

진동레벨과 진동속도의 상관성에 관한 비교연구

송하림¹⁾, 노영배²⁾, 강추원^{3)*}

Comparative Study on Relationship between Vibration Level and Vibration Velocity

Ha-Lim Song, Young-Bae Noh and Choo-Won Kang

Abstract This study measured a vibration level at each distance of construction fields where blasts occur using Lion measuring instrument and used BlastmateIII to measure vibration velocity at the same distance. A total 130 blasts occurred with the weight of a total of 5,180 kg and the number of blast holes per blast was 5, 10 and 20. The weight of 4 kg was used for each hole. Vibrations caused by blast was measured at the distance with the same velocity and level. Measurements were carried 15~102 m away from the blast source. and 273 data on vibration velocity and level were obtained from eight measurements. It analysed data on vibration velocity measured based on existing correlation formulas and compared them to real measurements to analyse interrelationship.

Key words Vibration level, Vibration velocity, Correlation formulas

초 록 본 연구에서는 발파가 이루어지는 공사현장에서의 거리별 진동레벨을 리온계측기로 측정하였고 같은 거리상에서 진동속도를 측정을 위해 BlastmateIII를 사용하였다. 현장실험에서 발파는 총 5,180kg의 장약량으로 총 130회의 발파가 진행되었으며 회당 발파공수는 5, 10, 20공으로 공당 4kg의 약량이 사용되었다. 발파로 인한 진동은 진동속도와 진동레벨로 같은 거리에서 동시 측정하였다. 계측은 발생원으로부터 15~102m 구간에서 측정하였고 8차례 구간을 나누어 진동속도, 진동레벨 데이터를 각각 273개 획득하였다. 측정된 진동속도 데이터를 이용하여 기존의 상관식에 의하여 분석하였으며 이를 실제 측정된 진동레벨과 비교 분석하고 상관성에 대하여 연구해 보았다.

핵심어 진동레벨, 진동속도, 상관식

1. 서 론

급격한 산업사회의 발전과 함께 주민들의 의식 수준의 향상에 따라 여러 현장의 발파로 인한 소음, 진동, 분진 등과 같은 환경 공해에 대한 민원이 더욱 민감해 지고 있는 실정이며 고속도로, 철도 및 지하철, 항만, 택지조성 및 재개발 등이 확충되고 있다. 이들

공사작업 수행과정에서의 터널굴착 암반의 파쇄 등 발파로 인한 환경공해(소음, 진동, 분진 등)의 발생은 필연적이다. 택지부족으로 인한 인접시공의 증가와 주민들의 환경피해에 대한 의식 수준의 향상으로 발파공사 작업으로 인한 환경공해문제가 계속 증가할 것으로 보이며 이러한 이유로 환경 분쟁 또한 증가할 것이다(강추원, 2005; 김남수 외, 2000). 우리나라의 기준을 보면 환경부에서 제정한 소음, 진동 규제법에서는 진동에 의한 정신적 피해를 진동레벨 단위로 규정하고 있으나 국토부에서는 진동에 대한 피해를 진동속도를 기준으로 관리되고 있는 상황이고 진동레벨을 평가하는 척도는 인체 감응도를 평가하는 것이지

¹⁾ 조선대학교 에너지자원공학과 박사과정

²⁾ 대동발파기술사사무소 대표

³⁾ 조선대학교 에너지자원공학과 교수

* 교신저자 : cwkwang@mail.chosun.ac.kr

접수일 : 2011년 12월 7일

심사 완료일 : 2011년 12월 21일

게재 승인일 : 2011년 12월 23일

만 인근 구조물 등에 미치는 물리적 영향 또한 진동속도로써 평가 관리되는 상황이다. 이러한 공사작업의 수행으로 발생하는 민원을 줄이기 위하여 공사의 시공 중에 소음, 진동, 분진의 환경공해에 대한 관리 및 계측을 실시하고 있다. 이러한 환경공해를 줄이기 위한 방법 중 계측에서의 발파에 의한 진동은 크게 2가지로 분류한다. 첫 번째로 건축구조물에 미치는 물리적 영향을 평가하는 진동속도(cm/sec)와 인체 감응에 의한 영향을 평가하는 진동레벨(dB(V))로 구분하게 된다. 현재 공사현장에서 측정되는 대부분이 진동속도를 기준으로 진동속도 측정기기를 사용하고 있으며 이와 반대로 인체에 대한 영향을 평가하는 진동레벨에 대한 측정은 거의 이루어지지 않고 있다. 이에 따라 진동속도를 진동레벨로 환산하기 위한 연구가 진행되고 있다.

