

# SIP말뚝의 주면마찰특성 및 주면 경계요소의 수치모델에 관한 연구

## A Study on the Skin Friction Characteristics of SIP and Numerical Model of the Interface Between SIP and Soils

천 병 식\*<sup>1</sup> Chun, Byung-Sik

임 해 식\*<sup>2</sup> Lim, Hae-Sig

### Abstract

While the interests in the environmental problem during the construction are increasing, the use of low noise-vibration auger-drilled pilling is increasing to solve noise and vibration problem in pilling. Therefore, in Korea, SIP (Soil-Cement Injected Precast Pile) method is mainly used as auger-drilled pilling. However, there is no proper design criteria compatible with the ground condition of Korea, so which is most wanted. To improve and supplement this situation, direct shear tests for the friction between SIP pile skin interface and soil were executed on various conditions. Through the analysis of test results, skin friction characteristics of SIP were investigated thoroughly. Also, hyperbolic model parameter formulas which describe the friction behavior and the new non-linear unit skin friction capacity model with SM, SC soil were suggested.

### 요 지

최근에 건설공사에서 발생하는 환경문제에 대한 관심이 고조되는 가운데 저소음, 저진동 공법인 매입말뚝공법이 건설현장에 많이 적용되고 있다. 이러한 건설여건의 변화에 부응하여 국내에서는 지반을 굴착하고 시멘트 페이스트를 주입한 후 기성말뚝을 삽입하는 SIP공법(Soil-Cement Injected Precast Pile)의 적용이 늘고 있으나, 현재 국내 지반조건에 맞는 고유의 관계식이 없는 실정이다. 이와 같은 문제해결에 기여하기 위해, 본 연구에서는 SIP말뚝 주면과 지반사이의 저항력을 직접전단시험으로 측정하여 그 경향을 분석하였다. 직접전단시험 결과 SIP말뚝의 주면 저항력 성분이 수직하중에 가장 크게 영향을 받는다는 것을 밝혀내고 국내 주요 토질인 SM, SC 토질에서 이를 인자로 한 최대주면저항력 산정식을 제안하였다. 또한 말뚝 표면과 주면 지반과의 전단저항 거동 특성을 수치적으로 정확히 묘사하기 위해 Duncan(1971)의 쌍곡선 모델식과 새로운 비선형 수치모델식에 따른 계수산정식을 제안하였다..

**Keywords :** Hyperbolic model, Interface of SIP, Non-linear unit skin resistance capacity model, SIP, Skin friction

### 1. 서 론

소음, 진동 등 건설공해가 사회적으로 큰 문제로 등장하여 기존 건축물주변에서의 말뚝공사는 시공이 거의 불가능할 정도로 공사 여건이 악화되고 있으며 이런

상황은 앞으로도 계속될 것으로 전망된다. 이를 해결하기 위해, 국내에서는 직항타공법보다는 지반천공 후 기성말뚝을 매입하는 공법인 SIP(Soil-Cement Injected Precast Pile)공법이 전체 말뚝공사 물량의 30%이상을 넘어서고 있으며 향후 점차 증가할 것으로 예상되고

\*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Civil Engrg., Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr)

\*2 정회원, 대한주택공사 주택연구소 과장 (Member, Deputy Manager, Housing REsearch Institute, haisik@jugong.co.kr)

표 1. 매입말뚝의 설계 지지력 공식

시공법	선단지지력 산정법	말뚝선단부 조건	주면마찰력 산정식	비고
타격공법	$R_p = 30 \bar{N}_1 A_p$	$\bar{N}_1 \leq 60$	$R_F = \left( \frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \phi$ $\bar{N}_s \leq 50, \bar{q}_u \leq 20 (\bar{q}_u = 1.25N)$	건설성 고시기준
시멘트풀 주입공법	$R_p = 20 \bar{N}_1 A_p$	$\bar{N}_1 \leq 50$	$R_F = \left( \frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \phi$ $\bar{N}_s \leq 25, \bar{q}_u \leq 10 (\bar{q}_u = 1.25N)$	건설성 고시기준
선굴착 근고공법	$R_p = 25 \bar{N}_1 A_p$	$\bar{N}_1 \leq 60$	$R_F = \left( \frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \phi$ $\bar{N}_s \leq 25, \bar{q}_u \leq 10$	건설성 인정공법
선굴착 최종타격공법	$R_p = 30 \bar{N}_2 A_p$	$\bar{N}_2 \leq 60$	$R_F = \left( \frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \phi$ $\bar{N}_s \leq 25, \bar{q}_u \leq 10$	건설성 인정공법
선굴착 최종경타공법	$R_p = 25 \bar{N}_2 A_p$	$\bar{N}_2 \leq 60$	$R_F = (0.9L_c + 2.4L_s) \phi$	건설성 인정공법

여기서,  $\bar{N}_1$  : 말뚝선단부의 N치 평균값,  $\bar{N}_2$  : 말뚝선단에서 (1~4)D의 N치 평균값  
 $A_p$  : 선단면적,  $L_s, L_c$  : 사질토층 및 점토층에서의 말뚝길이  
 $\bar{N}_s$  : 사질토층에서의 N치 평균값  
 $\bar{q}_u$  : 평균일축압축강도,  $\phi$  : 말뚝주면장(2πD)

있다(대한주택공사, 2001).

