

주변 공동을 고려한 터널의 동적거동에 관한 연구

김민규¹⁾, 이종우²⁾, 이종세²⁾

A Study on the Dynamic Behavior of Underground Tunnels with a Cavity

Min Kyu Kim, Jong Woo Rhee and Jong Seh Lee

Abstract. A dynamic analysis of a horseshoe-shaped tunnel near to cavity was performed to study the effect of the cavity on the dynamic behavior of the tunnel. In order to obtain the dynamic response of the tunnel embedded in a semi-infinite domain, a hybrid numerical technique was primarily developed. A dynamic fundamental solution in frequency domain for multi-layered half planes was derived and subsequently incorporated in the boundary element method. Coupling of the boundary element method for the far field with the finite element method for the near field is made by imposing compatibility condition of a displacement at the interface. The boundary element method is then coupled with the finite element method, which is utilized to model the near field including the tunnel and the cavity. In order to demonstrate the validity of the proposed technique, dynamic responses of single and multiply-layered semi-infinite structural systems are obtained by using the Ricker waveform and investigated in the limestone layer to find how the being and the location of the cavity affect the dynamic characteristics of the system.

KeyWords: Tunnel, Cavity, Fundamental Solution in Multi-layered Half-plane, Boundary Element Method, FE-BE Coupling Method

초 록. 본 연구에서는 마제형터널 주변에 공동이 존재하는 경우에 대해 동적해석을 수행함으로써 터널주변의 공동이 터널의 동적거동에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 반무한 평면상에서 터널의 동적응답해석을 수행할 수 있는 해석기법을 개발하였다. 먼저 주파수 영역에서의 다층 반무한 지반내에서의 동적 기본해를 유도하였고 이를 경계요소로 적용하였다. 외부영역을 모형화한 경계요소를 내부영역의 유한요소와 조합하여 반무한 영역에서의 터널구조의 동적응답을 구할 수 있도록 하였다. 개발된 기법의 검증에 위하여 단층 및 다층 반무한 구조계에 대해 Ricker 파형을 이용한 동적해석을 수행하여 기존의 해석결과와 비교하였고, 개발된 기법을 이용하여 석회암층에 있는 터널에 대해 공동의 유무 및 터널과의 이격거리에 따른 터널의 동적거동을 고찰하였다.

핵심어: 터널, 공동, 다층반무한 동적기본해, 경계요소, 유한요소-경계요소 조합해석

1. 서 론

최근 들어 많은 대규모 터널이 시공되고 있으나 터널은 근본적으로 교량과 달라서 터널이 통과하는 전 구간 의 지반조건을 완벽하게 파악한다는 것이 현실적으로 불가능하다. 특별히 강원도지역의 산악지형을 지나는 터널의 경우는 지형의 험준함으로 인하여 노선주변의 지반정보를 파악하는 것이 어렵다. 실제로 강원도 지역

의 경우 기존의 폐광이나 석회암동굴과 같은 공동이 터널 주변에 발견되어 그 안정성을 예측할 수 없는 경우가 발생하고 있는 실정이다. 도로터널의 경우는 동적하중에 의한 영향이 적을 수 있지만 철도터널의 경우 특히 고속전철이 지나가는 경우는 철도주행에 의한 주행하중이 매우 크게 발생하여 터널의 안전성 여부에 관한 많은 연구들이 진행되고 있는 실정이나 터널굴착 도중 폐광이 발견돼 안전문제가 제기됐던 경기도 화성 군 봉담면 '상리터널' 구간은 결국 공사비 1백17억원을 허비한 채 노선을 변경하는 사례가 발생하기도 했다(조선일보, 1998). 이러한 경우 터널주변의 공동이 터널의 동적 안정성에 미치는 영향에 대한 검토는 반드시 이루어져야 하는 과제인 것으로 판단된다. 따라서

¹⁾한양대학교 토목환경공학과 박사후 과정, 공학박사

²⁾시설안전기술공단 차장, 공학박사

³⁾한양대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

접수일: 2002년 7월 12일

심사 완료일: 2002년 9월 24일

본 연구에서는 터널 하부에 폐광 혹은 석회암 동굴이 존재하는 경우에 대해 기존터널의 동적 특성을 파악하는 것을 그 목적으로 하였다. 공동이 터널로부터 떨어진 이격거리에 따른 동적 특성을 검토하여 공동유무에 따른 터널의 동적특성을 분석하고 터널의 동적거동에 영향을 미치는 공동의 규모 및 터널과의 인접거리 등을 파악하고자 하였다.