기존의 대표적인 환산식인 Ejima 환산식은 최대속도 진폭으로부터 수직진동레벨을 산정하는 경우 수직진동에 대해서는 주파수가 8Hz 이상인 연속 정현파일 경우에 주로 사용되고 충격진동파형에서는 과대평가되는 경향이 있다. Venmarche 환산식 또한 진동레벨 환산에 이용되며 이 식은 일반적으로 진동원이 연속진동이 아닌 충격진동에서 진동레벨로의 환산에 적절하게 적용되고 있으나 뇌관의 종류나 1회 사용 지발단수 등의 적용이 다양하므로 진동평가에 어려움이 따른다. 그 밖에도 여러 상관식이 있으나 아직 명확한 결론에 도달하지 못하였다. 이러한 식에 사용되는 진동속도는 현행 소음진동 규제법에서 인체에 미치는 영향만을 고려하여 수직성분을 측정하도록 하고 있으나 발파진동이 건축구조물에 미치는 영향은 수직성분보다는 수평성분이 더 큰 피해를 발생시키는 경우도 있다. 이러한 이유로 가장 높은 값의 성분을 나타내는 PPV값으로 할 것인지 PVS 성분들의 실 벡터 합으로 할 것인지에 대한 구분이 필요하다.

최근의 연구에는 발파현장에서 발파진동 계측기로 측정된 진동 계측치(PPV, PVS, Vv)를 이용하여 진동레벨을 산출하는데 있어서 언제 어디서나 지발당 장약량 및 폭원과의 이격거리에 관계없이 유효하게 적용할 수 있는 새로운 진동레벨 추정식(김일중 외, 2009)을 제시하였고, 지면 및 구조물 높이에 따라 진동레벨과 진동속도를 측정하고 이들의 상관성 및 실측 진동레벨과 변환식에 의한 진동레벨과의 차이를

고찰(이연수 외, 2004, 2005)한 연구도 진행되었다.

본 연구에서는 8곳의 지역을 나누어 총 130회의 발파가 진행되었으며 15~102m거리 내에서 진동속도 측정기인 BlastmateIII와 진동레벨측정기인 VM-53을 이용하여 같은 거리에서의 진동레벨과 진동속도를 동시에 측정하였다. 측정된 진동속도는 Venmarche식과 Ejima식, 중앙환경분쟁조정위원회 방식을 이용하여 예측진동레벨 값을 산출하였다. 환산할 때의 진동속도는 최대 진동속도를 나타내는 성분인 PPV값과 3성분의 실 벡터합인 PVS로 나누어서 분석하였고, 환산된 예측진동레벨은 VM-53으로 측정된 실제측정 진동레벨과 비교하여 예측식의 진동레벨의 상관성에 대하여 고찰하였다.

2. 현장실험

2.1 연구지역의 지형

조사지역은 경기도 양주군에 위치한 ○○발파공사 현장이며 이 지역은 선캄프리아기 변성암, 주라기 퇴적암과 화강암류, 제4기 충적층으로 구성된다. 평야지대에 넓게 분포하는 흑운모 화강암은 저지대를 형성하고 이들은 동일한 화강암체임에도 불구하고 풍화양상의 명확한 대비를 보여준다.

