

## 마이크로파일의 하중전이특성 및 지지성능 분석

### Load transfer characteristics and bearing capacity of micropiles

구정민<sup>1)</sup>, Jeong Min Goo, 최창호<sup>1)</sup>, Changho Choi, 조삼덕<sup>2)</sup>, Sam-Deok Cho, 이기환<sup>3)</sup>, Ki-Hwan Lee

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Research Div. KICT

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원, Research Fellow, Geotechnical Research Div. KICT

<sup>3)</sup> 쌍용건설(주) 토목기술부 부장, General Manager, Department of Civil Engineering Technology, Ssangyong Engineering & Construction

**SYNOPSIS** : This paper presents the analysis result of load-transfer mechanism and pile movements associated with the development of frictional resistance to understand the engineering characteristics of micropile behavior. An field load tests were performed for two different types of micropiles and they are (i) thread bar reinforcement with  $D=50\text{mm}$  and (ii) hollow steel pipe reinforcement with  $D_{\text{out}}=82.5\text{mm}$  and  $D_{\text{in}}=60.5\text{mm}$  and wrapped with woven geotextile for post-grouting. The load test results indicated that micropiling with pressured grouting provided better load-transfer characteristics than micropiling with gravity grouting under both compressive and tensile loading conditions in that unit skin frictional resistance is well distributed along installation depth. The unit weight and unconfined compressive strength of cured grout were obtained for each piling method. The strength and unit weight of micropile with pressured grouting was higher than those with gravity grouting. The fact that load bearing quality with pressured grouting is better than that of gravity grouting could be attributed to the dense mutual adhesion between surrounding ground and pile due to pressurized grouting method and better grout quality.

**Keywords** : micropile, pressured grouting, geotextile pack, t-z curve

## 1. 서론

마이크로파일은 소구경 현장타설 말뚝의 한 종류로 시공방법의 용이함과 광범위한 적용성으로 다양한 형태로 지반구조물 보수·보강 공법에 적용가능하고 타 공법과 연계가 용이한 장점을 가지므로, 국내·외에서 구조물 보수·보강 용도로 그 사용이 증가하고 있는 실정이며, 일본과 미국의 경우 교각의 보강 또는 지반 구조물의 내진보강 목적으로 활발히 적용되고 있다(이정훈 외 2008, 최창호 외 2008a).

마이크로파일은 강봉 또는 희생용 케이싱을 구조체로 사용하여 직경 30cm이내의 소구경 형태로 중력식 또는 가압 방식으로 그라우트재를 주입하여 시공하는데, 선단지지 방식의 기존 말뚝 거동 개념과는 다르게 주로 주변마찰에 의해 거동된다.

마이크로파일의 품질 또는 거동특성은 천공방법, 그라우팅 방법 및 보강재 재질 등에 의해 크게 영향을 받는 것으로 보고된 바 있다(Anil Misra et. al., 2007). 마이크로파일의 거동특성은 주로 주변마찰력에 영향을 받으며, 특히 그라우팅 방법에 가장 큰 영향을 받을 것으로 예상되나, 국내에서는 이에 대한 체계적인 연구가 이루어지지 않아 보수적 설계가 이루어지고 있으며 이에 따라 설계의 비효율성이 단점으로 지적되고 있다. 또한 기존 말뚝과 비교해 볼 때 거동특성이 상이한 마이크로파일에 대한 이론적 검증이나 실제 하중전이 특성에 대한 체계적인 연구가 미비한 상태이고, 이에 따라 설계 및 시공과정에

