

충격반향기법을 이용한 깊은 기초의 건전도 평가(수치해석)

Integrity Evaluation of Deep Foundations by Using Impact Echo Method(Numerical Study)

김 동 수*¹

Kim, Dong-Soo

박 연 홍*²

Park, Yeon-Hong

Abstract

These days we broadly apply drilled shafts for deep foundations to build infrastructures. The defects of the deep foundations cause the decrease of their support load capacity and the increase of settlement, and the subsequent damage of the super-structures. In consequence, non-destructive testing techniques of concrete piles are important for their integrity evaluation. To improve understanding and reliable application of the impact echo method for the integrity evaluation of the drilled concrete piles, numerical studies of the impact response of concrete piles by using axis-symmetric three-dimensional finite element method are performed for (a) sound piles; (b) piles containing necks, voids and layers of low-quality concrete; and (c) piles in soil and/or above rock. The results of these studies show that the finite element method is effective for evaluating the impact response of drilled concrete piles.

요 지

근래에 들어 구조물의 대형화에 따라 현장타설 말뚝을 하부 구조물로서 광범위하게 적용하고 있다. 그러나 현장타설 말뚝에 결함이 생기면 상부 하중에 대한 지지력 저하와 함께 침하량이 증가하게 되어 상부 구조물에 치명적인 손실을 초래할 수 있다. 따라서 비파괴시험 기법에 의한 콘크리트 말뚝의 효과적인 건전도 평가기법 개발이 중요하게 대두되고 있다. 본 연구에서는 수치해석을 통하여 콘크리트 말뚝의 건전도 평가에 이용되는 충격반향기법의 적용성을 검토하였다. 3차원 축대칭 유한요소법을 이용하여 건전한 말뚝과 현장타설 말뚝의 전형적인 결함인 병목, 공동, 불량 콘크리트를 포함하는 말뚝, 그리고 지반 및 암반위에 놓인 말뚝에 관한 해석을 수행하였다. 해석결과 현장타설 말뚝에 적용되는 충격반향기법의 적용성 평가에 있어서 유한요소법이 효과적임을 알 수 있었다.

Keywords : Integrity evaluation, Deep foundation, Nondestructive testing, Impact-Echo method, Finite element method

*1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

*2 정회원, 삼안건설기술공사 사원

1. 서론

현재 국내에서 시공되는 토목·건축 구조물의 기초 형식으로 현장타설 콘크리트 말뚝이 널리 적용되고 있다. 그러나 말뚝의 내부 및 외부에 발생하는 결함으로 인하여, 말뚝의 지지력 저하 및 침하 등이 발생하고 상부 구조물의 붕괴나 손상이 야기되는 경우가 빈번해지고 있는 실정이다. 따라서 토목 구조물의 손상이나 결함, 건설 중인 구조물의 적정 시공 여부 등에 대한 객관적인 분석 및 올바른 평가가 매우 중요하며, 이를 위해 시공된 구조물에 손상을 가하지 않고 문제점을 조사하는 비파괴검사 기법이 대두되고 있다.

충격반향기법은 대상물에 충격이 가해졌을 때 발생한 응력파가 내부의 결함이나 불연속면 등을 만날 경우 반사되는 특성을 이용하여 결함 또는 경계층의 위치와 크기를 찾아내는 방법으로, 현장타설 말뚝의 경우에는 병목부, 공극, 균열, 중간이나 선단부의 불량층 등에서 반사된 응력파의 신호를 분석하여 그 위치 및 크기를 추정하게 된다.

본 논문에서는 현장타설 말뚝의 전전도 평가에 주요하게 사용되는 충격반향기법의 보다 신뢰성있는 적용을 위해 유한요소법을 이용한 수치해석을 수행하여 현장 타설 말뚝에서 전형

적으로 발생하는 결함 유형인 공극이나 균열, 병목부, 불량층 등을 가진 부재에 대한 충격반향기법의 결과를 검토하고, 각 결함에 대한 결과가 어떠한 양상으로 발현되는지 살펴보았다.

2. 현장타설 말뚝의 결함 유형 및 탐사기법

말뚝 기초에서 발생하는 결함은 말뚝 자체의 지지력을 감소시키는 동시에, 말뚝의 침하에 의한 구조물의 근본적인 안전성을 위협하게 된다. 현장타설 말뚝의 전형적인 결함 유형에 대하여 우제윤(1995)은 다음과 같이 설명하였다.

“말뚝 기초에서 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(weak concrete) 및 토사 혼입부(soil intrusion) 등과 같은 비균질 매질 형성 부위를 들 수 있다. 한편, 외부 결함으로는 말뚝 선단부의 굴착 잔류토(slime) 및 선단 하 공동 등으로 인한 연약 선단(soft toe), 그리고 말뚝 몸체와 주변부의 토층 사이에 형성되는 측면 공동(side cavity) 등이 대표적이다.” 그림 1에 전형적인 결함유형을 나타내었다.

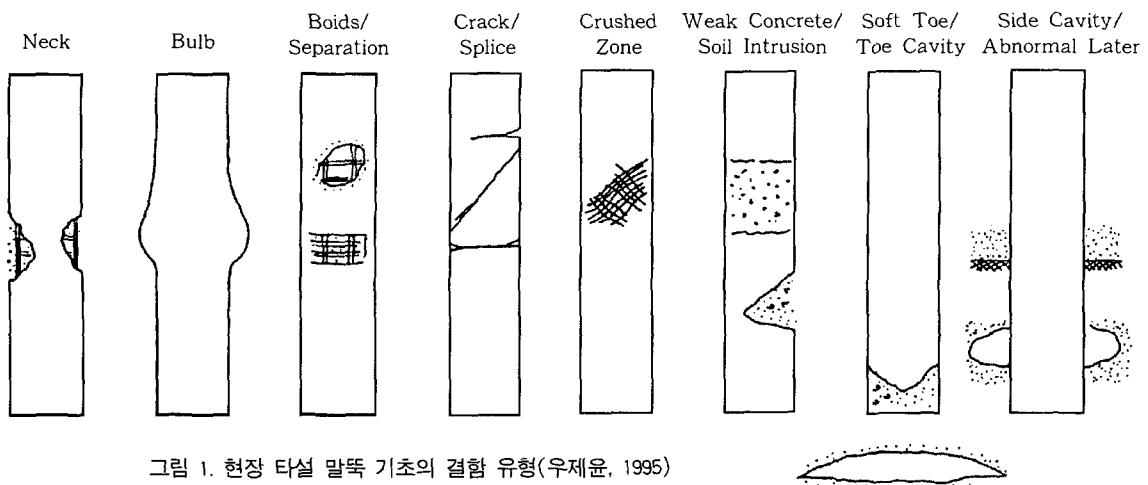


그림 1. 현장 타설 말뚝 기초의 결함 유형(우제윤, 1995)

현장타설 말뚝의 결합 탐사를 위하여 탄성파를 이용한 비파괴검사 기법이 주로 사용되고 있다. 초음파원이나 기계적 충격을 이용하여 말뚝에 응력파를 전파시킨 후, 응력파의 전파 속도 변화 및 반사 특성을 분석하면 말뚝 내부 및 외부의 결합의 존재 여부와 위치 및 나아가 결합의 특성 등에 대한 정보를 알아낼 수 있다. 현재 사용되는 방법에는 검측공 시험법과 비검측공 시험법이 있다. 검측공 시험법은 비검측공 시험법에 비해 신호 분석이 용이하고 시험의 신뢰도가 높으나, 말뚝내에 검측공을 설치하여야 하는 문제점이 있다. 비검측공 시험법은 말뚝 두부에서 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. 검측공 시험법으로는 수평검측기법(crosshole sonic logging), 상하향검측기법(up/down hole logging), 평행공 검측기법(parallel seismic logging) 등이 있으며, 비검측공 시험법으로는 충격반향(impulse echo, IE)기법, 충격응답(impulse response)기법 등이 있다. 본 연구에서는 대표적인 비검측공 시험법인 충격반향(IE)기법을 위주로 영향요소 연구를 수행하였다.

