

천공 후 말뚝타격공법의 진동·소음 문제 해소를 위한 적정 이격거리 산정 방안 연구

Estimating of Optimal Allowed Distance for Reducing Vibration and Noise Problems by Pile Driving after Drilling Method in Deep Foundation Work

박 흥 태* · 강 인 석**

Park, Hong-Tae · Kang, Lee-Seok

요 약

깊은기초 시공시에 기초파일의 항타작업은 인접구조물 등에 진동을 야기하고 소음으로 인해 주변지역에 민원을 발생시키고 있다. 이러한 문제로 진동·소음 문제를 직접 야기시키는 직타공법 보다는 주로 저소음·저진동 공법인 천공 후 타격공법을 적용하는 사례가 증가하고 있다. 그러나 천공 후 타격공법도 일정거리 이내에서 시공을 할 경우 진동·소음을 유발시켜 민원으로 인한 공기지연을 초래하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 건설 구조물의 구축을 위한 기초공사현장에서 말뚝공사를 할 때 발생하는 진동·소음을 천공 후 타격공법을 대상으로 지반조건이 상이한 7개의 현장에서 실측하여 이를 제정된 허용규제기준에 따른 적정 이격허용거리를 회귀분석 식으로 제시하고 있다. 이러한 연구 결과는 기초파일 공사시에 요구되는 적정 거리확보를 위한 기준역할을 하도록 하며, 인접 구조물이나 주민의 환경적 피해를 최소화하고, 나아가 공기지연으로 발생하는 클레임을 방지하는데 활용성을 갖도록 함에 연구의 목적이 있다.

키워드 : 기초파일, 깊은기초, 진동, 소음, 회귀분석

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 건설공사가 대형화되어감에 따라서 건설공사 현장에서 발생하는 진동·소음 문제는 국민들의 환경권에 대한 질적인 개선 요구와 진동·소음에 대한 규제법의 강화로 점차 심각성이 증대되고 있다. 진동·소음 규제법은 1994년 11월에 총리령으로 공포된 이래로 공사장 공사 진동 소음에 대한 허용규제기준이 엄격히 규정되어 있어서 기존 관행대로 말뚝항타 작업을 수행할 경우, 발생하는 진동·소음은 인근 주민이나 구조물에 피해를 빈번히 유발시켜 민원발생에 따른 공사중지로 인한 공정계획의 차질과 공사비 증액 등과 같은 경제적 손실을 초래할 수도 있다.

국내에서 사용되고 있는 직타공법은 선진국의 경우 전체 기초 공사의 약 20%정도가 사용되고 있으며, 이 경우도 주거나 상가

그리고 도심지에서는 사용을 자제하고 있는 실정이다. 따라서 굴착이나 속파기공법 등을 이용하여 말뚝을 심어서 시공하는 것이 대부분이지만, 근접시공이 불가피한 공사를 실시할 경우 환경문제는 필연적으로 발생되므로, 저진동·저소음 형태의 저공해 말뚝기초 시공법을 국내에서도 빠른 시일 내에 기초공사에 적용하여 양질의 시공을 실시하여야 할 것으로 사료된다.

국내의 진동·소음에 관련된 기존 연구들의 동향을 살펴보면, 도로를 달리는 차량들의 소음을 예측할 수 있는 도로소음의 예측모델에 대한 비교·평가(이규철 외, 1999)⁵⁾, SIP공법 시공시에 발생하는 진동 전달 및 감쇠 특성을 연구한 연구(박재영 외, 1999)⁶⁾, 발파와 관련된 진동·소음을 주 내용으로 하고 있는 건설현장 소음·진동·분진 평가 및 저감 대책(김하근 외, 1999)⁷⁾, 건설공사 수행시 발생하는 일반적인 진동·소음 대책을 다루고 있는 진동·소음 저감 대책(장을병, 2000)⁸⁾ 등이 있고, 말뚝항타시 진동에 대한 가설 방음벽의 성능예측을 주 내용으로 하고 있는 건설현장 소음도 평가 및 예측기법 개발(김하근 외, 1998)⁹⁾, 건설소음이 인근주민에게 미치는 영향에 관한 연구(조

* 일반회원, 공주대학교 공과대학 건설환경공학부, 부교수, 공학박사

** 종신회원, 경상대학교 토목공학과, 공학연구원, 교수, 공학박사

원희 외, 1999)⁸⁾가 있다. 외국의 기존 연구동향으로는 건설현장에서의 진동, 소음 저감 대책을 주 내용으로 하고 있는 Construction noise standards and the draft singapore code (Raymond B. W. Heng, 1985)⁹⁾, 건설현장의 진동·소음에 따른 비용절감 효과를 추정한 연구로는 Cost effectiveness of construction noise abatement, sound and vibration(F. M Kessler, 1981)¹⁰⁾ 등이 있으며, 이들 연구는 주로 도로소음이 나 건설현장에서의 진동·소음 경감 대책과 비용절감효과를 대상으로 하고 있다.

본 연구에서는 진동·소음 측정기를 이용하여 말뚝기초 공사 현장에서 진동·소음의 주범이 되고 있는 직타공법이 아닌 천공 후 타격공법만을 대상으로 진동·소음을 측정하였다. 연구에서는 측정된 자료를 토대로 회귀분석을 수행하여 진동·소음의 추정식을 도출하고, 이 식을 활용하여 발생원으로부터 제정된 진동·소음 허용규제기준을 만족하는 적정이격거리 기준을 제안함으로써 인접구조물과 주변의 환경적 피해를 최소화하는데 그 목적이 있다.

1.2 연구의 범위 및 방법

1) 연구의 범위

말뚝기초공사의 진동·소음에 영향을 미치는 것으로 판단되는 지반조건에 대한 비교, 분석은 기초공사가 진행중인 현장을 조사대상으로 할 수 밖에 없는 조사상의 한계로 인해 여러 종류의 지반조건을 임의로 선정할 수 없었다. 본 연구에서 조사대상으로 한 현장들의 지반조건은 하부깊이 층으로 갈수록 대체로 풍화도와 풍화암으로 구성되어 있어, 지반조건에 따른 진동·소음의 영향은 분석대상에서 제외하였다. 또한, 저소음·저진동 공법이라도 공법에 따라서 진동·소음의 차이가 있을 것으로 판단되어 본 연구에서는 오거 천공 후 타격공법(A, B, C 현장), T-4 천공 후 타격공법(D, E, F 현장), 진동회전압입공법(G 현장)으로 구분하여 공사장 공사소음 주간 주거지역 65dB(V)과 공사장 공사 진동 주간 주거지역 70dB(A)만의 이격거리를 비교·분석하는 것으로 범위를 한정하였고, 나머지 심야나 조석시간은 참고자료로 활용하도록 이격거리를 산출하여 놓았다. 그림 1은 본 연구에서 수행하는 흐름도를 나타내고 있다.

