

Simulation에 의한 콘크리트 구조물의 모형계산

김용인*, 손권익**, 변중무***, 서백수***

* 강원대학교 대학원 지구시스템공학과

** 강원대학교 산업공학과

*** 강원대학교 지구환경공학부

1. 서론

콘크리트 구조물의 태동기라고 볼 수 있는 60년대 초 이후 40여년이 경과된 지금 콘크리트 구조물의 보수 작업 및 재건축이 본격화 되었고, 성수대교 붕괴사고와 이후 연속적으로 발생한 사회적 재난으로 인하여 우리나라의 기존 콘크리트 구조물의 유지관리 및 안정성의 확보가 중요한 과제로 부각 되고 있다(심옥진, 1995, 안제훈, 2002).

이와 같은 이유로 수치 모델링을 통하여 콘크리트 구조물에 이상대를 설정하고 정밀 지반 조사에 응용되는 탄성과 토모그래피 원리를 이용하여 그 결과를 해석하고자 한다.

본 연구에서는 기존의 역산기법인 초동주시 역산법과 전파형 역산법에서 모형계산을 하여 두 역산 기법의 결과의 비교를 시도하였으며, 전파형 역산법에서 초기치의 영향 이외에 다른 변수들의 영향을 찾기 위해서 전파형 역산법에서 모형 계산을 시도하였다. 그리고 전파형 역산법의 초기치 문제의 해결을 위해서 초기치의 입력을 생략하는 보정형 전파형 역산법을 이용하여 모형계산을 시도하였다.(장선웅, 2001)

2. 이론적 고찰

2.1 탄성과 토모그래피의 기본 원리

탄성과 토모그래피 방법은 그 대상이 인체와 같은 소규모의 대상체가 아니기 때문에 자료의 측정에 있어서 많은 제약이 수반된다. 먼저 대상 단면의 정보를 얻기 위해 송신원으로 탄성파를 사용하며, 수신장치로는 탄성파 에너지를 측정할 수 있는 지오폰(geophone) 혹은 하이드로폰(hydrophone)을 사용하며, 측정되는 자료의 양도 의학분야에서 사용되는 자료에 비하여 상대적으로 작다. 일반적인 정밀지반조사에서 사용되는 탄성파 토모그래피의 경우, 대상 단면 하나에 대하여 20~60개의 송신원에 대하여 20~60개의 수신장치를 사용하므로 약 400~3600개 정도의 자료가 이용된다.(탐사목적에 따라 송신원-수진기 조합의 수는 가변적이거나 이는 경제적 시간적 공간적 제약을 받는다.) 따라서, 의학의 CT에 비하여 탄성파 토모그래피 기법은 전문적인 해석과정이 필요하다.

탄성파 토모그래피의 역산기법에는 초동주시 역산법과 전 파형 역산법이 있다.

2.2 보정형 역산법

전파형 역산법은 적당한 초기치를 주어야만 하므로, 본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위해서 다음과 같은 식으로 보정을 시도하였다. 보정된 역산 결과치를 I_{corr} 이라고 하면

$$I_{corr} = I_{cal} + \alpha + \beta(B_{theo} - B_{cal}) \quad (1)$$

와 같이 표현되며 이때 I_{cal} 은 계산된 역산 결과치, B_{theo} 은 공동이 존재하지 않는 경우의 콘크리트의 이론속도, B_{cal} 은 공동이 존재하지 않는 경우의 콘크리트의 계산속도이다.

이때 α , β 는 상수이며, 식 (2)와 같이 보정된 결과치이다. 이론치의 차의 제곱의 합을 최소화 시키는 값에 의해서 구할 수 있다.

$$\text{Min}(I_{corr} - I_{theo})^2 = \text{Min}_{\alpha, \beta} (I_{cal} + \alpha + \beta(B_{theo} - B_{cal}) - I_{theo})^2 \quad (2)$$

3. 기존 역산법에 의한 모형 계산

가로 40cm×세로 130cm의 2차원 콘크리트 이론모형을 만들었으며, 가로 40개, 세로 130개의 격자를 만들어 각각 격자의 크기를 1cm로 하였다. 구조물 모형의 좌측에는 송신기, 우측에는 수신기를 각각 41개씩 배열하였으며 콘크리트 탄성과 속도는 3,700m/sec, 공동의 속도는 370m/sec로 가정하였다.

