

## 수치해석을 이용한 파형 마이크로파일의 지지거동 분석

한진태<sup>1</sup>, 김성렬<sup>2\*</sup>, 장영은<sup>3</sup>, 이승현<sup>4</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원, <sup>2</sup>동아대학교 토목공학과, <sup>3</sup>과학기술연합대학원대학교 지반신공공간공학과,  
<sup>4</sup>선문대학교 토목공학과

## Evaluation of Bearing Capacity of Waveform Micropile by Numerical Analyses

Jin-Tae Han<sup>1</sup>, Sung-Ryul Kim<sup>2\*</sup>, Young-eun Jang<sup>3</sup> and Seung-Hyun Lee<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Constuction Technology

<sup>2</sup>Dept. of Civil engineering, Dong-A University

<sup>3</sup>Division of Geospace engineering, University of Science & Technology

<sup>4</sup>Dept. of Cilvil engineering, Sunmoon University

**요 약** 최근 국내에서 철도부지 상부에 인공지반을 구축하고, 인공지반 위에 복합주거타운을 건설하는 정책이 추진되고 있다. 이에 상부 구조물 및 인공지반을 지지할 수 있는 적합한 기초형식이 요구되는데, 철로와 철로 사이의 좁은 공간에 급속 시공 가능한 기초 형식 중 가장 대표적인 방법은 마이크로파일로 알려져 있다. 그러나 주기초로 마이크로파일이 사용될 경우 기초 시공비가 크게 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 마이크로파일의 경제성 및 지지력을 향상시키면서 철도상부 인공지반에 적합한 신개념 마이크로파일을 제안하였다. 신개념 마이크로파일은 지반을 Jet Grouting 공법을 이용하여 지반의 일정 영역을 고결시킨 뒤 강봉을 시공하는 방법에 Jet Grouting 시 말뚝체를 파형(waveform)의 형상으로 시공하여 지지력을 향상시키고 기존 마이크로파일 대비 말뚝의 전체 길이를 줄여 경제성을 높이고자 한 방법이다. 본 연구에서는 2차원 축대칭 유한요소해석을 수행하여 이러한 파형 마이크로 파일의 지지거동을 분석하였다. 해석 결과 파형 마이크로파일은 일반 마이크로파일에 비해 길이가 15% 정도 감소하였음에도 불구하고 동일한 설계하중에서 변위가 감소하여 지지력 및 경제성 측면에서 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한, 파형 마이크로파일의 요철에 의한 주면 마찰력 증가효과는 상대적으로 연약한 토층에서 큰 것으로 나타났다.

**Abstract** Recently in Korea, the policy is being proceeded to build a intergenerational housing on artificial ground of railroad site for utilizing rental house. Due to narrow space of rail road site, suitable method have to be developed such as micropiles which is known as a method of a fast construction. However, If micropile is used as foundations for the super structure, construction cost is increases compared with other pile. Consequently, new concept micropile proposed to improve both bearing capacity and cost efficiency of general micropile. New concept micropile consists of waveform cement grout surrounding tread bar that formed by grouting the soil layer with jet grouting method as control the grout pressure and flow. The micropile with waveform is expected to decrease the construction cost by cut down pile length of general micropile. This paper examined the behavior of the new concept micropile with waveform subjected to axial load using two-dimensional axisymmetric numerical analyses method. According to the numerical result, there will cost effectiveness as the pile displacement decreased despite the length of waveform micropile is down about 5% from a general micropile under the same loading condition. Also, the effect of skin friction force which mobilized from the waveform of micropile appeared at relatively soft ground.

**Key Words** : Micropile, Jet grouting, Numerical analyses, Railroad site, Waveform

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업인 '도심지 인프라에 기반한 인공지반 및 수직입체 지상공간 조성기술 개발' 과제의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

\*Corresponding Author : Sung-Ryul Kim(Dong-A Univ.)

Tel: +82-51-200-7622 email: sungryul@dau.ac.kr

Received October 14, 2013 Revised November 4, 2013 Accepted November 7, 2013

## 1. 서론

급속한 도시개발로 인한 수도권 지역의 건물밀도 증가를 해결하기 위해 철도부지 및 우수지 상부에 인공지반을 조성하고 구조물 및 녹지공간을 위한 공간으로 활용하기 위한 방안이 주목받고 있다. 특히, 교통시설 유휴부지 등의 국공유지를 중심으로 인공지반을 구성하고 주거지역을 조성할 경우 타 주거형식에 비해 상당한 경제적 효과 및 주택 임대 수요 충족, 접근성 증가 등의 다양한 효과를 기대할 수 있어 일본 및 유럽 등지에서는 철도지반 상부의 인공지반을 활용한 주거 복합단지 개발 프로젝트가 이미 진행된 바 있다[1].

최근에는 우리나라 또한 상기 복합 주거공간을 조성하여 신혼부부 및 사회초년생 등에게 저렴하게 공급하고자, 1차적으로 오류·가좌지구 2곳을 개발하겠다는 내용의 행복주택 사업 계획을 발표하였다. 행복주택 사업의 1차 선정 지구인 오류·가좌지구는 현재 운영 중인 철도와 관련 시설물들이 존재하고 있는 지역이며, 2차 선정 예정 지구 또한 철도부지 내에 위치한 지역으로 고려되고 있는 실정이다.

