

고층아파트 인근 발파작업시 진동 및 폭음이 층별로 미치는 영향 연구

A Study on the Influence of Blasting Vibration and Sound on each Floor
In High-rise apartment Building during Blasting Operation

양 국정, 심 동수, 이 증식, 강 대우
Kook-Jung Yang and Dae-Woo Kang
동아대학교

초 록

1960년대 후반부터 시작된 경제개발계획과 주택정책으로 좁은 국토면적에 많은 주택을 보급하기 위하여 다세대 주택인 고층 아파트가 많이 신축되고 있으며, 고층 건물의 규모 및 그 수가 기하급수적으로 증가함에 따라 인근 건축물과 근접하여 시공하는 경우가 많아지고 있다. 구조물의 신축·증축 및 지하철 공사나 통신선로 등의 지하공간의 활용에 따라 타 공법보다 공사의 진행속도가 빠른 발파작업이 크게 증가하고 있으며, 도심지에서 인근 고층 구조물 및 건축물에 발파작업으로 인한 진동 및 폭음 등의 민원을 일으키는 직접적인 공해가 발생되고 있다.

본 연구지역은 부산 명장동의 "B초등학교 교지정지 및 교사 신축공사"현장으로서 인근 고층아파트 103동, 104동 및 105동의 1층, 6층, 11층 및 16층에 계측기를 설치하여 발파작업으로 인한 진동 및 폭음이 층별로 미치는 영향을 검토하고자 하였다.

핵심어 : 진동, 폭음, 계측기

1. 서 론

지금까지의 발파연구는 진동 및 폭음의 발생, 전달 및 구조물에 미치는 영향 등에 관한 연구, 특히 일반 가옥 및 저층 구조물에 미치는 영향에 관한 연구가 주로 이루어지고 있다. 그러나, 산업의 발달로 고층 구조물의 수가 급격히 증가하고 있으며, 이러한 고층구조물에 관한 진동 및 폭음의 영향연구는 거의 없는 것이 실

정이다.

연구대상지역인 부산 명장동의 "B초등학교 교지정지 및 교사 신축공사" 현장은 인근 지역에 고층아파트가 다수 위치하고, 발파작업으로 터파기 공사를 시작하였으며, 발파작업으로 인한 진동 및 폭음이 발생하였다.

이러한 진동 및 폭음이 인근 고층아파트에 미치는 영향을 연구하기 위하여 발파 패턴 및 현지 암반을 조사하였으며, 인근 SK아파트 103

동, 104동 및 105동의 1층, 6층, 11층 및 16층에 진동 및 폭음을 동시에 측정할 수 있는 계측기를 설치하였다.

1층, 6층, 11층 및 16층에서 층별로 측정된 자료는 층별로 입자 속도, 주파수 및 폭음의 경향을 분석하고, 회귀분석을 실시하여 진동속도와 환산거리간의 상관성을 나타내는 발파진동 추정식을 구함으로써 고층아파트 인근 발파작업시 진동 및 폭음이 층별로 미치는 영향을 검토하고자 한다.

2. 주변현황 및 대상암반의 역학적 특성

2.1 지형 및 지질

본 연구 대상지역은 부산 명장동에 위치하고 있으며, 뒤쪽으로는 H여자고등학교가 위치하고, 앞쪽 및 우측으로는 도로를 연하여 20층 이상의 고층 아파트가 위치하고 있으며, B초등학교 교지정지 및 교사 신축을 위한 터파기 공사로서 발파를 통하여 암반굴착을 한다.