2.2 실험방법

진동속도와 진동레벨을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 진동계측기 BlastmateIII 3대와 진동레벨측정기 리온 VM-53 3대를 사용하여 계측하였다. 계측기 설치하는 발파가 진행되는 자유면에 반대방향으로 일직선상에 계측기를 설치하였으며 거리는 7m, 15m, 30m로 설정하였으나 현장여건과 지반상황을 고려하고 발파회당 발파위치가 변동함에 따라 계측거리는 15~102m내에서 계측되었다. 현장 내에서 구역별로 발파가 진행되었으며 발파 진동 발생원으로부터 거리별 진동레벨과 진동속도를 측정하였다. 계측된 데이터 중에서 현장 내 다른 작업이나 장비의 진동간섭으로 인해 데이터의 결과에 영향을 미치는 데이터는 전체 자료에서 제외시켰다. 발파제원은 Table 1과 같으며 총 4,780kg의 장약량으로 130회의 발파가 진행되었으며 회당 발파공수는 5, 10, 20공으로 공당 4kg의 약량이 사용되었다.

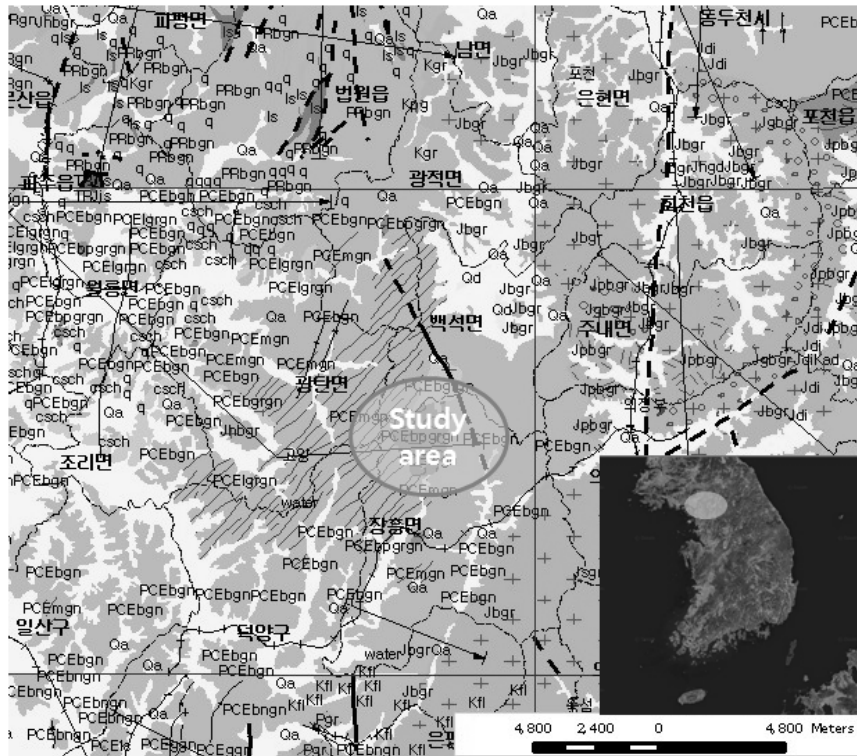


Fig. 1. Study area in SongChoo country club blasting work.



Fig. 2. A picture of installed Blastmate and Vm-53.

Table 1. Blasting conditions

Blast area	Number of Blast hole	Charge (kg)	number of Blast	Number of Blast hole per Blast	Charge per delay (kg/delay)
1 area	35	140	7	5	4
2 area	240	960	24	10	4
3 area	150	600	15	10	4
4 area	140	560	7	20	4
5 area	100	400	20	5	4
6 area	40	160	8	5	4
7 area	190	760	19	10	4
8 area	300	1200	30	10	4

3. 진동레벨 환산식

3.1 중앙환경분쟁조정위원회 방식

다음의 식 (1)은 중앙환경분쟁조정위원회의 진동레벨 환산식은 실벡터합으로 표현되는 최대발파진동속도를 이용하고 있다.

$$VL = 13.54 \cdot \text{Log } V_{peak} + 72.33 \quad (1)$$

여기서, VL 은 진동레벨, dB(V)

V_{peak} 는 발파진동속도 최대값, cm/sec이다.