일반적으로 터널은 동적인 하중에 크게 영향을 받지 않는다고 생각해 왔으므로 터널의 동적거동에 대한 연구가 시작된 것은 그리 오래된 일이 아니다. 그러나 최근 고속전철의 건설로 인해서 기존에 터널구조에 가해지던 하중에 비하여 큰 동적하중이 가해지게 되었고, 비교적 지진에 대하여 안전하다고 여겨지던 터널구조물도 지진에 의해서 손상을 입는 사례가 발생함에 따라 터널의 동적응답에 대한 연구가 점차 활발히 이루어지고 있는 상황이다. 터널구조물이 지상구조물과 비교하여 동적해석에서 가장 문제가 되는 것은 반무한 지반상에 위치하고 있기 때문에 발생하는 지반의 방사조건을 어떻게 고려하는가 하는 문제이다. 지반의 방사조건을 고려하기 위한 경계조건에 대한 연구는 크게 흡수경계를 사용하여 경계에서 파의 반사가 이루어지지 않도록 수치적으로 파를 흡수할 수 있도록 하는 방법, 무한요소를 사용하는 방법, 그리고 경계요소를 사용하는 방법 등으로 크게 구분할 수 있다.

흡수경계를 사용하는 방법은 Wolf(1985)에 의해서 광범위하게 연구되어 지반-구조물 상호작용해석문제로 확장되었다. 흡수경계와 유사한 방법으로 최근의 연구로서 Kirzhner와 Rosenhouse (2000)는 상용 유한차분 해석 프로그램인 FLAC(Itasca Consulting Group, 1996)을 이용하여 지진하중을 받는 터널의 동적해석을 수행하였다. FLAC에서는 지반문제의 동적해석을 위하여 quiet boundary라는 기능을 제공하여 경계에서의 파 반사문제를 해결할 수 있도록 하였다.

무한요소를 사용한 방법은 Bettess(1977, 1992)에 의하여 처음으로 연구가 되었으며 최근에는 Kumar(2000)에 의해서 무한요소를 이용하여 지중공동에서의 동적응답에 대한 연구가 수행되었다. 무한요소(Infinite Element)는 경계에서의 파반사문제를 효과적으로 해결함으로써 기존의 유한요소해석의 한계를 극복할 수 있도록 한 방법이다. 국내의 경우 Kim, J.M. 등(2001)과 Choi, J.S. 등(2001)이 무한요소를 이용한 지반-구조물 상호작용 해석기법을 대만 원자력발전소 구조물과 지하철 박스(Box) 구조물에 적용한 바 있다.

경계요소법을 이용한 방법은 Brebbia(1984)와 Banerjee(1976)등에 의하여 많은 연구가 수행되었으며 국내의

경우 이종우(1998)는 다층반무한 평면에서의 동적기본해를 유도하여 경계요소법에 적용하였고, 김문겸 등(1998, 2000)은 동적기본해를 이용하여 지반구조물 상호작용해석을 수행하였다. 경계요소법은 반무한 지반상에서의 방사조건을 만족함으로써 터널과 같은 지반구조물의 동적해석문제에 가장 적합한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 기존에 개발된 다층 반무한 동적 기본해를 암반상에 위치하고 있는 터널구조물에 적용하여 터널주변에 위치하고 있는 공동이 터널구조의 동적응답에 미치는 영향에 대하여 고찰해 보고자 한다.

2. 유한요소 경계요소 조합에 의한 모형화

2.1 유한요소의 정식화

전체계의 동적 운동방정식은 식 (1)과 같이 행렬형태로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

여기서 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 그리고 $\{F\}$ 는 각각 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬 그리고 하중벡터를 나타낸다. 식 (1)을 시간변수에 대해 Fourier 변환을 수행하면 시간의 함수인 하중벡터 $\{F\}$ 및 변위벡터 $\{u\}$ 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\{u(\omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{\bar{u}(t)\} \exp\{-i\omega t\} dt \quad (2a)$$

$$\{F(\omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{\bar{F}(t)\} \exp\{-i\omega t\} dt \quad (2b)$$

그러므로 식 (1)은 식 (3)과 같이 주파수영역에서의 운동방정식으로 나타낼 수 있다.

$$[S(\omega)]\{u(\omega)\} = \{F(\omega)\} \quad (3)$$

여기서, $[S(\omega)]$ 는 임피던스행렬로서 식 (4)와 같이 표현되는 동적강성행렬을 나타낸다.

$$[S(\omega)] = [K^*] + i\omega[C] - \omega^2[M] \quad (4)$$

여기서, $[K^*]$ 는 정적 강성행렬을 나타낸다.

