

탄성과 기법을 이용한 콘크리트궤도의 구조강성 및 충전상태 평가에 관한 연구

Evaluation on Structural Stiffness and Grouting Efficiency of Concrete Track using Elastic Wave Tests

이일화[†] · 조성호* · 장승엽**

Il-Wha Lee · Sung-Ho Joh · Seung-Yup Jang

Abstract Recently, concrete track is replacing ballast track for efficient and economic maintenance of track. It considerably offer less maintenance, a longer service life and reduced life-cycle costs. With the aim of achieving high-quality track construction work, of developing tools for quality assurance in new construction and for later technical inspection of material condition, a quality strategy has to be developed. For these purpose, NDT which is using the seismic wave has carried out in situ studies in the test construction section. The used NDT are SASW test, impact echo test and continuous impact echo test. The test is performed 5,353 times on 49 pre-cast concrete track panels to verify the stiffness structure and grouting efficiency of the track structure. To conclude, because of the non-homogeneous characteristic of concrete material, it is restricted to apply the elastic wave test at some aspect. However it is possible to acquise a sufficient reliability about structural stiffness and grouting efficiency of concrete track.

Keywords : Elastic wave, Concrete track, Stiffness, Grouting, Settlement

요 지 콘크리트궤도는 유지보수상의 장점으로 인하여 자갈궤도를 급속히 대체하고 있다. 반면에 보수보강이 어렵기 때문에 매우 엄격한 설계와 시공기술이 필요하며 이러한 기술을 만족하기 위해서는 평가기술 또한 뒷받침이 되어야 한다. 본 논문에서는 이와 같이 시공 및 유지보수의 평가기술을 확보하기 위한 방안으로서 탄성파를 이용하는 비파괴조사기법을 다양하게 적용하였다. 사용된 기법은 SASW시험, 임팩트에코시험, 연속임팩트에코시험이다. 시험은 49개의 프리캐스트 판넬의 강성구조와 충전성능을 평가하는 목적으로 총 5,353회에 걸쳐 수행되었다. 적용 결과, 콘크리트재료 자체의 비균질성으로 인하여 탄성파시험의 적용 및 분석이 제한적이지만 본 논문에서 목적하는 슬래브의 강성구조와 충전성(공극)에 대한 신뢰성 있는 조사 결과를 얻을 수 있을 것으로 나타났다.

주요어 : 탄성파, 콘크리트궤도, 강성, 충전, 침하

1. 서론

근래 철도건설 분야에서는 유지보수에 대한 절감 목적으로 콘크리트궤도가 신설건설의 주종을 이루고 있어 경부고속철도 2단계 구간과 호남고속철도에서도 콘크리트궤도가 채택되었다. 콘크리트궤도는 하중을 전달하는 도상층을 콘

크리트로 일체화시킨 구조로서 LCC(Life Cycle Cost)측면에서는 유리하지만, 시공후의 보수 및 보강이 매우 곤란하기 때문에 엄격한 설계와 시공기술이 필요하며 이러한 기술을 만족하기 위해서는 평가기술 또한 뒷받침이 되어야 한다. 본 논문에서는 비파괴적으로 신속하게 콘크리트궤도의 구조적 건전도와 재료 결함을 평가할 수 있는 탄성파시험의 적용성을 평가하였다. 궤도구조물에서 탄성파시험은 목적에 따라 다양하게 적용될 수 있으며 콘크리트 슬래브에 대해서는 내부의 공극, 균열, 결함, 접촉상태 등을 파악하는 목적으로 사용된다. 콘크리트공시체를 대상으로 하는 비파괴 탄성파기법에는 다양한 종류가 있다. 그러나 콘크리트

[†] 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원
E-mail : iwlee@krri.re.kr

TEL : (031)460-5326 FAX : (031)460-5319

* 정회원, 중앙대학교 토목공학과 정교수

** 정회원, 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 선임연구원

재료의 특성상 다양한 골재의 포함, 피시험체의 대형화, 재료 및 양생조건에 따른 강도의 변화, 미세균열 등이 발달해 있기 때문에 상대적으로 재료의 비균질성이 매우 높다. 따라서 철과 같이 단일 재질에 대한 시험결과 만큼의 신뢰성을 얻는 것을 불가능하기 때문에 시험방법의 선정에 주의가 필요하다. 본 논문에서는 이중에서도 콘크리트재료에 대한 신뢰성이 확보되었다고 판단되는 SASW기법, 충격반향(Impact Echo)기법, 연속충격반향(Continuous Impact Echo)기법을 적용하였다. SASW기법은 주로 지반의 진단 파속도 주상도를 파악하는데 적용하는데, 최근에는 콘크리트 구조체에 대한 강성평가에서도 적용한다[2,3]. 충격반향 시험은 일반적으로 코어를 채취하거나 정확한 두께를 알고 있는 위치에서 콘크리트의 파속도를 구한후 이를 구조물의 대표값으로 사용하여 부재의 두께 및 결함을 탐지한다[4]. 본 논문에서 제안한 연속충격반향기법은 충격반향기법의 특성을 기반으로 하여 큰 범위의 구조물을 효과적으로 평가하고 그 결과를 가시화하는 기법이다. 측선을 따라 충격반향시험을 복수로 수행하여 그 결과를 하나의 컨투어로 표현함으로써 성능평가에 보다 객관적인 결과를 제공해 준다. 본 논문에서는 콘크리트궤도의 시공성과 관련된 평가를 목적으로 슬래브의 강성구조 및 충전(공극)상태에 대한 공학적 분석과 해석을 통하여, 탄성파 기법이 적용되는 매질의 저변형률 특성의 측면에서의 결과를 제시하였다. 시험은 전라선에 부설된 프리캐스트 콘크리트궤도 시험시공 구간중 49개의 슬래브 판넬에서 총 5,353회를 수행하였다.

2. 콘크리트궤도 평가를 위한 탄성파 기법

콘크리트궤도를 대상으로 하는 비파괴시험에는 다양한 종류가 있으나, 재료의 불균질성 등으로 인하여 그 적용에는 한계가 있다. 다음의 탄성파기법들은 콘크리트재료에 대한 적용성이 확보된 것으로 평가되는 기법들로서 본 논문에서는 이중 SASW기법, 충격반향기법, 연속충격반향기법 3가지를 이용하였다.