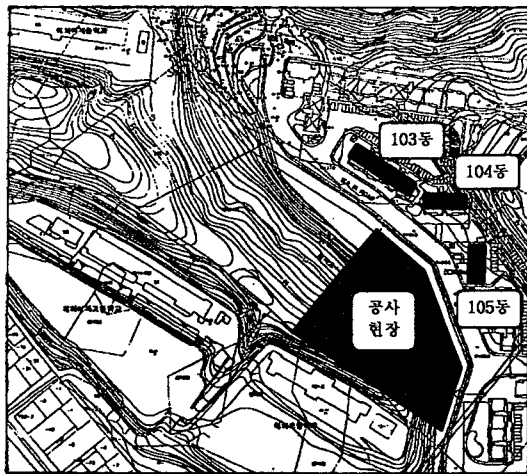


그림 1. 발파 현장 평면도

이 지역 일대의 지형은 해발고도(100 M이내)가 높지 않으나, 경사가 있는 편이어서 이는 화

산암류가 분포하는 지역에서 특징적으로 나타나고 있다. 능선의 발달은 연결되거나 규칙성이 없고 고립된 형태로 불규칙적인 산재분포를 보이고 있다.

이 지역은 경남지역에 발달한 백악기 경상계에 해당하며, 암종은 안산암류이다. 암갈색, 암녹색을 띠는 안산암은 대부분 피상이고 반상조질을 가진다. 암갈색을 띠는 안산암은 풍화정도가 약하고 신선한 상태를 보이고 있으며, 암녹색을 띠는 반상안산암은 풍화정도가 심하며 균열과 절리가 발달되어 있는 것을 알 수 있다. 발파대상 지역의 암반은 대부분이 균열과 절리가 발달되어 있으나, 균열과 절리가 거의 없는 균질의 세립질 안산암을 기반암으로 하고 있어서 깊은 심도의 굴착에는 다소 발파 효율이 적을 것으로 기대된다.

2.2 암석의 성질

실험실내 시험에서 사용한 암석시료는 조사지역내의 대표적인 암종을 얻기 위하여 표토를 제거한 후 풍화작용을 받지 않은 신선한 암반에서 부분적으로 채취하였으며, 현지 암반에서 채취한 3개의 시료의 강도시험 결과 및 점착력과 마찰각은 표1과 같다.

표 1. 시료의 강도 실험 결과

구분	일축압축강도 (Kg/cm ²)	삼축압축강도 (Kg/cm ²)		점착력 (Kg/cm ²)	마찰각 (°)
		봉압 (10Kg/cm ²)	봉압 (15Kg/cm ²)		
시료-1	1031.22	1289.65	1468.24	87.56	69.7
시료-2	1633.86	1687.64	2122.49	108.6	71.8
시료-3	1405.26	1567.59	1934.46	98.4	70.1

3개의 시료의 압축강도시험 결과는 1031.22 Kg/cm²~1633.86 Kg/cm²으로 나타났으며, 무결암 강도에 따른 암석강도의 분류방법에 의하여 높은 강도를 가지는 경암에 해당된다.

3. 발파진동 및 폭음의 측정

3.1 발파 진동 및 폭음 측정

본 연구에 사용된 측정기기는 캐나다 InstanTel사에서 제작된 Blastmate 시리즈이며, 대상지반에서의 지반진동에 영향을 받고 있는 인근 지역의 고층 아파트 3동의 각 1층, 6층, 11층 및 16층에 1~2대를 설치하고 진동 및 폭음을 계측하였다.

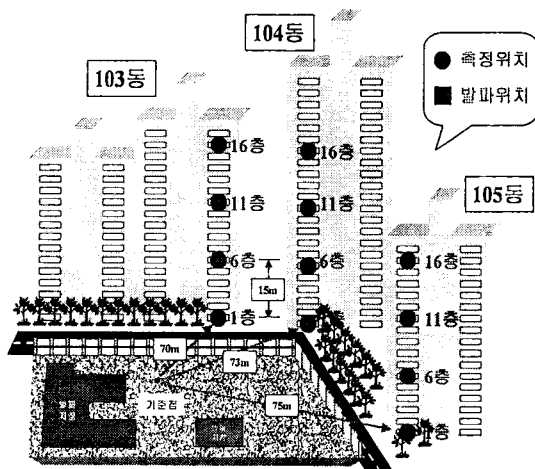


그림 2. 발파현장 위치 및 인근현황

그림 3은 측정에 사용된 진동계와 Geophone 및 Microphone을 설치한 모습을 보여준다.

