

## 공간적으로 변이하는 지진파에 대한 터널의 응답 예측

## Prediction of Tunnel Response by Spatially Variable Ground Motion

김 인 태<sup>1)</sup> · 한 정 우<sup>2)</sup> · 윤 세 웅<sup>2)</sup> · 박 두 희<sup>†</sup>

Kim, Intai · Han, Jungwoo · Yun, Seung · Park, Duhee

**ABSTRACT** : Various components including wave scattering, wave passage, and site amplification effects cause the ground motion to vary spatially. The spatially varying ground motion can significantly influence the dynamic response of longitudinal structures such as bridges and tunnels. While its effect on bridges has been extensively studied, there is a lack of study on its effect on underground tunnels. This paper develops a new procedure for simulating the tunnel response under spatially varying ground motion. The procedure utilizes the longitudinal displacement profile, which is developed from spatially variable ground motion time histories. The longitudinal displacement profile is used to perform a series of pseudo-static three dimensional finite element analyses. Results of the analyses show that the spatially variable ground motion cause longitudinal bending of the tunnel and can induce substantial axial stress on the tunnel lining. The effect can be significant at boundaries at which the material properties of the ground change in the longitudinal direction.

**Keywords** : Tunnel, Spatial variation, Ground motion, Longitudinal displacement profile

**요 지** : 지진파는 진원지로부터 지표면으로 전파되는 과정에서 전파경로와 부지증폭정도의 차이, 그리고 비균질한 지반에서의 지진파 산란 등으로 인하여 공간적으로 변이하게 된다. 공간적으로 변이하는 지진파는 교량과 터널과 같이 종단방향 길이가 긴 구조물에 큰 영향을 미칠 수 있다. 지진파의 공간적 변이성이 교량에 미치는 영향에 대해서는 잘 알려져 있지만 터널에 미치는 영향에 대해서는 체계적인 연구가 수행된 바 없다. 본 연구에서는 공간적으로 변이하는 지진파에 대한 터널의 응답을 예측하기 위한 새로운 기법을 개발하였다. 개발된 기법의 핵심은 이격거리별 계산된 공간적으로 변이하는 지진파의 시간이력으로부터 생성되는 종단방향 변위 주상도이다. 종단방향 변위 주상도는 일련의 3차원 유사정적 유한요소해석을 수행하는데 사용되었다. 해석결과, 공간적으로 변이하는 지진파는 터널에 종단방향 힘을 유발하며 터널 라이닝에 큰 축력이 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 특히 지반의 특성이 변이하는 경계면에서 영향이 큰 것으로 나타났다.

**주요어** : 터널, 공간적 변이성, 지진파, 종단방향 변위 주상도

## 1. 서 론

산업화와 도시화로 인한 가용면적 부족과 비용증가로 인하여 지하시설물이 점차 확충되고 있다. 특히 국내의 경우 임야 면적은 국토의 70% 이상으로 비율이 높아 지하공간의 활용이 매우 중요하다. 지하기반시설물의 핵심 요소인 터널은 지반진동에 대하여 지상구조물에 비하여 안전한 것으로 알려졌으나, 1995년 일본 고베 지진과 1999년 대만에서 발생한 치치 지진 등은 터널에서도 심각한 피해가 발생할 수 있음을 보여주고 있으며 터널의 내진설계의 필요성을 입증하고 있다.

터널의 지진해석법은 크게 동적해석법과 응답변위법으로 분류할 수 있다. 동적해석법은 설계지반운동 시간이력을 이용하여 지하구조물과 지반과의 동적 상호작용을 고

려하는 가장 사실적인 기법이며 구조물의 형상이나 지반조건이 복잡한 경우 등에 사용된다. 동적해석법은 정적해석과는 다르게 추가적으로 감쇠 경계조건, 감쇠비 등을 정의해야 하므로 해석수행이 어려우며 해석시간이 현격하게 증가하는 단점을 가지고 있다.

터널의 경우 겉보기 중량이 주변의 지반보다 작고 지반에 둘러 쌓여 있으므로 일산감쇠가 크며 진동이 빠르게 진정된다(이인모 등, 2000). 즉, 터널은 관성력에 의하여 자유롭게 진동하지 않으며 지반운동에 순응한 운동을 하게 된다. 이와 같은 이유로 터널의 지진해석시 동적해석보다는 관성력을 무시하고 지반변위를 주위지반에 강제적으로 작용하여 터널의 동적 응답을 모사하는 응답변위법이 널리 사용된다.

응답변위법을 수행하기 위해서는 터널을 둘러싸고 있는

1) 비회원, 명지대학교 공과대학 교통공학과 조교수

2) 비회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

† 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 전임강사(E-mail : dpark@hanyang.ac.kr)

지반내 변위를 산정해야 한다. 지반변위에 대한 터널의 응답은 크게 1) 전단변형, 2) 축압축 또는 인장, 3) 종방향 휨 거동과 같은 세 가지 유형으로 분류할 수 있으며 터널의 내진설계시 각각의 응답에 대한 안정성을 응답변위법으로 평가하게 된다.

전단변형은 터널에 가장 지배적인 영향을 미치는 변형유형이며 수직방향으로 전파되는 전단파에 의하여 발생한다. 터널의 전단변형에 대한 응답은 2차원 수치해석(Hashash 등, 2001a; Hashash 등, 2005)이나 해석해(Wang, 1993)를 사용하여 예측하게 된다. 축압축과 인장은 터널축에 평행방향의 입자운동을 유발하는 체적파에 의하여 발생한다. 종방향 휨거동은 축방향과 수직방향의 입자운동에 의하여 발생한다. 축변형과 휨거동은 터널축에 평행하거나 일정한 각도로 입사하는 지진파에 의하여 발생한다. 터널축에 일정한 각도로 입사하는 조화파에 의하여 터널에 발생하는 변형률과 곡률에 대한 해석하는 St John 등(1987)에 의하여 제안되었다. St John 등(1987)의 해석해의 적용시 조화파의 진폭은 변위주상도에서 구해진 최대변위를 사용하며 입사각은 터널의 응답이 최대가 되는 각도를 선정하게 된다. 해석하는 지진파가 터널에 도달하는 시간차만을 고려하며 지진파 산란, 지반증폭현상 등에 의해서 추가적으로 발생하는 비간섭성(incoherency)을 고려하지 않으므로 종방향 변위를 크게 과소예측할 수 있다. 또한, 지반진동을 조화파로 단순화하므로 사실적인 해석이라고 볼 수 없다.