SIP공법의 특성상 지지력 발휘는 일반 직향타 말뚝과는 다른 특성을 나타낸다. 특히 SIP공법에서는 말뚝 주면부의 조건이 직향타 말뚝과 큰 차이를 보인다. 그러나 아직까지 객관적인 근거를 토대로한 매입말뚝 고유의 설계 지지력 산정식은 없는 실정이다. SIP공법 발원지인 일본에서는 주로 표준관입 시험결과인 N값을 이용한 공식을 사용하며 기관별로 기준이 다르다. 국내에서는 이들 산정식을 주로 준용하고 있는 실정이며 이들을 표 1에 나타내어 보았다. 특히 SIP말뚝의 지지력 특성은 시공, 양생, 시멘트 페이스트 배합 등 여러 요인에 의해 영향을 받으므로 많은 시험자료의 분석을 통한 정확한 지지력 산정이 요구된다.

본 연구에서는 이와 같은 문제 해결에 기여하기 위해 SIP말뚝 주면과 지반사이의 저항력을 실내 직접전단시험으로 측정하여 경향을 분석하였다.

## 2. 실내 시험

### 2.1 직접전단시험

SIP 말뚝의 주면저항력 특성을 규명하기 위한 시험방법으로는 여러 가지 방법이 있을 수 있으며, 각 방법들마다 각각의 장단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 SIP 말뚝의 주면저항력 특성을 실내시험에서는 직접전단시험으로 검토해 보기로 하였다.



그림 1. SIP말뚝 표면 본뜨기

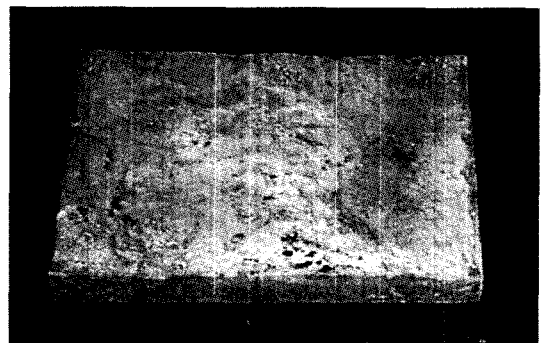


그림 2. 완성된 조도판

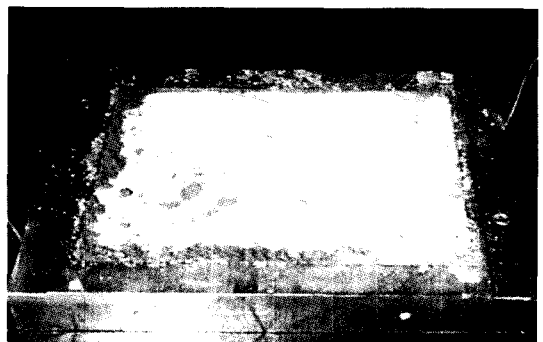


그림 3. 시험기에 거치된 조도판

SIP 말뚝의 표면을 직접전단시험시 재현하기 위하여 시공된 SIP말뚝을 인발하여 그 표면의 본을 뺀다. 현장에서 그림 1과 같이 식물성 실리콘을 이용하여 표면의 본을 뜬 후 시험실에서 물/시멘트비 83%의 시멘트 페이스트를 이용하여 시험에 사용될 시멘트 조도판을 제작하였다(그림 2, 3 참조). 또한 실제 SIP말뚝 요철면에 본을 뜬 성형시킨 조도판의 시험결과와 비교, 분석을 위해 요철이 없는 무조도면을 제작하였다.

## 2.2 시료토

본 시험에 사용된 시료토는 국내에서 광범위하게 분포되어 있는 화강풍화토를 대상으로 하였으며 주요 물성치는 표 2와 같다. 입도 분석을 통한 입도분포곡선은 그림 4와 같다.

## 2.3 실내 직접전단시험 개요

전단상자 크기는 10cm×10cm를 사용하였고 하부층 상자에는 물/시멘트비 83%의 몰탈로 성형된 조도판과 무조도판, 그리고 현장에서 채취해 온 시료가 채워지고

표 2. 시료의 물성치

구분	자연함수비	비중	액성한계	소성한계	토질분류
SM	16 %	2.70	NP	NP	SM
SC	27 %	2.69	38.13 %	20.06 %	SC

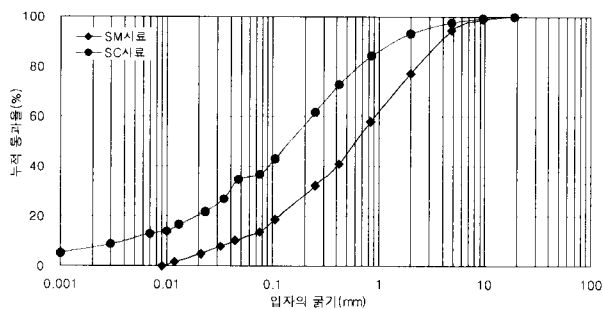


그림 4. 시험시료 입도분포곡선

상부층 상자에는 현장에서 채취해 온 시료를 채워 넣어 3종류의 전단시험을 실시하였다.

