

# 접이식 웨지 장착 강관네일의 현장 인발시험 및 3차원 유한요소해석

## Field Pull-out Test and 3-D FEM Analysis for Steel Pipe Nailing Installed Foldable Wedge

권교근\* · 최봉혁\*\*

Kwon, Kyo-Keun · Choi, Bong-Hyuck

### Abstract

In this study, field pull-out test and 3-D FEM analysis have been performed for examining and reflecting the behavior of steel pipe nailing installed foldable wedge. Field pull-out test was performed under various conditions. As a result, the steel pipe nailing installed foldable wedge has an effect of pull-out resistance increased about 30% in comparison with non-wedge type steel pipe nailing. Through back analysis in 3-D FEM for behavior of non-wedge type steel pipe nailing, friction characteristics between nail to soil was analyzed and obtained first consistent with field pull-out behavior. Then, the frictional characteristic was used for analyzing the behavior of the steel pipe nailing installed foldable wedge. The result was compared with the test results. Consequently, friction coefficient ( $\mu$ ) of about 1.2 between grout to soil leads to good agreement with analysis results and test results. And a limited pull-out resistance,  $T_L \cong 32$  tonf is similar to field pull-out test result which is improved about 33% in comparison with non-wedge type steel pipe nailing's  $T_L \cong 24$  tonf.

**Keywords** : steel pipe nailing, foldable wedge, pull-out test, 3-D FEM analysis

### 요 지

본 연구에서는 접이식 웨지를 장착한 강관네일의 거동 특성 평가를 위해 현장인발시험 및 3차원 수치해석을 수행하였다. 접이식 웨지를 장착한 강관네일의 현장인발시험 결과 접이식 웨지가 없는 경우에 비해 약 30% 정도의 인발 저항 증진효과가 있는 것으로 평가되었다. 한편, 강관네일의 합리적인 인발거동 분석을 위해 3차원 수치해석에서는 접이식 웨지가 장착되지 않은 강관네일의 역해석을 통하여 현장 인발거동과 일치하는 네일과 지반사이의 마찰 특성을 평가하고, 이를 접이식 웨지가 장착된 강관네일의 해석에 도입하여 그 거동을 분석하였다. 시행착오를 통한 역해석 결과 그라우트와 지반 사이의 마찰계수( $\mu$ )는 약 1.2 정도가 발휘되는 것으로 평가되었으며, 강관네일의 극한인발저항력은  $T_L \cong 32$  tonf으로 접이식 웨지가 장착되지 않은 네일의  $T_L \cong 24$  tonf 보다 약 33% 증가하는 것으로 평가되어 현장인발시험결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 강관네일, 접이식 웨지, 인발시험, 3차원 유한요소해석

### 1. 서 론

일반적으로 쏘일네일(Soil Nailing) 공법은 토사 지반의 취약한 전단강도 보강을 위하여 지반내에 보강재를 설치하고 그라우트 주입 고결로 보강재와 원지반과의 일체화된 상호 거동을 유도함으로써 도로 건설이나 부지 조성 시 발생하는 자연 지반 절취 비탈면의 안정성을 향상시키기 위한 목적으로 널리 적용되는 보강공법이다. 쏘일네일 공법은 1972년 프랑스에서 철도사면 보강에 최초로 적용되었으며, 국내의 경우 1993년 대구 동아일보 사옥 지하 터파기 공사에 처음

으로 사용된 이후 터파기 및 비탈면 보강공법으로 널리 사용되고 있다(건설교통부, 1997).

쏘일네일에 작용하는 내력은 쏘일네일 보강 구조체의 상호 거동에 의해 미소 변형이 유발되는 한도에서는 네일에 대부분 인장력만이 작용하게 되고, 변위가 증가하여 파괴에 이르게 될 경우는 인장력뿐만 아니라 전단응력과 휨 모멘트도 함께 작용하게 된다(이송 등, 2001). 따라서 쏘일네일 공법의 설계는 네일에 작용하는 인장력, 전단력 등을 고려하여 사면 안정해석 방법에 적용하는 한계평형해석법이 주로 사용되거나 아직까지 세계적으로 공인된 설계방법은 없다. 근래

\*정회원 · (주)평화지니어링 상무

\*\*교신저자 · 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원 (E-mail : bhchoi@kict.re.kr)

들어 한계평형이론에 운동학적 이론을 추가한 Kinetic법과 FHWA (Federal Highway Administration, 1996)에서 제안한 설계법이 적용되고 있다(주용선 등, 2008).

한편, 강관네일(Steel Pipe Nailing) 공법은 지반을 천공한 후 강관 보강재를 삽입하고 천공홀 내에 그라우트를 주입하여 보강재와 지반 사이를 일체화시켜 지반 변형을 억제시키는 공법이다. 일반적으로 강관네일의 인발력은 그라우트의 주입방법에 따라 변화하며, 최근 무압 또는 매우 낮은 압력의 그라우팅에 의해 이완된 지반을 보강하거나 균열 및 절리가 매우 심한 지반, 지하수위가 높은 지반 등에서 발생하는 문제점을 개선한 가압식 강관 네일링공법에 대한 연구가 보고되고 있다(최동남 등, 2007).

