

구조물의 안전진단을 위한 충격파의 주파수 영역 탐사에 관한 연구

서백수¹⁾, 김훈²⁾, 김형준²⁾, 이상철²⁾

¹⁾강원대학교 지구·환경공학부 교수

²⁾강원대학교 지구시스템공학과 박사과정

²⁾강원대학교 지구시스템공학과 석사과정

A study about frequency domain analysis of impact-wave for detecting of structural defects in the concrete structure

Baeksoo Suh¹⁾, Hyoungjun Kim²⁾, Sangchul Lee²⁾

¹⁾Division of Environmental and Geosystem Engineering, Kangwon National University

²⁾Division of Geosystem Engineering, Kangwon National University

요약 : 충격탄성과 검사법은 콘크리트 구조물 내부의 결함과 외부 표면 사이에서 반사되어 전파되는 응력파를 이용한 비파괴 시험 방법이다. 본 연구에서 토목 구조물의 안전진단을 위하여 충격탄성과 검사법을 이용한 비파괴 시험을 수행하였다. 이를 위해서 토모그래피 방식을 이용한 투과법, 크로스 홀 방식을 이용한 투과법 그리고 일반적으로 터널 라이닝과 같은 1차원 면에서 사용되는 반사법을 적용해 그 결과를 비교·분석하였다.

주요어 : 콘크리트 구조물, 비파괴 시험, 충격 탄성과 검사법, 토모그래피, 크로스 홀, 투과법, 반사법

Abstract : Impact seismic wave test is a method for nondestructive testing of concrete structure using of stress wave which is propagated and reflected from internal flaws within concrete structure and external surface. In this study, we performed non-destructive testing using impact seismic wave test for safety diagnosis of civil engineering structures. For this, I've compared and analyzed the result in the way of reflective method mostly using on one-dimension such as tunnel lining, and penetration method using the way of cross hole and tomography.

Keywords : concrete structure, nondestructive testing, impact seismic wave test, tomography, cross hole, penetrating method, reflection method

1. 서론

토목구조물에 콘크리트를 적용한 역사가 길어짐에 따라 우리나라를 비롯한 세계각지에서 기존구조물의 노후화가 심각해지고 있고, 또한 성수대교 붕괴사고와 이후 연속적으로 발

생한 사회적 재난으로 인하여 우리나라의 기존 콘크리트 구조물의 유지관리 및 안정성의 확보가 중요한 과제로 부각되고 있다(안제훈, 2002).

본 연구에서는 이상과 같은 맥락에서 토목·건축 구조물에 대한 비파괴 조사법의 적용성을 살펴보기 위하여 교량의 안전성에 직접적인 원인이 될 수 있는 교각 모형을 제작하여 교각 내 미세균열의 발달을 탐지하려 하였다. 이 연구 이전에 1차원 형상의 콘크리트 라이닝 모델과 3차원 형상의 콘크리트 교각 모델에 대한 두께측정과 미세균열에 관한 연구가 행해졌었다. 그 연구에서 1차원 형상의 콘크리트 라이닝 모델에 대한 연구는 실험환경 및 모델의 속성에 의해 좋은 자료를 얻어 연구가 성공적으로 이루어졌으나 3차원 형상의 콘크리트 교각 모델에서는 좋은 결과를 얻지 못하였다.

이를 위해서 3차원 형상을 가지는 한 개의 실험실 수준의 교각을 모델로 정하여 충격탄성과 검사법 중 교각에서 주로 사용되는 투과법을 이용하였고 그 다음으로 반사법을 이용한 결과와 검사법의 효율성을 비교 고찰하였다. 또한 토모그래피와 크로스 홀을 이용한 투과법 그리고 반사법을 사용하여 재원이 다른 장비를 가지고 실험을 행한 뒤, 그 결과를 비교해 보았다.

2. 충격탄성과 검사법

2.1 충격탄성과 검사법의 원리

충격탄성과 검사법의 원리가 Fig. 1에 나타나 있다. 일반적으로 고체에 짧은 충격외력을 가하면, 그 방향으로 대단히 큰 밀도 변화를 나타내며, 그 고체가 가지고 있는 고유 진동이 발생한다. 초음파(일반적으로 주파수 20kHz 이상의 탄성과) 영역을 포함한 광범위한 주파수의 탄성파가 발생한다. 이때 발생된 초음파 영역의 탄성파는 동시에 발생된 주파수중 가장 낮은 파, 즉 기본파와 함께 전달된다. 이 기본파는 파장이 길고, 큰 에너지를 가지고 있기 때문에 콘크리트와 같은 불균질한 고체중에서도 그다지 산란치 않고 원거리까지 전파된다. 전파 도중에 철근이나 공동, 경계부, 저면에서 기본파에 포함된 초음파만 그 위치에서 반사하게 된다. 이 반사파는 고유진동수의 초음파이기 때문에 큰 에너지를 가지고 있다. 이러한 반사파를 감지하여 시간별로 측정하면 철근이나 공동의 위치, 콘크리트의 두께를 측정할 수 있다.

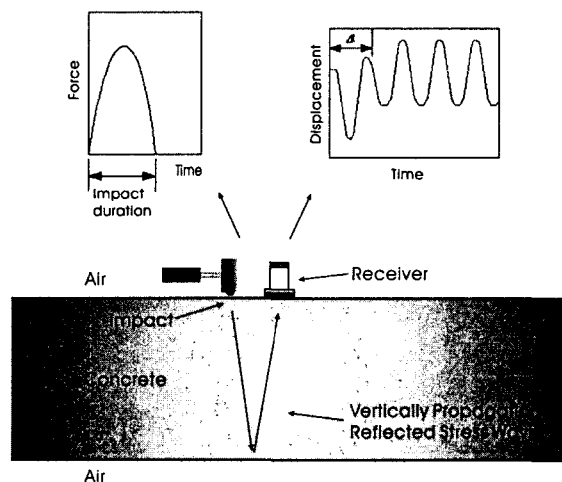


Fig. 1. Schematic diagram of impact seismic wave test

2.2 검사장치 구성 및 측정원리

탐사장치는 Fig. 2와 같다. 임팩트 해머와 수신기, A/D 변환기, 자료획득 및 처리하는 컴퓨터로 구성된다. 측정할 곳에 해머로 충격을 가해서 진동을 감지하여 전기 신호로 변환한다. 이 신호가 시간계측의 Start 신호가 된다. 충격에 의해 콘크리트 표면에 탄성파가 발생하여 내부로 전파된다. 공동, 철근, 저판 등에서 반사되어 되돌아오는 탄성파를 수신기로 감지하여 전기 신호로 변환한다. 이때 탐사 목적에 따라 특정 주파수의 탄성파를 선별하여 시간계측을 한다. 충격 탄성파 탐사법의 경우, 초음파 탐사법과 같이 연속적인 송신 펄스를 이용하지 않고 단발 충격파를 이용하기 때문에 파형기억장치와 오실로스코프의 역할을 하는 컴퓨터에 표시하는 방식을 적용한다.

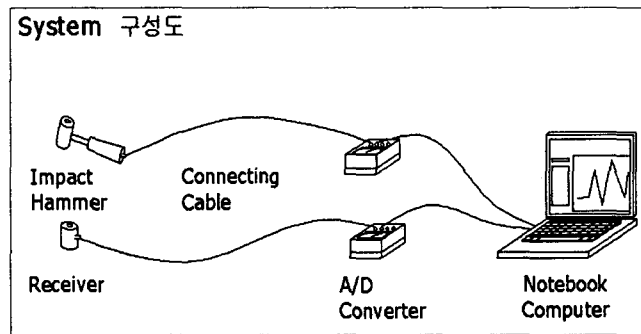


Fig. 2. Schematic illustration of test configuration

다음은 본 연구에서 사용된 장비 중 가진기와 수신기의 재원을 나타낸 표이다.

