

근접장 발파진동에서 진동속도와 진동레벨의 비교

The Vibration Velocity and Vibration Level of Near-field Blasting Vibration in an Urban Blasting Site

이 연 수* · 장 서 일*

Yeon Soo Lee and Seo Il Chang

(2005년 3월 17일 접수 : 2005년 7월 18일 심사완료)

Key Words : Blasting Vibration(발파 진동), Vibration Level(진동 레벨), Vibration Velocity(진동 속도), Vertical Vibration Level(연직 진동 레벨)

ABSTRACT

The vibration level (dB(V)) and vibration velocity (cm/sec) on the ground and buildings due to the differences of the measuring sites from the blasting source was investigated. To compare with vibration level and vibration velocity their magnitude was not surely directly proportional and vibration velocity 0.1 cm/sec was 45~50 dB(V). The difference between the measured vibration level and the calculated vibration level by Ejima's equation using vibration velocity PVS(peak vector sum) showed 21.0~30.9 dB(V) on the ground, 15.3~23.6 dB(V) on the apartment, respectively. And the correlation of vibration velocity and vibration level at the measuring sites of lower altitude showed higher than that of higher altitude.

1. 서 론

발파진동을 평가하는데 있어서의 문제점은 진동크기를 가속도 단위인 진동레벨(dB)로 나타낼 것인가 아니면 속도 단위인 카인(cm/sec)으로 나타낼 것인가에 따라 평가 대상이 다르다는 것이다. 이와 같은 문제점이 상존하고 있음에도 불구하고 우리나라의 소음·진동규제법에서는 진동레벨을 발파진동의 평가척도로서 사용하고 있다. 진동레벨은 인체가 느끼는 감각량을 나타내는 단위로서 진동의 크기와 인체가 느끼는 감각량이 비례하지 않기 때문에 이를 고려하여 대응척도로 환산한 단위이며, 가속도레벨을 주파수 대역별로 인체감각 보정치를 다르게 보정하고 있기

때문에 구조물의 손상을 표시하거나 평가하는 물리적 척도로 사용하기에는 곤란한 점이 있다.

현행 소음·진동규제법에서는 인체에 미치는 영향만을 고려하여 수직성분(Z축)을 측정하도록 하고 있으나, 발파진동이 건축구조물에 미치는 영향은 수직 성분 보다는 수평성분이 더 큰 피해를 발생시키는 경우도 있다. 또한 국제표준기구(ISO)에서는 진동에 대한 노출시간이 짧으면 허용기준을 높게 정하고 있다. 따라서 발파진동은 진동의 지속시간이 짧기 때문에 노출시간을 고려하여 허용기준을 높은 수준으로 설정하여야 하는데도 이를 반영하지 않고 있는 실정이다.⁽¹⁾ 대부분의 공사현장에서는 발파진동의 평가척도로서 진동속도를 사용하고 있기 때문에 발파진동으로 인한 민원 제기 시 발파진동의 피해를 규명하는데 어려움이 있고, 이를 판정하는데 모호한 경우가 많다.

따라서 이 연구에서는 경사진 도심지 공사장 특성을 고려하여 지면높이 및 구조물 높이에 따라 발파진동의 진동레벨과 진동속도를 측정하여 변화를 파악하

* 책임저자 : 정희원, 서울시보건환경연구원

E-mail : lys0716@seoul.go.kr

Tel : (02)570-3393, Fax : (02)570-3394

* 정희원, 서울시립대학교 환경공학부

고, 진동레벨이 구조물에 대한 피해를 평가하는데 있어서 문제점이 없는지 이들의 상관성 및 실측진동레벨과 변환식에 의한 진동레벨과의 차이를 비교 분석해 보았다.

2. 조사 연구 방법

2.1 조사지점

이 연구는 서울시내 아파트신축공사장을 중심으로 조사하였다. 이 지역은 중생대 쥐라기의 흑운모 화강암이 기반암을 이루고 있고, 또한 신생대 제4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다. 암질은 조립의 연결 또는 중경질 암반으로 분포하고 있으며, 지표층에는 풍화작용에 의해 생성된 마사토가 부분적으로 덮여 있고, 지표층으로부터 심도가 깊어질수록 절리와 균열이 적은 암반이 분포하고 있다. 또한 지형은 북사면으로 10도의 경사를 이루고 있다.

Fig. 1은 진동전파 매질인 지반의 주상도이다.