본 논문에서는 간섭성 함수를 통하여 사실적으로 생성된 공간적으로 변이하는 지진파를 기반으로 종방향 터널의 응답을 모사하는 새로운 응답변위법을 개발하였으며, 지진파의 비간섭성이 터널에 미치는 영향을 예측하였다.

## 2. 간섭성 함수와 공간적으로 변이하는 지진파

두 지진파간의 유사성은 개별적인 주파수별 진폭과 위상각간의 상호관계를 나타내는 간섭성 함수로서 나타낼 수 있다. 두 지진파 시간이력  $u_j(t)$ 과  $u_k(t)$ 간의 간섭성 함수는 다음과 같이 정의된다:

$$\gamma_{jk}(\omega) = \frac{S_{jk}(\omega)}{\sqrt{S_{jj}(\omega) S_{kk}(\omega)}} \quad (1)$$

여기서  $\omega$  = 각속도,  $S_{jk}(\omega) = u_j(t)$ 와  $u_k(t)$ 간의 cross-power spectral density, 그리고  $S_{jj}(\omega)$ 와  $S_{kk}(\omega)$ 는 각각  $u_j(t)$ 와  $u_k(t)$ 의 auto-power spectral density이다. 식 (1)은 다음과 같이 정의될 수도 있다:

$$\gamma_{jk}(\omega) = |\gamma_{jk}(\omega)| \exp[i\theta_{jk}(\omega)] \quad (2)$$

여기서  $\theta_{jk}(\omega) =$  두 지진파간 각속도  $\omega$ 에서의 위상각이다. 식 (2)의 위상각은 다음과 같이 정의될 수 있다:

$$\theta_{jk}(\omega) = \tan^{-1} \frac{\text{Im} \gamma_{jk}(\omega)}{\text{Re} \gamma_{jk}(\omega)} \quad (3)$$

일반적으로  $\gamma_{jk}(\omega)$ 는 복소수이므로 일반적으로 이의 절대값을 취해 두 지진파간의 상호유사성을 나타내며 이를 Lagged coherency라고 한다. 간섭함수 절대값의 크기는  $0 \leq |\gamma_{jk}(\omega)| \leq 1$ 이다. 만약 Lagged coherency의 값이 1이라면, 두 지진파는 해당 주파수에서 동일하다는 의미이며, 만약 0이라면 두 지진파는 해당 주파수에서 유사성이 전혀 없다는 의미이다.

간섭성 함수는 지진파의 공간적으로 변이성을 설명하는데 매우 유용한 도구이다. 촘촘한 간격으로 설치된 공저탄성파배열(downhole array) 계측기록으로부터 다양한 형태의 경험적 간섭성 함수가 제안되었다. 그림 1은 Abrahamson 등(1992), Harichandran 등(1986), 그리고 Luco 등(1986)이 제안한 경험적 간섭성 함수들을 비교하고 있다. 그림 1은 Lagged coherency가 이격거리와 주파수에 의하여 결정된다는 것을 확인할 수 있다. Lagged coherency는 이격거리와 주파수가 증가할수록 급격하게 감소한다. 이는 이격거리가 커질수록 지진파간의 유사성이 감소한다는 것을, 그리고 저주파수보다는 고주파수 요소가 이격거리의 영향을 크게 받는다는 것을 의미한다. 모든 함수들에서 이와 같은 공통적인 경향이 발견되기는 하나 이들의 정량적인 수치에는 큰 차이가 있음을 볼 수 있다. 이들은 각각 다른 지역의 계측기록으로부터 개발되었으므로 지역적 특성이 함수간의 큰 분산정도에 기여하였으며, 지진자료를 필터링 및 프로세스하는 수치적 기법의 차이, 회귀분석 기법의 상이성 등으로 인하여 정량적 수치에 추가적인 차이가 발생하였다(Zerva 등, 2002). 이들 함수 이외에도 다양한 형태의 함수들이 제안되었으며 이중에서 대표성이 있는 함수 하나를 선정하는 것은 불가능하며 다양한 함수의 적용이 필요할 것이다.

그림 1의 경험적 간섭성 함수는 이격거리에 따라서 변이하는 지진파의 특성 규명에는 유용하지만 함수만으로 공간적으로 변이하는 지진파가 구조물에 미치는 영향을 평가하기에는 충분하지 않으며 이를 위해서는 구조물의 지점별 지진파 시간이력이 필요하다. Hao 등(1989), Abrahamson (1992), Kafatygiotis 등(1999) 등은 간섭성 함수의 특성을 보전하며 이격거리별 지진파 시간이력을 생성하는 수치해

