

우리나라 지반진동 허용기준의 제정 및 적용에 관한 제안(Ⅰ): 구조물

Guideline on Limitation of Ground - Induced Vibration(Ⅰ): Structures

우 제 윤

한국건설기술연구원, 지반연구실

1. 서 론

근래 우리나라도 환경인식이 고양되고 쾌적한 생활추구의 욕구가 높아지면서 각종 토목·건축공사나 육상 교통·운송 차량체의 주행으로 인해 발생하는 지반진동으로 인한 구조물, 기기, 사람에 대한 진동폐해 민원이 다발하고 있다. 특히 최근에 들어서는 지하철 및 도로공사, 고층빌딩 및 대단위 아파트 건설 공사 등 진동다발 토건공사들이 도심지역 및 주거·공단 밀집지역 인근에서 급격히 증대함에 따라 진동·소음에 대한 집단 민원의 속출로 공사 수행에 많은 어려움을 겪고 있는 것은 주지의 사실이다. 또한 향후 도로의 교통량 및 중차량의 통행량과 지하철·철도의 운행량의 증가가 예측되고, 가까운 장래의 경부고속전철 운영을 감안할 때, 우리나라에서도 선진외국과 같은 교통진동의 폐해를 경감·방지할 수 있는 실질적 대책의 수립 필요성이 날로 절실해져 가고 있다.

그러나 아직까지 우리나라에는 특히 이러한 지반진동 폐해의 방지 및 갈등해소에 토대가 되는 지반진동 규제기준에 관한 체계적이고도 합리적인 법적·기술적 근거가 전무한 실정이다. 그리고 이러한 지반진동 규제기준의 제정에 필수적인 건설진동 및 교통진동에 대한 실증적 연구노력은 물론, 이와 관련한 기본적 지식에 대한 교육, 홍보 수준 또한 크게 미흡한 실정이다. 이는 불과 최근까지도 관련 문제의 연구 필요성 및 시급성에 대한 인식이 크게 부족했고, 이에 따른 연구여건의 미성숙으로 관·산·학계가 연계된 문제해결 노력이 미흡했던데 근본적인 원인이 있다. 따라서 이 글에서는 앞으로 우리나라 나름대로의 지반진동 규제 기준의 제정과 관련 연구의 촉진을 고무하는 차원에서 최근까지의 해외 연구성과를 토대로 국내 지반진동 규제기준 제정의 방향 및 그 적용과 관련한 기술적 제안 사항을 정리해 보고자 한다.

2. 진동규제 기준의 기본적 고려사항

2.1 국가·지역·학술적 주관성

진동규제 기준은 국가·지역·사람에 따라 진동폐해에 대한 일반적 인식은 물론, 학술적 의견에 있어서도 상당한 차이가 있을 수 있어 본질적으로 주관적 견해의 개입 여지가 클 수 밖에 없다. 아울러 대부분의 환경문제 관련 기준들이 그러하듯이 진동규제 기준 또한 근본적으로 산업·사회·문화의 수준의 변화와 특히 환경문제에 대한 예민도가 변화함에 따라 같이 변화하는 속성을 갖고 있다. 따라서 어떤 '만국공통적' 또는 '통시대적'인 항구불변의 법규적 기준의 형태를 상상·기대한다는 것 자체가 무리한 일이다.

이는 역설적으로 말하여 자신이 속한 지역의 여건을 감안함이 없이 남의 나라에서 원류된 진동규제 기준을 무비판적으로 준용하는 것이 얼마나 무의미한 동시에 주체성이 없는 일인가를 의미하는 것이기도 하다. 현재 우리나라는 국내 독자적인 공식 진동규제 기준이 없는 탓에 이른바 "권위"있다는 외국의 진동규제 기준을 사실상 무비판적으로 수용·적용하고 있다. 이와 함께 출처도 분명치 않고, 과도한 주관적 견해에 입각하거나 특수한 목적에서 제안된 외국의 관련 연구사례를 유·불리한 여건을 고려하여 형평과 일관성을 결여한 채 준용하는 경우도 적지 않다. 특히 과도하게 이기적인 민원으로 인해 불합리하게 낮은 허용 진동치가 설정·강요됨으로써 각종 공익성 토건 공사의 수행에 많은 어려움이 따르는 등, 혼란과 갈등을 일으키고 있는 실정이라 국내 여건을 감안한 공식 진동규제 기준의 제정이 시급한 실정이다.

2.2 피해 대상 및 피해 종류의 구분

피해 대상은 기본적으로 구조물·기기·사람 및 가축으로 구분해야 한다. 진동폐해의 종류는 크게 "파손"(damage: 구조물 및 기기), "기능장애"(malfunction: 기기 및 사람/가축), "공해성"(nuisance 또는 intrusion: 사람)으로 구분하고, 피해의 정도 또한 표 2.1에 나타낸 바와 같이 어느정도 세분할 필요가 있다.

2.3 진동영향 평가의 척도

주지하는 바와 같이 진동의 영향을 평가하는 근간 척도는 진동의 진폭(변위, 속도, 가속도) 및 진동수(또는 주파수)와 같이 진동현상을 수학적·물리적으로 나타내는데 사용되는 "물리적" 척도이다. 그러나 때로는 실제적으로 진동이 피해대상에 미치는 영향을 보다 효과적으로 파악하는 측면에서 이러한 근간척도외의 이차적인 평가척

표 2.1 진동피해의 구분(안)

대 상	종 류		적 요	비 고
	양 태	구분		
구조물	미관적 손상	파손	단독주택 및 소규모 건축물의 내외벽의 미장재가 떨어져 나가거나 균열을 일으키는 정도로서 큰 어려움없이 원상회복이 경미한 경미한 손상	균열의 형태·깊이 등에 대한 면밀한 조사 필요
	토건구조적 손상	파손	토목·건축구조물의 구조요소간 연결부위의 이탈·이완, 골격부재내의 균열발생 및 파단·침하·뒤틀림 등 구조물의 구조적 안정과 기능에 심각한 위협이 되는 중대한 손상	
기 기	일시적 오작동	기능 장애	충격진동 등에 의해 기기가 일시적으로 오작동 되는 정도로서 커다란 물적·작업 방해적 피해를 유발하지 않는 정도의 피해	전자저울등을 이용한 정밀계측 현미경 촬영등 컴퓨터 및 컴퓨터를 이용한 기기에서 데이터 처리 오류 및 초정밀 분석·가공·제조 기기의 오작동.
	품질 손상	기능 장애	기기자체의 항구적 고장을 유발하는 정도는 아니나, 기기를 이용한 사람의 작업에 큰 지장을 주거나 기기의 처리·가공으로 얻어지는 성과·제품의 질을 크게 떨어뜨리는 수준의 피해	
	고 장	파손	기기를 구성하는 주요부품의 이탈, 접속부의 단결·파단을 초래하여 기기자체의 수리를 요하는 중대한 피해	
사람 및 가축	심리적 피해	공해성	신경이 전혀 안쓰이지는 않으나 참을 만한 정도의 피해	주변환경 여건, 사람에 따라 가변사건예고·설득으로 어느정도 해결가능 수면방해, 집중도가 높은 정밀작업 지장 등
	생산성 저하	공해성	참기 어려울 정도의 심한 불안감 및 불쾌감을 유발하는 정신적 피해를 일으키고 휴식여건 및 작업수행 성과에 영향을 미침으로서 근무효율 및 생산성을 크게 떨어뜨리는 수준의 피해. 가축의 경우는 불안을 유발하여 축산생산성을 저하시키는 수준	
	생리적 피해	기능 장애	의학적으로 사람 및 가축의 생리상태에 직접적인 영향을 미쳐 육체적 건강을 해치는 수준의 피해. 가축의 경우는 수태불능 등의 중대한 축산피해	

도를 병용할 필요가 있다. 예를 들어 구조물의 손상 가능성을 예측함에 있어 지표면이나 구조물의 특정지점에서 측정되는 진동 진폭치를 기준하는 것보다는 진동으로 인해 구조물에 유발되는 동적 응력 및 변형율의 크기를 기준하는 것이 보다 직접적이고 실증적인 척도가 되다고 볼 수 있다. 따라서 일반 건축물 및 토목구조물을 포함한 구조물의 경우는 진동에 의해 유발되는 응력 및 변형율 또는 안전율 등과 같은 “역학적” 척도를 병용할 필요가 있다. 한편, 사람의 진동에 대한 예민도 및 피해 정도는 진동의 진폭에 정비례하지 않을 뿐 아니라 주파수 특성 및 기타의 진동의 양태 (진동방향, 지속시간, 등)에 따라 큰 차이를 나타내므로 이들의 복합적 영향을 고려한 “의학·환경공해적” 척도를 사용하여 사람에 대한 진동의 영향을 포괄적으로 평가하는 것이 보다 합리적일 수가 있다.

그러나 이와같은 “비물리적” 척도들은 주관적 견해가 다양할 수 있고 적용배경 및 관련 제약조건을 숙지하지 못하는 경우에는 논란을 일으킬 소지가 많다. 이에 대한 좋은 예는 독일에서 공해진동 평가 척도로 사용되는 KB치인데, 이는 진폭과 주파수를 대개 변수로 하는 진동 환산식을 이용해 얻어지는 일종의 무차원의 공해진동 척도로서, 일반기술자로서는 어떤 특별한 과학적 근거를 거쳐 환산식이 도출되었는지 쉽게 이해하기 곤란하고 그 물리적 의미의 파악도 어렵다. 또다른 예는 일본에서 사람에 대한 진동영향 평가시 적용되고 있는 “보정가속도 레벨”인데, (일본은 이를 간단히 “진동레벨”이라고 명명하고 있음) 이는 진동가속도의 크기를 데시벨 (decibel: dB) 단위로 환산함에 있어 환산기준 가속도(reference acceleration)의 값을 주파수 대역(range)에 따라 달리하고 있다. 따라서 일반적인 진동 진폭의 데시벨 단위 환산값과 혼동을 일으킬 소지가 없지 않다.