총 79회의 시험을 실시하였고, 조도판은 현장에서 오거로 천공하여 시공된 SIP말뚝의 실제 요철면에 본을 뜬 시멘트 밀크로 성형시켜 제작하였다(Head, 1982). 시험은 변형 제어방식으로 전단속도는  $\epsilon_h = 2\%$ 인 약 2mm/분으로 하였으며 전단시험중 공시체의 최대강도 값이 나타나지 않을 때에는 변위 약 10mm 전단상태에서의 값을 최대값으로 채택하였다(김용필 등, 2000).

## 3. 실내시험 결과

조사된 말뚝표면과 접한 흙 사이나 본 실험에 사용된 흙만의 직접전단시험에 의한 일반적인 전단거동은 그림 5와 같다. 이 그림은 매끈한 말뚝 표면과 접한 흙에 대한 직접전단시험 측정 결과를 예시한 것으로 수행된 실내시험에 대해 전반적인 거동 형태는 유사하였다.

### 3.1 실내시험결과 분석

전단저항력의 특성을 살펴보기 위하여 경계면에서의 최대전단저항력과 수직하중, 흙의 단위중량과의 관계를 살펴보면 그림 6~7과 같다. 이 그림들을 잘 살펴보면 아주 중요한 정보를 제공하고 있는데 전단면에 작용하

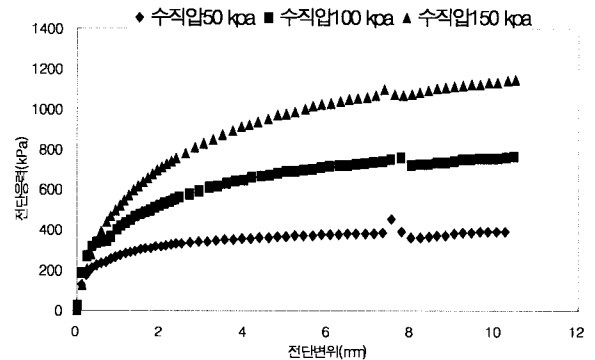


그림 5. 전단변형-응력 관계곡선

표 3. 실내 직접전단시험 개요

구분	내용	비고
시험 종류	· 흙 - 흙 · 흙 - 무조도판	· 흙 - 조도판 · 흙과 SIP의 관계도출
함수비	· 16%(SM 시료) · 27%(SC 시료)	· 현장 자연함수비
수직 응력	· 50kPa, 100kPa, 150kPa	· 시료의 채취심도 고려(SM:4m, SC:5.5m)
습윤 단위중량	· 15kN/m <sup>3</sup> ~ 20kN/m <sup>3</sup>	· 단위중량 변화에 따른 강도정수 비교 목적.

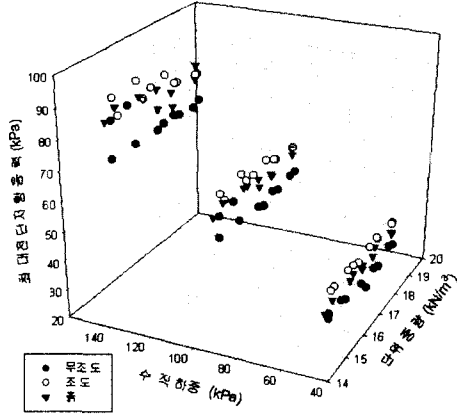


그림 6. 최대 주면전단 저항응력(SC시료)

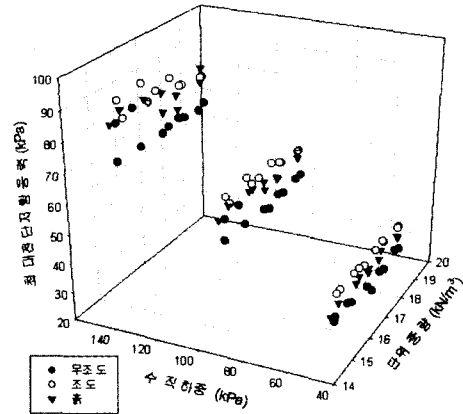


그림 7. 최대 주면전단 저항응력(SM시료)

는 수직하중이 최대전단 저항력에 미치는 영향이 월등히 크다는 것이다. 즉, 깊이별로 지중응력이 차이가 나는 것은 명확한 사실이며 그에 따라 말뚝 표면에 작용하는 수직하중이 차이가 나는 것이 주면 저항력에 가장 큰 영향을 주는 인자이므로 이런 특성을 고려한 주면 설계 지지력 산정이 반드시 필요하다고 사료된다. 또한 흙의 밀도에 따라서도 주면전단저항력값이 영향을 받는 것으로 측정되었다(Lambe & Whitman, 1979).

