

# 터널구조물의 내진해석

## Seismic Analysis of Tunnel Structures



이인모\*  
Lee, In-Mo



안대진\*  
An, Dae-Jin

### Abstract

Generally, it has been noted that underground structures have a consistent record of suffering much less damage than surface facilities during earthquakes; but it is still necessary to illustrate the dynamic response of tunnel structures subject to earthquake loadings and to provide the appropriate method for the seismic analysis of underground tunnel structures since many types of underground structures have been and will be constructed in countries situated within seismic zones. In this study, first, seismic analyses for underground tunnel structures are performed by using quasi-static analysis method and dynamic analysis method. Second, seismic analyses in tunnel portals are performed by using above methods. The results of seismic analyses for the tunnel structure show that the tunnel structure conforms to ground deformation and that seismic design by using the quasi-static analysis method is more conservative than that by using the dynamic analysis. The results of the dynamic FEM analysis for the tunnel structure show that the simplified 2-D FEM analysis using a sine wave rather than the 3-D FEM analysis can be adopted for seismic analysis. Finally, the results of the dynamic FEM analysis in tunnel portals show that the force acting on the lining is largest near to the tunnel portal when an earthquake wave propagates parallel to tunnel axis.

**Keywords:** Sesimic Analysis, Quasi-static analysis method, Dynamic analysis method, Tunnel structure, Portal

\*1 고려대학교 토목환경공학과 교수

\*2 유신코퍼레이션 사원

## 요 지

일반적으로 지진발생시 터널구조물은 지상구조물에 비해 입는 피해가 매우 작다고 해서 내진설계에 대한 인식이 부족하였다. 그러나, 현재까지 많은 유형의 지하터널이 건설되었고, 앞으로는 더 많은 건설계획이 있으므로 지진시 지하터널구조물에 대한 안정성 확보가 중요하고 많은 연구가 필요하다. 본 논문에서는 지진발생시 터널의 동적거동을 파악하고, 적절한 내진해석을 제안하기 위해서 응답변위법과 동적해석법을 이용하여 내진해석을 실시하였다. 해석 결과는 지진발생시 터널구조물이 지반의 변형에 순응한다는 것을 나타내었고, 응답변위법에 의한 내진해석이 동적해석법에 의한 것보다 대부분의 경우 더 보수적인 해석이라는 것을 보여주었으며, 마지막으로 동적해석시 간편화된 2차원유한요소해석이 복잡한 3차원해석보다 내진해석시 더 효율적이라는 것을 보여주었다. 갱구부의 내진해석결과에서는 지진파가 터널축과 평행하게 진행할 때 갱구부에 설치된 라이닝에 가장 큰 단면력이 발생하는 것으로 나타났다.

**주요어:** 내진해석, 응답변위법, 동적해석법, 터널구조물, 갱구부

## 1. 서론

요즘 우리나라는 지형적 특성을 극복하기 위하여 지하공간을 적극적으로 활용하여 많은 구조물들을 건설하고 있다. 우리나라의 지형처럼 국토가 좁고, 산이 많은 곳에서는 지하공간의 이용이 매우 필수적이라고 할 수 있다.

지하구조물은 지상구조물과 비교하면 지진의 영향을 매우 작게 받는다고 알려져 있다. 그러나, 최근 대규모의 지하구조물이 건설되고 있고, 앞으로도 더욱 다양한 구조물이 지하에 건설될 것으로 예상된다. 따라서, 지하구조물에 있어서도 지진시에 피해를 막기위해 충분한 내진설계가 요구된다.

일반적으로 지하구조물의 겉보기 중량은 주변의 지반과 비교하여 가볍거나 또는 같은 정도이다. 또 주위가 지반으로 둘러싸여 있으므로 일산감쇠가 크고, 자기 진동이 곧 진정되어 버린다. 그러므로 관성력에 의해 지하구조물 자신이 지반속에서 자유롭게 진동하는 일은 없고 지반의 진동에 순응한 움직임을 나타낸다. 따라서 지하구조물에 생기는 응력은 관성력에 의한 영향보다도 주변 지반의 상대 변위에 의해 강제적으로 생겨나게 된다. 그것에서 지진시에 생기는 지하 구조물의 응력을 구하기 위해 지반변위를 강제적으로 구조물에 주는 것에 의해 정적으로 계산하려고 하는 방식에 근거한 내진해석법이

응답변위법이다.

동적해석법은 시간이력해석법을 이용하여 암반 및 지하공동을 해석하는 것이다. 이것은 주로 가상정적해석법에 의한 결과의 확인을 위해 쓰이거나, 구조물의 형상이나 지반조건이 복잡한 경우 등의 내진해석에 쓰인다.

지하구조물의 내진설계를 위해서는 지진발생에 따른 지하구조물 및 주변지반의 동적응답에 대한 해석적인 단계를 거쳐야 한다. 이를 위해 설계자는 지하구조물의 중요도와 제원, 주변지반의 동적지반정수 그리고 지진하중에 대한 거동메카니즘을 파악하고 적절한 해석절차를 통해 신뢰할 수 있는 결과를 도출하여야 한다.

본 연구에서는 지진시 터널구조물의 동적거동을 파악하기 위하여 응답변위법과 동적해석법을 이용하여 내진해석을 실시하였다. 그리고, 이를 통하여 적절한 내진해석절차를 연구하였다.

## 2. 내진해석법

### 2.1 응답변위법

#### 2.1.1 터널횡단방향 응답변위법

터널횡단방향 응답변위법에서는, 다음의 순서에 따라

터널 가로단면에 생기는 지진시 증분 단면력을 산정한다.

