

## 고무막 패커시스템을 적용한 가압 그라우팅 쏘일네일링 공법의 인발거동 특성 The Pull-out Characteristics of Pressurized Grouting Soil Nailing using Rubber Membrane Packer System

배경태<sup>1)</sup>, Kyung-Tae Bae, 최경집<sup>2)</sup>, Kyung-Gyp Choi, 조국환<sup>3)</sup>, Kook-Hwan Cho, 김현정<sup>4)</sup>, Hyun-Jung Kim, 김지환<sup>4)</sup>, Ji-Hwan Kim

<sup>1)</sup> 서울산업대학교 건설기술연구소 박사후연구원, Post-Doc., Inst. of Const. and Tech., Seoul National Univ. of Technology

<sup>2)</sup> (주)지오텍 코리아 대표이사, CEO, Geotech Korea, Co. Ltd.

<sup>3)</sup> 서울산업대학교 건설공학부 조교수, Assistant Professor, School of Civil Eng., Seoul National Univ. of Technology

<sup>4)</sup> 서울산업대학교 건설공학부 석사과정, Graduate student, School of Civil Eng., Seoul National Univ. of Technology

**SYNOPSIS** : The pressurized grouting soil nailing method using rubber membrane packer system was developed for recycling materials to minimize environmental pollution and reducing construction costs. For this purpose, field pull-out tests were performed to evaluate the characteristics of soil nailing by measuring tensile stresses and axial displacements.

**주요어(Key words)** : Pressurized Grouting Soil Nailing, Rubber Membrane Packer System, Field Pull-out Test

### 1. 서 론

쏘일네일링 공법은 주로 지하굴착 및 사면보강에 보편적으로 사용되는 공법으로 현장에서 일반적으로 사용되는 중력식 그라우팅은 3~6회 반복주입으로 인한 공동발생 및 충전불량, 유효경 감소 및 불연속면 충전 불가 등의 단점이 있다. 최근 개발된 발포우레탄을 이용한 가압 그라우팅 방식의 경우 이러한 단점을 보완하고 공기단축 및 인장저항력 증대의 장점이 있으나, 가압 재료의 일회성 사용과 환경오염의 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 보완하여 재사용 가능한 고무막 패커를 적용하여 친환경적이며 경비를 절감할 수 있는 가압 그라우팅 쏘일네일링 공법(pressurized grouting soil nailing method using rubber membrane packer system)을 개발하였다. 본 공법은 그라우팅 두부에 설치한 고무막 패커를 팽창시켜 네일 정착부를 완전히 밀폐하고 가압 그라우팅(5~10kgf/cm<sup>2</sup>)을 실시하여 천공경 확대 및 주변지반으로의 침투로 인한 지반과 쏘일네일링 그라우트체의 마찰저항특성 향상에 따른 인장저항력 증가로 시공성 및 경제성을 증대한 공법이다.

본 연구에서 개발된 고무막 패커시스템을 적용한 가압 그라우팅 쏘일네일링의 현장적용성과 정량적 및 정성적 분석을 위하여 일반적인 중력 그라우팅 및 고무막 패커시스템을 적용한 가압 그라우팅 쏘일네일을 김천시 ○○댐 현장 절토사면에 시공하고 각각 인발시험을 실시하였다. 쏘일네일의 심도별 인발거동 특성을 고찰하기 위하여 강봉에 스트레인게이지를 부착하고 인장저항력과 축방향변위 등을 측정하여 각 공법을 비교, 평가하였다.

### 2. 가압식 쏘일 네일링

가압식 쏘일네일링 공법은 그라우팅 두부에 패커를 설치하여 네일 정착부를 완전히 밀폐하고 압력분사 그라우팅을 실시하여 정착부의 유효직경 및 인발저항력을 증가시켜 안전율을 향상시키는 공법이다. 가압식 쏘일네일링은 그라우팅 주입압 5~10kgf/cm<sup>2</sup>을 사용하며 중력 그라우팅에 비해 발휘되는 마찰

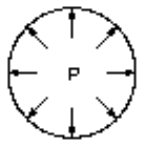
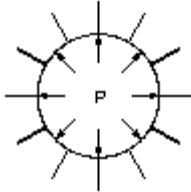
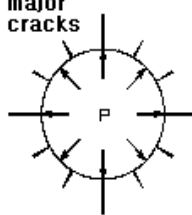
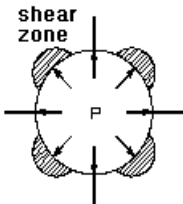
저항력이 주입압에 비례하여 선형적으로 증가하는 특징이 있다(Hobst 등, 1983).

