

소음·진동 피해진단 기술 정립방향

백용진* · 이중선* · 배동명**

(*한국건설안전기술원 · **부경대학교)

1. 머리말

최근에 성수대교 붕괴, 대구 지하철 공사장 폭발사고, 삼풍 백화점 붕괴 등을 계기로 각종 구조물의 안전에 관한 문제가 사회적 관심사로 대두되고 있으며, 이러한 사회 분위기를 반영하여 국가 기반 시설물 및 각종 구조물에 대한 안전성을 평가하는 안전진단분야가 새로운 학문으로 부각되고 있으며, 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 최근 그 중요성이 강조되고 있는 소음·진동 피해진단은 내·외부의 환경적 요인에 의한 구조물과 인체 및 가축에 대한 안전성 및 사용성 평가 개념으로서 기존의 환경영향평가와는 성격을 달리한다. 즉, 환경영향평가는 환경상의 예상되는 문제점을 사전에 예측하여 악영향을 예방 또는 저감하는 측면의 제도로서 주 대상이 보통 인체이고 평가 목적도 공해성과 쾌적성 여부를 판단하는 환경적 요소에 국한되며 또한 분쟁사례의 대부분은 정신적인 피해 문제가 주로 다루어진다. 하지만 소음·진동 피해진단은 이미 발생한 문제에 대한 감정의 성격이 짙고, 주 대상이 구조물 뿐만 아니라 인체, 가축 등 다양하고 평가목적도 소음·진동원에 대한 인접 구조물, 인체, 가축 등의 안전성 및 사용성 혹은 피해 원인 규명에 있으며, 분쟁 사례로는 물질적·정신적인 피해문제가 모두 다루어진다.

현재 행해지고 있는 환경 기술자에 의한 공해성 환경영향평가와 택지조성사업, 터널공사, 각종 도로공사, 건물 해체 작업시 이루어

지는 발파 기술자에 의한 발파 영향평가 및 토목·건축 기술자들에 의해 시공현장에서 주로 행해지는 기타 건설 소음·진동 영향평가는 진단 개념에서 볼 때, 측정목적과 측정대상에 따른 각종 기준적용과 측정방법 및 분석 절차 상에서 몇가지 문제점을 안고 있으며 실제 현장 계측시에도·측정위치선정, 센서부착 방법, 측정횟수 및 측정모드선정 등에서 상당한 오류를 범하는 것을 종종 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 각종 소음·진동 영향평가의 현실태 및 피해 대상물에 대한 진단시 우려되는 기준 적용, 측정 및 분석상의 문제점들을 조사하고 개선방안을 살펴봄으로써 소음·진동 피해진단 기술을 정립하고 향후 과제에 대해 논의 하고자 한다.

2. 진단 대상 및 사례 분석

소음·진동 피해진단은 전술한 바와 같이 주로 소음·진동원에 인접한 건물이나 건물내의 거주자, 농가에서와 같이 측사가 있을 경우 가축 등이 주로 대상이 된다.

진단 사례를 분석해보면 주로 다음과 같은 소음·진동원으로부터 발생하는 민원이 대부분으로 인근 주민의 불안감 및 정신적 피해문제와 인접 구조물의 손상여부에 대한 진단이 행해지며 특히 건설공사 현장일 경우 공사 영향권 설정 및 피해대상 구조물의 피해액 혹은 보수보강 방법, 저감 대책안, 보수비용산정 등이 진단항목으로 추가되는 경우도 있다. 그 외 각종 기계설비가 설치된 공장 및 기타 구조물에서의 구조 안전진단시 가동중인 기계설

비로부터 발생하는 진동에 의한 바닥 슬라브의 안전성 여부에 대한 평가와 공동주택 내부에서 발생하는 바닥 충격음 및 실간 차음 성능 평가, 급배수 설비소음 평가 등이 있다.

- (1) 발파로 인한 소음·진동
- (2) 항타등 건설 중장비로 인한 소음·진동
- (3) 구조물 해체·파괴에 따른 소음·진동
- (4) 지하철, 도로, 철로가 통과하는 지역에서의 소음·진동
- (5) 공장등 구조물내 각종 기계설비에 따른 소음·진동
- (6) 공동주택내 내부소음

그림 1은 진단대상이 일반 구조물인 경우, 소음·진동 피해진단 과정을 개략적으로 보여주는 수행 흐름도이다. 우선 현장조사 단계에서는 주변 구조물 유무와 규모, 밀집도 및 차폐물 조사, 소음·진동원 종류·규모, 발생횟수 조사, 소음·진동원으로부터 이격거리 측정, 대상 구조물 주변의 지질상태조사, 압소음·압진동 측정 등 주변 환경에 대한 조사가 우선 이루어져야 한다.