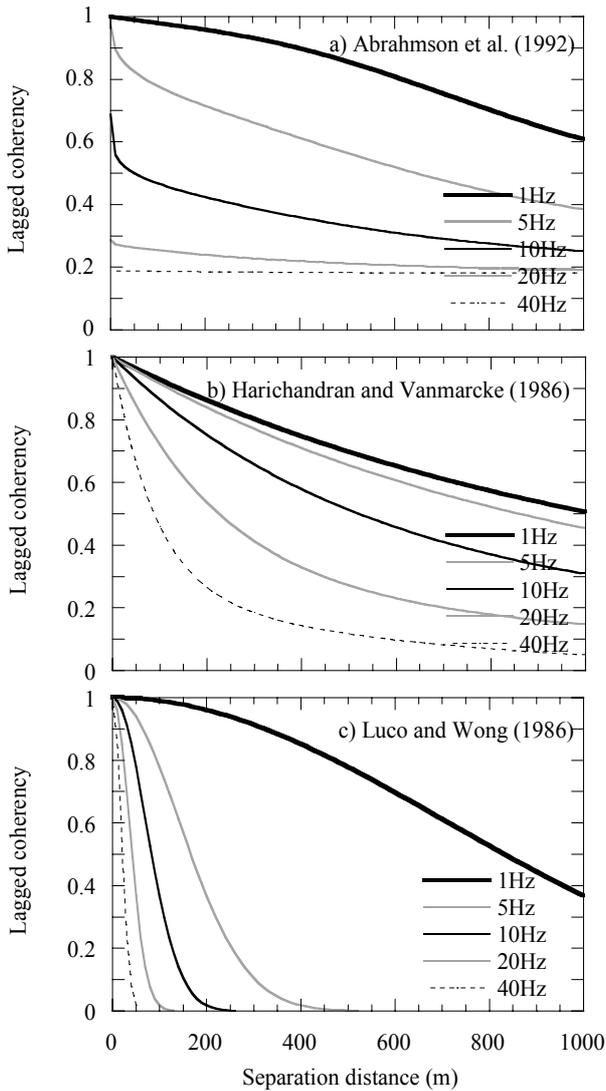


그림 1. 해석에 사용된 경험적 간섭성 함수

석적 기법을 개발하였다. 해석기법은 기준 지진파, 간섭성 함수, 그리고 이격거리를 입력치로 선정하면 원하는 지점에서의 지진파 시간이력을 생성한다.

본 연구에서는 Abrahamson(1992)이 제안한 방법을 이용하여 공간적으로 변이하는 지진파를 생성하였다. 이를 위하여 사용된 세 개의 기준 지진파를 사용하였으며 이들은 그림 2에 도시하였다. 그림 2a는 고베지진 중 계측된 지진파이며 이는 이 논문에서 TS1로 명하였다. 그림 2b는 미국 로마 프리에타 지진 중 Gilroy Station # 1에서 계측된 파이며 이는 TS2라 명하였다. 그림 2c(TS3)은 국내 설계응답스펙트럼 맞춤형 인공 지진파이다.

공간적으로 변이하는 지진파는 총 10개의 지점에서 생성되었다. 지점간의 이격거리는 100m이며 총 연장길이는 1000m이다. 생성된 지진파는 baseline 보정을 하여 영구변위가 발생하지 않도록 하였다. 기준 지진파와 생성된 지진파의 특성을 비교하기 위해서 이격거리 300m, 600m, 1000m에

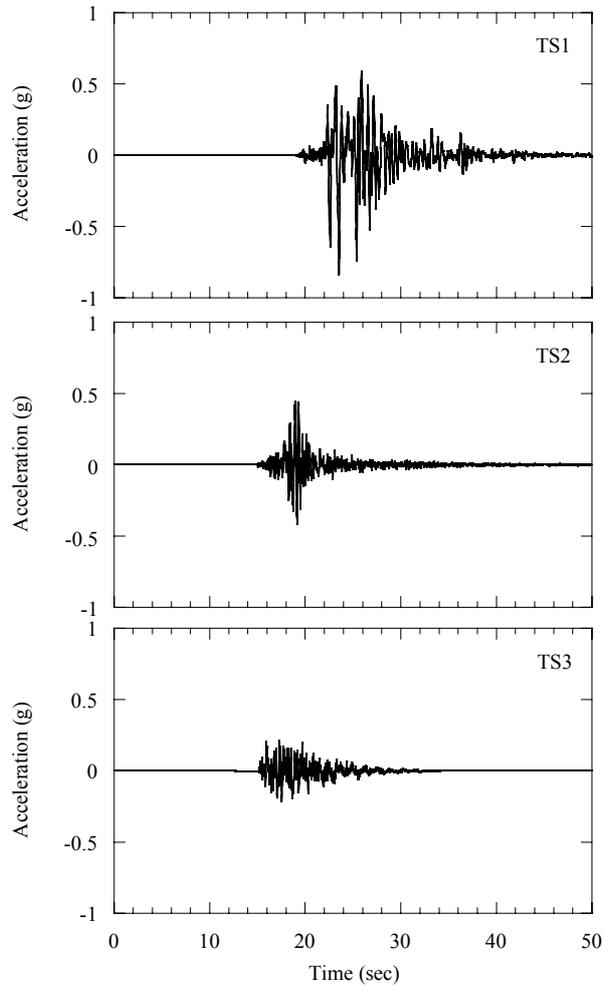


그림 2. 해석에 사용된 기준 지진파

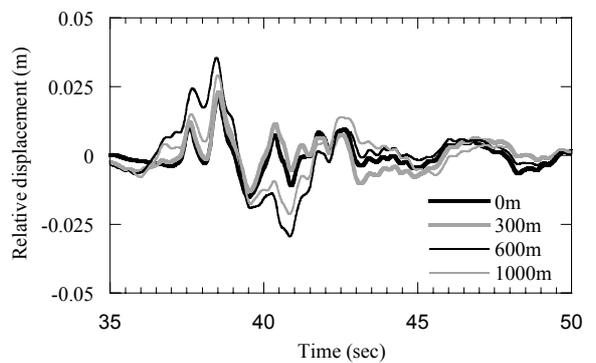


그림 3. TS-1 지진파와 간섭성 함수를 이용하여 계산된 변위 시간이력 (이격거리: 0, 300, 600, 1000m)

서 생성된 지진파와 기준 지진파의 변위 시간이력을 비교해 보았다(그림 3). 생성시 Abrahamson 등(1992)의 경험적 간섭성 함수(그림 1)와 세 개의 기준파(그림 2)들이 모두 사용되었다. 그림 3은 기준 그리고 생성된 지진파간에 큰 차이가 있음을 확연하게 볼 수 있으며 이들의 유사성은 이격거리가 증가할수록 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 경향은 간섭성 함수와 일치하며 Abrahamson

(1992)의 기법이 합리적인 것을 알 수 있다.

### 3. 종단방향 변위 주상도

일차원 지반응답해석에서 수직으로 전파되는 전단파는 지반에 전단변형을 유발한다. 토층에서의 지반변형은 층간의 최대상대변위를 나타내는 변위주상도로서 표현된다. 터널의 경우 관성력의 영향이 매우 작으며 지반변위에 순응하는 운동을 보인다고 설명한 바 있다. 따라서 터널의 지진해석시, 지반응답해석에서 계산된 변위주상도를 통하여 응답변위해석을 수행하게 된다.

