

# 도심 터널의 발파 진동 특성



이홍기  
RMS 테크놀로지(주)



손성완  
RMS 테크놀로지(주)



김동용  
삼보기술단(주) 구조부

## 1. 개요

구조물 동적 설계 엔지니어들에게 있어서 의문을 가지고 있는 관심사 중에 하나가 설계단계에서 구조물과 건물 개개의 구역에 대한 진동과 소음을 예측하고 대책을 제시하고 있는 방법론이 정당하고 절차가 합리적이며, 어느 수준의 에러(error)를 가지고 있는가를 확인하는 일이다. 만일, 소음 및 진동문제를 풀고 있는 엔지니어 자신이 예측치와 대책에 대하여 스스로 의문을 가지고 이를 설계에 반영한다면 시공과 사용상에서 심각한 문제를 야기시킬 여지를 가지고 있게된다. 특히, 소음, 진동문제는 최종적으로 건물이 시공 중이거나 완료 단계에서 확인되고 발생하는 문제이기 때문에 사후 대책에는 많은 시간과 노력이 필요한 특성을 가지고 있다. 이러한 문제를 사전에 예방할 수 있는 방법 중에 하나가 초기 프로젝트 계획단계에서 전문적인 기술 검토가 이루어지는 것이 무엇보다도 중요하다. 그리고 소음, 진동 문제는 다양한 진동 및 소음원과 유틸리티 특성 및 구조의 전반적인 설계 인자(因子)에 대하여 민감한 응답 변화를 가지고 있기 때문에 필요에 따라 결정하는 정책적인 문제가 아니라 문제의 정확한 예

측과 해결이라는 기술적인 차원으로 접근하는 인식의 전환이 필요하다. 특히, 도로터널과 지하철도의 공사 현장에서 발생하는 굴착과 발파로 기인하는 소음 및 진동에 의한 주변 구조물 및 유틸리티의 안정성 및 거주환경에 대한 환경 문제의 평가와 대책에 대한 중요성이 증대되고 있다. 이러한 기술적인 신뢰성을 검증하기 위해서는 전반적인 소음, 진동해석 및 제어를 위한 합리적인 절차서의 사용 유무와 지반, 건물 기초, 구조의 동적(動的) 특성에 대한 신뢰성 있는 데이터 적용 문제, 소음/진동허용규제치의 합리적인 평가와 결정문제, 소음/진동원에 대한 정의와 적용 문제 등을 명확하고 정량적으로 제시해야 할뿐만 아니라 대책에 대한 최적 설계 능력을 갖추고 있는지를 확인할 필요가 있다. 그러나 구조물의 소음, 진동문제에 사용되고 있는 결정적인 데이터들이 각 엔지니어링 회사가 보유하고 있는 독특한 수치와 절차를 사용하고 있기 때문에 일률적으로 정당한 것인가, 아닌가라는 문제는 최종적인 시공이 완료단계에서만 검증할 수 있기 때문에 기술의 신뢰성을 평가하는 문제가 용이하지 않다는 것이 현실적인 어려움이다. 이러한 문제점으로 인하여 반도체 공장의 건설, 문화재 및 소음, 진동에 민감한 지역과 건물

을 통과하는 지하철 터널공사에는 초기설계단계에서 많은 경험과 실적을 가지고 있는 국내외의 엔지니어링 회사에 기술적인 자문과 대책을 의뢰하는 경향을 가지고 있다.

터널의 굴착에 따른 소음, 진동문제는 굴착 방법에 따른 진동 및 소음원에 대한 정의가 명확하지 않기 때문에 소음, 진동 예측을 위한 입력 데이터의 결정에 어려움이 있다. 그리고 지반이라는 불연속, 불균질 매질에 대한 동적 모델링의 한계성 및 구조물과 건물에 대한 진동응답을 예측하기 위한 동적 해석의 어려움은 이미, 구조설계엔지니어들에게 많이 알려진 과제이다. 당사에서는 이러한 동적 불확실성을 인정하고 축적된 다양한 실험과 측정데이터를 동적 해석의 입력 데이터로 활용하는 준경험법(Semi-Empirical Method)라는 방법론을 독자적으로 개발하여 기기급 반도체공장의 미진동(micro vibration) 제어에서부터 지하철 및 철도 진동에 이르는 다양한 적용과 데이터의 신뢰성을 확보하여 왔다.

