

# 말뚝기초 시공현황 조사와 항타진동 측정

Survey of Pile Foundation Construction Practice in Korea and  
Ground Vibration induced by Pile Driving

홍성원\*1, 이원제\*2

---

## Abstract

The current design and construction practice prevailing in Korea has been investigated. From the survey the various problems at hand have been listed up and evaluated. The objectives of this research is to propose the means to solve the current problems from the result of the investigation. At the same time, the propagation characteristics of vibration and noise due to construction, especially pile driving, have been studied and the current regulation that restrict these construction nuisance has been investigated by field measurement.

## 요 지

본 연구에서는 말뚝과 관련하여 실무 기술진에게 각종 개념에 대한 이해도를 증진시키며, 국내 설계시공 관련한 제반 문제점을 조사 분석하여 이에 대한 해결 방안을 제시할 뿐 아니라 건설공해로 지칭되는 각종 공해중에서 특히 항타작업에 따라 유발되는 진동과 소음에 대하여 지반조건과 항타 방법에 따른 진파특성을 알아보고 측정 결과와 민원조사 결과를 통하여 현재의 관리기준을 검토하였다.

---

\*1 정회원, 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 실 장

\*2 정회원, 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 연구원

## 1. 서론

말뚝기초를 설치하는 궁극적인 목적은 축조되는 구조물의 안전 확보이며 이와 같은 목적을 최소의 경비와 시간내에 달성하는 것이라 하겠다. 시공관련 기술수준의 향상과 더불어 말뚝의 지지력을 이론적으로 규명하려는 노력이 계속되어 왔다. 보다 안전하고 경제적인 건설을 위해서는 말뚝 지지력에 대한 이해가 필연적이다. 많은 이론적, 실험적 연구 노력에도 불구하고 말뚝지지력에 대한 이해는 아직도 상당한 불확실성을 갖고 있는 부분으로 남아 있는 실정이다. 근래에 들어와서는 이와 같은 말뚝 지지력 이해라는 근본적인 과제 외에 말뚝시공으로 인한 지반의 진동, 소음등의 환경적인 문제가 주요 관심사로 등장하여 이러한 요구를 충족시킬 수 있는 공법개발이 활발히 진행되고 있다. 이와 같은 경향은 도시지역에서의 건설에 더욱 뚜렷하여, 도심지에서의 재개발 등의 경우 말뚝항타로 인한 소음, 진동 및 지반조건의 변화가 인근주민 및 구조물에 미치는 영향이 문제시 되고 있다. 특히 인근 구조물이 과거의 설계기준에 맞추어 건설된 경우 현재의 건설 대상물의 각종 시방조건 만족만으로는 민원의 발생을 방지할 수 없게 된다. 이와 같은 영향을 규명하고 합리적인 방지기법을 도출하기 위하여는 항타로 인한 진동·소음에 대한 연구와 흙-말뚝간의 상호 작용을 연구함으로써 효과적인 시공규제 조건의 기준설정 및 방지공법의 개발이 가능할 것이다.

선진 외국에서는 이러한 문제점에 대하여 관련 연구를 통하여 오래전부터 규제를 실시하고 있으며 우리나라에서도 근래에 들어 규제가 강화되는 추세이나 근본적인 연구실적은 저조한 실정이어서 이부분에 대한 연구가 시급히 요청되고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 건설 여건을 감안하여 보다 합리적인 말뚝기초의 설계 및 시공방안을 강구하기 위하여, 국내의 말뚝기초 설계 및 시공현황을 조사하여 문제점을 파악하고 제기되는 문제점의 원인을 분석하고 해결방안을 모색하며, 건설공해로 지칭되는 각종 공해 중에서 특히 항타작업에 따라 유발되는 진동과 소음에 대하여 지반조건과 항타방법에 따른 발생량을 측정하여 이의 전파특성을 살펴보고 측정결과와 민원조사 결과를 통해 공해 관리기준과 비교함으로써 기준의 타당성과 현실성을 검토하였다. 본 논문에 기술된 연구내용은 최근(1989~1991년) 3개년간 당 연구원에서 수행한 바 있는 말뚝기초관련 과제성과중 “시공” 측면의 내용을 발췌·요약한 것임을 부언한다.

## 2. 설계, 시공 현황 및 문제점

말뚝기초에 관한 수많은 이론적, 실험적 연구결과들에 의하여 말뚝기초의 지지력 그리고 침하기구(mechanism)에 대하여는 큰 진전이 있었음은 주지의 사실이다. 이들

연구 결과들이 시사하여 주는 바는 현재의 설계 및 시공 관행들은 말뚝기초의 안전에 보탬이 될 수도 또는 위험이 될 수도 있다는 것이다. 그러나 지금까지 산발적으로 발표된 각종 연구 결과들이 비록 종합적인 체계화 과정을 갖지 못했다 할지라도 이를 이유로하여 소홀하게 취급될 수는 없을 것이다.

현재 우리나라의 설계 및 시공 기술수준 향상을 위해서는 근본적으로 장기간에 걸친 연구와 더불어 현장 실태 조사를 통하여 문제점을 도출하고 그에 대한 대책을 수립하는 과정이 보다 절실하게 요청된다. 본 연구에서는 국내의 설계, 시공등 현장조사를 실시, 아래와 같은 관점에서 분석하였다.

- ① 공사계획 단계에서의 문제점
- ② 설계상의 문제점
- ③ 시공상의 문제점

현황에 대한 문제점의 대략적인 내용은 외국의 유사한 연구 결과(1)(2)(3)(4)와 크게 상이하지는 않으나 보다 근본적인 문제점은 우리나라의 경우 이러한 문제점들이 일부에 국한되지 않고 상당히 폭넓게 만연되어 있으며 또 여러가지 사정으로 이들 문제점들을 문제시하지 않으려는데에도 있는 것으로 사료된다.

## 2.1 사업계획 입안상의 문제점

말뚝기초의 설계 및 시공과 관련한 문제점 조사 과정에서 설계 또는 시공에 종사하는 많은 실무자들의 공통적인 견해는 근본적인, 즉 사업계획 단계에서의 비전문적 목표설정과 목표의 무리한 완료 그리고 여기에서 비롯되는 각종 파오가 악순환 되는 것으로 압축할 수 있을 것이다.

말뚝기초를 안전하게 설계, 시공한다 함은 소정의 말뚝(재질, 규격, 형상)을 소정의 지반 조건에 소정의 방법(항타, 매설, 현장타설)으로 설치하여 계획된 역할을 수행케 하는 것이다. 이를 위해서는 지반조건의 적절한 확인, 재질의 품질보장, 시공관리의 철저 등이 요구되며 자연상태에 존재하는 지반조건의 다변성은 말뚝기초의 계획, 설계, 시공에 있어 필요한 여러가지 과정을 요구하고 있다. 즉 아무리 완벽하게 계획된 경우에도 지반조건의 변화등은 사전에 예측할 수 없는 경우가 많이 있어 초기의 가정하에 작성된 설계조건의 확인이 필수적이다. 여러가지 필수과정들 중에서 특히 문제점을 유발시키는 전반적인 계획 소홀 외에

첫째, 지반조사와 관련한 예산, 기간의 배정

둘째, 소정의 품질보장을 위한(콘크리트 말뚝의 경우) 양생기간

세제, 가정된 지반조건 및 지지력의 현장 확인 등이 주요 문제점으로 대두된다.

## 2.2 지반조사상의 문제점

각종 기초를 설계함에 있어 지반조사의 중요성은 아무리 강조하여도 지나치지 않은 부분이다. 적절하지 못한 지반조사는 기초의 파괴를 유발하거나 이러한 상황을 감안한 과잉 설계를 유발케 되어 비경제적인 설계를 하게 된다. 지반조사의 부실로 인한 손실액에 대하여는 조사자료가 없어 가늠할 수 없으나, 적절치 못한 지반조사로 인한 기초의 파괴로 야기된 손실이 연간 500억원 이상이라는 영국 건축연구소의 연구결과(5)로 미루어 볼때, 막대한 예산이 낭비되고 있을 가능성은 충분하다 할 수 있을 것이다. 여기에 파괴로 인한 공정지연, 또 과잉 설계로 인한 예산 과실 등을 감안한다면 문제의 심각성을 짐작할 수 있을 것이다.

