

러브파와 레일리파의 분산특성을 이용한 동시역산해석(II) - 동시역산해석기법의 검증 및 적용 -

Joint Inversion Analysis Using the Dispersion Characteristics of Love Wave and Rayleigh Wave (II) - Verification and Application of Joint Inversion Analysis -

이 일 화¹ Lee, Il-Wha
조 성 호² Joh, Sung-Ho

Abstract

Love wave and Rayleigh wave are the major elastic waves belonging to the category of the surface wave. Those waves are used to determine the ground stiffness profile using their dispersion characteristics. The fact that Love wave is not contaminated by P-wave makes Love wave superior to Rayleigh wave and other body waves. Therefore, the information that Love wave carries is more distinct and clearer than that of others. Based on theoretical research, the joint inversion analysis that uses the dispersion information of both Love and Rayleigh wave was proposed. Numerical analysis, theoretical model test, and field test were performed to verify the joint inversion analysis. Results from 2D, 3D finite element analysis were compared with those from the transfer matrix method in the numerical analysis. On the other hand, the difference of results from each inversion analysis was investigated in the theoretical model analysis. Finally, practical applicability of the joint inversion analysis was verified by performing field test. As a result, it is confirmed that considering dispersion information of each wave simultaneously prevents excessive divergence and improves accuracy.

요 지

러브파와 레일리파는 표면파로서 각 파가 가지는 분산특성을 활용하여 지반의 강성주상도를 파악할 수 있는 특징을 가지고 있다. 이 중 러브파는 한 방향에 대한 응력-변위만 고려하기 때문에 수치적 모델링이 간단하고 전파시에는 이론적으로 체적파의 영향 및 밀도의 변화가 없어 각 각의 물성치를 갖는 다층구조지반에서 적용성이 높다고 할 수 있다. 이러한 장점을 활용하여 러브파와 레일리파의 분산정보를 같이 이용하여 동시역산해석을 할 수 있는 기법이 제안되었다. 동시역산해석기법은 본 논문을 통하여 수치해석, 이론모델, 그리고 현장시험을 통하여 검증되었다. 수치해석에서는 2,3차원 유한요소해석과 전달행렬법의 결과를 비교하였고, 이론모델해석에서는 각 각의 역산해석에서의 결과를 서로 비교하여 검토하였다. 더불어, 현장에서 SASW시험을 수행하여 제안된 동시역산해석기법의 적용성을 검토하였다. 검토 결과, 각 표면파의 정보를 동시에 고려하는 것이 과도한 발산을 방지하고 해의 정확도를 향상 시키는 것으로 확인되었다.

Keywords : SASW, Joint inversion, Love wave, Rayleigh wave, Dispersion

1 정회원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute, iwlee@krii.re.kr)

2 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 부교수 (Member, Assoc. Prof., Dept. of Civil Engrg. Chung-Ang Univ.)

1. 서론

현재까지 토목분야에서 지반조사를 위한 표면파탐사에는 레일리파의 수직성분 즉, 전파방향의 수직운동에 대한 위상분산정보가 주로 이용되었는데, 이는 표면파 중 레일리파의 수직성분에너지가 가장 크기 때문이었다. 그러나 지층구조가 복잡하고 층간 강성차가 큰 경우, 포장구조체 등에서는 그 해상도가 낮아 역산(inversion) 해석시에 많은 어려움이 있었다. 해상도가 낮아지는 이유로는 고차모드가 저차모드에 영향을 미치는 모드점프 현상과 지반조사분야에서 사용되는 가진원의 에너지가 작고 가진원과 감진기와의 간격이 좁기 때문에 감쇠되지 않은 체적파에 의해 분산곡선상에서 오차가 발생하기 때문이다. 이러한 문제점을 보완하는 방법으로서 Passive SASW(Tokimatsu et al., 1992), Multi channel SASW(조성호와 강태호, 2000) 등이 연구되었으며, 본 논문에서도 이러한 문제점을 보완하기 위하여 수평표면파의 적용을 연구하였다. 수평표면파의 대표적인 종류로는 레일리파의 수평성분과 러브파가 있다. 이 중 러브파의 가장 큰 특징은 이론적으로 압축체적파 및 레일리모드에 의한 영향이 없다는 것이다. 이러한 장점을 표면파탐사에 도입하여 수평표면파의 주파수영역해석에 의한 동적지반물성치의 결정에 있어 그 신뢰도와 해상도 향상을 위한 시도를 하였다.

본 논문에서는 제안된 동시역산해석기법의 검증을 위하여 해석적 검토와 이론모델을 이용한 역산방법별 결과 검토 그리고 최종적으로 현장시험을 통하여 동시역산해석기법의 적용성을 검토하였다.

2. 동시역산해석을 위한 SASW시험

동시역산해석을 위한 현장시험은 기존 SASW시험(Joh, 1996)과 유사하게 수행되며 러브파에 대한 시험이 추가된다(그림 1). 단, 동시역산해석을 위해서는 각 표면파에 대하여 동일한 위치, 동일한 감진기 간격 및 동일한 주파수 범위에 대하여 시험을 수행한다. 러브파는 레일리파에 보다 에너지가 작기 때문에 장파장성분에 대한 충분한 자료를 획득하기 위해서는 고감도 수평속도계를 사용하는 것이 유리하다.

순서는 현장시험을 통하여 측정된 실험분산곡선(experimental dispersion curve)을 이용하여 대표분산곡선(averaged dispersion curve)을 결정하고 이를 역산해석에

