

---

표면파 기법을 이용한 동적물성의 측정 및 공동검측  
(Measurement of Dynamics Properties and Detection of Voids  
Using the Spectral-Analysis-of-Surface-Wave Method)

우제운 (한국건설기술연구원, 지반연구실, 선임연구원)

---

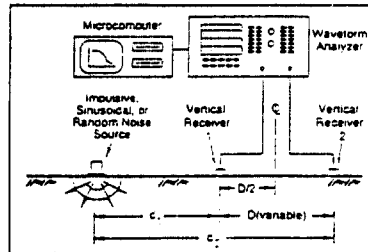
차 례

요 지

1. 서론
2. 표면파 기법
3. 실험
4. 실험 결과 및 분석
5. 결론

감사의 글

참고문헌



본 연구에서는 표면파 기법(SASW Method)이라고 불리는 일종의 탄성파 검측법을 이용하여 재료의 시간경과에 따른 강성도(stiffness) 변화특성과 공동(void)을 검출할 수 있는 실험적 기술을 연구하였다.

실험을 위하여 길이 10 피트, 폭 5 피트, 두께 20 인치의 콘크리트 슬래브를 제작하였으며 슬래브의 한 부분에는 폭 2인치의 정사각형 단면을 갖는 채널형상의 공동 두 개를 표면으로부터 공동 중심까지 깊이가 각각 2인치 및 4인치 되는 위치에 조성하였다.

콘크리트 슬래브의 상부 표면에 진동기와 진동감지기를 설치한 다음, 진동신호분석기를 이용하여 진동감지기에서 포착되는 표면진동파 신호의 주파수 특성함수로부터 표면파의 주파수 성분에 따른 전파속도 및 파장의 변화를 측정하였다. 양생 시간 경과에 따른 표면파의 평균 전파속도 변화를 효과적으로 산정할 수 있는 데이터 획득 및 분석 방법을 제시하였으며, 파장과 공동의 상대적 크기 및 측정점과 공동의 상대적 위치 변화에 따른 영향을 분석함으로써 공동의 존재 여부를 파악과 공동위치의 근사적 추정을 위한 데이터 분석 포맷을 제시하였다.

이와같은 연구결과로부터 표면파 기법이 재료의 시간경과에 따른 강성도 변화 특성의 파악과 공동이나 균열 등 각종 결함의 비파괴적 조사를 위한 원위치 시험법으로 사용될 수 있음을 밝혔다. 그러나 공동의 형상, 크기 등 보다 정밀한 공동특성의 규명을 위해서는 향후 많은 이론적·실험적 연구가 필요하다.

## 1. 서 론

표면파 기법은 수평다층체를 이루는 각 이질층들의 탄성물성(elastic properties) 및 성층구조를 비파괴적으로 결정할 목적으로 개발된 시험법이다. 이 시험법의 원리는 1950년대에 최초로 정립되어, 처음에는 일정한 주파수의 정상진동파(steady-state vibration)를 이용하는 시험법의 개발이 이루어졌다.(1) 이후 1980년대부터는 미국 텍사스 오스틴 대학의 연구팀을 중심으로 충격이나 무작위진동(random vibration)을 이용하고 진동파신호의 주파수 특성함수를 활용하여 시험의 경제성 및 정확도를 크게 개선시킨 획기적인 시험법이 개발되어 다양한 목적의 지반 및 포장체의 비파괴적 조사에 매우 실용성 높은 시험법으로 각광받고 있다.(2~27)

표면파 기법은 구조체의 어느 한 표면만이 노출되어도 시험이 가능하며, 검측공을 구조체 내부로 뚫을 필요가 없는 비관입적(nonintrusive)인 시험법이기 때문에 지반, 포장체, 구조물 등의 제반 비파괴조사(nondestructive test) 목적에 폭넓게 활용될 수 있는 잠재력을 갖고 있다. 그러나 지금까지 이 시험법은 주로 지반이나 도로포장체를 구성하는 각 이질층의 탄성계수를 추정할 목적으로 관련 실험기술이나 데이터 분석기법이 연구되어 왔고, 본 연구에서 다루고자 하는 바와 같이 재료의 시간에 따른 연속적인 강성도변화를 측정하거나 공동의 검측과 관련한 실험기술 및 이론적 연구는 극히 최근에 이르러서야 본격적으로 시도되고 있다.(22~27)

표면파 기법을 양생중의 콘크리트와 같이 시간에 따라 강성도가 변하는 재료에 적용하는데 따른 문제점은 양생 초기에 연약한 재료의 콘크리트 표면에 진동감지기를 견실하게 부착하는 문제, 적절한 주파수 성분과 진동에너지를 갖는 진동파를 효과적으로 유발·포착하는 문제 등으로 집약된다. 그리고 공동의 검측에 대해서는 우선적으로 관련 해석적(analytical)이론의 부재로 말미암아 감지기 간격, 진동점의 위치, 사용되는 진동파의 종류 및 주파수 성분의 영향, 또한 공동의 깊이·형상·규모 등과 같은 제반 변수의 영향에 대한 사전 예측이 어려운 것이 실험절차의 개발 차원에서 커다란 문제점이다. 한편, 진동파의 감지점이 구조체의 측면 등에 가까워 반사파의 영향이 클 경우에 반사파로 인한 교란 영향을 배제 또는 삭감시키는 문제도 중요한 사항이다. 최근 이러한 문제점의 해결을 위해 소수의 연구들이(22, 23) 수행된 바 있으나 아직까지 미숙한 상태라 할 수 있으며, 특히 공동의 검측에 대해서는 극히 개념적이거나(21), 효과적인 실험절차나 포괄적인 데이터분석을 결여한 연구수준에 머무르고 있어(23, 25), 보다 많은 연구가 필요한 실정이다.

한편, 표면파 기법과 관련한 실험기술로서 최근 괄목할 만한 기술개발이 이루어지고 있는 분야는 초음파(ultrasonic wave)수준의 매우 높은 고주파수의 압축파(compressional wave)를 이용하는 시험법들이 있다. 여기에 속하는 대표적인 시험법은 펄스반사법(Pulse-Echo 또는 Impact Echo Test), 펄스공명법(Pulse Resonance Test), 그리고 초음파법(Ultrasonic Pulse Velocity) 등이다.(28) 이들 시험법은 압축파를 이용하는 것이 표면파를 이용하는 표면파 기법과 다른 점이나 시험절차, 특히 데이터 분석과정에서 유사한 점이 많다.

그러나 이들 시험법은 하나의 측정점을 대상으로 하는 일점시험(pointwise test) 특성 때문에 시험시간이 많이 소요되는 것이 큰 단점이다. 표면파 기법은 두 개 이상의 측정점에 대하여 동시에 시험을 할 수 있고, 임의의 두 지점을 잇는 축선이 차지하는 지역을 대상으로 하는 지역적 시험이기 때문에 실험 소요시간을 크게 단축할 수 있다. 따라서 표면파 기법을 공동검측에 확대 적용할 수 있는 시험기술의 개발은 공동 검측실험의 경제성 증진 측면에서도 중요한 것이라 하겠다.

## 2. 표면파 기법

표면파 기법은 구조체의 표면에 진동을 가하여 탄성과 형태로 전파되는 표면진동파를 검출하여 매질의 탄성물성이나 성층특성을 비파괴적으로 결정하는 시험법이다. 탄성파에는 매질의 내부 깊숙한 곳까지 파에너지가 소멸됨이 없이 전파되는 관계로 체적파(body wave)로 분류되는 전단파(shear wave - S파)와 압축파(compressional wave - P파), 그리고 표면하 일정깊이 이하에서는 파에너지가 거의 소멸되는 관계로 표면파(surface wave)로 분류되는 레일리파(Rayleigh wave - R파)와 러브파(Love wave - L파) 등이 있는데, 표면파 기법은 이 중에서 표면진동파 에너지의 대부분을 차지하는 R파를 이용하는 시험법이다. 다음에는 표면파 기법의 이론적 배경과 시험장비, 시험절차 및 데이터 분석방법 등에 대하여 최근까지의 관련연구 성과를 종합 분석하여 개관한다.

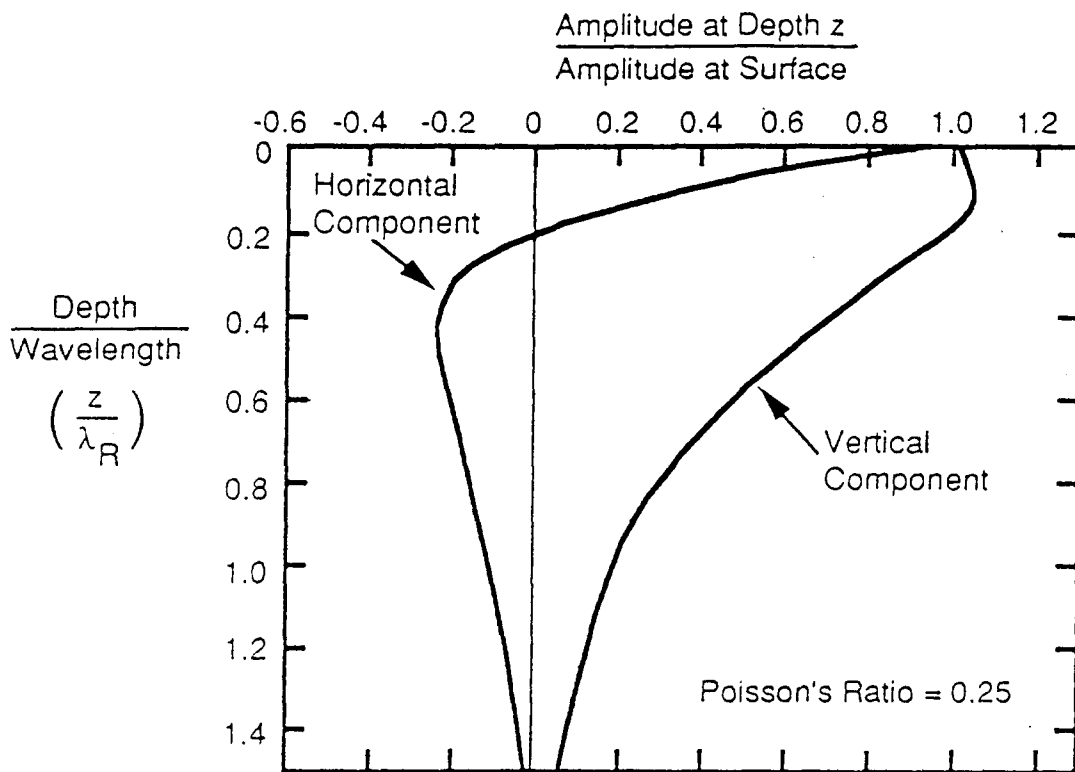
### 2.1 레일리파(Rayleigh Wave)의 특성

레일리파는 표면을 따라 전파되는 다른 탄성파에 비하여 월등하게 큰 파에너지를 수반하며 진동점으로부터 거리가 멀어짐에 따른 파에너지의 기하학적 감쇠(geometrical damping)도 다른 탄성파에 비하여 현저히 적다. 따라서 표면에서 감지되는 표면진동파는 사실상 R파에 의한 것으로 간주해도 무방하다. 표면파 시험은 이와같이 표면에서 가장 명확하게 검출할 수 있는 R파의 수직진동 성분을 검출하고 이 파의 독특한 주파수 특성 및 에너지 분포 특성을 활용하는 시험법이다.

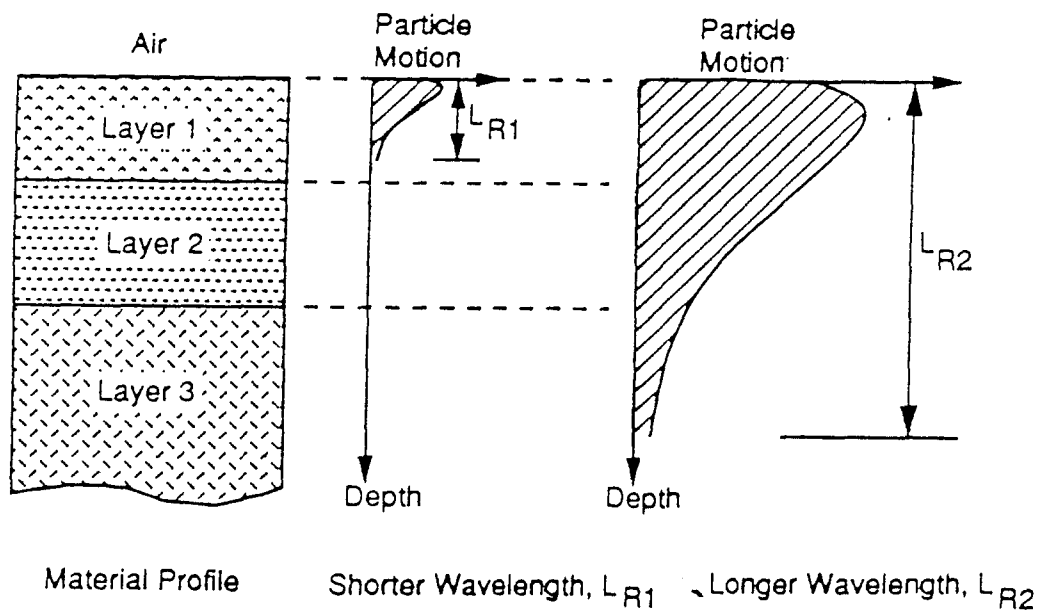
R파와 같은 표면파는 균질한 매체(homogeneous medium)에서는 파의 주파수 및 파장의 크기에 관계없이 일정한 속도로 전파되나 다층체(multi-layered medium)와 같은 비균질 매질에서는 전파속도가 주파수 또는 파장에 따라 변화한다. 이러한 특성을 분산(dispersive)특성이라 한다.

이와같은 R파의 분산특성은 R파 에너지의 깊이에 따른 에너지 분포특성과 밀접한 관계가 있다. 그림 1에는 R파에 의한 진동변위의 깊이에 따른 변화를 나타내었다. 그림에 보듯이 R파의 파에너지는 깊이가 증가함에 따라 지수함수적으로 급격히 감소하여, 파에너지의 대부분은 대략 한 파장 깊이내에 집중된다. 따라서 R파의 전파속도는 한파장 깊이내에 포함되는 매질의 물성에 큰 영향을 받게 된다. 파장이 변화하면 한 파장 깊이 내에 포함되는 매질들의 평균물성은 달라지므로 R파의 전파속도는 파장의 크기에 따라 변화하는 것이다. 그런데 파동이론으로부터 파의 전파속도는 파장과 주파수의 곱과 같으므로 R파의 속도는 주파수에 따라서도 변화하게 된다.

한편, 다층체와 같은 비균질 매체에서는 하나 이상의 진동모드(vibration mode)가 존재하므로, R파는 같은 주파수라 할지라도 진동모드에 따라서 전파속도가 다르다. 바꾸어 말하면 일정한 가진 주파수(exciting frequency)의 진동을 가하는 경우에도 상이한 진동모드에 속하는 R파의 전파속도는 서로 다르며, 따라서 파장의 크기도 상이하다. 이를 R파의 모드 특성이라고 하는데, R파의 전파속도 변화를 주파수-속도 또는 파장-속도의 좌표평면상에 나타내면 그림 2에 나타낸 바와 같이, 진동모드에 따라 변화패턴이 각기 다르고 서로 중첩되지 않은 일련의 특성곡선들이 형성된다. 이러한 특성곡선들을 분산곡선(dispersion curve)이라고 하는데, 주어진 주파수 또는 파장에 대하여 최소의 전파속도를 주는 곡선이 기본모드(fundamental mode)에 해당되며, 나머지 상대적으로 큰 전파속도를 주는 곡선들은 고차모드(higher mode)에 해당된다. 그림에서 보듯이 기본모드의 분산곡선은 모든 주파수 또는 파장영역에 걸쳐 존재하나, 고차모드의 분산곡선들은 주파수가 어느정도 이하로 되거나 또는 파장이 어느정도 이상이 되면 더 이상 존재하지 않는 특성을 갖는다. 이와같이 고

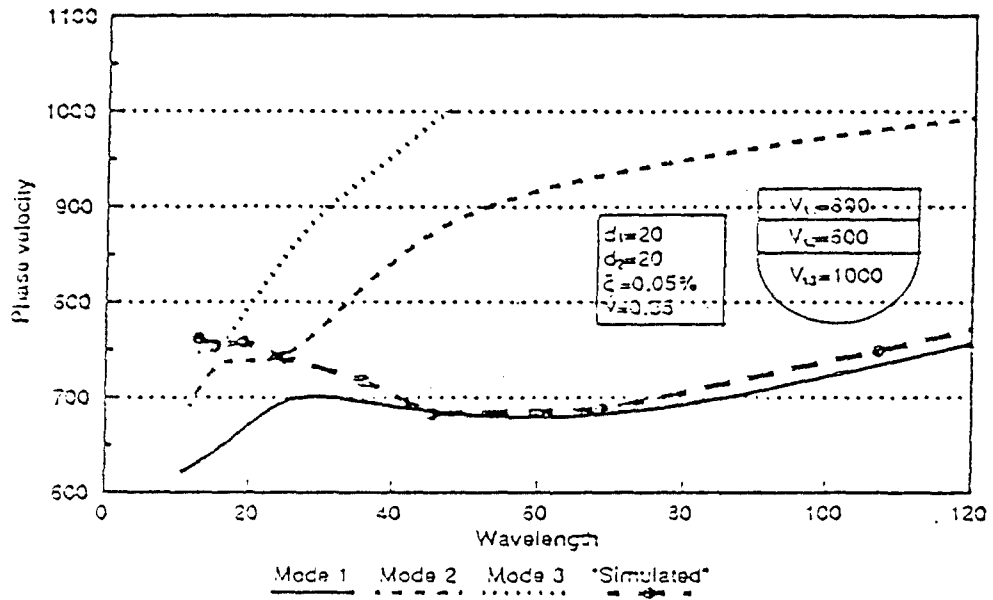


a. In a Homogeneous Medium, (after 23 from 33)

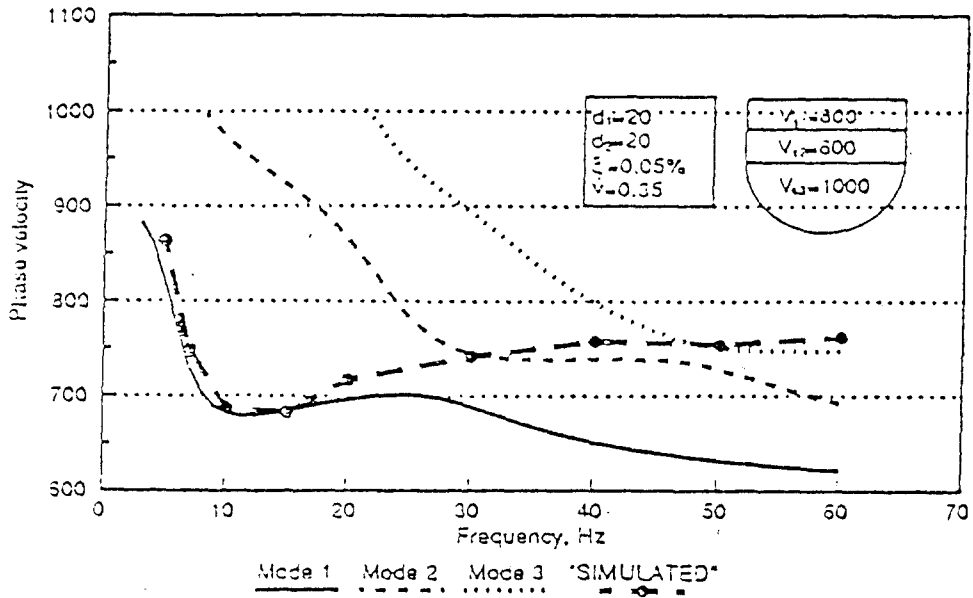


b. In a Multi-Layered Medium with Different Wavelengths.  
(after 23 from 22)

Fig. 1. Amplitude of Particle Motion versus Depth for Surface Waves of Rayleigh-Type. (after 22, 23, 33)



a. Wavelength - Velocity Plot



b. Frequency - Velocity Plot

Fig. 2. Modal Dispersion Curves of Surface Waves of Rayleigh-Type in a Two-Layer over a Half-Space System With Stiffer Layer over Softer Layer. (after 20)

차모드의 분산곡선이 더 이상 존재하지 않게되는 주파수 또는 파장의 경계치를 절락(cut-off) 주파수 또는 절락파장이라고 하는데, 이들의 값은 모드에 따라 다르다.

