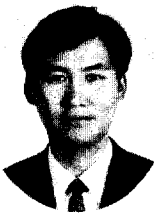
특 집

건축 토목구조물의 비파괴 검사방법

탄성파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴검사

Nondestructive Testing of Concrete Structures Using Stress Wave Techniques



김동수* 이광명**

1. 서 론

국내에서 콘크리트 구조물의 결함탐사나 강도평가에 비파괴기법이 제한적으로 이루어지고 있기는 하지만 다양한 비파괴검사기법에 대한 이해가 부족한 형편이고, 각각의 사용용도에 따른 장단점을 파악하지 못하거나 얻어진 결과분석에 대한 신뢰성에 문제가 있는 것으로 판단되는 등 기술이 초보단계에 머물러 있고 전문적인 기술인력도 부족한 실정이다.

본 고에서는 탄성파를 이용한 비파괴검사기법과 관련하여 초음파 속도법, 충격반향기법, 표면파기법, 크로스홀 검측법 등의 기본원리, 측정장비 및 방법, 신호처리, 적용사례 등을 소개하고자 한다. 탄성파기법은 측정된 탄성파속도로부터 콘크리트의 동탄성계수 값을 얻을 수 있는 장점이 있고, 강도와의 상관관계를 이용하여 구조물의 손상을 예측할 수 있다. 또한 탄성파의 반향 특성을 이용하면 콘크리트 부재의 두께 측정, 균열 및 공동탐사에 적용할 수 있으며 현장에서 천공 없이 검사가 이루어지기 때문에 검사대상물에 대한 손상이 없으며, 같은 위치에 대하여 언제라도 반복적인 시험이 가능하기 때문에 지속적인 유지 · 보수에 적절하고 모든 검사가 대상물의 한 면만을 사용하기 때문에 접근성의 문제가 발생하지 않는다.

2. 탄성파의 종류 및 전파특성

2.1 파의 종류

콘크리트 매질을 따라 전파하는 탄성파는 매질 내부를 따라 전파하는 체적파(P파와 S파)와 매질 표면을 따라 전파하는 표면파로 나눌 수 있다. 이러한 파의 구별은 파의 전파속도와 파가 전파되는 매질 입자의 거동 특성에 의해 구별된다 (Richart et al. 1970).

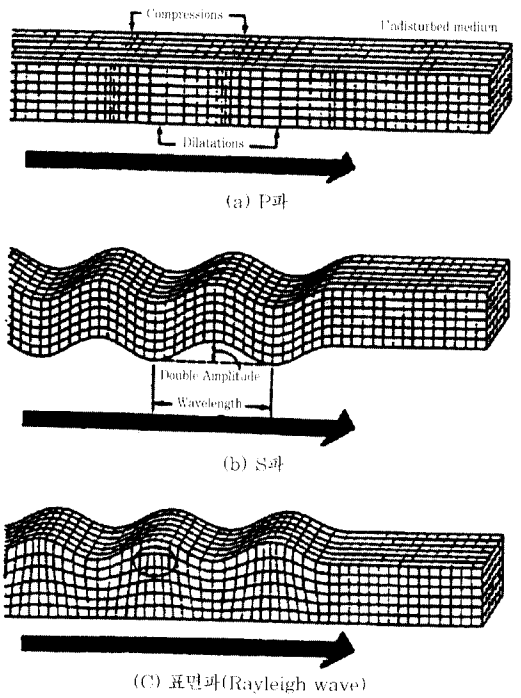
* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수
** 정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수

2.1.1 체적파

매질 내부를 따라 전파하는 체적파에는 P파와 S파 두 가지 종류가 있다. P파는 매질의 전단 변형 없이 체적 변형만을 일으키며 매질 입자의 운동 방향은 파의 전파 방향과 같다(그림 1.1(a) 참조). 측방향 변위가 구속되어 있는 경우 P파의 속도, V_P는 매질의 탄성 계수 값과 밀도에 의해서 다음과 같이 결정된다.

$$V_P = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \qquad (1)$$

여기서, M : 구속탄성계수, E : Young 계수, ρ : 밀도, ν : 포아송비이다.



(a) P파

(b) S파

(C) 표면파(Rayleigh wave)

그림 1 탄성파의 거동 특성

만일 측방향 변위가 허용되는 봉(bar)과 같은 형태의 매질을 따라 전파하는 경우에는, 다음 식에 의하여 압축파의 속도, V_C를 결정할 수 있다.

$$V_C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (2)$$

S파는 P파와는 반대로 매질의 체적 변형 없이 전단 변형만을 일으키며, 매질 입자의 운동 방향은 파의 전파 방향과 수직을 이룬다. S파의 속도, V_S는 매질의 전단탄성계수 값과 밀도에 의해서 결정된다.

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \qquad (3)$$

여기서 $G = \dfrac{E}{2(1+\nu)}$: 전단탄성계수이다.

2.1.2 표면파

반무한체 매질의 표면을 따라 전파하는 표면파는 깊이가 증가함에 따라 진폭이 지수 함수적인 감소를 보이며, 거의 모든 에너지가 한 파장 깊이 안에 분포하는 특성을 보인다. 표면파의 전파에 따른 매질 입자의 거동은 파의 전파 방향에 대한 수평 요소와 연직 요소의 합으로 나타내는데, 이들 요소의 거동은 깊이에 따라 차이를 보인다.

균질한 매질을 통과하는 경우 표면파는 주파수나 파장에 관계없이 일정한 속도로 전파되나, 다층체와 같은 비균질 매질에서는 주파수 또는 파장에 따라 전파 속도가 변화한다. 이러한 특성을 분산 특성이라고 하고, 파장에 따른 파의 속도를 그래프로 나타낸 것을 분산 곡선이라고 한다.

