

## 경사지반에서 SASW기법 적용시 수치해석을 이용한 영향요소 연구

### Numerical Studies for Application of the SASW Method in an Inclined Soil Layer

김동수 \*

윤종구 \*\*

Kim, Dong-Soo

Yoon, Jong-Ku

---

#### ABSTRACT

The Spectral Analysis of Surface Waves(SASW) Method has a great potential for rapid determination of shear wave velocity profile of ground. However, it has an inherent limitation in the interpretation of test results due to the assumption that the ground is layered horizontally. The reason of the assumption is that difficulties exist in obtaining analytical solutions of wave equation when a soil system is composed of inclined soil layer. In this study, a finite-element method has been employed to assess the effects of dip angle and stiffness contrast of inclined soil layers and the testing direction on the dispersion curve. The propagation of wave front in the inclined soil layer was also investigated. The results indicated that the influence of dip angle on the dispersion curve is getting obvious as the dip angle increases and the propagation of wave front in the inclined layer also entirely different compared with the case of the horizontal layer.

---

#### 1. 서 론

SASW기법에서 얻은 실험분산곡선은 현장 지반의 강성 주상을 합리적으로 반영하고 전단파 속도 주상도를 신속하게 결정할 수 있는 장점을 가지고 있는 반면, 시험결과를 해석하는데 있어 전문지식을 갖춘 공학자의 판단이 비교적 많이 요구되는 단점이 있다. SASW기법을 수행하면 파장(주파수)에 따른 전단파 속도의 변화를 알 수 있는 실험분산곡선을 얻게 되고, 이를 이론적으로 얻어진 이론 분산곡선과 반복 비교하는 시행착오법(iterative forward modeling analysis)이나 이 과정을 자동으로 처리하는 역산과정을 겸용하여 지반의 물성을 추정한다. 이러한 실험결과의 분석 과정에서는 통상적으로 지반을 수평층상구조로 된 반무한체로 가정하여 왔는데, 이는 지반이 기울어져 있거나 굴곡을 이루고 있을 경우 해석적인 방법(analytical method)으로는 파의 전파를 해석

---

\* 한국과학기술원 토목공학과 부교수, 정회원

\*\* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

하기 어렵기 때문이다.

따라서, 해석적인 해를 구할 수 없을 경우 유한요소를 이용한 수치해석 방법으로 다양한 지반조건에서 SASW기법을 시뮬레이션 하여 실험분산곡선의 변화를 알아보는 일은 의미가 있다. 또한, 역산은 공학자가 실험분산곡선의 특성을 파악하여 지반에서 전단파 속도의 전파특성을 유추해 나가는 과정이고, 공학자의 경험을 필요로 하므로 지반의 특성에 따른 실험분산곡선의 특성을 이해하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 효과적이고 신뢰성 있는 SASW기법의 확립을 위하여 수평지반에서 SASW기법을 적용할 수 있는지 타당성을 검토한 후 경사진 지반에서 SASW기법을 수치해석 방법으로 시뮬레이션하고, 지반의 기울기 및 강성도의 차이가 실험분산곡선에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 또, 경사진 지반에서 가진원의 위치가 실험분산곡선에 미치는 영향 및 파의 전파형상에 대한 검토를 수행하여 기존의 해석기법에서 얻어진 결과와 비교 분석하였다.

## 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 전파 에너지의 대부분이 한 파장 깊이 내에 분포한다(그림 1). 표면파가 전파할 때 매질의 입자 거동은 파의 전파방향에 대한 수평요소와 연직요소의 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(Richert 등, 1970).

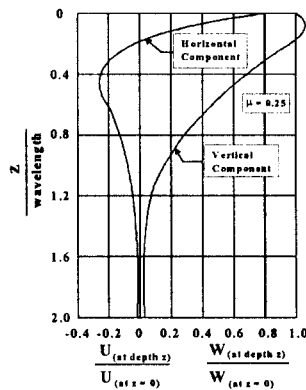
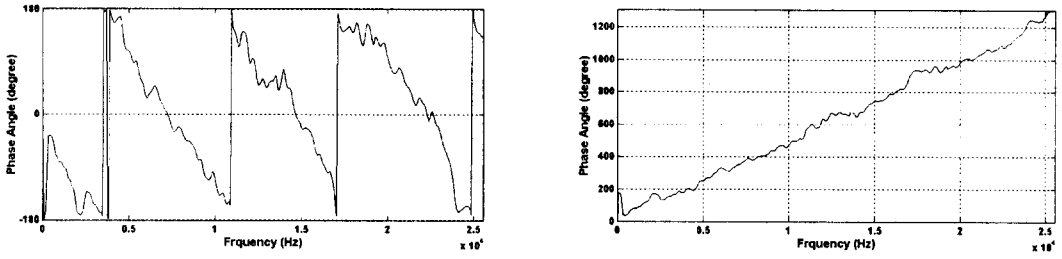


그림 1 깊이에 따른 표면파 전파형상(Richert 등, 1970)

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 동적신호분석기를 이용하여 시간영역 신호로 기록된다. 시간영역의 신호는 FFT를 이용하여 주파수영역의 신호로 변환하고, 이 신호로부터 크로스파워스펙트럼(cross power spectrum)의 위상정보(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 깊이에 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.



