

지하철 진동의 전파 특성

Propagation Characteristics of Subway-Induced Vibrations

백영식¹⁾, Young-Shik Paik, 목영진²⁾, Young-Jin Mok, 이석진³⁾, Seok-Jin Lee
양승범⁴⁾, Seung-Bulm Yang

- 1) 경희대학교 공과대학 토목·건축공학부 교수, Professor, School of Civil and Architectural Engineering, Kyung Hee University
- 2) 경희대학교 공과대학 토목·건축공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil and Architectural Engineering, Kyung Hee University
- 3) 롯데 건설(주) 기술연구소 연구원, Research Engineer, Lotte Construction Co.
전 경희대학교 대학원 토목공학과
- 4) 현대 건설(주) 엔지니어, Engineer, Hyun Dai Construction Co.
전 경희대학교 대학원 토목공학과

SYNOPSIS : measurements of subway-induced vibrations were conducted at the surface of two sites. Also ground-born vibrations at the various depths were measured at a test site developed by drilling two boreholes. The measured data were analyzed and the findings are as below ;

1. The subway-induced vibrations at surface are transmitted with the coefficient of geometrical damping(n) of 1 and coefficient of material damping(α) of 0.07~0.09
2. The vibrations propagate with the two contradictory phenomena of radiation spreading and layer amplification
3. Two data presentation formats, one is vibration spectra and the other is simplified harmonic waves, are turned out to be very effective to characterize subway-induced vibrations.

Key words : Subway-Induced Vibrations, Propagation Characteristics, Vibration Spectra, Field Measurements

1. 서론

최근 경제의 급속한 성장으로 사회간접시설 확충이 가속화되고 있다. 각종 사회간접시설이 도심지에서 건설되고 운행되어 진동공해에 의한 폐해와 민원발생이 제기되고 있다. 특히 우리 나라는 국토가 좁고 산업체제도 대도시 밀집형이어서 대도시 지하철 건설 및 운행에 의한 진동공해 문제가 대두되고 있다. 지하철에 의한 진동은 진동원이 지하에서 시작되어 지반을 통과해 수진 구조물이나 인체에 전달되고 있다.

본 논문에서는 지하철 진동이 지반을 전파하는 특성을 규명하여 진동크기의 예측과 경감방안 모색에

기여하고자 한다. 지하철 연변 지표면 2개소와 지중 진동을 계측하기 위한 검측공을 설치한 연구 현장에서 지반진동을 계측하고 계측된 자료를 처리하는 기법을 개발하여 지하철 진동의 전파모델 및 특성을 규명하였다.

2. 스펙트럼 분석

속도 감지기나 가속도 감지기에 의해 진동의 입자속도나 가속도를 계측한다. 진동기준의 척도가 속도나 가속도로 되어있어 필요에 따라 계측된 한 진동척도(예: 가속도)로부터 다른 진동척도(예:속도나 변위)로 변환하여야 한다. 즉, 가속도를 적분하면 속도가, 속도를 다시 적분하면 변위가 얻어진다. 반대로 변위를 미분하면 속도가, 다시 속도를 미분하면 가속도가 얻어진다. 그러나, 한 진동척도기록을 시간대역(time domain)에서 직접 미분이나 적분하면 그 기록의 dc값(진동기록의 평균값)에 의해 원하는 진동척도의 기록을 얻기 어렵다. 이러한 어려움을 극복하고자 시간대역의 진동기록을 푸리에 변환(Fourier transform)을 통해 주파수대역의 기록으로 변환하여 매우 간단한 연산(시간대역에서의 적분은 주파수 대역에서는 곱의 연산이고 미분은 나누는 연산임)으로 적분한다. 주파수대역에서 고주파 통과 필터(high-pass filter)로 수치 해석적 노이즈(noise)를 제거한 후 시간대역으로 역변환(inverse transform)하면 원하는 척도의 진동 기록이 얻어진다. 자세한 설명은 백영식 외(1996)를 참조하기 바란다.