특히 피해대상 구조물 조사는 구조물의 열화상태에 따라 허용 기준치가 결정되므로 상당히 중요한데 현재 구조물에 대한 각종 소음·진동 영향평가에서는 거의 등한시 하는 실정이다. 따라서 보다 합리적인 허용 기준치를 산정하기 위해 피해 대상물 규모, 구조 및

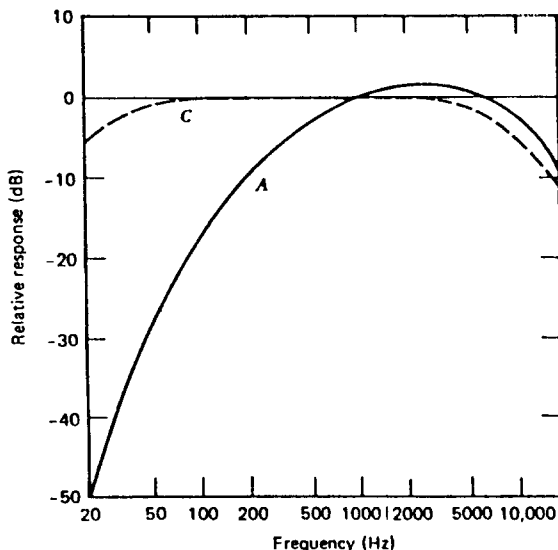


그림 1 소음·진동 피해진단의 일반적인 흐름도 (구조물일 경우)

재료형태 조사, 건물 이력·사용 용도 조사, 균열 및 열화상태조사 등이 반드시 수행되어야 하고 필요시 부등침하·변위조사, 콘크리트 압축강도 시험 등이 수행되어야 한다.

특히 발파나 각종 건설공사, 구조물 해체 및 파괴에 의해 소음·진동원이 발생할 경우 피해 대상물에 대한 균열 및 열화현상에 대한 2차 조사가 해당 작업이후 반드시 수행되어 균열 및 열화현상에 대한 진전여부, 부등침하와 같은 이차적인 피해 여부를 확인하여야 한다.

발파와 관련된 소음·진동피해 진단 의뢰시에는 간혹 안전발파 설계제탄까지 요구하는 경우도 있는데 이 때에는 발파 진동식 및 단당 장약량을 결정하기 위해 현장조사시 시험 발파가 선행되기도 한다.

사례분석에서 알 수 있듯이 소음·진동 피해진단은 각종 소음·진동원과 그에 따른 진단대상 및 목적에 따라 진단기법이 달라질 수밖에 없으며 대책(안)도 발생원 및 전파경로상의 방음·방진대책과 구조물 자체의 보수·보강 대책 그리고 시공현장일 경우 공법 및 설계변경 등 다양하게 제시할 수 있다. 따라서 다양한 분야의 전문가에 의해 측정 및 분석이 이루어져야 하며 이를 토대로 종합적인 판단에서 진단의 결과가 이루어져야 한다. 하지만 현실태는 평가 보고서가 조사자의 전문분야만이 강조되어 작성되는 경향이 있고 측정 및 분석방법도 조사자에 따라 커다란 차이를 보이고 있는 실정이다.

3. 진단 영향요소

소음은 여러가지 원인에 의해 발생되지만 그 대부분은 공기중에 존재하는 물체의 진동이나, 배기 또는 폭발 등에 의해 생성되는 공기중의 와류에 의해 발생하여 주로 대기층을 전파한다.

반면에 진동은 물체에 작용하는 충격력 또는 타격력과 회전 및 왕복 운동시에 발생하는 관성력에 의해 발생하여 지반을 타고 주로 전파한다.

경험적으로 볼 때, 소음은 전술한 사례에서 (2), (6)의 경우에 주로 발생하는 문제로 대상은 인체 및 가축인 경우가 많고 그외 (1)~(5) 사례 대부분은 진동에 따른 문제로 구

표 1 진동원의 구분

진동	구분	작업
일시진동	건설진동	폭파 : 폭파 다짐/치환-지반개량, 구조물 해체/노후 구조물 제거 등, 지질탐사 파 : 채광발파-지하/노천광산, 채석, 건설발파-터파기, 터널굴착, 구릉절토 지반타격 : 동다짐공법, 석주공법, 타격식 굴착-지하연속벽/현장타설말뚝/ 케이슨시공
		항타 : 단말뚝/터널말뚝의 타입 지반굴착 : 압따기(ripping), 파쇄, 기계식, 현장타설 기초공사-지하연속벽, 현장타설말뚝, 기계식 터널링(TBM), Shield, Load-Header 지반천공 : 시추, 어스앵커링 건설장비 : 다짐장비-진동롤러, 플레이트 콤팩터(Plate Compactor), 토공장비-불도저
지속진동	교통진동	도로차량진동 : 도심중 교통도로, 고속도로 철도열차진동 : 지하철, 일반철도, 고속철도
	산업진동	동력기계 : 회전 원동기, 터빈 등 왕복운동, 동력기, 컴프레서 가공기계 : 채련·제지·절삭기계 기타 : 대형 크레인

조물 피해진단이 대부분이다. 따라서 진동의 영향요소에 대해서는 주로 진동에 관해 살펴보고 영향 인자로 작용하는 요소들을 발생원, 전파매질, 수신부(피해대상)로 나누어 논의하고자 한다.

3.1 발생원

앞장에서 전술한 바와 같이 소음·진동원은 다양하게 주어진다. 하지만 피해진단 측면에서 가장 중요한 소음·진동원 특성은 지속시간 및 발생빈도이다. 왜냐하면 지속시간 및 발생빈도에 따라 각종 평가기준 적용 자체가 달라지기 때문이다.

소음·진동은 지속시간에 따라 일시적인 것과 지속적인 것으로 나눌 수 있는데 진동의 경우, 지속진동은 기계진동과 같은 정상진동(steady-state vibration)이나 진동 햄머의 진동과 같이 연속적으로 발생하는 진동(continuous vibration)을 말하며 일시진동은 폭발 및 충격과 같은 일과성의 진동을 말한다. 열차진동과 같이 진동은 일시적이지만 일련의 충격진동이 비교적 짧은 시간간격을 두고 반복되어 발생빈도가 빈번한 경우 연속진동에 포함된다.

