

# 쏘일네일링과 앵커가 결합된 하이브리드 공법의 하중전이 메커니즘

## Load Transfer Mechanism of Hybrid Model of Soil-nailing and Compression Anchor

서 형 준<sup>1</sup> Seo, Hyung-Joon

김 현 래<sup>2</sup> Kim, Hyun-Rae

한 신 인<sup>3</sup> Han, Shin-In

이 인 모<sup>4</sup> Lee, In-Mo

### Abstract

The load transfer mechanism of hybrid model of soil-nailing and compression anchor is studied in this paper. The hybrid model is composed of an anchor bar (installed at the tip) with two PC strands and a steel bar. It can make active behavior of skin friction by applying the pre-stress. In this paper, the load transfer mechanisms of soil-nailings, compression anchors, and hybrid models, respectively, are obtained from skin friction theory and load transfer theory. Field pullout tests are performed to identify the load transfer mechanism and experimental results are compared with analytical solution. In case of soil-nailings, the tension load is transferred from face to tip, however, in case of compression anchors, the compression load is transferred from tip to face. The experimental behavior of the hybrid model is similar to that of compression anchor when only pre-stress is applied. If the pullout test is performed by simultaneously pulling out the anchor and the nail, the compression load is dominant at the tip and tension load is dominant at the face. The load transfer mechanism of the hybrid model shows the combined behavior of soil-nailings with compression anchors.

### 요 지

본 논문에서는 쏘일네일링 공법, 앵커 공법, 또한 이 두공법의 장점을 결합한 하이브리드 공법의 하중전이 메커니즘에 대한 연구를 수행하였다. 하이브리드 공법은 철근과 PC강연선을 보강재로 하며, 프리스트레스를 가함으로써 능동적인 주면마찰력 양상을 유도하고자 한다. 본 논문에서는 주면마찰력 산정 이론과 하중전이 이론을 바탕으로 각 공법의 하중전이 메커니즘을 파악하였다. 또한 현장인발시험을 실시하여 측정된 계측결과와 분석 및 하중전이 이론과의 비교 검토를 통해서 하이브리드 공법의 하중전이 메커니즘을 규명하였다. 쏘일네일링 공법은 인발거동 시 전면에서부터 선단으로 인장력이 전이되는 양상을 보이는 반면, 앵커 공법은 내하체가 위치한 선단에서 프리스트레스를 가함에 따라 선단에서 전면으로 압축력이 전이된다. 이 두 공법을 결합시킨 하이브리드 공법은 프리스트레스를 가할 때에는 앵커공법과 같이 선단에서 압축력이 발생하지만 동시인발 시에는 선단에서는 압축력이 전면에서는 인장력이 발생하게 된다. 따라서 하이브리드 공법의 하중전이 메커니즘은 쏘일네일링의 거동과 앵커의 거동이 모두 나타난다.

**Keywords :** Hybrid Model of Soil-nailing and Compression Anchor, Load Transfer Mechanism, Pre-stress, Skin Friction

1 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.)

2 하리기술22(주) 대표이사 (CEO, Ghari Geotechnology 22 co., Ltd.)

3 (주)서영엔지니어링 상무 (Director, Seoyeong Engineering Co., Ltd.)

4 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수 (Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ., inmolee@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

쏘일네일링 공법은 보강재를 삽입하고 그라우팅을 함으로써 지반과 그라우팅과의 주면마찰력과 보강재의 인장력을 통해서 사면안정을 이루는 공법이다. 쏘일네일링 공법은 지반의 변위가 발생하여야 저항을 하는 수동적인 공법인 것에 반해 앵커 공법은 초기에 프리스트레스를 가하면서 지반의 변위를 억제하는 능동적인 공법이다. 하지만 앵커공법은 초기에 보강재가 저항할 수 있는 하중을 사용하기 때문에 프리스트레스 후에 저항할 수 있는 잔여하중이 프리스트레스를 가한 만큼 감소하게 된다. 따라서 이러한 두 공법의 장점을 결합하고 단점을 보완하기 위해 두 공법을 결합한 하이브리드 공법이 개발되었다. 하이브리드 공법은 PC강연선과 철근이 결합된 보강재를 가지고 있으며, 초기에는 PC강연선을 통해서 프리스트레스를 가할 수 있으며, 프리스트레스 후에도 철근 및 두 보강재의 상호작용을 통해서 저항할 수 있다.

김태섭(2009)은 압축형 앵커에 대한 연구를 통해서 앵커의 거동 메커니즘에 대해서 연구하였으며, 이와 유사하게 김낙경(2001)은 인장형 앵커와 압축형 앵커의 하중전이에 대해서 실험을 통해서 연구를 진행하였다. 박시삼 등(2004)은 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 안정 해석 및 설계에 관한 연구를 수행하였다. 프리텐션 쏘일네일링은 선단부에 고정너트를 장착하여 프리텐션 하중을 가할 경우, 네일 선단부에서 주면마찰력이 크게 발휘될 수 있도록 고안한 공법으로 주면마찰력이 선단에서 작용될 수 있도록 프리스트레스를 가하는 것은 하이브리드 공법과 동일하나 본 하이브리드 공법은 프리스트레스를 PC강연선을 통해 내하체에서 직접 가한다는 점에서 차이가 있다. Liang과 Feng(1997)이 그라운드 앵커에서 작용하는 주면마찰력을 식으로 제안하였다. 본 연구에서는 Wang과 Richwien(2002)이 제안한 식을 통해서 주면마찰력을 산정하고자 한다. 하이브리드 공법의 거동 특성은 서형준 등(2010)에 의해서 현장시험과 이론을 통해서 규명이 되었다. 하지만 서형준 등(2010)은 철근과 PC강연선 사이의 상호 거동에 집중하여 연구를 진행하였다. 따라서 본 연구에서는 쏘일네일링과 앵커가 결합된 하이브리드 공법의 하중전이 메커니즘을 하중전이 이론 및 현장인발시험을 통해서 규명하고자 한다.

## 2. 배경이론

### 2.1 주면마찰력 산정이론

본 논문에서는 쏘일네일링, 앵커 그리고 하이브리드 공법의 주면마찰력을 산정하기 위해서 주면마찰력을 발휘시키는 지반의 주요 인자에 대한 고찰과 이를 바탕으로 주면마찰력을 산정하기 위한 이론식을 소개한다.

Wang과 Richwien(2002)은 직접전단시험을 바탕으로 지반과 보강재 사이에서 작용하는 지반의 저항요소를 인발마찰계수( $f^*$ )로 규정하였으며, 인발마찰계수와 지반에 작용하는 평균연직응력( $\sigma_m$ )을 바탕으로 지반과 그라우팅 사이의 주면마찰력을 산정하였다.

$$f^* = \frac{F}{\pi DL\sigma_m} \quad (1)$$

여기서,  $F$ 는 인발력,  $D$ 는 삽입된 보강재의 직경,  $L$ 은 보강재의 정착길이를 나타낸다. 인발마찰계수( $f^*$ )는 모래가 조밀할수록 증가하며 마찰계수( $f$ )보다 더 커지게 되는 것을 알 수 있으며, 이는 지반의 다일레이턴시 효과에 의한 것으로 평가하였다. 인발모델은 보강재가 강성이며 탄성계수가 주위의 흙보다 매우 큼을 전제한다. 또한 모래는 탄성이라는 가정을 포함하고 있다. 그림 1에서 인발력( $F$ )을 가할 경우 모래의 체적은 일정하며 모래의 팽창각( $\psi$ )은 밀도에 의존한다. 따라서 팽창각( $\psi$ )의 변화에 따라 소성 체적팽창 변형율( $\Delta e_v^s$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Roscoe(1970), Vermeer(1990)).

