

진동으로 인한 건축물 피해 평가에 관한 연구

2002. 4.

연구기관 : (주)한국구조안전기술원

환 경 부
중앙환경분쟁조정위원회

提 出 文

중앙환경분쟁조정위원회 위원장 귀하

본 보고서를 “진동으로 인한 건축물 피해 평가에 관한 연구”의 최종
보고서로 제출합니다.

2 0 0 2 년 4 월

연 구 기 관 : (주)한국구조안전기술원

책임 연구원 : (주)한국구조안전기술원 김 태 섭
정 형 화

연 구 원 : (주)한국구조안전기술원 이 희 현
조 시 환
김 상 현

한양대학교 건축공학부 지 남 용

대한주택공사 주택도시연구원 김 하 근
천 영 수

자 문 위 원 : 1 & B 기술사 사무소 원 연 호

목 차

1. 서 론	1
1.1 연구의 목적 및 필요성	1
1.2 연구의 방법 및 범위	2
 2. 진동 특성 및 추정	 5
2.1 진동의 정의와 구분	5
2.2 진동 평가 척도	10
2.3 발생원별 진동 특성	14
2.3.1 발파 및 건설장비 진동의 특성	14
2.3.2 교통 진동의 특성	21
2.4 진동의 전파 특성 및 추정 방안	24
2.4.1 거리에 따른 진동 감소	24
2.4.2 환산거리에 따른 진동 감소	29
2.4.3 발파 진동속도의 추정	33
2.4.4 건설장비 진동속도의 추정	38
2.4.5 진동 속도 추정 예	44
2.5 진동 측정방법	45
2.5.1 진동 측정시스템	46
2.5.2 진동 측정지침	47
 3. 건축물의 결함 및 진동피해 인과관계	 52
3.1 건축물의 분류	52
3.1.1 구조형식별 분류	52
3.1.2 재료별 분류	54
3.1.3 시공과정에 의한 분류	55

3.1.4 방재상 분류	55
3.2 건축물의 결함	57
3.2.1 결함 발생요인	57
3.2.2 건축물의 결함 유형	61
3.2.3 진동피해에 대한 일반적 관점	92
3.3 건축물 진동피해 인과관계 기준	100
3.3.1 국외 기준	100
3.3.2 국내 기준	115
3.3.3 종합 의견	119
3.4 진동으로 인한 건축물 피해 인과관계 검토 기준(안)	120
4. 진동피해 평가 방안	126
4.1 일반사항	126
4.2 진동피해 평가를 위한 검토 항목	127
4.2.1 진동발생원에 대한 검토 항목	127
4.2.2 전파경로에 대한 검토 항목	129
4.2.3 대상건축물에 대한 검토 항목	129
4.2.4 측정 데이터에 대한 검토 항목	130
4.3 진동 기여도	130
4.3.1 건축물 상태 평가	132
4.3.2 작용진동 수준 평가	134
4.3.3 진동 기여도 산정(안)	135
4.3.4 진동 기여도 산정 예	135
5. 진동피해 배상액 산정 방안	138
5.1 보수·보강 방안	138
5.1.1 일반사항	138

5.1.2 보수공법	139
5.1.3 보강공법	140
5.2 피해 배상액 산정(안)	141
5.2.1 보수·보강의 경우	141
5.2.2 재사용이 어려운 경우	142
6. 결 론	144
6.1 진동속도 추정	144
6.2 진동피해 검토 기준(안)	145
6.3 진동피해 평가(안)	147
6.4 진동피해 배상액 산정(안)	148

참고문헌

부 록

1. DIN 4150 PART 3
2. ANSI S2.47
3. 건축물의 내용년수 - 한국감정원
4. 중앙환경분쟁조정위원회 조정사례
5. 진동 측정 자료
6. 보수·보강 공법

1. 서 론

1.1 연구의 목적 및 필요성

근래 건설현장 또는 채석장, 탄광에서의 발파 및 중장비 사용 등에 따른 진동·소음 관련 민원은 점차 증가되어 가는 경향을 띄고 있다.

진동·소음으로 인한 피해 분쟁은 중앙환경분쟁조정위원회 설립 이래 2001년 말을 기준으로 총 461건의 분쟁조정 사례 중 366건으로서 전체 사건의 79% 정도를 차지하고 있으며, 해마다 그 비중이 높아지는 추세를 나타내고 있다.

진동과 소음은 전파매질이 다를 뿐, 파동이라는 동일한 범주에 속하는 물리현상으로 동반 작용하면서 감각적으로 상승효과를 일으키는 경우가 많아, 이로 인한 피해평가 시 양자를 동시에 고려하는 것이 불가피할 경우도 있다.

그러나, 피해대상의 범위를 주변 건축물로 국한시킬 경우 그 영향도는 큰 차이를 나타내는 바, 소음만으로 건축물에 직접적인 피해가 발생하는 경우는 거의 없으나, 진동 문제는 정신적 피해와 함께 건축물 피해로도 이어질 수 있다 하겠다. 이에 따라, 진동으로 인한 민원의 경향은 건축물 등의 물적 피해뿐만 아니라 인체의 감응도에 따른 보상 또는 반대급부의 기대심리를 물적 피해와 연관시켜 민원을 제기하는 사례도 많은 것으로 조사되고 있다.

진동으로 인한 주변 건축물의 피해는, 진동이 지반을 통하여 전파된다는 점에서 지반특성에 따라 전파양상이 영향을 받으며, 또한 건축물의 상태, 즉 사용재료, 노후화 정도, 구성형태, 시공성, 기초형식 등 다양한 요인에 의하여 그 정도가 크게 달라지는 특성을 지니고 있다.

하지만, 현실적으로 이에 관한 연구가 부족한 상태에서 지금까지는 전문가의 직관에 따라 인과관계의 정도 및 피해 배상액이 결정되었던 바, 이에 따른 논란의 여지도 배제할 수 없을 것이다. 그러므로, 지속적으로 많은 자료를 축적하는 한편, 피해 평가방법의 확립을 통하여 분쟁조정 업무의 합리성 증진을 도모할 필요가 있다.

이러한 필요성에 따라 실시되는 본 연구는, 국내·외 기준과 연구 결과, 사례 등을 종합하여 진동으로 인한 건축물 피해정도에 대한 평가 및 이에 따른 배상액 산정을 위한 합리적 방안을 고찰·제시하는데 그 목적이 있다.

1.2 연구의 방법 및 범위

건축물에 발생되어 있는 결함에 미친 진동의 영향 정도에 대한 평가와 함께, 진동피해가 인정될 경우 그 배상액의 합리적 산정을 위하여, 다음과 같은 방법 및 범위를 설정하고 본 연구를 진행하기로 한다.

1) 진동 추정방식에 대한 고찰

환경분쟁조정 업무의 특성상, 진동은 현장에서의 실 계측보다 관련자료를 감안하여 추정하는 경우가 더욱 많다고 할 수 있다.

지반을 전파매체로 하는 진동의 경우에는 매체경로의 특성, 즉 지반의 충격 흡수성과 매질의 밀도 및 지형 등의 조건에 따라 전파된 진동의 크기가 크게 달라지게 되므로, 특정조건에서 제안된 추정식 또는 측정 데이터를 제반조건이 상이한 상황에 적용하기에는 상당한 문제가 있다고 할 것이다.

그러나, 현실 여건상 그러한 추정방식의 적용에 대한 불가피성도 인정하지 않을 수 없으므로, 관련변수를 평가하고 그 적용상의 오류를 개선하는 등의 보완을 통하여 진동 추정치의 신뢰성을 높이기 위한 노력이 필요하다고 할 것이다.

이에 따라, 최근의 국·내외 연구결과 등을 근거로 발생원별 진동 특성에 대한 고찰과 함께, 진동 추정방식 등에 대하여 고찰하고자 한다.

2) 진동으로 인한 건축물 피해의 인과관계 검토를 위한 기준(안) 고찰

진동에 의한 건축물의 피해는 자체변형의 발생에 따라 일어나며, 그 피해의 정도는 진동속도에 비교적 비례하는 것으로 평가되고 있다. 따라서, 진동에 의한 건축물 피해를 평가하기 위한 척도로서는 주로 진동속도가 사용되고 있으며, 세계 각 국에서는 나름대로의 인과관계 검토 기준치를 설정·적용하고 있다.

그러나, 기준치를 초과하는 진동이 가해졌다 하여도 반드시 건축물에 피해가

발생되는 것은 아니며, 역으로 기준치에 미달되는 진동이 가해질 경우에도 건축물의 상태에 따라 피해가 발생할 수 있다는 점을 감안할 때, 규제기준은 있으나 실질적인 피해기준은 없는 상태라 할 수 있으며, 이는 현실적으로 어쩔 수 없는 한계라 하여도 과언이 아닐 것이다.

진동에 의한 건축물 피해정도를 정량화시키는 것을 어렵게 만드는 주된 요인의 하나로서 건축물이 매우 다양한 형태로 구축되고 그 상태도 각양각색이란 점을 들 수 있다. 즉, 건축물에 사용된 재료 및 그 노후화 정도, 구성형태, 시공성, 기초형식 등과 같은 제반 요인에 의하여 진동피해의 양상은 크게 달라지게 된다.

이를 감안하여, 진동 기준치의 설정 시 건축물의 구조형식, 시공성 및 노후화 정도 등을 고려하는 등 다소의 보완이 있어야 할 것으로 사료되나, 상당한 변수를 포함하고 있으므로 이를 단순·범용화시키기 위해서는 보다 많은 자료의 축적이 있어야 할 것으로 생각된다.

이러한 면을 감안하여도 건축물의 경과연수 등을 주 요인으로 하여 설정된 기존의 분쟁조정위원회 진동피해 검토 기준에는 획일적인 면이 없지 않아 피해 인과관계의 판정을 위한 척도로 활용하기에는 상당한 문제가 있으므로, 다소의 조정 및 보충을 통하여 국내 상황에 부합하는 합리적 지침의 제정을 위한 연구가 요구되고 있는 실정이다.

이러한 점을 감안하여, 국·내외 기준 및 이론, 사례 등을 조사하고, 진동에 의한 건축물 피해를 각 구조형식별로 비교·검토함으로써, 국내 실정에 부합되는 진동피해 인과관계 검토 기준(안)을 고찰·제시하기로 한다.

3) 건축물의 상태와 진동피해 평가를 위한 이론 및 실무적 사항에 대한 고찰

진동 자체에 대한 이론은 어느 정도 수립되어 있다고 할 수 있지만, 다양한 형태의 건축물을 대상으로 그 영향 정도를 평가하기는 매우 어려운 것이 사실이다.

진동에 의한 주변 건축물의 피해 정도를 평가하기 위한 현장조사 시 거의 제기되는 문제로서 결함이 발생한 시기에 대한 당사자들의 진술이 상반된다는 점을 들 수 있다. 즉, 현재의 결함은 누구나 육안으로 확인 가능한 상태에서, 민원인은 인근에서 공사가 시작된 이후에 현재와 같은 상태로 결함이 발생 또는 진전되었다고 주장하는 반면, 시공자는 공사 착수 이전에도 현 상태와 비슷한 수준의 결함이 존재하였다고 주장하는 것이다.

이러한 점을 감안하여 건축물의 상태 및 결함 발생원인에 대한 평가방법과 함께, 진동피해 정도를 파악하기 위한 주요 검토항목 등을 고찰·제시함으로써 분쟁 조정 업무의 효율성을 기하고자 한다.

4) 진동으로 인한 건축물 피해 평가 및 배상액 산정 방안 고찰

현 시점에서 진동으로 의한 건축물 피해와 관련하여 명확한 기준 등이 미흡한 바, 그 평가는 주로 전문가의 경험에 의지하고 있는 실정이다. 따라서, 기준 차이에 따른 피해 인정수준의 편차 또는 판단 착오 및 주관적 요소가 개입될 가능성도 완전히 배제할 수 없으므로, 이의 개선을 위하여 건축물의 상태 및 작용진동 수준의 정량화를 통한 피해 평가(안)을 고찰·제시하기로 한다.

아울러, 진동으로 인한 피해 배상액 산정에 있어서도 현재 각 축조형태별 건축물의 신축단가에 대비한 보수율 등을 고려하여 그 금액을 산정하고 있으나, 현 여건상 불가피한 측면을 일부 감안하여도 보수율이란 개념 자체가 다분히 주관적이고 추상적인 면이 없지 않다고 할 것이다. 또한, 건축물의 상태 및 피해정도에 따라 보수, 보강, 철거 등 다양한 방안이 제기될 수 있는 바, 보수율에 의거한 획일적 배상액 산정에는 다소 문제가 있는 것으로 판단된다. 따라서, 유사사례에 대한 조사·분석 등을 통하여 건축물의 손상정도에 따른 피해 배상액 산정의 합리화 방안을 모색하고자 한다

2. 진동 특성 및 추정

진동으로 인한 건축물 피해의 인과관계 규명은 진동의 발생과 전파, 그리고 대상건축물의 진동응답 특성에 관한 지식을 필요로 한다.

이는 진동의 발생 메커니즘에 따라 건축물에 미치는 유해성 여부 및 그 정도가 달라질 수 있으며, 매질에 따른 전파특성에 따라 건축물에 전달되는 진동의 크기, 주파수, 지속시간 등이 변함과 동시에, 건축물의 기초 및 상부 구조물의 동적특성에 따라 피해의 정도를 좌우하는 진동응답의 크기가 결정되기 때문이다.

그러나, 현재 진동피해 문제와 관련한 많은 기준이나 지침들이 그러하듯이, 실무적인 차원에서는 진동원과 대상건축물의 특성에 따라 어떠한 관계를 갖는지 또는 전달된 파의 종류가 어떠한 것인지 등에 대한 정보보다는 건축물에 도달된 진동의 크기와 특성이 중요시된다.

이 경우 만약 요구되는 위치에서 직접적인 진동 계측이 가능하다면 문제가 간단해지지만, 계측이 불가능하거나 실측된 정보가 없을 경우에는 건축물에 작용한 진동값을 추정하여야 하며, 이를 위해서는 결국 진동의 발생 메커니즘과 매질에 따른 전파특성을 알아야 한다.

따라서, 본 장에서는 진동의 기초지식에 대한 고찰과 함께, 발생원별 특성, 그리고 진동계측과 추정방법에 대하여 알아보하고자 한다.

2.1 진동의 정의와 구분

본 연구에서 대상으로 하는 발파나 각종 건설장비 또는 차량통행 등으로부터 유발되는 동적인 움직임은 “일정시간 지속적인 진동(Vibration, 이하 진동이라 함)”과 “충격(Shock)”으로 대별하여 생각할 수 있다.

진동(Vibration)과 충격(Shock)은 일반적으로 지반, 건축물 또는 다른 물체의 동적인 움직임을 의미한다.

구체적으로 말하면, 진동(Vibration)은 평형상태에 대한 반복적인(Oscillatory) 움

직임을 의미하며, 충격(Shock)은 대상물의 갑작스런 움직임의 변화를 나타낸다. 여기서, ‘갑작스런 움직임’이란 실제 대상물의 진동주기와 비교하여 움직임의 변화가 보다 짧은 시간에 일어남을 의미한다.

진동(Vibration)과 충격(Shock)은 시간에 따른 대상물의 위치변화로 묘사될 수 있으며, 이 때 대상물 위치의 변화는 진동속도나 가속도의 관점에서 표현될 수도 있다.

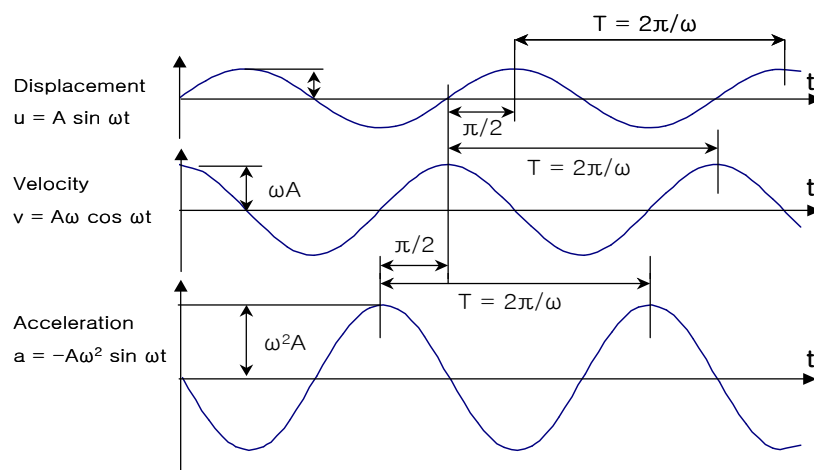
실무적 차원에서 변위는 종종 진폭(Amplitude)으로 언급되기도 하는데, 이것이 정현진동(Sinusoidal oscillation)의 최대값을 의미하는 것은 아니다. 정현진동의 경우, 결론적으로 이야기하면 변위 진폭, 속도 진폭, 가속도 진폭이 모두 존재한다.

정현진동의 경우에는 상기 척도 중 어느 것을 사용하여도 운동을 묘사하기에 충분하며, 이는 상기 값들 사이의 변환이 시간을 고려한 적분과 미분에 의해 가능하기 때문이다. 그러나, 정현진동 이외의 진동에 있어서는 이러한 데이터의 변환은 필연적으로 오차를 포함하게 된다.

진동의 가장 단순한 형태는 앞서 언급한 정현진동(Sine vibration)으로도 불리는 조화진동(Harmonic movement)으로서, 아래의 식 (2.1)로 표현될 수 있다.

$$x(t) = A \sin(\omega t + \psi) \quad (2.1)$$

여기서, A = 변위 진폭, ω = 각 주파수, t = 시간, ψ = 위상각을 나타낸다.



[그림 2.1] 정현진동의 가속도, 속도, 변위의 변화

정현진동 중 위상각은 실무적 차원에서 별다른 의미를 갖지 않으며, 주로 진폭과 각 주파수라는 두 가지 척도에 의해 진동의 특성이 결정되어 진다.

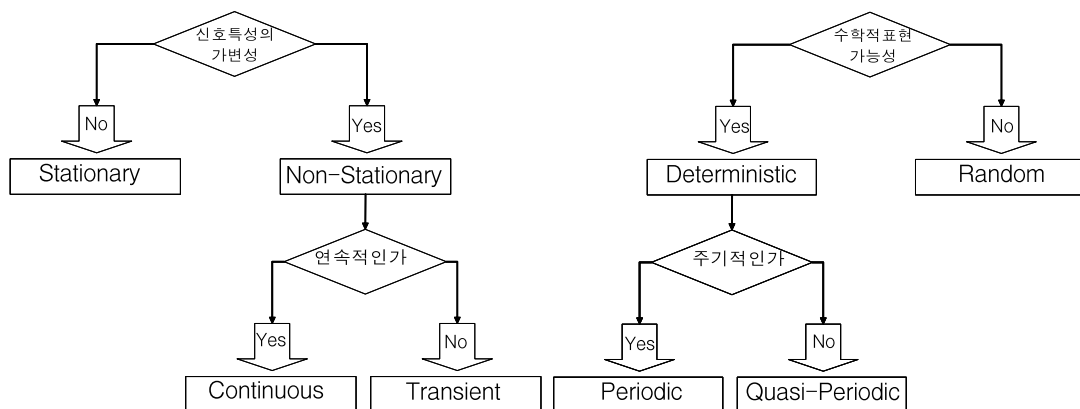
[그림 2.1]에서 알 수 있는 바와 같이, 미분과 적분에 의한 정현진동의 서로 다른 운동 묘사 방법상의 변환은 $\pi/2$ 라는 위상변화와 각 속도 ω 의 곱과 나눔에 의해 결정될 수 있다.

그러나, 보다 복잡한 특성을 갖는 다른 종류의 진동들은 정현진동과 같이 단순히 그 특성을 묘사할 수 없는 것이 일반적이다. 예를 들어, 노이즈 진동은 유한한 수의 변수에 의해 결코 완전하게 그 특성이 묘사될 수 없다.

하지만, 이러한 진동도 가능한 한 적은 수의 변수로 단순화시키는 것이 해석상 유리하므로, 복잡하게 진동을 분류하기보다는 실무자들에게 가장 중요하게 인지되어야 하는 내용을 중심으로 진동을 분류하여 다루고자 한다.

진동은 관점에 따라 그 분류가 다양할 수 있으나, 진동의 특성이 시간에 따라 변하는가의 여부에 따라 정상(Stationary)진동과 비정상(Non-stationary)진동으로 구분될 수 있으며, 정상진동은 다시 진동신호가 수학적으로 표현 가능한가의 여부에 따라 규칙성을 갖는 진동과 불규칙한 진동으로 구분될 수 있다.

앞으로 우리가 다루고자 하는 대부분의 진동은 모두 이 범주에 속하며, [그림 2.2]에 이러한 진동신호의 분류체계를 간략히 도식화하여 나타내었다.



(a) 진동신호의 분류

(b) 정상신호의 분류

[그림 2.2] 신호의 분류

1) 확정적 진동과 충격(Deterministic vibrations and Shocks)

“확정적(Deterministic)이다”라는 말은 정현진동과 같이 운동의 움직임이 수학적 함수에 의해 예측될 수 있다는 의미이다. 엄격한 의미에서 완전히 확정적인 진동은 존재하지 않으나, 이러한 수학적 함수를 이용한 표현은 매우 유용한 근사값을 제공할 수 있다.

주기진동(Periodic vibration)은 확정적 진동의 가장 일반적인 형태이며, 주기 T 를 갖고 반복적인 운동을 하는 파(Wave)에 의해 그 특성이 결정될 수 있다. 그러한 파(Wave)는 수많은 주파수 성분을 갖는 파가 합성된 것으로 간주되며, 이를 소위 위상정보를 포함하여 다양한 주파수 $f_o = 1/T, 2f_o, 3f_o, \dots$ 를 갖는 푸리에 시리즈(Fourier-series)라 부른다. 이 경우 후자의 주파수 성분들은 종종 배수진동성분(Over-tone)으로 간주되기도 하며, 정현진동은 오직 한 개의 주파수 f_o 를 갖는 매우 특별한 경우라 할 수 있다.

주기진동(Periodic vibration)은 주기적으로 작동하는 기계류들로부터 발생된다. 예를 들어, 직조기계와 같이 왕복운동에 의한 지배적 특성을 갖는 장비들을 포함하여 모터(Explosion motors), 펌프(Pumps), 진동 로울러(Vibratory rollers), 컴프레서(Compressors), 그리고 팬(Fans)과 같은 회전운동 기계류들이 이에 속한다.

이외에도, 콘크리트 바이브레이터(Concrete vibrators), 진동다짐기(Vibratory compactors), 그리고 말뚝 향타용 해머(Hammers) 등이 주기진동을 만들어 내는 또 다른 예이다.

[그림 2.2]의 분류에서도 알 수 있듯이, 엄격한 의미에서 확정적 진동의 부류에는 과도진동(Transient vibration)과 충격(shock)이 포함되지 않는다. 그러나, 실무적인 관점에서는 많은 진동들이 지수함수적으로 감소하는 정현진동과 유사하게 표현될 수 있으며, 그 예로서 파일 향타 또는 발파와 같이 짧은 기간에 이루어지는 충격에 의해 가진되는 건축물의 진동 등을 들 수 있다.

2) 노이즈(Noise) 또는 불규칙 진동(Random vibrations)

확정적 진동은 수학적인 표현에 의해 묘사될 수 있으므로 진동의 이전 이력을 알고 있다면, 원칙적으로는 진동의 궤적을 연속 추적하는 것이 가능하다.

하지만, 노이즈의 경우에는 이러한 작업이 불가능하며, 단지 통계적인 의미의 묘사만이 가능하므로 이러한 진동을 불규칙(Random)하다고 이야기한다. 이 경우 진동은 확정적인 진동과 혼재하여 존재하거나 신호에 영향을 미쳐 상세한 관측을 어렵게 만들기도 한다.

불규칙한 노이즈 진동을 묘사하는데 사용되는 일반적 표현으로는 R.M.S.(Root Mean Square), 표준편차(Standard Deviation), 파워밀도 스펙트럼(Power Density Spectrum), 자기상관함수(Autocorrelation Function), 그리고 확률밀도 함수(Probability Density Function) 등이 있다.

실무에서는 종종 정상 노이즈 진동(Stationary noise vibration)이라는 표현을 하며, 이 말의 의미는 만약 노이즈 진동에 대하여 상기 언급된 변수들이 제한된 시간 간격으로 충분히 오랜 시간동안 고정된다면, 변수들의 값은 절대시간과 무관한 값을 얻을 수 있다는 말이다. 예를 들어, R.M.S.나 스펙트럼과 같은 변수 값들이 시간에 따라 크게 변하지 않는다는 것이다.

교통진동이나 건설장비진동 중 일부는 좀처럼 정상 노이즈 진동이 될 수 없다. 하지만, 밀집된 교통량을 갖는 도로로부터 어느 정도 이격된 거리에서는 그러한 특성을 얻는 것이 가능하다.

반면, 비정상 노이즈 진동과 충격(Non-stationary noise vibrations and shocks)은 평균값이나 표준편차가 시간에 따라 심하게 변화하는 비정상 진동의 그룹에 속한다. 이러한 변화는 빠르거나 느릴 수 있으며, 전자의 경우를 과도 진동(Transient vibrations)이라 부른다. 느리거나 빠르다고 판단하는 것은 물론 진동의 영향을 받는 구조물이나 시스템과 관련이 있다. 느리게 변하는 노이즈 진동의 예로는 교통량이 시간에 따라 변화할 때, 위에서 설명한 밀집된 교통으로 인해 발생하는 진동을 들 수 있다. 빠르게 변화하는 노이즈 진동의 예로는 교통량이 드문 도로에 차량이 지나갈 때의 경우를 들 수 있을 것이다.

사실, 모든 진동은 엄격한 의미에서 비정상 노이즈 진동이라는 사실에도 불구하고, 그것들에 대한 이론은 거의 개발된 것이 없다. 그러므로, 그러한 진동으로부터 측정된 값들은 훨씬 다루기가 어렵다.

2.2 진동 평가 척도

시간의 변화에 따른 진동의 강도와 변화를 묘사하는데 사용되는 수많은 척도들이 있으며, 앞서 언급한 확정적 진동과 노이즈 진동, 정상 진동과 과도진동 등 그 특성에 따라 서로 다른 척도들이 사용되게 된다.

진동문제를 다루는데 있어 가장 중요한 부분의 하나는 바로 적합한 척도를 사용하는 것으로, 이것은 인체 또는 건축물 등에 미치는 영향과 상응하는 정현함수를 찾는 문제라 할 수 있다.

이러한 특성화는 시간 영역과 주파수 영역 모두에 적용될 수 있으나, 아마도 후자의 경우가 더욱 일반적일 것이다.

아울러, 적용하는 척도에 따라 다른 차원을 갖는 스펙트럼이 되므로 상이한 척도를 사용하여 도출된 결과를 직접적으로 비교하는 것은 불가능하다.

(1) 최대값(Peak value, x)

최대값은 일정시간 동안 발생한 진동의 최대 절대값이다. 어떤 경우에는 진동의 정(+)-부(-) 여부가 함께 정의되어야 한다.

(2) R.M.S.값(Root Mean Square, x_{eff})

R.M.S.값은 식 (2.2)에 의해 정의되며, 순수 정현함수의 경우에는 $x_{eff} = \hat{x}/\sqrt{2}$ 의 값을 갖는다.

$$x_{eff} = \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} x^2 dt / (t_2 - t_1)} \quad (2.2)$$

(3) 평균값(Mean value, $\bar{x}$)

평균값은 구간 t_1 과 t_2 에서 식 (2.3)과 같이 정의된다. 진동의 경우 종종 이 평균값이 “0”로 정의되기도 한다.

$$\bar{x} = \int_{t_1}^{t_2} x dt / (t_2 - t_1) \quad (2.3)$$

(4) 표준편차(Standard deviation, σ)

표준편차는 구간 t_1 과 t_2 에서 식 (2.4)와 같이 정의된다. 만약, 평균값 $\bar{x}=0$ 라면, 표준편차는 R.M.S.값과 같다.

$$\sigma = \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} (x - \bar{x})^2 dt / (t_2 - t_1)} \quad (2.4)$$

(5) 진동량의 단위

진동의 강도 또는 크기를 나타내는 단위는 변위, 속도, 가속도의 관점에서 각각 <표 2.1>에 주어진 것과 같은 단위들이 사용된다.

<표 2.1> 진동량의 단위

구분	기본단위	변환 단위	
가속도	cm/s ²	gal = 1 cm/s ² g = 980cm/s ² $\approx$ 1000 gal m/s ² = 10 ² cm/s ²	inch/s ²
속도	cm/s	mm/s = 10 ⁻¹ cm/s kine = 1 cm/s m/s = 10 ² cm/s	inch/s
변위	cm	μ = 10 ⁻³ mm = 10 ⁻⁴ cm mm = 10 ⁻¹ cm m = 10 ² cm	inch

진동량의 단위인 cm, cm/s, cm/s² 등은 선형적 척도로서 건축물에 대하여는 이러한 척도가 잘 적용될 수 있으나, 인체감각에 미치는 영향은 이러한 선형적 척도로서 평가할 수 없다. 이에 따라 인체감응을 기준으로 하는 대수척도인 가속도 레벨 또는 수직보정 진동레벨 등이 제안되어 있으나, 본 연구에서는 건축물 피해를 대상으로 한다는 점에서 이에 대한 상세 검토는 생략하기로 한다.

전술한 바와 같이 정현진동의 경우에는 식 (2.5)에 의하여 변위, 속도, 가속도 사이에 각 주파수의 곱과 나눔에 의한 상호 변환이 가능하다.

$$a = 2\pi f v, \quad v = 2\pi f D \quad (2.5)$$

여기서, a =가속도(m/s^2), v =진동속도(m/s), D =변위(m)이다.

하지만, 정현진동 외의 진동에 있어서는 이러한 관계가 성립되지 않으므로 주의가 요망된다.

예를 들어, 진동속도의 최대값을 측정한 후 이 값을 변위를 기준으로 하는 진동피해 기준과 대비하기 위하여 식 (2.5)를 사용하여 변위로 환산할 수는 없다. 만약 그럴 경우에는 변위의 크기가 50% 정도 낮게 예측될 수 있으며, 이러한 잘못된 해석은 피해기준을 상회하는 부하레벨의 증가를 허용하는 결과를 초래할 수 있다.

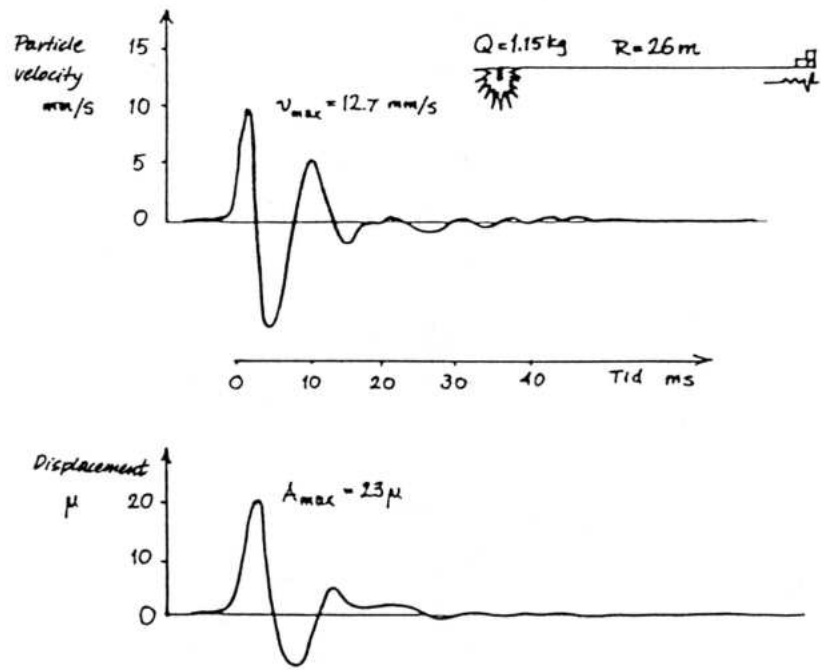
이러한 경우 변위를 신뢰성 있게 계산하기 위해서는 반드시 진동속도의 시간 이력을 적분하여야만 하며, 다음과 같은 예를 들기로 한다.

1.15 kg의 장약량을 이용한 발파를 통하여 진동원으로부터 26m 떨어진 지점에서의 진동이 속도계에 의해 기록되었다. 기록된 최대 진동속도는 12.7 mm/s였으며, 최대 진동속도가 기록된 신호의 주파수는 약 150Hz(1/0.0067)였다.

이 때, 실제 측정된 최대변위는 23 μ 였으나([그림 2.3] 참조), 만약 식 (2.5)에 상기 조건의 수치를 대입하여 최대 변위를 산출한다면, 식 (2.6)과 같이 실측치의 절반 정도에 해당되는 13 μ 의 결과를 얻게 되는 것이다.

$$D = \frac{v}{2\pi f} = \frac{12.7 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 150} = 13 \cdot 10^{-6} m \approx 13\mu \quad (2.6)$$

한편, 진동레벨과 진동속도의 관계로부터 식 (2.7), 식 (2.8) 등과 같은 변환식도 제시되어 있으나, 정확하게 일치할 수는 없으며, 특히 주파수 영역 등을 고려한 특정조건에서만 사용할 수 있다는 것을 염두에 두어야 할 것이다.



[그림 2.3] 진동속도의 변위로의 적분

아울러, 건축물 피해와 관련하여 진동레벨로써 그 영향도를 평가하는 경우도 일부 있으나, 진동레벨은 인체감응을 기준으로 설정된 척도라는 점에서 적용이 불가하며, 반드시 진동속도를 근거로 하여야 한다는 점을 강조하고자 한다.

$$Y = 20 \log V + 91 \quad (8\text{Hz} \leq f) \quad \text{정현진동의 경우(일본)} \quad (2.7)$$

$$Y = 20 \log V + 10 \log(1 - e^{-t/0.63}) + 85 \quad \text{발파진동의 경우} \\ \text{(대한주택공사)} \quad (2.8)$$

여기서, 진동레벨 Y 의 단위는 dB(V) , 진동속도 V 의 단위는 cm/sec 이며, t 는 진동파형의 연속시간을 나타낸다.

2.3 발생원별 진동 특성

많은 국가에서 건축물에 대한 진동피해 예측과 관련한 기준이나 추천사항들을 제안하고 있다. 이 기준들은 주로 발파 또는 건설장비와 같은 진동원을 대상으로 하고 있으며, 교통이나 공장기계 등에 의한 진동에 대하여는 아직까지 정립된 기준이 미흡한 실정이다. 아마도 전자의 경우에는 건축물에 직접적인 손상을 발생 시키기에 충분한 진동레벨을 갖고 있고, 또한 이로 인한 민원이 자주 발생된다는 사실에 기인하는 것으로 판단된다.

후자의 경우에는 발생진동의 크기가 건축물에 직접적인 손상을 유발할 만큼 크지 않은 것이 보통이나, 근래에 들어 교통량의 증가와 도심의 과밀화에 따른 영향으로 교통진동에 의한 피해문제가 점차 대두되고 있다. 이는 미소한 진동도 지반조건에 따라 침하를 유발하는 등 간접적인 손상의 원인이 될 수 있다는 최근의 연구실적을 바탕으로 하나, 현 시점에서 이에 대한 자료는 부족한 실정이다.

본 절에서는 발파 및 건설장비 진동, 교통 진동으로 구분하여 각각의 특성을 검토하고자 하며, 기타 기계·설비 진동의 경우에는 주변 건축물에 대한 피해사례가 적고, 또한 어느 정도 기술적인 제어가 가능하다는 점에서 검토를 생략하기로 한다.

2.3.1 발파 및 건설장비 진동의 특성

발파나 건설행위를 통하여 발생하는 지반운동은 크게 압축파(P파), 전단파(S파), 표면파(Rayleigh파)의 3가지 파(Wave)로 대표될 수 있다. 지반운동을 완전하게 묘사하기 위해서는 운동의 세 가지 직교 성분인 이들 3 종류의 파를 모두 측정하여야만 한다.

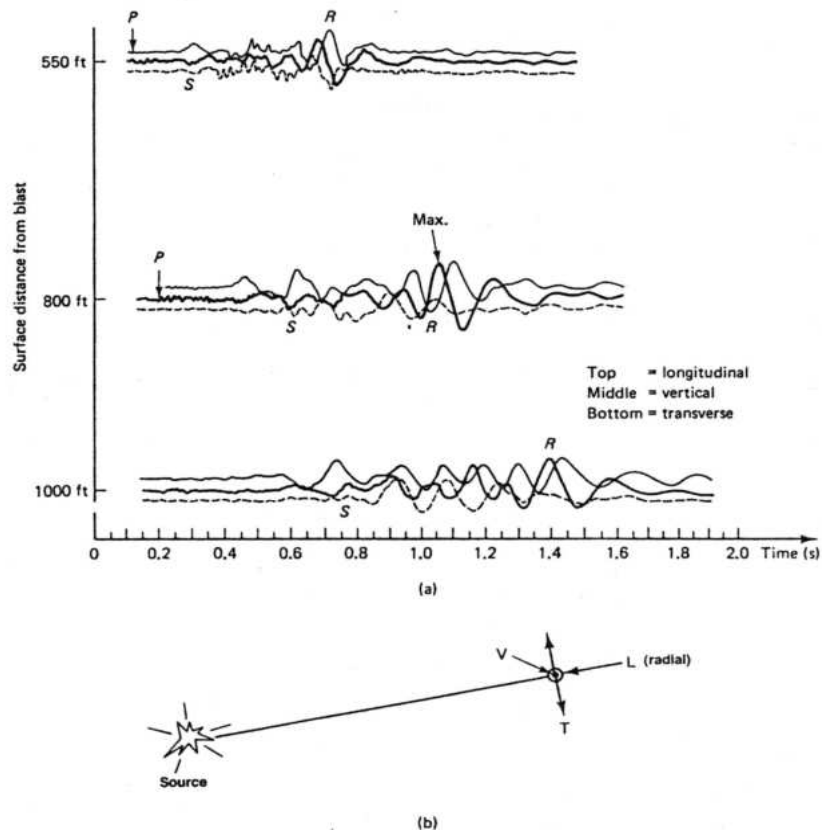
[그림 2.4]는 건설발파에 의한 시간이력의 일반적 형태와 이들 파의 전파특성을 도식화하여 나타낸 것으로, 파의 진행방향 성분인 L파는 보통 진원으로부터 수평적으로 반경을 형성하며 전파되며, 다른 두 성분은 그러한 반경방향에 대하여 수직(V파), 또는 횡(T파)으로 전파된다.

이들 3 종류의 파는 다시 두 가지 형태로 분류될 수 있는데, 암반이나 토양의

체적을 통하여 전파되는 체적파(Body wave)와 표면, 특히 상부 지표면을 따라 전파되는 표면파(Surface wave)가 그것으로, 가장 중요한 표면파는 [그림 2.4(a)]에서 R로 표시된 Rayleigh파이다.