3. 충격반향(IE)기법

3.1. 기본원리

시험체의 표면에 기계적 충격(impact)을 가하면 구형의 파면을 가지고 시험체 내부로 전파되는 체적파(P, S파)와 실린더 형태의 파면을 가지고 시험체 표면을 전파되는 표면파(R파)가 발생한다(Richert 등, 1970). 이때 체적파는 균열, 공동과 같은 불연속체나 이질 매질층 간의 경계면을 만나면 반사되어 응력파가 발생한 표면으로 돌아온다. 이때 감지기가 충분히 가진점 근처에 위치한다면 균열, 공동과 같은 매질 내의 불연속체나 이질 매질층 간의 경계

면에서 반사된 P파에 의한 표면 변위가 S파에 의한 표면 변위보다 훨씬 크므로 표면에서 감지되는 파형은 반사된 P파에 의한 파형으로 볼 수 있다.

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. 이때, 시험체의 치수를 알고 있을 경우 구성 재료의 강성도 결정을 통한 콘크리트의 불량도를 추정할 수 있고, 재료의 압축파 전파 속도를 알고 있다면 반사파의 도달 시간을 측정하여 시험체 내부에 존재하는 불연속면의 위치를 알아낼 수 있다. 그림 2는 충격반향 기법의 개요도를 나타낸 것이다(Carino 등, 1986; Lin 등, 1991; Mathorta and Carino, 1991).

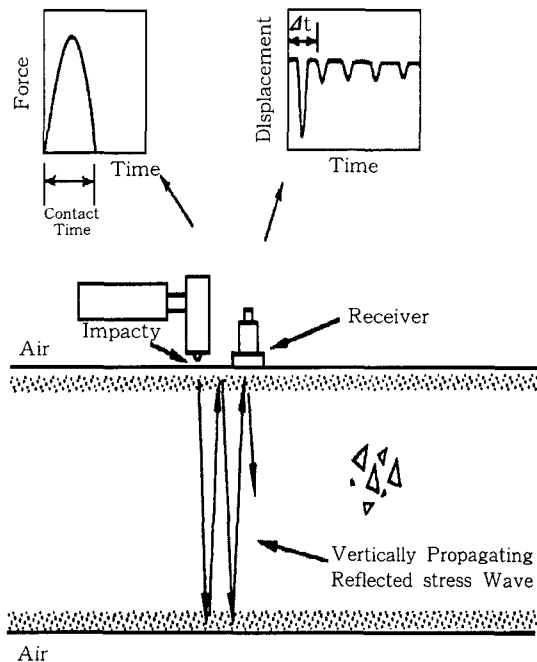
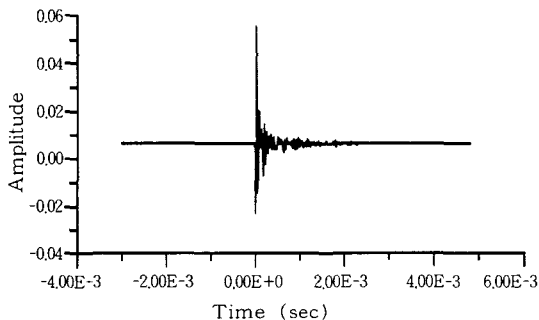


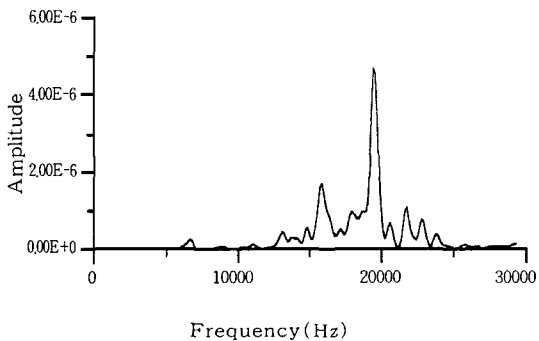
그림 2. 충격 반향기법의 장비 구성 및 개요도

3.2 신호처리 및 분석

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 첫 번째 모드 성분(주파수가 가장 작은 모드 성분)의 영향이 가장 크다. 따라서 시간영역에서의 기록을 FFT(Fast Fourier Transform)를 사용하여 주파수영역으로 변환하면 첫 번째 모드의 주파수가 최대 진폭 주파수가 된다. 그림 3은 콘크리트 시험체의 깊이 0.1m에 위치한 공동에서 반사된 파의 시간영역 기록과 고속 푸리에 변환을 통한 주파수영역 기록을 비교하였다. 시간영역 해석에서는 반사파의 도달시간을 명확히 찾아낼 수 없는 반면에 주파수영역 해석에서는 공



(a) 시간 영역 기록



(b) 주파수 영역 기록

그림 3. 공동에서 반사된 파의 시간영역 기록과 주파수영역 기록

진주파수를 쉽게 얻을 수 있다.

첫 번째 모드의 파장과 두께(관심을 가지는 균열, 공동, 이질 매질층 등으로부터 감지기가 부착되어 있는 표면까지의 거리, T) 사이의 관계는 경계 조건에 의해서 결정되는데, 충격 방향 기법의 적용 시에 생길 수 있는 경계 조건은 크게 자유면-자유면과 자유면-고정면이다. 자유면-자유면과 같은 경계 조건은 공동, 균열 등이 존재할 때의 경계 조건으로서, 자유면과 자유면 사이를 다중 반사하는 파를 구성하는 각 모드의 주파수는 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

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

여기서, f_n = n번째 모드의 공진주파수, V_p = P파의 속도이고 첫 번째 모드의 파장 λ 는 두께의 2배가 된다. 매질의 P파 전파 속도를 알고 있을 때 이질 매질층까지의 두께 T는 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

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

자유단-고정단과 같은 경계 조건은 매질 내부에 매질에 비해 현저하게 강성도가 큰 이질 매질이 존재할 때의 조건으로 콘크리트 말뚝이 강성이 큰 암반에 근입된 경우, 콘크리트 말뚝과 암반에 의하여 주어지는 경계 조건이다. 이러한 경계 조건에서 다중 반사되는 파를 구성하는 각 모드의 주파수는 다음 식과 같다.

$$f_n = \frac{nV_p}{4T}, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (3)$$

식 3에 의하면 첫 번째 모드의 파장 λ 는 두께의 4배가 된다. 매질의 압축파 전파 속도를 알고 있을 때 이질 매질층까지의 두께 T는 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

$$T = \frac{V_p}{4f_1} \quad (4)$$

한쪽 경계는 자유면이고 다른 한쪽이 자유면과 고정면의 중간정도 강성을 갖는 경우, 첫 번째 모드의 파장은 두께의 2배에서 4배 사이의 값을 갖게 되고 두께 T는 다음 식에 의해서 구할 수 있다.

$$T = \frac{V_p}{kf_1}, \quad k = 2 \sim 4 \text{ 사이} \quad (5)$$

윗 식들을 사용하여 두께를 측정함에 있어서는 매질에서의 응력파의 속도를 미리 알고 있어야 한다. 응력파의 속도는 경계 조건과 두께를 미리 알고 있는 부위에서의 계측을 통하여 알아낸다.