그림 1은 현재 가장 빈번하게 사용되고 있는 4가지 예측 방법의 신뢰도를 비교한 결과이다. 그림에서 보여주고 있는 것과 같이 우리 국내에서 가장 많이 사용되는 표준관입 시험과 정역학적 예측 방법의 신뢰도는 극히 불량하다(4).

예를 들어 국내에서 SPT함마의 실측속도 분석으로 얻은 결과에 의하면 속도에너지 효율은 미국이나 일본에 비해 80~85% 수준인 것으로 나타났고 추정 동적 효율을 적용하면 국제 표준값  $N_{60}$ 을 얻기 위해서는 측정치에 0.86~0.68을 곱하여야 한다는 보고(10)가 있다.

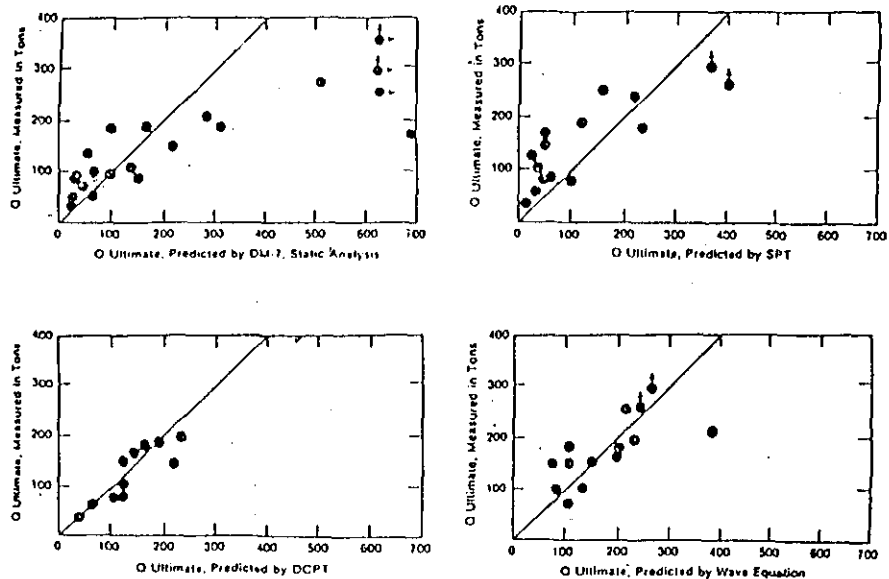


그림 1 각종 예측방법에 의한 말뚝지지력 비교

반면 정적관입 시험결과와 실제 말뚝 지지력의 상관관계는 상대적으로 우수함을 알 수 있다. 이와 유사한 실증연구 결과들(5)(6) 역시 정적관입시험의 우수성을 보여주고 있다.

이상의 국제적인 조류에도 불구하고 우리 국내의 실정은 거의 천편일률적인 표준관입 시험으로 일관하고 있는 실정이다. 이러한 현상의 원인은 궁극적으로는 전술한 사업 계획상의 문제점과 지반조사에 허용되는 기간 및 예산상의 문제로 귀착된다.

### 2.3 공사기간 공정상의 문제

본 연구의 수행을 위하여 실시한 말뚝기초 시공현장 조사, 보다 자세하게는 콘크리트말뚝 항타 현장조사시 공통적으로 대두되는 문제점은 거의 대부분의 말뚝들이 항타후 심하게 파손되어 있다는 것이었다(그림 2 참조).

이러한 문제점 발생의 원인을 다각도로 추적했을 때 가능한 원인들로서는

- ① 소정의 양생강도 미확보
- ② 지반조건을 고려하지 않은 설계
- ③ 소정의 말뚝 재질 보호장치 미비
- ④ 시공장비 선택의 문제
- ⑤ 말뚝 재질의 설계 강도

등으로 결론지을 수 있었으며, 향후 적절한 항타 관련 상한선의 제정 그리고 관련 시방서의 보완등이 시급한 것으로 나타났다.



그림 2 현장에 도착된 콘크리트 말뚝들(선단부의 불량에)

## 2.4 설계상의 문제점

말뚝기초 설계는 크게 나누어 구조적인 설계와 토질·기초 측면의 설계로 구분할 수 있다. 구조적인 설계에서는 말뚝 재질에 대한 품질관리와 재질강도가 주된 검토항목으로 되어 있으나, 특별한 경우를 제외하고는 국내의 경우 한국공업규격(KSE-2403)의 제품으로 설계하게 되어, 불확실한 변수가 많은 토질·기초측면의 고려가 실질적인 주요항목이라할 수 있다. 이같은 상황은 선진외국의 경우에도 큰 차이가 없어 일반적으로 말뚝기초의 설계는 토질, 기초측면중심으로 검토되는 경우가 대부분이다.

그러나 우리나라의 경우는 상황이 상당히 상이한 실정이다. 아래의 예는 다세대 주택 건설을 위한 기초설계 과정으로 발주기관에 따라 다소의 차이는 있으나 거의 대동소이한 실정이다.

- ① 건물하중 계산으로 기초에 전달되는 하중계산
- ② 각 기초부에 전달되는 하중을 콘크리트 말뚝의 허용 하중을 감안하여 말뚝직경 및 말뚝본수 계산
- ③ 표준관입시험 결과로부터  $N > 40$ 인 지지지반 확인으로 말뚝 깊이 결정

이상의 과정에서 토질, 기초측면의 고려는 세번째 과정의 지지층 깊이 확인뿐으로 대부분의 설계는 상부구조 설계를 담당한 건축구조 기술자에 의하여 시행되고 있다. 토질, 기초분야의 비전문가에 의한 말뚝기초의 설계 그리고 토질, 기초측면으로 표준관입시험결과만의 고려는 말뚝기초의 파괴를 유발하는 각종지반조건에 대처하기에는 크게 미흡한 실정이다.

말뚝기초를 설계하기 위해서는 적절한 지지력 예측이 필수적으로 요구된다. 말뚝기초의 규격과 소요량은 말뚝지지력 계산에 의하는 바, 지지력 예측의 신뢰도에 따라 설계의 안전성 및 경제성이 크게 좌우되기 때문이다. 말뚝 지지력의 예측은 지금까지 제안된 수많은 방법들이 있으나 각종 연구 결과들에 의하면 말뚝 재하시험에 의하는 방법외에는 그 신뢰도가 극히 낮은 실정이다.

여러가지 예측방법에 의한 지지력과 말뚝 재하시험과의 비교 연구들에 의하면 네덜란드 및 서유럽에서 적용되는 정적관입시험 결과에 의하는 방법이 가장 우수한 것으로 보고되고 있으나, 이 경우에도 상당한 오차는 배제할 수 없는 것으로 나타나고 있다.(6)(7) 말뚝지지력과 관련한 기술 수준은 미국 토목학회가 주관한 말뚝지지력의 예측과 실제비교 연구 결과에서도 잘 알 수 있다. 최신의 지반조사 기법을 모두 동원하여 지반자료를 입수하고 그 결과를 사계의 최고권위 기술자, 학자들이 예측한 결과는 실제와 큰 차이가 나타나고 있어 현재의 기술수준의 한계를 보여주고 있다.

## 2.5 시공과 관련한 문제점

항타현장의 조사과정에서 나타난 문제점은 조사된 콘크리트 말뚝항타의 경우, 극소수의 현장을 제외하고 거의 대부분의 말뚝들이 심하게 두부파손이 되고 있다는 점이었다. 심한 경우에는 15m 길이의 말뚝이 항타완료후 3m이상이 완전 파쇄되어 12m 만이 남아 있는 경우도 있었다(그림 3). 그리고 많은 현장에서 항타도중 말뚝이 전단되는 소위 중파가 발생되고 있었다(그림 4).