그림 1의 (a),(b)는 동일한 교각모형에 공동이 1개 존재할 경우 유한 요소법을 이용한 peak 1에 의한 초동주시와 각각 ART, LSQR 역산법에 의한 토모그래피이며, (c)는 2개의 공동이 존재할 경우 유한요소법을 이용한 peak 1에 의한 초동주시와 역산법 중의 하나인 LSQR 역산법에 의한 토모그래피이다. 공동이 1개 존재할 경우에는 주위에 약간의 잡음은 존재하지만 공동의 위치 및 크기가 비교적 정확하게 나타남을 알 수 있다. 그러나 2개의 공동이 존재할 경우에는 중앙에 커다란 공동이 1개 존재하는 것처럼 나타나는 것을 볼 수 있다.

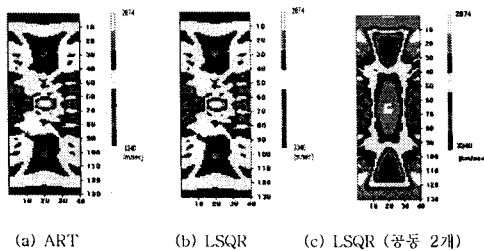


Fig. 1. 초동주시 역산법에 의한 결과

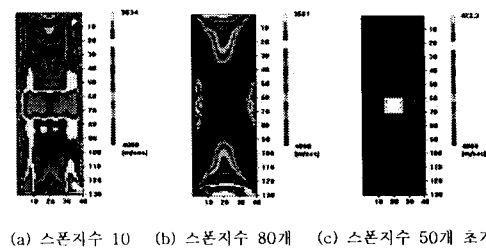


Fig. 2. 전파형 역산법에 의한 결과

초동주시역산법과의 비교를 위하여 전파형 역산을 시도하였으며, 그림 2는 초기치 및 스펙트럼 수에 따른 계산치의 차이를 알기 위하여 계산한 결과이다.

그림 2는 모두 송수신기 수를 41개, 송수신기 간격은 각각 3cm, 콘크리트의 전파속도는 3,700m/sec, 공동의 전파속도는 370m/sec로 가정하였다. 인위적인 경계면에 의한 반사파를 제거하기 위하여 스펙트럼 수를 10~80개 까지 증가시키면서 계산을 하였다.

그림 2(a),(b)는 모암의 초기속도치만 주었고, 그림 2 (c)는 콘크리트 및 공동의 초기속도치를 입력시켰다. 계산 결과를 보면 공동의 초기속도치를 입력시키지 않은 그림 2의 (a),(b)는 이론모형과 현저한 차이를 보인다. 그러나 공동의 초기속도치를 입력한 그림 2 (c)의 경우는 이론모형과 가까운 결과를 나타냄을 볼 수 있다. 반사파 제거를 위한 스펙트럼 수에도 계산 결과의 차이는 다소 있지만 전파형 역산의 경우 초기에 입력해 주는 초기 추정 속도에 따라 역산의 결과가 현저한 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

4. 전파형 역산법에 의한 모형 계산

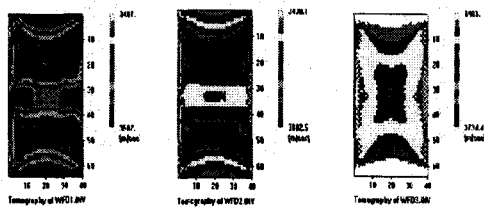
4.1 입력 파형이 조화파(harmonic wave)일 경우의 모형계산

계산시간의 절약 및 새로운 실험모형과의 자료해석 비교를 위하여 계산 모형 크기를 가로 40cm, 세로는 이전 모형의 크기의 1/2인 65cm로 축소하고 공동 대신 6cm×40cm의 stripe 모형이 있다고 가정하여 계산을 행하였다. 입력파형은 기존의 역산 프로그램에서 사용된 조화파(harmonic wave)일 경우로 계산을 행하였다. 초기 속도 입력치의 영향을 없애기 위해서 초기치 입력을 하지 않고 계산을 시도하였다.