2.2 탄성파의 반사 및 굴절

서로 다른 파전파 속도를 가지는 매질 사이의 경계면에 파가 입사하면 일부는 반사되고 일부는 굴절된다. 이러한 파의 반사 · 굴절은 빛의 반사 · 굴절과 유사하며 Snell의 법칙에 의하여 반사각 및 굴절각을 구할 수 있다.

불연속 경계면에서의 반사파 및 굴절파의 진폭의 크기는 각 매질의 밀도와 파속의 곱으로 표현되는 음향학적 임피던스(Acoustic Impedance), A에 의해 결정된다. 음향학적 임피던스는 같은 매질이라도 전파되는 파의 종류에 따라 다른 값을 가진다(Malhotra and Carino 1991).

$$A = \rho \cdot V \qquad (4)$$

충격 반향 기법에서 가진원과 감지기가 아주 가까이 있는 경우 감지기에 도달하는 파는 불연속 경계면에 연직으로 입사한 P파가 반사되어 되돌아오는 것

으로 볼 수 있다. 이와 같이 연직으로 파가 매질 1에서 매질 2로 입사하는 경우, 각 매질의 음향학적 임피던스의 차이에 따른 반사파와 굴절파의 에너지는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$A_{반사파} = A_i \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (5)$$

$$A_{굴절파} = A_i \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (6)$$

여기서, Z_1 : 매질 1의 음향학적 임피던스, Z_2 : 매질 2의 음향학적 임피던스, A_i : 불연속 경계면에 입사한 파의 에너지이다.

매질 2의 음향학적 임피던스가 매질 1의 음향학적 임피던스에 비해 아주 작은 경우, 불연속 경계면에 입사한 파의 에너지는 거의 모두 반사된다. 콘크리트 매질 내에 존재하는 공동은 이러한 조건의 좋은 예이다. 반면에 매질 1과 매질 2의 음향학적 임피던스가 같다면, 입사된 파의 거의 모든 에너지가 반사 없이 매질 2로 전달된다.

3. 탄성파 시험법

3.1 초음파 전파속도법(파속법)

파속법은 콘크리트 매질에서 전파되는 응력파 중 종파 전파속도로부터 콘크리트의 균질성 · 내구성 등의 판정, 콘크리트 내부의 공동이나 균열 추정 및 강도의 추정에 이용된다.

콘크리트에 접착시킨 단자로부터 발진한 초음파 펄스(10~200kHz)가 콘크리트 중을 이동하여 다른 쪽의 단자에 도달한 시간을 구하여 전파시간으로 하며, 양단자간의 거리를 구하여 속도를 구한다. 파속법은 콘크리트 중의 파속과 강성도 사이에 존재하는 물리적 관계(식(1))에 근거한 방법으로 파속과 압축강도 사이에 직접적으로 연결되어지는 관계가 있는 것은 아니다.

콘크리트 재료의 압축파 전파속도를 대략 4km/s로 하면 측정거리 0.1m인 경우 종파의 도달시간은 25μs이다. 따라서 도달시간 측정의 정확도가 파속법에서 매우 중요하며, 이를 위해 표준시험편을 이용한 측정장비의 검증(calibration) 및 측정대상면과 측정단자와의 접촉성(coupling)증진 방안들이 필요하다. 또한 압축파 전파속도를 이용하여 콘크리트의 강도를 추정하기 위하여는 콘크리트의 재료, 배합, 재령 등 요소, 측정부위의 상태, 내부철근의 상황 등의 영향요소들을 고려하여 종파속도와 강도사이의 대표적인 관계를 획득하여 적용하여야 한다.

본 방법에서는 콘크리트의 종류, 측정대상물의 형상 · 크기 등에 대한 적용상의 제약은 비교적 적다. 용도로서는 구조체 콘크리트의 품질관리, 거푸집의 탈형시기의 결정, 프리캐스트 콘크리트 제품 제조공장에 있어서의 품질관리, 기존 콘크리트 구조물의 콘크리트 강도판정 등을 위한 보조수단으로서의 활용 등이 가능하다.

3.2 충격 반향 기법

시험체의 표면에 기계적 충격을 가하여 발생한 압축파는 균열, 공동과 같은 불연속체나 이질 매질층 간의 경계면을 만나면 반사되어 발생한 표면으로 돌아온다. 표면에 도달한 파는 표면에서 반사되어 다시 매질 속으로 전파되며 이러한 파는 다시 불연속층에서 반사된다. 이와 같이 표면과 균열, 공동과 같은 불연속체 사이 또는 표면과 이질 매질층 사이의 다중 반사에 의한 공진 상태가 유발된다. 충격반향기법은 시험체의 표면에 충격(impact)을 가하여 발생된 압축파가 불연속면이나 이질 매질층 간의 경계면에서 반사되어 표면으로 돌아온 파형을 검토하여 구조체의 품질 판정, 두께 측정, 균열 및 공동 탐사 등에 적용되는 방법이다. 그림 2는 충격 반향 기법의 개요도를 나타낸 것이다.

충격반향기법의 신호 처리는 시간 영역(time-domain)

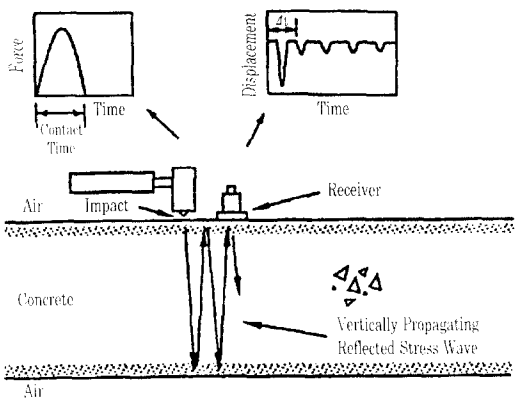


그림 2 충격 반향 기법의 장비 구성 및 개요도

해석과 주파수 영역(frequency-domain)해석의 두 가지로 나누어 생각할 수 있다. 가늘고 긴 말뚝이나 피어 기초에는 충격파가 콘크리트 속으로 충분히 전달될 수 있도록 상대적으로 저주파의 파를 사용한다. 이러한 파는 시험체 내의 반사체에 적당한 각도로 부딪치면 표면으로 돌아와 변위를 유발하며, 이러한 표면 변위를 시간 영역상에서 해석하여 시험체의 건전도를 평가한다. 말뚝같은 구조물은 기하학적 구조의 특성상 전파되는 파의 에너지를 좁은 경로에 집중시켜 표면에서의 파형 분석을 쉽게 한다.

