

경전선 복선전철 및 부산신항 노반건설공사 중
PDT말뚝 적용성 연구

**A Study of Applicability of PDT(Pulse Discharge Technology) Pile to
Kyung-Geon Rail Road and the bedding Construction of a new port in Busan**

허억준* 박재명** 윤수동** 김태훈***
Hur, Eok-Jun Park, Jae-Myung Yun, Su-Dong Kim, Tae-Hoon

ABSTRACT

In the past decades, complain about ground vibration and noise induced by pile driving has been quickly increased. Because of that, auger drilled piling methods have frequently used specially in urban area. However, the present auger drilled piling methods induce inevitable ground disturbance as well as a certain degree of vibration and noise due to the final hammering. For these reasons, a new auger drilled piling method is required to be developed. This paper introduces PDT(Pulse Discharge Technology) piling method and presents the characteristics of bearing capacity. The PDT piling method is to install in-situ piles using electric power so called Pulse. The pile installed by PDT appears to be able to develop shaft and end bearing capacity efficiently. This paper introduces PDT(Pulse Discharge Technology) piling method, which is the 512nd new construction technology . The PDT piling method is to install in-situ piles using electrical power so called Pulse power. The pulse power is physical value that indicates the energy change per unit time(dE/dt). Since the pulse power is to push ground, using the pulse power is enable a hole to be expanded as well as the ground to be improved by compaction. Therefore, The pile installed by PDT appears to be able to develop shaft and end bearing capacity efficiently. In this study, couples of pile loading tests were carried out to figure out whether or not the PDT piling method is applicable to constructions like rail road facility . As a result, it was concluded that the PDT piling technique meet the requirements for such a rail road related construction.

1. 서 론

최근엔 건설공사 진행시 각종 기준이 강화되어 지반진동 및 소음 등 민원발생사례가 급증하면서 대구경 현장타설 말뚝공법, 선굴착에 의한 저소음·저진동의 매입말뚝공법이 보편화 되었다. 하지만 대구경 현장타설 말뚝공법의 경우 대형장비 및 규모 및 지지력이 너무 커 과 설계로 인한 경제적 손실이 많으며 매입말뚝의 경우, 굴착 배토시 지반교란과 응력이완으로 인하여 전체지지력의 약 60%를 차지하며 주변마찰력이 직항타 말뚝 보다 상당히 작게 나타난다(Van Weele, 1988 : De Beer, 1988). 또한 천공시 발생하는 슬라임의 처리가 완전하지 못하여 굴착공 저면에 슬라임이 잔존하게 되면 말뚝의 선단부가 슬라임 위에 놓이게 됨으로써 말뚝의 선단지지력이 매우 취약할 뿐만 아니라 상당한 크기의 변위가 발생한 후에 선단지지력이 발휘되기도 한다(Broms 등, 1988). 따라서 말뚝의 지지력 증대를 위해서는 최종적으로 경타를 해야 하는데 항타로 시공할 때 보다 작지만 상당한 크기의 소음과 진동이

*정회원, 한국철도시설공단 건설처장(1급)
**비회원, (주)세월리타 상무이사/공법연구부 선임연구원
***비회원, 대우건설 기술연구원 선임연구원

발생하기 때문에 완전한 저소음·저진동 공법이라 할 수 없다.

이에 민원 및 경제적인 철도시설 건설공사에 건설신기술 제 512호 (“펄스방전 기술과 강성체 철근망 및 고강도 모르타르를 사용한 소구경 현장타설 말뚝공법”)의 철도시설 건설공사에 대한 적용성을 평가하고자 시험시공 및 결과분석을 하였다.

