

HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Wave) 방법을 사용한 말뚝기초의 비파괴 건전도 평가방법의 개발

Development of Non-Destructive Pile Soundness Test Using HWAW Method

박 형 춘¹ Park, Hyung-Choon
김 동 수² Kim, Dong-Soo
조 성 은³ Cho, Sung-Eun

Abstract

The evaluation of soundness of pile is very important for the safety of super structure. In this paper, the HWAW (Harmonic Wavelet Analysis of Wave) method which is developed to determine phase and group velocities of waves is applied to evaluate integrity of pile non-destructively. The proposed method can evaluate a soundness of pile and pile end condition which is very important factor for pile behaviour. To verify the applicability of HWAW method in non-destructive test for pile, the numerical simulation test using ABAQUS was performed. And the model pile was made and the proposed non-destructive pile tests were applied to evaluate soundness and end boundary condition of model pile in the air and soil box. Through a numerical simulation and model tests, it is shown that the HWAW method has good potential of applying to the evaluation of pile integrity.

요 지

다양한 토목·건축 구조물의 하부구조로 많이 사용되는 콘크리트 말뚝기초는 상부 토목·건축 구조물의 안전에 있어 매우 중요한 요소이다. 본 논문에서는 이러한 말뚝의 비파괴적인 건전성 평가를 위하여, 범용적인 파의 위상·그룹속도 결정법인 HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Wave)방법을 말뚝의 비파괴 시험에 적용하였다. 제안된 방법은 말뚝 자체의 건전성 평가와 선단지지말뚝의 거동에 매우 중요한 말뚝 선단부 상태(경계조건)를 자동적으로 결정할 수 있다. 제안된 방법을 검증하기 위하여 ABAQUS를 사용한 수치모의 실험을 수행하였으며, 실제 모형말뚝을 제작하여 공기 중 실험과 실제 지반조건을 모사하기 위한 토조내 실험을 수행하였다. 이러한 수치모의 실험과 실제 모의 실험을 통하여 말뚝의 비파괴 건전성 평가에 있어서의 제안된 방법의 타당성을 확인하였다.

Keywords : HWAW, Pile end boundary condition, Pile Integrity

1. 서 론

대규모 토목·건축 구조물의 기초 형식으로 널리 사

용되고 있는 콘크리트 말뚝기초는 상부구조물의 안전성 확보에 있어 매우 중요한 요소이다. 말뚝 자체의 구조적 결함이나 연약 선단부의 문제, 또는 주변지반과

1 정희원, 충남대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Chungnam National Univ., civilman@cnu.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., KAIST)

3 정희원, 한국수자원연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 2월 28일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

말뚝사이의 상호작용의 문제등과 같은 말뚝 건전성에 문제가 발생하면, 상부 토목·건축구조물에 큰 피해를 입힐 수 있다. 따라서 시공중 또는 시공후 말뚝의 건전성을 정확히 평가할 수 있는 방법의 개발이 구조물 안전성 유지에 매우 중요하다. 말뚝의 건전성 평가를 위해서는 말뚝을 천공하여 그 내부상태를 직접 확인하는 것이 가장 최선의 방법이지만, 시간적, 경제적으로 비효율적이며 말뚝 구조물에 손상을 준다는 단점을 가지고 있다(한국지반공학회, 1997). 따라서, 최근에는 대상 구조물에 손상을 주지 않고 비파괴적으로 말뚝의 건전성을 평가하는 다양한 방법이 제안되고 있다(체종훈 등, 2001; 조철현 등, 1999).

이러한 비파괴 말뚝 건전성 평가방법 중 대표적인 방법으로 충격반향기법(Impact Echo Method)(Sansalone and Streett, 1997)과 충격 응답기법(Impulse Response Method)이 있다(Gassman, 1997). 이러한 방법은 말뚝 표면에 가해진 충격하중에 의해 발생하는 말뚝 두부 표면의 진동신호를 주파수 영역에서 해석하여 대상 구조물의 건전성을 평가하는 방법으로 좋은 적용성을 보이고 있다. 그러나 길이가 일정길이 이상되는 말뚝에는 한계주파수로 인하여 적용하기가 어려우며, 데이터 해석을 위해 말뚝 선단부에 대한 예비적인 지식이 있어야 한다. 그러나 실제 현장에서 말뚝 선단부의 경계조건을 미리 알기는 매우 어렵다.

본 논문에서는 이러한 기존의 말뚝 비파괴 건전성 평가방법들의 문제점을 보완하기 위하여 HWAW방법을 비파괴 말뚝 건전성 평가에 적용하였다. HWAW방법은 시간-주파수 해석을 사용하는 범용적인 파의 위상-그룹 속도 결정방법으로 이미 비파괴 지반 탄성과 조사에 적용하여 훌륭한 적용성을 보였다(박형춘과 김동수, 2004a; 박형춘과 김동수, 2004b; 박형춘 등, 2004). 말뚝의 건전성 평가에 있어, HWAW방법은 모든 주파수 대역을 신호처리에 사용하기 때문에 한계주파수에 따른 측정가능 말뚝길이의 제한이 없으며, 말뚝 선단부의 경계조건(시공상태)을 아무런 예비지식없이 효과적으로 결정할 수 있다. 이러한 말뚝선단부 경계조건은 말뚝, 특히 선단 지지말뚝의 거동에 있어 매우 중요하다. 본 논문에서는 HWAW방법을 사용한 말뚝의 건전성 평가 방법을 제안하였으며, 제안된 방법을 검증하기 위하여 ABAQUS를 사용한 수치모의 실험과 모형 말뚝을 제작하여 공기 중과 토조 내 실험을 수행하였으며, 이를 통하여 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

2. HWAW방법을 이용한 말뚝의 건전성 평가 방법

2.1 말뚝내를 전파하는 파의 해석

말뚝 표면에 가해진 연직 충격하중에 의해 말뚝내부에 발생하는 파의 주성분은 P파이며, 그림 1에 주어진 바와 같이 시간에 따라 말뚝 두부와 말뚝 선단부 사이를 반복진행하게 된다. 말뚝 표면에 위치한 감지기에서 얻어지는 시간영역신호는 몇 개의 시간대역 혹은 파그룹으로 나눌수 있다. 첫번째 파그룹에 해당하는 신호는 충격하중 자체에 의해 발생하는 말뚝표면의 진동으로 이 시간대역 신호의 크기 및 위상정보는 순수하게 말뚝 표면과 가해지는 충격하중의 특성에 기인한다. 이에 반하여 2번째 이상되는 파그룹들에 해당되는 시간 대역의 신호는 말뚝을 구성하는 재료와 말뚝을 둘러싼 매질의 특성과 말뚝 선단부(말뚝 하단부) 경계조건에 의해 결정된다. 즉 2번째 이상되는 파그룹의 크기는 재료 및 기하학적 감쇄와 분산특성(주파수에 따른 탄성계수의 변화)에 의해 결정되며, 위상은 말뚝 재료의 분산특성과 주변부 경계조건, 그리고 선단부 경계조건에 의해 결정된다. 일반적으로 콘크리트와 같은 말뚝 재료 자체의 분산특성은 무시할 수 있다. 따라서 2번째 이상의 파그룹의 크기는 말뚝 및 주변부 지반에 의한 재료 및 기하학적 감쇄에 주로 영향을 받는다. 이러한 파그룹의 크기는 말뚝 내부를 전파하는 파그룹의 에너지 크기를 평가하는데 사용된다. 또한 2번째 이상의 파그룹들의 위상정보는 말뚝 선단부 경계조건에 의해 주로 결정된다.

