

## 현장시험에 의한 충격반향기법의 말뚝 건전도 검사 적용성 평가

### Verifications of the Impact-echo Technique for Integrity Evaluations of the Drilled Shaft Using Full Scale Tests

정 경 자<sup>1</sup> Jung, Gyungja

조 성 민<sup>2</sup> Cho, Sung-Min

김 홍 종<sup>3</sup> Kim, Hong-Jong

정 종 홍<sup>4</sup> Jung, Jong-Hong

#### Abstract

The reflected signals from the defects of a pile and the boundaries between the pile and soils are analyzed to evaluate the integrity of drilled shafts in the impact-echo test. Signals varied according to both of the stiffness ratio of the pile to defects and that of the pile to surrounding soils. Model tests using the small size pile in the laboratory and numerical analyses have limitations in finding the characteristics of the signals due to different stress wave characteristics and unreliable modelling for the interaction between the pile and soils respectively. Full scale testing piles which have artificial defects are installed by the actual construction method and they were used to investigate the characteristics of reflected signals according to defects and the stiffness ratios of the pile to soils around.

#### 요 지

말뚝 두부에서 응력파를 발생시키고 반사신호를 감지하여 말뚝의 건전도를 평가하는 충격반향기법은 말뚝 내 결함 및 주변 지반과의 상호 강성비에 따라 신호 특성이 달라질 수 있다. 실내모형실험과 수치해석만으로는 실제 지반의 복잡한 지층조건을 고려하여 지반-말뚝 간의 상호작용을 모사하기가 어려우므로, 현장시험이 필수적이라 할 수 있다. 이 연구에서는 암반층에 근입되는 현장타설말뚝의 건전도 검사를 위한 말뚝 내 신호 특성 분석을 위하여 인위적인 결함을 가진 실규모 모형 말뚝을 현장 지반에 시공하고, 결함의 종류 및 말뚝과 주변 지반의 강성비에 따른 충격반향기법의 신호 특성을 분석하였다.

**Keywords :** Defects, Drilled Shaft, Impact-echo Test, Integrity, Stiffness Ratio

#### 1. 서 론

충격반향(impact-echo, IE) 기법은 응력파가 다른 매질과의 경계면에서 반사 또는 투과되는 성질을 이용하는 것으로 비파괴적인 방법이며, 간편하고 경제적으로 말뚝의 건전도 검사 외에도 각종 구조물의 안전진단 분야에서도 적극적인 활용을 위한 연구가 이루어지고

있다. 구조물의 안전진단을 위하여 반사 신호의 해상도를 향상시키기 위한 조미라(2002)의 연구를 비롯하여 최근에는 터널의 라이닝 두께, 배면 공동 감지 등에 적용하기 위한 연구(안제훈, 서백수 2004) 등이 그 예이다.

그러나 교량, 터널 등과는 달리 지중에 매입된 말뚝 구조물의 경우는 그 길이와 상관없이 지표에 노출된

1 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 연구원 (Member, Researcher, Korea Highway Corp., gjjung@freeway.co.kr)

2 정회원, 한국도로공사 인천대교건설사업소 기술지원팀 부장 (Member, Director, Korea Highway Corporation)

3 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원 (Member, Chief Researcher, Korea Highway Corporation)

4 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원 (Member, Chief Researcher, Korea Highway Corporation)

지점에서만 응력과 에너지를 발생시킬 수 있으며, 또한 말뚝의 재질 특성뿐만 아니라 주변 지반조건이 응력과 전달 과정에 큰 영향을 미친다는 점에서 말뚝의 건전도 검사에 대한 적용에는 다소의 어려움이 있다. Stain(1982)이 말뚝 주변 지반이 단단한 경우에 응력과 에너지의 대부분이 주변 지반으로 소산되어 말뚝 선단으로부터 반사되는 응력파가 너무 약해 감지하기 어렵다고 지적한 이후로 말뚝에 적용되는 충격반향시험의 제한성에 대한 연구가 이루어졌다. Liao와 Roesset(1997)은 수치해석을 통해 말뚝 직경에 대한 길이비(L/D)가 30 이하이고 말뚝과 지반의 탄성계수 비( $=E_p/E_s$ )로 나타낸 강성비가 50 이상인 조건에서 말뚝 선단의 반사 신호를 감지할 수 있다고 하였고, 김형우(2003)는  $E_p/E_s$ 가 77보다 작거나, 또는 말뚝 내부의 전단파 속도( $V_{sc}$ )에 대한 지반의 전단파 속도( $V_{ss}$ )의 비가 0.1 이하이고,  $V_{ss}$ 가 300m/s 보다 클 경우는 말뚝 선단으로부터 반사되는 응력파 신호를 식별하기 어렵다고 하였다. 이 외에도 플라스틱 원형 봉을 이용한 모형실험과 수치해석을 통하여 단면축소가 전단면 대비 50% 이상일 경우에 결함의 감지가 가능하며, 또한 주파수 영역보다는 시간영역 해석을 통해 보다 작은 결함을 감지할 수 있다는 연구결과도 있다(김동수, 김형우 2000). Finno와 Gassman(1998)은 타격시의 힘을 측정할 수 있는 해머를 이용하는 충격응답(impact-response) 시험에서 말뚝의 운동성에 따른 길이비(L/D)별 해상도와  $V_{ss}/V_{sc}$  값의 상관관계를 제안하였으며, 국내에서는 수치해석을 통하여 L/D 값에 따른 기존의 제한 조건과 말뚝 직경에 따른 체적 증가가 해상도를 감소시킨다는 연구 결과를 제시하였다(이원구, 이병식 1999). 암반에 근입된 말뚝에서 암반의 강성 및 암반 내 근입 깊이에 따른 말뚝의 선단 조건별로 응력파의 반사 신호가 달라지며, 이는 말뚝의 공진주파수 변화에 기인한다는 연구결과도 있다(Kim, Kim 2004; 이병식, 이원구 2001).

