고속철도 터널 상부의 아파트 구조에 대한 진동 영향 평가[鑛]

장동운 | 기술개발부과장
| 02-3433-7727
| E-mail: safety@ssyenc.co.kr

1. 철도 진동 및 터널 구조의 진동특성

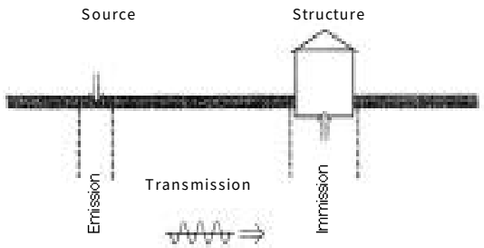
1.1 개요

철도변에서발생되는진동영향을평가하는것은크게두가지측면이있다. 첫째는구조물의동적인특성을 검토하여, 해당구조의안전도 여부를 평가하는것이다. 두 번째로는, 해당 건축물에 거주하는 주민의 인체에 미치는 영향을 검토하여, 생활환경의 불편함을초래하는지의유무를판단하여야한다. 본검토에서는 위의 두가지 핵심사항을 검토하기 위하여 공학적인 예측기법을 응용하여 진동의 크기를 분석하였다. 이와함께, 제도적인 허용기준을 조사 · 분석하여, 예상되는진동의크기를비교한후, 안전성여부를검토하고자한다.

다음 [그림 1.1]은 개략적인 지반진동의 전달과정을보여주고있다.

鑛본 고는 2002년 8월에 홍익대 철도 · 교통 연구센타에서 발간된 보고서를 발췌 · 요약한것입니다.

[그림1.1] 터널- 아파트단지의진동전파시스템



경부 고속철도의 경우 전체 노선연장 412km 중에 서토공이111km, 교량이112km, 터널이 189km로서 터널구간이전체노선의 46%를차지하며, 100m ~ 17,070m까지총 77개의터널이계획되어있고, 이 중 대전-대구 구간이 27개로서 전체의 35%를 차지하고 있다. 고속철도에서 사용되는 지하터널은 독일 DBN에서 측정 발표된 계측 자료를 참고로 하여 공기 압변동계산에의한이론적접근방법을채택하여 속도별터널내공단면을선정하였다.

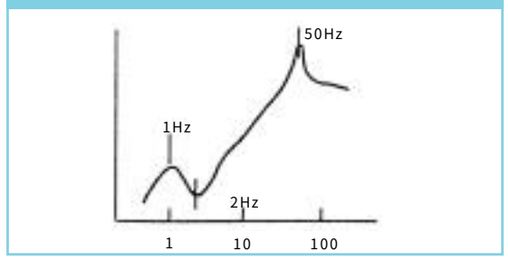
[표 1.1]은고속철도의설계기준과지하터널의단면특성을보여주고있다.

[표1.1] 고속철도의설계기준과터널단면

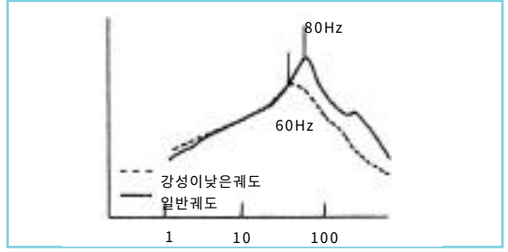
구분	한국경부고속철도
최고속도(km/hr)	300
최소곡선반경(m)	7,000
최급구배(‰)	25
궤도중심간격(m)	5.0
터널단면적(m²)	107
설계하중	UIC 하중

철도차량의 하부구조에 전달되는 주파수는 100Hz 미만의 저주파 진동이 주된 에너지대역을 이루고 있다. [그림 1.2]는고속철도의차축에서측정된진동스펙트럼을 보여주고 있다. [그림 1.2]에서 볼 수 있듯이 차량의 진동은 50Hz 대역에 최대 에너지가 분포되어 있다. 이와 함께, 궤도 하부에 전달되는 진동스펙트럼을 보면, 일반적으로 60Hz ~ 80Hz 대역이 크게 나타난다. 즉 구조물에 가해지는 진동에너지는 62Hz에 중심을 둔 옥타브대역에 놓여 있음을 알 수 있다. [그림 1.3]는궤도하부에서측정된진동주파수특성을보여주고있다.

[그림1.2] 차축의진동주파수특성



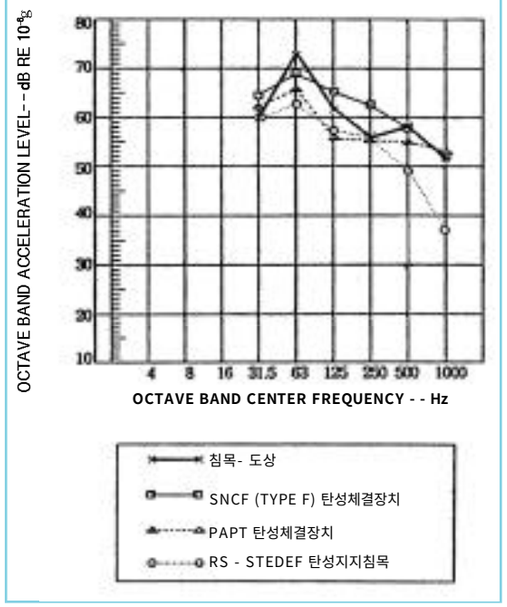
[그림1.3] 궤도하부의진동주파수특성



1.2 터널의진동전달특성

고속철도의 진동특성은 지하구조물인 터널구간을 운행하게되면터널을 지지하고있는주변지반의강성값등에따라영향을받게된다. [그림 1.4]는궤도상부에서 측정된 고속철도의 진동스펙트럼이 터널주변에미치는영향을보여주고있다. 우리나라의 고속철도는프랑스의 SNCF에서운영하는차량과동등하다고 보고 탄성궤도를 주행하는 고속철도의 진동스펙트럼을 보면 63Hz에서 70dB 초반의 크기를 가지고 있음을 볼 수 있다. 63Hz 대역 다음으로는 31.5Hz 성분이크게나타나며125Hz 이상의진동에너지는급격하게감소하고있음을볼수있다.

