

# 충격반향기법을 이용한 포장궤도 모르터의 충전성능 평가

## Evaluation of Pouring Capacity for Paved Track Mortar using the Impact Echo method

이일화\*  
Lee Il-Wha

### ABSTRACT

The paved track is a kind of pre-packed concrete in which mortar is poured to the void of the ballast. The pouring capacity is the most important for the strength of the paved track. The developed pouring material has the 6~8sec mobility and used minute particles aggregate. However, they has a rapid hardness speed, the pouring ability can be fallen. So, the impact echo method was applied to estimate the pouring ability of the paved track in this research. The impact-echo method is a technique for flaw detection in concrete. It is based on monitoring the surface motion resulting from a short-duration mechanical impact. The method overcomes many of the barriers associated with flaw detection in concrete based on elastic wave methods. In this paper, we make an attempt to estimate the dynamic stiffness, thickness of the layer, existence and location of inside flaw of paved track taking advantage of this technique.

### 1. 서론

포장궤도는 미리 설치되어 있는 골재에 모르터를 충전하는 일종의 프리팩 콘크리트로서 충전성이 궤도의 강도 특성을 좌우한다. 개발된 충전재료의 유동성은 J로드 6~8초로서 미세골재가 포함되며 유동성은 뛰어나지만, 초속경성을 가지고 있어 시공상의 시간지연 등으로 인하여 충전성능이 저하될 우려가 있다. 특히 사용골재가 도상자갈의 입도분포를 그대로 사용하기 때문에 높은 충전성능이 요구된다. 충진이 불량할 경우에는 충전층내에서 공극이 발생하거나 침목과의 접합이 불량하게 될 가능성이 있어 이에 대한 검토가 필요하다. 그래서 본 연구에서는 포장궤도 시공 후 충전성능을 평가하기 위한 방법으로서 충격반향기법(Impact Echo Test)을 적용하였다. 충격반향기법은 근래 시도되기 시작한 구조물 비파괴 검사 방법 중 하나로 충격에 대한 구조물의 동적 응답을 분석하여 구조물의 결함을 탐지하는 방법이다. 이 기법을 이용하여 충전층 재료의 동적강성, 층의 두께, 내부 균열의 유무 및 위치 등에 대한 평가를 수행하고자 하였다.

### 2. 충전성능 평가를 위한 비파괴조사기법

부재의 충전성능 평가에는 다양한 방법이 있지만, 부재에 손상을 주지 않는 비파괴적인 방법이 합리적이다. 비파괴조사기법을 통하여 얻을 수 있는 정보는 크게 시간영역자료와 주파수영역자료를 이용하여 충전층의 두께, 충전재료의 강성, 부재의 결함유무 및 위치를 파악할 수 있다. 본 연구목적에 적용 가능한 비파괴기법에는 다음과 같은 방법들이 있다.

#### 2.1 충격반향기법

충격반향기법은 비파괴 검사 방법 중 하나로 충격에 대한 구조물의 동적 응답을 분석하여 구조물의 결함을 탐지하는 것이 주목적이다. 시험은 그림 1과 같이 충격에 의한 탄성파를 외부표면에서 매질내에 발생시켜 내부균

\* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원, 정희원

열 및 외부표면에서 반사되어온 파를 감지하고 그 반사파의 공진현상을 이용함으로써 매질의 물리적인 특성을 규명하는 기법이다. 표면위의 감진기에 의하여 측정되는 시간영역에서의 기록을 FFT변환하면 다중반사에 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. 포장궤도의 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.