체적파는 다시 인장과 압축을 거듭하면서 전파되는 압축파(P파)와 뒤틀림 또는 전단파(S파)로 나누어질 수 있다. 지표면 아래에서 행해지는 건설행위에 의한 폭파와 충격은 짧은 거리에서는 체적파가 지배적으로 되며, 이 파들은 다른 암석 또는 토양층, 지표면과 같은 경계층을 만날 때까지 구상(球狀)의 형태를 띄면서 바깥 방향으로 전파된다. 전파되는 파가 경계면을 만나면, 경계면에서는 전단파와 표면파가 생성되며, 원거리에서는 표면파가 보다 중요성을 갖게 된다.

일반적으로, 진동원으로부터 근거리의 위치에서는 이들 3 종류의 파가 모두 전달되어 파의 형태를 구별하기 어려운 반면, 원거리에서는 느리게 움직이는 전단파와 표면파가 압축파로부터 분리되기 시작하여 구별이 가능하다.



[그림 2.4] 건설발파 진동 시간이력의 일반적 형태

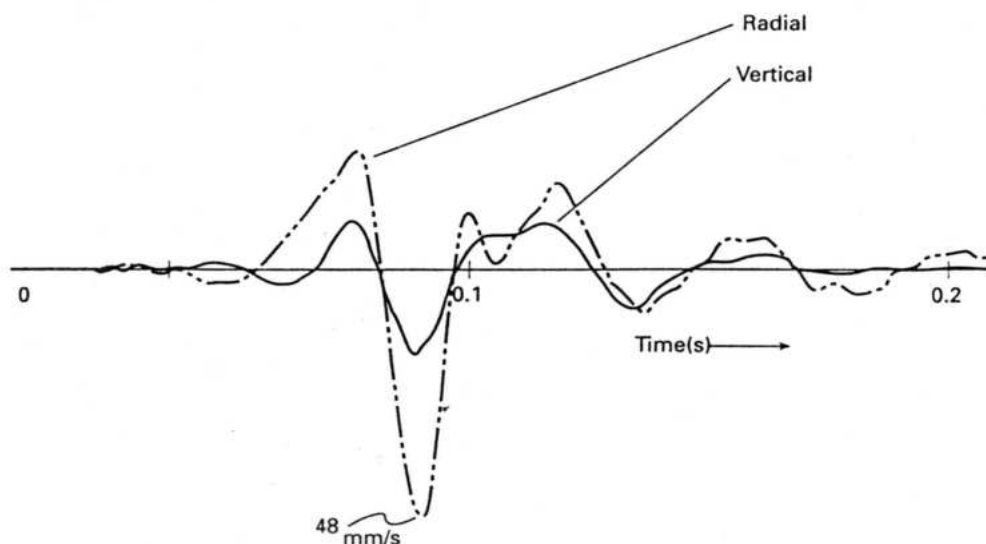
파일항타 등 건설행위 과정에서 발생하는 대부분의 충격파는 2차적인 방향을 갖는 단 하나의 지배적인 파형을 만들어 낸다([그림 2.5] 참조).

반면, 발파는 밀리세컨드와 같이 아주 짧은 시간에 지발되며, 적은 양의 장약으로 직력기폭되므로 진행경로와 지발시간의 차에 따라 전파면과 파형이 겹치게 된다. 발파진동의 경우 각각의 파가 도달하는 순서가 이같이 복잡하기 때문에 현재까지 발파진동의 상세한 부분까지 연구가 진행되지는 못하고 있는 실정이나, 발파 시 단일파동에 대한 연구를 바탕으로 Reinhart (1975)와 같은 연구자들에 의하여 발파진동의 영향한계를 평가하기 위한 유용한 관계들은 체계화되어 있다.

압축파, 전단파 그리고 레일리파는 통과하는 토양이나 암석에 따라 입자들의 운동형태가 다르다. 따라서, 토양 및 암석에 축조된 구조물들은 어떤 파가 작용하는가에 따라 변형의 양상이 달라지게 된다.

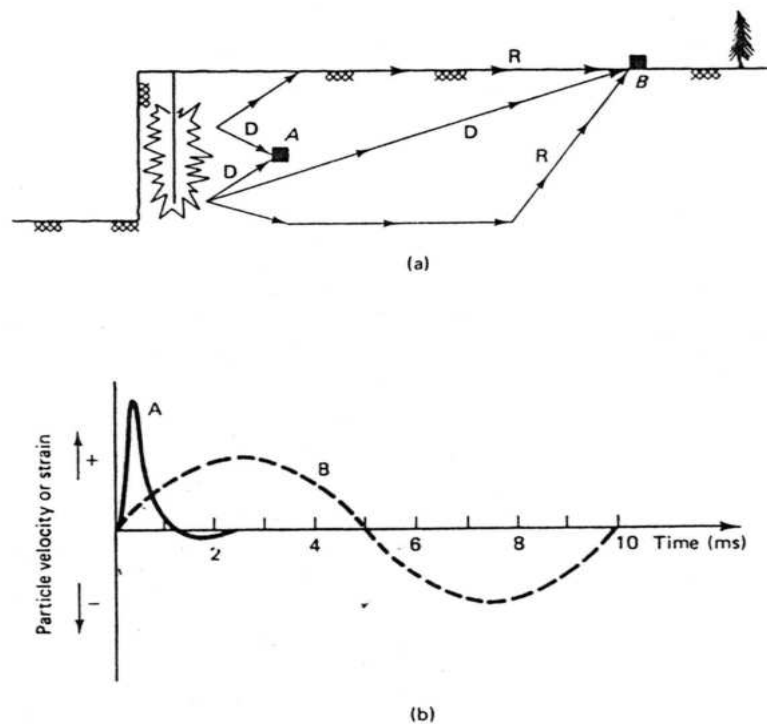
종파(P파, 압축파)는 파가 진행하는 것과 같은 방향으로 입자운동을 하며, 전단파는 파의 진행방향에 직각방향으로 움직이는데, 수직일 수도 있고 수평일 수도 있다([그림 2.4(b)] 참조). 반면, 레일리파는 가장 복잡한 형태로 전파되는데, 파의 진행방향에 대하여 평행하면서도 수직인 방향으로 움직인다.

대부분의 발파와 항타에서는 [그림 2.6(a)]에 나타낸 것과 같이 B지점에 계측기를 설치하여 [그림 2.6(b)]의 B와 같은 형태의 파를 얻지만, 발파원과 근접한 곳에서는 A 위치의 계측기로 파가 직접 전달되어 하나의 뾰족한 파형을 만든다.



[그림 2.5] 파일항타에 의한 충격파의 시간이력

[그림 2.6(b)]에 도시한 파들은 대표적인 발파진동의 예로서, 근접발파의 경우 $1,000 \sim 2,000 \mu s$ 즉 $1 \sim 2 ms$ 동안 지속되는 일시적인 순간파형을 만들고, 원거리에서는 $10 \sim 100 ms$ 의 지속시간을 갖는 파를 만든다. 또한, 원거리에서는 일반적으로 이러한 파들이 조합되어 [그림 2.4(a)]와 같이 일련의 겹쳐진 정현파형을 만들며, 향타의 경우에는 근거리에서 $40ms$ 정도의 지속시간을 갖는 [그림 2.5]와 같은 펄스 파형을 만든다.

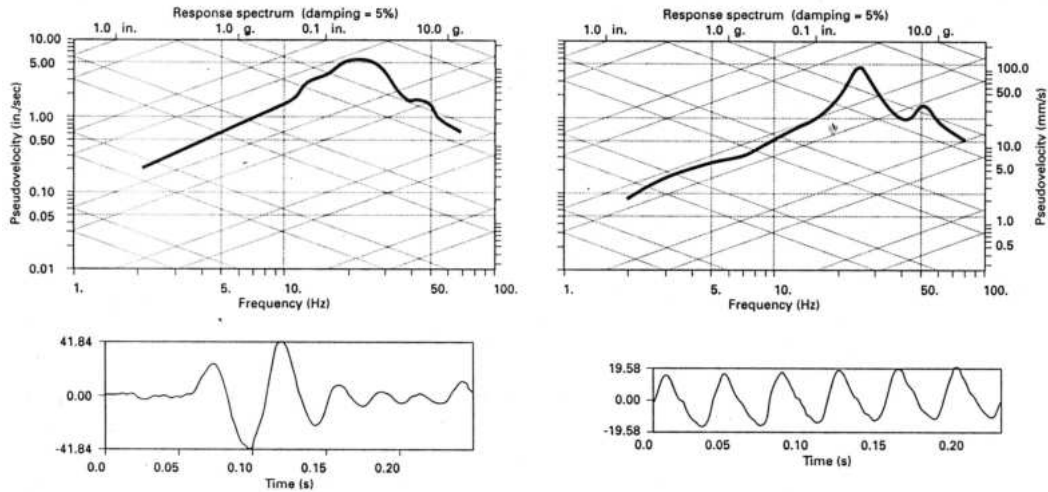


[그림 2.6] 건설발파시 근거리와 원거리에서의 시간이력 특성

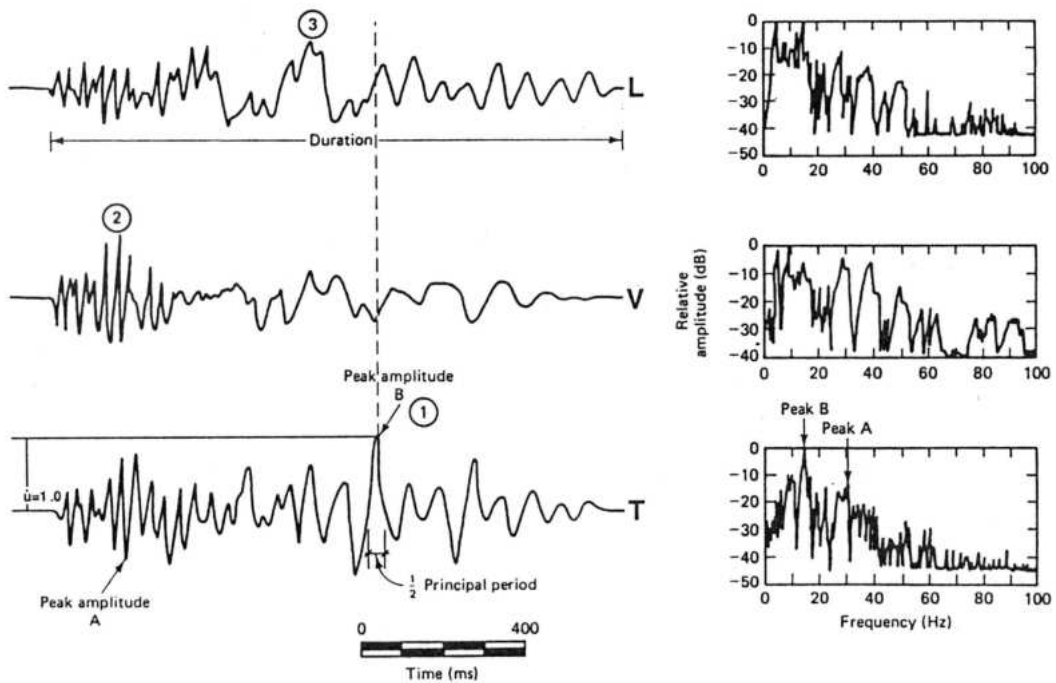
파일향타와 탄광발파의 경우에 있어 진동속도의 시간이력과 주파수 영역에서의 대표적인 형태가 [그림 2.7]과 [그림 2.8]에 제시되어 있다.

시간이력을 묘사하는데 있어서 가장 중요한 변수는 최대 진폭, 고유주기(고유 주파수의 역수), 그리고 진동의 지속시간이다. 이 3가지 변수는 진동원과 전달매체에 따라 달라지며, 일반적인 건설작업과 발파작업시의 진동 특성치는 <표 2.2>에 제시된 범위 내에서 형성된다. 도심지에서의 굴착과정에서 시행되는 발파는

근접발파가 될 수 있는데, 이와 같은 경우에는 그러한 특성치가 더 높은 값을 가질 수도 있으나, 통상 사용되는 측정장비들은 근접발파와 같은 극한 상황에 대처하도록 설계되어 있지 않기 때문에 이러한 기록들의 측정이 어려울 수 있다.



[그림 2.7] 파일향타시 시간이력과 지배 주파수(좌측: 충격, 우측: 일반진동)



[그림 2.8] 전형적인 탄광발파시 시간이력과 지배 주파수(Stagg and Engler, 1980)

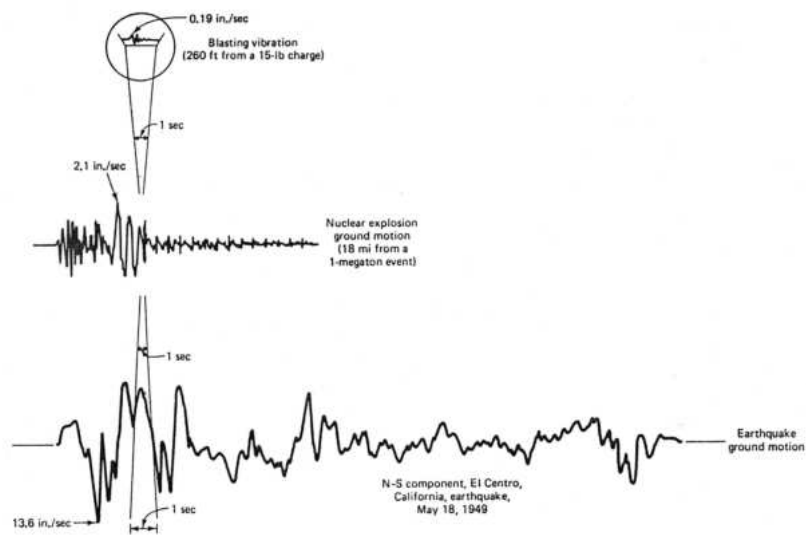
<표 2.2> 발파 및 건설장비 진동의 일반적 수준

척도	수준	단위
변위	$10^{-5} \sim 1$	cm
입자속도	$10^{-5} \sim 10^2$	cm/s
입자가속도	$1 \sim 10^4$	cm/s ²
진동지속시간	0.5 ~ 2.0	s
파장	30 ~ 1,500	m
진동수	0.5 ~ 200	Hz
변형률	3 ~ 5,000	μ in./in.

건설진동과 지진 또는 핵폭발 진동 사이에 구분되는 중요한 특징을 [그림 2.9]의 시간이력 비교로부터 쉽게 알 수 있다. 먼저, 건설진동은 지진이나 핵폭발 진동보다 더 높은 주파수에서 에너지를 전달하며, 두 번째는 상대적으로 짧은 지속시간과 변위로 인해 적은 에너지를 수반한다는 점이다.

진동원에 따른 에너지는, 파일항타 등의 충격진동과 작은 장약량을 사용한 발파진동을 비교할 때에도 현저한 차이를 나타낸다.

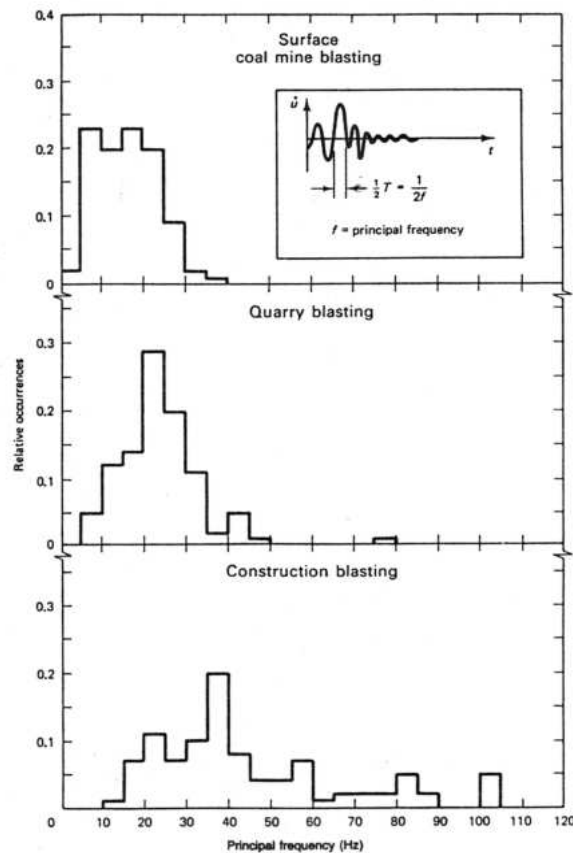
Wiss(1980)는 0.5kg의 다이ना마이트가 약 $1.4 \sim 2.8 \times 10^6$ joule의 에너지를 방출하는 반면, 전형적인 디젤햄머 항타기는 상기 값의 1/100에 정도에 해당되는 0.024×10^6 joule의 에너지만을 방출한다는 것을 밝힌 바 있다.



[그림 2.9] 건설발파에 의한 시간이력과 지진이나 핵폭발에 의한 시간이력의 비교

<표 2.2>에서와 같이, 일반적 건설진동은 0.5~200 Hz에 이르는 다양한 주파수를 갖나, 건설행위의 방식에 따라 지배 주파수의 변화 폭은 다소 한정적이 되기도 한다. 예를 들어 [그림 2.10]에서와 같이 지배 주파수가 최대의 진폭을 나타내는 펄스와 관련된 것으로 정의될 때, 발파방식에 따라 그 값이 다른 것을 확인할 수 있다. 일정거리에 위치한 구조물에서의 진동계측 결과에 의하면, 노천탄광의 경우와 같이 비교적 많은 장약량을 사용한 발파진동은 건설 발파진동에 비하여 지배 주파수가 더 낮은 영역에서 형성되는 경향이 있는 것으로 알려지고 있다.

즉, 일반적인 건설발파의 경우 그 규모가 작고 건축물과의 이격거리가 짧아 주로 암을 통하여 진동이 전달되므로 더 높은 주파수를 만들어 내는 경향이 있으며, 이러한 고주파수를 갖는 지반운동은 나름대로의 이점이 있다. 이는 고주파수를 갖는 지반운동이 저주파수의 경우보다 건축물에 더 낮은 변형도를 유발하며, 따라서 주변 건축물에 균열 등을 발생시킬 가능성이 더 낮아지기 때문이다.



[그림 2.10] 발파형태별 지배 주파수 비교 (Siskind, 1980)

건설발파시의 지배 주파수는 매우 광범위한 영역에 걸쳐 분포하는 반면, 건설 작업과 관련된 충격과 건설장비의 경우에는 지배 주파수의 범위가 발생원에 따라 보다 세분화될 수 있다. 예를 들어, 파일항타시의 지배 주파수는 15~30Hz([그림 2.7] 참조), 동다짐기에 의한 지배 주파수는 5~15Hz인 것으로 알려지고 있다.

모든 건설진동의 지배 주파수는 발생원 뿐만 아니라 전달매질에 의해서도 일정 수준 영향을 받게 된다. 높은 주파수를 갖는 진동은 암반보다 일반 토사를 통하여 전파될 때, 더 빨리 감쇠되고 여과되는 경향이 있다.

한편, 특별한 경우에 있어 지층에서의 파로효과(Waveguide effect)로 특정 주파수의 파를 더 멀리 전달하기도 한다. 예를 들어, 전단파는 식 (2.9)에 의한 주파수를 갖는 토양 층 또는 암반에서 선택적으로 증폭될 수 있다.

$$f = \frac{c_s}{4H} \quad (2.9)$$

여기서, c_s 는 전단파의 전파속도, H 는 토양 또는 암반 층의 두께

이러한 사항들을 배경으로, 일정거리에서 2~3m 이상의 두께를 갖는 토양 층에서 측정한 발파진동의 지배 주파수는 1~40Hz이며, 암반에서의 지배 주파수는 10~100Hz로 조사된 바 있다(Leet, 1960).

2.3.2 교통진동의 특성

교통진동의 주된 발생원으로는 도로상을 주행하는 차량과 철도운행을 들 수 있다. 차량이 도로를 주행할 때, 자체 중량에 의하여 침하가 발생하는 한편, 모든 바퀴의 압력이 빠르게 변화함으로써 에너지가 연속적으로 전달되게 된다. 또한, 도로의 요철이 심할 경우에는 충격이 발생하며, 이러한 충격 에너지는 파(Wave)의 형태로 주변에 전파된다. 이 경우, 레일리파 형태의 표면파가 지배적이나, 수직방향으로 분극된 전단파(SV파) 또한 존재하며, 일반적으로 상기 파동들이 혼합된 형태를 띄게 된다.

이러한 파의 전파속도는 35 m/s 정도 또는 그 이상으로서, 포화된 느슨한 점토

질 지반에서는 더 낮을 수도 있으나, 단단한 토질에서는 속도가 빠르게 증가하여 퇴석에서는 1,500~2,000 m/s, 암반에서는 그 이상이 되기도 한다.

교통진동은 버스나 트럭과 같은 중차량의 경우에는 문제시될 수도 있으나, 자가용 등에 의해서는 거의 인지할만한 진동이 발생하지 않는다고 할 수 있다.

아울러, 버스나 트럭의 경우에는 노면의 요철과 맞부딪칠 때 발생하는 충격과 차량의 차축이 덜컹거림으로 인해 추가적으로 발생하는 반복적 진동이 있다.

충격하중은 토질의 고유 주파수와 일치하는 지반진동을 유발하는 한편, 차축의 덜컹거림으로 인한 추가적인 반복진동은 차량 서스펜션의 특성에 따라 고유한 주파수를 갖는 진동을 유발한다. 이 경우, 토질의 고유 주파수가 건축물 또는 그 구성부재의 고유 주파수 중 어느 것과 일치한다면 공진현상이 발생하여 진동이 증폭될 수도 있다.

교통진동과 관련하여 주변 건축물에 미치는 영향은 노면상태, 차량의 무게, 속도 그리고 서스펜션 시스템, 토질의 종류와 층의 구성, 계절적 요인, 도로로부터의 거리, 건축물의 종류 등을 포함하여 상호 연관된 많은 요인들에 의해 좌우되므로 그 평가가 단순하지 않다.

일반적으로는 도로로부터의 거리가 멀어질수록 진동의 진폭이 감소하나, 원거리일 경우에 있어서도 지반상태 및 지형에 따라 국부적으로 큰 진동이 유발되는 경우(표면파에 위함)도 있으며, 보통 10~30Hz의 주파수 범위를 갖는다.

또한, 노면이 거칠수록 차량의 주행속도가 진동의 크기에 더 큰 영향을 미치게 된다. 서스펜션 시스템의 효과 역시 노면상태와 차량의 속도에 좌우되는데, 주행속도가 낮고 노면이 거칠지 않을 경우에는 서스펜션 시스템에 의한 영향이 크지 않은 반면, 주행속도가 높고 노면이 거칠다면 서스펜션 시스템의 영향은 매우 크게 작용할 수 있다.

IRC(2001)의 보고에 따르면, 유사한 중량을 갖는 버스와 트럭이 거친 노면을 운행할 때, 주행 속도가 25km/h 정도에서는 발생진동의 수준이 거의 동일하나, 주행 속도가 50km/h로 증가할 경우에는 버스로 인하여 발생하는 진동수준이 트럭에 의한 진동수준의 거의 2배에 가까운 것으로 조사되었다고 한다.

또한, 교통진동에 있어서는 지반의 지질과 지층의 구성이 중요하며, 일반적으로 지반의 강성과 감쇠가 작을수록 더 큰 진동이 발생하게 된다.

충격하중의 경우 지반진동은 대지의 고유 주파수와 일치할 때 가장 높은 진동

수준을 갖게 되며, 대지의 고유 주파수는 토질의 강성과 지층의 구성에 좌우된다. 연구 결과에 의하면, 교통진동에 의한 피해는 층후 7~15m의 부드러운 점토질 지반에서 가장 큰 수준을 나타내는데, 이 영역에서 토질의 고유 주파수는 주택이나 바닥의 고유 주파수와 일치하게 되어 공진현상을 유발하게 되므로 진동의 증폭을 발생시키기 때문이라고 보고되고 있다.

계절적인 요인 역시 교통진동의 발생수준에 다소의 영향을 미칠 수 있다. IRC의 최근 조사에 따르면, 겨울에는 상부토층이 동결하게 되므로, 다른 계절에 비하여 발생하는 진동의 수준이 절반 정도에 불과한 것으로 보고하고 있다.

경험적으로 판단할 때, 차량주행으로 인한 진동은 건축물의 노후화 과정에 부분적으로 기여할 수는 있어도, 슬래브 및 기초 등에 균열과 같은 직접적인 손상을 발생시키는 원인이 될 정도로는 크지 않은 것이 보통이다. 그러나, 건축물을 구성하는 각 부재들은 지반의 부동침하, 동결융해, 그리고 리노베이션이나 보수 등에 의한 잔류응력을 갖고 있다. 이러한 경우, 차량주행으로 인하여 발생한 낮은 수준의 진동도 그러한 잔류응력에 추가되어 부재를 손상시키는 촉매로 작용할 가능성이 있다는 점에 유의하여야 할 것이다.

철도운행으로 인한 진동은 차량 운행에 따른 진동과 유사하나, 차량 자체가 매우 길기 때문에 그로 인한 진동도 상대적으로 오래 지속(일반적으로 1~2분)된다는 점에서 그 특성상의 차이가 있으며, 선(線) 진동원으로서 열차의 전 구간에 걸쳐 진동이 동시에 발생한다는 점 또한 상이하다 하겠다. 즉, 열차의 경우 모든 바퀴들이 진동원으로 작용하기 때문에 장주기의 진동을 발생시키게 되며, 각 차축에 대하여 동일하게 큰 중량을 갖는 기차가 가장 큰 진동을 유발하게 된다.

또한, 이러한 진동은 다른 진동과 비교하여 낮은 주파수를 갖게 되므로, 상대적으로 작은 진동에 의해서도 건축물 피해가 발생할 가능성이 있다. 열차의 운행에 따라 발생하는 표면파는 열차 길이의 반 이하 거리 영역에서는 기하학적인 감쇠가 없으며, 모든 감쇠는 재료적인 감쇠에 의한 것이다. 따라서, 진동수준은 거리의 증가에 따라 서서히 감소하게 되나, 기차로부터 200~300m 거리에서도 인지가 가능한 경우도 있다. 열차 운행속도의 감소에 따른 진동수준의 감소는 70km/h 이하의 속도에서만 의미를 가지며, 그 이상의 속도에서는 속도의 변화에 따른 차이가 크게 없는 것으로 보고되고 있다.

2.4 진동의 전파 특성 및 추정 방안

진동을 예측하고 이를 제어하고자 하는 기준들은 최대 진동속도와 지배 주파수 모두에 대한 정보를 필요로 한다. 만약, 진동수준이 낮을 경우에는 진동속도가 더욱 중요한 변수로서 고려되며, 이 때 지배 주파수는 진동원의 메커니즘과 전달매질의 특성을 근거로 예측되어 적용될 수도 있다.

진동속도의 예측에는 크게 두 가지 접근방법이 있는데, 거리에 따른 진동의 감소(Attenuation) 정도를 이용하는 방법과 환산거리를 이용하는 방법이 그것이다.

거리에 따른 진동의 감소 정도를 이용하는 방법은, 임의의 거리에서 진동속도를 알고 있을 경우 거리의 변화에 따른 속도를 예측하는데 사용되며, 대부분 토층 지반에서의 건설작업과 관련되어 검토되고 있다.

환산거리에 의한 방법은, 진동원의 에너지에 의하여 무차원화된 거리에 따른 감소를 나타낸 것으로, 발파나 동다짐 진동과 같이 동일한 거리에서 동일한 진동원이 다양한 에너지를 방출할 때 유용하게 활용할 수 있다.

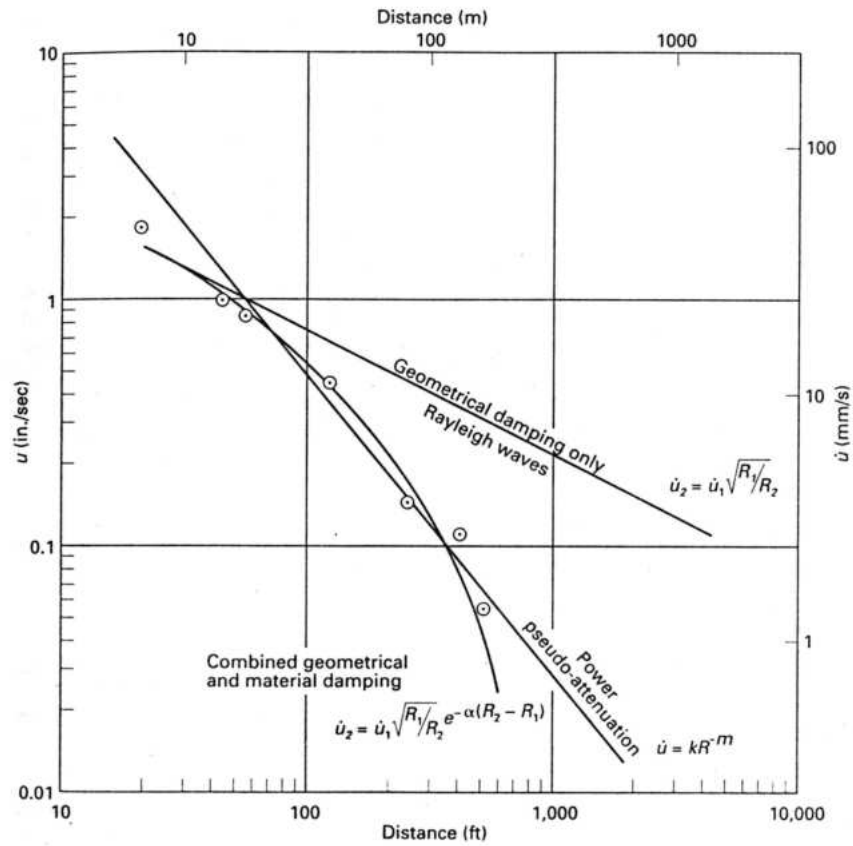
본 절에서는 상기 두 접근방법에 따른 진동속도의 예측기법을 검토하고자 하며, 아울러 현재 민원의 주된 대상이 되고 있는 발파 및 건설장비 진동에 대해서는 실무적 활용성을 고려하여 실측 데이터에 근거한 주요 추정방식을 소개하고자 한다.

2.4.1 거리에 따른 진동 감소

거리에 따른 진동의 감소는 기하학적 감쇠와 재료적 감쇠라는 2가지 현상에 의해 발생한다.

[그림 2.11]는 6톤 무게의 추를 27m 높이에서 낙하시킨 동다짐에 의하여 발생된 진동이 앞서 언급한 두 가지 현상으로 감쇠되는 것을 나타내고 있으며, 이러한 감쇠는 진동원으로부터 거리에 따른 최대속도의 감소로서 표현된다.

기하학적 감쇠는 식 (2.10)에 나타낸 바와 같이 두 거리 R_1 과 R_2 에서의 관계를 통하여 표현될 수 있다. 이 때, 최대 진동속도 U_1 '은 알고 있는 값이고, U_2 '는 모르는 값이다.



[그림 2.11] 거리에 따른 진동속도 감소

$$U_2' = U_1 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^n \quad (2.10)$$

여기서, 지수 n 은 파의 종류에 따른 함수로서, 모든 방향(구상)으로 전파되는 체적파의 경우 지중에서는 1, 표면에서는 2이며, Rayleigh파의 경우는 1/2이다.

다른 관점에서 보면, 이 지수는 진동 에너지가 전달될 때 전파면에서의 단위면적당 에너지의 감소를 나타낸다.

기하학적 감쇠 외에 진동파(Wave)는 진동의 각 사이클 또는 파장(λ)과 관계된 마찰에 의해서도 에너지 손실이 발생한다. 한 사이클의 변형을 통하여 발생하는 이러한 이력에너지의 손실은 재료의 변형특성에 따른 함수이므로 재료감쇠라 칭하며, 전파거리에 따른 로그 스케일에 비례하는 특성을 갖고 있다.

$$U_2' = U_1' e^{-\alpha(R_2 - R_1)} \quad (2.11)$$

[그림 2.11]에서와 같이 감쇠성분을 조합하여 곡선으로도 표시할 수 있으며, 레일리파의 경우 $n=1/2$ 이므로 식 (2.11)은 식 (2.12)과 같은 관계를 갖는다.

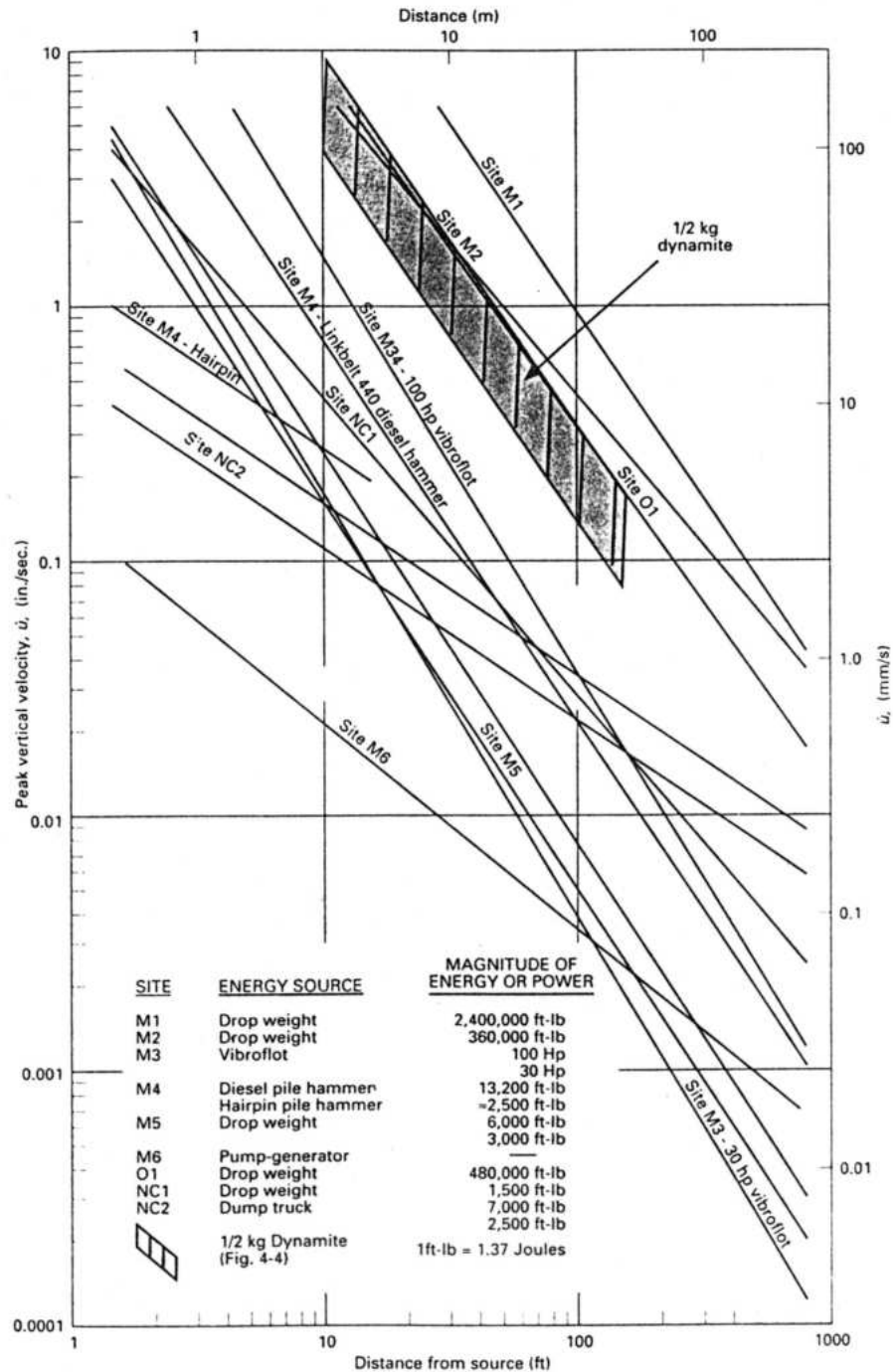
$$U_2' = U_1' \sqrt{R_1/R_2} e^{-\alpha(R_2 - R_1)} \quad (2.12)$$

주파수가 높은 파는 동일한 거리를 이동할 때 보다 많은 사이클의 운동을 수반하므로 α 값은 지배 주파수에 따라 변화하게 된다. 재료감쇠는 사이클 당의 거리가 아닌 에너지 손실의 함수임을 주지하여야만 한다. 이러한 주파수에 대한 의존성은 지배 주파수가 동일한 파형에서 거리에 따라 감소되는 이유를 설명해준다. 저주파수 성분은 더 적은 사이클을 가지고 전파되며, 이에 비례하여 더 적은량의 에너지 손실을 나타낸다. <표 2.3>에는 대표적인 α 값이 주어져 있는데, 암반보다 토양에서 α 값이 더 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

<표 2.3> α 값에 의한 토질의 분류

구분	α (1/ft)		재료설명
	5Hz	50Hz	
I	0.003~0.01	0.03~0.10	Weak or soft soils (삽이 쉽게 들어갈 수 있을 정도) : 교란상태의 흙, 건조하거나 부분적으로 수분이 포함된 토탄, 매립지, 진흙, 느슨한 해안사나 언덕에 쌓인 모래, 최근 굴착된 지반, 유기질토, 표토 등
II	0.001~0.003	0.01~0.03	Competent soils(삽으로 굴착 가능한 정도) : 모래질 점토, 실트질 점토, 자갈, 실트, 풍화암
III	0.0001~0.001	0.001~0.01	Hard soils(삽으로 굴착 불가능한 정도) : 조밀하게 다져진 모래, 건조 압밀된 점토, 압밀된 해안 빙력토, 부분적으로 노출된 암
IV	< 0.0001	< 0.001	Hard or Competent rock (해머로 깨기 어려운 정도) : 기반암, 최근에 노출된 경암

[그림 2.12]는 광범위한 건설작업으로부터 최대 진동속도와 거리와의 관계를 도식화한 것이다.



