

매입 말뚝공법의 항타공해 저감효과

A Study on the reduction effect of noise and vibration using auger-drilled piling

박찬국¹⁾ : Park, Chan Kook, 박용부²⁾ : Park, Yong Boo, 이명환³⁾ : Lee, Myung Whan,
조천환⁴⁾ : Cho, Chun-Whan, 이장덕⁵⁾ : Yi, Chang-Tok, 이원제⁶⁾ : Lee, Won-Je

¹⁾ 대한주택공사 주택연구소 주임연구원, Senior Researcher, Korea National Housing Coporation

²⁾ 대한주택공사 주택연구소 연구원, Researcher, Korea National Housing Coporation

³⁾ 파일테크 대표, Principal, PILETECH Consulting Engineers (02) 3402-2361

⁴⁾ 삼성물산(주), (02) 2145-6584

⁵⁾ 파일테크 이사, Manager, PILETECH Consulting Engineers

⁶⁾ 파일테크 차장, Senior Researcher, PILETECH Consulting Engineers

SYNOPSIS :

Recently, a more strict regulation has become effective on ground vibration and noise induced by construction activities. Consequently the demand for the most widely used method of installing precast piles, i.e. driven piles, is declining. At the same time the demand for low noise and low vibration piling method increased sharply. Currently there are several different low noise and low vibration methods of installing precast piles, mostly preboring method. However, the actual level of ground vibration and noise of these method of construction has not yet been clearly understood. In this paper, through field measurement, suggestion has been made to meet the requirements of the revised regulation.

1. 서 론

최근 심각하게 대두되고 있는 환경문제와 더불어 건설공사에 대한 소음 및 진동규제법이 매우 엄격하게 개정되어 1994년 11월 21일에 총리령으로 공포된 바 있다. 특히 지금까지는 명문화되어 있지 않았던 건설공사에서 유발되는 건설진동에 대하여 규제기준을 명시함으로써 수도권 또는 지방도시 등에서 활발히 진행되고 있는 주택건설공사의 말뚝기초시공에 대하여 지대한 영향을 주게 되었다.

말뚝기초의 시공법은 항타공법과 매입공법으로 분류할 수 있다. 항타공법은 디젤해머, 유압해머 등 타격장비에 의한 시공법으로서 소음 및 진동이 상대적으로 크게 발생하게 된다. 이때 발생하는 항타공해는 수도권역일 경우 허용기준을 훨씬 초과하는 것이 일반적이므로 이에 대한 대안으로서 매입말뚝 시공법이 널리 적용되는 추세이다. 이와 같은 매입말뚝 시공법을 소위 저소음·저진동 공법 또는 저공해 공법이라 부르고 있는데 현재 적용중인 이들 시공법은 대분하면 1) 오가배토굴착 + 시멘트풀주입 + 최종경타(일명 SIP 공법), 2) 광관케이싱을 이용한 굴착 + 시멘트풀주입 + 말뚝낙하(일명 SAIP 공법), 3) 오가배토굴착 + 선단 및 주면고정액 주입 + 말뚝회전삽입(일명 COREX 공법)등 3종류가 있다. 이들 시공법들은 외국에서 도입되어 개량 혹은 보완된 것들로서 특정한 공법명으로 불리워지고 있으며, 공법들간의 차이점은 굴착방법과 말뚝의 최종설치 방법에 있으며, 이에따라 시공성 및 지지력 특성이 다르게 나타나고 있다.

본 논문은 개정된 소음·진동 규제법에 부합하는 적합한 말뚝시공법을 제안함으로써 민원발생에 대하여 합리적으로 대처할 수 있도록 하는데 최종목표를 두고 현재 수행중인 「말뚝의 저소음·저진동 시공법에 관한 연구」의 중간결과로서, 현장측정을 통한 항타공법 및 매입말뚝 공법의 진동·소음 특성을 분석하고 강화된 규제기준과의 비교를 통해 적합한 시공방법을 제안하였다.

2. 소음·진동 규제기준

현재까지 적용되어 오고 있는 소음·진동 규제는 1991년 2월 고시된 바 있는 환경관련법내의 소음·진동 규제법 시행규칙 및 시행령이었다. 이 법규내에 제시된 소음관련 규제는 아래[표 1]에 보인 바와 같으며, 진동관련 규제는 수치로서 제시되지 못하고 있었다.

따라서 진동규제에 대한 사항은 뚜렷한 근거없이 외국의 관련기준중 가장 엄격하다고 볼 수 있는 [표 2]에 나타난 독일의 DIN 규정을 일반적으로 적용하여 왔다.

