

# 지하철레일 및 전동차 소음에 대한 기여도 평가의 연구

— 다차원 스펙트럼 해석에 의한 지하철 진동의  
건축 구조물에 미치는 영향 —

A Study on Estimation of Contribution for Noise of rail of  
Subway and Locomotive

— Effect of building structure on vibration of subway by  
multi-dimensional spectral analysis —

\*오 재 웅 ( Oh, Jae Eung )  
\*강 호 정 ( Kang, Ho Jung )  
\*\*차 일 환 ( Cha, Il Whan )

## 요 약

본 논문에서는 서로 상관관계가 있는 다입력원 진동계의 진동원을 규명하기 위한 방법을 제안 하였다. 다차원 스펙트럼 해석을 이용함으로써 지하철 진동의 가장 중요한 진동원을 발견하였다. 이 분석은 진동의 전달경로가 매우 복잡할 때 다입력-단일출력으로 모델화 하여 분석하는 방법이다. 또한 레지듀 스펙트럼 분석과 부분기여함수의 개념을 적용하여 지하철 진동이 콘크리트 구조물의 진동에 미치는 영향을 마이크로 컴퓨터로 계산하였다. 이러한 연구의 결과로 지하철 진동의 다차원 스펙트럼의 오버올레벨을 측정치와 비교하였다.

## ABSTRACT

This paper presents a new method for vibration source identification in a multiple vibration sources environment where the vibration sources may be coherent each other. It is found that the major characteristics proportion of the vibration sources is generated in vibration of subway by using multi-dimensional spectral analysis. This analysis is modeled as a multiple-input/single-output system, when the vibration propagating system of ground is very complicated. In this analysis the concepts of residual spectral analysis and the partial coherence function are applied. Contributions of vibration of reinforced concrete building between each vibration sources of subway and vibration of building are computed by microcomputer system. Finally, overall level for vibrating of subway by multi-dimensional spectral are compared with those measured.

\* 한양대학교

\*\* 연세대학교

1. 서 론

최근 대도시의 교통문제를 해결하기 위한 방안의 하나로 지하철 건설 및 이에 따른 지하철 운행이 점점 증대되어 가고있다. 이와같은 지하철의 운행증대는 각종 오염을 배출하고 있지만 그 중에서도 지하철 진동차의 주행으로 생긴 진동은 인체 뿐만아니라, 각종 구조물 즉 지하철선로, 역사 및 인근지역의 건축구조물에 영향을 주어 심리적 압박감과 구조물의 균열, 침하 및 파괴등과 같은 물리적 영향을 주고 있다.

이러한 진동차의 주행으로 발생하는 진동은 각 진동원의 경로가 매우 복잡하게 되어있기 때문에 진동의 저감대책을 세우는 것은 어려운 문제가 많다.<sup>1) 2)</sup> 한편, 진동차의 진동은 지하철 Box, Box와 주택가 사이의 지반 등에 전파, 공진되어 각기 다른 진동특성을 지니게 된다. 따라서 건축구조물에 미치는 진동차의 진동 및 지하철 Box, 지반의 진동을 방지하거나, 각 진동원으로부터 방지대책을 연구하기 위해서 새로운 해석방법을 도입하여 이와같은 발생을 규명하고 나아가서 이에 대한 대책을 수립 할 필요가 있다.

본 연구는 현재 운행하고 있는 지하철 진동이 인근 지역주택가에 위치한 5 층 (지하층 포함) 콘크리트건물에 미치는 기여도를 평가하기 위하여 다입력 단일 출력계로 모델화 하였다. 다차원 스펙트럼 해석법을<sup>3) 4) 5)</sup> 적용하여 연구를 수행함으로써 지하철 각부의 방진대책을 효과적으로 실시할 수 있는 기초자료를 마련할 수 있게 하는데 그 목적이 있다.

2. 다차원 스펙트럼의 이론적 고찰

그림 1 (a)의 경우 입력간의 상관관계가 존재한다고 가정하면 출력 스펙트럼은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_{yy}(f) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 H_{ij}^*(f) H_{ij}(f) S_{ij}(f) + S_{nn}(f) \quad (1)$$

여기서  $H_{ij}(f)$ 는  $i$  번째 입력이 출력에 기여하는 전달 함수를 나타내며  $S_{ij}(f)$ 는 입력  $X_i(t)$ 와  $X_j(t)$ 간의 상호 스펙트럼을 나타낸다. 또한  $H_{ij}^*$ 는  $H_{ij}$ 의 공액 복소수를 나타내며  $S_{nn}(f)$ 는 외란  $n(t)$ 의 파워 스펙트럼을 나타내고 있다.

한편 식(1)에서 입력간의 상호관계가 없는 경우의 스펙트럼은

팩트럼은

$$S_{yy}(f) = \sum_{i=1}^3 |H_{ii}(f)|^2 S_{ii}(f) + S_{nn}(f) \quad (2)$$

로 나타나며 식 (1), (2)를 일반적으로 F.R.F법 (Frequency response function)이라 부른다.