말뚝의 선단부 경계조건은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 마찰 말뚝과 같이 말뚝 선단부가 지중에 위치하는 경우 말뚝의 임피던스가 지반의 임피던스에 비하여 상대적으로 매우 크기 때문에 자유단 경계조건으로 볼 수

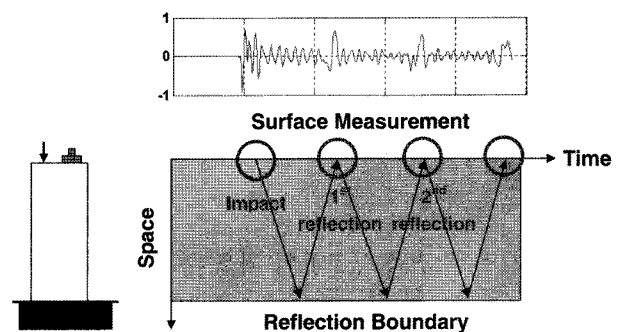


그림 1. 말뚝 표면에 가해진 충격하중에 의해 발생하여 시간-공간을 따라 말뚝 내부를 전파하는 체적파

있다. 선단지지 말뚝의 경우 말뚝이 관입된 암반의 면적이 말뚝의 단면적에 비하여 상대적으로 매우 크다. 이런 상대적으로 큰 면적차이는 임피던스 차이를 유발하며, 이런 경우 말뚝의 선단부 경계조건은 고정단으로 볼 수 있다(Graff, 1975). 세번째 경우는 현장타설 말뚝의 시공 중 말뚝 선단부의 슬라임등이 완전히 제거되지 않은 상태로 말뚝 시공이 이루어지는 경우로 말뚝 선단부는 자유단과 고정단 사이의 경계조건을 가진다. 이러한 선단부 경계조건은 신호의 위상정보에 반영된다. 전파되는 파가 자유단 경계조건에 입사, 반사하게 되면, 반사파는 입사파와 동일한 위상을 가진다(그림 2(a)). 그러나 만일 파가 고정단 경계조건에 입사하게 되면, 반사파는 입사파와 180°의 위상차를 가지게 되며(그림 2(b)), 자유단과 고정단 사이의 경계조건을 가지는 경계면에 입사하게 되면, 0°에서 180° 사이의 위상차를 가지게 된다. 즉 각 파그룹사이의 위상차에 있어 말뚝 선단부의 경계조건에 따라 특정의 위상차가 존재하게 된다. 따라서 이러한 위상차로부터 말뚝 선단부의 경계조건을 판단할 수 있으며, 이를 통하여 말뚝선단부의 시공상태를 평가할 수 있다.

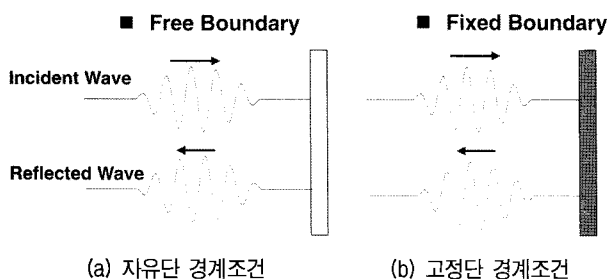
그림 1에서 얻어진 시간영역신호에 대해 시간에 따른 파의 에너지 분포에 따라 각각의 파그룹을 나누는 것은 매우 어려우며, 일반적으로 얻어지는 다중 주파수 시간영역신호에 대해 각 측정 시간에서의 정확한 위상값을 결정하는 것은 불가능하다. 경우에 따라 대략적인 위상변화를 실험자의 직관에 의하여 결정할 수도 있으나 일반적으로 매우 어렵다. 또한 말뚝의 비파괴 시험법으로 사용이 증가하고 있는 충격반향기법이나 충격응답기법에서 사용되는 푸리에(Fourier)변환을 통한 주파수 영역 신호처리에서도 각 주파수성분의 시간영역 전체에 걸친 평균적인 크기·위상정보는 얻을 수 있으나 시간에 따른 파그룹의 분해 및 위상정보의 결정은 불가능하다. 따라서 시간영역 해석이나, 주파수 영역 해석 모두 위상

정보로부터 말뚝의 선단부 경계조건을 결정하기가 매우 어렵거나 불가능하며, 말뚝의 건전성 평가를 수행하기 위해서는 이러한 말뚝의 선단부 경계조건을 미리 알아야 한다.

시간에 따른 신호의 크기(에너지) 및 위상정보의 변화를 결정하기 위해서는 시간-주파수 변환을 사용하여 얻어진 시간영역신호를 시간-주파수 영역으로 변환시켜야 한다. 이러한 시간-주파수 변환을 위한 여러 방법이 있으나, 방법에 따라 고려하는 변수들이 다르며 변환 결과에서 얻어지는 결과들도 다르다. 본 연구에서는 시간-주파수 변환방법으로 하모닉 웨이브릿 변환을 사용한다. 하모닉 웨이브릿 변환은 Newland(1999)에 의해 개발된 시간-주파수 변환 방법으로 Park and Kim(2001)에 의해 하모닉 웨이브릿에서 얻어지는 결과들의 물리적 의미가 증명되었다. 즉 임의의 중심주파수 f 를 가지는 주파수대역에 해당하는 하모닉 웨이브릿 $W_f(\omega)$ 혹은 $w_f(t)$ 를 적용하여 얻어진 복소수 형태의 하모닉 웨이브릿 계수, $a_f(t)$ 의 크기는 중심주파수 f 를 가지는 파그룹의 윤곽선함수이며, 위상은 파그룹 신호의 시간에 따른 정확한 위상이다.

그림 3은 그림 1에서 주어진 신호의 하모닉 웨이브릿 변환을 사용하여 결정한 시간-주파수 지도로서 그림에서 보는 바와 같이 각 주파수성분에 대한 크기정보와 위상정보를 시간에 따라 결정할 수 있다. 하모닉 웨이브릿 계수의 크기는 파의 시간에 따른 에너지 분포를 나타내며, 이로부터 각각의 주파수에 해당하는 파그룹의 시간에 따른 분포를 정확히 결정할 수 있다. 하모닉 웨이브릿 계수의 위상은 각각의 파그룹의 시간에 따른 정확한 위상값으로 이러한 위상정보로부터 말뚝 건전성 평가에 필요한 말뚝 선단부의 경계조건을 예비지식 없이 결정할 수 있다. 이러한 각 단일 주파수 성분의 시간에 따른 위상변화는 이론적으로 시간에 대해 일정한 기울기를 가져야 한다. 따라서 시간-주파수 상의 불연속적인 계측 시간이 아닌 연속적인 모든 점에서 정확한 위상값을 결정할 수 있으며, 이로부터 시간-주파수 변환에서 피할 수 없는 불확정성 원리 때문에 발생하는 낮은 해상도 문제를 해결하여 위상속도 결정에 있어 기존 시간-주파수 해석에서 이론적으로 가질 수 있는 최고의 해상도보다 높은 해상도를 데이터 해석에 사용할 수 있다(박형춘, 2001).