[표 1] 생활소음 허용기준(1991)⁽¹⁾

단위 : dB(A)

대 상 지 역	시간별 대상소음		조 석	주 간	심 야
			(05:00 ~ 08:00) (18:00 ~ 22:00)	(08:00 ~ 18:00)	(22:00 ~ 05:00)
주거지역, 녹지지역 취락지역중 주거지구, 관광 휴양지역, 자연환경 보전지역, 학교, 병원의 부지 경계선으로부터 50 m이내 지역	확성기에 의한 소음	옥외설치	70 이하	80 이하	60 이하
		옥내에서 옥외로 방사되는 경우	50 이하	55 이하	45 이하
	공장 및 사업장의 소음		50 이하	55 이하	45 이하
	공사장의 소음		65 이하	70 이하	55 이하
상업지역, 준공업지역, 일반공업지역, 취락지역중 주거지역외의 지구	확성기에 의한소음	옥외설치	70 이하	80 이하	60 이하
		옥내에서 옥외로 방사되는 경우	60 이하	65 이하	55 이하
	공장 및 사업장의 소음		60 이하	65 이하	55 이하
	공사장의 소음		70 이하	75 이하	55 이하

비 고 : 1. 대상지역의 구분은 국토이용관리법에 의하며, 도시지역은 도시계획법에 의한다.

2. 공사장 소음의 규제기준은 주간의 경우 소음발생시간이 1일 2시간미만일 때에는 +10 dB, 2시간이상 4시간이하일 때에는 +5dB를 보정한 값으로 한다.

[표 2] 진동허용기준(독일 DIN 4150)

등 급	I	II	III	IV
건물형태	문 화 재 (역사적으로 매우 오래된 건물)	주택, 아파트,상가 (작은 균열을 지닌 건물)	주택, 아파트, 상가 (균열이 없는 양호한 건물)	산업시설용공장 (콘크리트로 보강된 건물)
최대속도 허용치 (mm/sec)	2.0	5.0	10.0	10.0 ~ 40.0

※ 충격진동에 관한 규정이며, 연속진동인 경우는 1/3로 한다.

위의 [표 2]에서 볼 수 있는 진동허용기준의 단위는 속도(mm/sec) 단위로서 지반진동의 최대입자속도(peak particle velocity)로 표시, 적용하여 왔다.

그러나, 후술한 새로이 개정된 규제기준에서는 인체감각과 구조물예의 영향을 함께 고려하는 등가진동레벨(Leq dB(V))단위를 사용하고 있으므로 이에 대한 개념을 살펴볼 필요가 있다.

2.1 진동기준 단위의 개념

사람이 느낄수 있는 진동레벨(Vibration Level, VL)의 최소치는 55 ± 5 dB 정도이고 공해진동의 진동수 범위는 1 ~ 90 Hz 정도이며 진동레벨의 범위는 60 ~ 80 dB정도가 일반적이다. 진동레벨(VL)은 물리적인 가속도값의 상대비교치인 진동가속도(Vibration Acceleration Level, VAL)에 주파수 대역별 인체의 진동감각특성을 수직 또는 수평으로 보정한 값으로써 현행 건설진동 규제기준에 사용되는 단위이다.

o 진동가속도레벨(VAL)

$$VAL = 20 \log\left(\frac{a_{rms}}{a_r}\right) \quad (1)$$

여기서 a_{rms} : 측정 대상 진동의 가속도 실효치(m/sec²)

a_r : 기준진동의 가속도 실효치

(1 gal 또는 10⁻⁵ cm/sec² 이 사용되며 공해진동의 경우에는

10⁻⁵ m/sec²이 많이 사용됨.)

단위는 dB이다.

o 진동레벨(VL)

$$VL = 20 \log\left(\frac{a_{rms}}{a_r}\right) - \omega_n \quad (2)$$

여기서 ω_n 은 주파수 대역별 인체감각보정치로 다음과 같다.

$$\omega_n = 20 \log\left(\frac{a_0}{10^{-5}}\right) \quad (3)$$

a_0 는 주파수 대역별로 차이가 있는데 이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 2 \times 10^{-5} \times f^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{m/sec}^2), \quad 1 \leq f \leq 4 \\
 a_0 &= 10^{-5} \quad (\text{m/sec}^2), \quad 4 \leq f \leq 8 \\
 a_0 &= 0.125 \times 10^{-5} \times f \quad (\text{m/sec}^2), \quad 8 \leq f \leq 90
 \end{aligned}$$

단위는 수평진동의 경우 dB(H), 수직진동인 경우 dB(V)로 표기한다.

o 등가진동레벨(Equivalent Vibration Level)

