

현장타설말뚝의 비검측공 건전도시험법에 관한 해석적 고찰 (I)

Theoretical Considerations in the Application of Impact Echo and Impulse Response Techniques to Integrity Tests on Drilled Shafts (I)

이 병 식*¹ Lee, Byung-Sik

이 원 구*² Lee, Won-Goo

Abstract

Non-destructive out-hole testing methods, impact-echo and impulse-response are widely applied to evaluate integrity of drilled shafts. However, it is not clear whether capacities of these methods are able to distinguish the existence of defects in various conditions, such as type, size and location. Since performing an experimental observation program is not practical for these varieties of condition, theoretical studies are conducted in this paper. Capabilities of the testing methods are evaluated by examining the accuracy of estimated defect sizes and locations. Based on results obtained from these studies, it has been verified that the location and the type of defect are generally well estimated by both testing methods, even though the defects size is relatively small. However, estimation of the size using the impulse response method is found to be generally unacceptable. Consequently, it has been concluded that the inversion processing for the measured dynamic signals needs to be applied to overcome this limitation.

요 지

현장타설말뚝의 건전도 평가에서 충격반향, 충격응답기법과 같은 비검측공 시험법을 적용하는 사례가 점차로 증가되는 추세에 있다. 비검측공시험법의 적용성을 체계적으로 평가하기 위해 수행된 일련의 연구결과 중에서 본 논문에서는 시험법의 결함탐지 능력을 평가하기 위해 수행된 해석적 연구결과에 관해 논한다. 이 연구에서는 시험법의 결함탐지 능력에 대한 제반 영향인자 중에서 결함의 유형, 위치 및 크기의 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위해서 여러 가지 조건에서 말뚝머리에 작용하는 충격하중에 대한 흙-말뚝 구조의 동적응답을 ABAQUS를 이용한 유한요소법으로 해석하였다. 이로부터 얻은 신호를 충격반향 혹은 충격응답기법으로 처리·분석하여 각 시험법의 결함탐지 능력을 평가해보았다. 연구결과 이들 두 기법 모두 결함의 위치와 유형은 비교적 정확하게 탐지하는 것으로 나타났다. 그러나 충격응답기법을 이용하여 추정된 결함 크기는 신뢰도가 매우 낮았다. 이 문제를 해소하여 시험법의 적용성을 향상시키기 위해서는 측정된 동적응답신호를 이용하는 적절한 역계산 기법을 개발하여 적용할 필요가 있다는 결론을 얻었다.

Keywords : Drilled shaft, Impact echo, Impulse response, Integrity of drilled shaft

1. 서 론

현장 타설 콘크리트 말뚝의 건전도 평가를 위해서 비

검측공 시험법인 충격반향기법(impact echo)이나 충격응답기법(impulse response)을 적용하는 사례가 증가되는 추세에 있다 (Baker 등, 1993; Finno 와 Gassman,

*1 정희원, 공주대학교 공과대학 토목환경공학과 조교수

*2 정희원, 공주대학교 대학원 토목공학과

1998). 이들 시험법에서는 측정되는 말뚝의 공진주파수와 응답파의 진폭 등을 분석하여 말뚝의 결합부위 혹은 말뚝의 길이, 강성이나 단면적 등을 추정하게 된다.

그러나 비검측공 시험법으로부터 얻은 결과는 말뚝의 크기, 경계 조건, 지반 조건, 결합 요소 등과 같은 “영향인자”에 의해서 크게 영향을 받으므로 시험법의 적용이나 결과의 판독에 있어서 아직도 기술적인 어려움이 내재되어 있는 것이 사실이다. 따라서 이들 시험법을 현장에 적용함에 있어서 시험법의 배경 이론 및 분석기법에 대한 기반기술의 축적과 시험법의 한계 등에 관한 충실한 이해가 선행되어야 한다. 이러한 배경에서 현재 비검측공 시험법의 적용성을 체계적으로 평가하고 향상시키기 위한 시험 및 해석적 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다(Lin과 Sansalone, 1994; Finno와 Gassman, 1998; 박연홍, 1997; 이원구, 2000).

이(2000)가 수행한 해석적 연구에서는 말뚝전도 평가에 대한 비검측공 시험법의 적용성을 좌우하는 중요한 인자들의 영향을 유한요소해석방법을 적용하여 체계적이고 광범위하게 조사하였다. 이들 연구결과 중 본 논문에서는 다양한 결합 조건에 대한 비검측공 시험법의 결합 탐지 능력을 평가한 연구결과에 대하여 논하고자 한다.

2. 충격하중에 대한 말뚝의 응답 해석

비검측공 시험 방법의 결합탐지 능력을 평가하기 위해 말뚝머리에서 작용하는 충격하중에 대한 흙-말뚝 구조의 동적응답을 ABAQUS를 이용한 유한요소법으로 해석하였다. 해석결과를 충격반향기법과 충격응답기법으로 신호처리하여 분석함으로써 각 시험법의 결합탐지 능력을 평가해 보았다.

2.1 해석 대상 흙-말뚝구조

본 연구에서 고려한 해석대상 흙-말뚝 구조의 구성을 개략적으로 나타내면 그림 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 말뚝은 지반에 수직으로 시공되고, 실제 현장 조건을 고려하여 말뚝 머리의 일부분은 지표면 위에 돌출되어 있는 것으로 가정하였다. 시험 수행단계에서 말뚝 머리에 가하는 충격하중은 수직동분포하중으로 가정하였다. 말뚝은 직경(D)이 1.0 m이고, 길이가 각각 $20\text{ m}(L/D = 20)$ 혹은 $40\text{ m}(L/D = 40)$ 인 경우들을 가정하였다.