## 2.1. 가압 그라우팅 시 주변지반의 거동특성

압력분사시 주입압에 따른 천공면 주변지반의 거동특성은 공내재하시험시의 경우와 유사하며, 이를 구체적으로 명시하면 표 2.1과 같다(Clarke, 1995). 주입압이 비교적 작은 경우에 천공면 주변지반은 탄성적인 거동을 나타내나 주입압이 임계주입압( $P_{cr}$ )보다 커지면 균열이 발생하면서 천공면이 점차 확대 되는 현상이 발생한다. 이 상태에서의 지반은 탄·소성 거동을 나타내며 주입압이 더욱 커져서 한계주입압( $P_{lim}$ )을 초과하게 되면 수압파쇄(hydrofracture)현상이 발생하면서 지반은 소성거동을 나타낸다.

수압파쇄현상이 발생하면 주변지반의 소성화로, 그라우팅체의 팽창이 예상되지만, 지반의 지지력 증대는 기대할 수 없기 때문에, 기본적으로 수압파쇄현상이 발생하지 않도록 주입압의 크기를 조절하여야 한다. 또한 가압 그라우팅시 수압파쇄현상을 방지하기 위한 시공방법으로, 그라우팅 과정에서 주입압을 그림 2.1(c)에 도시한 바와 같이 단계별로 증가시킬 경우 주변지반이 보강되면서 주입압이 서서히 증가 되기 때문에 수압파쇄현상이 방지되고 아울러 주변지반의 보강효과 및 지지력의 증대효과가 우수하다고 보고된 연구사례도 있다(Kleyner 등, 1993).

표 2.1 압력분사 시 주입압에 따른 주변지반의 거동특성(Clarke, 1995)

구 분	Case ①	Case ②	Case ③	Case ④
개요도				
주입압	$P < P_{cr}$	$P = P_{cr}$	$P_{cr} < P \leq P_{lim}$	$P > P_{lim}$
주변지반의 거동특성	·탄성거동 ·지반 내에 균열이 발생하지 않음	·지반 내에 균열이 발생하기 시작함	·탄·소성거동 ·지반 내에 균열이 점점 더 크게 발달함	·소성거동 ·수압파쇄 현상이 발생함

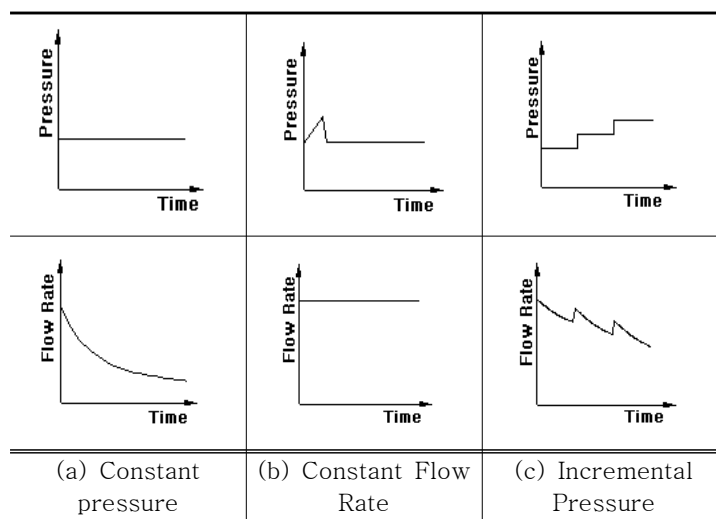


그림 2.1. 압력분사 주입방식(Kleyner 등, 1993)

