

## 터널발파굴착시 수치해석에 의한 구조물의 영향평가

김 학 문\*

### Influence of Adjacent Structures using Numerical Method during Tunnel Blasting

Hak-Moon Kim\*

**요 약** 터널의 3차원 해석을 통한 발파진동 평가시에 최대진동속도를 산정하기 위해 구조물 하부에서의 진동응답이 감소하는 터널직경의 3D위치까지의 경계를 설정하여 수치해석을 수행하였다. 구조물하부에서 터널발파시 진동성분이 장약으로부터 구형형상으로 전파되어나갈 때 구조물에서 발파막장의 거리가 터널직경의 약 1~2배일 때 최대진동속도를 나타내었으며, 수치해석시에는 속도성분영역을 확인하여 정확한 구형의 발파진동속도영역의 산정이 중요한 것으로 나타났다. 또한, 속도성분과 기존의 발파진동전파식을 비교한 결과 터널심도 15m, 25m일 경우에는 유사하게 나타났으나, 터널심도 35m일 경우에는 기존 발파진동전파식과는 상당한 차이를 보이므로 터널심도가 터널직경의 5배 이상일 경우에는 기존발파진동전파식에 의한 속도성분이 수치해석에 비해 과다하게 산정됨을 알 수 있었다.

**Abstract** The numerical analysis indicated that the vibration response reduced sharply at the three times of tunnel diameter. Visual display of vibration response was possible through 3-D FEM computer program, and displacement of structure, particle velocity were obtained as output. It was found that the vibration velocity was maximum at distance one to two times of tunnel diameter for the given simplified blast loadings. The results of numerical analysis were compared with empirical based predictive equation of blasting. The empirical equation showed a good agreement with 3-D FEM results at a certain range of tunnel depth in this particular type of ground conditions.

**Key Words** : tunnel blasting, simplified blast loadings, vibration response

## 1. 서 론

NATM 터널 공사에서는 발파에 의한 굴착이 일반적으로 사용되고 있다. TBM 등 기계에 의한 굴착은 진동 발생이 그다지 크지 않으나, 발파방법에 의한 터널 굴착시에는 발파진동에 의하여 인근구조물에 영향을 미칠 뿐만 아니라 민원에 의한 문제가 자주 발생되고 있는 실정이다. 특히, 도심지터널 발파 굴착시 폭굉압에 따른 구조체의 연속적인 거동에 의한 손상영향을 예측하여 인접구조물을 보호할 수 있는 수치해석적 분석이 요구된다. 일반적인 발파하중에 대한 모델링은 암석의 파괴 등에 의한 영향으로 탄소성 변형거동을 보이며 발파에 의한 폭굉압의 충격파는 3차원적이므로 본 연구에서는 보다 정확한 해석으로 접근하기 위하여 3차원유한요소 해석을 실시하였다. 발파하중은 폭약이 발파할 때 발생

되는 발파압력으로 산정하였고, 압력하중의 방향은 3차원의 이점을 살려 굴진방향과 방사형으로 최대한 실제 조건과 가깝게 모사하였다. 또한 발파에 의한 인접구조물 및 지반의 영향을 알아보려고 터널심도, 막장위치, 구조물의 편심 등에 따른 조건을 변화시켜 3차원 유한요소 해석을 통한 발파시 최대 지반변위, 최대 지반 진동속도의 상호관계를 고려하여 매개변수연구를 수행하였다.

