

풍화토 지반에 적용된 인장형 앵커의 주면마찰응력 분포특성에 대한 수치해석적 연구

Numerical Study on the Skin Friction Characteristics of Tension Type Ground Anchors in Weathered Soil

정 현 식¹ Jeong, Heyon-Sik

한 광 석² Han, Kwang-Suk

이 영 생³ Lee, Yeong-Saeng

Abstract

Distribution of both axial force and skin friction should be investigated in order to estimate pull-out capacity of ground anchors. Numerical method of computing load-transfer characteristics of the ground anchors, however, has not been specified and studies on this area are not sufficient. This study suggested the numerical method of simulating the characteristics of axial force and skin friction distribution against the tension type ground anchors. Also, debonding behaviors of skin friction and axial force were calculated by the suggested numerical method as a function of load levels. As a result of the review, it is confirmed that the distributions of axial force and skin friction by the suggested numerical method are relatively similar to those of field test results.

요 지

지반앵커의 인발능력을 평가하기 위해서는 앵커 정착장에 작용하는 축력 및 마찰응력 분포특성을 검토해야 한다. 그러나 지반앵커의 하중전이특성에 대한 해석적 방법은 현재 기준화되지 않았으며 또한 이와 관련된 연구도 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 마찰(인장)형 지반앵커를 대상으로 풍화토 지반조건에서 작용하중별 정착장에 작용하는 축력 분포와 주면마찰응력분포 특성을 모사할 수 있는 해석적 방법을 검토하였으며, 본 해석적 방법을 통해 주면마찰응력의 진행적 변화거동 특성을 분석하였다. 검토결과 제안된 해석적 방법에 의한 정착장 축력 및 주면마찰응력 분포가 현장실험결과와 비교적 유사함을 확인하였다.

Keywords : Ground anchors, Debonding, Axial force, Skin friction, Shear strain, Strand, Fixed length

1 정희원, 경기대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Student, Dept. of Civil Engrg., Kyonggi-Univ.)

2 정희원, 경기대학교 토목공학과 박사수로 (Member, Ph. D. Course Comp., Dept. of Civil Engrg., Kyonggi-Univ.)

3 정희원, 경기대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyonggi-Univ., Tel: +82-31-249-9709, Fax: +82-31-249-9718, yslee@kyonggi.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지반앵커 공법은 천공홀내 강재와 그라우트로 앵커 정착장을 조성하여 구조물에 발생하는 인장력에 저항하는 공법으로 보통 고강도의 PC강선에 선행하중(pre-stress)을 가하여 지반으로부터 발생하는 응력, 변형, 변위 등으로부터 구조물을 안정시키는 구조체이다.

이러한 지반앵커는 크게 세부분으로 구성되는데 먼저 그라우트와 인장재의 부착저항과 지반과 주입재의 마찰저항을 통해 앵커력을 발휘하는 정착장과 정착장에서 발휘되는 응력을 전달하는 자유장, 그리고 자유장을 통해 전달되는 응력을 목적하는 구조체에 직접 재하하는 정착구로 구성되며 각각 필요한 안정성을 만족시킬 수 있도록 설계되어야 한다(Kim et al., 2016).

이때 지반앵커의 정착장은 필요로 하는 응력을 직접 발휘하는 가장 중요한 요소로 지반의 종류, 앵커의 정착 방식, 인장재의 종류, 그라우팅 방식 등이 충분히 고려되어야 하며 특히, 지반과 주입재의 마찰저항, 주입재와 인장재의 부착저항, 지반의 지압강도 등에 대한 안정성이 충분히 확보되어야 한다. 또한 앵커거동은 지반과 그라우트, 인장재 등의 이질적인 재료로 구성된 조건에서 구조적 성능을 발휘하게 되므로 각각의 재료 특성과 역학적 상호 관계에 대하여 충분히 고려되어야 한다. 이러한 지반앵커의 정착원리는 대표적으로 지반과 그라우트의 마찰저항, 그라우트와 인장재의 부착저항에 의해 필요한 앵커의 저항력을 확보하는 마찰형 앵커와 지반의 지압강도를 이용하여 필요한 앵커의 저항력을 확보하는 지압형 앵커로 크게 구분 할 수 있다. 여기서 지압형 앵커는 정착지반을 구성하는 암반이 비교적 신선할 경우 그라우팅 이전에 선행하중을 재하 할 수 있다는 장점 때문에 주로 암반정착조건으로 적용하고 있으며, 마찰형 앵커는 비교적 지반의 불균질성에 대한 대응력이 양호하여 모든 지반조건에 적용이 가능하다는 장점이 있는 관계로 국내외적으로 가장 보편화된 지반앵커 형식이다(Xanthakos, 1991; Kim et al., 2016).

이러한 지반앵커에 대한 연구중에서 Kim(2001)은 풍화토 지반을 대상으로 인장형 앵커와 압축형 앵커 각각에 진동현식 스트레인게이지를 설치하여 지반앵커의 하중전이특성을 검토하였으며, Kim et al.(2004)과 Kim et al.(2014)은 각각의 위치별 내하체가 부착된 하중분산형 지반앵커를 대상으로 내하체 위치별 매립형 게이지를 이용하여 하중분산의 작용력을 분석하였다. 또한 Hong et al.(2004)

은 지반앵커 두부에 설치된 로드셀을 이용하여 흙막이 지보공으로 이용되는 어스앵커의 초기앵커력과 인장력의 변화량을 측정하였고, 특히 Sung et al.(2011)은 인장형 지반앵커가 설치된 현장을 대상으로 자유장부와 정착부에 각각 광섬유브래그격자(Fiber Bragg Grating, FBG)를 설치하여 각 인장하중별 앵커 정착장의 응력분포를 측정하였다.

한편 정착장에 작용하는 정착응력 분포특성은 많은 현장과 실험적 결과를 통해 매우 비선형적인 관계임을 보여주고 있다(Ostermayer and Scheele, 1977; Weerasinghe, 1993). 그러나 국내외적으로 설계시의 정착응력분포특성을 설계편의상 보통 정착장의 길이에 비례하는 “일정한 주면마찰저항력값”으로 적용하고 있다. 이는 지반앵커 주면마찰응력 발현에 대한 공학적 메카니즘이 비교적 복잡한 관계로 지반앵커 설계시에 지반조건별 비선형적 정착거동을 모사하는데 어려움이 있기 때문이다.

그러나 이러한 기존 설계 방법은 설계앵커력을 예측하는데 있어서 비교적 편리하다는 장점이 있으나 다음과 같은 문제점을 내포하고 있다. 먼저 앵커인장하중 증가에 따른 정착장의 정착응력분포에 대한 분석이 곤란하고, 또한 각각의 앵커 인장하중 조건에 따른 정착장에서의 변위 특성을 파악하는데 한계가 있다. 물론 이러한 특성들을 파악하기 위해서 각각의 앵커제원과 지반조건별로 별도의 수치해석적 방법을 수행할 수는 있으나 이를 실무적으로 적용하기 위해서는 비교적 복잡하고 또한 상대적으로 비효율적일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 기존 설계방법으로는 구현할 수 없었던 지반앵커의 거동을 보다 용이하게 분석할 수 있는 방법을 제안하고 동시에 정착장 주면마찰응력의 진행적 변화(progressive debonding) 현상의 구현이 가능한 해석적 방법을 제안하고자 한다.

이를 위해서 본 논문에서는 기실시된 현장시험자료를 근간으로 지반앵커 정착장부의 축변형률 특성을 검토하고 이를 근거로 정착장부의 주면마찰응력과 축변형률의 관계를 분석할 것이다. 즉 본 논문은 현장시험결과에 부합되는 조건으로 지반앵커 정착장의 축변형률과 주면마찰응력과의 관계를 이용함으로써 지반앵커의 전반적인 거동을 예측할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 정착장 주면전단응력과 전단변형률의 관계

2.1 개요

일반적으로 지반내 설치된 지반앵커의 주면마찰응력

이 발휘되기 위해서는 어느 정도의 축변위가 발생해야 함은 자명한 사실이다(Xanthakos, 1991; Littlejohn, 1997). 즉 Fig. 1에 나타난 바와 같이 지반앵커의 축변형은 그라우트와 지반 접촉면간의 “미끄러짐 마찰(slip friction) 현상”에 주로 영향을 받게 되는데 여기서 그라우트와 지반 접촉면간의 전단변형 발생은 결국은 지반앵커의 축변형량 변화로 귀착되게 된다. 물론 인장재와 그라우트의 부착저항이 지반과 그라우트의 마찰저항 보다 작은 경우에는 지반앵커의 극한주면전단저항이 발생하기 이전에 인장재의 뽑힘(pull out)이 발생할 수 있으나 대부분의 실험결과와 기준서에서는 인장재와 그라우트의 부착저항이 지반과 그라우트 마찰저항 보다 상대적으로 더 큼을 나타내고 있다(Littlejohn, 1980; Xanthakos, 1991).

따라서 이러한 그라우트와 지반 접촉면간의 전단변형과 전단응력 관계가 규명된다면 실무적으로 지반앵커의 전단변형에 따른 앵커거동을 보다 용이하게 분석할 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 풍화토 지반을 대상으로 그라우트와 지반 접촉면간의 주면마찰응력을 수치해석적인 방법을 통해 선행 분석할 것이며, 이를 근간으로 대상지반의 축변형률과 주면마찰응력과의 상관관계를 제안하고 본 결과를 이용하여 지반앵커의 전단거동과 인발거동을 평가할 것이다. 또한 본 평가결과를 실제 현장에서 측정된 시험결과와 비교분석함으

로써 제안된 주면마찰응력과 축변형률과의 상관관계의 적정성을 검증하고자 한다.

2.2 정착장 주면전단응력과 전단변형률의 특성

Woods et al.(1997)은 Fig. 2와 같이 마찰형(인장형) 앵커를 대상으로 그라우트와 지반 접촉면간의 전단변형과 전단응력 관계를 제시하였으며, 이러한 관계는 인장재와 그라우트 접촉면(interface)간의 극한부착저항이 발생하기 이전에 먼저 그라우트와 지반간의 극한마찰저항이 발현됨을 가정한다. 또한 앵커 인발시 작용하중은 정착장 앞부분에서부터 하중이 작용하며, 이로 인해 인장재(tendon)는 탄성변위가 발생하게 되고 이에 대응하는 주변 그라우트의 변형이 발생함을 가정한다. 따라서 앵커 정착장부에 하중이 작용하게 되면 인장재와 그라우트와의 상호 부착저항에 입각하여 정착장 변형이 발생하게 되며, 이로 인해 그라우트와 주면지반의 전단변형이 발생하게 됨을 의미한다.

즉 Fig. 2의 관계가 성립되기 위해서는 다음과 같은 가정사항을 만족해야 한다.