Table 1. Specification about impact seismic wave test equipments

	Model	Sensitivity	Resonant frequency	Max force	Low frequency	High frequency	Made by
impact hammer	5800A4	10.1 mV/LbF	50.0 kHz	1000 LbF			Dytran
	5800B4	10.1 mV/LbF	75.0 kHz	1000 LbF			Dytran
accelerometer	3100D24	1000.0 mV/g (±5 %)			0.6 Hz	26.0 kHz	Dytran
	726	100.0 mV/g (±5 %)			0.6 Hz	15.0 kHz	Wilcoxon
	736	100.0 mV/g (±5 %)			2.0 Hz	25.0 kHz	Wilcoxon

Fig. 3은 균질한 슬래브와 깊이 d에 넓은 범위의 균열을 가지는 슬래브 상에서 측정된 충격탄성파 검사의 반사법과 깊이 d에 넓은 범위의 균열을 가지는 콘크리트 교각 상에서 측정된 충격탄성파 검사의 투과법으로부터 나온 파형과 스펙트럼을 보여준다.

아래의 그림과 같이 최종 진폭스펙트럼(amplitude spectrum)에서 최고치에 해당하는 주파수 f를 알아낸다면 그리고 콘크리트 모형의 P파 속도를 안다면 그 모형의 내부공극이나 외부경계면까지의 길이(T)는 다음과 같이 계산된다.

$$T = \frac{C_p}{2f} \tag{1}$$

여기서 C_p 는 시험체의 P파 속도, f 는 P파의 응답주파수

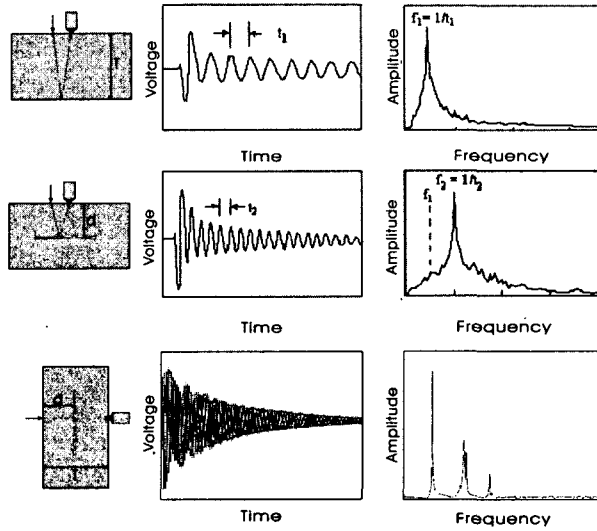


Fig. 3. Comparison of the impact seismic wave response of a solid plate with the response of a plate with a large crack

3. 모형 제작 및 예비 실험

3.1 모형 제작

실험실 수준의 모형은 다음의 Fig. 4와 같다. 가로×세로×높이가 40×40×70cm인 콘크리트로 타설되어 제작되었고 내부에 공동의 모양을 재현하기 위해서 인공적으로 정육면체(6cm×6cm×6cm)의 공동을 삽입하였다.

모형 내부의 공동은 20×40×70cm의 콘크리트 모형을 2개를 만든 후 서로 접합되는 부위에 세로로 3×6×6cm로 파낸 다음에 두 부분을 접합하는 방식으로 제작되었다.

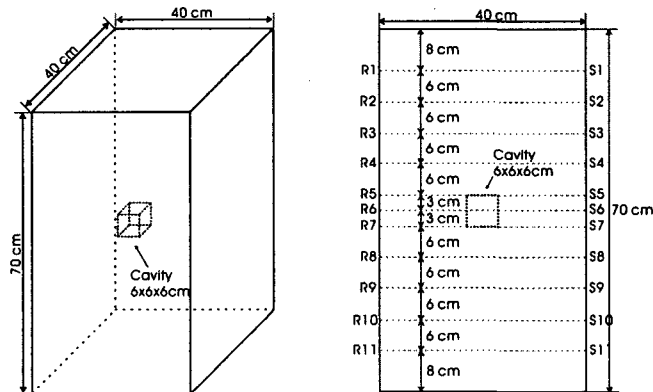


Fig. 4. Solid and side view of the pier model

3.2 예비 실험

3.2.1 실험모형

본 연구를 수행하면서 예비실험의 모델로 두 개의 작은 블록을 제작하였다. 두 개의 작은 블록 중 하나는 10×14×22cm의 크기를 갖고 있는 균질한 암석이고 다른 하나는 크기가 10×14×30cm인 가운데에 균열을 인위적으로 만든 암석이다.

3.2.2 실험 결과

충격탄성과 검사법을 이용한 실험 결과, 작은 블록 형상의 예비실험모형 1과 2 모두 최대 주파수가 예리한 peak를 보이고 있으며, 이는 블록 전체 두께와 균열까지의 두께를 찾는 데 정확한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 5는 두께 10cm인 균질한 블록과 크랙이 있는 블록에서 측정된 주파수응답함수(FRF ; Frequency Response Function) 결과이다.

Fig. 5에서 동적신호분석기(FFT Analyzer)에서 주 주기가 되는 구간을 첫 번째 공진모드로 푸리에 변환하면 $f'=7225\text{Hz}$ 로 측정된다. P파 속도가 1500m/s 이므로, 심도 T' 는 식 $T'=C_p/2f'$ 에 의하여 10.38cm 로 실제 두께와 비교할 때 0.38cm 의 오차로 모델 두께를 정확하게 찾아낸 것임을 알 수 있다.

Fig. 5의 모델 2에 대한 주파수응답함수에서 두 번째 피크에서의 변환 주파수 값은 $f'=6000\text{Hz}$ 이다. P파 속도가 600m/s 이므로, 심도 T' 는 식 $T=C_p/2f'$ 에 의하여 5.0cm 로 실제 공동까지의 두께와 비교할 때 0.5cm 의 오차로 모델 두께를 정확하게 찾아낸 것임을 알 수 있다.

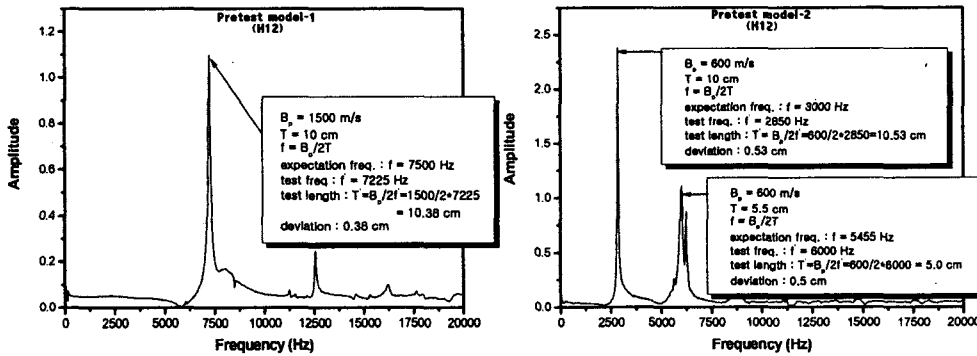


Fig. 5. FRF from impact-seismic wave test of the Model-1,2

4. 실험 및 결과 고찰

4.1 투과법 중 토모그래피 방식을 이용한 충격탄성과 검사법 실험

실험 시 토모그래피 방식을 이용한 투과법을 사용하여 가진기와 수신기 사이의 각도와 거리에 따른 주파수영역에서의 반응을 밝혀내었다. 그리고 수신기의 재원에 따라 나타나는 결과를 비교해보았다(Table 2).

