

현장타설 말뚝의 비파괴 검사

우 제 윤
한국건설기술연구원
지반연구실, 선임연구원

1. 서 론

근래에 우리나라에서도 현장 타설식 콘크리트 말뚝기초(이하 '말뚝기초'로 축약)의 공법이 증가하면서 말뚝기초의 지지력 저하 및 침하의 잠재요인이 되는 말뚝 몸체의 구조적 결함 및 말뚝과 주변 지반과의 지지·접촉 상태를 파악할 수 있는, 이른바 말뚝기초의 결함조사법(또는 건전도 시험법, pile integrity test)에 대한 관심이 높아 가고 있다. 최근, 잇따른 대형 교량 붕괴사고와 관련하여 교각 말뚝기초의 결함 여부가 거론된 바 있고, 앞으로 서·남해안 개발등과 관련하여 열악한 지반조건에서 대형 및 중요 구조물의 축조가 증대할 것임을 미루어 볼 때 말뚝기초의 시공품질관리 측면에서 결함조사의 필요성은 한층 더 높아질 것이다.

그러나, 현재 국내 기술 수준은 아직까지 이러한 결함조사법과 관련한 세부 기술사항에 대한 이해가 크게 부족한 상태임은 물론, 그 필요성에 대한 인식조차 미흡한 실정이라 하겠다. 따라서 이 글에서는 지금까지 개발된 말뚝기초의 결함조사법들을 개관하고, 특히 이 중에서 실용성 및 신뢰성 측면에서 가장 많이 적용되고 있는 응력파(stress wave)전파 특성을 활용한 비파괴 시험법들에 대한 세부 기술적 측면에 대하여 상세하게 소개하고자 한다.

2. 결함조사법 개관

말뚝기초의 결함조사법은 한마디로 말뚝기초 내·외부의 결함부위를 파악하며 말뚝기초의 근원적인 지지력 저하 및 침하 잠재요인을 진단·평가하는 기술이다. 이러

한 결함조사법 중에서 말뚝을 인발해 내거나 주변 지반을 굴착하여 직접 육안으로 확인하는 것이 가장 확실한 방법의 하나라고 생각할 수 있겠으나, 이러한 직접적인 방법은 시행가능한 여건이 극히 제한적이라서 사실상 '조사법'이라고 부르는 어렵다. 나아가, 육안 관찰에 의한 방법을 동원하더라도 실제로 말뚝내부의 상태를 전반적으로 파악하는데는 한계가 있고, 특히 말뚝-지반의 원위치의 지지·접촉상태를 추정하는 것은 불가능하다. 따라서 비단 현실성의 측면에서 뿐 만 아니라 조사의 실질성, 유용성 측면에서도 간접적인 시험 방법이 불가피하다고 할 수 있다.

이와 같은 간접적인 말뚝결함 조사법과 관련하여 현재 시험원리 및 측정기법을 달리한 다양한 시험 방법들이 적용되고 있다. 이 중에서 시험의 간편성 및 신뢰성, 도출정보의 다양성 측면에서 가장 널리 적용되고 있는 방법은 초음파원(ultrasonic source) 및 기계적 충격(mechanical impact)에 의해 발생하는 낮은 변형율(low-strain)조건의 응력파 전파 특성을 활용한 시험법들로서, 현재 다양한 형태로 상품화되어 있다. 이밖에도 최근에는 가진기(vibrator)를 이용한 정상진동법(steady-state-vibration test) 및 전기비항법(electric-resistivity method) 등이 연구되고 있으나, 아직 실용화 될 수 있는 기술개발 단계에는 못 미치고 있다.

따라서 이 글에서는 저변형율의 응력파 전파 특성을 활용한 말뚝기초의 비파괴 결함 조사법들에 대하여 중점적으로 다루고자 한다. 다음에는 이들 시험법의 세부 기술 측면을 알아보기에 앞서서 말뚝기초에서 발생하는 전형적인 결함의 유형을 살펴본다. 그리고 결함부위가 초래하는 응력파 반사·전달 특성의 변화 양상의 분석과 관련된 기본적 이론 및 측정기술 측면에 대하여 다룬다.

2.1 말뚝기초의 결함 유형

말뚝기초에서 흔히 발생하는 내부결함으로는 병목부(neck) 및 확대부(enlarged zone, 또는 bulb)와 같은 비정상적 단면, 그리고 공동(void)/ 콘크리트 이격 부위(separation), 균열(crack), 파쇄부(crushed zone), 시공이음(splice) 등과 같은 불연속 부위, 또한 불량 콘크리트(weak concrete) 및 토사혼입부(soil intrusion) 등과 같은 비균질 매질 형성 부위 등을 들 수 있다. 한편, 외부결함으로는 말뚝 선단부에서 굴착잔류토(slime) 및 선단하 공동 등으로 인한 연약선단(soft toe), 그리고 말뚝 몸체와 주변부의 토층 사이에 형성되는 측면 공동(side cavity) 등이 대표적이다. 그림 2.1에는 이와 같은 말뚝기초의 결함들의 유형을 이상적으로 나타내었다.

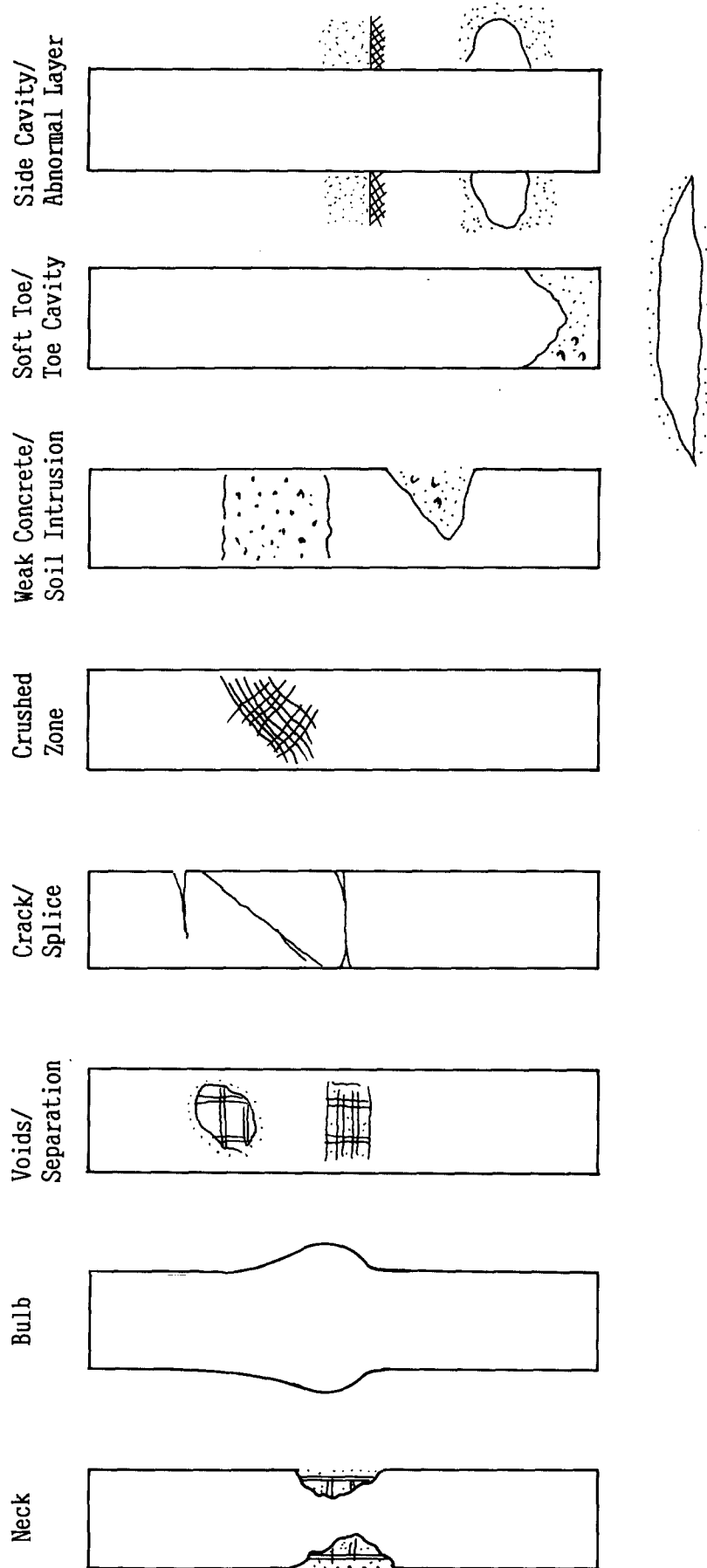


그림 2.1 현장 타설 말뚝기초의 결함유형

한편, 그림 2.1에 나타낸 바와 같은 말뚝 내·외부의 각종 결함부위는 응력파의 전파 측면에서 볼 때, 말뚝몸체를 구성하는 주재료인 콘크리트와 응력파 전파 특성이 상이한, 이른바 ‘응력파적 이상부위(acoustic abnormaly)’가 된다. 일반적으로 이러한 응력파적 이상부위에서 응력파의 전파속도는 주재료(콘크리트)와 큰 차이를 나타내고, 이러한 결함부위에서 응력파 에너지의 일부는 반사된다.

따라서 말뚝몸체내에 적절한 응력파 전파 경로를 설정하고 초음파원이나 기계적 충격을 이용하여 응력파를 발생시킨 다음, 응력파의 전파속도 변화 및 응력파의 반사특성을 분석하면 말뚝 내·외부의 결함부위 존재 여부, 위치, 나아가 결함의 특성 등에 대한 정보를 역추출해 낼 수 있다. 이것이 응력파 전파 원리를 이용한 결함조사법들의 공통적인 근본 개념이다.

그런데 여기서 한 가지 미리 이해해 두어야 할 사항은 ‘응력파적 이상부위’가 반드시 말뚝의 구조적 안정을 위협하는 ‘구조적 결함(structural defects)’을 의미하지는 않는다는 점이다. 예를 들면 구조적으로 그다지 문제가 되지 않는 경미한 균열이나 실제로 큰 문제를 초래할 만큼의 커다란 균열도 응력파 전파 특성 측면에서는 동등한 효과를 갖는다. 따라서 시험성가로 부터 판정되는 결과는 일차적으로 잠재성 결함으로 간주하는 것이 원칙이며, 안정성 측면에서 문제를 최종적으로 판정하는 데는 다른 보조시험 및 조사를 통하여 정밀한 확인절차가 필요할 수도 있음에 유념해야 한다.

2.2 결함조사법의 종류

현재 가장 널리 적용되고 있는 저변형율의 응력파 검측법들을 대분하면 검측공 시험법(borehole sonic logging test)과 비검측공 시험법(non-borehole test)으로 나눌 수 있다. 검측공 시험법은 강관(steel tube) 등을 이용하여 응력파 발생장치 및 감지기를 삽입할 수 있는 검측공을 말뚝기초의 시공단계에서 하나 이상 말뚝에 매설해 두거나, 기시공된 말뚝의 경우는 말뚝 인접 지반에 조성하여 수평검측(crosshole sonic logging : CSL)기법이나 상하향 검측(up/down hole logging)기법을 적용하는 시험방법이다. 후자의 경우는 검측공이 하나만 필요하므로 단일공 검측법(single hole sonic logging: SSL)이라고 부르기도 한다.

검측공 시험법은 말뚝의 길이 방향을 따라 정밀하게 결함조사를 시행할 수 있고 말

뚝의 근입 깊이를 정확히 측정할 수 있는 것이 큰 장점이다. 그러나 검측공을 조성하는 측면에서 말뚝몸체 및 지반을 손상시키는 조치가 불가피하고, 특히 많은 수의 시험이 필요한 경우에는 시간 경비적 측면에서 경제성이 낮은 것이 단점이다. 또한 기시공된 말뚝기초를 대상으로 하는 경우에는 검측공의 천공작업을 위한 공간 확보 및 기타 주변 여건상의 제약으로 인하여 수행이 어려운 문제도 따른다. 비검측공 시험법은 검측공을 별도 조성할 필요없이 응력파의 유발을 충격지점과 응력파의 감지 지점이 모두 말뚝두부의 표면에서 이루어진다. 검측공 시험법들이 검측공을 조성해야 하는 측면에서 '관입성(intrusive)의 비파괴 시험법'이라면 이 시험법은 비관입성(nonintrusive)의 완전한 비파괴 시험법이라고 할 수 있다.

한편, 비검측공 시험법에서는 말뚝두부를 손잡이 햄머(hand-held hammer)나 낙하체(drop weight)를 이용하여 타격함으로써 말뚝의 길이 방향으로 응력파를 유발시킨다. 이와 같은 비검측공 시험법들이 검측공 시험법과 본질적인 다른 것은 결합부위를 진단하는데 있어 검측공 시험법이 직접 도달파(direct arrival waves)의 전파속도 및 진폭(또는 파에너지 강도)의 변화를 활용하는 반면에, 비검측공 시험법은 응력파가 말뚝내부의 각종 결합부위 및 말뚝선단으로부터 반사된 후에 말뚝두부로 되돌아온 반사파(reflected wave)의 신호특성을 활용한다는 점이다.

최근에는 손잡이 햄머 등을 이용하는 종래의 비파괴 시험법이 말뚝이 길거나 결합 및 손상정도가 심한 경우 신뢰성 있는 결과를 얻기 어려운 측면, 그리고 본질적으로 결합부위의 특성(크기, 형태 등)을 파악하는데 한계가 있는 점 등을 보완할 목적으로 새로운 비파괴 시험법들이 시도되고 있다. 이러한 새로운 비파괴 시험법들 역시 본질적으로는 저변형율의 응력파 조건을 수반하는 시험법에 속한다. 현재 상품화 단계에 이른 대표적인 것으로는 무거운 중량체를 자유낙하시키는 방법 등을 이용하여 상대적으로 높은 변형율을 수반하는 조건에서 말뚝을 일시진동(transient vibration) 시키고 말뚝-지반의 동적 상호작용의 분석에 토대를 둔 시험법을 들 수 있다. 또한 가진기(vibrator)를 사용하여 가진 주파수(exciting frequency)를 바꾸어 가면서 말뚝을 정상진동(steady-state-vibration) 시키고, 주파수 영역에서 진동신호 특성을 분석하여 말뚝의 결합을 진단하는 시험법도 연구되고 있다. 이와 같은 최근의 새로운 시험법들은 말뚝의 동적 지지력 시험법에서 활용되고 있는 기법과 맥락을 같이하는 것이라 볼 수 있는데, 단지 유발되는 변형율 조건이 말뚝의 동적 재하 시험법에서와 같이 매우 높은 변형율(high-strain)조건이 아니라는 점에서 근본적인 차이가 있다. 다음에는 지금까지 개관한 각종 비파괴 결합법들의 세부 기술내용에 대하여 설명한다.

3. 검측공 시험법

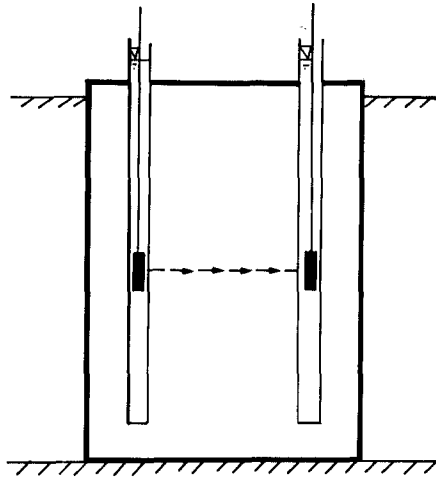
이 시험법은 시공단계에서 사전 매설한 강재(steel) 또는 PVC재의 케이싱(casing)관을 이용하는 것이 보편적이다. 그러나 기시공된 말뚝기초를 대상으로 할 때는 말뚝기초의 코어링(coring)공 같이 케이싱(casing)이 없는 검측공을 활용할 수도 있다. 그리고 말뚝기초의 코어링이 여건상 불가능한 경우에는 말뚝기초에 가까운 인접 지반내에 말뚝기초와 수직으로 평행되게 검측공을 조성하여 시험을 행할 수도 있다. 이와 같은 방법을 말뚝물체에 검측공을 조성한 경우(직접 측정법)와 구분하여 평행측정법(parallel sonic logging : PSL)이라고 부른다.

3.1 시험법의 종류 및 시험장비

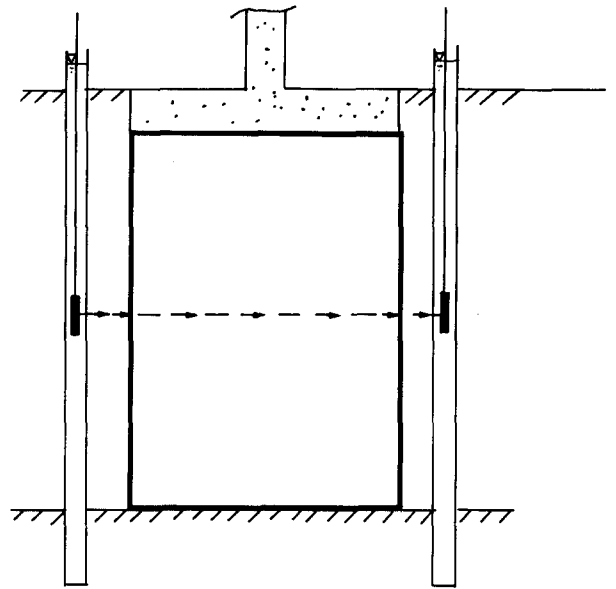
그림 3.1에는 여러 형태의 검측공 시험법들을 함께 나타내었다. 그림에서 보듯이, 수평검측 기법의 경우는 충격공과 감지공을 별개로 하는 한 쌍의 검측공이 필요하나, 상하향 검측법의 경우는 단 하나의 검측공이 소요된다. 그런데 상하향 검측기법에는 다시 충격장치와 감지기를 검측공내에 모두 삽입하고 서로 일정간격을 유지한 상태에서 이들의 위치를 조금씩 변화시켜가면서 실험을 행하는 방법(공내 직접 측정법), 검측공내에는 감지기만을 위치시키고 말뚝기초의 두부를 타격하는 방법(공외 직접 측정법), 그리고 검측공을 말뚝기초 몸체 밖의 인접지반내에 조성 한 다음 말뚝두부의 노출부위나 상부구조물을 타격하는 방법(평행 측정법)이 있다.

한편, 검측공 시험법에서는 일반적으로 짧은 지속시간을 갖는 펄스형태의 충격파를 일정시간 간격을 두고 연속적으로 발생시킬 수 있는 압전식(piezoelectric) 펄스 발진기를 사용하여 응력파를 유발시킨다. 그러나 단일공 검측법의 경우, 공내 직접 측정법을 제외한 기타의 방법들에서는 단순한 손잡이 햄머를 이용하는 것이 일반적이다.