(a) 비전개 위상각 스펙트럼 (b) 전개 위상각 스펙트럼

그림 2 일반적인 위상각 스펙트럼

3. 수치해석모델

본 연구에서는 충격하중이 가해질 때 파의 전파특성을 효율적으로 모사할 수 있는 수치해석 프로그램인 ABAQUS/Standard를 이용하였다. 본 연구에서 수행된 예제들의 해석모델에서 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 4절점 사각형 유한요소를 사용하였다. 수평지반의 경우 그림 3과 같이 모델링하

여으며, 경사지압의 경우 그림 4와 같이 상부 층과 하부 층이 만나는 경계면을 기울어지도록 구성하였다. 해석모델은 수평방향으로 20m, 수직방향으로 15m의 유한요소 영역과, 유한요소 가장자리 경계면에는 파의 반사로 인한 영향을 없애기 위한 무한요소 영역으로 구분되어진다. 따라서, 무한요소가 사용된 원거리 영역(far field)에서는 변위, 응력, 에너지 등이 지수함수 형태로 감소하여 매우 작은 값이 되므로 특별한 경계조건이 필요 없다(Lysmer and Kulhemeyer, 1969).

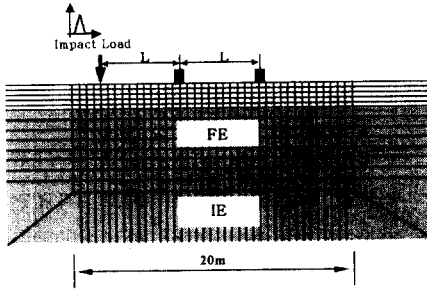


그림 3 수평지반 해석모델

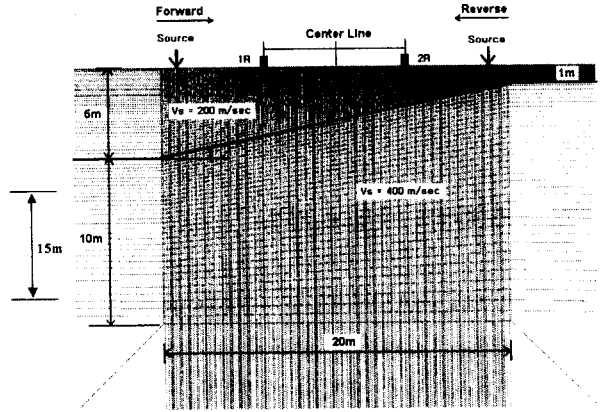


그림 4 경사지반 해석모델(기울기=11.3 °)

수평지반의 경우 중간 정도의 밀도를 가진 건조한 사질토 지반으로 가정하였으며, 경사지반의 경우 상부 층의 지반은 중간 정도의 밀도를 가진 건조사질토 지반으로 가정하였고, 하부 층은 조밀한 건조 사질토 지반으로 가정하였다. ABAQUS를 이용하여 해석을 수행하기 위하여 지반의 밀도, 전단탄성계수 및 포아송비 등을 표 1과 같이 가정하였다.

충격하중은 그림 5와 같이 해석 시작 시간으로부터 1msec가 지난 후에 2msec 동안 지속되는 형상이며 이때, 하중의 최대 진폭 크기는 단위하중(1N/m)이 되도록 가정하였다. 경사진 지반의 해석모델은 표 2에 나타내었다.

표 1. 해석에 사용된 지반의 물성치

층 구분	전단파 속도 (m/sec)	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	포아송비	전단탄성 계수 (MPa)
수평 층	200	1800	0.3	72.0
상부토사층	200	1800	0.3	72.0
하부토사층	400	1950	0.3	312.0

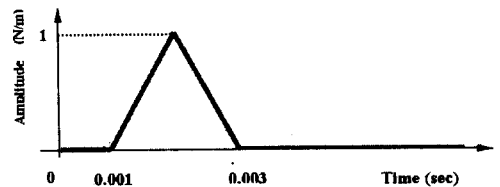


그림 5 하중 조건

표 2. 경사진 지반의 해석 모델

기울기	모델명		상부층의 좌측 깊이
11.3 °	Forward #2	Reverse #2	5 m
14.0 °	Forward #3	Reverse #3	6 m
16.7 °	Forward #4	Reverse #4	7 m
19.3 °	Forward #5	Reverse #5	8 m
21.8 °	Forward #6	Reverse #6	9 m

#### 4. 수평 지반에서의 타당성 검토

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 변화 등으로 인하여 지표면으로부터 0.5m - 1m 까지는 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.