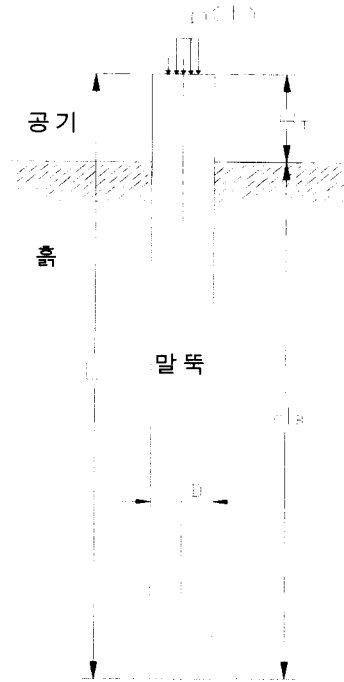


그림 1. 해석대상 흙-말뚝 시스템

말뚝의 재료는 밀도 $2,300\text{ g/cm}^3$, 포아송비 0.2, 탄성계수 33.1 GPa , 압축파 속도 $3,800\text{ m/sec}$, 전단파 속도 $2,327\text{ m/sec}$ 의 재료특성을 가진 콘크리트로 가정하였다.

말뚝 주변 지반은 밀도 $1,800\text{ g/cm}^3$, 포아송비 0.4, 탄성계수 0.05 GPa , 압축파 속도 167 m/sec , 전단파 속도 100 m/sec 의 균질한 모래로 조성되어 있는 것으로 가정하였다.

2.2 흙-말뚝 구조의 유한요소 모델링

비검측공 시험을 해석적으로 재현하기 위해 그림 1에 보인 흙-말뚝 구조를 그림 2에 보인 바와 같은 1차원 유한요소모델로 이상화하였다. 여기에서 말뚝은 집중질량 트러스 요소로, 말뚝과 지반 사이에 발생하는 마찰 저항과 말뚝의 선단지지 조건은 스프링 요소와 감쇠 요소로

표 1. 스프링 요소(K_s)와 감쇠 요소(C_s)의 물성치(Liao와 Roesset, 1997)

말뚝 주변 지반		
요 소	$k_v(\text{N/m})$	$c_v(\text{kg/m-s})$
경험식	$2.3 G_s$	$2 \pi \rho_s V_s f_D$
말뚝 선단 지반		
요 소	$K_{v,b}(\text{N/m}^2)$	$C_{v,b}(\text{N-s/m})$
경험식	$4G_{sfp}/(1-V_s)$	$0.85k_{v,bfp}/V_s$

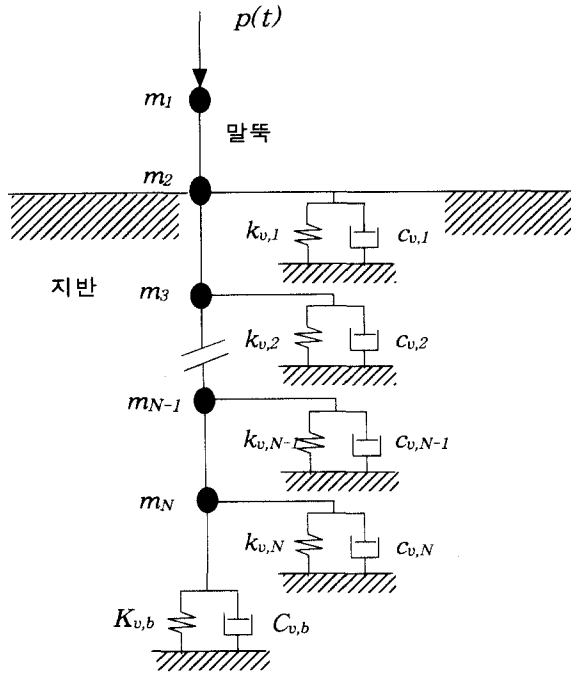


그림 2. 흙-말뚝구조의 1차원 유한요소 모델링

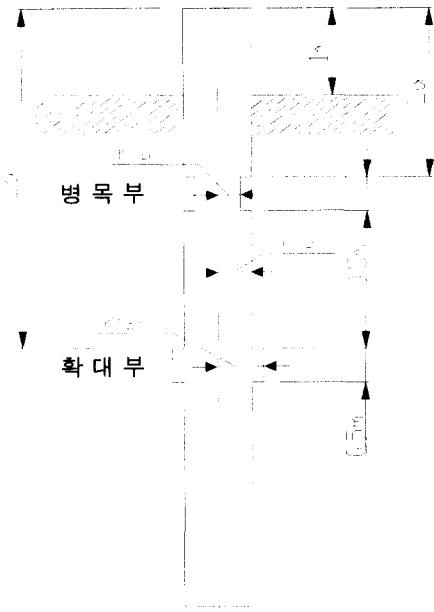


그림 3. 병목부와 확대부 결합의 모델링

각각 고려하였다. 스프링 요소의 스프링 계수와 감쇠 요소의 감쇠 계수는 표 1에 보인 관계로부터 추정하였다. 이 표의 관계식에서 r_p 는 말뚝의 반경, ρ_s , G_s 와 V_s 는 각각 지반의 밀도, 전단변형계수와 전단파속도이다.

충격하중은 다음 식 (1)로 정의되는 반파장의 Sine 곡선으로 가정하였다.

$$p(t) = P_o \sin\left(-\frac{\pi}{T_d}\right)t \quad (1)$$

여기서 충격하중의 지속시간, T_d 는 1.5×10^{-3} sec로, 최대 진폭, P_o 는 $15,570 \text{ N/m}^2$ 으로 가정하였다. 재하면은 말뚝의 중심에서 반경이 25 mm인 원형으로 가정하고, 이 면적에 충격하중이 등분포로 작용하는 것으로 가정하였다.

