

도심지 발파공사장의 발파진동 특성

The Characteristics of Blasting Vibration in the Construction of Apartment and Buildings in Urban Area

이 연 수* · 장 서 일**

Yeon-Soo Lee and Seo-II Chang

Key Words : Blasting Vibration(발파진동), Vibration Level(진동레벨), Vibration Velocity(진동속도), Dominant Frequency(탁월주파수)

ABSTRACT

In order to evaluate the effect of blasting vibration in buildings and it's resident located around blasting construction field in urban area, blasting vibration characteristics were measured the vibration level, vibration velocity. The 250g and 750g of charged powder were used at the apartment and at the ground, respectively.

In the measurement of the ground, Z(perpendicularity) axis was the highest value in vibration level, but vertical axis was the highest value at 25m point and longitudinal axis was the highest value at 50m point in vibration velocity. The amount of measurement was high value when measuring point is higher than blasting source, while that of measurement was low value when measuring point is lower than blasting source. In the measurement of the apartment, Z axis was the highest value in vibration level, but in vibration velocity transverse axis was the highest value at ground, was vertical axis at 1st floor, was longitudinal axis at 3rd floor and was vertical and longitudinal axis at 5th floor. The vibration level and the vibration velocity of 50m point showed higher correlation value than 25m point at the ground, but those of 25m point showed higher correlation value than 50m point at the apartment.

1. 서 론

도심지에서의 아파트 및 고층건물 신축공사장에서는 보안 시설물이 근접해 있음에도 불구하고 충분한 양의 지하공간을 확보하기 위하여 근거리 발파작업이 이루어지고 있다. 이때 발생하는 소음·진동이 환경공해로 인식됨에 따라 피해보상을 요구하는 주민들의 민원과 저항에 부딪히는 사례(1)가 빈발하고 있어 공사 진행에 차질을 초래하는 경우가 많다. 현재 발파진동은 소음·진동규제법에서 dB(V)로 규제하고 있는데 이 단위는 대부분의 공사관계자 및 이해관계인에게는 생소한 용어이다. 그렇기 때문에 공공기관에서 발주하는 공사조차도 dB(V)를 기준으로 하지 않고, 속도 단위인 cm/sec(카인)를 발파진동의 시방서 기준으로 채택하고 있는 등 발파진동의 법적용에 상당한 문제점(2)이 있다. 또한 최

근 개정된 소음·진동규제법(3)은 건설소음·진동 규제기준을 삭제하고 생활소음·진동 규제기준에 합병하여 개정하였다. 이것은 소음·진동 민원 중 가장 많은 빈도수를 차지하고 있는 건설공사장의 소음·진동특성을 고려하지 않고 규제기준치를 제시하여 규제(4)하고 있어, 시공사들은 혼란과 갈등을 일으키고 있는 실정이라 국내 여건을 감안한 새로운 발파진동의 평가 및 규제기준의 제정이 시급하다 하겠다.(5) 따라서 본 논문은 발파공사장에서 발생하는 진동속도와 진동레벨이 인체 및 구조물에 미치는 영향을 조사하기 위하여 발파진동을 측정거리별 및 발파위치별로 동시에 측정하는 모든 인자들 간의 상호 관련성과 발파속도의 vertical, longitudinal, transverse의 PPV에 대한 동특성과 진동레벨의 X, Y, Z축에 대한 동특성을 고찰하였다. 그리고 진동속도를 진동레벨로 환산한 예측치와 실측한 진동레벨과의 비교 및 이들 양자간의 상호관련성에 있어서의 문제점을 비교 검토하여 민원인과 시공사 사이의 분쟁을 줄이고, 진동피해에 대한 객관적이고 정확한 자료를 제시함으로써 신속하게 민원을 처리하여 불필요한 공사지연 방지에 기여하고자한다.

* 서울시보건환경연구원
E-mail : lys0716@seoul.go.kr
Tel : (02)570-3388, Fax : (02)570-3384

** 서울시립대학교

2. 계측 및 조사방법

2.1 측정위치

본 연구의 대상지역은 서울시내의 재개발아파트공사장을 중심으로 조사되었다. 이 지역은 중생대 주라기의 흑운모 화강암이 기반암을 이루고 있으며, 신생대 제4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다. 지표층에는 풍화작용에 의해 마사토가 부분적으로 덮여 있고, 지표층으로부터 심도가 깊어질수록 절리와 균열이 적은 암반이 분포하고 있으며, 지형은 경사가 15~20°를 이루고 있다. 깊이에 따른 층별 분포는 상부로부터 매립토층, 풍화암층, 연암층, 경암층 순으로 구성되어 있으며, 주변에는 단독 및 연립주택이 3면에 매우 근접하여 있고, 본 연구에서 구조물측정 평가에 적용된 신축아파트는 20여 미터 떨어져 위치하고 있다.

