

노후된 콘크리트 구조물의 안전도 평가를 위한 초음파기법의 주파수 및 시간영역 해석에 관한 연구

서백수^{1)*}, 손권익²⁾

A Study on Frequency and Time Domain Interpretation for Safety Evaluation of old Concrete Structure

Backsoo Suh and Kwon-Ik Sohn

Abstract For non-destructive testing of concrete structures, time and frequency domain method were applied to detect cavity in underground model and pier model. To interpret the measured data, time domain method made use of tomography which was completed with first arrival time and inversion method. In this study, frequency domain method using Fourier transform was tried. Maximum frequency in the frequency domain was analyzed to calculate location of cavity.

KeyWords Non-destructive testing, Time domain, Frequency domain method, Underground model, Pier model, Maximum frequency

초 록 콘크리트 비파괴 검사를 위하여 배면공동모형과 교량공동모형에 대하여 시간영역 탐사와 주파수영역 탐사를 실시하였다. 시간영역 탐사는 초동주시 역산법을 이용하여 토모그래피를 작성하여 공동의 여부를 해석하였다. 주파수영역 탐사는 시간영역 기록을 푸리에 변환에 의한 주파수영역에서의 최대 주파수를 분석하여 해석하였다.

핵심어 비파괴 검사, 배면공동모형, 교량공동모형, 시간영역 탐사, 주파수영역 탐사, 최대 주파수

1. 서 론

토목구조물에 콘크리트를 적용한 역사가 길어짐에 따라 우리나라를 비롯한 세계각지에서 기존구조물의 노후화가 심각해지고 있고, 또한 국내에서도 최근 신규 건설 중인 대형 구조물의 붕괴사고가 나타나면서 토목 구조물의 안전진단 및 평가에 대한 필요성이 날로 증가하고 있다. 단시일 내에 많은 대형 구조물의 축조는 필연적으로 일부 구조물의 부실화를 야기 시켰으며, 각종 콘크리트 구조물이 노후화됨에 따라 효과적인 보수·보강을 통한 안전관리가 중요한 문제로 대두되고 있다. 구조물 안전진단 시 적용되는 대상은 터널, 교량, 댐 등

의 토목구조물과 아파트, 건축물, 블록 등과 같은 건축 구조물이 주 대상이 된다. 그러나 콘크리트 구조물은 다른 구조물에 비하여 자체 하중이 크고 균열이 생기기 쉬워서 붕괴의 우려성을 내포하고 있으므로 시공 중의 품질관리는 물론 지진, 화재와 같은 외부의 충격으로 손상을 입을 시에는 안전점검이 뒤따라야 한다. 콘크리트와 같이 구성입자가 큰 재료에 대하여 비파괴 시험을 실시할 경우 구성입자에 의해 산란되는 신호가 크기 때문에 강한 에너지의 충격을 발생시켜야 하고 수신되는 신호의 처리 기술도 요구된다.

본 연구에서는 콘크리트의 노후화에 따른 연약대의 존재를 가정하여 콘크리트 구조물 내부에 공동이 존재할 때와, 교각모형에서 공동이 존재할 경우에 대하여 시간영역(time domain)탐사와 주파수영역(frequency domain)탐사를 실시하여 앞으로의 자료 획득 및 해석에 도움을 주고자 하였다(Dines, K. 등, 1979, Lou, Y. 등, 1991, 현병구 등, 1992).

¹⁾ 강원대학교 지구·환경공학부 교수

²⁾ 강원대학교 산업공학과 교수

* 교신저자 : bssuh@kangwon.ac.kr

접수일 : 2005년 8월 1일

심사 완료일 : 2005년 8월 24일

2. 기초이론

시간영역 탐사의 초동주시 발췌(first arrivaltime picking) 및 이론모형계산에 관한 기초 이론은 서백수(2004) 등에 의해서 발표되었으며, 본 연구에서는 주파수영역탐사의 기초 이론에 대해서 기술하고자 한다(Lin, Y. 등, 1991).