이러한 하모닉 웨이브릿 계수의 물리적 의미를 바탕으로 매질을 따라 전파하는 파의 위상 그룹속도를 결정



(a) 자유단 경계조건 (b) 고정단 경계조건
그림 2. 경계조건에 따른 파의 위상변화

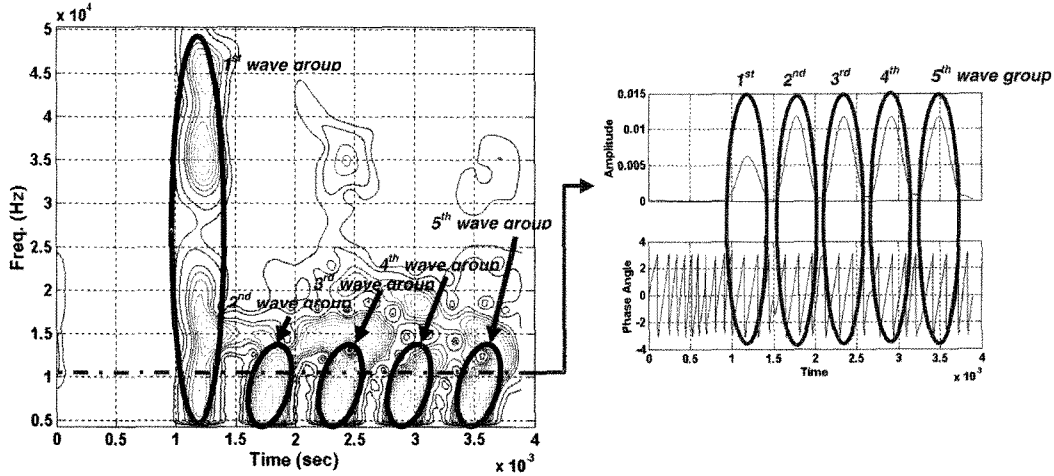


그림 3. 말뚝 표면에서 계측된 파의 시간-주파수 크기 지도 및 위상, 크기 정보

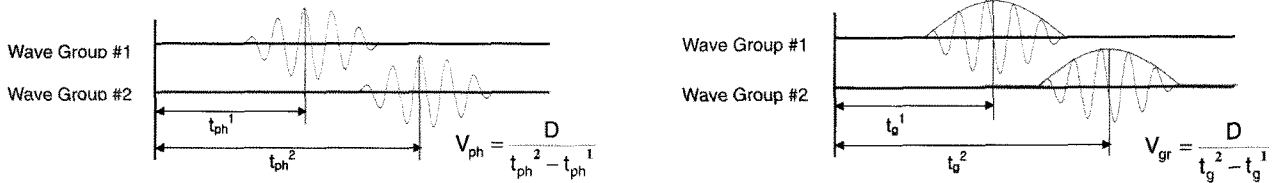


그림 4. 단일 주파수 성분의 위상·그룹속도의 결정(D : 감지기 간격)

하기 위한 방법으로서 HWAW방법이 제안되어 있다. 위상 그룹속도는 그림 4와 같이 정의 할 수 있다. 즉 위상속도는 각 주파수 성분의 시간영역 표현에서 특정의 위상이 전파되는 속도로서 매질의 물성치에 대한 정보를 포함하고 있으며 위상속도를 이용하여 여러 비파괴 시험을 수행하게 된다. 그룹속도는 파그룹의 윤곽선이 전파하는 속도로서 파 에너지의 전파 속도이다. 그림 4를 보면 각 주파수 성분의 매우 국부적인 정보만을 이용하여 위상·그룹속도가 결정될 수 있음을 알 수 있다. HWAW방법은 그림 4에 개념적으로 표현된 방법을 사용한다. 기존의 시간영역해석의 경우 각 주파수 성분의 시간에 따른 크기·위상정보의 결정이 불가능 하며, 주파수 영역 해석의 경우 신호를 각 주파수 성분으로 분해가 가능하나, 각 주파수 성분의 시간에 따른 크기 및 위상정보를 결정할 수 없다. 따라서 이런 해석의 경우 시간영역 전체에 걸친 각 주파수 성분의 평균적 정보만을 사용할 수 있으며, 잡음의 영향을 많이 받게 된다. 그러나 시간-주파수 해석을 이용하는 HWAW방법은 각 주파수 성분이 가질 수 있는 최고의 신호/잡음비를 가지는 국부적인 시간영역 신호만을 데이터 해석에 사용하기 때문에 잡음의 영향을 최소화 할 수 있다(박형춘, 2001; 박형춘과 김동수, 2004a; Park and Kim, 2001).

2.2 HWAW방법을 이용한 말뚝의 건전성 평가

HWAW방법은 2개의 감지기 사이의 매질을 따라 전파하는 파의 위상·그룹속도를 결정하기 위한 방법으로 탄성파 비파괴 지반조사기법에 성공적으로 적용되었다(박형춘 등, 2004). 본 연구에서는 기존 HWAW방법을 하나의 감지기를 사용한 말뚝의 비파괴 건전성 평가 및 말뚝 선단부의 경계조건의 결정에 적용하였다. 이를 위하여 기존 HWAW방법을 다음과 같이 수정하여 말뚝의

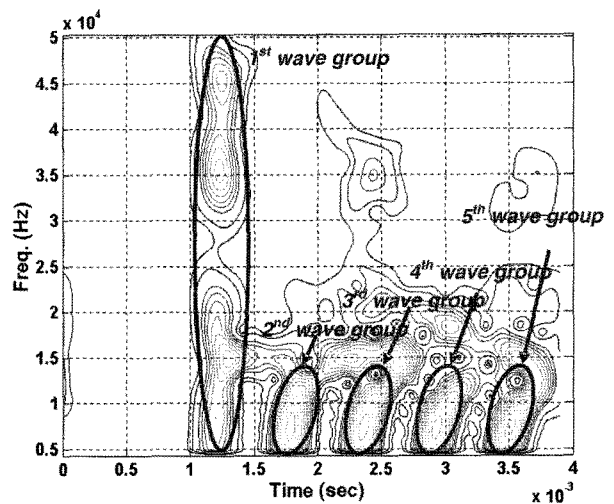


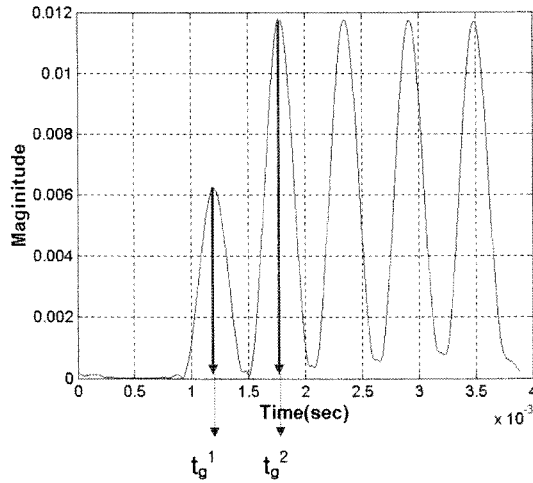
그림 5. 말뚝 표면에 가해진 충격하중에 의해 발생한 말뚝 표면 변위 신호의 시간-주파수 크기 지도 및 각 파그룹의 결정

건전성 평가에 적용하였다.