이러한 연구들을 요약하면 1)말뚝과 지반의 강성비, 2)말뚝의 직경에 대한 길이비, 3)결함의 단면비율에 따라 말뚝에 적용되는 충격반향시험이 제한될 수 있다는 것으로 시험이 가능한 조건에서 말뚝의 건전성에 따른 반사신호의 특성에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 실내 모형시험의 경우에는 일반적으로 균질한 재질의 말뚝 모형을 사용하기 때문에 골재와 시멘트의 혼합체인 현장타설말뚝의 재질에서와는 달리 단순한 반사신호를 얻게 되며, 응력파의 파장이 말뚝의 직경에 비하여 매우 큰 조건이므로 실규모 말뚝의 결과에서 나타날 수 있는

신호의 왜곡 현상이 없게 된다. 실제 말뚝에서 발생하는 주변지반과 말뚝과의 복잡한 상호작용에 대한 모델링의 한계는 실내모형시험과 수치해석 모두가 가지는 한계이다. 이에 현장에서 얻게 되는 시험 결과를 바탕으로 말뚝의 건전도 평가를 위한 신호특성의 분석이 요구된다.

이 연구에서는 우리나라의 시공 여건상 가장 빈번하게 발생하는 대표적인 결함을 인위적으로 모사한 실규모의 현장타설 콘크리트말뚝을 설치한 후 충격반향시험을 실시하고, 말뚝의 결함 유무와 그 유형에 따라 신호 특성을 규명하고자 하였다. 지반조사와 현장시험을 통해 말뚝 주변 지반에 대한 말뚝의 강성비를 산정하여, 지반의 강성이 시험 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 채취한 시료를 통해 구한 말뚝의 일축압축강도로 산출한 탄성계수와 말뚝 내부의 응력과 전달 속도로 구한 탄성계수의 상관성을 분석하여 충격반향시험 수행 및 분석시 초기 응력과 전달속도 결정에 활용할 수 있도록 하였다.

## 2. 충격반향시험

충격반향(impact-echo, IE) 기법에 의한 현장타설말뚝의 건전도(integrity) 시험은 말뚝 머리에서 발생하여 콘크리트 내부로 전파되는 응력파가 다른 성질의 매질을 만날 때 일부가 반사되어 머리부로 되돌아오는 원리를 이용한 것이다. 밀도, 단면적, 탄성계수가 각각  $\rho_1, A_1, E_1$ 인 매질에서  $\rho_2, A_2, E_2$ 인 매질로 진행되는 응력파 에너지의 일부는 반사(reflection)되어 원래의 매질 쪽으로 돌아가고 나머지는 다른 매질 쪽으로 투과(transmission)한다. 이 때 말뚝 머리에서 시간에 따라 응력파의 속도 변화를 측정하게 되면 그림 1과 같이 매질의 변화를 알 수 있게 된다. 이러한 응력파의 반사 및 투과 특성은 두 매질의 임피던스(impedance) 차이에 주로 영향을 받게 되는데, 매질의 경계면에서 발생하는 입사파와 반사파,

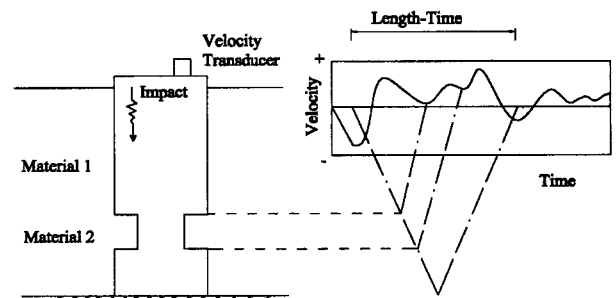


그림 1. 말뚝 내부의 임피던스 차이에 의한 말뚝 머리 수신 파형의 예

투과파에 대한 속도와 힘의 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_1(\sigma_i + \sigma_r) = A_2\sigma_t \quad V_i + V_r = V_t \quad (1)$$

$$u_i = f_1(x - v_1t), \quad u_r = g_2(x + v_1t), \quad u_t = f_2(x - v_2t) \quad (2)$$

식 (1), (2)에서  $\sigma_i$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$ 는 각각 입사파, 반사파, 투과파의 응력이며,  $V_i$ ,  $V_r$ ,  $V_t$ 는 각 파의 속도,  $u_i$ ,  $u_r$ ,  $u_t$ 는 각 파에 의한 변위를 나타낸다. 투과파와 반사파의 응력을 입사파의 함수로 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\sigma_t = \frac{2A_1\rho_2v_2}{A_1\rho_1v_1 + A_2\rho_2v_2}\sigma_i, \quad \sigma_r = \frac{A_2\rho_2v_2 - A_1\rho_1v_1}{A_1\rho_1v_1 + A_2\rho_2v_2}\sigma_i \quad (3)$$

