

SASW 기법에 대한 수치해석 적용성 연구

A Study on the Applicability of Numerical Analysis for the SASW Method

김 동 수* ¹	Kim, Dong-Soo	윤 중 구* ²	Yoon, Jong-Ku
이 병 식* ³	Lee, Byung-Sik	박 형 춘* ⁴	Park, Hyoung-Choon

Abstract

Finite element analyses are proposed to simulate the SASW method conducted for two cases of a soil half-space and a single soil layer over a soil half-space. Based on the results obtained from the study, both the ratio of finite mesh size to the lower range of interested wavelengths and the sampling rate of responses were found to be important factors to simulate properly the characteristics of the wave propagation. In addition, it was verified that dispersion curves obtained from appropriately tuned finite element analyses match well with the analytical dispersion curves. As a result, it could be concluded that the finite element analysis using ABAQUS is applicable to simulating the SASW method theoretically.

요 지

현장지반의 최대전단탄성계수를 신속하고 합리적으로 구할 수 있는 표면파기법에 대해 유한요소법을 이용하여 시뮬레이션 할 경우 적용할 수 있는 효율적인 해석조건에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구결과 파의 전파형상을 효율적으로 묘사하기 위하여는 관심 있는 최소 파장에 대한 유한요소 크기의 비가 매우 중요한 요소임을 확인하였고, 데이터의 측정시간간격도 중요한 요소임을 확인하였다. 또한, 유한요소해석을 이용하여 얻은 반무한체 시스템과 2층 시스템의 분산곡선과 이론적 분산곡선이 비교적 잘 일치함을 볼 수 있었다. 따라서, 유한요소해석을 적절히 적용하는 경우에 표면파기법을 효과적으로 시뮬레이션 할 수 있음을 확인하였다.

Keywords : SASW method, Wave front, Shear wave velocity, Dispersion curve, Mesh size, Sampling rate

1. 서론

최근 해외에서 지진에 의한 피해가 늘어나고 우리 나라 도 지진에 대하여 안전한 나라가 아니라는 인식이 확산되면서 내진설계에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이에 따라 내진설계를 위한 지반의 동적물성치 산정기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 내진설계를 위하여는 지반의 변형율에 따른 전단탄성계수의 변화를 신뢰성 있게 구해야 하며, 이를 위하여 먼저 선행되어야 할 지반조사는 현

장지반의 최대전단탄성계수(G_{max})를 구하는 것이다.

현장에서 최대전단탄성계수를 구할 수 있는 방법은 크로스홀 방법(cross-hole test), 다운홀 방법(down-hole test), SASW기법(Spectral-Analysis-of-Surface Waves method) 등이 있다. 이들 시험법은 현장 지반에서 파의 전파특성을 이용하여 지반의 고유 물성치인 최대전단탄성계수를 구하는 탄성과 시험법에 해당하고, 각 시험법의 장단점, 프로젝트의 중요도, 장비의 가용성 및 현장지반 조건 등을 고려하여 선택적으로 수행된다(해양수산부, 1999).

*1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수
 *2 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
 *3 정회원, 공주대학교 토목공학과 조교수
 *4 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

본 연구에서는 시추공 없이 지표면에서 수행되는 SASW 기법에 대한 연구를 위하여, 균질한 수평 지반과 층상 구조로 이루어진 수평 지반에서 파의 전파형상에 대한 수치해석 연구를 ABAQUS 프로그램을 이용하여 수행하였다. 시간영역에서 유한요소해석법을 이용한 동적해석을 수행할 경우 유한요소의 크기를 작게 하면 양질의 결과를 얻을 수 있으나 요소의 개수가 많아져 해석시간이 길어지게 되고, 유한요소의 크기를 크게 하면 해석시간은 짧아지나 매질에서 전파되는 파의 전파특성을 제대로 묘사할 수 없는 단점이 있다. 또한, 주어진 해석시간에 측정시간간격을 크게 했을 경우 해석은 빨리 끝날 수 있으나 파의 전파형상이 제대로 묘사되지 않고, 주파수 영역에서 해상도가 떨어진다. 반면, 측정시간간격을 작게 했을 경우 파의 전파형상이 정확해지는 장점 및 주파수 영역에서 해상도가 개선되는 장점이 있으나, 해석시간과 비용이 많이 들게 된다.

본 논문에서는 SASW 기법의 유한요소 시뮬레이션에 있어서 적용할 수 있는 효과적인 해석조건에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위하여, 가장 간단한 모델인 선형탄성 반무한 지반에서 유한요소의 크기와 측정시간간격(sampling rate)을 최적화하고, 얻어지는 전파속도의 분산곡선을 이론적인 분산곡선과 비교하여 검증하였다. 또한, 상부 층과 하부 층의 강성이 다른 수평 층으로 이루어진 지반에서 파의 전파형상을 살펴 해석결과의 신뢰성을 검토하였다.

2. SASW기법의 개요

SASW기법은 층상구조에서 표면파(R-wave)의 분산특성의 측정과 해석에 그 바탕을 두고 있다. 표면파는 실린더 모양의 전파형상(wave front)을 가지고 매질의 표면을 따라 전파되며, 깊이가 증가함에 따라 진폭이 지수함수 모양으로 감소하여 전파에너지의 대부분이 한 파장 깊이 내에 분포한다(그림 1). 표면파가 전파할 때 매질의 입자 거동은 파의 전

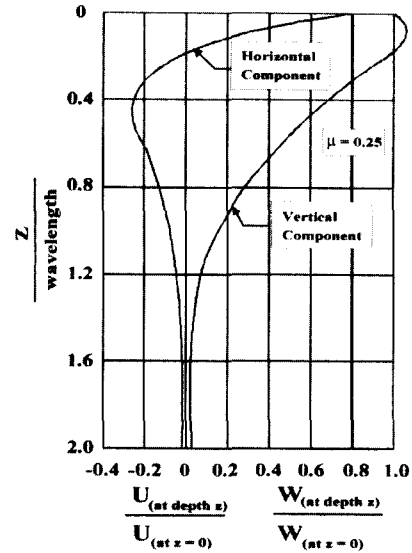
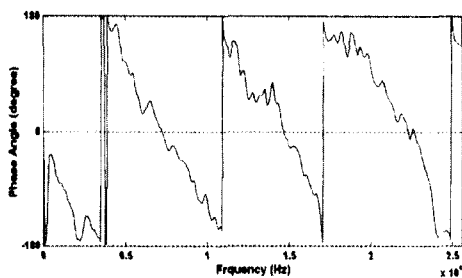