다차원 스펙트럼 해석을 입력간 혹은 입출력간의 관계로부터 상관성분을 제거하기 위해서는 레지듀얼 스펙트럼을 구해야 한다. 예를 들어 1 차적인 레지듀얼 스펙트럼은 다음과 같다.

$$S_{ii}(f) = S_{ii}(f) - |L_{ii}(f)|^2 S_{ii}(f) \quad (j=2, 3, y) \quad (3)$$

$$S_{ij, i}(f) = S_{ij}(f) - L_{ij}(f) S_{ij}(f) \quad (i=2, 3; j=y) \quad (4)$$

여기서  $L_{ii}(f)$ 는 입력간 및 입출력간의 상관성분을 제거시킨 경우의 최적전달함수이다. (그림 1 (b) 참조) 2 차적인 레지듀얼 스펙트럼은  $X_0(t)$ 에 대하여 구하면 다음과 같다.

$$S_{22, 1, 2}(f) = S_{22, 1}(f) - |L_{22}(f)|^2 S_{22, 1}(f) \quad (5)$$

$$S_{yy, 1, 2}(f) = S_{yy, 1}(f) - |L_{2y}(f)|^2 S_{22, 1}(f) \quad (6)$$

$$S_{3y, 1, 2}(f) = S_{3y, 1}(f) - |L_{2y}(f)|^2 S_{32, 1}(f) \quad (7)$$

한편 입력간 및 입출력간의 기여관계를 나타내는 일반 기여도 함수 (ordinary coherence function)는

$$\gamma_{ij}^2(f) = \frac{|S_{ij}(f)|^2}{S_{ii}(f) S_{jj}(f)}, \quad \gamma_{iy}^2 = \frac{|S_{iy}(f)|^2}{S_{ii}(f) S_{yy}(f)} \quad (8)$$

$$(i=1, 2, 3; j=1, 2, 3; i=j)$$

으로 정의되며 이러한 관계식을 이용하여 부분 기여도 함수 (partial coherence function)를  $X_0(t)$ 에 대하여 구하면

$$\gamma_{3y, 1, 2}^2(f) = \frac{|S_{2y, 1, 2}(f)|^2}{S_{33, 1, 2}(f) S_{yy, 1, 2}(f)} \quad (9)$$

로 되며 이 식을 이용하여 입력간 및 입출력간의 상관성분을 제거할때 다중 기여도 함수 (multiple coherence function)는 다음과 같다.

$$\gamma_{yx}^2(f) = 1 - \{1 - \gamma_{1y}^2(f)\} \{1 - \gamma_{2y, 1}^2(f)\} \{1 - \gamma_{3y, 1, 2}^2(f)\} \quad (10)$$

여기서

$$r_{zy-1}^2(f) = \frac{|S_{zy-1}(f)|^2}{S_{zz-1}(f) S_{yy-1}(f)}$$

이다.

실제로 진동원을 검출하려면 출력에 대한 입력의 순수한 기여량을 계산할 필요가 있으므로 기여 출력 스펙트럼(coherent output spectrum)을 이용하게 된다. 예를 들어 3 입력  $X_1(t)$ ,  $X_2(t)$ ,  $X_3(t)$ 가 출력에 기여하는 기여 출력 스펙트럼은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_{1y-2,3}^2(f) S_{yy-2,3}(f) \\ r_{2y-1,3}^2(f) S_{yy-1,3}(f) \\ r_{3y-1,2}^2(f) S_{yy-1,2}(f) \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)은 입력신호와 출력신호 측정시 S/N 비가 높을수록 실제의 출력계의 출력 스펙트럼과 잘 일치한다.

### 3. 측정방법 및 데이터 처리

#### 3.1 측정방법 및 측정계

지하철의 진동을 규명하기 위하여 지하철 2호선의 지하구간인 A지점에서 그림 2.에서 보는 바와 같이 지하철 Box 부분, 지하철 Box와 주택가 사이의 지반 및 주행중인 진동차를 각각 입력  $X_1$ ,  $X_2$  및  $X_3$ 로 하고 지하철에서 인접한 5층 건물의 지하층에서의 진동을 출력으로 하여 3입력 단일 출력계로 모델화 하였다.

또한 각 지점에서 X축방향(선로 평행방향), Y축방향(선로 직각방향), Z축방향(상하방향)으로(그림 3 참조) 각각 20번씩 진동측정계(Vibration Meter; VM-12A)로 입력 3지점 및 출력 1지점에서 동시에 측정하여 고감도 녹음기(Tape Recorder: B & K 7005)에 각각의 진동원에 대한 시계열 신호(Time series)를 수록하였다.

#### 3.2 데이터 처리

녹음기에 수록된 시계열 신호를 Dynamic Analyzer(SD-375)를 통해 모니터링 하면서 IEEE-488 인터페이스 버스를 통해 마이크로 컴퓨터에 전송 하였

다. 주파수 영역은 공해진동의 주파수 영역 및 건물에 손상을 주는 주파수 범위 등을 고려하여 100Hz까지 분석하였고, 시계열 신호의 샘플링 시간은 지하철 진동차의 통과시간 및 시계열 신호의 증감 등을 감안하여 4초로 하였다. 마이크로 컴퓨터(MEC-9801)에 전송된 데이터는 주파수 응답함수 및 기여도 합성등을 계산하여 X-Y Plotter(MP-100)과 프린터(MP-80F/T)로 출력시켰다. 측정계 및 분석계의 계통도(Block-Diagram)는 그림 4에 나타나 있다.

### 4. 측정결과 및 고찰

#### 4.1 지하철 각 부의 진동특성

그림 5, 6, 7, 8은 지하철 Box, 지반, 진동차 및 5층 콘크리트 건물의 시간영역에서의 진동신호를 주파수 영역으로 나타내고 있다. 출력인 5층 건물에서의 파워 스펙트럼은 X축에 대해서는 0.78Hz 부근 및 12, 11 Hz 47, 27 Hz 등에서 진동신호가 크게 나타났고(그림 8(a) 참조) Y축에 대해서는 그림 8(b)에서 보여지듯이 진주파수 영역(1~100Hz)에서, Z축에서는 36Hz에서 80Hz에 걸쳐서(그림 8(c) 참조) 큰 진동신호가 발생했다. 특히, 차상에서의 90dB 이상의 진동이 건물에서 50dB이하로 감소된 것은 각종 진동차단 효과 및 거리감쇠로 인한 것으로 생각된다.

