

# 충격반향기법을 이용한 암반근입 현장타설말뚝의 선단조건 평가

## Assessment of End Condition of Drilled Shafts Socketed into Rock by Impact Echo Test

김 형 우\*<sup>1</sup> Kim, Hyung-Woo  
김 동 수\*<sup>2</sup> Kim, Dong-Soo  
김 원 철\*<sup>3</sup> Kim, Won-Cheol

### Abstract

Small and full scale model tests were performed to obtain the transient responses of shafts subjected to elastic impact by impact-echo test. Four end conditions of drilled shafts were considered: (1) free, (2) fixed, (3) rock-socketed, and (4) soft bottom. In small scale model tests, mock-up shafts were fabricated to simulate these four drilled shafts using poly-urethane and plastic material. Additionally, skin frictions between shaft and rock were changed to find out the effect of side contact on dynamic responses. All impact responses were tested in the air. Subsequently, full scale model tests were also carried out on concrete shafts that were in free and rock-socketed condition. The end conditions of the drilled shafts could be identified with good reliability by the waveforms from both small and full scale model tests. The results obtained in this study will provide an improved understanding of the impact responses for end conditions, especially for rock-socketed drilled shafts that are frequently designed and built in Korea.

### 요 지

말뚝 선단 조건에 따른 충격반향기법의 시간영역 신호를 실내 모형실험에 의하여 분석하였다. 선단조건으로는 자유단, 고정단, 암반 근입, 연약 선단부의 네 가지 조건을 고려하였으며, 이를 위하여 폴리우레탄 재질의 모형말뚝과 모노캐스트 재질의 모형암반을 제작하여 실험을 수행하였다. 실내실험 결과 각각의 경계조건에 대한 신호의 특성을 파악할 수 있었으며, 말뚝 선단 조건뿐만 아니라 말뚝과 주변 암반과의 부착상태도 추정할 수 있는 가능성을 확인하였다. 또한 실내 모형실험의 결과를 검증하기 위하여 현장실험을 수행하였으며, 암반 근입 말뚝에 대한 신호 분석 결과 충격반향기법에 의한 현장타설말뚝의 비파괴 진단도 평가는 적용성이 충분히 있는 것으로 파악되었다.

**Keywords :** Drilled shaft, End condition, Impact-echo test, Non-destructive test, Rock-socketed

### 1. 서 론

현재 국내에서 시공되는 토목, 건축 구조물의 기초 형식으로 현장타설 콘크리트 말뚝이 널리 적용되고 있다. 현장타설 콘크리트 말뚝은 직경이 크고 소수의 말

뚝이 상부 구조물 전체를 지지하는 형식으로 시공되어 하나의 말뚝이 구조물의 하중을 지지하는데 큰 비중을 차지한다(건설교통부, 1997; 건설교통부, 1996). 말뚝 내의 결함은 말뚝의 변형 및 파손을 유발하고, 상부 구조물의 안전에 치명적인 영향을 미치게 된다(FHWA).

\*1 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, KAIST, Dept. of Civil and Environmental Engrg., PhD. Student)

\*2 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, KAIST, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Prof., dskim@kaist.ac.kr)

\*3 정희원, 한양대학교 강사 (Member, Hanyang Univ., Dept. of Civil Engrg., Lecturer)

과거의 대형 교량의 붕괴 사고 원인이 교량 하부기초의 결함으로 밝혀짐에 따라 기존 토목 구조물, 특히 현장타설 말뚝기초의 유지관리 및 안정성 확보가 중요한 과제로 부각되고 있다. 따라서 말뚝 기초의 구조적 결함이나 주변 지반과의 지지 및 접촉 상태를 파악할 수 있는 결함 조사방법에 대한 관심이 기울여지고 있으며, 이에 대한 보다 효율적인 방법의 검토가 이루어지고 있다.

우리 나라는 대부분의 현장타설 말뚝이 풍화암 또는 연암에 근입되어 시공되는데(건설교통부, 1996), 이때 말뚝 선단 바닥에 슬라임과 같은 연약층이 존재하는지, 또는 말뚝 선단 주변부가 암반과 충분히 접촉되어 있는지 등의 정보를 알아낼 필요가 있다. 왜냐하면 슬라임과 같은 연약층, 또는 말뚝 선단 주변부와 암반 사이의 불완전한 부착상태 등은 말뚝의 선단지지력을 감소시키고, 침하량을 증가시키기 때문이다.

현장타설 말뚝의 선단조건 및 결함을 정확히 평가하기 위해서는 말뚝을 천공하여 그 내부상태를 확인하는 것이 가장 최선의 방법이지만(한국지반공학회, 1997; FHWA), 이 방법은 시간적, 경제적으로 비효율적이며 말뚝 구조물에 손상을 준다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 최근에는 시공된 구조물에 손상을 주지 않고 내부의 결함을 조사하는 비파괴 검사 기법이 각광을 받고 있다(Report of a Task Force, 2000).

현장타설 말뚝의 선단조건 및 결함 탐사를 위하여 현

재 사용되고 있는 비파괴 검사기법은 검측공 시험법(borehole seismic test)과 비검측공(non-borehole seismic test) 시험법으로 구분된다(목영진 등, 2000). 검측공 시험법은 비검측공 시험법에 비해 신호 분석이 용이하고 시험의 신뢰도가 높으나, 말뚝 내에 검측공을 설치해야 하는 단점이 있다. 이에 반해 비검측공 시험법은 말뚝 두부에서 간단한 시험 기구를 이용하여 수행되므로 많은 수의 말뚝에 대한 품질관리 등에 손쉽고 효율적으로 적용될 수 있으나, 신뢰도는 검측공 시험법에 비해 다소 떨어지는 것으로 알려져 있다(FHWA, 1993).

본 논문에서는 비검측공 시험법인 충격반향기법을 사용하여 현장타설 말뚝의 선단조건 및 결함 탐사에 대한 적용성을 검토하였다. 선단조건으로는 자유단, 고정단, 암반 근입, 연약 선단부의 네 가지 조건을 고려하였으며, 이를 위하여 폴리우레탄 재질의 모형말뚝과 모노캐스트 재질의 모형암반을 제작하여 실내 모형실험을 수행하였다(Kim, 2000b). 또한 실내 모형실험의 결과를 검증하기 위하여 실대형 크기의 현장타설 콘크리트 말뚝에 대한 현장실험을 실시하였다.

## 2. 봉(rod)에서의 종파(Longitudinal Wave)의 전파

그림 1에 제시된 바와 같이 단면적이  $A$ 이고, Young's modulus가  $E$ 이며, 단위중량이  $\gamma$  인 봉(rod)의 자유진동

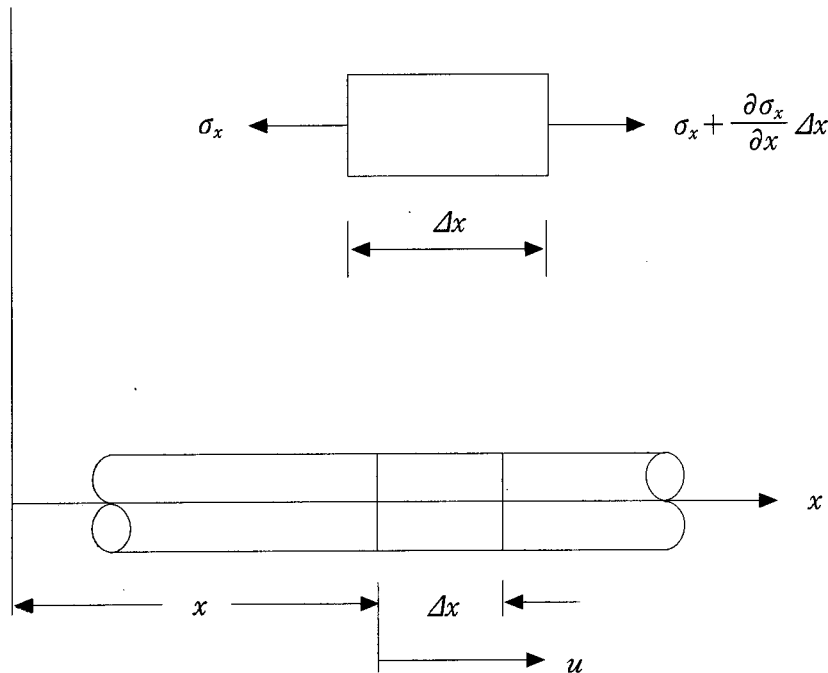


그림 1. 봉에서의 종방향 진동(Richert, 1970)

을 고려해보기로 한다. 각각의 단면적은 운동하는 동안에 평면을 유지하며, 응력은 단면적에 대하여 균일하다고 가정하면, 운동방정식은 다음의 방법으로 직접 얻을 수 있다(Braja, 1993; Richart, 1970).