본 연구에서는 기존 강관네일의 인발저항 특성 강화를 위하여 접이식 웨지를 개발하고 이를 장착한 강관네일의 현장 극한인발시험을 실시한 후 그 결과를 바탕으로 3차원 유한요소 해석을 통하여 그라우트와 지반사이의 마찰특성을 평가하고, 접이식 웨지 장착에 따른 인발변형 거동 특성을 분석하였다.

## 2. 현장 인발특성 평가 결과

### 2.1 현장 인발시험 개요

현장 인발시험은 동일한 지반조건에서 접이식 웨지가 장착된 강관네일과 이를 장착하지 않은 네일의 인발시험 결과를 비교하여 접이식 웨지가 인발저항에 미치는 영향을 검증하고자 수행하였다. 인발시험 현장은 경기도 ○○도로 개설공사 구간의 높이 약 30m인 풍화토층 절취사면으로 상부 지층은 심한풍화~완전풍화 상태, 하부에서는 보통정도의 풍화상태를 나타내었으며 천공시 지하수위는 확인되지 않았다(표 1 참조). 강관네일( $\phi 42.7\text{mm}$ ,  $t 2.6\text{mm}$ )은 그림 1에서 보는

것과 같이 풍화토층을 대상으로 설치하였으며, 저면으로부터 약 2.5m 높이에서 상호 간섭효과를 배제하기 위해 600cm 길이의 네일을 수평 간격(C.T.C) 4m로 10공을 천공( $D114.3\text{mm}$ , HX천공)하여 접이식 웨지를 장착하지 않은 네일(nail #1)과 접이식 웨지를 장착한 9개(nail #2~#10)의 네일을 설치하였다. 초기인발 후 네일의 평균정착 길이는 약 540cm 정도이며, 웨지 블레이드의 길이는 nail #2~#8까지는 10cm, nail #9와 #10은 8cm의 블레이드를 사용하였다.

한편, 그라우트 주입은 강관네일 2.0m당 1개소 씩 설치된 패커를 이용하여  $p \approx 5.0\text{ kgf/cm}^2$  정도의 가압주입을 실시하여 강관네일과 그라우트의 일체 거동을 유도하였으며, 시험에 따른 인발거동은 풍화토 지반인점을 감안하여 그라우트와 지반 사이에서의 인발파괴를 예상하였다.

인발시험은 CLOUTERRE(1991)에서 제안한 변형률제어방식(변위속도 1mm/min)에 의해 극한인발시험(controlled displacement pull-out test)을 실시하였으며, 네일 두부에서의 인발력( $T_0$ )-변위( $y_0$ ) 관계도를 얻고 이를 이용하여 네일의 극한 인발력( $T_L$ ,  $T_{ult}$ )과 인발강성계수,  $K_\beta$ (곡선의 초기 기울기), 단위주면 마찰저항( $q_s$  또는  $u_{max}$ )을 평가하여 비교하였다.

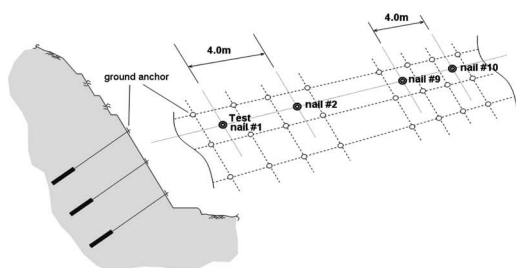
한편, 인발하중을 가하는 인발 Jack은 허용인발력 45tonf의 제품을 이용하였으며, 반력판은 최초로 실시한 nail #10의 경우 30cm×30cm의 반력판을 사용하였으며, nail#1~nail#9의 경우 60cm×60cm인 반력판을 사용하였다.

### 2.2 접이식 웨지 개요

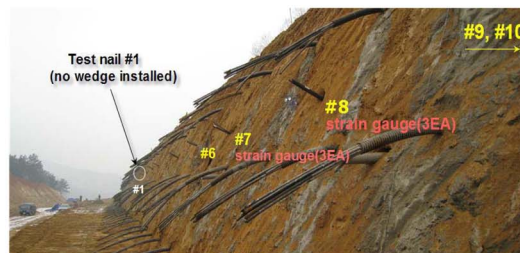
접이식 웨지는 가압 그라우팅에 의한 강관네일의 인발력 향상을 위하여 강관 외부에 설치되는 삼발이 구조의 3개 블레이드(blade)로 구성되며, 접이식 웨지 블레이드는 패커의 팽창으로 작동되어 초기인발을 가함으로써 지반에 정착되도록 고안되었다. 외부 패커의 팽창으로 웨지 블레이드를 공벽

표 1. 지반조건 및 조사결과

구분	지층 및 SPT		지층 구성 상태	공내전단시험(BST)	
	층후(m)	N		BH-1	BH-2
풍화토	8.0	15/30 ~ 50/12	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 실트질 모래로 구성</li> <li>• 모암 조직 잔존, 습윤 상태</li> </ul>	$c = 1.1\text{t/m}^2$ $\phi = 27.47^\circ$ $(N=50/23)$	-
풍화암	1.8~4.3	50/10 ~ 50/1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 암편 섞인 실트질 모래</li> <li>• 심한풍화, 모암조직 및 구조 잔존</li> </ul>	-	$c = 2.4\text{t/m}^2$ $\phi = 29.68^\circ$ $(N=50/23)$
발파암	2.0~2.7	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 편마암, 심한풍화~보통풍화</li> <li>• 단주~장주 상태의 코아 회수</li> <li>• TCR: 45.8~96.0%, RQD: 6.0~78.0%</li> </ul>	-	-

