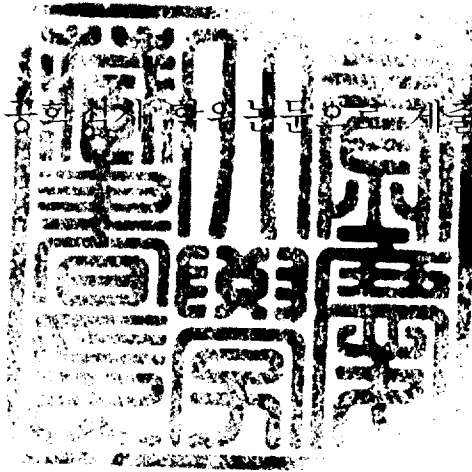


공학석사 학위논문

공동주택 기초 파일공사의
진동 및 소음 특성 연구

지도교수 이 수 용

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2005년 2월

부경대학교 산업대학원

건축공학과

정 일 찬

정일찬의 공학석사 학위논문을 인준함

2004년 12월 17일

주 심 공학박사 김 영 찬



위 원 공학박사 이 재 용



위 원 공학박사 이 수 용



목 차

1. 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구내용 및 범위	2
2. 건설공사에 의한 지반진동 특성	4
2.1 지반진동 발생특성	4
2.2 지반진동 측정법	16
2.3 진동치 및 소음치의 허용규정	22
3. 진동 및 소음 측정 결과 분석	38
3.1 현장개요 및 측정방법	38
3.2 기초파일 공법별 진동·소음 측정 결과	49
3.3 기초파일 공법별 진동·소음 추정식	76
3.4 기초파일 공사의 진동 저감대책	85
4. 결론	88
참고문헌	90
Abstract	92
부록	95

표 목 차

표 2.1	지반진동 발생원에 따른 공사종류	5
표 2.2	일반적인 말뚝의 응력전파 특성	12
표 2.3	지반내 진동파의 속도	13
표 2.4	진동센서의 종류	18
표 2.5	진동의 단위표시	19
표 2.6	일본의 도로교통에 의한 공해진동 허용기준	24
표 2.7	발파진동과 구조물 및 인체의 피해관계	25
표 2.8	생활진동 규제기준	26
표 2.9	특정공사의 사전 신고 대상 기계·장비의 종류	27
표 2.10	특정공사의 사전 신고 대상 공사	28
표 2.11	노동부 고시 04-17호	28
표 2.12	진동과 건축물 피해의 인과관계 판단을 위한 가이드라인	29
표 2.13	독일의 구조물 진동기준 DIN 4150 (1970년)	30
표 2.14	독일의 Vornorm DIN 4150 Teil 3 (1975년)	30
표 2.15	1986년 개정본 DIN 4150-part3(short-term structural vibration)	31
표 2.16	1986년 개정본 DIN 4150-part3(steady-state vibration)	32
표 2.17	Osaka 지역의 진동허용 수준	33
표 2.18	Shinnaisenken 지역의 진동허용 수준	33
표 2.19	특정 건설작업의 진동권고기준(일본)	33
표 2.20	기준값 및 계수	36
표 3.1	측정장비의 제원	44

표 3.2 강관파일 항타 장비 및 말뚝 세원	45
표 3.3 PHC파일 항타 장비 및 말뚝 세원	47
표 3.4 동다짐 작업장비	48
표 3.5 이격거리 10m에서의 진동 및 소음 측정 결과	49
표 3.6 이격거리 20m에서의 진동 및 소음 측정 결과	51
표 3.7 이격거리 30m에서의 진동 및 소음 측정 결과	53
표 3.8 이격거리 50m에서의 진동 및 소음 측정 결과	54
표 3.9 이격거리 100m에서의 진동 및 소음 측정 결과	56
표 3.10 관입깊이에 따른 거리별 진동 측정 결과	58
표 3.11 관입깊이에 따른 거리별 소음 측정 결과	59
표 3.12 이격거리 10m에서의 진동 및 소음 측정 결과	61
표 3.13 이격거리 20m에서의 진동 및 소음 측정 결과	63
표 3.14 이격거리 30m에서의 진동 및 소음 측정 결과	64
표 3.15 이격거리 40m에서의 진동 및 소음 측정 결과	66
표 3.16 이격거리 50m에서의 진동 및 소음 측정 결과	68
표 3.17 관입깊이에 따른 거리별 진동 측정 결과	69
표 3.18 관입깊이에 따른 거리별 소음 측정 결과	71
표 3.19 지반 동다짐 진동측정 결과	72
표 3.20 지반 동다짐 소음측정 결과	73
표 3.21 기초공법별 항타에 의한 진동·소음 측정 평균치	75
표 3.22 기초공법별 항타에 의한 진동·소음 측정 최대치	75
표 3.23 박홍태, 손창백에 의한 진동·소음 평균치 추정식	82
표 3.24 진동 추정식에 의한 구조물별 최소 이격거리	84
표 3.25 소음 추정식에 의한 지역별 최소 이격거리	85
표 3.26 방진대책 비교	86

그림목차

그림 2.1 진동 발생특성에 따른 분류	4
그림 2.2 파일향타시 지반진동속도와 이격거리 관계	7
그림 2.3 N치와 진동속도의 관계	7
그림 2.4 충격식 해머로부터 발산되는 복합된 파장의 형상	9
그림 2.5 탄성파의 종류	10
그림 2.6 진동레벨계의 기본적인 구성	19
그림 2.7 진동감각 보정특성	20
그림 2.8 측정점의 선정	20
그림 2.9 발파진동에 대한 인체의 반응	25
그림 2.10 USBM 발파 피해수준에 대한 기준	35
그림 2.11 거리 계수 F_d	37
그림 3.1 측정대상 현장 조감도	38
그림 3.2 측정대상 현장 위치도	39
그림 3.3 측정대상 부지 횡단면도	40
그림 3.4 측정부지의 지층단면도	42
그림 3.5 진동 및 소음 측정위치	43
그림 3.6 측정기기	44
그림 3.7 강관파일 배치도	45
그림 3.8 PHC파일 배치도	46
그림 3.9 진동·소음 측정 방법	48
그림 3.10 이격거리 10m에서의 진동 측정 결과	50

그림 3.11 이격거리 10m에서의 소음 측정 결과	50
그림 3.12 이격거리 20m에서의 진동 측정 결과	52
그림 3.13 이격거리 20m에서의 소음 측정 결과	52
그림 3.14 이격거리 30m에서의 진동 측정 결과	53
그림 3.15 이격거리 30m에서의 소음 측정 결과	54
그림 3.16 이격거리 50m에서의 진동 측정 결과	55
그림 3.17 이격거리 50m에서의 소음 측정 결과	55
그림 3.18 이격거리 100m에서의 진동 측정 결과	56
그림 3.19 이격거리 100m에서의 소음 측정 결과	57
그림 3.20 관입깊이에 따른 거리별 진동 측정 결과	58
그림 3.21 관입깊이에 따른 거리별 소음 측정 결과	60
그림 3.22 이격거리 10m에서의 진동 측정 결과	61
그림 3.23 이격거리 20m에서의 소음 측정 결과	62
그림 3.24 이격거리 20m에서의 진동 측정 결과	63
그림 3.25 이격거리 20m에서의 소음 측정 결과	64
그림 3.26 이격거리 30m에서의 진동 측정 결과	65
그림 3.27 이격거리 30m에서의 소음 측정 결과	65
그림 3.28 이격거리 40m에서의 진동 측정 결과	67
그림 3.29 이격거리 40m에서의 소음 측정 결과	67
그림 3.30 이격거리 50m에서의 진동 측정 결과	68
그림 3.31 이격거리 50m에서의 소음 측정 결과	69
그림 3.32 관입깊이에 따른 거리별 진동 측정 결과	70
그림 3.33 관입깊이에 따른 거리별 소음 측정 결과	71
그림 3.34 지반 동다짐 진동측정 결과	73
그림 3.35 지반 동다짐 소음측정 결과	74

그림 3.36 강관파일 진동 추정식	76
그림 3.37 강관파일 소음 추정식	77
그림 3.38 PHC파일 진동 추정식	78
그림 3.39 PHC파일 소음 추정식	79
그림 3.40 지반 동다짐 진동 추정식	80
그림 3.41 지반 동다짐 소음 추정식	81
그림 3.42 강관파일 진동·소음 추정식 기존연구와 비교	83
그림 3.43 PHC파일 진동·소음 추정식 기존연구와 비교	83

공동주택 기초 파일공사의 진동 및 소음 특성 연구

산업대학원 건축공학과 정 일 찬
지도 교수 이 수 용

건설 공사장에서 발생하는 지반진동은 대형 건설장비의 이용과 파일향타, 암반발파 등에 의해 주로 발생되는데 이와 같은 지반진동이 어느 한계를 넘어서게 되면 인근 주민이나 가옥에 피해를 빈번히 유발시켜 민원 발생에 따른 공사중지를 초래할 수도 있으므로 사전에 적극 대처하는 것이 매우 중요하다.

국내에서 파일박기 공사에 비용이 저렴하여 많이 사용되고 있는 직타공법은 지반의 진동을 야기하고 이러한 진동은 인근 구조물에 심각한 손상을 줄 수 있다. 특히 도심지의 경우 향타 파일로부터 가까운 거리에 구조물들이 위치하거나 연약지반인 경우 진동의 영향으로 피해가 막대할 수 있다.

따라서 이러한 진동에서 유발되는 피해를 줄이기 위하여 진동원별 지반진동의 특성 및 영향을 파악할 필요가 있으며, 또한 진동을 최소화 할 수 있는 방안을 다각적으로 강구할 필요가 있다.

본 연구에서는 연약지반상의 공동주택 기초공사시에 발생하는 진동·소음의 특성 파악을 위해 기초공법별로 실제 공사 현장에서 강관파일, PHC파일, 지반 동다짐공사의 진동·소음을 측정하였다. 현장에서 직접 측정한 자료의 결과를 고찰하고, 이를 회귀분석 하여 현장 여건에서의 진동 및 소음 추정식을 도출하였다. 진동 및 소음규제기준에 따른 구조물별 최소 이격거리를 도출된 추정식에 대입하여 실무에 활용할 수 있도록 검토 하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 파일 박기작업에서 소음 및 진동의 크기는 공법별, 파일종류별, 거리 및 깊이에 따라 차이가 많으며, 진동원으로부터 이격거리에 따른 진동 및 소음의 크기 변화는 지수곡선으로 나타났다.

(2) 이격거리와 진동·소음 값의 상관성에 있어서는 본 연구의 실험식과 기존 연구 성과를 비교한 결과 추세는 지수곡선으로 유사하나, 진동·소음의 실제 측정값은 현장조건에 따라 상당한 차이가 나타났다.

(3) 파일 향타에 따른 진동은 파일 선단부분으로부터 전달되는 특성으로 인해 관입깊이가 깊어질수록 줄어드는 것으로 나타나고, 소음은 해머가 파일을 타격하는 두부에서 주로 발생하므로 관입깊이에는 영향을 적게 받는 것으로 나타났다.

(4) 강관파일, PHC파일 및 동다짐 공법 중 진동측면에서는 동다짐공법이 강관파일과 PHC파일공법에 비하여 2배 이상의 최소 이격거리가 필요한 것으로 나타났다. 이는 공법의 특성인 다짐해머 중량이 상대적으로 크고 낙하높이가 높은 원인으로 향타 에너지가 크기 때문인 것으로 본다.

(5) 인접건물이 주택 및 아파트인 경우 소음 최대치 국내 규제기준을 실험식에 대입하면 PHC파일공법은 강관이나 동다짐공법에 비하여 4배 이상의 이격거리가 필요한 것으로 나타났다.

이상의 연구 결과는 부산광역시 명지·신호지역과 유사한 연약지반에서의 기초파일박기 공사 소음 및 진동에 관한 현장실무 참고자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

주요어 : 진동, 소음, 강관파일, PHC파일, 동다짐, 이격거리

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 국내 대부분의 건설공사가 대형화, 복잡화, 고층화 되면서 주로 도심지나 연약지반 상에 건설되는 경우도 점차 증가하고 있는 추세에 있다. 이에 비례하여 건설 도중 발생하는 건설 공사장의 진동 및 소음으로 인한 피해분쟁은 중앙환경조정위원회 설립 이래 2002년을 기준으로 총722건의 분쟁조정 사례 중 600건¹⁾으로 전체 사건의 약 83%정도를 차지하는 등 그 비중이 점차 증가하고 있는 실정이다.

건설 공사장에서 발생하는 지반진동은 대형 건설장비의 이용, 파일항타, 암반발파 등에 의해 주로 발생되는데 기존 관행대로 공사를 수행할 경우 이와 같은 지반진동이 어느 한계를 넘어서게 되면 인근 주민이나 가옥에 피해를 빈번히 유발시켜 민원 발생에 따른 공사중지를 초래할 수도 있으므로 사전에 적극 대처하는 것이 중요하다.

또한 국내에서 주로 사용되고 있는 직타공법은 말뚝의 항타가 지반의 진동을 야기하고 이러한 진동은 구조물에 심각한 손상을 줄 수도 있다. 도심지의 경우에는 항타 말뚝으로부터 가까운 거리에 구조물들이 위치하기 때문에 진동의 영향을 많이 받으며, 특히 연약지반의 경우 그 피해 범위가 더욱 크게 발생한다.

따라서 이러한 진동으로부터 구조물에 미치는 피해를 줄이기 위하여 건설 공사장에서 발생하는 진동원별 지반진동의 특성 및 진동영향을 파

1) 이경린 외 3인, 건설소음·진동 피해분쟁조정 사례분석, 대한건축학회 학술발표대회논문집 제21권 제1호, pp.649 ~652, 2004.04

약할 필요가 있으며, 또한 건설 공사장에서 발생하는 건설 진동을 최소화 할 수 있는 진동저감 방안을 다각적으로 강구할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 각종 건설현장에서 발생하는 지반진동에 대한 향타 진동원별 진동발생 특성분석과 지반조건에 따라 구조물에 미치는 진동영향을 파악한다. 이를 바탕으로 기초공사에 주로 사용하는 파일향타 공사시 발생하는 진동·소음을 기초공법별로 현장 측정하였다. 측정 결과를 분석하여 진동 및 소음 추정식을 도출하고 진동 및 소음규제기준과 진동을 저감할 수 있는 대책을 제안함으로써, 이를 실무에 활용하여 인접구조물과 주변의 환경적 피해로 인한 민원발생을 최소화하는데 그 목적을 두었다.

1.2 연구내용 및 범위

본 연구에서는 공동주택 기초공사에서 파일향타 공사시 발생하는 진동·소음을 기초공법별로 현장에서 측정하여 결과분석 및 대책을 제시하고자 하였으며, 기초공법은 강관파일, PHC파일 및 지반 동다짐으로 3가지 종류이다.

연구의 내용은 다음과 같다.

1) 진동원별 지반진동 특성분석

- 각종 진동 발생원별 지반진동 특성 조사
건설장비의 종류 및 공사방법 등에 따른 지반진동의 특성 조사
- 각종 진동 발생원별 지반진동 전파특성 분석

2) 진동추정방법 및 진동영향평가방법 연구

· 지반진동의 측정방법 고찰

· 지반의 진동영향 평가방법 연구

· 지반진동의 허용기준 현황

3) 진동 및 소음 추정식 도출

- 강관파일 항타

- PHC파일 항타

- 지반 동다짐

4) 기초파일 공사의 진동 저감대책

2. 건설공사에 의한 지반진동 특성

2.1 지반진동 발생특성

지반진동 발생은 각종 형태의 대형 건설공사에 따른 공사장의 진동과 지하철, 철도 등의 차량 주행에 의한 진동으로 크게 나눌 수 있다. 이러한 지반진동은 어느 한계치를 넘어서게 되면 인접 구조물에 손상을 야기하거나 인근 주민에게 불안감을 주어 여러 가지 사회적인 문제점들을 야기한다. 따라서 이러한 문제를 사전에 예방하기 위해서는 지반진동을 발생시키는 진원의 종류에 따른 진동 발생특성을 분석하여 이를 토대로 적절한 대책을 수립해야 한다. 일반적인 진동 발생특성에 따른 분류는 그림 2.1²⁾과 같다.

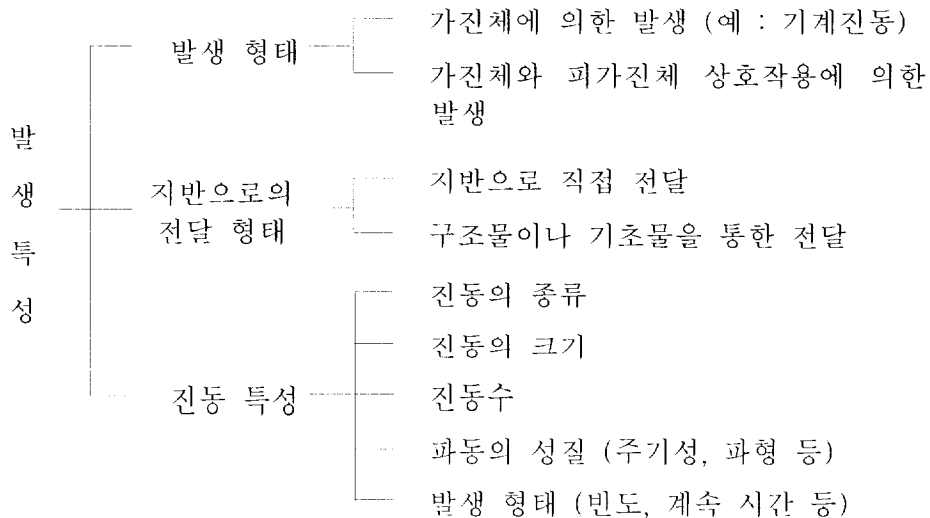


그림 2.1 진동 발생특성에 따른 분류

2) 김동원, 건설공사장의 지반진동 영향 평가 및 진동 예측 프로그램 개발, 경희대학교 대학원 토목공학과 석사학위논문, pp.3~4, 2000. 02

이를 위해 먼저 지반진동을 유발시키는 발생원에 대한 특성을 조사 분석하였다. 표 2.1은 지반진동을 일으키는 건설공사 유형별 진동 발생원과 차량 진동 발생원에 관한 것이며, 일반적으로 파일항타 및 암반발파 등의 건설기계 사용에 따른 지반진동 문제가 주류를 이루고 있다.

표 2.1 지반진동 발생원에 따른 공사종류

진동원	구성요소
파일항타	디젤파일 해머 진동파일 해머 드롭 해머
지반타격	똥다짐 공법, 석주공법 타격식 굴착
발파	폭파다짐, 치환 - 지반개량 구조물 해체 - 노후 구조물 제거 등 지질탐사 건설발파 - 터파기, 터널굴착, 구름절토
지반굴착	압파기, 파쇄, 기계식 현장타설 기초시공 - 지하 연속벽, 현장타설 말뚝 기계식 터널링 - TBM, Shield, Load Header
지반천공	시추, 이스앵커링
건설장비	다짐장비 - 진동로울러 도공장비 - 불도저
차량	지하철, 고속전철, 일반철도 차량

각 지반진동 발생원에 대한 진동 발생특성 중 대표적인 진동 발생원에 대한 특성을 살펴보면 다음과 같다.

2.1.1 파일항타에 의한 진동특성

일반적으로 건설공사장에서 발생하는 진동은 공장기계 등에서 발생되

는 연속적인 진동과는 달리 발생원의 장소가 이동한다는 것과 비교적 단기간에 걸쳐 끝이 난다는 특징이 있다. 그러나 파일항타의 경우에는 비교적 좁은 지역에서 많은 개수의 말뚝을 항타하여 시공하므로 어느 정도의 연속적인 진동이 발생하게 되고, 이로 인한 인근지역의 주민이나 가족 등에 영향을 미칠 수가 있다.

말뚝 기초공사에서 발생하는 지반진동의 대부분은 기성말뚝의 타입에 의해 주로 발생되고 있다. 기성말뚝의 종류에는 RC말뚝, PC말뚝, PHC말뚝 및 강관말뚝 등이 있고, 또한 이들을 타입하는 항타기도 드롭해머, 디젤해머, 진동항타기 등 여러 종류가 있다. 파일항타시에 발생하는 진동은 말뚝의 형상, 말뚝의 크기 및 항타기의 종류에 따라 다르게 발생되고, 또한 타입되는 지반에 따라서도 달라지므로 간단히 나타낼 수는 없으나 건설 공사장에서 발생하는 대부분의 민원은 바로 이와 같은 파일항타에 의해 발생되고 있다.

그림 2.23)는 일본 건설성에서 조사한 서로 다른 타격방법에 의한 파일항타시의 이격거리에 따른 진동속도값의 변화를 나타낸 것으로서 사용되는 각종 말뚝 뿐 아니라 항타기의 종류에 따라서도 다양하게 변화하고 있다는 것을 알 수 있다. 전반적으로 이격거리가 멀어짐에 따라 진동속도는 점차 감소하고 있는데 진동속도 2mm/sec가 측정되는 이격거리는 5~30m 에 걸쳐 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 말뚝 항타에 의한 지반진동은 관입되는 지반의 각 심도별 N치와 밀접한 관계가 있는데 일반적으로 비례하는 관계를 나타내고 있으나 지반의 특성, 타입에너지의 크기 등에 따라 차이가 많이 날 수가 있다.

3) 김동환, 건설공사장의 지반진동 영향 평가 및 진동 예측 프로그램 개발, 경희대학교 대학원 토목공학과 석사학위논문, p7, 2000. 02

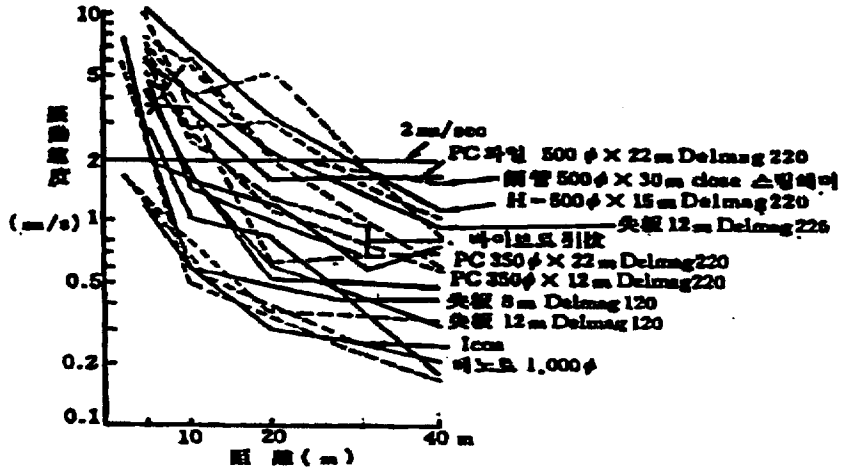


그림 2.2 파일항타시 지반진동속도와 이격거리 관계

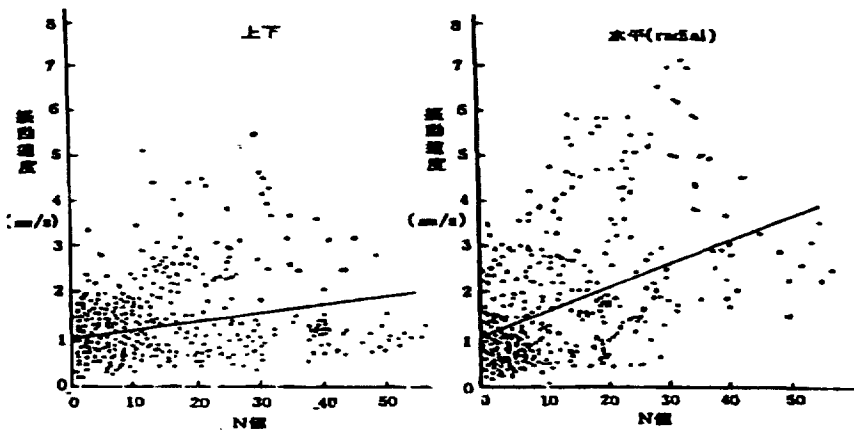


그림 2.3 N치와 진동속도의 관계

그림 2.3은 말뚝의 타입깊이에 관계없이 지반의 N치와 진동원으로부터 20m 거리의 지표지점에서 측정된 진동속도와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것은 전반적으로 N치가 증가함에 따라 측정되는 지반진동이 증가하는 경향을 나타내고 있으나 동일한 N치 값에서도 다양한 진동분포를 나타내고 있으므로 파악하기가 매우 어렵다는 것을 알 수 있다.

2.1.2 파일향타에 따른 진동 및 영향

(1) 타격관입 말뚝의 진동

파일향타로 발생하는 에너지는 지진파 또는 응력파의 형태로 말뚝에서부터 구조물까지 지반내 또는 지표면을 따라서 이동하게 된다. 이러한 에너지의 크기는 여러 가지 요소에 의해 변화하게 되는데 지반의 성질 및 종류뿐만 아니라 말뚝으로부터의 에너지의 전파는 향타기와 말뚝의 제원에 따라서 달라진다.

말뚝의 지지방법이 주변저항력과 선단저항력의 두 가지 메커니즘에서 오듯이 지진파도 동일한 두 가지 메커니즘을 통하여 말뚝에 의해 발생한다.⁴⁾

전단파는 말뚝 관입시 말뚝과 주변 지반사이의 상대변위 또는 말뚝과 접합 지반의 탄성변형에 의하여 말뚝표면을 따라 발생하게 된다. 전단응력은 말뚝상부에서 말뚝과 인접한 지반 내로 들어가게 되고 말뚝내부의 충격응력이 선단부로 전달됨에 따라 전단응력은 말뚝으로부터 콘 형태의 파 형태로 전달되게 된다. 콘의 각도는 매우 작는데 이유는 압축파의 속도로 말뚝을 따라 전달되는 향타충격의 속도는 일반적으로 지반내로 전달되는 전단파의 속도보다 10배이상 빠르기 때문이다. 말뚝으로부터 발산되는 파의 선단부 형태는 실린더 형태로 가정할 수 있다.

말뚝주변 마찰에 의한 파의 선단부는 점차적으로 증가하는 실린더 형태와 마주치게 되고 선단부를 따라 에너지밀도는 점차적으로 말뚝에서의 거리에 따라 감소하게 된다. 콘 또는 실린더의 표면은 파의 선단으로 알려져 있는데 이것은 말뚝주변과 흙 사이의 상호작용에 의해 발생하는 응

1) 김태원, 향타진동이 인접구조물에 미치는 동적 영향 및 대지방안에 대한 연구, 부산대학원 산업대학원 석사학위논문, 2001. 02

력 증가를 이끄는 부분이기 때문이다. 파가 진행되는 방향은 파의 선단부와 직교하게 된다. 이러한 파의 선단부에서의 입자의 운동은 그림 2.4에서 나타낸 화살표와 같이 말뚝과 평행하여 진동하게 된다.

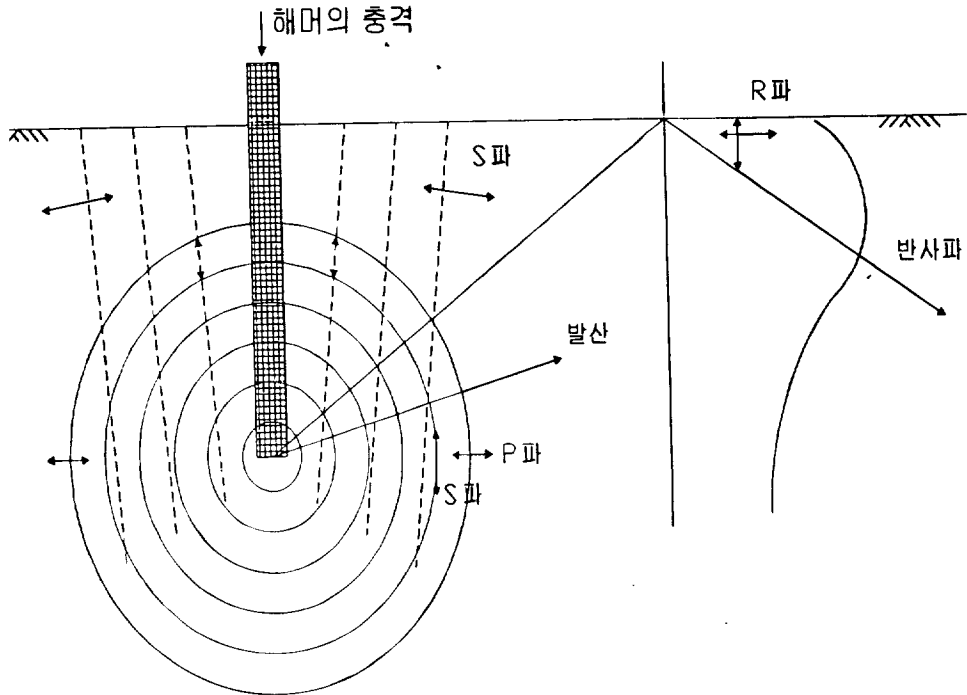


그림 2.4 충격식 해머로부터 발산되는 복합된 파장의 형상

균일한 지반(균질, 등방, 선형탄성지반)에서 진원에 의해 발생하는 지반진동의 탄성파는 크게 지반내부로 전파되는 체적파(body wave)와 지표면을 따라 전파되는 표면파(surface wave)로 나눌 수 있으며, 이를 세분하면 다음 그림 2.5와 같다.

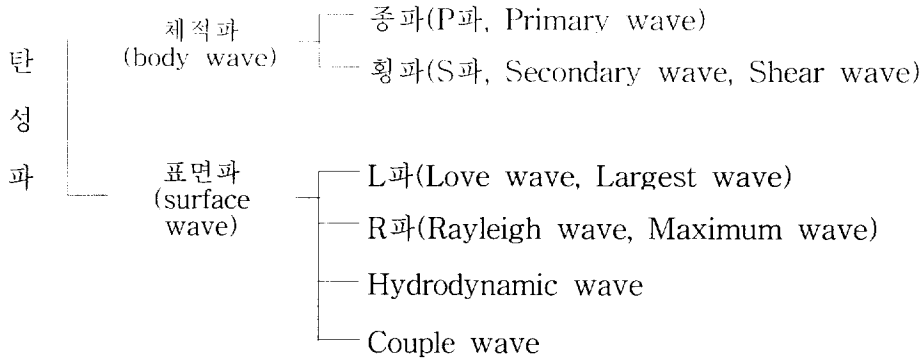


그림 2.5 탄성파의 종류

체적파는 지반이 불포화상태인 경우 두 가지 형태로 나타나는데 primary body wave(P파)와 secondary body wave(S파)가 그것이다. 이러한 파는 때로는 각각 압축파와 전단파로 불리기도 한다. 이상적인 균일한 지반에서는 단 한가지 종류의 표면파가 있는데 이것이 Rayleigh wave(R파)이다.