앞의 수직진동레벨(dB(V))을 지속시간이나 측정 횟수에 의해 평균화한 값을 등가진동레벨이라 하며 다음의 계산식에 의해 구해진다.

$$\begin{aligned}
 L_{eq} &= 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} 10^{L_i/10} dt \right] (\text{연속진동인 경우}) \\
 &= 10 \log \left[\sum_{i=1}^m f_i \cdot 10^{L_i} \right] \quad (4) \\
 &= 10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^m 10^{L_i}}{m} \right] (\text{일정간격으로 진동이 발생하는 경우})
 \end{aligned}$$

여기서 f_i 는 i 의 진동레벨 L_i 의 지속시간을이고 L_i 는 i 번째의 진동레벨이며, T 는 진동지속시간이다.

즉, 수직방향의 등가진동레벨이 건설진동 규제기준에 적용되는 값으로 규제기준의 단위인 L_{eq} dB(V)이다.

2.2 규제기준의 강화

[표 3] 및 [표 4]에는 소음·진동규제법 시행규칙내에 있는 개정, 고시된 건설소음 규제기준 및 건설, 생활 진동규제 기준을 각각 나타내었다. 개정된 기준이 기존 기준과 달라진 내용은 우선 소음기준의 경우는 전술한 [표 1]에서의 대상소음종 공사장소음을 건설소음으로 따로 분리하여 제시하고 있으며, 그 규제정도는 동일하다. 반면, 진동규제기준은 수치로서 명시함으로써 생활 환경보호에 대한 적극적인 규제를 실시하고 있음을 알 수 있다. 아울러 앞서 살펴본 기준내 단위개념을 인체각각을 우선적으로 고려하는 진동레벨로 제시하고 있으며, 이같은 규제기준값을 기존의 속도개념으로 바꾸어 비교해 볼 때 매우 엄격해졌음을 알 수 있다. 즉, 표내의 대상지역중 주거지역..., 등에서 주간에 적용하는 기준은 65 dB(V)인데 이는 약 1 mm/sec의 진동속도에 해당함으로 보다 엄격하게 강화되었음을 알 수 있다.

[표 3] 건설소음 규제기준⁽⁴⁾

(단위 : Leq dB(A))

대 상 지 역	시 간 별		
	조 석 (05:00 ~ 08:00) (18:00 ~ 22:00)	주 간 (08:00 ~ 18:00)	심 야 (22:00 ~ 05:00)
주거지역, 녹지지역, 준도시지역중 취락지구 및 운동휴양지구, 자연환경보전지역, 학교·병원·공공도서관의 부지경계선으로부터 50 m 이내 지역	65 이하	70 이하	55 이하
상업지역, 공업지역, 농림지역 및 준도시지역중 취락지구외의 지구, 미고시지역	70 이하	75 이하	55 이하

[표 4] 건설, 생활진동규제기준⁽⁴⁾

(단위 : Leq dB(V))

대 상 지 역	시 간 별	
	주 간 (06:00 ~ 22:00)	심 야 (22:00 ~ 06:00)
주거지역, 녹지지역, 준도시지역중 취락지구 및 운동휴양지구, 자연환경보전지역, 학교·병원·공공도서관의 부지경계선으로부터50 m 이내 지역	65 이하	60 이하
상업지역, 공업지역, 농림지역 및 준도시지역중 취락지구외의 지구, 미고시지역	70 이하	65 이하

비 고 : 1. 대상지역의 구분은 국토이용관리법에 의하며, 도시지역은 도시계획법에 의한다.

2. 본 규제기준은 주간에 한해 진동발생시간이 1일 4시간이하일 때에는 +5dB를 보정한 값으로 한다.