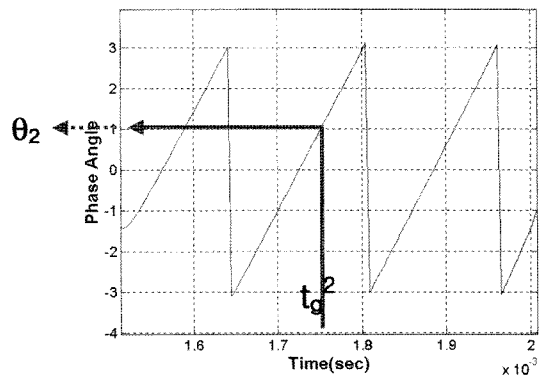
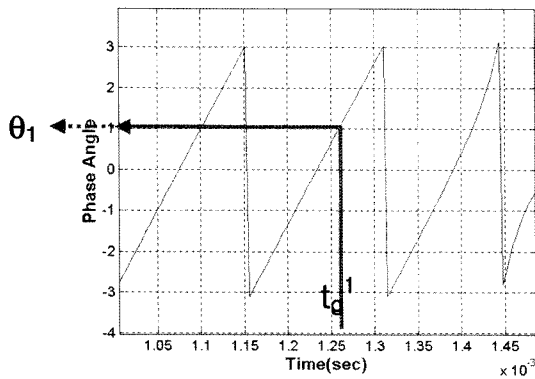
1) 말뚝 표면에서 얻어진 시간영역 신호에 대해 하모닉 웨이브릿 변환을 수행하여 얻어진 시간-주파수 크기 지도로부터 각각의 파 그룹을 결정한다. 각각의 파 그룹은 시간-주파수 크기 지도에서 에너지가 국부적으로 집중된 부분이다(그림 5). 이때 각각의 웨이브릿이 정의되는 주파수 대역은 충분히 좁아야 한다.

2) 임의의 하모닉 웨이브릿 함수 $W_f(\omega)$ 의 중심주파수, f 에 해당하는 그룹지체시간과 위상지체시간을 결정한다.

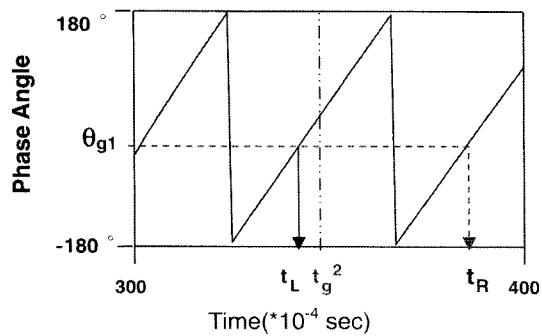
- a) 파그룹 1과 2에서의 그룹 지체시간, t_g^1 과 t_g^2 (그림 6(a))를 결정한다. 그룹지체시간은 파그룹 1과 2에서의 하모닉 웨이브릿 계수 $a_r^1(t)$ 과 $a_r^2(t)$ 의 크기가 최대가 되는 시간이다.
- b) $a_r^1(t)$ 과 $a_r^2(t)$ 위상정보로부터 말뚝 선단부 경계조



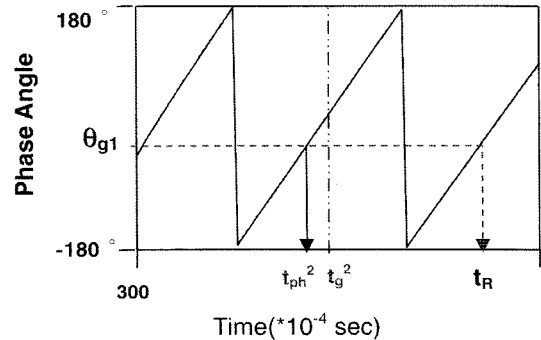
(a) 파그룹 1과 2에서의 그룹 지체시간 t_g^1 과 t_g^2 의 결정



(b) t_g^1 과 t_g^2 에 해당하는 위상, θ_1 과 θ_2 의 결정



(c) t_L 과 t_R 의 결정



(d) 파그룹 2에서의 위상 지체시간 결정

그림 6. 임의의 주파수 $(n+m)\pi$ 에서의 그룹·위상 지체시간의 결정

건과 기준위상, θ_{g1} 을 결정한다(그림 6(c)).

If $|\theta_1 - \theta_2| = 0^\circ \rightarrow$ 자유단 경계조건 (1)

$$\theta_{g1} = \theta_1$$

If $|\theta_1 - \theta_2| = 180^\circ \rightarrow$ 고정단 경계조건 (2)

$$\theta_{g1} = \theta_1 + 180^\circ \text{ when } \theta_1 < 0$$

$$\theta_{g1} = \theta_1 - 180^\circ \text{ when } \theta_1 \geq 0$$

여기서, θ_1 과 θ_2 는 t_g^1 과 t_g^2 해당하는 위상이다(그림 6(b)).

c) $a_{m,n}(t)$ 의 위상정보로부터 t_L 과 t_R 을 결정한다. t_L 은 t_g^2 의 좌측에 위치하며 위상값 θ_{g1} 을 가지는 여러 개의 시간 중 t_g^2 에 가장 근접한 시간이며, t_R 은 t_g^2 의 우측에 위치하며 위상값 θ_{g1} 을 가지는 여러 개의 시간 중 t_g^2 에 가장 근접한 시간이다(그림 6(c)).

d) t_{ph}^1 은 t_g^1 과 동일하며, t_{ph}^2 은 t_L 과 t_R 중 t_g^2 에 보다 더 근접한 시간으로 결정한다(그림 6(d)).

3) 전체주파수 영역에 대한 그룹·위상지체시간을 결정하기 위하여 과정 2)를 모든 하모닉 웨이브릿 계수에 대하여 반복 수행한다(그림 7).

4-1) 말뚝의 길이가 L 이라면 그룹속도(V_{gr})와 위상속도(V_{ph})는 다음과 같이 얻어진다.

$$V_{gr} = \frac{2L}{t_g^2 - t_g^1} \quad (3)$$

$$V_{ph} = \frac{2L}{t_{ph}^2 - t_{ph}^1} \quad (4)$$

4-2) 말뚝의 체적파 위상속도가 V_{ph} 라면 말뚝의 길이는 다음과 같이 얻어진다.

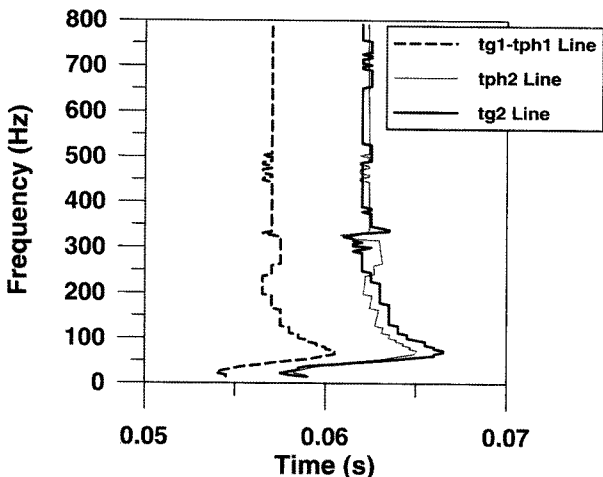


그림 7. 시간-주파수 영역에서의 위상·그룹 지체시간

$$L' = 0.5 \times (t_{ph}^2 - t_{ph}^1) \quad (5)$$

L' : 말뚝 길이 혹은 말뚝내의 crack과 같은 불연속 경계면 까지의 길이

위에서 제안된 파의 위상·그룹속도 결정과정의 2-d)가 성립하려면 두 감지기 사이의 파형의 찌그러짐이 일정범위 내에 있어야 한다. 이러한 파형의 상대적인 찌그러짐은 파의 분산특성 때문에 발생한다. 이러한 상대적인 찌그러짐은 주기정규화된 시간간격 계수 Δt_T 로 이론적으로 측정할 수 있다. 주기 정규화된 시간간격 계수, Δt_T 는 각각의 주파수에서 결정된 그룹지체시간, t_g 와 위상지체시간, t_{ph} 의 시간차이를 주기로 정규화한 함수로서 다음과 같다(박형춘과 김동수 2004a).

