

# 현장타설 콘크리트 말뚝의 초음파 검사 판정기준에 대한 고찰

## Decision Criterion of Ultrasonic Coring Test for In-situ Concrete Piles



안 중 선\*\*

### 1. 서 론

서해안 고속도로중 경기도 평택과 충남 당진을 연결하는 총길이 9.4km, 교량연장 7.321km의 서해대교 건설공사의 현장타설말뚝은 약 1980본으로, 교량의 상부 및 차량의 이동하중을 지탱해주는 주요한 지지말뚝이다. 이 말뚝은 지반조사, 굴착, 철근가공 조립 및 설치, 콘크리트의 생산, 운반, 타설 등 각 공종별 시공과정에서 철저한 품질관리 과정을 거치지만 기초 pile의 특성상 심도가 깊고 수중에서 콘크리트가 타설되는 점을 감안, 최종품질검사 시험이 필요하다고 판단되어 현장타설말뚝에 대해 비파괴 검사의 일종인 초음파검사(ultrasonic coring test)를 시행하게 되었다.

초음파 시험결과에 따라 말뚝의 결함유무 및 결함정도를 파악하고 이에따라 말뚝의 보강여부를 결정하게 되는데, 실제로 본시험을 적용해 본 결과, 초음파 검사결과 해석에 관한 명확한 규정이

없이 이의 정립이 1차 과제로 대두하였다.

따라서 서해대교 감리단은 판정기준 설정을 위한 시험을 계획하였으며 시공사의 협조하에 인위적으로 다양한 결함을 포함시킨 실물규모의 시험말뚝을 제작하고 이를 대상으로 시험을 실시하였다.

본 고를 통하여 시험과 관련된 제반사항과 그 결과를 소개하고자 한다.

### 2. 비파괴 검사의 개요

재료가 갖고 있는 물리적 성질을 이용하여 물체를 파괴하지 않고 그 성질을 추정하고 결함여부를 판정하는 시험방법이다.

#### 2.1 비파괴 검사의 종류

비파괴 검사에는 다음과 같은 방법이 있다.

- 1) 방사선 투과 방법(R.T)
  - x-Ray 투과 검사
  - r-Ray 투과 검사

\* (주)대우엔지니어링 서해대교 감리단 차장

- 2) 초음파 검사(U.T) { 펄스 반사법  
투과법  
공진법

3) 자분 탐상검사(M.T)

4) 침투 탐상검사(P.T)

5) 기타

종류 및 적용성은 B.S(British Standard) 1881에 나오는 다음표 표 1과 같다.

## 2.2 비파괴 검사의 적용

표 1에서와 같이 대구경 파일의 결함 유무의 품질관리에 가장 널리 쓰이고 효과가 인정된 초음파 검사(ultrasonic coring test)로 서해대교 현장타설말뚝의 품질관리를 시행하기로 하였다.

## 2.3 초음파 검사(ultrasonic coring test)의 개요

### 2.3.1 초음파 검사의 원리

재료중에 음파보다도 주파수가 짧은 초음파(0.

표 1 비파괴 시험의 종류

Method	Test situation					
	Quality control	Investigation of standard of workmanship	Control of formwork removal, pre-stress release or load application	Comparative survey of quality of concrete in the structure	Investigation of potential durability	Investigation of fire, frost, chemical attack or similar
- Pull-out test (cast-in insert)	×		×			×
- Pull-out test (drilled hole)	×		×	×		×
- Internal fracture	×		×	×		
- Break-off test	×		×			
- Pull-off test	×		×	×		
- Penetration resistance	×		×	×		
- Surface hardness	×			×	×	×
- Screed test	×				×	×
- Dynamic response	×		×		×	
- Ultrasonic pulse velocity measurement	×	×	×	×	×	×
- Acoustic emission		×			×	
- Electronmagnetic cover measurement	×	×			×	
- Radar		×		×		
- Radiography		×				×
- Radiometry	×	×		×		
- Neutron moisture measurement					×	
- Depth of carbonation				×	×	×
- Initial surface absorption				×	×	
- Surface permeability					×	
- Resistivity measurement				×	×	
- Half-cell potential measurement					×	
- Strain measurement		×	×	×	×	×
- Thermography					×	×
- Maturity measurement			×			
- Resonant frequency	×					

5~25MHZ)를 피검사체의 일면에 입사시킨 다음, 도달 또는 반사되는 초음파의 도달시간, 파의 크기를 관찰하여 피검사체의 결함유무, 크기 및 특성등을 평가하는 시험으로, 충격파(반사파) 시험법, 초음파 시험법(ultrasonic coring test : 이하 sonic test)이 널리 사용되고 있다.