$$h = \frac{V_p}{2f_1}$$

식 1

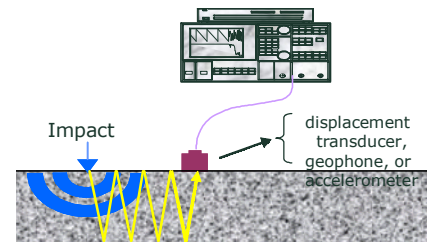


그림 1. 충격반향기법의 개요

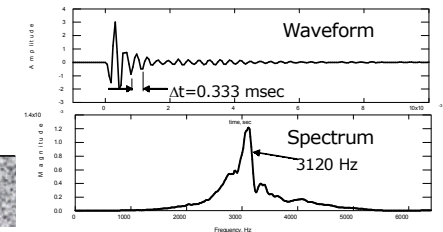


그림 2. 충격반향시험시의 전형적인 결과

#### 2.2 판파를 이용한 방법

판파(plate wave)는 재료의 비파괴검사에 이용되는 초음파의 또 다른 형태로 유도초음파 또는 램파(Lamb wave)라고도 한다. 이 파는 몇 과정 정도의 두께를 갖는 재료 내에 존재하는데, 재질의 진 두께를 통하여 진행하는 복합된 진동형태로 구성되기 때문에 박판의 결합검출에 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 진파의 형태는 주파수-두께의 곱에 따라 전파속도가 결정되면, 대부분 주파수-두께 곱의 변화에 따라 전파속도가 변하는 분산(dispersion)특성을 갖고 있다.

#### 2.3 충격응답기법

충격응답(Impulse Response)기법은 포장층 내에 존재하는 결함을 찾기 위하여 사용되는 P파 공진충정기법인 충격반향기법과 달리, 포장내에 상태를 유추하기 위하여 횡모드 진동을 측정한다. 저주파 성분의 횡모드 진동은 충격반향기법보다 측정하기가 더 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 유동성이라고 하는 용어로 표현하며, 유동성도표는 동적강성(Dynamic Stiffness)으로 정량화될 수 있다. 슬래브의 동적강성은 유동성도표에서 초기 기울기의 역수로 정의되며, 슬래브 유연성(flexibility)의 역수로 이해할 수 있다. 충격응답기법은 상부 슬래브로 인하여 노반의 지지력확인이 어려운 콘크리트궤도의 노반조건을 평가하는데 적합하다.

## 2.4 SASW(Spectral Analysis of Surface Wave)기법

SASW 기법은 지반이나 구조물에 대하여 전단강성의 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 지표면에 응력파를 발생시키고 일정 위치만큼 떨어진곳에서 진동에 의한 지반의 진동을 측정하여 하부지반의 지층구조와 깊이에 따른 전단파 속도분포를 구하는 것이 SASW 시험이다. SASW 시험은 측정된 시간영역 신호의 푸리에변환, 전달함수의 계산 위상과 스펙트럼의 분석과 위상속도의 계산, 분산곡선의 결정, 역산해석 등의 과정에 의해서 최종적으로 지반의 전단파속도 추상도를 구하게 된다. 최근에는 상기의 비파괴기법들을 2개 이상 병행하여 사용함으로써 정확성을 높이기 위한 시도를 하고 있다.



그림 3. 콘크리트케오에서의 SASW시험

## 3. 충격반향시험

### 3.1 시험계획

시험의 목적은 포장케오의 충전재의 충진성능을 평가하기 위함이다. 평가항목은 압축파의 속도와 공진주파수를 이용하여 재료의 강성과 충진깊이, 충진결합에 대한 여부이다. 우선 시험시편을 이용하여 굵은 골재가 포함된 공시체에서의 시험가능성을 평가하고 포장케오에서 시험을 수행하였다. 시험은 위치당 10회를 시행하여 평균값을 사용하였다.

### 3.2 시험 방법

먼저 P파 속도를 측정하기 위해서는 그림 4와 같이 매질의 평평한 면에 가속도계와 같은 감진기를 수직방향으로 놓고, 바로 그 옆에서 해머와 같은 발진기로 충격을 주어 응력파를 만들어 낸다. 수직방향으로 발생된 응력파는 반대쪽 자유단에 도달하게 되고, 도달한 이 응력파는 반사되어 처음 충격을 주었던 자유단으로 되돌아가게 된다. 이렇게 응력파가 양쪽 단에서의 반사를 반복하게 될 때, 매질 길이 두 배의 파장에 대한 정현파가 가장 지배적인 성분이 되고, 이 성분의 주파수를 파워스펙트럼에 의하여 결정한다.