지속진동의 공진(resonance)이나 피로(fatigue)효과에 의한 궁극적인 손상정도는 단지 진동의 강도 자체만으로 예측될 수 없다. 따라서 진동에 따른 피해진단 결과 도출

시 대상건물의 상태를 충분히 반영하여 고도의 공학적 판단에서 이루어져야 한다.

소음은 일반적으로 그 변동특성에 따라 정상음, 변동음, 간헐음, 충격음, 분리 충격음, 준정상 충격음의 6종류로 분류되고 건설기계의 주요 작업소음을 위의 분류 방식에 따라 구분하면 표 2와 같다.

3.2 전파매질

일반적으로 소음은 주로 공기층을 통해 전파되고 진동은 가진원이 구조물 외부에 있을 경우에는 주로 지반을 통해, 내부에 있을 경우에는 주로 구조물을 통해 전파된다. 진동원에서 발생하는 탄성파(elastic wave)는 전파매질에 따라 P파, S파, 표면파 형태로 전달

표 2 주요 건설기계의 작업 소음의 분류

소음의 분류	주요 건설기계의 작업소음
정상	Reverse Circulation Drill 굴삭기, 콘크리트 커터, 공기압축기, 발동 발전기
변동	불도저, 트랙터쇼벨, 유압 쇼벨, Road-Roller, Earth-Drill 굴삭기
간헐	콘크리트-블레이커, 리벳팅 기계
충격	(발파)
분리 충격	디젤 파일 햄머, 포장면 파쇄기, Steel Ball Rammer
준정상 충격	진동파일 드라이버, 천공기

되며 전달매질의 종류 및 대상 구조물의 이격 거리에 따라 도달하는 탄성파의 종류 및 크기는 상이하다.

진동원이 구조물 외부에 존재하고 전파매질이 지반일 경우 야기되는 지반진동은 전달지반의 종류 및 물성치, 대상 구조물의 기초지반 상태에 따라 평가기준 적용이 달라진다. 특히 지반진동에 의한 인접 구조물의 피해는 느슨한 사질토 또는 입상토질의 토사지반의 경우에는 지반다짐으로 야기되는 부등침하에 의한 손상과 같은 이차적인 피해를 생각할 수 있으므로 조사대상 지역의 부지 특성 파악은 간과할 수 없는 일이다.

외부 진동원의 경우 다시 전파경로에 따라 지표면 진동과 지중진동으로 나누어진다. 예를들면 도로에서 발생하는 교통진동은 지표면 진동으로 지하철 진동은 지중진동으로 구분되고 말뚝항타의 경우 진동원의 깊이가 계속 변하므로 깊이변화에 의한 영향도 고려하여야 한다. 지반에 전달되는 진동의 강도 및 진동 에너지의 주파수 분포 특성은 진동원의 기진 특성 그 자체보다는 진동원-지반의 전달 특성 또는 동역학적 순응 특성(dynamic impedance characteristic)에 큰 영향을 받는다. 지반 진동을 전파시키는 주 매질인 지반의 특성은 탄성파의 전파특성, 동역학적 물성-동탄성계수(dynamic moduli), 또는 탄성파 속도값(elastic wave velocity) 및 재료감쇠(material damping) 또는 내부감쇠(internal damping)와 밀접한 관계가 있다.

대부분의 경우 지반 탄성파의 진폭은 진동원에서 거리가 멀어질수록 감소하나, 지반의 성층 특성상 지반내 특정한 지층 또는 경로를 따라 큰 진동에너지가 전달됨으로 인하여 지반진동 강도는 진동원에서 가까운 지점보다 오히려 먼지점에서 크게 될 수 있다. 이와 같은 현상은 지반내에 큰 규모의 암맥이 진동원과 멀리 떨어진 수진체에 걸쳐 있는 경우, 파로 효과(wave guide effect)에 의하여 발생되거나 단층대 및 파쇄대와 동일 구조물들의 상호작용으로 진동이 회절 또는 간섭 됨으로써 발생될 수도 있다. 또한 비교적 심도가 깊은 연약 토사층이 하부인 견고한 암반층 위에 놓이고 진동이 토사층의 고유진동수에 근접하면 지반자체에 공진 현상이 초래되어 지반진동이

증폭될 수 있다.

구조물의 손상 가능성을 예측하는 척도로서 입자속도가 가장 널리 채택되고 있는 이유중의 하나는 입자속도와 변형률 사이에 직접적인 비례관계가 성립하기 때문이다. 그러나 실제로 변형률의 크기는 입자속도 뿐만 아니라 지반 탄성파 전파속도(즉 지반의 강성도)에 따라서도 변화한다는 점에 유념해야 한다.

3.3 수신부(피해대상)

소음·진동의 피해대상은 크게 구조물, 인체, 동·식물 등으로 나눌 수 있다. 하지만 경험적으로 볼 때 소음에 따른 영향은 인체, 가축이 지배적이고 구조물은 진동에 따른 피해가 지배적이다. 따라서 소음은 정신적 피해 문제로, 진동은 물적인 피해 문제로 귀착되는 경우가 허다하나 실제 민원의 경향은 인체의 감지 수준 정도에서의 소음·진동에 대해 정신적 피해 뿐만 아니라 보상 또는 반대 급부의 기대심리를 물적 피해로 연관시켜 민원을 제기하는 사례가 많다. 특히 국내에서는 구조물에 대한 허용기준이나 성문화된 법률, 조례가 미비한 상황에서 민원 발생시 피해 판정 기준이 모호하여 건설업계와 민원인들 당사자간에 협상·타결이 어려운 형편이다.

