

# 풍화암 사면에서의 압력분사 그라우팅 네일 보강 효과 연구

## Evaluation of Reinforcing Effects of Pressure-Injected Grouting Nail in Weathered Rock

황영철\* · 김낙영\*\*

Hwang, Young-Cheol · Kim, Nak-Young

### Abstract

The slope reinforcing method utilized in this paper reinforces the ground overall by means of filling borehole as well as permeating grout material into ground by injecting it through the grouting pipe. In order to reflect these characteristics to design, not only the ground reinforcing effect by the structural material itself but also the ground strength improvement effect by the grouting injection must be quantitatively evaluated. But precedent research of it has been insufficient. Therefore, the slope reinforcing method was applied to the weathered rockmass slope situated in the highway in order to analyze reinforcing effect and the instrumentation of slope was performed. Through analysis of this field test, the slope reinforcing method was proved to be effective and back analysis method based on instrumentation values of slope was proposed to apply to reinforcing design. In this paper, the effectiveness of reinforcing method was certified through proposed back analysis.

**Keywords** : Grouting Nail, Rock Slope Reinforcing, Ground Reinforcing

### 요 지

압력분사 그라우팅 네일을 이용한 사면보강공법은 천공 후 그라우트재에 압력을 가하여 그라우트재의 천공홀 충전뿐만 아니라 지반으로의 침투주입 효과를 일으켜, 전체적인 보강력 증대를 기대하는 공법이다. 이런 특성을 설계에 반영하기 위해서는 구조재료 자체에 의한 지반보강효과 뿐만 아니라 압력분사 그라우팅에 따른 지반강도의 증진효과를 정량적으로 평가하는 것이 선행되어야 하나 아직까지는 이에 대한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 절리가 발달한 풍화암 사면을 대상으로 시험시공 및 계측을 실시하고, 얻어진 계측값을 평가하여 절리가 발달한 풍화암 사면에서의 보강특성을 확인하였다. 또한 계측값으로부터 얻은 보강특성을 설계에 적용하기 위한 역해석 기법을 제안하였으며, 제안된 역해석 기법을 통하여 암반사면에서의 압력분사 그라우팅 네일 공법의 효용성을 확인하였다.

**주요어** : 압력분사 그라우팅 네일, 암반사면보강, 사면설계, 지반보강특성

\* 정희원 · 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

\*\* 정희원 · 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

# 1. 서론

최근들어 도로선형의 직선화로 대절토 사면이 많이 생겨나고 있으며, 이에 따른 문제점 해결을 위하여 적절한 보조공법의 적용이 증가하고 있다. 현재 국내에서 많이 적용되고 있는 사면 안정화 대책으로는 크게 사면 경사를 완화시키는 방법, 중력식·역T형 옹벽이나 보강토 옹벽 등의 토류 구조물을 이용하는 방법, 그리고 어스앵커 및 락볼트 또는 쏘일네일링 등을 이용하여 사면을 보강하는 방법 등으로 구분할 수 있다. 이들 중 구조적 재료를 이용하여 사면을 보강하는 공법에서는 주로 이형철근을 보강재로 사용하여 왔으며 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러나 국내의 지질특성상 절토사면 붕괴의 많은 부분이 파쇄가 심하여 지반이 느슨한 상태로 존재하거나, 절리의 발달로 인해 암반의 암편화가 원인이 되고 있으나, 이러한 부분에 대한 적절한 대책공법은 아직까지 연구나 적용이 미진한 실정이다.

절리 발달이나 굴착으로 인해 느슨해진 풍화암 사면의 경우는, 압력분사 그라우팅공법이 적절한 대안으로 떠오르고 있으나 압력분사 그라우팅에 따른 지반강도의 증진효과를 정량적으로 평가하는 것은 실험실 뿐만 아니라 현장에서 매우 어려운 일이므로 아직까지는 이에 대한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 압력분사 그라우팅 네일과 기존의 네일을 동일한 사면에 시공하고 계측을 실시함으로써 거동특성의 차이를 확인하고 수치해석을 통하여 보강특성을 역해석함으로써 압력분사 그라우팅 네일에 의한 지반보강효과를 정량적으로 추적하고자 하였다.

## 2. 압력분사 그라우팅에 의한 지반 보강 효과

### 2.1 공법개요

압력분사 그라우팅 네일은 기존의 일반 네일공법과 동일한 천공경으로 지반을 굴착한 후 네일을 삽입하고 그라우트액을 지반에 따라 5~15kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 가압하여 보강하는 공법이다. 본 공법의 지반보강 기본 메카니즘은 주입관에 의한 구조체 보강뿐 아니라 이미 이완된 지반의 간극으로 시멘트 현탁액을 침투시켜 지반의 전체 강도를 증대시키는 공법이라는 점에서는 터널보강공사로 이용되는 강관다단그라우팅 공법과 유사하다고 할 수 있다. 그림

1은 압력분사 그라우팅네일 시공을 위한 공법개념도를 나타낸 것이다.