임피던스,  $Z$ 는 식 (4)와 같이 특정 위치의 힘을 응력 파 속도로 나눈 값으로 나타낼 수 있으며, 이는 다시 단면적과 밀도, 탄성계수의 항으로 표시된다.

$$Z = \frac{F}{V} = A\sqrt{\rho E} \quad (4)$$

식 (4)를 식 (3)에 대입하여 정리하면 식 (5)와 같이 투과파와 반사파의 응력을 입사파 응력  $\sigma_i$ 과 두 매질의 임피던스  $Z_1$ ,  $Z_2$ 로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_t = \frac{2(Z_2/Z_1)(A_1/A_2)}{1 + (Z_2/Z_1)}\sigma_i, \quad \sigma_r = \frac{(Z_2/Z_1) - 1}{1 + (Z_2/Z_1)}\sigma_i \quad (5)$$

식 (5)에서,  $Z_2$ 가  $Z_1$ 보다 작으면 반사파는 음(-)의 값을 갖는 인장파로 나타나며, 그 반대의 경우에는 양(+)의 값을 가지는 압축파로 나타남을 알 수 있다. 충격반향시험의 경우 말뚝 머리에서 발생시킨 응력파는 말뚝 내부의 단면적, 밀도 또는 탄성계수의 변화가 있는 지점에서 반사되고 말뚝 두부에서 수신된 파형에 중첩되어 기록된다.

균질한 품질관리가 가능한 기성말뚝과는 달리 현장에서 지반을 굴착한 후 철근을 삽입하고 콘크리트를 채우는 현장타설말뚝은 설치 지점의 지반 및 지하수 조건과 복잡한 시공 절차 과정에서 말뚝 본체에 결함을 내포할 수 있다. 그림 2에서 보여지듯이 이러한 결함은 응력파의 반사원이 될 수 있으며, 이러한 말뚝 내부의 반사원 외에도 말뚝과 근입 지반의 경계면, 다층지반에서 강성 차이가 큰 말뚝 주변 지반의 지층 경계면도 반사원이 될 수 있으므로, 말뚝 머리에서 측정하는 실제의 응력파 속도 프로파일은 매우 복잡한 양상을 보이게 된다.

한편, 충격반향시험의 경우 말뚝 머리에서 생성한 응

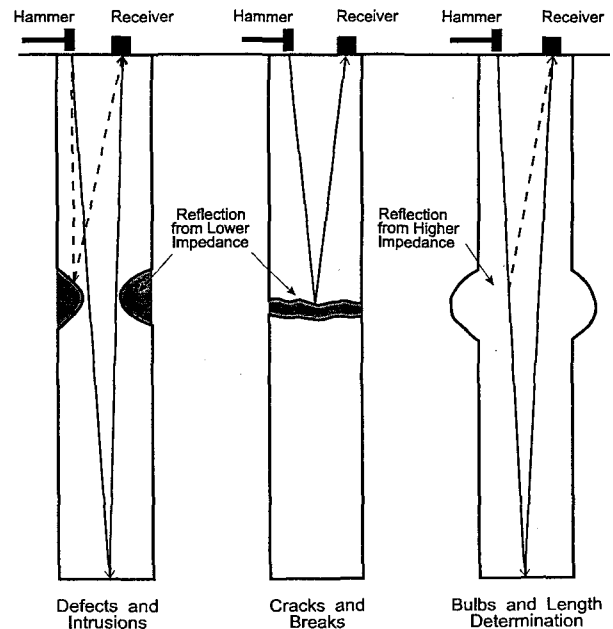


그림 2. 현장타설말뚝에 존재 가능한 반사원

력파는 그 파장이 말뚝의 직경보다 크기 때문에 주파수에 따라 파의 전달속도가 달라지는 분산현상이 일어나지 않는다고 보고, 파는 말뚝의 길이방향을 따라 1차원적으로 진행한다고 가정한다. 그러나 응력파의 파장이 말뚝의 직경보다 작을 경우에는 이러한 가정이 유효하지 않게 되며, 파는 분산되어 그 전달 속도는 주파수에 따라 달라지게 된다. 콘크리트 내에서 응력파의 전달 속도를 4,000m/s라고 보면, 1m 직경의 말뚝에 대해서는 주파수가 4kHz보다 낮을 경우에만 상기 가정이 유효하며, 또한 말뚝의 직경이 2m일 때에는 파의 주파수가 2kHz보다 저주파이어야 한다. 충격반향시험의 결과 해석을 위한 다른 하나의 가정은 말뚝 내부를 통과하는 응력파의 속도변화에 대한 것이다. 응력파 속도는 콘크리트의 강도에 비례하므로 강도가 작은 구간에서는 속도가 감소하게 되나, 이를 고려하는 것은 현실적으로 매우 어려우므로 말뚝 전체 길이에 대하여 응력파의 전달 속도가 일정하다고 가정한다.