2.3 결합 요소의 모델링

현장 시공시 발생할 수 있는 대표적인 결합들인 병목부 혹은 확대부 결합이 말뚝 내에 존재하는 경우를 고려하였다. 그림 3에 보인 바와 같이 결합이 존재하는 말뚝요소의 단면적을 병목부 결합인 경우에는 감소시키고, 확대부 결합인 경우에는 증가시켜 이들의 영향을 해석에서 고려하였다. 이와 같이 결합의 유형을 변화시키고, 더불어서 결합의 위치 및 크기가 서로 다른 여러 조건의 말뚝에 대해서 동적 응답을 해석하였다.

본 논문에서 조사한 경우들을 종합하면 표 2에 보인 바와 같다.

3. 해석결과 분석

표 2에 정리한 각 경우들에 대한 해석결과를 충격반향기법과 충격응답기법을 이용하여 분석함으로써 결합을 정의하는 제반요소, 즉 유형, 위치 및 크기에 대한

표 2. 결합의 유형, 크기, 위치가 변하는 말뚝조건

구분	L/D	결합 유형	결합 위치 L_o (m)	결합부 말뚝 반경 (m)	면적, m^2 (증감율, %)	구분번호
유형 및 크기	20 혹은 40	무결합	-	0.5	0.785	Intact
		병목	11	0.4	0.503 (▼ 36)	c-1
				0.3	0.283 (▼ 64)	c-2
				0.2	0.126 (▼ 84)	c-3
				0.1	0.031 (▼ 96)	c-4
		확대	11	0.6	1.131 (△ 44)	e-1
				0.7	1.539 (△ 96)	e-2
				0.8	2.011 (△ 156)	e-3
				0.9	2.545 (△ 224)	e-4
		결합 위치	20	병목	2	0.1
11	tc2					
19	tc3					
확대	2			1.0	3.142 (△ 300)	te1
	11					te2
	19					te3

각 시험법의 탐지 능력을 평가해 보고자 하였다.

충격반향기법에서는 시험에서 얻어진 신호를 시간영역 혹은 주파수 영역에서 분석한다. 시간영역에서는 충격하중에 대한 변위 및 속도신호로부터 구한 파의 도달 시간과 입자운동의 방향에 근거하여 결함을 탐지한다. 주파수 영역에서는 신호의 공진 주파수 양상을 분석하여 결함을 탐지한다.

충격응답기법에서는 얻어진 신호로부터 말뚝의 운동성(mobility)을 주파수 영역에서 분석하여 결함을 탐지한다. 충격반향기법과 비교하여 이 기법을 이용하면 결함의 크기를 추정할 수 있다는 장점이 있다.

결과분석은 표 2의 내용에 따라 결함의 유형과 크기를 변화시킨 예들에 대한 검토 결과를 먼저 기술하고, 다음에 결함의 위치가 변함에 따른 결과를 각 시험법에 대해서 기술하였다.

3.1 결함의 유형 및 크기 변화

3.1.1 위치 탐지 능력

표 2에 정리한 c-1로부터 c-4의 병목부 결함이 존재하

는 경우에 대해서 얻은 변위와 속도신호를 그림 4에 나타내었다. 또한 확대부 결함에 대한 예들인 e-1으로부터 e-4의 경우에 대한 변위와 속도신호를 그림 5에 나타내었다.

그림 4와 5의 결과들로부터 판단할 때 결함부에서 반사되는 반사파의 크기는 결함의 크기가 증가함에 따라 증가되고 있음을 알 수 있었다. 비교적 작은 결함에 대해서도 결함부위에서 반사되는 반사파의 존재를 확인할 수 있어 말뚝재료의 압축파 속도를 아는 경우에 말뚝 두부에 반사파가 도달하는 시간을 측정하여 결함의 위치를 추정할 수 있음을 알 수 있었다. 즉, 그림 4와 5에서 결함부에서 파동이 반사되어 돌아오는 데 소요되는 시간은 약 0.0055초 정도이다. 모래지반에 관입되어 있는 말뚝이지만 말뚝 내로 전파되는 파동을 일차원 파동으로 가정할 때 말뚝의 압축파 속도가 3,800 m/sec 이므로 파의 전파거리는 약 20.9 m로 구해져 실제 전파거리 22 m와 거의 같다. 이러한 결과는 병목부와 확대부에 대해서 유사한 추세를 보이므로 결함의 유형과 관계없이 시간영역에서 충격반향기법으로 결함의 위치를 추정하는 것이 가능한 것으로 판단되었다.