[그림1.4] 고속철도의궤도상부에서측정된진동스펙트럼특성

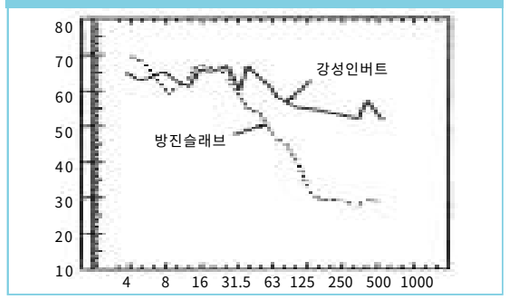


이러한 진동이 터널 내를 전파할 때에 터널의 주변 지반구조가 암반인지의 유무에 따라 진동감쇠 정도가다르게나타난다. 트랙의중심으로부터 7.5 ~ 10m 떨어진터널중암반위에놓여져있는경우60dB 수준이나타나고있음을알수있다. 역시63Hz 대역의 주파수에너지가주된진동원이되고있다.

고속철도 등 철도차량이 지하터널을 주행할 때에 진동진폭이60 ~ 70dB 수준을보여주는데이터는관련 문헌에 많이 참고되고 있다. [그림 1.5]는 지하에 매설된 터널을 철도차량이 주행할 때에 측정된 진동특성을보여주고있다.

앞의 데이터와 유사하게 진동크기는 60dB ~ 70dB 수준을 보여주고 있으며 125Hz 이상부터는 진폭이 크게감소되고있음을볼수있다.

[그림1.5] 지하터널구조물의진동특성



2. 지반진동의 특성과 전파현상

2.1 진동발생특성

최근 국내에서는 지하철, 고속철도, 고속도로, 신도시개발, 도로확충및각종대규모건설공사들이계획되어 활발히 진행되고 있는데, 건설도중 발생되는 건설 공사장의 소음 및 진동으로 인한 민원이 끊임없이 제기되고있다. 지반진동은대형건설장비의 이용, 말뚝의 항타, 암반발파 등에 의해 주로 발생되고 있다. 이와 같은 건설 공사시에 발생되는 진동이 한계치를 넘어서게되면인근구조물에손상을야기하거나인근 주민에게 불안감을 주어 결국 민원이 발생되고 이로 인한 문제가 발생할 수 있으므로 사전에 적극 대처하는것이무엇보다필요하다. 특히, 교통유발진동과건설현장 주변에 진동에 민감한 가축이나 어류 등을 기르고있는경우에는심각한문제발생의소지가있다.

지반진동은 발생원인에 따라, 점 진동원과 선 진동원으로대별된다. 점 진동원으로 대표적인작업은항타작업과 발파작업이고, 선 진동원은 철도차량의주행시나타나는것이대표적이다

2.2 진동의전파특성

지반내외의각종진동원에의해발생하는지반진동파는크게실채파(또는입체파, body wave)와표면파(surface wave)로나누어진다. 체적파는 지표면을 포함한 지반내부 전체를 통해 원구형의 파동면(spherical wave front)을 형성하며 입체적으로 전파되는 탄성파로서, 압축파(compression, primary wave : P파)와 전단파(shear, secondary wave ; S파)로 구성된다. 한편, 표면파는 원통형의 파동면(cylindrical wave front)을 갖고 파에너지의 대부분이 지표부근에 집중된 상태에서 전파되는 탄성파이다. 이러한 표면파의주종을이루는것은레일리파(Rayleight wave ; R파)인관계로표면파를흔히레일리파라고도부른다. 지표면진동파에너지의대부분은표면파(R파)에 의한 것인데, 이는 R파의 파동면이 원통형인 관계로 상대적으로 체적이 큰 원구형의 파동면을 갖는 체적파의 경우보다 전파거리(r)증가에 따른 에너지 감쇠율이 적기 때문이다. 체적파의 경우는 r^2(지표면) 및 r^1(지반내부)에반비례하나, 표면파의경우파에너지 거리감쇠율은$r^{0.5}$에반비례한다.

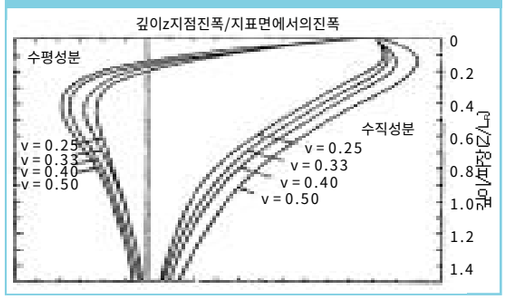
한편, 진동원이지표에놓일때지표로전달되는진동에너지의약 67%는표면파의형태로전파된다. 그리고 진동원이 지표하부에 놓인 경우라도 일차적으로 체적파형태로지표로직상승한파 에너지는지표면을 만나표면파로 바뀌어 전파되는데, 이러한표면파 에너지는내부경로를통하여 지표부근의수진구조물쪽으로직접전파되는 체적파에비하여파에너지 감쇠율이 낮으므로 지표면 진동파의 대부분은 표면파에의한것이라고간주할수있다.