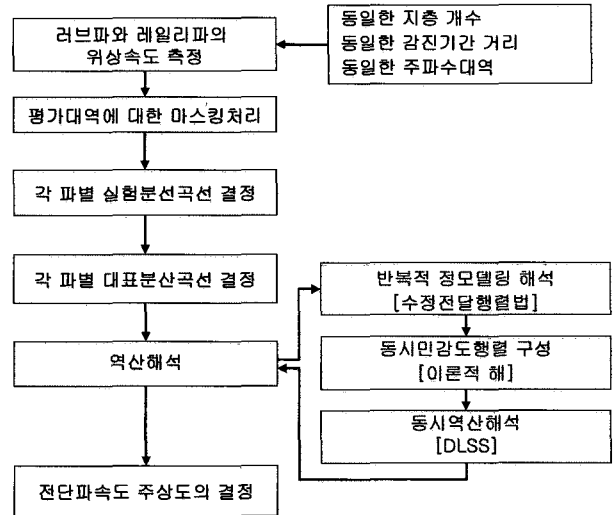


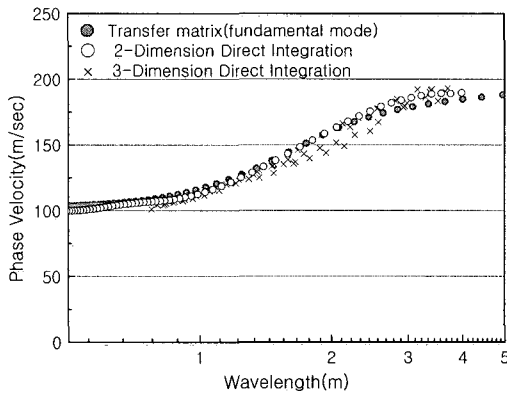
그림 1. 동시역산해석을 위한 SASW시험의 순서도

서 사용한다. 역산해석은 반복적 정모델링해석(forward modeling analysis), 동시민감도행렬(jointed sensitivity matrix) 그리고 역산해석(inversion analysis)의 단계를 거친다. 본 논문에서는 정모델링시 이론분산곡선의 계산은 수정전달행렬법(Tzong & Pezien, 1983)을 이용하였으며, 역산해석에서는 Damped Least Square Solution (DLSS)을 사용하였다. 러브파와 레일리파의 분산특성은 민감도행렬 구성시 동시에 고려되며, 역산해석을 위해 계산된 모델변수(model parameter)는 러브파와 레일리파에서 동일하게 적용된다. 역산 해석의 결과가 합리적인지는 실험치와 이론치 사이의 RMS(root mean square)오차를 이용하여 판단하는데 오차를 만족하지 않으면 반복계산별 러브파와 레일리파의 동시민감도행렬을 다시 구성하고 역산해석을 수행한다. 역산해석의 결과에 따라 모델변수를 변화시켜가면서 최종 RMS오차가 허용치 이내가 될 때까지 계산을 반복한다.

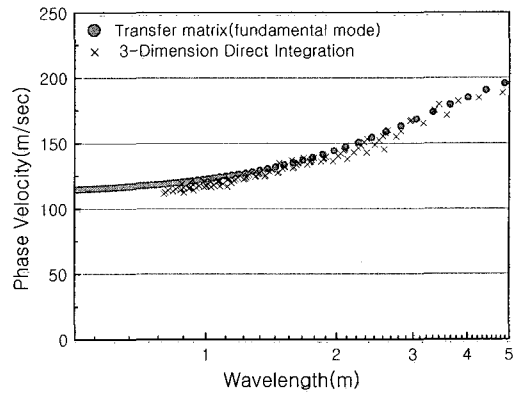
3. 이론분산곡선의 비교

정모델링해석에 사용되는 수정전달행렬법의 검증을 위하여 수치해석적 방법을 통하여 표면파의 분산특성을 비교하였다. 해석에서는 상부층의 두께가 0.5m이고 전단파속도가 110m/sec, 하부반무한층은 전단파속도가 220m/sec인 지반모델을 이용하여 전파특성을 검토하였다. 사용된 물성값은 단위중량 1.7t/m³, 포아손비 0.33이다. 해석은 시간영역에서의 해석법 중 안정성이 높은 Newmark-β법을 사용하였다.

그림 2(a)는 레일리파에 대하여 전달행렬법으로 구한



(a) 레일리파의 경우



(b) 러브파인 경우

그림 2. 해석기법별 표면파의 분산특성

이론해(fundamental mode)와 2, 3차원 유한요소해석으로 수행한 결과를 비교한 그림이다. 2차원 유한요소해석의 경우 이론해와 일치하는 것으로 나타났으며, 3차원해석의 결과도 해석조건에 따른 일부영역을 제외하면 유사한 결과를 나타내었다. 3차원 해석결과는 6개의 배열 조건(1m:2m, 1m:3m, 1m:4m, 2m:3m, 2m:4m, 3m:4m)을 마스킹처리한 복합분산곡선을 나타내고 있다. 파장이 0.8m(125Hz)까지는 약 100m/sec부근에서 완만한 속도의 증가를 보이다가 그 이상에서는 200m/sec의 값까지 증가하게 된다. 2차원해석의 경우, 표면파의 파장이 0.8m까지는 100m/sec의 일정한 위상각속도를 보이고 그 이후에서는 위상각속도가 200m/sec까지 증가한 후, 일정해지기 때문에 상부층에 대한 정확한 표현이 가능하지만, 3차원해석에서는 해석조건 때문에 민감도가 감소하는 것으로 계산되었다.

그림 2(b)는 러브파 성분에 대한 분산곡선을 나타내고 있다. 해석모델은 레일리파의 해석모델과 동일한 조건이다. 러브파의 경우에도 레일리파와 유사한 분산특성을 나타내며, 주파수별 위상각속도의 값은 전단파속도와 같은 범위를 가진다. 전달행렬법으로 구한 이론해와 비교한 그림에서 해석조건에 따른 일부영역을 제외하면 유사한 결과를 나타내었으며 수치해석상 위상각속도측정에 있어 횡단성분을 이용한 분산곡선이 레일리파보다 추종성이 다소 뛰어난 것으로 나타났다.

유한요소해석 결과는 대부분의 해석영역에서 이론해와 일치하는 것으로 나타났으나 0.8m 이하의 단파장 영역과 4m 이상의 장파장 영역에서는 경계조건이나 적분 시간간격에 의한 차이가 발생하였다.

4. 이론모델을 이용한 동시역산해석

4.1 이론 모델

본 논문에서 제안한 동시역산해석기법에 대한 검증을 위해 그림 3과 같은 이론모델을 이용하여 정확도를 평가하였다. 이론모델은 두께 2m의 상부 2개 층과 하부 반무한체로 구성하였으며, 각 층의 물성치는 전단파속도만 차이가 있으며 나머지는 같은 값을 사용하였다. 사용된 주파수대역은 5~23Hz이며 민감도행렬을 구하기 위한 섭동(perturbation)계수(Joh, 1996)는 1×10^{-5} 을 사용하였다. 역산해석에서는 각 파의 탁월모드(fundamental mode)만 이용되었다.

