

암 발파에서의 소음·진동 규제기준과 저감 방안

양 형 식

(전남대학교)

1. 머리말

건설 부문에서 소음이나 진동의 발생원은 건설장비나 발파 또는 항타와 같은 시공상의 충격원 들이다. 이들 소음과 진동은 단속성이거나 하루 중 지속되는 시간이 짧은 경우가 많고 전체 건설이 계속되는 기간도 한정적이므로 상시적인 공장이나 교통부문과는 성격이 크게 다르다. 또 건설사업은 공익성을 띄고 있는 경우가 많기 때문에 수인한계가 높은 점에 대한 고려가 절실하다. 그러나 실제 법규면에서 이러한 뒷받침이 미비한 형편이다. 또 시공의 필요성은 불가피한데 기술적인 면에서는 기존의 규제기준을 만족시킬 수 없는 경우도 없지 않다. 대표적인 불가피 사례는 시가지에 재개발지구에 있어서의 기초작업을 들 수 있다. 기초 토공 장비들은 일정한 정도의 진동과 소음을 배출하는데 근접한 거리에서의 진동과 소음수준은 현행법규의 기준보다 높을 수밖에 없다. 따라서 건설로 인한 소음과 진동 부문에 있어서는 ISO 기준이나 DIN과 같은 별도의 가중치 부여 방안이 마련되어야 할 것이다.

한편 공정시험법에는 발파진동과 소음이 별도로 규정되어 있다. 이는 발파진동이나 소음의 특성이 다른 어느 소음, 진동원보다도 다른 특수한 것이기 때문이다. 그러나 법규에서는 발파진동 규제기준이 정의되어 있지 않기 때문에 속성상 건설진동이나 소음규제기준의 적용을 받고 있는 형편이다.

본고에서는 이러한 규제기준에 대한 언천적

인 문제점을 제시하고 이에 대하여 최근의 연구를 소개하였다. 한편 발파 부문에 있어서 정해진 기준을 만족하기 위한 소음·진동의 저감대책에 대하여 논하였다.

2. 건설 특히 발파 소음·진동에 대한 규제기준과 그 문제점

2.1 현행법규의 미비

현행법규에는 발파 소음·진동에 대한 별도 기준이 없어 일반 건설 소음·진동 기준으로 규제하고 있다. 더구나 건설·소음·진동 규제 기준 자체가 비현실적이어서 적용상의 애로가 많다. 현행기준(소음진동 규제 시행규칙)은 건설소음, 진동을 생활소음의 연장선상에서 파악하고 있다. 그러나 건설 소음, 진동은 공장이나 교통에 의한 것과는 달리 한시적이고 충격성이 우세하며 또 공익성이 있다는 점에서 당연히 달리 취급되어야 한다.

한시성에 대한 보정으로 소음의 경우, 주간 소음 발생시간(작업시간)이 1일 2시간 미만일 때는 +10 dB, 2시간 이상 4시간 이하일 때는 +5 dB을 보정하는 것이 전부이다. 따라서 발파와 같이 1회에 1~2초를 초과하지 않는 발파진동이나 소음에 대한 고려가 전혀 없다. 또 환경규제기준을 지킨다고 하더라도 손해배상에 대한 보호는 받지 못하므로 공익성의 고려도 전혀 되지 않고 있는 실정이다.

외국의 경우는 대개 건설진동을 충격진동으로 규정하고 그 중에서도 발파진동은 극히 짧은 시간 동안만 유지되는 점에서 별도의 기준을 마련하고 있다. DIN 4150이나 국제 규정

표 1 DIN의 허용진동수준(KB 기준, 낮)

장 소	지속성 진동	충격성 진동
주거지역, 주말 별장지역, 소규모 집단주거지역	0.2	4
마을지역, 복합지역, 핵심지역	0.3	8
상업지역(사무실도 해당)	0.4	12
산업지역	0.6	12
(활용형태, 주택점유율에 따른) 특별지역	0.1~0.6	4~12

표 2 빌딩내 진동에 대한 인체의 만족 수준(낮)

장 소	연속 또는 단속진동		하루 수회 정도의 충격진동	
	진동레벨 dB(V)	진동속도 mm/s	진동레벨 dB(V)	진동속도 mm/s
특수작업장(병원수술실 등)	54	0.1	54	0.1
거주지	60~66	0.2~0.4	83~93	3.0~9.0
사무실	66	0.4	90~96	6.0~12.8
공장	72	0.8	93~96	9.0~12.8

인 ISO 2631 등은 충격성 진동과 연속성 진동을 구분하고 주간인 경우 충격성 진동에 대해서는 20~30배 정도로 허용 기준을 높게 인정하고 있다.