3. 현장측정 결과

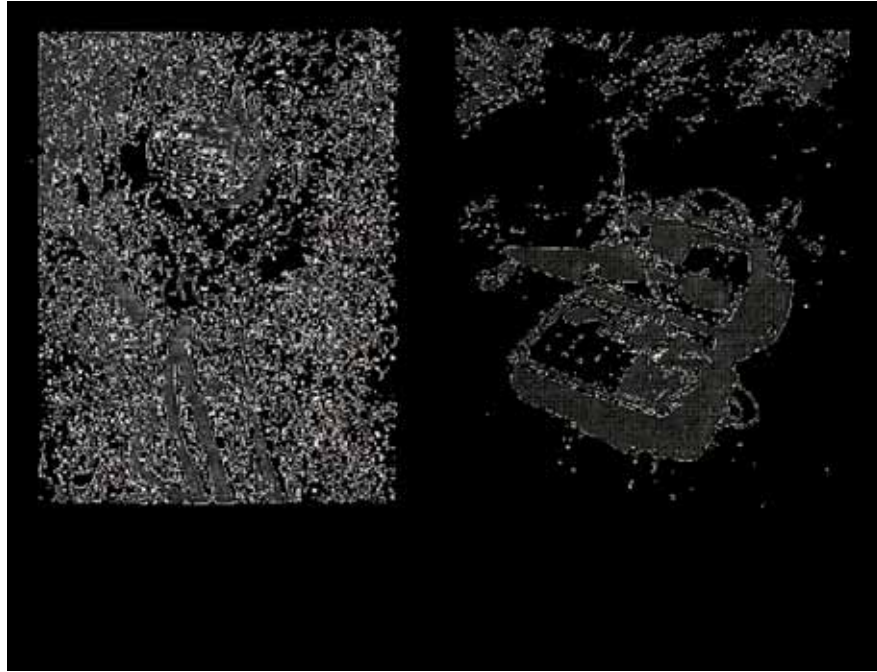
앞서 언급한 규제기준의 적절성 및 말뚝시공현장에서 유발되는 소음·진동의 발생정도를 함께 검토하기 위해 말뚝시공방법별로 소음기 및 진동측정기를 사용하여 현장측정을 수행하였다.

대상현장은 주로 아파트 신축현장이었으며 항타공해로 인한 민원이 제기되지는 않은 현장이었다. 그러나 저공해 공법중 「오가무배토 굴착 + 선단 및 주면고정액주입 + 회전삽입」 공법이 적용되었던 현장은 도로 교량 건설현장으로써 기존공법에 대한 심각한 민원이 제기되어 본 공법으로 대체, 시공되는 현장이었다.

구분한 말뚝시공방법은 서론에서 언급하였던 공법들 중 3가지 공법이 각각 적용되는 현장이었으며 진동·소음의 상대적인 크기를 비교하기 위해 일정한 거리를 유지한 후 측정하였다.

3.1 측 정 방 법

현장측정에 사용된 장비는 현행 규제기준의 단위에 적합한 기능을 지닌 장비를 사용하였다. 소음측정기는 일본 Rion사의 NL-O1A장비를 사용하였고 진동측정기는 Rion사의 VM 51 장비를 사용하였으며 소음진동원(말뚝시공지점)으로부터 일정한 거리를 정하여 소음레벨 및 진동레벨을 말뚝공법별로 측정하였다(사용장비는 [사진 1]참조).



3.2 측정 결과

말뚝기초 시공현장에서 발생하는 공법별 소음·진동의 정밀하고 절대적인 비교를 위해서는 동일한 현장(동일한 지반조건)에서 비교하고자하는 공법을 모두 적용하여 가능한 유사한 외력(소음·진동 발생원)을 가한 후 측정하는 것이 바람직하겠으나, 본 측정에서는 이러한 접근보다는 대상현장에서 지반조건을 고려하여 말뚝을 시공하는 현실적 상황을 상대적으로 비교하는데 주안점을 두었다. 즉, 지반조건이나 환경여건을 고려하여 시공방법이 선정되면 각 시공방법이 적용되는 현장에서 소음·진동을 측정하고 이들 결과를 규제기준을 중심으로 상대적으로 비교·평가하는 차원에서 현장측정을 수행하였다.