입력  $X_1$ , 즉, 지하철 Box에서는 X축, Y축, 및 Z축 방향 모두 35Hz에서부터 85Hz까지 전반적으로 높은 진동신호가 발생했고, 지반에 대해서는 3축방향 모두 35Hz에서 80Hz 사이가 큰 진동신호를 나타냈다. 또한, 진동차의 파워 스펙트럼은 X축에 대해서는 7Hz 부근과 43Hz에서 62Hz까지 큰 진동신호를 보이고 있으며 Y축방향은 1.8Hz 부근과 50Hz 근처에서, Z축은 2Hz 및 35Hz와 60Hz 사이에서 신호가 크게 나타나고 있다.

이상과 같이 각 진동원에서의 파워 스펙트럼을 살펴 보았는데 주파수별로 개개의 입력원들이 출력에 대하여 어떻게 영향을 미쳤는지는 명확하게 알 수 없다. 따라서 본 연구에서는 입력간 및 입출력간의 각 공진 주파수별로 기여관계를 알아보기 위해서 다차원 스펙트럼 해석법을 적용했다.

#### 4.2 다차원 스펙트럼 해석법의 적용 타당성 검토

다차원 스펙트럼 해석법을 적용하기 위한 이론적 가정에서 가장 중요하다고 생각되는, 입력간의 상

관관계와 입출력간의 상관관계를 검토 할 필요가 있다. 특히 입력간의 일반기여도함수 ( $J_{ij}^2$ )는 임의의 입력  $X_i$  와  $X_j$ 가 상호 독립적이거나 혹은 상호간에 상관관계가 있는지에 대한 매우 중요한 요소가 된다.

본 연구에서, 그림 9,10,11 및 표 1, 2, 3에서 나타내듯이, X축 및 Y축, Z축방향 모두 0.57 이상의 높은 값을 나타내기 때문에 입력간의 상관관계가 큰 값으로 존재하는 것으로 생각되며, 또한, 이러한 것은 다차원 스펙트럼 해석의 필요성을 의미한다. 실제로 다차원 스펙트럼 해석을 할 경우에 이론적인 가정 및 결과를 검증하기 위해서는 출력과 주어진 입력간의 다중기여도함수의 값이 0.5 이상의 값이 요구된다.<sup>2)</sup> 만약 다중기여도 함수가 낮은 값을 갖는 경우에는, 다입력계로 해석 할 때에, 비선형적인 요소에 대한 영향이 크거나, 혹은, 실제로 존재하는 다른 입력원이 무시된 것으로 생각할 수 있다. 그러나, 본 연구에서 얻은 다중기여도 함수는 표 4 및 표 5와 6의  $J_{ij}^2$ 에서 보여진 바와 같이 전 주파수 영역에서 1에 가까운 값을 나타내고 있으므로 본 연구에서의 다차원 스펙트럼 해석법의 적용은 타당하다고 사료된다.

### 4.3 각 입력원의 출력으로의 기여평가

그림 5,6,7 및 그림 8은 진동원들의 X축 및 Y축, Z축 방향에 대한 파워 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그런데, 이러한 입력과 출력의 파워 스펙트럼만으로는 입출력 기여도를 정확하게 판단하기 어려우므로 레지듀(residue)하여 계산한, 부분 기여도 함수를 그림 12, 13 및 14로 나타내었고, 입력간 및 입출력간의 상관관계를 판단하였다. 이것에 의하여 각진동 모드에서의 입력의 출력에 대한 기여관계를 다차원 스펙트럼 해석에 의해 얻었다.

#### 4.3.1 X축의 기여관계

X축의 전 주파수 영역 (0~100 Hz)에 걸친 오버올(overall)한 값을 살펴보면 (그림 15(a) 참조) 대체적으로 20 Hz 까지의 기여순위는 진동차, 지하철 Box, 지반진동 순으로 나타났으나 20 Hz 이상에서는 지하철 Box, 지반, 진동차, 진동 순으로 기여관계가 크게 나타나고 있다. 한편 각 진동모우드별 기여관계는 표 4에서 자세하게 보여지고 있다.

#### 4.3.2 Y축의 기여관계

Y축의 기여관계를 살펴보면 그림 15(b)에서 보여지듯이 전 주파수 영역에 걸쳐 각 입력원이 출력에 미치는 기여관계는 각 주파수영역에서 다른 순위로 나타나고 있으며, 이러한 진동모우드별 입력원들의 기여관계는 표 5에서 보여주고 있다.

#### 4.3.3 Z축의 기여관계

그림 15의 (c)에서 보여주듯이 Z축방향에서의 기여관계는 10Hz 이하에서는 지하철 Box, 지반진동, 진동차진동 순으로 전체레벨에서의 기여관계가 크게 나타났으나, 10Hz 이상에서는 대체적으로 지하철 Box, 진동차, 지반의 진동 순서로 기여관계가 크게 나타났다. 이러한 Z축의 각 진동모우드별 기여관계를 표 6에서 나타내고 있다.

