

# 경사지반에서 SASW기법 적용시 수치해석을 이용한 영향요소 연구

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

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

### 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 that the propagation of wave front in the inclined layer is entirely different from that in the horizontal layer.

### 요 지

SASW기법은 실험에서 얻은 실험분산곡선이 현장 지반 강성의 주상을 합리적으로 반영하므로 실험결과로부터 전단파 속도 주상도를 신속하게 결정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나, 실험결과를 해석하는 과정에서 현재까지는 지반의 층상구조를 수평으로 가정하는 근본적인 한계점을 지니고 있었다. 이는 지반이 수평층상구조가 아닐 경우 해석적인 해를 구하기 힘들기 때문이다. 본 논문에서는 유한요소 수치해석을 통하여 경사진 지반에서 SASW기법을 수행했을 경우 지반경사를 고려한 지반 조건이 실험분산곡선에 미치는 영향을 규명하였다. 이를 위하여 지반의 기울기와 표면파 전파 방향이 실험분산곡선에 미치는 영향과 파의 전파형상에 미치는 영향을 규명하기 위한 해석을 수행하였다. 해석결과 경사지반에서 지반 조건이 변함에 따라 실험 분산곡선에 많은 변화가 나타났고, 경사진 지반에서 파의 전파형상은 수평 층에서의 파의 전파형상과는 전혀 다른 특성으로 나타남을 알 수 있었다.

**Keywords :** SASW method, Inclined soil layer, Dispersion curve, Shear wave velocity, Wave front

### 1. 서론

SASW기법에서 얻은 실험분산곡선은 현장 지반의 강성주상을 합리적으로 반영하고 전단파 속도주상도를 신

속하게 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

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

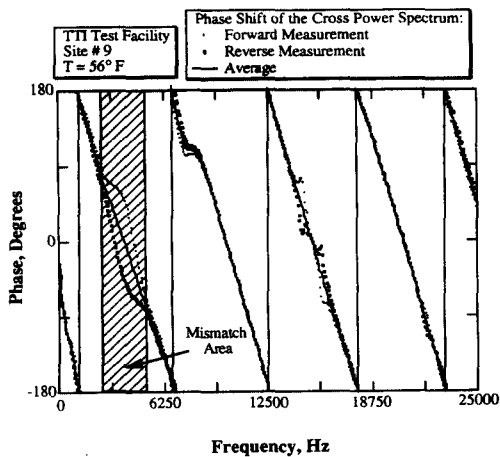


그림 1. 정방향 및 역방향 시험에서 구한 표면파의 위상각 차이 및 평균값(Marwan, 1993)

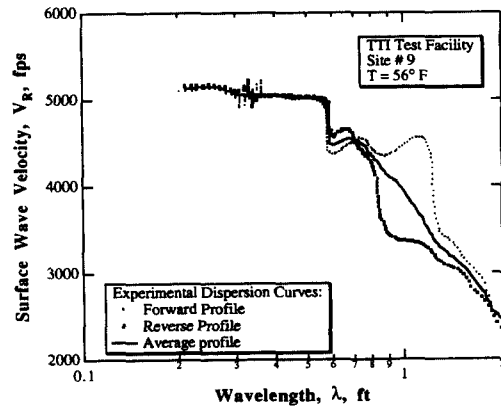


그림 2. 정방향 및 역방향 시험에서 얻은 표면파 속도의 분산곡선 및 평균값(Marwan, 1993)

실험분산곡선을 얻게 되고, 이를 이론적으로 얻어진 이론 분산곡선과 반복 비교하는 시행착오법(iterative forward modeling analysis)이나 이 과정을 자동으로 처리하는 역산 과정을 겸용하여 지반의 물성을 추정한다. 이러한 실험결과 분석 과정에서는 통상적으로 지반을 수평층상구조로 된 반무한체로 가정하여 왔는데, 이는 지반이 기울어져 있거나 굴곡을 이루고 있을 경우 해석적인 방법(analytical method)으로는 파의 전파를 해석하기 어렵기 때문이다.