### 3. 시험말뚝 제작 및 시험

시험용 실규모 현장타설 콘크리트말뚝은 직경 1m, 길이 14m인 1본과 직경 1m, 길이 13.5m인 4본으로 구성되어 있으며, 베노토(Benoto)공법으로 한국도로공사 도로교통기술훈 야외시험장에 설치하였다(사진 1). 시험말뚝은 일렬로 설치되었으며, 말뚝 중심간의 간격은 5m

이다. 암반층은 치즐로 파쇄 후 해머그래브로 파편을 제거하였으며, 공벽이 유지되는 암반층 상단까지 케이싱을 설치하였다. 충격반향시험은 해머와 수진기 및 데이터로거 본체로 구성된 사용 장비를 이용하였으며 시험말뚝의 설치일로부터 30일 이상이 경과된 후 실시하였다(사진 2).

말뚝 주변 지반의 영향을 분석하기 위하여 말뚝 양측에 대하여 시추조사를 실시하였으며 말뚝과 지반의 탄성비에 의한 강성비를 얻기 위하여 공내재하시험을 실시하였다. 그림 3에서 보여지듯이 말뚝의 설치 지반은

지표면으로부터 깊이 약 10m까지는 매립토층이며, 각 말뚝의 선단은 연암층에 1m 이상 근접시키는 것을 원칙으로 하였다. 매립토층 아래에 1m 미만의 전담토층이 존재하며, 그 하부에 1, 2번 말뚝의 경우에는 풍화암층이 2-3m, 4-5번 말뚝의 경우에는 약 1m의 풍화잔류토층과 연암층이 존재한다.

시험 말뚝에는 현장에서 가장 발생하기 쉬운 재료분리, 선단불량, 단면축소를 모사한 인위적 결함을 포함시켰다(그림 3). 재료분리 결함은 실제 현장 조건과 동일하게 수중 콘크리트 타설 중 트레미관을 들어올리는 방

