

제주 거문오름용암동굴계에 영향을 미치는 차량 및 건설장비 진동특성에 대한 연구

이근춘^{1,3} · 송재용¹ · 안웅산² · 박유철³ · 조경남^{4,*}

¹주식회사 산하이앤씨

²제주특별자치도 세계유산본부

³강원대학교 지구물리학과

⁴강원대학교 지질학과

요 약

본 연구는 제주도 거문오름용암동굴계 분포지역에서 차량 및 건설장비에 의해 발생하는 진동의 영향을 분석하고 용암동굴의 효율적인 관리보존 대책을 마련하기 위해 수행되었다. 이를 위해 차량 및 건설장비 진동시험을 수행하고 그 결과를 바탕으로 진동원과의 거리 및 속도변화에 따른 영향을 평가하였다. 차량진동시험에서 문화재 연속진동 기준인 0.07 cm/sec를 만족하는 거리별 차량속도를 산출한 결과, 중량 2톤 내외의 승용차는 100 km/h 이하의 속도에서는 영향반경이 1 m를 초과하지 않는 것으로 평가되었다. 버스 및 덤프트럭의 영향범위는 차량 속도를 60 km/h로 설정할 경우 각각 2.2 m와 2.8 m이며, 차량 속도를 80 km/h로 설정할 경우 각각 3.0 m, 3.7 m로 평가되었다. 제주도 거문오름용암동굴계에 속하는 도로의 속도기준이 60 km/h 내외임을 고려할 때, 용암동굴과 도로와의 거리가 10 m 이상 이격되어 있는 거문오름용암동굴계에는 차량 진동이 동굴 안정성에 직접적인 영향을 미치기는 어려운 것으로 판단된다. 건설장비 진동시험 결과를 토대로 거리에 따른 진동 영향을 평가한 결과, 문화재 연속진동 기준인 0.07 cm/sec를 만족하는 브레이커 작업 가능 한계는 10.9 m로 평가되며, 다짐작업의 경우, 14.0 m로 평가되었다. 진동속도(PPV)와 진동레벨(vibration level) 관계식을 통해 규제 기준을 만족하는 진동속도를 도출한 결과, 주간 1.525 mm/sec 이하, 야간 0.904 mm/sec 이하에서 규제기준을 만족하는 것으로 파악되었다. 또한, 문화재의 연속진동속도 기준을 0.07 cm/sec로 반영하였을 경우 동굴 내에서의 진동레벨 기준은 57.6 dB(V)로 평가되었다.

주요어: 거문오름용암동굴계, 진동속도, 진동레벨, 차량, 건설장비

Geun-Chun Lee, Jae-Yong Song, Ung-San Ahn, Yu-Chul Park and Kyoung-nam Jo, 2021, A study on the vehicles and construction equipments vibration characteristics of Geomunoreum lava tube system, Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 2, p. 209-225

ABSTRACT: This study has been conducted to analyze the effect of vibration occurred by vehicles and construction equipments in the area of Geomunoreum Lava Tube system, Jeju Island, South Korea, and to prepare the efficient preservation and management measures for lava tubes. For this purpose, vibration tests with vehicles and construction equipments were performed. Then, the effects of the distance from the vibration sources and velocity changes of them were evaluated. Within the standard for continuous vibration of cultural properties (0.07 cm/sec), the result of vehicle vibration tests shows that passenger vehicles with the weight of about 2 tons do not exceed the influential radius of 1 m at the lower speed than 100 km/h. When the vehicle speed was set to 60 km/h, the influential range of the bus and dump truck were 2.2 m and 2.8 m, respectively. When the vehicle speed was set to 80 km/h, the influential range of the bus and dump truck were evaluated 3.0 m and 3.7 m. Considering that the speed limit of roads surrounding to the Geomunoreum lava tube system is around 60 km/h, it can be concluded that the stability of the cave (passages) in the Geomunoreum lava tube system has been secured against any types of vehicle activities because most of cave passages have sitted below about 3 m at least from the surface. Nevertheless, in the fact that many passages across directly beneath paved roads, long-term stabiility needs to be considered. As a result of vibration tests on construction equipments, the influential distances of breaker and compaction engineering works were evaluated as 10.9 m and 14.0 m, respectively. For the test result of the vibration

* Corresponding author: +82-33-250-8555, E-mail: kjo@kangwon.ac.kr

velocity that satisfies the restriction standard through the interaction formula of vibration velocity (PPV) and vibration level (dB(V)), the restriction standard was satisfied under 1.525 mm/sec during the daytime and 0.904 mm/sec during nighttime. Furthermore, within the standard of continuous vibration velocity (PPV) for cultural properties (0.7 mm/sec), the maximum permissible vibration level in the lava tube caves was evaluated as 57.6 dB(V).

Key words: Geomunoreum lava tube system, vibration velocity (PPV), vibration level, vehicle, construction equipment

(Geun-Chun Lee and Jae-Yong Song, SanHa Engineering & Construction Co., Ltd., Seongnam 13207, Republic of Korea; Ung-San Ahn, World Heritage Office, Jeju Special Self-Governing Province, Jeju 63143, Republic of Korea; Geun-Chun Lee and Yu-Chul Park, Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24314, Republic of Korea; Kyoung-nam Jo, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24314, Republic of Korea)

1. 서 론

제주도에는 많은 수의 용암동굴이 분포하고 있으며, 인구의 증가 및 관광산업의 발달로 인하여 용암동굴 주변에서 다양하고 많은 개발행위가 이루어지고 있다. 도로를 통한 차량의 이동이나 지반굴착, 지중전공과 항타, 지반다짐 등의 건설공사를 수행하는 경우 불가피하게 진동이 발생될 수 있으며, 이들 진동은 주요 매질인 지반을 통해 주변에 영향을 미치게 된다.

해외의 많은 용암동굴들이 최초 형성 직후 쉽게 약화되는 지질학적 특성으로 인해 상대적으로 단기간 내에 붕괴되는 반면, 제주도에 분포하는 용암동굴들은 오랜 기간 최초 용암류의 지표유동 특성을 극히 잘 보존하고 있다. 하지만 이러한 제주도 용암동굴의 지질유산학적 가치도 지속적인 개발 행위에 의해 쉽게 영향 받을 수 있는 가능성이 제기되고 있다.

철도가 없는 제주도에서의 교통진동의 경우, 1톤 내외의 중량을 가지는 승용차에서부터 수십 톤에 이르는 덤프트럭까지 다양한 차량에 의해 진동이 발생될 수 있다. 또한, 다양한 건설장비 사용으로 진동을 야기할 수 있는 건설공사장의 공중으로는 크게 지반정지공사, 기초공사, 콘크리트공사, 포장공사, 파괴해체공사, 기타 공사 등으로 구분할 수 있다(KEI, 2007).

건설현장이나 도로가 용암동굴과 인접하여 위치하는 경우, 차량이동 및 장비운영 과정에서 발생하는 진동이 동굴에 손상을 야기하거나 동굴 붕괴 등 심각한 피해를 발생시킬 수 있고 공사수행에도 차질을 발생시킬 수 있다. 차량운행은 진동에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 연구자료가 미미하나 건설장비 운영과 관련된 진동의 경우 지금까지 다수의 연구자들에 의해 진동추정식이 제안되었다. Kim (1997)은 철추

의 자유낙하에 의한 낙추진동을 평가하여 진동추정식을 산출한 바 있으며, Kim (1999)은 경부고속철도 3공구 건설현장을 대상으로 DHK 7 유압햄머를 활용한 진동특성을 평가하였다. Choi (1999)는 디젤항타기, 유압항타기, 오거보링(auger boring), SIP공법 항타기에 대한 실측자료를 바탕으로 진동추정식을 산출하였으며, Lee and Park (2001)은 화강암 지반을 대상으로 암반굴착 시의 브레이커 진동에 대한 추정식을 산출한 바 있다.