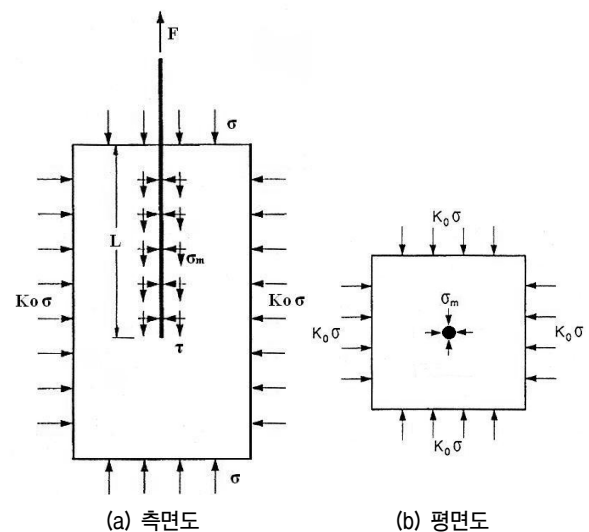


그림 1. 흙-보강재간 작용응력 개요도(Wang과 Richwien(2002))

$$\Delta\epsilon_v^p = -\Delta\gamma \tan\psi \quad (2)$$

여기서,  $\gamma$ 는 전단변형률이다. 전체지반의 체적이 일정하다고 가정하였을 때, 소성체적변형률은 탄성체적변형률과 동일하다.

$$\Delta\epsilon_v^e = -\Delta\epsilon_v^p = \frac{\tau}{G} \tan\psi \quad (3)$$

여기서,  $\tau$ 는 보강재에 작용하는 평균 전단응력,  $G$ 는 전단탄성계수이다. Hooke의 법칙에 의해서 탄성체적변형( $\Delta\epsilon_v^e$ )과 다일레이턴시에 의해 증가하는 평균연직응력( $\Delta\sigma_m$ )의 관계는 다음과 같다.

$$\Delta\epsilon_v^e = \frac{1}{E}(1-2\nu)(1+2K_0)\Delta\sigma_m \quad (4)$$

여기서,  $E$ 는 지반의 탄성계수이고  $K_0$ 는 횡방향 정지 토압계수이다. 지반의 탄성계수( $E$ )와 전단탄성계수( $G$ ) 사이의 관계를 고려하여 식 (3)을 식 (4)에 대입하여 정리하면,

$$\Delta\sigma_m = \frac{2(1+\nu)}{(1-2\nu)(1+2K_0)} \tau \tan\psi \quad (5)$$

여기서 인발력이 최대값에 도달하면 파괴가 발생하므로, 파괴 시의 전단강도( $\tau_f$ ), 즉 극한주면마찰력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_f = (\sigma_m + \Delta\sigma_m)f = \left( \sigma_m + \frac{2(1+\nu)}{(1-2\nu)(1+2K_0)} \tau_f \tan\psi \right) f \quad (6)$$

식 (6)을 정리하게 되면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Rightarrow \tau_f = \frac{f}{1 - [2(1+\nu)/(1-2\nu)(1+2K_0)]f \tan\psi} \sigma_m \quad (7)$$

인발마찰계수( $f^*$ )는 평균연직응력( $\sigma_m$ )과 전단강도( $\tau_f$ ) 사이의 관계이므로 다음과 같이 얻어진다.

$$f^* = \frac{f}{1 - [2(1+\nu)/(1-2\nu)(1+2K_0)]f \tan\psi} \quad (8)$$

인발마찰계수( $f^*$ )는 초기마찰계수( $f = \tan\phi$ )와 비선형의 관계를 가지며, 인발마찰계수는 지반의 다일레이턴시 효과에 영향을 받는다. 또한 팽창각( $\psi$ )이 0이면  $f$ 와  $f^*$ 는 같게 된다(Wang과 Richwien(2002)).

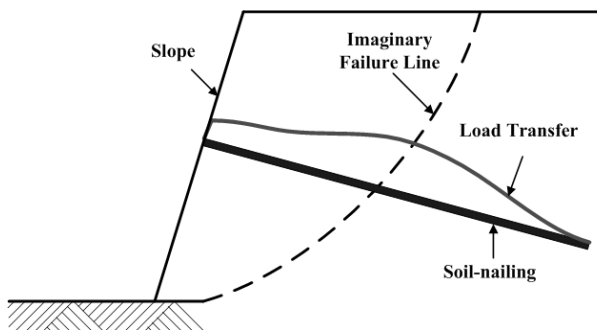
식 (8)은 점착력이 없는 사질토에서 인발할 경우, 인발마찰계수( $f^*$ )가 초기마찰계수( $f$ )에 비해 다일레이턴시 효과에 의해서 얼마나 증가할 것인지를 나타낸 것이다. 만약 점착력이 있는 지반에 대해 인발마찰계수를 산정할 경우, 팽창에 의한 효과가 마찰계수의 증가에 지배적이라면 인발저항력은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_f = f^* \sigma_m + c \quad (9)$$

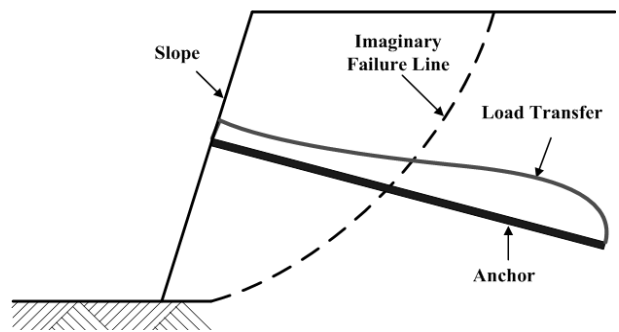
## 2.2 하중전이 이론

쏘일네일링, 앵커 그리고 하이브리드 공법은 각 공법의 저항특성에 따라 하중전이 방식이 달라지게 된다. 먼저, 쏘일네일링 공법 같은 경우 지반의 변위가 발생하게 되면 저항을 하게 되는 수동적인 공법으로 하중이 파괴면의 전면에서 선단으로 전이되게 된다(그림 2(a) 참조). 하지만 앵커 공법은 지반의 변위를 억제하기 위해 선단의 내하체에서 프리스트레스를 가하기 때문에 하중이 선단에서부터 발생하게 되며 전면으로 전이된다(그림 2(b) 참조).