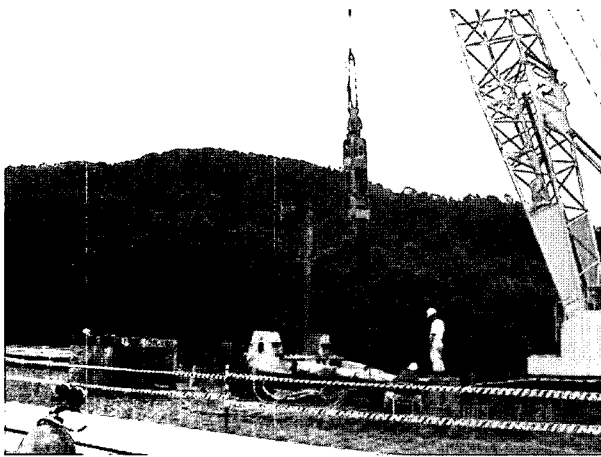


사진 1. 시험말뚝 시공전경



사진 2. 충격반향시험 전경

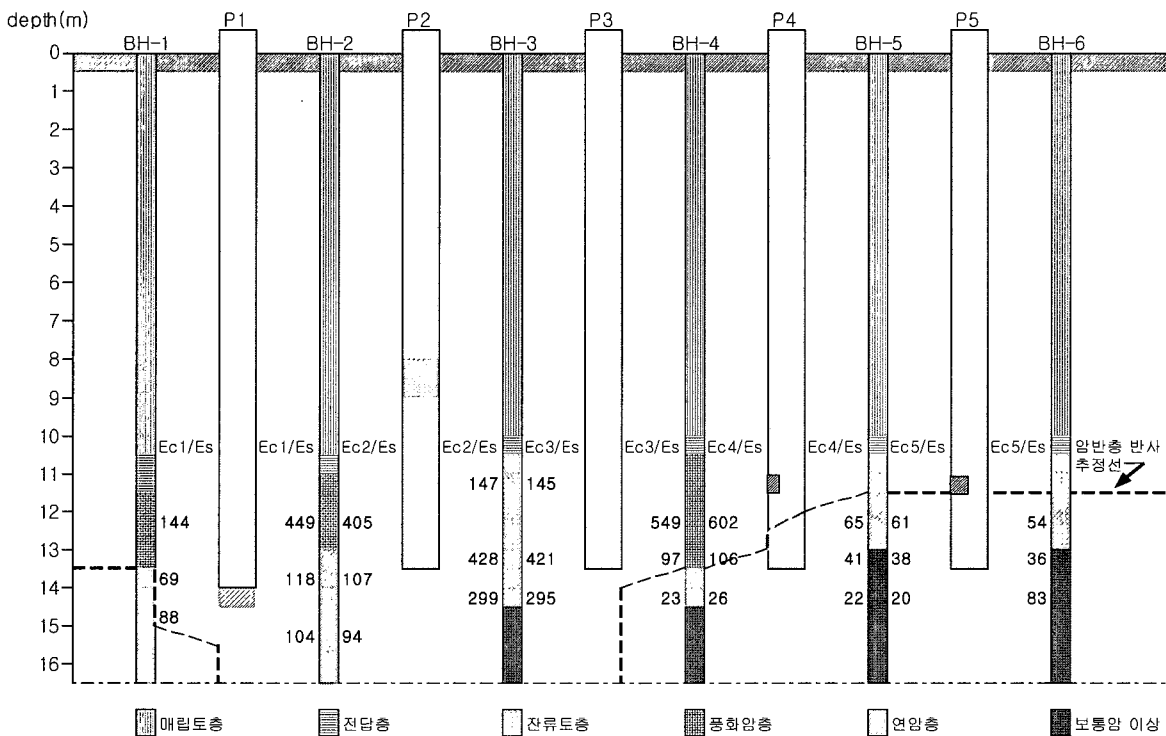


그림 3. 시험말뚝과 지반조사 결과

법으로 형성하였으며, 선단불량 결함은 암반 굴착 후 선단청소를 하지 않은 상태에서 진흙을 투척하여 만들었다. 단면축소 결함은 토사를 담은 자루를 말뚝의 주철근 케이지에 고정시키는 방법을 사용하였는데, 올케이싱 공법의 경우 토사층의 공벽 유지를 위해 암반층 상단부까지만 케이싱을 삽입하는 것이 일반적임을 감안하여 결함의 위치를 토사층과 암반층의 경계부로 하였다. 의도된 결함은 공대공 초음파 검층(crosshole sonic logging, CSL)을 통하여 확인하고, 그 결과와 비교하였다(조성민 등 2003).

#### 4. 충격반향시험 결과 및 분석

##### 4.1 말뚝과 지반의 강성에 대한 분석

말뚝이 근입된 암반의 특성이 말뚝의 머리부에서 발진한 응력파의 반사 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 암반층과 말뚝의 탄성계수를 이용하여 깊이별로 강성비의 차이를 분석하였다.

충격반향시험의 해석시에는 말뚝 내에서 응력파가 전달되는 속도가 일정하다고 가정한다. 그러나 말뚝의 길이(L)를 정확히 아는 경우에는 선단에서 반사된 신호의 도달시간,  $t_p$ 를 이용하여 식 (6)으로 응력파 속도,  $V_c$ 를 계산하고, 식 (7)의 관계에 따라 말뚝 재료의 탄성계수( $E_c$ )를 추정할 수 있다.

$$V_c = \frac{2 \times L}{t_p} \quad (6)$$

$$E_c = V_c^2 \times \rho = \left( \frac{2 \times L}{t_p} \right)^2 \times \rho \quad (7)$$

식 (7)은 압축파가 긴 막대를 통과하는 경우의 관계식으로, 무한매질에서는 탄성과 속도가 포와송 비의 영향을 받는 반면에 횡방향으로 변위가 가능한 말뚝 기초에서는 그 영향이 없음을 보여준다. 이에 따라 깊은 말뚝 기초를 통과하는 압축파의 속도는 무한매질에서보다 5~15% 정도 작다. 콘크리트의 밀도( $\rho$ )는 일반적인 값인  $2,300\text{kg/m}^3$ 을 사용하였다.

한편, 콘크리트 말뚝의 탄성계수는 일축압축강도를 이용하여 구할 수도 있다. BS 8100에서는 콘크리트의 일축압축강도( $q_{cu}$ , MPa)와 초기 탄성계수  $E_i$ (GPa)의 관계를 다음과 같이 제안하였다.

$$E_i = 9.1 \times q_{cu}^{0.33} \quad (8)$$

표 1에서 충격반향시험으로 얻은 말뚝 선단의 반사 신호를 기준으로 산출한  $V_c$ 를 이용하여 구한 말뚝의 탄성계수와 말뚝에서 채취한 시료로부터 얻은 일축압축강도( $q_{cu}$ )에 의한 탄성계수와 비교하였으며, 이를 그림 4에 나타내었다. 표와 그림으로부터 콘크리트 말뚝의 응력과 속도로 구한 탄성계수가 강도로 구한 값보다 12~22% 가량 크게 나타났다.

말뚝이 근입된 풍화암층 이하에 해당하는 지반의 탄성계수,  $E_s$ 는 공내재하시험을 통해 구하였다. 시험 결과로부터 동일하게 연암층으로 분류된 시추주상도와는 달리 13m 깊이를 기준으로 그 이하의 깊이에서 공내재하시험에 의해 산정한  $E_s$ 는 78~612MPa로 큰 차이를 보였다.

이렇게 구한 암반층 지반의 탄성계수( $E_s$ )와 표 1에서 응력과 속도로 계산한 말뚝의 탄성계수( $E_c$ )의 비( $E_c/E_s$ )를 두 매질의 강성비( $K_E$ )로 정의하였으며, 그림 3은 말뚝과 시추공 위치, 깊이별 말뚝-지반 강성비( $K_E$ )를 도시한 것이다.