동굴 주변 및 상부에서의 차량운행과 공사가 전반적으로 증가하는 제주도의 현실을 고려할 때, 제주도 중요 천연문화재인 용암동굴의 보호를 위하여 진동이 동굴에 미치는 영향을 평가하고 이에 대한 적합한 대책을 수립하여야 한다. 그러나 현재 제주도 용암동굴과 관련된 교통 및 건설장비 운영의 진동 연구는 제주특별자치도 세계유산본부(Jeju Special Self-Governing Province, 2020)에서 이제 시작단계에 접어들고 있는 실정이다. 또한, 현재 일반적으로 사용되고 있는 건설장비에 의한 진동속도를 추정하는 방식은 제주도가 아닌 내륙에서 제안한 추정식이나 수십 년 전 외국에서 제안된 일부 자료만을 근거로 하고 있어(KEI, 2010) 다공질이고 절리의 발달이 많은 암반으로 구성되어 있는 제주도의 지반 특성성을 감안하여 진동속도를 추정하는 것과 그 결과에 있어 상당한 차이를 나타낼 수 있다. 즉, 제주도 용암동굴의 안정성을 확보하기 위해서는 제주도 지질 및 지반조건이 반영된 차량운행 및 건설장비 운영에 대한 실제적이고 체계적인 연구가 반드시 필요하다.

이 연구에서는 제주 거문오름용암동굴계 지역에서의 현장실험과 계측을 통해 차량운행 및 건설장비 운영에 따른 진동특성을 평가하고자 하였다. 거문오

름용암동굴계 지역의 지질은 제주-한림도폭(Park *et al.*, 1998)에서 선흘리 현무암질 안산암으로 구성되어 있으나, 성산도폭(Won *et al.*, 1993)에서는 덕천리알칼리현무암의 연장부로 인식한 바 있다. 이 연구의 최종적인 목적은 거문오름용암동굴계의 효율적 관리보존 대책의 과학적 근거 및 기준을 마련하는데 있다.

2. 연구 방법

연구지역은 다공질이고 절리의 발달이 많은 현무암이 발달하는 곳이며 용암동굴이 분포하는 지반조건인 지역으로 일반적인 지역의 진동특성과는 상당한 차이가 있을 가능성이 있기에 차량 종류별 교통진동과 공사방법에 대한 건설장비 진동에 대해 연구를 수행하였다.

2.1 차량운행에 의한 교통진동 시험

차량운행에 의한 교통진동 시험의 경우 소형 승

용차와 버스 그리고 화물을 적재한 25톤 덤프트럭에 대하여 운행속도에 따른 진동영향을 평가하였다. 승용차는 9인승 승합차량인 모델명 CARNIVAL을 활용하였으며, 실험 당시 탑승자를 포함한 차량의 중량은 약 2.2톤이었다. 버스는 모델명 GRANDBIRD인 45인승 버스를 대상으로 하였으며, 중량은 약 15.0톤이다. 25톤 덤프트럭은 모델명 SCANIA를 활용하였고, 적재된 골재중량을 포함하여 총 무게는 40.0톤이 되도록 하였다(표 1).

차량운행 속도에 따른 진동을 평가하기 위해 북홀로 도로에서 수행하였으며(그림 1) 승용차의 경우 20~100 km/h, 버스 및 덤프트럭의 경우 20~80 km/h로 차량 운행속도를 달리하여 진동을 발생시켰다. 진동속도와 진동레벨의 계측은 발파진동시험 계측장비를 활용하여 진동원인 차량 타이어 위치를 기준으로 각각 1.0 m, 2.5 m, 4.0 m 이격한 지점에서 수행하였다.

계측장비는 현장측정 범위가 가능하고 진동속도와 진동레벨이 동시 측정이 가능한 장비를 사용하였다(표 2).

Table 1. Types and weights of test vehicles.

Type	Van	Bus (45 Passenger)	Dump truck (25 ton)
Model	CARNIVAL	GRANDBIRD	SCANIA
Weight	2.2 ton	15.0 ton	40.0 ton



Fig. 1. A location of vehicle vibration tests and photographs of in-situ tests (a-c).

2.2 건설장비 진동시험

건설장비 진동시험의 경우, 지반정지공사와 파괴 및 해체공사 진행의 경우를 상정하여 진동전달특성을 평가하였다. 시험지역은 2개소를 선정하였으며, 선정된 지역은 만장굴 삼거리에서 약 2.0 km 떨어진 해변가 도로를 기준으로 좌우 양측에 위치하고 있다(그림 2). 진동원은 굴삭기(Model : VOLVO EW140E)에 브레이커(BH14S, 830 kg)를 장착하고 지반에 충격을 가하는 브레이커 작업(파괴 및 해체 공사)과 굴삭기로 노면을 평탄화하고 다지는 다짐작업(지반정지 공사)으로 구분하여 수행하였다. 브레이커 작업의 경우 1,700 RPM으로 일정한 충격을 가하면서 시험을 수행하였으며, 정지작업에 대한 진동시험의 경우 일반적인 상황을 가정하여 굴삭기 버킷(bucket; 462 kg, 0.6 m³)을 높이 0.5 m 위치까지 들어 올려 자유낙하 형식의 충격을 가하는 방식을 적용하였다. 진동의 계측장비는 진동원(브레이커 작업 및 다짐 작

업 수행 지점)으로부터 1.0~33.0 m 구간 내에서 매 1.0 m 간격으로 이격하여 설치되었으며 교통진동시험 계측장비와 동일한 장비를 사용하였다(표 2).

국민의 생활, 정신적 안정을 위하여 공장, 도로, 철도 등으로부터 발생하는 소음 및 진동으로 인한 피해를 방지하고, 이들을 적정하게 관리 및 규제하기 위하여 소음·진동규제법이 제정되어, 1997년 개정·보안되었다(KEI, 2002). 이 법의 적용범위에 생활 소음, 진동 중 건설 소음, 진동이 포함되어 있으며 이 기준에 의거하여 이번 연구에서도 진동레벨 규제기준을 주간 65 dB(V) 이하, 야간 60 dB(V) 이하로 하여 분석하여 건설장비 운영시 진동속도와 진동레벨의 상관관계를 평가하였다.

국립환경과학원(Kang *et al.*, 2003)에서는 건설공사장의 건설공종별 투입되는 건설기계류의 진동레벨 (dB(V)) 발생을 제시한 바 있다.

이 연구에서는 브레이커 작업과 다짐 작업에서의

Table 2. Major specifications of the vibration-measuring equipment.

Measuring equipment	Equipment specification
Neo Blast (Sound & Vibration Analyzer)	<ul style="list-style-type: none"> • Human & Sismic Sound and Vibration Measurement • Measurement : Sound_Leq (Av, max, min) Vibration_PPV (mm/sec), Max • Level Range : Sound_35~130 dB, Vibration_254 mm/sec • Frequency Range : Sound_20~8,000 Hz, Vibration_1~90 Hz • Sampling frequency : Sound_24 KHz, Vibration_1 KHz • Vibration Sample Rate : 1000 sps

* Leq (Equivalent Noise Level), PPV (Peak Particle Velocity).



Fig. 2. A location of construction vibration tests and photographs of in-situ tests.

Table 3. The results of vehicle vibration tests for a van.

Vehicle	No. of measurements	Velocity (km/h)	Distance (m)	PPV (mm/sec)			
				1st	2nd	3rd	Average
Van	M-1	40	1.0	0.16	0.14	0.23	0.18
	M-2		2.5	-	-	-	-
	M-3		4.0	-	-	-	-
	M-1	50	1.0	0.24	0.28	0.35	0.29
	M-2		2.5	-	0.13	0.18	0.16
	M-3		4.0	-	-	-	-
	M-1	60	1.0	0.25	0.30	0.36	0.30
	M-2		2.5	0.12	0.13	0.18	0.14
	M-3		4.0	-	-	-	-
	M-1	70	1.0	0.35	0.61	0.31	0.42
	M-2		2.5	0.15	0.16	0.23	0.18
	M-3		4.0	0.14	0.15	0.15	0.15
	M-1	80	1.0	0.57	0.41	0.49	0.49
	M-2		2.5	0.19	0.19	0.17	0.18
	M-3		4.0	0.17	0.17	0.14	0.16
	M-1	90	1.0	0.68	0.79	0.68	0.72
	M-2		2.5	0.20	0.18	0.19	0.19
	M-3		4.0	0.17	0.16	0.17	0.17
M-1	100	1.0	0.46	0.75	0.77	0.66	
M-2		2.5	0.24	0.22	0.20	0.22	
M-3		4.0	0.20	0.16	0.16	0.17	

진동시험을 수행하여, 이들 시험 결과와 국립환경과학원 조사에서 제시된 건설기계류의 거리에 따른 진동속도를 종합하여 현장시험시 모사하지 않은 각 건설장비 운용 과정에서의 진동레벨을 유추한다. 이를 위하여 거리에 따른 진동레벨의 변화양상을 평가하고 각각의 기계류 운용에 따른 진동레벨의 가중치를 제시하여 건설장비 운영에 따른 진동영향 예측을 평가하였다.