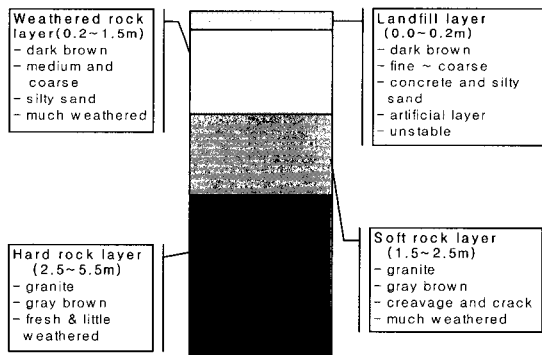


Fig. 1 Drilling log drawing

Table 1 Specifications of blasting field

Class	Ground measurement	Structure measurement
Drill hole diameter(mm)	45	45
Drill hole depth(m)	2.5	1.5
Burden(m)	1.0	0.6
Hole space(m)	1.0	0.6
Charge per hole(kg)	0.75	0.25
Sub-drilling(m)	0.2	0.2
Stemming(m)	1.6	1.2
Explosives	Newmite Plus 32 mm	
Detonators	Hi-DETO MS ID	

2.2 측정기기

이 연구에서는 건축구조물 및 사람에 미치는 영향을 각각 평가하기 위해 2종의 발파진동 계측장비를 사용했다. 진동계는 건축구조물의 피해정도를 평가하기 위한 장비로서 진동속도와 소음을 동시에 측정할 수 있는 DS-677(InstanTel, Canada) 4대를 사용했다. 그리고 사람에게 미치는 피해정도를 계측하는 진동레벨계는 소음·진동공정시험방법의 사용기준에 부합되는 진동공해 측정 장비 VM-52 (Rion, Japan) 4대를 사용했다.

2.3 조사방법⁽⁶⁾

지면측정은 천공장 2.5m, 천공경 43mm를 수직천공한 후 Emulsion계 폭약인 Newmite Plus 32mm 750g을 장약하고, 공의 나머지 부분은 모래로 메지한 후 12회 발파하였다. 발파와 동시에 발파원으로부터 25m 및 50m 떨어진 4지점에서 진동속도와 진동레벨을 측정하였다. 발파설계는 벤치발파로 했으며, 자유단면은 남서향을 향하고 있었다. 4번 지점은 자유단면의 상단부로서 가장 낮은 1번 지점보다 10m 내외 높았고, 발파원과 동일한 암반이 연속된 지점이었다. 3번 지점은 4번 지점과 같은 암반이지만 풍화암층이 5cm 정도 덮여 있었으며, 1번 지점보다 5m 정도 높은 지점이었다. 그리고 1, 2번 지점은 자유단면 하단부에 위치하고, 2번 지점은 암반, 1번 지점은 마사토가 덮여 있는 지점이었다.

구조물 측정은 지면측정 4번 지점의 연장선을 선정하여 발파원으로부터 25m, 50m 이격된 거리에서 1.5m를 수직천공하고, 공당 장약량 250g을 장약하여 6회 발파하였다. 측정지점은 신축중인 고층아파트의 지면, 1층, 3층 및 5층을 선정하여 4개 지점 동시에 진동속도 및 진동레벨을 측정하였으며, 발생원을 향하고 있는 아파트 거실 앞에 위치한 베란다 중간 지점을 선정했다.

Table 1은 이 연구에 적용된 발파설계 조건에 관한 사항이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 지면의 진동속도와 진동레벨

Fig. 2는 발생원으로부터 25m, 50m 이격된 지면에서 계측한 PVS 진동속도와 진동레벨과의 지점별

비교이다. Fig. 2(a)에서 진동속도 계측범위는 0.420~0.813 cm/sec, 진동레벨 계측범위는 57.1~68.5 dB(V)로 나타났고, Fig. 2(b)에서 진동속도 계측범위는 0.129~0.283 cm/sec, 진동레벨 계측범위는 44.6~58.4 dB(V)로 나타났다. Fig. 2(a)의 지점 1에서 진동레벨이 57.1 dB(V)일 경우 진동속도는 0.434 cm/sec이었으나, 지점 2에서는 진동레벨이 61.3 dB(V)로 지점 1보다 4.2 dB(V) 높은데도 불구하고 진동속도는 0.420 cm/sec로 0.014 cm/sec 낮았다. 그리고 3, 4번 지점은 진동레벨이 높은 경우 이와 비례하여 진동속도도 높게 나타났다.

