

# 충격진동 계측의 문제점과 개선 방안

건설공사장에서 준용되고 있는 발파진동 및 발파소음에 대한 우리나라의 법과 제도 등 전반적인 관리 시스템 문제를 고찰하고, 이들로 인한 불필요한 민원을 예방하며 예산 낭비를 방지하고자 한다.

## 서론

발파 등 압파쇄 및 절취 작업에서 발생하는 진동과 소음으로 인한 건축물 피해를 예방하기 위한 허용기준은 국토해양부 ‘도로공사 노천 발파 설계·시공지침’<sup>1)</sup>과 일선 경찰서의 양수허가서 부관에서 통상적으로 진동속도 값 0.3 cm/sec(PVS)을 인정하고 있으며 최근에는 0.2 cm/sec로 강화되는 추세이다.

국내 허용기준은 미국, 독일, 영국 등 세계 어느 나라의 허용기준보다 작게는 약 3배 많게는 10배까지 엄격하다. 0.3 cm/sec는 독일 표준 DIN 4150<sup>2)</sup>에서 특별히 보존 가치가 있는 문화재 등에 대하여 10Hz 이하 주파수 대역의 진동 크기에 대한 허용기준으로서 국내 건설 발파의 주파수 대역이 통상적으로 30 Hz~50 Hz 이상임을 고려하면 독일의 문화재에 적용하는 허용기준보다 약 2배 정도 엄격하다.

도심지 개발이 많은 우리나라와 일본은 건설현장에서 발생하는 진동과 소음에 대한 정신적 피해를 관리하기 위하여 법률로서 진동과 소음의 허용기준을 정하고 있다. 일본은 특별히 발파에 대한 규정은 지자체별로 규정되어 국가법으로서의 허용기준은 없으나 건설현장에서 10시간 작업 기준으로 소음 허용기준이 85 dB(A) 진동 허용기준은 75 dB(V)<sup>3)</sup>이다. 우리나라 환경부「소음·진동관리법」에서 주거지역 등은 주간 시간대의 생활소음·진동규제기준치에 +10 dB을 보정하도록 하여 발파에 대한 허용기준은 진동레벨은 75 dB(V)과 소음레벨은 75

김동연

((주)SV 대표)

이연수

(사)한국소음·진동기술사회

lys39393@hanmail.net

dB(A)<sup>4)</sup>이다. 또한, 발파 횟수 보정에 의한 가중치를 더하면 허용기준은 더욱 낮아지게 된다. 발파로 인한 소음과 진동의 지속시간은 10초 이내이나 우리나라의 허용기준은 일본의 10시간 작업기준의 허용기준보다 훨씬 엄격하다. 허용기준이 엄격함에 따라 암파쇄 공법이 결정되며 공사비는 기하급수적으로 상승한다.

이처럼 우리나라는 모든 구조물에 대한 진동기준을 문화재급 이상으로 관리하여 많은 비용이 발생하는 과잉 설계가 되고 법과 제도에서의 허용 한도도 매우 엄격하다. 또한, 거의 모든 건설현장에서는 민원 예방을 위한 계측 관리를 하고 있음에도 진동 및 소음에 대한 민원은 계속되고 있다.

이는 민원의 본질에 대한 잘못된 이해에서 비롯되며 많은 비용을 투입하여 주파수 관리 없이 진동의 크기만을 낮추는 것은 민원 예방에 극히 제한적인 효과가 있으며 근본적인 해결 방법이 아니라고 판단된다. 즉, 공법 결정부터 시공 중 계측 관리, 민원인 피해 평가에 관한 국가기관의 시스템 문제로서 그 피해는 국민이 부담하고 있으며 발파 시공업체와 민원인은 직접 피해를 보고 있다.

1980년 이래 미국 광무국 등 여러 국가에서 동일한 문제에 대하여 많은 연구보고서를 발표한 자료를 고찰하고, 허용기준 그리고 민원 관련 통계 자료를 통하여 민원의 본질을 고찰하였다. 따라서 우리나라의 법과 제도 등 시스템 문제를 파악하여 불필요한 민원을 예방하고, 국가의 예산 낭비를 방지하는 경제성 있는 합리적인 관리가 될 수 있기를 바란다.