## 2.2. 가압 그라우팅의 임계주입 및 한계주입압

지반을 탄성체로 가정하고 축대칭 상태에서 Mohr-Coulomb 파괴규준을 적용시켜 유도하면, 임계 주입압은 식(1)과 같이 정의할 수 있다(Kleyner 등, 1993). 여기서, 임계 주입압은 표 2.1의 경우 Case ②와 같이 지반 내에서 균열이 발생하는 시점의 주입압을 의미한다.

$$P_{cr} = \frac{1 - K_a}{2} [\sigma_h + c \cdot \cot\phi] \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_h$  : 정지 상태에서의 수평토압

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right),$$

$\phi$  : 흙의 내부 마찰각

또한 한계 주입압은 천공면 주변 지반이 저항할 수 있는 최대 주입압으로, Vesic의 공팽창 이론(1972)을 토대로 평가식이 유도되며, 이를 정리하면 식(2)와 같다.

$$P_{lim} = c \cdot F_c + q \cdot F_q \quad (2)$$

여기서,  $F_c = (F_q - 1) \cdot \cot\phi$

$\Delta$  : 평균 체적변형율(비압축성인 경우에는,  $\Delta=0$ )

$$F_q = (1 + \sin\phi) \cdot (I_{rr} \cdot \sec\phi)^{\frac{\sin\phi}{(1 + \sin\phi)}}$$

$q$  : 초기 지중응력

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta \sec\phi'}$$

$c$  : 주변 흙의 점착력

$$I_r = \frac{E}{1(1 + \nu)(c + q \tan\phi)}$$

$E$  : 주변 흙의 탄성계수

## 3. 가압식 쏘일네일링 개발

### 3.1. 개요

일반적인 쏘일네일링 공법은 중력식 그라우팅을 적용하여 고결시간이 길고, 수축현상을 보완하기 위하여 3~6회 정도의 그라우팅을 실시하므로 반복 공정으로 인하여 시공성이 저하되고 공기가 길어진다. 또한, 주입압을 유지할 수 없어 충전상태의 확인 및 품질관리가 용이하지 못하다. 본 연구에서 개발한 가압식 쏘일네일링 공법은 그림 3.1과 같이 그라우팅 두부에 고무막 패커를 설치하여 네일 정착부를 완전히 밀폐하고 가압 그라우팅(5~10kgf/cm<sup>2</sup>)을 실시하여 정착부의 유효직경 및 인발저항력을 증가시켜 안전율을 향상시키는 공법이다.

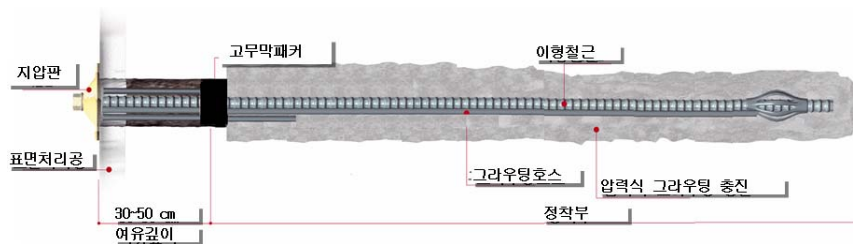


그림 3.1. 가압식 쏘일네일링 공법 개요도

### 3.2. 고무막 패커시스템

개발된 고무막 패커시스템은 그림 3.2와 같다. 그림 3.2(a)에서와 같이 그라우트 주입구 3개소, 공기 배출구 1개소가 4방향에 설치된다. 또한 고무패킹을 팽창시키기 위한 너트장치가 4개소에 위치하고 있으며 중앙부 홀은 쏘일네일의 보강재인 이형철근이 위치하게 되는데, 고무패킹의 팽창과 더불어 이형철근은 패커시스템과 고정된다. 그림 3.2(b)의 패커시스템의 몸체는 가압식 그라우팅에 의한 그라우트의 유출을 막기 위해 고무패킹을 팽창시켜 천공홀에 밀착시킨다. 결론적으로, 고무패킹의 팽창은 패커시스템과 지반과의 밀착 및 패커시스템과 이형철근의 밀착의 두 가지 효과를 거둘 수 있다. 그라우트 주입은 그라우트 믹서에서 1개 관으로 주입되며, 압력 측정장치를 통과한 후 3개의 지선으로 분기되어 주입되어진다(그림 3.2c). 이때, 압력측정 장치의 게이지를 통해 지속적인 압력 상태를 체크할 수 있으며, 앞쪽에 위치한 밸브에 의해 가압강도를 조절할 수 있다(그림 3.2d).



