

## 토목공학 분야에서의 충격반향법의 응용

정연문<sup>1)</sup> · 하희상<sup>1)</sup>

### Application of Impact Echo Method to Civil Engineering Fields

Yunmoon Jung and Heesang Ha

**요 약 :** 금속 물체의 내부 상태를 조사하기 위하여 사용되고 있는 여러 가지 비파괴 조사법들은 콘크리트 재료의 불균질성으로 인하여 콘크리트 물체에의 적용에는 한계가 있다. 충격반향법은 물성의 변화가 존재하는 경계면이나 결합 부위에서 반사되는 탄성파의 공진 주파수를 이용하는 비파괴 조사법으로서 콘크리트 구조물의 내부 상태를 파악하기 위하여 활용될 수 있다. 본 연구에서는 충격반향법의 현장 적용을 위한 자료획득 시스템을 구축하였고 여러 가지 조건하에서 현장 시험을 수행하였다. 콘크리트 구조물의 두께 및 결합, 공동 존재 여부, 옹벽 뒷채움 상태와 터널 라이닝의 두께 및 결합, 그리고 활주로의 포장 두께 및 결합등의 조사를 위하여 충격반향법을 적용하였다. 10% 이하의 오차 범위내에서 결과를 제공함으로써 충격반향법의 토목분야에서의 활용 가능성이 입증되었다.

**Abstract :** Many nondestructive test methods used for metallic materials have some limit in application to concrete materials due to their heterogeneity. Impact echo method utilizes the resonance frequency of reflected seismic waves from defects or the boundary between two materials and can be applied to investigate the interior of concrete structures. In this study, a field data acquisition system for the impact echo method was assembled and field tests under various conditions were performed. The impact echo method was applied for investigating thickness/defects/backfilling of concrete structures/tunnel lining/airport pavement. The applicability of the impact echo method to the civil engineering field was substantiated by providing results within 10% errors.

**Keywords :** Impact Echo Method, Non Destructive Test.

## 서 론

충격반향법(impact echo method)이란 인위적으로 발생되어 물체 내부를 전파하다가 물성의 변화가 존재하는 경계면이나 결합 부위에서 반사되는 탄성파를 이용하는 비파괴 조사법이다. 충격반향법은 콘크리트 슬래브나 포장체의 두께 측정에 사용될 수 있으며 콘크리트 구조물 내부 또는 포장체 직하부 보조기층 내부의 cracks, delaminations, voids, honeycombing, debonding과 같은 결함의 위치와 대략적인 크기를 결정하는데 사용될 수 있다. 충격반향법의 적용 가능 구조물은 도로 포장체, 교량, 교각, 건물, 터널, 댐, 벽체 등으로서 대부분의 토목 구조물에 적용이 가능하나 조사의 성공적 수행을 위해서는 조사 원리 및 조사 대상체의 구조에 관한 충분한 이해가 필수적이다.

전통적인 콘크리트 조사 방법으로는 코어링, 드릴링 또는 일부분을 제거한 후의 육안 검사와 같은 파괴법이 널리 쓰여져왔다. 이와 같은 방법들이 높은 신뢰도를 갖고 있기는 하지만 많은 시간과 비용이 필요하며 또 조사시 발생된 결함이 추

후의 문제를 야기시키기도 한다. 최근 십 수년간 콘크리트 뿐만 아니라 다른 재료의 물체 내부 조사를 위하여 X선, 감마선, 레이더, 적외선, thermography, 음향법 등과 같은 비파괴 조사법이 시도되어 왔다. 그 중에서도 가장 오랜 역사를 가지고 있으며 가장 널리 사용되고 있는 비파괴 조사법인 음향법은 물체 내부에서의 응력파의 전파에 기초를 두고 있으며 파동-속도법, 공진법, 반향법의 세 가지 방법으로 구분될 수 있다.

반향법에서, 응력파는 변환기(transducer) 또는 기계적인 충격에 의해서 물체 표면으로부터 내부로 전파된다. 변환기 또는 기계적 충격이 사용되었을 때, 이 방법을 각각 파동반향법(pulse-echo method) 또는 충격반향법이라고 부른다. 1940년대 초반에 도입된 이래로, 널리 사용되고 있는 초음파 파동반향법은 특히 금속이나 플라스틱과 같은 균질한 물질의 비파괴 조사에 효과적으로 사용되고 있으나 콘크리트의 두께나 내부 결합 조사에서는 좋은 결과를 제공하지 못하였는 바, 그 이유는 물질의 불균질성으로 인하여 고주파수(100 kHz 이상)의 응력파가 빠르게 감쇄하기 때문이다.

본 연구에서는 충격반향법의 원리 및 자료획득 시스템을 간

\*2000년 7월 31일 접수

1) 현대건설(주) 기술연구소(Hyundai Institute of Construction Technology)

략하게 서술하고 여러 가지 조건하에서 현장 시험을 수행하여 토목공학 분야에서의 충격반향법의 적용 가능성 및 한계성을 논의하고자 한다.