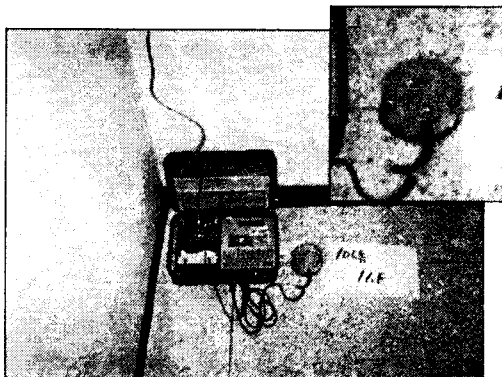


그림 3. 계측기 설치 및 고정

지면에 수진기(Geophone)를 견고하게 고정시키기 위하여 수진기 주위에 실리콘을 사용하여 고정시켰고, 수진기내의 화살표 방향과 폭원 방향과의 일치하도록 하였으며, 수진기내의 수포를 이용하여 평행상태도 확인하였다.

3.2 사용폭약 및 사용뇌관

대상지역에서의 암반은 안산암으로 경암에 속하나 절리 및 균열이 발달해 있으며 인근 지역에 고층건물(아파트 등)과 같은 보안물건이 위치해 있으므로 다소 폭속이 낮은 에멀션 폭약을 사용하였다. 사용된 폭약으로는 New Emulite $\phi 32\text{mm}(160\text{g})$ 을 사용하였고, 공당 장약량 0.8 Kg(5본), 지발공수 1~3공(지발당 장약량 0.8~2.4 Kg)이며, 사용뇌관은 #2번 ~ #7번 전기뇌관(코넬)을 사용하였다.

3.3 발파설계

부산 명장동의 "B초등학교 교지정지 및 교사 신축공사" 현장에서 실시한 발파작업은 인접한 지역의 고층아파트 및 학교 등의 보안물건에 대해 발파진동과 소음의 영향을 줄이기 위해 소규모 진동제어발파로 설계 되었다.

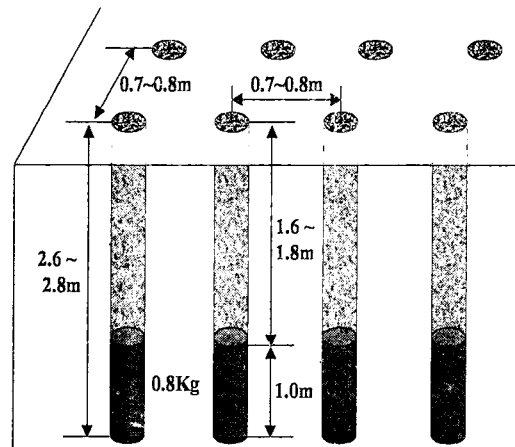


그림 4. 발파 패턴도

천공장은 2.6~2.8 m, 저항선 및 공간격 0.7~0.8 m, 공당 장약량이 0.8 Kg(5분), 지발공수는 1~3공이다.

대부분의 발파작업은 1공씩 이루어졌으며, 발파효과를 높이기 위해 자유면과 가까운 공부터 발파를 실시하였다.

3.4 고유진동 주파수

주 주파수의 발생대역을 결정하기 위해서는 발파진동의 파형을 측정하여 이로부터 최대 진동속도가 나타나는 부분의 주파수를 직접 계산하는 방법과 푸리에 주파수 스펙트럼(Fourier Frequency Spectrum)을 작성하여 가장 큰 진동속도대의 주파수 범위를 분석하는 방법 등이 있다. 최근에 국내에서 사용되는 대부분의 진동 측정기는 기기 내에 분석모듈이 내장되어 있어 주 주파수 대역을 자동적으로 산정후 출력할 수 있다.