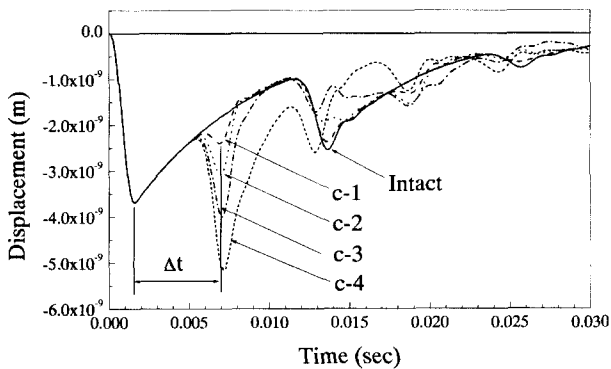


그림 4. 병목부 존재 시 시간영역 신호 (L/D = 20)

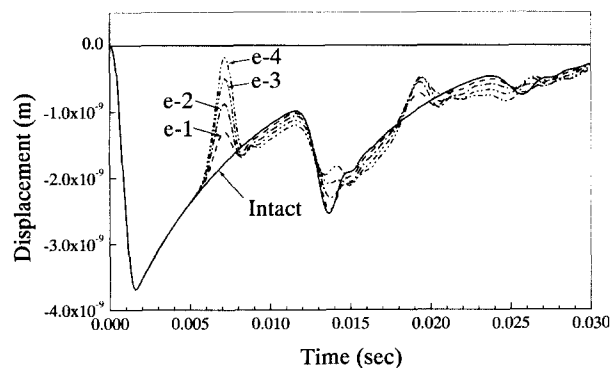


그림 5. 확대부 존재 시 시간영역 신호 (L/D = 20)

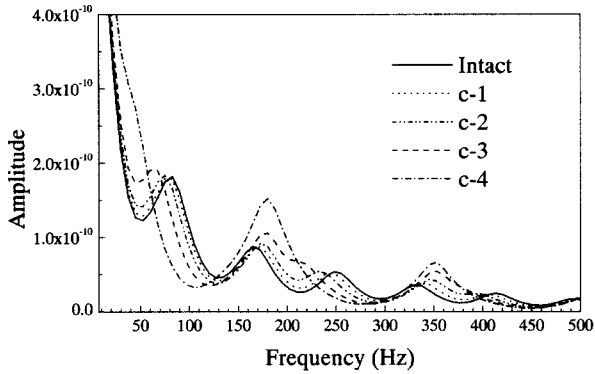


그림 6. 변위신호의 주파수 영역 스펙트럼(병목부)

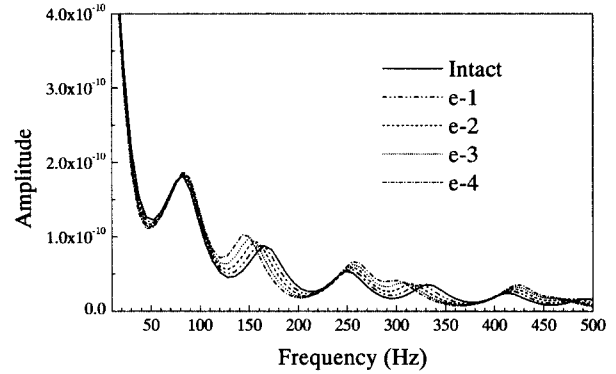


그림 7. 변위신호의 주파수 영역 스펙트럼(확대부)

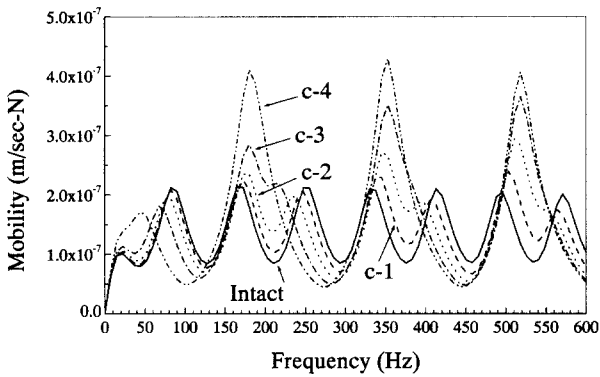


그림 8. 말뚝의 운동성 스펙트럼(병목부)

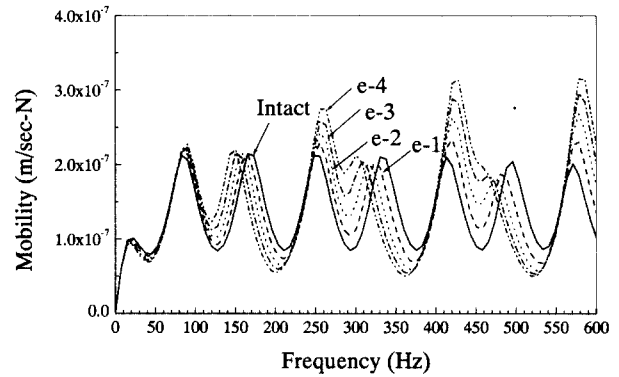


그림 9. 말뚝의 운동성 스펙트럼(확대부)

또한, 충격반향기법에서는 그림 4와 5에 보인 바와 같은 시간영역 신호들을 주파수 영역으로 변환하여 구한 스펙트럼으로부터 탁월주파수 간격을 측정하여 말뚝의 길이나 결함의 위치를 탐지하기도 한다. 그림 4와 5에 보인 변위신호를 주파수 영역으로 변환하여 구한 신호를 그림 6과 7에 각각 나타내었다.

한편, 시험 시 충격하중의 신호를 측정하는 충격응답 기법에서는 시간영역에서의 하중과 속도신호들을 이용하여 주파수 영역에서 말뚝의 운동성(mobility) 스펙트럼을 구해 결함을 탐지한다. 그림 4와 5에 보인 예들에 대해서 충격응답기법으로 신호를 분석하기 위해서 운동성의 스펙트럼을 구하고 이를 그림 8과 9에 각각 나타냈다.