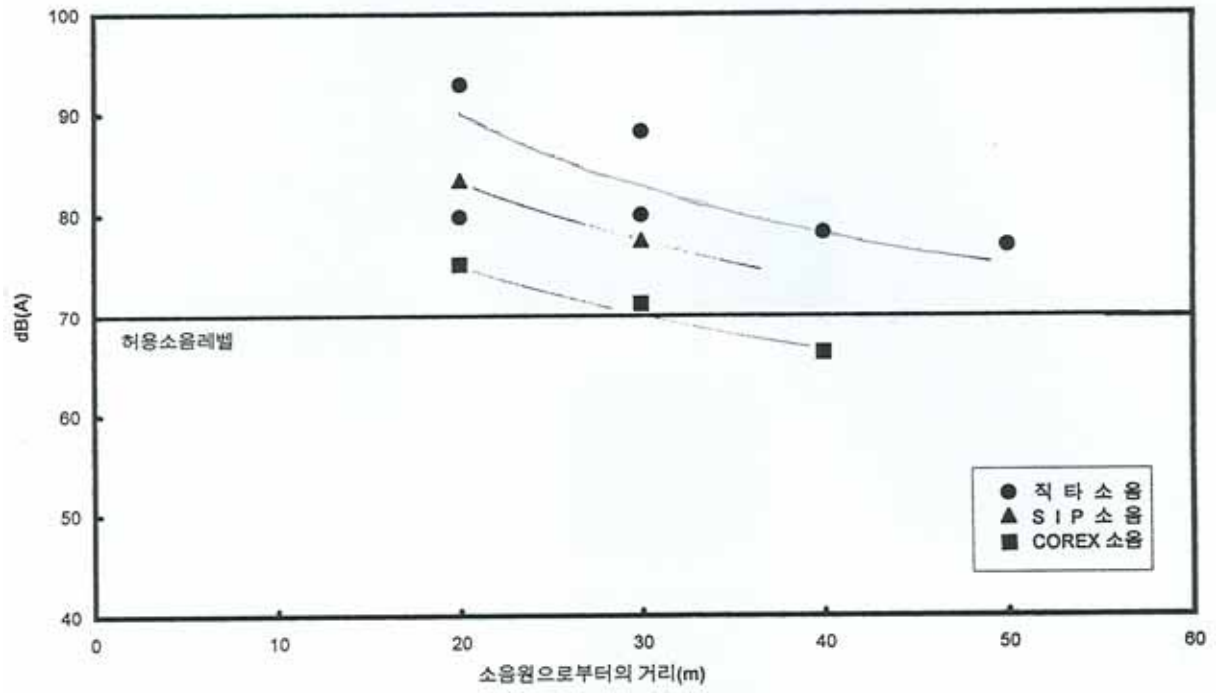
[표 5]에는 앞에서 언급하였던 시공방법중 1)적타공법(디젤해머 또는 유압해머 사용), 2) 「오가배토굴착 + 시멘트풀주입 + 최종경타」 공법, 3) 「오가무배토굴착 + 선단 및 주면고정액주입 + 회전삽입」 공법 등이 시공되는 현장에서, 소음의 경우 기계소음 및 타격소음을 측정하였고 진동의 경우는 오가굴착시 및 타격시에 말뚝이 선단지지층에 최종관입 될 때 측정한 결과를 나타내었다.

3.3 결과 해석

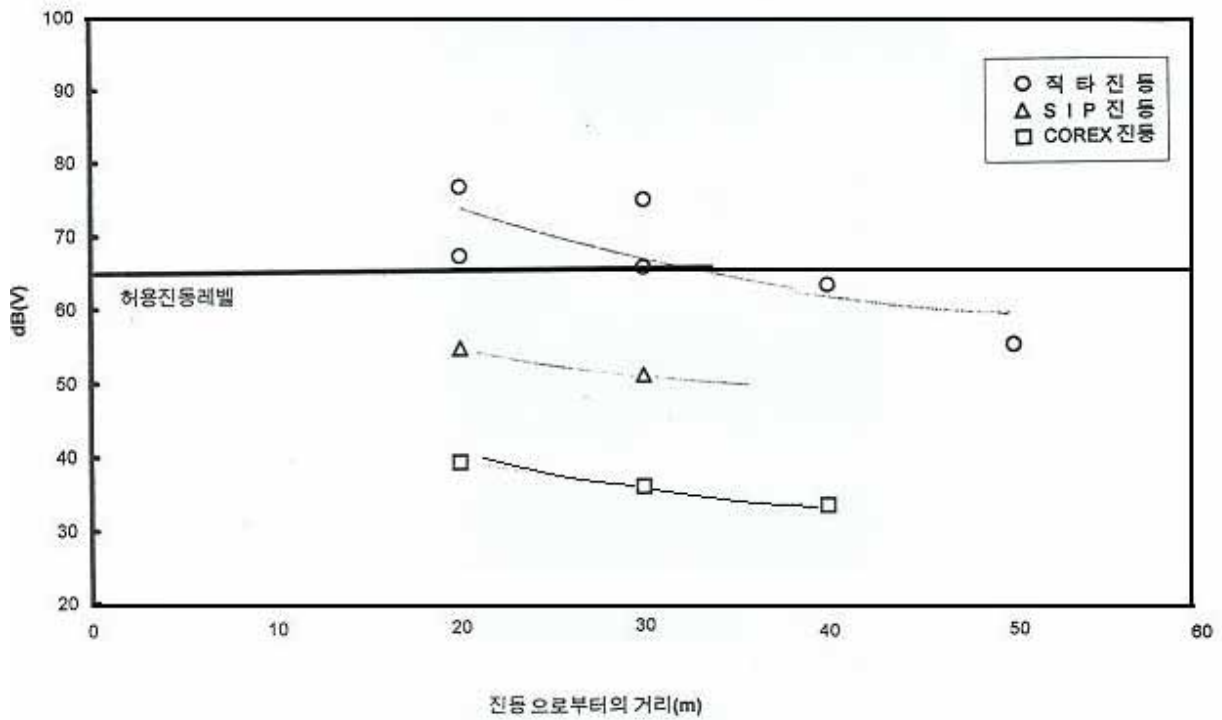
[그림 1] 및 [그림 2]에는 [표 5]의 결과를 측정거리에 따른 소음레벨 및 진동레벨의 변화양상으로 도시하였으며 [그림 3]에는 시공방법별로 각 레벨을 나타내었는데 각 그림내에는 규제기준과의 비교를 위해 대상지역이 주거지역..., 등인경우의 허용치를 함께 표시하였다.