슬래브, 벽 같이 파의 이동거리가 짧은 경우 감지기에 서 얻는 시간영역상에서의 신호는 다양한 주파수를 가진 여러 가지의 파가 뒤섞여 복잡한 형태를 가지므로 반사된 P파의 정확한 도달 시간을 감지하기가 어렵다. 이런 이유로 파의 이동거리가 짧은 경우 일반적으로 주파수 영역에서의 해석이 사용된다. 감지기에 의하여 측정되는 시간영역에서의 파형은 서로 다른 주파수를 가지는 무한히 많은 독립적인 정현파의 합으로 볼 수 있다. Fig. 1(a), (b)는 본 실험에서 얻은 콘크리트 시험체의 깊이 20cm에 위치한 자유면에서 반사된 파의 시간영역기록과 고속 푸리에 변환을 통한 주파수영역기록을 비교하였다. 시간영역해석에서는 반사파의 도달시간을 명확히 찾아낼 수 없는 반면에 주파수영역해석에서는 공진주파수를 쉽게 얻을 수 있다. 매우 낮은 파장을 갖는 공동이 위치한 시험체라면 반사파의 도달시간을 구분하기 어려운 반면 주파수영역에서는 공진주파수의 해석을 명확히 할 수 있다(안재훈, 2004).

첫 번째 모드(주파수가 가장 작은 모드 성분)의 파장과 두께(관심을 가지는 균열, 공동, 이질 매질층 등으로부터 감지기가 부착되어 있는 표면까지의 거리, T)사이의 관계는 경계조건에 의해서 결정되는데 충격반향기법의 적용 시 생길 수 있는 경계조건은 크게 자유면-자유면과 자유면-고정면의 경계조건이다. 자유면-자유면과 같은 경계조건은 공동, 균열 등이 존재할 때의 경계조건으로서 자유면과 자유면 사이를 다중 반사되는 파를 구성하는 각 모드의 주파수는 식 (1.1)로부터 구할 수 있다.

$$f_n = \frac{nV_p}{2T}, \quad n=1,2,3,\dots \quad (1.1)$$

여기서 f_n : n번째 모드의 공진주파수

V_p : P파의 속도

식 $V = f\lambda$ 와 (1.1)식을 비교해보면 첫 번째 모드의 파장(λ)은 두께의 2배가 된다. 따라서 매질의 P파 전파 속도를 알고 있을 때 이질매층까지의 두께, T는 식 (1.2)에 의하여 구할 수 있다.

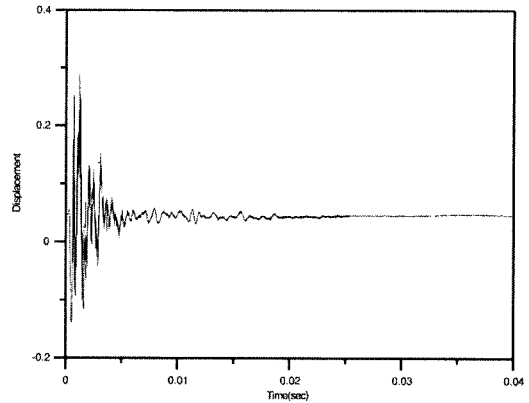


Fig. 1(a). Waveform obtained from an impact-echo test

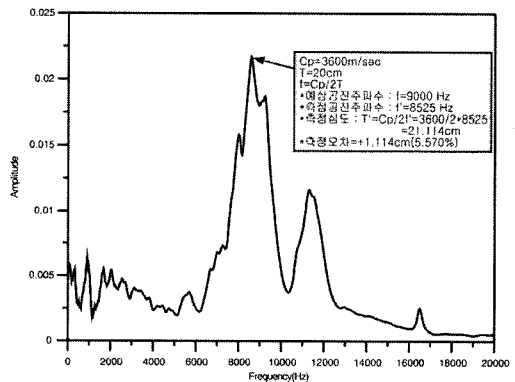


Fig. 1(b). Spectrum obtained from an impact-echo test

$$T = \frac{V_p}{2f_1} \quad (1.2)$$

3. 실험 모형 연구

콘크리트 구조물의 노후화에 따른 연약대의 존재를 가정하여 지하 공동이 위치할 경우와 교각 모형에 공동이 존재할 경우에 대하여 시간영역 탐사와 주파수 영역 탐사를 실시하였다.