2.2 외부영역의 경계요소해석

다층 반무한 평면에서의 동적 기본해는 다음과 같다 (이종우, 1998, Kim et al., 2000).

$$\widetilde{u}_{qr}^*(\omega, x, z, z_S) = \frac{C_n}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [k^n e^{(-kz^* - ikx^*)}] dk \quad (5)$$

$q, r = x, z$

여기서, C_n 은 파동수 k 에 독립적인 상수이고, z^* 및 x^* 는 각각 수진점과 가진점간의 수직거리 및 수평거리이다.

변위성분 및 응력성분은 최종적으로 식 (6)과 같이 점근해가 변위의 동적해와 일치하는 구간까지 수치적분을 수행하고 그 이상의 구간에 대해서는 점근해의 이론적분값을 이용할 수 있다.

$$u_{pq}^e(\omega, x, z, z_S) = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{-a}^{+a} \{ (D_{nq}^j) e^{-ikx^*} \} dk + \int_{-\infty}^{-a} \{ (\widetilde{D}_{nq}^j) e^{-ikx^*} \} dk + \int_{+a}^{+\infty} \{ (\widetilde{D}_{nq}^j) e^{-ikx^*} \} dk \right]$$

$p, q = x, z$

(6)

점근식의 피적분항은 지수적으로 감쇠하는 $e^{-k(z-z^*)}$ 항을 포함하고, 깊이 z 의 함수이며, 파동수가 증가함에 따라 발산하는 항을 포함하지 않으므로 점근식에 대해 무한 Fourier 적분을 수행하면 식 (7)과 같은 형태의 적분식이 되고 각각의 무한적분 이론해를 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2\pi} \int [(\widetilde{D}_{nq}^j) e^{-ikx^*}] dk = \frac{A}{2\pi} \int [k^n e^{(-kz^* - ikx^*)}] dk \quad (7)$$

여기서, A 는 파동수 k 에 독립적인 상수이다.

식 (8)은 영역 Ω , 경계 Γ 로 이루어진 다층반무한 구조계에서 Ω 영역내 임의의 한 점 F 에서의 응력 평형방정식을 응력텐서 σ_{kj} , 물체력 b_k 와 변위 u_k 를 이용하여 나타낸 것이며, 가상일의 원리에 의해서 적분방정식을 형성하면, 식 (9)와 같은 체적적분방정식이 구해진다.

$$\sigma_{kj,j} + \rho b_k - \rho \ddot{u}_k = 0 \quad (8)$$

$$\int_{\Omega} \sigma_{kj,j} u_k^* d\Omega + \int_{\Omega} \rho b_k u_k^* d\Omega - \int_{\Omega} \rho \ddot{u}_k u_k^* d\Omega = 0 \quad (9)$$

여기서, u_k^* 는 영역 Ω 에서 정의되는 응력 σ_k^* 와 물체력 b_k^* 하의 가상의 단위 동하중에 의한 변위이다. 만약 물체력이 고려되지 않는 경우, 특이점의 영향을 고려한 구조계의 직접 경계적분방정식은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_{lk} u_l + \int_{\Gamma} p_{lk}^* u_k d\Gamma = \int_{\Gamma} u_k^* p_k d\Gamma + \int_{\Omega} u_k^* \rho \chi_k d\Omega \quad (10)$$

여기서, c_{lk} 는 경계면의 기하학적 형상에 의해서 결정되는 상수이고, p_k 와 p_{lk}^* 는 각각 실제 하중과 가상의 단위동하중에 의한 경계면 Γ 에서의 표면력이며, χ_k 는 물체력을 나타낸다.