2.3.2 초음파 검사의 시험방법

가장 일반적으로 사용되는 충격파법과 초음파법에 대해 간단히 알아본다.

1) 충격파(반사파) 시험법

이 시험의 원리는 파일 머리 부분에 해머로 충격을 주면 콘크리트 내부에서 발생한 응력파가 pile toe를 거쳐 돌아오는 반사시간을 기초로 한 것이다.

파일 머리 부분을 먼저 플라스틱 망치로 가격한다. 그리고 이것에 의해 발생된 응력파를 pile toe까지 압축파(응력파)를 내려보낸 다음 그곳에서 다시 파일 머리로 반사되며 부착된 센서(geophone or accelerometer)를 통해 그러한 반사파의 움직임을 감지할 수 있다. 본 방법의 단점은 파일 축을 따라 선형형태, 즉 Pile Necking 또는 fatting에 대한 정보는 줄수 있지만 파일 단면에 따른 결함에 대해서는 정보를 얻을 수가 없다.

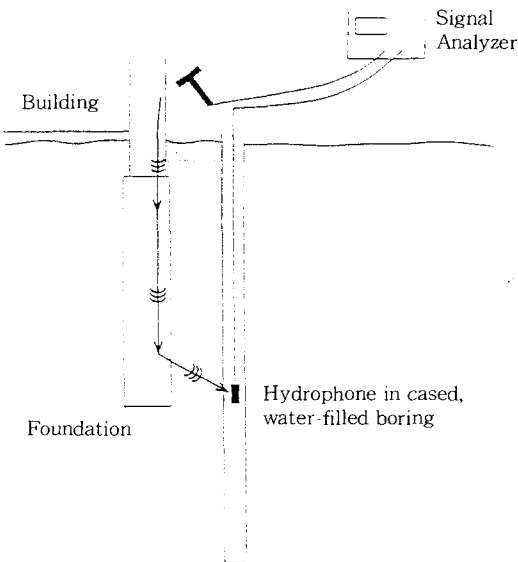


그림 1 충격파 시험법의 원리 및 방법

2) 초음파법

파일의 콘크리트 타설시에 Probe Guiding Tube가 파일의 주철근 방향으로 미리 설치되며 4개의 tube를 통해 초음파 probe가 드리워져 초음파 전파시간을 측정한다.

Tube 속은 물로 채워지며 물은 probe의 펄스를 전달하는 coupling으로써 작용한다. 기기구성은 음파발생기, oscilloscope, 2개의 probe(receiver, transmitter)로서 그림 2와 같다.

장점으로는, 측정깊이의 제한이 없고 정확도가 동일하며, sonic tube를 철근 대신하며, grouting 주입로로 이용될 수 있다. 콘크리트 타설후 48시간후에 시험이 가능하며, 파일 횡단면상의 결함의 방향 및 크기, 종단면상의 결함의 수직적 크기 및 위치를 확인할 수 있다. 시험결과 분석이 비교적 간단하고 보호한 점이 거의 없다.

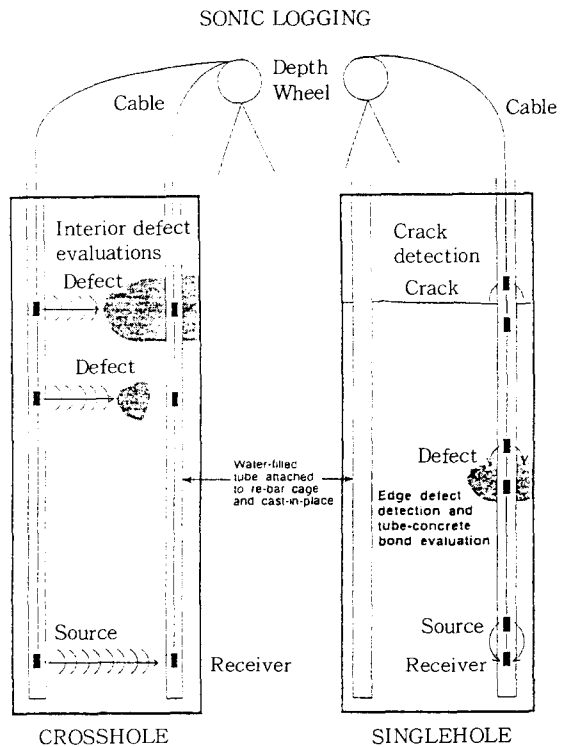


그림 2 초음파 시험기기 구성도

### 3. 초음파 검사 확인시험

#### 3.1 시험의 목적

서해대교 기초에 시공된 현장타설 말뚝의 건전도 확인을 위해 실시되는 초음파 검사 결과해석 기준설정을 목적으로 본시험이 계획되었다. 이를 위해 실제말뚝 크기와 동일한 시험말뚝을 제작하였으며, 제작도중 말뚝내부에 여러 가지 결함을 발생시켰다. 이러한 결함은 결함위치에 따른 영향, 크기에 따른 영향, 재료강도에 따른 영향, 재료분리에 따른 영향 등을 파악할 수 있도록 배치되었다.