표 1. 산정방법별 말뚝의 탄성계수 비교

말뚝	$t_p$ (msec)	$V_c$ (m/s)	$V_c$ 로 구한 $E_c$ (GPa)	$q_{cu}$ (MPa)	$q_{cu}$ 로 구한 $E_c$ (GPa)
P1	7.000	4,000	36.8	38.6	30.4
P2	7.105	3,800	33.2	35.4	29.5
P3	7.158	3,772	32.7	28.4	27.4
P4	6.842	3,946	35.8	35.1	29.4
P5	7.105	3,800	33.2	30.8	28.2

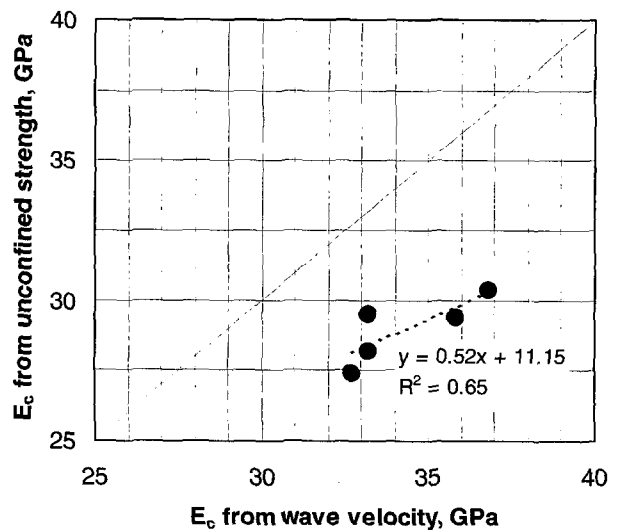


그림 4. 표 1의 말뚝 탄성계수 비교

## 4.2 암반에 근입된 말뚝의 결함별 시험 결과

암반에 근입된 5본의 시험용 말뚝에 대하여 각 3회씩 충격반향기법의 건전도 검사를 실시하고 얻은 파형 기록을 각각 그림 5, 6, 8, 9 및 10에 나타내었다. 시험결과로부터 각 말뚝에 대한 3회의 반복시험을 통해서 충격반향시험의 재현성을 확인할 수 있다. 시험결과 분석에서, 콘크리트 말뚝 내부를 통과하는 응력파의 속도는 3,800m/s로 가정하였다.

그림 5는 인위적으로 선단이 불량한 조건을 조성한 1번 말뚝에서의 결과로, 말뚝 길이가 13.3m인 지점에서 인장파로 반사되는 파를 확인할 수 있으며, 말뚝길이를 기준으로 10m 이후에서 속도가 지속적으로 감소하고 있다는 것이 특징적이다.

재료분리 결함을 가진 2번 말뚝의 결과인 그림 6에서는 말뚝 머리로부터 7.5m 지점에서 강한 인장파를 확인할 수 있으며, 예상과 달리 길이 10.9m 지점에서도 이상 신호가 관찰되었다. 충격반향시험과 병행한 공대공초음파검층(CSL)의 결과를 통하여 이 지점에 시공 도중의 도하지 않았던 결함이 발생하였음을 확인하였다. 그림

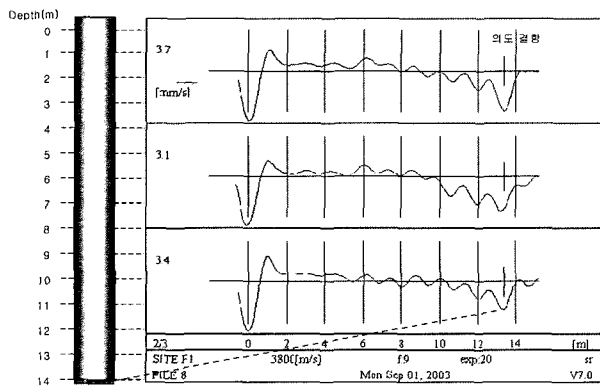


그림 5. P1-선단불량 결함 말뚝의 시험결과

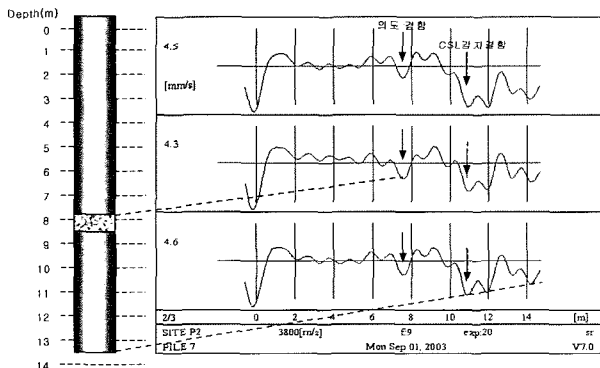


그림 6. P2-재료분리 결함 말뚝의 시험결과

7은 2번 말뚝의 CSL 프로파일로서, 오른쪽의 두 실선 그래프는 각각 초음파의 에너지 크기와 도달시간을 나타낸다. 결함부위에서 에너지의 감소와 도달시간의 지연을 확인할 수 있다.

