

# 준경험적 방법을 이용한 터널발파 작업시 인접구조물의 동적해석 및 진동영향성 평가

## A Dynamic Analysis and Evaluation of a Building Structure due to Tunnel Blast by using Semi-Empirica Method

손성완<sup>0\*</sup>, 류국현<sup>\*</sup>, 전종균<sup>\*\*</sup>, 남영식<sup>\*\*\*</sup>, 김동기<sup>\*\*\*\*</sup>

Sung-Wan Son, Kuk-Hyun Ru, Jong-Kun Chun, Young-Sik Nam, Dong-Gi Kim

**Key word** : Direct Dynamic Design, Blasting, Safety of Structure, Tunnel Blast, Semi-empirical Method

### ABSTRACT

Most engineers, related to soil and civil dynamic field, have been interested in the direct dynamic design of building transmitted from soil and rock to structure due to blasting. However it is not easy to estimate the dynamic response of structures due to blasting by using analytical method because of difficulties of soil modeling, prediction of excitation force and so on. In this paper, dynamic analysis have been performed to predict vibration level and evaluate dynamic safety of structure adjacent to tunnel blast 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 지하철과 철도공사 현장에서 발파로 인해 발생하는 진동에 의한 주변 구조물 및 유틸리티의 안정성 및 거주환경에 대한 환경 문제의 평가 중요성이 증대하게 되었다. 이러한 발파에 의한 구조물의 진동 영향성을 평가함에 있어 통상적으로 단편적인 시발파에 의한 진동 계측을 통한 진동 전파식의 도출 또는 건교부등에서 제시한 발파 진동 추정식을 사용하여 발파진동 영향성 평가가 이루어져 왔으며 그 이유는 많은 구조물 동적 해석 분야에 종사하는 엔지니어들이 지반을 통해 전달되는 발파 진동에 의한 구조물의 동적 응답 평가 분야에 관심을 가져 왔지만, 발파 진동원의 정량적인 추정, 지반 모델링의 한계성 그리고 지반과 구조물의 상호 작용 효과 등의 어려움 때문에 명확한 해석 기법을 제시하지 못하고 있다.

본 연구에서는 실험과 경험을 기본으로, 해석은 개개의 실험 데이터와 등가 유한 요소 모델을 연결하는 통합 시스템을 활용하는 준경험적 기법(Semi-Empirical Method) 사용하여 발파 패턴에 따른 진동원 입력원을 정의하여 직접 동적 응답 해석 방법을 수

행하여 보다 신뢰성 있는 발파 진동 예측 절차서 및 동적 모델을 제시하고자 하였다.

### 2. 발파진동의 예측 및 평가

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 다르다.

#### 2.1 발파 진동식을 이용한 평가

발파진동을 예측할 때 경험적으로 제시된 발파 진동 평가식을 이용하는 방법으로 현재 건교부 암발파 설계 기준등에서 미광무부 식을 추천하고 있다. 이러한 식에 의하여 거리에 따른 지발당 장약량을 산정하고 발파를 수행하게 되는 가장 단순한 방법이며 각 암반의 특성 및 발파 방식의 특성 등을 고려 할 수 없는근사적인 예측방법이다.

$$V = 160 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.6} \quad (\text{미광무부, USBM식})$$

#### 2.2 시험 발파를 통한 발파진동식에 의한 평가

발파 지역의 암반 특성등을 고려하기 위하여 발파가 수행되는 지역에서 시험 발파를 통하여 진동을 계측하고 그 계측결과를 분석하여 아래의 발파식의 적절한 상수 값을 Fitting 하여 전파식을 도출한다. 이 방법은 직접 실

\* 알엠에스 테크놀러지 주식회사  
E-mail : rmstech@rmstech.co.kr  
Tel : (041) 556-7800, Fax : (041) 556-7808

\*\* 선문대학교 기계공학부

\*\*\* 코오롱 건설(주)

\*\*\*\* 유신 코퍼레이션 (주)

험에 의해서 식을 산출하므로 지역의 지층 특성을 고려할 수 있는 이점이 있으나, 정확한 발파식 추정을 위해서는 많은 시발파 데이터를 요구하고 실제 발파 패턴의 특성을 고려하지 못하는 단점이 있다.

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

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

### 2.3 직접 동적해석법에 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 진동특성을 구현함으로써 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 연구에서는 실험 및 계측 데이터를 토대로 동적해석 모델을 구축하는 준 경험적 방법을 이용하여 직접 동적 해석을 통한 발파 진동을 평가하였다.