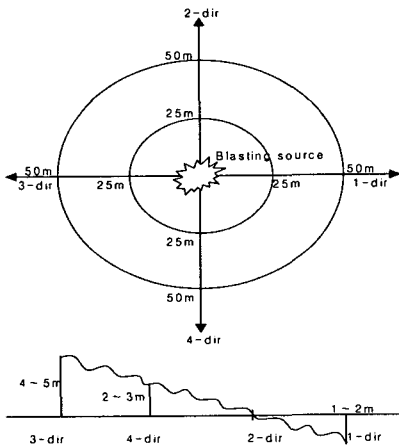


Fig. 1. The map of measuring sites

2.2 측정장비

본 연구에서는 구조물 및 사람에게 미치는 영향을 평가하기 위해서 2종의 계측기를 사용했다. 사용된 장비로는 발파진동을 시간에 따라 변위, 속도 및 가속도 등을 절대단위로 계측하는 진동계(vibration meter)와 비교단위인 가속도레벨 및 진동레벨을 계측하는 진동레벨계(vibration level meter)를 사용했다. 진동계로 사용된 장비는 진동변위 성분, 진동속도 성분, 진동가속도 성분, 발파소음도 및 주파수를 동시에 측정하여 기계 자체에 부착된 프린터로 현장에서 즉시

출력하거나 데이터를 저장한 후 사무실에서 컴퓨터를 이용하여 출력할 수 있는 Blastmate Series II DS-677 (InstanTel, Canada) 4대를 사용했다. 진동레벨계는 공해진동의 평가와 관련된 지면진동의 계측에 사용되는 측정기로서 인체가 진동을 받을 때 그 진동의 성질 및 진동을 받는 장소에 따라 다르게 느껴지고, 특히 주파수에 따른 인체감각보정에 따라서도 다르게 느껴지는 Vibration Level Meter VM-52(Rion, Japan) 4대를 사용했다. 이 장비는 건설진동, 생활진동, 도로진동 및 철도진동 등 공해진동을 측정할 수 있는 장비로서 가속도레벨 및 진동레벨을 선택적으로 측정할 수 있다.

2.3 측정방법

측정은 발파대상 암반을 굴착기로 지름 43mm를 수직천공한 후 그 곳에 emulsion계 폭약인 Newmite Plus 32mm를 250g과 750g을 장약하고, 장약 상부는 모래로 전색하였다. 정확한 측정을 위하여 일단 발파를 하였으며, 발파 동시에 진동계 및 진동레벨계로 10~15회 측정하였다. 지면 측정은 2.5m를 수직천공한 후 공당 750g의 장약량을 충전하고, 동시에 지면 1, 2, 3, 4번 지점으로부터 25m와 50m 떨어진 거리에서 각각 계측하였다. 또한 구조물에서의 측정지점은 지면측정의 3번 지점의 연장선상을 선택하였으며 주변 안전시설물을 고려하여 1.5m를 수직천공한 후 공당 250g의 장약량을 충전하였다. 동시에 지면 및 구조물의 1층, 3층, 5층으로부터 25m 및 50m 떨어진 거리에서 계측하였다. 진동계 계측항목은 Longitudinal, Transverse, Vertical의 3방향의 PPV와 진동레벨계 측정항목은 진동레벨의 X, Y, Z축의 3성분이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 지면에서 측정한 발파진동

발파진동의 지면 측정지점은 폭발원을 중심으로 동서남북의 4방향을 선정하였다. 각 지점의 발파진동 측정 결과치는 다음과 같았다.