그림 4 포장케오시편에서의 충격응답시험

### 3.3 시험공시체에서의 적용성 검토

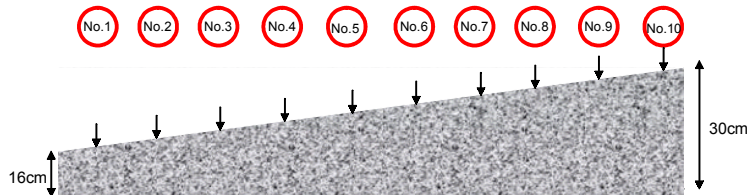


그림 5. 시험공시체의 형상과 시험위치

충격응답기법의 적용성을 검토하기 위하여 위치별로 두께가 다른 콘크리트 공시체를 제작하여 시험기법의 적용성을 검토하였다. 공시체의 길이는 10m, 두께는 16cm부터 30cm까지의 범위를 가지며 다음 그림 5와 같이 총 10개 지점에서 반향시험을 실시하였다.

다음 그림 6과 7은 각 위치별 측정된 주파수영역의 측정 결과이다. 시험공시체가 균일한 재료이기 때문에 해석결과에서도 공진주파수를 쉽게 구분할 수 있다. 그림 8은 두께별 P파 속도를 나타낸 그림으로서 측정된 공진주파수로부터 계산된 값이다. 시험공시체의 두께가 정확하다고 가정하였을 때의 재료의 압축파속도로서 비교적 균일하게 계산되며 평균값은 3400m/sec로 계산되었다. 그림 9는 콘크리트 슬래브의 P속도가 일정(3,400m/sec)하다고 가정하고 실제 측정된 슬래브의 두께와 계산한 슬래브의 두께를 비교한 그림이다. 일부 측정개소를 제외하고는 상당히 정확히 측정된 것을 알 수 있다.

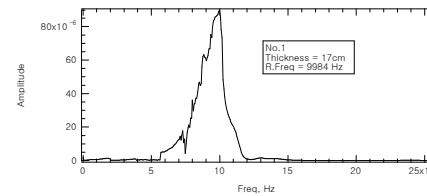


그림 6. 주파수 응답곡선(No.1)

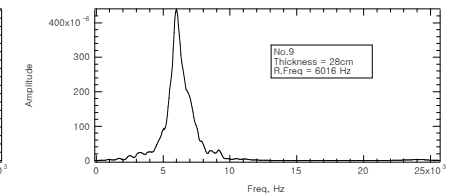


그림 7. 주파수 응답곡선(No.9)

