

## Tricone-Bits 천공장비의 진동 분석 및 진동 거리감쇠 추정에 관한 연구

조성규\* · 서성철\*\* · 박형근\*\*\*

Cho, Seongkyu\*, Seo, Sung Chul\*\*, Park, Hyung Keun\*\*\*

### A Study on Vibration Analysis and Estimation of Vibration Damping of Tricone-Bits Drilling Machine

#### ABSTRACT

Recently, with the development of construction machinery, low-vibration construction machine such as Tricone-Bits, which can drill both soil and rock layers and minimize vibration, is being used frequently. However, although many studies have been conducted on the prediction of vibration values for earth augers and pile drivers, the reality is that studies on the effects of vibration on low-vibration drilling equipment are lacking. In this paper, ground vibration values for Tricone-Bits were measured, and a vibration distance damping formula was proposed using this. In addition, after predicting the vibration of the earth auger and pile driver using the previously proposed vibration distance damping formula, the degree of vibration damping for the Tricone-Bits was evaluated by comparing and analyzing it. As a result, the Tricone-Bits showed a vibration reduction effect of 97% and 93% compared to these machine and It will help with management and prediction of the ground vibration effects evaluation on the low-vibration equipment such as Tricone-Bits.

**Keywords :** Construction vibration, Low-drilling machine, Tricone-Bits, Vibration distance damping formula

#### 초 록

최근 도심지에서는 재건축, 재개발 및 초고층 건물이 활발하게 건축되고 있다. 이러한 공사현장은 지하공간 활용을 위하여 가시설 공사가 필수로 수행되며, 이를 위하여 건설 장비를 활용한 천공이 수반된다. 가시설 공사에 사용되는 천공장비는 토사층과 암반층에서 각각 어스오거와 향타기(T-4)를 주로 활용하였다. 최근에는 건설기계의 발달로 토사층과 암반층 모두 천공 가능하고 진동을 최소화 할 수 있는 Tricone-Bits와 같은 저진동 건설장비가 사용되고 있다. 하지만, 어스오거와 향타기에 대한 진동치 예측에 대한 연구는 다수 수행되었으나 저진동 천공장비에 대한 진동 영향에 대한 연구는 부족한 것이 현실이다. 본 연구에서는 저진동 천공장비인 Tricone-Bits에 대한 지반 진동치를 측정하고, 이를 활용하여 진동 거리감쇠식을 제안하였다. 또한, 기존 제시된 진동 거리감쇠식을 활용하여 어스오거 및 향타기에 대한 진동 예측한 후, 이를 비교 및 분석하여 Tricone-Bits 천공기에 대한 진동감쇠 정도를 평가하였다. 그 결과, Tricone-Bits 천공 장비는 어스오거와 향타기 대비 97% 및 93%의 진동저감 효과가 나타났다.

**검색어 :** 건설 진동, 저진동 건설기계, Tricone-Bits, 진동 거리감쇠식

\* 충북대학교 토목공학과 박사과정 (Chungbuk National University · noblemann@naver.com)

\*\* 정회원 · 충북대학교 토목공학과 박사과정 (Chungbuk National University · sungchul92@nate.com)

\*\*\* 종신회원 · 교신저자 · 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Chungbuk National University · parkhk@chungbuk.ac.kr)

Received February 22, 2023/ revised April 10, 2023/ accepted April 11, 2023

### 1. 서론

최근 구도심의 재개발 및 재건축 공사, 도심 내 대규모 사무용 빌딩 신축공사는 기존 건물들에 인접하여 건설되고 있다. 도심지 건물의 지하 공간 확보를 위한 공법에는 주로 토류벽, SCW, CIP, 지하연속벽 등과 같은 가설공법이 사용되고 있으며, 가설공법에는 항타기, 오거, T-4 등과 같은 천공장비가 사용된다. 천공장비는 진동과 소음을 발생시켜 인접 건물의 균열 또는 인적 피해를 발생시키게 된다(Kang, 2009; Jung, 2007). 최근에는 진동과 소음 영향을 최소화하기 위하여 암반까지 천공이 가능한 저진동 천공장비인 Tricone-Bits가 사용되고 있으나 진동기준이 제시되어 있지 않을 뿐만 아니라, 진동영향 연구는 거의 전무한 실정이다(Choi and Min, 2012).