## 발파진동에 대한 민원의 본질

현재 국토해양부 및 경찰서의 건축물에 대한

진동 허용기준은 진동의 크기로서 민원인 건축물 앞마당에서 발생하는 진동의 크기(cm/sec)를 계측하는 방법으로는 민원의 본질을 평가하기란 불가능하다. 민원인 앞마당에서의 진동의 크기로서는 건축물 내부에서 민원인이 느끼는 진동에 대한 불만을 설명할 수 없다. 미국 광무국 연구보고서 'RI 8507 등'<sup>5)</sup>에서는 단순히 진동의 크기만으로 평가될 수 없는 진동 주파수와 지속시간에 대한 주택의 응답특성과 인체의 응답특성에 대한 종합적인 평가가 가능하도록 하였다.

표 1은 2개의 발파 현장에서 계측된 진동 측정 자료의 사례이다. 이를 통하여 현재 국내의 관리 시스템 및 해외 관리 표준의 평가 방식 차이를 확실히 알 수 있다.

### 국내 관리 체계에 의한 평가 및 조치

현장 I의 발파는 최고진동속도가 0.29 cm/sec로 국토해양부 및 경찰서 지침에 따른 허용기준 이내로서 민원이 발생하는 것은 민원인의 억지라고 평가될 수 있다.

현장 II의 발파는 최고진동속도가 0.40 cm/sec로 동일 지침에 따르면 허용기준을 벗어나며 발파 시공자는 진동의 크기를 줄이기 위하여 경제성과 시공성을 희생하며 지발당 장약량을 감소하든지 공법을 변경해야 한다.

### 미국 광무국 표준에 의한 평가 및 조치

현장 I은 지반진동크기 0.29 cm, 주파수 16 Hz로서 저주파에 의한 건축물 공진을 고려하여 실제 건축물 영향 진동은 0.75 cm/sec 평가되며

〈표 1〉 발파진동 계측자료

현장 I	현장 II
PPV(V) : 0.29 cm/sec	PPV(V) : 0.40 cm/sec
Fre : 16 Hz	Fre : 50 Hz

건축물에 피해를 주지 않는다. 현장 II는 지반진동 크기 0.40 cm/sec, 주파수는 50 Hz로서 공진이 발생하지 않는 주파수 대역으로 건축물 영향 진동은 0.40 cm/sec 이하로 평가되며 건축물에 피해를 주지 않는다.

Siskind et al. (1980), Crum and Siskind (1993), Crum and Pierce (1994) 등의 연구를 토대로 정립된 미국 광무국의 RI 8507 보고서 및 미국 National Institute of Rock Mechanics의 연구 (S&T Project : MT/134/02)에 따르면 지반진동으로 인한 구조물 공진 영향이 20 Hz 이하 주파수 대역에서는 증폭률이 2.5배 이상이고 20 Hz ~ 50 Hz에서는 증폭률 영향에 의한 구조물의 공진 효과에 대한 증폭률이 1 ~ 2.5배이다. 50 Hz 이상에서는 오히려 증폭률이 1.0 이하로 감소될 수 있다.

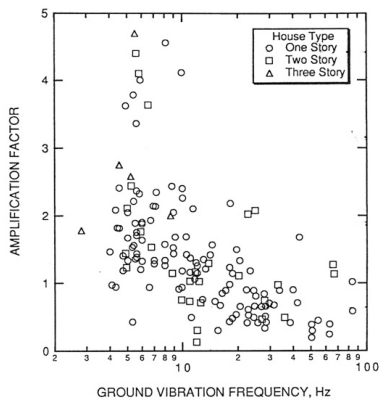
### 정신적 피해 평가

현장 I에서 발생하는 지반진동은 0.29 cm/sec이지만 주파수가 16 Hz로서 인체 및 건물이 민감하게 반응하는 20 Hz 이하의 대역이고 건축물이 흔들리는 진동은 0.75 cm/sec 이므로 건물 내부의 주민은 발파로 인하여 충분히 불안감을 느낄 수 있다. 현장 II에서 발생하는 지반진동은

