

## 미지의 교량기초에 대한 비파괴 시험기법(NDT)의 적용성에 관한 연구 A Study on the Application of NDT(Non-Destructive Testing) Techniques to the Unknown Bridge Foundations

채종훈<sup>1)</sup>, Jong-Hoon Chae, 이원재<sup>2)</sup>, Won-Jae Lee, 유재명<sup>3)</sup>, Jae-Myung Yu, 이우진<sup>4)</sup>, Woo-Jin Lee

- 1) (주) 한석엔지니어링, Han Suk Engineering Co., Ltd.
- 2) 세진기초산업(주) 이사, Director, SeJin Engineering Co., Ltd.
- 3) 고려대학교 박사과정, Ph. D. Student, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.
- 4) 고려대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

**SYNOPSIS** : In this study, ten drilled shafts were constructed for evaluating the application of NDT(Non-Destructive Testing) techniques. The drilled shafts, 0.4 m in diameter and 7.0 m in length, were constructed at Namyangju site in Namyangju City. One of the shafts was constructed with no defect, and the other shafts were constructed with the defects of soft bottom, necking, bulging, cave-in and/or weak concrete. Then, these techniques were applied to the bridge foundations for studying unknown bridge foundation characteristics.

**Key Words** : Drilled Shaft, CSL(Crosshole Sonic Logging), CT(Crosshole Tomography), PS(Parallel Seismic), SE(Sonic Echo), IR(Impulse Response)

### 1. 서론

교량구조물은 인간의 생명과 재산에 직결되는 매우 중요한 구조물인 관계로 건설 후에도 지속적인 유지/관리가 반드시 수반되어야 한다. 그러나, 시공 후 경과기간이 오래된 교량 등은 기초의 안전평가를 위한 기본자료인 기초구조물에 대한 시공기록이 보존되지 못한 경우가 있어 안전진단시 가장 큰 저해요인이 되어왔다. 따라서 이와 같은 시공정보가 누락된 교량기초에 대해 재해예방과 잔존수명평가를 위한 안전진단이 시행될 경우 기초깊이와 결합의 종류, 위치, 분포 뿐 아니라 기초형식과 재질 등 미지의 교량기초정보(unknown bridge foundation characteristics)를 확인할 수 있는 기술활용이 요망된다.

본 연구에서는 미지의 교량기초정보를 확보하기 위한 방법으로 탄성파탐사기법을 이용한 비파괴 시험 기법(NDT&E, nondestructive testing and evaluation)의 적용성에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 남양주에 직경 0.4m, 길이 7m 정도의 모형말뚝 10본을 시공하였다. 이들 모형말뚝에 5가지 NDT 기법이 적용하였으며, 이를 실제 현장에 또한 적용하였다.

### 2. NDT 기법

#### 2.1 NDT 기법의 종류와 기본 원리

비파괴시험(NDT, Non-Destructive Testing) 기법(이하 NDT 기법)은 대상구조물에 대해 사용성에 제한 없이 최소한의 변형만을 가하여 구조물의 안전을 확인할 수 있는 시험이다. 이 중 교량기초에 적용 가능한 기법은 5가지 정도이며 해당 현장 조건에 맞추어 적용할 경우 그 효과가 크다. 이러한 NDT 기법은 검측공 기법(Borehole Method)과 표면파 기법(Surface Reflection Method) 등 크게 2가지로 나눌 수 있다.

## 2.2 검측공 기법(Borehole Method)

### 2.2.1 CSL(Crosshole Sonic Logging) 시험

본 시험은 그림 1과 같이 1개의 발신자와 1~2개의 수신자로 이루어져 있으며, 이 사이에 존재하는 결함을 발신자에서 발생한 압축파의 도달시간과 에너지로 그 여부를 확인하는 시험이다. 그림 1과 같이 말뚝의 최하부에서 수신자와 발신자를 동시에 인발하여 깊이-도달시간 혹은 에너지 그래프를 얻을 수 있으며, 이를 통해 결함이 존재하는 위치를 확인할 수 있다.