지금까지 서술한 R파의 분산특성과 모드특성으로 말미암아 충격 등에 의해 다양한 주파수 성분 및 모드 성분의 R파들이 동시에 유발되어 전파되는 경우에 이들이 합성되어 이루는 진동파 시간기록(time record)의 파형(waveform)은 감지점이 멀어짐에 따라 점차적으로 시간축을 따라 늘어져 펼쳐지는 형상으로 변화한다. 이는 주파수 성분이 다른 R파들, 그리고 같은 주파수라도 진동모드가 다른 R파들은 전파속도가 서로 달라 감지점에 도달하는 시간이 다르고 그 차이는 감지점이 멀어질수록 커지기 때문이다. 이와 같은 연유로 진동점으로부터 먼 지점에서 포착된 진동파 신호기록은 주파수 및 모드성분이 다른 개개의 R파들이 상호 분리되어 전체적인 파형은 분산된(dispersive) 형상을 갖게 된다.

그런데 표면파 시험에서 검측되는 실제의 표면진동파는 앞에서 서술한 바와 같이 일반적으로 하나 이상의 진동모드가 복합되어 이루어진 것이므로, 이러한 복합 표면진동파(resultant surface wave)의 전파속도는 특정한 진동모드에 속하는 R파의 전파속도와 차이가 있음에 유의해야 한다. 그림 2에 굵은 점선으로 나타낸 곡선은 실제의 표면파 시험조건을 모사(simulate)하여 얻어진 복합진동파의 분산곡선을 나타내었는데 그림에서 보듯이 복합적 표면진동파의 분산곡선은 특정한 진동모드에서 R파의 분산곡선과 다르다. 이러한 고찰을 토대로 할 때, 사전 해석없이 실측 분산곡선으로부터 개개의 진동모드별 분산곡선을 분리해내거나, 역으로 진동모드별 분산곡선으로부터 복합적 표면진동파의 분산곡선을 합성해내기는 불가능한 것이다.

그러나 표면파 시험이 개발된 이래 불과 최근까지도 표면파 시험에서 얻어지는 실측 분산곡선은 여러개의 진동모드의 영향이 복합된 것으로서 개별적인 진동모드별 분산곡선과는 본질적으로 다르다는 것을 알지 못했거나, 해결 불가능한 문제로 인식되어 다음과 같은 두 가지 통설이 실측 분산곡선의 분석에 적용되어 왔다. 하나는 깊이가 증가함에 따라 대체적으로 강성도가 일률적으로 증가하는 자연지반에서의 표면파 시험성과를 토대로 표면파 시험에서 검측되는 표면진동파는 대부분의 경우 실제로 기본모드에 속한다고 가정하는 통설이다. 또 하나는 표층부근의 지반강도를 높인 개량지반의 경우나, 중간에 상대적으로 매우 낮은 저항성도의 이질층이 협재하는 경우 및 포장구조체와 같이 강성도가 깊이에 따라 일률적으로 감소하는 경우의 시험성과에 기초한 것으로서, 실측 분산곡선에서 기본모드로 간주되는 부분과 고차모드로 간주되는 부분은 서로 상이한 종류의 진동(vibration type)에 기인하므로, 이들의 분석을 위해서는 해당되는 종류의 진동해석에 적합한 별개의 이론을 적용해야 한다는 통설이다.

첫번째의 통설은 모든 주파수에서 기본모드가 기타의 고차모드들에 비해 월등하게 큰 에너지를 수반할 것이라는 막연한 가정에 토대를 둔 것이다. 그리고 두번째 통설은 상부층이 하부층에 비하여 상대적으로 매우 큰 강성도를 갖는 경우에는 고주파수에서의 진동패턴이 실제로 이질층으로 이루어진 복합판(composite plate)에서의 휨진동(flexural vibration)과 유사해지며, 저주파수에서의 진동패턴은 반무한체(half-space)의 진동패턴과 유사해진다는 1950년대의 실험적 연구성과<sup>(1)</sup>에 토대를 둔 것이다.

그러나 전자의 경우는 후술할 바와 같이 실제로 큰 에너지를 수반하는 진동모드는 성층 특성에 따라, 또한 주어진 성층 구조에서도 주파수 성분에 따라서 변화하므로 근본적으로 그릇된 가정이다. 후자의 경우는 실제로 상호접촉(welded)되어 있는 이질층들의 경계면을 자유표면(free surface)으로 간주하여 판(plate)이론을 적용하므로써 경계조건(boundary condition)의 처리에 근본적인 모순이 있고, 또한 판 진동이론(plate vibration theory)과 반무한체 진동이론(half-space vibration theory)을 적용하는 한계 주파수의 선정기준이 모호한 문제점이 있다.

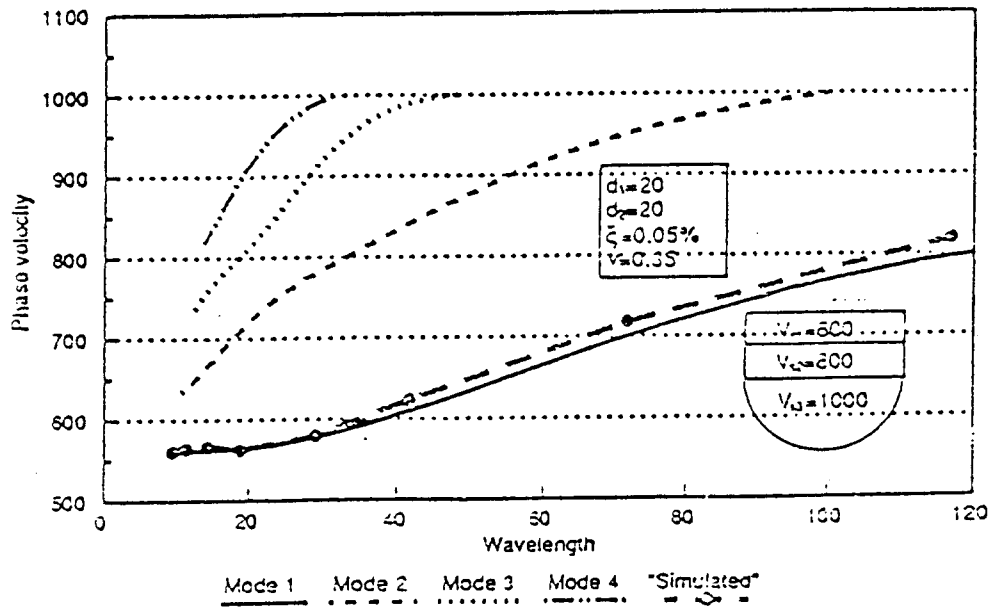
최근, 이와 같은 통설들을 토대로 한 표면파 시험의 분석결과가 많은 오차를 줄 수 있음이 구체적으로 인식되기 시작함에 따라 R파의 모드 특성을 감안하여 일괄적이고 통일성 있는 이론을 적용하기 위한 연구들이 본격적으로 진행되고 있다. (6, 7, 10, 12, 19, 20) 이러한 연구노력의 결실로서 아주 최근의 획기적인 연구성과(20)에 의하면, 표면파 시험에서 검출되는 여러개의 진동모드가 합성된 복합 표면진동파의 전파속도는 가장 큰 에너지를 수반하는 우세모드(dominant vibration mode)에서의 R파 속도와 가깝게 되는데, 이러한 우세모드는 일정한 크기의 주파수 대역을 달리하며 기본모드에서 고차모드 쪽으로 천이(transfer)된다는 것이 밝혀졌다. 그리고 이러한 모드의 천이상태를 보이는 경계주파수 부근에서의 복합 표면진동파의 전파속도는 해당 주파수에서 우세모드와 차상급 고차모드의 R파 속도사이의 중간 값을 갖는 것으로 규명되었다. 그리고 이러한 천이 주파수 부근에서는 인접한 두 모드의 분산곡선은 그림 2에 나타낸 바와 같이 상호 맞붙는 형태가 되는 급격한 굴곡부위가 형성되는 특징을 나타낸다고 밝혀졌다. 그림 2에 굵은 점선과 중간점으로 나타낸 복합진동파의 분산곡선을 고찰하면 주파수가 증가함에 따라 점차 차상급 모드의 R파 속도로 이동해 나가는 형태가 됨을 알 수 있다.

그런데 이러한 특성은 이질층의 강성도가 깊이에 따라 일률적으로 증가하고 성층구조를 갖는 경우에는 발생하지 않으며 이러한 경우에는 모든 주파수에서 기본모드가 우세 모드가 되는 특이한 현상이 발생한다고 규명되었다. 그림 3에는 이러한 경우에 얻어진 복합 표면진동파의 분산곡선을 나타내었는데 그림에서 보듯이 주파수에 무관하게 기본모드의 R파속도와 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 표면파 시험의 측정치들이 주파수 성분에 관계없이 모두 기본모드에 속하는 것으로 가정했던 종래의 통설이 자연지반과 같이 강성도가 깊이에 따라 일률적으로 증가하는 경우에 양호한 분석결과를 주었던 경험적 사실을 뒷받침하는 것이다. 그리고 그림 2에서 보듯이 중간에 저 강성층이 놓이는 경우에 우세 모드가 주파수 대역에 따라 고차모드로 천이한다는 사실은 이질층의 강성도 분포가 불규칙한 일반적인 성층구조에 있어서 주파수가 어느 크기 이상이면 반무한체 진동에서 복합판의 진동형태로 바뀐다고 가정하는 종래의 통설이 사실상 반무한체의 진동이라는 한 종류의 진동이 주파수에 따라 우세모드가 바뀌는 것을 편법적으로 해석하기 위한 것이므로 경우에 따라서는 큰 오차를 유발할 수 있음을 의미하는 것이다.

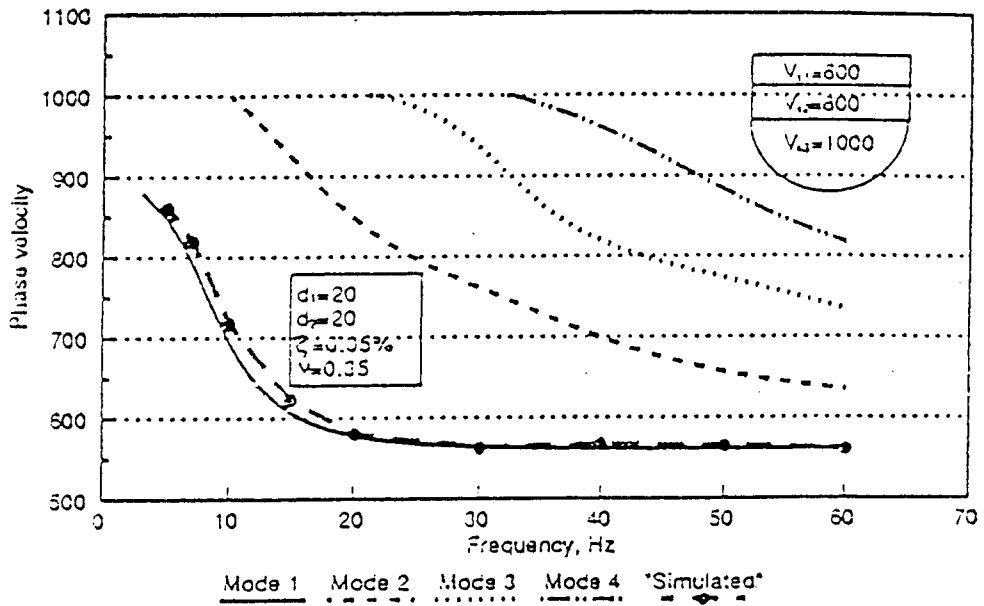
한편, 현재까지 발표된 표면파 시험성과들을 고찰하면 실측 분석곡선은 특정한 범위의 주파수 또는 영역에서 그림 2나 3에 나타난 바와 같이 하나의 매끄러운 복합 표면진동파의 분산곡선이 형성될 수 없을 정도로 측정치들이 하나의 파장 또는 주파수에 대해서도 여러개의 속도치가 대응되는 등의 형태로 매우 불규칙하게 산포되는 경우가 많음을 알 수 있다. 이러한 원인은 감지기의 간격이 달라짐에 따라 측정구간내의 재료의 균질도가 달라지는데도 부분적인 원인이 있기도 하나 근본적으로 전술한 R파의 모드특성으로 말미암아 다른 주파수에서 측정된 상이한 R파 속도치들로부터 산정되는 파장값은 같아 질 수 있기 때문이다. 또한 실제의 재료에서는 파에너지가 마찰열의 형태로 소멸되는 내부감쇠(internal 또는 material damping)가 있으므로 파에너지가 상대적으로 낮은 진동모드의 R파는 감지점이 멀 경우에는 실제적인 검출이 불가능하기 때문에 감지점의 간격이 달라지면 우세모드를 제외한 기타의 진동모드들의 영향 정도는 달라져 감지기 간격에 따라서 동일한 주파수 또는 파장이 라 할지라도 실측 속도치는 달라지게 되는 것이다.

이와같이 표면파 시험의 측정결과들을 파장-속도의 좌표상에 일련의 점들로 나타내었을 때, 동일한 파장에 대해 여러개의 속도치가 대응되는 형태로 측정점들이 산포되면 하나의 매끄러운 분산곡선을 도출하기 위해 다음의 두 가지 방법이 쓰이고 있다. 하나는 측정치들의 표준편차(standard deviation) 크기를 고려하여 극단적인 차이를 보이는 측정치들은 제외하고 나머지 측정치를 대상으로 단순한 산술평균하여 얻는 평균치를 매끄럽게 연결하는 방





a. Wavelength - Velocity Plot



b. Frequency - Velocity Plot

Fig. 3. Modal Dispersion curves of Surface Waves of Rayleigh-Type in a Two-Layer over a Half-Space System with Softer layer over Stiffer Layer. (after 20)

법이다.(3) 또 한가지 방법은 모든 측정점을 대상으로 최소자승 원리(least-square principle)에 입각한 곡선을 커브피팅(curve fitting)하는 방법이다.(18)

## 2.2 시험 방법

표면파 시험에서는 먼저 현장실험을 통하여 R파의 분산곡선을 도출하고, 이를 관련이론을 토대로 분석하여 시험대상 매체의 탄성물성 및 성층구조 등을 역추정하게 된다. 전자를 실측 분산곡선 도출 단계, 후자를 역산(inversion)단계라고 한다. 다음에는 이러한 표면파 시험에 필요한 시험장비의 구성, 시험절차, 데이터의 분석방법에 대해 기술한다.

### 1) 시험장비

진동유발장비, 진동감지기, 그리고 진동신호분석기(waveform analyzer) 등이 표면파 시험에 필요한 세가지 필수 장비이다. 진동유발장비로는 햄머(hammer)와 같은 간단한 충격용구를 사용할 수도 있으며, 특정한 파형 및 주파수 성분을 조절할 수 있는 진동기를 사용하기도 한다. 진동감지기는 일반적으로 속도계(velocity transducer)나 가속도계(accelerometer)가 사용되는데, 낮은 주파수의 진동파가 지배적일 경우는 전자를, 높은 주파수 성분이 지배적일 때는 후자를 택하는 것이 보통이다. 진동신호분석기로는 진동파 시간기록을 주파수 영역으로 푸리에 변환(Fourier Transform)시키는 기능이 내장된 것을 사용하는 것이 일반적이다. 그림 4에는 이러한 시험장비의 구성과 연결도를 나타내었다.

### 2) 측정의 간격

실험은 먼저 시험대상 물체의 표면에 일정한 방향으로 축선을 설정하고 그림 4에 나타낸 바와 같이 축선상에 하나의 진동점과 두 개의 감지점으로 구성되는 측정배열구간(testing array)의 위치와 각 측정점의 간격을 적절히 변경시켜 가면서 일련의 시험을 반복한다. 이때 진동점과 감지점의 위치는 유발되는 R파의 주파수 성분을 고려하고, 파에너지의 강도 그리고 진동신호 분석기의 정밀도 및 감지기의 접촉면적 등을 감안하여 적절한 간격을 두고 설정해야 한다.

우선 감지점이 진동점에서 너무 멀리떨어져 있으면 진동파의 감쇠로 말미암아 검출되는 진동파 신호의 잡음비(signal-to-noise ratio)가 커져 측정 오차가 증대한다. 반면에 너무 가까우면 체적파의 영향이 증대하거나, 진동에너지가 클 경우에는 재료의 비선형(nonlinear) 거동으로 인한 오차요인이 증대하며, 또한 정상적인 파동면(wavefront)이 형성되지 못하는데 따른 근원적 오차요인의 영향-이를 근접효과(near field effect)라고 한다. - 이 증대한다.

일반적으로 진동점과 첫번째 감지점 사이의 간격을 두 개의 감지점간의 거리와 같게 하는 것이 대부분의 경우에 측정결과를 주는 것으로 알려져 있으나, 원칙적으로는 전술한 측면을 면밀히 고려하여야 한다.

한편, 대부분의 진동신호분석기의 측정 정밀도를 고려할 때, 측정결과 중에서 주어진 감지기 간격의 3배 이상이 되는 긴 파장의 R파 속도 측정결과들은 분석시 제외하는 것이 보통이다.(2) 그리고 감지기의 접촉면이 축선상에 포함되는 길이의 1/4 이하되는 짧은 파장의 측정결과들도 분석시 배제하는 것이 일반적이다. 또한 정밀한 실험을 목적으로 앞에서 언급한 근접효과를 감안해야 하는 경우에는 진동점과 첫번째 감지점의 간격보다 작은 파장의 측정결과들도 분석의 대상에서 제외하는 것이 바람직 한 것으로 알려져 있다.(7,20)

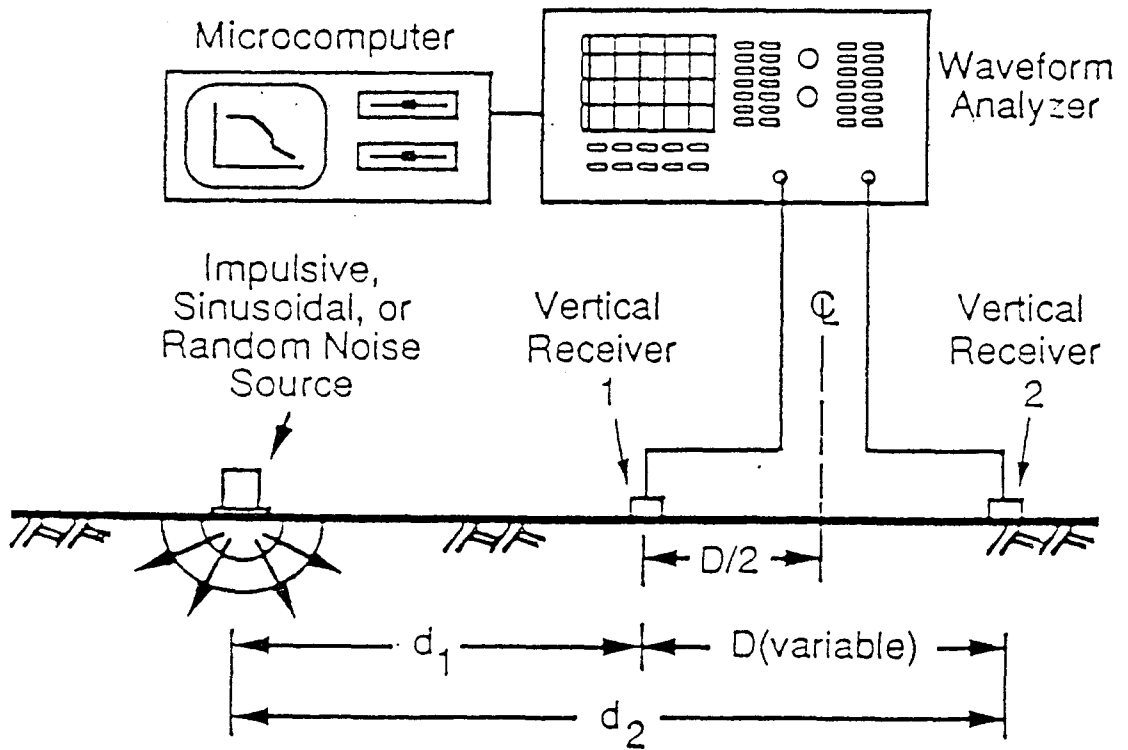


Fig. 4. Schematic Configuration of Equipments Used for the SASW Test.  
(after 22)

### 3) 분산곡선의 도출

표면파 시험에서는 임의의 두 감지점에서 포착된 진동파 신호를 푸리에 변환(Fourier Transform)하여 얻게되는 주파수 특성 함수들로부터 R파의 주파수 성분과 특정 주파수에 있어 R파의 파장 및 전파속도, 그리고 파에너지의 강도와 데이터의 질(quality)을 판정한다. 표면파 시험에서 이러한 목적으로 활용되는 중요한 주파수 특성함수는 크로스 스펙트럼(cross-spectrum)과 상관함수(coherence function)이다. 전자로부터는 주파수 성분별 R파의 파장과 전파속도를 산정하고, 후자로부터는 측정결과의 신뢰도를 판정 할 수 있다.