이산화된 요소 사이에 모서리점이 포함되는 경우 표면력의 불연속이 발생될 수 있으므로 이 절점을 중복시켜서 풀어야 한다. 즉, 2개 요소의 사이에서 앞부분의 절점과 뒷부분에서의 절점으로 나눈다. 그러나 변위는 일정하여야 하므로 절점을 중복시킬 필요가 없다. 이 식을 이용해 전체 절점에 대하여 행렬을 구성하면 식 (11)과 같다.

$$[H^{BE}] \{u^{BE}\} = [G^{BE}] \{p^{BE}\} \quad (11)$$

여기서, 절점의 수가 N 이고 요소의 수가 NE 라면 행렬 $[H^{BE}]$ 와 $[G^{BE}]$ 는 면내운동의 경우 각각 $2N \times 2N$ 의 차원과 $2N \times 2NE$ 의 차원을 형성하며 면외운동의 경우는 각각 $N \times N$ 의 차원과 $N \times NE$ 의 차원을 이룬다. 절점 당 지지항과 미지항의 수는 같으므로 식 (11)은 다원 일차 연립방정식의 형태로 표현되며, 다시 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$[A^{BE}] \{X^{BE}\} = \{F^{BE}\} \quad (12)$$

여기서, $[A^{BE}]$ 는 $[H^{BE}]$ 와 $[G^{BE}]$ 를 이용하여 구성한 행렬이고, $\{X^{BE}\}$ 는 미지의 변위와 하중의 벡터이며, $\{F^{BE}\}$ 는 기지의 변위와 하중에 대한 벡터이다. 그러므로 행렬식 (12)에 대한 해를 구하여 경계요소해석을 수행할 수 있다.

2.3 내부영역과 외부영역의 조합

일반적으로 유한요소와 경계요소를 조합하는 방법은 유한요소의 계방정식을 경계요소 형태로 변환하는 방법과 경계요소의 계방정식을 유한요소 형태로 변환하여 조합하는 방법의 두가지 경우가 있으며, 본 연구에서는 경계요소의 계방정식을 유한요소의 계방정식 형태로 변환하여 조합하는 방법을 사용한다(Hartman, 1989).

유한요소의 동적 강성도행렬 $[S^{FE}]$ 와 경계요소의 동적 강성도행렬 $[S^{BE}]$ 는 모두 같은 형태의 하중-변위관계를 갖고 있으므로 이들의 조합이 가능하다. 즉,

유한요소와 경계요소간의 접합면에서 공유하는 절점에 대해 강성도행렬과 하중을 조합함으로써 전체 동적 강성도행렬과 하중을 구성하여 식 (13)과 같이 유한요소의 형태로 나타낼 수 있다.

$$[[S^{FE}]+[S^{BE}]]\{\{u^{FE}\}+\{u^{BE}\}\} = \{\{F^{FE}\}+\{F^{BE}\}\} \quad (13)$$

이로부터 전체 동적 강성도행렬과 하중형태로 나타내면 식 (13)은 식 (14)와 같이 된다.

$$[S^G]\{u^G\} = [F^G] \quad (14)$$

여기서, $[S^G]$ 는 조합된 전체 동적 강성도행렬이고 $\{u^G\}$ 는 조합된 전체 변위이며, $\{F^G\}$ 는 조합된 전체 외부 작용하중을 나타낸다.

3. 동적 경계요소 해석의 검증 및 적용성

본 연구에서 개발된 동적 2차원 기본해를 적용한 경계요소해석방법을 검증하기 위해 균일 물성을 갖는 반무한 탄성구조체 및 기반암 위에 적층된 구조체에 대한 동적응답 해석을 실시하여 기존 Estorf 등(1990)의 연구결과와 비교하였다. 이때 하중 함수는 Ricker 파형을 이용하였다. Ricker 파형은 시간영역 뿐만 아니라 주파수영역에서 비슷한 형태의 파형을 갖고, 초기에 빠른 감쇠 특성을 보이므로 해석 단계를 줄일 수 있는 잇점이 있다. 시간영역에서의 Ricker 파형은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(t) = M(1-2t^2)e^{-t^2} \quad (15)$$

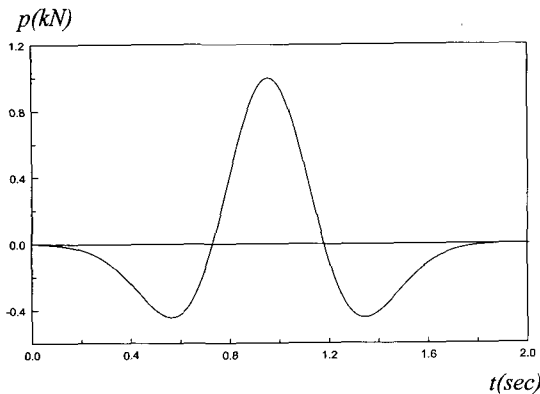


Fig. 1. Applied Load for Verifying Analysis.