2.1 SASW(Spectral Analysis of Surface Wave)기법

SASW 기법은 지반이나 구조물에 대하여 진단강성의 깊이별 변화를 추정하기 위하여 비파괴적으로 수행하는 현장 시험법이다. 충격이나 진동에 의해서 발생한 응력파는 지반이나 구조물의 매체를 통하여 사방으로 전파되어 나가는데, 진동원에서 일정거리만큼 떨어진 지표면에 설치한 진동 감진기에 의해 지반이나 구조물의 진동을 측정하게 된다. 이렇게 공시체면에 응력파를 발생시키고 일정 위치만큼 떨어진 곳에서 진동을 측정하여 하부구조의 깊

이에 따른 전단파 속도분포를 구하는 것이 SASW 시험이다. SASW 시험은 측정된 시간영역 신호의 푸리에변환, 전달함수의 계산 위상각 스펙트럼의 분석과 위상속도의 계산, 분산곡선의 결정, 역산해석 등의 과정에 의해서 최종적으로 시험체의 전단파속도 주상도를 구하게 된다[1,2].

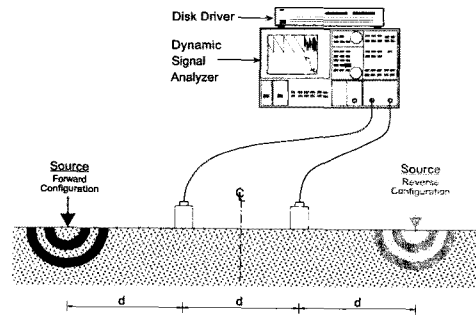


Fig. 1. Schematics of the SASW Test

2.2 충격반향(Impact Echo)기법

충격반향기법은 충격에 대한 구조물의 동적 응답을 분석하여 구조물의 결함을 탐지하는 것이 주목적이다. 시험은 Fig. 2와 같이 충격에 의한 탄성파를 외부표면에서 매질내에 발생시켜 내부균열 및 외부표면에서 반사되어온 파를 감지하고 그 반사파의 공진현상을 이용함으로써 매질의 물리적인 특성을 규명하는 기법이다. 표면위의 감진기에 의하여 측정되는 시간영역에서의 기록을 FFT변환하면 다중 반사에 의한 공진주파수를 얻게 된다. 이와 같이 주파수영역에서의 해석이유는 시간영역에서는 반사파의 도달시간을 명확히 찾아낼 수 없는 반면에 주파수영역에서는 공진주파수를 쉽게 얻을 수 있어 반사파의 도달주기를 결정할 수 있기 때문이다. 충격반향기법의 적용시에 첫 번째 모드의 파장과 두께사이의 관계는 경계조건에 의해서 결정되는데, 이러한 경계조건은 자유단-자유단과 자유단-고정단 조건이다. 콘크리트궤도의 경우는 자유단-자유단조건으로 볼 수 있으며 매질의 P파 속도를 알고 있을 경우, 이질매질층까지의 두께를 구하는 식은 다음과 같다. 여기서 V_p 는 매질의 P파 속도, f_1 은 1차 모드에 의한 공진주파수를 나타낸다.

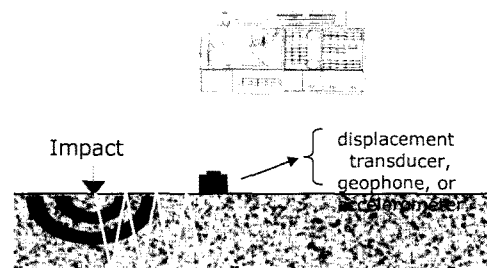


Fig. 2. Schematics of the Impact Echo Test

$$h = \frac{V_p}{2f_1} \quad (1)$$

2.3 연속충격반향(Continuous Impact Echo)기법

충격반향시험은 일종의 일점법 시험으로서 국부매질의 상태만을 평가하게 된다. 그리고 콘크리트궤도와 같이 비교적 큰 규모의 구조물에 대하여 전반적인 평가를 수행하기에는 시험에 소요되는 노력과 시간이 과다하게 되어 실용적이지 못하다. 따라서 본 논문에서는 충격반향기법의 특성을 기반으로 하여 큰 범위의 구조물을 효과적으로 평가하고 그 결과를 가시화하는 기법인 연속충격반향기법을 도입하였다. 이 기법은 축선을 따라 충격반향시험을 복수로 수행하여 그 결과를 하나의 컨투어로 표현하는데 본 논문에서는 Fig. 7과 같이 침목의 사이에서 5cm 단위로 시험을 수행하여 2차원적인 결과를 얻기 위하여 노력하였다. 기존 충격반향기법과 차이점은 입사체적파에 대한 응답을 주파수영역이 아니라 파장영역으로 표현하였다. 이른바 파장은 심도의 0.3~0.5배로 표현되는 것으로 이해할 수 있는데 결과적으로 연속충격반향기법은 측정위치의 파장 영역에서의 반사에너지의 형태로 표현되는 컨투어를 결정하게 되고 이 컨투어의 에너지 분포형태로부터 가장 지배적인 반사면(균열, 바닥면, 공극 등)의 분포형태를 시각적으로 평가할 수 있게 된다.

2.4 충격응답(Impulse Response)기법

충격응답기법은 포장층 내에 존재하는 결함을 찾기 위하여 사용되는 P파 공진측정기법인 충격반향기법과 달리, 포장내에 상태를 유추하기 위하여 횡모드 진동을 측정한다. 저주파 성분의 횡모드 진동은 충격반향기법보다 측정하기가 보다 수월하다. 충격응답기법은 포장구조물이나 콘크리트 슬래브의 표면에서 충격하중을 가하여 표면에 부착된 감진기로 탄성파를 측정하며, 충격하중으로는 슬래브에 저주파 횡진동을 발생시킬 수 있는 임펄스 햄머를 사용한다. 충격응답기법으로 측정된 임펄스 햄머 신호와 감진기 신호를 임펄스 햄머 신호로 나누어 주파수 응답을 계산한다. 주파수응답의 크기는 특별히 유동성(Mobility)이라고 하는 용어로 표현하며, 유동성도 표는 동적강성(Dynamic Stiffness)으로 정량화될 수 있다. 슬래브의 동적강성은 유동성 도표에서 초기 기울기의 역수로 정의되며, 슬래브 유연성(Flexibility)의 역수로 이해할 수 있으며 Fig. 3에서 초기 접선의 기울기(K_{dyn})를 이용한다. 충격응답기법은 상부 슬래브로 인하여 노반의 지지력확인이 어려운 콘크리트궤도의 노반조건을 평가하는데 적합하다.