### 충격반향법의 원리

충격반향법은 탄성 충격에 의하여 발생된 응력파에 기초를 두고 있으며 그 원리가 Fig. 1에 도시되어 있다. 물체의 표면에서 작은 강철구의 짧은 타격에 의한 기계적인 충격은 응력파를 발생시키며 이 응력파는 물체의 내부를 통과하다가 내부의 결함이나 반대편의 표면에서 반사되어 되돌아온다. 반사파의 변위가 타격점 근처에 설치된 변환기에 기록되며 시간 영역에서의 변위는 주파수 영역에서의 진폭으로 변환될 수 있다. 타격 표면과 내부의 결함 또는 반대편의 표면 사이에서의 응력파의 다중 반사는 순간적인 공진을 야기시키며 이는 주파수 스펙트럼상에서 쉽게 파악될 수 있고 이를 이용하여 내부의 결함도를 평가하거나 결함의 위치를 결정할 수 있다.

내부 결함의 존재 여부나 위치 또는 구조물의 두께 등에 관한 정보를 제공하는 것은 바로 시간 영역에서의 파형과 주파수 영역에서의 스펙트럼의 특징적인 형태이다. 내부에 결함이 존재하는 경우에는 파형이나 스펙트럼의 형태가 왜곡되며 특징적인 형태의 분석을 통하여 결함의 존재 여부나 위치에 관한 정성적이고 정량적인 정보를 획득할 수 있다.

판상(plate)은 충격반향법을 적용할 수 있는 대상중에서 가장 간단하고 또 가장 일반적인 구조물이다. 충격반향법 조사에 있어서 이상적인 판상이란 평행한 두 개의 표면이 있으며 측면으로부터의 다중 반사가 결과에 영향을 미치지 않을 정도로 크기가 충분해야 한다. 즉, 마주보고 있는 두 표면사이의 다중 반사에 의해 발생된 변위가 변환기에 수신된 신호를 결정해야 한다.

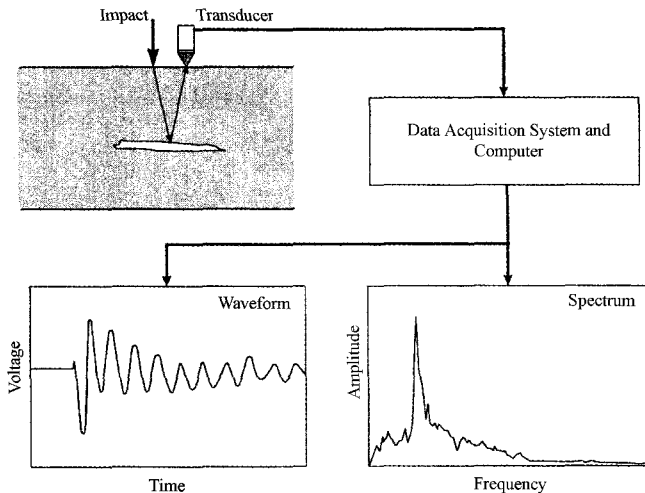


Fig. 1. Principle of impact echo method (Sansalone and Streett, 1997).

두께가 T이고 양 쪽 표면이 공기와 접촉하고 있는 판상 모델이 Fig. 2에 나타나 있다. 변환기에 수신된 파형은 모델 내부를 통과하고 경계면에서 다중 반사된 P파와 표면을 따라 전파된 R파에 의한 것이다. P파의 다중 반사가 그림 (a)에, 그에 따른 파형이 그림 (b)에 개략적으로 표시되어 있다. 이때, 판상의 크기가 두께에 비해서 충분히 크다면 측면으로부터의 R파의 반사는 기록되지 않으므로 R파는 파형 초기에만 나타날 것이다. R파는 P파와 S파보다 느린 속도로 표면을 따라 전파하며 주로 진폭이 큰 half sine 곡선의 모양을 갖고 있다. 그림에서  $t_c$ 는 충격원의 접촉 시간인데 충격으로 야기되는 충격파의 주파수 특성을 결정하는 요소이다.

물체 내부에서의 P파의 다중 반사가 충격반향법에서 가장 중요한 정보를 제공한다. 다중 반사파는 반사될 때마다 위상이 변하는데, 초기의 파를 P라고 하면 아래 경계면에 도달하는 P, 3P, 5P, 7P는 압축파(compressional wave)이고 충격면으로 돌아오는 2P, 4P, 6P는 인장파(tension wave)이다. 충격 시점부터 표면에서 2P의 도달시간인  $t_1$ 은 충격파가 전파한 시간이며 이것은 충격파가 전파한 거리  $2T$ 를 충격파의 전파 속도  $C_p$ 로 나눈 값이다. 동일한 시간 간격으로 반사파들이 계속 충격면으로 돌아오는 바, 이는 주기성이 파형의 지배적인 특성이 되는 것을 의미한다. 이 때, 주파수  $f$ 는 주기의 역수이므로  $1/t_1$ 이 된다. 이로부터 충격반향법에서 가장 핵심적인 관계식이 아래와 같이 유도된다.

$$f = \frac{C_p}{2T}$$

다시 말해서, 판상체의 두 경계면 사이에서 발생하는 P파의 다중 반사파형은 파의 속도를 판상 두께의 두 배로 나눈 주파수를 가진 주기 함수에 의해 지배된다.