그림 2는 폭발원에서 25m 떨어진 1, 2, 3, 4번 지점에 대한 X, Y, Z축의 진동레벨 특성을 나타낸 것이다. 1번 지점의 X축을 제외하면 각 축의 지점별 크기는 대체로 측정위치가 높은 지점은 진동레벨이 높게, 낮은 지점은 낮게 나타나는 유형을 보였다. 동일한 장약량 사용 및 동일한 측정거리에서 발파진동의 계측 결과가 상이하게 나타난 것으로 보면 발파진동의 크기는 공당 장약량 및 발파패턴에 의해서만 좌우되는 것이 아니라 지반진동이 전파되는 매질 및 계측 위치에 따라서도 상당한 변화가 있는 것으로 보인다.

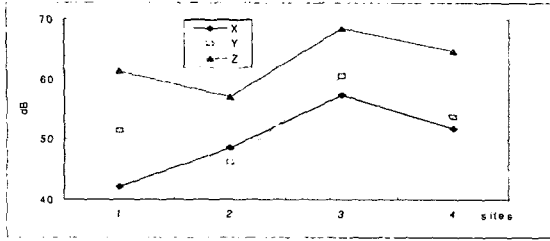


Fig. 2. The comparison of vibration level by sites at 25m on the ground.

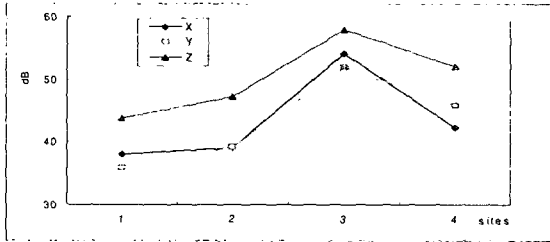


Fig. 3. The comparison of vibration level by sites at 50m on the ground.

그리고 각 성분별 진동레벨의 크기는 4지점 평균값으로 Z축이 62.9 dB(V)로 가장 높았고, Y축과 X축은 53.0 dB(H), 50.0 dB(H)로 나타났다. 그림 3은 50m 떨어진 각 지점의 진동레벨 특성을 나타낸 것으로 각 성분의 지점별 크기 또한 그림 2와 비슷하게 높은 지점은 높게 낮은 지점은 낮게 나타났다. 이들 발파진동의 진행과 중에서 P파가 가장 먼저 도착하고, 그 다음 S파, R파가 도착되는데 P파는 단순파동을 유발하므로 앞 방향 외의 자유면을 만나면 진행방향과 수직되게 진동하는 S파를 발생시킨다. 그리고 물체를 따라 이동하는 Rayleigh파는 P파와 유사한 성질을 갖고 있으며, L파는 S파와 비슷한 성질을 갖는 표면파들이다.(6)

그림 4는 25m 떨어진 각 지점의 T, V, L축 방향 및 PVS의 진동속도 특성이다. 각 성분별 진동속도의 평균 크기는 V축이 0.443 cm/sec로 가장 높았고, L축은 0.384 cm/sec 그리고 T축이 0.363 cm/sec로 가장 낮았다. 그림 5는 50m 떨어진 각 지점의 T, V, L축 방향의 진동속도의 특성을 나타낸 것으로 각 축 방향의 진동속도는 그림 4와 비슷했다.

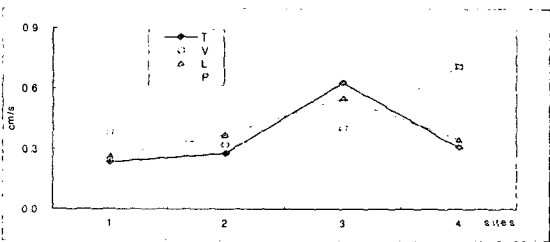


Fig. 4. The comparison of vibration velocity by sites at 25m on the ground.

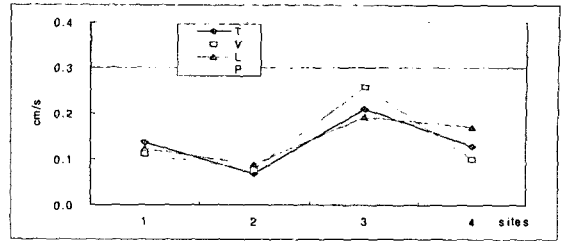


Fig. 5. The comparison of vibration velocity by sites at 50m on the ground.

전 지점의 성분별 진동속도의 평균 크기는 L축이 0.143 cm/sec로 가장 높았고, 다음으로 V축이 0.137 cm/sec 그리고 T축이 0.136 cm/sec로 가장 낮았으나 대체로 3축 방향이 비슷한 크기를 보였다. 각 성분의 지점별 크기는 진동레벨과 비슷하게 대체로 높은 지점은 높게, 낮은 지점은 낮게 나타나는 유형을 보였다.

