

한국암반공학회 1997년도 학술발표회

건축물 및 인체에 대한 발파진동
허용기준 고찰

1997년 3월 28일

한국자원연구소 자원개발연구부
이 경 운

1. 서 론

현재 우리 나라에는 다양한 사회간접자본의 건설이 실행되고 있다. 사회간접자본의 건설은 국가의 장기적인 성장을 위하여 필요한 공공적인 사업이지만 필수적으로 대형의 건설작업이 수반하기 마련이다. 이미 인구의 집중도가 높은 도시지역은 물론이고 농어촌지역에 이르기까지 이들 건설사업으로 인한 진동과 소음 문제로 민원이 끊이지 않고 있는 형편이다. 특히 오랜 개발도상의 기간에 일방적으로 보호되지 못하였던 시민의 권리가 요지음 집단민원의 제기라는 형태로 표출되었고 이 과정에서 진정한 민원피해의 발생여부를 가릴 수 있는 기준이 필요하게 되었다.

진동, 소음은 비상시성 공해원으로서 발생원이 사라지면 그 즉시 소멸되는 것이므로 대기나 수질 혹은 폐기물처럼 희석이 될 때까지 상당한 시간을 요하는 여타 오염과는 달리 지속성이 없다. 그러나 진동, 소음은 인체 감각으로 직접 느낄 수 있다는 점에서 다른 오염들보다 쉽게 문제제기가 이루어진다. 즉 문제의 심각성에 비해 민원의 가능성은 훨씬 많다. 또 진동과 소음은 동시에 발생하는 경향이 있고 건설공사의 경우에는 먼지나 차량의 운행으로 인한 사고 위험성 등이 상승작용을 일으키는 경향도 있다. 우리 나라에서 지난 수년간 발생한 민원문제 중 절반 가량이 진동, 소음으로 인한 것이었다.

환경분쟁조정위원회가 91년 출범한 이래로 접수된 분쟁에 대한 사항을 보면 소음, 진동 관련 건수가 전체의 50%를 차지한다. 나머지는 건설관련 건으로 이 중 절반에 해당하는 14건이 발파와 관련되어 있다.

실제에 있어서는 진동이나 소음 문제는 피해의 정의가 모호할 뿐만 아니라 법령과 시행법규도 비교적 미비한 형편이어서 최종적인 판정은 전문가에 의존해야 하는 형편이다. 특히 법령에서는 규제를 위한 기준만 설정되어 있을 뿐

이며 그나마 건설진동이나 소음을 여타의 상시적인 교통진동과 소음, 공장진동과 소음, 생활소음과 거의 동일한 기준으로 규제하고 있는 등 법규의 뒷받침이 되어 있지 않기 때문에 판례에 따라 불합리한 판정이 계속되고 있다. 일례로 건설진동에 대한 규제는 주간의 주거지역에 대하여 수직보정한 진동규제기준이 65~70 dB이며 소음규제기준도 이와 유사하다. 그러나 이러한 수준에 대해서는 전혀 진동에 영향을 미칠 수가 없고 인체에 대해서도 어떤 병리적인 현상이 나타날 수 없는 정도이다. 통계적으로는 약 5 % 정도의 주민이 진동에 대한 불쾌감을 토로하는 정도가 되며 그나마 이 수준의 진동에 대해서는 진동주파수 영역에 따라 반응이 현저하게 다르기도 하다. 따라서 규제기준과 배상기준은 달라야만 하며 인과관계의 규명을 위한 측정방법, 정신적 피해배상액 산정기준 및 방법 등 체계를 정립할 필요가 있다.

96년 말까지 환경부의 위탁으로 국내외의 여러 판례나 보고서들을 수집하고 검토하여 진동에 의한 피해분쟁 사건의 인과관계 규명 및 피해액 산정을 위한 기초조사 및 기본체계 정립을 통하여 규칙제정의 근거자료로 삼기위한 연구를 수행하였는데 오늘 그 중에서 건설진동을 비롯한 진동에 의한 건축물 및 인체의 진동 감응도, 허용한계를 고찰하고 하나의 안으로 기준을 제시하고자 한다. 이 자리를 빌어 연구에 참여한 류창하, 박철환 박사등 연구소 연구진과 전남대 양형식교수의 적극적인 협력에 감사하는 바이다.

2. 피해기준 척도로서의 최대진동속도

구조물에 대한 진동피해에 대하여 많은 연구가 진행되어 그 결과 진동속도를 기준척도로 하여 피해기준을 두는데에 공감을 하고 있다. 건축물에 영향을 주는 진동원에는 지진 진동을 제외하고도 많은 것이 있어 피해의 가능성으로 볼때에 발파진동 뿐만은 아니다. 공장진동, 교통진동, 철도진동, 건설진동 등이 주변의 건물에 피해를 줄 수 있을 것이다. 그러나 이러한 진동원은 주위 가까이 대상물이 있을 때를 제외하고는 현재 기준으로하고 있는 피해진동 한계에 달하지 않는 경우가 대부분이다.

지반진동에서 피해정도를 규정하는 요소로서 진동속도를 기준으로 하지만 속도 자체는 피해를 유발하지 않고 다음과 같은 경우로서 건축물에 피해를 주게된다.

1. 차등변위, 즉 기초지반의 운동으로 의곡을 일으킬 때
2. 지반의 입자속도 벡터가 크기 혹은 방향을 변화하여 그 결과 건축물의 관성력이 발생할 때

실제로는 건축물은 이 두 가지 의곡과 관성력에 동시에 지배받으며 여러 이유로서 기존하던 응력 및 응변에 중첩이 된다. 이와 같은 복합적인 영향요소가 건축물이 견딜 수 있는 한계를 넘을 때 피해가 발생한다.

입자운동을 수직 및 수평적으로 나누어 의곡과 관성력 factor 에 대한 건축물의 반응을 도식화하면 그림 1과 같다. (New, 1990)

기초지반에서 의곡을 발생시킨 전단응력 γ 는 입자속도 V 와 전단파 (shear wave) 전파속도 C_s 에 비례하며 반면 dilatation 에 의한 응변 ε 은 압축파 전파속도 C_p 에 비례한다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

즉

$$\gamma = \frac{V}{C_s}$$

$$\epsilon = \frac{V}{C_p}$$

이 계산방법은 지반운동에 인접하여 움직이는 어떠한 건축물, 즉 파이프, 터널, 기초 등에도 적용할 수 있다.

그러나 건축물에서는 실제 의곡변형은 건축물의 응답에 따르게 되어 고유진동주파수와 감쇠특성이 지반운동으로부터 비롯되는 응변량을 결정하게 된다. 단순화하기 위해 지반운동의 주파수가 건축물 규격보다 긴 경우를 보면 그림 1b와 1d 에서와 같이 건물을 상하 좌우로 움직이도록 하기 위해서는 건축물과 지반 경계면에 힘의 작용이 필요하다. 이 힘은 건축물의 질량과 지반운동으로부터 기인하는 가속도에 좌우된다. 가속도 a 는 입자속도 V 와 주파수 f 와의 함수임으로 다음과 같이 표현된다.

$$a = 2\pi f V \quad (\text{단 조화운동일 때})$$

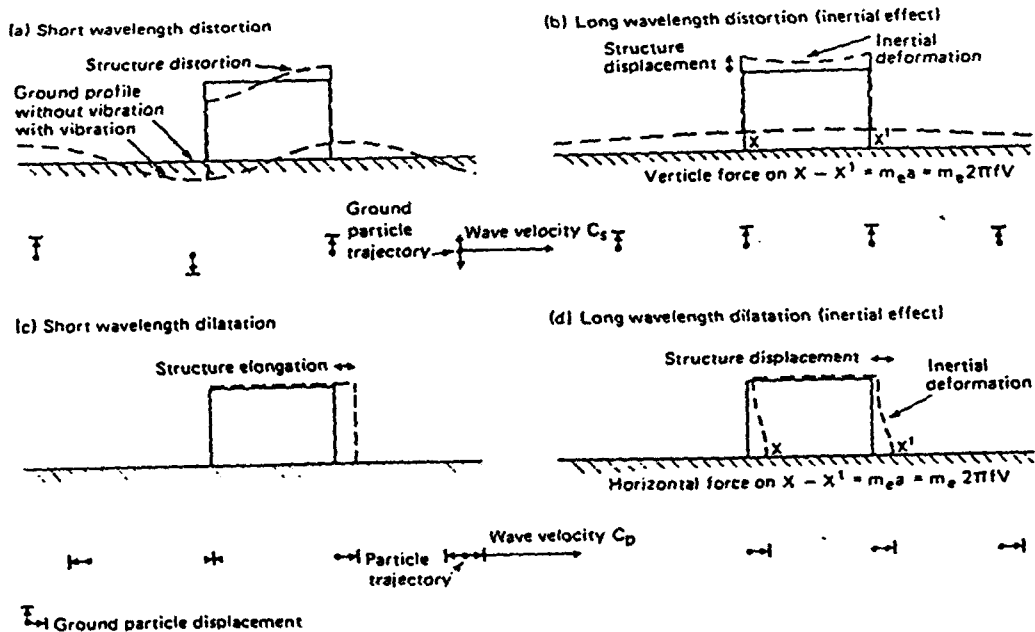


그림 1 지반운동에 의해 발생된 변위와 관성력

다시말해서 건축물 내에서 전달되는 실제 작용력은 입자의 응답특성에 달려 있지만 주어진 구축물에서 피해를 주는 지반진동과 관련되는 매개변수는 입자 속도와 주파수로 확정할 수 있다. Langerfors와 Kihlstrom(1978)은 건축물이 세워진 기반의 전파속도가 피해정도 수준에 영향을 주는 것으로 처음 발표하였고 피해시작한계를 규정한바 있다.