[그림 2.12] 건설진동의 크기와 거리에 따른 감소(Woods and Jedele, 1985)

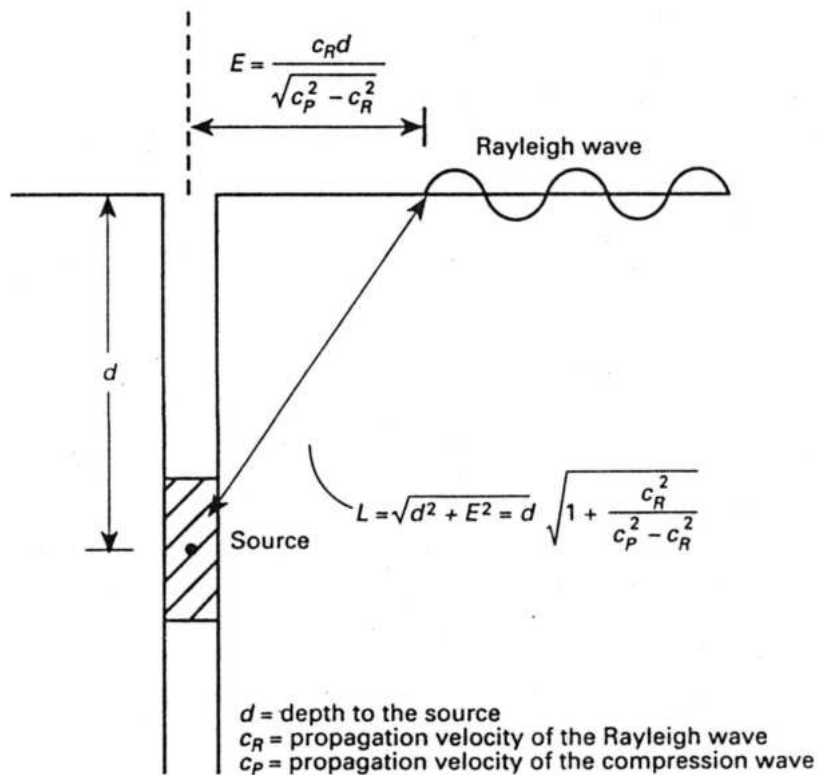
기하학적 감쇠와 재료적 감쇠의 조합은, 발파 또는 건설장비에 의한 진동이 원거리에서 레일리파가 지배적이 되는 이유를 설명해 주고 있다.

첫째, 레일리파는 단지 지표면상에서만 전파되며, 체적파와 같이 구상의 표면보다는 원통형의 표면상에서 에너지를 전파한다는 점으로서, 이러한 차이는 더 작은 감쇠지수(n)값을 갖는 이유를 설명해 준다.

둘째, 전술한 바와 같이 원거리에서는 낮은 주파수의 레일리파가 이동 변형 사이클의 수가 적어 높은 주파수를 갖는 체적파보다 에너지의 손실이 적다는 점이다.

셋째, 레일리파가 향타나 발파와 같은 진동원으로부터 발생되지 않았다 할지라도, 진동원에 상관 없이 토양 내에서는 유사한 형태를 갖는다.

한편, [그림 2.13]에서와 같이, 진동원과 레일리파의 굴절거리는 전파속도의 함수임을 확인할 수 있다..



[그림 2.13] 진동원과 레일리파의 굴절거리 관계(Daemon et al., 1983)

2.4.2 환산거리에 따른 진동 감소

에너지가 방출될 때, 최대 진동속도를 예측하기 위하여 사용되는 “환산거리에 의한 추정방식”은 발파나 낙하충격을 이용하는 동다짐의 경우 특히 그 신뢰도가 높다고 할 수 있으며, 자승근 환산($R/E^{1/2}$)과 삼승근 환산($R/E^{1/3}$) 방식이 널리 채택되고 있다. 무차원 변수로서 자승근 환산거리 또는 삼승근 환산거리에 대한 연구는 새로운 개념은 아니며, 이미 핵폭발의 소규모 모델링과 연계되어 사용되어 왔던 바(Engineering Research Associates, 1952, 1953), Hendron의 제안으로 발파 진동에 적용되기 시작하였다(Ambraseys and Hendron, 1968).

Buckingham pi의 무차원 해석이론에 따라, Hendron은 발파현상과 관련된 6개의 무차원 독립변수가 존재하는 것으로 가정하였으며, 폭발무게 W 는 폭발에너지에 비례하므로 발파에 의한 에너지 E 로 대체되었다. Hendron에 의해 고려된 6개의 변수는 u/R , u'/c , R/c^2 , ft , tc/R , $W/\rho c^2 R^3$ 로서 앞의 4개 항은 종속변수이며, 나머지 2개 항은 독립변수들의 조합이다. pi의 이론에 따라 임의의 지수를 갖는 변수들은 서로 곱해질 수도 있고, 무차원변수의 함수로서도 고려될 수 있다.

고정된 토양이나 암반의 밀도(ρ)는 20% 이상 변하지 않고, 탄성파의 속도(c)도 두 배 이상으로는 변하지 않는다. 따라서, W 와 R 의 변화는 밀도와 탄성파 속도의 변화보다 훨씬 중요한 의미를 가지므로 u/R , u'/c , $W/\rho c^2 R^3$ 은 u/R , u , W/R^3 로 변환되었다. 이에 발파진동에 영향을 미치는 요소로서 화약류의 종류, 장약량, 장약밀도, 기폭방법, 전색정도, 자유면의 수, 거리 및 매질의 전파속도 등이 고려되었으며, 진동속도는 거리와 장약량의 함수로서 식 (2.13)과 같이 일반화될 수 있다.

$$V = K \left(\frac{D}{W^b} \right)^n \quad (2.13)$$

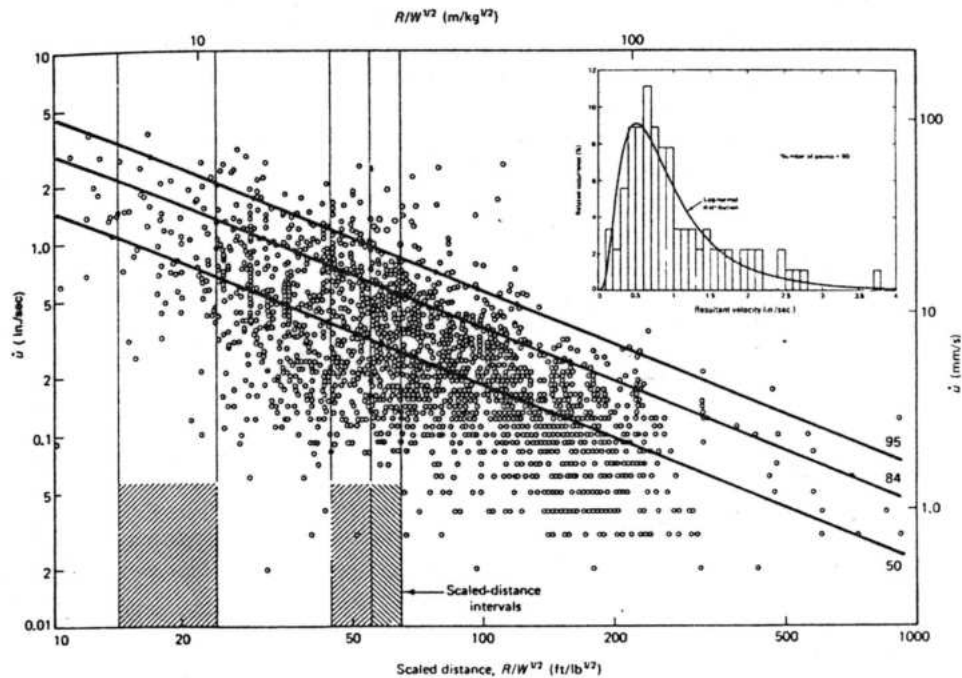
여기서, W =지발당 장약량, D =발파 폭원과 계측점 사이의 거리, K =발파진동 상수, b =장약지수, n =감쇠지수를 나타내며, K 와 n 은 매질의 진동전달 특성을 반영하는 계수로서 입지상수라 한다. b 는 장약과 관련된 상수로서 봉상(棒狀) 장약의 경우 1/2, 구상(球狀) 장약의 경우 1/3을 사용하며, $b=1/2$ 일 때를 자승근 환산,

B=1/3일 때를 삼승근 환산이라 한다.

자승근 환산식, 즉 거리를 에너지의 자승근으로 나눈 환산거리($R/E^{1/2}$)의 함수로써 진동속도를 도식화하는 방법은 삼승근 환산식보다 더 전통적인 방법이다.

[그림 2.14]는 Lucole과 Dowding (1979)이 Illinois에 있는 40개의 탄광과 채석장, 건설현장 등에서 약 2,500회의 발파기록을 정리한 것으로, 자승근 환산거리에 근거하여 진동속도의 감소 관계를 결정하고자 하였으나, 상당한 수준의 분산도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

이러한 분산으로 인하여 대부분의 규정에서는 계측이 없는 한, 발파는 평균값보다는 최대 가능속도에 근거하여 설계하도록 권장하고 있다.



[그림 2.14] 발파에 의한 최대 진동속도의 변화(Lucole and Dowding, 1979)

[그림 2.14]에서 보듯이, 주어진 환산거리에서 진동속도의 변화는 몇 가지 경우로 대표될 수 없는 상당히 많은 다른 조건이 존재함을 나타낸다. 이는 발파시간과 측정상의 오차 뿐 아니라 지형적 차이, 발파형태, 진동파의 형태, 폭파의 기하학 등과 관련한 많은 변수를 포함하며, 이러한 차이에 의한 유사한 변화를 향타

등 다른 건설작업에서 수집된 데이터에서도 확인할 수 있다.

결론적으로 이야기하자면, 계측에 의하지 않고는 발파나 향타 등에 의한 진동 속도의 정확한 추정은 불가능하며, 다양한 조건하에서 많은 진동 추정식들이 기존 연구를 통하여 보고되었다 할 지라도, 그러한 식들은 주어진 조건하에서만 의미를 갖는다고 할 수 있다.

그러므로, 반드시 주어진 환경에서 계측을 통하여 진동속도를 구할 필요가 있으며, 계측된 정보가 없을 경우에는 최대한 현재의 환경과 유사한 환경에서 제공된 추정식을 사용하는 것이 바람직하다.

발파시의 지배 주파수와 최대 진동속도의 예측을 위해서 널리 사용되고 있는 또 다른 방법으로는 전술한 삼승근 환산에 의한 방식이 있다. 환산의 효용성을 설명하기 위하여 Hendron은 14~145,000kg의 지발당장약량에 대한 발파계측 결과를 [그림 2.15]과 같이 도식화하였다.

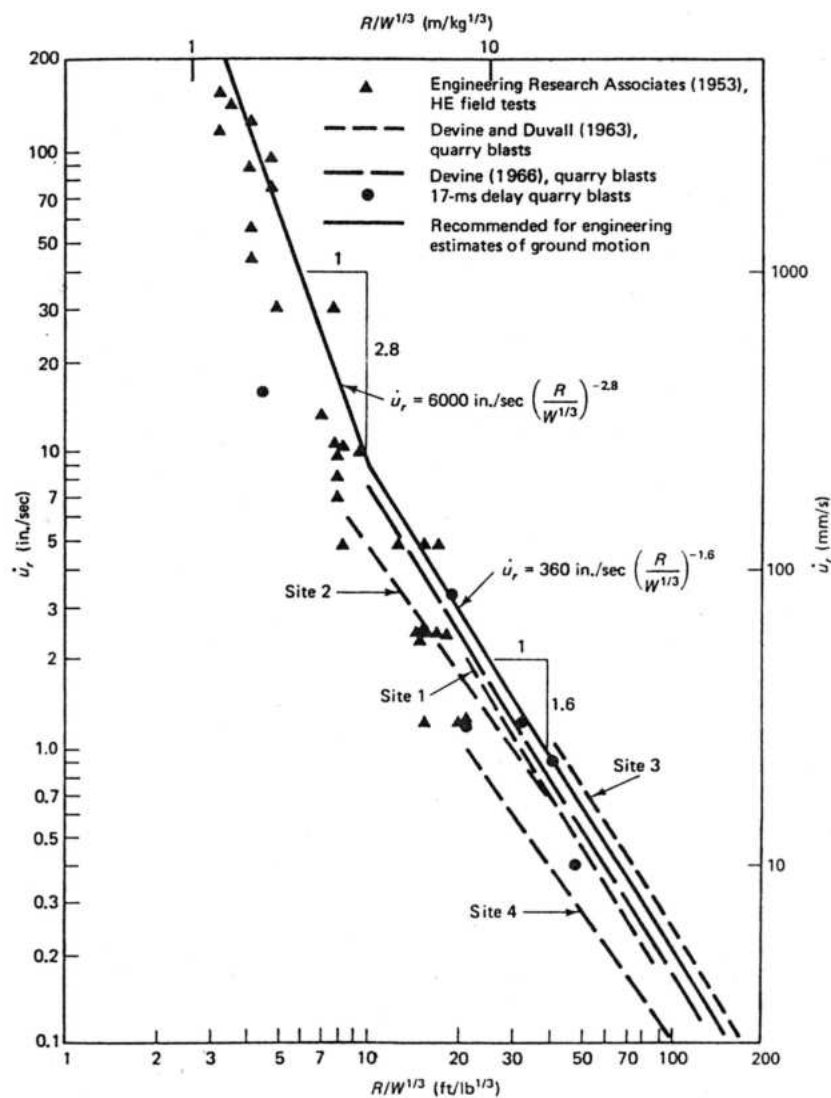
[그림 2.14]의 경우와 비교하여 샘플수의 차이는 있다 하겠으나, [그림 2.15]에서는 W 값의 변화에도 불구하고 환산거리($R/W^{1/3}$)에 따른 진동속도가 비교적 안정된 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

그러나, 암 발파에 대한 기존 연구들에 의하면, 최대 진동속도는 지발당 최대 장약량 또는 주어진 임의의 시간에 폭발하는 양과도 밀접한 관계가 있음을 보여주고 있으며(Devine, 1966), 매질 내의 전파속도, 장약 사이의 거리, 발파가 진전되는 방향 등 다른 변수들에 의해서도 영향을 받는다는 사실을 지적하고 있다. 결국 이러한 사실은 삼승근 환산이 진동속도를 예측하는데 있어서 어느 정도 신뢰성 있는 값을 제시할 수도 있지만, 실제적으로는 자승근 환산의 경우와 같이 큰 차이 없이 각 조건별 특성에 따라 해석되어져야만 한다는 점을 의미하고 있다(Oriard and Emmert, 1980).

여기서, 한가지 주목하여야만 하는 점은 현재 목적으로 하는 사항의 본질이다. 진동을 제한하여 이로 인한 피해를 줄이고자 하는 것이 목적이라면 상기의 접근 방법들은 나름대로의 기준에 의하여 소기의 목적을 달성하는데 도움을 줄 것이다. 하지만, 특정기준에 근거하여 발생한 진동이 건축물 손상의 원인이 되었는지의 여부를 평가하고자 한다면 예측치의 정확도가 크게 요구된다. 이러한 관점에

서 보면, 상기의 접근방법들은 모두 어느 정도의 분산도를 지니고 있기 때문에 진동값의 정확한 예측은 불가능하며, 결국 실제 측정값에 근거하지 않는 한 비교 평가에 대한 신뢰도에 높은 점수를 줄 수는 없을 것이다.

다음 절에서는 실무적인 문제에 응용이 가능하도록, 발파진동과 주요 건설장비 진동에 대하여 국내·외 현장측정 데이터를 근거로 제안된 몇몇 추정식이 제시될 것이다.



[그림 2.15] 삼승근 환산거리와 최대 진동속도와의 관계
(Ambraseys and Hendron, 1968)

2.4.3 발파 진동속도의 추정

발파진동 속도를 예측하고자 여러 학자들에 의하여 많은 방식이 제안되어 왔으며, 현재로서는 자승근 환산식(Square root scaling), 삼승근 환산식(Cube root scaling) 그리고 입지특성 환산식(Site specific scaling)의 형태로 대별될 수 있다.

이 중 자승근 환산식과 삼승근 환산식이 널리 적용되고 있으며, 입지특성 환산식은 환산거리가 매우 짧은 경우, 즉 근접발파의 경우 적합한 것으로 보고되고 있다.

환산거리에 따른 발파진동 예측식에 대한 신뢰도를 살펴보면, 연구자마다 견해 차이를 나타내기는 하나, 전반적으로는 자승근 환산거리를 채택한 경우보다 삼승근 환산거리를 채택한 경우가 조금 더 신뢰성이 있는 것으로 평가되고 있다.

<표 2.4>와 <표 2.5>는 국내의 여러 학자들이 연구하여 발표한 자승근 환산거리 및 삼승근 환산거리식에서의 발파 진동상수(k)와 감쇠지수(n)를 정리한 것이다.

서울 지하철공사에서 화강암 및 편마암 지역의 굴착작업에 따른 발파진동 측정자료를 종합한 결과에서도 삼승근 환산을 이용한 경우가 조금 더 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났다.

아울러, 많은 시험발파를 통하여 식 (2.14) 및 식 (2.15)와 같은 입지특성 환산식을 제시하였으며, 이에 적용할 수 있는 발파진동 상수를 화약 종류 및 개착식 발파와 터널식 발파로 구분하여 <표 2.6> 및 <표 2.7>을 제시하였다.

<표 2.4> 자승근 환산거리에 대한 발파진동상수, 감쇠지수의 측정사례

암석 종류	K	n	최대속도 성분*	신뢰도	연구자
화강암 편마암 사암	7.9	-0.969	P	50%	임한욱 등(1992)
	28.9	-0.969	P	95%	
	49.6	-0.969	P	95%	
석회석	45.24	-1.803	V	50%	이정인 등(1979)
석회석	48.00	-1.46	M	50%	이경운 등(1987)
석회석	26.18	-1.492	P	50%	양형식 등(1990)

* P : 세 성분의 벡터합, V : 수직성분, M : 각 성분중 최대값

<표 2.5> 삼승근 환산거리에 대한 발파진동상수, 감쇠지수의 측정사례

암석 종류	K	n	최대속도 성분*	신뢰도	연구자
화강암	138	-1.700	M	50%	이경운 등(1984)
	87	-1.500	M		
편마암	648	-1.640	M	50%	이경운 등(1987)
화강 편마암	128.02	-1.754	V	50%	이정인 등(1991)
	367	-1.754	V	100%	
	260	-1.754	V	95%	
화강암 편마암 사암	44.9	-1.350	P	50%	임한옥 등(1992)
	149.9	-1.350	P	95%	
	456.8	-1.350	P	99%	
석회석	103.2	-1.640	P	50%	양형식 등(1990)
	272.0	-1.640	P	95%	
	406.3	-1.640	P	99%	

* P : 세 성분의 벡터합, V : 수직성분, M : 각 성분중 최대값

$$\text{서울 편마암에서 } V = K W^{0.5} D^{-1.5} \quad (2.14)$$

$$\text{서울 화강암에서 } V = K W^{0.57} D^{-1.7} \quad (2.15)$$

김수일 등에 의하면, 우리나라의 발파진동 자료는 <표 2.8>에 의한 伊藤과 吉川の 연구결과와 유사한 범위를 갖고 있으며, Attewall의 연구결과와는 다소 차이가 있는 것으로 보고하고 있다.

또한, Devine, Langefors, 伊藤, 吉川, 미광무국의 제안식, Attewall의 제안식을 국내 측정자료와 비교한 결과, 가장 높은 상관관계를 갖는 것은 미광무국식이며, 국내 지질조건에 적합한 식은 삼승근 환산거리를 이용한 방법임을 지적하였다.

이와 함께, 도심지와 채석장의 발파를 구분하여 비교하였으며, 그 결과 상기 식들 모두가 도심지의 소규모 발파에 대하여는 높은 상관성을 나타내었으나, 채석장 등의 대규모 발파에서는 낮은 상관도를 갖는 것으로 보고하였다.

연구 결론에서는 암종에 따른 구분이 필요함을 지적하고, 실측결과를 바탕으로 각 암석의 종류를 대표할 수 있는 발파진동 추정식을 화강암, 편마암, 그리고 석회암으로 구분하여 <표 2.9>와 같이 제안하였다. 또한, 화강암과 편마암에서의 발파진동 추정식은 매우 유사하게 나타났음에 착안하여 화강암과 편마암 모두에 적용할 수 있는 발파진동 추정식을 별도로 제안하고 있다.

<표 2.6> 식 (2.14)의 적용을 위한 발파진동상수 'K'값

구분 화약	발파방법 압축강도 (kg/cm ²)	개 착 식		터 널 식	
		바닥발파	계단발파	심발발파	확대발파
다 이 나 마 이 트	1500~1200	91	61	71	41
	1200~900	85	55	65	35
	900~600	79	49	59	29
	600이하	72	42	52	22
함 수 폭 약	1500~1200	73	49	57	33
	1200~900	68	44	52	28
	900~600	63	39	47	23
	600이하	58	34	42	18
초 안 폭 약	1500~1200	58	39	46	26
	1200~900	54	35	42	22
	900~600	50	31	38	18
	600이하	46	27	34	14

(*) 진동식 : $V = K W^{0.57} D^{-1.5}$, 지질조건 : 서울 편마암, 천공경 : 38mm

<표 2.7> 식 (2.15)의 적용을 위한 발파진동상수 'K'값

구분 화약	발파방법 압축강도 (kg/cm ²)	개 착 식		터 널 식	
		바닥발파	계단발파	심발발파	확대발파
다 이 나 마 이 트	1800~1500	147	117	128	97
	1500~1200	136	106	116	86
	1200~900	125	95	105	75
	900~600	114	84	94	64
	600이하	103	73	83	53
함 수 폭 약	1800~1500	117	94	102	78
	1500~1200	109	85	93	69
	1200~900	100	76	84	60
	900~600	91	67	75	51
	600이하	82	58	66	42
초 안 폭 약	1800~1500	96	76	66	63
	1500~1200	87	68	74	55
	1200~900	80	61	67	46
	900~600	73	54	60	41
	600이하	66	46	53	34

(*) 진동식 : $V = K W^{0.5} D^{-1.7}$, 지질조건 : 서울 화강암, 천공경 : 38mm

<표 2.8> 발파진동 추정식(국외 연구)

제안자	추정식	발파진동상수	비고
USBM	$V = K \left(\frac{D}{W^m} \right)^n$	m: 장약량에 따른 지수 n : 거리에 따른 감쇠지수 K : 발파진동상수	
伊藤	$V = K W^{2/3} D^{-2}$	K=250~1,000 교질다이나마이트 K=15~21 흑색화약	
Langefors	$V = K W^{0.5} D^{-0.75}$	K=300~700	
吉川	$V = K W^{3/4} D^{-2}$	K=100~700 터널 K=150~650	
日本油脂(株)	$V = K W^{3/4} D^{-1.5}$	K=80±40, 터널발파, 고성능다이나마이트 K=60±20, 터널발파, 제어발파폭약 K=20±10, 터널발파, 콘크리트파쇄기 K=50±30, 노천발파, 고성능다이나마이트 K=40±25, 노천발파, 제어발파폭약 K=15±10, 노천발파, 콘크리트파쇄기	
日本火薬(株)	$V = K W^{3/4} D^{-2}$	K=450~900 터널발파, 심발발파 K=200~500 터널발파, 확대발파 K=300~700 터널발파, Toeing발파 K=100~300 대구경벤치발파 K=300~2,000 향타	0.2<D<4,000
旭化成	$V = K W^{2/3} D^{-n}$	K=500~1,000 심발발파 K=300~500 확대발파 K=200~500 벤치발파 n=2.0 발파지점과 건축물 사이 지층이 암반일 때 n=2.5~3.0 발파지점과 건축물 사이 지층이 점토일 때	10<W<3,000 30<D<1,500

<표 2.9> 암종에 따른 진동속도 추정식(김수일 등)

구분	진동속도 추정식
화강암	$V = 135.6 (D/W^{1/3})^{-1.80}$
편마암	$V = 114.0 (D/W^{1/3})^{-1.70}$
석회암	$V = 273.8 (D/W^{1/3})^{-1.60}$
화강암과 편마암	$V = 111.4 (D/W^{1/3})^{-1.73}$

이상과 같은 검토결과를 종합하여, 발파진동속도의 추정에 대한 지침을 다음과 같이 제안하고자 한다.

우선, 진동속도는 주어진 조건하에서 계측을 통하여 얻는 것을 원칙으로 하며, 계측이 불가능한 상황에서는 해당현장에서 제안된 추정식 또는 해당환경과 최대한 유사한 조건에서 제안된 추정식을 적용하도록 한다.

단, 현장에서의 추정식이 불비하고, 현재의 조건조차 불명확한 최악의 상황에서는 식 (2.16)과 같은 미광무국의 추정식을 사용할 것을 권장한다.

전술한 식은 자승근 환산거리에 의한 추정식으로 비록 근래의 연구 결과들이 삼승근 환산거리에 의한 추정식의 신뢰도를 상대적으로 높게 평가하는 경향을 나타내기는 하나, 대부분 특정조건 하에서의 제한된 계측량에 근거하고 있어 아직까지는 검증하여야 할 부분이 많다고 할 수 있을 것이다.

앞서 언급한 바와 같이, 진동속도는 수많은 요인에 의하여 영향을 받게 되므로 추정식이 충분한 신뢰도를 갖기 위해서는 가능한 한 많은 양의 실측 데이터를 근거로 제안되어야 한다. 현재까지 보고된 바로는 미광무국의 추정식이 일반적 조건에서 가장 많은 양의 실측 데이터를 근거로 제안되었으며, 국내에서 제안된 추정식들은 아직까지는 만족할 만한 신뢰도를 갖기에 부족한 면이 없지 않다고 할 것이다. 앞에서도 살펴보았듯이 이러한 사실은 국내의 몇몇 연구자들에 의해서도 지적된 바 있으며, 또한 실무 경험이 풍부한 전문가들의 견해를 반영한 것이다.

이와 관련한 향후 연구과제로서, 국내에서도 각 관련기관이 보유하고 있는 데이터를 최대한 통합하여 샘플수도 풍부하고 국내 실정에 부합되는 추정식을 제안하는 것도 고려할 가치가 있을 것이다.

$$V = 172.5 (D/W^{1/2})^{-1.6} \quad (2.16)$$

여기서, D는 진동원으로부터의 거리(m), W는 장약량(kg) 이다.

식 (2.16)에 의해 추정된 진동속도는 통계적인 의미에서 평균에 해당하는 최대값(PPV)이며, 단위는 cm/s이다.

2.4.4 건설장비 진동속도의 추정

항타나 기타 건설장비로 인한 진동도 앞서 소개된 두 가지 접근방법에 의하여 추정될 수 있다.

식 (2.17)은 에너지의 관점에서 환산거리로 일반화된 추정식을 나타낸 것으로, Wiss(1967)와 Attewell and Farmer(1973) 등에 의하여 제안되었다. 이는 앞서 서술한 발파진동에 있어서의 무차원화된 변화량을 묘사하기 위한 방법과 동일한 개념에 근거한다.

$$V' = K \left(\frac{R}{E^{1/2}} \right)^n \quad (2.17)$$

여기서, V=최대 진동속도(Peak particle velocity), D=진동원으로부터의 거리, E=충격에너지이며, K와 n 값은 경험적인 상수이다.

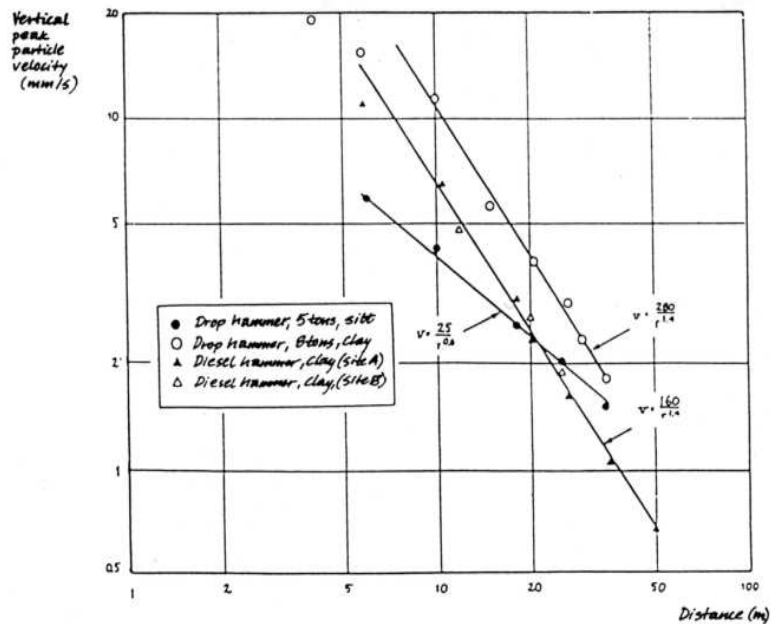
충격에너지 E는 램이나 햄머의 낙하충격에 의한 위치에너지로 식 (2.18)에 의해 구할 수 있다.

$$E = m \cdot g \cdot h \quad (2.18)$$

여기서, E=충격에너지(Joule), m=램 또는 햄머의 무게(kg), g=중력가속도(m/sec²), h=낙하높이(m)를 나타낸다.

항타장비로부터의 발생진동은 장비의 무게, 타격속도, 타격진동수, 파일의 형태, 주변지반과 하부지반, 파일의 단면적, 파일의 직립정도, 그리고 타격시의 편심도 등에 영향을 받게 된다.

아울러, 항타진동은 전파되는 지반의 토질에 따라 그 전파 양상이 달라지게 되며, 그 예를 [그림 2.16]과 [그림 2.17]에 제시하였다. 항타에 의한 지반진동의 주파수 범위는 보통 2~15Hz 정도이며, 발파에 의한 주파수보다 훨씬 낮다고 할 수 있다.



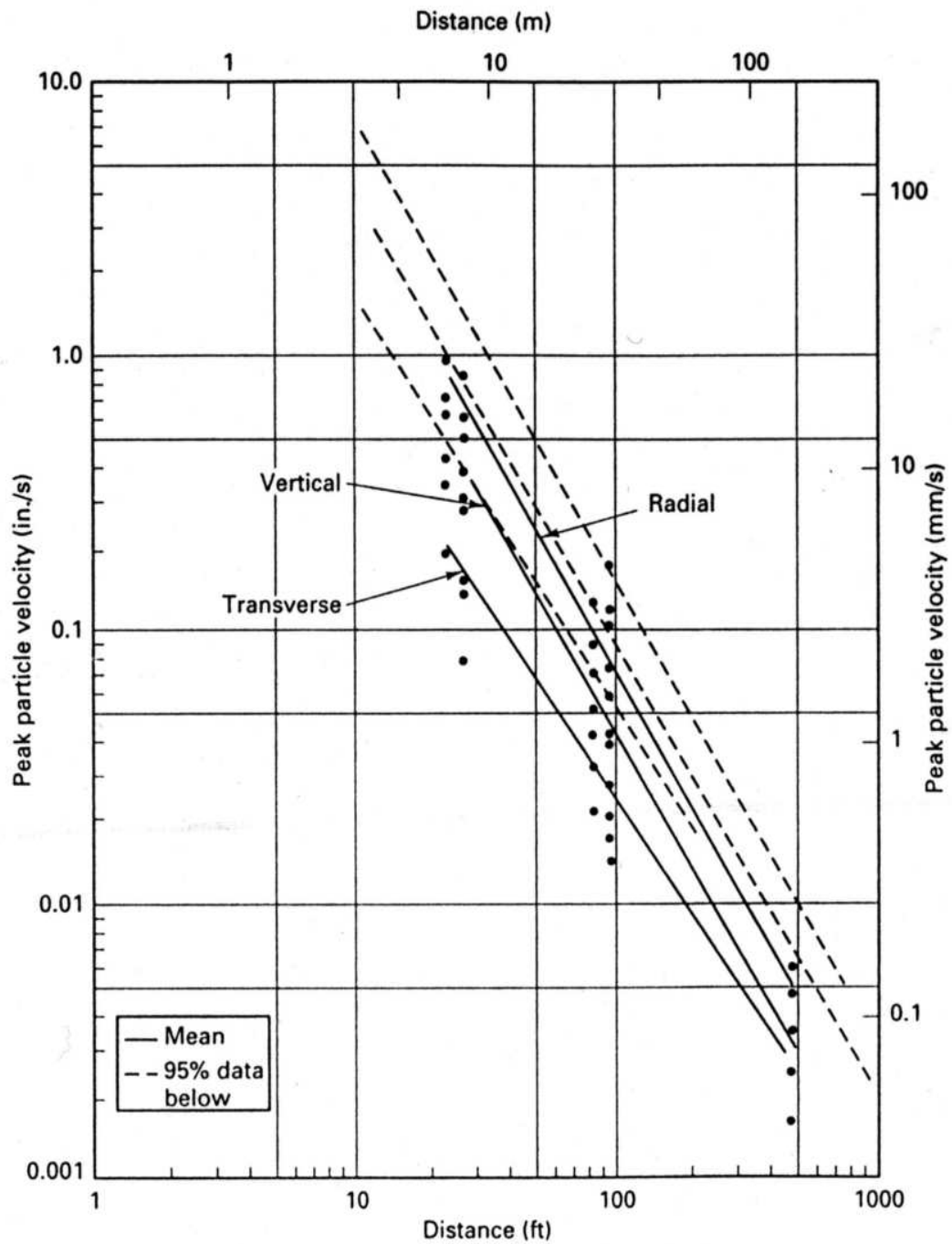
[그림 2.16] 항타에 의한 점토와 실트질 지반에서의 진동속도 감소(Martin, 1980)

항타나 동다짐과 같은 건설장비에 의한 진동도 지반에서의 흡수성이나 탄성파의 속도와 매질의 밀도로서 표시되는 임피던스 등에 따라 그 전파양상이 크게 달라지므로, 지반특성이 고려되지 않은 임의의 추정식을 특정상황에 적용하는 것은 아무런 의미가 없다.

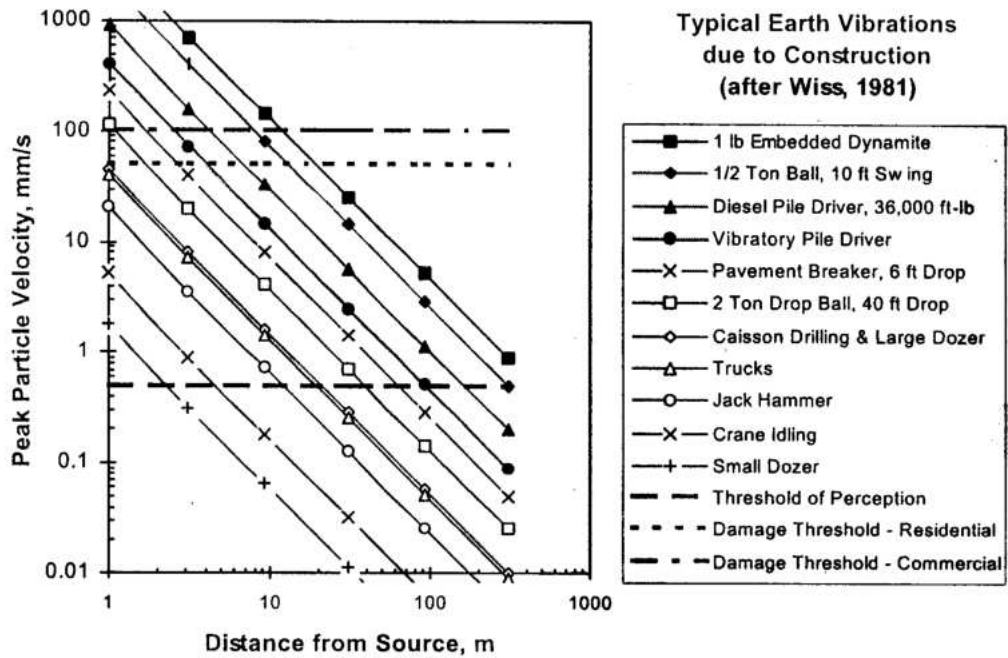
그러므로, 건설장비에 의한 진동속도의 추정 역시 발파진동의 경우와 마찬가지로 실 계측을 우선으로 하며, 충격시험 등으로 먼저 지반진동의 특성을 구한 뒤 그 결과를 참조하여 진동속도를 추정하는 것이 바람직하다.

[그림 2.18], [그림 2.19], [그림 2.20]에 “거리 및 환산거리에 따른 각종 건설장비 진동의 변화”와 관련한 국외 연구결과를 수록하였으며, <표 2.10>에는 몇 가지 건설장비를 대상으로 한 진동 추정식에 관한 국내 연구결과가 소개되어 있다.

국내의 경우 다양한 지반조건별로 건설장비 진동을 건축물 손상과 연관지어 보고한 사례가 적어 유사한 문제 발생 시 진동추정에 많은 어려움이 예상되며, 향후 이와 관련한 연구가 필요하다고 하겠다.