일반적으로 암석에 압력을 가하면 가한 방향으로 종파의 전파속도는 빨라지고 가압 방향과 수직인 방향으로는 늦어지는 경향을 보이는데(7) 이때 전파속도의 이방성은 약 40~50%까지 나타내는 경우도 보고되고 있지만,(8) 암석의 조직, 결정, 배열 그리고 공극율과 같은 물성의 차이에 따라 횡방향의 전파속도가 초기 속도보다 더 빨라지는 경우도 보고되고(9) 있다. 또한 주파수 분석은 발파진동의 신호중에서 가장 미세한 주파수 대역을 찾는데 그 목적(10)이 있으며, 일반적으로 암석 발파에서 큰 진폭을 갖는 신호의 최대 주파수는 저주파수를 보이는 것(11)으로 알려져 있다. 대체적으로 25m 거리에서는 낮은 주파수가, 50m 거리에서는 높은 주파수가 지배주파수로 나타났으며 발파진동이 높게 나타난 지역은 낮은 주파수를 나타냈고, 낮은 발파진동을 나타내는 경우에는 높은 주파수를 나타냈다.

3.2 구조물에서 측정된 발파진동

대부분 도심지에서의 발파작업은 주변에 주택이나 상가 또는 다중이용시설물들이 산재하고 있기 때문에 이들 구조물에 미치는 발파진동의 영향분석을 정확히 평가하여 발파진동으로 인한 민원을 사전에 차단하는 것이 급선무이다. 구조물에 미치는 영향을 고찰하기 위해 측정지점은 발파공을 중심으로 지면측정 3번 방향의 연속선상에 위치하고 있는 신축중인 고층아파트의 지면과 1층, 3층 및 5층을 선정하였다.

그림 6은 25m 떨어진 아파트에서 각 지점의 X, Y, Z축의 진동레벨 특성을 나타낸 것이다. 각 성분의 지점별 크기는 대체로 지면이 가장 높게 나타났으며, 건물의 상층으로 갈수록 낮게 나타나는 유형을 보였다. 그리고 각 성분별 진동레벨의 크기는 4지점의 평균값으로 Z축이 46.3 dB(V)로 가장 높았다. 수평진동레벨은 1층에서는 Y축이 X축보다 높았고, 3층은 반대로 X축이 높았으며, 5층은 비슷했다. 그림 7은

50m 떨어진 아파트에서 각 지점의 X, Y, Z축의 진동레벨 특성을 나타낸 것으로 25m 지점과 마찬가지로 Z축이 가장 높았다. 그림 8은 25m 떨어진 아파트에서 각 지점의 T, V, L축 방향의 진동속도 특성을 나타냈다. 지면은 T축 방향이 0.1 cm/sec, 1층은 V축 방향이 0.064 cm/sec, 3층은 L축 방향이 0.07 cm/sec, 5층은 L축 및 V축 방향이 0.048 cm/sec로 나타나 진동레벨처럼 일정한 양상을 보여주지 못했다. 각 성분별 진동속도의 전체 지점의 평균크기는 V축 방향이

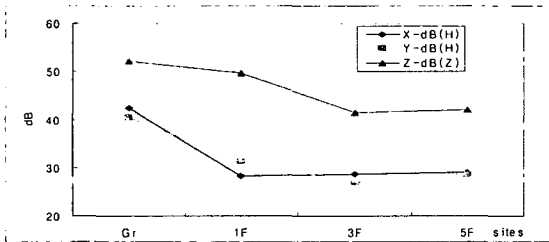


Fig. 6. The comparison of vibration level by sites at 25m on the apartment.

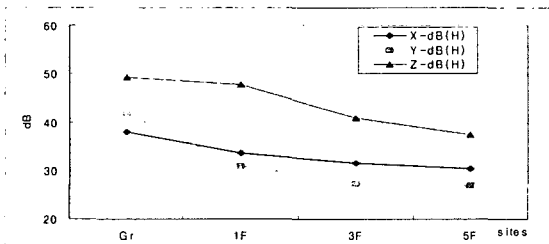


Fig. 7. The comparison of vibration level by sites at 50m on the apartment.