발파에 의해 발생하는 파들은 그림 2a와 같이 압축파, 전단파, 표면파의 세가지 범주로 크게 나눌 수 있다. 파동을 완전하게 설명하기 위해서는 그림 2b처럼 운동의 세방향 직교성분을 측정하여야 한다. 짧은 거리에서는 세 개의

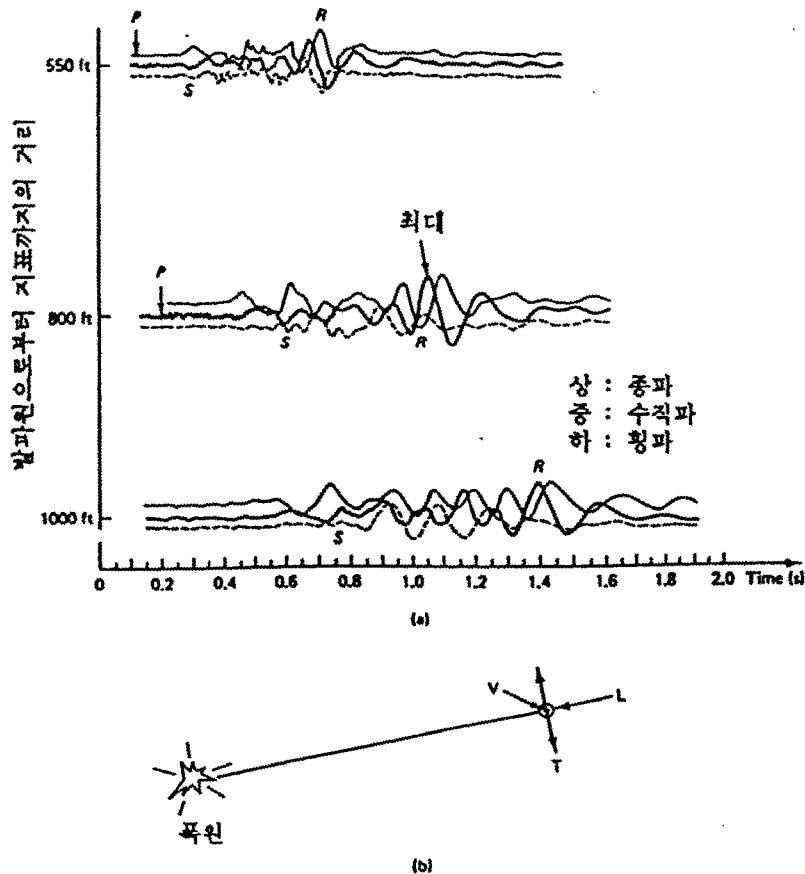


그림 2 발파 진동의 일반적인 형태, 상대적 크기 및 도달시간,
P:압축파, S: 전단파, R:레이리파

파가 모두 함께 도달하여 파의 형태를 구별하기가 대단히 복잡한 반면 먼거리에서는 느리게 움직이는 전단파와 표면파가 압축파로부터 분리되기 시작하여 구별이 된다.

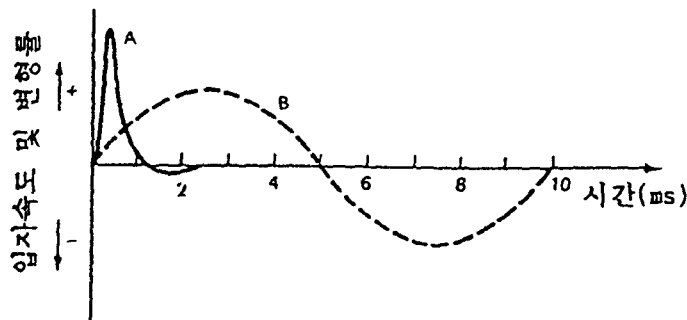
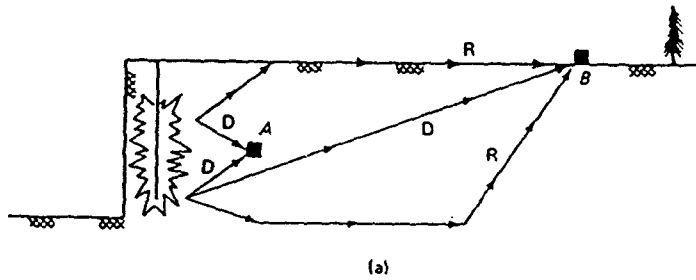


그림 3 두 가지 대표적인 발파 배열에 대해 이상화한 파형

(a) 발파 변환기, (b) 이상화한 파. D: 직접 전달파, R: 반사/굴절파

그러나 대부분 발파는 밀리세컨드로 지발되며 적은 량의 장약으로 직렬기폭됨으로 진행경로와 지발시간의 차에 따라 전파면과 파형이 겹쳐지게 된다. 대부분의 발파문제에서 그림 3a의 B지점에 해당하는 곳에 수신기를 두어 측정한다. 근접한 곳에서의 폭발은 A지점에 직접 전달되어 뾰족한 파동 A를 만든다. 폭원에서 먼 위치 B에서는 직접 전달파, 반사파, 굴절파 등이 조합되어 대체로 sine파인 B를 만든다.

도심지 개발에서 굴착작업은 불가분 근접발파가 시행되는데 발파진동기록을 통해 중요 변수인 진동크기, 고유주기, 진동지속시간 등을 파악하여야하며 그 범위를 추적하여보는 것은 앞으로의 과제라할수 있다. 한편 발파에서 주파수의 기록은 매우 중요하며 주파수에 따라 건축물 인체 등의 반응정도가 다르기 때문에 허용기준에서도 구별이 있게 된다.

3. 진동의 계측과 추정

발파진동속도의 추정

발파진동의 세기에 영향을 주는 變數들을 大別하면 1) 화약의 종류와 장약량, 2) 발파원으로 부터 측정지점까지의 거리, 3) 암반의 力學的, 構造的 특성, 4) 천공패턴, 장약방법, 점화순서 등의 발파방법이며 지역적 특성과 발파조건에 따라 다르므로 대상지역별로 발파조건에 따른 발파진동측정을 통하여 전파 특성을 도출하여야 한다.

가) 일반식

발파진동을 예측할 수 있는 전파식은 진동의 속도성분으로 표시할 때 일반적으로 장약량 및 발파원으로 부터의 거리를 주요 변수로 하여 다음 식과 같은 유형으로 표현할 수 있다.

$$V = k D^a W^c$$

여기서

V = 최대진동속도(Peak Particle Velocity), cm/sec

D = 폭원으로 부터의 거리, m

W = 지발당 최대장약량, kg

k, a, c = 자유면 상태, 화약의 성질, 암질 등에 따르는 상수

나) 次元解析에 근거한 추정식

주요 變數들을 選定하고 次元解析(Dimensional analysis) 技法을 이용하여 해석하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{V}{c} = k \left[\frac{D(r c^2)^{1/3}}{W^{1/3}} \right]^n$$

밀도와 c 의 변화량 W, D 의 영향에 비해 무시할 정도로 가정하면,

$$V = k \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^n \quad (3.5)$$

여기서 n = 감쇠지수

b = scaling 지수

k = 자유면 상태, 화약의 성질, 암질 등에 따르는 상수

D = 폭원으로 부터의 거리, m

W = 지발당 최대장약량, kg

V = 최대진동속도, cm/sec

상기 식의 표현에서 D/W^b 는 거리를 장약량으로 scaling'한 의미를 나타내며 이를 환산거리(scaled distance)라는 표현을 사용할 수 있다. 상기의 식은 장약

량의 세제곱근에 의해 환산한 형태로 이를 세제곱근 환산 (cube root scaling)이라고 부른다.

指數 b는 次元解析에 근거한 1/3의 값 외에도 미국 광무국을 중심으로 처리된 계측결과들에는 다음과 같이 1/2 의 값으로도 처리되고 있으며 이를 제곱근 환산 (root scaling) 이라 부른다.

$$V = k \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^n$$

진동예상식에는 K, n의 입지상수가 포함되어 있는데 이는 특히 발파가 이루어지는 지역의 지반조건과 화약의 배열 및 기폭방식 등에 따라 크게 달라진다. 특히 지층의 두께나 지반내의 탄성과 전달속도와 밀도로 표시되는 지반조건에 따라 큰 폭으로 변하기 때문에 사용하는 장소마다 그 값이 달라진다. 그러므로 발파진동속도의 추정을 위해서는 필수적으로 시험발파를 실시하여야 하고 이를 통해 입지상수들을 결정하여야 한다.

다) 측정사례

강원도 동해시 쌍용자원개발 석회석 노천채굴장

$$V = 326.1 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.47}$$

경기도 시흥시 화강편마암 지역

$$V = 220.3 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.424}$$

4. 건축물의 진동피해 인과 관계

건축물의 진동 민감도에 따른 등급화

진동과 건축물의 피해관계를 연결시키는 일은 여러 이유로 하여 단순하지 않다. 건축물은 다양한 방법으로 규격, 재료, 건축시공 방법 및 여러 형태의 지반을 기초로 하여 구축되기 때문이다. 여기에 더하여 진동의 강도, 진동 종류, 주파수 대역, 파장등과 건축물의 주축과 입사하는 진동 파와의 각도 등이 피해를 주는 영향요소가 될 수 있기 때문이다. 그러나 이 모든 영향요소가 진동피해를 판단하는 데에 충분하지는 못하며 중요한 것은 결국 건축물의 요소에 주는 정력학적 응력수준이 지반침하, 습도의 변화 및 온도변화에 의해 어떠한 부하를 추가적으로 받고 있는 상태에서 조그마한 진동이라도 곧 균열을 발생시키는 키의 역할이 될 수도 있는 극단적인 응력상태를 생각할 수도 있기 때문이다.

따라서 건축물의 진동에 의한 피해를 판단하기 위하여 구분한다면 진동 민감도라는 척도를 아래와 같은 기준으로 검토하여 볼 수 있다.

- 1) 건축물의 종류
- 2) 용도지역별 건축물 구분
- 3) 건축물의 노후도에 따른 등급화

주요 사용 재료에 의한 분류와 용도 지역별 분류를 종합하여 건축물의 등급을 구분하여 표와 같이 판정 기준으로 삼았다. 여기에 노후도에 따른 세분화는 콘크리트의 중성화 깊이, 철근 부식정도, 균열 폭에 따라 3등급으로 하였다.