$x$ 의 직각 방향 평면에 작용하는 응력은  $\sigma_x$ 이고,  $(x+\Delta x)$ 의 직각방향 평면에 작용하는 응력은  $[\sigma_x + (\partial\sigma_x/\partial x)\Delta x]$ 이다.  $x$  방향의 힘의 합은 다음 식과 같다.

$$-\sigma_x A + (\sigma_x + \frac{\partial\sigma_x}{\partial x} \Delta x) A = F$$

만일,  $x$ 방향의 요소의 변위를  $u$ 라고 하면, Newton의 제 2 법칙에 의해 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\sigma_x A + \sigma_x A + \frac{\partial\sigma_x}{\partial x} \Delta x A = \Delta x A \frac{\gamma}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\text{즉, } \frac{\partial\sigma_x}{\partial x} = \frac{\gamma}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

$x$  방향의 변위는  $\partial u/\partial x$ 이며, 변위에 대한 응력비는 Young's modulus를 의미하므로,  $\sigma_x = E \frac{\partial u}{\partial x}$ , 그리고,  $\frac{\partial\sigma_x}{\partial x} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ , 밀도( $\rho$ )는  $\rho = \gamma/g$ 이므로 (1)식은  $E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$  이 되며 이를 다시 쓰면 다음 식 (2)와 같이 된다.

$$\text{즉, } \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } v_c^2 = \frac{E}{\rho}$$

이때 이  $v_c$ 는 봉에서의 위상속도(phase velocity) 또는 종파전파속도(longitudinal wave propagation velocity)라 한다(Richart, 1970).

그림 2(a)는 봉 끝 부분에서의 응력을 나타낸 것이고, 그림 2(b)는 봉의 매우 작은 부분에서 시간  $t_n$ 과 압축응력  $\sigma_x$ 을 나타낸 것이다. 시간  $t_n$ 동안 압축력이 봉으로 전달되는데, 봉의 한 부분에서 또 다른 부분으로 파가 전달될 때의 속도를 파 속도(wave velocity,  $v_c$ )라고 하며, 입자의 속도(particle velocity,  $\dot{u}$ )와는 구별된다(Richart, 1970).

$\Delta t$  시간동안 압축응력이 이동한 거리는  $\Delta x = v_c \Delta t$ 이며,  $t_n$  이후의 시간에서  $x_n = v_c t_n$  길이 만큼 압축부분으로 구성되므로 다음 식 (3)이 성립한다.

$$u = \frac{\sigma_x}{E} x_n = \frac{\sigma_x}{E} v_c t_n \quad (3)$$

입자의 속도  $\dot{u}$ 는 (4)와 같이 봉의 파 속도, 강성도, 그리고 응력의 크기에 따라 변화하며, 응력의 크기와 입자의 속도는 비례관계가 성립한다.

$$\dot{u} = \frac{u}{t_n} = \frac{\sigma_x v_c}{E} \quad (4)$$

압축응력일 때 파의 속도와 입자의 속도는 같은 방향의 속도성분을 가지고, 인장응력일 때는 반대 방향의 속도성분을 갖는다. 또한 입자의 속도는 응력에 의존하지만 파의 속도는 재료의 특성에 의존한다. 한편, 자유단에서 압축파(compression wave)는 동일한 크기와 형상을

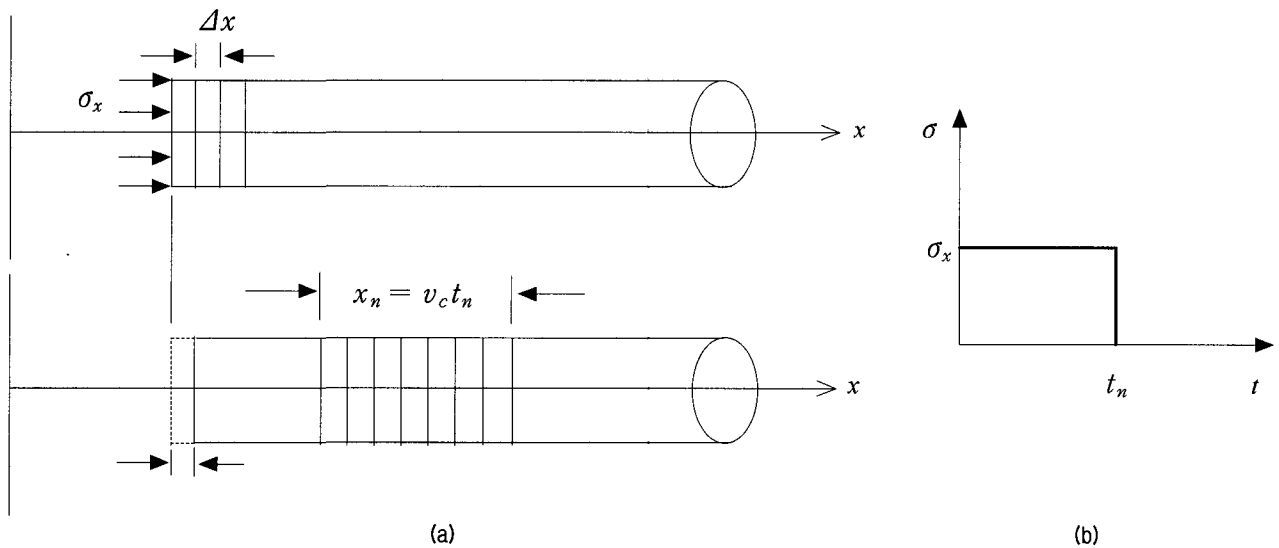


그림 2. 파의 속도와 입자의 속도(Richart, 1970)

갖는 인장파(tension wave)로 반사되며, 인장파는 동일한 크기와 형상을 갖는 압축파로 반사된다. 하지만, 고정단에서는 자유단에서와 달리 압축파는 동일한 크기와 형상을 갖는 압축파로, 인장파는 동일한 크기와 형상을 갖는 인장파로 반사된다(Braja, 1993; Richart, 1970). 이러한 파의 전파 특성은 말뚝의 선단조건 뿐만 아니라 말뚝 내부의 결함을 탐지할 수 있게 해주며, 충격반향기법의 시간영역 신호를 분석하는데 이론적 근거를 제공해 준다.

### 3. 충격반향기법(Impact-Echo Method)

#### 3.1 개요

본 방법은 시험체의 표면에 충격을 가하여 발생된 체적파(body wave)가 불연속면이나 이질 매질층 간의 경계면에서 반사되어 표면으로 돌아온 파형을 검토했하여 구조체의 품질 판정, 두께 측정, 균열 및 공동 탐사 등에 적용하는 방법이다(Sansalone, 1997). 미국 표준국(National Bureau of Standards)의 Carino와 Sansalone팀에 의하여 지속적인 발전을 이룬 이 방법은 말뚝이나 피어와 같은 깊은 기초의 근입 깊이, 중간 파손 유무와 그 위치를 측정하는데 있어서 좋은 결과를 제공해 주며, 특히 말뚝의 경우에는 구조물의 길이가 길어서 주파수 영역이 아닌 시간 영역 상에서도 충분히 반사파의 도달 시간을 감지할 수 있다(Sansalone, 1991).