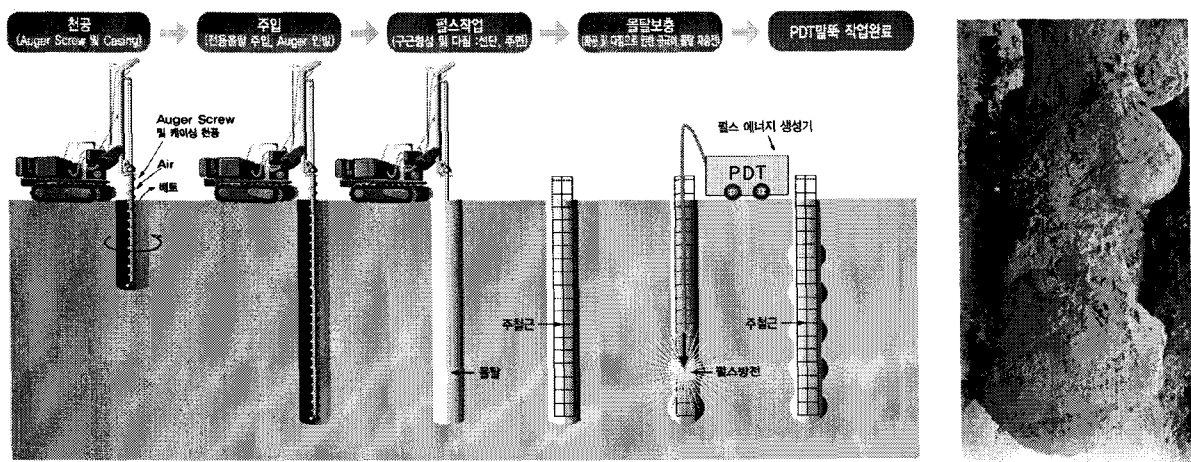
2. PDT말뚝공법 및 시험시공

2.1 공법개요

펄스파워(Pulse power)란 전기방전 현상을 이용한 에너지 압축 기술로서 단위시간당 에너지 변화량을 나타내는 물리량(dE/dt , 여기서 E와 t는 각각 에너지 및 시간)으로 그 크기는 주어진 에너지를 얼마나 짧은 시간 내에 부하에 방출하느냐에 의해 결정된다. 1J(joule)의 에너지를 1sec 동안에 방출하면 1W(watt)의 파워가 되지만 $1\mu s(10^{-6}sec)$ 의 짧은 시간에 방출 하면 단위 시간당의 에너지변화량이 아주 큰 1MW (10^6Watt)에 이르는 큰 파워를 가지게 된다. 즉 펄스파워 기술은 에너지 보존 법칙의 원리에 의한 것으로 에너지 저장장치를 통하여 전력변환 혹은 에너지 압축을 이용하는 기술이다. PDT말뚝공법은 이와 같이 전기에너지 전환에 의해 발생하는 펄스파워를 이용하여 천공벽을 충격파로 확장시켜 기초말뚝을 현장에서 조성하는 공법을 말한다.

2.3 시공방법

펄스방전 기술을 이용하여 말뚝의 단면적 증가 및 말뚝 주변의 지반을 다짐을 통하여 말뚝과 주변 지반과의 마찰력 및 선단지지력을 증대시키고, 강성체 철근망과 고강도 몰탈(Mortar)을 사용함으로써 말뚝본체의 강성 및 강도를 증진시키는 소구경 현장타설말뚝 공법이며 시공순서는 그림 1과 같다.



<그림.1> 시공순서 및 말뚝의 구근형상

2.3 국내의 현황

현장타설 말뚝의 경우 직경 800 ~ 3000mm 이상의 대구경으로 대형 토목, 건축기초, 교량기초 등으로 국내에서 사용되고 있으나 직경 300 ~ 500mm 정도의 소구경현장타설 말뚝은 주로 외국에서 많이 사용되고 있다. 국내의 경우 현장타설 말뚝공법으로 대구경은 RCD, PRD공법이 주로 적용되며 소구경으로는 150 ~ 250mm 작업하는 Micro Pile을 많이 사용하나 300 ~ 500mm의 경우 적용되는 사례가 매우 적다. 중간 크기의 현장타설 말뚝공법의 경우 대한주택공사 주택도시연구원에서 개발한 중구경 현

장타설 말뚝공법 500 ~ 600mm, 1본/140ton(최대)까지 설계가 가능하고 PDT말뚝공법의 경우 250 ~ 500mm, 1본 / 200ton(최대)까지 적용이 가능한 공법이나 국내 시공사례가 매우 적은 상태이다.

2.4 시험시공 및 재하시험

2.4.1. 시험 개요

1) 시험 목적

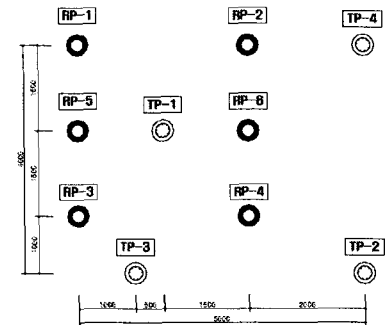
본 PDT말뚝의 시험시공과 재하시험은 (주)00건설에서 시공하는 경전선 복선전철 및 부산신항 노반건설공사에 기초말뚝으로 PDT말뚝의 현장 적용성을 검토할 목적으로 시행하였다. 이에 따라 PDT말뚝을 시험시공하고 나서 시험말뚝에 대한 정재하시험, 수평재하시험, 동재하시험 및 건전도시험을 시행하여 말뚝의 허용연직지지력 및 허용수평지지력을 확인하였다. 아울러 건전도시험을 시행하여 말뚝단면의 변화와 건전성을 판단하였다.

