

# 저진동 파일시공법에 따른 지반진동 응답 예측을 위한 실험적 연구

## Experimental Study for Prediction of Ground Vibration Responses by the Low-Vibration Pile Driving Methods

강성후\* · 박선준† · 정석규\*\*

Park, Sun Joon · Kang, Sung Hoo · Jung, Seug Gyu

**Key Words** : SIP-method(SIP공법), Vibration(진동), Vibration Equation(진동추정식), Pile Driving(파일항타)

### ABSTRACT

In this study, the SIP (Soil-cement Injected precast Pile) method among the Low-vibration & Low-noise pile driving methods was decided into study compensation. Ground vibrations by the SIP methods step by step divide and were analyzed. Quantitative response values and ground vibration equations with reliability were presented from findings of this study. Also, vibration responses that are occurred by the SIP method of construction were compared as quantitative with vibration responses by general method of construction that are presented in existent study. Ground vibration values by the SIP method correspond to level of 17 ~ 57% of values that are assumed by the Attewell & Famer`s equation, respectively, and these result compares in reliability 50% and separated distance 10 ~ 50 m. Also, those values were analyzed that correspond to level of 14 ~ 96% of ground vibration values by the Prof. Park's equation, respectively. Construction limit extents, separation distances from vibration occurs position, were presented that can satisfy domestic criteria for vibration control for the SIP methods. Those presented in this paper were divided newly according to reliability.

## 1. 서론

무진동·무소음 공법은 시공기술의 발전과 더불어 그 종류가 다양해지고, 시공 시 발생하는 진동과 소음을 상당부분 감소시키는 효과를 발휘하고 있다. 그러나 무진동·무소음의 기초파일 시공법에 의해 발생하는 진동과 소음의 감소량을 실험을 통해 정량적으로 계측·분석하여 그 결과를 연구성과로써 발표한 사례는 매우 드물다. 본 연구에서는 무진동·무소음 공법 중에서도 널리 사용되고 있는 SIP(Soil-cement Injected precast Pile)공법을 대상으로 하였다. SIP 공법은 말뚝직경보다 100mm 정도 큰 연속오거로 선굴착 후 오거(auger) 중공부를 통하여 시멘트풀을 굴착공 내에 주입하게 된다. 시멘트풀 주입이 완료되면 오

거를 인발한 후 기성말뚝을 삽입, drop hammer 또는 steam hammer를 사용하여 최종 항타를 실시한다. 이러한 과정을 거쳐 파일시공이 이루어지는 동안 발생하는 지반진동 및 소음을 오거와 항타 공정 단계별로 분석하여 계측한 데이터를 정량적으로 제시하고, 그 결과로부터 진동추정식을 제안하고자 한다. 또한 SIP공법에 의해 발생하는 진동과 기존의 연구결과에 의해 제시된 타 공법으로 인한 진동 발생 수준에 대해서 정량적인 비교를 수행하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 항타진동 추정식

Wiss와 Attewell & Famer는 파일시공으로 인한 지반의 진동응답을 추정하기 위하여 발파로 인한 지반의 진동을 추정하는 것과 동일한 개념에서 진동을 발생시키는 해머에 너지(E)의 항을 포함하도록 하여 식(1)의 형태를 제안하였다.<sup>(1,2)</sup> 식(1)에서 V는 지반의 진동속도(cm/s), D는 진동발생원으로부터 지반진동 측정지점까지의 거리(m), E는 진동해머의 에너지, K는 진동상수, n은 지반감쇠지수이며  $D/E^{1/2}$ 은 환산거리(Scaled Distance : SD)를 각각 의미한

† 교신저자; 동신대학교 토목공학과  
E-mail : parksj@dsu.ac.kr  
Tel : (061) 330-3136, Fax : (061) 330-3136

\* 동신대학교 토목공학과

\*\* 전라남도청

다.