### 4.4 진동의 전달특성 및 차단효과 (Shield effect)

진동원을 검출할 경우, 각 입력원의 출력으로의 전달경로를 차단할 때, 그때의 출력을 해석적으로 예측하는 것이 가능하다. 이러한 차단효과를 예측하기 위하여 F.R.F법(Frequency Response Function)을 이용하여, 그림 16의 (a), (b), (c)와 같이 각 진동원을 차단시킨 전 주파수영역에 걸쳐서 진동레벨 값을 적분한 것을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 16(a)에서 보여주듯이 지반진동의 진동을 차단할 때가 다른 진동원을 차단할 때 보다 더 작은 값을 보이고 있으므로 X축에 대해서는, 지반진동의 진동을 완전하게 차단함이 출력, 즉, 5층 콘크리트 건물의 진동저감에 가장 효과적임을 알 수 있다. 다시 역으로 말하면 X축에 대해서는 지반진동이 진동특성이 출력에 가장 크게 기여 한다는 것이다. 같은 논리로 Y축방향 및 Z축방향에 대해서 살펴보면 Y축은 진동차진동을 차단함이 현저한 진동저감율·가져올 수 있고 (그림 16의 (b) 참조) Z축에 대해서는 35 Hz 이하에서는 진동차진동을 차단하는 것이, 60 Hz 이상에서는 지하철 Box의 진동을 차단함이 출력으로의 진동저감에 가장 효과적인 방법이라고 생각할 수 있다.

## 5. 결 론

지하철의 진동에 따른 인접 건축구조물에서, 진동

의 저감대책을 세우는데 중요한 것은 지하철 각부의 기여관계 및 전달특성을 파악하고 진동원을 검출하는 것이다. 이상과 같은 지하철 각 부에 대한 진동의 측정 및 분석의 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1). 다차원 스펙트럼 해석을 이용하여 지하철의 진동원으로 간주되는 각 부의 공진 주파수를 검출하고 각 모드별로 기여순위를 결정할 수 있었다.

2). 1) 과 같은 결과로 각 부에 대한 방진대책을 주파수별, X축 및 Y축 Z축방향별로 수행한다면 주객가의 진동을 효과적으로 줄일 수 있을 것이다.

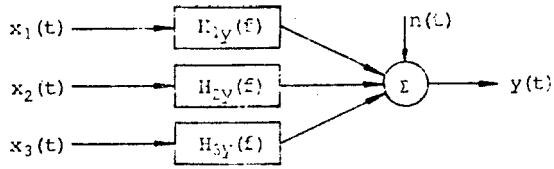
3). 오버울 진동레벨에 미치는 기여순위는 X축에 있어서는 지반진동이, Y축에 있어서는 전동차 진동이 Z축에 대해서는 지하철 Box의 진동이 가장 큰 것을 알수 있다.

후 기

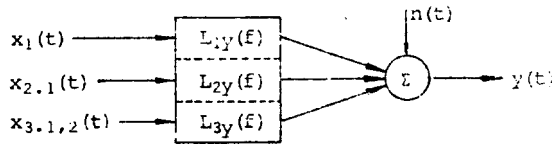
본 연구는 1985년도 재단법인 녹십자 연구소의 연구 지원으로 이루어졌으며 이에 감사말 드리는 바입니다.

참 고 문 헌

- (1) M.E. Wang and M.J. Crocker, "On the application of coherence techniques for source identification in a multiple noise source environment", J. Acoust. Soc. Am. 74(3), pp. 861-872, 1983.
- (2) J.E. OH, "Applications of multi-dimensional spectral analysis for noise source identification on mechanical structures", Thesis of Doctor Eng. Tokyo institute of Technology, 1983.
- (3) 오계용, "PKT-50 Daisy Wheel printer 의 소음 제어에 관한 연구," 금성사보고서, 1985.
- (4) J.S. Bendat and A.G. Piersol, "Engineering applications of correlation and spectral analysis", John Wiley & Sons, 1980.
- (5) 吳在広, "鍛造機の衝撃騒音の検出の多次元スペクトルの応用," 日・機・論文集, 51卷, 463号, pp. 699-704, 1985.
- (6) 吳在広外3人, "多次元スペクトル解析による閉空間モデルを利用した衝撃騒音源の検出," 日・機・論文集, 49卷, 447号, pp.1971-1981, 1983.