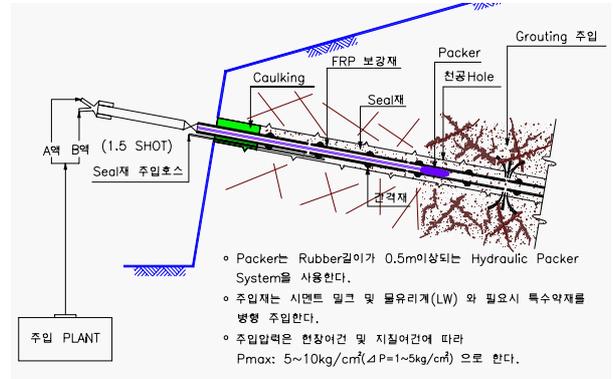


그림 1. 압력분사 그라우팅 네일 공법의 개념도

본 공법 시공시 그라우트제의 지반침투에 의한 보강효과를 극대화 하기 위하여 다단그라우팅을 실시하도록 설계되었다.

### 2.2 그라우팅에 의한 지반 강도 증가

#### 2.2.1 Ata & Vipulanandan 방법

Ata & Vipulanandan(1998)은 일축압축시험 및 인발시험 결과로부터 그라우트의 점착 및 부착강도가 silicate-grouted sand의 역학적 거동에 미치는 영향을 평가하였다. 일축압축시험을 위한 시편은 그라우트와 grouted sand에 대하여 각각 준비되었으며, 최대 2년까지 양생기간을 변화시켜가며 시험을 실시하였다. Grouted sand의 압축강도는 식 (1)에서와 같이 그라우트의 압축강도 및 부착강도( $\sigma^G$ ,  $\sigma^{AT}$ )와 지반의 간극비( $n_p$ )의 향으로 표현할 수 있다.

$$\sigma^{GS} = \frac{L\sigma^G + M\sigma^{AT}}{1 + N\sigma^G + P\sigma^{AT}} \quad (1)$$

여기서, L, M, N, 그리고 P는 모래와 그라우트의 특성에 따라 실험적으로 결정되는 계수이다. 계수 L과 M은 그라우트 체적비에 비례하며, N과 P는 모래의 초기 간극비, 입경 그리고 균등계수에 좌우된다.

지반의 간극비와 그라우트제의 압축강도 및 부착강도가

결정된다면, 식 (1)은 grouted sand의 압축강도를 추정하는 데에 이용될 수 있다. 초기 간극비 0.36, 균등계수 1.05인 Ottawa sand와 경험적인 값들에 대한 다중선형 회귀선을 이용하여 식(1)을 다음 식(2)로 표현하였으며, 그라우트 강도와 식 (2)으로부터 예측된 grouted sand의 강도는 그림 2와 같다.<sup>(5)</sup>

$$\sigma^{GS} = \frac{n_p \sigma^G + (1 - n_p) \sigma^{AT}}{0.26 + 0.37(\sigma^G + \sigma^{AT})} \quad (2)$$

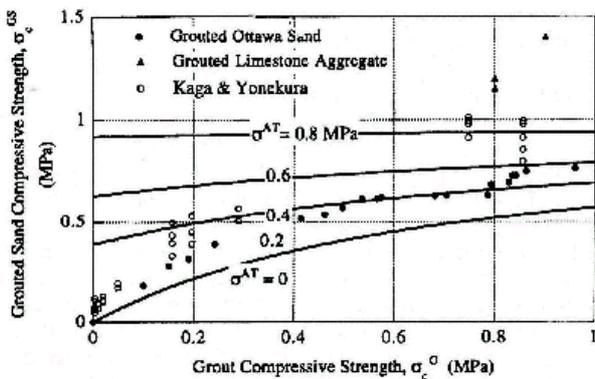


그림 2. 그라우트의 부착강도로부터 예측된 grouted sand의 압축강도

그라우트의 압축강도와 부착강도에 대한 실험결과가 없는 경우에는 그림 3과 4로부터 추정된 값을 이용하여 grouted sand의 압축강도를 구할 수 있다.