표 1 진동 민감도에 따른 건축물의 등급화안

등 급	노후도에 따른 세분	건축물 구분	비 고
I	A	철근 콘크리트조의 산업용 및 상용 건물	공업지역 및 상업지역 건축물
	B		
	C		
II	A	콘크리트, 벽돌조의 주거 건물	상업지역, 준주거지 역 건축물
	B		
	C		
III	A	조적조, 시멘트 블록조의 주거 건물. 학교, 종교시설, 병원 건물	전용주거지역 건축 물
	B		
	C		
IV	A	III 등급의 건물이 개축된 경 우, 역사적 보호 건물	
	B		
	C		

- * 전제 조건
- 1) 건축물은 일반적인 건축기술상의 규정으로 지어 졌으며 실정에 맞게 유지 관리된 것이어야 한다.
 - 2) 노후도의 세부구분은 A,B,C로 하며 경과연수, 콘크리트 노후화정도(표 4.2 abc에 의거한 평가)로서 평가한다.
 - 3) 건축물이 특별히 노후화된 경우는 여건에 따라 민감도 등급을 한 단계 낮은 범주에 포함시킬수 있으나 차후 검증을 통한 조정과정에서 확정되어야 할 것이다.

건축물의 피해형태

발파에 의해 발생하는 피해는 폭원이 매우 근접하여 있을때를 제외하고는 지반진동 또는 발파풍에 의한 진동 균열이 주 원인이다. 여기서 발파진동의 피해 규모를 명확히 정의하기 위해 Northwood 등(1963) 은 오래된 회벽가옥을 대상으로 시험한 결과를 토대로 발파진동 피해를 다음과 같이 구분하였다.

- (1) 한계 피해 : 기존하는 균열의 확대 및 회벽에 발생하는 새 균열의 시작, 굴뚝에서 이미 이완상태인 벽들의 움직임
- (2) 경미 피해 : 창문 유리의 파손, 회벽이 떨어지는 등의 손상과 구조물의 강도에 영향을 주지 않는 미세균열
- (3) 중요 피해 : 구조물의 심한 약화를 초래하는 결과 즉 큰 균열, 기초의 변형, 벽체의 변형, 지상층의 약화와 변형을 초래하는 침하, 벽의 기울어짐 등 구조물의 약화를 초래하는 피해

일반적으로 한계 균열을 미세 균열이라고 하는데 76 mm/s에서 나타났고 낮은 구조물에서는 경미 피해가 114 mm/s, 중요 피해는 203 mm/s 에서 발생하였다.

발파진동의 규제 수준은 피해에 있어서 제 1 단계인 균열의 시작을 방지하는 수준에서 결정되며 실제로 이 수준이라면 주택이 일상 생활속에서 자연적으로 노후되는 수준이 되기도 한다. Stagg 등은 매일의 온도, 습도변화에 의한 변형량이 진동속도 수준으로 76 mm/s, 일상적인 실내활동에 의한 변화량은 22.4 mm/s 에 해당되는 것을 실험적으로 밝힌 바 있다.

따라서 일상생활 중에 발생하는 변형률과 온도, 습도 변화로부터 오는 변형률은 미세 균열을 발생시키기에 충분함으로 발파진동을 경험한 후에 건물에서 균열 발생을 발견한다는 것은 놀라운 일이 아니며 모든 원인을 발파에 의한 것으로 믿게 된다.

이에 따라 발파 작업에 앞서서 당사자는 관련되는 지역사회나 개인에게 다음과 같은 사항을 일깨워 줄 필요가 있다.

- (1) 균열은 여러 가지 건축상 하자로 발생한다.
- (2) 집주인이 알고 있건 모르고 있던 간에 주택은 균열을 발생시키고 있으며 해를 거듭할수록 증가한다.
- (3) 이 균열들은 미관상의 문제이지 구조물의 위험을 초래하지 않는다.
- (4) 문을 쾅하고 닫는다든지 주변의 교통진동으로 진동을 일으키면 이것은 발파에 의한 것보다 정도가 심할 수 있다.
- (5) 인간은 건축물보다 진동에 더 예민하다.

건축물의 허용진동도와 기준

지반운동이 어느 진동원에 의해 지속적으로 영향을 받을 때 피해 발생의 가능성은 충격적, 순간적인 진동일 때의 수준보다 낮은 수준에서도 있게 된다. 그러나 도시 건물에 대한 이러한 지속적인 진동 영향에 대해서는 연구된 바가 별로 없다. 교통진동의 경우 Wiffin 과 Leonard(1971) 는 이에 대해 언급하며 결론적으로 건축구조물의 외관을 해치는 피해는 진동 속도가 5 mm/sec 를 초과 할 때이며 구조적 피해는 10 mm/sec 를 초과할 때 생긴다고 하였다. 허용 기준을 정하기위한 안전기준에서 볼 때 상반된 의견이 존재한다. 즉 환경론자의 의견이 점차 대두됨에 따라 표준화 기관에서 인정하는 수준은 불합리할 정도로 낮아지고 있고 건설업자나 화약제조업자는 이와 반대로 건축물이나 인체에 동력학적 진동의 평가기준을 낙관적으로 보는 경향이 있다.

진동 균열 발생 한계에 대한 확률적 연구를 통해 하한선을 결정하려는 연구가 진행되어 왔지만 실제에 있어 건축물의 자연적 노화로 인한 균열과 거의 구별할 수 없는 미세 가시 균열의 발생을 관찰하여 타당한 입자속도를 설정한다는 것도 어렵다. 또 구조적으로 약하고 이미 변형된 벽재로 되어 있는 오래된 가옥을 관측한 결과에 의해 하한이 결정된다면 감리가 철저히 되어 건축된 철근 콘크리트조 건축물의 경우에는 적용 할 수 없다.

미세 가시 균열의 발생에 대한 입자속도 하한 수준에서 균열 발생의 가능성이

5 % 이하인 경우가 Siskind 등 (1980, 1981)에 의하면 12 mm/s(0.5in./s)인 것으로 발표되었고 이것은 즉 머리카락 굵기의 균열이 확장되는 한계균열이 발생할 하한이 되는 것이다. 높은 진동수대역(> 40 Hz)의 피해자료를 확률적으로 분석한 결과는 입자속도가 75 mm/s(3 in./s)에 달할 때까지 작은 균열이 발생할 확률이 5 %가 되지 않는다는 것을 보여준다.

허용진동 수준에 대하여는 표준안을 마련해 놓은 국가들도 있고 아직 그렇지 못한 국가들도 있다. 발파진동에 의한 주변 구조물이나 시설물의 피해는 암석, 토질 등의 지질적 매질을 통하여 전달되는 지반진동과 공기중을 통하여 전파되는 발파풍에 의한 피해로 구분된다. 미국은 미광무국을 중심으로 1940, 1960, 1980년대의 세 번의 주기로 발파진동의 피해에 대한 연구가 이루어져 왔다. 이 연구의 중요한 결론은 건축물의 경우는 발파의 진동속도값 50.8 mm/sec (2 inch/sec) 가 건축물피해의 기준이 되나 주파수가 낮은 경우는 이보다 낮은 12.7 mm/sec (0.5 inch/sec) 에서도 피해가 올수 있다는 것이다. 반면 인체를 비롯한 생물은 발파진동이나 음압에 대하여 진동의 가속도 성분에 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있고 이를 기준으로 그 허용치가 적용되고 있다.

독일은 1986년 기존의 DIN 규격을 보완하여 주파수 특성을 고려한 수정안을 마련하였다. 이 규정에서는 주파수대역을 고려한 점과 건축물의 형태, 최대진동 속도, 진동주파수 및 건물 내에서의 진동치를 변수로 매우 세부적인 규정을 하고 있는데 경계 주파수는 10Hz, 50Hz, 100Hz 로 정하고 있다. 미광무국과 DIN 4150 Part 3의 규정에서 진동의 측정점은 건물의 인접지반에서의 최대진동속도를 기준으로 하고 있으며 DIN 4150 Part 3의 규정에서 건물내의 허용진동 값은 주파수에 관계없이 건물 최상부층 바닥에서 측정된 8 mm/sec - 40 mm/sec 의 진동도 이다.

국내에서는 발파진동에 대한 구체적인 규제조항이 아직 정해지지 않은 상태이며 서울시 지하철 공사 발파작업에 통상 적용하고 있는 기준은 대상 건축물을

네 종류로 분류하여 진동 주파수에 관계없이 0.2 cm/sec - 4.0 cm/sec 의 진동도를 허용하고 있다. 그러나 실제 시공현장에서는 민원의 소지를 줄이기 위해 대상지역의 구조물 형태에 관계없이 문화재 수준의 허용 값인 0.2 cm/sec-0.3 cm/sec 의 낮은 진동도로 제한을 받고 있어 너무 보수적이라는 견해가 대두되고 있다.

1) 독일의 건축물에서의 진동 영향 평가기준 DIN 4150 Part 3 의 특징
이 규정은 규제치 내로 준수될 때는 건물의 가치를 떨어뜨리는 손상을 주지 않는다는 면책기준이며 건물이나 그 일부분의 손상으로 가치가 절감되었다는 것은

- (1) 건물이나 부재에서 안전상의 지장 초래
- (2) 천장바닥의 지지능력 감소

이거나 또는 주택이나 진동에 예민한 건물 혹은 보존가치가 있는 역사적 보호 건물 등에서 가치의 감소라고 할 때는 예를 들어

- (1) 벽체의 회벽에 금이 갔거나
- (2) 이미 존재하던 실금이 확대되었거나
- (3) 내력벽에서 또는 천정에 금이 가는 것을 말한다.

표 2는 최대 진동속도, 기초에서와 최상층에서의 v_i 값을 나타내고 있다.

이 기준 값은 높은 빈도로서 피로현상을 일으킬 요지가 있거나 시간적 간격에서 공진을 일으킬 요지가 적을 경우이며 표 에 제시된 기준 값을 지켰을 경우 진동에 의한 원인으로 가치를 감소시키는 피해는 발생하지 않으며, 그래도 만일 피해가 관찰되었다면 이 피해의 결정적인 원인은 다른데 있으며 기준치 초과가 명확하다면 상세한 조사가 뒤따르고 특히 저주파에서의 경우를 유의한다.