(a) in the case of incoherent input system



(b) in the case of coherent input system

Fig.1 Model of three input / single output system

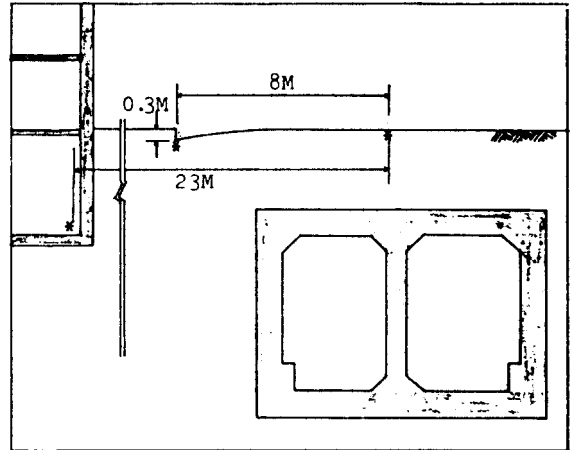


Fig.2 측정 위치

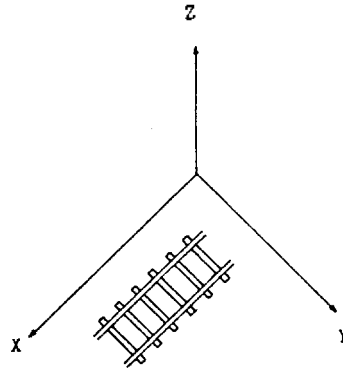


Fig. 3

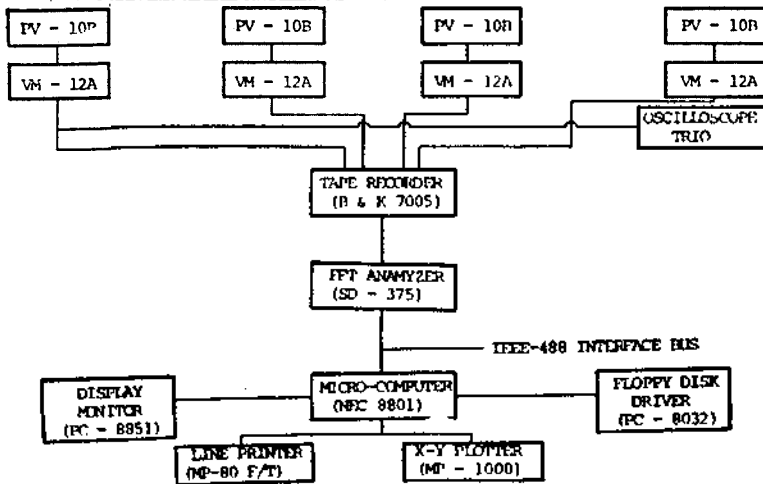


Fig.4 측정계 및 분석계의 계통도

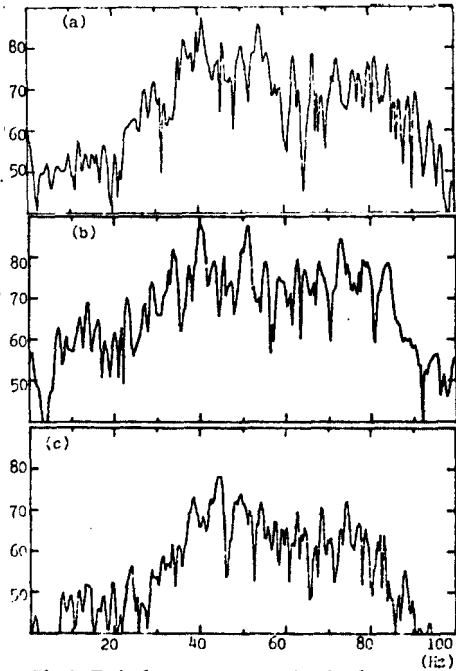


Fig.5 Typical power spectrum density for Box of Subway

(a) X axis (b) Y axis (c) Z axis

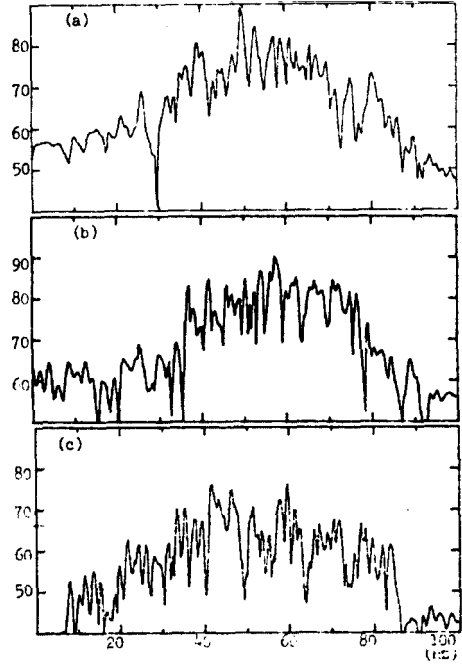


Fig.6 Typical power spectrum density for earth

(a) X axis (b) Y axis (c) Z axis

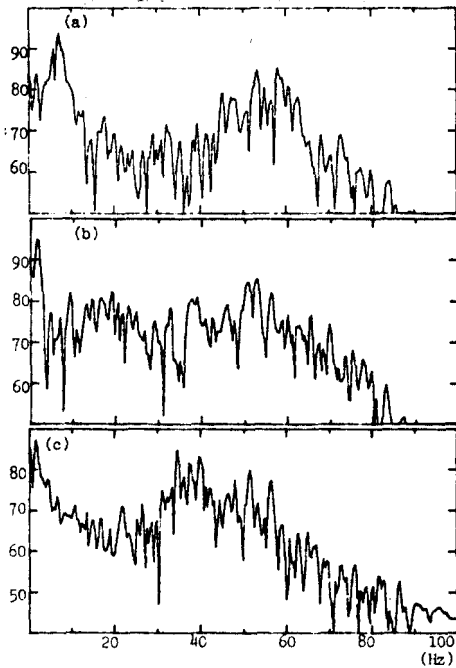


Fig.7 Typical power spectrum density for locomotive

(a) X axis (b) Y axis (c) Z axis

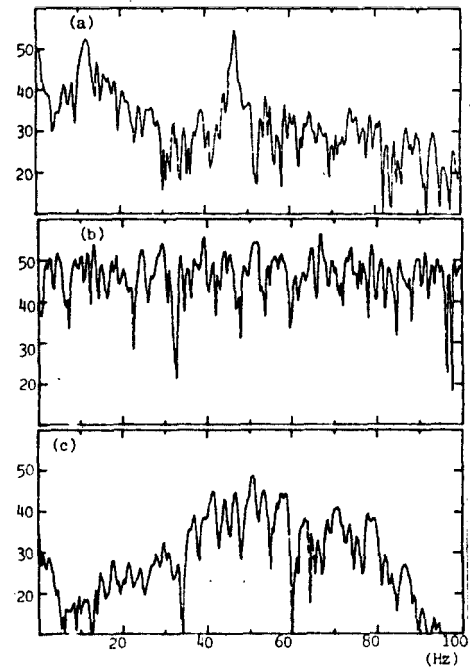


Fig.8 Typical power spectrum density for concrete Building

(a) X axis (b) Y axis (c) Z axis

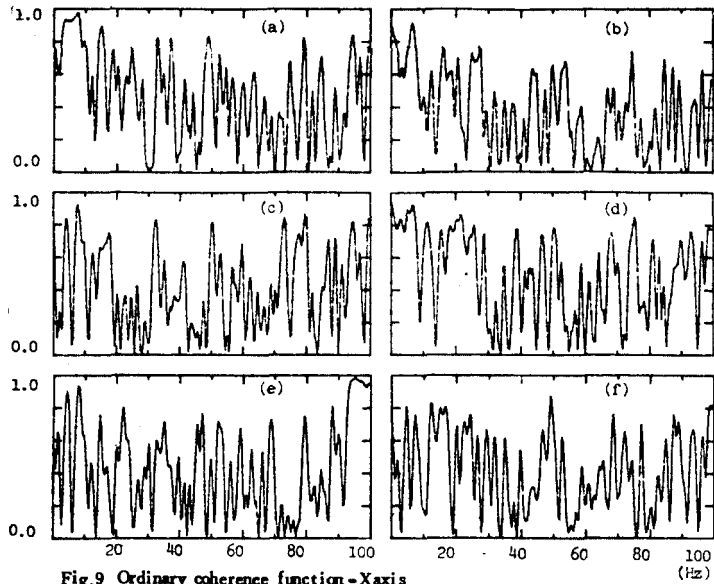


Fig.9 Ordinary coherence function - X-axis

