

# 준 경험적 방법에 의한 발파진동원의 특성과 구조물 동적 해석에 관한 연구

손성완\*, 김준호\*\*, 정석영\*\*, 홍성경\*\*, 김동용\*\*\*

## A Study on Dynamic Structural Analysis for Blast Vibration by using Semi-Empirical Method

Sung-Wan Son\*, Joon-Ho Kim\*\*, Sek-Young Jeong\*\*, Seong-Kyeong Hong\*\*, Dong-Yong Kim\*\*\*

### ABSTRACT

Most engineers, related to soil and civil dynamic field, have been interested in the dynamic response of building transmitted from soil and rock to structure due to blasting. However it is not easy to estimate the dynamic response of structures and utilities due to blasting by using analytical method because of difficulties of soil modeling, prediction of excitation force and so on.

In this paper, dynamic response analysis have been performed to predict vibration levels of structure due to blasting and the semi-empirical method, which is based on vibration measurement data, has been employed to consider blast vibration characteristics.

### 1. 서론

각종 건설현장, 특히 최근 지하철도의 공사 현장에서 발파로 인해 발생하는 소음 및 진동에 의한 주변 구조물 및 유틸리티의 안정성 및 거주환경에 대한 환경 문제의 평가의 중요성이 증대하게 되었다.

여지껏 많은 구조물 동적 해석 분야에 종사하는 엔지니어들이 지진을 통해 전달되는 발파 진동에 의한 구조물의 동적 응답 평가 분야에 관심을 가져 왔지만, 불행히도 발파 진동원의 정량적인 추정, 지반 모델링의 한계성 그리고 지반과 구조물의 상호 작용 효과 등의 어려움 때문에 명확한 해석 기법을 제시하지 못하고 있다. 따라서 발파진동에 의한 지반 및 구조물의 정량적인 응답 예측과 제어에 위해서는 새로운 개념의 동적해석과 실험방법 등이 필요할 것으로 예상된다.

이러한 노력의 일환으로 최근 반도체 분야를 중심으로 이러한 불확실성을 내포하는 순수 해석적인 기술 보다는 실험과 경험을 기반으로, 해석은 개개의 실험 데이터와 등가 유한 요소 모델을 연결하는 통합 시스템을 활용하는 준경험적 기법(Semi-Empirical Method)이 사용되고 있다. 이것은 구조물의 동적해석에 필요한 데이터나 해석구조를 가능한 모든 부분에서 불확실한 요인을 제거한 실제적인 요소로 형성된 통합구조를 갖도록 하는 방법론적 접근이다.

본 연구에서는 지하철 공사 현장에서 발파로 인한 주변 구조물의 기판 및 구조물 진동 계측을 수행하여 발파 진동 특성을 고찰하고 이를 바탕으로 준 경험적 방법에 의한 동적 응답 해석을 수행하여 신뢰성 있는 진동 예측 모델을 제시하고자 하였다.

### 2. 발파진동의 특성

#### 2.1 발파 진동 개요

폭약이 장약공내에서 폭발하면 주위 암반은 강력한 폭굉 충격을 받으며 폭약과 접촉한 주변의 상태는 고온 고압하에서 용융되며 유체역학적으로 거동하는 현상을 나타낸다. 장약공의 외부는 충격압에 의하여 파쇄대가 발생함과 함께 에너지가 전달되면서 원주방향 균열의 생성 및 전파 등 여러 형태의 암반파괴를 일으킨다. 어느 범위를 지나면 에너지는 암반을 파괴시키지 못할 정도로 급격히 저하되고 응력파(stress wave)의 형태로 전파된다. 즉 힘을 받은 질량은 변형을 계속하려 하고 암반이 갖고있는 강성은 변형을 원래상태로 되돌리려고 하면서 변형과 회복을 반복하는 파공의 형태로써 응력파가 전달되며, 이 응력파의 도달에 따라 지반의 반응은 진폭과 주기를 갖는 진동의 형태로 나타난다. 이를 발파진동(Blast vibration)이라 부른다.