즉 진동원에서 어느정도 이상 떨어진 지표부근 지점에서 발생하는 지반진동파 에너지는 사실상 표면파에 의한 것이라 간주해도 무방하다. 따라서 지반진동의 차단은 바로 이 표면파(R파) 에너지의 전달을 차단하는 것이 핵심이다. 표면파(R파)가 전술한 바와 같이 파 에너지의 대부분이 지표부근에 집중되는 특성을 갖는 것은 [그림 2.1]에 나타내었듯이 R파의 진폭은 깊이가 증가함에 따라 지수(exponential)함수적으로 급격히 감소하는 특성을 갖기 때문이다. [그림 2.1]의 진폭변화 특성은 균질지반에 대한 것인데 지방이 포아송비에 따라 다소의 차이가 있으나 파장의 1.5배 깊이 이하에서는 표면파의 영향에사라진다.

한편, 여러개의 이질토층을 갖는 다층지반 및 깊이에 따라물리적특성이점진적으로변하는비균질지반에서는 깊이에 따른 진폭변화 특성이 다소의 차이가있으나역시파장의1 1.5배깊이이상에서는표면파에너지의거의대부분이소멸된다.

한편, 표면파(R파)는 균질지반에서는 전파속도(V_R)가 진동의 주파수(f) 또는 파장(L_R)에 관계없이 일정하나, 비균질 지반에서는 진동의 주파수가 바뀌면 $V_R = f \cdot L_R$의 관계식에 따라 전파속도 및 파장이 변화하는 이른바 분산(dispersive)특성을 나타낸다. 따라서 비균질 지반에서는 지반진동파의 주파수 성분에 따라 파장이 바뀌므로 표면파의 진동영향 깊이가달라짐에유의할필요가있다. 지표층을이루는토사지반에서 표면파의 전파속도 $V_R = 100\ 350$ m/s의범위에놓인다. 그런데, 건설, 교통, 기계기초진동 등 각종 인공적 진동원에 의해 유발되는 진반진동파 에너지가 집중되는 주파수 대역의 하한계는 대부분 10 20Hz임을 고려하면, $L_R = 5$m 35m의 범위에 놓이는것으로보면된다. 지반진동차단구조물의설계시에는 이와 같은 표면파의 파장길이를 고려하는 것이설계의핵심사항이다.

[그림2.1] 표면파진폭의깊이에따른변화(균질지반)



2.3 진동전파예측식

철도차량의 주행시 철로변에 나타나리라 예상되는 지반진동의 크기를 사전 설계단계에서 파악할 수 있으면발생될수있는문제를미리적절하게대처할수 있을 것이다. 이를위해 현재 설계단계에서는예전에 수행된 유사한 지반조건이나 시공조건에서의 관련자료를 검토하여 유추하거나 일부 구간에 대해서는 시험시공을 실시하여 간접적으로 예측할 수 있는 방법을쓰고있으며또한기존에수행된많은현장측정자료를 토대로 진동예측 방정식을 도출하여 이를 현장에적용하고있다. 일반적으로지반진동은진동 발생원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 감소하는 경향을 보이나 이는 지반특성이나 시공상황, 진동발생원의 특성등여러가지요인에따라감쇠되는특성이다르게나타나고있다.

충격지점으로부터거리에따른진동의크기를예측하기 위해서는 주변을 따라 방출되는 변형에너지가 여러가지 형태의 실체파(body wave)와 표면파(surface wave)로주변지반에전파된다고 가정한다. 이들실체파와 표면파의 진폭은 파의 방사(기하학적 감쇠)와 전달 지반의 마찰(재료감쇠)에 의한 에너지 손실에 의해 항타지점으로부터 거리가 증가함에 따라 감소된다. 이러한 기하학적 감쇠와 재료감쇠를 포함시켜 측정거리에따른진동감쇠관계의식으로나타내면다음과같다.

$$A(r) = A_0(r_0)\left(\frac{r_0}{r}\right)^k \exp[-(r-r_0)] \qquad (3.1)$$

여기서, $A(r)$ = 거리r에서최대입자가속도, 속도또는변위

r =충격지점으로부터의거리

$A_0(r_0)$ = 기본거리r_0에서최대입자가속도,

속도, 또는변위

r_0 = 충격지점으로부터기본거리(Reference Distance)

k =기하학적감쇠의무차원계수

α= 재료감쇠계수[차원: (길이)^{1}]

지반에 의해 야기된 파동의 전파관계는 매우 복잡하고 진동원의 종류 등에 따라 서로 다르기 때문에, 식(3.1)에서의 기하학적 감쇠와 재료감쇠계수의 상대적 비율을 아직도 정확하게 산정하지 못하고 있는 실정이다. 그러나 많은 학자들은 점진동원의 측정치로부터 기하학적 감쇠계수(k)와 재료감쇠계수(α)를 추정하고 있다. 예를 들면 Lo(1977), Dalmatov (1977), 그리고Clough 및Chameau(1980) 등은그

$$A(r) = A_0(r_0)\left(\frac{r_0}{r}\right)^{1/2} \exp[-\alpha(r-r_0)] \qquad (3.2)$$

들의진동치데이타로부터식 (3.2)에서 기하학적감쇠계수k의값으로 1/2을제시했다.

재료감쇠계수의 경우도 기하학적 감쇠계수와 마찬가지로 여러 학자에 의해 항타진동 사례와 정상상태의 지표면 진동실험(steady-state Surface Vibration Tests)의결과로서산정되고있다.