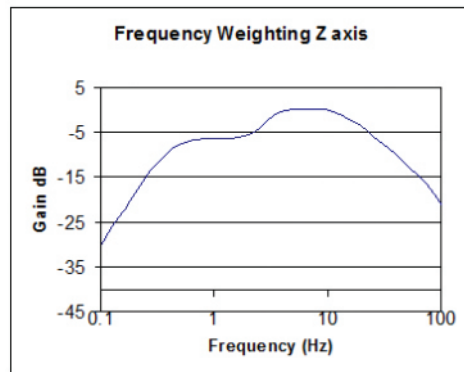
0.4 cm/sec이나 주파수 대역이 높아서 인체 및 구조물은 민감하게 반응하지 않고 실제로도 민원이 발생하지 않았다.

환경진동측정기기에 의한 진동속도는 주파수 보정 및 지속시간보정 때문에 진동속도 산출식보다 실제 측정값이 낮다. 인체감응특성에 따라 주파수보정을 하면 발파 진동의 주파수가 50 Hz에서는 인체는 실제 진동보다 -15 dB 낮게 감지한다. 그리고 측정값이 실효치(약 100 ms 동안 rms 평균값) 즉, 5공을 발파하면 진동지속시간이 20 ms이나 100 ms에서 rms 평균값을 구하기 때문에 측정값은 현저히 낮아진다. 특히 정현파 진동에서는 rms 평균값의 최대치인 max는 피크에 비하여 30% 정도 낮다.

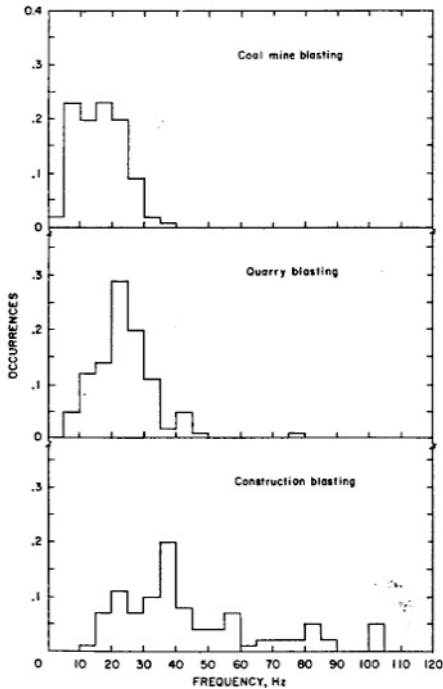
미국 광무국에서는 발파로 인한 주변 구조물 피해 및 거주민의 정신적 피해에 대한 주파수의 중요성을 주목하여 지속적으로 연구했으며 **그림 3**은 발파 패턴에 따라 발생하는 전형적인 주파수 성분을 조사하여 발표한 자료이다. 주파수는 발파의 규모, 거리, 암질 등의 영향에 따라 달라질 수 있다. 자료는 광산 및 채석장 발파는 지발당 화약량 90 kg 이상 사용하여 거리 100 m 이상 지점에서 계측된 자료이며 건설현장 발파는 지발당



[그림 1] 증폭률(미국 광무국 RI 8507)



[그림 2] 진동에 대한 인체 감응특성(ISO 2631)



[그림 3]광산, 채석장, 건설현장의 발파에서 발생하는 주요 주파수 (Siskind, 1980)

화약량 0.5 kg ~ 6 kg을 사용하여 거리 10 m ~ 50 m에서 계측된 자료이다. 우리나라 도심지 발파 규모는 그림 3의 건설발파와 유사하며 주파수 대역은 15 Hz에서 60 Hz이다. 문제가 될 수 있는 20 Hz 이하는 5% 정도로서 여기서 민원이 발생된다고 판단된다.

사례에서 알 수 있듯이 국내 발파의 허용기준 0.3 cm/sec는 과도하게 낮게 설정되어 있어 20 Hz 이하의 저주파가 발생하더라도 건축물에는 피해를 주지 않지만 정신적, 불안감을 줄 수 있다. 즉, 우리나라에서 발생하는 대부분의 민원 본질은 정신적 피해로서 이는 진동의 크기만으로 관리될 수 없고 진동 주파수와 지속시간에 대한 주택의 응답특성과 인체의 응답특성에 대한 종합적인 평가로 가능<sup>6)</sup>하다. 이와 관련하여 우리나라에 이를 규제할 수 있는 환경부의 「소음·진동 관

리법」이 있다.