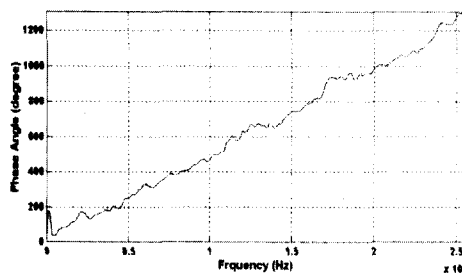
그림 1. 깊이에 따른 표면파 전파형상(Richart 등 1970)

파방향에 대한 수평요소와 연직 요소의 합으로 나타나고, 이들 입자의 거동은 깊이에 따라 차이를 보인다. 표면파 입자의 거동은 얇은 곳(파장 길이의 20% 이내)에서는 파의 전파방향과 역행하는 타원형태(retrograde ellipse)를 보이고, 깊은 곳에서는 진행하는 타원형태(prograde ellipse)를 이룬다. 표면파는 균질한 매질을 통과하는 경우 주파수나 파장에 관계없이 일정한 속도로 전파되나, 지반이나 포장체와 같은 층상구조를 가지는 비균질 매질에서는 주파수 또는 파장에 따라 전파속도가 변화한다. 이러한 특징을 분산특성이라고 한다(Richart 등, 1970).

SASW기법의 가진원으로는 다양한 주파수 대역을 가지는 표면파를 발생시키기 위하여 충격하중등을 가한다. 이렇게 형성된 표면파는 매질 표면에서 입자속도(particle velocity)를 측정할 수 있는 2개의 감지기와 동적신호 분석기를 이용하여 시간영역 신호로 기록된다. 시간영역의 신호는 FFT를 이용하여 주파수영역의 신호로 변환하고, 이 신호로부터 크로스파워스펙트럼(cross power spectrum)의 위상



(a) 비정개 위상각 스펙트럼



(b) 정개 위상각 스펙트럼

그림 2. 일반적인 위상각 스펙트럼

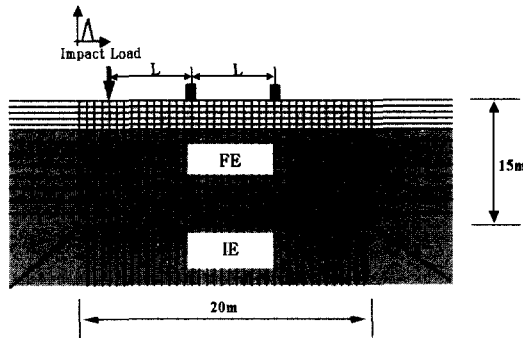
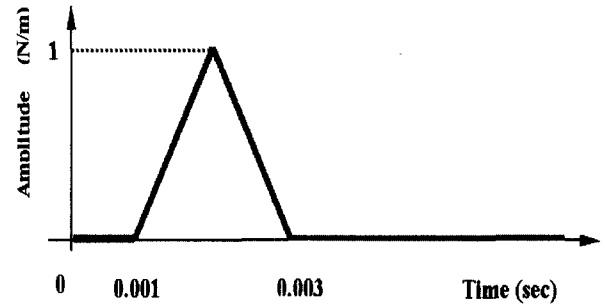


그림 3. 유한요소 해석모델그림



4. 입력 하중 조건

정보(phase information) 및 상관함수(coherence function)를 구한다. 그리고, 위상정보와 상관함수를 이용하여 파장 또는 주파수에 따른 위상속도(phase velocity)를 계산한 후 실험분산곡선을 얻게 된다.

현장에서 SASW기법을 수행할 경우 감지기 사이의 간격, 데이터 측정시간간격, 관심 있는 주요 주파수 대역 등을 결정하여야 한다. 두 개의 감지기에서 얻어진 신호의 위상각 스펙트럼의 전형적인 예는 그림 2에 나타나 있다. 그림 2-(a)와 같이 $-\pi$ 에서 $+\pi$ 의 사이에서 비전개상태(wrapped)로 나타나지만, 분산곡선을 구하기 위해서는 각 주파수에서의 실제 위상차가 필요하여, 그림 2-(b)와 같이 전개상태(unwrapped)로 나타낸다.

실험분산곡선을 이용하여 지반의 강성을 추정하는 것을 역산이라고 하며, SASW기법의 역산과정에서는 현장에서 구한 위상속도와 깊이 따른 전단파 속도의 주상도를 가정하여 계산한 이론적인 위상속도를 비교하고 이 과정을 반복하여 최종적으로 실험과 해석에서 구한 위상속도가 일치하는 경우에 가정된 전단파 속도 주상도를 실제 조건으로 본다.

3. 수치해석모델

3.1 해석프로그램과 수치해석모델의 설정

본 연구에서는 충격하중이 가해질 때 파의 전파특성을 효율적으로 모사할 수 있는 수치해석 프로그램인 ABAQUS/Standard를 이용하였다. 본 연구에서 수행된 예제들의 해석 모델에서 다음과 같은 가정들을 적용하였다.

- (1) 지반은 균질하고 수평으로 층이 이루어진 반무한체로 가정하였다.
- (2) 지반을 선형탄성체로 가정하였으며, 이는 일반적으로 SASW기법을 수행하는 동안 발생하는 지반의 변형을

수준은 0.001%보다 작은 미소변형을 수준이기 때문이다.

- (3) 해석은 2차원 평면변형조건에서 수행되었다.

본 연구에서는 그림 3과 같이 수평방향으로 20m, 수직방향으로 15m의 유한요소(finite element, FE) 영역과 유한요소 바깥쪽의 무한요소(infinite element, IE) 영역으로 모델링하여 해석하였으며, 유한요소는 4절점 정사각형 요소를 사용하였다. 무한요소는 하중이 가해지고 나서 일정 시간이 흐른 후 경계 지점에서 파가 반사되어 돌아오는 영향을 없애기 위하여 사용하였다. 이러한 무한요소의 사용은 동적해석에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 Lysmer와 Kuhlemeyer (1969)에 의해 개발된 에너지 흡수 무한요소를 사용하였다. 이 무한요소는 모델의 경계면에 수직 방향과 수평 방향으로 두 개의 독립적인 감쇠기를 붙여 경계면에서 에너지를 흡수하도록 설계되었다. 따라서, 무한요소가 사용된 원거리 영역(far field)에서는 변위, 응력, 에너지 등이 지수함수 형태로 감소하여 매우 작은 값이 되므로 특별한 경계조건의 적용이 필요치 않다.