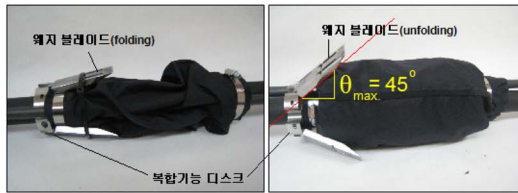


(a) 시공 단면 모식도

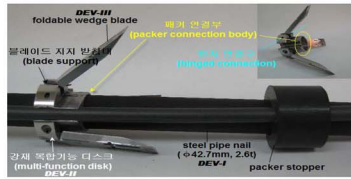


(b) 시공 후 모습

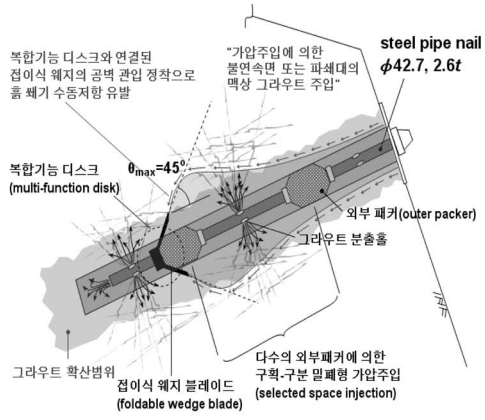
그림 1. 인발시험을 위한 강관네일 설치 모습



(a) 웨지 팽창 전·후



(b) 접이식 웨지 구조



(c) 인발저항 모식도

그림 2. 접이식 웨지 구조 및 인발저항 모식도

에 완전 밀착시킨 후 초기 인발을 가하면 3개의 블레이드는 천공벽 지반에 근입되면서 벌어지는 구조로 되어있다. 이때 웨지 블레이드는 최대 확장각( $\theta_{max}=45^\circ$ )에 도달하면 더 이상 벌어지지 않고 고정된 상태로 2차 그라우트 주입에 의해 고정되어 지반과 일체화 된다. 지반에 근입된 삼발이 구조의 웨지 블레이드는 인발저항 발휘 시 수동저항을 유발하는 정착체 역할을 하게 된다(그림 2 참조). 이로 인해 접이식 웨지 장착 강관네일링에서는 기본적으로 그라우트 고결체와 지반과의 표면마찰저항을 기대할 수 있으며 천공벽 지반에 근입된 웨지 블레이드의 흠 췌기 역물림 수동저항 효과로 인하여 복합적인 인발저항을 발휘하게 된다.

### 2.3 현장 인발시험 결과

#### 2.3.1 하중-변위관계도( $T_o$ - $y_o$ curve) 분석

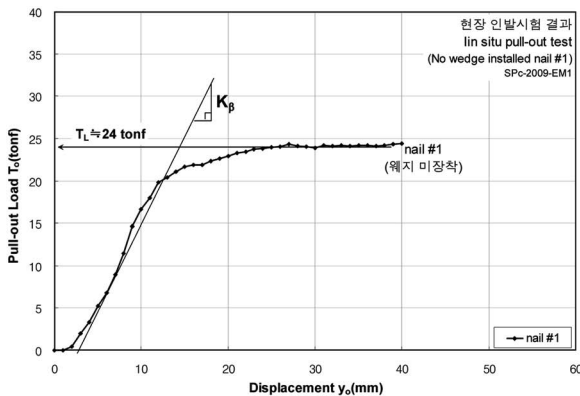
현장 인발시험에 따른 하중-변위 관계는 그림 3에서 보는 바와 같이, 웨지 미장착 네일(nail #1)에서는 항복하중 이후 인발하중이 일정 값에 수렴하는 반면, 접이식 웨지 장착 네일(nail #2~nail#9)에서는 항복 하중 이후에도 인발하중이 일정 값에 수렴하지 않고 미미하나 계속 증가하며 하중-변위 곡선의 초기 접선 기울기(인발강성계수,  $K_\beta$ )가 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보였다. nail #10의 경우 상대적으로 작은 반력판(30cm×30cm) 사용에 따라 인발 시 충분한 인발 하중-변위 특성이 나타나지 않은 것으로 판단된다.

이때, 웨지 장착 네일은 웨지 미장착 네일에 비해 극한인발력( $T_L$ )이 약 1.033~1.383배로 평균 30% 정도 증가하였으며, 단위주면 마찰저항( $q_s, u_{max}$ )의 경우 약 1.037~1.389배, 인발강성계수( $K_\beta$ )의 경우는 약 1.0~2.4배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 여기서, 극한인발력( $T_L$ )은 nail#1이 항복 후 수렴을 보이는 변형 수준인  $y_o(i)=30\text{mm}$ 을 기준으로 평가하였다.