#### 3.2 시험방법 및 사용장비

##### 3.2.1 시험방법

##### 1) 시험항목

##### (1) 말뚝 선단 재료분리 영향

시공상 부주의로 발생할 수 있는 재료의 분리현상의 영향을 알기위해 잔골재로 재료분리층을 만들어 시험하였다.

##### (2) 결함부의 크기에 따른 영향

결함의 크기에 따른 Sonic Test 결과를 알아보기 위해 그림 3의 Section B처럼 지름 3cm~20cm, 높이 10cm의 스티로폼로 결함물체를 제작하여 이에 따른 영향을 시험하였다.

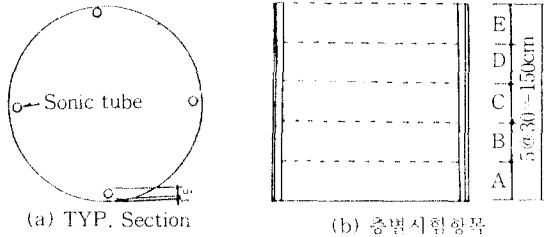
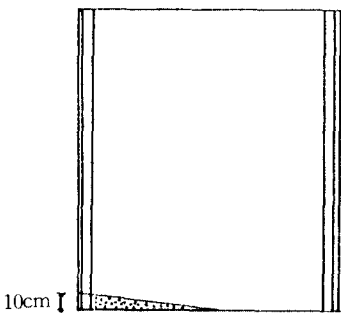
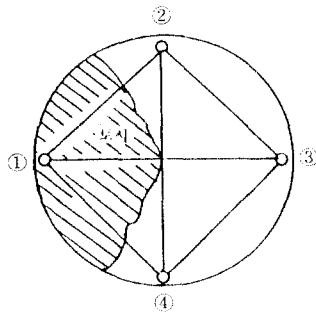


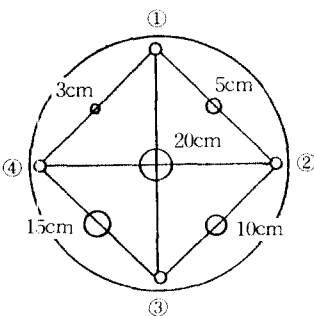
그림 3 증별시험 항목



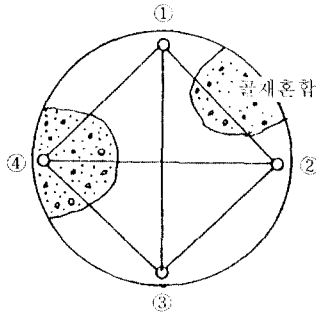
• A층(말뚝선단 Slime의 영향을 파악)



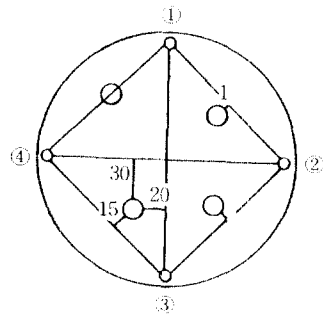
	D	E	비 고
결함길이 (D)	10cm	20cm	재료 : 스티로폼 L=10cm



• B층(결함부 크기의 영향을 파악)



• C층(재료분리)



• D-E층

(음파 전달경로와 결함부의 상대적 위치에 따른 영향)

그림 4 검증기구

(3) 음파전달 경로와 결함부의 상대적 위치에 따른 영향

음파전달 경로와 결함부의 상대적 위치에 따른 영향을 알아보기 위하여 그림 3의 D, E층과 같이 결함을 설치하여 위치에 따른 영향을 시험하였다.

(4) 재료 강도에 따른 오차

재료강도에 따른 영향을 알아보기 위하여 콘크리트 타설후 7일, 52일 후의 강도를 비교하였다.