4.2 해석 결과

역산해석은 러브파만 이용한 경우, 레일리파만 이용한 경우 그리고 두 개의 파를 같이 이용한 동시역산의 경우로 구분하였다. 역산해석의 위한 초기가정치는 그림 4에서와 같이 상부층으로부터 130, 150, 400m/sec이

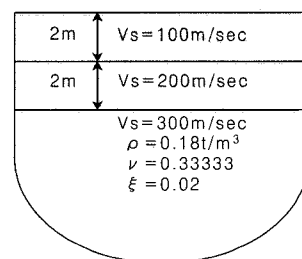


그림 3. 이론해석을 위한 수치모델

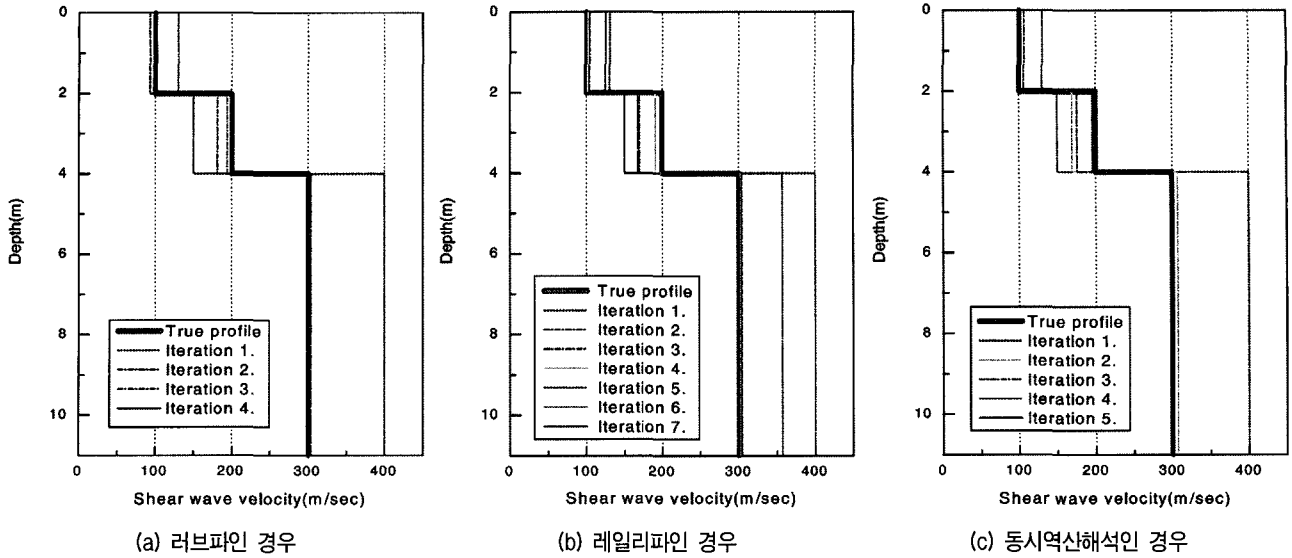


그림 4. 해석조건별 역산해석 결과

고 층두께는 이론모델과 동일한 두께를 사용하였다. 러브파를 이용한 역산해석 결과, 4회의 반복계산을 통하여 RMS오차값은 0에 수렴하였으며 해석시간도 상당히 빨랐다. 이는 러브파의 정모델링시 한 방향에 대한 운동 방정식과 특성방정식을 고려하면 되기 때문이다. 레일리파도 러브파와 같은 층두께와 초기모델변수가 사용되었으며 정모델링시 분산특성을 결정하는 루틴만 다르다. 레일리파에 대한 해석시는 RMS오차가 0으로 수렴할 때까지는 7번의 반복계산이 수행되었다.

동시역산해석에서도 같은 층두께와 초기모델변수가 사용되었으며 역산해석시 러브파와 레일리파의 분산정보가 같이 포함된 동시민감도행렬[G]을 이용하였다. 동시역산해석을 통하여 새로운 모델변수(m)를 구하기 위해서는 위상속도의 차(Δd)가 민감도행렬 구성시 러브파와 레일리파에 대하여 동일하게 적용된다. 동시역산 해석시 RMS오차가 0으로 수렴할 때까지는 5번의 반복계산이 수행되었으며 반복계산시 전단파속도값의 소수점 이하를 고려하지 않았다.

4.3 반복계산별 RMS오차

그림 5는 그림 3의 이론모델을 이용하여 각 역산해석별 반복계산의 횟수와 각 반복계산시의 RMS오차를 나타낸 그림이다. 이론모델조건을 이용한 검증 결과, 레일리파보다 러브파가 해의 수렴속도가 빠르고 반복계산 횟수도 작은 것으로 나타났다. 레일리파의 경우 세번째 반복계산에서 RMS오차가 다시 증가하다가 네번째 반

복계산부터 감소하는 것을 볼 수 있는데, 지반의 전단파 속도의 차이가 클 경우, 즉 층 강성이 구분되어 있을 경우에는 레일리파가 하부지층의 강성변화에 민감하기 때문에 변동(RMS오차의 증가)이 발생한 것으로 판단된다. 실제 현장시험자료를 이용한 역산해석에서 RMS오차가 다시 증가하는 경우, 수렴하지 못하고 발산하는 경우가 많다. 반면에 러브파의 경우는 반복횟수에 따라 점진적으로 RMS오차가 감소하는 것을 알 수 있다.

동시역산해석을 수행한 경우, 반복계산은 5회가 수행되었는데, 러브파보다는 1회가 많고 레일리파보다는 2회가 적은 횟수이다. 해석모델조건에 따라 반복계산의 경향이 바뀔 가능성이 있지만, 그림 3의 해석조건일 경우, 동시역산해석기법을 사용하는 것이 레일리파만 사용했을 때 보다 반복횟수를 감소시켰고, 수렴도도 높았다. 이는 러브파 전달행렬 구성의 간편성과 각 파의 주 파수대역별로 민감도 차이가 반영되었다고 할 수 있다.

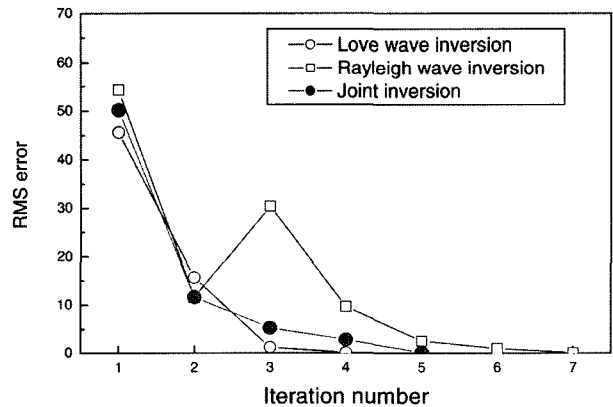


그림 5. 반복역산해석별 RMS오차의 비교

5. 동시역산해석의 현장적용

5.1 현장시험 개요

러브파와 레일리파 동시역산해석의 검증을 위하여 현장시험을 수행하여 그 적용성을 검토하였다. 시험현장은 Multi-Channel Tomographic SASW시험(조성호 & 강태호, 2000)을 수행한 현장으로 같은 위치에서 러브파와 레일리파를 이용한 SASW시험을 각각 수행하였다. 각 해석조건은 레일리파만 이용한 경우, 러브파만 이용한 경우 그리고 동시역산해석을 한 경우의 결과를 비교하였다. 시험 현장은 산악지역이며, 정상부근의 구릉으로 약 100m이상의 평탄한 부지가 확보되어 있었다. 그림 6은 인접한 시추공에서의 시추주상도이다. 지표면에서 0.5m까지는 일반적인 붕적층이며, 그 아래 5.0m까지는 조밀한 풍화토이다. 5.0m부터는 파쇄대가 발달된 연암층으로 절리와 풍화가 심한 층이다. 시추조사위치가 시험위치와 다소 떨어져 있는 관계로 시추조사 결과는 현장지반의 개략적 경향을 파악하는데만 사용되었다. 그림 7은 시험현장에서 측정된 2차원 시험 결과인데, 시험 위치가 그림에서 화살표로 표시된 구간으로 다른 구간에 비하여 복잡한 지반구조를 가진 것을 알 수 있다.