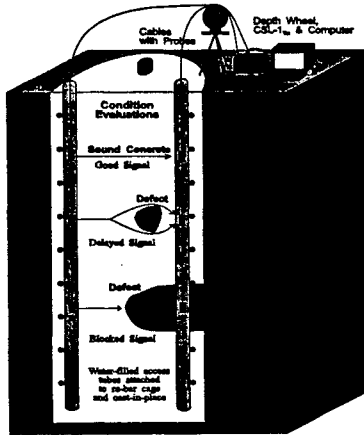


그림 1 CSL 시험

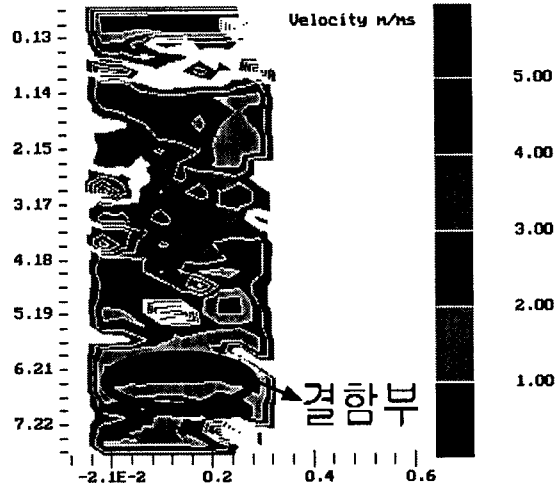


그림 2 CT 시험결과

### 2.2.2 CT(Crosshole Tomography) 시험

본 시험의 수행방법은 CSL시험과 유사하나, 수신자를 고정시킨 상태에서 발신자를 이동시키는 점이 다르다. 통상 CSL시험으로부터 확인된 결함 위치를 중심으로 수행되며, 그 결과로부터 결함의 대략적인 분포를 알 수 있다. CT 시험 결과인 그림 2와 같이 말뚝 하부 6.5m 지점에서 말뚝 전단면에 결함이 존재함을 확인할 수 있다.

### 2.2.3 PS(Parallel Seismic) 시험

PS 시험은 말뚝의 두부가 노출되지 않아 압축파 발생이 어려운 경우, 즉 표면과 기법의 적용이 곤란한 경우 검측공을 그림 3과 같이 근접 시공하여 해당 기초의 깊이를 추정할 수 있는 시험이다.

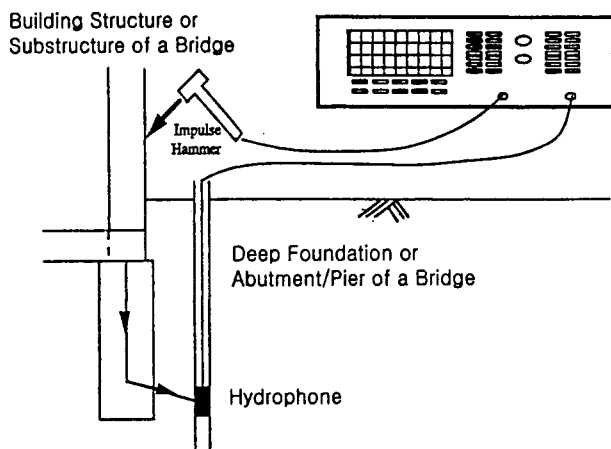


그림 3 PS 시험

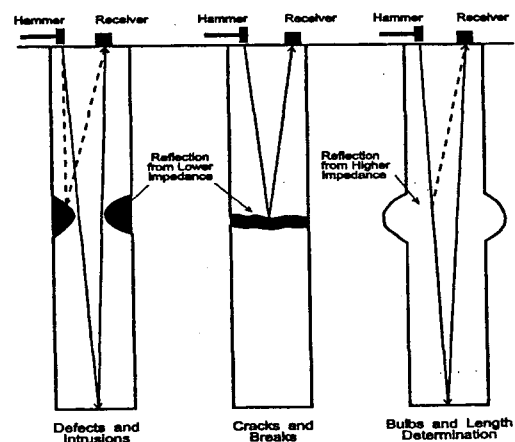


그림 4 표면과 기법

### 2.3 표면파 기법(Surface Reflection Method)

표면파 기법은 그림 4와 같이 말뚝의 두부가 노출되었을 경우, 로드 셀(Load-Cell)이 부착된 해머를 이용하여 압축파를 발생시킨 후 반사파를 속도계 혹은 가속도계를 이용하여 측정한다. 측정된 반사파를 시간영역(Time Domain)에서 해석할 경우 SE 시험, 주파수영역(Frequency Domain)에서 해석할 경우 IR시험이라 한다.

