

암 발파 진동 측정 사례 분석

An analytical Case Study on Measurement of Ground Vibration from Rock Blasting

정 칠 호 Chul-Ho Chung *
 정 상 문 Sang-Moon Chung **
 이 칠 Chul Lee **

* 대한주택공사 단지토목 연구부 부 장, Deputy Chief, Division of Civil Engineering, Housing Research Institute, KNHC
 ** 대한주택공사 단지토목 연구부 연구원, Researcher, Division of Civil Engineering, Housing Research Institute, KNHC

SYNOPSIS

In this study, various problems of ground vibration from rock blasting have been discussed, and field tests of rock blasting - ground vibration were carried out to find out the system of evaluation and control method for selecting blast design values and the rationale for the selection.

Criteria of estimating structural response and damage caused by ground vibration from rock blasting are also discussed for the safety design of blast.

1. 서 론

본 연구는 발파암을 대상으로 국내,외의 발파와 관련한 지반 진동 발파 진동식, 발파 설계법 등에 대한 문헌조사와 대한주택공사 택지 개발 현장에서 암발파, 진동을 측정 분석하여 구조물의 종류별 허용 진동속도 기준과 발파진동 상한식을 제시함으로써 암발파 설계, 시공의 안정성과 효율성을 확보할 수 있도록 하는데 주 목적이 있다.

2. 문헌고찰

2.1 구조물별 진동 허용기준

발파진동의 크기를 표시하거나 발파진동의 허용기준을 결정하려면 발파진동의 크기를 비교할 수 있는 척도를 정하여야 할 것이다.

이에는 다음의 3 가지가 있는데 지반의 움직이는 정도를 나타내는 "변위", 지반이 움직이는 "속도"와 "가속도"가 그것이다.

그런데 유럽, 캐나다, 미국 등에서 수십 년간에 걸쳐 수행된 연구 들을 종합해 보면 인체가 감응하는 정도는 가속도 성분에 따라 변하고, 지상이나 지하의 구조물이 받는 피해의 정도는 진동속도 성분과 직접적인 관련이 있는 것으로 보고되고 있다.

그러므로 암발파 진동의 허용기준을 설정하기 위해서 속도성분을 측정하여 이를 바로 구조물에 미치는 피해의 척도로 삼는 것이 가장 손쉽고 편리한 방법으로 생각된다.

1930년 미 광부국(U.S.B.M) 에 의해 처음 제시되어 1942년 동기관 에서 발표한 '채석장 발파의 지진 효과 (Seismic Effects of Quarry Blasting)' 라는 보고서 (Bulletin 442)에서 이에 대한 체계를 확립 하였다.

지금까지의 여러 기관이나 학자들이 발표한 내용을 요약하면 다음과 같다.

2.1.1 Langefors, Kihlstrom, Westerberg (Ground Vibrations in Blasting, Water Power, 1958)

스웨덴의 건고한 기반암 위에 축조된 주택을 대상으로 실험. 연구 한 결과는 다음과 같다.

- 7.00 cm/sec까지는 건물에 아무런 피해가 없었다.
- 10.75 cm/sec에서는 미세한 균열과 외벽이 떨어진다.
- 15.75 cm/sec에서는 건물에 균열이 발생한다.
- 22.75 cm/sec에서는 건물에 심각한 균열이 발생한다.

2.1.2 Edwards, Northwood (Experimental Blasting Studies on Structures, National Research Council, Ottawa : Canada, 1959)

캐나다의 학자인 두 사람은 연약한 모래와 점토질로 된 표토위에 위에 건축된 3층의 주택과 다소 단단한 빙하시대의 표토 (Well Consolidated glacial till)위에 건축된 3층의 주택을 대상으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 5.0 cm/sec 이하에서는 안전하다.
- 5.0 - 10.0 cm/sec에서는 주의를 요한다.
- 10.0 - 12.0 cm/sec 가 되면 건물에 피해를 입힐 우려가 있다.