터널의 굴착과 차량 또는 지하철의 운행에 따른 소음, 진동예측과 대책을 위하여 여지껏 많은 구조물 동적 해석 분야에 종사하는 엔지니어들이 지반을 통해 전달되는 진동원에 의한 구조물의 동적 응답 평가 분야에 관심을 가져 왔지만, 불행히도 발파 또는 지하철의 진동원의 정량적인 추정의 어려움과, 지반 모델링의 한계성 그리고 지

반과 구조물의 상호 작용 효과등에 대한 동적 특성에 대한 불확실성으로 인하여 신뢰성 있는 동적 해석 기법의 제시에 어려움을 가지고 있는 실정이다. 이러한 노력의 하나로 준경험법이라는 방법론을 적용하여 터널의 진동, 소음문제를 예측하고 저감대책을 제안하는 새로운 개념의 동적 해석 절차를 수립하고 진동원이 발파인 것에 대하여 적용하였다. 최근 반도체 분야를 중심으로 이러한 불확실성을 내포하는 순수 해석적인 기술 보다는 실험과 경험을 기본으로, 해석은 개개의 실험 데이터와 등가 유한 요소 모델을 연결하는 통합 시스템을 활용하는 준경험적 기법(Semi-Empirical Method)이 개발되고 있다. 이것은 구조물의 동적 해석에 필요한 데이터나 해석구조를 가능한 모든 부분에서 불확실성이 큰 요인을 실험과 측정 데이터로 제거하여 불확실성을 최소화하는 실제적인 요소로 형성된 통합구조를 갖도록 하는 방법론적인 접근이다.

본 연구에서는 지하철 터널공사 현장에서 발파로 인한 지반 및 구조물 진동 측정과 해석을 통하여 발파 진동원의 특성을 정의하고 이를 바탕으로 준 경험적 방법에 의한 동적 응답 해석을 수행한 실예제를 정리한 것이다. 그리고 터널 공사와 굴착으로 발생하는 소음문제는 진동으로 기인하는 저주파수의 구조음(structure-borne noise)이 발생하는 것이 일반적이다. 이것은 지반이나 구조체의 진동이 소음으로 변화하는 방사계수에 의하여 결정되기 때문에 정확한 구조 진동값이 결정될 경우, 이것으로 기인하는 구조소음 수준을 계산할 수 있다.

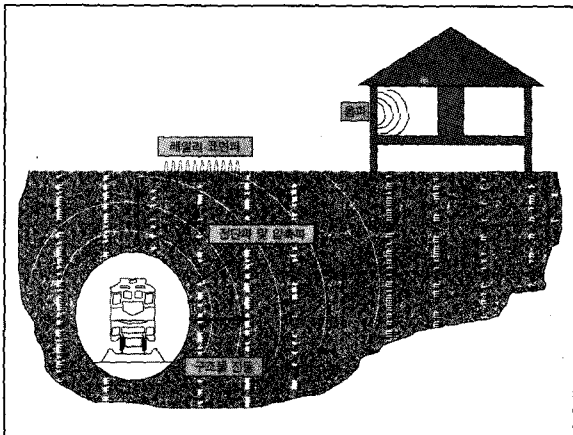


그림 1.

## 2. 발파진동의 특성

### 2.1 발파 진동 개요

폭약이 장약공내에서 폭발하면 주위 암반은 강력한 폭펍 충격을 받으며 폭약과 접촉한 주변의 상태는 고온 고압하에서 용융되며 유체역학적으로 거동하는 현상을 나

타낸다. 장약공의 외부는 충격압에 의하여 파쇄대가 발생 함과 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, 점화순서 등의 발파방법이며 지역적 특성과 발파조건에 따라 다르므로 대상지역별로 발파 조건에 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.