## 2) 시험계획

### (1) 규격

- 콘크리트 : 황산염을 많이 포함하는 해수, 지하수에 접촉하는 부위의 콘크리트 공사에 많이 사용되는 내황산염 포틀랜드 시멘트를 사용하였다 : 350-19-2, 5(5종)

- 시험용 Mold : 지름 1500mm 강관 사용

### (2) 시험용 Sample 제작

층별시험 항목은 그림3과 같고 각 층 세부 단면별 결함 설치모양은 그림 4와 같다.

## 3.2.2 사용장비

본 시험에 사용된 장비는 미국 OLSON Instruments, Inc 사의 CSL(Crosshole Sonic Logging) 시스템으로 기기 구성은 다음 그림 5와 같고, 시험결과의 CSL LOG sample의 예는 다음 그림 6과 같이 좌측에는 energy 변화표시가, 우측에는 velocity변화가, 좌측상단에는 시험용 tube의 위치등이 나타나 있다.

## 3.3 시험결과의 분석

### 3.3.1 재료분리에 따른 영향

#### 1) 재료분리 설치 모양

수중 콘크리트 타설시 발생할 수 있는 재료분리 현상을 재현하기 위하여 넓이가 말뚝단면적의 약 15% 정도인 골재 혼합물 2개소를 오른쪽 그림 7과 같이 약 15cm 두께로 설치하여 sonic tube ①번에서 sonic tube ②번(이하 ①→②로 표기)으로 시험하여 그 영향을 분석하였고, 나머지 각각의 경우도 같은 방법으로 시험하여 영향을 분석하였다.

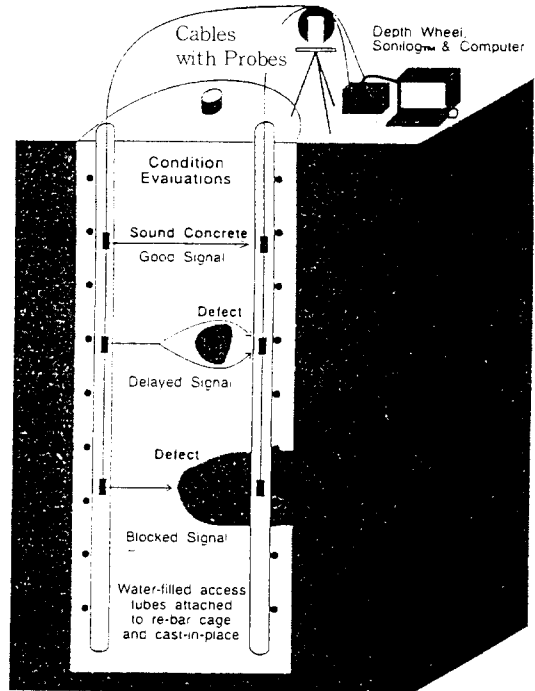
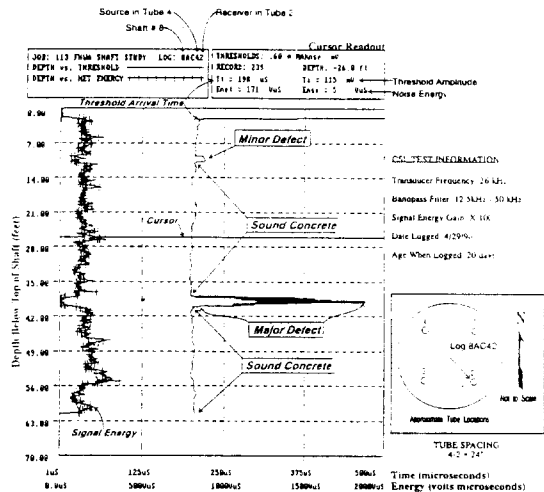


그림 5 CSL 기기 구성도



Note: Shaft is 3 ft diameter with known defects attached to the rebar cage during construction. The Major Defect is a 1/6 diameter neck in at 40 ft depth (5.6% of shaft cross-section). The Minor Defect is an elliptical inclusion at 12 ft depth (1.5% of shaft cross-section).

그림 6 CSL LOG Sample



그림 7 재료분리 설치, C층

## 2) 분석결과(그림 11 CSL LOG도)

에너지의 변화는 모든 경우에 나타나며, 결합부위가 음파의 전달경로상에 있는 경우 5% ~ 47% 정도 속도가 감소한다. 속도의 감소비율과 음파 경로상에서 결합부가 차지하는 면적과의 상관관계는 불분명하며, sonic tube ④공에서 수신된 경우 속도 감소율이 35%~47%인 것으로 부터 유추할 때 결합부의 두께가 크게 영향을 미치는 것으로 보인다.