그러나 앞에서 언급한 수식은 이론적인 것이며 현실적인 적용에서는 약간의 보정이 필요하게 된다.

$$f = \frac{\beta C_p}{2T}$$

위의 수식은 고체 형태의 구조물에서의 충격반향법의 기본적인 수식이며  $\beta$ 는 대상체의 모양에 의해 결정되는 shape factor

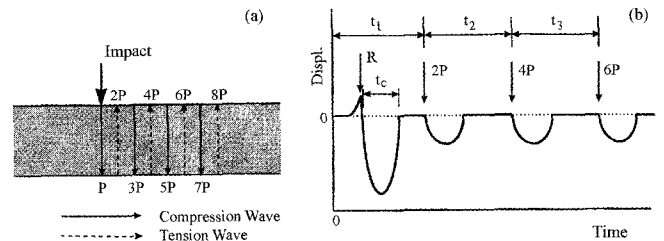


Fig. 2. Schematic diagram of impact echo test in a plate. (a) P wave multiple (b) wavelet.

이다. 고체 판상의 경우에 있어서  $\beta$ 의 값은 0.96이다.

### 자료획득 시스템

충격반향법에 사용되는 장비는 크게 신호분석기, 충격원, 변환기로 구성되며 Fig. 3에 나타나 있다. 본 연구에서 신호분석기로는 HP 35670A Dynamic Signal Analyzer를 사용하였으며 이는 마이크로 프로세서가 시간 및 주파수 영역에서 계산을 할 수 있는 디지털 오실로스코프의 일종이다. 사용 가능한 주파수 범위는 0.000122 Hz~102.4 kHz이다.

충격원으로 Fig. 4에 있는 여러 가지 종류의 망치 및 자체 제작한 강철 구슬을 사용하였으며 강철 구슬 충격원의 크기가 Table 1에 요약되어 있다(현대건설(주) 기술연구소, 2000). 충격원의 선택에 따라서 주파수가 다른 파형을 발생시킬 수 있기 때문에 적절한 충격원의 선택은 시험의 결과에 직접적인 영향을 미친다. 변환기로는 PCB사의 353B33 가속도계를 사용하였으며 신호를 증폭시키기 위하여 신호조정기(signal conditioner)를 사용하였다.

### 연구 및 현장 적용 사례

#### 콘크리트 두께 조사

현대건설(주) 기술연구소 실험동의 시험실에서 바다 슬래브의 두께 및 결합 파악을 위하여 충격반향법 시험을 수행하였

Table 1. Size of iron balls

번호	직경 (mm)
1	17.5
2	14.2
3	12.6
4	9.5
5	8.8

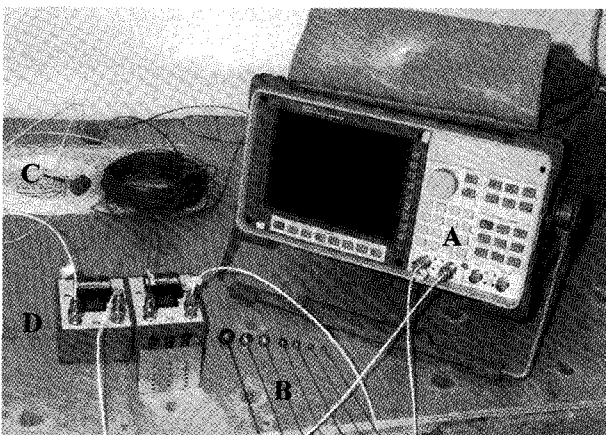


Fig. 3. Impact echo data acquisition system. (a) Dynamic Signal Analyzer (b) impact source (c) transducer (d) signal conditioner.

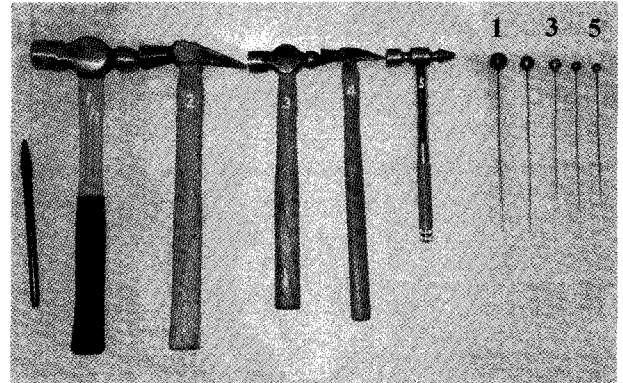


Fig. 4. Hammers & iron balls used for impact source.

다. 시험실에서 사용되고 있는 특수 장비의 전원 연결을 위하여 바다에 시추공이 천공되어 있었기에 슬래브의 두께(25.7 cm)를 정확하게 측정할 수 있었다. Pundit를 이용하여 측정된 슬래브에서의 응력과 속도는 3,500 m/s이었으며 충격원으로는 강철 구슬을 사용하였다. Fig. 5에 나타나 있는 시험 결과로부터 공진 주파수를 결정하여 슬래브의 두께를 계산하였다.

$$T = \frac{\beta C_p}{2f} = \frac{0.96 \times 3500}{2 \times 6900} = 0.2434(m)$$

실제 두께와의 차이는 1.33 cm였으며 오차율은 5%이다.

#### 콘크리트 내부 공동 조사

콘크리트 구조물 내부의 공동은 여러 가지 원인으로 발생하게 되며 구조물의 안정성을 위협할 수도 있다. 현대건설(주) 기술연구소에서 시험용으로 자체 제작한 콘크리트 블록 모델에서 공동 파악을 위하여 충격반향법 시험을 수행하였다. 콘크리트 모델의 크기는 500 cm (L) × 120 cm (H) × 49 cm (T)이며 부피는 3 m<sup>3</sup>이며 당시 210 kg/cm<sup>2</sup>의 강도로 제작되었다. 모델에서의 응력과 속도는 4,000 m/s 이었다.