3.2 입력 지반상수, 입력 하중 및 측정시간간격

지반은 중간 정도의 밀도를 가진 건조한 사질토 지반으로 가정하였다. 이러한 조건에 대해 지반의 밀도는 17.7kN/m^3 , 전단탄성계수는 72.0MPa , 포아송비는 0.3으로 가정하였다.

SASW기법을 수행할 때 하중으로 사용되는 가진원은 크게 충격 가진원(impact source)과 연속 가진원(continuous source)으로 분류된다. 일반적으로 충격 가진원은 충격하중 형태로 가해지며 연속 가진원은 궤도차량이 감지기로부터 일정한 거리로 떨어져 전진과 후진을 반복하여 연속 진동을 발생시키는 형태로 가해진다. 본 연구에서는 삼각형 모양의 충격 선하중을 가진원으로 사용하였다. 충격하중은 그림 4

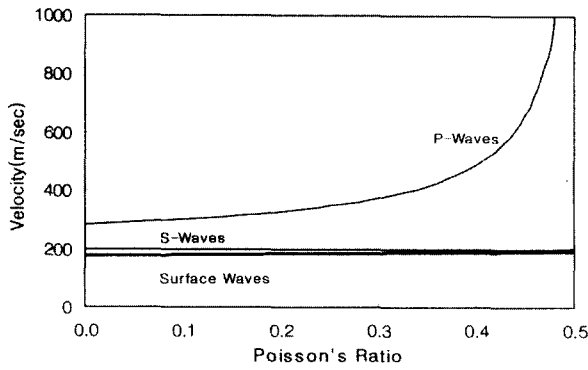


그림 5. 포아송비에 따른 응력파와 Rayleigh파의 속도 관계(Richert 등 1970)

와 같이 해석 시작 시간으로부터 1 msec가 지난 후에 2 msec 동안 지속되는 형상이며 이때, 하중의 최대 진폭 크기는 단위하중(1N/m)이 되도록 가정하였다.

또, 유한요소의 크기와 더불어 측정시간 간격도 파의 전파특성을 묘사하는데 매우 중요한 요소임을 고려하여 측정시간간격은 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz의 세 경우에 대한 해석을 수행하였다.

4. 유한요소 크기 및 측정시간간격의 최적화

4.1 균질한 지반에서 이론적인 파의 전파 속도

시간영역에서 동적해석을 수행할 경우 해석에 드는 시간 및 비용을 최소화하고 파의 전파형상을 효과적으로 묘사하기 위하여 유한요소의 최적화는 반드시 필요하다. 현장 지반에서 SASW기법을 수행할 경우 지반을 통하여 전파되는 파장의 길이는 극히 짧은 것부터 매우 긴 것까지 다양하게 존재한다. 그러나, 지반에서 파가 전파 될 경우 감쇠현상에 의해 에너지가 소산되기 때문에 짧은 파장의 경우 곧 소멸되어 버린다. 따라서, 유한요소법으로 SASW기법을 시뮬레이션 할 경우 모든 파장을 고려할 필요는 없고, 지표면으로부터 관심 있는 깊이까지 양질의 결과를 얻기 위한 최소 파장을 결정하는 것이 합리적이다.

일반적으로 SASW기법을 수행할 경우 현장 지반 지표면의 교란에 의한 영향과 계절적 변화등으로 인하여 지표면으로부터 0.5m - 1m까지는 신뢰할 만한 결과를 얻기 힘들다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 지하 0.5m를 관심 있는 최소 깊이로 정하였고, 관심 있는 최소 파장의 길이는 관심 깊이의 두 배인 1m로 정하였다.

본 연구에서는 이를 위하여, 유한요소의 크기와 관심 있는 최소 파장의 길이의 비를 1:2(50cm), 1:4(25cm), 1.5(20cm), 1:10(10cm), 1:20(5cm) 등 다섯 종류의 모델에 대한 해석을 수행하였다. 또, 측정시간간격의 영향을 조사하기 위하여 각 모델마다 1000Hz($\Delta t=1\text{msec}$), 2000Hz($\Delta t=0.5\text{msec}$), 4000Hz($\Delta t=0.25\text{msec}$)의 세 가지 해석을 수행하였다.

전단파 속도가 200m/sec인 균질한 지반에 대해서 포아송비가 0에서 0.5까지 변할 때 압축파 속도 및 표면파 속도의 변화를 그림 5에 나타내었다(Richert, 1970). 본 연구의 해석에서 대상지반의 전단파의 속도를 200m/sec, 포아송비를 0.3으로 가정하였으므로, 이론적인 표면파의 속도는 그림 5로부터 185.5m/sec임을 알 수 있다. 이렇게 구한 표면파 속도의 이론적인 값을 여러 가지 유한요소크기에 대한 수치해석에서 얻은 표면파 속도와 비교하여 최적 유한요소의 크기를 결정하고자 한다.

최적 유한요소 및 측정시간간격은 최소 파장의 길이 1m에 해당하는 깊이에서 이론적인 표면파 속도와 비교하여 오차가 5% 보다 작은 모델 중에서 해석 시간이 짧은 것을 선택하였다.

