

터널 라이닝내부에서 전파되는 탄성응력파를 이용한 수치해석적 비파괴검사

Numerical Analysis of NDT Using Elastic Stress Waves in Concrete Lining

김 문 겸*
Kim, Moon-Kyum

이 재 영**
Lee, Jae-Yung

요 지

지하구조물의 건전성을 평가하기 위한 비파괴시험으로써 탄성응력파를 이용한 충격반향탐사법을 수치해석적인 방법을 통하여 수행하였다. 즉, 일면만으로 접근 가능한 터널 면에서의 충격가진과 동적응답의 측정으로 이질면을 포함한 내부의 상태를 예측할 수 있다. 연구의 수행은 탄성거동을 하는 매질 내부에서 전파되는 탄성응력파의 특성을 이해하고, 이를 동적 유한요소해석으로 모형화하여 충격반향탐사법을 수치해석적으로 수행한다. 이질재료가 2개의 층을 이루고 있는 경우 표면층의 두께를 쉽게 측정할 수 있었으며, 구조물의 병진운동, 회전운동과 구조물 내에서 다중반사되는 탄성응력파에 의한 복합적인 영향을 받는 터널과 같은 원통형 구조물에서 동적응답의 주파수 특성으로부터 터널라이닝 내부에 형성된 공동의 위치와 크기의 예측이 가능하였다. 수치해석적인 방법과 병행하여 다양한 형태의 경계조건을 가지는 구조물에 대한 충격반향탐사법의 실험을 수행할 경우 실제적인 문제에 적용, 건전성 평가의 지표를 마련할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 비파괴시험, 탄성응력파, 충격반향법, 지하구조물, 주파수해석

Abstract

As a method of Non-Destructive Test(NDT) to evaluate soundness of underground structures, Impact-Echo(IE) test using elastic stress wave propagation is simulated numerically. Impact and picking up the dynamic signal on concrete lining make it possible to predict the conditions behind the lining including heterogeneous surface. The characteristics of stress waves in the elastic media are reviewed and the numerical analysis of NDT is simulated by dynamic finite element analysis. From the results of numerical IE test, the thickness of surface layer in 2-layered heterogeneous material plates is calculated easily. The frequency analysis of the dynamic responses of the cylindrical structure, like a tunnel, which is affected by complex factors (translation, bending motion of the structure and the influence by multi-reflected stress waves) leads to know the presence of internal flaw. In the case of executing experimental and numerical test on the structures with various boundary conditions, it is possible to apply IE test to actual problems and to estimate the states of a structures.

Keywords : non-destructive test, elastic stress wave, impact-echo method, underground structure, frequency analysis

* 정회원·연세대학교 공과대학 토목공학과, 교수
** 정회원·연세대학교 공과대학 토목공학과, 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 1998년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1999년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

지하구조물에 대한 지금까지의 안전 진단은 주로 구조해석에 의한 설계검토 및 외관조사를 위주로 시행되어 왔다. 그러나, 최근 들어 전반적인 구조물에 대한 안전성에 의문이 제기되면서 이제까지의 시공위주의 기술 개발에서 구조물의 유지관리에 대한 기술 개발로 관심이 전환됨에 따라 터널 구조물의 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있는 결함, 특히 구조물과 지반사이에 존재하는 공동에 대한 탐지 및 보수 문제가 중요한 문제로 부각되고 있다. 이러한 공동은 최근의 고속철도의 터널 구간과 같이 터널 자체의 단면이 커지고 장대화됨에 따라 공동에 의한 터널 구조물의 파괴 위험성도 증가하고 있다. 따라서 현장에 적용가능한 공동탐사 방법에 대한 연구 및 개발이 시급히 요구되고 있는 실정이다.

터널의 시공 중 시공불량으로 인하여 터널 지보재와 인접지반 또는, 암반 사이에 발생하는 공동은 그 주변에서 연화영역을 생성하게 되고 이로 인한 지반 강성의 감소를 초래하게 된다. 이로 인하여 구조물과 지반의 접촉불량으로 인한 구조적인 결함이 발생하여 터널 지보재에 국부적으로 과도한 하중이 가해질 수도 있으며 시간 경과에 따른 공동확대에 따라 지반침하 등에 의하여 터널 구조물 전체에 걸친 균열 파괴 등이 초래될 수도 있다. 따라서 이러한 터널주변의 공동을 초기에 발견하여 보강 등의 대책을 수립하기 위한 많은 연구와 시도들이 실행되고 있는 실정이다.

일반적으로 지하구조물에 대한 공동탐사의 방법으로는 충격파(impulsive wave)탐사, 탄성파(elastic wave)탐사, 레이더 탐사방법 등을 사용하고 있다.¹⁾ 이러한 방법들은 각각의 장단점을 가지고 있으며, 특히 충격파 반향파의 측정을 이용한 방법이 지하구조물에 적절히 사용될 수 있다고 평가되어²⁾ 본 연구에서는 충격파탐사를 지하구조물에 적용한다.

충격파를 이용한 구조물의 결함판정방법은 system identification 방법에서는 평가하기 힘든

복잡한 다자유도계의 실제 구조물에 대한 효과적인 비파괴검사 방법이 될 수 있다. 한편, 이러한 비파괴검사 방법의 개발과 기술축적을 통하여 터널 구조물뿐만 아니라 고층 건물, 교량 아스팔트 포장 등 토목 구조물 전 분야에 대해 적용될 수 있는 비파괴검사법을 개발하여 구조물의 손상 및 결함을 탐지하고 나아가 구조물의 동특성 파악에 활용하여 구조물의 정확한 해석 및 설계에 응용될 수 있을 것이라고 사료된다.

본 연구는 충격탄성파를 이용한 충격반향탐사법을 현장에서 적용할 수 있도록 하기 위하여 수치해석적인 방법을 통하여 터널과 같은 지하구조물에서 탄성응력파가 전파되고, 반사되는 특성을 파악하고, 실험을 통하여 그 결과를 검증하고자 한다. 본 논문은 탄성응력파의 전파특성을 유한요소해석을 통하여 수치해석적인 방법으로 알아본다. 또한 터널과 같이 지중에 매설된 구조물에서 충격하중에 의한 탄성응력파의 전파특성과 그에 따른 동적응답을 얻어 구조물의 결함상태를 예측할 수 있도록 한다.