$$\Delta t_T = \frac{1}{V_{gr}} \cdot \frac{dV_{ph}}{d\lambda} \cdot D \quad (6)$$

여기서 λ 는 파장, D 는 감지기 간격으로 말뚝 비파괴 시험의 경우 $2L$ 이 된다. 주기 정규화된 시간간격 계수의 크기를 통하여 파형의 찌그러짐을 평가할 수 있다. 주기 정규화된 시간간격 계수가 $n-0.5 < \Delta t_T < n+0.5$ (여기서 n 은 정수)의 값을 가지면, 실제 위상속도를 반영하는 감지기 2에서의 위상지체시간은 위의 과정 2-d)에서 얻어지는 위상지체시간으로부터 (주기)* n 만큼 떨어져 위치하게 된다. 즉 주기 정규화된 시간간격 계수의 절대값이 0.5보다 큰 경우 과정 2-d)에서 결정되는 감지기 2의 위상지체시간에 대하여 (주기)* n 만큼의 보정이 필요하게 된다. 이러한 보정과정을 데이터 복원과정이라고 한다. HWAW방법은 위에서 제안된 과정과 데이터 복원과정을 거쳐 대상 시스템의 위상속도를 결정한다(박형춘과 김동수 2004a). 이 모든 과정은 자동화 되어 있다. 일반적으로 콘크리트 매질 자체의 분산특성은 무시할 수 있으며, 따라서 콘크리트 말뚝의 건전성 평가에 HWAW 방법을 적용시 분산특성에 의한 파형의 찌그러짐은 거의 무시할 수 있다.

2.3 적용방안

만일 말뚝을 구성하고 있는 재료의 체적파 속도를 미리 알고 있다면, 과정 4-2)를 통하여 말뚝의 길이나 말뚝 내부에 존재하는 결함깊이를 평가할 수 있으며, 말뚝의 길이를 미리 알고 있는 경우 과정 4-1)을 통해 얻어진

위상속도로부터 탄성계수를 결정하고, 이러한 탄성계수로부터 재료의 건전성 평가가 가능하며, 강성과 탄성계수와의 관계식을 사용하여 동시에 시공관리도 가능하다.

말뚝의 건전성 평가를 위한 HWAW방법은 말뚝을 따라 전파하는 체적파의 분산곡선을 결정할 수 있다. 즉 주파수에 따른 체적파의 위상속도와 그룹속도를 결정할 수 있다. 일반적으로 말뚝을 따라 전파하는 체적파에는 한계주파수(cut off frequency)가 존재한다(Graff, 1975). 즉 주어진 말뚝의 기하학적 구조와 주변 경계조건에 따라 전파가능한 주파수 성분이 결정되며, 한계주파수 이하의 주파수성분은 말뚝내부를 따라 전파되지 못한다. 말뚝의 길이가 긴 경우, 충격 반향기법에서 데이터 해석에 사용하는 공진 주파수는 말뚝 길이에 반비례하기 때문에 매우 작은 값을 가지게 되며, 경우에 따라 한계주파수 이하에 위치하게 된다. 결과적으로 실제 말뚝에 해당하는 첫번째 공진 주파수가 아닌 다른 공진주파수값을 데이터 해석에 사용할 수 있으며, 이런 경우 오류가 발생할 수 있다. 이에 반하여 HWAW방법은 이런 한계주파수를 포함한 다양한 주파수 대역에서 위상속도를 결정하기 때문에 이러한 한계주파수에 의한 문제가 발생하지 않는다. 또한 이러한 분산곡선은 말뚝 자체의 기하학적 구조와 주변부 경계조건에 대한 정보를 포함하고 있다. 따라서 이러한 말뚝의 분산곡선에 대한 역산을 수행하여 기존 방법에 비하여 아주 세밀한 말뚝의 평가가 가능하다. 이와 관련된 연구는 추후 연구에서 다루고자 한다.

충격반향기법과 같은 말뚝 비파괴 건전도 평가 방법들은 선단부 경계조건에 대한 예비적인 정보가 데이터

해석을 위해 필요하다. 그러나 실제 현장에서 데이터 해석에 필요한 정확한 선단부 경계조건을 미리 알기는 매우 어렵다. 이에 반하여 제안된 방법은 데이터 해석과정에서 말뚝 선단부의 경계조건을 자동적으로 결정하여 데이터 해석에 사용한다. 이러한 선단부 경계조건의 자동적인 결정은 말뚝거동에 있어 중요한 말뚝 선단부의 시공상태를 평가하는데 효과적으로 사용될 수 있다.

3. 예제 해석을 통한 검증

3.1 고정단 경계조건

고정단 조건을 가지는 말뚝에 대한 검증을 위하여 ABAQUS를 사용한 수치모의 실험을 수행하였다. 수치모의 실험을 위하여 축대칭 모델을 사용하였으며 그림 8과 같은 직경 0.1m, 길이 1m의 말뚝과 3500m/sec의 P파 속도를 가지는 재료물성을 사용하였다. 말뚝 선단부는 고정단 경계조건을 사용하였다. 이러한 고정단 경계조건은 선단지말뚝과 같이 암반에 말뚝을 관입시킨 경우 만날 수 있는 경계조건이다. 말뚝의 상단 표면에 충격하중을 가하고, 동일한 말뚝 상단 표면에서 계측된 시간에 따른 변위 신호에 대하여 제안된 방법을 적용하여 데이터 해석을 수행하였다.

그림 9는 말뚝 상단 표면에서 얻어진 시간영역 신호와 파워스펙트럼, 그리고 시간-주파수 크기 지도이다. 시간영역신호를 보면, 시간축상에서 각각의 파 그룹을 구분하기가 어려우며, 각 파그룹에서의 위상의 변화를 결정하기가 어렵다. 즉 시간영역신호에서의 신호의 크

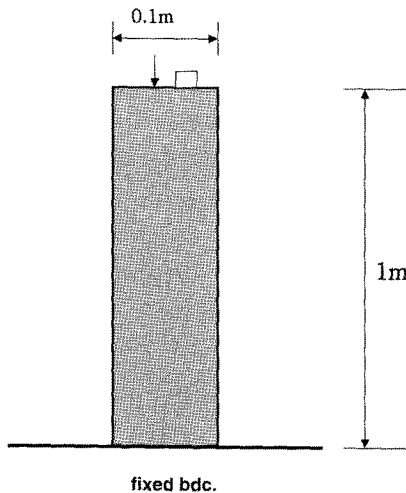


그림 8. 수치해석을 위한 말뚝의 형상 및 수치모델

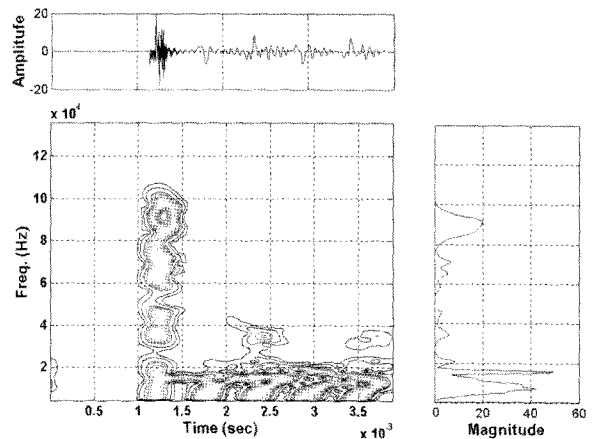


그림 9. 말뚝 표면에 가해진 충격하중에 의해 발생한 말뚝 표면 변위 신호의 시간영역 신호, 주파수 영역 신호, 시간-주파수 영역 신호

기와 대략적인 위상변화를 보고 말뚝의 선단부 경계조건을 결정하여 말뚝의 건전성 평가를 수행하는 것은 일반적으로 매우 어렵다.

