

## 사면의 변이영역에서 보강재의 변형률 특성

### Strain Characteristics of Reinforcing materials in the transition zone of slopes

김경태<sup>1)</sup>, Kyung-Tae Kim, 장대수<sup>2)</sup>, Dae-soo Chang, 장기태<sup>3)</sup>, Ki-Tae Chang, 한희수<sup>4)</sup>, Heui-Soo Han

1) (주)GMG 과장, Section Chief, GMG Co. Ltd.

2) 금오공과대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. Civil Eng, KIT

3) 금오공과대학교 토목공학과 교수, Professor, Kumoh National Institute of Technology

4) 금오공과대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Kumoh National Institute of Technology

**Abstract :** For the calculation of internal stability, the hypothesis in conventional design is on the basis of two distinct zones, which are 'active zone' and 'passive zone'. This means that there is an abrupt discontinuous transition from active to passive states across a potential failure line. The existence of a discontinuity of this nature appears physically unreasonable, especially from kinematic considerations. A series of pull-out model tests was undertaken from a wall being rotated about the toe to find the strain distribution mobilized from near the wall face into the deep, stable zone through the centre plane. With this finding of transition zone, the objective of study is aiming at identifying the likely effect of this zone in designing method by comparing with the prevailing design method.

**Key words :** active zone, passive zone, pull-out model tests, transition zone

## 1. 개요

네일링으로 보강된 토류 벽체에서의 안정검토를 위한 재래적인 설계방법은 구별된 두 영역, 즉, 랭킨의 파괴영역(active zone)과 저항영역(passive zone)에 근거하고 있다. 파괴영역에서는 흙과 보강재가 일체가 되어 활동함으로 상대변위가 없으며, 따라서 흙/보강재 사이의 상호작용(interaction)은 없는 것으로 가정한다. 반면에 이러한 활동에 대응하는 인발저항력(pull-out resistance)은 파괴면 바깥의 저항영역에서 고려되고 있다. 이러한 개념은 가상 파괴면을 중심으로 한 주동영역과 저항영역사이의 갑작스러운 불연속성의 전이(discontinuous transition)를 전제하는 것이며, 이것은 물리적, 혹은 동역학적인(kinematic) 관점에서 자연스럽지 못한 비합리적인 것으로 보여진다.

Rowe et al.(1992)은 성토보강옹벽에서 전이영역의 범위를  $45^\circ + \phi/2$  와 내부마찰각  $\phi$  의 사이로 규정하였으며, 이 영역에서의 수평변위는 거의 없다고 하였다. 보강영역에서의 주된 변형은 자립영역(self stable zone) 즉, 내부마찰각  $\phi$  바깥영역에서의 흙의 변위로 인한 것으로 생긴다고 하였다. Chang et al.(1996)은 전이영역의 범위를  $45^\circ + \phi_{ps}/2$  와 평면변형 마찰각  $\phi_{ps}$  사이에 있음

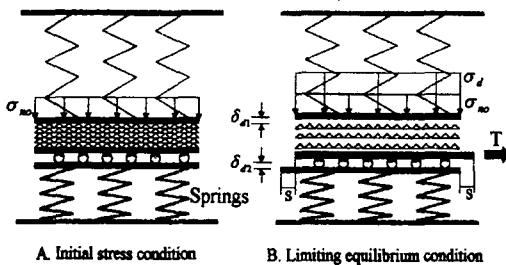
을 실내 인발 저항값으로 나타내었으며, 전이영역에서는 구속다ilatancy 효과(restrained dilatancy effect)를 기대할 수 없다고 하였다. 또한, 전면파괴를 고려하지않는 상태에서 수행된 인발시험치의 사용은 위험하다고 하였다.

본 연구는 광섬유 격자 센서가 부착된 특수 네일 인발 시험을 통해 변형률을 측정함으로써, 변이영역이 인발저항에 미치는 영향을 규명하려한다.