2. 탄성응력파를 이용한 비파괴검사

탄성거동을 하는 매질에서 전파되는 탄성응력파(elastic stress wave)의 특성을 이용하여 매질 내부의 상태를 예측하는 방법으로 충격반향탐사법과 표면파탐사방법이 있다. 이러한 방법들을 이용하여 대상매체의 동탄성계수를 추정하고, 이러한 값과 관계가 있는 압축강도를 추정할 수 있다. 특히, 충격반향탐사법은 대상매체 내부에서 탄성응력파의 전파경로가 바뀌게 되는 이질면, 또는 공동 등의 영향을 감지하여 매체내부의 상태를 예측할 수 있는 방법이다.

2.1 충격반향탐사법

충격반향탐사법(Impact-Echo Method)은 최근에 많은 분야에서 사용되고 있는 구조물의 비파괴검사법이다.³⁾ 이 방법은 구조물에 응력파를 발생시켜 그 응답을 분석하여 결함을 탐지하는 방법이다. 응력파는 충격해머 또는 기타의 충격

가진력을 일으킬 수 있는 장비에 의하여 발생된다. 그림 1은 충격반향탐사법의 개요를 나타낸 것이다. 충격에 의하여 대상구조물의 표면에 발생한 응력파는 압축파(compressional wave, P파)와 전단파(shear wave, S파), 그리고 표면파(surface wave, R파)의 형태로 매질 내와 매질 표면으로 전파된다. 이러한 파들은 자유면과 물성이 다른 매질의 경계면, 그리고 충분한 크기를 가지는 내부 불연속면에서 반사가 이루어진다. 반사된 파들은 다시 가진표면으로 전파되고 이 표면에 도달한 파들은 또다시 반사되어 매질 내로 전파된다. 이렇게 표면과 내부결함 사이 또는 표면과 외부경계면 사이에서 다중반사(multiple reflection)가 일어나면서 일시적인 공진이 일어난다. 예를 들어, 판과 같이 양면에 경계를 가지는 물체에서는 두 자유면 사이에서 앞뒤로 파가 이동하면서 공진을 일으키며 다중반사가 이루어진다. 판의 표면에 위치한 변환기(transducer)를 사용하여 각각의 반사파가 판의 바닥으로부터 표면에 도달하면서 발생시키는 변위를 측정한다.

그림 2는 콘크리트 매스에 충격을 가한 후 근접한 수신점에서 연직변위를 측정한 예이다. 이러한 시간이력곡선은 R파와 다중반사된 P파와 S파, 그리고 모드 전환에 의해 발생한 파 등으로 이루어진다. 그림 2와 같이 복잡한 시간이력곡선

은 각 파의 특성에 따라 영향을 받은, 특정 주기를 가지는 sine, 또는 cosine 곡선의 합으로 이루어져 있다. 따라서 푸리에(Fourier) 변환을 통하여 특성주파수의 영향강도를 산출할 수 있다. 그림 3은 그림 2의 시간이력곡선을 푸리에 변환을 통하여 주파수 스펙트럼으로 변환한 것이다. 이러한 주파수 스펙트럼에서의 각각의 첨두(peak) 신호에 해당하는 주파수는 각 파의 지배적인 주기를 나타낸다.

충격반향탐사법에서 주로 분석하는 대상은 여

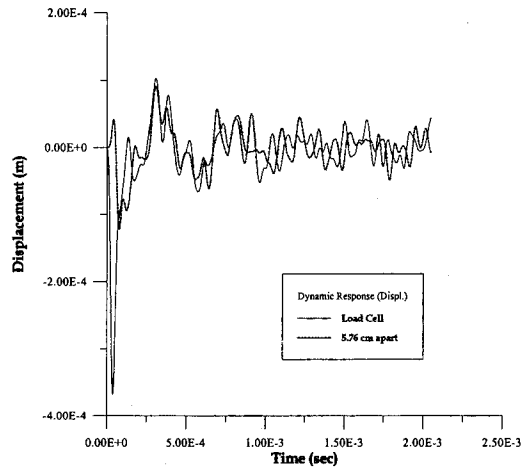


그림 2 시간에 따른 표면에서의 동적응답

FFT 해석기

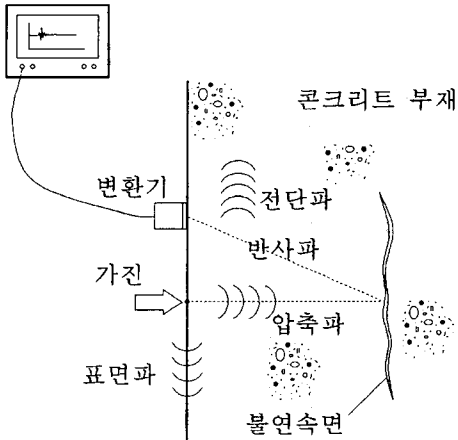


그림 1 충격반향탐사법

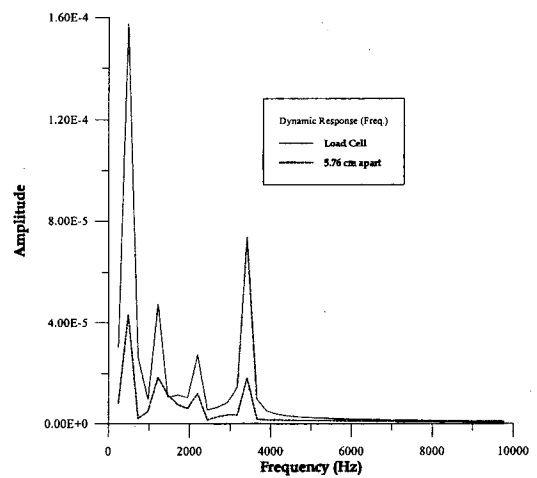


그림 3 푸리에변환에 의한 주파수스펙트럼

러 반사파 중 P파이다. 충격반향탐사법에서 P파를 탐지에 주로 이용하는 이유는 P파에 의한 변위가 S파에 의한 변위보다 훨씬 큰 값을 가지기 때문이다.⁴⁾ 변환기가 가진점에 가깝게 위치된 경우, P파와 S파의 발산 특성에 의하여 P파의 변위가 변위응답에서 지배적으로 나타나게 된다. 대상 매질에 대한 P파의 전파속도 C_p 를 알고 있는 경우, 다음 식에 의하여 반사면의 깊이 T 를 결정할 수 있다.

$$T = \frac{C_p}{2f_p} \quad (1)$$

여기서, f_p 는 반사된 P파의 주파수이며, C_p 는 매질 내에서 전파되는 P파의 속도이다.