$$V = K(D/E^{1/2})^n = K(SD)^n \quad (1)$$

진동 에너지에 의해 발생하는 지반의 진동속도는 측정되는 방향에 따라 3가지 성분으로 구분된다. 진동발생원과 진동측정점을 일직선으로 연결한 연장선상을 x축과 일치시키고 이를 기준으로 x, y, z의 직교좌표계를 중첩시킨다면 x축은 L(Longitudinal)성분, y축은 T(Transverse)성분, z축은 V(Vertical)성분으로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 3가지 성분에 대한 벡터 합을 고려한 PVS(Peak Vector Sum= $(V^2+T^2+L^2)^{1/2}$ ) 값<sup>(1,2,3)</sup>을 구하여 사용하였으며, 진동추정식은 50%, 90%, 95%의 비초과 확률을 갖도록 구분하여 제시하였다. 각각의 비초과 확률을 갖는 진동추정식은 식(1)에서 정의된 진동상수 K에 의해 결정되는데 K 값은 식(2)와 같이 구할 수 있다. 식(2)에서  $\mu$ 는 진동치의 평균을 의미하며,  $\sigma$ 는 표준편차, Z는 확률변수로서 50%일 때 0, 90%일 때 1.282, 95%일 때 1.64가 된다.

$$K = \mu + Z\sigma \quad (2)$$

## 2.2 기존의 연구

Attewell & Farmer가 제안한 다양한 진동추정식 중 SIP 공법의 해머에너지 수준과 비슷한 에너지를 갖는 추정식은 식(3)과 같다.<sup>(1)</sup> 식(3)은 sheet 파일을 대상으로 하고 있으며, 추정된 진동치는 50%의 신뢰도와 mm/s의 단위를 갖는다. 식(3)의 V, E, D는 식(1)에서 정의한 값과 같다.

$$V = 32.36 \left( \frac{\sqrt{E}}{D} \right)^{1.61} \quad (3)$$

Prof. Kang 등<sup>(4)</sup>은 저진동, 저소음의 대표적인 공법 중 하나인 PRD(Percussion Rotary Drill)공법을 대상으로 파일시공이 이루어지는 동안 발생하는 지반의 진동속도 추정식을 제안하기 위하여 거리와 해머에너지의 곱에 의해 산정된 환산거리와 지반진동치의 관계를 정량적으로 분석하여 식(1)의 형태로 제시하였다. 연구결과에 의하면 50%, 90%, 95%의 신뢰도 수준에 해당하는 진동추정식은  $2.798(SD)^{-0.793}$ ,  $3.485(SD)^{-0.793}$ ,  $3.705(SD)^{-0.793}$ 으로 각각 제안하였다. 상관계수 r은 -0.858로 제시되어 있으며, 제안된 진동추정식의 해머에너지는 73.5~88.2kN·m의 범위를 갖는다.

Prof. Park 등<sup>(5)</sup>의 연구에서는 Diesel drop hammer를 사용하여 6본의 콘크리트 파일을 향타하는 동안 발생하는 지반진동을 실측 및 분석하여 얻은 진동추정식을 신뢰도

50%, 90%에 따라 진동상수 K는 1.865, 3.684로, 지반감쇠지수  $n=-1.137$ 로 각각 제시하였다. 여기에 사용된 해머 에너지는 48.1~61.8kN·m의 범위이다.

## 2.3 진동규준

최근에는 환경문제에 대한 기대수준이 높아지면서 과거에 비해 민원발생이 빈번해짐에 따라 진동 허용기준치를 하향 조정하여 0.3~0.5cm/s 범위 값을 일반적으로 사용하고 있다. 또한 민원인들의 대부분은 정신적 피해기준을 물질적인 피해기준으로 연관지어 보상을 요구하고 있으며, 건설공사 현장에서 민원을 제기하면 보상을 받을 수 있다는 기대심리가 팽배해 있는 실정이다. Table 1은<sup>(6)</sup> 과거 건설교통부(현, 국토해양부) 감사관실에서 발파진동 및 향타진동 등 건설진동에 대한 구조물의 진동과 소음허용기준을 제시한 것으로써 진동수에 따라 진동규준을 세분화한 것이 기존의 진동규준과 비교하여 개선된 사항이다. 파일 시공으로 인한 지반 진동응답이 갖는 진동수는 일반적으로 35Hz이하의 특성을 갖게되므로 본 연구에서도 10~35Hz 범위의 진동규준을 적용하였다.