3. 현장계측

3.1 지표면 현장계측

제 2기 지하철 연변 공터에서 지표면에 계측기를 설치하고 진동원으로부터 이격 거리별 진동을 측정하여 거리별 감쇠특성을 연구하였다. 현장은 2개소로 각각 현장1, 현장2로 명명하였다. 그림 1.과 그림 2.는 현장1과 현장2의 지층분포와 지하철 위치를 나타낸 단면도이다.

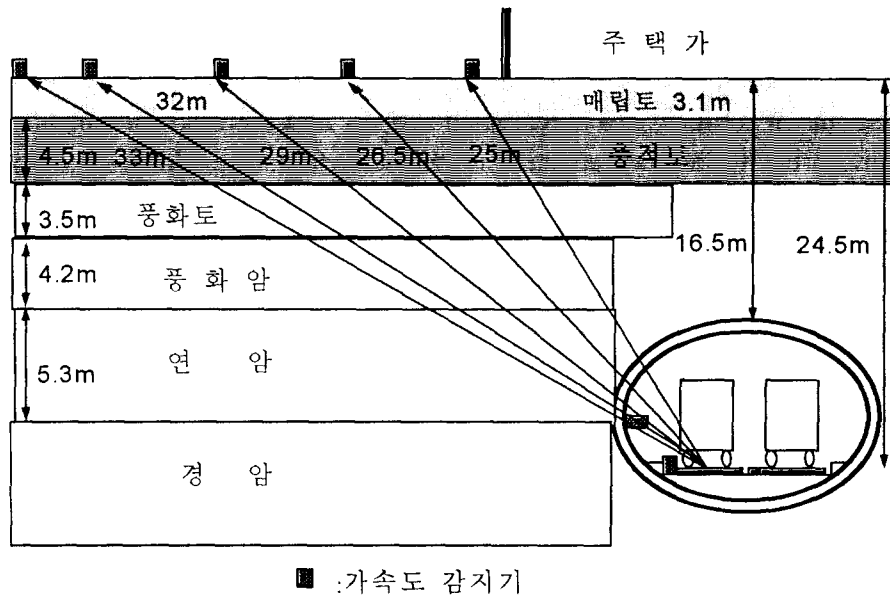


그림 1. 현장1의 단면도

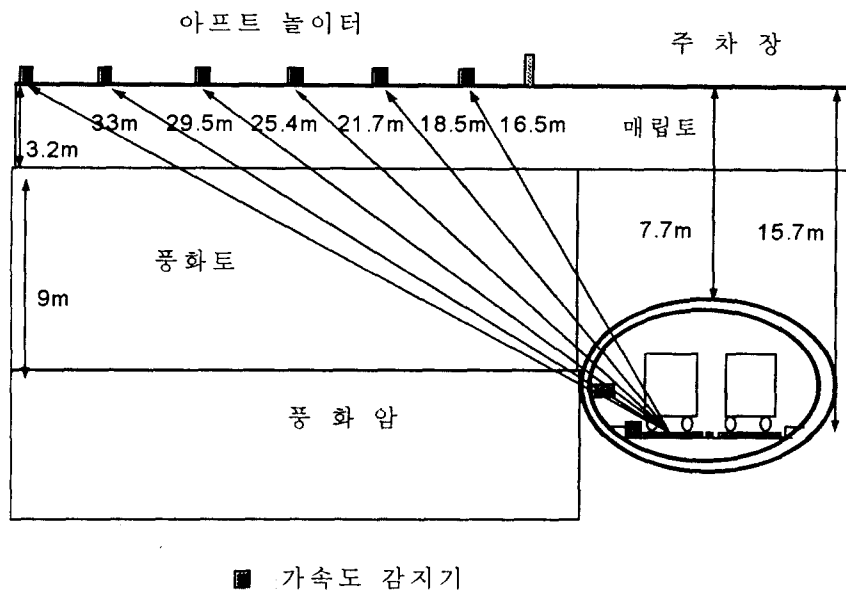
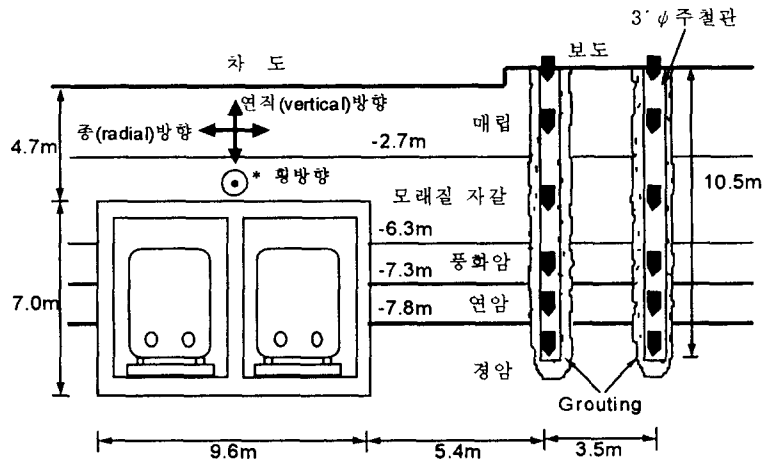