피해보상 판정에 대한 대법원 판례를 분석하면 수신부측의 피해대상이 인체의 경우에는 연령, 건강상태, 주변환경 등에 따라, 가축의 경우에도 가축의 종류, 상태 등에 따라 피해 판정에 대한 판례 사례가 다르므로 각종 기준 적용시 유의해야 한다. 피해대상이 구조물일 경우에도 마찬가지로 구조물의 열화상태, 기초 지반상태, 지하실 유무 등에 따라 허용 진동치가 달리 결정되므로 대상 구조물에 대한 전반적인 조사가 필수적이나 현재 각종 구조물에 대한 소음·진동 영향평가에서는 거의 등한시 하는 실정이다.

4. 문제점 및 개선방안

4.1 평가 기준 적용

표 3에서와 같이 일반적인 공해성 환경영향 평가에서 기준으로 삼고 있는 국내 법적 규제치는 소음·진동 모두 인체에 대한 기준으로 평가척도도 소음의 경우 건강한 사람이 가장

표 3 건설 및 생활소음·진동규제기준 (제32조, 제57조 관련)

① 건설소음규제기준

[단위 : Leq dB(A)]

대상지역	시간별	조 석 (05:00~08:00, 18:00~22:00)	주 간 (08:00~18:00)	심 야 (22:00~05:00)
주거지역, 녹지지역, 준도시지역중 취락지구 및 운동휴양지구, 자연환경 보전지역, 학교·병원·공공도서관의 부지경계선으로부터 50m이내 지역		65 이하	70 이하	55 이하
상업지역, 공업지역, 농림지역, 준농림지역 및 준도시지역중 취락지구외의 지구, 미고시지역		70 이하	75 이하	55 이하

② 생활소음규제기준

[단위 : Leq dB(A)]

대상지역	시간별		조 석 (05:00~08:00, 18:00~22:00)	주 간 (08:00~18:00)	심 야 (22:00~05:00)
	대상지역				
주거지역, 녹지지역, 준도시지역중 취락지구 및 운동휴양지구, 자연환경 보전지역, 학교·병원·공공도서관의 부지경계선으로부터 50m이내 지역	확성기에 의한 소음	옥외설치	70 이하	80 이하	60 이하
		옥내에서 옥외로 방사되는 경우	50 이하	55 이하	45 이하
	공장·사업장 또는 건축설비에서 발생하는 소음		50 이하	55 이하	45 이하
	공사장의 소음		50 이하	70 이하	55 이하
상업지역, 공업지역, 농림지역, 준농림지역 및 준도시지역중 취락 지구외의 지구, 미고시지역	확성기에 의한 소음	옥외설치	70 이하	80 이하	60 이하
		옥내에서 옥외로 방사되는 경우	60 이하	65 이하	55 이하
	공장·사업장 또는 건축설비에서 발생하는 소음		60 이하	66 이하	55 이하
	공사장의 소음		70 이하	75 이하	55 이하

비 고 : 1. 대상지역의 구분은 국토이용관리법에 의하며, 도시지역은 도시계획법에 의한다.

①+② 2. 공사장 소음의 규제기준은 주간의 경우 소음발생기간(작업시간)이 1일 2시간 미만일 때 +10dB, 2시간 이상 4시간 이하일때는 +5dB를 보정한다.

3. 확성기 사용기준 : 옥외에 설치한 측정기의 사용은 1회 2분 이내로 하며, 15분이상 간격을 두어야 한다.

③ 건설, 생활진동규제기준

[단위 : Leq dB(A)]

대상지역	시간별	주 간 (08:00 ~18:00)	심 야 (22:00 ~05:00)
주거지역, 녹지지역, 준도시지역중 취락지구 및 운동휴양지구, 자연환경 보전지역, 학교·병원·공공도서관의 부지경계선으로부터 50m이내 지역		65 이하	60 이하
상업지역, 공업지역, 농림지역, 준농림지역 및 준도시지역중 취락지구외의 지구, 미고시지역		70 이하	65 이하

비고 : 1. 대상지역의 구분은 국토이용관리법에 의하며, 도시지역은 도시계획법에 의한다.

2. 본 규제기준은 주간에 한해 진동발생기간이 1일 4시간 이하 일때에는 +5dB를 보정한 값으로 한다.

할 수 있는 1 kHz 음의 최저 음압 실효치 $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ 를 기준으로 하고 있다. 또한 진동의 경우 4~8 Hz로 상하진동하는 가속도 실효치 10^{-5} m/s^2 를 기준으로하여 임의의 음압 또는 가속도 실효치를 비교 단위로 나타낸 데시벨을 사용한다. 이와같은 단위가 사용되는 것은 사람의 감각이 외부의 음압 또는 가속도의 자극에 대수척도로 비례하기 때문이다.

소음·진동에 대한 인간의 감각은 주파수에 따라서 상이한데 소음의 경우 기준으로 정한 1 kHz 보다도 낮은 주파수에서는 감각이 둔하고 진동의 경우도 기준으로 정한 4~8 Hz 이외의 주파수에서는 감각이 둔하다. 따라서 환경중에 존재하는 소음 또는 진동의 주파수 대역별 레벨에서 감각이 둔하여 실제로 느끼지 못하는 양을 뺀 값을 소음도 또는 진동레

벨이라하며 이 양이 실제로 감각되는 레벨이다. 소음·진동 측정기에는 표 4에 제시된 보정량과 같이 느끼지 못하는 양을 전기적으로 소거하는데 이를 소음계의 경우 A특성이라고 하고 진동레벨의 경우는 V특성이라고 하며 우리나라 소음·진동 규제법의 공정 시험 방법에서 선택하고 있는 감각보정회로이다.