그림 3 3m정도의 두부파괴 발생 광경



그림 4 말뚝의 중간파괴

한편 국내에서 발생하는 건설공해 민원의 경우 통계적 분석은 행하지 못하였으나, 도심지의 비교적 소규모 공사에서는 주민들의 직접적인 진정 창구라고 할 수 있는 구청 단위에는 서면화된 자료의 보관이 이뤄지지 않고 단지 진정이 접수되면 담당직원의 중재로 시공자는 공사방법을 다소 변경시키므로써 민원의 소지를 감소시키거나 물리적 보상을 통하여 공정을 끌어가고 있었다. 그리고 항타작업과 같은 공해발생 가능성이 큰 작업들은 preboring과 같은 공법으로 일부 전환되어 심각한 민원현상은 줄어들고 있는 추세이지만 각종 공사시에 발생하는 공해요인에 대해 적합하게 적용할 수 있는 규제기준이 미비하고 민원해소 담당자의 적극적인 해결 의지와 분위기가 성숙되지 않아 아직도 크고 작은 시비가 많이 발생하고 있다. 특히 현행 규제기준들은 실제 현상과는 거리가 멀게 수립, 적용되기 때문에 주관적 판단이 크게 좌우되는 진동, 소음 공해의 경우 상호간의 이해가 불충분한 실정이다.

이외에 주택공사에서 조사한 바<sup>(13)</sup>에 따르면 1987년 고양행신 지구와 최근의 군포 산본지구, 청주산남지구 등에서 항타 작업시 발생하는 진동에 대한 민원으로 공사에

막대한 차질을 빚었던 예가 있었고 기타 발파작업과 동압밀 작업도중 진동으로 인해 콘크리트 타설이 지연되거나 민원의 발생으로 공사가 중단되는 사태가 발생한 경우도 보고 되고 있다.

따라서 현재 진동이나 소음의 피해를 억제하기 위한 공법의 개발 및 적용에 대한 인식이 높아 가고 있는 상황이고 좀더 적극적인 연구와 협력으로 대처하고자 하는 의식이 있으므로 관계 당국의 협조를 통한 광범위하고 자세한 민원조사와 자료의 통계적 분석 등으로 그 현황을 정확히 파악하여 실현 가능성이 충분하고 현실을 반영하는 기준이 정립됨으로써 건설 공사시 발생하는 상호간의 피해를 감소시키거나 방지할 수 있는 제도적 개선이 시급히 이루어져야 할 것으로 판단된다.

### 3. 향타진동 측정

본 연구에서 측정대상으로 택한 지역은 주로 아파트 건설현장으로서 특히 신도시 건설지구(산본, 일산)가 포함되며 서울마포, 수서 및 안산, 마산, 이리 등에서 측정을 수행하였다. 측정대상 지역들은 도심지 근접공사와 같이 건설공해에 민감한 지역은 아니었고 비교적 장기간의 공사기간이 소요되는 곳이어서 향타진동과 소음을 측정하는데 어려움은 없었다. 단지 현장의 공정과 측정 절차상의 차이점이 있어 시행착오를 범하기도 하였다. 그리고 민원과 직접 연관되는 지역에서 진동이나 소음의 허용기준을 민원사항과 비교할 수 있는 기회가 적어 아쉬웠다.

측정목적이 향타기 종류별, 지반 조건별 진동 수준과 소음을 측정하여 비교하는 것이었기 때문에 대상 향타기로는 디젤 함마, 진동식함마, 그리고 마산지역에서 소규모로 사용되고 있던 유압식 함마, 저공해 공법의 일종인 선굴착공법 적용현장 등에 대해 진동과 소음의 감소현상을 각각 비교하고 현행 규제 기준의 타당성을 간접적으로 검토하고자 하였다. 또한 상호비교결과에 따라 향후의 향타작업에 관련하여 가장 공해가 적은 방법의 모색이 요구되었다.

#### 3.1 측정방법

측정에 사용한 기기는 미국 SINCO가 제품인 S-6 Peak Vibration Monitor(그림 5)와 일본 RION제 Sound Level Meter(그림 6)를 병용하였다. S-6 시스템은 Monitor Control Unit, 두개의 3축 트랜스듀서(센서), 소음측정센서와 연결케이블로 구성되어 있다. 소음 센서는 발파소음이나 기타 음압이 큰 경우(91 dB 이상)의 측정에 적합하도록 설계되어 있어 향타시 원거리에서의 소음 측정에는 부적당하였기 때문에 소음계(sound level meter)를



사용하여 A특성 소음레벨을 측정하였다. 진동 센서는 최대입자속도(peak particle velocity)에 대해 서로 직교하는 3축성분(longitudianl, vertical, transverse)을 감지하며 측정 값은 모니터에 display 되거나 프린트할 수 있게 되어 있고 주파수 분석과 그래픽 기능을 갖고 있다. 측정 모드는 3가지인데 Peak only, Freqeucy & peaks, Graph & peaks mode로 각각 선택할 수 있으며 진동센서의 수평유지 check는 Test mode에서 행할 수 있게 되어 있다. 소음측정에 대해서는 특별한 주파수 분석을 생략하고 단순히 거리에 따른 A특성(dB(A)) 소음레벨을 측정하였다.

진동을 측정하기 위해서는 우선 그림 7과 같이 측정위치를 파고 2개의 3축센서를 일정 거리를 두고 수평으로 견고하게 묻는다. 그 후에 케이블을 모니터에 접속시킨 후 측정모드와 5~10sec 정도의 진동 감지시간을 setting하고 거리를 변화시키면서 측정하며 아울러 소음계도 거리에 따라 작동시킨다.