결론적으로 상층부 천장바닥에서의 진동이 20 mm/s 이하이면 건축물의 피해

표 2 충격진동의 영향을 평가하기 위한 진동속도 기준 (DIN 4150 Part 3)

항	건물 형식	기준 진동속도 v_i mm/sec				최상층 바닥면
		기초			모든 주파수대	
		주파수 대				
		< 10 Hz	10 - 50 Hz	50 - 100* Hz		
1	상업지역 건물, 공장지역 건물 및 이와 유사한 형식의 건축물	20	20-40	40-50	40	
2	주택건물 및 부속 건축물과 활용 면에서 이와 유사한 건축물	5	5-15	15-20	15	
3	특별히 진동에 민감하여 1항과 2항에 해당되지 않거나 특별히 보존가치가 있는 건축물(예: 역사적 기념물)	3	3-8	8-10	8	

*) 100 Hz 이상의 주파수에서는 100 Hz 에 준한 값을 최소한의 기준 값으로 한다.

가 없음이 보장된다. 특수한 경우이지만 진동 햄머나 브레이커등으로 발생하는 진동은 짧은 시간충격이 아님으로 상시진동으로 간주하여 공진과 피로현상이 벽체와 천장바닥에 발생하는지의 여부를 계측과 계산으로 판정하지만 지속적으로 수평진동이 5 mm/sec에서도 하등의 피해가 없으며 이 값은 상업지역, 공장지역 건물과 주택지역 건물에서의 경험적 결과이다.

2) 미광무국의 기준의 특징

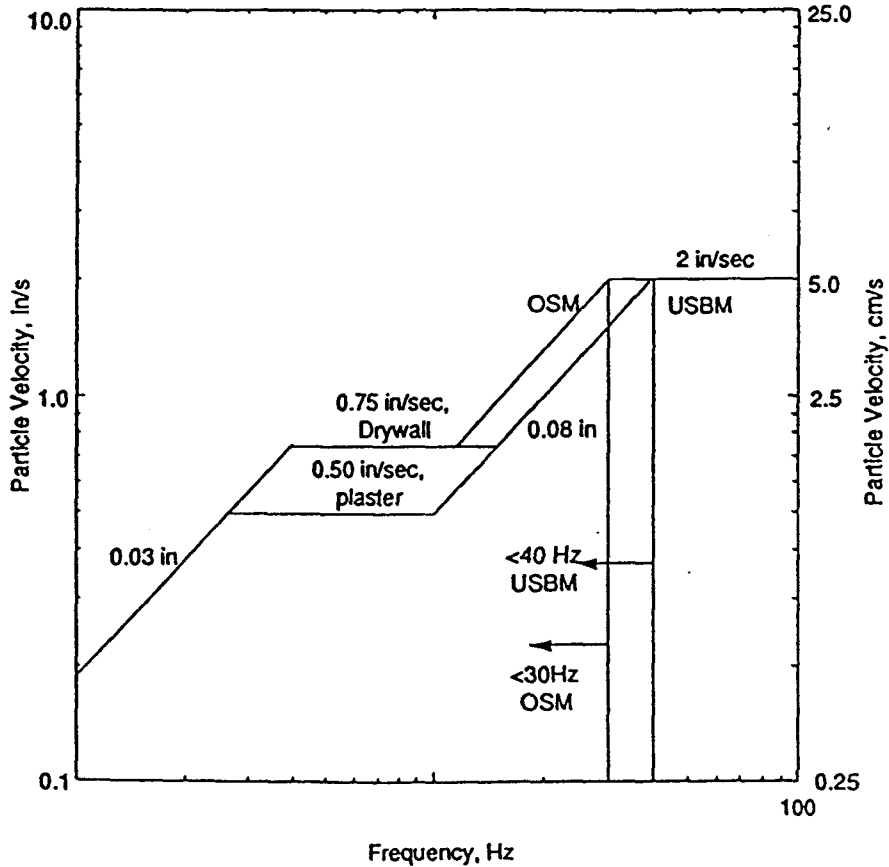


그림 4 US Bureau of Mines 의 지반진동에 대한 기준

3) 스위스의 기준 SN 640 312a 의 특징

스위스 도로교통위원회 산하 전문위원회 가 1987 부터 작업을 시작하여 1992 년 4월 Norm 640 312 a 를 승인 받았다. 새 규정에서의 특징은 고층 및 지하 층에서의 건축물의 “민감도 분류” 이며 “빈도분류” 및 진동속도의 주파수에 대한 고려가 포함된 것이다. 주파수가 8Hz 이하일 때는 발파진동 규정에서 보다 더 낮은 기준치를 적용하며 이 기준 값을 지키게 되면 진동에 의한 피해를

막을 수 있다.

표 3 건축물에 대한 충격진동 영향 기준치

민감도 등급	빈도 등급	최대 진동속도 벡터 (V_R) mm/s 결정적인 주파수대		
		< 30 Hz*	30-60 Hz	> 60 Hz**
(1) 극히 적게 민감	가끔씩 자주 계속적	기준치: 민감도 등급(3)의 3배까지에 해당하는 값		
(2) 적게 민감	가끔씩 자주 계속적	기준치: 민감도 등급(3)의 2배까지에 해당하는 값		
(3) 보통으로 민감	가끔씩 자주 계속적	15 6 3	20 8 4	30 12 6
(4) 극히 민감	가끔씩 자주 계속적	기준치: 민감도 등급(3)의 값과 1/2수준 사이의 값		

*) 8 Hz 이하의 주파수에서는 최저 기준치를 적용

**) 150 Hz 이상의 주파수일 경우는 더 큰 값의 기준치를 적용할 수 있다.

1) 이 규정에서도 민감도로 네 등급을 설정했고 고층과 지하층을 구분하였다. 분류에서 결정적인 기준이 되는 점은 구조물 각 부재의 민감도로써 건축구조 양식 및 기타 요소, 예를 들어 건축자재, 건물 상태, 외벽처리, 회칠 등으로 부터 정해지는 것이다.

2) 진동의 빈도수에 따른 진동영향을 세 등급으로 나누어 가끔씩, 즉 조사하는 평가시간 간격에서 영향수가 1,000 보다 훨씬 작을 때와 자주, 계속적, 즉 영향수가 100,000 보다 훨씬 많을 때로 구분하고 있다.

3) 주파수대역을 구분하여

- 8 Hz 부터 30 Hz 사이
- 30 Hz 부터 60 Hz 사이
- 60 Hz 부터 150 Hz 사이로 정하고 있다.

진동에 의한 피해정도를 평가하는 내용은 최대 진동속도 벡터 V_R 로서 mm/s 단위로 표현되며 여기에 발생 빈도와 주파수대가 고려되어야 한다. 계측된 값이 기준치 이하에 있으면 적은 피해정도도 가능성이 없으며 기준치의 30%를 초과하는 몇 번의 초과 값으로만도 피해가능성의 확률을 거의 높이고 있지 않다. 만일 기준치의 2배의 값이 작용한다면 피해는 가능성이 있게 된다. 연결된 균열이 생기게 되는 경우는 기준치의 몇 배가 될 때 일 것으로 본다.

4) 스웨덴의 발파진동 영향 평가기준 SS 460 48 66 의 특징

스웨덴 표준은 1989 에 승인되어 1991 년 개정되었다. 건축물에 영향을 주는 발파진동 수준을 결정하는데 큰 도움이 되며 인체 혹은 진동에 예민한 장비 시설은 고려하지 않고 있다. 세 성분의 진동속도 값을 계측하여야 하며 건물의 기초지반에서 계측하도록 규정한다.

기준 값 v 는 다음 식과 같이 규정한다.

$$v = v_0 F_k F_d F_t$$

여기서 v_0 는 보정되지 않은 최대 진동속도 (mm/s)

F_k 는 건축물의 품질 계수로

$F_k = F_b F_m$ 즉 건물계수와 건축재 계수의 積으로 표시

F_d 는 거리 계수

F_t 는 발파작업의 작업기간을 표현하는 계수

이와 같은 값은 별도의 표 에 의해 결정하여 계산된다.

우리 나라 건축물의 진동허용기준안

현재 국내 발파 현장에서 통상적으로 적용하고 있는 기준에 대한 문제점들을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 국내의 경우 아직 발파진동에 대한 표준 code가 없는 상황에서 작업장 별로 일정하지 않은 기준들이 적용되고 있으며 민원 발생시 민원 해결을 위한 근거에 대한 타당성 등 문제가 끊임없이 제기되고 있다.
- 2) 현재 지하철 공사 등 일부 토목현장에서 설계 기준 값으로 적용되고 있는 지반진동속도 0.2 - 0.3 cm/sec의 수치는 1980년대 허용기준의 제안시 문화적 유물과 같은 건물에 대한 것이었으나 최근에 와서는 발파 설계에 일률적으로 적용됨에 따라 작업능률에 심각한 영향을 미칠 뿐만 아니라 발파작업 자체를 어렵게 하고 있다. 이러한 수준은 발구름에 의해 유발될 수도 있는 수준에 해당한다.
- 3) 일본 기상청에서 사용하고 있는 지진에 대한 진도표시와 진동 속도로 표시 하는데 있어서는 진동 특성에 있어서 상이하므로 그 영향에 있어서도 수준이 다르다. 이 표에 의하면 진도 II 에서 일반인이 느끼고 문이나 미닫이가 움직이는 정도이며 진동속도로 0.12 cm/sec로 대비되지만 발파진동의 영향과 대비 되지 않는다.
- 4) 발파진동을 계측하는 기기들은 모두 진동속도를 출력하도록 되어 있으나 국내 규제안은 dB 단위로 규제되고 있어 인체의 감응도의 기준한 척도를 바꾸어야 한다.
- 5) 주택공사에서 도심지 택지조성공사시의 진동허용기준을 제시한 것을 살펴 보면 문화재, 컴퓨터 등 정밀기기가 설치된 건물의 경우는 0.2 cm/sec, 주택, 아파트 등 거주민이 많은 건물은 0.5cm/s, 상가, 사무실, 공공건물의 경우는 1.0 cm/s, 철근 콘크리트, 철골조 공장은 4.0 cm/s 로서 독일의 발파진동에 대한 허용기준인 DIN 4150 을 참조한 지하철 2,3호선 공사시 발파진동의 허용기준과 유사한 점이 많다. 그러나 주택공사의 기준에는 기타 인체가 진동을 느

끼지만 불편이나 고통을 호소하지 않는 한계로서 1.0 cm/sec 를 제시하고 있어 인체반응을 고려하였다고 하지만 건축물의 균열피해 기준과 인체에 대한 불평 기준을 활역히 구별하여 주지 못하고 있다.