4. 해석계획

4.1. 유한요소 해석 프로그램

본 연구에서는 KIESSI를 이용하여 결함을 가진 콘크리트 부재에 대한 유한요소법 해석을 수행하였다. KIESSI(KAIST Infinite Element Soil-structure Interaction Analysis Program)는 한국과학기술원 토목공학과에서 개발된 지반-구조물 상호작용 해석용 전산 프로그램으로 유한요소법-무한 요소법을 기초로 하여 주파수영역에서 축대칭체에 대한 동적 거동을 구하는 프로그램이다(Yun등, 1995). KIESSI 프로그램의 평가 지침 및 적용 사항은 다음과 같다.

1) 지반-구조물 상호 작용계는 축대칭 형상과 물성치를 갖는 것으로 가정되며 KIESSI의 동적 해석은 주파수영역에서 이루어진다.

2) 구조물과 지반의 매질은 요소간에 변화하는 강성도와 감쇠 특성이 탄성계수와 이력 감쇠비에 의해 표현되도록 점탄성 재료로 가정되었다. 지반-구조물 상호 작용계에서 충분히 떨어진 원역 지반은 점탄성 매질인 반무한체나 기저암 위에 수평층상을 지닌 반무한 점탄성 매질로 가정되었다.

3) 구조물과 근역 지반은 축대칭 9절점 유한요소로 모형화하고, 원역 지반은 동적 무한요소를 이용한다. KIESSI에 사용된 무한요소는

표면파와 체적파의 파동 전파에 대해 효과적으로 적용할 수 있다.

4) KIESSI의 해석이 수행되는 동안 전체의 구조물과 지반의 거동은 선형으로 가정된다.

본 연구에서는 콘크리트 말뚝을 기본 구조물로 정하고 주위 지반을 공기 및 일정한 강성을 가진 지반 또는 지반과 암반이 층상 배열된 형태로 적용하였다. 이에 따라, 콘크리트 및 주위 지반의 재료 상수와 경계 조건, 하중 및 해석 주파수 등에 관한 사항을 입력하여 해석을 수행하였다.

4.2. 시험부재

4.2.1. 시험부재

현장타설 말뚝기초에 해당하는 모델말뚝은 반경(R) 50mm, 길이(H) 1m의 축대칭 원형 말뚝으로 콘크리트의 탄성계수는 33.1Mpa, 포아송비는 0.2, 밀도는 2300kg/m³으로 이에 따른 축방향의 이론적인 체적파(압축파 및 전단파) 속도 및 표면파 속도는 각각 3800m/s, 2327m/s, 2121m/s로 계산된다.

이와 같은 형상을 가진 결함이 없는 부재의 경우, 콘크리트 내의 P파 속도 3800m/s에 따라 부재의 길이에 대한 1900Hz의 공진주파수를 가지게 되며 이를 기준으로 2n배수의 공진주파수를 나타내게 된다. 이때 표면파의 측면반사에 의한 공진주파수가 21.2kHz의 값을 가지므로 응력파에 의해 발생하는 공진주파수인 1900Hz의 최대 11배수까지는 표면파에 의한 영향없이 산정할 수 있다.

또한, 결함을 가진 콘크리트 부재에 대한 반응 결과를 알아보기 위하여 다음과 같이 말뚝기초에 주요하게 발생하는 결함으로 공동(void), 병목부(neck), 불량 콘크리트(weak concrete), 선단부 불량(slime) 등의 결함을 가진 부재를 설정하고, 이때 각 결함의 위치와 크기 및 물성치를 변화시켜 결함의 형태에 따른 반응 결과를 산정하였다. 그림 4는 결함을 가진 콘크리트 부재의 형태를 나타낸 것이며, 결함의 위치 및 크기 등의 자세한 사항은 각

사례에서 예시하였다. 본 연구에서 사용한 모델 말뚝의 크기는 실제 현장에서 사용하는 말뚝에 비하여 규모가 작다. 다음절에서 설명된 바와 같이 실제 규모의 말뚝을 사용하여 유한 요소의 크기와 최소 파장의 상관관계를 맞추기 위하여는 상당량의 요소 개수와 계산 시간이 필요하기 때문에 말뚝의 크기를 축소하여 영향 요소 연구에 초점을 맞추었다.

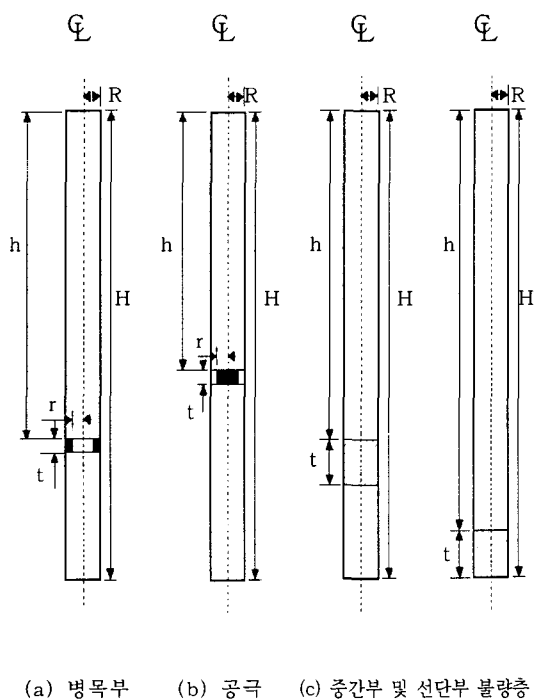


그림 4. 결함을 가진 콘크리트 부재의 형상

4.2.2. 유한요소망

FEM 해석에서 만족스러운 결과를 얻기 위해서는 유한요소 하나의 크기가 주파수가 가장 높은 파장 길이의 1/10보다 작아야 한다. 본 연구에서는 0.025m × 0.025m 크기의 유한요소를 사용하여 최소 0.25m의 파장 길이를 가진 주파수 성분까지 산정이 가능하도록 하였다. 즉, 콘크리트의 압축파 속도인 3800m/s에 대해