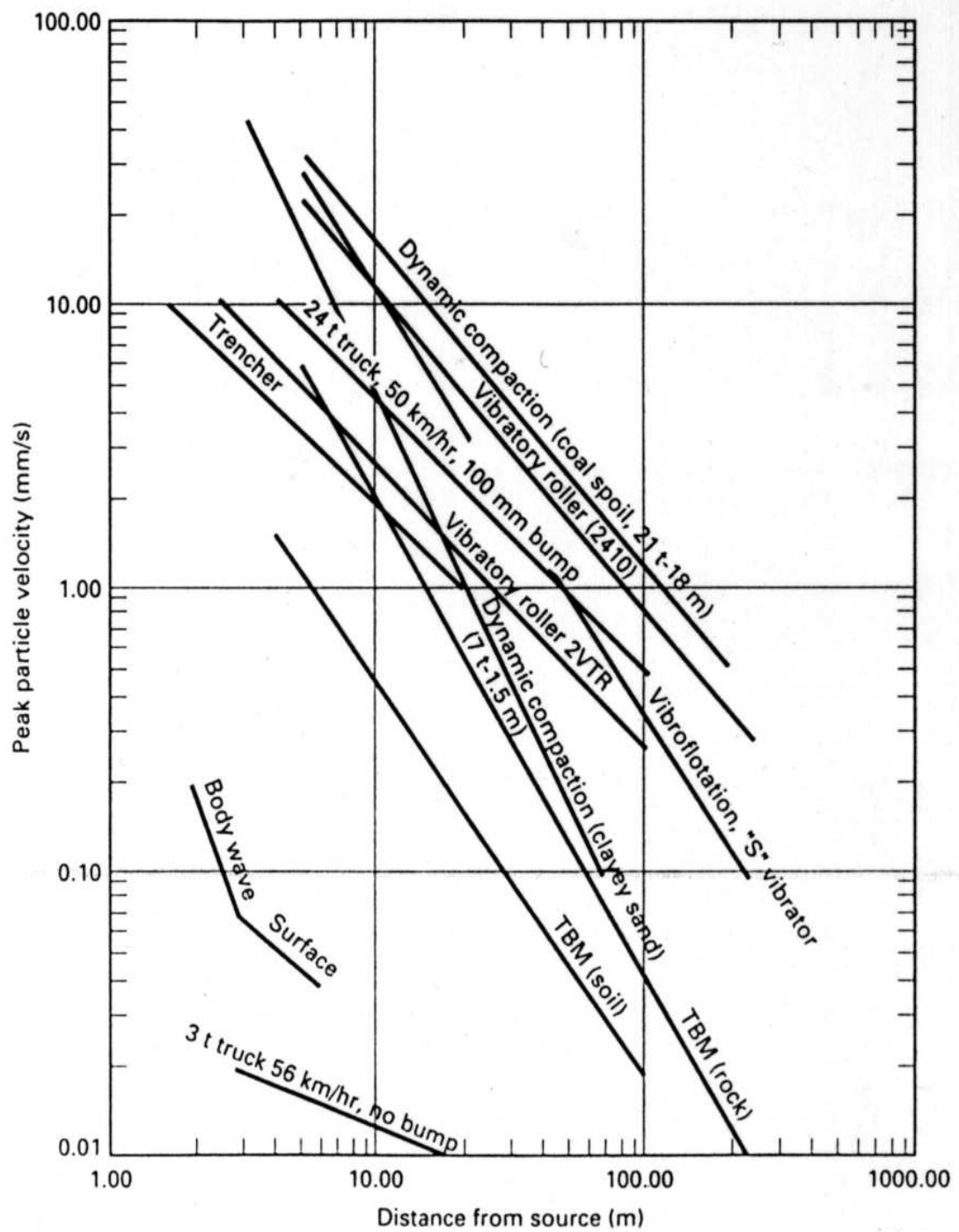
[그림 2.17] 모래와 자갈지반에서 H파일 항타에 의한 진동속도의 거리 감쇠
(Phoenix, MKT 디젤햄머)



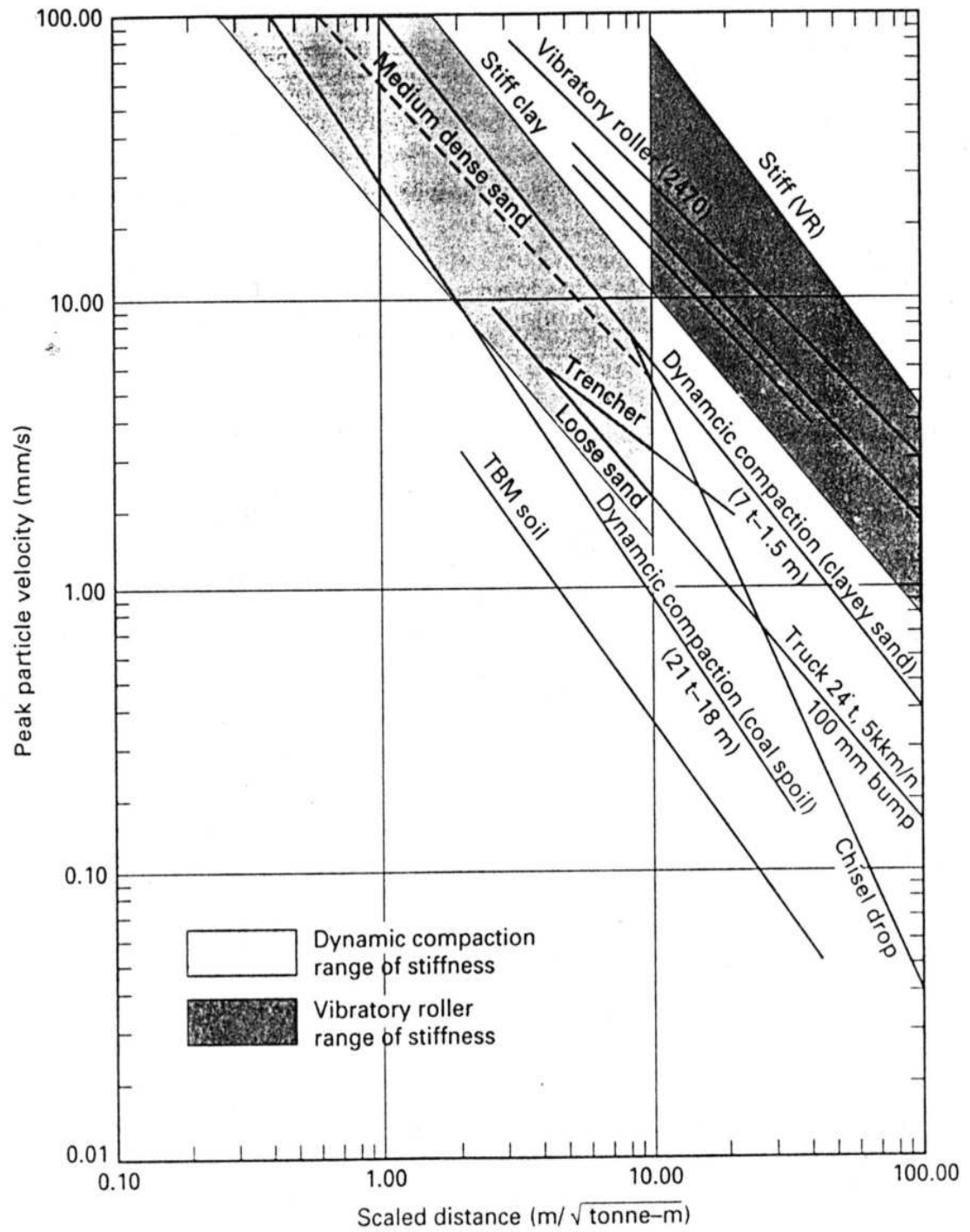
[그림 2.18] 거리에 따른 각종 건설장비의 진동속도 감소(Wiss)

<표 2.10> 건설장비에 의한 진동속도 추정식

제안자	추정식	비 고
대한주택공사 (1990)	$V = 50.55 \left(\frac{R}{\sqrt{E}} \right)^{-1.54}$	낙하물 충격진동 (v=mm/s, E=t.m, D=m)
Mayne	$V = 15 \left(\frac{R}{\sqrt{E}} \right)^{-1.7}$	낙하물 충격진동 (v=mm/s, E=t.m, D=m)
김종훈(1997)	$V = 0.0045 \left(\frac{R}{\sqrt{E}} \right)^{-1.15}$	철추의 자유낙하에 의한 낙추진동 화강편마암, (v=mm/s, E=Joule, D=m)
김남수(1999)	$V = 87 \left(\frac{R}{\sqrt{E}} \right)^{-1.3}$	경부고속철도 3공구 건설현장 DHK 7 유압햄머(v=mm/s, E=t.m, D=m)
최신훈(1999)	$V = 22.43 X^{-0.85}$	디젤항타기, (V=cm/s, X=m)
	$V = 391.57 X^{-1.887}$	유압항타기, (V=cm/s, X=m)
	$V = 9.31 X^{-1.09}$	오거보어링, (V=cm/s, X=m)
	$V = 0.0004 X^2 - 0.066 X + 2.806$	SIP공법 항타기, (V=cm/s, X=m)
박현성(2001)	$V = 0.152 \left(\frac{R}{\sqrt{E}} \right)^{-1.83}$	암반굴착시의 브레이커 진동, 화강암



[그림 2.19] 거리에 따른 각종 건설장비의 진동속도 감소
(Dowding, from Construction Vibrations(Book, 1996))



[그림 2.20] 환산거리에 따른 각종 건설장비의 진동속도 감소
(Dowding, from Construction Vibrations(Book, 1996) 1996)

2.4.5 진동속도 추정 예

국내에 위치한 모 석산 발파현장에서의 진동 계측자료에 대한 회귀분석을 통하여 (2.19), (2.20)과 같은 진동 추정식을 구하였다.

<표 2.11>은 상기 식과 함께, 앞서 언급한 USBM의 추정식 (2.16)에 지발당장약량 0.5kg을 대입하여 각 이격거리별 진동속도를 구하여 대비한 것이다.

그 결과, 적용하는 추정식에 따라 근거리에서는 상당한 편차를 나타내는 것을 알 수 있으며, 따라서 기존 식에 의한 추정에는 한계가 있음을 확인할 수 있다.

1) 자승근 환산거리에 의한 추정식

$$V = 317.4 (D/W^{1/2})^{-1.66} \quad (2.19)$$

2) 삼승근 환산거리에 의한 추정식

$$V = 219.9 (D/W^{1/3})^{-1.6} \quad (2.20)$$

3) USBM 추정식(자승근 환산거리)

$$V = 172.5 (D/W^{1/2})^{-1.6}$$

<표 2.11> 발파진동 추정식별 거리에 따른 진동속도

폭원과 대상물과의 이격거리 (m)	진동 속도(cm/s)		
	자승근 추정식	삼승근 추정식	USBM 추정식
10	9.7	7.6	6.0
20	3.1	2.5	2.0
30	1.6	1.3	1.0
40	1.0	0.8	0.7
50	0.7	0.6	0.5
60	0.5	0.4	0.3
70	0.4	0.3	0.3
80	0.3	0.3	0.2
90	0.3	0.2	0.2
100	0.2	0.2	0.2
110	0.2	0.2	0.1
120	0.2	0.1	0.1
130	0.1	0.1	0.1
140	0.1	0.1	0.1
150	0.1	0.1	0.1
160	0.1	0.1	0.1

2.5 진동 측정방법

진동측정을 위해서는 먼저 측정대상 및 조건 그리고 목적으로 하는 측정요소에 적합하도록 측정 시스템이 구성되어야 하며, 용도에 따라 계측의 항목과 방식이 결정되어야 한다. 즉, 피해기준과 부합하는 변수를 측정하는 것이 중요하며, 건축물 피해와 관련된 가장 중요한 측정변수는 진동속도와 진동 주파수이다.

이는 현재 정립되어 있는 많은 건축물 피해기준들이 대부분 진동속도를 척도로 사용하고 있기 때문이며, 또한 진동의 증폭 여부와 관련하여 주파수에 따른 구분으로 기준값의 크기를 달리 하고 있기 때문이다.

계측시 어떤 종류의 게이지를 사용할 것인가 하는 문제 역시 측정하고자 하는 변수와 진동특성에 따라 달라져야 한다. 고주파가 지배적인 진동의 경우에는 측정대상이 진동속도일지라도 가속도계를 사용한 후 환산하는 방식을 채택하는 것이 바람직하다. 변위 측정 센서는 크고 다루는데 불편함이 있어 직접적으로 사용하는 경우는 흔치 않으며, 진동속도를 측정한 후 진동속도와 시간 관계의 적분으로부터 환산하는 것이 일반적이다.

진동으로 인한 피해평가를 목적으로 할 경우, 발생원과 빈도에 따라 측정방법 역시 달라져야 한다. 진동 발생이 하루 수회에 불과한 발파와 같은 경우에는 그때마다의 계측이 불가피하며, 공장의 기계적 진동과 같이 지속적인 경우에 있어서는 일정시간 동안의 계측과 처리로 충분할 것이다. 반면, 교통진동과 같이 불규칙적인 상시성의 진동일 경우에는 시간에 따라 진동 계측값이 현저한 변화를 가져올 수 있으므로 특별한 처리가 필요하다.

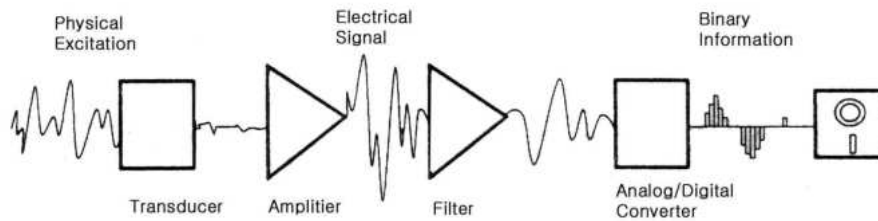
현재 국내에는 환경 규제법에 따라 인체의 진동감응에 준하는 진동레벨에 대한 계측 방법만이 기술되어 있으며, 건축물 피해 평가를 위한 진동속도의 계측에 대하여는 표준화된 방법이 정립된 바 없어 이에 대한 방법론의 정립이 요구된다 하겠다.

이에 따라, 본 절에서는 이러한 요구에 대한 기본자료의 제공을 목적으로 계측시 고려하여야 할 주요사항들에 대하여 기술하고자 한다.

2.5.1 진동 측정시스템

일반적으로, 진동의 측정과 분석은 일정시간 동안 연속된 일련의 신호를 계측한 후, 진동의 특성을 결정하기 위한 해석이 수행된다.

계측을 위한 일반적인 기기의 Set-up은 [그림 2.21]과 같으며, 목적에 따라 어느 한 단계가 생략되거나 서로 조합되어 사용되기도 한다.



[그림 2.21] 일반적인 진동측정시스템

진동 데이터를 수집하는데 있어 가장 기본적인 기기는 센서(Sensor) 혹은 트랜스듀서(Transducer)로서 진동의 물리적인 양을 전기적인 양으로 변환하며, 변위계, 속도계, 가속도계로 구분된다.

증폭기는, 센서로부터 수집된 큰 임피던스에서의 매우 약한 신호를 낮은 임피던스의 신호로 변환하여 주는 장치로서, 이는 전기적인 신호를 분석장치나 기록장치로 전송하는 과정에서 포함하게 되는 노이즈를 최소화시켜 신호와 노이즈를 확실하게 구분할 수 있도록 하는 역할을 한다.

필터링(Filtering)은 측정된 신호를 주파수 영역별로 어느 부분은 통과시키고 원치 않는 부분(고주파 또는 노이즈)은 제거하는 여과 과정을 의미한다. 필터는 연속 및 샘플된 신호를 취급하기 위하여 각각 아날로그 및 디지털로 구분되며, 통과되는 스펙트럼 성분에 따라 Low-pass, Band-pass, High-pass, Band-stop으로 구분된다. 보통 상업용 A/D 변환기는 Binary 혹은 ASCII 형태이며, 연속적인 신호를 Binary의 경우 2 Digit(0 또는 1), ASCII의 경우 10 Digit(0-9)로 변환한다. A/D 변환은 신호가 변환되어야 할 시간 간격 및 스패를 정의하는 샘플링(Sampling)

과정과 정의된 시간과 일치하는 신호의 값을 변환하는 정량화(Quantization) 과정으로 나눌 수 있다. 샘플링의 경우 엘리에이싱 현상에 의해 스펙트럼이 왜곡되지 않도록 하여야 하며, 정량화 과정에서는 출력된 Word 길이에 따른 오차에 유의하여야 한다.

이러한 과정을 통하여 계측된 정보는 최종적으로 신호의 특성에 따라 목적으로 하는 값을 얻기 위한 주파수 응답함수 FRF, PSD 등의 계산이 진동 분석기를 통하여 수행된다.

2.5.2 진동 측정지침

1) 센서의 선택

진동 계측에 있어 올바른 센서의 선택은 가장 중요한 사항의 하나라 할 수 있다. 센서의 선택에 있어서는, 측정대상의 예상 주파수 영역을 포함하는 동적 범위(Dynamic range)와 공진 주파수, 측정조건 하에서의 신호 민감도(Sensitivity), 그리고 센서 자체가 지니고 있는 노이즈의 레벨 등이 고려되어야 한다.

<표 2.12>는 진동원별 구조물의 응답특성을 정리한 것으로, 측정하고자 하는 진동특성에 적합한 센서(동적 범위, 민감도 등)를 선정하기 위한 기본적인 정보를 제공한다.

센서 선정시 고려되는 측정 유효 주파수 범위(동적 범위)는 입력된 물리적인 진동량을 전기적인 양으로 변환하는데 있어서 선형성을 갖는 범위를 말하는 것으로, 측정 메카니즘에 따라 공진특성을 나타내는 고유 주파수의 상위 또는 하위 영역에서 선형성을 갖는 두 개의 그룹으로 분리된다.

건축물이나 지반진동의 측정에 폭넓게 사용되는 이른바 속도계(Velocity pick-up) 또는 지오폰(Geophone)은 일차 공진 주파수보다 상위의 주파수 영역에서 선형성을 갖는 센서이며, 가속도계는 공진 주파수보다 하위의 주파수 영역에서 작동하는 센서이다.

예를 들어 진동 계측시 속도계를 사용하고자 한다면, 측정대상 주파수 영역보다 하위의 고유 주파수를 갖는 센서를 사용하여 선형성을 유지할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

<표 2.12> 다양한 진동원별 진동응답 특성

Vibration Forcing Function	Frequency range Hz	Amplitude range μm	Particle velocity range mm/s	Particle acceleration range m/s^2	Time characteristic	Measuring quantities
Traffic: road,rail,ground-borne	1 to 80	1 to 200	0.2 to 50	0.02 to 1.0	C	pvth
Blasting vibration ground-borne	1 to 300	100 to 2500	0.2 to 500	0.02 to 5	T	pvth
Pile driving ground-borne	1 to 100	10 to 50	0.2 to 50	0.02 to 2.0	T	pvth
Machinery outside ground-borne	1 to 300	10 to 1000	0.2 to 50	0.02 to 1.0	C	pvth/ath
Acoustic Traffic,machinery outside	10 to 250	1 to 1100	0.2 to 30	0.02 to 1.0	C	pvth/ath
Air over pressure	1 to 40				T	pvth
Machinery inside	1 to 1000	1 to 100	0.2 to 30	0.02 to 1.0	C	pvth/ath
Human activities						
a) impact	0.1 to 100	100 to 500	0.2 to 20	0.02 to 5	T	pvth
b) direct	0.1 to 12	100 to 5000	0.2 to 5.0	0.02 to 0.2		ath
Earthquakes	0.1 to 30	10 to 10^5	0.2 to 400	0.02 to 20	T	pvth/ath
Wind	0.1 to 10	10 to 10^5			T	ath
Acoustic inside	5 to 500					

Key:

C = continuous

T = transient

pvth = particle velocity time history

ath = acceleration time history

(Simplified categories, see 3.1 and 3.2)

NOTES:

1. The ranges quoted above are extremes but indicate the values which may be experienced and which may have to be measured (see also note 3). Extreme ranges of amplitude of displacement and frequency have not been used to derive particle velocity and acceleration.

2. The frequency range quoted refers to the response of buildings and building elements to the particular type of excitation. It is indicative only.

3. Vibration values within the ranges given may cause concern. There are no standards which cover all varieties of building, condition, and duration of exposure, but many national codes associate the threshold of visible effects with peak particle velocities at the foundation of a building of more than a few millimeters per second. A significant probability of some damage is linked to peak particle velocities of several hundred millimeters per second. Vibration levels below the threshold of human perception (see ISO 2631) may be a concern in delicate and industrial processes.

센서의 민감도란 물리적인 진동량에 대하여 출력으로 제시되는 전기적인 양의 상대값을 의미하는 것으로, 측정하고자 하는 진동수준이 매우 낮음에도 불구하고 민감도가 낮은 센서를 사용할 경우에는 측정신호와 노이즈의 구별이 어려운 상황을 초래될 수 있다. 역으로, 측정하고자 하는 진동수준이 높은 상황에서 민감도 역시 높은 센서를 사용할 경우에는 기기의 계측한계를 넘는 진동값을 출력하여 측정상의 오류를 가져올 수도 있다.

따라서, 측정대상 진동수준에 대한 사전 정보를 가지고 적정 민감도의 센서를

선정하도록 하는 것이 우선되어야 할 것이다.

계측 결과의 신뢰도를 높이기 위해서는 센서의 무게와 S/N비(신호 대 노이즈의 비)도 중요한 선정인자로 고려되어야 하는데, 일반적으로 센서의 무게는 측정대상 구조물 무게의 10%를 넘지 않아야 하며, S/N비는 높을수록 좋으나 최소 5 dB 이상이 확보되어야 한다.

2) 센서의 설치방법

본 연구에서 다루고자 하는 건축물 손상과 관련된 진동은 대부분 건축물 외부로부터 지반을 통하여 전달되어 오는 것이므로 지반진동의 측정을 중심으로 센서의 설치방법을 설명하기로 한다.

센서는 지반진동의 특성을 충분히 반영할 수 있도록 설치하는 것이 중요하므로, 조건이 허락한다면 10mm 이상의 직경을 갖은 강한 철봉 등으로 고정하여 지표면과 일체가 되도록 설치하는 것이 바람직하다. 이가 의미하는 바는 진동에 의하여 지반에서 센서가 미끄러지는 것을 방지할 수 있도록 설치되어야 한다는 점이며, 이와 관련된 기본적인 지침은 다음과 같다.

- ㉠ 지반의 최대 가속도가 0.2g 이하일 때에는 특별한 고정장치 없이 요철이 없는 수평면 위에 센서를 놓고 계측하여도 무방하다.
- ㉡ 지반의 최대 가속도가 0.2~1.0g일 때에는 흙 속에 센서를 완전히 묻거나 센서 위에 모래주머니 등을 올려놓아 미끄러짐을 방지하여야 한다.
- ㉢ 계측지점이 암반이나 콘크리트, 아스팔트와 같은 경우에는 양면테이프나 에폭시, 또는 급결 접착제를 이용하여 센서를 고정시키도록 한다.
- ㉣ 1.0g 이상의 가속도 운동에 대해서는 시멘트나 볼트 등을 이용하여 단단한 면에 센서를 고정하여야 한다.
- ㉤ 가능한 한 충분히 다져져 단단히 굳은 장소에 설치하여야 한다. 특이한 지형이거나 또는 센서에 인접하여 복잡한 반사, 회절 등의 현상이 발생할 수 있는 지점은 피한다. 일반적으로 발파진동 계측용 센서는 지반에 고정시키기 위한 스파이크를 부착할 수 있도록 되어 있으므로 굳은 지반에 설치할 경우에는 스파이크를 박으면 되나, 암반이나 콘크리트, 아스팔트나 건축물의 기초 또는 벽에 설치할 경우에는 천공을 하고 고정시키는 방법을 사용

하는 것이 좋다.

- ㉞ 센서는 수평을 유지할 수 있도록 설치하고, 센서의 응답 축과 계측하고자 하는 방향이 일치하도록 정확한 위치에 고정하여야 한다.
- ㉟ 센서는 온도, 자기, 전기 등의 영향을 받을 수 있으므로, 가능하다면 고압선 등 외부의 영향을 받지 않는 장소에 설치하여야 하며, 불가피한 경우에는 그러한 영향을 차단할 수 있는 사전조치를 취하여야 한다.
- ㊱ 특별한 설치방법을 요하는 센서는 제작회사의 장비사양에 기술되어 있으므로 그 지침에 따르도록 한다.

3) 측정점 및 측정위치의 선정

진동으로 인한 건축물 피해와 관련한 여러 기준마다 제시하고 있는 진동 측정 지점 및 위치가 각각 상이하므로, 적용하고자 하는 기준의 내용을 확인한 후 요구하는 조건을 만족하도록 측정점 및 위치를 선정하여야 한다.

예를 들어, 미국이나 캐나다 기준의 경우에는 대상건축물과 인접한 곳에서의 지반운동을 기준으로 피해의 가능성을 평가하고 있는 반면, 유럽의 많은 기준들은 건축물의 기초부위에서 계측된 값에 근거하여 피해의 여부를 평가하고 있다.

이러한 차이는 각 기준마다 근거로서 사용된 계측자료가 어느 위치에서 측정되었는가에 따른 것이라 할 수 있다.

진동은 발생원을 중심으로 거리에 따라 변화하며, 건축물 인접지반과 기초, 지하층, 최상층에서의 측정치가 모두 달라지므로 반드시 적용하고자 하는 기준에서 요구하는 조건과 부합되도록 측정위치가 선정되어야 한다.

다음에서 설명된 내용은, 진동으로 인한 건축물 및 구조부재의 손상 유무를 판정하고자 할 경우, 측정점 및 위치 선정과 관련한 일반적 사항을 정리한 것이다.

건축물의 진동특성을 파악하기 위해서는 많은 측정점이 필요하며, 건축물의 규모, 구조형식, 분석하고자 하는 내용 등에 따라 측정점의 수를 결정하여야 한다.

일반론적으로는, 건축물의 기초 또는 그 부근에서 측정하거나 1층 외벽의 아래 부분에서 측정하는 것이 바람직하다. 그리고, 건축물 내부에서는 각 층별로 진동의 크기가 다르기 때문에 동시 측정하는 것이 가장 바람직한 바, 각 층과 기초부

분 바닥, 지표면 등에 측정점을 선정하여 계측한 후, 전달함수(Transfer function) 등을 구하게 되면 건축물의 진동특성을 파악할 수 있다.

4층(약 12m)을 넘는 건축물의 경우, 2~3개 층의 간격을 두고 측정점을 정하며, 옥상층에도 측정점을 두어야 한다.

또한, 건축물 평면의 길이가 10m 이상일 경우에는 10m 수평 간격으로 측정점을 두는 것이 바람직하다.

한편, 구조적 결함이나 건축물의 변형을 결정하고자 할 경우에는 구조적인 강성을 가지는 구조부재에서 직접 측정하도록 하며, 이 때 3축 모두에서 측정이 이루어져야 한다. 때로는 바닥이나 벽의 거동이 관심의 대상이 되기도 하나, 이러한 부위에서 비교적 큰 진동이 감지되었더라도 구조적인 손상과는 큰 관계가 없는 경우가 많다.

건축물 내에서 발생하는 진동과 관련된 계측은 시행착오의 과정을 거칠 수 있으며, 모니터링 컴퓨터가 준비되고 제반장치들이 잘 작동되도록 준비된 경우에서만 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있다.

4) 데이터수집 및 신호처리

동일한 건에 대하여도 가능한 한 다양한 지점에서 측정하는 것이 바람직하다. 진동 추정식을 유도하기 위하여 통계적인 처리가 필요한 경우에는 충분한 의미가 있는 수의 측정이 필요하며, 한 부지에서 적어도 20회 이상의 측정이 수행되는 것이 바람직하다.

최근에는 센서로부터 기록에 이르기까지의 과정이 일체화된 상용 계측시스템들이 보급되고 있으므로 사용상 많은 편리함이 있으나, 측정시 시스템의 성능한계를 명확히 파악하여 오류를 피해야 한다.

3. 건축물의 결합 및 진동피해 인과관계

3.1 건축물의 분류

옛부터 건축재료로서 나무나 돌 등 천연재료가 사용되어 왔다. 석기시대에는 나무 및 풀을 사용하여 집을 지었기 때문에 구조는 주로 목구조(木構造)로서, 부재(部材)를 묶어서 집을 지었다. 그 후 금속기(金屬器)의 발명으로 목재의 가공이 가능하게 되고, 못 등 체결용(締結用) 철물도 만들어지게 되었다. 또 돌의 가공도 용이하게 되어 석조건축물도 탄생하였다. 한편 흙도 옛날부터 이용되었는데, 움막이나 점토(粘土)를 쌓아 만든 벽에서 시작하여 흙벽돌벽, 벽돌벽을 사용하기에 이르렀다. 목조에서 석조로 진보됨에 따라 기둥이나 벽을 돌로 구축하고, 그 위에 나무나 돌로 보를 올려놓는 구조가 생겼으며, 벽돌로 건조될 때는 단위부재가 작기 때문에 점차 볼록한 구조가 생기고 이것이 아치 등으로 발전하였다. 한편, 철의 공업생산이 발전되면서 철을 사용한 구조공법이 연구되어, 18세기말에는 철골트러스 구조가 탄생하였으며, 19세기초에는 공장·철도역·교량 등이 철골로 만들어졌다. 19세기 후반에 발명된 철근콘크리트구조는 다양한 장점으로 인하여 급속히 발달되었고, 20세기에는 세계적으로 보급되어 현대건축의 대표적인 건축공법이 되었다. 최근에는 신재료의 개발과 더불어 건축구조도 점차 다양해지고 있는데, 그 중에서도 경금속과 합성수지가 크게 주목되고 있으며, 많은 발전이 기대되고 있다.

일반적으로 건축물에는 다양한 종류가 있으며 이를 구조형식에 의해 분류하면 크게 조적식 구조(組積式構造), 가구식 구조(架構式構造), 일체식 구조(一體式構造) 등으로 나눌 수 있고, 구조재료에 의해 분류하면 벽돌구조, 나무구조, 블록구조, 돌구조, 철근콘크리트구조, 철골구조, 철골철근콘크리트구조 등으로 나눌 수 있다.

3.1.1 구조형식별 분류

1) 조적식 구조

주구조체를 단위재료와 접착재로 접합하여 벽체 등 중요한 힘을 받는 구조체를 만드는 구조로서 단위재료의 종류에 따라 벽돌구조, 돌구조, 블록구조 등으로

나눌 수 있다.

이 구조는 사용재료의 특성상 내화, 내구, 방한, 방서적이지만 접합부의 접착력이 상대적으로 취약하기 때문에 지진등의 횡력과 부동침하에 대한 저항성이 약하다.

2) 가구식 구조

수직구조체인 기둥과 수평구조체인 보 등 건축물의 골격을 이루는 단위부재를 이음과 맞춤에 의해 접합하여 형성하는 구조로서 사용재료에 따라 철골구조, 나무구조 등으로 나눌 수 있다.

목재, 강재(鋼材) 등 가늘고 긴 부재를 접합하기 때문에 단위부재의 배치와 접합부의 강성에 따라 전체강도가 좌우되며, 내진, 내풍 등 횡력에 대해 강하나 내화적이지 못한 단점이 있다.

3) 일체식 구조

기둥과 보 또는 슬래브 등 전체 구조체를 일시에 형성하는 강접합된 구조물을 말하며, 철근콘크리트구조 또는 철골철근콘크리트구조와 등이 이에 속한다.

각 구조체가 일체로 형성되므로 현재까지의 구조 중 가장 견고한 구조물을 형성할 수 있는 장점이 있으며 모든 재해에 대하여 가장 우수한 방재성능을 가진 구조이다.

4) 입체구조

입체적인 구조요소를 형성함으로서 외력, 하중을 지지하는 구조로 입체트러스 구조, 절판구조, 셀구조, 현수구조 등이 있다.

5) 기타구조

(1) 공기막 구조 : 공기의 기압차를 이용하여 얇은 막상 부재로 공간을 형성하는 구조로 한겹의 막을 설치하여 내부공간을 가압하는 방식과 중층막 또는 관상막 내부를 가압하여 막에 생기는 인장력으로 형태를 유지하는 방식이 있으며 기둥이 없는 대규모 공간을 확보할 수 있는 장점이 있다.

(2) 커튼월 구조 : 철근콘크리트조 또는 철골조등으로 뼈대를 구성하고 그 사이 또는 구조부재의 전면에 벽면재를 부착하여 구조물을 완성하는 구조이다.

3.1.2 재료별 분류

1) 벽돌구조

단위재료인 벽돌과 모르터 등 접착재를 이용하여 구조체를 형성하는 구조로서 일반적으로 접착재의 강도가 전체강도를 좌우한다. 내화성은 우수하나 지진 등 횡력에 취약한 것이 단점이다.

2) 나무구조

건축물의 뼈대로서 나무를 사용하며, 못, 꺾쇠, 볼트 등의 접합철물을 사용하여 이음 및 맞춤에 의해 접합하는 구조로서 지진 등 횡력에는 강하나 방화, 방부적이지 못한 것이 결점이다.

3) 블록구조

단위재료인 콘크리트블록을 모르터 등 접착재를 이용하여 만든 구조체이다. 벽돌구조와 같이 내화성은 있으나 횡력에 취약하며, 철근을 보강하여 보강블록조로 축조하면 어느 정도 횡력에 대해 견딜 수 있다.

4) 돌구조

단위재료인 돌과 접착재 및 부속철물 등을 이용하여 만든 구조로서 내구, 내화적이기는 하나 횡력에 약한 것이 단점이다.

5) 철근콘크리트구조

철근과 콘크리트를 사용하여 구조부재를 일체로 형성하는 구조로서 내구, 내화, 내진적인 구조이다. 보통 현장 철근콘크리트구조, 철근과 콘크리트를 써서 특수처리 가공, 제작하는 구조로 PC콘크리트구조와 PS콘크리트구조가 있다.

6) 철골구조

H형강, 채널, 앵글 등 강재를 사용하여 리벳, 고력볼트, 용접 등의 접합에 의해 뼈대를 형성하는 구조로 고층건축물 또는 경간이 넓은 건축에 쓰인다. 철골구조는 내화적이지 못하므로 피복에 유의해야 하며 내구성 및 유지관리에 많은 주의가 필요하다.

7) 철골철근콘크리트구조

건축물의 골조를 철골로 하고 그 외부를 철근콘크리트로 피복하여 보강한 구조이다. 철근콘크리트는 철골의 내화피복의 역할을 하기도 한다.

3.1.3 시공과정에 의한 분류

1) 습식구조

철근콘크리트구조, 벽돌구조 등과 같이 물을 사용해서 현장에서 시공하는 구조이다. 자유로운 형태를 얻을 수 있으나 공사기간이 길어지고, 겨울철 공사가 곤란한 단점이 있다.

2) 건식구조

물을 거의 사용하지 않는 공법에 의한 건축구조를 총칭하는 것으로서 철골구조, 나무구조, PC구조 등이 이에 속한다.

구조부재를 일정한 공장에서 생산, 가공 또는 부분 조립한 기성재를 현장에서 맞추어 구성하는 구조로서 계절에 관계없이 시공할 수 있으며 대량생산이 가능하고 일정품질을 유지할 수 있으며 공사기간을 단축할 수 있다.

3.1.4 방재상 분류

방재상으로는 방화구조 및 내화구조, 내진구조, 내풍구조, 내구구조, 방공구조, 방충구조, 방미구조 등으로 분류할 수 있다.

<표 3.1> 건축구조의 분류

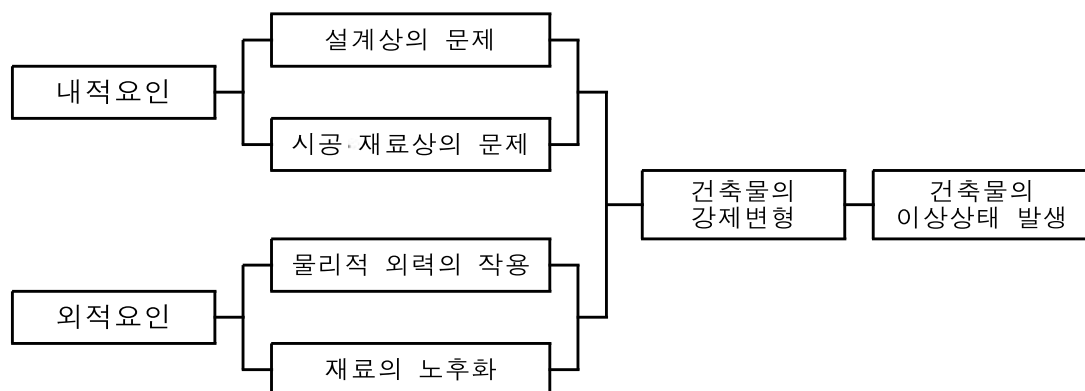
대분류	소분류	장점	단점
구조 형식별 분류	조적식 구조 (Masonry Struc.)	⇒ • 벽돌/블록/돌구조로 그 형식이 간단하고 저렴 • 내화,내구,방한,방서적	• 지진 등 횡력에 약함 • 부동침하에 대한 저항성이 약함
	가구식 구조 (Framed Struc.)	⇒ • 나무구조/철골구조 • 내진,내풍구조	• 나무구조 - 내화,내구성 낮음 • 철골구조 - 내화피복 필요
	일체식 구조 (Monolithic Struc.)	⇒ • 강력하고 균일한 강도를 낼 수 있음 • 우수한 방재성능	• 비교적 고가 • 시공이 복잡
재료별 분류	나무구조 (Wooden Const.)	⇒ • 구조방법이 간단 • 시공이 용이 • 공사기간이 짧음 • 외관이 아름답고 경쾌 • 철거 및 이전 용이	• 내구력 부족 • 부식 화재에 취약 • 접합부의 소요내력이 구조 내력 결정
	벽돌/블록구조 (Brick/Block Const.)	⇒ • 내구성, 내화성 • 방한,방서 • 공사비 저렴	• 지진 및 횡력에 약함 • 습기 • 비교적 저층 구조
	돌구조 (Stone Const.)	⇒ • 내구,내화,방한,방서 • 외관이 장중	• 고가 • 시공이 까다롭고 공사기간이 길어짐 • 지진 및 횡력에 약함
	철근콘크리트구조 (Reinforced concrete Const.)	⇒ • 내구,내화,내진 • 수중 설치 가능 • 힘의 흐름 연속적 • 부재 형태 자유제작	• 자중이 큼 • 고가, 공기가 길어짐 • 균일한 시공 곤란 • 폐기물의 발생
	철골조 (Steel Const.)	⇒ • 고층 및 대스팬 구조 가능 • 내진,풍력에 강함 • 시공이 용이 • 이동,해체 수리 가능	• 고가 • 내구,내화성이 약함
	철골철근 콘크리트구조 (Steel Framed R.C Const.)	⇒ • 내구,내화,내진 • 고층 및 대건축에 적합 • 가장 우수한 구조	• 비교적 고가 • 자중이 큼 • 공기가 길고 시공이 복잡

3.2 건축물의 결함

3.2.1 결함 발생요인

건축물의 결함은 입지조건, 구조형식 및 사용재료 등과 같은 다양한 요인으로 인해 발생하게 된다. 크게는 내적요인과 외적요인으로 나눌 수 있으며, 내적요인에 영향을 미치는 인자로서는 시공성 및 내구성에 대한 설계단계에서의 불충분한 고려, 현장에서 재료의 취급, 시공에 관한 이해와 인식부족 등을 들 수 있다. 외적요인에 영향을 미치는 인자는 기상조건으로서 온도, 습도, 일사량, 강우량과 사용하중 등을 들 수 있다.

이러한 요인이 단독으로 영향을 미치는 경우는 거의 없으며 다수의 요인들이 건축물이 완성되고 이용되는 과정 속에서 서로 복잡하게 영향을 미친다고 할 수 있다.



[그림 3.1] 건축물의 결함발생 메카니즘

1) 내적 요인

결함발생의 내적 요인으로는 크게 설계단계, 시공단계로 분류할 수 있다.

(1) 설계단계

구조, 재료 및 설비제품, 성능의 오류, 설비용량의 부족 등 계획상의 오류로 인

하여 발생하는 결함이다.

- 시공에 부적절한 설계도면
- 시방서(특기,표준) 및 도면의 불일치
- 동일건축물에서 건축상세, 구조, 전기, 설비 도면의 상호관련성이 무시된 경우
- 응력해석, 미비
- 설계도면과 시공된 건축물이 현저하게 차이가 있는 경우
- 하중의 설계미비

(2) 시공단계

재료에 의한 결함은 재료의 내구성이 저하된 재료를 사용하는 경우에 하자가 발생한다.

- 공정 및 현장관리 부실
- 감리감독의 부실
- 부적절한 자재 및 재료의 사용, 규격과 성능의 미달
- 시공의 정밀성 부족(작업성 개선을 위한 물타기, 거푸집 조기제거, 이음길이의 미확보, 배근 부정확, 다짐 불량, 등)
- 공사기간의 부족
- 전문지식 및 기술 부족
- 현장 여건에 부적절한 시공

2) 외적 요인

결함발생의 외적 요인으로는 물리적 외력의 작용, 유지관리의 소홀, 재료의 노후화로 분류할 수 있다.