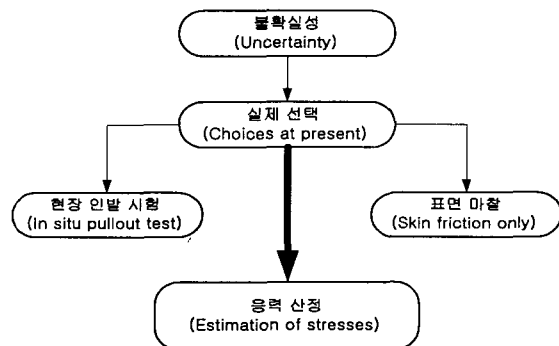
## 2. 인발저항력

절개 사면의 보강을 위한 네일링 공법의 적용은 보다 보편화 추세에 있으며, 특히 터널 막장에 대한 단기적인 지보공법으로서의 활용은 증가 추세에 있다. 네일의 기본적인 역할은 주로 굴착으로 인한 수평 응력 감소를 억제함으로써 지반의 안전을 유지시킨다는 점에서 위의 두 방법은 같다고 할 수 있다. 네일/지반 상대 변위로 인해 유발되는 인장력에 의해 그 기능을 발휘한다. 이 인장력은 흩썩기 또는 흩과의 접촉을 잡아주는 역할을 하므로 이 인장력이 없으면 흩은 터널면이나 사면에서 흘러내리거나, 떨어져 나가게 된다.

네일과 흩사이의 상호작용은 상당히 복잡하며, 네일 시공방법, 종류 및 형태, 흩의 종류와 밀도 등, 다양한 요인들에 의해 영향을 받는다. 그러나 흩이 전단될 때 네일 주위에 존재하는 흩은 흩을 둘러싸고 있는 주위 흩에 의해 구속되므로 접촉면에서의 연직응력이 증가되어 마찰저항도 커지게 되는 '구속된 딜리턴시' 효과에 의해 실제 저항력은 상당히 커지게 된다.(Recommendations Clutterre. 1991)[그림 1]. 이는 정지된 상태의 지반에서 인발된 네일의 저항력이 파괴시 네일에 동원되는 인발력 값을 대표 할 수 있을 것인지 의문을 가지게 된다.



<그림 1> 구속된 딜리턴시의 모델



<그림 2> 예비설계단계에서 통용되고 있는 방법

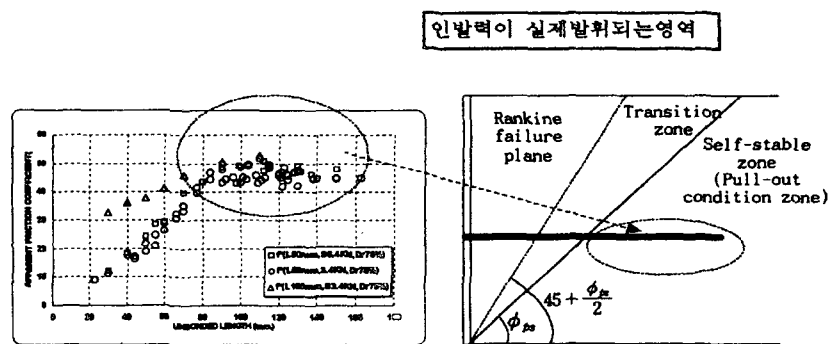
### 2.1. 인발력 산정

지금까지 수행된 모든 시험의 가장 중요한 목적들은, 파괴시 네일들에 발생하는 최대 축응력점의 위치를 찾고, 이 점들을 연결함으로써 최종적으로는 사면파괴면의 형태를 결정하는 것이었다. 파괴면이 결정되면, 이들 파괴면을 중심으로 파괴영역과 저항영역을 구분 짓고, 이 저항영역에서 네일이 사면파괴활동에 저항하는 힘을 산정한다. 마지막 단계는 산정된 네일의 인발저항력과 파괴를 일으키려는 힘과 평형을 유지토록 네일의 길이를 결정하는 것이다. 인발저항력의 산정은 상기 설계의 기본 원리에서 알 수 있듯이 산정되는 네일저항력의 크기에 따라 네일 길이가 달라지고 결과적으로 이것은 공법의 경제성에 직접 영향을 미치는 요인으로 작용하게 된다. 인발저항력 산정에 관해 세계적으로 통용되고 있는 현 설계법들의 큰 차이는 두 가지인데 첫째는 현장에서 직