우선 공동이 존재하지 않는 부분에서 충격반향법 시험을 수행하였다. 충격원으로는 망치를 사용하였으며 Fig. 6에 나타나

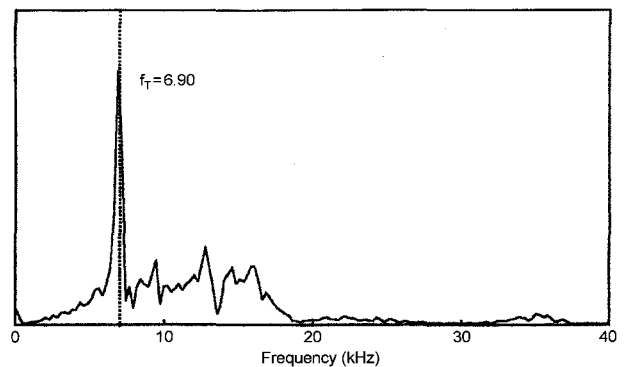


Fig. 5. Result on the concrete slab of laboratory floor.

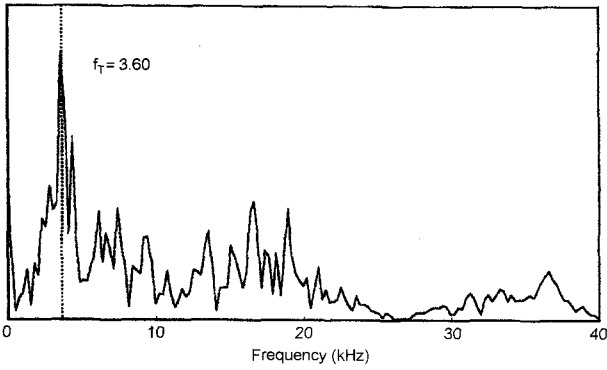


Fig. 6. Result with the concrete block model.

있는 시험 결과로부터 공진 주파수를 결정하여 콘크리트 구조물의 두께를 계산하였다.

$$T = \frac{\beta C_p}{2f} = \frac{0.96 \times 4000}{2 \times 3600} = 0.533(m)$$

실제 두께와의 차이는 4.3 cm 였으며 오차율은 9% 였다.

다음에는 모델의 내부에 있는 직경 90 mm PVC pipe를 목표로 하여 동일한 시험을 수행하였다. 파이프는 한 쪽 벽면으로부터는 15 cm 심도에, 그리고 그 반대 쪽 벽면으로부터는 25 cm 심도에 위치하고 있다. 충격원으로는 강철 구슬을 사용하였다. Fig. 7은 15 cm 심도의 벽면에서의 시험 결과를 보여주고 있다. 이로부터 공진 주파수를 결정하여 콘크리트 내부의 공동까지의 심도를 계산하였다.

$$T = \frac{\beta C_p}{2f} = \frac{0.96 \times 4000}{2 \times 12300} = 0.156(m)$$

실제 두께와의 차이는 0.6 cm 였으며 오차율은 4% 였다. 본 시험에서 한 가지 특기할 사항은 25 cm 심도의 벽면에서의 시험에서는 우세한 공진 주파수를 찾는데 실패한 사실이다. 충격반향법 시험에서 공동이 탐지되기 위해서는 공동의 크기가 공동 최대 심도의 1/3 이상은 되어야 한다는 것을 확인하였다.

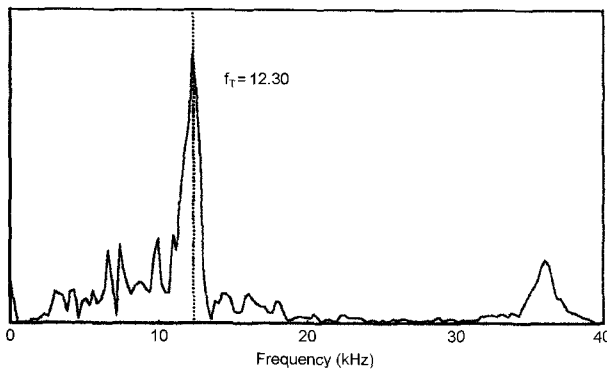


Fig. 7. Result of void test with the concrete block model.

### 콘크리트 옹벽 뒷채움 상태 조사

토목 구조물 하부 또는 배면에서의 접촉 상태의 평가가 필요한 경우가 종종 발생한다. 하부 또는 배면에 공동이 존재하고 있는 슬래브, 옹벽, 도로, 활주로와 같은 구조물에 과도한 하중이 작용한다면 구조물이 손상될 가능성이 높아진다.

현대건설(주) 기술연구소 토질실험실에서 시험용으로 자체 제작한 콘크리트 옹벽 모델에서 옹벽과 뒷채움재의 접촉 상태를 추정하기 위하여 충격반향법 시험을 수행하였다. 옹벽의 두께는 35 cm이었으며 옹벽과 속도는 4,000 m/s 이었다.