2) 연구의 방법

(1) 측정기기

진동측정기는 순간 값 외에 시간당 레벨, L10치, 파워평균, 최대 값을 3방향 동시에 측정이 가능하고, 측정된 값이 대형액정 화면에 표시되며, 출력단자는 3방향 독립으로 출력되기 때문에 레벨 레코드 등에 동시기록이 가능한 일본 RION사의 VM52 기

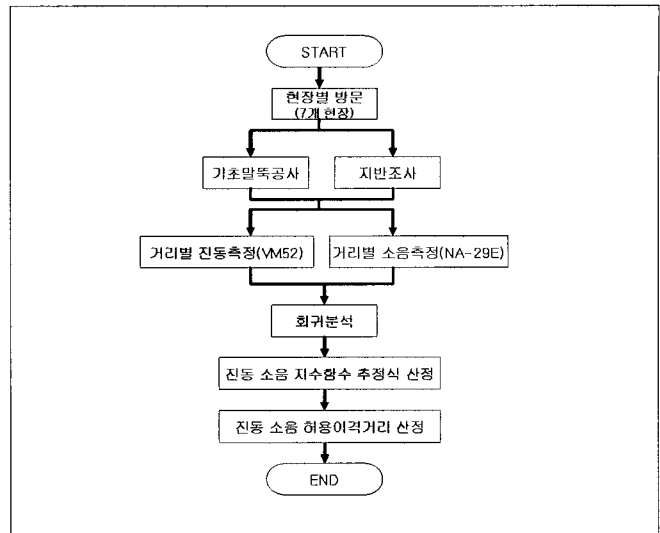


그림 1 연구의 수행방법

기를 사용하였다. 소음측정기는 잔향시간, 등가소음도(Leq) 및 최대 값의 측정이 가능하고 주파수대역별 소음 특성을 파악할 수 있는 일본 RION사의 NA-29E 기기를 사용하였다.

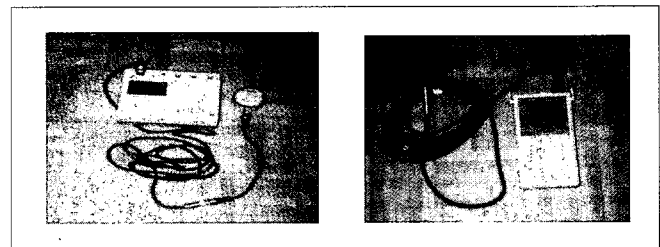


사진1. 진동 측정기(VM52)

사진2. 소음측정기(NA-29E)

(2) 측정방법

주거지역에서 진동·소음 규제치가 주간에 각각 65dB(V), 70dB(A)이므로 이들 규제치를 확보하기 위하여 발생원로부터 10-50m까지 10m간격으로 측정하였으나 현장조건의 한계로 인하여 E, F 현장에서는 10-40m까지 10m간격으로 측정하였다.

이는 본 연구의 조사대상 공사현장이 주로 주거지역과 인접한 지역으로, 인근 주거지역과의 이격거리가 50-60m 정도가 대부분이기 때문이다. 본 연구에서 진동·소음 측정시간은 증가하면 증가할수록 정확치가 분석되나 회사측의 부정적인 견해와 각 현장마다 말뚝, 해머종류, 말뚝길이에 따라 향타시간이 다양하여 현장에 맞는 시간간격을 선택하였고, 측정방법은 다음과 같다.

진동측정은 VM52 측정장비를 5분 이상으로 setting하여 말뚝이 향타되는 동안 L10치를 읽어 기록하였고, 측정위치에 3축 센서를 매몰하여 수평으로 견고하게 묻은 후 중량물(모래주머니)을 얹어 측정하였다. 소음측정은 NA-29E 측정장비를 5분

이상으로 setting하여 말뚝이 향타되는 동안 등가소음도(Leq)를 읽어 기록하였고, 측정위치에 마이크론의 높이(1.2-1.5m)로 설치하여 측정하였다.

2. 진동·소음에 의한 환경오염피해 규제기준 및 측정시험방식

2.1 건설 진동·소음 규제기준

현재까지 적용되고 있는 진동·소음 규제기준은 1991년 2월 고시된 바 있는 환경관련 법규내의 진동·소음 규제법 시행령 및 시행규칙이었다. 진동관련 규제는 수치로 제시되지 못하여 외국의 관련기관 중 가장 엄격하다고 볼 수 있는 독일의 독일공업규격(DIN; Deutsche Industrienorm)규정을 일반적으로 적용해 왔다. 이 법규에 제시된 진동·소음관련 규제를 2003년 7월 1일 다시 개정하여 고시하였고, 그 기준은 표 1 및 표 2와 같다.⁴⁾

표 1. 생활진동규제기준(2003년 7월 1일 개정) (단위: dB(V))

대상지역	공사장 공사 진동	
	주간	심야
주거지역 등	65이하	60이하
기타지역	70이하	65이하

표 2. 생활소음규제기준(2003년 7월 1일 개정) (단위: dB(V))

대상지역	공사장 공사 진동		
	조석	주간	심야
주거지역 등	65이하	70이하	55이하
기타지역	70이하	75이하	55이하

본 연구에서는 표 1과 표 2의 건설 진동·소음 규제기준 중 주거지역을 기준으로 회귀분석 식과 이 식에 근거한 적정 허용이격거리기준을 제시한다.

2.2 공법별 진동·소음 측정 대상 제한

1) 공법별 현장별 토층과 특성

또한 본 연구에서는 현장의 토질 조건이 표 3의 A현장을 제외한 하부 깊이 층에서의 토층은 풍화토와 풍화암 순으로 구성되어 있으며, A현장은 화강암, 나머지 현장은 풍화암까지 말뚝향타가 관입되었을 때의 진동 소음을 측정하였다. 각 공법별, 현장별 토층현황 및 특성은 표 3, 표 4, 표 5와 같다.

표 3. 오거 천공 후 타격공법, 토층 및 특성

현장구분	깊이 별 토층	말뚝향타 관입깊이	N치(최대/최소)
A현장	매립층 모래층 모래·자갈층 화강암	15m	50/3
B현장	점토·자갈·호박돌 자갈질 점토 풍화토 풍화암	10m	50/20
C현장	모래질 자갈층 풍화토 풍화암	14m	50/14

표 4. T-4 천공 후 타격공법-타격, 토층 및 특성

현장구분	깊이 별 토층	말뚝향타 관입깊이	N치(최대/최소)
D현장	풍화 잔적토 풍화된 암 풍화암	25m	50/11
E현장	호박돌 자갈 풍화토 연암	13m	30/21
F현장	풍화 잔적토 풍화토 풍화암	25m	50/11

2) 공법별 현장별 진동·소음 측정자료

본 연구에서 3가지 공법에 7개 현장을 대상으로 진동·소음을 측정하여 회귀분석을 수행하였다.