Fig. 2(b)는 발생원으로부터 50 m 이격된 지면에서 계측한 PVS 발파진동속도와 발파진동레벨의 지점별 비교이다. Fig. 2(a)와는 다르게 지점 1에서의 진동레벨이 48.2 dB(V)일 경우 진동속도는 0.129 cm/sec이었으나, 지점 2에서는 진동레벨이 44.6 dB(V)로 지점 1보다 3.6 dB(V) 낮은데도 불구하고 오히려 진동속도는 0.167 cm/sec 높았다. 대부분의 경우 지반 진동파의 진폭은 진동원에서 거리가 멀어질수록 감소하

나, 어떤 경우에는 지반의 성층 특성상 지반내 특정한 지층 또는 경로를 따라 큰 진동에너지가 전달됨으로 인하여 지반진동의 크기는 오히려 진동원에서 가까운 지점보다 먼 지점에서 크게 될 수도 있다. 이와 같은 현상은 지반내에 큰 규모의 암맥이 멀리 떨어진 수진체와 연결되어 있는 경우로 이러한 지층은 진동안내효과를 일으킴으로서 더 큰 진동이 발생할 수 있고, 단층대 및 파쇄대와 같은 진동차단대의 존재나 진동파가 전파 경로상에 놓인 구조물들의 상호작용으로 회절 또는 간섭됨으로 인해 발생할 수도 있기 때문⁽²⁾으로 판단된다. 3번, 4번 지점은 Fig. 2(a)와 같은 패턴을 보였다.

이처럼 진동속도 크기에 따라 진동레벨 크기가 비례하지 않으므로 계속해서 두 단위를 혼용해서 사용한다면 혼란만을 가중시킬 것으로 사료된다. 발파진동을 가속도 단위로 평가하고자 한다면 건축구조물에 미치는 영향은 가속도레벨(dB)을 사용하고, 사람이나 가축의 경우에는 가속도레벨에 주파수대역별 인체감각보정치를 적용한 수직진동레벨(dB(V))을 사용할 수도 있다. 그렇지만 건축구조물에 대한 피해는 수직진동 뿐만 아니라 수평진동도 영향을 주기 때문에 X, Y, Z축의 단일 성분으로 평가되는 가속도레벨로 평가하기에는 다소 무리가 있다. 따라서 가장 이상적인 발파진동 평가방법은 건축구조물의 경우 진행성분, 법선성분, 수직성분이 벡터합으로 구해지는 PVS 진동속도를 사용하는 것이 타당하다고 판단된다.

그리고 공사관계자들은 PVS 진동속도가 0.1 cm/sec일 경우 수직진동레벨이 70 dB(V)을 초과한다고 주장하고 있지만, 실제 수직진동레벨은 45~50 dB(V)로 계측되어 상당한 차이가 있는 것으로 평가되었으며,

$$dB(V) = 20 \log V + 71 \text{ dB} \quad (1)$$

$$V = \text{mm/sec}$$

이들은 주로 (1)과 같은 식으로 표현되는 예지마 변환식⁽³⁾에 의한 진동레벨을 dB(V)로 잘못 이해하고 있는 것으로 판단되었다.

Fig. 3은 측정지점별로 실측한 진동레벨과 예지마 변환식에 의한 진동레벨을 비교한 그림이다. 예지마 변환식으로 구한 진동레벨이 3(a)에서는 1번 지점 26.6 dB(V), 2번 지점 22.2 dB(V), 3번 지점 22.5 dB(V), 4번 지점 21.0 dB(V)만큼 높게 나타났으며,