4.2 유한요소의 크기

위에서 설명한 여러 가지 조건의 해석결과 중에서 대표적으로 가진원과 첫 번째 감지기 사이의 거리 및 두 감지기 사이의 거리가 각각 6m, 측정시간간격이 2000Hz일 경우 각 유한요소 크기에 따른 실험분산곡선의 변화를 그림 6에 나타냈다. 그림의 결과에서 유한요소의 크기가 50cm일 경우, 파장의 길이가 3m보다 짧은 부분에서 표면파의 속도가 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 이는 사용되어진 유한요소의 크기가 최소 파장 길이에 비하여 너무 커 수치에러가 많이 발생하여 파의 전파특성이 제대로 묘사되지 않았기 때문이다. 유한요소의 크기가 25cm와 20cm의 결과에서도, 파장의 길이 2m 보다 얇은 깊이에서 표면파의 속도가 급격히 감소해 이론적인 속도와 많은 차이가 나는 것을 알 수 있다. 그러나, 유한요소의 크기가 10cm일때와 5cm일 경우, 관심 있는 최소 파장 길이 1m에 해당하는 깊이에서 이론적인 표면파 속도를 비교해보면 오차가 각각 4.5%, 3.0%로 5% 이하가 됨을 알 수 있다.

이러한 결과는 유한요소 크기에 따른 위상각의 변화를 나타내는 그림 7의 결과에도 잘 나타나 있다. 균질한 수평 지반에서 위상각의 차이는 이론적으로 간격이 일정한 튜니 모양

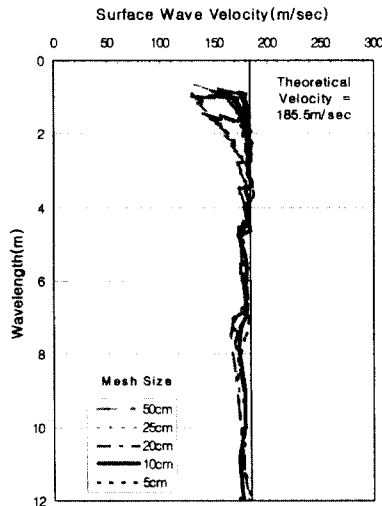


그림 6. 유한요소 크기에 따른 실험분산곡선의 변화(2000Hz)

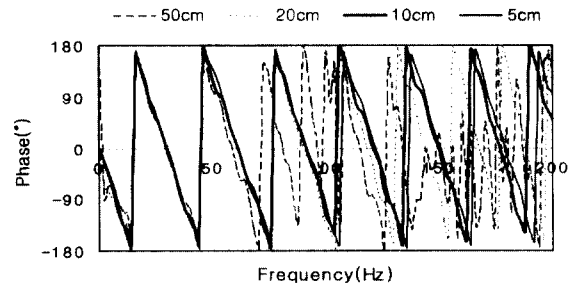


그림 7. 유한요소 크기에 따른 위상각의 변화(2000Hz)

의 직선형태로 나타나야 한다. 그림 7에서 유한요소의 크기가 50cm와 20cm일때의 결과를 살펴보면 낮은 주파수 영역에서는 위상차이가 등간격을 가지는 톱니 모양의 직선으로 나타나는 반면에 높은 주파수 영역으로 갈수록 위상차이의 간격이 비정상적으로 좁아지고 위상각의 반전이 빈번해져 해석결과의 신뢰도가 낮음을 알 수 있다. 반면, 유한요소의 크기가 10cm와 5cm에서는 높은 주파수 영역에서도 톱니가 등간격의 직선형태로 나타나 해석결과의 신뢰도가 높다.

본 연구에서 수행한 15개 모델에서 파장 1m의 경우 이론적인 표면파 속 Δt 도에 대한 해석결과의 오차 및 타격이 가해진 후 시간 증분(을 0.0005초로 0.5초 동안 해석했을 경우 해석시간을 표 1에 비교하였다. 해석에 사용된 컴퓨터 기종은 CRAY사의 CRAYC90 슈퍼컴퓨터이다. 이 표의 결과에서 유한요소의 크기가 작아지면 양질의 결과가 얻어짐을 확인할 수 있다.

위 결과를 종합해보면, 유한요소의 크기가 관심 있는 최소 파장의 길이의 1/10 보다 작아야 파의 전파특성을 효율적으로 묘사할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존의 문헌의 결과와도 일치한다(Kuhlemeyer and Lysmer, 1973).

4.3 측정시간간격의 최적화

유한요소의 크기가 10cm일 경우에 대하여 측정시간간격이 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz일 때 구해지는 분산곡선을 그림 9에 비교하였다. 이 경우 유한요소의 크기가 관심 있는 최소 파장 길이의 1/10 정도 되지만, 측정시간간격이 1000Hz 일때 파장의 길이 2m이하에 해당하는 깊이에서 표면파 속

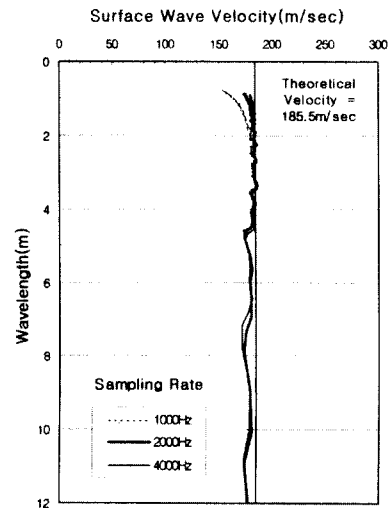


그림 8. 측정시간간격에 따른 실험분산곡선의 변화 (요소 크기는=10cm)

도가 갑작스럽게 감소하는 것을 볼 수 있다. 반면, 2000Hz와 4000Hz의 결과는 이론적인 속도와 비교하여 큰 차이를 보이지 않고, 비슷한 결과가 얻어졌다. 이는 적당한 측정시간 간격을 사용하지 않았을 경우 유한요소의 크기가 충분히 작아도 수치적인 에러가 증가하고, 측정시간간격도 파의 전파 특성을 효과적으로 묘사하기 위한 중요한 변수임을 의미한다. 표 1에는 측정시간간격이 변함에 따라 이론적인 표면파 속도에 대한 오차의 변화가 나타나있고, 측정시간간격이 감소하면 오차가 감소함을 알 수 있다.

이상의 결과를 종합해 보면, 본 논문의 해석 대상지반에 대해서 파의 전파특성을 가장 잘 묘사할 수 있는 모델은 유한요소의 크기가 5cm 이고 측정시간간격은 4000Hz일 경우이다. 그러나, 표 2의 해석시간에 나타난 바와 같이 이 모델은 해석시간이 지나치게 길어 비경제적인 해석이 된다. 따라서, 이론적인 표면파 속도와 비교하여 오차가 5% 보다 작은 모델 중에서 해석시간이 가장 짧은, 유한요소의 크기가 10cm이고 측정시간간격은 2000Hz인 모델을 본 연구의 해석에서 적용할 최적 유한요소 모델로 선택하였다.