그림 8은 결함 없이 시공한 3번 말뚝의 결과로서, 말뚝의 선단에서 강한 인장파와 반사 신호가 관찰된다. 무결함 말뚝으로 제작된 3번 말뚝의 주변 지반은 그림 3의 BH-3와 BH-4의 지반조사 결과에서 알 수 있듯이 지층의 변화가 심하다. 특히 BH-3 시추공에 대한 공내재해 시험의 결과로 구한 강성비로 판단하면 11m 깊이의 풍

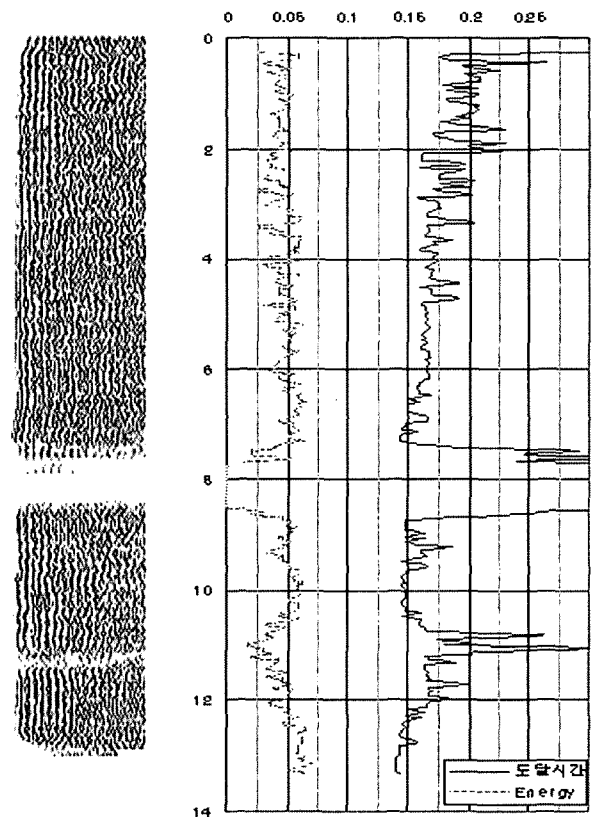


그림 7. P2-CSL 프로파일

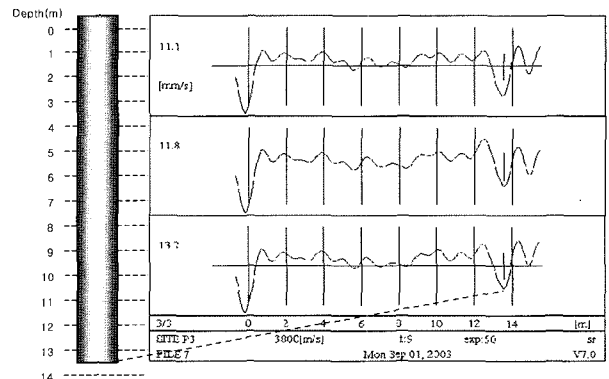


그림 8. P3-무결함 말뚝의 시험결과

화산류토층이 말뚝 선단부의 연암층보다 강성이 큰 것으로 나타나고 있다.

그림 9, 10은 단면축소 결함을 지닌 4번 말뚝(단면축소율 10%), 5번 말뚝(단면축소율 20%)으로서, 선단부의 반사 신호가 다른 말뚝보다 복잡하게 나타났다. 이는 토사 혼입 등으로 말뚝의 콘크리트 단면이 감소하는 결함의 위치가 지층 강성이 급변하는 토사층과 암반층의 경계면 부근에 있으며, 또한 파의 반사가 발생하는 말뚝 선단으로부터 비교적 가깝기 때문이다. 두 말뚝의 경우, 모두 암반 근입부에서 반사된 인장과 신호가 감지되었으며, 단면 축소 결함에 의한 신호는 이들 인장 반사 신호와 섞여 따로 구분하기가 어렵다. 이러한 결과는 충격 반향기법을 적용하는 경우, 재료분리와 같이 말뚝 단면의 전체에 걸쳐 형성된 결함과는 달리 단면의 일부에만 국한된 결함은 인지하기가 쉽지 않음을 말한다. 이것은 김동수와 김형우 등(2000)이 실내모형시험을 통해 단면 축소율이 50% 이상이 되어야 결함 식별이 가능하다는 보고와도 유사하다.