발파작업으로 인한 지반진동의 주파수는 주로 진동의 파형과 발파의 심도에 크게 좌우되는 데 건물과 같은 지상구조물의 고유주파수(Natural Frequency)가 발파에 의한 진동의 주 주파수와 공진 현상을 보이게 되는 경우 매우 심각한 피해가 예상되기도 한다. 구조물의 고유주파수는 건물의 높이, 폭등에 따라 다르며, 지진공학의 연구문헌에 의하면 고층 건물 상부구조의 고유진동수는 다음과 같은 간단한 근사식으로 구할 수 있다.

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{L}{0.05h}}$$

(Newmark와 Hall, 1982)

여기서 L은 구조물의 폭이고, h는 높이이다.

이 식은 $P = \frac{2\pi}{0.01N}$ 즉 $f = \frac{1}{0.1N}$ 로 더 단순화 할 수 있다.

대체로 1층 건물일 경우 약 10Hz, 2층일 경

우 5Hz 내외의 값을 갖는 것으로 추정되며, 본 현장에서 가장 인접한 103동, 104동 및 105동의 고유진동 주파수를 위의 식으로 구하면 (103동 - 폭 : 50 m, 높이 : 48 m(16층), 104동 및 105동 - 폭 : 25 m, 높이 : 75 m(25층)) 103동의 고유진동수는 28.68 Hz이며, 104동 및 105동의 고유진동주파수는 16.22 Hz이다. 층수가 높은 104동과 105동의 고유진동수는 103동의 고유진동수 보다 낮게 나타나며, 이는 구조물의 높이가 높아질수록 저주파 대역으로 이동하므로 지진파와 같은 저주파 대역에서 취약성을 나타내고 전달거리도 저주파일수록 멀리까지 도달한다.