## 2. 해석조건 및 방법

### 2.1 발파파괴 메커니즘

발파가 주변 구조체에 미치는 영향에 대해 많은 연구가 진행되어왔다. 그 중 Hino(1956)와 Duvall 등(1957)은 암반이 장약으로부터 구형형상으로 전파되어 나가는 충격파의 반사에 의해서 주로 파괴가 되어진다고 제안하였으며, 이 연구는 Starfield 등(1968)에 의해 검증되었다[4,5]. Fourny(1981)는 기존의 일차원 응력파 전달에 대한 인장 파괴메커니즘을이차원에서의 응력파 형상파

\*단국대학교 공학부 토목환경공학전공

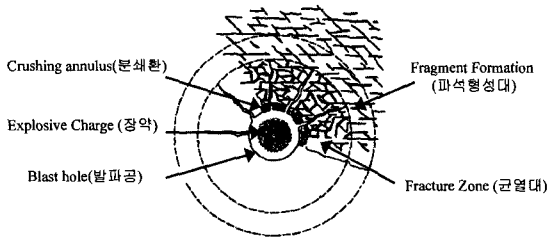


그림 1. Coursen(1979)이 제안한 기체압 파괴메커니즘

파괴메커니즘을 제안하였으나, 1960년대 Langefors 등과 Persson 등은 응력파를 무시하고 발파공에 가해지는 기체압을 파괴현상의 원인으로 재조명하였고, Coursen (1979)은 실험을 통하여 장약공에서의 높은 기체압력으로 장약공주면의 파괴현상이 발생된 것임을 검증하였다. 이와 같이 발파 하중은 장약공에서 높은 기체압력으로 장약공을 파괴 시키는 것으로 판단되며, 따라서 본 연구는 발파하중을 기체압력으로 모사하였다[6, 7].

2.2 발파하중의 적용기법

본 해석에 사용된 발파하중은 도심지 터널을 감안한 Smooth Blasting 공법을 기초로 하여 모형화하였으며, 해석시 발파하중은 압력으로 표현하였다. 발파하중을 압력으로 변환하는 식은 Jones & Hino(1956)가 제안한 식을 사용하였다. 본 연구에서는 디커플링과 커플링의 비교는 제외하였으므로 압력을 동적하중으로 환산한 Starfield(1968)의 압력하중식을 사용하여 변환한 값을 매질에 전달시 5~15% 정도 전달된다고 볼 때 최대값 15% 정도로 진동발생에너지로 가정하여 그림 2와 같이 적용하였다. 이는 Langefors가 따르면 파괴대상물이 압반일 경우 폭약이 갖는 에너지 중 폭속으로 대표되어지는 동적효과를 약 15%를 본 것과 일치한다[2, 6].

2.3 압반상태에 따른 현장의 발파진동전파식

표 1. 폭약의 종류에 따른 폭굉압력

폭약 종류	폭약 밀도 (g/cc), $\rho_e$	폭속 (m/s), $v_e$	폭굉압력 (g/cm <sup>2</sup> ), Pa	비고
Gelatin Dynamite	1.35	5500	107E4	본해석적용
Emulan	1.24~1.27	6000	198E4	
ANFO	0.9	3300	423E3	

Jones & Hino\*(1956) ; (\*日野能雄: 工業火藥協會誌)

$$P_D = 0.000424v_e^2\rho_e(1 - 0.153\rho_e + 0.193\rho_e^2)$$

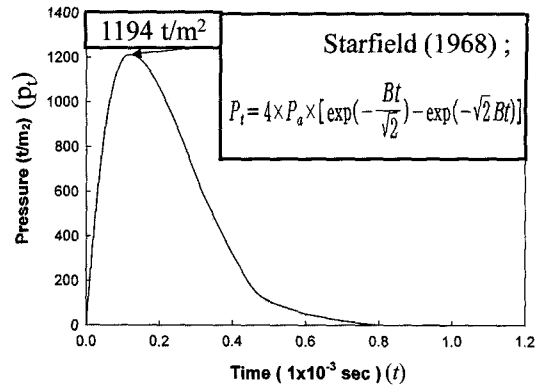


그림 2. 시간이력에 따른 발파하중 입력값

발파진동의 크기를 예측하기 위한 발파진동 전파식은 일반적으로 최대 지발당 장약량과 폭원으로부터의 거리 두가지를 변수로 하여 식 (1), (2)와 같이 사용되는데, 이 식에서 두 상수 K, n 값은 현장에서의 시험발파를 통해 구해야 하나, 설계단계에서는 시험발파가 불가능하므로 대부분 경험적인 방법을 통해 구해진 K, n 값을 사용하고 있다.