표 1 이론적인 표면파 속도에 대한 해석결과의 오차(파장 길이=1m)

요소크기	이론적인 속도 (m/sec)	유한요소 해석결과 (m/sec)			오차(%)		
		1000Hz	2000Hz	4000Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
50cm	185.5	127.2	130.5	135.2	31.4	29.6	27.1
25cm		150.0	159.7	162.4	19.1	13.9	12.4
20cm		156.1	166.9	170.4	15.8	10	8.1
10cm		163.9	177.1	181.2	11.6	4.5	2.3
5cm		165.8	179.9	184.2	10.6	3	0.7

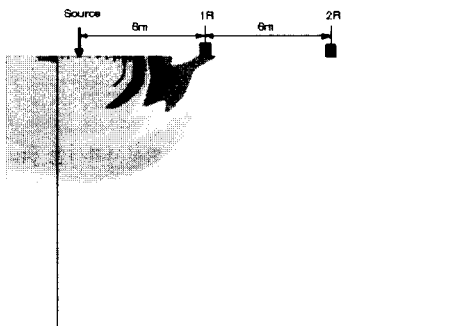
표 2 요소크기에 따른 해석시간의 비교

요소크기	요소수(개)	계산시간(sec)		
		1000Hz	2000Hz	4000Hz
50cm	1,300	1,657	3,307	6,590
25cm	5,000	6,362	12,701	25,251
20cm	6,730	11,227	22,234	55,980
10cm	10,252	17,443	32,220	78,842
5cm	23,170	36,140	74,051	143,758

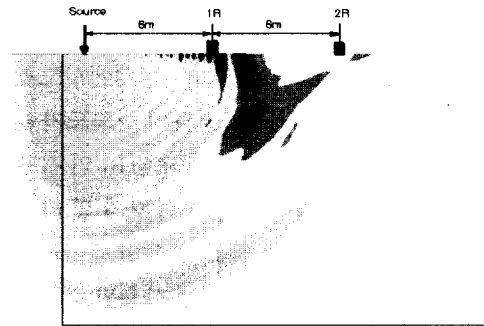
5. 수평 지반에서 파의 전파형상

5.1 균질한 수평 지반에서 파의 전파형상

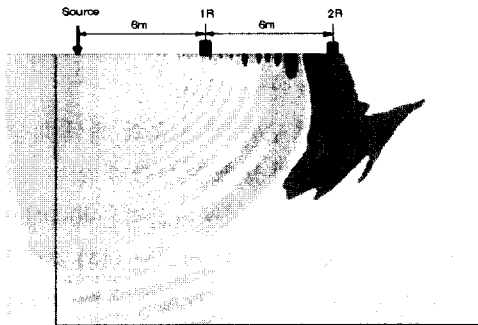
표면파의 시간적, 공간적인 에너지 분포의 변화를 알아보기 위하여 표면파의 전파에 의해 발생하는 지반 수직변위의 분포를 살펴보았다. 하중을 가해 발생하는 표면파의 전파형상을 보기 위해 0.02초 간격으로 수직변위를 구해 그림 9에