#### 가. 파장 및 전파속도의 계산

크로스 스펙트럼의 위상각 곡선(phase diagram)은 두 개의 감지점으로부터 얻은 진동파 신호가 갖는 위상각차(phase lag)를 주파수 성분별로 나타낸 특성곡선이다. 파동이론으로부터 두 지점에서 감지된 진동파 신호의 위상각차를 알면 진동파의 파장 및 전파속도를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\lambda = \frac{360^\circ}{\theta} \cdot S \quad \dots \dots (1)$$

$$V = f \cdot \lambda \quad \dots \dots (2)$$

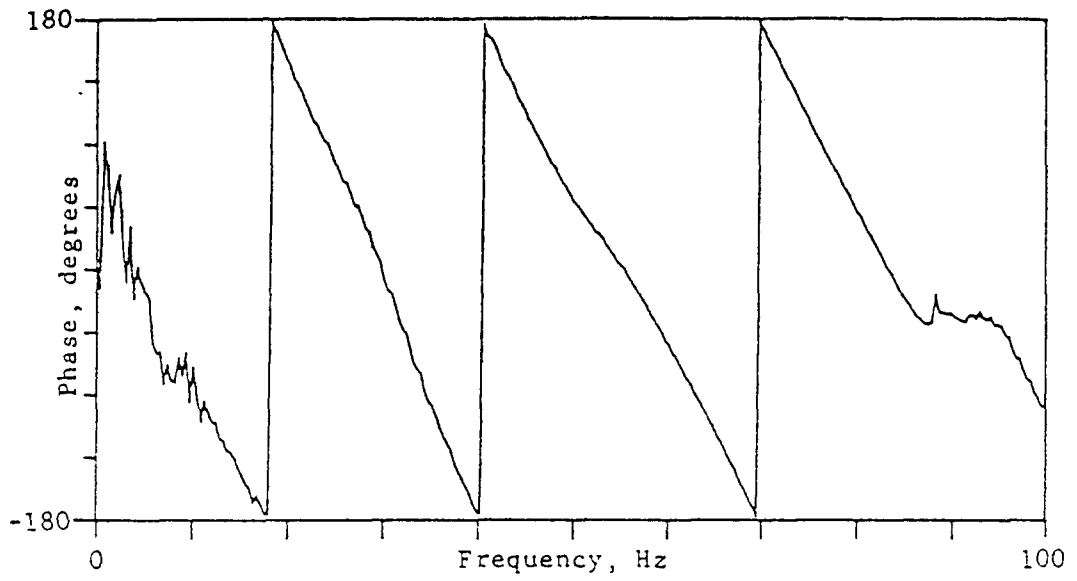
여기서,  $\lambda$ 는 파장,  $V$ 는 전파속도,  $f$ 는 주파수,  $\theta$ 는 위상각 차이이며  $S$ 는 두 감지점간 거리이다.

한편 상관함수는 주파수 성분별로 두 진동파 신호의 상관도를 0~1의 수치로 나타낸 특성곡선이다. 상관도는 잡음신호(noise signal) 및 반사파 등에 의한 교란정도를 나타내는 척도로서 1에 가까울수록 측정결과의 신뢰도가 높음을 의미한다.

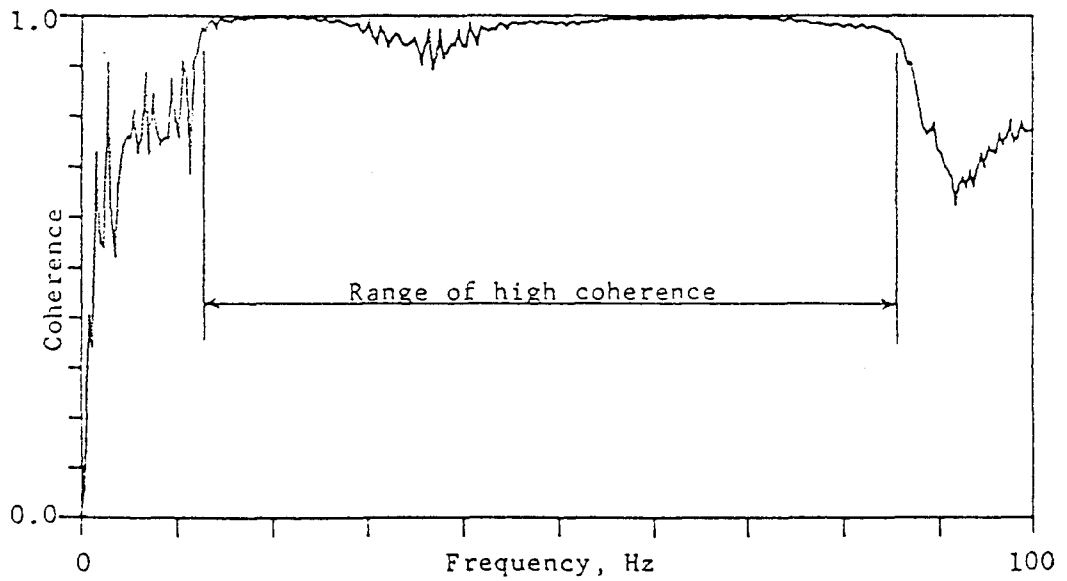
이와같은 위상각 곡선 및 상관함수의 산정은 진동신호 분석기를 이용하면 검측과 동시에 얻게되는데, 그림 5에는 대표적인 측정결과의 일례를 나타내었다. 위상각 곡선이 그림 5와 같이 톱니형태로 접힌(wrapped) 모양이 된 것은 측정기기가 실제의 위상각을  $180^\circ$  이내의 수치로 환산하여, 제한된 크기의 표시창에 효율적으로 나타내지도록 한 결과이다. 실제의 위상각을 산정하기 위해서는 그림 5에서 커다란 톱니모양이 형성된 구간들을 좌측부터 아래 쪽으로 연이어 붙였을때 얻어지는 펼친(unwrapped) 위상각 곡선을 고려해야 하는데 실제의 위상각,  $\theta$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$\theta = 360n - \phi \quad (\text{단 } |\phi| < 180^\circ, n=0, 1, 2, \dots) \dots (3)$$

여기서  $\phi$ 는 기기의 눈금 읽음 위상각차이고,  $n$ 은 그림 5에서 커다란 톱니모양이 형성되는 구간의 일련번호로서 가장 좌측에 있는 것을 0으로 한다. 그림 6에는 기기의 표시창에 나타나는 원래의 접힌 위상각 곡선과 식(3)의 관계를 이용해 얻은 펼친 위상각 곡선을 비교하여 나타내었다.

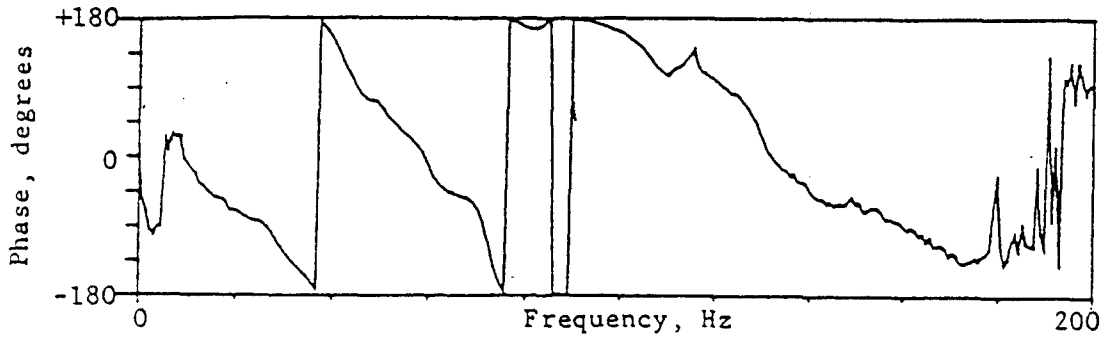


a. Phase of the cross spectrum

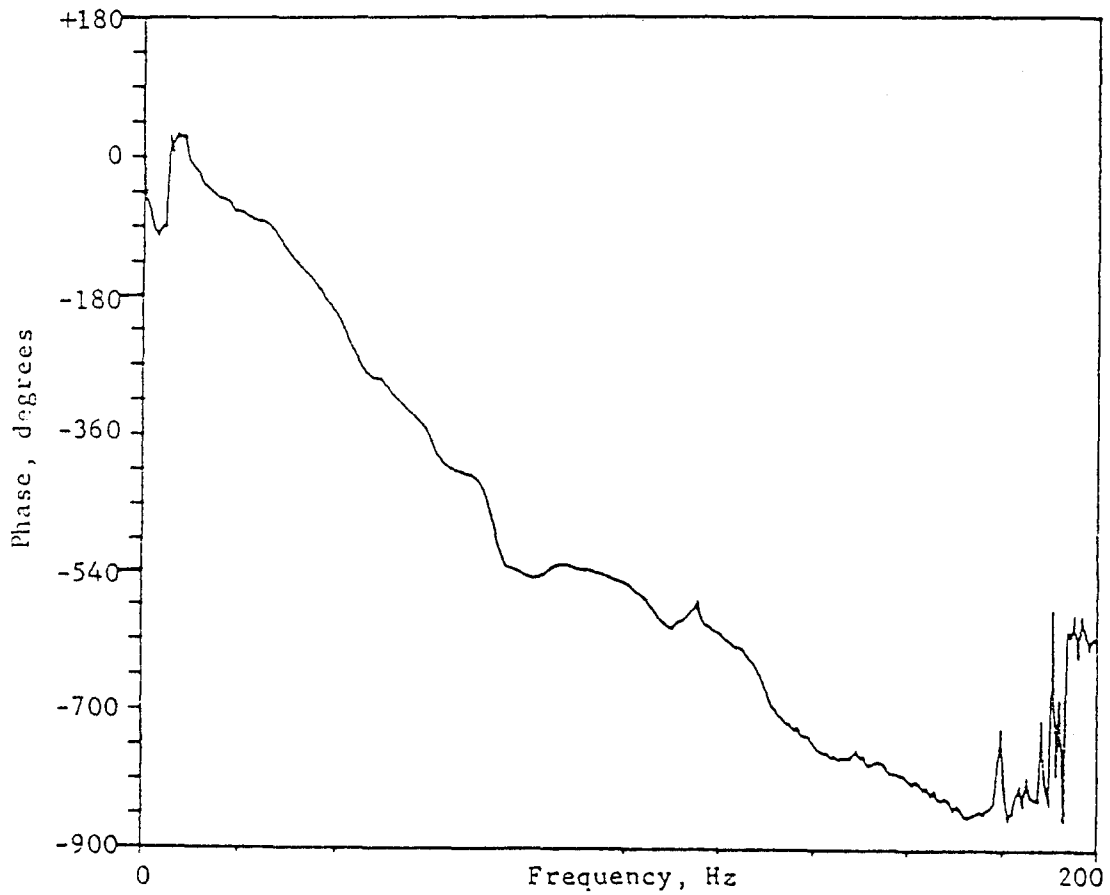


b. Coherence function

Fig. 5. Phase Plot of Cross-Spectrum with Coherence Function. (after 2)



a. Wrapped Phase Plot



b. Unwrapped Phase Plot

Fig. 6. Comparison of "Wrapped" and "Unwrapped" Phase Plots. (after 2)

## 나. 윈도우(Windowing)

표면파 시험에서 반사파의 교란이 극심하면, 경우에 따라서는 측정결과의 분석이 불가능한 상태가 될 수 있다. 따라서 이러한 경우에는 반사파의 교란 영향을 최소화 할 수 있는 적절한 조치를 강구해야 한다.

본 연구에서는 이러한 조치의 하나로서 포착된 원래의 진동파 시간기록(time record)에 시간축을 따라 경중율(weighting)을 달리하는 윈도우 함수(windowing function)를 곱함으로써 특정시간 대역의 데이터의 영향을 삭감시키는 방법을 사용하였다. 진동파신호기록에서 반사파 성분은 주신호(main signal) 성분의 뒤에 나타나는 것이 대부분이므로 경중율이 시간에 따라 지수함수적으로 감소되는 윈도우 함수를 사용하면 늦은 시간에서 반사파 영향을 효과적으로 감소시킬 수 있다. 이러한 지수함수 윈도우(exponential window)의 경중율 함수식은 다음과 같다.

$$W(t) = e^{-t/\tau} \quad \dots \dots (4)$$

여기서  $W$ 는 경중율,  $t$ 는 시간,  $\tau$ 는 경중율의 시간에 따른 감소정도를 결정하는 시간정수(time factor)이다. 시간정수의 값은 특정한 기준치가 정해져 있는 것이 아니라 기본적으로 데이터의 획득 시간(sampling time)과 포착된 진동파 신호의 주파수특성 등을 고려하여 양호한 측정결과를 확신할 수 있을 때까지 여러차례의 시도를 통해 시행착오적으로 결정한다.

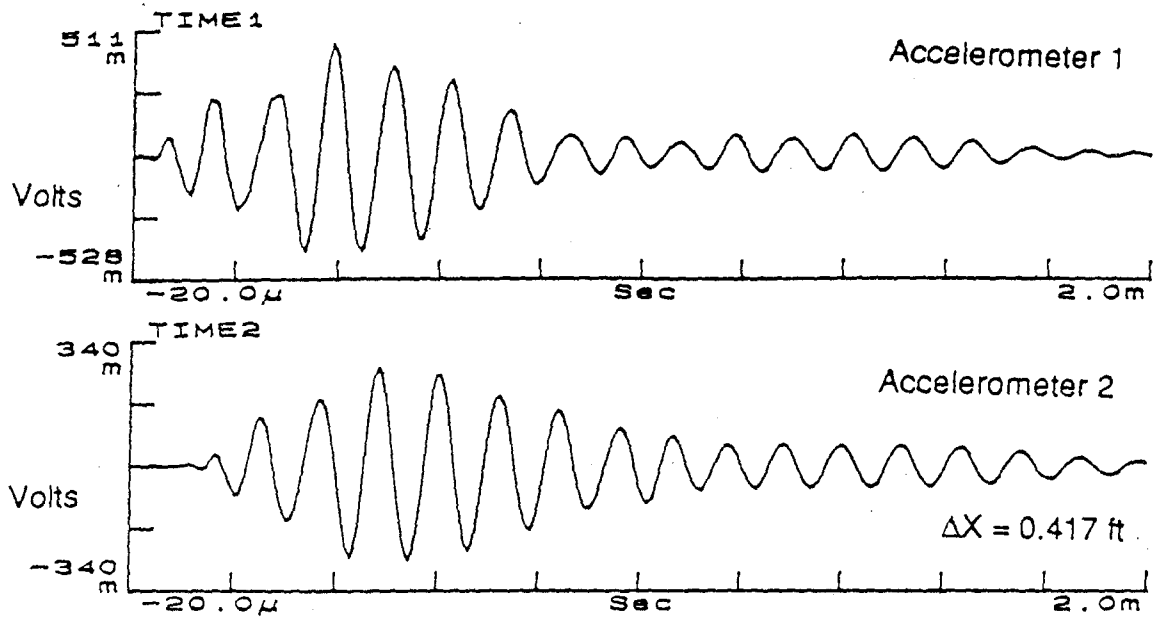
이와 같은 윈도우 처리는 시간영역(time domain)에서는 반사파의 영향을 감소시키는 긍정적 효과를 주기도 하나, 주신호 성분을 포함한 전체적인 진동파 신호의 패턴이 가공됨에 따라 주파수 특성이 과다하게 변질되는 부정적 효과도 수반하기 때문에 세심한 주의가 필요하다.

그림 7에는 지수함수적 윈도우 처리를 한 진동파 시간기록을 원래의 것과 비교한 일례를 나타내었다. 그리고 그림 8에는 그림 7의 각 경우에 해당하는 크로스 스펙트럼의 위상각 곡선과 상관함수를 나타내었다.

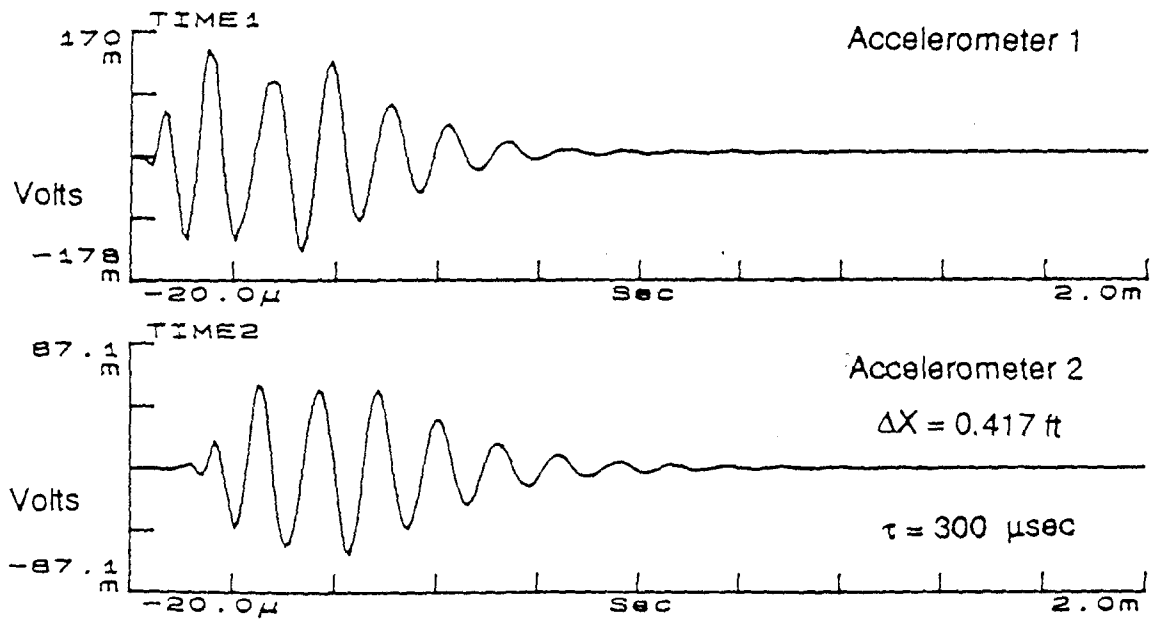
그림 8을 고찰하면 윈도우 처리결과 위상각 곡선은 훨씬 매끄럽고 톱니 모양의 구간이 선명히 드러나는 양호한 측정결과를 얻을 수 있으며, 상관함수도 중간중간에 골이 형성되는 부분이 없는 이상적인 형상이 됨을 알 수 있다. 한편, 그림 9에는 그림 8의 각 경우에 대한 실측 분산곡선을 나타내었는데, 윈도우 처리 결과로 훨씬 부드러운 변화를 보이는 분산곡선을 얻게 됨을 알 수 있다.