그림 2. 현장2의 단면도

현장1은 우리나라 지하철이 통과하는 전형적인 지반조건으로 토사, 풍화암, 연암, 경암층으로 이루어져 있고 터널은 연암과 경암층을 관통한다. 그리고, 현장2는 풍화토가 두텁고 터널이 풍화토와 풍화암을 관통하고 있다. 진동원은 지하철 터널 내벽에서 계측한 진동크기로 규정하였고 진동원의 위치는 궤도의 중점으로 가정하였다. 터널 벽체에서의 진동의 크기 즉, 입자가속도는 $30\sim 55\text{cm/sec}^2$ 이고 속도로는 $0.25\sim 0.4\text{cm/sec}$ 이었다. 이러한 진동 크기는 제2기 지하철에서 궤도에 고무패드를 사용한 방진궤도를 설치하여 터널 벽체나 터널 슬래브의 진동크기를 상당히 감소시킨 결과이다. 그림 1.과 그림 2.와 같이 5m 간격으로 계측기를 매설하여 지하철 운행시 진동을 측정하였다. 사용된 장비는 PCB사 가속도 감지기 308/CO2와 HP사 파형분석기(dynamic signal analyzer)를 사용하였다.

3.2 지중 계측

지중계측은 지중내의 진동전파특성을 규명하고자 시행하였다. 특히 지층에 따른 지중진동변화와 각 측정점에서 방향별 진동크기에 대해 연구하였다. 이 연구를 위하여 지하철 2호선 방배역 부근에 연구 현장을 조성 하였다. 계측현장은 그림 3.과 같이 Box형 구조의 터널이 지표에서 4.7m되는 곳에 위치하고 있으며 경암, 연암, 풍화암, 모래질자갈, 매립토 등의 다양한 토층이 분포하고 있다. 각 토층에서 지하철 진동을 계측하기 위해 터널로부터 5.4m와 8.9m되는 위치에 깊이 10.4m의 검측공을 설치하였다. 직경 76mm 주철관을 케이싱으로 사용하였다. 케이싱 주위를 그라우팅하여 지반과 잘 밀착되어 지반진동이 공내 계측기에 잘 감지되도록 하였다. 이 연구를 위하여 3방향 속도감지기를 제작하였다. 여기에 사용된 속도감지기(geophone)는 Mark Products사의 4.5 Hz감지기로 감도는 0.9volt/in/sec 이다. 이 속도감지기 3개를 각 방향(수직, 횡방향, 종 방향)별로 내장시키고 검측공내에 밀착시키기위해 공기주머니(air bag)를 부착하였다.