접 측정된 인발시험치를 사용하는 것(Soil Dilatancy 고려)이고 둘째는, 유효응력개념의 상재하중을(Cover depth) 사용하는 것(Soil Dilatancy 무시)으로 대별된다. 재래적인 일반 보강토 방법과는(성토) 달리, 네일링공법은 원지반에 흙을 천공하므로써 네일을 설치한다. 이때 흙 내부의 지반이 제거되므로써 천공된 흙 주위는 응력해방(Stress Relief 혹은 hoop stress)이 발생하며, 흙이 자립하는 경우 흙 주위를 둘러싼 원주 방향의 응력(Radial Stress)은 이론적으로 “0(zero)”가 된다. 때문에 해당 깊이 하에서의 네일이 받는 초기응력은 덮개토압으로 인한 연직응력의 함수가 될 수 없다는 것은 주지의 사실이다. 실제 이러한 사실을 뒷받침하는 근거로서는, Gassler(1988)는 현장 인발시험치가 지반깊이 2.5m이하에서는 거의 동일하며, 지반깊이(Cover depth)의 함수가 아니라는 것을 보여 주었다. 그러나, 현재 대부분의 설계방법은 초기응력을 덮개토압으로 산정하고 있다. 현재로서는 이들 외에 다른 선택의 여지는 없다. 이와 같이 네일 저항력 산정에 많은 불확실성이 내포 되어있어 큰 문제점으로 대두되고 있다.(그림 2)

## 2.2. 변이 영역(Transition zone)

네일의 인발력 산정시 저항 영역에서의 인발 값을 설계에 반영한다. 그러나, Kinematic한 관점에서 보면 이 가정이 실제적일 수 있을까 하는 문제가 제기될 수 있다. 옥스퍼드 대학에는 이것에 관한 실내 모형 시험을 수행한 바 있다.(Chang & Milligan, 1996). 254mm×153mm×202mm의 토조에 입경이 고른 모래를 낙하시켜 밀도를 조정후, 연직 응력을 가하여 일정 속도로 인발 할 경우, 전면판(벽체)의 고정시와 회전시 네일에 동원되는 인발력을 각각 구했다. 벽체 회전 끝(Toe) 부분에서 수평방향과  $\phi$ (흙의 내부마찰각)로 구분되는 바깥영역에서는, 벽체의 이동없이 인발시킨 인발값과 파괴시 이 영역에서 측정된 인발저항력이 동일하였으며, 겉보기 마찰계수  $f^*(\tau/\sigma_v)$ 가 약 4-6 범위가 되었다. 또한 안식각영역과 소성영역 사이(Transition zone), 즉,  $\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2}$  <변이 영역(Transition zone) <  $\phi$  에서는  $f^*$ 값이 1 이내가 되어 다일레이션의 영향을 고려할 수 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과들은 벽체 회전 끝(Toe) 부분에서 수평방향과  $\phi$ 로 구분되는 바깥영역, 즉, 자립영역(Self-stable zone)에서만 다일레이션 효과가 충분히 발휘되고 있으며, 이 영역을 엄밀한 의미의 인발 적용 구간으로 볼 수 있다는 것을 시사한다.(그림 3)



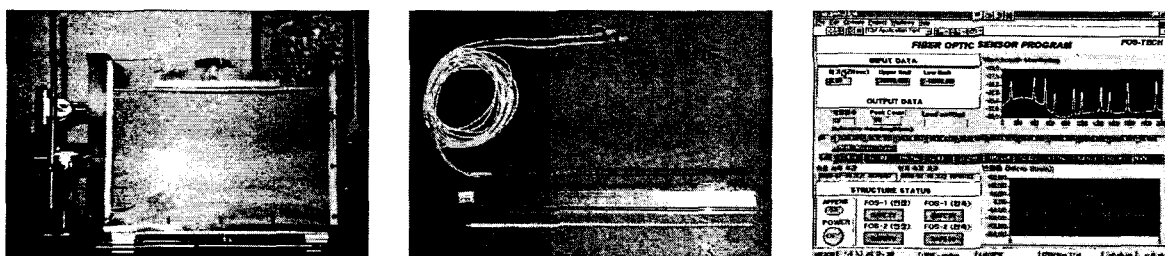
<그림 3> 변이 영역의 존재. K.T.Chang(1996)