### 3.3.2 Slime에 따른 영향

#### 1) Slime 설치 모양

현장타설말뚝 선단에 slime이 있을 경우를 재현하기 위해 sonic tube ①을 중심으로 ②, ④에 약 10cm 두께로 말뚝 단면적의 약50% 정도로 모래를 포설하여 그 결과를 확인하였다.

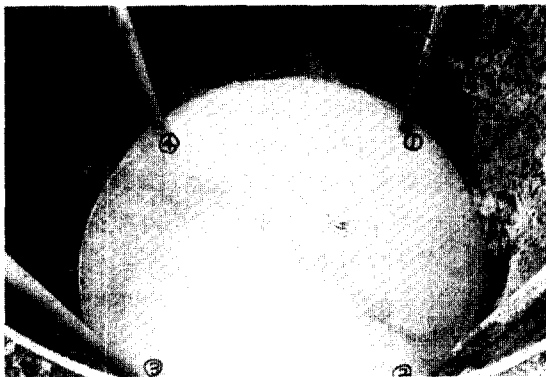


그림 8 Slime 설치, A층

## 2) 분석결과(그림 11 CSL LOG도)

에너지의 변화는 모든 경우에 나타나며 4% ~ 18%까지 속도의 감소를 나타내고 있으나, 모래가 얇고 일부만 있는 지역(③→④, ②→④)은 속도의 변화를 나타내지 않고 있다. 위의 결과로 볼 때 속도의 변화가 나타나는 최소두께는 10cm 이상일 것이며 같은 두께의 slime이라도 발신기보다는 수신기 근처의 slime이 더 큰속도의 변화가 나타남을 알 수 있다.(①→②와 ③→①의 경우)

### 3.3.3 결합 크기에 따른 영향

#### 1) 크기별 결합 설치사진

그림 4의 검증기구에서 볼 수 있는 것과 같이 결합의 크기에 따른 영향을 재현하기 위해 크기가 다른(지름 3cm~20cm) 결합물체(스치로플)를 초음파의 전달경로상에 오른쪽 그림 9과 같이 설치하여 결합의 크기에 따른 에너지 및 속도의 변화를 시험하였다.

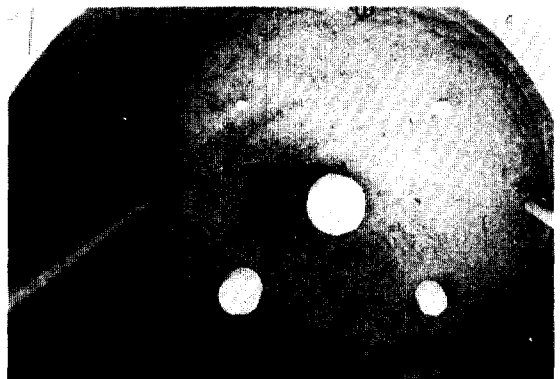


그림 9 크기별 결합 설치, B층

## 2) 분석결과(그림 11 CSL LOG 도)

에너지 변화는 미소하여 그 유무를 판정하기가 어려우며, 속도도 일부(지름 15cm)를 제외하고는 변화가 나타나지 않는다. 이는 결합물체가 말뚝단면적의 약 3% 정도로 작기 때문으로 사료된다. 위의 결과로 크기가 지름 20cm, 높이 10cm 결합이 초음파의 전달경로상에 있더라도 다른 결합부분이 없으면 에너지나 속도의 변화가 나타나지않을 알 수 있으며 결합위치에 따른 오차분석시 다시 분석해 보기로 한다.

### 3.3.4 결함 위치에 따른 오차

#### 1) 위치별 설치 사진

말뚝단면상의 일부에 결함 발생시를 재현하기 위하여, 지름 10cm, 20cm, 높이 10cm의 스티로폼로 결함물체를 제작하여 초음파의 전달경로상과 이에서 어느정도 떨어진 위치에 각각설치(그림 4의 D, E층, 그림 10) 하여 그에 따른 영향을 분석하였다.