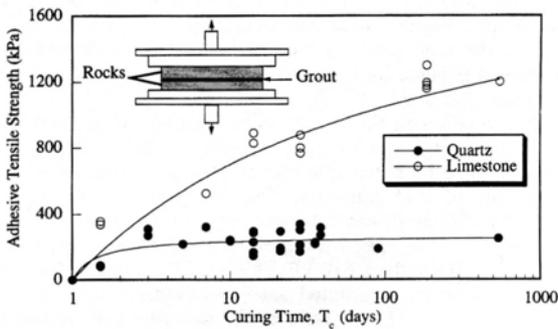


그림 3. 양생기간에 따른 그라우트의 압축강도

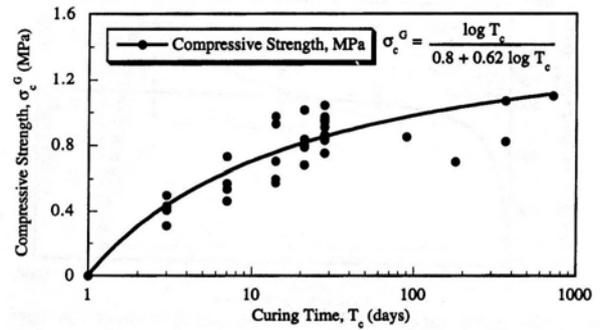


그림 4. 골재종류와 양생기간에 따른 부착강도 변화

### 2.2.2 시멘트현탁액 주입에 의한 신선한 암석절리의 강도특성 변화

김태혁 등(2000)은 주입에 의한 암석 절리면의 수직 압축특성과 전단특성 변화를 규명하기 위하여 신선한 인공절리에 대하여 시멘트현탁액을 주입한 후, 절리압축시험과 직접전단시험을 실시하였다. 화강암과 대리석에 대한 강도 시험 결과로부터, 절리면의 파괴식으로 가장 많이 적용되고 있는 Barton의 식에 기초하여 주입후 절리면의 최대전단강도 예측식을 식 (3)와 같이 제안하였다. 이 식은 절리간극이 비교적 크고 절리면이 신선한 경우에 대해서만 적용할 수 있으며, 절리압축강도가 주입재의 압축강도보다 작은 경우나 절리간극이 매우 작은 경우에는 적용할 수 없다.

$$\tau_p = c_i \sigma_n \tan \left[ \phi_{bi} + \alpha \frac{A}{F} \log(GCS/\sigma_n) \right] \quad (3)$$

- 여기서,  $c_i$  : 절리면과 주입재 접촉면의 점착력  
 $\sigma_n$  : 절리면에 작용하는 수직응력  
 $\phi_i$  : 편평한 절리와 주입재 사이의 접촉면 마찰각  
 $F$  : 주입두께와 관련된 팽창 감소함수  
 $GCS$  : 주입재의 단축압축강도  
 $\alpha$  : 시험상수 (절리면 거칠기 및 절리압축강도와 관련된 보정상수)  
 $A$  : 절리면 거칠기 계수

### 3. 암반사면 보강특성

#### 3.1 현장시험시공 및 계측

##### 3.1.1 현장 및 계측개요

압력분사 그라우팅 네일(천공직경 105mm,  $\phi$ 50mm,  $t=5$ mm)에 대한 시험시공은 경부고속도로 구미-동대구 간 확장공사 구간 중 절리면이 발달하여 사면의 안정이 문제시 되는 구간을 대상으로 시공하였다. 사면은 풍화암~연암 정도의 강도를 가지고 있으며, 시공중 일부 붕괴가 발생한 구간이다. 이 구간의 보강을 위하여 억지말뚝이 시공되고 그림 5에서와 같이 사면의 상부에는  $\phi$ 25mm 철근을 이용한 네일공법(천공직경 105mm)이 적용되고 하부에는 압력분사 그라우팅 네일공법이 적용되었다. 본 공사에서 압력분사 그라우팅 네일은 중공의 FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)관을 이용하였다.

지반거동 계측을 위한 계측기는 각각 네일 및 압력분사 그라우팅 네일에 설치되었으며 계측기 설치 세부내용은 그림 6과 같다. 본 사면에 보강된 압력분사 그라우팅 네일관의 길이는 8.0m의 것이 사용되었으며 시공 시 압력분사 그라우팅 네일관 위치별로 작용하는 응력 및 변형율을 측정하기 위하여 지표면에서부터 1.0m 이격되어 1.2m 간격으로 총 6개의 센서를 설치하였다. 또한 동일사면의 압력분사 그라우팅 네일 상부사면에 길이 10m의 네일이 시공되었으며 이 네일에도 응력 및 변형율 측정을 위한 센서가 설치되었다.

압력분사 그라우팅 네일관의 거동계측을 위한 계측기는 광섬유 격자센서를 이용하였으며 총 4개의 압력분사 그라우팅 네일관에 각각 6개의 광섬유격자센서가 그리고 1개의 압력분사 그라우팅 네일관에는 5개의 광섬유격자센서가 부착되어 총 29개의 센서에 의해 측정되었다. 또한 총 5개의 네일에도 30개의 광섬유격자센서가 부착되었다.