## 3. 시험 종류 및 방법

### 3.1. 실내 인발 시험

시험 장비는 모형 네일의 동원되는 인발력 측정을 위해서 만들어진 것으로 시험의 종류는 크게 두 종류로 나누어진다. 순수한 인발시험용 토조 박스를 이용하여 재래적으로 시행하고 있는 현장 인발 시험과 같이, 정지상태의 지반에서 인발시 동원되는 인발력을 측정하는 것과, 흙 썩기 파기 시 네일에 작용하는 인발력을 규명하기 위해 벽체의 회전을 가능케한 시험으로 나눌 수 있다.

모형 네일 인발 시험을 위해 길이 490mm, 내경 8mm, 외경 12mm의 FRP 네일에 10개의 서로 다른 파장 대역을 가진 광섬유 격자(FBG) 센서를 멀티플렉싱으로 예폭시 부착을 한후, 그림 4와 같이 토조 박스(폭 300mm, 높이 400mm, 길이 500mm)에 넣었다. 이때 모래는 주문지 표준사로서 실내 시험을 통해 내부마찰각이 34도로 나타났으며, 안치 방법은 낙사법을 이용하여 일정 밀도를 유지하였다, 연직하중을 재하하여, 네일에 추가적인 상재하중을 가한후 일정 속도로 인발하였다. 부착된 광섬유 격자센서를 통해 구해지는 변형률은 그림4의 우측의 소프트웨어를 통해 얻어진다.

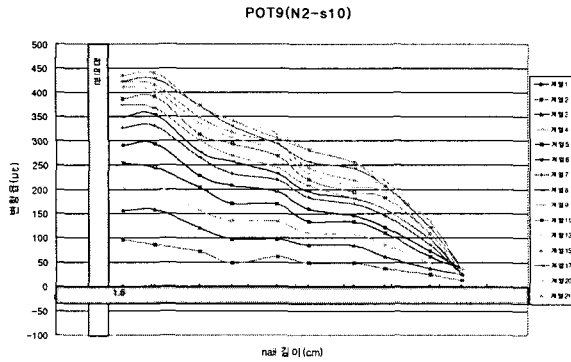


<그림 4> 토조 박스(좌측), FBG 센서가 심겨진 네일(중앙), Software(우측)