4.1.1 실험방법

Fig. 6과 같이 토모그래피 방식을 이용한 투과법을 사용하여 그 각도와 거리에 따른 주파수영역에서의 반응을 밝혀내는 형태의 실험을 수행하였다. Fig. 8과 같이 양쪽 측면에 11개의 측정점을 미리 그려두었고, 가진점 S1에서 가진을 하고 수신점 R1~R11에서 차례로 수신을 하였다. 이와 같은 방법으로 실험 모형을 세가지 종류의 수신기를 사용하여 각각의 결과를 얻은 뒤 종류별 측정결과를 비교·분석하였다.

Table 2. Kind of equipments used in impact seismic wave test

실험 번호	사용 가진기 모델	사용 수신기 모델	사용 임팩트 팁
1-1	5800A4	3100D24	알루미늄 팁
1-2	5800A4	736	알루미늄 팁
1-3	5800A4	726	알루미늄 팁

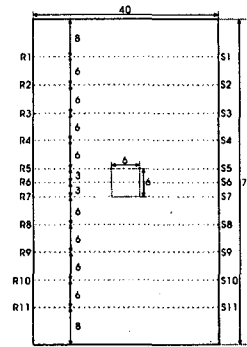
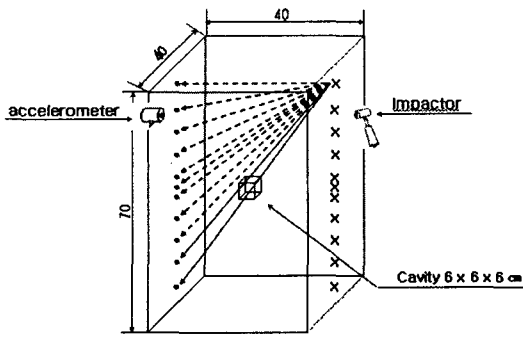


Fig. 6. Schematic solid view of the pier model test Fig. 7. Side view of the pier model test point

4.1.2 측정 결과

4.1.2.1 실험 1-1 결과 (모델 5800A4 가진기와 모델 3100D24 수신기 사용)

최초 실험은 수신기 모델 3100D24를 사용하여 측정하였다. 콘크리트 교각 모형도 예비실험모형과 마찬가지로 3차원 형상으로 최대주파수가 예리한 peak를 보이고 있다. Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 두께 40cm이고 가운데에 6cm의 공동이 있는 콘크리트 형상에서 측정된 충격탄성과 검사법의 시간과형, 파워 스펙트럼, 주파수응답함수를 나타낸 결과이다.

Fig. 8은 시간영역(time domain)의 결과로 가진기에서 발생한 응력파가 다중 반사하여 감지기에서 표면 변위를 일으킨 것이다. 여기서 동적신호분석기(FFT Analyzer)에서 주 주기가 되는 구간을 첫 번째 공진모드로 푸리에 변환하면 Fig. 9, Fig. 10과 같이 $f'=5075\text{Hz}$, $f'=7450\text{Hz}$ 로 측정된다. $f'=7450\text{Hz}$ 는 P파 속도가 3600m/s 이므로, 심도 T'는 21.48cm 로 실제 공동까지의 두께 17cm 와 비교할 때 4.48cm 정도의 측정 오차가 있으나 이는 두께를 비교적 정확하게 찾아낸 것임을 알 수 있다. 그러나 $f'=5075\text{Hz}$ 는 31.53cm 로 콘크리트 교각 전체 두께 40cm 와 비교할 때 너무나 큰 오차를 보이고 있다. 그 이유는 가진기에 의해 생긴 응력파가 공동부분에서 반응을 보이면서 수신기까지 이동하면서 시간지연이 일어났기 때문이다. 공동이 아닌 균열에서의 주파수응답함수에서는 이런 현상이 거의 보이지 않음을 Fig. 5에서 볼 수 있다. 배면 공동이 없는 부분에서의 결과는 정확하게 측정되었다.

비교적 얇은 심도에서의 측정은 Fig. 9의 파워스펙트럼보다 Fig. 10의 주파수응답함수(FRF ; Frequency Response Function)를 이용해서 해석하는 것이 더 바람직한데, 이는 전체 주파수범위에 대하여 진폭을 정규화시킴으로써 고주파수 대역의 신호를 해석하기에 더 용이하기 때문이다.

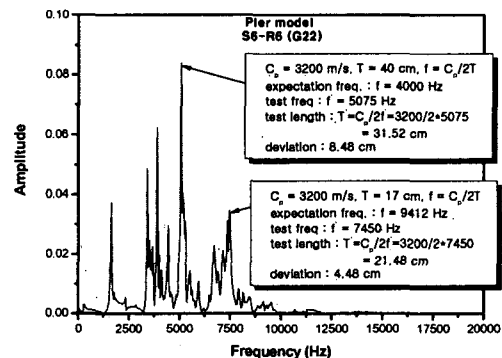
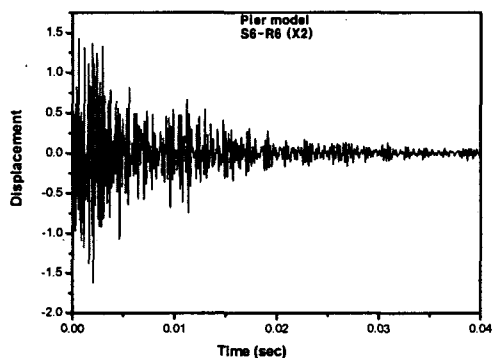


Fig. 8. Waveform(X2) from impact seismic wave test of the pier model Fig. 9. Spectrum(G22) from impact seismic wave test of the pier model

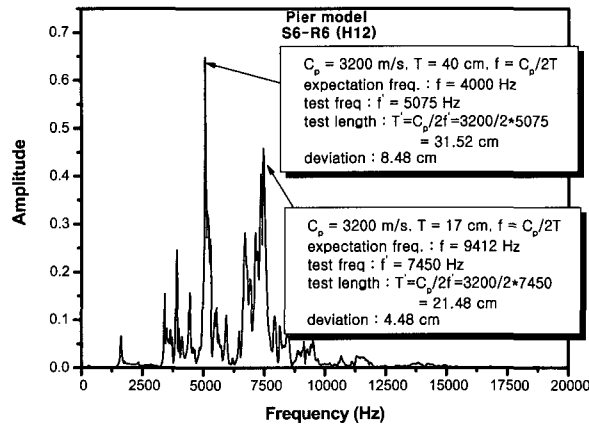


Fig. 10. FRF(H12) from impact seismic wave test of the pier model

Fig. 11은 콘크리트 교각 모형의 공동부분에서 측정된 주파수 분석 결과를 심도전환한 결과이다. 각 측정별로 여러 형태의 결과를 볼 수 있다. 가진기와 수신기의 각도별로 여러 형태를 보이지만 S6에서 볼 수 있듯이 실제 모형의 형상을 정확히 나타낼 수 있었다.