(1) 물리적 외력의 작용

- 적설, 강우하중, 토압 및 수압, 적재하중 및 고정 하중 등의 과도한 작용
- 결빙, 온습도에 의한 팽창수축력, 지반침하 및 슬라이딩, 사용자의 과도한 외력 등
- 지진, 바람, 모래, 우박 등 자연현상에 의한 외력, 사용자에 의한 마모 등

- 차량, 건설기계, 항공기, 천둥, 건축물설비 등에 의한 진동 및 소음
- 태양광, 결빙 등에 의한 열화
- 산, 염류 등에 의한 화학적 침식 및 미생물, 해충 등에 의한 생물학적 피해

(2) 유지관리 소홀

- 용도 및 구조변경등과 과하중으로 인한 구조부재의 과도한 변형 및 균열
- 화재에 의한 손상
- 균열, 누수, 백태, 철근 및 강재부식 등 결함부의 보수보강 등 유지관리 미흡

(3) 재료의 노후화

재료 노후화의 주요 원인은 경과년수이며, 경과년수에 의한 노후화는 자연적으로 아래와 같은 재료의 성능저하 현상과 함께 건축물의 기능저하로 나타나게 된다.

- 침하, 휨, 처짐, 비틀림
- 균열, 누수, 백태, 부식
- 박리, 박락, 부서짐, 낡음
- 층분리
- 풍화, 분해

<표 3.2>은 건축물노후화의 주요원인별 성격 및 효과로서 ISO6241에서 제시하고 있는 기준에 따른 것이다.

<표 3.2> 건축물 외적 결함의 요인

영향요인	건축물 외부로부터의 작용		건축물 내부로부터의 작용	
	대기요인	지반 및 지표면	사용자 요인	설계 요인
1. 물적 요인				
1.1 하중	적설하중, 강우하중	토압, 수압	적재하중	고정하중
1.2 외력 및 변형력	결빙압, 온습도에 의한 팽창력	지반침하 및 슬라이딩	사용자의 과도한 힘	수축응력, 점동력, 기타 설계상 주어진 변형력
1.3 동역학 및 에너지	바람, 모래바람, 우박, 기타 외력	지진	마모, 기타 건축물 내부에서 작용하는 힘	물의 애머링 효과
1.4 진동 및 소음	바람, 천동, 항공기, 폭발, 차량통행, 기계장비 등	차량통행 및 기계 장비에 의한 진동	음악 및 무용활동, 주택설비 및 가구 등에 의한 소음, 진동	설비소음 및 진동
2. 전자기적 요인				
2.1 열, 빛 등의 방사	태양광의 방사, 방사능 조명	방사능 방출	조명, 방사능 방출	자재 표면에서의 방사
2.2 전기	-	누전류	-	정전기, 전기제품
2.3 자기	-	-	자장의 형성	자장의 형성
3. 온도 요인	과열, 결빙, 온도응력	지반열, 지반동결	인간의 방사열, 담배	난방, 화재
4. 화학적 요인				
4.1 물, 수용제	공기중 습기, 결로, 강우 및 강설	지표수, 지하수	수분살포, 결로, 세탁용세제, 알콜	급수, 배수, 누수
4.2 산화제	산소, 오존, 질소산화물	양전기 화학물질	살충제, 표백제	양전기 화학물질
4.3 수축제	-	황화물	연소물질, 암모니아	연소물질, 음전기 화학물질
4.4 산	탄산, 새의 분비물, 황산	탄산, 가스성 산	식초, 구연산, 탄산	황산, 탄산
4.5 염기물	-	생석회	수산화나트륨, 수산화칼륨	수산화나트륨, 시멘트
4.6 염분	염분성 안개	질산염, 인산염, 염화물	염화나트륨	염화칼슘, 플라스틱
4.7 중성화물질	중성먼지	속회암, 실리카	지방, 기름, 잉크, 중성먼지	지방, 기름, 중성먼지
5. 생물학적 요인				
5.1 식물, 미생물	박테리아, 식물의 씨	박테리아, 사상균, 진균류, 식물의 뿌리	박테리아, 재배 화초	-
5.2 동물	해충, 조류	설치류, 개미, 벌레	애완동물	-

3.2.2 결함 유형

건축물에서 발생하는 결함의 분류는 구조물별, 재료별, 결함형태별, 결함발생 부위별 등 다양한 방법이 있다(<표 3.3> 결함별 증상 및 증상내용). 여기서는 우선 결함의 형태에 따라 살펴보고, 그 중 가장 빈번하게 나타나는 균열에 대하여, 일체식(철근콘크리트)구조와 조적식 구조에서의 특징에 대해서 좀 더 자세히 알아보도록 하겠다.

<표 3.3> 결함별 증상 및 내용

성능저하 증상		결함 내용
균열	철근에 인접	배근의 위치라고 생각되는 부위에 발생하는 균열. 수직, 수평의 직선형의 패턴
	개구부 주변	개구의 우각부에서 발생하는 사균열
	망목상	망목상의 균열(1m 이내에 접근되지 않는다고 판별 불가능한 것처럼 상세한 것은 제외)
	기타	규칙성,불규칙성에 관계없이 상기 이외의 균열
들뜸		마감재가 구체에서 박리한 상태, 구체콘크리트에 있어서는 철근의 피복 등이 들떠있는 상태
박락 및 탈락	마감재	마감재가 박락된 상태
	콘크리트	들뜬 콘크리트가 구체에서 박락된 상태(철근노출 동반하는 경우 있음)
	타일 및 화강석 돌붙임	구체에 부착된 타일이나 화강석, 기타 장식 마감재 등이 떨어진 상태
녹오염		부식된 강재의 녹이 유출되어 마감재나 콘크리트의 표면에 부착하여 오염되어 있는 상태
기타의 오염		곰팡이, 매연, 이끼 등에 의한 오손, 풍해
결로		실내의 온습도 차이나 단열 불량으로 인하여 벽 표면에 발생하는 이슬 맺힘 현상
누수		물이 새거나 물방울이 맺히는 현상(결로와 구분)
변형		구체가 설계된 수직도나 수평도를 벗어나 휘거나 처지는 현상
침하		지반의 연약화나 주위환경의 변화로 인한 수압 등의 변화에 따른 건축물 및 주위 바닥의 변형
부품설치불량		마감재의 설비기기, 기타 장치 등을 잘못 설치한 상태(설치물 자체의 제품하자와 구별)
자재불량		재료나 기기 자체가 결함을 가지고 있는 상태
이상감각		흠, 경사에 의해 일어나는 이상감각, 바닥의 진동 등.

1) 결 함

(1) 균열

균열은 크게 건축물의 주요 구조체의 균열과 비구조체의 발생하는 균열로 나누어 살펴볼 필요가 있다.

구조체의 균열은 주로 기둥, 보, 슬래브, 옹벽 등 콘크리트 부재에 발생하는 균열을 말한다. 균열은 콘크리트 성능저하에 영향을 미치며, 간과할 경우에는 초기의 미세한 균열이 물리적외력의 작용 및 건축물의 노후화와 더불어 확대 진전되어 건축물의 기능, 성능저하 및 균열부를 통한 공기 및 수분의 침투로 인해 콘크리트의 중성화에 영향을 주게 되고, 이를 통해 철근의 부식을 초래할 수도 있다.

이러한 균열은 미관 저해, 불안감 발생 등 뿐만 아니라, 부재를 관통하는 균열의 경우에는 누수의 원인도 되고, 전반적으로 거주성을 악화시키는 것뿐만 아니라 타 부위의 성능저하를 촉진하고, 건축물 구조안전성을 해칠 수도 있다.

한편, 비구조체를 포함한 건축물 각부에서 발생하는 균열증상 사례는 <표 3.4>와 같다.

<표 3.4> 비구조체의 균열발생 부위와 증상 사례

부 위	증 상
벽 체	콘크리트와 조적벽의 접합부에 균열이 발생한다. 창문 하부 조적벽에 균열이 발생한다. 측벽에 균열이 발생한다. 타일면이나 타일모서리에 균열이 발생한다.
바 닥	발코니 바닥에 균열이 발생하고 물이 샌다. 방바닥에 균열이 발생하여 장판지가 갈라진다. 욕상바닥 방수층 보호모르터에 균열이 발생한다.

(2) 누수

누수는 실외 및 실내의 물기가 다른 부위로 침입하는 현상으로 구조체에 발생한 균열, 실링재나 방수재료의 노후화, 개구부 주변의 틈새와 균열이나 부적절한 방수공법, 시공불량 등에 그 원인이 있으며 발생부위가 매우 다양하다.

누수는 거주성을 해치고 건축물의 내구성면에서도 바람직하지 않은 현상이다.

<표 3.5> 누수 발생 부위와 증상 사례

부 위	증 상
욕 상	파라펫 끝 부분에서 물이 샌다. 파이프 덕트 주위에서 물이 샌다. 곤돌라 앵커 매입부분 아래로 물이 샌다.
화장실	하부층 천장이 물에 젖는다. 출입문 주위가 물에 젖는다. 욕조주위 코킹이 파손되어 물에 젖는다.
기계실, 전기실	지하 전기실 트랜치에 물이 고인다. 지하 기계실 바닥에 물이 고인다. 지하도에 물이 고인다.

(3) 결로

결로는 실내의 수증기가 온도가 낮은 벽면이나 창유리에 접촉되었을 때 온도가 낮은 면의 포화수증기에 포함되지 않고 물방울이 되어 부착되는 현상이다. 결로가 생기면 불투습층의 재료표면에 물방울이 맺히며, 흡수성 물질에는 습기가 차서 곰팡이류, 각종 균의 번식으로 인한 장식의 손상 및 악취가 발생하고, 변형에 의해 건축물 재료의 노후화를 촉진한다.

일반적으로 주택에 결로가 발생하는 부위는 외기와 면한 벽체나 벽체 모서리 부위이며, 외측세대에서 많이 나타난다. 그리고 바닥장판지나 욕실의 벽체에 결로나 결빙이 발생하는 경우도 있다. 일반적인 결로의 증상은 <표 3.6>과 같다.

<표 3.6> 결로 발생 부위와 증상 사례

부 위	증 상
벽 체	벽체 전반에 걸쳐 습기가 차서 벽지가 젖는다. 모서리 부위에 결로가 발생한다.. 커튼박스 주위에 습기가 찬다. 창문 하부에 물기가 찬다. 철문프레임에 물방울이 맺힌다.
천 장	천장벽지에 습기가 찬다. 천장 등기구나 전기박스 주위에 습기가 찬다.
바 닥	장판지 이면에 습기가 찬다.

(4) 변형

부재의 변형은 처짐이 주를 이루고 있다. 처짐의 발생은 설계시 하중계산이 잘못되었거나 시공시 배근 간격의 미준수, 동바리의 조기철거 등이 원인이 되고 있으며, 사용중 설계하중 이상의 과도한 적재물도 변형의 원인이 된다. 변형은 균열을 유발하게 되고, 유발된 균열을 통하여 누수의 원인이 된다. 또한 창호 주위에 손상을 가져와 창호의 개폐를 어렵게 하는 등의 사용불편을 초래하게 된다.

<표 3.7> 변형 발생 부위와 증상 사례

부 위	증 상
벽 체	발코니 아랫부분이 처진다. 발코니 파라펫과 조적조 외벽간의 틈새가 넓어서 슬래브와의 사이가 과다하게 벌어진다. 현관턱 높이가 안 맞거나 바닥타일의 줄눈과 평행하지 않는다. 계단실 선이 이웃계단과 맞지 않는다.
설치물	욕조에 흠집이 생긴다. 반자돌림이 휘거나 벽체와 벌어진다. 천장부착 형광등이 기울어져 보인다. 천장물딩이 구부러지거나 벽지 사이와 틈이 생긴다. 창호가 뒤틀리거나 인방부위가 쳐져서 창호 개폐가 어렵다.

(5) 기타 결함 (들뜸, 박리, 박락, 침하 등)

기타 자주 발생하는 결함은 시공적인 하자과 건축물의 경과년수에 따른 재료의 노후화 요인, 사용 및 유지관리 소홀 등에 의해 발생하며 결함별 증상사례는 다음 표와 같다.

<표 3.8> 기타 결함의 증상 사례

부 위	증 상
들뜸, 박리 및 박락	내외벽의 타일이 벽에 밀착되지 못하고, 울린다. 내외벽의 타일 등의 장식마감재가 떨어진다. 콘크리트 구체의 모르터 마감면이나 표면일부가 떨어진다.
침하	건축물외벽과 주위 바닥에 이격이 생긴다. 건축물주위 바닥에 균열이 생긴다. 외부담장에 수직,경사균열이 생기거나, 기울어 진다. 건축물 주출입구 바닥에 균열,이격이 생긴다.

<표 3.8> 기타 결함의 증상 사례(계속)

부 위	증 상
창호 결함	미닫이를 닫았을 때 문짝 간에 틈이 생긴다. 수직문틀이 배가 나온다. 윗인방이 처져 개폐가 용이하지 않다. 알루미늄바가 일그러진다.
배수 결함	쓰레기장 배수구가 막힌다. 화장실 바닥에 물이 고인다. 오수 배수가 잘 안된다. 변기오수가 우수관이나 생활오수관으로 유입된다.
소음	엘리베이터 작동시 소리가 난다. 옆세대의 레인지후드 작동시 소리가 난다. 이웃집 소음이 들린다.

2) 콘크리트의 균열

콘크리트는 일반적으로 압축강도가 크나, 인장강도가 낮기 때문에 시공 도중과 시공 후에 일어나는 체적변화와 구속조건 및 외력의 작용 등에 기인하여 균열이 발생되기 쉽다.

콘크리트의 균열은 여러가지 원인에 의하여 콘크리트의 경화를 전후로 나타나는데 균열이 표면에서 관측되어질 때면 이미 콘크리트 내부조직에는 미세 균열로 인하여 조직이 상당히 손상되어 있다고 볼 수 있다.

구조체의 균열은 콘크리트의 성능을 저하시키고 내부철근의 부식을 유발하여 구조안전성에 영향을 미치며 미관저해와 누수발생 등의 원인이 되기 때문에 균열에 대한 세밀한 조사가 필요하다. 만일 구조체 콘크리트 성능저하에 영향을 주는 균열을 간과할 경우에는 초기의 미세한 균열이 콘크리트의 중성화에 영향을 주게 되고, 겨울철에는 동해를 입을 수 있다. 또한 내부철근에까지 도달한 균열이면 외부로부터 수분이 직접 철근까지 도달되는 통로가 되어 철근의 부식속도를 증가시킨다. 부재를 관통하는 균열의 경우에는 누수의 원인도 되고, 전반적으로 거주성을 악화시키는 것 뿐만 아니라 타 부위의 성능저하를 촉진하는 경우도 있다.

마감되어 있는 철근콘크리트조 건축물의 결함정도를 외관조사만으로 판정하는

것은 곤란하지만 외관에 발생한 결함현상은 반드시 원인을 가지고 있으며, 그러한 원인은 균열이나 누수 등의 형태로서 나타나게 된다.

따라서, 균열의 발생원인을 추정하고, 필요시는 그 원인을 규명하여 구조물의 종류나 상황에 따라서 보수 등 조치를 강구해야 한다.

(1) 균열의 원인과 형상

콘크리트의 균열은 경화 전에 발생한 것과 경화 후에 발생한 것으로 구별되나, 여러 가지 원인이 중복되어 발생하는 것이 일반적이며, 발생기구가 복잡하여 정확한 원인규명이 곤란한 경우가 있다. 따라서 균열상태나 특징상 가능성이 있는 몇 가지 원인을 추정하여 측정결과나 자료를 근거로 검토하여 원인의 범위를 좁히면서 규명하는 방법이 바람직하다.

가) 균열의 원인

(가) 경화전의 균열

콘크리트 타설에서 응결이 시작하기까지 약 2~3시간 정도 사이에 발생하는 것을 말하며 콘크리트의 배합, 시공방법 등과 타설되는 장소, 기상조건 등에 의해 영향을 받는다.

ㄱ) 초기 건조 균열

콘크리트의 응결이 시작한 상태에서, 콘크리트 표면에서 급격한 건조가 발생했을 경우 표면의 수축으로 인한 균열의 방향성은 불규칙하며, 균열의 폭도 작은 형태로 나타난다.

ㄴ) 침하 균열

콘크리트 타설직후, 재료의 비중 차이에 따라서 불리딩이 생기고, 비중이 큰 재료는 불리딩에 상당하는 침하를 일으킨다.

철근, 골재, 거푸집 등에 따라 부분적으로 침하가 지장을 받으면 콘크리트의 윗면에 균열이 생긴다.

ㄷ) 경화열에 의한 균열

시멘트가 수화하고 경화할 때에 수화열이 발생하기 때문에 콘크리트의 내부 온도가 상승 팽창하지만, 경화의 진행에 따라 차츰 냉각되어 수축균열이 생긴다. 타설, 경화된 콘크리트에 새로운 콘크리트를 이어 타설할 경우 등은 새로운 콘크리트가 경화열에 따라 팽창한 것이 수축할 때, 그 수축이 이미 타설된 콘크리트에 의해서 구속되어 타설이음부에 균열이 생긴다.

ㄹ) 거푸집, 동바리의 침하, 진동 및 충격 등에 의한 균열

콘크리트의 경화 과정에 거푸집이나 동바리가 침하하거나 진동이나 충격을 받을 경우에 발생한다. 일반적으로 이 균열은 폭이 커서 구조물의 내력이나 내구성에 문제가 될 가능성이 크다.

ㅁ) 사용재료에 의한 균열

콘크리트 재료 중 체적변화를 일으키는 것이 있을 경우 예컨대 알카리골재반응을 일으키는 골재를 사용한 경우나 팽창제를 과다하게 사용한 경우 등에 균열이 생긴다.

(나) 경화 후의 균열

ㄱ) 건조수축, 온도 변화, 건조·습윤의 반복 등에 의한 균열

구조물 등 부재의 자유신축이 구속되어 있는 경우는 건조수축이나 온도변화에 따라 균열을 일으킨다. 또 부재내부의 철근에 따라 건조시의 자유신축이 구속을 받아 철근에는 압축력을 콘크리트에는 인장력이 생겨 균열을 일으킨다. 콘크리트는 습윤, 건조에 따라서도 팽창 수축되지만 반복작용에 의해 균열이 생긴다.

ㄴ) 동결, 융해에 의한 균열

동결 작용에 의해서 얇은 모상의 균열이 생기지만 동결 융해의 반복에 따라 균열이 진행하고 표면이 박리된다. 물시멘트비(W/C)가 큰 콘크리트, 다짐이 불충분한 부분, 응력이 큰 부분, 물에 닿는 부분 등에는 작용이 크다.

ㄷ) 구조적 균열

철근 콘크리트에서는 인장력을 받는 부분의 콘크리트는 인장한계 변형을 초월하면 균열이 생긴다. 시공불량에 의한 원인으로 발생하기도 하며, 설계단계에서의 고려미흡 및 사용시의 과대한 재하하중·기초의 침하 등 설계하중 이외의 외력작용을 받으면 비교적 큰 균열이 생긴다.

ㄹ) 콘크리트의 중성화, 철근의 부식에 의한 균열

콘크리트는 공기중의 탄산가스의 작용에 의해 중성화된다. 균열부분에서는 내부에 대한 진행이 크다. 콘크리트가 중성화된 부위의 철근은 발청하고, 환경조건이 나쁜 경우에는 부식이 신속히 진행된다. 철근은 부식에 따라 체적이 팽창되고, 콘크리트에는 철근에 따라 균열이 생긴다. 또한 구조물이 전식을 받은 경우는 더욱 심하다.

ㄱ) 물리적 외력에 의한 균열

지진, 근접 구조물의 시공에 의한 소음 및 진동, 지반의 이완 및 침하에 의한 기초의 침하 등 외력작용을 받으면 비교적 큰 균열이 생긴다.

나) 균열 형상과 특징

콘크리트의 균열의 원인은 매우 다양하고, 그로 인해 발생하는 균열의 위치 및 형상 역시 다양하게 나타난다.

다음 <표 3.9>와 [그림 3.1]에서는 원인에 따른 균열의 특징과 형상을 보여준다.

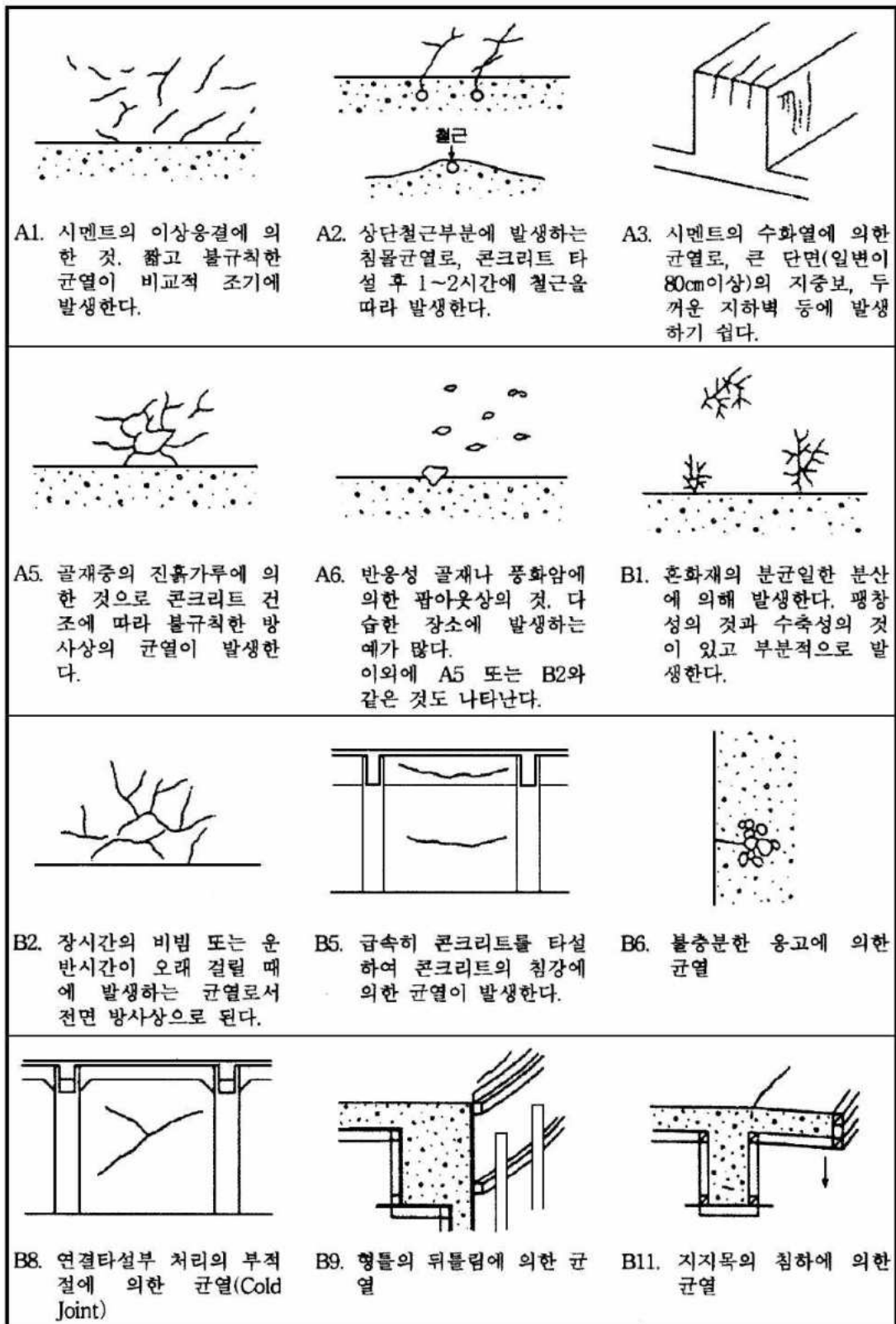
그러나, 균열조사시 균열의 원인이 1개의 항목만으로 명확히 나타나는 경우도 있지만, 대개의 경우 균열의 발생은 여러 가지 항목이 복합적으로 작용하여 발생하거나 그 원인의 파악이 어려운 경우도 많다. 따라서, <표 3.9>와 [그림 3.1]의 내용을 참고로 하여 원인을 추정하는 것이 바람직하다.

<표 3.9> 균열 원인에 따른 특징

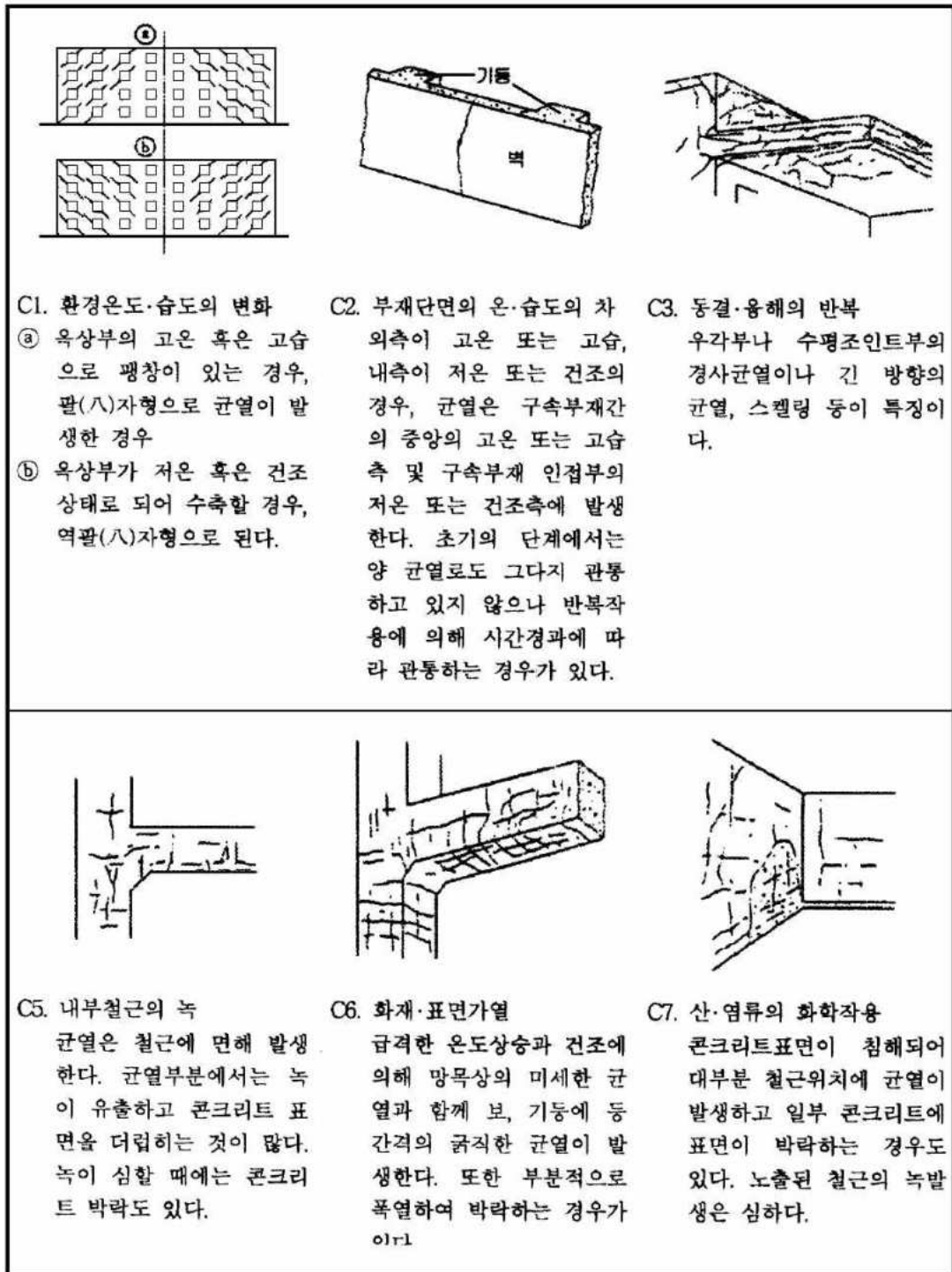
구 분	균열의 원인	균열의 특징
A. 콘크리트의 재료적 성질에 관계된 것	A1 시멘트의 이상응결	폭이 크고 짧은 균열이 조기에 불규칙하게 발생
	A2 콘크리트의 침하 및 블리딩 (Bleeding)	타설후 1-2시간에서 철근의 상부, 벽과 상판의 경계 등에서 발생
	A3 시멘트의 수화열	단면이 큰 콘크리트에서 1-2 주 후부터 직선상의 균열이 대체로 등간격으로 규칙적으로 발생. 표면에 그치는 것과 부재를 관통하는 것이 있다.
	A4 시멘트의 이상팽창	방사형의 그물모양의 균열
	A5 골재에 함유되어 있는 점토분	콘크리트 표면의 건조에 따라서 불규칙하게 망상의 균열이 발생
	A6 반응성 골재 또는 풍화암의 사용	콘크리트 내부로 부터 거북등 모양으로 발생 다습한 곳에 많이 발생
	A7 콘크리트의 건조 수축	2-3개월 후 부터 발생하며 점차 성장함 개구부나 기둥, 보로 둘러싸인 모서리에서 경사균열이 상판 및 보등에서 등간격으로 수직으로 발생
B. 시공에 관계된 사 항	B1 혼화제의 불균일한 분산	팽창성과 수축성인 것이 있으며 부분적으로 발생
	B2 장시간 비빔	전면에 그물모양 또는 짧은 불규칙한 균열이 발생
	B3 펌프 압송시의 시멘트, 수량의 증가	A2 및 A7의 균열이 발생하기 쉬움
	B4 타설 순서의 실수	B7과 B8의 원인이 됨
	B5 급속한 타설	B9과 A2의 균열이 발생하기 쉬움
	B6 불충분한 다짐	표면에 곰보가 생기기 쉽고, 각종 균열의 기점이 되기 쉽다.
	B7 배근불량, 철근의 피복두께 감소	슬래브에서는 주변에 따라 원형으로 발생. 배근, 배관의 표면에 발생
	B8 이음처리의 부정확	이음 부분에서 균열이 생김
	B9 거푸집의 변형	거푸집이 움직인 방향에 평행하게 부분적으로 발생
	B10 누수(거푸집이나 지반으로부터)	

<표 3.9> 균열의 원인과 특징(계속)

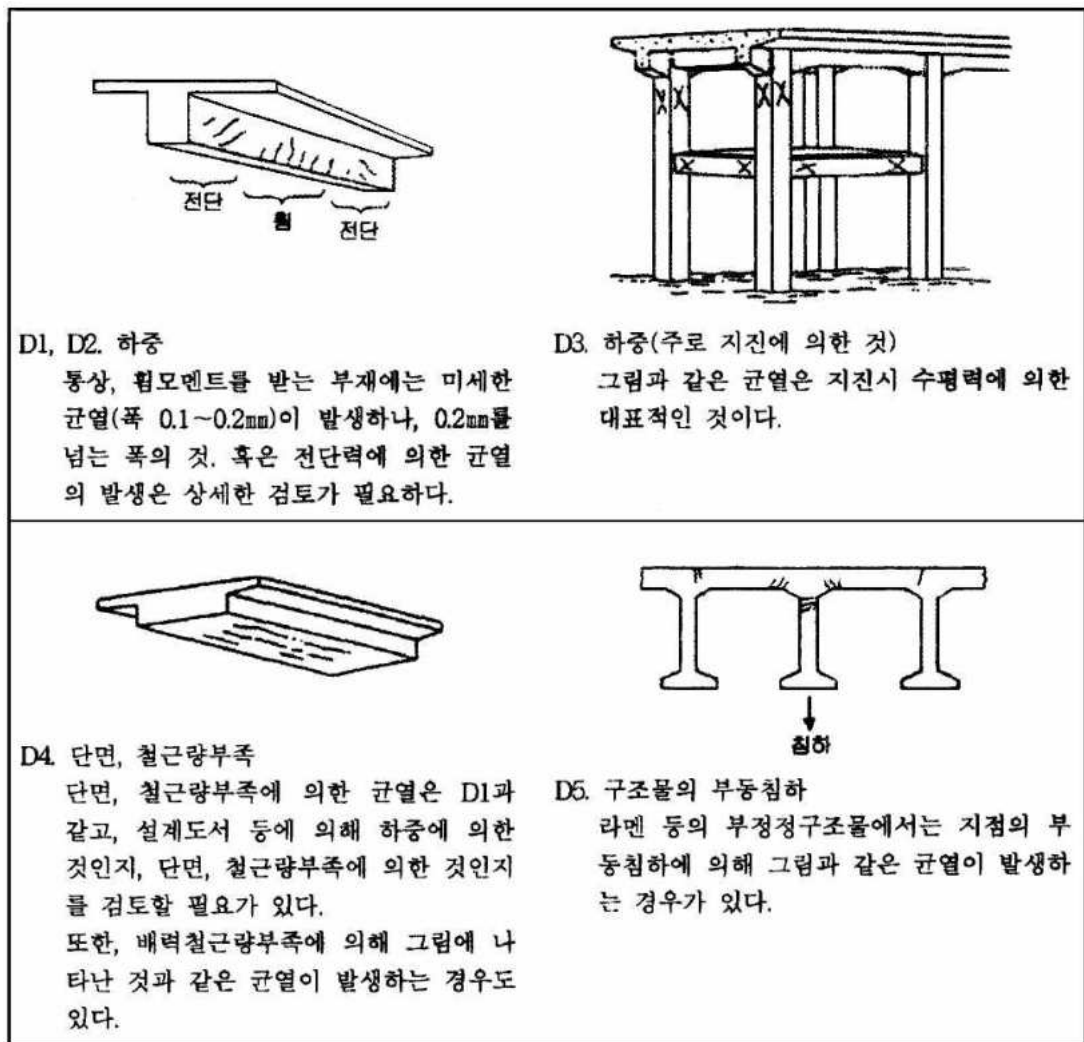
구 분	균열의 원인	균열의 특징
B. 시공에 관계된 사 항	B11 거푸집 지지틀의 침하	상판, 보의 단부 상단 및 중앙부 하단 등에 발생
	B12 거푸집 조기 제거	콘크리트 강도 부족에 의한 균열. A7의 영향도 커짐
	B13 경화전의 진동 및 재하	D의 외력에 의한 균열과 동일
	B14 초기양생중의 급격한 건조	타설 직후, 표면의 각 부분에 짧은 균열이 불 규칙하게 발생
	B15 초기 동해	미세한 균열, 탈형하면 콘크리트면이 희게 변 색됨
C. 외 적 요인에 관계된 사 항	C1 환경온도, 습도의 변화	A7의 균열과 유사. 발생한 균열은 습도 변화 에 따라 변동
	C2 부재 양면의 온도, 습도차	저온측 또는 저습측의 표면에 휨 방향과 직각 으로 발생
	C3 동결, 융해의 반복	표면이 부풀어 부슬부슬 떨어짐
	C4 동결	D의 외력에 의한 균열과 같음
	C5 내부 철근의 녹	철근을 따라 큰 균열이 발생. 피복 콘크리트 가 박리하며 녹물이 유출됨
	C6 화재, 표면 가열	표면 전체에 미세한 거북등 모양의 균열 발생
	C7 산, 염류의 화학 작용	표면이 침식되고, 팽창성 물질이 형성되어 전 면에 균열이 발생
D. 하중에 관계된 사 항	D1 하중(설계하중 이 내의 경우)	주로 휨 하중에 의해 보 또는 슬래브의 인장 측에 수직으로 균열이 발생
	D2 하중(설계하중을 초과하는 경우)	D1 또는 D3와 같은 형태의 균열이 발생
	D3 하중(지진)	지진하중에 의해서 기둥, 보, 벽 등에 45° 방 향으로 균열이 발생
	D4 단면 철근량의 부족	D1 및 D2와 같은 형태. 상판과 차양 등 에서 처진 방향으로 평행하게 균열이 발생
	D5 구조물의 부동침하	45° 방향으로 큰 균열이 발생



[그림 3.2] 균열의 원인과 그 형상



[그림 3.2] 균열의 원인과 그 형상(계속)



[그림 3.2] 균열의 원인과 그 형상(계속)

(2) 균열에 대한 평가

콘크리트 부재의 균열은 요구되는 상태에 따라 허용 균열폭이 달라지며, 일반적으로 요구되는 성능은 내구성 및 방수성의 두 가지 측면에서 고려되고 있다.

허용 균열폭은 보수여부의 판정을 위한 기준이 된다. 균열조사에서 조사된 균열폭을 다음 <표 3.10>과 대조하여 보수의 필요여부를 판정한다. 조사된 균열폭이 보수를 필요로 하는 균열폭과 필요로 하지않는 균열폭 사이의 균열폭이 될 경우에는 균열폭 뿐만 아니라 균열의 원인, 균열의 깊이, 밀도, 패턴 등을 종합하여 판단하여 기술자의 판단에 따라 보수의 필요여부를 판정하여야 한다.

<표 3.10> 보수의 필요여부에 관한 균열폭

(단위 : mm)

구 분 \ 환 경		내구성			방수성
		심하다	중간	완만	-
보수를 필요로 하는 균열 폭	대	0.4이상	0.4이상	0.6이상	0.2이상
	중	0.4이상	0.6이상	0.8이상	0.2이상
	소	0.6이상	0.8이상	1.0이상	0.2이상
보수를 필요로 하지 않는 균열폭	대	0.1이하	0.2이하	0.2이하	0.05이하
	중	0.1이하	0.2이하	0.3이하	0.05이하
	소	0.2이하	0.3이하	0.3이하	0.05이하

※ 대,중,소는 콘크리트 구조물의 내구성 및 방수성에 이르는 유해성 정도를 나타내며 균열의 깊이, 패턴, 피복두께, 콘크리트 표면 피복의 유무, 재료 배합 등의 영향을 종합하여 결정한다.

가) 내구성에서 본 허용 균열폭

철근콘크리트 부재에서는 일반적으로 설계하중이 작용할 때, 0.1~0.2mm 정도의 굴곡균열이 발생한다. 균열이 철근부식에 미치는 영향은 단순히 표면균열 뿐만 아니라 철근에 대한 콘크리트의 피복두께, 환경조건(물과의 접촉조건, 공기중의 송분, 온도 등) 등과 밀접한 관련을 지닌다. 부재의 내력 내지 내구성의 관점에서 철근의 부식은 철근단면의 감소에 의한 저항모멘트의 저하, 부식면적의 확대에 따른 콘크리트와 철근의 부착파괴, 녹의 팽창압에 의한 피복 콘크리트의 박리 등의 피해를 발생시킨다. 균열폭 0.2mm 정도 이하에서는 일반적으로 철근의 단면결손은 경미한 듯하며, 철근의 인장내력에 미치는 영향도 작다. 균열이 발생한 곳에서는 철근과 콘크리트에 박리가 발생하고, 부식은 이 부분을 통하여 균열 발생한 곳 좌우로 확대되며 동시에 녹팽창압에 의한 박리로 확대되어 부식이 더욱 진행된다. 표면의 균열폭이 0.2mm 정도라 해도 균열이 발생한 곳의 철근 부식길이는 5~10cm에 이르는 수도 있다.

