

# 콘크리트 활주로 건전도상태의 종합평가를 위한 비파괴 탄성파기법

## Seismic Techniques for the Integrated Assessment of Structural Integrity of Concrete Runway

조 성 호<sup>1</sup> Joh, Sung-Ho

강 태 호<sup>2</sup> Kang, Tae-Ho

조 미 라<sup>3</sup> Cho, Mi-Ra

서 영 찬<sup>4</sup> Suh, Young-Chan

권 수 안<sup>5</sup> Kwon, Soo-Ahn

### Abstract

Concrete pavement may suffer from material deterioration or structural problems, which lead to surface cracks and deflection of a concrete pavement. Degraded concrete pavement, when it is still under operation, should be recovered by an urgent maintenance to avoid the discontinued service leading to the significant traffic problems and economic loss. Seismic techniques are good tools to assess the structural integrity of concrete runway. It is because seismic techniques can evaluate engineering properties nondestructively and quickly and the evaluation can be extended to subgrade. In this study, a series of numerical simulations of stress-wave propagation were performed to verify feasibility of seismic techniques as an assessment tool. Based on the results of the numerical simulation, a framework of using seismic techniques was presented for the nondestructive integrated assessment for structural integrity of concrete runway. And the presented framework was applied to ○○ concrete runway with surface cracks, which required urgent maintenance, to identify the causes of the surface cracks. The results obtained from the structural integrity assessment were compared with the measurements of the cores collected from the same runway for verification of the presented framework.

### 요 지

콘크리트 포장에는 재료의 결함이나 구조적 문제점으로 인하여 표면균열, 슬래브의 처짐 등과 같은 문제가 발생할 수 있다. 결함이 발생한 콘크리트 포장이 현재 운용중일 때 심각한 교통문제와 경제적 손실을 초래하지 않기 위해서는 신속하게 유지관리가 이루어져야 한다. 이러한 콘크리트 포장의 신속한 유지관리를 위해서 탄성파 기법이 효율적으로 활용될 수 있는데, 이는 탄성파 기법으로 재료의 공학적 물성과 건전도 상태를 비파괴적, 비관입적으로 신속하게 측정할 수 있고, 또한 콘크리트 하부 기층, 보조기층, 노반의 강성까지 측정할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문이다. 본 연구에서는 건전도 평가기법으로서 비파괴 탄성파 기법의 적합성을 평가하기 위하여 탄성파 기법에 관한 수치해석을 수행하였고, 수치해석 결과를 근간으로 하여 콘크리트 활주로의 재료적 결함, 구조적 건전도 상태를 종합적으로 평가하는 비파괴기법 평가체제를 제안하였다. 표면균열이 국부적으로 발달한 ○○ 콘크리트 활주로에 대하여 본 연구에서 제안한 평가체제를 적용하여 표면균열의 원인을 규명하였다. 탄성파 건전도 평가로 획득한 활주로의 건전도 상태는 현장에서 채취한 코어와 코어시험 결과를 이용하여 비교함으로써 본 연구에서 제안한 비파괴 탄성파 기법 평가체제의 신뢰성을 확인하였다.

**Keywords :** SASW 기법, Impact-Echo 시험, Impulse Response 시험, concrete pavement

1 정희원, 중앙대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Chung-Ang Univ.)

2 학생회원, 중앙대학교 토목공학과 박사수료 (Student Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Chung-Ang Univ.)

3 정희원, 중앙대학교 건설환경연구소 전임연구원 (Member, Researcher, Construction and Env. Research Institute, Chung-Ang Univ.)

4 정희원, 한양대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

5 정희원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology)

## 1. 서론

국내 공항의 활주로 포장은 대부분 JCP(Jointed Concrete Pavement) 형식의 콘크리트 포장으로 되어 있으며, 이러한 콘크리트 포장이 완공된 지 오래되어 노후화된 포장뿐만 아니라, 완공 된지 2~5년 밖에 되지 않은 비교적 초기 연령에 속하는 활주로에서도 균열로 인한 문제점들이 발생하고 있다. 활주로 표면에 발달한 균열과 활주로의 부분 처짐 등이 대표적인 문제점들이라 할 수 있다. 활주로에 발생하는 재료적, 구조적 문제점들은 활주로 폐쇄라는 심각한 상황으로 이어질 수 있기 때문에, 활주로에 대한 건전도 평가와 유지보수는 적시에 신속하게 수행될 필요가 있다.

최근 콘크리트 구조물의 결함을 진단하고, 건전도를 평가하는 방법으로 비파괴 탄성과 기법을 널리 활용하고 있다. 터널 콘크리트 벽체의 건전도 평가, 교량의 콘크리트 상판, 콘크리트 옹벽 등과 같은 콘크리트 구조물이 대표적인 비파괴 탄성과 기법의 성공적인 적용사례라고 할 수 있다. 또한, 도로 포장의 경우에 있어서도 포장층의 두께와 탄성계수를 추정하기 위하여 비파괴 탄성과 기법이 적용되었었고, 최근에는 비파괴 탄성과 기법을 활용하는 측정 장비도 개발되고 있다. 비파괴 탄성과 기법은 구조물에 손상을 입히지 않고 신속하게 수행되며, 또한 매질의 탄성계수, 구조물의 두께 등과 같은 공학적 물성을 평가할 수 있기 때문에 콘크리트 구조물에 대한 건전도 평가기법으로의 적합성은 우수하다고 할 수 있다. 탄성과 기법이 콘크리트 포장도로에 처음으로 적용된 것은 1980년대이었다. 레일레이파를 이용한 SASW 기법(Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method)이 대표적인 사례로서 포장층의 탄성계수와 두께를 추정하기 위하여 적용되었고, 1980년 후반 충격반향기법(impact-echo method)도 포장층의 두께를 추정하기 위하여 적용되었다. 레일레이파를 이용하는 표면파 기법을 콘크리트 포장에 적용한 연구는 Nazarian and Stokoe(1984), Heisey, Stokoe and Meyer(1988), Nazarian, Stokoe, Briggs and Rogers(1988), Nazarian and Stokoe(1988), Sheu, Rix and Stokoe(1988) 등이 대표적이며, 충격반향기법을 콘크리트 구조물에 적용한 연구로는 Sansalone and Carino(1986) 등이 있다. 1990년대에도 포장구조체에 대한 탄성과 기법 연구는 계속되어 Roesset, Chang, Stokoe and Aoud(1990), Sansalone, Yuan, Weissinger and McDaniel(1997) 등의 연구결과가 발표되기도 하였다.

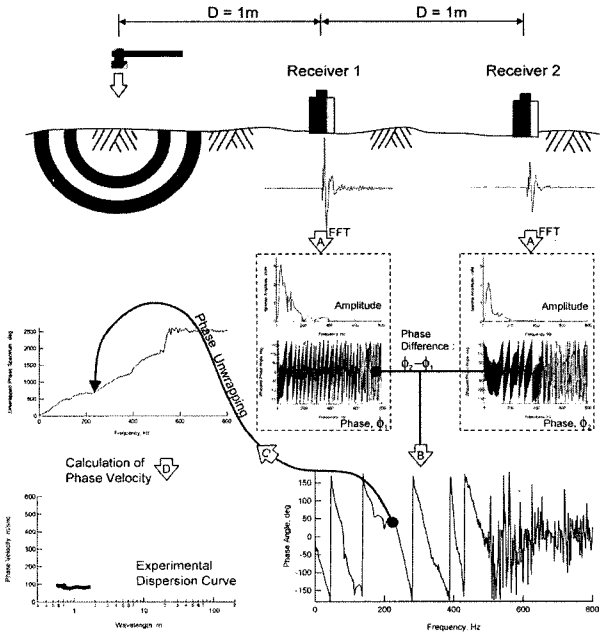
콘크리트 구조물의 건전도 평가를 위하여 활용되는 탄성과 기법으로는 SASW 기법, 충격반향기법, 충격응답기법(impulse response method) 등이 있으며, 기법에 따라 장단점이 존재한다. 본 연구에서는 Kausel, Peek(1982)이 개발한 3차원 파동전파 모델링 기법인 동강성행렬법에 의하여 각 탄성과 기법의 타당성과 신뢰성을 확인하고, 이를 바탕으로 체계적인 콘크리트 활주로의 비파괴 건전도 평가체제를 제안하고자 한다. 제안하고자 하는 탄성과 기법에 의한 비파괴 건전도 평가체제는 비파괴 표면파 기법의 내재적인 문제로 발생할 수 있는 오류를 피하기 위하여, 콘크리트 재료의 전단강성, 활주로 슬래브의 동적강성, 활주로 콘크리트 표층의 두께, 개략적인 내부균열 분포의 추정, 보조기층의 전단강성 등의 평가를 통하여 콘크리트 활주로에 대한 종합적인 평가를 수행할 수 있도록 하고자 한다. 본 연구에서 제안하는 비파괴 탄성과 기법 평가체제의 신뢰성을 확인하기 위하여 국부적으로 표면균열이 심하게 발달되어 있는 콘크리트 활주로에 대하여 본 연구에서 제안한 평가체제를 적용하고, 현장에서 채취한 콘크리트 코어를 이용하여 탄성과 기법의 신뢰성을 확인하고자 하였다.