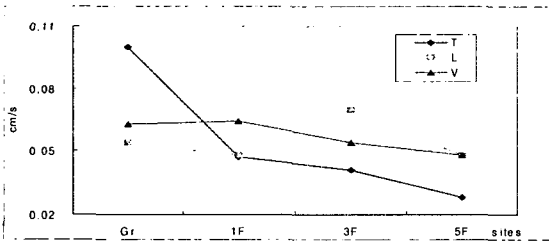


Fig. 8. The comparison of vibration velocity by sites at 25m on the apartment.

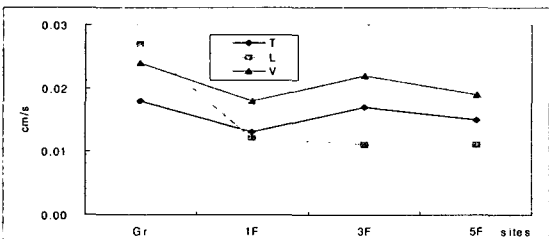


Fig. 9. The comparison of vibration velocity by sites at 50m on the apartment.

0.057 cm/sec로 가장 높았고, L축 방향은 0.055 cm/sec 그리고 T축 방향이 0.054 cm/sec로 가장 낮게 나타났지만 대체적으로 3방향 성분이 비슷했다. 그림 9는 50m 떨어진 아파트에서 각 지점의 T, V, L축 방향의 진동속도의 특성을 나타낸 것으로 각축 방향의 진동속도는 지면에서 L축 방향이 0.027 cm/sec로 가장 높게 나타났으나 1층에서는 의외로 제일 낮게 나타났다. 그리고 지면을 제외한 다른 지점에서는 V축 방향이 가장 높게 나타났고, 특이하게 1층보다 3층이 더 높게 나타났다.

지금까지의 계속 자료에서 구조물에서의 지반진동의 크기는 수직방향 성분이 항상 우세한 성분이 아닌 것으로 나타났으며, 지반진동은 전달하는 매질 및 구조물을 구성하고 있는 재료에 따라 수평성분들이 더 큰 영향을 미칠 수도 있는 것(12~14)으로 나타났다. 발파진동의 3축 방향 성분 중 일반적으로 수직성분이 우세하다고 보고되고 있으나 지형, 지질 및 전달매체에 따라 각기 다른 성분의 지반 진동파가 발생하게 되는데 진행성분이 우세하거나 접선성분이 우세한 경우도 있으므로 최대진동속도를 알기 위해서 발파진동측정기는 세 성분을 동시에 측정할 수 있어야 한다. 아파트에서의 측정위치별 주파수와 발파진동과의 관계는 25m 지점에서는 지면에서부터 3층까지는 유사한 경향을 보이다가 5층에서 갑자기 주파수가 낮아졌고, 50m 지점에서는 1층에서 급격하게 주파수가 커지다가 낮아져 일정한 패턴이 없었다. 이러한 이유는 폭원으로부터 거리가 멀어질수록 고주파 성분이 사라지면서 진동의 진폭도 서서히 감소되며 저주파 성분이 우세(15)하게 나타난 것으로 사료된다.

3.3 실측치와 예측치의 비교

구조물에 대한 피해는 진동속도로 피해 정도를 나타내지만 인체에 대한 피해는 진동레벨로 평가하는 방법이 일반적이다. 단순히 최대진동속도로 진동레벨을 예측하는 경우 수직진동에 대해서는 변환식인 Ejima 식을 사용하고, 최대 진폭과 진동 파형의 계속시간으로 진동레벨을 예측하는 경우는 Vanmarcke 식을 사용한다. 다음은 실측한 진동속도를 진동레벨로 변환시킨 값과 실측한 진동레벨과의 비교이다.

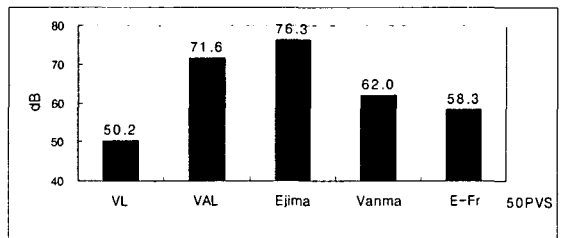


Fig. 10. The comparison of actual and prediction vibration level to PVS velocity at 25m on the ground.

그림 10은 25m 떨어진 지면에서 실측한 진동레벨과 실측한 PVS 진동속도를 진동레벨로 변환시킨 값과의 비교이고, 그림 11은 50m 떨어진 지면에서의 비교이다.