표에서 KB는 “사실인식 강도” 개념으로 진동의 주파수와 지속시간을 고려한 값이다. 1992년에는 더욱 보편적인 내용으로 개정되었는데 이 규정에 의한 발파의 허용 진동수준은 사전 경고의 유무와 발파의 빈도수에 따라 허용진동수준을 KB 5~13.3(5~19 mm/s, 건물내 수직성분) 정도로 제시하고 있다.

표 2는 국제표준화기구의 기준으로 같은 경향을 볼 수 있다.

2.2 피해 대상의 문제

우리 나라의 기준은 피해의 대상이 명시되어 있지 않기 때문에 적용상의 혼선이 빚어지고 있다. 진동 피해는 구조물 피해, 인체 피해, 가축 피해로 나눌 수 있다. 환경법에는 인체를 대상으로 한 진동레벨 dB(V)을 적용한다. 그러나 대상에 따라 응답이 다르므로 적용 기준도 달라야 한다.

구조물 피해를 판단할 수 있는 진동량의 단위로는 선형 척도인 진동변위(cm), 진동속도(cm/s, kine), 진동가속도(cm/s²) 등이 있고 피해정도는 그 크기에 비례한다. 특히 진동속

도는 가장 신뢰도가 높아서 지표로 많이 사용된다. 인체의 감각은 Weber·Fechner의 법칙에 따라 대수척도로 대응하므로 인체에 대한 피해의 판정에는 대수척도인 dB이 사용된다. 가축은 인체보다 진동이나 소음에 더 민감하다고 하나 정량적으로 정해져 있지 않다. 이는 가축의 종류가 다양하고 품종에 따른 변화가 크기 때문이다. 미국 연방연합위원회는 가축사육지역의 소음 수준을 65~75 dB 이하로 유지하도록 권고하고 있다.

2.3 계측 항목의 문제

진동속도는 진동원의 설계를 위해 계측한다. 환경적 차원에서는 진동레벨이 주로 계측된다. 이들 두 진동량은 이론환산식

$$Y = 20 \log V + 71 \quad (1)$$

V : 최대 진동속도치(mm/s)

Y : 진동레벨, dB(V)

이 소개되어 있지만 단순조화진동이 아니거나 진동주파수가 8 Hz 이하이면 환산이 곤란하다. 진동주파수 특성을 알지 못하는 진동속도의 경우 진동레벨을 알 수 없고 진동레벨 만으로는 구조물에 대한 영향을 평가할 수 없다.

2.4 제안 기준

이러한 일련의문제점을 극복하고 합리적인

표 3 건물에 대한 기준(안)

민감도 등급	건물형식	진동속도 mm/s		
		<10 Hz	10~40 Hz	>40 Hz
I	공업지역 및 상업지역의 철근콘크리트조 산업용과 상업용 건물	15	15~45	45~50
II	주거지역의 콘크리트, 벽돌조의 주거 건물	10	10~25	25~30
III	조적조 시멘트 블록조의 주거건물, 학교, 종교시설, 병원 건물	5	5~15	15~20
IV	III등급의 건물이 개축된 건물, 역사적 보호건물	2.5	2.5~7.5	7.5~10

표 4 인체에 대한 기준(안)

(a) 연속진동에 대한 인체의 피해 판정기준(안)

장 소	시간	만족기준 A		인정기준 B	
		진동레벨 dB(V)	진동속도 mm/s	진동레벨 dB(V)	진동속도 mm/s
특수지역(병원수술실 등)	낮밤	54	0.1	-	-
거주지	낮	63	0.4	73	1.3
	밤	57	0.2	67	0.6
사무실	낮밤	66	0.6	76	1.8
공장	낮밤	72	1.1	82	3.6

* 진동수준은 ISO의 기준에 따라 유도. 주파수 8 Hz 이상 기준. 그 이하는 주파수별 보정 필요

(b) 충격진동에 대한 인체의 피해 판정기준(안)

장 소	시간	만족기준 A		인정기준 B	
		진동레벨 dB(V)	진동속도 mm/s	진동레벨 dB(V)	진동속도 mm/s
거주지	낮 ¹	83	4	86	5.6
사무실	낮 ¹	90	9	93	12.5
공장	낮 ¹	93	12	97	20.0

1. 야간에는 건설진동 발생을 원칙적으로 배제한.

