

지반조건의 변화에 따른 SIP 항타진동의 특성에 관한 실험적 연구

○ 광 광 수* 박 재 영* 이 병 윤* 김 재 수**

A Study on the Characteristics of Piling Vibration by SIP Method about Variation of Various Earth Conditions

Kwang-Soo Kwak* Jae-Young Park* Byeong-Yun Lee* Jae-Soo Kim**

ABSTRACT

Recently, construction vibration has caused annoyance for a number of dwellers in nearby construction field and that induced from operating of large construction equipment, has become a very serious issue in our living environment. But, construction vibration standard of our country is efficient. Especially, directly blow method(diesel piling method, oil pressure method, etc) has caused much problems of highly impactive vibration. Construction works, in order to solve these problem, will be used SIP(Soilcement Injected Precast Pile) method of low vibration equipment. In this point, this study attempts to survey on the characteristics of piling vibration by SIP method for various earth conditions in construction field. And this study intends to get the basic data to establish a standard about construction vibration.

1. 서론

최근에 활성화되고 있는 대단위 주택건설공사와 도시재개발 건설현장에서 유발되는 소음·진동공해는 주민의 정온한 주거환경에 영향을 미치는 중요한 요인으로 등장하고 있다. 건설현장에서 발생하는 건설진동중에서 항타기계류로부터 발생하는 진동은 심리적인 불쾌감을 조성하기도 하고 구조물에 균열을 발생시키는 등 그 심각성이 점차 증대되어 강력한 민원의 대상이 되고 있다. 따라서 도심에서는 인근주민이나 구조물에 피해를 유발하여 민원발생에 따른 공사중지를 초래할 수도 있는 기존의 적타공법 대신에 저소음·저진동형으로 개발된 SIP(Soil-Cement Injected Precast Pile)공법에 의한 항타작업이 대부분 이루어지고 있다. 그러나 국내의 경우 이에 대한 정확한 실태 파악과 항타진동의 전달 및 감쇠특성이 파악되어 있지 않아 진동민원 발생시 효과적이고 체계적인

방진대책 수립이 매우 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 지반조건에 따른 SIP 공법을 이용한 항타작업시 발생하는 건설진동의 전달 및 감쇠특성을 파악해 보고자하며, 이를 토대로 향후 효율적인 방진대책 수립을 위한 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

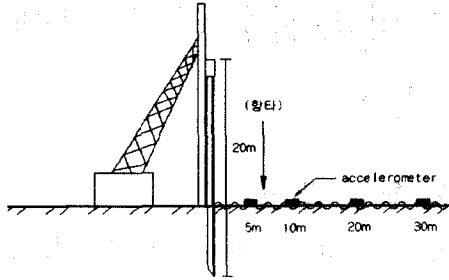
II. 측정방법 및 장비제원

지반조건에 따른 SIP 항타진동의 전달 및 감쇠특성을 파악해 보기 위하여 본 연구에서는 환경오염 공정시험법에서 정하는 공해진동 측정방법과 소음진동규제법에서 정한 진동공정시험법 및 ISO 2631 Part II(1989)에 준하여 측정을 실시하였으며, 거리에 따른 진동감쇠량을 파악하기 위한 측정지점은 <그림 1>과 같으며, 진동측정 기기구성은 <그림 2>와 같다.

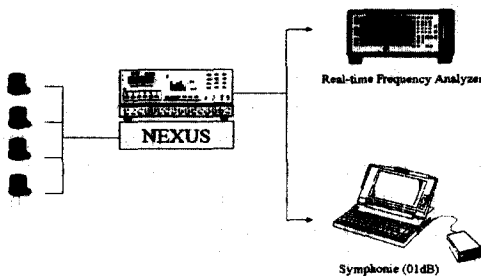
측정방법은 가속도계를 통해 진동픽업한 신호를 Nexus를 거쳐 DAT(Digital Audio Tape Recorder)로 현장에서 녹음하였으며, 이를 실험실에서 Signal Analyzer와 FFT Analyzer를 이용하