식 (1)에서와 같이 충격반향탐사법을 수행하기 위해서는 대상매체의 P파 속도를 미리 알고 있어야 한다. 시험부재 또는 구조물의 결함이 없는 부분에서 그 두께를 아는 경우 P파의 속도는 바닥부분에서 반사되는 P파의 주파수를 구하여 식 (1)에 대입하여 구할 수 있다.

반사면의 깊이를 결정하기 위해서는 시간영역에서 얻어지는 파형으로부터 P파 성분을 구별해내야 한다. 충격가진시에는 초기에 진폭이 큰 표면파가 발생하여 파형에서의 초기부분을 가리게 된다. 따라서 P파의 도달을 정확하게 구별하기 위해서는 가진점과 수신점 사이의 거리를 최소화 함으로써 표면파 신호와 반사파 신호 사이의 시간간격을 증가시키고 대상구조체에 대하여 횡방향으로 충분한 거리를 주어 횡방향 경계면으로부터 반사된 표면파가 반사파에 대한 응답을 가리지 않도록 해야 한다.

충격반향탐사법의 구성은 가진장비, 변환기, 그리고 FFT(Fast Fourier Transform) 해석이 가능한 신호처리기로 이루어진다. 이 방법에서 주로 고려하는 주파수 범위는 500Hz~50kHz이므로 센서와 해석기는 시험에 적절한 대역과 분해능을 가진 것을 사용한다.

2.2 신호측정 장비의 사양

충격반향탐사법 수행을 위한 장비는 충격을 받

생할 수 있는 장치, 충격해머(impact hammer) 또는 쇠공형식(ball type)의 가진장치와 응력파가 구조물에 발생시킨 변위 또는 가속도를 측정하기 위한 변위계 또는 가속도계, 충격량과 변위계 또는 가속도계에서 받아들인 신호를 분석, 저장할 수 있는 신호처리기(data aquisition system)로 구성된다.

2.2.1 충격해머

구조물에 탄성응력파를 발생시키는 장비로서, 고려해야 할 자료는 충격량과 충격의 지속시간이다. 수치해석에 사용된 충격은 그림 4와 같이 반파장의 정현파 형태를 가지는 시간에 대한 함수를 사용한다. 이러한 충격함수는 탄성충격으로부터 결정되는 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁵⁾

$$F = F_{max} \sin \pi \frac{t}{t_c} \quad 0 \leq t \leq t_c \quad (2)$$

여기서 F_{max} 는 충격이 가해지는 동안의 최대하중을 나타내며, t_c 는 충격의 지속시간이다.

2.2.2 가속도계

콘크리트 라이닝 두께를 고려하면 라이닝의 두

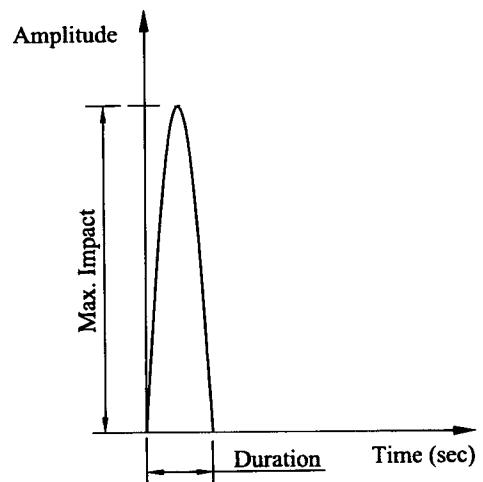


그림 4 정현파형태의 충격함수

계 또는 내부의 공동을 탐지할 수 있는 주파수의 범위는 대략 10~40kHz 범위 내이다.

2. 2. 3 신호처리기

충격파에 의한 변위의 신호가 변위계 또는, 가속도계를 통하여 측정되면 이러한 신호들을 받아들여 저장하고, 이를 FFT 기법을 통하여 주파수 영역에서의 응답으로 변환시켜주는 역할을 한다.

3. 동적유한요소해석

탄성파의 전달에 따른 구조물 표면에서의 응답을 얻기 위하여 유한요소해석을 이용하여 모형화하였다. 유한요소해석을 수행하기 위하여 구조물을 평면변형률의 상태로 가정하며, 시간에 따른 변위응답을 얻기 위하여 시간단계의 진행에 따라 가친의 함수를 입력할 수 있고, 각 시간단계의 응답을 매 전 단계의 변위로 구할 수 있는 명시적 시간적분법(Explicit Time Integration Scheme)⁶⁾을 사용하였다. 각 시간단계의 변위를 구하는 방법은 다음과 같이 중앙차분 근사법을 이용하였다.

3. 1 중앙차분 근사법

각 시간단계 t_n 에서 구조물의 평형방정식 $[P]_n - [f_{Bi}]_n + [f_{Fi}]_n + [f_{Di}]_n - [f_{Ti}]_n = 0$ 을 행렬의 형태로 쓰면 다음과 같다.

$$M d_n + C d_n + p_n = f_n \quad (3)$$

여기서 M 과 C 는 각각 구조계 전체의 중량과 감쇠를 나타내는 행렬이다. p_n 은 내부저항절점력(internal resisting nodal forces) 벡터이며, f_n 은 외부에서 가해진 물체력 또는 표면력에 해당하는 절점력(nodal forces) 벡터이다. d_n, \dot{d}_n 은 각각 시간 t_n 에서 절점의 가속도와 속도를 나타내는 벡터이다. 식 (3)을 유한차분 표현을 이용하여 가속도와 속도의 항을 변위의 항으로 바꿔줄 수 있다.