철도부지 상부에 조성된 인공지반이 주거단지로부터 전달되는 하중을 안정적으로 지지하도록 하기 위해서는 적절한 기초형식의 설계 및 시공기술에 관한 전반적인 해결책이 제시되어야 한다. 철도부지의 특성상 기초 시공면적이 매우 협소하므로, 기초 한 본당 발휘되어야 하는 지지력이 기존 기초에 비해 극대화 되어야 한다. 또한 철도는 종단과 횡단의 변형을 엄격히 규제하고 있고, 기존 선로의 철도 운행에 대한 영향을 최소화하여야 하므로, 협소한 지역에서 신속히 시공 가능한 근접·급속 시공 기술이 도출되어야 한다.

현재까지 적용된 다양한 기초형식 가운데 근접시공 또는 급속시공이 가능한 공법은 심초기초(caisson type pile), 로터리파일(rotary pile), 마이크로파일(micropile) 등으로 알려져 있다. 각 기초형식마다 장단점이 존재하나, 지지력 및 경제성 측면에서 마이크로파일의 성능 개선을 수행한다면 인공지반 지지를 위한 가장 적합한 형식이 될 것으로 판단된다.

마이크로파일은 일반적으로 직경이 300mm 이하의 소구경 말뚝으로, 1950년대 초반 이탈리아에서 개발되었다. 시공 목적과 대상 지반에 따라 직경 120~250mm사이의 마이크로파일이 사용되고 있으며, 상부 하중의 크기에 따라 길이의 차이를 나타낸다. 소규모 천공장비를 이용하여 소정의 깊이까지 천공한 후 강봉(thread bar)을 삽입하고 천공홀 내부에 그라우트를 실시하는 마이크로파일은 시공 장비의 진입이 용이하여 대구경 장비의 진입이 어려

운 건물의 신설과 보강에 주로 사용되어 왔다. 마이크로파일은 선단지지력과 주변마찰력에 의해 상부구조물을 지지하는 기존 파일과 달리, 선단지지력을 고려하지 않고 파일의 주변부에 작용하는 마찰력만을 고려하여 설계에 적용하고 있다[2]. 그러나 국내에서는 마이크로파일 설계시에 상부 토사층에서 발현되는 지지력을 설계지지력에 반영하지 않고, 기반암 부근에서의 마찰지지력만을 고려하는 것이 일반적이므로, 만약 토사층에서 충분한 마찰지지력 발현이 가능하다면 말뚝의 길이를 절감하여 경제성 있는 기초공법의 시공이 가능할 것으로 예상된다.

마이크로파일의 지지성능을 개선시키기 위한 다양한 연구가 국내외적으로 수행되어 왔다. 그 중, 마이크로파일의 경사설치를 통해 파일과 인접지반의 구속효과로 인한 지지력 증가 효과를 기대하고 파일의 설치각도에 따른 지지력 변화에 관한 연구가 수행된 바 있다[3][4]. 실제로 마이크로파일의 설치각도 및 길이를 변화시켜 지반의 지지력 증가효과를 관찰한 결과 연직 시공된 마이크로파일보다는 약 75° 경사를 적용하여 설치하는 것이 보강효과에 더욱 효과적이라는 것을 실험을 통해 확인하였다[5].

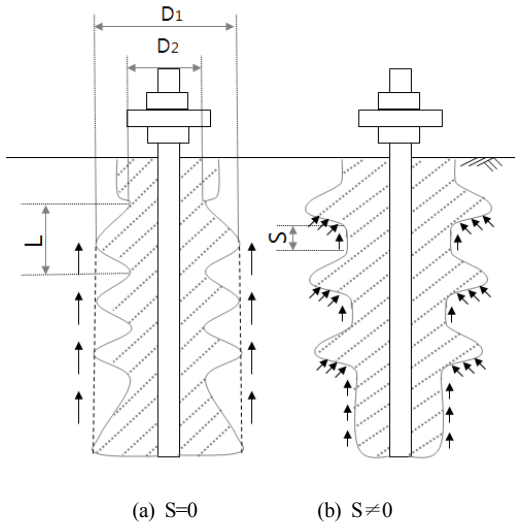
또한 중력식 그라우트와 가압식 그라우트 방법에 따른 지지력 변화를 관찰하고자 각각 토사층과 기반암층에 관입된 마이크로파일에 대한 실험이 수행되었으며, 연구 결과 가압식 그라우트를 적용한 마이크로파일의 지지력이 중력식 그라우트를 적용한 것에 비해 지지저항 성능이 개선되는 것으로 나타났다[6].

또한, 마이크로파일의 강봉이나 강관을 토목 섬유팩으로 감싸고 섬유팩 내부에 주입재를 주입하며 천공직경을 확대한 팩마이크로파일에 대한 연구가 수행되었다. 그라우트 방법 개선 및 구조 변화를 통해 지지저항 성능을 개선시키고자 한 팩마이크로파일은 마이크로파일의 단면적 증대와 주변지반 압축으로 인한 말뚝주면의 마찰저항면적 증대가 발생해 인발저항력 또한 유리한 특성을 보였다[7-9].