본 연구에서는 Tricone-Bits 천공장비에 대한 진동 거리감쇠식을 제안하고, 기존 제시된 진동 거리감쇠식으로 예측한 건설장비의 진동치와 비교하여 저감효과를 제시하는데 그 목적이 있다.

### 2. 연구범위 및 방법

본 연구범위는 가시설공사 천공장비인 Tricone-Bits 작업 중 발생하는 진동 영향 분석이다. 일반적인 가시설공사에서의 지층조건과 천공장비 및 회전력을 사용하였으며, 진동 측정거리에 따른 진동 감쇠 정도를 분석하였다. 지층조건은 토사층 6 m~9 m 위치 후, 풍화암 또는 연암층이 존재하며, 천공장비는 YJ5600HB를 사용하고 회전력은 RPM 1380, 회전속도 40회/min로 일정하게 유지하였다.

- Vibration Frequency Range : 1 ~ 500Hz
- dB Measurement Range : 35 ~ 120dB
- Noise Measurement Range : 30 ~ 130 dBA
- Noise Frequency Range : 20Hz ~ 8KHz
- Dynamic Range : 90dB 이상
- Measurement Value : Instantaneous, Leq, Lmax, Lmin

Fig. 1. Blastmate III Function

연구 방법으로는 첫째, 공사 수행 현장 지반에 설정된 자유장 지진계 한계치를 활용하여 기준치를 산정하고, 환경부 공사장 소음·진동 관리지침서에서 제시한 건설장비 진동레벨을 기존 제시된 진동 거리감쇠식을 활용하여 진동치를 추정하였다. 둘째, Tricone-Bits 장비를 대상으로 지반 천공 시 발생하는 진동치를 진원지에서 거리별로 측정하여 산정된 기준치 및 진동추정치와 비교 분석하였다. 셋째, 천공 작업에서 측정 수집한 진동치에 대하여 선형회귀분석하여 진동 거리감쇠식을 추정하였다. 넷째, 분석결과를 종합하여 진동에 관한 ISO 기준, 건설장비(오거 및 항타) 추정 진동치 및 Tricone-Bits 장비 진동치를 비교하여 진동저감 효과를 분석하였다. 진동측정에는 Blastmate III를 사용하였으며, 측정센서는 지표면에 단단하게 고정하여 1분 간격으로 진동측정기에 진동치가 자동 저장되도록 설정하였다.

### 3. 연구 동향

국내 건설기계류 진동에 대한 기준은 환경부 공사장 소음·진동 관리지침서에 제시되어 있다(MoE, 2007). 건설 진동은 지표면을 천공장비가 타격할 때 종파, 횡파, 래리파의 순서로 전달되며, 일반적으로 래리파가 67%, 횡파가 26%를 차지하고 있어 표면파가 주를 이루게 되므로, 건설진동에 대한 문제는 일반적으로 지표면상에서 나타난다(Kim, 1997, 2004). 건설기계류에 대한 실측 진동치에 대한 연구(Kang et al., 2005)에서 흙막이공법 작업 시 Sheet Pile 또는 H-Beam을 진동해머로 항타하는 것보다 Water Jet, 유압식 공법, SCW 공법을 활용하는 것이 4.4 dB~29.7 dB까지 진동을 저감하는 것으로 나타났다. 이는 흙막이공법 시공 시 파일



Fig. 2. Tricone-Bits Machine & Sensor Location

Table 1. Vibration Level of the Earth Auger and Pile Driver

Description	Operation Status	Classification	Vibration Level by Distance (dB(V))			
			7.5 m(Log Distance)		15 m(Log Distance)	
			Range	Mean	Range	Mean
Earth Auger	No Load	KVBa0102	45.9			
	Work	KVBa0101	40.1/68.0	61.1	36.4/58.9	53.0
	Hit	KVBa0106	53.5/55.9	54.7	46.9/54.8	52.4
Pile Driving	Work	KVBb0106	70.1/76.0	73.9	68.7/70.3	69.6

인입을 위한 천공 수행 과정에서 사용되는 장비 및 공법에 따라 진동 영향의 편차가 큰 것으로 판단할 수 있다. 환경부 공사장 소음·진동 관리지침서에는 다양한 건설장비에 대한 진동 기준치를 제시하였으며, 어스오거와 항타기의 진동레벨을 Table 1에 정리하였다.