표 5. 진동압입공법(바이브로 해머), 토층 및 특성

현장구분	깊이 별 토층	말뚝향타 관입깊이	N치(최대/최소)
G현장	매립층 점토 풍화토 풍화암	23m	50/10

오거천공 후 타격공법, T-4 천공 후 타격공법, 진동회전압입 공법에 의한 현장별 향타기 종류, 말뚝종류 및 거리별 진동·소음 측정자료는 표 6, 표 8, 표 10과 같으며, 10m에서 40m 혹은 50m까지 10m 간격으로 향타에 대한 진동·소음을 측정하였다. 또한 표 7과 표 9에서와 같이 공법별 진동·소음에 대한 상한치와 평균치를 따로 구분하여 분석한 것은 상한치와 평균치의 분석모형을 지표로 하여 표 3과 표 4의 조건과 유사한 현장조건에서 진동·소음의 측정에 의한 적정 허용이격거리를 확보하지 못했을 때, 주거지역에서의 진동·소음 허용기준치 65dB(V), 70dB(A)를 만족하는 적정 허용이격거리를 용이하게 구하고자 하는데 있다.

표 6. 현장별 제원 및 진동·소음 측정자료
(오거 천공후 타격공법) $dB(V)/L_{10}$, $dB(A)/L_{eq}$

현장 구분	항타기 종류	말뚝 종류	구분	측정거리				
				10m	20m	30m	40m	50m
A현장	유압식	PHC	진동	60.4	55.4	51.2	47.3	43.3
			소음	88.2	81.2	75.1	68.7	61.9
B현장	유압식	PSC	진동	63.5	57.6	43.3	42.0	39.6
			소음	79.5	78.6	71.4	71.9	70.6
C현장	드롭식	PHC	진동	50.2	42.9	34.6	30.0	23.9
			소음	91.1	84.2	75.3	71.8	68.0

표 7. 상한치, 평균치 진동·소음 측정자료
(오거 천공후 타격공법) $dB(V)/L_{10}$, $dB(A)/L_{eq}$

타격 때의 소음·진동	구분	측정거리				
		10m	20m	30m	40m	50m
상한치	진동	63.5	57.6	51.2	47.3	43.3
	소음	91.1	84.2	75.3	71.9	68.0
평균치	진동	58.0	52.0	43.0	40.0	35.6
	소음	86.3	81.3	73.9	70.8	66.8

표 8. 현장별 제원 및 진동·소음 측정자료
(T-4 천공 후 타격공법) $dB(V)/L_{10}$, $dB(A)/L_{eq}$

현장 구분	항타기 종류	말뚝 종류	구분	측정거리				
				10m	20m	30m	40m	50m
D현장	유압식	PHC	진동	57.6	54.7	53.5	52.4	51.1
			소음	94.1	88.0	81.1	74.6	70.5
E현장	드롭식	PHC	진동	54.7	49.0	45.5	35.1	-
			소음	84.2	79.6	73.2	73.0	-
F현장	유압식	PHC	진동	69.6	66.3	58.7	56.1	-
			소음	96.1	91.0	85.0	80.4	-

표 9. 상한치, 평균치 진동·소음 측정자료
(T-4 천공 후 타격공법) $dB(V)/L_{10}$, $dB(A)/L_{eq}$

타격 때의 소음·진동	구분	측정거리				
		10m	20m	30m	40m	50m
상한치	진동	69.6	66.3	58.7	56.1	51.1
	소음	96.1	91.0	85.0	80.4	-
평균치	진동	60.6	56.7	52.6	47.9	-
	소음	91.5	86.2	79.8	76.0	-

표 10. 현장별 제원 및 진동·소음 측정자료
(진동회전압입공법) $dB(V)/L_{10}$, $dB(A)/L_{eq}$

현장 구분	항타기 종류	말뚝 종류	구분	측정거리				
				10m	20m	30m	40m	50m
G현장	진동식	강관	진동	66.0	62.4	57.9	56.8	54.2
			소음	79.0	75.2	73.9	73.5	72.9

3. 회귀분석 추정식 산정기준

소음은 보통 점음원으로부터 거리가 2배가 되면 6dB씩 감소되는 형태를 보이므로 선형의 1차식으로 산출하고, 진동은 지반 조건에 따라 다르지만, 보통의 경우 거리가 2배 증가하면 1-10m 범위에서는 4dB, 4-20m 범위에서는 6dB씩 감소한다. 따라서 근거리에서는 거리에 따른 감쇠량이 크고 어느 정도 이격된 거리에서는 거리에 따라 감쇠량이 적게 되어 보통 지수함수로 표현된다. 따라서 소음은 1차식, 진동은 지수함수식으로 회귀분석을 수행하여 도출하였다. 여기서 1차식, 지수함수식의 변수 "X"는 표1과 표2의 조건에 부합하는 허용이격거리를 나타낸다. 그리고 추정식의 신뢰도 판정 기준은 $R^2=0.95$ 이상 "양호", $R^2=0.90-0.94$ "보통" $R^2=0.90$ 이하 "낮음"하여 판단하였다. 또한, 점토, 사질토, 암 등의 지반에 따른 감쇠(Damping) 값을 정량화한 값을 고려하여 회귀분석을 수행하면 보다 현실적인 결과가 도출될 것으로 판단되나 지층의 구성 및 자료의 변수가 다양하여 정량화한 감쇠 값을 얻기에는 현실적으로 많은 노력과 시간이 요구된다. 따라서 감쇠 값을 고려하고 있지는 않았지만, 본 논문에서 적용한 값들은 표 3, 표 4, 표 5의 지반에서 말뚝이 항타되는 동안 측정된 진동·소음 값으로서 어느 정도의 감쇠 값이 고려된 상태에서 얻은 결과치라 할 수 있으므로 표 3, 표 4, 표 5의 지반과 동일하거나 유사한 지반에서는 본 연구의 결과를 참조하여 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 각 공법별 현장별 진동·소음 분석

4.1 오거 천공 후 타격공법

오거 천공 후 타격공법의 진동·소음 측정자료를 가지고 A현장, B현장, C현장의 진동·소음에 대한 회귀분석 결과는 그림 2 및 그림 3과 같고, 이 그림의 분석결과를 가지고 정리한 진동 소음 지수함수의 추정식이 표 11, 표 14, 표 17과 같다. C현장이 진동이 낮고 소음이 높은 것은 타격공법, 말뚝의 종류, 깊이별

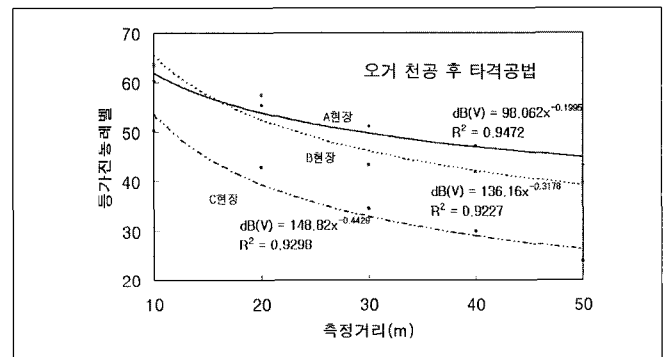


그림 2. 등가 진동 회귀분석

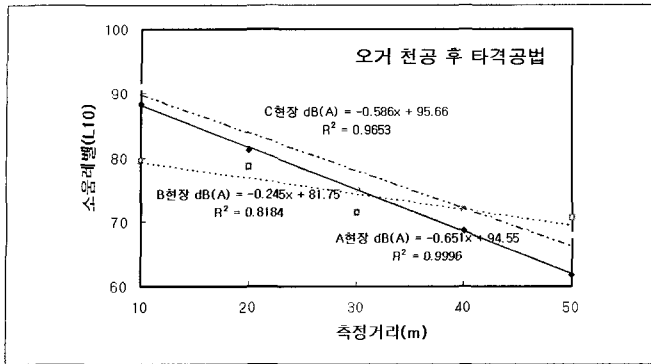


그림 3. 소음레벨 회귀분석

토층의 종류, 현장조건 등의 다양한 요인이작용한 것으로 판단 된다.