변위 스펙트럼인 그림 6과 7의 결과에서 나타나는 탁월주파수들은 속도신호로부터 구한 그림 8과 9의 운동성 스펙트럼에서 보이는 탁월주파수와 근본적으로 동일한 특성을 가진다. 그러나 이들 그림의 결과에서 판단할 때 탁월주파수를 구분함에 있어서 변위 스펙트럼보다는 운동성 스펙트럼을 사용하는 경우에 다소 용이하게 탁월주파수를 구분할 수 있을 것으로 판단되었다. 따

라서 탁월 주파수간의 간격으로부터 말뚝의 길이나 결함의 위치를 탐지하는 예들을 아래에 보임에 있어서 운동성 스펙트럼을 사용하기로 하였다.

그림 8과 9의 결과에서 탁월주파수 간격을 측정함에 있어서 모드의 순서에 관계없이 진폭이 뚜렷하게 발현되는 주파수간의 간격을 측정하였다. 각 경우에 대해서 측정된 주파수 간격에 근거하여 $L = \frac{V_c}{2 \times \Delta f}$ 의 관계로부터 추정된 말뚝길이와 결함위치의 결과들을 표 3에 정리하였다.

표 3의 결과에서 판단할 때 결함의 크기가 상당히 큰 경우(단면적 증감율이 약 80% 이상)에는 탁월주파수 간격으로부터 비교적 정확하게 결함의 위치를 추정할 수 있었다. 그러나 결함의 크기가 상대적으로 작은 경우에 탁월주파수의 변화에 미치는 결함의 영향이 작아져 결함 말뚝과 무결함 말뚝의 탁월주파수가 거의 유사하게 되므로 결함을 감지하기가 어려워짐을 알 수 있다. 결과적으로 신호의 주파수 영역 스펙트럼을 이용하는 방법은 앞서 보인 시간영역 신호를 이용하는 방법보다 결함의 위치를 탐지함에 있어서는 적용성이 낮은 것으로 나타났다.

표 3. 주파수 영역 스펙트럼을 이용한 말뚝길이와 결함위치 추정결과

구분 번호	결함 유형	결함 위치 (m)	결함부 반경 (m)	탁월 주파수		Δf (Hz)	추정 결함위치 (m)	오차 (%)
				f_1	f_2			
Intact	-	-	0.5	90	173	83	22.9	14.5
c-1	병목	11	0.4	83	173	90	21.1	91.8
c-2			0.3	75	180	105	18.1	64.5
c-3			0.2	353	180	173	11.0	0.0
c-4			0.1	353	180	173	11.0	0.0
e-1	확대	11	0.6	165	255	90	21.1	91.8
e-2			0.7	158	255	97	19.6	78.2
e-3			0.8	428	262	165	11.5	4.7
e-4			0.9	428	262	165	11.5	4.7

3.1.2 유형 탐지 능력

그림 4~9에 보인 신호들로부터 결함 유형 탐지의 가능성을 평가하여 보았다.

우선 그림 4와 5의 신호를 검토한 결과, 반사파의 변위 및 속도 신호의 진폭부호가 결함의 유형에 따라서 결정됨을 알 수 있었다. 병목부 결함의 경우인 그림 4의 신호를 살펴보면, 충격하중에 의해 발생된 압축파가 말뚝 내로 전파되면서 말뚝의 결함부위에서 인장파로 반사되고 다시 말뚝의 두부에서 압축파로 반사되는 신호가 측정되는 것으로 판단되었다. 이러한 현상은 결함 부위의 단부 구속 조건을 자유단으로 가정할 때 발생하는 변위 특성이다. 반면에 확대부 결함의 경우인 그림 5의 신호에서는 단부 구속 조건이 고정단일 경우와 비슷한 추세로 충격하중에 의해 발생된 압축파가 매질 내를 전파하면서 고정단 경계조건에서 압축파로 반사되고 다시 말뚝의 두부에서 인장파로 반사되는 특성을 보였다. 결과적으로 이러한 특성을 이용하여 결함의 유형을 판단할 수 있음을 알 수 있었다.

병목부와 확대부 결함에 대한 변위의 주파수 스펙트럼과 운동성 스펙트럼(그림 6~9)을 살펴보면, 병목부 결함의 경우 약 100 Hz보다 낮은 영역에서 탁월주파수가 감소하는 경향을 보인다. 반면에 확대부 결함의 경우 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향을 고려할 경우 결함의 유형을 탐지가 어느 정도 가능하지만, 시간영역 신호를 사용하는 방법보다는 부정확한 판단을 할 우려가 있음을 알 수 있었다.

3.1.3 크기 탐지 능력

충격반향기법에서 운동성의 스펙트럼을 이용하여 결함의 크기 정도를 추정할 수 있다. 스펙트럼의 조화운동

표 4. 말뚝의 횡단면적 추정 결과

구분 번호	결함 유형	반경 (m)	횡단면적 (m ²)	N ($\times 10^{-7}$)	추정 횡단면적 (m ²)	오차 (%)
Intact	-	0.5	0.7854	1.34	0.8539	9
c-1	병목	0.4	0.5027	1.45	0.7891	57
c-2		0.3	0.2827	1.64	0.6977	147
c-3		0.2	0.1257	2.17	0.5273	319
c-4		0.1	0.0314	1.39	0.8231	2521
e-1	확대	0.6	1.1310	1.27	0.9009	20
e-2		0.7	1.5394	1.24	0.9227	40
e-3		0.8	2.0106	1.24	0.9227	54
e-4		0.9	2.5447	1.25	0.9153	64

구간에서 운동성의 기하평균 $N (= \sqrt{pq})$ 과 말뚝의 횡단면적 A_p 에는 $A_p = 1/N\rho_c V_c$ 의 관계가 있다. 여기서 p 와 q 는 각각 조화운동구간에서 운동성의 최고치와 최소치를, ρ_c 와 V_c 는 각각 말뚝재료의 밀도와 1차원 압축파 속도를 나타낸다. 그림 8과 9의 결과로부터 각 경우에 대해서 결함부의 횡단면적을 구해 표 4에 정리하였다.