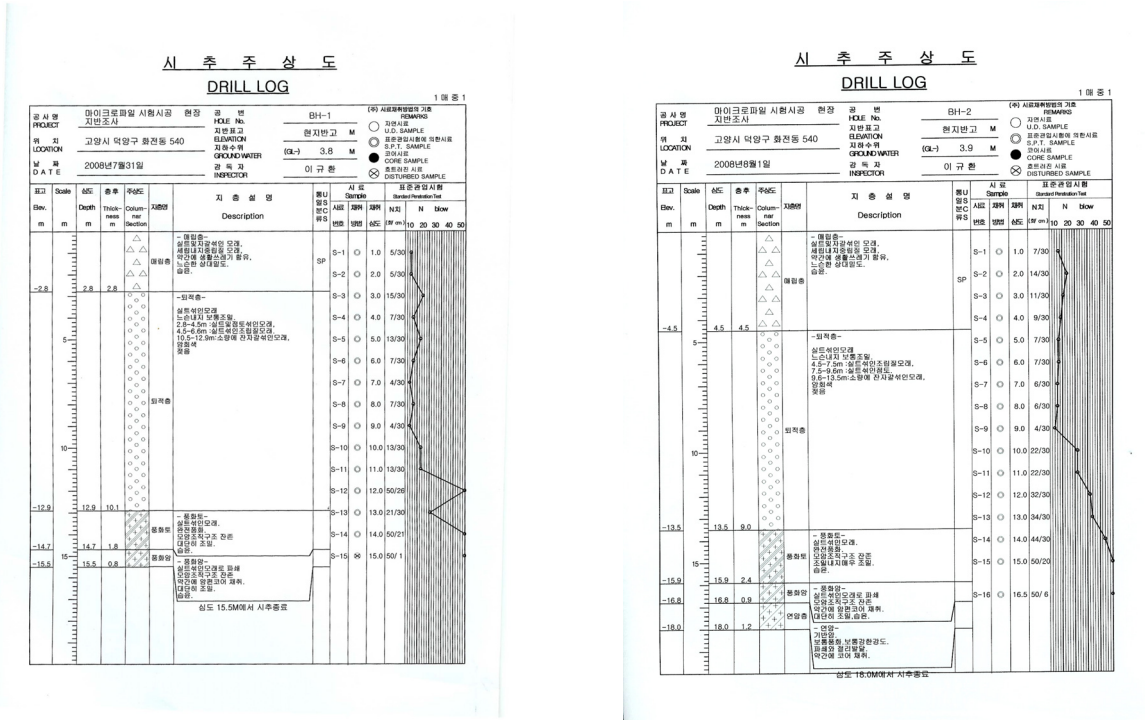
서 안정성 뿐만 아니라 경제성 확보의 측면에서 고려해 볼 때 불합리한 점이 존재한다. 따라서 마이크로파일의 설계/시공의 효율성 제고 측면에서 주변마찰력이 개선된 새로운 시공방법의 제안 및 하중전이 특성 분석에 대한 체계적 연구가 필요하다.

따라서 본 고에서는 새롭게 제안된 가압주입으로 시공된 신개념 마이크로파일의 하중전이특성 및 가압주입이 그라우트체 품질에 미치는 영향을 파악하고자 동일한 조건의 지반에서 기존에 시공되던 방식인 중력식 주입방식과 새롭게 제안된 가압 주입 방식으로 마이크로파일을 현장 시험시공하고, 이를 대상으로 정재하시험(연직압축/연직인발 시험)을 수행하여 파일별 하중전이 특성 및 주입방법 변화에 따른 그라우트체의 강도 개선 여부를 비교·분석하여 지지력 개선에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

## 2. 파일시공방법에 따른 하중-변위 관계

### 2.1 현장 시험구의 지반조건 및 시험시공된 마이크로파일 종류

현장 시험지역의 지반조건을 파악하고자 마이크로파일이 시공될 영역 내에 2차 시추조사를 실시하였으며, 조사결과는 그림 1과 같다. 지표면에서 2.8~4.5m 깊이까지는 N치가 5/30~15/30 범위의 느슨한 상대밀도를 가지는 매립층이 존재하였고, 매립층 하부 12.9~13.5m 범위까지 N치가 4/30~50/26인 느슨내지 매우 조밀한 상대밀도를 가지는 퇴적층이 분포된 것으로 파악되었으며, 그 이하 지층에서는 풍화토층 및 풍화암이 존재하는 것으로 시추조사 결과 나타났다.



(a) BH-1

(b) BH-2

그림 1. 시추주상도

본 과업에서 새롭게 제안된 신개념 마이크로파일본의 객관적 하중전이 특성 및 지지력 개선 여부 파악을 위하여 회전수세식 방법으로 천공된 삭공에 중력식 방법으로 그라우트체를 주입하는 기존 방식인 시험대조군 파일을 시공하였으며, 시공된 파일 종류 및 그에 따른 시험종류는 다음 표 1과 같다.

시험시공된 모든 파일들은 직경 152mm의 케이싱과 직경 186mm의 케이싱 드릴을 사용하여 회전수세식 방식으로 천공작업을 수행하였다.