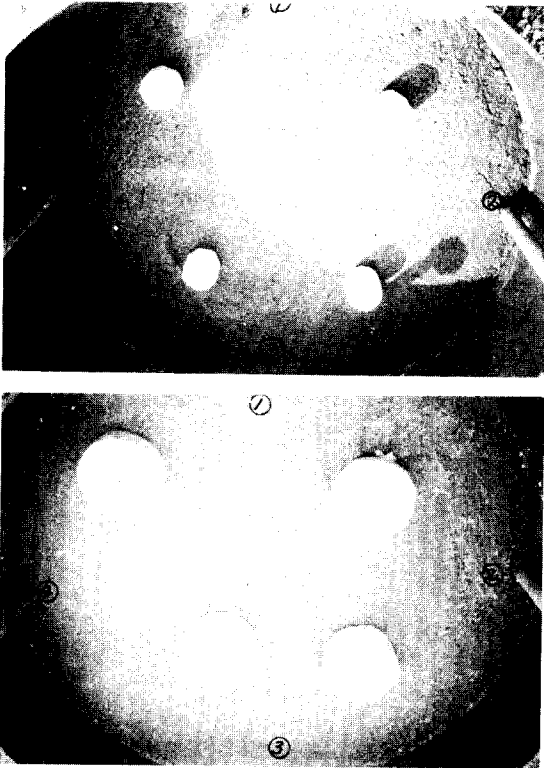


그림 10 위치별 설치, D층, E층

#### 2) 분석결과(그림 11 CSL LOG 도)

에너지의 변화는 지름 10cm인 경우는 미소하며 20cm인 경우는 뚜렷한 감소를 보인다. 이는 말뚝 단면력과 결함물체의 면적의 비율이 지름 10cm인 경우는 2% 정도이며, 지름 20cm인 경우는 약 7%로, 앞의 경우와 종합하여 볼 때 면적 비율이 2~3%인 경우는 초음파의 전달 경로상에 있는 것과 에너지의 변화는 관계가 적은 것으로 사료되며, 면적 비율이 7% 이상인 경우는 초음파 전달경로상의 유부와 상관없이 에너지는 변화하는 것으로

사료된다. 지름 10cm인 경우 속도의 변화는(②→④, ③→① 경우만 미소) 거의 나타나지 않으며, 지름 20cm인 경우 4%~15%까지 감소하고 있다. 이중 ②→④, ③→①의 경우가 속도의 변화가 큰 것은 초음파의 전달경로 양쪽에 결함물체가 있는 경우이다. 위의 결과에서 음파의 전달 경로 근처라도 지름 20cm, 높이 10cm 이상의 결함 물체가 양쪽에 2개 이상 있을 경우 속도와 에너지가 모두 변화함을 알 수 있다,

### 3.3.5 재료 강도에 따른 오차

#### 1) 시험

콘크리트 타설후 7일후와 52일후의 강도가 다른 경우의 영향을 시험, 분석하였다.

#### 2) 분석결과(그림 11 CSL LOG 도)

전반적으로 강도가 다른 경우(재령 7일, 52일의 강도를 갖는 재료)에도 Sonic Test 결과 특별한 변화는 없었으나 7일 강도일때 미소한 속도의 감소를 보인 경우(①→②의 경우 크기오차, 재료분리층, ②→③ 경우 위치오차시험층등)는 시간이 지나 강도가 증가함에 따라 속도의 감소가 나타나지 않고 있다.

## 4. 결 론

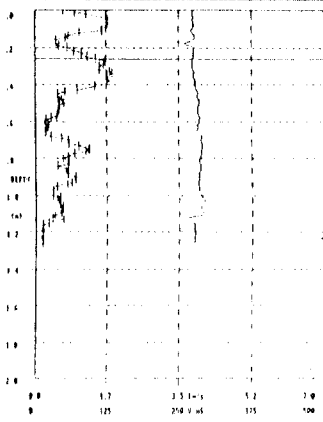
현장타설말뚝의 건전도를 확인하기 위해 수행되는 sonic test 결과 해석의 기준설정을 목적으로 실제 시공되는 말뚝과 동일한 규격으로 시험체를 제작하여 말뚝내부의 결함이 sonic test 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 본 시험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 재료분리에 따라 에너지의 변화는 모든 경우에 나타나며, 속도의 변화는 직선상에 있는경우 약 5%~47%까지 속도의 감소가 나타난다.

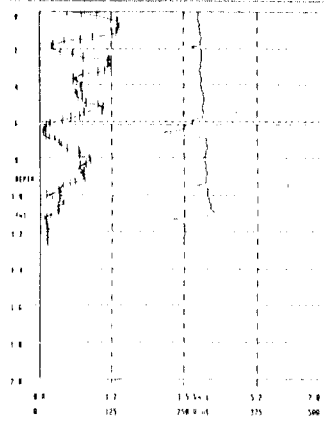
2) Slime에 의한 시험결과, 에너지의 변화는 뚜렷하며, 속도의 변화도 약 4%~18% 사이로 나타나며 발신기 보다는 수신기 근처의 slime에 더 큰 영향을 나타낸다.