임한옥 등이 콘크리트 구조물에 대하여 30 Hz 이하에서 0.8-2.0 cm/sec, 30 Hz 이상에서는 1.0-4.0 cm/sec 의 허용기준을 제안하는 등 점차 주파수대역에 대한 고려가 대두되고 있다.

6) 발파진동에 의한 굴착공사 부근 가옥에서 기존 실금의 변화를 5개월간 관찰한 결과 진동 수준이 0.1mm/sec 에서부터 최대 42 mm/sec, 그 중에 10 mm/sec 가 65%, 5 mm/sec 이내가 93%인 총 92회에 걸친 발파작업과정에서의 변화를 보면 -0.03 mm 에서 +0.08mm 로 기존 균열의 확대를 확인 할 수 없다는 결론을 얻고 있다.(강대우, 1996)

7) ISRM 의 발파진동 계측방법의 표준화제안에서도 앞에서 제시된 확실적인 피해한계 데이터로부터 12mm/sec 및 20 mm/sec 를 하한선으로 할 것을 제안하고 있다.

8) 일반적으로 상한선은 주파수대역이 높은 경우와 철근 콘크리트와 같은 건축구조상 진동에 영향이 적은 건축물 및 산업지역 건물에 적용하며 기준 값의 3 - 5배 까지 즉 50 mm/sec 를 정하고 있다.

이상의 검토로부터 건축물의 진동 허용수준(안)을 표 5 와 같이 제시한다.

주파수 대역의 구분은 10 Hz, 10 - 40 Hz, 40 Hz 로 하였고 대상 건축물의 구분은 민감도에 따른 4등급으로 하였다.

표 5 건축물의 진동허용 기준(안)

민감도 등급	대상건축물	진동속도 mm/sec		
		주파수 대역		
		< 10 Hz	10 - 40 Hz	> 40 Hz
I	공업지역 및 상업지역의 철근콘크리트조의 산업용과 상업용 건물	15	15 - 45	45 - 50
II	주거지역의 콘크리트, 벽돌조의 주거건물	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

- * 1) 민감도에서 보통인 III등급을 기준으로 I등급은 3배까지에 해당하는 값, IV등급은 1/2 수준에 해당하는 값임
- 2) 기준값 5-15 mm/sec(주 주파수에 따라 기준값이 정해짐)는 ISRM의 하한선 한계인 12 mm/sec를 근거로 함.
- 3) 상한선 한계는 DIN, ISRM 및 Esteves의 상한폭을 근거로 함.
- 4) 이 기준값은 건축물이 노후도 등급 A에 속할 때 임.
- 5) 이 기준값은 각 방향성분중 최대 값을 의미하며 순간적인 충격진동에 대한 기준값임.
- 6) 이 기준값은 건축물의 기초지반에서 측정된 것으로 하며 건축물내 최상층에서 계측 할 경우 40Hz 에 해당하는 값을 기준값으로 할 것을 제안하며 추후 검증과정에서 조정되어야 할 것임.

5. 진동의 인체에 대한 영향

진동에 대한 인체의 감응도 및 허용기준

진동이나 소음이 인체에 미치는 피해는 생리적인 피해와 심리적인 피해를 들 수 있다. 심리적인 면에서의 진동 영향은 개인이 갖고 있는 감정이나 분위기에 의해 크게 좌우되며 개인차가 크다. 생리적인 반응은 객관적인 심리현상, 호흡, 맥박, 신진대사 등의 변화를 의미하며 심리적인 면에 비하여 개인적 차이가 극단적이지 않다.

우리는 실제 생활에서도 상당한 수준의 진동이나 소음에 노출되고 있다. 예컨대 차량이용자에게 가해지는 진동 수준은 10 cm/sec이 넘는 경우가 많고 교통량이 많은 도로변에서의 보행중 소음 노출도는 80 dB을 상회하는 경우가 허다하며 방 안에서 측정한 구형 패종시계의 소음이 84 dB인 경우도 있다. 그렇지만 이러한 진동, 소음에 대하여 특별한 신체적 장애가 발생한다고는 알려져 있지 않다. 비록 진동이나 소음이 '원하지 않는' 진동과 음향이라고 하더라도 이토록 높은 수준에서의 진동이나 소음에 대해서 특별한 신체적 증상이 없으므로 대개의 진동, 소음에 의한 피해는 정신적인 것으로 볼 수 있다.

그러나 특정한 환경에 따라서는 소음에 의해 수면장애나 체온의 변화, 침샘의 건조 등 여러 가지 생리적 변화를 야기할 수 있다. 이러한 증상이 바로 생리적 피해에 연관되지는 않는다고 하더라도 심리적인 불안감이나 불쾌감을 야기할 수 있고 정신적인 압박감에 의한 이차적인 생리적 피해를 초래할 수 있을 것이다. 이런 점에서 원하지 않는 진동이나 소음으로 인한 정신적 피해를 불러 일으키는 수준은 신체적 피해를 불러오는 진동, 소음 수준에 비하여 낮게 마련이다.

진동에 대한 인간의 반응 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 진동은 인간에게 위협을 알리는 신호로 해석하는 본능적인 감각 대상으로 특히 사전에 경고가 없으면서 발생원을 파악하기 어려운 진동에 대해서는 매우 불쾌하게 감지된다.
- 2) 진동이 소음, 초고음과 같은 다른 저해요소와 병행해서 발생될 때는 더 크게 부각된다. 인간의 반응은 유전적 조건 외에도 학습에 따른 영향이 있다. 즉 진동을 수반하는 둔탁한 소음은 지진을 연상케 하여 어떤 사람에게서 공포감을 일으킨다. 반면 지나가는 트럭의 소음과 진동은 무엇이 발생원인지 즉각 판단할 수 있어서 밝혀지지 않은 발생원에 대한 진동과 비교하여 약하게 반응하게 된다. 또 원하지 않는 소음이나 진동이 반복적으로 영향을 주면 불평에 상승효과를 가져오게 되어 실제 계측되는 수준에서보다 다른 반응을 하게 된다.
- 3) 이와 반대로 주변의 소음과 진동을 일으키는 사항이 본인에게 피할 수 없는, 또 이익을 주는 수단이라고 하면 인내할 수 있는 수준이 상당히 높게 된다.
- 4) 수면에도 학습효과가 있다. 즉 전에 방해를 받으며 자던 습관의 사람은 조용한 환경에서 자던 사람보다 주변 진동에 덜 예민하다.

결론적으로 보면 인체에 주는 진동수준을 어느 선에 두어야 불평이 없게 되는가는 매우 어려운 일이다. 낮은 수준에서도 몇 퍼센트의 사람은 불평을 하게 된다. 확실한 점은 진동 노출시간이 짧으면 짧을수록, 또 사전에 진동에 노출되는 이유와 주는 영향 및 확실한 시간을 알려 줌으로서 참을 수 있는 수준은 높아진다는 사실이다.

인체의 진동에 대한 감응은 사람마다 다르고 같은 사람이라 하더라도 신체적 심리적 상태에 따라 다를 수 있다. 따라서 이를 모두 반영하는 포괄적인 기준의 산정은 어렵다. 이런 점에서 필연적으로 통계적 접근이 필요하며 여러 학자들에 의해 발표된 자료를 살펴보면 다음과 같다.

Reiher와 Meister(1931)에 의하면 인체는 주진동수 3~10 Hz, 진폭 0.0001 cm의 조화진동을 받고 있을 때 서 있는 경우에는 연직진동에, 누워있는 경우에는 수평진동에 더 민감하다고 하였다. 이들은 또 정현파 진동을 500 초동안 주어 불쾌감을 느끼는 한계를 밝혔는데 30 Hz에서 0.5 mm/s에 달할 때, 5 Hz에서 50 mm/s에 달할 때이다. Crandell (1949)은 구조물에 피해를 주지 않는 정도의 진동에 대하여서도 인체는 감지하여 불안감 등을 가질 수 있다고 보고하였다. Guignard와 Irving(1960), Rathbone(1963) 들은 인체공학적으로 진동문제를 다루어 인체의 고유진동수와 일치하는 진동에 대하여 인체의 지각력이 더 예민해지고 불편한계도 낮아진다고 발표하였다. 인체의 주진동수는 1~10 Hz이며 사람에 따라 자세에 따라 다르지만 대개 서 있을 때는 5~12 Hz, 누워있을 때는 3~4 Hz, 앉아 있을 때는 4~6 Hz 정도이다. 성별차가 있지만 개인차가 더 크다. 인체의 감수성은 0.001 g 이상이며 한계주파수도 1,000 Hz에 달한다. Salmon은 진동에 대한 인체의 감응을 3단계로 구분하고 진동수준에 따른 주민의 불편이나 항의를 통계적으로 처리하여 진동의 한계를 주민수 10 %가 불평하게 되는 선에서 결정하여 1 cm/s를 제안하였다. Wiss와 Parmelee(1974)는 연속적인 진동과 1회의 충격에 대하여 조사하였으며 Siskind(1980)에 의하면 0.6 초 동안의 단일 진동으로는 12 mm/s에 도달하지 않고는 확실하게 감지할수 없다고 하였고 이에 대해 ISO 지침은 노출 최단시간이 1 분으로 되어 있다.