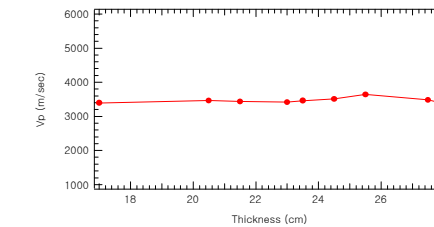


그림 8. 위치별 P파 속도

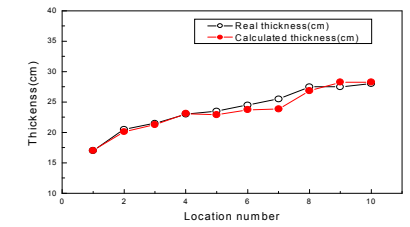


그림 9. 위치별 실측 및 시험 두께

## 3.4 포장케오 충진성능 평가

### 3.4.1 시험방법

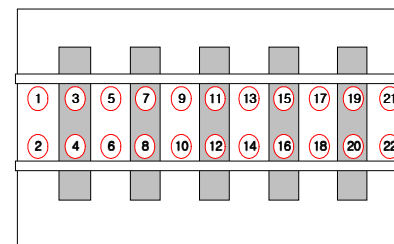


그림 10. 시험 위치



그림 11. 포장케오 공시체와 시험장면

포장제도 시험시공 시험체에서는 충전재료의 충전성능을 평가하기 위하여 그림 10, 11과 같이 충전면과 침목상면에서 시험을 실시하였다. 충전면은 42~44cm의 두께에 걸쳐 모르타가 충전되어 있고, 침목상면은 상부 19.5cm는 침목이며 하부 24~26cm는 모르타가 충전되어 있어 물성이 다른 두께의 층으로 이루어져 있다. 시험목적은 충전면에서는 내부층에서의 충전상태에 대한 평가이며, 침목상면에서는 침목과 하부충진층과의 결합상태를 파악하고자 하였다. 시험에 사용한 가지원은 Impact 햄머와 쇠파수 등을 사용하였으나 신호회독이 어려워 중앙의 망치를 사용하였다. 측정은 위치당 10회를 시험하여 평균한 값을 사용하였으며, 감진기에서 받는 시간이력과 주파수(Frequency)는 Power Spectrum으로 분석하였다.

### 3.4.2 공진주파수 특성

다음 그림 12는 각 시험위치에서의 1차 공진주파수를 나타낸 그림이다. 공진주파수는 시험공시체의 두께를 알고 있기 때문에 바로 환산하면 재료의 압축파속도(재료강성)를 구할 수 있다. 그림은 충전면에서 측정된 값과 침목면에서 측정된 값을 구분하였다. 각 측정치의 평균값은 3,565, 4,305Hz로서 충전층과 침목의 두께를 잘 표현하였다. 각 측정값의 편차가 크지 않고 고른 분포를 보이기 때문에 1차 공진주파수 해석결과로만 평가할 때는 대체로 양호한 충전이 되었다고 판단할 수 있다.

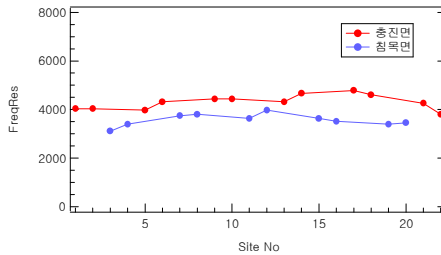


그림 12. 포장제도 시험체에서 위치별 공진주파수

### 3.4.3 주파수영역에서의 신호특성

다음 그림 13~15는 각 측정위치에서 측정된 대표적인 파워스펙트럼이다. 모든 측정 결과에서 공진주파수에 대한 구분은 확연히 알 수 있었으며, 일부 위치에서는 결합이 존재하는 것으로 파악되었다. 그림 13은 상태가 양호한 충전층에서의 대표적인 파워스펙트럼으로서 전체 주파수대역에 걸쳐 공진주파수는 하나만 존재하는 것을 알 수 있다. 측정결과를 분석하면 충전층내에는 특별한 이상(균열, 공동)이 없는 것으로 판단할 수 있으며, 충전두께(42~44cm)를 알고 있으므로 층내의 압축파의 속도는 3,780~3,960m/sec로서 포장제도의 설계강도를 확보함을 알 수 있다. 그림 14는 측정위치중 상태가 불량하다고 판단되는 위치(No 18)에서의 파워스펙트럼으로서 그림상 2개의 피크값을 볼 수 있다. 첫 번째 피크값은 정상상태의 충전층과 동일하지만, 두 번째 피크값은 12,000Hz에서 보이며, 이는 충전층 내부 약 15cm 부근에서의 결합이 것으로 추정된다. 결합원인은 균열이나 공동 등에 의한 반사효과로서 시공시 모르타재료의 공급이 원활하지 않아 충전시간이 일부 지연된 지점이 있었는데, 이때 발생한 것으로 추정되었다. 그림 15는 침목상면에서 측정된 자료로서 일차고유진동수는 충전면과 유사하나 고주파대역에서의 패턴은 다른 것을 알 수 있는데 이는 침목하면과 충전층의 접촉면에 기인하는 것으로 판단된다. 침목의 두께는 19.5cm로서 재료의 압축파속도가 동일하다고 가정하면, 10,000Hz에서 2차 공진주파수가 발생할 것으로 예상되었으나 측정 결과에서는 5,000~9,000Hz 대역에서 플랫한 신호가 감지되었다. 이러한 결과를 바탕으로 침목하면과 충전층과는 큰 결합이 없는 것으로 판단할 수 있다.