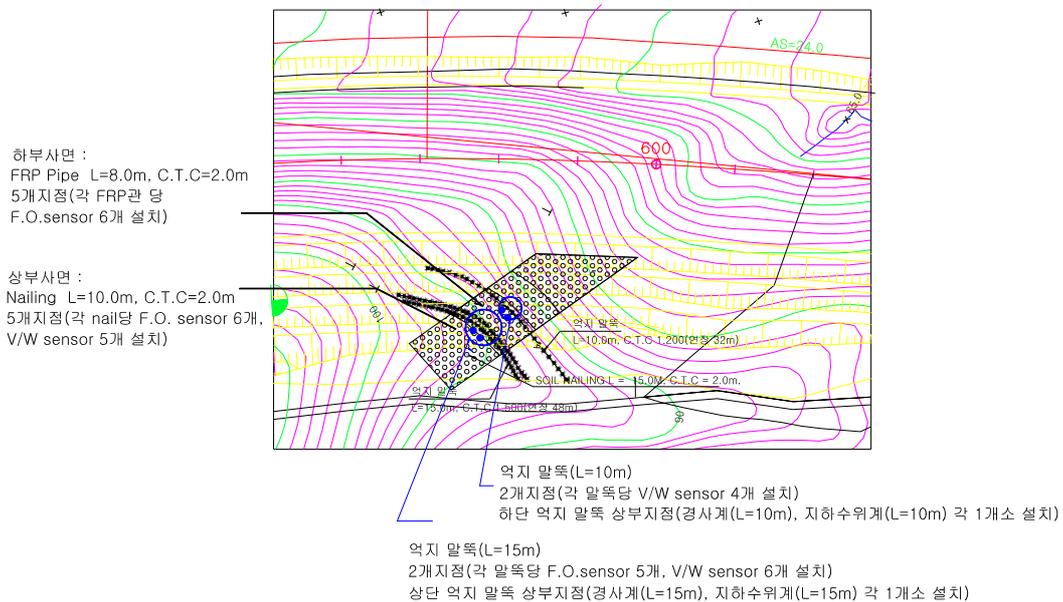


그림 5. 현장 보강 평면도 및 계측기 매설 개요도

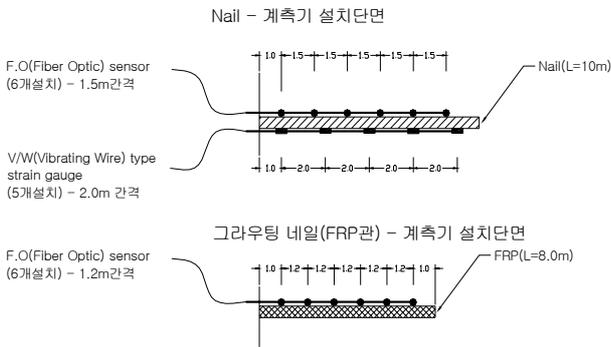


그림 6. 네일 및 압력분사 그라우팅 네일의 센서 설치 위치

일반적으로 구조물의 변형측정에 많이 사용되었던 빛의 간섭을 이용한 광섬유 센서는 변형율에 기인한 경로차에 의한 간섭신호로부터 변형율을 측정하는 방법을 이용한 것이나, 본 사면에 시공된 광섬유센서는 광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg grating sensor, FBG sensor)로서 변형율과 온도 등의 외란을 반사파장의 변이 측정을 통해 측정하는 원리로 구성된 것을 적용하였다. 이 센서시스템의 특징은 광섬유 한 라인상에 여러개의 센서를 배열하여, 통신상에 이용되던 파장분할 다중화기법을 사용함으로써 실제 구조물의 변형상태를 배열된 여러개의 센서로 동시에 다점 측정을 구현할 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한 출력신호가 변형에 대하여 선형적이며 센서가 광섬유 자체의 강도를 거의 유지하므로 강도특성 또한 우수하다는 장점이 있다(장 등, 2000).

### 3.1.2 압력분사 그라우팅 네일 거동 계측결과

압력분사 그라우팅 네일관의 거동계측은 총 5개의 관에 29개의 센서를 부착하여 2000년 7월 3일 초기계측을 실시한 이후 현재까지 지속적으로 계측을 실시중에 있으며 평균적으로 1회/3일 빈도로 측정 중에 있다.

그림 7은 2000년 7월 3일 초기계측 이후 각 압력분사 그라우팅 네일에서 최대 응력값을 나타내는 센서에 대한 시간별 응력 변화이다. 대부분 설치 후 초기계측이 시작된 이후 9월 중순까지 응력이 지속적으로 증가하며 증가속도 변화량이 많은 것으로 측정되었으며, 11월 이후의 응력변화는 거의 안정을 찾고 있는 것으로 판단된다. 이는 우리나라 기후 특성상 7월부터 9월중순까지의 강우량이 많으며,

이는 동일한 사면내에 설치된 간극수압계에 의한 지하수위 측정결과로부터로도 알 수 있다(그림 8).

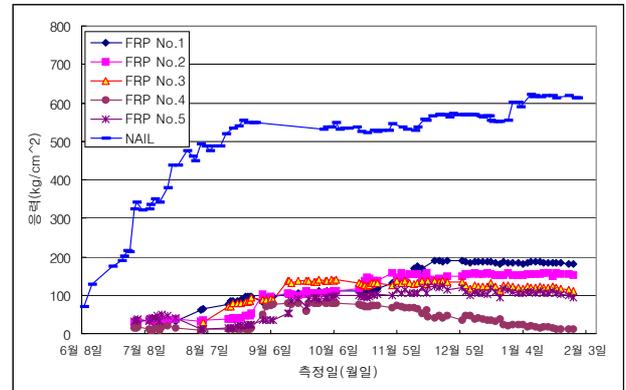


그림 7. 압력분사 그라우팅 네일관 및 네일의 응력변화량 계측결과(2000/7/3~2001/01/30)

압력분사 그라우팅 네일관에 부착된 센서에 의해 측정된 값은 No.1 그라우팅 네일관(FRP No.1)에서 최대 약 179.8kg/cm<sup>2</sup>의 응력을 받고 있는 것으로 측정되었다. 각 보강재별 최대응력이 발생한 위치는 표1과 같다.