쏘일네일링과 앵커가 결합된 하이브리드 공법은 그림 3에서 보이는 것과 같이 철근과 PC강연선이 결합된

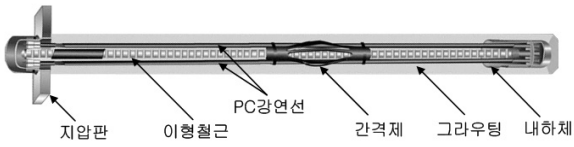


(a) 쏘일네일링의 하중전이

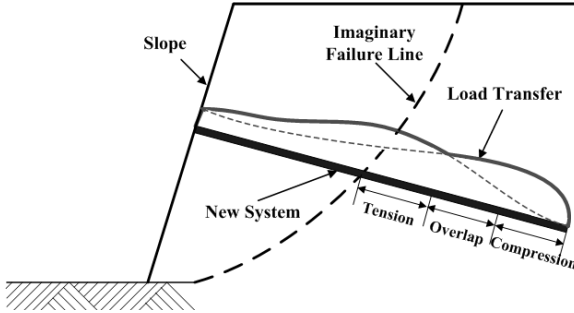


(b) 앵커 공법의 하중전이

그림 2. 각 공법의 하중전이 메커니즘 개념도



(a) 하이브리드 공법의 모식도



(b) 하이브리드 공법의 하중전이

그림 3. 하이브리드 공법의 구성

표 1. 보강재의 물성

	탄성계수 (GPa)	항복하중 (kN)	직경 (mm)	단면적 (mm <sup>2</sup> )
PC 강연선	200	318	12.7	197.4
철근	204	203	25	506.7

신공법으로 쏘일네일링과 앵커의 장점을 모두 고려한 하이브리드 공법이라고 할 수 있다. 하이브리드 공법에서 사용하는 보강재의 물성은 표 1에 나타나 있다. ABG 하이브리드 공법의 선단부를 보게 되면 PC강연선과 내하체가 연결되어 있어 PC강연선에 프리스트레스를 가하여 내하체에서 전면부로 하중이 전이되게 된다. 또한

인발거동이 발생하게 되면 선단부의 내하체로부터 하중이 전이되어 파괴면 밖에서의 주면마찰력은 작용하는 토압에 대하여 능동적으로 저항할 수 있다는 장점이 있다. 전면부에서는 PC강연선에 프리스트레스를 가한 후 콘을 이용해 PC강연선을 고정하여 지속적으로 내하체에 하중을 전달할 수 있도록 구성되어 있다.

따라서, 두공법의 하이브리드 공법 같은 경우 초기에는 프리스트레스를 가하기 때문에 앵커 공법과 동일한 거동을 보이나 프리스트레스 후 파괴거동 시에는 전면에서는 쏘일네일링과 같이 하중이 전이되고 선단에서는 앵커와 같이 하중이 전이되어 중심부에서 하중이 중첩되는 것을 알 수 있다(그림 3(b) 참조).

쏘일네일링 공법의 하중전이 메커니즘을 보게 되면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 인발 초기에는 인발하중 ( $F$ )이 작기 때문에 주면마찰력( $\tau$ )에 의해서 감소하여 하중이 선단부까지 전이되지 않게 되다가 하중이 어느 시점 이후부터는 선단부까지 전이되는 전이하중( $F_{trans}$ )이 발생하게 된다. 그 후 더 큰 하중을 가하게 되면 극한 하중( $F_{ult}$ )까지 하중이 증가하여 쏘일네일링의 파괴가 발생하게 된다. 따라서 쏘일네일링의 하중전이는 인발 하중( $F$ ), 주면마찰력( $\tau$ ) 그리고 전이되는 하중으로 나타낼 수 있다.

$$F - T_s + F_{tip} = 0 \quad (10)$$

여기서,  $F_{tip}$ 는 선단으로 전이되는 하중,  $T_s$ 는 인발저항력으로 주면마찰력( $\tau$ )에 원주와 길이성분을 곱한 하

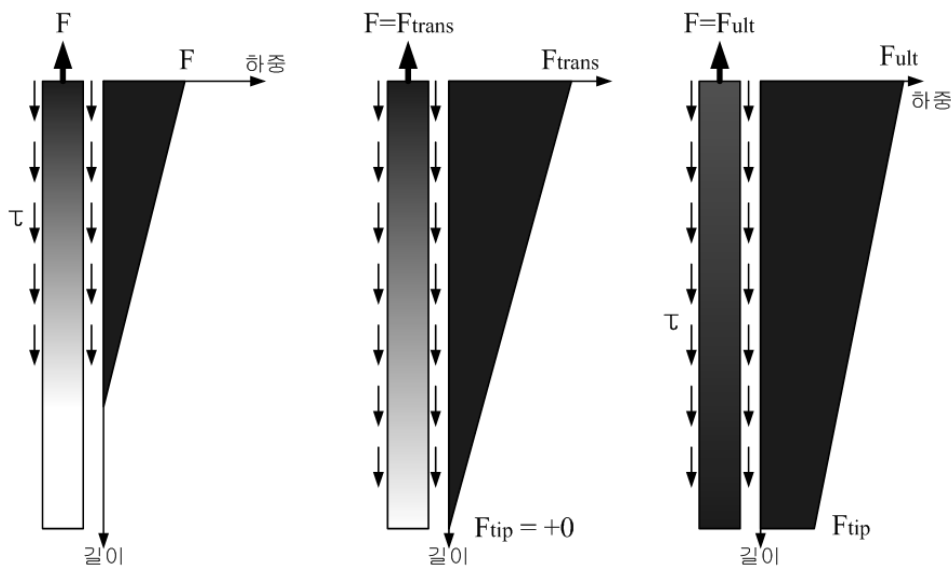


그림 4. 쏘일네일링의 하중전이 메커니즘

중값이다.

앵커공법은 쏘일네일링과 반대방향인 선단에서 프리스트레스( $Q_i$ )를 가하게 된다. 프리스트레스를 가하게 되면 초기에는 주면마찰력에 의해 하중이 감소하여 전면까지 하중이 전이되지 않지만 프리스트레스를 더 크게 가하게 되면 하중이 전면으로 전이되어 전이하중( $Q_{trans}$ )이 발생하게 된다. 그 후 더 큰 프리스트레스를 가하게 되면 결국 극한하중( $Q_{ult}$ )에 도달하게 되며, 이를 나타내면 식 (11)과 같다(그림 5 참조).

$$Q_i - T_s + Q_{i,face} = 0 \quad (11)$$

하이브리드 공법은 먼저 앵커공법과 동일하게 선단에서 프리스트레스( $Q_i$ )를 가하게 된다. 프리스트레스 하중이 전면으로 모두 전이되게 되면(전이하중( $Q_{trans}$ ))

작용) 프리스트레스를 그만 가하게 된다. 따라서 초기에 프리스트레스를 가하는 단계에서 하이브리드 공법의 철근, PC강연선 및 그라우팅 부분은 압축력을 받게 된다. 하지만 지반의 변위가 발생함에 따라 전면부에서부터 인발하중( $F$ )이 가해지게 되고, 인발하중이 점점 증가함에 따라(극한하중( $F_{ult}$ )) 프리스트레스에 의해 발생한 압축력은 점점 감소하게 된다. 또한 PC강연선이 지속적으로 인장저항을 함에 따라 선단부의 내하체에서는 압축력이 지속적으로 가해지게 된다. 따라서 전면부는 인발하중이 지배적이고 선단부는 압축력이 지배적이며 중심부에서 중첩현상이 발생하는 구간이 나타나게 된다(그림 6 참조).