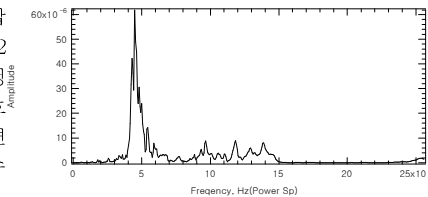


그림 13. 상태가 양호한 충전층에서의 주파수응답(No.2)

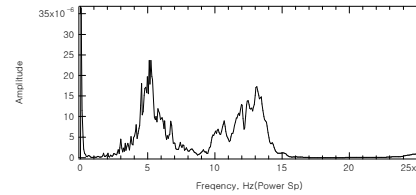


그림 14. 상태가 불량한 충전층에서의 주파수 응답(No.18)

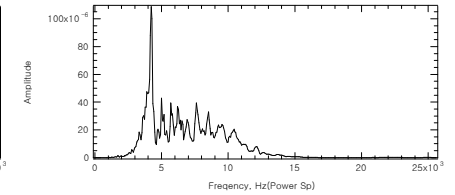


그림 15. 침목상면에서의 주파수 응답(No.8)

## 4. 코어압축강도 시험결과

충격반향기법으로 측정된 포장제도의 충전성능평가를 검증하기 위하여 각 측정위치에서 코어를 채취하여 상태를 육안으로 조사하고 압축강도를 시험하였다. 압축강도 시험 결과를 그림 16에 나타내었다. 코어 시험편의 압축강도 시험 결과 대부분 25MPa 이상의 압축강도를 발현하였으나, No. 18번의 경우 다른 시험체보다 작은 압축강도 특성을 보여 주었다. 이 시험체의 경우 코어공시체가 그림 17과 같이 국부적으로 충전상태가 불량한 것을 확인할 수 있었는데, 이러한 원인이 압축강도 및 충격반향시험의 결과에 영향을 미친 것으로 판단된다.

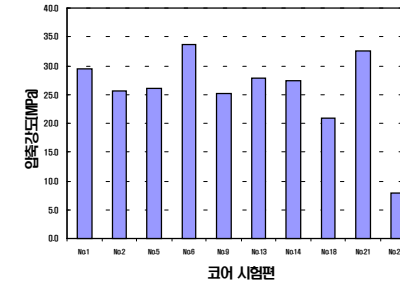


그림 16. 위치별 압축강도 시험 결과



그림 17. No.18코어의 모르타 충전상태

## 5. 결론

포장제도의 충전성능을 평가하기 위하여 충격반향기법을 적용하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 충격반향기법의 1차 고유진동수로부터 전체 충전깊이와 충전층의 전단강성은 비교적 정확히 파악할 수 있었다. 또한 주파수분석결과로부터는 결합의 유무와 위치를 파악할 수 있었으며, 코어시험을 통하여 확인하였다.
- 충격반향기법의 적용 결과, 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되어, 향후 현장적용시 충전성능을 확인하는 시험기법으로 적용할 예정이다.

### 참고문헌

- 조성호, 강태호, 조미라, 서영찬, 권수안, “콘크리트 활주로 건전도상태의 종합평가를 위한 비파괴탄성파기법”, 한국지반공학회는문집, 제21권, 4호, 2005.6 pp.1~13
- 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