3.1 배면공동모형

지하 콘크리트 구조물 내에서의 지하공동모형은 경기도 오산시의 (주)아주지오시스템 오산공장 내에 위치한 지하공동연구모형을 사용하였다. 이 콘크리트의 강도는 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상이며 내부 공동은 얇은 아크릴 재료로 10cm, 20cm, 30cm 크기의 정사각형 모양의 상자를 제작하여 모형화 하였다. 정사각형 공동이 위치한 각 층과의 거리는 각각 30cm, 60cm, 90cm이며, 공동의 높이는 Fig. 2에서와 같이 10~30cm이다. 배면 공동으로는 단열재

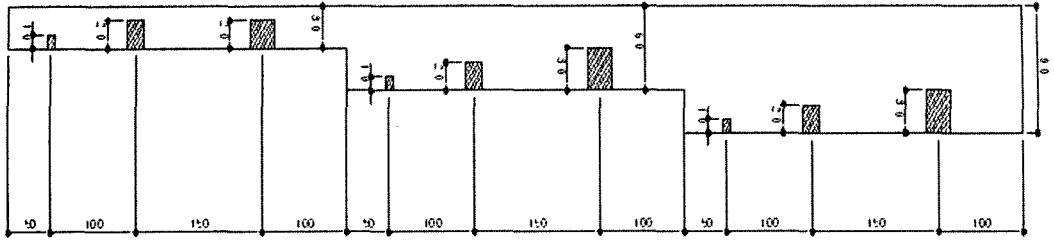


Fig. 2. Side view of the underground cavity model(scale : cm)

의 일종인 스티로폼(styrofoam)을 묻어두었으며, 공동 이외의 부분은 균질한 콘크리트이며, P파의 전파속도는 3,600m/sec으로 측정되었다.

시간영역 탐사

54kHz 센서(sensor)를 이용하여 Fig. 3과 같은 전기탐사의 쌍극자 배열을 응용하여 시간영역 탐사를 시도하였다. 좌측 끝 지점에 1개의 센서(송신원)을 위치하고 1개의 센서(수신원)을 10cm, 20cm, 30cm... 이동하면서 전기탐사의 쌍극자 탐사와 동일한 방법으로 측정하였다. 이때 측정 장비는 스위스 PROCEQ 사의 초음파 장비인 TICO를 사용하였다. 초음파 전파속도의 단면도는 Fig. 4와 같으며, 그림에서 단면의 깊이와 공동의 위치

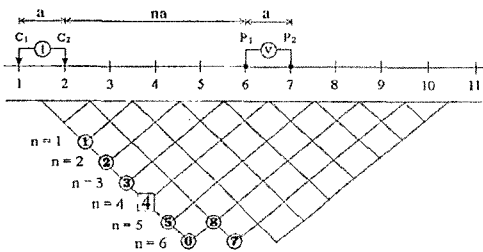


Fig. 3. Dipole-dipole array of electrical prospecting

해석이 매우 어려움을 알 수 있다.