표 4의 결과로부터 결함의 크기 변화에 따라 추정된 결함부 횡단면적도 변화함을 알 수 있다. 그러나 해석 결과로부터 추정되는 횡단면적은 실제 횡단면적과 비교 시 큰 오차를 보임을 알 수 있다. 결과적으로 충격응답기법을 이용하여 결함의 크기를 정밀하게 추정하기에는 어려움이 있는 것으로 판단되었다. 따라서 결함의 크기를 비교적 정밀하게 추정하기 위해서는 위와 같은 방법 대신에 역해석 기법을 동원한 분석과정의 적용이 필요하다는 결론을 얻었다.

3.2 결함의 위치 변화

말뚝 내에 존재하는 병목부 혹은 확대부 결함의 위치 변화에 따른 비검측공 시험의 결함 탐지 능력을 평가하였다. 이를 위해서 말뚝길이 20 m이고, 직경이 1 m ($L/D = 20$)인 말뚝에 대해서 결함이 두부로부터 각각 2 m, 11 m 그리고 19 m에 존재하는 경우들(표 2 참조)에 대해서 앞서 설명한 해석적 방법으로 충격하중에 대한 말뚝의 진동신호들을 구하고 이를 분석하였다. 결함의 크기는 병목부의 경우에 결함부 반경을 0.1 m(단면적 96% 감소)로 가정하였으며, 확대부 결함의 경우에는 1 m(단면적 300% 증가)로 가정하였다.

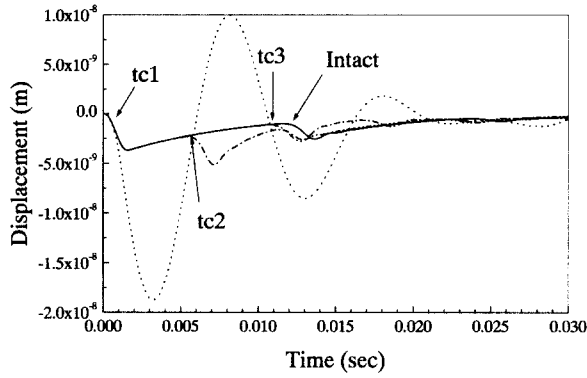


그림 10. 병목부 결합위치에 따른 변위신호의 변화

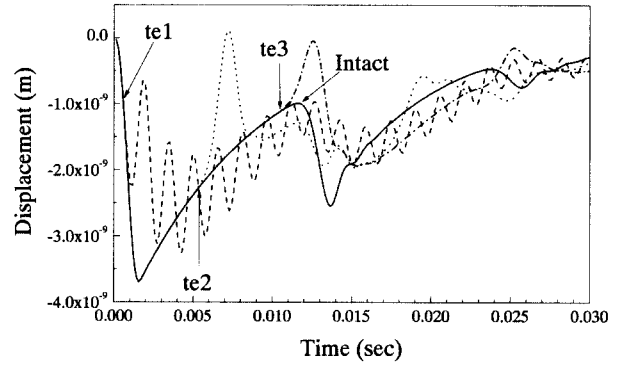


그림 11. 확대부 결합위치에 따른 변위신호의 변화

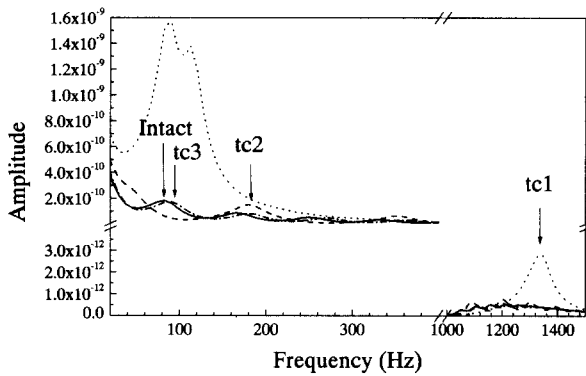


그림 12. 병목부 결합의 경우에 대한 변위스펙트럼

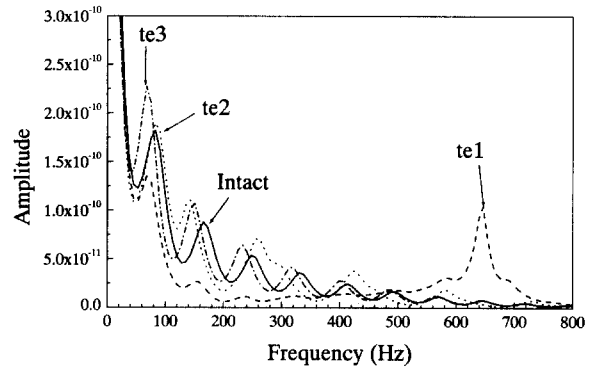


그림 13. 확대부 결합의 경우에 대한 변위스펙트럼

3.2.1 위치 탐지 능력

말뚝 내에 병목부 결합이 존재하는 경우에 결합 위치의 변화에 따른 두부 변위의 변화양상을 그림 10에 나타냈다. 또한 확대부 결합을 갖는 경우들에 대한 결과를 그림 11에 나타냈다. 이들 그림의 각 신호에서 무결합 말뚝인 경우에는 말뚝의 단부, 결합 말뚝인 경우에는 결합의 위치에서 반사되는 변위신호의 도달시간을 각각 구하고 $L = V_c \times \Delta t / 2$ 의 관계로부터 말뚝의 길이 혹은 결합위치를 계산하여 얻은 결과를 표 5에 정리하였다.