그런데 이와 같이 말뚝의 결함조사를 목적으로 적용하는 검측공 시험법들은 지반의 원위치 동특성치(in-situ dynamic properties) 등을 결정할 목적으로 적용되는 유사한 검측공 시험법들과 근본적으로 다른 점에 유념할 필요가 있다. 지반조사 목적의 경우에는 주로 전단파(shear wave)를 이용하지만, 결함조사 목적의 검측공 시험법에서는 압축파(compression wave)를 이용한다는 점이 다르다. 이러한 측면에서 말뚝결함용 검측공 시험법을 '음파' 검측법(sonic logging)이라고 부르는 것이다. 또한, 발

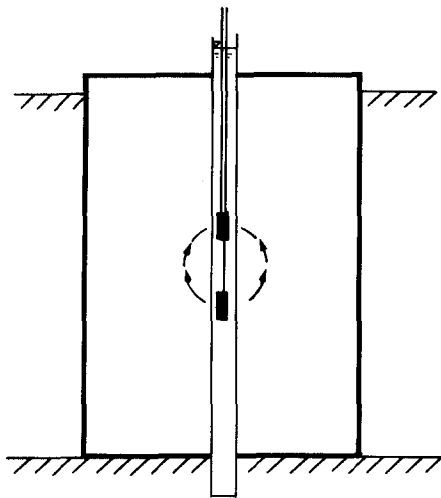


a) Direct

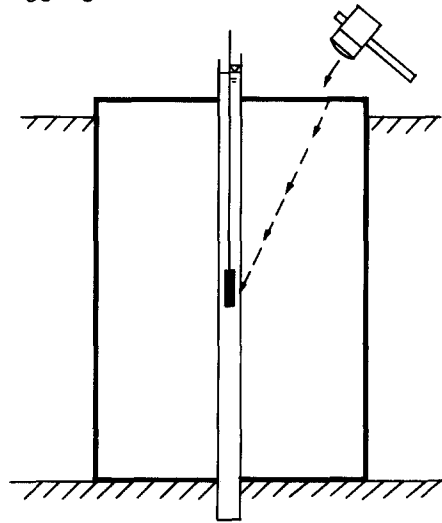


b) Parallel

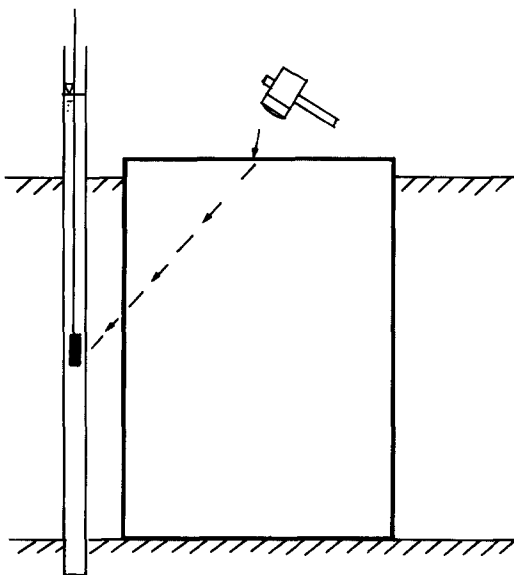
가) Crosshole Sonic Logging



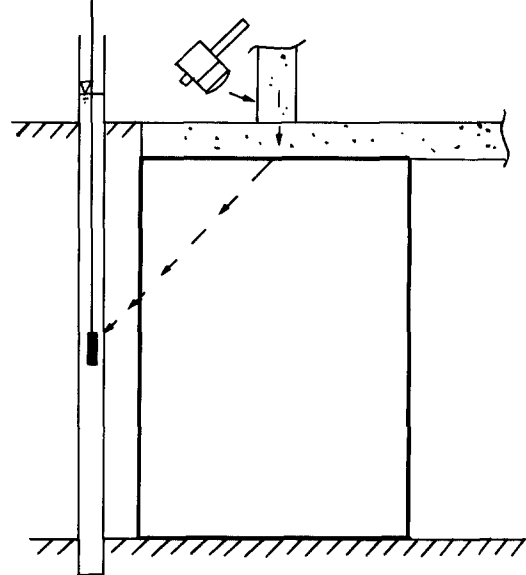
a) Direct (In-Hole-Source)



b) Direct (Out-Hole-Source)



c) Parallel (Hit-on-Pile)



d) Parallel (Hit-on-Structure)

나) Singlehole Sonic Logging

그림 3.1 검측공 시험법

생된 응력파 에너지의 효과적 전달을 위하여 충격장치 및 감지기와 검측공내벽간의 커플링(coupling)방법 측면에서 또다른 근본적 차이점이 있다. 결함조사 목적의 시험법에서는 압축파를 이용하므로 단순히 충격공 및 감지공 내부를 물로 가득 채워 넣음으로써 충격공에서 충격장치를 통하여 유발된 응력파의 검측공 내벽으로의 전달시키고, 감지공으로 전파된 응력파 에너지가 감지공벽을 지나 감지기에 효과적 전달되게 한다. 그러나 지반조사 목적의 경우에는 전단파의 검측이 중요하므로 충격장치 및 감지기가 검측공내벽에 완벽하게 밀착될 수 있는 까다로운 커플링 시스템이 필요한게 일반적이다. 표 3.1에는 이와 같은 결함조사 목적의 검측공 시험에 필요한 주요 시험장비 구성을 현재 가장 앞선 시스템을 기준으로 나타내었다.

3.2 시험결과와 분석

한편, 그림 3.2~그림 3.4에는 전술한 검측공 시험법들에서 도출되는 전형적인 데이터 분석 결과들을 나타내었다. 먼저 수평검측기법에 대한 그림 3.2의 가)에 나타난 한 쌍의 파형은 감지기로부터 포착된 응력파의 시간기록(time history record)으로서 이 중에서 위에 나타난 신호는 결함부위로 인하여 응력파가 감지되지 않은 상태를 나타낸다. 그리고 아래에 나타난 신호는 결함부위가 존재하지 않는 경우로서, 결함부위가 있는 경우인 윗그림에 비하여 매우 강도가 큰 응력파 신호가 감지됨을 알 수 있다. 한편, 그림 3.2의 나)에 나타난 그림은 깊이에 따른 응력파 도달시간(우측 그림) 및 에너지 강도 변화(좌측그림)를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 결함의 정도가 심할수록 도달시간과 에너지 강도가 낮게 나타나므로 깊이에 따른 결함부위들의 존재 여부는 물론, 결함 정도를 매우 정밀하게 파악할 수 있음을 알 수 있다.

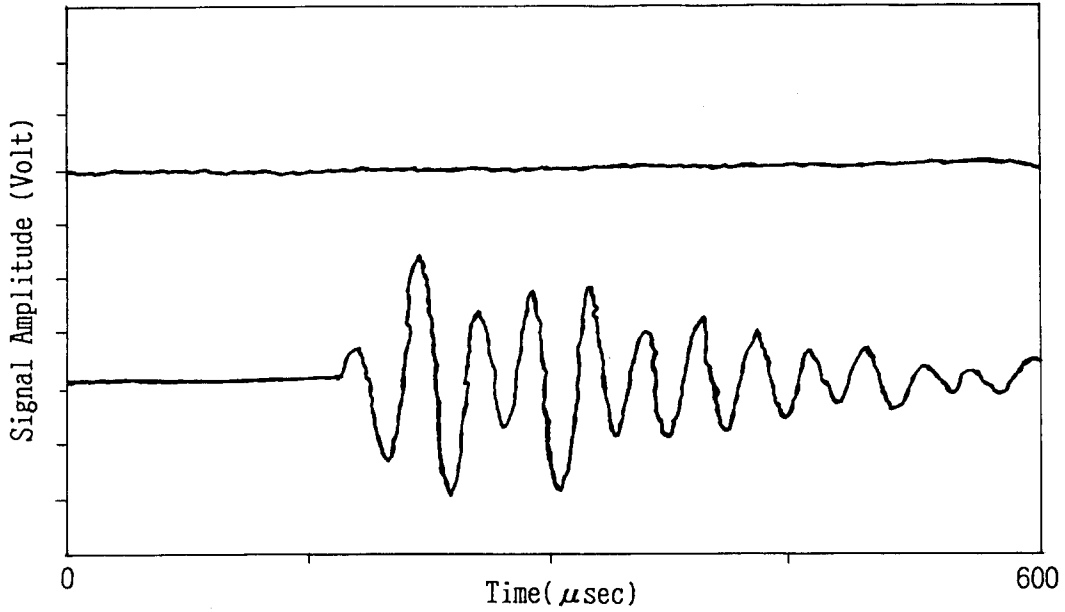
그림 3.3은 단일공 공내 직접측정법에 대한 것으로서 검측공내에 한 쌍의 압전식 펄스 발진기/감지기의 간격을 1 ft(30 cm)로 유지한 상태에서 수평검측기법과 유사한 형태의 데이터 분석을 시행한 결과의 일례이다. 그림에서 보듯이 응력파 도달시간이 상대적으로 길고, 에너지 강도가 낮은 부분중에서 상층부(깊이 약 8 ft = 2.4 m까지)는 불량 콘크리트 타설과 같은 말뚝몸체의 결함부위로 추정할 수 있다. 그리고 깊이 약 68 ft= 20.5 m부근에서 나타난 결함부위는 말뚝의 선단부와 하부의 지지층과의 경계로 추정되는 깊이이다. 이와 같은 공내 직접측정법은 검측공에 인접한 부위를 따른 결함부위만을 파악할 수 있어 횡방향의 말뚝몸체 전체를 대상으로한 수평검측기법에 비해서는 말뚝 전반에 걸친 결함조사에 한계가 있다. 그러나 적어도 말뚝의 근입 깊이 및 말뚝선단 및 지지층의 상태를 파악하는데는 매우 유용한 수단이 된다.

표 3.1 검측공 시험법의 시험장비 구성

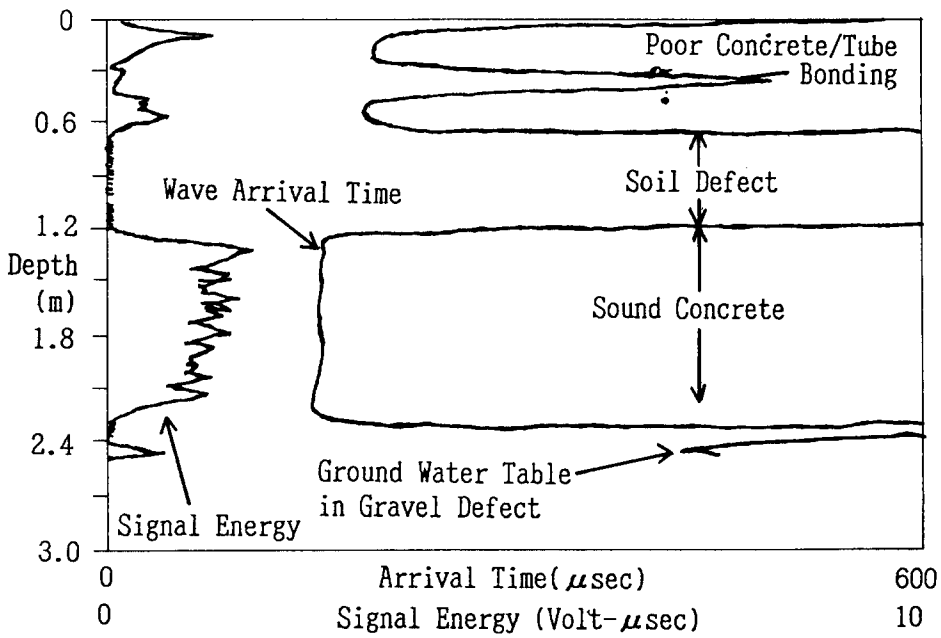
장비 시험법	응력파 유발장치	응력파 감지기	응력파 신호포착/ 분석장치	비 고
수평검측 기법(직접 및 평행측정 법)	압전식 펄스발진기* (peizelectric pulse generator) 및 신호발생기 (signal generator)	압전식 진동감지기* (piezoelectric vibration sensor) : 보통 가속도계	마이크로 컴퓨터를 이용한 진동 신호 분석시스템	* 충격장치 및 감지기 용 케이블(cable)의 삽입길이를 측정하 여 충격장치 및 감 지기의 깊이를 자동 계측할 수 있는 전 자식 자동심도 계측 (depth meter)가 있음
단일공검측 기법(공내 직접 측정)	상 동	상 동	상 동	
단일공검측 기법(공외 직접 측정)	충격 햄머	상 동	상 동	
단일공검측 기법(평행 측정)	충격햄머	상 동	상 동	

주) * 압전식 펄스 발진기와 진동감지기는 동일한 제품이다. 압전원리의 특성상, 압전체는 외부전압에 비례하여 팽창하고, 반대로 일정한 전류조건하에서 외부압력을 받을 경우 압력의 크기에 비례하여 출력전압이 변화한다. 따라서 펄스 발진 및 감지 목적에 공통적으로 사용할 수 있는 편리함이 있다.

그림 3.4는 단일공 평행측정법에 대한 것으로서 검측공내의 감지기 위치를 달리 하면서 측정된 응력파의 도달시간들을 감지기 심도-압축파 도달시간의 좌표평면상에 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 측정점들을 연결하면 기울기를 달리하는 직선들이 얻



가. 감지기 도착 응력과 신호



나. 깊이에 따른 응력과 도달시간 및 에너지 강도 변화

그림 3.2 수평검측기법의 측정결과 일례

JOB: 235	LOG: B55SA	THRESHOLDS: 2.00 * MAXnse mV
DEPTH vs. THRESHOLD		RECORD: 371
DEPTH vs. NET ENERGY		DEPTH: -29.2 ft
		Tt = 255 uS
		Ta = 42 mV
		Enet = 195 VuS
		Ense = 1 VuS

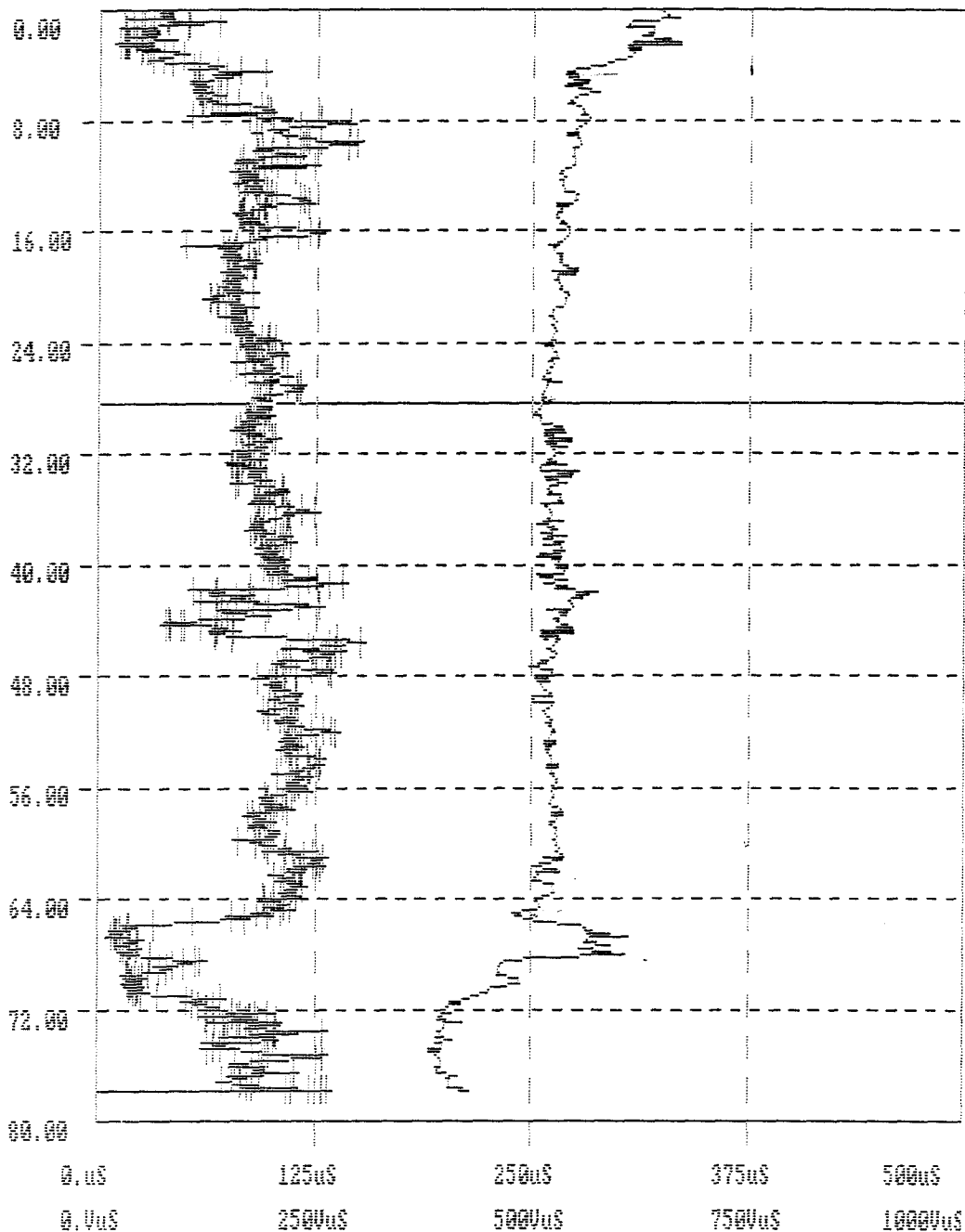
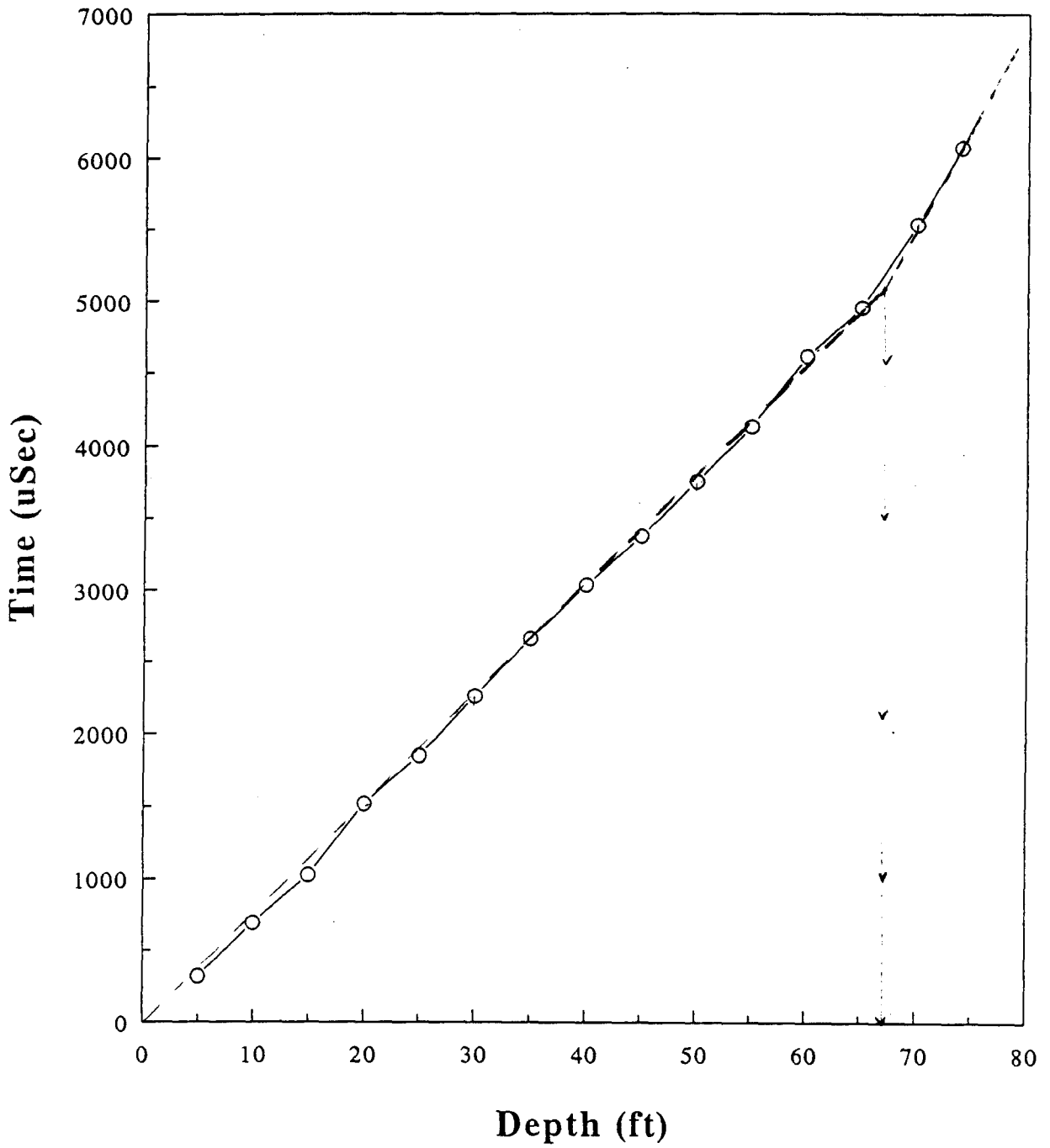


그림 3.3 단일공 (공내 직접) 측정법의 실측결과 일례



—○— Exp. Disp.

그림 3.4 단일공 (평행) 측정법의 실측결과 일례

어지는데 이들 직선의 기울기는 응력전파 경로상에 놓인 재료의 평균 압축파 전파속도에 해당된다. 일정한 깊이까지 하나의 매끄러운 직선이 형성된다면 그 깊이까지는 결함부위가 없는 상태라고 간주할 수 있다. 반면에 측정점들이 비교적 크게 산포되는 형태를 보이는 경우에는 일단 결함부위의 존재를 의심할 수 있다. 그러나 이와 같은 방법으로 결함 부위의 존재 및 특성을 정밀하게 파악하는 한계가 있다. 그림 3.4의 결과는 내부 결함이 없는 말뚝기초에서 얻은 것으로서 상, 하부에 기울기가 확연히 다른 두개의 직선이 형성되는 것은 말뚝몸체와 하부 지지층 지반의 강성도(stiffness)가 다르기 때문이다. 이 때 두 직선의 연장선이 만나는 교점에 해당하는 깊이가 말뚝선단부에 해당된다. 이와 같은 단일공 평행 검측법 역시 전술한 공내 직접측정법과 마찬가지로 말뚝몸체 전반에 걸친 정밀한 조사목적으로는 부족하지만 말뚝의 근입 깊이나 선단 지지층 지반의 강성도를 파악하는데는 효과적인 수단의 하나가 된다.