먼저 첫 번째 가정사항은 앞서 설명한 바와 같이 인장재와 그라우트 접촉면간의 부착응력 저감 현상이 발생하기 이전에 먼저 그라우트-지반간의 주면마찰응력 저감

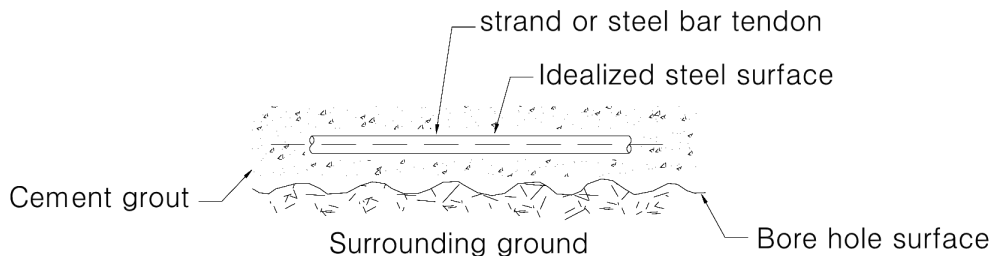


Fig. 1. Detailed view of grout-tendon interface with irregular bore hole surface

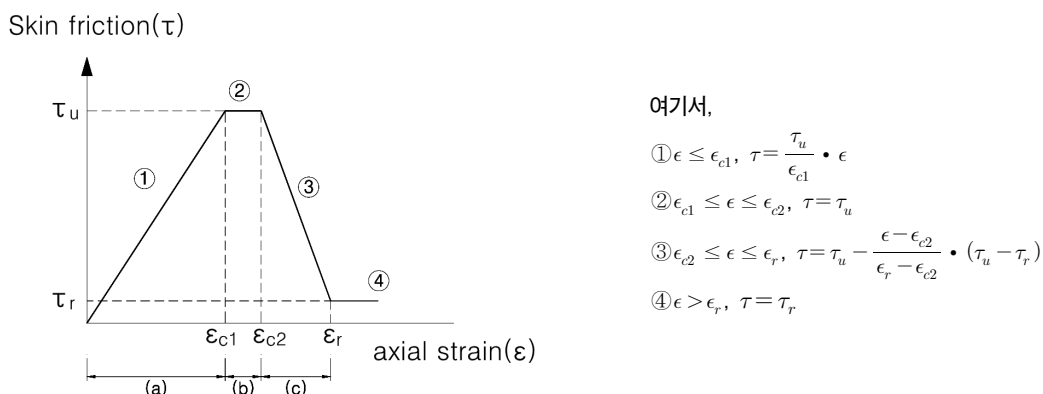


Fig. 2. Skin friction and axial strain relationship of ground anchors

현상이 발생하게 됨을 가정한다. 이는 일반적으로 연암 이하의 지반조건에서는 충분히 타당한 것이다(Littlejohn, 1980; BS Code, 1989).

두 번째 가정사항은 앵커 인발시 작용하중이 정착장 앞부분에서부터 선형적으로 작용함을 가정하는 것으로, 이는 마찰형(인장형) 앵커를 대상으로는 충분히 타당한 개념이다(Littlejohn, 1997; Xanthakos, 1991; FHWA, 1999). 즉 앵커 인발시 선형적으로 인장재(강재) 앞부분에서부터 탄성변위가 발생하게 되고, 이 탄성변위에 대응하는 주변 그라우트의 변형이 발생하게 되며 이때 하중은 점차 정착장 끝부분으로 전이되게 된다. 즉 축방향 하중 증가 시 그라우트체의 반경방향으로 미세 균열이 발생하면서 동시에 축방향으로 변형이 발생하게 되는데 이는 실제 지반앵커의 주변마찰응력이 발휘되기 위해서는 어느 정도의 축변위가 발생한다는 명백한 사실에 근거한 것이다.

세 번째 가정사항은 그라우트와 지반 접촉면간의 “미끄럼 마찰(slip friction) 현상”은 그라우트-지반간의 임계축변형률을 초과했을 때 발생한다는 것이다. 즉 Fig. 2에 나타난 바와 같이 인장하중 작용시 초기에는 1차 임계축변형률(ϵ_{c1})까지는 축변형률이 증가하면서 이에 따른 주변마찰응력도 증가하지만 어느 2차 임계축변형률(ϵ_{c2}) 이상에서는 축변형률이 증가함에 따라 주변마찰응력은 점차 감소하여 결국은 잔류 주변마찰응력(τ_r)로 수렴하게 될 것이다. 이때의 잔류 주변마찰응력(τ_r)값은 지반앵커 정착장의 인발이후 발생하는 소성변위에 해당하는 값이다.

이러한 지반앵커의 거동은 국내에서 보편적으로 적용되고 있는 마찰형(인장형) 앵커의 일반적인 거동에 기인한 것이므로 상기 가정사항은 비교적 합리적인 가정사항이다(Littlejohn, 1980; Xanthakos, 1991; Kim et al., 2014).

2.3 수치해석을 통한 정착장 주변전단응력과 전단변형률의 상관관계

본 논문에서는 마찰형(인장형) 앵커를 대상으로 지반

앵커의 축변형률과 전단변형률과의 상관성을 검토하기 위해서 수치해석을 실시하였다. 이때 수치해석에 적용되는 앵커제원 및 지반조건은 김포지역 현장시험조건을 고려하여 설정하였으며, 이를 근거로 지반앵커의 정착거동을 분석하였다. 이를 위해 실시한 수치해석 프로그램은 국내외 범용적으로 많이 이용되는 SIGMA/W 프로그램(GEO-SLOPE International Ltd.)을 이용하였으며 각각의 해석조건은 다음과 같다.

2.3.1 해석조건

1) 해석단면 및 모델링도

본 수치해석에서는 지반앵커의 인발에 따른 인장재(강연선)의 축변형률과 주변지반의 마찰거동을 분석하기 위해서 Fig. 3, 4와 같이 지반-앵커구조체를 모델링하였으며, 수치해석에 적용된 앵커제원은 Table 1에 나타난 바와 같이 김포지역 현장시험에서 실시된 시험앵커체 조건을 적용하였다. 즉 지반앵커의 정착장(L_b)은 현장시험조건과 동일하게 각각 6.0m, 5.0m로 설정하였고, 인장재(강연선) 조건은 허용인장력 400kN까지 작용할 수 있도록 직경 12.7mm의 강연선 4가닥 조건으로 모델링하였으며 본 수치해석을 통해 각 인장하중 조건별 정착장의 축변위와 주변마찰응력을 검토하였다.

2) 지반앵커 모델링 조건

본 수치해석에서는 인장력 증분에 따른 앵커 주변지반의 응력변화를 검토하기 위해서 자유장(L_f)과 정착장(L_b)은 빔(beam)요소로 모델링 하였으며 이때 자유장(L_f) 구간은 강연선 $\phi 12.7\text{mm}$, 4가닥 조건을 고려하기 위해 강연선 4가닥 조건에 대응하는 단일 환산직경의 강연선으로 모델링 하였다(Table 2, Fig. 5 참조). 또한 지반앵커의 정착장(L_b)은 천공경(D_{bh})=105mm조건을 고려하여 강연선과 그라우트의 복합체로 구성되는 빔(beam)요소로 모델링하였으며 이때 복합구조체에 대한 환산물성치 조건은 식 (1)과 같이 적용하였다(Table 3 참조).

Table 1. Site test condition for field pull out test of ground anchors (Sung, 2012)

Classification	Bore hole Dia. (mm)	Free Length (m)	Fixed Length (m)	Total Length (m)
SA-1	105	5.5	6.0	11.5
SA-2	105	6.5	5.0	11.5

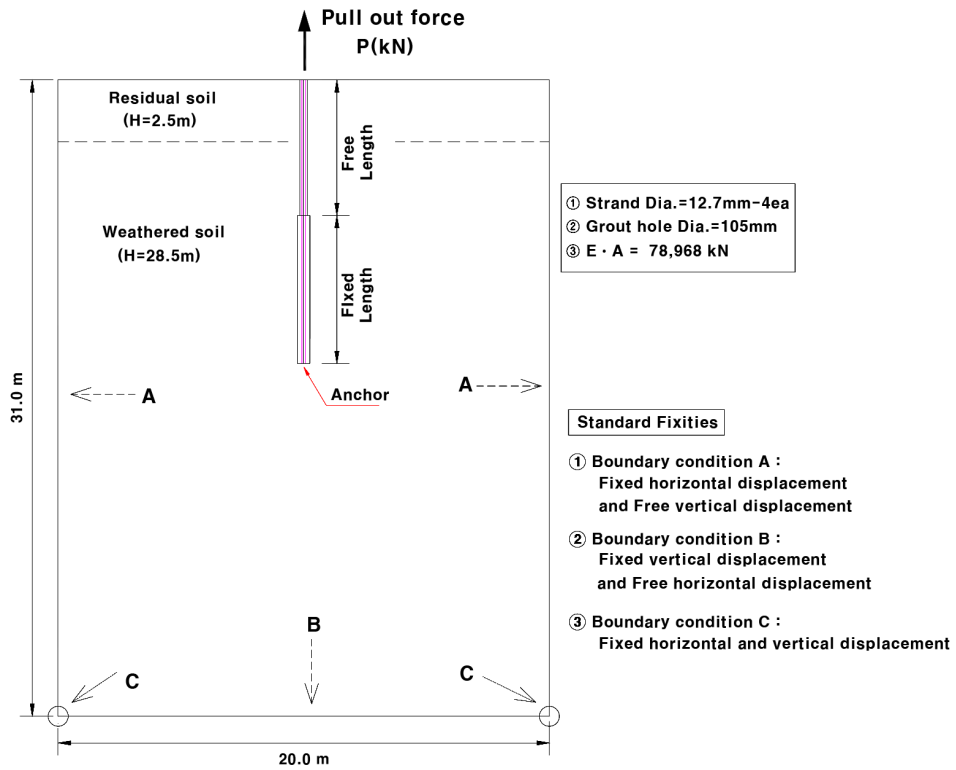


Fig. 3. Modeling and boundary conditions for numerical analysis

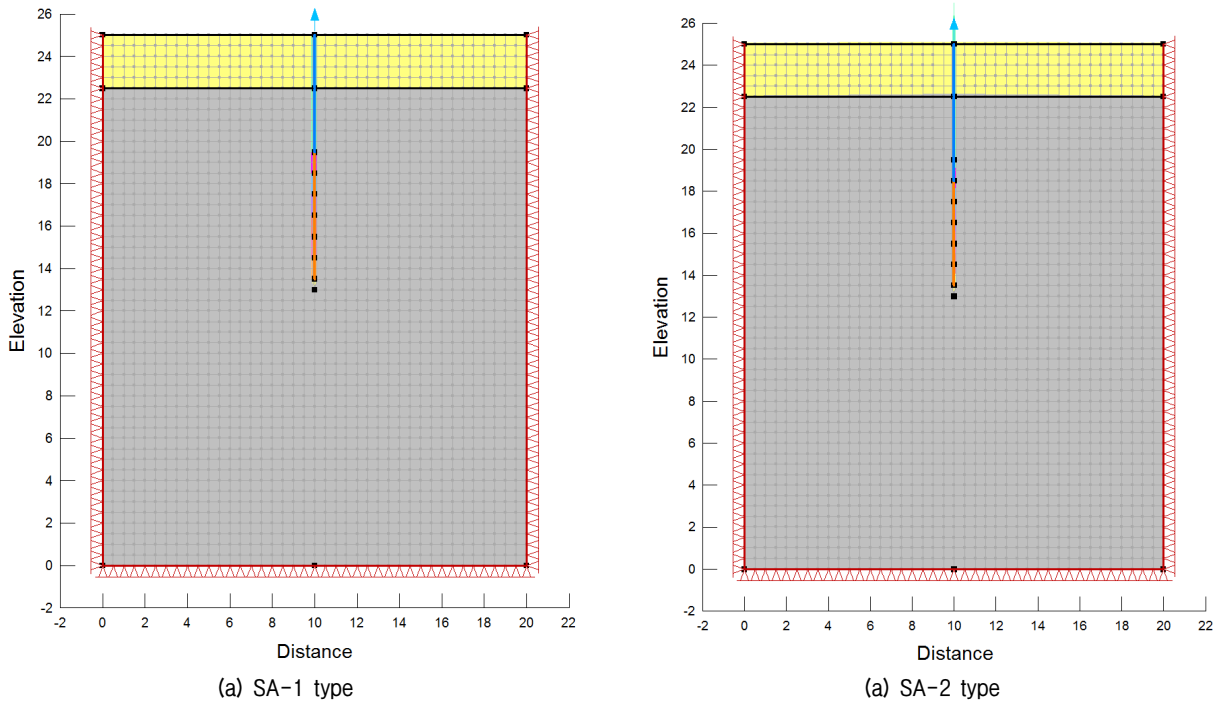


Fig. 4. Modeling diagram of soil and ground anchors for FEM analysis

$$E_t = \frac{E_s \cdot I_s + E_g \cdot I_g}{I_t} \quad (1)$$

여기서, E_t : 정착장의 탄성계수, I_t : 정착장의 단면2

차모멘트

E_s : 강연선의 탄성계수, I_s : 강연선의 단면2차모멘트

E_g : 그라우트의 탄성계수, I_g : 그라우트의 단면2차모

멘트

Table 2. Physical properties of strand type tendon

Tendon Type	Nominal diameter (mm)	Nominal cross section (mm ²)	Unit weight (kN/m)	Allowable tensile force (kN)	Classification
PC 7-wire Strand	12.7	98.71	7.59×10^{-3}	109.8	KS D 7002