위와 같이, 마이크로파일의 성능을 개선시키기 위해 마이크로파일의 구조 및 배열 개선 방안들이 다양하게 제안되었으나, 경제성과 지지력을 동시에 만족시키는 방법에 대한 연구는 부족한 실정이다. 이에, 본 연구에서는 Jet grouting 및 그라우팅 형상 변화를 통해 신개념 마이크로파일을 제안하였으며, 수치해석을 통해 본 연구에서 제안된 신개념 마이크로파일의 지지력 향상 효과를 기존 마이크로파일과 비교 분석하였다.

## 2. 파형 마이크로파일 개념

본 연구에서 제안하고자 하는 신개념 마이크로파일은 토사층의 일정영역을 고결시키기 위한 Jet grouting을 통해 그라우트체를 파형(waveform)의 형상으로 시공하는 파형 마이크로파일이다. 본 파형 마이크로파일은 파형요철을 통해 기존 마이크로파일 대비 지지력을 향상시키고 말뚝의 길이를 줄여 경제성을 향상시키고자 한 방법이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 파형을 이루는 요철의 길이  $L$  과 요철과 요철의 간격  $S$ 는 조절이 가능하다. 파형 마이크로파일의 지지거동 메커니즘은 Fig. 1(a)와 같이 요철의 간격  $S$ 가 작은 경우 요철 바깥쪽을 따라 주변마찰력이 발휘되거나, Fig. 1(b)와 같이 요철의 간격  $S$ 가 넓은 경우에는 요철 하부의 경사면에 의해 발현되는 전단저항체에 의해 지지력이 발휘되는 형태로 나타난다.



[Fig. 1] Concept of waveform micropile

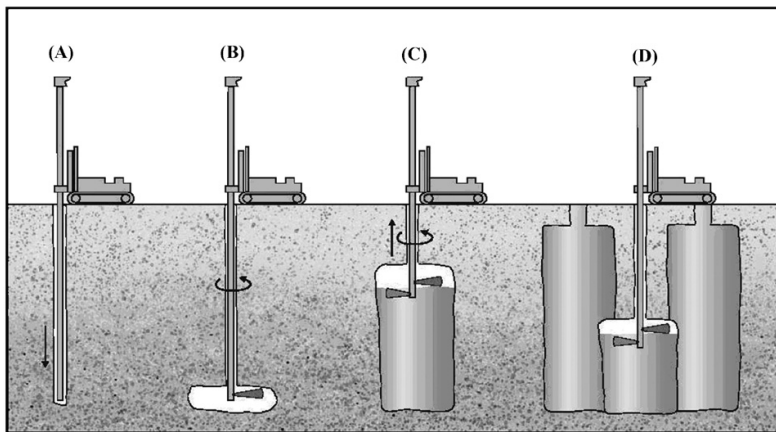
파형 마이크로파일의 파형을 이루는 그라우트체는 Fig. 2에서 보여주고 있는 Jet grouting 공법을 활용하여 생성한다. 본 연구에서는 Soil jet grouting 또는 Soilcrete라고도 알려져 있는 본 공법을 활용해 마이크로파일 시공을 위한 천공단계에서 천공경 주변의 토사를 고결시킴과 동시에 소요의 압력을 가하여 파형을 생성하는 방법을 제안하였다. 점차 마이크로파일의 적용이 기존의 보강기초 뿐만 아니라 지반개량, 지중 연속벽, 차수벽 및 직접기초로의 범위가 확대되고 있으므로, 그라우트체를 지지저항체로 거동할 수 있도록 한다면 마이크로파일의 지지저항성능 개선에 효과가 있을 것으로 예상된다. 특히, 지반개량 효과가 탁월해 매립지와 같은 연약지반 기초 시공시 활용되는 Jet grouting 공법은 지반의 강도 증진을 가져올 뿐 아니라, 주변 토사와의 배합으로 인한 그라우트체의 연성이 증가하여 균열에 대한 품질관리가 어려웠던 기존 그라우팅의 단점을 보완할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 지반조건 및 해석종류

본 연구에서는 파형 마이크로파일의 적용성을 분석하기 위하여 수치해석을 통해 지지력 발현 양상을 관찰하고, 요철 길이와 간격 등에 따른 지지력 변화에 대한 연구를 수행하였다.

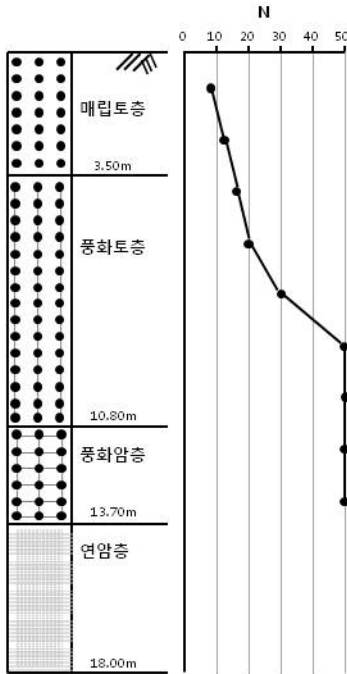
수치해석에 적용한 지층 조건은 행복주택 시범사업의 1차 선정지구인 오류동 역사 부근의 지반 조건을 적용하였다. 지층 구성은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 상부로부터



[Fig. 2] Sequence of jet grouting method[10]

(a) drilling, (b) jetting test, (c) jetting, forming a column, and (d) completion

사질토로 이루어진 매립토층, 풍화토층, 풍화암층, 기반암층 순으로 이루어져 있다. 매립토층이 분포하는 지표면으로부터 심도 3.5m까지의 지층은  $N$ 치가 10내외의 연약한 특성을 나타내고 있다. 반면 풍화토층부터 풍화암층, 기반암층으로 내려갈수록  $N$ 치가 20에서 50까지 점차 증가한다.