## 2. 비파괴 도로포장 평가를 위한 탄성과 기법

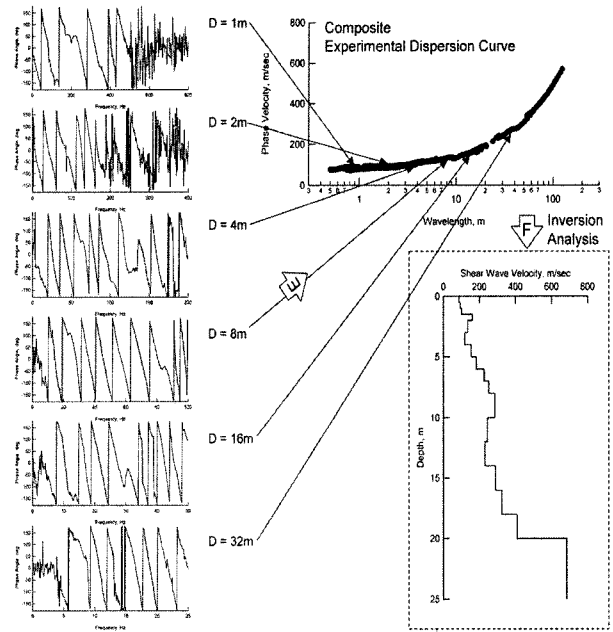
콘크리트 활주로의 비파괴 종합평가를 위하여 본 연구에서 고려하고자 하는 탄성과 기법은 SASW 기법, 충격반향기법, 충격응답기법 등이다. 일반적인 콘크리트 구조물에 대하여 성공적으로 적용되었던 이들 기법의 특징과 측정사례를 살펴보면 다음과 같다.

### 2.1 SASW 기법(Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method)

SASW 기법은 지반이나 구조물에 대하여 전단 강성의 깊이별 변화를 추정하기 위하여 비파괴적으로 수행하는 현장 시험법이다. 충격이나 진동에 의해서 발생한 응력파는 지반이나 구조물의 매체를 통하여 사방으로 전파되어 나가는데, 진동원에서 일정 거리만큼 떨어진 지표면에 설치한 진동 감진기에 의해 지반이나 구조물의 진동을 측정하게 된다. 이렇게 지표면에서 응력파를 발생시키고 일정 위치만큼 떨어진 곳에서 진동에 의한 지반의 진동을 측정하여 하부지반의 지층구조와 깊이에 따른 전단파 속도분포를 구하는 것이 SASW 시험이다. 그림 1에 기본적인 SASW 시험방법을 설명하였다.

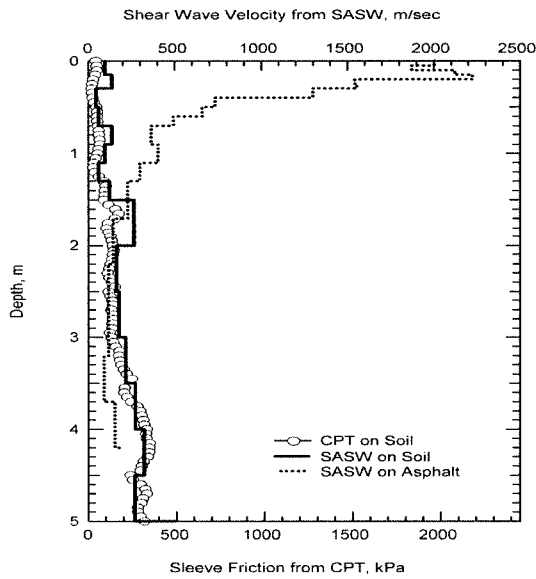


(a) 실험분산곡선의 결정

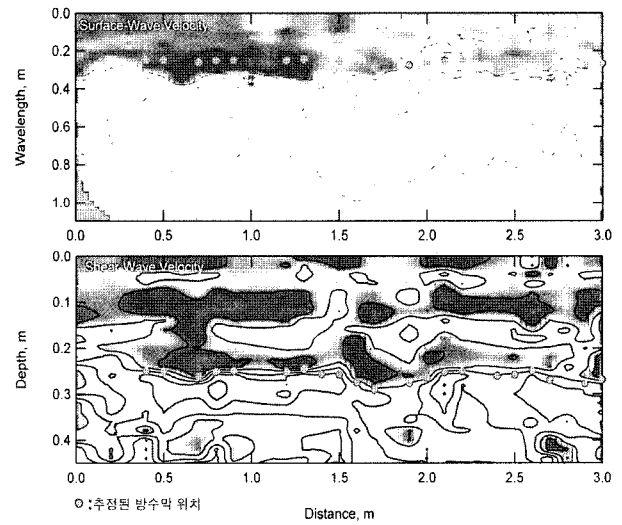


(b) 역산해석에 의한 S-파 속도 주상도의 결정

그림 1. SASW 시험의 자료분석 및 해석방법



(a) 포장도로에 대한 SASW와 CPT 시험 결과의 비교



(b) ○○터널 콘크리트 라이닝에 대하여 SASW 시험으로 구한 2차원 전단강성 분포

그림 2. SASW시험의 적용사례

측정된 시간영역 신호의 푸리에변환, 전달함수의 계산, 위상각 스펙트럼의 분석과 위상속도의 계산, 분산곡선의 결정, 역산해석 등의 과정에 의해서 최종적으로 지반의 전단파속도 주상도를 구하게 된다. 그림 2는 SASW 시험의 아스팔트 포장과 콘크리트 터널벽체에서의 전형적인 적용사례를 보여주고 있다.

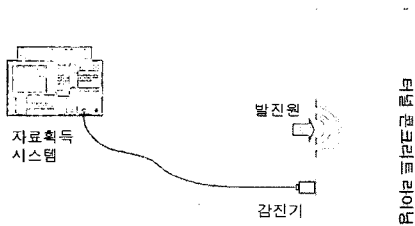
## 2.2 충격반향기법(Impact-Echo Method)

물리적인 충격에 의해서 발생이 되는 탄성파는 한 입자의 진동이 인접 입자로 전달되면서 전파가 된다. 탄성파가 여러 층으로 구성되어 있는 매체를 통과할 때에는 층과 층사이의 음향 임피던스에 의해 영향을 받게 된다. 층간 임피던스 차이가 클 때에는 탄성파가 인접

층으로 전파되기보다는 경계면에서 반사되는 비율이 높게 된다. 표면에서 발생된 탄성파가 매질 내부로 전파되다가 공극이나 균열, 층상 박리, 연약층 등과의 경계면을 만나면 반사되어 표면으로 되돌아오게 되는데, 표면으로 돌아온 탄성파는 표면에서 또 반사되어 매질 내부로 전파되는 현상이 발생하고, 이러한 현상은 계속 반복된다. 이 때 표면과 반사면에서 다중반사를 일으키는 지배주파수를 측정하여 매질의 반사면까지 깊이나 매질의 탄성과 속도를 구하는 탄성파 기법이 충격반향시험의 기본 개념이다(그림 3(a)). 그림 3(b)는 충격반향시험의 대표적 적용사례로서, 터널벽체에서 횡방향으로 연속적으로 충격반향시험을 수행하여 획득한 것으로, 터널벽체의 두께 변화를 보여주고 있다.

### 2.3 충격응답기법(Impulse-Response Method)

충격응답기법은 콘크리트 슬래브 아래의 연약한 지지층을 확인하기 위하여 성공적으로 적용되었던 탄성파 기법이다. 포장층 내에 존재하는 결함을 찾기 위하여 사용되는 P-파 공진측정법인 충격반향기법과는 달리, 충격응답기법은 포장내의 상태를 유추하기 위하여 횡모드 진동을 측정한다. 저주파 성분의 횡모드 진동은 충격반향기법보다 측정하기가 더 수월하다.