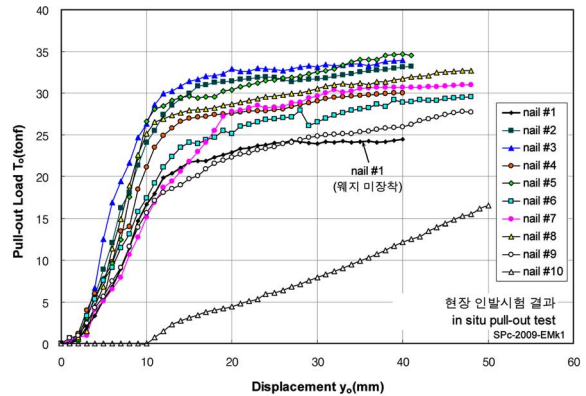
#### 2.3.2 변형률계 측정에 의한 네일의 인장력 분석

네일의 인장력 계측 및 분석은 변형률계를 이용한 네일 축 방향 발휘 인장력 계측결과를 보여주는 그림 4에서 보듯이 nail#8( $l_{blade}=10\text{cm}$ )에 설치한 변형률계로부터 측정된 변형률과 해당 변위 단계의 인장력 변화 및 축 방향 분포형태를 분석하여 단계별 인발 저항력 전이거동을 분석하였다.

계측결과에 따르면 인발시험 시 강관네일에 발생하는 인장력은 접이식 웨지의 영향을 반영하고 있는 것으로 보인다. 두부변위( $y_o$ ) 20mm 수준에서 SG#1, SG#2는 그라우트체와 주변지반과의 주면마찰저항 항복으로 인해 발휘 인장력의 감소가 나타난 반면, 접이식 웨지 너머에 위치한 SG#3의 경우에는 인장력의 감소가 미미한 것으로 나타났다. SG#3의 미미한 인장력 감소는 접이식 웨지에 의한 인발하중 재분배 시 직접적인 영향권 밖에 위치하게 되어 상대적으로 서서히 하중 전이가 발생하는 것으로 판단된다.

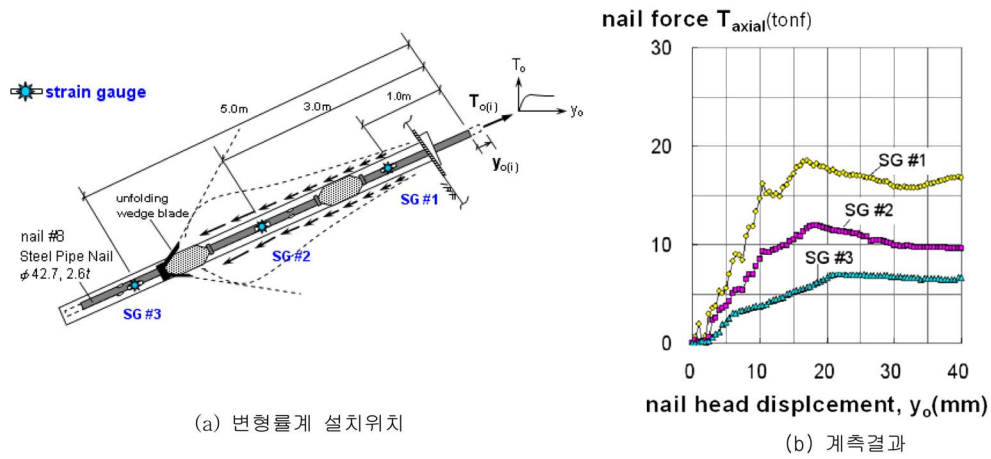


(a) 웨지 미장착 네일 인발시험 결과



(b) 전체 인발시험 결과

그림 3. 현장 인발시험에 의한 하중-변위관계도( $T_o$ - $y_o$  curve)



(a) 변형률계 설치위치

(b) 계측결과

그림 4. 변형률계를 이용한 네일 축 방향 발휘 인장력 계측결과

### 3. 3차원 유한요소해석에 의한 접이식 웨지 강관 네일의 인발거동

현장인발시험결과 접이식 웨지는 풍화토 지반에서 약 30% 정도의 인발저항 증진효과가 있는 것으로 평가되었다. 이때, 접이식 웨지는 블레이드의 공벽 근입으로 그라우트 주입 고결에 의해 완전한 정착이 이루어지면서 인발저항 증진이 발생하는 것으로 판단된다. 유한요소해석은 이러한 역학적 거동원리(mechanism)를 해석적 방법으로 확인해 보고 강관네일 설계 인자를 정량적으로 분석하기 위하여 수행하였으며, 그 결과를 인발시험결과와 비교하였다.

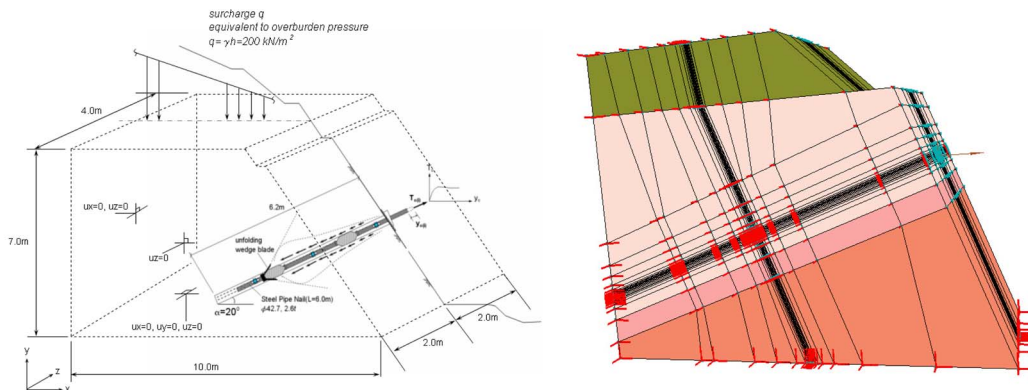
#### 3.1 해석범위

유한요소해석은 흙과 암반, 지중 구조물, 굴착, 흙-구조물 상호 작용에 대한 모사가 가능한 지반전용 해석프로그램인 Z\_Soil 3D, version 6.26x를 이용하여, 인발시험 현장을 대