따라서, 해석적인 해를 구할 수 없을 경우 유한요소를 이용한 수치해석 방법으로 다양한 지반조건에서 SASW기법을 시뮬레이션 하여 실험분산곡선의 변화를 알아보는 일의 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 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. 경사진 지반에 대한 기존 해석기법

일반적으로 SASW기법을 수행할 경우 동일한 현장 지반에서 정방향(forward) 시험과 역방향(reverse) 시험을 수행

하여, 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 1에 보였다. 또한, 이들 결과로부터 구한 양방향 및 평균값에 대한 분산곡선을 그림 2에 보였다.(Marwan, 1993).

기존의 해석방법으로 경사진 지반에 대한 해석을 수행할 때, 그림 1과 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 아니므로 이에 대한 검증이 필요하다.

일반적으로 그림 3과 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, 그림 2에 나타난 바와 같이 양방향의 표면파 속도를 평균 할 경우 수평 지반의 표면파 속도를 얻을 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 본 연구에서는 수치해

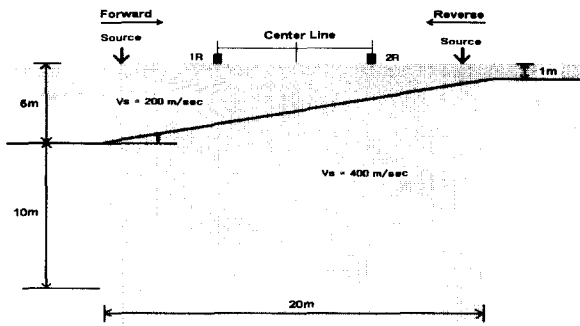


그림 3. 경사진 지반의 유한요소 해석모델(기울기=11.3°)

석을 통하여 기존의 해석방법 및 가정 사항들을 기울어진 지반에서 수치해석을 통하여 검증하였다.

### 3. 해석계획

#### 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 변형률 수준은 0.001%보다 작은 미소변형률 수준이기 때문이다.
- (3) 해석은 2차원 평면변형조건에서 수행되었다.

본 연구에서는 4절점 사각형 유한요소를 사용하였고 그림3과 같이 상부 층과 하부 층이 만나는 경계면을 기울여지

표 1. 해석에 사용된 지반의 물성치

층 구분	전단파 속도 (m/sec)	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	포아송비	전단탄성계수 (MPa)
상부 토사 층	200	1800	0.3	72
하부 토사 층	400	1950	0.3	312
하부 암반 층	1000	2400	0.2	2400

도록 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 와 Kulhemeyer, 1969).

본 연구에서는 지하 0.5m를 관심 있는 최소 깊이로 정하였고, 관심 있는 최소 파장의 길이는 관심 있는 최소 깊이의 두 배인 1m로 정하였다. 따라서, 파의 전파형상을 효율적으로 묘사하기 위한 유한요소의 크기는 관심 있는 최소 파장 길이의 1/10 이하가 되어야 함을 고려하여, 상부 층 유한요소의 크기는 10cm 이하가 되도록 정하였다. 한편, 유한요소의 크기와 더불어 중요한 요소는 측정시간간격이다. 본 연구에서는 유한요소의 크기 및 측정시간간격의 최적화 과정을 통하여 측정시간간격을 2000Hz로 정하였다(김동수 등, 2000).

#### 3.2 입력 지반상수 및 입력 하중

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

충격하중은 그림 4와 같이 해석 시작 시간으로부터 1msec가 지난 후에 2msec 동안 지속되는 형상이며 이때, 하중의 최대 진폭 크기는 단위하중(1N/m)이 되도록 가정하였다.