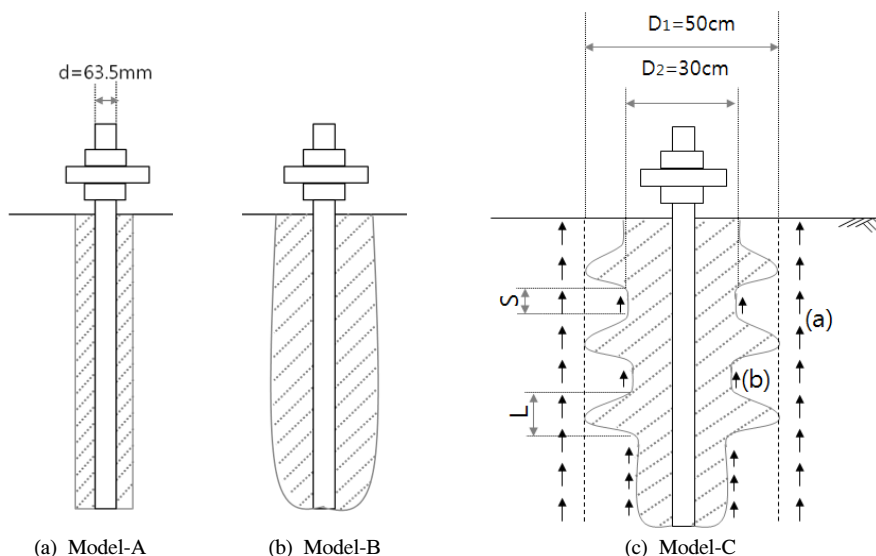


[Fig. 3] Boring logs of study site

해석에 적용된 마이크로파일의 종류는 Fig. 4에 나타난 총 세 가지이다. Model-A(Fig. 4(a))는 일반 마이크로파일, Model-B(Fig. 4(b))는 파형이 없는 soil jet grouting을 적용한 마이크로파일, Model-C(Fig. 4(c))는 파형 마이크로파일을 의미한다. 강봉의 직경은 모두 63.5mm를 적용하였다. Model-A의 그라우트체 직경은 기성 케이싱의 직경을 고려하여 177.5mm를 적용하였다. 그리고, Model-B의 그라우트체 직경은 500mm이다. Model-C의 그라우트체는 외경( $D_1$ ) 500mm, 내경( $D_2$ ) 300mm이다.

해석은 Table 1에 정리한 것을 토대로 하여 수행하였다. 우선, 파형이 없는 Model-A와 Model-B에 대한 해석을 수행하였다. 그리고, 파형 마이크로파일은 요철의 길이( $L$ )와 간격( $S$ )를 각각 2가지씩 변화시키며 (Model-C-1)~(Model-C-4)의 4가지 해석을 수행하였다. 또한, 지지거동 비교를 위하여 요철이 없는 마이크로파일 (Model-C-N)를 함께 해석하였다. 이에 따라, 총 7가지의 해석을 수행하여 마이크로파일의 지지거동을 분석하였다.

그라우트체의 강도( $f_{ck}$ )는 Model-A의 경우 35MPa, 그 외의 경우 10MPa를 적용하였다. 파일의 지반근입깊이는 Model-A의 일반 마이크로파일의 경우 설계하중으로 가정한 약 1000kN의 지반지지력이 발휘되는 깊이인 16m로 산정하였다. 이때, 근입깊이 산정을 위해서는 본 논문에서 활용한 지반정보를 바탕으로 지지력을 계산하였으며, 그 결과 연암층 2m, 총 길이 16m의 말뚝 근입이 필요한 것으로 나타났다. 또한 Model-B와 Model-C의 Jet grouting을 적용한 마이크로파일의 경우 Jet grouting의



[Fig. 4] Analysis models of micropiles

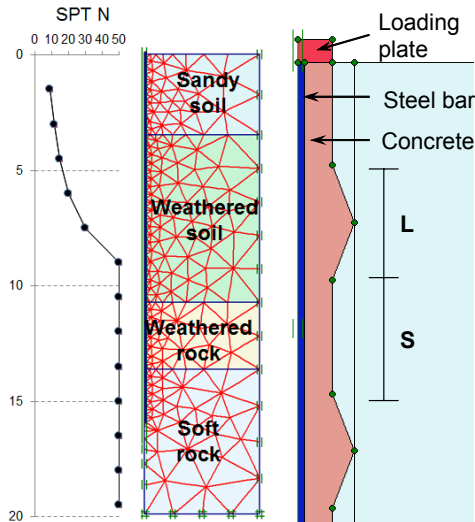
시공 가능 깊이 및 일반 마이크로파일 대비 경제성을 고려하여 풍화암 상단(파일근입깊이=13.7m)까지 근입되는 것으로 가정하였다.