중앙차분 근사법을 사용하면 가속도는 다음과 같이 변위의 항으로 나타낼 수 있다.

$$d_n \cong a_n = \frac{1}{(\Delta t)^2} \{d_{n+1} - 2d_n + d_{n-1}\} \quad (4)$$

여기서 a_n 은 가속도이고, $d_{n-1}, d_n,$ 과 d_{n+1} 은 각각 시간단계 t_{n-1}, t_n, t_{n+1} 인 경우의 변위를 나타내고 있다. 또한 Δt 는 각 시간단계의 시간변화량, 즉 시간증분을 나타낸다. 동일한 방법에 의하여 속도를 변위의 항으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{d}_n \cong v_n = \frac{1}{2\Delta t} \{d_{n+1} - d_{n-1}\} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 식 (3)에 대입하면 식 (6)으로 표현되는 평형방정식을 얻을 수 있다.

$$M \left\{ \frac{d_{n-1} - 2d_n + d_{n+1}}{(\Delta t)^2} \right\} + C \left\{ \frac{d_{n-1} - d_{n+1}}{2\Delta t} \right\} + p_n = f_n \quad (6)$$

식 (6)을 정리하여 시간 $t_n - \Delta t$ 와 t_n 에서 알고 있는 변위 d_{n-1}, d_n 으로부터 시간 $t_n + \Delta t$ 에서의 변위 d_{n+1} 을 직접적으로 구할 수 있다.

$$d_{n+1} = \left[M + \frac{\Delta t}{2} C \right]^{-1} \times \{ (\Delta t)^2 [-p_n + f_n] + 2M d_n - [M - 0.5\Delta t C] d_{n-1} \} \quad (7)$$

3. 2 초기조건 계산

두 개의 시간단계 $t_n - \Delta t$ 와 t_n 의 변위를 포함하고 있는 중앙차분법에 의한 지배평형방정식은 해석이 시작되는 $t_n = 0$ 시점에서는 특별한 적용방법이 필요하다. 즉 초기조건으로 주어져야 할 $d(0 - \Delta t)$ 가 주어져야 한다. 식 (5)로부터 이러한 상태를 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d(0) \cong v(0) = \frac{1}{2\Delta t} \{d(0 + \Delta t) - d(0 - \Delta t)\} \quad (8)$$

식 (8)을 정리하여 다음과 같은 초기조건을 얻을 수 있다.

$$d(0-\Delta t) = -2\Delta t v(0) + d(0+\Delta t) \quad (9)$$

이와 같이 구한 초기조건식을 식 (7)에 대입함으로써 초기상태를 나타낼 수 있다.

3.3 내부저항절점력

충격하중의 발생으로 구조물에 변위가 발생하면 시간의 경과와 함께 탄성체의 복원력이 발생하게 된다. 이러한 복원력은 유한요소해석에서 내부저항절점력으로 정의되는 항으로 산정할 수 있다. 즉, 각 시간단계 n 에서 식 (7)에 따라 요소의 절점변형율을 변위의 항으로 직접 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = [B]u \quad (10)$$

여기서, ϵ 는 요소절점의 변형율 벡터이며, u 는 요소절점의 변위벡터이다. $[B]$ 는 변위와 변형율의 관계를 정의하는 적합조건을 나타내는 행렬이다.

절점의 변형율과 요소내 발생된 응력으로부터 다음과 같이 내부저항력을 산정할 수 있다.

$$P_n = \int_{\Omega} [B]^T \sigma_n d\Omega \quad (11)$$

여기서, P_n 은 시간단계 n 에서의 내부저항력 벡터이며, σ_n 는 시간단계 n 에서의 요소 내 가우스점 (Gauss point)에서의 응력 벡터이다.

3.4 파의 반사를 막기 위한 경계조건

반무한지반에 따른 파의 발산효과를 얻기 위하여 모형화된 전체구조계의 경계면은 감쇠기를 설치하여 경계면에서 발생하게 되는 파의 반사를 제거하였다. 즉, 식 (3)의 평형방정식에서 경계면 절점에 해당하는 감쇠항을 상대적으로 큰 값을 사용하였다.

4. 수치해석적 충격반향탐사법

수치해석적인 방법으로 충격반향탐사법을 수행하기 위하여 대상구조물을 유한요소로 모형화하고, 그림 3과 같은 충격함수를 대상구조물 중

앙에 적용하였다. 충격하중에 의한 동적응답은 충격이 가해진 점에 인접한 점에서의 연직성분의 변위를 측정하였다. 충격함수의 지속시간은 광역 주파수발생을 위하여 30×10^{-6} 초로 하였으며, 최대충격량은 충격해머에 의한 값을 사용하여 4,000N으로 가정하였다. 참고로 쇄공형식의 가진기를 사용할 경우 최대 충격량은 쇄공의 직경이 16mm인 경우 1,388N의 가진력을 얻을 수 있다.³⁾ 동적응답의 측정시간은 해석시간단계와 샘플링 (sampling) 개수에 의하여 결정된다. 본 해석에서는 해석시간단계를 1.0×10^{-6} 초이며, 샘플링개수는 FFT를 수행하기 위하여 2²개에 해당하는 4,096개로 하였다. 따라서 측정시간은 전체 0.004096초가 된다.