### 3.2 최대주면저항력 산정식

이러한 특성을 고려하여 말뚝표면에 작용하는 수직하중과 실제 자연조건에서 말뚝표면에 작용하는 수직하중에 영향을 주는 단위중량을 인자로 하는 SIP 말뚝의 주면저항력 산정식을 제시하였다(Bowels, 1982). 실험 결과를 토대로 SM, SC 토질과 접하는 SIP 말뚝의 단위 주면 전단저항력 추정식을 제시하면 다음과 같다.

SM 토질에서의 SIP말뚝 주면 전단저항력  $\tau_s$ 는 다음과 같다.

$$\tau_s = 16.5 - 0.48\gamma + 0.8\sigma_n \quad (1)$$

SC 토질에서의 SIP말뚝 주면 전단저항력  $\tau_s$ 는 다음과 같다.

$$\tau_s = 27.6 - 0.65\gamma + 0.4\sigma_n \quad (2)$$

여기서,  $\tau_s$  : 단위 주면 전단저항력(kPa)  
 $\gamma$  : 흙의 전체단위중량(kN/m<sup>3</sup>)  
 $\sigma_n$  : 수직응력(kPa)

## 4. 말뚝 주면 경계요소의 수치해석 모델

### 4.1 쌍곡선 모델

말뚝 표면과 주면 지반과의 전단저항 특성을 수치적으로 정확히 묘사하기 위해서는 알맞은 모델식이 필수적이다. 지금까지 경계요소의 저항력을 나타내는 수치 모델로 쌍곡선 모델이 전반적으로 많이 쓰이고 있으며(Gomez et al., 2000), 본 연구에서 국내에 광범위하게 분포되어 있는 화강풍화토(SM, SC)를 대상으로 실시한 실내 직접전단시험을 통해 얻은 결과를 쌍곡선 모델에 적용하여 그 적용성을 검토하였다. 쌍곡선 모델해석에 사용된 함수식은 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = \frac{\Delta_s}{\frac{1}{K_f \cdot \gamma_w \cdot \left(\frac{\sigma_n}{P_a}\right)^n} + \frac{R_f \cdot \Delta_s}{\sigma_n \cdot \tan \delta_p}} \quad (3)$$

여기서,  $\tau$  : 전단응력  $n$  : 강성지수  
 $\delta_p$  : 마찰저항각(deg)  $\gamma_w$  : 물의 단위중량  
 $\sigma_n$  : 수직응력  $\Delta_s$  : 전단변형량  
 $P_a$  : 대기압  $K_f$  : 강성수  
 $R_f$  : 파괴율

식 (3)에서 알 수 있듯이 쌍곡선 함수식에 적용되는 계수값은 총 4개( $K_f$ ,  $n$ ,  $R_f$ ,  $\delta_p$ )로 구성되어져 있다. 물의 단위중량  $\gamma_w$ 와 대기압  $P_a$ 는 상수값이므로 그 값이 쌍곡선 분석법과 무관하게 일정한 값을 사용하였으며, 수직응력  $\sigma_n$ 은 각 실험단계에서 적용된 수직응력값을 적용하였고, 전단변형량  $\Delta_s$ 는 실험에서 얻어진 값을 사용하였다.

#### 4.2 쌍곡선 모델의 계수

각각의 전단 변형량-전단저항력 데이터를 쌍곡선 분석법에 의해 계수  $K_f$ ,  $n$ ,  $R_f$ ,  $\delta_p$  를 구한 후  $K_f$ ,  $n$ ,  $R_f$ ,  $\delta_p$  값들을 다양하게 분석한 결과 계수값들은 경계

면에 접하는 흙의 단위중량과 구속압에 밀접한 연관성을 가지고 있음을 알 수 있었으며 따라서 식 (3)의 계수들은 경계면에 접하는 흙의 밀도와 구속압을 변수로 하는 일련의 함수식(식 (4), (5) 참조)으로 나타낼 수 있었다. 식 (3)에서 제시된 계수들의 토질조건에 따른 흙의