#### 3.3 해석 대상 모델

본 연구에서는 두 종류의 경사진 층상구조로 이루어진 지

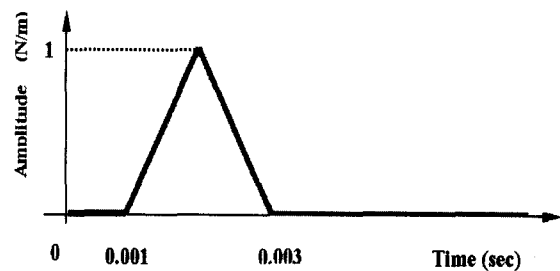


그림 4. 입력 하중 조건

표 2. 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

반에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 첫 번째 해석모델에서는 상부 층과 하부 층을 토사지반으로 설정하여 강성의 차이가 두 배 되도록 물성치를 입력하였고 지반은 모두 건조 사질토로 가정하였다. 두 번째 해석모델에서는 상부 층은 토사지반, 하부 층은 암반으로 이루어진 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 경사진 지반을 묘사하기 위하여 그림 3과 같이 좌측에서 우측으로 갈수록 상부 층의 깊이가 점점 얕아지는 형태로 모델을 구성하였다.

각각의 모델은 지반의 기울기가 실험분산곡선에 미치는 영향을 조사하기 위하여 표 2에 나타난 바와 같이 10 가지 예제에 대하여 해석을 수행하였다. 또, 가진원의 위치에 따른 실험분산곡선의 변화를 살펴보기 위하여, 가진원의 위치를 정방향과 역방향에 두어 해석을 수행하였다. 한편, 정방향과 역방향 시험에서 얻어진 결과를 평균했을 때 수평 지반(reference)의 결과와 일치하는지를 조사하기 위하여, 일부 예제의 경우(기울기 11.3°) 기울어진 층의 평균 깊이에 해당하는 수평 층에 대한 해석을 수행하여 경사진 지반의 결과와 비교하였다.

## 4. 해석결과

### 4.1 하부 층이 토사인 지반조건에 대한 해석결과

표 2에 정리한 여러 가지 해석조건 중에서 대표적으로 지반의 기울기가 11.3° 일 경우 정방향 및 역방향 시험, 기울어진 지반의 평균 깊이에 해당하는 수평 지반의 해석결과에 대한 실험분산곡선을 그림 5에 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 전단파 속도가 큰 하부 층의 영향이 나타나기 시작하는 깊이로 분석된다. 또한, 경사진 지반에서 수행한 해석결과를 살펴보면 얕은 깊이(2m 이하)에

서는 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 6은 정방향, 역방향, 수평지반의 경우 크로스 파워 스펙트럼의 위상각 정보를 나타낸다. 양방향 시험을 평균하여 구한 위상각 정보와 그림 6의 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 5의 결과에서 주목할 만한 사실은 2절에서 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 같을 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 7과 그림 8에 잘 설명되어 있다. 그림 7과 그림 8은 각각 정방향 및 역방향에서 타격을 가했을 경우 0.02, 0.04, 0.05 그리고 0.09초 후에 파가 전파되는 형상을 나타낸 것이다. 그림 7-(a)의 경우 구형 형태의 체적파는 하부 층으로 전파된 반면, 에너지가 많이 분포되어 있는 표면파는 충분히 발현되지 않아 상부 층에서만 전파가 이루어짐을 볼 수 있다. 그림 7-(b)에서는 파는 상부 층의 표면을 따라 전파되는 파와 하부 층을 따라 전파되는 파로 구분되어짐을 볼 수 있고, 그림 7-(c)에서는 상부 층과 하부 층의 표면파가 서로 다른 속도로 전파됨을 볼 수 있다. 그림 7-(d)에서는 하부 층으로 전파된 파는 이미 해석모델 바깥으로 전파되어 보이지 않지만, 상부 층을 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