두 그림에서 볼 수 있는 바와같이 적타방법은 발생원으로부터 30 m가 이격된 경우에도 소음 및 진동의 허용범위를 초과함으로써 도심지에서 시공될 경우 부적합한 공법임을 분명하게 알 수 있다. 한편, 나머지 두 가지 시공법의 경우 진동레벨은 20 m 지점에서 허용범위 이내의 값이 기록되었으나 소음레벨은 40 여 m 이상 이격되어야 허용범위를 만족시키는 것으로 나타나고 있다. 이 때 측정된 소음레벨은 최종타격(보통 10~20타)과 굴착기계등의 기계소음이 주 발생원으로써 규제기준중 소음기준은 특히 기계 소음이 주된 소음원인인 공법의 경우를 감안할 때 현실성이 다소 결여된 불합리성이 내포되었다고 판단된다.

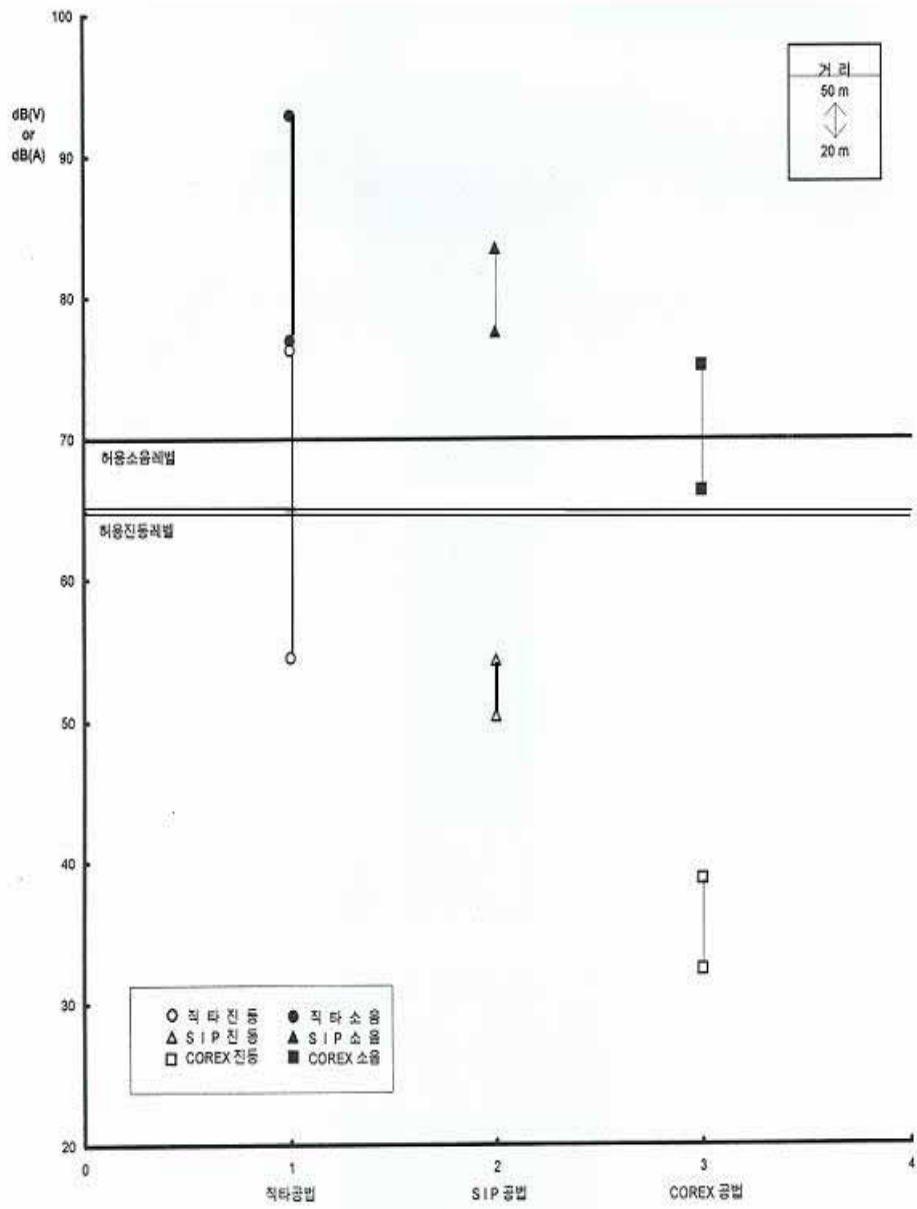
결론적으로, 말뚝시공에 따른 소음·진동에 의한 민원이 발생할 수 있는 현장에서는 저공해 공법을 적용하여야 규제기준중 특히 진동규제치를 만족시킬 수 있으며(발생원으로부터 20 m 이내 기준) 소음규준은 기계소음레벨이 고려되지 않고서는 같은 거리일 때 사실상 만족시키기 어렵다는 것을 알 수 있다.