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

여기서, PPV = 최 대 진 동 속 도 (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 경계조건 및 구조물과 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 조건

을 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

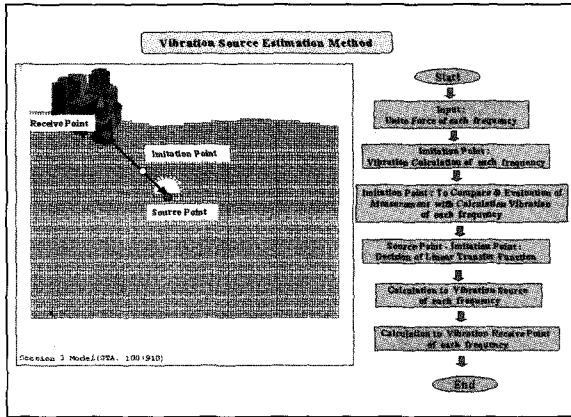


그림 2. Vibration Source Estimation Method

동적 해석에 사용되는 진동원을 정확히 찾아내는 것은 대단히 어려운 일이다. 특히, 동적 해석에서 진동원은 가진력(加振力)의 형태로 나타내는 것이 일반적이기 때문에

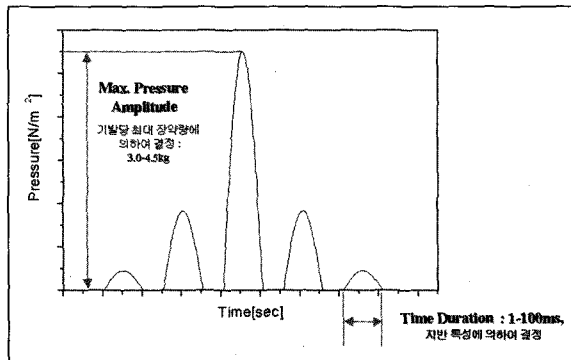


그림 3. Characteristics of Blast Vibration Source

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 절차서를 정리하면 그림 2와 같다.

#### 나. 발파 진동원의 특성

진동주파수, 진동계속 시간 발파에 따라 생기는 진동은 충격적인 현상이며, 적어도 嫌疑이 암반일 경우에는 진동 계속시간은 자연 진동 등에 비교해서 대단히 짧고, 지속 시간은 약 數 10~100 ms 정도이다. 또한 발파는 많은 경우, 적당한 段差를 두고 몇단의 段差로 실시되지만, 예를 들어 DS段發 5단 정도의 발파라도, 전체적인 진동 계속시간은 2초 정도에 불과하다. 또한, 진동 주파수는 발파의 진동이 문제가 될 정도의 거리가 되는 범위에서는 수십~수100Hz 정도의 높이이다. 이 주파수는 통상, 구조물의 고유 주파수와는 상당한 거리를 두고 있다. 발파 진동의 진동원은 전형적인 충격성 진동이기 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

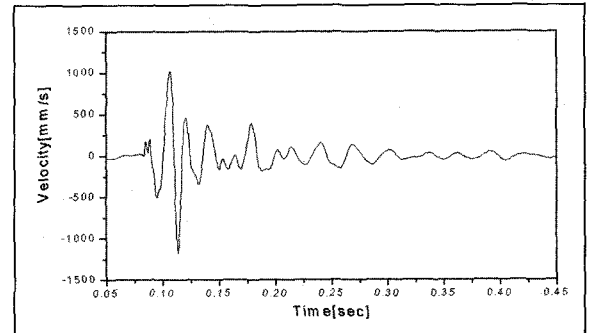


그림 4. Characteristics of Soil Vibration Response due to Blast(10 m away from Source)

표 1. Vibration Measurement Result

측정지점	가속도 기준		OverAll(rms)		Figure Name	
	Peak	Peak	[ $\mu\text{m}/\text{s}^2$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{s}$ ]		
	Frequency (Hz)	Acceleration [ $\mu\text{m}/\text{s}^2$ ]				
1회	1	75.75	2.5704	9.62	0.0260	1ST-A/VC1T/H
	2	48.00	1.6364	7.55	0.0206	1ST-A/VC2T/H
	3	79.50	11.2757	131.80	0.1427	1ST-A/VC3T/H
	4	75.75	2.1663	85.27	0.0792	1ST-A/VC4T/H
	5	72.50	95.0527	8343.90	7.1248	1ST-A/VC5T/H
2회	1	76.75	2.2241	9.53	0.0204	2ND-A/VC1T/H
	2	51.75	1.1173	6.07	0.0127	2ND-A/VC2T/H
	3	76.75	9.5042	67.59	0.0828	2ND-A/VC3T/H
	4	76.75	3.4058	75.67	0.0695	2ND-A/VC4T/H
	5	76.25	106.5210	10691.82	9.0847	2ND-A/VC5T/H

\* 상기 데이터는 각각의 주파수데이터의 4~80[Hz] 범위에서 최대치를 선정함.