- 1) 터널이 없는 지반의 지진응답변형을 구해서 그것을 터널에 작용시키는 지진력으로 사용한다. 여기서는 지진력으로 지반응답변위를 사용한다.
- 2) 원형터널의 단면은 강성이 같은 링으로 모델링 된다. 이 때 링은 일반적으로 연속된 탄성보로 가정되어진다(그림 1). 이렇게 하면 터널에 지반변위가 작용할 때의 터널 변형에 관한 미분 방정식을 세울 수 있다. 이 미분방정식을 풀면 복잡한 식이 유도되므로, 간편화시키면 다음과 같은 근사식으로 나타낼 수 있다.(志波由紀夫, 1991)

$$M = \frac{3\pi EI}{2RH_g} U_h \sin\left(\frac{\pi H}{2H_g}\right) \sin 2\theta \quad (1)$$

$$V = -\frac{3\pi EI}{R^2 H_g} U_h \sin\left(\frac{\pi H}{2H_g}\right) \cos 2\theta \quad (2)$$

$$N = -\frac{3\pi EI}{R^2 H_g} U_h \sin\left(\frac{\pi H}{2H_g}\right) \left(2 + \frac{G_s R^3}{6EI}\right) \sin 2\theta \quad (3)$$

여기서, M은 휨모멘트, N은 축력, V는 전단력, E'는 라이닝의 탄성계수, G<sub>s</sub>는 지반의 전단계수, I는 라이닝 단면의 단면2차 모멘트, U<sub>h</sub>는 지표면 상대변위, R은 터널반경, H는 터널중심의 깊이, H<sub>g</sub>는 지층의 두께이다.

$$\kappa : \text{라이닝의 단면계수} \left( \cong \frac{I}{AR^2} \right)$$

h : 라이닝 두께

### 2.1.2 터널 종단방향 응답변위법

파장이 L, 진폭이 A인 전단사인파가 발생하여 터널구조물에 작용할 때(그림 2), 터널을 보와 같이 가정한다면 전단변위에 대한 터널의 곡률은 다음과 같은 식을 적용하여 구한다.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = -\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 \cos^3 \phi \sin\left(\frac{2\pi x}{L/\cos \phi}\right) A \quad (4)$$

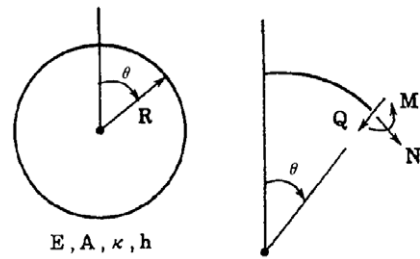
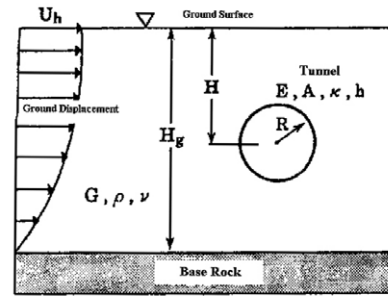


그림 1. 해석모델과 단면력 성분

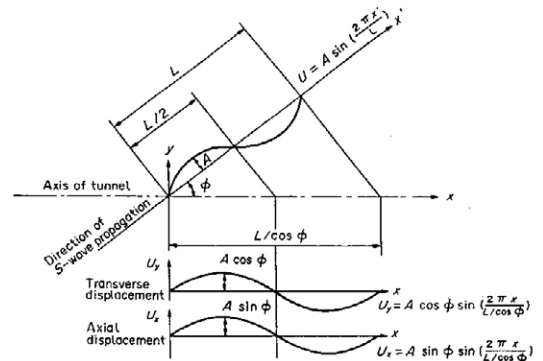


그림 2. 전단파에 의한 변위

여기서 ρ는 곡률반경을 나타낸다. 터널구조물에 작용하는 단면력을 구하는 식은 다음과 같다.

$$M = \frac{E' I}{\rho} = \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 \cos^3 \psi E' I A \sin\left(\frac{2\pi x}{L/\cos \psi}\right) \quad (5)$$

$$V = \frac{\partial M}{\partial x} = \left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 \cos^4 \psi E' I A \cos\left(\frac{2\pi x}{L/\cos \psi}\right) \quad (6)$$

$$N = \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 \sin \psi \cos \psi E' A_c A \cos\left(\frac{2\pi x}{L/\cos \psi}\right) \quad (7)$$

여기서  $E'$ ,  $I$ ,  $A_c$ 는 각각 터널구조물의 탄성계수, 단면 2차 모멘트, 단면적을 나타낸다.

## 2.2 동적유한요소해석법

파전파이론을 사용하여 지진에 의한 동적거동을 파악하기 위해 본 논문에서는 유한요소해석기법을 사용하였다. 이 해석기법에 기초를 둔 컴퓨터 프로그램으로는 PENTAGON-2D, 3D를 이용하였다. 지반을 모델링하기 위해서 솔리드요소를 사용하고, 터널구조물을 모델링하기 위해서는 프레임(frame)요소와 셸(shell)요소를 사용하였다.

지하구조물의 동적해석에 사용되는 경계조건으로 감쇄 경계조건이 있으며 필요에 따라 해석영역의 상부, 하부, 측면부에 사용된다. 이러한 감쇄경계조건은 해석경계면에 도달한 지진파의 굴절 및 반사현상을 막고 발산되는 파의 진행방향으로 발산되는 현상을 모델링하기 위해 설정된다. 감쇄경계조건에 대한 수치해석적인 처리방법은 여러 가지가 있으나 일반적으로 경계면에 법선 및 접선방향의 dashpot를 설치하여 경계면에 도달한 지진파를 흡수하는 방법이 사용된다.

위와 같은 조건을 적용하여 다음과 같은 운동방정식에 의해 시간이력해석이 이루어진다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{R(t)\} \quad (8)$$

여기서,  $[M]$ 은 전체질량행렬,  $[C]$ 는 전체감쇄행렬,  $[K]$ 는 전체강성행렬,  $\{u\}$ 는 전체절점변위벡터,  $\{R(t)\}$ 은 전체절점하중벡터이다. 이 방정식은 Newmark- $\beta$ 법에 의한 직접적분법으로 계산되어진다.

## 3. 터널 횡단방향 내진해석

### 3.1 지반/터널구조물의 모델링

터널횡단방향 내진해석을 위한 지층조건은 그림 3과 같이 기반암부터 지표면까지의 지층두께가 63m이고 풍화암으로 모델링되었다. 터널의 제원은 직경 8m, 설치위치는 지표면 하부 29m 지점으로 설정하였다. 해석에 적용된 지층 및 라이닝에 대한 물성치는 표 1과 같다.