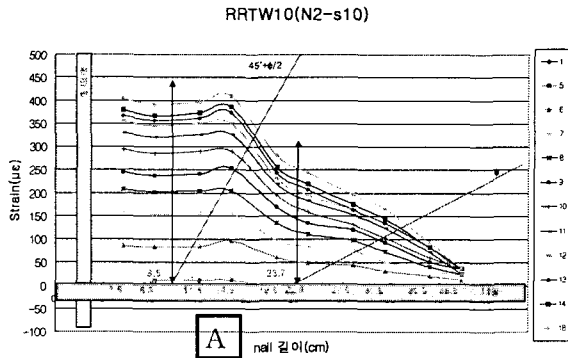
## 3.2. 실내 시험결과 및 분석

### 3.2.1. 고정 벽체(at rest)에서의 인발시험

파괴가 수반되지 않은 '정지된 지반(at rest)에서 평가된 네일의 인발 저항값이 실제 벽체 파괴가 발생되었을 때 동원될 수 있는 저항치와 동일한 것으로 볼 수 있을 것인가? 이러한 문제는 소일 네일링 공법에서 해결되어야 할 현안 핵심 문제중의 하나로 보여진다. 본 시험에서는 이와 같은 문제를 규명하기 위해, 먼저 고정 벽체에서의 인발시험을 수행하였고 이들을 다음(벽체 회전 시 인발 시험) 시험과의 비교를 위한 근거로 삼았다. 그림 5는 상대밀도 74-76%, 상재하중 200kgf 로써 시험한 것으로, 네일을 고정된 상태에서 토조의 이동으로 네일에 동원되는 인장력을 측정하였다. 그림 5에서 처럼, 축응력의 분포가 선형적 것으로 보아 균질한 지반속에 둘러싸인 강성 네일에서의 인발 저항력은 균등한 것을 의미한다. 그러나 부분적으로 그래프 상 끝부분이(표면에서 30-40cm 깊이)에서 변형률 곡선의 급작스런 기울기의 변화를 보이는데 이는 그림 4와 같이 네일이 이상적인 강성(rigid)체가 아닌 것으로 인해 네일 구간에서 동원되는 전단 저항력이 다르기 때문이다. 네일 구간구간에서의 부분적인 굴곡은 모래 낙사법(Raining)에 의한 모래 안치시 부분적인 상대밀도의 차에 의한 다일레이션 효과의 영향으로 보여진다. 낙사법(Raining)은 전 세계적으로 공인되고 있는 보편적인 시료안치 방법의 하나이지만, 여전히 부분적인 멤브레인 효과로 인해 시료구성이 완전한 균질상태가 될 수 없다. 네일 앞구간에서 시작점의 형태와 변형률 값이 다른 것은 시험 중 모래가 부분적인 유실로 인해 전면판 바로 뒤쪽에서의 네일 압축으로 인한 인장력의 손실을 초래한 것으로 보이며, 네일 설치시 발생하는 부분적인 수평오차에 기인한 것으로 보여진다. 이런 점들을 제외한 나머지 부분에서는 이상적인 분포 형태와 유사하게 보여지며, 최대 변형률의 값이 평균  $450 \mu\epsilon$  범위의 일정값을 보여주고 있다.



<그림 5> 벽체 고정 인발 시험(200kgf)



<그림 6> 벽체 회전 인발 시험(200kgf)

### 3.2.2. 벽체회전시의 인발 시험

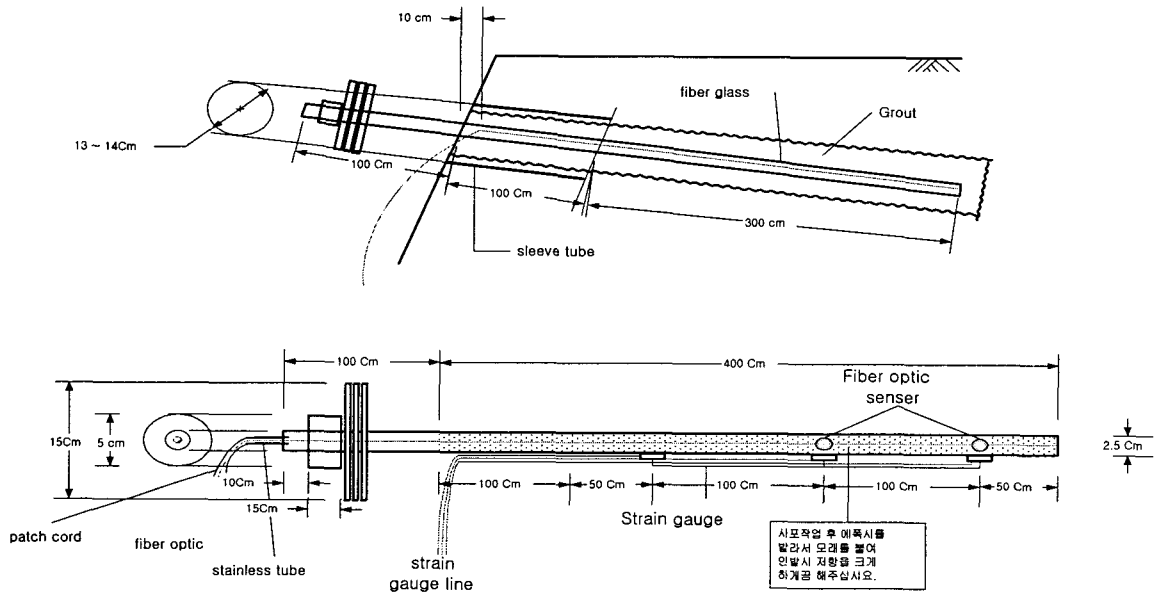
시험 결과는 그림 6과 같이, 동일 한 상대밀도, 하중 단계 200kgf에서의 변형을 곡선 분포 결과를 나타내고 있다. 하중 200kgf에서의 변형을 기울기의 변화는 전면판으로부터 약 14.8cm에서부터 시작하고 있으며, 이 위치의 모래에서부터 전단 저항력이 발생한다는 것을 의미한다. 또한 위치의 좌표로서는 내부마찰각  $\phi$  로 정의되는 자립영역의 시작점과 랭킨의 주동파괴 영역 사이에 위치하고 있으며, 변이영역의 일정 부분에서부터 인발저항력이 시작됨을 알 수 있다.[A부분] 이로 미루어 보면, 지금까지의 연구자들의 발표 내용과 비교해 본다면, 인발저항에 대한 변이영역의 영향이 있음을 알 수 있지만, K.T.Chang(1988)이 언급한 것에 정량적인 차이가 있는 것으로 나타난다. 시험결과를 토대로 이 위치를 정량적으로 표시한다면, 전이 영역의 중간 지점에 있다. 실제 흙의 파괴시 네일에 동원되는 인발저항력은 정지된 상태에서 인발한 값의 90%에 해당하는 값이 된다고 한다면 본 시험의 결과는 이에 잘 맞는 것으로 보인다.(그림 5& 그림 6 비교).