여기서, $\tau = (t - t_s)/t_0$ 이고, t_s 는 최대값이 발생되는 시간이며, M 은 크기(amplitude), t_0 는 파형의 지배적인 주기이다. 본 연구에서 사용된 하중의 경우, t_0 를 $1/\pi$ 로 하고, t_s 를 $3/\pi$ 로 하였다. 이는 지배적인 주파수가 1 Hz 이고, 하중의 최대값이 0.95초에 나타나는 형태를 갖는다. 본 연구에서 수행한 결과를 시간영역 응답으로 변환시키기 위해 FFT(Fast Fourier Transformation)을 이용한 역변환을 수행하였다. Fig. 1과 같이 $P(t) = f(t)/M$ 의 작용하중을 표면상의 한 점 A에 가한 후 작용점으로부터 50m 떨어진 표면상의 한 점 B에서의 응답을 구하였다.

첫 번째의 검증대상인 균질 반무한 구조체는 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 본 연구방법의 타당성을 검증하기 위한 해석 지반물성은 기존의 해석과 동일한 값을 이용하였다. 탄성계수는 266MPa, 포아송비는 0.33, 밀도는 2000kg/m^3 으로 하였다. Fig. 3에서와 같이 본 해석 결과는 기존의 경계요소 해석결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 특히 기존의 점하중에 대해 면외방향으로 무한적분을 수행한 수치해석과 비교해 볼 때 해석 결과는 거의 일치하나 그 수행속도에서 큰 효과를 나타내었다.

본 연구방법의 타당성 검증을 위한 두 번째의 검증 대상으로서 기반암위에 적층된 균질 지반에 대한 문제를 다루었다. 해석 대상의 형태는 Fig. 4에 나타낸 바와 같으며, 기반암에 적층된 상부 균질지층의 물성은 첫 번째 예제와 동일한 것을 사용하였다. 이때 기존의 방법은 기반암을 모형화하기 위해 고정된 경계조건을 이용하여 그 해를 구하였지만 본 연구에서는 개발된 다층 반무한 기본해를 이용하기 위해 경계조건을 사용하지 않고 강성이 매우 큰 반무한 기반암으로 모형화하여 그 해를 구하였다.

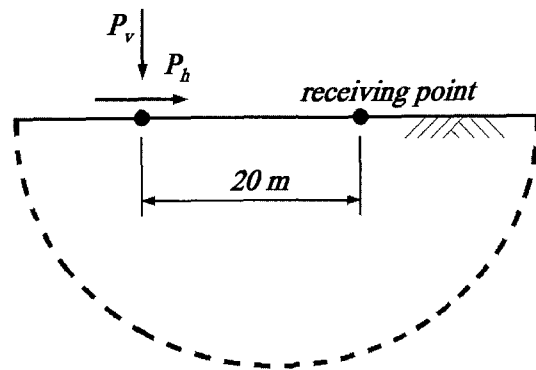


Fig. 2. Homogeneous Infinite Half Space.

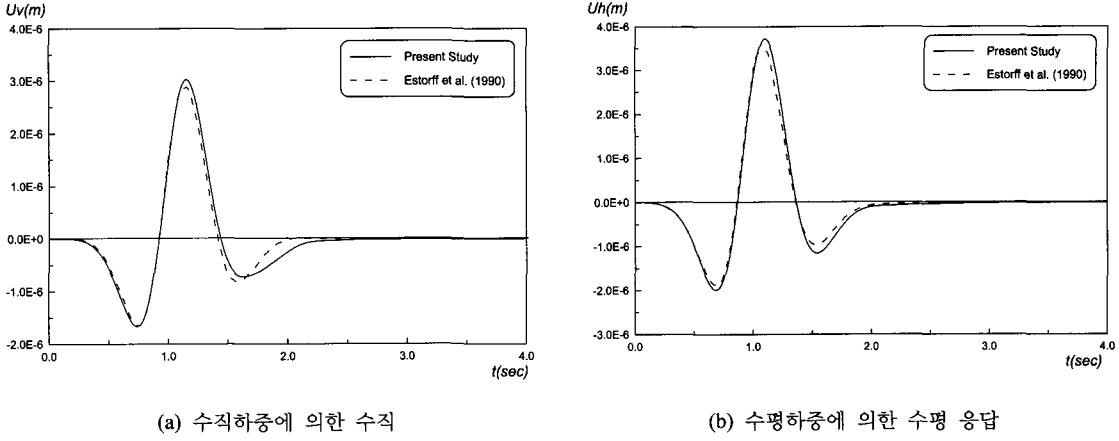


Fig. 3. A Comparison of Present Study and Previous Work.