Notes.1: Tendon ($\phi 12.7$ mm, 4-Strand) cross section area (A_s) = $(98.71 \times 10^{-6}) \times 4 = 3.95 \times 10^{-4}$ (m²)

Notes.2: Equivalent dia. of strand (D_s) = $\sqrt{\frac{4 \cdot A_s}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3.95 \times 10^{-4}}{\pi}} = 0.0224$ m = 22.4 mm

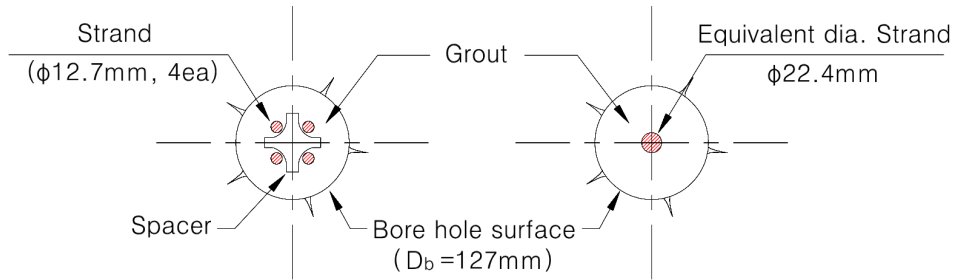


Fig. 5. Cross section condition of bore hole and strand

Table 3. Physical properties of free length and fixed length

Classification	Young's modulus E_s, E_t (kPa)	Length (m)	Dia. (mm)	Cross section area (m ²)	Moment of inertia (m ⁴)
Free length	2.0×10^8	5.5	22.4	3.95×10^{-4}	1.24×10^{-8}
Fixed length	2.3×10^7	6.0	105	8.7×10^{-3}	5.95×10^{-6}

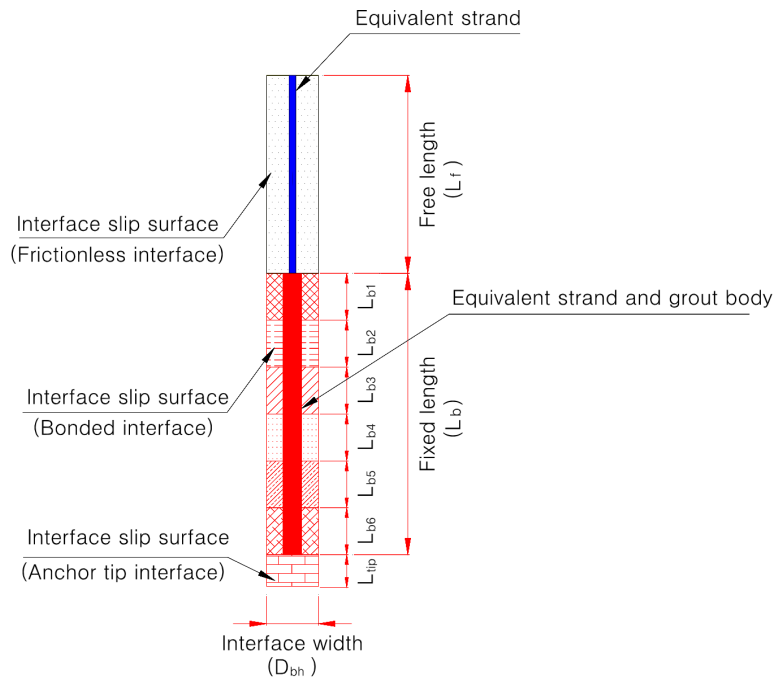


Fig. 6. Interface slip condition of ground anchor with free length and fixed length

Table 4. Soil properties condition for FEM analysis

Classification	Soil layer height (m)	Unit weight (kN/m ³)	Young's modulus (MPa)	Cohesion (kPa)	Fiction angle (deg.)	Poisson's ratio
Deposit soil	2.5	18	5.0	10	25	0.35
Weathered soil	22.5	19	30.0	30	30	0.33

3) 지반모델링 조건

본 수치해석에서 적용된 지반조건은 Fig. 16에 나타난 현장지반조사 결과를 참조하여 Table 4와 같이 적용하였으며, 이때 정착장 구간의 토층은 현장실험조건과 동일하게 화강풍화토 지반조건으로 설정하였다.

4) 인터페이스 슬립(interface slip)조건

본 수치해석에서는 인장력 증분에 따른 정착장 앞부분의 인발변위와 이에 따른 주변마찰거동을 분석하기 위해서 정착장 주변지반과의 인터페이스 슬립(interface slip)조건을 설정하였다. 먼저 자유장부 인장재는 인장력에 자유롭게 거동할 수 있도록 인장재(강연선) 주변의 인터페이스 슬립면(interface slip surface)에 대한 전단강성은 고려하지 않았다. 반면 정착장부는 인장재(강연선)와 주변 그라우트를 고려한 빔(beam)요소로 모델링 하였으며 이때 정착장 주변의 인터페이스 슬립면(interface slip surface)에 대한 전단강성은 풍화토 조건의 극한주변마찰저항 값을 참조하였고 또한 주변지반의 변위에 대응할 수 있도록 주변지반의 탄성계수를 고려하여 설정하였다. 이에 대한 인터페이스 슬립면(interface slip surface)의 물성치는 Table 5에 나타내었다.

한편 인터페이스 슬립(interface slip)은 앵커 정착장 끝부분 이하까지 확장하였는데 이는 앵커정착장의 인장재(강연선)가 직접적으로 정착장 하부 주변지반과 접촉이 되지 않도록 유도하기 위함이다. 즉 Table 5에 나타난 물성치를 이용하여 축력 작용시 인장재(강연선)의

변위량에 따른 정착장 주변 그라우트와 주변지반과의 전단응력이 발생하도록 유도하였다.

2.3.2 해석결과

Fig. 7과 Fig. 8은 현장 지반조건(풍화토)에서 앵커인장력 P=200kN 작용시의 자유장부와 정착장의 y축 변위도와 축력분포를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 자유장 구간에서는 앵커 작용력 P=200kN이 균일하게 작용하는 반면 이하 정착장 구간에서는 심도가 깊어질수록 정착장의 주변마찰저항에 따른 앵커 작용력이 점차 감소함을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각의 인발하중 P=100kN, 200kN, 300kN, 400kN 작용시 SA-1 앵커와 SA-2 앵커의 정착장 심도별 축력분포와 주변마찰응력분포도를 나타낸 것으로서 Fig. 9(a)와 Fig. 10(a)에 나타난 축력분포를 살펴보면 정착장 앞부분에서 축력이 가장 크게 발생함을 알 수 있으며 점차 정착장 끝부분으로 갈수록 감소함을 나타낸다. 한편 정착장의 각 위치별 주변마찰응력(τ_i)은 심도별 축력분포를 이용하여 식 (2)와 같이 산정하였으며 이에 따른 주변마찰응력 분포 결과는 Fig. 9(b)와 Fig. 10(b)에 나타내었다. 즉 풍화토 조건에서의 주변마찰응력은 정착장 앞부분에서 크게 발생함을 알 수 있다.

$$\tau_i = \frac{P_i - P_{i-1}}{\pi \cdot D_{th} \cdot (L_i - L_{i-1})} \quad (2)$$

Table 5. Physical properties of Interface slip surface zone

Classification		Cohesion (kPa)	Fiction angle (°)	Shear modulus (MPa)	Poisson's ratio	
Interface slip surface	Free length	0.0	0.0	0.0	0.4	
	SA-1 Type Fixed length (L _b =6.0m)	L _{b1} =1.0m	800	30	10.0	0.2
		L _{b2} =1.0m	500	30	5.0	0.2
		L _{b3} =1.0m	250	30	2.5	0.2
		L _{b4} =1.0m	150	30	1.5	0.2
		L _{b5} =1.0m	100	30	1.0	0.2
		L _{b6} =1.0m	50	30	0.5	0.2
		L _{tip} =0.5m	50	30	0.5	0.2
	SA-2 Type Fixed length (L _b =5.0m)	L _{b1} =1.0m	800	30	10.0	0.2
		L _{b2} =1.0m	500	30	5.0	0.2
		L _{b3} =1.0m	250	30	2.5	0.2
		L _{b4} =1.0m	150	30	1.5	0.2
		L _{b5} =1.0m	100	30	1.0	0.2
		L _{tip} =0.5m	50	30	0.5	0.2