4. 측정자료 분석 및 결과

4.1 층별 최대 입자 속도 및 벡터합 분석

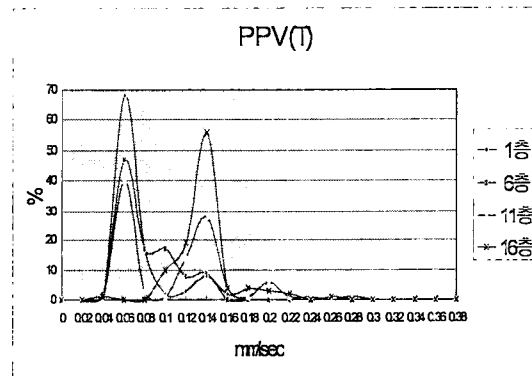


그림 5. 층별 PPV (T) - 105동

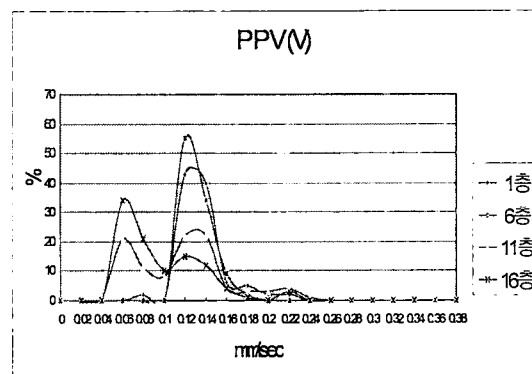


그림 6. 층별 PPV (V) - 105동

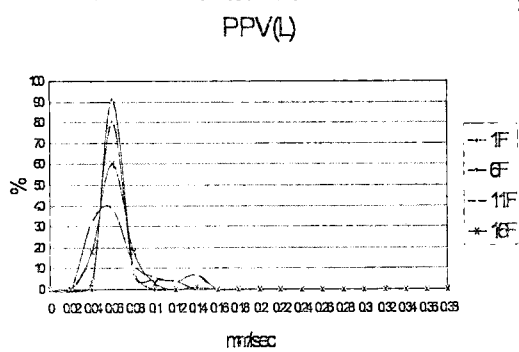


그림 7. 층별 PPV (L) - 105동

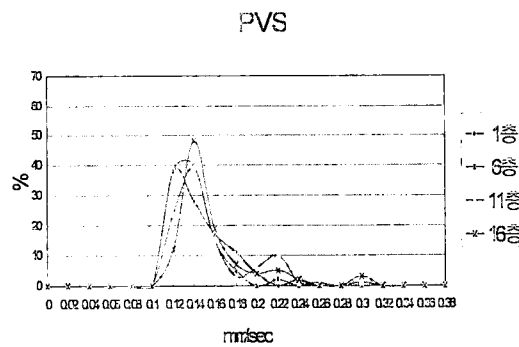


그림 8. 층별 PVS - 105동

층별 입자 속도(PPV)와 벡터합(PVS)를 분석한 결과 층별 입자 속도 중 접선 성분(T)은 1층에서 낮은 진동속도 비율이 가장 크게 나타났으며, 층이 높아지면서 높은 진동속도 비율이 증가하는 경향을 보이며 이와는 반대로 수직성분(V)은 1층에서 높은 진동속도 비율이 가장 크게 나타났으며, 층이 높아지면서 낮은 진동속도 비율이 증가하므로 진동속도가 감소하는 경향을 보인다. 그리고, 진행성분(L)은 층이 증가하면서 분포대역이 넓어지나 거의 동일한 분포대역을 보인다.

일반적으로 건물은 수직성분보다 접선 성분에 취약성을 보인다. 층별 입자 속도 중 접선 성분은 층이 높아지면서 진동속도가 증가하는 경향을 보이므로, 고층 건물 일수록 진동에 대한 영향이 크다는 것을 나타낸다.

벡터합인 PVS는 105동에서는 거의 동일한 경향을 보인다.

4.2 층별 주파수 및 폭음 분석

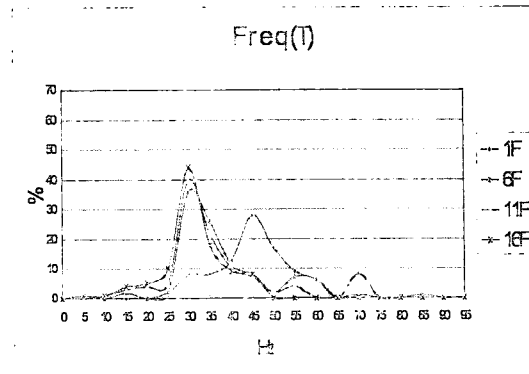


그림 9. 층별 Freq (T) - 105동

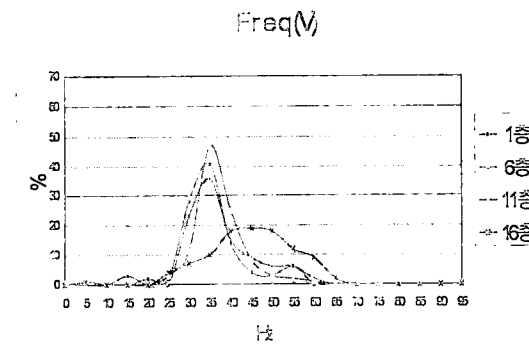


그림 10. 층별 Freq (V) - 105동

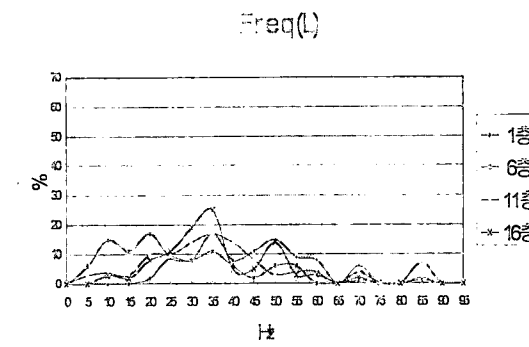


그림 11. 층별 Freq (L) - 105동

층별 주파수를 분석한 결과 주주파수 대역은 층별 주파수 성분에 따라 다소 차이가 있으나

대체로 25~45 Hz의 분포를 보인다.