3.2 Ejima 식

Ejima 변환식은 최대속도 진폭으로부터 수직진동레벨을 산정하는 경우 수직진동에 대해서는 주파수가 8Hz 이상이고, 연속 정현 파형일 경우에 한하여 변환된 수직진동레벨과 실측한 수직진동레벨과의 상관성이 성립한다는 이론적인 변환식으로 발파진동과 같이 지속시간이 짧은 충격진동파형에 대해서는 수직진동레벨이 과대평가되는 경향이 있다.

$$VL = 20 \cdot \text{Log } V_{peak} + 71 \quad (2)$$

여기서, VL 은 진동레벨, dB(V)

V_{peak} 는 발파진동속도 최대값, cm/sec이다.

3.3 Venmarcke 식

발파 진동속도를 진동레벨로 전환 시에는 일반적인

로 진동원이 연속진동이 아닌 충격진동이므로 Vanmarcke 식을 사용한다. 식 (3)과 같은 Vanmarcke 식은 충격진동을 진동레벨로 환산하는데 적절하게 적용할 수 있다.

$$VL = 20 \cdot \log(V_{peak}) + 10 \cdot \log(1 - e^{-Td/0.63}) + 85 \quad (3)$$

여기서, Td 는 진동파형의 연속시간(sec)이다.

4. 진동레벨과 진동속도의 상관성 고찰

4.1 실측진동레벨과 환산식에 의한 예측진동레벨의 비교

본 실험에 있어서 진동속도는 V방향, T방향, L방향 중 가장 높은 값으로 나타내어지는 PPV값과 세성분의 실 벡터 합으로서 가장 높은 값인 PVS로 나누어 측정하였으며 BlastmateIII 진동측정기로 측정한 PPV 값은 0.168~1.7cm/sec이고 PVS값은 0.2~1.87cm/sec로 계측되었다. 리온 진동레벨기를 이용하여 측정한 진동레벨은 65.5~85.9dB(V)로 거리 15~102m 내에서 측정되었다.

측정된 데이터는 Ejima 환산식, Venmarcke 환산식, 중앙환경분쟁조정 위원회의 환산식으로 PPV와 PVS 값으로 구분하여 진동레벨로 환산하였고 각각의 환산 진동레벨과 측정 진동레벨을 비교 분석하였다.

4.2 실측진동레벨과 예측진동레벨의 비교 검토

진동레벨과 환산식에 의한 PPV, PVS 예측진동레벨은 Fig. 3, Fig. 4로 분석되었다. 중앙환경분쟁조정

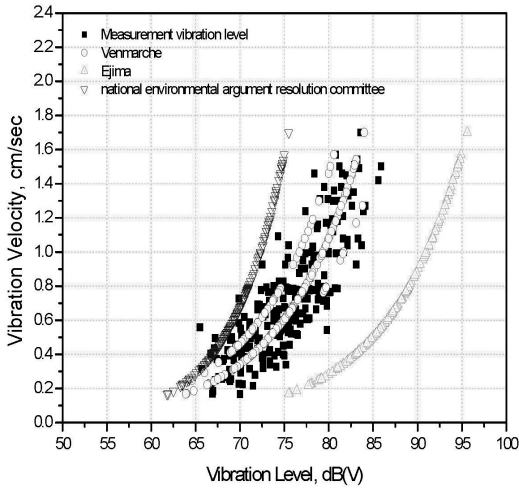


Fig. 3. The conversion results that used PPV of total data.

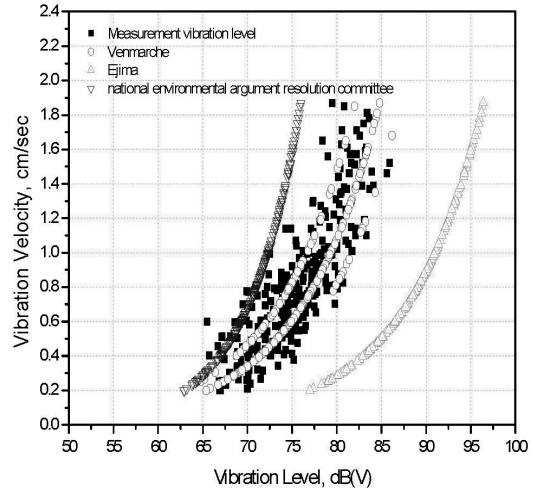


Fig. 4. The conversion results that used PVS of total data.