주파수 영역 탐사

Fig. 5는 공동이 없는 30cm 두께의 균질한 콘크리트 상에서 측정된 결과로 측정된 공진주파수 $f=5,800\text{Hz}$ 이다. P파의 전파속도 CP가 3,600m/sec이고, 식 $T=CP/2f$ 를 이용하면 측정된 두께는 31.0cm로 실제 모델 두께 30 cm에 거의 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 6은 30 cm의 균질한 콘크리트 내 10 cm×10 cm

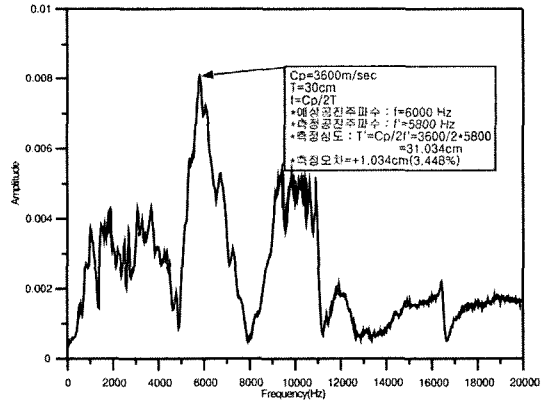


Fig. 5. Spectrum obtained from impact-echo test at A1 area, when no cavity is located in the model

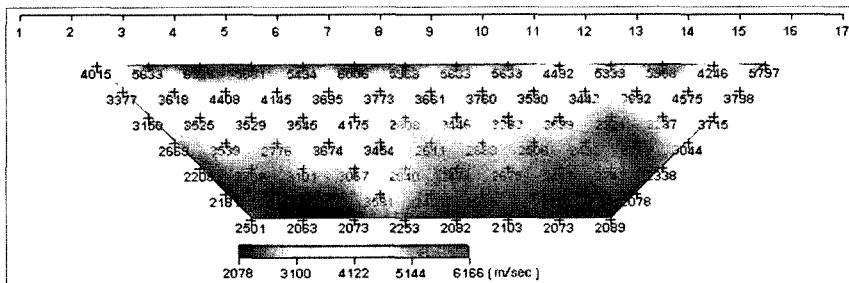


Fig. 4. A pseudo-section of field data

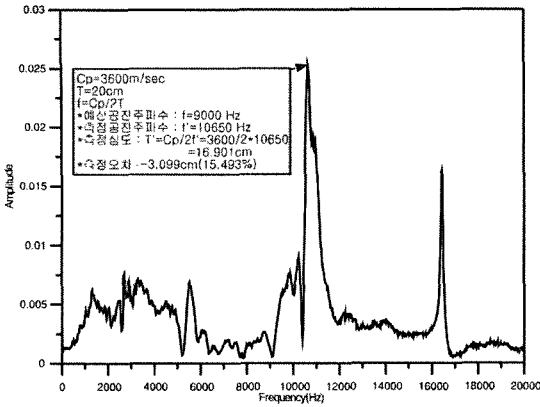


Fig. 6. Spectrum obtained from impact-echo test at A1 area when a cavity is located in the model

×10cm의 공동이 포함된 구간에서의 측정 결과를 보여 주고 있다. 측정 결과 콘크리트 표면에서 공동 상부까지의 실제 두께는 20 cm이고, 계산된 두께는 16.9 cm로 -3.1cm(15.5%)의 오차가 나지만, 이는 천부 결함에서의 짧은 파장에 기인한 잡음의 원인이거나 콘크리트 표면의 풍화에 의한 것으로 보인다.

Fig. 7은 Fig. 2의 배면공동모형을 표면에서 주파수 영역으로 측정하여 심도 변환을 한 결과를 나타낸 단면이다.