(a) 패커시스템 상부



(b) 패커시스템 측부



(c) 그라우트 주입장치



(d) 패커시스템 팽창상태

그림 3.2. 개발된 고무막 패커시스템

## 4. 현장 인발시험

### 4.1. 인발시험 개요

고무막 패커시스템을 적용한 가압 그라우팅 쏘일네일링의 인발거동 특성을 고찰하기 위하여 그림 4.1(a), (b)와 같이 각각 6개소 씩 일반적인 중력식 그라우팅 및 고무막 패커시스템을 적용한 가압 그라우팅 쏘일네일을 사면에 시공하고 인발시험을 실시하였다. 지반 내에서 쏘일네일의 심도별 인장저항력과 축방향변위 등을 측정하기 위하여 강봉에 스트레인게이지를 부착하여 시험을 실시하였다(그림 4.1c). 강봉의 길이는 5m이며 스트레인게이지의 간격은 1m 마다 부착하여 총 4개 위치에 부착하였다. 그림



4.1(d)는 현장 인발시험의 전경이며, 시험부지는 김천시 ○○댐 공사를 위한 절개지에서 수행되었고, 지반조건은 천공 결과 풍화암 및 연암에 해당하는 것으로 확인되었다.



(a) 중력식 쏘일네일링



(b) 가압식 쏘일네일링



(c) 스트레인게이지 설치



(d) 인발시험 전경

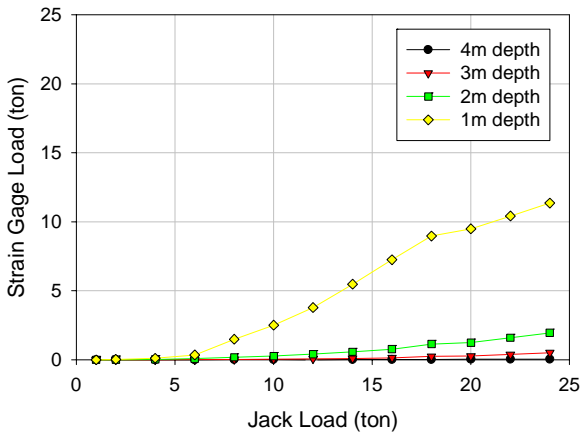
그림 4.1. 현장 인발시험

## 4.2. 시험결과 및 분석

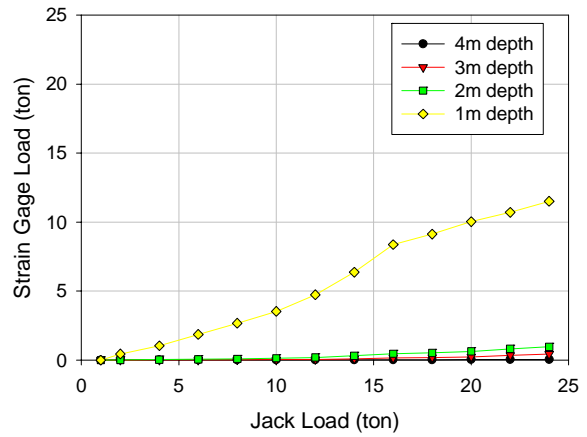
중력식 및 가압식 쏘일네일링에 대한 인발시험을 실시하여 각각의 심도별 인발저항특성을 고찰하고 각 공법의 인발저항력과 변형특성을 비교, 고찰하였다.