하이브리드 공법은 초기 프리스트레스에 의한 압축하중, 인발거동 시 전면부에서 작용하는 인장하중 및 내

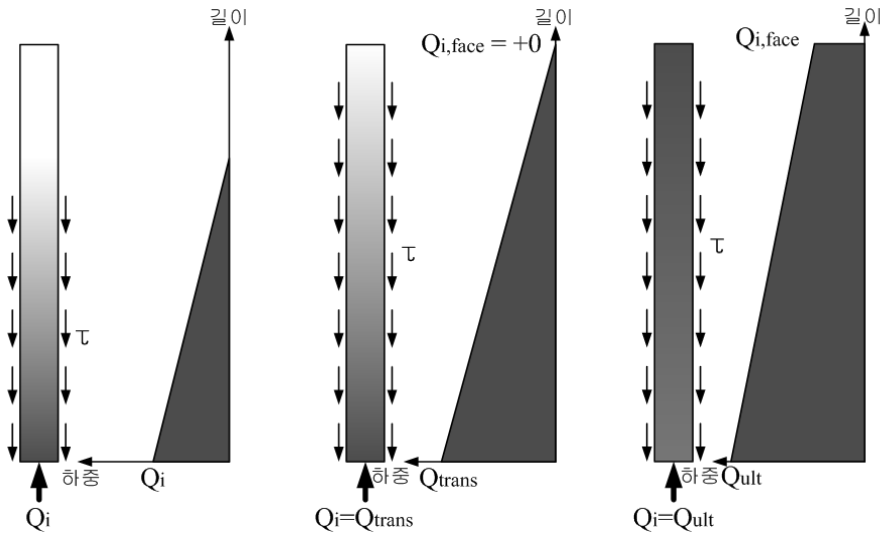


그림 5. 앵커공법의 하중전이 메커니즘

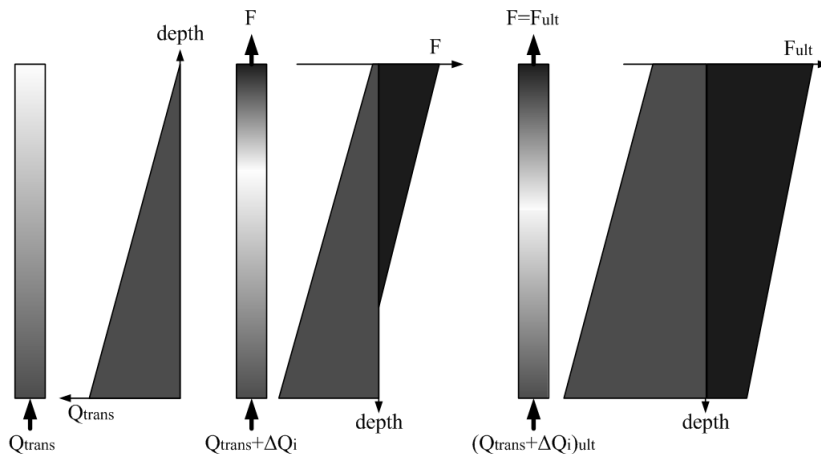


그림 6. 하이브리드 공법의 하중전이 메커니즘

하체에서 지속적으로 가해지는 압축하중에 대한 고려를 해주어야 한다. 서형준 등(2010)은 하중전이 이론을 바탕으로 프리스트레스를 가할 경우와 인발거동이 발생할 경우에 철근이 받는 압축력을 산정하였다. 식 (12)는 프리스트레스를 가할 경우 철근이 받는 압축력이며, 식 (13)은 동시인발 거동이 발생할 경우 철근이 받는 인장력 증가량이다.

$$F_s = \frac{Q_i}{\left(A_s + \frac{E_g}{E_s} A_g\right)} A_s \quad (12)$$

$$\Delta Q_{i+1,comp} = 2.6Q_i - \frac{3.6Q_i}{\left(A_s + \frac{E_g}{E_s} A_g\right)} A_s \quad (13)$$

여기서,  $F_s$ 는 철근이 받는 하중,  $Q_i$ 는 프리스트레스 하중,  $A_s$ 는 철근의 단면적,  $A_g$ 는 그라우팅의 단면적,  $E_s$ 는 철근의 탄성계수,  $E_g$ 는 그라우팅의 탄성계수, 그리고  $\Delta Q_{i+1,comp}$ 는 동시인발 시 압축력을 고려한 철근의 인장력 증가량이다. 이 식을 통해서 하이브리드 공법의 두 보강재 사이에서 작용하는 하중에 대해서 판단할 수 있다. 식의 자세한 유도과정은 서형준(2010) 등의 논문을 참조하기 바란다.

### 3. 현장인발시험

본 연구에서 현장인발시험은 쏘일네일링, 앵커, 그리고 두공법이 결합된 하이브리드 공법의 하중전이 메커니즘을 규명하고자 실시하였다. 따라서 철근과 그라우팅 내부에 변형률계를 설치하여 보강재의 선단 및 전면부에서부터 발생하는 하중전이 양상을 파악하였다. 현장시험 결과는 앞서 제안한 주변마찰력 산정이론과 하중전이 이론을 바탕으로 제안된 이론식과 비교해 보았으며, 이론식의 정용성을 판단하였다.

표 2. 각 시공 공법별 정리

공법	종류	주변마찰력 작용시점	하중 증가(kN)					
			0	59	98	137	167	196
쏘일네일링	S.N.	전면부	인 발					
앵커	C.A.	선단부	프리스트레스					
하이브리드	H.M.	선단부	프리스트레스			동시인발		

### 3.1 현장시험의 계획 및 대상지반

현장시험은 강원도 원주시 지정면에서 실시하였으며, 쏘일네일링 1공, 앵커 1공, 하이브리드 모델 1공에 대해서 계측을 실시하였다. 모든 공법은 4.3m로 연직으로 시공하였으며, 인발시험 시 각 공법의 하중변화 양상을 측정하기 위해 그림 7에서 보는 것과 같이 계측간격을 두어 철근 변형률계와 그라우팅 변형률계를 설치하였다. 그림 7에서 보는 것과 같이 각각의 공법이 시공된 장소에 2공의 시추조사를 실시하여 지층의 구성을 판단하였으며, 표준재하시험, 공내재하시험,  $\gamma$ 선을 이용한 밀도검측, 직접전단시험을 통해서 지반물성치를 산정하였다. 대상지반은 N치가 16정도인 지반으로 탄성계수는 5.5GPa, 단위중량은 17.8kN/m<sup>3</sup>, 내부마찰각 35.9°, 점착력 45.5kPa로 나타났다.