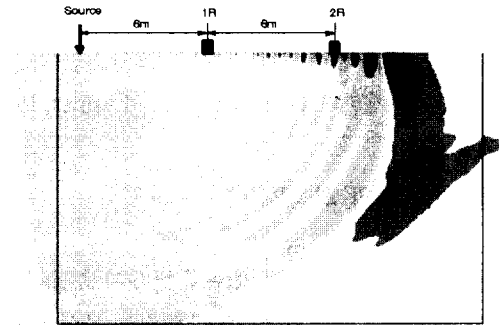
(a) 0.02초 후 파의 전파형상



(b) 0.04초 후 파의 전파형상



(c) 0.06초 후 파의 전파형상



(d) 0.08초 후 파의 전파형상

그림 9. 균질한 수평지반에서 파의 전파형상

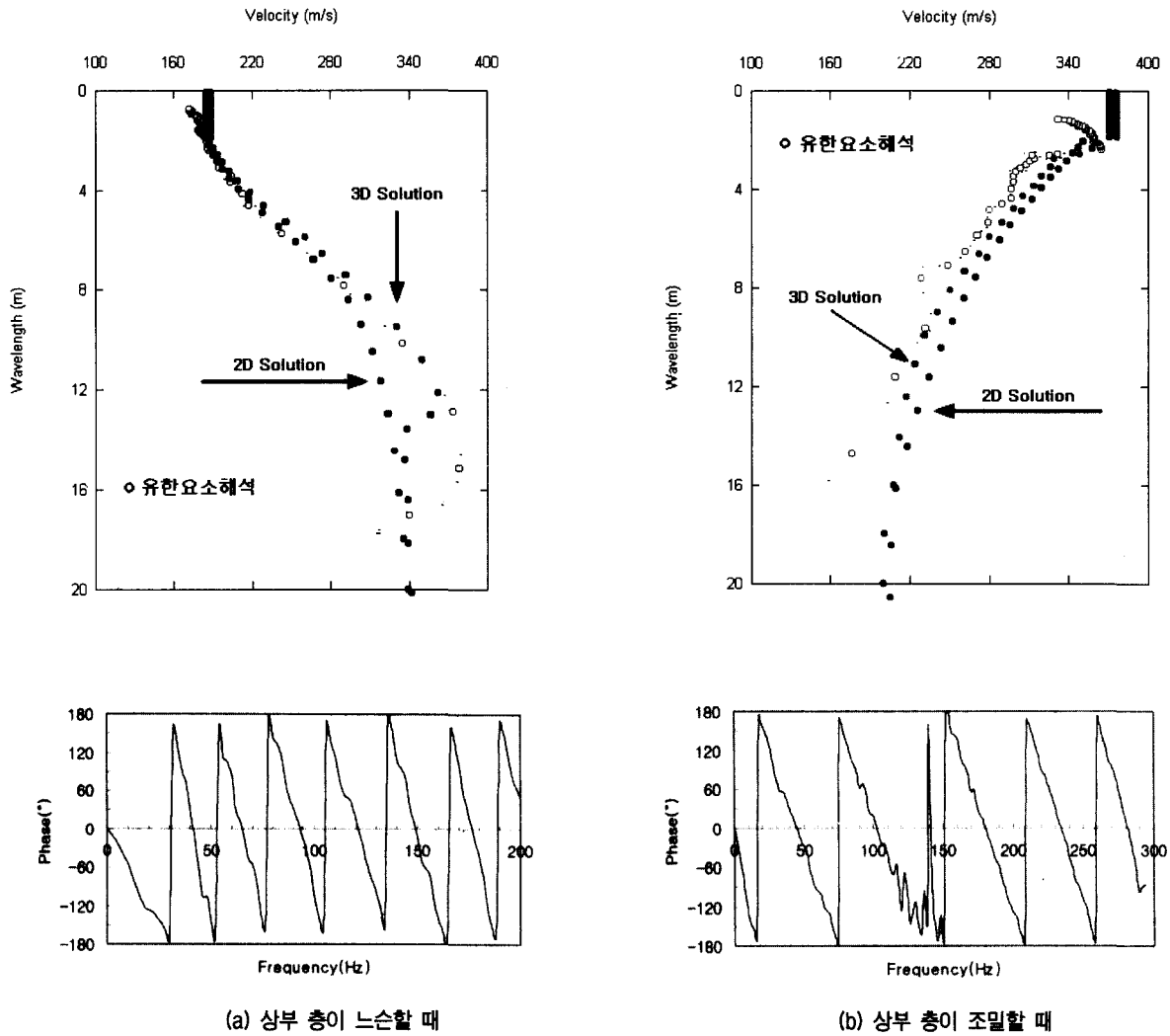


그림 10 해석결과와 WinSASW 결과와의 비교

보였다. 그림의 결과에는 표면파에 의한 변위 뿐만 아니라 구형 형태로 전파되는 체적파에 의한 변위의 영향이 함께 고려되어 있다. 그러나, 지반 표면파의 에너지가 상대적으로 지표면에 집중하므로 표면파의 전파형상을 이들 결과로부터 추정 가능하다. 그림에서 색깔이 진한 부분일수록 수직 변위가 많이 발생된 부분이고, 변위가 많이 일어난 부분은 파의 에너지가 많이 분포되어 있어 파의 전파형상을 보여준다.

하중이 가해지고 0.02초 지났을 때 파의 전파형상을 나타내는 그림 9-(a)의 결과로부터 파의 대부분이 첫 번째 감지기까지 도달하지 못했고, 대부분의 에너지는 지표면 근처에 구형 형태로 분포하고 있으며, 색깔이 진한 표면파 부분보다 에너지가 작은 P파와 S파가 빠르게 전파되는 양상을 보임을 알 수 있다. 하중이 가해진 후 0.04초가 지난 그림 9-(b)

에서 체적파는 상당히 많이 전파되었지만, 표면파는 지표면 근처에서 전파되고 아직 두 번째 감지기까지 도달하지 못한 것을 알 수 있다. 그림 9-(c), (d)에서도 체적파는 멀리 전파되어 계산영역을 벗어나고 있고, 표면파의 전파영역이 점점 깊은 영역까지 확대되는 것을 볼 수 있다. 이는 근역에서는 표면파가 제대로 발현하지 않고 원역으로 갈수록 표면파 성분이 발현되는 이론 현상을 수치적으로 보여준다.

위 결과를 종합해보면, 표면파는 지표면 근처에서 실린더 형태로 전파되는 것을 알 수 있다. 따라서, 수직변위를 이용하여 표면파의 전파형상을 연구하는 방법은 타당한 것으로 판단되며, 유한요소법으로 SASW 기법을 충분히 시뮬레이션 할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 무한요소를 사용하여 유한요소의 경계면에서 파가 반사되어 돌아오는 현상을 발견할 수 없으며, 원역으로 갈수록 표면파 성분이 발현되는 등 본

연구에서 적용된 해석모델은 합리적으로 표면파 전파특성을 묘사함을 알 수 있다.

5.2 상부 층이 느슨하고 하부 층이 조밀한 수평 지반에서 파의 전파형상

본 절에서는 물성치가 다른 두 개의 층으로 이루어진 수평지반에 대해 ABAQUS를 이용한 유한요소 해석과, 현재 SASW기법의 데이터 처리에 널리 이용되고 있는 프로그램인 WinSASW의 2차원(2D solution) 및 3차원(3D solution) 해석을 적용하여 SASW 기법을 시뮬레이션하고 결과를 비교하였다. 위층이 느슨하고 아래층이 조밀한 지반을 구성하기 위하여 전단파 속도를 각각 200m/sec와 400m/sec로 가정한 해석을 수행하였다. 해석 대상지반에 대해 4장의 균질한 수평지반의 해석에서 사용되었던 것과 동일한 모델을 적용하였다.

각 해석결과로부터 구한 이론적 분산곡선들은 그림 10-(a)에 비교하였다. 그림의 결과를 살펴보면 깊이가 증가

할수록 분산곡선이 점점 증가하는 형태로 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이 현상은 상부 층이 느슨하고 하부 층이 조밀한 모델의 조건과 잘 부합된다. 전반적으로 ABAQUS를 이용하여 얻은 신호의 분산곡선과 WinSASW를 이용하여 얻은 이론적 분산곡선이 잘 일치함을 알 수 있다. WinSASW에서는 발전기와 첫 번째 감지기, 그리고 두 감지기 사이의 거리는 1:1이 되도록 설정하였다.