Table 1 Vibration criteria

Class	I	II	III	IV	Reference	
Vibration criteria (cm/s)	10~35Hz	0.2	0.5	1.0	~4.0	physical damage standard
	> 35Hz	0.3	0.8	1.5	5.0	

Type of structures

- Class I : cultural asset & computer equipment surrounding
- Class II : house & apartment(with small crack)
- Class III : house & apartment(no crack)
- Class IV : SRC building, RC structure

## 3. 현장실험

### 3.1 실험 개요 및 준비

SIP 시공으로 인한 지반진동 측정실험은 2개 공사현장을 대상으로 하였으며, 2개 공사현장 모두 교량기초 공사 중이었다. 공사현장은 실제 해당지역의 이니셜을 이용해 H지역과 Y지역으로 각각 구분하였으며, H지역과 Y지역 모두 각각 3본의 강관파일이 시공되는 동안 계측이 이루어졌다. SIP 시공이 진행되는 동안 발생하는 지반의 진동을 측정하기 위하여 Blastmate III(InstanTel Co. CANADA) 3set를 거리 감쇠효과가 평가될 수 있도록 설치위치를 변화시켜가면서 설치하였다. 계측은 진동발생원(향타원)의 위치에 따라 최소 10.31m에서부터 최대 156.2m까지 거리 감쇠를 고려하여 설치하였다. 진동발생원으로부터 근거리에서 원거리까지 계측기를 설치한 이유는 SIP 공법이 저진동 공법인 점을 고려하여 거리에 따른 확실한 지반진동을 측

정하기 위함이다.

SIP 시공이 이루어지는 과정을 크게 2단계로 구분하여 지반진동을 측정하였다. 첫 번째 단계는 오거를 이용하여 외부강관 케이싱과 함께 굴착하는 “오거작업단계”, 두 번째는 시멘트 풀 주입과 동시에 강관파일 삽입 및 최종 근입이 이루어지는 “항타단계”이다. 그림 1은 SIP 시공 중인 파일드라이버로써(CBM-500) H 지역과 Y 지역 모두 동일한 모델이 사용되었다. Fig. 1(a)는 오거작업을 진행하고 있는 전경이며, (b)는 항타단계 작업전경이다. 항타단계에서는 29.4kN 중량의 해머가 사용되었으며, 낙하고는 2.0m에서 3.5m까지 변화하였다.



(a) Auger - site H



(b) Drop hammer - site Y

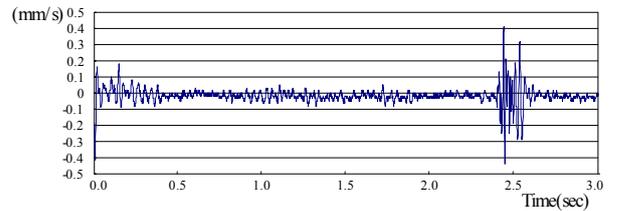
Fig.1 Site view for SIP driving

H 지역의 지반은 N치 6~8로써 실트가 섞인 모래 (0.0~3.8m)와 N치 12~27값인 모래가 섞인 자갈 (3.8~5.0m), 풍화암(5.0~7.0m)로 구성되어 있었다. 시험항타를 위한 파일의 길이는 풍화암까지 지지되기 위해서 최소 6.5~7.5m로 설계되었으며, 본 연구에서 측정 대상으로 한 3본의 파일길이는 6.5~7.5m 였다.

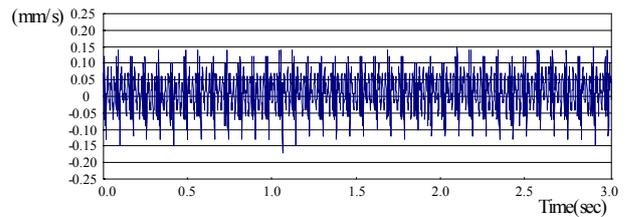
Y 지역의 지반은 N치 8로써 실트질 점토로 매립 (0.0~1.7m)을 한 후 N치 2~3값인 매우 연약한 습윤포화 상태인 퇴적층(1.7~5.5m), N=3회인 보통조밀한 완전풍화 잔류토층(5.5~6.2m) 다음으로 연암층(6.2~7.2m)로 구성되어 있었다. 시험항타를 위한 파일의 길이는 풍화암까지 지지되기 위해서 파일의 길이는 최소 5.5~6.1m로 설계되었다.