진동 평가는 일반적으로 주파수 영역을 이용하는데, 사람의 듣는 능력을 나타내는 척도인 Bel의 10분의1인 dB(데시벨)이 지반 진동의 물리적 표현으로 주로 이용된다. 데시벨(dB)을 이용하는 진동에 대한 물리적 표현은 진동가속도레벨(VAL), 진동속도레벨(VVL), 진동변위레벨(VDL)이 있고, 이러한 표현은 인체감각 등에는 관계가 없어 ISO R-2631에서는 진동가속도레벨에 중심주파수 대역별 인체감각 보정치를 가한 것을 진동레벨(VL)이라 한다 (Hwang and Koh, 2001; Shin, 2009).

#### 4. 진동치 예측 및 결과분석

##### 4.1 건설장비 진동 예측치 및 진동 기준치 산정

건설장비 진동레벨은 거리에 따라 감소하므로 진동 거리감쇠식은 식 (1)과 같다(Korea Environment Institute, 2007; Kim, 2003). 환경부 공사장 소음·진동 관리지침서에서 제시한 건설장비별 대수거리 7.5 m에 대한 어스오거와 항타기에 대한 진동레벨을 식 (1)을 이용하여 산정한 예측치를 Table 2에 정리하였다. 예측된 장비별 최소·최대 진동레벨에 대한 가속도 및 중력가속도 계산 값과 OO발전소 자유장지진계 진동기준치를 Table 3, Table 4에

정리하였다.

$$VL(dB) = VL_0 - 20 \log\left(\frac{r}{r_0}\right)^n \quad (1)$$

여기서, VL: r(m) 떨어진 지점의 진동레벨, dB(V), VL<sub>0</sub>: r<sub>0</sub>(m) 떨어진 지점의 진동레벨, dB(V), r: 진동원으로부터 예측점까지의 거리(m), r<sub>0</sub>: 진동원으로부터 기준 측정지점까지의 거리(7.5 m or 15 m), n: 기하감쇠정수(평균값: 0.81, 항타기: 0.75, 브레이커: 1.2, 굴착기: 0.36, 천공기: 1.8, 디젤기: 0.35, 발전기: 0.42)이다.

Tricone-Bits 천공에 대한 진동관리 기준치는 Seismic Trigger 수직 값(0.0067 g)의 1/2인 0.0035 g를 적용하여 70.50 dB (VAL(dB)=20log(0.00335/10<sup>-5</sup>))로 산정하였다.

##### 4.2 측정거리별 진동 분석

Tricone-Bits 천공장비는 연속회전력으로 토사와 암반을 잘게 분쇄하여 천공하므로 진동이 연속적으로 발생한다. 지반 굴착 후 각 측정별로 암반(연암)은 각각 No.36: 10 m, No.31: 9 m, No.28, 23,19,16,14: 6 m 깊이에서 출현하였다(Fig. 3). 각 측정별 진동측정 연속데이터는 Fig. 4와 같다.

측정별 최대·최소 진동치에 대한 진동평균치 차이는 11 dB이며, 천공 깊이 11.5 m에 대한 천공 평균소요시간은 41분으로 측정되었다. 최대 및 최소 천공시간은 No.28에서 26분, No.31에서 53분이었으며, 토사층이 암반층보다 천공홀 유지를 위해 천공시간이 더 소요되는 것으로 파악되었다. 진동은 토사를 천공하는 구간에서

**Table 2.** Vibration Level of the Drilling Machine (Log Distance r<sub>0</sub> = 7.5m)

Description		10 m	15 m	20 m	25 m	30 m	31.3 m	Damping Constant
Earth Auger	Min. (dB)	39.62	37.75	35.79	33.87	32.07	31.62	Boring Machine: 1.8
	Max. (dB)	67.52	65.69	63.69	61.77	59.97	59.52	
Pile Driving	Min. (dB)	65.89	61.97	59.55	57.80	56.43	56.11	Pile Driving: 0.75
	Max. (dB)	71.79	67.87	65.45	63.70	62.33	62.01	

**Table 3.** Prediction Value on Maximum-Minimum Vibration Level, Acceleration and Gravitational Acceleration of the Drilling Machine

Description		VAL(dB)	Acceleration, a(m/s <sup>2</sup> )	Acceleration of Gravity (g)
Earth Auger	Min.	31.62	0.00038	0.000039 g
	Max.	67.52	0.02377	0.002425 g
Pile Driving	Min.	56.11	0.00639	0.000652 g
	Max.	71.79	0.03886	0.003965 g