A2의 일부분과 A3부분에서는 콘크리트 표면이 노후화되어 표면이 고르지 못하였으므로 실험이 불가능하였다. 굽은 선 부분은 측정된 주파수를 심도 계산한 것이며, A1, A2 부분을 제외하면 터널의 위치 및 높이가 잘 일치함을 보여주고 있다. 이 지역의 자료들을 3차원

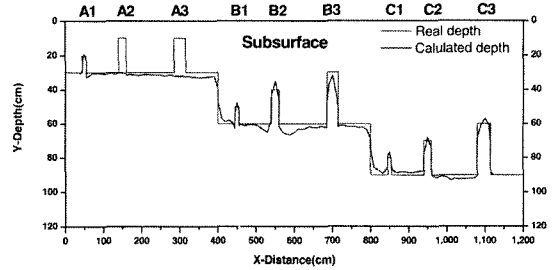


Fig. 7. Two-dimensional depth conversion result of the Model

으로 심도 변환한 결과는 Fig. 8에서 볼 수 있으며, 공동의 위치 및 높이에 대한 계산결과를 좀 더 쉽게 알아볼 수가 있다.

3.2. 교각공동모형

Fig. 9와 같이 교각모형의 크기를 가로, 세로, 높이를 각각 40cm×40cm×70cm로 하였으며 중심부에 6cm×6cm×6cm 크기의 공동을 제작하였다. 이때 콘크리트의 P파 속도는 약 3,200m/sec이고, 공동에는 공기가 채워져 있어 밀도는 0.0001g/cm³, 전파속도는 340m/sec로 입력하였다.

시간영역 탐사는 서백수 등(2004)에 의해서 여러 가지 역산법에 의해서 이론모형에 의해서 계산되었으며, 본 연구에서는 교각실험모형에 대하여 자료를 측정하고 역산을 행하였다. 그러나 교각모형이 지하공동모형에 비하여 자유면이 더 많으므로 주파수영역 탐사의 자료획득과 자료해석에 어려움이 있었다.

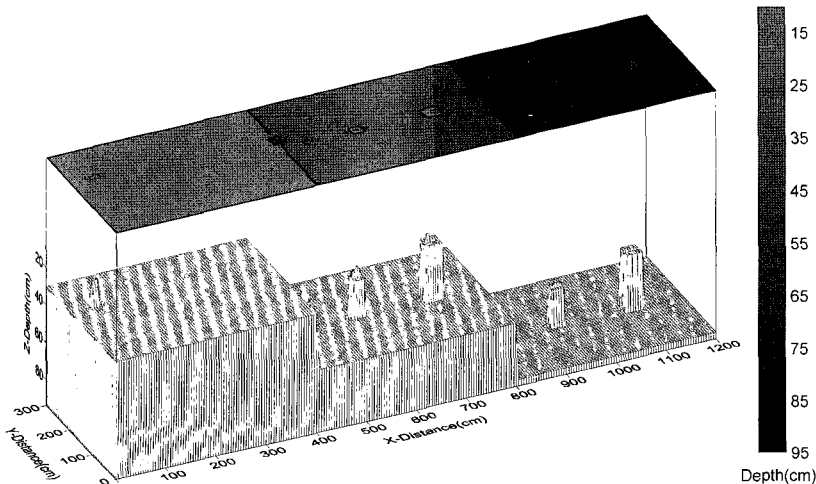


Fig. 8. Three-dimensional depth conversion result of the Model

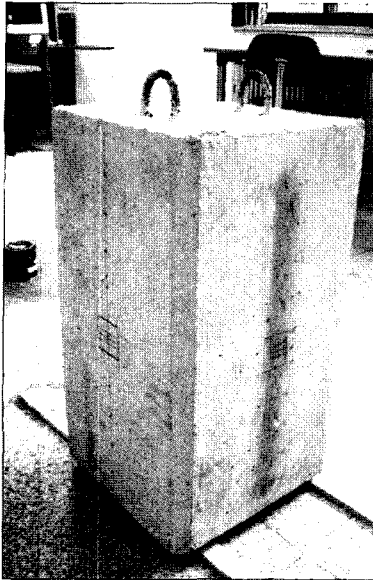


Fig. 9. A view of the pier model

시간영역 탐사

시간영역 탐사는 초기도달시간을 이용하는 방법으로 역산법으로는 ART, SIRT, LSQR, CG 등이 있다. 초동주시발체는 주시해석결과(tomogram)에 매우 중요한 역할을 한다. 초동주시발체는 서백수 등(2004)의 연구에 의한 방법을 사용하며, 역산법으로 LSQR방법을 사용하였다.