3. 지반진동의 허용기준

산업화가 가속되면서 각종 건설공사 유발진동(발파, 항타, 다짐, 굴착, 작업 등), 교통진동(도로차량, 지하철, 일반철도, 고속전철등), 산업설비진동(발전기, 동력기, 대형펌프, 공작기계) 등에의해발생하는 지반진동 폐해는중요한문제로대두되고 있다. 지반진동의전파와영향에대한개념도는[그림 3.1]에 보여져 있다. 철도운행으로 인하여 선로구조물이나 기초지반에서 발생하는 진동은 주변구조물에 영향을 미칠소지가있다. 따라서정량화된진동레벨의 산정이 필요하다. 국외에서는 진동변위(단위: μmm, cm), 진동속도(단위:mm/s, cm/s(kine)), 진동가속도(단위: mm/s², cm/s²(gal), g(980cm/s²)) 등의척도를사용하여 진동의 크기를 나타내고 있으며, 나라마다 지반조건 및 사회적특성이다르기때문에 기준이다른실정이다. 국내에서는그동안환경진동에 대한관심의 증가로 수차례에 걸쳐 도로나 철도의 교통소음 · 진동에 관한기준안의제정및 개정이있어왔지만아직까지 법적, 기술적 규제는 미비한 실정이다. 철도 주행시 문제가 되는 환경진동은 주로 저주파 대역이며 이에 대한 피해로는 주변지역 주민의 심리적 또는 생리적 인영향과주변구조물에대한것으로구분하고있다.

[그림3.1] 진동의전파와영향: 건설또는교통수단에의한충격

철도 등진동원으로부터 멀리 떨어져 있지 않은 지역의 구조물은 진동발생원에서부터 전파되는 탄성에너지의 피해를 받아 구조연결부가 이완되거나 건물내,외의벽등에피해등을야기시키고, 심한경우지반의 침하를 수반하여 구조물의 안전성에도 치명적인영향을끼치는것으로알려져오고있다.

3.1 건축구조물에미치는영향

교통수단, 또는산업용설비에의해발생되는진동은 주변의 환경에 영향을 주고 건축구조물 등의 파괴를 야기시키는원인이다. 이와같은환경에피해를끼치는진동은지표면을통해전달되며측정단위로속도의 경우 mm/s, 가속도의 경우 m/s²을 사용한다. 진동에 의해건물이영향을받는경우는속도의최대값(peak)이선호되고있으며환경진동이인체에미치는경우는 속도나가속도의단위로표현하는게적합하다. 진동이 건축물에미치는피해를판단하기위해서는 건축물의 종류, 용도 지역별 구분과 건축물의 노후도를 고려하여야 한다. 일반적으로, 건축물이란 토지에 정착하여 건설되어지붕과벽으로공간을막아거주, 작업, 저장 등의용도에쓰이는것을말한다. 여기에추가되어부속하는 대문, 담장, 굴뚝은 물론 지하실, 지하 시가와 같은 지하건축물과탑비, 기념상, 선전탑 기타지붕벽 등이없는것도포함하여그범주는넓다.

이와 같은 건축물의 종류는 다음과 같이 사용재료에따라진동피해영향이달라진다.

- 나무구조
- 벽돌구조
- 시멘트블록구조
- 돌구조
- 철근콘크리트구조
- 철골구조

특히, 구성양식은 진동의 민감도에 영향을 크게 미치기때문에재료보다중요한판단근거가되고있다. 구성요소중에서특히조적조양식은진동에취약한 구조로알려져있다.

건축물의 진동 영향은 건축법상 정의하고 있는, 용도에따라달라진다. 우리나라에서는건축구조물을

■주거,공업, 상업, 기타특수

지역으로대분류하고있으며, 소음진동규제법에의하면, 용도별 진동 허용 크기를 달리 하고 있다. 한편, 건축물의노후도도진동허용크기에영향을줄수있다.

건설방법과해당지역지반의탄성파전파특성에따라결정되는건설작업으로인한진동발생수준과위험에노출된구축물의형태와해당지역주민의피해에대한 민감도에따라결정되는감내수준에의거한진동의 허용수준이라는것은매우주관적인형태이다. 특히불쾌감을주는심리적인피해와연계해서는더욱어렵다.

3.2 철도진동의허용기준에대한검토

철도진동에 관해서는 영국 Nelson교수의 연구결과가많이알려져 있으며, 지반진동의 피해영향을객관적으로평가하는자료로쓰이고있다.

Nelson 과 Saurenman은열차주행시지반진동에따른사람과건물에대한 여러 진동기준을제시하였다. 이기준에의하면전체적피해에 대해서는 50mm/s로, 국부적 피해에 대해서는 5mm/s로 기준치를 제시하고 있다.

한편, 독일은 3부분으로 구성되어 있는 DIN 4150(Structural Vibration in Building)을통하여건물에 대한 진동기준을 실증적이고 체계적으로 제정, 적용하고있다. 먼저서독에서는 1938년체계적인연구를통하여DIN 4150을 제정하였는데건축물의등급을 분류하여 각 등급별로 진동허용치를 규제하였으며 1970년에다시개정하였다.

그러나 1975년 허용진동 속도치가 너무 낮아 비현실적이라는 지적에 따라 구조물 손상부분에 대해 Vornorm DIN 4150 Teil 3의개정이있었다. 계속되는 비현실적이라는 지적에 따라 계속하여 1986년까지공식개정을거듭하였으며, 국내에서는 1986년 개정본이많이인용소개되고있다. 1986년개정본에서는 일시진동과 정상진동으로 구분하고, 구조물 전체와구조물부재에대한기준을따로구분하였으며 다시 구조물 전체에 대한 것을 3등급으로 분류하여 허용최대 진동속도를 제한하고 있다. 일시진동에 대해서는[표 3.1]과 같이, 정상진동에 관해서는 [표 3.2]와같이진동허용치를제한하고있다.