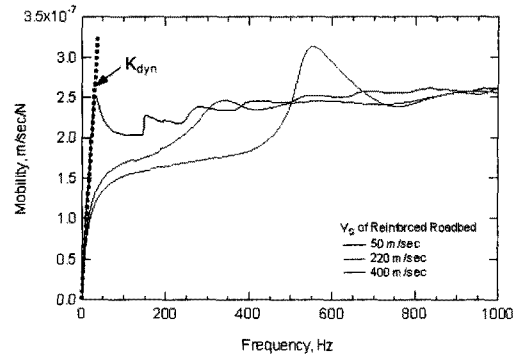


Fig. 3. IR Test Result on Rhada 2000-type Track

2.5 판파(Plate Wave)■ 이용한 방법

판파(Plate Wave)는 재료의 비파괴검사에 이용되는 초음파의 또 다른 형태로 유도초음파 또는 램파(Lamb Wave)라고도 한다. 이 파는 몇 파장 정도의 두께를 갖는 재료 내에 존재하는데, 재료의 전 두께를 통하여 진행되는 복합된 진동형태로 구성되기 때문에 박판의 결함 검출에 사용된다. 판파의 진동양식의 특성은 밀도, 재료의 탄성특성과 구조, 시편의 두께 및 주파수에 영향을 받는다. 판파는 대칭모드(S-Mode)와 비대칭모드(A-Mode)의 2종류가 있다. 각 전파의 형태는 주파수-두께의 곱에 따라 전파속도가 결정되면, 대부분 주파수-두께 곱의 변화에 따라 전파속도가 변하는 분산(dispersion)특성을 갖고 있다.

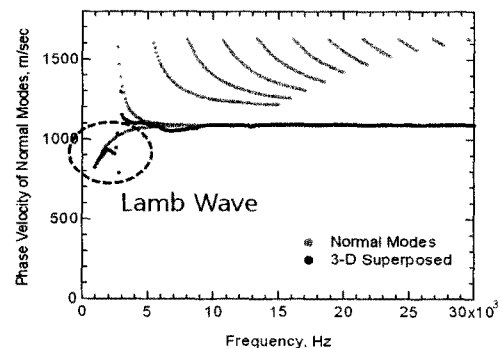


Fig. 4. PW Test Result on Rhada 2000-type Track

3. 프리캐스트 콘크리트궤도의 구조

콘크리트궤도는 크게 현장타설방식과 프리캐스트 슬래브를 사용하는 방식이 있는데 본 논문에서는 프리캐스트 슬래브 방식을 대상으로 하였다. 프리캐스트 슬래브는 적절하게 다져진 노반위에 빈배합콘크리트기층(HSB, Hydraulic Stabilized Base) 상부에 설치된다. 궤도의 높이를 정확히 조정하기 위하여 콘크리트 슬래브와 HSB층 사이에 시멘트 모르타르 그라우팅재를 충전한다.

3.1 A형 슬래브궤도

A형 슬래브궤도는 프리캐스트 슬래브를 콘크리트 기층 위에 올려놓고, 슬래브 하부에 충전재를 주입하여 고정시키는 구조로 이루어진다. 슬래브의 크기는 6.45m(L)×2.4m(W)×0.2m(H)이고, 콘크리트 설계강도는 40MPa이다. 노반은 원지반 위에 입도조정쇄석으로 이루어지는 일정 두께의 강화노반을 설치하고, 그 위에 다시 콘크리트 기층을 설치하는 구조를 가지며, 안정화기층은 도로 포장에서 사용하는 HSB층을 적용한다. 콘크리트 기층의 폭은 대략 3.2m 내외, 두께는 30cm, 콘크리트 강도는 15MPa로 한다. 슬래브 하부와 콘크리트 기층 사이에는 시멘트와 아스팔트 유제를 혼합한 시멘트 아스팔트 모르터를 적용한다. 이 충전재는 강도 15MPa 이상이고 소요의 자기충전성(self-compaction)을 확보해야 한다.

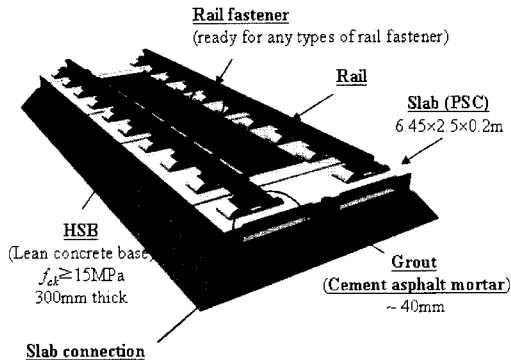


Fig. 5. Structure of A-type Precast Slab Track

3.2 B형 슬래브궤도

B형 슬래브궤도는 A형과 마찬가지로 프리캐스트 슬래브를 노반과 콘크리트 기층 위에 올려놓는 구조를 가지지만, 프리스트레스트 콘크리트 대신 철근 콘크리트 슬래브를 적용한다. 프리캐스트 콘크리트 슬래브 하나의 크기는 1.65~3.8m(L)×2.3m(W)×0.165 m(H)이고, 콘크리트 설계강도는 45MPa이다. 슬래브 패널 하부에 주입하는 충전재는 일반 무수축 시멘트 모르터를 적용하며, 모르터의 강도는 슬래브 패널과 유사한 강성을 갖도록 45MPa 내외로 설정하였다. 토공구간에서 노반과 기층의 구성은 A형 슬래브궤도와 동일하다.

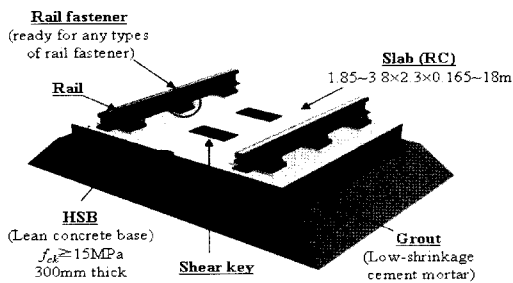


Fig. 6. Structure of B-type Precast Slab Track

4. 탄성파시험 계획 및 구성

4.1 탄성파 시험계획

시험 시공된 콘크리트 슬래브 궤도의 시공과 관련하여 재료 및 구조적 품질평가와 관련된 요구되는 사항은 슬래브의 탄성계수와 충전상태이다. 슬래브의 탄성계수는 고강도 콘크리트를 타설하였기 때문에, 텐던, 철근망과 같은 슬래브 내부 장애물로 인하여 콘크리트 재료의 불균질성이 초래될 가능성이 있고 충전상태는 모르터를 주입하여 슬래브와 HSB층 사이의 공극을 채웠지만, 국부적으로 발생하는 압력유실, 썩기와 같은 물리적 장애물 등으로 인한 불균질의 가능성이 있다. 이와 같은 시공결함은 콘크리트궤도의 장기 안정성에 영향을 줄 수 있기 때문에, 초기에 결함의 원인을 조치하여야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 열차운행에 지장을 주지 않고 콘크리트 슬래브에 구조적 손상을 초래하지 않으면서, 콘크리트 슬래브의 구조적 건전도와 재료적 결함을 평가할 수 있는 탄성파 시험을 계획하였다. 수행된 탄성파 시험의 구체적 내용은 Table 1에 정리한 바와 같다.