말뚝 표면에 기계적 충격(impact)을 가하면, 말뚝 내부로 전파되는 체적파(P, S파)와 말뚝 표면을 따라 전파되는 표면파(R파)가 발생하게 되는데, 이때 체적파는 균열, 공동과 같은 불연속체나 이질 매질층 간의 경계면을 만나면 반사되어 응력파가 발생한 표면으로 돌아온다. 표면에 도달한 파는 표면에서 반사되어 다시 말뚝 내부로 전파되며, 이 파는 다시 불연속층에서 반사된다. 이와 같이 표면과 균열, 공동과 같은 불연속체 사이, 또는 표면과 이질 매질층 사이의 다중 반사에 의한 공진 상태가 유발되는데 이때, 말뚝의 압축파 전파 속도를 알고 있다면 반사파의 도달 시간을 측정하여 말뚝 내부에 존재하는 불연속면의 위치를 알아낼 수 있다(Hsiao, 1999; Steinbach, 1975; Sansalone, 1997). 충격원(impact source)은 저주파(약 2kHz 미만)를 발생시킬 수 있는 해머 또는 강철구(steel ball)를 사용하며, 감지기는 가속도계 또는 속도계를 사용한다. 이 때 감지기의 신호를 신호조정기

(signal conditioner)로 증폭하여 동적신호분석기(dynamic signal analyzer)로 보낸 후 신호처리를 수행하게 된다 (Kim, 2000a; FHWA, 1993).

#### 3.2 신호처리

충격반향기법의 신호 처리는 시간 영역 해석과 주파수 영역 해석의 두 가지로 나누어 생각할 수 있다(Sansalone, 1997). 가늘고 긴 말뚝이나 피어 기초에는 충격파가 콘크리트 속으로 충분히 전달될 수 있도록 상대적으로 저주파의 파를 사용하는데, 이러한 파는 시험체 내의 반사체에 적당한 각도로 부딪치면 표면으로 돌아와 변위를 유발하며, 이러한 표면 변위를 시간 영역상에서 해석하여 말뚝의 선단조건 및 결함 등을 평가한다. 말뚝과 같은 구조물은 기하학적 구조의 특성상 전파되는 파의 에너지를 좁은 경로에 집중시키므로 표면에서의 파형 분석을 쉽게 한다. 또한 파의 발생원과 감지기 사이의 간격이 길기 때문에 반사파의 도착 시간을 시간 영역에서 비교적 정확하게 결정할 수 있다(Sansalone, 1991).

충격반향기법의 적용 시, 말뚝 선단의 경계조건은 크게 자유단-자유단과 자유단-고정단으로 구분할 수 있다. 자유단-자유단의 경계 조건은 말뚝 내부에 공동, 균열 등이 존재하거나, 또는 말뚝이 마찰말뚝과 같이 선단이 암반 내부에 근입되어 있지 않고 흙 속에 파묻혀 있는 상태를 말한다. 이러한 자유단-자유단 경계조건에서는 입력된 압축파가 자유단의 경계면을 반사할 때 인장파로 반사되어 돌아온다. 그리고 다시 자유단인 표면에서 인장파가 압축파로 바뀌어 매질 속으로 전파하게 되는데 이와 같이 자유단과 자유단 사이를 다중 반사하는 파의 시간영역의 신호를 그려보면 그림 3(a)와 같다. 이 때 이들 파를 구성하는 각 모드의 주파수는 다음 식으로부터 구할 수 있다(김동수 등, 1999; 목영진 등, 2000).

$$f_n = \frac{nV_p}{2L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

여기서,  $f_n$  : n번째 모드의 공진주파수

$V_p$  : P파의 속도

$L$  : 말뚝의 길이

말뚝에서의 P파 전파 속도를 알고 있을 때, 공동 또는 균열까지의 깊이 또는 말뚝의 길이  $L$ 은 다음 식에 의해

여 구할 수 있다(김동수 등, 1999; 목영진 등, 2000).

$$L = \frac{V_p}{2f_1} \quad (6)$$

한편, 자유단-고정단과 같은 경계 조건은 콘크리트 말뚝이 강성이 큰 암반 내부에 근입되어 있는 경우의 경계 조건이다. 이러한 경계 조건에서는 입력된 압축파가 위상을 바꾸지 않고 압축파로 반사하게 되는데, 그 이유는 일정한 강성을 가진 매질이 좁은 단면에서 넓은 단면으로 증가되는 효과를 갖기 때문이며(김동수 등, 1999; Kim, 1999), 다시 자유단인 표면에 도달해서는 압축파가 인장파로 바뀌게 된다. 이와 같이 다중 반사되는 파의 시간 영역의 신호는 그림 3(b)와 같고, 파형의 극성(polarity)이 달리 나타나게 된다. 그리고 다중 반사되는 파를 구성하는 각 모드들의 주파수는 다음 식과 같다(김동수 등, 1999; 목영진 등, 2000).

$$f_n = \frac{nV_p}{4L}, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (7)$$

말뚝에서의 P파 전파속도를 알고 있을 때, 공동 또는 균열까지의 깊이 또는 말뚝의 길이 L은 다음 식에 의하여 구할 수 있다(김동수 등, 1999; 목영진 등, 2000).

$$L = \frac{V_p}{4f_1} \quad (8)$$

식 (6)과 식 (8)을 사용하여 말뚝의 길이, 또는 결함의 위치를 찾아냄에 있어, 첫 번째 모드들의 공진 주파수만을 가지고는 우리가 얻은 최대 진폭 주파수가 말뚝의 표면

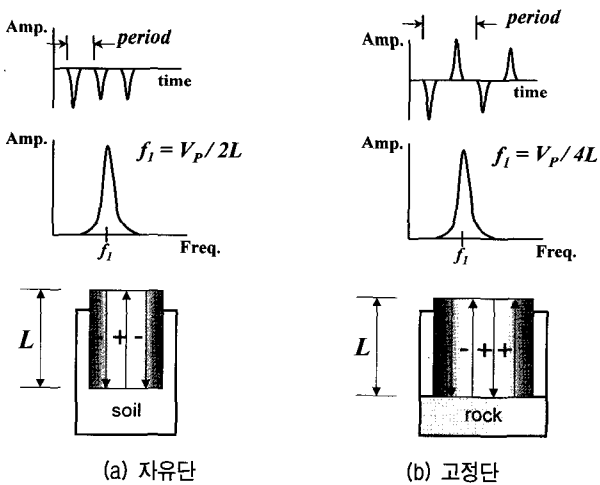


그림 3. 충격반향기법의 이상화된 시간영역 및 주파수영역 신호

과 공동 사이의 다중 반사에 의한 것인지 암반 표면과의 다중 반사에 의한 것인지 구별할 수 없다. 따라서 두 번째 모드들의 공진 주파수를 고려하여야 하는데, 식 (5)와 식 (7)에서 보는 바와 같이 공동과의 다중 반사에 의한 두 번째 모드들의 공진 주파수 값은 첫 번째 모드들의 공진 주파수의 두 배가 되며, 암반과의 다중 반사에 의한 두 번째 모드들의 공진 주파수 값은 첫 번째 모드들의 공진 주파수의 세 배가 된다. 따라서 주파수 영역의 신호인 파워 스펙트럼에서 두 번째 모드들의 공진 주파수 값이 첫 번째 모드들의 공진 주파수 값의 몇 배인가를 살펴보면, 매질 내부의 불연속면의 종류를 구별할 수 있다(김동수 등, 1999; 목영진 등, 2000; Kim, 2000a; Kim, 1999).