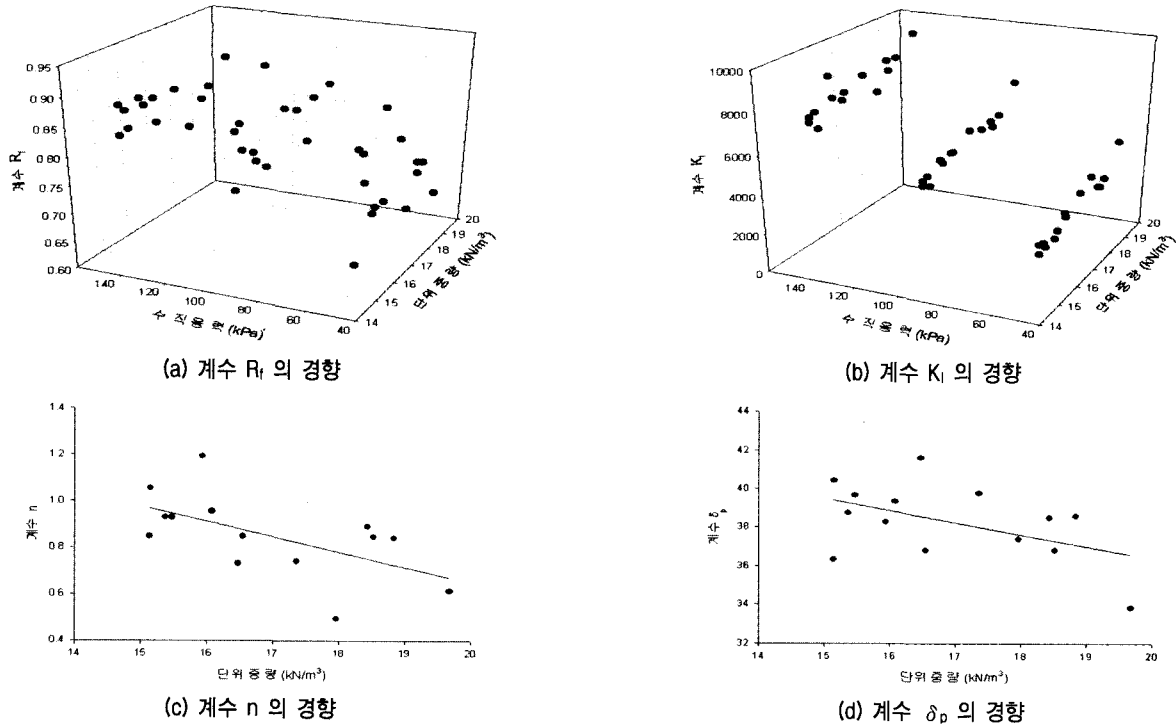


그림 8. SM토질에서의 쌍곡선 모델 계수 경향

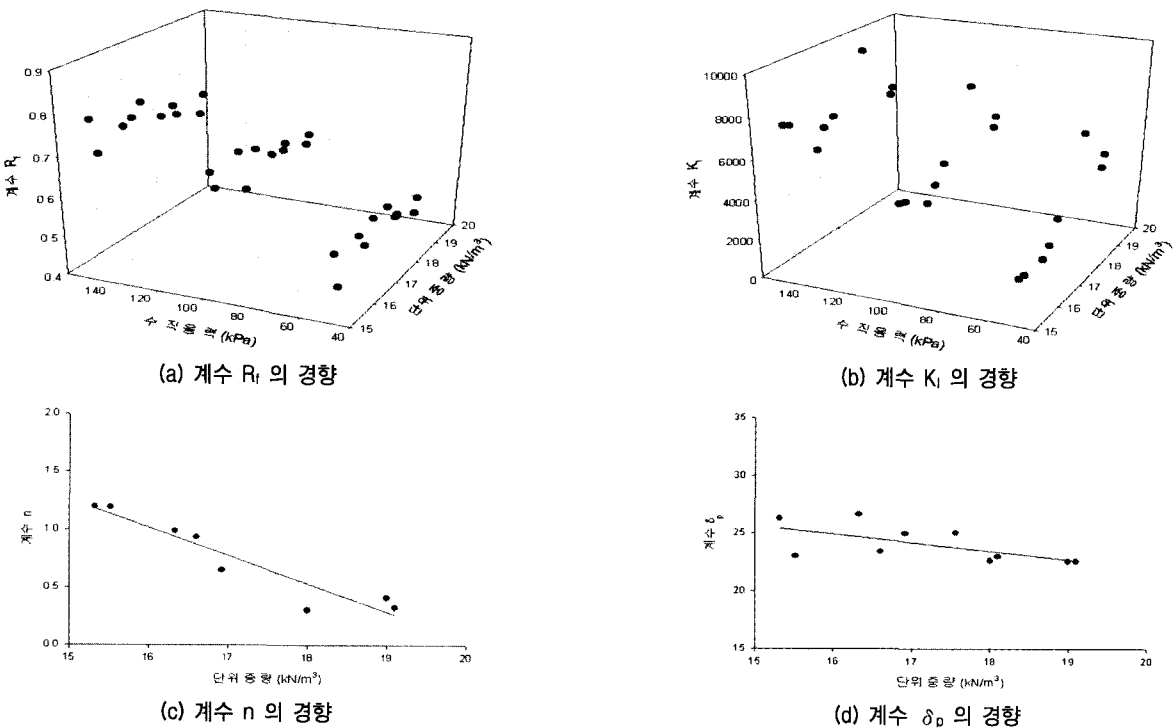


그림 9. SC토질에서의 쌍곡선 모델 계수 경향

단위중량과 구속압과의 연관성을 그림 8과 9에 나타내었다.