**Table 4.** Reference Value on the Free Field Seismometer

Description	Seismic Trigger	OBE (Operation Basis Earthquake)	SSE (Safe Shutdown Earthquake)
Horizontal	0.01 g	0.1 g	0.2 g
Vertical	0.0067 g	0.067 g	0.133 g



Fig. 3. Vibration Measuring Point and Earth Retaining Picture

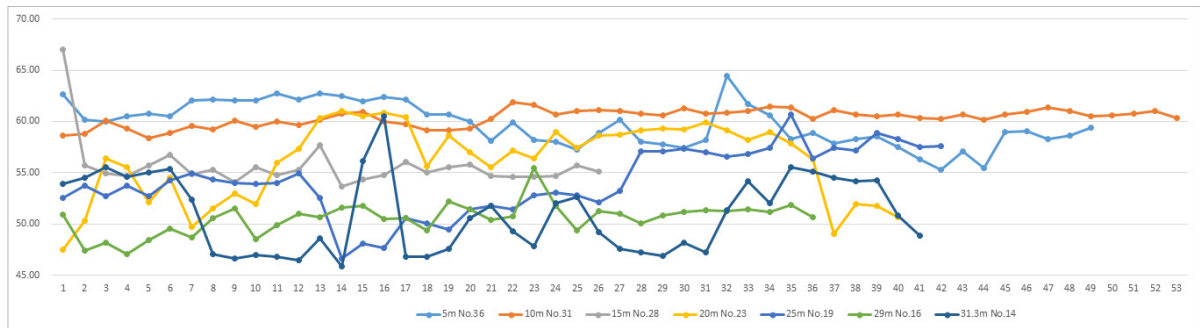


Fig. 4. Vibration Measuring Graph of the Each Measurement Point

Table 5. Vibration Value on Maximum, Minimum and 5 Minute Section of the Tricone-Bits

Pile No.	Distance (m)	Drilling Time (min.)	Min. (dB)	Max. (dB)	Vibration Value per 5 Minutes (dB)				
					0~5	5~10	10~15	15~20	20~25
36	5 m	49	55.28	64.48	60.83	61.74	62.41	61.19	58.30
31	10 m	53	58.38	61.86	59.01	59.43	60.30	59.47	61.08
28	15 m	26	53.65	67.02	57.63	55.28	55.15	55.44	54.84
23	20 m	40	47.45	61.04	52.35	52.13	59.04	58.49	57.13
19	25 m	42	46.64	60.65	53.10	54.29	51.23	49.83	52.37
16	29 m	37	47.05	55.48	48.39	49.75	50.98	50.82	51.56
14	31.3 m	41	45.87	60.55	54.71	49.70	48.79	50.48	50.71
Average		41	50.62	61.59	55.15	54.62	55.41	55.10	55.14