한편, 수평검측기법의 경우에는 결함부위의 존재가 확신되는 경우에서 결함부위의 입체적 형태(즉 상, 하 및 방사방향 분포범위)를 정밀하게 추정할 수 있다. 이를 위해서는 충격점과 감지점을 수평으로 하는 배열구조외에 이들의 위치를 상하로 경사지게 하는 배열구조를 적용하는 경사 시험법(inclined 또는 staggered testing)을 채택하거나 검측공을 최소한 3개 이상으로 하여 다각 방향으로 검측을 시행하는 다공 시험법(multihole testing)을 적용한다. 그림 3.5와 그림 3.6에는 경사시험법 및 다공 시험법의 시험 개념도를 나타내었다. 그리고 사진 3.1 및 3.2에는 이와 같은 수평검측 시험을 위해 검측공용 강관을 설치한 실예를 나타내었다.

지금까지 설명한 검측공 시험법을 요약하면 말뚝내부의 결함부위 파악, 말뚝 근입 깊이, 지지층의 상태 파악 측면에서 가장 정밀한 방법은 수평검측기법이라고 할 수 있다. 그리고 단일공 검측법은 간편하게 말뚝의 근입깊이 및 말뚝선단부 지지층의 상태 파악을 할 수 있는 매우 유용한 수단이 된다고 말할 수 있다. 여기서 한 가지 덧붙이자면 말뚝내부에 케이싱이 있는 검측공을 말뚝기초 시공중에 사전 매설하는 경우에 콘크리트와 케이싱 외벽간의 불량하면 응력파의 전달이 차단되어 시험결과를 오도할 소지가 발생된다. 이러한 측면에서 PVC관 같은 비금속재관보다는 콘크리트와 부착력이 상대적으로 높은 강관과 같은 금속재관을 사용하고 가능하다면 콘크리트 타설시 검측공 주변을 추가적으로 다지는 것이 바람직하다.

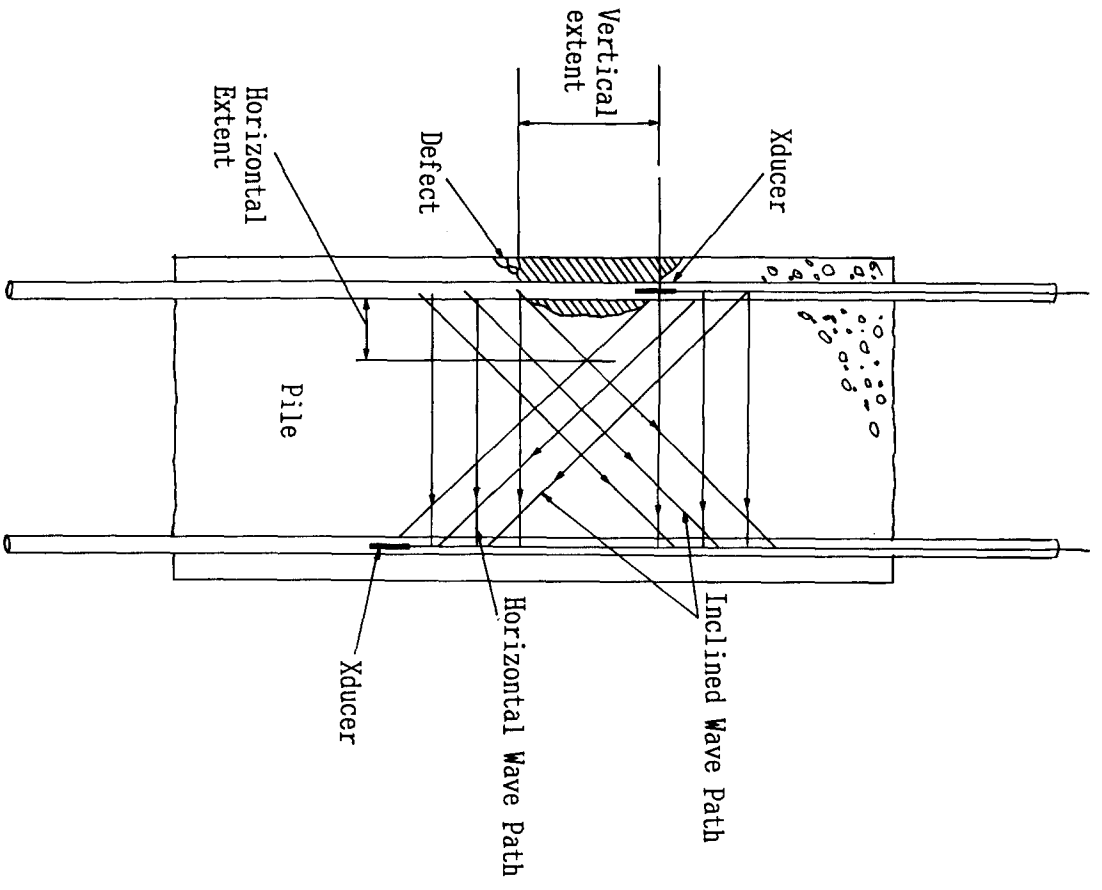


그림 3.5 수평진측기법의 경사시험법

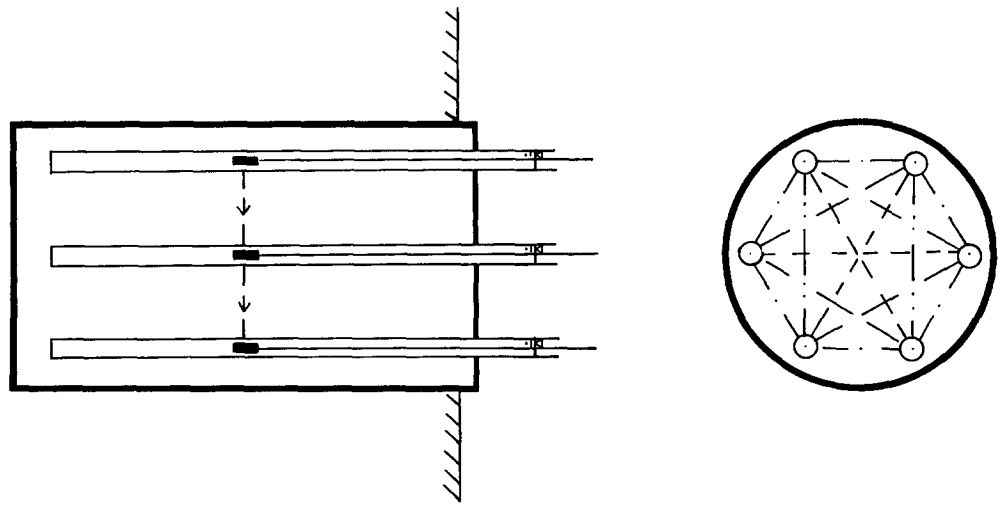


그림 3.6 수평진측기법의 다공시험법

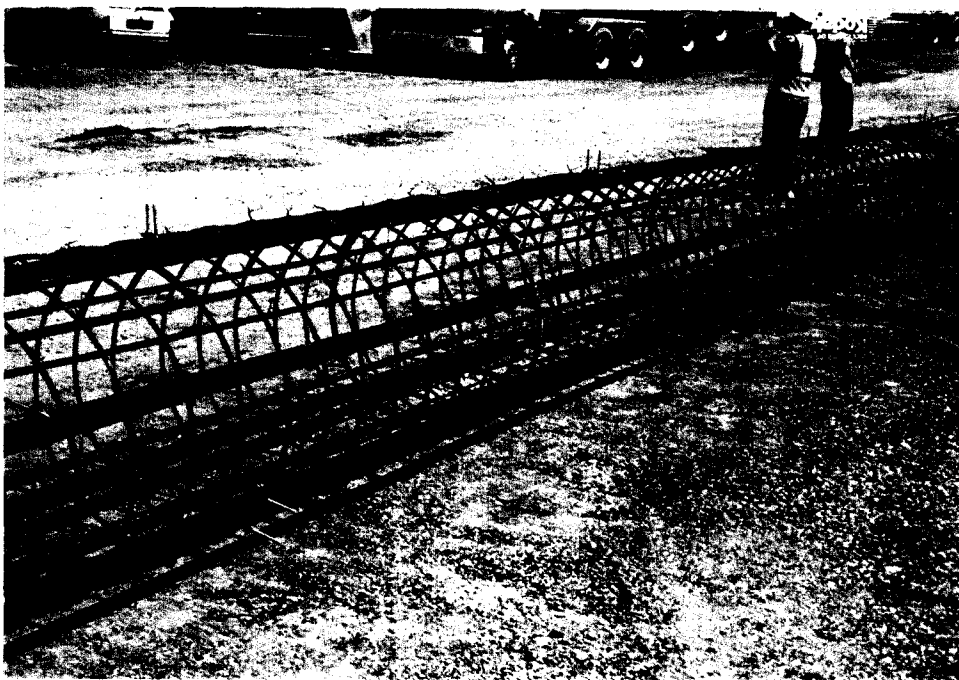


사진 3.1 수평검측기법 시험용 케이싱의 설치



사진 3.2 수평검측기법 시험용 케이싱 고정장치

4. 비검측공 시험법

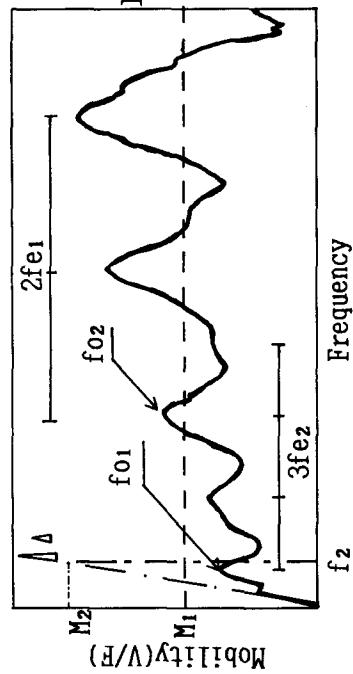
비검측공 시험법은 응력파의 유발 및 감지(또는 말뚝의 가진 및 진동의 감지)가 모두 말뚝두부에서 시행되는 완전한 비파괴 시험법이다. 현재까지 등장한 다양한 비검측공시험법들을 대분하면 크게 일시진동법(transient dynamic test)과 정상진동법(steady-state-vibration dynamic test)로 나눌 수 있다. 이 중에서 일시진동법은 이미 상품화될 정도의 실험기술 형태로 개발이 완료되어 현재 활발히 적용되고 있다. 반면에 정상진동법은 아직 연구개발 단계에 있다고 볼 수 있다. 따라서 여기서는 일시진동법만을 소개하는 정도로 그치고자 한다.

4.1 일시진동법의 개요

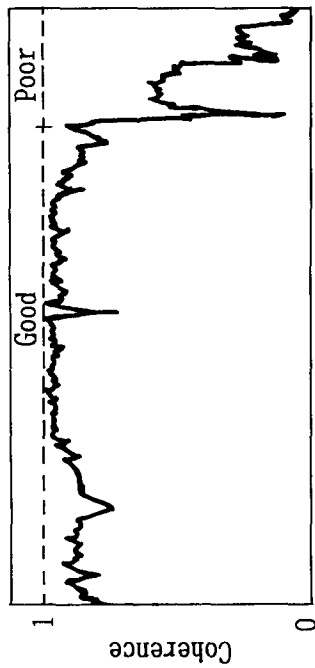
일시진동법은 반사 응력파 신호(또는 일시진동 신호)를 처리·분석하는 방법에 따라, 충격반향기법(impulse echo: IE technique), 충격응답기법(impulse response: IR technique) 그리고 진동신호 역산기법(signal matching: SM technique)으로 대분된다. 그리고 IE기법은 다시 펄스반향(pulse-echo: PE)법과 진동파반향(sonic-echo: SE)법으로 세분된다. 그러나 IE기법과 IR기법은 손잡이 햄머 등을 이용하여 말뚝두부를 가볍게 타격함으로써 얻어지는 응력파 신호를 각각 시간영역(time domain) 및 주파수 영역(frequency domain)에서 분석하는 것이 다를 뿐, 시험장비 구성 및 세부 시험 절차는 동일하다.

한편, SM기법은 무거운 손잡이 햄머로 강하게 내려 치거나 무거운 중량체를 일정한 높이에서 자유낙하시켜 말뚝에 강한 충격을 가했을 때 말뚝 나타내는 일시진동 신호를 말뚝-지반의 동적 상호작용 거동에 토대를 두고 분석하는 측면에서 IE/IR 기법과는 시험원리상 본질적으로 다르다. 그러나 시험시 유발되는 절대적인 변형을 크기는 여전히 말뚝이 이상적인 탄성거동을 나타내는 저변형을 조건에 속한다. 그리고, IE/IR 기법이나 SM기법에서 손잡이 햄머를 이용하는 경우는 하나의 진동감지기가 말뚝두부의 상면에 설치되나, 낙하 중량체를 이용하는 SM기법에서는 말뚝두부에서 어느 정도 떨어진 말뚝의 주변부에 두 개의 진동감지기를 지름 방향의 양단에 설치하기도 한다. 이 때 낙하 중량체의 충격이 말뚝에 원활히 전달될 수 있도록 강제 하중판(loading plate) 및 하중판과 말뚝두부의 커플링을 위한 수지(resin) 등의 접합제를 사용한다.

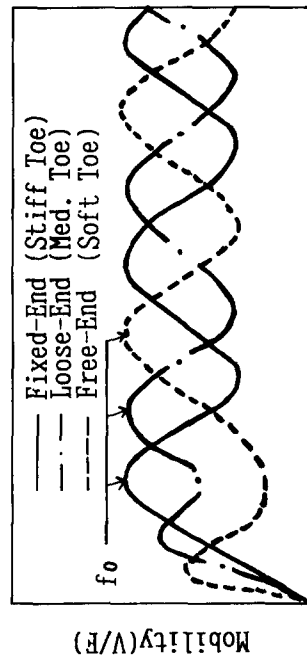
그림 4.1과 그림 4.2에는 IE/IR기법 및 SM기법의 세부기술사항을 소개하기에 앞서 먼저 각 시험법의 개념도를 나타내었다. 그리고 표 4.1에는 이들 시험법에 사용되는 주요 시험장비의 구성을 최근의 가장 앞선 시스템을 기준하여 나타내었다. 다음에는



a) Mobility Spectrum (Defect Pile)

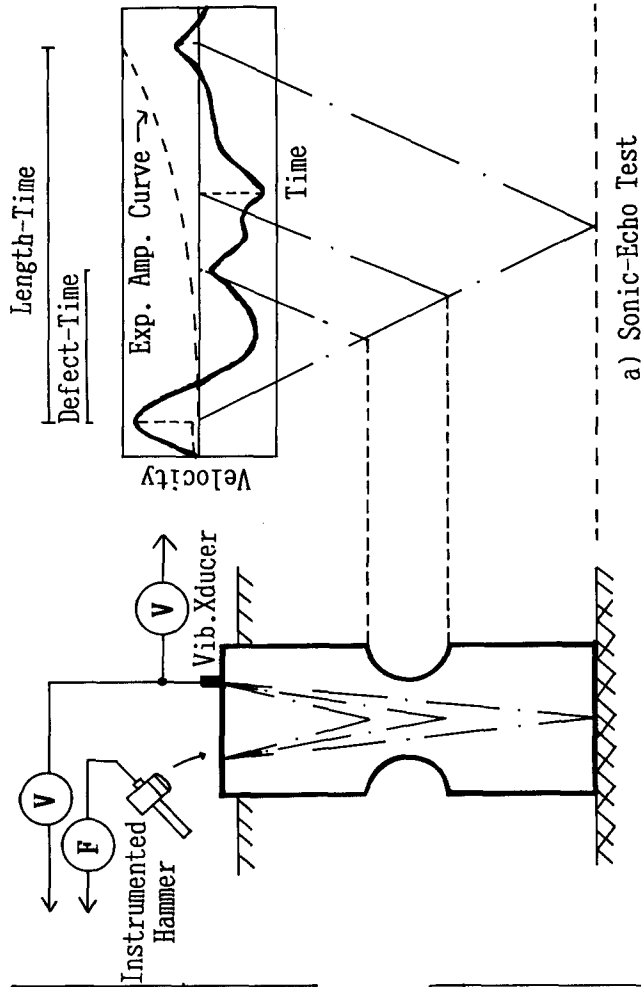


b) Coherence Spectrum (Defect Pile)

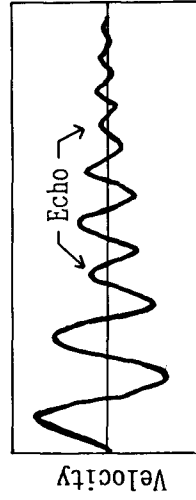


c) Mobility Spectrum (Sound Pile)

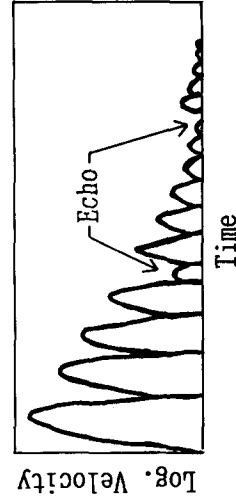
가) Impulse-Response Tests



a) Sonic-Echo Test



b) Pulse-Echo Test



가) Impulse-Echo Tests

그림 4.1 충격반향 (IE)기법 및 충격응답 (IR)기법

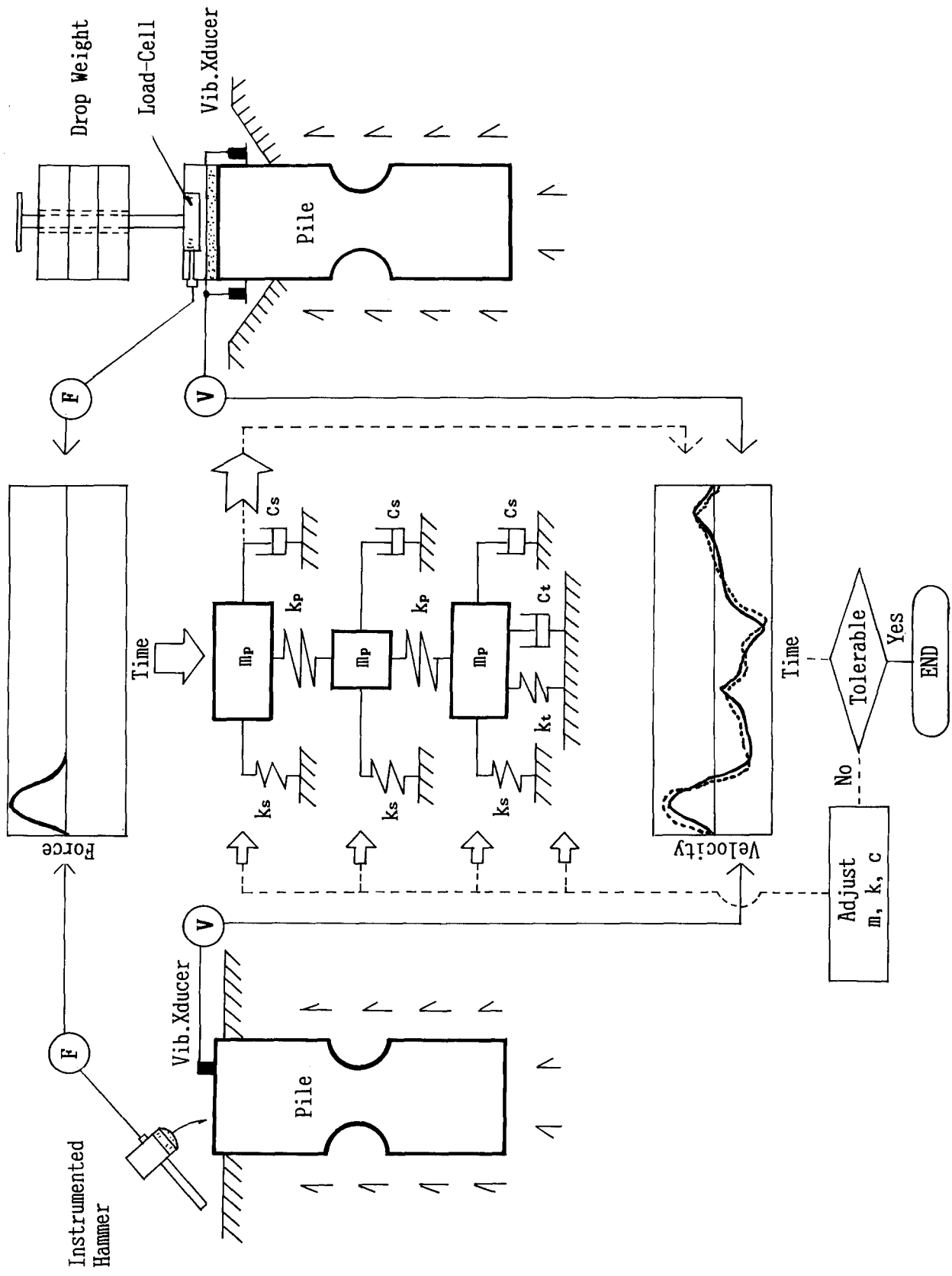


그림 4.2 진동신호 역산기법 (Signal Matching Technique)

각 시험법의 공통적인 이론적 토대를 먼저 설명하고, 이어서 시험법별로 세부 데이터 분석기술에 대하여 설명하고자 한다.