진동폐해에 관한 많은 연구성과가 이루어진 일부 선진국에서는 이러한 “비물리적” 척도를 사용하여 진동규제 기준을 설정한 경우도 더러 있으나, 1) 이들은 진동의 진폭과 주파수에 대한 간단한 함수관계로 정의되는 것이 대부분이라는 점. 2) 진동폐해에 관한 기존의 많은 통계분석 자료들이 진동의 진폭 및 주파수와 상관계 형태로 축적되어온 점. 3) 진동계측의 원데이터 (raw data)를 확보하는 측면 등을 감안할 때, 일단 국내 나뭇대로의 충분한 사례조사의 축적과 관련분석 성과가 축적되기 전까지는 일단 진폭 및 주파수와 같은 진동의 물리적 척도를 사용하는 것이 가장 무난하다고 할 수 있다.

2.4 진동원(Vibration Source)의 특성

진동 영향 평가 측면에서 가장 중요한 진동원의 특성은 진동의 지속시간 및 진동

의 발생빈도라고 할 수 있다. 즉 진동이 일시성(transient)인가, 지속성(persisting)인가, 또는 진동의 영향이 단기적(short-term)인가, 장기적(long-term)인가를 구별하는 것이다. 이는 지속진동의 경우는 공진(resonance)효과나 피로(fatigue)효과에 의한 궁극적인 손상정도는 단지 진동의 강도 자체만으로 예측될 수 없기 때문이다. 일시진동(transient vibration)이라 하면 충격진동(impulsive vibration)과 같이 진동 지속시간이 짧고 발생빈도의 측면에서는 일과성(一過性: single-event)의 진동을 말한다.

지속진동(persisting vibration)이라 하면 기본적으로 기계진동(machine vibration)과 같은 정상(steady-state) 진동이나 진동다짐기(vibration hammer)와 같이 진동이 연속적으로 발생하는 “연속진동(continous vibration)”을 말한다. 아울러 열차진동과 같이 진동이 일시적으로 멈추기는 하나 일련의 충격진동이 비교적 짧은 시간 간격을 두고 반복 발생하는 형태의 “단속진동(intermittent vibration)”과 같이 충격진동이라 할지라도 그 발생빈도가 빈번한 경우를 포함한다.

한편 지반진동의 특성은 본질적으로 진동원의 기진(起震: excitation) 특성과 진동원-지반의 진동전달(transmission) 특성에 크게 영향을 받는다.

기진 특성이라 하면 진동이 기계적인 충격에 의해 발생하는가 또는 발파·폭파와 같이 지반내 폭발 에너지의 방출로 인한 것인가 등 진동을 일으키는 물리·화학적 메카니즘을 말한다. 진동원-지반의 진동전달 특성은 진동원에서 발생된 진동력(또는 에너지)이 진동원과 지반과의 접촉 경계면을 통하여 궁극적으로 지반으로 전달되기 까지의 제반 기계·구조적 접속요소 및 진동원·지반 시스템간의 동역학적 또는 응력파적 순응 특성(dynamic/acoustic impedance charateristic)을 말한다.

최종적으로 지반에 가해지는 진동의 강도 및 진동에너지의 주파수 분포 특성은 진동원의 기진 특성 그 자체보다는 진동원-지반의 진동전달 특성 또는 동역학적 순응 특성에 큰 영향을 받는다. 예를 들어 지하철·철도에 있어 열차 주행에 의해 발생하는 지반진동의 양태는 열차의 중량·속도와 같은 기본적인 기진 특성 자체보다는 바퀴 및 레일의 마모도 및 평탄도 레일 이음부의 간격, 레일의 곡선반경, 그리고 체결구 및 침목의 종류, 도상의 종류(자갈:ballast 또는 무도상 non-ballst:concrete) 와 같은 궤도 시스템, 또한 지하철의 경우는 터널의 구조적 상세, 고가철도의 경우는 고가교 상도구조 및 교각기초의 구조적 특성 등 차량-궤도-궤도지지 구조물 시스템의 동역학적 특성에 보다 큰 영향을 받는다.

표 2.2에는 이와 같은 진동원의 특성을 감안한 지반진동원의 분류(안)을 나타내었다.

표 2.2 진동원의 구분

일시 진동 (trans- ient)	건설 진동 (const- ruction vibra- tion)	<p>폭파 : 폭파 다짐/치환-지반개량 (explosion) 구조물 해체-노후 구조물 제거 등 지질 탐사-</p> <p>발파 : 채광발파-지하/ 노천광산, 채석, (blasting) 건설발파-터파기, 터널굴착, 구룡절토</p> <p>지반타격 : 동다짐(dynamic compaction)공법, (Ground 석주(stone column)공법, Tampering) 타격식 굴착(chiseling) - 지하연속벽/ 현장타설 말뚝/케이슨의 시공</p> <p>항 타 : 단말뚝/널말뚝의 타입 (pile driving)</p> <p>지반굴착 : 암파기 (ripping), 파쇄(breakring), (machined 기계식 현장타설 기초시공 - 지하연속벽, excavation) 현장타설말뚝</p> <p>기계식 터널링 - TBM, Shield, Load-Header</p> <p>지반천공(drilling): 시추(boring),어스앵커링(earth-anchoring)</p> <p>건설장비(construction: 다짐장비-진동로울러, plate compactor equipment) 토공장비 - 불도저</p>
	지속 진동 (persi- sting)	
	교통진동 (traffic induced vibra- tion)	<p>도로차량진동 : 도심 중교통 도로, 고속도로</p> <p>철도열차진동 : 지하철, 일반철도, 고속철도</p>
	산업진동 (indus- try- induced vibra- tion)	<p>동력기계* : 회전원동기, 터빈(turbine) 등 왕복운동 동력기(reciprocating engine) 컴프렛서(compressor)</p> <p>가공기계 : 제련·제지·절삭기계</p> <p>기타 중공업 기계 : 대형 crane</p>

2.5 지반특성

지반은 진동을 전파하는 주매질로서 지반진동파의 전파특성, 지반의 성층 특성 및 동역학적 물성 - 동탄성계수(dynamic elastic moduli), 또는 탄성파 속도값(elastic wave velocity) 및 재료감쇠(material damping) 또는 내부감쇠(internal damping) - 과 밀접한 관계가 있다.

따라서 지반특성에 대한 고려없이 진동규제 기준을 논한다는 것은 근본적으로 불합리한 일이다. 위에서 다시 자세히 다루겠지만 지반진동의 진폭이 동일한 경우라도 지반의 강성도(stiffness)가 낮을수록 진동에 의한 구조물 손상 가능성은 높아진다. 바꾸어 말하면 연약한 지반위에 축조된 구조물에 대한 허용 진동 진폭 값은 견고한 지반위에 축조된 구조물에 비해 낮아야 한다.

한편, 느슨한 사질토 또는 입상토질의 토사지반의 경우에는 오랜 기간동안 “지속진동”을 받거나 빈번한 “일시진동”을 받는 경우 지반다짐(densification)효과로 인한 지반 자체의 침하에 의하여 이차적인 진동피해가 초래될 수 있다. 한편 이러한 지반의 영구침하는 발파진동과 같은 일시진동의 경우에도 발생할 수 있다. 실트 입경 크기의 이하의 세립분이 5%를 넘지 않는 느슨한 경우는 일단 발파로 인한 지반다짐이 발생할 가능성이 있는 것으로 알려져 있다. 또한 매우 드물긴 하나 느슨한 사질지반이 포화된 경우에는 발파진동에 의해 지반이 액상화(liquefaction)됨으로써 심각한 피해가 초래될 수도 있다. 또한, 발파지점에 인접한 토사 및 암반 사면의 경우는 발파시의 관성력으로 안전율이 저하될 수 있으며, 특히 암반사면의 경우에는 절리를 통한 폭발 가스압(gas pressure)의 누출로 불안정한 암괴(rock block)가 이완·변위될 수도 있다.

한편 대부분의 경우 지반진동파의 진폭은 진동원에서 거리가 멀어질수록 감소하나, 어떤 경우에는 지반의 성층 특성상 지반내 특정한 지층 또는 경로를 따라 큰 진동에너지가 전달됨으로 인하여 지반진동 강도는 오히려 진동원에서 가까운 지점보다 먼지점에서 크게 될 수도 있다. 이와 같은 현상은 지반내에 큰 규모의 암맥(岩脈)이 진동원과 멀리 떨어진 수진체 사이에 걸쳐 있을 경우 이러한 지층은 진동 안내효과(wave guide effect)를 일으키므로써 발생할 수 있다. 또한, 단층대 및 파쇄대와 같은 파동 차단대(wave barrier)의 존재나 지반진동파가 진동전파 경로상에 놓이는 구조물들의 상호작용으로 회절(diffraction) 또는 간섭(interference)됨으로 인해 발생할 수도 있다.

또한 비교적 심도가 깊은 연약 토사층이 하부의 견고한 암반층위에 놓이는 지반이 큰 강도의 발파진동을 받는 경우에는 발파진동의 탁월주파수(predominant frequency)가 토사층의 고유진동수(natural frequency)에 근접하면 지반자체의 공진(resonance)

현상이 초래되어 지반진동이 증폭될 수 있다. 토사층의 공진 진동수는 토사층의 심도 및 평균 강성도에 따라 달라진다. 그런데 만일 발파지점에 가까운 곳에 위치한 지반보다 멀리 떨어진 지점에서의 지반이 진동증폭 정도가 상대적으로 크게 되면 진동원으로 부터 멀리 떨어진 지점에서 지반진동의 강도가 가까운 지점보다 크게 된다. 따라서 조사대상 지역 고유의 부지특성을 조사하는 것은 결코 간과할 수 없는 항목의 하나이다.

2.6 지반-구조물의 동적 상호작용(dynamic interaction)

구조물에 최종적으로 전달되는 진동은 지반자체의 진동특성과 현저히 다르다.

예를 들어 그림 2.1을 보면 지표면에서 측정된 '입력' 지반운동의 가진속도기록(excitation velocity record)과 '출력' 구조물의 반응속도기록(response velocity record)의 파형(waveform)은 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 더욱이 구조물의 부위(그림에서 중앙벽 및 상층부)에 따라서도 반응속도기록은 차이가 있음을 알 수 있다.