### 4.2.1. 심도별 인발저항 특성

그림 4.2 및 4.3은 각각 중력식 및 가압식 쏘일네일링에 대한 심도별 인발저항력을 나타낸 그림이다. 그림 4.2에서와 같이 중력식의 경우 지표면 근처인 심도 1m에 설치한 스트레인게이지의 인발저항력은 최대 11.5ton, 그 이후인 2m 이상에서는 최대 1.9ton으로 지표면 근처에서 대부분의 인장저항이 발휘되는 것을 알 수 있으며, 그림 4.3의 가압식인 경우에도 심도 1m 부근의 인발저항력은 최대 13.5ton, 2m 이후에는 최대 2.2ton으로 두 경우 모두 대부분의 인발저항을 심도 1m 부근의 지표면 근처에서 발휘되는 것으로 나타났다. 위의 결과를 분석해 보면 쏘일네일링 공법의 인발저항에 가장 중요한 요소인 그라우팅으로 인한 유효경 확대의 영향이 대부분 네일의 저심도에서 나타남을 알 수 있으며, 이로 인해 파괴메커니즘이 네일의 뒷부분까지 전달되지 못하고 대부분 앞 부분에서 발생됨을 알 수 있었다.

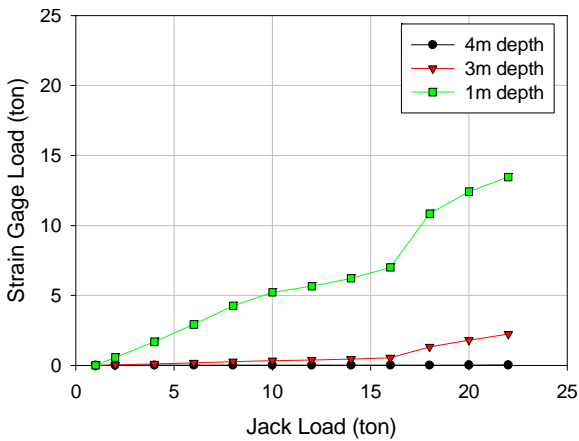


(a) Test No. 3

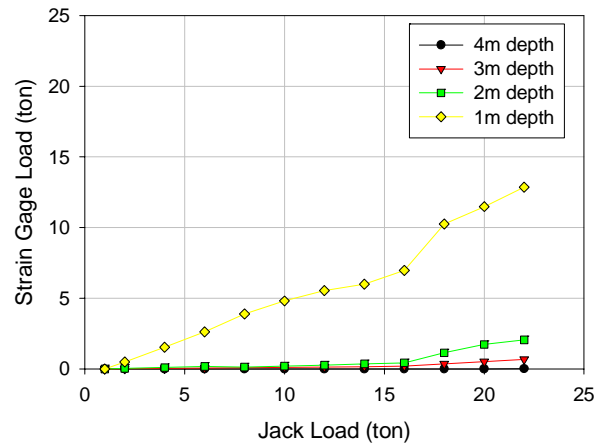


(b) Test No. 4

그림 4.2. 중력식 쏘일네일링의 심도별 인발저항력



(a) Test No. 1



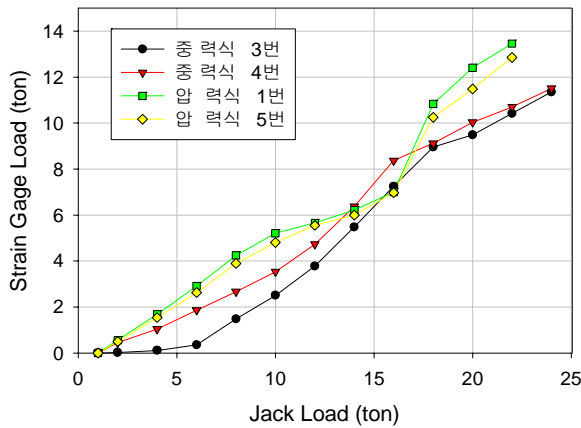
(b) Test No. 5

그림 4.3. 가압식 쏘일네일링의 심도별 인발저항력

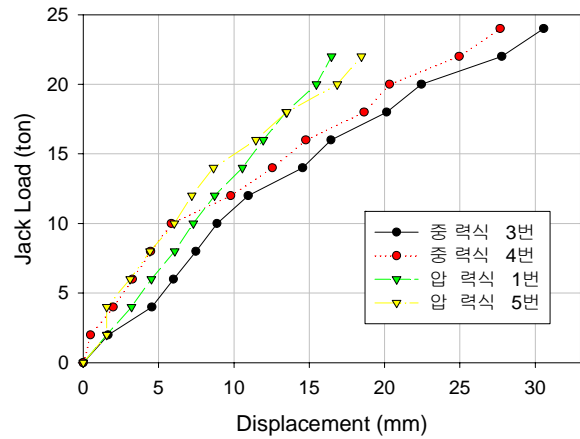
#### 4.2.2. 인발저항과 변형특성의 비교

그림 4.4는 중력식 및 가압식 그라우팅 쏘일네일링의 인발 거동특성을 비교한 그림이다. 그림 4.4(a)의 경우 인발저항력이 최대로 발휘되는 그림 4.2 및 4.3의 심도 1m 부근의 인발저항력을 비교한 그림이며, 그림 4.4(b)는 인발시험시 가압관에 설치한 다이알게이지를 통해 측정된 쏘일네일의 축방향변위를 비교한 그림이다. 인발저항력은 잭 하중 22ton이 작용하는 경우 중력식은 10.4~11.5ton, 가압식은 12.9~13.5ton로 가압식의 인발저항 능력이 약 24.5% 증가 하였으며, 인발변형 특성은 중력식은 25.0~27.8mm, 가압식은 16.5~18.5mm로 가압식의 경우 중력식에 비하여 변위가 약 33.7% 감소하였다.

한편, 가압그라우팅 쏘일네일링인 경우 강봉의 허용응력까지 재하 하였음에도 불구하고 그라우팅과 강봉 그리고 지반의 부착강도가 증가하여 최대 축방향변위가 25mm 이내로 발생하는 것으로 미루어, 가압식 그라우팅 쏘일네일링인 경우 그라우팅 강도보다는 강봉의 인장강도가 네일 시스템의 인발거동에 더 큰 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다. 따라서 허용 인장응력이 더 큰 강봉을 사용한다면 인장저항력을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 인발저항력