따라서 이러한 소음계와 진동레벨로 측정된 데이터를 구조물에 그대로 적용하여 피해성 여부를 판단하는 것은 부적절하다. 왜냐하면 환경 규제 기준치나 데시벨 측정기기 측정치 자체가 인체에 대한 감각보정치를 기준으로 한 것이고 특히 구조물 관련 각종 진동기준은 속도의 향으로 표현한 것이 많아 데시벨 측정치는 주파수에 따라 환산 해야하는 등 비교점도 절차가 까다로워지기 때문이다.

진동의 경우에는 데시벨 이외에도 속도, 가

표 4 주파수 대역별 소음·진동의 보정량

중심주파수(Hz)	31.5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
소음보정량(dB)	-39.4	26.2	-16.1	-8.6	-3.2	0	+1.2	+1.0	-1.1
중심주파수(Hz)	1	2	4	8	16	31.5	63		
진동보정량(dB)	-6	-3	0	0	-6	-12	-18		

표 5 1986년 개정본 DIN 4150-part 3 (일시진동)

건물의 등급		I	II	III
건물의 형식		상업 혹은 산업용 건물 : 사무실, 공장 건물	주거용건물 : 연립주택, 단독주택, 아파트	진동예민 구조물 : 취약건물, 문화재 등의 중요 구조물
주파수별 허용진동 속도 V_R (mm/s)	10Hz이하	20	5	3
	10~50Hz	20~40	5~15	3~8
	50~100Hz	40~50	15~20	8~10
	주파수복합	40	15	8

표 6 서울 지하철의 허용 진동 기준치

구 분	문화재	주 택 아파트	상 가	철근콘크리트 빌딩 및 공장	컴퓨터 시설물 주변	비 고
건물 기초에서의 허용 기준치(cm/sec)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0	0.2	

비고 : 1) 위의 기준은 서독의 Vornorm DIN 4150, Teil 3을 기준

2) 주파수는 약 100 Hz까지 통요

3) 연속진동인 경우 위의 값의 1/3을 적용

4) Pick up 위치를 해당 건물의 외부마당(Ground)에 설치함을 기준으로 한다.

속도, 변위 등 3가지 물리적 척도로써 나타낼 수 있는데 건물에 대한 진동의 허용한계도 이러한 척도에 따라 여러가지 설이 있다. 예를 들면 Langefors, E. Banik, F. J. Crandell, J. F. Wiss 등은 속도를 기준으로 피해정도를 구분해야 한다고 제안한 반면, R. Westwater, Hatanaka 등은 변위를, J. R. Theone & Windes 등은 가속도를 기준으로 피해 구분을 규정할 것을 주장하였다. 이와같이 학자마다 주장이 다양한 것은 건물에 대한 피해기준으로서 아직 정설이 없다는 것을 뜻하는데 이 원인은 첫째, 진동에 의한 피해가 변위나 속도에 의존하는지 아니면 가속도에 의한 것인지 피해의 기구가 불분명하고 둘째, 건물이라고 하여도 목조건물, RC건물 등 구조와 재료에 따른 종류 및 특성이 다양한데다 그 보존상태(노후도)도 매우 다르기 때문이다. 하지만 유럽, 캐나다, 미국 등에서 수십년간에 걸쳐 수행된 연구들을 종합해보면, 인체가 감응하는 정도는 가속도 성분에 따라 변하고 지상이나 지하 구조물이 받는 피해의 정도는 진동 속도 성분과 직접적인 관련이 있는 것으로 보고되고 있다.

독일, 스위스, 스웨덴 등 환경 문화의식이 높은 서유럽 국가에서는 오래전부터 자국에 맞는 진동허용기준을 설정하고 진동을 억제하기 위한 노력을 기울여 왔다. 최근에는 대부분의 기준이 입자속도 뿐 아니라 구조물의 종류, 진동 지속시간, 주파수 범위 등을 고려하여 진동 기준치를 체계적으로 정립하여 제정하고 있다. 특히 독일은 3부분으로 구성되어 있는 DIN4150을 통하여 건물에 대한 진동기준을 실증적이고 체계적으로 제정·적용하고 있다. 1986년 개정분에서는 일시진동과 정상진동으로 구분하고 구조물 전체와 구조물 부재에 대한 기준을 따로 구분하였으며, 다시 구조물 전체에 대한 것을 3등급으로 분류하여 허용 최대속도를 제한하고 있다. 표 4는 일시진동에 대한 허용 기준을 나타낸다.