4.1 경계조건의 고려

본 연구를 통하여 개발한 유한요소해석프로그램 IMPES (IMPact Echo Simulator)의 결과와 범용프로그램으로 사용되고 있는 유한차분해석프로그램인 FLAC을 이용한 동적응답의 결과(7)를 비교하였다. 탄성응력파의 반사영향을 배제하기 위하여 FLAC에서는 상당히 큰 영역 (100m×200m)에 대하여 동적응답을 얻었으며, IMPES에서는 경계절점에서 응력파의 흡수역할을 하는 감쇠기를 둬으로써 작은 영역 (200cm×20cm)을 이산화하고도 동일한 효과를 얻을 수 있었다. 그림 5는 가진점에서 5.76cm떨어진 위치에서 수직변위를 측정된 것으로 두 가지 경우에서 큰 차이를 보이지 않는다. 단, 작은 모형의 경우에 있어 탄성응력파가 대상하부의 경계면에서 반사되어 수진점에 도달하는 시간인 5,200μsec 후부터는 무한지반의 영향을 고려하지 못함에 따라 감쇠기의 역할에 따라 약간의 차이를 보이고 있다. 하지만, 그림 6과 같이 시간에 대한 두 동적응답을 푸리에변환을 통하여 주파수에 대한 동적응답으로 변환할 경우, 2kHz 이하의 낮은 주파수 대역에서만 응답이 검출되며, 두 응답의 차이가 나타나지 않는다. 반사파에 의한 10kHz 이상의 주파수 대역에서는 두 경우 모두 응답이 검출되지 않아 경계조건에 의한 반사의 영향을 무시할 수 있다.

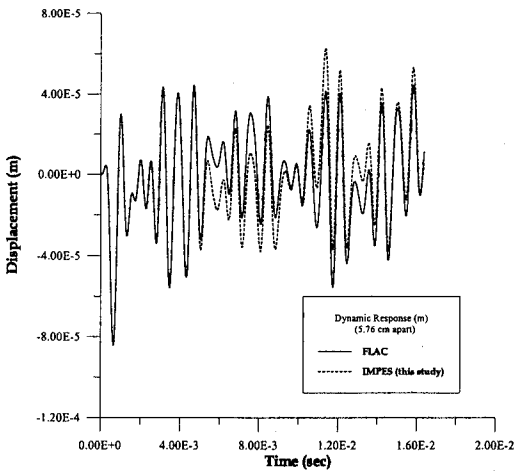


그림 5 FLAC과 IMPES의 시간에 대한 동적응답

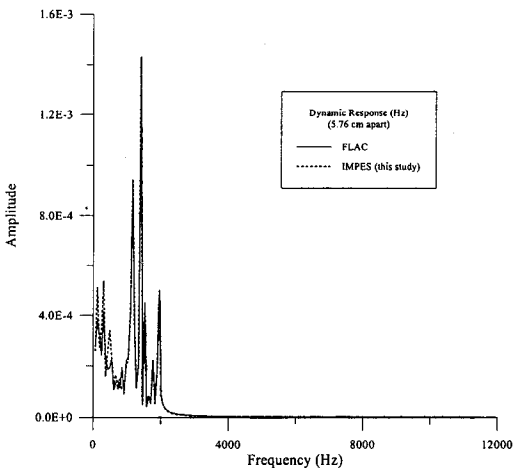


그림 6 FLAC과 IMPES의 주파수에 대한 동적응답

4.2 적층판모형

그림 7은 적층판에 대한 충격반향탐사법을 수치 해석적으로 적용하기 위한 모형이다. 적층판은 두 가지의 이질적인 재료가 평행하게 부착되어 있다고 가정한다. 상층의 재료와 하층의 재료는 서로 다른 탄성계수를 가지는 경우로, 이러한 탄성계수의 차이에 따라 두 재료는 임피던스의 차이를 나타내게 되며, 매질의 임피던스 차이에 따라 응력파의 전파 특성이 바뀌게 된다.⁸⁾

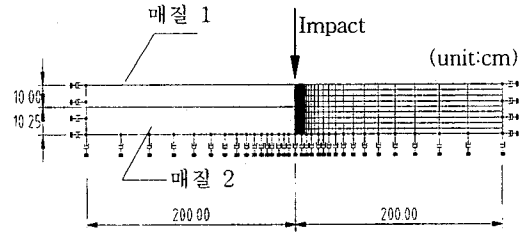


그림 7 적층판 모형

적층판에서의 충격반향탐사법을 수행하기 위하여 적층판 중심에 충격합수를 적용하고 충격을 가한 점에서 3.17cm떨어진 표면에서 연직성분의 변위를 측정하였다.

적층판에서의 탄성응력파의 전달특성은 두 재료의 임피던스 차이 값에 따라 다음과 같이 두 가지 상태에서 다른 변화를 보인다.⁴⁾ 첫 번째는 콘크리트 라이닝이 상대적으로 임피던스의 값이 낮은 지반과 자유면 사이에 존재하는 상태이며, 두 번째는 상대적으로 임피던스의 값이 높은 암반과 자유면 사이에 존재하는 상태이다. 동일한 두께를 가지는 콘크리트 라이닝에서 접촉하고 있는 재료가 지반인 경우와 암반인 경우에 탄성응력파의 전파특성 때문에 수신점에서 얻어지는 응답이 바뀌게 된다. 지반과 접촉하고 있는 경우 접촉면에서 응력파의 위상 변화가 없지만 암반과 접촉하고 있는 경우 높은 임피던스의 암반에 의하여 응력파의 위상이 바뀌게 되어 표면사이에서 다중반사되는 응력파의 전파거리가 2배가 된다. 수치해석적 모형실험에 사용된 재료의 물성치는 표 1과 같다.

4.2.1 콘크리트와 지반이 적층판을 이룰 경우

적층판 상부의 콘크리트는 판과 같은 형태이며, 하층의 지반은 경계조건에 감쇠기를 설치하여 파의

표 1 모형구성재료의 물성치⁹⁾

재료	탄성계수	포아송비	단위중량	임피던스
단위	GPa	-	kg/m ³	kg/m ² s
콘크리트 라이닝	33.1	0.2	2,300	9.2×106
지반	1.0	0.3	1,800	1.6×106
암반	70.0	0.3	2,900	15.0×106

반사가 일어나지 않도록 함으로써 반무한인 지반의 영향을 고려하고자 하였다.