ISO의 전신진동에 대한 인체의 노출 평가 일반사항

학자들의 다양한 제안에도 불구하고 각자의 진동 측정방법이나 평가방법이 통일되지 않아 국제표준기구(ISO)에서는 1974년에 전신진동 노출의 평가에 관한 지침(ISO 2631)을 정하였고 이 규정은 1978, 1982년의 개정을 거친 후 1985년과 1989년에 다시 확대되어 오늘에 이르고 있다. 이 기준은 세계적인 기준이 되고 있으며 일본과 우리나라에서도 법규와 규제기준의 많은 부분을 이에 기초하여 제정하고 있다. 이 지침은 고체의 표면으로부터 전신에 전달되는 1

~80 Hz의 진동에 대한 수치적 노출기준을 다루고 있다. 기준은 쾌적함 유지 (preserving comfort), 능률(working efficiency) 그리고 안전 즉 건강(safety or health)을 위한 기준으로 정의하였으며 그 한계를 쾌적성 감퇴한계(reduced comfort boundary, 이하 쾌적한계), 피로-능률 감퇴 한계(fatigue - decreased proficiency boundary, 이하 능률한계) 그리고 노출한계(exposure limit)의 세가지 기준선으로 나타낸다.

ISO의 건물진동에 대한 인체의 노출 평가

1989년에 건물내의 지속적 및 충격적 전신 진동에 대한 인체의 노출 평가를 위한 기준 ISO 2631-2를 제정하였는데 기존의 ISO 2631-1은 사실 비행사나 운전자와 같이 직업적으로 진동을 받는 사람들에 대한 것이었기 때문에 일반인들에 대한 진동노출도 평가의 기준으로는 다소 무리가 따랐던 것이 사실이다. 이런 점에서 ISO 2631-2는 건물내에 있는 인체가 불편함을 느끼는 기준에 대해서 평가할 수 있는 여러 가지 사항들을 제안하고 있다.

건물 내에서의 진동에 대한 불만은 대개 인지할 수 있는 수준을 조금만 넘으면 발생하는 것으로 여러나라에서 보고되고 있다. 일반적으로 만족수준은 최소 불만수준과 관련이 있고 피로나 건강상의 장애 수준과는 무관하다.

건설이나 굴착작업과 같이 일시적이거나 짧은 동안의 드문 진동과 같이 최소 불만수준보다 높은 수준의 진동을 참아낼 수 있는 상황도 있다. 경고음, 통지, 규칙적인 발생, 적절한 대민관계 등으로 놀람은 감소될 수 있다. 아주 드문 경우를 제외하고는 피로한계나 노출한계와는 무관하다. 설계기준의 설정은 경험적, 사회적, 경제적 요소를 고려해야하며 실효치를 기본으로하여 1/3 옥타브 중심주파수에 따른 기초곡선을 활용할수 있고 그림 5, 6 과 유사하여 여기에 서는 생략한다.

독일기준 DIN4150 Part 2 의 건물내 인체에 대한 평가 기준

DIN 4150의 part 2는 1975년 제정되었다가 1992년 개정된 것으로 ISO의 기준 설정에 많은 영향을 미친 것으로 알려져 있다. 이렇다 할 통계적 연구가 이루어지지 못하고 있는 우리나라의 형편에 비추어 독일의 경험은 추후 기준 설정에 큰 도움이 될 것이다. 1992년의 개정은 1979년의 주된 개념인 KB값을 좀더 보편적인 A 기준으로 종합한 것이며 종래의 KB에서 A로의 환산이 가능하다.

이 규정은 1-80 Hz까지의 진동에 대하여 적용되며 건물 내부의 바닥을 통하여 인체에 전달되는 진동을 대상으로 한다. 진동은 정현파나 임의 주기의 진동과 비주기성 진동까지 포함된다.

진동을 통해 인체가 느끼는 고통은 진동의 여러 가지 물리량 즉 진폭, 속도, 가속도 등의 크기, 진동 주파수, 지속시간, 출현빈도, 발생시간대, 충격적 효과(놀라게 하는 정도)에 좌우되며 진동을 받게되는 인체의 건강상태나 진동이 작용할 때 사람의 활동 상황, 진동발생에 대한 적응도와 정신적 자세 등 같이 객관적일 수 없는 상황도 관련이 있다. 그외에도 진동에 수반하는 소음이나 시각적인 효과 등도 크게 영향을 미치게 된다.

따라서 진동의 영향을 정량화하기 위하여 독일기준은 “사실인식 강도(Wahrnehmungsstärke) KB”라는 개념을 도입하였다.

KB는 건물 내에서의 진동량(진동변위, 진동속도, 진동가속도)과 진동주파수로부터 구하게 되며 지속시간, 빈도 및 발생시간대에 따라 세분화한다. KB허용치는 건물의 주변환경, 진동의 지속시간과 빈도 및 발생시간대에 따라 구분되며 어떤 KB값이 허용치를 넘지 않으면 현저한 불쾌감이나 고통을 느끼지 않게 된다.

진동환경하의 건물에 사람이 거주할 수 있는 조건을 평가하는 KB 곡선을 진동의 크기와 진동주파수의 함수로 정의하여 제시하고 있다. 이 곡선은 1-2 Hz 범위에서는 가속도에, 8 Hz 이상에서는 진동속도에 비례한다. 그 사이는 보간

처리하였으며 최대 오차는 1 dB 이내로 되어 있다.

이러한 평가곡선이 KB를 parameter로 하여 그림 5, 6에 각각 가속도 및 속도 향으로 주어져 있으며 이러한 곡선의 근사로서 다음의 식들이 정의되어 있다.

$$KB = a \frac{\alpha}{\sqrt{1+(f/f_0)^2}} \quad a \text{는 가속도 (m/s}^2\text{)}$$

$$KB = v \frac{\beta f}{\sqrt{1+(f/f_0)^2}} \quad v \text{는 진동속도 (mm/s)}$$

$$KB = x \frac{\gamma f^2}{\sqrt{1+(f/f_0)^2}} \quad x \text{는 진동폭 (mm)}$$

여기서 f_0 는 5.6 Hz의 기준 진동주파수이고 α, β, γ 는 진동을 최대치로 측정했을 경우에는 20.2, 0.13, 0.80이며 사인파 파동에 대한 실효치의 경우에는 각각의 값에 $\sqrt{2}$ 를 곱하면 된다.

단속, 충격 진동인 경우에는 최대치에 근거하여 평가한다.

이상의 방법으로 계산한 KB 값은 건축물이나 건물 실내에서 표 6에 나타낸 값을 초과하면 안된다. 특별한 규정이 없는한 낮은 6:00-22:00 시간대를 의미하고 그 나머지 22:00부터 오전 6:00까지는 밤이다. 주어진 KB 값을 초과하지 않는 한 현저한 진동피해는 없다고 본다.