- |                        |                        |                        |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| (a) $\gamma_{12}^2(f)$ | (b) $\gamma_{13}^2(f)$ | (c) $\gamma_{23}^2(f)$ |
| (d) $\gamma_{1Y}^2(f)$ | (e) $\gamma_{2Y}^2(f)$ | (f) $\gamma_{3Y}^2(f)$ |

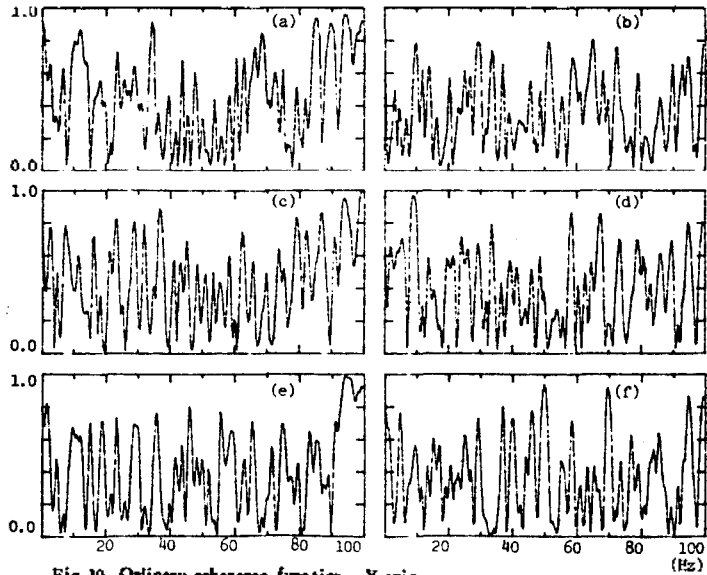


Fig.10 Ordinary coherence function - Y axis

- |                        |                        |                        |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| (a) $\gamma_{12}^2(f)$ | (b) $\gamma_{13}^2(f)$ | (c) $\gamma_{13}^2(f)$ |
| (d) $\gamma_{1Y}^2(f)$ | (e) $\gamma_{2Y}^2(f)$ | (f) $\gamma_{1Y}^2(f)$ |



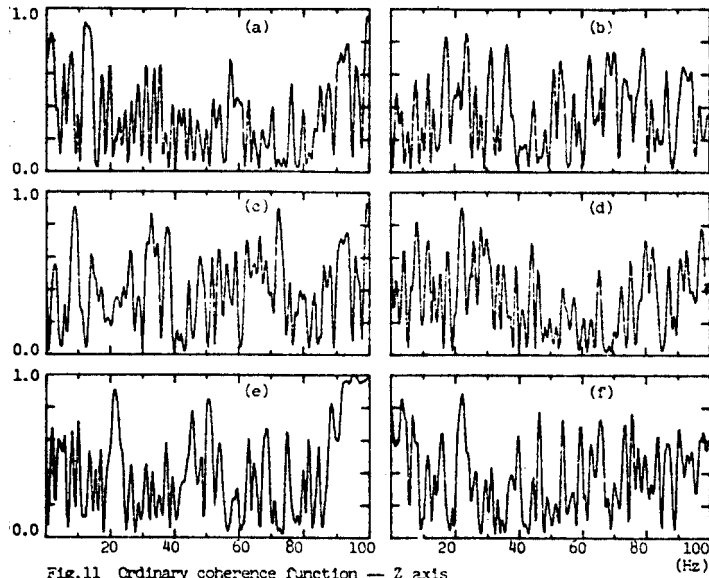


Fig.11 Ordinary coherence function -- Z axis

- (a)  $\gamma_{1z}^2(f)$       (b)  $\gamma_{1z}^2(f)$       (c)  $\gamma_{2z}^2(f)$   
 (d)  $\gamma_{1y}^2(f)$       (e)  $\gamma_{2y}^2(f)$       (f)  $\gamma_{1y}^2(f)$