중앙환경분쟁조정위원회의 발표 자료<sup>7)</sup>에 의하면 2012년 6월 기준으로 진동·소음 피해 관련 분쟁 건수는 전체 2,727건에서 2,336건으로 86%를 차지하고 정신적 피해가 1,046건으로 39% 첫 번째며 정신적 피해와 건축물 피해를 함께 신청한 사건은 641건으로 25%로서 두 번째이다. 정신적 피해에 대한 민원이 64%를 차지한다.

### 수입제품인 발파진동·소음측정기의 소음 데이터의 신뢰도 문제

국내 발파 현장에서 사용되고 있는 발파진동·소음측정기(BlastMate, Beckman 등)의 소음측정 자료는 민원인뿐 아니라 측정자도 신뢰하지 않고 있다. 발파진동·소음측정기는 환경소음레벨(dB(A))을 측정할 수 있다고 광고되고 있으나 근본적으로 250 Hz 이하 대역의 음압(peak, dB(L))을 측정하는 기기<sup>8)</sup>이다. 그 이유는 환경소음레벨(max, dB(A))을 측정할 수 있는 측정기는 측정가능 주파수 범위가 31.5 Hz~8000 Hz 이상<sup>9)</sup>이어야 하기 때문에 환경소음레벨을 측정할 수 있는 성능이 부족하다. 또한, 환경측정기는 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」제3장 제9조 1항에 의하여 형식승인<sup>10)</sup>을 얻어야 하나 발파진동·소음측정기는 형식승인을 얻지 않았기 때문에 동법에 위법한 기기이다. 즉, 발파진동·소음측정기의 소음 자료에 의한 소음 피해에 대한 평가는 법률에 위반되며 주민의 정신적 피해를 공정하게 평가할 수 없다고 판단된다.

비록 발파진동·소음측정기가 정상이라도 환경부 형식 승인된 환경소음측정기기의 실제 측정값보다 낮다. 이는 시간 보정 특성이 환경측정기기에는 적용되어 측정값이 실효치(125 ms 동안 rms 평균값) 구하기 때문에 측정값이 낮다. 정현

파에서는 rms 평균값의 최대치인 max는 피크에 비하여 30% 정도 낮은 것으로 나타난다.

## 국내 관리 시스템의 문제

국내에는 발파로 인한 정신적 피해에 대한 허용 한도 그리고 측정기기 및 측정 표준이 법률로 제정되어 있다. 그러나 국토해양부는 정신적 피해에 대한 허용 한도가 발파를 수행할 수 없을 정도로 너무 엄격하기 때문에 진동속도의 크기만을 관리하고 있다고 설명하였으나 이것도 잘못된 변환식의 오류에서 발생되었고, 환경부의 기준 또한 논리적이거나 합리적인 근거 없이 과도하게 규제하고 있는 실정이다. 이런 불합리한 관리 체계로 인한 피해는 고스란히 국민이 당하고 있으며 직접적으로 발파 시공회사 및 민원인이 감당하고 있는 체제로 되어 있다. 이와 같은 불합리한 체도에 대하여 문제점을 제시하고자 한다.

## 국토해양부에서의 진동속도 관리기준의 문제

국토해양부는 발파로 인하여 발생하는 진동으로 야기된 정신적 피해를 배제하고 오직 진동 속도로만 관리 기준을 설정한 이유는 다음과 같다. 환경부「소음·진동 관리법」의 규제기준인 65 dB(V)

를 만족하는 진동속도의 크기 0.08 cm/sec를 에지마식<sup>11)</sup>으로 산출하고 이 진동속도 크기로는 발파진동을 관리할 수 없는 무리한 기준이라며 건축물의 허용기준을 0.3 cm/sec로 설정하였다고 한다. 이와 관련된 문제점을 열거하고자 한다.

$$\text{에지마(江島) 식} : VL = 20 \text{ Log } V + 91 \quad (1)$$

$$(V = \text{cm/s})$$

식 (1)은 8 Hz 이상의 정현파진동의 경우에만 정확하고 발파와 같은 충격진동의 경우는 정확하지 않은 에지마(江島)식으로 진동속도를 단순히 대수(dB)로 산출하기 위한 방식이다. 그림 2의 진동에 대한 인체 감응특성 (ISO 2631)<sup>12)</sup>을 적용하면 최대 -20 dB까지 보정될 수 있으며 주파수와 지속시간에 따라 다르지만, 통상적인 발파 시 환경기준을 초과하기 위해서는 0.40 cm/sec 이상 되어야 한다.