2) 시험말뚝 및 시험내용

<표. 1> 시험말뚝 및 재하시험 내용

구분	말뚝 번호	시험말뚝 직경(mm)	시험말뚝 길이(m)*	설계하중 (t/본)	시공일자 / 시험일자
정재하시험	TP-1	340	8.0(9.0)	102.0	06.05.10 / 06.05.25
수평재하시험	TP-2	340	6.2	-	06.05.10 / 06.05.25
동재하시험	TP-3	340	6.9(8.4)	102.0	06.05.10 / 06.05.26

* 괄호밖 : 시험할 때 말뚝길이, 괄호내 : 당초 말뚝시공길이



<그림.2> 시험말뚝배치도

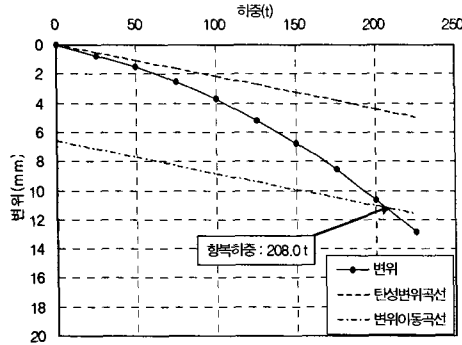
3) 시험결과

지반조사를 추가로 시행하여 얻은 지반자료를 이용하여 기존 기초말뚝의 설계지지력을 만족시킬 수 있는 PDT말뚝의 길이와 철근량을 산정한 후 시험시공과 재하시험을 시행하였다. PDT말뚝의 시험시공은 P14와 P15 교각 사이에서 실시하였으며 시험시공은 Ø340mm, PDT말뚝을 총 11본 시행하였다. 철근은 HD29(SD40) 4가닥을 사용하였으며, 몰탈은 시험배합강도 470kgf/cm²이상 되도록 하였다. 펄스방전은 말뚝선단부에서 40회, GL-2.0m까지는 1m심도마다 10회씩 주었으며 매립층에서는 펄스방전을 시행하지 않았다. 펄스방전으로 인해 몰탈이 하강되면 추가로 재주입하였다.

가. 정재하시험(TP-1) 결과

- (1) 정재하시험은 Earth Anchor의 인발력을 이용한 재하방법으로, ASTM 1143의 규정을 적용하여 표준재하방법으로 실시하였다. 시험말뚝(TP-1)은 시공 후에 정재하시험을 실시되었으며, 총 시험하중을 9단계로 나누어 설계하중(102.0ton/본)의 220%인 225.0ton/본까지 4단계로 재하하였다. 시험 결과 총침하량은 12.86mm, 잔류침하량은 4.90mm로 나타났다.

- (2) 재하시험 중 극한하중이 확인되지 않았기 때문에 최대시험하중을 항복하중으로 판단하였다. 따라서 PDT말뚝의 허용지지력은 111.1ton/본 정도가 되는 것으로 확인되었다.
- (3) 그림 3에 나타내어진 Davisson's method 분석법에 따라 지지력을 분석한 결과 208.0ton에서 항복하중이 발생함에 따라 허용지지력은 약 104.0ton/본 정도가 되는 것으로 판단된다. 그리고 모든 분석법에서 설계지지력 102.0ton/본 을 만족하는 것으로 확인되었다.



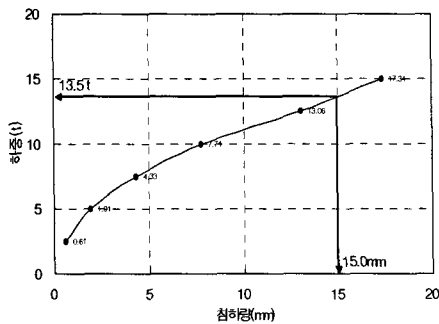
<그림. 3> Davisson's method 분석법

<표. 3> 정재하시험 결과 (침하량 기준)