#### 2.3.1 SE(Sonic Echo) 시험

앞에서와 같이 속도계 혹은 가속도계에 의해서 측정된 결과는 그림 5와 같으며 반사파의 발생 깊이, 또는 말뚝의 길이 D를 압축파의 속도  $V_p$ 와 시간  $t_p$ 를 이용한 식 1을 이용하여 구할 수 있다.

$$D = V_p \times \frac{t_p}{2} \quad (1)$$

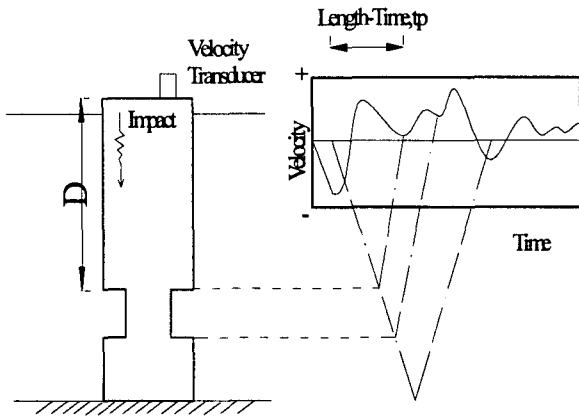


그림 5 SE 시험 개요

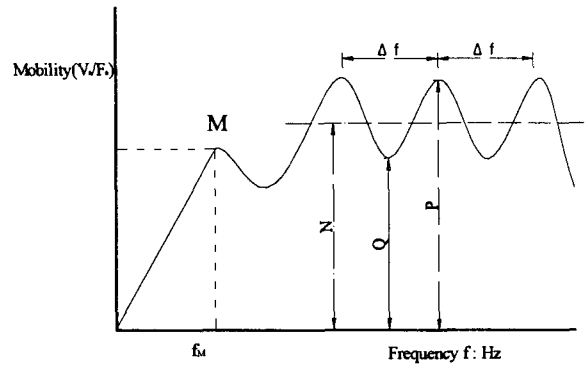


그림 6 유동도 곡선(Mobility Curve)

#### 2.3.2 IR(Impulse Response) 시험

측정된 결과를 FFT(Fast Fourier Transform)를 거쳐 주파수 영역으로 변환 후, 그림 6과 같은 여러 개의 첨두점이 존재하는 충격응답곡선(Impulse Response Curve) 혹은 유동도 곡선(Mobility Curve)을 구할 수 있다. 여기서, 일정한 간격을 가지는  $\Delta f$ 를 이용하여 그 발생깊이(결합의 깊이 혹은 말뚝의 길이)를 식 2와 같이 구할 수 있다.

$$D = \frac{V_p}{2\Delta f} \quad (2)$$

위 충격응답곡선에의 결합 위치에서 이론적인 유동도(Mobility, N)와 측정된 유동도로부터 말뚝의 단면적 감소를 예측할 수 있다. 또한  $f_m$ 까지의 기울기를 이용하여 하중-재하곡선에서의 초기 기울기를 추측, 이를 재하시험 대상 말뚝의 선정에 이용할 수 있다.

### 3. 모형말뚝 시험

전술한 5가지 NDT 기법의 적용성을 평가하기 위해 대형교량기초로 가장 많이 사용되는 현장타설말뚝을 축소 실험물로 시공하였다. 해당 현장은 남양주 부근에 조성되었으며, 그 직경 0.4m, 길이 약 7.0m 정도의 말뚝에 대한 배치도와 제원은 각각 그림 7과 표 1과 같다.

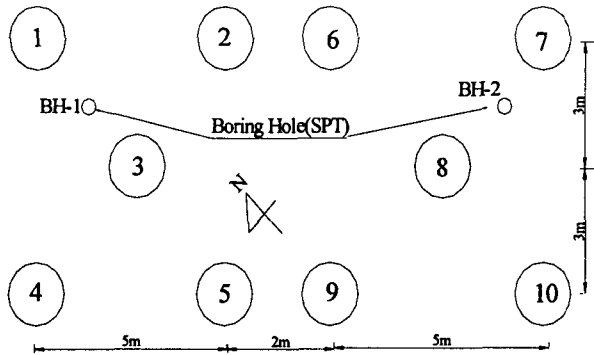


그림 7 현장모형말뚝 배치

말뚝 번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
깊이 (m)	6.7	7.2	6.4	7.4	7.1	6.9	6.6	7.0	6.4	6.7
L/D	17	18	16	19	18	17	17	18	16	17

표 1 말뚝 제원표

### 3.1 지반조건

현장은 그림 8과 같이 7m 부근까지 N치가 20-30 정도의 매립토로 구성되어 있으며, 지하수위는 약 7m 부근에 존재하는 것으로 SPT(표준관입시험)결과 확인되었다. 또한, 실내 입도분포 시험으로부터 USCS 분류법에 의거 SW(Well graded Sand) 지반으로 분류할 수 있다.