내구성에서의 허용균열폭의 예로써 ACI 224 위원회에서는 <표 3.11>에 나타낸 바와 같이 5가지 조건별로 정하고 있다. 그밖에 CEB-FIP 국제 지침 및 세계각국에서 주로 내구성에 대하여 정한 허용 균열폭에 대한 규정은 각각 <표 3.12>, <표 3.13>과 같다.

<표 3.11> 내구성에서의 허용 최대 균열폭 (ACI 224R-80)

조 건	허용최대균열폭(mm)
건조공기 중 또는 보호층이 있는 경우	0.40
습한 공기중 · 흠 속	0.30
동결 방지용 약품을 사용한 경우	0.175
해수 · 해풍에 의해 반복 건습을 받는 경우	0.15
수밀 구조부재	0.10

<표 3.12> 내구성을 고려한 허용 균열폭 (CEB-FIP Model Code)

조 건	허용 최대 균열폭(mm)	
	영구하중과 정기적으로 작용하는 변동하중	영구하중과 변동하중 의 불합리한 조합
유해한 노출조건하의 부재	0.1	0.2
보양되어 있지 않은 부재	0.2	0.3
보양되어 있는 부재	0.3	미관상의 검토

<표 3.13> 허용 최대 균열 폭에 대한 각국의 예

국 명	제안자 또는 기준	경계조건 또는 대상 구조물	허용균열의 폭(mm)
일 본	운수성	항만 구조물	0.20
	일본공업규격	원심력 철근콘크리트 기둥 설계하중시, 설계휨모멘트 작용시 설계하중, 설계휨모멘트 개방시	0.25 0.05
미 국	ACI Building Code 318-83	옥내부재 옥외부재	0.33 0.41
러시아	SNIP II-B-1-62	비 부식성 약 부식성 중 부식성 강 부식성	0.30 0.20 0.20 0.10
프랑스	Brocard		0.40
스웨덴		도로 고정하중만 고정하중 + 1/2적재하중	0.30 0.40
영 국	CP-110	일반환경 부식성 환경	0.30 0.40
유 럽	유럽 콘크리트 위원회(CEB)	상당한 침식작용을 받는 구조물의 부재 방호공이 없는 보통 구조물의 부재 방호공이 있는 보통 구조물의 부재	0.10 0.20 0.30

나) 방수성에서 본 허용 균열폭

방수성에서 본 허용 균열폭에 대해서는 아직까지 실험적, 이론적 검토가 행해지고 있으나 명확히 정해지지 않은 것이 현실이다. 또한 허용 균열폭은 가해지는 수압, 구조물의 용도나 부재 두께 등의 용인에 영향을 받는다. 콘크리트 균열에서의 누수량은 큰 수압이 작용할수록 많아진다. 균열에서의 누수량은 균열폭의 3승에 비례하여 증대하는 것으로 보고되고 있다. 따라서 균열을 작게 분산시켜 하나의 균열폭을 작게하는 일은 누수량을 감소 시키는 데 있어 매우 효과적인 방법이다.

다음 <표 3.14>는 방수성에서 본 허용 균열폭에 대한 기존 연구의 내용이다.

<표 3.14> 기존 연구에 의한 방수상의 허용 균열폭

연구자 명	허용 균열폭 (mm)	비 고
狩野 春一 外	0.06	조사연구에 의하면, 두께 12cm의 Slab에서 균열폭 0.04mm 정도는 누수가 거의 없음. 0.06mm 전후가 위험도 20% 정도의 누수 한계 폭으로 간주됨.
任入 豊和	0.05	두께 10cm의 공시체에 대해서 투수실험을 실시한 결과, 균열 폭 약 0.05mm 이하에서는 투수가 거의 없음. 또한 RC 구조물에 있어서 조사를 한 결과, 실용 방수상 지장이 없는 균열 폭을 0.05mm로 규정하였음.
浜田 稔	0.03	실제 아파트에 대해 조사한 결과, 균열 폭 0.06mm를 누수 한도로 하였지만, 0.03mm에서도 누수가 되는 경우도 있음.
向井 毅	0.06	두께 5cm의 모르터에 대한 실험에서, 균열폭 0.07mm 이상은 명확히 누수 현상이 있음.
神山 幸弘 外	0.06 이하	벽체가 포수상태의 경우, 무풍 또는 미풍일 경우 누수 되는 최소의 균열 폭은 0.06~0.08mm임.
重倉 祐光	0.12 이하	균열 폭 0.12mm (이 이하의 시험은 하지 않음)에서의 투수는 0에 가깝다.
石川 廣川	0.15 이하	건조상태의 두께 8mm 콘크리트 공시체의 균열 폭 0.15mm 이하에서는 균열 주변에 얼룩이 생기는 정도이며, 누수는 없음.
坂本 昭夫 外	0.09	누수에는 균열 폭에 대한 벽두께의 영향이 큼. 두께 18cm 이하의 모르터 실험에서 누수 되지 않는 균열 폭은 0.05mm 이하이며 실제의 벽체는 이보다 큰 0.04mm 임.

(3) 균열에 대한 판정

균열의 원인조사와 함께 균열의 폭, 길이, 진행여부 등을 조사하여 결함정도에 대한 등급을 결정한다. 결함의 등급은 <표 3.15>와 같다.

<표 3.15> 균열의 결함등급

단 계	결 함 등 급
I	일반적으로 발생할 수 있는 현상으로 구조적으로 안전한 상태
II	경미한 균열현상으로 보수를 필요로 하지는 않으나, 진전 가능성이 있으므로 주기적인 관찰을 필요로 하는 단계
III	주의를 필요로 하는 현상으로서 시멘트 페이스트나 모르타르 자체보수를 실시한 후 주기적인 관찰을 필요로 하는 상태
IV	전문가적인 주의를 필요로 하는 현상으로 보수전문가에 의해 현상의 점검 및 보수를 실시하고 주기적인 관찰을 필요로 하는 상태
V	구조물에 심각한 결함현상이 발생하여 구조전문가에 의한 안전진단이 필요한 상태
VI	구조물의 붕괴징후가 있으므로 거주자 및 주요 기자재를 긴급 대피시킨 후 구조전문가에 의한 안전진단이 필요한 상태

균열의 결함등급은 부재별로 발생한 균열의 폭, 진전여부, 균열길이, 콘크리트 박락, 누수 등에 관련된 항목을 체크하고 이를 토대로 결함의 등급을 결정한다.

3) 조적조의 균열

(1) 균열의 발생원인

조적조에서는 대각선상으로 인장력과 압축력이 가해지면 균열이 생기고 틈새가 벌어진다. 이것은 기초의 구조결함과 아울러 건축물의 평면상 또는 입면상의 불합리성과 불균형하중에 크게 기인한다.

조적구조는 풍압력, 지진력 등 횡력에 대해서 약하며 층수가 높아지면 벽두께가 두껍고 무거워 적합하지 않은 단점은 있으나, 4~5층 범위내에서는 큰 장비와 기구없이 손쉽게 만들 수 있는 구조이다. 또한 철근콘크리트구조와 철골조에서도 내력벽이 아닌 장식벽이나 간막이벽에 많이 사용되고 있으며, 특히 석재나 붉은 벽돌은 색감, 질감이 우수하여 의장적 표현이 다양하고 자유로워서 바탕벽체는 콘크리트나 블록 및 시멘트벽돌을 사용하더라도 마감면에는 석재 또는 치장벽돌인 붉은벽돌로 쌓는 경우가 많다.

조적조 건축에서의 균열의 원인은 크게 조적단위재료에 의한 균열, 구조적 원인에 의한 균열, 시공상의 결함으로 인한 균열 등으로 대별되며 각각에 대한 세부적인 원인은 다음과 같다.

가) 조적 단위재료에 기인한 균열

(가) 온 · 습도

점토소성 제품 및 시멘트제품은 일반적으로 흡수율 및 자체강도에 따라 벽돌조와 블록조에서 온도변화에 따른 부피변화를 일으키게 된다. 즉 온도변화에 따라 신축성을 가진 재료의 조적재료이므로, 이러한 재료로 구성되어 있는 벽체는 각 단위재료의 차동적인 이동량에 의하여 벽체에 응력이 발생하게 된다. 따라서 이 내부응력에 대응하는 내력이 부족한 부분에 균열을 일으키게 된다.

또한, 각 조적단위재료의 제조에 사용되는 재료는 동일한 것이라 할지라도 성분, 함수율, 밀도, 탄성계수 등 벽돌성질에 관련되는 재질을 완전히 일정하게 하기는 매우 어렵다. 각 재료의 배합, 입도 및 분포상태, 내부공극량 및 분포상태, 양생조건 등이 절대 동일할 수는 없으며, 그 생산과정에서 온도변화에 대한 신축

을을 모두 동일하게 제조하기는 거의 불가능하다 할 수 있다.

따라서 같은 제품이라도 사실상 이질재료라고 할 수 있으며, 이러한 이질재료가 시멘트 모르터 혹은 석회 모르터 등 접착재에 의하여 교착되어 벽체를 형성하고 있기 때문에 실질적으로 교착상태에 있어서도 각각 그 접착강도가 다른 조적벽체를 형성하게 된다.

그러므로 조적단위재료의 이질적인 신축율 및 교착제인 시멘트 모르터 혹은 석회 모르터와의 이질적인 신축율의 차에 의하여 차동적인 이동량이 발생하게 되고 이에 대한 내력이 부족한 부분에 균열(龜裂)을 유발하게 된다. 또한, 벽체를 중심으로 건축물의 내부와 외부의 온도차로 인하여 외부에 접한부분의 표면 신축율과 건축물내부로 면한 벽체의 재질적인 신축율의 차가 생기게 되어 균열이 발생하며, 이와 같은 균열은 수평줄눈 혹은 수직 줄눈에서 일어나고 경우에 따라서는 사형균열과 계단형 균열로 나타난다.

이러한 신축율 및 온도차에 의한 벽체의 내부응력은 벽체에균열뿐만 아니라 특히 철근콘크리트 라멘조의 비내력벽과 같이 철근콘크리트구체와 벽체와의 이질적인 재료의 신축율에 의한 차동적(差動的)인 이동량이 발생하므로 보나 기둥과의 접착부위에 균열이 발생하게 한다. 또한, 공간쌓기로 되어 있는 벽체의 경우는 외벽과 내벽의 온도차가 크기 때문에 내벽보다 외벽에서 균열발생이 현저하게 나타난다. 이와 같은 현상은 벽면적이 클수록 더욱 뚜렷하고, 가로와 세로의 길이의 차가 큰 벽체일수록 더욱 심하게 나타난다.

각 조적 단위재료의 열적성질과 벽체구성양식에 따른 열전달율은 각각 <표 3.16>, <표 3.17>과 같다.

<표 3.16> 재료의 열적성질

재료	비중	열전도율	비열	열팽창계수	실험온도
콘크리트	2,270	1.1~1.4	0.211	0.43	-
보통벽돌		0.62	-	0.55	-
화 강 석	2.810	2.90	0.2	0.84	41
시멘트모르터		1.1~1.49	-	1.1~1.4	

<표 3.17> 벽체표면에 있어서의 열전달율(Kcal/m² · h · °C)

실		재료와 열류(熱流)의 관계										α		
실 내		마루 · 천장에서 열이 상향으로 전열된 경우와 주벽에 대하여										7		
		마루 · 천장에서 열이 하향으로 전열될 경우										5		
실 외	풍속 (m/s)	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
	α	11	12	13	17	20	22	24	26	28	30	31	33	35

한편, 벽체에 함유된 수분이나 습기는 벽체 내부상태와 벽면의 마감재료 및 마무리에 따라 다르나 일반적으로 다공질의 재료는 외기조건의 영향을 받기 쉽다. 특히, 같은 벽체라도 온도와 마찬가지로 수분의 분포가 동일하지 않을 경우 내부의 조직이 불균등한 재료이면 수분의 함유가 불균등하게 된다. 그러므로 온도와 습도는 밀접한 관계를 가지며 온도변화에 따른 조적단위재료의 부피변화를 더욱 촉진케 하는 한편 열전도율에도 크게 영향을 미치게 된다.

따라서 온도에 의한 균열요인과 같은 현상이 일어나게 된다. 우리나라의 기후는 동기에 있어 최저 -20°C, 하절기에는 최고 +40°C로 볼 때 기온차의 최대치는 60°C가 된다. 이에 따른 상대습기량이 건축물의 내외부 온도차에 의하여 급격한 변화를 일으키게 되며 특히 동기에 있어서 균열발생의 간접적인 요인이 된다.

(나) 표면상태 및 규격

조적구조는 표면상태에 따라 동일한 교착제를 사용할지라도 접착강도가 달라지며, 온도에 의한 재질적인 신축율에 영향을 미치게 되므로, 단위 벽체의 강도상의 불균형을 이루게 된다.

또한 규격이 일정치 않으면 교착제의 사용량이 달라지므로 벽체의 강도 및 부피변화에 따른 내부응력 등의 균열원인을 더욱 조장하는 불균일한 벽체가 된다.

(다) 강 도

조적단위재료의 강도는 곧 벽체의 내력에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 특히 집중하중이 걸리는 부분은 각 개체의 부착강도가 문제되며 하중분산에 지장을 주게 된다.

동일한 강도를 가진 단위재료일지라도 그 크기에 따라 벽체의 내력이 다르게 되며, 접촉면적이 달라짐에 따라 이에 대한 시공성이 균열발생의 요인이 된다. 또한 줄눈의 재질이 균질하지 않을 때 벽체 강도가 불균등하게 되며 부분적인 균열발생의 요인이 된다.

조적조의 외벽에 사용되는 붉은 벽돌은 다른 요업제품과 마찬가지로 풍화된 진흙을 성형하여 그늘에 말려 굳어진 날벽돌(adobe)을 소성로에서 구운 것으로, 불순물이 많은 저급점토에 제점제로서 모래를 가하거나 색조조절을 위해 석회를 가하여 소성 제품화 한 것으로 시멘트벽돌보다 상대적으로 강도값이 낮다. 보통 벽돌의 흡수율과 압축강도는 다음과 같다.

<표 3.18> 보통벽돌의 품질

종류 품질	1종		2종		3종	
	24시간	3시간	24시간	3시간	24시간	3시간
흡 수 율 (%)	10이하	13이하	13이하	16이하	15이하	18이하
압축강도(kg/cm ²)	210이상		160이상		110이상	

나) 설계상의 미비 및 구조적인 원인에 의한 균열

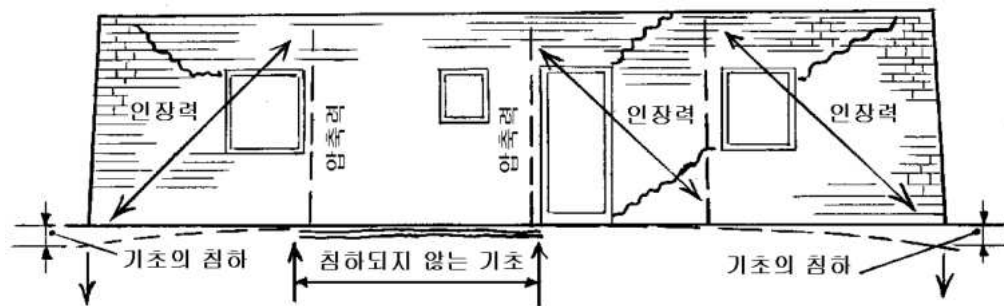
(가) 부동침하

지반은 연약층의 깊이차 · 경사면 · 지하유수방향 · 말뚝지정 · 기초의 부분적 적용 등에 의해 부동침하가 생기게 되며 이러한 원인에 의해 조적조에서의 균열을 유발시킨다. 지반의 허용침하량 이상의 하중이 작용하거나 장기간에 걸쳐 지반이 서서히 가라앉게 되는 부동침하의 영향은 여러 가지가 있다. 이러한 원인 중에는 건축물의 과하중 등 직접적인 원인뿐만 아니라 주변의 지하수위 변동, 인접건축물의 공사시의 진동 및 충격, 지반의 이완, 지하수위 저하 등에 따른 영향 등이 있으며, 부동침하에 의해 건축물에 균열이 발생하게 된다.

특히 횡력에 대해 취약한 조적조의 건축물은 다른 구조물에 비하여 부동침하에 의한 피해가 특히 심각하다. 조적벽체는 조적단위재료의 접촉강도가 벽체의

강도를 좌우하게 되므로 압축강도에는 비교적 강한 구조체이나 인장강도는 매우 낮으며, 횡력에 대한 저항성 또한 적다. 즉 수직하중에 대한 응력에 비하여 수평하중에는 극히 약한 구조체이므로 기초구조가 그 어떤 요인으로 부동침하를 일으키게 되면 벽체의 길이 방향이나 직각방향으로 수평력이 작용하여 인장력을 받게 된다. 따라서 벽체의 부동침하 또는 부상(浮上)은 균열의 요인이 되며 침하와 부상의 양상에 따라 다양한 균열이 발생하게 된다.

부동침하가 발생하게 되면 건축물에서 침하가 일어나는 부위와 반대로 부상하는 부위에 의하여 비틀림현상이 일어나게 되며 이는 건축물에 응력요소로 작용하게 되어, [그림 3.3]과 같은 대각선 인장균열이 차등적인 침하에 따라서 발생하고 경암반같은 침하되지 않는 부위는 대체로 중심부위에서 발생하게 된다.



[그림 3.3] 부동침하에 의한 균열의 발생

또한 이러한 응력은 개구부와 신축줄눈 및 접합부위 등에 집중되어 부재의 변형 및 균열을 발생하게 되며, 부동침하로 인한 균열은 <사진 3.1>과 같은 경사형, 계단형의 균열이 발생한다.

따라서 부동침하에 의한 건축물의 균열발생을 최대한 억제하기 위해서는 건축물은 연약층의 지반조사를 면밀히 하고 동일한 건축물이 일반지반과 메운 지반에 걸쳐지거나, 경사면 또는 비탈옆 등에 세울 때에는 부동침하에 대한 고려를 충분히 해야 한다.

또한 건축물자체의 중량을 줄이고 평면구성에 있어서 복잡한 평면구성이나, 입면적으로도 부분적 층수차 또는 경술한 증축 등을 삼가하고, 벽면은 균형있는 배치와 하중의 집중을 피하여야 하며, 건축물의 중량을 균등하게 배분하여야 한다.

또한 기초는 동일 형식과 구조로 강성도 높여야 하고, 인접건축물의 배치에도 서로 영향이 미치지 않도록 해야 한다.



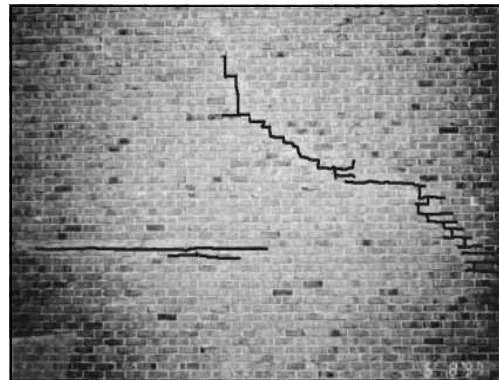
<사진 3.1> 부동침하에 의한 균열

(나) 집중하중

상부구조체를 지지하는 내력벽에 상부구조체에 따른 하중이 벽체의 어느 부분 이든지 집중적으로 작용하는 경우에 균열이 발생하게 된다. 이 집중하중이 벽체에 균등하게 분산되지 못할 때, 집중하중에 의하여 국부적으로 벽체에 전단력 또는 인장력이 작용하게 되며, 이와같은 상부의 집중하중으로 하층의 조적조에 <사진 3.2>와 같은 균열이 발생하며, 건축물에 가해지는 여러종류의 하중에 의해서 발생하는 응력이 벽체의 허용응력도 이상으로 가해진다면 그곳에서는 응력이 발생하게 된다.



<사진 3.2> 집중하중에 의한 균열



<사진 3.3> 집중하중에 의한 균열

(다) 개구부주위

조적조 건축물은 벽량과 문꼴의 크기, 구조 및 배치에 따라 균열발생의 큰 원인이 된다. 따라서 벽돌구조로는 특별한 보강법을 쓰지 않고서는 문꼴을 넓게 내지 않아야 하며, 불균형한 배치를 피하고, 상·하층의 창문의 위치와 너비는 일치시키고 창문 주위가 약화되는 것을 방지하여야 한다.

또한 벽체의 개구부로 하여금 내력벽이 내력적으로 균형을 이루지 못할 경우 균열발생의 요인이 되며, 단위평면상에 개구부의 배치가 균등하지 못할 때 내력벽의 배치가 자동적으로 균형을 잃게 되어, 상부하중이 편중되는 경우가 발생한다. 따라서 온도의 변화에 따른 벽체의 부피변화율의 차이를 고려하여 발생을 최대한 억제하여야 한다.



<사진 3.4> 개구부 주위의 균열 I



<사진 3.5> 개구부 주위의 균열 II

특히, 개구부와 개구부 사이의 벽체가 길이보다 높이가 큰 세장한 벽면을 이룰 때 수평력에 대한 내력이 더욱 저하되어, 벽체내부에 전단력이 작용하여 균열이 발생하게 된다. 또한 개구부 상부하중이 양지지점으로 충분히 전달되지 못할 경우 국부적인 균열발생의 요인이 된다.

조적조 건축물에서 개구부의 상인방에는 대부분 치장벽돌을 세워쌓기하여, 이 인방벽돌부분에 생기는 균열이 상당히 많이 발생하고 있으며, 상부의 하중으로 인한 균열(<사진 3.4>)과 인방벽돌부위의 균열(<사진 3.5>) 등이 많이 발생하고 있다.

또한 개구부 중에서 1층 출입구의 캔틸레버로 시공된 부분은 <사진 3.6>과 같이 주위의 구조체 및 치장벽돌 부분에서 균열이 발생하며, 이는 캔틸레버의 자중과

그 위에 적재된 하중으로 인하여 구조체인 콘크리트 기둥과 치장벽돌에 응력집중이 균열발생원인으로 분석할 수 있다.



<사진 3.6> 캔틸레버주위의 균열

(라) 신축줄눈(Expansion Joint)

신축줄눈 부위의 결함은 서로 다른 두 벽체가 만나는 경우와 동일한 재료가 만나는 경우에 발생하며, 서로 다른 두 벽체가 만나서 장력이 마찰저항력을 충분히 극복하지 못하면 하나 또는 두 개의 균열이 발생하게 된다. 치장벽돌에서의 신축줄눈은 후자의 경우가 대부분이며, 이 경우에는 수축과 팽창이 반복해서 누적되어서 신축에 의한 휨과 전단력에 의해 넓은 벽체에서 균열과 틈새가 벌어지는 결함이 발생하게 된다.



<사진 3.7> 신축줄눈부위의 결함

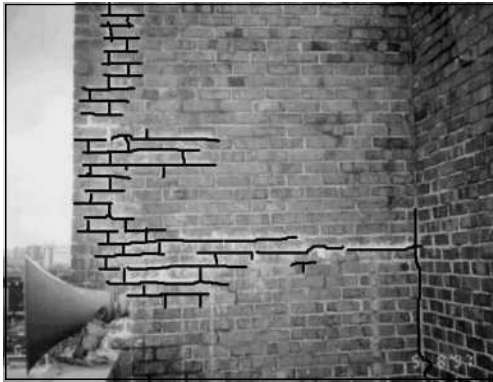
또한, 신축줄눈에 줄눈재료의 신축율이상으로 큰 응력이 작용하게 되면 신축줄눈 부위에 균열이 발생한다. 이러한 결함이 발생할 수 있는 넓은 이음매는 외부 표면 즉, 치장벽돌이 분리되지 않도록 인장력에 대한 저항성이 뛰어난 재료로 구성되어야 한다. 대부분 신축줄눈의 결함은 균열과 틈새의 벌어짐으로 나타난다. 그밖에도 수직 침하에 의해 발생한 경사형 균열이 주변에 나타나는 경우도 있다.

다) 시공상의 결함으로 인한 균열

조적구조체는 단위재료를 줄눈 모르터로 결합시켜 일체적인 구조효과를 기대하는 구조이나 조적조의 강도는 시공숙련도, 즉 모르터 깔기, 모르터의 배합과정, 모르터의 사용방법 등에 따라 좌우된다. 따라서 줄눈 모르터와 개체와의 부착력이 불량하거나 시공의 부실로 줄눈강도가 기준강도에 미흡하면 계획된 일체식 구조는 소단위 집합구조가 된다.

또한 시공숙련도는 구조체의 강도에 직접적으로 영향을 미치므로 기능공들의 자질능력 및 기술습득으로 인한 현장교육이 선행되어야 한다. 조적구조의 부속철물인 금속앵커볼트나 금속타이 같은 중요한 연결철물제품들이 부적절하게 부착하거나 느슨해지면, 비뚤어지거나 헛돌게 되며, 심지어 떨어지게 된다. 이는 조적체에 큰 응력을 유발시켜 균열을 발생시키고, 조적 단위재료가 파손되고, 흠이나 좌굴 등의 결함이 발생하게 되며, 건축물모서리와 정면에서 측면으로 계속되는 부분에서 탈락하게 된다. 또한, 앵글이 모서리에서 탈락하는 곳에서 응력이 집중되고 모서리 균열을 초래하기도 한다.

이러한 결함들은 시공숙련도의 부족이나 미숙에 의한 착오로 앵글이 부족한 내력을 갖고 있음에도 불구하고 두터운 벽체일수록 흔히 발생하며, 이러한 결함을 막기 위해서는 세밀한 점검에 의한 보강이 필요하게 된다. 그러므로 벽체의 강도에서 모르터의 강도와 재료개체의 강도가 규정치와 같이 일정한 경우에는 시공숙련도에 의해서 결정되기 때문에 기능공의 자질은 비내력 벽체의 균열발생을 유발하는 데 큰 영향을 미친다. <사진 3.8~3.9>는 모르터가 인력으로도 파괴되는 시공상의 결함에 의한 균열발생의 예를 보여주고 있다.



<사진 3.8> 시공상의 결함에 의한 균열



<사진 3.9> 시공상의 결함에 의한
모르터의 파손

또한, 콘크리트 기둥이나 보에 연결철물을 사용하지 않은 곳에서 치장벽돌이 쉽게 탈락하는 것을 볼 수 있는데, 특히 볼트의 경우는 삼입물인 금속철판앵글에서 구멍 정렬선이 맞지 않는 부위에서 문제가 종종 발생한다. 이런 문제점은 금속철판에 새로운 구멍을 뚫거나 콘크리트에 볼트로 고정하는 방법으로 보강할 수도 있으나, 때때로 부식되거나 탈락되어 검사를 하지 못하는 경우가 발생하기도 한다. 또한, 창대쌓기 부분의 시공불량이나 파손과 외부벽체를 통해 물이 침투함으로서 치장벽돌의 오염, 탈락, 손상이 일어나는 사례도 많이 발생하며, 이러한 현상은 부주의한 시공이나 설비등의 시공후 발생하는 구멍이나 틈새로 물이 유입되는 통로가 생기기 때문에, 구멍이나 균열 그리고 느슨한 비흘림은 올바른 점검을 통해 사전조치를 취해야 한다. 따라서, 이런 구성성분의 부족으로서 벽돌 벽체의 결함이 생기고, 재료적 결함은 벽돌자체의 불량이나 그들을 연결하는 모르터불량으로 인한 결과로서 발생할 수 있으며, 철물의 부식, 비흘림막의 붕괴 그리고 다른 모든 벽체 구성물의 불량 등으로 이어진다.

(2) 균열의 유형별 분류

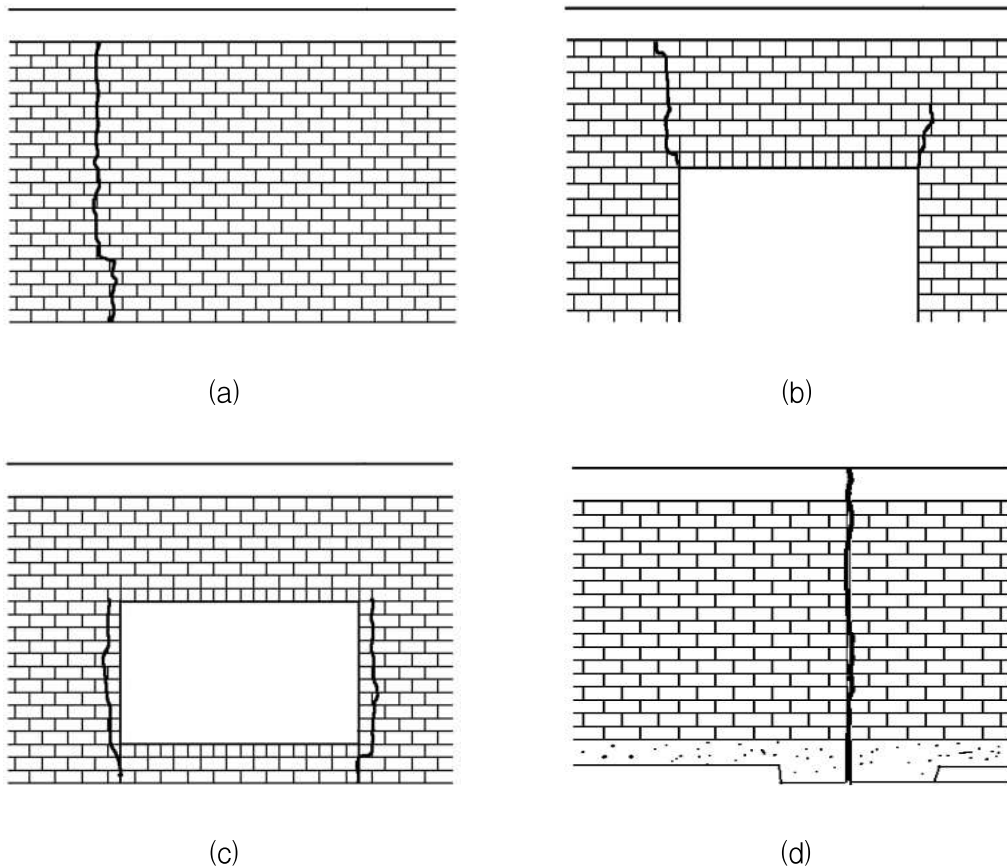
건축물에 발생하는 균열은 원인별, 형태별, 부위별 여러 가지로 나눌수 있으나 일반적으로 구조체에 발생하는 균열과 비구조체에 발생하는 균열로 크게 구분할 수 있으며, 장소에 따라 외벽체의 균열과 내부벽체의 균열로 나뉘어서 구분할 수

있다.

콘크리트 라멘구조에 조적식 비내력벽 형태에서 치장줄눈을 중심으로 균열형태를 유형별로 정리하면 다음과 같이 분류된다.

가) 수직형 균열

수직형균열은 대부분 조적재료 자체의 강도부족과 온도차 및 시공상의 결함 등에 의한 조적단위재료와 모르터에 나타나는 균열이다. [그림 3.4(a)]는 건축물의 외부기온변화에 따른 벽체의 수직방향과 수평방향의 신축율차로 인한 균열로서 조적재료 상호간의 접착강도와 조적단위재료 자체의 내부응력에 대한 내력이 부족하여 일어나는 현상이다. 이와 같은 현상은 주로 세로 줄눈을 중심으로 하여 대체적으로 벽체길이 방향의 중앙에 발생되어 있다.



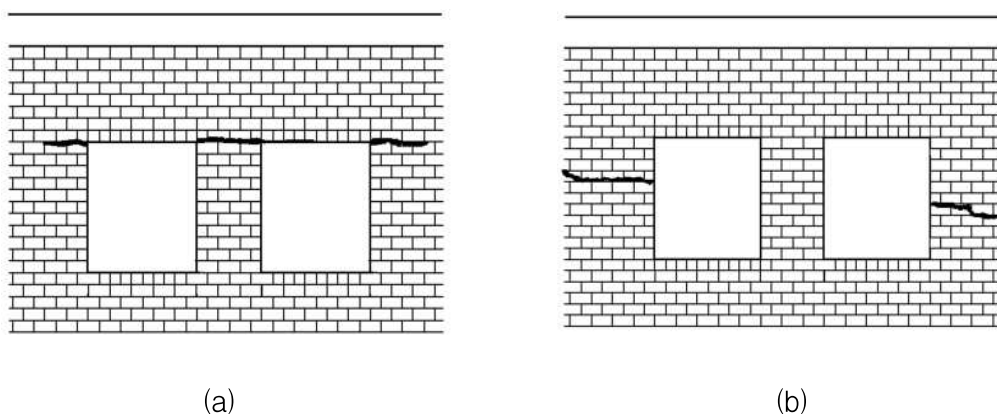
[그림 3.4] 수직형 균열

특히 철근콘크리트 라멘조의 비내력벽은 기둥, 보 등의 철근콘크리트구체와 벽체와의 이질적인 재료의 신축율에 의한 차동적(差動的)인 이동량에 의하여 균열을 발생하게 한다. 또한, 공간쌓기로 되어있는 바깥벽에서는 외벽과 내벽의 온도차가 크고 내벽보다 외벽이 상술한 바와 같은 균열발생이 현저하게 나타난다. 특히 벽체의 길이가 길고 넓은 벽면에서 볼수 있는 현상이다.

[그림 3.4(b),(c)]와 같이 창문 또는 출입문을 중심으로 한 수직형균열은 인방구조 처리가 완벽하지 못한데 주 원인이 있으며, 이를 중심으로 주위 벽체의 온도차가 다른 부분보다 크기 때문이다. 캔틸레버 부분에서도 같은 수직형의 균열이 나타나며, 신축건축물과 기존의 건축물과의 다른 기초부위에 따른 침하량과 이질적인 재료사용에 의한 수직균열도 많이 발생하는 사례이다.

나) 수평형 균열

수평형균열은 비교적 벽체의 길이에 비해 두께가 적을 때, 즉 건축물 내부의 대린벽 유무에 다른 단위벽의 높이가 길이 보다 클 때 일어나는 현상으로 벽체의 자중 또는 건축물하중이 과다하여 벽체에 휨 응력이 작용되거나 기온차로 인한 조적재료의 신축작용이 상하로 일어날 때 벽체 내부응력에 대한 내력 부족과 조적재료 상호문제 이질적인 접착성에 관계되어 발생하는 균열로서 주로 벽체의 중앙부에서 시작되어 단부로 진행되는 균열이다.



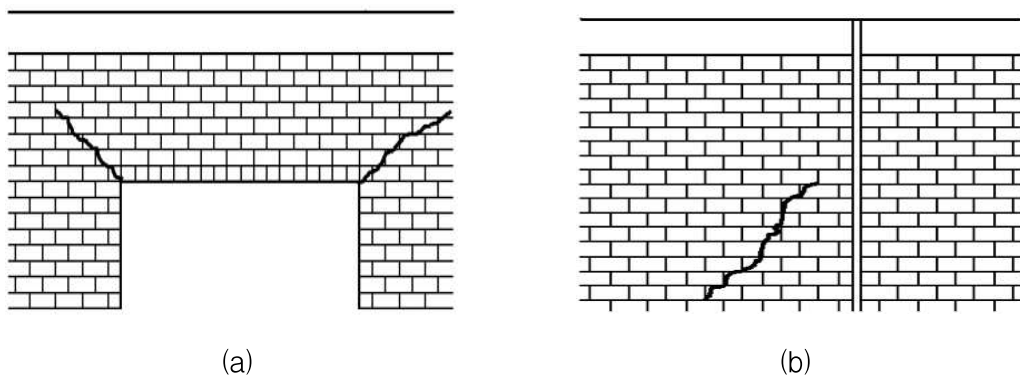
[그림 3.5] 수평형 균열

특히, [그림 3.5(a)]에서와 같이 창대의 높이가 수평을 이룰 때 창문과 창문 사이벽이 창문 너비보다 적을 때 인접된 창대나 인방을 중심으로 수평 균열을 발생하고 있다. 또한 [그림 3.5(b)]와 같은 창문의 선대의 중간 지점에서 균열을 일으켜 벽체 중앙으로 진전되어 가는 유형도 있다. 이는 개구부 주위의 벽체 온습도차로 인한 신축작용의 영향과 창문 또는 출입문에 의한 진동의 영향도 있을 것으로 생각된다.

다) 경사형 균열

경사형 균열은 벽체에 가하는 하중이 편중되어 수평력이 벽체의 길이방향으로 작용 할 때, 또는 구조체의 부동침하 등으로 일어나는 균열형태이다. 즉, 수평력에 대한 조적단위재료의 전단내력이 부족한데 그 원인이 있다고 할 수 있다. 이 경우에는 대체적으로 벽체의 모서리 부분에서 응력방향에 따라 벽체의 중심부로 균열이 진전됨을 나타내주고 있다. 또한 벽의 넓이 또는 대린벽의 유무에 관계없이 균열은 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 경사를 이루고 있다.

이와 같은 현상은 창문 주위에서 가장 많이 일어나고 있다. 이는 창문의 인방구조가 부실하여 창틀에 하중이 집중되거나 창선대를 통하여 허리벽으로 하중이 전달될 때 창틀, 문틀의 모서리에서 바깥쪽으로 균열이 진전되고 있음을 알 수 있다. 창대의 모서리 부분에서 시작되는 균열은 조적단위재료의 강도에 따라 다르나 창선대를 통하여 전달되는 하중에 대한 내력이 부족할 때 [그림 3.6]과 같은 경사형 균열이 일어나게 된다.



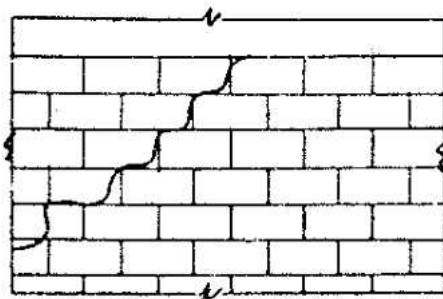
[그림 3.6] 경사형 균열

이와 같은 현상은 창문 주위에서 복합적으로 일어나는 현상으로 볼수 있다. 신축줄눈의 주위에 발생하는 수직침하에 의한 경사형균열이 나타나는 경우도 있다.

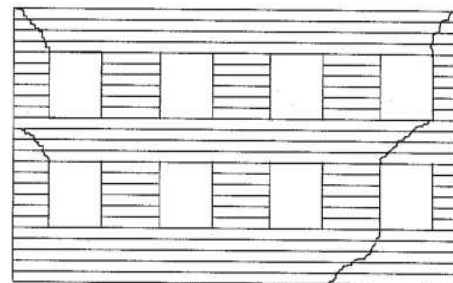
라) 계단형 균열

계단형균열은 경사형균열과 같은 내용의 수평력이 벽체에 작용될 때 조적단위 재료의 강도가 이에 접하는 점착강도보다 클 때 일어나는 현상이다. 기초지반의 부동침하, 구조부의 편중으로 인한 균열 및 조적단위재료와 교착제인 시멘트 모르타르와의 이질적인 신축율의 차에 의한 내력부족 부분의 균열발생현상으로서, 조적재료 자체가 노출되어 있을 때 주로 발생하는데, 이와 같은 현상은 조적단위재료의 강도가 비교적 좋은 것으로 추정되는 벽체에서 볼수 있다.