지금까지 서술을 토대로 분산곡선 도출의 과정을 요약하면 다음과 같다. 먼저 포착되는 진동파 시간기록의 파형을 고찰하여 반사파 영향이 크다고 판단되면 윈도우 처리를 통해 전반적인 데이터의 질을 향상시킨다. 다음으로, 상관함수의 분석을 통해 데이터 중에서의 상관도가 낮은 주파수 성분은 배제한다. 또한 2.2의 2)에서 서술한 바와 같이 측정간격에 따른 유효파장의 범위를 고려하여 측정오차가 큰 데이터를 이차적으로 배제한다. 그런다음 측정 결과들을 파장-속도의 좌표상태에 일련의 측정점들로 나타내고 측정점들을 2.2의 3)에서 설명한 방법등을 토대로 커브피팅(curve fitting)하여 분산곡선을 도출한다.

한편, 파장-속도의 분산곡선에 더하여 주파수-속도의 분산곡선이나 실제의 위상각으로 환산된 펴친(unwrapped) 위상각 곡선을 도출하면, 이상 데이터의 발생 원인 규명 등 다각적인 분석을 기할 수 있다. 여기서 한가지 언급할 것은 주파수-속도 및 주파수-위상각 곡선은 주파수에 대하여 하나의 속도치나 위상각치가 대응되는 일대일(one-to-one)의 함수형태로 되나, 파장-주파수 곡선은 그렇지 않다는 점이다. 즉, 하나의 파장에 대해서도 여러개의 속도값이 대응될 수 있다. 이는 2.1에서 서술한 바와 같이 근본적으로 R파의 모드특성



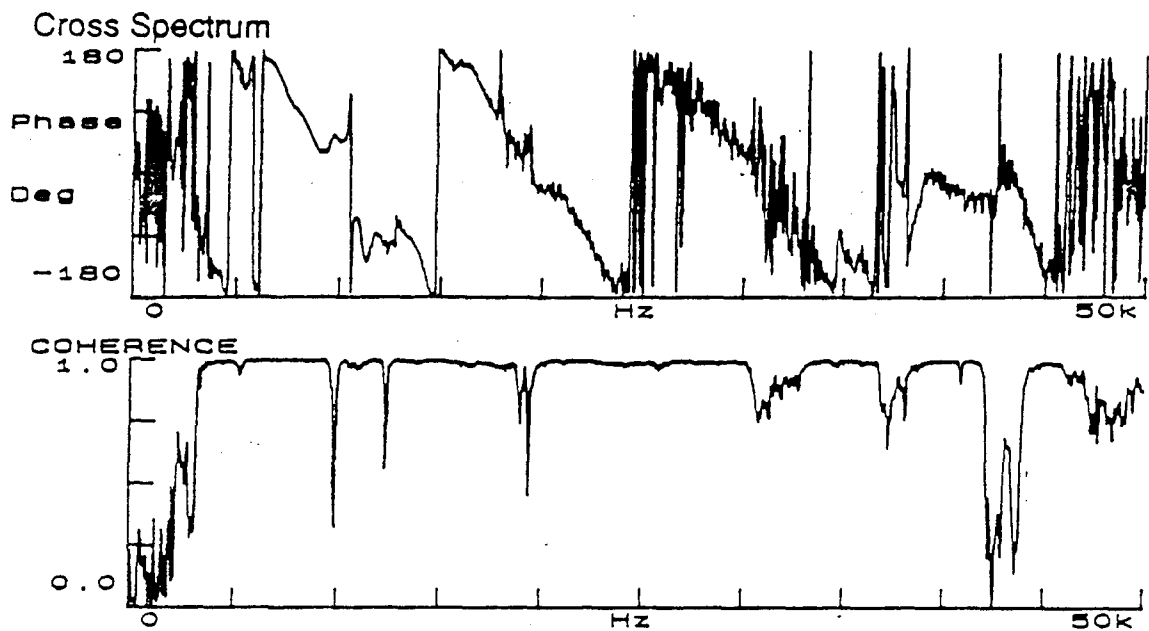
a. Typical Unwindowed Time Records



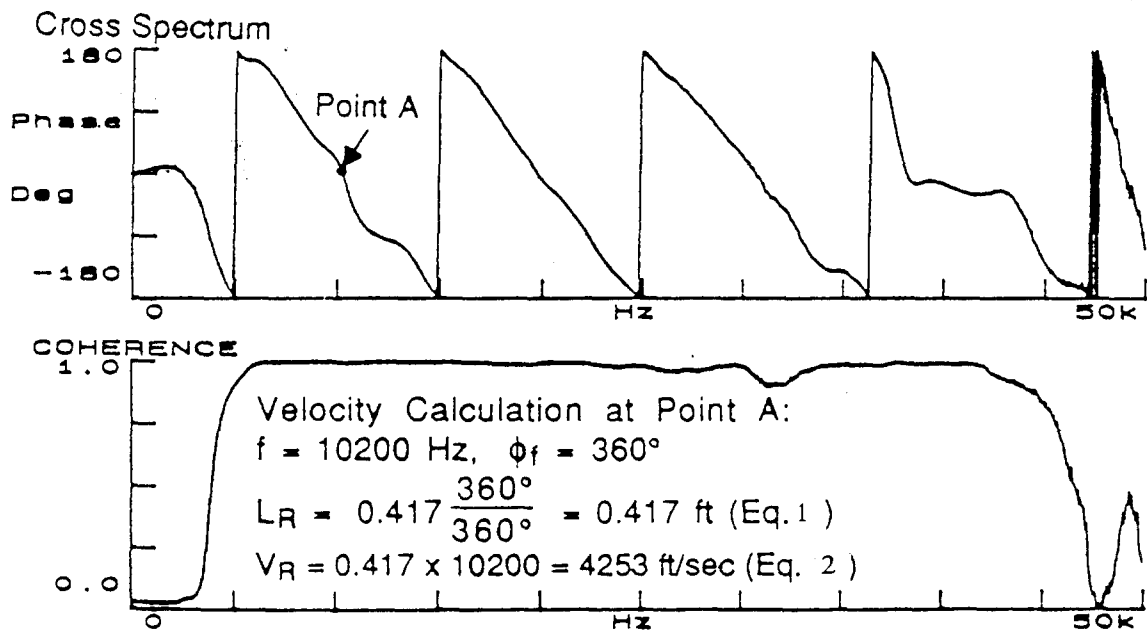
b. Typical Windowed Time Records

Fig. 7. Comparison of Typical Unwindowed and Windowed Accelerometer Time Records Measured on a Concrete Slab. (after 23)



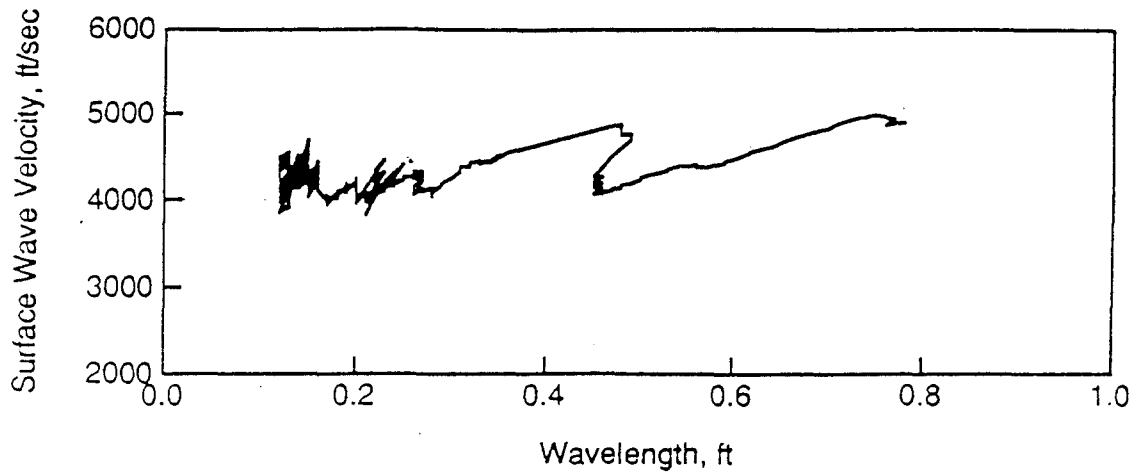


a. From Unwindowed Time Records Shown in Fig. 7a.

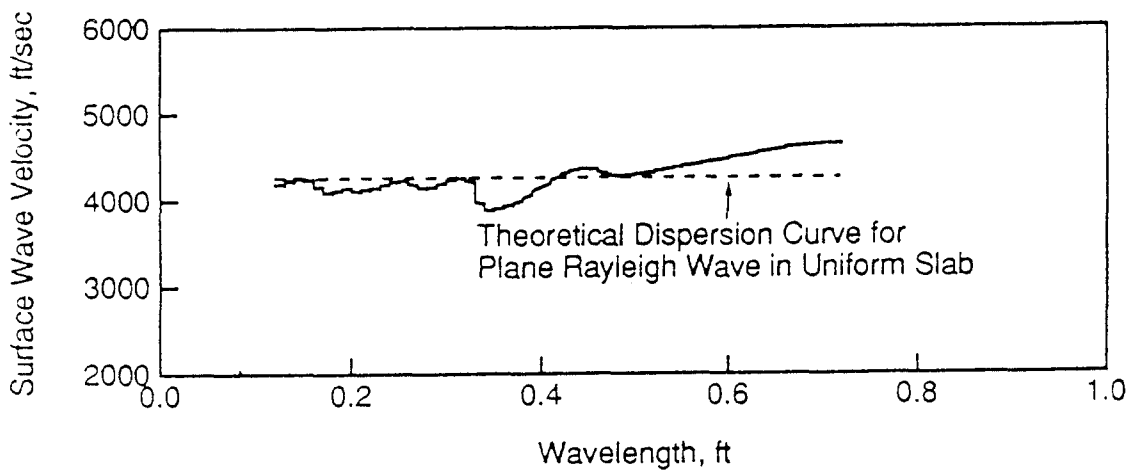


b. From Windowed Time Records Shown in Fig. 7b.

Fig. 8. Comparison of Phase Plots and Coherence Functions from Unwindowed and Windowed Time Records Shown in Fig. 7. (after 23)



a. From Unwinded Time Records Shown in Fig. 7a.



b. From Windowed Time Records Shown in Fig. 7b.

Fig. 9. Comparison of Dispersion Curve from Unwinded and Windowed Phase Plots Shown in Fig. 8. (after 23)

으로 인한 서로다른 진동모드의 혼재, 그리고 잡음신호 및 반사파의 교란이나 부적절한 윈도우 처리로 인한 과도한 데이터의 주파수 특성 변질 등에 기인한다. 이와같이 측정점들이 하나의 매끄러운 분산곡선을 형성하기 어렵게 일관성 없이 심하게 산포되는 경우에는 무리하게 하나의 실측 분산곡선을 도출하기 보다는 측정점들을 커브피팅 함이 없이 그대로 나타내는 것이 바람직하다.

### 2.3 역산(Inversion)

역산은 시험을 통하여 얻어진 실측 분산곡선의 분석을 통하여 시험대상 물체의 역학적 특성 및 성층특성을 역추정하는 일련의 데이터 분석과정이다. 이와같은 역산은 표면파 기법의 핵심이 되는 것으로서 종래에는 경험과 근사적인 이론적 가정을 토대로 간단한 성층구조를 갖는 경우에 한해 적용할 수 있는 경험적 역산방법(2.3.5)이 적용되어 왔으나, 최근에는 수평다층체에서 표면파 분산이론(29~32) 등을 토대로 비교적 정확한 역산결과를 얻을 수 있는 해석적(analytical)역산방법(4, 6, 10, 11, 18, 19)이 개발되어 널리 쓰이고 있다.

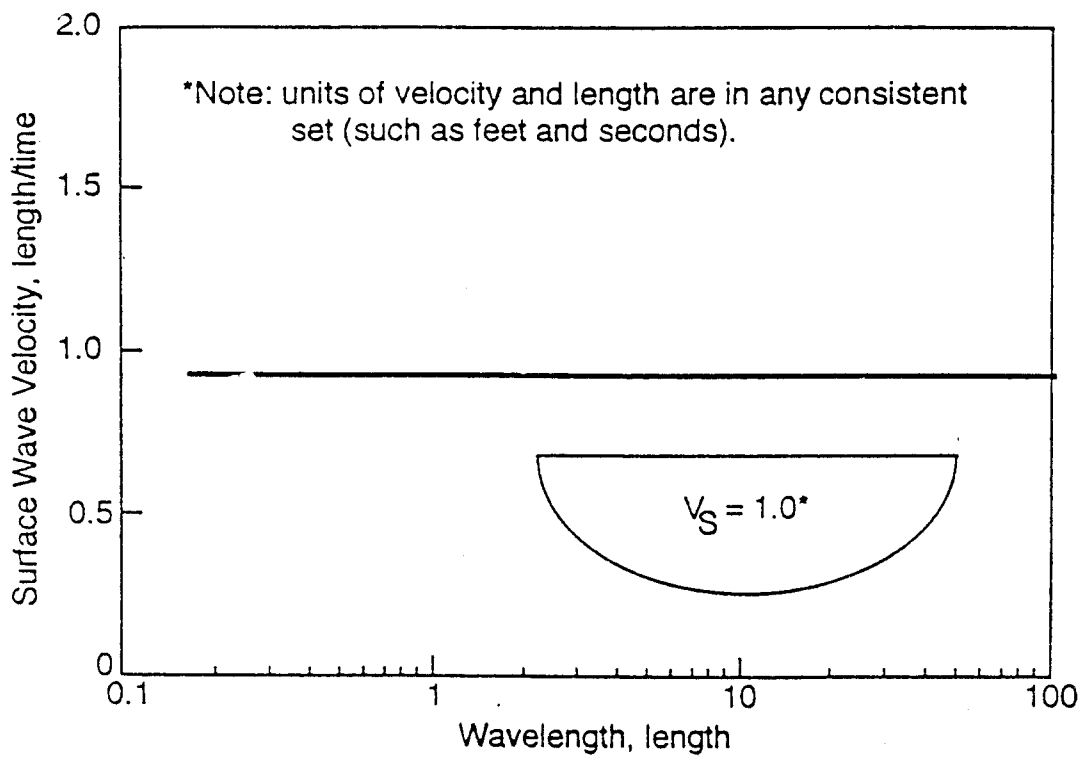
해석적 역산방법의 원리는 먼저 실측 분산곡선의 패턴을 분석하여 시험대상 물체의 이론적 해석 모델을 적절히 가정한 다음, 모델에 대한 이론적 분산곡선이 실측 분산곡선과 허용 오차 범위내에서 일치할 때까지 모델 각 층의 탄성 특성치와 두께와 같은 주요 변수들을 시행착오적으로 반복 가정하여 결정하는 것이다. 이와같은 역산절차를 전향역산(forward inversion)이라고 하는데, 해석모델에서 이질층들의 수가 많으면 결정해야할 변수의 수가 많아지고 근본적으로 다층체에서 표면파 분산이론과 같은 복잡한 이론을 토대로한 분석이 필요하므로 전산 프로그램의 사용이 필수적이며, 반복가정에 따른 숙련된 판단이 요구된다.

그러나 본 연구에서와 같이 최상부 표층만을 다루는 경우에는 표층의 두께 보다 작은 파장의 범위에서 실측 분산곡선을 분석하면 되므로 전술한 복잡한 역산방법을 적용할 필요없이 후술할 바와 같이 간단한 절차를 통하여 표층의 탄성특성치를 결정할 수 있다.(17) 따라서 여기서는 표층의 특성만을 역산하는 절차에 대해서만 기술한다.

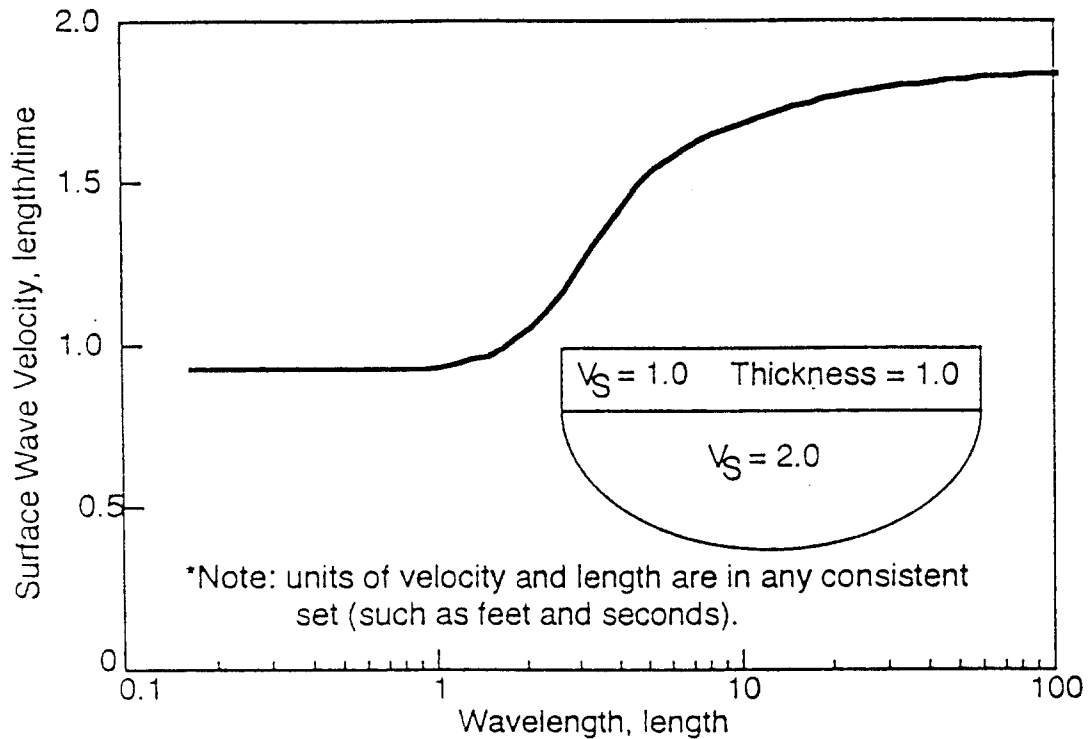
그림 10에는 각각 균질한 매질과 하나의 표층을 갖는 성층구조에서 R파의 이론적 분산곡선을 비교하여 나타내었다. 각 층의 강성도는 전단파 속도,  $V_s$ 로 나타내었는데, 먼저 그림 10a 를 고찰하면 균질매질에서 R파의 속도,  $V_R$ 는 파장에 무관히 일정하므로 이론적 분산곡선은 수평한 직선형태가 됨을 알 수 있다. 그런데 그림 10b 를 고찰하면 다층체라 할지라도 파장이 표층의 두께보다 작은 R파는 표층과 동일한 강성도를 갖는 균질 매질에서의 R파와 동일한 전파속도를 갖게됨을 알 수 있다. 즉, 그림 10b 에서 파장이 표층두께(1.0)보다 작은 영역에서 분산곡선은 그림 10a에서와 같이 수평한 직선형태가 된다. 이는 2.1에서 서술한 바와 같이 R파의 전파속도는 한 파장 깊이내에 포함되는 매질의 물성에 크게 영향을 받기 때문이다. 따라서 최상부 표층의 특성만을 다루는 경우에는 해석적 역산방법과 같은 복잡한 역산절차를 거치지 않고 실측 분산곡선에서 표층의 두께에 해당되는 파장까지의 분산곡선을 표층의 물성으로 이루어진 균질 반무한체에서의 R파의 분산곡선으로 간주하여 분석하면 된다.