* 정회원, 원광대 건축음향연구실 박사과정

** 정회원, 원광대 건축음향연구실 부교수, 공학박사



<그림 1> 거리별 측정지점의 단면도



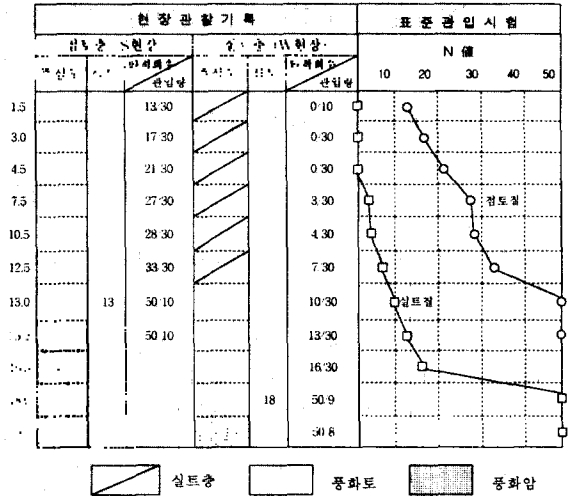
- Accelerometer (B&K Type 4378)
- Nexus (B&K Type 2692)
- DAT (Sony Pc216Ax)
- Calibration Exciter (B&K Type 4294)
- Real-time Frequency Analyzer (B&K Type 2144)
- Symphonie (01dB)
- Notebook Computer

<그림 2> SIP 항타진동 측정을 위한 기구구성도
 여 분석하였다. 분석 주파수 대역은 건설진동의 특성을 고려하여 1/3 Octave band인 2Hz~250Hz로 하였으며, 지반진동의 계측에 사용한 Accelerometer는 전 측정지점에 걸쳐 저주파 특성이 우수한 B&K Type 4378을 사용하였고 Reference는 ISO 기준인 $10^{-6}m/sec^2$ 을 기준으로 측정, 분석하였다.

또한 본 연구에서 측정한 장비제원은 117PS/2200 RPM(Leader=25m) High-power 직분식 엔진 탑재한 DHJ-40의 동일한 모델이 사용되었으며, RAM 타격에너지는 10t.m, PHC(Ø-350, L=20m) Pile로 깊이 각각 13m, 18m (N=50/10,9) 타격하는 방법이 적용되었다.

III. 측정대상지역의 지질현황

측정대상지역은 행정구역상 전북 전주시 이서면에 위치한 S 아파트 공사현장과 전북 군산시에 위치한 W 건설현장으로서 항타작업시 다른 장비의 사용을 제한하여 주변의 배경진동(background noise)를 최소화하였다. 측정대상지역의 토질주상도는 <그림 3>과 같다.



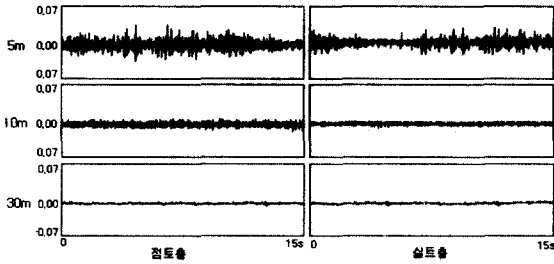
<그림 3> 측정대상 지역의 토질주상도

그림에서 보면 S 건설현장은 점토질인 상하부 풍화대의 풍화산류토층 및 풍화토층은 표준관입 시험에 의한 타격회수가 13/30~33/30(Blows/cm)로 매우 느슨 내지 하부로 갈수록 조밀(Very Loose)한 상대밀도를 가지고 현지표하 3~13m까지 분포하고 있으며, 풍화암층은 표준관입 시험에 의한 타격회수(N=50/10) 이상으로 매우 조밀한(Very Dense)한 상대밀도를 가지고 있다. 또한 W 건설현장은 표토에서 12.5m까지 세립질 내지 조립질 모래로 구성된 very loose한 상대밀도를 가진 실트질 점토층이며, 18m까지는 세립질 내지 조립질 모래와 자갈이 존재하여 하부로 갈수록 점차 조밀해지는 풍화토층을 이루고 있고 그 이상에서 하부풍화대인 풍화암층이 타격회수(N=50/9)로 하부로 갈수록 더욱 조밀해지는 상대 밀도를 가지고 있다.