특성을 평가하기 위하여 사용되는 데이터는 그림 3과 같으며 보통암의 경우 진동응답 형태는 그림 4와 같다

### 3. 지하철 공사 현장 발파 진동 측정/분석

시흥 IC 지하철 작업구 발파 작업시 수행하는 발파작업으로 기인한 발파진동으로 인근 ○○공사 시설물의 안전성을 확보하기 위하여 동적해석의 입력자료로 사용하고 자 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

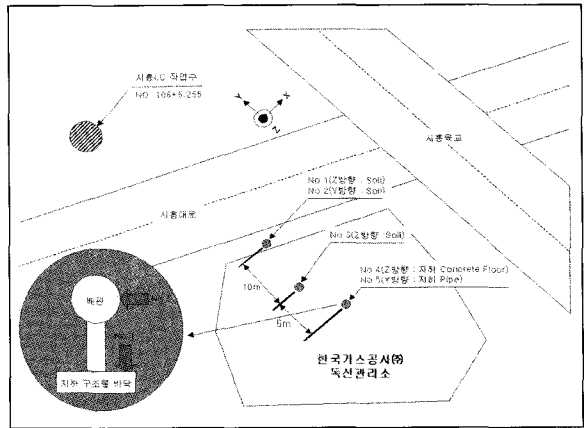


그림 5. Measuring Locations of Blast Vibration

#### 라. 측정결과

각 측정위치에서 계측된 가속도 시간 이력곡선을 그림 6에서 그림 9에 나타내었으며 표 1에 최대 주파수 성분 및 overall 값을 정리하였다.

계측 결과를 살펴보면 본 발파의 경우 주발파에 의한 충격성 진동이 지반을 가진시키는 일반적인 진동특성과는 다른 결과를 보이고 있다. 본 발파진동 신호의 경우 일