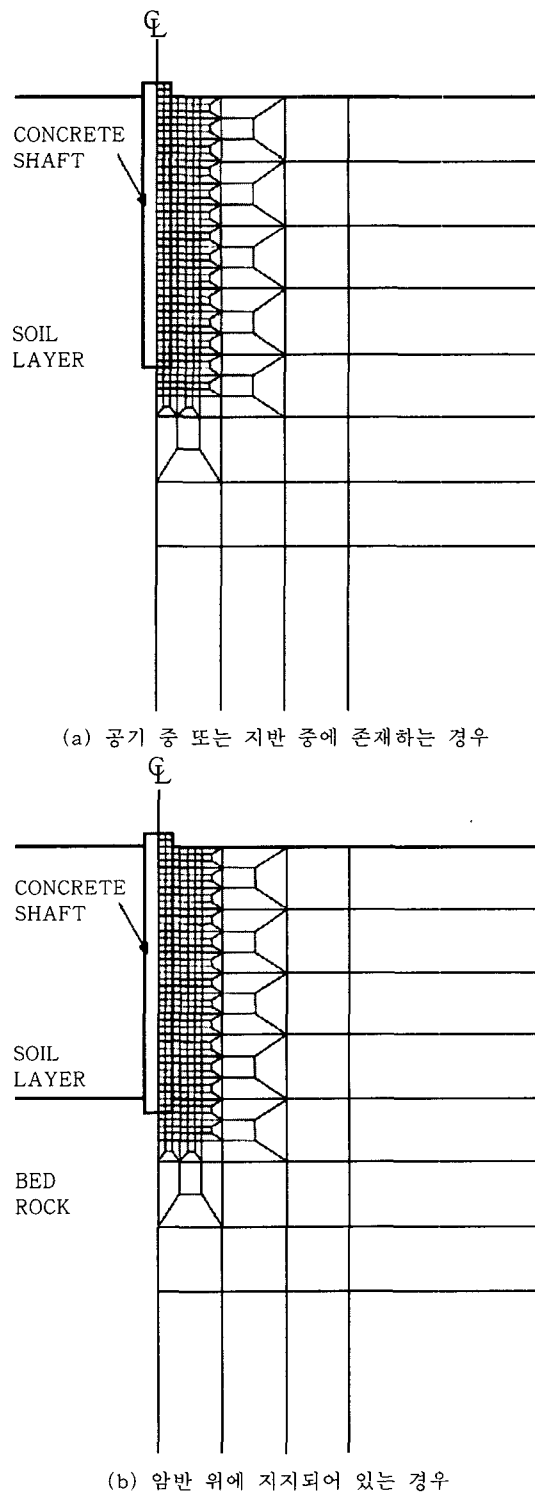


그림 5. 부재의 위치 및 유한 요소의 배치 형태

서 최고 15.2kHz의 주파수 성분을 한계로 가지므로 구하고자 하는 공진주파수 및 타격 지점에서 최소 0.125m까지의 근거리 존재하는 결함을 추정할 수 있도록 하였다. 부재의 윗부분 단면의 중앙에 전 주파수 영역에서 같은 에너지를 갖는 하중으로 타격하고, 200rad/s (= 32Hz) 간격으로 80000rad/s (= 12732Hz)의 주파수 영역에 걸쳐 0.025m 떨어진 지점에서의 수직 변위를 측정하였다. 콘크리트 말뚝과 주위 지반 모두에 대해 0.025m×0.025m 크기의 유한요소를 사용하였고, 부재에서 충분히 떨어진 지반은 유한요소의 크기를 증가시켜 그 이후에 연결되는 수평, 수직 및 모서리 무한요소의 수를 줄였다. 그림 5는 공기나 지반 중 또는 암반 위에 위치한 경우 요소망의 배치형태를 나타낸 것이다.

5. 해석결과

5.1. 공기중의 콘크리트 부재

5.1.1. 결함이 없는 경우

결함이 없는 순수한 콘크리트 말뚝 기초에 대한 충격반향기법의 결과를 규명하기 위하여 자유단-자유단의 경계조건을 만족시키는 공기중의 콘크리트 부재를 고려하였고, 이를 위해 부재의 주위를 전단파속도 0.001m/s, 포아송비 0.01, 밀도 0.001kg/m³의 아주 연약한 매질로 설정하였다. 이에 따라 부재의 위치 및 유한요소의 형태를 결정하고 충격반향기법에 대한 결과를 다음과 같이 산정하였다. 이때, 공진주파수 1805Hz, 3610Hz, 5415Hz 등을 구할 수 있고, 이는 식 3.2로부터 구한 부재 길이 1.0m에 대한 공진주파수인 1900Hz 및 그 n배수의 주파수보다 약간 작은 값으로 나타난다.

공진주파수의 수치가 이론적으로 구하는 경우보다 작게 구해지는 이유는 이론적인 해가 응력파의 전파 및 반사에 대해 부재의 경계 조건을 무시하고 1차원적으로 간주되어 구해지는 반면에, 실제 응력파의 전파 및 반사는 전파 경로의 주위 경계 조건에 영향을 받기 때문인

것으로 판단된다.

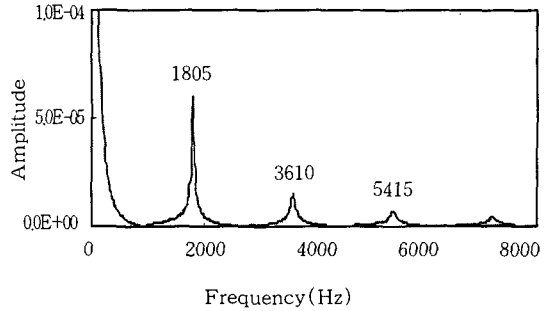


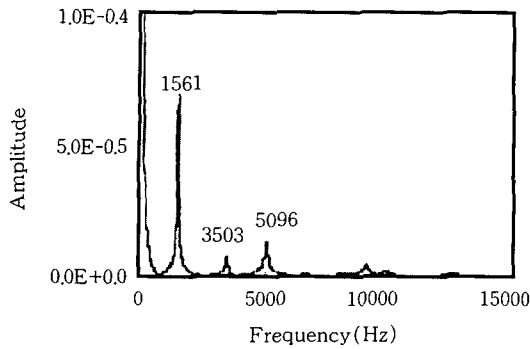
그림 6. 공기중의 결함이 없는 콘크리트 부재에 대한 결과

5.1.2. 결함이 있는 경우

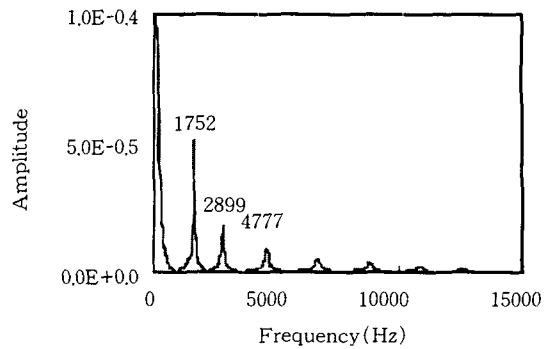
· 결함의 위치에 따른 결과

병목부의 위치를 변화시키는 경우의 결과를 구하기 위하여 전단면에 대한 상대면적이 75%로 동일한 결함을 깊이 0.40m와 0.83m에 그림 4(a)와 같이 배치하였고, 이에 따른 결과를 그림 7과 같이 구하였다. 1516Hz와 1752Hz는 부재의 길이에 대한 공진주파수를 나타내나, 결함이 없는 경우보다 상당히 작은 값으로 나타난다.