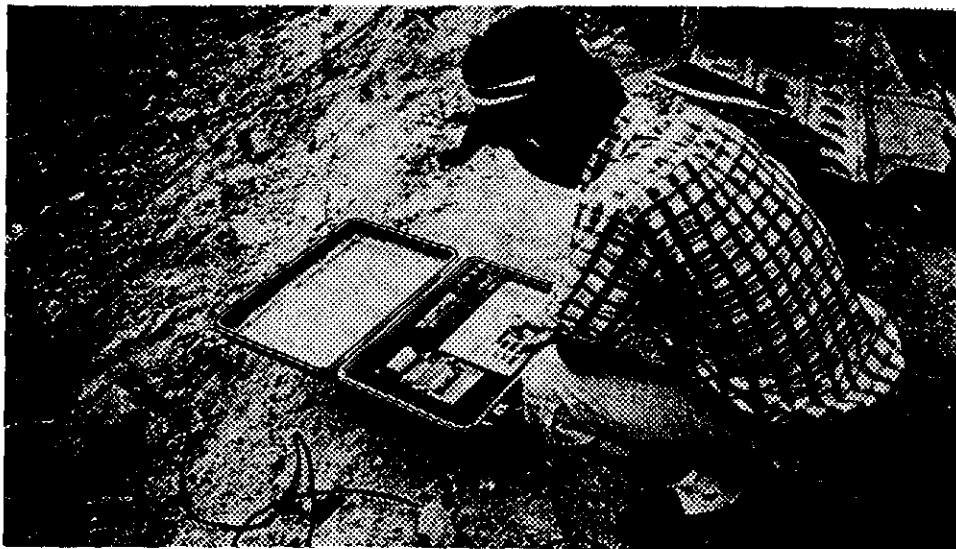


그림 5 S-6 진동측정기

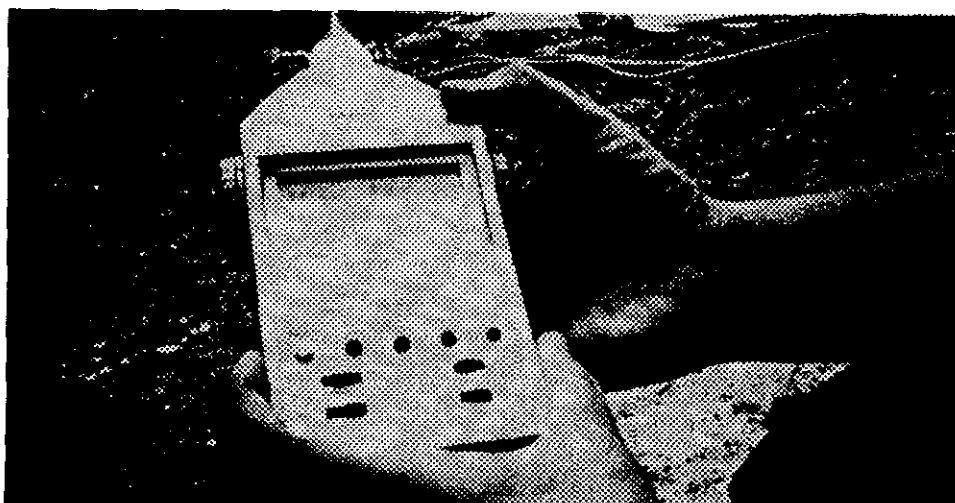


그림 6 소음계

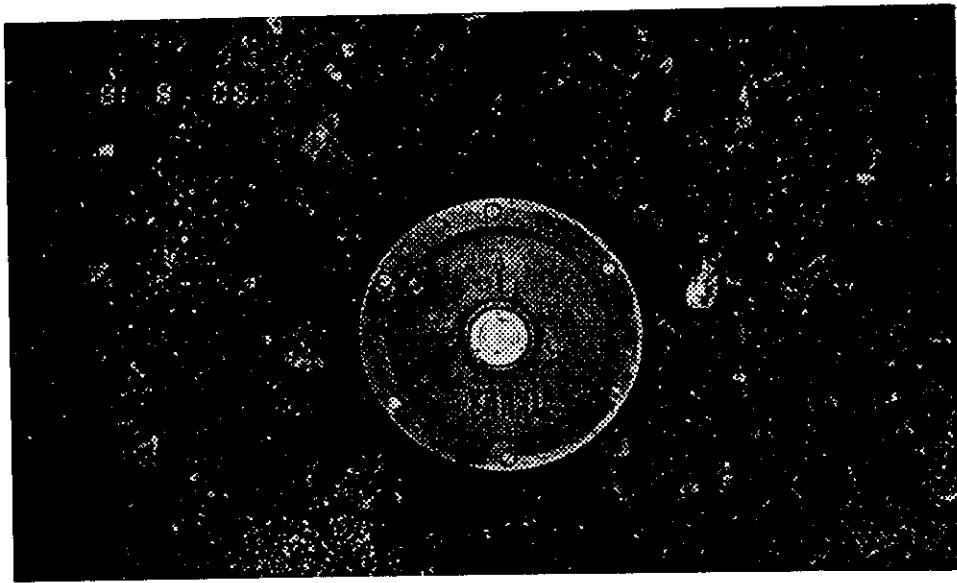


그림 7 센서 설치

### 3.2 측정결과 및 분석

#### 1) 함마종류 및 지반조건별 측정

측정이 수행된 대상지역은 3개지역(마산, 이리, 산본)이며 결과분석에 사용한 측정횟수는 총 6회이다. 측정시 고려한 함타기의 종류는 진동함타, 디젤함타, 유압함타로서 진동함타는 주로 널말뚝 함타에 적용되고 있으며 유압함타는 국내에서 제작되어 일부 사용되고 있었는데 다른 함타기에 비해 효율과 건설공해측면에서 유리한 것으로 문헌에 보고되고 있어서 측정시 이를 염두에 두었다. 측정지역의 개괄적인 지반조건을 살펴보면 이리의 경우 연약점토층이 수 m 포함되어 있었고 마산은 6m 정도의 매립층이 존재하며 산본은 보통 지반 조건이었다(그림 8). 그리고 진동과 소음을 측정하는 시기는 말뚝이 지지층에 도달기 바로 전후 약 1.5m정도 관입되는 시간동안으로 결정하고 3~4회 측정하여 최대치를 기록하였다. 이는 지반조건에 따라 함타초기에는 1회의 자유낙하나 말뚝의 자중으로 관입되어 진동이나 소음이 최대치에 훨씬 미치지 못하는 현상을 배제하기 위함이었다. 분석시 고려한 주요내용으로는 함타기 종류와 지반조건에 따른 진동과 소음의 거리 감쇄현상 및 말뚝의 직경별 측정결과들을 기존의 연구결과와 비교하는 것으로 하였다.

표 1 및 2에 측정지역의 함타작업 개요와 분석에 이용한 측정값을 정리하였으며 표 3에는 측정기기로 부터 출력된 진동속도와 주파수 분석예를 도표화하였다. 그리고 그림 8에는 측정지역의 지질주상도를 토질조건과 N치를 중심으로 도시하였으며 M-1의 경우는 널말뚝을 보오링 조사지역과 거리가 있는 곳에서 진동함타로 관입시키는 경우로써 주상도가 제외되었지만 대체로 M-3와 유사한 것으로 판단하였으며 관입 깊이는 5m 내외였다.

표 1 측정지역의 항타개요

측정지역	항타기	항타개요	비 고
마산해운동	진동함마 디젤함마(K25) 유압함마(Z30)	sheet pile φ 350mm PC말뚝 φ 350mm PC말뚝	진동측정 (M-1) 진동, 소음(M-2) 진동, 소음(M-3)
이리동산동	디젤함마(K25)	φ 350mm PC말뚝	진동, 소음(I-1)
산 본	디젤함마(K35) 디젤함마(K35)	φ 350mm PC말뚝 φ 500mm PC말뚝	진동, 소음(S-I) 진동, 소음(S-2)

표 2 측정결과 정리

측정번호	거리(m)	최대입자속도 (mm/sec)	소음수준 [dB (A)]
M-1	3.0	10.16	-
	4.0	7.02	
	5.0	5.35(4.74)	
	8.0	2.60	
M-2	17.7	2.09(1.94)	100.4
	24.6	1.49	94.3
	31.6	1.13(1.07, 0.98)	90.0
	39.0	0.97(0.94, 0.93)	88.2
	51.1	0.89(0.83, 0.79)	81.0
M-3	12.2	1.79(1.66)	83.0
	20.3	0.80(0.76)	77.0
	28.4	0.67	73.0
	35.6	0.37	71.0
I-1	12.9	4.89	103.0
	16.8	3.12	102.0
	20.7	1.57	97.0
	24.6	0.70	95.0
	28.5	0.66	88.0
	30.0	0.62	87.0
S-1	10.0	4.22(4.08)	99.8
	16.2	2.94(2.11)	98.3
	22.0	1.94(1.84)	94.5
	32.0	1.18(1.10)	94.0
	39.6	0.77(0.67)	88.2
	51.5		84.9
S-2	9.7	7.67(6.53)	95.5
	14.8	6.45(6.38)	93.2
	20.0	3.90(3.71)	90.3
	25.2	3.01(2.28)	90.0
	27.0	2.36(2.20)	88.6
	39.6	1.04(0.91)	84.7

( ) 3-4회 측정값중 나머지 peak치를 기재하였음  
\* 표 3.3의 예에 나타난 최대치

표 3 측정결과 예

EVENT #99 17:00:17 30 AUG 99  
EVENT WINDOW = 7 SECONDS  
SN:06=4749 A=0754 B=0765 SL=0053  
OPERATOR = LWJ  
DIESEL HAMMER( SAN-BON K25)