동적유한요소해석을 위하여 3차원해석과 2차원해석이 실시되었다. 그림 4는 2차원 유한요소망을 나타내고, 그림 5는 3차원 유한요소망을 나타낸다. 자유장운동을 묘사하기 위해서 2차원, 3차원 모두 양 측면에 수직방향 변위를 구속하는 경계조건(elementary boundary)을 적용하였고, 바닥면에는 감쇄경계조건(dashpot)을 적용하였다. 입력지반운동은 바닥면에 전단파로 작용된다.

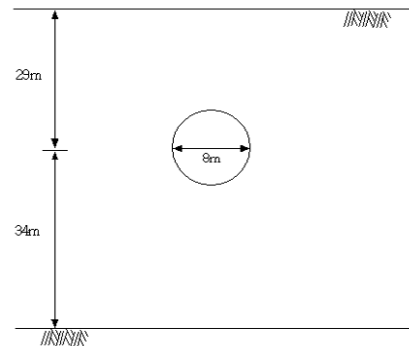


그림 3. 지반/터널구조물 모델링

표 1. 입력물성치

풍화암	라이닝
$E = 4 \times 10^5 \text{ kPa}$	$d = 8 \text{ m}$ (직경)
$\nu = 0.3$	$t = 30 \text{ cm}$ (두께)
$\gamma = 21.56 \text{ kN/m}^3$	$E' = 2 \times 10^7 \text{ kPa}$
$H = 63 \text{ m}$	
재료감쇄 = 5%	

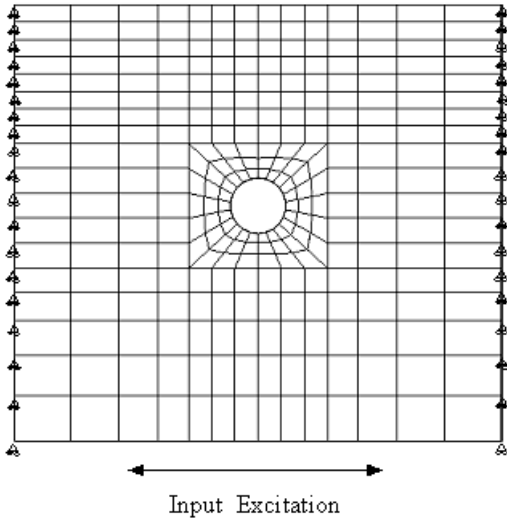


그림 4. 2차원 유한요소망

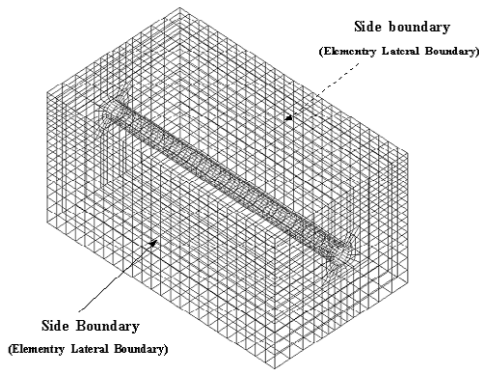


그림 5. 3차원 유한요소망

### 3.2 입력지반운동

내진해석을 실시하기 위해서 입력지반운동이 먼저 결정되어야 한다. 국내의 경우, 지진에 대한 과거기록이 없는 실정이므로, 건설교통부의 '내진설계기준'에 의거하여 설계응답스펙트럼을 작성한 후 이것을 이용하여 입력지반운동으로 사용되는 가속도시간이력곡선을 작성하였

다. 주어진 해석조건에 의하여 설계응답스펙트럼은 아래와 같은 절차에 의해 그림 6과 같이 작성된다.

- 지진구역 : 서울 (구역 1)
- 지반종류 : 단단한 토사지반 (SD)
- 재현주기 : 1000 년 (붕괴방지수준)
- 지진계수 :  $C_a = 0.16, C_v = 0.23$
- $T_s = C_v / 2.5C_a = 0.23 / 0.4 = 0.575$
- $T_0 = 0.2 \times T_s = 0.115$
- $T = 0 \rightarrow S_A = C_a \cdot I = 0.16 \times 1.4 = 0.224$
- $T = T_0 \rightarrow S_A = 2.5C_a \cdot I = 2.5 \times 0.16 \times 1.4 = 0.56$
- $T = T_s \rightarrow S_A = C_v \cdot I / T = 0.23 \times 1.4 / T = 0.322$

그림 7은 그림 6의 설계응답스펙트럼에 부합하는 지표면 가속도 시간이력곡선을 SIMQKE를 이용하여 작성한 것이다.

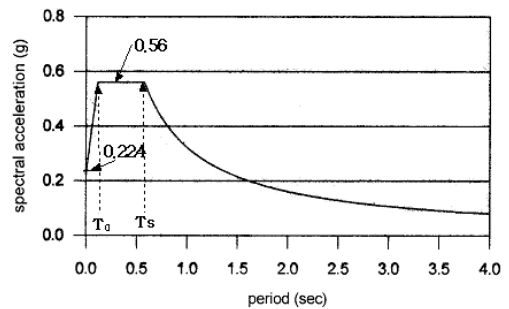


그림 6. 설계응답스펙트럼

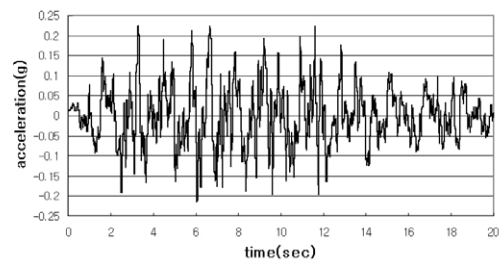


그림 7. 지표면에서의 가속도 시간이력 곡선

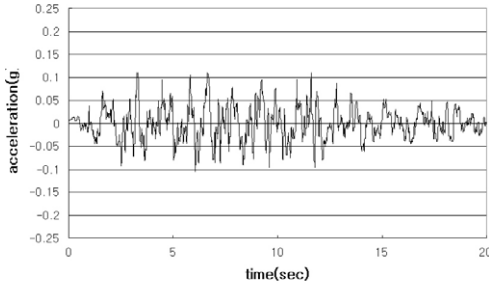


그림 8. 기반면에서의 가속도 시간이력 곡선

기반면에서의 입력지반운동을 파악하기 위해서 먼저 지진에 의한 지반의 자유장운동을 파악하여야 깊이에 따른 진폭의 감쇄현상을 고려할 수 있다. 이를 위해 SHAKE 해석을 실시하여 그림 8과 같은 기반면의 가속도 시간이력곡선을 작성한다.