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 종류로 설정하여, 수치해석을 위한 SASW 기법의 적용성을 연구하였다. 본 연구에서는 수평지반의 전단파의 속도를 200m/sec, 포아송비를 0.3으로 가정했으므로, 이론적인 표면파의 속도는 185.5m/sec가 된다. 따라서, 이론값과 수치해석 결과를 비교하여 타당성을 검토하였다. 최적 유한요소는 최소 파장의 길이 1m 에 해당하는 깊이에서 이론적인 표면파 속도와 비교하여 오차가 5% 보다 작은 모델 중에서 해석 시간이 짧은 것을 선택하였다.

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 얕은 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 되어, 관심 있는 최소 파장길이의 1/10 이하 정도가 되어야 효과적으로 SASW 기법을 시뮬레이션 할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 결과는 유한요소 크기에 따른 위상각의 변화를 나타내는 그림 6의 위상각 차이 그래프의 결과에도 잘 나타나 있다. 균질한 수평 지반에서 위상각의 차이는 이론적으로 간격이 일정한 튕니 모양의 직선형태로 나타나야 한다. 위상각 차이 그래프에서 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.

위 결과를 종합해보면, 수치해석을 이용한 SASW기법의 시뮬레이션이 가능함을 알 수 있고, 효과적인 시뮬레이션을 위해서는 유한요소의 크기가 관심 있는 최소 파장길이의 1/10 보다 작아야 함을 알 수 있다.

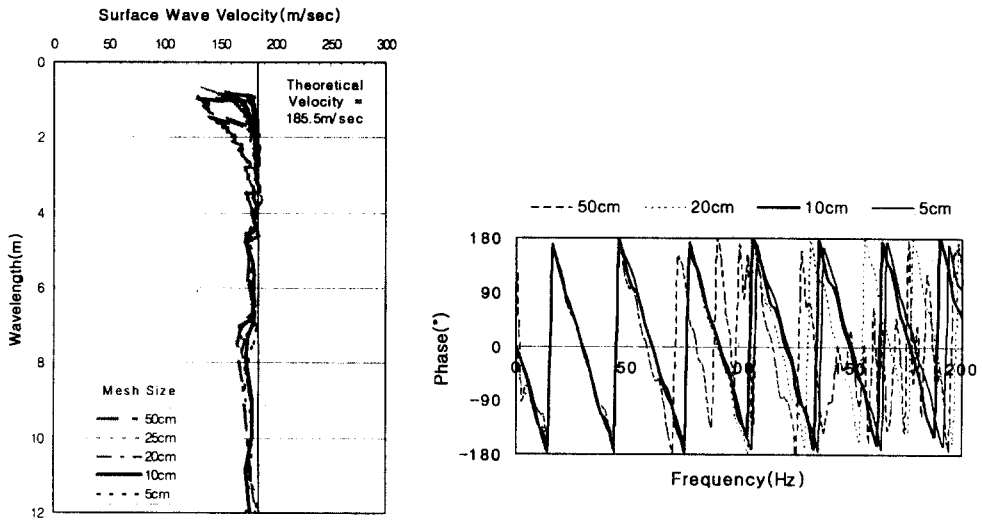


그림 6 유한요소 크기에 따른 실험분산곡선 및 위상각 차이 그래프의 변화

## 5. 경사진 지반에 대한 기존 해석기법

일반적으로 SASW기법을 수행할 경우 동일한 현장 지반에서 정방향(forward) 시험과 역방향(reverse) 시험을 수행하여, 그 결과를 평균하여 평균 실험분산곡선을 얻는다. 두 시험의 결과를 평균하는 이유는 감지기 고유의 오차를 서로 상쇄시키려는 목적과, 지반이 수평 층으로 이루어지지 않았을 경우 양방향 시험 결과를 평균하여 평균 실험분산곡선을 구하고, 지반의 기울기에 대한 영향을 상쇄시키기 위한 것으로 알려져 있다. 이러한 실험 예로 정방향과 역방향 시험을 통해 얻은 결과의 위상각 차이 및 양방향 위상각 차이의 평균값을 나타내는 실험 결과를 그림 7에 보였다(Marwan, 1993).

기존의 해석방법으로 경사진 지반에 대한 해석을 수행할 때, 그림 7과 같이 양방향의 위상각 차이가 일치하지 않고, 평균값을 기준으로 아래와 위로 불룩하게 나타난다고 알려져 있고, 그 평균은 수평 지반의 위상각 차이와 같아지는 것으로 가정한다. 그러나, 기울어진 지반의 양방향 시험에서 얻어진 결과의 평균값이 수평 지반의 결과와 같아진다는 기존의 가정은 확인된 사항이 아니

므로 이에 대한 검증이 필요하다.