[Table 1] Pile dimension and grout strength

Model type	Pile dimension
Model-A	D=177mm ( $f_{ck}^*=30\text{MPa}$ ), Length=16m
Model-B	D=500mm ( $f_{ck}=10\text{MPa}$ ), Length=13.7m
Model-C-1	L=1D <sub>1</sub> , S=5D <sub>1</sub>
Model-C-2	D <sub>1</sub> =500mm D <sub>2</sub> =300mm L=1D <sub>1</sub> , S=1D <sub>1</sub>
Model-C-3	Length=13.7m L=2D <sub>1</sub> , S=5D <sub>1</sub>
Model-C-4	L=2D <sub>1</sub> , S=1D <sub>1</sub>
Model-C-N	D <sub>1</sub> =D <sub>2</sub> =300mm Length=13.7m -

\*Yield strength of grout body

### 3.2 해석 수행



[Fig. 5] Element meshes and pile modeling

해석에 이용된 프로그램은 Plaxis ver.8[11] 프로그램이다. 해석조건은 2차원 축대칭 조건을 적용하여 말뚝과 지층의 반단면을 모델링하였다. 요소망 작성에 이용된 요소는 15절점 삼각형 요소를 적용하였다. 말뚝 중앙으로부터 좌우 경계면까지의 거리는 5m를 적용하여 경계면 영향을 배제하였다. 하부경계면은 지표면으로부터 20m 깊이를 적용하였다.

Table 2와 Table 3은 해석에 이용된 입력물성값으로서 각각 지반과 말뚝의 입력물성값을 보여준다. 구성모델은 지반과 말뚝재료에 대하여 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을

적용하였다. 그라우트의 인장강도값은 일반적으로 압축강도의 7~11%의 값을 가지는 것으로 알려져 있으며, 본 해석에서는 압축강도의 1/10값을 입력하였다[12].

축하중 재하는 변위제어 방법을 적용하여 말뚝두부의 변위를 하향으로 증가시켰다. 이 때, 재하위치에 발생하는 반력을 이용하여 말뚝두부의 하중-변위 곡선을 도출하였다.

[Table 2] Input properties of soils

Type	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (kPa)	$\phi$ (deg.)	$\psi$ (deg.)	c (kPa)	$\nu$
Sandy soil	18	13,250	32	2	-	0.33
Weathered soil	19	20,000	38	8	-	0.33
Weathered rock	21	100,000	33	3	30	0.33
Soft rock	23	500,000	35	5	200	0.3

$\gamma$ =Unit weight, E=Young's modulus,  $\phi$ =Internal friction angle,  $\psi$ =Dilatancy angle, c=Cohesion,  $\nu$ =Poisson's ratio

[Table 3] Input properties of pile materials

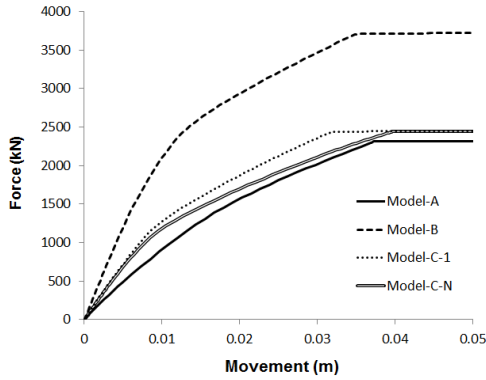
Type	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\nu$	Comp. strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
Steel bar	78	210	0.3	555	555
Grout (35MPa)	23	27.2	0.2	35	3.5
Grout (10MPa)	23	14.8	0.2	10	1

## 4. 해석결과

### 4.1 말뚝두부 축하중-변위 곡선

Fig. 6은 말뚝두부에서의 축하중-변위 곡선을 비교한 것이다. 축하중은 점차 증가하다가 변위가 30~40mm 범위 에 도달하였을 때 극한값이 나타난다. 극한값의 크기는 Model-B, Model-C (Model-C-1과 Model-C-N), 그리고 Model-A 순으로 큰 것으로 나타났으며, 각각 3720kN, 2450kN, 그리고 2310kN이었다. 주목할 것은 Model-C의 극한값은 요철의 유무에 관계없이 서로 일치하였다. 다만, 요철이 있는 경우(Model-C-1) 동일한 하중에서의 변위가 요철이 없는 경우(Model-C-N)에 비하여 감소하는 것으로 나타났다. 설계하중으로 가정한 1000kN이 작용할 경우, 직경이 가장 큰 Model-B의 변위가 최소로 발생

하였으며, 파형 마이크로파일인 Model-C 또한 일반 마이크로파일에 비해 약 40% 정도의 변위 감소 효과가 나타나 큰 지지력 향상 효과를 나타내었다.



[Fig. 6] Pile head load-movement curves of micropiles

Table 4는 각 파일의 재료 항복강도를 보여준다. Table 1에서 각 재료의 항복강도는 강봉과 그라우트의 항복강도값을 더하여 산정하였다. 표에서 ( )안의 값은 허용 재료강도값으로서 강봉의 경우 극한강도의 60%, 그라우트의 경우 항복강도의 25%를 적용하였다. Fig. 6의 극한하중과 Table 4의 재료 항복강도값은 서로 일치하는 것을 알 수 있다. 이것은 본 해석의 지반조건이 매우 양호하여 지반지지력이 나타나기 전에 재료항복이 먼저 발생하였기 때문이다. 각 파일의 항복강도는 Model-B가 가장 크며, Model-A와 Model-C의 항복강도는 각각 2301kN(Model-B의 62%), 2435 kN(Model-A의 66%)이었다.