### 3.3 내진해석 결과 비교

터널과 지반의 상대강성에 따라 원형터널의 동적응답을 파악하기 위해 라이닝 두께가 30cm, 40cm, 50cm인 경우에 대하여 응답변위법과 동적해석법을 적용하여 해석을 실시하였다. 그림 9는 지진시 원형 라이닝에 작용하는 축력의 분포를 나타낸 것이다. 이것은 전단파가 연속적으로 진행할 때 라이닝에 발생하는 축력이 천단에서 45° 지점에서 최대라는 것을 나타낸다. 그리고, 응답변위법과 동적유한요소해석법 적용시 단면력분포가 같게 나타났다.

그림 10은 네 가지 해석법으로 내진해석시 라이닝에 발생하는 최대응력을 나타낸 것이다. 응답변위해석과 정적유한요소해석시 최대응력이 비슷하게 나타났다. 이것은 지진시 터널이 지반변형에 순응함을 나타낸다. 응답변위해석시 최대응력이 동적유한요소해석을 수행했을 때 보다 약 1.5배 크게 나타났다. 이것은 응답변위법에 의한 내진해석이 더 보수적 해석법이라는 것을 나타낸다.

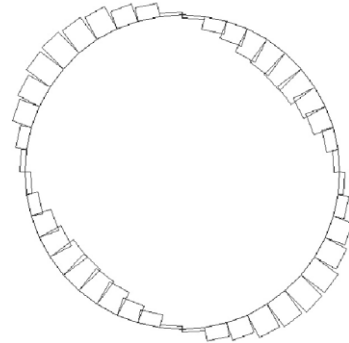


그림 9. 라이닝 축력 분포

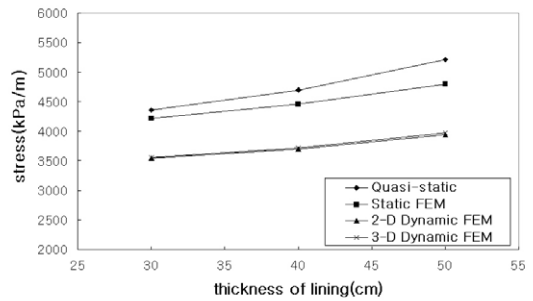


그림 10. 라이닝 최대압축응력

## 4. 터널 종단방향 내진해석

### 4.1 지반/터널구조물의 모델링

지반과 터널구조물의 해석모델과 물성치는 횡단방향 내진해석과 동일하다. 3차원 유한요소망은 그림 5와 같다. 양측면 경계에 터널축방향 변위를 구속하는 경계조건을 적용하고 해석모델의 앞면과 뒷면에 감쇄경계조건을 적용했다.

입력하중으로는 SH파를 사용하여 해석모델의 앞면에 작용시켰다. 그림 11은 2차원 유한요소망을 나타낸다. 양면 경계에 터널축방향 변위를 구속하는 경계조건을 적용하고, 양 측면에 감쇄경계조건을 적용했다.



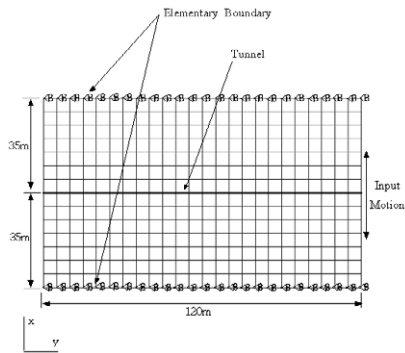


그림 11. 2차원 유한요소망

### 4.2 입력지반운동

입력지반운동으로 사인파와 지진파가 사용되었다. 사인파의 가속도 진폭은 SHAKE를 이용한 파동 해석결과 터널이 위치한 지점의 최대가속도인 0.165g로 하였으며 주기는 기반면 상부지층의 고유주기로부터 0.96 sec 로 설정하였다. 지진파는 기반암 가속도 시간이력곡선을 최대가속도가 0.165g가 되도록 선형증가시켜 사용하였다.

### 4.3 종방향 내진해석 결과

그림 12는 터널 종방향 해석영역범위, l를 60m, 120m, 180m로 했을 때, 사인파를 이용한 3차원 동적해석시 라이닝에 발생하는 최대 압축응력을 나타낸 것이다. 해석영역의 길이가 입력사인파의 1/2파장(L)보다 작을 경우 단부의 경계효과로 인하여 라이닝에 발생하는 압축응력이 과소평가되었고, 1/2이상일 경우 일정하게 나타났다. 이것은 사인파를 이용한 3차원 동적유한요소해석시 종방향 해석영역은 입력파 파장의 1/2이상이어야 정확한 해석결과를 얻을 수 있다는 것을 나타낸다.

그림 13은 경계조건이 동적해석에 미치는 영향을 파악하기 위해서 해석에 적용되는 두가지 케이스를 나타낸다. 첫 번째 케이스는 해석모델의 양 측면에 축방향변위를 구속하는 경계조건을 사용하였고, 두 번째 케이스는 위, 아래면에 축방향변위를 구속하는 경계조건을 사용하였다.