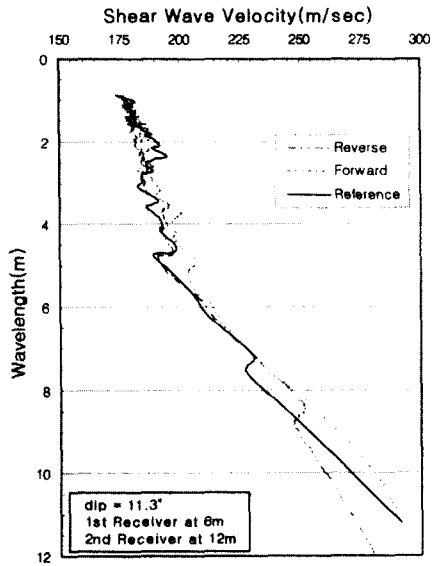


그림 5. 지반의 기울기가 11.3° 일 경우 해석결과

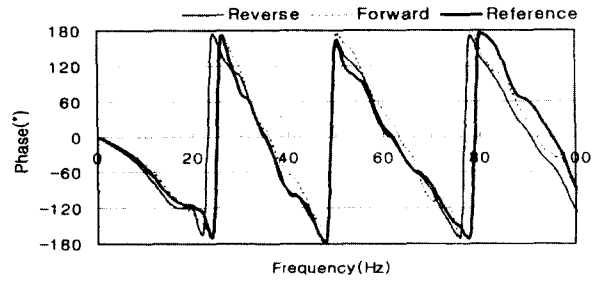
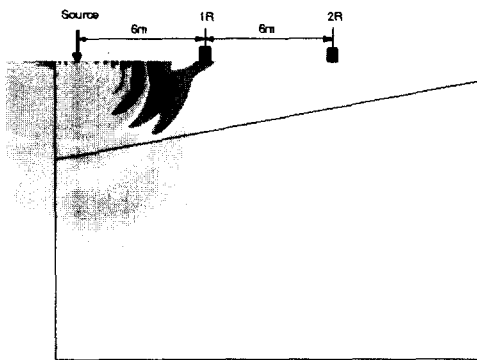


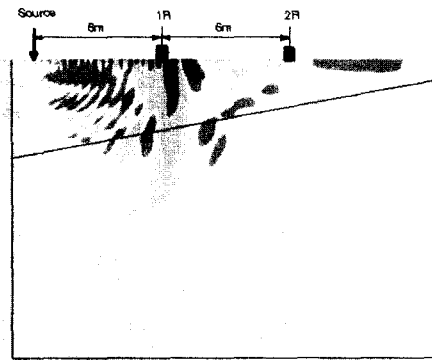
그림 6. 기울어진 지반 및 수평 지반의 위상각 차이

하부 층에서 빠르게 전파됨을 알 수 있다. 따라서, 정방향의 경우 상부 층과 하부 층의 물성이 분산곡선에 효과적으로 반영됨을 알 수 있다.

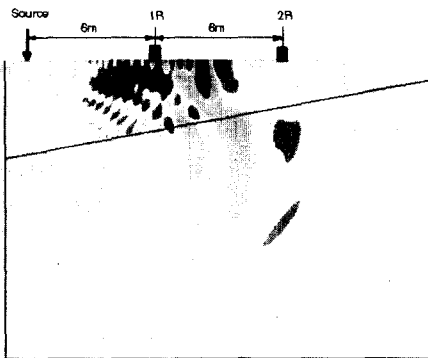
그러나, 그림 8의 역방향 시험의 경우 가진원에서 발생된 대부분의 파는 이질층의 경계면에서 하부 층으로 굴절되지 못하고 대부분 상부 층 쪽으로 반사를 일으켜 속도가 느린 상부 층에서 전파됨을 볼 수 있다. 특히, 그림 8-(b), (c), (d)의