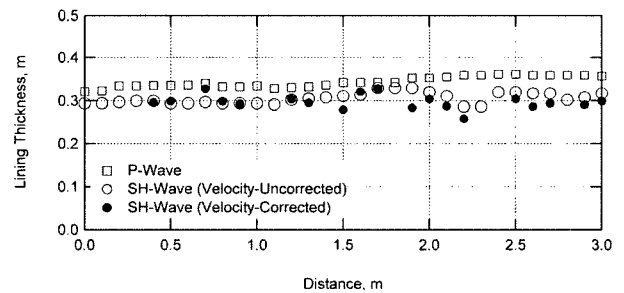
(a) 기본개념도

충격응답기법시험은 그림 4(a)에 도시한 바와 같이, 포장구조물이나 콘크리트 슬래브의 표면에서 충격하중을 가하여 표면에 부착된 감진기로 탄성파를 측정하며, 충격하중으로는 슬래브에 저주파 횡진동을 발생시킬 수 있는 계측해머를 사용한다. 충격응답기법시험으로 측정된 대표적인 측정결과는 그림 4(b)에 도시된 것과 같다. 충격응답기법시험으로 측정된 계측해머 신호와 감진기 신호는 FFT를 이용하여 주파수 영역으로 변환하고, 감진기 신호를 계측해머 신호로 나누어서 주파수 응답을 계산한다. 주파수 응답의 크기는 단위 힘당 속도의 단위로 표현된다. 주파수 응답의 크기는 특별히 유동성(mobility)이라고 하는 용어로 표현하며, 유동성 도표는 동적강성(dynamic stiffness)으로 정량화될 수 있다. 슬래브의 동적강성은 유동성 도표에서 초기 기울기의 역수로 정의되며, 슬래브 유연성(flexibility)의 역수로 이해할 수 있다.

### 3. 수치 모델링에 의한 탄성파기법의 적용성 확인

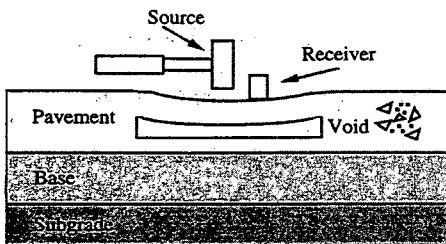
#### 3.1 수치 모델링 기법과 포장 구조체의 모델링

콘크리트 포장의 매질을 통해 전파되는 탄성파를 이론적으로 모델링하기 위해, 동강성 행렬법(dynamic stiffness

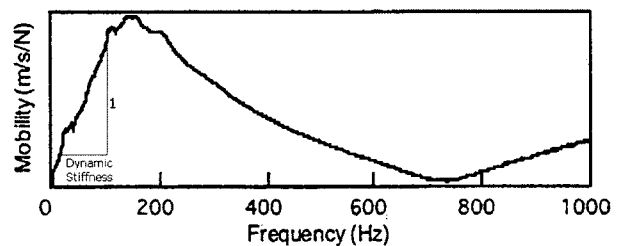


(b) 전형적인 적용사례

그림 3. 충격반향시험의 기본 개념과 전형적인 적용 사례



(a) Impulse Response 시험의 실험 구성



(b) 측정된 주파수응답 곡선과 동적강성

그림 4. 충격응답시험의 자료분석 및 해석 방법

matrix method)을 사용하였다. 동강성 행렬법은 다층구조체에서 임의 층간경계면에 작용된 동적 하중에 대해 층간 경계면에 발생하는 변위와 응력을 계산하는 방법으로, SASW 실험을 모사하기 위해 많은 연구자들 (Foinquinos and Roesset, 1991; Gucunski and Woods, 1992; Al-Hunaid, 1994)이 사용하여 그 신뢰성과 효율성은 이미 입증되어 있다. 본 연구에서도 SASW 실험, 충격반향실험, 충격응답실험 등을 모사하고자 동강성행렬법을 구현하는 프로그램을 작성하여 이를 사용하였다.

동강성행렬이란 여러 개의 지층으로 구성되어 있는 다층구조 지반에서 층간 경계면에 작용한 외력과 각 층간 경계면에서의 변위의 관계를 의미한다. 이 동강성행렬은 주파수와 파장의 함수로서 일반적인 구조해석에서 언급되는 강성행렬과 같은 형태로 이해할 수 있다. Kausel과 Roesset(1981)는 동강성 행렬을 제안하였고, 임의 하중으로 인해 발생하는 지층 구조의 응답에 대한 관계를 공식으로 제안하였으며, 표면파는 평면파로 표현되었다. 그 후, Kausel과 Peek(1992)는 원형 하중에 대한 다층구조의 응답을 강성행렬의 방법으로 구하는 방법을 제시하였다. 이 방법에서는 원통형 파선을 가지는 표면파로 가정하여 해석하였다. 평면 파선을 가지는 2D 해석에 대하여, 원통형 파선을 가지는 Kausel과 Peek의 해석해를 3D 해석해라고 한다. 3D 해석은 표면파의 특별한 모드를 대표하지 않고, 표면파와 체적파의 고차모드들이 조합된 해를 구해주기 때문에, 3D 해석하는 실제 표면파의 전파특성을 해석하는 가장 적합한 해라고 할 수 있다.

동강성행렬법으로부터 결정되는 표면파의 수직 변위는 식 (1)의 형태로 정리된다.

$$w(r) = qR \sum_{l=1}^{2N} (\phi_z^{(l)})^2 I_{ll} \quad (1)$$

여기서,

$$I_{ll} = \frac{\pi}{2ik_l} J_l(k_l R) H_0^{(2)}(k_l r)$$

$w(r)$ 은 발진원에서  $r$ 만큼 떨어진 곳에서의 수직변위이고,  $q$ 는 디스크 하중,  $R$ 은 디스크의 반경이다.  $\phi_z^{(l)}$ 는 표층에서  $l$ 번째 모드의  $z$ 성분 모드변위이고,  $k_l$ 은  $l$ 번째 고유해이다.  $J_l$ 는 첫 번째 차수의 첫 번째 Bessel 함수이고,  $H_0^{(2)}$ 는 첫 번째 차수의 두 번째 Hankel 함수이다.

포장구조체에 대한 탄성과 기법의 적용성을 평가하기 위하여 SASW 실험, 충격반향실험 등의 수치실험을 수행하였다. 수치실험은 본 연구진에 의해 개발된 프로그램을 사용하였으며, 건전한 포장구조체와 결함 있는 포장구조체에 대한 수치실험결과를 비교하였다. 수치모델에 사용된 포장구조체의 지층구조와 전단파 속도는 표 1에 제시된 바와 같다. 포장구조체의 결함은 표층, 보조기층, 기층 등에 별도로 존재하는 것으로 가정하여 세 가지 결함 포장구조체를 설정하였다. 따라서, 무결함, 표층 결함, 보조기층 결함, 기층 결함 포장구조체 등 모두 네 가지의 포장구조체에 대해 SASW기법의 수치실험과 충격반향기법의 수치실험을 수행하였다. 포장구조체 각 층의 결함은 균열이나 재료의 열화 등으로 발생하기 때문에, 각층의 전단파 속도가 30% 감소되는 것으로 각 층의 결함을 모델링하였다. SASW 실험의 경우는 포장구조체의 손상 유무에 대해서 레일레이파의 분산특성을 비교하였고, 충격반향 실험의 경우는 공진주파수의 변화, 충격응답 실험의 경우는 동적강성의 변화 등을 살펴보았다.

### 3.2 콘크리트 포장체에 대한 탄성파 기법의 수치실험 결과

콘크리트 표층의 결함은 SASW 실험, 충격반향 실험, 충격응답 실험 등에서 모두 확인할 수 있다. SASW 실험의 경우는 그림 5(a)에서 살펴볼 수 있듯이, 표층에 해당

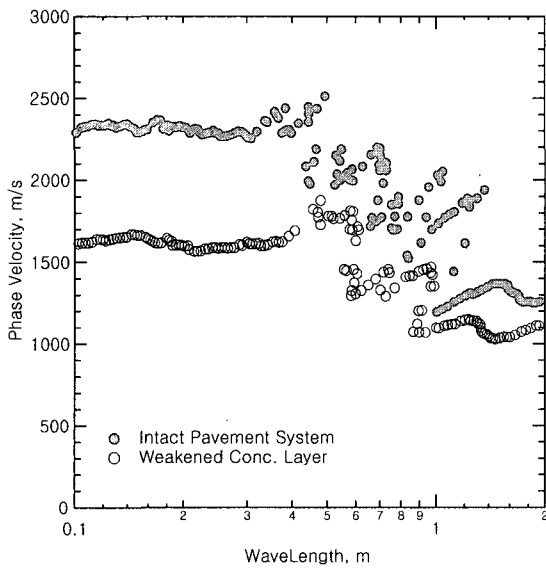
표 1. 탄성파 기법의 수치실험에 사용된 포장구조체

층구조	층두께, m	각층의 전단파 속도, m/sec			
		무결함	표층 결함	보조기층 결함	기층 결함
콘크리트 표층	0.30	2500	1750	2500	2500
아스콘	0.05	2000	2000	2000	2000
보조기층	0.35	1000	1000	700	1000
기층	0.50	500	500	500	350
노반	반무한	150	150	150	150