콘크리트 부재의 표면에서 충격에 의해 발생하는 P파는 구형의 형태로 전파되어 나가기 때문에 깊이가 증가할수록 전파하는 에너지는 부재 내부의 넓은 영역에 걸쳐 분포한다. 병목부를 가지고 있는 부재의 경우, P파가 부재의 길이 방향으로 전파되다가 병목부의 위치를 지나면서 병목부와 정상 콘크리트 매질에 걸쳐 분포하게 된다. 따라서 P파 속도는 정상적인 콘크리트의 임피던스뿐만 아니라 병목부의 아주 작은 임피던스의 영향을 받게 되어 정상 콘크리트에서의 P파 속도보다 작은 전파속도를 가지게 되고, 이에 따라 부재 길이에 대한 공진주파수의 값도 작게 나타난다. 실제 충격반향시험을 거쳐 얻은 결과에서 결함의 위치에



(a) 깊이 40cm, 75% 병목부



(b) 깊이 83cm, 75% 병목부

그림 7. 병목부의 위치를 변화시킨 경우의 결과 비교

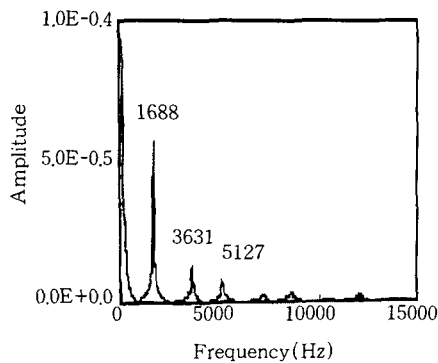
대한 공진주파수를 구할 수 없는 경우라도, 결함이 없는 부재와 비교하여 부재의 길이에 대한 공진주파수가 작게 나타나는 경우에는 부재 내에 어느정도의 결함이 존재한다고 추정할 수 있고, 정밀한 결함조사법을 통해 그 위치를 판별할 수 있다.

깊이 0.83m 지점의 병목부의 경우에는 부재 길이에 대한 공진주파수가 지배적으로 나타나 병목부의 위치에 대한 공진주파수는 사실상 판별하기 어렵다. 이는 응력파가 발생하는 충격 지점에서 상대적으로 먼 거리에 병목부가 존재하며 부재 길이의 위치와 근접하기 때문으로

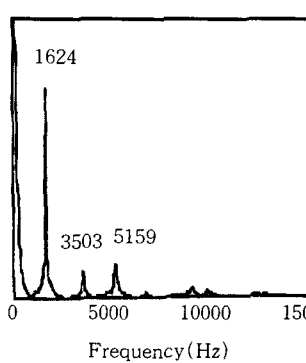
판단된다. 깊이 0.40m 지점에 병목부가 존재하는 부재에서도 결함의 위치에 대한 공진주파수가 부재의 길이에 해당하는 공진주파수의 배수와 비슷한 값을 보이나, peak값이 순차적으로 감소되다가 5096Hz에서 증가된 형태를 보이므로, 이에 해당하는 0.37m 깊이에 결함이 존재한다고 추정할 수 있다.

· 결함의 크기에 따른 결과

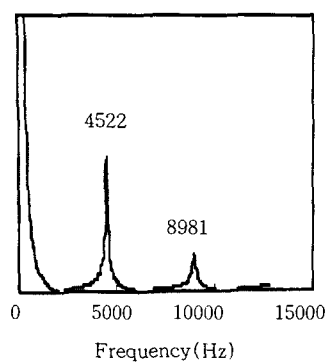
깊이 0.40m에 존재하고 전단면에 대한 상대면적이 각각 44%, 69%, 100%인 공극을 가지는 경우를 구한 결과, 그림 8에서와 같이 상대면적 44%의 작은 공극에 대해서는 부재의 길이



(a) 44% 공극



(b) 69% 공극



(c) 100% 공극

그림 8. 공극의 크기를 변화시킨 경우의 결과 비교

에 해당하는 공진주파수인 1688Hz만을 구할 수 있고, 상대면적 69%인 경우에는 1624Hz, 5159Hz로 부재의 길이와 결합의 위치 0.37m를 추정할 수 있다. 이때, 부재의 길이에 대한 공진주파수는 병목부의 경우와 마찬가지로

는 결과와 일관성을 보인다.

· 불량층의 두께와 강성에 따른 결과

깊이 0.70m에 위치하고, 750m/s의 전단파속도를 갖는 불량층의 두께를 각각 0.1m와 0.15m로 변화시켜 그림 9와 같이 결과를 산정하였다.

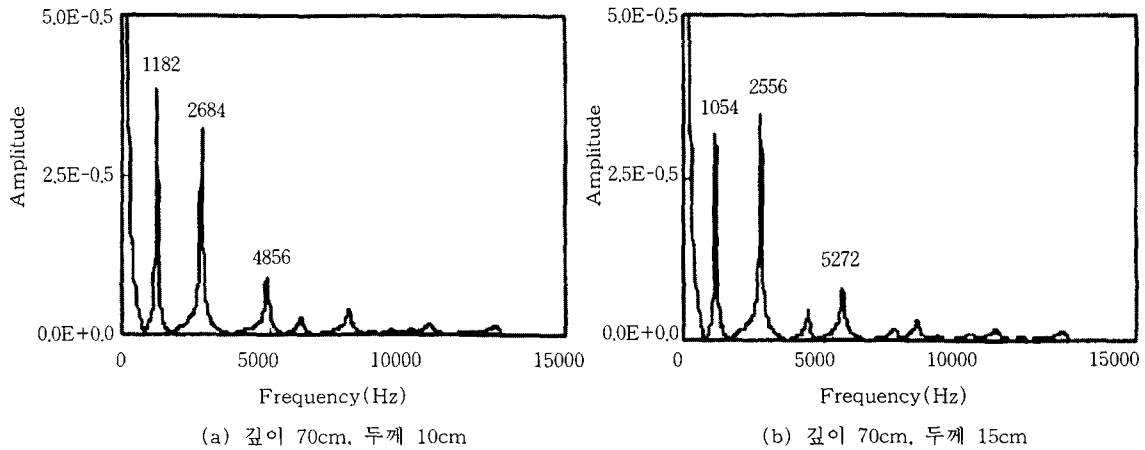


그림 9. 불량층의 두께를 변화시킨 경우의 결과 비교

1900Hz보다 작게 발현된다. 또한 전단면에 공극이 존재하는 경우에는 부재의 길이에 대한 공진주파수는 나타나지 않고, 결합의 위치에 해당하는 공진주파수인 4522Hz 및 그 배수인 8981Hz만을 발현한다. 본 수치실험 결과는 Lin 등(1991)이 수행한 수치실험에서 결합의 상대면적이 50% 이상인 경우 결합탐지가 가능하다

결과에서 알 수 있듯이 불량층을 통과하는 동안 전파속도의 감소로 인하여, 부재의 길이에 해당하는 공진주파수는 각각 1182Hz와 1054Hz로 작게 나타난다. 불량층의 위치에 대한 공진주파수는 두께 0.10m인 결합에서 2684Hz로 나타나고, 두께 0.15m인 결합에서는 2556Hz와 그 배수인 5272Hz로 부재의 길이에