유한한 길이의 부재에 존재하는 불연속 경계면에 파가 입사하면 다양한 종류의 반사, 굴절파가 발생하므로 시간 영역상에서의 신호는 다양한 주파수를 가진 여러 종류의 파가 뒤섞여 복잡한 형태를 가지게 되며, 반사된 P파의 정확한 도달 시간을 감지하기가 어렵다. 이런 이유로 일반적으로 주파수 영역에서의 해석이 사용된다. 감지기에 의하여 측정되는 시간 영역에서의 파형은 서로 다른 주파수를 가지는 무한히 많은 독립적인 정현파의 합으로 볼 수 있다. 파가 매질 속을 전파할 때 높은 주파수 성분일수록 감쇠가 커지기 때문에 전체 파형에서 첫번째 모드 성분(주파수가 가장 작은 모드성분)의 영향이 가장 크다. 따라서 시간 영역에서의 기록을 FFT(Fast Fourier Transform)를 사용하여 주파수 영역으로 변환하면 첫번째 모드의 주파수가 최대 진폭 주파수가 된다. 그림 3은 콘크리트 시험체의 깊이 0.1m에 위치한 공동에서 반사된 파의 시간영역기록과 FFT를 통한 주파수영역 기록을 비교하였다. 시간영역해석에서는 반사파의 도달시간을 명확히 찾아낼 수 없는 반면에 주파수영역 해석에서는 공진주파수를 쉽게 얻을 수 있다.

시험부재의 두께(관심을 가지는 균열, 공동, 이질 매질층 등으로부터 감지기가 부착되어 있는 표면까지 거리, T)를 알고 있는 경우 P파의 전파속도를 공진주파수(f_1)부터 구할 수 있다.

$$V_p = 2f_1T \tag{7}$$

또한 매질의 전파속도를 알고 있을 때 이질 매질층까지의 두께, T는 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

$$T = \frac{V_p}{2f_1} \tag{8}$$

압축파의 속도는 경계조건과 두께를 미리 알고 있는 부위에서의 계측을 통하여 알아낸다. 이렇게 얻어진 속도는 두께를 구하는데 사용될 뿐 아니라 식 (1) 혹은 (2)을 사용하여 동탄성계수값을 구하여 콘크리트의 품질을 평가할 수 있다.

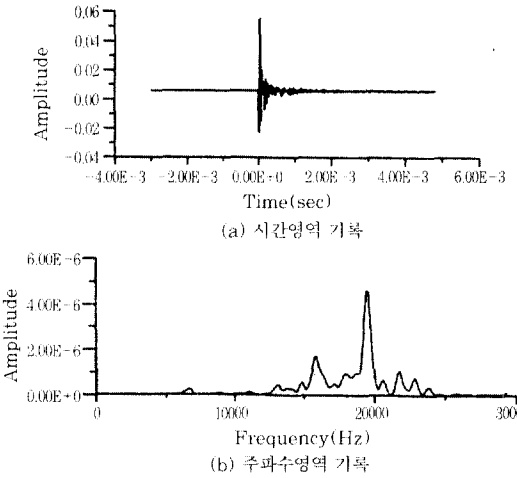


그림 3 0.1m 깊이에 위치한 공동에서 반사된 파의 시간 영역 기록과 주파수 영역 기록

3.3 표면파 기법

표면파(SASW)기법이란 표면파의 분산특성을 이용하여 구성재료의 파속도와 강성을 파악하는 현장 시험법이다. 표면파의 에너지는 깊이방향으로 표면으로부터 지수함수적인 감쇠를 나타내며 파에너지의 대부분은 거의 한파장에 해당하는 깊이안에 존재한다. 그러므로 충격시 발생되는 표면파의 속도는 한파장에 해당되는 구성재료의 강성에 영향을 받게 된다 (Krstulovic-Opara et al. 1996).

다층구조의 구조체에서 SASW시험을 하게 되면 그림 4와 같이 첫 번째 층 두께보다 짧은 파장을 가지는 파에 의한 입자거동은 첫 번째 층에만 국한되므로, 파의 속도는 첫 번째 층의 강성도에만 영향을 받는다. 그러나 파장의 길이가 증가함에 따라 입자의 거동은 첫 번째 층 하부재료까지도 포함하게 된다. 따라서 층상구조 매질에서 파의 전파속도는 파장의 길이(또는 주파수)에 따라 변하는 분산특성을 갖게 된다. 그러므로 파장 길이에 대한 표면파 속도를 측정하여 깊이에 따른 각 층의 강성도를 추정하는 것이 가능하다.