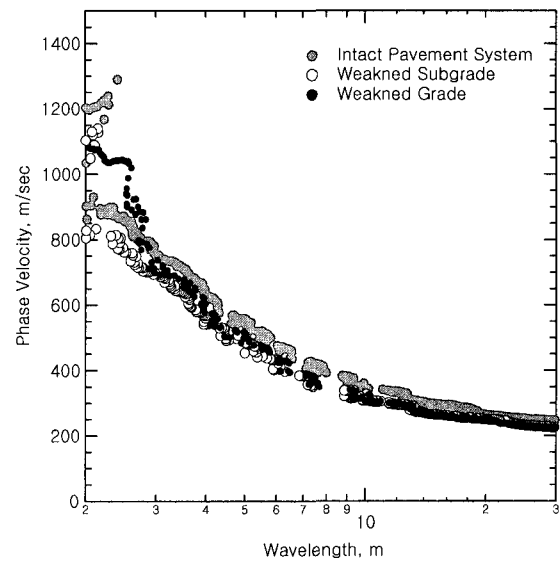
되는 파장의 범위에서 레일레이파 위상속도는 2300m/sec에서 1600m/sec로 감소하였다. 즉, 콘크리트 표층의 전단파 속도결합은 위상속도에서도 30%의 감소로 나타났다. 그리고, 충격반향 실험의 경우는 그림 6(a)에 도시되어 있는 것처럼, 콘크리트 표층의 결합은 공진주파수의 감소로 나타났다. 즉, 7642.9Hz에서 5434.6Hz로 감소하였는데, 이는 29%의 감소에 해당된다. 따라서, 충격반향 실험에서도 콘크리트 표층 결합은 거의 동일한 크기로 공진주파수의 변화가 나타났다고 할 수 있다. 그리고, 충격응답 실험의 경우도 그림 6(b)에 도시한 것처럼,

콘크리트 포장의 결합으로 인하여 동적강성이 감소한 것을 확인할 수 있다. 무결합 콘크리트 표층에 대한 동적강성은  $7.74 \times 10^9 (N/m^2/m)$ 이었던 반면, 결합 콘크리트 표층에 대한 동적강성은  $5.62 \times 10^9 (N/m^2/m)$ 으로 감소되었고, 감소비율은 약 27%이었다.

한편, 보조기층과 기층의 결합은 충격반향 실험과 충격응답 실험에서는 현저한 변화를 보이지 않았고, 단지 SASW 실험에서만 뚜렷한 변화를 확인할 수 있었다. 그림 5(b)에 보조기층과 기층의 결합으로 인한 레일레이파의 위상속도 변화를 도시하였다. 두 경우 모두에 있어

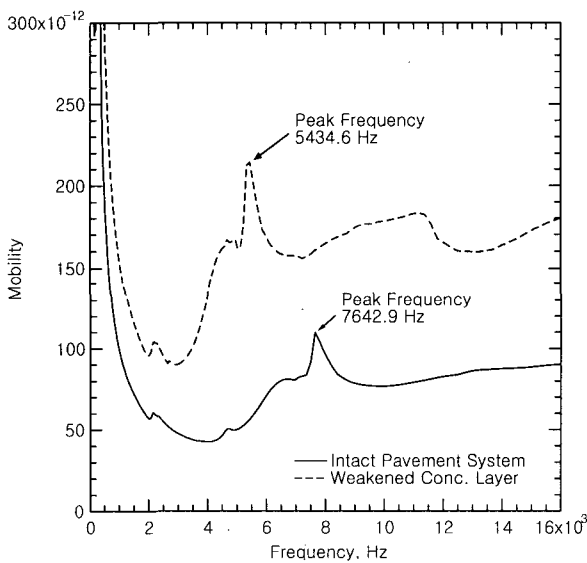


(a) 표층

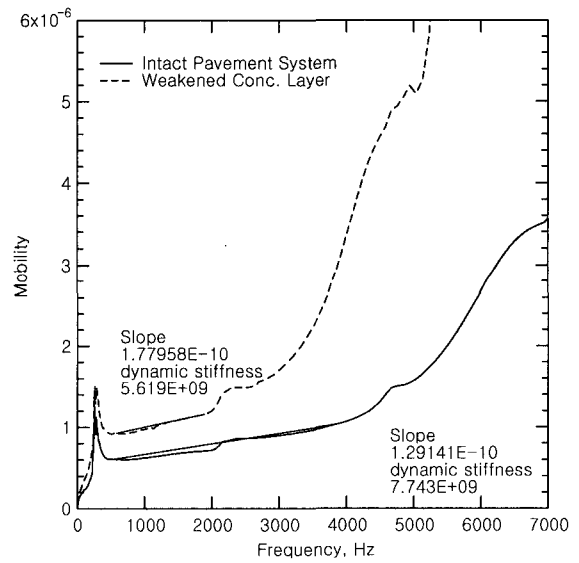


(b) 보조기층과 기층

그림 5. 포장구조체의 강성 변화에 대한 SASW 시험의 결과



(a) 충격반향시험



(b) 충격응답시험

그림 6. 포장구조체 표층 강성변화에 대한 충격반향시험, 충격응답시험의 결과

서 위상속도의 감소가 확실히 나타나고 있지만 감소율은 30%에 미치지 못하고 있다. 그러나 위상속도 분산곡선에 대한 역산해석 이후 획득되는 전단파 속도의 경우는 감소율이 30%에 근사할 것으로 판단된다.

탄성과 실험의 수치모사로 획득된 결과를 정리하면, 콘크리트 표층의 결함은 SASW 실험, 충격반향 실험, 충격응답 실험 등이 확인할 수 있으며, 보조기층과 기층의 결함은 SASW 실험만이 확인할 수 있는 것으로 판단된다.

#### 4. 활주로 건전도 평가를 위한 종합적 탄성파시험 기법의 제안

활주로를에서 발견되는 문제점 중 재료 및 구조적 결함에 관련된 사항을 보면, 활주로 표면에 종방향으로 발달한 균열의 경우와 활주로 일부지역의 처짐이 발생하는 경우가 있다. 특히, 종방향으로 발달한 균열의 경우, 비행기의 윗하중이 크지 않은 지역에서 균열발달 상태가 오히려 더 크게 나타나기도 하고, 동일한 윗하중 경로이면서도 한 쪽 경로에는 균열이 없고 다른 쪽 경로에만 균열이 발생하기도 한다. 이와 같은 결함을 가지고 있는 공항 활주로의 경우, 그 결함의 소재가 콘크리트 표층에 국한하지 않고, 보조기층 또는 기층에 존재하기도 한다. 따라서 결함원인의 규명을 위한 조사나 건전도 평가는 보조기층과 기층까지 포괄할 수 있어야 한다. 이러한 요구조건을 만족하고 콘크리트 활주로의 재료적 결함, 구조적 건전도 상태를 종합적으로 평가하기 위하여 그림 7, 그림 8과 같이 비파괴시험 평가체제를 제안하였다. 그림 7은 공항 활주로 건전도 평가를 위하여 가능한 비파괴 탄성과 시험의 종류와 평가항목을 제시하고 있다. 콘크리트 표층의 탄성계수와 탄성계수의 횡방향 변이성은 SASW 실험, 콘크리트 표층 내에 존재하는 균열의 분포상황은 충격반향시험, 콘크리트 표층의 동적강성은 충격응답시험, 콘크리트 재료 감쇠비는 충격반향시험 등으로 평가할 수 있다. 현장에서 콘크리트 코어를 채취할 수 있는 경우는 비교와 신뢰성 확인을 위하여 실내에서 공진실험을 별도로 수행할 수도 있다. 또한, 보조기층과 기층의 탄성계수는 SASW 실험으로 평가할 수 있다. 이러한 일련의 실험을 통하여 콘크리트 표층의 탄성계수, 균열분포 상황, 표층 탄성계수의 횡방향 변이성, 동적강성 등을 종합적으로 비교 평가하여 균열, 재료불량, 슬래브 두께 변화 등과 같은 콘크리트 표층의 건전

도 상태를 평가할 수 있다. 그리고, 콘크리트 표층의 건전도 상태만으로 콘크리트 포장구조체의 결함을 평가할 수 없을 때에는 콘크리트 슬래브 하부구조를 평가하는 SASW 시험을 별도로 수행할 수 있다.