#### 2.2 발파 진동의 예측

발파에 의한 지반진동의 세기에 영향을 주는 변수들을 대별하면 ① 화약의 종류와 장약량, ② 발파원으로부터 측정지점까지의 거리, ③ 암반의 역학적, 구조적 특성, ④ 천공패턴, 장약 방법, 전착순서 등의 발파방법이며 지역적 특성과 발파조건에 따라 다르므로 대상지역별 발파조건에 따른 발파진동측정을 통하여 전파특성을 도출하여야 한다. 지반진동의 세기를 나타내는 진동의 진폭은 변위, 속도, 가속도 등으로 나타낼 수 있으나 구조물에 대한 영향평가와 관련해서는 진동속도에 의한 척도를 사용하는 것이 가장 합리적인 것으로 알려져 있다.

#### 가) 예측식의 일반적인 형태

발파진동을 예측할 수 있는 전파식은 진동의 속도성분으로 표시할 때 일반적으로 장약량 및 발파원으로부터의 거리를 주요 변수로 하여 다음 식과 같은 유형으로 표현할 수 있다.

\* RMS 테크놀로지(주)

\*\* 한국 가스 공사 안전 방재 연구실

\*\*\* 삼보 기술단(주) 구조부

$$PPV = k D^a W^c$$

여기서, PPV = 최대진동속도(Peak Particle Velocity), cm/sec

D = 폭원으로 부터의 거리, m

W = 지발당 최대장약량, kg

k, a, c = 자유면 상태, 화약의 성질, 암질 등에 따라 결정되는 상수

위의 일반식은 거리를 장약량으로 환산한 형태로서 표시하면 다음과 같다.

$$PPV = k \left( \frac{D}{W^b} \right)^n$$

#### 나) 차원해석을 이용한 전파식의 유도

발파진동 관련 주요 변수들을 선정하고 차원해석(Dimensional analysis)기법을 이용하여 해석하면 변수들간의 관계를 예측할 수 있는 다음과 같은 이론적인 식을 유도할 수 있다.

$$PPV = k \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^n$$

여기서, n = 감쇠지수

위 식은 거리를 장약량의 세제곱근에 의해 환산한 형태로서 이를 세제곱근 환산(cube root scaling)이라고 부른다. 장약량의 지수 b는 미국 광무국을 중심으로 처리된 계속결과들은 다음과 같이 1/2의 값으로도 처리되고 있으며 이를 제곱근 환산(root scaling)이라고 부른다.

$$PPV = k \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^n$$

#### 다) 동적 해석에 의한 발파 진동의 예측

지반의 복잡한 경계조건과 구조물의 지반과의 상호관계를 복합적으로 관찰하기 위해서는 일반적인 예측식과 실험식을 대신하여 지반과 구조물을 동적으로 모델링하고 발파의 입력 가진력에 대한 필요한 위치에 대한 전달함수를 구함으로써 발파로 기인하는 진동을 예상할 수 있다. 이러한 해석적인 방법은 발파의 조건과 지반의 조건을 유사하게 실현할 수 있을 뿐만 아니라 구조변경과 대책에 대한 변화를 탄력적으로 적용할 수 있기 때문에 복잡한 지반-구조물의 시스템에 대하여 많이 적용하는 방법이다. 본 연구에서도 내진해석에 사용한 동적 모델링 방법을 활용하여 발파진동의 특성을 평가하고 분석하였다.

### 2.3 일반적인 발파 진동 특성

#### 가) 발파 진동원 추정 방법과 평가

동적 해석에 사용되는 진동원을 정확히 찾아내는 것은 대단히 어려운 일이다. 특히, 동적 해석에서 진동원은 가진력(加振力)의 형태로 나타내는 것이 일반적이기 때문에 발파와 열차 진동의 진동원을 가진력의 개념으로 직접 측정하거나 계산적인 방법으로 진동 해석에 필요한 형태로 얻는 것은 실용적인 차원에서 어려운 일이기 때문에 본 과제에서는 Semi-Empirical Method의 한 방법을 활용하여 진동원을 결정하였다. 진동원을 결정하는 절차를 정리하면 아래와 같다.

