

# 점진동원과 선진동원 주위의 진동환경관리를 위한 VMS의 적용

허영\*, 구용우\*\*, 이승수\*\*

## Application of VMS to Management of Vibration Environment around Point Vibration Source and Line Vibration Source

Young Huh\*, Yong-Woo Koo\*\*, Seung-Soo Yi\*\*

### ABSTRACT

효율적인 진동환경관리를 위해 GIS Software를 사용하여 개발된 진동환경관리시스템(Vibration Management System: VMS)을 점진동원과 선진동원에서의 진동관리에 적용하였다. 점진동원에 의한 진동관리를 위해서는 발파진동을 예로 들었으며, 선진동원의 경우는 지하철 운행시의 교통진동에 의한 인근지역에서의 진동환경을 분석하였다.

### 1. 서론

여러 종류의 진동원은 크게 나뉘어, 점진동원과 선진동원으로 구분된다. 동일한 진동원이라도 수진점까지의 거리에 따라 선진동원이 점진동원으로 취급되어야 하기도 하나, 이 두 가지의 진동원은 상이한 진동전파 특성을 나타내어 진동환경의 관정을 위하여 구별되어 분석되어야 한다. 본 논문에서는 점진동원의 경우에는 발파진동을, 선진동원의 경우에는 지하철진동을 예로 들어 본 연구실에서 개발된 진동환경관리시스템 (VMS: Vibration Management System)을 적용하였다.

선진동원으로 분석된 지하철진동의 경우, 지하철은 교통난 해소를 위하여 불가피하게 인구밀집지역을 통과할 수밖에 없다. 이에 따라 지하철 노선은 인근건물에 인접하거나 심지어는 건물 바로 아래로 건설되는 경우도 있어, 건설시 뿐 아니라 완공 후 지하철 운행 시에 발생하는 진동과 소음으로 인해 민원이 발생할 가능성이 높다. 이러한 지역에서의 진동민원을 사전에 예방하기 위해서는 시공전에 진동환경의 예측이 선행되어야 한다. 이를 위해 지형공간정보를 신속하게 처리할 수 있는 VMS를 활용함으로써 지반진동환경을 효율적으로 관리할 수 있다. 점진동원으로 분석된 발파진동의 경우에도 설계단계 뿐 아니라 시공시에도 적절한

진동관리를 수행함으로써 진동으로 인한 여러 문제의 예방이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구의 활용은 지반진동환경 관리시스템을 사용하여 진동원의 종류에 따라 상이한 진동전파의 형상을 고려하는 위치정보를 저장하고, 역시 진동원의 종류에 따라 상이한 거리에 따른 진동의 변화특성을 고려한 속성정보를 저장한다. 즉, 점진동인 발파진동의 예측식 또는 선진동인 지하철진동에서의 운행에 따른 진동예측식을 적용하여 만들어지는 속성정보를 위치정보와 함께 인근건물 또는 주변지역의 규제치와 비교하여 진동에 의한 문제를 일으킬 수 있는 건물 또는 지역의 파악을 통해 효과적인 진동저감대책의 수립이 가능하다.

### 2. 진동 개요

지하철의 운행 또는 발파 등으로 인해 발생하는 진동은 지반을 통해 주위로 전달되어 인근의 구조물 또는 주민들에게 좋지 않은 영향을 미친다.

지하철진동의 경우, 운행시 발생하는 지반진동은 전동차 차륜과 레일과의 상호작용으로 발생한 진동이 구조물, 지반을 통하여 주위로 전달된다. 발파의 경우, 폭발시 발생하는 연속적인 가스압과 충격파로 인한 진동이 주위로 전파된다.

이러한 진동은 전파경로인 지반의 진동전파 특성이 파악이 난이하고, 여러 학문분야가 종합적으로 관련되어 있다.

\* 수원대학교 토목공학과 조교수

\*\* 수원대학교 토목공학과 대학원

2.1. 지하철 운행에 따른 진동

지하철 운행에 따른 진동은 크게 차량에 의한 것과 레일에 기인하는 두 가지 종류로 대별되며, 이 중 레일에 기인하는 진동은 다시 레일의 휨에 의한 성분과 레일 및 차륜의 거칠기에 기인하는 두 가지 성분으로 나뉘어 질 수 있다. 이러한 다양한 원인에 의해 발생하는 진동은 터널이나 터널주위 지반의 재료적 또는 기하학적인 동적 특성에 의해 진동주파수의 성분이 변화되어 주위의 지표면 또는 건물 등의 수진점에 도달할 때는 발생된 진동과는 그 특성이 매우 다르다. 이와 같이 진동원을 케도시스템을 포함하는 터널로 볼 때, 터널로부터 지반을 거쳐 주위의 수진점에 전달될 때까지의 진동전파 경로상에서 진동의 동적 특성을 변화시키는 많은 요인으로 인해 수진점에서의 진동의 크기를 예측하기란 매우 어렵다.