CHANNEL PEAK  
A LONG. +2.883 MM/S  
A VERT. +2.684 MM/S  
A TRAN. +2.813 MM/S  
A VECTOR 4.086 MM/S  
THLD 0.075 MM/S RANGE 7.5  
B LONG. +1.288 MM/S  
B VERT. +2.103 MM/S  
B TRAN. +1.133 MM/S  
B VECTOR 2.117 MM/S  
THLD 0.075 MM/S RANGE 7.5

EVENT #99  
A VECTOR  
FREQ. NORM. PEAK NORM.  
BAND BAND FREQ. PEAK  
(HZ)  
5-7 0.34 5 0.29  
8-10 0.11 8 0.068  
11-14 0.21 13 0.15  
15-18 0.20 17 0.085  
19-27 0.087 22 0.036  
28-39 0.035 32 95E-4  
40-53 48E-4 43 26E-4  
54-75 44E-4 68 92E-5  
76-107 26E-4 98 38E-5  
108-151 28E-4 125 26E-5  
152-213 18E-4 174 28E-5

그림 9와 그림 10에는 소음·진동 값의 측정결과를 도시하였다. 우선 그림 9에는 동일한 site에서 항타방법에 따라 진동속도의 변화현상을 나타내었는데 그림에서 보듯이 진동함마와 유압함마에 의한 항타진동은 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 유압함마(230 램 중량 3.0ton)의 타격에너지와 진동함마의 에너지가 유사하고 M-1 지역의 지질조건이 M-3과 근접한 곳이었기 때문인 것으로 판단되며 널말뚝의 관입깊이는 약 5m정도에 불과하여 지지층에 도달되지 않은 반면 M-3는 지지층에 도달되었을때의 진동속도라고 볼때 유압함마가 상대적으로 진동유발이 적은 것으로 나타났다.

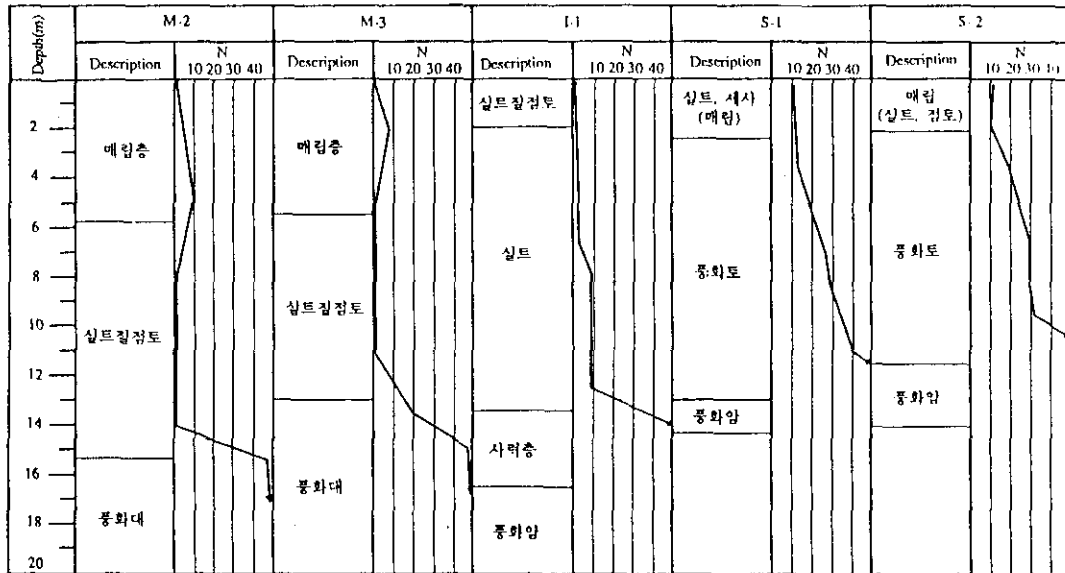


그림 8 토질 주상도

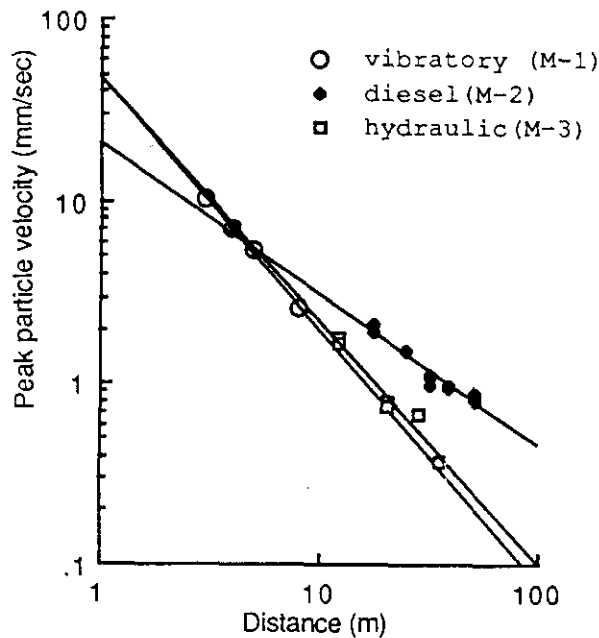


그림 9 동일 Site의 항타방법별 진동 속도

지반조건과 항타방법이 진동속도와 소음수준에 미치는 영향을 살펴보기 위해 그림 10에 동일한 함마 용량 및 말뚝직경 조건을 갖는 측정결과를 도시하였다. 일반적으로 진동전파식의 거리는 환산거리(scaled distance)를 사용하여 표시하지만 여기서는 항타에너지를 동일하게 고려하므로 단순한 수평 측정거리를 적용하여도 문제는 없다. 그림 8의 주상도를 참조하여 항타상황을 살펴보면 I-1의 경우 관입깊이는 10~11m로써 완전한 지지층에 도달하기 전단계이고 수m의 연약층의 존재로 감쇄현상이 상대적으로 증가하였으며, M-2는 15~17m를 관입하기 위해 이어박기 항타를 실시하여 지지층에 도달되었고 M-3 또한 지지층 도달시의 진동속도라고 보면 유압함마에 의한 진동과 소음의 발생이 비교적 작고 특히 소음은 후술할 규제기준 중에서 30m 지점의 측정 소음수준을 80dB(A) 이하로 규제하는 항목에도 부합할 수 있을 정도의 경향을 나타내었다.

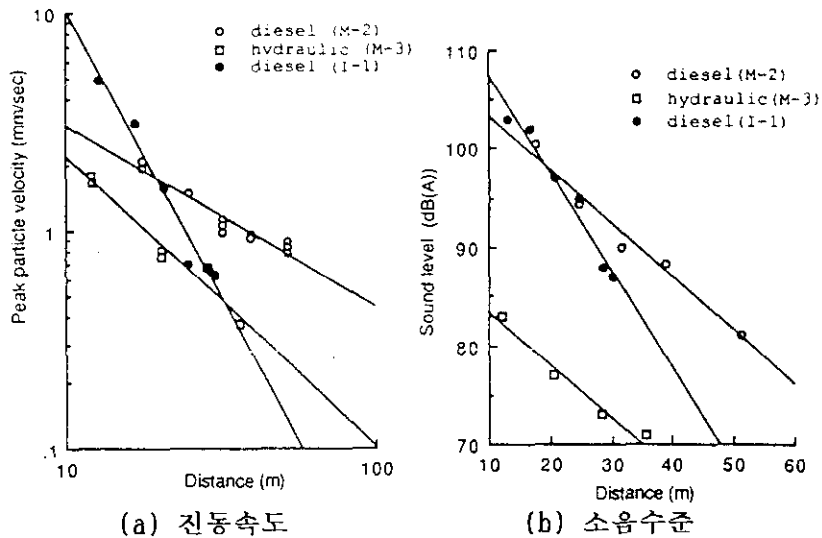


그림 10 동일함마용량(램 2.5ton)과 말뚝직경( $\phi$ 350mm PC 말뚝)에 따른 진동속도 및 소음수준

항타진동과 N치의 관련성을 연구한 기존 결과에 따르면 기타조건을 일정하게 두고 N=10을 기준으로 할때 진동속도의 경향은  $N < 10$ 인 경우가  $N > 10$ 보다 다소 큰 것으로 보고 (13)된 바 있다.