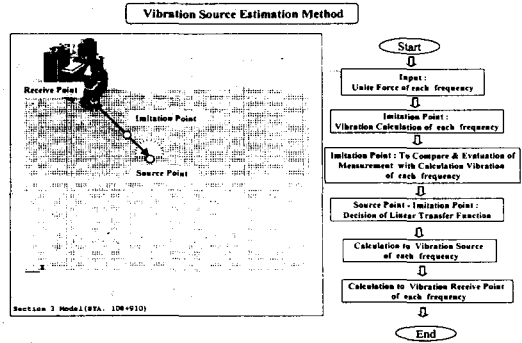


Fig. 1 Vibration Source Estimation Method

#### 나. 발파 진동원의 특성

진동주파수, 진동계속 시간 발파에 따라 생기는 진동은 충격적인 현상이며, 적어도 煤質이 암반일 경우에는 진동 계속시간은 자연 진동 등에 비교해서 대단히 짧고, 지속시간은 약 數 10~100 ms 정도이다. 또한 발파는 많은 경우, 적당한 段差를 두고 몇단의 段發로 실시되지만, 예를 들어 DS段發 5단정도의 발파라도, 전체적인 진동 계속시간은 2초 정도에 불과하다. 또한, 진동 주파수는 발파의 진동이 문제가 될 정도의 거리가 되는 범위에서는 수십~수100Hz 정도의 높이다. 이 주파수는 통상, 구조물의 고유 주파수와는 상당한 거리를 두고 있다. 발파 진동의 진동원은 전형적인 충격성 진동이기에 때문에 진동원의 정확한 특성을 지배하는 인자를 확정할 필요가 있다. 충격성 진동원을 표현하는 방법은 단위 면적에 대한 가진력과 충격 신호의 형상, 충격 지속시간, 발파의 장약과 발파의 순서에 의하여 결정된다. 그러나 이러한 모든 조건에서도 동적 해석을 위해서 관심의 대상이 되는 최대 진동 압력과 그것에 대한 지속시간이다. 일반적인 발파 진동원의 특성을 평가하기 위하여 사용되는 데이터는 Fig. 2와 같으며 보통암의 경우 진동응답 형태는 Fig. 3과 같다

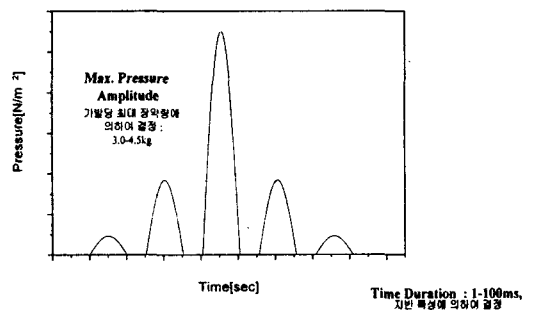


Fig. 2 Characteristics of Blast Vibration Source

◎ 터널 지저부의 지반이 보통암 인 경우의 진동응답  
(Imitation Point Vibration으로 활용)

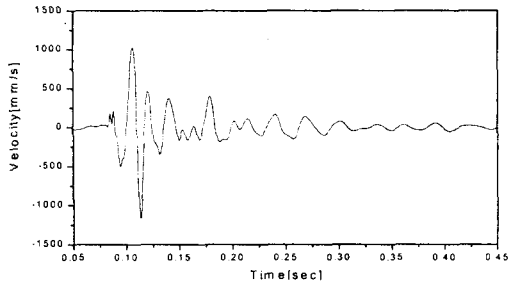


Fig. 3 Characteristics of Soil Vibration Response due to Blast(10 m away from Source)

3. 지하철 공사 현장 발파 진동 측정/분석

시흥 IC 지하철 작업구 발파 작업시 수행하는 발파작업으로 기인한 발파진동으로 인근 한국가스공사 시설물의 안전성을 확보하기 위하여 동적해석의 입력자료로 사용하고자 실제 발파작업시 인접지반 및 구조물에서의 진동 측정/분석을 수행하였다.

가. 측정일시 : 2000년 10월 17일

나. 분석설정 환경 :

- Sampling Time : 4 sec
- Overlap : Retrigger
- Frequency Range : 200 Hz
- Frequency Resolution : 0.25 Hz
- No of Average : 1
- averaging Method : Trigger
- Windows : Transient
- Trigger : Free Run

다. 측정지점 :

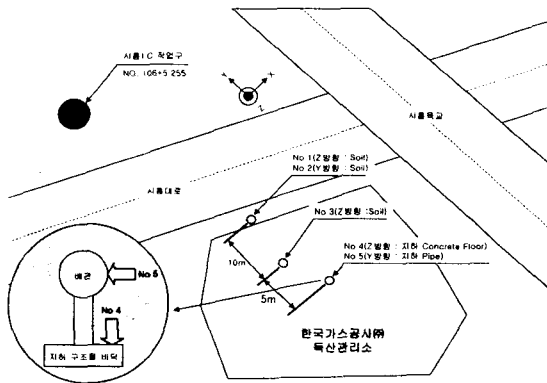


Fig.4 Measuring Locations of Blast Vibration

라. 측정결과

각 측정위치에서 계측된 가속도 시간 이력곡선을 Fig 5에서 Fig. 8 게 나타내었으며 Table 1에 최대 주파수 성분 및 overall 값을 정리 하였다.