#### 4. 암반근입 현장타설말뚝의 비파괴 건전성 평가

현장타설 말뚝의 지지력은 주로 선단지지력에 의존하고 있을 뿐만 아니라 직경이 또한 크기 때문에 말뚝기초와 비교하면 주변 마찰력보다 선단지지력에 의존하는 비율이 크다. 그러므로 현장타설 말뚝기초는 확실하게 견고한 지반에 도달시키고, 또한 가능하다면 1.0m 이상 견고한 지반 속으로 관입시켜야 한다(건설교통부, 1997). 우리 나라에서 시공되고 있는 대부분의 현장타설 말뚝은 암반근입 말뚝으로서, 말뚝 선단이 암반 속으로 말뚝 직경의 약 1~2배 근입되도록 설계되고 있다(건설교통부, 1996). 말뚝 선단이 암반에 근입되어 있지 않고 단지 말뚝 주면의 마찰력으로만 지지되는 마찰말뚝에 대한 충격반향기법의 실험결과는 말뚝 선단이 암반 속에 근입되어 있는 선단지지형 말뚝에 대한 실험결과와 서로 다를 것으로 예상된다. 이는 암반에 근입되어 있거나 암반 위에 놓여 있는 말뚝의 경우 암반의 강성이 콘크리트와 비슷하거나 크지 않은 연암의 경우에도, 수평 방향으로 무한히 넓은 면적의 매질을 형성하므로, 말뚝보다 강성이 큰 고정면을 형성하게 되어, 자유단-고정단의 경계조건을 가지게 되기 때문이다(김동수 등, 1999).

말뚝의 선단조건에 따른 충격반향기법의 동적 거동 특성을 파악하기 위하여 본 연구에서는 선단조건을 자유단, 고정단, 암반 근입, 연약 선단부의 네 가지 조건으로 나누어 각각에 대한 모형말뚝을 제작하여 실내실험을 수행하였으며(Kim, 2000b), 또한 실내 모형실험의 결과를 검증하기 위하여 실대형 현장타설 콘크리트 말뚝에 대한 현장실험도 실시하였다.

#### 4.1 실내실험

말뚝과 암반을 실제와 유사하게 재현하고 실내에서 의미 있는 신호를 획득하기 위하여, 모형말뚝으로서는 파의 전파속도가 비교적 느린 우레탄 재질의 봉(직경 6cm, 길이 60cm)을 사용하였으며, 암반으로서는 파의 전파속도가 우레탄 보다 상대적으로 빠른 모노캐스트(Monocast) 재질의 원형 플레이트(직경 25cm, 높이 15cm)를 사용하였다. 자유단-자유단 공진주시험(Free Free Resonant Column Test) 결과 우레탄의 P파 속도는 470 m/sec로 측정되었고, 모노캐스트의 P파 속도는 1,883 m/sec로 측정되었으며(Kweon, 1998), 속도 차이를 비교해 볼 때, 이들 재질의 강성비가 말뚝과 암반의 강성비를 어느 정도 재현할 수 있다고 판단된다. 우레탄과 모노캐스트를 이용한 모형말뚝은 사진 1에 제시되어 있다.

일반적으로 현장타설말뚝의 선단 경계조건은 그림 4에 제시된 바와 같이 (1) 자유단(free), (2) 고정단(fixed), (3) 암반근입(rock-socketed), (4) 연약 선단(soft bottom)의 네 가지로 구분할 수 있다(전, 2000; Liao, 1994; Paolo, 1997). 첫 번째의 자유단 조건은 마찰말뚝에서 볼 수 있는 조건으로 선단부가 흙 속에 놓여 있는 상태이다. 두 번째의 고정단 조건은 말뚝의 선단이 암반에 근입되지 않고 암반 바로 위에 올려져 있는 선단지지 상태를 나타낸 것이다. 세 번째의 암반근입 조건은 말뚝 선단이 암반 속으로 말뚝 직경의 1~2배 근입되어 있는 상태이며, 마지막으로 네 번째 연약 선단 조건은 암반에 근입되어 있는 말뚝 선단에 슬러리와 같은 연약층이 존재할 때를 나타낸 것이다.

위의 네 가지 조건에 대한 파의 전파특성을 살펴보기 위하여 그림 5와 같이 실내 모형말뚝 실험을 실시하였

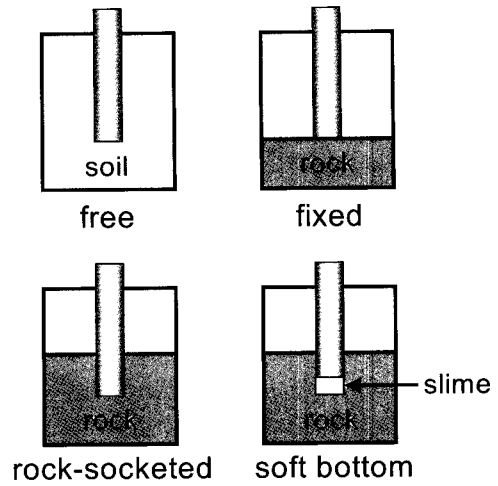


그림 4. 실제 말뚝의 선단 경계조건

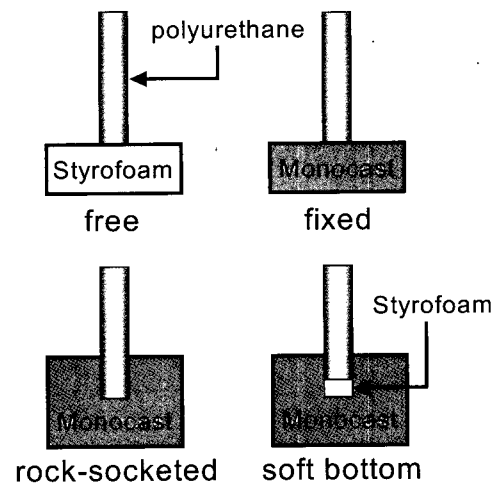


그림 5. 모형말뚝의 실험조건

다. 첫 번째의 자유단 조건을 모사하기 위하여 우레탄 모형말뚝을 스티로폼 위에 올려놓았으며, 두 번째의 고정단 조건은 우레탄 모형말뚝을 딱딱한 모노캐스트 플레이트 위에 올려놓아 실험을 실시하였다. 세 번째의 암반근입 조건은 모노캐스트에 모형말뚝의 직경인 6cm의 깊이로 천공을 한 후, 말뚝을 모노캐스트에 에폭시로 단단히 접착시켰다. 그리고 마지막 네 번째인 연약 선단 조건은 (1) 천공된 구멍 바닥에 스티로폼을 설치한 후, 모형말뚝을 에폭시로 접착시키지 않고 구멍에 끼워 넣은 경우와 (2) 천공된 구멍 바닥에 스티로폼을 설치한 후, 모형말뚝을 에폭시를 사용하여 구멍에 단단히 접착시킨 경우의 두 가지로 다시 구분하였다. 이렇게 구분한 이유는 실제 암반 근입 현장타설 말뚝의 선단 주면마찰(side friction)에 따라 말뚝과 암반과의 접촉상태(contact condition)가 달라지기 때문이다(Paolo, 1997). 위에서 설명한 각각의 모형말뚝 선단조건을 표 1에 정리하였다.