SM 토질에서의 쌍곡선 모델 계수 산정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 R_f &= 0.86 - 0.0081\gamma + 0.0008\sigma_n \\
 K_f &= -4584 + 316.9\gamma + 46.13\sigma_n \\
 n &= 1.969 - 0.0661\gamma \\
 \delta_p &= 48.85 - 0.6242\gamma
 \end{aligned}
 \quad (4)$$

SC 토질에서의 쌍곡선 모델 계수 산정식

$$\begin{aligned}
 R_f &= 0.639 - 0.012\gamma + 0.002\sigma_n \\
 K_f &= -6746 + 486.9\gamma + 36.77\sigma_n \\
 n &= 4.909 - 0.2432\gamma \\
 \delta_p &= 36.75 - 0.7386\gamma
 \end{aligned}
 \quad (5)$$

여기서,  $\gamma$  : 흙의 단위중량(kN/m<sup>3</sup>)  
 $\sigma_n$  : 수직응력(kPa)

#### 4.3 새로운 비선형 수치모델의 제안

말뚝 주면 경계요소에 대한 전단저항 거동 예측시 쌍곡선 모델은 적용된 함수식과 계수값 산정 절차가 용이치 않은 불편함이 있었다. 또한 쌍곡선 분석법에 의거해 제안된 계수값 산정식을 본 연구에서의 실험결과와 비교해 볼 때 다소 편차가 발생함을 알 수 있었다(그림 12, 13 참조). 따라서, 이러한 단점을 보완하고 본 연구를 통해 알 수 있었던 SIP말뚝표면과 지반 사이에서의 전단 변형률-응력 특성, 즉 말뚝 주면 경계면에서의 전단저항 거동은 흙의 밀도와 구속압에 의한 영향이 크다는 관계

를 고려한 새로운 함수식을 제시하기 위하여 수많은 시행착오를 거쳐 가장 적합한 식 (6)을 제시하였다(Gomez et al., 2000).

제안된 함수식의 특성은 그림 10과 같다.

$$\tau = \frac{a\Delta_s^c}{b + \Delta_s^c} \quad (6)$$

여기서,  $\tau$  : 전단 저항력(kPa)  
 $\Delta_s$  : 전단 변형량(mm)  
a, b, c : 계수

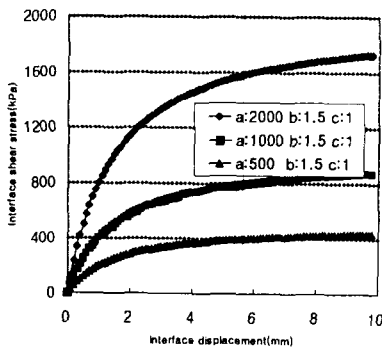
#### 4.4 새로운 전단저항 거동 모델의 계수

각각의 전단 변형량-전단저항력 데이터를 식 (3)의 함수식으로 회귀분석하여 계수 a, b, c를 구한 후 a, b, c값들을 다양하게 분석한 결과 계수 a, b, c값은 경계면에 접하는 흙의 단위중량과 구속압에 밀접한 연관성을 가지며 따라서 식 (3)의 계수들은 쌍곡선 모델 계수 산정식과 같이 경계면에 접하는 흙의 밀도와 구속압을 변수로 하는 일련의 함수식(식 (7), (8) 참조)으로 나타낼 수 있었다. 식 (3)에서 제시된 계수들의 흙의 단위중량과 구속압과의 연관성을 그림 9와 10에 나타내었다.

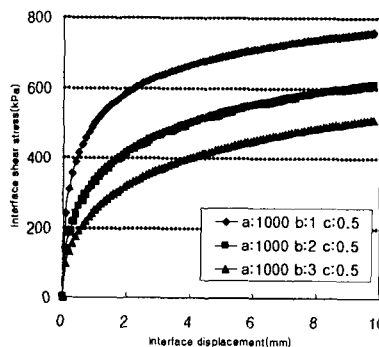
SM 토질에서의 새로운 비선형모델 계수 산정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 a &= 239.77 - 2.347\gamma + 0.31\sigma_n \\
 b &= 15.98 - 0.224\gamma - 0.06\sigma_n \\
 c &= 0.60 - 0.012\gamma + 0.0014\sigma_n
 \end{aligned}
 \quad (7)$$

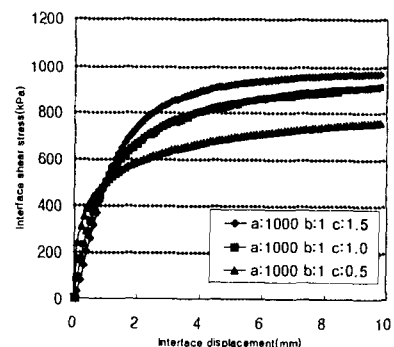
SC 토질에서의 새로운 비선형모델 계수 산정식은 다음과 같다.