$$V = K \left[ \frac{D}{W^b} \right]^n \tag{1}$$

$$K = E_i \times (R_i + S_c \times Q_i) \tag{2}$$

여기서, V는 발파진동속도 (cm/sec), D는 폭원으로부터의 거리 (m), W는 최대 지발당 장약량(kgf), b는 1/2 또는 1/3(비교적 가까운 거리에서는 1/3 사용)을 의미한다. 또한 E<sub>i</sub>는 화약보정율(다이너마이트1.0), R<sub>i</sub>는 압중에 따른 발파상수(서울편마암 0.0206), S<sub>c</sub>는 압축강도 (kgf/cm<sup>2</sup>), Q<sub>i</sub>는 발파방법에 따른 보정값(확공발파시 10), n은 감쇄지수(서울편마암=1.5)이다. 이에 적용된 값들은 서울지하철 3, 4호선에서 사용된 값들을 사용하였다.

2.4 수치해석의 개요

본 연구는 연암 지반에서의 터널 굴착시 발파에 따른 상부구조물의 영향(B<sub>0</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>; 길이와 폭이 같은 구조물) 및 지반거동을 규명하기 위하여 그림 3과 같은 조건으로 총 48개의 3차원 탄소성 모델을 이용하여 구조물의 위치와 발파지점의 심도, 깊이 및 위치를 변화시켜 매개변수 변환연구를 수행하였다. 유한요소 경계는 그림 4와 같이 유한 요소망 외부는 무한영역으로 표현하고 비선형이며 파의 반사를 방지할 수 있는 비반사 경계를 사용하였다. 또한, 순수하게 발파만의 영향을 보고자 지보재의 모델링과 지하수의 영향은 고려하지 않았다.

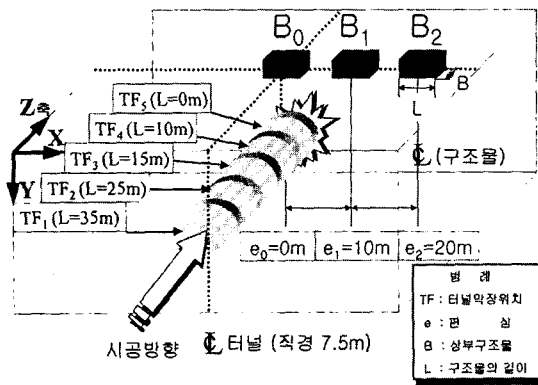


그림 3. 구조물 위치와 발파지점

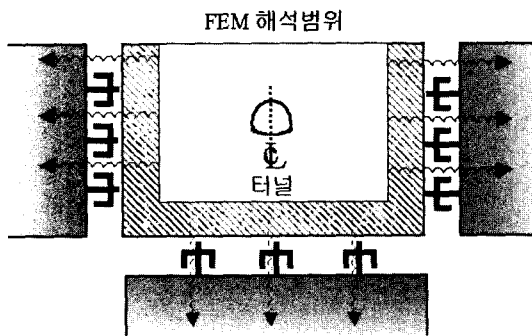


그림 4. 점성경계 (경계를 자유)

지반과 관련된 동적해석을 유한요소 해석으로 수행 시, 해석경계를 고정경계로 취할 경우에는 Dynamic Wave가 경계면에서 반사되어 오게 된다. 그러나 실제 해석경계 밖으로는 지반이 연속되어 존재하므로 Dynamic Wave가 반사되지는 않을 것이다. 그러므로, 일반적으로 유한요소해석(FEM)에서는 이 문제를 해결하기 위해서