우선 뒷채움을 하지 않은 옹벽에서 충격반향법 시험을 수행하였다. 충격원으로는 망치를 사용하였으며 Fig. 8에 나타나 있는 시험 결과로부터 공진 주파수를 결정하여 콘크리트 옹벽의 두께를 계산하였다.

$$T = \frac{\beta C_p}{2f} = \frac{0.96 \times 4000}{2 \times 5100} = 0.376(m)$$

실제 두께와의 차이는 2.6 cm 였으며 오차율은 7% 이다.

이번에는 모래로 뒷채움을 한 상태의 옹벽에서 동일한 충격반향법 시험을 수행하였다. Fig. 9에 나타나 있는 시험 결과로부터 알 수 있듯이 콘크리트 옹벽 내부에서의 공진 주파수 뿐만 아니라 또 하나의 공진 주파수가 파악되었다. 모래의 옹벽과 속도를 2,000 m/s로 가정하여 계산한 결과, 두 번째 공진이

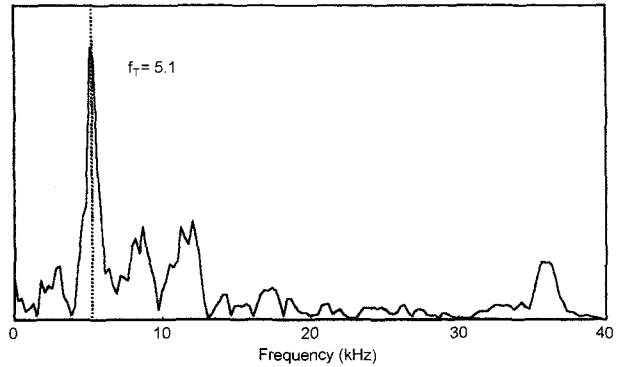


Fig. 8. Result with the concrete wall.

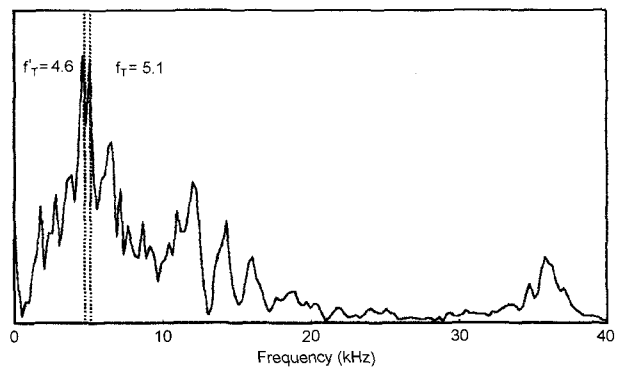


Fig. 9. Result with the concrete wall sand-backfilled.

발생한 심도는 옹벽 표면으로부터 39.7 cm 이었다. 제2의 공진 주파수는 옹벽 뒷채움한 모래 내부에서 발생된 것을 알 수 있다.

위의 두 시험 결과를 비교해 보면 옹벽 뒷채움이 없을 경우의 주파수 반응은 비교적 단순하며 뾰족한 단일 주파수 피크를 갖고 있으나 모래로 뒷채움을 한 경우의 주파수 반응은 다소 복잡한 양상을 보이며 두 개의 주파수 피크를 갖고 있다. 그 이유는 뒷채움이 없을 경우(배면에 공동이 존재할 경우에는 대부분의 에너지가 콘크리트와 공기와의 경계면에서 반사되나 뒷채움을 한 경우에는 에너지의 일부가 콘크리트와 모래와의 경계면에서 투과하여 콘크리트 내부에서의 에너지가 감소하기 때문이다. 이는 콘크리트/공기 및 콘크리트/모래에서의 음향 임피던스(acoustic impedance)의 차이에 기인한다. 이상과 같은 결과를 이용하면 판상 토목 구조물 하부 또는 배면에서의 접촉 상태를 평가하는데 충격반향법을 활용할 수 있다.

**터널 라이닝 두께 및 결함 조사**

터널 배면의 공동은 터널의 안정성을 저해하므로 라이닝과 암반의 접합 상태 또는 배면 공동의 파악은 터널 안전 진단에 필수적인 사항이다. 터널 라이닝 두께 및 결함 파악을 위하여 시공중인 터널 현장에서 충격반향법 시험을 수행하였다. 터널은 먼저 슛크리트를 10 cm 두께로 타설하고 방수포와 부직포를 설치한 후에 콘크리트를 40 cm 두께로 타설하였다.

사전 정보로부터 배면 상태가 서로 상이한 두 지점(47+265 & 47+275)의 천단부에서 충격반향법 시험을 수행하여 결과를 비교하였다. Pundit를 이용하여 측정된 콘크리트 라이닝에서의 응력과 속도는 4,700 m/s 이었다.

우선 47+275 지점의 천단부에서 충격반향법 시험을 수행하였다. 충격원으로는 망치를 사용하였으며 Fig. 10에 나타나 있는 시험 결과로부터 두 개의 공진 주파수를 파악할 수 있다. 비교적 작은 피크를 가진 높은 공진 주파수(5.4 kHz)는 콘크리트 라이닝/슛크리트의 경계면에서, 매우 큰 피크를 가진 낮은 공진 주파수(3.8 kHz)는 슛크리트/암반의 경계면에서 각각 야기된 것으로 판단된다.