기반암 위에 적층된 지반에 대한 해석결과도 Fig. 5에서와 같이 기존의 경계요소 해석결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 이로부터 본 연구방법의 타당성을 입증할 수 있었다. 0.5초 이전 초기시간에서의 수평 및 수직응답과 3초 이후의 수평응답 해석결과 비교치에서 다소 차이가 발생하였는데, 이는 주파수해석 결과의 역변환시 발생하는 aliasing 효과 및 일정주파수 이후에서의 truncation 때문에 발생하는 오차인 것으로 사료된다.

일반적으로 경계요소법은 다양한 물성을 포함하는 다영역 문제 및 복잡한 기하학적 성질을 갖는 해석대상 구조체를 해석하는 데에는 많은 문제점 및 어려움이 따르므로 해석 대상구조물 주변을 유한요소로 모델링하고 방사조건을 만족하는 외부영역을 본 경계요소법으로 모델링하여 조합해석할 경우, 더욱 다양한 구조물에 대해 효과적인 해석을 수행할 수 있다.

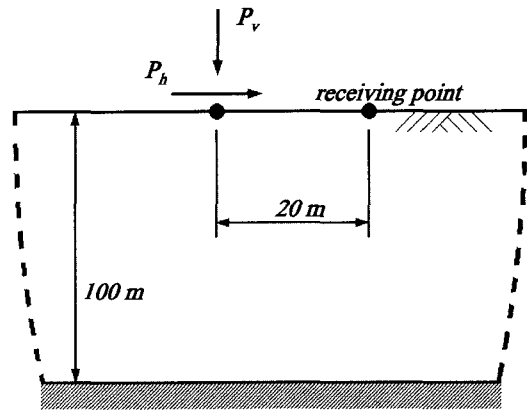


Fig. 4. The Ground System on the Base Rock.

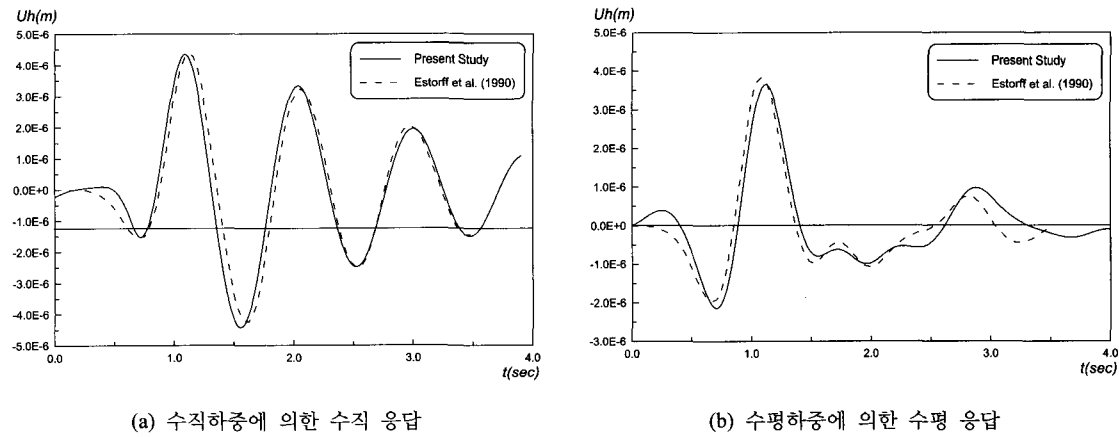


Fig. 5. A Comparison of the Results (on the Base Rock).

4. 수치해석 및 결과분석

본 연구에서는 석회암지역에 위치한 마제형 터널구조에 대하여 가상공동에 의한 동적영향을 고찰하기 위한 해석을 수행하였다. 해석대상 구조계는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 전체적으로 석회암지역으로서 지하 30 m까지는 풍화암이 존재하고 그 이하는 보통암 지형인 가상의 지반을 선정하였으며, 철도터널에서 가장 일반적인 마제형 터널이 존재하는 경우를 생각하였다. 지반내 터널의 위치는 그림에 표시한 바와 같으며 저면부 중앙지점에 각 주파수별 단위하중을 작용시켰다. 터널하부에 가상의 공동은 터널저면으로부터 여러 이격거리(d)에 존재하는 것으로 하였으며, 이때 터널 천단부와 저면부에서의 동적응답을 비교하였다. 터널 라이닝은 콘크리트로서 두께는 50 cm로 하였다. 해석에 사용된 지반과 라이닝의 물성은 Table 1에 정리한 바와 같다. 수치해석을 위한 모델은 Fig. 7에서 제시한 바와 같이 공동이 없는 경우 140개의 평면변형률 요소를 사용하였으며, 이 중에서 경계요소는 60개를 사용하였다. 각 요소의 크기는 선택한 지반물성과 해석주파수를 고려하여 50 cm를 넘지 않도록 구성하였다. 경계요소의 숫자를 최소한으로 줄이도록 요소망을 구성하여야 해석시간을 줄일 수 있으므로 최적의 요소망이 되도록 구성하였다. 공동이 있는 경우는 터널 저면에 4개의 요소를 제거함으로써 136개의 요소를 사용한 모델을 사용하였다.