표면파시험에서는 다양한 주파수 특성을 가진 표

면파를 발생기키기 위하여 충격하중(impact load)을 가한다. 이렇게 형성된 표면파는 2개의 수진기(속도계 혹은 가속도계)에 의하여 감지되고 스펙트럼 분석기(spectral analyzer)를 이용하여 파신호를 기록한다. 기록된 파는 FFT를 이용하여 주파수영역으로 변환되고, 이 때 크로스파워스펙트럼(cross power spectrum)의 위상정보(phase information) 및 상관함수(coherence function)를 평가하여 위상속도(phase velocity)와 파장의 관계인 분산곡선(dispersion curve)을 계산할 수 있다. 이 분산곡선을 이용하여 다층구조체의 강성을 추정하는 것을 역산(inversion)이라 하며 표면파기법은 현장에서 위상속도를 바탕으로 역산과정에 의해 최종적으로 깊이별 강성을 추정하는 것이다. 표면파 시험의 기본장비 배치도를 그림 5에 나타내었다.

표면파기법은 모든 계측이 대상체의 표면에서 이루어지므로 비파괴검사에 효율적으로 이용되고, 충격반향기법과 비교하여 대상구조의 두께와 강성을

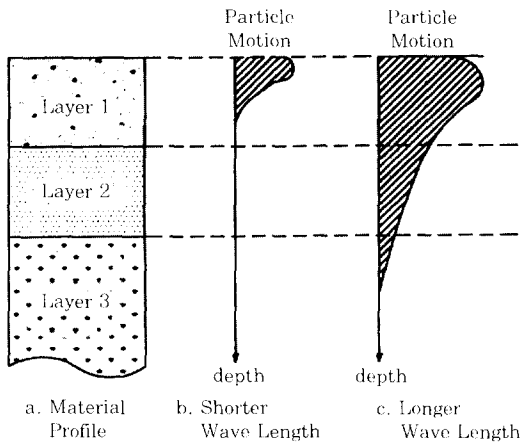


그림 4 파장의 길이에 따른 표면파의 에너지분포

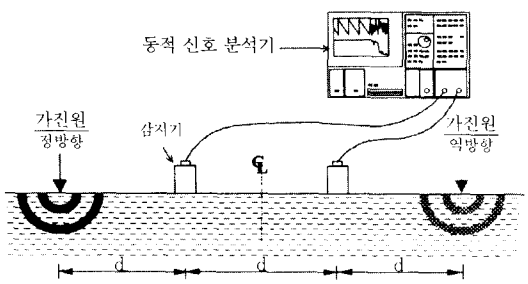


그림 5 표면파실험의 기본 장비 배치도

동시에 얻을 수 있는 장점이 있다. 현재의 주요적용분야로는 포장체의 유지·보수를 위한 비파괴 평가방법으로 FWD나 Dynaflect방법과 함께 사용되고 있으며 최근, 양생중인 콘크리트 슬래브의 강성도 측정에 이용되었다. 또한 포장구조나 슬래브 등과 다른 경계 조건을 가지는 보, 기둥 등 구조적 부재의 손상도 추정을 위해 표면파기법의 적용가능성을 타진하고 있으며, 터널, 교량, 포장체 등의 비파괴 진단에 계속적인 적용범위의 확대가 이루어지고 있다.

3.4 크로스홀 검측법

콘크리트 타설 전에 미리 설치된 튜브를 통하여 초음파 송·수신 센서를 삽입하고 현장타설 말뚝의 길이에 따른 초음파의 전달속도의 변화를 측정·분석하여 콘크리트의 탄성계수의 변화를 평가하는 방법이며, 결함의 정확한 위치, 크기 파악과 함께 결함의 정량적 분석(탄성계수)이 가능하다.

크로스홀 검측법의 해석에 있어서 가장 핵심적인 요소는 송신기에서 발생시킨 초음파가 수신시까지 도달하는 시간과 수신된 초음파의 진폭(에너지)이다. 콘크리트에 결함부가 있을 경우 결함부를 따라 수신된 신호는 도달 시간이 길어지고 진폭은 작아지게 된다. 결함부위가 작을 때에는 초음파의 도달 시간이 약간 길어지고 에너지도 약간 줄어들지만, 결함부위가 클 경우에는 도달 시간이 매우 길어지거나 신호가 감지되지 않으며 수신된 신호의 진폭도 매우 작다. 초음파의 전달속도는 콘크리트의 탄성계수가 클수록 더 빠르고 따라서 도달 시간은 더 짧아진다. 콘크리트의 탄성계수(E)와 초음파의 전달속도(V_p), 콘크리트의 밀도(ρ)는 (식 (1))과 같은 관계를 가진다.

일반적으로 콘크리트에서의 초음파 전달 속도는 3000~4200m/sec 사이의 값을 가지며, 콘크리트의 질에 문제가 있거나 결함이 존재하여 전달경로가 길어질 경우 초음파의 도달시간이 지연된다. 또한 공벽의 붕괴나 토사관입 등으로 인하여 콘크리트가 균질하게 형성되지 못하였을 경우, 초음파 에너지는 급격히 감쇠되어 수신기에는 매우 미약한 신호만이 감지된다. 콘크리트와 검측공 케이싱 외벽간에 접촉상태가 불량하면 응력파의 전달이 차단되어 실험결과를 오도할 소지가 발생한다. 이런 측면에서 PVC관과 같은 비금속재 관보다는 콘크리트와 부착력이 상대

적으로 높은 강관을 사용하고 가능하다면 콘크리트 타설시 검측공 주변을 추가적으로 다지는 것이 바람직하다.

말뚝에 결함부가 있을 경우 필연적으로 도달 시간의 지연과 진폭의 감소가 동시에 일어나므로, 이 두 가지 요소를 함께 고려하여야 정확한 판단이 가능하다. 비파괴검사의 특성상 아무런 이상이 없는 경우와 심각한 이상이 있는 경우는 결과 분석이 쉽게 이루어지지만 항상 확실한 판단을 내리기 힘든 경우가 생기기 마련이며 이러한 경우에는 단면의 물성을 영상화할 수 있는 Tomography를 이용한 검측방법을 추가로 적용할 수 있다.