수직으로 전파되는 전단파는 지반이 공간적으로 균일할 경우 전단변형만을 유발할 것이다. 하지만 전절에서 설명된 바와 같이 지진파는 공간적으로 변이한다. 터널에 도달하는 지진파의 특성이 상이하거나 시간차가 발생할 경우 이로 인하여 발생하는 추가적인 변형을 고려할 필요가 있다. 이를 모사하기 위해서는 전절에서 생성된 공간적으로 변이하는 지진파 시간이력을 활용해야 한다.

터널의 종단방향 지반변형 형상은 전절에서 생성된 위치별 지진파 시간이력을 시간단계별로 연결하여 얻을 수 있다. 이와 같이 생성된 지반형상을 종단방향 변위 주상도라고 명하도록 한다. 총 생성되는 종단방향 변위 주상도는 지진파의 총 지속시간에 시간단계를 나누는 수와 동일하다. 종방향 변위 주상도는 지반응답해석에서 계산되는 수직방향 변위 주상도와 개념적으로는 유사하다고 볼 수 있으며 이는 수직방향 변위 주상도와 마찬가지로 이를 통하여 응답변위법을 수행할 수 있다는 점에서 매우 유용하다.

그림 4는 지진파 TS-1과 Abrahamson 등(1992)의 간섭성 함수를 기반으로 생성된 변위 주상도를 보여주고 있다. 그림 4의 변위는 상대변위, 즉 기준 지진파와 이격거리별 계산된 지진파의 변위 차이를 의미한다. 주상도의 곡률과 터널의 응답이 비례하므로 시간단계별 생성된 주상도로부터

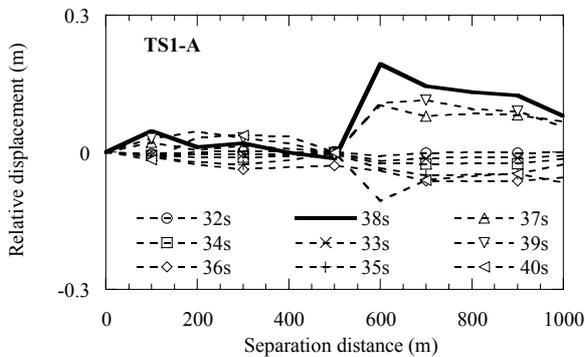


그림 4. TS-1지진파와 Abrahamson 등(1992)의 간섭성 함수를 이용하여 생성된 다양한 시간단계에서 계산된 종방향 변위 주상도

터 가장 곡률이 큰 주상도 한 개를 선정하였다. 세 개의 지진파와 간섭성 함수 들을 이용하여 총 9개의 주상도를 생성하였다. 굵은 선으로 표시된 선은 곡률이 가장 큰 주상도이다. 그림 5는 생성된 변위 주상도를 보여주고 있으며 주상도의 표기방법은 표 1과 같다.

종단방향 변위 주상도는 기준파의 주파수 특성과 진폭에 의하여 결정된다. 세 지진파 중 가장 큰 TS-1파를 사용하였을 경우, 가장 큰 상대변위가 발생하였으며 이는 0.45m로 계산되었다. 변위 주상도는 지진파뿐만 아니라 사용된 간섭성 함수에 의해서도 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. Luco 등(1986)의 간섭성 함수를 사용하였을 경우 가

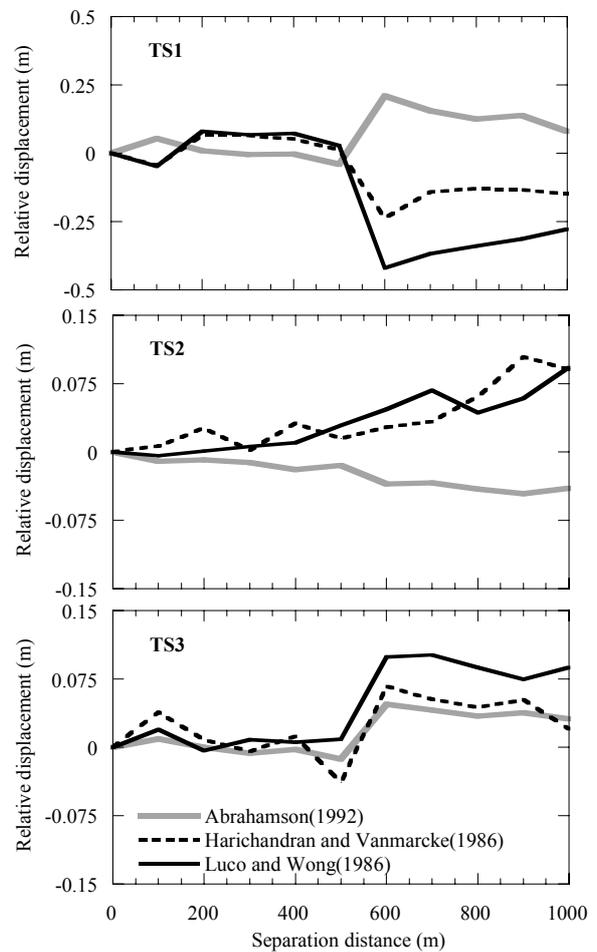


그림 5. 세 개의 기준파와 간섭성 함수로 생성된 종방향 변위 주상도 비교

표 1. 생성된 종단방향 변위 주상도

지진파	종단방향 변위 주상도		
	간섭성 함수		
	Abrahamson et al. (1992)	Harichandran and Vanmarcke (1986)	Luco and Wong (1986)
TS1	TS1-A	TS1-S	TS1-H
TS2	TS2-A	TS2-S	TS2-H
TS3	TS3-A	TS3-S	TS3-H

장 큰 상대변위가 발생하였다. 이는 타 함수들에 비하여 Luco 등(1986)의 함수는 이격거리가 증가할수록 간섭성이 가장 급격하게 감소하기 때문이다(그림 1). 종단방향 변위 주상도는 다음 절에서 3차원 응답변위해석에 사용되었다.

#### 4. 공간적으로 변이하는 지진파에 의한 터널의 응답 예측

본 절에서는 종단방향 변위 주상도를 활용하여 공간적으로 변이하는 지진파에 대한 터널의 응답을 예측하였다. 터널의 제원, 지반의 물성치, 해석조건 등은 다음과 같다.