### 3. 시험발파 진동계측 및 분석

현재 국철이 설계되고 있는 터널 구간에서 발파 지점에 인접하여 거주구조물이 위치한 지역에서 발파에 의한 충격성 진동원에 따른 지반 및 구조물의 진동 전달 특성을 실측하기 위하여 시험발파를 통한 진동 계측을 수행하였다.

#### 3.1 시험발파 조건

- 1) 장약량 : 1 kg
- 2) 발파공 암반 : 경암
- 3) 발파 지점과 구조물 이격거리 : 60m
- 4) 발파공 지름 : 65 mm

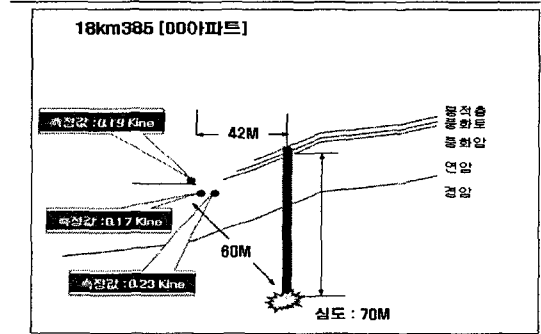
#### 3.2 시험발파 계측 결과

시험 발파 계측 결과를 고찰하면 아파트 지역의 부지 경계에서 진동 속도 최대값을 보였으며 0.2 Kine을 초과하여 나타났다. 그러나 아파트 부지 경계에서 약 8m 정도 떨어진 아파트 2층 거실 중앙에서의 진동 값은 부지 경계 보다 다소 적은 0.19 Kine의 값을 나타내었다. 진동 속도 시간 이력을 고찰하면 발파에 의한 충격성 진동이 전파 될 때 지반에서는 감쇠가 다소 급격하게 일어나는 반면, 구조물에

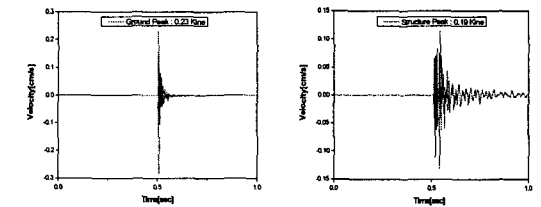
서는 충격성 진동에 의한 구조 모드의 여진 현상으로 진동 응답의 여진이 지반보다 길게 나타나며 발파원과 동일한 이격거리에서는 지반보다 구조물의 최대 응답이 다소 크게 나타나고 있음을 알 수 있다



(a) 시발파진동 계측 전경



(b) 시발파진동 계측 지점 및 결과



(c) 시발파 진동 계측 시간 이력

Fig.1 Test Blasting Vibration Measurement Results

### 4. 거주 구조물 동특성 실험 및 해석

대상지역의 발파시 수진 구조물로서 평가 대상이 되는 주거 구조물에 대한 동특성을 고려하기 위하여 동적 실험 및 해석을 수행하였다. 동특성 수행 지점은 구조물을 대표 할 수 있고 발파에 의한 영향성이 가장 클 것으로 예상되는 1층 바닥 슬라브에서 수행되었다.

#### 4.1 분석 환경

- ① Trigger Mode : Level ② No of Average : 5
- ③ Time Span : 4sec(1024) ④ Freq. Span : 100Hz
- ⑤ Average Method : Linear ⑥ Windows : Force/Exp
- ⑦ Overlap : Re-trigger

## 4.2 실험 및 해석 결과

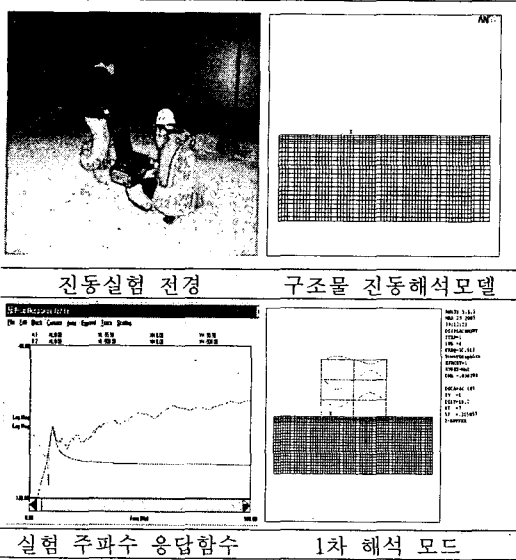


Fig. 2 Vibration Experimental and Analysis Results of Apartment Structure

## 5. 시험발파 조건에서의 동적해석

동적 해석의 방향은 시발파시 측정된 진동 계측 결과를 토대로 하여 준 경험적 방법을 통하여 지반 및 구조물의 진동 전파 특성을 구현할 수 있는 신뢰성 있는 해석적인 모델을 구축하는데 있다.