## 4. 현장 인발시험

### 4.1 인발시험 방법 및 절차

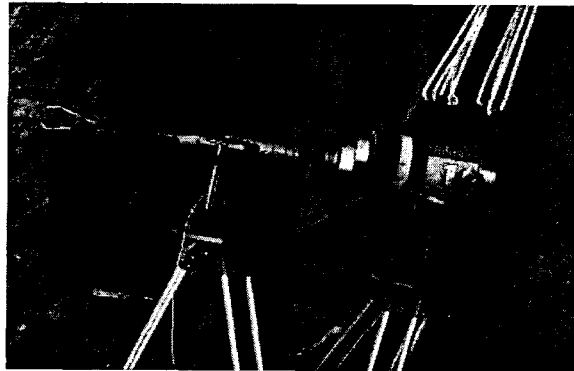
절개 사면을 Nailing 보강처리를 하면서, 철근과 Fibre Glass에 FBG 센서와 Strain gauge를 부착하여 인발시험을 통하여 Nail의 변형을 측정하고자 하였다. 30cm 전면판을 사면에 설치한 후, 로드셀 및 자키를 장착하고 그 뒷부분을 작은 전면판을 여러 개를 단다. 그리고 다이알 게이지를 앞, 뒤 전면판에 모두 장착하기 위한 장치를 준비(삼발이)하고 초기 하중을 어느 정도 주면서 단계별로 하중을 가하여 그때의 로드셀의 값과 Strain gauge 값, FO Sensor의 값을 얻었다. FRP Nail의 FBG Sensor와 Strain gauge의 각 하중 단계를 4, 8, 12, 15ton으로 점차 증가시켰다. 총 길이 5m, Strain gauge 3개, FBG 센서 2개, 홀 직경 100mm, 홀 깊이 4m, 위치 및 부착 여부는 FBG 센서의 경우, FRP Nail 제작시 삽입하여 일체화하였다. FO sensor 끝 부분의 처리는 센서의 민감성과 꺾임성의 약함을 보완하기 위해서 마지막 센서 Line이 나오는 부위에서 Patch Cord와 튜브를 사용하여 보호하였다. Strain gauge의 경우는 위의 철근과 같은 방법으로 처리를 했다. 그림 7은 각 센서의 위치를 표시한 상세도이다. 그림 8은 FBG 센서와 변형률 gauge를 이용한 현장

인발 시험 장면을 보여준다.