Table 1. Seismic Wave Test Items and Contents

평가 항목	평가를 위한 탄성파 시험	시험이 수행된 슬래브
콘크리트 슬래브의 주파수응답특성	충격반향시험	시험공시체
콘크리트 슬래브의 탄성계수	SASW 시험	A형 슬래브: No. 1~19 B형 슬래브: No. 1~30
모르터의 충전상태	1차원 평가	A형 슬래브: No. 14~19 B형 슬래브: No. 1~9
	2차원 평가	연속충격반향시험 A형 슬래브: No. 1~19 B형 슬래브: No. 1~30

4.2 탄성파 시험구성

탄성파시험이 수행된 위치는 Fig. 7의 평면도에 표시하였다. 콘크리트 슬래브의 탄성계수와 탄성파 속도를 측정하기 위한 SASW 시험은 각 슬래브의 물성을 대표할 수 있는 동일 지점에서 수행하였고, 충전상태를 평가하기 위한 충격반향시험은 체결장치에 인접한 지점에서 복수로 수행하였다.

4.3 콘크리트 슬래브의 탄성계수 측정

콘크리트 슬래브의 탄성파 속도와 탄성계수를 평가하기 위한 탄성파 시험은 SASW 시험이었으며, Table 2에 요약한 바와 같이 A형 슬래브 19개, B형 슬래브 30개 총

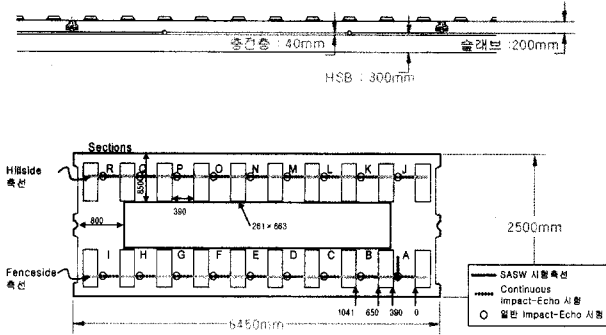


Fig. 7. Test Dimension and Locations of A-type Track

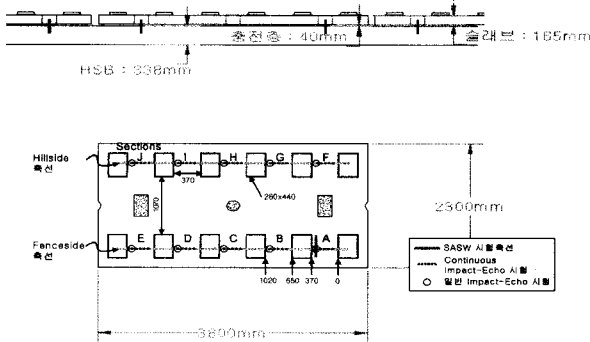


Fig. 8. Test Dimension and Locations of B-type Track

49개의 대표측선에 대해서 수행하였다. SASW 시험은 깊이별 탄성파 속도 또는 탄성계수의 변화를 측정하기 위하여 수행되었다. 콘크리트 슬래브의 영탄성계수 및 전단탄성계수는 SASW 시험으로 측정된 탄성파속도로부터 결

정될 수 있다. 전단탄성계수(G)와 영탄성계수(E)는 식 (2), (3)에서와 같이 전단파 속도(v_s), 단위질량(ρ), 포아송비(ν)를 이용해서 구할 수 있다. 일반적으로 콘크리트의 포아송비는 0.21~0.23을 사용하며 본 논문에서는 0.22로 가정하였다.

$$G = \rho v_s^2 \quad (2)$$

$$E = 2(1 + \nu) \rho v_s^2 \quad (3)$$

4.4 콘크리트 슬래브 하부의 충전상태

충전상태 평가시험이 수행된 위치는 Table 2에 요약한 바와 같으며, A형 및 B형 슬래브에 대해서 시험을 수행하였다. 충격반향시험은 슬래브의 국부지점의 상태를 정밀하게 평가하는 것이고, 연속충격반향시험은 국부지점보다는 축선 전체의 정량적인 상태를 공간적으로 평가하는 것이다. A형 슬래브의 경우, 연속충격반향시험은 각 section (A, B, C, ... R)에서 6cm 간격으로 6개 지점에서 충격반향시험을 수행하였다. 따라서 하나의 슬래브에 대해 모두 108번의 충격반향시험을 수행하였다. B형 슬래브의 경우, 연속충격반향시험은 각 section (A, B, C, ... J)에서 5cm 간격으로 5개 지점에서 충격반향시험을 수행하여, 하나의 슬래브에 대해 모두 50번의 충격반향시험을 수행하였다. 그리고 같은 축선방향의 결과를 모아서 두 개의 축선, Hillside축선과 Fenceside축선에 대해 충전상태에 대한 평가결과를 2차원 컨투어로 제시하였다.

Table 2. Test Items and Locations

탄성파시험	슬래브	측정 위치와 간격	회수
SASW 시험	A형: No. 1~19	각 슬래브의 Section A 측선길이: 20cm	19회
	B형: No. 1~30	각 슬래브의 Section A 측선길이: 20cm	30회
충격반향 시험	A형: No. 14~19	각 슬래브의 Section A SASW 축선의 중점에서 2개의 방향	216회
	B형: No. 1~9	각 슬래브의 Section A SASW 축선의 중점에서 2개의 방향	180회
연속충격 반향시험	A형: No. 1~13	Sections A, B, C, ..., Q Section 당 6cm 간격 6개지점	1,404회
	A형: No. 14~19	Sections A, B, C, ..., Q Section 당 6cm 간격 6개지점	1,404회
	B형: No. 1~9	Sections A, B, C, ..., J Section 당 5cm 간격 5개지점	1,050회
	B형: No. 10~30	Sections A, B, C, ..., J Section 당 5cm 간격 5개지점	1,050회

5. 콘크리트 슬래브 궤도에 대한 평가

콘크리트궤도의 강성구조 평가와 그라우팅 충전상태 평가를 위해 탄성파 시험을 수행하였다. 탄성파 시험은 비파괴적, 비관입적으로 수행되었으며 사용된 시험법은 SASW 시험, 충격반향시험, 연속충격반향시험이다. 본 절에서는 탄성파 시험으로 획득된 시험자료를 바탕으로 콘크리트 슬래브의 재료적, 구조적 공학적 물성을 파악하였다.

5.1 콘크리트 슬래브에서의 주파수응답특성 평가

평가목적은 탄성파의 속도와 공진주파수를 이용하여 재료의 강성과 두께에 대한 신뢰도 평가이다. 공시체는 콘크리트궤도의 지지층인 HSB층이다. 길이는 10m, 두께는 16cm부터 30cm까지의 범위를 가지며 다음 Fig. 9와 같이 총 10개 지점에서 충격반향시험을 실시하였다.