시간영역신호에 대하여 푸리에 변환을 적용하여 얻은 파워스펙트럼을 보면, P파속도 3500m/sec와 고정단 경계조건을 가지는 1m 길이의 말뚝에 해당하는 공진주파수 875Hz에서의 피크값외에도 대략 1700Hz에서 최대크기를 가진다. 이런 경우 파워스펙트럼에서 얻어지는 최대크기에 해당하는 공진주파수로부터 P파 속도를 아는 경우 말뚝의 길이와 같은 기하학적 구조, 혹은 말뚝의 길이를 아는 경우 P파 속도를 결정하여 말뚝 재료의 건전성을 평가시 오류를 유발 할 수 있다. 또한 이러한 공진주파수를 사용하여 말뚝의 건전성 평가를 수행하여야 하는 경우 말뚝 선단부에 대한 정보를 가지고 있어야 한다. 즉 동일한 공진주파수값에 대하여 선단부 경계조건에 따라 전혀 다른 결과가 나온다.

시간-주파수 지도는 이러한 시간영역신호와 주파수영역신호의 정보를 종합적으로 동시에 평가한다. 그림 10은 주어진 시간영역신호에 대한 하모닉 웨이브릿 변환을 통하여 결정된 시간-주파수 지도로부터 얻어진 6.9KHz 주파수 성분의 시간에 따른 크기정보와 위상정보이다. 그림을 보면 크기정보로부터 시간영역신호에 존재하는 각 주파수 성분의 파그룹을 정확히 구별할 수 있으며, 위상정보로부터 반사면(말뚝 선단부)의 경계조건을 일체의 예비적인 정보 없이 결정할 수 있다. 즉 첫번째와 두번째 파그룹이 최대에너지를 가지는 시간, t_b^1 과 t_b^2 에 해당하는 위상값을 비교하여 보면, 대략 180도의 위상차가 존재하며, 이로부터 말뚝의 선단부 경계조건이 고

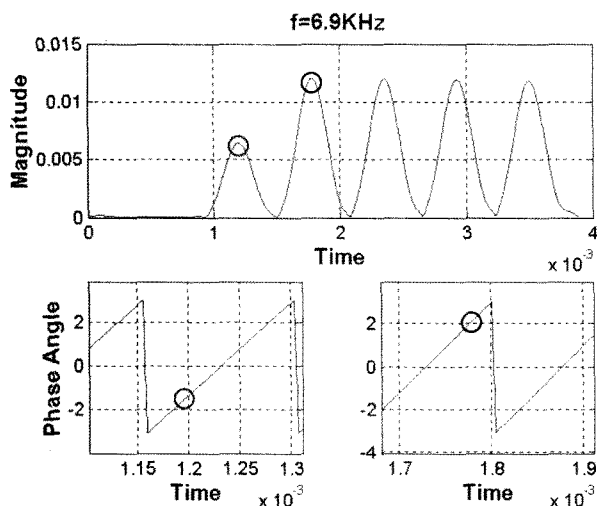


그림 10. 6.9kHz 주파수 성분의 파그룹 1과 2에서의 크기 위상정보

정단이라는 것을 알 수 있다. 그림 11은 앞에서 제안된 방법의 과정 4-1)과 말뚝 길이 1m 적용하여 얻어진 분산곡선으로서 수치해석에 사용된 P파속도 3500m/sec와 정확히 일치함을 볼 수 있다. 이러한 실험과 제안된 방법에 의한 데이터 해석을 통하여, 만일 말뚝의 체적파속도를 시편 실험을 통하여 미리 알고 있는 경우, 과정 4-2)를 통하여 말뚝 선단부가 고정된 1m길이의 말뚝이라는 것을 알 수 있으며, 만일 말뚝 길이를 알고 있다면, 과정 4-1)로부터 말뚝 선단부가 고정되고, P파속도 3500m/sec에 해당하는 탄성계수를 가지는 콘크리트로 구성된 말뚝이라는 것을 알 수 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 주어진 신호의 시간-주파수 크기 지도에서 첫번째 파그룹은 말뚝의 표면과 가진원의 특성에 의해 크기 위상정보가 결정되며, 2번째 이상되는 파그룹의 위상 및 크기정보는 말뚝 자체의 재료, 기하학적 특성 및 경계조건에 의해 결정된다. 따라서 2번째 이상되는 파그룹들을 신호처리에 사용하는 것이 가장 이상적이다. 그러나, 시간이 흐름 또는 파가 공간을 따라 전파됨에 따라 에너지 손실이 발생하며, 이런 에너지 손실로 인하여 감지기에서 측정되는 신호가 충분한 에너지를 가지는 많은 수의 파그룹을 포함하기가 어렵다. 따라서 실제 실험에 있어 충분한 에너지를 가지는 첫번째와 두번째 파그룹을 데이터 해석에 사용하는 것이 가장 효율적이다. 첫번째 파그룹은 실제 말뚝자체의 정보는 포함하고 있지 않지만, 2번째 파그룹에 포함된 말뚝의 정보를 알아내는데 사용될 수 있다. 즉 두 파그룹 사이의 시간축상에서의 크기와 위상의 상대적인 이동을 신호처리에 사용되기 때문에 첫번째 파그룹을 두번째 파그룹의 데이터 해석을 위한 기준으로 충분히 사용될 수 있으며, 얻어진 결과는 이론적으로 2번째 3번째 파그

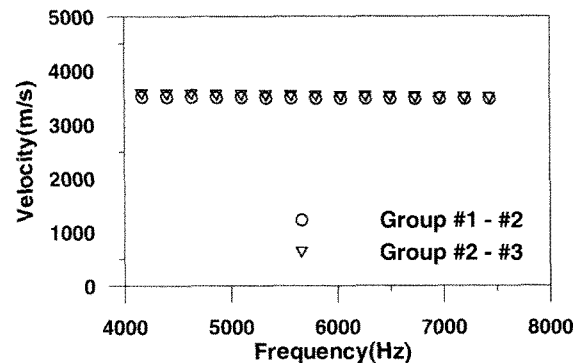


그림 11. 파그룹 1과 2로부터 결정된 말뚝 내부를 전파하는 P파의 분산곡선 및 파그룹 2와 3으로부터 결정된 P파의 분산곡선 비교

를 사용하여 얻어진 결과와 동일한 값을 가져야 한다. 그림 11은 첫번째와 두번째 파그룹을 신호처리에 사용하여 얻은 결과와 두번째와 세번째 파그룹을 사용하여 얻은 결과를 비교한 그림으로 전체 주파수 대역에서 두 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. 따라서 첫번째 파그룹과 두번째 파그룹을 데이터 해석에 사용할 수 있다.