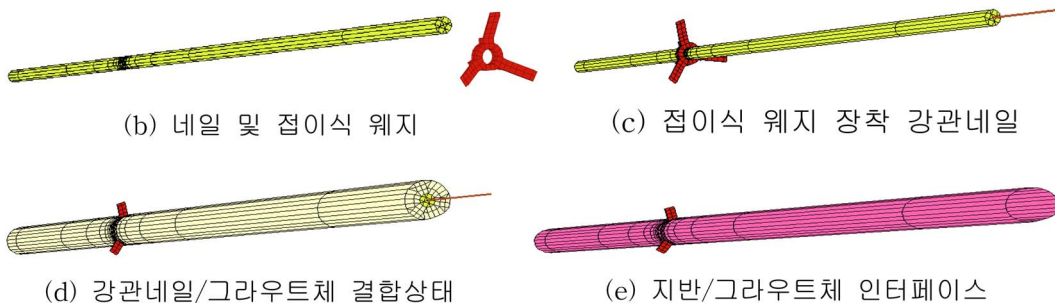
상으로 접이식 웨지가 장착된 네일과 접이식 웨지가 장착되지 않은 네일을 모델링하고 극한인발시험 절차를 해석과정에 도입하여 수행하였다(그림 5 참조).

유한요소해석 단면은 현장 인발시험 시 상호 간섭효과를 배제하기 위해 고려한 설치간격 C.T.C=4.0m 범위를 적용하였으며, 연직방향으로는 사면의 전체 높이가 30m에 달하여 이를 실 모델 그대로 고려할 경우 요소 수가 지나치게 많아지기 때문에 사면 상부 높이를 고려하여 등가 상재하중으로 처리하였다.

한편, 시험대상 네일은 현장 인발시험 시 그라우트체와 지반사이에서 인발과파가 발생하였으므로, 유한요소해석 시 이를 고려하여 그라우트체와 지반과의 인발 과파거동을 유도하였다. 이를 위하여 그라우트체와 지반 사이의 마찰 거동을 모델링할 수 있는 인터페이스를 도입하였다. 우선 접이식 웨지가 설치되지 않은 네일을 대상으로 시행착오법에 의한 역해석을 통하여 그라우트체와 지반 사이의 마찰 특성치를 결



(a) 유한요소해석 단면 모델



(b) 네일 및 접이식 웨지

(c) 접이식 웨지 장착 강관네일

(d) 강관네일/그라우트체 결합상태

(e) 지반/그라우트체 인터페이스

그림 5. 해석 단면 및 해석에 적용된 유한요소망(Finite Element Mesh)

표 2. 유한요소해석에 적용한 재료특성 및 변형모델

No.	재 료	$\gamma$ (tonf/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$E_s$ (tonf/m <sup>2</sup> )	$\phi$ ( $^{\circ}$ )	$c$ (tonf/m <sup>2</sup> )	파괴규준
1	풍화토	1.9	0.33	3,500	27	1.1	Drucker-Prager
2	풍화암	2.2	0.30	5,000	35	25	Drucker-Prager
3	연암	2.3	0.25	300,000	40	50	Drucker-Prager
4	접이식 웨지	7.8	0.18	$2.1 \times 10^7$	-	-	Elastic
5	그라우트 <sup>1)</sup>	2.2	0.20	$2.0 \times 10^6$	-	-	Elasto-perfect plastic
6	강관네일	7.8	0.18	$2.1 \times 10^7$	-	-	Elastic

1) 그라우트 :  $E_c = 4.73 \sqrt{f_{ck}} = 2.0 \times 10^6 \text{ tonf/m}^2$ ,  $f_c = 2,000 \text{ tonf/m}^2$ ,  $f_t = 200 \text{ tonf/m}^2$ , tensile strain failure  $\epsilon_f = 0.01\%$  (Neville, 1996)

정하였으며, 이를 접이식 웨지가 장착된 네일의 해석에 적용하여 그 해석 결과를 현장 인발시험결과와 비교하였다.

### 3.2 재료특성 및 변형모델

유한요소해석 시 재료는 지반의 경우 연속체 요소로서 탄소성 재료로, 강관네일과 접이식 웨지 및 웨지 블레이드는 탄성재료로, 그라우트체는 탄소성 거동 재료로 고려하였다(표 2 참조). 한편, 그라우트체와 지반과의 접촉면에 대한 인터페이스 요소는 마찰-미끄러짐 거동(frictional slip behavior)을 모사할 수 있도록 Coulomb 마찰 모델을 이용하였으며, 하중의 제어는 Z\_Soil에서 지원하는 시간에 따른 하중 변화를 모사할 수 있는 load-time function을 이용하여 항복하중을 제어하고 항복 이후의 거동에 대해서는 마찰-미끄러짐 거동(linear elasto-plastic; cutting-plane procedure)이 구현되도록 하였다. 이때, 항복하중의 제어는 현장인발시험에서 얻은  $T_o-y_o$  곡선 상의 항복하중 값을 적용하였다.