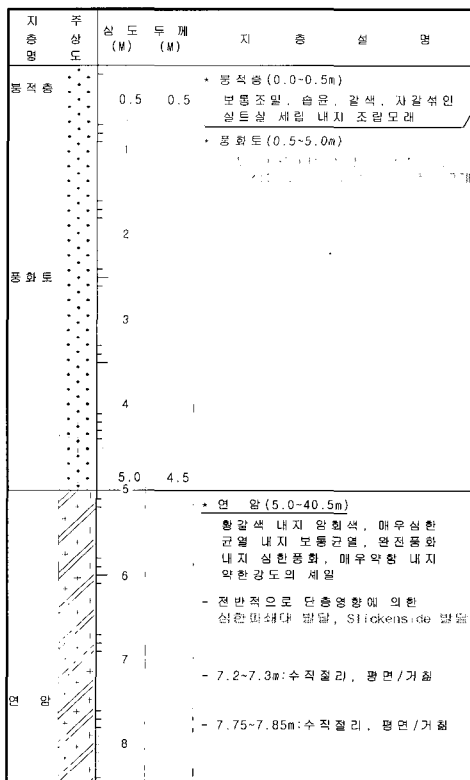


그림 6. 현장지반의 시추주상도

5.2 시험구성

현장시험은 같은 구간에서 러브파와 레일리파를 각각 측정하였으며, 가능한 깊은 심도까지 측정을 수행하였다. 채택한 감진기간 거리, 설정한 주파수 대역과 예상되는 해석심도를 표 1에 정리하였다.

5.3 표면파의 가진 방법

레일리파를 이용한 표면파시험에서의 가진방법은 수직방향의 지반운동을 이용한다. 레일리파는 수직방향 가진 원으로부터 얻은 파 중 가장 큰 에너지를 가지고 있기 때문에 여기서 얻은 위상각차를 레일리파의 위상각차라고 판단한다. 레일리파는 에너지가 가장 크기 때문에 햄머 등을 이용한 수직가진으로 쉽게 파를 발생시킬 수 있다.

현장에서 러브파를 발생시키기 위해서는 횡단방향(transverse direction)으로 가진을 하여야 한다. 이를 위하여 다양한 방법을 사용할 수 있는데, 주로 전파방향의 횡단방향으로 지반을 타격하며, 연직타격을 통하여서도 러브파의 정보를 얻을 수는 있다. 이상적인 방법은 횡단가진이 가능한 대형재하장비를 사용하거나 재하판과 지반사이의 미끄러짐을 방지하기 위하여 못이나 핀 등으로 고착시킨 후 횡단방향으로 직접가진 또는 비틀(torsional)가진을 하는 방법이 있다. 이러한 방법은 이론적으로 압축파와 SV파의 발생을 최소화시킬 수 있다.

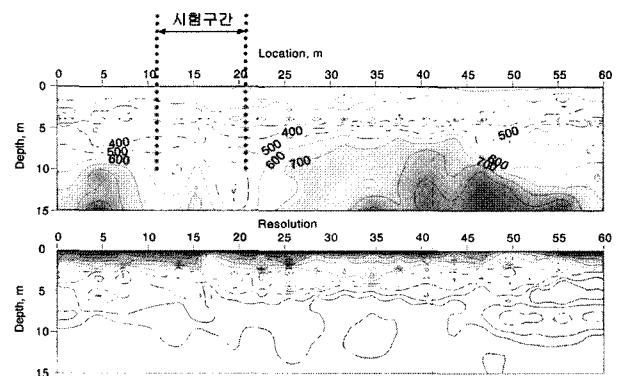


그림 7. MTSASW시험으로 구한 시험현장의 전단파 토모그래피

표 1. 동시역산해석을 위한 SASW시험조건

Receiver Spacing (m)	Frequency Span (Hz)	Expected Evaluation Depth (m)
0.8	3200, 1600, 800	1.0
1.5	800, 400	2.0
3	200	9.0
6	100, 50	18.0
12	100, 50	36.0

본 시험에서는 현장에서의 적용성을 높이기 위하여 아래 그림 8과 같은 가진판을 제작하여 현장에서 지반에 날을 삽입하여 비틀기진동을 하거나 횡단방향으로 타격하여 러브파를 발생시켰다. 현장측정 결과, 다양한 방향에서의 가진 즉 수직, 수평 및 횡단방향에서 가진을 하더라도 SH파에 대한 측정은 가능하였지만, 크기가 작아서 위상정보를 획득하기는 어려웠다. 그래서 지반조건 및 현장조건에 따라 가진방법을 다르게 적용하였으

며 주로 그림 8의 Case II 방법이 많이 사용되었다.

Case III은 감진기간의 간격이 넓은 경우, 중추(100kg)에 의한 낙하에너지를 얻기 위해 사용하였다.