3. 연구 결과

3.1 차량운행에 의한 교통진동 시험

승합차(2.2톤), 버스(15.0톤), 덤프트럭(40.0톤)을 대상으로 각각 63회에 걸쳐 속도 및 거리 변화에 따른 진동측정을 수행하였다. 측정 결과, 승합차는 40 km/h 이상, 버스 및 덤프트럭은 20 km/h 이상의 속도에서 계측기에 진동이 확인되었으며 승합차, 버

스, 덤프트럭을 대상으로 한 차량진동시험 측정 결과를 제시하였다(표 3, 4).

3.2 건설장비 진동시험

2개 지점(Site 1과 2)을 대상으로 각각 114회와 143회의 브레이커 작업을 모사한 진동시험을 수행하였다(그림 2). 그 결과, 진동원에서 2.0 m 이내의 거리에서는 Site 1이 Site 2에 비해 보다 높은 진동특성을 나타내는 것으로 평가된 반면, 그 이상의 거리에서는 Site 2가 상대적으로 높은 진동특성을 보이는 것으로 나타났다(표 5). 진동원 2.0 m 이내에서 Site 1이 보다 큰 진동속도를 보이는 것은 Site 1이 노출된 기반암을 대상으로 브레이커 작업을 수행한 반면 Site 2는 토사로 덮여 있는 지반에서 작업을 수행하여 브레이커 작업 인접 구간에서 급속한 속도저하가 발생하였기 때문으로 판단된다. 진동원으로부터 2.0 m 이상의 구간에서 Site 2가 높은 진동속도를 보이

Table 4. The results of vehicle vibration tests for a bus and a dump truck.

Vehicle	No. of measurements	Velocity (km/h)	Distance (m)	PPV (mm/sec)				
				1st	2nd	3rd	Average	
Bus	M-1	20	1.0	0.26	0.26	0.23	0.25	
	M-2		2.5	-	0.11	0.12	0.12	
	M-3		4.0	-	-	0.11	0.11	
	M-4	30	1.0	0.60	0.47	0.51	0.53	
	M-5		2.5	0.18	0.18	0.18	0.18	
	M-6		4.0	0.16	0.18	0.18	0.17	
	M-1	40	1.0	0.67	0.95	0.85	0.82	
	M-2		2.5	0.25	0.27	0.30	0.27	
	M-3		4.0	0.26	0.26	0.31	0.28	
	M-4	50	1.0	1.12	1.12	1.84	1.36	
	M-5		2.5	0.33	0.38	0.38	0.36	
	M-6		4.0	0.31	0.28	0.35	0.31	
	M-1	60	1.0	1.80	1.57	1.52	1.63	
	M-2		2.5	0.45	0.50	0.46	0.47	
	M-3		4.0	0.43	0.49	0.49	0.47	
	M-4	70	1.0	2.25	2.13	2.05	2.14	
	M-5		2.5	0.72	0.62	0.70	0.68	
	M-6		4.0	0.70	0.62	0.74	0.69	
	M-1	80	1.0	2.14	1.79	2.00	1.98	
	M-2		2.5	0.66	0.63	0.54	0.61	
	M-3		4.0	0.79	0.67	0.63	0.70	
	Dump truck	M-1	20	1.0	0.35	0.43	0.34	0.37
		M-2		2.5	0.14	0.21	0.11	0.15
		M-3		4.0	0.13	0.19	-	0.16
M-4		30	1.0	0.72	0.76	0.64	0.71	
M-5			2.5	0.22	0.26	0.26	0.25	
M-6			4.0	0.14	0.26	0.18	0.19	
M-1		40	1.0	1.02	1.08	1.55	1.22	
M-2			2.5	0.30	0.34	0.33	0.32	
M-3			4.0	0.22	0.28	0.27	0.26	
M-4		50	1.0	1.48	1.87	2.16	1.84	
M-5			2.5	0.54	0.48	0.60	0.54	
M-6			4.0	0.43	0.38	0.48	0.43	
M-1		60	1.0	2.20	2.32	2.16	2.23	
M-2			2.5	0.67	0.70	0.67	0.68	
M-3			4.0	0.41	0.81	0.64	0.62	
M-4		70	1.0	2.60	2.14	2.68	2.47	
M-5			2.5	0.96	0.72	0.86	0.85	
M-6			4.0	0.76	0.63	0.75	0.71	
M-1		80	1.0	1.99	2.53	1.64	2.05	
M-2			2.5	0.88	1.11	1.05	1.01	
M-3			4.0	0.72	1.08	0.69	0.83	

Table 5. The results of construction vibration tests for a breaker.

Work	No. of measurements	Distance (m)	PPV (mm/sec)							
			Site 1				Site 2			
			1st	2nd	3rd	Ave.	1st	2nd	3rd	Ave.
Breaker	M-1	1.0	142.63	104.15	92.16	112.98	40.70	40.67	40.23	40.53
	M-2	2.0	38.44	36.28	34.38	36.37	23.56	23.60	20.27	22.48
	M-3	3.0	11.55	8.01	6.86	8.81	18.44	20.94	20.94	20.11
	M-4	4.0	4.00	3.90	3.80	3.90	18.76	18.64	18.02	18.47
	M-5	5.0	1.80	1.86	1.87	1.84	5.17	5.34	5.25	5.25
	M-6	6.0	1.63	1.81	2.01	1.82	3.15	2.82	2.79	2.92
	M-7	7.0	1.44	1.38	1.22	1.35	3.92	3.88	3.85	3.88
	M-8	8.0	1.34	1.23	1.27	1.28	2.22	2.21	2.20	2.21
	M-9	9.0	0.73	0.73	0.67	0.71	2.20	2.13	2.31	2.21
	M-10	10.0	0.55	0.54	0.54	0.54	1.81	1.52	1.47	1.60
	M-11	11.0	0.38	0.38	0.38	0.38	1.45	1.39	1.35	1.40
	M-12	12.0	0.41	0.41	0.40	0.41	0.94	0.92	0.91	0.92
	M-13	13.0	0.24	0.24	0.22	0.23	0.49	0.49	0.47	0.48
	M-14	14.0	0.24	0.27	0.23	0.25	0.33	0.35	0.36	0.35
	M-15	15.0	0.18	0.17	0.19	0.18	0.54	0.64	0.63	0.60
	M-16	16.0	0.17	0.16	0.16	0.16	0.59	0.58	0.57	0.58
	M-17	17.0	0.13	0.13	0.12	0.13	0.24	0.25	0.26	0.25
	M-18	18.0	-	-	-	-	0.25	0.27	0.27	0.26
	M-19	19.0	0.11	0.11	-	0.11	0.35	0.29	0.28	0.31
	M-20	20.0	-	0.11	-	0.11	0.20	0.22	0.19	0.20
	M-21	21.0	-	-	-	-	0.29	0.25	0.28	0.27
	M-22	22.0	-	-	-	-	0.32	0.21	0.19	0.24
	M-23	23.0	-	-	-	-	0.15	0.12	0.12	0.13
	M-24	24.0	-	-	-	-	-	-	-	-

는 것은 해당 구간의 토사층 두께가 10 cm 이내로 얇아 진동감쇠에 큰 영향을 주지 않는 동시에 기반암 노출지역에 비해 지반상태가 양호하기 때문으로 판단된다.

다짐 작업을 모사한 진동시험 역시 동일 지점을 대상으로 수행하였으며, 각각 186회와 198회 반복시험을 수행하였다. 브레이커 작업과 마찬가지로 진동원에서 2.0 m 이내의 거리에서는 기반암 노출지역이 비노출지역에 비해 보다 높은 진동특성을 나타내는 것으로 평가되었으나 그 이상의 거리에서는 기반암 비노출지역에서 상대적으로 높은 진동특성을 보이는 것으로 파악되었다(표 6).