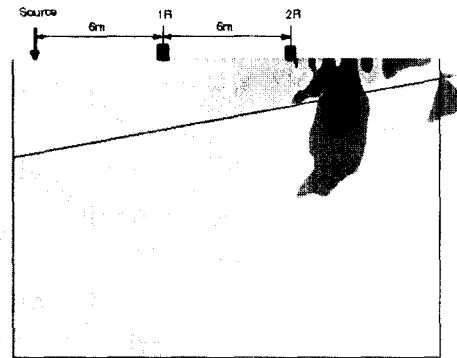
(a) 타격 후 0.02초 후의 전파형상



(b) 타격 후 0.04초 후의 전파형상

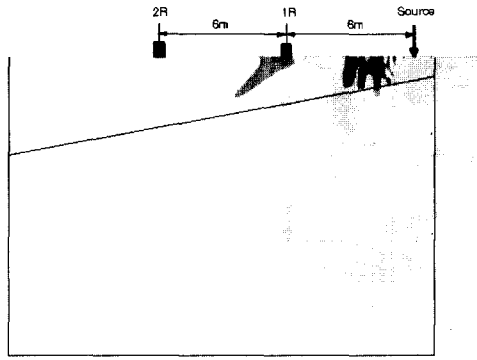


(c) 타격 후 0.05초 후의 전파형상

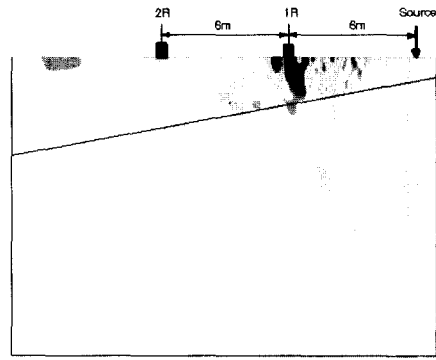


(d) 타격 후 0.09초 후의 전파형상

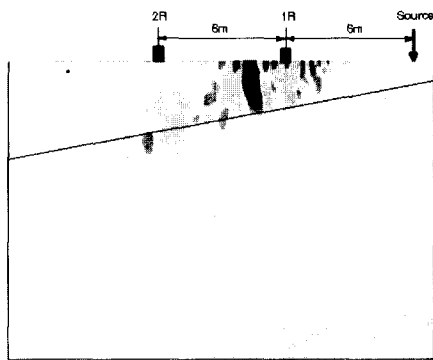
그림 7. 정방향 시험시 파의 전파형상(기울기=11.3° )



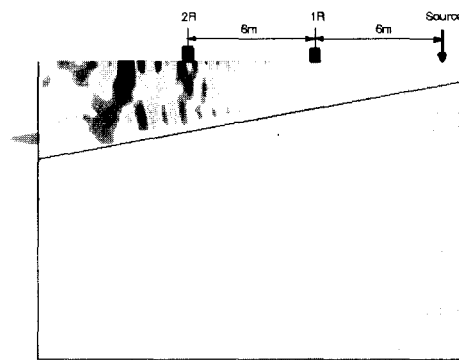
(a) 타격 후 0.02초 후의 전파형상



(b) 타격 후 0.04초 후의 전파형상



(c) 타격 후 0.05초 후의 전파형상



(d) 타격 후 0.09초 후의 전파형상

그림 8. 역방향 시험시 파의 전파형상(기울기=11.3°)

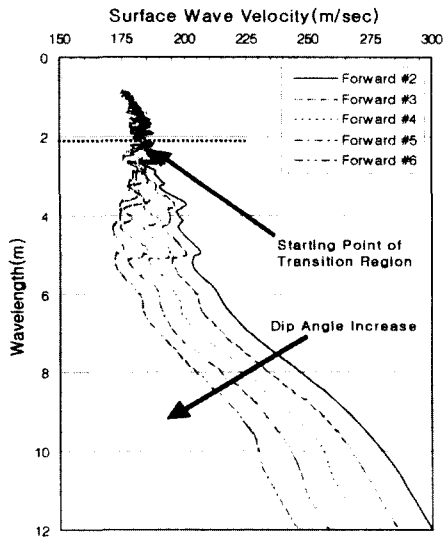
경우 대부분의 전파 에너지는 상부 층에서만 발생함을 확연히 보여주고 있다. 이는 파의 전파형상이 실린더 형태로 전파되지 않고 경계면에서 파의 반사와 산란이 파의 전파에 중요한 영향을 미치는 것을 의미한다. 따라서, 역방향의 경우 전단파 속도가 느린 상부층의 영향이 더 커지게 되고, 상대적으로 하부 층의 영향이 작아지게 되어 그림 5와 같이 실험 분산곡선의 깊은 깊이에서 정방향의 결과보다 작게 나타난 것으로 분석된다.