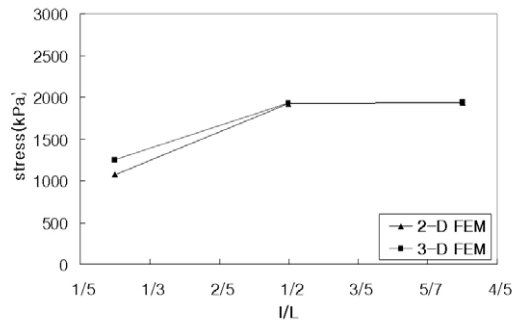


그림 12. 영역범위에 따른 라이닝의 최대압축응력

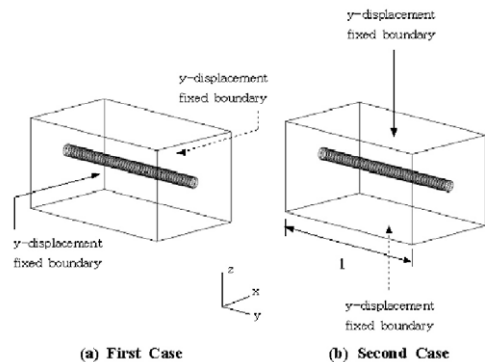


그림 13. 경계조건을 고려한 해석 케이스

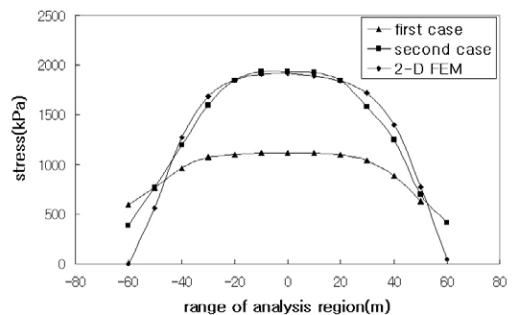


그림 14. 경계조건의 효과

그림 14는 위의 두가지 케이스에 대한 3차원 동적유한요소해석시 라이닝에 발생하는 최대 압축응력을 나타낸 것이다.

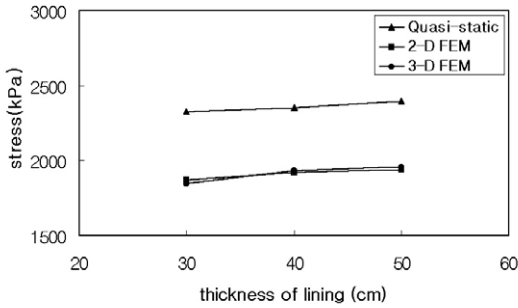


그림 15. 응답변위법과 동적해석법 비교

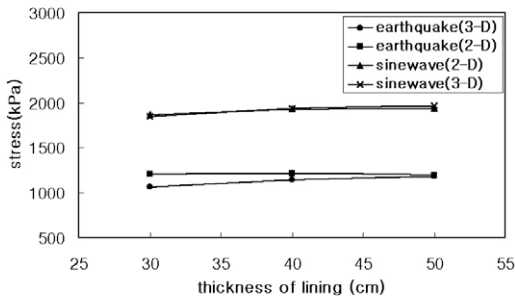


그림 16. 사인파와 지진파 사용시 비교

SH파를 입력파로 사용했을 때, 양측면에 구속경계를 적용한 경우(case1) 자유장운동은 적절히 나타내지만 축방향 라이닝 변위를 억제시켜 발생하는 단면력을 작게 한다. 위, 아래면에 구속경계를 적용한 경우(case2)는 2차원 종방향 해석 결과와 같은 최대응력값을 나타내므로 경계조건을 합리적으로 설정한 것으로 볼 수 있다. 그러므로, 3차원 종방향 내진해석시 자유장운동을 적절히 묘사하면서 정확한 단면력 결과를 얻기 위하여 합리적인 경계조건의 사용이 중요하다.

그림 15는 응답변위법과 동적유한요소해석법을 적용했을 때 계산된 라이닝의 최대응력을 나타낸다. 응답변위법 적용시 최대응력이 동적유한요소해석법을 적용했을 때보다 약 1.3배 크게 나타났다. 이것은 횡방향 내진해석과 같이 응답변위법에 의한 해석이 더 보수적이라는 것을 나타낸다.

그림 16은 입력하중으로 사인파와 지진파를 이용했을 때 계산된 라이닝의 최대압축응력을 비교한 것이다. 2차원, 3차원유한요소해석 모두 사인파를 사용했을 때가 지진파를 사용했을 때보다 최대압축응력이 약 1.8배 크게 나타났다. 2차원해석과 3차원해석의 결과는 같게 나타났다. 그러므로, 종방향 내진해석시 사인파를 이용한 간편화된 2차원 유한요소해석이 효율적이고 안전측해석임을 알 수 있다.

그림 17은 종방향 지층의 물성이 변할 경우의 효과를 파악하기 위하여 해석에 사용되는 지반모델이고,  $E_1/E_2$ 가 1, 2, 5, 10 인 케이스에 대하여 해석이 수행되었다. 입력하중은 사인파를 사용하였다.

해석결과 계산된 라이닝의 최대 압축(인장)응력은 그림

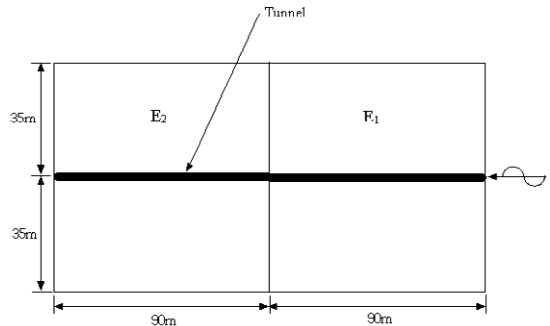
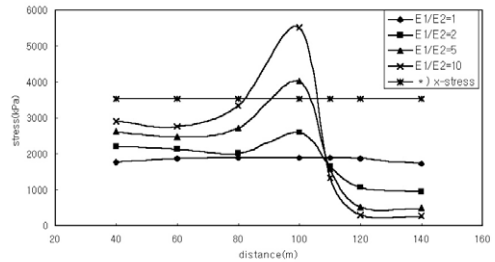


그림 17. 지반물성변화를 고려한 해석모델



\*) : maximum tensile(compressive) stress acting on the lining due to a wave propagating normal to tunnel axis

그림 18. 종방향해석과 횡방향해석의 비교



18과 같이 나타난다. 지반의 물성이 변하는 지점에서 가장 큰 응력의 증가가 나타났다. 지반의 물성차이가 작으면( $E_1/E_2=1, 2$ ) 횡단방향 내진해석시 라이닝에 발생하는 최대응력이 더 지배적이고, 지반의 물성차이가 크면( $E_1/E_2=5, 10$ ) 종방향 내진해석시 발생하는 라이닝의 최대응력이 더 지배적이라는 것을 알 수 있다.