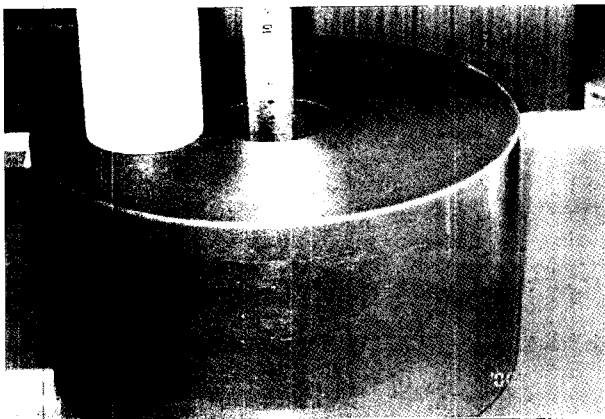


사진 1. 모형말뚝의 근입부

표 1. 모형 말뚝의 선단조건

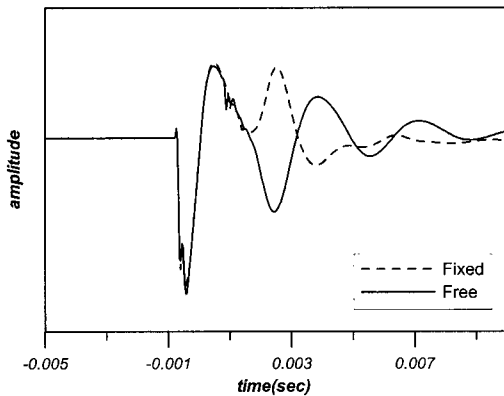
구분	조건	말뚝과 암반과의 부착상태
CASE 1	자유단(free)	-
CASE 2	고정단(fixed)	-
CASE 3	암반근입(rock-socketed)	양호
CASE 4	연약선단(soft bottom)	양호
CASE 5	연약선단(soft bottom)	보통

그림 6은 여러 가지 경계조건 하에 있는 모형말뚝 각각에 대한 실험 결과로서, 먼저 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 경계조건이 자유단(free)인 경우와 고정단(fixed)인 경우 반사 파형의 신호가 각각 하향 및 상향으로 확연히 구분되어 나타난다. 이것은 말뚝 머리에서 충격에 의해 발생한 압축파가 말뚝 선단의 자유단(free) 조건에서는 반사되면서 인장파로 극성(polarity)이 바뀌며, 고정단(fixed) 조건에서는 극성이 압축파로 바뀌기 때문이다.

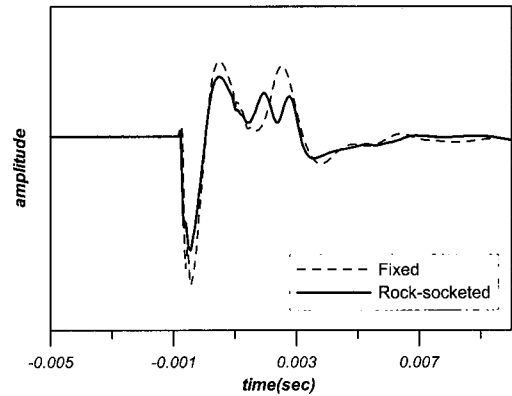
암반근입(rock socketed) 조건의 파형 신호는 그림 6(b)에 제시되어 있는 바와 같이 고정단(fixed) 조건과는 다르게 두 개의 봉우리 형태의 신호가 생기는데, 첫 번째의 봉우리 신호는 근입부에서 반사되는 신호이며, 두 번째

의 봉우리 신호는 말뚝 선단부에서 반사되는 신호라고 추정된다. 이와 같이 두 개의 봉우리 신호는 말뚝과 암반이 서로 완벽하게 접촉이 안되었기 때문에 발생하는 신호라 판단된다.

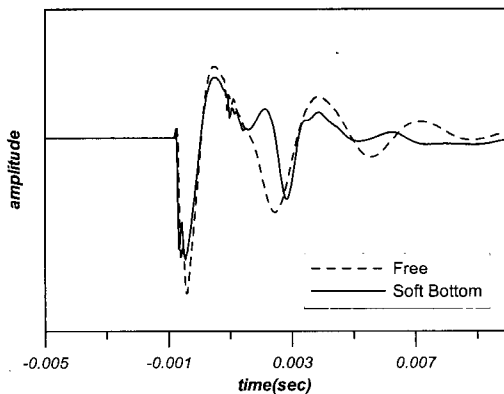
연약 선단 조건에 대한 실험결과는 그림 6(c) 및 그림 6(d)에 제시되어 있는데, 여기서 bond라고 표시되어 있는 연약 선단 조건은 우레탄 재질의 모형말뚝이 모노캐스트 모형암반에 에폭시로 완전히 접촉되어 있는 상태를 말하며, 이 경우 반사 파형이 고정단(fixed) 조건의 경우와 유사하게 나타났다. bond라고 표시되어 있지 않은 연약 선단 조건은 모형말뚝과 모형 암반이 에폭시로 접촉하지 않아서 모형말뚝의 두부에서 충격을 가하면 말뚝이 아래 방향으로 매우 작은 변위를 가지고 조금씩 이동할 수 있는 조건이다. 이 때의 반사 파형은 그림 6(c)에서 보는 바와 같이 일부 에너지는 말뚝 주면에서 약간 반사를 하여 고정단으로 작용하며, 나머지 에너지는 말뚝 선단에서 반사를 하여 자유단으로 작용하는 것으로 나타났다. 따라서 연약 선단 조건 말뚝이라 하더라도 말뚝의 주면과 암반과의 부착상태가 우수한 경우에



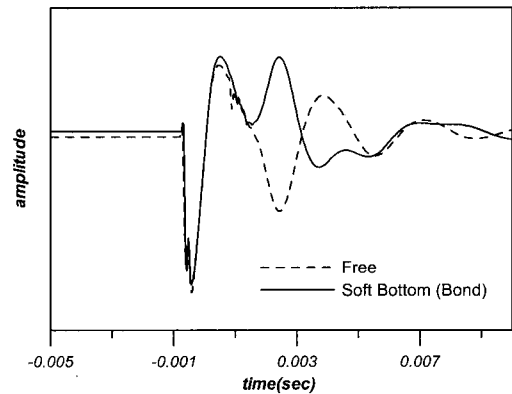
(a) 자유단(CASE 1) 및 고정단(CASE 2)



(b) 고정단(CASE 2) 및 암반근입(CASE 3)



(c) 자유단(CASE 1) 및 연약선단(CASE 5)



(d) 자유단(CASE 1) 및 연약선단(CASE 4)

그림 6. 여러 가지 경계조건에 대한 파형

는 모든 에너지가 경계면에서 반사하므로 파형이 고정 단 조건의 경우와 동일하여 연약층의 존재 여부를 탐지 할 수 없을 것으로 예상되며, 이와는 달리 말뚝의 주면과 암반과의 부착상태가 보통인 경우에는 반사 파형이 자유단 조건의 경우와 유사하므로 연약층을 탐지할 수 있을 것으로 예상된다.

## 4.2 현장실험

### 4.2.1 제 1 현장

#### 4.2.1.1 현장 개요

현장실험은 그림 7에 제시된 바와 같이 토사층 및 암반에 근입되어 있는 말뚝에 대하여 각각 수행되었다. 각 말뚝의 직경은 0.4m이며 말뚝의 길이 및 선단 경계 조건은 표 2에 정리되어 있다. 이중에서 선단부의 자유 단 경계조건을 재현하기 위하여 8번 말뚝 선단에는 Styrofoam을 설치하였다(전경수 등, 2000).