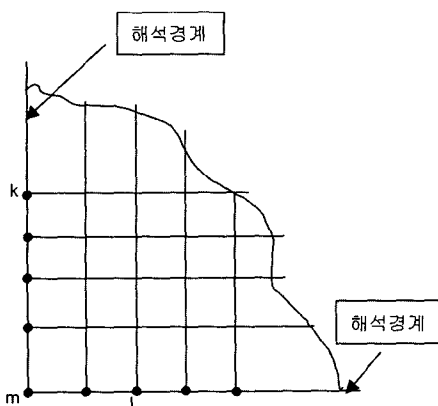


그림 5. 경계면이 수직인 경우

위의 그림 4와 같이 해석경계를 구속하지 않는 대신에 경계에 점성을 도입하여 점성경계를 취한다. 이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 사용된 유한요소해석 프로그램에서도 이러한 점성경계를 사용하였으며, 이 경우에 점성경계에서의 값을 구하는 방법은 그림 5와 식 (3)~(6)에서와 같이 적용하였다[5].

그림 5에서 k점의 x방향 점성경계값  $C_{kx}^v$  은 압축파(P 파)에 의존한다.

$$C_{kx}^v = \rho \cdot A \cdot v_p \quad (3)$$

여기서,

$\rho$  : 경계에 접해있는 외부매질의 밀도

A : 절점이 차지하는 면적

$v_p$  : P파의 속도

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (5)$$

또한, k점의 y방향의 점성경계값  $C_{ky}^v$  은 전단파(S파)에 의존한다.

$$C_{ky}^v = \rho \cdot A \cdot v_s \quad (6)$$

여기서,

$v_s$  : S 파의 속도

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (7)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (8)$$

그림 5에서 l점 방향의 점성경계 k값은 값과 동일한 방법으로 구한다.

수치해석에 Rayleigh Damping값의 적용은 다음과 같다.

$$C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K \quad (9)$$

$$\alpha + \beta \cdot \omega_i^2 = 2\omega_i \xi_i \quad (10)$$

여기서,

$\alpha, \beta$ : Damping 계수

$w_i$ : i번째 모드의 고유치의 제곱근

$\xi_i$ : i번째 모드의 Damping을

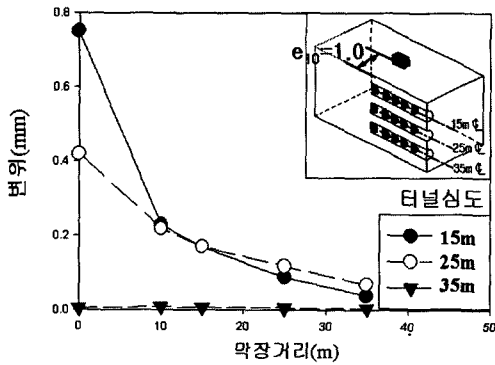
여기서,  $\omega_i$  값은 Eigen Value 해석을 수행 후 각 mode별 Eigen Value의 제곱근값을 사용한다. 이 과정

을 거쳐  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 구하여 수치해석시 적용하였다. 본 연구에서는 Rayleigh Damping을 위하여 정적해석을 통한 자유진동해석을 실시하여 Damping계수를 구하고, 감쇠율은 2%로 설정하여 동적해석을 실시하였다.

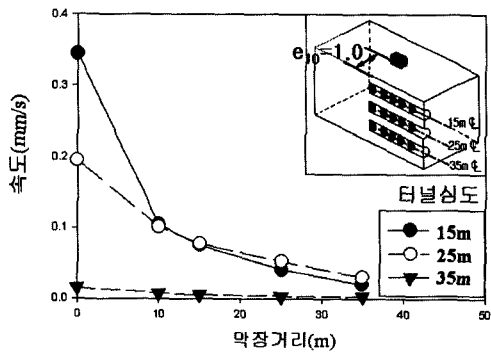
### 3. 해석결과 및 분석

#### 3.1 막장거리 이격시 편심에 따른 변위 및 속도

그림 6(a), (b)를 보면 구조물을 기준으로 하여, 발파에 의한 진동성분은 터널심도 15m인 경우의 구조물 직하부발파시 가장 큰 진동성분을 수반하였으며, 이격거리 10m까지는 급격한 변위 감소를 나타내었고, 그 이상 이격시에는 진동성분이 완만한 기울기로 감소함을 알 수 있었다. 터널심도 25m일 경우는 구조물 직하부 발파시에 진동성분이 가장 크게 나타났으며, 막장 이격거리에 따라 완만한 기울기로 감소하였다. 터널심도 35m 일 경우 막장거리 이격에 따른 진동성분의 차이는 거의 없었으며, 편심이 없는 경우와 비교시 약 30% 정도 작게 나타났다.