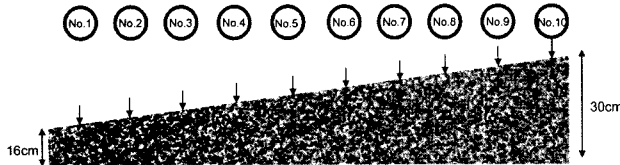


Fig. 9. Location and Shape of Test Bed

다음 Fig. 10과 11은 각 위치별 측정된 주파수영역의 측정 결과로서 공진주파수를 쉽게 구분할 수 있다. Fig. 12는 두께별 P파 속도를 나타낸 그림으로서 측정된 공진 주파수로부터 계산된 값이다. 시험공시체의 두께가 정확하다고 가정하였을 때의 재료의 압축파속도로서 비교적 균일하게 계산되며 평균값은 3400m/sec로 계산되었다. Fig. 13은 콘크리트 슬래브의 P속도가 일정(3,400m/sec)하다고 가정하고 실제 측정된 슬래브의 두께와 계산한 슬래브의 두께를 비교한 그림으로서 신뢰성이 높은 것으로 나타났다.

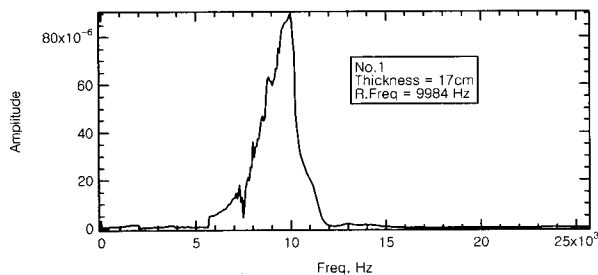


Fig. 10. Frequency Response Curve(No.1)

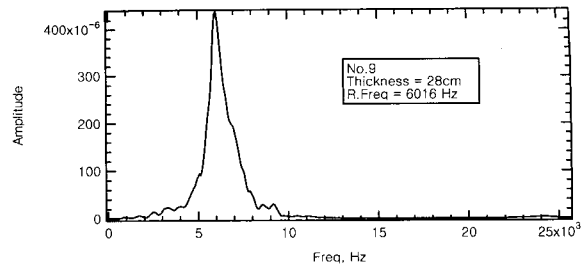


Fig. 11. Frequency Response Curve(No.9)

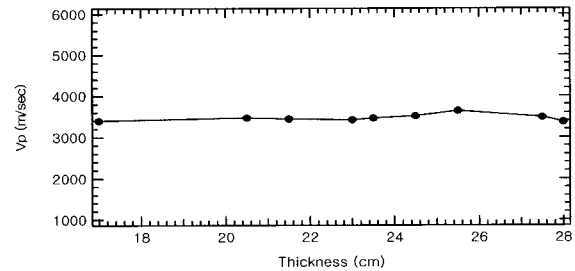


Fig. 12. P Wave Velocity at each Location

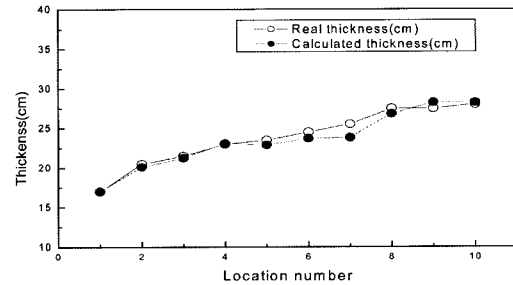


Fig. 13. Real and Test Thickness at each Location

5.2 SASW 시험에 의한 콘크리트궤도 슬래브의 강성 평가

SASW 시험으로는 측정지점에서 레일리파 속도 분산 곡선을 결정할 수 있었다. 콘크리트 슬래브궤도의 탄성계수 또는 탄성파속도 주상도 평가는 슬래브의 section A에서 수행되었다. SASW 시험으로 획득한 시계열 가속도계 신호는 Fig. 14와 같고, 이를 이용하여 구한 위상각 스펙트럼은 Fig. 15와 같다. 이로부터 결정된 위상속도 분산곡선과 역산해석을 수행하여 결정한 전단파속도 주상도는 Fig. 16과 같다. Fig. 16(a)의 주상도를 보면 A형 슬래브는 모두 20cm 두께를 가지고 있는데, 표면부의 약 3cm 정도는 내부콘크리트 매질보다 다소 강성이 낮은 것으로 평가되었다. 즉, 약 3cm 정도의 슬래브 표면층은 양생과정의 특성상 내부 매질보다 다소 약하게 굳어진 것으로 나타난 것인데, 이러한 경향은 전체 A형 슬래브에 공히 나타나는 현상이다. Fig. 16(b)의 B형 슬래브는 약 2.5~5cm 깊이에서 콘크리트의 강도가 낮아지는 3층 구조를 보이고 있다.

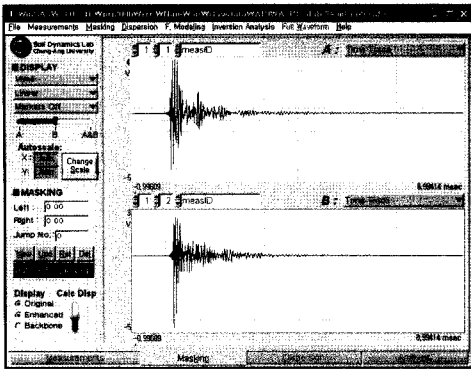


Fig. 14. Acceleration in Time Domain

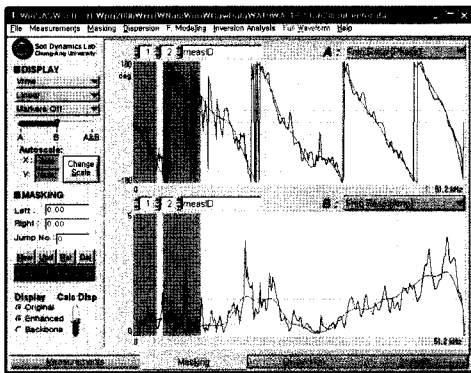
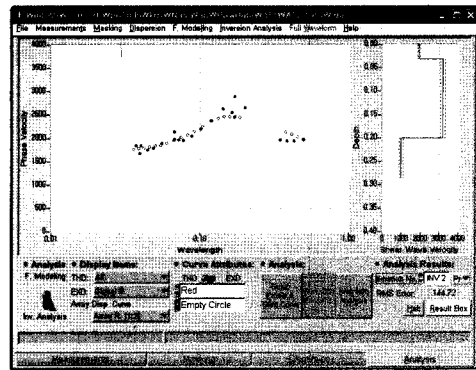
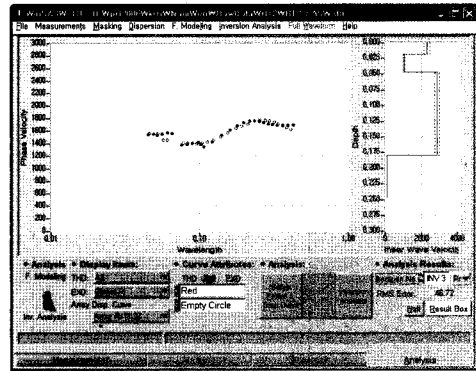