교통진동의 한도(철도)는 표 1과 같으며, 이를 지하철 운행에 따른 진동의 크기를 예측식을 사용하여 추정하고, 비교함으로써, 사전에 진동저감 대책을 수립하여 시공에 반영할 수 있는 시간적 여유를 갖을 수 있다.

표 1. 교통 진동의 한도 (철도)

대 상 지 역	주간	야간
	06:00 - 22:00	22:00 - 06:00
주거지역, 녹지지역, 취락지역중 취락지구 및 운동 휴양지구, 자연환경보전지역, 학교, 병원, 공공도서관의 부지경계선으로부터 50m 이내지역	65 dB(V)	60 dB(V)
상업지역, 공업지역, 농림지역, 준농림지역 및 준도시지역중 취락지구 및 운동휴양지구의 지역, 미고시지역	70 dB(V)	65 dB(V)

2.2. 발파 진동

발파진동의 크기는 진동입자 변위, 진동속도, 진동가속도로 표시하고, 발파진동의 측정은 그 방향에 따라 수직성분, 진행성분, 그리고 두 파의 방향과 직각을 이루는 접선성분의 세 성분에 대해 실시된다. 발파진동은 지진진동에 비해 지속시간이 짧고, 주파수 범위도 수십에서 수백 Hz의 고주파이어서 감쇠가 쉽게 일어나며, 파형이 비교적 단순하다. 또한 지진에 의한 진동피해는 그 정도를 보통 가속도로 표시하고 있으나, 발파진동에 의한 구

조물에 의한 구조물의 피해정도는 진동속도에 비례하기 때문에, 세계 각국에서는 대부분 발파진동의 규제기준을 진동속도의 최대치로 정하고 있으며, 현행 우리나라에서는 발파진동에 대한 구체적인 규제조항은 없는 상태이며, 표 2는 외국자료를 참고로하여 서울시 지하철 건설시 적용된 기준치이다.

표 2. 서울시 지하철 건설시 적용되는 기준치

건축물의 종류	허용진동치 (cm/sec)
유적이거나 고적등의 문화재	0.2
결합이 있는 건물, 빌딩이나 균열이 있는 저택	0.5
균열이 있고 결합이 없는 빌딩	1.0
회벽이 없는 공업용 콘크리트 구조물	1.0 ~ 4.0

2.3. 진동의 예측식에 대한 이론

가) 지하철운행에 따른 지반진동예측식

현재까지 발표된 여러 진동예측식들은 다양한 진동보정항목을 제시하였다. 본 논문에서 선진동으로 취급된 지하철진동의 관리를 위해 사용된 예측식은 식(1)로, 본 논문에서 사용된 각 성분의 설명은 다음과 같다.

먼저, 진동원에서의 기준진동인  $L_{OV}$ 는 지반을 세가지로 구분하여 각각의 진동원을 제시하고, 진동의 평균레벨이 아닌 상한레벨을 예측하는 Wilson공식을 따랐고, 나머지 항목은 수식으로 이루어져 공식적용이 편리한 뉴욕지하철모델을 따랐다.

$$L_v = L_{OV} + C_{RV} + C_{SV} + S_{FV} + C_{HV} + C_{MV} \quad (1)$$

$L_{OV}$  : 기준 진동 가속도레벨(dB)

$L_v$  : 예측되는 수진점의 진동가속도레벨 (dB)

$C_{RV}$  : 거리 감쇠에 의한 진동 보정치 (dB)

$C_{SV}$  : 진동의 속도 보정치 (dB)

$S_{FV}$  : 진동의 레일 체결 강성도 보정치 (dB)

$C_{HV}$  : 터널의 벽두께에 따른 진동 보정치 (dB)

$C_{MV}$  : 차량의 질량에 의한 진동 보정치 (dB)

① 거리감쇠치보정

거리감쇠치에 대한 보정식인 식(2)는 지하철 진동을 실제파로·판단, 진동이 진동원으로부터 거리에 따라 대수적으로 감소하는 현상을 나타냈으며, 감소계수 B는 실제측정에 의한 자료에서 회귀분석을 통해 얻는다.

$$Y(\text{dB}) = A - B \log(R) \quad (2)$$

A : 기준 진동 가속도레벨 VAL(dB)

Y : 주파수별 VAL(dB)

R : 진원으로 부터 예측지점까지 거리

② 속도 보정

$$C_{sv} = 16.6 \log\left(\frac{v}{56}\right) \quad (3)$$

v : 열차운행 속도(km/h), 56은 기준속도.