### 3.2 실험결과

H 지역과 Y 지역에서 SIP 시공 시 측정된 지반진동치들을 Table 2에 정리하였다. 시험 시공된 강관파일은 모두 6본 이었으며, H 지역에 사용된 파일드라이버의 해머무게는 29.4kN, 낙하고 2.0~3.0m, Y 지역의 경우에는 해머무게 29.4kN, 낙하고 2.5~3.5m 였다. Table 2에서 첫 번째 컬럼에 사용된 기호들에 대한 설명은 Table 2의 하단에 기술하였으며, 예를 들어 'HD2-3'은 'H 지역의 항타(Drop hammer)단계에서 2번째 시공 파일 중 3번째 계측구간이라는 의미를 갖는다. Fig. 2(a)는 항타단계에서 파일과 13.7m 떨어진 위치에서 계측된 연직방향 지반진동 시간이력이며, (b)는 Auger 시공단계에서 26.2m 떨어진 위치에서 계측된 연직방향 지반진동 시간이력을 보여주고 있다.



(a) Drop hammer stage



(b) Auger stage

Fig. 2 Time histories for ground vibration at site H

## 4. 진동추정식 및 진동응답 평가

### 4.1 진동추정식

H 지역에서 계측된 지반진동치들 중 항타단계의 15개 데이터와 Y 지역의 항타단계에서 계측된 18개의 데이터를 이용하여 회귀분석한 후 Fig. 3(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 계측치들의 평균값을 의미하는 신뢰도 50%에 해당하는 진동추정식과 95%신뢰도를 갖는 진동추정식 그리고 타 공법과의 비교를 위해 90%의 신뢰도를 갖는 진동추정식을

구분하여 제시하였다. H와 Y 지역, 오거단계와 항타단계에 대한 진동추정식 산정결과를 Table 3에 정리하였다. 표에 사용된 기호 HD, HA, YD, YA에서 H와 Y는 실험지역을, D와 A는 항타와 오거단계를 각각 의미한다.

Fig. 4에는 동일한 SIP 공법이 적용된 H 지역과 Y 지역의 진동속도 응답 추정식과 기존 연구결과들에 제시된 추정식을 신뢰도 50%를 기준으로 비교하였다.

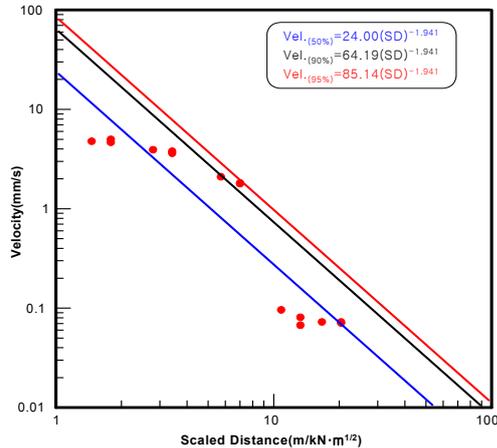
SIP공법의 경우 지반의 특성을 파악하기 위하여 널리 사용되는 N치가 상대적으로 높은 H지역이 큰 진동응답을 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 4로부터 HA, HD, YD 지반진동의 감쇠정도를 나타내는 진동속도 응답 추정선의 기울기는 유사한 기울기 정도를 보이고 있음을 알 수 있다. 다만 YA, 즉 Y지역의 오거로 인해 발생한 진동의 감쇠정도는 상대적으로 완만하게 나타났다. H 지역의 항타로 인해 발