3) 결함의 크기에 따른 오차의 경우 일부(지름 3cm, 20cm)를 제외하고는 에너지의 감소가 나타나며, 속도의 변화는 일부(지름 15cm)만을 제외

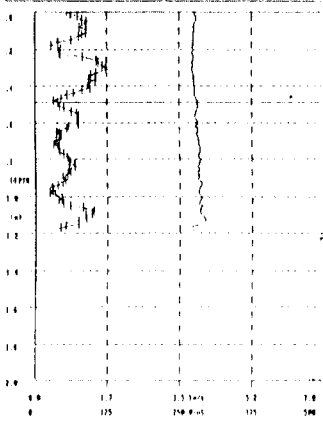
JOB: 13000101 NAME: LAG 212141.PLI      INSTRUMENT: 2 By P-100  
 TIME PAIR: 1 - 2 CH. 1      RECORD: 16      OFFSET: 26 m  
 DEPTH vs. VELOCITY      Wd = 3022 m/s  
 DEPTH vs. TOT. DIRECTION      Etc: 2.00 Wd      Case: 0.00 Wd



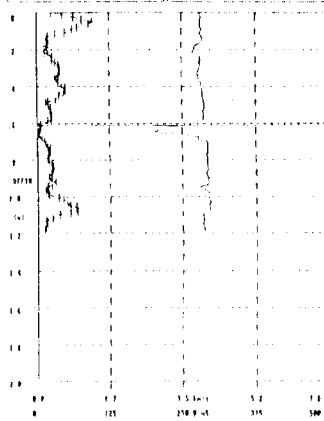
JOB: 13000101 NAME: LAG 212141.PLI      INSTRUMENT: 2 By P-100  
 TIME PAIR: 1 - 2 CH. 2      RECORD: 18      OFFSET: 12 m  
 DEPTH vs. VELOCITY      Wd = 3287 m/s  
 DEPTH vs. TOT. DIRECTION      Etc: 2.00 Wd      Case: 0.00 Wd



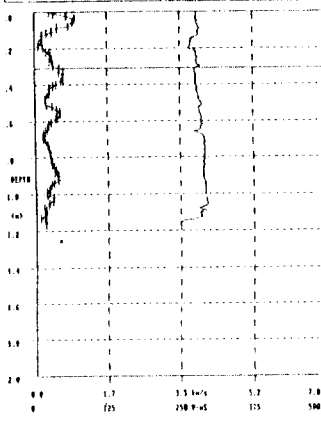
JOB: 13000101 NAME: LAG 212141.PLI      INSTRUMENT: 2 By P-100  
 TIME PAIR: 2 - 3 CH. 1      RECORD: 51      OFFSET: 49 m  
 DEPTH vs. VELOCITY      Wd = 3329 m/s  
 DEPTH vs. TOT. DIRECTION      Etc: 2.00 Wd      Case: 0.00 Wd



JOB: 13000101 NAME: LAG 212141.PLI      INSTRUMENT: 2 By P-100  
 TIME PAIR: 2 - 3 CH. 2      RECORD: 41      OFFSET: 61 m  
 DEPTH vs. VELOCITY      Wd = 3616 m/s  
 DEPTH vs. TOT. DIRECTION      Etc: 2.00 Wd      Case: 0.00 Wd



JOB: 13000101 NAME: LAG 212141.PLI      INSTRUMENT: 2 By P-100  
 TIME PAIR: 3 - 4 CH. 1      RECORD: 61      OFFSET: 31 m  
 DEPTH vs. VELOCITY      Wd = 3664 m/s  
 DEPTH vs. TOT. DIRECTION      Etc: 2.00 Wd      Case: 0.00 Wd



JOB: 13000101 NAME: LAG 212141.PLI      INSTRUMENT: 2 By P-100  
 TIME PAIR: 3 - 4 CH. 2      RECORD: 51      OFFSET: 47 m  
 DEPTH vs. VELOCITY      Wd = 3940 m/s  
 DEPTH vs. TOT. DIRECTION      Etc: 2.00 Wd      Case: 0.00 Wd