Fig. 15. Phase Velocity and Amplitude Spectrum of Transfer Function



(a) A-type Track Slab



(b) B-type Track Slab

Fig. 16. Comparison of Shear-wave Velocity by SASW

평균 S파, P파 속도는 A형 슬래브가 B형 슬래브보다 약 23% 정도 크게 측정되었다. P파의 경우는 약 820m/sec, S파의 경우는 약 520m/sec 정도 더 크게 평가되어, A형 슬래브가 B형 슬래브보다 강성과 강도가 더 크다는 것을 알 수 있다. SASW시험으로 평가한 평균 P파 속도는 충격반향시험 결과 분석에서도 활용하였다. Fig. 16에서 A형과 B형 슬래브의 깊이 별 전단파속도의 차이는 프리캐스트의 구조 차이(면적, 크기, 철근배근, 압축강도)와 양생조건 차이일 것으로 판단된다.

5.2 충격반향기법에 의한 충전상태 평가

콘크리트 슬래브 하부의 모르타르 충전 상태를 평가하기 위하여 충격반향시험을 수행하였다. 충격반향시험은 양단 자유면의 경계조건을 가지고 있는 평판 구조물에 있어서 자유면 경계를 찾는 데 효과적인 방법으로 널리 활용되어 왔다. 이러한 충격반향시험의 특징을 이용하여 본 연구에서도 그라우팅 충전상태를 평가하고자 하였다. 그라우팅 충전상태가 양호하면 콘크리트 슬래브 표면에서 발생한 탄성파는 충전층을 통과하여 HSB층까지 전파되어 가며 HSB층의 바닥면에서 반사파가 발생할 것이다. 반면, 그라우팅 충전상태가 양호하지 않으면 즉, 콘크리트 슬래브하부면과 HSB층 사이에 공간이 존재하면 탄성파는 콘크리트 슬래브

하부면에서 반사파가 발생하게 될 것이다. 이러한 반사파 발생위치를 찾기 위해서 충격반향시험을 적용하였는데, 본 연구에서는 두 가지 측면으로 충격반향시험을 적용하였다. 첫 째는 일반 충격반향시험으로 측정지점 하부 매질을 국부적으로 평가하는 것이었고, 두 번째는 충격반향시험을 인접한 여러 측정점에서 수행하여 반사파 발생추이를 공간영역에서 정성적으로 평가하는 연속 충격반향시험을 적용하는 것이었다. 15개 슬래브에 대해서는 일반 충격반향시험을 적용하였고, 나머지 34개 슬래브에 대해서는 연속 충격반향시험을 적용하였다.

5.2.1 일반 충격반향시험 적용 결과

충격반향시험에서는 양단자유면의 경계면에서 발생하게 되는 공진현상을 찾는 것이 주 목적이다. 이를 위하여 Fig. 17에 예시한 바와 같이, 전달함수의 진폭스펙트럼을 파장영역으로 도시하여 공진현상을 파악하였다. 공진현상이 나타나는 파장이 약 0.4m 정도이므로 반사경계면은 약 0.2m에 위치하고 있음을 알 수 있다. 한편, 반사경계면이 뚜렷하게 존재하지 않는 경우는 Fig. 17에서 회색으로 도시된 경우와 유사한 경우로서 공진현상을 나타내는 강한 첨두모양이나 큰 진폭을 보여주지 못하고 있다.

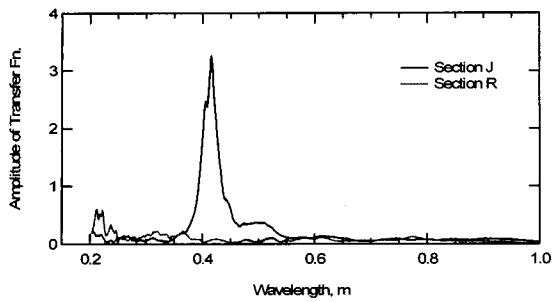


Fig. 17. Result of Impact Echo Test in Wavelength Domain

따라서 콘크리트 슬래브 하부의 충전상태가 양호하지 않은 경우는 다음과 같은 기준을 모두 만족하는 경우라고 정의할 수 있다.

- 공진현상을 나타내는 강한 침두 모양이 측정되는 경우.
- 공진 파장에 대한 진폭이 현저히 큰 경우.
- 침두치의 진폭이 1.0을 초과하는 경우
(동일시료에 대한 충격반향시험의 통계적 결과 기준)
- 동일 지점에서 타격위치를 달리하여 측정한 두 시험 결과가 모두 불량일 경우

Fig. 18은 6번 B형 슬래브에서 수행한 충격반향시험 결과로서 진폭스펙트럼을 도시한 그림이다. B형 슬래브의 각 위치(A-J)에서의 주파수별 진폭스펙트럼으로서 위치별 타격위치를 달리하여 2회 시험에 대한 결과이다. 대부분의 시험위치에서는 특별한 공진현상이 발생하지 않았으나, 위치 B에서는 약 0.4m 파장에서 침두 진폭이 현저히 크게 나타나 충전상태가 양호하지 않은 것으로 판단된다. 이러한 기준을 이용하여 판단해 보면, 전체 일반 충격반향시험 슬래브중 Table 3에 제시된 슬래브들의 충전상태가 양호하지 않은 가능성이 높다고 사료된다.