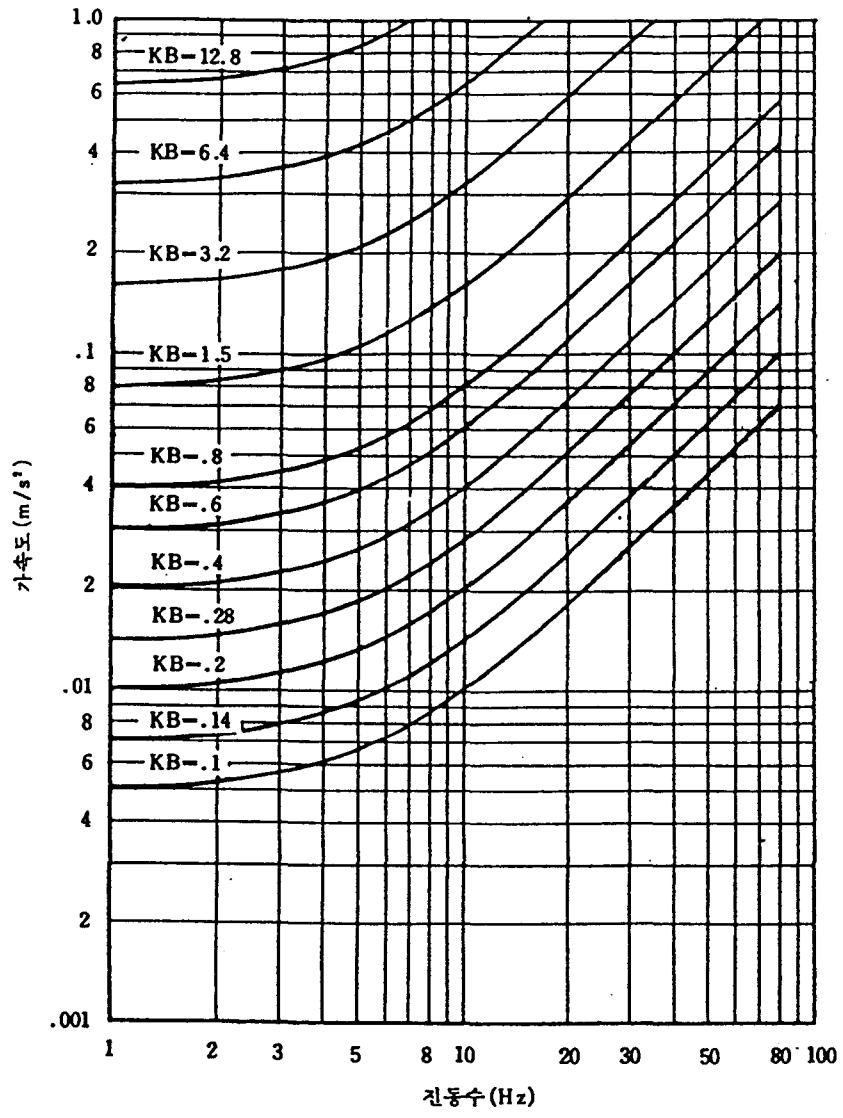


그림 5 KB 값에 따른 가속도 곡선

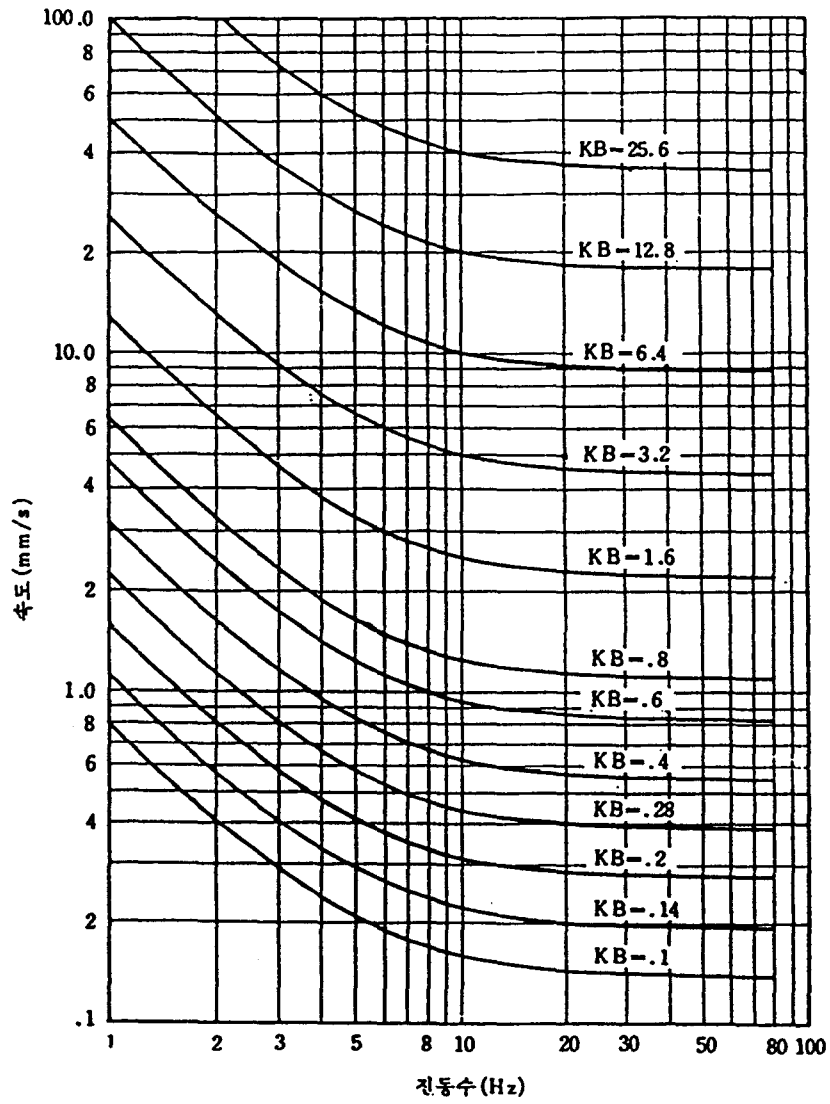


그림 6 KB 값에 따른 속도곡선

KB 값을 계산하기 위한 진동의 측정은 조사하려는 건물에서 수직방향으로 가장 진동이 큰 장소인 바닥에 설치한다. 이런 지점은 보통 상층의 천장 가운데 지점이다. 여기서 구한 KB 기준치를 새로운 기준치인 A_0 로 환산하는데 발파 진동을 포함하여 짧은 기간 동안 단독으로 발생하는 충격진동에 대한 환산은 환산계수 $C_F = 0.6$ 을 적용하여 구한다.

$$A_0 = KB \cdot C_F$$

발파진동 작용에서 구조물에 공진 현상은 일어나지 않으며 이는 영향시간이 1초 미만이기 때문이다. 새 규정에서 진동영향은 A_0 의 값에 의해 판단한다. 여기서 A_0 는 하한기준 값으로 예측된 진동크기가 이 값의 이하라면 규정을 지킨 것이며 만일 상한 기준값 A_0 보다 크다면 규정을 지키지 못한 것이 된다. 또한 드물게 발생하는, 순간적인 진동이 A_0 값보다 작으면 규정에 적합한 경우가 되며 지속적이거나 반복적인 진동 영향의 경우는 예측치가 A_r 보다 작아야 규정을 지킨 것이 된다.

표 6 새 규정에 의한 발파시 기준 값

항	작용지역	낮			밤		
		A _u	A _o	A _r	A _u	A _o	A _r
1	작용지역이 그 주변에 산업시설과 경우에 따라서는예외적으로 시설의 소유자 및 산업체의 책임자가 사는 주택, 감독 및 대기작업자가 거처하는 집이 있는 지역 (§9 BauNVO 산업지역 참조)	0.4	6	0.2	0.3	0.6	0.15
2	작용지역이 그 주변에 대부분 산업 시설이 있는 지역 (§8 BauNVO 산업지역 참조)	0.3	6	0.15	0.2	0.4	0.1
3	작용지역이 그 주변에 대부분 산업시설도 아니고 대부분 주택도 아닌 지역 (§7 BauNVO의 핵심지역, §6 BauNVO의 혼합지역, §5 BauNVO의 마을지역 참조)	0.2	5	0.1	0.15	0.3	0.07
4	작용지역이 그 주변에 대부분 또는 오직 주택만 있는 지역 (§ 3 BauNVO 의 순수한 주택지역, § 4 BauNVO 의 일반적인 주택지역, § 2 BauNVO 의 작은 규모의 집단주거지역 참조)	0.15	3	0.07	0.1	0.2	0.05
5	특히 작용영향으로부터 보호되어야 할 지역 즉 병원, 휴양시설, 및 이와 유사한 지역으로 정해진 특별 지역	0.1	3	0.05	0.1	0.15	0.05

* 괄호 안은 건축사용규정(BauNVO)에서 지정한 지역이며, 규정상 항목 1 부터 4 까지의 특징에 해당한다.

* A_u 는 하한 기준값

A_o 는 상한 기준값

A_r 은 지속적 진동일 때 기준값임

우리나라 소음·진동 규제법

1991년 이후 소음·진동규제법은 모법인 환경보전법으로부터 분리되어 별도의 법으로 되었으며 이는 소음과 진동 문제가 우리나라에서도 중요한 공해문제로 대두되었음을 의미한다. 우리나라에서는 환경문제가 사회적인 문제로 대두된 것이 그리 오래된 일은 아니어서 1963년에 공해방지법이 처음 제정되었으나 선언적인 의미만 있었고 1977년에 이르러서야 환경보전법으로 되었으며 1991년에 소음, 진동을 분리시켜 제정하게 된 것이다.

법 정신은 인간의 쾌적한 삶을 위하여 이상적으로 인식되는 소음 및 진동 환경을 제시하고 이를 추구해 나가고자 하는 것이다. 따라서 제시된 기준들은 방해받지 않는 혹은 사회통념적으로 수인이 되는 수준의 명시라고 할 수 있다. 이 기준들은 주로 일본의 소음규제법과 진동규제법을 많이 참고한 것으로 보이며 일본의 법규가 ISO의 기준을 많이 참조한 것이므로 결국 ISO의 기준은 우리나라의 소음 진동 규제법에 많은 영향을 미치고 있다고 볼 수 있다.

우리나라 소음진동규제법에서 제시하고 있는 기준은 개개시설에 대한 강제적 준수기준으로서의 배출기준 혹은 규제기준이 혼용되고 있다. 그러나 실제 규제수준은 환경개선 목표로서의 환경기준과 같이 이상적인 기준이 제시되고 있는 부분이 없지 않다. 환언하면 지나치게 낮은 소음이나 진동수준을 제시하여 현재의 기술로는 준수불가능한 기준도 있다. 특히 건설진동이 그러한데 일반적으로 건설진동은 중장비의 사용이 불가피하며 인구밀도가 높고 기존 도심지에서의 작업이 불가피할 때가 많다. 또 건설공사 자체가 공익적인 성격을 띄는 사업인 경우가 많으므로 사회 통념상의 수인되는 수준이 높을 수 있음에도 불구하고 법 시행규칙은 지나치게 낮은 기준을 제시하므로써 건설자체가 항시적으로 환경오염원이 되는 사례가 빈번하게 된 것이다. 그런 점에서 건설부문의 소음, 진동 규제기준은 완화해야할 필요성이 많다. 또 소음, 진동에 대한 규제기준은 환경기준을 만족하기 위하여 강제성을 띄고 준수케 하는 기준이나 이 기준을 초과하는 것이 곧 환경피해를 유발하는 것이라 말할 수는 없다. 따

라서 규제기준의 법규위반으로서 처벌의 대상은 될 수 있으나 환경피해에 대한 인과관계가 인정되는 것은 아니다. 그런 점에서 지금까지의 적용은 문제가 없지 않다.

[별표 15]<개정 94.11.21>

건설 및 생활소음·진동규제 기준(제32조, 제57조 관련)

3. 건설진동·소음규제기준

(단위 : Leq dB(V))

대상지역	시간별	주간	야간
		(06:00~22:00)	(22:00~06:00)
주거지역, 녹지지역, 준도시지역중 취락지구 및 운동·휴양지구, 자연환경 보전지역, 학교·병원·공공도서관의 부지 경계선으로부터 50 m 이내 지역		65 이하	60 이하
상업지역, 공업지역, 농림지역, 준농림지역중 취락지구 및 운동·휴양지구외의 지역, 미고시지역		70 이하	65 이하

- 비고 : 1. 대상지역의 구분은 국토이용관리법에 의하며, 도시지역은 도시계획법에 의한다.
 2. 본 규제기준은 주간에 한해 진동 발생시간이 1일 4시간 이하일 때는 +5 dB을 보정한 값으로 한다.

진동 피해 인과관계 인정 기준의 설정

ISO가 제시하는 전신진동에 대한 세 한계는 피로기준을 적절히 위치이동하여 얻어진다. 쾌적기준은 피로기준에서 10 dB 빼면 되고 노출한계는 피로기준에 6 dB을 더한 수준이 된다.

ISO의 지침에 따라 진동레벨로 인체의 감응을 표시하면 쾌감-불쾌감의 경계는 75 dB (지표기준, 가옥내에서의 기준 = +5 dB) 이며 생리적 영향이 인체에 영향이 나타나는 기준은 85 dB (지표기준, 가옥내에서의 기준 = +5 dB)로 된다. 이 값은 산업현장에 있어서 대상 진동에 대하여 8시간 노출을 기준으로 한 것이다. 진동의 피해 대상이 되는 사람들은 진동원 부근에서 상주하는 사람들로 생각할 수 있고 이들에 대한 기준은 건물내 인체의 반응이 더 적합한 기준이 될 수 있다고 본다. 건물내의 인체 감응을 나타낸 ISO의 기준으로 조정하여 8 Hz 이하의 진동주파수에 대해서는 어느 진동량을 택하더라도 합성 기초곡선이 하나의 값으로 되지 않으므로 8~80 Hz의 진동에 대해서는 수직 보정한 54 dB이나 진동속도 0.1 mm/s를 기준으로 하고 장소와 시간대 및 진동의 성격에 따라서 만족기준을 다시 설정하면 표 7과 같이 된다.