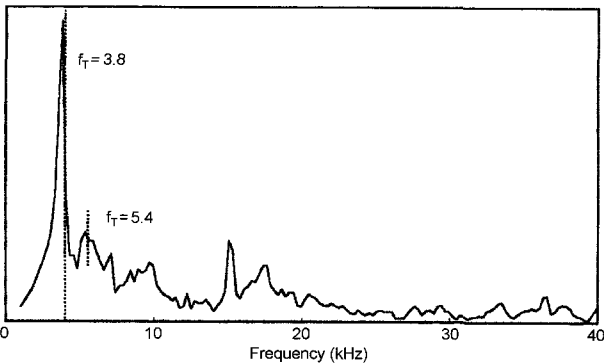


Fig. 10. Result at the station 47+275.

콘크리트 라이닝의 두께를 계산하면

$$T = \frac{\beta C_p}{2f} = \frac{0.96 \times 4700}{2 \times 5400} = 0.418(m)$$

실제로 타설된 콘크리트 라이닝의 두께는 확인할 수 없었으며 설계값과의 차이는 1.8 cm 였다. 또한 슛크리트의 응력과 속도를 3,500 m/s로 가정하여 계산한 결과, 슛크리트층의 두께는 13 cm 였다. 역시 실제 타설된 두께를 확인할 수 없었으며 설계값과의 차이는 3 cm 였다.

슛크리트/암반 경계면에서의 공진 피크 진폭이 콘크리트/슛크리트 경계면에서의 공진 피크 진폭보다 훨씬 큰 것은 각 경계면에서의 음향 임피던스에 기인하는 바, 이는 콘크리트와 슛크리트의 물성 차이보다 슛크리트와 암반의 물성 차이가 더 크기 때문이다. 이상의 시험 결과로부터 콘크리트 라이닝과 슛크리트의 접합 상태가 양호하다는 것을 추정할 수 있다. 만약 콘크리트 라이닝과 슛크리트의 접합 상태가 불량하여 그 접합부에 공극이 존재한다면 상이한 시험 결과를 얻게 되기 때문이다.

다음은 47+265 지점의 천단부에서 충격반향법 시험을 수행하였다. Fig. 11에 나타나 있는 시험 결과로부터 콘크리트/슛크리트 경계면에서 공진하는 주파수를 파악하여 콘크리트 라이닝의 두께를 계산하였다.

$$T = \frac{\beta C_p}{2f} = \frac{0.96 \times 4700}{2 \times 5600} = 0.4028(m)$$

실제로 타설된 콘크리트 라이닝의 두께는 확인할 수 없었으며 설계값과의 차이는 0.28 cm 였다.

Fig. 10에 제시한 47+275 지점에서의 시험 결과와는 달리 콘크리트/슛크리트 경계면에서 큰 진폭을 갖는 공진 주파수만이 존재하고 슛크리트/암반 경계면에서의 공진 주파수가 나타나지 않는 이유는 콘크리트 라이닝과 슛크리트의 접합 상태가 불량하여 그 접합부에 공극이 존재하기 때문에 콘크리트와 공극간의 음향 임피던스가 매우 크므로 대부분의 에너지가 반사되고 슛크리트로는 에너지가 투과하지 않기 때문인 것으로 사

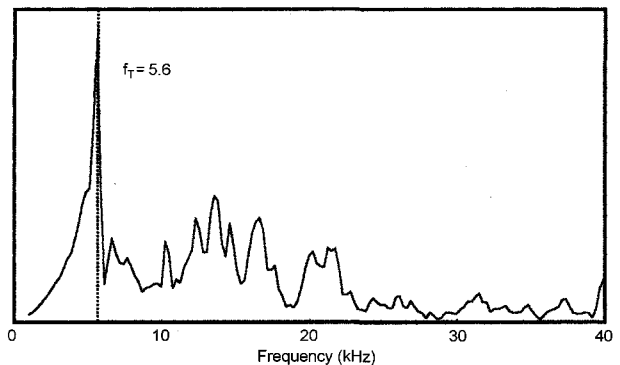


Fig. 11. Result at the station 47+265.

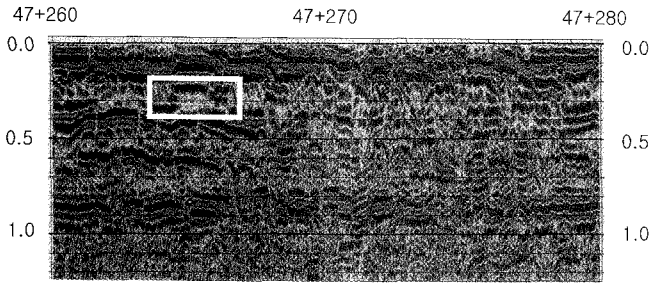


Fig. 12. Result of the GPR survey at 47+260~47+280.

려된다.

Fig. 12는 같은 지점에서 수행된 지오투다 시험 결과를 보여주고 있는 바, 상기에서 언급한 충격반향법의 시험 결과와 동일한 결과를 제시하였다. 47+275 지점에서는 콘크리트 라이닝과 슛크리트의 접합 상태가 양호하여 전자파의 반사면이 존재하지 않지만 47+265 지점에서는 불량한 접합 상태로 인한 콘크리트 라이닝과 슛크리트 사이의 공극으로부터 야기된 강한 반사면이 뚜렷하게 보이고 있다.