Table 2. Comparison of conversion results of total data and measurement vibration level

Conversion method	Blast area								Average	
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Vibration level (dB(V))	76.6	74.3	73.1	77.3	74.1	79.0	72.1	79.5	75.4	
Venmarche	PPV	77.5	74.0	71.8	80.5	71.9	74.8	74.3	79.1	75.1
	PVS	78.1	75.2	72.8	81.8	72.8	75.9	74.9	80.0	76.0
Ejima	PPV	90.4	85.7	83.5	89.8	86.2	89.2	85.9	90.8	87.3
	PVS	91.1	86.8	84.5	91.1	87.1	90.2	86.5	91.6	88.2
중앙환경 분쟁조정 위원회	PPV	72.0	68.7	67.2	71.5	69.1	71.1	68.9	72.2	69.8
	PVS	72.4	69.5	67.9	72.4	69.7	71.8	69.3	72.7	70.4

위원회 방식으로 분석한 결과 전체 자료에 대해 61.8~75.5의 범위로 평균값은 69.84dB(V)이고 PVS의 환산일 경우 62.9~76dB(V)이고 평균값은 70.46dB(V)이다. 중앙환경분쟁조정 위원회 방식은 실측진동레벨에 비하여 4.95~5.57dB(V)가 낮게 분석되었다. 이와 반대로 Ejima 환산식은 11.92~12.82dB(V)로 높게 나타났는데 이는 발파진동과 같은 짧은 충격진동 파형에서 과대평가 된다는 기존의 연구 결과와 일치함을 보였고, PPV 환산의 값은 75.5~95.6dB(V)으로 평균값은 87.33dB(V)이며 PVS에서의 환산은 77~96.4dB(V)로 평균 88.23dB(V) 분석되었다. 마지막으로 Venmarche 환산식은 다른 환산식과 달리 진동파형 연속시간이라는 뇌관 시차가 환산식에 포함되므로 좀 더 정확한 분석이 가능하며 PPV에서의 환산은 63.4~84dB(V)로 평균 75.17dB(V)이고 PVS에서의 환산은

64.8~86.2dB(V)로 평균 76.08dB(V)이다. 이는 실측진동레벨과 0.24~0.67 dB(V)의 차이로 거의 일치하는 것으로 분석되었다.

진동속도는 Ejima 변환식, Venmarche 변환식, 중앙환경분쟁조정 위원회의 변환식에 의해 분석한 결과 Table 2와 같다. Ejima 변환식은 최대속도 진폭으로부터 수직진동레벨을 산정하는 경우 수직진동에 대해서는 주파수가 8Hz 이상이고 연속 정현파형 일 경우에 한하여 변환된 수직진동레벨과 실측한 수직진동레벨과의 상관성이 성립한다는 이론적인 변환식으로 발파진동과 같이 지속시간이 짧은 충격진동파형에 대해서는 과대평가되는 경향이 있다는 사실과 일치함을 보였다. 중앙환경분쟁조정 위원회 방식은 최대 발파진동속도(실 벡터합)를 이용하고 있으며 PPV값과 비교하여 많이 차이를 보이지 않았지만 실측진동레벨과