표 1. 계측결과 각 보강재 별 최대 응력 발생위치

Nail 및 FRP관 번호	FRP No.1	FRP No.2	FRP No.3	FRP No.4	FRP No.5	Nail
최대응력 발생 위치 (지표면으로부터 거리, m)	4.6m	4.6m	4.6m	7.0m	3.4m	9.0m

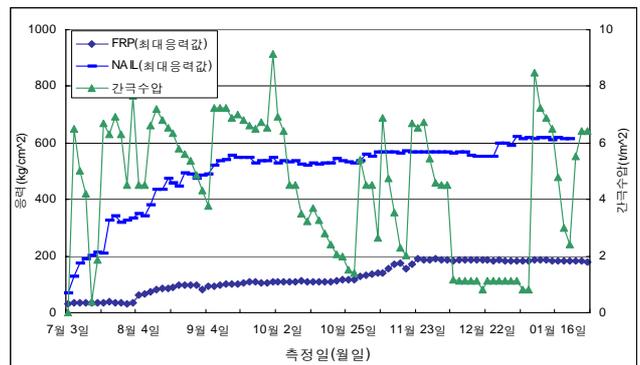


그림 8. 대상사면 간극수압계 측정결과와 사면내 지하수위 변동(2000/7/3~2001/01/30)

본 연구에서 압력분사 그라우팅 네일관으로 사용된 FRP 관의 인장시험결과에 의하면 인장파괴시 하중은 약 21ton 정도로서 인장강도는 약  $3,300\text{kg}/\text{cm}^2$  정도이고 계측결과 측정된 최대 응력은 이 값의 약 5.4% 정도이므로, 압력분사 그라우팅 네일에 의해 보강된 사면은 현재 안정에 별 문제 없는 것으로 판단된다(그림 9).

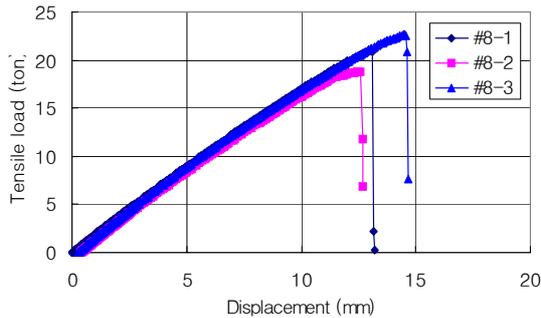


그림 9. 압력분사 그라우팅 네일로 이용된 FRP관의 인장시험 결과(하중-변위곡선)

또한, 압력분사 그라우팅 네일을 시공한 사면과 동일한 사면 소단 상부에 10m 길이의 네일이 시공된 상태이며 이 네일에 설치된 총 30개의 광섬유센서 중 현재까지 가장 큰 응력을 나타낸 값은  $613.33\text{kg}/\text{cm}^2$  으로서 압력분사 그라우팅 네일관에 설치된 최대 응력값인  $179.8\text{kg}/\text{cm}^2$ 에 비하여 약 3.4배 정도 크게 작용하고 있는 것으로 측정되었다. 이를 단면을 고려하여 하중으로 환산하면, 네일에 작용하는 하중은 약 3.01ton/ea 이고 압력분사 그라우팅 네일에 작용하는 하중은 약 1.27ton/ea 정도로 계산되므로 압력분사 그라우팅 네일에 의해 보강된 지반에서의 작용하중은 기존의 네일공법에 의해 보강된 부분에 비하여 약 42% 정도의 하중만이 작용하고 있는 것으로 평가된다. 이러한 경향은 최대값만을 비교한다는 점과 동일사면이라 하더라도 위치가 다소 다르다는 점에서 절대값의 비교에 다소 오차가 있을 수 있으나, 계측된 값의 경향을 비교할 때, 압력분사에 의한 그라우트재의 지반 충전으로 활동에 대한 저항력이 커졌기 때문이라 추정할 수 있다.

### 3.2 그라우트재에 의한 보강효과 추정방법

암반은 암반내에 여러 불연속면이 존재하고 지반의 강도

는 암반 불연속면의 특성에 좌우되게 된다. 이러한 불균질성과 이방성으로 인하여 암반 자체의 거동특성을 파악하기는 매우 어려운 일이며, 특히 그라우트재의 주입에 의해 거동특성이 어떻게 달라지는가에 대한 평가도 매우 어려운 문제이다. 그라우트재에 의한 주입효과를 현장 및 실험실에서 확인하고 정량화 하기란 매우 어려운 일이며, 특히 이러한 보강효과를 설계에 적용하고자 할 경우에는 지반의 불균질성으로 인해 많은 난관에 부딪히게 된다.

따라서, 본 논문에서는 현장에서 확인된 보강효과를 이용하여 역해석에 의해 지반강도의 증가정도를 추정하고자 하였다. 이를 위하여 동일한 사면에 시공된 네일과 그라우트 네일에서 측정된 응력변화로부터 수치해석기법을 이용하여 다음과 같은 절차를 거쳐 그라우트 네일의 효과를 역추적 하였다(그림 10).