[표 3.1]에서 허용진동속도는 구조물 전체에 대한 것으로 기초부분에서 측정한 것은 성분 구별없이 가장 큰 값을 기준치로 하고 있다. 여기서 주파수 복합항은 구조물 상부층 바닥평면에서의 반응 주파수로 주파수에 관계없이 제한하는 것이며 구조물 부재에

대해서는주파수에관계없이 20mm/s로 제한하고있다. [표 3.2]에 의하면 고유진동수가 4Hz이하인 고층건축물의꼭대기에서최대속도 5mm/s와 지의지속적인 수평진동이일어나는 경우 독일 건축법에의해지어진 건물은 아무 이상이 없으며 허용치를 초과한다고 해서 손상이 반드시 발생하는 것은 아니다. 보통 수평방향의 고유진동수를 측정하기는 대단히 어려우므로 근사적으로 f ≅10/n(여기서 n은 건축물의 층수)식을사용하고있다.

[표3.1] 1986년개정본DIN 4150 - part 3 (일시진동)

건물의등급		I	II	III
건물의형식		상업혹은산업용 건물;사무실, 공장건물	주거용 건물:연립주택,단독주택,아파트	진동 예민 구조물:취약건물이나,문화재등의중요구조물
주파수별 허용진동 속도 VR (mm/s)	10 Hz 이하	20	5	3
	10~50 Hz	20 ~ 40	5 ~ 15	3 ~ 8
	50~100 Hz	40 ~ 50	15 ~ 20	8 ~ 10
	주파수복합	40	15	8

* 측정위치는구조물기초이며10Hz 이하의진동에반응하는허용진동속도이다.

[표3.2] 1986년개정본DIN 4150 - part 3 (정상진동)

건물의등급	I	II	III
건물의형식	상업혹은산업용 건물;사무실, 공장건물	주거용 건물:연립주택,단독주택,아파트	진동 예민 구조물:취약건물이나,문화재등의중요구조물
건물의 허용 진동속도 VR	≤5 mm/sec (0.2 inch/s)	≤5 mm/sec (0.2 inch/s)	

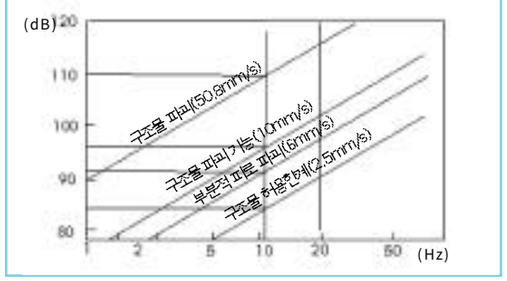
* 측정위치는구조물기초이며10HZ 이하의진동에반응하는 허용진동속도이다.

한편, 터널주행시평가의대상이되는조건은시속 100km로 해당구간을 통과하는 경우이다. 통과할 때에 나타나는 주된 진동에너지는 63Hz 대역에서부터 나타난다.

따라서, 본 평가에서는 구조물의 진동허용 기준을 63Hz 대역에초점을맞추어서수행하였다.

구조물의 진동허용 기준은 63Hz 대역의 에너지 성분을고려하면그림4.3 보여져있는바와같다. 그림에서 보면, 63Hz 대역에서 구조물의 허용한계는 93dB 이며, 구조물의부분적인피로파괴가일어나는 진동의크기는 103dB이다.

[그림3.2] 건물의진동허용기준



4. 현장의 진동 예측 및 평가

4.1 지반조건

현장은 부산OO동 소재의 재건축 단지로써 단지의 남쪽부지를 고속철도가 지하 70m 깊이에서 통과하도록 계획되어 있다. 해당부지의 지반상태는 지표면으로부터심도 10 12m 까지는풍화토로실트질, 점토질등의흙으로구성되어있다. 관입저항치N값은 10/30 17/30 수준을 보여주고 있다. 한편, 하부지층구조는 암반구조로 되어 있어 관입 저항치로 N값은 40 이상을 나타내고 있다. 암반은 지표층 아래 13m부터 시작되고 있으며 터널이 관통하는 심도 70m는경암으로이루어진구조라고판단할수있다.

4.2 고려사항

(1) 주행속도에 대한 고려

터널내부에는 고속철도가 20량으로 구성되어 시속 100km 주행하는것으로가정하였다.

(2) 터널 주변 암반이 미치는 영향

터널이 지하에 매설되어 있는 경우 지상구간을 주행하는 철도차량대비 진동절연 효과가 크게 나타난다. 진동을결정하는지반구조는 암반과 흙기초대비로 표현된다. 여기서, 은암반구조에서의가속도, 는

$$\alpha = \frac{Z_{st}+Z_s}{Z_{st}+Z_r}\ \alpha$$

흙기초에서의가속도를나타내며, 여기서

Z_s : 암반의임피던스

Z_r : 흙임피던스

Z_{st} : 터널구조물임피던스

를나타낸다.

암반에있는터널구조물의진동진폭은흙기초보다 약20dB 정도낮게나타나게된다.