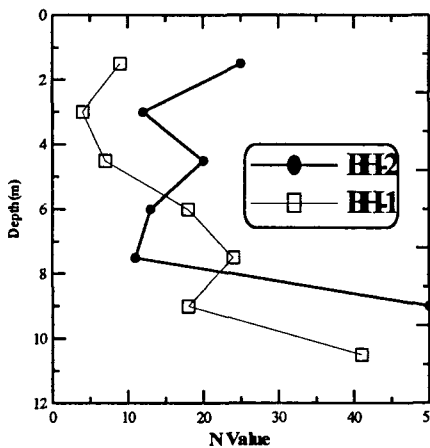


그림 8 현장 N값



그림 9 모래 주머니를 이용한 결함 조성

### 3.2 말뚝시공

본 현장의 모형 현장타설말뚝은 유압식 해머형 천공기를 이용하여 천공 후, 압축강도 210kg/cm<sup>2</sup>, 슬럼프 15cm의 콘크리트를 타설하였다. 인위적인 결함의 조성을 위해 그림 9와 같이 모래 주머니를 이용하였으며, 이를 철근에 가는 철사를 이용하여 고정하였다. 조성된 결함은 현장타설말뚝에서 흔히 발생할 수 있는 것으로서, 각각의 말뚝에 그림 10과 같이 조성되었다.

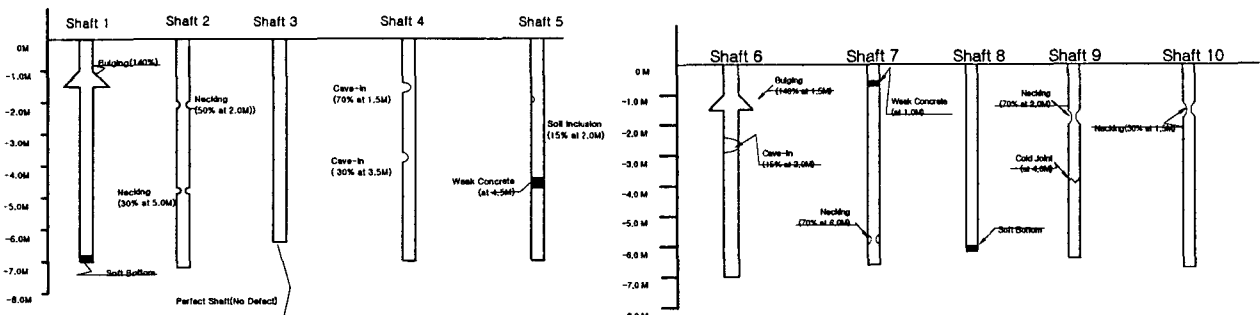


그림 10 말뚝에 조성된 결함의 종류와 위치

### 3.3 사용장비

본 연구에 사용된 장비는 미국 Olson Eng.社에 주문 제작한 것으로 모듈을 교체함으로써 다양한 NDT 기법을 적용할 수 있다. 자체 배터리와 운영체제가 내장되어 있어 현장조건에 구애받지 않고 시험을 할 수 있다.

### 3.4 시험결과

#### 3.4.1 CSL 시험결과

이미 현장에서 많이 사용되고 있는 본 시험은 결함의 위치 추정에는 높은 정확도를 보이고 있으나, 정확한 결함의 정도를 알 수 없다는 단점이 있었다. 그러나, 결함의 정도에 따라 측정된 파의 형태가 그림 11과 같이 다름을 알 수 있다. 따라서, 이러한 파의 형태로부터 결함의 정도에 대한 상대적인 분석이 가능하다.

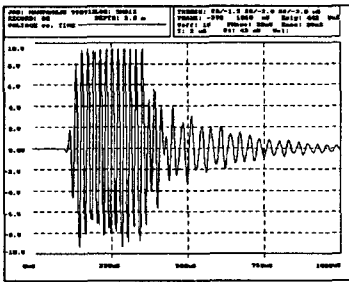


그림 11-1 정상파형(Shaft 5)