* , 횡방향(transverse)은 지하철 운행 방향과 나란한방향임

그림 3. 지중계측의 현장 단면도

4. 지반진동의 전파특성

4.1 지표면에서의 전파특성

지반진동이 진동원으로부터 전파되는 거리에 따라 에너지가 넓은 영역으로 확산하므로 진동 진폭이 감소하게 된다. 이때 거리에 따라 에너지가 확산되는 현상으로 일어나는 감쇠를 기하감쇠라 하고 매질의 입자간의 마찰로 인해 발생하는 에너지 손실을 재료 감쇠라 한다. Bonitz(1931)는 이 두 감쇠를 복합하여 다음과 같이 진동 감쇠식을 제안하였다.

$$A = A_a \left(\frac{r_1}{r} \right)^n \cdot e^{-\alpha(r-r_1)} \quad (1)$$

여기서, A : 진동원으로부터의 거리 r에서의 진동진폭
 A₁ : 진동원으로부터의 거리 r₁에서의 진동진폭
 α : 재료감쇠계수(토사에서 0.006~0.08)

식(11)에서 (r₁/r)ⁿ 항은 기하감쇠이며 e^{-α(r-r₁)} 항은 재료감쇠를 나타낸다. 진동원위치와 형태에 따라 기하감쇠는 표 1.과 같다.

표 1. 진동원과 파 종류에 따른 기하감쇠 계수

진동	진동 형태	발생 파 종류	기하감쇠계수, n
지표면	점진동	체적파	2.0
		표면파	0.5
	선진동	체적파	1.0
		표면파	0
지중	점진동	체적파	1.0
	선진동	체적파	0.5

그림 4는 현장1과 현장2의 거리별 지하철 진동에의 감쇠특성이다. 이 감쇠특성 중 기하감쇠계수 n 은 1로 나타나 지하철 진동원은 선진동보다는 점진동에 가까운 것으로 나타났다. 이는 지하철 차량의 수가 선진동으로 작용하기에는 적은 것을 의미한다. 보통 우리 나라 지하철이 연암 및 경암을 관통(현장1)하거나, 풍화암 및 풍화암(현장2)을 관통하므로 재료감쇠계수를 $\alpha = 0.07 \sim 0.09$ 로 사용할 수 있는 것으로 판단된다.