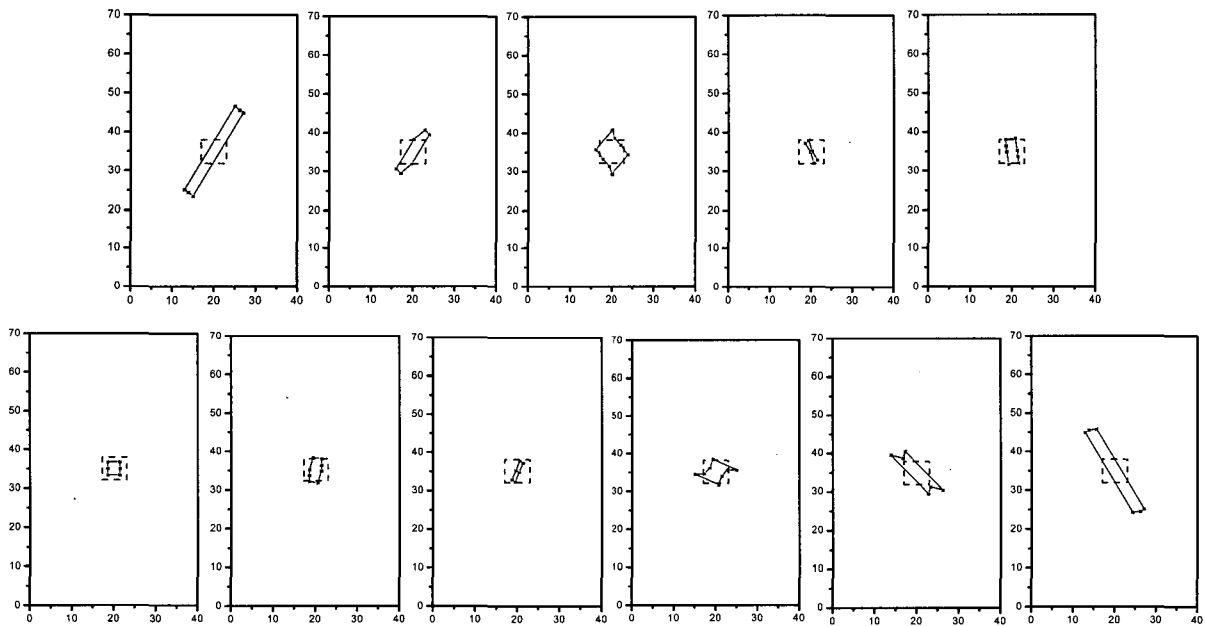


Fig. 11. 2D depth conversion result of the pier model (S1~S11)

4.1.2.2 실험 1-2 결과 (모델 5800A4 가진기와 모델 736 수신기 사용)

두 번째 실험은 수신기 모델 736을 사용하여 측정하였다. 이 실험도 1번 실험과 마찬가지로 최대주파수가 예리한 peak를 보이고 있다. 대체적으로 첫 번째 실험에서 사용한 수신기 모델 3100D24를 사용했을 때와 결과가 비슷하였으나 측정라인의 각도가 1-1 실험보다 약간 낮은 약 31° 에서부터 5cm 이상의 오차를 볼 수 있었다.

Fig. 12는 수신기 모델 736을 가지고 콘크리트 교각 모형의 공동부분에서 측정된 주파수 분석 결과를 심도전환한 결과이다. S1, S2, S10, S11에서 가진을 한 결과에서는 공동의 측정이 어려웠으므로 S3부터 S9까지만 2D 단면도를 도출할 수 있었다.

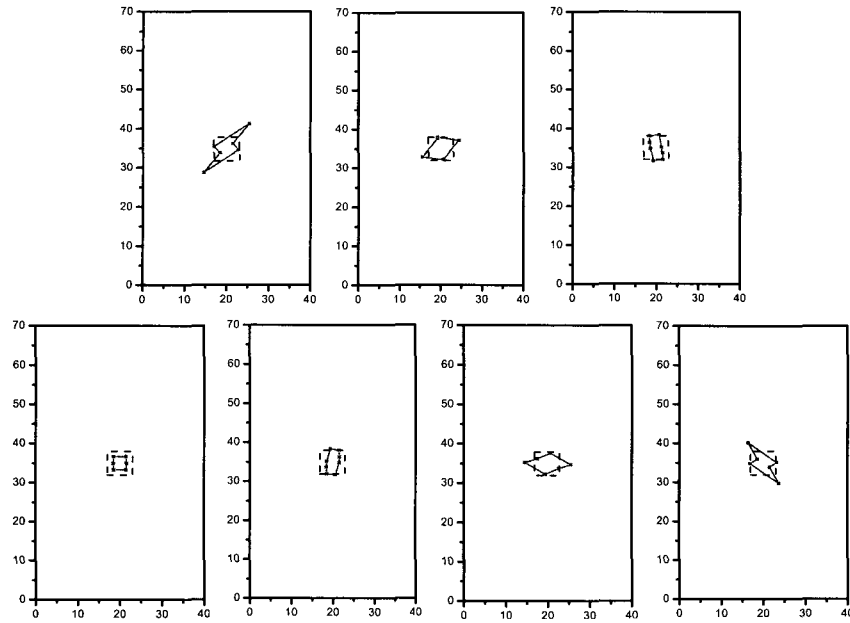


Fig. 12. 2D depth conversion result of the pier model (S3~S9)

4.1.2.3 실험 1-3 결과 (모델 5800A4 가진기와 모델 726 수진기 사용)

세 번째 실험은 수진기 모델 726을 사용하여 측정하였다. 이 실험도 이전 실험과 마찬가지로 최대주파수가 예리한 peak를 보이고 있다. 대체적으로 수진기 모델 736을 사용한 경우와 결과가 비슷하지만 측정주파수를 비교해보면 그 값이 736을 사용했을 때보다 세 밀하지 못하였다. 그 이유는 수진기 재원을 보았을 때 첫 번째 실험에서의 수진기보다 주파수 대역폭이 좁기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 13은 수진기 모델 726을 콘크리트 교각 모형의 공동부분에서 측정한 주파수 분석 결과를 심도전환한 결과이다. S1, S2, S3, S9, S10, S11에서 가진을 했을 때 공동의 측정이 어려웠으므로 S4부터 S8까지만 2D 단면도를 도출할 수 있었다.

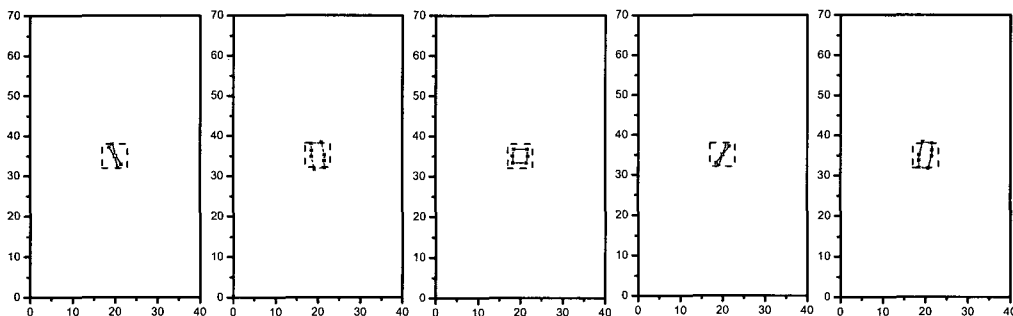


Fig. 13. 2D depth conversion result of the pier model (S4~S8)

4.1.3 실험 1-1과 실험 1-2 비교 (수진기의 민감도에 따른 결과 비교)

모델 736을 사용한 1-2번 실험에서는 1-1번 실험과는 달리 공동을 지나는 측정라인 중에 큰 각도의 측정라인의 주파수응답함수에서 공동부분의 피크를 볼 수 없었다. 이것은 공동부분에서 반응이 생기지 않는 것이 아니라 다른 잡음들과 비슷한 진폭으로 나타나 식별이 가능하지 못한 것이다. 이것은 실험 1-1에서 사용한 수진기와 주파수 대역에서는 거의 차이가 없으나 수진기의 민감도가 10배가 낮기 때문인 것으로 판단된다.

4.1.3 실험 1-2와 실험 1-3 비교 (주파수 대역에 따른 결과 비교)

모델 726을 사용한 실험 1-3에서는 실험 1-2와 비슷하게 공동을 지나는 측정라인 중에 큰 각도의 측정라인의 주파수응답함수에서 공동부분의 피크를 볼 수 없었다. 그리고 측정라인의 각도는 모델 726을 사용하였을 때와 비슷하게 31° 이상부터 5cm 이상의 오차를 볼 수 있었다.