그림 7의 비파괴 시험기법을 이용하여 콘크리트 활주로 포장의 건전도 상태를 평가하는 평가체제를 제안하면 그림 8과 같다. 그림 8(a)는 콘크리트 활주로 표면균열에 대한 평가체제를, 그림 8(b)는 활주로 처짐에 대한 평가체제를 각각 설명하고 있다. 콘크리트 활주로 표면에 표면균열이 발생한 경우는 콘크리트 슬래브의 건전도 상태를 우선적으로 확인하고, 활주로 하부 지지층의 건전도 상태를 확인하는 것으로 하였다. 이는 표면균열의 직접적인 원인이 콘크리트 포장의 재료 결함일 가능성이 가장 크다고 판단하였기 때문이다. 따라서 표면균열이 발생한 지점에서 가능한 인접한 지점에 측선을 설정하여 단파장 SASW 시험과 충격응답시험에 의해서 콘크리트의 강도와 강성을 측정하도록 하였다. 만일 콘크리트 강도와 강성이 양호한 경우는 다음으로 충격반향시험으로 콘크리트 슬래브 두께를 확인하도록 하였다. 콘크리트 슬래브 두께도 적절하다면, 콘크리트 슬래브를 지지하고 있는 보조기층과 기층의 강성을 평가하도록 하였다. 보조기층과 기층의 강성은 장파장 SASW 시험에 의해서 측정가능할 수 있다. 한편 콘크리트 활주로 처짐이 발생한 경우는 활주로 하부 지지층의 강성을 우선 평가하고 다음으로 콘크리트 슬래브의 건전도 상태를 평가하도록 하였다. 콘크리트 표면에 균열이 존재하지 않은 상태에서 슬래브의 처짐이 발생한 경우는 활주로 하부지지층의 작은 강성으로 인한 것일 수 있기 때문이다.

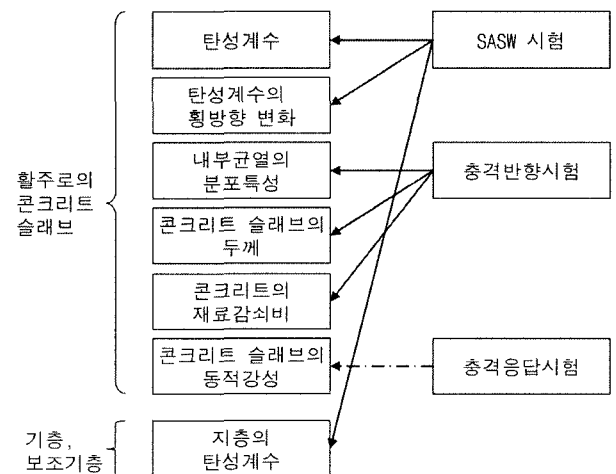


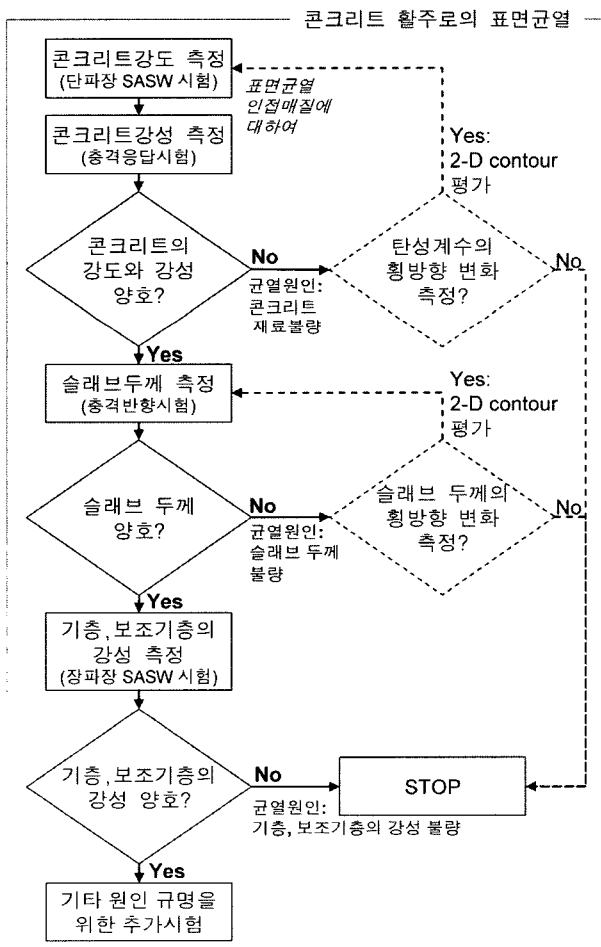
그림 7. 공항 활주로 결함의 원인 규명을 위한 평가항목과 평가를 위한 탄성파 시험

## 5. 활주로 건전도 평가를 위한 탄성파시험의 현장 적용

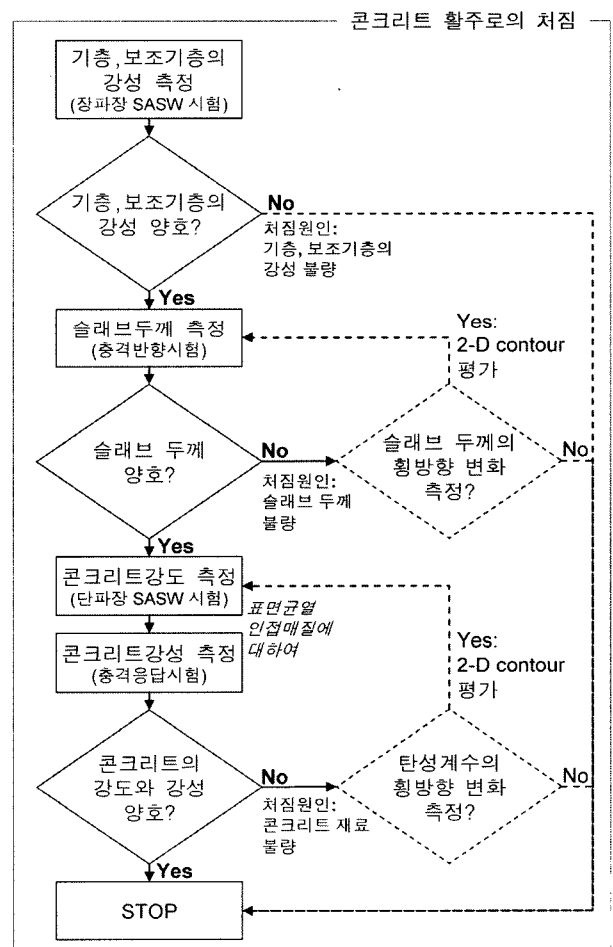
실제 운용중인 ○○공항에 대하여 그림 8(a)의 절차를 따라 일련의 탄성파 시험을 수행하였다. ○○공항의 활주로 슬래브 구성과 균열상태는 그림 9(a)에 도시한 바와 같으며, 건전도 평가를 위하여 수행된 비파괴 탄성파 시험의 종류와 시험위치는 그림 9(b)에 요약한 바와 같다. ○○공항의 경우, 활주로 건설시기를 고려하면 현재 활주로 전반적으로 균열이 심하게 발생한 상태이고, 일부 처짐도 발생한 상황이다. 특히, 비행기 이착륙이 일어나는 지점(슬래브 94.4)에서는 콘크리트 슬래브의 표면균열이 발생하지 않은 반면, 비행기 유희중이 거의 작용되지 않은 지점(슬래브 57.2-R5)에서는 표면균열이 심하게 발생되어 있는 상황이었다. 반면 슬래브 57.2-R5 인접지역(슬래브 57.2-R3)에서는 균열이 거의 발생하지 않은 미묘한 상황이 존재하였다.