### 2.4 강성도(Stiffness)의 결정

역산단계를 통하여 일차적으로 결정되는 것은 각 층의 탄성과 전파속도치인데, 탄성이론으로부터 매질의 탄성과 전파속도는 영계수(Young's modulus),  $E$ , 전단계수(shear modulus),  $G$ , 포아손비(Poissons ratio),  $\nu$ 과 같은 강성도 특성치와 다음과 같은 관계가 있다.



a. For Uniform Half-Space



b. For Single Layer over Half-Space

Fig. 10. Theoretical Dispersion Curves for Surface Wave of Rayleigh-Type in a Uniform Half-Space and Single Layer over Half-Space System. (after 23 from 17)

$$G = \rho V_s^2 \quad \dots \dots (5)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad \dots \dots (6)$$

$$V_R = \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} \cdot V_s$$

$$\approx 0.91 V_s \quad (\text{단 } 0.1 < \nu < 0.3) \quad \dots \dots (7)$$

여기서  $\rho$ 는 매질의 밀도이다.

따라서 표면파 실험을 통하여 매질의 R파 속도,  $V_R$ 을 측정하면 식(5)~식(7)의 관계를 이용하여 영계수, 전단계수와 같은 탄성특성치를 결정할 수 있다. 이 때 포아손비나 밀도는 매질의 종류에 따라 근사적인 값을 알 수 있으므로 적절한 값의 가정치를 사용하는 것이 일반적이다.

### 2.5 공동의 검출

매체내에 공동이나 균열과 같은 불연속 지대가 존재할 경우에 표면파 에너지의 일부는 반사되거나 체적파 형태로 산란(scattering) 된다.<sup>(24)</sup> 이때 표면파의 분산특성은 무결함 매체(intact medium)에서와는 다른 양상을 나타내게 된다. 공동이나 균열이 표면파의 정상적인 전파에 미치는 영향의 정도나 패턴은 공동 및 균열의 형상, 크기, 깊이 등에 따라 달라질 것이나 아직까지 이러한 영향인자를 모두 고려하여 표면파의 분산특성을 예측할 수 있는 포괄적인 해석적 이론은 부재하므로 현재로서는 실험적 연구를 통한 접근이 불가피하다.

표면파 기법을 이용한 공동의 검출 문제와 관련하여 가장 우선적으로 고려해야 할 사항은 R파의 파장과 공동의 상대적 크기, 그리고 감지점과 공동의 상대적 위치라 할 수 있다. 이는 실제적으로 표면파 기법을 통해 공동의 존재 여부 자체를 검출할 수 있는 가능성을 파악하는데 가장 중요한 요소이다. R파는 2.1에서 서술한 바와 같이 대부분의 에너지가 한 파장 깊이에 분포함을 감안할 때 직관적으로 공동의 깊이보다 작은 파장의 R파 들은 공동의 영향을 별로 받지 않고 마치 무결함 매체에서와 같은 정상적인 분산특성을 보일 것으로 추측된다. 따라서 분산곡선의 파장에 따른 변화 패턴을 분석하면 공동의 존재 여부 및 대략적인 공동의 깊이의 추정이 가능할 것으로 추정된다. 또한, 감지점의 위치에 따라 포착된 진동파 신호에서 공동으로 인한 교란의 정도가 달라질 것이므로 감지점의 위치를 달리하여 얻은 일련의 분산곡선들을 비교분석하면 축선상의 공동의 위치를 파악할 수 있을 것으로 추정된다.

### 3. 실험

본 연구에서는 재료의 시간경과에 따른 강성도 변화와 공동 검출에 표면파 기법을 적용할 수 있는가를 구명하기 위하여 모형 콘크리트 슬래브를 제작하여 일련의 실험을 수행하였다. 연구의 주안점은 양생중의 연약한 콘크리트체를 대상으로 시험을 적용함에 따른 세부 실험절차의 개량과 강성도 변화 및 공동의 존재를 효과적으로 검출할 수 있는 데이터 분석 포맷의 정립에 두었다.

### 3.1 콘크리트 슬래브

실험을 위하여 미국 텍사스 오스틴 대학 토목과 지하실험실 내에 길이 10피트(feet), 폭 5피트, 두께 20인치(inch)의 콘크리트 슬래브를 제작 설치하였다. 슬래브는 포트랜드 시멘트와 모래, 그리고 최대 입경 0.5인치의 콩자갈(pea gravel)을 배합한 레미콘(ready-mixed-concrete)을 운반·타설하여 조성하였다.

슬래브는 그림 11에 나타낸 바와 같이 네 부분으로 구분하여 각각 다른 종류의 실험을 수행하였다. 제 1분할 지역은 공동이 없는 무결함 단면(intact section)으로 하여 양생중 콘크리트의 강성도 변화를 측정하는 실험을 수행하였다. 제 2 및 제 3 분할지역에는 내부에 폭 2인치의 정사각형 단면을 갖는 채널형태의 공동을 표면으로부터 공동의 중심까지 깊이가 각각 2인치 및 4인치 되도록 조성하여 공동검측을 위한 실험을 수행하였다. 공동은 콘크리트 타설전에 정사각형 알루미늄관을 매설하고 타설된 콘크리트가 어느 정도 굳은 후 인발해내는 방법으로 형성하였다. 한편 제 4분할 지역은 향후 Impact-Echo 시험 및 Cross-Hole 시험과 같은 비교 시험의 수행을 목적으로 슬래브 바닥면의 일부분을 계단형상으로 만들고, 중간지점의 몇군데에 슬래브를 수직으로 관통하는 방향과 슬래브의 바닥면에서 슬래브의 폭방향을 따라 관통하는 방향으로 원형관관을 매설하여 진동감지기를 내부에 설치할 수 있도록 하였다.

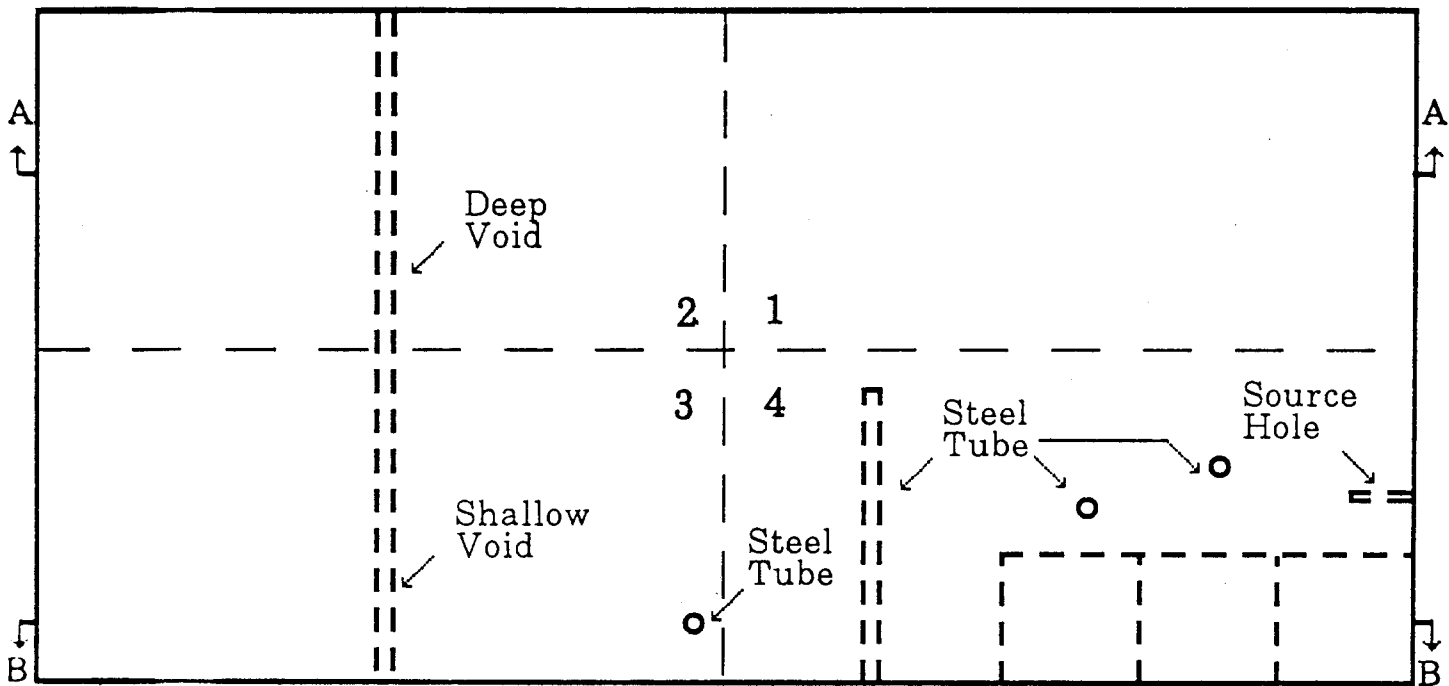
콘크리트는 타설 직후 진동봉(vibration rod)를 이용해 세밀한 다짐작업을 하였으며 상부표면은 매끄럽게 마감처리하였다. 실험은 이와같은 콘크리트의 다짐, 표면 마무리 작업을 마치고 표면위에 진동 감지기를 설치한 직후 곧바로 수행되었는데, 레미콘 배합기에 물을 섞은 시각을 기준으로 약 3시간 경과후 부터 데이터의 측정이 이루어졌다.

### 3.2 시험장비

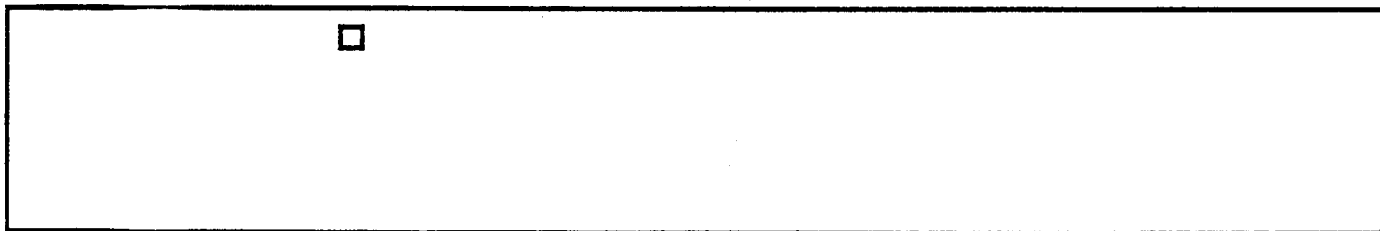
본 연구에서 사용한 진동발생장치는 압전식 진동기(piezoelectric vibrator)로서 미국 Wilcoxon Research사가 제작한 모델명 F7 및 F8 두 종류를 사용하였다. 이들은 각각 500~20,000Hz 및 200~10,000Hz의 고주파수 진동을 효과적으로 유발시킬 수 있는 가동식(portable) 소형 진동기로서 콘크리트체와 같이 단단한 물체에 작용시킬 경우 매우 높은 고주파수의 진동파를 유발시키는데 적절한 진동기 이다.

진동감지기는 압전식 가속도계(piezoelectric accelerometer)를 채택하였는데 미국 PCB사가 제작한 모델명 303A02 및 303A03 두 종류를 사용하였다. 이 가속도계는 직경 7mm, 높이 15mm, 무게 2.3g의 소형으로서 공진주파수(resonant frequency)가 각각 100KHz 및 70KHz 이고  $\pm 10\%$  측정오차를 보이는 주파수 반응 대역은 7~20,000Hz로서 고주파수의 진동을 정밀측정 하는데 적합한 진동감지기 이다.

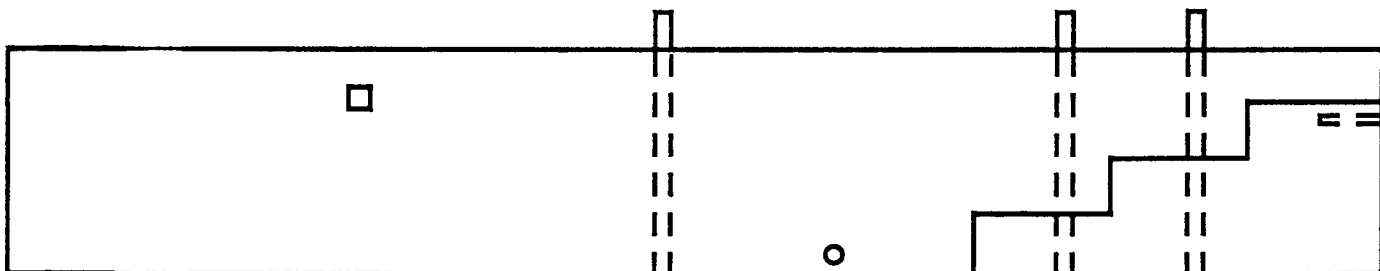
진동신호분석기는 미국 Hewlett Packard 사의 모델명 HP 3562A Dynamic Signal Analyzer를 사용하였다. 이 장비는 분석채널 수가 2개 이고, 양 채널 동시 사용시 분석가능 주파수의 범위가  $60\mu\text{Hz} \sim 50\text{KHz}$  인 장비로서, 디지털 샘플링(digital sampling)과 고속 푸리에 변환(FFT) 연산 알고리즘을 토대로 각종 주파수 특성 함수를 즉시처리(real-time process)할 수 있다. 그리고 진동기의 작동을 위한 입력가진신호(input exciting signal)를 디지털 방식으로 생성시키는 기능이 내장되어있다. 따라서 본 연구에서는 진동기의 가동을 위해 별도의 신호발생기(signal generator)를 사용하지 않고, 이 장비에 내장된 무작위 진동신호(random vibration signal) 및 파열정현파(burst sine wave signal)를 직접 진동기에 입력시켰다.



a. Plan View



b. Cross-Sectional View (A-A)



c. Cross-Sectional View (B-B)

Scale  $\frac{1 \text{ foot}}{12 \text{ inches}}$

Fig. 11. General Geometry of Test Concrete Slab

### 3.3 진동감지기의 설치

여러개의 진동감지기를 타설직후의 연약한 콘크리트 표면에 동시에 설치하기 위하여 본 연구에서는 그림 12에 나타낸 특별한 보조장치를 제작하였다. 이와같은 장치를 사용한 것은 무엇보다 각 감지기를 소요의 위치에 정확하게 놓이도록 하고, 또한 감지기가 콘크리트 내에 묻히는 깊이 등을 동일하게 유지하여 상이한 정착(coupling) 상태가 발생함에 따른 측정오차를 배제하기 위한 조치이다. 이 장치는 감지기가 삽입되는 구멍의 중심선을 따라 두 쪽으로 해체될 수 있도록 설계되었다. 두 쪽의 보조장치를 붙인 상태에서 중앙에 형성된 구멍안으로 감지기를 삽입한 후, 구멍의 측면을 관통해 형성된 고정나사를 조여 바닥면으로부터 모든 감지기가 동일한 크기 만큼 돌출되도록 고정시킨다.

이와 같은 상태에서 보조장치의 바닥면이 콘크리트 표면에 완전히 접촉되도록 한 후, 두 쪽의 보조장치를 결합시키는 고정나사를 풀고 양 쪽으로 조심스럽게 밀어내어 분리시키면 감지기의 정착상태가 교란되는 것을 방지 할 수 있다. 보조장치의 양 끝을 사각형상으로 다 낸 것은 보조장치를 사각지지봉에 지지될 수 있도록 한 조치로서, 분리작업시 지지봉을 따라 두 쪽의 보조장치가 평행을 유지하며 분리될 수 있도록 한 것이다.

한편, 감지기의 하부에 돌출된 정착용 나사부에는 직경 8 mm의 육각너트(nut)와 직경 9.5 mm의 톱니형 와셔(washer)를 접착시켜 일체로 만든 정착부를 연결하여 감지기가 콘크리트 표면하에 견실하게 정착될 수 있도록 하였다. 그리고 급경화 석고제(hydrostone)를 물에 섞어 만든 교착용액을 콘크리트 표면에 소량 떨어뜨린 후 감지기가 삽입될 때 콘크리트와 섞이게 함으로써 정착부가 콘크리트내에 견고하게 부착되도록 하였다.

감지점의 간격은 2, 4, 8, 인치를 고려하였으며 진동점과 첫번째 감지점의 간격은 감지점 간격과 동일하게 하였다. 무결함(intact) 단면에서는 진동점으로부터 각각 2, 4, 6, 16 인치되는 곳에 4개의 감지기를 설치하였다. 공동이 있는 단면에 대해서는 공동을 가로지르는 방향으로 8개의 감지기를 2인치 간격으로 설치하고 선정된 감지점 간격(2, 4, 8인치)에 해당하는 한 쌍의 감지기를 택하고, 진동점의 위치를 이동시키는 방식을 취하였다. 그림 13에는 무결함 단면 및 공동이 있는 단면에서 채택된 측정점의 배열구조와 측정순서를 나타내었다. 공동이 없는 단면의 측정점에 붙인 숫자는 진동점으로부터 각 감지점이 떨어진 거리(단위: 인치)를 나타내며, 공동이 있는 단면에서 숫자는 공동으로부터 각 측정점이 떨어진 거리를 나타낸다. 부(-)의 수치는 측정점이 그림에서 공동의 좌측에 있는 경우를, 정(+)의 숫자는 오른쪽에 있는 경우를 의미한다. 그리고 한 쌍의 측정점을 이은 디귤( $\zeta$ )자 모양의 연결선상에 표시된 숫자는 선정된 각지점 배열구조의 이동 순서를 의미한다. 이 때 진동점은 모든 경우에서 선택된 감지점 배열구간의 왼쪽에 위치한다.

## 4. 실험결과 및 분석

표면파 시험의 측정결과는 파장-속도, 주파수-위상각, 주파수-속도 좌표평면상에 나타내었다. 공동이 있는 경우의 측정결과는 데이터의 수가 많은 관계로 부록에 별도로 수록하였으며 여기서는 이들 중 대표적인 결과만을 발췌하여 다룬다.