##### 4.1. 지반과 터널 모델링

해석에 사용된 지층은 그림 6과 같다. 지층의 깊이와 넓이는 각각 90m이며 종단방향 길이는 1000m로 모델링되었다. 지반 물성치로는 세 가지 조합(Type 1, 2, 3)이 사용되었으며 이들은 표 2와 같다. 지층은 Type 1과 동일한 물성치를 가진 기반암 위에 놓여 있다고 가정되었다. 지반의  $K_0$ 은 1.0이라 가정되었다.

터널은 연장길이가 타 구조물에 비하여 매우 길기 때문에 터널 축 방향으로 지반의 물성치가 변이하게 된다. 반면, 지진파의 증폭정도는 지반의 물성치에 크게 지배를 받게 된다. 즉, 지반 물성치가 변이하는 경계면에서 서로 상이한 지진파의 증폭효과로 인하여 매우 큰 상대 변위가 발생할 수 있으며 이로 인한 터널 라이닝에 작용하는 축력과 모멘트가 지반이 균질한 경우에 비하여 크게 증폭될 수 있다. 이와 같은 현상을 모사하기 위하여 종단방향 지층 특성은 균질한 경우와 비균질한 경우가 모두 사용되었다. 비균질한 경우, 지층간의 경계는 좌측경계로부터 600m 지점에 있다고 가정되었으며(그림 6) Type 1에서 Type 2, 그리

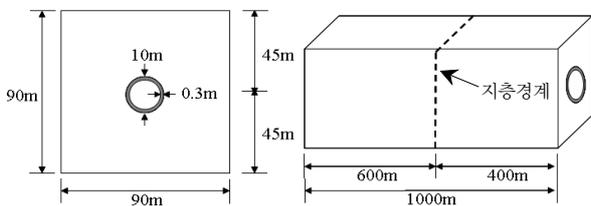


그림 6. 지반과 터널의 해석단면

표 2. 지반 물성치

지반 Type	탄성계수 (MPa)	Poisson's ratio	점착력 (kPa)	전단파속도 (m/sec)	단위중량 ( $t/m^3$ )
Type 1	19,500	0.20	6,700	1734	2.70
Type 2	5,400	0.25	1,700	929	2.50
Type 3	330	0.30	140	252	2.00

고 Type 1에서 Type 3으로 변이하는 경우를 모델링 하였다. 터널의 지름은 10m이며 지층의 중앙에 위치하고 있으며 라이닝의 두께는 0.3m이며 탄성계수는 24,800MPa로 모델링 되었다.

##### 4.2. 종단방향 변위 주상도 생성

전절에서 생성되었던 종단방향 변위 주상도는 암반 노두에서의 지반변형을 나타내므로 지표면으로부터 일정 깊이에 위치한 터널해석에는 적용될 수 없다. 지층내 변위 주상도를 생성하기 위하여 암반 노두에서 생성된 지진파를 Deconvolution하여 상응하는 기반암의 운동을 계산한 후, 이에 대한 지층의 응답을 계산하여 터널 깊이에서의 운동을 추출하여 새롭게 변위 주상도를 생성해야 한다.

본 해석에서는 일차적으로 TS-1 지진파와 Abrahamson 등(1992)의 간섭성 함수를 사용하여 암반 노두에서 공간적으로 변이하는 지진파를 생성하였다. 생성된 모든 지진파에 대하여 Deconvolution을 수행하여 기반암 운동을 계산하였으며 이들을 입력지진파로 사용하여 세 가지의 지층에 대한 지반응답해석을 수행하였다. 계산된 변위 시간이력으로부터 깊이 45m에서의 종단방향 변위 주상도를 생성하였다. Deconvolution과 응답해석에 사용된 해석프로그램은 DEEPSOIL(Hashash 등, 2001b; Park 등, 2004)이다. 이와 같은 방법으로 생성된 종단방향 변위 주상도는 그림 7과 같다. 전파되는 지진파의 증폭 정도는 기반암과 상부지층의 임피던스 비율(Impedance ratio)의 큰 영향을 받는다.

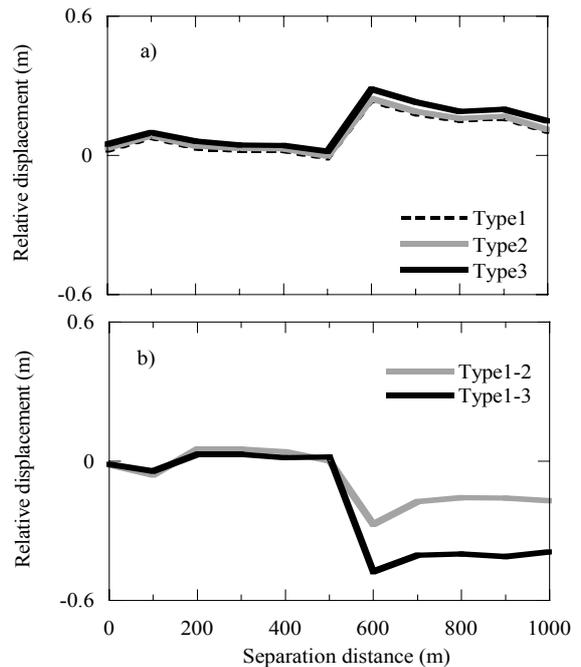


그림 7. 유한요소 해석에 사용된 변위 주상도

가장 큰 증폭은 비율이 가장 큰 Type 3 지반에서 발생하지만 그림 7a는 종단방향 변위 주상도는 지반의 물성치의 영향을 거의 받지 않는 것을 보여주고 있다. 이와 같은 이유는 강성이 감소하여 임피던스 비율이 증가하면 지진파가 증폭되기는 하지만 종단방향으로 균일하게 증폭되기 때문에 상대변위로서 계산되는 변위 주상도는 크게 변화하지 않기 때문이다. 하지만 비균질한 지반의 경우, 지반 증폭 정도에 큰 차이가 발생하기 때문에 지반의 경계면에서 변위차가 현저하게 증가하게 된다(그림 7b).