Fig. 10에서와 같이 좌측에는 5cm 간격으로 송신기, 우측에는 5cm 간격으로 수신기를 배열하여 자료를 획득하였다. 측정 장비는 TICO를 사용하였으며, 54kHz 센서(sensor)를 사용하여 전파시간을 측정하였다.

Fig. 11은 LSQR 역산법에 의한 토모그램의 결과이며 콘크리트 내의 공동의 크기는 다소 차이가 있으나 위치는 정확하게 나타남을 볼 수 있다.

주파수 영역 탐사

실험실 수준의 교각 모델은 실제 교각의 형상을 축소하여 40cm×40cm×70cm의 실험실 수준으로 제작한 것이다. 이 교각 모델의 P파 속도는 3,200m/s이다.

Fig. 12와 Fig. 13은 두께 40cm이고 가운데에 6cm의 공동이 있는 콘크리트 형상에서 측정된 충격탄성파 검사법의 주파수응답함수(FRF ; Frequency Response Function)를 나타낸 결과이다.

Fig. 12는 두께가 40cm인 콘크리트 교각 모형에 6cm 크기의 공동이 존재할 경우에 측정된 주파수 응답함수

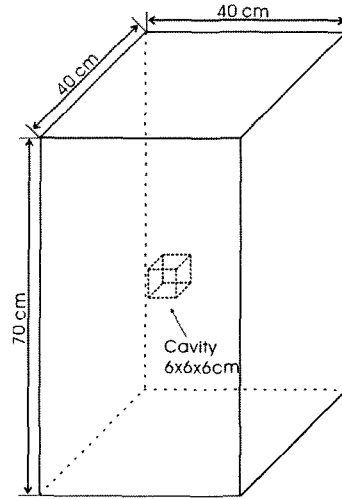


Fig. 10. View of the pier model

이다. 동적신호분석기(FFT Analyzer)에서 주 주기가 되는 구간을 첫 번째 공진모드로 푸리에 변환하면, 그림에서와 같이 A에서의 공진주파수는 5,075Hz, B에서의 공진주파수는 7,450Hz로 측정된다. 이때 A와 B는 각각 교각의 끝부분과 공동의 앞부분을 나타낸다. 공진주파수가 5,075Hz(A지점)일 경우, P파 속도가 3,200m/s 이므로 심도 T'는 식 $T'=Cp/2f'$ 에 의하여 31.53cm로 계산된다. 실제 교각의 두께 40cm와 비교하면 8.47cm 정

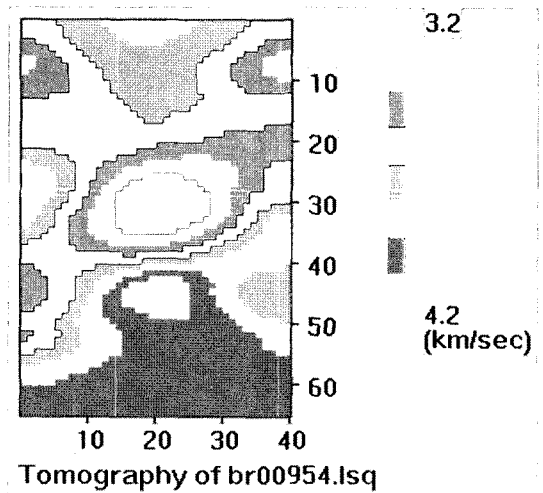


Fig. 11. The tomography of experimental data result used LSQR inversion method when one cavity is located in concrete model