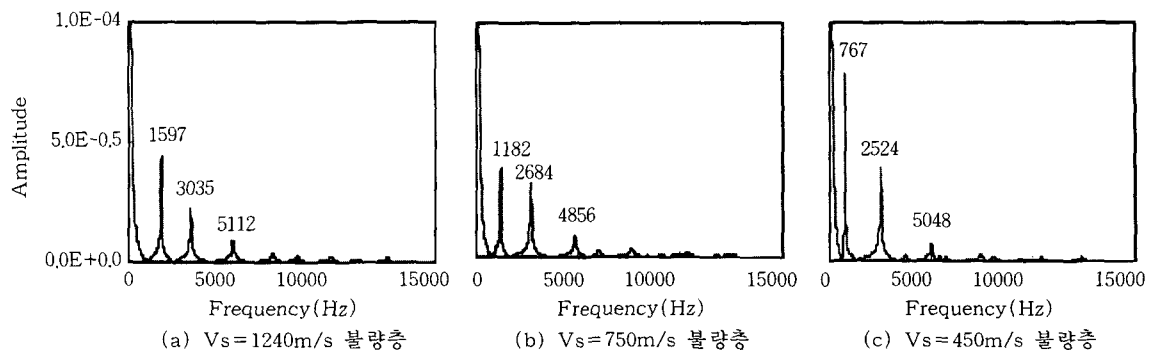


그림 10. 불량층의 강성을 변화시킨 경우의 결과 비교

대한 공진주파수보다 뚜렷하게 발현된다. 이로 부터 환산된 결함의 위치는 각각 깊이 0.71m와 0.74m이다.

강성이 다른 불량층에 대한 결과를 알아보기 위하여 두께 0.10m, 깊이 0.70m에 불량층의 전단파 속도를 각각 1240m/s, 750m/s, 450m/s로 변화시켜 배치하였다. 그림 11에서 보듯이 전단파 속도가 1240m/s인 불량층의 경우에는 부재의 길이에 대한 공진주파수가 1597Hz와 3035Hz 등으로 나타나고, 불량층에 의한 영향은 거의 나타나지 않는다. 그러나 불량층의 전단파속도가 감소됨에 따라 부재 길이에 해당하는 공진주파수는 1182Hz와 767Hz로 급격히 작아지고, 두번째 이후의 주파수들도 점차 다른 양상을 보인다. 전단파속도가 450m/s인 불량층의 경우, 2524Hz와 그 2배수인 5048Hz로부터 결함의 위치를 0.75m로 추정할 수 있다.

5.2. 지반내의 콘크리트 부재

5.2.1. 결함이 없는 경우

일정한 강성을 지닌 지반으로 둘러싸인 콘크리트 부재에 대한 해석은 실제의 현장 타설 콘크리트 말뚝 기초에 대한 충격반향시험 결과를 보다 현실적으로 반영해준다. 밀도가 1800kg/m³, 포아송비가 0.3이고, 전단파속도가 100m/s인 지반 내에 존재하는 결함이 없는 부재에 대한 결과를 살펴보면, 그림 11에서 보는 바와 같이 부재의 길이에 해당하는 공진주파수는 1789Hz,

3530Hz으로 공기 중에서의 경우와 거의 유사하게 산정할 수 있으나, 부재에 가해진 충격 에너지가 부재를 둘러싸고 있는 지반으로 전파되어 소산되기 때문에 공기 중에 위치한 부재의 경우보다 전체적으로 에너지가 감소한 양상을 보인다.

지반의 강성에 따라 결과가 어떻게 달라지는지 알아보기 위하여, 전단파속도가 각각 100m/s와 200m/s, 300m/s인 세 종류의 지반 중

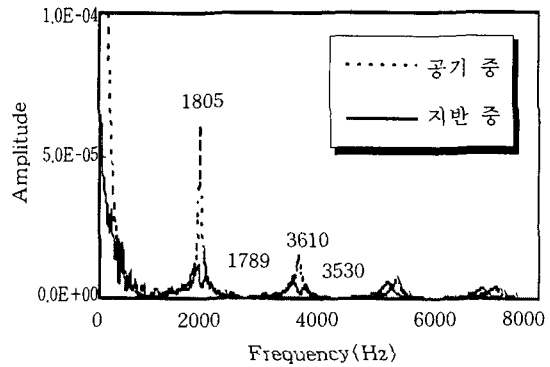


그림 11. 공기중과 지반내에 위치하는 경우의 결과 비교

에 존재하는 부재에 대해 결과를 산정하였다. 그림 12에서와 같이 지반의 전단파속도가 증가함에 따라, 지반으로 소산되는 에너지가 점차적으로 증가하여 부재 길이에 대한 공진주파수를 산정하기 어려워짐을 알 수 있다.

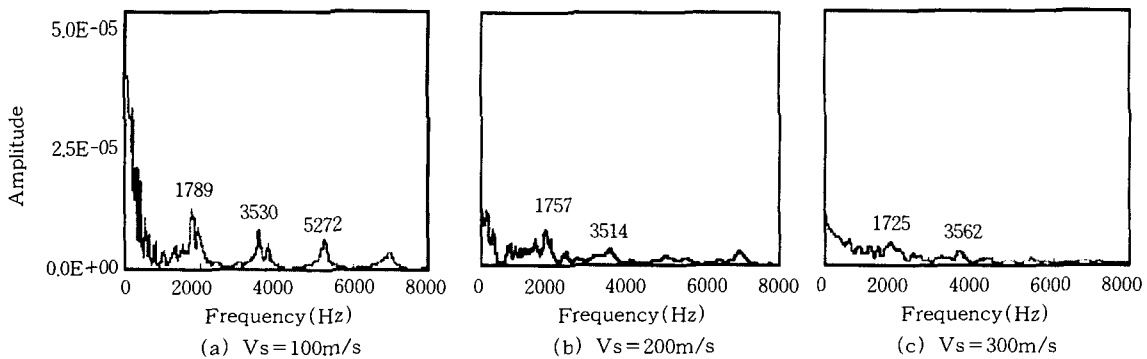


그림 12. 지반의 전단파속도 변화에 따른 결과

5.2.2 결함을 가진 경우

깊이 0.45m 지점에 전단면에 대한 상대면적이 각각 56%와 75%인 병목부를 배치한 결과(그림 13), 두 경우 모두 부재의 길이에 대한 공진

찬가지로 결함의 크기가 커질수록 부재에 대한 공진주파수는 감소되고, 결함의 위치에 대한 공진주파수는 점차 뚜렷해지는 경향을 보인다. 지반 중에 위치하고 중간 부분이나 선단 부