기준을 마련하기 위해 다음과 같은 기준이 제안되었다.

가축에 대한 권고기준은 암소음과 암진동의 계측결과를 참조하여 각각 70 dB(A)와 70 dB(V)로 제안하였다.

3. 발파진동의 제어

3.1 발파진동의 설계인자

발파진동의 크기를 결정하는 인자로는 화약의 종류, 1회 발파에 사용되는 총장약량, 한 단차에 발파되는 단당장약량, 천공간격, 심도, 저항선의 길이 그리고 화약의 장전형태나 기폭방식 등 발파 관련인자와 지층 특히 진동

을 전달하는 암반의 종류, 층의 두께, 지반 내의 탄성과 전달속도, 암반의 밀도 그리고 지형 등 지역의 지반조건 들을 들 수 있다.

발파에 있어서 설계의 대상이 되는 인자는 발파관련 인자들로 진동을 고려한 발파의 설계는 단당 장약량의 설계를 의미한다. 지형이나 지반조건과 같은 조절 불가능 인자는 설계에 의한 선택이 불가능하며 이들은 모두 설계의 불확정성을 증가시키는 역기능을 한다. 발파 진동의 예측은 건설진동 중에서도 가장 어려운데 이는 대부분의 영향요소들이 조절 불가능 인자로 되어 있기 때문이다.

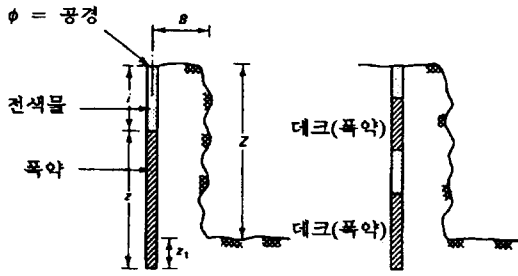


그림 1 분할장막

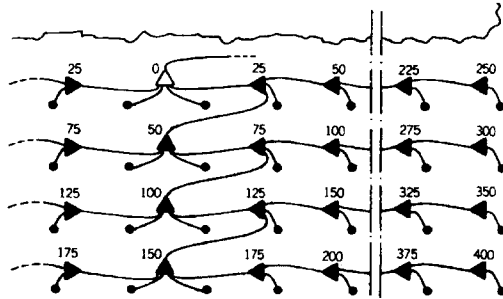


그림 2 벤치의 무한단차 발파

3.2 발파진동의 예측

발파진동의 예측에는 환산거리식,

$$v = K \left[\frac{D}{b\sqrt{W}} \right]^{-n} \quad (2)$$

이 사용된다. 여기서 v 는 최대진동속도, D 는 진원과 구조물 사이의 거리, W 는 단당장약량이며 K 와 n 은 입지상수이며 특히 n 을 감쇠지수라 한다. $SD = \frac{D}{b\sqrt{W}}$ 를 환산거리(scaled distance, SD)라 하며 특히 $b=2$ 인 경우의 SD를 자승근환산거리라 한다. 환산거리식의 입지상수(K)와 장약지수(n)는 실험적으로 결정되며 모든 불확실성 즉 조절불가능 요소들이 이 항에 의해 반영된다.

3.3 시험발파

환산거리를 이용한 진동예상식으로 진동속도를 추정할 때 주의할 점은

- ① 어떠한 경우라도 시험발파를 실시하여야 한다.
- ② 설계는 95% 신뢰도를 갖는 선형회귀분석식을 사용한다.
- ③ 로그정규분포의 표준편차를 적용할 수 있도록 하기 위해 최소한 30개의 자료를 획득하여야 한다.
- ④ 진동주파수도 분석해야 한다.

추정 수치가 규제기준치보다 높으면 기존의 발파시에 규제기준보다 높은 진동이 발생하였을 확률이 인정된다. 그러나 이러한 추정은 발파진동수준의 분포특성상 참고자료로 활용될 뿐 이것만으로 피해의 여부를 판정할 수는 없다. 따라서 발파시작부터 계측을 실시하는 것이 최선의 방법이다.