말뚝선단부에서는 각각의 충격은 부피변화를 야기하게 되고 선단부에서 P파와 S파를 발생시킨다. P파와 S파는 반구형의 선단파 형태를 지니면서 말뚝 선단에서 밖으로 퍼져나가게 된다. P는 S파보다 빠른 속도로 진행하므로 P파의 선단파는 S파의 선단파보다 항상 앞서서 진행된다. P파와 S파가 지표면과 만나게 되면 일부에너지는 R파로 변화되고 일부에너지는 다시 지반 내로 반사된다. 새롭게 발생한 R파는 Rayleigh 파의 특징을 지닌 채로 지표면을 따라 진행되므로 말뚝으로부터 일정거리에서는 세 가지 파를 모두 볼 수 있게 되는 것이다. 이러한 각각의 파와 연관된 에너지의 크기는 여러 가지 요소에 의존하게 되는데 주로 말뚝의 관입심도, 지반의 경도, 지반의 균일성, 말뚝에 전달되는 에너지 등이 있다. 구조물에 손상을 가하는 잠재력을 지닌 것은 바로 말뚝타격에 의해 지중으로 전달되는 이러한 파에 의한 것이다.

균일한 지반조건에서의 기본적인 응력과 생성 메카니즘을 그림 2.4와 같다. 만약 지반이 다층지반이거나 불균일한 경우에는 응력과 전달은 더 복잡해질 것이다. 각각의 S파와 P파가 성질이 다른 지층경계에서 만나게 되면 P파와 S파에 대한 반사파와 굴절파가 발생하게 된다.

말뚝이 지표면에서부터 향타되어 관입 될 때 처음 향타진동은 Rayleigh파의 형태로 지표면을 따라 먼저 이동하게 된다. R파는 다른 지진파보다 지표면을 따라서 감쇠가 천천히 일어나므로 결과적으로 체적파보다 먼 거리까지 손상에너지를 전달하게 된다. 말뚝관입이 어느 정도 되면, 주변저항과 선단지지에 의한 진동발생이 주가 되어 체적파를 생성하게 되고 이것은 거리에 따라 급격하게 감쇠가 된다. 그러므로 지표면에 있는 목표물에 대하여 말뚝선단이 지표근처에 있을 때가 깊은 심도에 있을 때보다 진동이 훨씬 심하다. 이것은 지표면 근처에서의 파의 전달을 최소화하기 위하여 말뚝시공을 매입공법으로 하도록 제안할 수도 있을 것이다. 그러나 목표물이 관이나 터널처럼 지중 내에 묻혀 있는 경우에는 지표면에만 발생하는 Rayleigh 파는 구조물에 손상을 미치지 않지만 선단에서 발생하는 체적파는 손상을 줄 수 있다.

(2) 향타진동의 응력 전파 특성

향타충격에 의해 발생하는 지반운동은 말뚝이 관입되는 지반보다 말뚝 재료 및 말뚝크기에 더 의존적이다. 말뚝머리에서의 램의 낙하로 인한 충격에 의해 에너지는 말뚝 내로 축적된다. 말뚝이 충격으로 인한 에너지를 전달할 수 있는 능력은 다음 식으로 말뚝 임피던스에 의존한다.

$$I = \rho V_p A_p \quad (\text{식 2.1})$$

여기서

I = 말뚝의 임피던스

ρ = 말뚝재료의 단위질량

V_p = 말뚝 내로 전달되는 P파의 속도

A_p = 말뚝의 단면적

말뚝을 관입시키기 위해서 말뚝머리에 가해지는 하중은 관입에 저항하는 하중을 극복해야 하지만 임피던스 말뚝을 통해 전달 가능한 하중의 크기를 제한하게 된다. 그러나 임피던스는 말뚝머리에 가해지는 충격과 말뚝이 관입되는 지반과는 무관하며 단지 말뚝재료와 크기만의 함수이다. Peck은 몇 가지 종류의 말뚝과 크기에 대하여 임피던스 값을 제시하였고 표 2.2에 나타내었다. 이 표에서만 보면 크기가 비슷한 말뚝일지라도 재료특성 특히 탄성계수가 다른 경우에는 상당히 큰 임피던스 차이를 보이고 있다.

표 2.2 일반적인 말뚝의 응력전파 특성

말뚝구분	\bar{Y} (kg/m)	ρ (kg s ² /m ⁴)	c (n/s)	ρc (kg s/m ³)	A (cm ²)	$\rho c A$ (t s/m)	ratio
나무							
10inch 직경 Kiln	640.4	65.3	4,145	270,669	506.5	137.2	1
10inch 직경 소나무	960.6	97.9	3,231	316,305	506.5	160.4	1.2
콘크리트	2400	244.8	3,383	828,231			
10inch 직경					506.5	421.5	3.1
20inch 직경					2027.1	1680.6	12.3
강재	7850	800	5,151	4,120,960			
HP10×57					108.1	446.5	3.3
HP12×53					100.5	434.0	3.2
HP14×117					222.2	959.1	7.0
10-3/4×0.188강관					40.3	165.7	1.2
10-3/4×0.297강관					59.2	257.2	1.9
10-3/4×0.365강관					76.8	316.1	2.3
강재/콘크리트							
10 3/4×0.279강관	2962.0	28.11	3,6881	340,687	567.1	634.0	4.6
콘크리트 속채움							

말뚝으로부터 지반으로 전달되는 에너지는 주로 해머와 말뚝특성에 의존한다. 지반 고유의 진동을 산정하는데 Heckman & Hagerty의 공식을 사용하고 있다.

$$z = k\sqrt{\frac{E_h}{D}} \quad (\text{식 2.2})$$

여기서 K는 말뚝의 임피던스에 의존하는 값이다.

항타 말뚝으로부터 발산되는 진동의 전파를 산정하는데 있어서 말뚝의 임피던스는 반드시 고려되어야 한다는 것을 유추할 수 있다. 일반적인 부지에서 관입되는 말뚝으로부터 동일거리에 있을 때 K값의 범위가 10 정도일 때 가능한 말뚝 임피던스의 범위는 대략 5정도이다. 주요한 관찰 요소는 말뚝 임피던스는 항타말뚝으로부터 지반으로 전달되는 진동의 양에 영향을 준다는 것이다. 항타말뚝을 검사할 경우에는 해머에너지, 말뚝 재료, 말뚝크기를 고려해야 하며, 지반내의 매질의 종류에 따른 진동파의 속도는 표 2.3과 같다.

표 2.3 지반내 진동파의 속도

매질의 종류 압축		압축파 속도 $V_p(\text{m/s})$	전단파 속도 $V_s(\text{m/s})$
충격층	점성토	250	80-160
	사질토		60-120
공적층	동 Rock	1000-2000	140-200
	섬성토		160-250
압식	사질토	4000-6700	200-350
	비암		600-1000
	사암		700-2000
	화강암		2100-3300
	원부암	4000-6700	2500-3800

(3) 향타진동이 구조물에 미치는 동적 영향

지반위에 구조물이 있으면 진동이 전파되어 올 때 지반의 진동은 구조물이 없을 때와는 다르다. 오히려 구조물이 있으면 지반에서 존재하지 않는 공진 현상이 일어나며 그것이 구조물의 피해와 관련되기 때문이다. 진동으로 인한 구조물의 피해로는 기초 콘크리트나 벽의 균열, 부착물의 탈락 등의 직접적인 피해 이외에도 진동에 의하여 발생하는 지반의 변형이나 파괴로 인하여 구조물 기초의 부등침하 등 간접적 피해가 있다. 구조물에 피해를 일으키는 진동의 한계는 80~130 gal로서 천장에 균열이 생기고 지붕 슬레이트가 느슨해진 예가 있으나 980 gal 이상에도 아무런 피해가 발생하지 않는 예도 있기 때문에 이와 같은 현상을 고려하여 구조물에 대한 진동의 허용한계에 대한 여러 사람들의 연구 결과들이 제시되고 있으며 최근의 연구에서는 진동손상 기준안에 진동수를 보다 폭넓게 포함시키고 있다.

(4) 진동으로 인한 침하

침하를 유발시키는 파일향타로 인한 진동은 많은 반복횟수의 낮은 진폭의 전단변형율을 갖기 마련이다.⁵⁾ Seed & Silver는 지진으로 인한 작은 수의 강한 진동운동으로부터 발생하는 침하를 예측하기 위하여 고진폭 전단시험으로 마른 모래의 침하에 대한 연구를 수행하였다. 많은 반복횟수의 저변형율 진동에 대한 침하를 예측하기 위하여 그들의 결과를 로그 로그도표에 외부보간(extrapolation)하였다. Borden & Shao는 실내 반복전단시험으로부터 반복횟수와 전단변형률로부터 부피변형률을 산정하였다. 그들이 제안한 관계식은 다음과 같다.

5) 김동수, 도심지에서 진동에 의한 주변침하 산정기법 개발, 한국과학기술원, 1997.04

$$\Delta e_{col} = a(\gamma - \gamma_c)(\log N_{cyc})^b \quad (\text{식 2.3})$$

여기서

Δe_{col} = 동적부피 변형률

γ = 전단변형률 크기

γ_c = 현재의 구속압에 대한 전단변형률 크기

N_{cyc} = 전단변형률에 대한 반복횟수 (실내의 뒤틀림변형률)

a, b = 실내 공진주시험으로부터 결정된 지반종류 구속압의 기능

그러나 이 접근 방법을 사용하기에 앞서 a, b 상수를 결정하기 위하여 실내시험을 반드시 수행하여야 한다.

(5) 양생중인 콘크리트에 대한 위험 가능성

말뚝의 향타진동으로 인한 지반진동의 또 다른 결과는 최근 설치된 뼈대 구조물의 콘크리트나 새로 타설되어 양생중인 콘크리트의 교란을 일으킬 수도 있다.

양생중인 콘크리트에 가해지는 충격은 콘크리트 타설후 28일 강도의 70%에 도달하기 전 즉, 아직 충분히 양생되지 않은 콘크리트에 상당한 외부의 흔들림이나 또는 충돌로 인한 교란이 가해지는 것을 일컫는다. 주요한 관심은 분자결속이 발휘되는 단계에서 콘크리트 입자배열을 분열시킬 정도의 하중 임계값을 초과하지 않는가 하는 것이다. 일반적으로 이것은 7일 안에 발생하는데 콘크리트의 수화작용이 시작된 이후에 물리적으로 손상된 분자결속은 다시 회복되지 않을 것이고 이로 인한 콘크리트의 공칭강도는 감소될 것이다. 하지만 콘크리트 입자배열이 교란되지 않고 그대로 있다면, 즉 상대 전단응력이 가해지지 않고 강한 구속상태라면 입자결속은 그대로 발휘될 것이다.

미국에서 가장 통상적으로 사용하는 침투속도 진동 제한은 50mm/s 이다. Atkins & Dixon(1971)은 건설활동과 콘크리트 작업에 관련된 진동 기준의 제정에 대한 광범위한 역사적 기록과 참고문헌을 수집하였다. 몇몇 보고서에서 침투속도 50mm/s를 초과하는 것도 있었지만 그러한 높은 값을 사용할 수 있는 근거 있는 자료가 부족하여 진동제한 값은 공학적인 RC 구조물에 대하여서는 50mm/s를 추천하였다.

2.2 지반진동 측정법

2.2.1 측정기기

지반진동에 의한 영향평가를 위해서는 먼저 가진원으로부터 발생하는 진동치를 정확히 측정해야 한다. 이러한 진동측정을 위해서는 측정목적에 적합한 측정기를 갖추어야 한다.

일반적으로 진동측정을 위한 측정기는 세가지 성분 즉, 수직성분, 진행성분, 접선성분을 각각 측정할 수 있어야 하며, 이를 위해서는 무엇보다 진동을 감지하는 센서(변환기)가 매우 중요한 요소이다. 센서에는 지오폰(Geophone) 및 피에조미터(Piezometer) 형태가 있다. 지오폰은 원통형 영구자석 속에 코일이 진동을 따라 움직이면서 자장속에 코일이 움직이면 전기가 발생하는 원리를 이용한 것이다. 한편 피에조미터는 스트레인게이지를 사용한 인공적인 것과 힘을 받으면 전기를 띠게 되는 압전물질을 이용한 것이 있는데 진동의 가속도를 측정하는 가속도 변환기로써 많이 사용된다.

현재, 국내에 도입되어 사용되고 있는 진동측정기로는 S-6 Model 53136과 Etna 8(미국 SINCO사), SSU 2000DK (미국 Geosonic사), Blastmate II(미국 Instantel사), VME Model F (스웨덴 Nitro Consult

회사), VS-1200(미국 Sprengnether 회사) 등이 있다.

이 중에서 S-6 Model 53136 은 2개의 센서를 가지고 있어 두 군데에서 동시에 성분별 진동속도 및 벡터합을 측정할 수 있고 주파수 분석도 가능하다. 이 측정기기는 발생 진동원에 대하여 서로 직교하는 3축방향 성분(Longitudinal : 종수평성분, Vertical : 수직성분, Transverse : 횡수평성분)을 측정할 수 있는 기기이다. 측정되는 진동속도를 측정할 수 있으며 측정값은 모니터 상에 나타내거나 프린트 할 수 있다. 그리고 진동속도 감지에는 지표매설식 속도계 Geophone 2개를 사용한다.

반면, SSU 200KD와 BlastmateII는 측정된 진동을 진동속도 외에 진동변위와 진동가속도로도 읽을 수 있고, 사용자가 설정한 진동수준 이상의 진동에 대해서 자동으로 측정을 시작하는 Trigger 기능을 가지고 있다. 본체와 연결된 센서는 1개씩 가지고 있으나, SSU 2000DK의 경우는 별도로 미진계(microseismograph)를 구입할 경우 원하는 만큼의 센서채널을 갖출 수 있다.

한편, 진동 측정에 있어서 또 다른 중요한 문제의 하나는 센서의 현장 설치이다. 측정장치는 지질상태가 일정한 한 선에 배열해야 하며 센서를 설치할 때는 진동의 가속도를 고려하여 흔들리지 않게 잘 고정시켜야 한다. 즉, 최대 가속도가 0.3g 이하이면 센서가 흔들릴 가능성은 적고 별도의 부착장치 없이도 수평 측정면에 그대로 유지될 것이다. 그러나, 최대 가속도가 0.3g~1.0g 사이일 때는 센서를 측정면이 토양이면 완전히 묻거나 최소한 부분적으로 묻고 모래주머니를 올려야 하며, 측정면이 암석, 아스팔트, 콘크리트면이면 센서는 양면접착테이프나 에폭시 또는 급결시멘트 등으로 측정면에 고정해야 한다. 만일 최대 가속도가 1.0g 보다 크면 시멘트와 볼트로 센서를 단단한 표면에 고정시켜야 하며, 토양에서는 완전히 묻으면 충분한 구속력을 얻을 수 있다.

2.2.2 진동센서

현재 사용되고 있는 진동센서는 출력이 입력 가속도에 비례하는 가속도센서, 입력 속도에 비례하는 속도센서, 입력 변위에 비례하는 변위센서 등이 있다. 일반적인 기계진동, 소형 구조물의 진동, 충격 등 비교적 진동레벨이 높고 고주파인 진동의 측정에는 압전형 가속도센서가, 지반진동 및 대형구조물의 진동 등 비교적 진동레벨이 낮고 저주파인 진동측정에는 속도센서, 또는 변위센서가 많이 이용된다.

일반적으로 진동센서는 진동하는 물체에 직접 부착하여 진동을 감지하는 접촉형이 많이 쓰이지만, 회전축 등 센서를 직접 부착하지 못하는 경우에는 비접촉형 센서가 사용된다.

진동센서의 종류는 표 2.4와 같다.

표 2.4 진동센서의 종류

구 분	형 식	감지량	사용주파수 범위(Hz)
접촉형	압전형	가속도	1 ~ 20000
	동전형	속도	10 ~ 1000
	차동트랜스형	변위	DC ~ 100
	스트레인게이지형	변위	DC ~ 500
비접촉형	용량형	변위	DC ~ 100000
	전자 광학형	변위	DC ~ 100000
	과전류형	변위	DC ~ 5000

진동레벨계는 진동공해의 평가와 관련된 지반진동의 측정에 사용되는 진동측정기로써 센서, 주파수 분석, 표시 및 감각보정 등 진동의 감지에서 지시까지 모두 할 수 있게 구성된 장비이다. 진동레벨계는 주로 옥외에서 사용되므로 견전지를 전원으로 하는 포터블형으로 제작되어 있다. 그리고 진동레벨은 진동가속도의 실효치로 계산되므로 진동레벨계도 진동의 실효치를 검출하게 제작된다.

진동레벨계의 기본적인 구성은 그림 2.6과 같다.

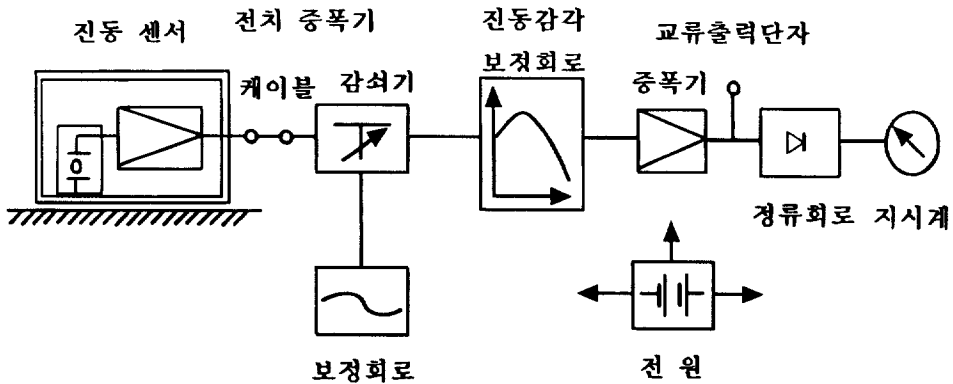


그림 2.6 진동레벨계의 기본적인 구성

진동레벨계는 내부에 연산회로를 내장하여 센서가 감지한 가속도 신호를 적분하여 속도 또는 변위로 지시할 수 있고, 진동량도 필요에 따라 Peak Value, Peak to Peak치, rms치(실효치, Root Mean Square Value) 등으로 나타내며 사용단위도 표 2.5 진동의 표시단위와 같이 G, m/sec^2 , cm/sec^2 , ft/sec^2 등으로 다양하게 나타낼 수 있다.

지반진동을 측정하는 경우 측정기에 부착된 센서는 대개 한 방향으로만 감응하기 때문에 측정기는 진원으로부터 진행, 접선, 수직의 3방향의 진동을 각각 측정할 수 있도록 3개의 센서를 갖추고 있어야 한다.

표 2.5 진동의 단위표시

성분	표시단위
변위	cm, mm, μ , inch
속도	cm/sec(kine), mm/sec, inch/sec
가속도	cm/sec ² , gal(1gal=1cm/sec ²), G(1G=100gal)
주파수	cycle/sec(c.p.s.), Hz

진동감각보정은 그림 2.7에 보인 연직 및 수평 보정특성이 일반적으로

6) 김동완, 건설공사장의 지반진동 영향 평가 및 진동 예측 프로그램 개발, 경희대학교 대학원 토목공학과 석사학위논문, p24, 2000, 02

채택되는데, 이는 인체의 진동에 대한 반응특성이 이와 유사하기 때문이다. 진동이 인체에 미치는 영향은 진폭과 주파수에 의존하고 또 연직과 수평의 진동에서는 느낌이 다르다.

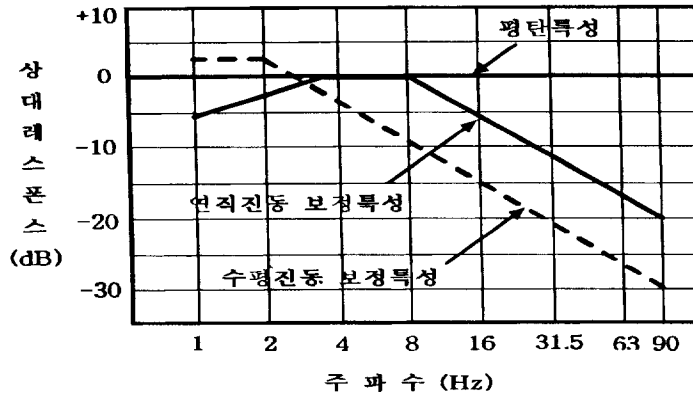


그림 2.7 진동감각 보정특성

그림 2.7은 전신진동의 크기에 관한 감도를 표시한 것으로 8Hz 이상에서는 연직방향에 비해서 수평방향의 감도가 9dB 낮고 반대로 4Hz 이하에서는 수평방향의 감도가 높음을 알 수 있다.

2.2.3 측정위치 선정

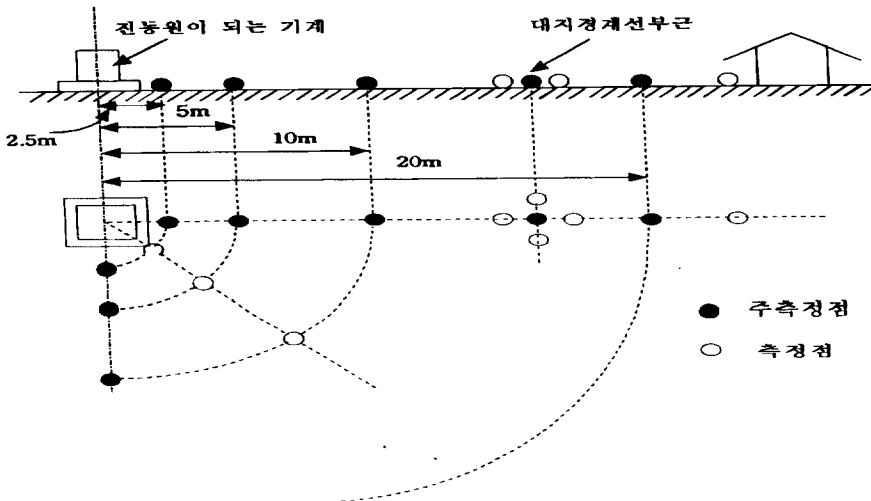


그림 2.8 측정점의 선정

공장, 사업장, 건설작업 및 도로교통에서 진동이 발생하여 주변 주택에 영향을 미치고 있을 때, 우선 해당 지역의 규제 기준과 측정된 진동레벨과 비교한다. 규제기준은 공장 등의 부지경계선에서 진동의 크기의 허용한도이므로 이 경우 측정장소는 공장의 부지경계선이 된다. 측정점은 주택 등에 면한 문제가 되는 부지경계선상으로 하고 경계선에 따라서 임의의 간격으로 선정한다.

만약 부지경계선상에 측정점을 선정하는데 그림 2.8과 같이 진동원에서 경계선으로 수직인 점을 선정하고 경계선 외측에서 측정할 경우 진동의 거리감쇠를 구하여 그로부터 경계선상의 진동레벨을 추정하여야 한다. 경계선에 담장 등이 서 있을 경우, 지반진동에 의해서 담장이 공진을 일으켜 그 가까이의 진동이 커지는 수가 있다. 이 때도 위와 마찬가지로 측정점을 선정하여 측정한다.

2.2.4 측정시의 주변 조건

지반진동을 측정할 때 비, 바람 등이 강한 날은 피하는 것이 바람직하다. 또 인접공장 등 대상 진동 이외의 진동(암진동)에 의한 영향도 고려하여야 한다.

측정에 사용되는 측정기기의 사용 온도 범위에 주의하고 특히 한냉지, 고온기계 가까이, 그리고 하절기의 직사 일광하 등에서는 측정기의 지시치가 불안정하게 되기 쉬우므로 이들을 방지하는 연구가 필요하다. 바람이 강할 경우, 바람에 의한 수목, 담장 등과 가까운 곳을 피하여 측정한다. 사용하는 진동센서에서 바람 난음이 발생할 경우에는 방풍카바 등으로 바람을 차폐할 것을 고려한다. 센서에 빗방울이 직접 닿으면 그의 진동이 미약하나 검출될 수도 있으므로 저 레벨의 측정시 주의를 요한다. 특히 방수형이 아닌 센서는 우중 측정시 세심한 주의가 요구된다.

특정 진동원에서 발생하는 진동만을 대상으로 하는 진동의 측정은 대상 진동이 있을 때와 진동이 없을 때의 진동레벨의 차이가 10 dB 이상 일 것이 요망된다.

2.3 진동치 및 소음치의 허용규정

지반진동에 의한 피해는 인적피해와 물적피해로 나눌 수 있으며 인적 피해 측면에서의 진동은 흔히 '공해진동'으로 부르고 있다. 공해진동은 소음과 같이 주파수 성분에 따른 인체진동 반응 차이를 감안하여 데시벨 척도와 같은 특별한 단위의 영향평가 척도를 사용하여 허용치를 규정하는 것이 일반적이다. 반면 물적피해는 데시벨 척도와 같은 환산척도보다는 진동의 기본적인 물리적 척도인 변위·속도·가속도의 계측치 자체를 직접 사용하여 허용진동치를 규정하는 것이 일반적이다. 아울러 진동의 평가치로는 소음과 같이 전 주파수 성분을 고려한 평균 진동강도를 나타내는 유효치(rms)보다는 최대치(Peak) 및 최대치의 진폭을 주는 주파수 성분을 기준하는 것이 일반적임에도 유의 할 필요가 있다. 이러한 기준으로부터 구조물과 인체 및 가축 등에 미치는 허용진동 기준치를 설정하여 진동영향을 평가하는데 이를 관리하기 위한 기준치는 각 나라별, 지역별, 현장조건별로 달리 규정되어 있다.

국내의 경우도, 일반적인 건설공사에 의한 지반진동의 기준치를 제시하고 있는데, 이 기준도 외국의 기준치를 근거로 작성, 사용하고 있는 실정이다. 외국의 경우에도 지반진동의 기준은 각 공종별로 달리 규정한 것이 아니라 주로 발파에 의한 진동을 규제할 목적으로 작성한 기준치를 일반 건설 공사장의 진동기준치로 사용하고 있다.

국내·외에서 적용하고 있는 진동기준을 참고문헌자료를 중심으로 소개하면 다음과 같다.⁷⁾⁸⁾

2.3.1 공해진동(인적피해 측면)의 영향과 허용기준

진동에 대한 구조물의 피해는 직접적인 재산의 피해를 야기하게 되어 일찍부터 강조되어 왔으나 최근 들어 생활환경의 보존에 대한 인식이 높아져 인체에 대한 진동 및 소음의 영향이 큰 문제로 대두되고 있다. 진동이 인체에 미치는 피해는 생리적인 피해와 심리적인 피해를 들 수 있다.

심리적인 면에서의 진동 영향은 개인이 갖고 있는 감정이나 분위기에 의해 크게 좌우되며 개인차가 크다. 생리적인 반응은 객관적인 심리현상, 호흡, 맥박, 신진대사 등의 변화를 의미하며 심리적인 면에 비하여 개인적 차이가 크지는 않다.

높은 수준의 진동을 일정기간 이상 전신에 받게 되면 순환기계, 자율신경계, 내분비계 등에 생리적 영향을 미치며 성가심, 불쾌감 등의 심리적 영향 및 수면, 업무 등 일상생활에 영향을 줄 수 있다. 그러나 보통의 낮은 진동이 생리적인 피해를 직접적으로 야기하는 경우는 드물다. 직업병적인 수준의 신체 피해는 착암기 등의 작업자가 국부진동에 오랫동안 노출되어서 발생하는 경우를 제외하면 거의 없다고 할 수 있다.

진동에 대한 인체반응은 소음과 같이 진동의 세기뿐만 아니라 진동의 주파수 성분에 따라 큰 차이를 보인다. 그리고 진동의 방향(수직, 수평)에 따라서도 달라진다. 그런데 공해진동의 경우는 소음의 A 보정곡선과 같이 널리 통용될 수 있는 인체감각 보정기준이 아직 정립되어 있지 않아, 여러 가지 척도가 사용되고 있다. 특히 데시벨 단위로 진동강도를 나타내는데 있어 나라마다 서로 다른 기준 진동레벨 및 보정치를 사용하고

7) 김동환, 건설공사장의 지반진동 영향 평가 및 진동 예측 프로그램 개발, 경희대학교 대학원 토목공학과 석사학위논문, pp.29~36, 2000. 02

8) (주)한국구조안전기술원, 진동으로 인한 건축물 피해 평가에 관한 연구, 환경부 중앙환경분쟁조정위원회, pp.100~125, 2002.01

있음에 유의해야한다. 또한 변위·속도·가속도 중 어느 것을 적용한 데시벨치 인가, 그리고 모든 주파수 성분을 고려한 유효치(rms)를 기준한 것인가 또는 최대치(Peak)를 기준한 것인가에 유념해야 한다.

다음은 공해진동 허용기준 중 일본의 경우에 대한 공해진동 허용기준이다.

일본에서는 가속도를 기준으로 모든 주파수 성분을 고려한 평균강도를 유효치(rms)로 계측한 다음, 이를 데시벨치로 환산한 단일 지표치를 사용한다.

일본에서는 일반적으로 70dB를 공해진동 허용치로 하고 있는데 특별히 지하철 진동에 대한 공해진동 허용치가 법적으로 제정되어 있지는 않다. 참고로 표 2.6에는 일본의 <진동규제법>에 규정되어 있는 도로교통에 의한 공해진동 허용기준을 나타내었다.

표 2.6 일본의 도로교통에 의한 공해진동 허용기준

시간대 구역	주 간 (05-08시 ~ 19-22시)	야 간 (19시·22시 ~ 05 (08시))	비 고
1종 구역 (주거진흥구역)	65 dB	60 dB	보정 가속도 레벨
2종 구역 (상업/공업지역)	70 dB	65 dB	

우리나라의 경우에는 인체에 대한 진동허용 기준치를 별도로 규정하는 것은 없다. 그러나 인체의 반응은 구조물보다 훨씬 민감하므로 최근에는 보다 엄격한 외국의 기준을 적용하려는 노력이 일고 있다.

표 2.7)은 발파진동에 의한 인체 및 구조물에 미치는 영향범위를 나

9) (주)한국구조안전기술원, 진동으로 인한 건축물 피해 평가에 관한 연구, 환경부 중앙환경분쟁조정위원회, pp.100 ~ 125, 2002.01

타낸 것인데, 표에서 알 수 있는 바와 같이 입자속도 0.05cm/sec 이상이
 면 많은 사람이 진동을 느끼게 되고 0.5cm/sec 이상이면 인체는 건물이
 무너질 듯한 느낌을 받지만 실제 건물에는 극히 가벼운 피해가 생길 수
 있는 정도인 것으로 알려져 있다. 실제로는 인체의 감응이 주관적이어서
 개인차가 크고 자세나 진동의 입력방향에 따라 크게 다르기 때문에 통계
 적 처리가 필요하다. 보통 그림 2.9와 같이 인체반응을 감지단계, 불쾌감
 을 느끼는 단계, 인내불능단계의 3단계로 나누며 진동이 1cm/sec 가 되
 면 인근 주민의 10%가 항의를 하게 된다고 보고 되어있다.