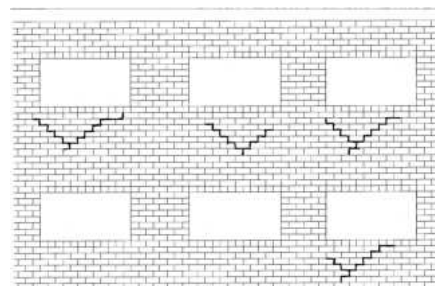
치장벽돌의 조적체에서 계단형 균열을 일으키고 있는 벽은 줄눈부분이 현저하게 서로 박리되어 있음을 볼 수 있으며, 대체적으로 계단형 균열은 부동침하로 인하여 발생되는 경우가 많다.



(a)



(b)



(c)

[그림 3.7] 계단형 균열

3.2.3 진동피해에 대한 일반적 관점

진동과 건축물 피해와의 관계는 몇 가지 이유에서 매우 복잡하다.

그 이유의 하나로는 건축물마다 규모, 사용재료, 구조 및 구법, 시공성 등이 상이하다는 점을 들 수 있다. 아울러, 가해지는 진동의 종류, 크기, 주파수 그리고 건축물의 주축에 대하여 진동이 전파되어 나가는 방향 등은 피해정도에 큰 변수로 작용하게 된다.

그러나, 이러한 변수만으로는 건축물에 대한 진동피해의 정도를 판단하는데 충분하다고는 할 수 없다. 가장 중요한 사항은 건축물을 구성하는 각 재료 또는 부재의 응력상태로서, 진동이 가해짐으로써 당초의 응력이 어느 수준까지 증가되는가 하는 것이다. 따라서, 부재가 이미 정적 극한 응력상태에 도달되어 있던 극단적인 경우라면, 매우 작은 진동도 심각한 피해의 원인으로 작용할 수 있다.

문제를 보다 구체화하기 위하여 피해를 1) 직접적인 진동피해, 2) 노후화 촉진피해, 3) 간접적인 진동피해라는 3개의 범주로 나누어 생각해 본다.

“직접적인 진동피해”는, 이전에 비정상 응력상태에 노출된 적이 없고 손상이 없는 상태, 즉 무손상 건축물에 진동이 작용함으로써 균열 등의 피해가 발생하는 경우를 의미한다.

“노후화 촉진피해”라 함은 구조체 자체에 대한 피해는 없으나, 모르터나 플라스터 등과 같은 마감재에 균열을 발생시키거나 또는 기존의 균열을 진전시키는 등의 피해를 의미하며, 이후 건축적 손상피해로도 표현하였다.

“간접적 진동피해”의 예로는 진동에 의한 지반의 침하를 들 수 있다. 특정 지반조건, 즉 느슨한 사질층 또는 매립층 등의 경우에는 진동 자체가 침하의 원인으로 작용할 수 있으며, 결국 건축물에 피해를 초래하게 된다.

건축물에는 자중, 적재하중 등과 같은 제반하중에 의하여 응력이 유발되며, 이에 따른 변형이 발생하게 된다. 엄밀한 의미에서 암반 위에 기초를 두고 있지 않은 대부분의 건축물들은 사용기간 동안 정도의 차이는 있겠으나 어느 정도의 침하를 경험하게 되며, 이로 인한 응력이 건축물에 작용하게 된다.

심지어 걷고, 뛰고, 춤추고, 가구를 옮기는 등의 일상행위도 건축물에 응력을

발생시키며, 또한 바람이나 온·습도 변화와 같은 기후요소들도 응력을 유발하게 된다. 주변으로부터 아무런 인위적 영향을 받지 않는 상태에서도 앞서 언급한 통상적 요인에 의하여 발생될 수 있는 응력에 따른 변형량은 의외로 크다.

이러한 사실과 본 연구에서 대상으로 하는 진동피해를 연관한 연구 예로서, Stagg 등은 매일의 온·습도 변화에 의한 변형량은 발파진동 수준으로 7.6cm/s, 일상적인 실내활동에 의한 변화량은 2.24cm/s에 해당된다고 밝히고 있다.

이를 <표 3.19>에 나타내었으며, <표 3.20>에 일상활동에 의하여 발생하는 진동의 속도를 평가한 국내의 연구결과를 수록하였다.

<표 3.19> 일상활동, 하루의 환경변화 및 발파로 인한 변형률 수준의 비교

부하현상		위치 ^{*1}	현상으로 인한 미세균열 ($\mu\text{in./in.}$)	해당 발파수준 ^{*2}	
				in./s	cm/s
일상의 환경변화		K1	149	1.2	3.00
		K2	385	3.0	7.60
일 상 활 동	걸기	S2	9.1	0.03	0.08
	떨어뜨림	S2	16.0	0.03	0.08
	땀뿜기	S2	37.3	0.28	0.71
	문 광 닫기	S1	48.8	0.50	1.27
	못박기	S12	88.7	0.88	2.24

* K1, K2는 두 장의 석고벽 사이의 테이프를 바른 연결부에 위치

* 변형률 대 지반진동의 비례도에 기초한 수치임

<표 3.20> 일상활동에 의한 발생 진동속도(예)

진동원	진동속도(cm/s)		
	현대식 철골 사무실	현대식 조적 주택	오래된 주택 (회벽 블록)
정상적 걸음걸이	0.002~0.02	0.005~0.05	0.002~0.03
발구름	0.02~0.05	0.03~0.30	0.015~0.07
문을 밀쳐 닫기	1.0~1.5	1.1~1.7	0.3~0.9
충격식 구멍 뚫기	0.5~2.5	1.0~2.0	1.0~1.5

* 콘크리트 라멘조 건물에서 E-beam 기초 부근 약 1.5m 거리에서 발구름에 의한 진동수준은 0.26cm/s 로 나타났음.(류창하,1995)

건축물을 구성하는 부재들이 무손상 상태로 남아있는지의 여부를 결정하는 것은 제반요인의 작용에 따라 발생하는 응력의 정도와 해당재료가 갖는 고유의 최대응력 수준, 즉 강도와 관련이 있다. 만약, 발생하는 응력이 재료의 극한강도를 넘는다면 균열 등과 같은 피해가 발생할 것이다.

진동피해를 평가함에 있어서는, 정적인 부분과 함께 진동에 의하여 유발된 동적 응력이 구분되어야 하며, 또한 그 합에 대한 고려 역시 중요하다.

진동피해를 평가하는 방법 중, 비교적 정확하지만 복잡하고 많은 노력을 소요로 하는 방법은 역시 이러한 응력을 계산하는 것이다. 그러한 방법의 예가 DIN 4150 Part 3에 묘사되어 있는데, 진동계측과 변형측정을 통하여 응력을 계산하는 방법이 제시되어 있다.

하지만, 단기간의 진동을 유발하는 건설행위나 차량운행 등과 연관지어 상기 방법을 적용하는 것은 너무 복잡하다고 할 수 있다. 그러므로, 이를 대신하여 경험에 바탕을 둔 허용 진동에 대한 기준 값들이 실용적으로 통용되고 있으며, 건축물의 종류와 상태, 기초의 상태, 그리고 진동의 종류에 관한 정보를 포함하고 있다. 그러나, 현재 통용되고 있는 이러한 기준들의 문제는 건축물에 가해진 진동의 속도가 이를 초과하지 않았다 하여 아무런 피해가 없다는 등의 보증이 불가능하다는 데 있다.

현재의 기준들 중 발파진동과 관련해서는 비교적 신뢰도가 높은 값들이 제시되어 있으나, 그것들은 주로 직접적인 진동피해에 근거한 것이다. 그러나, 매우 작은 진동에 의해서도 건축물의 노후화가 촉진되는 등의 피해가 발생할 수 있으므로, 기준 값들을 이러한 피해를 배제하는 값으로 사용하는 것은 불가능하다는 점을 주지하여야만 한다.

발파 이외 타 진동원의 경우에는, 이로 인하여 유발된 건축물 피해와 관련한 자료의 부족으로 일반적인 허용 기준값들이 거의 제시되지 못하고 있다. 교통, 항타, 진동다짐 등으로 인한 진동은 직접적 피해의 원인이 되는 수준까지 도달하는 예가 적으며, 피해를 야기시켰다 하여도 주로 건축물의 노후화를 촉진시키는 정도에서 그치기 때문이다.

따라서, 진동피해의 유무를 판단하는 합리적인 시발점은 외부 가진원에 의하여 유발된 응력의 크기와 건축물이 갖고 있는 응력을 상호 연관지어 비교하는 작업일 것이다.

교통이나 건설행위에 의해 발생하는 진동은 앞서 언급된 모든 종류의 파(압축파, 전단파, 레일리파)를 포함하여 주변으로 전파된다.

이 때, 진동원 주변에서는 모든 종류의 파를 고려하여야만 하나, 진동원으로부터 거리가 멀어질수록 레일리파의 의미가 더 커지게 된다. 이는 레일리파가 체적파에 비하여 기하학적 감쇠가 적은 표면파이기 때문이며, 발생원과 어느 정도 이격된 지점에서 진동을 모니터링하는 대부분의 과정에서는 주로 레일리파가 측정된다고 할 수 있다.

다음 서술될 내용에서는, 이러한 종류의 파들이 유발할 수 있는 피해를 건축물에 유발되는 응력과 연관지어 살펴보고자 한다.

① 인장응력

압축파(P파)가 매질 내에서 전파될 때, 매질은 인장응력과 압축응력에 노출된다. 지반의 경우, 인장응력에 대한 극한강도는 대부분 압축강도의 경우보다 훨씬 낮으므로 여기서는 주로 인장응력에 대하여 논하기로 한다.

반 무한공간에서 탄성매질을 통해 전파되는 평면파만이 존재한다고 가정한다. 이 때, 인장응력은 후크의 법칙(Hooke's law)에 따라 식 (3.1)과 같이 주어진다.

$$\sigma_t = \varepsilon E \quad (3.1)$$

여기서, ε = 매질의 신장, E = 탄성계수를 나타낸다.

또한, 매질의 신장은 식 (3.2)와 같다.

$$\varepsilon = \frac{v}{c} \quad (3.2)$$

여기서, c = 파동의 전파속도, v = 입자의 속도를 나타낸다.

따라서, 다음 식 (3.3)과 같은 관계가 형성된다.

$$\sigma_t = \frac{E v}{c} \quad (3.3)$$

이 경우, [그림 3.8]과 같은 상태로 되는데, 건축물의 기초를 통과하는 파동은 지반에서 전파속도 c_b 와 동일한 크기의 수평성분 속도를 갖는다. 지표면 위 또는 내부에서 발생하는 진동은 주로 수평방향으로 전파되는 파에 의한 것이므로, c_b 와 i_b 는 c_m 과 i_m 으로 각각 전환되며, 각 i_s 를 갖고 건축물의 골조 내로 굴절되는 파동에너지는 다음 식 (3.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sin i_s = \frac{c_s \sin i_b}{c_b} \quad (3.4)$$

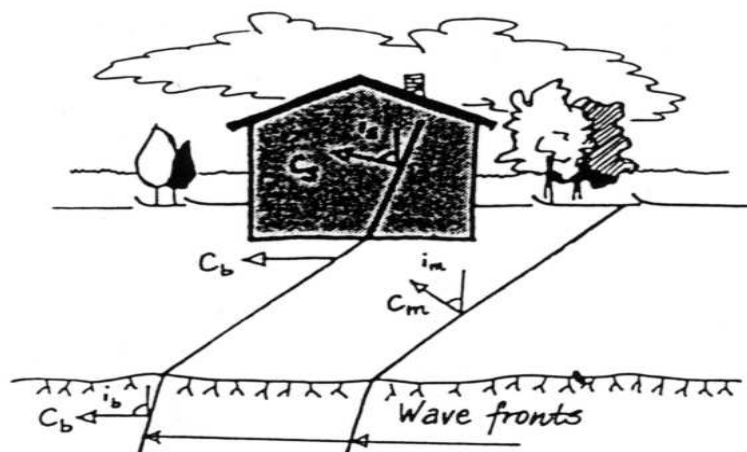
여기서, c_b =기반내의 전파속도, c_s =골조내의 전파속도이다.

그러므로, 건축물의 골조, 즉 구조체에 발생하는 인장응력은 식(3.5)와 같다.

$$\sigma_{ts} = \frac{v_{\max} E_s}{c_s} \quad (3.5)$$

여기서, E_s =골조의 탄성계수, $v_{\max}$ 와 c_s 는 골조 내에서 파의 진행방향 성분으로 측정된다.

아울러, 지하와 건축물과의 접촉면을 따라 수평 인장응력이 발생하며, 그 크기는 c_b 와 c_s 에 의해 좌우된다.



[그림 3.8] 지반과 건축물에서의 파(Wave)의 이동

$$\sigma_{th} = \frac{c_s \sin i_b}{c_b} \cdot \frac{v_h E_s}{c_b} \quad (3.6)$$

여기서, v_h 는 구조체를 통과하는 파의 진행방향에 대한 입자속도의 수평성분, c_b 는 암반 내 전파속도의 수평성분, c_s 는 구조체를 통과하는 파의 전파속도를 나타낸다. 또한, 가정에 따라, $\sin i_b \approx 1$ 이 된다.

식 (3.5)와 식 (3.6)을 비교하면, 일반적으로 $v_h < v_{\max}$, $c_b > c_s$ 임을 실험적으로 알 수 있다. 따라서, 인장강도는 종종 식 (3.5)에 따라 계산될 때 최대가 된다.

② 전단응력

전단응력이 발생하는 이유는 인장응력의 경우와 유사하다. 입자속도는 전단파의 진행방향에 수직한 방향으로 측정된다. 이 경우, 2종류의 전단응력이 발생하는데, 기초 하부에 발생하는 τ_h 와 골조 내에서 발생하는 $\tau_{\max}$ 이 그것이다.

$$\tau_h = \frac{c_s \sin i_b}{c_b} \cdot \frac{v_h G_s}{c_b} \quad (3.7)$$

$$\tau_{\max} = \frac{v_{\max} G_s}{c_s} \quad (3.8)$$

③ 휨응력

진동으로 유발되는 여러 응력 중 휨응력이 가장 지배적일 경우의 예로서 교통 진동을 들 수 있을 것이다. 이러한 현상은 주로 진흙이나 모래와 같이 느슨한 토양에 기초를 둔 저층 건축물에서 발생하는데, 이러한 지반에서는 표면파의 전파속도가 매우 낮고 파의 길이가 건축물의 스패와 유사하기 때문이다.

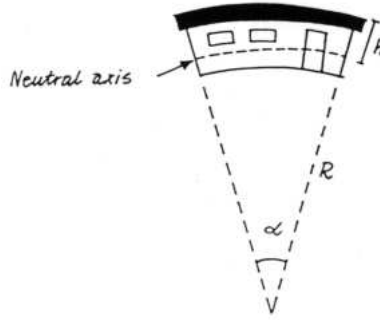
만약, 표면파를 정현함수로 나타낼 수 있다고 가정한다면, 파의 마루에 대한 가장 작은 휨 반경은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{\min} = \frac{c^2}{A} \omega^2 = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} \quad (3.9)$$

여기서, c =파동의 전파속도, A =변위의 크기, ω =각 진동수, λ =파장을 나타낸다.

이 경우, 상대 변형도 ε 은 식 (3.10)으로 주어지며, h 에 대한 정의는 [그림 3.9]와 같다.

$$\varepsilon = \frac{(R+h)\alpha - R\alpha}{R\alpha} = \frac{h}{R} \quad (3.10)$$



[그림 3.9] 지반의 힘에 의한 건축물의 변형

식 (3.9)과 식 (3.10)으로부터 식(3.11)을 유도할 수 있다.

$$\varepsilon_{\max} = \frac{hA_v A \pi^2}{\lambda^2} \quad (3.11)$$

휨응력은 운동변위의 크기와 건축물의 높이에 비례하며, 파장의 제곱에 반비례함을 식 (3.11)을 통하여 알 수 있다. 원점에서는 이러한 휨응력이 표면파의 입자속도로부터 발생하는 신장 응력과 전단 응력에 더해진다. 파의 마루에 놓여 있는 주택의 경우, 변형이 접촉면에서의 입자운동으로부터 발생한다.

$$\varepsilon_t = \frac{2\pi A_h}{\lambda} = \frac{V_h}{c_R} \quad (3.12)$$

여기서, A_h =표면파의 수평변위, V_h =표면파의 수평방향 입자속도, λ =파장, c_R =표면파의 속도이다.

식 (3.11)과 식 (3.12)로부터 전체변형 ε_r 은 식 (3.13)과 같이 주어진다.

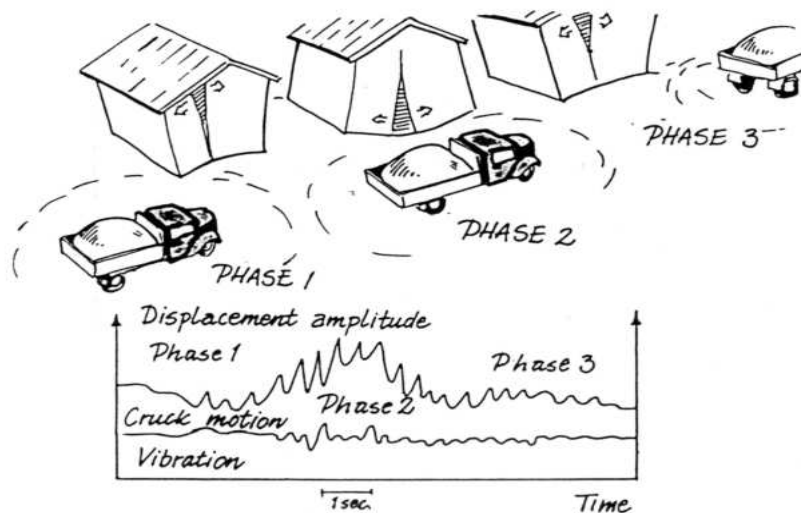
$$\varepsilon_r = \varepsilon_{\max} + \varepsilon_t = \frac{hA_v 4\pi^2}{\lambda^2} \cdot \frac{2\pi A_h}{\lambda} \quad (3.13)$$

④ 준정적 변형(Quasi-static strain)

중량의 차량이 느슨한 포화상태의 점토질 지반 위의 도로를 주행할 때, 차량진동으로 유발된 응력은 제방의 강성과 건조한 외곽의 점토질로 인하여 주위 수십 미터에 걸쳐 변형을 일으킨다. 심할 경우, 이로 인하여 지반이 침하 또는 함몰됨으로써 주변 건축물에도 영향을 미칠 수 있으며, 이를 [그림 3.10]에 표현하였다.

도로 근방에 위치한 건축물에 대해서는 이러한 지반의 침하가 의미를 가질 수 있지만, 만약 매우 긴 건축물의 전면이나 박공의 입면이 도로와 면한다면 이러한 효과는 그리 심각하지 않다.

이러한 진동에 대해서는 현재 잘 정립된 방법론이 존재하지 않기 때문에 지배적인 파장의 실제크기와 변위량을 측정하기란 매우 어렵다. 건축물에 유발되는 최종 응력은 운행차량의 종류 등에 따라 변하며, 구조적인 피로가 발생할 수도 있다는 사실이 고려되어야 한다. 이 경우, 건축물의 움직임은 0.1~0.5Hz 범위의 진동수를 갖는 영역에서 일어나므로, 일반적인 방법으로는 파악이 어렵다고 할 수 있다. 기존 연구결과에 의하면, 차량의 주행로와 연결된 균열 부위에서 측정된 가장 큰 변형은 약 0.15mm였던 것으로 보고된 바 있다.



[그림 3.10] 차량 통과시 건축물 내의 진동과 균열 양상

3.3 건축물 진동피해 인과관계 기준

3.3.1 국외 기준

1) 독일

독일에서는 1938년부터 체계적인 연구를 시작한 이래, 구조물에 대한 진동기준을 실증적이고 체계적으로 정리한 DIN 4150(Structural Vibration in Buildings)이 제정되었다.

DIN 4150은 지반특성에 대한 고려는 미흡하나, part 3에서 진동피해와 관련하여 구조물을 각 형식별로 구분하고 기초 레벨과 최상층 레벨에서 측정된 속도값에 대하여 공진이나 피로 효과를 배제한 조건에서의 기준을 제시하고 있다.

<표 3.21>, <표 3.22>는 1970년 제정된 DIN 4150이며, 1986년 개정본에서는 진동의 종류 및 주파수 영역대 등의 개념을 도입하여 보다 세분화된 최대진동속도를 <표 3.23>, <표 3.24>와 같이 제안하고 있다.

<표 3.21> DIN 4150 (1970년)

등 급	I	II	III	IV
건축물 형태	문화재 등 (역사적으로 매우 오래된 건축물)	주택,아파트,상가 (작은 균열을 지닌 건축물)	주택,아파트,상가 (균열이 없는 양호한 건축물)	산업시설용 공장 (철근콘크리트로 보강된 건축물)
진동속도 (cm/s)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0

* 충격진동에 관한 규정이며, 연속진동인 경우는 1/3으로 한다.

<표 3.22> 서독의 Vornorm DIN 4150 Teil 3 (1975년)

등 급	I	II	III
건축물 형태	주거용 건축물 : 공동주택, 연립주택	큰 강성을 갖고 있는 건축물	등급 I, II와는 다른 취약한 건축물
건축물 기초에서의 허용진동속도(cm/s)	≤ 0.8	≤ 3.0	≤ 4.0

* 대략 1~80Hz 부근에서의 허용진동 속도이며 때로는 315Hz까지 가능하다.

<표 3.23> 1986년 개정본 DIN 4150 - part3(short-term structural vibration)

건축물 등 급	건축물 형식	주파수별 허용진동속도 $V_R(\text{cm/sec})$			
		구조물 전체			
		기초			최상층 바닥면
		구조물의 반응주파수대			전 주파수 영역
		10Hz 이하	10 ~ 50Hz	50 ~ 100Hz	
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

* 100Hz 이상의 진동에서는 100Hz에 준한 값을 기준값으로 한다.

*1 : 발생빈도에 있어 피로피해(fatigue), 또는 발생시간 간격(interval) 측면에서 공진현상(resonance)을 일으킬 우려가 없는 진동을 말한다.

*2 : 직교 3축 방향(수평:x,y, 수직:z)의 성분을 동시에 측정한 성과 중에서 성분 구별 없이 가장 큰 것을 기준치로 한다. 수평성분의 어느 하나(x 또는 y)는 건물 외곽선과 평행한 방향을 택한다.

*3 : 측정점은 지하층 최외측 벽체를 기준으로 하고, 벽체 하단의 기초나 벽체 내부 또는 벽체의 우묵한 곳을 택한다. 지하실이 없는 경우는 건축물 외곽 벽체의 지면에 가까운 하단부를 기준으로 하되, 지표면에서 50cm 이상 떨어지지 않은 지점을 선정하여야 한다.

<표 3.24> 1986년 개정본 DIN 4150 - part 3(steady-state vibration)

종별	진 동 속 도	
	구조물 전체	바닥슬래브
	수평 성분 *1	처짐방향 성분
1종	0.5cm/s (0.2 inch/s) *2	1.0cm/s (0.39 inch/s)
2종	0.5cm/s (0.2 inch/s) *2	
3종	데이터 없음 *3	

*1 : 최상층에서의 연속 수평진동.

*2 : 기준치는 안전치 개념의 값으로 이를 초과한다고 해서 반드시 피해가 발생함을 의미하는 것은 아님

*3 : 통계조사자료가 없음을 의미함.

2) 일본

일본은 각 현마다 그 기준치가 다르나, 일반적으로 인구가 밀집된 지역에서는 발파진동값이 0.2cm/s를 넘지 못하도록 규제하고 있으며, 특히 야간에는 그 규제치를 더욱 엄격하게 적용하고 있다.

전반적으로, 일본의 기준은 건축물에 대한 피해보다는 인체피해를 대상으로 한 규제이므로 매우 엄격한 경향을 보이고 있다.

<표 3.25>와 <표 3.26>은 일본 두 지역에서의 진동속도 허용치에 대한 예를 나타낸 것으로, 사용척도 상에 다소의 혼선이 있는 것을 확인할 수 있다.

<표 3.27>은 특정 건설작업의 진동 권고기준으로서, dB(V)의 척도를 사용하여 인체감응과 관련한 규제를 시행하고 있다

<표 3.25> Osaka 지역의 진동허용 수준

지역 구분	주간(cm/s)		야간(cm/s)	
공 업	7~22시	0.15	22~7시	0.07
상업, 준공업	7~22시	0.15	22~7시	0.05
주 거	8~20시	0.15	20~8시	0.03
공장적지	7~22시	0.15	22~7시	0.05
기 타	8~20시	0.15	20~8시	0.03

<표 3.26> Shinnaisenken 지역의 진동허용 수준

(단위 : cm/s)

지역 구분	주간 8~18시	야간 6~8시, 18~23시	심야 23~6시
주거전용	0.03	0	0
주 거	0.03	0.03	0
상업, 준공업	0.09	0.06	0
공 업	0.12	0.09	0.03
공업전용	0.12	0.12	0.09
기 타	0.06	0.03	0

<표 3.27> 특정 건설작업의 진동권고기준(일본)

진동레벨	작업시간		1일 작업시간		최대작업 일수	일요일, 공휴일 작업
	제1호구역	제2호구역	제1호구역	제2호구역		
75dB(V)	오후7시 - 오전7시 작업금지	오후10시 - 오전6시 작업금지	10시간 이하	14시간 이하	연속 6일 초과 못함	금지

※ 비고

1. 데시벨이란 계량법(1992년 법률 제51호) 별표 2에 규정하는 진동가속도레벨의 계량 단위를 말한다.
2. 진동의 측정은 계량법 제71조의 조건에 합격한 진동레벨계를 사용하여 연직방향으로 시행한다. 이 경우 감각보정회로는 연직진동특성을 이용하는 것으로 한다.
3. 진동 피크업의 설치장소는 아래와 같이 한다.
 - 가. 완충물이 없고 또한 충분한 다짐 등이 시행된 단단한 장소
 - 나. 경사 및 요철이 없는 수평면을 확보할 수 있는 장소
 - 다. 온도, 전기, 자기 등의 외부조건의 영향을 받지 않는 장소
1. 진동의 크기는 특정작업장소의 부지경계선에서 측정한 값이다.
2. 진동측정방법은 JIS C1510 에 의한다.
3. 지역구분은 아래와 같다.
 - 제1호구역은 도시계획법상 용도지역구분으로서 제1종 주거전용지역, 제2종 주거전용지역, 주거지역, 근린상업 상업 준공업지역으로서 상당수의 주거가 집합된 구역, 학교·병원 등으로부터 주위 80m 에 해당지역이다.
 - 제2호 구역은 제1호 구역이외 지정구역이다.
4. 75dB(V)를 초과하는 특정건설작업에 있어서는 개선권고명령을 행사한다.
5. 재해발생 지역일 때는 적용에서 제외한다.

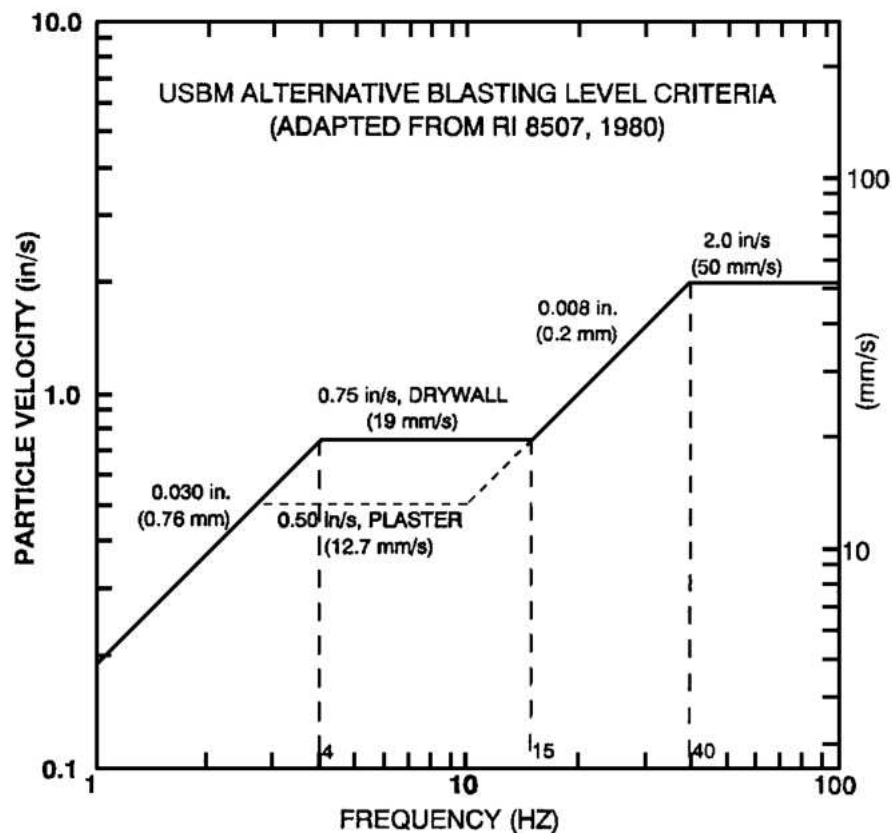
3) 미국

미국의 경우 발파진동에 대한 연구가 주로 미광무국(USBM)을 중심으로 이루어졌는데, 1971년 미광무국에서 자체 연구결과와 함께, 여러 다른 연구자들의 연구결과를 통계적 방법을 도입하여 해석하였으며, 건축물 피해와 관련하여 최대 진동속도 5.0cm/s는 안전한계(damage criterion), 13.8cm/s는 경미한 한계(minor damage), 19.4cm/s는 상당한 한계(major damage)로 정의하였다. 1980년에 Siskind

등에 의한 보고서에서는 진동속도에 대한 주파수의 영향을 고려하여, 40Hz 이상의 진동수를 갖는 발파진동에 대해서는 5.0cm/s를 허용치로 적용할 수 있으나, 40Hz 이하의 주파수를 갖는 발파진동에 대해서는 1.2cm/s로 낮추어야 할 것으로 제안하였다.

상기 결과에 근거하여 USBM에서 제안된 주거용 구조물에 대한 발파진동의 안전 수준은 최대진동속도 1.2cm/s에서 5.0cm/s이다. 주택에 전달되는 진동은 주파수와 구조물 형식에 영향을 받으며, 특히 연약지반에 낮은 주파수의 진동이 작용할 경우 그 영향이 큰 것으로 지적하였다.

한편, USBM에서 제안된 기준은 주로 단층 목조주택을 대상으로 한 결과로서 외벽의 회벽 모르터 등에서 발생하는 결함을 기준으로 평가하였다.



<그림 3.11> USBM 발파 피해수준에 대한 기준

4) 스웨덴

스웨덴 표준은 건축물에 영향을 주는 발파진동의 수준을 결정하기 위한 것으로 세 성분의 진동속도 값을 계측하여야 하며, 건물의 기초지반에서 계측하도록 규정하고 있다. 이 기준은 1989년에 승인되고, 1991년 한차례의 개정을 거쳤다.

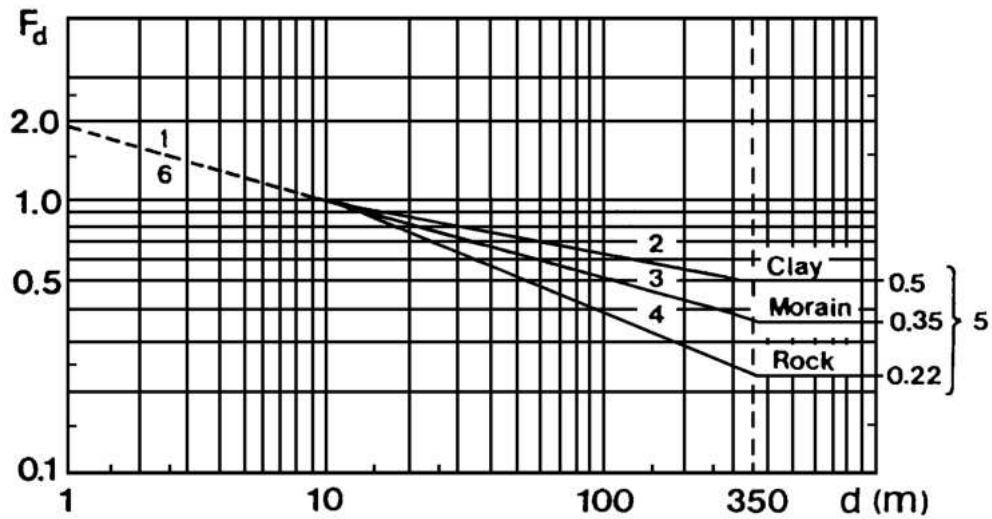
기준값 v 는 다음 식과 같이 규정한다.

$$v = v_0 \times F_k \times F_d \times F_t \quad (3.14)$$

여기서, $F_k = F_b \times F_m$ 로 하며, <표 3.28>과 <그림 3.12>에 의해 결정된다.

<표 3.28> 기준값 및 계수

분 류	등급	내 용	기준값/계수
진동속도 v_0	1	점토, 자갈층	1.8(cm/s)
	2	화석, 슬레이트, 연약한 석회석	3.5(cm/s)
	3	강한 석회석, 사암, 편마암, 화강암, 현무암	7.0(cm/s)
건축물 계수 F_b	1	중량급 건축물	1.70
	2	산업, 상업건물	1.20
	3	표준 주거 건물	1.00
	4	교회, 박물관 등 예민한 건물	0.65
	5	피해를 받기 쉬운 상태의 역사적 건축물	0.50
건축재 계수 F_m	1	보강 철근 콘크리트	1.20
	2	콘크리트, 벽돌	1.00
	3	경량골재 콘크리트	0.75
	4	인조 석재 벽돌	0.65
공사기간 계수 F_t	1	터널 지하공동, 도록 굴착 등 건설	1.0
	2	채석, 광산 작업	0.75~1.0



<그림 3.12> 거리 계수 F_d

스웨덴 기준은, 식 (3.14)와 같이 건물의 크기 및 구조형식, 지반조건과 함께, 발파가 진행되는 공사종류, 발파시점과 측정부위까지의 거리 등 매우 다양한 사항을 변수로 하여 정해졌다고 할 수 있다.

5) 스위스

<표 3.29>와 같이, 스위스 Norm 640 312a에서는 발파진동, 기계진동, 건설 및 교통진동 등이 건물에 미치는 영향을 평가하였다. 이 규정은 건물의 민감도를 네 등급으로 설정하였고, 다시 고층과 지하층을 구분하였다. 분류에서 결정적인 기준이 되는 점은 각 부재의 민감도로서 건축구조 양식 및 기타 요소, 예를 들어 건축자재, 건물 상태, 외벽처리, 회칠 등으로부터 결정되어 졌다. 계측된 값이 기준치 이하에 있으면 적은 피해가 발생할 가능성이 없고 기준치의 30%를 초과하는 몇 번의 진동으로도 피해가 유발될 확률은 낮은 것으로 평가하였으며, 기준치의 2배의 값이 작용한다면 피해의 가능성이 있게 된다.

<표 3.29> SN 640 312a(1992)

(단위 : cm/s)

종 별	구조물의 종류	빈도	주파수 범위(Hz)		
	지상층 건물 / 지하 건축물		< 30Hz	30~ 60Hz	> 60Hz
1	지상층 건물 해당 없음 / 철근 콘크리트 혹은 철제 교량 철근콘크리트, 콘크리트, 축벽으로 된 지지벽 견고한 암석 혹은 잘다져진 연약암내에 개착된 갱 도, 터널, 지하공동, 수갱	가끔씩 자주 계속적	3등급의 3배까지 허용		
2	철근콘크리트의 상용 및 생산업체 건축물(대개의 경우 외벽 모르터칠 없음) massive하게 지어진 사일로, 탑, 높은 굴뚝 / 연약암반내 지하 공동, 터널, 수갱, 관로 지하 주차시설 지표가까이 설치된 각종 관로 건식 축벽	가끔씩 자주 계속적	3등급의 2배까지 허용		
3	콘크리트, 철근콘크리트, 벽돌로 조적된 주거건물 조적 혹은 인공적 건축자재에 모르터칠로 된 사무 실, 학교, 병원, 교회 건축물 저장소, 주철배관, 민감한 케이블 지하동굴, 터널의 중간천정 및 차도용 포장	가끔씩 자주 계속적	1.5 0.6 0.3	2.0 0.8 0.4	3.0 1.2 0.6
4	회벽 주택, 볼트식 구조물, 3등급 건물이 개축 혹 은 새로이 단장된 건축물 역사적 보호 건축물 / 오래된 납 케이블, 주철배관	가끔씩 자주 계속적	3등급의 값과 1/2수준의 사이의 값		

* : 8Hz 이하의 주파수에서는 최저 기준치를 적용

* : 150Hz 이상의 주파수에서는 더 큰 값의 기준치를 적용할 수 있다.

참고로, 이전 스위스의 기준은 <표 3.30>과 같다. 이전 기준에서도 구조물을 형식에 따라 분류하고 진동원을 발파진동과 교통진동으로 구분하였으며, 주파수의 범위에 따라 허용기준을 정하고 있다. 역사적 가치가 있는 문화재나 기타 진동에 민감한 구조물은 발파진동의 경우, 10~60Hz 범위에서는 0.8cm/s, 60~90Hz 범위에서는 0.8~1.2cm/s를 허용기준으로 하였으며, 교통 및 기계 진동의 경우, 10~30Hz 범위에서는 0.3cm/s, 30~60Hz 범위에서는 0.3~0.5cm/s를 허용기준으로 정하고 있다.

<표 3.30> 건축물의 진동에 대한 기준

종 별	구조물의 종류	발파진동		교통/기계 진동	
		주파수 범위(Hz)*	입자속도 (cm/s)	주파수 범위(Hz)**	입자속도 (cm/s)
1	철근 콘크리트구조 및 철골구조(모르타르 피복 안한 상태)로 된 공장, 상가 건축물, 옹벽, 교량, 탑구조, 노출배관구조, 콘크리 트 피복을 하거나 안한 지하공동, 터널, 수 직갱 등의 지하구조.	10~60	3.0	10~30	1.2
		60~90	3.0~4.0	30~60	1.2~1.8
2	콘크리트로 된 기초벽 및 복공이 있는 건 축물 : 인공석재나 다듬돌 또는 콘크리트로 된 지상지하연결벽, 다듬돌로 된 옹벽, 흙 지반에 설치된 배관, 벽돌피복된 지하공동, 터널, 수직갱 등 지하구조물, 토사지반에 매설된 관로.	10~60	1.8	10~30	0.8
		60~90	1.8~2.5	30~60	0.8~1.2
3	콘크리트로 된 기초벽 및 지하실 복공이 있는 건축물, 지상층에 있는 목재 발코니, 인공석 재료로 된 지상, 지하 연결벽.	10~60	1.2	10~30	0.5
		60~90	1.2~1.8	30~60	0.5~0.8
4	특별히 진동에 민감하거나 보호해야 할 구 조물.	10~60	0.8	10~30	0.3
		60~90	0.8~1.2	30~60	0.3~0.5

* : 작은 값은 60Hz에 대한 값, 큰 값은 90Hz에 대한 값. 그 중간은 직선적으로 변화.