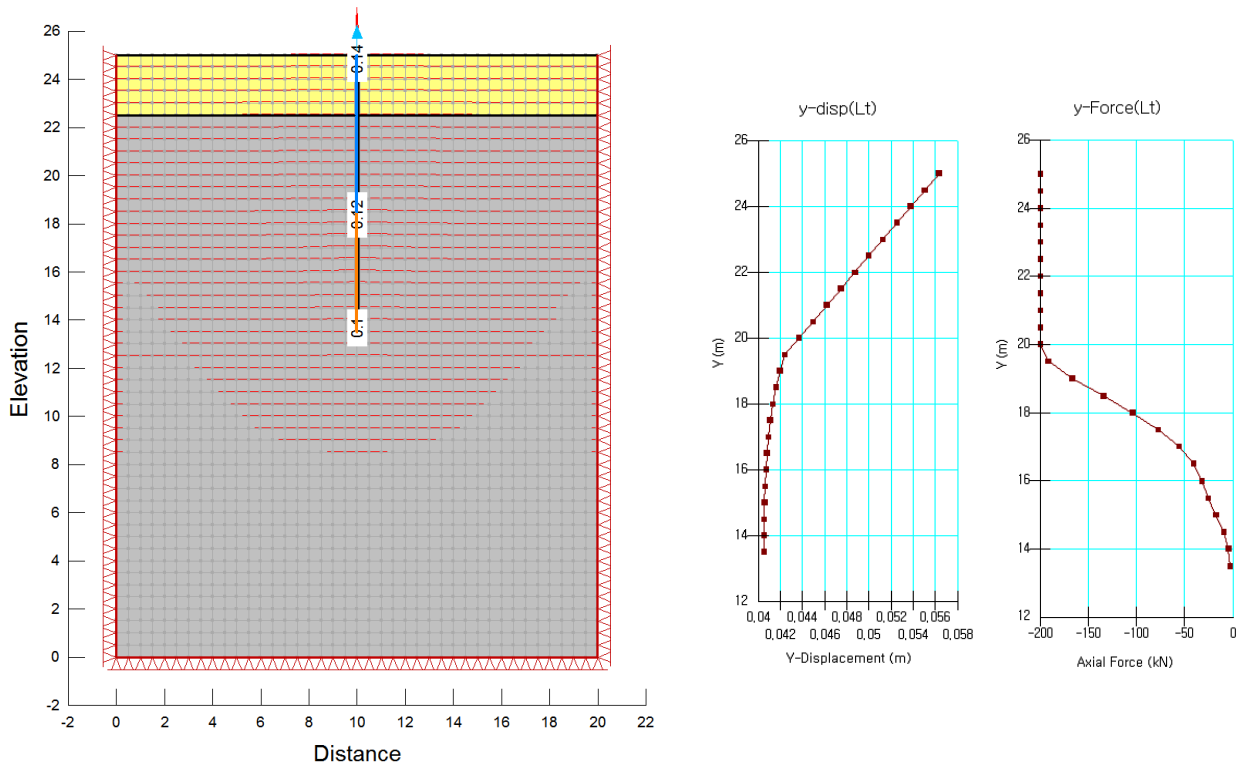


Fig. 7. Y-displacements vector and axial force diagram with depth (SA-1 Type)

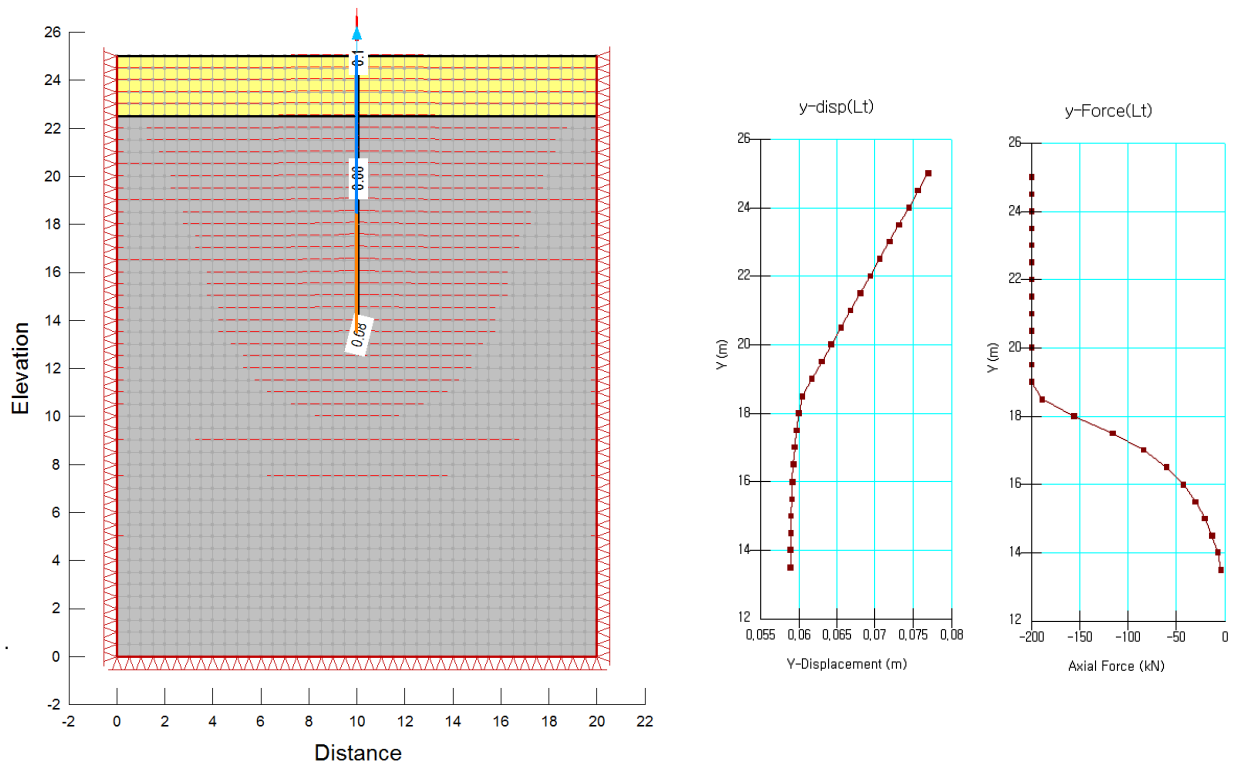


Fig. 8. Y-displacements vector and axial force diagram with depth (SA-2 Type)

여기서, P_i : 정착장부 각 절점에 작용하는 축력
 D_{th} : 천공직경, L_i, L_{i-1} : 정착장 선단에서 절점 i
 및 $i-1$ 까지의 정착장 길이

Fig. 11(a)와 Fig. 12(a)는 인발하중 $P=100\text{kN}, 200\text{kN}, 300\text{kN}, 400\text{kN}$ 조건에 대한 수치해석 결과를 참조하여 각각의 앵커축변형률과 주변마찰응력과의 관계를 나타

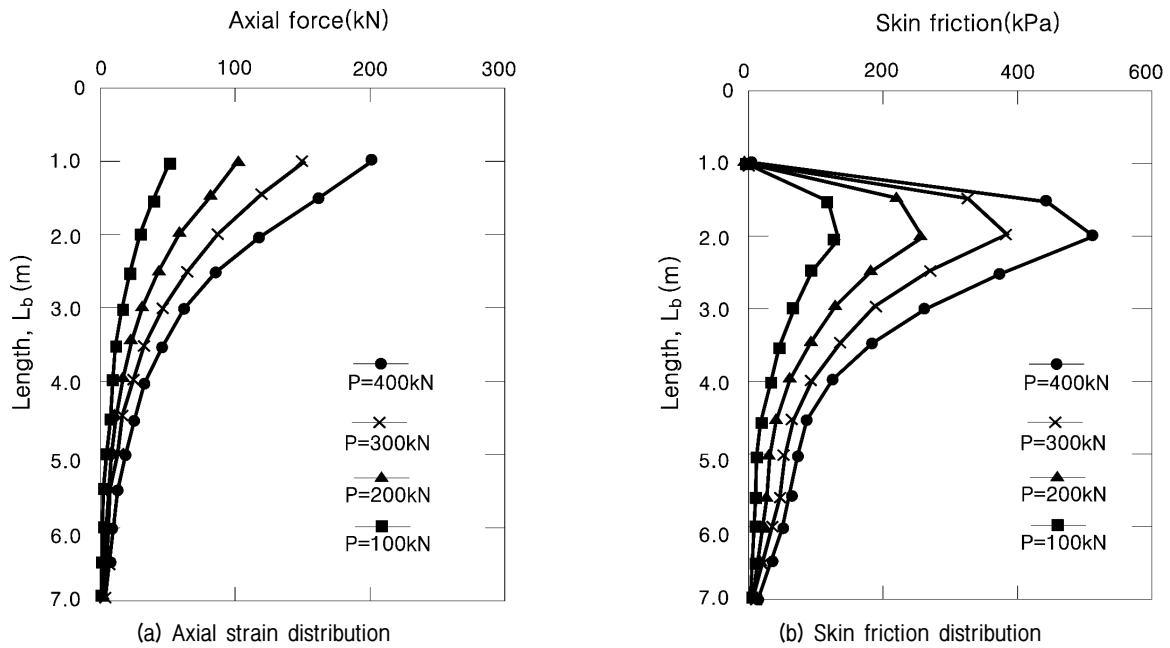


Fig. 9. Axial force and skin friction diagram of fixed length (SA-1 Type)

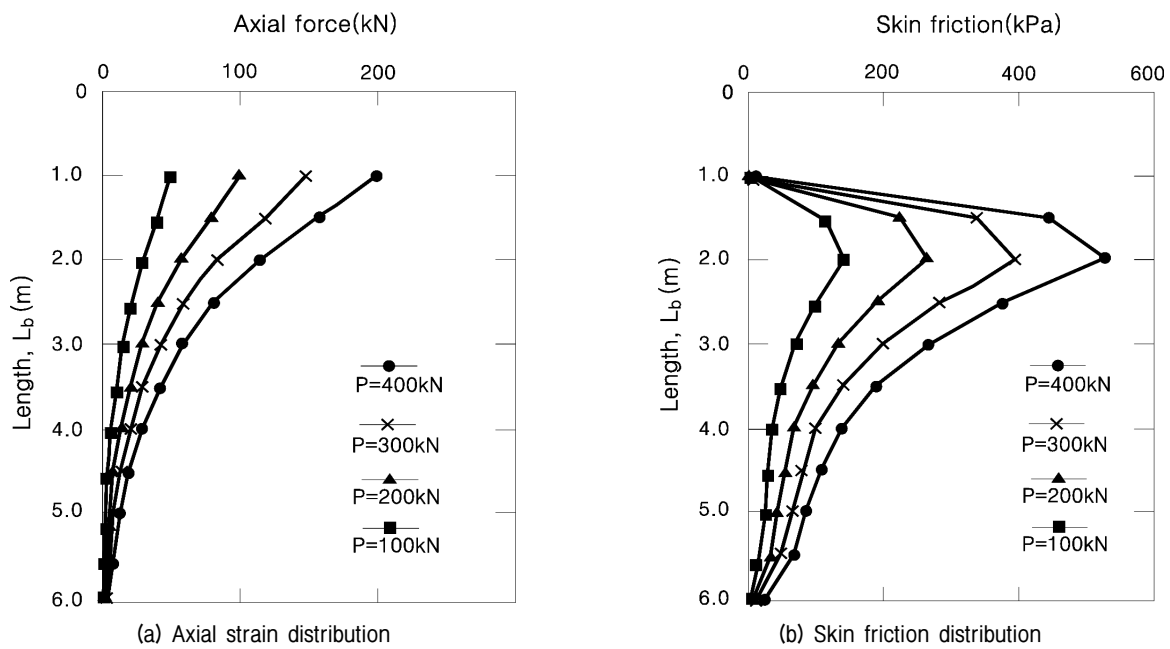


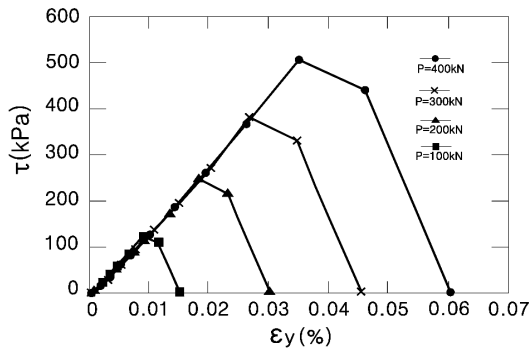
Fig. 10. Axial force and skin friction diagram of fixed length (SA-2 Type)

낸 것이다. 즉 그림에 나타난 바와 같이 신장량이 커질수록 대체적으로 주면 전단응력이 증가하다가 일정 변형률 이상에서는 최대 주면전단응력 점차 감소함을 나타내고 있다. 즉 Woods et al.(1997)이 제안한 정착장 주면전단응력-전단변형률 관계도와 대체로 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 또한 Fig. 11(b)와 Fig. 12(b)는 각각의 인장하중 조건에 대하여 최대 축변형률과 최대 주면마찰응력을 기준으로 정규화하여 나타낸 것으로 본

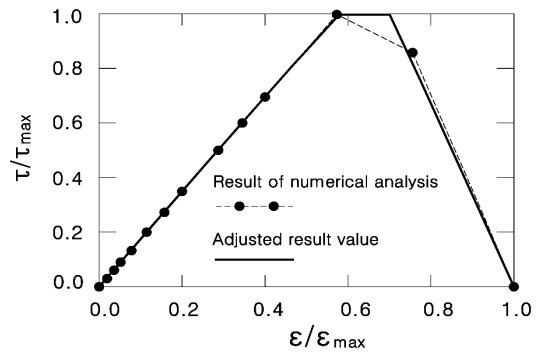
논문에서는 주면마찰응력의 진행적 변화거동을 파악하기 위한 기초자료로 본 수치해석결과를 활용하였다.