따라서 진동규제 기준을 건물 주변의 지표면에서 측정되는 지반진동의 진폭을 기준으로 규정하는 것은 근본적으로 모순이 있는 것이다. 또한 구조물의 진동특성은 부위(벽, 기둥, 바닥 슬래브 및 저층부/고층부 등)마다 다른 것이 일반적이므로 구조물과 기초부 또는 지면에 가까운 건물부위에서 측정되는 구조물 진동진폭을 기준하는 것도 원칙적으로 부적절한 것이다.

주지하는 바와 같이 지반진동과 구조물 진동 특성이 차이가 나는 것은 지반구조물의 동적상호작용 효과 때문인데, 이는 지반의 강성도 구조물 기초의 형식 및 시공방법, 상부구조의 전반적 구조형식, 구조요소의 배치/상호접속 상태 및 재료적 특성 등 매우 다양한 영향요인에 의해 지배를 받는다. 구조동역학 해석측면에서 이와 같은 지반-구조물의 상호작용 효과를 감안한 구조물의 진동예측 문제는 "입력" 지반 진동에 대한 "출력" 구조물 진동의 상관관계를 나타내는 전달함수(transfer function)의 결정문제로 귀착된다.

전달함수는 "입력" 진동의 가진 주파수(excitation frequency)에 따른 "출력" 진동의 증폭비율(amplification ratio) 및 위상(phase)변화 특성을 규정하는 시스템 고유의 주파수 특성함수이다. 이와 같은 구조물의 전달함수는 해석적(analytically)으로 결정할 수도 있고 실험적으로(experimentally) 결정할 수도 있다. 전자의 경우는 구조물-지반 시스템을 일련의 질량(mass)-용수철(spring)-감쇠기(dashpot)로 구성된 다자유도(multi-degree-of-freedom: MDOF) 또는 단자유도(single-degree-of-freedom: SDOF)의 진동계로 모델링(modelling)하여 결정하는 방법이 일반적으로 적용된다.

이와 같은 방법으로 결정되는 구조물의 진동진폭(변위/속도/가속도/진폭)의 주파수

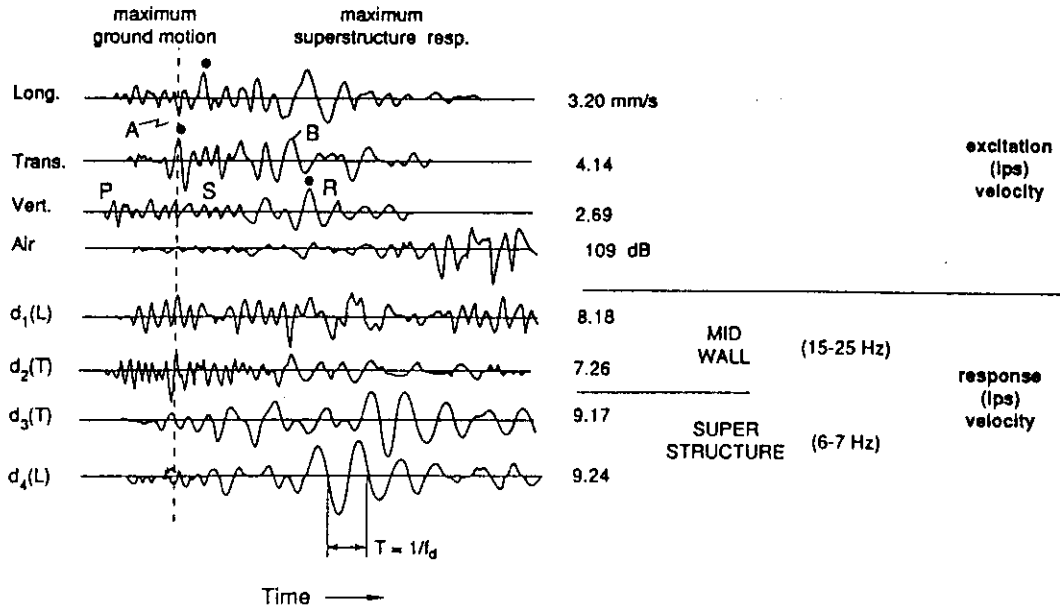


그림 2.1 지반진동과 구조물 진동 시간기록의 비교

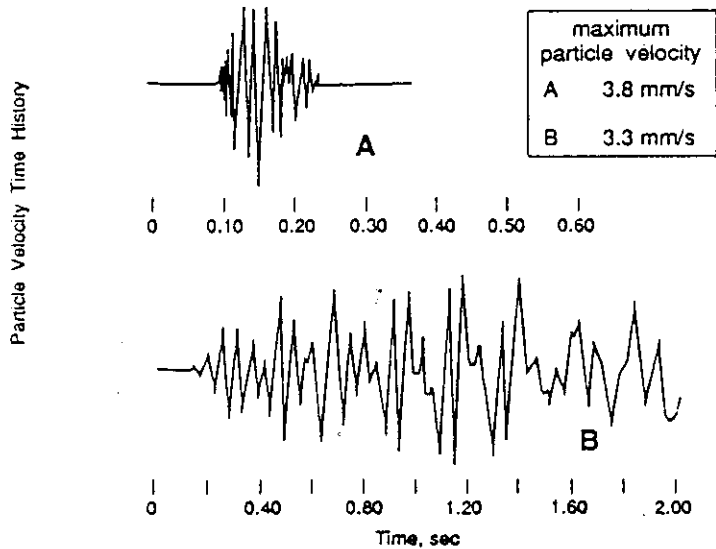
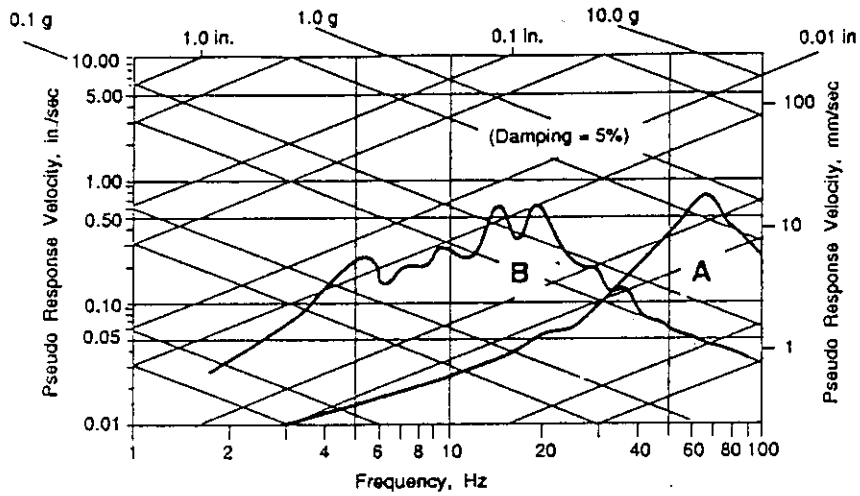


그림 2.2 지반진동과 구조물 응답 스펙트럼 관계

에 따른 변화 특성곡선을 흔히 응답 스펙트럼(response spectra)이라고 부르기도 하는데, 그림 2.2에는 파형(waveform)이 상이한 두 개의 입력 지반진동에 대한 구조물의 응답스펙트럼 일례를 나타내었다. 그림에서 보듯이 두 지반진동 시간기록의 최대 입자 속도는 큰 차이가 없으나($A = 3.8 \text{ mm/s}$, $B = 3.3 \text{ mm/s}$) 각각에 대한 구조물의 응답 스펙트럼 곡선은 현저하게 다름을 알 수 있다. 예를 들어 주파수 대역 5~20 Hz에 있어서 구조물 진동진폭(속도)는 무려 10배 이상 차이가 남을 알 수 있다. 따라서 단순히 건물 주변에서 측정된 지표면 진동의 최대값만을 기준으로 구조물의 손상 가능성을 평가한다는 것은 근본적으로 불합리한 것임을 알 수 있다.

그러므로 보다 합리적인 구조물 손상 가능성 평가를 위해서는 구조물의 동역학적 거동 특성치-고유진동수(natural frequency) 및 감쇠비(damping ratio)-와 입력 지반진동의 가진 주파수 특성을 감안한 응답해석을 수행해야 한다.

3. 지반진동에 의한 구조물의 손상 메카니즘

지반진동에 의한 구조물의 손상 가능성(damage potential)은 지반 또는 구조물의 특정부위에서 측정된 진동진폭(변위/속도/가속도)의 크기와 밀접한 관계가 있는 것은 사실이다. 그러나 엄밀히 말하면 구조물의 손상을 일으키는 것은 진동진폭 그 자체가 아니라 근본적으로 지반운동에 의해 구조물에 발생하는 관성력(intertial force), 또는 구조물이 굴곡을 이루는 지반운동에 순응하려는 과정에서 발생하는 동적 부등변위(dynamic differential displacements)이다. 장기간에 걸친 지속적인 진동을 받거나, 큰 규모의 충격진동을 여러 차례 받는 경우에는 지반의 “다짐침하”(densification-settlement)가 주요 원인이 될 수도 있다. 그리고 드물긴 하나 구조물의 기초지반내에 느슨한 사질토층이 지하수위하에 놓여 있는 경우 비교적 큰 강도의 진동력의 반복재하 되면 “액상화 침하(liquefaction-settlement)가 발생할 수도 있다.

다시 말하면 단순히 지반이나 구조물이 어떤 크기의 진폭이상으로 “움직”인다고 해서 반드시 손상을 일으키기에 충분한 조건이 도달된 것으로 오인해서는 안된다. 반대로 장기적인 다짐침하로 인한 손상 가능성을 감안할 때 진동레벨이 단기적인 진동 기준치 이하라 해서 손상 가능성이 전혀없다고 말할 수도 없는 것이다.

다짐침하나 액상화 침하는 공통적으로 느슨한 모래질 지반에 한해 발생가능한 것이고, 특히 다짐침하는 장기적인 누적침하와 관련된 요인들을 고려해야 한다. 그리고 액상화 침하는 일반적인 허용진동치를 넘는 비교적 큰 충격진동의 경우 예상될 수 있는 특수한 문제이다. 따라서 이들에 대한 고찰은 지반 제약상 일단 다음 기회로 미루고 다음에는 지반운동에 의해 구조물에 작용되는 관성력과 동적 부등변위로 인한 구조물의 손상 메카니즘에 대해서만 살펴보고자 한다.