그림 7과 그림 8의 경사진 지반에서 파의 전파형상에서 볼 수 있듯이, 본 연구결과 정방향과 역방향 시험에서 탄성 파의 전파경로가 전혀 다름을 알 수 있고, 경사진 지반에서 파의 전파형상은 수평지반에서 파의 전파형상과도 전혀 다름이 밝혀졌다. 따라서, 그림 5의 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.

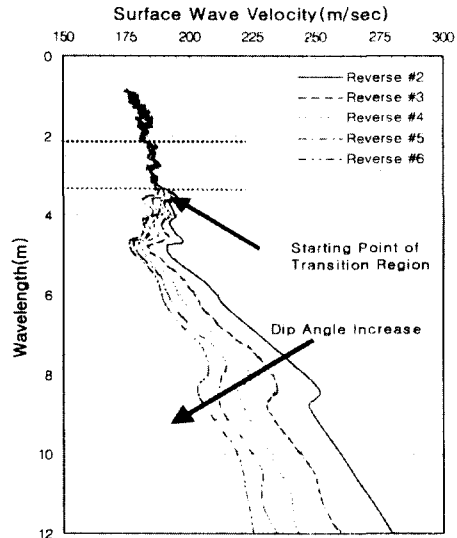
그림 9는 경사진 지반에서 가진원이 정방향 및 역방향에 위치했을 경우 표 2에 나타난 바와 같이 지반의 기울기 증가에 따른 실험분산곡선의 변화를 나타내었다. 그림 9의 결과를 살펴보면 두 가지 중요한 경향을 발견할 수 있다. 첫째는 지반의 기울기가 증가함에 따라 정방향과 역방향 시험의 실험분산곡선이 뚜렷하게 감소하는 것이고, 둘째는 양방향 시험에서 표면파 속도가 급격히 증가하는 천이구간(transition region)의 시작점이 현저하게 다른 점이다.

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 층물성의 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 9의 결과를 살펴보면 천이구간의 시작점이 정방향

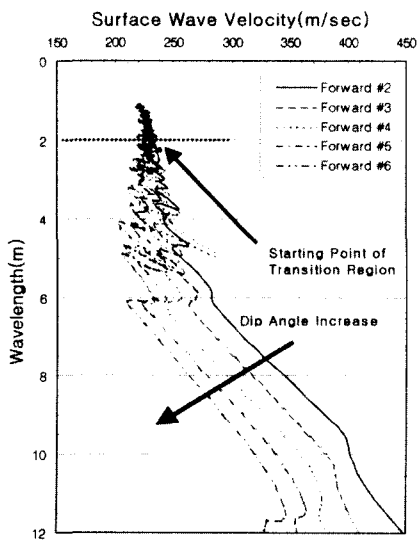


(a) 정방향시험

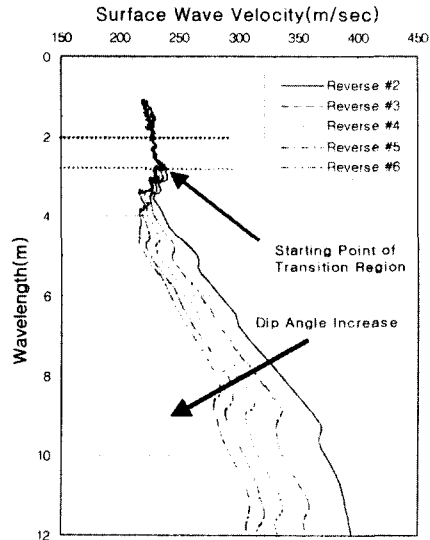


(b) 역방향 시험

그림 9. 경사진 지반에서 해석결과



(a) 정방향시험



(b) 역방향 시험

그림 10. 지반-암반 예제의 해석결과

의 경우 파장의 길이 2m에 해당하는 깊이에서 나타나고, 역방향의 경우 파장의 길이 3.5m에 해당하는 깊이에서 발생한다. 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.