(a) 진동 변위



(b) 진동 속도

그림 6. 막장거리 이격시 변위 및 속도

#### 3.2 터널심도별 속도영역

그림 7~그림 9는 터널 심도에 따른 속도영역을 나타낸 것이다. 응력구근모양의 속도영역으로 보았을 때 터널심도 15m일 때 가장 큰 구근모양을 나타내었으며 25m일 때는 다소 감소된 구근형태를 보이며 35m일 때는 그림 9와 같이 속도성분이 감소하면서 구근의 형태가 상당히 축소됨을 알 수 있었다. 이는 구조물에 영향을 미치는 진동속도 성분은 터널심도가 깊어짐에 따라 급격히 감소됨을 나타낸다.

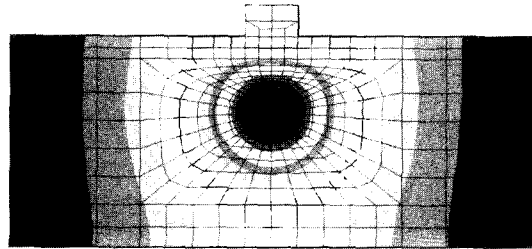


그림 7. 터널심도 15m일 때의 속도영역

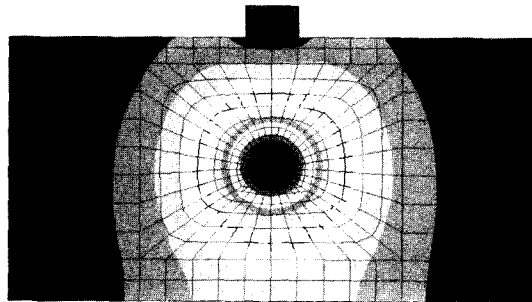


그림 8. 터널심도 25m일 때의 속도영역

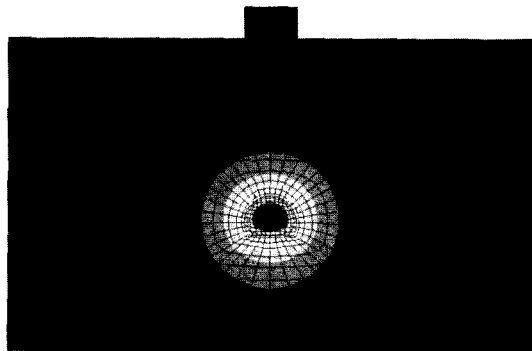


그림 9. 터널심도 35m일 때의 속도영역

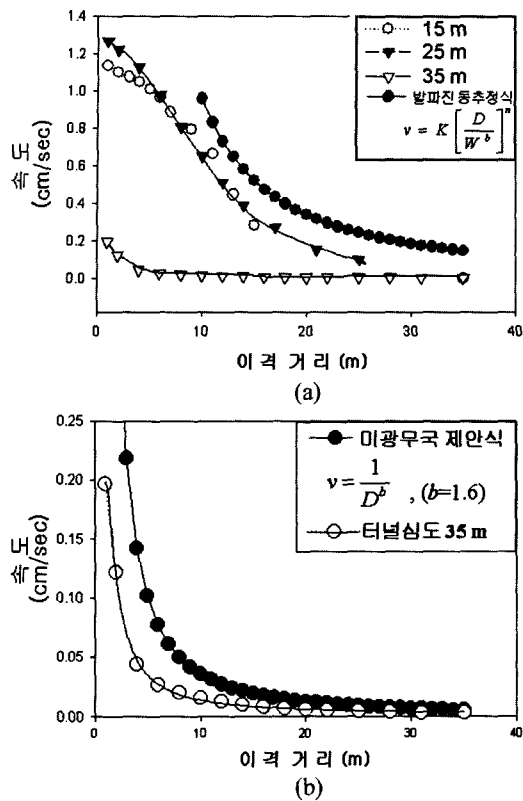


그림 10. 발파진동전파식과 수치해석값과의 비교

수값을 본 연구대상 해석단면에 적용한 발파진동속도식과 수치해석결과에서 거리별 조합속도성분을 비교한 결과 아래 그림 10(a)와 같이 이론식과 터널심도 15m, 25m일 때는 유사하게 나타났으나 35m일 때는 수치해석값과 발파진동전파식의 결과는 매우 상이하게 나타났다. 그림 10(b)는 미광무국에서 제안한 거리에 따른 진동속도비율을 수치해석값과 비교분석한 결과이며, 터널심도 35m일 경우에는 미광무국에서 제안한 식에 의한 결과와 수치해석결과가 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 이는 터널심도가 터널직경의 5배 이상 일 경우에는 기존의 발파진동전파식에 의한 속도성분이 과다하게 산정될 우려가 있다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 연암지반에서 발파점과 구조물 사이의 수평거리 및 편심거리 변화시 인접구조물의 안정성을 평가하기 위하여 3차원유한요소해석을 통한 매개변수연구를 수행하였다.

(1) 3차원 해석을 통한 발파진동 평가시에 최대진동속도를 산정하기 위해 구조물 하부에서의 응답이 감소하는 터널직경의 3D위치까지 해석해야 할 것으로 판단된다.

(2) 발파하중을 발파기체압력으로 터널굴진방향 및 방사형으로 터널 천단부에 모두 압력하중을 가하여 유한요소법에 적용함으로써, 발파압력이 미치는 주변구조체의 파괴메커니즘의 영향을 볼 수 있었으며 터널심도와 막장거리별 이격시 발파에 의한 영향이 감소하는 영역을 확인할 수 있었다.