항타진동의 주파수 특성은, peak frequency의 범위가 5Hz~28Hz 정도로 나타났으며 항타방법과 지반조건에 따라 다소의 차이가 나타나지만 문헌에 보고되는 바와 같이 주변에 구조물이 있는 경우 그 구조물 자체의 고유 주파수가 작기때문에 공진현상으로 구조물에 손상을 입히는 상황은 특별히 고려하지 않아도 될 것으로 판단되며 오히려 주파수 분석은 방진대책 수립시 방진 구조물의 설계시에 유효하게 적용될 것으로 사료된다.

2) 지반진동 성분고찰

항타 방법과 항타 깊이에 따라 지반진동 3축 성분(longitudinal, transverse, vertical)의 변화 경향을 분석하고자 3개 현장(일산, 수서, 안산)에서 진동 측정을 수행하였으며 아울러 도심지에서 어느정도 보급, 시공되고 있다고 판단되는 선굴착공법(preboring) 적용시의 저진동 효과를 조사하였다.

표 4에는 디젤 함마와 드롭 함마를 이용한 항타의 시공 개요를 나타내었다.

표 4 항타시공 개요

측정지역	항타기	항타개요	비 고
마포유수지 주차장 (M.V)	드롭함마	φ350, 400	선굴착후 경타(輕打)
일산신도시 (I.V)	K35디젤	φ350, 400 PC pile	직타(直打)
수서주공 임대 APT (S.V)	K25디젤	φ350 PC pile	직타(直打)
안 산 (반월단지) (A.V)	K25디젤	φ350 PC pile	직타(直打)

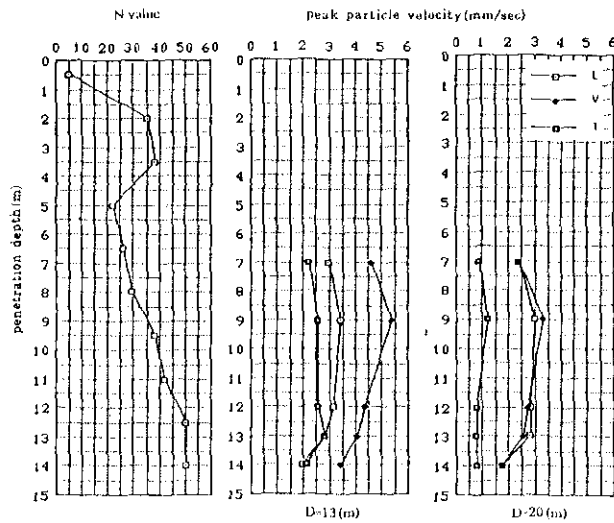
① 거리의 변화에 따른 항타 깊이별 3축 성분

그림 11(a), (b)는 지반조건을 대표하는 것으로 널리 이용되고 있는 SPT 결과인 N값의 변화에 따른 항타깊이별, 거리별 지반진동의 3축성분을 나타내고 있다.

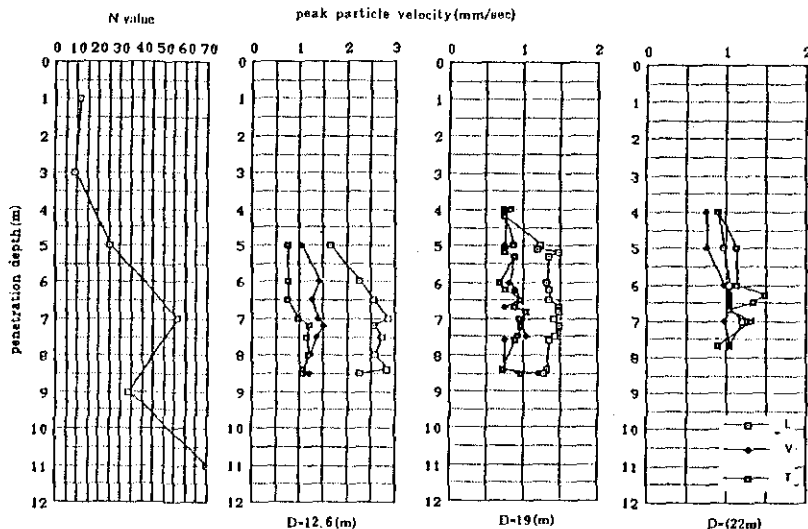
그림중 일산 현장의 경우, 비교적 균질한 지층에서는 선단부분의 굳기가 커질수록 지반진동이 커지는 것이 일반적인 경향이나 관입깊이 7m 이후 부분에서 N값은 증가하여 50에 이르고 있지만 거리별 진동속도는 감소하는 현상이 나타나고 있다. 이같은 현장의 원인으로는 관입깊이가 증가하면서 측정 지점에 도달되는 진동성분이 지반 감쇄효과에 따라 점점 그 크기가 작아지는 것으로 판단된다. 다른 원인이라고 사료되는 점은 항타 종료(13m~14m)시 최종 1~2회의 타격은 기능공의 습관상 타격에너지가 급격히 줄여서 종료시키는데 이때 측정된 진동값은 상대적으로 작게 나타나는 경우가 있어 그림중 급격한 감소는 여기에 원인이 있다고 판단되지만 궁

극적으로는 9m 이후부터 계속 감소 현상이 나타나는 것은 거리에 의한 감쇄효과 (geometrical damping)가 더 큰 영향을 미친 요인이며 문헌에 의하면 약한 상재토 층 아래의 굳은 지층에 말뚝선단이 관입될 때는 지반진동이 감소한다는 보고(9)도 있음을 고려할 때 이같은 현상은 본 측정의 하나의 경향으로 결론지을 수 있겠다.

한편 그림중의 수서현장은 항타가 종료된 깊이 8.5m 정도까지 지반진동의 증가 경향이 지반조사 결과 N값의 경향과 유사하게 나타나고 있으며 거리의 증가에 따라 진동은 감소하고 있음을 보인다. 그런데 지반조사 결과에서 나타나는 것은 항타 깊이가 약 10M정도에서 종료되어야 했으나 실제로는 8.5m내외에서 일찍 종료됨으로써 시공상 오류 또는 지반 조사상의 오류가 발생하고 있음을 알 수 있었으며 일반적으로 진원에서 가까운 지점에서는 V성분이 L성분보다 우세하고 거리가 멀어지면 V성분의 급격한 감쇄로 L성분이 우세하게 나타난다는 경향과 차이가 나는 것은 noise의 간섭이나 측정오차에도 기인하는 것으로 판단된다.



(a) 일산현장



(b) 수서현장

그림 11 거리별 지반진동의 3축 성분

문헌에 의하면 (8), 일반적으로 지반진동의 3축 성분 중 수직성분(vertical component)이 가장 우세하게 측정되는 것으로 보고되고 있으나 본 측정 결과를 보면 공통적으로 한가지 성분이 우세하게 나타나는 일관성은 보이지 않고 있다. 이는 지반조건에 영향을 가장 크게 작용하고 있음을 반영하는 것이며 정성적인 경향 파악을 위해서는 보다 많은 측정이 필요할 것으로 판단된다.

그림 12에는 거리 변화에 따른 각각의 축방향 진동성분을 비교·도시하였는데 그림에 나타나듯이 거리가 멀어짐에 따라 각각의 축방향 진동값이 확연하게 감소하는 현상을 보이고 있다. 그리고 세 성분 중 수직 성분은 가장 큰 값으로 측정되고 있으며 진동의 증가폭도 다른 성분보다 우세하게 나타나는 특징을 보이고 있다.