** : 작은 값은 30Hz에 대한 값, 큰 값은 60Hz에 대한 값. 그 중간은 직선적으로 변화.

6) 폴란드

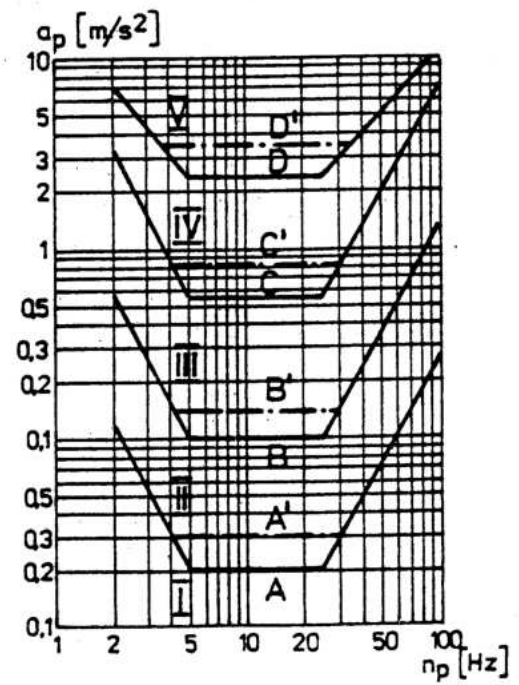
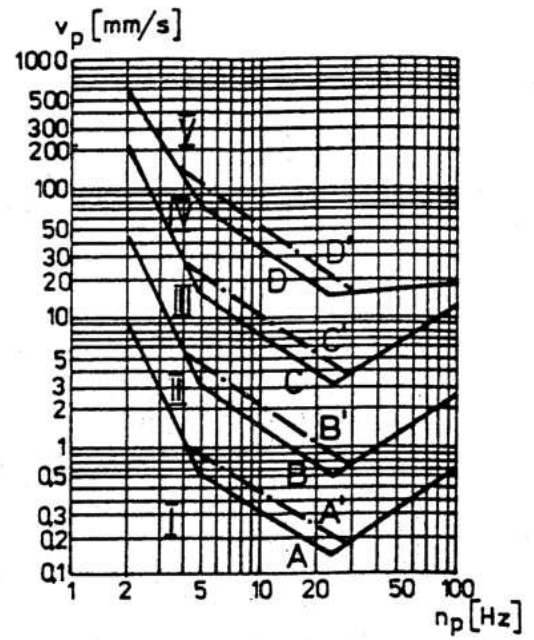
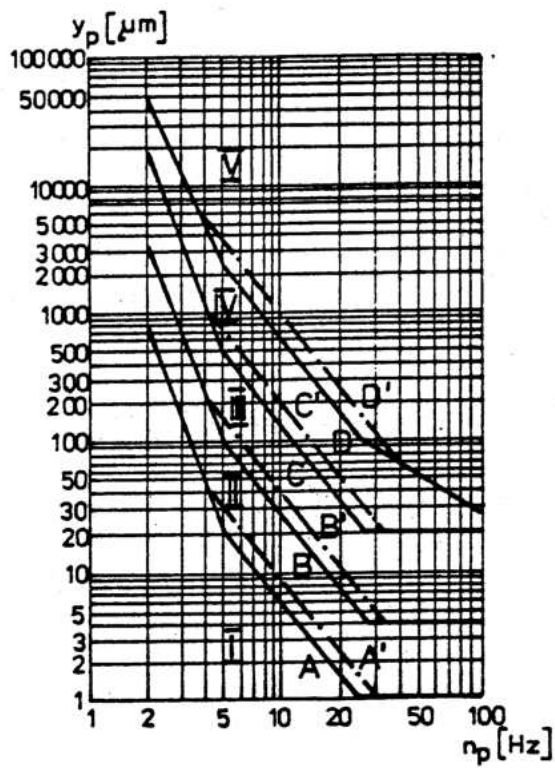
폴란드 기준(SWD)은 전통적인 주거 형식의 건축물만을 대상으로 제안된 기준으로서, 크게 2개의 그룹으로 건축물을 분류하여 기준을 제안하고 있으며, 진동의 적용 수준을 5개의 영역으로 구분 적용하고 있다는 점에 있어 다른 기준들의 취약점을 다소 개선시킨 기준이라 할 수 있다. 건물에 대한 그룹별 구분은 <표 3.31>과 같으며, <표 3.32>는 5개의 영역에 대한 구분을 나타낸 것이다. 또한, 이 기준에서는 주파수별 진동의 제한값을 도식화하여 자세히 제안하고 있는데 <그림 3.13>은 이를 나타낸 것이다.

<표 3.31> 건물의 그룹별 구분

구분	피 해 수 준
SWD-I	1 내지 2층 규모이고, 평면치수가 작은 소규모 건축물
SWD-II	5층까지의 다층 건축물로서, $h/b \leq 2$ 인 조건을 만족하는 건축물 여기서, h는 지면 위 건축물의 높이, b는 최소 평면치수임.

<표 3.32> 진동피해 수준에 따른 구분

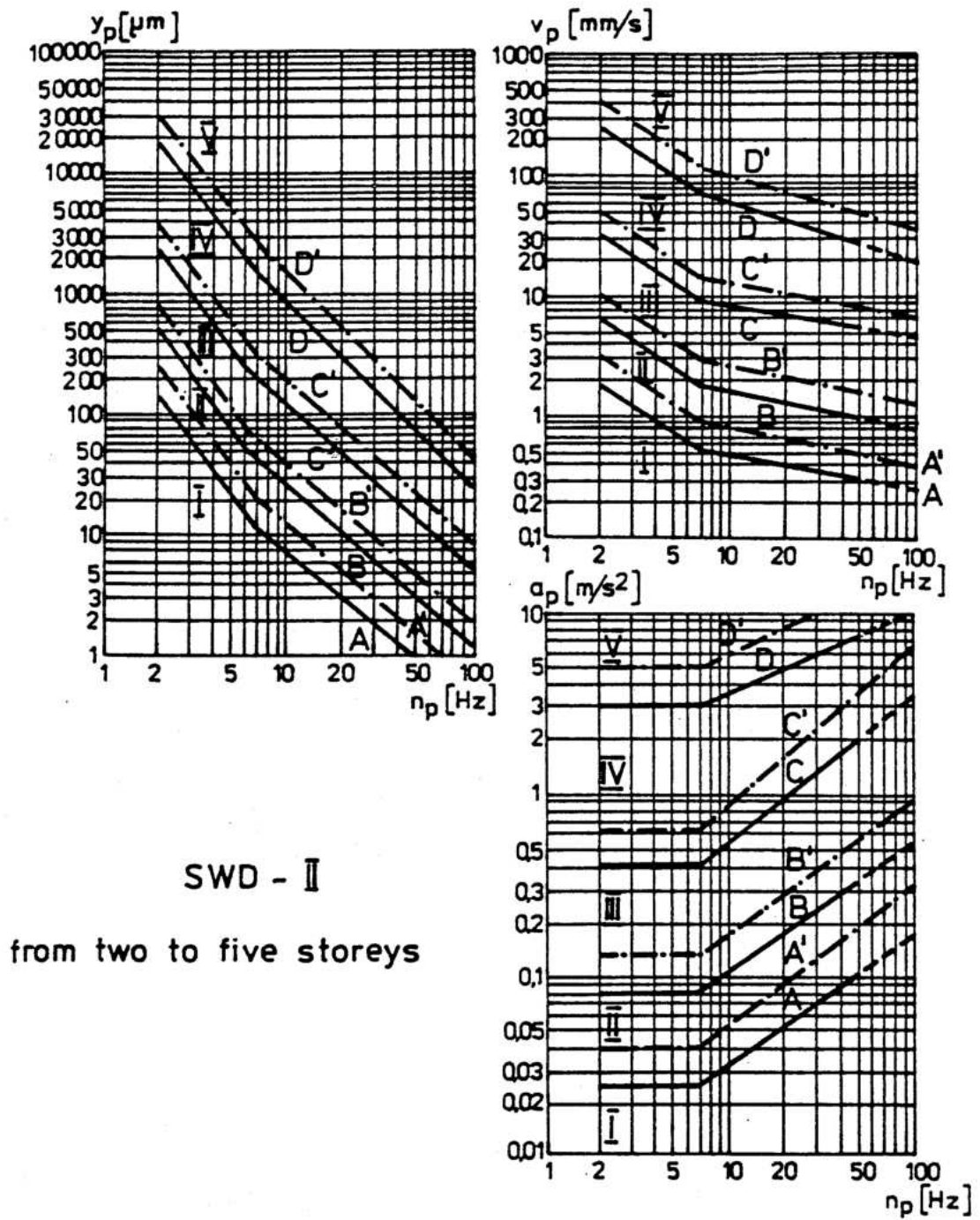
구분	피 해 수 준
Zone I	건축물에 피해가 없는 진동
Zone II	건축물에는 피해가 없으나, 작용시간에 따라 모르터나 플라스터에 초기 균열이 발생할 가능성이 있는 진동.
Zone III	건축물에 대한 유해진동. 건축물의 구조요소에 국부적인 균열이 발생할 수 있음. 이러한 진동은 건축물을 취약화하여 동적인 하중에 대한 저항성을 감소시킴. 플라스터나 모르터의 탈락이 있을 수 있음.
Zone IV	건축물에 유해한 진동. 다수의 균열이 발생되고, 건축물의 벽체나 다른 부재들에 국부적인 피해 발생. 벽체에 매달려있는 물체가 떨어질 수 있음. 천장의 탈락, 목조반자가 벽체로부터 이탈될 가능성 있음. 진동원을 제거하거나 진동효과를 감소시킬 필요 있음.
Zone V	벽체나 바닥슬래브의 붕괴 등 건축물에 매우 심각한 유해요인이 되는 진동. 사람에게 위험한 상태. 이러한 진동레벨이 예상된다면 건축물을 사용할 수 없음.



SWD - I
for one, two floors

(a) SWD-I 그룹에 적용되는 기준

<그림 3.13> 진동제한 기준



SWD - II

from two to five storeys

(b) SWD-II 그룹에 적용되는 기준

<그림 3.13> 진동제한 기준(계속)

7) 기타

영국은 인구조밀 지역의 터널 발파시에는 1.0cm/s, 인구가 드문 지역에서는 2.5cm/s로 진동의 허용기준치를 두고 있으며, 주파수 12Hz 이하인 노천 석탄광 발파에 대해서는 1.2cm/s의 허용기준을 채택하고 있다.

오스트리아는 주파수 15Hz 이하의 진동에 대해서는 변위를 기준으로 0.2mm를 허용기준으로 하고, 15Hz 이상에 대해서는 진동속도의 실벡터합을 기준으로 1.9cm/s를 채택하고 있다.

ISO에서 제시한 진동허용기준은 인체에 대한 기준값으로, 전신진동에 대한 인체의 노출과 건물진동에 대한 평가로 나누어 평가하고 있다.

기타, 각 국 학자들에 의한 진동피해 연구 결과는 다음과 같다.

캐나다의 Edwards와 Northwood는 10cm/s 이하의 진동속도에서는 피해가 일어나지 않으며 10~12cm/s에서는 건축물의 피해가 우려된다고 하였으며, 안전율을 고려하여 진동속도 허용한계로 5cm/s가 적당하다고 보고하였다. 한편, Siskind 등(1980,1981)은 미세 가시균열의 발생에 대한 입자속도 하한 수준에서 균열 발생의 가능성이 5% 이하인 경우를 12mm/s(0.5in./s)인 것으로 발표하였는데, 이것은 머리카락 굵기의 균열이 확장되는 한계균열이 발생할 하한으로 볼 수 있다. 또한, 높은 진동수대역(≥ 40 Hz)의 피해자료를 확률적으로 분석한 결과 입자속도가 7.5cm/s(3in./s)에 달할 때까지 작은 균열이 발생할 확률은 5%가 되지 않는다는 것을 보여주었다.

교통진동의 경우 Wiffin 과 Leonard(1971)는 건축 구조물의 외관을 해치는 피해는 진동속도가 5mm/s를 초과할 때이며 구조적 피해는 10mm/s를 초과할 때 생긴다고 하였다. 또한, 교통진동은 대부분 지반진동보다는 공기를 매질로 한 음파로서 전달된다고 주장하였다. 영국의 도로교통연구소에서 연구된 바로는 보통밀도의 사질지반에 세워진 건축물을 4개월간 교통진동으로 시뮬레이션한 결과, 350만대의 화물수송차량을 의미하는 진동속도 1~4mm/s로 영향을 주었으나 눈에 띄는 피해는 없었다고 보고하였다.

<표 3.33>~<표 3.35>는 각국 학자들에 의한 실험결과와 측정사례를 정리한 것이다.

<표 3.33> 지반에 따른 진동속도와 피해정도(Langefors, 1978)

진동범위	지하수 수준이하의 점토, 모래, 자갈	회석, 슬레이트, 연약한 석회석	강한 석회석, 석영질 사암, 편마암, 화강암, 현무암	피해정도
종파의 전파속도 (m/s)	300~1500	2000~3000	4500~6000	
발파에 의한 진동속도 (cm/s)	0.4~1.8	3.5이하	7.0이하	피해없음
	0.6~3.0	5.5	11.0	무시할 수 있는 피해 (피해한계)
	0.8~4.0	8.8	16.0	균열생성
	1.2~6.0	11.5이상	23.0이상	상당한 피해발생

<표 3.34> 지반에 따른 허용진동수준(ESTEVEs, 1978) - 포르투갈

건물의 종류	허용진동치(Vector Sum Peak Particle Velocity, cm/s)		
	결집력이 없는 토양 및 자갈의 혼합	어느정도 결집력이 있는 토양, 균일하고 높은 등급의 모래	결집력이 있는 토양, 암석
	P<1000m/s	P=1000~2000m/s	P>2000m/s
유적, 병원, 고층빌딩	0.25	0.5	1.0
통상적인 건물	0.5	1.0	2.0
철근콘크리트, 내진건물	1.5	3.0	6.0

<표 3.35> 각 연구자별 진동 허용한계

연 구 자	변 수	허 용 한 계
Langefors, et al, 1958	속도	2.9inch/sec(≒7.3cm/sec)
Edwards & Northwood, 1960	속도	5cm/sec
Dvorak, 1962	속도	2cm/sec
Northwood, et al, 1963	속도	10cm/sec
Devine, 1966	변위와 환산거리	0.03", 50ft/lb 1/2
Nicholls, et al, 1971	속도	5cm/sec
Wiss & Nicholls, 1974	속도	7~20inch/sec
Bogdanoff, et al, 1975	속도	11cm/sec
Bergling, et al, 1977	속도	11~30cm/sec for > 400Hz
Esteves, 1978	속도(지반조건)	0.25~6cm/sec
Siskind, et al, 1980	속도와 주파수	5cm/sec for > 40Hz 1.2cm/sec for < 40Hz

3.3.2 국내 기준

1) 소음, 진동 규제법

국민의 생활, 정신적 안정을 위하여 공장, 도로, 철도 등으로부터 발생하는 소음·진동으로 인한 피해를 방지하고, 소음·진동을 적정하게 관리, 규제하기 위하여 소음·진동규제법이 제정되어, 1997년 개정·보안되었다. 이 법의 적용범위는 공장 소음·진동, 생활 소음·진동(건설 소음·진동이 생활소음·진동에 포함됨), 교통 소음·진동, 항공기 소음 등의 규제와 관리이다.

이 중 본 보고서에서 다루는 진동관련 기준은 소음진동 규제법 제3장의 ‘건설 소음에 대한 소음·진동 규제 기준’으로, 그 내용은 <표 3.36>과 같다.

소음·진동에 대한 기준치도 대상 소음레벨 및 대상 진동레벨로 설정되어 건설공사장 소음의 관련 규제기준은 1994년 11월에 소음·진동규제법 시행규칙에 의해 생활 소음과는 다르게 분류되어 제시되었으나, 1997년 생활 소음과 동일한 범위에 포함되어 개정하였다.

<표 3.36> 생활진동 규제기준

(단위 : dB(V))

시 간 별 대 상 지 역	주 간 (06:00—22:00)	심 야 (22:00—06:00)
주거지역, 녹지지역, 준도시지역 중 취락지구 및 운동·휴양지구, 자연환경보전지역, 기타지역안에 소재한 학교·병원·공공도서관	65이하	60이하
기 타 지 역	70이하	65이하

- 비고 : 1. 진동의 측정방법과 평가단위는 소음·진동공정시험방법에서 정하는 바에 따른다.
 2. 대상지역의 구분은 국토이용관리법(도시지역의 경우에는 도시계획법)에 의한다.
 3. 규제기준치는 대상지역을 기준으로 하여 적용한다.
 4. 공사장의 진동규제기준은 주간의 경우 1일 최대작업시간이 2시간이하일 때는 +10dB을, 2시간초과 4시간이하일 때는 +5dB을 규제기준치에 보정한다.

소음진동규제법에 의한 규제기준은 단위를 소음의 경우 L_{eq} dB(A)에서 dB(A)로, 진동의 경우 L_{eq} dB(V)에서 dB(V)로 변경하였다. 또한, 건설 소음·진동에 대한 기준치도 대상 소음레벨 및 대상 진동레벨로 설정되어 있으므로 측정 소음레벨과 암소음 레벨을 측정하여 산정해야 한다.

건설공사에서 <표 3.37>의 기계·장비를 2일 이상 사용하고, <표 3.38>에서 정하는 규모의 특정공사를 시행하는 경우에는 관할 시·도지사에게 특정공사의 개요, 방음, 방진시설의 설치내역 및 도면 및 기타 소음·진동 저감 대책에 대해서 신고하여야 한다.

<표 3.37> 특정공사의 사전 신고 대상 기계·장비의 종류

1	항타기, 항발기, 항타항발기(압입식 항타항발기는 제외)
2	병타기
3	착암기
4	공기압축기(공기토출량 2.83 m ³ /분 이상의 이동식인 것)
5	건축물 파괴용 강구
6	브레이커(휴대용 제외)
7	굴삭기
8	발전기
9	로우더
10	압쇄기

* 저소음, 저진동을 발생하는 기계·장비라고 환경부 장관이 인정하는 기계, 장비라고 인정되는 경우에는 신고 대상에서 제외한다.

<표 3.38> 특정공사의 사전 신고 대상 공사

1	연건평이 300 제곱미터 이상인 건축물의 건축·해체 관련 공사
2	구조물의 용적합계가 500제곱미터 이상 또는 면적합계가 500제곱미터 이상인 토목건설공사
3	면적합계가 500제곱미터 이상인 토공사·정지공사
4	총 연장이 100미터 이상 또는 굴착 토사량의 합계가 100제곱미터 이상인 굴정공사
5	종합병원, 공공도서관, 학교, 공동주택 등의 부지 경계선으로부터 직선거리 50m 이내에서 시행되는 공사
6	도시계획법 제17조 제1항 제1호의 규정에 의한 주거지역에서 시행되는 공사

2) 지하철 공사

<표 3.39>는 서울 및 부산 지하철공사 기준으로, 독일의 DIN 4150(1971년) 규정에 의한 허용진동값을 기초로 하여 작성되었으며, 외국의 기준들에 비해 상당한 안전율을 보이는 수준이다.

<표 3.39> 서울과 부산 지하철 기준(충격진동의 경우)

등 급	I	II	III	IV
건물형식	문화재 (역사적으로 매우 오래된 건물)	주택, 아파트, 상가 등 (작은 균열을 지닌 건물)	주택, 아파트, 상가 등(균열이 없는 양호한 건물)	산업시설용공장 (철근콘크리트로 보강된 건물)
최대속도 허용치 (cm/sec)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0

3) 노동부 고시 94-26호

발파구간 인접 구조물에 대한 피해 및 손상을 예방하기 위하여 다음 <표 3.40>에 의한 값을 준용한다.

<표 3.40> 노동부 고시 94-26호

건물분류	문화재	주택 아파트	상가 (금이없는 상태)	철골 콘크리트 빌딩 및 상가
건물기초에서의 허용 진동치 (cm/sec)	0.2	0.5	1.0	1.0 ~ 4.0

* 기존 구조물에 금이 있거나 노후 구조물 등에 대하여는 상기표의 기준을 실정에 따라 허용범위를 하향 조정하여야 한다.

** 이 기준을 초과 할 때에는 발파를 중지하고 그 원인을 규명하여 적절한 패턴(발파 기준)에 의하여 작업을 재개한다.

4) 중앙환경분쟁조정위원회

중앙환경분쟁조정위원회에서는 진동에 의한 건축물 피해의 인과관계 판단을 위한 가이드라인으로서 <표 3.41>을 활용하고 있다.

<표 3.41> 진동과 건물측 피해의 인과관계 판단을 위한 가이드라인

진동구분 \ 건물구분		문화재 ₃	주택 · 상가			비 고
			1등급 ₄	2등급 ₅	3등급 ₆	
1. 충격진동 ₁ 시의 인과관계 판단기준						
가. 진동강도(cm/sec)		0.2이상	0.3이상	0.5이상	1.0이상	
나. 충격진동시의 영향범위		70m이내	53m이내	37m이내	23m이내	폭약1kg 사용시
2. 연속진동 ₂ 시의 인과관계 판단기준						
가. 진동강도(cm/sec)		0.07이상	0.1이상	0.17이상	0.33이상	독일 : 0.17 일본 : 0.16
나. 진동원으로 부터의 거리	진동햄머 (대형)	50m이내	45m이내	40m이내	31m이내	Lo = 89dB (0.79cm/sec)
	굴 착 기 (0.7m)	31m이내	26m이내	22m이내	15m이내	Lo = 91dB (1.00cm/sec)
	브레이커 (유압식)	13m이내	10m이내	7m이내	4m이내	Lo = 82.5dB (0.38cm/sec)
* 연속진동 허용치는 충격진동 허용치의 1/3 적용						
1」 충격진동 : 화약을 써서 발파작업을 하는 경우의 진동						
2」 연속진동 : 향타기, 향발기, 파쇄기, 브레이커, 착암기, 백호, 도저, 굴착기 등을 사용하여 작업을 하는 경우의 진동						
3」 문 화 재 : 역사적으로 매우 오래된 건물						
4」 1 등 급 : 건축 후 15년 이상의 노후건물						
5」 2 등 급 : 건축 후 5년 이상이며, 작은 균열을 지닌 건물						
6」 3 등 급 : 건축 후 5년 미만이며, 균열이 없는 새 건물(철근콘크리트 건물 포함)						
7」 (공식) $V=100\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.46}$						
V : 진동치(kine) W : 폭약량(kg) D : 폭원으로 부터의 거리						
8」 (공식) $Y=L_0-10\log_R-AR$						
Lo : 1m에서의 진동레벨 A : 감쇄지수 R : 지점까지의 거리(m)						
9」 (공식) $Y=20\log V+91\left(8Hz\leq F\right)$						
V : 진동속도(cm/sec) Y : 진동레벨(dB(V))						

3.3.3 종합 의견

이상과 같이, 진동으로 인한 건축물 피해와 관련한 각 국의 기준을 검토한 결과, 축적된 자료를 바탕으로 자국의 사회·환경적 상황에 나뉠 것 부합하는 기준이 제시되어 있음을 알 수 있다.

미국의 경우에는 채광터널 등의 발파작업을 통해 얻어진 수년간의 자료를 바탕으로 진동피해의 기준이 제시되었으며, 그러한 상황에 따라 대부분 목조주택에 발생될 수 있는 마감재의 손상을 기준으로 하고 있다.

일본의 경우에는 지진이 자주 발생하는 지역인 관계로 발파나 건설장비 진동에 건축물 피해는 거의 다루어지지 않고, 주로 인체감응을 대상으로 한 진동 기준이 제시되어 있으며, 스위스에서는 도로교통위원회에서 교통량에 따른 진동관련 데이터를 중심으로 기준을 제정하였다.

각 국에서 제시되고 있는 진동관련 기준을 주요 항목별로 비교·검토한 결과를 <표 3.42>에 수록하였다.

<표 3.42> 각 국의 진동관련 기준 비교

	독일 DIN	미국 광무국	스웨덴	스위스		일본	Langefors	Esteves
				SN 620 312a	-			
단위	cm/s	in/s	cm/s	cm/s	cm/s	dB	cm/s	cm/s
측정기준	ppv	-	ppv	V _R	-	연직 성분	-	pvs
주파수분류	10/50/100	4/15/40	-	30/60	10/30/60 10/60/90	-	-	-
측정위치	○	-	○	-	-	○	-	-
구조물분류	○	-	○	○	○	-	-	○
진동원구분	shot term/ steady	발파	발파	발파/ 교통	발파/ 교통,건설	-	발파	발파
지반분류	-	-	○	-	-	-	○	○
공사기간	-	-	○	-	-	-	-	-
빈 도	-	-	-	○	-	-	-	-
기 타						인체 기준		

3.4 진동으로 인한 건축물 피해 인과관계 검토 기준(안)

건축물에 대한 진동의 영향을 예측하는 것은 매우 복잡한 문제이다.

진동으로 인한 건축물의 동적응답은 수많은 요인들에 의해 영향을 받으나, 현재의 방법들은 불규칙한 특성을 갖는 요인들에 대하여도 주관적인 접근방법을 취하는 경향마저 띄고 있는 것이 사실이다. 하지만, 분명히 알아야만 하는 것은 어떠한 경우에도 모든 종류의 건축물에 적용할 수 있는 통합된 평가방법은 존재할 수 없다는 점이다.

따라서, 다양한 건축물을 대상으로 진동피해를 평가하기 위해서는, 일부 국외 기준들에서 고려된 바와 같이 동적특성에 따라 건축물을 분류·평가하는 것부터 시작하는 것이 가장 바람직한 접근방법일 것이다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 진동피해 인과관계 검토 기준(안)을 동적영향에 대한 기존 연구결과와 여러 기준들을 근거로 국내 실정에 맞게 재조정하여 제시하고자 한다.

진동피해의 인과관계 검토 기준(안)을 제시함에 있어 다음과 같은 사항들이 고려·가정되었다.

전 절에서 살펴보았듯이 많은 나라들이 건축물에 대한 진동 영향을 예측하기 위한 기준이나 지침을 지니고 있으며, 일부를 제외하고는 주로 노천탄광이나 지하탄광, 건설발파 등과 같은 발생원으로부터의 진동을 주 대상으로 하고 있다.

피해발생과 관련한 안전한 진동수준에 대하여는 기준마다 상당한 차이를 나타내고 있는데, 이는 측정점, 실험대상, 안전성 등에 대한 근거가 각각 다르게 적용되고 있기 때문이다.

이 경우 가장 주목되는 것은 건축물에 미치는 실제적인 진동효과와 기준에서 적용되고 있는 수치 사이에 매우 큰 차이가 있다는 점으로, 이는 진동으로 인한 건축물의 피해를 주로 구조적 손상 측면에서 평가한 기존의 연구 결과와 달리, 기준이나 지침에서 제안한 값은 마감재 손상 등과 같은 피해를 그 대상으로 하고 있기 때문이다.

그러므로, 기준을 적용하는데 있어서 피해의 수준을 구분하여 평가하는 것은

피해 정도를 올바르게 판단하는데 있어 매우 중요한 사항임을 알 수 있다. 즉, 낮은 수준의 진동에서는 마감재 손상 등과 같은 건축적 피해만이 발생하게 되며, 이러한 경우에는 페인트를 다시 칠하거나, 도배, 또는 모르터와 플라스터의 균열 보수 정도의 비용만을 고려하여도 충분하다. 반면, 건축물에 높은 수준의 진동이 작용하였다면 피해는 구조적인 것이 되며, 배상액 또한 달라져야 할 것이다.

결국, 진동피해에 대한 이러한 구분은 피해의 정도와 비례하여 지불해야만 하는 비용의 예측을 용이하게 하며, 이에 대한 고려가 본 검토 기준(안)에서 반영되었다.

다음으로 고려되어야 하는 사항은 건설재료에 대한 것이다. 현재는 많은 기준들이 건설재료에 대한 구분을 반영하고 있지 않으나, 몇몇 연구결과들은 그 중요성을 시사하고 있다. Nadolski나 Wall의 연구에 의하면, 어떤 기준에서는 10 cm/sec라는 높은 진동속도를 허용하고 있지만, 0.1~0.5 cm/sec의 낮은 진동속도에서도 부분적 피해가 나타날 수 있다는 사실을 보여주고 있다. 이 경우 연구의 대상이 된 건축물들은 작은 주거건축물이나 상업용 건축물로서 주로 조적조이며, 이러한 건축물들은 지반진동의 결과로서 야기되는 동적인 하중에 대하여 설계되지 않았다는 점을 시사한다.

반면, 미국 탄광협회에서 수행한 수년간의 연구결과를 토대로 진동효과 문제를 다루고 있는 Siskind 등은 여전히 더 높은 진동속도 값을 허용하고 있는데, 이는 아마도 상기 연구에서 취급한 건축물의 구조형식이 타 연구에서의 대상물과 상이하다는 점에서 온 차이로 사료된다. Siskind 등의 연구는 주로 목조 건축물들을 대상으로 하고 있는데, 일반적으로 목조 건축물은 동적인 하중에 대하여 벽돌이나 블럭으로 구성된 조적조 건축물들과는 다르게 거동할 것이라고 판단되기 때문이다. 그러므로, 진동피해 기준은 건설재료에 대한 구분과 진동피해 수준에 대한 고려가 명확히 구분된 후 제시되어야 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

국내에서 많이 회자되고 있는 DIN이나 USBM 등과 같은 기준들이 실제로 이러한 사실을 고려하고 있음에도 불구하고 진동피해의 수준에 대해서는 구분 없이 적용되고 있다는 점이 개선점으로서 지적될 수 있다.

다음으로 주목되는 점은 측정점에 대한 것이다. 건축물의 피해를 평가하기 위

하여 기준으로 적용되는 진동의 척도는 최대 진동속도이다. 이 경우, 진동이 측정된 장소는 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 건축물 근처 지표면에서 측정된 진동과 건축물의 하부에서 측정된 진동은 그 진폭과 주파수 범위에 있어서 크게 다를 수 있다.

일반적으로, 건축물 근처 지표면에서 측정된 진동값은 같은 레벨의 건축물 내에서 측정된 진동값보다 더 높는데, 이는 건축물과 지반의 상호작용 때문이다. 또한, 진동 주파수의 변화는 지반과 건축물의 접점에서 발생하게 된다. 즉, 건축물 내부에서 측정된 진동은 일반적으로 지반에서 기록된 것보다 낮은 주파수를 가지며, 이 경우 건축물은 필터와 같은 작용을 한다. 따라서, 건축물의 고유 주파수와 같거나 거의 같은 주파수를 갖는 진동이 건축물로 전달되므로 파일향타와 같은 진동원의 경우에는 반드시 건축물 내부에서 측정된 진동이 유해진동의 예측을 위해 적용되어야만 한다. 반면, 탄광에서와 같이 다량의 폭발물에 의한 진동의 경우에는 진동궤적에서 특성의 변화와 지반으로부터 건축물로의 전달과정에서의 변화는 거의 무시할 정도이다. 즉, 이러한 진동원으로부터 방출된 커다란 에너지는 실무적인 관점에서 지반과 건축물의 접점에서 진동의 감소가 발생하지 않는 것으로 간주된다. 결국, 지반과 건축물 내부에서 측정된 진동 예측자료가 그 유해성 여부를 예측하는데 거의 동일한 결과를 낳는다. 이러한 관점에서 측정 위치에 대한 문제는 역시 여러 기준들의 허용 값들이 서로 상이한 수준을 나타내는 이유 중의 하나로서 작용될 수 있으나, 종종 간과되는 경향이 있다.

그러므로, 진동의 영향을 평가하는데 있어서는 기준 값을 적용하는데 따른 측정위치와 측정값의 수준(최대값 또는 RMS) 또한 반드시 명확히 제시될 필요가 있다.

그밖에 많은 기준들이 갖는 단점 중의 하나로 진동의 작용시간의 차이에 따른 구분이 부족하다는 점이 주목된다. 물론, 스위스 기준과 같이 예외적인 기준도 있다. 이 기준에서는 간접적인 방법으로 시간요소를 고려하고 있다. 또한, 기계나 교통진동과 같은 진동원에 대하여는 발파보다 더 낮은 진동수준이 동일한 건축물의 카테고리에 대하여 허용되고 있다. 허용 진동수준과 상응하는 진동수 범위는 진동원에 따라 좌우되며 대부분 10Hz-90Hz 사이를 한계로 하고 있다.

상기와 같은 검토와 가정에 근거하여 건물의 진동피해 인과관계 기준(안)을 <표 3.43>~<표 3.44>와 같이 제안한다. 본 기준(안)은 마감재 손상 등과 같은 건축적 피해에 대한 유해성 여부를 기준으로 제시된 진동수준을 <표 3.43>의 내용으로 하고 있으며, <표 3.44>에 의하여 건물의 노후도, 진동의 작용시간, 기초의 형식 및 지반의 영향 등에 의한 진동수준의 강화 여부를 가중치를 통하여 제한하고 있다.

진동수준을 결정함에 있어서, <표 3.43>은 독일의 DIN 4150 및 Norm 640 312a를 근간으로 한 것으로 건물의 재료별 특성 및 주파수별 특성에 따른 구분을 국내 실정에 맞게 재조정한 것이다. 특히, 건축물의 등급화는 분류된 건축물의 동적인 특성이 유사하다는 점과 동적인 하중에 대하여 설계되었는가의 여부에 따라 가능한 한 분류를 간략화하고자 하였으며, 주파수의 구분에 따른 진동수준은 최근의 연구결과에 따른 내용을 반영하여 결정하였다.

<표 3.44>는 폴란드 기준 및 Norm 640 312a를 근간으로 한 것이며, 건축물의 노후도, 진동의 작용시간, 지반상태 등에 따른 진동의 효과를 가중치로서 고려하도록 하였다. 대상건축물이 그룹 II에 해당되기 위해서는, 제반조건이 동 표의 그룹 II 항목에 제시된 4개 조건에 3개 이상 부합될 경우로만 한다.

아울러, 본 기준치를 초과하는 수준의 진동이 작용하였다고 하여 반드시 건축물 피해가 발생한다는 의미는 결코 아니며, 어느 정도의 인과관계가 인정될 수 있는 수준이라고 보는 것이 타당할 것이다. 또한, 본 기준치 이하의 진동 수준에서 피해 주장이 제기될 수도 있는 바, 어느 경우에건 관계 전문가의 자문은 필수적이라 할 것이다.

<표 3.45>는 본 기준(안)과는 무관하나, SWD(1986)의 내용을 준용한 것으로, 저자들의 견해로서 “진동 피해에 대한 구분이 비교적 합리적이다”라는 판단에 따라 참고적으로 수록한 것이다. 이에 대하여는 향후 보다 많은 실험결과와 연구실적을 토대로 수정·보완될 필요가 있는 것으로 판단된다.

<표 3.43> 진동피해 인과관계 검토 기준(안) (그룹 II의 경우)

건축물 분 류	건 축 물 형 식	주파수별 허용 진동속도 (cm/sec)		
		10Hz 이하	10Hz~50Hz	50Hz~100Hz
A	철근콘크리트, 철골조의 고층 건축물, 아파트 및 이와 유사한 형식의 건축물 (동적 하중에 대하여 설계된 건축물)	2.0	2.0~4.0	4.0~5.0
B	철근콘크리트, 철골조로서 상기 A항에 해당되지 않는 건축물(동적 하중에 대하 여 설계되지 않은 건물)	1.5	1.5~2.0	2.0~3.0
C	조적조 형식의 주거용 건축물 및 부속 건축물(저층 건축물) 또는 이와 유사한 형식의 건축물, 단층 의 주거용 목조 건축물	0.5	0.5~1.5	1.5~2.0
D	진동에 예민한 건축물, 취약건축물, 특별 한 보존가치가 있는 건축물(문화재 등)	0.3	0.3~0.8	0.8~1.0

- 1) 100Hz 이상의 진동에서는 100Hz에 준한 값을 기준값으로 함.
 2) 측정점은 최저층의 외측 벽체 또는 바닥슬래브를 기준으로 하고, 측정값은 직교하는 3축 방
 향의 성분들 중 최대값을 기준으로 함.

<표 3.44> 진동원, 진동경로 및 건축물의 상태에 따른 구분

구 분	그룹 I	그룹 II
건 축 물 상 태	피해부위를 지니고 있는 오 래된 건축물, 보수·보강되거나 증축된 건축물	무손상 건축물 구조적 변경사항 없음
재료와 건축물의 구조	조적조, 콘크리트조, 석조로 서 잘 구축되지 않은 건축물, 기초의 부실, 타이보의 부족, 바닥 처짐, 큰 개구부 또는 불규칙 개구부를 갖는 벽체	잘 지어진 조적조 또는 철근 콘크리트 건축물, 타이 보를 지닌 벽체와 일체로 연결된 강한 바닥슬래브
지반과 기초의 종류	낮은 강성의 지반(느슨한 모 래, 매립층), 불연속기초	강성이 큰 토양(단단한 토양) 시공이 양호한 기초
진동의 작용시간	장시간 또는 영구적인 진동	단시간의 진동
가 중 치	0.7	1.0

<표 3.45> 단계별 진동피해 수준

구분	피 해 수 준	가중치
1	건축물에 피해가 없는 진동	< 1.0
2	건축물 골조에는 피해는 없으나, 작용시간에 따라 모르터나 플라스터 등과 같은 마감재에 초기 균열이 발생할 가능성이 있는 진동	1.0
3	건축물 자체에 대한 유해진동. 구조요소에 국부적인 균열이 발생할 수 있음. 이러한 진동은 건축물을 약화시켜 동적인 하중에 대한 저항성을 감소시킴. 플라스터나 모르터의 탈락이 있을 수 있음	6.0
4	건축물에 대해 매우 큰 유해진동. 많은 균열이 나타나고, 벽체나 다른 부재들에 국부적인 피해 발생. 벽체에 매달려있는 물체가 떨어질 수 있음. 천장의 탈락, 목조반자가 벽체로부터 이탈될 가능성 있음. 진동원을 제거하거나 진동효과를 감소시킬 필요 있음	20
5	벽체나 바닥슬래브의 붕괴 등을 유발하는 등 건축물에 매우 심각한 유해요인이 되는 진동. 사람에게 위험한 상태. 이러한 진동수준이 예상된다면 건축물은 사용될 수 없음	20 <