4. 결과해석 및 고찰

4.1 차량운행에 의한 교통진동

4.1.1 거리에 따른 진동영향 평가

승합차의 차량속도 40 km/h 이상의 데이터의 경우, 신뢰성이 확보되지 않는 데이터일 가능성이 크기에 평가에서는 승합차의 차량속도 50~100 km/h와 버스 및 덤프트럭 차량속도 20~80 km/h를 대상으로 진동속도와 거리와의 상관관계를 분석하였다. 진동속도와 거리와의 관계는 거리가 가까울수록 진동속도가 급격히 커지는 양상을 보이며, 이는 거듭제곱 식으로 표현할 수 있다. 각 속도별 거리와 진동속도와의

Table 6. The results of construction vibration tests for the compaction.

Work	No. of measurements	Distance (m)	PPV (mm/sec)							
			Site 1				Site 2			
			1st	2nd	3rd	Ave.	1st	2nd	3rd	Ave.
Compaction	M-1	1.0	92.40	91.36	79.40	87.72	20.98	18.42	18.19	19.20
	M-2	2.0	21.70	18.47	26.32	22.16	10.22	12.84	10.26	11.11
	M-3	3.0	5.94	5.05	7.48	6.16	8.24	8.59	10.04	8.96
	M-4	4.0	4.99	4.95	4.77	4.90	14.10	13.98	13.77	13.95
	M-5	5.0	3.51	3.75	3.35	3.54	5.88	4.34	5.57	5.26
	M-6	6.0	3.56	3.87	3.69	3.71	4.43	4.54	3.65	4.21
	M-7	7.0	3.82	3.81	3.37	3.67	3.35	3.16	3.09	3.20
	M-8	8.0	2.11	2.50	2.53	2.38	2.11	2.04	2.16	2.10
	M-9	9.0	2.49	2.66	2.59	2.58	2.50	2.97	3.00	2.82
	M-10	10.0	2.03	2.03	1.94	2.00	2.38	2.25	2.25	2.29
	M-11	11.0	1.73	1.71	1.63	1.69	1.68	1.75	1.66	1.70
	M-12	12.0	2.00	1.98	2.00	1.99	1.02	1.03	1.01	1.02
	M-13	13.0	0.85	0.81	0.75	0.80	1.08	1.03	1.02	1.04
	M-14	14.0	0.59	0.58	0.52	0.56	0.68	0.63	0.68	0.66
	M-15	15.0	0.50	-	-	0.50	0.57	0.53	0.57	0.56
	M-16	16.0	0.46	0.46	0.46	0.46	0.56	0.55	0.53	0.55
	M-17	17.0	0.27	-	0.26	0.27	0.37	0.34	0.43	0.38
	M-18	18.0	0.29	-	-	0.29	0.55	0.53	0.47	0.52
	M-19	19.0	0.27	0.26	0.26	0.26	0.63	0.60	0.56	0.60
	M-20	20.0	0.23	0.23	0.24	0.23	0.64	0.61	0.56	0.60
	M-21	21.0	0.21	0.20	0.19	0.20	0.63	0.57	0.52	0.57
	M-22	22.0	0.27	0.26	0.24	0.26	0.35	0.32	0.30	0.32
	M-23	23.0	0.23	0.25	0.24	0.24	0.38	0.27	0.29	0.31
	M-24	24.0	0.27	0.27	0.25	0.26	0.20	0.21	0.21	0.21
	M-25	25.0	0.22	0.22	0.21	0.22	0.44	0.44	0.43	0.44
	M-26	26.0	0.12	0.11	0.14	0.12	0.44	0.47	0.43	0.45
	M-27	27.0	0.13	0.11	0.11	0.12	0.19	0.19	0.19	0.19
	M-28	28.0	0.14	0.14	0.14	0.14	0.26	0.23	0.23	0.24
	M-29	29.0	0.12	0.14	0.14	0.13	0.13	0.12	0.15	0.13
	M-30	30.0	0.14	0.15	0.15	0.15	0.18	0.18	0.20	0.19
	M-31	31.0	-	-	-	-	0.18	0.17	0.16	0.17
	M-32	32.0	-	-	-	-	0.16	0.14	0.12	0.14
	M-33	33.0	-	-	-	-	0.14	0.12	0.11	0.12
	M-34	34.0	-	-	-	-	-	-	-	-

관계식을 표현하였으며(표 3, 4), 상관관계를 도출한 그래프도 제시하였다(그림 3, 4, 5). 도출된 각 차량

속도 별 진동속도와 거리와의 상관관계식은 동일한 거리에 따른 진동영향을 평가하는데 활용하였다.

4.1.2 속도변화에 따른 진동영향 평가

거리에 따른 진동영향 평가에서 산정된 관계식을 활용하여 동일한 거리에서 승합차 속도의 변화와 진동속도와의 관계를 분석하였다. 모든 차종에서 상관관계식의 기울기는 거리가 가까울수록 증가하며 거리가 멀어질수록 감소하는 경향을 보이는데 이는 진동원과 거리가 가까울수록 차량의 속도변화가 진동속도에 더 큰 영향을 미침을 의미한다. 승합차의 경우, 진동원과 거리가 2.0 m 이내에서는 결정계수 (R^2)가 0.84 이상의 양호한 상관성을 보이거나 그 이상

의 거리에서는 전달되는 진동이 미약하고 차이가 크지 않기 때문에 0.5 이하의 낮은 값을 보인다. 반면, 버스나 덤프트럭의 경우에는 R^2 이 전반적으로 0.86 이상의 매우 높은 상관성을 보이고 있다. 거리별 승합차 속도와 진동속도와의 관계식을 표현하고(표 8), 상관관계를 도출한 그래프를 도시하였다(그림 6, 7, 8).

4.1.3 차량운행에 따른 진동영향 예측

각 거리별 차량 속도에 대한 진동속도의 관계를 토대로 거리별 기울기 값의 변화를 분석하면 거리와

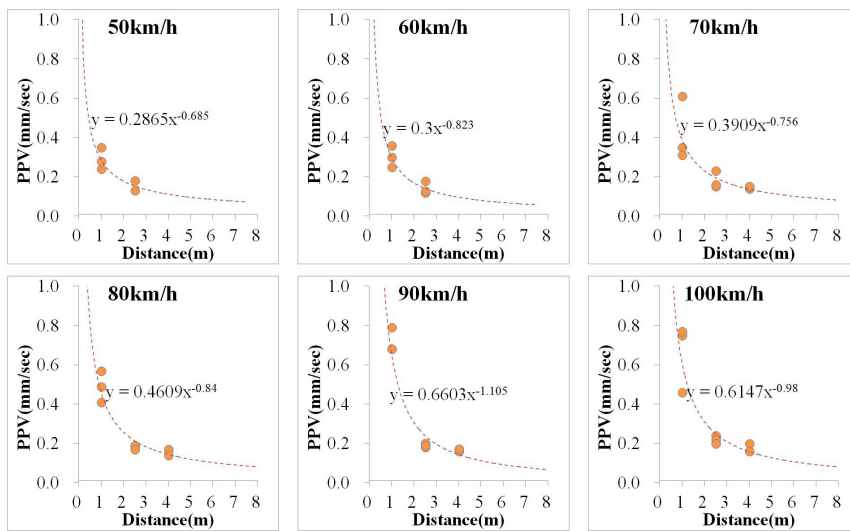


Fig. 3. The relationships between *PPV* and distance for a van with various velocities.