그림 13은 수서 현장에서 측정한 결과 중 단위 관입 깊이당 항타수와 지반진동속도의 vector합(3축 성분에 대한 제곱합의 제곱근)의 관계를 도시한 것이다. 측정 점은 말뚝으로부터 약 11m 떨어진 곳이었기 때문에 대체로 큰 값이 측정되었고 항타수가 증가하면서 진동 입자속도는 증가하는 경향을 보이고 있다. 항타는 약 6.2m 관입후에 종료되었으나 진동값은 5.5m 부근에서 항타가 정지된 후 재개되면서 초기 항타시 측정된 값이었으며 항타에너지는 앞단계보다 작으면서 항타수만 상대적으로 증가했던 상황이었으므로 시공상 오류로 판단할 때 궁극적으로는 항타수와 진동속도의 벡터합은 비례하는 것으로 결론 지을 수 있겠다.

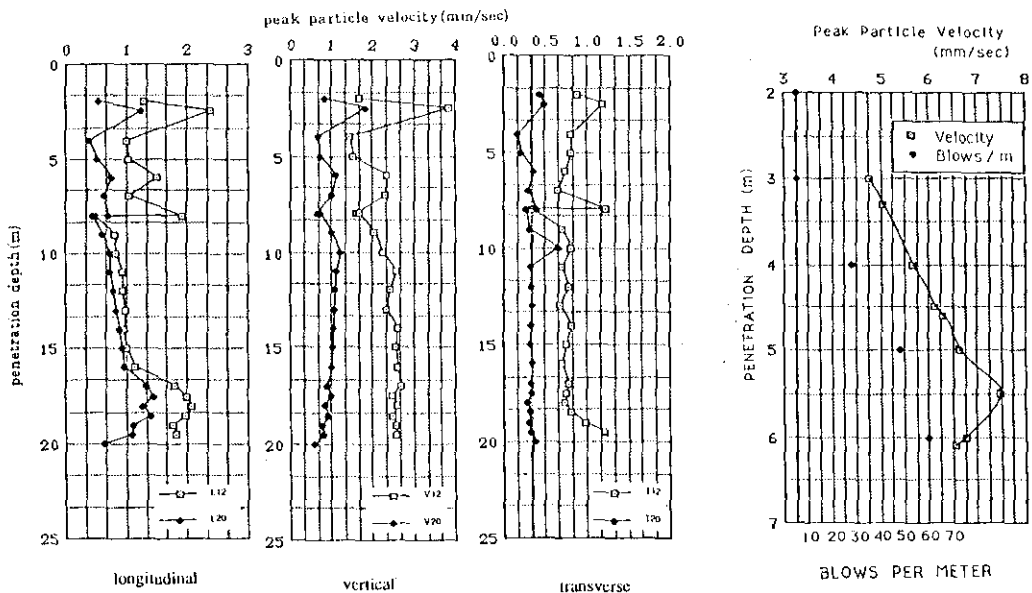


그림 12 거리 변화와 각각의 축방향 성분      그림 13 항타수와 진동 속도의 관계



② 시공방법에 따른 진동속도의 변화

최근 도심지 향타 시공에의 적용이 증가추세에 있는 auger에 의한 선굴착 (preboring) 공법 적용 현장에서 측정한 결과와 전술한 3개 현장중 2개 현장의 디젤함마 시공결과를 비교하여 그림 14에 도시하였다. 선굴착 공법은 hole에 PC말뚝을 근입한 후 드롭함마로 최종 경타하여 지지층에 도달시키는 시공 방법이며 지반진동은 최종 경타시의 발생량을 측정하였다.

그림에 나타나듯이 저공해 공법에 의한 진동값은 디젤함마로 시공한 경우의 35%~55%에 해당하는 정도로 작게 발생함을 알 수 있다. 또한 디젤함마에 의한 시공은 선굴착후 경타시공보다 대개 시공시간이 길고(말뚝 1개 관입기준) 타격횟수가 많아 진동 지속시간도 길기 때문에 선굴착 공법의 최종 경타수가 10~20회 정도임을 감안할 때 더욱 불리함을 알 수 있다. 결국 저공해 공법은 후술할 관리기준(수진점 기준 2mm/sec)에 근거할 때 근거리에서의 적용도 가능할 것으로 판단된다.

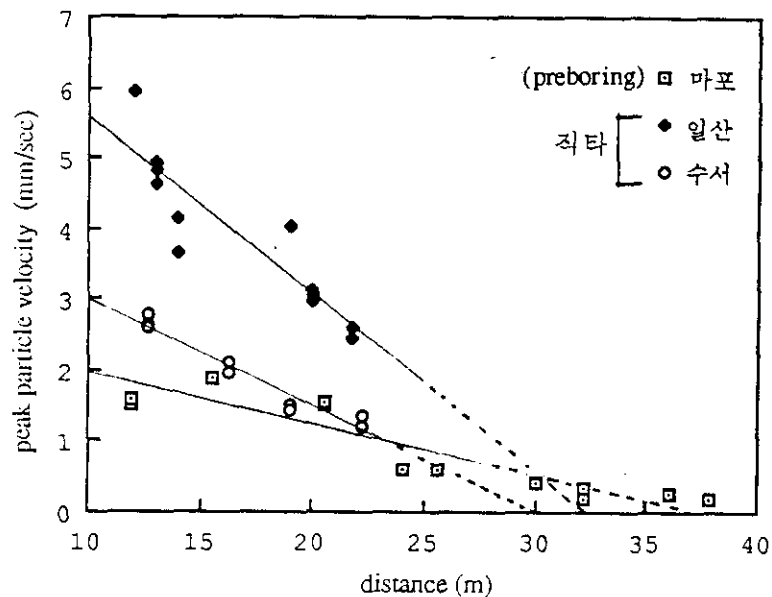


그림 3.14 직타공법과 선굴착 공법의 진동속도 비교

3) 규제기준과의 비교

전술한 바와 같이 국내에서는 건설공해에 대한 실질적인 규제기준이 적용되고 있지 못하기 때문에 민원발생 등 여러가지 문제점 노출이 불가피한 실정이다. 본 절에서는 우리나라의 환경보존법(1990) 및 환경관계법규(1991)에서 규정하고 있는 진동소음 관련 내용을 조사하여 측정결과와 비교하므로써 기준의 현실성을 검토하고 일본 등 국외의 규제기준을 간략하게 예시하기로 한다.

현재 공해에 관한 업무를 관장하고 있는 기관은 환경처로서 1990년 7월에 여러가지 법규를 통합하여 '환경관련법'으로 국회를 통과하였으며 시행령과 시행규칙이 제정고시(1991. 2)된바 있다. 표 5는 전술한 '환경관련법' 중 소음·진동 규제법(1990.8제정)의 시행규칙(1991.2.2제정)의 별표로 제시된 생활 소음의 허용 기준이다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이 대상 지역을 구분하여 공사장의 소음 기준치를 이전 법규보다 상향 조정하여 제시하고 있다. 따라서 실제 항타 작업시 항타기 구동을 위한 발전기의 소음만으로 75dB(A)을 상회하고 있는 실정이므로 소음 공해에 따른 민원 발생의 여지가 있는 현장에서는 직타 방법에 의한 말뚝 기초 시공이 불가능함을 알 수 있다. 한편 규칙 제30조(특정공사의 종류 등)에는 저진동, 저소음 장비를 사용하는 공사라고 환경처 장관이 인정하는 경우에는 특정공사의 종류에서 제외시킬 수 있음을 명시하고 있어 간접적으로 저공해 공법의 적용을 규정하고 있다고 볼 수 있다.