해석결과는 터널의 천단부와 저면중앙부에서의 수직방향 응답변위를 관측하였다. 일반적인 열차진동하중의 주파수 범위가 80 Hz 미만이므로, 해석은 0~80 Hz까지 범위내에서 수행하였으며, 해석결과는 Fig. 8에 도시한 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 천단부의 경우 저면부에 비하여 더 큰 응답이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 천단부의 경우 라이닝 표면에서 관측한 값이고 저면부의 경우는 라이닝과 암반과의 경계점에서 관측한 값이므로 수직방향 변위의 구속효과에 의하여 변위가 작게 발생하는 것으로 판단된다. 공동이 없는 경우에서부터 가로세로 1 m의 정사각형 공동이 이격거리 3.1368 m 떨어진 경우까지 7단계에 걸친 해석을 수행한 결과 이격거리가 멀어질수록 변위값이 공동이 없는 경우에 수렴하는 것을 알 수 있다. 공동이 터널과 1 m 이내로 근접하여 있는 경우는 천단부의 경우 46%, 저면부의 경우 82% 변위의 증가가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 공동이 터널로부터 멀어질수록 근접해 있는 경우 동적응답의 감소정도가 현저하므로 어느정도의 거리를 유지한다면 터널 주변의 공동이 터널의 동적안정성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 그러나 공진이 발생하는 주파수대가 40-50 Hz 주변에 위치하고 있으므로 열차진동의 진동수 범위와 일치할 경우 큰 위험을 초래할 수도 있을 것으로 판단된다. 따라서 공동에 의한 터널의 동적영향에 대한 좀 더 자세한 고찰을 위해서는 공동의 크기효과 및 실제 속도

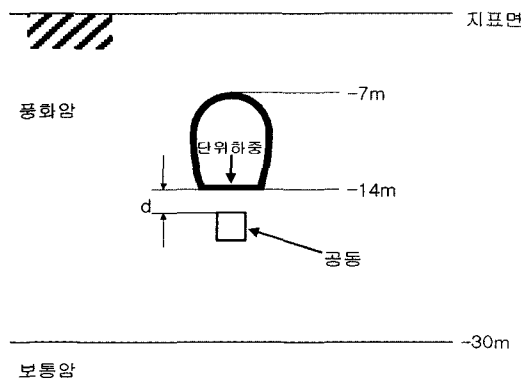


Fig. 6. Analysis for Tunnel and Cavity.

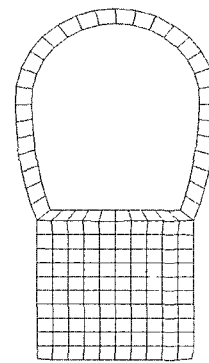


Fig. 7. Numerical Model for Analysis.

Table 1. Material Properties for Analysis.

종류	깊이(m)	전단파속도(m/s)	밀도(kg/m ³)	탄성계수(MPa)	포아송비	감쇠비
풍화암	0 - 30	400	1,900	790	0.3	0.02
보통암	30 - ∞	935	2,400	5,460	0.3	0.02
콘크리트라이닝		1,000	2,500	6,500	0.3	0.02