일반적으로 그림 4와 같이 상부 층이 느슨하고 하부 층이 단단한 기울어진 지반에서 SASW기법을 수행할 경우 우측에서 좌측으로(역방향) 전파되는 시험에서 얻은 표면파 속도가 좌측에서 우측으로(정방향) 전파되는 표면파 속도보다 빠르게 나타날 것으로 예상할 수 있다. 이는 표면파의 분산특성을 고려해 볼 때 역방향에서 시험을 수행했을 경우 상대적으로 단단한 하부 지반의 영향을 많이 받을 것으로 예상할 수 있기 때문이다. 또, 양방향의 표면파 속도를 평균 할 경우 수평 지반의 표면파 속도를 얻을 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 본 연구에서는 수치해석을 통하여 기존의 해석방법 및 가정 사항들을 기울어진 지반에서 수치해석을 통하여 검증하였다.

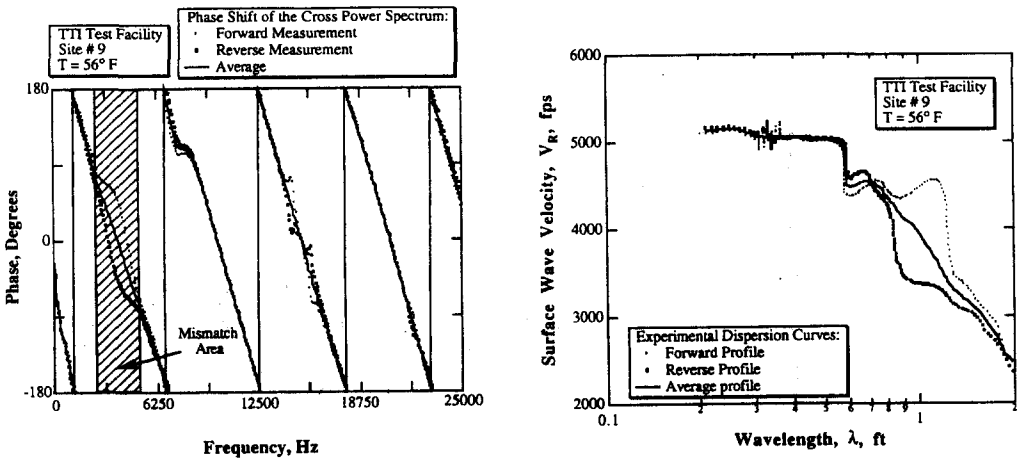


그림 7 정방향 및 역방향 시험에서 구한 표면파의 위상각 차이 및 평균값(Marwan, 1993)

## 6. 경사진 지반에서의 해석결과

표 2에 나타난 여러 가지 해석조건 중에서 대표적으로 지반의 기울기가  $11.3^\circ$  일 경우 정방향 및 역방향 시험, 기울어진 지반의 평균 깊이에 해당하는 수평 지반의 해석결과에 대한 실험분산곡선을 그림 8에 함께 나타냈다. 해석결과 양방향 시험에서 모두 파장의 길이가 5m 보다 짧은 부분에 해당하는 깊이에서는 표면파 속도가 완만하게 증가하다가, 그 보다 깊은 곳에서는 급격하게 증가하고 있다. 이러한 급격한 변화는 상부 층에 비하여 진단파 속도가 큰 하부 층의 영향이 나타나기 시작하는 깊이로 분석된다. 또한, 경사진 지반에서 수행한 해석결과를 살펴보면 얕은 깊이(2m 이하)에서는 수평 지반과 정방향의 결과가 비슷하고, 중간 정도의 깊이(2m-7m)에서는 수평 지반과 역방향 시험의 결과가 비슷하며, 깊은 깊이(8m 이상)에서는 수평 지반의 결과가 양방향 결과의 중간 값에 해당함을 알 수 있다. 이러한 결과는 표 2에 나타난 여러 예제에서도 공통적으로 나타나는 현상이다. 그림 8의 정방향, 역방향, 수평지반(reference)의 경우 크로스 파워 스펙트럼의 위상각 정보를 나타낸다. 양방향 시험을 평균하여 구한 위상각 정보와 그림 8의 수평 지반의 위상각 정보를 비교해보면, 수평 층의 분산곡선은 양방향 시험결과의 단순 평균값과 일치한다는 Marwan(1993)의 설명과는 현격한 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서, 지반이 기울어져 있을 경우

양방향 시험 결과의 평균값이 수평 지반의 결과와 일치한다고 단정할 수 없고, 본 해석모델과 같은 지반의 경우 기존의 방법을 이용하여 데이터를 해석하면 신뢰성이 떨어질 수 있다.