#### 4.2 지반과 암반으로 이루어진 예제에 대한 해석결과

그림 10은 상부 층이 느슨한 토사지반( $V_s=200\text{m/sec}$ )이고 하부 층은 보통암( $V_s=1000\text{m/sec}$ )으로 이루어진 지반에서 SASW기법을 시뮬레이션한 결과를 정리한 그래프이다. 본 예제 해석에 사용된 물성치는 표 1에 나타난 바와 같다. 그림 9의 결과와 마찬가지로 양방향 시험에서 지반의 기울기가 증가함에 따라 실험분산곡선이 감소하는 경향과, 천이구간의 시작점이 정방향보다 역방향 시험에서 더 깊은 곳에 위치하는 것을 알 수 있다. 그러나, 그림 9와 비교하여 정방향 시험의 경우 파장 2m에서 5m 사이에 해당하는 깊이에서

실험분산곡선이 요동을 치는 현상이 더 크게 나타나고, 그림 9의 역방향 시험에 대한 실험분산곡선에서 천이구간이 시작되는 깊이가 더 얕아졌다는 점이 특이하다.

일반적으로 파가 전파할 때 위상차이를 구할 경우, 파의 가진원은 동일한 것으로 가정한다. 그러나, 본 예제의 경우와 같이 이질층이 존재하여 그 경계면에서 파의 반사나 굴절이 발생하면 새로운 가진원이 경계면에 존재하는 것과 같은 효과가 있기 때문에 원칙적으로는 정확한 위상차이를 구할 수 없다. 따라서, 그림 10의 정방향 시험 실험분산곡선이 역방향 시험의 분산곡선보다 더 심한 굴곡이 생기는 이유는 이질층에서 강성도 차이에 의한 파의 반사 및 굴절에 의한 영향으로 판단된다. 이러한 결과는, 본 절의 지반-암반 예제가 4.1절의 토사지반의 예제보다 강성도 차이가 커 실험분산곡선상에 요동치는 모습이 더 크게 생기는 현상을 설명할 수 있고, 역방향 시험에서 천이구간의 시작점이 그림 9와 비교하여 볼 때 얕은 깊이에 존재하는 이유는 하부 층의 전단파 속도가 두 배 가량 증가하여 하부 층의 영향이 커졌기 때문인 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

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 지반에 서가진원의 위치에 따라 파의 전파특성이 달라지기 때문인 것으로 분석된다.

- (4) 본 연구에서는 상부 층과 하부 층의 강성도에 변화를 주면서 해석을 수행하였다. 해석결과 강성도의 차이가 클수록 실험분산곡선 및 위상각 차이의 분산이 더 심하게 생기는 현상이 발생하였다. 이는 상부 층과 하부 층의 강성도의 차이가 클수록 이질층의 경계면에서 파의 반사와 굴절에 의해 발생하는 새로운 파의 영향이 더 커지기 때문이다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

1. 김동수, 윤종구, 이병식, 박형준(2001), "SASW 기법에 대한 수치해석 적용성 연구" 한국지반공학회는논문집. 제17권 제1호 2001. 2. pp. 67~76
2. ABAQUS/Standard Ver. 5.7 User Manual, Finite element software package. Hibbit, Karlsson & Sorenson, Inc.
3. Lysmer J. and Kuhlemeyer, R. L.(1969), "Finite Dynamic Model for Infinite Media.", J. Eng. Mech 95(EM4), 859-877.
4. 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.
5. 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
6. 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.
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)