### 4.1 강성도 변화의 측정결과

그림 14에는 무결함 단면에서 감지점 간격이 2 인치인 경우 양생시간의 경과에 따른 R파 분산곡선의 변화를 나타내었다. 그림에서 보듯이 각 분산곡선의 뚜렷한 평균속도의 증가는



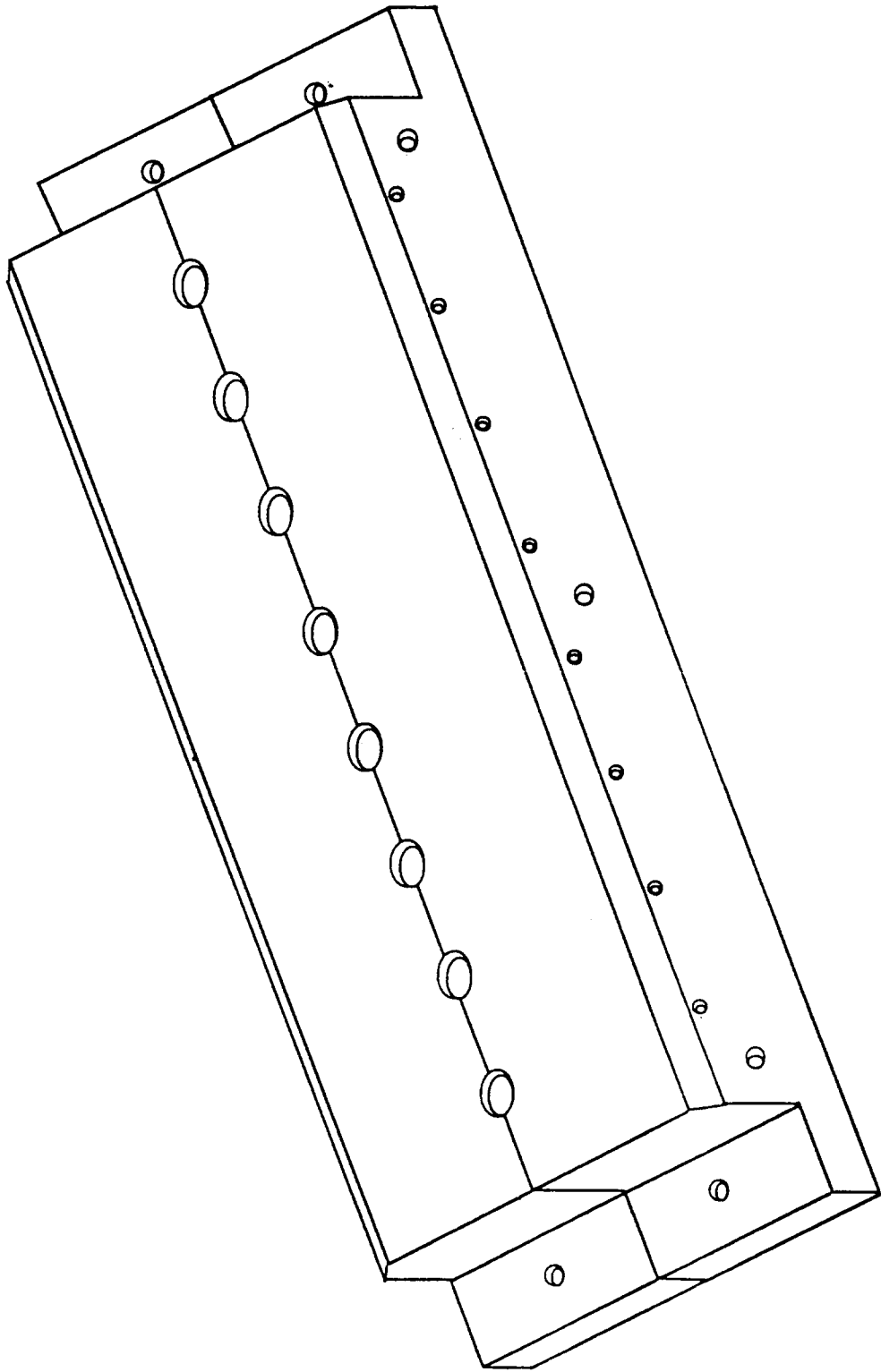
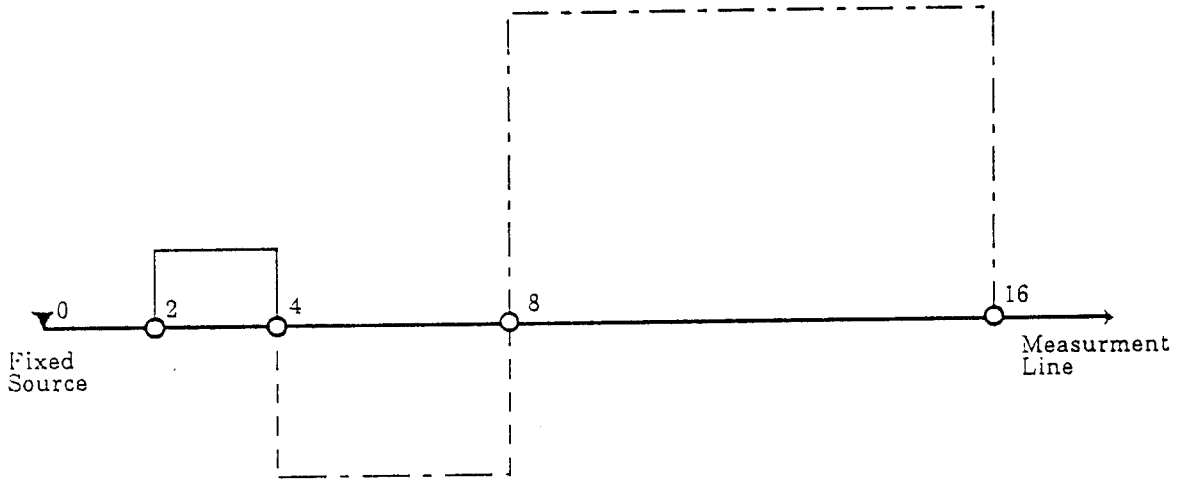
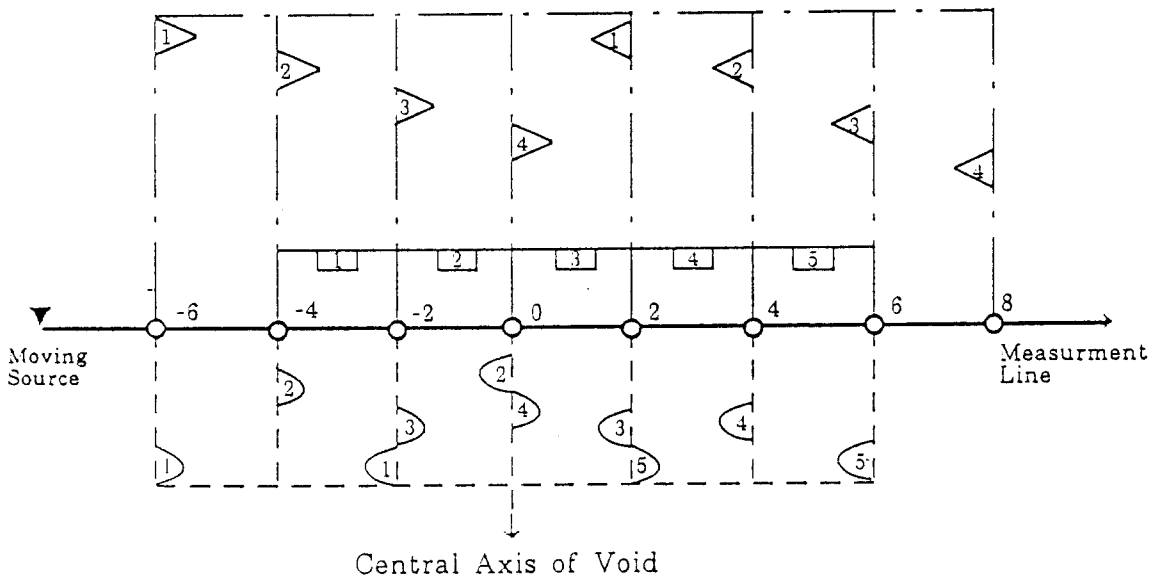


Fig. 12. Equipment Used for Precise Installation of Receivers on Soft Concrete Surface



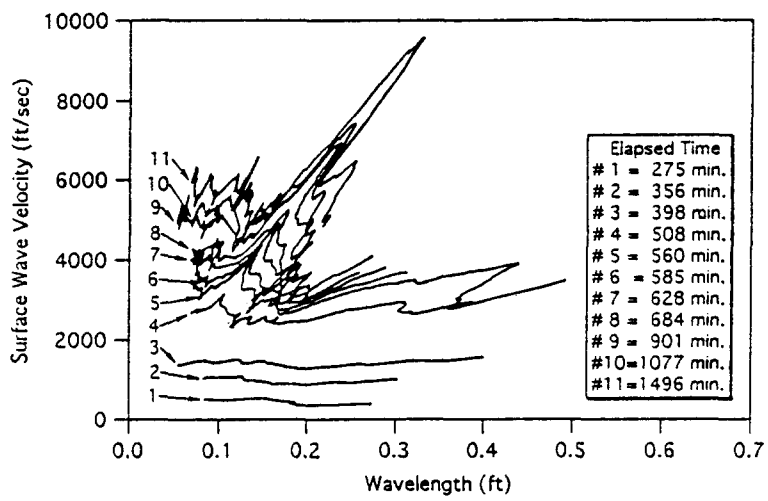
a. For Intact Section



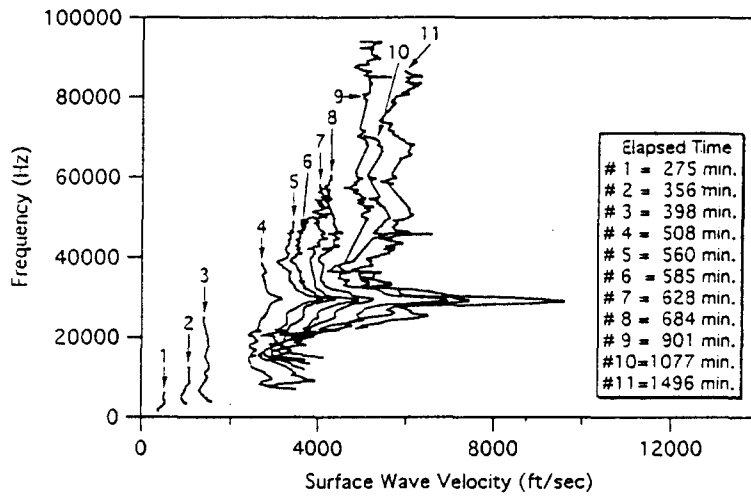
- 2 Inch Spacing
- - - - 4 Inch Spacing
- . - . 8 Inch Spacing
- ▼ : Source
- : Receiver

b. For Voided Section

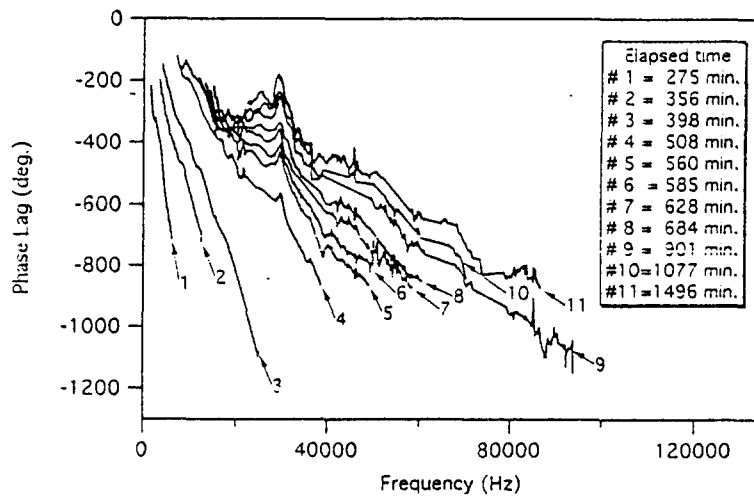
Fig. 13. Arrangement of Receivers for the SASW Tests



a. Wavelength - Velocity Plot



b. Frequency - Velocity Plot



c. Frequency - Phase Plot

Fig. 14. Experimental Dispersion Curves of Surface Waves from Intact Concrete Slab with Receiver Spacing of 2 inches, Measured at Different Curing Times.

양생시간 경과함에 따라 콘크리트의 강성도가 증대함을 잘 나타내주고 있다.

그림 14의 결과를 고찰하면 양생 초기에는 파장-속도의 분산곡선이 수평한 직선에 가까운 형상을 보여 파장이 슬래브 두께(20 인치, 1.7피트)보다 작은 경우에 예측되는 이론적인 분산곡선에 부합되는 변화를 보이고 있으나, 양생시간이 어느정도 지나면 불규칙하게 산과 골이 형성되는 형태로 변화하기 시작하고 있음을 알 수 있다.

특이한 것은 산과 골이 형성되는 파장치가 일정하게 증가하여 분산곡선의 전체적 형상은 마치 우측으로 이동하여 확대되는 변화를 보이고 있는 점이다. 이에 대한 원인을 알아보기 위하여 그림 14b, 14c에는 주파수-위상각 곡선과 주파수-속도 곡선을 나타내었다. 그림에서 보듯이 그림 14a의 산과 골들에 해당하는 주파수 성분은 양생시간에 관계없이, 즉 콘크리트의 굳은 정도에 무관하게 일정한 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 콘크리트가 굳어갈수록 R파의 전파속도는 빨라지는데, 동일한 주파수라 할지라도 파장의 계산치는 증가할 것이므로 그림 15a의 파장-속도 분산곡선에서 산과 골에 해당되는 파장 값은 우측으로 이동되는 것이다.

그런데 이와같은 특정한 주파수 성분에서 평균속도치를 상회하는 큰 값의 전파속도가 측정되는 것은 주어진 감지점 간격에서 기본모드 외에 고차모드의 R파가 검출된 결과이거나 근접효과, 그리고 반사파 에너지의 다중반사(multiple reflection)로 인한 보강간섭에 의한 감지기-정착부의 일체가 일으키는 공진(resonance) 현상 등이 복합적으로 미치는 영향에 기인하는 것으로 추측된다. 그림 14b, 14c에서 보듯이 이들의 영향은 콘크리트가 굳어갈수록 내부감쇠(internal damping)가 감소하므로 점차 증대하고 있음을 알 수 있다. 특히, 그림 14b, 14c에서 약 30 kHz 주파수 부근에서 보이는 극단적인 교란은 데이터 전체의 질을 떨어뜨리는 결과를 초래하고 있음을 알 수 있다.

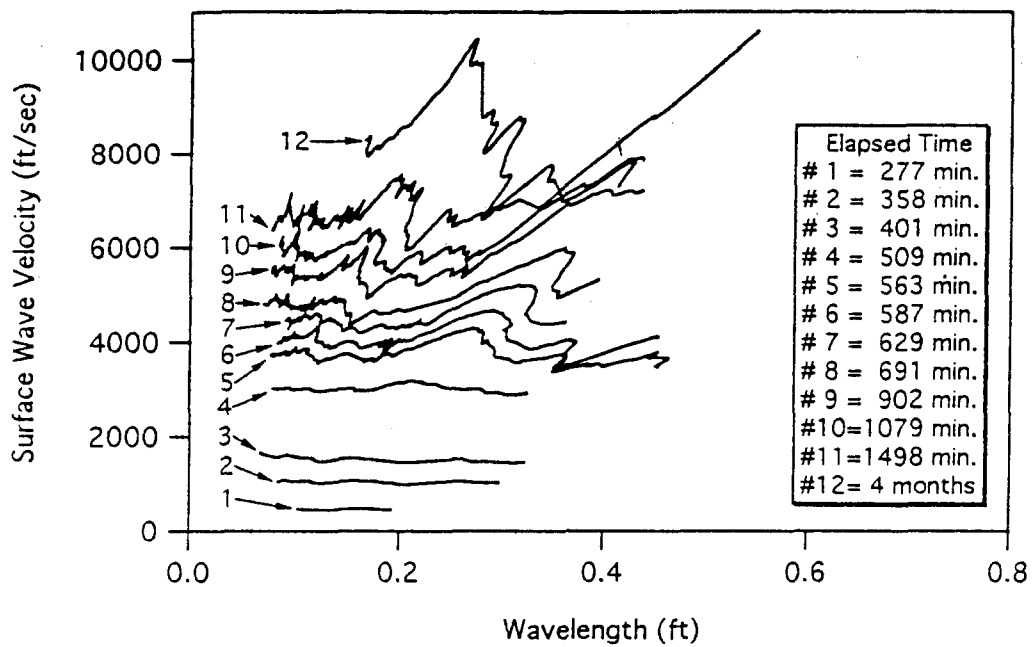
그러나 그림 15 및 그림 16에는 감지기 간격을 각각 4인치 및 8인치로 넓혀 측정한 결과를 나타내었는데 감지기가 2인치 일 때 보다 훨씬 양호한 결과를 주고 있음을 알 수 있다. 그리고 그림 14b에서 보이는 약 30 kHz 주파수 부근의 극단적인 분산곡선의 비정상적 변화가 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 아마도 감지기 간격이 달라지므로써 근본적으로 반사파 에너지의 다중반사 패턴이 달라져 감지기가 공진됨이 없이 정상적으로 거동하기 때문인 것으로 추측된다. 그리고 측정점의 간격이 넓혀짐에 따라 근접효과로 인한 오차요인이 감소되고, 감지기의 정착상태가 양호했기 때문이라고 추정된다.

한편, 분산곡선의 불규칙한 변화정도가 심한 경우에는 이론적인 수평직선의 분산곡선을 가장한 평균 R파 속도를 결정하기가 곤란한데, 이러한 경우라도 주파수-위상각 곡선을 이용하면 다음과 같은 절차를 통하여 평균속도를 효과적으로 결정할 수 있다. 그림 16b와 같은 펼친 주파수-위상각 곡선에서 우측상단 모서리의 원점을 통과하고 위상각 곡선을 커브피팅하는 하나의 직선을 긋는다. 커브피팅 직선은 최소자승(least-square) 원리를 적용하여 작도하거나, 복잡하지 않은 경우는 극단적인 굴곡부위를 제외한 부분을 목측으로 적절히 연결하여 작도하면 된다. 이렇게 작도된 직선의 기울기를 측정하면 다음의 관계로부터 평균 R파 속도를 결정할 수 있다.

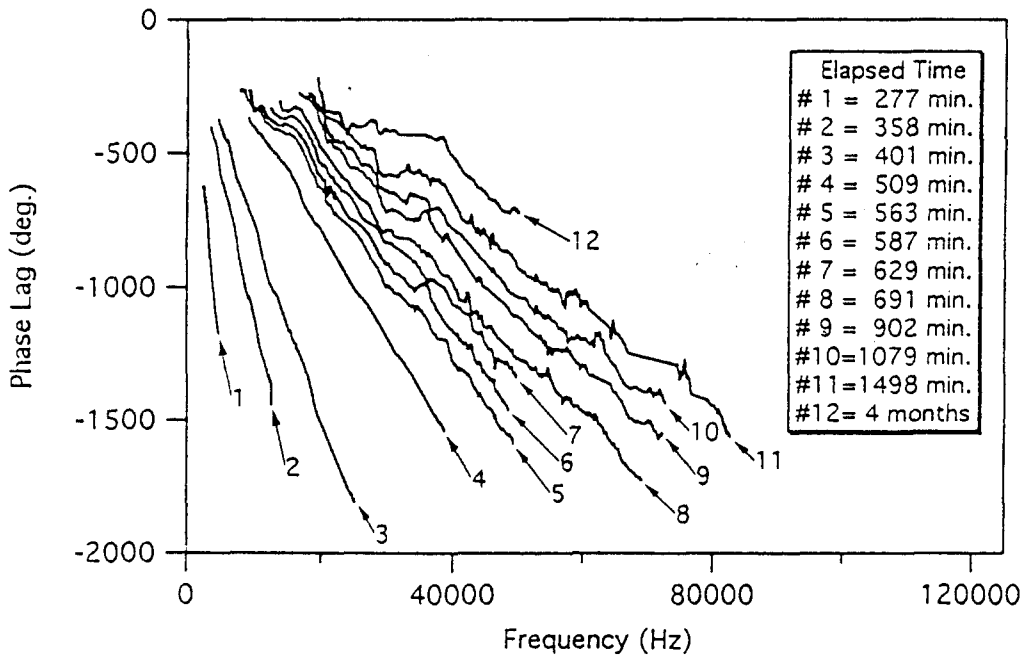
$$\begin{aligned}
 V_R &= 360^\circ \left[ \frac{f}{\theta} \right] \cdot S \\
 &= 360^\circ \cdot \Delta \cdot S \quad \dots \dots (8)
 \end{aligned}$$

여기서  $\Delta=f/\theta$ 는 위상각 곡선의 평균기울기이고, S는 감지점의 간격이다.