표 2.7 발파진동과 구조물 및 인체의 피해관계

진 동 속 도	(mm/sec)	
	500.0	- 건물에 큰 피해가 일어난다. 건물에 균열이 생긴다.
	100.0	
	50.0	- 건물에 가벼운 피해가 일어난다.
	10.0	건물에 가벼운 피해가 생긴다.
	5.0	(사람은 건물이 무너질 듯한 느낌을 받는다.) - 인체에 심하게 느끼거나 사람이 진동을 느낀다.
	2.0	
	1.0	- 일반적으로 많은 사람이 진동을 느낀다.
	0.5	매우 민감한 사람이 진동을 느낀다.
	0.1	
0.05	- 인체로 느낄 수 있다	

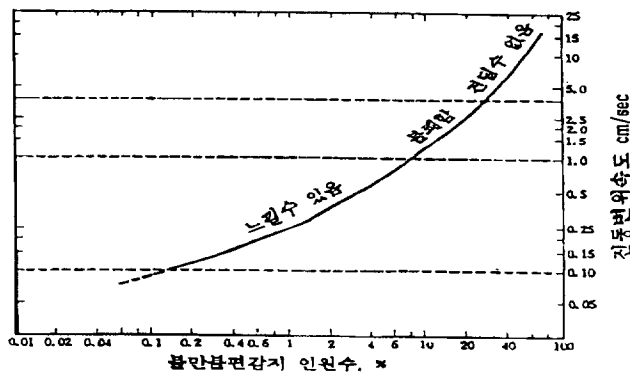


그림 2.9 발파진동에 대한 인체의 반응

2.3.2 구조물에 대한 영향과 허용 기준

(1) 국내 기준

1) 소음, 진동 규제법

국민의 생활, 정신의 안정을 위하여 공장, 도로, 철도 등으로부터 발생하는 소음·진동으로 인한 피해를 방지하고, 소음·진동을 적정하게 관리, 규제하기 위하여 소음·진동규제법이 제정되어, 1997년 개정·보완되었다. 이 법의 적용범위는 공장 소음·진동, 생활 소음·진동(건설 소음·진동이 생활 소음·진동에 포함됨), 교통 소음·진동, 항공기 소음 등의 규제와 관리이다.

이 중 보고서에서 다루는 진동관련 기준은 소음진동 규제법 제3장의 '건설소음에 대한 소음·진동 규제 기준'으로, 그 내용은 표 2.8과 같다.

소음·진동에 대한 기준치도 대상 소음레벨 및 대상 진동레벨로 설정되어 건설공사장 소음의 관련 규제기준은 1994년 11월에 소음·진동 규제법 시행규칙에 의해 생활 소음과는 다르게 분류되어 제시되었으나, 1997년 생활 소음과 동일한 범위에 포함되어 개정하였다.

표 2.8 생활진동 규제기준 (단위 : dB(A))

시간 별 대상 지역	주 간 (06:00-22:00)	심 야 (22:00-06:00)
주거지역, 녹지지역, 준도시지역, 중 취락지구 및 운동·휴양지구, 자연환경보전지역, 기타지역안에 소재한 학교·병원·공공도서관	65이하	60이하
기 타 지 역	70이하	65이하

- ※ : 1. 진동의 측정방법과 평가단위는 소음·진동공정시험방법에서 정하는 바에 따른다.
- 2. 대상지역의 구분은 국토이용관리법(도시지역의 경우에는 도시계획법)에 의한다.
- 3. 규제기준치는 대상지역을 기준으로 하여 적용한다.
- 4. 공사장의 진동규제기준은 주간의 경우 1일 최대작업시간이 2시간이하일 때는 +10dB을, 2시간초과 4시간 이하일 때는 +5dB을 규제기준치에 보정한다.

소음·진동규제법에 의한 규제기준은 단위를 소음의 경우 L_{eq} dB(A)에서 dB(A)로, 진동의 경우 L_{eq} dB(V)에서 dB(V)로 변경하였다. 또한, 건설 소음·진동에 대한 기준치도 대상 소음레벨 및 대상 진동레벨로 설정되어 있으므로 측정 소음레벨과 암소음 레벨을 측정하여 산정해야 한다.

건설공사에서 표 2.9의 기계·장비를 2일 이상 사용하고, 표 2.10에서 정하는 규모의 특정 공사를 시행하는 경우에는 관할 시·도지사에게 특정 공사의 개요, 방음, 방진시설의 설치내역 및 도면 및 기타 소음·진동 저감 대책에 대해서 신고하여야 한다.

표 2.9 특정공사의 사전 신고 대상 기계·장비의 종류

1	항타기, 항받기, 항타항받기(암입식 항타항받기는 제외)
2	병다기
3	착압기
4	공기압축기(공기 토출량 2.83m ³ /분 이상의 이동식인 것)
5	건축물 파괴용 강구
6	브레이커(휴대용 제외)
7	갈삭기
8	발진기
9	로우더
10	압쇄기

- ※ 저소음, 저진동을 발생하는 기계·장비라고 환경부 장관이 인정하는 기계, 장비라고 인정되는 경우에는 신고 대상에서 제외한다.

표 2.10 특정 공사의 사전 신고 대상 공사

1	연면적이 300㎡ 이상인 건축물의 건축·해체 관련 공사
2	구조물의 용적합계가 500㎡ 이상 또는 면적합계가 500㎡ 이상인 토목건설공사
3	면적합계가 500㎡ 이상인 토공사·정지공사
4	총 연장이 100m 이상 또는 굴착 토사량의 합계가 100㎡ 이상인 굴착 공사
5	종합병원, 공공도서관, 학교, 공동주택 등의 부지 경계선으로부터 직선거리 50m 이내에서 시행되는 공사
6	도시계획법 제17조 제1항 1호의 규정에 의한 주거지역에서 시행되는 공사

3) 노동부 고시 04-17호

발파구간 인접 구조물에 대한 피해 및 손상을 예방하기 위해서 다음 표 2.11에 의한 값을 준용한다.

표 2.11 노동부 고시 04-17호

건물분류	문화재	주택 아파트	상가 (급이 없는 상태)	철근 콘크리트 빌딩 및 상가
건물기초에서의 허용 진동치 (cm/sec)	0.2	0.5	1.0	1.0 ~ 4.0

※ 기존 구조물에 급이 있거나 노후 구조물 등에 대하여는 상기표의 기준을 실정에 따라 허용범위를 하향 조정하여야 한다.

4) 중앙환경분쟁조정위원회

중앙환경분쟁조정위원회에서는 진동에 의한 구조물 피해의 인과관계 판단을 위한 가이드라인으로서 표 2.12¹⁰⁾를 활용하고 있다.

10) (주)한국구조안전기술원, 진동으로 인한 건축물 피해 평가에 관한 연구, 환경부 중앙환경분쟁 조정위원회, p.118, 2004.04

표 2.12 진동과 건축물 피해의 인과관계 판단을 위한 가이드라인

진동구분	진동구분	분화제3	주택·상가			비고
			1등급4	2등급5	3등급6	
1. 충격진동1 시의 인과관계 판단기준						
가.	진동강도(cm/s)	0.2이상	0.3이상	0.5이상	1.0이상	
나.	충격진동시의 영향 범위	70m이내	53m이내	37m이내	23m이내	폭약 1kg 사용시
2. 연속진동2 시의 인과관계 판단기준						
가.	진동강도cm/s	0.7이상	0.1이상	0.17이상	0.33이상	독일 : 0.17 일본 : 0.16
나.	진동해머 (대형)	50m이내	45m이내	41m이내	321m이내	Lo=98dB (0.79cm/s)
	굴착기 (0.7m)	31m이내	26m이내	22m이내	15m이내	Lo=91dB (1.00cm/s)
	브레이크 (유압식)	13m이내	10m이내	7m이내	4m이내	Lo=83.5dB (0.38cm/s)
*연속진동 허용치는 충격진동 허용치의 1/3 적용						
1 충격진동 : 화약을 써서 밭파작업을 하는 경우의 진동						
2 연속진동 : 향타기, 향밭기, 파쇄기, 브레이크, 착암기, 백호, 도저, 굴착기 등을 사용하여 작업을 하는 경우의 진동						
3 분화제 : 역사적으로 매우 오래된 건물						
4 1등급 : 건축 후 15년 이상의 노후 건물						
5 2등급 : 건축 후 5년 이상이며, 작은 균열을 지닌 건물						
6 3등급 : 건축 후 5년 미만이며, 균열이 없는 새 건물(참근콘크리트 건물 포함)						
7 (공식) $V = 100 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.46}$						
V : 진동치(Kine), W : 폭약량(kg), D : 폭원으로부터의 거리						
8 (공식) $Y = L_o - 10 \log R - AR$						
Lo : 1m에서의 진동레벨, A : 감쇄지수, R : 지점까지의 거리(m)						
9 (공식) $Y = 20 \log V + 91 (8 \text{ Hz} \leq F)$						
V : 진동속도(cm/s), Y : 진동레벨(dB(V))						

(2) 국외 기준

1) 독일

독일에서는 1938년부터 체계적인 연구를 시작한 이래, 구조물에 대한 진동기준을 실증적이고 체계적으로 정리한 DIN 4150(Structural Vibration in Building)이 제정되었다.

DIN 4150은 지반측정에 대한 고려는 미흡하나, part 3에서 진동피해와 관련하여 구조물을 각 형식별로 구분하고 기초 레벨과 최상층 레벨에서 측정된 속도 값에 대하여 공진이나 피로를 배제한 조건에서의 기준을 제시하고 있다.

표 2.13 독일의 구조물 진동기준 DIN 4150 (1970년)

등 급	I	II	III	IV
건축물 형 태	문화재 등 (역사적으로 매우 오래된 건축물)	주택, 아파트, 상가 (작은 단열을 지닌 건축물)	주택, 아파트, 상가 (단열이 없는 양호한 건축물)	산업시설용 공장 (철근콘크리트로 보장된 건축물)
진동속도 (cm/s)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0

※ 충격진동에 관한 규정이며, 연속진동인 경우는 기준값의 1/3로 한다.

표 2.14 독일의 Vornorm DIN 4150 Teil 3 (1975년)

등 급	I	II	III
건축물 형 태	주거용 건축물 : 공동주택, 연립주택	큰 강성을 갖고 있는 건축물	등급 I, II와는 다른 취약한 건축물
진동속도 (cm/s)	≤ 0.8	≤ 3.0	≤ 4.0

※ 대략 1~80Hz 부근에서의 허용진동 속도이며 때로는 315Hz까지 가능하다.

표 2.13, 표 2.14 각각은 1970년 제정된 DIN 4150이며, 1986년 개정본에서는 진동의 종류

및 주파수 영역대 등의 개념을 도입하여 보다 세분화된 최대진동속도를 표 2.15, 표 2.16과 같이 제한하고 있다.

표 2.15 1986년 개정본 DIN 4150 - part3(short-term structural vibration)

건축물 등 급	건축물 형 식	주파수별 허용진동속도 VR (cm/sec)				최상층 바닥면 진 주파수 영역
		구조물 전체			기 초	
		구조물의 반응주파수대				
		10Hz 이하	10~ 50Hz	50~ 100Hz		
I	상업 또는 산업용 건물 및 이와 유사한 형식의 건축물	2.0	2.0~4.0	4.0~5.0	4.0	
II	주거용 건축물(연립주택, 단독주택, 아파트) 및 부속 건축물과 활용면에서 이와 유사한 건축물	0.5	0.5~1.5	1.5~2.0	1.5	
III	진동에 예민한 구조물, 특별한 보존 가치가 있는 건축물(문화재 등)	0.3	0.3~0.8	0.8~1.0	0.8	

※ 100Hz 이상의 진동에서는 100Hz에 준한 값을 기준값으로 한다.

- 1 : 발생빈도에 있어 피로피해(fatigue), 또는 발생시간 간격(interval)측면에서 공진현상(resonance)을 일으킬 우려가 없는 진동을 말한다.
- 2 : 직교 3축 방향(수평 : x,y, 수직 : z)의 성분을 동시에 측정된 성과 중에서 성분구별 없이 가장 큰 방법을 택한다. 수평성분의 어느 하나(x 또는 y)는 건물 외곽선과 평행한 방향을 택한다.
- 3 : 측정점은 지하층 최외측 벽체를 기준으로 하고, 벽체 하단의 기초나 벽체 내부 또는 벽체의 우묵한 곳을 택한다. 지하실이 없는 경우는 건축물 외곽 벽체의 지면에 가까운 하단부를 기준으로 하되, 지표면에서 50cm 이상 떨어지지 않은 지점을 선정하여야 한다.

11) (주)한국구조안전기술원, 진동으로 인한 건축물 피해 평가에 관한 연구, 환경부 중앙환경분쟁조정위원회, pp.100~101, 2004.04

표 2.16 1986년 개정본 DIN 4150 - part3(steady-state vibration)

종 별	진 동 속 도	
	구조물 전체	바닥슬래브
	수평 성분 *1	처짐방향 성분
1 종	0.5cm/s (0.2 inch/s) *2	1.0cm/s (0.39 inch/s)
2 종	0.5cm/s (0.2 inch/s) *2	
3 종	데이터 없음 *3	

※ 1 : 최상층에서의 연속 수평진동.

2 : 기준치는 안전치 개념의 값으로 이를 초과한다고 해서 반드시 피해가 발생함을 의미하는 것은 아님

3 : 통계조사자료가 없음을 의미함

2) 일본

일본은 각 현마다 그 기준치가 다르나, 일반적으로 인구가 밀집한 지역에서는 발파진동 값이 0.2cm/s를 넘지 못하도록 규제하고 있으며, 특히 야간에는 그 규제치를 더욱 엄격하게 적용하고 있다.

전반적으로, 일본의 기준은 건축물에 대한 피해보다는 인체피해를 대상으로 한 규제이므로 매우 엄격한 경향을 보이고 있다.

표 2.17과 표 2.18¹²⁾은 일본 두 지역에서의 진동속도 허용치에 대한 예를 나타낸 것이고, 사용 척도 상에 다소의 혼선이 있는 것을 확인할 수 있다.

표 2.19는 특정 건설작업의 진동 권고기준으로서, dB(V)의 척도를 사용하여 인체감응과 관련한 규제를 시행하고 있다.

12) (주)한국구조안전기술원, 진동으로 인한 건축물 피해 평가에 관한 연구, 환경부 중앙환경분쟁조정위원회, pp.102 ~ 103, 2004.04

표 2.17 Osaka 지역의 진동허용 수준

지역 구분	주간 (cm/s)		야간 (cm/s)	
	공업	7-22시	0.15	22-7시
상업, 준공업	7-22시	0.15	22-7시	0.05
주거	8-20시	0.15	20-8시	0.03
공장적지	7-22시	0.15	22-7시	0.05
기 타	8-20시	0.15	20-8시	0.03

표 2.18 Shinnaisenken 지역의 진동허용 수준

지역 구분	주간 8-18시	야간 6-8시, 18-23시	심야 23-6시
주거전용	0.03	0.00	0.00
주 거	0.03	0.03	0.00
상업, 준공업	0.09	0.06	0.00
공 업	0.12	0.09	0.03
공업전용	0.12	0.12	0.09
기 타	0.06	0.03	0.00

표 2.19 특정 건설작업의 진동권고기준(일본)

진동레벨	작업시간		1일 작업시간		최대작업 일수	일요일, 공휴일 작업
	제1호구역	제2호구역	제1호구역	제2호구역		
75dB(V)	오후7시 - 오전7시 작업금지	오후10시 - 오전6시 작업금지	10시간 이하	14시간 이하	연속 6일 초과 못함	금지

- ※ 1. 진동의 크기는 특정작업장소의 부지경계선에서 측정된 값이다.
 2. 진동측정방법은 JIS C1510에 의한다.
 3. 지역구분은 아래와 같다.
 - 제1호구역은 도시계획법상 용도지역구분으로서 제1종 주거전용지역, 제2종 주거전용지역, 주거지역, 근린상업, 상업, 준공업지역으로서 상당수의 주거가 집합된 구역, 학교·병원 등으로부터 주위 80m 에 해당지역이다.

- 제2호 구역은 제1호 구역이의 지정 구역이다.
- 4. 75dB(V)를 초과하는 특정건설작업에 있어서는 개선권고명령을 행사한다.
- 5. 재해발생 지역일 때는 적용에서 제외한다.

※ 비 고

1. 데시벨이란 계량법(1992년 법률 제51호) 별표 2에 규정하는 진동가속도레벨의 계량단위를 말한다.
2. 진동의 측정은 계량법 제71조의 조건에 합격한 진동레벨계를 사용하여 연직방향으로 시행한다. 이 경우 감각보정회로는 연직진동측성을 이용하는 것으로 한다.
3. 진동 피크업의 설치 장소는 아래와 같이 한다.
 - 가. 완충물이 없고 또한 충분한 다짐 등이 시행된 단단한 장소
 - 나. 경사 및 요철이 없는 수평면을 확보할 수 있는 장소
 - 다. 온도, 전기, 자기 등의 외부조건의 영향을 받지 않는 장소

3) 미국

미국의 경우 발파진동에 대한 연구가 주로 미광무국(USBM)을 중심으로 이루어졌는데, 1971년 미광무국에서 자체 연구결과와 함께 여러 다른 연구자들의 연구 결과를 통계적 방법을 도입하여 해석하였으며, 건축물 피해와 관련하여 최대 진동속도 5.0cm/s는 안전한계(damage criterion), 13.8cm/s는 경미한 한계(minor damage), 19.4cm/s는 상당한 한계(major damage)로 정의하였다. 1980년에 Siskind 등에 의한 보고서에서는 진동 속도에 대한 주파수의 영향을 고려하여, 40Hz 이상의 진동수를 갖는 발파진동에 대해서는 5.0cm/s를 허용치로 적용할 수 있으나, 40Hz 이하의 주파수를 갖는 발파진동에 대해서는 1.2cm/s로 낮추어야 할 것으로 제안하였다.

상기 결과에 근거하여 USBM에서 제안된 주거용 구조물에 대한 발파진동의 안전 수준은 최대진동속도 1.2cm/s에서 5.0cm/s 이다. 주택에 전달되는 진동은 주파수와 구조물 형식에 영향을 받으며, 특히 연역지반에

낮은 주파수의 진동이 작용할 경우 그 영향이 큰 것으로 지적하였다.

한편, USBM에서 제안된 기준은 주로 단층 목조주택을 대상으로 한 결과로서 외벽의 회벽 모르터 등에서 발생하는 결함을 기준으로 평가하였다.

USBM에서의 발파 피해수준에 대한 기준은 그림 2.10¹³⁾과 같다.

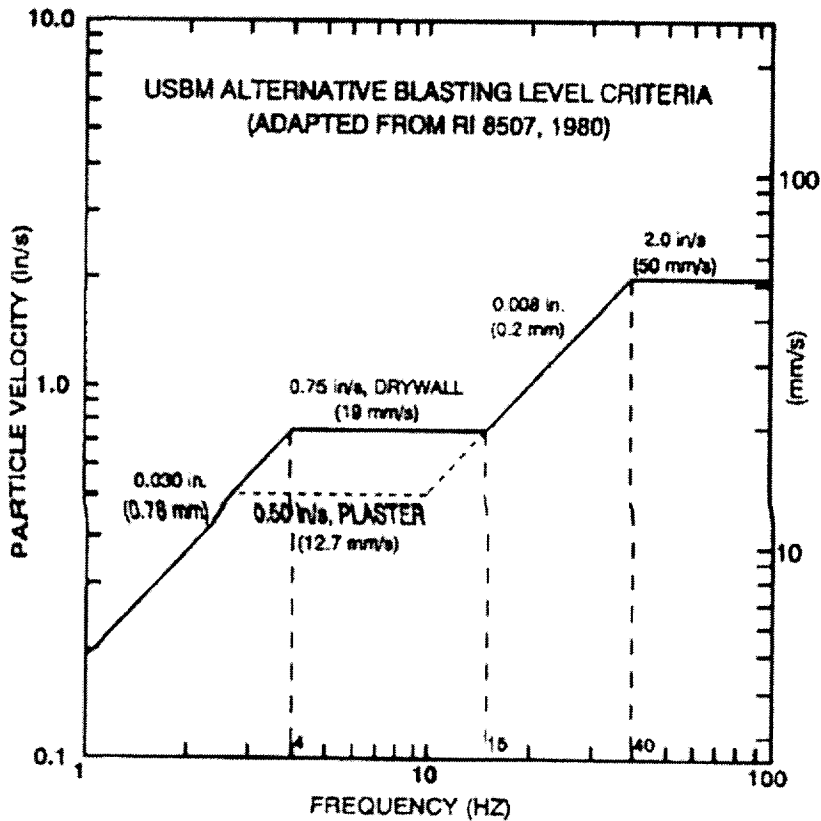


그림 2.10 USBM 발파 피해수준에 대한 기준

13) (주)한국구조안전기술원, 진동으로 인한 건축물 피해 평가에 관한 연구, 환경부 중앙환경분쟁 조정위원회, p.104, 2004.04

4) 스웨덴

스웨덴 표준은 건축물에 영향을 주는 발파진동의 수준을 결정하기 위한 것으로 세 성분의 진동속도 값을 계측하여야 하며, 건물의 기초지반에서 계측하도록 규정하고 있다. 이 기준은 1989년에 승인되고, 1991년 한차례의 개정을 거쳤다.

기준값 v 는 다음 식과 같이 규정한다.

$$v = v_0 \times F_k \times F_d \times F_t \quad (\text{식 2.4})$$

여기서, $F_k = F_b \times F_m$ 로 하며, 표 2.20과 그림 2.11에 의해 결정된다.

표 2.20 기준값 및 계수

분 류	등급	내 용	기준값/계수
진동속도 v_0	1	점토, 사갈층	1.8(cm/s)
	2	화석, 슬레이트, 연약한 석회석	3.5(cm/s)
	3	강한 석회석, 사암, 편마암, 화강암, 현무암	7.0(cm/s)
건축물 계수 F_b	1	중량급 건축물	1.70
	2	산업, 상업 건물	1.20
	3	표준 주거 건물	1.00
	4	교회, 박물관 등 예민한 건물	0.65
	5	피해를 받기 쉬운 상태의 역사적 건축물	0.50
건축재 계수 F_m	1	보강 철근 콘크리트	1.20
	2	콘크리트, 벽돌	1.00
	3	경량골재 콘크리트	0.75
	4	인조 석재 벽돌	0.65
공사기간 계수 F_t	1	터널 지하공동, 도로 굴착 등 긴질	1.00
	2	채석, 광산 작업	0.75-1.00

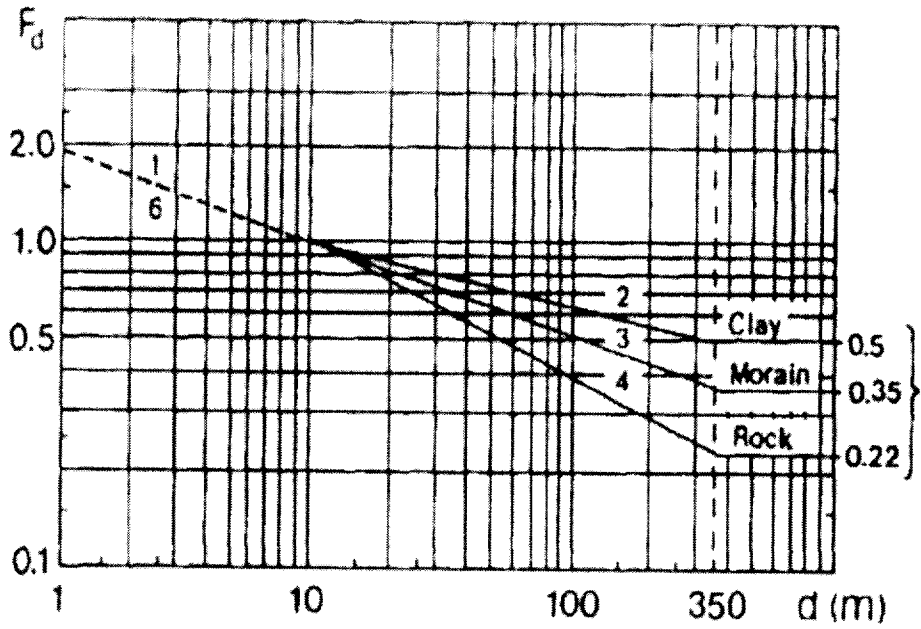


그림 2.11 거리 계수 F_d

스웨덴 기준은 (식 2.4)¹¹⁾와 같이 건물의 크기 및 구조형식, 지반형식, 지반조건과 함께, 발파가 진행되는 공사종류, 발파시점과 측정부위까지의 거리 등 매우 다양한 사항을 변수로 하여 정해졌다고 할 수 있다.

11) (주)한국구조안전기술원, 진동으로 인한 건축물 피해 평가에 관한 연구, 환경부 중앙환경분쟁 조정위원회, pp.105 ~ 106, 2004.01

3. 진동 및 소음 측정 결과 분석

3.1 현장 개요 및 측정방법

3.1.1 측정 현장

부산광역시 강서구 신호동 소재 A공동주택 현장을 주 대상으로 하여 공동주택 부분의 강관파일($\varnothing 609\text{mm} \times 1530\text{공}$) 기초와 상가부분의 PHC파일 기초 및 지하주차장부분의 기초지반 개량 공사인 지반 동다짐 공사에서 진동 및 소음을 측정하였다.

측정대상 현장의 조감도 및 위치도는 그림 3.1 및 3.2와 같다.

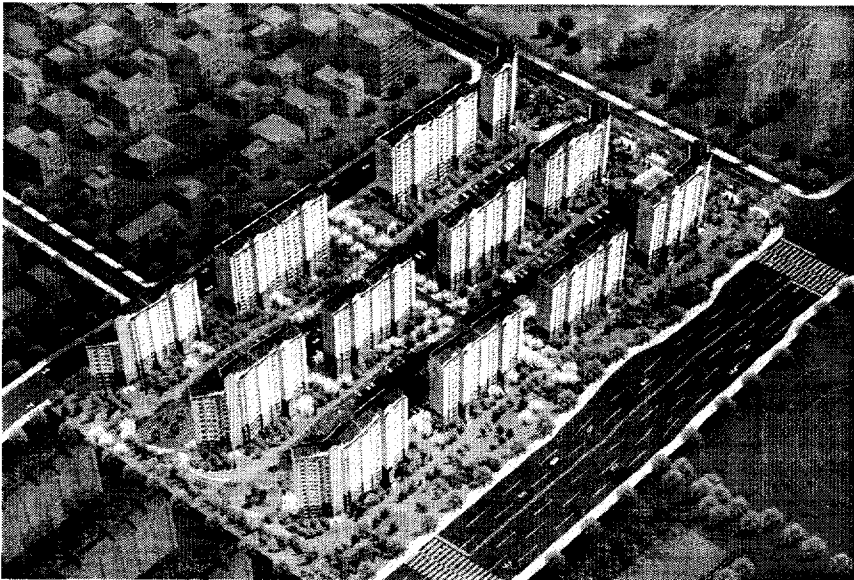


그림 3.1 측정대상 현장 조감도

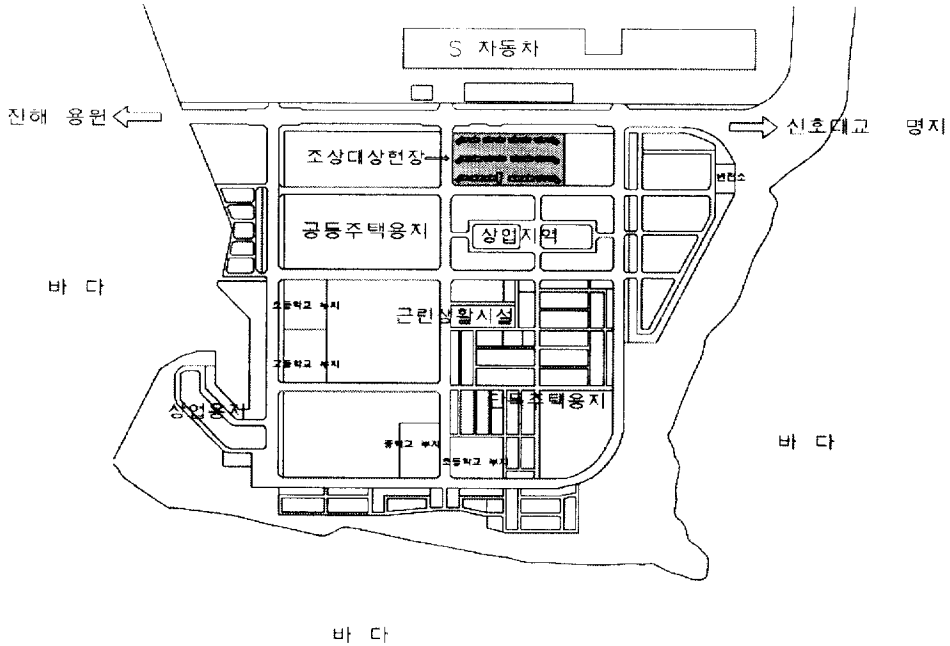


그림 3.2 측정대상 현장 위치도

3.1.2 지반상태

본 현장의 지층발달상태는 지표로부터 매립층, 퇴적층 및 풍화대 등의 순으로 나타났으며, BH-103과 BH-109 지점은 2.0m 정도를 굴착한 상태에서 조사를 실시하였다.

본 현장의 측정대상 부지 횡단면도 및 지층 단면도는 그림 3.3 및 그림 3.4와 같으며, 지층별 특성을 간단히 요약하면 다음과 같다.

1) 매립층

본 층은 지표에서 0.9m~2.2m 정도의 두께로 황갈색을 띠는 모래질 자갈로 구성되어 있으며, N치는 11회/30cm 정도로서 보통 조밀한 상태이다.