(a) 계수 a의 특성

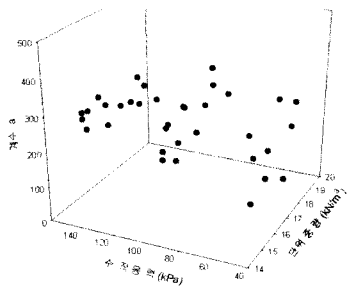


(b) 계수 b의 특성

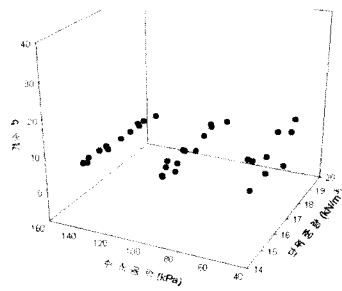


(c) 계수 c의 특성

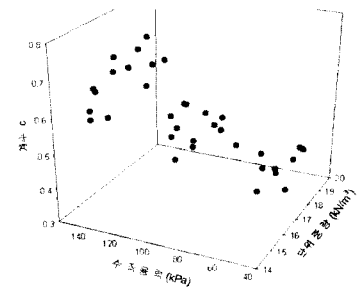
그림 10. 제안된 함수식의 특성



(a) 계수 a 의 경향

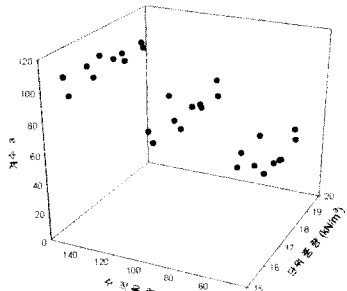


(b) 계수 b 의 경향

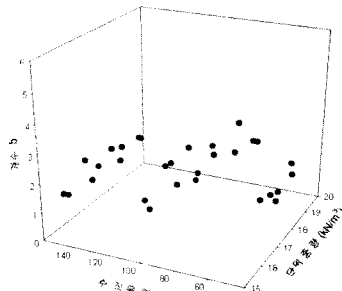


(c) 계수 c 의 경향

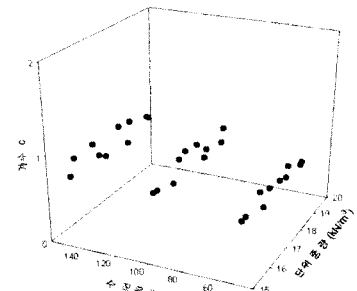
그림 11. SM 토질의 계수 경향



(a) 계수 a 의 경향



(b) 계수 b 의 경향



(c) 계수 c 의 경향

그림 12. SC 토질의 계수 경향

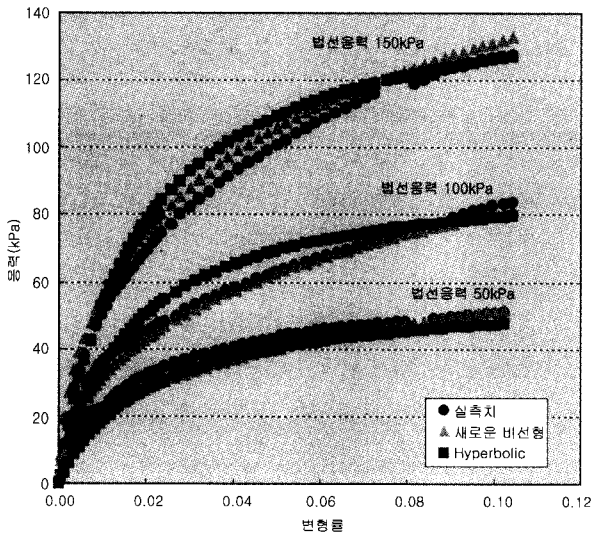


그림 13. 단위중량 17.96 kN/m<sup>3</sup>, SM 토질의 실측치와 예측모델들과의 비교

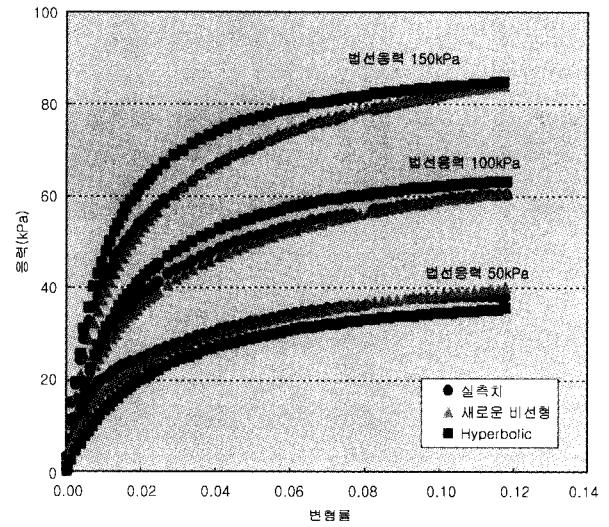


그림 14. 단위중량 16.92 kN/m<sup>3</sup>, SC 토질의 실측치와 예측모델들과의 비교

$$\begin{aligned}
 a &= 92.67 - 3.208\gamma + 0.43\sigma_n \\
 b &= 9.15 - 0.368\gamma - 0.0081\sigma_n \\
 c &= 0.70 - 0.008\gamma + 0.0018\sigma_n
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

여기서,  $\gamma$  : 흙의 단위중량(kN/m<sup>3</sup>)  
 $\sigma_n$  : 수직응력(kPa)

이상과 같이 설명된 쌍곡선 모델과 새로운 비선형 수치모델에 의해 묘사되는 SIP 말뚝 경계면에서의 전단응력-변형거동을 실측값과 비교한 결과 중 대표적인 것을 그림 13, 14에 나타내었다.

그림을 잘 살펴보면 쌍곡선 함수식에 의한 전단저항 거동 예측 모델은 전체적으로 실측값과 다소 편차를 보

이고 있으며, 본 연구에서 제시된 전단저항 거동 예측 모델은 경계면에서의 비선형 전단저항 거동을 잘 묘사하고 있는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

SIP말뚝의 주면 저항 특성을 살펴보기 위해 실내 전단 시험을 실시하고 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 같은 토질에서도 흙의 밀도와 접촉면의 거칠기에 따라서 경계면에서의 부착력과 마찰저항각의 경향이 다양하게 나타난다. 그러나 부착력과 마찰저항각 성분을 포함한 주면마찰저항력의 경우 비교적 일목요연한 경향을 보여주므로 향후 SIP 말뚝에서와 같은 경계면에서의 주면마찰저항력 산정이나 측정에는 부착력과 마찰저항각의 분리가 아니라 전체값인 주면마찰저항력을 고려하는 것이 효과적이다.