③ 레일의 체결강성도 보정

$$C_{FV}(\text{Fastner}) = 5 \log\left(\frac{K}{3 \times 10^7}\right) \quad (4)$$

$$K = \frac{\text{Fastner강성(N/m)}}{\text{Fastner간격(m)}}$$

④ 터널벽 두께의 보정

$$C_{HV(\text{벽두께})} = 40 \log(0.6/t) \quad (5)$$

⑤ 차량의 질량에 의한 보정

$$C_{Mv} = 20 \log \frac{m_2}{m_1} \text{ (dB)} \quad (7)$$

m<sub>1</sub> : 빈차, 53.76 ton

m<sub>2</sub> : 만차, 82.76 ton

나) 발파진동 예측식 산정

발파진동식은 식(8)과 같이 산정한다. 식(8)은 측정된 자료들의 회귀분석을 통해 m을 선택하고 환산거리( $\frac{R}{W^m}$ )와 진동속도(V)의 관계를 통해 n을 구한다.

$$V = K \left( \frac{R}{W^m} \right)^n \quad (8)$$

V : 발파진동 속도

K : 발파진동상수

W : 지발당최대장약량

R : 실제거리

n : 거리감쇠지수

m : 1/2 또는 1/3

### 3. GIS를 이용한 진동관리시스템

#### 3.1. 시스템 구현 환경

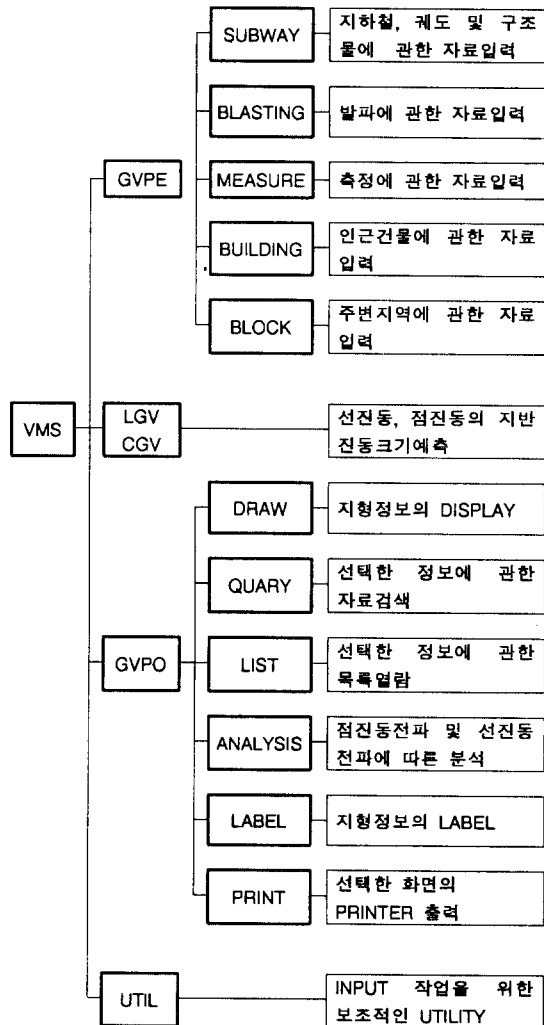


그림 1. 사용 시스템의 구성

본 연구에서 진동관리시스템에 적용한 GIS Software는 PC ARC/INFO V.3.4.2로, 이를 이용해 메뉴방식의 프로그램을 진동관리시스템(VMS)을 개발하였다. 또한 VMS에서 진동예측을 위한 예측식 Module은 MS-FORTRAN 5.0으로 작성, 컴파

일하여 사용하였다. 전체 시스템의 구성은 그림 1과 같다.