표 5의 결과를 분석하면 시간영역 신호를 분석하는 충격반향기법을 이용하여 결합의 위치를 비교적 정확

하게 탐지할 수 있다고 판단되었다. 그러나 결합이 말뚝의 두부에 매우 가깝게 존재하는 경우에는 충격하중신호와 반사파가 중첩되어 반사파의 도달시간을 정하기가 어려워지므로 결합위치를 추정하기가 어려웠다. 또한 결합위치 추정의 정확도는 결합의 유형에 관계없이 결합이 말뚝의 중앙부에 가깝게 존재할수록 양호해지는 결과를 얻었다.

3.1절에서도 보인 바와 같이 그림 10과 11에 보인 시간영역신호를 주파수 영역으로 변환한 변위스펙트럼을 사용하는 충격반향기법이나, 운동성 스펙트럼을 사용하는 충격응답기법을 적용하여 결합의 위치를 추정할 수 있다. 이를 위해 그림 10과 11의 결과에 대한 주파수 영역 스펙트럼을 구해 그림 12과 13에 보였다. 또한, 같은 경우들에 대한 운동성 스펙트럼을 구해 그림 14와 15에 보였다. 변위스펙트럼과 운동성 스펙트럼으로부터 나타나는 진동의 탁월주파수는 근본적으로 동일하므로 여기서는 운동성 스펙트럼을 이용하여 결합의 위치를 추정해 보고자 하였다.

그림 14와 15에서 스펙트럼의 조화운동 구간에서 결합의 존재를 반영하고 있는 것으로 판단되는 연속되는

표 5. 시간영역 신호를 이용한 결합위치 추정 결과

구분 번호	결합 유형	결합위치 (m)	Δt (sec)	추정 결합위치 (m)	오차 (%)
Intact	-	-	0.0116	22.04	10.2
tc1	병목	2	-	-	-
tc2		11	0.0056	10.64	3.3
tc3		19	0.0107	20.33	7.0
te1	확대	2	-	-	-
te1		11	0.0055	10.45	5.0
te3		19	0.0111	21.09	11.0

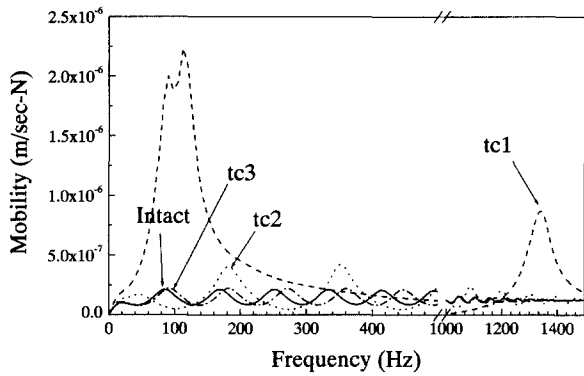


그림 14. 병목부 결함의 경우에 대한 운동성 스펙트럼

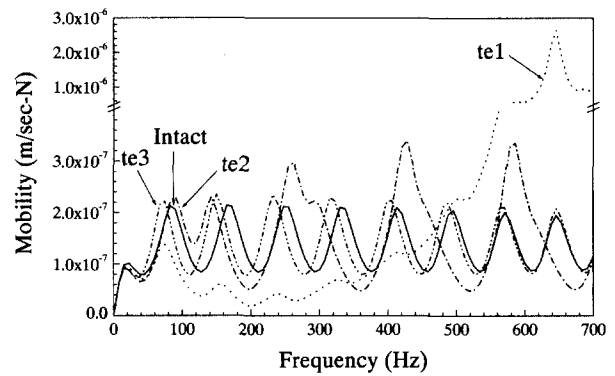


그림 15. 확대부 결함의 경우에 대한 운동성 스펙트럼

두 모드의 탁월주파수들을 선택하고 이들 탁월주파수 간의 간격으로부터 결함의 위치를 추정하였다. 표 6에 추정된 결함의 위치를 정리하였다.

그림 12~15의 결과를 살펴보면 결함말쪽의 진동특성은 무결함 말쪽의 진동과 결함에 의한 진동의 중첩으로 나타나는 것으로 판단되었다. 특히 결함의 위치가 말뚝두부에 매우 가까운 tc1과 te1의 경우에 이러한 현상은 상대적으로 높은 주파수에 탁월주파수가 형성되는 것으로 반영되고 있음을 알 수 있었다. 결함의 위치를 시간영역의 신호로부터 추정된 표 5의 결과와 탁월주파수로부터 추정된 표 6의 결과를 비교해 보면 실제의 실험 결과 분석에서는 이 두 가지 방법이 상호 보완적으로 응용될 수 있을 것으로 판단되었다. 예를 들면 결함이 말뚝의 두부에 가깝게 있는 경우 등과 같이 시간영역에 반사파의 초기 도달시간을 결정하기가 모호한 경우 주파수 영역에서 결정한 탁월주파수로부터 결함위치를 추정할 수 있을 것으로 예상되었다.

3.2.2 유형 탐지 능력

결함의 유형을 탐지함에 있어서는 3.1에서 살펴본 바와 같이 시간영역 신호에서 변위와 속도신호 부호의 역

전현상을 관찰하는 방법이 적용성이 높음을 알았다. 결함의 위치가 변하는 경우에도 이 방법이 적용성이 있는지의 여부는 그림 10과 11의 결과로부터 판단할 수 있다. 이들 결과를 보면 결함의 유형에 따라 반사파의 부호가 역전되는 양상을 보임을 알 수 있다. 그러므로 말뚝 내 결함의 위치가 변화되더라도 병목부와 확대부 결함의 구분은 어느 정도 가능하다고 볼 수 있었다.