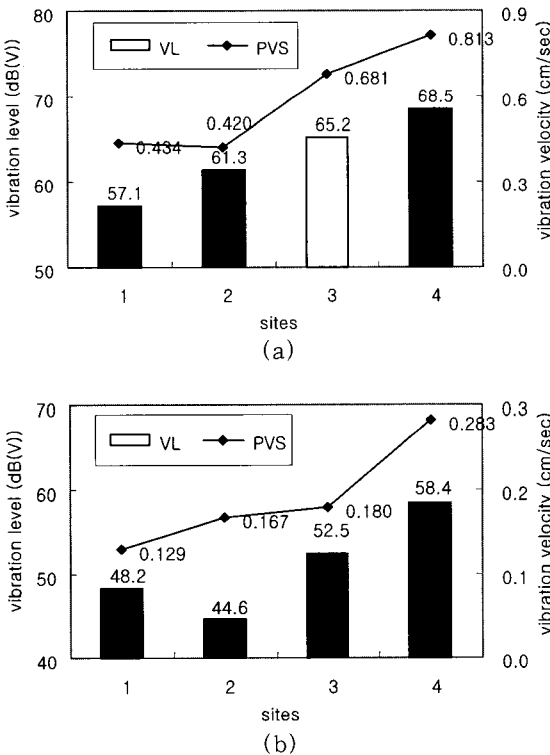


Fig. 2 Comparison of vibration level on the ground and PVS velocity at (a) 25 m and (b) 50 m from blasting source

3(b)에서는 1번 지점 25.0 dB(V), 2번 지점 30.9 dB(V), 3번 지점 23.6 dB(V), 4번 지점 21.6 dB(V) 만큼 높았다. Ejima 변환식은 최대속도 진폭으로부터 수직진동레벨을 산정하는 경우 수직진동에 대해서는 주파수가 8 Hz 이상이고, 연속 정현파형일 경우에 한하여 변환된 수직진동레벨과 실측한 수직진동레벨과의 상관성이 성립한다는 이론적인 변환식으로 발파진동과 같이 지속시간이 짧은 충격진동파형에 대해서는 수직진동레벨이 과대평가되는 경향이 있다⁽⁴⁾는 사실과 일치함을 보였다. 이와 같이 진동레벨이 과대평가되는 원인은 동일 화약이나 뇌관이라 할지라도 진동파형에 대한 뇌관의 기폭오차, 지질조건 등에 따라 변화하는 진동의 주파수에 따른 계속시간이 배제⁽⁵⁾되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 4는 높이에 따른 측정지점별 상관성을 나타낸 것이다. 4(a)는 1번 지점으로 상관계수 0.8574, 4(b)는 2번 지점으로 상관계수 0.9195, 4(c)는 3번 지점으로 상관계수 0.984로 매우 양호한 상관성을 보였지만, 4(d)는 측정위치가 가장 높고, 진동레벨 및 진동속도가 가장 높게 나타난 4번 지점으로 상관계수가 0.6636으로 상관성이 가장 낮게 나타났다. 이와 같은 결과는 25m와 50m로 구분하여 1번 지점부터 4번 지점까지의 측정값을 산술평균하여 상관성을 비교⁽⁶⁾

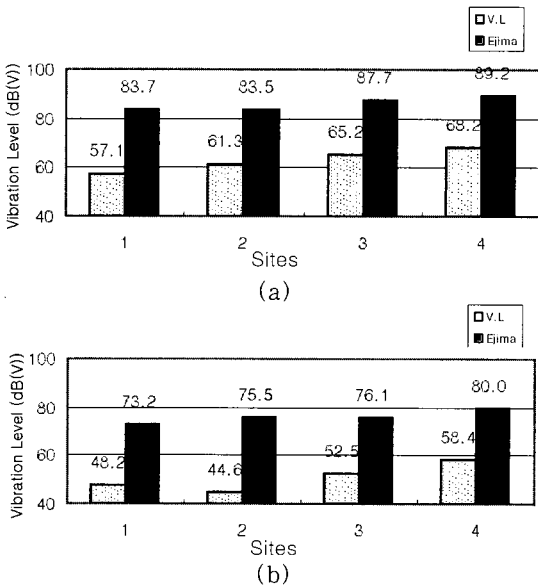


Fig. 3 Comparison of measured and converted vibration levels on the ground by sites at (a) 25 m and (b) 50 m from blasting source

한 경우보다 측정지점이 낮은 1번 지점부터 3번 지점까지는 매우 양호하였으나 발파진동이 높게 나타난 4번 지점은 낮게 나타났다.