### 3.2. INPUT MODULE

지하철진동에서의 입력모듈을 그림별로 설명하면 다음과 같다. 먼저, 그림 1에 나타난 GVPE Input Module에서는 주어진 도면의 환경에 따라 지하철, 궤도 및 구조물, 인접건물, 주변지역, 측정지점, 발파에 관한 자료를 입력하게 하였다.

그림 2는 그림 1의 SUBWAY항목에 관한 지하철 운행에 따른 진동크기를 예측하는 예측식의 자료가 되는 지하철, 궤도 및 구조물에 관련된 자료들을 화면을 통하여 입력한다.

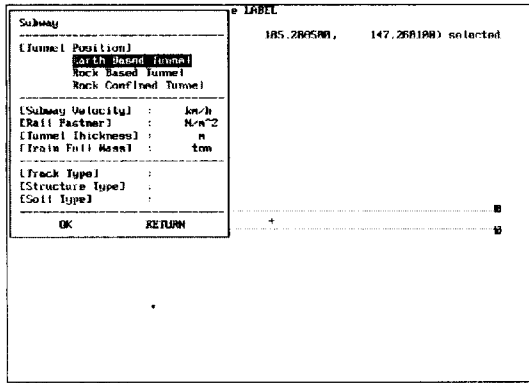


그림 2. 지하철, 궤도 및 구조물에 관한 자료입력

그림 3은 그림1의 BUILDING 항목에 관한 건물의 고유진동수, 진동속도 규제치 등의 비교자료를 건물을 선택하여 입력한다.

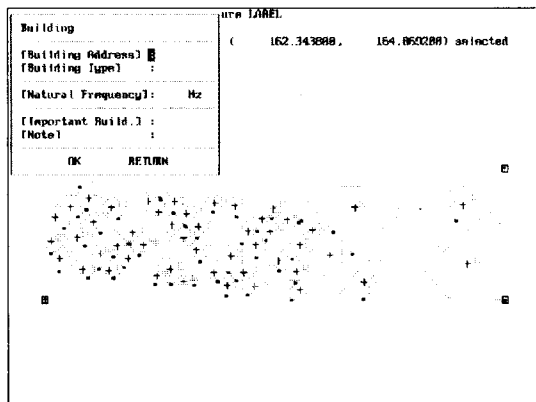


그림 3. 인접건물의 자료입력

그림 4은 그림1의 BLOCK 항목에 관한 주변지역의 주, 야간진동규제치 등의 비교자료를 지역을 선택하여 입력한다.

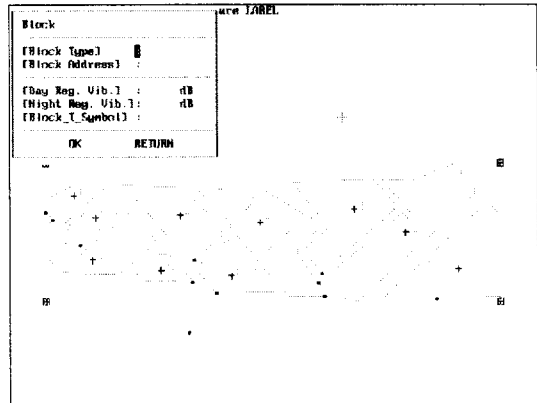


그림 4. 주변지역의 자료입력

그림 5은 그림1의 MEASURE 항목에 관한 측정지점의 지하철 운행에 따른 진동측정결과를 1/1 Octave Band와 O.A값으로 저장하기 위해 지점을 선택하여 입력한다.

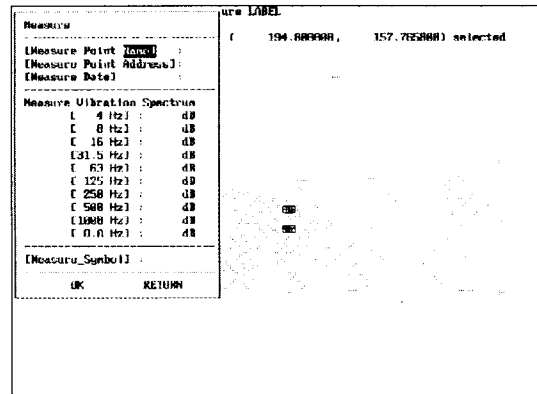


그림 5. 측정지점의 자료입력

그림6은 그림1의 BLASTING 항목에 관한 발파지점을 화면의 지역에서 선택하여 폭파감쇄지수, 발파진동상수, 지발당 최대장약량동의 발파에 관한 데이터를 입력한다.