4. 탄성파 시험법의 적용

4.1 강도의 추정

초음파 전파속도법을 사용하여 굳은 콘크리트 중에 전파되는 응력파 중 압축파 전파속도로부터 콘크리트의 압축강도를 추정할 수 있다. 예비실험 또는 현장시험을 수행하여 파속법에 의해 파속과 강도의 상관관계를 얻는 것을 원칙으로 하지만, 그렇지 못할 경우 기존의 실험식을 이용하여 강도를 추정할 수 있다. 구조체 콘크리트의 강도를 추정하는 경우 측정기기, 측정방법, 콘크리트의 재료, 배합, 재령 및 측정대상 등에 의해 파속이 변화하므로 이에 대한 고려가 필요하다. 반발도법과 파속법을 병용하여 콘크리트의 압축강도를 추정하는 방법도 있다.

충격반향기법을 사용하여 콘크리트 시험체의 첫 번째 공진주파수를 얻어 이로부터 P파속도와 동탄성계수를 구할 수 있으며, 콘크리트의 압축강도와 동탄성계수의 상관관계로부터 압축강도를 추정할 수 있다. 최근 슬래브와 벽체와 같은 판형부재의 콘크리트 강도를 추정하기 위하여 충격반향기법을 적용한 바 있다 (Pessiki and Johnson, 1996). 그들은 기지의 두께를 갖고 있는 판형시험부재에 대하여 P파의 속도를 결정하고, 동일한 배합과 양생조건을 갖고 있는 공시체를 통하여 얻은 콘크리트 강도와 P파 속도 간의 관계를 이용하여 판형부재의 강도를 추정하였다. 이 때 콘크리트 강도(f_c')와 P파속도(V_p)의 관계는 지수함수로서 다음과 같이 나타내었다.

$$f_c' = ae^{V_p b} \qquad (9)$$

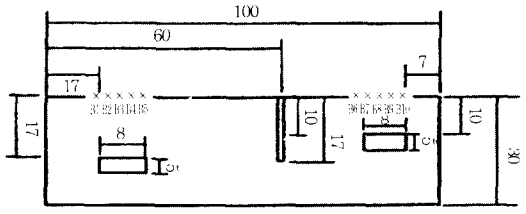
여기서 a와 b는 fitting상수이다. 양생시작 3시간 후부터 콘크리트 강도 4.5MPa에 이른 충격반향기법으로 콘크리트 강도와 P파속도의 관계를 얻을 수 있었다. 초기재령 콘크리트의 경우 강도증가에 대하여 P파속도가 급격히 증가하므로 충격공진법의 경우 초기재령 콘크리트의 강도측정에 효율적으로 사용할 수 있다고 판단된다.

4.2 콘크리트 부재의 결함 검사

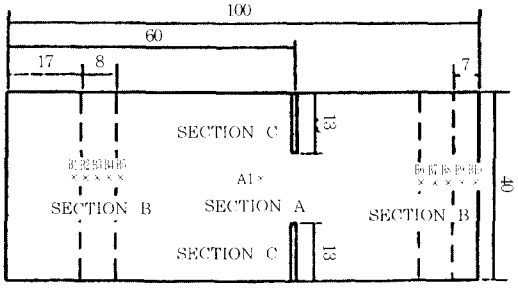
콘크리트 부재의 결함조사를 위하여 Sansalone 와 Carino(1988, 1989)은 기지의 위치에 공동, 균열, 불량콘크리트, 철근, 접착 이완면 등 손상을 유발시키고 충격반향기법으로 이들을 탐지하는 방법을 사용하여 시험 기법의 검증 및 주요 영향 요소들을 찾아내었다. 최근에 실험적 연구와 병행하여 유한요소법을 이용한 수치 해석적 접근을 시도하여, 충격 접촉 시간, 균열의 크기 및 위치, 부재의 형상 등이 주파수 반응 곡선 (Response Spectra)에 미치는 영향 등에 대하여 연구하고 있으며, 신경망 이론을 이용하여 실험 결과 분석의 자동화를 도모하고 있다(Lin and Sansalone, 1992). 또한 보형, 기둥형 부재나 터널 라이닝 검사에 충격반향기법의 적용을 연구하고 있다.

김동수 등(1997)은 기지의 위치에 공동이 포함된 콘크리트 시험부재를 제작하여 충격반향기법을 적용하였다. 시험부재는 길이 100*cm*, 폭 40*cm*, 두께 30*cm*의 콘크리트 시험부재로서 A, B 부분으로 나누어 실험을 수행하였다(그림 6). A구역은 무결함부위이고 B구역은 폭 8*cm*, 높이 5*cm*의 공동이 표면에서 공동의 천정까지의 깊이가 약 17*cm*와 10*cm*가 되도록 만들어져 있는 공동부위이다. A구역에는 밑변이외에 다른 경계로부터의 반사를 최소화하기 위하여 시험부재의 중심선을 따라 좌측으로부터 58*cm* 되는 곳에 감지점 A1을 설치하여 충격반향시험을 수행하였다. 구역 B에서는 각 공동의 중심으로부터 좌우로 감지점 간격이 4*cm*가 되도록 B1~B5, B6~B10을 시험부재의 중심선을 따라 설치하여 충격반향법에 의한 공동측정실험을 수행하였다(그림 6). 두께를 알고 있는 감지점 A1에서 충격반향시험을 수행하여 공동의 위치측정을 위하여 필요한 P파 속도 4070*m*/sec를 얻었다.