FIBER GLASS BAR

<그림 7> FBG 센서를 이용한 현장 인발 시험시 상용된 네일 상세도



<그림 8> FBG 센서와 변형률 gauge를 이용한 현장 인발 시험

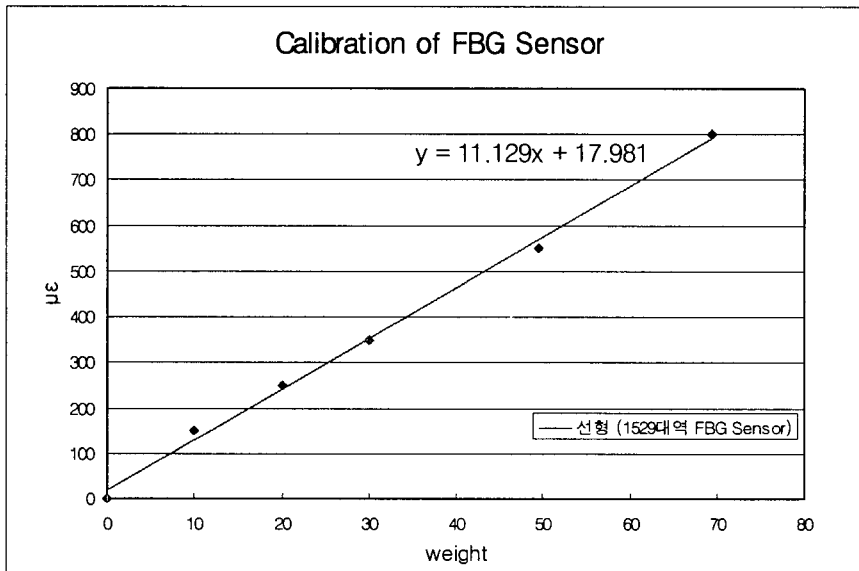
<표 1> 현장 인발 시험에 사용된 네일의 세부사항

계 원	직경(mm)	길이(m)	E 값(kg/cm <sup>2</sup> )	센서 개수	
				FO Sensor	S.G
FRP 네일	25	5	700000	2	2