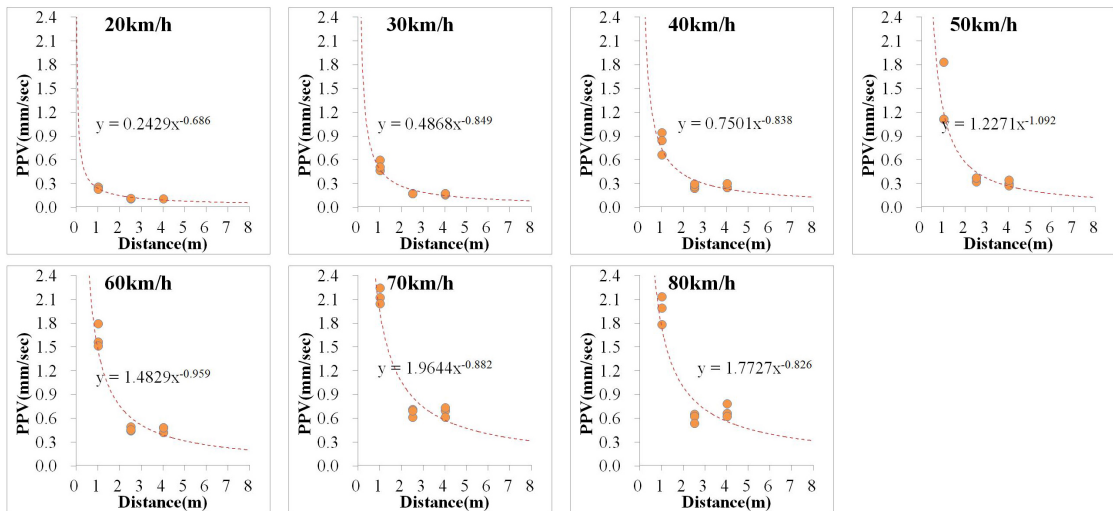


Fig. 4. The relationships between *PPV* and distance for a bus with various velocities.

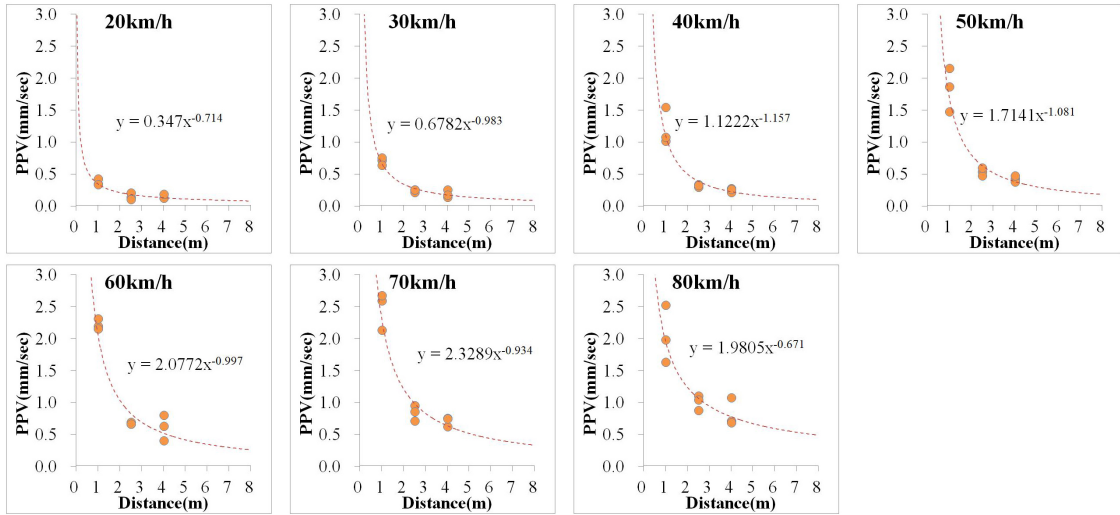


Fig. 5. The relationships between *PPV* and distance for a dump truck with various velocities.

Table 7. The derivations of *PPV* on distance and velocity for each type of cars.

Velocity (km/h)	Relational expression		
	Van	Bus	Dump truck
20	-	$PPV = 0.2429 \times D^{-0.686}$	$PPV = 0.3470 \times D^{-0.714}$
30	-	$PPV = 0.4868 \times D^{-0.849}$	$PPV = 0.6782 \times D^{-0.983}$
40	-	$PPV = 0.7501 \times D^{-0.838}$	$PPV = 1.1222 \times D^{-1.157}$
50	$PPV = 0.2865 \times D^{-0.685}$	$PPV = 1.2271 \times D^{-1.092}$	$PPV = 1.7141 \times D^{-1.081}$
60	$PPV = 0.3000 \times D^{-0.823}$	$PPV = 1.4829 \times D^{-0.959}$	$PPV = 2.0772 \times D^{-0.997}$
70	$PPV = 0.3909 \times D^{-0.756}$	$PPV = 1.9644 \times D^{-0.882}$	$PPV = 2.3289 \times D^{-0.934}$
80	$PPV = 0.4609 \times D^{-0.840}$	$PPV = 1.7727 \times D^{-0.826}$	$PPV = 1.9805 \times D^{-0.671}$
90	$PPV = 0.6603 \times D^{-1.105}$	-	-
100	$PPV = 0.6147 \times D^{-0.980}$	-	-

* *PPV* is vibration velocity (mm/sec) and, *D* is a distance (m) between the vibration source and the measuring equipment.

Table 8. The derivations of *PPV* on vehicle velocities for each type of cars.

Distance (m)	Relational expression		
	Van	Bus	Dump truck
1	$PPV = 0.0061 \times V$	$PPV = 0.0236 \times V$	$PPV = 0.0321 \times V$
2	$PPV = 0.0032 \times V$	$PPV = 0.0127 \times V$	$PPV = 0.0160 \times V$
3	$PPV = 0.0023 \times V$	$PPV = 0.0088 \times V$	$PPV = 0.0107 \times V$
4	$PPV = 0.0017 \times V$	$PPV = 0.0068 \times V$	$PPV = 0.0081 \times V$
5	$PPV = 0.0014 \times V$	$PPV = 0.0056 \times V$	$PPV = 0.0065 \times V$
6	$PPV = 0.0012 \times V$	$PPV = 0.0048 \times V$	$PPV = 0.0054 \times V$
7	$PPV = 0.0010 \times V$	$PPV = 0.0041 \times V$	$PPV = 0.0046 \times V$

* *PPV* is vibration velocity (mm/sec) and, *V* is a vehicle velocity (km/h).

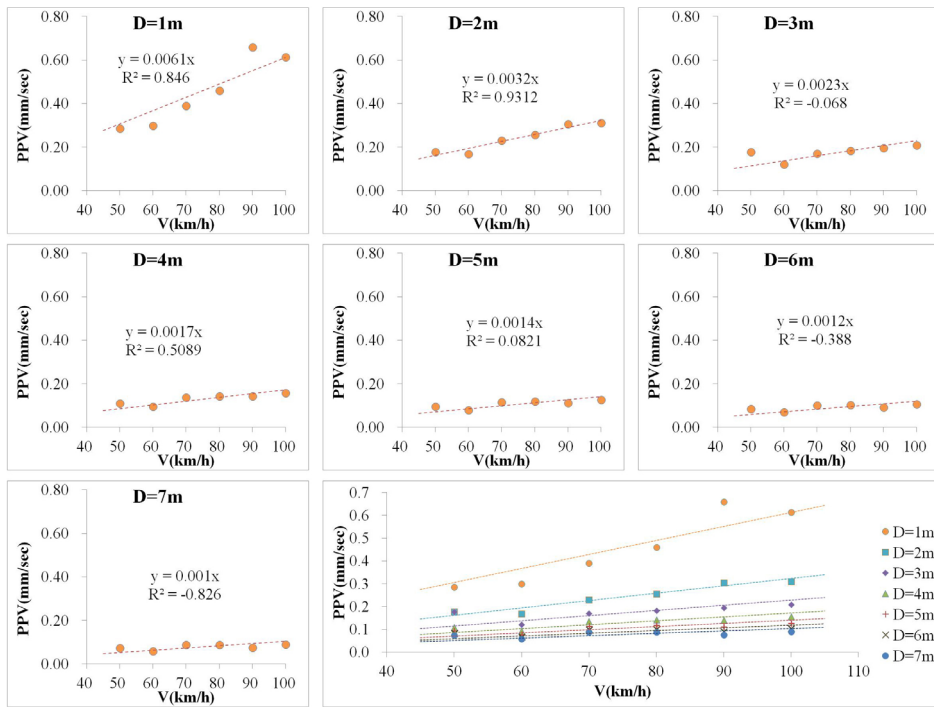


Fig. 6. The relationships between *PPV* and vehicle velocity for a van in the different distances.