표 1. 시공된 마이크로파일 종류 및 재하시험 종류

파일명	그라우트재 주입방법	재하시험 종류
G-C	중력식 주입(Gravity grouting)	연직압축시험(Compression axial load test)
G-P	중력식 주입(Gravity grouting)	연직인발시험(Pull-out test)
P-C	가압주입(Pressured grouting)	연직압축시험(Compression axial load test)
P-P	가압주입(Pressured grouting)	연직인발시험(Pull-out test)

모든 마이크로파일들은 심도 8m로 동일하게 시공하였으며, 신개념 마이크로파일은 기존 마이크로파일 시공단계와는 달리 천공→그라우트재 천공홀 주입→보강재 근입→1차 가압주입→상부패커 내부주입→보강재 내부 채움→2차 가압주입→외부주입 및 완료 순으로 시공하였으며 자세한 사항은 최 등(2009)을 참고한다. 가압주입 시공은 공압을 가하면 외주면이 팽창하여 강관 내측면과 에어패커 외주면과 완전밀폐가 형성되는 에어패커를 사용하여 단계별로 1차 주입압( $\Delta p$ )=1kgf/cm<sup>2</sup>, 2차 주입압( $\Delta p$ )=2~3kgf/cm<sup>2</sup>을 적용하여 수행하였다.

## 2.2 마이크로파일별 하중전이특성 분석

### 2.2.1 시험 방법

현장재하시험은 풍화암대까지 관입되어 충분한 안정성을 확보하기 위하여 심도 18.5m까지 천공하여 반력앵커를 설계 및 시공하였으며, ASTM D 1143(연직압축재하시험), ASTM D 3689에 준하여 수행하였다. 또한 마이크로파일은 소구경 현장타설 말뚝이므로 파일재하시험 수행과정에서 파일의 편심 발생에 대한 영향을 고려하여 FHWA(2005)의 마이크로파일 설계 및 시공에 관련된 매뉴얼을 참고하여 하중 크기 및 재하단계를 결정하였다. 본 현장 재하시험 결과는 침하량에 의한 분석법 중 허용침하량 25.4mm 일 때 대응하중을 항복하중으로 판단하는 전침하량 분석법에 준하여 항복하중을 결정하였다.

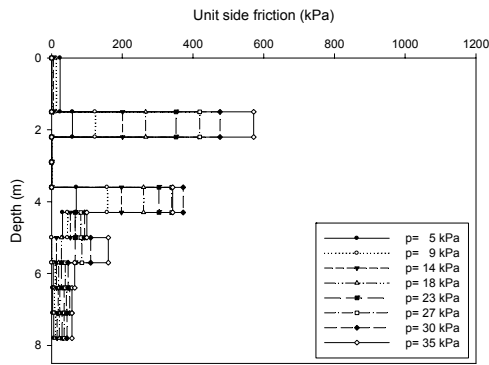
### 2.2.2 파일별 하중전이특성

현장 재하시험으로부터 얻어진 하중-침하시험 및 하중전이계측을 통하여 각 지지층에 대한 단위주면 마찰력을 추정하여 마이크로파일의 하중전이 특성을 분석하였으며, 그 결과는 다음 그림 2~3과 같다. 심도별 평균마찰력 계산과정에서 모든 파일들의 직경은 전 파일장에 대하여 23cm인 것으로 가정하였으며, 이는 파일회수 과정에서 심도별 마이크로파일의 외경 측정 결과에 기초한 것이다.

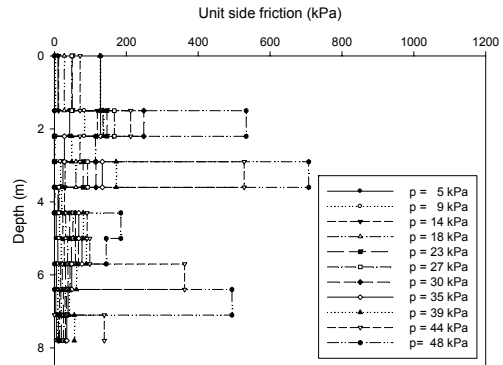
다음 표 2는 파일 회수과정에서 측정된 심도별 파일 직경값을 요약한 것으로 중력식 그라우팅을 적용한 마이크로파일의 경우, 심도에 따라 불규칙한 직경을 가지는 것으로 나타났으나, 가압 그라우팅을 적용한 신개념 마이크로파일의 경우 심도에 따라 비교적 일정한 직경을 가지는 것으로 나타났다. 분석 결과, 심도에 따라 다소 불규칙한 경향을 보이고 있는데 이는 계측 심도에서 파일 직경이 변화되거나 마이크로파일 특성상 소구경 파일로 시공되어 상부 재하로 인한 편심의 영향으로 추정된다.