### 3.3. OUTPUT MODULE

Output Module들에서는 지하철, 궤도 및 구조물, 인접건물, 주변지역, 측정지역, 발파에 관한 자

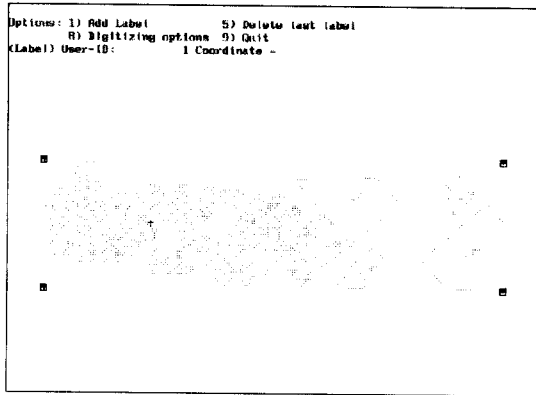


그림 6. 도면에서 발파지점 선택

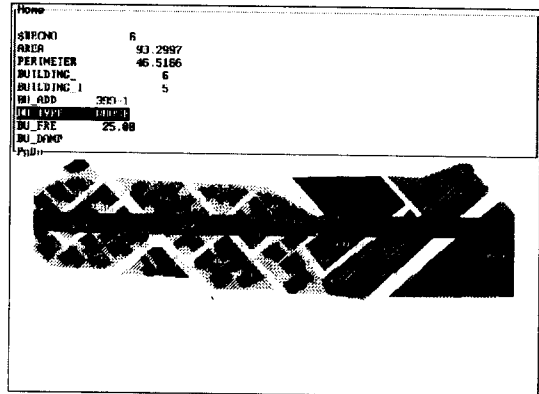


그림 8. 인접건물에 관한 목록검색

료에 대한 검색 및 목록확인이 가능하며, 그림 7은 주변지역에 대한 자료를 검색하는 것이고, 그림 8은 인접건물의 전체 목록을 검색하는 것이다.

측정에서 얻는 데이터의 저장과 건설공사 전에 지반진동의 전파형상에 따른 지반진동크기 예측 및 인접건물과 주변지역의 진동규제치 초과지역의 산정 및 검색이 가능하다. 따라서 문제를 일으키는 지역이나 건물에 대해 지반진동을 일으키는 진동원의 경계조건을 변환시켜 줌으로써 공사 전에 진동문제에 대해 대책을 강구할 수 있다.

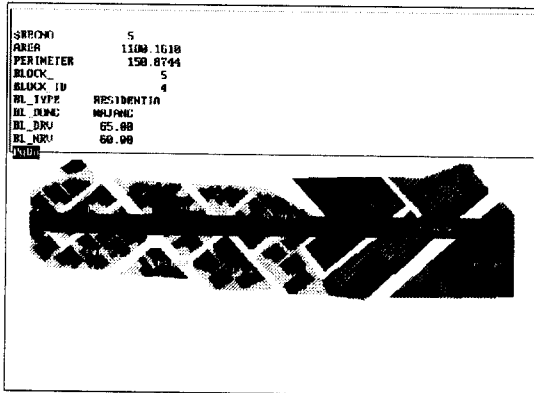


그림 7. 주변지역에 관한 자료검색

#### 4. 적용 사례

본 연구의 실제 적용지역은 지하철 5호선이 통과하는 지역중 민원이 제기된 곳으로 특정 주파수 영역의 진동값에 대한 예측을 필요로 하는 지역이

다. 또한 이 지역은 지하철 터널공사로 인해 야기되는 발파진동이 인근 건물에 미치는 영향을 예측 및 평가하기 위해서도 적합한 주위환경을 가지고 있다고 판단되어 지하철진동 및 발파진동에 의한 진동환경관리를 위한 실제 적용지역으로 선택하였다. 적용지역의 제원은 표 3과 같다.