3.4 진동원 조절과 진동 방향 조절

설계에 의해 진동을 조절할 수 있는 가장 중요한 요인은 단당 장약량의 결정이다. 환산거리를 이용해 장약량을 설계하거나 진동수준을 관리하는 방법으로는

- 1) 모든 진동수준을 계측하여 입지진동속도 제한 기준과 대비한다.
- 2) 시험발파 성적으로 작성한 95% 신뢰도 진동예상식에서 구한 환산거리를 적용하여 발파시공할 수 있다. SD 60m/kg^{1/2}을 기준으로 설계하고 실적에 따라 장약량을 조정할 수 있다. (양형식, 1992)

3) OSM 다이어그램을 이용하여 그 규제선 이하로 발파규모를 유지하는 방법 등이 있다.

암반파쇄를 위해서는 적절한 정도의 발파계수(비장약량)가 필요한데 이는 단위부피당 화약량으로서 이 값은 발파규모가 작아지면 오히려 커져야 한다. 단당 장약량을 줄이는 방법으로는 천공장을 유지하면서 천공내 장약을 분산하고 기폭을 따로 시키는 분할장막(그림 1), NONEL 방식의 커넥터를 이용한 무한단차발파(그림 2), 다단계 발파기를 이용하여 일회 발파량을 유지하면서 발파시간을 길게 나누는 다단발파법 등이 적용될 수 있다.

발파시 자유면을 최대한 활용하며 천공간격은 가능한 한 줄인다. 근거리인 경우 발파 진동 우세 방향을 파악하여 방향성 발파를 할 수도 있다.

3.5 피해대상원 보호

피해 대상이 되는 구조물 편에서 진동을 감소시키는 방법으로 진동전달 경로를 차단하는 방법이 있으며 전달경로가 암반인 경우 발파원과 수신점 사이를 직선으로 연결한 심도보다 더 깊게 나란히 천공하여 폭원쪽과 건물쪽의 암체를 분리시킨다. 지나치게 경비가 많이 들고 공간에 암체가 남아 있으면 진동 감쇠효

과도 분명하지 않기 때문에 문화재 부근에서 근접시공을 하는 경우를 제외하면 별로 이용되지 않는다.

3.6 발파대체공법

비발파 진동제어 공법으로는 미진동 파쇄기(CCR), 비폭성 파쇄제(약액주입 파쇄공법), cardox, 급속유압시스템 등이 있으나 공기가 느리고 경비는 많으면서도 발파에 비해 효과가 떨어진다.

4. 발파소음의 제어

4.1 발파소음의 영향요소

발파소음은 발파풍 또는 발파풍압(SPL)이라고 하는데 이의 원인으로는 고압가스가 압체를 순간적으로 밀어내는 기압파, 발파지점에서 약간 떨어진 곳의 지반진동으로 인한 반압파, 전색 또는 균열을 통해서 빠져 나온 고압가스가 대기에 노출되는 누출가스파 등이 있다. 정상적인 발파소음은 기압파에 의하나 보통 예기치 못한 큰 소음은 누출가스파에 의해 발생한다.

발파설계 요인으로서 발파 소음에 영향을 미치는 요소는 화약량, 기폭방식, 전색정도, 자유면의 형·자유면의 절리발달 상태 등을 들 수 있다. 발파외적 요인으로는 기후 특히 대기의 온도 분포, 풍향, 풍속 및 지형과 숲, 벽, 건물 등에 의한 차폐성 등을 들 수 있다. 물론 발파폭원과 수음점의 거리는 절대적인 요소이다.

지표보다 높은 고도에서 온도가 상승하는 대기역전의 경우에는 파로가 지표쪽으로 휘게 되고 소음은 지상에 집중된다. 3~60 km에 걸쳐 평균 1.8배 정도의 파가 집중될 수 있다.

풍향과 풍속에 따라서도 영향을 받는다.

$$\Delta p(dB) = 7.7 - 2.56 V_{kph} \cos \theta \quad (3)$$

여기서 V_{kph} 는 풍속(km/hr)이며 θ 는 풍향과 음파의 전달방향의 각이다.

4.2 발파소음의 예측

발파소음은 신뢰성이 높지는 않지만 삼승근 환산거리식으로 예측한다.

$$SPL(dB) = K \left(\frac{R}{W^{-1/3}} \right)^n \quad (4)$$

발파소음의 예측은 진동의 예측보다 더욱 불확실하다. 전색정도나 자유면에 나타나는 절리면의 영향으로 높은 가스압이 노출되어 예기치 않은 큰 소음을 발생시키는 경우가 많기 때문이다.