5.4 러브파를 이용한 역산해석

러브파를 이용한 SASW시험의 감진기 위치는 가진원에서 1m, 2m, 4m, 8m, 16m이고, 감진기 간격은 1m,

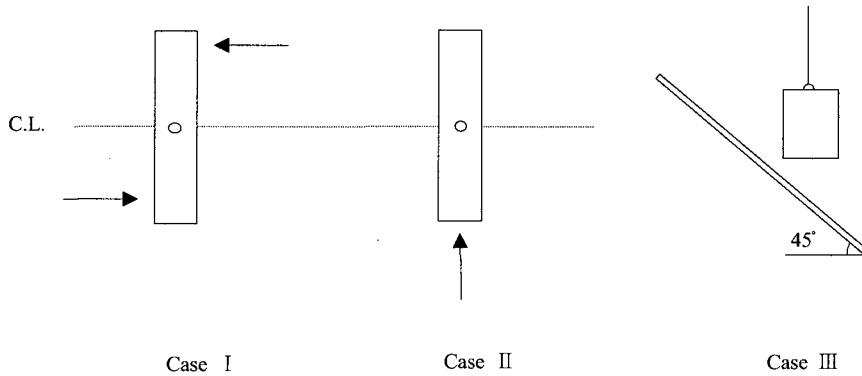
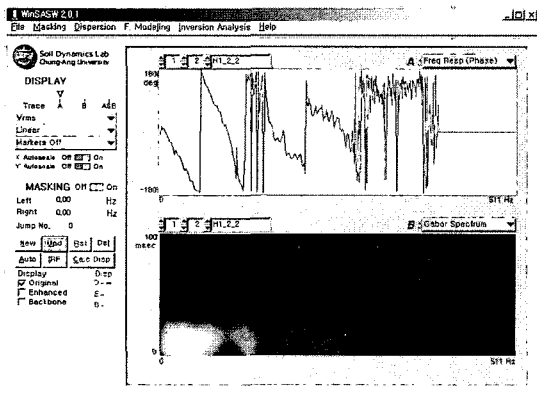
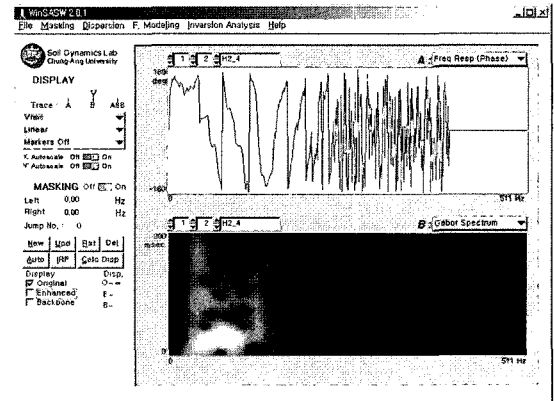


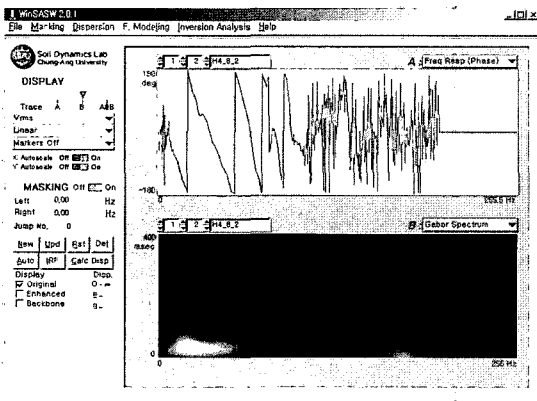
그림 8. 러브파의 가진 방법



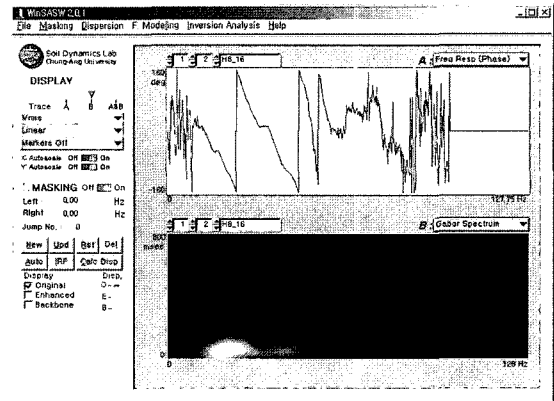
(a) 감진기 간격이 1m인 경우



(b) 감진기 간격이 2m인 경우



(c) 감진기 간격이 4m인 경우



(d) 감진기 간격이 8m인 경우

그림 9. 마스킹작업후의 위상스펙트럼과 거보스펙트럼

2m, 4m, 8m이다. 각 시험에 대하여 SASW Analyzer를 사용하여 분산곡선을 작성하였다. 각 감진기 간격별 위상스펙트럼과 거보스펙트럼이 그림 9에 제시되었다. 러브파에 대한 각 스펙트럼 결과를 보면 보편적인 레일리파의 전파특성보다 에너지의 집중도가 높은 것을 알 수 있다.

그림 9의 위상스펙트럼과 거보스펙트럼을 보면 감진기 간격이 1m, 4m, 8m일 때는 일반적인 경향이 보이지만, 2m인 경우에는 위상의 전개가 불규칙적이고 거보스펙트럼도 상당히 흐트러져 있는 것을 알 수 있다. 위상 전개의 불규칙성으로 해당 심도 지반의 프로파일이 복잡하다는 것을 유추할 수 있다. 거보스펙트럼에서도 다

른 감진기 간격과 달리 간격이 2m인 경우에는 신호가 퍼져서 감지되는 것을 알 수 있다. 다른 감진기 간격의 경우, 에너지가 집중되어 하나의 파그룹을 이루지만, 간격이 2m인 경우에는 전체 감진시간에 걸쳐 에너지가 분포한다. 이러한 경향은 경계층에서 발생한 반사파와 굴절파의 영향일 가능성이 크다.

그림 10은 각 감진기위치별 현장분산곡선을 나타낸 그림이다. 그림에서 6~8m 파장에서는 위상속도정보가 끊어지는 현상이 발생했는데, 지반의 불규칙한 프로파일때문인 것으로 판단된다. 현장시험시 장파장(8m이상) 성분에 대한 위상정보를 얻기가 어려웠는데, 이는 그림 8의 가진방법으로 수평성분파(러브파)에 대한 충분한 에너지를 발생시키는 것이 어려웠기 때문이다. 러브파의 장파장에 대한 위상정보를 얻기 위해서는 보다 큰 가진력이 필요할 것으로 판단된다. 러브파의 장파장 성분을 얻기 위한 가장 현실적인 방법은 불도저를 이용하는 방법이 가장 좋을 것으로 판단된다. 가진방향은 다르지만, 불도저 자체에서 발생하는 저주파 성분의 에너지가 크기 때문에 레일리파 및 러브파의 장파장 성분을 충분히 획득할 수 있다.

그림 10의 현장분산곡선으로부터 대표분산곡선을 구하기 위하여 WinSASW 2.0.1(조성호 & 강태호, 2000)을 사용하였다. WinSASW에서는 현장데이터처리를 위하여 IRF기법, 거보스펙트럼 등의 기법이 사용되지만, 결과의 비교분석을 위하여 필터링처리가 되지 않은 원자료를 사용하였다. 러브파의 역산해석을 위한 초기가정치중 전단파속도는 상부층으로부터 100, 200, 300, 400, 800m/sec이고 층의 두께는 상부층으로부터 1m, 1m, 2m, 3m, 그리고 반무한층으로 가정하였다. 총 7회의 역산해석이 수행되었으며, 4회부터 RMS오차가 10m/sec 부근으로 수렴되어 최종 RMS오차는 9.58m/sec이다. 그림 11에서 최종 전단파속도 주상도(iteration 7)를 보면 3번째 층이 2번째 층보다 전단파속도가 낮은 것으로 계산되어 러브파의 파동전파특성에 위배되지만, 최하부지층의 전단파속도가 크기 때문에 기본모드는 전체지반에 걸쳐 분산하는 것으로 나타난다. 하지만 러브파의 역산해석에서 그 차이가 크게 되면 정모델링계산이 어려워진다.