#### 4.2.1.2 충격반향기법 실험결과

8번 말뚝에 대한 충격반향기법 실험결과는 그림 8에 제시되어 있다. 이 말뚝은 마찰말뚝으로서 자유단의 조건을 가지므로 시간영역 신호의 극성이 동일함을 볼 수 있으며, 충격시점과 반사신호 사이의 시간차인 dt를 그

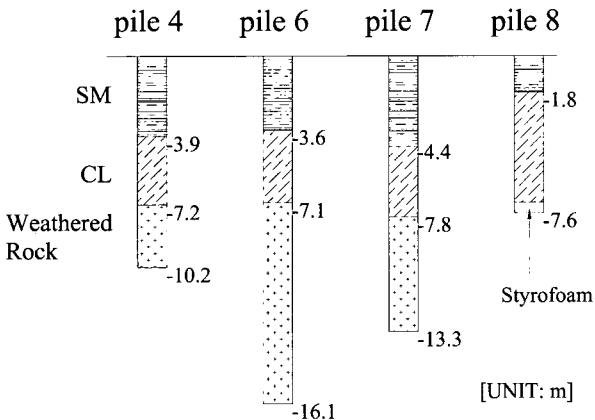


그림 7. 현장모형말뚝의 개요도(전경수 등, 2000)

표 2. 현장 말뚝 내역(전경수 등, 2000)

말뚝 번호	말뚝전체길이 (m)	풍화암 근입깊이 (m)	조건	비고
4	10.2	3	고정단	
6	16.1	9	고정단	
7	13.3	6	고정단	
8	7.6	soil	자유단	styrofoam

림에 표시하였다. 시간차 dt에 말뚝에서의 파의 전파속도를 곱해주면 말뚝의 길이를 산정할 수 있으며, 계산 결과는 7.0m로서 실제 마찰말뚝 길이인 7.6m와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

$$L = \frac{3.800 \times 0.003662}{2} = 7.0m$$

4번, 6번 및 7번 말뚝은 암반근입 말뚝으로서 풍화암의 근입깊이가 각각 3m, 9m, 6m인 말뚝이다. 그림 9에 제시되어 있는 4번 말뚝의 시간영역 신호를 살펴보면 두 개의 반사신호를 볼 수 있는데, 첫 번째의 signal 1이 토사층과 풍화암 경계부 사이의 반사신호이고, signal 2가 말뚝 선단부에서의 반사신호이다. 토사층과 풍화암 경계부 까지의 길이는 반사신호 사이의 시간차에다 파의 전파속도를 곱해주어 다음 식과 같이 길이를 산정하였는데, 이 경우는 실제 깊이인 7.2m와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

$$L = \frac{3800 \times 0.003998}{2} = 7.6m$$

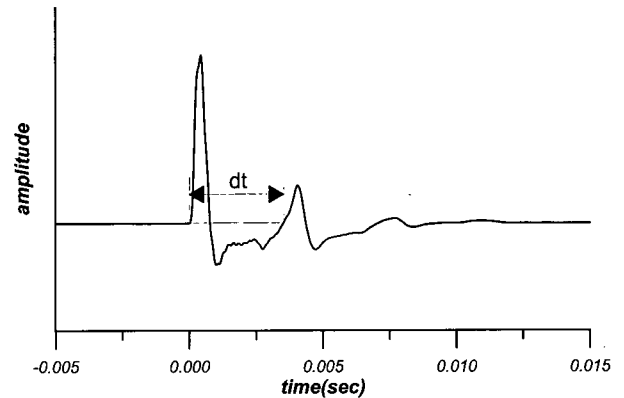


그림 8. 8번 말뚝(마찰말뚝)에 대한 시간영역 신호

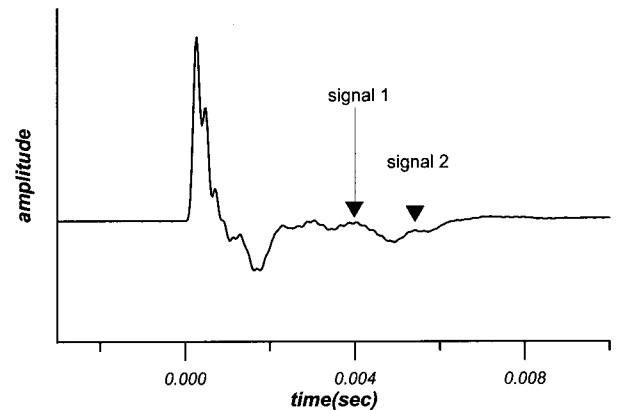


그림 9. 4번 말뚝(암반근입 말뚝)의 시간영역 신호



그리고 선단부에서의 반사신호 사이의 시간차를 구하여 산정한 말뚝 전체의 길이도 10.4m로서 실제 길이인 10.2m와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

$$L = \frac{3800 \times 0.005463}{2} = 10.4m$$

마찬가지로 6번 말뚝에 대한 시간영역 신호는 그림 10에 제시되어 있으며, 이 경우에는 얕은 깊이에서의 결합으로 추정되는 신호가 얻어졌다. 또한 signal 1은 토사층과 풍화암 경계면에서의 반사신호로 판단되며, signal 2는 말뚝 선단부에서의 반사신호로 판단된다. 토사층과 풍화암 경계부까지의 길이는 4.5m로 산정되었으며 실제 깊이인 7.1m와 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 그리고 말뚝 전체의 길이는 13.0m로서 실제 길이인 16.1m와 다소 차이가 있는 것으로 나타났는데, 이는 Liao와 Roesset이 제안한 충격반향기법 적용 한계인 말뚝의 길이 대 직경의 비 (L/D) 30을 초과하였기 때문인 것으로 판단된다(Liao, 1997).

마지막으로 7번 말뚝에 대한 시간영역 신호가 그림 11에 제시되어 있으며, 토사층과 풍화암 경계부에서 반

사되어 올라오는 신호(signal 1)로부터 경계부까지의 길이를 계산해보면 8.4m로서, 실제 깊이인 7.3m와 약간의 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 선단부에서의 반사신호(signal 2)로부터 산정한 말뚝 전체의 길이는 12.0m로서 실제 길이인 13.3m와는 약간의 차이가 있는 것으로 나타났다. 하지만 충격반향기법의 시간영역 신호를 분석하여 얻은 지금까지의 결과를 종합해 볼 때 말뚝의 길이, 그리고 토사층 및 암반 경계부에 대한 깊이를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

특히, 그림 11의 신호를 분석해 볼 때 토사층과 풍화암의 경계부(signal 1)에서의 반사파형이 큰 것으로 나타났는데, 이 사실로부터 이들 경계부에서 에너지의 대부분이 반사되었다고 판단된다. 따라서 7번 말뚝의 경우는 암반 근입부 주면과 주위 암반과의 부착상태가 양호할 것으로 추정된다.

한편, 현장 말뚝에 대한 주파수 영역의 신호를 그림 12에 제시하였는데, 그림 12(a)는 토사층에 근입되어 있는 8번 마찰말뚝의 스펙트럼이며, 말뚝 길이에 대한 공진주파수는 250Hz로서 말뚝의 P파 속도인 3,800m/sec를 식 (6)에 대입하면 말뚝 길이 7.6m를 얻는다. 이 값은