### 4.3. 유한요소해석

공간적으로 변이하는 지진파의 영향을 평가하기 위해서 VisualFEA(2003)를 이용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 3차원 격자망은 그림 8과 같다. 하부경계는 모든 방향에 대하여 구속하였으며 측면경계는 수직방향과 종단방향으로만 구속하였다. 지반은 8 노드 brick 요소로 모델링 되었으며 터널 라이닝은 8 노드 쉘 요소를 사용하였다. 터널 라이닝과 지반은 고정되어있다고 가정되

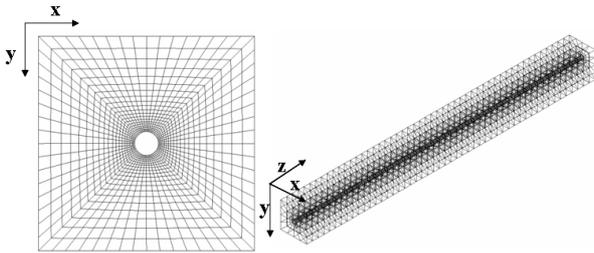


그림 8. 터널과 지반의 유한요소 격자망

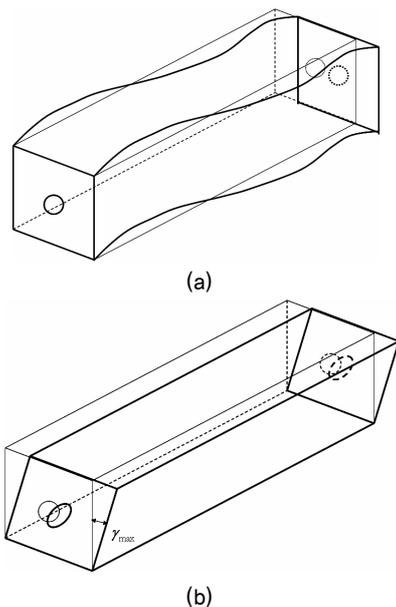


그림 9. 공간적으로 변이하는 지진파와 전단변형에 의한 지반의 변형 형상

었다(No-slip 조건: 인터페이스 요소는 모사되지 않았음).

### 4.4. 수치해석

본 해석에서는 종단방향 변위 주상도에 상응하는 수평 변위를 3차원 격자망의 측면 경계에 가해주었다(그림 9a). 이로 인하여 터널에는 수평면에서 종단방향 힘이 발생하게 된다. 사용된 변위 주상도는 그림 5에 도시하였으며 수행된 해석사례는 표 3과 같다. 사용된 기법은 응답변위법이며 관성력은 앞서 설명한 이유로 무시하였다. 종단방향 응답과 일반적으로 수행되는 횡단방향 응답을 비교하기 위하여 추가적으로 전단변형에 의한 터널의 응답을 비교하였다. 터널에 작용하는 최대전단변형률은 1차원 지반응답해석으로부터 계산하였으며 종단방향 해석과 동일하게 3차원 해석을 수행하였다(그림 9b). 두 가지 해석에서 터널 라이닝에 작용하는 축력과 모멘트를 계산하였다(그림 10).  $\sigma_r$ 과  $M_r$ 은 반경방향 축력과 모멘트이며,  $\sigma_H$  and  $M_H$ 은 수평면에서의 축력과 모멘트이다.

### 4.5. 결과 분석

그림 11은 공간적으로 변이하는 지진파에 의하여 터널 라이닝에 발생하는 축력과 모멘트를 비교하고 있다. 공간적으로 변이하는 지진파에 의해서 수평면에서 큰 축력이

표 3. 해석 사례

지반 균질성	지반 Type	해석 종류	
		횡단방향 해석	종단방향 해석
균질	Type 1	×	×
균질	Type 2	×	×
균질	Type 3	×	×
비균질	Type 1 → Type 2		×
비균질	Type 1 → Type 3		×