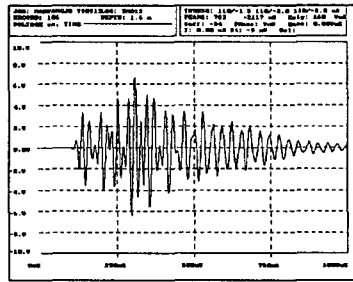


그림 11-2 Soil Inclusion

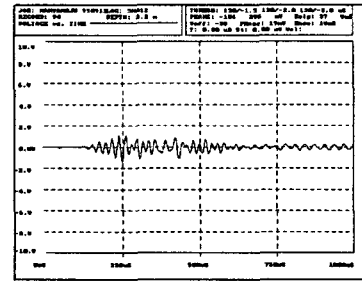


그림 11-3 Weak Concrete

최근에 본 시험이 많이 적용되고 있으나, 시험 시기가 많이 늦어져 실제 적용성이 떨어지고 있다. 따라서, 본 시험에서는 현장타설말뚝 시공 후 양생정도와 결함 판정 가능 시기를 평가해보고자 타설 후 시간경과에 따른 측정결과를 그림 12과 같이 나타냈으며, 그 시기는 4일 이후인 것으로 분석되었다.

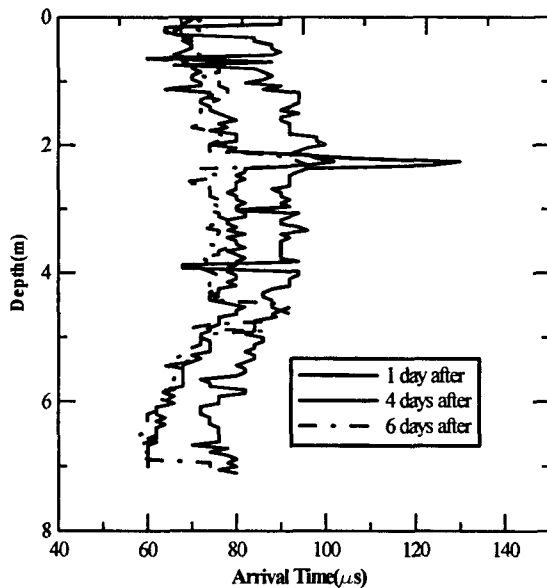


그림 12 타설 후 시간별 깊이-도달시간(Shaft2)

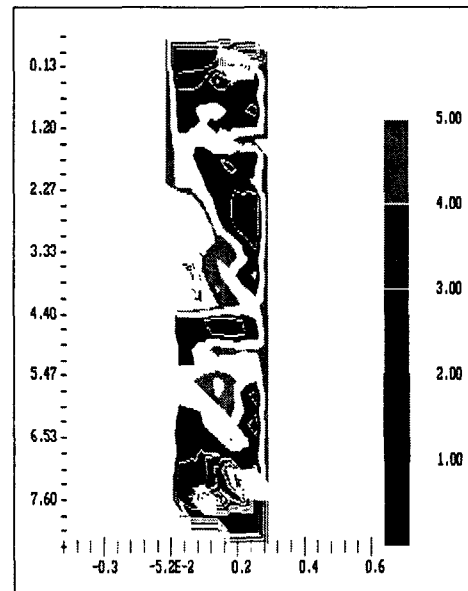


그림 13 CT 시험 결과(Shaft 2)

#### 3.4.2 CT 시험결과

CSL시험으로부터 결함의 위치로 판단된 부근을 중심으로 수행한 본 시험은 그림 13과 같이 결함의 대략적인 분포를 알 수 있다. 그림에서 2m, 5m 부근에 결함이 존재함을 알 수 있으며, 그 위치 또한 추정 가능하다.

### 3.4.3 PS 시험결과

시험 결과 10% 내의 오차를 보이고 있으며, 대표적인 시험 결과는 그림 14, 표 2와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 말뚝과 지반에서의 파의 도착시간이 다른 것은 물론, 파형이 V자를 이루어 분명한 구분이 가능함을 알 수 있다.