본 논문에서는 3가지 공법의 파괴거동을 고려하여 인발시험을 실시하였으며, 각각의 인발시험은 하중제어 방식을 통해 진행하였다. 쏘일네일링 공법은 전면에서 철근을 인장하여 약 160kN까지 인발시험을 실시하였으

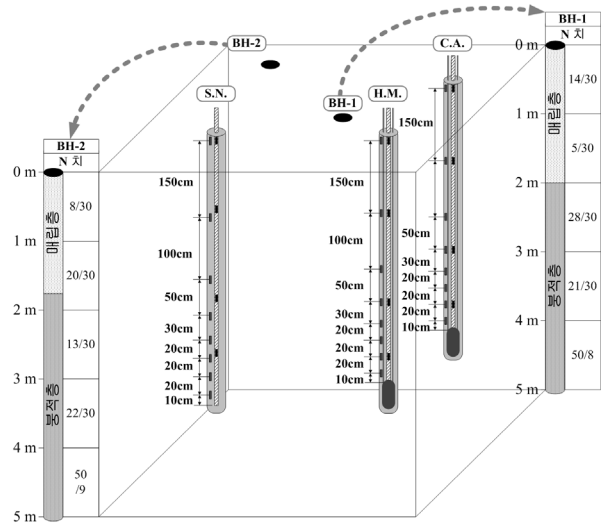


그림 7. 현장인발시험의 개요

며, 앵커 공법은 PC강연선에 프리스트레스를 196kN까지 가하는 인발시험을 진행하였다. 하이브리드 공법은 프리스트레스를 137kN까지 가한 후 철근과 함께 동시인발을 실시하였으며, 각 공법의 인발시험 개요는 표 1에서 보는 것과 같이 간략하게 나타나 있다. 따라서 쏘일네일링 공법은 전면에서부터 주면마찰력이 발휘되며, 앵커공법은 선단에서부터 주면마찰력이 발휘된다. 또한 하이브리드 공법은 초기에 프리스트레스를 가할 때에는 선단부에서 주면마찰력이 발휘되지만 동시인발 시에는 전면과 선단 모두에서 주면마찰력이 발휘될 것으로 판단된다.

### 3.2 현장인발시험 결과분석 및 이론적 검증

현장인발시험은 3가지 공법에 대해 각각 인발시험을 실시하였으며, 인발시험과 동시에 삽입된 철근 및 콘크리트 변형률계를 통해서 계측을 실시하였다. 현장시험에서 계측한 3가지 공법의 시험결과는 본 현장시험에 국한되기 때문에 이를 보완하기 위해 본 논문에서 제안한 이론식을 바탕으로 이론적 검증을 실시하였다.

쏘일네일링 공법은 지반의 변위가 발생하면 가상의 파괴면 밖에서 주면마찰력이 발휘가 된다. 따라서 인발시험은 전면부에서 철근을 인장하여 실시하였으며, 이때 계측결과는 그림 8과 같다. 또한 식 (9)를 통해 구한 주면마찰력을 식 (10)에 대입하여 쏘일네일링의 길이별 하중전이 양상을 이론적으로 전개하였다(그림 8 참조).

쏘일네일링을 인장하게 되면 전면부에서 인장하중이 크게 발생하며 주면마찰력에 의해 인장력이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 이론적으로 보았을 때 125kN으로 인장하중을 가하였을 때 전면에서 가해진 인장하중이 선단으로 전이되는 전이하중( $F_{trans}$ )이 나타나는 것을 알 수 있었다. 인발시험결과를 보았을 때도 약 100kN 정도에서 인장하중이 선단으로 전이되는 것으로 판단된다.

앵커 공법은 지반의 변위를 최대한 억제하기 위해서 초기에 프리스트레스를 가하게 된다. PC강연선에 가해진 프리스트레스 하중은 내하체로 직접 작용하게 되고, 내하체에서 가해지는 프리스트레스하중은 앵커체에 압축력으로 작용하게 된다. 그림 9의 인발시험 결과에서 보는 것과 같이 프리스트레스를 가하게 되면 내하체와 근접한 계측지점에서 압축력이 크게 작용하는 것을 알 수 있으며, 선단부에서 전면부로 갈수록 주면마찰력의 저항에 의해 압축력이 감소하는 것을 알 수 있다. 하중 전이의 이론값은 식 (9)에서 산정한 주면마찰력을 식 (11)에 대입하여 앵커체의 길이별로 산정하였으며, 이 결과는 앵커의 인발시험 결과와 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 내하체에서 가해지는 프리스트레스가 전면부로 전해지는 전이하중( $Q_{trans}$ )은 125kN으로 나타나는 것을 알 수 있다.

쏘일네일링 공법과 앵커공법을 보게 되면 쏘일네일링 공법은 전면에서 선단으로, 그리고 앵커공법은 선단에서 전면으로 가해진 하중이 전이되는 전이하중이 발