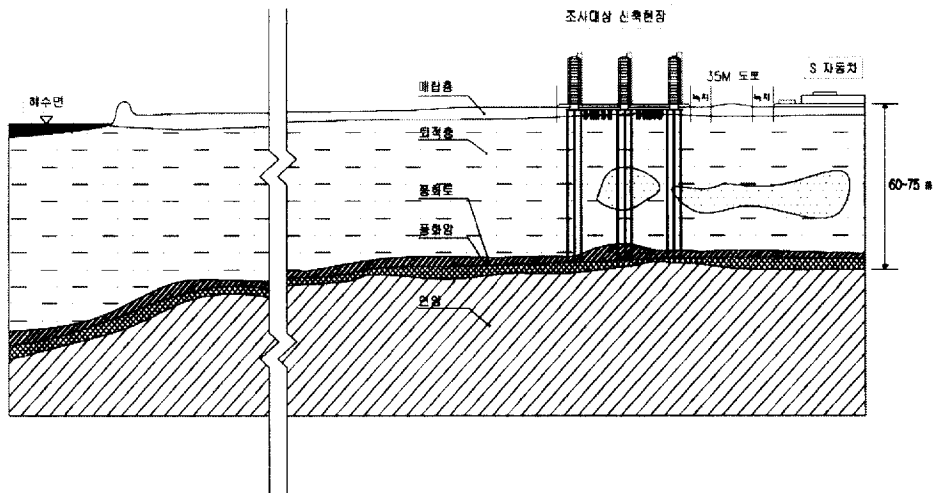


그림 3.3 측정대상 부지 횡단면도

2) 퇴적층

퇴적층의 발달상태는 상부로부터 상부 사질토, 상부 점성토, 중간 사질토, 하부 점성토, 하부 사질토 및 모래질 자갈 등의 순서로 나타났다.

가. 상부 사질토층

본 층은 12.1~13.6m 정도의 두께로 암회색을 띠는 실트질 모래로 구성되어 있으며, N치는 0회~20회/30cm 정도로서 매우 느슨 내지 보통 조밀한 상태이다. BH-103 및 BH-107 지점은 이 층 사이에 1.3~2.8m 정도 두께의 점토층이 협재되어 있다.

나. 상부 점성토층

본 층은 심도 13.0~15.8m부터 25.0~28.0m 정도의 두께로 암회색을 띠는 실트질 점토로 구성되어 있으며, N치는 1회~12회/30cm 정도로서 매우 연약 내지 견고한 상태이다.

다. 중간 사질토층

본 층은 심도 38.0~43.6m부터 6.3~7.7m 정도의 두께로 암회색의 실트질 모래 내지 점토질 모래로 분포되고 있으며, N치는 12회~43회/30cm 정도로서 보통 조밀 내지 조밀한 상태이다. BH-103 지점은 이 층 사이에 4.2m 정도 두께의 실트질 점토층이 협재되어 있다.

라. 하부 점성토층

본 층은 심도 44.3~51.3m부터 8.3~13.0m 정도의 두께로 암회색을 띠는 실트질 점토로 분포하고 있으며 N치는 10회~13회/30cm 정도로서 견고한 상태이다.

마. 하부 사질토층

본 층은 심도 56.8~57.8m부터 BH-103 및 BH-107 지점에서 3.7m 정도의 두께로 암회색을 띠는 실트질 모래가 분포하고 있으며, N치는 28회~50회/30cm 정도로서 보통 조밀 내지 매우 조밀한 상태이다. BH-103 지점은 이 층 하부에 2.6m 정도의 두께로 암회색을 띠는 견고한 상태의 실트질 점토가 분포하는 것으로 나타났다.

바. 모래질 자갈층

본 층은 심도 57.3~63.1m부터 7.2m 정도의 두께로 발달하며, 담청색 내지 회갈색을 띠는 모래질 자갈로 분포하고 있다. N치는 50회/19cm~1cm 정도로 매우 조밀한 상태이며, BH 107 지점의 심도 67.1~68.7m 지점은 회갈색을 띠는 모래섞인 점토질 자갈로 구성되어 있다.

3) 풍화대

본 층은 BH 107 지점에서만 확인되었으며, 심도 68.7m부터 회녹색을

씨는 모래질 실트로 분포하고 있다. N치는 29회/30cm 정도로서 매우 견고한 상태이다.

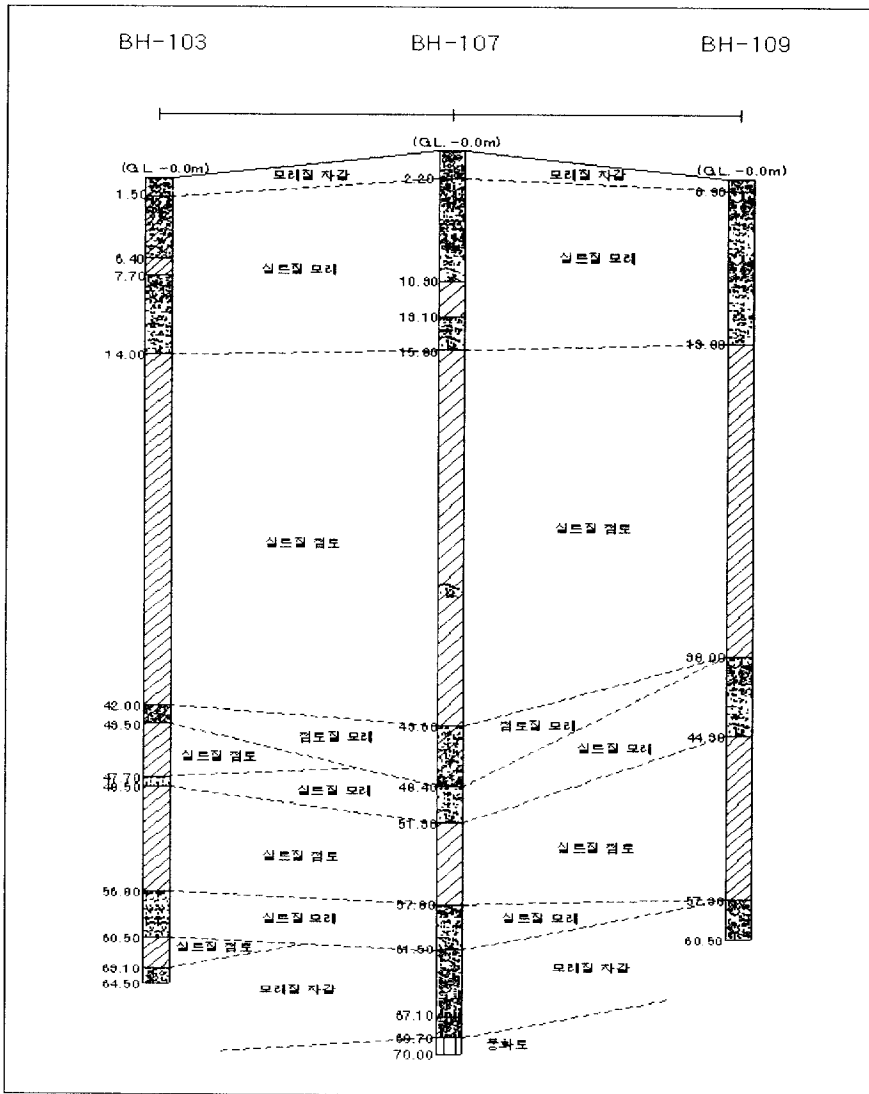


그림 3.4 측정 부지의 지층단면도

3.1.3 진동·소음 측정 방법

(1) 진동·소음 측정위치 및 측정기기

1) 진동·소음 측정위치

파일항타 및 동다짐시 충격에너지에 의하여 발생하는 진동파가 인접한 구조물이나 인근지역내의 시설물에 미치는 영향을 파악하기 위하여 진동 및 소음을 측정하였다. 각 기초공법별 진동 및 소음의 측정위치는 그림 3.5와 같다.

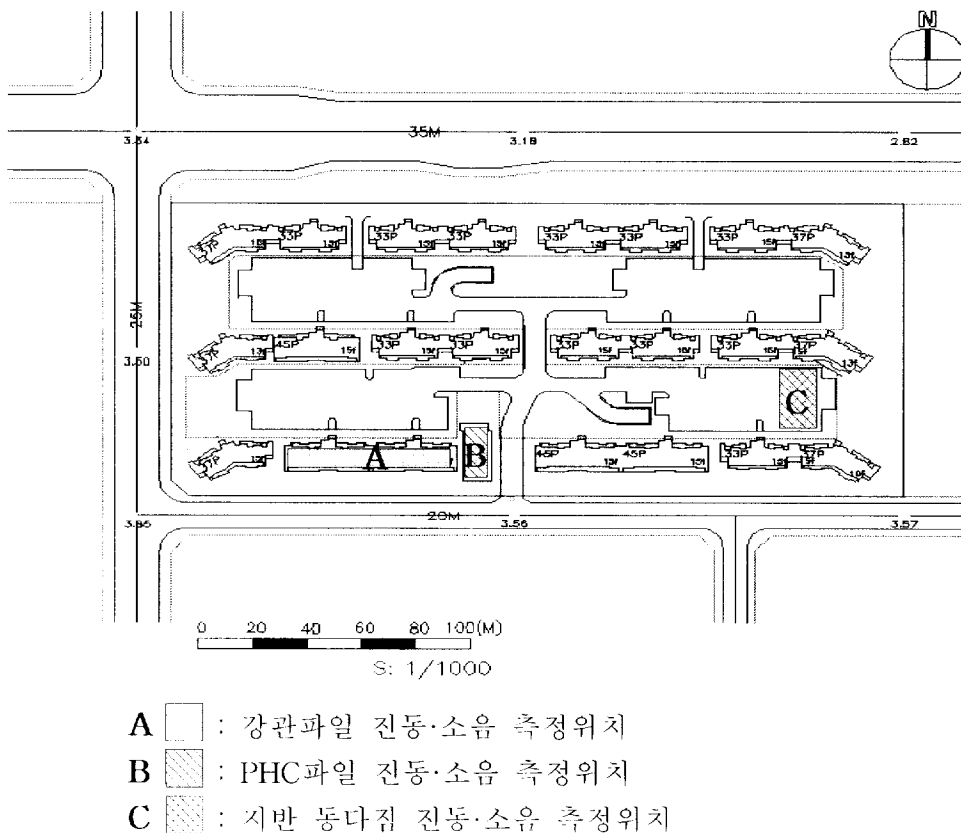


그림 3.5 진동 및 소음 측정위치

2) 진동·소음 측정기기

본 연구에 사용된 진동 및 소음 측정 장비는 진동과 소음을 동시에 측정할 수 있는 캐나다 INSTANTEL 社의 Blast Mate II DS-477 로 그 특성은 그림 3.6 및 표 3.1과 같다.



그림 3.6 측정기기

표 3.1 측정장비의 제원

항 목	특 성
Maximum Range	254mm/s (Particle Velocity)
Trigger Levels	0.125 ~ 254 mm/s steps of 0.01mm/s
Peak Acceleration	0.01 ~ 31g
Peak Displacement	0.00025 ~ 3.75cm
Frequency Analysis	Frequency at Peak plus USBM/OSMRE and DIN 4150 Field Frequency Analysis
Frequency Response	Seismic and Linear Air 1.5 ~ 250Hz
Microphone Maximum Range	130 dB

(2) 강관파일 항타의 경우

1) 측정 방법

타격지점으로부터의 거리(10m 간격)와 관입깊이(10m 간격)에 따라 측정을 실시하였다.

2) 측정일시 및 기상조건

2004년 06월 30일, 평균기온 22.9℃, 평균풍속 0.95m/s, 평균습도 71%

3) 진동 및 소음 측정 장소 : 103동 52~56번 파일

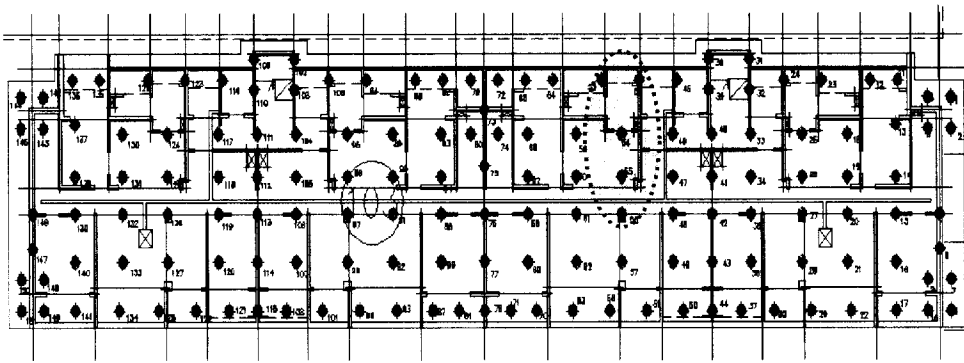


그림 3.7 강관파일 배치도

4) 항타 장비 및 말뚝의 제원

표 3.2 강관파일 항타 장비 및 말뚝 제원

형식	구동방식	램중량	타격에너지 (최고)	타격수	적용파일 지름	타격 방향
DKH 713	자유낙하방식	10ton	12.0 ton · m	38~65	Steel Pipe D609, 12t	연직

(3) PHC파일 항타의 경우

1) 측정 방법

타격지점으로부터의 거리(10m 간격)와 관입깊이(10m 간격)에 따라 측정을 실시하였다.

2) 측정일시 및 기상조건

2004년 10월 09일, 평균기온 19.5℃, 평균풍속 0.2m/s, 평균습도 64%

3) 진동 및 소음 측정 장소 : 119동 1~5번 파일

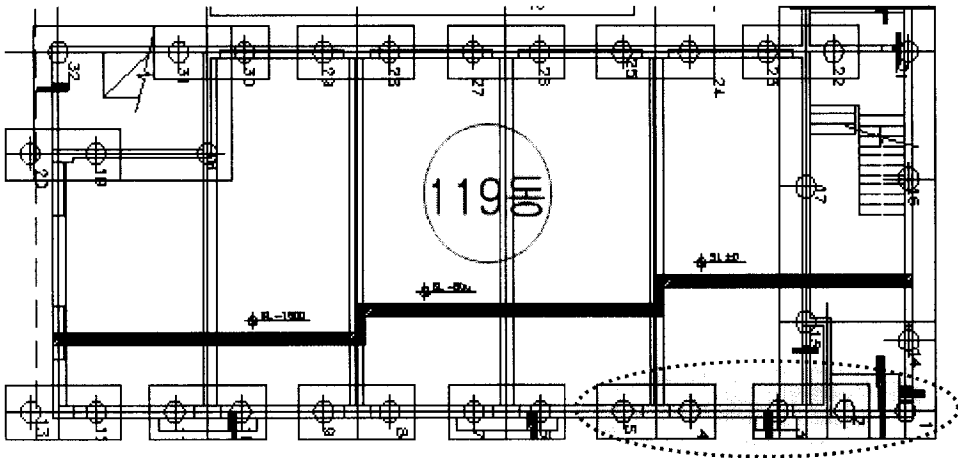


그림 3.8 PHC 파일 배치도

4) 항타 장비 및 말뚝의 제원

표 3.3 PHC파일 항타 장비 및 말뚝 제원

형식	구동방식	램중량	타격에너지 (최고)	타격수	적용파일 지름	타격 방향
DKH 713	자유낙하방식	10 ton	12.0 ton · m	38~65	PHC φ600, 90t	연직

(4) 지반 동다짐의 경우

1) 측정 방법

타격지점으로부터의 거리(10m 간격)에 따라 최대입자속도(Peak Particle Velocity)를 측정하였다. 본 현장의 진동 및 소음 측정은 아래 그림 3.9와 같이 진동원으로부터의 거리에 따른 방향별 진동성분의 특성 변화를 볼 수 있도록 측정되었다. 특히 측정시에는 3-D Geophone 및 Microphone을 사용하여 1회 측정시마다 3방향 (X, Y, Z)의 진동과 소음을 동시에 측정하였다. 진동측정의 순서는 다음과 같다.

- ① 동다짐 전용장비 및 Hammer를 일정위치에 정치시킨다.
- ② 진동측정용 Geophone 및 Microphone을 초기위치 X_1 에 설치한다.
- ③ 동다짐 Hammer를 낙하시켜 진동을 발생시키고 Geophone과 Microphone을 이용하여 진동 및 소음을 측정한다.
- ④ Geophone 및 Microphone을 다음 위치 X_2 에 이동시키고 ③의 과정을 반복한다.
- ⑤ 마지막 위치 X_n 까지 ③의 과정을 반복한다.

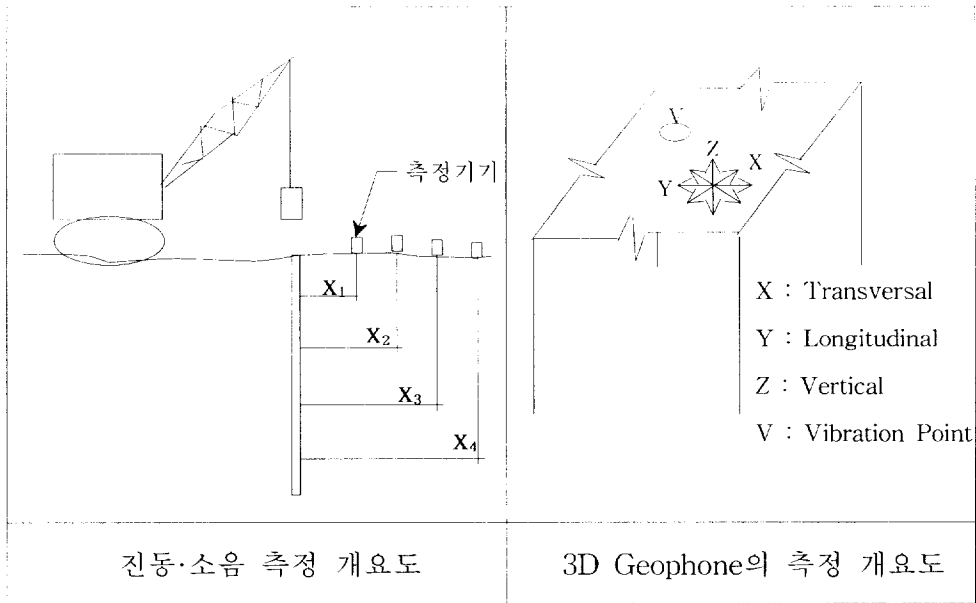


그림 3.9 진동·소음 측정 방법

2) 측정일시 및 기상조건

2004년 02월 02일, 평균기온 5.5℃, 평균풍속 3.02m/s, 평균습도 40%

3) 진동 및 소음 측정 장소 : 그림 3.5 진동 및 소음 측정 구간 참조

4) 동다짐 작업장비

표 3.4 동다짐 작업장비

NO	장비명	용량	수량	비고
1	LIEBHERR CRANE	80 ton	1대	Dynamic 전용장비
2	POUNDER MASS	15 ton	1조	
3	DROP HEIGHT	10~15m	1대	

3.2 기초파일 공법별 진동·소음 측정 결과

3.2.1 강관파일 공법

강관파일 항타시 발생하는 진동 및 소음에 대하여 이격거리에 따라 측정하였으며, 그 결과는 표 3.5~3.9 및 그림 3.10~3.19와 같다.

(1) 이격거리별 진동·소음 측정 결과

1) 이격거리 10m에서의 진동 및 소음 측정 결과

이격거리 10m에 대한 측정결과는 표 3.5, 그림 3.10 및 그림 3.11과 같다.

표 3.5 이격거리 10m에서의 진동 및 소음 측정 결과

관입깊이	측정값	
	진동(cm/s)	소음(dB)
10m	0.633	101.80
20m	0.554	102.20
30m	0.518	101.40
40m	0.562	103.60
50m	0.459	96.80
60m	0.416	98.40
64m	0.446	101.40

표3.5에서 보면 소음 값은 관입깊이별로 큰 차이를 보이지 않으나, 진동은 관입깊이가 깊어질수록 크기가 작아지고 있다.

이는 소음의 경우 파일의 두부에서 발생되기 때문에 관입 깊이에 따른 큰 차이가 없이 유사한 값을 보이나, 진동의 경우는 대부분 파일의 선단

부에서 발생하기 때문에 관입깊이가 증가 할수록 진동원으로부터 측정지점까지의 거리가 증가하기 때문에 감소하는 것으로 나타난다.

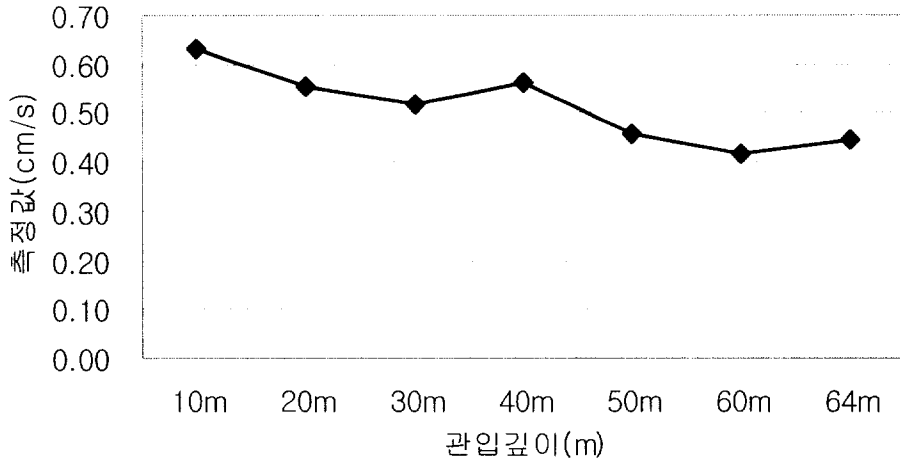


그림 3.10 이격거리 10m에서의 진동 측정 결과

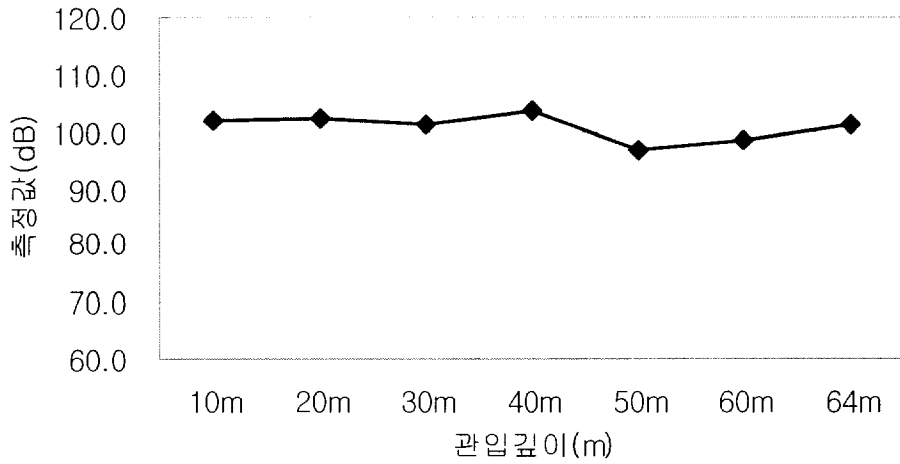


그림 3.11 이격거리 10m에서의 소음 측정 결과

2) 이격거리 20m에서의 진동 및 소음 측정 결과

이격거리 20m에 대한 측정결과는 표 3.6, 그림 3.12 및 그림 3.13과 같다.

표 3.6 이격거리 20m에서의 진동 및 소음 측정 결과

관입깊이	측정값	
	진동(cm/s)	소음(dB)
10m	0.217	95.20
20m	0.286	98.60
30m	0.214	96.20
40m	0.243	98.00
50m	0.275	91.80
60m	0.127	93.20
62m	0.140	96.20

표3.6에서 보면 소음 값은 앞에서와 같이 관입깊이에 따라 큰 차이를 보이지 않으며, 진동은 깊이에 따른 값이 지반여건상 일정치 않으나 전체적으로는 관입깊이에 따라 작아지고 있다.

이는 이격거리 10m에서와 경우와 같이 소음 및 진동발생의 특성에서 비롯되는 것으로 볼 수 있고, 진동 값이 일정하게 변하지 않는 것은 GL(-)50m지점의 모래층분포¹⁵⁾ 등 불균일한 퇴적층의 존재에 따라 응력파의 전달이 일정치 않기 때문인 것으로 추정된다.

15) 사단법인 대한토목학회 부산·울산·경남지회, 지하주차장 기초설계에 대한 검토의견서, 2003.12

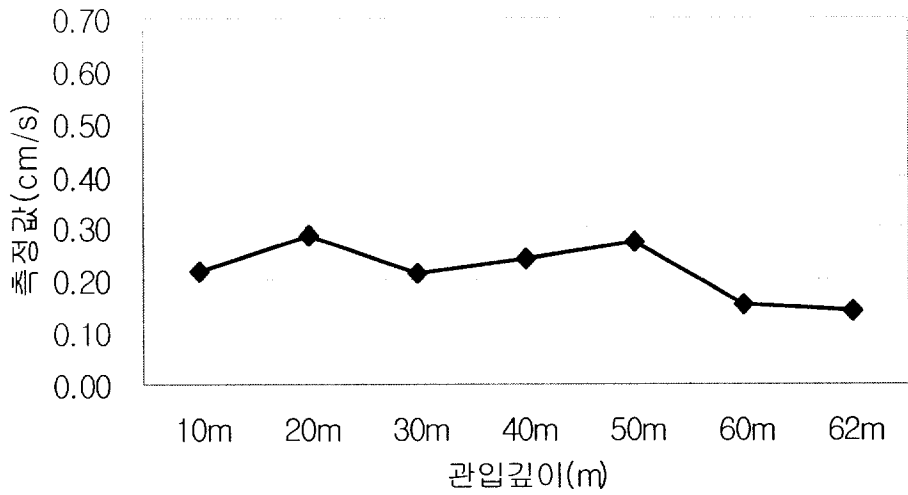


그림 3.12 이격거리 20m에서의 진동 측정 결과

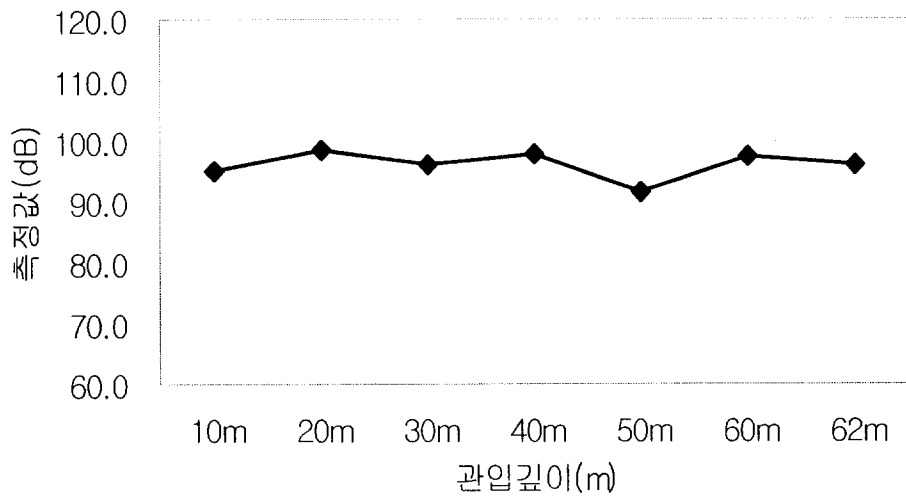


그림 3.13 이격거리 20m에서의 소음 측정 결과

3) 이격거리 30m에서의 진동 및 소음 측정 결과

이격거리 30m에 대한 측정결과는 표 3.7, 그림 3.14 및 그림 3.15와 같다.

표 3.7 이격거리 30m에서의 진동 및 소음 측정 결과

관입깊이	측정값	
	진동(cm/s)	소음(dB)
10m	0.119	95.40
20m	0.106	96.20
30m	0.124	94.20
40m	0.090	94.80
50m	0.091	86.40
60m	0.108	90.40
66m	0.098	93.60

이격거리 30m에서도 소음 및 진동값이 10~20m에서와 유사한 형태로 나타나고 있다.

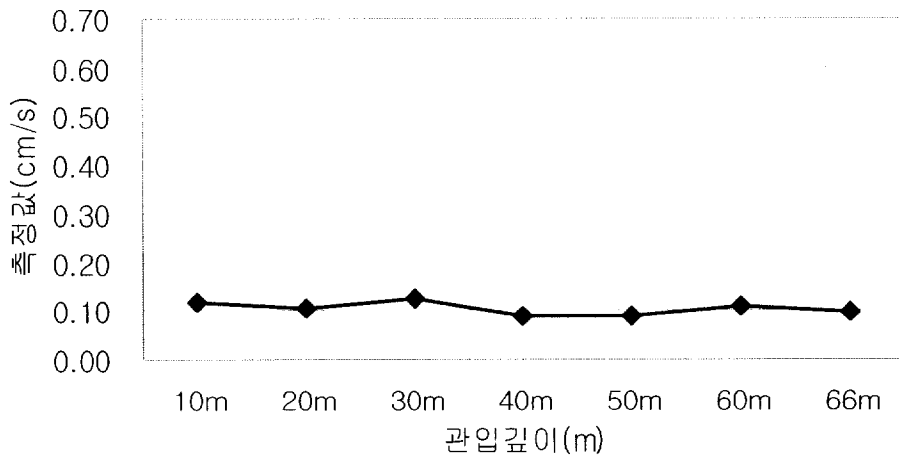


그림 3.14 이격거리 30m에서의 진동 측정 결과

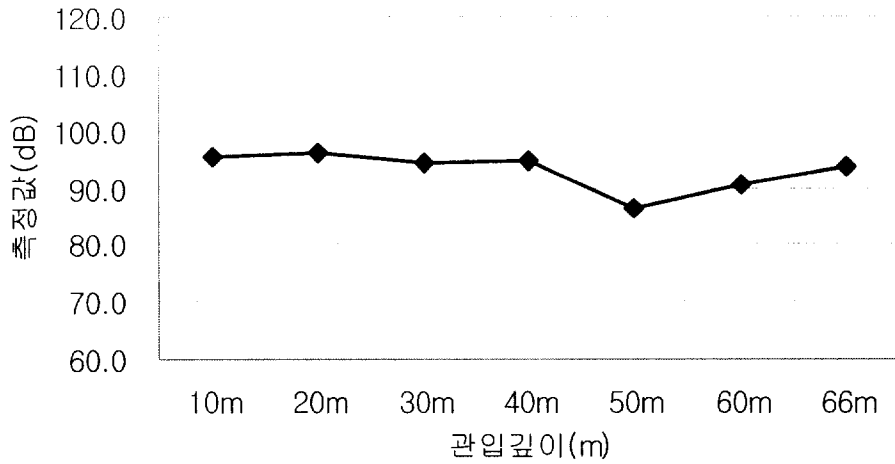


그림 3.15 이격거리 30m에서의 소음 측정 결과

4) 이격거리 50m에서의 진동 및 소음 측정 결과

이격거리 50m에 대한 측정결과는 표 3.8, 그림 3.16 및 그림 3.17과 같다.

표 3.8 이격거리 50m에서의 진동 및 소음 측정 결과

관입깊이	측정값	
	진동(cm/s)	소음(dB)
10m	0.130	84.40
20m	0.129	71.80
30m	0.144	74.40
40m	0.114	83.60
50m	0.098	79.60
60m	0.086	86.20
64m	0.052	82.80

이격거리 50m에서의 소음 및 진동값 변화는 10~40m에서와 유사하나, 소음값은 관입깊이별로 변화가 다소 심하게 나타나고 있다. 이것은 지층의 변화에 따른 차이로 보인다.