3.2 구조물의 진동속도와 진동레벨

Fig. 5는 발생원으로부터 25 m, 50 m 떨어진 구조물에서 계측한 PVS 진동속도와 진동레벨의 지점별 비교이다. Fig. 5(a)에서 진동속도 계측범위는 0.024 ~ 0.112 cm/sec, 진동레벨 계측범위는 41.4 ~ 52.2 dB(V)로 나타났고, Fig. 5(b)에서 진동속도 계측범위는

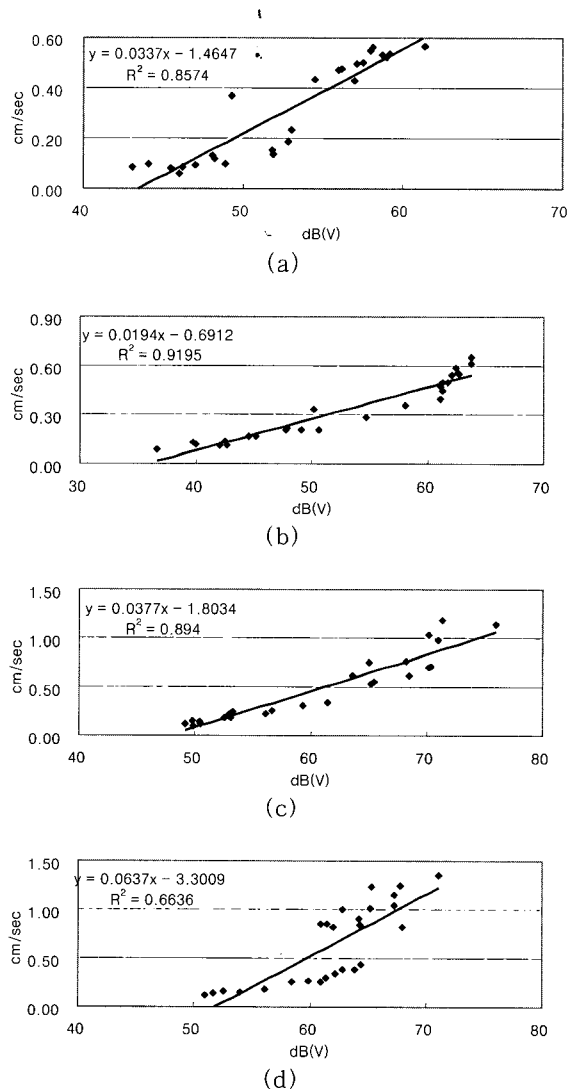


Fig. 4 Correlation of vibration level and PVS velocity on the ground at (a) 1st site, (b) 2nd site, (c) 3rd site and (d) 4th site

0.020~0.079 cm/sec, 진동레벨 계측범위는 37.4~49.3 dB(V)로 나타났다. 지면과 1층의 발파진동은 수직진동레벨이 높을 경우 이와 비례하여 진동속도도 높게 나타났다. 그러나 25 m 떨어진 지점의 3층에서 계측한 발파진동은 수직진동레벨이 41.4 dB(V)일 경우 진동속도는 0.031 cm/sec이었으나, 5층에서는 진동레벨이 42.0 dB(V)로 3층보다 0.6 dB(V) 높은데도 불구하고 진동속도는 0.024 cm/sec로 0.007 cm/sec 낮았다. 또한 50 m 떨어진 지점의 3층에서 계측한 발파진동은 진동레벨이 40.8 dB(V)일 경우 진동속도는 0.020 cm/sec이었으나, 5층에서는 진동레벨이 37.4 dB(V)로 3층보다 3.4 dB(V) 낮은데도 오히려 진동속도는 0.022 cm/sec로 0.002 cm/sec 높았다. 발파진동은 암질, 지형, 암반구조에 따라서 진동속도와 진동레벨에 상당한 차이가 있는 것으로 판단되었으며, 구조물에서 계측한 발파진동의 경우 지면과 1층은 진동레벨 단일 항목으로 인체 및 구조물에 미치는 영향을 평가하는 데는 문제점이 없을 것으로 사료되나, 3층 이상에서는 진동레벨과 진동속도의 비례관계가 거리에 따라 차이가 있으므로 진동레벨 단일 항목으로 발파진동을 평가하는 것은 다소 문제가 있을 수 있다고

판단된다.

Fig. 6은 구조물에서 측정지점별로 실측한 진동레벨과 에지마 변환식에 의한 진동레벨을 비교한 그림이다. 에지마 변환식으로 구한 진동레벨이 6(a)에서는 발파원으로부터 25 m 떨어진 지점의 비교로서 지면 21.7 dB(V), 1층 23.6 dB(V), 3층 22.3 dB(V), 5층 17.9 dB(V) 만큼 실측진동치보다 높게 나타났으며, 6(b)에서는 50 m 지점으로 지면 19.2 dB(V), 1층 18.9 dB(V), 3층 15.3 dB(V), 5층 19.6 dB(V) 만큼 높았다.