2.1.3 미 광부국에서는 종래의 연구내용을 많은 실험, 조사를 거쳐 보완하여 보고서 656에 정리하였는데, 동 보고서에서는 진동속도가 건물 피해 여부를 판정하는 가장 좋은 기준이며 다음과 같은 결론 을 제시하였다.

- 5 cm/sec 이하에서는 안전하다.
- 10 cm/sec 에서는 기존의 균열이 더 커지고, 새로운 균열이 형성된다.
- 13 cm/sec 에서는 회반죽이 떨어지고, 유리창이 파손되며, 조적조에 미세한 균열이 발생하나 구조 자체에는 문제가 없다.
- 19 cm/sec 이상에서는 조적조에 큰 균열이 발생하고 기초 지지력이 크게 흔들려 구조 자체가 크게 훼손된다.

이상과 같은 고찰에서 건물에 대한 발파 진동의 범위에 대하여 각 학자들의 결과를 종합하면 그림 1 과 같다.

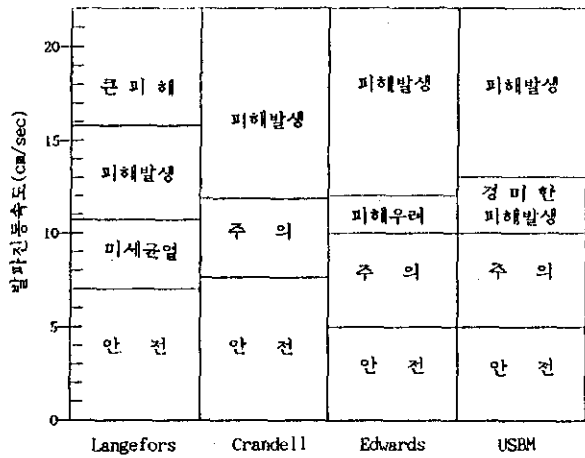


그림 1 학자들에 따른 발파진동의 피해 범위

2.2 허용 발파진동에 대한 기준

지금까지 국내,외 여러 기관에서 제시되어 온 발파시 구조물의 안전을 위한 진동기준은 대략 발파 진동속도 0.5 - 5.0 cm/sec 를 허용 진동 속도로 규정하거나 제안하고 있으나, 최근에 들어서는 구조물의 안전은 물론 사람의 불쾌감 해소등 민원 예방에 보다 많은 관심을 갖게 되어 갈수록 기준을 강화하는 추세에 있다.

표 1에 보인 국내 지하철 공사시 안전 기준치는 주로 독일의 DIN 4150 규정(표 2)에 준하여 설정하였는데, 이는 앞에서 이미 언급한 여러 학자들의 연구 결과에 비하여 상당히 엄격함을 알 수 있다.

표 1. 서울, 부산 지하철 진동 속도 허용치 (cm/sec)

구분	문화재, 컴퓨터시설	주택, 아파트	상가	R.C건물, 공장
허용치	0.2	0.5	1.0	1.0 - 4.0

표 2. 독일의 DIN 4150 규정

등급	I	II	III	IV
건물형태	문화재, 역사적으로 매우 오래된 건물	주택, 아파트 상가(작은 균열이 있는 건물)	주택, 아파트 상가(균열이 없는 양호한 건물)	산업시설용 공장(철근콘크리트보 보강된 건물)
최대허용치 (cm/sec)	0.2	0.4	0.8	1.0 - 4.0

※ 충격 진동에 관한 규정이며, 연속 진동인 경우는 1/3로 한다.

3. 현장 발파 진동시의 추정

3.1 발파 진동식

지반진동은 암석 발파시 총 발파 에너지의 0.5 - 10 % 가 탄성파로 변환되어 발생하는데, 이러한 발파진동의 크기는 발파방법과 현장조건에 따라 좌우된다.