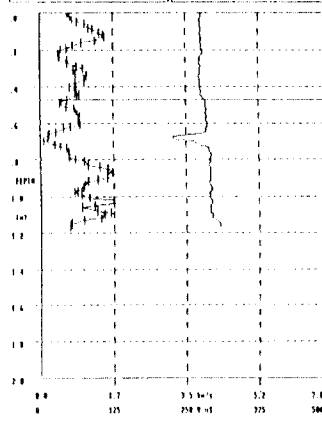


그림 11 CSL LOG도



표 2 Sonic Test 결과 분석 총괄표

종류	①→②		①→④		②→②		②→④		③→①		③→④	
	상 태	상 태	상 태	상 태	상 태	상 태	상 태	상 태	상 태	상 태	상 태	상 태
E층 위치오차 ( $\phi 20$ )	1cm 안쪽	중양	5cm 안쪽	30cm 안쪽	20cm 안쪽	15cm 안쪽						
	E	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	S	○(4%)	○(6%)	○(7%)	○(14%)	○(15%)	○(15%)	○(15%)	○(15%)	○(15%)	○(15%)	×
D층 위치오차 ( $\phi 10$ )	1cm 안쪽	중양	5cm 안쪽	30cm 안쪽	20cm 안쪽	15cm 안쪽						
	E	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	S	×	×	×	○(4%)	○(5%)	○(5%)	○(5%)	○(5%)	○(5%)	○(5%)	×
C층 재료분리	① ②	① ④	② ③	② ④	③ ①	③ ④						
	E	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	S	○(8%)	○(13%)	×	○(35%)	○(5%)	○(5%)	○(5%)	○(5%)	○(5%)	○(47%)	○(47%)
B층 크기오차	$\phi 15$	$\phi 10$	$\phi 8$	$\phi 20$	$\phi 20$	$\phi 5$						
	E	○	○	×	○	×	○	×	×	×	×	○
	S	○(4%)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
A층 Slime	① ②	① ④	② ③	② ④	③ ①	③ ④						
	E	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	S	×	○(8%)	○(4%)	×	○(18%)	○(18%)	○(18%)	○(18%)	○(18%)	○(18%)	×

REGEND

E : Energy    O : 변화있음  
S : Velocity    X : 변화없음

하고는 나타나지 않는다.

4) 위치에 따른 오차에서 에너지의 변화는 발뚧 단면적의 7% 이상 결함물체가 있으면 나타나고 있으며, 속도는 지름 20cm, 높이 10cm 결함의 경우는 위치에 따라 4%~15%까지 감소가 나타나며 지름 20cm, 높이 10cm 이하일 경우는 결과의 신뢰도가 떨어진다.

5) 강도에 따른 변화는 대체로 없음을 알 수 있다.

6) 속도의 감소가 나타나는 결함은 최소한 지름 20cm, 높이 10cm 이상의 물체임을 알 수 있다. 시험결과에 의하면 에너지 변화는 결함물체의 발뚧 단면적에 대한 비율이 7% 이상인 경우에는 전반적으로 결함유무, 위치 등에 따라 반응이 나타난다. 그러나 속도는 재료분리 및 slime에서는 변화를 보이며, 위치 및 크기에 따른 영향은 지름이 20cm일 경우에는 나타나고, 그 이하에서는 일정한 변화가 나타나지 않으나 지름 20cm, 높이

10cm 이상의 물체가 초음파의 전달경로 근처에 2개 이상 있을 경우는 속도의 변화가 나타난다.

본 시험에서 제작하여 사용한 결함물체의 크기가 너무 작아 기준설정된 본 목적에 충분히 만족하지 못하였음을 아쉬워하며, 다음 기회에 보다 많은 사람에 의해 큰 결함물체로 보다 많은 시험이 이루어져 보다, 정확한 기준을 설정할 수 있기를 바란다.

끝으로, 본시험에 대해 물심양면 적극 지원해 주신 LG건설(주) 서해대교 건설현장의 문정기 소장을 비롯한 관계자 여러분께 심심한 사의를 표한다.

참 고 문 헌

1. 비파괴 검사에 의한 파일결함 탐사, 제4권 4호, 1992. 12 콘크리트학회지
2. 비파괴 검사 이론과 실제, 대림산업 기술연구소 기술지도서-16
3. PILE 비파괴 검사방법의 비교검토서, 1991. 8 (주)대우엔지니어링
4. British Standard BS 1881 Part 201 : 1986
5. R. T. Stain Integrity Testing of Piles by Sonic Coring. Civil Engineering, April 1982
6. Sonic Coring Test of Caisson, Bored Pile and Cast In-Situ Pile. Testing and Consulting Services to the Construction Industry, SP3. January 1984
7. Interpretation of Sonic Coring results, R. T. Stain & H. T. Williams Testconsult CEBTP Ltd. UK
8. Ultrasonic tester battery version hand operated CAT. E46/B