(2)주파수가 고려되지 않은 0.2 cm/sec은 독일 표준 DIN 4150- II (1992년 개정본)에서 특별히 보존 가치가 있는 문화재 등에 대하여 10 Hz 이하 주파수 대역의 진동 크기에 대한 허용기준으로써 국내 건설 발파의 주파수 대역이 통상적으로 10 Hz 이상임을 고려하면 최대 2.5배 엄격

〈표 2〉 DIN 4150- II (1992)

건축물 등급	건축물 형식	주파수별 허용진동속도 VR(cm/sec)			
		구조물 전체최상층 바닥면			
		기초			최상층 바닥면
		구조물의 반응주파수대			전 주파수 영역
		10 Hz이하	10-50 Hz	50-100 Hz	
I	상업 또는 산업용 건물 및 이와 유사한 형식의 건축물	2.0	2.0-4.0	4.0-5.0	4.0
II	주거용 건축물(연립주택, 단독주택, 아파트) 및 부속 건축물과 활용면에서 이와 유사한 건축물	0.5	0.5-1.5	1.5-2.0	1.5
III	진동에 예민한 구조물, 취약한 건축물, 특별한 보존가치가 있는 건축물(문화재 등)	0.3	0.3-0.8	0.8-1.0	0.8

한 기준으로 합리적으로 개선되어야 한다(표 2 참조).

(3)현재의 관리 기준에서도 민원이 발생하는 것은 발파로 인한 주민의 불안감이며 이는 진동 크기만으로는 해결이 불가능하며 근본적으로 저주파수 대역을 관리하여야 한다. 또한, 진동속도 뿐 아니라 환경법에 있는 환경진동레벨과 환경소음레벨을 동시에 관리하여야 한다.

(4)현재 방식처럼 진동의 크기만을 고려한 공법 결정이 이루어지는 시스템은 국민 및 발파 시공업자를 위축시키는 방식이다. 설계 시에는 전혀 고려가 되지 않은 정신적 피해에 대한 책임은 실제로 발파시공단계에서 최하 계층인 발파 시공업자가 부담하고 있다.

### 환경부 환경진동레벨 및 환경소음레벨 허용기준 및 평가방식에 대한 문제

발파 관련 기술자들은 환경소음레벨의 허용기준을 준수하기 위하여 분할 발파를 할 수밖에 없으나 발파 횟수 보정이 적용되어 사실상 허용기준을 준수하기 매우 어렵다고 불평한다.

앞에서도 언급했지만, 도심지 개발이 많은 우리나라와 일본은 건설현장에서 발생하는 진동과 소음에 대한 정신적 피해를 관리하기 위하여 법률로서 진동과 소음의 허용기준을 정하고 있다. 일본은 특별히 발파에 대한 규정은 지자체별로 규정되어 국가법으로서의 허용기준은 없으나 건설현장에서 10시간 작업 기준으로 소음 허용기준이 85 dB(A) 진동 허용기준은 75 dB(V)이다.

우리나라 환경부「소음·진동 관리법」에서 주거 지역 등의 경우 주간 시간대의 생활소음·진동 규제기준치에 +10 dB을 보정하도록 하여 발파에 대한 허용기준은 진동레벨은 75 dB(V)과 소음레벨은 75 dB(A)이다. 또한, 발파 횟수 보정에 의한 가중치를 더하면 허용기준은 더욱 낮아지게 된다. 발파로 인한 소음과 진동의 지속시간은 10초 이내이나 우리나라 허용기준은 일본의 10시간 작업기준의 허용기준보다 훨씬 엄격하다. 허용기준이 엄격함에 따라 암파쇄 공법이 결정되며 공사비는 기하급수적으로 상승한다.