표 2. 심도별 마이크로파일 외경 측정 결과

파일명	측정심도별 직경(cm)			평균외경 (cm)	비고
	심도 1m	심도 3m	심도 6m		
G-C	22	-	24	23	· 파일회수과정에서 심도 3m 부분에서 그라우트체 할렬과괴로 측정불가 · 파일 표면 균일하지 않음
G-P	24	26	25	25	· 파일 표면 균일하지 않음
P-C	23	25	22	23	· 전 파일장에 대하여 비교적 균일한 직경 유지 및 표면이 매끈함
P-P	21	23	21	22	· 전 파일장에 대하여 비교적 균일한 직경 유지 및 표면이 매끈함

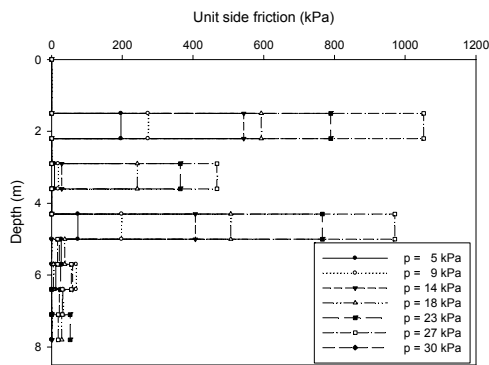


(a) G-C

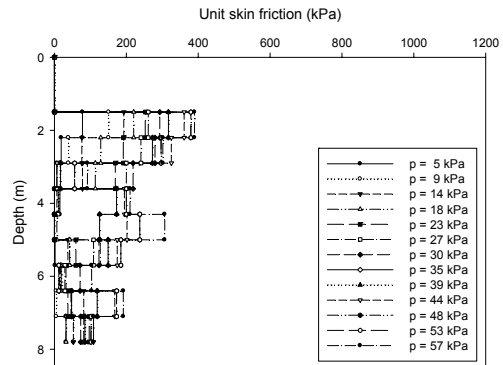


(b) P-C

그림 2. 연직압축시험



(a) G-P



(b) P-P

그림 3. 연직인발시험

기존 방식으로 시공된 파일들의 경우, 심도별 하중전이 특성이 매우 불규칙한 상태로 나타나고 있으며, 상대적으로 신개념 파일들의 경우 심도별 하중전이 특성이 양호함을 알 수 있다. 연직압축시험의 경우, G-C 및 G-P파일은 심도별 하중전이 특성이 매우 불규칙한 상태로 나타났는데 이는 지반 내에서 형성된 그라우트체의 품질 불량(그라우트체의 표면이 거칠고 직경이 일정하지 않으며, 그라우트체 강도가 떨어짐)에 의한 것으로 판단된다. 이와 대조적으로 P-C 및 P-P파일은 심도별 하중전이 특성이 비교적 양호한 상태인 것을 확인할 수 있는데, 가압주입에 따라 진 파일장에 대하여 그라우트체의 건전도 향상 및 이에 따른 파일체 자체의 강도 증가와 가압주입으로 지반과 파일체 간의 결합이 치밀해짐에 따른 것으로 판단된다(표 5 참조).

### 3. 파일시공방법-그라우트체 강도 관계

그라우트체는 기성제품인 보통포틀란트 시멘트(KS L 5210-1종)와 물을 w/c=45%로 현장배합 믹서기로 연속적으로 교반하면서 디지털 방식으로 주입압 및 주입량의 제어 및 기록이 가능한 유량계를 사용하여 실시하였으며, 그라우팅 과정에서 유동성 및 팽창성, 급결성 확보를 목적으로 혼화제를 1% 첨가하였다.

신개념 마이크로파일의 경우, 앞서 언급했듯이 중력 방식의 그라우팅과는 다르게 2단계에 걸친 가압주입 방식으로 실시하였는데, 가압주입에 따른 지반 내 양생된 그라우트체의 강도변화에도 영향을 줄 것으로 예상되며, 주입방식 변화에 따른 그라우트체의 강도 변화를 분석하고자 현장 재하시험 종료 후 시험대상 파일들을 굴착하여 회수하였다.