## 5. 갱구부의 횡단방향 내진해석

### 5.1 갱구부의 모델링

지진시 갱구부의 동적거동을 파악하기 위해, 그림 19와 같이 갱구부를 모델링하고 3차원 유한요소망을 작성하여 내진해석을 실시하였다. 갱구부의 지층의 두께는 36m, 종방향으로 100m떨어진 지점의 지층두께는 76m로 가정하였고, 터널직경은 8m, 라이닝 두께는 30cm로 가정하였다. 지반의 물성치는 표 2에 나타난 것과 같이 일반적인 연암층을 기준으로 설정하였다. 연직방향으로 진행되는 지진파에 대한 동적해석을 위한 2차원 유한요소망은 그림 20과 같다. 갱구부의 경사지형을 고려하기 위하여 종방향으로 다섯지점을 선정하여 해석을 수행하였다. 측면에 수직변위를 구속하는 경계조건을 사용하였고, 바닥면에는 감쇄경계조건을 적용하였다.

기반면 입력지반운동을 구하기 위하여 해석모델의 종방향 중간지점의 단면을 기준으로 SHAKE해석을 실시하여 기반면에서의 최대지반가속도를 구하여 그림 7을 선형축소시켜 사용하였다.

표 2. 지반과 라이닝의물성치

연암	라이닝
$E = 8 \times 10^5 \text{ kPa}$	$E' = 2 \times 10^7 \text{ kPa}$
$\gamma = 23.5 \text{ kN/m}^3$	$\gamma' = 23.5 \text{ kN/m}^3$
$\nu = 0.28$	$d = 8 \text{ m}$ (직경)
재료감쇠 = 5%	$t = 30 \text{ cm}$ (두께)

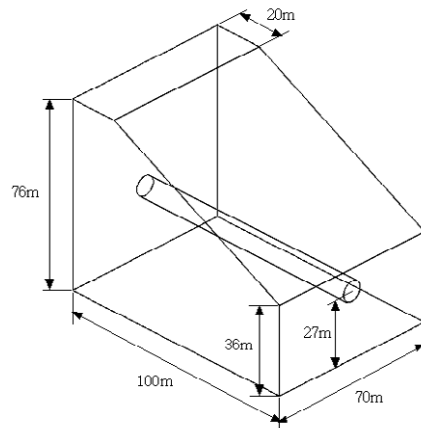


그림 19. 갱구부 해석모델

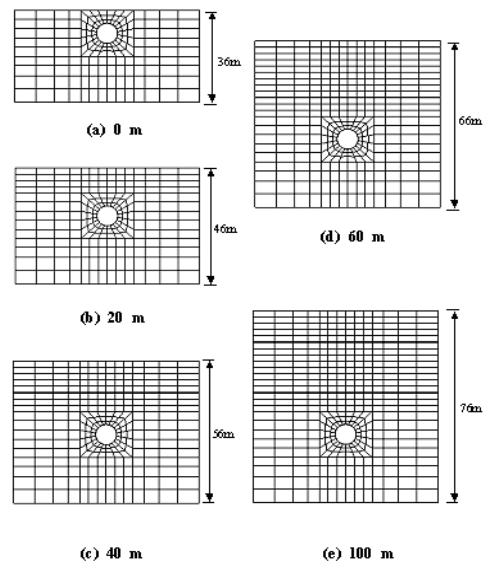


그림 20. 갱구부의 2차원 유한요소망

### 5.2 갱구부 횡방향 내진해석 결과

그림 21은 지진파가 연직으로 진행시 라이닝에 발생하는 최대 압축응력을 종방향에 대하여 나타낸 것이다. 2차원, 3차원해석 모두 갱구부에서 멀어질수록 최대 압축응력이 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, 2차원해석과 3

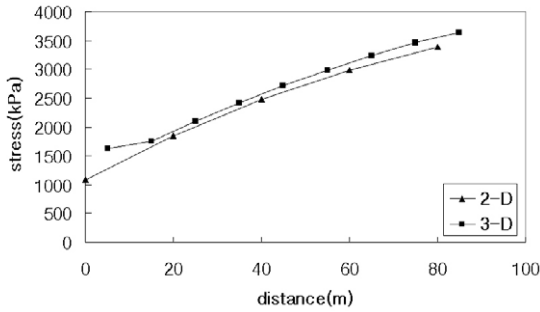


그림 21. 라이닝의 최대압축응력 (천단부에서 45° 지점)

차원해석시의 라이닝에 발생하는 최대 압축응력은 거의 같게 나타났다.

## 6. 갱구부의 종단방향 내진해석

### 6.1 갱구부 종단방향 모델링

갱구부의 동적거동을 파악하기 위하여 응답변위법과 동적유한요소해석법을 채택하였다. 갱구부 종단방향 내진해석을 위한 3차원 유한요소망과 경계조건은 그림 22와 같다. 자유장운동을 나타내기 위해 축방향 변위를 구속하는 경계조건이 측면 모서리부분에 적용되고, 앞, 뒷면에는 감쇄경계조건이 적용된다. 2차원유한요소망과 경계조건은 터널을 프레임요소로 사용한 것을 제외하고는 그림 22(C)와 같다.