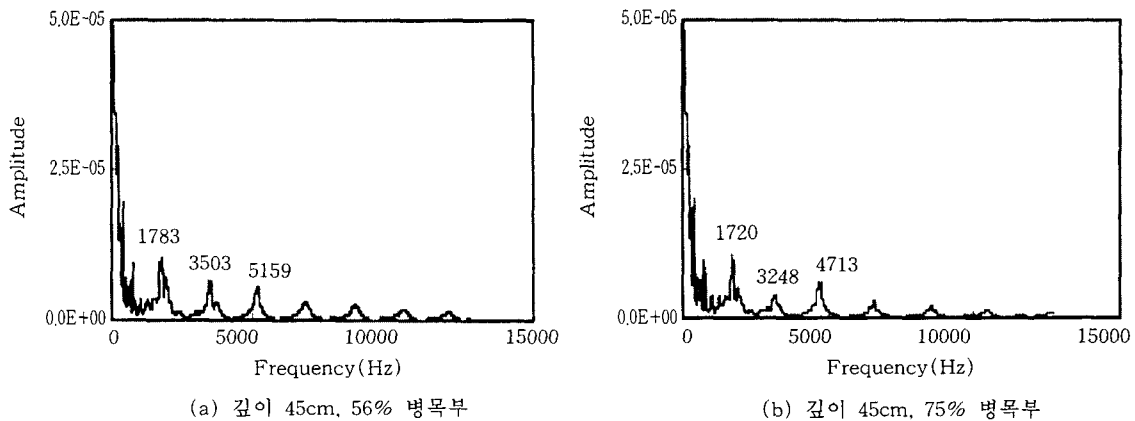


그림 13. 지반중 부재내의 병목부 크기 변화에 따른 결과 비교

주파수는 1783Hz와 1720Hz로 나타나고, 결함이 없는 경우보다 약간 감소한 값을 보인다.

결함의 위치에 대한 주파수는 75%의 충분한 상대면적을 가진 경우에만 4713Hz로 나타나고, 깊이 0.40m 지점에 결함이 존재한다고 추정할 수 있다. 지반 중에 존재하는 실제 말뚝 기초에 병목부가 존재하는 경우 공기 중에서의 마

분에 불량층이 존재하는 부재의 경우를 살펴보면 그림 14와 같다. 두께 0.15m, 전단파속도 750m/s의 불량층을 0.70m 지점에 배치한 경우와, 같은 두께의 전단파속도가 450m/s인 불량층을 선단부에 배치한 경우, 부재의 길이에 대한 공진주파수는 공기 중에서의 1054Hz, 1214Hz보다 작은 958Hz로 산정되기는 하나, 두

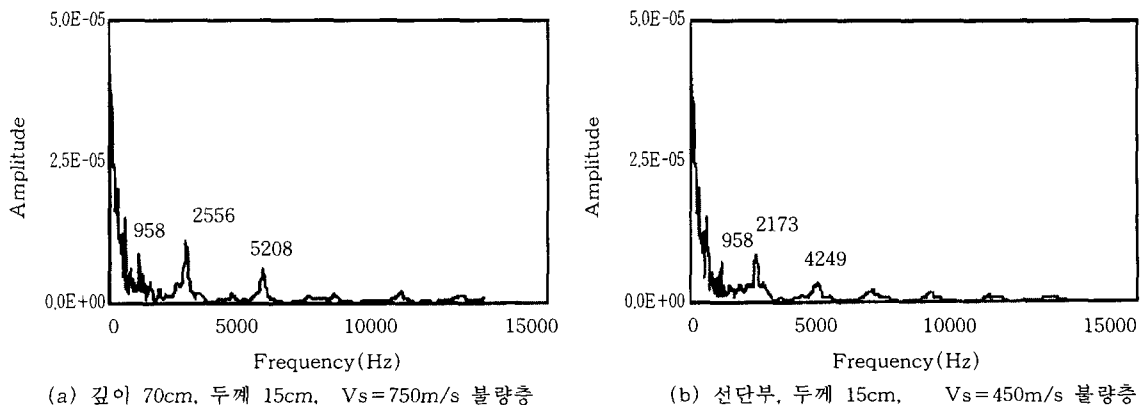


그림 14. 지반중 부재내의 중간부 및 선단부 불량층에 따른 결과

번째 공진주파수에 비해 작은 에너지를 갖는 것으로 나타난다. 불량층의 위치에 대한 공진주파수는 두 경우 모두 공기 중에서와 같은 값 2556Hz, 2173Hz를 발현한다.

5.3 암반 위의 콘크리트 부재

5.3.1 결함이 없는 경우

일정한 강성을 가진 매질이 좁은 단면에서 넓은 단면으로 증가되는 경우, 단면의 면적이 증가한 부분은 상대적으로 강성이 증가되는 효과를 갖게 된다. 따라서, 암반 위에 존재하는 말뚝의 경우 암반의 강성이 콘크리트와 비슷하거나 크지 않은 연암인 경우에도 수평방향으로

무한히 넓은 면적의 매질을 형성하므로, 말뚝보다 강성이 큰 고정면을 형성하게 되어 자유단-고정단의 경계조건을 가지게 된다. 이에 따라 식 3을 이용하여 부재 길이에 대한 공진주파수를 950Hz, 2850Hz, 4750Hz로 구할 수 있다.

앞의 경우와 동일한 물성치인 밀도 1800kg/m^3 , 포아송비 0.3, 전단파속도 100m/s 의 지반에 둘러싸이고, 밀도 2900kg/m^3 , 포아송비 0.2, 전단파속도 2000m/s 인 암반 위에 지지되어 있는 결함이 없는 콘크리트 부재에 대해 결과를 산정하였다. 그림 15에서 나타난 바와 같이 공진주파수는 895Hz, 2620Hz, 4345Hz로 나타나 식 3에서 구한 공진주파수보다 약간 작은 값으로 발현된다. 이때 선단부가 고정단의 경계조건을 가지므로 2차, 3차 공진주파수 2620Hz, 4345Hz는 1차 공진주파수 895Hz의 각각 약 3배와 5배를 이루게 된다.

5.3.2 결함을 가진 경우

암반 위에 지지된 콘크리트 부재 내에 크기가 다른 병목부를 배치한 결과는 그림 16과 같다. 상대면적이 56%의 크기가 작은 병목부의 경우에는 결함의 위치에 대한 공진주파수는 나타나지 않고, 부재의 길이에 대한 공진주파수 828Hz와 그 3배, 5배수인 2548Hz, 4363Hz를 발현한다. 이 경우에도 병목부에 따른 전파속도의 감소현상으로 결함이 없는 부재의 경우보다

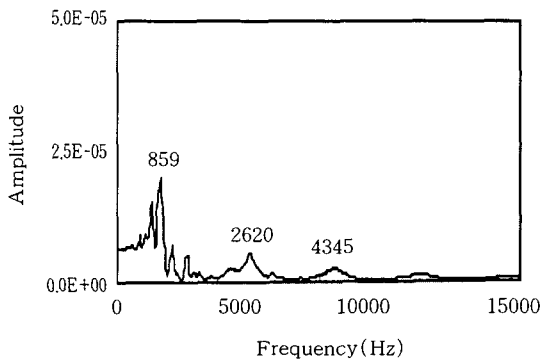
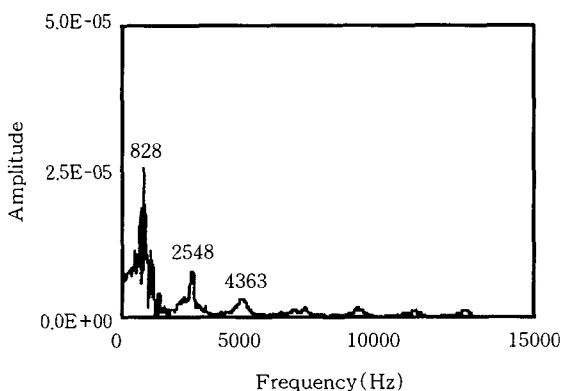
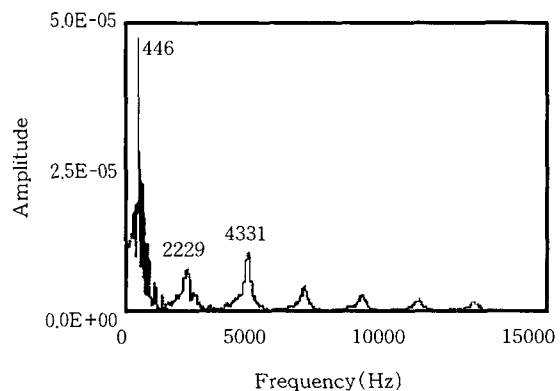