그림 17에는 이와같은 방법으로 결정한 평균 R파 속도의 양생시간 경과에 따른 변화를 감지점 간격별로 나타내었다. 그림에서 보듯이 각 측정점들을 커브피팅한 특성곡선은 시멘

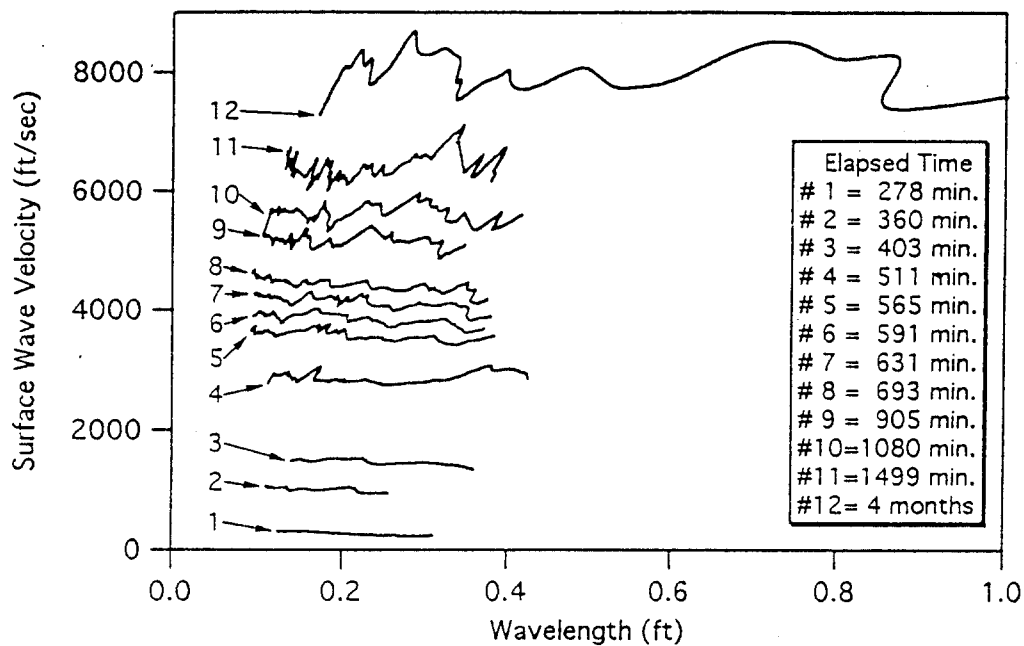


a. Wavelength - Velocity Plot

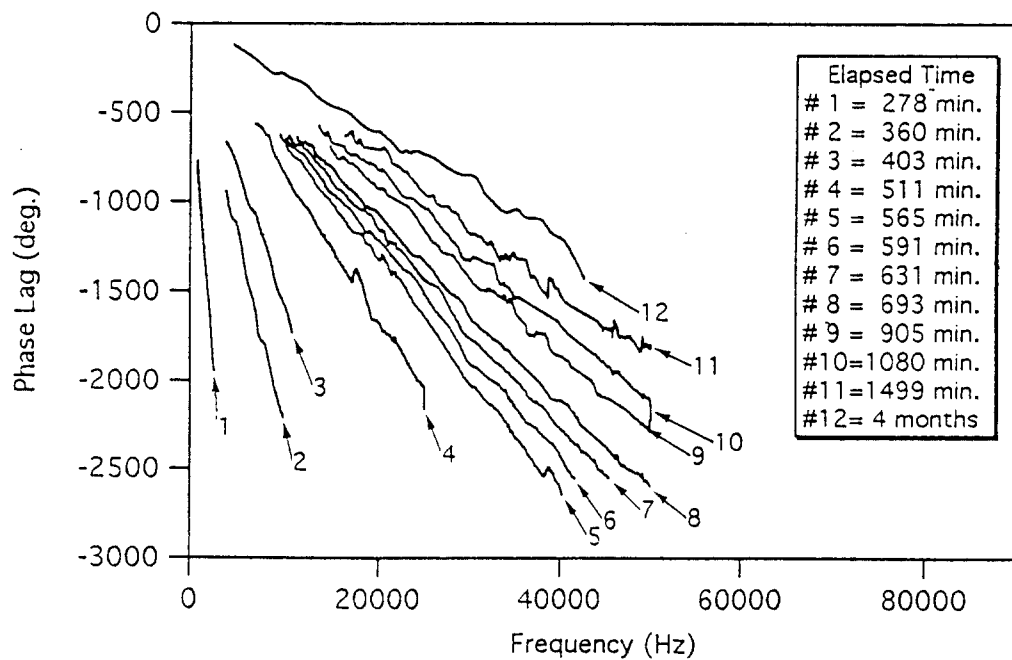


b. Frequency - Phase Plot

Fig. 15. Experimental Dispersion Curves of Surface Waves from Intact Concrete Slab with Receiver Spacing of 4 inches, Measured at Different Curing Times.

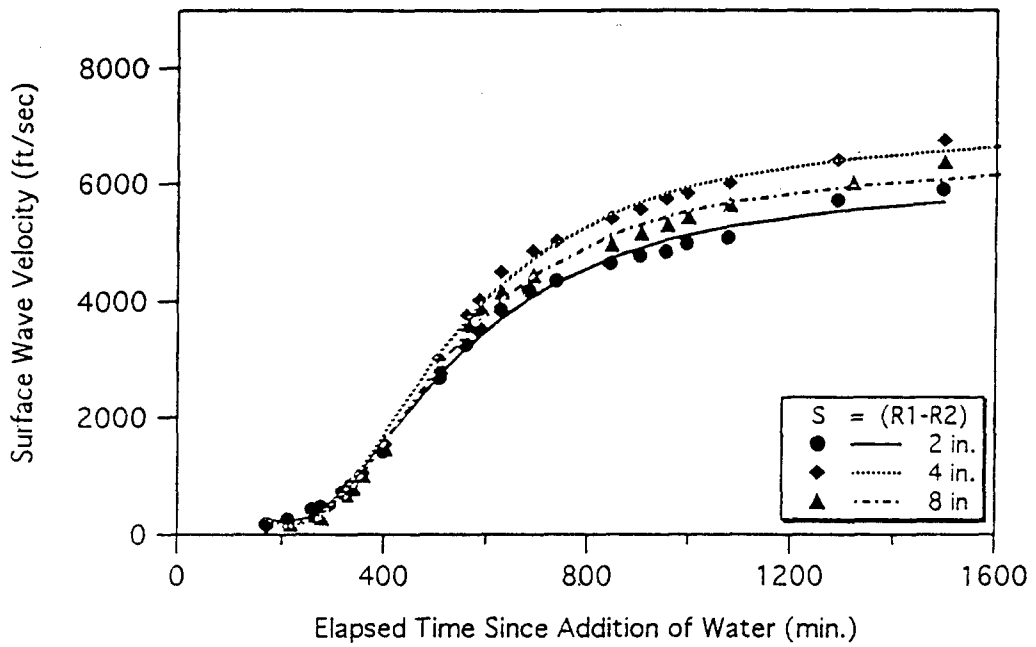


a. Wavelength - Velocity Plot

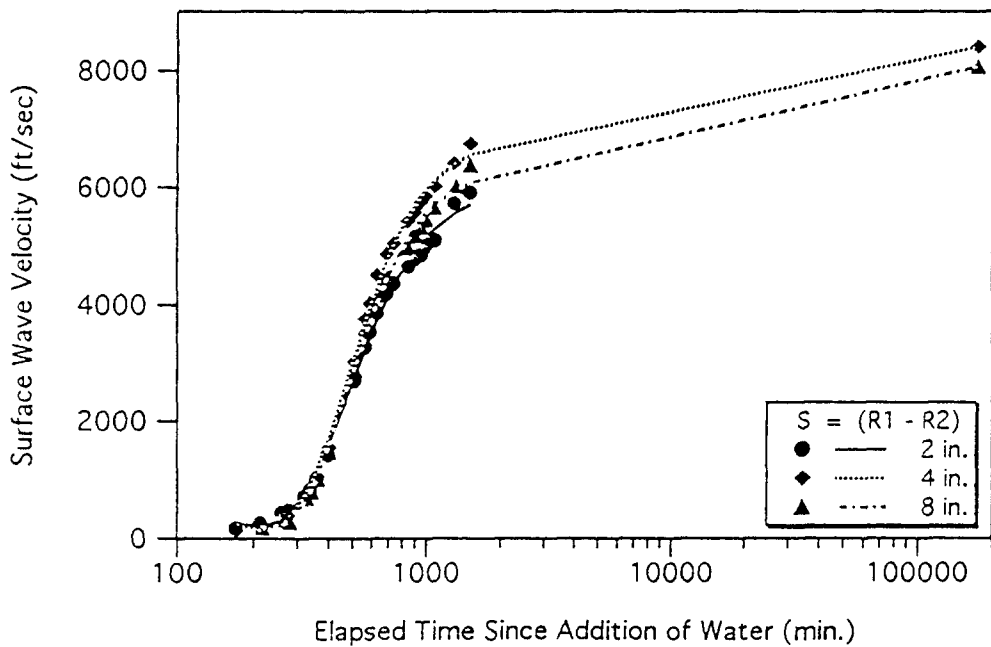


b. Frequency - Phase Plot

Fig. 16. Experimental Dispersion Curves of Surface Waves from Intact Concrete Slab with Receiver Spacing of 8 inches, Measured at Different Curing Times.



a. For Elapsed Time up to 1,600 min.



b. For Elapsed Time up to 4 months

Fig. 17. Variation of Average Surface Wave Velocities with Time for the Curing Concrete Slab.

트 콘크리트에서 예측되는 전형적인 강성도 변화 패턴을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그리고 모든 측정점들은 큰 편차(deviation) 없이 특성곡선에 매우 근접분포함을 알 수 있다. 이와같은 결과는 표면파 기법이 양생중의 콘크리트와 같이 시간에 따라 강성도가 변화하는 재료의 특성을 매우 효과적으로 측정할 수 있는 시험법이 될 수 있음을 입증하는 것이다. 감지점의 간격이 따라 평균 R파 속도값이 차이를 보이는 것은 근본적으로 축선을 따른 재료의 국부적 비균질성에 기인하는 것으로 볼 수 있으나, 전술한 바와 같이 근접효과 및 감지기의 정착상태 차이 등으로 인한 데이터의 질의 양호도에도 관계가 있다. 한편, 양생기간에 따른 R파 속도 변화곡선이 얻어지면, 식(5)~식(7)의 관계를 이용해 영계수 및 전단계수의 변화곡선도 얻을 수 있다.

## 4.2 공동검측 결과

공동검측 실험에서는 3.3에서 전술한 바와 같이 감지점 간격을 2, 4, 8 인치로 하는 측정배열 구간을 그림 13b에 나타낸 바와 같이 공동을 가로지르는 방향으로 이동시키면서 일련의 시험을 수행하였다. 측정결과의 분석은 기본적으로 공동이 없는 경우에 얻어진 측정결과와의 비교 분석을 통해 공동이 표면파의 분산특성 변화에 미치는 영향의 정도와 패턴을 파악하는 방식을 취하였다.

전반적으로 측정 결과들은 예측한 바와는 달리, 몇몇 경우를 제외하고는 각종 영향요인의 정량적 분석이 매우 어려울 정도로 불규칙하고 일관성없는 변화를 보이고 있다. 따라서 데이터의 분석시에는 2.5에서 서술한 이론적인 변수분석 결과를 고려할 때, 공동의 검측과 관련하여 가장 중요한 고려인자로 판단되는 파장과 공동의 상대적 크기 및 감지점과 공동의 상대적 위치에 대한 검토에 분석의 중심을 두었다.

### 1) 파장과 공동의 상대적 크기

표면파 에너지의 대부분은 한 파장 깊이내에 분포하므로 공동이 한 파장깊이 이하에 놓이는 경우에는 공동의 영향이 거의 없을 것으로 예측된다.

그림 18에는 이러한 예측에 부합되는 대표적인 측정결과의 일례를 나타내었다. 그림의 결과는 공동의 중심깊이가 4인치, 감지점 간격이 8인치인 경우, 양생시간(T) 12시간 전후에 얻은 것이다. 그림에서 보듯이 감지점 위치에 따라 예외적인 경우도 있으나 대체적으로 파장이 공동의 상면깊이(3인치, 0.25 피트)보다 커지면 분산곡선은 큰 폭의 기복을 보이는 변화를 나타내기 시작한다. 그리고 파장이 커질수록 기복의 정도는 점차 증대하여, 파장이 공동의 바닥면 깊이(5인치, 0.4피트)를 넘어서면 한층 더 급격한 기복이 나타나게 됨을 알 수 있다. 이와 같은 추세는 감지점 간격 및 공동의 깊이, 그리고 양생시간이 다른 각 경우에 있어서도 대체적으로 일관성있게 나타난다.

이러한 실험결과는 앞에서 서술한 R파의 깊이에 따른 에너지 분포특성을 고려한 수치 분석성상을 토대로 한 예측과 공동의 영향이 극대화되는 파장영역에서 다소의 차이가 있는 것이다. 그러나 기타의 실험적 오차요인의 영향과 대부분의 경우 파장의 공동 중심깊이의 2~3배에 이르는 긴 파장의 데이터를 얻을 수 없었던 실험적 한계를 감안 할 때, 실험결과는 이론적 예측과 크게 빗나가는 것은 아니라고 판단된다.

### 2) 감지점과 공동의 상대적 위치

앞서 2.5의 수치분석 결과를 통해서 예상되는 바와 같이 측점이 공동에서 어느 이상 떨



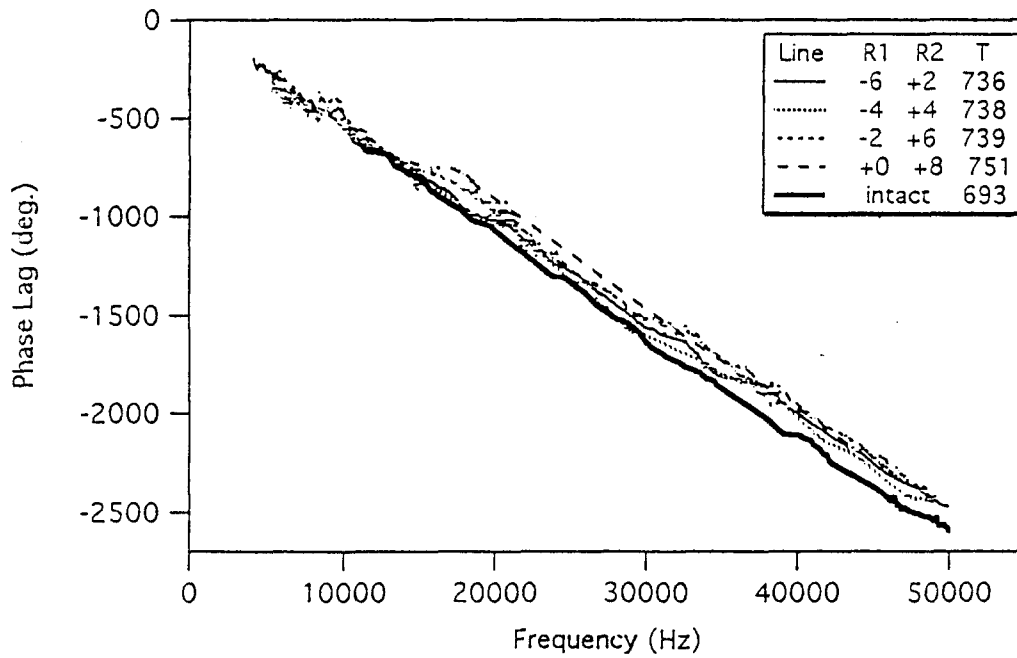
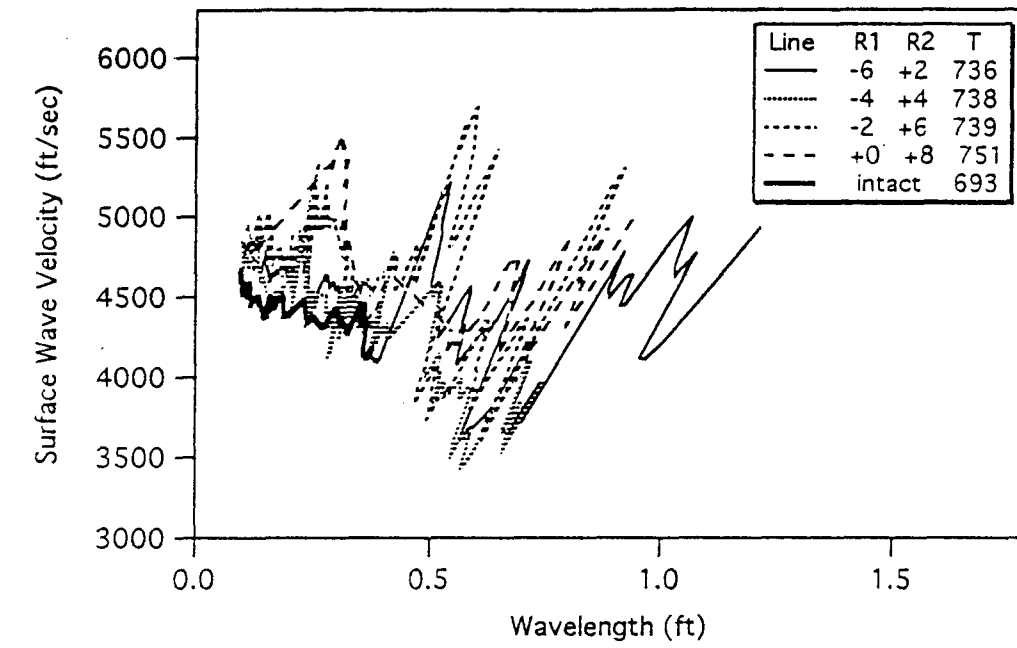


Fig. 18. Typical Dispersion Curves of Surface Waves from Concrete Slab with 2 inch-Square Void of 4 inch-Deep, Measured with Reciver Spacing of 8 inches.

어지면 공동의 영향은 없고, 가까운 경우라도 진동점이나 두개의 감지점이 공동을 중심으로 어떻게 놓이느냐에 따라 공동이 미치는 영향의 정도와 양상은 달라질 것으로 추정된다.

그림 19에는 이러한 예측에 부합되는 대표적인 측정결과의 일례를 나타내었다. 그림의 결과는 공동의 중심깊이가 4인치, 감지점 간격이 4인치인 경우, 양생시간 (T) 9시간에서 얻은 것이다. 분석의 편의상 각 분산곡선을 진동점과 공동의 거리가 멀고 두번째 감지점이 공동에 가까운 경우( $R_1=-6$ ,  $R_2=-2$  및  $R_1=-4$ ,  $R_2=0$ ), 공동이 감지점 사이에 놓이거나 ( $R_1=-2$ ,  $R_2=+2$ ) 첫번째 감지점이 공동의 바로 위에 놓이는 경우( $R_1=+0$ ,  $R_2=+4$ ), 마지막으로 진동점이 공동의 바로 위에 놓이며 첫번째 감지점이 공동에 가까운 경우로 구분한다. 이를 차례로 경우 1, 경우 2, 경우 3 라고 할 때, 각 경우에 속하는 분산곡선들은 대체적으로 유사한 변화패턴과 평균속도를 보이고 있음을 알 수 있다.

경우 1은 진동점과 감지점이 모두 공동의 좌측에 놓이는 상태이고, 경우 2와 3은 이들이 공동을 지나 점차 우측으로 이동된 상태임을 감안하면 분산곡선의 기복과 평균속도의 증감 패턴은 이와같은 축점과 공동의 대칭적 위치변화에 상응하는 것으로 볼 수 있다.

한편 경우 3이 무결함(intact) 단면에서의 결과와 큰 차이가 없는 것은 2.5에서 서술한 바와 같이 진동점이 공동의 바로 위에 놓이면, 공동에 반사되어 감지기 쪽으로 전파되어 나가는 반사파와 직접 전달되는 파 사이의 위상각 차는 거의 없게되어 분산곡선에서 공동의 영향이 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 판단한다. 반면에 경우 1과 경우 2는 진동점이 공동으로 어느정도 이상 떨어져 있으므로 반사파 및 산란파의 영향이 증대하여 분산곡선은 전술한 경우 3과는 크게 다른 변화를 보이는 것으로 추정된다.