### 3.3 유한요소해석 결과

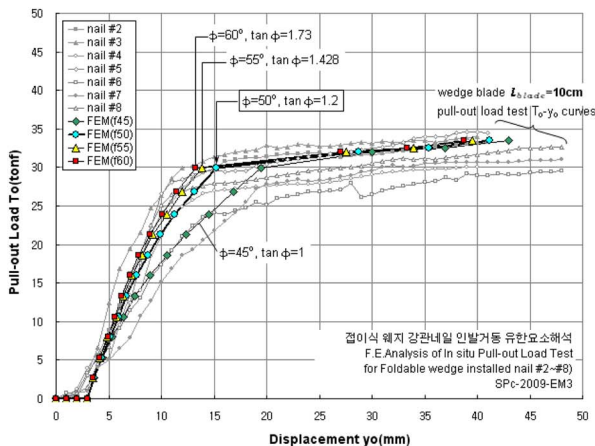
#### 3.3.1 역해석을 이용한 그라우트/지반 마찰계수 평가

그라우트/지반 마찰계수(friction coefficient,  $\mu = \tan \phi$ ) 평가는 현장 인발시험에서 얻어진  $T_o-y_o$ (measured) 곡선으로부터 인발 초기 반력관이 자리 잡기까지의 변위거동에 대해 보정을 취한  $T_o-y_o$ (modified) 곡선을 얻고, 이를 원점으로 수평 이동시킨  $T_o-y_o$ (transposition) 곡선을 이용하여 수행하였다(그림 6(a) 참조). 그라우트/지반의 마찰각은 접이식 웨지가 장착되지 않은 경우에 대해 인터페이스의 마찰각( $\phi$ )을  $45^{\circ} \sim 55^{\circ}$

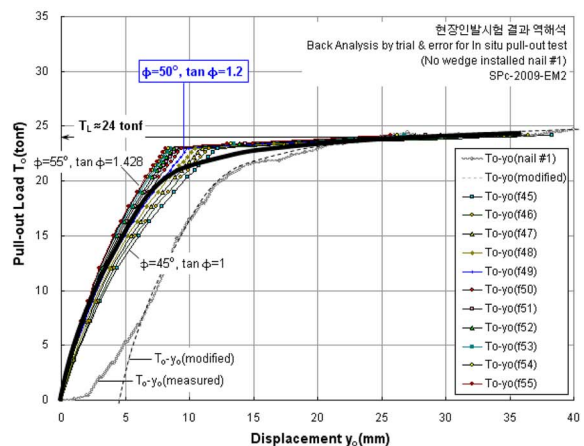
까지  $1^{\circ}$ 씩 변화시켜 가며 유한요소해석을 수행하여 결정하였다. 그림 6(a)에서 보듯이 마찰각이  $50^{\circ}(\mu = \tan \phi = 1.2)$  수준일 때 현장 인발시험 거동과 잘 일치하는 것으로 평가되었다.

한편, 접이식 웨지가 장착된 경우는 역해석을 통해 얻은 마찰계수( $\mu = \tan \phi = 1.2$ ) 값을 적용하여 유한요소해석을 수행하고 현장 인발시험결과와 비교하였다. 그림 6(b)에서 보듯이 마찰계수( $\mu = \tan \phi = 1.2$ ) 값을 적용한 결과 현장 거동과 유사한 경향을 나타내었다. 이때, 접이식 웨지가 장착된 강관네일은 극한인발력( $T_L$ )이 32tonf 정도로 접이식 웨지가 장착되지 않은 네일의  $T_L \approx 24 \text{ tonf}$ 보다 33% 정도 크게 나타났다.

또한, 그림 6(b)에서는 접이식 웨지가 장착된 강관네일의 마찰계수( $\mu = \tan \phi$ ) 값을 개략적으로 1.2~2.0로 변화시켜도 현장 인발시험결과와 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났으며, 이는 Kim et al.(2007)의 풍화토 지반을 대상으로 한 가압주입앵커체에 대해 앵커체와 주변 지반의 마찰계수( $\mu = \tan \phi$ )가 1.7 정도의 값을 갖는다고 보고한 결과와 유사한 결과를 나타내었다. 따라서, 접이식 웨지를 장착한 강관네일의 그라우트/지반 사이의 마찰계수( $\mu = \tan \phi$ )는 설계 시 접이식 웨지의 효과를 반영할 수 없는 경우 1.2~2.0의 범위에서 적용할 수 있음을 알 수 있다. 그림 6(b)에서는 접이식 웨지 장착 강관네일의 극한인발력( $T_L$ )을 현장  $T_o-y_o$  관계도 분석에서 고려한 변위  $y_{o(i)} = 30 \text{ mm}$ 을 기준으로 평가할 경우,  $T_L = 32 \text{ tonf}$  정도임을 알 수 있어 현장 인발시험의 평균 극한인발력(30.7tonf) 보다 4% 정도 크게 나타났으나 그 차이가 미미하기 때문에 해석 결과는 적절한 것으로 판단된다. 본 강관네일이 풍화 잔류토층을 보강대상으로 하고 있다는