계측 결과를 살펴보면 본 발파의 경우 주발파에 의한 충격성 진동 기 지반을 가진시키는 일반적인 진동특성과는 다른 결과를 보이고 있다. 본 발파진동 신호의 경우 일정시간 대역동안의 신호가 지속되 는 일종의 대역 랜덤신호 양상을 보이며 통상의 발파진동 보다 상

대적으로 고주파수 대역에서의 신호가 두드러짐을 알 수 있다

Table 1 Vibration Measurement Result

측정지점	가속도 기준		OverAll[rms]		Figure Name	
	Peak Frequency [Hz]	Peak Acceleration [ $\mu\text{m/s}^2$ ]	[ $\mu\text{m/s}^2$ ]			
			[ $\mu\text{m/s}^2$ ]	[ $\mu\text{m/s}$ ]		
1회	1	75.75	2.5704	9.62	0.0260	1ST-AVC1T/H
	2	48.00	1.6364	7.55	0.0206	1ST-AVC2T/H
	3	79.50	11.2757	131.80	0.1427	1ST-AVC3T/H
	4	75.75	2.1663	85.27	0.0792	1ST-AVC4T/H
	5	72.50	95.0527	8343.90	7.1248	1ST-AVC5T/H
2회	1	76.75	2.2241	9.53	0.0204	2ND-AVC1T/H
	2	51.75	1.1173	6.07	0.0127	2ND-AVC2T/H
	3	76.75	9.5042	67.59	0.0828	2ND-AVC3T/H
	4	76.75	3.4058	75.67	0.0695	2ND-AVC4T/H
	5	76.25	106.5210	10691.82	9.0847	2ND-AVC5T/H

\*. 상기 데이터는 각각의 주파수대역의 4-80[Hz] 범위에서 최대치를 선정함.