Table 2 Test and analysis results

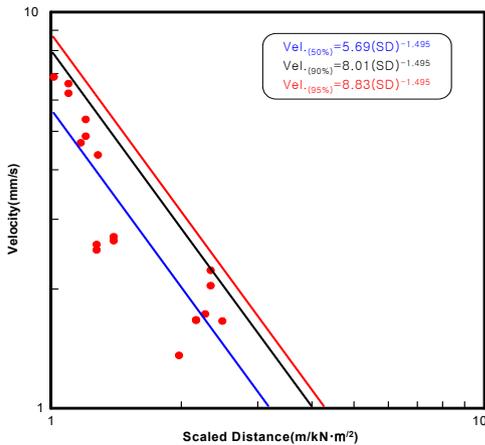
Pile	Dis. (m)	Energy (kN·m)	SD(D/E <sup>1/2</sup> )	PVS (mm/s)	Pile	Dis. (m)	Energy (kN·m)	SD(D/E <sup>1/2</sup> )	PVS (mm/s)
HD1-1	13.7	58.8	1.787	5.000	YD1-5	10.31	102.9	1.016	6.860
	53.7	58.8	7.003	1.816		20.03	102.9	1.975	1.360
HD1-2	13.7	58.8	1.787	4.660	YD2-1	11.01	73.5	1.284	4.360
	53.7	58.8	7.003	1.792		21.31	73.5	2.486	1.660
HD1-3	13.7	88.2	1.459	4.780	YD2-2	11.01	88.2	1.172	4.680
	53.7	88.2	5.718	2.100		21.31	88.2	2.269	1.730
HD2-1	26.2	58.8	3.417	3.795	YD3-1	11.97	73.5	1.396	2.650
	101.6	58.8	13.250	0.081		11.97	73.5	1.396	2.710
HD2-2	26.2	58.8	3.417	3.765		11.97	88.2	1.275	2.510
	101.6	58.8	13.250	0.067		11.97	88.2	1.275	2.590
HD2-3	26.2	88.2	2.790	3.926	YA2-1	11.01	73.5	1.284	0.192
	101.6	88.2	10.818	0.096		21.31	73.5	2.486	0.117
HD3-1	156.2	58.8	20.370	0.071	YA2-2	11.01	73.5	1.284	0.238
HD3-2	156.2	58.8	20.370	0.073		21.31	73.5	2.486	0.105
HD3-3	156.2	88.2	16.632	0.073	YA2-3	11.01	73.5	1.284	0.232
HA1-1	13.7	58.8	1.787	2.620		21.31	73.5	2.486	0.108
	53.7	58.8	7.003	0.112	YA2-4	11.01	73.5	1.284	0.166
HA1-2	13.7	58.8	1.787	2.590		21.31	73.5	2.486	0.106
	53.7	58.8	7.003	0.193	YA2-5	11.01	73.5	1.284	0.146
HA1-3	13.7	88.2	1.459	3.490		21.31	73.5	2.486	0.117
	53.7	88.2	5.718	0.225	YA2-6	11.01	73.5	1.284	0.208
HA1-4	13.7	88.2	1.459	2.810		21.31	73.5	2.486	0.117
HA2-1	26.2	58.8	3.417	1.840	YA2-7	11.01	73.5	1.284	0.184
	101.6	58.8	13.250	0.073		21.31	73.5	2.486	0.103
HA2-2	26.2	58.8	3.417	2.400	YA2-8	11.01	73.5	1.284	0.187
	101.6	58.8	13.250	0.071		21.31	73.5	2.486	0.100
HA2-3	26.2	58.8	3.417	2.330	YA3-1	11.97	73.5	1.396	0.139
	101.6	88.2	10.818	0.073		22.54	73.5	2.629	0.104
HA2-4	26.2	88.2	2.790	2.430	YA3-2	11.97	73.5	1.396	0.150
HA2-5	26.2	88.2	2.790	2.710		22.54	73.5	2.629	0.093
HA3-1	156.2	58.8	20.370	0.073	YA3-3	11.97	73.5	1.396	0.175
HA3-2	156.2	58.8	20.370	0.067		22.54	73.5	2.629	0.091
HA3-3	156.2	88.2	16.632	0.074	YA3-4	11.97	73.5	1.396	0.171
YD1-1	10.31	73.5	1.203	5.360		22.54	73.5	2.629	0.094
	20.03	73.5	2.336	2.040	YA3-5	11.97	73.5	1.396	0.124
YD1-2	10.31	73.5	1.203	4.860		22.54	73.5	2.629	0.081
	20.03	73.5	2.336	2.230	YA3-6	11.97	73.5	1.396	0.150
YD1-3	10.31	88.2	1.098	6.240		22.54	73.5	2.629	0.147
	20.03	88.2	2.162	1.670	YA3-7	11.97	73.5	1.396	0.151
YD1-4	10.31	88.2	1.098	6.600		22.54	73.5	2.629	0.093
	20.03	88.2	2.162	1.670	YA3-8	11.97	73.5	1.396	0.177
Reference						22.54	73.5	2.629	0.106