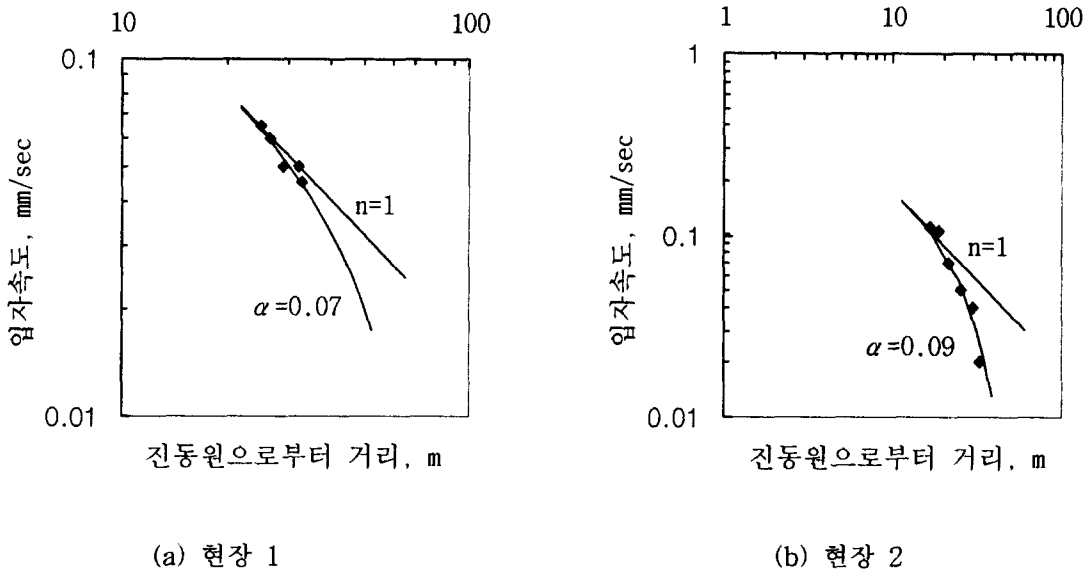


그림 4. 지하철 진동의 감쇠특성

4.2 지중 전파특성

4.2.1 스펙트럼 분석

지하철 진동의 지중내의 진동 특성을 파악하고자 스펙트럼 분석을 하였다. 스펙트럼 분석은 진동의 진폭과 주파수 성분을 포함시킬 수 있는 장점이 있다. 지중 진동은 속도 감지기를 계측하여서 계측 데이터는 입자속도이다. 이 입자속도를 앞에서 설명한 바와 같이 가속도와 변위 기록으로 변환하여 각 진동 척도의 평균 진폭을 삼분지에 그려 넣는다. 이때 속도 영역의 주파수 성분이 이 진동의 우세주파수이다. 그림 5는 진동원 가까이 있는 경암층의 진동 스펙트럼이고 그림 6은 지표면의 진동스펙트럼이다. 연암, 풍화암의 진동스펙트럼은 경암층과 유사하고 지표면 부근의 모래집 자갈층과 매립층의 진동 스펙트럼은 지표면과 비슷하다. 이 진동 스펙트럼에서 나타난 특징은 진동이 지표면으로 전파되면서 진폭이 감쇠현상이 뚜렷하지 않다. 특히 수직방향 진동 진폭은 암반층에서 토사층으로 전파되면서 뚜렷한 감쇠나 증폭현상을 보이지 않고 있다. 이 현상은 거리별 에너지 확산(기하 감쇠나 재료 감쇠)에 의한 감쇠와 각 지층구조의 공명현상에 의한 증폭(amplification)이 서로 상쇄되어 전 지층에 걸쳐 진동진폭의 변화가 없는 것으로 해석된다.

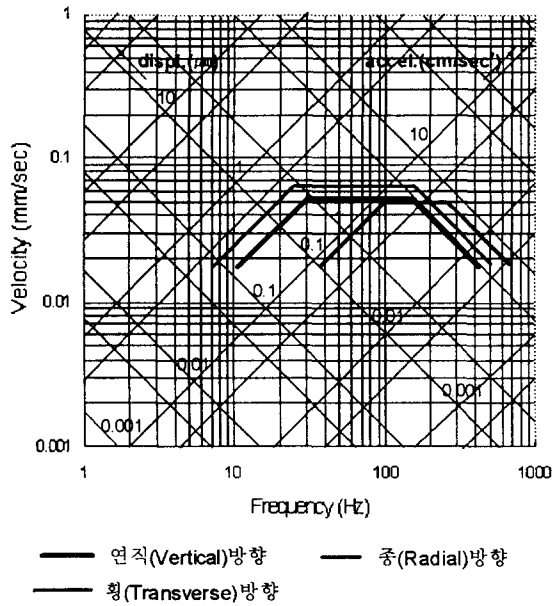


그림 5. 경압층의 방향별 진동스펙트럼

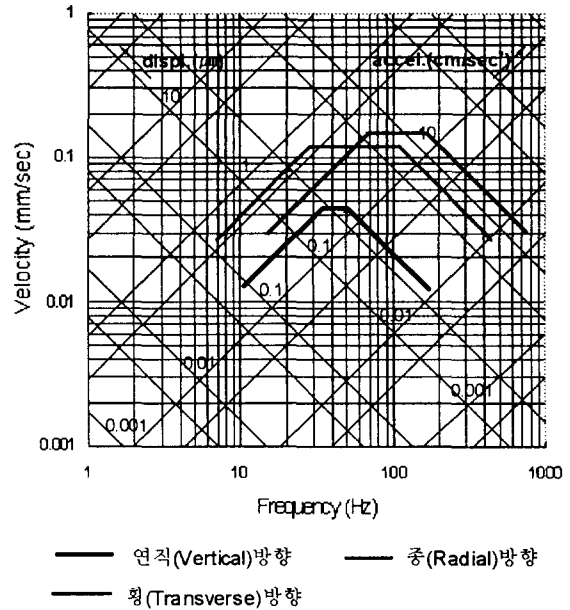


그림 6. 지표면의 방향별 진동스펙트럼

다만 우세주파수가 암반층에서 토사층으로 진동이 전파되면서 감소하고 있다. 이는 토사층에 의한 고주파수가 걸러지며(filltering) 거리 확산에 의한 진동감쇠와 지층의 공명 현상에 의한 진동증폭이 상쇄되는 것으로 판단된다.