발파진동을 평가할 때 진동레벨 단일 항목만으로 인체 및 건축구조물에 대한 영향을 평가하는 데는 많은 문제점이 있을 것으로 사료된다. 왜냐하면 지반진동의 진폭이 동일한 경우라도 지반의 강성도가 낮을수록 진동에 의한 구조물 손상 가능성은 높아지기 때문이다. 따라서 진동속도가 A일 때 진동레벨이 B라고 일방적으로 규정하여서는 안 될 것으로 판단된다. 결국 발파진동을 평가하기 위해서 인체 및 가축 등에 미치는 영향에 대한 평가단위는 수직진동레벨 dB(V)로 규정하고, 건축 및 시설물에 대한 물적인 피해 평가단위는 진동속도 cm/sec로 규정하여 발파진동이 미치는 대상물에 따라 평가단위를 이원화는 것이 효율적이라

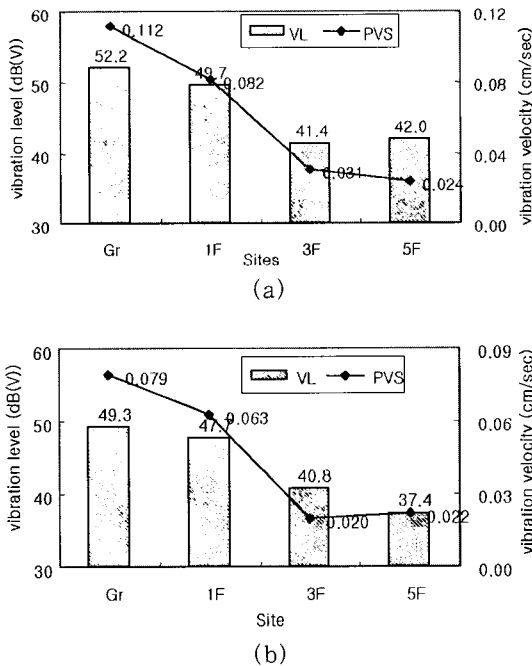


Fig. 5 Comparison of vibration level and PVS velocity on apartment at (a) 25 m and (b) 50 m from blasting source

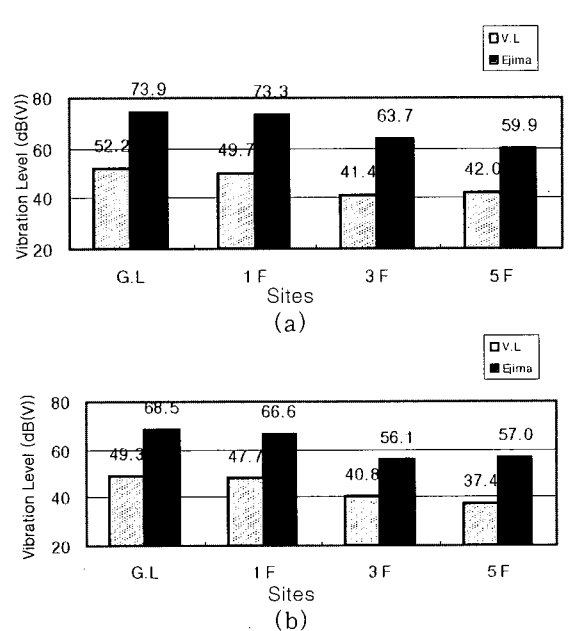


Fig. 6 Comparison of measured and converted vibration levels on the apartment by sites at (a) 25 m and (b) 50 m from blasting source

생각된다. 또한 민원인 및 시공사는 발파진동에 관한 진동레벨 및 진동속도의 개념차이를 확실히 알 수 있을 것이고, 공사장을 감독하는 감리회사 및 관공서에서는 민원에 대한 구체적이고 명백한 민원내용을 알 수 있어 민원해결에 효과적일 것으로 판단된다.

Fig. 7은 높이에 따른 측정지점별 상관성을 나타낸 것이다. 7(a)는 지면에 대한 것으로 상관계수 0.7965, 7(b)는 1층에 대한 것으로 상관계수 0.7439로 양호한 상관성을 보였지만, 7(c)는 3층에 대한 것으로 상관계수 0.2438, 7(d)는 5층에 대한 것으로 상관계수가 0.0018로 상관성이 없었다. 이와 같은 결과는 25 m와

50 m로 구분하여 측정값을 산술평균한 상관성⁽⁶⁾보다 지면과 1층의 경우는 높게 나타났지만 3층과 5층의 경우는 매우 낮게 나타났다.