표 4.1 일시진동법의 시험장비 구성

시험법	충격장치*1	진동감지기*2	진동신호포착/ *3 분석장치	비 고
IE기법의 PE법	경량의 단순 손잡이 햄머 경량 낙하 햄머	압전식 가속도계 속도계	검파기 (oscilloscope) PC-based digital signal processing (DSP) system*5	대수진폭기*3(logarithmic amplitude)(필수) 신호 미분/적분기 (선택)
IE기법의 SE법	상 등	상 등	상 등	지수증폭기*4(exponential amplifier) 연산기능 추가(필수)
IR기법	하중계(load cell) 가 장착된 계측식 충격햄머 (instrumented hammer)	압전식 가속도계 속도계	FFT Analyzer 또는 PC-based DSP system (필수)	충격응답함수(impulse response function) 연산기능 추가(필수)
SM기법	하중계가 장착된 중량의 손잡이 햄머, 또는 중량 낙하체+하중계	압전식 가속도계 속도계 변형율계(strain gauge)	FFT Analyzer(선택) PC-based DSP system	pile dynamic analysis(PDA) 소프트웨어 추가 (필수)

주) *1 IE/IR기법에 사용되는 손잡이 햄머 및 낙하 햄머는 대략 200 kg의 하중을 15 cm 높이에서 떨어뜨렸을 때 상응하는 충격강도를 낼 수 있는 것이면 대부분 경우 충분하다. 그러나 SM기법에는 이보다 큰 충격강도가 필요하다(충

격량 기준 최대 약 100 ton 내외)

- *2 감지기는 2 KHz 정도까지 주파수 응답 특성이 양호한 것이면 충분하다.
- *3 대수진폭 기능은 신호진폭 절대치의 상용 대수치를 연산하는 신호처리 기법이다(그림 4.1의 나-b: PE법 참조).
- *4 지수증폭 기능은 늦은 시간대에 형성되는 반사파 신호가 파에너지의 감쇠(damping/attenuation) 정도가 심하여 앞선 시간대의 신호보다 진폭이 매우 낮아 식별이 곤란할 경우, 시간축을 따라 증가하는 지수함수(exponential function)의 형태로 증폭비를 증가시켜 반사파 신호의 식별을 용이하게 하기 위한 시간영역에서의 신호처리 기법이다(그림 4.1의 나-a: SE법 참조).
- *5 PC-based DSP system을 사용하는 것이 가장 바람직하다. 이 시스템은 검파기 기능, 신호 미분/적분 기능, 대수진폭 기능, 지수증폭 기능, 신호여과 기능 등 필수적인 기본적 신호처리 외에 FFT 연산에 의한 자기 및 상호상관 함수(auto/cross-correlation function) 및 상관도 스펙트럼(coherence spectrum) 및 충격응답 함수(impulse response function) 등을 포함한 시간영역 및 주파수 영역에 있어 각종 신호 처리 및 분석용 소프트웨어, 그리고 SM기법을 위한 PDA 소프트웨어 등 제반 신호처리/분석 관련 추가적 소프트웨어들을 내장시킬 수 있어 매우 효과적이다. 처리가능 주파수 범위는 100 KHz까지면 충분하다. 신호처리 및 분석 기술에 대해서는 뒤에 상세히 서술한다.

4.2 시험 원리

앞에서 개관한 네 가지의 일시 진동법들은 신호처리 및 분석기술의 방법과 난이도에서 커다란 차이가 있지만 시험원리적 측면에서는 통합적 서술이 가능하다. 즉 말뚝의 축방향으로 작용하는 일시 진동하중에 의한 말뚝-지반 시스템의 응력파 전파(stress-wave propagation) 또는 동적 응답(dynamic response) 문제인 것이다. 말뚝에서 응력파 전파 문제와 동적 응답 문제는 실제적으로 같은 문제의 다른 표현에 불과하지만 일단 구분하는 것이 서로 다른 시험법들은 이해하는데 편리하다. 이러한 맥락에서 앞으로 IE 기법은 응력파 전파 측면을 기준하여, IR기법은 응력파 전파 및 동적 응답 측면을 모두 고려하여, 그리고 SM 기법은 동적 응답 측면만으로 서술하고자 한다.

(1) 응력파 전파 이론

응력파는 매체내의 균열·공동과 같은 불연속체나 이질 매질층간의 경계면을 만나면 반사된다. 따라서 말뚝 내·외부의 결합부위는 응력파의 반사원(reflector)이 된다. 말뚝머리의 표면으로부터 말뚝 내·외부의 반사원까지 길이를 D, 말뚝구성 재료의 압축파 전파속도를 Vc, 그리고 압축파가 결합부위에서 반사된 후에 말뚝머리 표면으로 되돌아 오는데 걸리는 시간- 즉 '왕복경과시간(two-way 또는 round-trip travel time)'-을 T라 하면, 속도= 거리÷시간의 관계로부터 다음의 식(4.1)이 성립한다.

$$V_c = 2D / T \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

만일, 말뚝 몸체를 이루는 재료의 압축파 전파속도(Vc)을 알고 있고, 실험을 통하여 왕복경과시간(T)을 측정할 수 있다면, 말뚝 내·외부의 각종 반사원의 깊이(D)를 위 식(4.1)의 관계로부터 산정할 수 있다. 이 때 측정된 반사원의 깊이(D)가 말뚝 몸체의 길이 (L)와 큰 차이를 나타내는 경우는 일단 말뚝 내부의 결합부위의 존재를 의심할 수 있다. 또한 큰 결합이 없는 건전한(sound) 말뚝의 경우에 말뚝의 길이(L)를 알고 있다면 식(4.10)으로부터 산정되는 압축파 속도를 이용하여 말뚝구성 재료의 강성도(stiffness) 및 강도(strength)를 추정할 수 있다.

참고로 여러 문헌에서 소개된 콘크리트의 불량도에 따른 압축파 전파속도는 표 4.2에 나타내었다. 그리고 그림 4.3에는 콘크리트 압축파 속도와 강도의 상관관계에 대한 도표들을 나타내었다. 대부분의 경우 콘크리트의 압축파 속도는 3500~4000 m/sec로 가정하는 것이 보편적인데, 이러한 범위의 가정치를 적용하여 얻은 반사원 깊이 추정결과는 그림 4.4에 나타낸 바와 같이 말뚝의 근입깊이를 기준할 때 대략 ±10 % 오차를 주는 것으로 밝혀져 있다. 다음에는 이와 같은 응력파 특성의 분석과 관련한 기본적인 측정기술에 대하여 설명한다.

(2) 신호패턴

말뚝머리를 햄머로 짧게 타격할 때 발생하는 응력파의 파형은 반정현파(haversine wave)에 가까운 펄스 형태가 되는데, 이러한 펄스는 말뚝내부의 반사원과 말뚝머리 표면을 여러 차례 왕복하면서 다중반사(multiple reflection)된다. 따라서 말뚝머리에 놓인 감지기에서 포착되는 진동의 시간기록(time history record)은 일련의 단위 펄스들이 여러차례 나타나는 형상을 갖게 된다. 그런데 이러한 다중반사 신호는 햄머

표 4.2 콘크리트의 품질별 압축파 속도

조 건	기준 1 (참고문헌 8)	기준 2 (참고문헌 9)	
	단위 : m/sec	단위 : m/sec	단위 : ft/sec
아주 양호	4120 이상	4570 이상	15000
양호	3300~4120	3660~4570	12000~15000
의심	2750~3300	3050~3660	10000~12000
불량	1920~2750	2130~3050	7000~10000
극히 불량	1920 이하	2130 이하	7000 이하

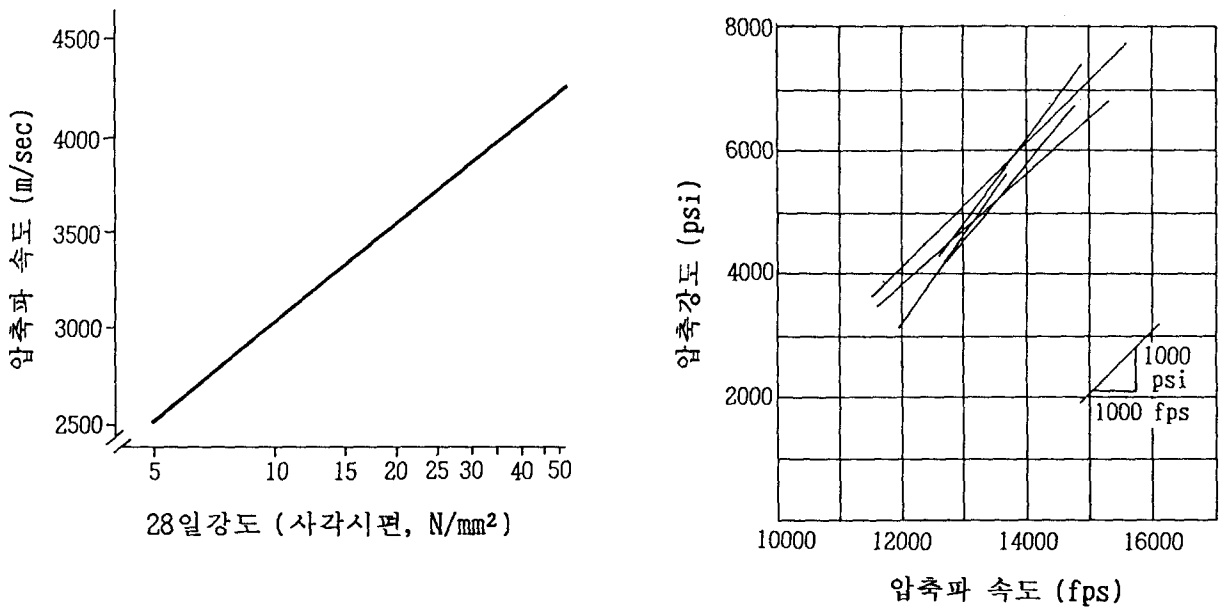


그림 4.3 콘크리트의 압축파 속도와 강도의 상관관계

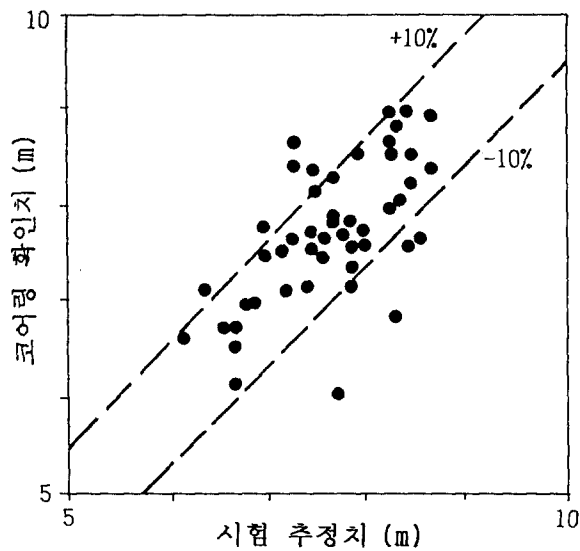


그림 4.4 말뚝 근입깊이 추정 오차 분포

의 충격시간(impact 또는 contact time)과 응력파가 반사원에 부딪힌 후 다시 표면으로 되돌아 오는데 걸리는 시간(왕복경과 시간)의 상대적 크기에 따라 그림 4.5에 나타낸 바와 같이 두 가지의 전형적 패턴을 갖는다.

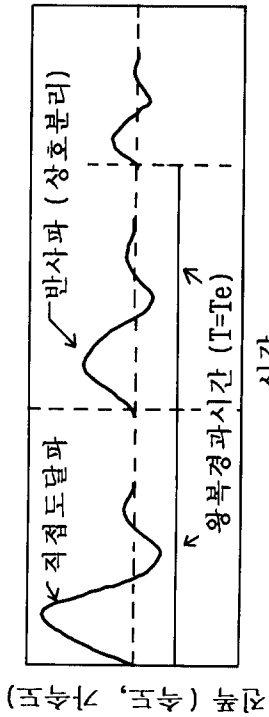
(가) 반향 패턴(Echo-Pattern)

충격시간(t_i)가 왕복경과시간(T)보다 충분히 작을 때 얻어진다. 이 경우 시간 기록의 신호 패턴은 그림 4.5의 가-a에서 보듯이 타격 직후 감지기에 포착되는 직접 도달 펄스를 포함하여 후속시간대에 형성되는 일련의 다중반사 펄스들이 일정한 시간 간격(time gap)을 두고 상호 명확히 분리되는 형태를 갖는다. 이와 같은 패턴은 메아리 (반향) 현상에 해당하므로 ‘반향 패턴(echo-pattern)’이라고 부른다. 한편, 반향 패턴 신호의 주파수 응답 스펙트럼(frequency response spectrum)은 그림 4.5의 나-a에서 보듯이 높낮이가 크게 차이나지 않는 일련의 다중 첨두(multiple peaks)들 나타낸다. 이 때 첨두치간의 평균 주파수 간격을 반향 주파수(echo-frequency), f_e 라고 하는데, 왕복경과시간(T)과 역수($f_e = 1/T$)의 관계가 있다.

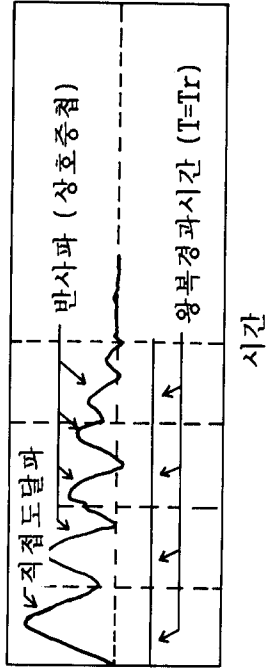
(나) 공진 패턴(Resonance-Pattern)

충격시간(t_i)이 왕복경과시간(T)에 비하여 클 때 얻어진다. 이 경우, 단위 펄스사이의 시간간격은 충분히 좁아지거나 중첩되어 그림 4.5의 가-b)에서 보듯이 매번의 펄스들은 상호 연속 또는 간섭되는 형태가 되어 마치 감쇠 정현진동 파동(transient damped sinusoidal oscillation)의 형상을 보인다. 이와 같은 신호패턴은 공진현상에 해당하므로 이를 ‘공진 패턴 (resonance-pattern)’이라고 부르며, 음파의 경우를 고려하여 ‘울림(ringdown) 패턴’이라고 부르기도 한다. 한편, 이 경우 주파수 응답 스펙트럼에서는 그림 4.5의 나-b)에서 보듯이 뚜렷한 단일 최대첨두(single maximum peak)가 나타낸다. 이 때 충격시간과 왕복경과시간이 이상적으로 같다면(즉, $t_i = T$) 공진첨두의 진폭은 극대화(maximize)된다.

이러한 공진패턴 신호의 경우 반사파의 왕복시간경과($T = T_r$)를 시간영역에서 직접 측정하기는 매우 어렵다. 그림 4.5의 나-b)에 보듯이 타격직후에 포착되는 직접 도달 펄스와 최초의 반사파 펄스가 구분 가능한 경우를 제외하고는 후속되는 반사파에 의한 연속 진동파형에서 T_r 을 정확하게 측정할 수 있는 경우는 실제로 매우 드물다.

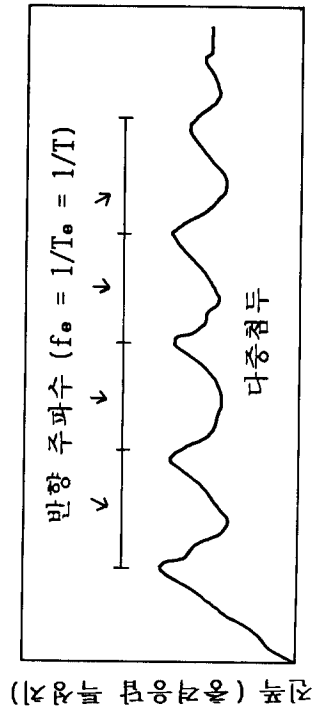


a) 반향 패턴

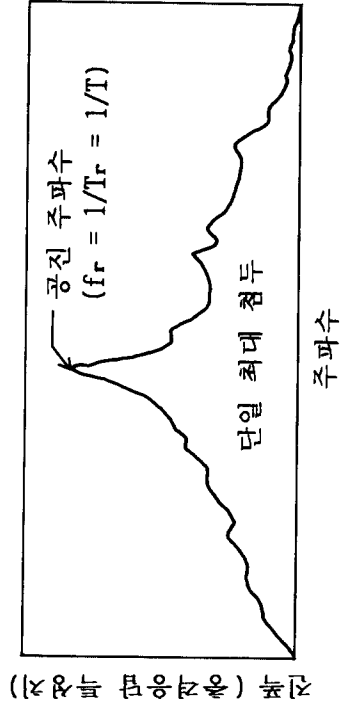


b) 공진 패턴

가) 시간기록 (time history record)



a) 반향 패턴



b) 공진 패턴

나) 주파수 응답 스펙트럼 (frequency response spectrum)

그림 4.5 시간기록 및 주파수 응답 스펙트럼

다시 말하여 대부분의 경우 신호패턴은 복합 주파수 성분의 비정현 진동파형으로 되는 것이 일반적인데 이러한 경우에는 원래의 시간기록에서 직접 T_r 을 측정하기는 매우 어렵다. 한가지 방법은 그림 4.2의 나-b)에서 아랫그림에 나타난 바와 같이 대수 진폭 처리를 통하여 얻어진 시간기록을 이용하는 것이다. 그러나 이러한 방법보다는 그림 4.5의 나-b)와 같은 주파수 응답 스펙트럼을 이용하여 공진점두를 찾아내고, 이때의 공진 주파수(resonant frequency), $f_r = 1/T_r$ 를 측정하여 왕복경과시간을 산정하는 것이 바람직하다. 한편, 반사원이 한 개 이상일 경우는 이와 같은 공진점두들이 여러개 나타날 수도 있다.

이상의 고찰을 토대로 신호패턴에 따른 반사파 왕복경과시간 및 반사원 깊이의 측정공식을 요약하면 다음의 표 4.3과 같다.

표 4.3 신호패턴에 따른 왕복경과시간 및 반사원 깊이 측정 공식

신호 패턴	시간영역 (시간기록)	주파수 영역 (주파수 응답스펙트럼)	비 고
반 향	$V_c = 2D / T$	$V_c = 2D \cdot f_0$	V_c : 압축파 속도 D : 반사원 깊이 T : 왕복경과시간
공 진		$V_c = 2D \cdot f_r$	f_0 : 반향 주파수 f_r : 공진 주파수

한편, 신호패턴의 조절과 관련하여 가장 주요한 요소는 햄머의 충격시간(t_i)와 왕복경과시간(T)의 상대적 크기인데 일반적으로 뚜렷한 반향 패턴의 신호를 얻기 위한 조건은 $t_i \leq (1/10)T$ 라고 알려져 있다. 그러나 이는 햄머와 말뚝의 재료적 특성, 그리고 햄머-말뚝 순응특성(mechanical compliance)을 좌우하는 햄머의 타격포인트 형상 및 재질 타격표면의 평탄도, 또한 감지기의 특성(감도, 종류-속도계 및 가속도계, 또는 압전식 및 변형율식(strain gauge type)- 및 반응의 상승/하강시간, 주파수 반응 특성 등) 그리고 감지기의 부착상태(coupling condition) 등에도 영향을 받는다. 일반적으로 반향 패턴의 신호를 유발하려면 짧은 타격시간, 고주파수의 충격파 유발, 그리고 고감도의 감지기가 필요하다. 한편, 동일한 타격조건이라면 반사원의 깊이가

클수록 반향 패턴의 신호가 얻어질 확률이 높다. 참고로 햄머의 충격시간은 평균 200 μ sec, 길다해도 1.0 msec 정도 되는 것을 감안하면 반사원의 깊이가 대략 4 m 이내인 경우에는 반향 패턴의 신호를 얻기가 어렵다고 볼 수 있다.