- H, Y : Testing site, D : Drop hammer stage, A : Auger stage, 1-1 : Pile number-Measurement sector

생되는 진동속도 응답 추정식이 본 연구의 실험범위에서는 가장 보수적인 진동치를 추정하고 있으므로, 이 식을 이용하여 SIP공법이 적용되는 공사현장의 개략적인 진동치의 추정이 가능할 것으로 판단된다. Fig. 4에서 50% 신뢰도를 갖는 진동추정식을 나타내는 선들은 그 선들을 설명하는 글상자의 좌측하단 꼭지점과 접하고 있다.



(a) testing site H



(b) testing site Y

Fig. 3 Velocity equations for drop hammer stage

Fig. 4의 SIP공법에 의한 지반진동과 Prof. Kang의 PRD 진동속도 추정식, Attewell & Famer의 추정식, Prof. Park의 Diesel Drop hammer의 진동속도 추정식들을 직접 비교하는 것은 해머에너지 적용범위, 지질조건, 진동전달 매질의 변화, 주변환경 등의 많은 변수들을 동일하게 만들어주는 과정이 우선되어야 하겠으나, 현 단계에서 이러한 모든 조건을 동일하게 치환하여 충족시키기는 불가능 하며, 무의미한 것이 사실이다. 그러나 본 연구로부터 제시된 Table 3과 Fig. 4는 건설현장에서 저진동 파일시공법 선택과 개략적인 진동속도 응답을 추정하기 위한 가이드라인으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

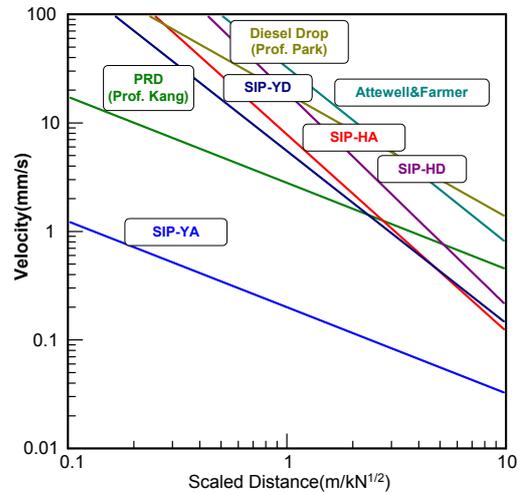


Fig. 4 Comparison of vibration equations

#### 4.2 파일시공법에 따른 진동치 평가

SIP공법과 기존의 연구 결과들에 의해 발생될 것으로 추정되는 지반진동치를 국내 건설공사 현장에서 널리 적용되고 있는 진동규준인 Table 1과 비교하였다. Class의 구분은 문화재 또는 보존이 필요한 역사적 시설물을 의미하는 Class I(2.0 mm/s 이하)과 작은 균열이 있는 주택, 아파트 또는 상가건물을 의미하는 Class II(5.0 mm/s 이하)를 대상으로 진동규준 만족여부를 검토하여 신뢰도 수준에 따라 시공이 가능한 이격거리를 Fig. 5에 예시하였다. 보다 진한 음영으로 처리된 영역, 즉 굵은 실선으로 둘러싸인 부분은 Class I의 진동규준을 만족하는 범위이며, 보다 열

Table 3 Vibration velocity equations for SIP

Site & Stage	Vibration velocity equations (mm/s)			Corr. coef.(r)	Sta. Dev.(σ <sub>x</sub> )	Energy(kN·m)
	50%	90%	95%			
HD	24.00(SD) <sup>-1.941</sup>	64.19(SD) <sup>-1.941</sup>	85.14(SD) <sup>-1.941</sup>	-0.853	0.589	58.8~88.2
HA	9.21(SD) <sup>-1.776</sup>	19.10(SD) <sup>-1.776</sup>	23.55(SD) <sup>-1.776</sup>	-0.897	0.324	58.8~88.2
YD	5.69(SD) <sup>-1.495</sup>	8.01(SD) <sup>-1.495</sup>	8.83(SD) <sup>-1.495</sup>	-0.773	0.071	73.5~102.9
YA	0.22(SD) <sup>-0.791</sup>	0.27(SD) <sup>-0.791</sup>	0.28(SD) <sup>-0.791</sup>	-0.766	0.022	73.5