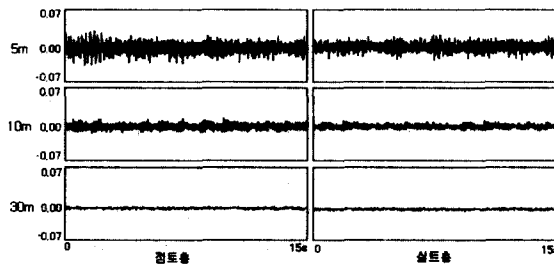
IV. 분석 및 고찰

4.1 SIP 항타공법의 작업진동 특성

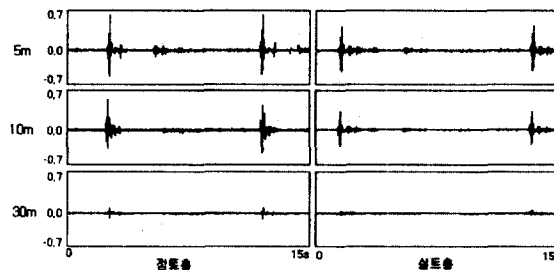
SIP 항타는 선굴착 선단고결 공법의 일종으로서 지층을 어스오거(earth auger)로 천공하여 원지반에 시멘트 페이스트를 주입하여 교반하고 최종항타하는 대표적인 저소음·저진동 방법으로 천공, 인발, 파일 항타작업순으로 구분할 수 있으며, 작업종류에 따라 발생하는 작업진동의 특성을 살펴보면 <그림 4>~<그림 6>과 같다.



<그림 4> 천공작업시 거리에 따른 시간이력곡선



<그림 5> 인발작업시 거리에 따른 시간이력곡선



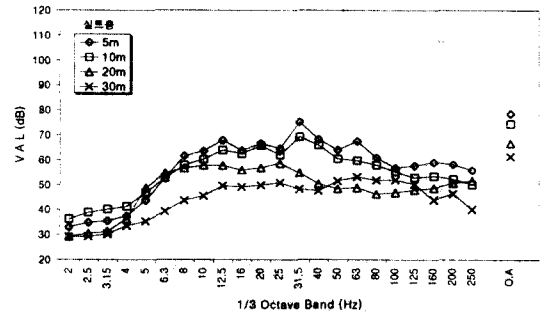
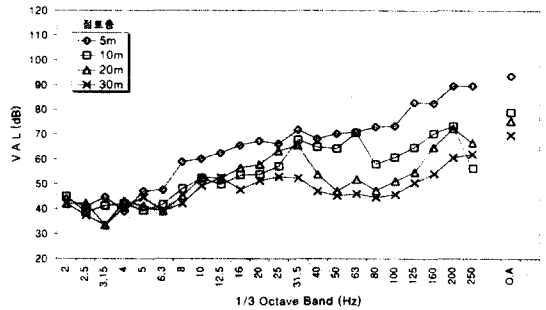
<그림 6> 항타작업시 거리에 따른 시간이력곡선

그림에서 보면 천공과 인발작업시 발생하는 지반진동은 일시진동이 정상진동으로 간주할 수 있을 정도로 지속되기 때문에 유사정상진동(Pseudo-steady-state vibrations)으로 분류할 수 있는데 비해 항타작업에 의해 발생하는 진동은

지속시간이 매우 짧고 충격하중의 형태로 발생하는 충격적 일시진동(Transient or impact vibration)임을 알 수 있다. 또한 SIP 공법시 발생하는 건설진동은 거리가 멀어질수록 급격히 감소하는 양상을 보이고 있음을 알 수 있으며, 실트질 지반에 비해 점토질에서 매우 높게 나타나는 특성을 보이고 있다.