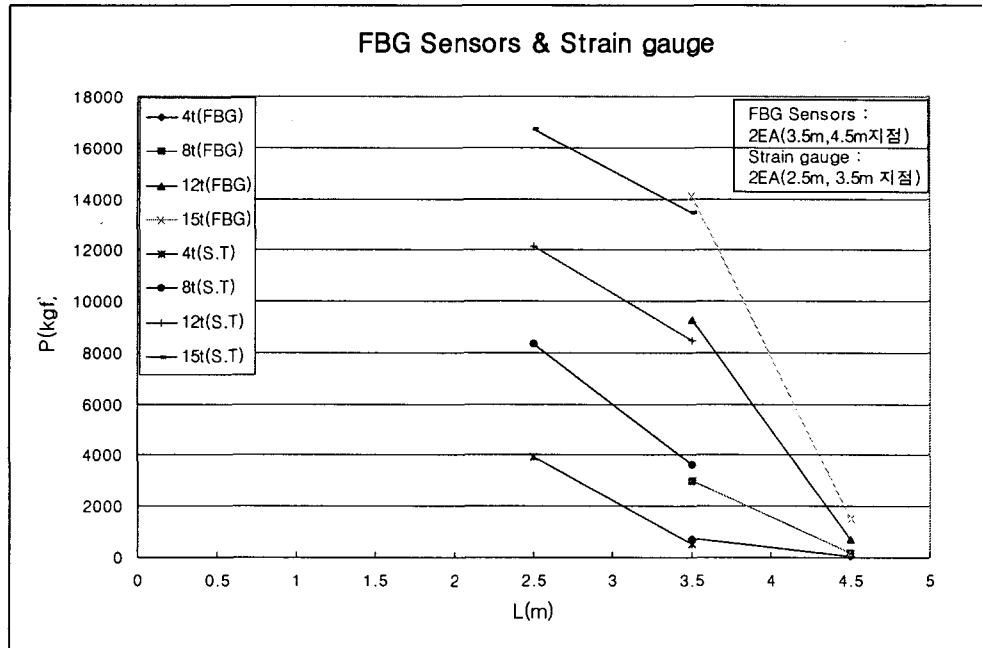
#### 4.2. 현장 시험 결과 및 분석

금오공대 지반보강기술연구소에서는 광섬유센서를 FRP Nail에 삽입, 일체화한 후 현장에 적용, 인발시험함으로서 기존에 사용하던 변형률 게이지(strain gauge)와 비교하여 좋은 결과를 얻었다. 그림 9는 FBG Sensor의 Calibration Curve이다. 이를 FRP Nail에 Strain Gauge와 병행하여 적용한 결과, 그림 10의 결과를 얻었다. 전면판에서 3.5m 지점과 4.5m 지점의 FBG Sensor에서 data를 구하였고, 2.5m 및 3.5m지점에서 Strain Gauge의 data를 구할 수 있었다.

3.5m 지점에 FBG Sensor와 Strain Gauge를 동시에 설치하여 시험 한 결과 90% 이상의 같은 수치를 얻을 수 있었다. 또한 각각의 data를 함께 그래프로 표시한 결과, 인발력에 의한, 각 깊이의 인발저항력의 크기가 점차적으로 증함을 알 수 있었다(그림 10 참조).



<그림 9> FBG Sensor의 Calibration Curve



<그림 10> 네일 인발시, FBG Sensors와 Strain gauge의 축력분포 (FRP Nail)

## 5. 결론

정밀한 광센서를 활용한 변형률 분포 곡선 측정 시험결과로 토대로 하면 다음과 같은 결론을 유추할 수 있다.

1. 재래적인 개념의 변이영역은 이 실험으로 불분명하다. 이유로서는 지반 자체의 전이 영역의 정의는 존재한다고 해도 의미가 없을 것으로 사료되며, 네일 등과 같이 보강재가 삽입될 때, 지반 그 자체로서 정의된 변이영역의 경계는 바뀌어 질 수 있다. 인발 저항치의 관점으로 정의되는 새로운 변이영역의 개념이 필요할 것으로 판단된다.
2. 그러나, 네일링 공법에서 사용되는 통상적인 네일의 경우, 지반에서 인발력은 재래적인 랭킨의 파괴 영역을 벗어난 변이영역 일정 구간까지 영향을 미치는 것으로 나타났다.
3. 실제구조물이 파괴 될 때에 유발되는 인발저항력은 정지된 지반에서의 그것의 약 90%에 이르는 것으로 판단되며, 구조물의 전면적인 파괴가 생겨날 경우 정지된 상태에서 산정된 인발저항력을 다 적용할 수 없는 것으로 판단된다. 즉, 정지된 상태에서 인발저항치를 설계에 반영한다면, 이는 과 설계가 된다. 이러한 것을 설계에 반영하기 위해서는 추가적인 시험 결과가 뒷받침되어야 할 것으로 보여진다.

## 참고 문헌

1. K.T. Chang & G.W.E.Milligan, "Effect of the transition zone in a nailed wall model test" University of oxford, UK,1996
2. R.A.Jewell, G.W.E.Milligan, "Deformation calculations for reinforced soil walls", Proc. 12th International Conf. of Soil Mech. and Found. Eng, Vol.2, pp. 1257-1258



3. R.A.Jewell, "Review of theoretical models for soil nailing" Proceedings of the Int. Reinforced Soil, Clasgow, 1990, pp. 256-275
4. R.A.Jewell, "Reinforced soil wall analysis and behaviour" OUEL Report, No. 1701/87. 1987
5. Karl Terzaghi, Ralphh B. Peck, Gholamreza Mesri, "Soil mechanics in engineering practice", 1996, pp. 137-141
6. Cartier, G. and Gigan, J.P, "Experiments and obserbations on soil nailing structures", Proc.8th ECSMFE, Helsinki, 1983, pp.473-476
7. Gallser, G., "In-situ technicques of reinforced soil", Proceedings of Internaitonal Reinforced Soil Conference, Glasgow, 1990, pp. 185-196
8. Milligan, G.W,E and Bransby, P.L., "Combined active and Passive rotational failure of a retaining wall in sand" Geotechnique, Vol.26, No.3, 1976, pp. 473-494