그림 8은 적층판 중심에 충격함수를 적용하고 충격을 가한 점에서 5.76cm떨어진 표면에서 연직성분의 변위를 시간의 변화에 따라 도시한 것이다. 그림에서 콘크리트와 지반 적층판의 경우와 콘크리트와 암반적층판의 경우를 함께 도시하였다. 콘크리트와 지반이 적층판을 이루는 경우 콘크리트 판의 휨변형이 상대적으로 크기 때문에 보다 큰 변형이 발생하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 시간에 대한 변위곡선으로부터 FFT를 수행하여 변위곡선에 영향을 미친 주파수를 계산하여 그림 9와 같이 도시하였다. 콘크리트와 지반이 적층판을 이루는 경우 콘크리트 내부에서 다중반사되는 파에 의한 응력파의 영향이 20.08kHz에 발생되었다. 콘크리트 라이닝의 물성으로부터 계산된 P파의 속도는 4,000m/sec이며, 두께 10cm를 식(1)에 대입하면 20kHz의 공진 주파수를 얻게 된다. 또한 콘크리트 판의 휨변형에 의한 진동 영향에 따라 98.88Hz의 낮은 주파수에서 침두주파수가 동시에 일어나고 있다.

4. 2. 2 콘크리트와 암반이 적층판을 이룰 경우

그림 8에서와 같이 콘크리트와 암반이 적층판을 이룰 경우 상대적으로 작은 변위가 발생한다. 이를

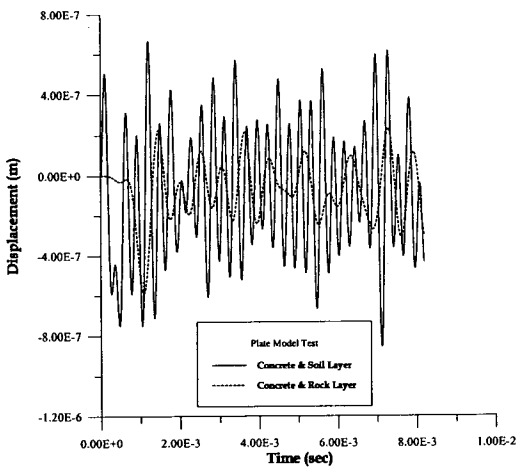


그림 8 적층판 모형에서의 변위이력곡선

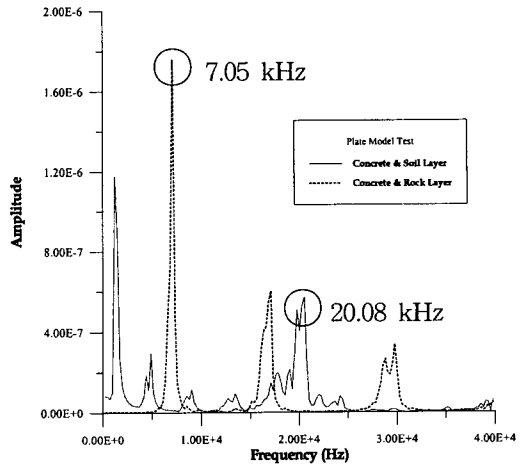


그림 9 적층판 모형에서의 주파수 응답

FFT 변화에 따라 주파수의 영향을 나타내면, 콘크리트 내부에서 응력파의 전파거리가 콘크리트와 지반이 적층판을 이루는 경우에 비하여 2배⁹⁾로 늘어남으로써 공진주파수는 반으로 감소한다. 따라서 이론적으로 10kHz에서 침두주파수 응답이 발생하게 되며, 본 모형실험에서는 그림에서와 같이 7.05kHz에서 침두주파수의 영향이 나타나게 된다.

4. 3 원통형구조 모형

터널구조물에서의 탄성응력파의 전파특성을 이해하기 위하여 그림 10과 같이 터널구조를 원

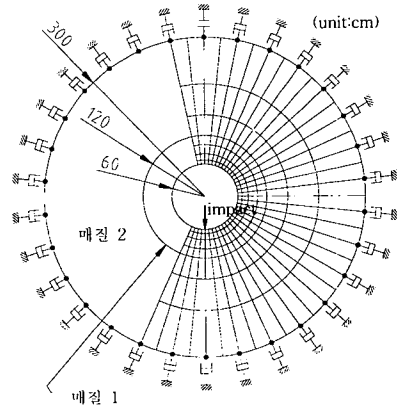


그림 10 원통형 모형

통형구조로 모형화하여 충격반향탐사법을 수행하였다. 적층판모형에서의 경우와 마찬가지로 동일한 두께를 가지는 원통형 콘크리트 라이닝 구조물이 지반 또는, 암반에 둘러싸인 상태를 모형화하였으며, 배면의 공동이 발생된 형태에 따라 변화되는 동적응답을 비교·검토하였다.

주변에 둘러싸인 지반의 조건과 공동의 형성 형태에 따라 그림 11, 표 2와 같이 4가지 모형 상태에서의 동적응답을 측정하였다.

그림 12에서부터 그림 15까지는 각 경우별로 시간에 따른 변위를 A, B, C점에서 측정하여 도시한 것이다. A와 C점에서는 수직방향의, B점에서는 수평방향의 변위를 측정하였다. 그림 16에서부터 그림 19까지는 각 경우에서의 변위를 FFT 변환하여 주파수형태의 응답으로 나타낸 것이다.

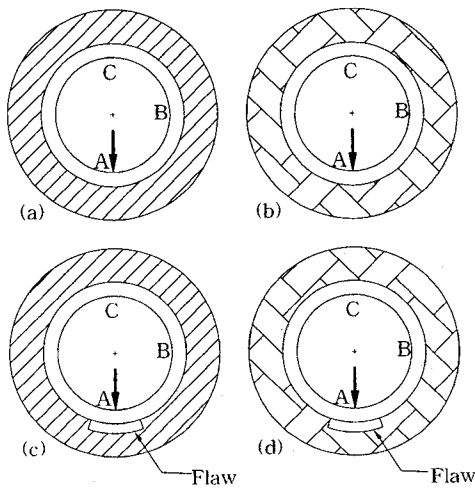


그림 11 원통형 모형의 단면설정

표 2 원통형 모형의 실험조건

CASE	Boundary Condition
CASE I (a)	지반이 주변을 둘러싸고 있는 경우
CASE II (b)	암반이 주변을 둘러싸고 있는 경우
CASE III (c)	CASE I + 배면공동이 있는 경우
CASE IV (d)	CASE II + 배면공동이 있는 경우