(unit : mm/s)

Dis. (m)	SD (m/10m <sup>0.75</sup> )	PRD (Prof. Kang)			SIP												Attewell & Farmer		Diesel Drop (Prof. Kang)	
					HA			HD			YA			YD						
		50%	90%	95%	50%	90%	95%	50%	90%	95%	50%	90%	95%	50%	90%	95%	50%	50%	90%	
10	1.065	2.66	3.32	3.53	6.97	14.42	17.77	16.80	44.13	58.24	0.19	0.23	0.25	4.98	7.25	8.07	29.25	17.37	34.30	
12	1.278	2.30	2.87	3.05	5.01	10.36	12.78	11.75	30.88	40.75	0.16	0.20	0.21	3.73	5.43	6.05	21.81	14.11	27.88	
14	1.491	2.04	2.54	2.70	3.79	7.84	9.66	8.69	22.84	30.14	0.15	0.17	0.19	2.92	4.25	4.74	17.02	11.84	23.40	
16	1.704	1.83	2.28	2.43	2.97	6.16	7.59	6.69	17.58	23.20	0.13	0.16	0.17	2.36	3.44	3.83	13.72	10.18	20.10	
18	1.917	1.67	2.08	2.21	2.40	4.97	6.13	5.31	13.96	18.42	0.12	0.14	0.16	1.96	2.86	3.18	11.35	8.90	17.58	
20	2.13	1.54	1.91	2.03	1.99	4.11	5.07	4.32	11.36	14.99	0.11	0.13	0.14	1.66	2.42	2.69	9.58	7.90	15.60	
25	2.662	1.29	1.60	1.70	1.33	2.74	3.38	2.79	7.34	9.69	0.09	0.11	0.12	1.17	1.70	1.89	6.69	6.13	12.10	
30	3.194	1.11	1.39	1.48	0.95	1.97	2.43	1.96	5.14	6.78	0.08	0.10	0.10	0.87	1.27	1.42	4.99	4.98	9.84	
40	4.259	0.89	1.10	1.17	0.57	1.17	1.44	1.11	2.92	3.86	0.06	0.08	0.08	0.55	0.81	0.90	3.14	3.59	7.09	
50	5.324	0.74	0.93	0.98	0.38	0.78	0.96	0.72	1.89	2.49	0.05	0.06	0.07	0.39	0.57	0.63	2.19	2.79	5.50	

Fig. 5 Vibration influence estimation and comparison on pile driving methods

은 음영으로 처리된 영역, 즉 굵은 점선으로 둘러싸인 부분은 Class II의 진동규준을 만족하는 작업범위를 의미한다. Attewell & Famer의 제안식이나 Prof. Park(Diesel Drop)의 제안식에 의해서 추정된 진동응답치의 값들을 서로 비교할 때 저진동 공법인 SIP공법과 PRD(Prof. Kang) 공법은 진동저감 효과가 탁월한 것을 알 수 있다.

hammer에 의한 지반진동치의 26~96%, 14~28%의 수준에 해당하는 것으로 밝혀졌다. SIP공법의 H 지역과 Y 지역에서 오거의 경우에 지반진동치는 Attewell & Famer의 제안식에 의한 지반진동치의 17~24%, 0.6~3%의 수준에 해당하며, diesel drop hammer에 의한 지반진동치의 14~40%, 1.0~2%의 수준에 해당하는 것으로 밝혀졌다. 파일시공법에 따른 지반진동치의 비교 결과를 Fig. 6에 bar chart 형태로 도시하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 저진동 파일 시공법인 SIP(Soil-cement Injected precast Pile)공법을 대상으로 파일시공이 이루어지는 동안 발생하는 지반진동을 공정단계별로 분석하여 진동추정식을 제안하고 SIP공법에 의한 지반진동과 기존의 연구결과에 의해 제시된 지반진동치들을 정량적으로 비교하여 진동저감 정도를 평가하고자 하였다.