(3) 구조물하부에서 터널발파시 진동성분이 장약으로부터 구형형상으로 전파되어나갈 때 근접된 거리에서 최대진동속도가 나타나는 것이 아니라 터널직경의 약 1~2배일 때 최대진동속도를 나타내었으며, 수치해석시 속도성분영역을 확인하여 정확한 구형의 발파진동속도 영역의 산정이 필요하다고 판단된다.

(4) 수치해석결과에 의한 속도성분과 현장계측에 의한 발파진동전파식을 비교 결과 터널심도가 터널직경의 5배 이상일 경우 발파진동전파식에 의한 속도성분이 수치해석 결과에 비해 크게 나타남을 알 수 있었다.

#### 후 기

이 연구과제는 2003년도 단국대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] 김문겸 · 안상용, “지중발파하중의 2차원 및 3차원 모형화의 비교연구”, 대한 토목학회논문집, 2000.
- [2] 日野能雄: 工業火藥協會誌, 17-4, pp.242, 1956.
- [3] DIN, “German Standards Organization. Vibrations in Building Construction”. DIN 4150, Berlin, 1983.
- [4] Duvall W.I, Fogelson D.E. “Review of Criteria for Estimating Damage to Residences from Blasting Vibration”. Report of Investigations 5968, U. S. Bureau of Mines, Washington DC, 1962.
- [5] PENTAGON-3D Manual, 에메랑드 소프트.
- [6] Starfield, A.M. and Pugliese, J.M, “Compressional Waves Generated in Rock by Cylindrical Explosive Charges”, Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 5, pp. 67-77, 1968.
- [7] U. Langefors, B. Kihlstrom “The modern technique of Rock Blasting”
- [8] Yong Lu, Hong Hao, Guowei Ma and Yingxin Zhou, “Simulation of Structural Response under High-Frequency Ground Excitation”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2001; 30; pp 307-325, 2001.