그림 15. 암반 위에 지지된 경우의 결과



(a) 56% 병목부



(b) 75% 병목부

그림 16. 암반 위 부재내의 병목부 크기 변화에 따른 결과 비교(깊이 0.45m)

감소된 공진주파수가 산정된다.

반면에 상대면적 75%의 병목부에 대해서는 부재의 길이에 대한 공진주파수가 현저히 줄어든 446Hz으로 나타나고, 다음으로 큰 에너지를 갖는 공진주파수 4331Hz로부터 결함의 위치를 추정할 수 있다. 이로써, 크기가 충분히 큰 병목부에 대해서는 공기 중이나 지반 내에 존재하는 경우와 마찬가지로 결함의 위치에 해당하는 공진주파수를 발현하나, 부재의 길이에 대한 공진주파수는 병목부에 대한 영향으로 상당히 작은 값으로 산출되므로 부재의 길이에 대한 정보를 정확히 반영하지는 못한다.

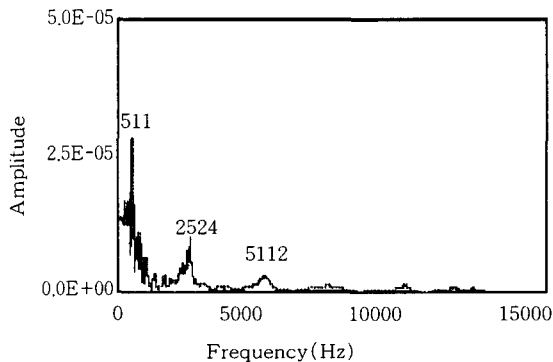
그림 17에서는 중간 부분이나 선단 부분에 불량층을 포함하는 부재의 결과를 보이고 있다. 결과에서 알 수 있듯이, 부재의 길이에 해당하는 공진주파수는 모두 511Hz로 산정된다. 그러나 불량층을 통과하는 동안의 전파속도 감소로 인해 950Hz보다 현저히 작은 값을 나타내게 된다. 또한 각각의 두번째 공진주파수인 2524Hz와 2141Hz는 첫번째 공진주파수 511Hz의 배수가 아닌 각 결함의 위치에 대한 공진주파수를 나타내게 되고, 세번째 공진주파수인 5112Hz, 4249Hz는 각각 두번째 주파수 2524Hz, 2141Hz의 2배수로 발현된다. 즉, 결함이 없는 경우와 비교하여 결함에 대한 공진주파수가 지배적으로 나타나게 되고, 이에 따라 불량층의

위치를 추정할 수 있다.

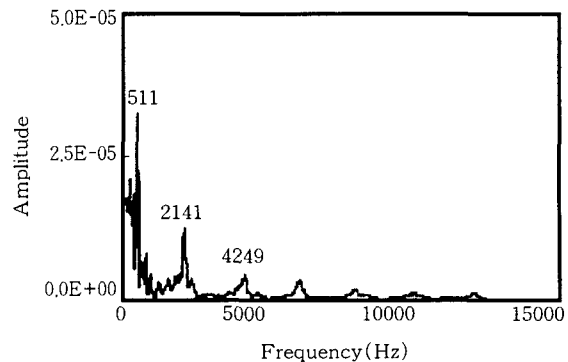
6. 결론

공기 중이나 지반 내 또는 암반 위에 존재하는 콘크리트 말뚝에 병목부와 공극, 불량층의 결함을 배치하여 수치해석을 통한 충격반향기법의 적용성을 살펴보았다. 본 논문에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 무결함 부재의 경우 충격반향기법의 주파수영역 분석을 이용하여 부재 길이의 측정이 가능하였다. 또한 무결함 부재의 결과를 기준으로 부재의 결함 유무를 판단할 수 있다.
- 2) 병목부 및 불량층을 가진 부재의 경우, 결함에 의한 전파속도 감소효과로 인하여 부재 길이에 대한 공진주파수가 결함이 없는 경우보다 작은 값으로 산정되어, 이로부터 환산된 부재의 길이를 추정하는 데에는 오차가 따르게 된다. 한편, 결함의 위치에 대한 공진주파수는 결함의 크기가 상대면적 50% 이상으로 증가하고, 결함의 위치가 선단부에 근접하지 않는 경우에 그 위치의 판별이 가능해진다.
- 3) 지반내 말뚝이 존재하는 경우에서는, 가해진 충격 에너지가 주위지반으로 소산되어 전반적으로 작은 에너지의 공진주파수를 나타낸다. 한편 결함에 대한 반응은 공기중 부재의



(a) 깊이 70cm, 두께 15cm, $V_s=750\text{m/s}$ 불량층



(b) 선단부, 두께 15cm, $V_s=450\text{m/s}$ 불량층

그림 17. 암반 위 부재내의 중간부 및 선단부 불량층에 따른 결과

경우와 유사하다.

4) 암반 위에 지지된 부재는 암반과의 인접면이 고정단을 형성하여 부재의 길이에 대한 고차 모드의 공진주파수가 3배, 5배로 증가한다. 결함이나 불량층이 존재하는 경우에는 부재 길이에 대한 공진주파수가 급격히 감소하고 결함 위치에서 자유단 거동을 하여 고차 모드의 공진주파수가 2배수로 발현된다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단의 목적기초 특정연구(98-0601-0201-3) 연구비 지원과, 한국과학기술원 기관고유사업의 연구비 지원으로 수행된 연구 결과의 일부로 감사를 포함합니다.

참고 문헌

1. 우제윤, "비파괴 시험 기법을 이용한 지반조사와 토건구조물의 안전진단 및 품질관리 : 비파괴 시험기술을 이용한 현장타설 말뚝의 품질관리",

한국지반공학회 전문가 초청 학술 세미나, 1995.

2. Yun, C .B., Kim, J. M. and Hyun, C. H., "Axisymmetric Elastodynamic Infinite Elements for Multi-layered Half-space," Int. J. Num. Mrth. Engng., 1995, 38, 3723-3743

3. Carino, N. J., Sansalone, M., and Hsu, N. N., "Point Source - Point Receiver Technique for Flaw Detection in Concrete," ACI JOURNAL , Proceedings V. 83, No. 2, Apr. 1986, pp. 199-208

4. Lin, Y., 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.

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

6. 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.

(접수일자 1999. 1. 6)