4.1.1 A 현장 진동 소음 분석

(1) 측정방법 및 지반조건

측정은 10m에서 50m까지 10m간격으로 향타에 대한 진동·소음 측정을 실시하였다. PHC말뚝을 천공한 후 유압해머로 깊이 15m(50/3)의 화강암까지 향타하는 동안에 측정하였다. 이 지역의 토층은 깊이별로 매립층, 모래, 모래 자갈층, 화강암 순으로 구성되어 있다.

(2) 추정식 산정

상기의 지반조건으로 구성된 토층에서 진동·소음 측정자료를 A현장에 대해 회귀분석한 결과 표 11과 같이 지수함수의 추정식이 도출되었고, 진동(R²)=0.9472, 소음(R²)=0.9996으로 신뢰도는 매우 양호한 것으로 나타났다.

표 11. A현장 진동·소음 추정식

현 장 구 분	구분	진동dB(V) · 소음dB(A) 추정식	상관계수 (R ²)
A현장	진동	dB(V) = 98.062X ^{-0.1995}	0.9472
	소음	dB(A) = -0.651X+94.55	0.9996

(3) 허용거리

지반조건별 말뚝 직향타 측정치에 대해 진동·소음의 지수함수의 추정식으로부터 진동 허용기준치 dB(V) 65와 소음 허용기준치 dB(A) 70에 대한 역산으로 적정 허용이격거리를 구해보면, 표 12 및 표 13과 같고, 주간 주거지역을 기준으로 적정 허용이격거리를 계산한 결과 진동의 경우 8m, 소음의 경우 38m 이상의 이격거리가 요구되는 것으로 판단된다.

표 12. 생활진동규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 진동 규제 기준 허용거리(m)			
	주거지역 등		기타지역	
	주간	심야	주간	심야
A현장	8	12	5	8

표 13. 생활소음규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 진동 규제 기준 허용거리(m)					
	주거지역 등			기타지역		
	조선	주간	심야	조선	주간	심야
A현장	46	38	61	38	30	61

4.1.2 B 현장 진동·소음 분석

(1) 측정방법 및 지반조건

측정은 10m에서 50m까지 10m간격으로 향타 진동·소음 측정을 실시하였다. PSC말뚝을 천공한 후 유압해머로 깊이 10m(50/20)까지 향타하는 동안에 측정하였다. 이 지역의 토층은 토지개발공사에서 조성한 지구로서 깊이별로 점토, 자갈, 호박돌, 자갈질 점토, 풍화토, 풍화암 순으로 구성되어 있다.

(2) 추정식 산정

상기의 지반조건으로 구성된 토층에서 진동·소음 측정자료를 B현장에 대해 회귀분석 결과 표 14와 같이 지수함수의 추정식이 도출되었고, 진동(R²)0.9227, 소음(R²)=0.8184로 의 신뢰도는 양호하나 소음의 신뢰도는 다소 낮은 것으로 나타났다.

표 14. 진동·소음 추정식

현 장 구 분	구분	진동dB(V) · 소음dB(A) 추정식	상관계수 (R ²)
B현장	진동	dB(V) = 136.16X ^{-0.3178}	0.9227
	소음	dB(A) = -0.245X+81.75	0.8184

(3) 허용거리

지반조건별 말뚝 직향타 측정치에 대해 진동·소음의 지수함수의 추정식으로부터 진동 허용기준치 dB(V) 65와 소음 허용기준치 dB(A) 70에 대한 역산으로 적정 허용이격거리를 구해보면, 표 15 및 표 16과 같고, 주간 주거지역을 기준으로 적정 허용이격거리를 계산한 결과 진동의 경우 10m, 소음의 경우 48m 이상의 이격거리가 요구되는 것으로 판단된다.

표 15. 생활진동규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 진동 규제 기준			
	허용거리(m)			
	주거지역 등		기타지역	
	주간	심야	주간	심야
B현장	10	13	8	10

표 16. 생활소음규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 진동 규제 기준					
	허용거리(m)					
	주거지역 등			기타지역		
	조식	주간	심야	조식	주간	심야
B현장	69	48	109	48	28	109

표 18. 생활 진동 규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 진동 규제 기준			
	허용거리(m)			
	주거지역 등		기타지역	
	주간	심야	주간	심야
C현장	7	8	6	7

표 19. 생활 소음 규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 진동 규제 기준					
	허용거리(m)					
	주거지역 등			기타지역		
	조식	주간	심야	조식	주간	심야
C현장	53	44	70	44	36	70

4.1.3 C 현장 진동·소음 분석

(1) 측정방법 및 지반조건

측정은 10m에서 50m까지 10m간격으로 향타에 대한 진동·소음 측정을 실시하였다. PHC말뚝을 천공한 후 드롭해머로 14m(50/14)의 풍화암까지 향타하는 동안에 측정하였다. 이 지역의 토층은 1~2m를 매립토로 성토하고, 원지반은 모래질 자갈층; 풍화토, 풍화암 순으로 구성되어 있다.

(2) 추정식 산정

상기의 지반조건으로 구성된 토층에서 진동·소음 측정치를 C현장에 대해 회귀분석 결과 표 17과 같이 지수함수의 추정식이 도출되었고, 진동(R2)=0.9298, 소음(R2)=0.9653으로 진동의 신뢰도는 양호하며, 소음의 신뢰도는 매우 양호한 것으로 나타났다.

표 17. 진동·소음 추정식

현장 구분	구분	진동dB(V) · 소음dB(A) 추정식	상관계수 (R²)
C현장	진동	$dB(V) = 148.82X^{-0.4429}$	0.9298
	소음	$dB(A) = -0.586X + 95.66$	0.9653

(3) 허용거리

지반조건별 말뚝 직향타 측정치에 대해 진동·소음의 지수함수의 추정식으로부터 진동 허용기준치 dB(V) 65와 소음 허용기준치 dB(A) 70에 대한 역산으로 적정 허용이격거리를 구해보면, 표 18 및 표 19와 같고, 주간 주거지역을 기준으로 적정 허용이격거리를 계산한 결과 진동의 경우 7m, 소음의 경우 44m 이상의 이격거리가 요구되는 것으로 판단된다.