그림 3.1에는 지반진동파에 의한 구조물의 거동을 진동파의 성분과 파장(wavelength)에 따라 구분하여 개념적으로 나타내었다. 그림 3.1의 a)와 b)는 파의 진행방향과 직교하는 평면상에 수직전단(vertical shear)변형을 일으키는 지반진동파 성분(SV 성분파)에 의한 것이다. 그리고 c)와 d)는 파의 진행방향이 놓이는 수평면상에서 파의 진행방향을 가로지르는 횡수평방향의 전단변형(transverse shear)을 일으키는 지반진동파 성분(SH 성분파)에 의한 것이다. 한편, 그림 e)와 f)는 파의 진행방향과 나란한 종방향으로 압축/팽창변형(longitudinal dilation/compression)을 일으키는 지반진동파(P 성분파)에 의한 거동을 나타낸다.

SV 성분파는 전단파(shear wave) 및 표면파(surface wave)중에서 레일리파(Rayleigh wave)의 수직성분에 의해 발생한다. 그리고 SH 성분파는 전단파의 수평성분 및 표면파

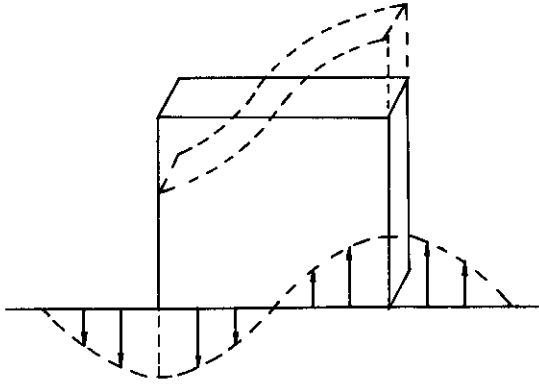
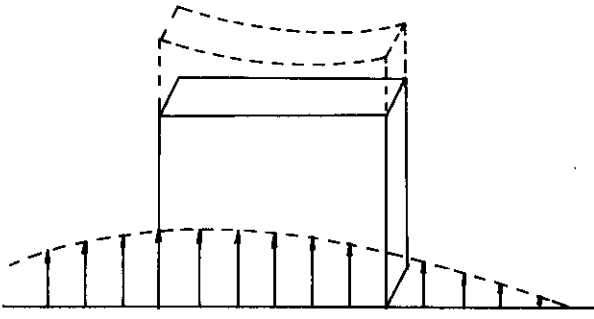
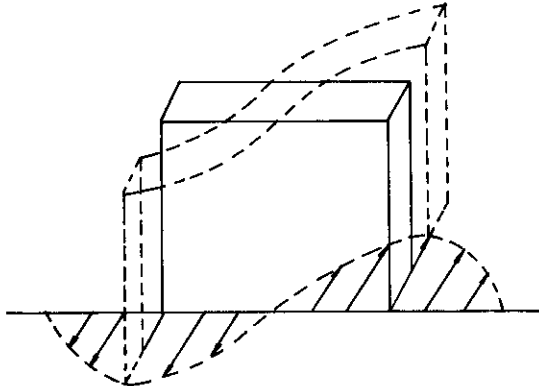
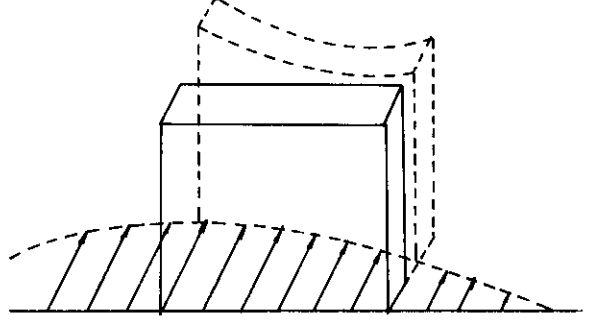
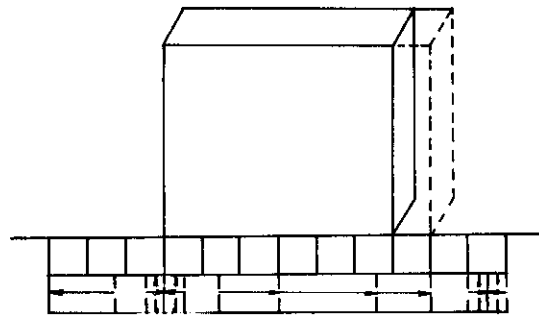
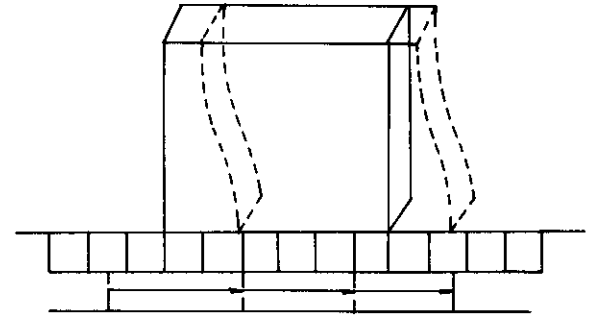
	Short Wavelength	Long Wavelength
S & R - Wave (SV)	 <p>a) Vertical Distortion</p>	 $F = M_o (A_{V1} - A_{V2})$ <p>b) Vertical Bending</p>
S & L - Wave (SH)	 <p>c) Transverse Distortion</p>	 $F = M_o (A_{T1} - A_{T2})$ <p>d) Transverse Bending</p>
P & R - Wave (P)	 <p>e) Longitudinal Elongation</p>	 $F = M_o (A_{L1} - A_{L2})$ <p>f) Longitudinal Shearing</p>

그림 3.1 지반진동파 파장의 크기에 따른 구조물 변형 특성

중 러브파(love wave)에 의해서 발생하고, P 성분파는 압축파(compression wave) 및 레일리파의 수평성분에 의해 발생한다.

그림 3.1에서 보듯이 구조물의 거동은 본질적으로 위에서 설명한 지반진동파의 성분에 따라서 달라진다. 그러나 진동성분에 대해서도 해당 진동성분파의 파장(wave length)과 구조물의 크기(접지길이)의 상대적 크기에 따라서 구조물의 변형 양상은 차이를 나타냄에 유념할 필요가 있다. 단파장(short - wavelength) 조건에서 구조물에 작용하는 힘은 구조물이 지반운동을 순응하려는 과정에서 발생하는 부등변형(differential displacement)에 의해 발생한다. 반면에 장파장(long-wavelength)조건에서는 구조물의 접지면을 따른 지반운동의 벡터(vector)적 변화에 의해 발생하는 관성력(inertial force)이 구조물을 변형시키는 힘으로 작용한다. 즉 지반진동 속도(ground particle velocity) 그 자체에 의해서가 아니라, 그 벡터적 변화(크기 및 방향)에 의해 구조물을 변형시키는 힘이 발생하는 것이다.

한편 실제로 이와 같은 '부등변형' 메카니즘과 '관성력' 메카니즘은 동시에 복합적으로 발생한다. 이러한 복합작용에 의해 구조물에 작용되는 힘의 작용으로 구조물이 설계허용 변형치 이상으로 과도하게 변형을 일으키면 손상이 발생하는 것이다. 이를 응력의 측면에서 달리 표현하면 지반운동에 의해 발생된 힘에 의해 특정구조 부재에 동적응력(dynamic stress)이 유발되고, 이것이 부재가 이미 받고 있던 정적응력 및 이전 시간대의 동적응력을 포함한 선행응력(preexisting stress)에 더해진 총합치가 부재의 허용응력을 초과하면 구조물은 손상을 입는다.

파장(λ)은 파동이동으로부터 파동의 전파속도(c) 및 주파수(f)와 $\lambda = c/f$ 의 관계가 있다. 그리고 파동의 전파속도는 다시 매질의 밀도와 강성도(stiffness)와 제곱근과 각각 역비례 및 비례관계가 있다. 한편 파동의 전파속도는 파의 종류(압축파/전단파/표면파)에 따라서 차이가 있다(나열 순서대로 속도가 빠르다). 따라서 파장에 대한 고려의 필요성은 지반진동의 성분 및 주파수 특성, 그리고 지반의 다짐상태(밀도) 및 연경도(강성도)에 대한 고려의 필요성을 의미하는 것이다.

한편, 지표면 진동파 에너지의 대부분은 레일리파에 의해 수반되는 것이 일반적인데, 레일리파와 같은 표면파는 비균질 지반의 경우에는 가진주파수에 따라 전파속도가 변하는 이른바 분산(dispersion) 특성을 갖으므로 주파수 성분에 따라 파장이 달라진다. 또한 하나의 가진 주파수에 대해서도 서로 상이한 전파속도를 갖는 전파모드(propagation mode)가 존재하는 이른바 모드특성(modal characteristic)을 갖고 있어 이론적으로는 파장이 다른 수많은 파들이 함께 전파될 수 있다. 이러한 분산특성 및 모드특성은 지반의 성층구조와 각 층의 상대적인 강성도 차이에 따라 변화한다.

이와 같은 고찰을 토대로 할 때, 보다 합리적인 구조물 손상 가능성의 평가를 위해서는 지반진동의 진폭만을 기준할 것이 아니라 지반진동파의 성분, 그리고 특별히 파장의 크기 그리고 지반특성에 대한 고려가 수반되어야 함을 알 수 있다.

다음으로 구조물의 손상 가능성을 구조물의 변형율(strain)의 크기로 평가하는 것과 관련한 사항을 구체적으로 살펴본다.

파동이론으로부터 파동이 전달되는 매질의 변형율은 평면파 조건(plane wave condition)을 가정하는 경우 다음 관계식을 이용하여 결정할 수 있다.

$$\varepsilon = V/V_p \quad \text{또는} \quad V/C_R \quad (1a)$$

$$\gamma = V/V_s \quad \text{또는} \quad V/C_R \quad (1b)$$

여기서 ε 와 γ 은 각각 압축변형율 및 전단 변형율이고, V 는 매질 자체의 운동속도(즉 입자속도)이며, V_p , V_s , C_R 는 각각 압축파, 전단파, 표면파(레이리파)의 매질 전파속도이다.