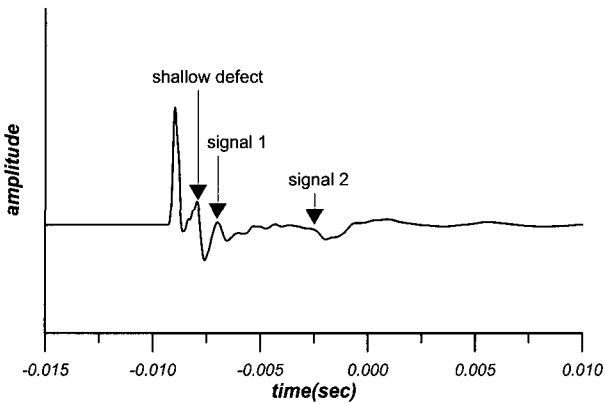


그림 10. 6번 말뚝(암반근입 말뚝)의 시간영역 신호

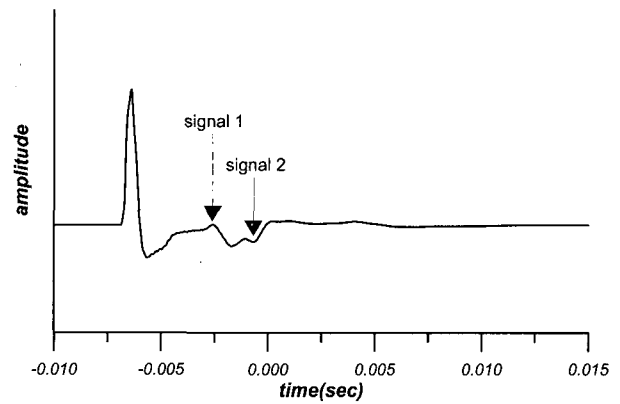
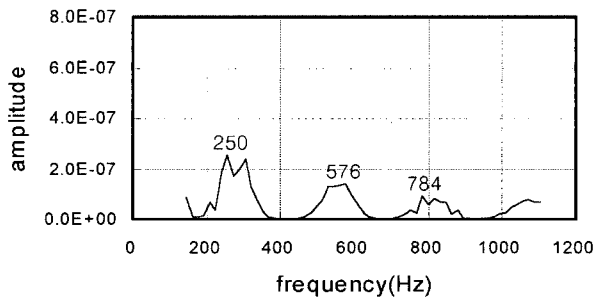
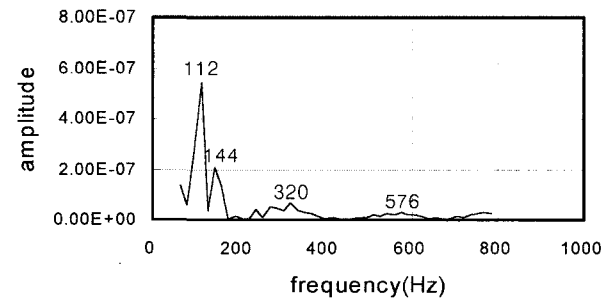


그림 11. 7번 말뚝의 토사층 및 암반 경계부에 대한 시간영역 신호



(a) 토사층에 근입된 마찰말뚝의 스펙트럼



(b) 암반에 근입되어 있는 말뚝의 스펙트럼

그림 12. 현장 말뚝에 대한 주파수 영역의 신호

실제 8번 말뚝의 길이와 정확히 일치하는 값이다. 또한 각 모드의 공진주파수도 250Hz, 576Hz, 784Hz로서 식 (5)에서  $n$ 이 1, 2, 3으로 증가하는 자유단-자유단의 경계 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다.

그림 12(b)는 암반에 근입되어 있는 4번 말뚝의 스펙트럼이며, 말뚝 길이에 대한 공진주파수는 112Hz이고 말뚝의 P파 속도인 3,800m/sec를 식 (8)에 대입하면 말뚝 길이 8.5m를 얻는다. 이 결과는 실제 말뚝 길이인 10.2m와 다소 차이가 있는데 그 이유는 말뚝이 암반에 근입되어 있기 때문에 파가 암반 경계면에서 반사되어 초래된 결과라 판단된다. 각 모드의 공진주파수는 112Hz, 320Hz, 576Hz로서 식 (7)에서  $n$ 이 1, 3, 5로 증가하는 자유단-고정단의 경계조건을 만족하고 있음을 알 수 있다.

#### 4.2.2 제 2 현장

##### 4.2.2.1 현장 개요

제 2 현장은 실대형 크기의 현장타설말뚝이 건설된 곳으로 말뚝의 직경은 1.5m이며, 말뚝 선단은 그림 13에 나타난 바와 같이 모두 암반에 근입되어 있다. 특히, B 말뚝의 경우는 말뚝 상부가 풍화암에, 그리고 말뚝 하부 및 선단이 연암에 근입되어 있는 것으로 조사되었다.

##### 4.2.2.2 충격반향기법 실험결과

###### (1) A 말뚝

A 말뚝에 대한 충격반향기법 실험의 시간영역 결과는 그림 14에 제시되어 있다. signal 2로 표시된 화살표 지점은 말뚝 선단에서의 반사시점을 표시한 것이며, 말뚝 바닥이 고정단으로 작용하므로 파형이 아래로 내려

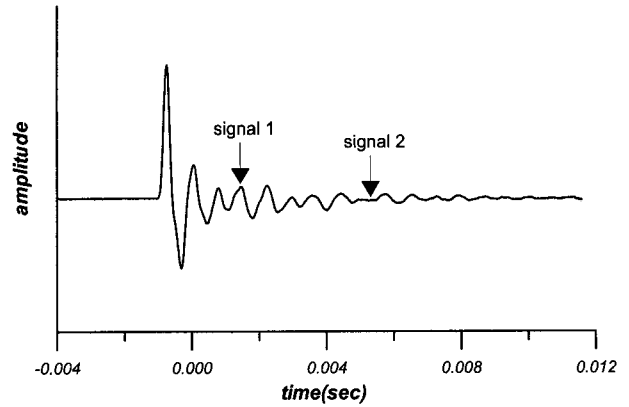


그림 14. A 말뚝의 반사 신호

가는 시점을 말뚝 선단부의 반사시점으로 본 것이다. 이 그림에서 구한 시간차를 이용하면 말뚝의 길이를 산정할 수 있는데, 이 때 12.96m가 얻어지며 실제 말뚝길이 13m와 거의 일치함을 알 수 있다.

또한, signal 1으로 표시된 화살표는 암반 근입부에서의 반사신호를 나타낸 것이며, 진폭이 감소하다가 다시 증가하는 지점을 잡은 것이다. 이 그림에서 구한 시간차를 이용하여 풍화토와 풍화암 경계부까지의 길이를 산정하면 4.64m가 얻어진다. 이 값은 실제 풍화암 경계부까지의 길이 6.8m와 많은 차이를 보이고 있는데 그 이유는 풍화토와 풍화암의 경계가 명확하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

###### (2) B 말뚝

B 말뚝의 경우에는 그림 15에서 보는 바와 같이 말뚝 선단부에서 올라오는 반사신호를 획득하기가 어려웠는데, 그 이유는 말뚝 주변 지반의 탄성계수( $E_s$ )와 콘크리트