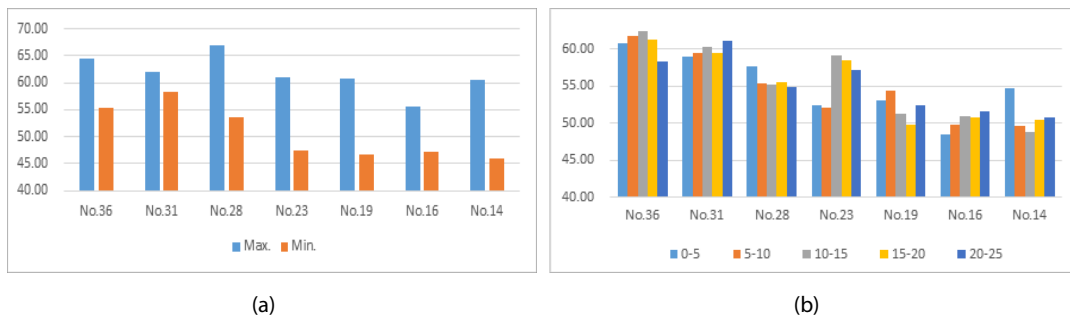


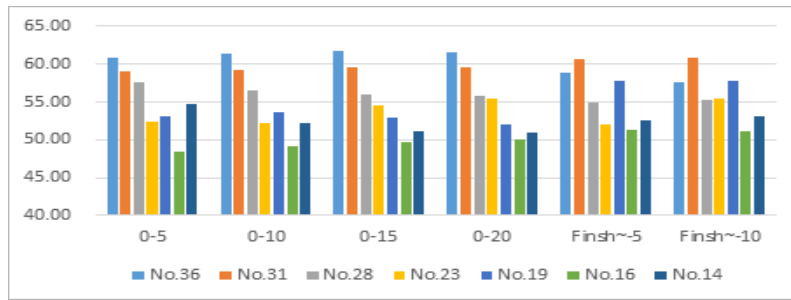
Fig. 5. Vibration Value Graph on Maximum, Minimum and 5 Minute Section of the Tricone-Bits Machine: (a) Max. and Min. Vibration Value, (b) 5 Minute Section Vibration Value

크게 나타났으며, 지표면에서 깊어질수록, 측정지점에서 거리가 멀어질수록 감쇠하였으나 암반에 도달하면 진동치는 다시 증가하

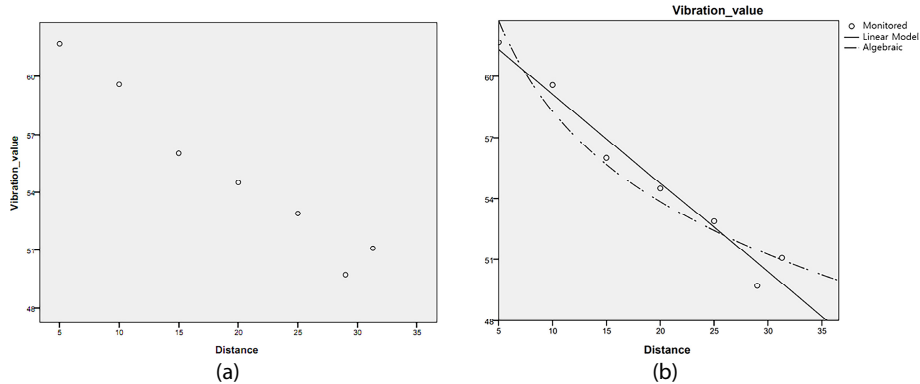
였다 측정된 진동치에 대하여 최대 및 최소, 5분 단위 구간평균진동치를 Table 5 및 Fig. 5에 정리하였다.

**Table 6.** Average Vibration Value by Cumulative Time Section (Unit: dB)

Pile No.	Distance	0~5 min.	0~10 min.	0~15 min.	0~20 min.	Finsh~ -5 min.	Finsh~ -10 min.
36	5 m	60.83	61.29	61.66	61.54	58.86	57.60
31	10 m	59.01	59.22	59.58	59.56	60.72	60.83
28	15 m	57.63	56.45	56.02	55.88	54.93	55.18
23	20 m	52.35	52.24	54.51	55.50	51.95	55.39
19	25 m	53.10	53.69	52.87	52.21	57.86	57.81
16	29 m	48.39	49.07	49.71	49.99	51.28	51.08
14	31.3 m	54.71	52.21	51.07	50.92	52.51	53.07



**Fig. 6.** Average Vibration Value Graph by Cumulative Time Section



**Fig. 7.** Scatter Plot and Regression Graph of Linear and Logarithmic Distance: (a) Scatter Plot by 0-15 Minute Average, (b) Regression Graph

### 4.3 진동 거리감쇠식 추정

#### 4.3.1 누적시간 진동치 분석 및 산점도

Tricone-Bits 진동 거리감쇠식 추정을 위하여 누적 시간별 진동치를 분석하여 Table 6 및 Fig. 6에 정리하였다. 천공 작업과정에서 Tricone-Bits가 토사층을 굴착한 후 암반에 도달하면 진동치가 대체적으로 증가하였으며, 증감치는 -2%~9% 분포를 갖는 것으로 나타났다. 진동 거리감쇠추정 모형에 사용된 진동치는 천공 시작시점부터 15분까지의 진동치가 모든 측정에서 토사층을 천공하는 구간으로 파악되어 분석 데이터로 선정하였다. Fig. 7은 거리별 진동치 회귀분석 모형 선정을 위한 산점도 및 회귀모형 그래프이다.