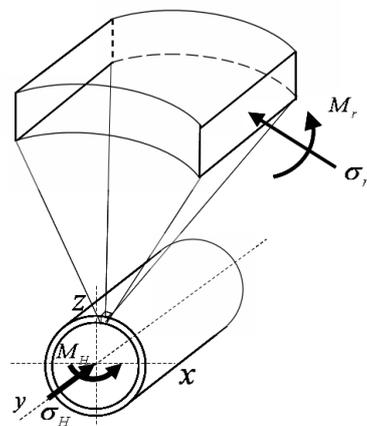


그림 10. 터널 라이닝에 작용하는 축응력과 모멘트 표기법

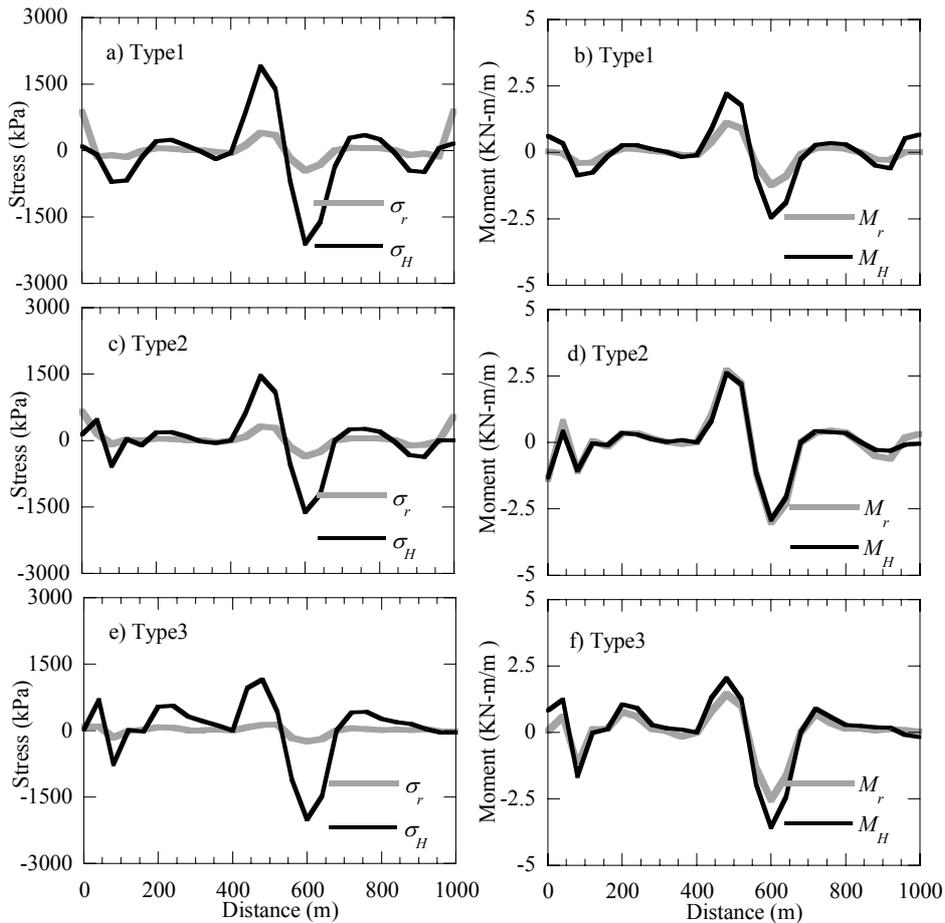


그림 11. 공간적으로 변이하는 지진파에 의하여 터널 라이닝에 작용하는 축응력과 모멘트 비교

발생하는 반면, 반경 방향에서는 매우 작은 응답이 계산되었다. 모멘트는 반경 방향 그리고 수평면에서 모두 작게 계산되었다. 지반의 Type에 따라 터널의 응답의 변화는 매우 작은 것으로 나타났다. 이는 전절에서 설명되었다시피 지반의 강성이 변화함에 따라 증폭 정도가 일정하며, 따라서 종단방향 변위가 유사하기 때문이다(그림 7).

공간적으로 변이하는 지진파의 영향을 평가한 종단방향 해석과 일반적으로 수행되는 횡단방향 해석을 비교하고자 전단변형으로 인한 터널의 응답을 계산하였다(그림 12). 터널은 전단변형에 의하여 반경 방향 축력과 모멘트가 크게 발생하는 반면 수평면에서의 응답은 매우 작게 발생한다. 지반의 강성이 감소할수록 전단변형률이 증가하며 이로 인하여 축력과 모멘트도 크게 증가한다. 그림 12c는 연약지반에서는 12,000kPa나 되는 축력이 발생할 수 있음을 보여주고 있다. 종단방향과 횡단방향 해석결과를 비교해보면 Type 1 지반의 경우 종단방향해석의  $\sigma_H$  최대값과 횡단방향 해석의  $\sigma_r$ 이 유사한 것으로 나타났다. 반면, Type 2와 Type 3 지반의 경우 지반의 강성 감소로 인한 전단변형률의 증가로 횡단방향 해석결과는 크게 증가한 반면, 종단방

향 응답은 상대적으로 영향이 작은 것으로 나타났다. 이는 터널의 강성이 낮은 토층에서는 전단변형이 가장 지배적인 응답이라는 것을 의미한다.

그림 13은 불균질한 지반에서의 응답을 보여주고 있다. 지반이 Type 1에서부터 2로 변화하는 경우, 계산된 응답은 균질한 지반과 유사하다. 이는 Type 1과 2에서의 지진파의 증폭 정도가 유사하기 때문인 것으로 분석된다. 하지만 지반이 Type 1에서 3으로 변이할 경우, 지반의 경계면에서 매우 큰 증폭이 발생하며 이로 인하여 터널 라이닝에 축력과 모멘트가 집중되며 응답이 크게 증폭된다. 따라서, 지반의 특성이 종단방향으로 크게 변이할 경우, 터널의 내진 설계시 이를 고려하는 것이 중요하다고 판단된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 공간적으로 변이하는 지진파가 터널에 미치는 영향을 평가하고자 일련의 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 공간적으로 변이하는 지진파에 의한 지반변위를 규명하고자 먼저 각 위치별 이격거리가 100m인 10개의