(3) 응력파의 반사·전달 특성

응력파는 불연속면이나 이질매질의 경계면을 만나면 파에너지의 일부는 반사(reflection)되어 원래의 매질쪽으로 돌아가고, 나머지는 다른 매질쪽으로 전달(transmission)된다. 이와 같은 응력파 반사/전달 특성은 이른바 두 매질간의 '응력파 저항율(acoustic impedance: AI)' 또는 '응력파 밀도(acoustic density: AD)'라고 불리는 물리량에 의해 정량적으로 규정된다. 그런데 AI 또는 AD는 두 매질의 밀도 및 강성도, 접촉부의 단면 크기, 그리고 응력파의 주파수 성분에 따라 달라진다.

그림 4.6에는 매질의 밀도(ρ), 강성도(V), 단면의 크기(A)가 상이한 이질매질내로 일정한 주파수의 응력파가 전파되는 경우를 나타내었는데 $(\rho VA)_2/(\rho VA)_1$ 의 비가 1보다 크거나 작게 되면 응력파는 이질매질 경계면에서 반사된다. 이러한 연유에서 AI 또는 AD를 두 이질매질간의(ρVA)의 비율로 정의하기도 한다. 일시진동법에서 식별가능한 AI/AD치는 최소한 1:0.8 이상(또는 1:1.2 이하)라고 알려져 있다. 참고로 이는 원형 말뚝을 기준하면 약 10%의 직경변화, 콘크리트의 탄성계수 및 강도를 기준하면 약 44%의 물성치 변화에 해당한다. 그리고 V_1 과 V_2 를 각각 3000 m/sec 및 3600 m/sec로 가정하는 경우 그림 4.3으로부터 약 15 N/mm²(153 kg/cm²)의 강도변화를 의미한다. 따라서 단면 변화가 물성치 변화보다 응력파의 반사/전달 특성에 큰 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

한편, 말뚝 주변의 지반이 서로 상이한 강성도를 보이는 다층(multi-layer) 구조인 경우에도 각 이질토층들의 경계면은 파의 반사면이 된다. 따라서, 비록 말뚝자체가 결합이 전혀 없는 경우라도 말뚝선단부에 해당되는 반사파와 함께 이질토층의 경계면들에 상응하는 반사파 성분이 존재하게 된다. 그러나 앞에서 고찰한 바와 같이 인접 토층간의 강성도 차이가 44% 이상될 만큼 커다란 변화를 보이지 않은 경우는 확연한 식별이 가능할 정도의 반사파 성분이 나타나지 않는다. 그런데 이와 같은 커다란 강성도의 차이를 보이는 경우는 말뚝의 선단이 지지되는 암반층과 상부 토사층을 제외하고는 실제적으로 말뚝의 주변부가 놓이는 상층부의 토사층내에 존재하는 것은 희박하다. 그리고 설혹 이러한 층이 존재한다 하더라도 대부분의 경우 말뚝기초의 시공단계에서 확인될 수 있으므로 이로 인한 결합조사의 오도를 크게 우려할 필요는 없다.

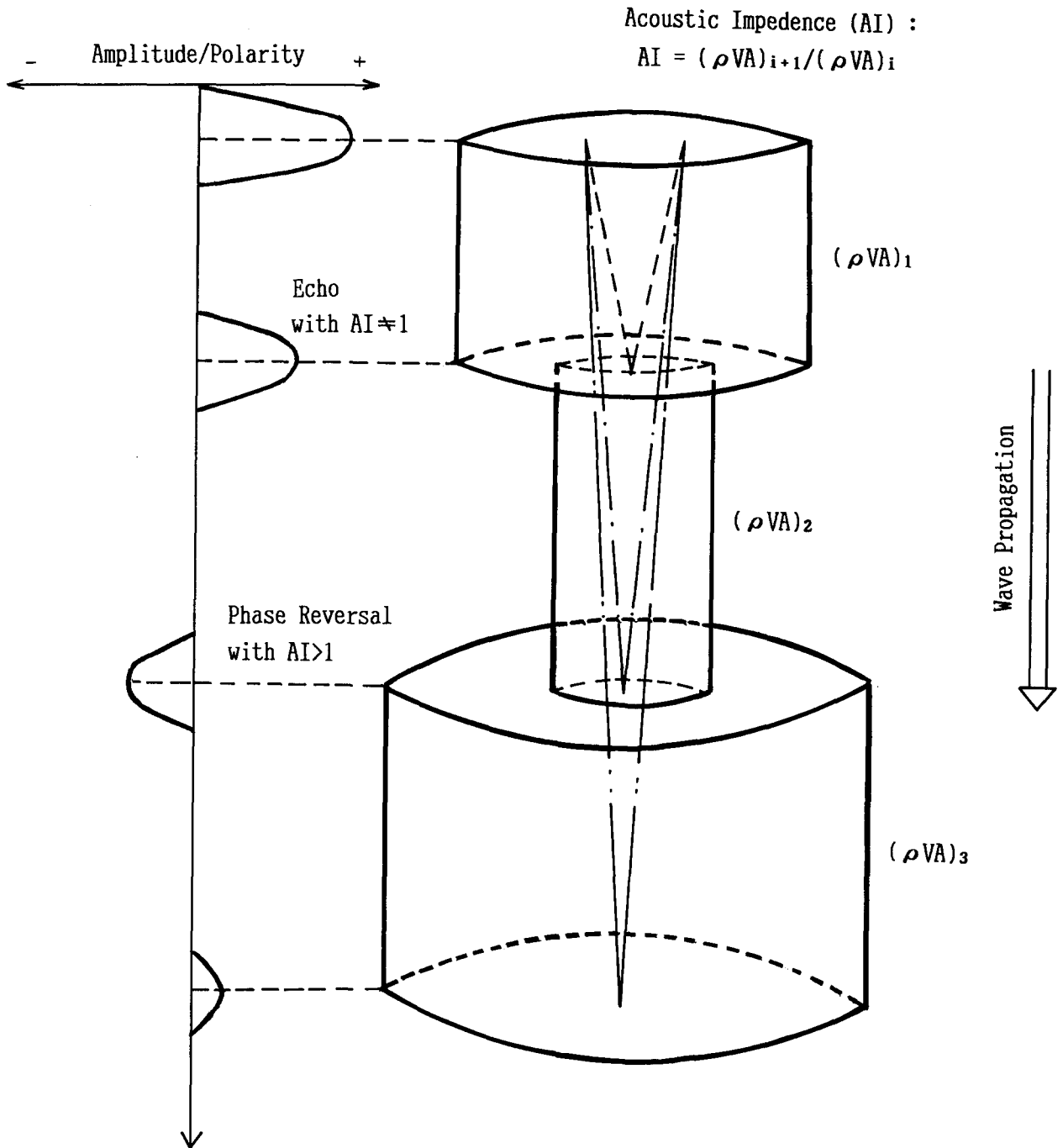


그림 4.6 응력과 저항율 (AI) 과 반사파 특성

그러나 이러한 측면은 비파괴 시험법에 의한 결함조사시에는 지반조사 성과나 말뚝기초 시공과정의 관련 정보의 수집 및 분석을 결코 간과해서는 안된다는 것을 역설적으로 의미하는 것이다.

한편 그림 4.6에서와 같이 응력파가 매질(i)에서 매질(i+1) 방향으로 진행할 때 $(\rho VA)_{i+1}/(\rho VA)_i$ 의 값이 1보다 큰 경우에는 두 이질매질의 경계면에서 반사되어 매질(i)쪽으로 '반사'되는 응력파 에너지가 매질(i+1)쪽으로 '전달'되는 파에너지가 상대적으로 작아진다. 그리고 이 경우에는 매질(i)로 입사된 파(incident wave)와 매질(i+1)과의 경계면에서 반사된 후 다시 매질(i)쪽으로 되돌아오는 반사파(reflected wave)의 극성(polarity)은 서로 반대가 된다. 이와 같이 AI 차이로 인해 응력파의 극성이 뒤바뀌는 현상을 '극성전도(polarity 또는 phase reversal)'라고 부른다.

한편, AI는 응력파의 주파수 성분에 따라서도 변화하는데 이로 말미암아 말뚝의 공진주파수와 같은 주파수 응답특성치들은 AI에 따라서 달라진다. 그림 4.1의 가-c에서 유동도 스펙트럼(mobility spectrum)의 첨두치에 해당하는 주파수 값들이 변화하는 것은 바로 말뚝선단부의 구속상태 또는 지지층의 강성도(fixed/loose/free 또는 stiff/medium/soft)에 따라 AI특성이 변화하기 때문이다.

지금까지 설명한 응력파 전파 측면에서 고찰한 일시진동법의 데이터 분석과 관련한 기본적 개념을 요약하면 말뚝내부의 결함부위나 말뚝선단부의 깊이는 식(4.1) 및 표 4.2의 관계를 이용하여 파악할 수 있고, 반사원의 특성은 반사파의 강도 및 극성변화를 통하여 추정할 수 있다고 정리할 수 있다. 그런데 실제의 시험에서 왕복경과시간(T)을 측정하는 것만도 그다지 간단한 문제는 아니다. 왜냐하면 콘크리트의 압축파 전파속도(V_c)는 대략 3500 ~ 4000 m/sec임을 고려하면 반사원 추정깊이의 허용 측정 오차를 1 m로 기준할 때 식(4.1)의 관계로부터 약 50 μ sec의 시간측정 정밀도를 유지해야 하기 때문이다. 나아가 반사원의 종류, 형태, 재질, 갯수와 같은 반사원의 특성, 그리고 말뚝의 전반적인 건전도와 주변지반과의 접촉 및 지지상태를 포괄적으로 판단하는 것은 한층 더 어려운 문제이다. 다음에는 이와 같은 실제적인 측정 및 데이터 분석과 관련한 주요 기술 세부 사항들을 각 시험법별로 약술한다.

4.3 충격반향기법(Impulse-Echo: IE Technique)

이 시험기법은 말뚝두부의 타격으로 발생된 응력파가 말뚝의 몸체 내부로 진행하

면서 말뚝내부의 결합부위 및 선단부를 만나 반사된 후 말뚝두부로 되돌아온 '반향파' 신호의 특성을 시간영역(time domain)에서 분석하는 방법이다. 이 시험기법은 응력파 신호의 시간기록 상에서 '반향파'를 직접 검출한다는데서 이 시험법에 속하는 두 가지의 실험법(PE법 및 SE법)을 통칭하여 총격 '반향법'이라고 부르는 것이다.

본래 응력파의 '반향' 현상을 시간영역에서 직접 검출하는 실험법들은 기성제 말뚝(precast pile)의 결합조사를 위해 개발된 것이다. 기성제 말뚝의 결합은 큰 균열 및 파쇄부, 또는 시공이음과 같이 일반적으로 전단면을 가로지르는 파단적인 불연속 결합(discontinuity)이 지배적이므로 시간기록상에는 선명한 반향파가 나타난다. 즉, 기성제 말뚝의 경우는 말뚝의 결합여부를 판단하는데 시간기록상에서 반향파의 검출만으로도 충분하고, 그 유형은 대부분 파단성 결합으로 간주해도 무방하다고 할 수 있다.

그러나 현장 타설식 말뚝의 경우에는 결합의 유형이 기성제 말뚝에서와 같이 전단면을 가로지르는 파단성 결합보다는, 병목 및 확대부와 같은 단면 변화 부위, 토사혼입부와 같은 비정상적 재료의 형성부위, 콘크리트의 이격 및 공동과 같은 고립성(isolated)의 불연속부위 등과 같이 말뚝 단면의 일부에 걸친 결합이 주종을 이룬다. 즉, 대부분의 경우 말뚝단면의 구조적 연속성이 일부 유지되는 결합의 유형이 지배적이다. 응력파는 이러한 국부성 결합 부위에서도 반사될 것이나, 일정 크기 이상의 파에너지는 연속부위를 통해 전달된다. 따라서 말뚝 두부에서 포착되는 응력파의 시간기록상에 나타나는 반향파들은 말뚝 전단면에 걸쳐 형성된 파단성 결합의 경우에 비하여 상대적으로 진폭이 작아진다. 그러므로 실제의 시험에서는 잡음신호(noise signal)의 영향 등으로 후술할 바와 같이 특수한 신호처리 및 분석기술을 적용하지 않고는 반향파의 검출이 매우 어려운 경우가 많다.

결론적으로 말하여 동등한 시험 조건 - 타격강도, 말뚝-지반 시스템 고유의 파에너지 감쇠(damping/attenuation)정도 등-이라면 결합부위에 의한 반향파 검출의 확률은 기성제 말뚝보다 현장타설식 말뚝이 낮다. 그러나 최근의 전자 계측 장비를 이용한 신호처리·분석 기술의 발전은 현장타설식 말뚝기초에서 총격 반향법을 이용하여 포착된 응력파 신호의 잡음신호 제거 및 지수증폭(exponential amplification) 기법등을 통하여 정확한 반향파의 검출이 가능하게 되었다. 이 점에 대해서는 뒤에 상세히 설명하기로 하고 다음에는 총격 반향법에서 속하는 세분 시험기법으로서 PE 및 SE법에 대하여 소개한다.

(1) PE법 (Pulse-Echo Test)

이 시험법은 가장 초보적 형태의 일시진동 시험법이라고 할 수 있다. 충격은 단순한 햄머나 낙하햄머 등 간단한 용구를 활용하며, 잡음 신호의 제거 등을 위한 특별한 신호처리 기술을 적용하지 않는다. 단지 다소 강한 충격을 충격시간이 약간 길게 되도록 조정하고, 감지기는 공진형(resonant type)을 사용한다. 이러한 경우 얻어지는 진동신호의 패턴은 제 4.2 절에서 설명한 바와 같이 공진패턴이 된다. 이 때 말뚝 내부에 결함이 없다면 이 경우 응력파는 말뚝두부와 선단부를 여러차례 반사되면서 진폭이 지수함수적으로 감소될 것이므로 신호패턴은 이상적인 감쇠정현 자유진동파형에 가깝게 된다.

그러나 말뚝내부에 결함부위가 존재하면(특히 전단면에 걸친 파단성 결함) 그림 4.1의 나-b)의 윗 그림에서 보듯이 내부결함에 의한 반사파의 영향으로 그 이전까지 지수함수적으로 감소하던 파형의 진폭이 다소 감소되는 형태로 교란되는 현상을 나타낸다. 이 때 반사파의 도달시점을 보다 효과적이고 검측을 위해서는 그림 4.1의 나-b)의 아랫 그림에 나타낸 바와 같이 진폭의 절대값에 대수치(log-amplitude)를 취한 시간기록을 활용하기도 한다. 이와 같은 신호처리 기술을 대수 진폭처리라 하는데 그림에서 보듯이 진동파형의 상대적인 진폭차가 극대화 되어 반사파의 식별이 용이하게 됨을 알 수 있다. 그런데 이와같은 대수진폭 시간기록에서는 극성전도의 여부 대한 정보를 얻을 수 없어 결함부위의 특성을(상대적 강성도 등) 파악할 수 없는 것이 단점이다.

그런데 말뚝이 길거나 또는 결함부위가 깊은 곳에 있는 경우에는 말뚝 및 지반 고유의 재료감쇠(material 또는 internal damping) 및 파에너지 입체적 분산으로 인한 기하학적 감쇠(geometric damping) 효과로 인하여 반사파의 진폭은 매우 작아져 잡음 신호(noise signal) 등의 영향이 상대적으로 커지므로 반사파의 식별이 불가능하게 되는 때가 많다. 따라서 단순한 진동신호의 포착 감지 만으로는 정확한 결과를 기대하기 어렵고, 신호의 잡음비(signal-to-noise ratio: SN 비)를 낮추기 위한 신호처리 기술이 필수적이다. 이에 대해서는 다음에 설명할 SE법에서 상세히 설명한다.

결론적으로 말하여 지금까지 설명한 PE법은 별다른 신호처리 및 분석기술을 적용함이 없는 가장 단순한 일시진동 시험법으로서 확연한 파단성 결함이 존재하는 기성제 말뚝의 경우에도 적합하고, 현장 타설식 말뚝기초와 같이 국부적·고립성 결함이 주

종을 이루고, 말뚝의 근입깊이가 비교적 큰 말뚝기초에 대해서는 부적절한 시험법이라고 할 수 있다. 그리고 기성제 말뚝의 경우라도 말뚝주변 지반의 감쇠가 큰 경우에도 신뢰성 높은 시험성적을 기대하기 어렵다.

(2) SE법 (Sonic-Echo Test)

이 시험법은 전술한 바와 같은 PE법의 단점 보완한 시험법이라고 볼 수 있다. 그러나 근본적으로는 충격반향원리에 의한 결함조사법을 보다 복잡하고 다양한 형태의 결함들이 혼재하며 규모가 큰 현장타설식 말뚝기초에 대하여 확대 적용하기 위하여 개발된 것이라고 할 수 있다. 이 시험법에서는 시간기록상에 나타나는 반사파의 선명도를 증진시키기 위하여 다음에 설명할 바와 같은 특수한 신호처리 기술들을 적용하는 것이 특징이다.

(가) 신호여과 (Signal Filtering)

우선 포착된 진동신호의 잡음비를 낮추기 위하여 신호여과기(signal filter)가 사용된다. 일시진동법에서 발생하는 잡음 신호원(noise source)은 측정 시스템 자체 및 외부의 전자기적 교란 요인에 의해 발생하는 전기적 잡음신호(electric noise)와 시험의 본질적 특성이나 주변 여건 등에 의해 불가피하게 발생하는 잡음진동(extraneous vibration) 신호로 대분된다. 전자의 경우는 접지(grounding)처리 상태를 점검·개선하거나, 시간평균화(time-averaging) 기법등을 적용하여 대부분의 경우 간단히 제거할 수 있다. 문제가 되는 것은 후자의 경우인데 이에 속하는 잡음신호는 시험성적에 지대한 영향을 미치므로 반드시 제거해야만 한다.

이와 같은 잡음진동 신호가 발생하는 것은 대부분의 경우 다음 두 가지 요인에 의해서이다. 그 중 하나는 충격에 의해 말뚝전체가 강체진동(rigid-body vibration)하는 것에 기인하는 것으로서, 이에 의해서는 매우 낮은 저주파수 성분의 잡음신호가 발생한다. 또 다른 요인은 말뚝의 두부 부근에서 흔히 발생하는 불량시공부위나 파쇄/균열부위, 그리고 감지기가 놓인 표면직하에 가까이있는 국소적인 결함부위에 의한 것이다. 이러한 감지기 근처의 결함부위에 의해서는 매우 높은 주파수를 수반하는 공진패턴의 잡음신호가 발생 된다. 이와 같은 고주파수의 잡음진동 신호는 주 결함부위로 인해 발생된 반사파의 형태를 교란시켜 도달시점의 식별을 어렵게 만든다.

이러한 잡음진동 신호의 제거를 위해서는 신호여과기(signal filter)를 사용해야 하는데, 여기에는 특정 주파수 이하의 모든 저주파수 신호를 제거하는 고주파 통과식

(high-pass filter), 반대로 특정 주파수 이하의 모든 고주파 신호를 제거하는 저주파 통과식(Low-pass filter), 그리고 특정 주파수 대역(band)에 놓이는 신호만을 통과시키는 대역통과식(band-pass filter)의 세 종류가 있다. 한편, 이러한 신호여과의 기기적 처리 방식에는 연속형(analog)과 수치형(digital)이 있다.

그런데 이러한 신호여과 과정을 거치면 통과된 신호의 특성-진폭 및 위상(phase), 주파수 특성 등 이 본래의 상태와는 다소 달라지는 역효과가 발생하므로 여과 주파수(filtering frequency) 대역의 선정에는 주의가 필요하다. 특히, 말뚝두부에 가까이 위치한 결함부위는 말뚝-지반 시스템의 동적응답 특성에 매우 큰 영향을 미치는데, 이러한 경우 이른바 수학적으로 역포선(deconvolution) 연산 논리에 토대를 둔 신호여과 방식(이를 deconvolution filtering이라 함)을 적용하는 경우에는 원신호의 일부가 그림 4.7에 나타난 바와 같이 원 신호의 파형이 과증폭(overshoot)되거나 물결치는 모양(ringing 또는 rippling)의 형태로 과도하게 변질될 수 있다. 이와 같은 부적절한 신호여과에 의한 과도한 신호변질은 반사파의 도달 시점 산정에 큰 오차를 초래하거나 반사파의 식별 자체를 곤란하게 만든다.