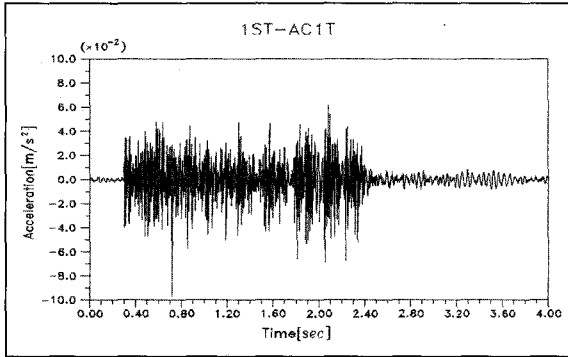


그림 6. Vibration Acceleration Response of No.1

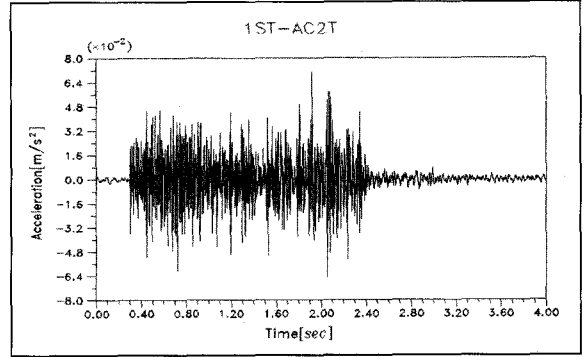


그림 7. Vibration Acceleration Response of No.2

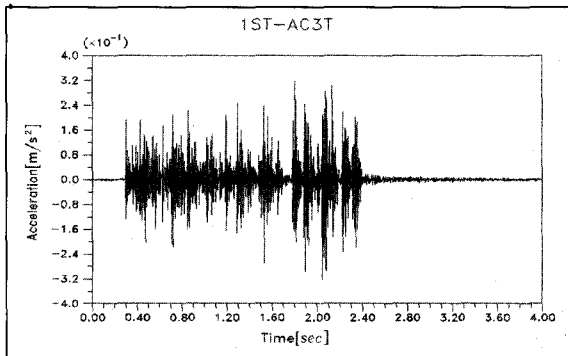


그림 8. Vibration Acceleration Response of No.3

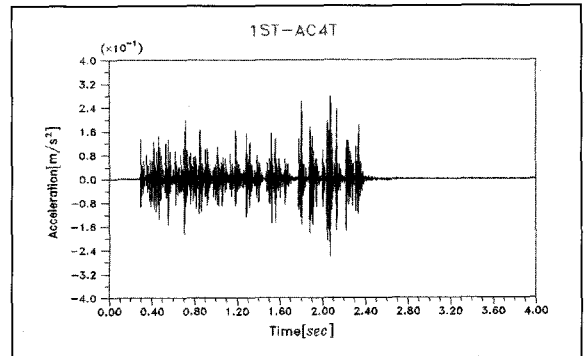


그림 9. Vibration Acceleration Response of No.4

정시간 대역동안의 신호가 지속되는 일종의 대역 랜덤 신호 양상을 보이며 통상의 발파진동 보다 상대적으로 고주파수 대역에서의 신호가 두드러짐을 알 수 있다

#### 4. 발파 진동으로 인한 구조물 동적 해석

발파진동으로 기인하는 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 동하중으로 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 :  $E = 24\text{GPa}$ ,  $\rho = 2400\text{kg/m}^3$ ,  $\nu = 0.15$  / Soil : 표 2)

지반 및 구조물을 모델링하기 위한 기본 물성치들은 표 2에서 정리하였다.

표 2. Typical Material Properties

지층	$\gamma$	$\gamma_{sat}$	실측N치	보정N치	$\phi$ (deg.)	C(t/m <sup>2</sup> )	E <sub>s</sub> (t/m <sup>2</sup> )	ks(t/m <sup>3</sup> )	$\nu$
매립토층	1.8	1.9	3~50	2~40	24~34	0	500~2100	1200~3700	0.25
퇴적토층	점토층	1.6	4~30	3~25	20~32	0~140	450~4800	1200~2400	0.3
	모래층	1.8	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>)    N : 대표적인 표준입시시험치    C : 점착력 (t/m<sup>2</sup>)     $\nu$  : 포아송비  
 $\gamma_{sat}$  : 지반의 포화단위중량 (t/m<sup>3</sup>)     $\phi$  : 내부마찰각(도)    E<sub>s</sub> : 지반의 변형계수(t/m<sup>2</sup>)    ks : 지반반력계수(t/m<sup>3</sup>)

표 3. Finite Analysis Model Case for Blast Vibration

해석 모델	진동원 모델	지반 모델	비 고
Case 1	진동원 모델①	지반 모델①	초기 해석 모델
Case 2	진동원 모델①	지반 모델②	고주파 모드의 영향을 포함하기 위해
Case 3	진동원 모델②	지반 모델②	고주파 모드 및 실제 폭파상태의 시뮬레이션

가. 해석 모델

진동원인 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.

표 3에 해석이 수행된 3가지 경우를 정리하였으며 아래의 해석에 사용된 진동원 모델 및 유한 요소 해석 모델에 대해 설명하였다.

(a) 진동원 모델 ① (등가 연속 충격성 진동원)

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

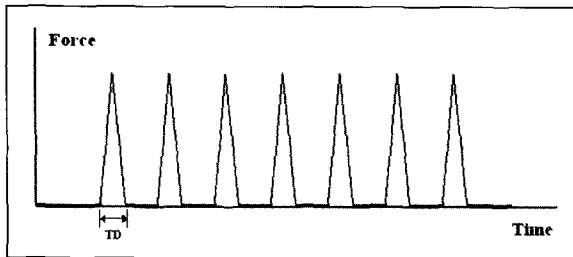


그림 10. 등가 연속 충격성 진동원(삼각파)

충격 진동원

여기서 삼각파의 Time duration의 각 발파공의 발파 지연시간인 10 ms를 사용하였고 Pulse사이의 간격은 계측 신호를 고려하여 정하였다.