(b) 변형특성

그림 4.4. 중력식 및 가압식 쏘일네일링의 인발저항 및 변형특성

## 5. 결론

본 연구에서는 일반적으로 사용되는 중력식 및 발포우레탄을 사용하는 가압식 그라우팅 쏘일네일링 공법의 단점을 보완한 고무막 패커시스템을 적용한 가압그라우팅 쏘일네일링공법을 개발하였으며, 중력식과 가압식 쏘일네일공법의 인발거동 특성을 비교하는 현장 인발시험을 수행하였다.

- (1) 중력식 및 가압식 쏘일네일링 두 경우 모두 대부분의 인발저항을 심도 1m의 지표면 부근에서 발휘하는 것으로 나타났으며, 이로 인해 파괴메커니즘이 네일의 뒷부분까지 전달되지 못하고 대부분 앞부분에서 발휘됨을 알 수 있었다.
- (2) 가압식 쏘일네일링의 인발저항 특성은 중력식에 비하여 인발저항 능력이 약 24.5% 증가 하였으며, 인발변형 특성은 축방향변위가 약 33.7% 정도 감소하였다.
- (3) 가압그라우팅 쏘일네일링인 경우 강봉의 항복응력까지 재하 하였음에도 불구하고 그라우팅과 강봉 그리고 지반의 부착강도가 증가하여 최대 축방향변위가 25mm 이내로 발생하는 것으로 미루어 항복응력이 큰 강봉을 사용한다면 허용 인장저항력을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 교육인적자원부 · 산업자원부와 한국산업기술재단에서 시행한 산학협력중심대학 육성사업의 지원에 의한 것으로, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Clarke, B. G. (1995), *Pressuremeters in geotechnical design*. Blackie Academic & Professional, London, pp. 130~160.
2. Hosbt, I. L. and Zajic, I. J. (1983), *Anchoring in Rock and Soil*, 2nd Ed., Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands.
3. Kleyner, I., Krizek, R. J. and Pepper, S. F. (1993), "Influence of Grout Pressure on Capacity of Bore-injected Piles and Anchors", *Proc. of the International Conference on Grouting in Rock and Concrete*, Salzburg, Austria, pp. 159~165.
4. Vesic, A. S. (1972), "Expansion of Curves in Infinite Soil Mass". *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 98, No. SM3, pp. 265~288.