3. 지반앵커의 주면마찰응력 분포 산정을 위한 해석적 방법

앞서 설명한 지반앵커의 정착거동을 분석하기 위해서는 기본적으로 지반조건별, 지반앵커제원별로 앵커의

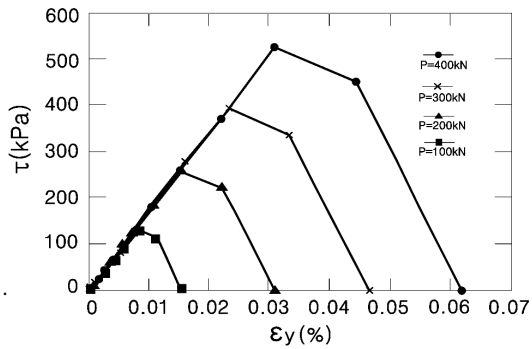


(a) Axial strain & skin friction relationship

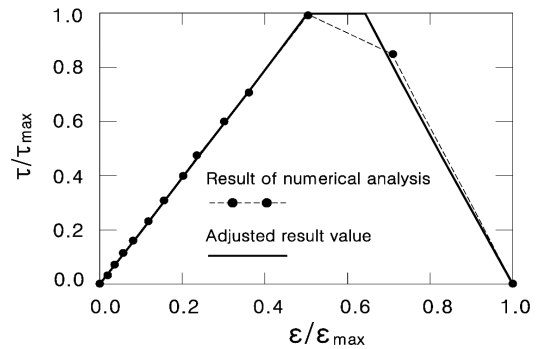


(b) Normalized characteristic diagram of axial strain and skin friction

Fig. 11. Axial strain and skin friction characteristic at fixed length (SA-1 Type)



(a) Axial strain & skin friction relationship at fixed length zone



(b) Normalized characteristic diagram of axial strain and skin friction

Fig. 12. Axial strain and skin friction characteristic at fixed length (SA-2 Type)

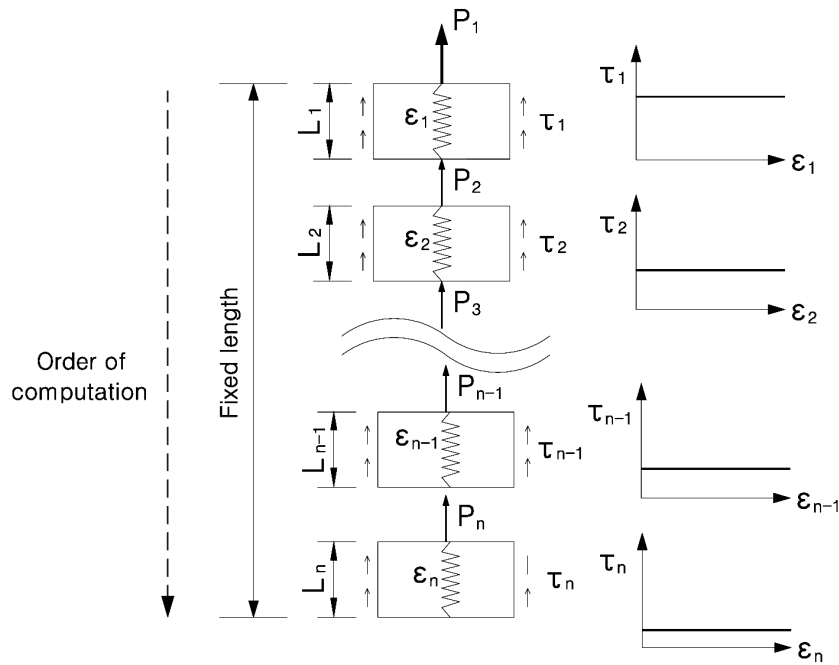


Fig. 13. Conceptual diagram for the review of axial force and skin friction distribution

탄성신장량과 주변마찰력의 관계도가 필요하며 본 절에서는 풍화토 지반조건을 대상으로 Fig. 11(b) 및 Fig. 12(b)에 근거하여 인발하중에 따른 정착장의 인장거동

를 평가하는 방법을 설명하고자 한다.

우선적으로 지반앵커 거동분석을 위해서는 다음과 같은 선행 기지값을 결정해야 한다.

- ① 지반앵커의 제원 : 천공경 직경(D_{in}), 인장재 제원 (E, A), 정착장 길이(L_b)
- ② 정착장 주변의 지반조건 : 극한주면마찰응력(τ_u), 잔류주면마찰응력(τ_r)
- ③ 지반조건별 임계축변형률($\varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c2}$), 잔류축변형률 (ε_r)

여기서, 실질적으로 지반앵커가 인발한 경우에도 정착장 주변의 잔류주면마찰응력이 미소하게 존재함이 일

반적이거나 본 검토시에는 안전측의 개념으로 잔류주면마찰응력(τ_r)은 발생하지 않는 것으로 고려하였다.

따라서 ①,②,③의 선행 기지값을 이용한 지반앵커의 정착거동을 모사하기 위한 방법은 Fig. 13의 개념도를 이용하여 다음과 같은 순서로 계산할 수 있다.

- (1) step.1 : 정착장의 극한주면마찰응력(τ_u)과 정착장 앞부분의 작용하중을 고려한 최대축변형률 (ε_{max}) 설정.

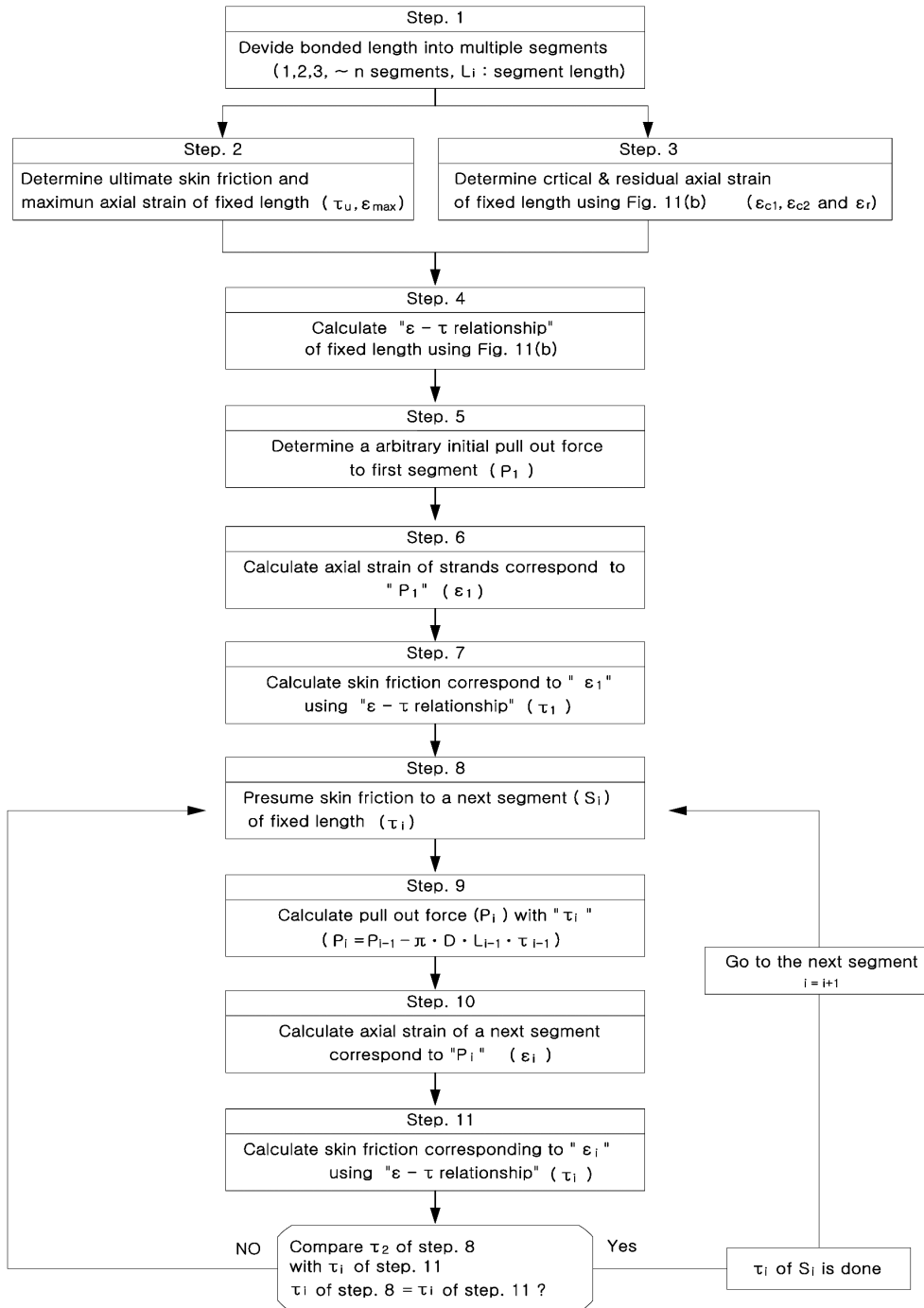


Fig. 14. Flowchart for the review of axial force and skin friction distribution

- (2) step.2 : 정착장의 축변형률과 주면마찰력 정규화 관계(Fig. 11(b) 또는 Fig. 12(b))를 이용하여 임계축변형률(ϵ_{c1} , ϵ_{c2})과 잔류축변형률(ϵ_r) 산정.
- (3) step.3 : 지반앵커 정착장의 각 segment 분할(n개)
- (4) step.4 : 지반앵커 정착장 앞부분(segment-1)의 인발하중 설정, 예로서 $P_1=200kN$ 설정.
- (5) step.5 : 지반앵커 정착장 앞부분(segment-1)의 인발하중($P_1=200kN$)에 해당하는 인장재(강연선)의 축변형률(δ_1) 또는 탄성변형률(ϵ_1) 산정.
- (6) step.6 : 탄성변형률과 주면마찰응력의 관계로부터 탄성변형률(ϵ_1)에 해당하는 주면마찰응력(τ_1)값 산정.
- (7) step.7 : segment-2의 주면마찰응력(τ_2)값 가정. 이때 τ_2 의 초기가정값은 segment-1의 변형률(ϵ_1)의 약 0.5배에 해당하는 값으로 설정.
- (8) step.8 : segment-2의 주면마찰응력(τ_2)을 고려한 인장하중 산정. 즉, $P_2=P_1 \cdot \pi \cdot D \cdot L_1 \cdot \tau_1$ 산정.
- (9) step.9 : 인장하중 P_2 에 대한 segment-2의 탄성신장량 $\epsilon_2 = \frac{P_2}{E \cdot A}$ 산정.
- (10) step.10 : segment-2의 탄성변형률(ϵ_2)에 해당하는 주면마찰응력(τ_2)값을 탄성변형률과 주면마찰응력의 관계로부터 산정한 후 step.7의 가정값과 step.10의 값이 같아질 때까지 step.7~10과정

을 반복계산(trial and error 방법).