갱구부의 내진해석을 위한 입력하중의 선정기준이 부족하므로 갱구부로부터 30m, 70m, 110m 지점을 기준으로 각각 입력하중을 구해서 해석을 수행하였다. 표 3은 응답변위법에 적용하기 위하여 터널이 위치한 깊이에서의 지반변위를 응답스펙트럼에 의한 단순계산법에 의해 구한 것이다. 표 4는 세 지점의 횡단면에 대하여 SHAKE 해석을 통하여 터널이 위치한 깊이에서의 최대지반가속도를 구한 것이다. 가속도 시간이력곡선을 작성할 때 이 값들을 최대가속도 값으로 사용한다.

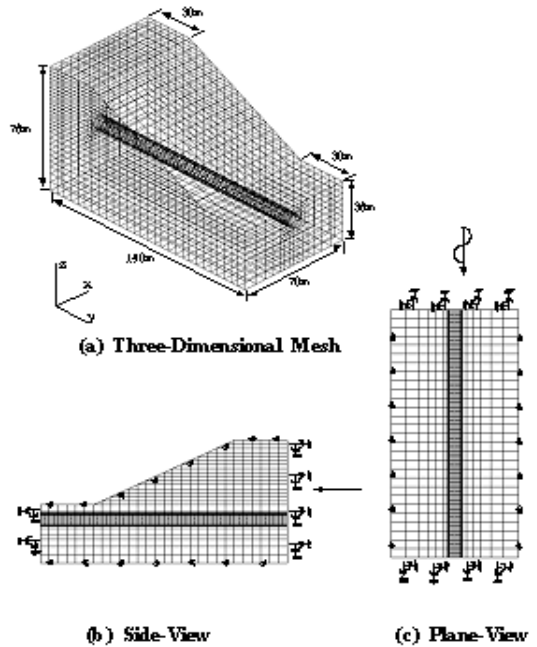


그림 22. 갱구부 종단방향 3차원 유한요소망

표 3. 입력지반운동(응답변위법)

	30m	70m	110m
T(sec)	0.40	0.63	0.85
S <sub>A</sub> (g)	0.21	0.21	0.21
A(z)(m)	0.01	0.019	0.026
L(m)	144	224	304
u(x, z)(m)	0.01sin(0.044x)	0.019sin(0.028x)	0.026sin(0.021x)

표 4. 터널깊이 지점의 최대지반가속도

종방향 거리 (m)	최대지반가속도 (g)
30m	0.192
70m	0.15
110m	0.115

### 6.2 갱구부 종단방향 해석결과 비교

그림 23, 24는 사인파와 지진파를 입력하중으로 사용했을 때 터널깊이의 최대지반가속도와 라이닝에 발생하는 최대압축응력을 종단방향에 대하여 나타낸 것이다. 두

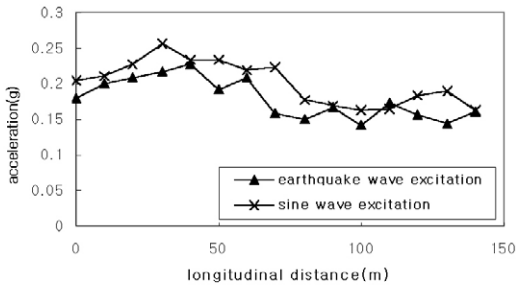


그림 23. 최대지반가속도(3차원유한요소해석)

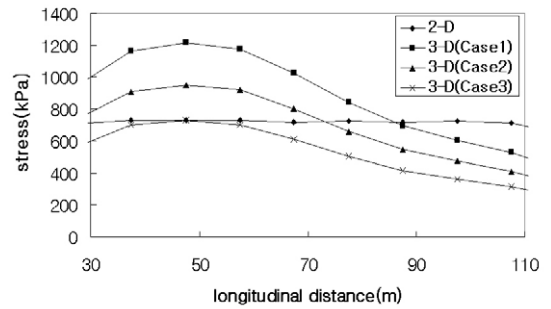


그림 25. 입력지반운동에 따른 라이닝응력 변화

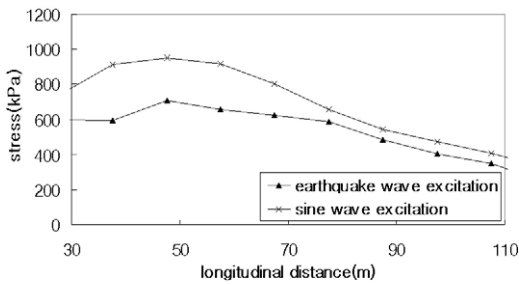


그림 24. 라이닝의 최대압축응력(3차원 유한요소해석)

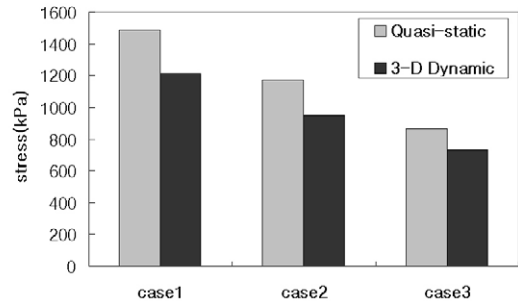


그림 26. 응답변위법과 동적해석법 비교

그래프 모두 갱구부에서 값이 가장 크고 갱구부로부터 종 방향으로 들어갈수록 최대지반가속도와 최대압축응력값이 감소함을 나타내었다. 사인파를 사용한 경우의 최대응력값이 지진파를 사용했을 때보다 더 크게 나타났다. 그러므로, 지진파가 터널축과 평행하게 진행할 경우 갱구부에서 가장 큰 피해가 예상되고, 내진해석시 사인파를 적용하는 것이 더 보수적인 해석임을 알 수 있다.

그림 25는 표 4의 최대지반가속도를 이용한 3가지 사인파를 사용한 3차원유한요소해석과 경사지형을 고려하지 못하는 2차원 해석의 결과를 비교한 것이다. 갱구부(30m지점)를 기준으로 구한 입력지반운동을 사용했을 경우가 가장 큰 응력을 발생시키는 것으로 나타났다. 이것은 갱구부를 기준으로 구한 입력지반운동을 사용하는 3차원 동적유한요소해석이 가장 보수적인 해석임을 나타낸다.