구조물의 손상 가능성을 예측하는 척도로서 입자속도(V)가 가장 널리 채택되고 있는 이유는 바로 식(1)에서 보듯이 입자속도와 변형율은 직접적인 비례관계가 성립하기 때문이다. 그러나 실제로 변형율의 크기는 식(1)의 분자에 해당하는 입자속도 뿐만 아니라 분모의 지반진동파 전파속도(즉 지반의 강성도)에 따라서도 변화한다는 점에 유의해야 한다.

예를들어 상대적으로 큰 진폭의 압축파 성분에 뒤이어 다소 낮은 진폭의 전단파가 전파되는 경우를 가정해 보자. 이와 같은 경우에 최대입자속도(peak particle velocity)를 기준으로만 구조물의 손상가능성을 평가한다면 압축파 성분만을 고려한 결과가 되는데, 이러한 평가는 전단파에 의해 발생할 수 있는 보다 큰 손상가능성을 간과하는 것이 된다. 왜냐하면 전단파는 압축파보다 전파속도가 현저히 빠를 수 있으므로(포아손비 0.3일 때 두배차이) 실제적으로 발생한 변형율의 크기는 전단파에 의한 것이 압축파에 의한 것보다 상당히 클 수 있기 때문이다. 더욱이 전단파에 의한 지반진동 방향을 따른 구조물의 저항력이 압축파의 진행방향을 따른 방향보다 취약한 경우(벽돌쌓기식의 건물 등) 그 손상 가능성은 더욱 커진다.

한편 동일한 강도 및 성분의 지반진동을 받는 경우라도 토사지반위에 축조된 건물은 암반위에 축조된 건물보다 손상 가능성은 10배 정도 높다고 할 수 있다. 이는 암반의 진동파 전파속도는 토사지반에서 비해 보통 10배 정도 빠르기 때문이다.

한편, 식(1)에 의한 변형율의 예측 및 이를 토대로한 손상가능성 평가는 어디까지

나 지중매설관(underground pipes), 터널(tunnel), 구조물 하부기초(foundation)와 같이 구조물 전체가 지중에 완전히 구속되어 있고 유연성이 높아 지반운동과 구조물의 동적거동이 거의 일치하는 이상적인 경우이나 적용가능한 것임에 유념해야 한다. 즉 구조물의 지상부(상부구조, 특히 상층부)나 하부기초의 경우라도 매설상태가 불량하거나 강성이 큰 경우에는 변형율의 산정에 식(1)을 적용할 수 없다.

따라서 보다 합리적인 구조물 손상 가능성 평가를 위해서는 근본적으로 지반-구조물 전체의 특성 및 구조물의 각 구조 요소간 접촉 세부조건을 감안한 동적응답 해석결과 구해진 변형상태로부터 구조물의 특정지점·특정부재에서 발생하는 응력 및 변형율을 기준해야 한다. 이를 위해서는 무엇보다 구조물의 상부구조-하부기초-지반 시스템의 고유진동수(natural frequency), 감쇠비(damping ratio), 진동모드(mode) 등과 같은 구조동역학적 해석에 필요한 동역학적 특성치를 일차적으로 결정하고, 응답스펙트럼 방법등을 이용하여 주파수에 따른 구조물의 진동거동 특성 변화를 예측하여야 한다.

한편, 이러한 순수한 동적해석 방법 대신에 의사정적(quasi-static)해석 기법을 적용할 수도 있다. 그러나 이 때는 지반 및 구조물 부재 구성재료의 역학적 특성치(강성도 및 강도) 들은 정적재하 조건과 동적재하 조건의 경우 현저한 차이가 있음에 유념하여, 실제의 동적재하 조건(동적하중강도, 가진주파수 및 재하속도 등)을 반영한 상태에서 결정된 값을 적용해야만 한다.

4. 해외 주요 구조물 진동규제 기준

구조물의 진동규제 기준은 비단 구조물 자체의 손상 (damage) 측면 뿐 아니라, 구조물에 설치되는 주요기기 및 물품(골동품등), 그리고 구조물내에서 거주·작업하는 사람 또는 가축에 대한 피해 방지 측면까지도 포함하는 포괄적인 형태가 되는 것이 가장 바람직할 것이다. 그리고 손상의 경우라도 비록 손상상태가 육안으로 식별할 수 있는 상태로까지 발전되지는 않았으나, 질적저하로 인한 문제로 향후 잠재적 손상요인으로 작용하거나 기타 재산가치적 저락을 초래하는 측면까지 고려하는 것이 이상적일 것이다. 그러나 이와같이 포괄적인 구조물 진동규제 기준을 다룬다는 것은 결코 쉬운 일이 아니다. 본질적으로 구조물의 손상/기기 및 물품피해/사람·가축 피해의 측면은 각각 고유한 영향요인 및 평가기준이 고려되어야 하는 것이므로 우선 이들을 상호 분리한 별도의 구조물 진동규제 기준을 제정하는 것이 바람직하다고 판단된다. 따라서 다음에는 “구조물의 손상” 측면을 위주로 외국에서 적용되고 있는 권위있는 주요 규제기준들을 검토하고자 한다.

4.1 독일

독일은 DIN 4150 (Structural Vibration in Buildings)을 통하여 국가 규준으로 제정·적용하고 있다. DIN 4150은 3개의 별도 규정으로 구성되어 있는데 구조물의 손상에 관한 것은 DIN 4150 - part 3 (Effects on Structures)이다. DIN 4150은 오랜기간에 걸쳐 수행된 실증적 실험 및 실제 사례의 분석결과를 토대로 마련된 것이며, 구조물에 미치는 진동영향의 평가와 관련된 주요한 평가항목을 포괄적으로 다루고, 그 방법 및 절차가 매우 합리적이고 체계적으로 짜여져 있는 것으로 정평이 나 있다. 따라서 DIN 4150에 대해서는 조금 자세한 고찰이 필요하다.

우선 DIN 4150은 1938년에 최초로 제정되었는데, 유독히 “구조물 손상”과 관련한 DIN 4150 - part 3만은 여러차례 개정을 거듭하였다는 점에 유념할 필요가 있다. 이는 DIN 4150 - part 3에서 규정되어 온 허용진동 속도치가 너무 낮아 비현실적이라는 견해가 주원인이다. 필자의 문헌조사에 의하면 DIN 4150 - part 3의 공식개정은 1970년, 1975년, 1986년에 이루어졌던 것으로 판단된다. 그런데 일부 국내외 문헌을 통하여 개정을 위해 검토되었던 개정안 및 초고본 (revision proposal/draft) 들이 인용·소개되면서 개정년도 및 내용자체가 원래의 개정본과 다소 다른 것들이 알려진 경우도 더러 있다. 또한 영어로 번역되는 과정에서 원본의 의도와는 다른 의미를 줄 수 있는 형태로 변질된 것, 또는 원본의 관련내용을 충실히 소개하지 않고 주요한 부대조건 및

계약사항이 생략되거나 아예 원본과 틀리게 왜곡된 것들도 많아 혼란을 주고 있다.

주지하다시피, 현재 국내에서 허용 발파진동기준의 하나로서 많이 적용되고 있는 서울/부산 지하철 허용진동 기준 1970년 DIN 4150 - part 3를 원용한 것이고, 현재 국내 관련 논문 및 연구 보고서에 인용되고 있는 것들은 대부분 1975년 이전의 것들이다. 더욱이 그나마도 허용진동치의 측정 및 산정방법, 주파수 특성에 따른 가변성, 진동측정 위치, 등에 관한 주요 특기사항이 생략·변질되었거나, 심지어는 구조물 종별에 대한 기술내용이 원본과 다른 의미를 갖도록 번역된 것도 많아 혼란을 가중시키고 있다. 차제에 이러한 혼동을 막고 DIN 4150 - part 3에 대한 명확한 이해를 도모하는 차원에서 표 4.1 및 그림 4.1에는 현행 1986년 DIN 4150 - part 3의 내용을 필자 나름대로 원본의 의도에 충실한 범위내에서 재구성하여 보았다.

1986년 개정본이 그 이전의 것 (1975년 이전)들과 크게 달라진 것은 무엇보다 주파수 성분에 따른 허용진동치의 구분을 명확히 하고 평가기준 입자 속도치로서 종래의 의사벡터 합성치 (pseudo vector sum value)를 버리고 성분 입자속도치 (component value)를 채택한 점이다. 그리고 보다 합리적인 평가를 위하여 구조물 기초 뿐 아니라 구조물 최상부층에서 측정된 진동 값을 평가 기준으로 추가한 점이다.

독일의 DIN 4150 - part 3 (1986)은 표 4.1에서 보듯이 기본적으로 일시진동과 정상진동을 구분하고, 구조물 전체에 대한 것과 구조물 부재에 대한 것을 구분한 것이 특징이다. 그리고 진동 속도치외에는 응력을 기준한 평가 및 특히 피로효과에 대한 내용, 나아가 진동침하에 대한 고려의 필요성을 언급하는 등 매우 세심하고 짜임새 있는 규준을 제시하고 있어 진동규제 기준에 대한 하나의 표준적인 모델을 제공하고 있다. 그러나 후술할 스웨덴 규준과 같이 지반특성에 대한 고려가 전무하고, 과거에 비해 허용진동치를 다소 상향시켰다고는 하나 여전히 비현실적으로 낮다는 평가를 받고 있다.

4.2 스위스

스위스도 독일처럼 국가규준으로 제정·적용하고 있다. 표 4.2에는 현행 (1978년 개정) 스위스 기준을 나타내었다. 허용진동치를 발파진동과 교통/기계진동으로 명확히 구분하고 이들에 의한 탁월 주파수 대역별로 허용진동 속도치를 규정하고 있는 것이 특징이다. 명시되지는 않았으나 진동측정위치는 지표면이 아닌 구조물 기초로 판단된다.