하중이 가해진 후 0.02초 간격으로 구한 파의 전파형상을 그림 11에 나타내었다. 이 경우 균질한 수평지반의 전파형상과는 달리, 조밀한 하부 층에서 파의 전파가 더 빠르게 일어나는 것을 알 수 있고 파의 전파 에너지 대부분은 상부 층에 존재함을 알 수 있다. 이와 같이 파의 전파가 상부 층에서만 일어나는 이유는 상부 층과 하부 층의 경계조건과 밀접한 관련이 있다. 상부 층의 경계조건을 살펴보면, 위로는 공기 층이 있어 완전 자유단으로 가정할 수 있고, 아래에는 밀도가 더 큰 이질층과 접해있다. 따라서, 파가 전파될 경우 위에서는 전반사가 발생하고 아래에서는 파의 일부는 하부 층으로 전파되지만 대부분의 파는 다시 상부 층으로 반사를 일으

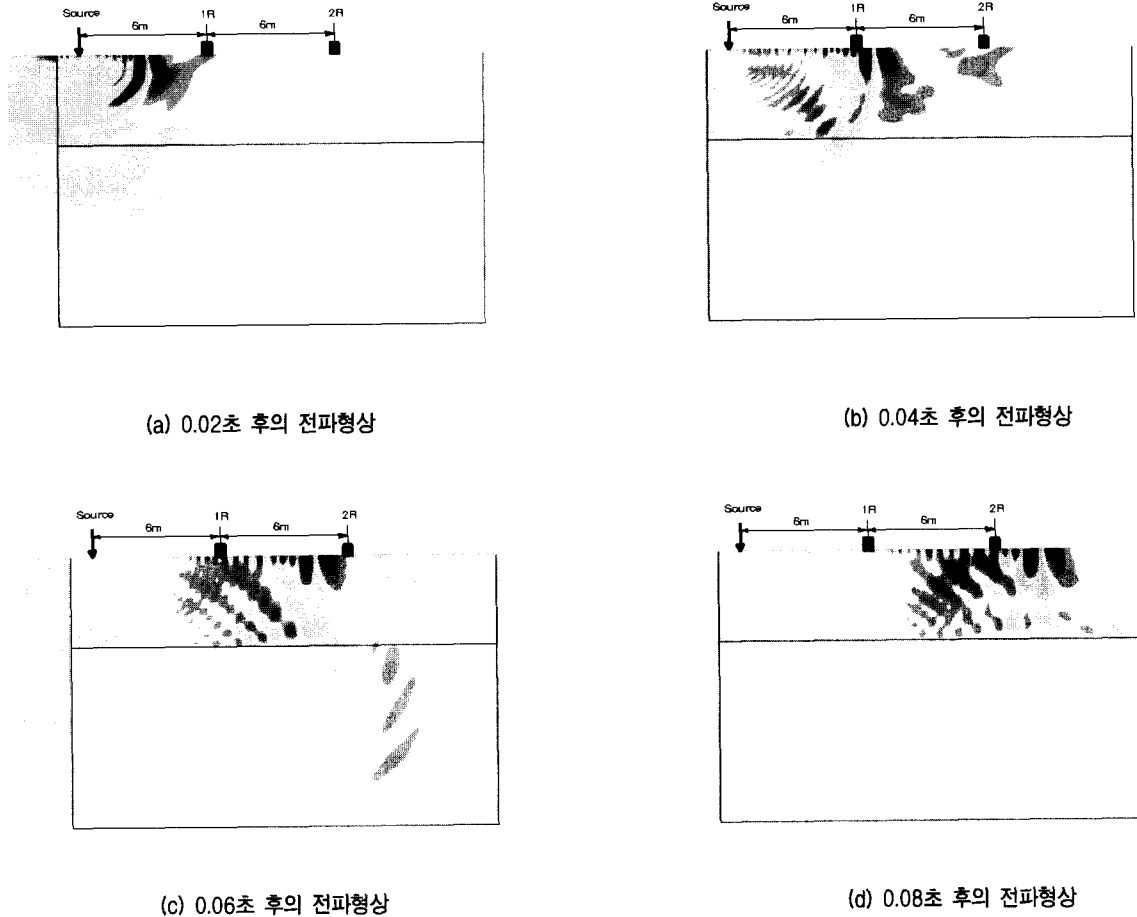


그림 11. 상부 층이 느슨하고 하부 층이 조밀한 지반에서 파의 전파형상

킨다. 이렇게 경계면에서 반사되는 파를 러브파(Love wave)라고 하는데, 이에 따라 대부분의 파가 상부 층에서만 전파되는 것으로 판단된다. 따라서, 균질한 수평지반에서 파의 전파형상과는 다른 형상으로 전파됨을 알 수 있고, 이질층에서 ABAQUS를 이용한 SASW기법의 시뮬레이션이 가능한 것으로 판단된다.

5.3 상부 층이 조밀하고 하부 층이 느슨한 수평 지반에서 파의 전파형상

본 절에서는 상부 층과 하부 층의 전파 속도를 각각 400m/sec와 200m/sec로 정하여 상부 층이 조밀하도록 해석 모델을 구성하였다. 그림 10-(b)는 상부 층이 조밀할 때 수치 해석결과와 WinSASW의 결과를 비교한 그래프이고, 깊이가 증가할수록 표면파 속도가 점점 감소하는 형태로 나타나는 것을 볼 수 있다. ABAQUS의 결과와 WinSASW의 2차원 및 3차원의 결과와 비교해보면 해석결과의 경향성은 유사하지만, 3차원 해석결과에 더 근접함을 알 수 있다. 그러나,

파장 3m이하의 표면파에 대해서는 상부층을 반무한체로 가정하여 해석하는 WinSASW의 결과와 차이가 많이 나고, ABAQUS의 결과에서 표면파 속도의 급격한 감소를 보여 신뢰성이 부족한 것으로 판단된다. 위상각 차이 그래프를 살펴보면, 주파수 140Hz부근에서 위상각 차이가 급격하게 변하는 부분이 나타나 것이 특이하다. 상부 층의 표면파 속도를 대략 360m/sec로 가정하였을 경우 주파수 140Hz에 해당하는 파장의 길이는 대략 2.6m 정도 되는데, 분산곡선에서도 파장의 길이 2.6m 부근에서 표면파 속도가 급격하게 변하는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 이유는 이질층을 만나는 경계부근에서 파의 반사가 일어나 다양한 파동이 발생되고 표면파 또한 전파속도가 변화되는 상태에 있어 이들 영향이 감지기에 측정되는 위상각 차이에 영향을 주었기 때문이다. 이 경우 파의 전파특성을 더욱 자세하게 알아보기 위해서는 유한요소의 절점수를 증가시켜야할 필요가 있다.