이하 각 segment에서도 step.7~10과 같은 방법으로 각 segment별 앵커축력 P_i 와 주면마찰응력 τ_i 산정할 수 있으며, 이러한 전반적인 계산방법은 Fig. 14에 나타내었다.

4. 풍화토 지반조건에서 인장형 앵커의 인발거동

4.1 현장인발시험에 의한 인장형 앵커의 인발특성

본 논문에서는 지반앵커의 인발특성에 대한 해석적 방법을 검증하기 위해서 김포 현장에서 실시된 Sung(2012)의 현장인발시험 자료를 이용하였다. 즉 Sung(2012)은 풍화토 지반조건을 대상으로 인장형 앵커의 각 위치별로 섬유 브래그격자(Fiber Bragg Grating, FBG)를 이용하여 자유장과 정착장부의 작용응력을 측정하였으며, 이에 따른 시험결과는 로드셀을 이용한 시험결과와 대체로 일치하는 경향을 보임에 따라 시험결과의 신뢰성이 검증되었다.

따라서 본 논문에서는 Sung(2012)에 의해 사전 분석된 현장인발시험 결과를 이용함으로써 지반앵커의 인장거동에 대한 해석적 방법의 유용성을 검증하고자 한다. Sung(2012)이 실시한 각 시험조건 및 지반조건은 각각 Table 6 및 Fig. 15, 16에 나타내었으며, 각 지반앵커

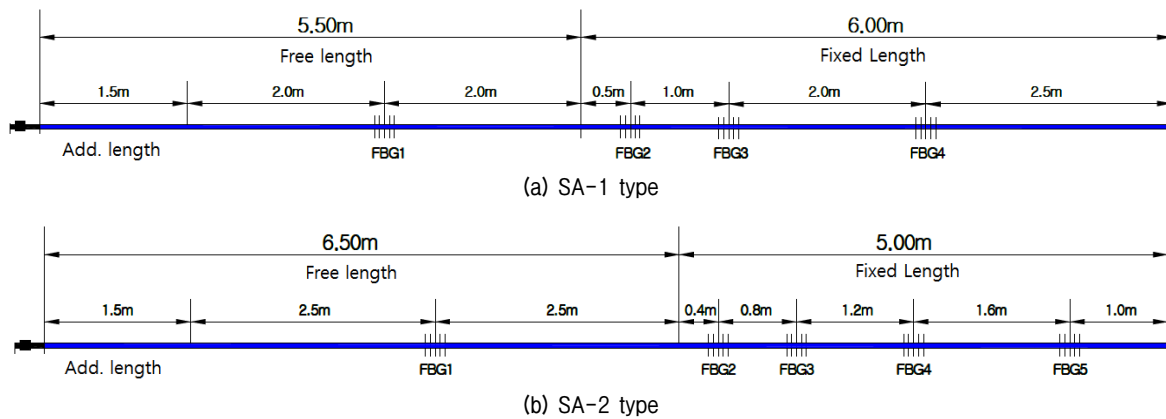


Fig. 15. FBG sensor arrangement for field test of tension type anchors

Table 6. Site test condition for field pull out test of ground anchors

Classification	Bore hole Dia. (mm)	Free Length (m)	Fixed Length (m)	Total Length (m)	Soil condition of fixed zone
SA-1	105	5.5	6.0	10.0	Weathered soil
SA-2	105	6.5	5.0	10.0	Weathered soil

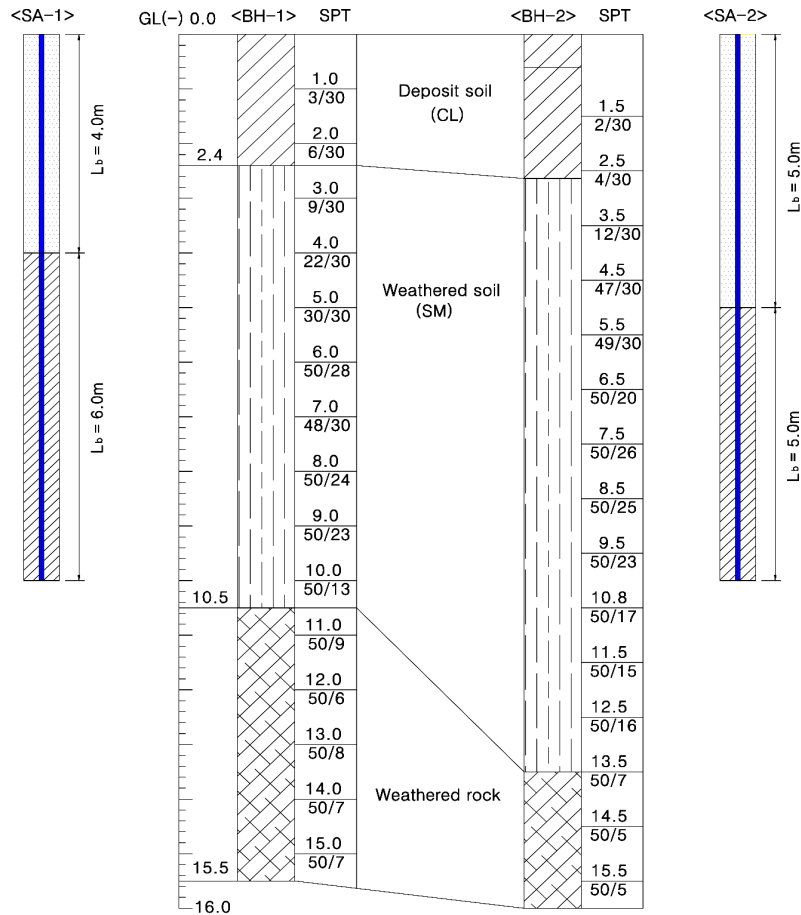
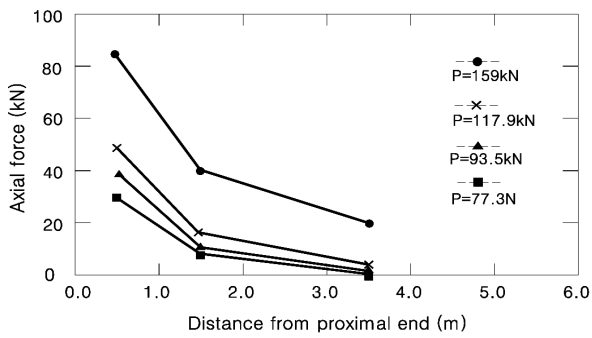
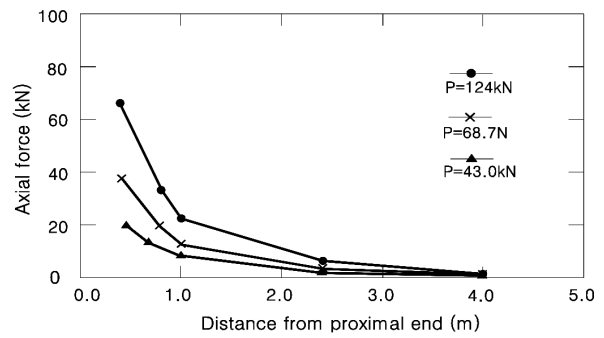


Fig. 16. Soil condition for field test of ground anchors

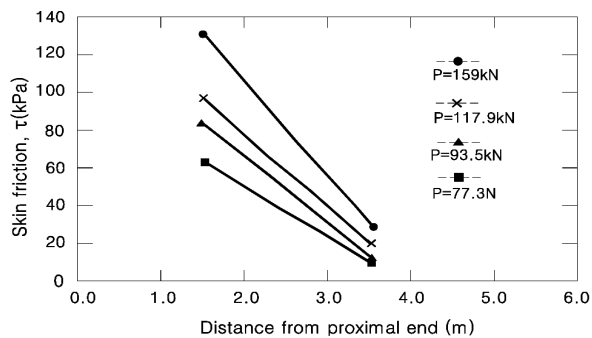


(a) SA-1 type

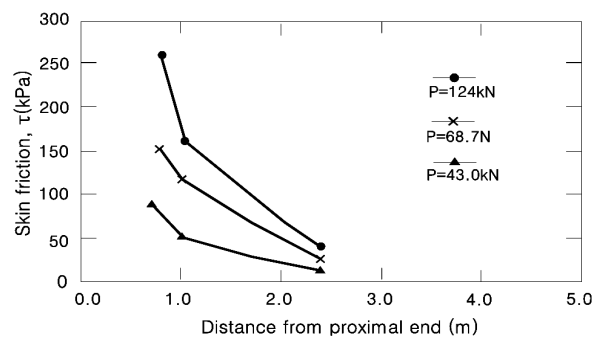


(a) SA-2 type

Fig. 17. Axial force diagram of fixed length



(a) SA-1 type



(a) SA-2 type

Fig. 18. Skin friction distribution diagram at fixed length

별 시험결과는 Fig. 17과 Fig. 18에 나타내었다.

4.2 해석적 방법을 이용한 인장형 앵커의 인발특성

현장 지반조건에 대한 지반앵커의 인발특성을 파악하기 위하여 앞서 설명한 해석적 방법을 이용하였으며 검토조건은 현장시험조건과 동일하게 적용하였다.

즉 극한주면마찰응력(τ_u)은 정착장 구간의 지반조건 ($N > 50$ 조건외의 풍화토)에 해당하는 500kPa조건으로 설정

하였으며, 최대측변형률(ϵ_{max})은 현장 최대시험하중($P = 159kN$)조건과 강연선(7-wire strand)의 축강성($EA = 78,968kN$) 조건을 고려하여 약 0.2%로 가정하였다. 기타 앵커제원과 지반조건은 다음과 같이 산정하였다.