4.3 스웨덴

국가 전체 기준은 없으나, 주요 도시에서 견고한 암반위에 축조된 주요 구조물에

표 4.1a 구조물 손상 가능성 평가 기준 (일시진동*: DIN 4150-part 3/1986 개정)

종별*	구조물 종류	입자속도*2 : 단위 mm/s(괄호내 : inch/s)				구조물 부재*c
		적용구분*b	구조물 계	구조물 기 초*3	구조물 최상부층 바닥면*4	
1종	상업/산업용 건물; 기타 이들과 유사한 형태로 설계된 건축물	구조물 반응 주파수*b, d	10 Hz 이하*5	10~50 Hz	50~100 Hz*1	주파수 복합 *b, f
		시공실/공장 건물*g	20 (0.79)	20~40 (0.79~1.58)	40~50 (1.58~1.97)	40 (1.58)
2종	주거용 건물; 기타 이와 유사한 형태로 설계된 건축물	단동주택, 연립 아파트*g	5 (0.20)	5~15 (0.20~0.59)	15~20 (0.59~0.79)	15 (0.59)
		취약구조/노후 건물, 유적지 (문화재, 구조물)*g	3 (0.12)	3~8 (0.12~0.32)	8~10 (0.32~0.39)	8 (0.32)
비고	원본주석 #1 : 100 Hz 이상의 진동에 대해서는 최소한(50~100 Hz)범위에 해당하는 기준치를 평가기준으로 적용해야 함.					
원 해 설	*1: 발생빈도에 있어서 피로(fatigue) 손상을 일으킬 가능성이 높거나, 발생 시간간격(interval) 측면에서 공진(resonance) 현상을 일으킬 우려가 없는 구조물(예: 2층 구조물)에 대한 진동에 의한 진동성상 및 공진현상을 일으킬 가능성을 배제할 수 없으므로 정상진동에 관한 기준을 적용한다.					
	*2: 직교 3축방향(수평: X, Y 수직: Z)의 성분을 동시에 측정 한 성과중에서 성분 구별없이 가장 큰 값을 기준치로 한다. 수평성분의 어느 하나(X 또는 Y)는 건물 외곽선과 평행한 방향을 택한다.					
	*3: 지하실 최저층의 최외측 벽체를 기준하고, 벽체 하단의 기준 높이를 50cm 이상 떨어지지 않은 지점으로 한다. 지하실이 없는 경우는 건물 외곽벽체의 지면에 가까운 하단부를 기준하며, 지표면에서 50cm 이상 떨어지지 않은 지점으로 해야 한다.					
	*4: 수평(X, Y 방향)진동 성분의 측정 위치는 건물 최외측 벽면, 석조의장부(masonry) 내부 또는 이에 가능한 가까운 지점으로 한다.					
	*5: 수직(Z방향)진동 성분만을 기준할 값임. 측정 위치는 진동속도가 가장 클 것으로 예상되는 지점(보통 바닥 중앙부)으로 한다.					
	*6: 바닥 부재의 손상 발생 가능성을 배제할 수 있는 안전치(초과한다고 해서 반드시 손상이 발생함을 의미하지는 않음-필자주).					
필 자 해 설	*a: 원본에는 "line"으로 표기하고 "구조물 총별" 구분 기호후서두에 수간(1,2,3)만을 사용하였다. 이는 그림 4.1에 나타난 구조물 중별의 "기준곡선" (구조물 기초에서의 측정치에 대한 기준치 상한계 값의 주파수)에 따른 빈도곡선의 구조번호(Line 1,2,3)를 지칭하는 것인데 보다 명확한 이해를 도모하고자 비꾸었음. 앞의 면화성을 기하고져 부기한 것임 않았으나, 그 중요성상 표에 포함시킨 것임.					
	*b: 원본에는 "일"로 표기되었는데, 이는 구조물 동역학의 진동수(excitation frequency)가 아니라, "슬러" 구조물진동의 반응주파수(response frequency)임에 유념.					
	*c: 원본에는 "일"로 표기되었는데, 이는 구조물 동역학의 진동수(excitation frequency)가 아니라, "슬러" 구조물진동의 반응주파수(response frequency)임에 유념.					
	*d: 원본에는 "일"로 표기되었는데, 이는 구조물 동역학의 진동수(excitation frequency)가 아니라, "슬러" 구조물진동의 반응주파수(response frequency)임에 유념.					
	*e: 원본에는 "일"로 표기되었는데, 이는 구조물 동역학의 진동수(excitation frequency)가 아니라, "슬러" 구조물진동의 반응주파수(response frequency)임에 유념.					
	*f: 원본에는 "일"로 표기되었는데, 이는 구조물 동역학의 진동수(excitation frequency)가 아니라, "슬러" 구조물진동의 반응주파수(response frequency)임에 유념.					

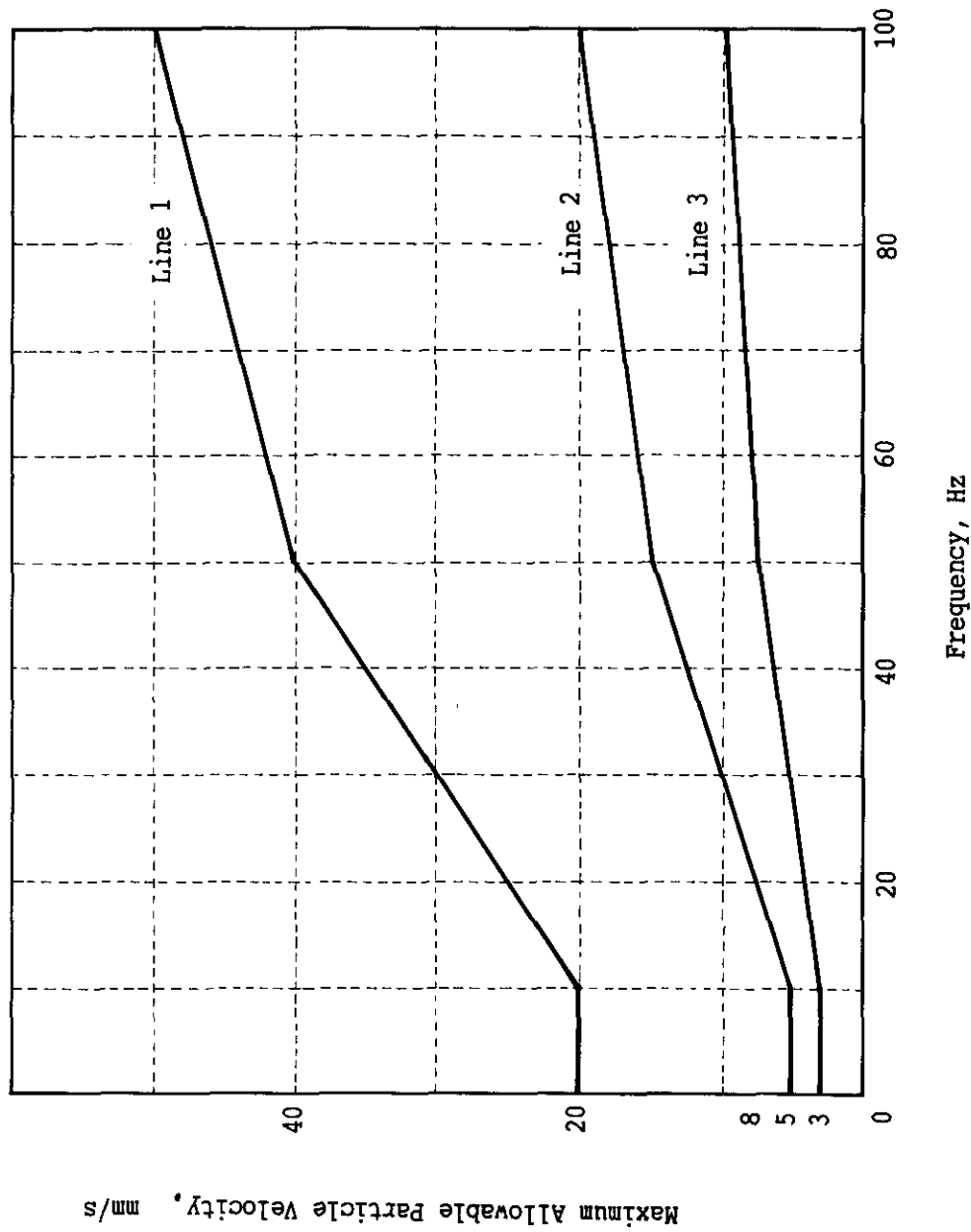


그림 4.1 DIN 4150 - part 3의 일시진동 허용속도 표준곡선 (구조물 기초 측정값 기준)

표 4.2 스위스의 구조물 손상 진동규제 기준 (1978)

종별	구조물 종류	발파 진동		교동/기계 진동			
		주파수 범위 10~90 Hz	입자 속도		주파수 범위 10~60 Hz	입자 속도	
			mm/s	inch/s		mm/s	inch/s
1 종	강구조 및 철근 콘크리트 구조물 : 공장건물/옹벽구조물/ 교량/철탑/개수로 구조물 (open channels); 지하의 터널 및 지하 공동(chamber) 중 콘크리트 라이닝 처리한 것, 또는 라이닝이 없는것	30 30~40	1.18 1.18~1.57	12 12 ~ 18	0.47 0.47~0.71		
2 종	기초벽 (foundation wall)이 있고 콘크리트 슬래브 (floor) 콘크리트 또는 석조재 벽체로 축조된 건물; 석조식 옹벽; 느슨한 지층내 관거 (conduits) : 지하 터널 및 지하공동 중 석조재 라이닝 처리한 것	18 18~25	0.71 0.71~0.98	8 8~12	0.31 0.31~0.47		
3 종	석조재 벽체와 함께 천장을 갖고 있는 건물	12 12~25	0.47 0.47~0.71	5 5~8	0.20 0.20~0.31		
4 종	역사적 가치가 있는 구조물 및 기타 진동에민 구조물	8 8~12	0.31 0.31~0.47	3 3~5	0.12 0.12~0.20		

대하여 시행되고 있는 대표적인 일시진동 규제기준은 표 4.3과 같다. 한편, 표 4.4에는 스웨덴 학자들에 의하여 연구·제안된 일반주택에 대한 발파진동 허용기준을 나타내었다. 기초지반의 강성도를 고려하고, 구조물 진동속도 (V)와 기초지반의 압축파 전파속도 (V_p)의 비율 (V/V_p)를 손상정도를 예측하는 척도로 제시한 것이 특징이다. 참고로 표 4.5에는 이와 유사한 맥락에서 일반주택외의 구조물에 대하여 Esteves가 제안한 허용진동 기준도 나타내었다.