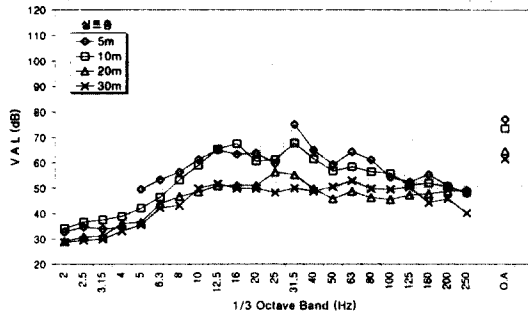
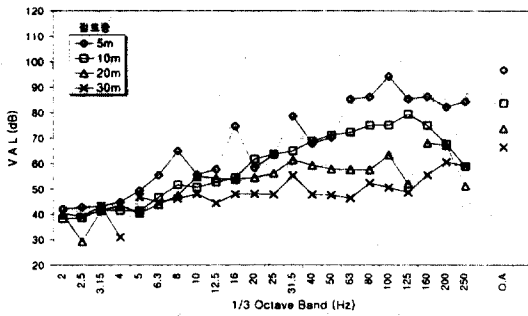
4.2 거리에 따른 주파수별 진동감쇠 특성

지반조건의 변화에 따른 SIP 공법에 의한 작업시 발생하는 건설진동의 전달 및 주파수별 감쇠 특성을 1/3 Octave Band로 측정된 결과는 <그림 7>~<그림 9>와 같고 작업의 종류에 따른 O.A(overall) 값을 통해 비교해 보면 <그림 10>과 같다.

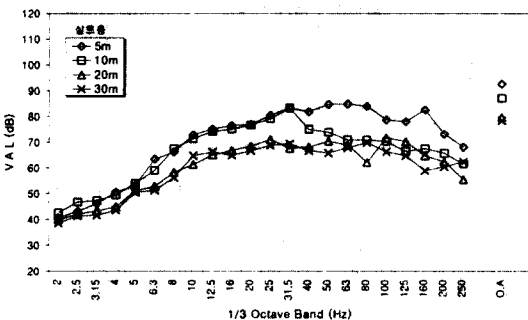
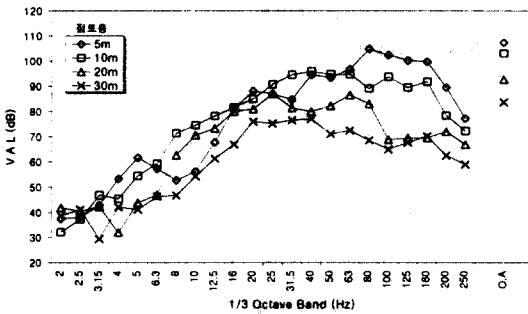


<그림 7> 천공작업시 거리에 따른 주파수별 특성

그림에서 보면 작업지점과 비교적 가까운 5m 지점의 경우 점토층의 주요진동성분은 천공이 200Hz, 인발이 100Hz, 항타가 80Hz로 나타나지만 실트층의 경우 천공과 인발이 31.5Hz, 항타가 50Hz 부근에 나타나 점토층이 실트층에 비해 비교적 고진동수 대역에 주요진동성분이 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한 천공, 항타작업의 경우