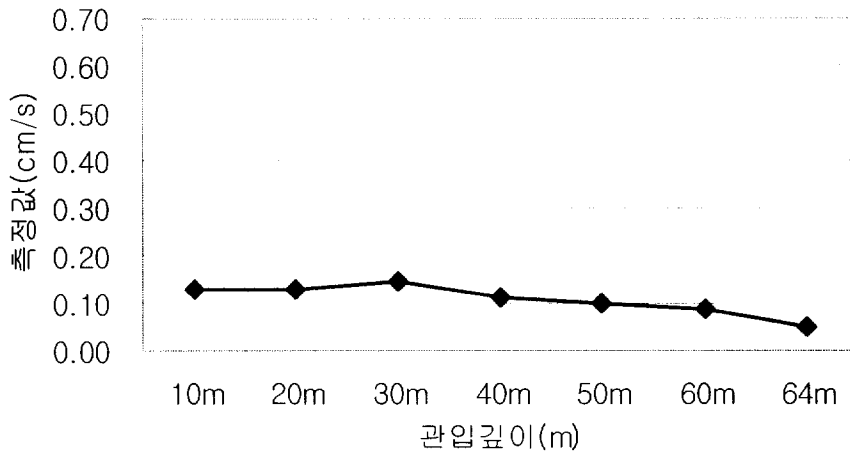


그림 3.16 이격거리 50m에서의 진동 측정 결과

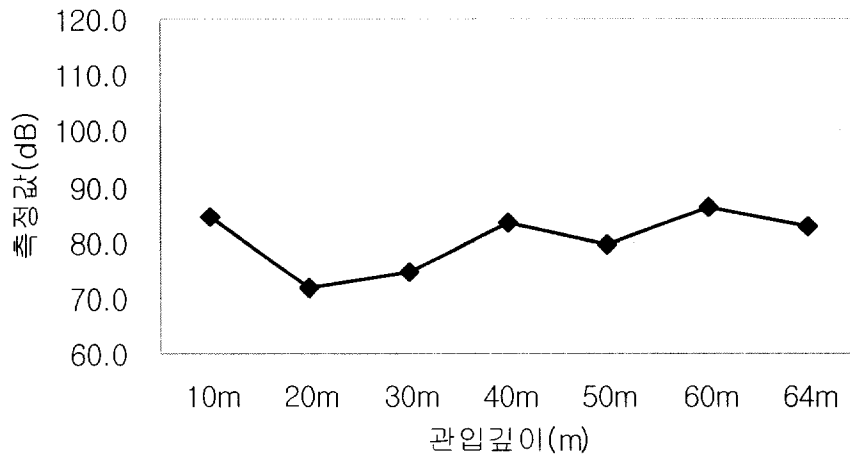


그림 3.17 이격거리 50m에서의 소음 측정 결과

5) 이격거리 100m에서의 진동 및 소음 측정 결과

이격거리 100m에 대한 진동 및 소음 측정결과는 표 3.9, 그림 3.18 및 그림 3.19와 같다.

표 3.9 이격거리 100m에서의 진동 및 소음 측정 결과

관입깊이	측정값	
	진동(cm/s)	소음(dB)
10m	0.113	78.20
20m	0.030	77.80
30m	0.041	79.80
40m	0.027	77.00
50m	0.041	73.40
60m	0.040	63.40
64m	0.030	75.80

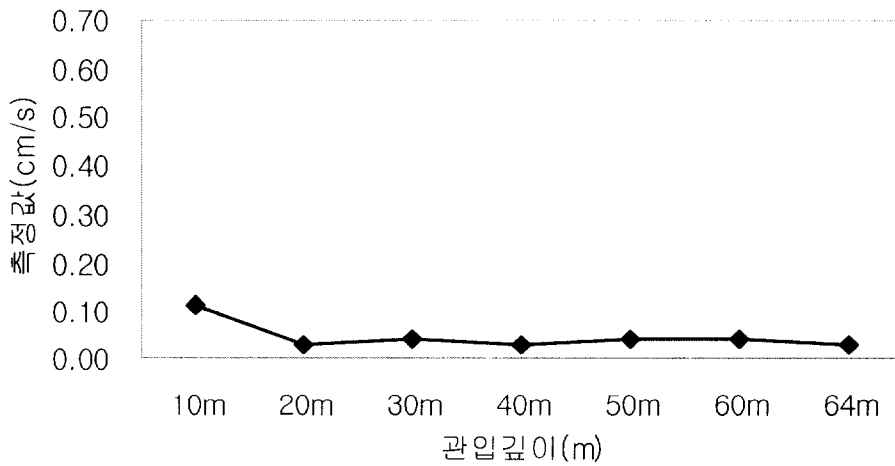


그림 3.18 이격거리 100m에서의 진동 측정 결과

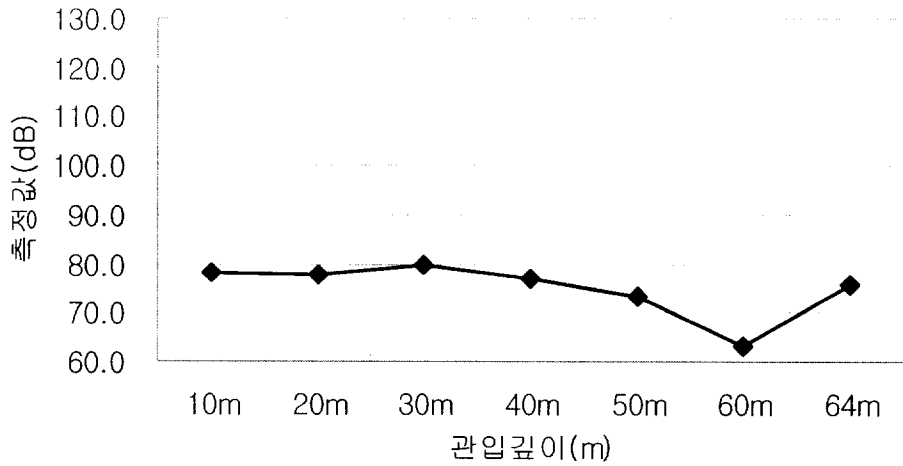


그림 3.19 이격거리 100m에서의 소음 측정 결과

여기서는 소음 및 진동 값이 모두 관입깊이별로 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이 경우는 이격거리가 점차 멀어짐에 따라 파일 선단부 및 두부로부터 측정지점까지의 전파거리 변화에 따른 차이에서 비롯되는 것으로 본다.

(2) 강관파일 진동·소음 측정 결과 종합

1) 진동 측정결과

강관파일 향타시 진동 측정결과를 종합하면 표 3.10 및 그림 3.20과 같다.

표 3.10 관입깊이에 따른 거리별 진동 측정 결과 (단위 : cm/s)

측정거리 관입깊이	10m	20m	30m	50m	100m
10m	0.633	0.217	0.119	0.130	0.113
20m	0.554	0.286	0.106	0.129	0.030
30m	0.518	0.214	0.124	0.144	0.041
40m	0.562	0.243	0.090	0.114	0.027
50m	0.459	0.275	0.091	0.098	0.041
60m	0.416	0.127	0.108	0.086	0.040
최종	0.446	0.140	0.098	0.052	0.030

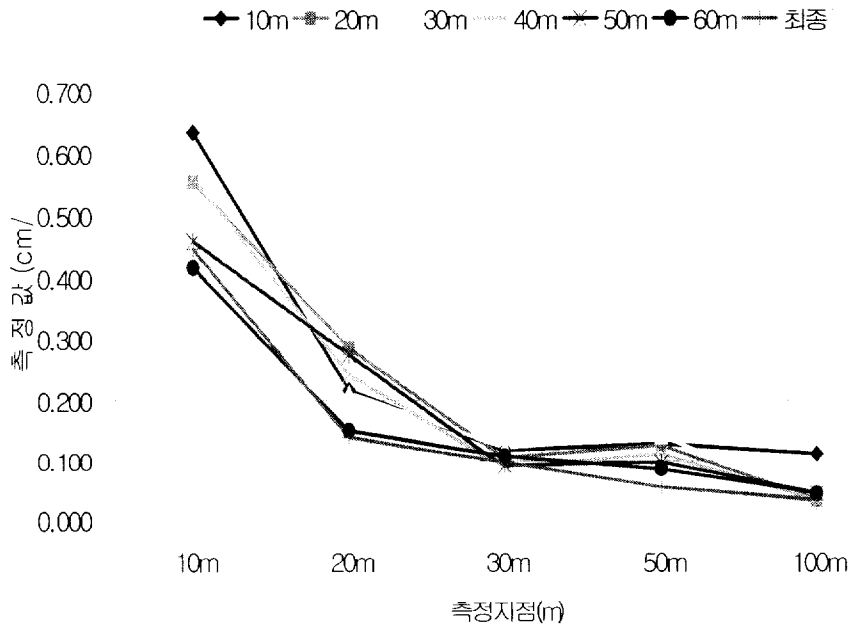


그림 3.20 관입깊이에 따른 거리별 진동 측정 결과

① 전체적으로 보면, 관입깊이에 따라 진동은 감소하는 것으로 나타나고 있다. 특히, 근거리인 10m의 경우 이러한 경향이 두드러진다. 이는 진동이 파일의 선단부로부터 전달되기 때문에 관입깊이가 증가할수록 진동원으로부터 측정지점까지의 거리가 증가하기 때문인 것으로 본다.

② 진동원으로부터 측정거리가 멀어질수록 곡선적으로 감소하고 있으며, 이는 거리감쇠효과에 의한 진동저감이 가능하다는 것을 나타낸다.

2) 소음 측정결과

강관파일 항타시 소음 측정결과를 종합하면 표 3.11 및 그림 3.21과 같다.

① 소음은 관입깊이에는 크게 영향을 받지 않으며, 이는 소음이 주로 파일의 두부에서 발생하기 때문으로 볼 수 있다.

② 측정거리에 따른 소음값은 진동과 마찬가지로 감소하고 있다. 따라서 거리감쇠효과에 의한 소음저감이 가능하다.

표 3.11 관입깊이에 따른 거리별 소음 측정 결과 (단위 : dB)

측정거리 깊이	10m	20m	30m	50m	100m
10m	101.80	95.20	95.40	84.40	78.20
20m	102.20	98.60	96.20	71.80	77.80
30m	101.40	96.20	94.20	74.40	79.80
40m	103.60	98.00	94.80	83.60	77.00
50m	96.80	91.80	86.40	79.60	73.40
60m	98.40	93.20	90.40	86.20	63.40
최종	101.40	96.20	93.60	82.80	75.80

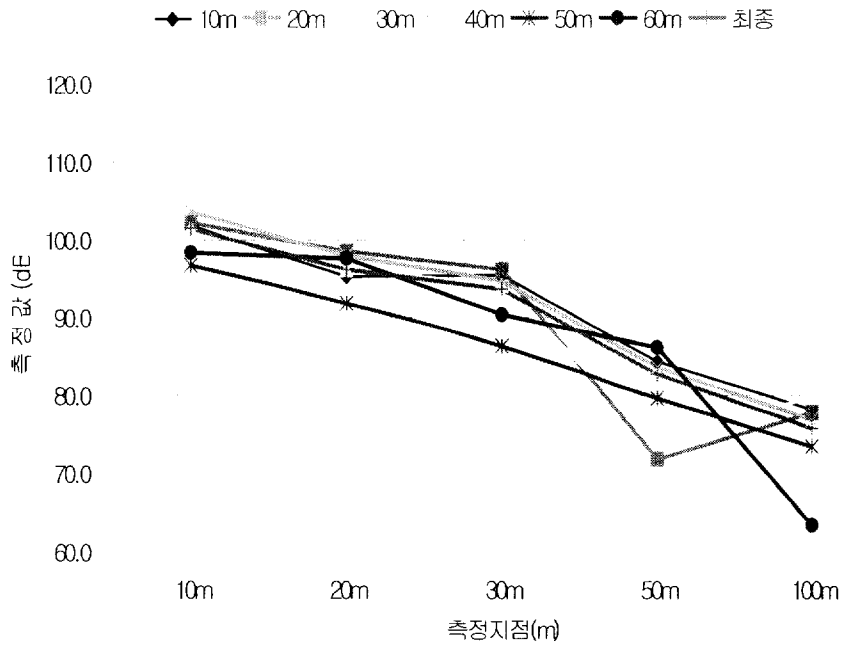


그림 3.21 관입깊이에 따른 거리별 소음 측정 결과

3.2.2 PHC파일 공법

PHC파일 항타시 발생하는 진동 및 소음에 대하여 이격거리에 따라 측정된 결과는 표 3.12~3.16 및 그림 3.23~3.30과 같다.

(1) 이격거리별 진동·소음 측정 결과

1) 이격거리 10m에서의 진동 및 소음 측정 결과

이격거리 10m에 대한 측정결과는 표 3.12, 그림 3.22 및 그림 3.23과 같다.

여기서 보면 강관파일과 동일하게 소음 값은 관입깊이별로 큰 차이를 보이지 않으나, 진동은 관입깊이가 깊어질수록 크기가 줄어들고 있다.

표 3.12 이격거리 10m에서의 진동 및 소음 측정 결과

관입깊이	측정값	
	진동(cm/s)	소음(dB)
10m	1.751	115.00
20m	0.991	121.00
30m	0.627	118.00
40m	0.643	116.00
50m	0.610	123.00
64m	0.416	117.00

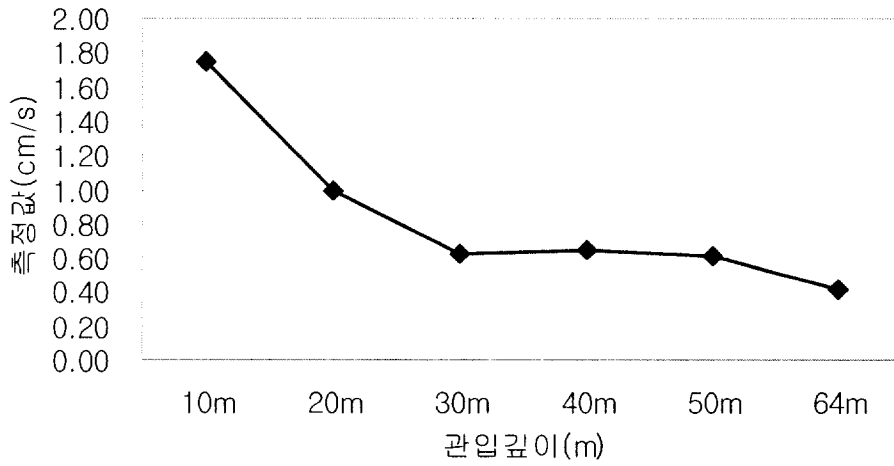


그림 3.22 이격거리 10m에서의 진동 측정 결과

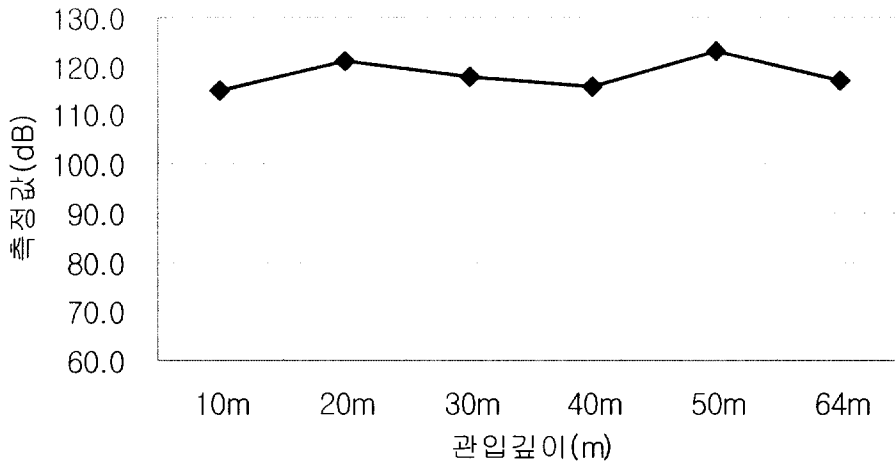


그림 3.23 이격거리 10m에서의 소음 측정 결과

이는 소음의 경우 파일의 두부에서 발생되기 때문에 일정한 값을 보이
나, 진동의 경우는 대부분 파일의 선단부에서 발생하기 때문에 관입깊이
가 증가 할수록 진동원으로부터 측정지점까지의 거리가 증가하기 때문이
다.

2) 이격거리 20m에서의 진동 및 소음 측정 결과

이격거리 20m에 대한 측정결과는 표 3.13, 그림 3.24 및 그림 3.25와
같다.

여기서도 소음 값은 관입깊이별로 큰 차이를 보이지 않으나, 진동은
이격거리 10m 측정값보다 차이는 작으나 관입깊이가 깊어질수록 진동의
크기가 작아지고 있다.

이는 소음은 파일의 두부에서 발생하고, 진동은 대부분 파일의 선단부
에서 발생하기 때문에 관입깊이가 증가 할수록 진동원으로부터 측정지점
까지의 거리가 증가하기 때문이다.

표 3.13 이격거리 20m에서의 진동 및 소음 측정 결과

관입깊이	측정값	
	진동(cm/s)	소음(dB)
10m	0.354	108.00
20m	0.329	111.00
30m	0.237	115.00
40m	0.178	111.00
50m	0.175	111.00
62m	0.135	106.00

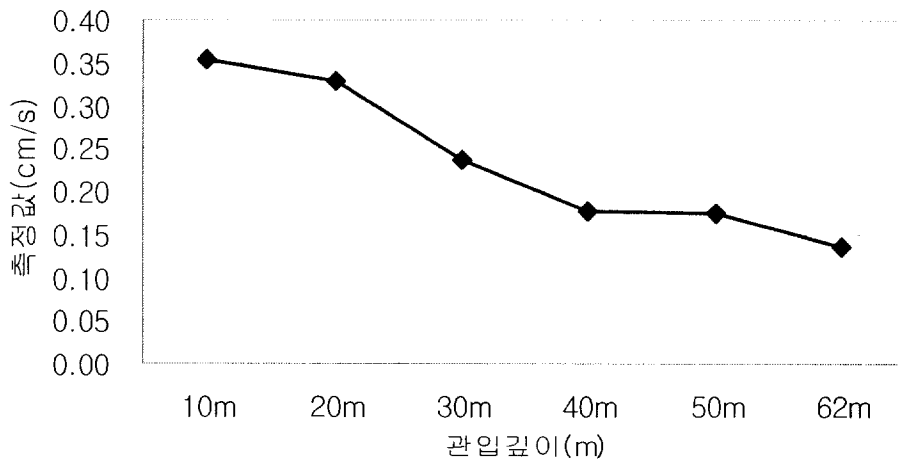


그림 3.24 이격거리 20m에서의 진동 측정 결과

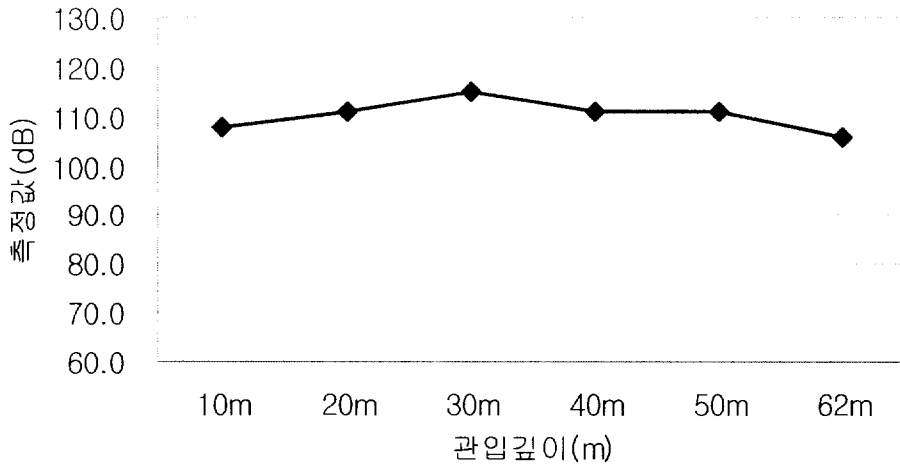


그림 3.25 이격거리 20m에서의 소음 측정 결과

3) 이격거리 30m에서의 진동 및 소음 측정 결과

이격거리 30m에 대한 측정결과는 표 3.14, 그림 3.26 및 그림 3.27과 같다.

표 3.14 이격거리 30m에서의 진동 및 소음 측정 결과

관입깊이	측 정 값	
	진동(cm/s)	소음(dB)
10m	0.121	106.00
20m	0.119	106.00
30m	0.075	104.00
40m	0.059	104.00
50m	0.052	102.00
66m	0.048	105.00

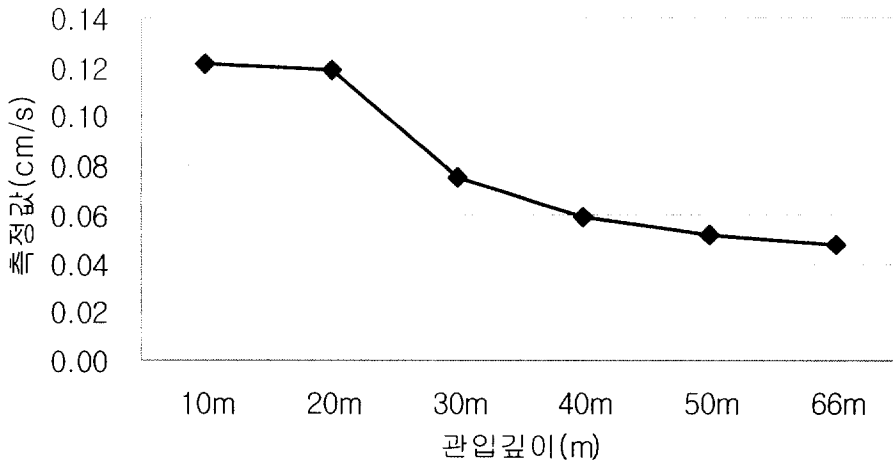


그림 3.26 이격거리 30m에서의 진동 측정 결과

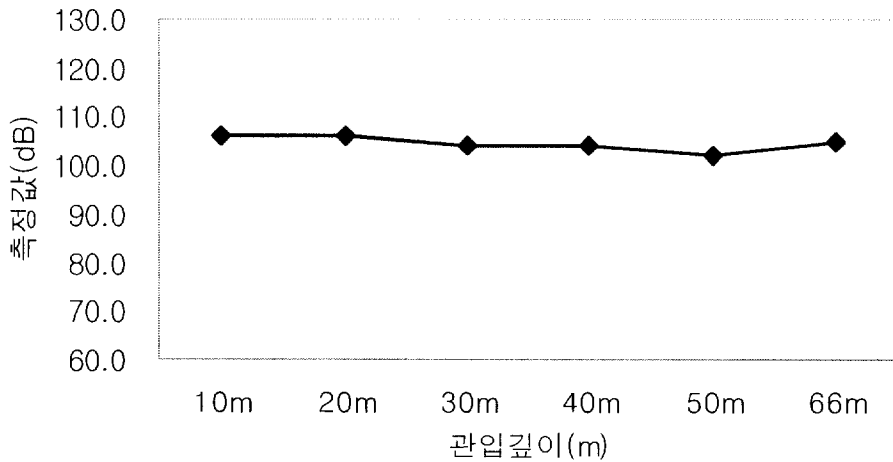


그림 3.27 이격거리 30m에서의 소음 측정 결과

여기서도 소음 값은 관입깊이별로 큰 차이를 보이지 않으나, 진동은 관입깊이가 깊어질수록 진동의 크기가 작아지고 있다.

이는 소음은 파일의 두부에서 발생하고, 진동은 대부분 파일의 선단부에서 발생하기 때문이다.

4) 이격거리 40m에서의 진동 및 소음 측정 결과

이격거리 40m에 대한 측정결과는 표 3.15, 그림 3.28 및 그림 3.29와 같다.

여기서도 소음 값은 관입깊이별로 큰 차이를 보이지 않으나, 진동은 관입깊이가 깊어질수록 진동의 크기가 작아지고 있다.

이는 소음은 파일의 두부에서 발생하고, 진동은 대부분 파일의 선단부에서 발생하기 때문이다.

표 3.15 이격거리 40m에서의 진동 및 소음 측정 결과

관입깊이	측 정 값	
	진동(cm/s)	소음(dB)
10m	0.138	94.00
20m	0.110	98.00
30m	0.095	98.00
40m	0.070	98.00
50m	0.065	94.00
64m	0.067	94.00

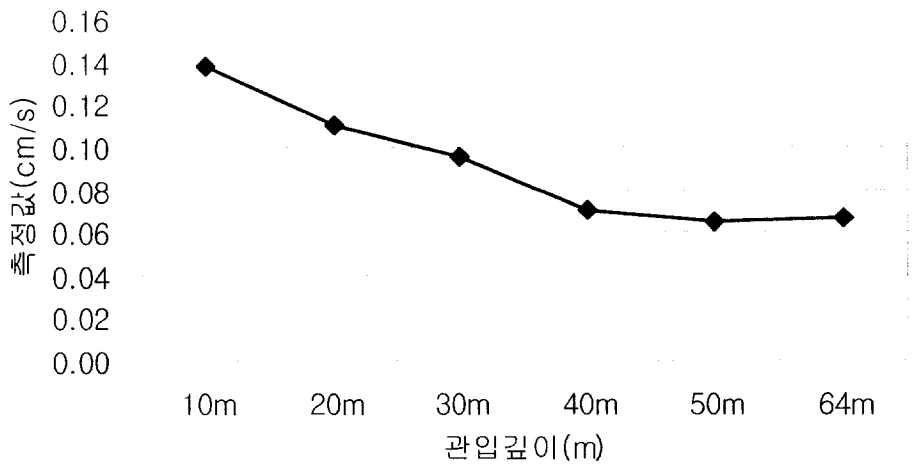


그림 3.28 이격거리 40m에서의 진동 측정 결과

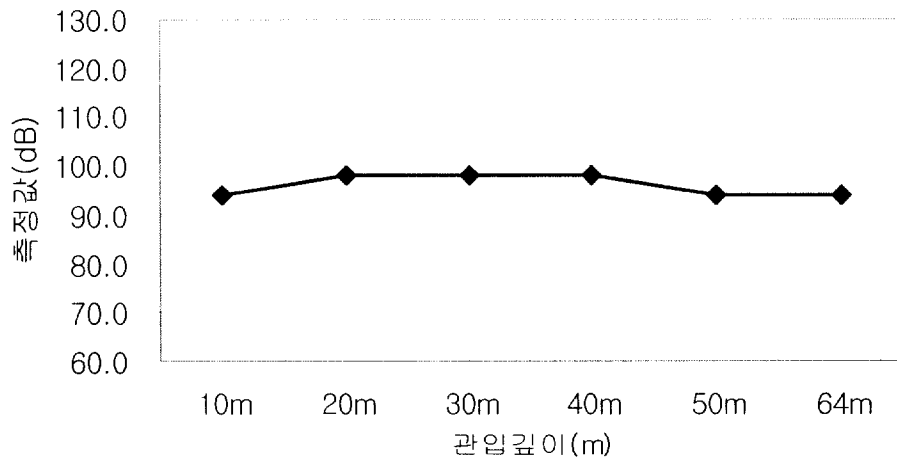


그림 3.29 이격거리 40m에서의 소음 측정 결과

5) 이격거리 50m에서의 진동 및 소음 측정 결과

이격거리 50m에 대한 측정결과는 표 3.16, 그림 3.30 및 그림 3.31과 같다.

여기서도 소음 값은 관입깊이별로 큰 차이를 보이지 않으나, 진동은 관입깊이가 깊어질수록 진동의 크기가 작아지고 있다.

이는 소음은 파일의 두부에서 발생하고, 진동은 대부분 파일의 선단부에서 발생하기 때문이다.

표 3.16 이격거리 50m에서의 진동 및 소음 측정 결과

관입깊이	측정값	
	진동(cm/s)	소음(dB)
10m	0.102	98.00
20m	0.052	94.00
30m	0.052	88.00
40m	0.051	94.00
50m	0.046	94.00
64m	0.044	88.00

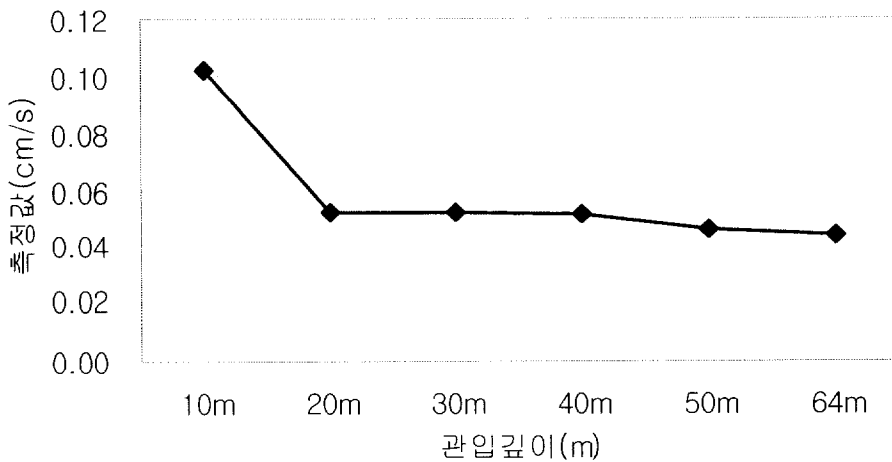


그림 3.30 이격거리 50m에서의 진동 측정 결과

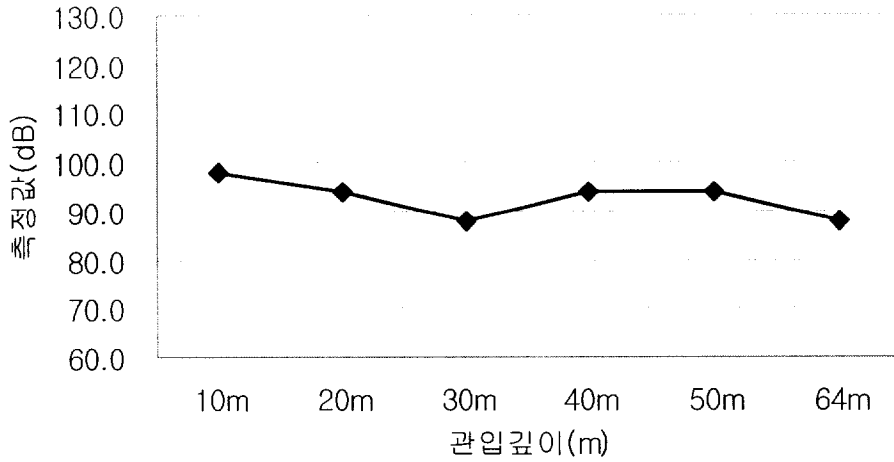


그림 3.31 이격거리 50m에서의 소음 측정 결과

(2) PHC파일 진동·소음 측정 결과 종합

1) 진동 측정결과

PHC파일 항타시 진동 측정결과를 종합하면 표 3.17 및 그림 3.32와 같다.