4.4 미국

국가규준으로 제정된 것은 없고, 특별히 발파진동과 관련, 잘 알려진 미 광부국 (USBM) 및 노천 광산국 (OSM)의 기준을 토대로 이른바 “2 ips (inch per second)” 안전치 기준이 통용되고 있다.

그림 4.2에는 이와 같은 USBM/OSM의 기준과 최근 국제암반 역학협회 ISRM의 의해 제안된 바 있는 보완기준을 함께 나타내었다. 그리고 비교의 목적상 DIN 4150 - part 3도 함께 나타내었다. 그림에서 보듯이 USBM/OSM 규준선은 DIN 4150 - part 3의 1종구조물 (“0”로 표시된 규준선)과 비슷함을 알 수 있다. USBM/OSM 기준은 주로 채광발파 데이터를 중심으로 정립된 것으로서 1) 인구 희박지역에서 시행된 것이 많고 2) 발파지점과 구조물간 거리가 먼 것이 주종을 이루며 3) 단순구조의 일반가옥에 대한 피해 조사 성과에 토대를 둔 관계로, 1) 환경의식이 상대적으로 높은 도시권의 인구 밀집지역과 2) 특별히 도심개발과 관련한 근접 발파 및 비채광 발파 (건설발파) 3) 그리고 일반가옥의 다양한 구조형식의 도시권 구조물에 대해서는 적용상 문제가 없지 않다고 판단된다. 아마도 DIN 4150 - part 3 규준과의 상당한 차이는 문화권적 차이외에도 기준정립의 토대가 되었던 데이터의 본질적 차이 때문이라고 판단된다. 이 밖에도 미국에서는 여러 연구자·기관·설계회사에 의해 제안된 기준들이 실무에서 적용되고 있는 것으로 알려져 있으나, 이들은 전술한 바와 같이 모두 “2 ips 안전치” 범주를 넘지 않는다. 역설하면 다양한 의견이 존중되고 인구 밀집도가 낮은 타인지 진동규제기준에 관한 유럽국가에 비해 후진국인 셈이다.

4.5 기타국가

그림 4.3에는 영국·호주·프랑스·인도에서 적용되고 있는 기준을 함께 나타내었다. 인용문헌의 제약상 국가규준 인지의 여부가 불확실하다. 인도와 프랑스 기준이 극단적인 대조를 보이고 영국과 호주의 기준은 대동소이한 것이 주목할 만하다. 참고로 영국의 경우는 공공기관 (BRE, TRRL 등)에서 연구 제안된 기준들이 여러 많은데 일

표 4.3 스웨덴 주요도시에서 적용되고 있는 견고한 암반 내외에 축조된 구조물에 대한 일시진동 허용진동 기준 (Persson 등, 1980)

구조물 자체 손상		구조물 종류	편 위 (mm)	입자 속도 (mm/s)	가 속도 (mm/s ²)*1
		철근 콘크리트 방호구조물 (bunker)	-	200	-
		고층아파트군 및 현대식 철근 콘크리트 또는 철골 구조물	0.4 (0.03)	100 (3.94)	-
		견고한 암반내 지하공동 (cavern)의 천단 (roof): span = 10 ~ 18 m	-	70 ~ 100 (2.76 ~ 3.94)	-
		서구식 연립주택 (flats): 벽돌 또는 이와 유사한 석조식 벽체로 축조된 것		70 (2.76)	
		중소형 콘크리트 건물		35 (1.38)	
		스웨덴 국립박물관		25 (0.98)	
		: 건물 자체			
		: 진동 예민 전시물			5 *1 (0.20)
		컴퓨터 센터: 컴퓨터 지지 구조물	0.1 (0.004)		2.5 *1.2 (0.01)
		차단기 제어실 (circuit - breaker control room)	-		0.5 ~ 2 *1.2.3 (0.02 ~ 0.08)

주 * 1 : 일반적으로 컴퓨터에 대한 허용진동치는 7Hz 이상의 복합 주파수 성분의 경우 유효치 (RMS value)로 0.18g (176 mm/s²; 6.93 inch/s²), 또는 등가 첨두치 (peak value)로 0.25g (245 mm/s²; 10 inch/s²) 이다 : 또한 최근의 컴퓨터 제작업체의 조사에 의하면 진동에 가장 민감한 디스크 드라이브를 기준해도 약 50Hz 이상의 일시진동의 경우 컴퓨터 몸체에 대하여 2g (19.620 mm/s²; 772 inch/s²)이다. 따라서 원본의 표에 인용된 수치는 mm/s² 단위가 아니고 g 단위를 잘못 표기한 것으로 판단된다.

* 2 : 보통 전기·전자 접속회로 (relays)의 허용진동치는 가속도 단위로 주어진다.

* 3 : Gustafsson(1973)은 스웨덴 TV 방송국에 대한 조사 결과, 방송국 건물주변의 발파진동 허용치는 속도치로 35 mm/s로 (1.38 inch/s)가 적절한 것으로 보고한 바 있다. 가속도 단위로 3g (29,403 mm/s², 1158 inch/s²)까지 허용된 경우도 있다.

표 4.4 스웨덴 학자에 의해 제안된 발파진동 허용기준 (Langefors 등, 1978, 1958, Gustafsson 1973)

지 반 조 건	토 질	점토, 모래, 자갈 (지하수위 하)	빙퇴석 (morain), 점판암 (slate) 연질 석회암	건고한 석회암, 석영질 사암, 편마암, 화강암, 휘록암	손 상 정 도	V/V _p 값 ^{a,b} (mm/s)/(m/s)
		300*a1 ~ 1500 (984 ~ 4921)	2000 ~ 3000 (656 ~ 984)	4500 ~ 6000 (14763 ~ 19685)		
		4 ~ 8 *a2 (0.16 ~ 0.31)	35 (1.38)	70 (2.76)		
		6 ~ 30 (0.24 ~ 1.18)	55 (2.17)	110 *a3, a4 (4.33)		경미한 균열 발생 (균열발생 경계치)
		8 ~ 40 (0.31 ~ 1.57)	80 (3.15)	160 *a3, a4 (6.30)		뚜렷한 균열발생
		12 ~ 60 (0.47 ~ 2.36)	115 (4.53)	230 *a3, a4 (9.06)		심각한 균열 발생

* 1 : 건물주변 지반, 건물기초에서 측정할 것을 비교하여 들 중 큰 값으로 함.

* 2 : 암반의 경우 70mm/s(2.76 inch/s), 토사지반의 경우 50mm/s(2.0 inch/s)를 실무차원에서의 "안전 확인치"로 권장; 균열상태에 주의할 기울이는 경우, 100mm/s(4.0 inch/s)까지도, 손상이 전혀 없거나 극히 경미한 손상을 유발하는 정도로 발파 수행 가능; 발파 강행이 부득이한 경우, 150mm/s(5.91 inch/s)까지라도, 손상 가능성은 중대하나, 손상시 완벽한 보수의 비용 부담을 감수한다면 발파수행 가능. 한편, Gustafsson (1973)은 건설한 콘크리트 구조물은 200mm/s 이상의 발파진동에도 견딜 수 있음을 밝힌바 있다.

* 4 : V_p 기준값을 약 5000m/s로 가정하고, V 기준값은 표의 V_p=(4500~6000)m/s에서의 허용치 (각각 70, 110, 160, 230 mm/s)를 그대로 한 것임. 이 밖에도 Langefors(1958)는 V/V_p=0.006일 때는 "회벽이 떨어지거나 균열 없음", V/V_p=0.001일 때는 "균열의 흔적없음", V/V_p=0.06일 때는 "경도에서 낙석이 시작됨"을 규정하고 있다.

* a : Gustafsson(1973)은 a1: 1000m/s를 하한치로 보았다.

a2: 18mm/s로 하였다.

a3: 각각 (100, 150, 225)mm/s로 하였다.

한편 당초 Langefors(1958)는 a4: 각각 (107.5, 157.5, 227.5)mm/s로 하였다.

* b: Gustafsson (1973)은 비록 허용진동치가 주어졌지 하나, 손상 가능성의 평가는 V/V_p 값을 기준해야 함을 강조하였다(특별히 기초지반이 암반인 경우에는 - 필자 주)

Gustafsson (1973)은 V/V_p를 "전단변형각 (shearing angle)" 이라고 부르고 있는데, 수식적으로는 "압축변형각"이라고 하는 것이 옳다고 생각할 수 있으나 압축파에 의해 지반은 압축·인장되지만 구조물에서는 전단변형이 발생함에 유념하면 오히려 적절한 것이다 (그림 3.1 참조).