대체적으로 수진기 모델 736을 사용한 경우와 결과가 비슷하지만 측정주파수를 비교해 보면 그 값이 736을 사용했을 때보다 세밀하지 못하였다. 그 이유는 수진기 재원을 보았을 때 첫 번째 실험에서의 수진기보다 주파수 대역폭이 좁기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 투과법 중 크로스 홀 방식을 이용한 충격탄성과 검사법 실험

실험 시 크로스 홀 방식을 이용한 투과법을 사용하여 가진기의 접촉면 재질에 따른 측정 결과를 밝혀내었다(Table 3).

4.2.1 실험 방법

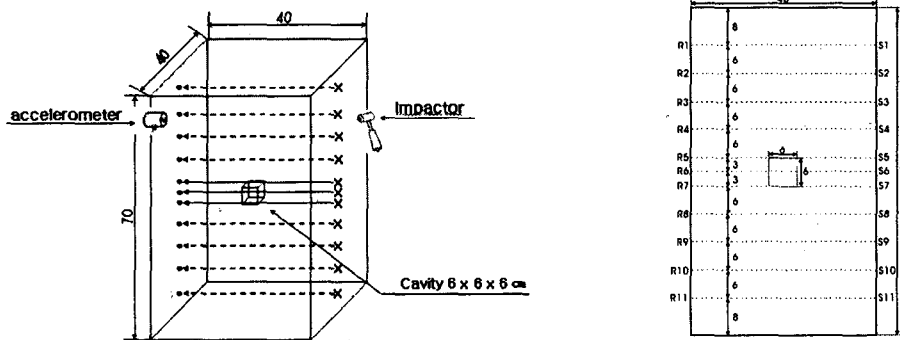


Fig. 14. Schematic solid view of the pier model test
Fig. 15. Side view of the pier model test point

실험 방법은 Fig. 14와 같이 크로스 홀 방식을 이용한 투과법을 사용하여 두 종류의 임팩트 팁을 사용해 각각의 결과를 얻은 뒤 측정결과를 비교·분석하였다. 실험은 Table 3과 같이 장비를 사용하여 실험을 수행하였다.

Table 3. Kind of equipments used in impact seismic wave test

실험 번호	사용 가진기 모델	사용 수진기 모델	사용 임팩트 팁
2-1	5800B4	3100D24	알루미늄 팁
2-2	5800B4	3100D24	플라스틱 팁

4.2.2 측정 결과

4.2.2.1 실험 2-1 결과 (알루미늄 임팩트 팁 사용)

이 실험은 가진기의 접촉 임팩트 팁을 알루미늄으로 만들어진 것으로 사용하였다. 이 실험도 상기 실험과 마찬가지로 3차원 형상으로 최대주파수가 예리한 peak를 보이고 있다. Fig. 16과 Fig. 17은 두께 40cm이고 가운데에 6cm의 공동이 있는 콘크리트 형상에서 측정된 충격탄성과 검사법의 주파수응답함수(FRF ; Frequency Response Function)를 나타낸 결과이다. 여기서 동적신호분석기(FFT Analyzer)에서 주 주기가 되는 구간을 첫 번째 공진모드로 푸리에 변환하면 Fig. 16과 같이 $f_1=5075\text{Hz}$, $f_2=7450\text{Hz}$ 로 측정된다.

$f'=7450\text{Hz}$ 는 P파 속도가 3200m/s 이므로, 심도 T'는 21.48cm 로 실제 공동까지의 두께 17cm 와 비교할 때 4.48cm 정도의 측정 오차가 있으나 측정 오차 한계를 5cm 로 보았을 때 이는 비교적 정확한 두께를 유추한 것임을 알 수 있다. Fig. 17도 위와 같은 방법으로 계산해 보면 40.00cm 로 실제 콘크리트 교각 모형의 두께 40cm 와 비교할 때 오차가 없는 정확한 두께를 유추한 것임을 알 수 있다.

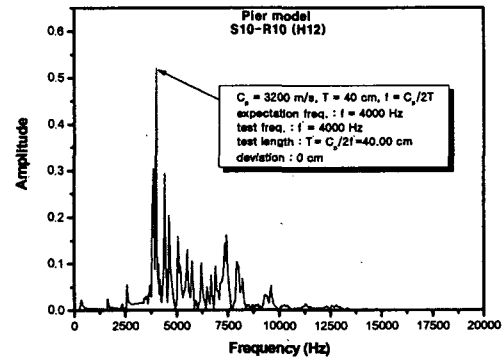
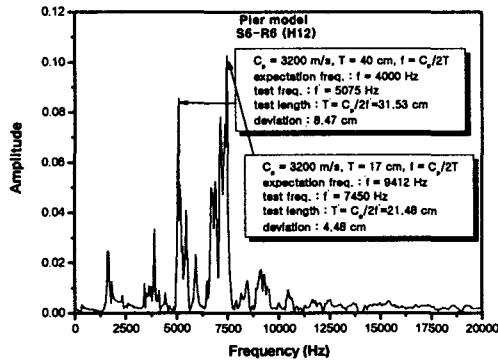


Fig. 16. FRF from impact seismic wave test of the pier model Fig. 17. FRF from impact seismic wave test of the pier model

다음 Fig. 18은 콘크리트 교각 모형의 공동부분에서 측정한 주파수 분석 결과를 심도전환한 결과이다. 이 2D 단면도의 공동 측정 결과를 보았을 때 측정 결과와 달리 더 작은 오차를 가진 것처럼 보이는 이유는 공동의 오른쪽면에 대한 그 측정값이 왼쪽 3개의 점이고 공동의 왼쪽면에 대한 그 측정값이 오른쪽 3개의 점이기 때문이다. 비록 이렇다 할 지라도 이 측정값들이 5cm 의 허용 오차 한계내에 있기 때문에 비교적 정확한 결과를 보여준 것이라 판단된다.

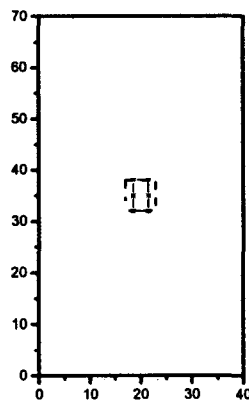


Fig. 18. 2D depth conversion result of the pier model

4.2.2.2 실험 2-2 결과 (플라스틱 임팩트 팁 사용)

이 실험은 가진기의 접촉 임팩트 팁을 플라스틱으로 만들어진 것으로 사용하였다. 이 실험도 상기 실험과 마찬가지로 3차원 형상으로 최대주파수가 예리한 peak를 보이고 있다. Fig. 19와 Fig. 20은 두께 40cm 이고 가운데에 6cm 의 공동이 있는 콘크리트 형상에서 측정된 충격탄성과 검사법의 주파수응답함수(FRF ; Frequency Response Function)를 나타낸 결과이다. 상기 설명한 바와 같은 방법으로 심도 계산을 해보면 외벽에서 공동까지의 길이는 22.54cm 로 실제 공동까지의 거리 17cm 와 비교할 때 5.54cm 의 측정 오차를 보여주

어 측정 오차 한계를 5cm로 보았을 때 이는 부정확한 두께를 유추한 것임을 알 수 있다. 그리고 이 때 같이 측정된 콘크리트 전체 두께는 31.53cm로 실제 두께 40cm와 비교할 때 너무나 큰 오차를 보이고 있다. f' 가 5075Hz로 측정된 이유는 위 4.1.2.1절에서 설명되었다. 배면 공동이 없는 부분에서 측정된 결과인 Fig. 20에서 최대 진폭을 보이는 주파수로 계산해 보면 62.14cm로 실제 콘크리트 교각 모형의 두께 40cm를 넘는 불량한 측정이었음을 알 수 있다. Fig. 19에서 큰 진폭의 주파수들 중에 실제 두께와 비슷한 주파수가 있으나 최대 진폭의 주파수를 교각 두께로 보고 계산한다는 기준 때문에 무시하였다.