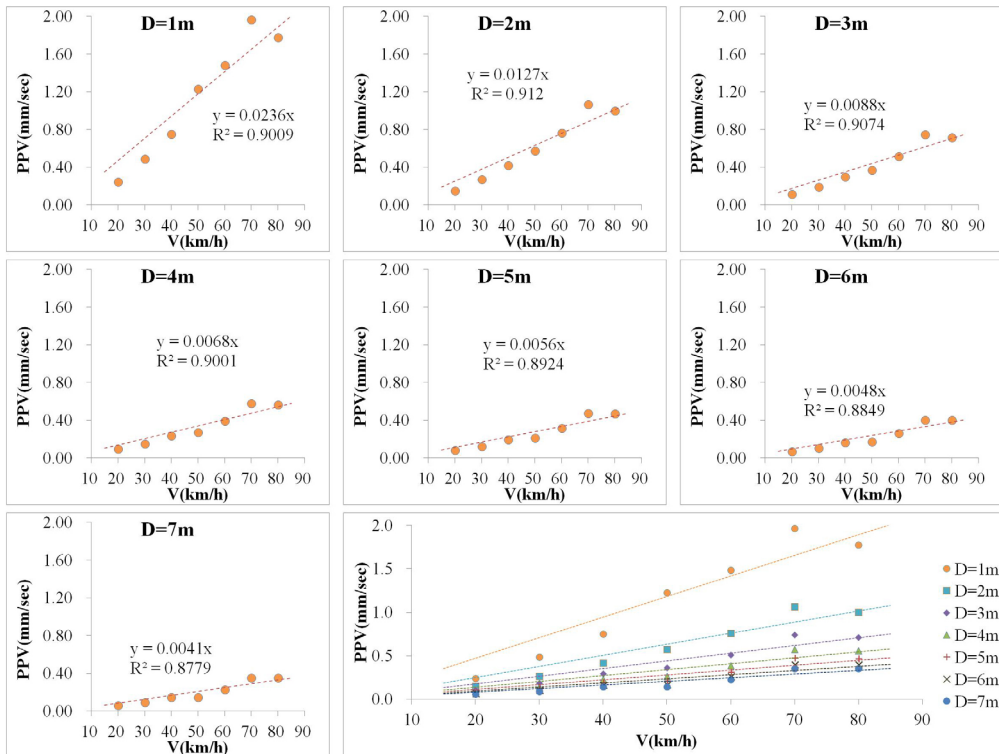


Fig. 7. The relationships between *PPV* and vehicle velocity for a bus in the different distances.

차량속도에 따른 진동속도 추정식을 도출할 수 있다. 거리별 기울기의 변화 양상(그림 9)과 차량별 진동속도와와의 거리 및 차량 속도와의 상관관계를 제시하였다(표 9).

이와 같은 관계식을 활용하여 문화재 기준인 0.07 cm/sec를 만족하는 거리별 차량속도를 산출하였다(표 10).

산출결과를 볼 때, 중량 2톤 내외의 승용차의 경우, 1 m 이격하여 114.8 km/h의 속도로 운행하여도 문화재 연속진동 허용범위를 초과하지 않는 것으로

평가되었다. 차량 유형과 속도를 변경하면 그 결과는 크게 다르게 나타난다. 예를 들면, 속도를 60 km/h로 설정할 경우 버스의 연속진동 허용범위는 2.2 m이며, 덤프트럭은 2.8 m로 평가되었다. 또한, 차량 속도를 80 km/h로 설정할 경우 버스 및 덤프트럭의 영향범위는 각각 3.0 m 및 3.7 m로 평가되었다. 이와 같은 결과는 제주도 거문오름용암동굴계에 속하는 도로의 속도기준이 60 km/h 내외라는 점과 용암동굴과 도로와의 거리가 대부분 약 10 m 이상 이격되어 있다는 점에서 천연동굴 문화재 안정성 등에는

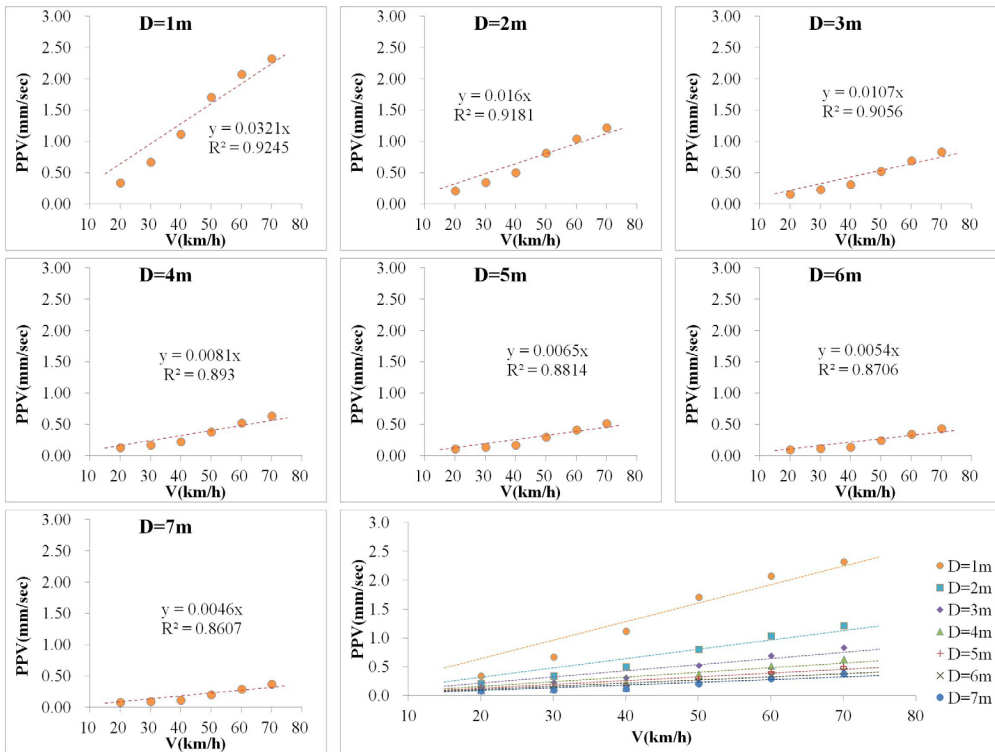


Fig. 8. The relationships between *PPV* and vehicle velocity for a dump truck in the different distances.

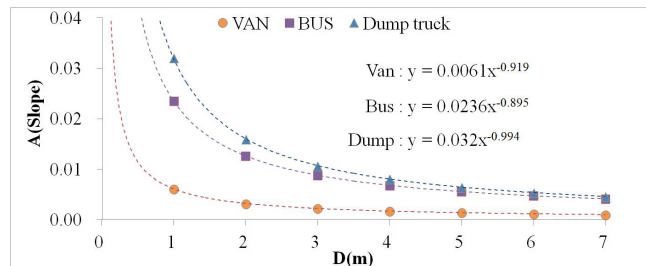


Fig. 9. The relationship between slopes and the distances (m) from the vibration sources to measuring points. The slope mean the changes in *PPV* (cm/sec) to vehicle velocity (km/h).

Table 9. The relationship among *PPV*, distance and velocity for three types of vehicles.

Vehicle	Relational expression
Van	$PPV = 0.0061 \times D^{-0.919} \times V$
Bus	$PPV = 0.0236 \times D^{-0.895} \times V$
Dump truck	$PPV = 0.032 \times D^{-0.994} \times V$

* *PPV* is vibration velocity (mm/sec), *D* is a distance (m) from the source to the equipment, and *V* is a vehicle velocity (km/h).

Table 10. Acceptable references for the vehicle velocity to the distance based on the *PPV* criterion of 0.07 cm/sec for the heritage site.

Distance (m)	Allowable vehicle velocity (km/h)		
	Van	Bus	Dump truck
1	114.8	29.7	21.9
2	217.0	55.2	43.6
3	315.0	79.3	65.2
4	410.3	102.6	86.8
5	503.6	125.2	108.3
10	952.3	232.9	215.7

Table 11. The derivations of *PPVs* on distance for breaker and compaction engineering works.

Work	Relational expression
Breaker	$PPV = 107.66 \times D^{-2.109}$
Compaction	$PPV = 71.19 \times D^{-1.753}$

* *PPV* is vibration velocity (mm/sec) and, *D* is a distance (m) between the vibration source and the measuring equipment.

큰 영향을 주지 않을 것으로 생각된다.