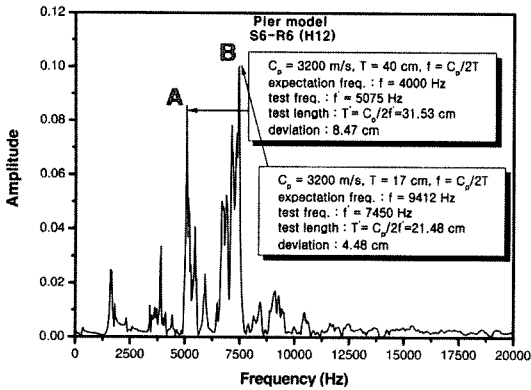


Fig. 12. FRF(Frequency Response Function) from impact seismic wave test of the pier model

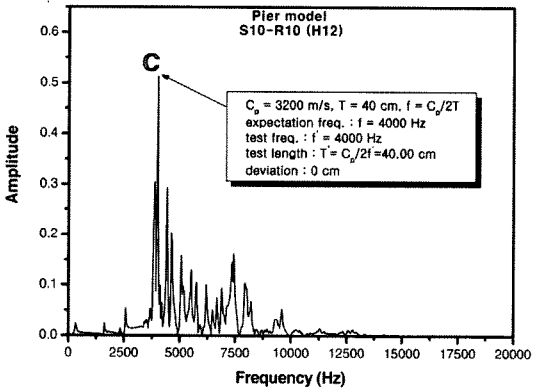


Fig. 13. FRF(Frequency Response Function) from impact seismic wave test of the pier model

도의 측정오차가 발생한다. 그 이유는 송신기에 의해 생긴 응력파가 공동부분에서 반사, 굴절, 회절 등 여러 현상이 일어나면서 시간 지연이 발생했기 때문인 것으로 생각된다. 공진주파수가 7,450Hz(B지점)일 경우 심도 T'는 식에 의하여 21.48cm로 계산되며, 실제 공동까지의 두께 17cm와 비교할 때 4.48cm 정도의 측정오차가 발생한다. 이것은 측정 오차 한계를 5cm로 보았을 때 비교적 근접한 두께를 유추한 것임을 알 수 있다.

Fig. 13은 공동이 존재하지 않을 경우의 주파수 응답 함수이며 C에서의 공진주파수는 4,000Hz로 상기 식에 의해서 40cm로 계산된다. 이것은 실제 콘크리트 교각 모형과 비교하여 오차가 없는 정확한 두께로 계산됨을 알 수 있다.

Fig. 14는 콘크리트 교각 모형에 대한 예상주파수와 측정주파수의 차이를 비교한 히스토그램이고 Fig. 15는 예상거리와 측정 거리의 차이를 비교한 히스토그램이다. Fig. 14에서 실험번호 1부터 실험번호 11까지가 교

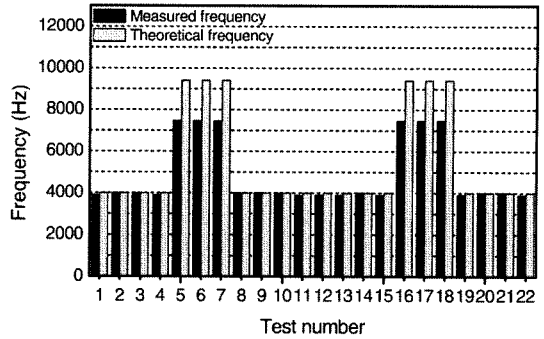


Fig. 14. Comparison of theoretical and measured frequency for the pier model

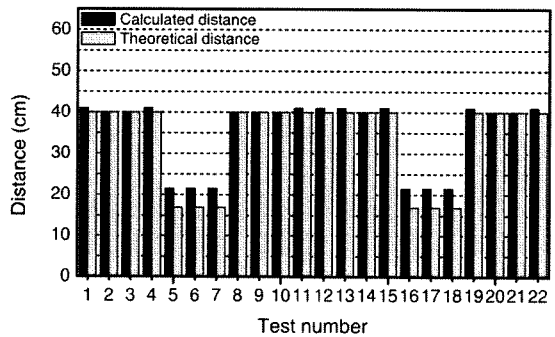


Fig. 15. Comparison of theoretical and calculated distance in the frequency domain for the pier model

각 모형의 한쪽 단면을 측정하고 실험번호 12부터 실험번호 22까지가 반대쪽 단면을 측정하고 있다. 그리고 실험번호 5, 6, 7과 실험번호 16, 17, 18이 교각의 공동부분을 측정하고 있다.