[Table 4] Pile material strength

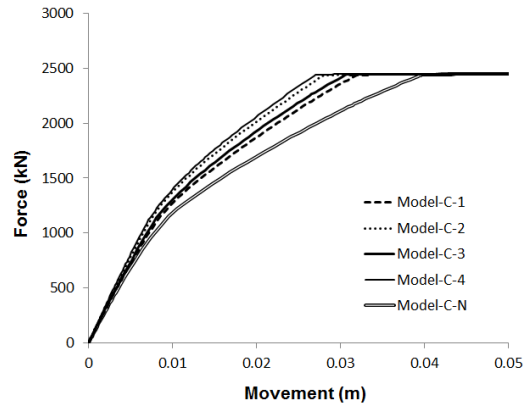
Model type	Yield and allowable load (kN)		
	Steel bar	Grout	Sum
Model-A		541 (135 <sup>**</sup> )	2301 (1464)
Model-B	1760 (1329 <sup>*</sup> )	1931 (482)	3691 (1811)
Model-C		674 (168)	2435 (1497)

( ): Allowable stress of material  
 \* 60% of pile ultimate strength  
 \*\* 25% of grout body yield strength

Fig. 7은 파형 마이크로파일의 말뚝두부 축하중-변위 곡선이다. 요철의 간격, 요철의 길이에 관계없이 동일한 극한값을 보여준다. 이것은 최종적인 재료항복 상태에서

는 요철이 파일 재료강도에 기여하지 못하기 때문에 판단된다. 본 해석조건에서 파일의 지반 근입깊이는 파일 직경(그라우트체 포함)의 103배(Model-A) 또는 45배(Model-C)이다. 즉, 파일직경에 비해 근입깊이가 매우 깊기 때문에 지반지지력이 극한값에 도달하기 전에 파일재료항복이 발생하였다. 그러므로, 마이크로파일이 양호한 지반에 설치된다면 대부분의 경우 파일 한분당 설계력은 지반지지력이 아닌 재료강도에 의해 결정될 것으로 판단된다.

다만, 재료항복이 발생하기 전의 말뚝변위를 살펴보면 요철의 저항력에 의해 요철의 개수가 많을수록 그리고 요철의 길이가 커질수록 변위가 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 허용하중 크기에서는 파형 마이크로파일의 변위 억제 효과가 큰 것으로 판단된다.



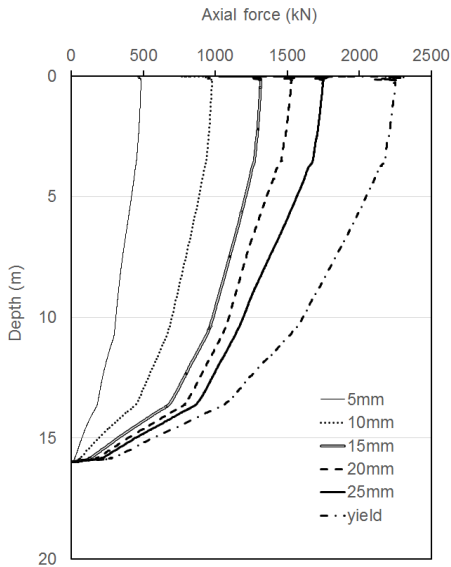
[Fig. 7] Pile head load-movement of waveform micropiles

Table 5는 각 파일의 재료 허용강도에 해당하는 말뚝두부 변위를 정리하였다. 두부변위는 Model-A, Model-C, 그리고 Model-B의 순서대로 크게 나타났다. Model-C의 평균 변위는 Model-A에 비하여 31% 감소하여, 파형 마이크로파일이 길이가 일반 마이크로파일 대비 2.3m, 약 15% 정도 짧아졌음에도 불구하고 기존 마이크로파일에 비하여 지지성능이 우수한 것으로 나타났다. 또한, Model-C의 경우 동일한 요철간격(S)에서 요철길이(L)가 1D<sub>1</sub>에서 2D<sub>1</sub>으로 2배 증가함에 따라 변위값은 평균 4.3% 감소하였으며, 동일한 요철길이에서 요철간격이 5D<sub>1</sub>에서 1D<sub>1</sub>으로 1/5로 감소함에 따라 변위값은 평균 11.8% 감소하였다. 따라서, 요철길이가 증가할수록, 요철간격이 감소할수록 파형 마이크로파일의 지지력이 증가할 것으로 예상된다. 그러나, 본 결과는 추후 다양한 조건에서 추가적인 해석 및 실험을 통해 검증할 필요가 있다.

[Table 5] Pile head movement at allowable material strength

Model type	Pile head movement(mm)
Model-A	17.9
Model-B	8.2
Model-C-1	13.4
Model-C-2	11.7
Model-C-3	12.7
Model-C-4	11.3
Model-C-N	15.8

Fig. 8은 일반 마이크로파일의 축하중 전이곡선이다. 축하중값은 강봉 내에 발생한 축응력값을 하중으로 환산하여 계산하였다. 축하중 분포를 보면 변위 15~20mm, 20~25mm 구간의 두부 축하중 증가크기가 0~5mm, 5~10mm구간의 축하중 증가정도에 비하여 작아졌다. 이는 변위 15mm부터 그라우트체의 항복이 발생하면서 그라우트체가 더 이상 추가하중을 지지하지 못하기 때문이다.