- 1단계 : 동일한 사면에서 측정된 계측결과로부터 네일과 압력분사 그라우팅 네일의 응력 차이 분석
- 2단계 : 임의의 단면을 가정하여 유한차분해석을 통한 지반강성별 각 네일에 작용하는 응력을 계산
- 3단계 : 각 네일에 작용하는 응력을 이용하여 한계평형 해석법으로 가정한 사면의 안전율을 계산
- 4단계 : 그라우트재의 지반보강효과를 고려하여 각 네일에 작용하는 응력의 일부를 감소시킨 후 가정한 사면의 안전율 재 계산
- 5단계 : 감소된 안전율은 지반강도를 증가시켜 당초 안전율을 확보 할 때까지 시행착오 계산
- 6단계 : 당초의 네일 응력과 증가된 지반강도정수를 이용하여 안전율을 계산하고, 이때 당초에 비하여 증가된 안전율이 당초 안전율이 될 때까지 네일의 중심간 간격을 변화하며 시행착오 계산

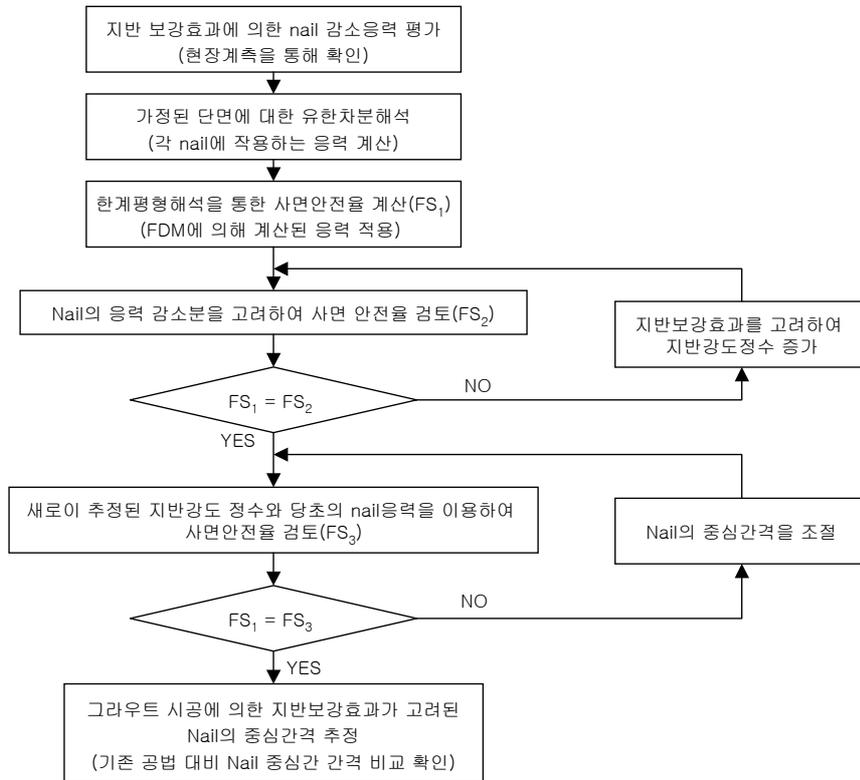


그림 10. 그라우트재에 의한 지반보강효과 추정을 위한 역해석 절차

### 3.3 수치해석에 의한 지반보강효과 추정

#### 3.3.1 유한차분해석

수치해석에 의한 지반보강효과의 추정은 앞에서 언급한 절차를 이용하여 진행되었으며, 유한차분해석은 FLAC\_2D 프로그램을 이용하였다.

지반보강효과 추정을 위해 사용된 사면은 높이 10m, 경사 1:0.5(V:H)로서 네일은 총 5단이 중심간격 1.5m 간격으로 설치되었으며, 해석에 이용된 지반강도정수는 표 2와 같다. 해석은 지반의 강도정수를 일정하게 유지한 채 탄성계수를 변화시키며 해석을 실시하여 각 네일에 작용하는 응력을 계산하였다(그림 11 및 12). 탄성계수는 풍화암의 상태에 따라 약한 풍화암에서 강한 풍화암 정도의 일반적인 값을 적용하였으며 각각 3,000t/m<sup>2</sup>, 5,000t/m<sup>2</sup>, 10,000t/m<sup>2</sup>일 경우에 대해 해석을 실시하였다.