국내 진동의 규제 기준치는 55 - 75 dB로 ISO 연속진동에 맞추어 설정되어 있다. 그러나 충격진동에 대해서는 주로 작업계속 시간면에서 5~10 dB을 더한 수준으로만 반영되어 있다. 따라서 충격진동부분에 대한 고려가 미흡하다. 독일기준에서도 ISO와 비슷한 방법으로 충격진동에 대한 보정이 이루어지고 있음을 볼 때 충격진동에 대한 만족기준의 상향조정은 합리적이라고 생각된다.

표 7 빌딩내 진동에 대한 인체의 만족 수준¹⁾

장 소	시간	연속 또는 단속진동 ⁴⁾		하루 수회 정도의 충격진동	
		진동레벨 dB(V)	진동속도 mm/s	진동레벨 dB(V)	진동속도 mm/s
특수작업장(병원수 술실, 정밀연구소 등)	낮 밤	54	0.1	54	0.1 ^{4),5)}
거주지	낮	60~66	0.2~0.4 ⁴⁾	83~93	3.0~9.0 ^{4)~7)}
	밤	57	0.14	57~80	0.14~2.0
사무실	낮 밤	66	0.4 ⁸⁾	90~96	6.0~12.8 ⁸⁾
공장 ⁹⁾	낮 밤	72	0.8 ⁸⁾	93~96	9.0~12.8 ^{8),10)}

1) 표는 그 수준 이하에서는 응답의 가능성이 낮은 진동의 크기를 보임(진동벽체로 인한 소음은 고려하지 않았음)

2) 반복충격으로 인한 준정적 진동도 포함. 충격은 ISO 2041(1975)의 3절 참조. 과도 충격진동을 뜻함

3) 수술실이나 정밀조작실 내의 과도진동의 크기는 해당 작업이 이루어지고 있는 동안의 것이다. 작업이 없을 때에는 협의와 사전경고의 있다면 일반 거주지에 대한 수치로 족하다.

4) 거주지에 있어서 수인한계는 대단히 넓은 범위의 값을 갖는다. 구체적 수치는 사회적, 문화적 요인과 심리적 자세 및 침해예상정도에 좌우된다.

5) 일당 진동발생수와 진동의 크기간의 상쇄성에 대해서는 아직 잘 확립되어 있지 않다. 다음의 잠정적인 관계는 하루 3회 이상의 진동발생경우에 사용한다. 즉 N이 하루의 진동발생회수일 때 $F_n = 1.7N^{-0.5}$ 의 가중치를 더 곱한다. 상시진동보다 낮은 진동에 대해서는 이 값을 채택하지 않는다. 진동크기의 범위가 최대치의 절반이하로 작을 때는 산술평균을 쓸 수 있다. 그렇지 않은 경우에는 최대치만을 사용한다.

6) 1초 이상의 경과시간을 갖는 단속적 진동인 경우 다음의 F_d 를 더 곱하여 조정할 수 있다. 진동의 경과시간을 T(초)로 표시할 때

$$\text{콘크리트 바닥이고 } T \text{가 } 1 \sim 20 \text{초이면 } F_d = T^{-1.22}$$

$$\text{나무 바닥이고 } T \text{가 } 1 \sim 60 \text{초이면 } F_d = T^{-0.32}$$

진동이력에서 10% (-20 dB)점에서 구할 수 있다.

7) 경암굴착에 있어서 지반이 교란되면 높은 진동주파수가 발생하는데 이 경우는 128까지도 무방한 것으로 보고되었다.

8) 사무실과 작업장에 있어서 작업능률의 감퇴 가능성을 고려하지 않고 과도 진동의 크기를 더 높여서는 안된다.

9) 낙하단조장치나 분쇄기와 같이 작업장을 진동시키는 공정의 진동은 여기서 거론한 작업장과는 다른 범주의 것이다. 가진작업에 대한 진동크기는 ISO 2631-1이 적용된다.

10) 연속진동이나 단속진동에 있어 제시 값을 두배로 하면 불만이 발생할 수 있고 네배로 하면 불만이 크게 증가될 수 있다.

한편 ISO에 의하면 쾌적기준은 피로기준보다 10 dB 낮고, 노출한계는 6 dB 더 높은 기준이다. 이러한 관점에서 표 4.11은 쾌적기준으로 판단할 수 있고 이에 따라 연속진동의 경우 피로기준은 10 dB, 노출한계는 16 dB을 각각 더한 값으로 생각할 수 있다.

인과관계 인정 기준 제안

이 연구에서는 여러 가지 외국의 선례를 문헌연구를 통하여 소개하였거니와 국제적으로 공인되고 인정받는 ISO의 기준 가운데서도 정신적 피해 부분에 있어서는 쾌적기준을 초과하는 수준의 진동에 대해서는 극히 민감한 사람의 경우에 정신적 피해 발생의 가능성이 있는 것으로 판정(A)하고 피로기준을 초과하면 일반적으로 정신적 피해 발생이 있는 것으로 판정(B)하여야 할 것으로 생각된다. 한편 노출한계를 초과한 경우에는 정신적 피해가 심각한 것으로 판정(C)할 수 있을 것이다. 즉 인과관계의 인정은 B 기준으로 생각할 수 있을 것으로 본다.

신체적 피해에 대해서는 국소진동에 의한 찰과상의 가능성이 있을 수 있으나 대단히 높은 진동수준에서의 일이고 떨미 등의 증세는 정신적인 고통으로 생각할 수 있다고 본다.

이러한 전제와 앞 항에서의 고찰을 정리 요약하면 다음과 같다.

표 8 연속진동에 대한 인체의 피해 판정기준(안)

장 소	시간	만족기준 A		피해인정기준 B		기준 C	
		진동레벨 dB(V)	진동속도 mm/s	진동레벨 dB(V)	진동속도 mm/s	진동레벨 dB(V)	진동속도 mm/s
특수지역 (병원수술실 등)	낮 밤	54	0.1	-	-	-	-
거주지	낮	63	0.4	73	1.3	79	2.5
	밤	57	0.2	67	0.6	73	1.3
사무실	낮 밤	66	0.6	76	1.8	82	3.6
공장	낮 밤	72	1.1	82	3.6	88	7.0

표에서 병원수술실 등 특수지역에서의 만족기준은 우선적으로 만족되어야 할 사안이므로 기준 B와 기준 C를 제시하지 않았다.

진동수준은 ISO의 기준에 따라 유도하였지만 진동주파수는 8 Hz 이상으로 되어 있고 그 이하의 진동이나 소음에 대해서는 주파수별 보정이 필요하다. 따라서 이런 경우에는 표에 의거하여 별도 계산이 필요하다.

여기서는 모든 근거가 피해판정의 용이성을 위하여 비교적 간단한 기기로 측정이 가능하여야 하고 측정 시점, 측정치 등의 기록 보존성이 있어야 하며 인체의 감수성을 잘 반영하는 메카니즘으로 되어 있어야 한다는 전제하에 기준의 진동레벨계를 사용하는 것으로 하였고 진동속도를 같이 병기하였다.

한편 충격진동은 진동의 계속시간이 짧고 미리 인지하고 있을 때는 상당히 높은 수준까지 수인할 수 있는 것으로 되어 있으나 야간의 경우에는 미리 고지하기도 쉽지 않고 숙면에 대한 방해의 우려가 있으므로 사실상 보호하기 힘들 것으로 판단된다. 따라서 야간의 충격진동에 대한 기준은 연속진동에 준해

서 엄격히 적용하여야 할 것이다.

충격진동에 대해서는 피로기준이나 노출한계의 개념이 확립된 것이 아니어서 위와 같은 방법으로 적용하기에는 논란의 여지가 많다고 생각된다. 이 연구에서는 연속진동의 경우 피로기준과 노출기준으로 보정하는 10 dB과 16 dB 대신 5 dB과 8 dB을 더한 수준으로 제안한다. 이런 방식으로 산정하고 단순화한 충격진동의 피해인정 기준은 다음과 같다.

표 9 충격진동에 대한 인체의 피해 판정기준(안)

장 소	시간	만족기준 A		피해인정기준 B		기준 C	
		진동레벨 dB(V)	진동속도 mm/s	진동레벨 dB(V)	진동속도 mm/s	진동레벨 dB(V)	진동속도 mm/s
거주지	낮	83	4	88	7	91	10
사무실	낮	90	9	95	16	98	22
공장	낮	93	12	98	22	101	32

6. 결 론

구조물은 진동속도와 주파수에 따라 응답이 다르고 인체는 진동가속도와 감응 주파수 즉 진동레벨에 따르므로 계측에서 그 척도를 달리하여야 하며 이에 근거한 피해기준을 제시하였다. 제시된 기준의 하한선은 피해발생이 확률적으로 낮은 경우에 해당되어 발생원자의 노력에 따라 기술적으로 실현 가능한 면책 기준이다. 한편 기준치의 상한을 초과하였더라도 곧 피해로 연결되지는 않으며 인과관계가 인정될 수 있는 경계라고 보아야 할 것이다.

- 1) 여러 기준중에서 건축물에 관한 규정으로는 미국 USBM, 독일의 DIN 4150 및 국제암반공학회 ISRM 표준안을 중심으로 조사 고찰하여 건축물에 대한 진동허용기준안을 제시하였다.
- 2) 진동의 인체에 대한 피해 판정기준으로서 ISO의 쾌적기준, 피로기준 및 노출한계에 대응하는 안전기준(A), 정신적 피해인정 기준(B)과 심각한 정신적 피해인정기준(C)를 제안하였다.

여기에 제시한 기준은 검증을 통하여 보완되어야하며 이와 관련한 사항을 규정화하기 위한 전문위원회를 통한 지속적인 노력이 필요하다고 본다.

한국암반공학회 1997년도 학술발표회

시추공벽 영상처리에 의한 JRC 산정

1997년 3월 28일

강원대학교 자원공학과

김 재 동