(3) 건축물 하부구조가 미치는 영향

암반과 지표층을 통해 전달되는 진동에너지는건물의기초에도달하여구조물을가진시키게된다. 한편, 현장의아파트기초는파일구조에의해바닥이다져져 있다. 파일구조는진동측면에서는건축물기초에도달된진동에너지를분산시키는방진구역할을하게되어 진동방지측면에서는유리하다. 본검토에서는파일의 진동방지특성은일단고려하지않고건축물의기초에 전달되는진동에너지만을검토하도록한다.

4.3 지표면진동의예측

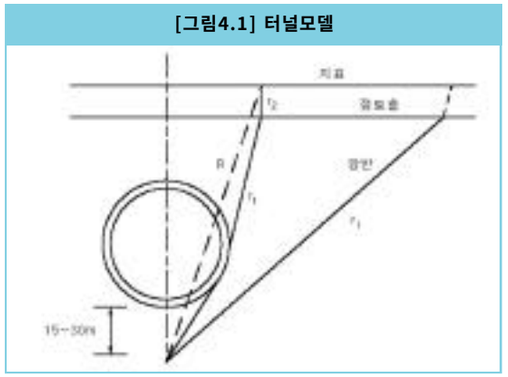
터널내부에서열차주행시발생되는진동은터널주변의 지반에 다양한 경로를 가지고 에너지파를 전파시키게된다. 지반진동에서 통상 다루는 지표면의 표면파는 통상 R파라고 하여 전파속도가 느리고 표면을통해전파되는특성을가지고있으며대단히큰에너지를전달하는특징을가지고있다.

또한 표면파는 감쇠가 극히 낮기 때문에 전파거리가먼곳까지쉽게진동에너지가전달된다. 따라서진동이 문제가 되는 경우, 대부분 R파에 의해 지배를 받는것으로 판단할수 있다. 즉, 일종의 굽힘파가평면에전달하는진동현상을지배한다고볼수있다.

한편 지하에서 발생되는 지중파의 경우, 종파가 에너지를 전달하는 메카니즘이 된다. 이러한 종파를 P파, S파라고 하고 탄성파이므로 실체파라고 부르고 있다. 실체파는터널에서탄성매질을통해전달된후, 지표면에 닿으면 반사와 굴절을 통해 표면파로 변환된다. 결국이러한지반이동시에존재하는경우여러가지파가발생하게되므로이러한파들의전파를예측하는것은매우복잡한작업이다.

본 검토에서는 진동원은 터널 중심선 지하에 있는 것으로보고모델링하고자한다.

[그림4.1] 터널모델



진동원에서 발생된 진동에너지는 전파과정에서 크게다음과같이3가지의물리적현상을거치게된다.

(i) 기하감쇠

(ii) 재료감쇠

(iii) 임피던스감쇠

(1) 거리감쇠 효과

지하에매립되어있는터널에서철도차량이운행하는 모델은 터널 인접 부위에서는 선하중으로 모델링할수있다.

차량길이대비선하중의영역은예측하고자하는진동위치가

(i) $l \le \frac{\text{차량길이}}{\pi}$: 선하중

(ii) $l > \frac{\text{차량길이}}{\pi}$: 점하중

으로분리하여검토할수있게된다.

기하감쇠의경우, 모델별로에너지의전파효과는다르게나타난다. 기하감쇠를지배하는감쇠효과A_1(dB)은

$$A_1(dB) = -S \cdot \log\frac{r_0}{r}$$

로표현된다. 여기서 S는모델별특성치, r_0는 기준진동크기를 측정한위치, r은진동원으로부터의 거리를 나타낸다.

[표 4.1]은 기하감쇠계수 S를 모델별로 보여주고 있다. 표에서볼수있듯이터널에서발생되는지중파는 지표면에서 운행하는 철도 차량에서 발생되는 표면파대비우수한감쇠특성을보여주고있다.

[표4.1] 모델별기하감쇠변수S

구분	모델	에너지	기하감쇠
지상철도	지표면선하중	표면파	0
터널	지중선하중	실체파	10
발파	지중점하중	실체파	20

터널진동은 지상에서 운행되는 철도 대비, 기하학적인감쇠가10dB 크게나타나고있음을볼수있다.

(2) 재료 감쇠효과

재료감쇠란 진동파가 암반과 흙 등 매질을 통과할 때나타나는감쇠특징이다. 재질이점탄성재료로볼수있는경우, 재료감쇠로나타나는진폭의영향은 로표현된다. 여기서,

$$A_2 = A_0 e^{-\frac{\omega\eta}{2c}R}$$

ω 진동주파수(rad/sec)

η 감쇠계수

c : 파의속도

R : 진원으로부터의거리

를나타낸다. 식에서볼수있듯이, 주파수가큰경우에는 재료감쇠가 빨리 일어난다. 따라서, 재료감쇠로 인한진동저감량A_2(dB)는

$$A_2(dB) = 27.3f\frac{n}{c}X$$

로표시된다. 여기서,

f : 주파수(Hz)

c : 전파속도

n : 무차원감소계수

X : 터널벽으로부터지반을통과하는전파거리

를 가리킨다. 전단파와 압축파는 터널구조물에서 유사한 손실계수 n을 갖는다. 압축파의 속도가 전단파보다는훨씬빠르므로 더긴손실을 예측하는데무엇보다중요하다.

실제의 사례에서, 70m의 거리를 전파해오는 과정에서나타나는약3 ~ 4dB 수준이됨을알수있다.

[표4.2] 재료감쇠전파에사용되는지반의물성치

흙의분류	전파속도c(ft/sec)	손실계수	밀도ρ(g/cm³)
암반	11,500	0.01	2.65
모래, 실트, 자갈, 황토	2,000	0.1	1.6
점토, 점토질흙	4,900	0.5	1.7

(3) 경계층 효과

지반을전파하는에너지파가밀도가서로다른지반을 통과하는 경우, 경계층에서 에너지 반사가 일어나 에너지전달이차단된다. 엄밀하게말해이러한에너지변화는감쇠라고하기엔용어의정의상문제가있으나 에너지의 전달측면에서 일정량 저감됨으로 이를 편의상임피던스감쇠라고부른다.