4.1.4 상한치, 평균치 진동·소음 분석

오거 천공 후 타격공법의 진동·소음 측정자료에 대한 상한치와 평균치를 따로 구분하여 분석한 것은 상한치와 평균치의 분석모형을 지표로 하여 표 3의 조건과 유사한 현장조건에서 진동·소음 측정에 의한 적정 허용이격거리를 확보하지 못했을 때, 진동·소음 허용기준치를 만족하는 적정 허용이격거리를 용이하게 구하고자 하는데 있으며, 진동·소음에 대한 상한치와 평균치의 회귀분석결과는 그림 4 및 그림 5와 같다.

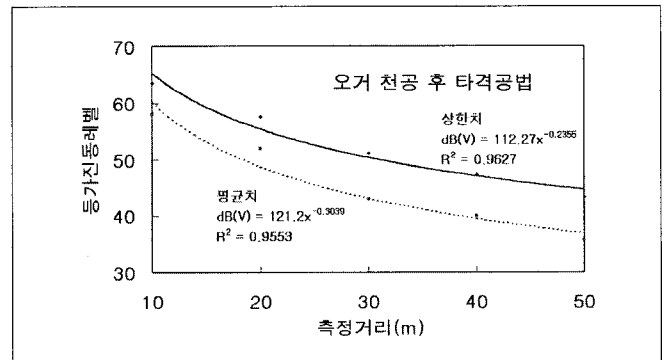


그림 4. 상한치, 평균치 등가 진동 회귀분석

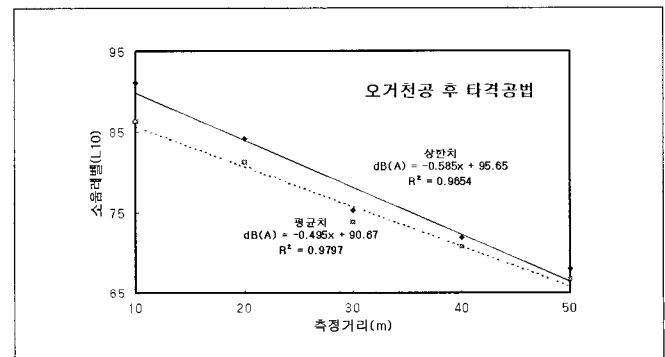


그림 5. 상한치, 평균치 소음레벨 회귀분석

(1) 추정식 산정

또, 이 그림의 분석결과를 가지고 진동·소음 지수함수의 추정식이 표 20과 같고, 진동의 상한치와 평균치의 (R2)=0.9627, (R2)=0.9553, 소음의 상한치와 평균치의 (R2)=0.9654, (R2)=0.9797로 신뢰도는 진동·소음 모두 매우 양호한 것으로 나타났다.

표 20. 상한치, 평균치 진동·소음 추정식

현장 구분	구분	진동dB(V) · 소음dB(A) 추정식	상관계수 (R ²)
진동	상한치	$dB(V) = 112.27X^{-0.2355}$	0.9627
	평균치	$dB(A) = 121.20X^{-0.3039}$	0.9553
소음	상한치	$dB(V) = -0.585X + 95.65$	0.9654
	평균치	$dB(A) = -0.495X + 90.67$	0.9797

(2) 허용거리

오거 천공 후 타격공법의 진동·소음 측정자료에 대한 상한치와 평균치를 따로 구분하여 분석한 진동·소음 지수함수의 추정식으로부터 진동허용기준치 dB(V) 65와 소음허용기준치 dB(A) 70에 대한 역산으로 적정 허용이격거리를 구해보면, 표 21 및 표 22와 같고, 주간 주거지역을 기준으로 적정 허용이격거리를 계산한 결과 진동의 경우 상한치 10m, 평균치 8m 그리고 소음의 경우 상한치 44m 평균치 42m 이상의 이격거리가 요구되는 것으로 판단된다.

표 21. 생활 진동 규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 진동 규제 기준			
	허용거리(m)			
	주거지역 등		기타지역	
	주간	심야	주간	심야
상한치	10	14	8	10
평균치	8	10	6	8

표 22. 생활 소음 규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 소음 규제 기준					
	허용거리(m)					
	주거지역 등			기타지역		
	조식	주간	심야	조식	주간	심야
상한치	53	44	70	44	36	70
평균치	52	42	72	42	32	72

4.2 T-4 천공 후 타격공법

T-4 천공 후 타격공법의 진동·소음 측정자료를 가지고 D현장, E현장, F현장의 진동·소음에 대한 회귀분석 결과는 그림 6 및 그림 7과 같고, 이 그림의 분석결과를 가지고 정리한 진동·

소음 지수함수의 추정식이 표 23, 표 26, 표 29와 같다.

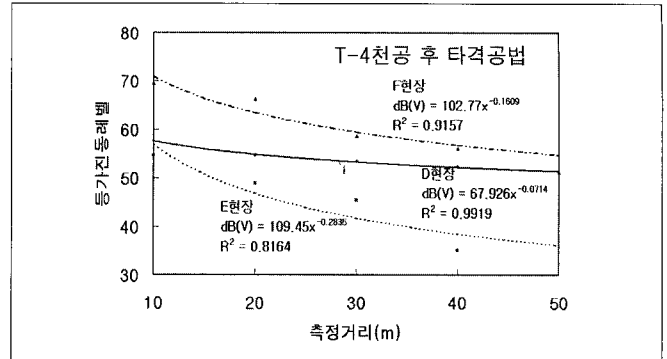


그림 7. 등가 진동 회귀분석

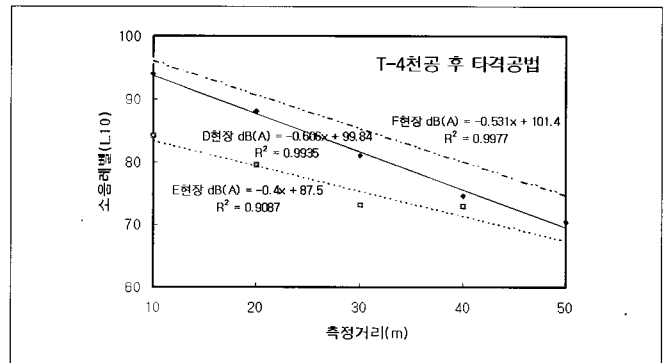


그림 6. 소음레벨 회귀분석

각 현장별 등가 진동·소음의 측정거리별로 동일하게 반비례하고 있는 것으로 나타났다.

4.2.1 D 현장 진동·소음 분석

(1) 측정방법 및 지반조건

측정은 10m에서 50m까지 10m간격으로 향타에 대한 진동측정을 실시하였다. PHC말뚝을 천공한 후 유압해머로 25m(50/11)의 풍화암까지 향타하는 동안 측정하였다. 이 지역의 토층은 깊이별로 풍화잔적토, 부분적으로 풍화된 암, 풍화암순으로 구성되어 있다.