거리와 장약량이 가장 큰 영향을 미치며 이외에도 사봉 폭약의 종류, 진쇄 방법, 천공 패턴, 파동의 전파 경로 및 지질 조건 등의 인자가 영향을 준다.

발파 진동의 크기는 변위, 속도, 가속도의 세 가지 척도중 진동속도가 구조물 피해정도와 가장 깊은 관계가 있으며 주파수 역시 많은 영향을 미친다.

발파진동이 주변 건물이나 주민에게 미치는 영향을 분석하기 위하여는 발파진동의 성질을 분석하여야 하는데 일반적으로 발파 진동식을 이용하고 있다.

발파 진동식은 국내,외에서 많은 실험 연구가 이루어져 여러가지 형태의 실험식이 알려져 있으나 미 광부국 고시 제 656호 (Nichols, Johnson and Duvall, 1971)에서는 식(1) 을 제시하고 있다.

$$V = K \cdot \left(\frac{D}{Wb} \right)^n \quad (1)$$

여기서,
 V : 진동속도 (cm/sec)
 D : 폭원으로부터의 거리 (m)
 W : 지발당 장약량 (Kg/delay)
 K : 발파 진동 상수
 b : 장약 지수
 n : 감쇄 지수

이 식은 거리와 장약량에 따라서 진동 속도가 어떻게 변화되는가를 나타내 주는 실험식의 일반적 모형이다.

K, b, n 등의 상수값은 각 조건에 따라 조금씩 달라지는데 미 광부국에서 많은 포목 공사 현장과 채석장에서 실험결과 제시한 관계식은 식(2)와 같다.

$$V = 72 \left[\frac{D}{W^{0.512}} \right]^{-1.63} \quad (2)$$

식(2)를 간략하게 표시하면 식(3)과 같이 표시할 수 있다.

$$V = 70 \left[\frac{D}{W^{0.5}} \right]^{-1.6} \quad (3)$$

듀폰사 (E. I. Dupont de Nemours & Co., 1977)에서는 발파 진동식을 식(4)와 같이 제시하고 있다.

$$V = 110 \left[\frac{D}{W^{0.5}} \right]^{-1.6} \quad (4)$$

식(3)과 (4)에서 우리는 동일한 거리에서 일정한 장약량으로 발파하였을 경우에 당연히 듀폰사가 제시한 공식인 식(4)가 보다 큰 진동속도를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

이들 식들은 단지 개략적인 값을 나타낼 뿐이고 K, b, n 값은 지형 여건, 암반의 종류, 지질, 지층의 두께 등 여러가지 요인이 복합적으로 작용하여 결정된다. 그럼에도 불구하고 b = 0.5, n = -1.6은 일반적으로 아주 잘 맞는다. 다만, K값은 변화폭이 크고 많은 요인에 의하여 영향을 받는 것으로 보고 되고 있다.

문헌조사를 통하여 발파 진동 계수에 대하여 다음 사항을 추정 할 수 있다.

- 측정 거리가 길어지면 고주파는 감소되고 저주파만이 계속되어 그 적합도는 상대적으로 높아진다.
- K 값은 거리가 길어질수록, 폭원의 위력이 커질수록 증가하는 경향을 보인다.
- 감쇄지수 n 은 대체적으로 -1.6을 중심으로 변하나 어떤 경향을 찾기 어렵다. 따라서, 스웨덴의 Langefors는 n 값을 -1.6으로 고정하고 K 값만을 변수로 하고 있는데, b 값을 0.5로 하여 식(5)와 같이 표시하면 발파 진동 측정 자료의 정리평가를 효율적으로 할 수 있을 것이다.

$$V = K \left(D / W^{0.5} \right)^{-1.6} \quad (5)$$

- 대규모 발파일수록 지형, 천공 배열 등의 요인에 대한 영향이 적어져서 적합도가 높은 발파 진동식을 구할 수 있고 이에 의한 보다 정확한 발파 진동의 예측이 가능하다.