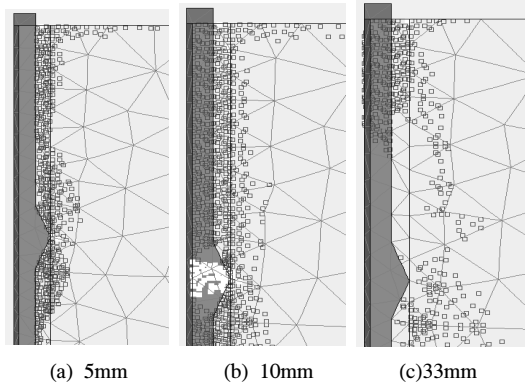


[Fig. 8] Axial load transfer curves of Model-A

#### 4.2 재료항복 및 축하중 전이거동

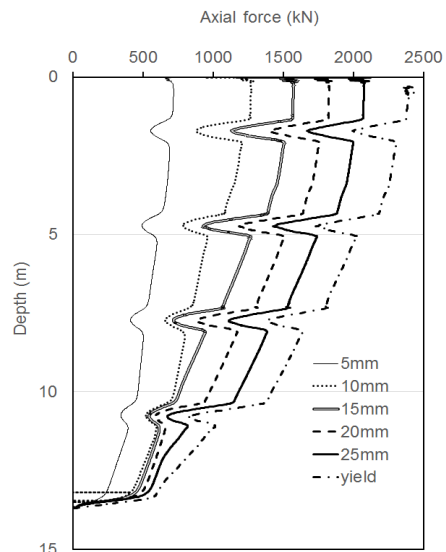
Fig. 9는 파형 마이크로파일의 재료항복거동을 보여준다. 변위 5mm까지는 파일 주면지반의 전단파괴가 발생하였으며, 요철부의 저항에 의해 요철부 상하부 지반의 파괴가 넓게 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 변위 10mm에 도달하면 요철부에서 인장파괴(그림의 흰부분)가 발생하고 요철부 상하부에서는 전단파괴가 발생하였다. 인

장파괴가 발생한 원인은 요철부에 저항력에 의해 힘의 불균형 상태가 발생하였기 때문으로 판단된다. 하중이 점차 증가하면 최종적으로 강봉의 전단파괴가 발생하면서 극한하중에 도달하게 된다.

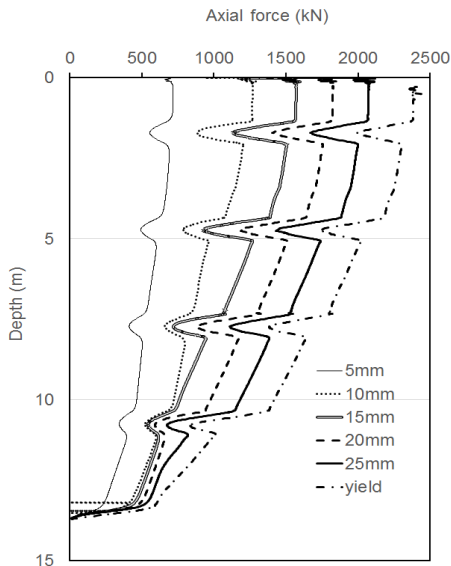


[Fig. 9] Yielding behavior of waveform micropile with increased load (흰점: 인장파괴, 검은점: Mohr-Coulomb 파괴)

Fig. 10은 파형 마이크로파일의 축하중 전이거동을 보여준다. 축하중 값은 강봉에서 발생한 축응력을 하중으로 환산한 값이다. 그림을 보면 요철이 존재하는 깊이에서 축하중이 감소하였다가 다시 증가하는 형태를 보여준다. 이것은 요철부가 존재하는 깊이에서는 파일 단면적이 증가하여 파일내 평균응력이 감소하기 때문이다. 요철부 아래에서는 단면적이 작아지면서 평균응력은 다시 증가하게 된다.