Table 3. Defected slab and locations by impact echo test

A형 슬래브		B형 슬래브	
슬래브번호	Section 번호	슬래브번호	Section 번호
A16	A	B6	B
A17	A, M		
A19	K, L, M		

5.2.2 연속충격반향시험 적용 결과

충격반향시험은 구조체내의 국부적 이상대에 대해서도 예민하게 반응을 하기 때문에, 콘크리트 슬래브 내부에 존재하는 국부적 충전 결함에도 예민하게 평가될 가능성이 있다. 따라서 국부적 지점에서의 측정결과를 슬래브 전체로 확대해석하여 결론을 내리기 보다는 가능한 넓은 지역의 측정결과를 종합하여 최종판단을 내리고자 연속충격반

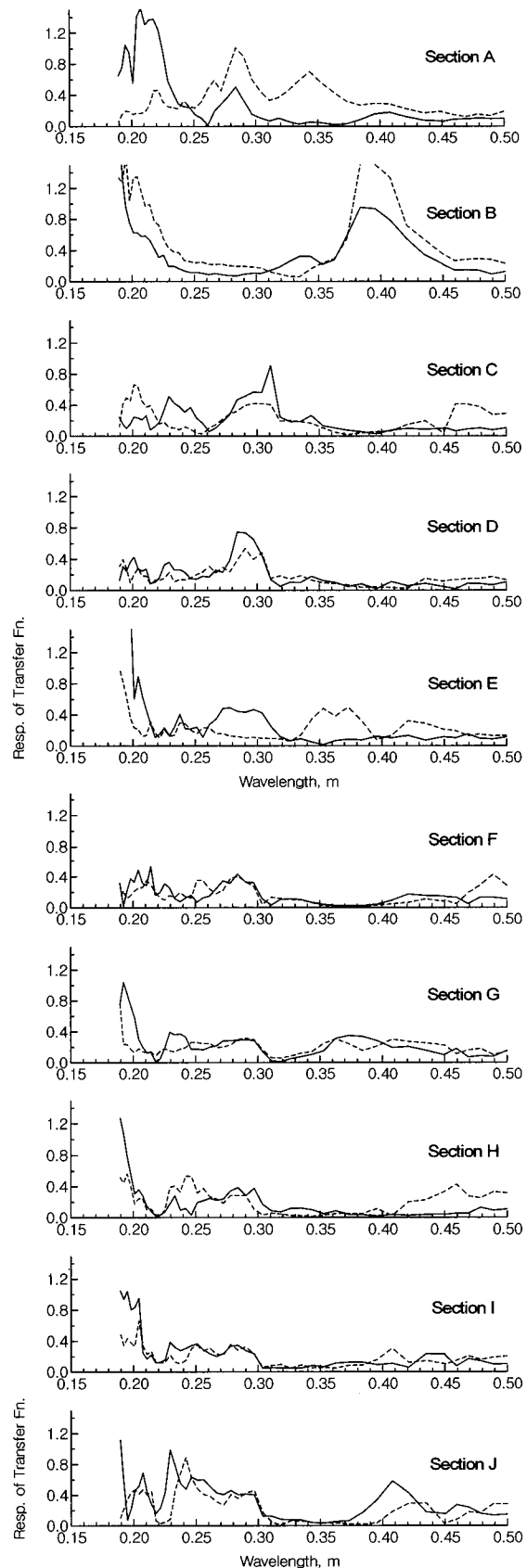


Fig. 18. Results of Impact Echo Test in Spectrum Amplitude (Slab No. 6)

향시험을 수행하였다. A형 슬래브의 경우에는 체결장치 사이에 모두 6개 충격반향시험을 6cm 간격으로 수행하여 모두 54개의 시험결과를 결합하여 Fig. 19와 같은 형태의 2차원 영상으로 표현하였다. 아래 그림은 양호하다고 판단되는 슬래브와 양호하지 않다고 판단되는 슬래브의 진폭스펙트럼을 비교한 그림이다. 충전성에 대한 판단기준은 2차원 영상에서 붉은 색이 강할수록 반사파의 진폭이 큰 것으로 표현되고, 파란색이 강할수록(진한색) 반사파의 진폭이 작은 것으로 표현된 것이다. Fig. 19(a)의 경우는 대체적으로 푸른색 계통으로 도시되어 있어서 파장 0.4m 인근에 강한 반사파를 찾아볼 수 없다. 반면, Fig. 19(b)의 경우, 2~5.5m 구간을 살펴보면, 파장 0.4m 인근에 강한 반사파가 밀집해 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 Fig. 19(b)의 Fence side 2~5.5m 구간은 충전상태의 불량 가능성이 높은 경우로 판단된다. 즉, 연속 충격반향시험에서 충전상태의 불량가능성이 있는 경우에 대한 판단기준은 시험으로 결정된 진폭스펙트럼의 2차원 영상에서 붉은 색의 영역이 넓은 지역으로 퍼져서 수평 방향의 띠를 형성하는 경우이다. 연속 충격반향시험 결과로부터 충전상태 불량 가능성이 있는 슬래브를 정리하면 다음 Table 4와 같다. 표에서 A형 슬래브의 경우, A1, A4, A8, A10, A14, A15, A16, A17, A18, A19, B형 슬래브의 경우, B4, B5, B6, B14, B17, B19 등에서 공극의 가능성이 감지되었다. 이중 국부적인 결함이 있는 슬래브를 제외하면, A4, A14, A15, A18 슬래브의 충전성이 취약할 가능성이 있다.

Table 4. Defected slab and locations by continous impact echo test

A형 슬래브		B형 슬래브	
슬래브	Section 번호	슬래브	Section 번호
A1	N	B4	J
A4	D, E, F, G, H, I, M	B5	J
A8	B, C, D, F	B6	B
A10	H, J, K	B8	A
A14	A,B,C,D,E,N,P,Q,R	B14	C, D
A15	A,B,C,D,E,F,J,K,L,M,N,P,Q,R	B17	B, C, D
A16	A,C,D,G,H,R	B19	B, J
A17	A,F,L,O,P		
A18	A,E,H,I,,J,N,O,P,Q,R		
A19	C,D,E,F,G,H,I,K,L		

5.2.3 보링홀 검사 결과 비교

충격반향시험결과와 신뢰성을 평가하기 위하여 충전상태가 양호하다고 판단되는 위치와 양호하지 않을 것으로 판단되는 슬래브 위치에서 직접 보링홀을 뚫은 후, 홀내부의 표면을 검사하였다. 보링위치는 슬래브 A12의 N, A4의 D 이다. 보링심도는 상부슬래브를 관통하여 HSB층까지 굴착하여 충전층에서의 충전도를 검사하였다. 검사 결과, 충전이 양호하다고 판단되었던 슬래브는 공극이 없이 밀실하게 충전되었으나 충전이 불량할 것으로 판단되었던 구간은 간극이 형성되어 있는 것을 육안으로 확인할 수 있었다. Fig. 20(a)는 12번 슬래브 N위치의 상태로서 양호한 것으로 확인할 수 있으며, Fig. 20(b)는 4번 슬래브의 D위치로서 충전이 불량하여 위치에 따라서 약 1~3mm의 간극이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