주파수 성분중 접선성분은 1층에서 높은 주파수 비율이 크게 나타났으며 층이 높아지면서 높은 주파수 비율이 감소하는 경향을 보이며, 이와는 반대로 수직성분은 1층에서 낮은 주파수 비율이 크게 나타났으며 층이 높아지면서 높은 주파수 비율이 증가하므로 주파수가 증가하는 경향을 보인다. 이는 진동속도 성분과 반대의 경향을 나타낸다.

그리고, 진행성분은 105동에서는 6층에서 증가하고 11층 및 16층에서는 조금 감소하므로 특별한 경향을 보이지 않는다.

층이 높아지면서 주파수 성분중 접선성분이 감소하는 경향을 보이므로, 고층건물일수록 저주파 대역의 경향을 보이는 접선성분의 영향이 크다는 것을 나타낸다.

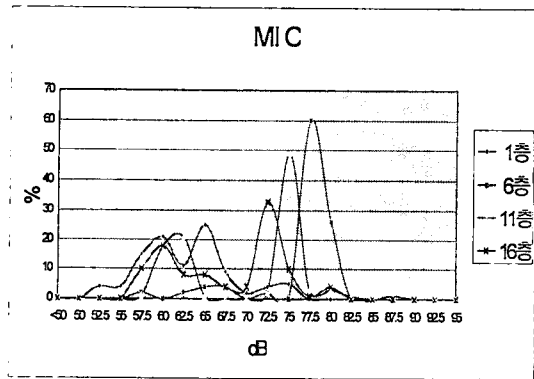


그림 12. 층별 MIC - 105동

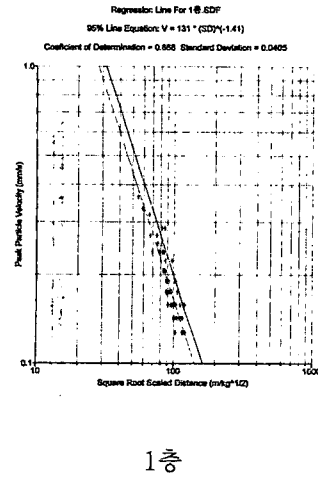
층별 폭음(MIC)은 105동에서 층이 높아지면서 높은 음압 비율이 감소하는 경향을 보이며, 1층에서의 음압 비율은 발파위치가 건물의 1층보다 약 3~5 m 정도 높은 곳에 위치하기 때문에 낮은 음압 비율이 가장 크게 나타나고 있다.

4.3 진동 추정식 산출

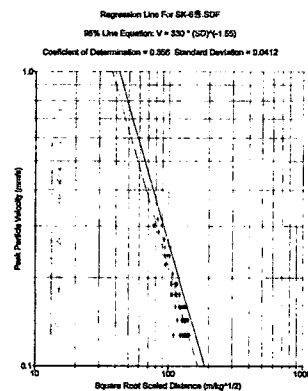
거리와 지발당 허용 장약량의 관계를 결정할 경우, 6~30 m 범위의 거리에서 삼승근 환산관계와 자승근 환산관계는 큰 차이가 없으나, 30

m 이상에서는 장약량이 적게 결정되어 안전율이 높아지며, 6 m 이하의 가까운 거리에서는 삼승근 환산거리가 안전율이 더 높다. 일반적으로 짧은 거리에서는 삼승근 환산거리가 먼 거리에서는 자승근 환산거리가 더 잘 맞는 것으로 알려져 있다.

대상지역과 측정지점의 거리는 약 75 m 이상이므로 자승근 환산거리를 이용하여 발파 진동 추정식을 산출하였으며, 대상지역 인근 고층 아파트 1층, 6층, 11층 및 16층에서 측정한 자료로부터 자승근 환산거리를 이용한 층별 발파 진동 추정식은 그림 13과 같다.