Table 1 Value of total mean ordinary coherence function -- X axis

$r_{1z}^2(r)$	$r_{1y}^2(r)$	$r_{2z}^2(r)$	$r_{1y}(r)$	$r_{1y}(r)$	$r_{1y}(r)$
0.700	0.539	0.679	0.612	0.707	0.625

Table 2 Values of total mean ordinary coherence function -- Y axis

$r_{1z}^2(r)$	$r_{1z}^2(r)$	$r_{1z}^2(r)$	$r_{1y}(r)$	$r_{1y}(r)$	$r_{1y}(r)$
0.693	0.673	0.657	0.603	0.643	0.625

Table 3 Values of total mean ordinary coherence function -- Z axis

$r_{1z}^2(r)$	$r_{1z}^2(r)$	$r_{1z}^2(r)$	$r_{1y}(r)$	$r_{1y}(r)$	$r_{1y}(r)$
0.575	0.614	0.604	0.600	0.599	0.619

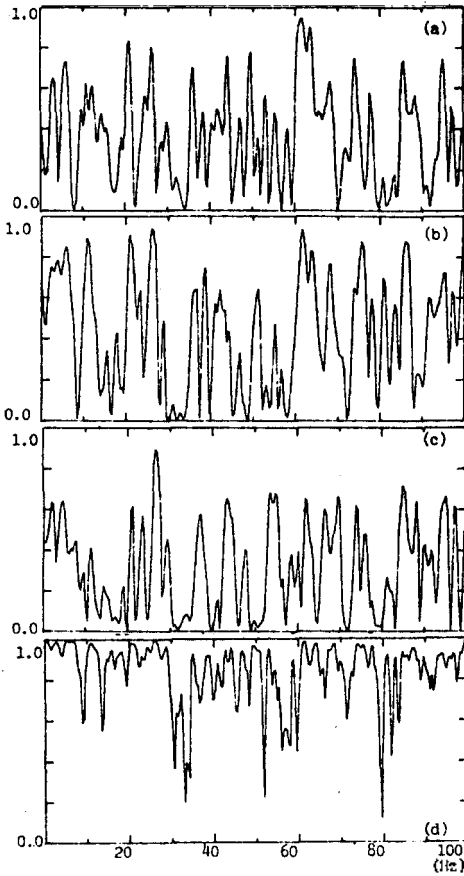


Fig. 12 Partial coherence functions and multiple coherence functions — X axis

(a)  $\gamma_{231,2}^2$  (b)  $\gamma_{231,3}^2$  (c)  $\gamma_{231,2}^2$  (d)  $\gamma_{y:x}^2$

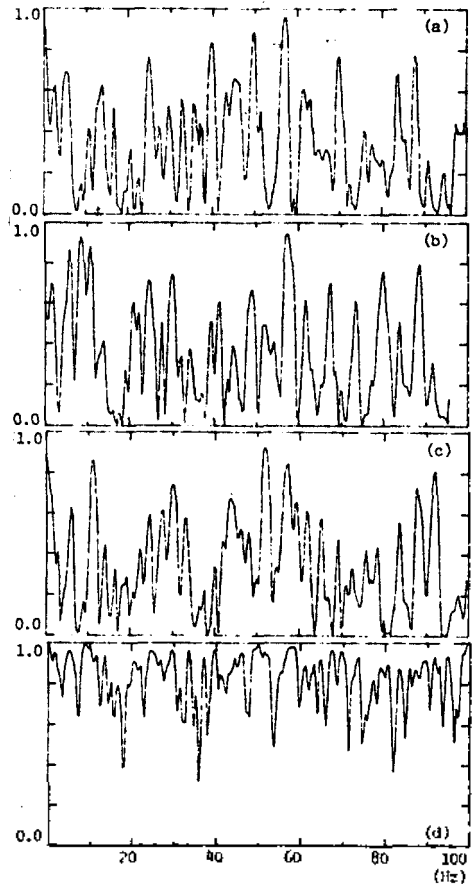


Fig. 13 Partial coherence functions and multiple coherence functions — Y axis

(a)  $\gamma_{132,2}^2$  (b)  $\gamma_{231,2}^2$  (c)  $\gamma_{231,2}^2$  (d)  $\gamma_{y:x}^2$

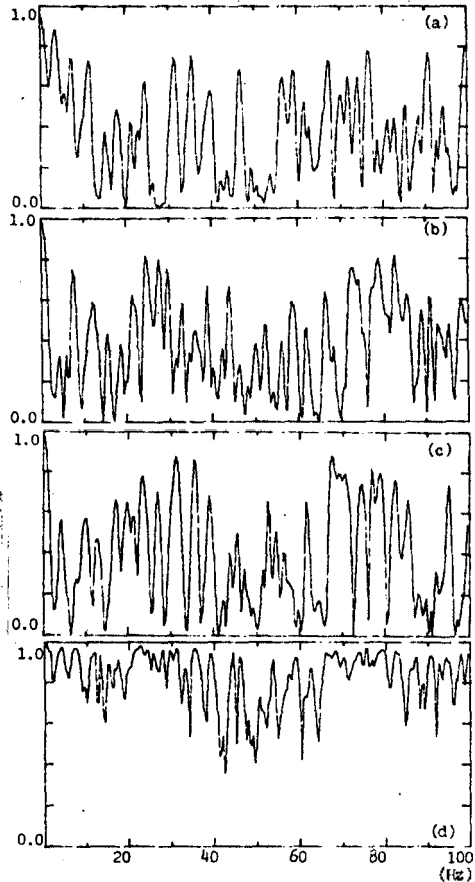


Fig. 14 Partial coherence functions and multiple coherence functions — Z

(a)  $\gamma^2_{13|2}$  (b)  $\gamma^2_{23|1}$  (c)  $\gamma^2_{13|4}$  (d)  $\gamma^2_{y:z}$