그러나 거리가 짧고 소량의 폭약을 사용하는 경우 각 측정 항목의 오차에 따라 분산의 정도가 크므로 계속시 이점에 유의해야 한다.

3.2 환산 거리 (Scaled Distance : SD)

환산 거리는 현장에서 발파지점으로 부터 인근 건물까지의 거리 D와 지발당 장약량 W만으로 쉽게 발파 진동의 안정성 여부를 판단할 수 있는 아주 실용적이고 효과적인 방법이다.

환산거리는 식(6)으로 정의된다.

$$SD = \frac{D}{W^{0.5}} \quad (6)$$

여기서, SD : 환산 거리
D : 발파점으로 부터 진동측정점 까지의 거리 (m)
W : 지발당 최대 장약량 (Kg)

환산거리는 보통의 거리와 같이 값이 크면 클수록 더욱 더 안전하다. 미 광부국에서는 환산 거리 22.5를 안전 발파의 한계 거리로 제안하고 있다.

즉 SD > 22.5 이면 진동에 의한 손실을 입을 확률이 아주 적다는 것을 나타낸다. 그러나 많은 기관에서는 이보다 더 안전하게 SD > 27을 사용하고 있다.

이들 조건에 따라 발파 진동식에서 진동 속도를 계산할 수 있다.

예를들면, $V = 70 \left[\frac{D}{W^{0.5}} \right]^{-1.6}$ 의 경우

$$SD = 22.5 \text{ 일때 : } V = 70 (22.5)^{-1.6} = 0.48 \text{ cm/sec}$$

$$SD = 27 \text{ 일때 : } V = 70 (27)^{-1.6} = 0.36 \text{ cm/sec}$$

즉, 위의 예에서 보인바와 같이 환산 거리는 거리와 장약량으로부터 쉽게 계산될 수 있으므로 이를 규정치와 비교하여 개략적인 안전성을 판단할 수 있다.

4. 현장 발파 진동 측정

암 발파로 발생되는 지반 진동에 대하여는 국내, 외 관련 기관 및 학자들이 실험을 통하여 발표한 기존의 진동 전파식들은 각각 지형적인 특성, 발파의 목적, 발파방법 등에 따라 달라질 수 있기 때문에 이 식들을 그대로 설계 및 시공에 적용하기에는 문제가 있으리라 판단된다.

본문에서는 대한주택공사의 부산 택지개발 지구를 대상으로 실제 발파 진동 측정을 실시하여 암 발파 방법에 따른 진동치를 측정하고, 진동식을 제시하였다.

4.1 측정 장비

진동 측정 기기는 미국 SINCO사 제품인 S-6 Peak Vibration Monitor 와 Rion사 제품인 VM-51 Vibration Level Meter를 사용하였다.

4.2 결과 분석

부산 택지개발 현장에서 모두 31개의 발파 진동치를 얻었으며, 그림 2는 환산거리와 진동속도와의 관계를 나타낸 것이다. 이들 관계로 전산 처리하여 회귀 분석을 실시하면 식 (7)과 같은 평균 지수식을 얻을 수 있으며 그림 2의 점선으로 표시되어 있다.

$$\text{평균 진동속도} : V = 61 \left(\frac{D}{w_0^{0.5}} \right)^{-1.6} \quad (\text{상관계수 } r=0.78) \quad (7)$$

이 식을 예상 최대 발파진동 추정식으로 제안하여 부산 현장에서 실용화함으로써, 진동을 제어시키고 인근 주민의 민원 해소에 활용하였다.