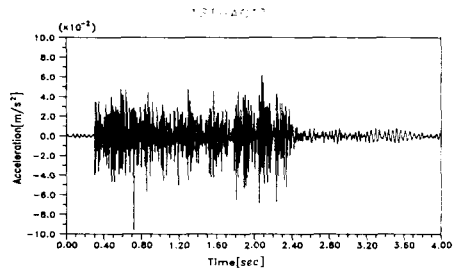


Fig. 5 Vibration Acceleration Response of No.1

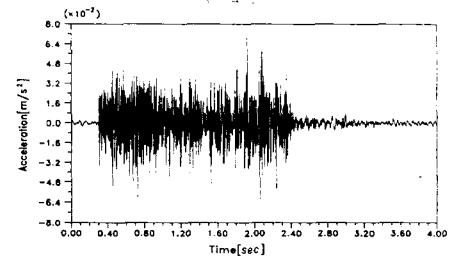


Fig. 6 Vibration Acceleration Response of No.2

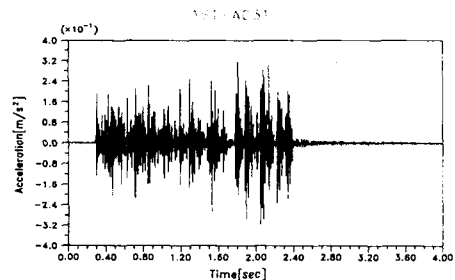


Fig. 7 Vibration Acceleration Response of No.3

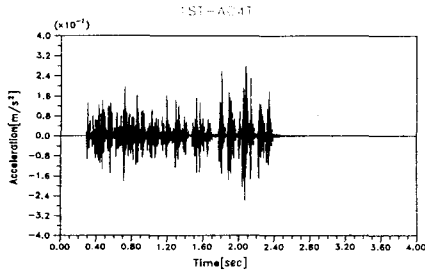


Fig. 8 Vibration Acceleration Response of No.4

4. 발파 진동으로 인한 구조물 동적 해석

발파진동으로 기인하는 한국가스공사 구조물의 동특성 영향을 해석적으로 검토하기 위하여 해석적 모델링을 수행하였다. 해석은 시흥 I.C. 수직구 발파현장을 모델로 제시된 도면에 따라 모델링을 실시하였다. 원활한 해석을 위하여 지반해석모델은 2차원모델을 이용하였으며, 가진원은 선하중으로 분포되는 등하중으로 하고, 지반 및 구조물은 무한평면으로 가정하였다. 사용한 해석프로그램은 범용 유한요소해석프로그램인 ANSYS 5.4를 이용하여 해석을 수행하였으며, 해석적 모델은 지반 및 구조물을 공사현장 측정 부위를 범위로 하였다. 동적 해석 수행에 있어서 외부조건에 의해 구조물에 대한 진동 영향은 미치지 않는 것으로 하였다. 사용된 Element는 1차 해석에 대해서는 2D-PLANE42로 모델링 하였다. 경계조건으로는 지반 해석에서는 경암 하부를 Fixed하고 좌우측 지반 연장부는 대칭조건 (symmetric condition)으로 단순화하였다. 해석모델에서 사용한 물성치는 콘크리트와 일반적인 지반의 대표 물성치를 적용하였다 (Concrete :  $E=24GPa$ ,  $\rho=2400kg/m^3$ ,  $\nu=0.15$  / Soil : 표 4.1) 지반 및 구조물을 모델링하기 위한 기본 물성치들은 Table 2에서 정리하였다.

Table 2 Typical Material Properties

지층	$\gamma$	$\gamma_{sat}$	실측 N치	보정 N치	$\phi$ (deg.)	C (t/m <sup>2</sup> )	$E_s$ (t/m <sup>2</sup> )	ks (t/m <sup>2</sup> )	$\nu$	
매립토층	1.8	1.9	3~50	2~40	24~34	0	500~2100	1200~3700	0.25	
퇴적토층	점토층	1.6	1.7	4~30	3~25	20~32	0~140	450~4800	1200~2400	0.3
	모래층	1.8	1.9	5~50	4~50	22~35	0	700~8200	1600~4000	0.25
풍화암층	2.1	2.2	50	40	34~36	0~3.0	6000~10000	5000~7000	0.15	
연암층	2.2	2.3	50	40	35~38	0~5.0	10000	7000~9000	0.13	
경암층	2.4	2.6	50	40	36~40	0~6.0	20000	9000~12000	0.12	

$\gamma$  : 지반의 습윤단위중량(t/m<sup>3</sup>)      C : 점착력 (t/m<sup>2</sup>)  
 $\gamma_{sat}$  : 지반의 포화단위중량 (t/m<sup>3</sup>)       $E_s$  : 지반의 변형계수(t/m<sup>2</sup>)  
N : 대표적인 표준입시험치       $\nu$  : 포아송비  
 $\phi$  : 내부마찰각(도)      ks : 지반반력계수(t/m<sup>3</sup>)

진동원의 발파지점의 발파로 인한 진동이 지반을 통해 수음점에 전달되는 진동응답을 정량적으로 평가하기 위해 2가지 진동원 모델과 지반 모델을 이용하여 3가지 경우의 해석모델에 대한 동적 응답 해석을 수행하였다. Table3 에 해석이 수행된 3가지 경우를 정리하였으며 아래에 해석에 사용된 진동원 모델 및 유한 요소 해석 모델에 대해 설명하였다.

Table 3 Finite Analysis Model Case for Blast Vibration

해석 모델	진동원 모델	지반 모델	비고
Case 1	진동원 모델 ①	지반 모델 ①	초기 해석 모델
Case 2	진동원 모델 ①	지반 모델 ②	고주파 모드의 영향을 포함하기 위해
Case 3	진동원 모델 ②	지반 모델 ②	고주파 모드 및 실제 폭파상태의 시뮬레이션

(a) 진동원 모델 ①(등가 연속 충격성 진동원)

: 실제 발파 진동 응답 계측치의 분석을 바탕으로 동일한 Amplitude와 Time duration을 갖는 연속성 충격 진동원

여기서 삼각파의 Time duration의 각 발파공의 발파 지연시간인10ms를 사용하였고 Pulse사이의 간격은 계속 신호를 고려하여 정하였다.