그림 7(a)와 그림 7(b)는 공동깊이 17*cm*와 10*cm*

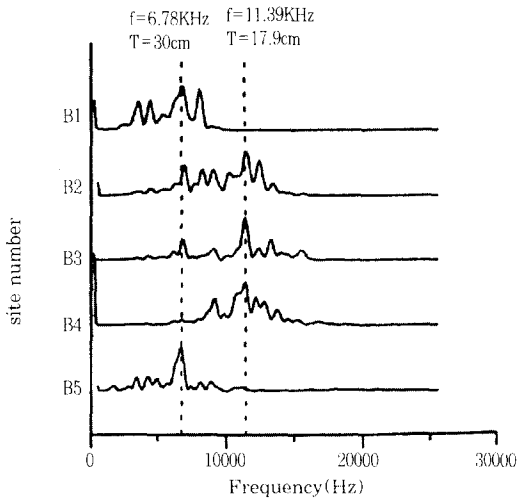


(a) Front view

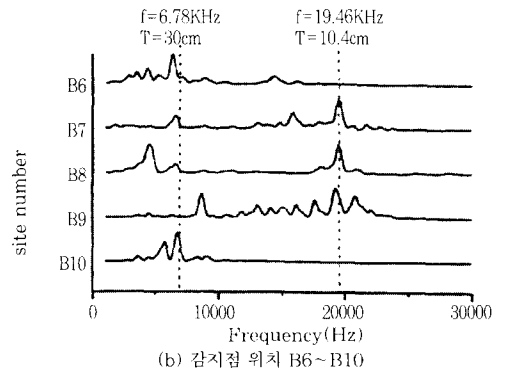


(b) Plan view

그림 6 시험부재의 형상 및 감지점 위치



(a) 감지점 위치 B1~B5



(b) 감지점 위치 B6~B10

그림 7 각 공동깊이에서 시험한 파워스펙트럼

에서 시험한 파워스펙트럼을 나타낸다. 정규화된 파워 스펙트럼에서 최대진폭을 가지는 공진주파수와 이 공진주파수에 해당하는 두께를 식 (8)을 사용하여 계산된 결과를 표 1에 나타내었다. 실험결과에 의하면 충격반향법이 공동의 위치를 1*cm* 내외의 오차범위내에서 비교적 정확히 찾을 수 있음을 알 수 있었고, 감지점의 위치를 변화시키며 데이터를 연속적으로 획득하면 시험대상체의 건전도를 신속하게 검사할 수 있었다.

표 1 각 감지점에서의 공진주파수와 깊이

Receiver Number	공진주파수(kHz)	깊이(cm)
B1	6.78	30.0
B2	11.39	17.8
B3	11.39	17.8
B4	11.39	17.8
B5	6.78	30.0
B6	6.40	31.8
B7	19.46	10.5
B8	19.46	10.5
B9	19.46	10.5
B10	6.78	30.0

4.3 터널 벽체의 건전성 평가

최근 활발한 지하공간 건설과 더불어서 터널 벽체의 건전성 평가에 대한 관심이 증가되고 있다. 탄성파를 이용하는 비파괴 검사기법은 단순한 층구조의 파악이외에 각층의 물성까지 확인할 수 있으며, 또한 라이닝 배면의 지하수나 유전율이 큰 강지보공 등에 의해 영향을 받지 않아 GPR로는 불가능한 영역에까지 적용될 수 있는 가능성을 가지고 있다.

Lin과 Sansalone(1994)는 동적 유한요소 프로그램을 이용하여 공기중, 토층, 암반층에 설치된 터널에서의 충격반향시험을 수치적으로 모사하여, 라이닝 두께, 콘크리트 품질, 내부 균열, 박리, 주위지반의 강성 등 여러 영향요소가 실험결과에 어떤 영향을 미치는지를 살펴보았다. 또한 광산의 수직갱의 콘크리트 라이닝에 대한 충격반향시험을 실시하여 터널벽체의 건전성 평가에 대한 적용성을 검증하였다 (Lin et al. 1991).

조성호(1998)는 연구용 터널에서 방수막이 설치된 벽체구간과 방수막이 설치되지 않은 벽체구간에서 표면파시험을 수행하였으며, 이들 시험결과의 비

교와 표면파시험의 이론적인 모사를 통해서 라이닝 두께, 방수막의 존재 및 위치를 추정하는 방법을 제안하였다.

4.4 현장타설 말뚝의 건전성 평가

말뚝 기초에서 발생하는 결함은 말뚝 자체의 지지력을 감소시키는 동시에, 말뚝의 침하에 의한 구조물의 근본적인 안전성을 위협하게 된다.

현장타설 말뚝기초에서 흔히 발생하는 내부 결함으로는 병목부(neck) 및 확대부(enlarged zone, 또는 bulb)와 같은 비정상적 단면, 그리고 공동(void), 콘크리트 이격 부위(separation), 균열(crack), 파쇄부(crushed zone), 시공 이음(splice) 등과 같은 불연속 부위, 또한 불량 콘크리트(week concrete) 및 토사 혼입부(soil intrusion) 등과 같은 비균질 매질 형성 부위 등을 들 수 있다. 한편, 외부 결함으로는 말뚝 선단부의 굴착 잔류토(slime) 및 선단하 공동 등으로 인한 연약 선단(soft toe), 그리고 말뚝 몸체와 주변부의 토층 사이에 형성되는 측면 공동(side capacity) 등이 대표적이다(우제윤,1995). 그림 8에 전형적인 결함유형을 이상적으로 나타내었다.