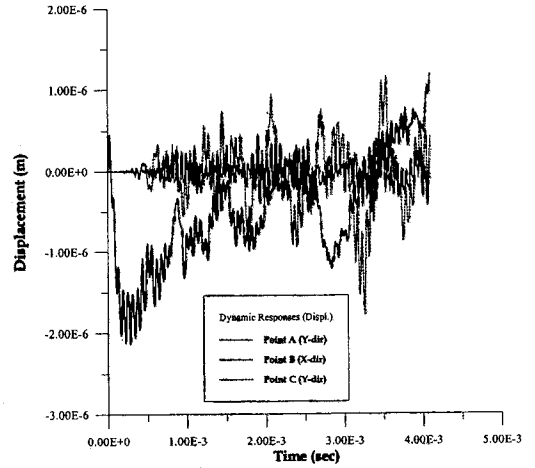


그림 12 Case I 의 시간에 대한 변위응답

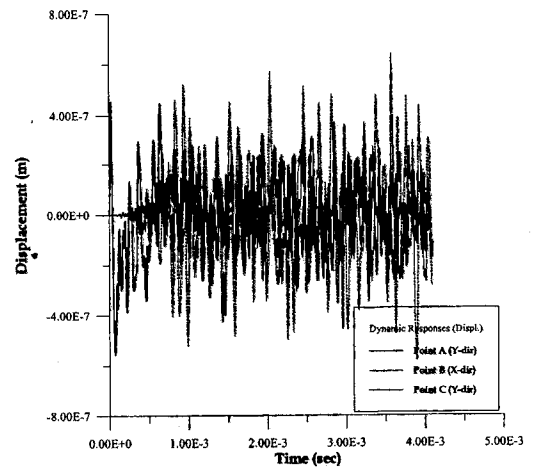


그림 13 Case II 의 시간에 대한 변위응답

4. 3. 1 CASE I 과 CASE II

CASE I 과 CASE II 의 결과는 적층판에서의 결과와 마찬가지로 지반으로 둘러싸인 경우에 비하여 암반으로 둘러싸인 경우 상대적으로 작은 변형이 일어나고 있다.

또한 주파수 응답에서의 결과에서도 CASE I 의 경우 20kHz 부근에서 침두주파수가 발생하며, 원통형구조물의 진동특성에 따라 낮은 주파수에서 침두주파수가 함께 발생하고 있다. CASE II

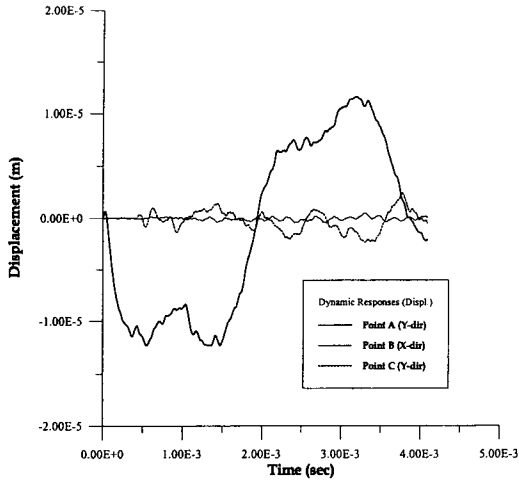


그림 14 Case III 의 시간에 대한 변위응답

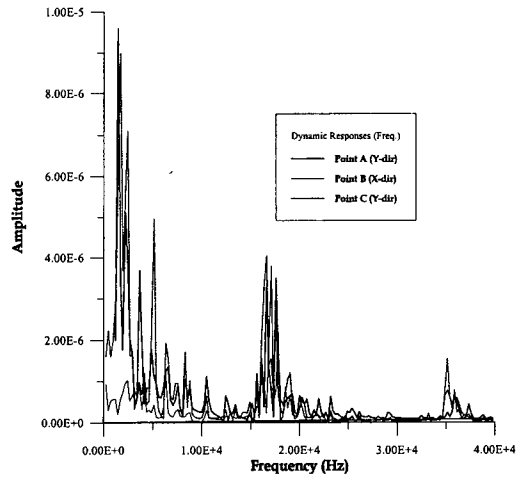


그림 16 Case I 의 주파수에 대한 변위응답

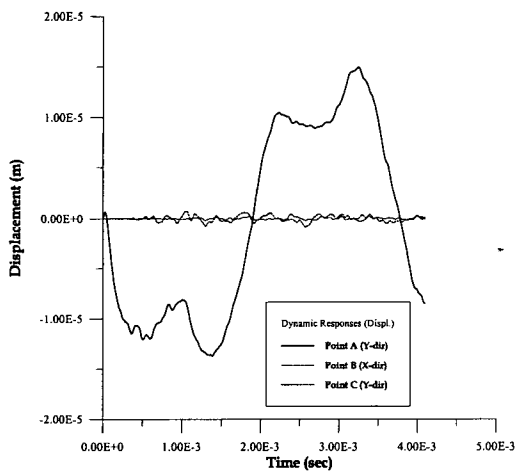


그림 15 Case IV 의 시간에 대한 변위응답

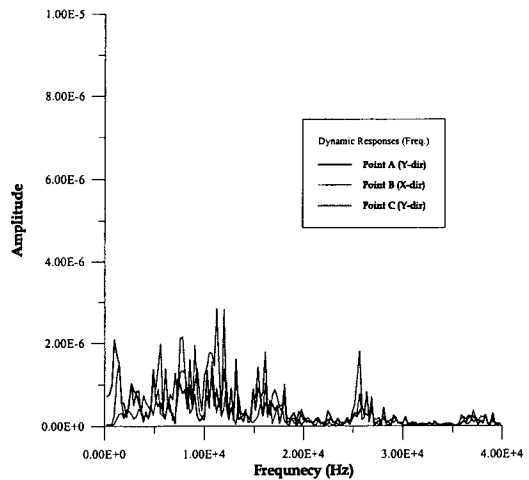


그림 15 Case IV 의 시간에 대한 변위응답

의 경우 뚜렷한 침투신호는 발생하지 않으나 가장 큰 침투신호를 가지는 주파수는 10kHz 부근에서 발생하고 있다.