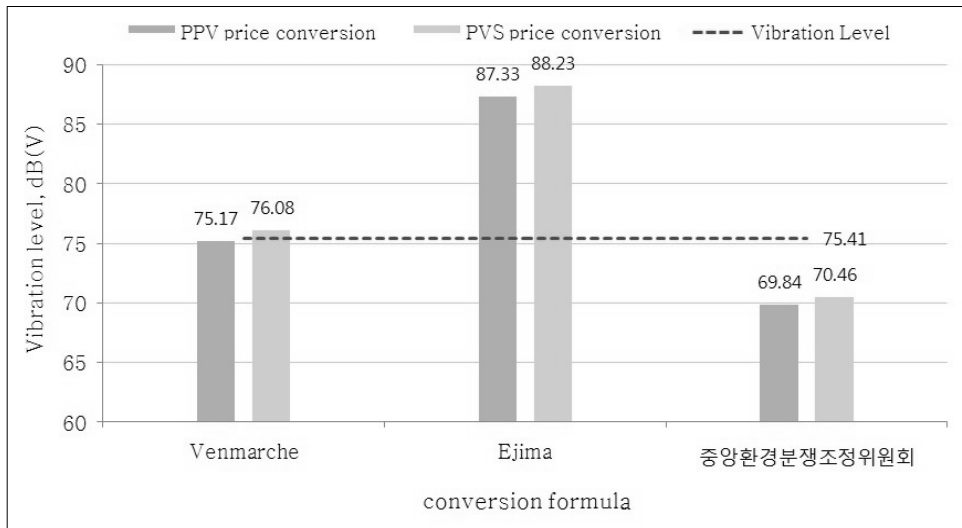


Fig. 5. Comparison of measurement vibration level and conversion vibration level.

좀 더 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. Venmarche 변환식은 Ejima 변환식과 중앙환경분쟁조정 위원회 방식과는 달리 충격진동을 진동레벨로 환산하는데 적절한 결과를 얻을 수 있었으나 발파공사의 종류, 뇌관의 종류와 1회 사용 지발단수, 진동이 전파되는 발파 지역 지질조건 등이 다양하므로 발파작업에 따른 진동평가에 어려움이 따를 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 5는 발파진동속도를 이용한 PPV와 PVS의 예측진동레벨의 평균적 데이터를 나타낸 표이다. 분석 결과 Venmarche 식은 측정진동레벨과 비교하여 PPV의 경우 99.68%, PVS의 경우 99.06% 일치하였고, Ejima식은 PPV의 경우 88.08%이고 PVS는 87.18%로 나타났다. 마지막으로 중앙환경분쟁조정 위원회 방법으로는 PPV의 경우 92.61%, PVS의 경우 93.44%로 분석되었다. 따라서 발파에서의 실측진동레벨과 예측진동레벨의 비교는 Venmarche 식에서 가장 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 PPV와 PVS의 적용성에는 Venmarche, Ejima식에서는 PPV가 각각 0.42%, 0.80% 높게 나타났지만 중앙환경분쟁조정 위원회 방법은 PVS가 0.83% 높게 나타났다.

5. 결론

발파진동을 평가하고자 할 때 건축구조물에 미치는

영향은 진동속도, 인체에 미치는 영향은 진동레벨로 표현된다. 일반적으로 발파공사현장에서는 진동속도를 평가 기준으로 측정하고 있으며 진동레벨 환산식에 의한 예측이 필요한 상황이다. 본 연구에서는 발파에서의 진동을 거리별로 진동레벨측정기와 진동속도 측정기를 사용하여 측정하였고 기존의 여러 진동레벨 추정식을 비교, 검토하여 현장업무에 있어서 신뢰성 있는 진동평가가 이루어지도록 하는데 목적이 있다.

1) 발파는 총 4,780kg의 장약량으로 총 130회의 발파가 진행되었으며 회당 발파공수는 5, 10, 20공으로 공당 4kg의 약량이 사용되었다. 측정결과 전체 데이터의 PPV값은 0.168~1.7cm/sec, PVS는 0.2~1.87cm/sec의 범위에서 계측되었고 진동레벨은 65.5~85.9dB(V)로 측정되었다. 발파로 인한 진동은 진동속도와 진동레벨로 같은 거리에서 동시 측정하였다. 계측은 발생원으로부터 15~102m 구간에서 측정하였고 8차례 구간을 나누어 진동속도, 진동레벨 데이터를 각각 273개 획득하였다. 측정된 데이터는 거리, 발파공수, 뇌관시차 등에 따라 진동속도가 비례하나 어떠한 경우 지반 내 특정한 지층 상태나 지반의 특성에 따라서 기존 데이터 보다 크거나 작게 나타났다.