## 5.1 콘크리트 슬래브의 건전도 상태

콘크리트 슬래브 균열의 원인 규명을 위해서는 SASW 시험, 충격반향시험, 충격응답시험 등을 수행하였고, 획득된 시험자료를 바탕으로 콘크리트 슬래브의 재료적, 구조적 공학적 물성을 평가하였다. ○○공항 활주로의 콘크리트 슬래브의 표층 2cm 부분이 전반적으로 약한 강성을 가지고 있고, 아래로 내려갈수록 슬래브 강성이 증가하였다(그림 10). 표면 균열 발달 지점(그림 10(b)의 57.2S)의 표층 강성과 평균 강성은 표면균열이 존재하지 않는 지점(그림 10(a)의 94.4C, 그림 10(b)의 57.2N)의 표층강성과 평균 강성보다 작았다. 한편, 종방향으로 분포되어 있는 표층강성의 분포는 그림 11에 도시된 바와 같다. 그림 11의 강성분포로부터 57.2S 지역이 특별히 취약한 것을 확인할 수 있다. 표층강성과 평균강성의 경향처럼, 동적강성의 경우에 있어서도 콘크리트 슬래브와 관계없이 표면균열 발달지점에서 동적강성이 작



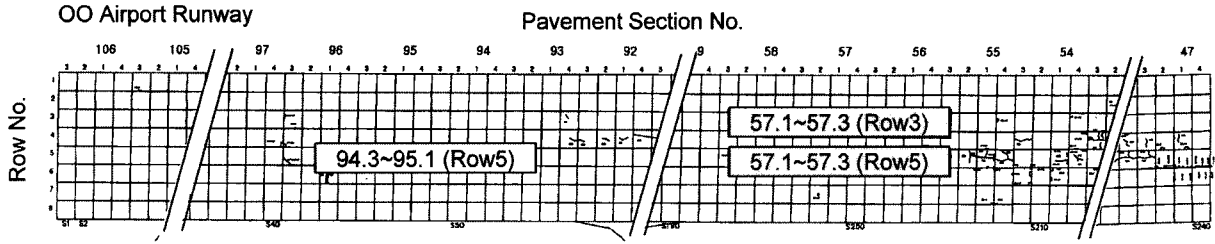
(a) 콘크리트 활주로의 표면균열 평가체제



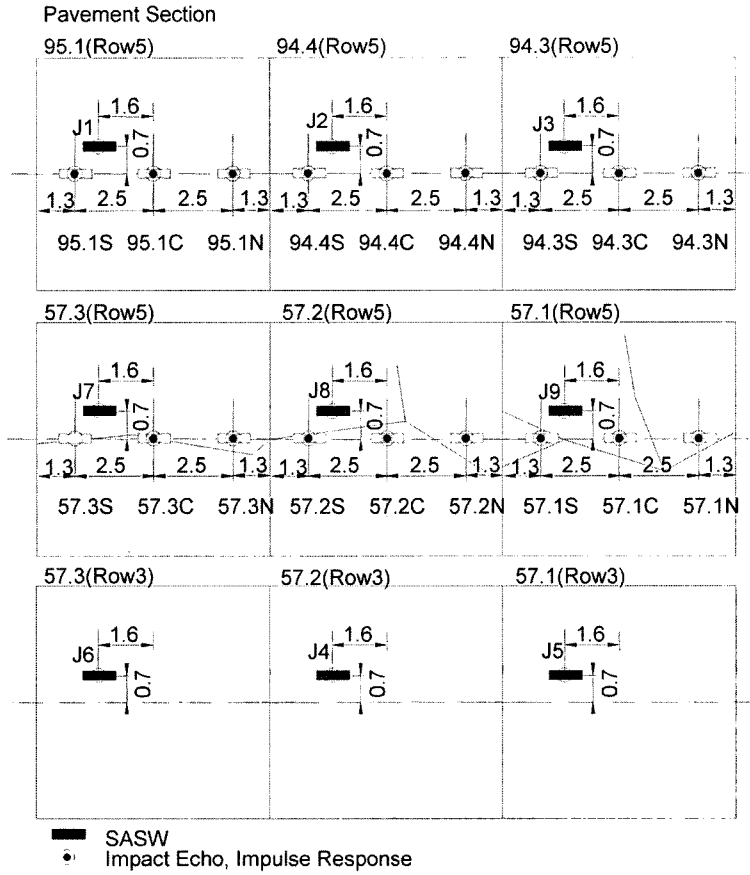
(b) 콘크리트 활주로의 처짐 평가체제

그림 8. 공항 활주로 결함의 원인 규명을 위한 비파괴 탄성파 시험체제





(a) 콘크리트 활주로의 슬래브 구성과 균열상태



(b) 수행된 비파괴 탄성파 시험의 종류와 시험위치

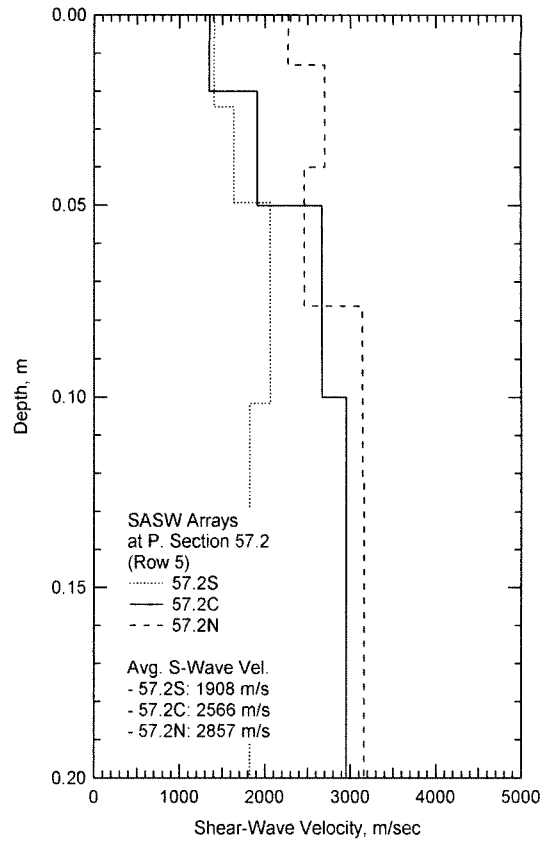
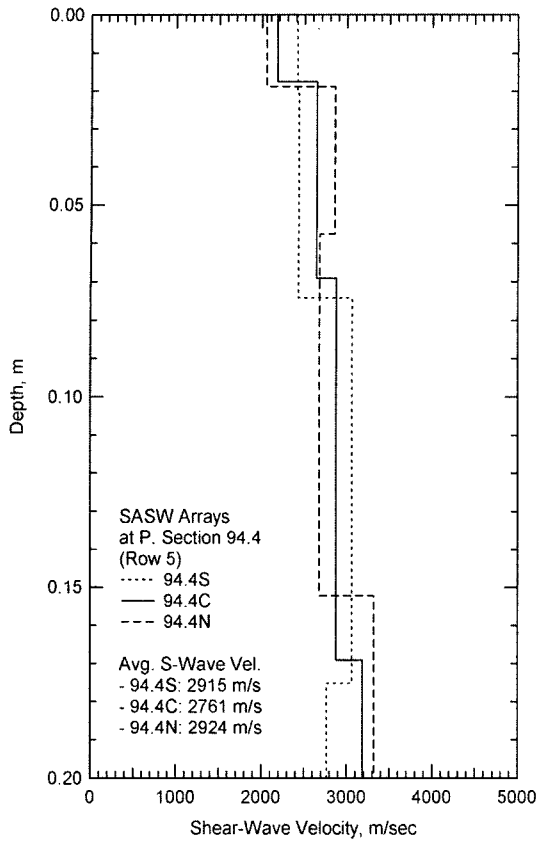
그림 9. 비파괴 탄성파 시험이 수행된 ○○ 공항 활주로의 슬래브 구성과 수행된 비파괴 탄성파 시험 위치

게 평가되었다(그림 12). 또한, 표층균열이 발달한 경우 슬래브 내부에 부반사면이 다수 존재하는 것으로 측정되어, 내부 균열의 가능성을 확인하였다(그림 13). 콘크리트 슬래브 두께는 위치에 따라 변동이 있는 것으로 평가되었다. 동일 슬래브 내에서도 슬래브 두께는 일정하지 않고 10cm 이상의 차이를 보이는 경우도 있었다(그림 14).