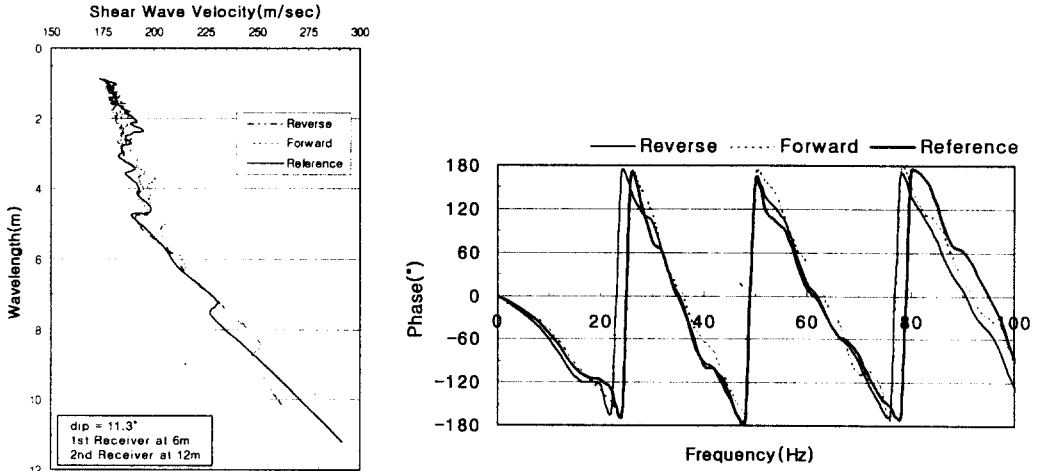


그림 8 지반의 기울기가 11.3° 일 경우 해석결과

그림 8의 결과에서 주목할 만한 사실은 5장에서 예상했던 결과와는 반대로, 정방향의 전단파 속도가 역방향 보다 파장의 길이 8m 보다 깊은 곳에서 크게 나타난 것이다. 전술한 바와 같이 실린더 형태의 전파형상을 갖는 표면파가 전파될 경우 대부분의 에너지는 한 파장 안에 존재하여 상부 층의 영향을 많이 받는다. 따라서, 지반의 형상이 본 해석모델과 같은 경우, 정방향에서 타격을 가하면 전단파 속도가 느린 상부 층의 영향을 상대적으로 많이 받게 되어 역방향보다 작게 나타날 것으로 예상했으나 해석결과 상반된 결과를 얻었다.

이러한 이유는, 수치해석을 이용하여 해석 대상 지반의 수직변위를 시뮬레이션 한 그림 9에 잘 설명되어 있다. 그림 9에는 정방향 및 역방향에서 타격을 가했을 경우 0.02, 0.04, 0.05 그리고 0.09 초 후에 파가 전파되는 형상을 나타내었다. 그림 9-(a)의 정방향 결과의 경우 구형 형태의 체적파는 하부 층으로 전파된 반면, 에너지가 많이 분포되어 있는 표면파는 충분히 발현되지 않아 상부 층에서만 전파가 이루어짐을 볼 수 있다. 그림 9-(b)의 정방향 결과에서는 파는 상부 층의 표면을 따라 전파되는 파와 하부 층을 따라 전파되는 파로 구분되어짐을 볼 수 있고, 그림 9-(c)의 정방향 결과에서는 상부 층과 하부 층의 표면파가 서로 다른 속도로 전파됨을 볼 수 있다. 그림 9-(d)의 정방향 결과에서는 하부 층으로 전파된 파는 이미 해석모델 바깥으로 전파되어 보이지 않지만, 상부층을 통과하는 표면파는 여전히 지표면을 따라 전파되고 있다. 즉, 정방향 시험의 경우 가진원에서 발생된 파가 전파되면서 얕은 깊이에 있는 파의 그룹(wave group)은 지표면을 따라 느리게 전파되고, 깊은 깊이에 있는 파의 그룹은 이질층의 경계면에서 굴절되어 하부 층에서 빠르게 전파됨을 알 수 있다. 따라서, 정방향의 경우 상부 층과 하부 층의 물성이 분산곡선에 효과적으로 반영됨을 알 수 있다.