Ejima 식은 최대속도 진폭으로부터 진동레벨을 산정하는 경우 연직진동에 대해서는 주파수가 8Hz 이상이고 연속 정현파형일 경우에 예측한 진동레벨과 실측한 수직진동레벨의

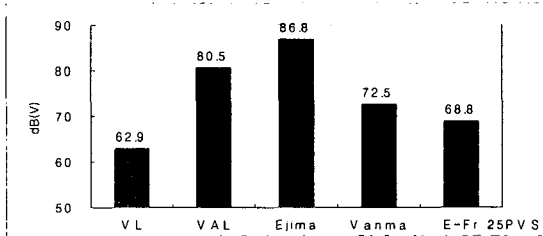


Fig. 11. The comparison of actual and prediction vibration level to PVS velocity at 50m on the ground.

상관성이 성립한다는 이론적인 변환식으로 발파진동과 같이 지속시간이 짧은 충격진동파형에 대해서는 진동레벨이 과대평가(16) 되는데, 실제 24.0~26.3 dB(V)의 진동레벨이 과대평가되었다. 이러한 문제점을 보완하고 보다 정확한 진동레벨을 예측하기 위하여 최대 진폭과 진동 파형의 계속시간으로 진동레벨을 구하는 Vanmarcke 식이 사용되고 있다. 이 식은 Ejima 식보다는 실측한 진동레벨에 상당한 근사치를 나타냈으나, 9.6~12 dB(V)의 진동레벨이 과대평가되었다. 그리고 Ejima 식에 의해 구한 예측값에서 주파수대역별 인체감각을 보정한 진동레벨은 5.9~8.1 dB(V)의 진동레벨이 과대평가되었다. 마지막으로 실측한 진동가속도레벨에 주파수대역별 인체감각을 보정하는 관계식으로 구한 진동레벨은 -0.4~3.4 dB(V)의 진동레벨이 과대평가되었다. 지금까지의 고찰에서 지면자료의 실측치와 예측치 비교에서 그 차이는 Ejima 식 값이 가장 높았고, 다음은 진동가속도레벨, Vanmarcke 식, Ejima 식으로 구한 값에서 주파수대역별 인체진동감각을 보정한 값, 실측한 진동가속도레벨에 인체감각 보정한 값 순으로 나타났다. 그리고 모든 비교에서 25m 거리보다는 50m 거리에서 구한 값이 더 높게 나타났다.

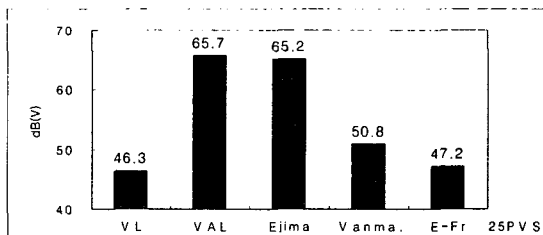


Fig. 12. The comparison of actual and prediction vibration level to PVS velocity at 25m on the apartment.

그림 12는 25m 떨어진 아파트에서 실측한 진동레벨과 실측한 PVS 진동속도를 진동레벨로 변환시킨 값과의 비교이고, 그림 13은 50m 떨어진 아파트에서의 비교이다. Ejima 식에 의해 구한 진동레벨과의 차이는 19 dB(V)가 높게 과대평가되었고, Vanmarcke 식에 의해 구한 진동레벨과의 차이는 4.5 dB(V)의 진동레벨이 과대평가되었다.

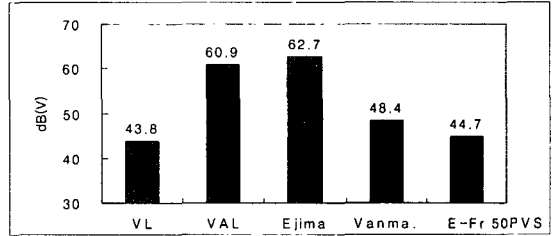


Fig. 13. The comparison of actual and prediction vibration level to PVS velocity at 50m on the apartment.