### 5.1 시발파 진동 입력원 특성

동적해석에 사용되는 진동원을 정확히 찾아내는 것은 대단히 어려운 일이다. 특히, 동적해석에서 진동원은 가진력(加振力)의 형태로 나타내는 것이 일반적이다. 따라서 발파 진동의 진동원을 가진력의 개념으로 직접 측정하거나 계산적인 방법으로 진동해석에 필요한 형태로 얻는 것은 실용적인 차원에서 어려운 일이다. 그러므로, 본 과제에서는 시험 발파로 얻어진 실측 자료를 토대로 발파진동의 진동 주파수, 진동시간을 고려하여 Semi-Empirical Method의 방법을 활용한 진동원을 결정하였으며, 동적해석을 위한 입력자료로 사용하였다. 시험발파의 경우 시추공( $\phi = 65$  mm)상에서 장약량 채운 상태의 단공 발파이므로 아래와 같은 단일 충격파의 형태로 생각할 수 있다.

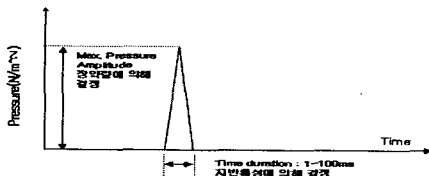


Fig. 3 Single Impulse vibration Source Model

## 5.2 동적해석 모델

해석모델은 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였으며 해석상의 원활함을 위하여 2차원 모델을 이용하였다. 사용된 Element는 2D-PLANE42로 모델링 하였으며, 경계조건으로는 지반 해석 시 전달함수의 구현을 위하여 모델지반 경암 하부를 Fixed하고 좌우측 지반 연장부는 대칭조건(symmetric condition)으로 단순화하였다. 특히, 지반 모델링에서 지반의 전파특성을 고려하여 지반의 우측과 좌측부는 감쇠비를 높여서 물성치를 적용하였다. 또한, 구조물 및 지반의 물성치는 조사 지역 내에 분포하고 있는 각 지층의 대표적인 토성치의 범위 내에서 적용하였다.

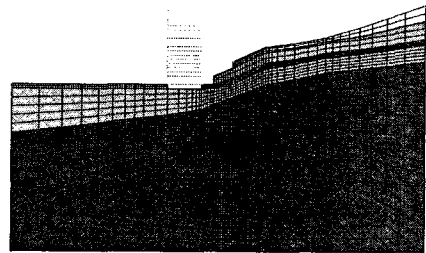


Fig. 4 Vibration Analysis Model for Blast

## 5.3 동적해석 결과

이상에서 얻어진 진동 입력원 및 동적해석 모델을 사용하여 시험 발파와 동일한 조건 및 지점에서 충격성 진동원을 가진 상태에서 진동 계측이 수행되었던 아파트 구조물 지반과 구조물 1층 슬라브 위치에서의 진동 응답을 계산하였다.

동적해석 결과에서 알 수 있듯이 계측 결과와 마찬가지로 지반에서의 진동 속도 시간 이력의 경우 감쇠가 급격히 진행되는 경향을 보이고 있으며 아파트 내부의 바닥 슬라브에서 슬라브의 1차 고유 진동 특성에 지배되어 여진하는 양상을 보이고 있으며 시간이력상의 최대치는 해석결과에서 다소 높게 나오고 있음을 알 수 있다

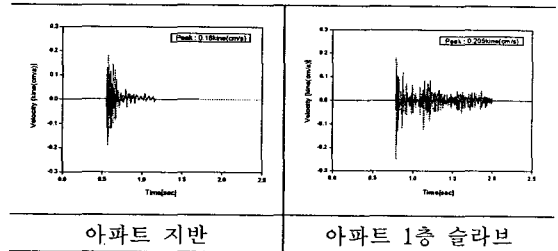


Fig. 5 Vibration Analysis Result for Test Blasting Condition

## 6. 터널 발파 패턴에 의한 동적해석

일반적으로 터널 작업시에서는 지반 환경 및 주변의 구조물 존재 여부에 따라 발파 계획서에 의한 발파 패턴을 설계하여 발파작업을 수행하게 된다. 이러

한 발파 패턴에 의한 진동원 특성은 각 지발의 발파 순서 및 지발당 장약량 및 지발 지연시간 등에 따라 시발파시 행하여진 단일 발파에 의한 진동원 특성과는 다른 형태를 보이게 된다.

### 6.1 발파 패턴에 의한 진동 입력원 결정

실제 발파에 있어서는 지반상태 및 주위 구조물의 위치거리등에 따라 대발파에서 정밀진동제어 발파동의 매우 다양한 발파 패턴을 가지고 발파를 진행하게 된다. 본 연구에서는 이미 작성된 발파 패턴 방식에 의하여 각 지발의 발파력을 단일 임펄스 충격력으로 부가하고 각 지발시간을 고려하여 진동원 입력 모델을 구축하였다.