또 다른 주목할 만한 특징은 수평방향 진동(횡방향과 종방향)은 수직방향 진동과는 달리 토사층에서 뚜렷한 증폭 현상을 보이고 있다. 이는 수평방향 진동이 SV(vertically polarized shear waves)파 성분이 많아 토사층의 SV파에 의한 증폭 현상이 거리별 진동 확산에 의한 진폭감쇠현상보다 우세한 것으로 해석된다. 토사층과 지표면에서 횡방향 진동진폭도 수직방향 진폭의 2~3배 큰 것으로 나타났다.

4.2.2 정현파 분석

지하철에 의한 지반진동은 시간대역 진동기록이나 주파수대역 스펙트럼으로 볼 때 대부분의 에너지가 우세주파수 부근에 밀집되어 정현파로 단순화하는데 무리가 없는 것으로 판단된다. 그러므로 본 진동기록을 속도기록으로 단순화된 정현파의 속도는 $A \sin 2\pi ft$ 이고, 가속도는 이를 미분한 $A(2\pi f) \cos 2\pi ft$ 이며, 변위는 속도를 적분한 $-\frac{A}{2\pi f} \cos 2\pi ft$ 이다. 여기서 진폭 A는 5~6개의 진동 속도 진폭의 평균치이고 f는 우세주파수이다. 이렇게 구한 입자가속도, 입자속도, 변위를 삼분지에 그려넣으면 한점으로 나타난다. 이 방법의 장점은 지하철 진동의 특성을 진동진폭과 우세주파수로 간편하게 나타낼 수 있는 점이다.

그림 7은 각 지층별 수직방향 진동의 진폭과 우세주파수가 표시되었는데 진동이 암반층으로부터 토사층을 지나 지표에 도달할 때까지 진동 진폭과 우세주파수가 큰 변화가 없음을 보여주고 있다. 이 현상은 앞에서 언급한 바와 같이 거리별 에너지 확산에 의한 감쇠와 지층의 공명에 대한 증폭 현상이 서로 상쇄됨을 뜻하여 이러한 정현파 단순화로 더욱 확연히 알 수 있다. 그림 8은 횡방향의 지층별 진동 진폭 변화를 나타내는데 암반층에 비해 토사층에서 2~3배 진동 진폭이 증폭된 것으로 나타났다. 종방향의 지층별 진동 진폭 변화도 횡방향과 유사하였다. 이 현상도 앞에서 언급한 바와 같이 지층공명에 의한 증폭현상이 거리별 에너지 확산에 의한 진동감쇠현상 보다 우세한 것으로 판단된다. 수평방향 진동은 전단파가 우세하고 이 전단파가 지표면으로 입사할 때 진동 진폭 증폭현상이 뚜렷한 것으로 판단된다. 우세주파수는 30Hz~70HZ로 나타났다. 그림 7과 그림 8을 비교할 때 지표면에서 수평방향 진동이

수직방향 진동의 3~4배 큰 것으로 나타났다. 인체는 척추방향의 진동에 민감하고 취침시 척추의 방향은 수평방향이므로 인체에 대한 진동공해 평가에는 수평방향 진동을 사용해야 한다. 본 연구 현장에서 지표면의 횡방향과 종방향의 속도진폭과 우세주파수를 각각 10^{-4} m/sec, $f=60$ Hz로 보고 일본의 공해진동 규제기준을 적용하면 다음과 같다. (백영식 외, 1997)

$$A(rms) = \frac{10^{-4}}{\sqrt{2}} \text{ m/sec}$$

$$A_o = (0.125 \times 10^{-5})f = (0.125 \times 10^{-5})(60)$$

$$\text{진동레벨} = 20 \log \frac{A}{A_o} = 19 \text{ dB}$$

계산된 진동레벨이 약 19dB로 야간의 주택가 진동규제기준 60dB에 훨씬 못 미치고 있다.