Table 4 Values of partial coherence function for subway at each resonance frequency — X axis

Frequency	$r^2_{13 2}$	$r^2_{23 1}$	$r^2_{13 4}$	$r^2_{y:z}$
47.27	0.133	0.322	0.454*	0.993
12.11	0.357	0.765*	0.491	0.990
0.78	0.435	0.606*	0.343	0.983
17.58	0.073	0.202*	0.106	0.982
20.70	0.251	0.649*	0.640	0.978
59.38	0.330*	0.177	0.143	0.957
24.61	0.206	0.211	0.474*	0.956
74.61	0.603	0.640	0.753*	0.954
39.45	0.139	0.561*	0.146	0.946
64.06	0.253*	0.832	0.902	0.942
79.30	0.418	0.491*	0.296	0.929

Table 5 Values of partial coherence function for subway at each resonance frequency — Y axis

Frequency	$r^2_{13 2}$	$r^2_{23 1}$	$r^2_{13 4}$	$r^2_{y:z}$
67.58	0.150	0.681*	0.360	0.989
39.84	0.184	0.509	0.819*	0.985
51.56	0.764*	0.316	0.414	0.984
13.67	0.176	0.354	0.558*	0.978
30.08	0.714*	0.700	0.524	0.973
79.30	0.311	0.552*	0.264	0.966
74.61	0.143	0.408*	0.051	0.965
25.00	0.592	0.713*	0.696	0.963
44.92	0.637*	0.391	0.565	0.958
2.34	0.420	0.664*	0.508	0.946

Table 6 Values of partial coherence function for subway at each resonance frequency -- Z axis

Frequency	$r_{1y11}$	$r_{1y12}$	$r_{1y13}$	$r_{1y1x}$
52.27	0.080	0.296 *	0.114	0.981
41.80	0.503	0.199 *	0.031	0.971
58.20	0.249	0.313	0.424 *	0.967
71.48	0.745 *	0.168	0.413	0.961
78.52	0.680	0.702 *	0.176	0.959
37.50	0.065	0.357 *	0.167	0.929
1.56	0.784	0.811 *	0.799	0.923
19.26	0.428	0.290	0.486 *	0.947

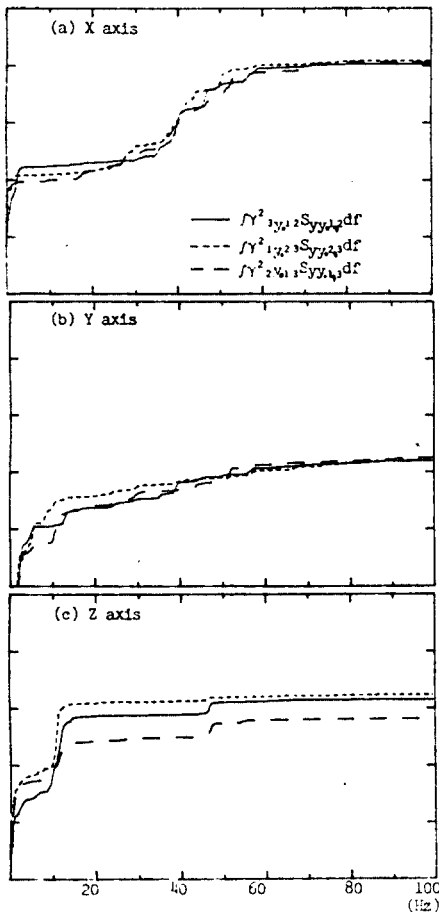


Fig. 15 Comparison integrated energy contribution to the coherent cut put power spectrum

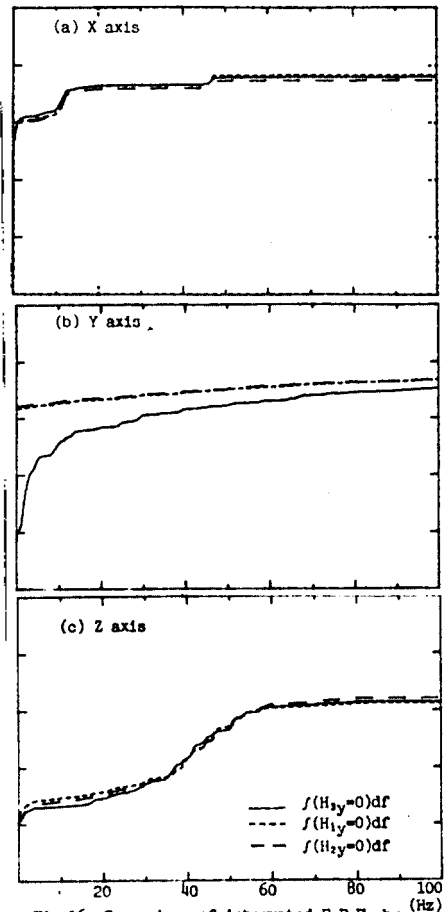


Fig. 16 Comparison of integrated P.R.F. by shield effect