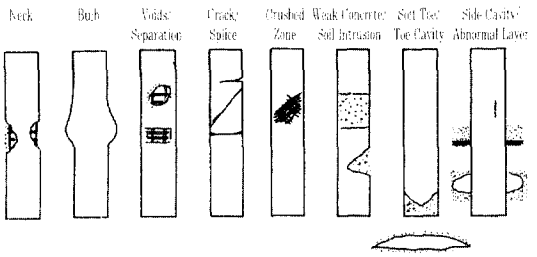


그림 8 현장 타설 말뚝기초의 결함 유형

현장타설 말뚝의 결함 탐사를 위하여 탄성파를 이용한 비파괴 검사기법이 주로 사용되고 있다. 현재 사용되는 방법에는 검측공 시험법과 비검측공 시험법(충격반향기법)이 있다. 검측공 시험법은 비검측공 시험법에 비해 신호 분석이 용이하고 시험의 신뢰도가 높으나, 말뚝내에 검측공을 설치하여야 하는 문제점이 있다. 비검측공 시험법은 말뚝두부에서 간단한 시험기구를 이용하여 수행되므로 많은 양의 말뚝에 대한 품질관리에 손쉽게 적용될 수 있으나 신뢰도는 떨어진다. 따라서 현장타설 말뚝의 건전도 평가를 위하여는 이들 방법들을 효과적으로 결합하여 신뢰도와 경제성을 증가시킬 필요가 있다.

박연홍(1998)은 유한요소법을 이용하여, 현장 타설 말뚝에서 전형적으로 발생하는 결함 유형인 공극이나 균열, 병목부, 불량층 등을 가진 부재에 대한 충격 반향 기법의 결과를 검토하고, 각 결함에 대한 결과가 어떠한 양상으로 발현되는지 알아보았다. 이와 동시에 병목부와 불량층을 가진 모형 콘크리트 부재를 제작하고 충격반향시험을 수행하여 그 결과를 비교함으로써, 유한요소해석을 통한 결과의 타당성을 검증하였다. 연구를 통하여 현장 타설 말뚝의 건전도 평가시 충격반향기법의 적용가능성, 기법 적용시의 문제점 및 시험결과의 신뢰성 있는 평가방법 등을 살펴보았다. 그림 9는 선단부에 불량층을 가진 부재에 대한 대표적인 유한요소 해석결과와 모형시험결과의 비교를 나타내었다.

대구경 현장타설말뚝(RCD공법, 직경 1.5*m*)의 건전도를 조사하기 위하여 콘크리트 타설전에 철근망에 부착한 튜브에 초음파 송수신 센서를 삽입하고 말뚝의 깊이에 따른 탄성파의 전달 특성을 파악하여 콘크리트의 타설, 양생 상태를 조사하는 크로스홀 검측법의 적용사례를 소개하면 다음과 같다 (동부건설, 1997).

시험말뚝은 직경이 1.5*m*이며 4개의 튜브가 설치

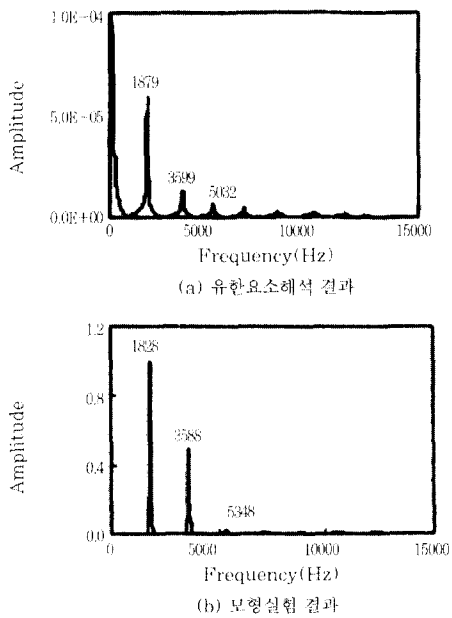


그림 9 선단부, 두께 10*cm* 불량층을 가진 부재에 대한 결과 비교

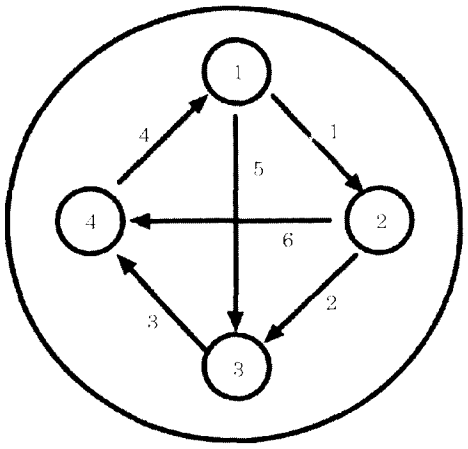


그림 10 튜브의 개수와 시험 단면

되어 있다. 시험을 통하여 말뚝 주변으로 4개의 로그와 대각선으로 2개의 로그를 얻을 수 있다. 그림 10은 튜브의 개수와 시험단면을 나타내었다.

그림 11은 수신된 초음파의 에너지 변화와 최초 도달시간의 변화를 말뚝의 깊이에 따라 나타낸 것이다(3번 시험단면). 말뚝 머리에서 2*m* 가량은 에너지가 매우 작으나 최초 도달시간은 정상적인 것을 알 수 있으며 이와 같은 현상은 작업과정에서 튜브가 좌우로 흔들려서 튜브와 콘크리트의 부착이 약해졌음을 나타내며 콘크리트의 강도에는 문제가 없다. 말뚝의 중간부위는 매우 정상적인 양상을 보이고 있으며 도달시간에 약간의 변동이 있는 것은 튜브가 말뚝의 전 길이(42*m*)에 걸쳐서 수직으로 평행하게 설치되어 있지 않기 때문인 것으로 판단된다. 말뚝의 선단에서 20*cm* 가량은 수신된 초음파의 에너지가 급격히 감소하고 도달시간도 크게 지연된 것을 알 수 있으며 이 부위는 콘크리트의 탄성계수가 상대적으로 낮은 것으로 판단된다.