- (2) 말뚝 주면 저항력의 산정에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 인자는 말뚝표면과 흙 전단면에 작용하는 수직 응력이며 SIP 말뚝의 경우 천공작업에 따른 표면 거칠기 양상은 같은 종류의 지반에서는 비교적 일정한 양상을 띠므로 국내지반의 대표적인 토질인 SM, SC 토질에서 흙의 밀도와 전단면의 수직응력을 고려한 SIP 말뚝의 최대 주면 저항력 산정식을 제안하였다.
- (3) 화강풍화토(SM, SC)를 대상으로 실시한 실내 직접 전단시험을 통해 얻은 결과를 지금까지 경계요소의 저항력을 나타내는 수치 모델로 주로 쓰이고 있는

쌍곡선 모델에 적용하여 쌍곡선 계수  $K_f$ ,  $n$ ,  $R_f$ ,  $\delta_p$ 에 대한 산정식을 제안하였다.

- (4) 실험 결과를 토대로 새로이 제시된 SIP 말뚝의 주면 저항력 거동을 묘사하는 새로운 비선형 모델식의 국내 주요 토질에 대한 산정식을 제시하였다.
- (5) 새로운 비선형 수치모델과 쌍곡선 모델에 의해 묘사되는 SIP 말뚝 경계면에서의 전단응력-변형거동을 실측값과 비교한 결과 쌍곡선 함수식에 의한 전단저항 거동 예측 모델은 실측값과 다소 편차를 보였으며, 본 연구에서 제시된 전단저항 거동 예측 모델에 사용된 함수식은 쌍곡선 모델에 사용된 함수식보다 훨씬 간략화 됐으며, 경계면에서의 비선형 전단저항 거동을 잘 묘사하고 있는 것을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

1. 김용필 등(2000), 지반공학 시험법 및 응용, 세진사, pp.381-403.
2. 대한주택공사(2001), SIP공법의 품질개선방안과 지지력 산정법 제안에 관한 연구, 대한주택공사, pp.1-13.
3. K. H. Head(1982), *Manual of soil laboratory testing*, Vol.2, ELE Internation Limited, London, pp.542-562.
4. J. E. Bowels(1982), *Foundation Analysis and Design 3rd. ed.*, McGraw-Hill International Book Company, pp.602-608.
5. J. E. Gomez, G. M. Filz, and R. M. Ebeling(2000), *Development of an improved numerical model for concrete-to-soil interfaces in soil-structure interaction analyses*, U.S. Army Corps of Engineers, pp.20-27.
6. T. W. Lambe and R. V. Whitman(1979), *Soil mechanics*, Wiley, New York, N.Y., 127p, 139p.

(접수일자 2003. 3. 10, 심사완료일 2003. 4. 12)