현재 국내에는 지반진동의 크기 기준치에 대한 구체적인 규제조항이 아직 없는 상태이며 표 5에서 보는 바와 같이 서울 및 부산 지하철 발파 작업시 적용했던 건물 및 지상 구조물에 대한 진동 기준을 일반 건설공사에 적용시키고 있는 실정이며, 이 기준도 외국의

기준치를 근거로 작성, 사용하고 있는 실정이다. 따라서 구조물에 대한 국내의 허용 진동 기준 제정 및 관련 법률 개정이 시급하며 현재 국내의 각종 허용기준을 적용할 경우에는 물적 피해기준과 인체 및 동·식물의 피해기준을 분리시켜 적용하는 것이 좋다. 즉, 소음·진동 규제법상의 규제 기준치는 주로 인체 및 가축에 응용 적용하는 것이 좋고 구조물에 대한 기준 적용은 외국의 사례를 참조하되 대상 건물에 대한 충분한 조사가 이루어진 뒤 기준치 적용을 합리적으로 운용해야 함으로써 과다한 공사비용 및 무분별한 민원을 예방해야 한다. 여기서 민원인들이 명심해야 될 사항은 구조물에 대한 이러한 외국 기준치도 진동을 규제할 목적으로 작성한 기준치이므로 대체로 상당히 엄격한 편인데 기준치를 초과하였다고 해서 반드시 피해를 유발하지는 않는다는 사실이다.

4.2 측정기기 선택 및 측정 방법

먼저 소음 측정기의 경우, 국내 환경부 공식 승인을 마친 장비를 사용하는 것이 좋다. KSC-1502, 1505에서 정한 사용기준을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 간이 소음계는 예비조사 등 소음도의 대략치를 파악하는데 사용되며 소음을 규제, 인증하기 위한 목적으로 사용되는 기계로는 KSC-1502에 정한 보통 소음계 또는 이와 동등 이상의 성능을 가진 것으로 dB 단위로 표시하는 것을 사용하여야 한다.

(2) 소음 측정기는 견고하고 빈번한 사용에 견딜 수 있어야 하며 항상 정도를 유지할 수 있어야 한다.

(3) 성능

① 측정 가능 주파수 범위는 31.5 Hz~8 kHz 이상이어야 한다.

② 측정 가능 소음도 범위는 35~130 dB 이상이어야 한다. 다만, 자동차 소음 측정에 사용되는 것은 45~130 dB 이상이어야 한다.

③ 각 특성별(A특성 및 C특성) 표준 입시각의 응답과 그 편차는 KSC-1502의 부표 1을 만족하여야 한다.

④ 레벨 레인지 변환기가 있는 기기에 있어서 레벨 레인지 변환기의 전환오차가 0.5

dB이내 이어야 한다.

- ⑤ 지시계의 눈금오차는 0.5 dB이내이어야 한다.

측정방법은 KSA 0701-1987 소음 공정 시험법을 준용하는 것이 좋는데 배출허용기준 측정법, 규제기준 측정법, 환경 기준 측정법, 발파·항공기 소음 측정법 등으로 나누어 있어 소음원의 종류와 측정목적에 따라 측정법을 달리 하고 있다. 그러나 공통적으로 측정 지점 및 위치는 피해자측 부지 경계선 중 소음도가 가장 높을 것으로 예상되는 지점을 택하고 지면에서 1.2 m 높이에서 측정하도록 하고 있다.

소음계의 동특성은 신호에 대한 계기의 응답특성을 나타내는 것으로 시정수에 따라 Fast, Slow로 나뉘고 Fast는 청감에 비교적 가까우며 Slow는 변동하는 소음의 평균적인 값을 읽기 쉽게하기 위한 것이다. 따라서 측정 소음원에 따라 적당한 동특성을 결정하여야 한다.

소음계의 청감보정회로는 A특성에 고정하여 측정하도록 하고 있으나 전술한 바와같이 A와 C보정회로는 인체에 대한 특성으로 가청 응답을 연구하는데 적합하지만 구조물 응답에 관련된 필요정보를 기록할 수 없다. 이런점에서 특히 발파 기술자들이 간과하는 점은 발파로 인한 발파풍과 같은 공기압력 파동을 측정할 경우 고주파수 압력의 음향과 진동을 흔들리게 하는 저주파수 파동이 동등하게 응답하지 않는다는 사실이다. 따라서 발파시 소음측정은 구조물에 구조적인 임계범위인 5~10

Hz와 인간의 가청 범위의 압력을 모두 정확하게 기록하는 선형 시스템이 필요하다.

피해진단의 대상이 가측인 경우 일반적으로 현장에선 A특성으로 측정된 뒤 상대적으로 사람보다 민감할 것이라는 막연한 판단을 내리고 있는 실정이다. 따라서 대상 가측의 청감 특성에 대한 연구가 절실하며 가측의 종류 및 상태별로 소음·진동 피해 발생에 대한 통계적 자료가 지속적으로 이루어져야 한다.

진동 측정의 경우 측정 목적이 공해성 환경영향평가일 경우 소음 측정과 마찬가지로 공정 시험법을 준용하고 측정장비도 KSC-1507에 정한 진동 레벨계 또는 이와 동등 이상의 성능을 가진 것이면 된다. 하지만 진동에 따른 피해진단시에는 구조물에 대한 외국의 각종 진동기준과 비교검토가 용이해야 하므로 속도 측정이 가능한 장비가 편리하며 신호처리 기술에 의해 변위 및 가속도로 전환이 가능하고 주파수 분석이 용이해야 한다.

여기서 한가지 확인해 두어야 할 것은 측정 장비 센서의 주파수 범위와 측정가능 지속시간, 데이터 메모리 용량 등이다. 즉 진동에 따른 신호의 파형, 주파수, 지속시간 등에 따라 적절한 장비를 선택하고 측정계를 구성해야 한다. 발파와 달리 진동원이 차량, 지하철, 공장의 기계설비 등과 같이 연속 진동의 경우 일부 진동에 따른 탄성파가 구조물에 치명적인 영향을 줄 수 있으므로 진단 특성상 일정기간의 지속적인 측정이 필요하며 따라서 충분한 메모리가 필요하다.