Fig. 15는 측정 길이를 나타내며 실험번호 5, 6, 7과 실험번호 16, 17, 18은 교각의 공동부분을 나타낸다. Fig. 14와 Fig. 15에서 고찰해 보면 주파수 영역에서 교각의 공동 위치를 정확하게 볼 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

이상과 같은 실험모형계산에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 터널라이닝 면과 같은 1차원 모형(배면공동모형)에서는 시간영역 탐사보다는 주파수 영역 탐사결과가 훨씬 정확함을 알 수 있었다. 시간영역탐사에서는 공동의 크기 및 위치 파악이 매우 불확실했으나, 주파수영역 탐사에서는 측정이 불가능

한 지역인 A1, A2 지역을 제외하고는 공동의 위치 및 크기를 상당히 정확히 계산할 수 있었다.

- 2) 자유면이 많은 교각공동모형에서의 주파수영역탐사는 주파수응답 스펙트럼의 양상이 뚜렷하지 못하고 잡음이 많아 공동의 크기와 위치계산에 어려움이 많아, 주로 시간영역 탐사를 행하였다. 그러나 본 연구에서 시도된 주파수 영역 탐사의 계산 결과인 Fig. 15에 의하면 공동의 크기와 위치를 보다 정확하게 알아낼 수 있었다. 최대주파수에 의해 계산된 거리는 공동이 없는 부분에서는 거의 오차가 없었으나, 공동이 존재하는 부분에서는 15~20% 오차가 발생하였으며 앞으로의 연구에 의해서 오차를 줄일 수 있을 것이다.

이상과 같은 연구방법이 앞으로 더욱 개선되고 발전되면 터널뿐만 아니라 댐과 같은 여러 건축물의 안전도 평가에도 활용이 가능할 것이다.

5. 사 사

이 논문은 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술

연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(D00482)이며, 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

1. 서백수, 김훈, 김용인, 손권익, 2004, 보정된 역산법에 의한 콘크리트 구조물의 모형 연구, 한국지구시스템공학회지, Vol. 41, No. 3, pp. 235-241.
2. 안제훈, 서백수, 2004, 충격반향기법의 주파수영역 해석을 이용한 구조물 안전진단에 관한 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 제 14권, 제 1호, pp. 35-42.
3. 현병구, 임해룡, 이호영, 1992, 지하단면의 영상재구성을 위한 탄성파 직선 파선 토모그래피의 적용성, 한국자원공학회지, 제 29권, pp. 245-254.
4. Dines, K. and Lytle, R., 1979, Computerized geophysical tomography, Proc. IEEE, Vol. 67, pp. 1065-1072.
5. Lou, Y., and Schuster, G., 1991, Wave equation travel-time inversion, Geophysics, Vol. 56, pp. 645-653.
6. Lin, Y., Sansalone, M., and Carino, N. J., 1991, Impact echo response of concrete shaft, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 14.2, 121-137.



서 백 수

1976년 2월 서울대학교 자원공학과 공학사
1978년 2월 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1988년 2월 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 033-250-6254
E-mail: bssuh@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 지구·환경공학부 교수



손 권 익

1979년 2월 서울대학교 자원공학과 공학사
1981년 2월 한국과학기술원 산업공학과 공학석사
1985년 2월 한국과학기술원 산업공학과 공학박사

Tel: 033-250-6284
E-mail: kisohn@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 산업공학과 교수