그리고 Ejima 식에 의해 구한 값에서 인체감각을 보정한 진동레벨은 0.9 dB(V)의 진동레벨이 과대평가되었으나 진동가속도레벨에 주파수대역별 인체감각을 보정한 진동레벨은 25m 지점에서는 1.4 dB(V), 50m 지점에서는 0.9 dB(V)의 진동레벨이 과소평가되었다. 이와 같이 진동레벨이 과대 또는 과소평가되는 원인은 동일 뇌관이라 할지라도 진동 파형에 대한 뇌관의 기폭오차, 지질조건 등에 따라 변하는 진동의 주파수에 따른 계속시간이 배제(16)되었기 때문으로 판단된다. 김 등(17)은 지면에서 Vanmarcke 식의 예측치와 실측치의 차이가 평균 5 dB(V)로 나타난다고 보고하였는데 이는 지면에서 측정된 본 논문 자료의 약 1/2 수준이었으나 구조물에서 측정된 측정치와는 비슷했다. 또한 Ejima 식의 예측치와 실측치 차이는 15~17 dB(V)로 본 논문의 지면 측정치와 비교하여 거의 10 dB(V)가 낮게 예측되었으나 구조물에서 측정된 진동레벨과는 비슷했다.

3.4 진동속도와 진동레벨과의 상관관계

그림 14 및 15는 25m와 50m 떨어진 거리에서 측정된 진동레벨과 PVS와의 상관관계를 나타낸 것으로서 25m 지점 및 50m 지점에서는 상관계수가 0.5792, 0.6656을 나타냈으며, 25m 보다는 50m에서 더 높은 상관성을 나타냈다. 김 등(17)은 Vanmarcke 식에 의한 예측치와 실측치의 비교에서 상관계수가 0.6536, Ejima 식에 의한 비교에서는 0.6114를 보고했는데 본 논문과 커다란 차이는 없었다.

그림 16 및 17은 25m와 50m 떨어진 아파트에서 측정된 진동레벨과 PVS측과의 상관관계를 나타낸 것으로서 25m 지점에서는 상관계수가 0.8666으로 상당히 양호한 상관성을 보였으나 50m 지점에서는 상관계수가 0.6881로 근거리보다는 상당히 낮게 나타났지만 지면에서 측정된 상관성보다는 높았다.

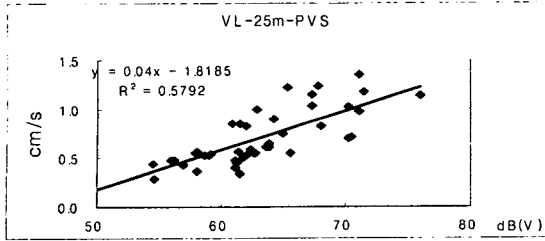


Fig. 14. The correlation of vibration level and velocity (PVS) at 25m on the ground.

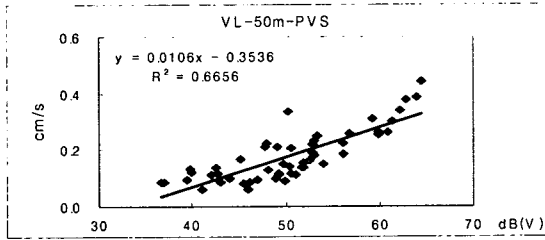


Fig. 15. The correlation of vibration level and velocity (PVS) at 50m on the ground.

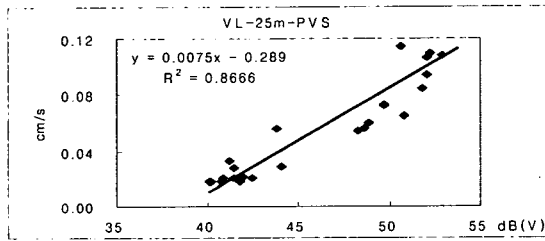


Fig. 16. The correlation of vibration level and vibration velocity(PVS) at 25m on the apartment.

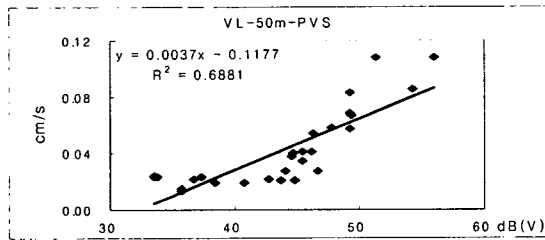


Fig. 17. The correlation of vibration level and vibration velocity(PVS) at 50m on the apartment.