(나) 지수증폭 (Exponential Amplification)

다음으로 신호 여과를 통하여 어느정도 잡음진동 신호를 제거한 경우라도 반사원의 깊이가 큰 경우에는 반사파의 진폭이 식별이 곤란할 정도로 매우 작은 경우가 많게 된다. 이러한 경우에는 시간축을 따라 지수함수적으로 신호의 증폭비를 증가시키는 이른바 지수증폭(exponential amplification) 통하여 후속시간대에 도착하는 반사파의 진폭을 상대적으로 크게 함으로써 반사파의 식별을 용이하게 할 수 있다. 한편, 이와 같은 지수증폭은 처리대상 시간구간 (time range)을 조절할 수 있는데, 이를 통하여 문제가 되는 모든 반사파 성분을 식별할 수 있다.

(다) 모집평균(Ensemble Averaging) 및 자기상관분석(Auto-Correlation Analysis)

그런데 이와 같은 신호증폭에 의해서는 잔존된 무작위성(random) 잡음신호의 성분도 동시에 증폭되므로 정확한 반사파의 도달 시점 검측은 여전히 문제가 될 수 있다. 이와 같은 경우에는 여러번의 시험 결과 얻어지는 시간기록들을 평균하는 이른바 모집평균 (ensemble averaging) 처리를 통하여 무작위성 (random) 잡음신호 성분을 제거함으로써 신호의 선명도를 높인다. 또는 자기상관 함수 (auto-correlation function)의 연산을 통하여 반사파의 도달 시점을 정확히 검측한다. 자기 상관함수는

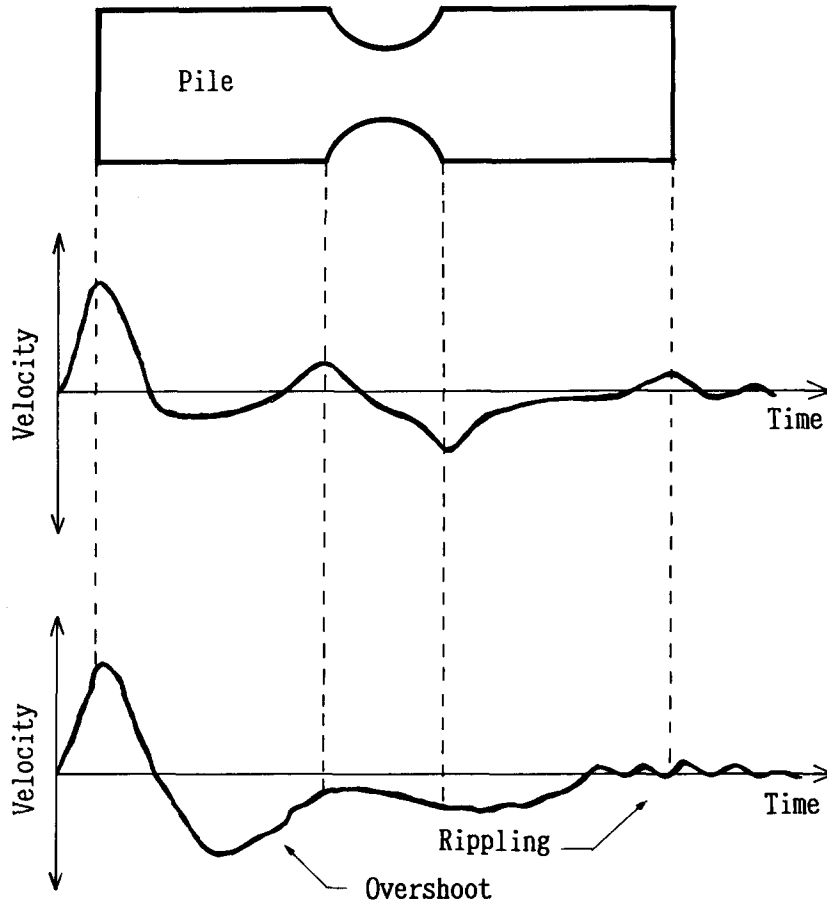


그림 4.7 신호여과 (Signal filtering)의 문제점

시간영역의 신호 특성함수의 일종으로서, 그림 4.8에 나타낸 바와 같이 이 함수는 일련의 최대/최소 첨두치들(maxima/minima)을 갖는 형상을 나타내는데 그림에서 보듯이 이들 첨두치는 각 반사파의 도달시점에 상응하는 시간차(time-delay)-그림에서 τ_1 , τ_2 , τ_3 -에서 나타난다.

지금까지 설명한 바와같이 SE법은 기본적으로 신호여과 및 지수증폭, 그리고 모집 평균 및 자기상관 함수와 같은 시간영역에서의 특수한 신호처리 기술을 활용함으로써 반사파들의 상호구분 및 선명도와 도달시점 검측의 정확도를 증진시켜 시험성파의 신뢰성을 높일 수 있는 방법이다. 제 4.1절에서 그림 4.1의 나-a)에 나타낸 시간기록은 앞에서 설명한 신호처리를 거쳐 얻어지는 전형적인 신호패턴을 나타낸 것으로서 그림에서 보듯이 병목부위에 의한 반사파 및 선단부에 의한 반사파 성분의 확연한 구분이 가능함을 알 수 있다. 병목부에 해당하는 한 쌍의 반사파 중에서 첫번째 것은 단면이 감소되는 경계면에 의해 발생된 것으로서 제 4.2절에서 설명한 바와 같이 $AI = (\rho VA)_2 / (\rho VA)_1$ 이 1보다 작은 경우에 해당되므로 파의 극성이 최초의 충격파와 동일하게 된다. 그러나 두번째 것은 반대로 단면이 커지는 경계면에 의해 발생된 것으로서 $AI = (\rho VA)_3 / (\rho VA)_2$ 이 1보다 큰 경우에 해당하므로 극성이 전도됨을 알 수 있다. 한편 같은 맥락에서 선단부에 해당하는 반사파의 극성이 바뀌지 않은 것은 지지층의 강성도가 말뚝보다 상대적으로 낮음을 의미한다.

그런데 여기서 한 가지 덧붙이자면 전술한 선단부 반사파 패턴이 굴착잔류토의 존재로 인한 것인지, 또는 견고한 지층까지 말뚝이 근입되지 못하고 상부 연약층내에 머무른것인지, 아니면 말뚝선단부와 지지층 사이에 큰 공동이 형성된 것에 기인하는지 여부를 분간하는 것은 어려운 일이다. 이러한 점은 말뚝내부의 결함부위에 대해서도 마찬가지로서, 토사혼입부인지, 불량콘크리트 부위인지 명확히 말할 수 없다. 나아가 반사파의 발생을 야기하는 결함이 사실상 구조적으로는 아무런 문제가 없는 단순한 응력파적 결함 (acoustic abnormality)인지 여부를 판정하는 또한 쉽지 않은 문제이다. 물론, 반사파의 진폭이나 인접한 반사파들의 극성전도 특성을 통하여 개략적인 추정이 가능하나, 이를 보다 명확히 하기 위해서는 많은 경험이 필요하다. 아울러 말뚝의 시공과정 및 지반조건 등 기타 부대 정보에 대해서도 세심한 정보수집과 분석이 수반되어야 한다.

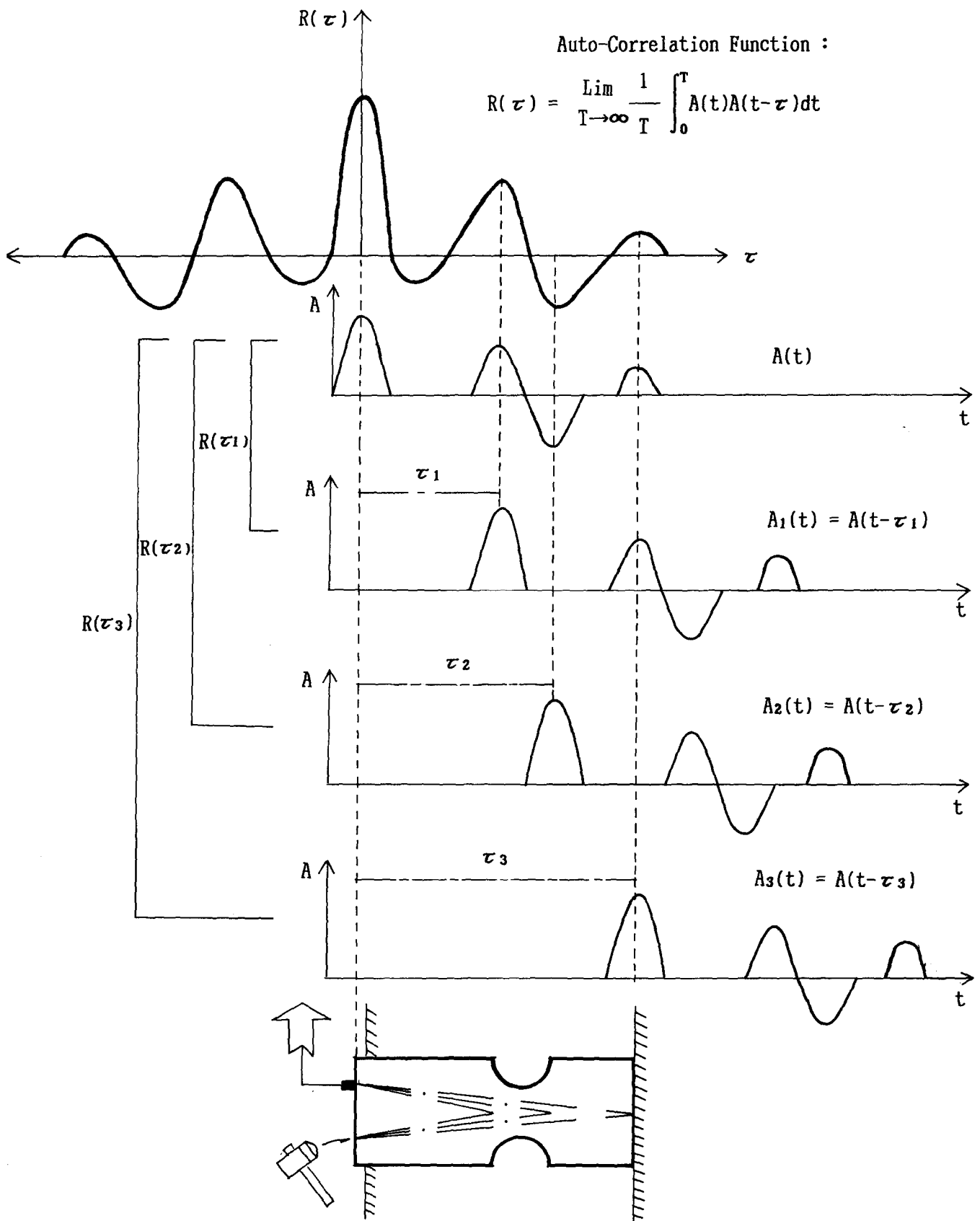


그림 4.8 자기상관 (autocorrelation) 함수를 이용한 반사파 도달 시간 측정

결론적으로 말하여 SE법은 비록 다양한 신호처리기술을 적용하여 신호의 질을 높임으로써 시험 성과의 신뢰성을 어느정도 증진시킨 방법이긴 하나, 본질적으로 시간영역의 데이터 분석에만 의존함으로써 다음의 IR법과 SM법에서 설명할 바와 같이 말뚝 선단 지지층 및 주변 접촉상태와 같은 중요한 정보를 파악하거나, 결합부위의 특성을 보다 정량적으로 규명하는데는 한계가 있다고 하겠다.

4.4 충격응답기법(Impulse-Response : IR Technique)

이 시험법은 앞에서 설명한 IE기법이 본질적으로 시간영역의 데이터 분석만에 의존함에 따른 문제점을 보완할 수 있는 시험법이다. 제 4.2절에 나타낸 그림 4.1의 가)를 참조하면 이 시험법이 IE기법과 크게 다른 것은 감지기로부터 포착되는 진동신호에 더하여 햄머 타격에 의한 충격신호(impact signal)도 측정하는 점이다. 그리고 신호 분석을 시간영역에서 하지 않고 주파수 영역에서 행한다는 점이다. 아울러 진동신호와 충격신호를 급속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform : FFT)시켜 얻어지는 충격 응답 특성(impulse response : IR) 함수를 활용하는 점이 또 다른 근본적 차이점이다.

한편, IR 시험법은 그림 4.1의 가-b)에 나타내었듯이 상관도 함수(coherence function) 또는 상관도 스펙트럼(coherence spectrum)를 통하여, 포착된 진동 신호의 주파수별 신뢰도를 판정할 수 있어 시험조건(타격강도 및 햄머 종류의 조절을 통한 주파수별 에너지 분포의 조정 등)의 합리적 조절과 측정된 시험성과의 신뢰성을 높일 수 있는 장점이 있다. 상관도는 한 쌍의 신호(여기서는 충격신호와 진동신호)의 상호 관련도를 나타내는 척도로서, 진동계 고유의 진동 특성에 의한 요인외에 잡음신호 등에 의해 포착된 충격 및 진동신호가 교란된 정도를 의미하며, 0 ~ 1사이 값으로 나타낸다. 상관도가 1에 가까울수록 두 신호간의 관련도가 높음을 의미한다.

한편, IR 함수는 충격하중 조건에서 진동계가 나타내는 주파수 응답특성 함수(frequency response function)의 하나로서 종축은 이른바 IR 특성치로, 횡축은 주파수로 하는 좌표평면상에 나타내면 그림 4.1의 가-a)에 나타낸 형태의 특성 곡선이 된다. IR 시험법에서 가장 많이 쓰이는 IR 특성치는 동적 유동도(dynamic mobility : DM)로서, 이는 단위 충격하중(impact force)에 의해 진동계(또는 입자)가 나타내는 진동속도(또는 입자속도 : particle velocity)로 정의된다. 즉, 속도/하중

(velocity/force)의 물리량으로서 보통 (mm/sec)/kg의 단위로 표현된다. 그러나 사람에게 따라서는 유동도를 가속도/하중(acceleration/force)의 물리량 -단위는 (mm/sec²)/kg 또는 g/kg, g는 중력가속도-으로 정의하기도 한다. 이러한 연유에서 IR시험법에서 얻어지는 IR특성 함수를 흔히 유동도 스펙트럼(mobility spectrum)이라고 부른다. IR 특성치에는 이 밖에도 동적 유연도(dynamic flexibility: DF, deflection/force ; mm/kg의 단위) 또는 동적 순응도(dynamic compliance : DC, force/deflection : kg/mm의 단위), 그리고 동적 강성도(dynamic stiffness: DS, force/deflection; kg/mm의 단위) 등이 쓰이는데, 이들은 유동도 스펙트럼을 일단 얻으면 신호의 미분·적분과정을 통해 산정할 수 있다.

한편, 유동도 스펙트럼은 제 4.2 절에서 설명한 바와 같이 신호의 패턴 (반향 및 공진)에 따라 두 가지 전형적인 변화 양상을 갖는다. 그림 4.2의 가-a)에 나타낸 것은 반향패턴에 해당되는 것으로서 그림에서 보듯이 서로 상이한 반향 주파수 값을 주는 일련의 반향 첨두치들이 형성됨을 알 수 있다. 반향 주파수와 진폭이 큰 반향 첨두치들은 상대적으로 낮은 위치에 있는 결합부위에 의한 것이며, 반향 주파수와 진폭이 작은 첨두치들은 깊은 위치에 있는 결합부위에 의한 것이다. 이는 결합부위의 깊이가 클수록 응력파의 왕복시간이 길어지고, 또한 파의 전파 경로가 길어지므로 재료 및 기하학적 감쇠에 의한 파에너지 손실량이 커지기 때문이다. 다음에는 결합부위의 깊이와 같은 단순한 정보외에 유동도 스펙트럼으로부터 역출할 수 있는 특성치들과 이들이 의미하는 물리적 특성에 대하여 설명한다.

(1) 특성 저항치(Characteristic Impedence: M1)

유동도는 입자속도(\dot{u})/ 힘(F)의 물리량인데, 말뚝과 같은 봉체(rod)에 대한 응력파 전파이론으로부터 $\dot{u} = F/(\rho VcA)$ 의 관계가 성립하므로 유동도(DM)는 제 4.2 절에서 설명한 AI의 특성치 (ρVcA)와 역수 즉, $DM = 1/(\rho VcA)$ -의 관계가 있다. 즉, 유동도 스펙트럼은 바로 주파수에 따른 AI 특성치의 변화를 나타내는 특성 곡선인 것이다.

한편, 그림 4.1의 가-a)에 나타낸 바와 같이 유동도 스펙트럼의 평균 높이에 해당하는 유동도치, M_1 - 이를 '특성 저항치 (characterestic impedance)'라고 함-은 말뚝-지반 시스템의 총체적 AI 특성을 나타낸다. 이러한 특성 저항치는 말뚝의 내부 결합 정도가 심할수록 또는 말뚝의 선단부의 지지층이 연약하거나, 말뚝 주변부에서 말뚝-지반의 마찰저항 상태가 불량할수록 특성 저항치는 증가하게 된다.

유동도 스펙트럼으로부터 특성 저항치, M_1 을 결정하기 위해서는 전체적인 유동도 곡선의 추세를 감안하여 눈 짐작으로 기하학적인 평균치를 구해도 대부분의 경우 큰 문제가 없다. 그러나 곡선의 변화 양상이 복잡하거나, 보다 정확도를 높이기 위해서는 분석대상 주파수 대역을 매우 크게하여 전반적인 곡선의 형상을 응축시킨 다음, 응축된 곡선하의 전면적을 대략 계산하고 곡선이 차지하는 주파수 대역의 크기로 나누어 산정하는 것이 바람직하다. 이 때 상관도(coherence)가 낮은 주파수 대역의 면적은 상관도를 경중율(weighting factor)로 하여 적절하게 유효면적을 구하는 것이 좋다. 참고로 햄머 타격등에 의한 충격으로 발생하는 응력파의 주파수 성분은 대략 10~2000 Hz의 범위에 놓이는데, 고주파수 성분은 감쇠가 심하여 높은 상관도를 보이는 대역의 상한계는 대부분의 경우 500 Hz 내외이다.

이와 같은 특성저항치는 지반상태가 크게 변화하지 않는 일정한 지역에 여러 개의 말뚝이 시공된 경우 말뚝들의 상대적인 결합정도 및 말뚝-지반의 지지/접촉 상태를 포함한 말뚝의 총체적인 건전도(integrity)를 판단하는데 매우 효과적인 수단이 된다. 그러나 보다 실질적으로는 말뚝두부에 가까운 곳에 위치한 병목부/확대부와 같은 중대한 결합부위의 존재여부를 파악하는데 유효한 척도가 된다. 이는 IR법에서 적용되는 타격강도는 그다지 큰 편이 아니며, 특히 말뚝이 길 경우나 말뚝 주변지반의 강성도가 큰 경우는 말뚝두부에 놓인 감지기로 되돌아오는 반사응력파의 에너지 강도가 상대적으로 작아지기 때문이다. 즉 말뚝의 전길이 보다는 말뚝두부에 가까운 일정한 깊이에 걸친 말뚝부위의 상태가 말뚝표면에 놓인 감지기에서 포착되는 진동신호의 전반적 특성에 지대한 영향을 미치기 때문이다.

한편, 특성저항치 M_1 이 결정되면 앞에서 설명한 바와 같이 $M_1 = 1/(\rho V_c A)$ 의 관계를 이용하여 다음과 같이 결합부위의 특성을 보다 정량적으로 파악할 수 있다.

첫째, 공동, 병목부, 확대부가 의심되는 경우에는 말뚝의 단위중량(ρ)와 압축파 전파속도를 기지의 양으로 할 때, 말뚝의 유효 단면적(effective 또는 average area)을 산정할 수 있다. 유효 단면적이 실제적인 말뚝의 공칭 단면적(nominal area)보다 작을 경우에는 공동이나 병목부의 존재를, 반대로 클 경우에는 확대부의 존재를 추정할 수 있다.

둘째, 케이싱이 있는 현장 타설식 말뚝기초의 경우라면 ρ 와 A 을 기지의 양으로 할 때, 압축파 속도(V_c) 값의 산정을 통하여 불량콘크리트 타설부위의 존재 여부 및 그 부실 정도를 추정할 수 있다. 또한 기성제 말뚝의 경우라면 파쇄부위를 추정할 수 있

다(파쇄부위에서는 응력파의 유효 전파경로가 길어지므로 속도가 작아지는 효과가 발생한다).