표 3.17 관입깊이에 따른 거리별 진동 측정 결과 (단위 : cm/s)

측정거리 관입 깊이	10m	20m	30m	40m	50m
10m	1.751	0.354	0.121	0.138	0.102
20m	0.991	0.329	0.119	0.110	0.052
30m	0.627	0.237	0.075	0.095	0.052
40m	0.643	0.178	0.059	0.070	0.051
50m	0.610	0.175	0.052	0.065	0.046
최소	0.416	0.135	0.048	0.067	0.044

① 전반적으로 관입깊이에 따라 진동은 감소하고 있으며, 특히, 근거리인 10m의 경우 이러한 경향이 뚜렷하다. 이는 진동이 파일의 선단부로부터 전달되기 때문에 관입깊이가 증가 할수록 진동원으로부터 측정지점까지의 거리가 증가하기 때문이다.

② 일반적인 경향과 마찬가지로 측정거리에 따라 감소하고 있으며, 거리감쇠효과에 의한 진동저감이 가능하다.

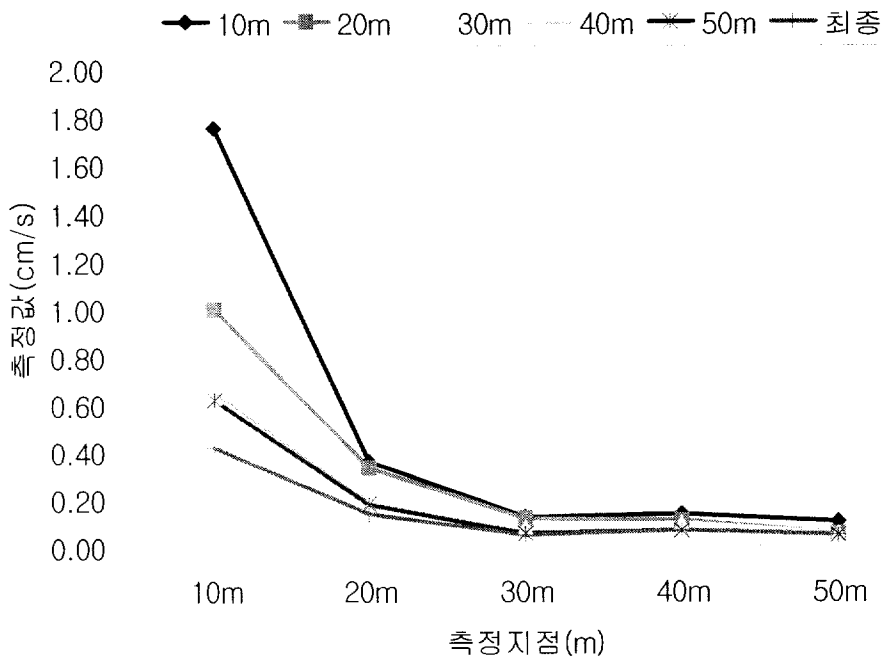


그림 3.32 관입깊이에 따른 거리별 진동 측정 결과

2) 소음 측정 결과

PHC파일 향타시 소음 측정결과를 종합하면 표 3.18 그림 3.33과 같다.

표 3.18 관입깊이에 따른 거리별 소음 측정 결과 (단위 : dB)

측정거리 관입깊이	10m	20m	30m	40m	50m
10m	115.00	108.00	106.00	94.00	98.00
20m	121.00	111.00	106.00	98.00	94.00
30m	118.00	115.00	104.00	98.00	88.00
40m	116.00	111.00	104.00	98.00	94.00
50m	123.00	111.00	102.00	94.00	94.00
최종	117.00	106.00	105.00	94.00	88.00

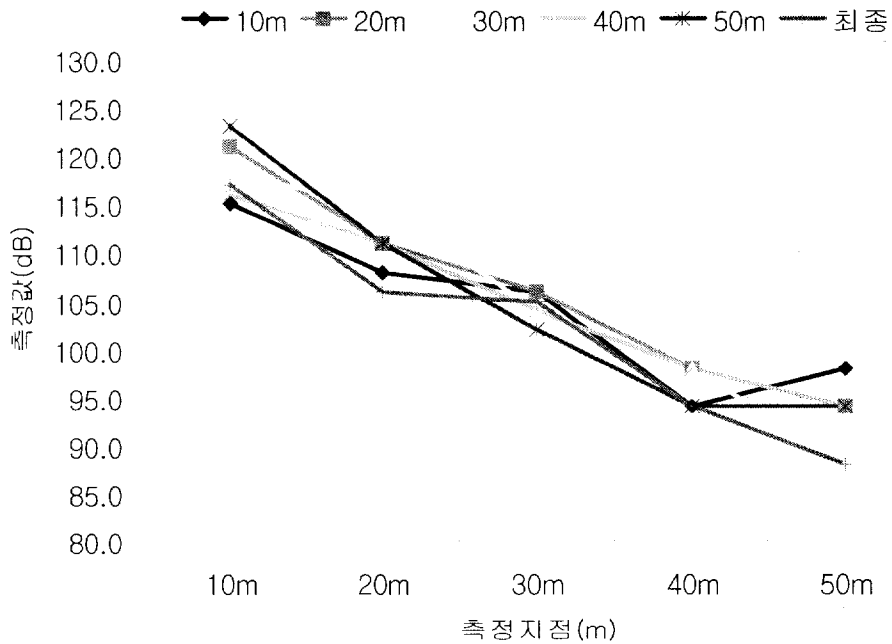


그림 3.33 관입깊이에 따른 거리별 소음 측정 결과

① 소음은 관입깊이와는 무관하며 이는 소음이 파일의 두부에서 발생하기 때문이다.

② 측정거리에 따른 결과는 진동과 마찬가지로 감소하고 있다. 따라서 거리감쇠효과에 의한 소음저감이 가능하다.

3.2.3 지반 동다짐 공법

(1) 진동 측정 결과

동다짐시 발생하는 진동에 대하여 이격거리에 따른 최대입자속도 (PPV)를 측정하였으며, 그 결과는 표 3.19 및 그림 3.34와 같다.

표 3.19 지반 동다짐 진동측정 결과

측정거리 (m)	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	100.0
진동 (cm/s)	4.43	1.24	0.72	0.44	0.36	0.35	0.05

현재 국내에 지반 동다짐 공사시의 진동에 대한 규제치가 제안되고 있지 않은 실정이므로 발파진동에 대한 서울, 부산지하철 진동속도 허용치를 참고하면 주택 및 APT의 경우 허용진동속도는 0.5cm/sec이다.

측정 결과에 의하면 30m 내에 위치한 주택에 대해서는 영향을 미칠 수 있을 정도의 진동이 발생하며, 그 이상의 거리에서는 진동으로 인해 구조물에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

따라서 지반 동다짐 지점으로부터 30m 이내에 구조물이 존재하는 경우에는 시공시의 충격과로 인하여 구조물 및 시설물에 손상이 우려되므로 다짐에너지의 적절한 조정뿐만 아니라 저감대책을 수립하여 시공하여야 할 것이다. 이에 관한 기존의 연구에 의하면 Hammer의 무게 보다는 낙하 높이가 입자속도에 더 큰 영향을 미치므로 낙하고를 낮추어 시공하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

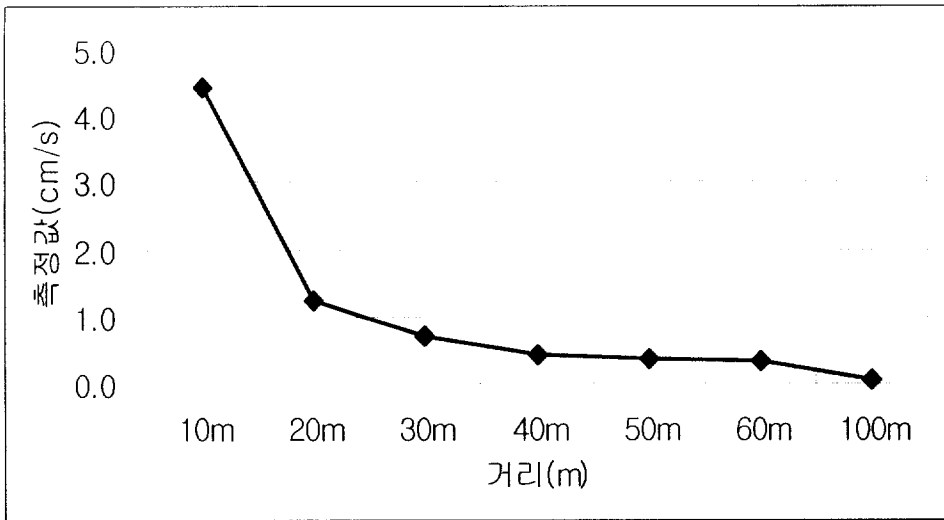


그림 3.34 지반 동다짐 진동측정 결과

(2) 소음 측정 결과

조사 현장에 대한 소음측정결과는 표 3.20에 나타내었다. 그림 3.35에서 보는바와 같이 지반 동다짐 지점으로부터 20~50m정도까지는 85~75dB 정도의 값을 나타내었고, 50m 이후부터 75dB 이하로 나타났다.

표 3.20 지반 동다짐 소음측정 결과

측정거리 (m)	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	100.0
소음 (dB)	94.1	85.3	82.6	78.9	77.1	71.6	68.8

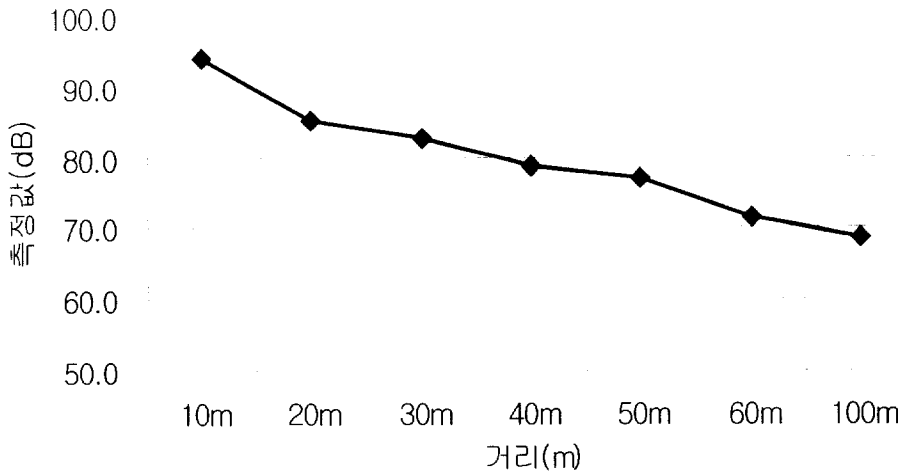


그림 3.35 지반 동다짐 소음측정 결과

3.2.4 진동·소음 측정 평균치 및 최대치

공사 현장에서 실험계획에 따라 기초공사 현장에서 측정한 기초공법별 진동·소음 결과는 아래 표 3.21 및 3.22와 같으며, 측정된 진동(cm/s)은 표 2.12의 식에 의하여 진동레벨(db(V))로 환산하여 나타내었다.

$$Y = 20 \log V + 91 \quad (8\text{Hz} \leq F) \quad (\text{식 3.1})$$

V : 진동속도(cm/s), Y : 진동레벨(db(V))

표 3.21 및 3.22에서 보면 진동값은 동일 심도일 경우 이격거리가 멀어질수록, 이격거리가 동일할 경우 횡타 심도가 깊어질수록 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 표면 진동은 상대적으로 해머의 중량이 무겁고 낙하 고가 높은 동다짐이 가장 크게 나타났다. 소음은 이격거리가 증가할수록 줄어들며, 파일의 관입깊이에는 크게 영향이 없는 것으로 나타났다. 기초

공법에 따른 소유의 차이는 파일자체의 단면적 및 중량이 큰 PHC파일이 가장 높게 측정되었다. 이는 타격에너지에 의한 차이로 해석되며 기초파일 공법종류에 따른 차이가 나타나므로 이를 고려한 소음방지 대책이 필요하다고 볼 수 있다.

표 3.21 기초공법별 향타에 의한 진동·소음 측정 평균치

구분 거리	강관파일		PHC파일		동다짐(평균)	
	진동 db(V)	소음 db(A)	진동 db(V)	소음 db(A)	진동 db(V)	소음 db(A)
10m	85.195	100.80	89.482	118.33	103.93	94.10
20m	77.775	96.23	78.409	110.33	92.87	85.30
30m	71.436	93.00	68.963	104.50	88.15	82.60
40m	71.370	81.97	70.165	96.00	83.87	78.90
50m	71.634	80.40	66.244	92.67	82.13	77.10
60m	68.808	76.08	-	-	81.88	71.60
100m	64.255	75.06	-	-	64.98	68.8

표 3.22 기초공법별 향타에 의한 진동·소음 측정 최대치

구분 거리	강관파일		PHC파일		동다짐(평균)	
	진동 db(V)	소음 db(A)	진동 db(V)	소음 db(A)	진동 db(V)	소음 db(A)
10m	87.028	103.60	95.866	123.00	103.93	94.10
20m	80.127	98.60	81.980	115.00	92.87	85.30
30m	72.868	96.20	72.656	106.00	88.15	82.60
40m	73.813	91.33	73.798	98.00	83.87	78.90
50m	73.279	86.20	71.172	98.00	82.13	77.10
60m	75.113	85.86	-	-	81.88	71.60
100m	72.062	79.80	-	-	64.98	68.8

3.3 기초파일 공법별 진동·소음 추정식

3.3.1 강관파일 공법

(1) 이격거리와 강관파일 진동 추정식

강관파일(∅609mm×12t)공법에서 항타시 측정된 진동과 이격거리와의 관계는 그림 3.36과 같으며, 측정값에서 도출된 실험식은 식 3.1 및 3.2와 같다. 여기서 Y 는 진동레벨(dB(V))이다.

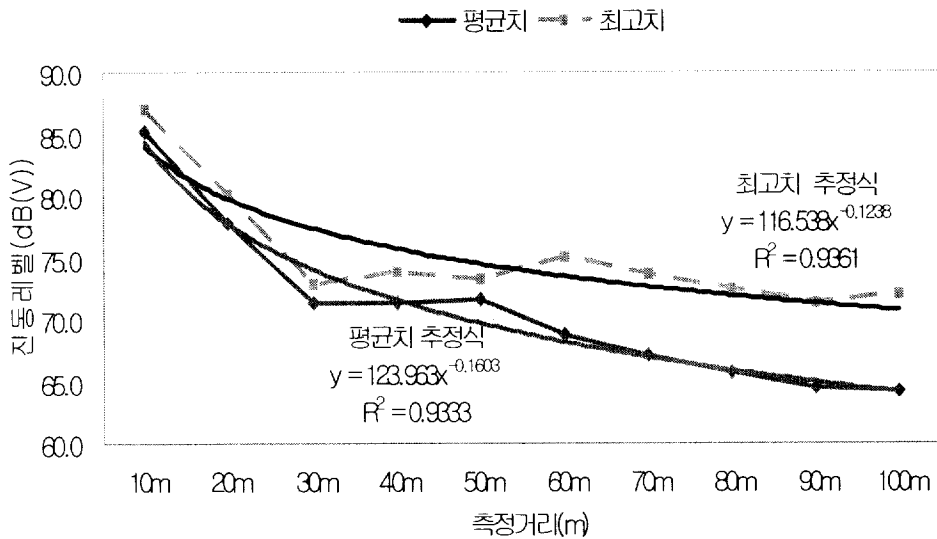


그림 3.36 강관파일 진동 추정식

① 강관파일 진동 최고치 추정 :

$$dB(V) = 116.538X^{-0.1238} \quad [X:이격거리(m), R^2=0.94] \quad (\text{식 3.1})$$

② 강관파일 진동 평균치 추정 :

$$dB(V) = 123.963X^{-0.1603} \quad [X:이격거리(m), R^2=0.93] \quad (\text{식 3.2})$$

(2) 이격거리와 강관파일 소음 추정식

강관파일(∅609mm×12t)공법에서 항타시 측정된 소음과 이격거리와의 관계는 그림 3.37과 같으며, 측정값에서 도출된 실험식은 식 3.3 및 3.4와 같다. 여기서 Y는 소음레벨(dB(A))이다.

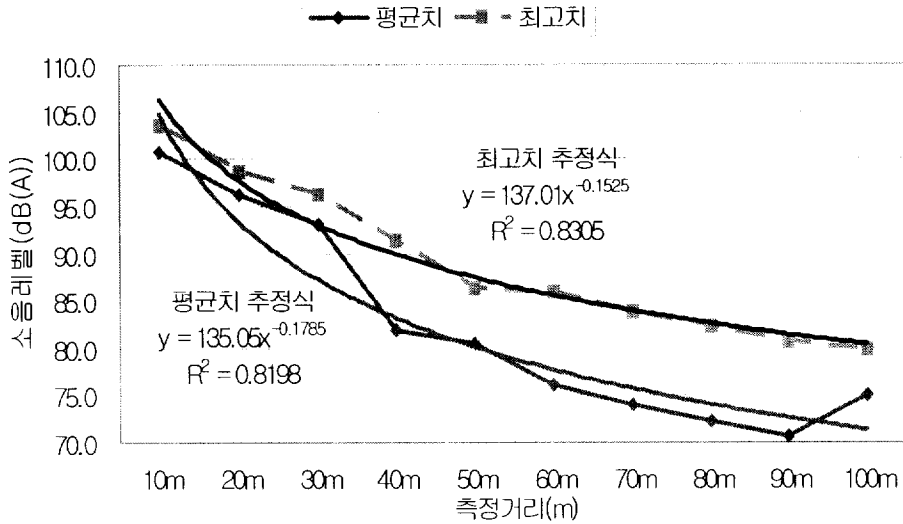


그림 3.37 강관파일 소음 추정식

③ 강관파일 소음 최고치 추정 :

$$dB(A) = 137.01X^{-0.1525} \quad [X: \text{이격거리(m)}, R^2 = 0.83] \quad (\text{식 3.3})$$

④ 강관파일 소음 평균치 추정 :

$$dB(A) = 135.05X^{-0.1785} \quad [X: \text{이격거리(m)}, R^2 = 0.82] \quad (\text{식 3.4})$$

3.3.2 PHC파일 공법

(1) PHC파일 진동 추정식

PHC파일(∅600mm×90t)공법에서 항타시 측정된 진동과 이격거리와의 관계는 그림 3.38과 같으며, 측정값에서 도출된 실험식은 식 3.5 및 3.6과 같다.

여기서 Y는 진동레벨(dB(V))이다.

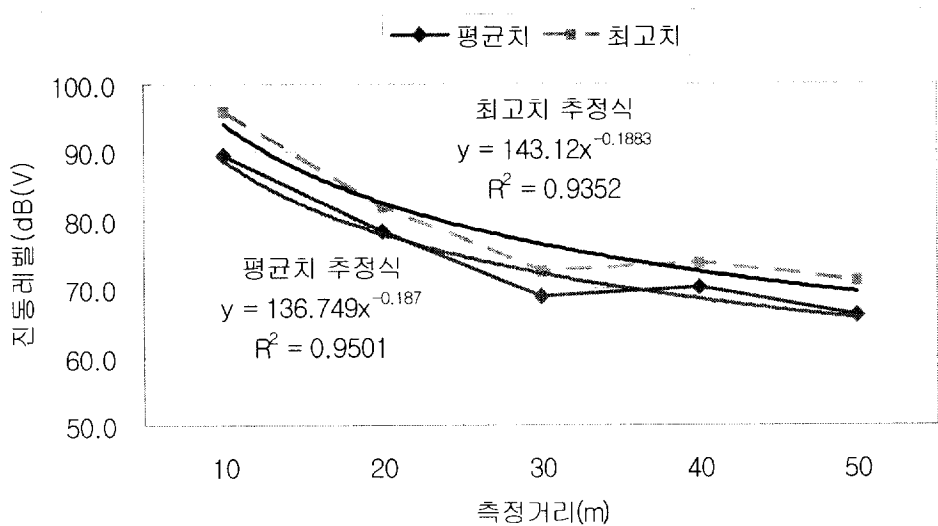


그림 3.38 PHC파일 진동 추정식

① PHC파일 진동 최고치 추정 :

$$dB(V) = 143.12X^{-0.1883} \quad [X:이격거리(m), R^2=0.94] \quad (\text{식 } 3.5)$$

② PHC파일 진동 평균치 추정 :

$$dB(V) = 136.749X^{-0.187} \quad [X:이격거리(m), R^2=0.95] \quad (\text{식 } 3.6)$$

(2) PHC파일 소음 추정식

PHC파일(∅600mm×90t)공법에서 항타시 측정된 소음과 이격거리와의 관계는 그림 3.39와 같으며, 추정값에서 도출된 실험식은 식 3.7 및 3.8과 같다.

여기서 Y 는 소음레벨(dB(A))이다.

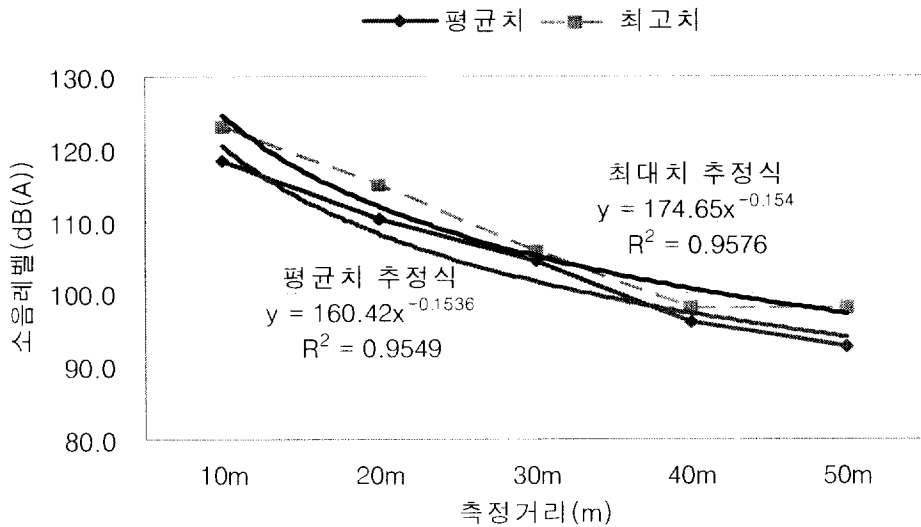


그림 3.39 PHC파일 소음 추정식

③ PHC파일 소음 최고치 추정 :

$$dB(A) = 174.65X^{0.1540} \quad [X:이격거리(m), R^2=0.96] \quad (\text{식 } 3.7)$$

④ PHC파일 소음 평균치 추정 :

$$dB(A) = 160.42X^{0.1536} \quad [X:이격거리(m), R^2=0.96] \quad (\text{식 } 3.8)$$

3.3.3 지반 동다짐 공법

(1) 지반 동다짐 진동 추정식

지반 동다짐 공법에서 항타시 측정된 진동과 이격거리와의 관계는 그림 3.40과 같으며, 측정값에서 도출된 실험식은 식 3.9와 같다.

여기서 Y는 진동레벨(dB(V))이다.

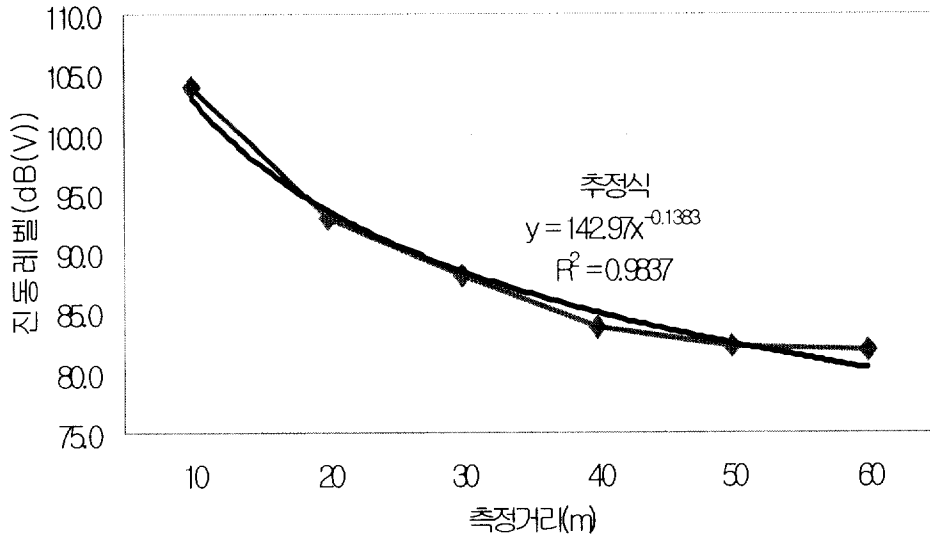


그림 3.40 지반 동다짐 진동 추정식

① 동다짐 진동 추정 :

$$db(V) = 142.97X^{-0.1383} [X:이격거리(m), R^2=0.98] \quad (\text{식 3.9})$$

(2) 지반 동다짐 소음 추정식

지반 동다짐 공법에서 향타시 측정된 소음과 이격거리와의 관계는 그림 3.41과 같으며, 측정값에서 도출된 실험식은 식 3.10과 같다.

여기서 Y는 소음레벨(dB(A))이다.

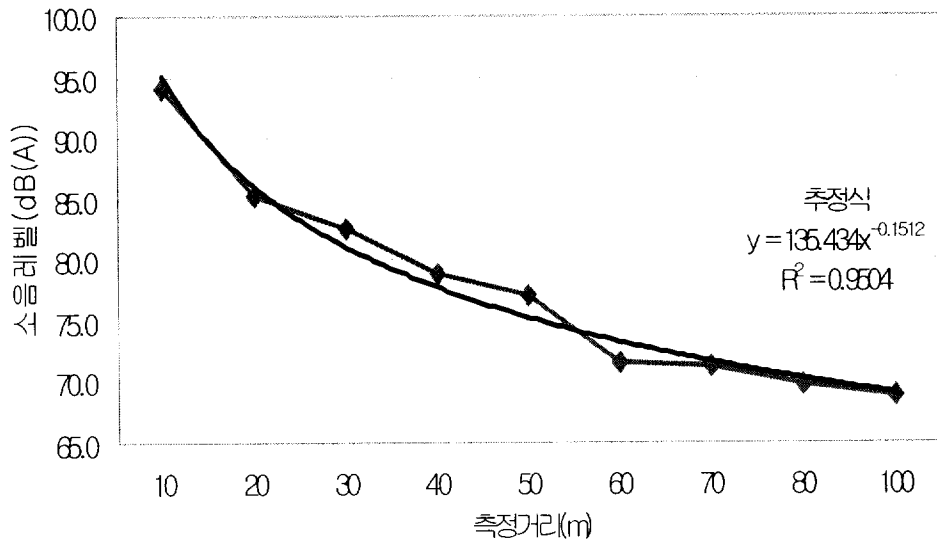


그림 3.41 지반 동다짐 소음 추정식

② 동다짐 소음 추정 :

$$dB(A) = 135.434X^{0.1512} \quad [X:이격거리(m), R^2=0.95] \quad (\text{식 } 3.10)$$

3.3.4 진동·소음 추정식 비교

강관파일, PHC파일 및 지반 동다짐 공사시 발생하는 진동·소음 측정결과에서 이격거리에 따른 추정식으로 나타내면 식3.1~식3.10과 같다.

이와 같이 본 연구에서 도출된 추정식을 기존의 연구결과와 비교하기 위하여 본 연구와 가장 유사한 내용인 박홍태, 손창백 연구¹⁶⁾의 직타공법 및 천공 후 타격공법에 대한 추정식(이하 비교식)을 사용하였다. 비교식의 조건이 본 연구 내용과 완전하게 일치하지는 않으므로 박홍태, 손창백 연구 결과의 평균치와 본 연구의 평균치를 비교하였으며 박홍태 외1명 연구의 평균치는 표 3.23과 같다 .

여기서 동다짐 공사는 비교식이 없으므로 제외하였다.