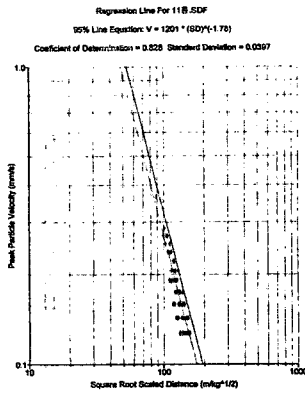
1층



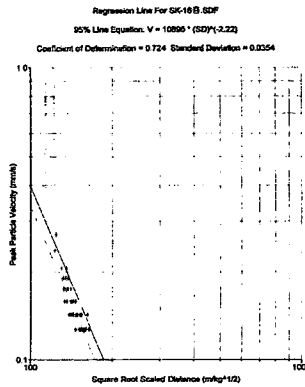
6층

표 2. 층별 진동 추정식

층 별	진동추정식	K	N	Coefficient of Determination
1층	131(SD) ^{-1.41}	131	1.41	0.868
6층	330(SD) ^{-1.55}	330	1.55	0.856
11층	1312(SD) ^{-1.80}	1312	1.80	0.823
16층	10985(SD) ^{-2.22}	10985	2.22	0.724



11층



16층

그림 13. 각 층별 진동 추정식

산출된 발파 진동 추정식의 95% 회귀분석식은 층이 높아지면서 진동 속도 상수인 절편 K값과 감쇠지수인 기울기 n값이 증가하므로, 환산거리(SD)가 동일한 100일 경우 층이 높아지면서 그 진동속도가 커진다. 표 2는 1층, 6층, 11층 및 16층에서 측정된 자료로부터 자승근 환산관계를 사용한 진동 추정식을 정리한 것이다.

각 층별 진동 추정식을 한곳에 도시하면 그림 14와 같다.

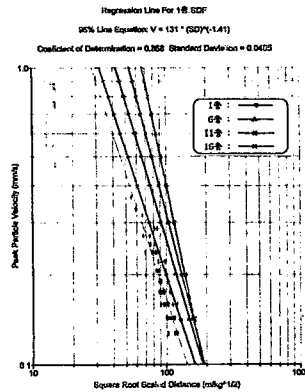


그림 14. 층별 진동 추정식 비교

횡축은 환산거리인 SD(Scaled Distance)를 나타내며, 종축은 최대 입자 속도를 나타낸다. 층이 높아지면서 기울기와 절편 값이 증가하므로 층이 높아지면서 동일 환산거리에서의 진동속도가 커진다는 것을 의미한다.

표 3은 장약량이 1 Kg일 때 동일한 100 m 거리(발파지점에서 건물까지의 거리(수평거리)와 측정지점까지 높이(수직거리)의 합 ; SD=100)일 경우 각 층에서의 진동 속도를 나타낸 것이다.

표 3으로부터 동일한 거리 100 m 지점에 위치한 고층아파트의 1층에서의 진동속도보다 55 m 지점에 위치한 16층에서의 진동속도의 크기가 약 2배가 되는 것으로 나타났으며, 이는 고층아파트에서 층이 높아짐에 따라 진동속도가 감소하는 것보다 일반 노천에서 거리가 증가함에 따라 진동속도가 감소하는 것이 더 크

다는 것을 나타낸다. 즉, 일반노천(1층)에서의 발파진동이 고층 아파트에서의 발파진동보다 더 빨리 감소한다.