## 5.2 활주로 지지층의 상태

활주로 콘크리트 슬래브의 강성이외에 슬래브 균열 원

인으로 가능한 또 다른 요인으로는 활주로 지지층의 연약한 강성이다. 아무리 콘크리트 슬래브의 강성이 크고 단단하여도 지지층이 국부적으로 연약하다면, 콘크리트 슬래브에 국부적으로 처짐이 발생하게 되고 그로 인하여 균열이 발생하게 된다. 본 장에서는 이와 같은 가능성을 확인하기 위하여 SASW 시험으로 지지층의 강성을 평가하였다. 균열이 많이 발생한 슬래브 57.2(Row 3)의 경우, 콘크리트 슬래브를 지지하는 쇄석층의 강성이 균열이 없는 슬래브(57.2(Row 5))보다 작았다. 따라서 콘크리트 슬래브가 더 많이 처지는 가능성을 가지고 있다고 할 수 있다(그림 13). 콘크리트 하부 연약지반은 슬래브



(a) 큰 윤택중하에서도 표면균열이 발생하지 않은 콘크리트 슬래브

(b) 작은 윤택중하에서도 표면균열이 발달한 콘크리트 슬래브

그림 10. ○○공항 활주로 콘크리트 포장 표면에서의 SASW 시험결과

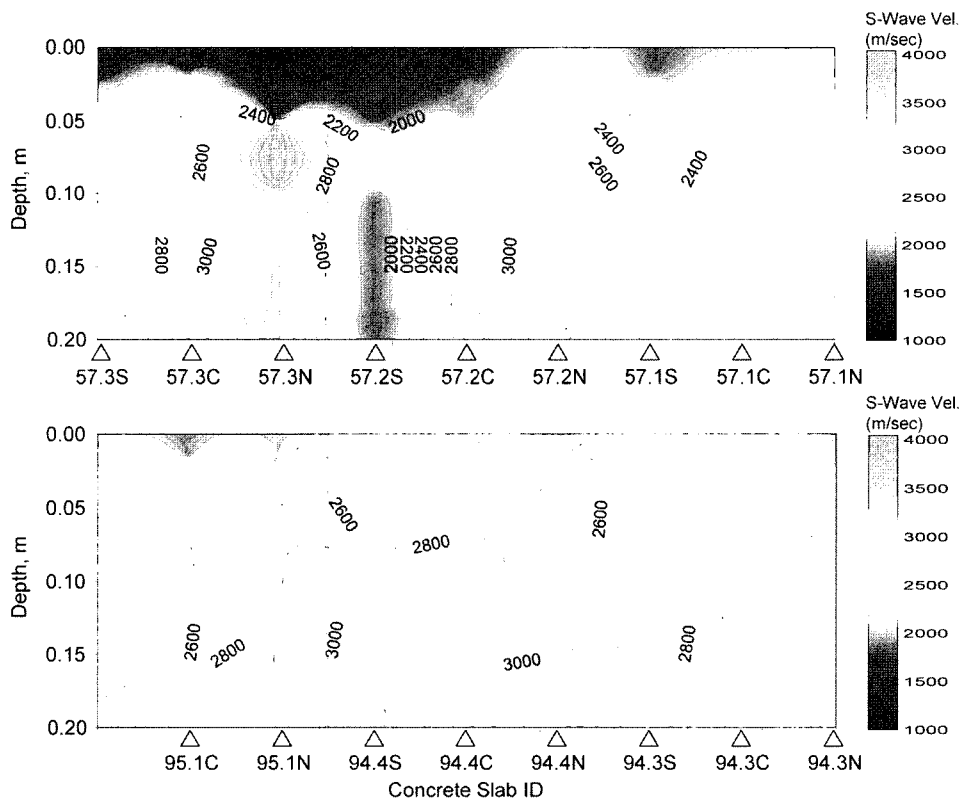


그림 11. SASW 시험으로 획득한 전단파 속도 주상도의 2차원 도표

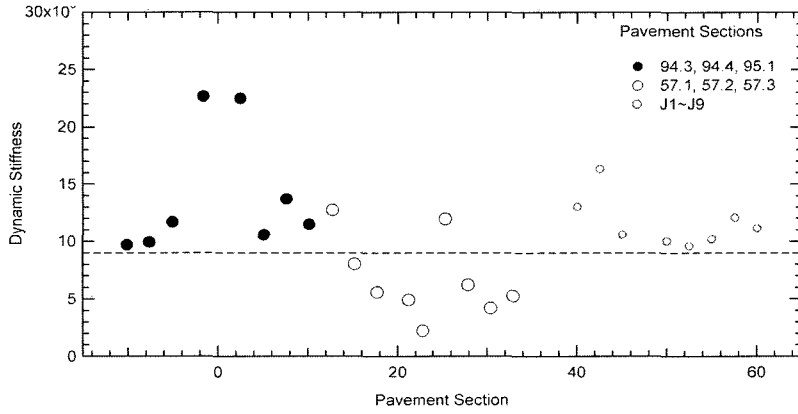


그림 12. 충격응답시험으로 측정된 콘크리트 슬래브의 동적강성

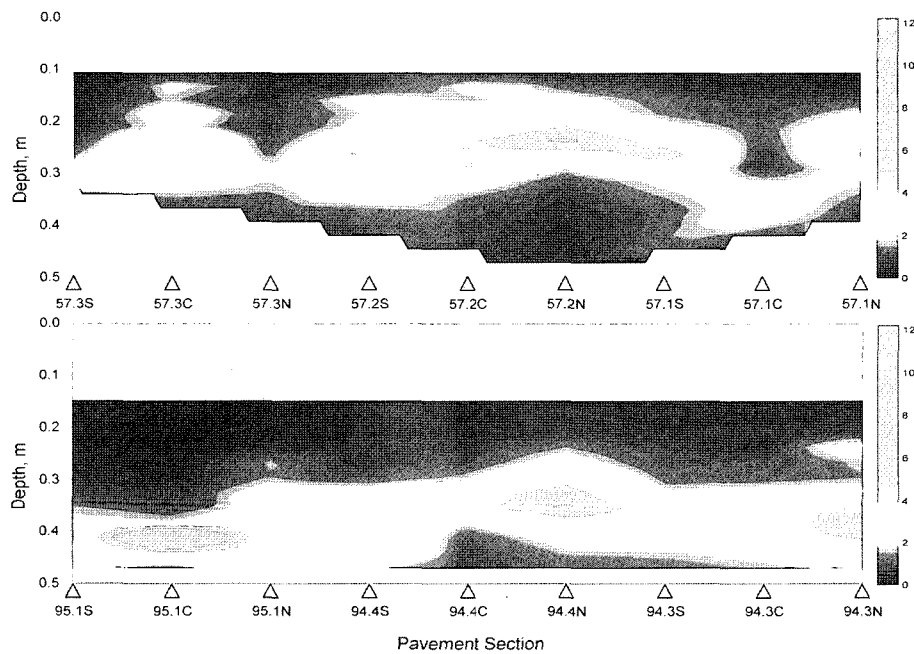


그림 13. 충격반향 시험으로 조사한 콘크리트 슬래브 내부의 반사면 또는 결함 분포

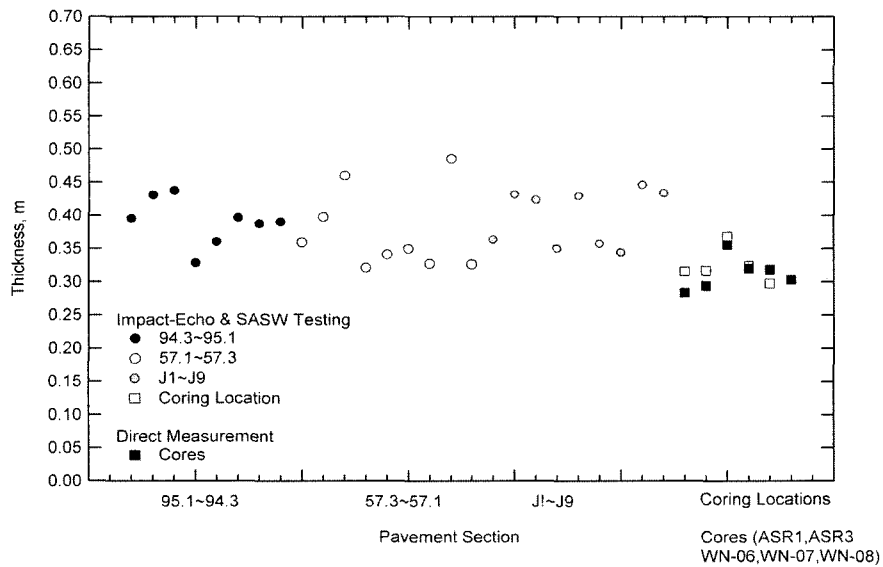


그림 14. 충격반향시험, SASW, 자유단 공진시험으로 측정된 콘크리트 슬래브의 두께

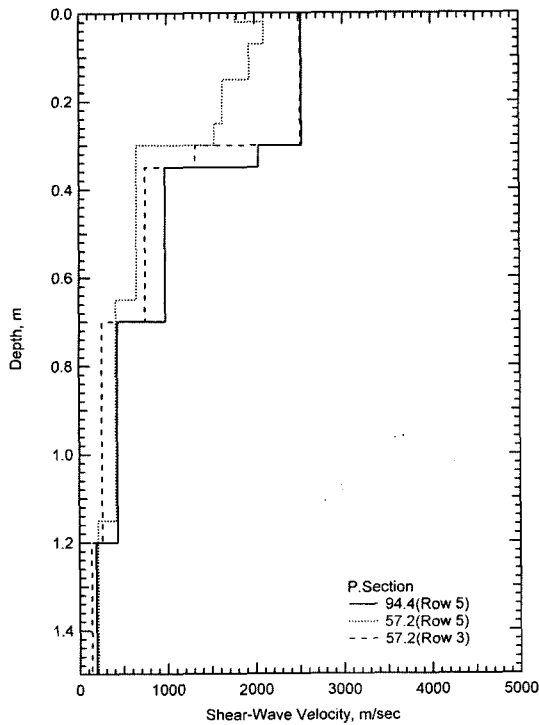


그림 15. SASW 시험으로 평가한 활주로 콘크리트 포장체의 전단파 속도 추상도

94.4 지역에 비해서 슬래브 57.2 지역의 경우 더 약한 것으로 평가되었지만, 같은 열에 있는 57.2(Row 3)와 57.2(Row 5)은 거의 차이가 없는 것으로 평가되었다.