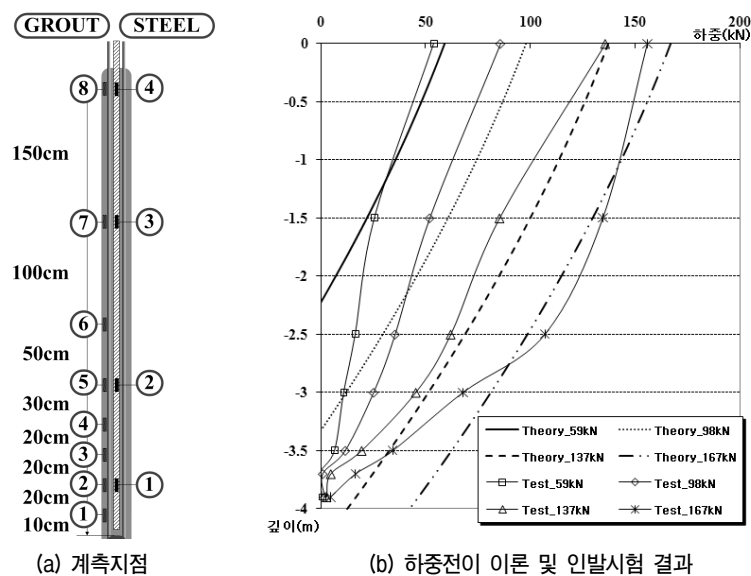


그림 8. 쏘일네일링 공법의 하중전이 메커니즘

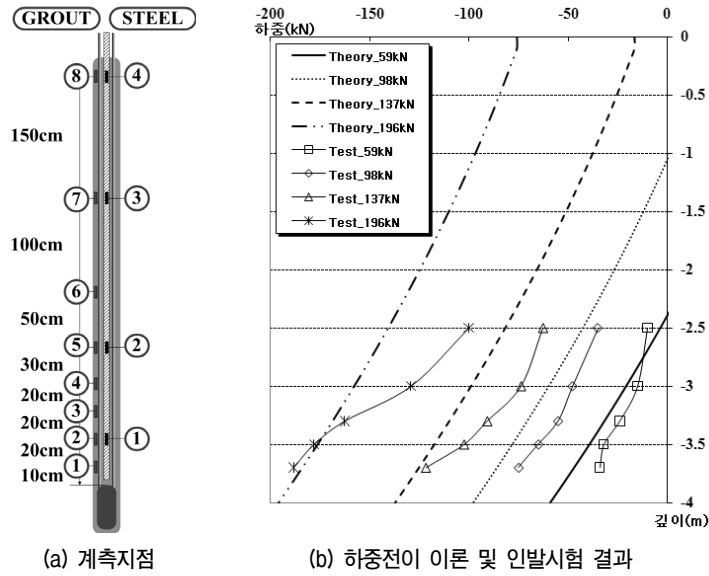


그림 9. 앵커 공법의 하중전이 메커니즘

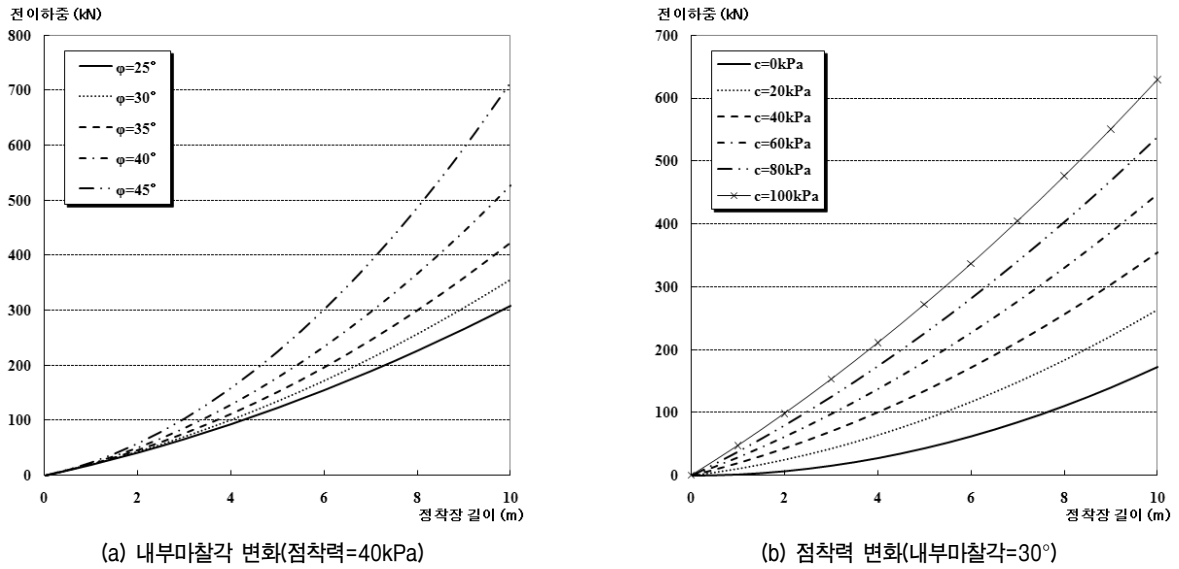


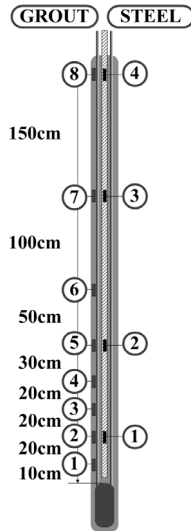
그림 10. 전이하중의 변화양상

생하는 것을 알 수 있다. 본 논문은 현장시험에서 붕적층 지반에 네일의 길이가 4.3m인 경우에 대해서 인발시험을 실시하였으며, 전이하중이 약 125kN으로 나타났다. 하지만 그림 10에서 보는 것과 같이 전이하중은 지반의 조건과 네일의 정착장의 길이에 따라 크게 변화한다. 정착장의 길이가 길어질수록 주변마찰력이 증가하기 때문에 전이하중이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 정착장의 길이가 길어질수록 내부마찰력에 의한 영향이 지배적인 것을 알 수 있다. 그림 10a에서 보는 것과 같이 정착장의 길이가 짧을 경우에는 내부마찰각 변화에 따른 전이하중의 변화폭이 크지 않지만 정착

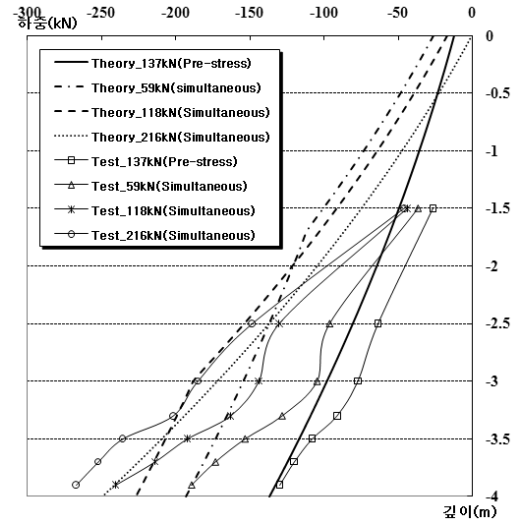
장의 길이가 길어지게 되면 내부마찰각의 변화에 따른 전이하중의 변화폭이 큰 것을 알 수 있다. 하지만 그림 10b에서 보는 것과 같이 점착력을 변화시킨 경우에는 정착장의 길이가 짧은 경우에도 전이하중의 변화폭이 큰 것을 알 수 있다. 따라서 정착장의 길이가 짧은 경우에는 점착력이 전이하중의 변화양상에 지배적이며, 정착장의 길이가 길어질 경우에는 내부마찰력에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있다.

하이브리드 공법은 쏘일네일링 공법과 앵커 공법이 결합된 공법으로 초기에는 프리스트레스를 가하고 난 후 동시인발을 하였다. 따라서 초기에는 앵커공법과 같