표 3. 동일한 100 m 거리(수평+수직)에서의 발파진동

구분	1층		6층		11층		16층	
거리(m)	수평	수직	수평	수직	수평	수직	수평	수직
진동크기 (mm/sec)	100	0	85	15	70	30	55	45
비율	1.00		1.32		1.67		2.00	

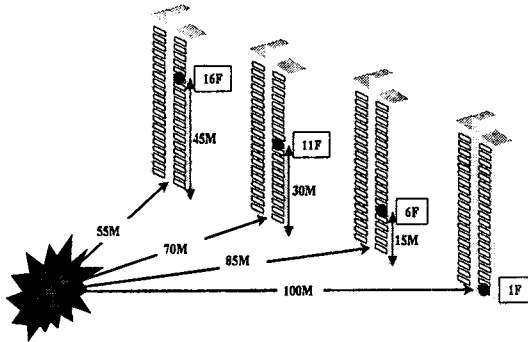


그림 15. 동일 거리 100 m에서의 발파진동

6. 결론

부산 명장동의 “B초등학교 교지정지 및 교사 신축공사” 현장에서 실시한 발파작업으로 발생하는 진동 및 폭음을 조사 및 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 103동(폭: 50 m, 높이: 48 m(16층))과 104동 및 105동 (폭: 25 m, 높이: 75 m(25층))의 고유진동 주파수는 NewMark와 Hall 식으로부터 103동은 28.68 Hz, 104동 및 105동은 16.22 Hz로 나타났으며, 주주파수는 층별로 조금씩 차이가 있으나, 대체로 25~45 Hz의 분포를 보

인다.

2. 층별 최대 입자속도중 접선성분 PPV(T)은 1층에서 가장 낮은 진동속도 비율이 가장 크게 나타났으며, 층이 높아지면서 높은 진동 속도 비율이 증가하는 경향을 보이나 수직성분 PPV(V)은 1층에서 가장 높은 진동속도 비율이 가장 크게 나타났으며, 층이 높아지면서 낮은 진동 속도 비율이 증가하므로 진동 속도가 감소하는 경향을 보인다. 그리고, 층별 최대 입자속도중 진행성분 PPV(L)과 진동속도벡터의 합성치인 PVS값은 변화가 적으며, 조금 감소하는 것으로 나타났다.

3. 층별 주파수중 접선성분 Freq(T)은 1층에서 높은 주파수 비율이 크게 나타났으며, 층이 높아지면서 높은 주파수 비율이 감소하는 경향을 보인다. 그러나, 수직성분 Freq(V)은 1층에서 낮은 주파수 비율이 크게 나타났으며, 층이 높아지면서 높은 주파수 비율이 증가하므로 주파수가 증가하는 경향을 보인다. 이는 진동속도 성분과 반대의 경향을 나타낸다. 층별 최대 입자속도중 진행성분 Freq(L)은 변화가 적으며 조금 감소하는 경향을 보인다.

4. 층별 폭음 (MIC)은 103동과 105동에서 층이 높아지면서 높은 음압 비율이 감소하는 경향을 보이며, 1층에서의 음압 비율은 발파위치가 건물의 1층보다 약 3~5 m 정도 높은 곳에 위치하기 때문에 낮은 음압 비율이 가장 크게 나타났다.

5. 자승근을 이용한 진동추정식을 사용하여 분석한 결과 동일한 거리가 100 m(발파지점에서 건물까지의 거리와 측정지점까지 높이의 합)일 경우 고층아파트의 1층에서의 진동크기보다 55 m 지점에 위치한 16층에서의 진동의 크기가

약 2배가 되는 것으로 나타났으며, 일반노천(1층)에서의 발파진동속도가 고층 아파트에서의 발파진동속도보다 더 빨리 감소하는 것으로 나타났다.

고층 아파트 인근 발파작업시 진동 및 폭음으로 인한 주변 고층 구조물에 대한 영향은 일반 가옥 및 저층 구조물 보다 큰 것으로 나타났으며, 특히 층이 높아지면서 최대 입자속도 중 접선성분 PPV(T)가 증가하고, 주파수 성분 중 접선성분 Freq(T)가 감소하므로 고층 건물일수록 접선성분에 대한 영향이 클 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) 이부경 “암석역학의 원리” 도서출판 대운 1999. P260~261
- 2) 이부경 “굴착공학의 원리” 도서출판 대운 1999. P66
- 3) Charles H. Dowding “Blast Vibration Monitoring and Control” 1985.
양형식 역 “발파진동학” P7.