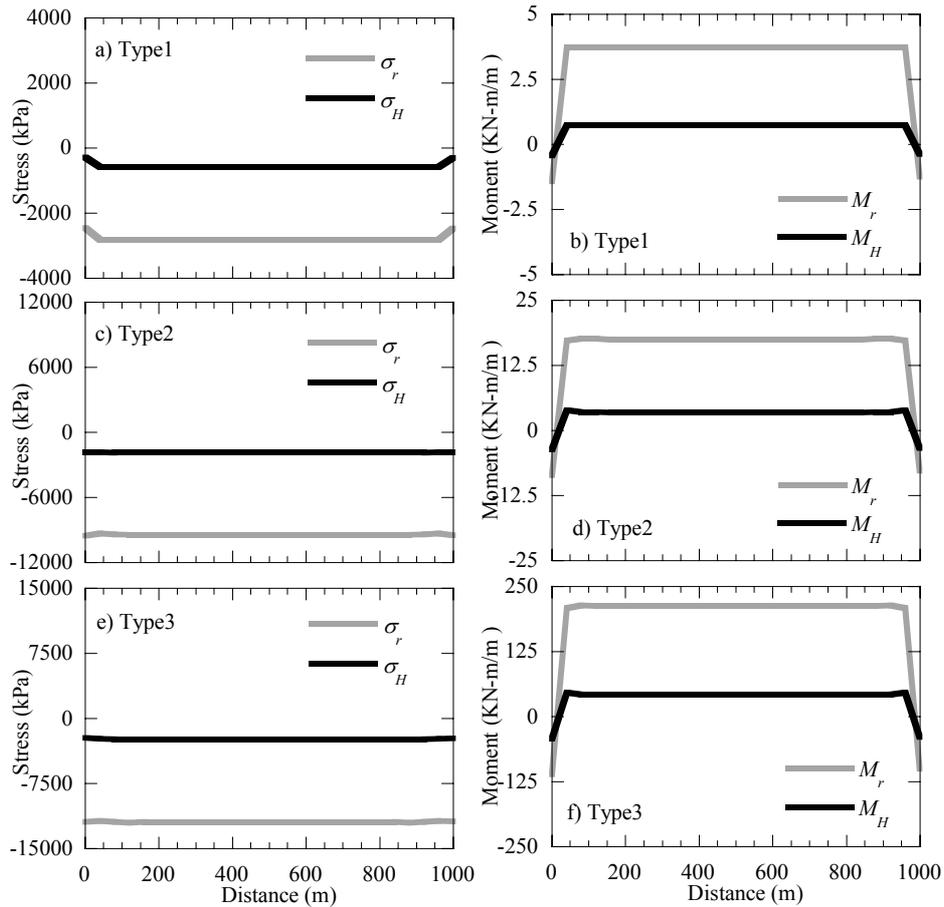


그림 12. 전단변형에 의하여 터널 라이닝에 작용하는 축응력과 모멘트 비교

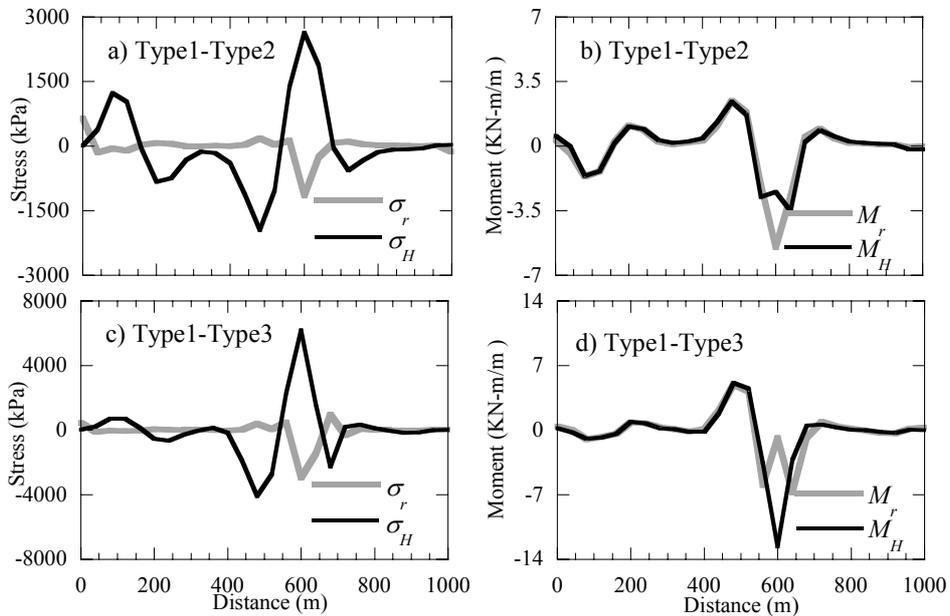


그림 13. 비균질한 지반에서 공간적으로 변이하는 지진파에 의하여 터널 라이닝에 작용하는 축응력과 모멘트

지점에서 지진파를 생성하였고 이로부터 종단방향 변위 주상도가 생성되었다. 종방향 변위 주상도는 곡률이 최대가 되는 주상도를 생성되었다. 변위 주상도는 사용된 기준 지

진파와 간섭성 함수의 영향이 매우 큰 것으로 나타났다.

계산된 변위 주상도는 3차원 해석단면의 측면 경계에 가해주었으며 이에 대한 터널의 응답을 계산하였다. 해석

결과는 공간적으로 변이하는 지진파로 인하여 터널에 큰 축력과 모멘트가 발생할 수 있음을 보였다. 이는 특히 지반의 물성치가 크게 변이하는 경계면에서 중요한 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐 기술 연구)에 의하여 연구비가 지원되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 이인모, 안대진(2000), 터널구조물의 내진해석, *한국터널공학회 논문집*, Vol. 2, No. 1, pp. 3~15.
2. Abrahamson, N.A.(1992), Generation of Spatially Incoherent Strong Motion Time Histories, 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain Vol. II, pp. 845~850.
3. Abrahamson, N.A., Schneider, J.F. and Stepp, J.C.(1992), Empirical Spatial Coherency Functions for Applications to Soil-Structure Interaction, *Earthquake Spectra*, Vol. 7, No. 1, pp. 1~27.
4. Hao, H., Oliveria, C.S. and Penzien, J.(1989), Multiple-Station Ground Motion Processing and Simulation Based on SMART-1 array data, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 111, No. 3, pp. 293~210.
5. Harichandran, R.S., Vanmarcke, E.H.(1986), Stochastic Variation of Earthquake Ground motion in Space and Time, *Journal of Engineering Mechanics* Vol. 112, No. 2, pp. 154~174.
6. Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B. and Yao, J.I.C.(2001a), Seismic Design and Analysis of Underground Structure, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 16, No. 4, pp. 247~293.
7. Hashash, Y.M.A., Park, D.(2001b), Non-Linear One-Dimensional Seismic Ground Motion Propagation in the Mississippi Embayment, *Engineering Geology*, Vol. 62, No. 1~3, pp. 185~206.
8. Hashash, Y.M.A., Park, D. and Yao, J.I.C.(2005), Ovaling Deformations of Circular Tunnels Under Seismic Loading, an Update on Seismic Design and Analysis of Underground Structures, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 20, No. 5, pp. 435~441.
9. Kafatygiotis, L.S., Zerva, A. and Pachakis, D.(1999), An Efficient Approach for the Simulation of Spatially Variable Motions for the Seismic Response of Lifelines, *Proc of 13th ASCE Engineering Mechanics Conf*, pp. 1~10.
10. Luco, J.E., Wong, H.L.(1986), Response of a Rigid Foundation to a Spatially Random Ground Motion, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 14, pp. 891~908.
11. Park, D., Hashash, Y.M.A.(2004), Soil Damping Formulation in Nonlinear Time Domain Site Response Analysis, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 249~274.
12. St John, C.M., Zahrah, T.F.(1987), Aseismic Design of Underground Structures, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 165~197.
13. VisualFEA(2003), User's Manual, *SYTecEnC*, pp. 1.
14. Wang, J.N.(1993), Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach, Monograph 7. New York, NY: Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc, pp. 25.
15. Zerva, A., Zervas, V.(2002), Spatial Variation of Seismic Ground Motions: An overview, *Applied Mechanical Review*, Vol. 55, No. 3, pp. 271~297.

(접수일: 2008. 3. 7 심사일: 2008. 3. 21 심사완료일: 2008. 5. 2)