4.3 진동원 조절

장약량을 엄격하게 유지하여 정상적인 소음의 발생수준을 조절하며 발파 관련 수칙을 준수하여 예기치 않은 소음의 발생을 최소화하는 방법이 최선이다. 자유면을 최대한으로 활용하고 전색을 충실히 한다. 전색은 일반적으로 최소한 2m 이상 또는 저항선 이상 실시하여야 한다. 또 천공과정 중에 절리의 발달 상황을 잘 파악하여 연약대에 분리장약 또는 중간전색을 실시하여 비산과 발파소음을 제어한다. 이 외에도 도심지나 인구 밀집 지역에서는 발파덮개를 사용하면 효과적이다.

저기압 상태에서는 대기 역전이 일어날 가능성이 많고 일반적으로 발파소음이 지표면에 집중되는 현상이 많으므로 발파를 피하도록 한다. 또 풍향이 적절치 못한 경우에도 발파를 보류하는 것이 바람직하다.

4.4 보호원 대책

발파가 이루어지는 시기는 짧은 기간에 지나지 않으므로 발파의 경우 현실적인 유일한 대안은 차단벽 또는 토사 언덕의 설치 뿐이다. 차단벽의 경우 대개 15dB 정도의 소음 감소 효과가 있으나 발파소음의 경우 발파장내에서는 110 dB(L)에 달하고 저주파수인 경우가 많아 완전한 효과를 기대할 수는 없다.

5. 제 언

건설소음이나 진동은 한시적이고 충격성이며 또 공익성이 많다는 특성상 규제기준의 현실화가 시급하다. 특히 충격성 진동인 발파에 대해서는 규제기준이 미비되어 있으므로 기준의 설정이 절실하다.

현재의 규제기준은 여러 가지 분쟁의 피해인과관계 인정 기준으로 적용되고 있는 실정 이므로 개정이 이루어질 때까지는 준수하도록

기술적 배려가 필요하다. 이는 환경오염을 막기 위해서도 필요하지만 사업상 자기보호를 위해서도 불가피하다.

공사 종료 후의 환경분쟁은 예측의 범위가 넓은 추정이나 배타적 원인판명에 의해 불이익을 당하는 사례가 빈번하므로 발주자나 시공자는 적절한 조치를 해야만 한다. 간략히 요약하면 아래와 같다.

1) 환경분쟁을 피하기 위하여 모든 규제기준을 면밀히 검토하여 시공에 반영한다.

2) 진동, 소음이 발생하는 공사에 대해서는 영향권내의 주민에게 미리 고지하도록 한다.

3) 환경관련 계측을 꼭 실시하도록 하고 계측결과는 기록으로 보존한다.

환경분쟁중에는 가축문제가 적지 않고 조정 사례에서 인체보다 더 엄격하게 적용되어 더 많은 보상책임이 과해지고 있다. 분쟁발생을 최소화하고 보호받기 위해서는 시공장소 주변에 측사가 있는지 여부를 조사하고 축종을 파악한다. 돈사나 우사인 경우 소음, 진동배출 수준을 현행 기준보다 낮은 수준으로 유지하고 방음벽, 차폐막 등 시설을 충실히 할 필요가 있다. 시공전후의 가축 수, 상태 등을 확인한다. 또 대상농가 주변의 진동 소음을 계측하고 기록을 보존한다.

참 고 문 헌

- (1) DIN 4150 Teil 2 (1992) Erschütterungen im Bauwesen-Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden
- (2) ISO 2631-2 (1989) Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 8 Hz)
- (3) 소음진동규제법 시행규칙(95.12.30) 환경부령 제15호
- (4) 양형식 역, 1992, 발파진동학(Dowding, C. H., Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall), 구미서관, 서울, 288p
- (5) 양형식, 1992, 지표발파의 진동특성에 관한 기초연구, 터널과 지하공간(한국암반역학회지) 2.2, 199-211
- (6) 양형식, 1996, 진동으로 인한 인체 및 가축의 피해와 인과관계 규명 및 피해액 산정 방법, 한국자원연구소 위탁연구 과제보고서
- (7) 이경운 외, 1996, 진동으로 인한 피해의 인과관계 검토기준 및 피해액 산정 방법에 관한 연구, 환경부 분쟁조정위원회