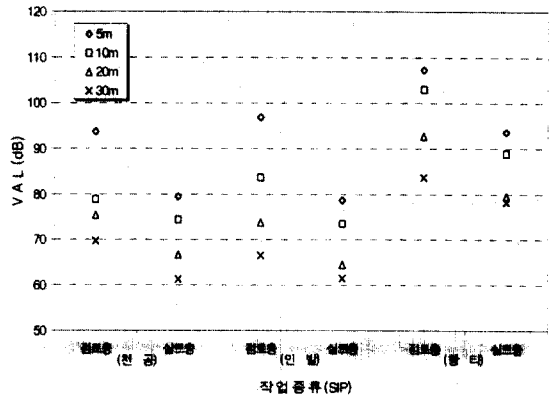


<그림 8> 인발작업시 거리에 따른 주파수별 특성



<그림 9> 항타작업시 거리에 따른 주파수별 특성

작업지점에서 거리가 멀어질수록 주요진동성분은 저진동수로 이동하는 특성을 보이고 있으며,¹⁾ 실



<그림 10> O.A값에 따른 작업종류별 진동감쇠 특성비교

트층에서는 이격거리가 30m 정도 되면 주요진동성분의 의미가 없어져 이러한 특성에 영향을 받지 않는 것으로 사료된다. 이격거리에 따른 VAL의 감쇠는 점토층의 경우 40Hz 이상의 진동수 영역에서 많은 감쇠를 보이지만 실트층의 경우 25~80Hz 진동수 영역의 감쇠가 많음을 알 수 있다.

또한 O.A(overall) 값에 의한 진동수특성을 비교해보면 점토층 지반의 경우 천공과 인발작업시 진동원으로부터 10m 이내인 지점에서는 인발진동이 높게 나타나고 있으나, 20m 이상이 되면 천공진동보다 2~3dB 낮게 나타나는 특성을 보이고 있으며, 실트층의 경우는 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 또한 항타진동은 RAM이 파일을 타격함으로써 발생하는 강한 충격진동이므로 견질지반인 점토층의 경우 거리가 멀어져도 상당히 높은 VAL을 나타내고 있으나 실트층인 경우는 점토층에 비해 모든 측정지점에서 매우 낮은 VAL을 나타내고 있다. 이러한 이유는 같은 가진조건일지라도 지반조건에 따른 임피던스의 특성과 지반의 동적상호작용(dynamic interaction)의 특성상 일반적으로 지반진동의 감쇠비(기하감쇠와 재료감쇠비)는 지반이 견고할수록 작고 지반이 느슨할수록 크게 나타나므로 연약지반인 실트층

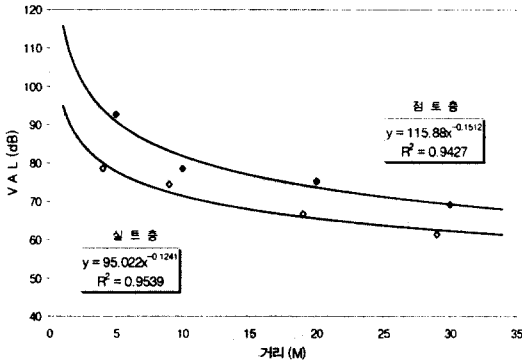
1) "Sand Drain 공법에 의해 발생하는 건설진동의 전달 및 감쇠특성에 관한 연구", 대한건축학회춘계학술발표대회, 2000.4

* 이 연구의 결과에서도 이와 유사한 경향을 보이고 있다.

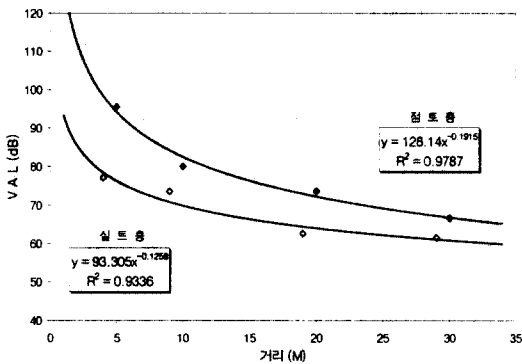
에서의 진동에너지 거리감쇠가 훨씬 많이 일어나기 때문에 사료된다.