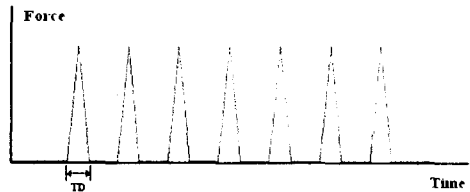


Fig. 9 등가 연속 충격성 진동원(삼각파)

(b) 진동원 모델 ②(연속 pulse 진동원)

: 발파 계획서를 바탕으로 폭파시 마다 각 폭발 시각에서 pulse 신호로 모델링하였으며 pulse 사이의 간격은 계획서에 나타난 폭발 지연 시간

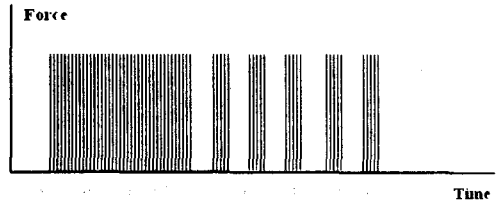


Fig. 10 연속 pulse 진동원

(c) 지반 해석 모델 ①(등가 Mesh 모델)

: 모델링된 지반구조의 mesh size가 모두 동일한 모델  
- Element Type : PLANE42 (2D)  
- No. of Node : 2174  
- No. of Element : 2052  
- Element Size : 2.5m

가) 해석 모델

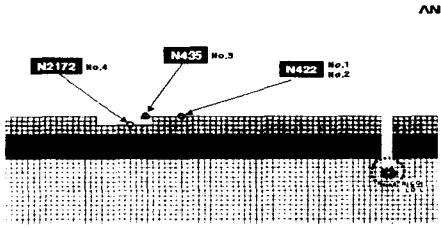


Fig. 11 Case ① 지반 해석 모델

d) 지반 해석 모델 ②(지표면 Fine Mesh 모델)

: 모델링된 지반구조의 mesh size를 지표면으로 갈수록 Fine Mesh한 모델

- Element Type : PLANE42 (2D)
- No. of Node : 3721
- No. of Element : 3622
- Element Size : 1m / 2.5m / 5m

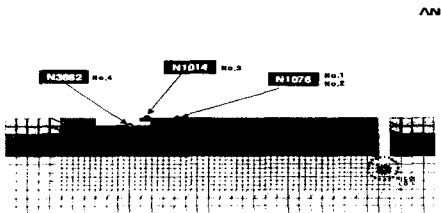


Fig. 12 Case ② 지반 해석 모델

나) 해석 결과

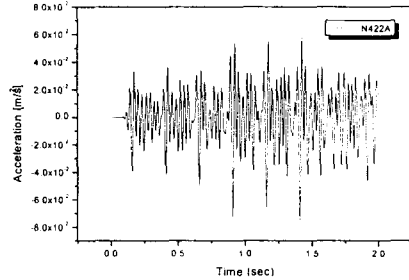
앞에서 언급된 3가지 해석 모델을 이용하여 발파시의 동적 응답 해석을 수행하였다. 지면과계상 계산점중 No.1에서의 각 해석 모델에서 얻어진 가속도 시간이력 및 주파수 응답 곡선을 Fig. 13에서 Fig. 15에 나타내었다.

해석 결과에서 나타듯이 Case 1(등가 연속 충격성 진동원 + 지반모델 ①)의 해석 결과를 살펴보면 발파가 진행되는 시간동안 계산된 가속도 시간 이력의 최대 진폭치는 계측결과 보다 다소 크게 나타나지만 전반적인 경향은 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 계측신호에서 나타나는 고주파수 성분을 거의 포함하고 있지 못함을 알 수 있다. 계측결과와 마찬가지로 발파원에서 먼 지점인 3번 위치에서 진폭이 더 크게 나타나고 있음은 응답 지점이 돌출된 개구부 형태로 되어있어 발생하는 국부 진동 모드의 영향으로 판단된다.