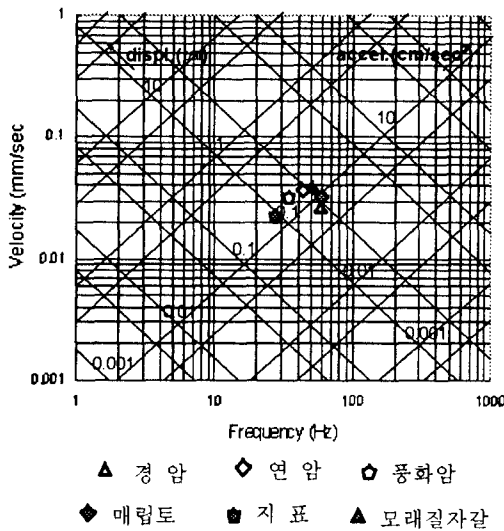


그림 7 수직방향 진동을 단순화한 정현파

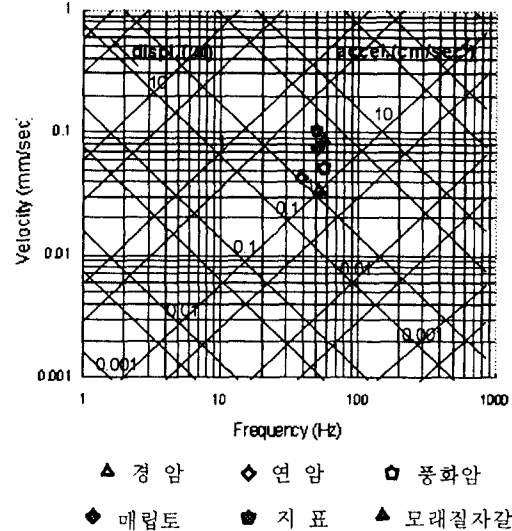


그림 8 횡방향 진동을 단순화한 정현파

5. 결론

본 논문에서 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 지반을 반무한 탄성체로 가정하고 지하철 진동원이 지중으로부터 전파되어 지표면에 도달한 진동진폭은 기하감쇠계수는 1이고 지하철 터널이 관통하는 대표적인 지반조건(암반층 위의 토사층)에서는 재료감쇠계수는 0.07~0.09이었다.
2. 지하철 터널벽 부근(터널벽에서 수평방향으로 9m이내)에서는 거리에 따른 에너지 확산에 의한 감쇠보다는 지층 공명에 의한 증폭현상이 우세한 것으로 나타났다. 수직방향 진동진폭은 이 두 상반된 현상에 의해 지층별 진폭의 증감이 없는 반면 수평방향 진동 진폭은 지층공명에 의한 증폭현상이 우세하여 토사층과 지표면에서 진동 진폭이 암반내의 진동진폭의 2~3배로 증가한 것으로 나타났다.
3. 지표면에서 수평진동(횡방향과 종방향)의 진폭이 수직방향 진동의 3~4배로 큰 것으로 나타나 수평진폭의 진폭을 사용하여 공해진동에 대한 평가를 하여야 한다. 특히 야간의 주택지역에서는 취침시 척추 방향이 수평이고 주변소음이 상대적으로 작아 수평진동에 인체가 매우 민감할 것으로 판단된다.
4. 지하철 진동은 정현파로 단순화하여 진동진폭과 우세주파수를 간략하게 삼분지에 표시할 수 있어 지하철 진동특성을 쉽게 규명할 수 있었다.

참고문헌

1. 백영식 외3인, 1996, "진동기록 데이터 처리와 적용 ", 대한토목학회 논문집, 제16권, 4호.
2. 백영식, 목영진, 1997, "지반진동의 전파 특성에 관한 연구", 목적기초 연구 과제 최종보고서, 한국 과학 재단
3. Bornitz, G. (1931), *Über die Ausbreitung der von Grosszokolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe*, J. Springer (Berlin)
4. Gutowski, T., Dym, C. (1976), "Propagation of Ground Vibration : A Review", *Journal of Sound and Vibration*, Vol 49(2), pp 179 ~ 193.

감사의글

본 연구는 한국과학재단 목적기초 (KOSEF 94-0600-05-01-3)프로그램의 일부 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.