(2) 특성 순응치(Characteristic Compliance)

그림 4.1의 가-a)에 나타낸 바와 같이 저주파수 영역에서 형성되는 유동도 스펙트럼의 초기부는 직선형태가 되는데, 이 직선부의 기울기-이를 ‘특성순응치(characteristic compliance)’라고 함-는 말뚝 선단부-지지층 사이의 동적 순응(dynamic compliance) 특성과 관계가 있다. 달리 말하면 말뚝 선단부 지지층의 강성도와 관계가 있다. 왜냐하면 낮은 주파수 성분의 응력파는 재료감쇠로 인한 파에너지 손실량이 적어 말뚝의 선단부까지 침투하는데, 특성순응치는 바로 이와 같이 선단부까지 내려간 응력파에 의한 말뚝 선단부-지지층 시스템이 낮은 변형을 조건에서 나타내는 동적 거동 특성을 반영하는 것이기 때문이다. 다음에는 유동도 스펙트럼의 초기 직선부가 나타내는 기울기, 즉 특성 순응치가 갖는 물리적 의미에 대하여 고찰해본다.

정현진동 이론으로부터 변위진폭 (u)는 속도진폭 (\dot{u})와 $\dot{u} = (2\pi f) \cdot u$ 의 관계가 있으므로 특성 순응치(Δ)와 강성도(DS) 및 유연도(DF)는 다음의 관계가 있다.

$$DS = 2\pi f_2 / M_2 = 2\pi / \Delta \dots\dots\dots (2.2a)$$

$$DF = 1 / DM = \Delta / 2\pi \dots\dots\dots (2.2b)$$

윗 식에서 M_2, f_2 그림 4.1의 가-a)에 나타낸 바와 같이 유동도 스펙트럼의 초기 직선부 연장선상에서 택한 임의의 유동도치 및 해당 주파수 값이다.

식 (2.2)의 관계로부터 특성 순응치는 바로 말뚝 선단부의 지지 상태 (강성도 및 유연도 특성)를 나타내는 척도임을 알 수 있다. 따라서 말뚝의 선단부가 굴착 잔류토층이나 연약지층에 놓일 경우는 견고한 지층에 놓일 경우 보다 특성 순응치 값이 상대적으로 커진다. 한편, 그림 4.1의 가-c)에는 건전한 말뚝의 경우에 대하여 말뚝 선단부의 상태에 따른 유동도 스펙트럼의 이론적인 변화 양상을 나타내었다. 그림에서 보듯이 말뚝 선단부의 상태가 불량할 수록 유동도 스펙트럼의 초기 직선부의 기울기가 급해짐을 알 수 있다.

(3) 특성주파수(Characteristic Frequency)

그림 4.1의 가-c)를 고찰하면 말뚝의 선단부의 상태가 불량할 수록 유동도 스펙트럼은 주파수축의 증가방향으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 이에 따라 유동도 스펙트럼의 반향첨두(echo-peak)들에 해당하는 주파수는 증가하고 있으나, 각 첨두간의 간격 (즉, 반향주파수)은 변함이 없음을 알 수 있다. 그리고 강성 지지층의 경우를 제외하고는 최초의 반향 첨두가 형성되기 전에 초기 직선부 사이에 골(valley)이 형성되고 그 깊이는 선단부 상태가 불량할수록 커지게 됨을 알 수 있다.

앞에서 서술한 관찰이 궁극적으로 의미하는 것은 최초의 반향 첨두가 나타나는 주파수 (f_0)-이를 '특성 주파수(characteristic frequency)'라고 함-는 말뚝의 선단부 상태가 나빠수록 증가 한다는 점이다. 이론적으로 말뚝이 이상적인 강성지지층(rigid base)에 고정된 경우의 초기 특성 주파수 (f_0)는 반향주파수 (f_e)의 1/2 값이 된다. 그러나 실제의 경우에 이상적인 강성층은 존재하지 않으므로 말뚝이 아주 견고한 지지층에 썩기된 (socketed)된 경우라도 앞에서 서술한 특성순응치는 이상적인 강성층에 비해 클 것이다. 따라서 유동도 스펙트럼의 초기 직선부의 기울기는 이상적인 강성층의 경우보다 약간 더 급해질 것이고, 이에 따라 최초의 반향첨두는 이상적인 강성층의 경우보다 약간 좌측에 형성된다. 즉, 실제의 경우는 아무리 지지층이 견고 하더라도 $f_0 < 0.5 f_e$ 인데, 일반적으로 $f_0 \approx 0.4 f_e$ 정도이면 아주 양호한 상태로 말뚝이 지지된 것으로 간주할 수 있다. 그런데 최초의 반향첨두가 형성되는 위치가 달라지는 현상은 비단 말뚝선단부에 상응하는 반향 첨두들에서만 아니라, 말뚝내부의 결합부위에 해당하는 반향첨두들에 대해서도 마찬가지로 발생한다. 따라서 내부결합 부위에 상응하는 특성 주파수 (f_{02})와 이 때의 반향주파수 (f_{e2})의 비율로부터 내부결합 부위의 특성 (공동, 불량 콘크리트 부위)을 파악할 수 있다.

(4) 동적 강성도(Dynamic Stiffness : DS)

식 (2.2a)로 산정되는 동적 강성도 (DS)는 낮은 변형율 조건에서 말뚝의 하중-침하 특성을 나타내는 척도임을 감안하면, IR 시험법은 말뚝의 지내력 (특별히 선단 지내력)과 같은 재하특성을 간접적으로 추정하는 시험으로도 활용될 수 있다. 물론, 말뚝의 지내력을 결정하기위한 정적 및 동적 재하시험은 근본적으로 매우 큰 변형율을 수반하고, 특히 어느 정도 이상의 말뚝 주면마찰이 유발되는 조건에서 수행되는 것이므로 IR 시험법에서 얻어지는 동적 강성도를 말뚝의 지내력을 평가하는 직접적인 척도로 사용하는 것은 무리한 일이다. 그러나 앞으로 재하시험 성과와의 비교분석 등을 통하여 연구해 볼만한 가치가 충분히 있는 것이다.

관련하여 최근의 연구성과에 의하면 비교적 작은 정적 하중을 가해 얻어진 저하중의 정적 강성도 (low-load static stiffness; LLSS) 값은 IR시험에서 얻어지는 동적 강성도 값의 50 %~100 % 범위에 놓이는 것으로 보고된 바 있다. 참고로 시공·안치 상태가 양호한 현장타설식 콘크리트 피어(pier) 기초 (길이 28 m, 직경 및 지반조건은 미발표)에 대한 실험결과 보고된 DS 값은 237 ton/mm(2.32 MN/mm, 13,300 kips/inch) 정도로 알려져 있다. 한편, 최근에는 IR시험법을 이용하여 말뚝주변-지반의 동적 상호작용과 관련한 특성치를 역출하기 위한 연구가 수행된 바 있는데, 이러한 연구 성과들이 축척되면 멀지 않아 IR시험법을 이용하여 말뚝의 내하력 특성까지도 파악할 수 있는 길이 열릴 것으로 판단된다.

말뚝의 재하시험과 관련하여 한가지 덧붙이자면, IR 시험은 최소한 재하시험을 행해야 할 말뚝을 선정하는데 합리적인 기준을 제공하고, 아울러 재하시험 성과의 분석을 보완하고 시험성과를 극대화 할 수 있는 보조수단으로서 활용될 수 있다는 점이다. 즉, 여러 개의 말뚝이 동일지역에 시공된 경우 무작위적으로 재하시험 대상 말뚝을 선정하는것 보다는 IR 시험을 병용하여 상대적으로 낮은 동적 강성도를 나타내는 말뚝을 선정하는 것이 보다 합리적이다. 또한 재하시험을 행하지 않은 말뚝의 경우라도 IR 시험 성과와 비교분석을 통해 지내력 차이의 원인을 추정하거나, 재하 시험 곡선에서 주변 마찰 지지 및 선단지지에 의한 부분의 변화 양상을 분석하는데 활용할 수 있다.

지금까지 설명한 IR 시험법의 특징을 요약하면, IE기법과 비교할 때 이 시험법은 주파수 영역에서 신호처리·분석 기술을 토대로 결합 부위는 물론, 말뚝 선단부의 지지상태에 대한 매우 다양한 정보를 추출해내는 진보된 시험법이라고 말할 수 있다. 그러나 주파수 영역의 신호분석 기술에 토대를 두는 IR 법은 FFT 변환에 따른 고유의 수학적 문제로 인하여 경우에 따라서는 시간영역에서 직접적인 측정이 이루어지는 IE 법에 비하여 측정오차가 커지는 문제를 내포하고 있음에 유념할 필요가 있다. 아울러 IR 시험법은 주파수 영역에서 신호 특성을 분석하므로 시간영역에서만 관측될 수 있는 극성전도 및 이와 관련된 결합부위의 특성 정보를 직접적으로 얻을 수 없는 것도 단점이다.

한편, IR 시험법에서 이용하는 제반 주파수 특성함수의 도출을 위해서는 신호 평균 (signal averaging)을 위해 여러차례 타격을 가해야 하는데, 매 번의 타격시 일관성

을 유지하여 신호의 재현성 (reproducibility)를 높이는 것이 매우 중요하다. 그렇지 않으면 경우에 따라서는 불규칙한 시험성과를 얻게 되어 시험성과의 판정에 어려움을 겪을 수 있다. 최근에는 이러한 단점을 보완하기 위해 햄머충격 대신에 전동식 진동기 (electrodynamic vibrator)를 쓰는 방법이 시도되고 있다.

한편, 최근의 마이크로 컴퓨터를 이용한 데이터 포착·분석 시스템을 사용하면 시간 영역 및 주파수 영역의 각종 신호처리·분석을 동시에 수행할 수 있으므로 IE기법과 IR기법의 시행·분석을 통합적으로 수행할 수 있고 IE 및 IR기법의 문제점을 상호보완할 수 있다. 이러한 시스템은 경비부담의 문제가 있긴하나 IE기법 및 IR기법을 위한 개별적인 전용 시스템을 구비하는 것보다는 지금까지 서술한 IE기법과 IR기법의 제반 제약사항을 고려할때 시험성과의 신뢰성을 높이는 측면에서 보다 바람직한 것이라고 하겠다. 더욱이 이러한 통합 시스템은 제 3 장에서 설명한 검측공 시험법에도 적용할 수 있고, 또한 다음에 설명할 SM법은 물론, 기타의 광범위한 진동계측 관련 시험 및 조사에도 확대 적용할 수 있는 다목적의 범용 진동신호 분석 시스템으로 활용할 수 있는 커다란 잠재력이 있다.

4.5 진동신호 역산기법(Signal Matching : SM Technique)

이 시험법은 앞에서 서술한 IE/IR법의 근본적인 문제점을 해결하기 위해 아주 최근에 연구개발된 시험법이다. SM법의 세부사항을 설명하기에 앞서 SM법과 같은 새로운 비파괴 시험법이 연구개발되고 있는 배경과 관련한 IE/IR 법을 포함한 비파괴 시험법들이 안고 있는 근본적인 문제점을 정리하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째로, 응력파적으로 동등한 효과를 초래하는 결합 부위에 대한 명확한 구분이 어렵다. 예를들어, 극성이 전도된 반사파는 병목부일 수도 있고 공동일 수도 있는데 이에 대한 명확한 판정은 실제적인 조사 경험이 많지 않는 초심자에게는 매우 어렵다.

둘째로, 결합 부위의 양태(규모, 재료적 특성)에 대한 구체적이고 정량적 판단이 사실상 어렵다. 나아가 구조적 결합인지, 단순한 응력파적 결합인지 구분이 어렵다.

셋째로, 타격에너지가 비교적 낮아 말뚝의 길이가 길거나 중간에 대규모 결합부위가 존재할 경우는 파에너지의 차단효과로 더 이상 깊은 곳의 상태를 진단해내기 어렵다.

넷째로, 비록 말뚝선단부의 지지층 상태는 IR법을 통해서 어느 정도 추정할 수 있지만, 말뚝 주면부의 접촉 상태나 주면부 외측의 지반내 측면 공동 (side cavity), 주면부 지반의 극단적·국부적 지반상태 변화 등, 말뚝 전길이에 걸친 말뚝-지반 시스

템의 실질적인 동적거동 특성을 좌우하고, 특히 말뚝의 지내력과 보다 밀접한 관계가 있는 말뚝주변 지반의 상태를 파악하기 어렵다.

이와 같은 IE/IR법으로 대표되는 종래의 비검측공 시험법의 제약점은 근본적으로 이들 시험법이 비교적 약한 충격에 의해 발생된 응력파의 반사 특성 분석에만 의존하는 것에 기인하는 것이다. SM기법은 보다 강한 충격을 말뚝에 가하여 말뚝이 비교적 깊은 깊이에 걸쳐 주변 마찰이 유발될 정도의 강제진동을 유발시킨다. 그리고 이러한 강제진동의 신호 특성을 말뚝의 동적 재하 시험에서와 같은 신호분석 방법을 활용하여 분석함으로써 말뚝 내부의 결합 부위 특성을 보다 구체적이고도 정량적으로 파악하고, 특히 말뚝주변부의 상태를 효과적으로 검측하기 위한 것이다. 이와 같은 SM법은 처음에는 SE법에 의한 결합조사를 컴퓨터를 이용하여 모사(simulation)함으로써 시험성과를 사전에 예측하기 위한 목적으로 개발 되었다. 이후 모형 시험과 현장시험을 통하여 결합부위의 특성을 정량적으로 파악하기 위한 기술개발이 본격적으로 진행되었으며 현재도 관련연구가 진행중에 있다.

SM기법의 시험원리는 말뚝-지반 진동계를 그림 4.2에 나타낸 바와 같이 일련의 질량(mass)-용수철(spring)-감쇠기 (dashpot)의 시스템으로 모델링 (modelling)한 다음, 말뚝두부에 가해진 실제의 타격 신호를 모델 시스템에 가했을때 얻어지는 말뚝두부의 ‘이론적’ 진동신호 특성과 감지기로부터 실제로 검측된 ‘실측’ 진동신호 특성이 서로 일치될 때까지 모델 시스템의 제반 진동영향 요소들의 물성치-질량, 용수철, 감쇠기와 관련한 말뚝 및 주변지반의 제반 물리적 기하학적 특성치-를 시행착오적으로 반복 가정하는 것이다. 이러한 연유에서 이 시험법을 진동신호 역산기법 (signal matching technique)이라고 부르는 것이다. 표 4.3에는 결합유형에 따라 말뚝-지반의 진동계를 구성하는 질량-용수철-감쇠기 3요소의 변화 및 이들 요소와 관련된 물성치를 나타내었다.

한편, 표 4.3에 나타낸 말뚝-지반 진동계의 각 구성요소의 특성치를 결정하기 위한 말뚝 및 지반의 물성치를 결정함에 있어 말뚝과 유관한 물성치들은 말뚝의 설계·시공 정보로부터 간단히 결정될 수 있으므로 큰 문제가 없다. 그러나 말뚝-지반의 상호작용 특성과 관련된 물성치는 기본적으로 표준관입시험 (SPT) 및 콘(Cone)관입시험 (CPT) 등의 사운딩(sounding) 조사 성과를 포함한 원위치 지반조사 성과가 필요하다. 특히 CPT 시험성과는 말뚝-지반의 마찰 특성치를 결정하는데 매우 유용하다. 이에 더하여 지반의 동탄성 특성치 (dynamic moduli) 및 감쇠비(damping ratio) 등을 원위치

표 4.3 결합유형에 따른 말뚝-지반 시스템의 진동계 구성요소 변화

결합유형		진동계 요소			비 고
구 분	종 류	질량(m)	용수철(k)	감쇠(c)	
비정상 단면 부위	병 목	$m_p(-)$	$k_p(-), k_s(-)$	$C_s(-)$	+ : 증가 - : 감소 $m_p \propto \rho A$ $k_p \propto \rho A V_c^2$ $k_s \propto f_s \cdot S$ $k_t \propto G_t \cdot R$ $C_s \propto f_s \cdot S$ $C_t \propto D_t$
	확 대	$m_p(+)$	$k_p(+), k_s(+)$	$C_s(+)$	
불연속 부위	공동	$m_p(-)$	$k_p(-)$	X	
	파쇄부	X	$t_p(-)$	X	
	균열	X	$k_p(-)$	X	
비균질 부위	불량콘크리트	$m_p(-)$	$k_p(-), k_s(-)$	$C_s(+)$	
	토사 흡입부	$m_p(-)$	$k_p(-), k_s(-)$	$C_s(+)$	
선단지지층 상태	굴착잔류토	X	$k_t(-)$	$C_t(+)$	
	선단하 공동	X	$k_t(-)$	$C_t(+)$	
주면지반 상태	측면 공동	X	X	$C_s(-)$	
	토층 경계	X	$k_s(\pm)$	$C_s(\pm)$	

주) m_p : 말뚝몸체의 질량

k_p : 용수철 계수(말뚝내부)

k_s : " (말뚝주면-지반)

k_t : " (말뚝선단-지반)

C_s : 감쇠 계수 (말뚝주면-지반)

C_t : " (말뚝선단-지반)

ρ : 말뚝의 밀도

A : 말뚝의 단면적

V_c : 말뚝의 압축파 속도

G_t : 선단 지지층의 강성도 특성치

D_t : 선단 지지층의 감쇠비

f_s : 말뚝주면-지반의 마찰 특성치

S : 말뚝 주면장

R : 말뚝의 직경

탄성과 검측법(in-situ seismic tests) 및 공진주/비틀림 전단 시험 (resonant column/ torsional shear test) 등을 이용하여 결정한 성과를 보완하면 더욱 바람직하다. 아울러 말뚝 시공 중에 관측 또는 계측된 주요 정보 또한 간과할 수 없는 사항이다.

이러한 기본적인 지반 및 시공정보를 토대로 SM기법에서 적용되는 신호역산(signal matching) 절차는 다음과 같이 두 단계로 나누어 수행된다.

제 1 단계에서는 주어진 지반정보를 이용하여 말뚝 시공 지역의 표준 지반상태를 결정한다. 이와 같은 표준 지반상태는 결함이 없는 건전한 말뚝에 대하여 시험을 시행하여 '입력' 타격신호에 대한 '출력' 실측 진동신호와 모델 시스템의 '이론' 진동신호 특성을 일치시킴으로써 도출할 수 있다. 이 때 가능하다면 기준 말뚝(reference pile)을 하나 이상 택하여 얻은 복수의 시험성과를 평균하여 표준 지반상태를 산정하는 것이 바람직하다.

제 2 단계에서는 결함이 발견된 말뚝에 대하여 결함의 특성을 정량적으로 파악하는 단계이다. 이 때 지반 물성치는 제 1 단계에서 결정된 것을 적용한다. 먼저 신호기록의 전반적 상태를 분석하여 주요 결함부위의 위치와 SE법에서 설명한 바와 같이 반사파의 패턴(극성전도, 진폭 감소 정도 등)을 토대로 결함부위의 특성(종류, 규모, 재질 등)을 개략적으로 모델링한다. 다음으로 이러한 예비적 결함부위의 특성을 반영한 모델 시스템의 '이론적' 시간기록을 도출하고, 이를 '실측' 시간기록과 비교한다. 이 때 이론 및 실측 시간기록이 잘 일치하지 않으면 결함부위 특성을 시행착오적으로 반복 수정하면서 두 시간기록 신호가 허용오차내에서 일치할 때까지 전체 작업을 반복수행한다.

관련 연구성과들에 의하면 실제로 이와 같은 방법을 통하여 각기 다른 유형의 결함부위를 구별할 수 있고 특히 응력파적으로 동등한 이상현상을 유발하는 결함부위까지도 구분이 가능한 것으로 보고되어 있다. 그러나 현재까지 SM법의 기술개발 수준은 시간영역의 신호특성만을 기준으로 하고 있는 관계로, 특히 주요 결함부위가 여러 개일 경우에는 신호의 상호 간섭효과로 인하여 신뢰성 높은 결과를 얻기가 어려운 한계에 머무르고 있다. 또한 이러한 경우에는 신호역산시 조정해야할 미지변수 수가 많아 지므로 설혹 신호일치가 되었다하더라도 분석 성과의 신뢰성이 낮아진다. 이러한 문제는 주파수 영역의 신호분석기술을 활용하면 해결될 수 있는 것으로 판단되는데, 앞으로 IR기법에서와 같은 유동도 스펙트럼 뿐만 아니라 다른 주파수 특성함수까지도 신

호일치의 기준으로 고려하는 새로운 기술의 개발은 좋은 연구과제라고 하겠다. 그리고 현재 SM기법에서 사용되는 타격강도 (낙하체 무게 기준 200 kg, 충격량 기준 1500 ton)는 비록 IE/IR기법에 비하여도 매우 큰 것이지만 여전히 근입깊이가 큰 말뚝이나 대규모 결합부위가 존재할 경우는 말뚝을 선단부까지 강제진동시키기에는 과부족이다. 따라서 현재의 기술 수준으로는 일정깊이 이하의 말뚝상태를 진단하는데는 여전히 문제가 따른다. 앞으로 타격강도를 말뚝의 동적 재하 시험에 준하는 정도(낙하체 무게 기준 20 ton, 말뚝 지내력 기준 2000 ton)로 하여 실질적으로 고변형율(high-strain)조건에서 결합조사를 시행하는 방법, 나아가 말뚝의 동재하시험 성과를 그대로 활용하는 방법은 연구할 만한 가치가 있다. 아울러 저변형율의 조건이지만 진동감지기를 말뚝 두부 한 곳에만 설치하는 대신 케이싱관을 이용하여 말뚝 전깊이에 걸쳐 일정간격으로 여러 개의 감지기를 매설하고, 이들로부터 포착되는 진동신호의 다중적 신호 분석을 행하는 방법 또한 대안의 한 가지로서 연구해볼 만하다.