그림 26은 표 3과 표 4의 3가지 입력하중 작용시 응답

변위법과 동적유한요소해석법의 결과를 비교한 것이다. 3가지 경우 모두 응답변위법 적용시 라이닝에 발생하는 최대응력이 더 크게 나타났다. 이는 비록 응답변위법이 갱구부의 지형은 고려하지 못하지만 더 보수적 해석임을 나타낸다.

## 7. 결론

횡단방향 내진해석시, 지반/터널구조물의 동적해석결과는 아래와 같다.

- 1) 전단파가 연직으로 진행할 경우, 천단부에서 45° 지점에서 가장 큰 단면력이 발생하였다. 응답변위법에 의해 계산된 라이닝에 작용하는 단면력의 분포와 동적해석법에 의해 계산된 단면력의 분포는 같았다.

- 2) 응답변위법과 정적유한요소해석법에 의해 계산된 단면력이 같았다. 이것은 터널구조물이 지진시 지반 변형에 순응한다는 것을 나타낸다. 응답변위법에 의한 라이닝의 최대응력이 동적유한요소해석법에 의한 라이닝의 최대응력보다 과대평가 되었다. 이는 응답변위법에 의한 내진해석이 동적해석법보다 보수적인 해석임을 나타낸다.
- 3) 2차원 동적유한요소해석에 의한 결과는 3차원 동적유한요소해석에 의한 결과와 같게 나타났다. 지형이 복잡한 갱구부의 경우에도 2차원해석결과와 3차원 해석결과가 같게 나타났다. 이것은 간편화된 2차원 동적유한요소해석이 타당하다는 것을 보여준다.

한편, 종단방향 내진해석시, 지반/터널구조물의 동적해석결과는 아래와 같다.

- 1) 터널축과 평행하게 진행되는 사인전단파를 이용한 동적해석을 위해서는 축방향 해석영역이 파장의 1/2 이상일 때 정확한 해석결과를 얻을 수 있다.
- 2) 동적해석시 자유장운동을 나타내고 정확한 단면력을 얻기 위해 적절한 경계조건의 적용이 매우 중요하다.
- 3) 응답변위법에 의해 계산된 라이닝의 최대 응력은 동적유한요소해석법에 의해 계산된 라이닝의 최대응력보다 과대평가 되었다. 이는 응답변위법에 의한 내진설계가 동적해석법에 의한 것보다 보수적인 설계라는 것을 나타낸다.
- 4) 2차원유한요소해석과 3차원유한요소해석에 의한 라이닝의 최대단면력이 같다. 그리고, 사인파를 입력하중으로 사용한 경우 라이닝 응력이 지진파를 사용한 경우보다 과대평가되었다. 그러므로, 사인파를 입력하중으로 사용한 간편화된 2차원동적유한요소해석이 내진해석시 적합하다는 것을 알 수 있다.

- 5) 지반조건이 다른 두 지반을 터널이 통과할 때, 라이닝의 단면력은 물성의 차이가 클수록 증가했다. 균일한 지반에 설치된 터널에 대해서는 횡단방향 내진해석시 라이닝에 작용하는 단면력이 더 컸고, 지반조건이 다른 두 지반을 터널이 통과할 경우, 종단방향 내진해석시 라이닝에 발생하는 단면력이 더 컸다. 그러므로, 지반의 물성차이가 작으면 횡단방향 내진해석시 라이닝에 발생하는 최대응력이 더 지배적이고, 지반의 물성차이가 크면 종단방향 내진해석시 발생하는 라이닝의 최대응력이 더 지배적이라는 것을 알 수 있다.
- 6) 갱구부의 횡단방향 내진해석시, 지반의 변형과 라이닝의 단면력은 갱구부에서 가장 크게 나타났고, 갱구부에서 멀어질수록 감소하였다. 그리고, 사인파를 입력하중으로 사용한 해석이 지진파를 입력하중으로 사용한 해석보다 더 보수적인 결과를 나타내었다.
- 7) 3차원해석시 갱구면을 기준으로 구한 지반운동을 이용한 경우, 라이닝에 발생하는 최대응력이 가장 컸다. 이것은 갱구부의 종단방향 내진해석시, 갱구부 단면을 기준으로 구한 지반운동을 사용하는 것이 보수적인 해석이라는 것을 나타낸다.

### 참고문헌

1. 한국지진공학회 (1999), "지중구조물의 내진설계", 한국지진공학회 제3회 기술강습회.
2. 이인모, 김상균, 이형원, 박의섭 (2000), "지하구조물의 내진설계", 대한터널협회지, 제2권, 1호, pp. 78~100
3. 편집부 (1996), 지하 구조물의 내진설계, 건설도서, 서울
4. 志波由紀夫 and 岡本 晋 (1991), "シールドトネルの横断面方向の地震時断面力の計算法", 日本土木學會論文集 No.437, pp. 193~202.
5. Bathe, K. J. (1996), Finite Element Procedures, Prentice-Hall, Inc.

6. Clough, R. W. and Penzien, J. (1993), Dynamics of Structures, McGraw-Hill, Inc.
7. Dowding, C.H (1977), "Seismic Stability of Underground Openings", Proc. Rockstore Conf, Stockholm.
8. Dowding, C.H. and Rozen, A. (1978), "Damage to Rock Tunnels from Earthquake Shaking", J.Geotech. Eng Div. Am. Soc. Civ. Engrs 104 (GT2) 175~191.
9. Gasparini D.A. and Vanmarke E.H. (1976), "SIMQKE, Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra", MIT.
10. Itasca Consulting Group (1996), "FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.3", MN:ITASCA Consulting Group, Inc.
11. Kirzhner F. and Rosenhouse G. (2000), "Numerical Analysis of Tunnel Dynamic Response to Earth Motions", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 249~258
12. Steven L. Kramer (1996), Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, pp.143~307.
13. St John C.M. and Zahrah T.F. (1987), "Aseismic Design of Underground Structures", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.2, No.2, pp. 165~197.
14. Schnabel, P.B. et al (1972), "SHAKE-A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites", Report No. EERC 72~12, Berkeley: Univ. of Calif.
15. Timoshenko and Stephen (1961), Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, pp. 278~318.