표 4.5 지반조건을 고려한 구조물 종류별 허용 발파 진동치 (after Esteves)

지 반 조	토 질	결집력이 없는 토사, 토사 및 자갈의 혼합			결집력이 어느정도 있는 토사, 균일하고 높은 등급의 모래		결집력이 있는 토사 및 암반
		1000 이하 (3281)	1000 - 2000 (3281 - 6561)	2000 이상 (6561)	5 (0.20)	10 (0.39)	
입자 속도 V , mm/s (inch/s)	압축파 속도 V_p , m/s (ft/s)	2.5 (0.10)					
	유적, 병원, 초고층 건물						
※ 백터 합성치	일반 건물	5 (0.20)					
	철근 콘크리트, 내진 구조물	15 (0.59)					

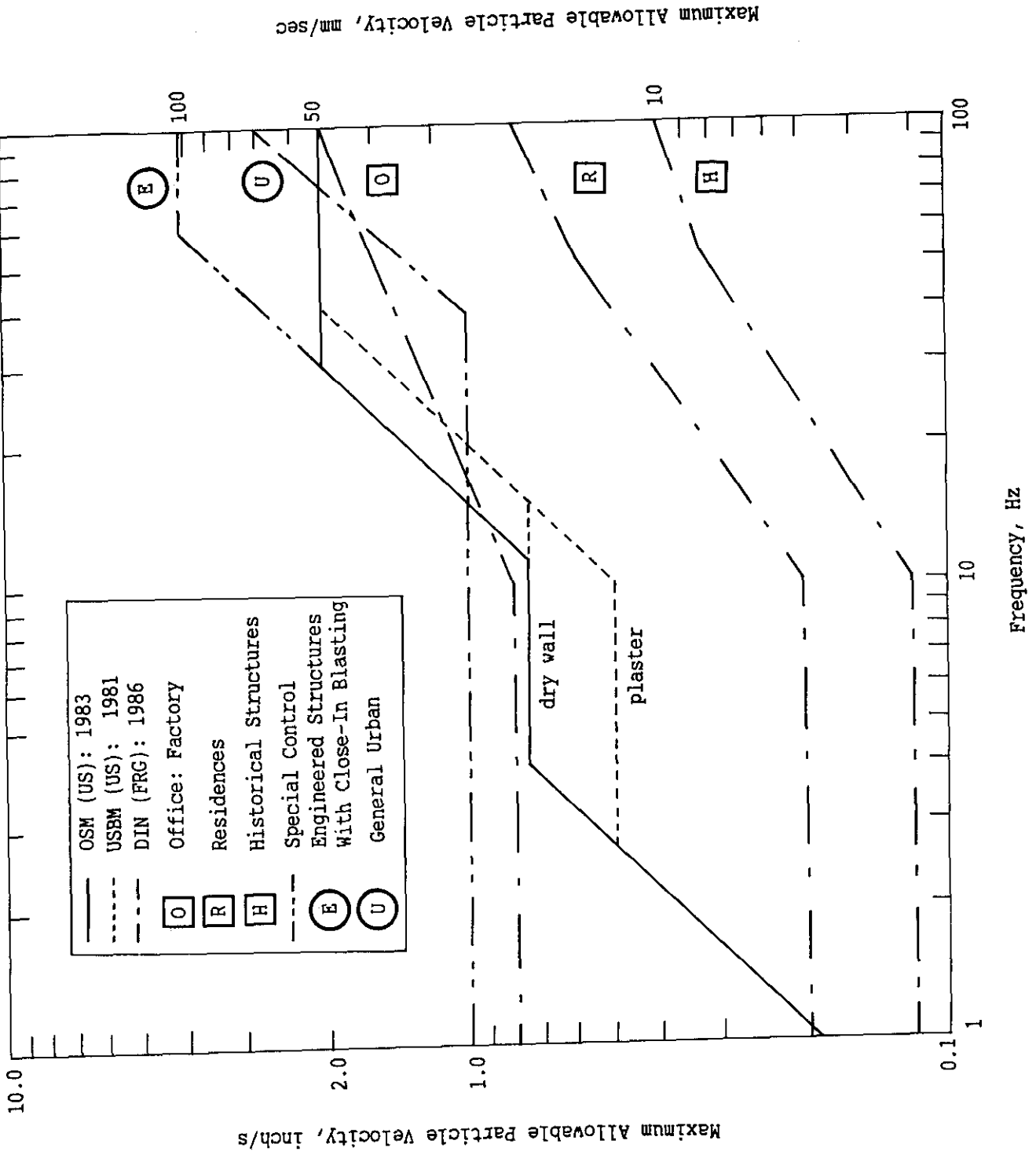


그림 4.2 OSM/USEM 허용발파 진동규준 곡선과 DIN 4150 - part 3 및 ISRM 기준 비교

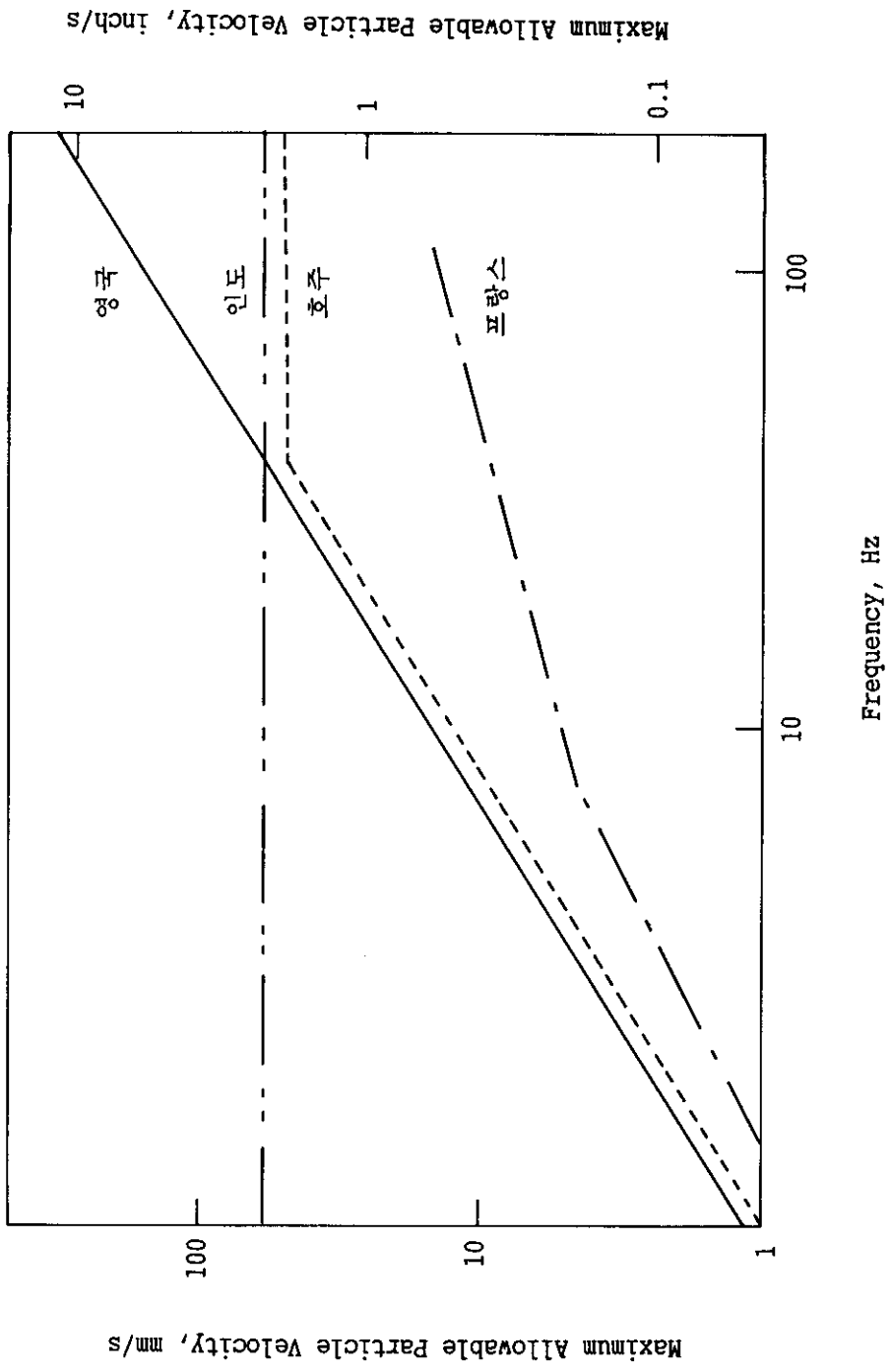


그림 4.3 영국 · 호주 · 프랑스 · 인도의 진동규제 기준 비교

관성이 없고 연도가 오래된 것이 많아 별도로 기재하지 않았다.

일본의 경우는 공해진동에 대해서는 구체적이고 세밀한 규제법이 있으나 구조물 손상에 관한 규정의 존재 여부는 불확실하다. 그러나 일부 문헌에 의하면, 1976년 공표 진동규제법에서 다음의 기준을 적용하는 것으로 판단된다.

- 2 mm/s 이하 : 피해 발생 많음
- 2~5 mm/s : 진동감지 가능하나 구조물 피해 없음
- 5~10 mm/s : 취약한 부분에서 경미한 피해발생 가능성 있다.

그러나 보수를 요하는 큰 손상은 발생하지 않는다.

5. 결 론

이 글에서는 앞으로 국내 진동규제 기준의 제정과 관련하여 일차적으로 구조물의 손상 평가 측면에서 감안해야 할 기술적 고려사항에 대하여 고찰해 보았다. 아울러 주요 진동규제 기준을 분석하여 향후 국내 진동규제기준의 정립 및 적용과 관련해 참조해야 할 측면을 검토하였다. 우리나라도 앞으로 진동폐해에 대한 문제가 날로 심각해짐을 고려할 때 관·산·학계가 연계된 연구가 조속한 시일내에 착수되기를 바란다.

참 고 문 헌

1. 우 제윤 (1989) "표면파 기법을 이용한 자연지반 및 포장구조의 동적 특성 추정에 관한 연구," 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제 8권, 제 4호, pp. 49~57.
2. 한국과학기술원 (1982), 지하철 3, 4호선 인접문화재 보호대책 수립을 위한 조사 연구. p 230.
3. DIN 4150 - part 3 (Revised May 1986): Structural Vibration in Buildings; Effects on Structures.
4. Dowding. C. H. (1985). Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice - Hall Inc., p 297.
5. Gustafsson. R (1973), Swedish Blasting Technique, SPI, Gotherburg, Sweden, p 328.
6. ISRM(1992), "Suggest Method for Blast Vibration Monitoring," Int'l Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Pergamon Press.

pp. 143~146.

7. Langefors. U and Kiklstorns. B (1978), *The Modern Technique of Rock Blasting*, 3rd. ed., A Halsted Press Book - John Wiley & Sons, 438p.
8. New. B.M. (1990), "Ground Vibration Caused by Construction Works," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.5, No.3 pp. 179-190