지금까지 살펴본 예측치와 실측치 및 상관계수와의 관계에서 거리에 따른 측정치의 다양한 변화가 있음에도 불구하고 발파진동을 확실히 진동속도나 진동레벨로 적용한다는 것은 문제가 있는 것으로 나타났으며, 진동속도(cm/s)와 진동레벨(dB(V))과의 관계에서 나타난 바와 같이 상관계수가 낮은 데도 혼용해서 사용한다는 것 또한 문제가 있는 것 같다. 따라서 인·축 및 구조물에 대하여 각각의 기준을 정하여 규제하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

4. 결론

서울시내에 위치하고 있는 아파트건설공사장에서 부지내의 지상 및 부지의부의 신축중인 아파트에서 발파진동에 대한 진동레벨, 진동속도, 주파수 등에 관한 변화, 예측치 및 상관성을 조사한 결과 아래와 같았다.

1. 지면측정에서 진동레벨은 Z축이, 진동속도는 25m 지점은 V축, 50m 지점은 L축이 높았다.
2. 구조물측정에서 진동레벨은 Z축이 가장 높았고, 진동속도는 일정한 패턴이 없었다.
3. 실측 및 예측진동레벨과의 차이 비교에서 크기는 Ejima 식이 가장 높았다.
4. 진동속도와 진동레벨의 관계에서 상관성은 낮았다.
5. 발파진동이 전파매질 및 거리에 따라 변화가 있으므로 확실히 적용한다는 것은 문제가 있는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- (1) 환경부, 2003, "발파소음진동측정방법 및 규제기준 개선방안에 관한 연구", 서울시립대학교, pp. 1.
- (2) 황현주, 2003, "발파관련 소음진동 기준의 문제점과 대책", Noise and Vibration, pp. 1.
- (3) 환경부, 2003, 소음진동규제법.
- (4) 발파소음진동허용기준검토(안), 2002, 건설교통부, pp. 1.
- (5) 우재운, 1995, "우리나라 지반진동 허용기준의 제정 및 적용에 관한 제안(1)", 한국지반 공학회지, pp. 117-141.
- (6) 박연수, 박선준, 1996, "발파진동에 대한 구조물의 영향평가 및 대책", 한국강구조학회지, 제4권, 제4호, pp. 22-27.
- (7) 이상은, 1999, "Acoustic Emission에 의한 암석의 파괴원 위치 결정과 미소 파괴 메카니즘 연구", 박사학위논문, 강원대 대학원, pp. 47.
- (8) Lockner, D. A., Walsh, J. B. and Byerlee, J. D., 1977, "Changes in seismic velocity and attenuation during deformation of granite", Journal of Geophysical Research, Vol. 82, pp. 5374-5378.
- (9) Chandra S. Rai and Kenneth E. Hanson, 1988, "Shear-wave velocity anisotropy in sedimentary rocks : A laboratory study", Geophysics, Vol. 53, pp. 800-805.
- (10) Berthelot, J. M., Souda, M. B and Robert, J. L., 1993, "Frequency analysis of acoustic emission signals in concrete", Journal of Acoustic Emission, Vol. 11, No.1, pp.11-18.
- (11) Hardy, Jr. and Rao, M. V. M. s., 1989, "An evaluation of the amplitude distribution of AE activity in specimens stressed to failure", Proc. 30th US Rock Mechanism Symposium Balkema, Rotterdam, pp.261-268.
- (12) 양형식, 1992, "지표발파의 진동특성에 관한 기초연구", 터널과 지하공간, 한국암반학회지, 제2권, pp. 199-211.
- (13) 김대상, 이정인, 이희근, 1991, "발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용진동치 결정한 연구", 한국자원공학회, 제28권, pp. 444-455.
- (14) 주재성, 권숙문, 1993, "근접발파에 대한 시멘트블럭조 건물의 진동응답 특성", 한국자원공학회, 제30권, pp.259-264.
- (15) 이정인, 발파진동, 1993, "발파풍압 및 비석의 조절을 통한 안전 발파", 대한토목학회지, 제41권 제1호, pp.99-117.
- (16) 김재영, 홍용기 외, 2001, "주민 생활환경에 있어서 진동레벨에 의한 발파진동의 평가", 대한환경공학회 2001 춘계학술연구발표회 논문집(II), pp. 141-144.
- (17) 건설현장의 소음·진동·분진 평가 및 저감대책에 관한 연구, 1999, 대한주택공사 주택연구소, pp. 90.