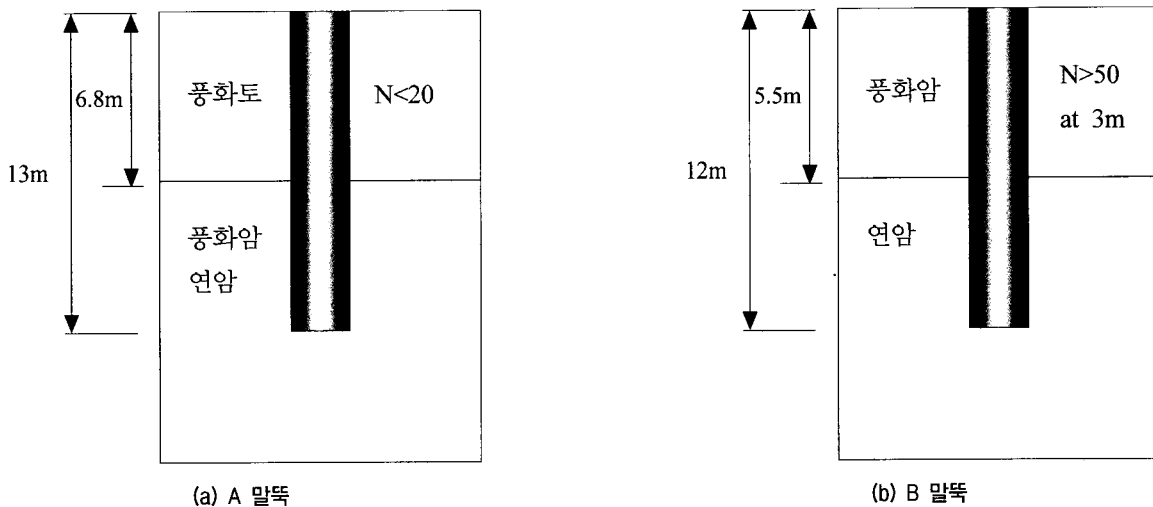


그림 13. 제 2 현장 개요도

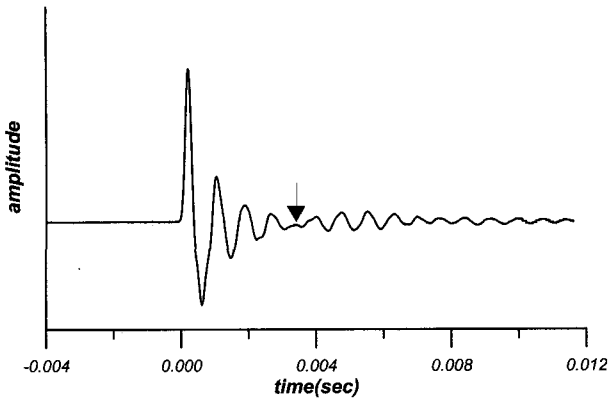


그림 15. B 말뚝의 암반 근입부에서의 반사신호

말뚝의 탄성계수( $E_c$ )의 비가 약 20으로서 Liao와 Roesset이 제안한 충격반향기법 적용 한계인 강성비( $E_c/E_s$ ) 50 미만이며, 따라서 입사된 파의 거의 모든 에너지가 반사 없이 암반으로 빠져나갔기 때문인 것으로 판단된다(Liao, 1994). 그림의 화살표의 신호는 풍화암과 연암 경계부에서의 반사신호를 나타낸 것이며, 신호의 진폭이 계속 감소하다가 다시 증가하면서 극성(polarity)이 반대로 되는 지점을 잡은 것이다. 이때의 시간차를 이용하여 경계부까지의 길이를 산정하면 6.4m가 얻어지는데 이 값은 실제 암반 근입부까지의 길이 5.5m와 약간의 차이가 있는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

지금까지 충격반향기법을 사용하여 암반에 근입된 현장타설 말뚝의 선단조건 평가 연구를 수행하였으며, 실내 모형실험 및 현장실험으로부터 얻은 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 충격반향기법의 실험으로부터 얻은 시간영역의 신호에 의하면 말뚝 선단부의 경계조건이 자유단(free) 상태인지, 고정단(fixed) 상태인지를 판별할 수 있다.
- (2) 암반근입 말뚝의 경우에는 마찰말뚝과 달리 토층과 암반층 경계면에서의 반사신호가 존재하며 이로부터 암반근입의 여부와 근입깊이를 추정할 수 있다.
- (3) 말뚝 선단부와 주위 암반과의 부착상태가 양호하다면 말뚝 선단부에 슬라임과 같은 연약층이 존재하더라도 고정단의 신호를 보이게 되며, 따라서 이 경우에는 연약층의 존재 여부를 충격반향기법으로 추정할 수 없을 것으로 판단된다.
- (4) 말뚝 선단부와 주위 암반과의 부착상태가 보통이면,

말뚝 선단부에 슬라임과 같은 연약층이 존재할 경우 자유단의 신호가 우세하게 나타날 것으로 판단된다. 따라서 이로부터 연약 선단층의 존재 여부는 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

- (5) 암반근입 말뚝에 대한 현장실험 결과 토사층과 암반의 경계면 위치는 탐지 가능한 것으로 파악되었다.
- (6) 말뚝 주변 지반의 강성이 stiff한 경우 말뚝 선단부에서 올라오는 반사신호를 획득하기가 어려웠으며, 이는 입사된 파의 대부분이 주변 지반으로 소산되었기 때문이라 판단된다.

이상의 결과를 종합해 볼 때 충격반향기법은 현장타설 콘크리트 말뚝의 선단조건 평가에 적용할 수 있을 것으로 판단되며, 특히 암반근입 말뚝 선단부와 주변 암반과의 부착상태 까지도 추정할 수 있는 가능성이 있는 것으로 파악되었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(98-0601-0201-3)지원에 의하여 수행된 것으로 이에 감사드립니다. 또한 현장타설 말뚝 부지에서 실험을 할 수 있도록 많은 협조를 해주신 한국도로공사 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 건설교통부 (1997), 구조물 기초 설계기준, pp.216-220.
2. 건설교통부 (1996), 도로교 표준시방서 설계편, pp.600-620.
3. 김동수, 박연홍 (1999), "충격반향기법을 이용한 깊은 기초의 건전도 평가(수치해석)", 한국지반공학회지, 제15권 제2호, pp. 139-152.
4. 목영진, 김동수, 이병식 (2000), 현장타설 말뚝의 건전도 평가기법의 개발, 한국과학재단 특정기초연구 제2차 중간보고서, pp. 19-39.
5. 전경수 (2000), 풍화암에 근입된 현장타설 말뚝의 연직 및 횡방향 지지기동 분석, 서울대학교 박사학위 논문, pp.47-61.
6. 한국지반공학회 (1997), 지반공학 시리즈 4 깊은기초, 구미서관, pp.284-286.
7. Braja M. Das (1993), Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT Publishing Company, Boston, pp.58-62.
8. Richart, F.E., Jr., Hall, J.R., Jr., Woods, R.D. (1970), Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, pp.60-92.
9. Hsiao, C., Lin, Y., and Chang, C. (1999), "Nondestructive evaluation of concrete quality and integrity in composite columns", NDT&E International, Vol.32, pp.375-382.
10. Joav Steinbach, and Eben Vey (1975), "Caisson Evaluation by

- Stress Wave Propagation Method", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.101, No.GT.4, pp.361-378.
11. Kim, D.S. and Kim, H.W. (2000a), "Parametric Study on the Impact-Echo Method using Mock-Up Shafts", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.16, No.2, pp.131-144.
  12. Kim, D.S. and Kim, H.W. (2000b), "Impact-Echo Response of Rock-Socketed Drilled Shafts", *International Conference on Application of NDT QA/QC & Geophysical Methodologies to Planning, Design, Construction, and Maintenance of Transportation Facilities*, St. Louis, Missouri, USA.
  13. Kim, D.S. and Park, Y.H. (1999), "Impact Echo Responses of Deep Foundations", *Proc. of the 1st International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics*, Choi. C.K., Schnobrich, W.C. eds, Seoul, Korea, pp.1399-1404.
  14. Kweon, G.C. (1998), *Alternative MR Testing Methods for Subgrade and Subbase Materials Considering Deformational Characteristics of Soils*, Ph. D Dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology, pp.34-40.
  15. Liao, S. (1994), *Nondestructive Testing of Piles*, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, pp.102-177.
  16. Liao, S. T., and Roesset, J. M. (1997), "Dynamic Response of Intact Piles to Impulse Loads", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.21, pp.255-275.
  17. Lin, Y., Sansalone, M., and Carino, N.J. (1991), "Impact-Echo Response of Concrete Shaft", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.14, No.2, pp.121-137.
  18. Mary J. Sansalone and William B. Streett (1997), *Impact-Echo Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, BULLBRIEL PRESS, ITHACA, N.Y, pp.29-74.
  19. Paolo Carrubba (1997), "Skin Friction of Large-Diameter Piles Socketed into Rock", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.34, pp.230-240.
  20. Report of a Task Force Sponsored by the G-I Deep Foundations Committee (2000), "Nondestructive Evaluation of Drilled Shafts", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, No.1, pp.92-95.
  21. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (1993), *Drilled Shafts for Bridge Foundations*, Publication No. FHWA-RD-92-004, pp.28-44.
  22. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, *Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods*, pp.403-410.

(접수일자 2001. 10. 24, 심사완료일 2002. 5. 20)