표 2. 지반보강효과 추정을 위해 해석에 사용된 지반 강도정수

지반 종류	단위 중량	점착력	내부 마찰각	탄성계수	비고
풍화암	2.0t/m <sup>3</sup>	3.0t/m <sup>2</sup>	35(deg.)	E=3,000 t/m <sup>2</sup> E=5,000 t/m <sup>2</sup> E=10,000 t/m <sup>2</sup>	

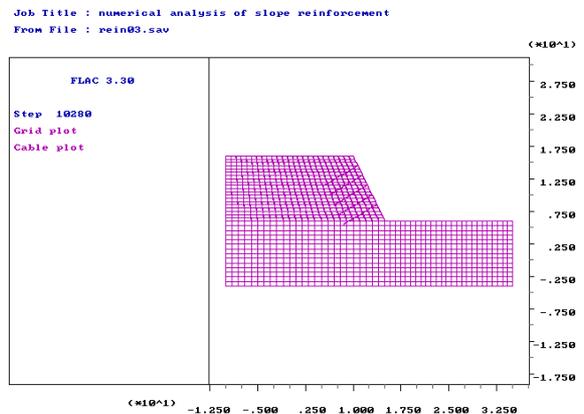


그림 11. 네일의 응력검토를 위한 mesh

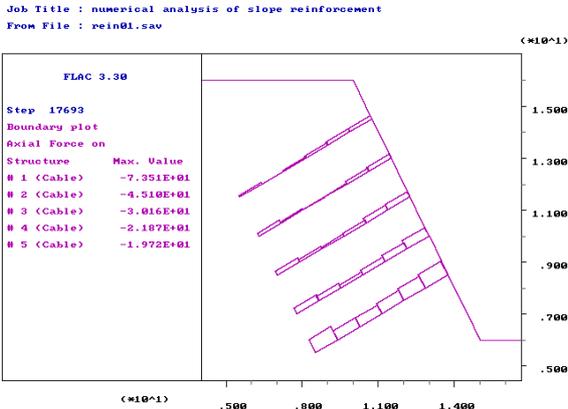


그림 12. 각 네일의 작용응력(지반 E=3,000t/m<sup>2</sup>)

해석결과 계산된 각 네일의 응력은 표 3과 같다.

표 3. 지반의 강성변화에 따른 각 네일의 작용응력

지반 탄성계수	네일에 작용하는 하중(ton/ea)				
	1단 (최상부)	2단	3단	4단	5단 (최하부)
E=3,000t/m <sup>2</sup>	1.23	1.24	1.98	2.93	6.02
E=5,000t/m <sup>2</sup>	1.42	1.31	1.70	2.61	4.66
E=10,000t/m <sup>2</sup>	1.32	1.23	1.26	1.92	3.04

### 3.3.2 역해석에 의한 그라우트 보강효과 추정

기존의 네일공법과 그라우트 네일공법의 현장계측결과 최대응력이 발생하는 네일을 대상으로 비교하였을 경우, 그라우트 네일공법에 의해 시공된 네일에 작용하는 하중은 기존의 네일에 작용하는 하중에 비하여 약 42%정도인 것으로 측정되었다. 그라우트 네일에 작용하는 하중이 상대적으로 작은 것은 그라우트 주입에 의해 강성이 증가된 지반이, 나머지 응력을 지지하고 있기 때문인 것으로 추정할 수 있다. 따라서, 유한차분해석으로부터 구한 각 네일에 작용하는 하중을 임의로 각각 80%, 60%, 40%로 감한 후 각각의 경우에 대해 한계평형해석을 실시하고 이를 대상으로 역해석하였다.

파괴활동면은 지반의 탄성계수가 3000t/m<sup>2</sup>일 때의 네

일응력을 적용하여 구한 활동면으로 고정하여 해석함으로써, 지반강도정수의 변화에 따른 활동면의 변화를 최소화하고자 하였다.

해석은 TALREN97 프로그램을 이용하였으며, 해석시 지반물성치는  $\gamma=2.0t/m^2$ ,  $c=3.0t/m^2$ ,  $\phi=35^\circ$ 를 적용하였다. 탄성계수의 변화에 따라 산정된 네일의 응력을 이용하여 사면의 안전율을 계산하고, 각 네일의 응력이 80%, 60%, 40%로 감해질 때의 사면안전율을 계산한 후, 감해진 네일의 응력에 의해 감소된 사면안전율이 원 응력인 100%의 네일 응력이 작용할 때의 안전율과 동일하도록 지반강도정수 중 점착력을 증가시켰다. 그 후 증가된 안전율이 다시 원 상태의 안전율이 될 때까지 네일의 간격을 늘이는 방법으로 진행하였다. 단, 해석시 동일한 개수의 네일을 설치하더라도 네일의 설치위치에 따라 다른 안전율이 계산되므로 해석단면상에서 네일의 수직간격은 고정된 채 수평간격만을 조정하여 개개의 네일이 지지할 수 있는 면적을 변화시켰다.

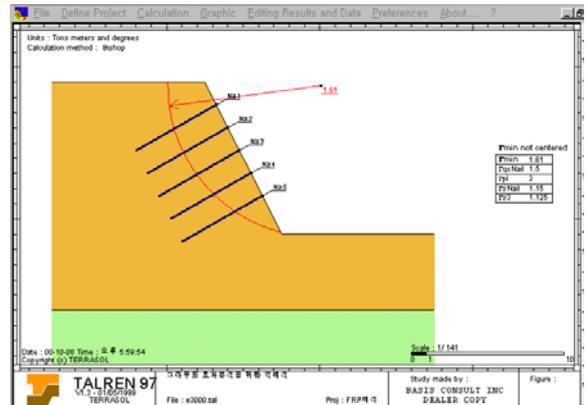


그림 13. 가정된 사면의 안정해석(한계평형해석, E=3000t/m<sup>2</sup>일 경우 네일 응력 고려)

네일의 응력감소는 그라우트 주입에 의한 지반보강에 기인한 것이므로 이를 고려하여 네일의 응력감소에 의한 것만큼 지반강도정수를 증가시켜, 동일한 사면안전율을 확보할 때의 네일의 간격을 결정한 결과는 그림 14와 같다.