측정센서의 주 방향은 진동원으로 향하도록 하고 진동센서의 수감측 방향이 경사지면 진동센서의 감도가 저하되므로 가능한한 수평바닥면에 설치하는 것이 좋다. 진동센서의 접촉공진을 피하기 위해 대도록 견고한 바닥면을 선정하고 바닥이 연약 지반일 경우 센서 자체를 묻거나 스파크(spike)로 고정하여 바닥과 일체 거동토록 한다.

건물내에서 진동 측정시 특히 환경 기술자들이 범하기 쉬운 오류는 건물의 구조적 특성을 감안하지 않은채 진동원에 인접한 특정 부위만 선택해서 측정한다는 것이다. 건물내에 측정시에는 슬래브 중심부에서 주로 최대 연직방향의 진동 진폭을 얻을 수 있고 강성 지 지보(예 : 기둥, 보)에 가까울수록 연직방향

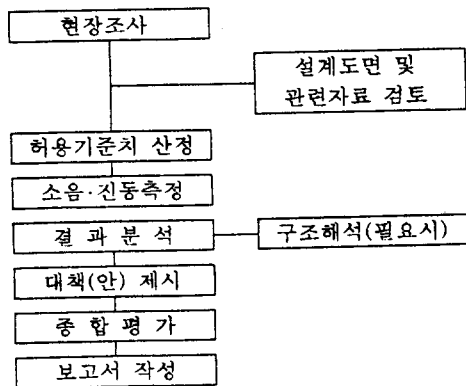


그림 2 청감 보정 회로

의 진폭은 줄고 상대적으로 수평방향의 진폭이 증가하므로 대상구조물의 구조 및 직하층의 벽체 및 지지부 형태에 따른 위치선정이 필수적이다. 켄틸레바 및 내민보의 경우 자유단 근방에서 최대진폭이 예상되고 벽체에 센서를 부착할 경우에는 벽체 중앙부, 벽체 개구부 모서리, 벽체 상단부에 주로 설치하여 벽체의 굴곡, 전단 및 비틀림 현상을 측정하고 벽체와 기둥, 벽체와 천정 이음매의 균열 여부를 관찰하도록 해야한다.

4.3 데이터 처리 및 평가분석방법

소음 측정치는 디지털 소음 자동 분석계나 레코더 등으로 기록한 측정 데이터를 공정 시험법에서 언급하는 자료분석 절차를 그대로 준용하면 될 것이다. 왜냐하면 경험적으로 볼 때 토목·건축 현장에서의 소음측정은 대부분 공해성 영향평가의 일환이고 대상도 인체 혹은 가축이기 때문이다. 그러나 평가 분석시간과해서 안 될 것은 이러한 소음 측정치가 규제 기준을 초과하지 않더라도 소음이란 원래 인간의 주관적 내지 심리적인 요소가 많이 작용하므로 사람에 따라서 또한 동일 인물이라도 때와 장소에 따라서 소음을 인식하는 정도가 다르다는 점이다.

진동의 경우는 발파와 같은 일과성 진동 혹은 충격진동의 경우 대부분 지속시간이 짧기 때문에 전체 파형을 기록한 뒤 주파수 분석 등을 통해 자료분석을 행하면 된다. 그러나 항타기, 차량, 열차 및 공장의 기계설비 진동과 같은 연속진동은 앞서 언급한 바와 같이 진단 특성상 일정한 시간동안 지속적인 측정을 통해 최대값의 평균을 산출하는 것이 바람직하고 반복진동에 따른 누적된 피로효과도 고려해야 한다.

한편 허용 진동치 산정이나 구조물의 피해 진단 결과 판정은 구조물의 기초 및 지반, 구조물 상태(노후도), 구조형태, 재료적 특성, 진폭 혹은 공진 현상 등과 같이 진동응답에 영향을 미치는 여러변수들에 대한 종합적인 고려에 의해서 결정되어야 한다. 실제로 문제를 일으키는 진동원이 건물 내부에 있을 경우, 예를 들면 공장의 기계설비와 같은 경우 건물의 각 부재로 전파하여 가는 주기가 짧은 진동은 슬래브 및 기둥에 곱힘 진동을 일으켜

건물 전체로 보면 국소적인 진동이나 부재의 안전성 면에서는 심각한 문제로 발전되는 경우가 허다하다. 따라서 구조물의 동적해석을 포함한 진동해석을 하여 그 특성을 반드시 분석할 필요가 있다.

지반으로부터 건물에 미치는 진동의 증폭문제도 특히 중요한데, 피해자가 실내에 거주하고 있음에도 불구하고 진동 측정 및 진동 규제 대부분이 지반상의 값으로 행해지고 있다는 점이 문제로 되고 있다. 구조물 및 구조물내 거주자에 대한 피해진단시는 지반상과 건물내부에서의 측정을 병행하여 증폭 및 감쇠 정도를 확인해 두는 것이 좋다. 건물에서 진동의 증폭율은 구조에 따라서도 다르며 대략 강성이 적은 방향의 성분쪽이 강성이 큰 방향 성분쪽보다도 증폭율이 크게 되는 경향이 있고 자연 지반과 콘크리트 바닥이나 기초상의 진동을 비교하면 강성이 큰 후자의 경우에 진동의 증폭율이 적게되는 현상을 빈번하게 경험할 수 있다. 따라서 건물 내부의 진동 응답 예측에서는 자연지반으로부터 건물 기초로의 진동의 감쇠, 건물 하부로부터 상부로의 진동 전달 특성 등 전체적 효과가 고려되어야 한다.