#### 4.3.2 진동 거리감쇠식 추정

단순 선형관계에 있는 회귀모형은 식 (2)와 같다. 선형회귀 함수는 측정 자료에서 가장 적합한 회귀계수  $\beta_0$ 와  $\beta_1$ 을 찾는 데 있으며, 이를 추정하기 위하여 일반적으로 최소제곱법이 사용된다. 회귀분석에서 결정계수는 종속변수  $Y$ 의 데이터  $y_i$ 에 대하여,  $y_i$ 의 총변동합에 대한 변동합의 비율을 나타내며 값이 클수록 회귀모형의 적합도가 높은 것으로 여겨진다(Lee, 2002). 일반적으로 공학에서는 결정계수가 70% 이상일 때 회귀방정식이 유의한 것으로 판단한다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon_i \quad (2)$$

여기서,  $\beta_0$ 와  $\beta_1$ 은 회귀계수이며,  $\epsilon_i$ 은 오차항이다.

**Table 7.** Result of Logarithmic Distance Regression Analysis

	B	SE	$\beta$	t	p
Damping Constant	73.060	2.047		35.695	.000
VLdis	-14.768	1.641	-.971	-9.001	.000
$R^2 = .942, F = 81.018 (p = .000)$					

Tricone-Bits 천공 작업에서 측정된 진동치는 거리가 멀어질수록 진동의 영향이 감소하는 곡선의 형태를 갖고 있다. 진동 거리감쇠식 추정에는 신뢰수준은 95%에서 대수거리(log distance) 선형회귀분석을 실시하였고, 회귀분석 결과는 Table 7에 정리하였다. 회귀분석을 통해 제안된 진동 거리감쇠추정식은 식 (3)과 같다. 회귀분석 모형에서 결정계수는 0.942, 유의수준이 .00<0.05이므로 제안된 회귀모형은 유의하다.

$$VLcal = 73.06 - 14.768\text{Log}(VLdis) \quad (3)$$

여기서, VLcal는 진동 거리감쇠식에 의한 예측치(Calculation), VLdis는 측정까지의 거리(Distance)이다.

**4.3.3 정규성 검증**

진동치 측정수(N)이 7개이므로, 회귀분석 정규성 검증을 위하여 Shapiro-Wilk 검정을 실시하여 Table 8에 정리하였다. 분석결과 유의확률이 .791>.05이므로 회귀분석 모형은 정규분포를 따르는 것으로 나타났다.

**Table 8.** Normality Verification

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistics	Degrees of Freedom	Significance Probability	Statistics	Degrees of Freedom	Significance Probability
Vibration Level	.135	7	.200	.957	7	.791

**Table 9.** Comparing with Vibration Value of the Reference, Tricone-Bits and Drilling Machine

Pile No.	Distance	Reference Value	Tricone-Bits (dB)			Earth Auger (dB)			Pile Driving (dB)		
			Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Com.(%)	Min.	Max.	Com(%)
36	5 m	70.50 (dB)	55.28	64.48	59.74	-	-	-	-	-	-
31	10 m		58.38	61.86	60.35	39.62	67.52	91.6	65.89	71.79	86.2
28	15 m		53.65	67.02	55.65	37.75	65.69	102.0	61.97	67.87	98.7
23	20 m		47.45	61.04	56.12	35.79	63.69	95.8	59.55	65.45	93.3
19	25 m		46.64	60.65	54.11	33.87	61.77	98.2	57.80	63.70	95.2
12	30 m		47.05	55.48	50.54	32.07	59.97	92.5	56.43	62.33	89.0
14	31.3 m		45.87	60.55	50.54	31.62	59.52	101.7	56.11	62.01	97.7
Mean			50.62	61.58	55.74	35.12	63.03	97.0	59.63	65.52	93.3

**Table 10.** Vibration Standards by ISO Application

Region	Time	Continuous Vibration (dB.rms)	Precussion Vibration (dB)
Hospital operating room		51(3.5 mm/s <sup>2</sup> )	54(5.0 mm/s <sup>2</sup> )
Residence	Day	57(7.0 mm/s <sup>2</sup> )	60(10.0 mm/s <sup>2</sup> )
	Night	54(5.0 mm/s <sup>2</sup> )	
Office		63(14.1 mm/s <sup>2</sup> )	66(19.9 mm/s <sup>2</sup> )
Factory, Plant		69(28.2 mm/s <sup>2</sup> )	72(39.8 mm/s <sup>2</sup> )

**4.3.4 Tricone-Bits 진동저감효과**

천공 작업 중 측정된 Tricone-Bits 진동치는 진동 거리감쇠식으로 예측한 어스오거 및 항타기에 대한 진동치 대비 최대치기준평균값으로 97% 및 93%, 진동관리 기준치로 산정한 70.50 dB의 87%인 것으로 나타났다(Table 9). Tricone-Bits 천공장비를 이용한 작업은 주로 낮 시간대에 이루어지며 측정된 평균 진동치는 ISO에서 규정하는 주거지(57 dB) 및 사무실(63 dB) 기준을 만족하였다.