(a) 웨지 미장착 네일의 역해석 결과



(b) 웨지 장착 네일의 해석결과

그림 6. 유한요소해석 결과와 현장 인발시험 결과의 비교

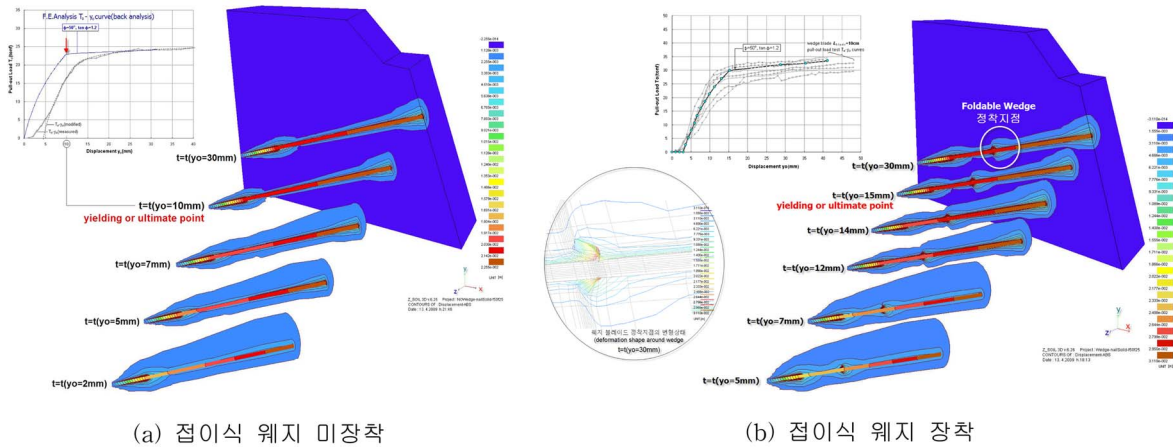


그림 7. 네일 인발에 따른 주변 지반의 변형상태

점을 감안한다면, 패커가 설치된 가압 그라우팅 강관네일의 경우 인발 시 강관네일과 그라우트는 일체 거동을 하며, 인발에 의한 미끄러짐 거동이 그라우트와 지반사이에서 발생한다는 본 해석의 기본 가정이 적절한 것으로 판단된다.

### 3.3.2 네일 인발에 따른 지반 변형

네일 인발에 따른 지반 변형 특성을 그라우트와 지반 사이의 마찰계수( $\mu = \tan \phi$ )를 1.2로 적용한 접이식 웨지 장착 여부에 따른 유한요소해석 결과를 통하여 평가하였다.

네일 인발에 따른 지반 변형은 접이식 웨지 미장착 네일의 경우와 장착 네일의 경우를 그림 7(a), (b)에서 각각 확인할 수 있다. 그림 7(a)에서는 전체적으로 인발 초기에 상대적으로 넓은 부위에 1mm 미만의 작은 변형이 발생하고, 인발이 진행되면서 점차 네일의 선단부와 두부로 변형이 집중되며, 그라우트체 주변의 경우 상대적으로 변형 발생 부위의 폭이 작은 것으로 나타났다.

한편, 접이식 웨지 장착 시의 지반 변형은 그림 7(b)에서 볼 수 있듯이 인발 초기부터 접이식 웨지 정착 지점을 중심으로 지반변형이 발달하는 것을 볼 수 있으며 특히 항복상태 도달하는  $t=t(y_0=15\text{mm})$  시점 이후로는 지반변형이 접이식 웨지 장착지점으로 집중되는 것을 볼 수 있다. 따라서 지반에 근입된 접이식 웨지 블레이드가 흙 썩기를 형성하고, 인발 시 상대적으로 넓은 변형영역을 형성하면서 수동저항을 유발하여, 응력을 재분배시킨다는 것을 유한요소해석 결과에서 확인할 수 있었다.

### 3.3.3 네일 인발에 따른 네일 축방향 인장력 분포

네일의 축방향 인장력 분포는 유한요소해석 결과를 이용하여 인발 시 네일 보강재에 발생하는 축방향 인장력의 분포를 검토하고 현장 인발시험과정을 통해 실측한 자료와 비교하였다.

네일 축 방향 발휘 인장력은 그림 8에서 보듯이 실측 자료 및 유한요소해석 결과 모두 네일 두부에서 가까운 지점일수록 인발하중의 직접적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 이때, 네일 축방향 인장력 변화는 네일 두부를 기준으로 접이식 웨지 장착지점 외부 지점인 SG#3의 경우 인발하중 증가에 대해 축 방향 발휘 인장력이 대단히 완만히 증가하는 것으로 나타났다. SG#3 지점의 완만한 인장력 증가는 접이