(b) 진동원 모델 ② (연속 pulse 진동원)

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

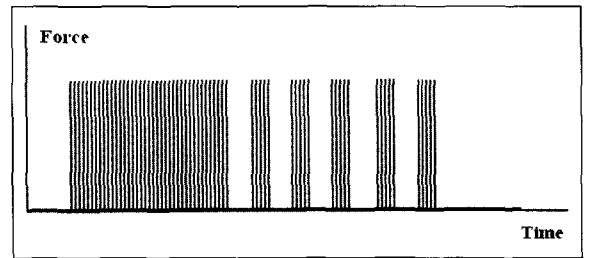


그림 11. 연속 pulse 진동원

(c) 지반 해석 모델 ① (등가 Mesh 모델)

: 모델링된 지반구조의 mesh size가 모두 동일한 모델

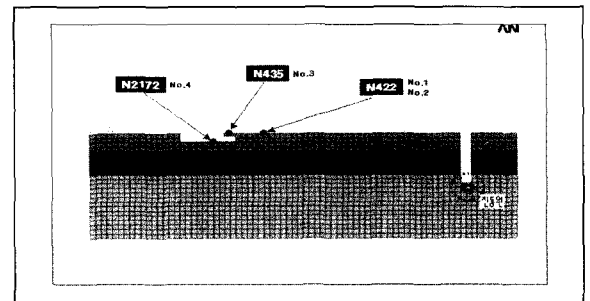


그림 12. Case ① 지반 해석 모델

- Element Type : PLANE42 (2D)
- No. of Node : 2174
- No. of Element : 2052
- Element Size : 2.5m

(d) 지반 해석 모델 ② (지표면 Fine Mesh 모델)  
 : 모델링된 지반구조의 mesh size를 지표면으로 갈수록 Fine Mesh한 모델

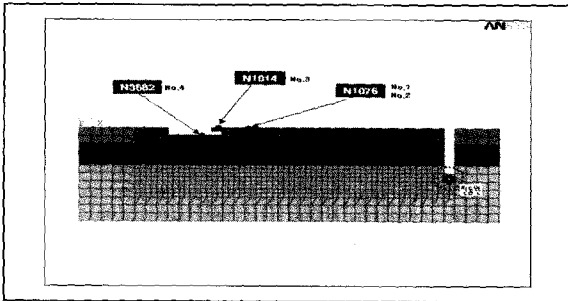


그림 13. Case ② 지반 해석 모델

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

나. 해석 결과

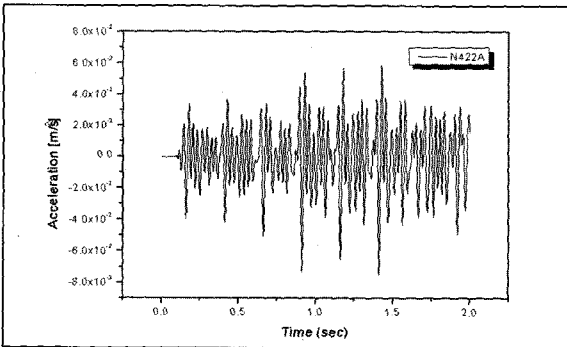
앞에서 언급된 3가지 해석 모델을 이용하여 발파시의 동적 응답 해석을 수행하였다. 지면관계상 계산점중 No.1에서의 각 해석 모델에서 얻어진 가속도 시간이력 및 주

파수 응답 곡선을 그림 14에서 그림16에 나타내었다.