[그림 1] 거리에 따른 소음 레벨



[그림 2] 거리에 따른 진동레벨



[그림 3] 시공방법별 소음 및 진동 레벨

[표 5] 말뚝공법별 소음레벨·진동레벨 측정결과 요약

지 반 구 분	시 공 방 법	이 격 거 리 (m)	최대타격 에너지 (t·m)	등가 진동레벨 (L_{eq} dB(V))	최대 진동레벨 (L_{max} dB(V))	등가 소음레벨 (L_{eq} dB(A))	말 뚝 유 형
A	○	20.0	3.15	76.2	78.7	92.9	PC
C	○	20.0	3.20	66.8	71.4	79.8	PHC
D	△	20.0	2.50	54.3	57.7	83.5	PHC
E	□	20.0	-	38.8	44.9	75.1	강관
A	○	30.0	3.15	74.2	77.6	88.3	PC
C	○	30.0	3.20	65.0	69.8	76.9	PHC
D	△	30.0	2.50	50.4	55.6	77.5	PHC
E	□	30.0	-	35.2	38.2	71.2	강관
B	○	40.0	3.50	62.8	67.3	78.3	PC
B	○	50.0	3.50	54.5	57.2	77.0	PC
E	□	40	-	32.4	36.9	66.3	강관

○ : 직타공법
 △ : 오가배토굴착 + 시멘트풀주입 + 최종경다
 □ : 오가무배토굴착 + 선단 및 주변고정액주입 + 회전삽입

A 지반 : 실트질 점토층 2 m, 점토질 실트층 4.2 m, 풍화토층 8.3 m, 풍화암층
 B 지반 : 풍화토층 8 m, 풍화암층
 C 지반 : 실트층 2.5 m, 풍화토층 19 m, 풍화암층
 D 지반 : 매립층 2.5 m, 풍화토층 10 m, 풍화암층
 E 지반 : 매립층 1.7 m, 충적점토층 7.5 m, 풍화토층 10.0 m, 풍화암층

참고로, 최근에 도입된 평창말뚝공법의 기술자료내⁽⁵⁾에서 발췌한 진동측정결과를 소개하고자 한다.

본 공법은 앞서 살펴본 공법들과는 원리가 다르지만 매입식 저공해 공법으로 상세사항은 본 논문집내의 「매입 말뚝공법의 지지력 특성」 논문에서 나와있다. 본 공법은 시공시 소음·진동이 매우 작게 발생하는 것으로 보고되고 있는데 측정결과중의 한 예를 시공사의 관련자료를 인용하여 살펴본다.

시공현장의 지반조건은 조밀한 tll층 또는 기반암 위에 약 7 m두께의 모래와 자갈질 모래층으로 구성되어 있다. 말뚝은 CPT결과의 콘저항치가 10MPa, SPT의 N값이 25정도되는 모래층에 최종 설치되었으며 지하수위는 시공될 평창체 하부에 위치하고 있다. 시공에 사용한 장비는 [표 6]에 보인바와 같은 진동해머(Vibratory hammer)였으며 시공시 발생하는 지반진동은 거리별 진동속도로 측정하였다. 측정결과를 [그림 3]에 나타냈으며 이 때 진동속도 추정식은 다음식을 적용하여 비교하고 있다.