**활주로 포장 두께 및 결함 조사**

하부에 층분리, 균열 또는 공동과 같은 결함이 존재하고 있는 활주로에 과도한 하중이 작용하면 활주로는 손상될 가능성이 높아진다. 활주로의 손상은 항공기 사고와 직결되어 대규모 인명 피해를 가져올 수 있으므로 규칙적인 활주로의 상태 점검이 불가피하나 현실적으로 광활한 활주로를 정밀하게 점검하는 일은 쉬운 일이 아니다. 본 연구에서는 빠른 시간에 넓은 지역을 조사할 수 있는 충격반향법 시험을 활주로 두께 및 결함 조사에 적용하여 그 활용 가능성을 모색하였다.

현재 건설중에 있는 인천국제공항 북측 활주로 현장의 노면 및 주활주로에서 활주로의 두께 및 결함을 조사하기 위하여 충격반향법 시험을 수행하였다. 인천국제공항 북측 활주로의

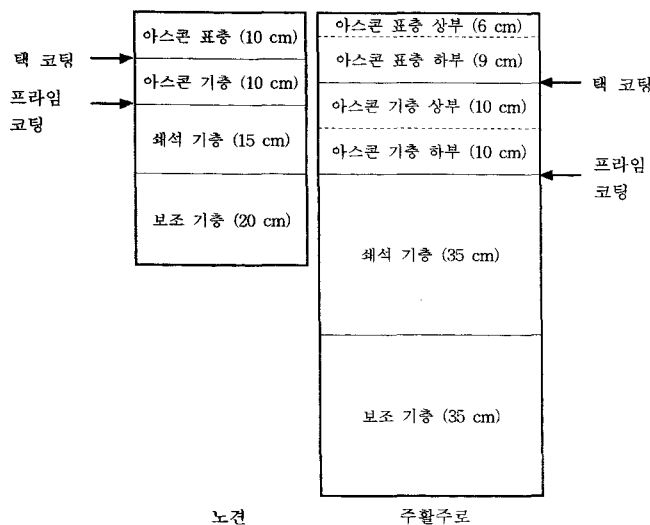


Fig. 13. Cross-sectional view of the runway of Incheon Int. airport.

노면 및 주활주로의 구조가 Fig. 13에 나타나 있다. 쇄석기층 및 보조기층의 재료는 골재와 시멘트로서 시멘트 안정처리기층이라고도 불리운다. 아스콘 표층과 아스콘 기층 사이에는 택 코팅(tack coating)이, 그리고 아스콘 기층과 시멘트 안정처리기층 사이에는 프라임 코팅(prime coating)이 각각 처리되어 있다.

Pundit를 이용하여 현장에서 채취한 아스콘 및 시멘트 코어로부터 응력파의 속도를 측정된 결과, 아스콘 및 시멘트의 응력과 속도는 각각 3,500 및 3,900 m/s 이었다.

(1) 노면

우선 노면에서 망치를 충격원으로 사용하여 충격반향법 시험을 수행하였다. Fig. 14에 나타나 있는 시험 결과로부터 세 개의 공진 주파수(4.6, 9.2, 15.9 kHz)가 파악되었다. 가장 높은 공진 주파수(15.9 kHz)는 아스콘 표층/기층의 경계면에 존재하는 택 코팅에서, 중간 공진 주파수(9.2 kHz)는 아스콘 기층/쇄석 기층의 경계면에 존재하는 프라임 코팅에서, 그리고 가장 낮은 공진 주파수(4.6 kHz)는 쇄석 기층/보조 기층의 경계면에서 각각 야기된 것으로 판단된다. 쇄석 기층과 보조 기층의 재료는 같은 시멘트이지만 골재의 입도가 다르다.

심도를 계산하는 수식으로부터 아스콘 표층(T<sub>1</sub>) 및 기층(T<sub>2</sub>)까지의 심도를 계산할 수 있다.

$$T_1 = \frac{\beta C_p}{2f} = \frac{0.96 \times 3500}{2 \times 15900} = 0.106(m)$$

$$T_2 = \frac{\beta C_p}{2f} = \frac{0.96 \times 3500}{2 \times 9200} = 0.183(m)$$

현장에 천공된 시추공으로부터 실제 타설된 아스콘의 두께

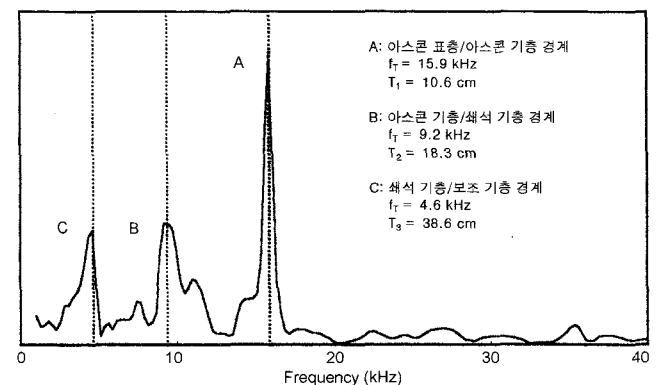


Fig. 14. Result on the runway shoulder.

Table 2. Summary of result on the runway shoulder

	실측 결과 (심도, cm)	시험 결과 (심도, cm)	오차 (cm)	오차율 (%)
아스콘 표층	9.7	10.6	+0.9	9
아스콘 기층	19.7	18.3	-1.4	7
쇄석 기층	확인 불가	38.6	-	-

를 확인할 수 있었으며 각 경계면 심도의 실측 결과 및 시험 결과가 Table 2에 요약되어 있다. 또한 쇄석 기층의 두께는 20.3 cm로 계산되었으나 실제 타설된 두께를 확인할 수 없었다.