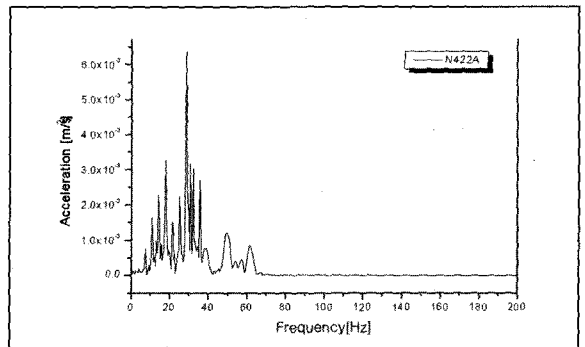
해석 결과에서 나타듯이 Case 1(등가 연속 충격성 진동원 + 지반모델 ①)의 해석 결과를 살펴보면 발파가 진행되는 시간동안 계산된 가속도 시간 이력의 최대 진폭치는 계측결과 보다 다소 크게 나타나지만 전반적인 경향은 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 계측신호에서 나타나는 고주파수 성분을 거의 포함하고 있지 못함을 알 수 있다. 계측결과와 마찬가지로 발파원에서 먼 지점인 3번 위치에서 진폭이 더 크게 나타나고 있음은 응답 지점이 돌출된 개구부 형태로 되어있어 발생하는 국부 진동 모드의 영향으로 판단된다.

Case 2의 경우 계측에서 나타난 고주파 성분을 고려하여 지반모델①에서 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 포함되어 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.



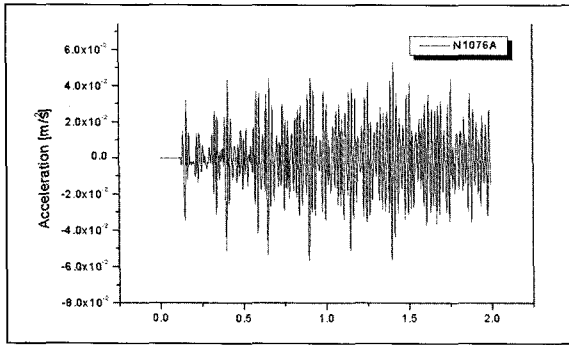
(a) Time History



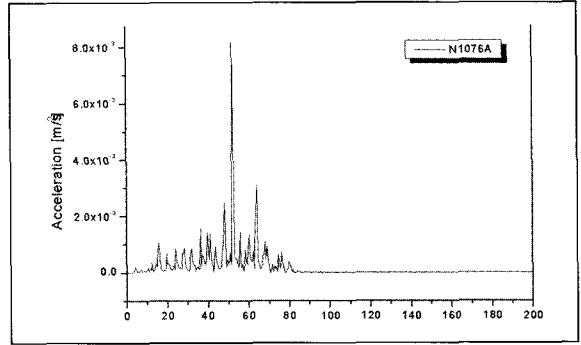
(b) Spectrum

그림 14. Vibration Response of No. 1(Case 1)



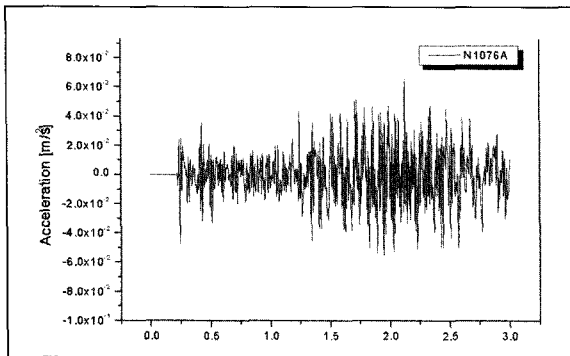


(a) Time History

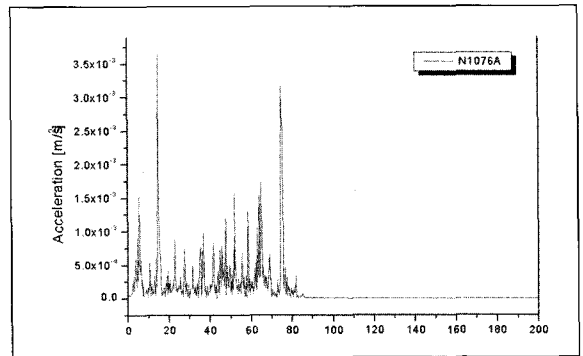


(b) Spectrum

그림 15. Vibration Response of No. 1(Case 2)



(a) Time History



(b) Spectrum

그림 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 있을것으로 판단된다.

## 참고문헌

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.