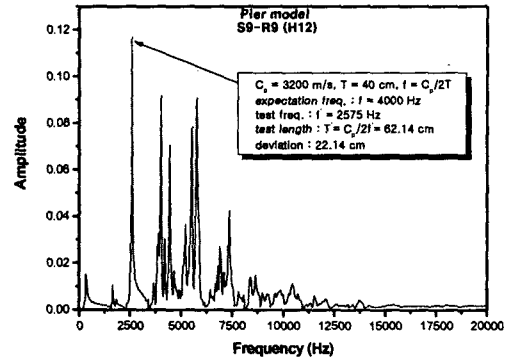
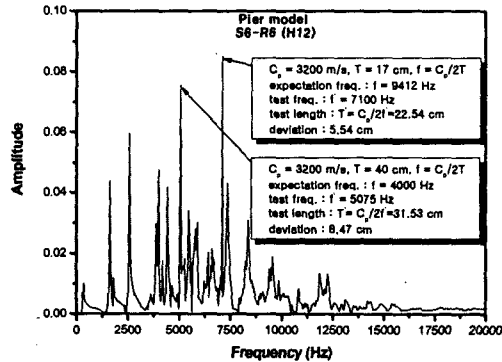


Fig. 19. FRF from impact seismic wave test of the pier model Fig. 20. FRF from impact seismic wave test of the pier model

다음 Fig. 21은 콘크리트 교각 모형의 공동부분에서 측정한 주파수 분석 결과를 심도전환한 결과이다. Fig. 18과는 달리 결과가 아주 양호하게 보인다. 이렇게 보이는 이유는 공동의 오른쪽면에 대한 그 측정값은 왼쪽의 점이고 공동의 왼쪽면에 대한 그 측정값은 오른쪽의 점이기 때문이다. 비록 아주 정확한 단면도를 얻은 것처럼 보일지라도 5cm의 허용 오차 한계를 넘는 측정값들로 이뤄진 2D 단면도이기 때문에 좋은 결과라 할 수 없다.

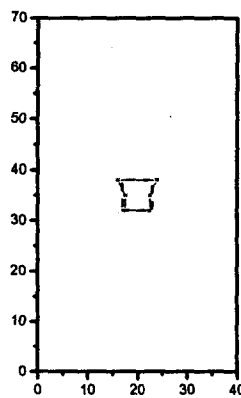


Fig. 21. 2D depth conversion result of the pier model

4.2.3 실험 2-1과 실험 2-2 비교

상기 결과와 같이 알루미늄 임팩트 팁을 사용하였을 경우가 좋은 결과를 얻었다. 플라스틱 팁을 사용하였을 경우에서도 알루미늄 팁을 사용하였을 경우와 비슷한 결과값을 얻은 데이터도 있었지만 콘크리트 교각의 재질 상 매우 불균질하여 전체적으로 불량한 결과를 얻은 것으로 판단된다. 다음 Fig. 22와 Fig. 23은 알루미늄 팁을 사용한 경우의 주파수용

답함수와 플라스틱 팁을 사용한 경우의 주파수응답함수이다. 두 그림을 비교해보면 Fig. 22가 Fig. 23보다 깨끗한 결과를 보여주고 있다. 이 두 개의 그림뿐만 아니라 배면 공동이 있는 부분에서의 주파수응답함수도 이러한 양상이 나타났다. 이것은 플라스틱 팁을 사용한 실험은 콘크리트 교각 모형의 전체 두께를 모르는 상황, 또는 내부가 어떤 상태인지를 모르는 상황에서는 결과 측정이 어려움을 알 수 있다. Fig. 22와 Fig. 23의 최대 진폭을 나타내는 주파수를 계산해보면 Fig. 22는 40.00cm로 실제 두께와 오차가 없는 정확한 결과를 보여주었다. 그러나 Fig. 23은 27.83cm로 실제 두께 40cm와 12.17cm의 오차를 보여주었다. 플라스틱 팁을 사용한 경우의 결과값들이 모두 큰 오차를 보이는 것은 아니지만 알루미늄 팁을 사용한 경우보다 정확성이 많이 떨어지는 것을 볼 수 있다.

콘크리트 교각 모형에 대하여 실험할 경우에 그 모형의 두께나 내부 상태를 전혀 모른다고 가정하였을 때 여러 개의 큰 진폭을 보여주는 주파수응답함수는 교각에 대한 정확한 측정이 매우 어렵다고 볼 수 있다. 그러므로 콘크리트 교각 모형에서는 플라스틱 팁을 사용하여 가진 한 실험은 정확한 측정이 매우 어렵다고 판단된다.

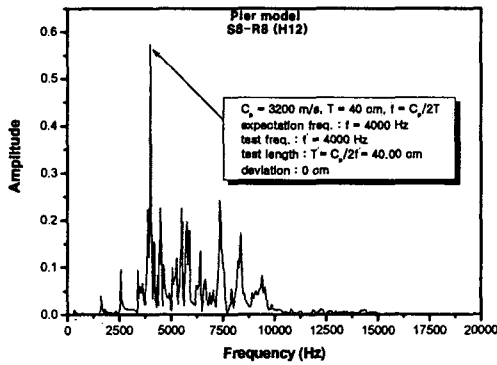


Fig. 22. FRF from impact seismic wave test of the pier model

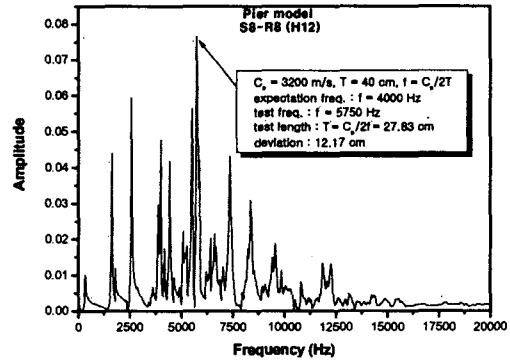


Fig. 23. FRF from impact seismic wave test of the pier model

Fig. 24는 콘크리트 교각 모형에 대한 예상주파수와 알루미늄 임팩트 팁과 플라스틱 임팩트 팁을 사용하여 측정한 주파수의 차이를 비교한 히스토그램이고 Fig. 25는 콘크리트 교각 모형에 대한 예상길이와 알루미늄 임팩트 팁과 플라스틱 임팩트 팁을 사용하여 측정한 길이의 차이를 비교한 히스토그램이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 기준으로 플라스틱 임팩트 팁을 사용한 경우가 알루미늄 임팩트 팁을 사용한 경우보다 좋지 않았다.