(2) 추정식 산정

상기의 지반조건으로 구성된 토층에서 진동·소음 측정치를 D현장에 대해 회귀분석 결과 표 23과 같이 지수함수의 추정식이 도출되었고, 진동(R2)=0.9919, 소음(R2)=0.9935로 진동과 소음 모두 신뢰도는 매우 양호한 것으로 나타났다.

표 23. 진동·소음 추정식

현 장 구 분	구분	진동dB(V) · 소음dB(A) 추정식	상관계수 (R ²)
D현장	진동	$dB(V) = 67.926X^{-0.0714}$	0.9919
	소음	$dB(A) = -0.606X + 99.84$	0.9935

(3) 허용거리

지반조건별 말뚝 직항타 측정치에 대해 진동·소음의 지수함수의 추정식으로부터 진동 허용기준치 dB(V) 65와 소음 허용기준치 dB(A) 70에 대한 역산으로 적정 허용이격거리를 구해보면, 표 24 및 표 25와 같고, 주간 주거지역을 기준으로 적정 허용이격거리를 계산한 결과 진동의 경우 2m, 소음의 경우 50m 이상의 이격거리가 요구되는 것으로 판단된다.

표 24. 생활 진동 규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 진동 규제 기준 허용거리(m)			
	주거지역 등		기타지역	
	주간	심야	주간	심야
D현장	2	6	1	2

표 25. 생활 소음 규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 소음 규제 기준 허용거리(m)					
	주거지역 등			기타지역		
	조석	주간	심야	조석	주간	심야
D현장	58	50	74	50	41	74

4.2.2 E 현장 진동·소음 분석

(1) 측정방법 및 지반조건

측정은 10m에서 40m까지 10m간격으로 항타 진동측정을 실시하였다. PHC말뚝을 천공한 후 유압해머로 13m(30/21)의 연암까지 항타하는 동안에 측정하였다. 이 지역의 토층은 호박돌, 자갈, 풍화토, 연암 순으로 구성되어 있다.

(2) 추정식 산정

상기의 지반조건으로 구성된 토층에서 진동·소음 측정치를 D현장에 대해 회귀분석 결과 표 26과 같이 지수함수의 추정식이 도출되었고, 진동(R²)=0.8164, 소음(R²)=0.9087로 진동의 신뢰도는 다소 낮은 것으로 나타났고, 소음 신뢰도는 양호한 것으로 나타났다.

(3) 허용거리

지반조건별 말뚝 직항타 측정치에 대해 진동·소음의 지수함수의 추정식으로부터 진동 허용기준치 dB(V) 65와 소음 허용기

표 26. 진동·소음 추정식

현 장 구 분	구분	진동dB(V) · 소음dB(A) 추정식	상관계수 (R ²)
E현장	진동	$dB(V) = 109.45X^{-0.2835}$	0.8164
	소음	$dB(A) = -0.4X + 87.5$	0.9087

준치 dB(A) 70에 대한 역산으로 적정 허용이격거리를 구해보면, 표 27 및 표 28과 같고, 주간 주거지역을 기준으로 적정 허용이격거리를 계산한 결과 진동의 경우 7m, 소음의 경우 44m 이상의 이격거리가 요구되는 것으로 판단된다.

표 27. 생활 진동 규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 진동 규제 기준 허용거리(m)			
	주거지역 등		기타지역	
	주간	심야	주간	심야
E현장	7	9	5	7

표 28. 생활 소음 규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 소음 규제 기준 허용거리(m)					
	주거지역 등			기타지역		
	조석	주간	심야	조석	주간	심야
E현장	57	44	82	44	32	82

4.2.3 F 현장 진동·소음 분석

(1) 측정방법 및 지반조건

측정은 10m에서 30m까지 10m간격으로 항타에 대한 진동측정을 실시하였다. PHC말뚝을 천공한 후 유압해머로 25m(50/11)의 풍화암까지 항타하는 동안 측정하였다. 이 지역의 토층은 깊이별로 풍화잔적토, 부분적으로 풍화토, 풍화암 순으로 구성되어 있다.

(2) 추정식 산정

상기의 지반조건으로 구성된 토층에서 진동·소음 측정치를 D현장에 대해 회귀분석 결과 표 29와 같이 지수함수의 추정식이 도출되었고, 진동(R²)=0.9157, 소음(R²)=0.9977로 진동의 신뢰도는 양호한 것으로 나타났고, 소음 신뢰도는 매우 양호한 것으로 나타났다.

표 29. 진동·소음 추정식

현 장 구 분	구분	진동dB(V) · 소음dB(A) 추정식	상관계수 (R ²)
F현장	진동	$dB(V) = 102.77X^{-0.1609}$	0.9157
	소음	$dB(A) = -0.531X + 101.4$	0.9977

(3) 허용거리

지반조건별 말뚝 직항타 측정치에 대해 진동·소음 지수함수의 추정식으로부터 진동 허용기준치 dB(V) 65와 소음 허용기준치 dB(A) 70에 대한 역산으로 적정 허용이격거리를 구해보면, 표 30 및 표 31과 같고, 주간 주거지역을 기준으로 적정 허용이격거리를 계산한 결과 진동의 경우 17m, 소음의 경우 60m 이상의 이격거리가 요구되는 것으로 판단된다.

표 30. 생활 진동 규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 진동 규제 기준					
	허용거리(m)					
	주거지역 등			기타지역		
	주간	심야		주간	심야	
F현장	17	29		11	17	

표 31. 생활 소음 규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 진동 규제 기준					
	허용거리(m)					
	주거지역 등			기타지역		
	조석	주간	심야	조석	주간	심야
F현장	69	60	88	60	50	88

4.2.4 상한치 및 평균치 분석

T-4 천공 후 타격공법의 진동·소음 측정자료에 대한 상한치와 평균치를 따로 구분하여 분석한 것은 상한치와 평균치의 분석모형을 지표로 하여 표 4의 조건과 유사한 현장조건에서 진동·소음 측정에 의한 적정 허용이격거리를 확보하지 못했을 때, 진동·소음 허용기준치를 만족하는 적정 허용이격거리를 용이하게 구하고자 하는데 있으며, 진동·소음에 대한 상한치와 평균치의 회귀분석결과는 그림 8 및 그림 9와 같다.

