håkansson, U. and Li, C. (1997), "Swellex in weak and soft rock—design guidelines", *International symposium on rock support-applied solution for underground structures*, Lillehammer, pp. 555-568.
3. Jeong, Y.Y., Choi, H.J., Kim, B.J., Yu, B.W., Kim, Y.I., Oh, S.J. (2007), "Design on the large section tunnel under shallow overburden", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 9, No. 2, pp. 171-182.
4. Kim, K.C. (2017), "A study on the behavior of inflatable pin-holed rockbolt", *Master Thesis*, Konkuk University, Republic of Korea, pp. 1-92.
5. Kim, Y.I., Yoon, Y.H., Cho, S.K., Yang, J.H., Lee, N.Y. (2002), "A Case study on the construction of a long tunnel in the youngdong railroad(Mt. Dongbeak-Dokye)", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol 4, No. 2, pp.155-165.
6. Li, C.C. (2016), "Analysis of inflatable rock bolts", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 49, No. 1, pp. 273-289.
7. Li, C., Håkansson, U. (1999), "Performance of the Swellex bolt in hard and soft rocks", *Rock Support and Reinforcement Practice in Mining*, 103.
8. Li, C., Stillborg, B. (1999), "Analytical models for rock bolts", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 36, No. 8, pp. 1013-1029.
9. Park, D.H., Kim, Y.K. (2007), "A study on analysis of tunnel behaviors considering the characteristics of in-situ stress distribution in rock mass", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 9, No. 3, pp. 275-286.

10. Son, S.G., You, J.O., You, J.H., Chung, J.M. (2011), "Field Evaluation of the Swelled Steel Tube Rockbolts", 2011 Autumn conference & annual meeting of the Korea Society for railway, Jeju island, Republic of Korea, pp. 1149-1156.
11. Soni. A. (2000), "Analysis of Swellex bolt performance and a standardized rock bolt pull test datasheet and database", Master's thesis, University of Toronto, Canada.
12. Wijk, G. and Skogberg, B. (1982), "The Swellex rock bolting system", Proc. 14th Canadian Rock Mech. Sympo, 20.