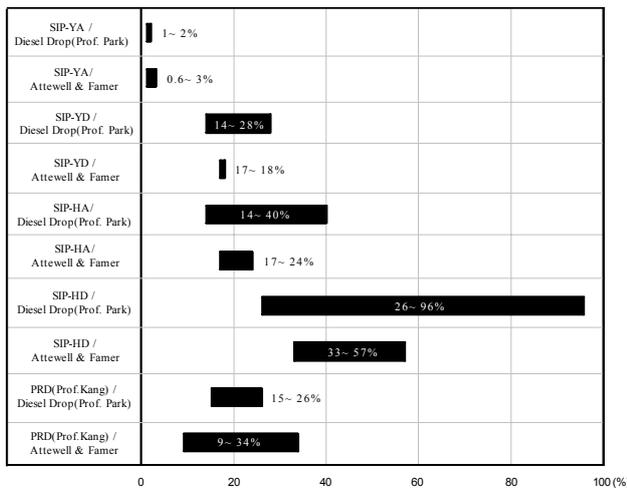


Fig. 6 Comparison of velocity responses on pile driving methods

신뢰도 50% 진동식을 기준으로 할 때 이격거리 10m~50m의 범위 내에서 Prof. Kang이 제안한 PRD공법에 의한 지반진동치는 Attewell & Famer의 제안식에 의한 지반진동치의 9~34%의 수준에 해당하며, Prof. Park이 제안한 diesel drop hammer에 의한 지반진동치의 15~26%의 수준에 해당하는 것으로 밝혀졌다. SIP공법의 H 지역과 Y 지역에서 항타의 경우에 지반진동치는 Attewell & Famer의 제안식에 의한 지반진동치의 33~57%, 17~18%의 수준에 해당하며, diesel drop

1. 신뢰도 50% 진동식을 기준으로 할 때 이격거리 10~50m의 범위 내에서 SIP공법에 의한 지반진동치는 Attewell & Famer의 제안식에 의한 지반진동치의 17~57%의 수준에 각각 해당하며, diesel drop hammer를 대상으로 한 Prof. Park의 제안식에 의한 지반진동치의 14~96%의 수준에 각각 해당하는 것으로 분석되어 지반진동의 저감효과는 상대적으로 우수한 수준임을 알 수 있었다.

2. SIP공법 중 항타단계에서 발생하는 지반 진동속도 응답의 예측 및 분석결과를 기준으로 50%, 90%, 95%의 신뢰도 수준에 따라 H 지역에서 진동상수를 24.00, 64.19, 85.14로, 감쇠지수를 -1.941로 각각 제안하였다. 또한, Y 지역에서는 진동상수를 5.69, 8.01, 8.83로, 감쇠지수를

-1.495로 각각 제안하였다.

3. SIP공법에 대해서는 진동발생원과의 이격거리에 따라 국내의 진동규제기준을 만족하면서 파일시공이 가능한 작업범위를 보여주는 table과 공법 간 진동저감 정도를 정량적으로 비교할 수 있는 bar chart를 새롭게 제시하였다. 이러한 결과들은 파일시공법 선택과 공사 전에 진동치를 개략적으로 추정할 수 있는 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. C. H. Dowing, 1996, "Construction Vibrations", Prentice Hall.
2. Park, Y. S., Lee, D. Y., and Jun, J. S., 1989, "A Study on Influence Evaluation and Countermeasure of Construction Vibration(I,II)", Daewoo Engineering Technical Research Institute.
3. Chopra, A. K., 1995, "Dynamics of Structures", Prentice Hall.
4. Kang, S. H., Park, S. J., and Jung, S. H., 2008, "Experimental Study on Vibration Reduction Estimation of PRD Pile Driving Method", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 7., pp. 775-782.
5. Park, S. J., Park, Y. S., etc, 2002, "Suggestion of Vibration Criteria for Fresh Concrete Considering Early Strength Increase", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 6., pp. 453-460.
6. Ministry of Construction and Transportation, 2002, "Allowable Standard Examination for Noise and Vibration by Blasting(Suggestion)", Audit and Inspection Office.