말뚝 번호	시공 깊이 (m)	측정 깊이 (m)	오차 (%)
1	6.7	6.8	1.5
3	6.4	7.0	9.4
8	7.0	6.6	5.7

표 2 PS 시험 결과

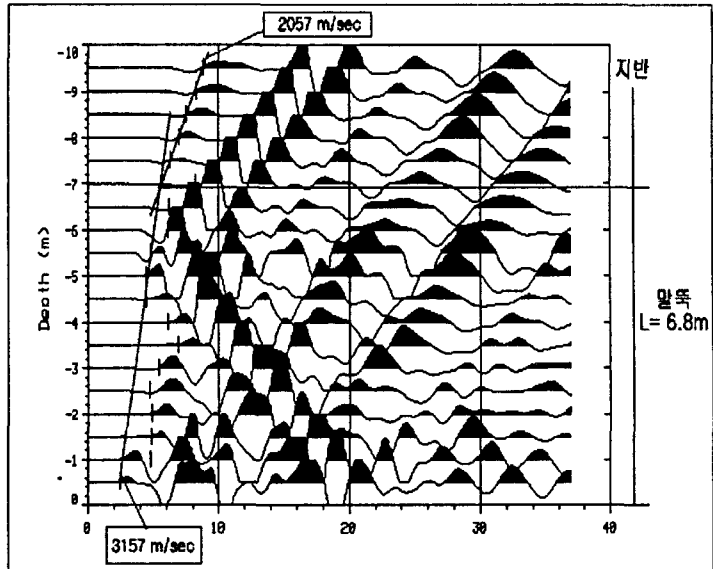
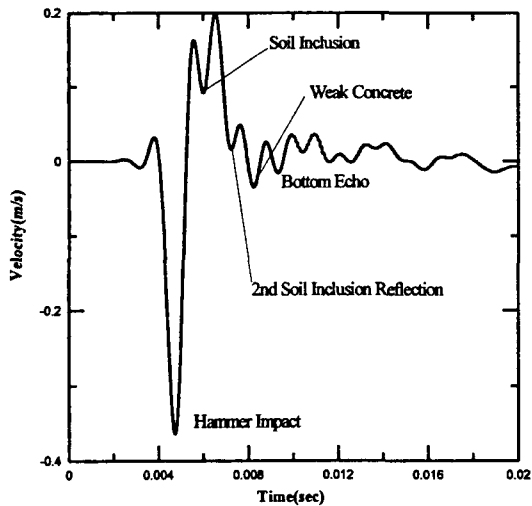


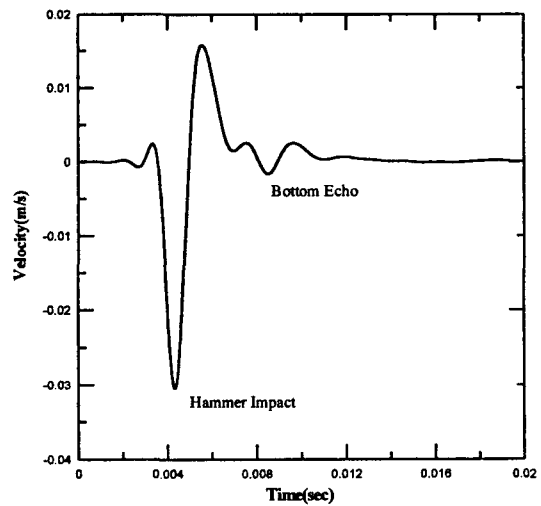
그림 14 Shaft1의 깊이-도달시간 그래프

### 3.4.4 SE 시험결과

본 시험은 말뚝 내에 존재하는 이상부위의 위치와 말뚝의 길이를 추정하기 위한 시험으로서 측정 데이터를 시간대영역에서 해석한다. 결함을 가진 말뚝 Shaft 5와 정상적인 말뚝 Shaft 3의 시험 결과를 그림 15 a, b에 나타내었다. 시험결과 결함의 위치와 말뚝의 길이가 하부에 존재하는 것으로 평가하는 경향이 있으며, 오차는 각각 8.325, 9.53%이었다.



(a)



(b)

그림 15 SE 시험결과 (a)shaft 5 (b) shaft 3

### 3.4.5 IR 시험결과

시험결과 그림 16과 같은 유동도 곡선을 구할 수 있었으며, 말뚝의 길이는  $\pm 3\%$ , 결함의 위치는 19%,

-23.7%의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, 이론적인 유동도로부터 추정된 말뚝의 직경과 측정된 유동도로부터의 직경을 이용해 말뚝의 단면적 감소를 예측할 수 있으며, 그 값은 실제 직경보다 약 3배 정도 적음을 알 수 있다. 그림 17은 유동도 곡선의 초기 기울기로부터 구한 동적 강성도(Dynamic Stiffness)로서 결함이 존재하는 말뚝에서의 값이 타말뚝에 비해 상대적으로 작음을 알 수 있다.