표 3.23 박홍태 손창백에 의한 소음·진동 평균치 추정식

공법	기준치	추정식 [x:이격거리(m)]
직타공법	진동 평균치	$dB(V) = 124.51X - 0.1609$ (식 11)
	소음 평균치	$dB(A) = 117.04X - 0.1705$ (식 12)
천공 후 타격공법	진동 평균치	$dB(V) = 102.77X - 0.1609$ (식 13)
	소음 평균치	$dB(A) = 112.41X - 0.2648$ (식 14)

16) 박홍태, 손창백, "아파트공사의 기초공법별 진동·소음 예측모델", 대한건축학회 논문집 16권 7호, 2000.07

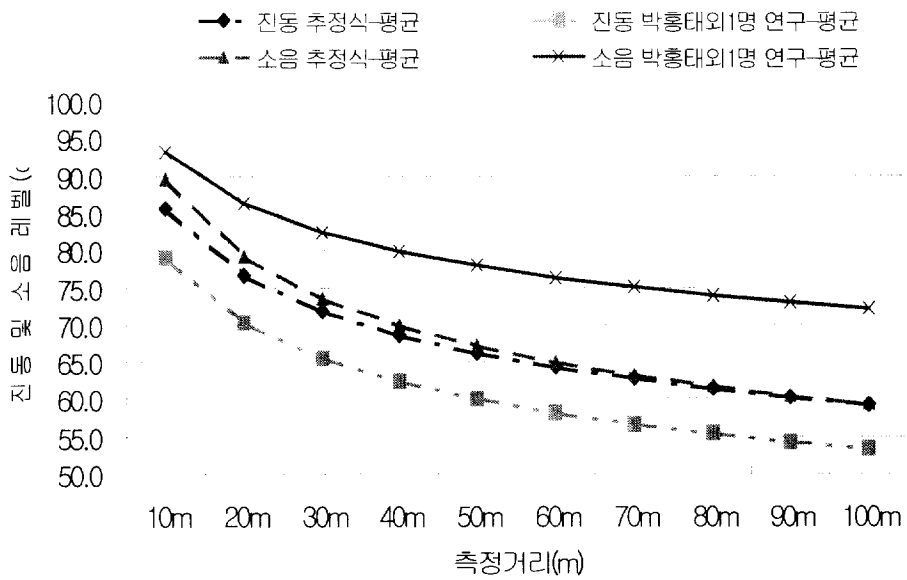


그림 3.42 강관파일 진동·소음 추정식 기존연구와 비교

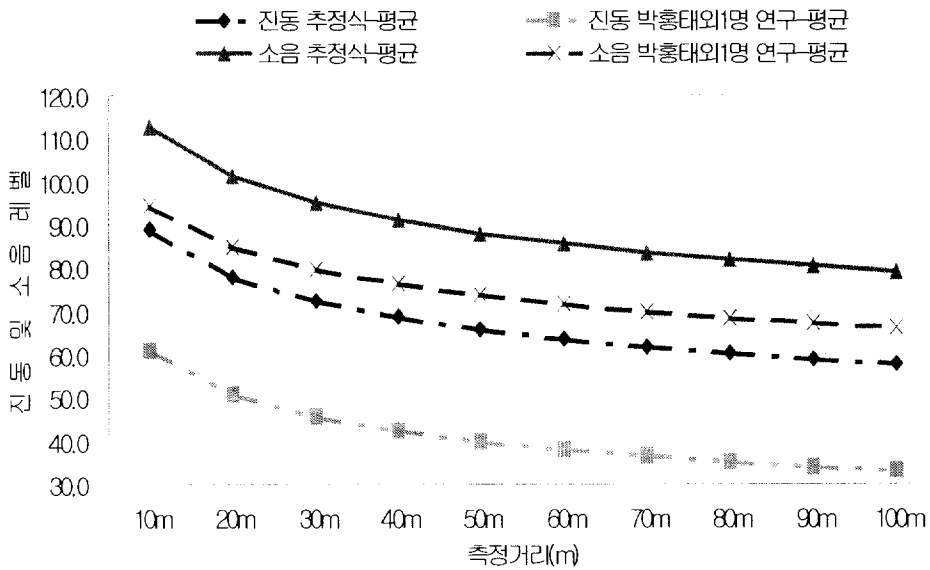


그림 3.43 PHC파일 진동·소음 추정식 기존연구와 비교

그림 3.42 및 3.43 에서 본 연구의 추정식과 박홍태외1명 연구의 관계를 살펴보면 이격거리와 진동·소음의 상관성에 있어서 형태는 거의 유사하나, 절대값

그림 3.41 및 3.42에서 본 연구의 추정식과 박홍태 외1명 연구의 관계를 살펴보면 이격거리와 진동·소음의 상관성에 있어서 형태는 거의 유사하나, 절대값의 차이는 나타나고 있다. 이는 지반 및 파일의 조건에 따른 차이에서 나타나는 결과로 볼 수 있다. 즉, 이러한 현장 조건차이가 파일공사에 의한 진동·소음의 정도에 영향을 크게 미친다고 볼 수 있다.

3.3.5 구조물별 최소 이격거리 검토

(1) 진동 추정식에 의한 최소 이격거리

본 연구에서는 노동부 고시 04-17호 및 서울지하철 2, 3호선 건설 당시 설정한 기준과 부산지하철 기준을 기준으로 한다. 각 진동 추정식에 의한 최소 이격거리는 표 3.24와 같다.

표 3.24 진동 추정식에 의한 구조물별 최소 이격거리

건물구분	허용진동치 (cm/sec)	최소 이격거리(m)			비 고
		상관파일	PHC파일	동다짐	
분화재	0.2	30	30	70	
주택, 아파트	0.5	20	20	40	
상가 (음이 없는 상태)	1.0	10	20	30	
철근콘크리트 빌딩 및 상가	1.0~4.0	10	20	30	

(2) 소음 추정식에 의한 최소 이격거리

본 연구에서는 국내에서 일반적으로 적용하고 있는 소음·진동 규제법에 의한 생활 진동 규제기준 표 2.8을 기준으로 한다.

따라서 소음 추정식에 의한 최소 이격거리는 표 3.25와 같다.

표 3.25 소음 추정식에 의한 지역별 최소 이격거리

시간별 대상지역	소음 허용치 (dB(A))		최소 이격거리(m)			비 고
			강관파일	PHC파일	동다짐	
A 지역	주간	70	90	380	80	
B 지역	주간	75	60	250	50	

3.4 기초파일 공사의 진동 저감대책

3.4.1 효율적 진동 저감법

기초파일 공사에 있어서 진동 및 소음을 저감하기 위한 대책으로는 진동원에 대한 대책과 수진층에 대한 대책으로 구분하여 생각할 수 있다. 어느 경우이거나 원하는 방진 및 방음효율을 얻을 수 있는 공법을 선택하거나 또는 방진·방음재를 선정하기 위해 다음 사항을 검토하여 실제 적용 여부를 검토하여야 한다.

- ① 방진 시스템 고유진동수가 하중 진동수의 30%이하가 되도록 한다.
- ② 기초의 허용변위를 초과하지 않도록 한다.
- ③ 동하중 및 정하중으로 인한 응력이 지반의 지내력을 초과하지 않도록 한다.

상기 검토를 통하여 방진·방음대책이 선정되면 실제 완성상태에서 진동추정을 통해 적합여부를 확인할 필요가 있다.

일반적으로 널리 적용되고 있는 방진대책을 기존 자료에서 소개하면
아래 표 3.26¹⁷⁾과 같다.

표 3.26 방진대책 비교

비교 항목	Trench	Pipe(Void Hole)	Pipe or Wall(Solid)
1. 실제 개념	* 지반 특히 지표면을 통해 전달되는 탄성파를 차단하기 위해 속이 빈 Trench를 형성시키는 방법이다.	* 완전방진구와 같은 개념으로서 속이 빈 Pipe를 지중에 배치하여 지반을 통해 전달되는 탄성파를 차단 혹은 Screen하는 것에 의해 지반진동을 경감시키는 방법이다.	* 콘크리트, 벤토나이트, Void Brick 등과 같이 지반의 Impedance(ρV)차이가 큰 재료로서 Obstacle Wall을 설치함으로써 지반을 통해 전달되는 탄성파가 Obstacle Wall에서 반사, 굴절됨으로써 진동을 경감시키는 방법이다.
2. 효율성	* 진동전파 경로를 차단하는 가장 확실한 방법이며, 따라서 효율성이 가장 높다.	* 완전방진구에 비해 효율성이 낮으나 Void Pipe Hole의 다열배치에 의해 상당한 효과를 얻을 수 있다.	* 연약한 지반에서는 Hard 한 재료를, 단단한 지반에서는 Soft한 재료를 사용함으로써 상당한 효과를 기대할 수 있다.
3. 시공성	* 토사지반에서는 Trench의 자립이 문제가 되며 도류벽을 설치하는 경우도 시공이 지극히 까다롭다.	* Void Pile Hole에 의해 공이 자립되므로 시공상 큰 문제가 없으며 비교적 협소한 공간에서도 작업이 가능하다.	* 시공 중의 공 자립이 요구되며 상당한 작업공간이 요구된다.
4. 경제성	* 공자립 및 도류벽 설치에 특수한 방법이 요구되어 고가이다.	* 완전방진구 공법에 비해 효율성은 떨어지나 비교적 경제적인 방법이다.	* 토사지반의 경우 Slurry Wall 주열식 Pile 공법 등이 적용되어 상당히 고가이다.

17) 이명재, 방진대책 및 설계, 대우엔지니어링 기술보 제6권 제2호, 1989.10

3.4.2 측정대상 현장에 적용한 진동 저감대책

현재 국내 건설공사시의 진동에 대한 규제치가 제안되고 있지 않은 실정이므로 발파진동에 대한 서울, 부산지하철 진동속도 허용치를 참고하면 주택 및 아파트의 경우 허용진동속도는 0.5cm/sec이다.

조사 현장의 강관파일 및 PHC파일기초의 경우 항타 지점의 10m 이내에 위치한 구조물에 대해서는 영향을 미칠 수 있을 정도의 진동이 발생하나 20m이상의 거리에서는 진동으로 인한 영향이 거의 없는 것으로 나타나 별도의 대책을 수립하지 않았으며, 동다짐의 경우 동다짐 지점으로부터 30m 이내에 구조물이 존재하면 시공시의 충격파로 인하여 구조물 및 시설물에 손상이 우려되므로 시공성, 경제성을 고려하여 다음과 같은 대책을 수립하였다.

- ① 속이 빈 Trench 형성으로 지표면의 진동 탄성파를 차단하는 방법
- ② 해머 낙하고를 낮추어 항타에너지를 적절히 조절하는 방법

조사대상 현장에서는 상기의 2가지 방법을 병행하여 적용하였으며, 이에 따라 진동의 크기를 허용진동속도인 0.5cm/sec이내로 감소시켜 공사를 진행할 수 있었다.

따라서 명지·신호지역의 경우에는 향후 파일 기초시의 진동 저감 방법으로 Trench 형성 방법 및 항타에너지 조절 방법을 사용하는 것이 효과적인 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 연약지반상의 건축물 기초 공법별 진동·소음 특성 파악을 위해 부산광역시 사하구 명지동 소재 공동주택공사 현장에서 강관파일, PHC파일 및 지반 동다짐공법의 진동·소음을 측정하였다. 측정된 자료를 분석하여 진동·소음 추정식을 도출하고, 국내의 진동 및 소음규제기준에 따른 구조물별 최소 이격거리를 파악하였다.

본 연구에서 도출된 결과는 다음과 같다.

1. 조사대상 현장에서 파일항타 진동원으로부터의 이격거리별 진동 및 소음을 측정하여 도출한 추정식은 다음과 같다.

공법	기준값		추정식 [x:이격거리(m)]
강관 파일	진동	최고치	$\text{dB(V)} = 116.538X^{0.1238} \quad [R^2=0.94]$
		평균치	$\text{dB(V)} = 123.963X^{0.1603} \quad [R^2=0.93]$
	소음	최고치	$\text{dB(A)} = 137.01X^{0.1525} \quad [R^2=0.83]$
		평균치	$\text{dB(A)} = 135.05X^{0.1785} \quad [R^2=0.82]$
PHC 파일	진동	최고치	$\text{dB(V)} = 174.65X^{0.1540} \quad [R^2=0.94]$
		평균치	$\text{dB(V)} = 136.749X^{0.187} \quad [R^2=0.95]$
	소음	최고치	$\text{dB(A)} = 174.65X^{0.1540} \quad [R^2=0.96]$
		평균치	$\text{dB(A)} = 160.42X^{0.1536} \quad [R^2=0.96]$
동다짐	진동	$\text{dB(V)} = 142.97X^{0.1383} \quad [R^2=0.98]$	
	소음	$\text{dB(A)} = 135.434X^{0.1512} \quad [R^2=0.95]$	

2. 이격거리와 진동·소음 값의 상관성에 있어서는 본 연구의 실험식과 기존 연구 자료를 비교한 결과 추세 곡선은 유사하나, 진동·소음 실제 측정값은 지반과 파일 규격 등 현장조건에 따라 상당한 차이가 나타났다.

3. 파일 항타에 따른 진동·소음의 관입 깊이별 발생특성을 보면, 진동

은 거의 파일 선단부분으로부터 전달되므로 관입깊이가 깊어질수록 줄어들어 가는 것으로 나타나고, 소음은 파일 두부로부터 주로 전달되므로 관입 깊이별로는 크게 차이가 없는 것으로 나타났다.

4. 강관파일, PHC파일 및 동다짐 공법 중 진동측면에서는 동다짐공법이 강관파일과 PHC파일공법에 비하여 최소 2배 이상의 이격거리가 필요한 것으로 나타났다. 이는 공법의 특성인 다짐해머 중량이 상대적으로 크면서 낙하 높이도 높은 원인에 의해 향타 에너지가 크게 작용하기 때문인 것으로 보인다.

5. 소음 최대치 국내 규제기준으로 볼 때 인접건물이 주택 및 아파트인 경우 PHC파일공법은 강관이나 동다짐공법에 비하여 4배 이상의 이격거리가 필요한 것으로 나타났다. 이 경우에 있어서 각 기초공법별 진동·소음원으로부터의 최소이격거리를 연구 결과 추정식으로 산정하면 다음과 같다.

구분	허용 규제치		최소 이격거리(m)		
			강관파일	PHC파일	동다짐
진동	cm/sec	0.5	20	20	40
소음	dB(A)	70	90	380	80

본 연구에서는 특정한 건설현장의 한정된 자료를 토대로 진동 및 소음에 관한 추정식을 도출하였으므로 활용에는 한계가 있다. 그러나 부산 명지·신호지역과 같이 지반이 매우 연약하면서 연약층 깊이가 깊은 유사 지역에서의 기초공사 현장실무에는 참고할 수 있을 것으로 사료된다. 기초파일 공사에서의 진동·소음은 지반조건 등에 따라 크게 차이가 있으므로 이후 현장 조건의 다양한 변화에 대응할 수 있는 실무자료 확보를 위해서는 추가적인 실측연구 자료 축적이 더욱 필요할 것이다. 또한 기초공사에서의 효율적인 진동 및 소음 완화 공법개발이 지속되어야 할 것으로 본다.

참고문헌

1. 김동완, "건설공사장의 진반진동 영향 평가 및 진동 예측 프로그램 개발", 경희대학교 대학원 토목공학과 석사학위논문, 2000.02.
2. (주) 한국구조안전기술원, "진동으로 인한 건축물 피해 평가에 관한 연구", 환경부 중앙환경분쟁조정위원회, 2004.04.
3. 김태원, "항타진동이 인접구조물에 미치는 동적영향 및 대처방안에 대한 연구", 부산대학교 산업대학원 토목공학과 석사학위논문, 2001.02.
4. 박홍태, 손창백, "아파트공사의 기초공법별 진동·소음 예측모델", 대한건축학회 논문집 16권 7호, 2000.07.
5. 이명재, "방진대책 및 설계", (주)대우엔지니어링 기술연구소, 대우엔지니어링기술보 제6권 제2호, 1989.10.
6. 이경렬 외 3인, "건설소음·진동 피해분쟁조정 사례분석", 대한건축학회 학술발표대회논문집 제24권 제1호, 2004.04.
7. 박종배 등, "말뚝의 저소음·저진동 시공법에 대한 연구", 대한주택공사, 1996.
8. 김남주, "건설소음·진동의 예측기법과 그 적용에 관한 연구", 전남대학교 대학원 자원공학과 박사학위논문, 1999.
9. 김병주, "건설환경에서 발생하는 건설진동의 주관적반응 평가에 관한 연구", 원광대학교 산업대학원 건축공학과 석사학위논문, 1998.
10. 사단법인 대한토목학회 부산·울산·경남지회, "부산 신호동 월 더하임 아파트 신축공사 지하주차장 기초설계에 대한 검토의견서", 2003.12.
11. "Pile 관입에 의한 지반진동의 모형실험", 기술정보, 1986.05.

12. DIN 4150-Part 3, "Structural Vibration in Building; effects on structures".
13. David E. Siskind, Steven V. Crum and Matthew N. Plis, "Blast vibration and other potential causes of damage in homes near a large surface coal mine in Indiana, Bureau of Mines", NTIS PB94-125648, 1993.
14. Dowding, C.H., "Construction Vibrations", Prentice Hall, U.S.A, 1996.
15. ANSI standard, "Vibration of buildings-guidelines for the measurement of vibration and evaluation of their effects on buildings", ANSI S2.47, 1990.

The Characteristics of Vibration and Noise at Piling Work in Apartment Building Foundation Construction

Il-Chan Jung

Department of Architectural Engineering
Graduate School of Industry
Pukyong National University

Abstract

Using a big construction equipment and for a pile drive work as well as a rock blasting works in the building construction site, occurs a vibrations of the earth as well as a noise emissions. If an over limit situation of a vibration of the earth and a noise emission by the construction work, then it incur the enmity of the people due to that a residential facilities structural damage as well as a sound environment damages. Therefor, it will be necessary to the active consider a countermeasure with before occurred damages.

Many building projects in the domestic applied the pile drive method as direct strike a piles, because it was low cost. However, it pile drive method will be a cause of a serious structural problem in the neighborhood structures in the weak ground condition as well as a structure of near construction site within downtown.

Therefore, for the reduce damage find out and analogize characteristics

vibration effective and grasp apprehend the meaning each earthquake from original point of vibration at construction site. Also it necessary decrease device several ways for the minimum construction vibration.

This study aim to estimate formulas of a vibration of each as well as a noise emissions by an apartment foundation pile drive work within the condition as weak ground. For the understanding of characteristics on the vibrations of earth as well as a noise emissions, measured to a vibration marks and a noise marks at pile drive works that is a Steel Pipe Pile, Prestressed High Strength Concrete Pile, Dynamic Deep Compaction. And find out the their estimate formulas through regression analysis.

Conclusion of this study was as following;

(1) The measured levels of a vibration and a noise at pile drive works was so different by reasons of the construction methods, piles, a distances as well as a depths between the their sources and measured points. According to a distance from their source to measured points, the change of a vibration level as well as a noise level was found as a regression curve.

(2) Result of comparison in the regression curves of this study and the preceding research as known curve, it was similar. However, measured vibration levels in this study was very different with the preceding value.

(3) Measured vibration levels was decreases at pile insert deeply, because the vibration of neighborhood site effected by the tip of piles. Measured noise level was so low changed, because the noise of neighborhood site effected by the top of piles and machines.

(4) The required for a secure minimum distance at Dynamic Deep

Compaction work was 2 times rather than the Steel Pipe Pile as well as the Prestressed High Strength Concrete Pile drive methods, because it's vibration hammer machine was so heavy and consumed of higher energy as well as the higher falling height.

(5) If the neighborhood building was a residential facility, then the required on a secure minimum distance of Prestressed High Strength Concrete Pile drive work was 4 times rather than the Steel Pipe Pile work as well as the Dynamic Deep Compaction work within the domestic noise regular.

Results of this study expected to support for the vibration of earth and the noise emission control method on the pile drive works at the weak ground condition as similar site that a region of Myung-Ji, Shinho in Busan city, South Korea.

Key words: Vibration, Steel Pipe Pile, Prestressed High Strength Concrete Pile, Dynamic Deep Compaction, Secure minimum distance

부 록

1. 강관파일 진동·소음 측정 자료

2. PHC파일 진동·소음 측정 자료

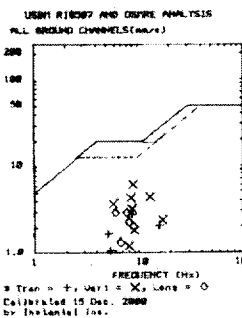
1. 강관파일 진동측정 자료

관입깊이 10M

INSTANTEL DS477 BLASTMATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT LOCATION
 USER
 TEST SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES

SCALED DIST. DISTANCE WEIGHT/delay
 3.2 18.0 m 18.0 kg
 TRIGGERED manual at 15:28:01
 23 June 2009

PPV	TRAN	VERT	LONG	units
FREQ	2.81	0.21	2.90	mm/s
TIME	0	0	0	Hz
ACCEL	0.00	0.00	0.00	ms
PK DISPL	0.000	0.181	0.000	mm
PUS	0.30	ms	at 922	ms
PK AIR D/P	101.9	dB(A)	at 634	ms

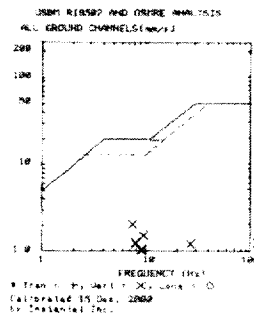


10M

INSTANTEL DS477 BLASTMATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT LOCATION
 USER
 TEST SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES

SCALED DIST. DISTANCE WEIGHT/delay
 6.3 18.0 m 18.0 kg
 TRIGGERED manual at 15:28:27
 23 June 2009

PPV	TRAN	VERT	LONG	units
FREQ	0.30	2.82	1.02	mm/s
TIME	22	0	0	Hz
ACCEL	0.01	0.01	0.01	ms
PK DISPL	0.000	0.042	0.010	mm
PUS	2.17	ms	at 945	ms
PK AIR D/P	95.2	dB(A)	at 925	ms

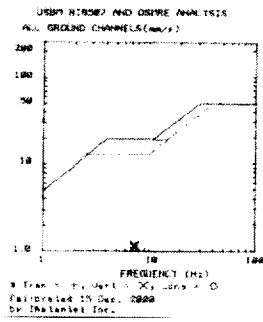


20M

INSTANTEL DS477 BLASTMATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT LOCATION
 USER
 TEST SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES

SCALED DIST. DISTANCE WEIGHT/delay
 9.5 18.0 m 18.0 kg
 TRIGGERED manual at 15:28:46
 23 June 2009

PPV	TRAN	VERT	LONG	units
FREQ	0.19	1.17	0.49	mm/s
TIME	27	0	18	Hz
ACCEL	0.01	0.01	0.01	ms
PK DISPL	0.000	0.018	0.009	mm
PUS	1.19	ms	at 120	ms
PK AIR D/P	95.4	dB(A)	at 63	ms

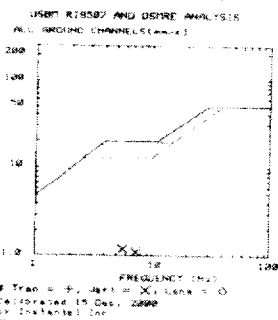


30M

INSTANTEL DS477 BLASTMATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT LOCATION
 USER
 TEST SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES

SCALED DIST. DISTANCE WEIGHT/delay
 15.0 18.0 m 18.0 kg
 TRIGGERED manual at 15:24:32
 20 June 2009

PPV	TRAN	VERT	LONG	units
FREQ	0.41	1.22	0.41	mm/s
TIME	19	0	10	Hz
ACCEL	0.00	0.01	0.01	ms
PK DISPL	0.000	0.022	0.004	mm
PUS	1.30	ms	at 228	ms
PK AIR D/P	84.4	dB(A)	at 183	ms

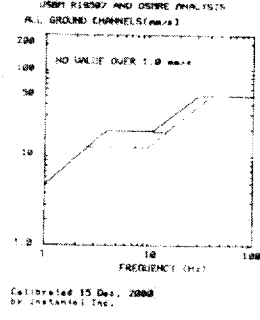


50M

INSTANTEL DS477 BLASTMATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT LOCATION
 USER
 TEST SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES

SCALED DIST. DISTANCE WEIGHT/delay
 180.0 m 18.0 kg
 TRIGGERED manual at 15:42:50
 20 June 2009

PPV	TRAN	VERT	LONG	units
FREQ	0.35	0.38	0.09	mm/s
TIME	0	0	0	Hz
ACCEL	0.00	0.01	0.01	ms
PK DISPL	0.000	0.019	0.017	mm
PUS	1.19	ms	at 628	ms
PK AIR D/P	70.2	dB(A)	at 187	ms



100M

관입깊이 20M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 8119 U 5.51
 CLIENT
 LOCATION
 USER
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES

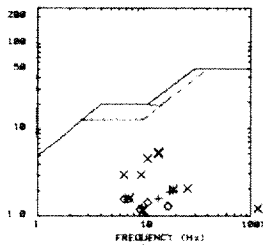
SCALED DIST. DISTANCE HEIGHT/delay
 5.8 20.0 m 10.0 kg

TRIGGERED manual at 13:46:47
 29 June 2009

TRAN	VEGT	LONG
PPU	1.52	5.46
FREQ	19	14
TIME	12	35
ACCEL	0.04	0.05
PK DISPL	0.012	0.002
PUS	5.54	ms

PK AIR D/P 182.3 dB(A) at 573 ms

USM RISES AND DISES ANALYSIS
 ALL GROUND CHANNELS(muss)



* Tran = +, Vegt = X, Long = O
 Calibrated 15 Dec. 2009
 by Instanteil Inc.

10M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 8119 U 5.51
 CLIENT
 LOCATION
 USER
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES

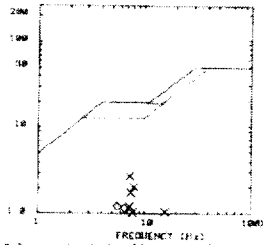
SCALED DIST. DISTANCE HEIGHT/delay
 6.8 20.0 m 10.0 kg

TRIGGERED manual at 13:18:44
 29 June 2009

TRAN	VEGT	LONG
PPU	0.94	2.25
FREQ	24	7
TIME	30	19
ACCEL	0.01	0.02
PK DISPL	0.008	0.013
PUS	2.90	ms

PK AIR D/P 99.6 dB(A) at 1 ms

USM RISES AND DISES ANALYSIS
 ALL GROUND CHANNELS(muss)



* Tran = +, Vegt = X, Long = O
 Calibrated 15 Dec. 2009
 by Instanteil Inc.

20M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 8119 U 5.51
 CLIENT
 LOCATION
 USER
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES

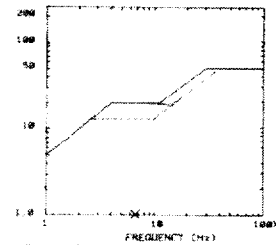
SCALED DIST. DISTANCE HEIGHT/delay
 0.0 30.0 m 10.0 kg

TRIGGERED manual at 13:39:18
 29 June 2009

TRAN	VEGT	LONG
PPU	0.30	1.00
FREQ	11	7
TIME	452	449
ACCEL	0.01	0.01
PK DISPL	0.004	0.004
PUS	1.00	ms

PK AIR D/P 30.7 dB(A) at 310 ms

USM RISES AND DISES ANALYSIS
 ALL GROUND CHANNELS(muss)



* Tran = +, Vegt = X, Long = O
 Calibrated 15 Dec. 2009
 by Instanteil Inc.

30M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 8119 U 5.51
 CLIENT
 LOCATION
 USER
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES

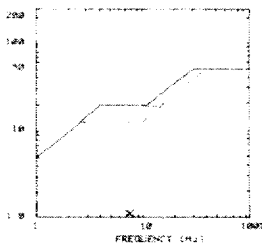
SCALED DIST. DISTANCE HEIGHT/delay
 12.8 20.0 m 10.0 kg

TRIGGERED manual at 13:58:11
 30 June 2009

TRAN	VEGT	LONG
PPU	0.52	1.13
FREQ	5	18
TIME	22	28
ACCEL	0.00	0.01
PK DISPL	0.002	0.011
PUS	1.29	ms

PK AIR D/P 21.8 dB(A) at 0 ms

USM RISES AND DISES ANALYSIS
 ALL GROUND CHANNELS(muss)



* Tran = +, Vegt = X, Long = O
 Calibrated 15 Dec. 2009
 by Instanteil Inc.

50M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 8119 U 5.51
 CLIENT
 LOCATION
 USER
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES

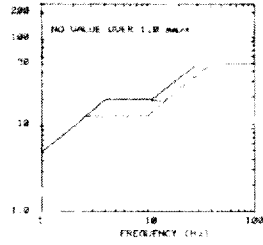
SCALED DIST. DISTANCE HEIGHT/delay
 91.0 20.0 m 10.0 kg

TRIGGERED manual at 13:54:53
 30 June 2009

TRAN	VEGT	LONG
PPU	0.10	0.22
FREQ	18	5
TIME	220	245
ACCEL	0.00	0.00
PK DISPL	0.002	0.000
PUS	0.30	ms

PK AIR D/P 27.8 dB(A) at 594 ms

USM RISES AND DISES ANALYSIS
 ALL GROUND CHANNELS(muss)



Calibrated 15 Dec. 2009
 by Instanteil Inc.