즉, 파의전달경로에서로다른종류의지반이존재하는 경우 매질의 밀도에 따라 굴절과 반사로 인하여 파장과진폭이변하게된다. 연약한모래지반이견고한 암반층위에놓일때진동주파수가모래지반의고유진동수에 근접하면 지반자체의 공진이 일어나 지반진동이증폭될수있다.

반대로 연약한 지층에서 견고한 지층으로 파가 전달시에는 진동감쇠가 일어난다. 지반 a 에서 지반 b 로파가통과하면서발생하는전파손실식은

$$A_3(dB) = -20\log\left[\frac{1}{2}\left(1 + \frac{\rho_b C_b}{\rho_a C_a}\right)\right]$$

여기서,

a, b : 서로다른두흙

ρ_a ρ_b: 흙의밀도

C_a C_b: 두흙에서의압축파속도

를나타낸다.

따라서, 암반에서 발생된 진동파가 점토층이나 모래층을만나게되는경우나타나는감쇠값 A_3(dB) 물성치의영향을받게된다.

4.4 예측결과

앞의터널진동모델에의하면, 진동원으로부터발생된진동에너지는

(i) 거리감쇠: A_1 (dB)

(ii) 재료감쇠: A_2 (dB)

를통해수진점에도달한다. 모델에의한진동저감은

$A = A_1$ (dB) + A_2 (dB)

의 합으로 나타나게 된다. 따라서 [그림 4.2]에서 보여져있는것과같이이격거리 70m를전파하면서 감쇠되는거리감쇠량은터널인접 7m에서측정된진동값대비, 10 dB 가줄어든다.

한편, 재료감쇠 효과는 진동주파수가 63Hz의 경우, 암반에서 0.15dB, 모래/점토층에서 감쇠되는 각각의 평균치 값을 사용하면 2.6dB가 감소하여 결과적으로 2.7dB 수준이 저감된다. 진동주파수가 증가하면비례하여진동감쇠가일어나게된다.

따라서, 터널구간으로부터 발생된 진동 에너지는 아파트 기초로 도달하는 동안 63Hz 기준으로 12.7dB 감소된다고볼수있다.

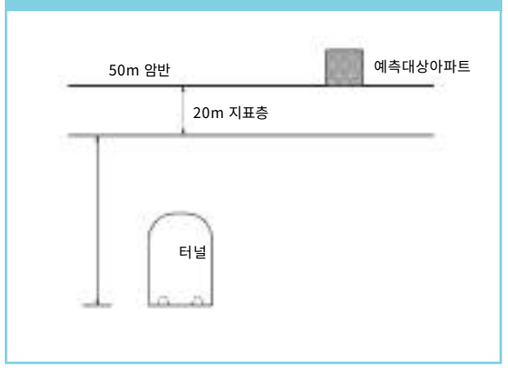
한편, 고속철도가 주행 할 때에 트랙변에 나타나는 진동크기는63Hz에서최대69dB 수준이되고있다.

실제, 터널의 주변에서는 앞의 고려사항에서 검토된바와같이, 이보다더낮은진동원이될것으로예상되므로 본 검토에 사용된 진동원은 대단히 보수적인측면에서진동을예측하는결과가된다.

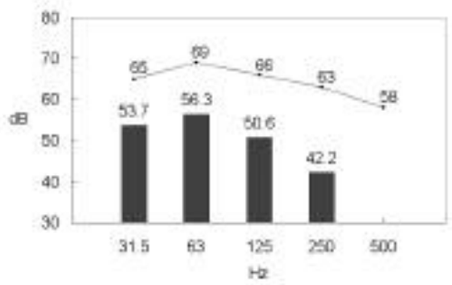
따라서, 진동원으로부터의진동저감특성을고려하여 건축구조물 하부에 도달되는 진동크기는 [그림 4.3]에보여져있다. 63Hz 대역에서최대56dB 수준이 되고 있다. 전 대역기준으로 보아도 58dB는 넘지 않을것으로사료된다.

이값은앞에서설명된것과같이, 모델링과정에서 진동의 피해 측면을 강조하기 위하여 진동원-전파과정-건축물방진의효과의전과정에서가급적가혹한 조건을 사용하였기 때문에, 보수적으로 예측한 결과이다. 실제, 현장의 진동은 이보다 낮게 나타날 것으로예견된다.

[그림4.2] 터널과진동예측대상위치



[그림4.3] 진동예측결과



5. 결 론

본 검토보고서는 터널구조내를 철도차량이 주행하는 경우, 지표면 70 m 하부에 놓여져 있는 터널에서 발생된 진동에너지가 지상의 아파트 단지 기초하부까지 전달되는 진동현상을 분석하는 것을 목적으로 하였다. 또한, 아파트 기초의 진동크기를 예측하고, 예측된 결과가 진동공해의 허용기준에 부합되는지의 여부를판단하는연구도수행하였다.

검토결과, 해당지역의 아파트부지는 고속철도의 진동피해 측면에서 건축물이 구조적으로 안전한 진동허용기준에 속하는 것으로 판명되었다. 이와함께, 해당지역의 거주민에게 진동피해를 미치는 수준에 대한 검토도 이루어 졌다. 인체진동의 허용기준인 국내의 소음진동규제법을 적용한 결과, 아파트 부지는 주거지역의 야간시간 진동허용치인 60 dB 이하가 되어, 정온한 진동환경을 보여 있는 것으로 사료된다.