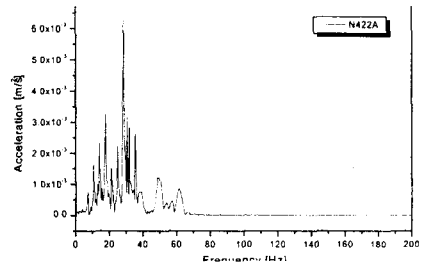
Case 2의 경우 계측에서 나타난 고주파 성분을 고려하여 지반모델 ②에서 표면파의 고주파 모드를 해석에 포함시키기 위하여 지반의 유한요소 모델의 mesh size를 표면으로 갈수록 Fine Mesh를 하였다. 해석 결과를 살펴보면 가속도 시간 이력의 최대치는 Case 1의 결과와 유사하지만 해석 결과에 고주파수 모드가 훨씬 많이 포함되고 있음을 알 수 있다.

Case 3에서는 Case 2에서 사용되었던 지반모델 ②와 진동원을 좀

더 실제 상태와 가깝게 묘사하기 위해 폭파 계획서를 바탕으로 실제 폭파가 일어나는 시점에 pulse 형태의 입력을 이용하여 해석을 수행하였으며 세가지 해석 Case중에서 시간력 특성이나 고주파수 영향 등에서 가장 계측 결과와 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

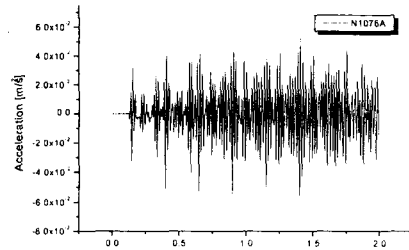


(a) Time History

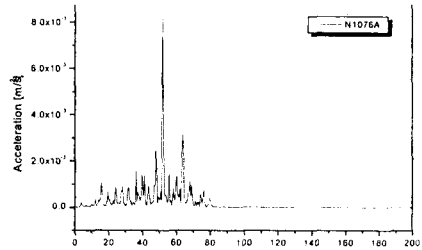


(b) Spectrum

Fig. 13 Vibration Response of No. 1(Case 1)

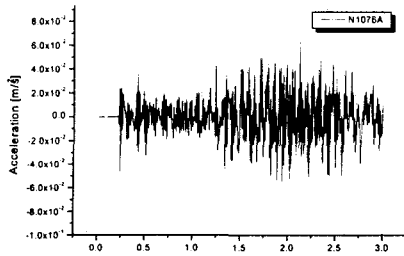


(a) Time History

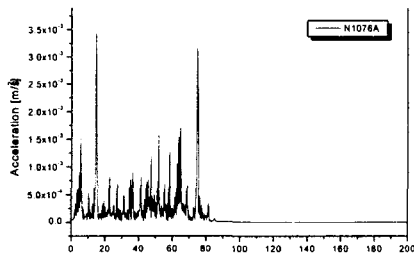


(b) Spectrum

Fig. 14 Vibration Response of No. 1(Case 2)



(a) Time History



(b) Spectrum

Fig. 16 Vibration Response of No. 1(Case 3)

## 5. 결론

발파 진동에 의한 지반 및 구조물의 동적 해석을 위하여 지하철 공사 현장의 발파 진동을 계측/분석 하였다.

계측 결과 측정된 발파 진동 특성이 일반적인 발파 진동 양상과 다른 특성을 지니고 있었으므로 준 경험적 방법에 의해 계측 신호를 바탕으로 발파 진동원의 특성에 맞는 진동원 입력 및 해석 모델 변경에 의하여 실제 진동 계측 결과와 유사한 경향을 갖는 동적 응답 해석을 수행할 수 있었다.

본 연구에서 얻어진 발파 진동원 특성 및 해석 모델의 경우 유사한 특성을 갖는 발파진동의 경우 발파 진동원 위치 변경 및 구조물 구조 변경에 따른 신뢰성 있는 진동 영향성 평가에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Charles H. Dowding, "Blast Vibration Monitoring and Control", Prentice-Hall, 1984
- [2] 이흥기 외, "준 경험적 방법을 이용한 충격성 진동을 대한 구조물의 동적응답의 예측", 한국 진동소음 공학회 춘계학술대회 논문집, 2000.
- [3] C. G. Gordon, "Vibration Prediction and Control in Microelectronics facilities, Inter-Noise 96, Proceeding Book 1, 1996
- [4] 김남수, 양형식, "발파 소음진동 수준의 변환 연구", 한국진동소음 공학회 춘계학술대회 논문집, 1988.