5.5 레일리파를 이용한 역산해석

레일리파를 이용한 SASW시험의 감진기 간격은 2m,

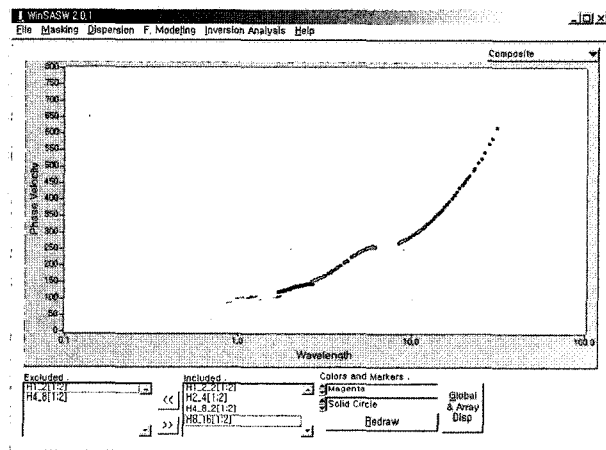


그림 10. 러브파를 사용한 경우의 현장분산곡선

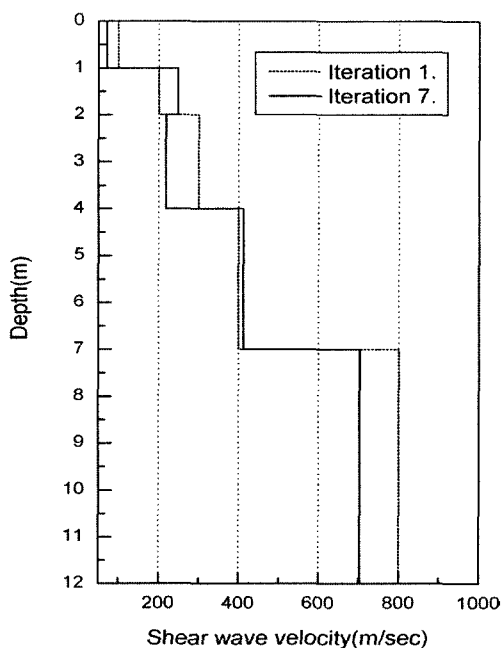
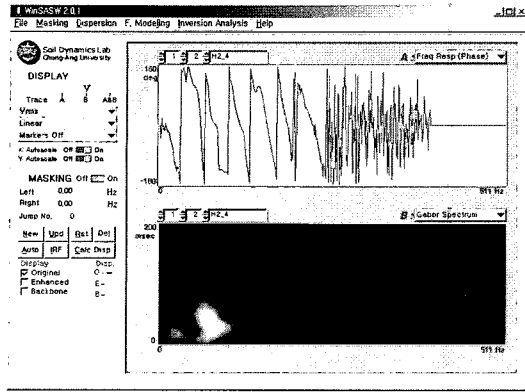
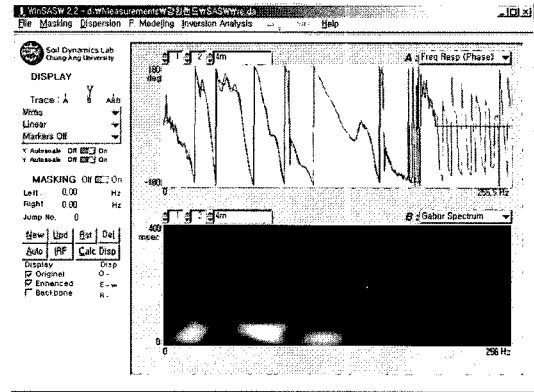


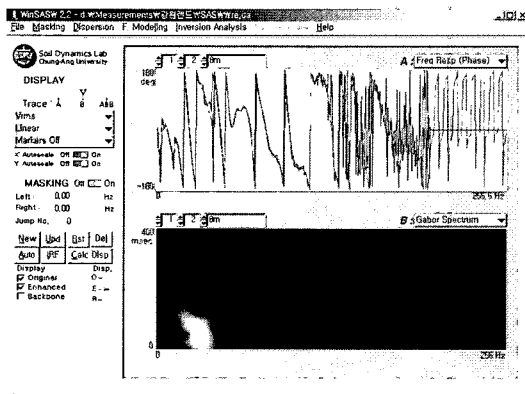
그림 11. 러브파를 사용한 경우의 전단파속도 주상도



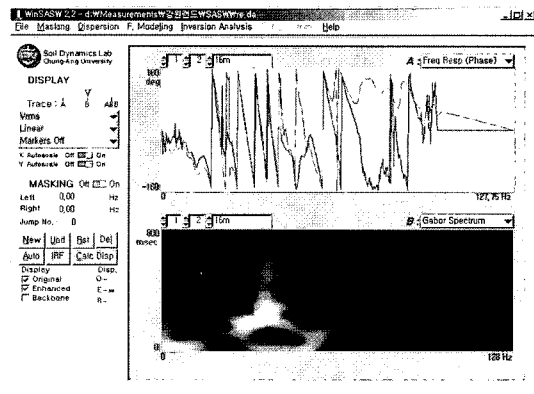
(a) 감진기간격이 2m인 경우



(b) 감진기간격이 4m인 경우



(c) 감진기간격이 8m인 경우



(d) 감진기간격이 16m인 경우

그림 12. 마스킹작업후의 위상스펙트럼과 거보스펙트럼

4m, 8m, 16m, 32m이지만, 러브파의 역산해석에 사용된 주파수대역과 유사하게 하기 위하여 대표분산곡선에서 주파수대역을 조정하였다. 사용된 주파수대역은 15~130Hz이다. 각 거리에 대하여 각각 SASW Analyzer를 사용하여 분산곡선을 작성하였으며 각 감진기 간격별 위상스펙트럼과 거보스펙트럼이 그림 12에 제시되었다. 러브파의 위상 및 거보스펙트럼과 비교해 보면 신호의 민감도가 상당히 떨어지는 것을 알 수 있다. 위상스펙트럼에서는 사용이 어려운 주파수대역이 있어 대부분의 경우에 마스킹처리가 되었으며 거보스펙트럼에서도 에너지 그룹이 나뉘어져 있거나 집중도가 떨어지는 것을 알 수 있다.