별 열차하중을 재하하여 그 응답을 분석해 보는 것이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 경계요소 해석을 이용하여 외부영역을 모형화하고, 유한요소 해석을 이용하여 내부 영역을 모형화하며 외부영역과 내부영역의 경계에서 이를 조합하여 암반상에서의 터널의 동적응답해석을 수행할 수 있는 해석기법을 제안하였다. 본 해석기법을 석회암층의 마제형 터널에 적용하여 주변부에 발생 예상할 수 있는 석회동굴 또는 폐광 등에 의한 공동의 영향을 고려한 동적해석을 수행하였고 해석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 연구에서 사용한 경계요소 해석방법의 타당성과 정확성을 검증하기 위해 Ricker 파형을 이용한 지반 진동 해석을 실시하였다. 해석대상은 단층 및 다층 균질반무한 구조계로서 기존의 연구결과와 비교하여 본 연구의 타당성을 검증할 수 있었다.
- 2) 본 연구에서는 경계요소-유한요소 조합 해석법을 이용하여 가상의 마제형 터널에 대한 동적해석을 수행하였다. 해석결과 공동이 터널과 1 m 이내로 근접하여 있는 경우는 공동이 없는 경우에 비해 천단부에서 46%, 저면부에서 82%의 변위 증가가 발생하는 것을 알 수 있었다. 그러나 공동과의 이격거리가 증가할수록 공동이 없는 경우의 응답에 수렴하는 경향을 보이는 것을 알 수 있었다. 따라서 규모가 작은 공동의 경우 터널의 동적응답에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 좀 더 실제적인 결과를 얻기 위해서는 실제 철도진동을 고려한 해석을 통한 응답을 검토해 보는 것이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Bettess, P., Infinite Elements, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.11, 53-64, 1977.
2. Bettess, P., *Infinite Elements*, Panshaw Press, U.K. 1992.
3. Choi, J.S., Yun, C.B. and Kim, J.M., Earthquake response analysis of the Hualien soil-structure interaction system based on updated soil properties using forced vibration test data, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.30, No.1, 1-26, 2001.
4. Hartmann, F., Introduction to Boundary Elements; Theory and Applications, Springer-Verlag, 1989.
5. Itasca Consulting Group, *FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.3*. Minneapolis, MN: ITASCA Consulting Group, Inc. 1996.
6. Kim, J.M., Choi, J.S. and Lee, J.S., A practical method for time-domain analysis of non-linear soil-structure interaction problem, *Proceedings of 10th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Philadelphia, PA, USA, Oct 7-10, 2001.
7. Kim, Moon Kyum., Lim, Yun Mook, and Rhee, Jong Woo, Dynamic Analysis of Layered Half Planes by Coupled Finite and Boundary Elements, *Engineering Structures*, Vol.22, No.6, 670-680, 2000.
8. Kirzhner, F. and Rosenhouse, G., Numerical Analysis of Tunnel Dynamic Response to Earth Motion, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.15, No.3, 249-258, 2000.
9. Kumar, P., Infinite Elements for Numerical Analysis of Underground Excavations, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.15, No.1, 117-134, 2000.
10. Von Estorf, O., Pais, A.L. and Kausel, E., Some Observation on Time Domain and Frequency Domain Boundary Elements, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.29, 785-800, 1990.1.
11. Wolf, J.P., *Dynamic Soil-Structure-Interaction*, Prentice-Hall, 1985.
12. 김문겸, 이종우, 이필규, 김민규, 점근해를 이용한 동적 2차원 다층 반무한 경계요소, 대한 토목학회 논문집, 제 18권, 제I-5호, 625-636, 1998. 9.
13. 이종우, 다층반무한 평면의 동적기본해를 이용한 지반-구조물 상호작용계의 경계요소해석, 연세대학교 대학원 박사학위논문, 1998.
14. 조선일보, 1998년 7월 7일.

김민규

1994년 연세대학교 토목공학과 공학사
1996년 연세대학교 토목공학과 공학석사
2002년 연세대학교 토목공학과 공학박사

Tel: 031-419-7201

E-mail: minkyu@hanyang.ac.kr

현재 한양대학교 토목환경공학과 박사후
과정, 공학박사

이종우

1989년 연세대학교 토목공학과 공학사
1991년 연세대학교 토목공학과
공학석사
1998년 연세대학교 토목공학과
공학박사

Tel: 031-910-4092

E-mail: jongwoo@kistec.or.kr

현재 한국시설안전기술공단 기술1본부
차장, 공학박사

이종세

1981년 연세대학교 토목공학과 공학사
1983년 Univ. of Pennsylvania 공학석사
1988년 Princeton University 공학박사
1988.7 - 94.6 미국 Clarkson 대학 토목·
환경공학과 조교수
1994.7 - 96.6 미국 Clarkson 대학 토목·
환경공학과 부교수
1995.7-2000.8 한양대학교 공학대학
토목·환경공학과 부교수
Tel: 031-400-5146

E-mail: jonglee@hanyang.ac.kr

한양대학교 토목환경공학과 교수,
공학박사