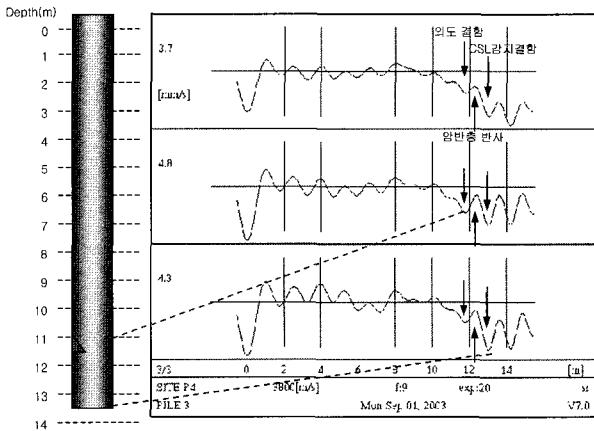


그림 9. P4-단면축소 10% 결함 말뚝의 시험결과

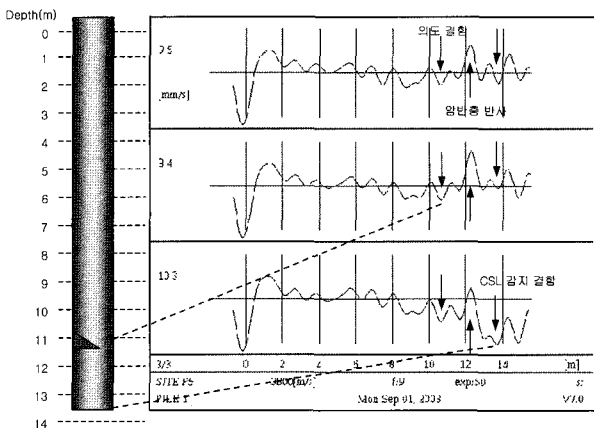


그림 10. P5-단면축소 20% 결함 말뚝의 시험결과

국내에서 설계 및 시공되는 현장타설말뚝은 풍화암 또는 연암 상단에 말뚝의 선단을 거치하는 것이 일반적이다. 따라서, 강성이 말뚝보다 큰 경암 정도의 지반에 말뚝의 선단이 근입된다면 압축파 신호로 선단을 확인할 수 있을 것이고, 선단층소가 불량한 말뚝은 인장신호로 확인할 수 있을 것이다. 그러나 그림 3의 결과에서 확인할 수 있듯이 보통암 수준의 경우에도 말뚝의 강성이 크므로 시험 말뚝의 결과에서와 같이 말뚝의 선단은 인장신호로 파악된다. 말뚝 선단부의 결함을 모사했던 1번 말뚝과 3번 말뚝의 결과를 비교하면, 주변 지반의 강성 특성에 따라서 선단부에서 강한 인장파가 도달했던 3번 말뚝과 달리 1번 말뚝은 선단부로 내려갈수록 지속적으로 속도가 감소하는 신호 특성을 보여주고 있다.

## 5. 결론

인위적인 결함을 포함하도록 조성한 직경 1,000mm의 현장타설콘크리트 말뚝 5본을 대상으로 충격반향기법에 의한 건전도 검사를 실시하고 결함의 종류별로 그 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시험용 말뚝 부지에서 암반층에 대한 말뚝의 강성비를 구한 결과 풍화암층은 97~602, 연암층은 23~428, 보통암의 경우에는 20~83의 값을 보였으며, 동일 암반층에서 강성비가 크게 변화하는 경우에는 충격반향기법을 적용한 건전도 검사의 반사신호에서 이러한 변화를 확인할 수 있었다.
- (2) 풍화암 또는 연암에 선단이 거치된 말뚝의 경우에도 말뚝의 선단은 인장파의 반사신호로 확인할 수 있었으며, 선단부 불량 여부는 선단부로 접근하면서 지속적으로 속도가 감소하는 양상과 관련이 있는 것으로 판단된다.
- (3) 말뚝 내부의 대부분의 중대 결함들은 인장파의 반사신호로 확인할 수 있으며, 주변 지반의 강성 증가는 압축파의 형태로 나타났다. 말뚝 설치 도중 콘크리트의 재료분리 등으로 말뚝 전단면에 걸쳐 발생한 결함은 경계면의 응력과 반사 신호가 매우 뚜렷하여 감지가 용이하였으나, 토사혼입 등으로 유발되는 부분적인 단면축소는 반사신호 분석만으로는 확인하기 어려웠다.

## 참고 문헌

1. 김동수, 김형우 (2000), “모형말뚝을 이용한 충격반향기법의 영향 요소 연구”, *한국지반공학회지*, 제16권, 제3호, pp.131-144.
2. 김형우 (2003), *응력과 진파 방법에 의한 현장타설 말뚝기초의 건전성 평가*, 박사학위논문, 한국과학기술원, pp.113-151.
3. 안제훈, 서백수 (2004), “충격반향기법의 주파수영역 해석을 이용한 구조물 안전진단에 관한 연구”, *한국암반공학회지*, 제14권, 제1호, pp.35-42.
4. 이병식, 이원구 (2001), “현장타설말뚝의 비검측공 건전도시험법에 관한 해석적 고찰(II)”, *한국지반공학회지*, 제17권, 제5호, pp.107-114.
5. 이원구, 이병식 (1999), “현장타설 콘크리트 말뚝의 건전도 평가를 위한 충격반향기법의 해상도 평가”, *대한토목학회 1999년도 학술발표회 논문집*, pp.275-278.
6. 조미라 (2002), “충격반향기법의 신뢰성 향상을 위한 탄성과 파동 전파 특성의 연구”, *콘크리트학회 논문집*, 제14권, 제2호, pp.266-274.
7. 조성민, 김홍중, 정경자, 정종홍, 안태송, 전경수 (2003), *현장타설 콘크리트 말뚝의 건전도 시험방법*, GE-03-06, 한국도로공사 도로교통기술원, pp.131-209.
8. Finno, R. J. and Gassman, S. L. (1998), “Impulse Response Evaluation of Drilled Shafts”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*, Vol.124, No.10, pp.965-975.
9. Kim, D. S. and Kim, H. W. (2004), “Evaluation of the Base Condition of Drilled Shafts by the Impact-Echo Method”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.27, No.5, pp.1-8.
10. Liao, S. T. and Roesset, J. M. (1997), “Dynamic Response of Intact Piles to Impulse Loads”, *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.21, pp.255-275.
11. Stain R. T. (1982), *Integrity Testing*, Civil Engineering, London, pp.53-59.

(접수일자 2005. 5. 31, 심사완료일 2005. 7. 5)