표 3. 적용지역의 제원

곡선 반경 R =	열차 설계 속도 (km/h)	구조물 형태	구조물 중량 (ton/m)	토피 (m)	토 질
∞	80	복선터널 (PD-4)	31.05	17.36	매립토, 충적토, 풍화암, 풍화암 연암, 경암

#### 4.1. 선진동 : 지하철진동

대상지역에서의 진동환경은 먼저 해당지역에서의 위치정보와 함께 지반조건, 지하철단면의 제원 및 예측식에 의한 속성정보에 의해 지하철노선 주위에서의 거리에 따른 진동을 예측한다. 이렇게 예측된 지하철운동에 따른 주변지역의 진동크기는 규제치와 비교하여 그림 9에 표시되어있다. 이에 의하면 일반적으로 주택지인 경우에 예측치의 O.A 값이 크게 나와 지역별 진동규제치를 넘어서는 것을 알 수 있다.

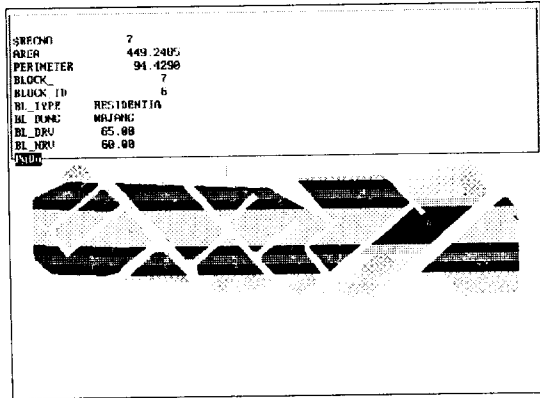


그림 9. 지역별 진동규제치와 지하철운행에 따른 선진동전파 진동크기 비교

#### 4.2. 점진동 : 발파진동

적용지역의 지하철단면은 터널구조로 발파에 의해 단면을 굴착하였다. 이러한 발파진동은 점진동원으로 볼 수 있다. 발파진동예측식에 의한 진동속도와 인접건물에 대한 진동속도 규제치와의 비교를 개발된 VMS를 이용하여 분석하였다.

이 지역에 대한 시험발파자료가 없으므로 기존 예측식에 제시된  $m=1/3$ , 발파상수  $K$ 는 900 (터널 발파의 심패기 발파), 거리감쇠지수  $n$ 은 1.5 (대상 지역의 토질주상도에 의해 진동감쇠가 비교적 적은 지역으로 판단)를 적용하였다.

그림 9는 발파진동에 의한 진동크기를 나타낸 것으로 적은 장약량에도 큰 진동속도치가 나와 인접구조물 대부분에서 규제치보다 큰 진동이 발생됨을 알 수 있다.

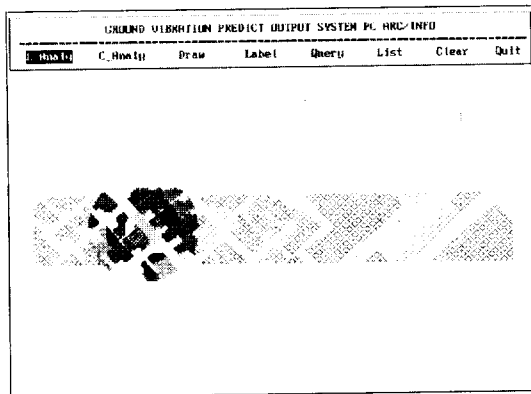


그림 9. 발파진동에 대한 건물의 진동속도규제치와 점진동에 따른 발파진동속도크기 비교

## 5. 결과

본 논문에서는 선진동원과 점진동원의 진동환경 관리를 위해 개발된 VMS를 실제 지역에 적용하였다.

추후 연구과제로는 속성정보를 다양화하기 위한 지속적인 측정자료의 확보와 함께, 측정값들의 개선된 통계적 처리를 위한 연구 및 이에 따른 기하감쇠곡선의 개선과 구조물의 동적 특성을 고려하는 모듈의 추가를 위한 연구가 계속되어야 한다.

## 참고문헌

- [1] 유복모, 지형공간정보론, 동명사, 1994
- [2] CHARLES H. DOWDING, Blast Vibration Monitoring and Control, 1984
- [3] 윤지선, 최신 발파기술, 1993, 歐美書館
- [4] 허영의 4명, "지하철진동 예측식의 사용성 판단을 위한 실측값과 예측값의 비교", 한국소음진동공학회 춘계학술논문집, 1996
- [5] 허영의 1명, "GIS를 이용한 진동환경 관리시스템 개발", 한국소음진동공학회 추계학술논문집, 1996
- [6] ESRI, Understanding GIS, 1990
- [7] ESRI, SML USER'S GUIDE, 1990
- [8] ESRI, PC ARC/INFO USER'S GUIDE, 1990