다음 표 3 및 표 4는 현장 재하시험 종료 후 회수된 파일체에서 코어링 후 샘플링하여 주입방법별 그라우트체의 단위중량 및 일축압축시험으로 측정된 강도 측정값을 요약한 것이다.

표 3. 회수된 그라우트체의 단위중량값

시공방법	단위중량	단위중량(kN/m <sup>3</sup> )			
		sample 1	sample 2	sample 3	평균값
중력식 주입		14.7	14.5	14.9	14.7
가압 주입		19.3	19.6	19.8	19.6

표 4. 회수된 그라우트체 압축시험 결과값

파일종류	단위중량	일축압축강도(MPa)			
		sample 1	sample 2	sample 3	평균값
중력식 주입		7.10	7.25	6.96	7.10
가압 주입		41.21	41.19	41.26	41.22

파일 회수 결과, 단위중량은 가압주입 방식으로 시공된 그라우트체의 값이 중력 방식으로 주입된 그라우트체에 비해 30%이상 증가된 것으로 나타났는데, 이는 그라우트체의 강도에 영향을 줄 것으로 예상되며 일축압축강도 시험 결과 중력식 주입에 의한 파일 공시체 강도 대비 480% 증가되었다. 이는 주변마찰력으로 상재하중을 지지하는 특성을 가지는 마이크로파일의 경우, 지반과 파일체 간에 일체화된 상태로 지지 또는 거동하게 되는데, 천공 과정에서 삭공 내 교란된 지반 부분과 파일의 그라우트체 간에 결합/구속의 형성과정에서 가압주입으로 그라우트체의 강도가 증가되고, 삭공을 보다 밀실하게 충전할 수 있게 되어 파일과 지반간의 결합/구속력을 증가시킴으로써 지지력 향상에 영향을 줄 수 있는 요인으로 작용된 것으로 판단된다.

## 4. 결론

1. 국내 마이크로파일의 시공실적이 증가하는 시점에서 설계 및 시공과정의 안정성 및 경제성 제고를 위하여 새롭게 제안된 신개념 마이크로파일의 지지력 향상 검증을 위한 현장 시험시공 및 재하시험 결과 중력방식으로 시공하는 기존 방식의 마이크로파일과 비교해 볼 때 성능향상을 확인할 수 있었다.
2. 심도별 하중전이 특성은 소구경 현장타설말뚝인 마이크로파일 특성상 다소 불규칙한 형태로 시험결과가 분석되었으나, 중력방식으로 시공한 마이크로파일과 비교해 볼 때, 전체 파일장에 대하여 하중전이가 양호하게 이루어졌다.
3. 가압 주입방식으로 시공된 신개념 마이크로파일의 경우, 파일회수 결과 지반 내 형성된 파일체의 직경은 중력식 방식으로 시공된 마이크로파일에 비하여 동등 또는 미소하게 증가된 크기로 전체 파일장에 대하여 표면이 양호하고 일정한 직경으로 회수되었다.
4. 가압주입으로 시공된 마이크로파일은 중력식으로 시공된 마이크로파일 대비 단위중량은 30% 이상, 일축압축강도는 480%이상 증가되어 파일체의 건전도 및 지지력이 향상되었다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2007년도 첨단도시개발사업(과제

번호:07도시재생B04) 지원 사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 최창호, 구정민, 이정훈, 조삼덕, 정재형(2009), 신개념 마이크로파일 개발 및 현장시험시공, 2009 지반 공학회 봄학술발표회.
2. 구정민, 이기환, 조영준, 최창호(2009), 성능검증을 위한 마이크로파일 현장 시험시공 및 재하시험, 2009 지반공학회 봄학술발표회.
3. Anil Misra, Lance A. Roberts, Rajesh Oberoi and C.-H. Chen(2007), "Uncertainty Analysis of Micropile Pullout Based upon Load Test Results", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE*, vol. 133, no.8, pp.1017~1025.
4. ASTM(1994), "Standard Test Methods of Piles Under Static Axial Compressive Load", *The Annual Book of ASTM Standards D 1143*, CD-Rom, Soil and Rock(1).
5. ASTM(1994), "Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load", *The Annual Book of ASTM Standards D 3689*, CD-Rom, Soil and Rock(1).
6. FHWA, (2005), **Micropile Design and Construction**, NHI-05-039, pp.7-1~7-28.