(a) Model-C-1



(b) Model-C-2

[Fig. 10] Axial load transfer curves of waveform micropile

파형 마이크로파일의 주면마찰력 증대효과를 분석하기 위해 Fig. 11과 같이 파일두부변위가 10mm인 경우의 축하중 전이곡선을 비교하였다. Model-A의 경우 주면마찰력 크기가 작은 것으로 나타났는데 이것은 그라우트체의 직경이 Model-C에 비하여 작아 주면면적이 작아졌기 때문으로 판단된다. Model-C의 하중전이 거동을 비교해보면 지표면 부근의 주면마찰력이 Model-C-1, Model-C-2, Model-C-N의 순서대로 큰 것으로 나타났다. 즉, 상대적으로 연약한 표토층(지표면~3.5m 깊이)에서 요철부가 저항력 증대에 기여하는 것을 알 수 있다. 그러나, 하부 층에서는 요철의 유무에 관계없이 주면마찰력 전이곡선이 거의 동일해지는 것으로 나타났다. 따라서, 파형 마이크로파일에서 요철은 상대적으로 연약한 토층에서 효과적으로 주면마찰력을 발휘시키는 것으로 판단되며, 이를 고려하여 향후 다양한 지반조건 및 요철 조건 등에서 추가적인 해석을 통해 파형 마이크로파일의 적절한 요철 길이 및 간격을 결정할 필요가 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 일반 마이크로파일, 일반 Jet grouting 파일, 그리고 파형 마이크로파일의 지지거동과 파형 마이크로파일의 적용성을 분석하였다. 본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 말뚝두부에서의 축하중-변위 곡선을 비교한 결과, 설계하중으로 가정한 1000kN에서는 파형 마이크로파일이 일반 마이크로파일에 비해 약 40% 정도의 변위 감소 효과가 나타나 큰 지지력 향상 효과를 나타내었다. 또한, 파형 마이크로파일이 길이가 일반 마이크로파일 대비 2.3m, 약 15% 정도 짧아졌음에도 불구하고 허용재료강도에 해당하는 말뚝두부 변위는 파형 마이크로파일이 일반 마이크로파일에 비하여 31% 감소하므로, 기존 마이크로파일에 비하여 지지능력과 경제성이 우수한 것으로 판단된다.
2. 파형 마이크로파일의 해석결과 동일한 요철간격에서 요철길이가 2배 증가함에 따라 말뚝 두부변위값은 평균 4.3% 감소하였으며, 동일한 요철길이에서 요철간격이 1/5로 감소함에 따라 변위값은 평균 11.8% 감소하였다. 그러므로 요철길이가 증가하거나, 요철간격이 감소할수록 파형 마이크로파일의 지지력이 증가하는 것으로 판단된다.
3. 파형 마이크로파일의 경우 본 해석조건에서 상대적으로 연약한 표토층 부근에서는 요철부가 주면마찰력을 증가시키는 결과를 보여주었으나, 단단한 하부층에서는 요철부의 유무에 관계없이 동일한 주면마찰력 크기를 나타내었다. 그러므로 향후 추가적인 해석 및 실험을 통하여 파형 마이크로파일의 최적 형상 및 적용 가능한 지반조건을 도출할 필요가 있다.

## References

- [1] C. M. Lee, J. H. Shim, "A case study on a classified by characteristics of pedestrian deck", *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 24, No. 2, pp. 559-562, 2004.
- [2] T. H. Hwang, J. H. Kim, O. Y. Kwon, "The effects of the breath of foundation and rock layer on the installation method of micro-piles", *Journal of Korea Geotechnical Society*, Vol 26, No. 6, pp. 29-38. 2010.
- [3] F. Lizzi, *Static of Monuments*, Sagep publisher, Genoa, Italy, 1982.
- [4] Tsukada, K. Miura, Y. Tsubokawa, Y. Otani, G. L. You, "Mechanism of bearing capacity of spread footings reinforced with micropiles", *Journal of soils and foundations*, Vol. 46, No. 3, pp.367-376, 2006.
- [5] J. D. Kim, J. H. Im, T. Y. Lee, "An Experimental Study on the Increase of the Bearing Capacity on Sandy Ground due to Micropile Reinforcement", *Proc. of*



*Korea Geotechnical Society spring conference*, pp. 411-416, 2003.

- [6] C. Choi, S.D. Cho, "Field verification study for micropile load capacity", *Proc. of 10th ISM Workshop*, pp. 1-10, 2010.
- [7] C. Choi, J. Goo, J. H. Lee, S. D. Cho, J. H. Jeong, "Development of New Micropiling Technique and Field Installation", *Proc. of Korean Geotechnical Society Spring National Conference*, pp.571-578, 2008.
- [8] C. Choi, J. Goo, J. H. Lee, S. D. Cho, "Development of new micropiling method enhancing frictional resistance with geotextile pack", *Proc. of 9th International Workshop for Micropiles*, 2009.
- [9] W. P. Hong, S. D. Cho, C. Choi, C. M. Lee, "Skin friction mobilized on pack micropiles subjected to uplift force". *Journal of Korea Geotechnical Society*, Vol 28, No. 6, pp. 19-29, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2012.28.6.19>
- [10] B. Nikbakhtan, M. Osanloo, "Effect of grout pressure and grout flow on soil physical and mechanical properties in jet grouting operations", *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol 46, No. 3, pp. 498-505, 2009.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmms.2008.10.005>
- [11] Brinkgreve, R.B.J. (2002), *Reference manual V8. Plaxis Version 8*, Netherlands: Balkema.
- [12] S. R. Kim, J. H. Lee, J. H. Park, M. K. Chung, "Analysis of reinforcement effect of steel-concrete composite piles by numerical analysis(I)-material strength", *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 29, No. 6, pp. 259-266. 2009.

### 한진태(Jin-Tae Han)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학석사)
- 2006년 8월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학박사)
- 2011년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 수석연구원
- 2013년 3월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교 지반신공간공학과 부교수

<관심분야>  
지반동역학, 기초공학

### 김성렬(Sung-Ryul Kim)

[정회원]

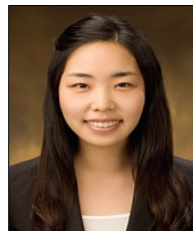


- 1996년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1998년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2003년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 토목공학과 부교수

<관심분야>  
지반공학, 기초공학

### 장영은(Young-Eun Jang)

[정회원]



- 2009년 2월 : 한동대학교 토목공학과(토목공학 학사)
- 2012년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 지반신공간공학과 (지반공학석사)
- 2012년 9월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교 지반신공간공학과 박사과정

<관심분야>  
지반공학, 기초공학

### 이승현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 교수

<관심분야>  
토질역학, 기초공학