4.3 거리에 따른 진동감쇠량의 예측상관식

SIP 항타시 발생하는 건설진동은 지반을 통해 전달되면서 진동원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 진폭과 진동에너지가 감소하게 되는데 이러한 거리에 따른 감쇠특성을 예측해 보면 <그림 11>~<그림 13>과 같다.

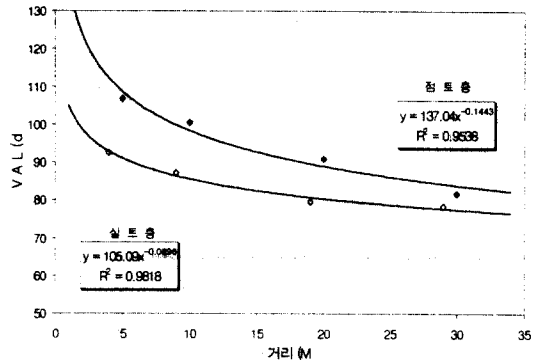


<그림 11> 천공작업시 거리에 따른 예측상관식



<그림 12> 인발작업시 거리에 따른 예측상관식

그림에서 보면 SIP작업시 발생하는 지반진동의 거리에 따른 감쇠는 일반적으로 진동이 지반을 타고 전달되는 과정에서 진동원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 기하감쇠(Geometrical damping)와 재료감쇠(Material damping)가 복합적으로 일어나 지수함수적으로 감쇠하는 특성이 있음을 감안해 볼 때 상당히 신뢰성 있는 예측치를 제안하고 있음을 알 수 있다. 따라서 향후 이러한 결과를 토대로 다양한 지반조건의 변화에 따른 VAL의



<그림 13> 항타작업시 거리에 따른 예측상관식

변동특성을 파악해 보면 보다 신뢰성 있는 예측을 제안할 수 있을 것으로 사료된다.

4.4 국내 건설진동 규제기준과의 비교

지반조건의 변화에 따른 SIP 항타작업시 건설진동의 측정자료를 소음진동규제법 시행규칙 제 29조 3항(생활진동의 규제기준)과²⁾ 비교해 보면 <표 1>과 같다.

<표 1>에서 보면 SIP 항타작업시 발생하는 건설진동의 대부분이 주간에 발생한다고 감안하면 점토층의 경우 항타진동은 30m 이상에서는 대상지역 I, II의 기준을 충분히 만족하고 있으나 20m에서는 대상지역 I의 기준만을 만족하고 있으며, 10m 이내에서는 대상지역 I, II를 훨씬 상회하고 있다. 또한 실트층 지반의 경우 20m 이상에서는 대상지역 I, II의 기준을 충분히 만족하고 있으나 10m에서는 대상지역 I의 기준을 만족하고 있으며, 5m 이내에서는 대상지역 I, II를 훨씬 상회하

2) 소음진동규제법중 건설진동규제기준 dB(V)

대상지역	시간별	주간 (06~22시)	심야 (22~06시)
	대상지역 I		65 이하
대상지역 II		70 이하	65 이하

- 대상지역 I: 주거·복지지역, 운동·휴양지구, 자연환경보전지역, 학교·병원·공공도서관의 부지경계선에서 50m 이내의 지역 등
- 대상지역 II: 기타지역
- 본 연구에서 측정된 데이터는 reference가 ISO 기준인 10^{-6} m/s²인데 반해 국내의 건설진동규제기준은 10^{-5} m/s²으로 규정하고 있으므로 이 기준에 맞춰 자료를 변환하였다.