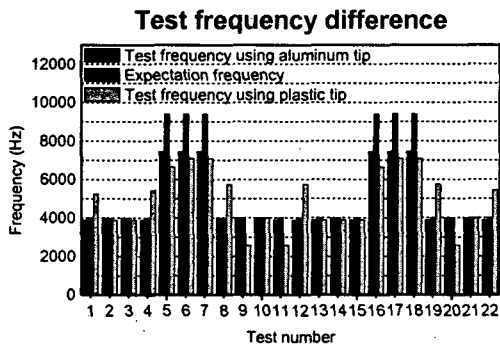


Fig. 24. Expected and measured frequency comparison for the pier model

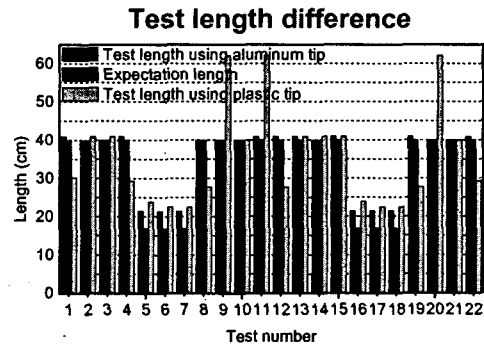


Fig. 25. Expected and measured converted length comparison for the pier model

4.3 반사법을 이용한 충격탄성과 검사법 실험

이 실험은 서로 다른 공진주파수를 갖는 가진기를 사용하여 반사법 충격탄성과 검사법을 수행한 뒤 그 결과를 비교하여 보았다(Table. 4).

4.3.1 실험 방법

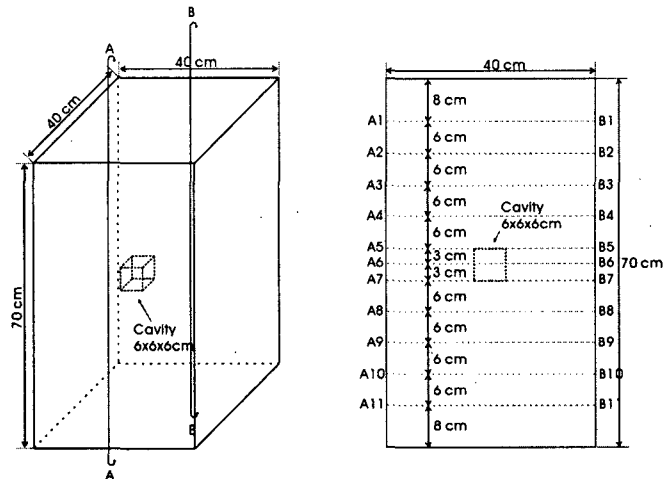


Fig. 26. Schematic solid and side view of the pier model test

Fig. 26과 같이 콘크리트 교각 모형에서 두 단면 A와 B에 대하여 같은 실험을 수행하였다.

Table 4. Kind of equipments used in impact seismic wave test

실험 번호	사용 가진기 모델	사용 수신기 모델	사용 임팩트 팁
3-1	5800A4	3100D24	알루미늄 팁
3-2	5800B4	3100D24	알루미늄 팁

콘크리트 교각 모형의 수신기가 위치하는 측정점은 가진원에서의 거리가 약 3cm 거리를 두어 이질 매질층 또는 불연속면의 반사면에서 반사되는 P파의 도달이 연직 반사된 파형으로 간주하도록 적당한 실험을 할 수 있었다. 측정 시 콘크리트 표면과 수신기간 사이에 그리스(grease)를 묻혀 충격파의 전달이 양호하도록 하였다.

4.3.2 측정 결과

4.3.2.1 실험 3-1 결과

최초 실험은 모델 5800A4의 가진기를 사용하여 측정하였다. Fig. 27은 배면 공동이 없는 콘크리트 부분에서 측정한 결과의 주파수응답함수로, 측정된 주파수는 4000Hz이고, 측정 결과 계산된 심도는 40cm로 교각의 실제 단면거리인 40cm와 일치하였다. Fig. 28은 교각 내 6×6×6cm의 공동이 있는 표면에서 측정한 B7 지점의 결과를 나타낸 것인데, 스펙트럼 단면에서 보면 입사한 충격파는 공동부분에서의 회절현상으로 인해 여러 개의 peak가 발생함을 알 수 있다. 측정된 주파수는 5050Hz로, 즉 심도는 31.68cm로 공동의 탐지가 불가능한 것으로 나타났다. 하지만 공동이 없는 표면에서 측정한 결과와 공동에서 반사된 공진주파수 결과는 차이성이 있는데 이는 공동이 있음을 암시하고 있으나, 실제 교각에서는 내부 결함에 대한 정보를 갖지 못하는 실정이므로 해석이 어렵다.

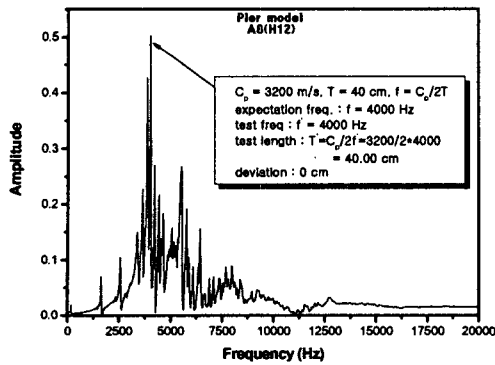


Fig. 27. FRF from impact seismic wave test at A8 on a pier model

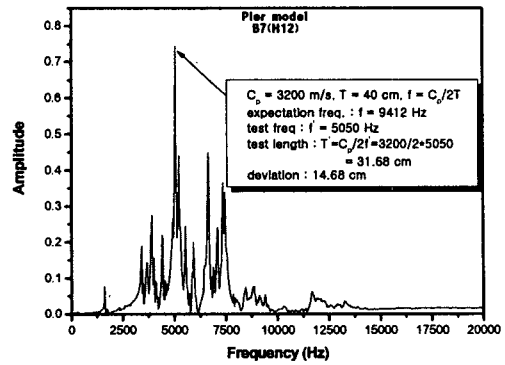


Fig. 28. FRF from impact seismic wave test at B7 on a pier model with cavity

Fig. 29는 콘크리트 교각 모형의 공동부분에서 측정된 주파수 분석 결과를 심도전환한 결과이다. 공동의 측정 위치와 실제 공동의 위치의 큰 오차를 보여주고 있다.

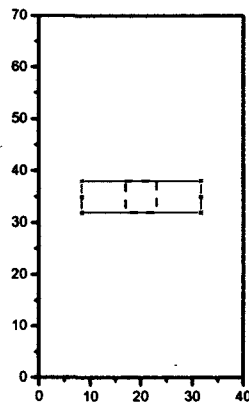


Fig. 29. 2D depth conversion result of the pier model

4.3.2.2 실험 3-2 결과

Fig. 30은 배면 공동이 없는 콘크리트 부분에서 측정된 결과의 주파수 응답함수로, 측정 공진주파수는 3900Hz이고, 이를 계산한 길이는 41.03cm로 실제 40cm와 1.03cm의 작은 오차를 보여주었다. Fig. 31은 A5지점의 결과를 나타낸 것인데, 측정 공진주파수는 5050 Hz로, 측정 심도는 31.68cm로 공동의 탐지가 불가능한 것으로 나타났다.

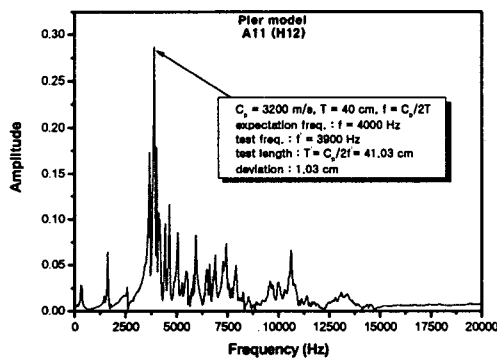


Fig. 30. Spectrum from impact seismic wave test at A11 on a pier model

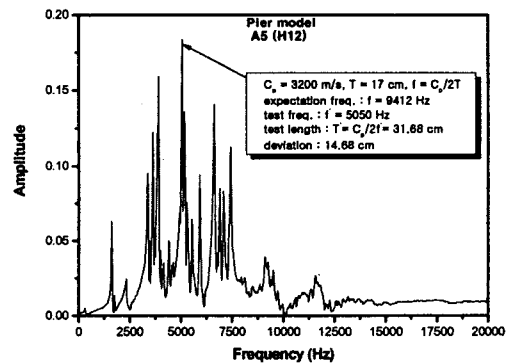


Fig. 31. Spectrum from impact seismic wave test at A5 on a pier model with cavity

Fig. 32는 콘크리트 교각 모형의 공동부분에서 측정된 주파수 분석 결과를 심도전환한 결과이다. 공동의 측정 위치와 실제 공동의 위치의 큰 오차를 보여주고 있다.