- ① 지반앵커의 제원 : 천공경(D_{th})=105mm, 강연선 12.7mm-4선, 정착장(L_b)=6.0m 및 5.0m
- ② 정착장 주변의 지반조건 : 극한주면마찰응력(τ_u)=500kPa, 잔류주면마찰응력(τ_r)=0kPa

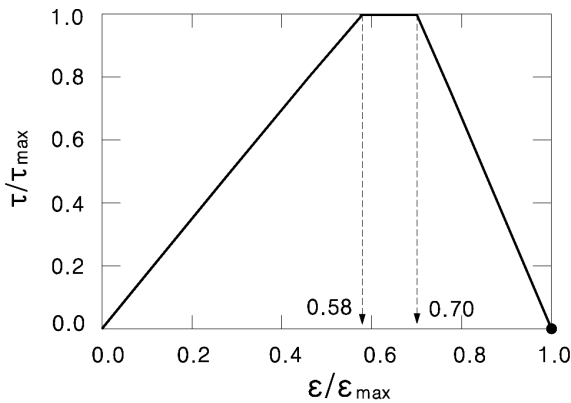


Fig. 19. Normalized characteristic diagram of axial strain and skin friction (SA-1)

여기서,

- ① $\frac{\epsilon_{c1}}{\epsilon_{max}} = 0.58, \epsilon_{c1} = \epsilon_{max} \times 0.58 = 0.116$
- ② $\frac{\epsilon_{c2}}{\epsilon_{max}} = 0.70, \epsilon_{c1} = \epsilon_{max} \times 0.70 = 0.140$
- ③ $\frac{\epsilon_r}{\epsilon_{max}} = 1.0, \epsilon_r = \epsilon_{max} \times 1.0 = 0.200$

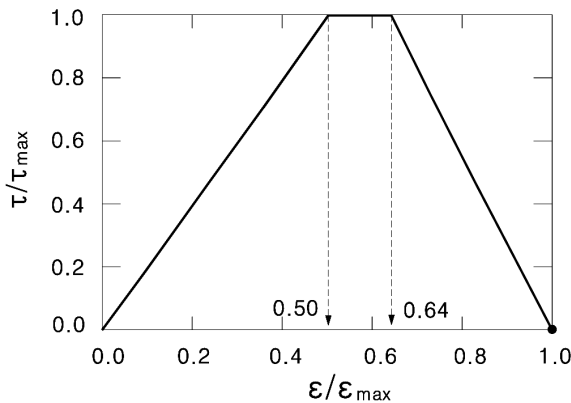
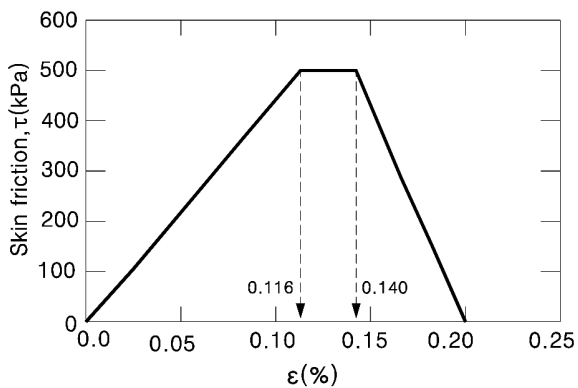


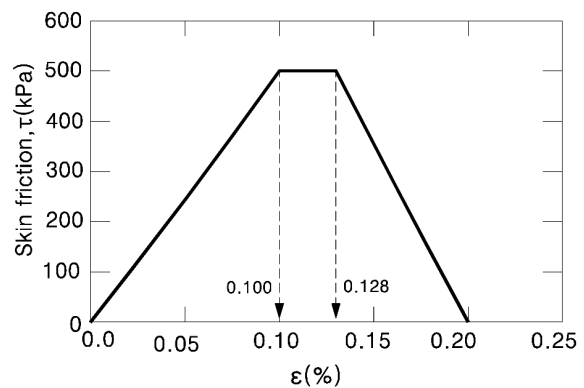
Fig. 20. Normalized characteristic diagram of axial strain and skin friction (SA-2)

여기서,

- ① $\frac{\epsilon_{c1}}{\epsilon_{max}} = 0.50, \epsilon_{c1} = \epsilon_{max} \times 0.50 = 0.100$
- ② $\frac{\epsilon_{c2}}{\epsilon_{max}} = 0.64, \epsilon_{c1} = \epsilon_{max} \times 0.64 = 0.128$
- ③ $\frac{\epsilon_r}{\epsilon_{max}} = 1.0, \epsilon_r = \epsilon_{max} \times 1.0 = 0.200$



(a) SA-1 Type



(b) SA-2 Type

Fig. 21. Relationship diagram of axial strain at fixed length zone and skin friction

③ 임계축변형률(ϵ_{cl} , ϵ_{c2}) 및 잔류축변형률(ϵ_r)은 최대 축변형률값($\epsilon_u=0.2\%$)을 이용하여 Fig. 19, 20과 같이 산정하였으며 이에 따른 지반앵커의 축방향 변형률과 주면마찰응력의 관계도는 Fig. 21에 각각 나타내었고 이를 Table 5에 요약 정리하였다.

한편 여기서 주목할 점은 Table 5에 나타난 바와 같이 임계축변형률의 크기는 각 앵커 제원별로 상이하다는 것이다. 즉 Fig. 19와 Fig. 20에 나타난 바와 같이 정착장 길이가 작을수록 임계축변형률의 상대적인 크기는 감소하고 또한 극한주면마찰력은 보다 작은 축변형률 조건에서 발생함을 알 수 있다.

Fig. 22와 Fig. 23은 Sung(2012)의 현장시험조건을 Fig. 14에 나타난 검토흐름도에 따라 순차적인 계산을 실시

하여 각각의 인장하중 조건별 앵커 축력분포와 주면마찰응력 분포를 나타낸 것으로 이때 정착장(L_b)의 segment 간격은 0.5m로 설정하였다. 여기서 Fig. 22(a)와 Fig. 23(a)는 각각의 인발하중 조건별 정착장에서의 축력분포를 나타낸 것이며, Fig. 22(b)와 Fig. 23(b)는 각각의 인발하중 조건에 따른 주면마찰응력 분포를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 인발하중이 작을수록 정착장 앞부분에 인발하중이 집중되며 동시에 정착장 끝부분에서는 하중전이가 비교적 작게 발생함을 나타낸다. 그러나 인발하중이 증가할수록 축변형량이 점차 증가하면서 어느 임계축력이상에서는 주면전단응력이 점차 정착장의 뒷부분으로 전이됨을 보이고 있다. 즉 Fig. 22(b)에 나타난 바와 같이 SA-1앵커의 경우 $P=93.5\text{kN}$ 까지는

Table 7. Site test condition for verification of numerical analysis method

Classification	Bore hole Dia (mm)	Bonded Length (m)	Skin friction (kPa)		Critical axial strain (%)		
			Ultimate	Residual	Primary	Secondary	Residual
SA-1	105	6.0	500	0	0.116	0.140	0.2
SA-2	105	5.0	500	0	0.100	0.128	0.2

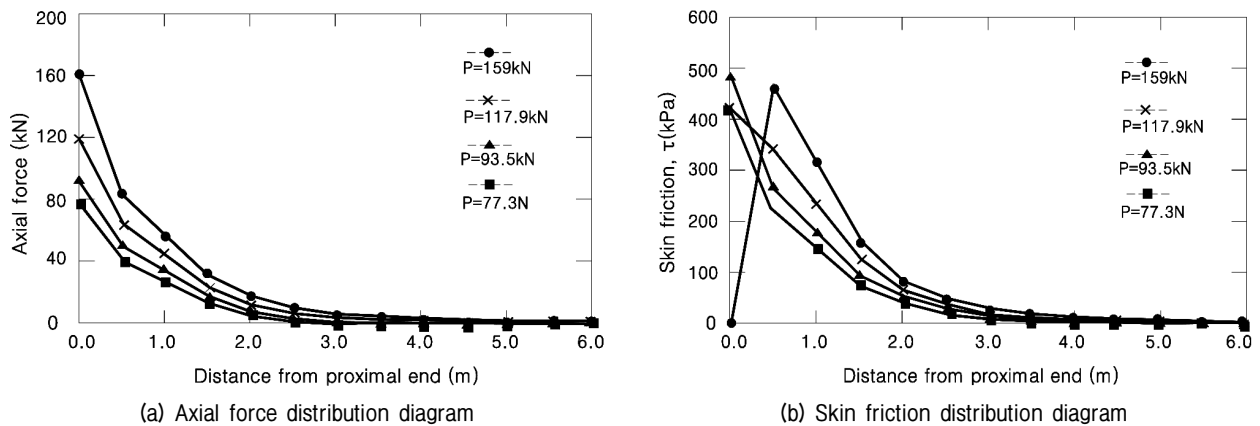


Fig. 22. Axial force & skin friction distribution diagram at fixed length (SA-1)

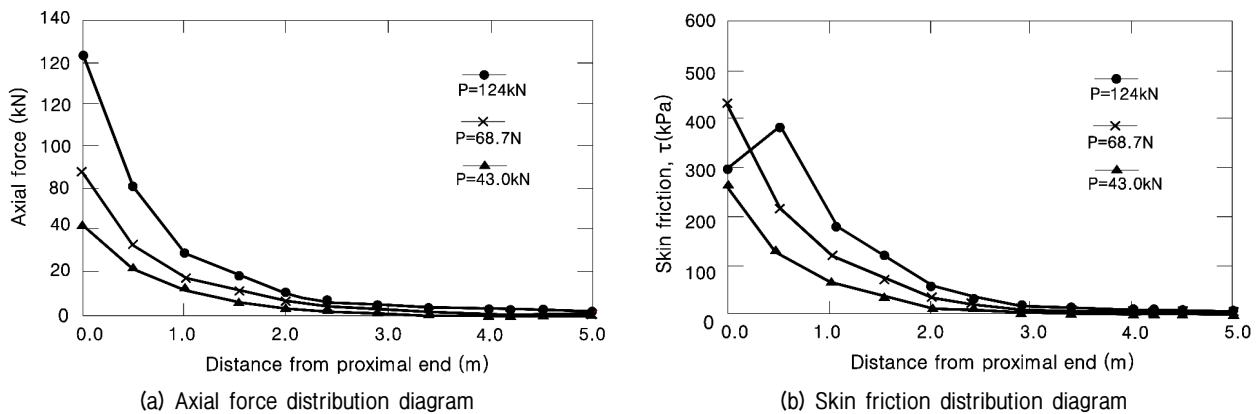


Fig. 23. Axial force & skin friction distribution diagram at fixed length (SA-2)

정착장 시작점에서 최대 마찰응력이 발생하나 P=159kN 조건에서는 정착장 시작점 이후의 약 0.5m지점에서 최대주면마찰응력이 발생되어 정착장에서의 하중전이가 발생됨을 보여준다. 이와 유사하게 SA-2앵커는 P=68.7kN까지는 정착장 시작점에서 최대 마찰응력이 발생하나 P=124kN조건에서는 정착장 시작점에서 약 0.5m지점에서 최대주면마찰응력 발생되어 전단응력이 점차 정착장 끝부분으로 전이됨을 보여준다.

4.3 해석적 방법과 실측결과의 비교분석

Fig. 24와 Fig. 25는 각각 SA-1앵커와 SA-2앵커에 대한 현장시험결과와 해석적 결과를 나타낸 것으로서 각 지반앵커의 축력분포는 Fig. 24(a)와 Fig. 25(a)에 나타낸 바와 같이 비교적 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 다만 전반적으로 해석치 대비 측정치가 전반적으로 다소 작게 분포하는 경향을 나타내는데 이는 현장 시험 조건상 자유장부에서도 일부 축력이 전이됨에 따

라 이로 인해 정착장부로의 전이되는 축력이 다소 감소함에 따른 것으로 파악된다. 한편 SA-1앵커의 경우 P=159kN조건을 제외한 나머지 축력조건에서는 축력분포가 대체로 유사한 경향을 보이고 있으며 특히 정착장의 끝점으로 이동할수록 축력이 점차 감소되는 특성을 확인할 수 있었다. 또한 SA-2앵커의 경우에도 해석치 대비 측정치가 비교적 작은 값의 분포를 보이나 전반적으로 모든 인발하중조건에서 실측치와 해석치가 거의 유사한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 24(b)와 Fig. 25(b)는 각 정착장부의 전단응력 분포를 나타낸 것으로서 축력분포와 동일하게 SA-1앵커의 P=159kN조건을 제외하고는 거의 상호간 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 풍화토 지반에 정착된 인장형 앵커를 대상으로 제안된 해석기법을 이용하게 된다면 지반앵커의 작용하중별 하중전이특성을 보다 쉽게 파악 할 수 있을 것으로 판단된다.