4. 결 론

지면 및 구조물 높이에 따라 진동레벨과 진동속도를 측정하고, 이들의 상관성 및 실측진동레벨과 변환식에 의한 진동레벨과의 차이를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 진동속도와 진동레벨 크기는 정비례관계가 없었으며, 진동속도 0.1 cm/sec일 경우 측정된 수직진동레벨은 45~50 dB(V)이었다.
- (2) 측정지점별 진동레벨과 에지마 변환식에 의한 진동레벨과의 차이는 에지마식에 의한 진동레벨이 지면의 경우 21.0~30.9 dB(V), 구조물인 경우 15.3~23.6 dB(V)만큼 높았다.
- (3) 측정지점별 상관성은 측정위치가 낮은 지점은 상관성이 높게, 측정위치가 높은 지점은 상관성이 낮게 나타났다.
- (4) 이상과 같은 결과로 평가대상물에 따라 평가 단위를 이원화하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) 류창하, 선우춘 외, 1994, "안전관련 구조물 근접 공사시 발파진동 허용기준의 적용성에 관하여", 한국암반역학회, 제 4 권, pp. 287~297.
- (2) 우재윤, 1995, "우리나라 지반진동 허용기준의 제정 및 적용에 관한 제안(I)", 한국지반공학회, pp. 117~141.
- (3) (社)日本騒音制御工學會技術部會編, 1996, 發破による音と振動, 山海堂, 東京, pp. 72~75.
- (4) 김남수, 양형식, 2000, "발파소음의 예측기법과 환경규제기준으로의 변환연구", 화약발파, 제 18 권, 제 2 호, 한국화약기술협회, pp. 14~22.
- (5) 김재영, 홍용기 외, 2001, "주민생활환경에 있어서 진동레벨에 의한 발파진동의 평가", 대한환경공학회 2001 춘계학술연구발표회 논문집(II), pp. 141~144.
- (6) 이연수, 장서일, 2004, "도심지 발파공사장의 발파진동 특성", 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권, 제 7 호, pp. 632~638.

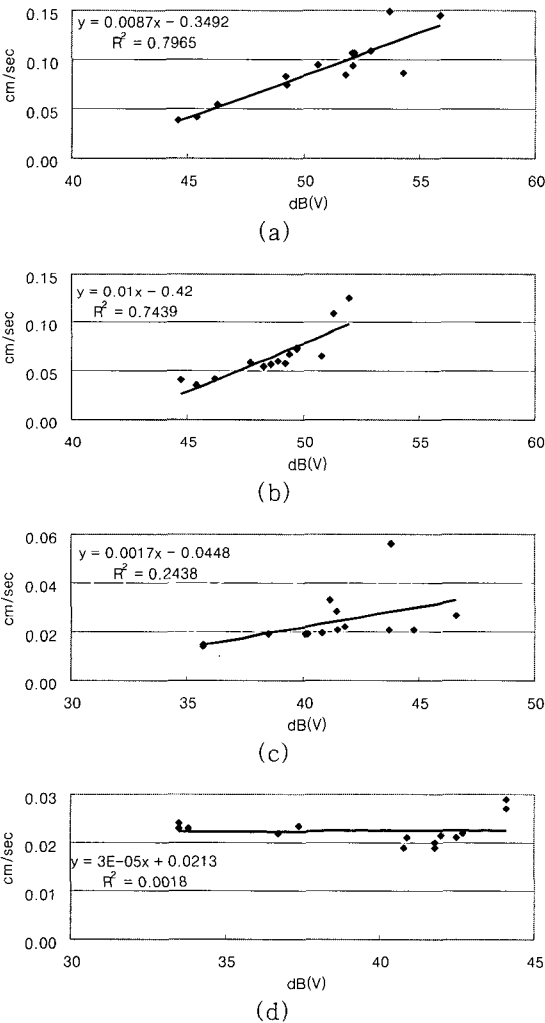


Fig. 7 Correlation of vibration level and PVS velocity on the apartment at (a) ground level, (b) 1st floor, (c) 3rd floor and (d) 5th floor