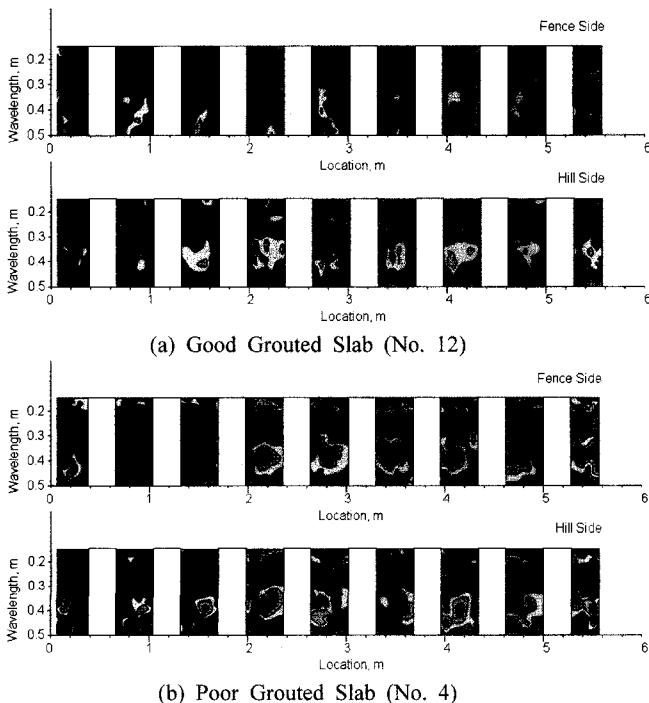


Fig. 19. Reflection-Energy Contour Determined by Continuous Impact Echo Test

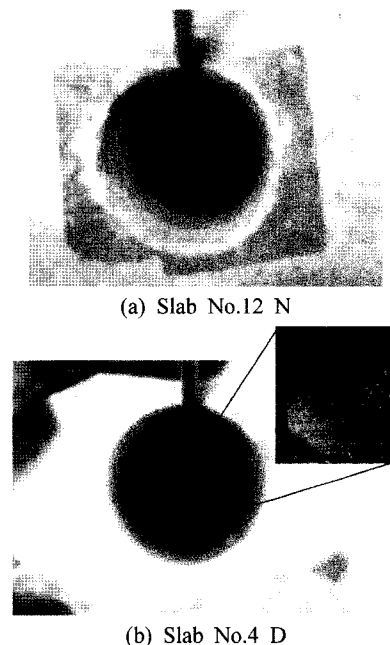


Fig. 20. Grouting State of Drilled Holes

6. 요약 및 결론

콘크리트궤도 슬래브의 구조적 건전도 상태와 충전(공극)상태를 비파괴적으로 평가하기 위하여 탄성파시험기법인 SASW시험, 충격반향시험, 연속충격반향시험법을 적용하였다. 시험결과에 대한 분석과 해석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 콘크리트 슬래브의 탄성계수 및 탄성파 속도의 깊이별 분석을 위한 SASW시험은 충격반향시험의 결과 분석에 필요한 탄성파속도를 확인하기 위한 보조적인 목적으로 수행되었지만, 시험결과는 심도별 탄성계수까지 확인할 수 있어 자세한 정보를 확보할 수 있었다. 시험 결과, A형 슬래브의 경우, 표층 약 3cm 부분 매질의 강성(강도)은 하부 매질의 강성(강도)보다 작게 평가되었고 A형 슬래브의 평균 강성(강도)은 B형 슬래브의 평균강성(강도)보다 약 23% 크게 평가되었다. 또한 A형 슬래브는 약한 표층을 가진 2층 구조로 평가되었지만, B형 슬래브는 깊이 2.5~5cm 부분의 강성(강도)이 취약한 3층 구조로 평가되었다.
2. 일반충격반향시험은 슬래브사이의 충전상태를 1차원적으로 평가하는 방법으로서 시험결과의 신뢰성은 높으나 시험면적이 국부적이기 때문에 전체적인 판단을 내리기는 곤란하였다. 시험 구간에서는 발진방향을 달리한 두 개의 측정결과를 바탕으로 충전상태에 대한 평가를 내렸는데, A형 슬래브의 경우 A16 (section A), A17 (section A, M), A19 (section K, L, M), B형 슬래브의 경우 B6 (section B)에서 불량 가능성이 파악되었지만 슬래브의 전체적인 충전성은 양호한 것으로 평가되었다.
3. 일반충격반향시험의 단점을 보완하기 위한 연속충격반향시험은 슬래브 저면적의 깊이별 충전상태를 단시간 내에 2차원적으로 판단하기에 유효한 것으로 평가되었다. 적용한 구간에서는 6cm 간격으로 수행한 54개의 Impact-Echo 시험결과를 병합한 2차원 영상을 바탕으로 평가를 수행하였다. A형 슬래브의 경우, A1, A4, A8, A10, A14, A15, A16, A17, A18, A19, B형 슬래브의 경우, B4, B5, B6, B14, B17, B19 등에서 공극의 가능성이 감지되었다. 이중 국부적인 결함이 있는 슬래브를 제외하면, A4, A14, A15, A18 슬래브의 충전성이 취약할 가

능성이 있다.

4. 시험결과를 종합적으로 판단해 보면, 콘크리트재료 자체의 취약성으로 인하여 탄성파시험의 적용 및 결과의 분석이 다소 제한적이지만 본 논문에서 적용한 탄성파시험을 이용할 경우, 콘크리트슬래브의 강성구조와 충전성(공극)에 대한 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원(AH08004A)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 이일화(2006), “충격반향기법을 이용한 포장궤도 모르타의 충전성능 평가”, 한국철도학회 춘계학술발표회.
2. 조성호, 강태호, 조미라, 서영찬, 권수안(2005), “콘크리트 활주로 건전도상태의 종합평가를 위한 비파괴 탄성파기법”, 한국지반공학회논문집, 제21권, 4호, pp.1~13.
3. 조성호, 강태호(2000), “지반의 전단파속도 토모그래피 영상을 구하기 위한 Multi-Channel Tomographic SASW (MTSASW) 기법”, 대한토목학회 가을학술발표회논문집, Vol. II, pp. 387~390.
4. Carino, N. J., Sansalone, M., and Hsu, N. N.(1986), “A Point Source-Point Receiver, Technuque for Flaw Detection in Concrete”, ACI JOURNAL, Proceeding Vol.83, No.2, Apr. pp. 199~208.
5. Olson, L.D. and Wright, C.(1990), “Nondestructive Testing for Repair and Rehabilitation,” Concrete International: Design and Construction, ACI, march, pp.58~64.
6. Rosenbald, B. L.(1995), “Evaluation of Stress-Wave Methods for Implementation into a Rolling System to Detect Pavement Irregularities”, Master Thesis, The University of Texas at Austin.
7. 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.

접수일(2008년 6월 10일), 수정일(2008년 9월 11일),
게재확정일(2009년 2월 12일)