3.2 자유단 경계조건

자유단 조건을 가지는 말뚝에 대한 제안된 방법의 검증을 위하여 모형말뚝을 사용한 실험을 수행하였다. 실험을 위하여 직경 0.1m, 길이 1m의 콘크리트 말뚝을 제작하였다. 말뚝제작을 위해 사용된 콘크리트는 3300m/sec의 P파속도를 가진다. 말뚝 선단부는 공기중에 위치시켰으며, 이러한 말뚝 선단부 경계조건은 자유단 경계조건이다. 이러한 자유단 경계조건은 주면마찰말뚝과 같이 지중에 말뚝이 위치하는 경우 만날 수 있는 경계조건이다. 말뚝의 상단 표면에 충격하중을 가하고, 동일한 말뚝 상단 표면에서 계측된 시간에 따른 변위 신호에 대하여 제안된 방법을 적용하여 데이터 해석을 수행하였다.

그림 12는 말뚝 상단 표면에서 얻어진 시간영역 신호와 파워스펙트럼, 그리고 시간-주파수 크기 지도이다. 시간영역신호를 보면, 3.1절의 고정단 말뚝의 경우와 마찬가지로 각 파 그룹을 구분하기가 어려우며, 각 파 그룹에서의 위상의 변화를 결정하기가 어렵다. 시간영역신호에 대하여 푸리에 변환을 적용하여 얻은 파워스펙트럼을 보면, P파속도 3300m/sec와 자유단 경계조건을 가지는 1m 길이의 말뚝에 해당하는 공진주파수 1650Hz

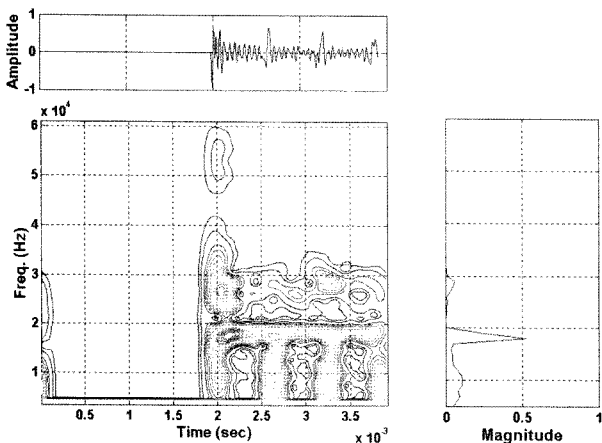


그림 12. 말뚝 표면에 가해진 충격하중에 의해 발생한 말뚝 표면 변위 신호의 시간영역 신호, 주파수 영역 신호, 시간-주파수 영역 신호

부근에서 피크값을 가진다. 이런 경우 말뚝의 길이나 재료물성을 올바르게 평가 할 수 있으나, 이 경우에도 말뚝 선단부 경계조건을 미리 알고 있어야 한다. 그림 13은 주어진 시간영역신호에 대한 하모닉 웨이브릿 변환을 통하여 결정된 시간-주파수 지도로부터 얻어진 9KHz 주파수 성분의 시간에 따른 크기정보와 위상정보이다. 그림을 보면, 크기정보로부터 시간영역신호에 존재하는 각 주파수 성분의 파그룹을 정확히 구별할 수 있으며, 위상정보로부터 반사면(말뚝 선단부)의 경계조건을 일체의 예비적인 정보 없이 결정할 수 있다. 즉 첫번째와 두번째 파그룹이 최대에너지를 가지는 시간, t_g^1 과 t_g^2 에 해당하는 위상값을 비교하여 보면, 두 시간위치에서의 위상이 거의 일치함을 볼 수 있으며, 이로부터 자동적으로 말뚝의 선단부 경계조건이 자유단이라는 것을 알 수 있다. 그림 14는 앞에서 제안된 방법을 적용하여 얻어진 분산곡선으로서 사용된 콘크리트의 P파속도 3300m/sec와 거의 일치함을 볼 수 있다. 이러한 실험을 통하여 만

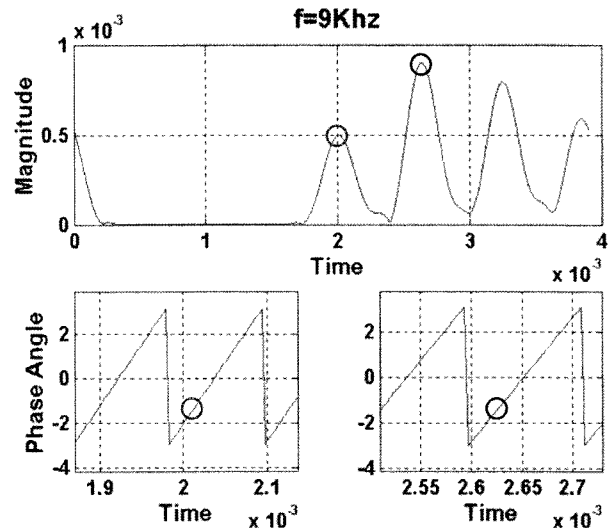


그림 13. 9KHz 주파수 성분의 파그룹 1과 2에서의 크기 위상정보

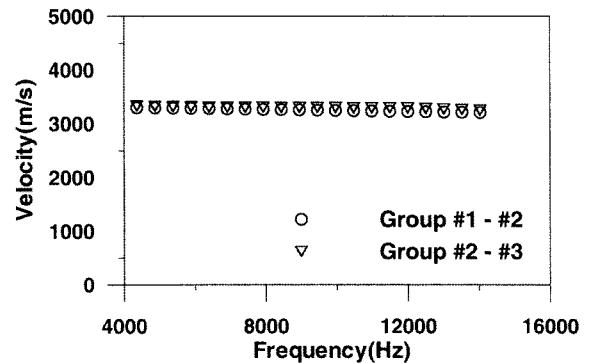


그림 14. 파그룹 1과 2로부터 결정된 말뚝 내부를 전파하는 P파의 분산곡선 및 파그룹 2와 3으로부터 결정된 P파의 분산곡선 비교

일 말뚝의 체적과 속도를 시편 실험을 통하여 미리 알고 있는 경우 말뚝 선단부가 자유단인 1m길이의 말뚝이라는 것을 알 수 있으며, 만일 말뚝 길이를 알고 있다면, 말뚝 선단부가 자유단이고, P파속도 3500m/sec에 해당하는 탄성계수를 가지는 콘크리트로 구성된 말뚝이라는 것을 알 수 있다.

말뚝 선단부에 자유단 경계조건을 가지는 말뚝의 경우 첫번째 파그룹과 두번째 파그룹을 신호처리에 사용하는 것이 타당한가를 알아보기 위하여 그림 14에서 첫번째 파그룹과 두번째 파그룹을 신호처리에 사용하여 얻어진 결과와 두번째 파그룹과 세번째 파그룹을 사용하여 얻어진 결과를 비교하였다. 그림을 보면, 전체 주파수 대역에서 두 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. 따라서 첫번째 파그룹과 두번째 파그룹을 데이터 해석에 사용함에 있어 문제가 없다.