(2) 주활주로

다음에는 주활주로에서 충격반향법 시험을 수행하였다. 시험 결과 분석이 Fig. 15에 나타나 있으며 여러 개의 공진 주파수 피크중에서 네 개의 주파수 피크가 구성 물질의 경계면에서 발생한 것으로 추정되었다. 28.9 kHz의 작은 피크의 공진 주파수는 아스콘 표층 상하부 경계면에서, 12.3 kHz의 큰 피크의 공진 주파수는 아스콘 표층/아스콘 기층의 경계면에 존재하는 택 코팅에서, 6.1 kHz의 작은 피크의 공진 주파수는 아스콘 기층 상하부의 경계면에서, 그리고 4.6 kHz의 큰 피크의 공진 주파수는 아스콘 기층/쇄석 기층의 경계면에 존재하는 프라이 코팅에서 각각 야기된 것으로 판단된다. 동일 물질의 상하부 경계면으로 부터의 공진 주파수 피크보다는 코팅재가 삽입된, 물성이 다른 경계면으로 부터의 공진 주파수 피크가 훨씬 크게 나타나는 것은 당연한 현상이다. 28.9 kHz와 12.3 kHz 사이에 보이는 공진 주파수는 아스콘 표층 하부 내부에 존재하는 결함에 기인하는 것으로 추정되나 확인할 수는 없었다.

수식으로부터 아스콘 표층 상하부 경계면( $T_1$ ), 아스콘 기층( $T_2$ ), 아스콘 기층 상하부 경계면( $T_3$ ) 및 쇄석 기층( $T_4$ )까지의 심도를 계산하였으며 각 경계면 심도의 실측 결과 및 시험 결과가 Table 3에 요약되어 있다.

$$T_1 = \frac{\beta C_p}{2f} = \frac{0.96 \times 3500}{2 \times 28900} = 0.058(m)$$

$$T_2 = \frac{\beta C_p}{2f} = \frac{0.96 \times 3500}{2 \times 12300} = 0.137(m)$$

$$T_3 = \frac{\beta C_p}{2f} = \frac{0.96 \times 3500}{2 \times 6100} = 0.275(m)$$

$$T_4 = \frac{\beta C_p}{2f} = \frac{0.96 \times 3500}{2 \times 4600} = 0.365(m)$$

Table 3. Summary of result on the main runway

	실측 결과 (심도, cm)	시험 결과 (심도, cm)	오차 (cm)	오차율 (%)
아스콘 표층 상부	6	5.8	-0.2	3
아스콘 표층 상부	15	13.7	-1.3	9
아스콘 기층 상부	26	27.5	+1.5	6
아스콘 기층 하부	36	36.5	+0.5	1

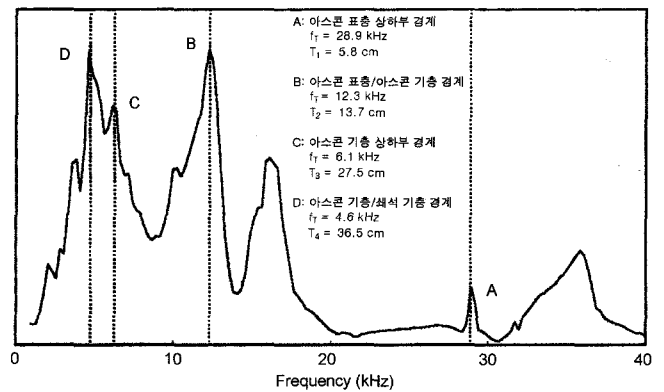


Fig. 15. Result on the main runway.

결론

충격반향법의 현장 적용을 위한 자료획득 시스템을 구축하여 여러 가지 조건하에서 현장 시험을 수행하였으며 토목공학 분야에서의 충격반향법의 적용 가능성 및 한계성을 파악하고자 하였다. 콘크리트 구조물의 두께 및 결함, 공동 존재 여부, 옹벽 뒷채움 상태와 터널 라이닝의 두께 및 결함, 그리고 활주로의 포장 두께 및 결함등의 조사를 위하여 충격반향법을 적용하여 10% 이하의 오차 범위내에서 결과를 제공함으로써 충격반향법의 토목분야에서의 활용 가능성이 입증되었다.

충격반향법의 성공적인 활용을 위하여서는 조사 대상체의 구조에 관한 충분한 이해와 여타 정보의 활용이 필수적이며 현장 조사시 최적 충격원의 선택과 변환기와 대상체의 완벽한 접촉에 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

사사

현장 자료획득에 도움을 주신 현대건설 주식회사의 윤철수 부장님과 지용호 실장님께 감사를 드리며 또한 자료해석에 필요한 기타 자료를 제공하여 주신 시설안전기술공단의 오영철 씨에게도 감사를 드립니다.

참고문헌

현대건설(주) 기술연구소, 2000, 구조물 비파괴조사 및 지반조사를 위한 지구물리탐사 기술개발, 연구보고서(98GEOR02).  
 Sansalone, M. J. and Streett, W. B., 1997, Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, NY.