물론 본 논문은 제한된 지반조건과 현장시험결과에 근거한 것이나 향후 본 해석적 방법을 다양한 지반조건

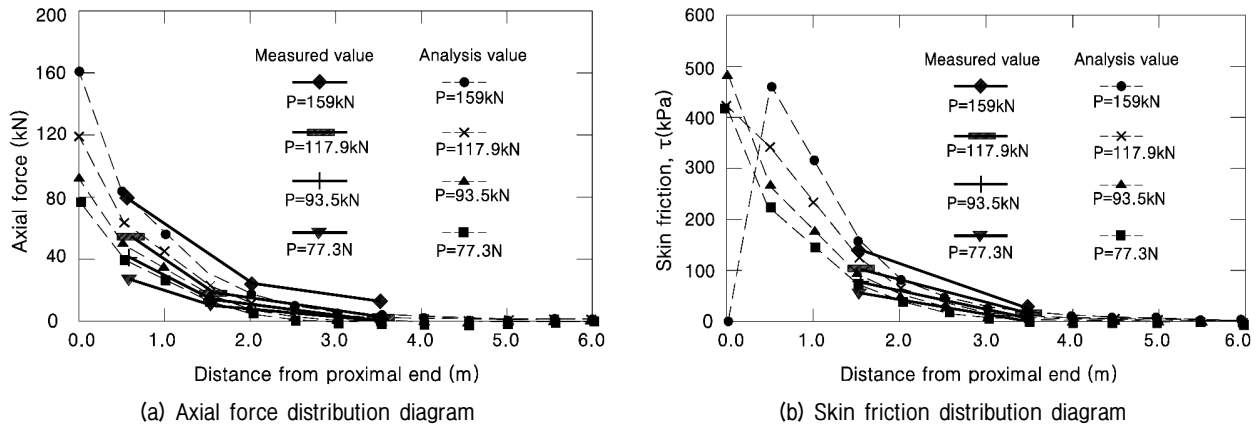


Fig. 24. Comparison of field test and analysis result about axial force & skin friction distribution of fixed length (SA-1)

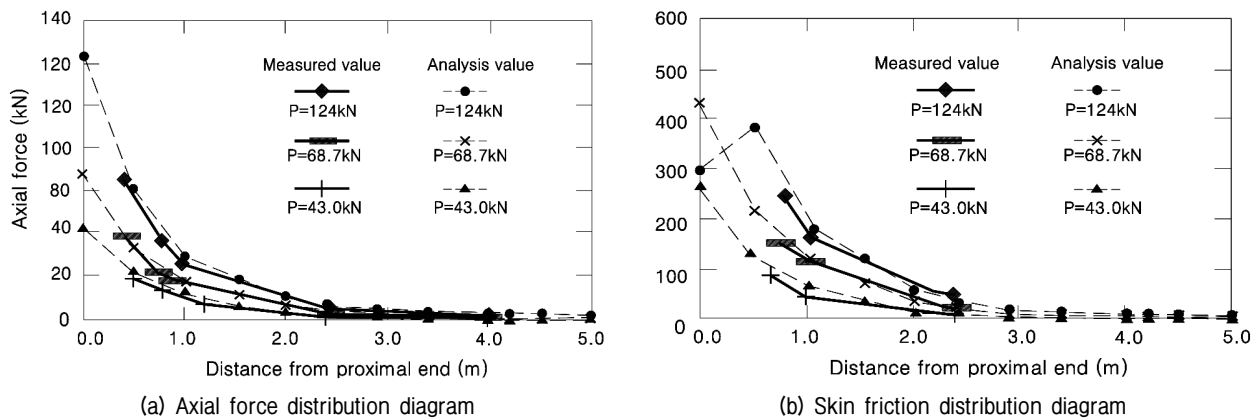


Fig. 25. Comparison of field test and analysis result about axial force & skin friction distribution of fixed length (SA-2)

과 다양한 지반앵커 타입의 적용하게 된다면 정착장의 하중전이특성을 규명하는데 보다 용이하게 이용될 수 있을 것으로 판단되며, 특히 보다 많은 지반조건 및 앵커타입별 본 해석기법에 의한 결과를 규정화할 수 있게 된다면 국내외 설계기준 및 시공기준 보완에 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 결 론

지반내 정착된 앵커는 인발하중이 증가함에 따라 정착장 주면마찰응력의 진행적 변화거동이 필연적으로 발생한다. 따라서 본 논문에서는 기존 지반앵커 설계법에서 구현할 수 없는 “지반내 정착된 인장형 앵커의 하중전이 특성”을 나타낼 수 있는 해석적 방법에 대해서 기술하였으며, 또한 제안된 방법을 현장 실험적 결과와 비교분석하였고 이에 따른 검토결과는 다음과 같다.

- (1) 풍화토 조건에 대한 앵커하중전이 특성은 일정하중까지는 정착장 앞부분측에서 인발하중이 집중 발생되며, 점차 인장하중이 증가함에 따라 인장하중은 정착장의 끝부분으로 전이됨을 확인 할 수 있었다.
- (2) 임계축변형률의 크기는 정착장 길이가 작을수록 감소하고 이에 따라 정착장의 극한주면마찰력은 보다 작은 축변형률 조건에서 발생함을 알 수 있었다.
- (3) 수치해석을 통해 획득한 정규화된 앵커신장변형률과 주면마찰응력의 관계를 이용하게 된다면 순차적인 해석적 방법을 통해 설계단계에서부터 각 지반조건에 대한 앵커하중전이 특성을 보다 용이하게 검토 할 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 본 해석적 방법은 기존 설계기법에서 평가할 수 없었던 인발하중에 따른 각 정착장 위치별 앵커 신장량과 축력분포의 구현이 가능하고 특히 기존 설계기법에서 평가되는 극한인발저항력의 적정성 여부를 판단할 수 있는 근거자료로 활용이 가능 할 것으로 판단된다.
- (5) 본 논문에서는 앵커 주면마찰응력에 대한 점진적인 변화거동을 구현할 수 있는 해석적 방법을 제시하였으며 본 해석적 방법을 다양한 지반조건과 앵커형식을 고려하여 추가적인 연구가 수행된다면 관련 분야에 대한 기준화 마련에 도움이 될 것으로 판단된다. 다만 본 해석적 방법은 인장재-그라우트간의 부착응력이 그라우트-지반간의 마찰응력보다 큰 조

건에서 그 적용성이 타당할 것이다.

감사의 글

본 논문은 2016년도 정부(중소기업청)의 재원으로 중소기업기술정보진흥원(No. C0396001)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2012), pp.5-19~5-26.
2. B.S 8081 (1989), “British Standards Code of Practice for Ground Anchorages”, British Standards Institution, pp.19-31, 34-39.
3. Budhu, M. (2011), “Soil Mechanics and Foundation”, pp.723-729
4. Civil Engineering Services Department Hong Kong (1989), “Model Specification for Prestressed Ground Anchors”, pp.51-65.
5. Coates, D. F. and Yu, Y. S. (1970), “Three Dimensional Stress Distributions Around a Cylindrical Hole and Anchor”, *Proc. 2nd Int. Conf. on Rock Mech.*, Belgrade, pp.175-182.
6. DIN 4125 (1990), “Ground Anchorages-Design, Construction and testing”, German Institute for Standardization, pp.19-31, 34-39.
7. Federal Highway Administration Ground (1999), “Anchor and Anchored Systems”, pp.4-10, 46-77.
8. GEO-SLOPE International Ltd (2007), “SIGMA/W Engineering Manual”, pp.107-152.
9. Hong, S. W. (2002), “The Study on Pullout Resistance Characteristic of the Compression Anchor by Pullout Test on the Field”, *Journal of Advanced Research in Ocean Engineering*, Vol.16, No.2, pp. 44-52.
10. Hong, W. P., Yun, J. M., and Song, Y. S. (2004), “Lateral Earth Pressure acting on Anchored Retention Walls installed in Cut Slope”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.24, No.2C, pp.125-133.
11. Ivering, J. W. (1981), “Development in the Concept of Compression Tube Anchors”, *Ground Eng.*, Vol.14, pp.31-34.
12. Kim, J. H. and Jeong, H. S. (2014), “Characteristics of Multi Load Transfer Ground Anchor System”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol.16, No.01, pp.25-50.
13. Kim, J. H. and Jeong, H. S. (2016), “Ground Anchor Technique for Executives”, first edition, CIR, pp.17-52.
14. Kim, N. K. (2001), “Load Transfer of Tension and Compression Anchors in Weathered Soil”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.17, No.3, pp.59-68.
15. Kim, Y. M., Cho, K. W., Kim, W. K., and Kim, H. M. (2004), “Load Distribution and Pullout Capacity of Compression Anchors”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, pp.4219-4224.
16. Lee, J. U. (2014), “Effect of Multi-Compression Type Anchor with the Installation Space of Compression Tube”, Ph D Thesis, Daejin University, pp.75-85.
17. Liao, H., Ou, C., and Shu, S. (1996), “Anchorage Behavior of Shaft Anchors in Alluvial Soil”, *J. Geotech. Engrg.*, Vol.122, Issue 7, pp.526-533.
18. Littlejohn, G. S. (1980), “Design Estimation of Ultimate Load

- Holding Capacity of Ground Anchors”, *Ground Engineering*, England, pp.25-39.
19. Ostermayer, H. (1974), “Construction, Carrying Behavior and Creep Characteristics of Ground Anchors”, *ICE Conf. on Diaphragm Walls and Anchorages*, London, pp.141-151.
 20. Ostermayer, H. and Scheele, H. (1977), “Research on Ground Anchors in Non-Cohesive Soils”, *Revue Francaise de Geotechnique*, Vol.3, pp.92-97.
 21. Post-Tensioning Institute (2004), “Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors”, pp.11-20, 35-50.
 22. Sung, H. J. (2012), “Tension Force Monitoring of Ground Anchor Using Fiber Optic Sensors Embedded Tendon”, Ph D Thesis, Chonnam National University, pp.69-144.
 23. Sung, H. J., Kim, Y. S., Kim, J. M., and Park, G. H. (2011), “Tension Force Monitoring of Tension Type Ground Anchor Using Optical FBG Sensors”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.6, pp.17-26.
 24. Swiss Society of Engineers and Architects (1977), “SIA. Edition Ground Anchors”, pp.28-37.
 25. Thorburn, S. and Littlejohn, G. S. (1993), “Underpinning and Retention”, Chapman & Hall, pp.304-310.
 26. Weerasinghe, R. B. and Littlejohn, G. S. (1997), “Load Transfer and Failure of Anchorages in Weak Mudstone”, *Ground Anchorages and Anchorages Structures*, Thomas Telford Ltd, London, pp.34-44
 27. Woods, R.I. and Barkhordari, K. (1997), “The Influence of Bond Stress Distribution on Ground Anchor Design”, *Proc. of Int. Conf. Ground Anchorages and Anchorages Structures*. London, pp.55-64.
 28. Xanthakos, P. P. (1991), “Ground Anchors and Anchored Structures”, A Wiley-Interscience Publication, pp.71-75, 105-106, 142-150.

Received : October 10th, 2016
 Revised : December 15th, 2016
 Accepted : January 10th, 2017