**5. 결론**

본 연구에서는 가시설품사 천공장비인 Tricone-Bits 작업 중 발생하는 진동 영향에 대한 관점에서 분석하였다. Tricone-Bits 천공장비는 토사층 천공이 암반층보다 더 소요되었으며, 암반층에 도달하면 진동치가 증가하는 경향이 나타나는 것으로 확인되었다.

Tricone-Bits 최대 진동치 기준 평균값은 OO발전소 자유장지진계 지진감지 한계치에 대하여 설정한 규준치 대비 87%, 진동 거리감쇠식에 의해 추정된 어스오거와 향타기 진동 예측치 대비 97% 및 93%의 진동저감 효과를 나타내었다. 작업 중 측정된 진동치는 회귀분석을 실시하여 Tricone-Bits 찬공 장비에 대한 진동치 예측이 가능하도록 진동 거리감쇠추정식을 제안하였다. 제안된 진동 거리감쇠추정식은 가시설공사 및 파일공사의 찬공장비 설계 및 시공 시 인접한 주민과 건물에 대한 진동 영향에 대한 추정을 가능하게 하여 민원 및 분쟁 저감으로 경제적 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 토사층 및 연암층의 지반조건과 찬공 깊이 11.5 m의 제한된 조건에서 수행된 진동 측정치를 분석하여 거리감쇠추정식을 도출하였고 비교 분석하였는데 한계가 있다. 향후에는 다양한 지역, 암반 및 깊이에서 Tricone-Bits의 진동측정 데이터를 축적하여 지반뿐만 아니라 건물에 나타나는 진동 영향 연구가 수행된다면, 공사 수행 전 또는 초기에 정밀한 파악이 가능하여 가시설공사 등에 대한 설계 및 공법 선정에서 진동에 대한 대처가 가능할 것이다.

## References

Choi, J. S. and Min, K. W. (2012). "A case study of analysis and evaluation of vibration by construction of cast in place concrete pile in the neighboring areas of Heunginjimun." *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, KSNVE, Vol. 22, No. 9, pp. 870-878, <https://doi.org/10.5050/KSNVE.2012.22.9.870> (in Korean).

Hwang, S. K. and Koh, T. H. (2001). "Ground vibration and resilient system - focus on the railway vibration." *Geotechnical Engineering*, KGS, Vol. 17, No. 6, pp. 38-47 (in Korean).

Jung, S. G. (2007). *A study on estimation of ground vibration responses by the pile driving*, MSc. Thesis, Dongshin University of Civil Engineering (in Korean).

Kang, D. W. (2009). *A study on a counterplan for environmental management problems caused by noise at construction site*, MSc. Thesis, Chung-Ang University of Environmental Construction (in Korean).

Kang, D. J., Lee, W. S., Lee, J. W. and Hong, J. K. (2005). "Characteristics of construction machinery noise and vibration." *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, KSNVE, Vol. 15, No. 6, pp. 645-651, <https://doi.org/10.5050/KSNVN.2005.15.6.645> (in Korean).

Kim, J. S. (1997). "Basic theory and effect of construction noise and vibration." *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, KSNVE, Vol. 7, No. 4, pp. 545-551 (in Korean).

Kim, E. R. (2003). *A study on prediction of railroad vibration*, Ph.D. Dissertation, Chonnam National University of Civil Engineering (in Korean).

Kim, H. G. (2004). *A study on evaluation method of construction vibrations*, Ph.D. Dissertation, Chonnam National University of Civil Engineering (in Korean).

Lee, J. M. (2002). *A study on statistical regression analysis*. MSc. Thesis, Yonsei University of Mathematics Education (in Korean).

Ministry of Environment (MoE) (2007). *Guidance of noise & vibration control under construction* (in Korean).

Shin, H. C. (2009). *Assessment of the ground-borne vibration induced by urban rapid transit in tunnels*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University of Technology (in Korean).