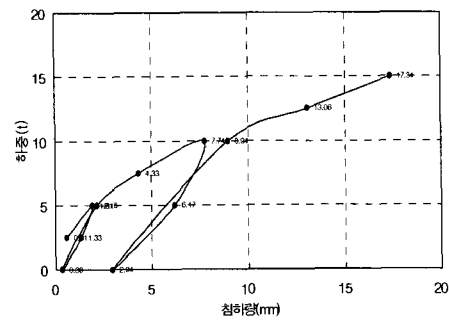
분석법	전침하량 (mm)	전침하량 기준 (mm)	허용 지지력 (t/본)
말뚝번호	12.86	34.0	112.5 ↑
기준	영국 (CP 2004) (말뚝직경의 10%일 때)		
분석법	잔류 침하량 (mm)	잔류침하량 기준 (mm)	허용 지지력 (t/본)
말뚝번호	4.90	8.5	112.5 ↑
기준	독일 (DIN 4026) 말뚝직경의 2.5%일 때		

나. 수평재하시험(TP-2) 결과

- (1) 수평재하시험은 주변말뚝의 수평발력을 이용한 재하방법으로, ASTM D3966의 규정을 적용하여 추가하중재하방법으로 실시하였다. 그림 4와 그림 5에 나타난 시험결과 15.0ton/본 재하시 수평변위는 17.34mm로 측정되었으며 도로교 표준 시방서(1996) 기준치 15mm 변위시 허용수평지지력은 13.5ton/본으로 확인되었다.



<그림. 4> P - S 곡선



<그림. 5> 잔류변위량 곡선

<표. 4> CAPWAP 분석 결과

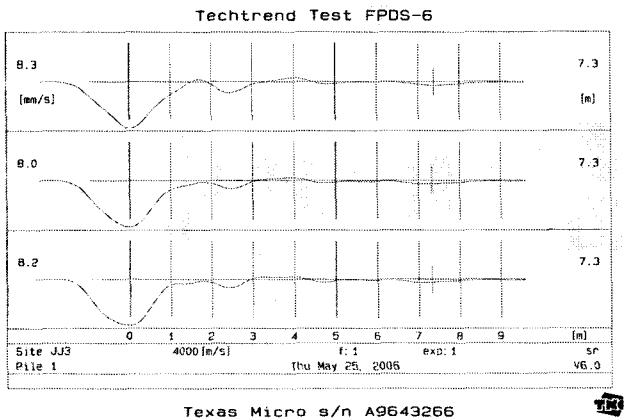
추정항목	말뚝번호	TP-3	추정항목	말뚝번호	TP-3		
타격BN / 분석BN		6 / 5	항타에너지(EMX, t·m)		2.1		
경과시간(hr)		384	압축응력(kg/cm ²)		324		
Ram 중량(t)		3.0	인장응력(TSX, (kg/cm ²))		5		
낙하고(m)		3.0	말뚝의 건전도(%)		100		
최종 관입량(mm)		1.0	항타시 말뚝의 지지력(RMX)		289.2		
말뚝번호	단위면적당 지지력(t/m ²)		단위 m당 주면마찰력(t/m)		전체지지력 대비(%)		
TP-3	주면		선단	평균	최대	주면	선단
	평균	최대					
	11.79	25.87					

다. 동재하시험(TP-3) 결과

(1) Drop Hammer (Ram Weight 3.0ton)를 사용하여 낙하고 3.0m에서 동재하시험을 시행한 결과 평균 관입량은 1.0mm정도로 측정되었다. 시험말뚝의 허용지지력(CAPWAP 분석 결과에 의한 최종 허용하중)은 116.84ton/분으로 확인되었음을 표 4에 나타내었다. 또한 Davisson's method 분석법에 의한 허용지지력은 146.05ton/분으로 확인되었다.

라. 건전도시험(SIT)

(1) 그림 6은 PDT 현장타설말뚝에 대하여 비 검측공 시험장비 시스템 FPDS-6(Foundation Pile Diagnostic System)를 이용하여 말뚝 건전도 조사(Sonic Integrity Test, SIT)를 실시한 것이다.
 (2) 표 5의 결과에서 시험말뚝의 길이는 7.3m ~ 9.0m로 추정되었으며, 시험말뚝의 대부분 상부 1.0m ~ 3.5m 지점에서 단면적의 큰 증가를 보이며 그 이하로는 0.5m ~ 1.0m 간격으로 단면적이 일률적으로 증가함을 보이고, 말뚝의 선단부위에서는 그 상부보다 좀 더 큰 단면적의 증가를 나타내는 것으로 판단된다. 또한 시험말뚝의 건전성은 모두 양호한 상태로 확인되었다.