하중이 가해진 후 0.01초 간격으로 구한 파의 전파형상은 그림 12에 나타내었다. 상부 층이 조밀한 경우는 그림 11의

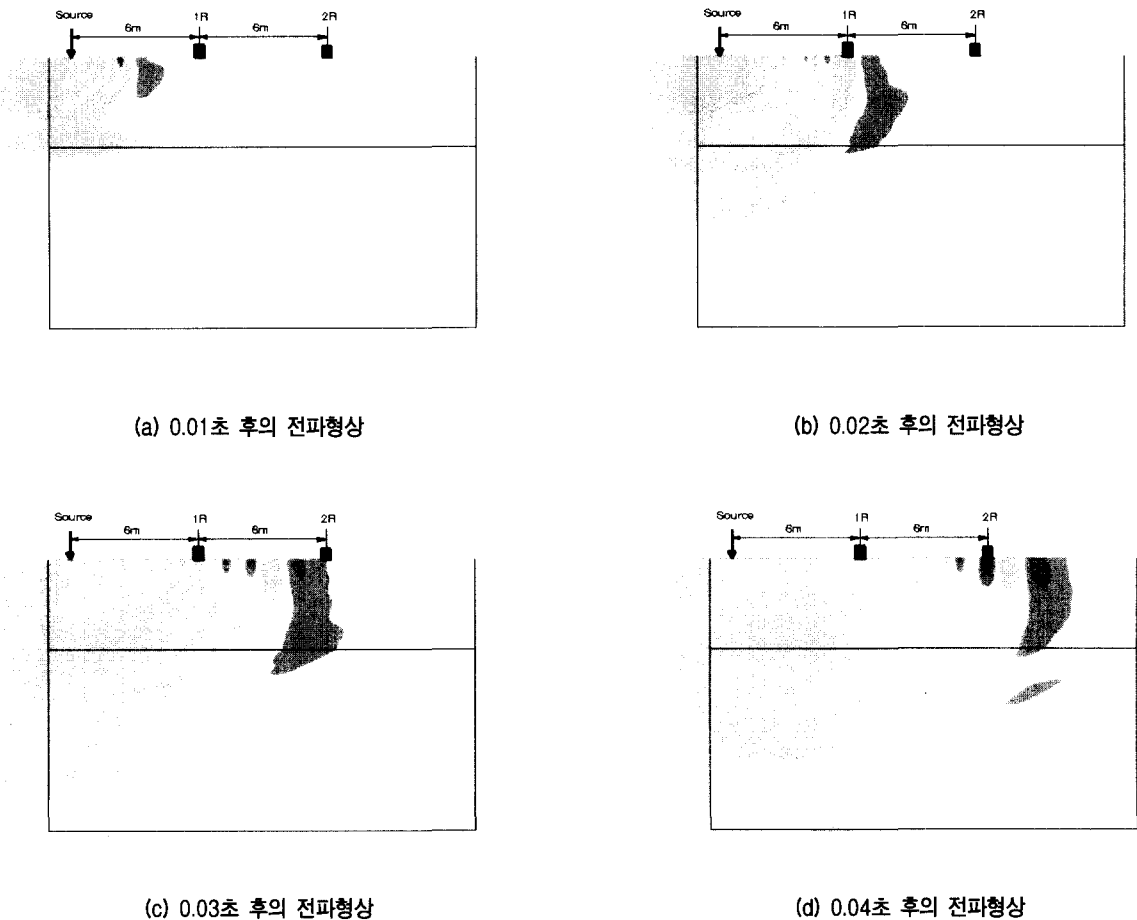


그림 12. 상부 층이 조밀하고 하부 층이 느슨한 지반에서 파의 전파형상

느슨한 경우와는 달리, 조밀한 상부 층에서 파의 전파가 더 빠르게 일어나는 것을 알 수 있고 파는 해석모델 전체에서 전파되는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 유한요소 수치해석을 이용하여 SASW기법을 시뮬레이션 하기 위하여 유한요소의 크기 및 측정시간 간격을 최적화하고, 균질한 수평지반과 서로 다른 강성도를 가지는 층으로 구성된 수평지반에 대한 해석을 수행하였다.

본 연구 결과, 시간영역에서 동적해석을 수행할 경우 파의 전파특성을 효율적으로 시뮬레이션 하기 위하여, 유한요소의 크기는 관심 있는 최소 파장의 길이의 1/10 보다 작아야 함을 알 수 있었다. 또, 유한요소의 크기와 더불어 측정시간 간격도 파의 전파특성을 묘사하는데 매우 중요한 요소임을 확인하였다.

수치해석을 이용하여 균질한 수평지반에서 SASW기법을 시뮬레이션한 결과 실린더 형태로 전파되는 표면파의 일반적인 특성이 잘 나타났다. 또, 서로 다른 강성도를 가지는 층으로 구성된 수평지반에서 SASW기법을 시뮬레이션 했을 경우에도 이론적인 표면파 속도 분산곡선을 적절히 구할 수 있어 유한요소 해석으로 SASW기법의 시뮬레이션을 효과적으로 수행할 수 있음이 밝혀졌다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC) 과제(2000G0103)의 연구비 지원과 한국전자통신연구원(ETRI) 연구개발정보센터(KORDIC)의 슈퍼컴퓨터 자원 무상지원 과제의 지원에 의한 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 해양수산부(1999), 항만 및 어항시설의 내진설계표준서
2. ABAQUS/Standard Ver. 5.7 User Manual, Finite element software package. Hibbitt, Karlsson & Sorenson, Inc.
3. F. E. Richart, J. R. Hall, and R. D. Wood.(1970), "Vibrations of Soils and Foundations" Prentice-Hall, Inc.
4. Lysmer J. and Kuhlemeyer, R. L.(1969), "Finite Dynamic Model for Infinite Media," J. Eng. Mech 95(EM4), 859-877.
5. Kuhlemeyer, R. L., and J. Lysmer(1973), "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", J. Soil Mech, & Foundations Div., ASCE, 99(SM5), 421-427.
6. Soheil Nazarian and Kenneth H. Stokoe(1985), II, "In Situ Determination of Elastic Moduli of Pavement Systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method : Practical Aspects", Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
7. Sung-Ho Joh(1992), Advances in Interpretation and Analysis Techniques for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) Measurements, Dissertation, Doctor of Philosophy, The Univ. of Texas at Austin.
8. Sung-Ho Joh(1992), WinSASW User's Guide, The Univ. of Texas at Austin,

(접수일자 2000. 9. 15)