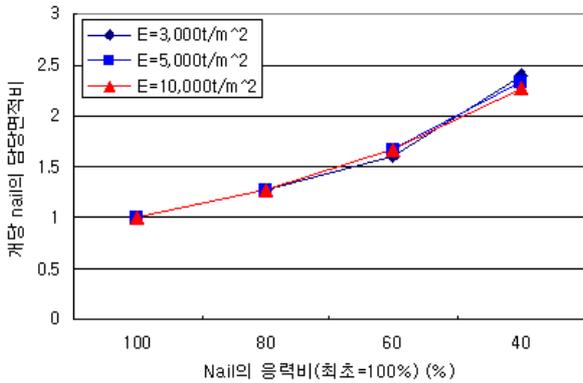


그림 14. 네일의 응력감소에 따른 개당 네일의 담당면적 비

해석결과 네일의 응력감소분이 클수록 즉, 그라우트에 의한 지반 응력분담율이 커질수록 개개의 네일이 분담하는 면적이 커지는 것으로 나타났으므로, 그라우트 네일에 의한 지반보강으로부터 시공되는 네일의 중심간 간격을 늘임으로써 전체적인 경제성을 확보할 수 있을 것이라 판단된다.

#### 4. 결론 및 고찰

본 논문에서는 절리가 발달해 있는 풍화암 사면에 대해 압력분사 그라우팅 네일 공법의 지반보강 특성을 파악하기 위하여 동일사면에 각각 기존의 네일공법과 압력분사 그라우팅 네일 공법을 병행하여 시공하였으며, 각각에 대한 장기거동을 계측함으로써 지반보강 거동 차이를 분석하였다. 이에 대한 결과는 다음과 같다.

1. 계측결과, 압력분사 그라우팅 네일에 작용하는 응력은 일반 네일에 비하여 전체적으로 작은 응력만이 작용하고 있는 것으로 나타났으며, 최대 응력 값을 비교한 결과 지반을 가압그라우팅 하지 않은 일반 네일에 비하여 약 40%정도의 응력만이 작용하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 경향으로 부터 압력분사 그라우팅 네일 시공에 의해 그라우트재로 보강된 지반의 저항력이 증가된 것이라 추정할 수 있다.
2. 압력분사 그라우팅에 의해 증가된 지반의 보강효과를 추정하여 설계인자로 이용하기 위해서는 지반강도 증가 정도의 정량화가 필요하며, 이를 위하여 그라우트 네일에 작용하는 응력 감소분을 그라우트에 의해 보강된 지반이 분담하는 것으로 가정하여, 지반의 강도증대 정도를 역추적하는 기법을 제안하였다.
3. 제안된 역추적 기법에 의해 가상단면을 수치해석한 결과 지반자체의 하중분담율이 증가하여, 네일에 작용하는 응력이 점차 줄어들음에 따라 동일한 안전율을 확보하는 압력분사 그라우팅 네일의 개수가 줄어들게 되고, 본 연구에서 가정한 단면의 경우는 네일응력이 약 40% 정도로 감소될 경우, 압력분사 그라우팅 네일의 1개당 담당면적은 일반 네일에 비하여 약 2.3배 정도까지 증가될 수 있는 것으로 나타났다.
4. 풍화암 사면에 시공된 압력분사 그라우팅 네일공법의 보강효과는 계측결과를 통하여 일부 확인할 수 있었으며, 향후 이어질 연구에서는 암반의 절리특성을 고려한 다양한 지반조건에서의 보강특성에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

(접수일자 2001. 12. 1)

#### 참 고 문 헌

1. 김홍택(1998), "압력분사 그라우팅 유효경 평가기법 및 실내모형 실험", 한국지반공학회 가을학술발표회, pp. 305~312.
2. 이준석(1999), "탄성파 및 역해석 기법을 이용한 침투그라우팅의 보강효과 검증에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제19권, 제III-6호, pp.1135-1142.
3. 장현삼(1999), "시추공 탄성파탐사 및 이의 토목공학적 응용", 한국지구물리탐사학회 학술발표회, pp. 176~201.
4. 황영철(2000), "토사사면에서의 FRP보강 그라우팅 공법 적용성 평가", 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp. 571~574.
5. Alaa Ata and Cumaraswamy Vipulanandan(1998), "Cohesive and Adhesive Properties of Silicate Grout on grouted-Sand Behavior", Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, pp. 38~44.
6. Hobst, L. and Zajic, S.(1983), "Anchoring in Rock and Soil", Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
7. Rovert E. Sheriff and Lloyd P. Geldart(1995), Exploration Seismology, Cambridge University Press, pp. 425~448.