(1) 추정식 산정

또, 이 도표의 분석결과를 가지고 진동·소음 지수함수의 추정식이 표 32와 같고, 진동의 상한치와 평균치의 (R2)=0.9179,

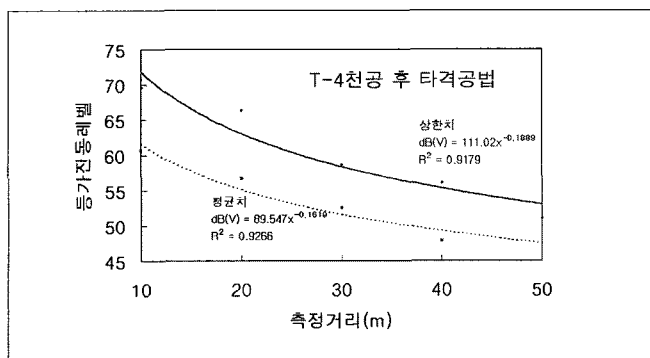


그림 8. 상한치, 평균치 등가 진동 회귀분석

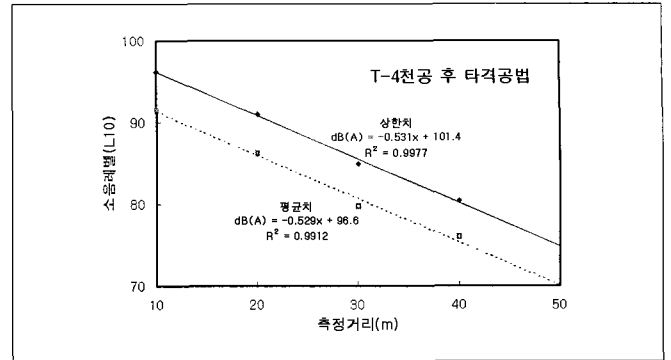


그림 9 상한치, 평균치 소음레벨 회귀분석

(R2)=0.9266으로 신뢰도는 다소 양호한 것으로 나타났고, 소음의 상한치와 평균치의 (R2)=0.9977, (R2)=0.9912로 신뢰도는 매우 양호한 것으로 나타났다.

표 32. 상한치, 평균치 진동·소음 추정식

현 장 구 분	구분	진동dB(V) · 소음dB(A) 추정식	상관계수 (R ²)
진동	상한치	dB(V) = 111.02X ^{-0.1889}	0.9179
	평균치	dB(A) = 89.547X ^{-0.1319}	0.9266
소음	상한치	dB(V) = -0.531X+101.4	0.9977
	평균치	dB(A) = -0.529X+96.6	0.9912

(2) 허용거리

T-4 천공 후 타격공법의 진동·소음 측정자료에 대한 상한치와 평균치를 따로 구분하여 분석한 진동·소음의 지수함수의 추정식으로부터 진동허용기준치 dB(V) 65와 소음허용기준치 dB(A) 70에 대한 역산으로 적정 허용이격거리를 구해보면, 표 33 및 표 34와 같고, 주간 주거지역을 기준으로 적정 허용이격거리를 계산한 결과 진동의 경우 상한치 17m, 평균치 7m 그리

표 33. 생활 진동 규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 진동 규제 기준					
	허용거리(m)					
	주거지역 등			기타지역		
	주간	심야		주간	심야	
상한치	17	25		11	17	
평균치	7	12		5	7	

표 34. 생활 소음 규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 진동 규제 기준					
	허용거리(m)					
	주거지역 등			기타지역		
	조석	주간	심야	조석	주간	심야
상한치	69	60	88	60	50	88
평균치	60	51	79	51	41	79

고 소음의 경우 상한치 60m 평균치 51m 이상의 이격거리가 요구되는 것으로 판단된다.

4.3 진동회전압입공법

진동회전압입공법의 진동·소음 측정자료를 가지고 진동·소음에 대한 회귀분석 결과는 그림 10 및 그림 11과 같고, 이 그림의 분석결과를 가지고 정리한 진동·소음 추정식이 표 35와 같다.

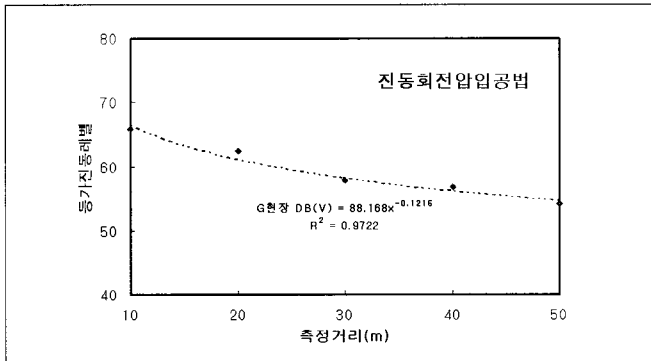


그림 10. 등가 진동레벨 회귀분석

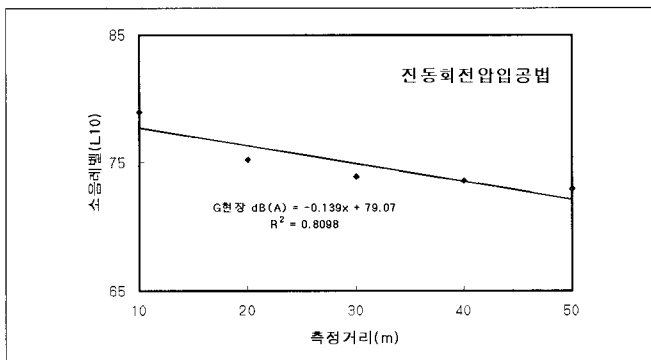


그림 11. 진동레벨 회귀분석

(1) 측정방법 및 지반조건

측정치는 10m에서 50m까지 10m간격으로 향타한 진동·소음 측정치를 실시하였다. 측정은 강관말뚝을 진동 해머로 깊이 23m(N=50/10)의 풍화암까지 회전압입하는 동안에 측정하였다. 이 지역의 토층은 깊이별로 충적층, 풍화토, 풍화암 순으로 구성되어 있다.

(2) 추정식 산정

상기의 지반조건으로 구성된 토층에서 진동·소음 측정치를 가지고 회귀분석 결과 표 35와 같이 지수함수의 추정식이 도출되었고, 진동(R2)=0.9722, 소음(R2)=0.8098로 진동의 신뢰도는 매우 양호한 것으로 나타났고, 소음의 신뢰도는 다소 낮은 것으로 나타났다.

표 35. 진동·소음 추정식

현장 구분	구분	진동dB(V) · 소음dB(A) 추정식	상관계수 (R²)
G현장	진동	$dB(V) = 88.168X^{-0.1216}$	0.9722
	소음	$dB(A) = -0.139X + 79.07$	0.8098

(3) 허용거리

지반조건별 말뚝 직향타 측정치에 대해 진동·소음의 지수함수의 추정식으로부터 진동 허용기준치 dB(V) 65와 소음 허용기준치 dB(A) 70에 대한 역산으로 적정 허용이격거리를 구해보면, 표 36 및 표 37과 같고, 주간 주거지역을 기준으로 적정 허용이격거리를 계산한 결과 진동의 경우 13m, 소음의 경우 66m 이상의 이격거리가 요구되는 것으로 판단된다.