3.2.3 크기 탐지 능력

충격응답기법을 이용한 결함의 크기 탐지 능력에 결함의 위치가 미치는 영향을 평가해 보고자 하였다. 이를 위해서 그림 14와 그림 15의 결과를 이용하여 결함부의 횡단면적을 추정하고 그 결과를 표 7에 정리하였다.

표 7의 결과에서 병목부 혹은 확대부 결함이 말뚝의 두부로부터 2 m에 존재할 경우, 주파수 영역에서 운동성의 조화운동 구간을 판단하기 힘들기 때문에 결함의 크기를 추정하기가 어려웠다. 결함의 위치가 11 m, 19 m에 존재할 경우에도 추정된 결함부 횡단면적은 실제 값과 큰 차이를 보이며, 추정된 값은 무결함 말뚝의 횡단면적과 거의 유사함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 표 4의 결과에서 보인 추세와 동일하다. 결과적으로 충격

표 6. 탁월주파수 간격으로부터 추정된 결함위치

구분 번호	결함 유형	결함 위치 (m)	탁월 주파수		Δf (Hz)	추정 결함위치 (m)	오차 (%)
			f_1	f_2			
Intact	-	-	90	173	83	22.89	14.5
tc1	병목	2	90	1344	1254	1.52	24.0
tc2		11	353	180	173	10.98	1.8
tc3		19	187	270	83	22.89	20.4
te1	확대	2	75	646	571	3.33	66.5
te2		11	428	586	158	12.03	9.4
te3		19	233	316	83	22.89	20.4

표 7. 결함의 크기 탐지능력에 대한 결함위치의 영향

구분 번호	결함 유형	결함 위치 (m)	횡단면적 (m ²)	N ($\times 10^{-7}$)	추정 횡단면적 (m ²)	오차 (%)
tc1	병목	2	0.0314	-	-	-
tc2		11	0.0314	1.39	0.8231	2521
tc3		19	0.0314	1.36	0.8423	2582
te1	확대	2	3.1416	-	-	-
te2		11	3.1416	1.28	0.8939	72.
te3		19	3.1416	1.36	0.8413	73

응답기법을 이용한 결함의 크기 추정은 적용성이 매우 낮은 것으로 판단되었다.

4. 결론

병목부와 확대부 결함들에 대한 비검측공 시험(충격 반향기법과 충격응답기법)의 탐지 능력을 평가한 본 논문의 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째로 말뚝 내에 존재하는 결함의 위치는 시간영역 신호를 분석하는 충격반향기법을 이용할 경우 비교적 작은 결함일지라도 결함이 두부에 가까운 경우를 제외하고는 반사파의 초기도달시간으로부터 어느 정도 정확하게 추정할 수 있었다. 신호의 주파수 영역 스펙트럼을 이용하는 충격반향기법이나 말뚝운동성의 스펙트럼을 이용하는 충격응답기법을 사용할 경우에는 결함의 크기가 작아질수록 탐지능력이 감소하였다. 그러나 이들 방법을 이용하면 결함이 말뚝의 두부에 가까운 경우에도 결함의 위치를 추정할 수 있는 가능성이 있었다. 결과적으로 실제의 실험결과 분석에 있어서 이들 방법들을 상호 보완적으로 응용할 수 있을 것으로 판단되었다.

둘째로, 병목부와 확대부 결함의 유형은 충격반향기법을 이용할 경우 시간 영역에서의 변위와 속도신호의 부호가 역전되는 현상을 관찰하여 추정이 가능하였다. 충격응답기법에서는 결함 유형에 따른 운동성의 변화양상이 구분되지 않으므로 결함 유형의 판별에 어려움이 있었다.

셋째로, 말뚝 내에 존재하는 병목부와 확대부 결함의 크기를 충격응답기법을 이용하여 추정하는 경우에 추정된 결함의 크기는 실제 크기와 상관관계를 보이지만 오

차가 매우 크므로 적용성이 낮았다. 따라서 결함의 크기를 보다 정밀하게 추정하기 위해서는 말뚝의 조건을 변화시키면서 얻은 해석적 결과를 시간 영역이나 주파수 영역에서 시험 결과와 일치시키는 방법(matching technique, forward modeling) 혹은 역계산 기법(inversion technique) 등을 동원하여야 한다는 결론을 얻었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 98-0601-0201-3)에 의하여 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 박연홍(1997), "충격반향기법을 이용한 깊은 기초의 건전도 평가", 석사학위논문, 한국과학기술원.
2. 이원구(2000), "비검측공 시험법을 이용한 현장 타설 콘크리트 말뚝의 건전도 평가에 관한 해석적 연구", 석사학위논문, 공주대학교.
3. Baker, C. N., Parikh, G., Briaud, J., Drumright, E. E. and Mensah, F.(1993), "Drilled Shafts for Bridge Foundations", FHWA Report, No. FHWA-RD-92-004.
4. Finno, R. J. and Gassman, S. L.(1998), "Impulse Response Evaluation of Drilled Shafts", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.124, No.10, October.
5. Liao, S. T. and Roesset, J. M.(1997), "Dynamic Response of Intact Piles to Impulse Loads", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.21, pp.255~275.
6. Lin, J. M. and Sansalone, M.(1994), "Impact Echo Response of Hollow Cylindrical Concrete Structure Surrounded by Soil and Rock: Part I -Numerical Studies", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.17, No.2, pp.207~219.

(접수일자 2001. 6. 14)