하지만 세계적으로 매우 높은 가치를 인정받고 있는 거문오름옹암동굴계의 경우, 화산활동의 과정에서 생성된 다공질 암반특성과 여러 겹의 내각구조 (lining)가 관찰되고 내각구조 사이의 공간이 분포하는 등의 특징으로 문화재 연속진동 기준을 초과할 수 있는 가능성이 상존하고 있다. 따라서 향후 추가적 연구 및 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

4.2 건설기계 진동분석

4.2.1 거리에 따른 진동영향 평가

브레이커 작업 및 다짐 작업 과정에서의 기반암 노출지역(Site 1)과 기반암 비노출지역(Site 2)의 진동시험 결과를 종합하여 진동속도와 거리와의 상관관계를 분석하였다. 진동속도와 거리와의 관계는 교통진동과 마찬가지로 거리가 가까울수록 진동속도

가 급격히 커지는 양상을 보이며, 이는 거듭제곱 식으로 표현할 수 있다. 각 작업별 거리와 진동속도와 의 관계식(표 11)과 상관관계를 도출하여 그래프로 도시하였다(그림 10).

이와 같은 관계식을 활용하여 문화재 연속진동 기준인 0.07 cm/sec를 만족하는 거리는 브레이커 작업의 경우, 10.9 m로 평가되며, 다짐작업의 경우, 14.0 m로 평가되었다. 산출결과를 볼 때, 작업구간과 동굴과의 거리가 11.0 m 이내인 지역에서는 동굴 내부에 문화재 연속진동 허용기준치를 초과할 개연성이 크므로 이들 작업에 대한 면밀한 검토를 하여 최종적인 과학적 판단을 내릴 필요가 있다.

4.2.2 건설장비 운영시 진동속도와 진동레벨의 상관관계 평가

건설장비 진동시험에서 측정된 총 306개의 진동

속도와 진동레벨 자료를 바탕으로 그 상관관계를 분석하였으며(그림 11), 그 관계식은 식 (1)과 같다.

$$PPV = 1.7 \times 10^{(-3)} \times e^{(0.1046 \cdot dB(V))} \quad (1)$$

진동속도와 진동레벨 관계식을 통해 규제 기준을 만족하는 진동속도를 도출한 결과, 주간 1.525 mm/sec 이하, 야간 0.904 mm/sec 이하에서 규제기준을 만족하는 것으로 파악되었다. 규제기준을 만족하는 거리는 브레이커 작업의 경우 약 7.5~9.6 m, 다짐 작업의 경우 약 9.0~12.1 m로 평가되었다. 건설장비 운

용에 따른 진동은 연속진동에 해당하고 문화재 연속 진동속도인 0.7 mm/sec를 고려하였을 경우, 동굴 내에서의 진동레벨 기준은 이번 연구에서 유도한 상관관계식에 따라 57.6 dB(V)로 평가할 수 있다.

4.2.3 건설장비 운영에 따른 진동영향 예측

먼저, 거문오름용암동굴계에서 수행한 브레이커 작업과 다짐 작업 과정에서의 건설장비 진동시험 결과를 종합하여 거리에 따른 진동레벨의 변화양상을 평가하였다. 이후 변화양상을 토대로 상관관계를 분석하였으며(그림 12), 식 (2)와 같은 관계식을 유도

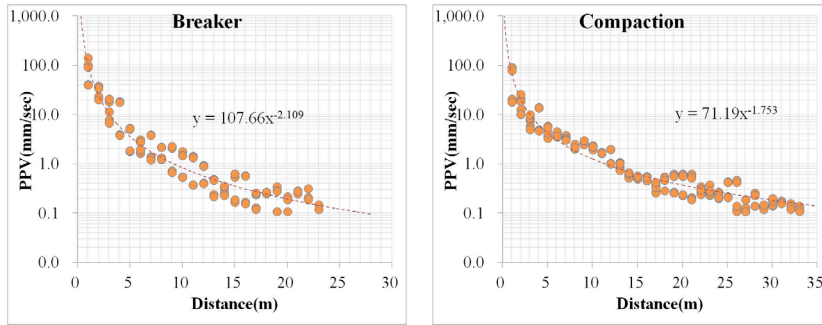


Fig. 10. The relationships between *PPV*s and distances for breaker and compaction engineering works.

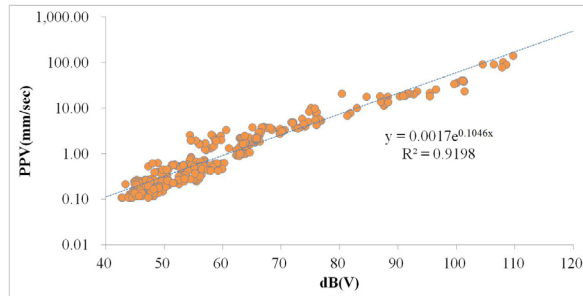


Fig 11. The relationship between *PPV* and vibration level for engineering works.

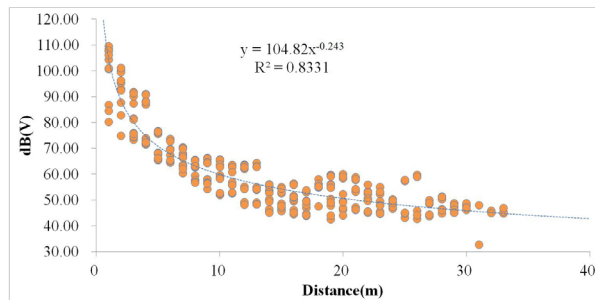


Fig 12. The relationship between vibration level (dB(V)) and distance (m) for engineering works.

Table 12. The results of weights and the vibration-excess radius by various types of construction equipments.

Type of Work	Equipment	Power (HP)	Situation of operation	weight	Constant		Radius of influence (m)	
					a	b		
Grading works	Backhoe	> 75	No load	0.54	57.03	-0.243	1.0	
		75~140	No load	0.50	52.06	-0.243	0.7	
		140~280	No load	0.60	62.94	-0.243	1.4	
			Work	0.59	62.01	-0.243	1.4	
		≥ 280	No load	0.51	53.77	-0.243	0.8	
	Bulldozer	50~240	No load	0.58	60.45	-0.243	1.2	
			Work	0.82	86.09	-0.243	5.2	
	Loader	≥ 104	Drive	0.56	58.90	-0.243	1.1	
	Grader	120~170	Work	0.54	56.88	-0.243	1.0	
	Tandem roller	≥ 75	Work	0.51	53.77	-0.243	0.8	
	Vibration roller	≥ 75	Vibrationless work	0.54	56.10	-0.243	0.9	
			Vibration work	1.09	114.69	-0.243	17.1	
	Tire roller	≥ 75	Work	0.39	40.87	-0.243	0.2	
	Tamping roller	≥ 5	Vibrationless work	0.64	66.67	-0.243	1.8	
			Vibration work	1.06	111.42	-0.243	15.2	
	Compactor	180	No load	0.67	70.40	-0.243	2.3	
			Work	0.99	103.34	-0.243	11.1	
	Foundation works	Earth auger	-	No load	0.68	71.33	-0.243	2.4
Work				0.91	94.95	-0.243	7.8	
Pile driving				0.81	85.01	-0.243	5.0	
Pile driver		Work	1.10	114.84	-0.243	17.2		
Vibration pile driver		Work	1.01	105.52	-0.243	12.1		
Small size Boring machine		Work	0.72	75.68	-0.243	3.1		
Concrete works	Concrete pump car	305~340	No load	0.37	38.70	-0.243	0.2	
			Work	0.66	69.31	-0.243	2.1	
Concrete works	Concrete finisher	305~340	Idle Running	0.39	40.72	-0.243	0.2	
			No load	0.44	46.47	-0.243	0.4	
			Work	0.49	51.75	-0.243	0.6	
Pavement works	Asphalt finisher	305~340	Work	0.50	52.53	-0.243	0.7	
			No load	0.38	39.47	-0.243	0.2	
Destruction and demolition works	Breaker	≥ 500 kg	Work	0.48	50.66	-0.243	0.6	
			< 500 kg	Work	0.86	89.98	-0.243	6.3
			No load	0.56	58.74	-0.243	1.1	
Etc.	Crane	-	Work	1.01	106.30	-0.243	12.5	
			No load	0.40	42.27	-0.243	0.3	
Etc.	Crane	-	Work	0.47	48.80	-0.243	0.5	

* Relational expression : $dB(V) = a \times D^b$

하였다.

$$dB(V) = 104.82 \times D^{-0.243} \quad (2)$$

* $dB(V)$ is vibration level and, D is a distance (m) between the vibration source and the measuring equipment.