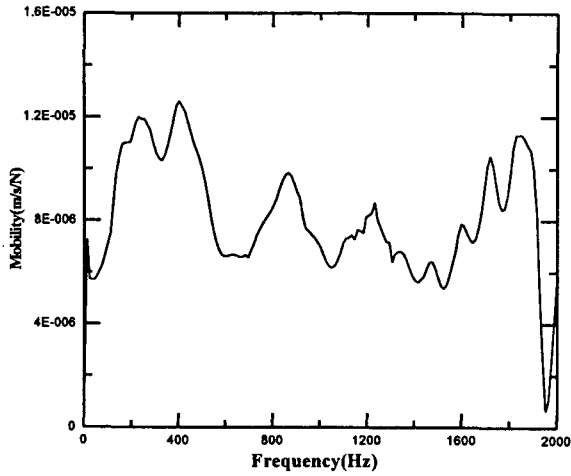


그림 16 IR 시험결과 (Shaft 9)

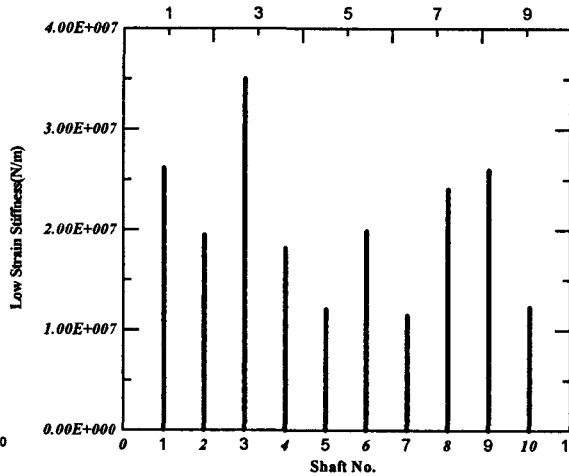


그림 17 말뚝별 동적 강성도

#### 4. 실물기초 시험

현장 모형시험으로부터 확인된 해석기술과 적용성을 바탕으로 하여 실제 교량 기초인 현장타설말뚝에 이를 적용하여 말뚝기초에 대한 시공정보 및 품질확인을 수행하였다.

##### 4.1 K 대교

본 현장은 직경 2.5m, 길이 30m의 RCD 말뚝으로서 CSL 시험 결과 그림 18과 같이 하부 25m에 큰 결함이 있는 것을 볼 수 있다. 구체적인 결함의 단면을 확인하기 위해 수행된 CT 시험 결과는 그림 19와 같으며, 이를 통해 결함이 말뚝 전단면에 걸쳐 있는 것을 알 수 있다.

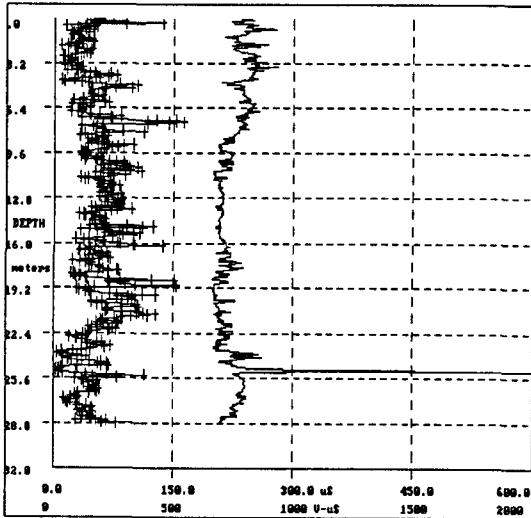


그림 18 검측공 1-4 CSL 시험결과

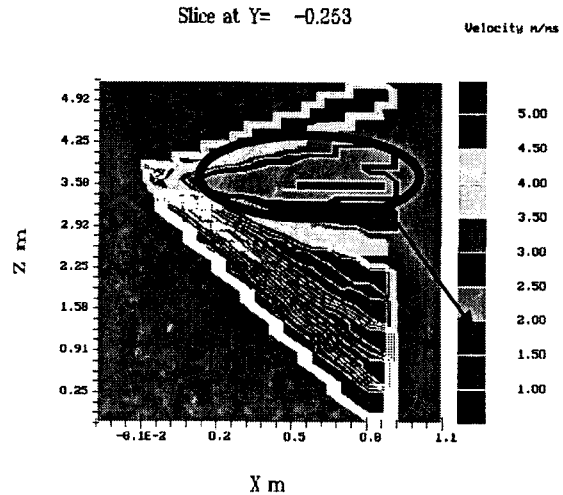


그림 19 검측공 1-4 CT 시험결과

##### 4.2 O 현장

본 현장은 PS 시험의 현장 적용성 및 신뢰도 파악을 목적으로 선정하였으며, 각 교각기초에 4개의 검측공을 조성하였다. 검측공은 직경 50mm PVC 관을 이용하였으며, 교각기초에 최대한 근접시공하였다. 시험결과는 표 3과 같으며, 거의 오차가 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서, 타 시험

법에 비하여 기초깊이 예측에는 가장 높은 정확도를 보이고 있음을 알 수 있다.