5. 결 론

최근 여러 대형사고의 발생으로 인하여 기존 구조물의 유지관리 및 안전성 확보와 시공중 구조물의 품질관리가 중요한 과제로 부각되고 있다. 국내에서도 콘크리트 구조물의 건전성 평가에 탄성파를 이용한 비파괴 검사기법이 사용되고 있으나 비파괴 검사기법에 대한 이해가 부족한 형편이고, 신뢰성 있는 시험기법 정립이 이루어지지 못하고 있다.

본 고에서는 탄성파를 이용한 비파괴 검사기법 중 초음파속도법, 충격반향기법, 표면파기법, 크로스홀 기법 등의 기본원리, 측정장비 및 방법, 신호 처리기법 등을 살펴보았다. 또한, 이들 기법들을 적용하여 강도의 추정, 부재의 결함검사, 터널 벽체 및 현장타설말뚝의 건전성 평가 등에 응용한 사례들을 알아보았다. 본 고에서 살펴본 내용은 급속도로 발전하고 있는 비파괴 기술의 진전에 비추어 보면 그 일부분에 지나지 않는다. 따라서, 이를 바탕으로 탄성파이용 비파괴검사 분야에 끊임없는 연구개발 및 적용이 이루어지기를 바란다.

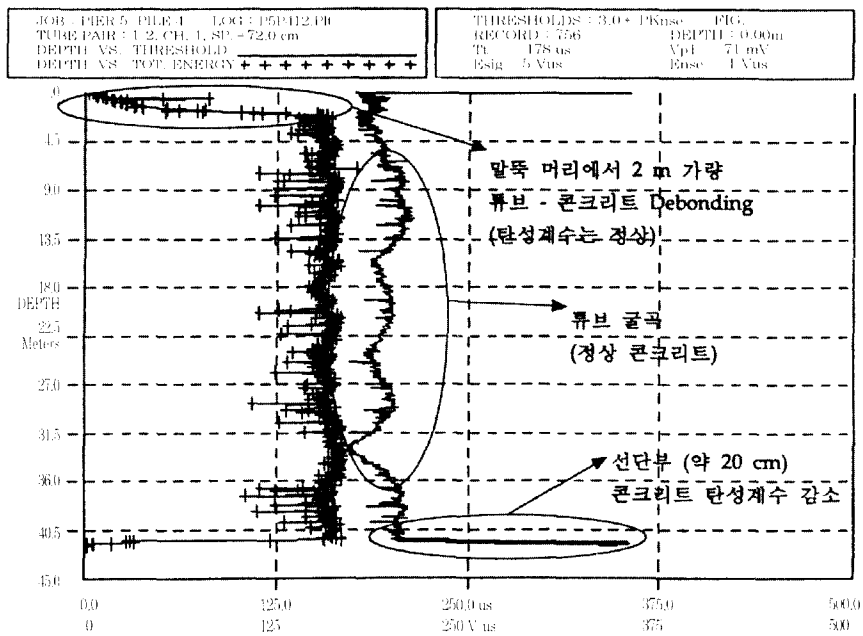


그림 11 크로스홀 검측법 시험결과 (에너지, 도달시간 표시)

참 고 문 헌

김동수, 박형춘, 이광명, "충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴검사," 콘크리트 학회지, Vol. 9, No. 2, 1997, pp.109-119.

박연홍, "충격반향기법을 이용한 깊은기초의 건전도 평가," 석사학위논문, 한국과학기술원, 1998, pp.71.

우제윤, "비파괴 시험 기법을 이용한 지반조사와 토건구조물의 안전진단 및 품질관리: 비파괴 시험기술을 이용한 현장타설 말뚝의 품질관리," 한국지반공학회 전문가 초청 학술 세미나, 1995, pp.175-228.

조성호, "SASW기법에 의한 터널 라이닝의 방수막 확인과 위치추정에 관한 연구" 대한토목학회 논문집(게재승인)

"현장타설말뚝 건전도시험 보고서" 동부건설(주) 기술연구소, 1997, 35p.

Krstulovic-Opara, N., Woods, R.D., and Al-Shayea, N. "Nondestructive Testing of Concrete Structures Using the Rayleigh Wave Dispersion Method," ACI Material Journal, V. 93, No. 1, Jan.-Feb., 1996, pp.75-86.

Lin, J. M. and Sansalone M., "Impact-Echo Response of Hollow Cylindrical Concrete Structures Surrounded by Soil and Rock: Part I-Numerical Studies, Part II-Experimental Studies," Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 17, No. 2, June, 1994, pp.207-226.

Lin J., Sansalone, M. and Carino, N. J., "Impact-Echo Response of Concrete Shaft," Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 14, No. 2, June, 1991, pp.121-137.

Lin, Y. and Sansalone, M., "Detecting Flaws in Concrete Beams and Columns Using the Impact Echo Method," ACI Material Journal, V. 89, No. 4, Jul.-Aug., 1992, pp.394-405.

Malhotra, V. M. and Carino, N. J., "HANDBOOK on NONDESTRUCTIVE TESTING of CONCRETE", CRC Press, NEW YORK, 1991, 343p.

Pessiki, S. P., and Johnson, M. R., "Nondestructive Evaluation of Early-Age Concrete Strength in Plate Structure by the Impact-Echo Method," ACI Material Journal, V. 93, No. 3, May-June, 1996, pp.260-271.

Richart, F. E., Jr., Hall, J. R., Jr., and Woods, R. D., "Vibrations of Soils and Foundations," Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1970, 414p.

Sansalone, M. and Carino, N. J., "Impact Echo Method: Detecting Honeycombing, the Depth of Surface Opening-Cracks, and Ungrouted Ducks," Concrete International : Design & Construction, V.10, and No. 4, April., 1988, pp.38-46.

Sansalone, M. and Carino, N. J., "Detecting Deliminations in Concrete Slabs with and without Overlays Using the Impact Echo Method," ACI Material Journal, V. 83, No. 2, Mar.-Apr., 1989, pp.175-184.