그러나 감지기 간격, 공동의 깊이, 양생시간이 다른 경우 측정된 모든 측정결과를 종합적으로 검토할 때 이러한 추세가 일반적이라고 말하기는 매우 어렵다. 특히 양생시간이 경과하여 콘크리트가 굳어가면 파에너지의 감쇠가 적어 반사파 및 산란파의 영향이 증대하므로 감지점의 위치가 서로 다른 경우의 분산곡선들은 일관성 없이 복잡한 변화를 보이며 서로 얽혀 축점의 이동에 따른 영향을 분석하기가 사실상 불가능하였다.

그림 20에는 공동이 있는 경우에 얻어진 모든 분산곡선의 평균 R파 속도치를 감지점의 위치를 구별하지 않고 공동이 없는 경우에 얻어진 특성곡선과 함께 나타내었다. 그림에서 보듯이 감지기 간격 및 공동의 깊이에 따라 다소의 차이는 있으나 공동이 없는 경우와 비교할 때 측정치들은 매우 큰 편차를 보이며 산포되고 있음을 알 수 있다.

지금까지의 분석성고를 종합적으로 검토할 때, 표면파 시험으로부터 공동의 구체적 형상 및 규모, 축선상의 분포범위를 정확하게 추정하는 것은 매우 어렵다고 할 수 있으나, 그림 18 및 19와 같은 개별적인 파장-속도 또는 주파수-위상각 곡선의 변화패턴 분석과 그림 20과 같은 평균 R파 속도변화 양상의 종합검토를 통해 최소한 공동의 존재여부 및 공동깊이의 근사적 추정은 가능하다고 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 양생중 콘크리트 슬래브에 대한 일련의 실험을 통해 표면파 시험을 이용한 재료의 시간경과에 따른 강성도 변화와 공동의 검출을 위한 실험기술 및 데이터 분석에 관하여 연구하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 양생중 콘크리트 슬래브와 같이 시간경과에 따라 강성도가 변화하는 재료의 특성 파악에 표면파 기법이 효과적인 원위치 시험법이 될 수 있음을 밝혔다.
- 2) 양생 초기의 연약한 콘크리트 표면에 효과적으로 감지기를 붙이는 방법과 적절한 감지점

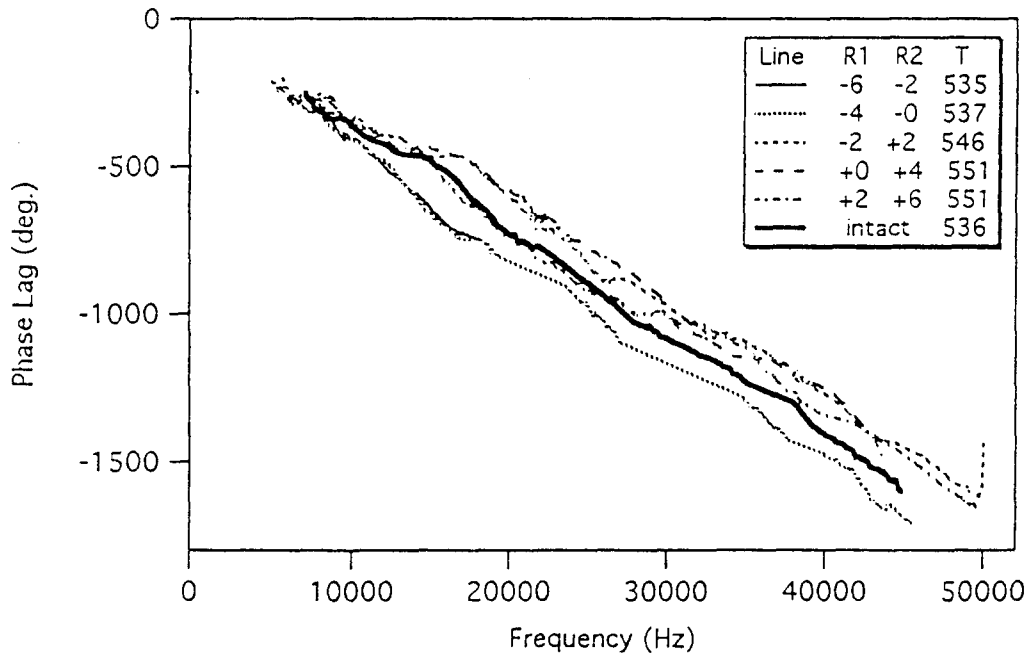
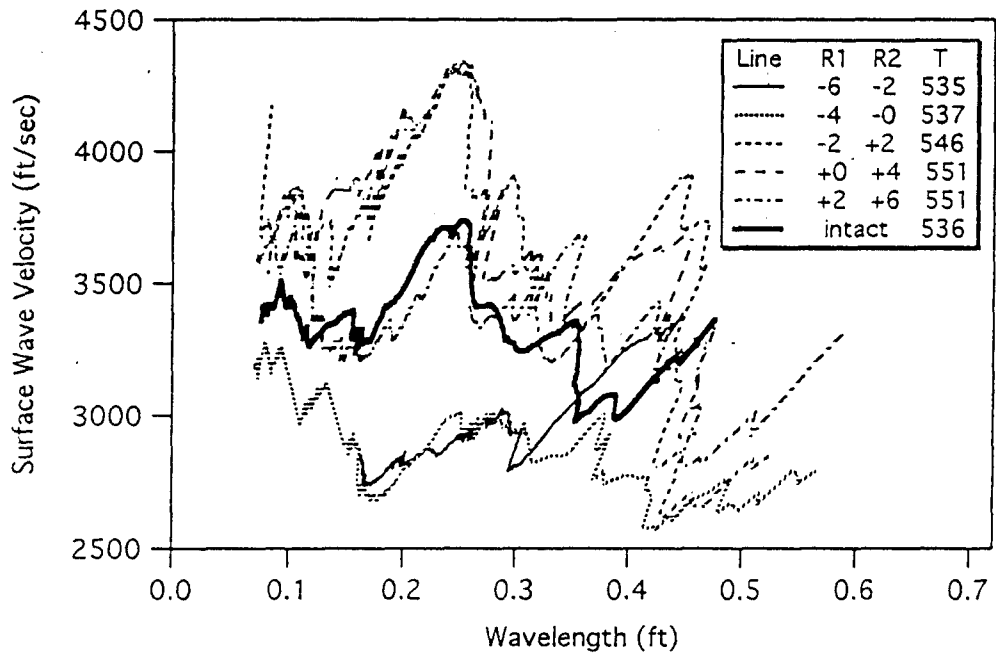
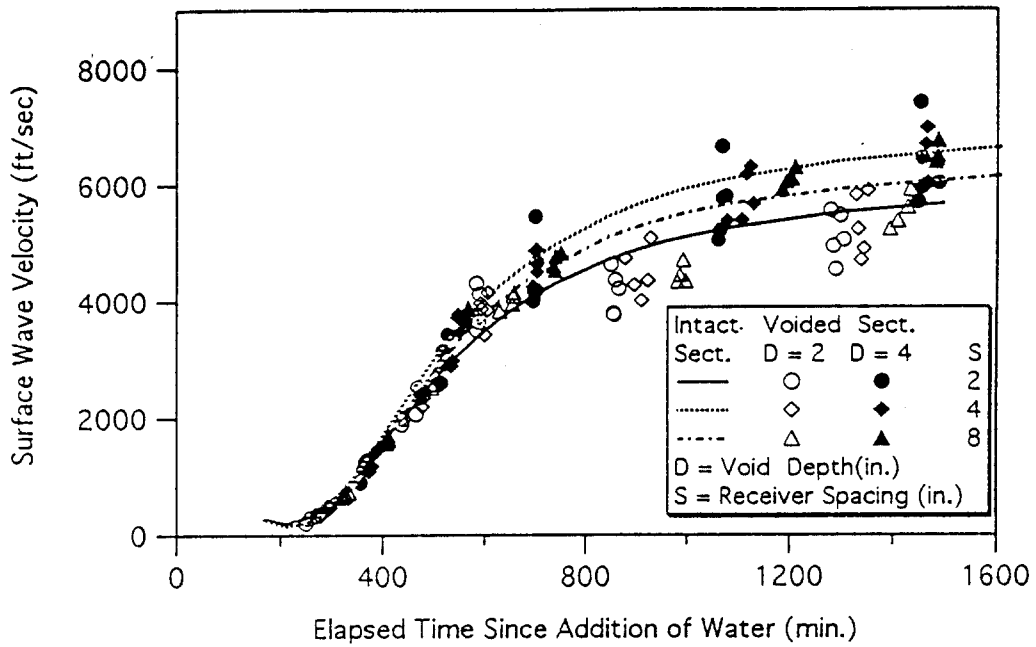
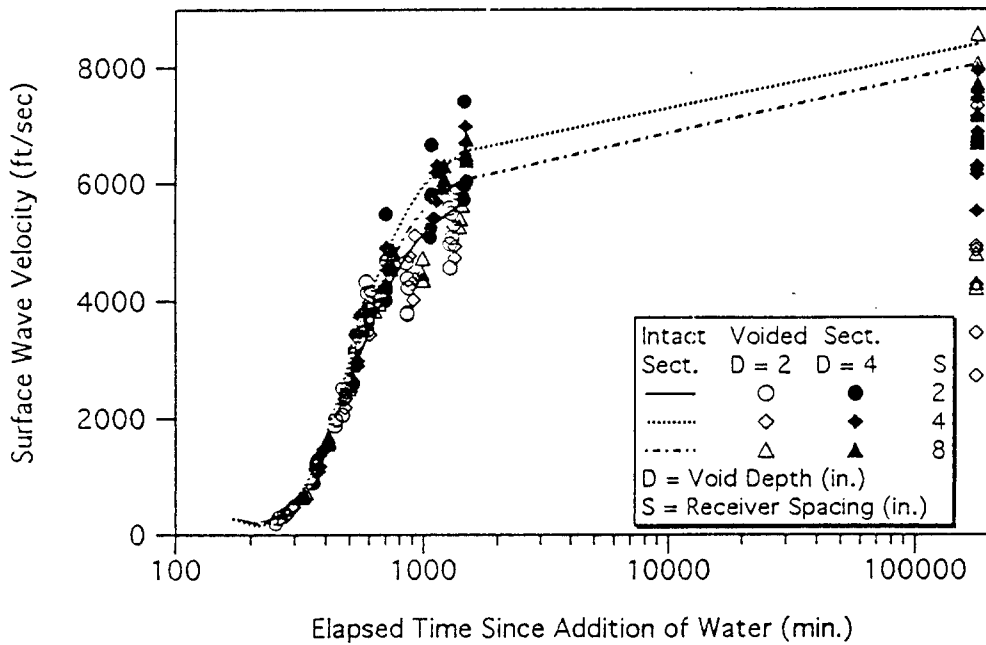


Fig. 19. Typical Dispersion Curves of Surface Waves from Concrete Slab with 2 inch-Square Void of 4 inch-Deep, Measured with Receiver Spacing of 4 inches.



a. For Elapsed Time up to 1,600 min.



b. For Elapsed Time up to 4 months.

Fig. 20. Comparison of Changes in Average Surface Wave Velocities from Intact and Voided Concrete Slabs with Various Receiver Spacings.

- 간격의 선정, 반사파의 영향을 최소화할 수 있는 방안을 제시하였다.
- 3) 표면파 기법으로 공동의 존재 여부 및 공동깊이의 대략적 추정은 가능하나 구체적인 공동의 입체적 크기 및 형상, 그리고 축선을 따른 위치를 정확히 추정하는 것은 매우 어렵다.
  - 4) 본 연구의 실험결과를 기준할 때 파장이 대략 공동의 상면깊이 이상일 경우에는 공동의 존재를 확신할 수 있을 만큼 분산곡선의 불규칙한 변화가 발생한다.
  - 5) 공동이 있을 경우 R파의 평균속도는 일률적으로 증가 또는 감소하고 경향을 나타내지 않고, 공동과 축점의 상대적 위치, 공동의 깊이와 축점의 간격이 달라짐에 따라 불특정하게 변화한다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 1990년도 전반기 Post-Doc. 지원사업의 도움으로 이루어진 것으로서 이와 같은 배려를 해준 한국과학재단에 충심의 감사를 드린다. 아울러 연수기관인 미국 University of Texas at Austin 토목공학과 부설 Geotechnical Engineering Center에서 연구하는 동안 연구설비의 이용을 비롯한 물심양면의 배려와 격려를 아끼지 않았던 Kenneth. H. Stokoe, II 교수와 연구를 보조해준 Jame A. Bay 군, 그리고 행정지원의 노고를 아끼지 않았던 Mrs. Teresa Tice-Bogg에게도 깊은 감사를 드린다. 그리고 소속기관인 한국건설기술연구원의 이윤식 원장과 홍성완 실장 이하 임직원 여러분께서 보여주신 연구기간 동안의 후원에도 진심의 감사를 드린다.

## 참 고 문 헌

1. Jones, R., "Surface Wave Technique for Measuring the Elastic Properties and Thickness of Roads: Theoretical Development," *British Journal of Applied Physics*, Vol.13, 1962, pp.21-29.
2. Heisey, J.S., Stokoe, K.H., II, and Meyer, A. H., "Moduli of Pavement Systems from Spectral Analysis of Surface Waves," *Transportation Research Record* 852, Transportation Research Board, Washington D.C., 1982, pp. 22-31.
3. Nazarian, S, Stokoe, K.H., II, and W.R. Hudson, "Use of Spectral Analysis of Surface Waves Method for Determination of Moduli and Thicknesses of Pavement Systems," *Transportation Research Record* 930, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1983, pp. 38-45.
4. Nazarian, S., "In Situ Determination of Elastic Moduli of Soil Deposits and Pavement Systems by Spectral-Analysis-Surface-Waves Methods," *Ph.D. Dissertation*, The University of Texas at Austin, 1984, 453 p.
5. 김수일, 이두희, 우제윤, "Rayleigh파의 해석을 통한 다층토의 동적 물성 추정에 관한 연구," *연세대학교 산업기술연구소 논문집*, 제 17집, 제 2권(23), 1985, pp. 237-245.
6. Shao, K.Y., "Dynamic Interpretation of Dynaflect, Falling Weight Deflectometer and Spectral Analysis of Surface Waves Tests on Pavement System,"

- Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 1985, 149p.
7. Sanchez-Salinero, I.: "Analytical Investigation of Seismic Methods Used for Engineering Applications," Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 1986, 401 p.
  8. Sheu, J.C., "Applications and Limitations of the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, Dec. 1987.
  9. Hiltunen, D.R. and Woods, R.D., "SASW and Crosshole Test Results Compared", Proceedings of ASCE Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics II - Recent Advances in Ground Motion Evaluation, Park City, Utah, June 1988, pp. 279-289.
  10. 우제윤, "표면파 기법을 이용한 자연지반 및 포장구조의 전단파 속도 추정에 관한 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1989.2., 134 p.
  11. Kim, S.I. and Woo, J.Y., "Evaluation of Moduli of Pavement Systems by Spectral analysis of Surface Wave Technique," Proceedings of 11th. Internatinal Road Federation Meeting, Seoul, April, 1989, pp. 112-115.
  12. Douglas, R.A., Eddy, J.L., and Wahls, H.E., "On Transforms and the Dispersion Computations Used for Evaluating Layer Properties," In Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM STP 1026, A.J. Bush III and G.Y. Baladi, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 612-627.
  13. Stokoe, K.H., II, Rix, G.J., and Nazarian, S., "In Situ Seismic Testing with Surface Waves," Proceedings of 12th. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Jeneiro, Brazil, Vol. 1, Balkema, Rotterdam, Aug. 1989, pp.331-334.
  14. Rix, G.J. and Stokoe, K.H., II, "Stiffness Profiling of Pavement Subgrades," Transportation Research Record 1235, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1989, pp.1-9.
  15. Stokoe, K.H., II, Wright, S.G., Rosset, J.M., Gauer, R., and Sedighi-Manesh, M., "In Situ Measurement of Stiffness Profiles in Ocean Bottom Materials Using th SASW Method," a paper persented at the 22nd Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 7-10, 1990.
  16. Satoh, T., On the Controlled Source Spectral Rayleigh Wave Excitation and Measurement System, Vibration Instruments Co. Ltd., Tokyo, 1989.
  17. Roesset, J.M., Chang, D.W., Stokoe, K.H., II, and Aouad, M., "Modulus and Thickness of the Pavement Surface Layer from SASW Tests," Transportation Research Record 1260, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1990, pp.53-63.
  18. Drnevich, V.P., Hossain, M.M., Wang, J. and Graves, R.C., "Determination of Layer Moduli in Pavement Systems by Nondestructive Testing," Transportion Research Record 1278, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1990, pp.18-26.
  19. Roesset, J.M., Chang, D.W., and Stokoe K. H., II, "Comparision of 2-D and 3-D Models for Analysis of Surface Wave Tests," Proceedings of 5th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Karsruhe, Germany, Sept.

- 1991, pp. 111-126.
20. Gucunski, No. and Woods, R.D., "Use of Rayleigh Modes in Interpretation of SASW Test," Proceedings of 2nd. International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Mar. 11-15, 1991, pp. 1399-1408.
  21. Satoh, T, Poran, C.J., Yamagata, K. and Rodriguez, J.A., "Soil Profiling by Spectral Analysis of Surface Waves", Proceedings of 2nd. International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Mar. 11-15, 1991, pp. 1429-1434.
  22. Rix, G.J., Bay, J.A., and Stokoe, K.H. II, "Assessing In Situ Stiffness of Curing Portland Cement Concrete with Seismic Tests," Transportation Research Record 1284, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1990, pp. 8-15.
  23. Bay, J.A. and Stokoe, K.H., II, "Field Determination of Stiffness and PCC Slabs Using the SASW Method," Proceedings of Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials, University of Colorado, Boulder, Colorado, Oct. 15-17, 1990, pp.71-86.
  24. Nogueira, A.C., "Effect of Cavities on the Propagation of Surface Waves," Master's Thesis, The University of Texas at Austin, Aug. 1986.
  25. Nazarian, S., "Detection of Deterioration Within and Beneath Concrete Pavements with Sonic and Ultrasonic Surface Waves," Proceedings of Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials, University of Colorado, Boulder, Colorado, Oct. 15~17, 1990, pp. 391-406.
  26. Bowen, B.R., "Use of Surface Waves to Evaluate Cracking and Crack Repair in Beams," Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, May 1992(Expected).
  27. Woo, J.Y., and Stokoe, K.H., II, "Detecting voids in Curing Concrete Slabs Using the SASW Method," Geotechnical Engineering Center Report, The University of Texas at Austin, 1992(in progress).
  28. Vekey, R.C.de, "Non-Destructive Evaluation of Structural Concrete : A Review of European Practice and Devepments," Proceedings of Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials, University of Colorado, Boulder, Colorado, Oct. 15-17, 1990, pp.1-15.
  29. Haskell, N.A., "The Dispersion of Surface Waves on Multi-Layered Media," Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 43, 1953, pp. 17-34.
  30. Knopoff, L., "A Matrix Methods for Elastic Wave Problem," Bulletin of Seismological Society of America, Vol.54, 1964, pp.431-438.
  31. Dunkin, J., "Computation of Modal Solutions in Layered Elastic Media at High Frequencies," Bulletin of Seismological Society of America, Vol.55, 1965, pp. 335-358.
  32. Kausel, E. and Roesset, J.M.: "Stiffness Matrices for Layered Soils," Bulletin of the Seismologica Society of America, Vol.71, No.6, Dec. 1981, pp.1743-1761.
  33. Richart, F.E., Jr., Wood, R.D., and Hall, J.H., Jr., Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1969.