위치		계획깊이 (m)	측정깊이 (m)	오차(%)
O 교각 P1	현장타설	6.0	6.2	3.3
O 교각 P2	말뚝	7.0	7.3	4.3
S 교각	PHC	11.5	12.1	5.2
A 교각	강관	8.5	8.1	5.9

표 3 PS 시험결과(종합)

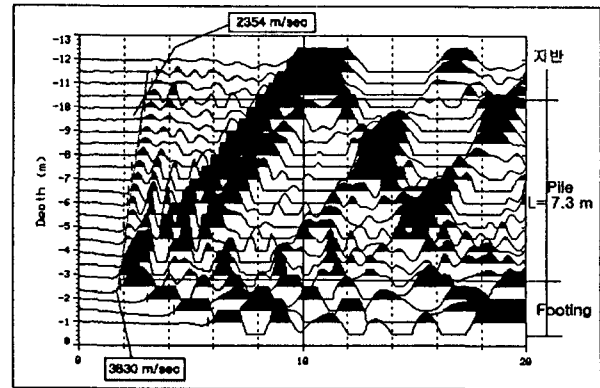


그림 22 PS 시험 결과(O교각 P2)

## 5. 결론

- 1) CSL 시험에서는 검측공이 반드시 필요하다는 단점이 있으나, 시험 결과 15%의 단면적 감소까지도 찾아낼 수 있으며, 그 위치 예측에도 높은 정확도를 보였다. 또한, CT 시험과 병행할 경우 구체적인 결함의 분포를 예측할 수 있었다.
- 2) 표면파 기법은 결함의 위치 산정보다 기초 깊이에 있어 그 오차가 10%내외로써 높은 정확도를 보여주고 있다. 그러나, SE 시험의 경우 단면의 감소와 증가에 대한 명확한 구분을 하기가 힘들 뿐 아니라, 그 결함의 크기 산정에도 큰 문제점이 있음을 알 수 있다. 이러한 단점은 IR시험이 병행될 경우, 유동도곡선(Mobility Curve)을 이용하여 결함 부분의 직경을 추정할 수 있었고, 그 오차는 15% 내외로써 비교적 높은 정확도를 보였다. 또한, 유동도 곡선 초기 부분의 기울기를 이용하여 구한 동적 강성도 비교 결과 건전한 말뚝일수록 그 값이 큰 것으로 나타났다.
- 3) 말뚝 길이 추정에 있어서 가장 정확한 시험은 PS 시험이며, 그 오차 또한 6% 내이다. 따라서, 시공정보가 없는 기초에 있어서의 말뚝길이 산정에 가장 유용한 기법임을 확인하였다.
- 4) 기지(known)의 기초에 대한 시험결과를 종합할 때 비파괴시험(NDT) 기법의 미지의 교량기초에 대한 적용성은 우수한 것으로 판단되며, 현장 조건에 맞는 기법을 선택적으로 적용할 경우 정확도도 확보할 수 있음을 알 수 있다.

## 6. 감사의 글

본 연구는 과학기술부 '99 국가연구개발사업(인위재해방재기술개발사업)의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 7. 참고문헌

1. 한국표준과학연구원, "Unknown Foundation의 진단기법 개발에 관한연구", 1999, 1999기관고유사업 위탁연구보고서
2. Clyde N. Baker, Gary Parikh, Jean-Louis Briaud, Elliott E. Drumright & Francis Mensah, "Drilled Shafts for Bridge Foundations", 1993, FHWA Technical Report
3. Jörn M. Seitz, "Low Strain Integrity Testing of Bored Piles", 1996, Application of Stress-Wave Theory to Piles, pp. 94-109
4. Richard J. Finno, "Paralle Seismic Evaluation of the NDE Test at the National Geotechnical Experimentation Site at Northwestern University", 1997, Final Report to the Infrastructure Technology Institute
5. Thomas M. Hearne, Kenneth H. Stokoe, Lyndon C. Reese, "Drilled Shaft Integrity by Wave Propagation Method", 1981, Journal of Geotechnical Engineering Vol. 107, No. GT10, pp 1327-1344