4. 3. 2 CASE III와 CASE IV

배면공동이 형성된 단면에서의 모형실험의 결과는 배면공동이 없는 경우에 비하여 시간에 대한 동적응답에서 큰 차이를 나타내고 있다. 공동이 형성된 측정점 A에서의 변위가 B, C 측정점에서

의 변위에 비하여 상당히 큰 것을 알 수 있다.

CASE III와 CASE IV에서 모두 공동형성에 의한 휨변형이 증가함에 따라 응력파의 공진에 의한 변위의 영향이 상대적으로 감소하여 콘크리트 라이닝 두께의 영향이 나타나지 않는다.

5. 결 론

이질면을 갖는 탄성매질내에서 전파되는 탄성

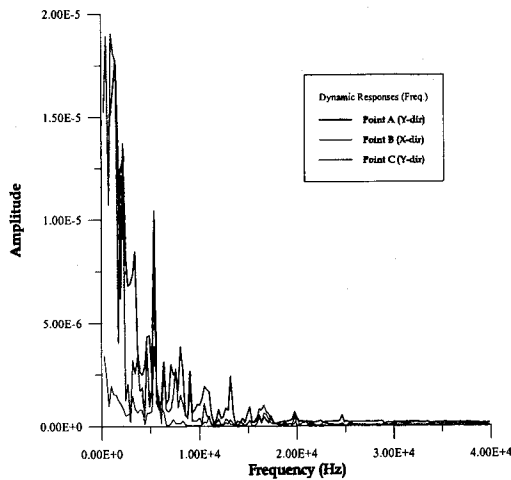


그림 18 Case III 의 주파수에 대한 변위응답

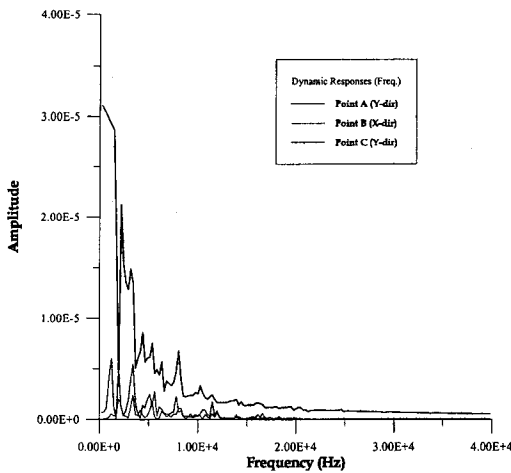


그림 19 Case IV 의 주파수에 대한 변위응답

응력파의 전파특성을 나타내기 위하여 동적유한 요소해석을 사용하여 수치해석적인 모형실험을 수행하였으며, 수치해석적 충격반향탐사법을 터널구조형식의 모형에 대하여 적용하고 그 결과에 대한 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이질면을 갖는 적층판내부에서 전파되는 탄성응력파가 다중반사됨에 따라 표면변위에 영향을 미치는 영향을 푸리에변환을 통하여 수치해석적으로 나타낼 수 있다.

2) 콘크리트 라이닝이 지반 또는 암반과 같이 이질재료에 둘러싸인 경우 콘크리트 라이닝 내부에서 전파되는 응력파의 위상변화 등에 따른 전파특성을 규명할 수 있다. 즉, 이질재료의 임피던스차이에 의한 이질면과의 경계면에서 파의 반사특성이 바뀌게 되어 주파수 형태의 동적응답이 변화됨을 알 수 있다.

3) 배면에 공동이 존재하는 지하구조물 표면에서의 동적응답은 라이닝 배면이 건전한 단면에서의 동적응답과 비교하여 수치해석의 결과와 같이 큰 차이를 나타내고 있다. 이러한 동적응답의 변화를 분석함으로써 비파괴적으로 지하구조물 배면의 상태를 예측할 수 있고, 이로부터 지하구조물에 대한 건전도평가의 지표를 마련할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 '96 핵심전문과제(961-1203-013-2)의 일부분이며, 재단의 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Haack, A., Schreyer, J., and Jackel, G., "State-of-the-Art of Non-destructive Testing Methods for Determining the State of a Tunnel Lining," *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 10, No. 4, 1995, pp. 413~431.
2. 김문걸, 이재영, 김용규, "주변암반과의 상호 거동 해석을 통한 지하구조물의 진동특성에 관한 연구", 한국소음진동공학회 춘계 학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, 1997. 5., pp. 229~234.
3. Sansalone, M., and Carino, N.J., *Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves*, Vol. II, NBSIR 86-3452, U.S. Department of Commerce, 1986.

4. Carino, N. J., Sansalone, M., and Hsu, N. N., "Flaw Detection in Concrete by Frequency Spectrum Analysis of Impact-Echo Waveforms," *International Advances in Nondestructive Testing*, 12th Editions, McGonnalgle, W.J., Ed., Gordon & Breach Publishers, New York, 1986, pp.117~146.
5. *Mechanical Vibration and Shock Measurements*, Br el & Kj r, Denmark, 1984, pp.256~257.
6. Owen, D. R. J., and Hinton, E., *Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice*, Pineridge Press, U.K. 1980.
7. 김문겸, 이재영, "동적응답 파형분석을 이용한 터널구조물 내부의 비파괴탐사에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집 (II), 대한토목학회, 1997, pp.385~388.
8. Carino, N. J., and Sansalone, M., "Finite Element Studies of the Impact-Echo Response of the Layered Plates Containing Flaws," *International Advances in Nondestructive Testing*, 15th Editions, McGonnalgle, W.J., Gordon & Breach Publishers, New York, 1990, pp.313~336.
9. Lin, J.-M., and Sansalone, M., "Impact-Echo Response of Hollow Cylindrical Concrete Structures Surrounded by Soil and Rock: Part I - Numerical Studies," *Geotechnical Testing Journal*, American Society for Testing and Materials, 1994, pp.207~219.
(접수일자 : 1998. 3. 19)