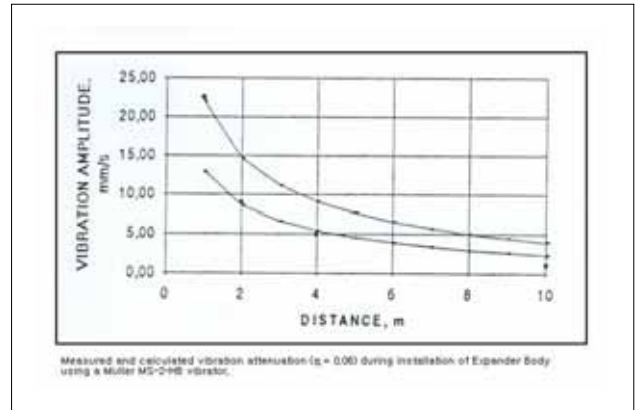
$$A_2 = A_1 (R_2/R_1)^{0.5} \text{Exp}^{-\alpha(R_2-R_1)} \quad (5)$$

여기서, A_2, A_1 : 거리 R_2, R_1 에서의 진동속도(mm/sec)
 α : 진동 감쇠 계수 (자갈질 모래의 경우 0.06)

측정결과와 앞의 예측식을 비교해 볼 때 예측식은 발생하는 진동속도의 상한 값으로서 적용할 수 있음을 볼 수 있으며, 측정점의 거리가 10 m를 넘는 경우 1.0 mm/sec 이하(약 65 L_{eq} dB(V))의 진동이 발생하므로 저진동 시공법으로서 충분한 효과를 발휘함을 볼 수 있다. 그러나 이상의 내용은 국내 현장에서 분석된 결과는 아니므로 향후에 비교분석이 수행되어야 할 것이며, 하나의 저공해 공법으로서의 적용성을 검토하는 자료로서 활용할 수 있다고 판단된다.

[표 6] 진동해머 제원

Vibrator	:	MS-2HB(스웨덴)
Centrifugal Force (kN)	:	2.00
Static moment (Nm)	:	2.0
Oscillating Amplitude (mm)	:	6.2
Frequency (Hz)	:	2.5
Vibrator Amplitude (mm/s)	:	97.3
Wave Velocity (m/s)	:	100
Wave Length (m)	:	4



[그림 4] 진동속도 측정결과 및 예측결과

4. 요약

본 논문 현재 수행중인 말뚝의 저소음·저진동 시공법에 관한 연구과제의 중간결과로서 현장측정 결과를 통해 분석한 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 건설공사, 특히 말뚝기초 시공시에 수반되는 소음 및 진동 관련 규제기준이 보다 엄격하게 개정, 적용되고 있으므로 주택가 등에 근접된 말뚝시공시에는 저공해 말뚝시공법이 필수 적으로 적용되어야 함을 재인식할 수 있었다.
- (2) 측정 대상현장에 따라 각각 적용하고 있는 시공법에 대하여 소음레벨 및 진동레벨을 측정된 결과 「오가우배토굴착 + 선단/주면고정액 주입 + 회전삽입」 공법의 경우가 가장 낮은 값이 측정되어 상대적으로 저감효과가 가장 큰 시공방법임을 알 수 있었다. 구체적으로는 직항타 공법의 경우 소음 및 진동 기준 모두를 초과하고 있으며 [오가배토굴착 + 시멘트풀주입 + 최종경타]공법은 진동치는 만족하고 있지만 소음측면에서는 허용치를 초과하고 있고 [오가우배토굴착 + 선단 및 주면고정액주입 + 회전삽입]공법의 경우 진동치는 물론 소음치도 어느정도 만족하고 있어 특히 소음이 주요한 환경 문제로 부각되는 현장에서는 공법적용시 신중한 고려가 필요하다.
- (3) 소음레벨에 대한 규제기준은 현실적으로 시공기계의 기계소음만으로도 초과되는 경우가 있어 다소 불합리한 점이 내포되어 있음을 시사하고 있다.

본 연구의 측정결과 비교시에는 현실적인 상황에 중점을 두었으며 다양한 조건들을 포함시키지 못하였으므로 계속되는 연구수행시에는 보다 체계적인 현장측정과 분석을 실시할 것이며 최종적으로는 공법별로 지반 및 거리에 따라 정량적인 예측식도 제시할 계획이다.

참고문헌

1. 사단법인 한국환경오염 방지시설 협회, “소음·진동 규제법”, 환경관계 법규, 1991
2. 이명환, 이원제, 이장덕, 나경준, 항타진동과 말뚝-흙의 상호작용, 한국건설기술연구원, 건기연 91-GE-111, 1991.
3. 대한주택공사, 진동이 주변구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향, 1990, 6
4. 대한민국법령집 제 39 편 환경 제 2장 환경보전, “소음·진동규제법 시행규칙”, 1994

5. K. Rainer Massarsh, "Installation of Soilex Expander Body with Müller Vibrator MS-2-HB", SOILEX, 1992. 11.