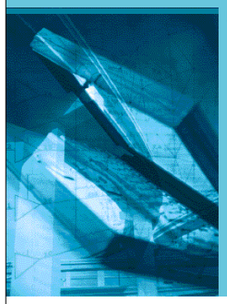
결과적으로 철도차량의 주행시 터널에서 발생되는 진동으로 인해 아파트 단지의 하부구조에 대한 진동영향은 구조물 안전도 측면에서 문제가 없을 것으로 판단된다.

참고문헌

□ 은희준, 김정태, “ 고속철도 환경소음 기준 및 진동기준에 대한 연구 ”, 1995,한국고속철도건설공단
□ 환경부,“ 진동으로인한피해의인과관계검토기준 ”, 1996
□ 도로건설소음의돼지의생산생리에미치는영향과양돈경영손실액평가에관한연구, 상지대농업자원개발연구소.
□ Mc Clenagham, L. and Bowles, A.,“ Effects on low-altitude overflights on populations of small mammals ”,‘ 96 Inter Noise 985-990
□ 유복모,‘ 지형공간정보론 ’, 동명사, 1994
□ 한국소음진동공학회, 소음진동편람.
□ 양형식,‘ 발파진동학 ’, 구미서관, 1992
□ 강대우, 심동수,‘ 응용발파기술 ’, 구미서관, 1995
□ 윤지선,‘ 최신발파기술 ’, 구미서관, 1993
] ESRI,‘ Understanding GIS ’, 1990
] ESRI,‘ SML USER S GUIDE ’, 1990
] ESRI,‘ PC ARC/INFO USER S GUIDE ’, 1990
] 한국도로공사,“ 건설공사장소음 · 진동방지시설설계기법에관한연구 ”, 1996
] 허영등, 경부고속철도건설로인한의료시설의소음진동영향평가, 한국소음진동공학회, 1997.2
] 김정태, 대구서부화물역 동다짐항타작업의진동영향평가및저감대책, 한국소음진동공학회, 2000.12
] 김정태, 양천아파트단지의소음진동측정및조사연구, 홍익대과학기술연구소,1996.12
] 신민호등,고속전철토공및지반진동저감기술, 1998.10, 한국철도연구원

발파소음 · 진동 허용기준안

(건설교통부, 2002.05)



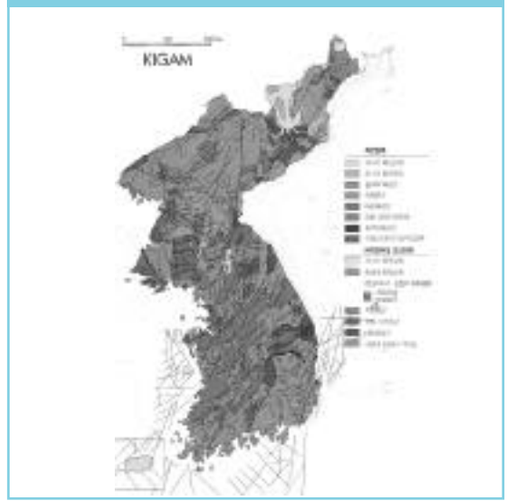
박철용 | 기술개발부대리
| 02-3433-7731
| E-mail: cypark@ssyenc.co.kr

1. 소개에 앞서

우리나라는지질학적으로고생대및중생대의견고한 암반이 지표면에 널리 분포하고 있으며 지형적으로 산지와 구릉지가 발달되어 전국토면적의 70% 이상을차지하고있어국도확장, 고속도로건설, 고속철도 건설, 지하철 공사 등 대형 국책사업과 도심지 내 아파트, 고층건물신축 등부지조성 공사에 불가피하게 암반굴착을 위한 발파작업이 증대되고 있는 실정이다.

일반적으로 건설작업의 영향으로 진동, 소음 등의 건설공해가 발생함에 따라 피해보상을 요구하는 인근 주민들의 민원과 저항에 부딪혀 사업수행에 막대한 차질을 초래하는 경우가 발생하므로 정부는 이러한환경에대한 분쟁성민원을방지하기위하여소음진동규제법을 1990년 8월 제정하였으며, 2000년 5월까지총7차례개정하였다.

[그림1.1] 한국지질도(국립지질자원연구원)



그러나, 발파공사에 있어서 민원발생이 많은 원인으로는무리한발파작업의관행이한원인일수있지만 최근 개정된 소음진동규제법이 발파진동과 소음의 특성을 고려하지 않고 발파작업에서 실현 불가능한 일반 생활소음 · 진동 규제기준과 동일한 수준으로규제하고있기때문이다.

이로인하여발파작업시민원의경향은발파진동이 건물과 시설물에 피해를 거의 미치지 않는 수준이라 하더라도 보상 또는 반대급부적인 기대심리 때문에 물적피해로 연관시켜서 민원을 제기하는 사례가 많다. 특히 국내에서는 발파공해기준이나 성문화된 법률 등이 체계적이지 못한 상황에서 민원발생시 피해판정기준이 모호하여 건설업자와 민원인들 당사자 사이에 피해 인과관계의 규명이 곤란하여 협상 타결이난해한실정이다.

본특집에서는건설교통부감사관실에서 2002년 5월공개한“ 발파소음 · 진동허용기준검토안 ”을중심으로 발파소음 · 진동의 특성과 검토 중인 발파소음 · 진동허용기준안에대하여소개하고자한다.