횟수 보정의 방식의 정당성을 평가하기 위하여 국내 환경법을 제정할 때 참고한 일본의 제도를 참고하였다. 일본은 발파와 같은 단발성 충격진동과 소음에 대하여 별도의 기준을 설정하지 않았으며 표 3과 같이 연속 진동 및 소음의 허용기준을 정하여 작업 시간대를 규제하고 있다.

표 4는 발파와 같은 단발성 충격소음에 대한 권고 기준안을 설정하기 위한 ISO/R1996 표준에 기초한 보정 표이다. 일본 화학공업회는 발파 소음은 10초 이내이고, 지속시간이 3시간당 시간당 생활은 0.2% 이하이므로 허용기준을 30 dB까지 낮게 평가할 수 있다고 하였다. 이와 같은 보정률을 적용하면 국내 기준은 8시간 기준으로 건설현장 소음 허용기준이 65 dB이고 1회 발파는 지속시간이 최대 10초 이하로서 0.2%에 해당하므로 생활소음 기준 65 dB에서 30 dB을 보정한 95 dB로부터 발파 횟수 보정하는 방식이 타당하다고 판단된다.

(표 3) 특정 건설작업의 소음권고기준(일본)

소음레벨	작업시간		1일 작업시간		최대작업 일수	일요일, 공휴일 작업
	제1호구역	제2호구역	제1호구역	제2호구역		
85 dBA	오후7시-오전7시 작업금지	오후10시-오전6시 작업금지	10시간 이하	14시간 이하	연속 6일 초과 못함	금지

〈표 4〉 간헐성소음의 시간발생률에 의한 보정

발생시간율	보정량(dB)	발생시간율	보정량(dB)
100~56	0	1.8~0.6	-20
56~18	-5	0.6~0.2	-25
18~6	-10	0.2 이하	-30
6~1.8	-15	-	-

주 : 낮 시간은 3시간당 발생시간이고 저녁 및 심야시간은 1/2시간당 발생시간

## 맺음말

1) 발파진동 평가는 단순히 진동 크기만으로 평가하는 시스템을 지양하고 진동 주파수와 지속 시간에 대한 주택과 인체의 응답특성에 대한 종합적인 평가가 이루어져야 한다.

2) 발파소음·진동 측정기기는 반드시 환경부의「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」에 의하여 형식승인을 얻은 장비를 사용하도록 한다.

3) 현재 사용되는 발파진동·소음측정기(수입 제품)는 형식승인을 얻지 않아 dB(A)로 측정되는 소음평가는 법률에 위배되고, 정확한 정신적 피해를 평가할 수 없으므로 사용하지 않아야 한다.

4) 발파진동·소음 측정기는 측정 가능 주파수 범위 때문에 환경소음(dB(A)) 측정용으로는 사용할 수 없고 음압(dB(L))을 측정하는 용도로만 사용하여야 한다.

5) 발파로 인하여 발생된 소음진동 문제는 진동속도뿐 아니라 환경법에서 규정하고 있는 환경진동레벨과 환경소음레벨을 동시에 계측하여 관리하여야 한다.

## 참고문헌

1. 국토해양부, 2006, 도로공사 노천발파 설계·시공 지침.
2. 독일산업표준, 1992, DIN 4150- II.
3. 일본 환경성, 2010, 특정 건설작업의 소음권고기준.
4. 환경부, 2012, 「소음·진동 관리법」
5. 미국, 1989, 광무국 연구보고서 'RI 8507 Blasting Vibration.
6. 이연수, 2004, “발파 근접장에서의 진동 특성”, 서울시립대학교 박사 졸업논문.
7. 환경부 중앙환경분쟁조정위원회, 2012, 보도자료
8. BlastMate(Instantel, Canada) 제품설명서.
9. 환경부, 2012, 소음·진동공정시험기준.
10. 환경부, 2012, 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법」
11. (사)일본소음제어공학회, 1996, 발파에 의한 음과 진동, 산해당.
12. ISO-2631, 1996, 진동에 대한 인체 감응특성.
13. ISO-R, 1996, 간헐성 소음의 시간발생률에 의한 보정. 