건설장비별 가중치 적용에 반영된 진동레벨은 국립환경과학원의 조사(Kang *et al.*, 2003)에서 제시된 7.5 m 이격된 거리에서의 진동레벨의 평균값이며, 가중치의 기준은 브레이커 작업과 다짐 작업의 평균값으로 하였다. 가중치의 기준을 브레이커 작업과 다짐 작업으로 특정한 이유는 이번 연구에서 이들 작업에 대한 진동평가를 수행하였기 때문이다. 여기서, 각 장비별 거리에 따른 진동의 감쇠 양상은 본 연구에서 수행한 진동시험의 감쇠양상과 동일하다고 가정하였다.

가중치를 바탕으로 각 건설장비별 거리와 진동속도와의 관계식을 도출하였으며, 건설장비 운영에서 진동레벨 기준치는 연속진동의 문화제 기준(0.07 cm/sec)에 따른 진동레벨 값(57.6 dB(V))을 반영하였고, 이를 기준으로 기준치 초과 반경을 산정하였다. 건설장비별 가중치, 관계식의 상수 및 각 장비별 기준치를 초과하는 반경을 산출하였다(표 12). 기준치 초과 반경 산출결과를 볼 때, 대부분의 작업은 반경이 10 m 이내로 평가되어 실질적으로 동굴에 영향을 미치기 어려운 것으로 판단된다. 그러나, 지반정지공사 중 진동롤러, 탬핑롤러, 법면다짐기와 기초공사의 향타기, 진동향타기 그리고 파괴 및 해체공사 시 브레이커를 운영하는 경우에는 영향반경이 10 m 이상을 초과하는 것으로 평가되었다. 따라서, 만장굴 입구 삼거리를 비롯하여 거문오름용암동굴계 직상부에서 이러한 공사를 수행하는 경우 반드시 동굴과 진동원과의 거리를 검토한 후 안정성이 확보된 상태에서 작업을 수행할 필요성이 있다.

이번 연구에서는 브레이커 작업 등 현장시험을 통해 얻은 단편적인 건설기계 진동특성을 바탕으로 다수의 공중 및 공사에 대한 진동영향 반경에 대한 영향평가를 수행하였다. 따라서, 거문오름용암동굴계의 건설장비 운영에 따른 진동특성을 보다 명확히 규명하기 위해서는 다양한 장비에 대한 현장실증

구를 수행할 필요성이 있다.

5. 결론

이 연구는 제주도 거문오름용암동굴계 지역에서 현장실험을 통해 차량 및 건설장비 진동특성을 평가하고 이를 기반으로 효율적인 용암동굴 관리보존 대책의 과학적 근거를 마련하기 위한 목적으로 수행하였다. 차량운행에 대한 교통진동시험 결과, 차량속도에 대한 진동속도의 관계를 토대로 거리별 기울기 값의 변화를 분석하여 거리와 차량속도에 따른 진동속도 추정식을 도출 후, 도출된 식을 활용하여 문화재 연속진동 기준(0.07 cm/sec)을 만족하는 거리별 차량속도를 산출한 결과, 제주도 거문오름용암동굴계에 속하는 도로의 속도기준이 60 km/h 내외임을 고려할 때, 용암동굴과 도로와의 최단거리가 10 m 이상 이격되어 있는 거문오름용암동굴계에서 차량 진동이 동굴 안정성에 직접적인 영향을 미치기는 어려운 것으로 판단된다. 건설장비에 대한 진동시험 결과, 문화제 연속진동속도 규제기준을 만족하는 브레이커 작업 거리는 약 7.5~9.6 m, 다짐 작업 거리는 약 9.0~12.1 m로 평가되었으며 동굴내에서의 진동레벨 기준은 상관관계식에 따라 57.6 dB(V)로 평가되었다. 본 연구에서 수행한 건설장비 진동시험 성과와 국립환경과학원 조사에서 제시된 건설기계류의 거리에 따른 진동속도를 종합하여 현장시험을 수행하지 않은 각 건설장비 운용 과정에서의 진동레벨을 유추하고 관계식 도출 후 영향반경을 산출한 결과, 지반정지공사 중 진동롤러, 탬핑롤러, 법면다짐기와 기초공사의 향타기, 진동향타기 그리고 파괴 및 해체공사의 브레이커를 운영하는 경우에는 영향반경이 10 m 이내인 것으로 평가되었다. 따라서, 만장굴 입구 삼거리를 비롯하여 거문오름용암동굴계 직상부에서 이러한 공사를 수행하는 경우 반드시 동굴과 진동원과의 거리를 검토한 후 안정성이 확보된 상태에서 작업을 수행할 필요성이 있다. 본 연구에서는 브레이커 작업 등 현장실증시험을 통해 얻어진 단편적인 건설기계 진동특성을 바탕으로 다수의 공중 및 공사에 대한 평가를 수행하였기에 거문오름용암동굴계의 건설장비 운영에 따른 진동특성을 보다 명확히 규명하기 위해서는 다양한 장비에 대한 현장실증을 수반하는 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 문화재청 국고보조사업(세계유산 보존 관리 사업)의 일환으로 제주특별자치도 세계유산본부의 지원(학술용역: 제주도 천연동굴 보존관리방안 연구 및 조사)을 받아 수행된 연구사업(과제번호: 17TBIP-C125148-01)이다. 이 연구는 부분적으로 한국연구재단의 기본 연구사업(과제번호: NRF-2020R1F1A1050252)의 지원을 받아 수행되었다.

REFERENCES

- Choi, S.H., 1999, An analysis of the effect of ground vibration on the piling. Ph.D. thesis, Yeungnam University, Gyeongsan (in Korean).
- Jeju Special Self-Governing Province, 2020, Study on the Conservation and Management of Volcanic Caves in Jeju Island. the Jeju World Natural Heritage Center in Korea, 63-132 (in Korean).
- Kang, D.J., Lee, W.S., Lee, S.J., Jang, S.K., Hong, J.K. and Lee, B.H., 2003, Characteristics of construction machinery noise. National Institute of Environmental Reserch, 27-28 (in Korean with English abstract).
- KEI (Korea Environment Institute), 2002, A Study on the Evaluation of Building Damage due to Vibration. National Environmental Dispute Resolution Commission, 115 p (in Korean).
- KEI (Korea Environment Institute), 2007, A Study on the Improvement of Noise and Vibration Estimation Method for Environmental Dispute Events in Construction Sites. National Environmental Dispute Resolution Commission, 10-11 (in Korean).
- KEI (Korea Environment Institute), 2010, A Study on the Correlation Analysis of Vibration Level and Vibration velocity. National Environmental Dispute Resolution Commission, 9-13 (in Korean).
- Kim, J.H., 1997, A Study on the Frequency Characteristics and Viscous Depreciation Rate of Ground Vibration by Blast and Fall Impact. Ph.D. thesis, Kangwon National University, Chuncheon (in Korean).
- Kim, N.S., 1999, A study on the prediction of construction noise and vibration. and their application. Ph.D. thesis, Chonnam National University, Gwangju, 83-85 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.U. and Park, H.S., 2001, A Study on the characteristics of Blasting Vibration and Breaker Vibration by Rock Excavation. Journal of Industrial Technology, 22, 107-117 (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Lee, B.J., Cho, D.R., Kim, J.C., Lee, S.R., Kim, Y.B., Choi, H.I., Hwang, J.J., Song, K.Y., Choi, K.Y., Choi, B.Y. and Cho, B.U., 1998, Jeju · Aewol geological map and geological report. Jeju Special Self-Governing Province, 290 p (in Korean).
- Won, J.G., Lee, M.W., Lee, D.Y. and Son, Y.K., 1993, Seongsan geological map and geological report, Construction Ministry. Jeju Island and Korea Water Resources Corp., 104 p (in Korean).

Received : March 4, 2021

Revised : March 29, 2021

Accepted : March 29, 2021