대표분산곡선은 WinSASW 2.0.1을 사용하였다. 사용된 위상스펙트럼의 정보는 러브파와 동일하게 필터링 처리가 안된 원자료를 사용하였다. 그림 13은 각 감진기 위치별 현장분산곡선을 나타낸 그림이다. 러브파의 현장분산곡선과 비교할 때 저주파대역에서부터 고주파대역까지 고른 분포를 보이고 있다. 이는 레일리파의 에너지가 러브파보다 크고, 장주기성분을 획득하기 위하여

고중량의 충격하중을 사용하였기 때문이다.

레일리파도 러브파와 동일한 충두계와 초기가정치가 사용되었다. 레일리파 역산해석결과의 RMS오차는 22.29m/sec로 러브파의 RMS오차보다 2배 이상 증가되었다. 그림 14의 전단파속도 추상도를 보면 3번째 층이 2번째 층보다 전단파속도가 약 30%정도 낮은 층이 있는 것으로 계

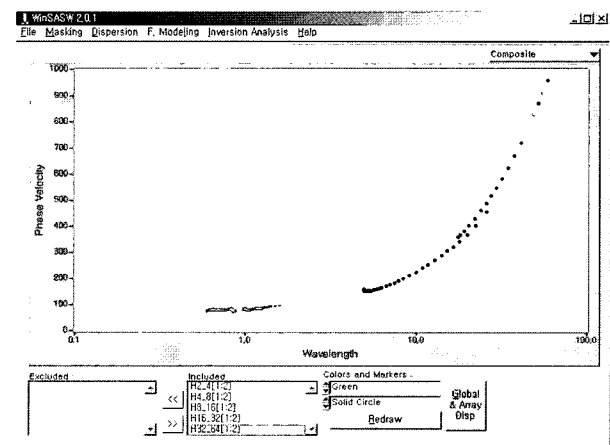


그림 13. 레일리파를 사용한 경우의 현장분산곡선

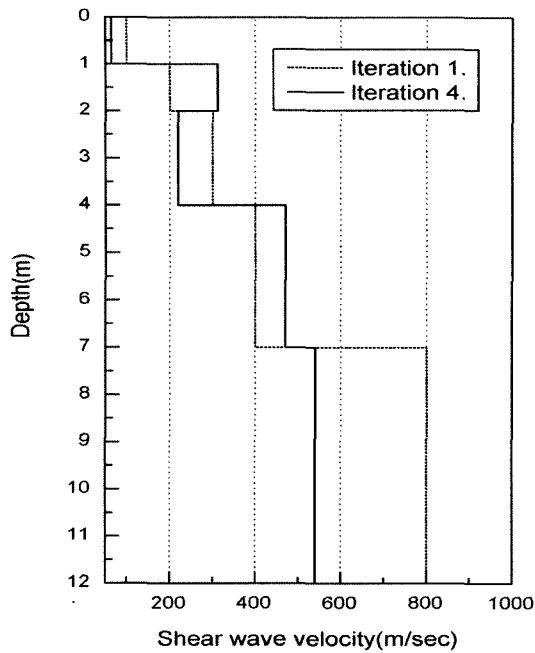
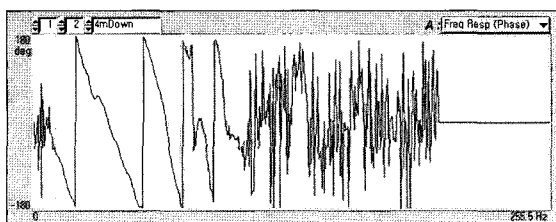


그림 14. 레일리파를 사용한 경우의 전단파속도 추상도

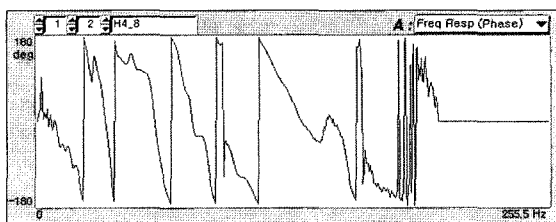
산되었다. 레일리파의 역산해석 수행시에는 역산결과가 수렴하지 않고 발산하는 경향이 컸다. 초기 가정치(층 두께와 전단파속도)에 따라 역산결과와 정확도가 크게 차이가 났는데, 초기값보다 과도하게 큰 결과값을 계산하는 경우가 있었다. 특히 반무한체의 전단파속도의 오차가 컸다. 그림 14의 결과에서도 4번째 반복역산 이후 발산하여 RMS오차를 더 이상 줄이지 못하였다.

5.6 동시역산해석

동시역산해석에서도 같은 층두께와 초기가정치가 사



(a) 러브파인 경우



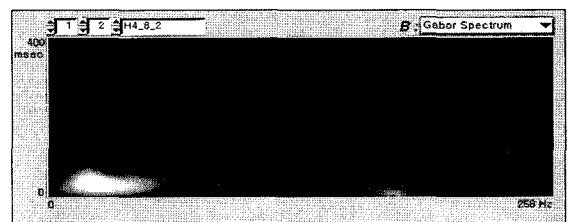
(b) 레일리파인 경우

그림 15. 위상스펙트럼(4m 간격)

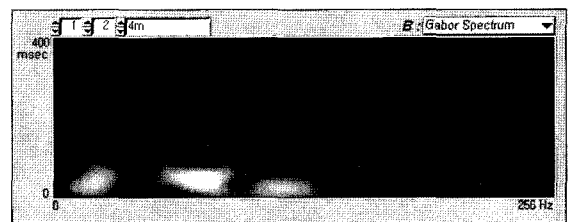
용되었으며 역산해석시 러브파와 레일리파의 민감도행렬을 동시에 이용하였다. 동시역산해석을 통하여 결정된 새로운 모델변수(m_i)는 정모델링시 러브파와 레일리파에 동일하게 적용되었다. 각 파의 감진기거리별 위상스펙트럼을 비교하면 다음 그림 15와 같은 현상이 발생한다. 감진기의 간격이 4m인 경우, 사용주파수의 대역은 20~75Hz인데, 러브파의 경우는 대역구간 전체를 사용할 수 있지만, 레일리파인 경우는 일부만 사용할 수 있다.

그림 16의 거보스펙트럼에서 러브파는 사용대역에 에너지가 집중되어 있지만, 레일리파의 경우에는 에너지가 분산되어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 각 파가 주파수별 또는 경계면의 위치에 따라 변위와 응력의 기여도가 다르기 때문이며, 지반조건에 따라 레일리파의 시험결과가 더 유리하게 계산될 수도 있다. 즉 동시역산해석시 사용가능한 주파수대역의 범위는 파의 종류, 지반조건 및 감진기의 간격에 따라 각기 달라진다고 할 수 있다. 이러한 현상은 동시역산해석을 통하여 보다 정확한 전단파추상도를 계산하기 위한 상호보완자료로 활용될 수 있다.