그러나, 그림 9의 역방향 시험의 경우 가진원에서 발생된 대부분의 파는 이질층의 경계면에서 하부 층으로 굴절되지 못하고 대부분 상부 층 쪽으로 반사를 일으켜 속도가 느린 상부 층에서 전

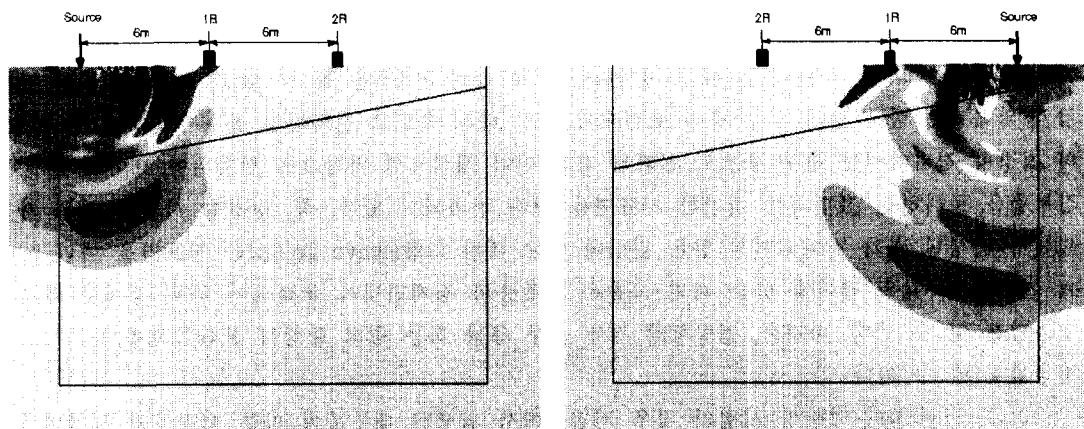


파됨을 볼 수 있다. 특히, 그림 9-(b), (c), (d)의 역방향 결과의 경우 대부분의 전파 에너지는 상부 층에서만 발생함을 확연히 보여주고 있다. 이는 파의 전파형상이 실린더 형태로 전파되지 않고 경계면에서 파의 반사와 산란이 파의 전파에 중요한 영향을 미치는 것을 의미한다. 따라서, 역방향의 경우 전단파 속도가 느린 상부층의 영향이 더 커지게 되고, 상대적으로 하부 층의 영향이 작아지게 되어 그림 8과 같이 실험분산곡선의 깊은 깊이에서 정방향의 결과보다 작게 나타난 것으로 분석된다. 그림 9의 경사진 지반에서 파의 전파형상에서 볼 수 있듯이, 본 연구결과 정방향과 역방향 시험에서 탄성파의 전파경로가 전혀 다를 수 있고, 경사진 지반에서 파의 전파형상은 수평지반에서 파의 전파형상과도 전혀 다름이 밝혀졌다. 따라서, 그림 8의 결과에서 정방향과 역방향의 실험분산곡선이 다르게 나타나는 것은 타당한 결과이고, 정방향과 역방향 시험 결과의 평균 전단파속도가 수평지반에서의 전단파 속도와 비교하여 다르게 나타나는 현상은 파의 전파경로가 전혀 다르기 때문임을 알 수 있다.

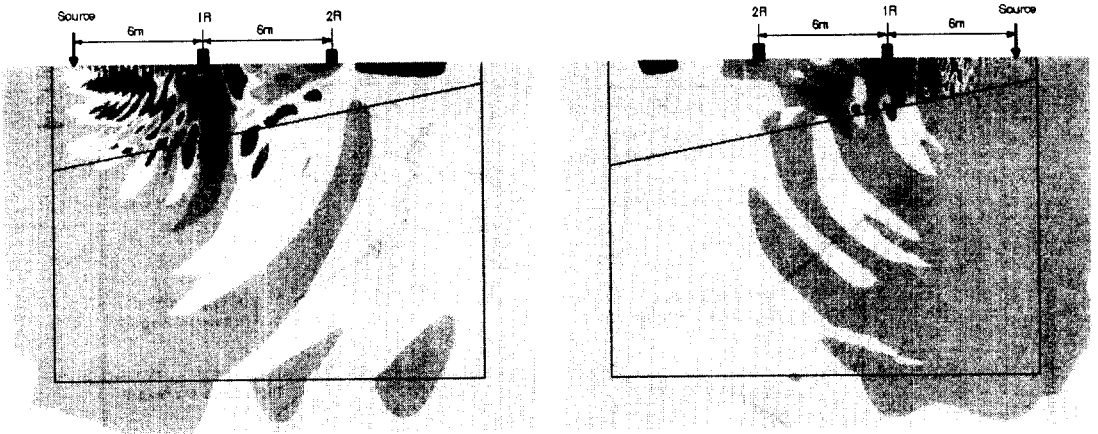
그림 10은 경사진 지반에서 가진원이 정방향 및 역방향에 위치했을 경우 표 2에 나타난 바와 같이 지반의 기울기 증가에 따른 실험분산곡선의 변화를 나타내었다. 그림 10의 결과를 살펴보면 두 가지 중요한 경향을 발견할 수 있다. 첫째는 지반의 기울기가 증가함에 따라 정방향과 역방향 시험의 실험분산곡선이 뚜렷하게 감소하는 것이고, 둘째는 양방향 시험에서 표면파 속도가 급격히 증가하는 천이구간(transition region)의 시작점이 현저하게 다른 점이다.