<표 1> 국내건설진동규제기준에 따른 O.A값 비교

		주간 dB<V> (10 ⁻³ m/s ²)					
		55미만	55이상 60미만	60이상 65미만	65이상 70미만	70이상 75미만	75이상
심 야 dB △ V	55미만	△ ◆ 대상지역 I					
	55이상 60미만	▲					
	60이상 65미만	○ 대상지역 II					
	65이상 70미만				◆		
	70이상 75미만					□ ● ■	
	75이상						
	구 분	5m	10m	20m	30m	항타진동	
점토층	■	●	◆	▲			
실트층	□	○	◇	△			

고 있는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 결과를 토대로 살펴보면 국내의 법적규제기준을 만족하기 위해서는 지반조건에 따른 SIP 공법에 의해 발생하는 항타진동의 경우 실트층에서는 10m 이상, 점토층 지반의 경우는 20m 이상 이격되어야 건설진동으로 인한 피해를 줄일 수 있으며, 이 범위 안에서 작업이 이루어질 경우 현장주변 주민들에게 많은 영향을 미칠 것으로 판단되며, 작업시 이에 대한 방진대책에 보다 세심한 주의와 관심이 필요할 것으로 사료된다.

V. 결론

지반조건의 변화에 따른 SIP 항타작업시 발생하는 건설진동의 전달 및 감쇠특성을 파악해 본 결과는 다음과 같다.

1. 천공과 인발작업시 발생하는 지반진동은 일시진동이 정상진동으로 간주할 수 있을 정도로 지속되기 때문에 유사정상진동으로 분류할 수 있으며 항타진동의 경우는 지속시간이 매우 짧고 충격하중의 형태로 발생하는 충격적 일시진동임을 알 수 있다.

2. 점토층의 경우 주요진동성분은 천공이 200Hz, 인발이 100Hz, 항타가 80Hz로 나타나지만 실트층의 경우 천공과 인발이 31.5Hz, 항타가 50Hz 부근에 나타나 점토층이 실트층에 비해 비교적 고진동수 대역에 주요진동성분이 분포하고

있음을 알 수 있다.

3. VAL(O.A)에 의한 진동특성을 비교해보면 항타진동은 지반조건에 따른 임피던스의 특성과 지반의 동적상호작용의 특성상 견질지반인 점토층의 경우 거리가 멀어져도 상당히 높은 VAL을 나타내고 있으나 실트층의 경우는 점토층에 비해 모든 측정지점에서 매우 낮은 VAL을 나타내고 있음을 알 수 있다.

4. SIP 항타작업시 발생하는 건설진동중 충격력이 가장 커 피해가 우려되는 항타진동의 경우 국내 건설진동 규제기준인 주간과 비교해 보면 실트층에서는 10m 이상, 점토층 지반의 경우는 20m 이상 이격되어야 건설진동으로 인한 피해를 줄일 수 있으며, 이 범위 안에서 작업이 이루어질 경우 현장주변 주민들에게 많은 영향을 미칠 것으로 판단되므로 작업시 세심한 주의와 관심이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 박재영, 광광수, 김재수, 「SIP공법에 의한 발생하는 항타진동의 특성에 관한 연구」, 대한건축학회논문집 제 15권 11호, 1999.11
2. 광광수, 박재영, 김재수, 「Sand Drain 공법에 의해 발생하는 건설진동의 전달 및 감쇠특성에 관한 연구」, 대한건축학회추계학술발표대회, 2000.4
3. 김재수, 「건설소음·진동의 기초이론과 영향」, 한국소음진동공학회 - 건설공사장 소음·진동 저감방안 세미나, 1997.6
4. (주)대우 건설기술연구소, 「건설진동의 영향 평가 및 대책에 관한 연구」, 1988
5. 한국건설기술연구소, 「항타진동과 말뚝 - 흙의 상호작용」, 1991.12
6. (주)대우 건설기술연구소, 「건설진동의 영향 평가 및 대책에 관한 연구(II)」, 1989
7. SIP 두성건설주식회사, SIP기초공법, 1990
8. 이진선, 「진동원에 따른 지반진동의 감쇠특성」, 한국과학기술원 석사학위논문, 1996
9. 한국소음진동공학회, 「소음진동 편람」, 1995
10. 대한주택공사 주택연구소, 「말뚝의 저소음·저진동 시공법에 관한 연구」, 1996.5