표 36. 생활 진동 규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 진동 규제 기준			
	허용거리(m)			
	주거지역 등		기타지역	
	주간	심야	주간	심야
G현장	13	24	7	13

표 37. 생활 소음 규제 기준 이격거리

현장 구분	생활 소음 규제 기준					
	허용거리(m)					
	주거지역 등			기타지역		
	조식	주간	심야	조식	주간	심야
G현장	102	66	174	66	30	174

4.4 진동·소음 분석 결과

표 38은 공법별, 현장별 깊은기초 말뚝향타시에 주거지역 진동·소음 추정식과 진동65dB(V)·소음70dB(A)를 기준으로 적정이격거리(m)를 회귀분석을 통해서 도출한 것이다. 그리고 표 39의 상한치 추정 식은 각 공법별 거리별(10-50m)로 진동·소음 측정치 중의 가장 큰 값을 적용하였고, 평균치는 각 공법별 거리별(10-50m)로 진동·소음 측정치를 산술평균 하여 적용하였다. 이렇게 분석한 목적은 표 3과 표 4의 조건과 유사한 현장 조건에서 적정 허용이격거리를 확보하지 못하였을 때, 현장조건을 충분히 고려한 후, 표 39의 상한치와 평균치사이의 허용이격거리를 기준으로 적용할 수 있을 것으로 판단해서이다.

표 38. 공법별 주거지역 진동·소음 추정식 및 적정 이격거리(m)

진동(65dB(V)), 소음(70dB(A))

공법별	현장구분	진동·소음추정식	주거지역 이격거리	
오거 천공 후 타격공법	A	진동	$dB(V) = 98.062X^{-0.1995}$	8
		소음	$dB(A) = -0.651X+94.55$	38
	B	진동	$dB(V) = 136.16X^{-0.3178}$	10
		소음	$dB(A) = -0.245X+81.75$	48
	C	진동	$dB(V) = 148.82X^{-0.4429}$	7
		소음	$dB(A) = -0.586X+95.66$	44
T-4 천공 후 타격공법	D	진동	$dB(V) = 67.926X^{-0.0714}$	2
		소음	$dB(A) = -0.606X+99.84$	50
	E	진동	$dB(V) = 109.45X^{-0.2835}$	7
		소음	$dB(A) = -0.4X+87.5$	44
	F	진동	$dB(V) = 102.77X^{-0.1609}$	17
		소음	$dB(A) = -0.531X+101.4$	60
진동회전 입입공법	G	진동	$dB(V) = 88.168X^{-0.1216}$	13
		소음	$dB(A) = -0.139X+79.07$	66

표 39. 공법별 주거지역 상한치, 평균치 진동·소음 추정식 및 적정 이격거리(m)

진동(65dB(V)), 소음(70dB(A))

공법별	현장구분	진동·소음추정식	주거지역 이격거리	
오거 천공 후 타격공법	상한 치	진동	$dB(V) = 112.27X^{-0.2355}$	10
		소음	$dB(A) = -0.585X+95.65$	44
	평균 치	진동	$dB(V) = 121.20X^{-0.3039}$	8
		소음	$dB(A) = -0.245X+81.75$	42
T-4 천공 후 타격공법	상한 치	진동	$dB(V) = 111.02X^{-0.1889}$	17
		소음	$dB(A) = -0.531X+101.4$	60
	평균 치	진동	$dB(V) = 89.547X^{-0.1319}$	7
		소음	$dB(A) = -0.529X+96.6$	51

5. 결론

오거천공 후 타격공법(3개 현장), T-4 천공 후 타격공법(3개 현장), 진동회전입입공법(1개 현장)으로 수행하는 7개 현장의 측정치를 가지고 주간 주거지역의 규제조건에 근거한 회귀분석에서 도출한 진동·소음 지수함수 추정 식으로부터 적정 허용이격거리를 제안하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 오거천공 후 타격공법의 현장별 진동(소음) 허용규제기준에 적합한 적정 허용이격거리는 발생원으로부터 A현장 8(38)m, B현장 10(48)m, C현장 7(46)m 이상의 거리를 확보해야 할 것으로 판단되며, 상한치와 평균치를 따로 구분하여 분석한 진동(소음) 허용규제기준에 적합한 적정 허용이격거리는 발생원으로부터 상한치 10(44)m, 평균치 8(42)m 이상의 거리를 확보해야 할 것으로 판단된다.

(2) T-4 천공 후 타격공법의 현장별 진동(소음) 허용규제기준

에 적합한 적정 허용이격거리는 발생원으로부터 D현장 2(50)m, E현장 7(44)m, F현장 17(60)m 이상의 거리를 확보해야 할 것으로 판단되며, 상한치와 평균치를 따로 구분하여 분석한 진동(소음) 허용규제기준에 적합한 적정 허용이격거리는 발생원으로부터 상한치 17(60)m, 평균치 7(51)m 이상의 거리를 확보해야 할 것으로 판단된다.

(3) 진동회전입입공법의 현장별 진동(소음) 허용규제기준에 적합한 적정 허용이격거리는 발생원으로부터 G현장 13(66)m 이상의 거리를 확보해야 할 것으로 판단된다.

이상에서와 같이 저진동·저소음 공법인 3가지 공법을 비교해 볼 때, 진동의 경우는 분석대상 공법 모두가 별 문제가 없는 것으로 나타났으나, 소음의 경우는 분석된 적정 허용이격거리 이상을 확보하지 못할 경우, 주거지역에서 공사를 수행할 때, 민원이 예상되므로 적절한 방호조치가 있어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. F.M Kessler : Cost Effectiveness of construction noise abatement, sound and vibration, Vol 15, No 5, pp18-22, 1981
2. Raymond B.W.Heng : Construction noise standards and the draft singapore code, applied acoustics, Vol 18, No 5, pp 337-354, 1985
3. 장을병, 소음 및 진동 저감대책, 경동기술공사, 2000.
4. 환경부, 소음진동규제법, 2003, 7
5. 이규철 외, 도로소음의 예측모델에 대한 비교, 평가 연구, 한국소음진동공학회지, 제 9권 6호, 1999.
6. 박재영 외, SIP공법에 의해 발생하는 건설진동의 전달 및 감쇠특성에 관한 실험적 연구, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, 1999.
7. 김하근 외, 건설현장 소음 진동 분진 평가 및 저감대책에 관한 연구, 대한주택공사, 1999. 11
8. 조원희 외, 건설소음이 인근주민에게 미치는 영향에 관한 연구, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, 1999
9. 김하근 외, 건설현장 소음도 평가 및 예측기법개발 연구, 대한주택공사, 1998. 6
10. 최일섭 외, 사회문제와 사회복지, 나남 출판사, 1997

논문제출일: 2005.07.12

심사완료일: 2005.08.23

Abstract

Pile driving work causes a vibration problem in the construction site using pile foundation and often causes civil affairs by construction noise around the construction site. For the vibration and noise problems, the driving after drilling method rather than the direct driving method is being generalized for reducing vibration and noise. However, this method also causes civil affairs when the driving work is operated in adjacent area. This study suggests a criterion for evaluating an optimal allowed distance for pile driving work by the driving after drilling method. Actual surveys of vibration and noise for pile driving work in seven construction sites were used for developing regression analysis equations. The results can be a standard to estimate the allowed distance to avoid vibration and noise problems in pile driving work for deep foundation.

Keywords : Pile driving, Deep Foundation, Vibration, Noise, Regression Analysis