본 해석모델과 같은 지반조건에서 기울기가 증가한다는 것은 상부 층의 영향이 상대적으로 커진다는 것을 의미하므로, 표면파가 전파될 경우 대부분의 에너지가 한 파장 깊이 안에 존재하는 특성을 고려하면 기울기가 증가할수록 상부 층 물성의 영향이 더 커진다는 것을 알 수 있다. 따라서, 상부 층의 전단파 속도가 하부 층보다 느리므로 지반의 기울기가 증가함에 따라 실험분산곡선이 감소하는 경향이 나타난 것으로 판단된다.

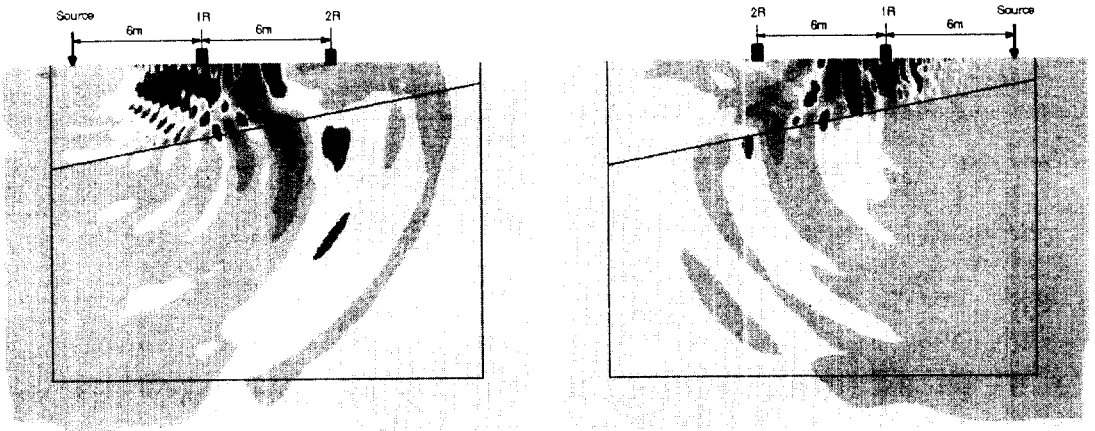
그림 10의 결과를 살펴보면 천이구간의 시작점이 정방향의 경우 파장의 길이 2m 에 해당하는 깊이에서 나타나고, 역방향의 경우 파장의 길이 3.5m에 해당하는 깊이에서 발행한다. 이는 본 해석모델과 같은 지반에서 정방향 시험을 수행할 경우 해석결과는 지반의 기울기에 민감함을 의미하고, 역방향 시험의 경우 지반의 기울기에 대한 영향이 상대적으로 작기 때문이다. 또한, 양방향 시험에서 하부 층의 영향이 나타나는 깊이가 다르다는 결론을 얻을 수 있다.



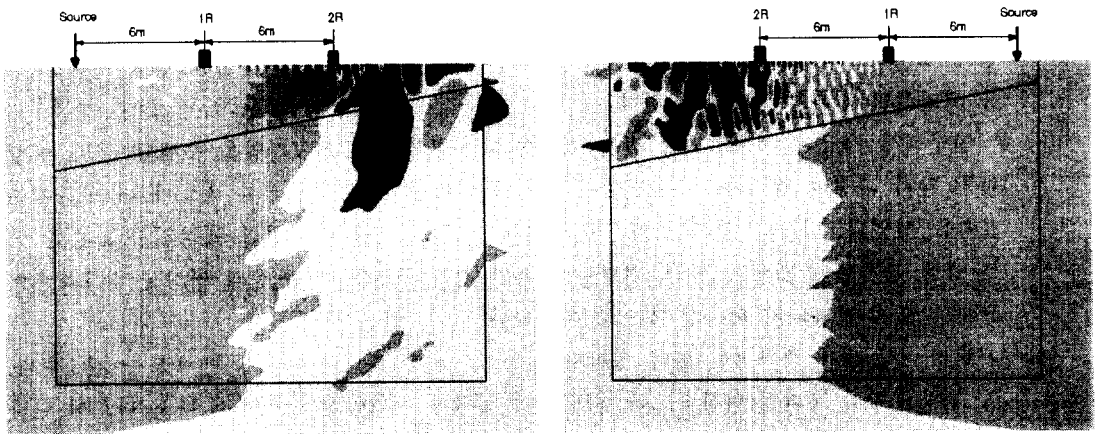
(a) 타격 후 0.02초 후의 전파형상(좌 : 정방향, 우 : 역방향)