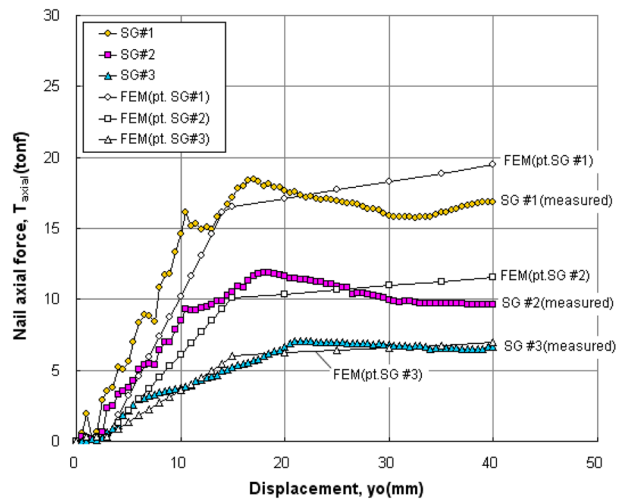


그림 8. 네일 축 방향 발휘 인장력 평가 결과

식 웨지 블레이드가 흙 썩기 수동저항을 유발하여 인발하중을 재분배시키기 때문으로 판단된다.

한편, 전체적인 축방향 인장력 변화는 실측 자료의 경우 네일 두부에 가까운 지점일수록 인장력이 증가하다가 감소되는 시점이 빠른 것으로 나타나고 있지만, 유한요소해석의 경우 거의 유사한 변위 발생 수준에서 축방향 발휘 인장력의 변화가 발생하면서 인장력의 감소가 나타나지 않는 것으로 평가되었다. 이는 유한요소해석 시 지반 및 네일의 이완에 의한 인발하중의 손실이나 크리프 변형과 같은 복잡한 거동을 수치해석적으로 정확히 구현하지 못하는 데에서 발생하는 것으로 추측된다.

또한, 네일 두부에서 가까운 지점(SG#1)에서는 인발 하중 증가에 따른 초기 축 방향 발휘 인장력의 변화가 실측치와 다소 차이를 보이는데 이는 인발 초기에 나타난 반력판의 자리 잡기 변위거동에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 전체적인 네일 축 방향 발휘 인장력의 변화는 SG#1, SG#2, SG#3 지점 모두 해석결과와 실측 결과의 경향이 일치하고 있어 유한요소해석에 의한 네일의 인발거동은 현장의 실제 상황을 잘 구현한 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 접이식 웨지를 장착한 강관네일의 인발저항

거동 특성을 분석하기 위하여 풍화토 지반의 사면을 대상으로 수행한 현장 인발시험 및 3차원 유한요소해석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 현장 인발시험결과, 접이식 웨지를 장착한 강관네일은 접이식 웨지 미장착 네일보다 극한인발저항력이 약 1.033~1.383배로 평균 30% 수준까지 증가하는 것으로 평가되었다.
2. 3차원 유한요소해석결과 접이식 웨지가 장착되지 않은 경우 그라우트와 지반 사이의 마찰계수( $\mu$ )는 약 1.2 정도로 평가되었으며, 접이식 웨지 장착 시 마찰계수( $\mu$ )는 약 1.2~2.0 정도로 평가되었다.
3. 그라우트와 지반 사이의 마찰계수,  $\mu=1.2$ 를 적용한 접이식 웨지 장착 강관네일의 유한요소해석 결과, 네일의 극한인발저항력은  $T_L=32\text{tonf}$ 으로 접이식 웨지가 장착되지 않은 네일의  $T_L=24\text{tonf}$  보다 약 33% 증가하는 것으로 평가되어 현장인발시험결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다.
4. 접이식 웨지 장착 강관네일의 극한인발력( $T_L$ )을  $y_{o(i)}=30\text{mm}$ 을 기준으로 평가할 경우  $T_L \cong 32\text{tonf}$  정도로 현장 인발시험의 평균 극한인발력(30.7tonf) 보다 4% 정도 크게 나타났으나 그 차이가 미미하기 때문에 해석 결과는 적절한 것으로 판단된다.
5. 접이식 웨지 장착 강관네일의 인발저항 증가원인은 현장

인발시험 및 유한요소해석 결과에 따르면 공벽에 근접되는 웨지 블레이드가 그라우트의 주입 및 고결에 의해서 완전히 정착되고 인발 시 지반과 맞물려 유발되는 수동저항에 의한 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 건설교통부(1997) **쏘일네일링 공법의 실용화방안 연구**.  
이송, 김종수(2001) 현장 인발시험에 의한 지반-네일의 하중전이 특성 연구, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제21권 제3C호, pp. 281-288.  
주용선, 김낙경, 김성규, 박중식(2008) 휨저항을 고려한 쏘일네일 보강사면의 해석에 관한 연구, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제28권 제6C호, pp. 331-338.  
최동남, 임희대, 송영수, 이규환(2007) 개량 강관네일링 공법을 이용한 사면 보강사례 연구, **한국안전학회지**, 한국안전학회, 제22권 제1호.  
FHWA (1996) *Manual for Design and Construction of Soil Nail Walls*.  
Kim, N.-K., Park, J.-S., and Kim, S.-K. (2007) Numerical simulation of ground anchors, *Computers and Geotechnics*, Vol. 34, Issue 6, pp. 498-507.  
Neville, A. M. (1996) *Properties of concrete 4th Ed.*, Harlow(UK): Addition Wesley Longman Ltd.  
Recommendations Clouterre (1991) *Soil Nailing Recommendations*, French National Research Project.

(접수일: 2009.9.3/심사일: 2009.10.6/심사완료일: 2009.10.6)