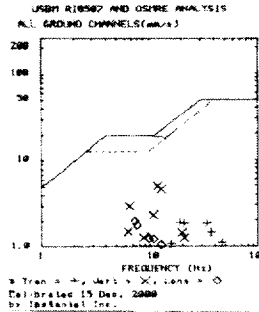
100M

관입깊이 30M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT
 LOCATION
 USER
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES

SCALED DIST. DISTANCE HEIGHT/delay
 9.3 18.0 m 18.0 kg
 TRIGGERED manual at 13:48:53
 29 June 2004

PPV	TRAN	VERT	LONG	max/g
FREQ	18	12	7	Hz
TIME	479	814	328	ms
ACCEL	0.65	0.04	0.02	g
PK DISP	0.015	0.029	0.011	mm
PVS	3.16 mm/s	at 0.14 ms		
PK AIR D-P	101.9 dB(C)	at 370 ms		

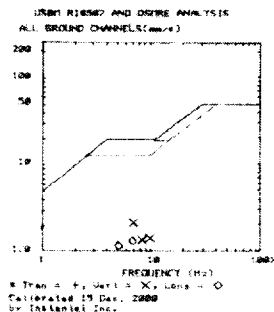


10M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT
 LOCATION
 USER
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES

SCALED DIST. DISTANCE HEIGHT/delay
 0.8 28.0 m 18.0 kg
 TRIGGERED manual at 13:49:05
 29 June 2004

PPV	TRAN	VERT	LONG	max/g
FREQ	0.71	2.18	1.92	Hz
TIME	14	7	7	ms
ACCEL	0.91	0.01	0.01	g
PK DISP	0.000	0.042	0.030	mm
PVS	2.14 mm/s	at 0.1 ms		
PK AIR D-P	90.2 dB(C)	at 30 ms		

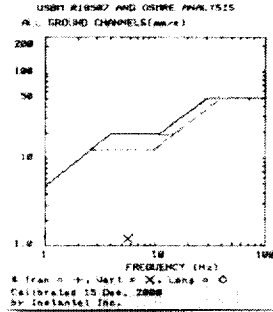


20M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT
 LOCATION
 USER
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES

SCALED DIST. DISTANCE HEIGHT/delay
 0.5 36.0 m 18.0 kg
 TRIGGERED manual at 13:49:50
 30 June 2004

PPV	TRAN	VERT	LONG	max/g
FREQ	0.32	1.22	0.28	Hz
TIME	14	0	0	ms
ACCEL	0.01	0.01	0.01	g
PK DISP	0.003	0.033	0.013	mm
PVS	1.24 mm/s	at 580 ms		
PK AIR D-P	89.2 dB(C)	at 431 ms		

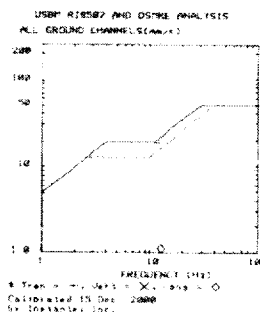


30M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT
 LOCATION
 USER
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES

SCALED DIST. DISTANCE HEIGHT/delay
 17.8 98.0 m 18.0 kg
 TRIGGERED manual at 13:49:56
 30 June 2004

PPV	TRAN	VERT	LONG	max/g
FREQ	0.71	0.00	0.11	Hz
TIME	14	7	7	ms
ACCEL	0.01	0.01	0.02	g
PK DISP	0.003	0.013	0.015	mm
PVS	1.44 mm/s	at 0.0 ms		
PK AIR D-P	24.4 dB(C)	at 0 ms		

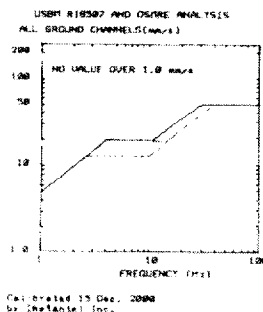


50M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT
 LOCATION
 USER
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES

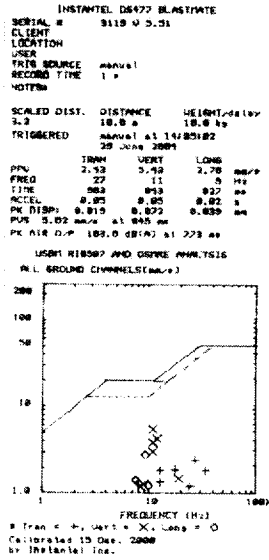
SCALED DIST. DISTANCE HEIGHT/delay
 91.8 166.0 m 18.0 kg
 TRIGGERED manual at 17:07:18
 30 June 2004

PPV	TRAN	VERT	LONG	max/g
FREQ	0.11	0.10	0.29	Hz
TIME	12	38	22	ms
ACCEL	0.00	0.00	0.00	g
PK DISP	0.001	0.002	0.000	mm
PVS	0.41 mm/s	at 0.4 ms		
PK AIR D-P	29.9 dB(C)	at 0.50 ms		

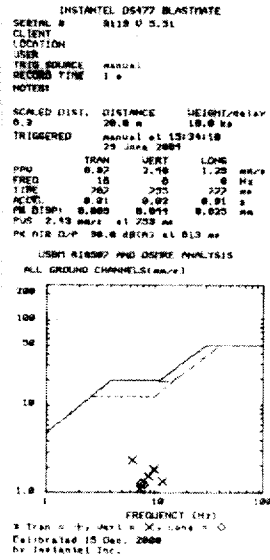


100M

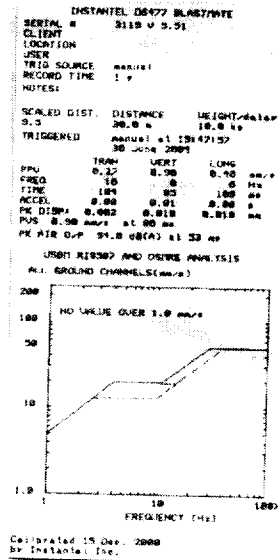
관입깊이 40M



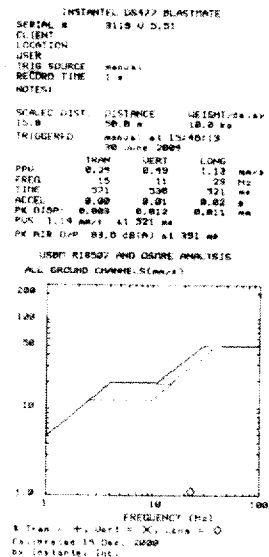
10M



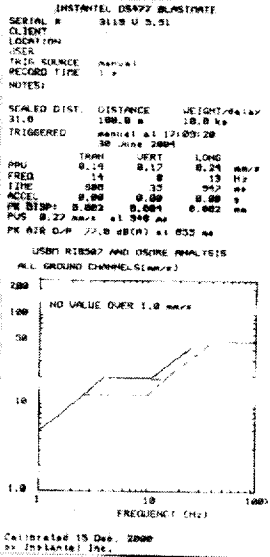
20M



30M

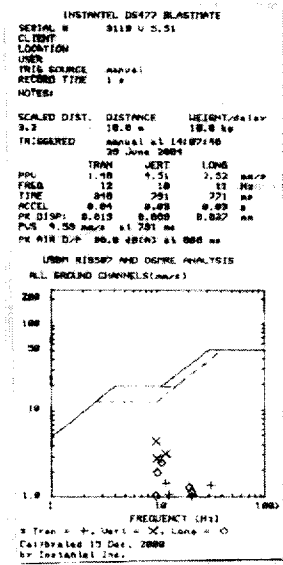


50M

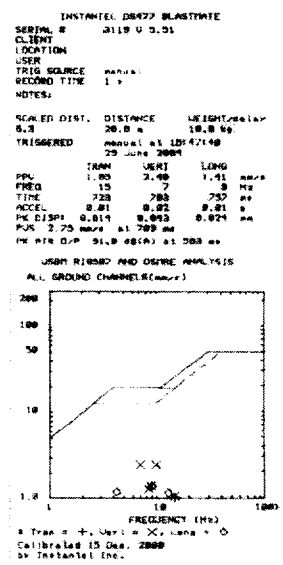


100M

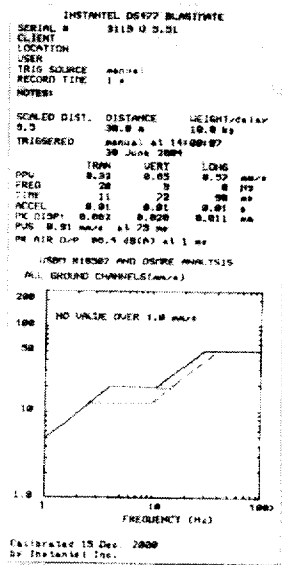
관입깊이 50M



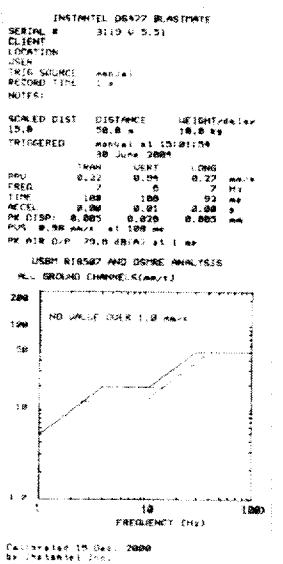
10M



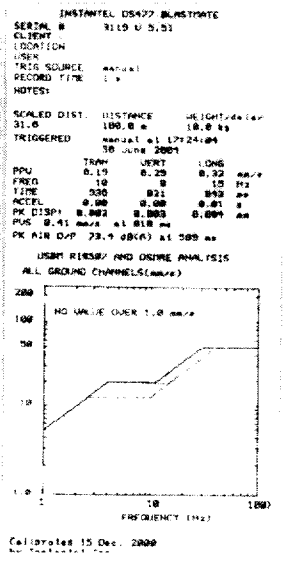
20M



30M

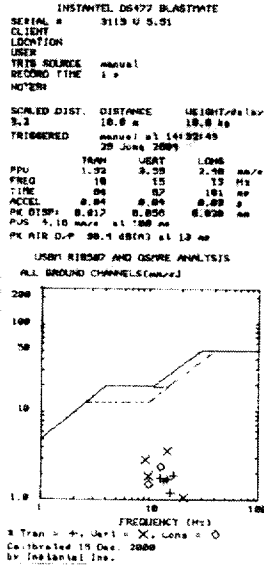


50M

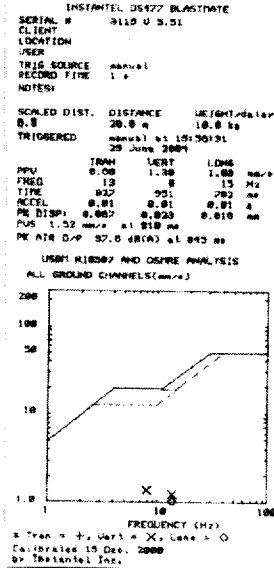


100M

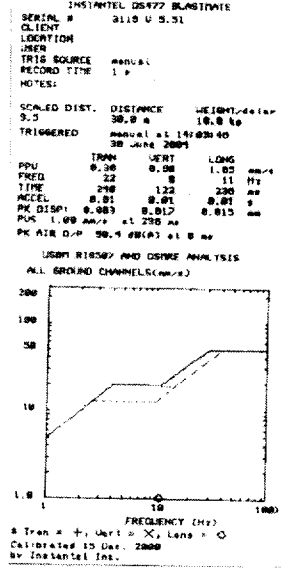
관입깊이 60M



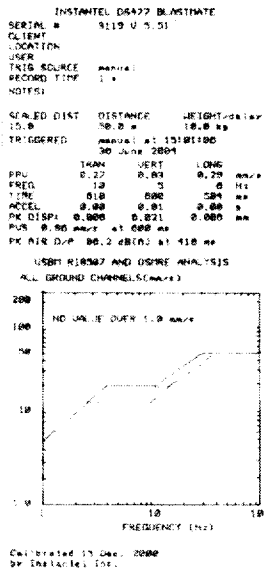
10M



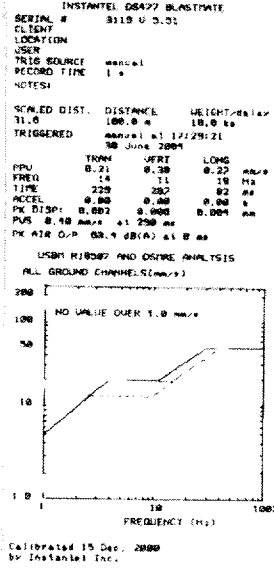
20M



30M



50M



100M

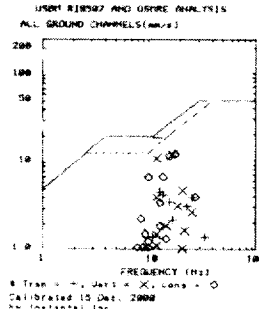
2. PHC파일 진동·소음 측정자료

관입깊이 10M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT HYOSUNG
 LOCATION SUNSHAN SITE
 USER MOOSUNG
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES:

SCALED DIST. DISTANCE WEIGHT/delay
 9.9 10.0 m 10.0 kg
 TRIGGERED manual at 10:52:38
 11 Oct, 2004

PPV	TRAN	VERT	LONG
FREQ	17.78	17.78	17.78 Hz
TIME	0.99	0.99	0.99 ms
ACCEL	0.20	0.24	0.23 g
PK DISP	0.845	0.149	0.103 mm
PUS	17.31 mm/s	at 618 ms	
PK AIR O/P	N/A	48(C) at 342 ms	

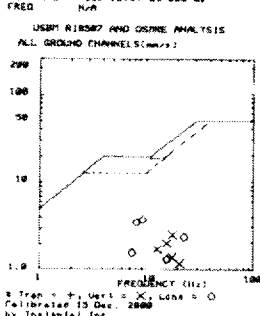


10M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT HYOSUNG
 LOCATION SUNSHAN SITE
 USER MOOSUNG
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES:

SCALED DIST. DISTANCE WEIGHT/delay
 0.3 20.0 m 10.0 kg
 TRIGGERED manual at 10:53:31
 11 Oct, 2004

PPV	TRAN	VERT	LONG
FREQ	1.82	2.38	3.48 Hz
TIME	1.7	1.0	3 Hz
ACCEL	0.88	0.89	0.84 g
PK DISP	0.615	0.821	0.852 mm
PUS	0.59 mm/s	at 718 ms	
PK AIR O/P	N/A	48(C) at 390 ms	

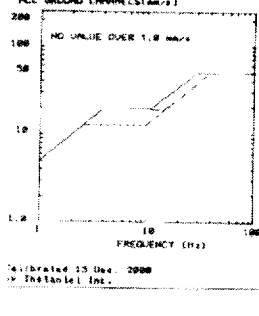


20M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT HYOSUNG
 LOCATION SUNSHAN SITE
 USER MOOSUNG
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES:

SCALED DIST. DISTANCE WEIGHT/delay
 20.0 m 10.0 kg
 TRIGGERED manual at 10:53:22
 11 Oct, 2004

PPV	TRAN	VERT	LONG
FREQ	0.59	1.02	0.84 Hz
TIME	1.9	0.9	0.9 ms
ACCEL	0.81	0.81	0.81 g
PK DISP	0.805	0.828	0.812 mm
PUS	1.21 mm/s	at 81 ms	
PK AIR O/P	N/A	48(C) at 829 ms	

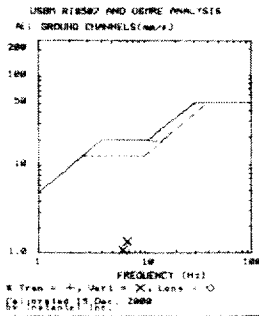


30M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT HYOSUNG
 LOCATION SUNSHAN SITE
 USER MOOSUNG
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES:

SCALED DIST. DISTANCE WEIGHT/delay
 12.7 40.0 m 10.0 kg
 TRIGGERED manual at 09:39:38
 11 Dec, 2004

PPV	TRAN	VERT	LONG
FREQ	0.59	0.59	0.9 Hz
TIME	0.99	0.99	0.99 ms
ACCEL	0.80	0.81	0.81 g
PK DISP	0.811	0.829	0.818 mm
PUS	1.38 mm/s	at 879 ms	
PK AIR O/P	N/A	48(C) at 203 ms	

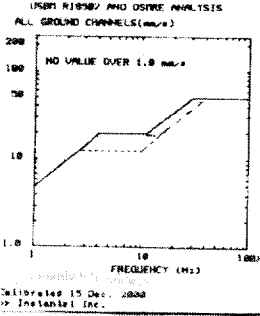


40M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT HYOSUNG
 LOCATION SUNSHAN SITE
 USER MOOSUNG
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES:

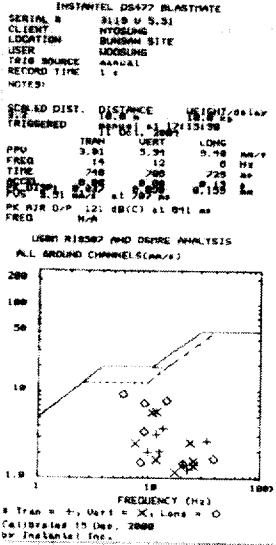
SCALED DIST. DISTANCE WEIGHT/delay
 15.8 50.0 m 10.0 kg
 TRIGGERED manual at 11:47:42
 11 Dec, 2004

PPV	TRAN	VERT	LONG
FREQ	0.51	0.58	0.43 Hz
TIME	0.92	0.92	0.92 ms
ACCEL	0.81	0.81	0.80 g
PK DISP	0.867	0.815	0.818 mm
PUS	1.62 mm/s	at 855 ms	
PK AIR O/P	N/A	48(C) at 190 ms	

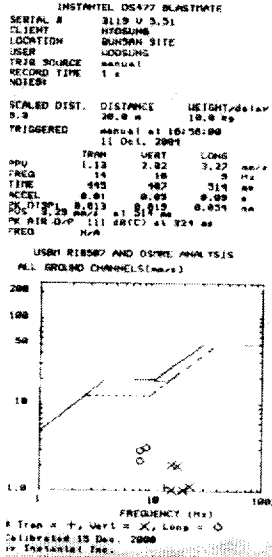


50M

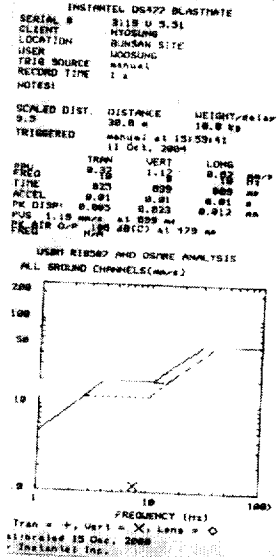
관입깊이 20M



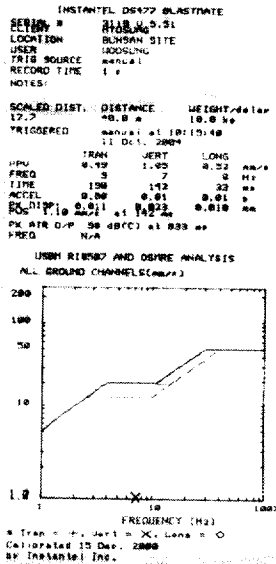
10M



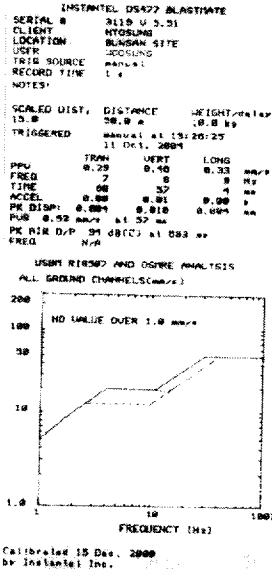
20M



30M



40M



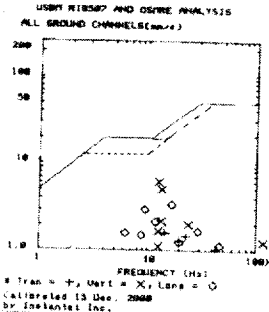
50M

관입깊이 30M

INSTANTEL DS477 BLASTPATE
 SERIAL # 3119 U 5.51
 CLIENT HYDSUNG
 LOCATION BUNSWAN SITE
 USER HOOSUNG
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 *
 NOTES:

SCALED DIST. DISTANCE WEIGHT/delay
 2.2 10.8 m 10.0 kg
 TRIGGERED manual at 17:51:32
 11 Oct. 2004

TRM	VERT	LONG	PPV	FREQ
1.09	0.22	2.44	1.09	17 Hz
TIME	919	387	894	ms
ACCEL	0.04	0.06	0.05	g
PK DISTP	0.014	0.002	0.003	ms
PUS	0.27	ms	at 257	ms
PK AIR O/P	118	dB(C)	at 121	ms
FREQ	N/A			

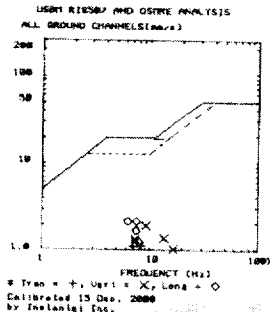


10M

INSTANTEL DS477 BLASTPATE
 SERIAL # 3119 U 5.51
 CLIENT HYDSUNG
 LOCATION BUNSWAN SITE
 USER HOOSUNG
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 *
 NOTES:

SCALED DIST. DISTANCE WEIGHT/delay
 0.2 20.8 m 10.0 kg
 TRIGGERED manual at 17:14:20
 11 Oct. 2004

TRM	VERT	LONG	PPV	FREQ
1.11	1.51	2.18	1.11	17 Hz
TIME	833	849	720	ms
ACCEL	0.01	0.02	0.02	g
PK DISTP	0.003	0.002	0.002	ms
PUS	0.17	ms	at 157	ms
PK AIR O/P	115	dB(C)	at 101	ms
FREQ	N/A			

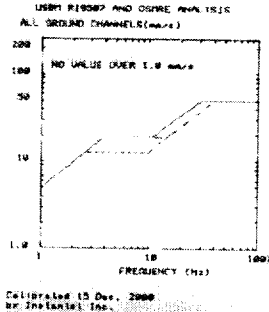


20M

INSTANTEL DS477 BLASTPATE
 SERIAL # 3119 U 5.51
 CLIENT HYDSUNG
 LOCATION BUNSWAN SITE
 USER HOOSUNG
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 *
 NOTES:

SCALED DIST. DISTANCE WEIGHT/delay
 5.3 30.8 m 10.0 kg
 TRIGGERED manual at 15:57:39
 11 Oct. 2004

TRM	VERT	LONG	PPV	FREQ
0.22	0.78	0.78	0.22	17 Hz
TIME	855	783	812	ms
ACCEL	0.00	0.01	0.00	g
PK DISTP	0.005	0.002	0.002	ms
PUS	0.18	ms	at 101	ms
PK AIR O/P	101	dB(C)	at 123	ms
FREQ	N/A			

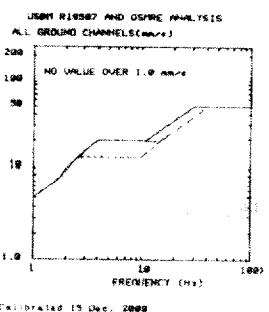


30M

INSTANTEL DS477 BLASTPATE
 SERIAL # 3119 U 5.51
 CLIENT HYDSUNG
 LOCATION BUNSWAN SITE
 USER HOOSUNG
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 *
 NOTES:

SCALED DIST. DISTANCE WEIGHT/delay
 12.7 40.8 m 10.0 kg
 TRIGGERED manual at 10:21:30
 11 Oct. 2004

TRM	VERT	LONG	PPV	FREQ
0.41	0.30	0.52	0.41	7 Hz
TIME	244	209	183	ms
ACCEL	0.005	0.003	0.011	g
PK DISTP	0.005	0.003	0.011	ms
PUS	0.50	ms	at 203	ms
PK AIR O/P	88	dB(C)	at 194	ms
FREQ	N/A			

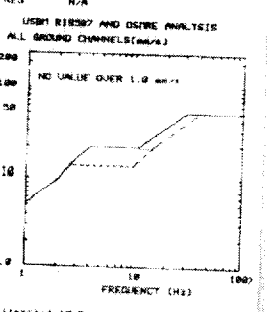


40M

INSTANTEL DS477 BLASTPATE
 SERIAL # 3119 U 5.51
 CLIENT HYDSUNG
 LOCATION BUNSWAN SITE
 USER HOOSUNG
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 *
 NOTES:

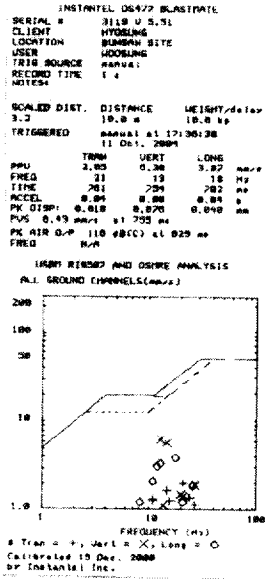
SCALED DIST. DISTANCE WEIGHT/delay
 15.8 50.8 m 10.0 kg
 TRIGGERED manual at 13:54:30
 11 Oct. 2004

TRM	VERT	LONG	PPV	FREQ
0.50	0.30	0.23	0.50	7 Hz
TIME	324	213	200	ms
ACCEL	0.00	0.00	0.00	g
PK DISTP	0.003	0.003	0.003	ms
PUS	0.52	ms	at 730	ms
PK AIR O/P	89	dB(C)	at 2	ms
FREQ	N/A			

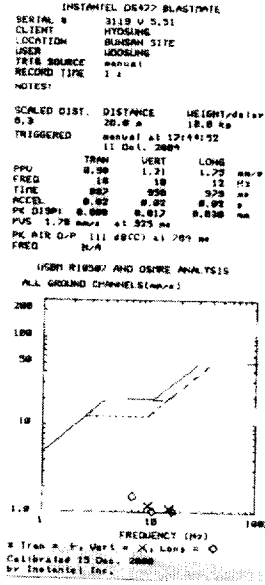


50M

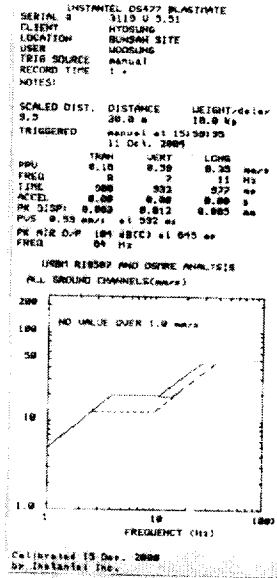
관입깊이 40M



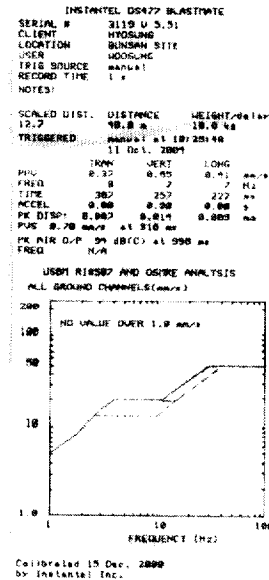
10M



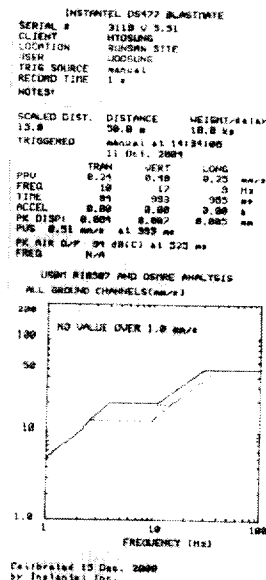
20M



30M



40M



50M

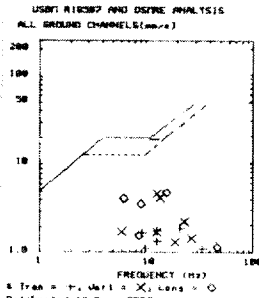
관입깊이 50M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT HYOSUNG
 LOCATION BUNSAN SITE
 USER WOODSUNG
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES:

SCALED DIST.	DISTANCE	HEIGHT, meter
3.2	10.0 m	10.0 kg

TRIGGERED manual at 17:50:27
 11 Dec. 2000

TRM	VERT	LONG
1.34	1.23	1.91 mm/s
FREQ	18	10 Hz
TIME	794	749 ms
ACCEL	0.00	0.00 0.00 s
PK DISP	0.024	0.007 0.024 mm
PUS	0.18 mm/s	at 745 ms
PK AIR O/P	123 dB(C) at 078 ms	FREQ N/A



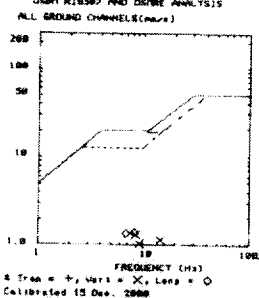
10M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT HYOSUNG
 LOCATION BUNSAN SITE
 USER WOODSUNG
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES:

SCALED DIST.	DISTANCE	HEIGHT, meter
0.3	20.0 m	10.0 kg

TRIGGERED manual at 17:51:23
 11 Dec. 2000

TRM	VERT	LONG
0.78	1.32	1.71 mm/s
FREQ	18	11 Hz
TIME	794	800 ms
ACCEL	0.00	0.00 0.00 s
PK DISP	0.002	0.020 0.020 mm
PUS	1.75 mm/s	at 581 ms
PK AIR O/P	111 dB(C) at 032 ms	FREQ N/A



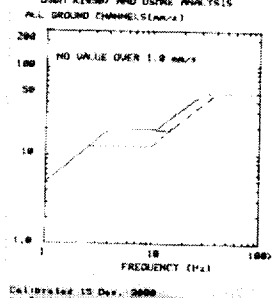
20M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT HYOSUNG
 LOCATION BUNSAN SITE
 USER WOODSUNG
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES:

SCALED DIST.	DISTANCE	HEIGHT, meter
5.0	30.0 m	10.0 kg

TRIGGERED manual at 15:55:53
 11 Dec. 2000

TRM	VERT	LONG
0.18	0.32	0.32 mm/s
FREQ	18	9 Hz
TIME	920	930 ms
ACCEL	0.00	0.01 0.00 s
PK DISP	0.002	0.010 0.002 mm
PUS	0.12 mm/s	at 930 ms
PK AIR O/P	102 dB(C) at 370 ms	FREQ N/A



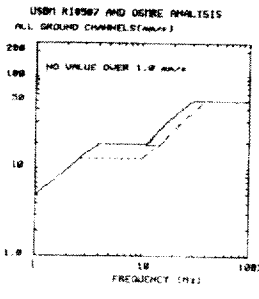
30M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT HYOSUNG
 LOCATION BUNSAN SITE
 USER WOODSUNG
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES:

SCALED DIST.	DISTANCE	HEIGHT, meter
12.7	40.0 m	10.0 kg

TRIGGERED manual at 18:34:43
 11 Dec. 2000

TRM	VERT	LONG
0.48	0.52	0.48 mm/s
FREQ	3	14 Hz
TIME	45	15 ms
ACCEL	0.00	0.01 0.00 s
PK DISP	0.003	0.019 0.000 mm
PUS	0.03 mm/s	at 380 ms
PK AIR O/P	94 dB(C) at 221 ms	FREQ 75 Hz



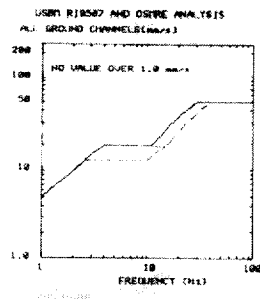
40M

INSTANTEL DS477 BLASTRATE
 SERIAL # 3119 U 3.31
 CLIENT HYOSUNG
 LOCATION BUNSAN SITE
 USER WOODSUNG
 TRIG SOURCE manual
 RECORD TIME 1 s
 NOTES:

SCALED DIST.	DISTANCE	HEIGHT, meter
15.0	50.0 m	10.0 kg

TRIGGERED manual at 18:34:18
 11 Dec. 2000

TRM	VERT	LONG
0.22	0.43	0.25 mm/s
FREQ	18	21 Hz
TIME	120	0 ms
ACCEL	0.00	0.00 0.00 s
PK DISP	0.002	0.000 0.004 mm
PUS	0.40 mm/s	at 0 ms
PK AIR O/P	94 dB(C) at 373 ms	FREQ N/A



50M

감사의 글

만학의 꿈을 이룬다는 것이 결코 쉽지 않다는 것을 절실히 느낀 짧은 시간이었습니다. 그러나 그 꿈의 절반이나마 완성단계에 이르게 된 것은 하나님의 은혜 가운데 인내하면서 오늘의 결실을 맺는데 동고동락한 선후배, 동료 여러분들과 주위의 따스하고도 매서운 성원과 격려 덕분이었습니다.

그동안 이러한 결실을 맺을 수 있도록 여러 가지로 부족한 저를 제자로 맞아 학문의 길로 인도하여 늘 지켜봐 주시고 가르쳐주시며 깊은 정성으로 지도하여 주신 이수용 지도교수님의 은혜에 진심으로 감사를 드립니다.

아울러 바쁘신 와중에서도 본 논문의 심사를 맡아 심사과정에서의 미흡함을 지적하고 지도하여주신 김영찬 교수님, 이재용 교수님께 깊은 감사를 드리며, 언제나 애정을 갖고 조언과 격려로 지도해 주신 조홍정 교수님, 류종우 교수님, 임영빈 교수님, 박천석 교수님, 김기환 교수님께도 진심으로 감사드립니다.

논문연구와 실측자료조사에 많은 격려와 도움을 보내주신 (주)평화TCM의 박영호회장님, 문휘영사장님, 이만희님, (주)가야ENG의 백승훈 이사님, 월건설(주)의 김용석소장님, 하석봉님과 학교에 있는 동안 늘 저에게 도움이 되어주셨던 이승철님, 정근주님, 이승준님을 비롯한 건축공학과 시공연구실 여러분들에게 감사의 마음을 전합니다.

지명(知命)이 다 되어 시작한 만학의 꿈을 이루기엔 가족들의 사랑과 격려가 또한 필연적이었습니다. 오늘이 있기까지 가장으로서의 역할에 충실치 못한 남편을 이해하고 감싸준 지순지고한 사랑을 가진 아내 오미옥, 항상 아버지를 사랑하는 두딸 지혜, 민지 그리고 늦둥이 막내아들 이삭, 저를 아는 세상의 모든 분들께 저의 가없는 사랑을 보냅니다.

2005년 1월

정 일 찬