### 5.3 비파괴 탄성파 시험결과의 종합적 평가

SASW 시험, 충격반향시험, 충격응답시험 등의 탄성파 기법으로 ○○공항 활주로 포장의 재료적 결함을 규명하기 위한 시험을 하였고, 콘크리트 슬래브를 지지하고 있는 보조기층과 기층의 강성에 대해서도 SASW 시험을 하였다. 콘크리트 슬래브의 현재 건전도 상태는 표층 균열이 발생한 대부분의 지점에서의 표층 강성과 슬래브 전체 평균 강성이 표층 균열이 없는 지점보다 작은 것으로 관찰되어, 콘크리트 재료의 품질 저하를 확인할 수 있었다. 표층 균열이 발생한 대부분의 지점에서 내부 균열의 단서가 되는 부반사면이 다수 관찰되고 있어서, 표층 균열뿐만 아니라 내부균열의 확산 가능성도 파악할 수 있었다.

하나의 슬래브를 타설하기 위해서 사용한 콘크리트 배합이 동일하였다면, 동일 슬래브 내에 강성이 양호한 것과 불량한 지점이 같이 존재하기 때문에, 콘크리트 슬래브에 발생한 표층 균열의 원인이 콘크리트 배합 불량

이라고 단언하기 어렵다. 활주로 하부노반의 강성 저하가 콘크리트 슬래브의 처짐을 초래하여 표층 균열의 원인이 될 수도 있지만, ○○공항 활주로의 경우 표층균열 발생지점과 노반강성 크기와의 상관관계를 찾을 수 없기 때문에, 노반강성의 저하로 인한 균열은 아니라고 판단된다. 그러나 균열이 발생한 슬래브의 경우, 양호한 활주로 쇄석층의 강성보다 불량한 활주로 쇄석층의 강성이 작게 측정되었기 때문에, 활주로 쇄석층의 강성 저하가 콘크리트 표층 균열의 직접적인 원인이었다고 판단할 수 있다. ○○공항 활주로는 위치하고 있는 원지반은 원래 연약지반으로서 활주로 시공 전에 샌드드레인 공법으로 지반안정처리 되었다고 하지만, 모래 말뚝이 설치되지 않은 지역에서 미진했던 압밀이 진행되어 국부적으로 압밀 침하가 발생한 것으로 추정된다. 따라서 활주로 시공초기에는 잘 다져져 있던 쇄석층이 압밀 침하와 더불어 느슨하게 되고, 이는 결과적으로 활주로의 침하와 표층 균열의 원인이 되었다고 할 수 있다.

## 6. 요약 및 결론

본 연구에서는 공항 활주로 포장에서 발생하는 균열과 슬래브 처짐 등의 결함을 평가하고 콘크리트 활주로의 건전도를 평가를 수행하는 비파괴 탄성파 기법 평가체제를 제안하였다. 콘크리트 활주로의 결함을 평가하는 건전도 평가기법으로서 탄성파 기법의 신뢰성을 확인하기 위하여, 건전한 활주로와 결함 있는 활주로에서의 탄성파 실험을 수치적으로 모사하였다. 비파괴 탄성파 시험을 활용하는 비파괴 평가체제는 콘크리트 활주로의 표면에 균열이 발생한 경우와 콘크리트 활주로 슬래브의 처짐이 발생한 경우에 대하여 별도로 제안되었으며, 콘크리트 슬래브에 대한 건전도 상태 평가와 활주로 슬래브 하부지지층에 대한 강성 평가의 두 영역으로 구성되도록 하였다. 본 연구에서 제안한 비파괴 탄성파 기법 평가체제의 신뢰성과 적용성을 평가하기 위하여, 국내 ○○ 공항 콘크리트 활주로에 비파괴 기법 평가체제를 적용하였다. 평가 결과, 콘크리트 포장의 재료상태나 슬래브 두께보다는 콘크리트 슬래브 하부 지지층의 강성이 문제이었다고 판단되었는데, 콘크리트 활주로에서 채취한 코어의 길이와 코어 자체에 대한 자유단 공진 실험으로 동일한 결과를 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 종합적 비파괴 시험기법의 적용은 국내 ○○ 공항에 처음으로 시도되었지만, 합리적인 이론적 기반과

타 콘크리트 구조물에 대한 많은 성공사례를 가지고 있기 때문에, 다른 공항 콘크리트 활주로의 경우에도 신뢰성 있게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2003-013-D00118)에 의해서 이루어진 것으로, 이에 진심으로 감사사를 드리는 바입니다.

### 참고 문헌

1. Al-Hunaidi, M.O. (1994), "Analysis of Dispersed Multi-Mod Signals of the SASW Method Using Multiple Filter/Crosscorrelation Technique", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.13, pp.13-24.
2. Gucunski, N and Woods, R. D. (1992), "Numerical Simulation of the SASW Test", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 11, pp.213-227.
3. Heisey, S., Stokoe, K. H., II, and Meyer, A. H. (1988), "Moduli of Pavement Systems from Spectral Analysis of Surface Waves," In *Transportation Research Record* 852, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.22-31.
4. Joh, S. H. (1996), *Advanced in Interpretation and Analysis Techniques for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Measurements*, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
5. Kausel, E. and Peek, R (1982), "Dynamic Loads in the Interior of a Layered Stratum: An Explicit Solution", Bull. Seismol. Soc. Am. Vol.75, No.5, pp.1459-1508.
6. Kausel, E. and Roesset, J. M. (1981), "Stiffness Matrices for Layered Soils", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.71, pp.1743-1761.
7. Nazarian S. and Stokoe, K. H., II (1984), "Nondestructive Testing of Pavements Using Surface Waves", In *Transportation Research Record* 993, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.132-144.
8. Nazarian S. and Stokoe, K. H., II (1989), "Nondestructive Evaluation of Pavements by Surface Wave Method", In *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*, STP 1026, A.J. Bush III and G. Y. Baladi (eds.), ASTM, Philadelphia, Pa., pp.119-137.
9. Nazarian S., Stokoe, K. H., II, and Briggs, R. C., and Rogers, R. (1988), "Determination of Pavement Layer Thicknesses and Moduli by SASW Method", In *Transportation Research Record* 1196, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
10. Nazaraian, Yuan, S., D., Weissinger, E., and McDaniel, M, (1997), "Comprehensive Quality Control of Portland Cement Concrete with Seismic Methods", In *Transportation Research Record* 1575, TRB, National Research Council, Washington, D.C. pp.102-111.
11. Roesset, J. M., Chang, D.-W, Stokoe, K. H., II, and Aouad, M, (1990), "Modulus and Thickness of the Pavement Surface Layer from SASW Tests", In *Transportation Research Record* 1260, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
12. Sansalone M. J., Lin, J. M. and Streett, W. B. (1996), "A New Procedure for Determining the Thickness of Concrete Highway Pavements Using Surface Wave Speed Measurements and the Impact-Echo Method", In *Innovations in Nondestructive Testing*, a Special Publication of the American Concrete Institute.
13. Sansalone, M., and Carino, N. J. (1986), *Impact Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves*, NBSIR 86-3452. National Technical Information Service, Springfield, Va., Sept., 222 pp.
14. Sheu, J. C., Rix, G. J., and Stokoe, K. H., II (1988), "Rapid Determination of Modulus and Thickness of Pavement Surface Layer", Presented at 67<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., Jan.

(접수일자 2005. 1. 17, 심사완료일 2005. 6. 17)