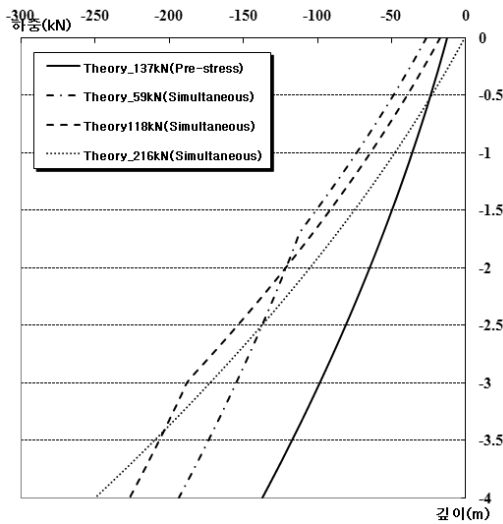




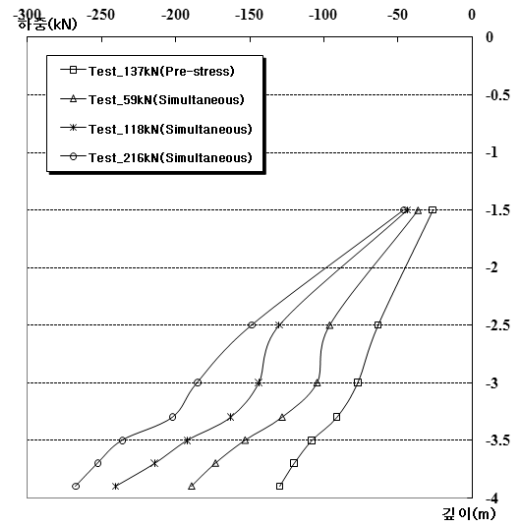
(a) 계측지점



(b) 하중전이 이론 및 인발시험 결과



(c) 하중전이 이론 결과



(d) 하중전이 인발시험 결과

그림 11. 하이브리드 공법의 하중전이 매커니즘

은 거동을 보이게 되지만 프리스트레스를 모두 가한 후 동시인발을 하게 될 때에는 쏘일네일링과 앵커의 거동을 모두 보이게 된다. 주면마찰력 산정 및 하중전이 이론을 통해 산정한 하이브리드 공법의 길이별 작용하중을 보게 되면 그림 11c와 같다. 먼저, 프리스트레스를 단계별로 137kN까지 가하는 경우에는 앵커의 거동과 동일하게 선단에서 압축력이 크게 작용하고 압축력은 전면으로 전이된다. 그리고 137kN 이후에 동시인발을 하게 되면 전면에서는 인장력이 작용하고 선단에서는 압축력이 작용하게 된다. 프리스트레스에 의해 압축거동을 보이던 하중전이 양상은 전면에서 인장력이 선단으로 작용하게 되면서 선단에서 작용하던 압축력이 감소하게 된다. 따라서 프리스트레스를 가하는 단계(앵커

거동)와 비교해 보았을 때 압축력이 감소하는 기울기가 가파른 것을 알 수 있다. 이러한 압축력 감소양상은 동시인발 하중이 증가함에 따라 더 크게 나타난다. 예를 들어, 동시인발하중이 59kN인 경우와 216kN인 경우를 비교해보면 216kN으로 인발하였을 때 인발하중은 매우 크지만 실제 작용하는 압축하중은 59kN으로 인발하는 경우에 비해 더 작은 것을 알 수 있다. 이는 철근의 신장량이 PC강연선보다 더 작기 때문에 철근에 하중이 집중되어 동시인발 이후의 인발하중의 분배가 내하체에서 가해지는 선단의 압축력보다 철근에서 가해지는 전면의 인장력이 약 2.6배 정도로 더 크기 때문이다. 따라서 동시인발 이후에는 전면에서 가해지는 인장력에 의해 그라우팅 구근 및 철근에 작용하고 있던 압축력이 감소

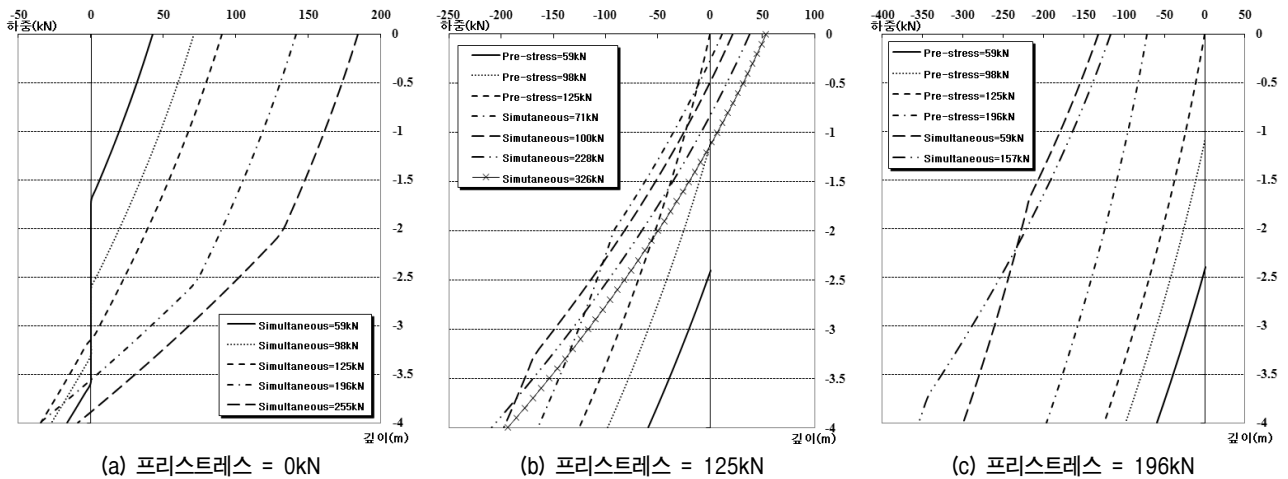


그림 12. 프리스트레스 변화에 따른 하중전이 양상

하는 것을 알 수 있다. 그림 11d에서 보는 것과 같이 현상인발시험에서도 프리스트레스를 가한 후에 동시인발을 하게 되면 압축력이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 11b에서 보는 것과 같이 하중전이 이론을 통해 산정한 하중의 분포양상과 실제 시험 값이 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 결론적으로 인발하중이 커질수록 전면에서 작용하는 인장력이 증가하게 되고 증가한 인장력은 선단에서 가해지는 압축력과 중첩하여 압축력을 감소시키게 된다. 따라서 하이브리드공법은 프리스트레스를 가할 때는 앵커공법과 같이 선단에서 압축력이 강하게 작용하고 동시인발을 하게 되면 선단에서는 압축력이 우세하고 전면에서는 인장력이 우세한 것을 알 수 있다.

하이브리드 공법은 쓰일네일링과 앵커가 결합된 공법으로 가장 큰 특징 중 하나가 프리스트레스를 가하는 것이다. 프리스트레스를 가하게 되면 초기 지반의 변위를 억제시킬 수 있으며, 굴착에 의해 느슨해진 지반을 다져주게 된다. 따라서 전면에서 발생할 수 있는 얇은파괴를 방지할 수 있다. 본 논문에서는 하이브리드 공법에서 프리스트레스 하중의 강도를 정량적으로 파악하기 위해서 프리스트레스를 가하지 않았을 경우, 전이하중으로 가하였을 경우, 그리고 전이하중에 비해 상대적으로 크게 가하였을 경우에 대해 비교하였다(그림 12 참조).