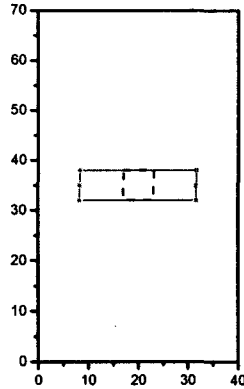


Fig. 32. 2D depth conversion result of the pier model

4.3.3 실험 3-1과 실험 3-2 비교 (가진기의 공진주파수에 따른 결과 비교)

Fig. 33은 콘크리트 교각 모형에 대한 예상주파수와 가진기 모델 5800A4와 가진기 모델 5800B4를 사용하여 측정된 주파수의 차이를 비교한 히스토그램이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 예상 길이를 기준으로 배면 공동이 없는 부분에서의 측정은 두가지 가진기를 사용했을 때 모두 오차가 거의 없는 좋은 결과를 보여주었다. 그러나 배면 공동이 있는 부분에서의 측정은 큰 오차를 갖는 좋지 못한 결과를 보여주었다. 50kHz의 공진주파수를 갖는 가진기 5800A4를 사용한 경우나 75kHz의 공진주파수를 갖는 가진기 5800B4를 사용한 경우 모두 측정 스펙트럼 상에서도 큰 진폭을 갖는 주파수가 여러 개로 나타나는 좋지 못한 결과를 보여주었다.

Fig. 34는 콘크리트 교각 모형에 대한 예상길이와 가진기 모델 5800A4와 가진기 모델 5800B4를 사용하여 측정하여 이를 분석한 길이를 비교한 히스토그램이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 예상 길이를 기준으로 배면 공동이 없는 부분에서의 측정은 두가지 가진기를 사용했을 때 모두 오차가 거의 없는 좋은 결과를 보여주었다. 그러나 배면 공동이 있는 부분에서의 측정은 큰 오차를 갖는 좋지 못한 결과를 보여주었다.

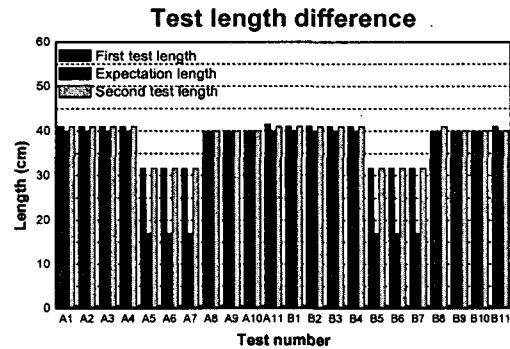
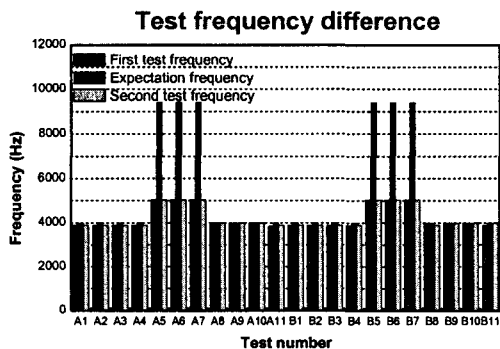


Fig. 33. Expected and measured frequency comparison for the pier model Fig. 34. Expected and measured converted length comparison for the pier model

교각 모형 측정에서 공동의 위치를 찾아내기가 어려운 이유는 공동이 위치하는 반사거리 에 비해 공동의 규모가 상대적으로 작기 때문에 충격파가 다중반사 현상을 일으키지 못

하고 파가 타고 넘어가는 현상을 일으키기 때문이라 판단된다.

4. 결론

교각의 안전진단에 대한 적용성 및 신뢰성을 알아보기 위하여 충격탄성과 검사법을 사용하여 측정 방식에 따라 그 결과가 어떻게 나타나는지와 가진기와 수신기의 재원에 따라 나타나는 결과를 알아보고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ① 토모그래피 방식을 이용한 투과법 실험을 통하여 콘크리트 교각 모형의 두께와 공동의 위치를 측정하였다. 실험 결과 콘크리트 모형의 두께에 해당하는 최대 진폭을 갖는 주파수를 찾을 수 있었고 공동의 위치 또한 찾을 수 있었다.
- ② 토모그래피 방식을 이용한 투과법 실험 시 가진기-수진기의 각도에 따라 그 결과가 다르게 도출되었다. 또한 민감도가 작은 수신기를 사용하였을 때 큰 각도의 측정라인에서 공동의 위치를 확인할 수 없었다. 그리고 주파수 대역이 작은 수신기를 사용하였을 때는 측정된 주파수가 세밀하지 못하였다.
- ③ 크로스 홀 방식을 이용한 투과법 실험을 통하여 콘크리트 교각 모형의 두께와 공동의 위치를 정확하게 측정하였다. 그리고 측정 시 사용되는 가진기의 임팩트 팁의 재질이 서로 다른 두 개를 사용한 결과 알루미늄을 사용한 결과가 플라스틱을 사용한 결과보다 작은 오차를 갖고, 주파수응답함수에서 공동의 위치를 나타내는 주파수를 찾아내기에 수월하였다.
- ④ 반사법 실험을 통하여 콘크리트 교각 모형의 두께와 공동의 위치를 측정하였다. 실험 결과 콘크리트 모형의 두께에 해당하는 오차 허용 한계 5cm이내의 결과를 찾을 수 있었으나 공동의 위치에 대한 결과는 너무 큰 오차를 보여서 찾을 수 없었다. 이 실험 시 가진기의 공진주파수가 다른 두 개의 가진기를 사용해보았으나 실험 결과 상 공동 측정의 결과가 좋지 못하여 그 차이를 발견하지 못하였다.
- ⑤ 충격탄성과 검사법 중에 일반적으로 콘크리트 라이닝 면과 같은 1차원 면에서 사용되는 반사법을 콘크리트 교각에 적용시킨 경우에 그 결과가 투과법을 이용했을 경우보다 훨씬 좋지 못했다. 따라서 3차원의 콘크리트 교각에 대한 안전진단을 수행할 때는 투과법을 이용하여 검사를 수행해야만 정밀한 진단을 할 수 있다고 판단된다.

참고문헌

- 김동수, 박형준, 이광명, 1997, 충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴검사, 콘크리트학회지, 제9권 2호, 109-119.
- 박형준, 1995, 충격반향기법과 SASW기법을 이용한 콘크리트 부재의 결함탐지, 한국과학기술대학교 대학원 석사학위논문.
- 안제훈, 2002, 충격반향기법의 주파수영역 해석을 이용한 구조물 안전진단에 관한 연구, 강원대학교 대학원 석사학위논문.
- 이희근, 이광명, 김영환, 2003, 초음파 속도법과 충격반향기법에 의한 콘크리트의 종파 속도 비교, 비파괴검사학회지, 23권 2호, 98-106.
- Lin, Y., Sansalone, M., Carino, N. J., 1991, *Impact-Echo Response of Concrete Shaft*, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 14, No.2, 121-137.
- Sansalone, M., and Streett, W., 1997, *Impact Echo : Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, Bullbrier Press, 47-52.
- Sansalone, M., and Carino, N. J., 1986, *Impact Echo : a Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves*, Report No. NBSIR 86-3452.