<그림. 6> SIT-3 측정결과 그래프

<표. 5> SIT 측정결과 그래프

시험번호	시험말뚝	말뚝예상 길이(m)	탄성파 속도(m/s)	비 고
SIT-1	TP-1	9.0	3,398	양호
SIT-2	TP-3	8.4	3,400	양호
SIT-3	TP-4	7.3	4,000	양호

6) 현장 적용성 연구 분석

가. 연구 분석개요

원설계시 강관말뚝(Ø508 x 12t)을 향타하는 것으로 계획된 말뚝기초구간에 향타에 의한 소음, 진동으로 민원이 발생하여 향타공법을 적용치 못하므로, 향타공법을 대체할 공법으로 SIP, RCD, PDT의 적용성을 같이 검토하였다.

나. 분석결과

PDT공법의 경우 현장타설 말뚝공법으로 소음 및 진동에 대한 민원발생의 소지가 없으며, 고강도 몰탈(400 ~ 600kg/cm²)을 사용하여 말뚝의 내구력이 확보된다. 또한 철도교 설계기준 산정식을 모두 만족하였으므로 철도시설 건설공사의 적용에도 문제가 없을 것으로 판단된다. 부분에도 PDT공법만의 펄스충격을 이용한 확공 효과가 뚜렷하여 선단면적 및 주면적, 선단지지력 및 주면마찰력이 상대적으로 높아 소구경이지만 말뚝길이가 줄어든다(Ø508mm SIP공법대비 12%감소). 고가의 강관말뚝보다 재료비 및 시공비(Ø508mm SIP공법 대비)가 길이와 본수에 따

라 약 5 ~ 15%정도 절감됨을 알 수 있었다.

3. 결론

PDT말뚝의 적용성을 연구하기 위하여 시험시공과 말뚝성능, 품질시험 및 경제성 등을 연구 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 지지력을 고려한 연구 분석

말뚝 기초로 사용할 경우 말뚝직경이 하중의 크기 및 지지력의 발현, 말뚝의 배치 조건 등을 고려해보면 450(최소 150ton/분) ~ 500(최대 200ton/분)mm가 우리 시설공사에 적합한 것으로 나타났다. 말뚝 본당 허용하중을 이용하여 기초 배열시 말뚝배치 숫자를 감소시킬 수 있으며 소요작업 길이 줄일 수 있어 공사기간 및 천공비 측면에서 매우 경제적임을 알 수 있었다.

2) 횡하중 작용시 연구 분석

지진하중처럼 큰 횡력이 작용하는 경우, 라멘구조 형식의 횡보강을 대비하여 고가의 강관말뚝을 이용한 말뚝기초를 주로 사용하지만 본당 지지력의 크기조정이 가능한 PDT공법이 매우 경제적이며 효과적임을 알 수 있었다.

3) 지지력 증가요인 및 적용성 연구 분석

현재 적용 펄스파워의 에너지와 지반간의 상관관계를 데이터화 하는 중이다. 전기충격에 의한 이론적 고찰은 연구가 마무리되었고 실험에 의한 데이터분석을 하고 있다. 또한 전용 몰탈의 물성 메커니즘과 에너지 흡수 후 강도증가의 원인분석을 하고 있다. 펄스말뚝 즉 PDT말뚝은 작은 직경에서도 지금까지 얻을 수 없었던 지지력을 얻을 수 있다. 이 원리를 이용한다면 작업의 속도, 슬라임, 자재비, 소음진동에 의한 민원처리비 등에 관련된 감소요인이 많을 것으로 판단된다.

<참고 문헌>

1. 채수근, 김태훈, 박재명(2005) "PDT(Pulse Discharge Technology) 말뚝의 적용성 연구", 2005년도 대한토목학회 학술발표 논문, pp.1~4
2. 김태훈, 채수근, 정규점(2005) "펄스파워를 이용한 현장타설말뚝의 지지력 특성", '05 지반 공학회 가을 학술발표회 논문, pp. 1~8
3. (주)세원리타, 지에스이엔씨(주), (주)대우건설 "펄스방전기술과 강성체 철근망 및 고강도 모르타르를 이용한 소구경 현장타설 말뚝공법". (신기술 지정 512 호)
4. 허억준, 신병우, 채수근, 김성수(2007) "PDT 말뚝용 모르타르의 개발 및 현장적용", '07 한국콘크리트 학회 봄학술발표회 논문, pp. 1~4
5. 신병우, 윤수동, 김철영, 김태훈, 허억준(2007) "인발력 증대를 위한 앵커 정착부 확공장치 연구", '07 구조물진단학회 봄학술발표대회 논문, pp. 1~4
6. 지에스이엔씨(2006) "경전선 복선전철 및 부산신항 P14~P15사이 시험시공보고서"

※ PDT방전기술을 앵커에 적용하기위해 건설교통부 건설핵심기술연구개발 사업으로 현재 2차년도 과제를 수행중임.