(b) 타격 후 0.04초 후의 전파형상(좌 : 정방향, 우 : 역방향)

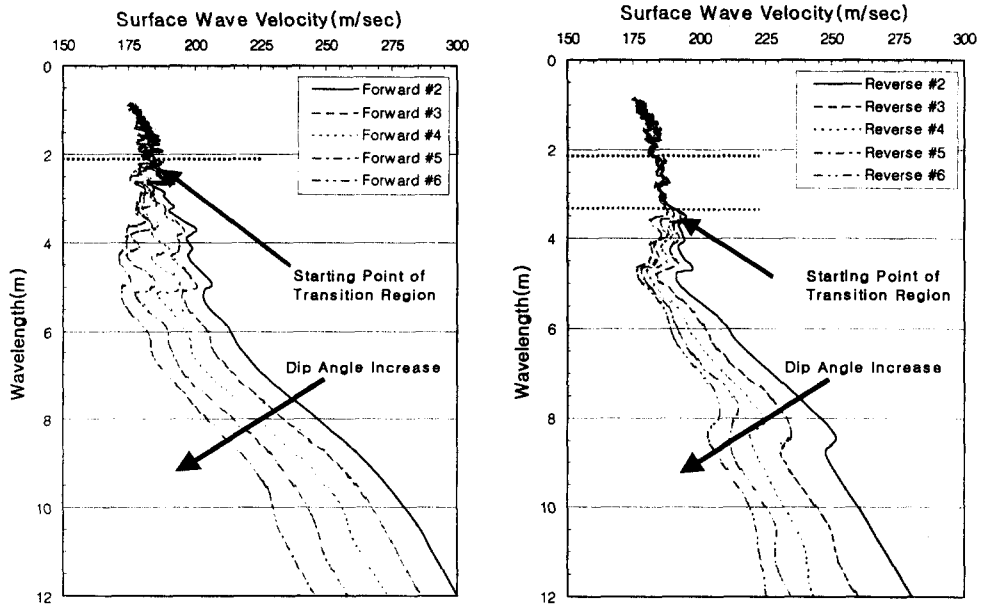


(c) 타격 후 0.05초 후의 전파형상(좌 : 정방향, 우 : 역방향)



(d) 타격 후 0.09초 후의 전파형상(좌 : 정방향, 우 : 역방향)

그림 9 파의 전파형상(dip=11.3°)



(a) 정방향 시험 (b) 역방향 시험

그림 10 경사진 지반에서 해석결과

5. 결론

본 연구에서 검토된 해석모델과 조건이 유사한 경사진 층을 가진 지반에서 SASW기법을 수행할 경우 다음과 같은 사항들이 고려되어야 한다는 결론을 얻었다.

- (1) 기울어진 지반에서는 정방향과 역방향 시험의 결과를 평균하여도 수평 지반의 실험분산곡선과 일치하지 않는다. 따라서, 기울어진 지반에서 SASW기법을 수행할 경우 이러한 점을 고려하여 결과를 분석해야 한다.
- (2) 본 연구에서 사용된 해석모델과 같은 기울어진 지반에서 SASW기법을 수행할 경우, 예상과는 달리 파장의 길이가 긴 표면파의 경우에 정방향 시험의 표면파 속도가 더 빨라지는 결과를 얻었다. 이러한 결과는 역방향 시험의 경우 대부분의 표면파 에너지가 느슨한 상부 층을 통하여 전파되는 반면, 정방향 시험의 경우 조밀한 하부 층의 영향을 상대적으로 크게 받으며 전파되기 때문인 것으로 분석된다.
- (3) 지반의 기울기가 증가함에 따라 양방향 모두 긴 파장 표면파의 위상각 속도는 감소한다. 또, 천이구역의 시작점(위상속도의 변이점)이 정방향과 역방향 시험에서 다소 다르게 나타나는데, 이는 기울어진 지반에서 가진원의 위치에 따라 파의 전파특성이 달라지기 때문인 것으로 분석된다.

## 7. 감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC) 과제(2000G0103)의 연구비 지원에 의한 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 8. 참고문헌

1. 김동수, 윤종구, 이병식, 박형춘(2001), "SASW 기법에 대한 수치해석 적용성 연구" 한국지반공학회논문집, 2001년 2월
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. Marwan F. A.(1993), "Evaluation of Flexible Pavements and Subgrades using the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) Method", Dissertation, Doctor of Philosophy, The Univ. of Texas at Austin
7. Soheil Nazarian and Kenneth H. Stokoe, II(1985), "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.
8. 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.
9. Sung-Ho Joh(1992), "WinSASW User's Guide", The Univ. of Texas at Autin.