4.6 일시진동법의 적용성

지금까지 설명한 여러가지 일시진동법들의 세부 기술적 사항에 대한 고찰과 그동안 이들 시험법을 실무에 적용하여 얻어진 관련 연구성과들을 토대로 말뚝의 결합조사에 일시진동법에 의한 비파괴 시험의 적용시 지침이 될만한 사항을 정리하면 다음과 같다.

(1) 말뚝 길이 추정

말뚝의 근입깊이 추정오차는 대략 $\pm 10\%$ 로 볼 수 있는데(그림 4.4 참조), 이 정도의 측정오차는 말뚝 선단부 근처의 결합부위를 정확히 판정하는 데는 부족할 수도 있다.

(2) 침투 깊이

일반적으로 IE/IR 방법과 같이 가벼운 타격으로 발생된 응력과 에너지의 감쇠정도는 말뚝의 세장비(길이/직경), 말뚝주변 지반의 연경상태 및 결합부위의 특성에 따라 변한다. 일반적으로 극히 연약한 지반의 경우는 세장비가 50까지도 가능하나, 견고한 지반인 경우는 세장비가 20을 넘어가기 어렵다. 그림 4.9는 점토질 지반에 근입된 무결합 말뚝에 대한 것인데 대략 세장비가 35에 이르면 반사파의 진폭이 1%이하로 줄어든다. 따라서 IE/IR법에서 최대 시험가능 세장비는 35이하로 보는 것이 바람직하다. 일반적으로 보다 큰 충격을 가하는 SM법의 경우에는 세장비를 크게 높일 수

진폭감소비 (반사파 진폭/충격파 진폭) : 대수축적

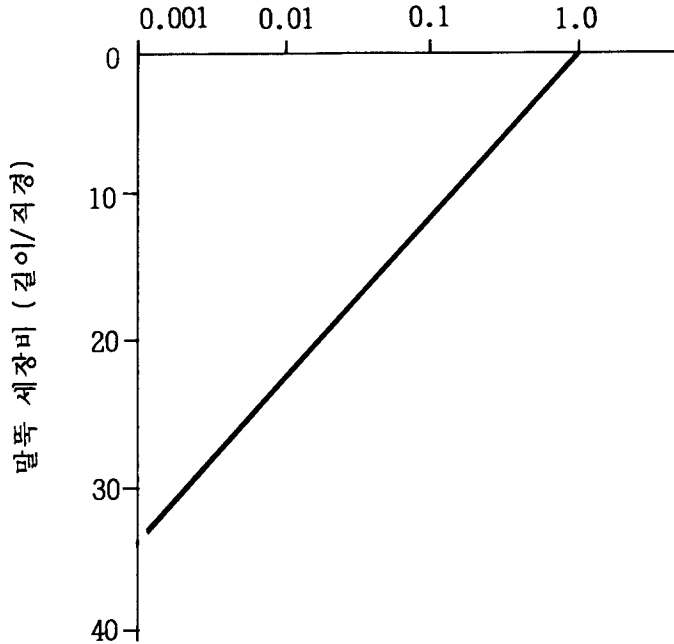


그림 4.9 말뚝의 세장비에 따른 반사파 감쇠정도

있다. 그러나 대규모 공동, 파단성 결함 등 AI특성치 차이가 큰 결함부위가 있을 경우에는 충격 강도를 높이더라도 침투깊이는 더이상 증가하지 않는다.

3) 반사파 신호의 선명도

반사파 신호의 식별정도는 사용된 측정장비의 분해능 (resolution) 및 시험시 잡음비에 따라 좌우된다. 측정장비의 분해능은 대개 40 ~ 60 dB (1/100, 1/1000의 해상도)의 범위에 놓이나 실질적인 분해능은 사용된 감지기 특성 및 장비의 전기적 제작 특성에 따라 변한다. 한편, 단순히 원래의 신호에만 의존하는 것보다는 모집평균, 자기상관 등 신호평균 처리를 하는 방법이 반사파의 선명도를 높일 수 있다.

4) 내부결함의 식별도

결함부위 전후의 AI 특성치를 아랫면에 놓이는 매질을 기준하면 반사파의 식별이 가능한 최소 AI 특성치는 제 4.3 절에서 서술한 바와 같이 (1.2:1)이다. 그러나 이러한 임계 AI 특성치를 갖는 결함부위의 검출을 위해서는 강한 파에너지를 갖는 고주파 수 성분의 응력파를 통해서 만이 가능하다. 따라서 이러한 경우에는 기본적으로 딱딱

한 햄머를 사용한 예리한 충격이 필요하고, 파일 두부의 타격부위 표면이 요곡이 없이 평탄해야 한다. AI 특성치가 (2:1) 내외가 되면 대부분의 주파수 성분의 응력파가 충분히 반사되어 선명한 반향파가 얻어진다. 그런데 4:1 이상을 넘어가면 거의 모든 응력파 에너지가 반사되어 최초의 결합부위 이하의 깊이에 대한 정보는 얻을 수 없게 된다. 이러한 AI 특성치는 말뚝 단면의 약 50 % 감소 및 콘크리트 강도로는 거의 0에 상응한다. 참고로 말뚝 전단면을 가로지르는 파단성 균열은 AI치가 대략 $2 \times 10^4:1$ 에 해당되는데 이 수치는 균열의 두께와는 전혀 무관하다. 즉 파단성 균열은 응력파 검측법에서 가장 예민한 결합 유형으로서, 그 검측이 매우 용이하다.

그런데 말뚝의 단면이 수 미터 (meter)에 걸쳐 서서히 변화되는 경우에는 명확한 형태의 반사파가 형성되기 어렵다. 아울러 토사혼입부 및 불량 콘크리트 타설부위의 경우도 마찬가지인데, 이러한 경우에는 PE 및 SE 법과 같이 시간기록에 의존하는 시험법은 근본적으로 부적합하다. 이 때는 IR 기법을 적용하여 얻는 각종 특성치들을 활용한 판단이 유효하다.

한편, 말뚝 단면의 크기의 산정과 관련한 내용을 살펴보면, 우선 시간기록에 의존하는 PE 및 SE 법으로는 단면변화에 대한 정량적 추정이 불가능하고, IR기법에서는 제 4.4 절에서 설명한 바와 같이 특성 저항치 $M_1 = 1/\rho VcA$ 를 이용한 추정이 가능하다. 그러나 이것도 대부분의 경우, 말뚝두부에서 약 2~3 m 깊이까지만 가능하다. 왜냐하면 가벼운 햄머 타격에 의한 응력집중부위는 대부분의 경우 상부 수 미터를 초과하지 못하기 때문이다. 이러한 경우 SM 시험법을 적용하면 보다 깊은 곳까지 진동에너지를 전달시킬수 있고, 말뚝-지반 진동계의 구성요소 중, 질량을 변화시키는 과정을 통해 비교적 깊은 곳에 있는 말뚝 단면적의 추정이 가능하다.

마지막으로 축방향을 따라 여러 개의 주요 결합부위가 존재할 경우에는 IE/IR 기법으로는 각 결합부위의 상대적인 특성 구분이 일반적으로 어렵다. 그리고 결합부위가 하나인 경우라도 불연속성 결합 (균열 및 공동)의 경우에는 말뚝의 축방향을 따른 규모를 추정하기 어렵다. 왜냐하면 미세한 균열 (hair crack)이나 수 미터에 이르는 대형 공동이나 동등한 응력파적 이상현상을 초래하기 때문이다. 이와 같은 경우에도 SM 법을 적용하면 어느정도 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

5) 말뚝주면 지반의 성층상태 영향

지반의 비구속조건에서의 압축파 속도(unconstrained compression wave velocity:

V_p)를 기준할때, 이질 토층의 경계면 전후의 V_p 비율이 윗층을 기준할 때 대략 (1:2.5) 이상이면 대부분의 경우, 토층 경계면에서 반사된 성분 에 의한 신호교란 영향은 무시할 정도로 경미하다. 그러나 (1:5) 이하로 되면 응력파가 완전히 반사되어 해당 토층 경계면 이하의 결함조사가 불가능해진다. 이러한 경우는 말뚝이 상부의 연약한 매립 토층을 지나 하부의 매우 견고한 지층에 지지되는 경우나, 상당한 길이의 말뚝 상층부가 사실상 구속되지 않은 경우(쓰레기 매립지반 등)에 해당된다. 이러한 지반조건에서는 말뚝 선단까지 내려 갔다가 되돌아 오는 반사 응력파 에너지의 대부분이 다시 말뚝하부로 재반사 된다. 따라서 연약층의 하부 경계면 이하에 근입된 말뚝 부분에 대한 조사성과는 신뢰성이 없다. 이러한 경우, 손잡이 햄머를 이용해서는 아무리 타격강도를 크게 하여도 소용이 없고, 근본적으로 SM 법과 같이 말뚝에 강제진동을 유발하는 방법을 적용하는 것이 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

5. 결론

지금까지 서술한 여러가지 말뚝 결함 조사법에 대한 내용을 종합할 때 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 가장 확실하고 정밀한 결과를 얻을 수 있는 방법은 수평검측기법(CSL법)이라고 할 수 있다. 그러나 이러한 검측공 시험법은 시간·경비적으로 비싼 시험이며, 특히 기시공 말뚝의 경우에는 시험 가능한 경우가 드물다. 이러한 측면에서 비검측공 시험은 시험이 신속하고 저렴하여 실용성이 높은 효과적인 시험이라고 할 수 있다. 그러나 이러한 비검측공 시험법은 비파괴 시험이 공통적으로 안고 있는 어느 정도의 모호성을 완벽히 해결할 수 없다는 것을 유념해야 한다. 그리고 양 시험법 모두에서 발견되는 응력파적 이상부위는 반드시 구조적 결함을 의미하지는 않는다는 점에도 주목해야 한다.
- 2) 현장 타설식 말뚝의 경우에는 균열보다 병목부 및 토사혼입부와 같은 내부 결함부위가 중요한 것인데 비검측공 시험법의 경우에는 이의 명확한 파악이 어렵다.
- 3) 비검측공 시험법들은 현재의 기술 수준을 감안할 때 원칙적으로 ‘잠재적’ 결함의 파악용도에 치중하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 그리고 잠재적 결함에 대한 세부 특성의 파악을 위해서는 지반조사 성과 및 말뚝 시공과정의 유관정보를 면밀하게 수집·분석하는 것이 필요하고, 많은 경험을 통한 공학적 판단이 요망된다. 더불어 보

다 정밀하고 정량적 결과를 얻기 위해서는 SM법과 같은 보다 이론적·기술적 근거를 보완한 새로운 기술개발이 요망된다고 하겠다.

4) 한가지 시험법에만 의존할 것이 아니라 상황에 따라 하나 이상의 시험법을 병용하는 것이 바람직하다. 이와 관련하여 각 시험법을 위한 개별적인 전용 시험기를 구비하는 것보다는 마이크로 컴퓨터 시스템을 이용한 통합적 진동신호 획득·분석 시스템을 구비하는 것이 경제적인 뿐만 아니라, 향후 개발될 새로운 시험법을 수용할 수 있는 측면에서 바람직하다.

5) 비검측공 시험법은 검측공 시험법에 비하여 시험이 신속하고 시험의 경제성이 높아 앞으로 관련 기술의 보완개발이 가속될 전망이다. 기술개발에 많은 노력이 필요하나 기술의 고부가가치성은 이를 충분히 상쇄할 수 있는 바, 앞으로 우리나라도 관련 기술의 개발에 노력을 기울일 필요가 있다.

7) 선진 외국에서는 말뚝의 결함조사법이 필수 시험항목으로 일반화 되어 있다. 앞으로 국내에서도 현장 타설식 콘크리트 말뚝기초의 적용이 가일층 증가할 것임을 감안할 때, 정밀·안전시공의 도모 및 연구개발의 활성화 차원에서 결함조사법을 설계·시공 단계에서 반드시 시행토록하는 정책적 뒷받침이 절실하다.

감사의 글

부족한 줄고를 작성하는데 도움을 주신 여러분에게 감사드린다. 무엇보다 행주대교 붕괴원인조사와 관련하여 연구 의욕을 일으켜 주신 한국건설기술연구원 지반연구실의 홍성완 실장님께 먼저 감사를 드린다.

두번째로는 말뚝 결함조사와 직결된 관련 현장 문제의 자문기회를 통하여 실무기술의 세부내용을 직접 체험할 수 있도록 배려하여 주신, (주)벽산건설의 현대관 이사님과 권만근 소장님, (주)다산 컨설턴트의 주재건 사장님과 조성하 실장님, (주)신평계측산업의 안병훈 사장님, 그리고 기타 현장 기술진 여러분에게 충심의 감사를 드린다. 아울러 관련 기술자문 및 자료 제공에 큰 도움을 주신 미국 Olson Engineering, Inc.의 Larry D. Olson 사장님과 Dennis A. Sack 씨에게도 깊은 감사를 드린다.

마지막으로 실무문제를 협의해 주시어 연구자극을 주신 (주)고려기초연구소의 이명환 박사님, 그리고 관련 자료의 수집에 협조하여 주신 부산 경성대학교의 최용규 교수님, 미국 뉴욕 Polytechnic University의 김동수 교수님, (주)현대 엔지니어링 토목 사업본부의 장준호 과장님과 권오욱님, (주)삼성종합건설 기술연구소의 이호범 선임연구원님, 또한 시험기 및 장비개발 정보의 수집에 도움을 주신 (주)다일의 강기호 사장님, (주)아주 지오시스템스의 안병운 사장님, 부산전자공업의 김성중 상무님과 미국 Test Measurement Systems Inc.의 Dr. Gerald R. Potts 사장님에게도 진심한 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. 우제윤(1993). “현장타설 콘크리트 말뚝기초의 비파괴 건전도 시험법,” 건설기술 정보, 통권 113호, 2월, pp.24~31.
2. 대우 엔지니어링(1991). PILE의 비파괴 검사방법의 비교검토서, 8월.
3. Alexander, A.M. and Hammons, M.I.(1990). “How to Distinguish a Reinforcing Bar From a Void in Concrete Using Nondestructive Acoustic Techniques,” a guest paper presented for Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials, University of Colorado, Boulder, Colorado, USA, Oct.
4. Bendat, J.S. and Piersol A.G.(1971). Random Data: Analysis and Measurement Procedures, Willey-Interscience of John wiley & Sins, Inc., New York, 407p.
5. Crawford, R. and Ellway, K.(1983). “Vibration Testing Clarified,” a guest paper Presented at Int’l. Conf. On Non-Destructive Testing.
6. De Jaeger, J., Broeck, M.V., Holeyman, A. and Legrand, C.(1988). “Integrity Tests on Various Types of Piles,” Proc. of Int’l Conf. on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Balkema, Rotterdam, pp.577~586.
7. Ellway K. (1987). “Pile Integrity Testing-a Misunderstood Technology”, Ground Engineering, Vol. 20, No. 6, Sep., p.6 and p.8.
8. Ellway, K.(1987). “Practical Guidance of the Use of Integrity Tests for the Quality Contral of Cast-In-Situ Piles,” Ground Engineering., Vol. 20, No.7 Oct. pp.8~12.
9. Hearne, T., Jr., Stokoe, K.H.,II and Reese, L.(1981). “Drilled Shaft Integrity by wave Propagation Method,” Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 107, No. 10, Oct., pp. 1327~1344.
10. Jenkins, R. S. (1985). “Nondestructive Testing -An Evaluation Tool,” Concrete International, Vol. 7, No. 2, Feb., pp. 22~26.
11. Keiller, A.K.(1985). “Assessing the Strength of In Situ Concrete,” Concrete International, Vol. 7. No. 2, pp.15~21.
12. Kissenpfenning, J. F.(1982). “Integrity Testing of Board Piles Using Sonic Logging,” Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 8, pp. 1079~1090.
13. Lilley, O. M. Kikenny, W. M. and Ackroyd, R. F.(1988). “Location and Evaluation of Defects in Full-Scale Pile Foundations Using a Steady-State

- Vibration Technique," Proc. of 27th Annual British Conference on Non-Destructive Testing, British Institute of Non-Destructive Testing, Portsmouth, UK, Sept., pp.103~114.
14. McCarter, W. j., Whittington, H. W. and Fordge, M. C. (1981). "An Experimental Investigation of the Earth-Resistance Response of a Reinforced Concrete Pile," Proc. Inst. Civil Engrs., Part2, Vol.71, Dec. pp. 1101~1129.
 15. Middendorp, P. and Reiding, F.J. (1988). "Determination of Discontinuities in piles by TNO integrity testing and Signal Matching Techniques," Proc. of Third International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Ottawa, Canada, May., pp.33~43.
 16. Muenow, R. (1990). "Concrete Nondestructive Testing ; Equipment and Application," Proc. of Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials, University of Colorado, Boulder, USA, Oct., pp.341~345.
 17. Olson, L.D.(1991). "Measurement of Subsurface, Deep Foundation and Slab / Subgrade Conditions with in Situ Seismic, Sonic and Vibration Methods," Proc. of Geotechnical Engineering Congress 1991, ASCE, Boulder, Colorado, USA, June, pp. 201~212.
 18. Reiding, F.J., Middendorp, P., and Van Brederode, P.J.,(1984).: "A Digital Approach to Sonic Pile Testing," a preprint for Second International Conference of the Application of Stress Wave Theory to Piles, Stockholm, May.
 19. Reiding, F.J., Middendorp, P., Schoenmaker, R.P., Middeldorp, F.M., and Bielefeld, M.W. (1988). "FPDS-2, a New Generation of Foundation Pile Diagnostic Equipment," a preprint for Third International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Ottawa, Canada, May.
 20. Sansalone M. and Carino N. J,(1986). "Impact-echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves," NBSIR 86-3452, Sept.
 21. Seitz, J.(1984). "Low Strain Integrity Testing of Bored Piles," Proc. of Second International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Stockholm, Sweden, May. pp.94~102.
 22. Seitz J.M. (1986). "Low Strain Integrity Testing of Bored Piles," Ground Engineering, Nov., pp. 25~33.

23. Stain R.T. (1982). "Integrity Testing," Civil Engineering, ASCE, April, pp. 54~59 and May, pp. 71~73.
24. Stain, R.T. and Williams, H.T.(1991). "Interpretation of Sonic Coring Results : a Reserch Project," Proc. of 4th Int'l DFI Conf. Balkema, Rotterdam, pp.633~640.
25. Starke, W.F. and Janes, M.C.(1988). "Accuracy and Reliability of Low Strain Integrity Testing," a preprint for Third Interantional Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Ottawa, Canada, May.
27. Steinbach, J. and Vey, E. (1975). "Caisson Evaluation by the Stress Wave Propagation Method," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 101, No. 4, pp.361~378.
27. Stokoe, K.H., II, Olson, L.D. and Reese, L.C.(1987). "Integrity Testing of Drilled Shafts," a paper presented for Geotechnical Engineering Faculty Workshop, International Association of Drilled Shaft Contractors, Fort Collins, Colorado, USA, July.
28. Swan, L. H. (1983). "Use of Vibration Testing for Quality Control of Driven Cast-In-Situ Piles," Proc. of Int'l Conf. On Non-Destructive Testing, pp. 113~123.
29. Van Koten, H Middendrop, P.(1980). "Equipment for Integrity Testing and Bearing Capacity of Piles," Proc. of Int. Seminar on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Stockholm, Sweden, June. pp.69~76.
30. Van Stalduinen, Bielefeld, M. W. and Minddendrop, P.(1989). "A Direct Prediction Technique for Discountinuities in Pile," a preprint for the Second Int'l Conf. on Foundations and Tunnels, London, UK, Sept.