동시역산해석을 위하여 사용된 주파수대역은 러브파와 레일리파의 자료범위를 동일하게 하기 위하여 20~130Hz대역을 사용하였다. 그림 17은 동시역산해석결과와 함께 러브파 및 레일리파로 계산된 결과를 비교한 그림이다. 동시역산해석 결과는 러브파의 결과에 조금 더 추종적인 것으로 나타났으며, 레일리파만 사용한 역산해석보다 RMS오차가 감소한 것을 볼 수 있다. 7m까



(a) 러브파인 경우



(b) 레일리파인 경우

그림 16. 거보스펙트럼(4m 간격)

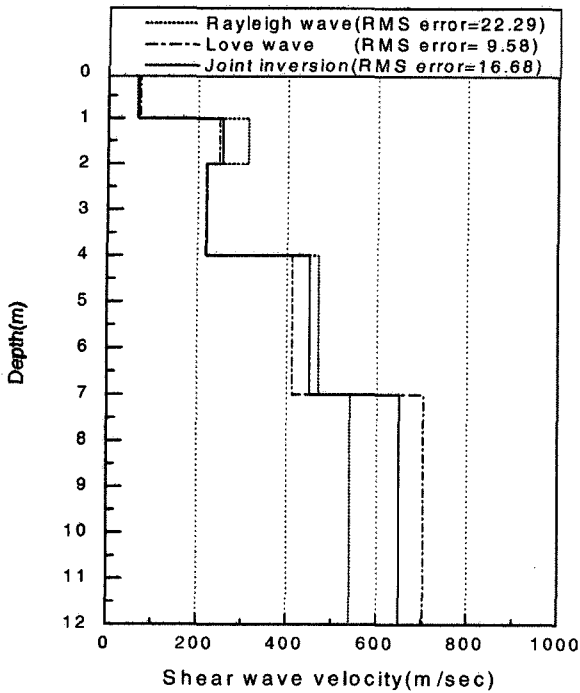


그림 17. 각 역산해석결과의 비교 전단파속도 추상도

지의 역산결과는 3개의 역산결과가 유사한 결과를 나타내고 있지만, 7m이하의 반무한체에서의 전단파속도는 역산방법에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. 그림 7의 MTSASW시험결과, 시험지역의 지형이 복잡하여 7m이하의 지반의 전단파속도가 400~600m/sec인 것과 비교할 때 깊은 지반에서는 레일리파의 역산결과가 더 정확한 것을 알 수 있다. 이는 현장분산곡선의 차이로 현장 측정시 동일한 위치에서 동일한 시점에 측정하여야 하지만, 따로 측정하면서 발생한 오차와 가진에너지의 크기 차이인 것으로 판단된다. 역산결과의 해상도 향상을 위해서는 현장측정시 세심한 주의가 요구된다.

6. 결론

제안된 동시역산해석기법의 적용성을 평가하기 위하여 이론적인 검증 및 현장시험을 수행하였다. 이론연구에서는 수정전달행렬법의 검증을 위하여 유한요소해석을 수행하였으며, 이론모델해석을 통하여 동시역산해석기법의 타당성을 검토하였다. 최종적으로는 현장시험을 수행하여 각 역산해석결과를 비교하였다. 평가 결과로부터 도출한 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 수정전달행렬법을 검토하기 위하여 2, 3차원 유한

요소해석을 수행하였다. 전달행렬법으로 구한 탁월 모드는 2차원 해석결과와는 동일하였으며, 3차원 해석결과와는 해석조건에 따른 일부영역을 제외하고는 유사한 결과를 나타내었다.

- (2) 이론모델을 이용한 역산해석에서는 러브파만 이용한 경우, 레일리파만 이용한 경우 그리고 두 개의 파를 같이 이용한 동시역산의 경우로 구분하였다. 동시역산해석을 수행한 경우에는 반복계산이 5회가 수행되었는데, 러브파보다는 1회가 많고 레일리파보다는 2회가 적은 횟수이다. 해석모델조건에 따라 반복계산의 경향이 바뀔 가능성이 있지만, 동시역산해석기법을 사용하는 것이 레일리파만 사용했을 때 보다는 반복횟수를 감소시켰고, 수렴도도 높았다. 이는 러브파 전달행렬 구성의 간편성과 각 파의 주파수대역별로 민감도 차이가 반영되었기 때문이라 할 수 있다.
- (3) 현장시험 결과, 각 파가 주파수별 또는 경계면의 위치에 따라 변위와 응력의 기여도가 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 즉, 동시역산해석시 사용 가능한 주파수대역의 범위는 파의 종류, 지반조건 및 감진기의 간격에 따라 각기 달라진다고 할 수 있다. 이러한 현상은 동시역산해석을 통하여 보다 정확한 전단파추상도를 계산하기 위한 상호보완자료로 활용될 수 있음을 확인하였다.
- (4) 시험지역의 지형이 복잡하여 정량적인 평가는 어렵지만, 동시역산해석 결과는 러브파의 결과에 조금 더 추종적인 것으로 나타났으며, 레일리파만 사용한 역산해석보다 수렴도가 우수하였고 RMS오차도 감소하였다. 하지만 심도가 깊어질 경우에는 레일리파의 역산결과가 더 정확한 것을 알 수 있었다. 이는 현장분산곡선의 차이로 현장 측정시 동일한 위치에서 동일한 시점에 측정하여야 하지만, 따로 측정하면서 발생한 오차와 가진에너지의 크기 차이인 것으로 판단된다. 본 논문에서 수행한 현장시험은 제한적이기 때문에 향후 보다 많은 시험을 통하여 자료를 확보하는 것이 필요하다.
- (5) 각 표면파는 주파수 대역별로 민감도가 다르기 때문에 동시역산해석을 수행할 경우에는 각 표면파의 정보를 동시에 고려하여 과도한 발산을 방지하고 해의 정확도를 향상 시킬 수 있는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 조성호, 강태호 (2000), “지반의 전단파속도 토모그래피영상을 구하기 위한 Multi-Channel Tomographic SASW (MTSASW) 기법”, 대한토목학회, 가을학술발표회 논문집, pp.387-390.
2. Joh, S.-H. (1996), *Advancement in the Data Interpretation and Analysis in the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method*, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
3. Tokimatsu, Kohji, Tamura, Shuji, and Kojima, Hisaya. (1992), “Effects of Multiple Modes on Rayleigh Wave Dispersion Characteristics”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 118/10, pp. 529-1543.
4. Tzong, T. J. and Penzien, J. (1983), “*Hybrid modelling of soil-structure interaction in layered media*”, Rep. No. UCB/EERC-83/22, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Calif.

(접수일자 2005. 4. 20, 심사완료일 2005. 6. 14)