식 (8)은 그림 2의 점선으로 나타낸 환산거리와 진동속도와의 상관도상에서 점의 집합을 대표하는 평균 지수식을 보정한 99.75% 신뢰 상한선이다.

$$\text{최대 진동 속도} : V = 160 \left(\frac{D}{w_0^{0.5}} \right)^{-1.6} \quad (8)$$

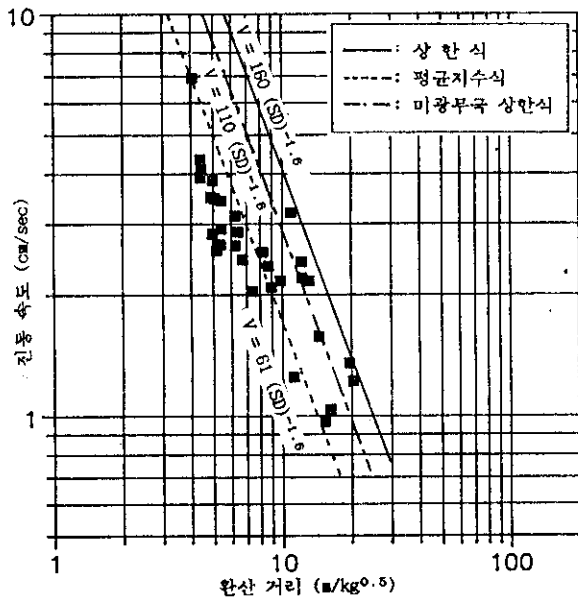


그림 2. 환산거리와 진동 속도의 관계 (부산)

4.4 미 광부국식과의 비교

1980년 미 광부국에서는 10여년간 많은 채석장과 노천광산을 대상

으로 측정된 발파진동 자료를 정리하여 환산거리와 진동 속도와의 관계에서 채석장의 상한선을 식 (9)와 같이 발파진동 추정식으로 발표한 바 있다.

$$\text{미 광부국} : V = 110 \left(\frac{D}{w_0^{0.5}} \right)^{-1.6} \quad (9)$$

이 상관식을 본 논문에서 제안한 식 (8)과 비교 검토하여 보면 그림 2에서 보는 바와 같이 본 연구에서 제안한 식 (8)이 보다 안전 측압을 확인할 수 있다.

5. 결 론

문헌조사와 현장실측을 통하여 구조물의 종류별 진동 허용기준과 발파진동 추정식을 검토하고, 발파 진동 상한식을 제시한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

문헌으로부터 구조물별 진동 허용 기준을 조사한 결과 발파 현장에 인접한 주택 및 아파트 등 거주민이 많은 건물과 상가, 사무실 및 기타 공공 건물에서의 발파 진동 속도는 각각 0.5 cm/sec, 1.0 cm/sec 이하로 설계, 시공되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 부산의 택지개발 현장에서 발파진동을 측정하고 환산 거리와 진동 속도와의 관계에서 평균 지수식을 보정한 99.75%의 신뢰 상한선을 제안하였는데, 이 식을 부산현장에서 예상 최대 발파 진동식으로 실용화 하여 진동을 제어시키고 민원해소에 기여하였다.

발파 진동 추정 설계물 근거로 하여 실제 현장에서는 시험 발파에 의한 진동을 측정, 분석하고 당초 진동추정식을 보완하여 실제 상황에 적합한 발파 진동식을 산정, 시공하여야 하며 이때 식 (5)와 같이 통일된 형태로 표시하면 지속적인 자료의 축적과 분석에 유리할 것으로 사려된다.

참고문헌

서울특별시 지하철공사 (1983). 발파진동식 확립과 제어발파 지침 결정을 위한 발파 보고서.

윤지선 (역저, 1992). 최신 발파기술. 구미서관.

Calvin J. Konya, Edward J. Walter (1985). Rock Blasting, U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration.

D.E. Siskind, M.S. Stagg, J.W. Kopp, C.H. Dowding (1980) Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mining Blasting, USBM RI 8507.

Wilbur I. Duvall, David E. Forgelson (1961). Review of Criteria for Estimating Damage to Residences from Blasting Vibration. USBM RI 5968.

James F. Devine, Richard H. Bech, Alfred V. C. Meyer, Wilbur I. Duvall (1966). Effect of Charge Weight on Vibration Levels from Quarry Blasting, USBM RI 6774.