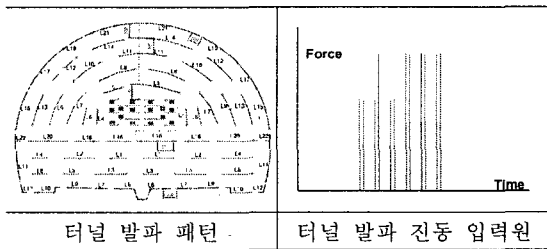


Fig. 6 Vibration Source Model of Pattern Blast

### 6.2 발파 패턴에 의한 진동 해석 결과

시발파 계측결과 및 주위 구조물 동특성 실험에 의해 구축된 동적해석 모델을 이용하여 설계된 발파 계획서에 따라서 패턴에 의한 발파작업시 주위 구조물과의 발파지점간의 이격거리에 따른 구조물의 진동 영향성 평가를 수행하였다. 아래그림에 대상 아파트 구조물의 지반 및 구조물 슬라브에서 진동속도 시간 이력 및 거리에 따른 진동속도 최대치를 나타내었다.

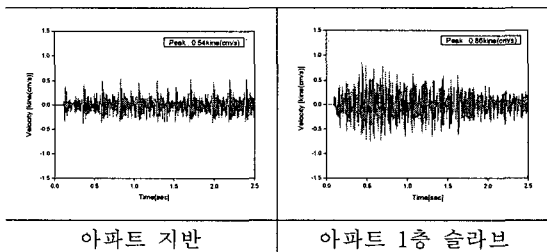


Fig.7 Vibration Velocity Time History at D=30m  
Table 1 Maximum Vibration Velocity according to Various Distance (unit : kine)

Dist.	30m	40m	50m	60m	70m	80m	100m
지반	0.54	0.34	0.23	0.18	0.13	0.11	0.073
구조물	0.86	0.53	0.36	0.27	0.19	0.15	0.098

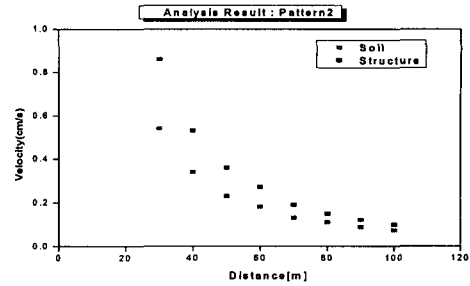


Fig.8 Vibration Analysis Result of Soil & Structure of Pattern Blast for Various Distance

해석된 시간이력에서 나타나듯이 패턴 발파시 시간 이력 곡선의 경우, 시험 발파시와는 다르게 연속되어 발생하는 충격에 의한 응답이 Phase summation 됨으로써 단일 충격에 의한 응답 보다 최대 응답이 크게 나오고 있음을 알 수 있으며 그 영향성은 지반보다 여진이 많은 구조물에서 더 크게 받고 있는 것으로 나타난다. 동일한 발파 패턴에 의한 발파작업시 구조물 내에서의 진동 응답이 지반보다 약 30-40% 정도 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

## 7. 결론

터널 굴착 작업시의 인접 구조물에서의 발파로 인한 진동영향성을 평가하기 위하여 제한적으로 이루어지는 시험 발파시의 진동 계측 결과를 이용하여 충격진동원에 의한 진동 전파 특성을 묘사할 수 있는 지반 해석 모델을 준경험적 기법을 이용하여 얻었으며 대상 구조물의 동특성 실험 결과를 토대로 구조물의 주요 진동 특성을 고려한 동적 해석 모델을 구축하였다. 또한 시험발파의 충격원과 실제 터널 발파시의 발파 패턴에 의한 충격성 진동원의 차이를 고려하기 위하여 시험발파시 얻어진 진동원 모델에 발파패턴에 의한 지발지연시간이 고려된 패턴에 따른 충격성 진동원을 입력하였다.

이상의 절차에 의한 발파 진동 해석 결과 계측결과와 유사한 경향을 갖는 동적 응답 결과를 얻을 수 있었으며 지반에서의 응답보다 구조물의 주고유 주파수들에서의 충격에 의한 여진에 따라 지반에서의 진동보다 30-40% 높은 진동 응답을 보이고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 수행한 터널 작업시 인접 구조물의 안정성 평가를 위한 발파진동 해석 절차서 및 동적 해석 모델의 경우 향후 유사한 발파 현장에서의 발파 계획서 작성 및 진동 영향성 평가에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.