2) Venmarche 환산식에 의한 예측진동레벨은 PPV

의 경우 63.4~84dB(V)로 평균 75.17dB(V)이고 PVS의 환산식은 64.8~86.2dB(V)로 평균 76.08dB(V)로 분석되었으며 실측진동레벨의 오차가 0.24~0.67dB(V)로 거의 일치하는 것으로 나타났다. Ejima 환산식에 의한 예측진동레벨은 PPV의 경우 75.5~95.6dB(V), PVS의 경우 77~96.4dB(V)의 범위로 나타났고 평균값은 각각 87.33dB(V), 88.23dB(V)으로 실측데이터 75.41dB(V)과 오차가 11.92~12.82dB(V) 높은 것으로 분석되었다. 이는 Ejima 식이 연속적인 정현 파형일 경우에 상관성이 성립하기 때문인 것으로 판단된다.

- 3) 측정된 PPV와 PVS를 이용하여 환산식에 의해 분석된 예측 진동레벨은 Venmarche 환산식은 0.91dB(V), Ejima 환산식은 0.9dB(V), 중앙환경분쟁조정위원회 방식에서는 0.62dB(V)로 PVS값이 더 높게 분석되었다. 발파진동이 인체에 미치는 영향은 V, T, L 성분 중에서 단일성분으로 PPV 값이나 V성분으로 주로 사용하고 있으나 건축물의 경우 수직, 진행, 접선 모든 성분에 영향을 받기 때문에 가장 이상적인 발파진동 평가 방법에는 V, T, L 성분의 벡터 합인 PVS의 진동속도를 사용하는 것이 타당하다고 판단된다.
- 4) 이상의 결과를 종합해보면 풍화가 어느 정도 진행된 흑운모화강암지역에서의 발파로 인한 진동레벨과 진동속도의 상관성은 Venmarche 환산식이 실제측정진동레벨과 비교하여 99.68%로 매우 정확

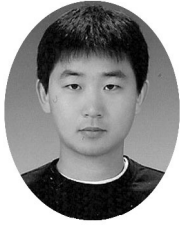
한 값을 보였으나 매 발파에 대한 뇌관의 종류와 1회 사용 지발단수 등 다양한 변수를 적용해야 하므로 공사현장에서의 진동평가에 어려움이 예상되고 나아가 지반의 상황이나 현장의 특성을 고려하여 보다 신속하고 정확한 업무수행이 되기 위한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문 또는 저서는 지식경제부 자원개발특성화대학사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 강추원, 2005, 발파공학 A to Z, 구미서관, pp. 379-398.
2. 이연수, 장서일, 2004, 도심지 발파공사장의 발파진동 특성, 한국소음진동공학회 논문집 제14권, 제7호, pp. 632-638.
3. 이연수, 장서일, 2005, 근접장 발파진동에서 진동속도와 진동레벨의 비교, 한국소음진동공학회 논문집, 제15권, 제8호, pp. 918-923.
4. 김일중, 원연호, 조영동, 2009, 진동레벨 추정식에 관한 연구, 2009 추계학술발표회 논문집(대한화약발파공학회), pp. 51-59.
5. 김남수, 양형식, 2000, 발파소음의 예측기법과 환경규제기준으로의 변환연구, 화약발파: 대한화약발파공학회 논문집, 제18권, 제2호, 대한화약발파공학회, pp. 14-22.

**승 하 림**

조선대학교 에너지자원공학과
박사과정

Tel: 062)230-7876

E-mail: ever0620@naver.com

**강 추 원**

조선대학교 에너지자원공학과 교수

Tel: 062)230-7117

E-mail: cw Kang@mail.chosun.ac.kr

**노 영 배**

대동발파 기술사 사무소 대표

Tel: 062)230-7876

E-mail: bayo21@hanmail.net