그림 12a에서 보는 것과 같이 프리스트레스를 가하지 않고 동시인발을 하게 되면 철근이 PC강연선에 비해 약 2.6배의 하중을 더 받은 만큼 인장력이 전면에서 작용하게 되고, 선단의 내하체에서 전면의 인장력보다 작은 압축력을 가하게 된다. 동시인발 하중이 125kN 정도에서

전면에서 인장력과 선단에서의 압축력이 서로 중첩되게 되며, 이때 중첩되는 지점은 전면에서부터 3m 떨어진 지점보다 뒤에 위치하는 것을 보았을 때 네일 전체에서 인장력이 우세한 것을 알 수 있다. 인발하중이 증가할수록 전체 네일에 작용하는 인장력은 더 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 255kN으로 동시인발하였을 때는 전체 네일에서 거의 인장력이 작용하는 것을 알 수 있다. 하지만 이 경우 철근의 항복하중이 약 200kN인 것을 고려해 보았을 때 거의 항복에 다다른 것을 알 수 있다. 따라서 프리스트레스를 가하지 않은 하이브리드 공법은 인장하중이 전체 하중전이에 있어서 나타나게 되며, 이 경우 큰 인발하중을 얻을 수 없게 된다. 두 번째로 프리스트레스를 196kN으로 가하게 되면, 그림 12c에서 보는 것과 같이 전체 네일에는 압축력이 지배하는 것을 알 수 있다. 프리스트레스를 가한 후 동시인발 상태에서 철근이 PC강연선보다 약 2.6배의 하중을 받은 만큼 네일에 인장력으로 작용하게 되지만 이미 네일은 압축력을 과하게 받고 있어 인장력이 작용하기는 역부족인 것을 알 수 있다. 따라서 PC강연선에 하중이 과하게 실리게 되어 PC강연선의 항복이 발생하는 것을 알 수 있다. 마지막으로 전이하중만큼 프리스트레스를 가한 경우이다. 프리스트레스를 가하는 동안 네일은 압축력에 의해 하중이 전이되는 양상을 보인다. 압축력이 지배적이던 네일은 동시인발을 함에 따라 하중전이 양상이 바뀌게 된다. 선단의 압축력보다 2.6배 정도 더 큰 전면의 인장력이 동시인발 과정에서 지속적으로 작용함에 따라 인장력과 압축력이 전체 네일에 고루 분포하는 것을 알 수 있다. 앞선 현장시험 계측결과에서 나타

나는 것과 같이 전면에서는 인장력이 지배적인 양상을 나타내며, 선단에서는 압축력이 지배적인 양상을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 프리스트레스를 가하는 동안 압축력이 네일에 지배적으로 작용하면서 동시인발을 하게 되면 PC강연선에서 항복이 발생할 것으로 판단되었지만(그림 12b의 그래프에서 좌측으로 이동) 동시인발을 함에 따라 철근이 하중을 집중적으로 받으면서(그림 12b의 그래프에서 우측으로 이동) 최종 인발하중이 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 쓰일네일링과 앵커가 결합된 하이브리드 공법의 하중전이 메커니즘을 규명하기 위하여 하중전이 이론 및 현장인발시험을 실시하였으며, 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 주변마찰력 산정 이론 및 하중전이 이론을 바탕으로 쓰일네일링, 앵커, 하이브리드 공법의 하중전이 메커니즘을 규명하였으며, 또한 각 공법에 대해 계측기를 설치하여 네일의 위치별로 하중의 전이 양상을 계측하였다. 적용된 이론과 시험결과는 유사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있으며, 주변마찰력 분포양상을 판단하기에 하중전이 이론의 적절성을 판단할 수 있었다.
- (2) 현장인발시험에서 적용된 지반과 네일의 제원의 경우 전면에서 선단으로, 또는 선단에서 전면으로 전이되는 전이하중이 약 125kN로 나타났다. 하지만 지반의 조건변화 및 시공조건에 따라 전이하중은 변화하게 된다. 따라서 이러한 전이하중 발생조건을 고려하기 위해 본 연구에서는 각 지반의 조건과 정착장의 길이에 따라 전이하중의 변화양상을 이론적으로 규명하였으며, 정착장의 길이가 짧은 경우 점착력에 의한 영향이 크며 정착장의 길이가 긴 경우 내부마찰력에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있었다.
- (3) 쓰일네일링 공법의 경우, 전면에서 가해진 인장력이 작용하게 되며 주변마찰력에 의해 감소하면서 선단으로 하중이 전이되는 양상을 보였다. 반대로 앵커 공법의 경우, 선단에서 가해진 프리스트레스에 의해 압축력이 선단에서 작용하게 되며 주변마찰력에 의해 압축력이 감소하면서 전면부로 전이되었다. 하이브리드공법은 프리스트레스를 가할 때는

앵커공법과 같이 선단에서 압축력이 강하게 작용하고, 동시인발을 하게 되면 선단에서는 압축력이 우세하고 전면에서는 인장력이 우세하게 나타난다.

- (4) 하이브리드 공법은 프리스트레스 후 동시인발을 할 때 인발하중이 증가할수록 네일에 작용하는 압축력이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 철근의 신장량이 PC강연선보다 더 작기 때문에 철근에 하중이 집중되어 동시인발 이후의 인발하중의 분배가 내하체에서 가해지는 선단의 압축력보다 철근에서 가해지는 전면의 인장력이 약 2.6배 정도로 더 크기 때문이다. 따라서 동시인발 이후에는 전면에서 가해지는 인장력이 네일에 작용하고 있던 압축력을 감소시키는 것을 알 수 있다.
- (5) 하이브리드 공법에서 프리스트레스 하중을 정량적으로 검토하였으며, 프리스트레스를 가하지 않았을 경우에는 하중이 전면에서 선단으로 가는 인장거동이 지배적인 양상을 보였다. 이와 반대로 프리스트레스를 과하게 주었을 경우 전체 거동이 압축력이 지배적인 양상을 보였다. 두 경우 인장력과 압축력이 조화를 이루지 못해 철근이나 PC강연선의 항복이 발생하기 쉬운 조건이었다. 하지만 프리스트레스를 약 125kN으로 가하였을 경우, 프리스트레스를 가하는 동안에는 압축력에 의해 하중이 전이되었지만 동시인발 이후에는 압축력에 비해 약 2.6배 큰 인장력이 작용하여 인장거동과 압축거동이 네일 전체에서 작용하게 된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업(과제번호: 10기술혁신E04)의 연구지원에 의하여 수행된 결과의 일부로서 관계당국에 심심한 사의를 표합니다.

#### 참고 문헌

1. 김낙경 (2001), 인장형 앵커와 압축형 앵커의 하중전이에 관한 연구, *한국지반공학회논문집*, 제17권 제3호, pp.59-68.
2. 김태섭 (2009), 가압식 압축형 지반 앵커의 인발저항 증대효과 연구, *박사학위논문 고려대학교*.
3. 박시삼, 김홍택, 최영근 (2004), 프리텐션 쓰일네일링 시스템의 안정해석 및 설계, *한국지반공학회논문집*, 제20권 제7호, pp.197-206.
4. 서형준, 김현래, 정남수, 이인모 (2010), 쓰일네일링과 앵커가 결합된 하이브리드 공법의 거동 메커니즘, *한국지반공학회논문집*, 제26권 제7호, pp.117-133.

5. Liang, Y. R. and Feng, Y. X. (1997), "Development and Application of Anchor-Soil Interface Models", *A Short Course on Soil Nailing, Ground Anchoring, and Anchored Excavation*, The Graduate School of Industrial Technology and Environment, Dongguk University.
6. Wang, Z. and Richwien, W. (2002), "A study of soil-reinforcement

interface friction", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.1, pp.92-94.

(접수일자 2011. 9. 26, 심사완료일 2011. 12. 21)