실제 지중내에서의 제안된 방법을 검증하기 위하여 모래로 채워진 토조내에 모형말뚝을 위치시키고 실험을 수행하였다. 그림 15는 토조내 말뚝 표면에서 충격하중에 의해 발생한 시간영역 신호와 얻어진 시간영역 신호로부터 결정된 시간-주파수 크기 지도이다. 그림 12와 그림 15를 비교하여 보면, 공기중에서 실험을 하여 얻어진 결과와 거의 유사하나, 토조내 실험에서 얻어진 신호에서 첫번째 파그룹에 대한 세번째 네번째 파그룹의 상대적인 크기가 공기중에서 실험한 결과에 비하여 상대

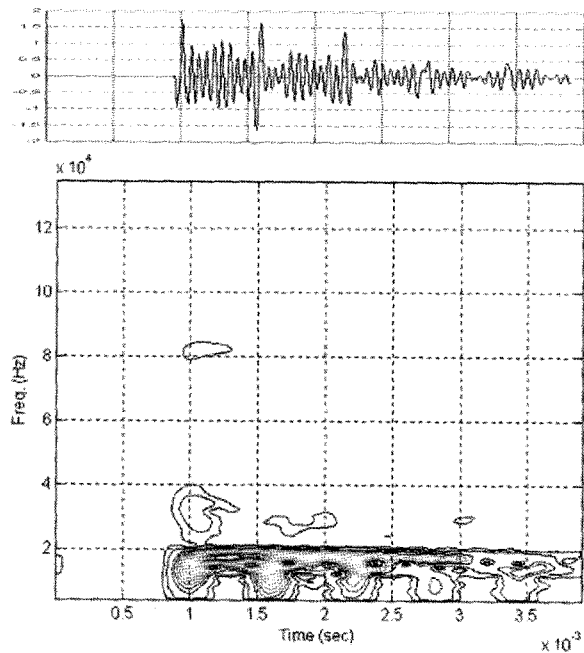


그림 15. 말뚝 표면에 가해진 충격하중에 의해 발생한 말뚝 표면 변위 신호의 시간영역 신호, 시간-주파수 영역 신호

적을 작다. 이러한 차이는 말뚝내를 전파하는 파가 말뚝과 접하고 있는 흙을 통하여 외부로 전파되기 때문에 생기는 일종의 기하학적 감쇠현상이다. 이러한 주변 흙을 통한 기하학적 감쇠는 각 파그룹의 크기에는 영향을 주나 각 파그룹의 위상에는 영향을 주지 않는다. 그림 16은 토조내에 위치하는 말뚝 표면에서 실험을 수행하여 얻어진 시간영역신호에 제안된 방법을 적용하여 얻어진 주파수에 따른 위상속도로서 공기중 실험과 마찬가지로 전체 주파수에서 대략 3500m/s의 P파 속도를 가진다. 이로부터 제안된 방법은 지중에 위치하는 말뚝에도 적용 가능성을 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 말뚝의 비파괴 건전성 평가를 위하여 새로운 데이터 해석기법을 제안하였다. 제안된 방법은 시간-주파수 해석에 기반을 둔 범용적인 파의 위상·그룹속도 결정방법인 HWAW방법을 사용한다. HWAW방법은 이미 비파괴 탄성과 지반조사에 적용되어 좋은 성과를 보였다. 제안된 방법은 감지기에서 얻어진 신호의 에너지가 집중된 국부적인 정보만을 사용하기 때문에 배경잡음의 영향을 최소화 할 수 있으며, 이러한 에너지가 집중된 국부적인 시간영역의 크기와 위상정보로부터 말뚝내를 전파하는 체적파의 분산곡선 혹은 말뚝의 길이나 말뚝내에 위치하는 crack과 같은 결함까지의 깊이 및 선단지말뚝에서 매우 중요한 말뚝 선단부 상태(경계조건)를 결정할 수 있다. 체적파의 분산곡선을 통하여 말뚝 자체의 건전성 평가를 수행할 수 있으며, 더 나아가 말뚝 주변부 지반 상태의 평가까지 가능할 것으로 생각된다. 위상정보로부터 얻어진 말뚝 선단부 경계

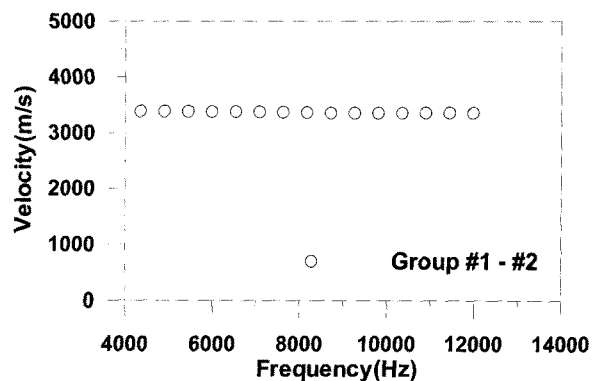


그림 16. 파그룹 1과 2로부터 결정된 말뚝 내부를 전파하는 P파의 분산곡선

조건은 선단지지 말뚝의 선단부 시공 상태를 평가하는데 매우 중요하게 사용될 수 있다. 제안된 방법을 검증하기 위하여 ABAQUS를 사용한 수치 모의 실험과 실제 모형말뚝을 제작하여 공기중과 실제지반내에서의 거동을 모사하기 위해 토조내에서 실험을 수행하였다. 이를 통하여 제안된 방법이 말뚝을 구성하고 있는 재료의 물성치나 말뚝 길이의 평가와 같은 말뚝 자체의 건전성 평가와 말뚝 선단부 상태(경계조건)의 결정에 아주 효과적으로 사용될 수 있음을 볼 수 있었으며, 이를 통하여 제안된 방법의 타당성을 검증할 수 있었다. 또한 추후 연구를 통해 다양한 지반 조건 및 다양한 상태의 현장 말뚝 적용을 통해 제안된 방법의 현장 적용성을 검증할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 충남대학교 학술연구비의 지원과 Sistec의 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. 박형준 (2001), *하모닉 웨이블릿 변환을 이용한 표면파기법에서의 신뢰성 있는 분산곡선 획득에 관한 연구*, 박사학위논문, 한국

과학기술원.

2. 박형준, 김동수 (2004a), "HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Wave)방법을 이용한 새로운 탄성과 지반조사기법의 개발(I) : 분산곡선의 결정", *대한토목학회 논문집*, Vol.24, No.2C.
3. 박형준, 김동수 (2004b), "HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Wave)방법을 이용한 새로운 탄성과 지반조사기법의 개발(II) : 실험구성 및 역산과정", *대한토목학회 논문집*, Vol.24, No.2C.
4. 박형준, 김동수, 이병식 (2004), "HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Wave)방법을 이용한 새로운 탄성과 지반조사기법의 현장 적용", *지반공학회 논문집*, 제20권, 6호, pp.1-9.
5. 조철현, 정현기, 이태섭, 김학수 (1999), "깊은기초의 건전도시험과 근입깊이 조사", *한국지구물리 탐사학회 제2회 학술발표회*, pp.202-216.
6. 채종훈, 유재명, 김대규, 이우진 (2001), "비파괴시험을 이용한 현장타설말뚝의 건전도 평가에 관한 연구", *한국지반환경공학회 논문집*, 제2권, 제4호, pp.5-14.
7. 한국지반공학회 (1997), *지반공학 시리즈 4 깊은기초*, 구미서관, pp.284-286.
8. Gassman, S. L. (1997), *Impulse Response Evaluation of Inaccessible Foundation*, Ph.D. Thesis, Northwestern University, Evanston, IL.
9. Graff, K. F. (1975), *Wave Motion in Elastic Solids*, Ohio State University Press.
10. Newland DE. (1999), "Ridge and phase identification in the frequency analysis of transient signal by harmonic wavelet", *J Vib And Acoustics*, Vol.121, pp.149-155.
11. Park HC, Kim DS. (2001), "Evaluation of the dispersive phase and group velocities using harmonic wavelet transform", *NDT&E Int*, Vol.34, pp.457-467.
12. Sansalone, M., and Streett, W. B. (1997), *Impact-Echo Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y.

(접수일자 2007. 4. 4, 심사완료일 2008. 8. 20)