그러나 아직도 표 7에 예시한 바와 같이 진동 규제기준이 수치로써 명시되지 않고 단순히 진동규제에 대한 피상적 범위만을 언급하고 있으므로 향후 그 관리기준을 정립한후 적용하여야 빈번하게 발생하고 있는 민원에 대한 적절한 대처방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

표 5 생활소음 허용기준(1991)(12)

단위: dB(A)

대상지역	시간별 대상소음		조 석	주간	심야
			(05:00~08:00) (18:00~22:00)	(08:00~18:00)	(22:00~05:00)
주거지역, 녹지지역, 취락지역중 주거지구, 관광 휴양지역, 자연환경 보전지역, 학교, 병원의 부지 경계선으로부터 50 m 이내 지역	확성기에 의 한소음	옥외설치	70이하	80이하	60이하
		옥내에서 옥외로 방사되는 경우	50이하	55이하	45이하
	공장 및 사업장의 소음		50이하	55이하	45이하
	공사장의 소음		65이하	70이하	55이하
상업지역, 준공업지역, 일반공업지역, 취락지역중 주거지역외의 지구	확성기에 의 한소음	옥외설치	70이하	80이하	60이하
		옥내에서 옥외로 방사되는 경우	60이하	65이하	55이하
	공장 및 사업장의 소음		60이하	65이하	55이하
	공사장의 소음		70이하	75이하	55이하

비고: 1. 대상지역의 구분은 국토이용관리법에 의하며, 도시지역은 도시계획법에 의한다.  
 2. 공장소음의 규제기준은 주간의 경우 소음발생시간이 1일 2시간미만일 때에는 +10dB, 2시간이상 4시간이하일 때에는 +5 dB를 보정한 값으로 한다.

표 6과 7에는 일본의 규제기준을 예시하였는데 특정건설작업에 수반하는 작업소음의 허용기준이 표 5의 내용과 비교할 때 본 연구에서 측정한 수치와 근접함으로써 그 현실성을 느낄 수 있다. 특히 항타작업이 수행되는 경우 방음카바 등의 사용이 엄격하게 규정되어 있고 이와 상응하는 규제기준이 적용되고 있다.

표 6 특정건설작업의 종류와 소음규칙(日)

작업(사용되는 기기에 따른다)	기 준 [dB(A)] <sup>*1</sup>	작업을 할 수 없는 시간 (1일당의 작업시간)	
		제1호지역 <sup>*2</sup>	제2호지역 <sup>*3</sup>
항타기, 항발기, 항타항발기	85	오후7시 ~ 오전7시 (10시간)	오후10시 ~ 오전6시 (14시간)
대굴뚝타기	80		
착암기	75	오후9시 ~ 오전6시 (10시간)	
공기압축기	75		
콘크리트 및 아스팔트플랜트	75		

- \* 1 작업장소의 대지경계선에서 30m의 지점에 있어서의 소음레벨
- \* 2 주거지역뿐만이 아니고 상업, 공업지역등도 포함해서 주거가 밀집하여 있는 지역과 학교, 병원주변으로 지정된 지역
- \* 3 제1호 이외에서 환경보전이 필요한 지역

표 7 특정건설 작업의 종류와 진동규칙(日)

작업(사용되는 기기에 따른다)	기 준 (dB)	작업을 할 수 없는 시간 (1일당의 작업시간)	
		제1호지역	제2호지역
항타기, 항발기, 항타항발기 강구(鋼球)에 의한 건축물파괴 포장파쇄기, breaker	75 dB이하	오후7시 ~ 오전7시 (10시간)	오후10시 ~ 오전6시 (14시간)

- (주1) 제1호지역, 제2호지역은 소음규제와 동일
- (주2) 진동레벨[VL] = 20 log V+69 (dB), V: 진동속도(mm/sec)  
75dB은 V=2(mm/sec)로서 인체를 대상으로한 한계기준임.

#### 4. 결론

본 연구에서는 국내의 말뚝기초설계 및 시공관련 현황을 조사하였으며 실제 시공현장에서 항타 및 측정을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 현행 국내의 말뚝건설에는 사업계획상 말뚝의 최소한 요구사항들, 예를 들어 소정의 재량확보, 또는 말뚝재하시험 등이 고려되지 못하고 있는 실정인바, 전반적인 말뚝공사 공정을 감안 최소한의 과정들이 생략되지 않을 수 있도록 제도적 보완이 요구된다.
- 2) 콘크리트 말뚝의 경우, 어떠한 이유에서도 소정의 양생기간은 보장되어야 한다. 이를 위해서는 공사기간의 예산기준에 수급불균형을 감안, 자재조달을 별도 공정으로 분류, 특별 관리해야 할 필요가 있으며 장기적으로는 물량수급 대책과 개발 계획이 연계 검토되어야 할 것이다.
- 3) 항타로 인한 말뚝 재질 파손을 방지하기 위하여 말뚝 재질 보호장치(쿠션)의 의무적 사용이 각종 시방서에 반드시 포함되어야 한다. 아울러 말뚝시공의 품질관리를 위한 표준 시방서의 제정이 요구된다.
- 4) 기술선진 외국에서는 건설공해를 비교적 합리적으로 관리 규제하고 공해와 관련한 민원을 해소하기 위해 기초 시공법을 저공해공법으로 전환하여 실용화 단계에 접어들고 있으나 우리나라에서는 규제항목의 부적절, 허용치의 과다 책정등 현실성이 결여된 관리기준이 항존하고 있으며 민원사항의 서면화 보존이 미비하여 자료의 통계적 처리에 어려움이 있는 실정이다. 이에 따라 민원담당 부서에서는 소정의 관리절차에 따른 법적인 규제를 실행하지 못하고 상황에 따른 임시적 조치를 취하는데 그치고 있어 실용적인 기준 정립이 요청되고 있다.
- 5) 말뚝기초의 궁극적인 목적이 구조물의 안정성에 있고, 이와 병행하여 경제성이 만족되어야 한다고 볼때 현재의 시공방법(항타시공)은 어느정도 충족시키고 있지만 건설공해측면에서 문제점을 갖고 있으므로 경제성에만 치중할 것이 아니라 저진동·저소음 내지는 무진동·무소음 공법으로 전환됨으로써 민원까지도 해소할 수 있어야 한다는 당위성 인식과 과감한 전환 및 실용화가 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. Healy, P.R. and Weltman, A.J. "Survey of problems associated with the installation of displacement piles," Construction Industry Research and Information Association Report PG8, 1980.
2. Thorburn, S. and Thorburn, J.Q., "Review of problems associated with the construction of cast-in-piles," Construction Industry Research and Information Association Report PG2, 1977.
3. "Future site investigations-quality and value for money," Ground Engineering, Vol.20, No. 5, 1987, pp.2-9.
4. Cheeks, J.R., "Analytical methods to predict pile capacities," Behavior of Deep Foundation, ASTM STP 670, Raymond Lundgren, Ed., 1979, pp.199-208.
5. Schmertmann, J.M., "Measurement of in-situ shear strength," State-of-the-art report, Proc., ASCE. Conference on in-situ measurement of soil properties, Raleigh, N.C. Vol. 2, 1975, pp.57-138.
6. Cheeks, R., "Analytical methods to predict pile capacities," Behavior of Deep Foundation, ASTM, STP670, 1979, pp.199-208.
7. Berigen, F.L., Windle, D. and Van Hooydonk, W.R., "Results of Loading tests on driven piles in sand," Proceedings, Conference on Recent Developments in the Design and Construction of Piles, ICE, 1979, pp.213-225.
8. Martin, D.J., "Ground vibrations from impact pile driving during road construction," Supplementary Report 544, Transport and Road Research Laboratory, 1980.
9. D.B. O'Neill, "Vibration and Dynamic Settlement from Pile Driving," Behavior of Piles, Proceedings of the conference organized by the Institution of Civil Engineers in London, pp.135-140.
10. 이명환, 이원제, 항타진동과 말뚝-흙의 상호작용, KICT 보고서, 1991.
11. 이명환, 이장덕, 말뚝기초의 설계 및 시공관리 개선방안, KICT 보고서, 1989.
12. 사단법인 한국환경오염 방지시설 협회, "소음·진동 규제법," 환경관계법규, 1991.
13. 대한주택공사, "진동이 주변구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향," 1990. 6