지반진동에 의한 인접 구조물의 피해는 진동에 따른 탄성파의 직접 전달에 의한 구조물의 손상과 진동에 의하여 발생하는 지반의 변형이나 지반다짐으로 야기되는 구조물 기초의 부등침하 등에 의한 간접적 피해가 있다. 현재 통용되고 있는 대부분의 진동 기준은 구조물의 재질이 탄성파에 의해 발생하는 응력을 얼마나 견딜 수 있느냐에 초점이 맞추어져 있어 도심지에서 반복적으로 작용하는 미소진동에 의하여 인접 건물이 손상을 입는 경우를 쉽게 간과하기 쉽다. Lacy와 Gould(1985)의 사례 연구에 의하면 현장 계측된 진동 속도가 현재 미국에서 통용되는 진동 기준치보다 훨씬 적은 0.2~1.8cm/sec의 저진동에서도 주위 건물이 손상을 입는 경우들이 보고되었다. 특히 도심지 공사에서 흔히 볼 수 있는 지반 굴착이 행해진 경우 인접지반이 측방 구속을 상실하여 발생하는 정적인 침하는 물론, 지반 구속 상태가 느슨해짐에 따라 진동침하가 증가하여 상당한 피해를 유발할 수 있다 (Dowding, 1991). 도심지에서 미소지반 진동

에 의한 지반침하는 진동원의 특성, 지반내의 구속응력, 지반의 물성치, 지형조건 등의 상호작용에 의해 유발됨으로 지반침하를 예측하기 위해서는 이들 요소들의 복합적인 영향들을 고려해야 한다.

진동의 주 진동수(dominant frequency)와 구조물의 고유 진동수가 일치하면 구조물이 공진을 일으키는 것은 기지의 사실이다. 그러나 현재 진동기준에는 이에 대한 영향이 심도 있게 고려되지 않고 있다. 따라서 피해진단시 진동원에 대한 주파수 응답해석은 반드시 필요하며 이를 바탕으로 구조물의 고유 진동수와 진동원의 주 진동수 대역을 동시에 고려한 구조물 피해 양상 관련 연구자료가 확립되어야 한다.

5. 맺음말

본 연구에서는 피해진단 사례분석을 통해 현 실태 및 문제점을 조사하고 개선방안에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 진단대상 및 목적을 분명히 파악하여 평가기준이 될 수 있는 허용 소음·진동치를 진단대상과 목적에 따라 합리적으로 설정하고 특히 진단 대상이 구조물일 경우, 대상 구조물의 안전성과 노후도에 대한 안전진단 결과와 유기적 관계에서 허용치 및 평가 결과를 도출해야 한다.

(2) 구조물의 진동에 따른 피해진단을 위해서는 구조물의 기초 및 지반 형태에 따른 영향, 구조형태에 따른 영향, 재료적 특성에 따른 영향, 증폭 혹은 공진문제, 반복진동에 따른 피로효과 등에 대한 지속적인 연구 및 국내 실정에 맞는 기준정립이나 관련 법률 개정이 절실하며 가축의 청감 특성 연구 및 소음 레벨에 따른 반응정도에 대한 통계적 자료들은 시급히 해결해야 할 과제이다.

(3) 소음·진동 피해진단은 다양한 분야의 전문가에 의해 측정 및 분석이 이루어져야 하며 이를 토대로 종합적인 판단에서 진단의 결과가 도출되어야 한다. 또한 구조물 피해 양

상관련 연구자료가 지속적으로 구축되어야 하며 진동원의 종류에 따라 인접구조물의 안전성에 상이한 영향을 미치므로 진동원 종류별(source dependent) 피해진단 기법 개발에 노력해야 한다.

참고 문헌

- (1) Dowding, E. H., 1985, Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice-Hall.
- (2) Langefors, U., and Kihlstrom, B., 1978, The Modern Technique of Rock Blasting, A Halsted Press Book.
- (3) Kinsler, L. E., and Frey, A. R., 1982, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc., Chap 11, 12.
- (4) Thomson, W. T., 1993, Theory of Vibration with Applications-Fourth Edition
- (5) Ray W. Clough, Joseph Penzien, 1993, Dynamics of Structure, MCGraw-Hill
- (6) 이정인, 임한욱, 1990, "발파진동에 의한 구조물 상호 영향평가보고서," 서울대학교 공학연구소
- (7) 유창화, 이정인, 1979, "발파작업에 의한 진반진동이 지상구조물에 미치는 영향평가에 관한 연구," 대한광산학회지, Vol. 16.
- (8) 우제윤, 1993, 한국지반공학회 지반진동위원회 학술 발표집, p. 122.
- (9) 대우기술연구소, 1988, 품질관리 지도서-건설진동편
- (10) 동아건설기술연구소, 1993, 현장기술지도서(건설환경관리-소음·진동)
- (11) 정일록, 1996, 소음·진동학, 신광출판사
- (12) 천병식, 오재웅, 1987, 지반진동 이론과 실제, 건설연구사.
- (13) 양형식, 1995, 발파진동학, 구미서관.
- (14) 송정락, 1995, 지반진동학, 엔지니어즈.
- (15) 한국소음진동공학회, 1995, 소음·진동 편람.
- (16) 환경관계법규(I)-소음진동규제법-, 홍문관 출판, 1996.3.