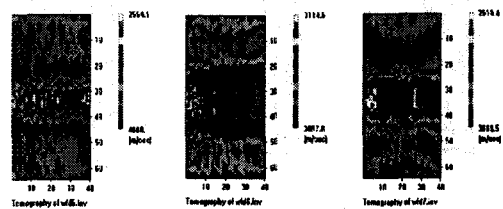
(1) 주파수의 변화에 의한 계산 결과

그림 3은 파형의 주파수를 각각 (a) 250Hz, (b) 500Hz(기존), (c) 1000Hz으로 하여 계산해 본 결과이다. 기존의 모형계산에서는 500Hz의 주파수를 사용하였다. 그림 3(a)는 주파수가 250Hz일 때의 토모그래피인데 이상대의 위치는 비슷하지만 이상대의 속도가 이론 모형과 많은 차이를 보이고 그림 3(b)는 주파수가 500Hz 일때의 토모그래피인데 가장 이론 모형에 가까워 보인다. 이는 역산 프로그램에서 송신 파형의 주주파수가 500Hz의 파형이기 때문으로 생각된다. 그림 (c)는 이상대의 위치를 찾지 못한다.

역산 프로그램상의 송신 파형의 주파수의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. 송신파형의 주파수에 따라서 모형 계산의 결과가 현저하게 변하는 것으로 볼 때 주파수가 전파형 역산의 결과에 영향을 많이 주는 것으로 생각된다.



(a)250Hz (b) 500Hz (c) 100Hz
Fig. 3. 주파수 변화에 의한 전파형 역산법의 결과



(a) 교차주기 25 (b) 교차주기 50 (c) 교차주기 100
Fig. 4. 교차주기 변화에 의한 전파형 역산법의 결과.

4.2. 입력 파형이 사각파(square wave)일 경우의 모형계산

입력 파형을 조화파(harmonic wave)에서 사각파(square wave)로 변형하여 모형계산을 시도하였다. 입력 파형을 조화파(harmonic wave)로 하였을 때의 모형계산 결과와 입력 파형이 사각파(square wave)일때 지속시간과 진폭을 변화해 가면서 모형 계산을 한 결과를 비교하였다. 그리고 조화파(harmonic wave)에서 모형계산에 영향을 미치는 것으로 보였던 변수가 주파수였던 점에 착안하여 사각파형(square wave)에서는 교차주기를 변화하여 모형계산을 시도하였다.

역산 반복수행 횟수는 10번으로 하였고 주파수는 500Hz로 하여 계산하였다.

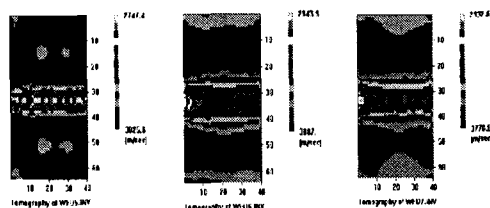
(1) 교차주기의 변화에 따른 계산 결과

그림 4는 교대로 부호가 바뀌는 사각파형(square wave)의 경우에 교차주기를 각각 25, 50, 100으로 변화하면서 계산하였다. 진폭은 0.001로 하였다. 실험결과를 보면 교차주기에 따라 결과가 많이 다른 것을 볼 수 있다. 비교적 결과가 잘 나오는 교차주기가 있는 것 같은데 교차주기가 그림 4(a)의 경우인 교차주기가 25인 경우와, 그림 4(c)의 경우인 교차주기가 100인 경우가 비교적 잘 나오는 것 같고 그림 4(b)는 좋은 결과가 나오지 않았다.

(2) 입력 파형의 변화에 의한 계산

그림 5는 교대로 반복하는 사각파형(square wave)로 준 결과 경계면이 좋지 않아 진폭의 변화를 부드럽게 하면 경계면이 나아질 것으로 예측되어 삼각형 모양의 파형을 주었다. 최대값은 +0.002로 하여 중간값은 선형으로 계산하여 삼각파형을 만들었다. 교차주기는 50, 100, 200으로 하였다. 그림 5(a)의 경우가 이상대의 크기나 속도가 이론 모형과 가장 일치하는 것을 볼 수 있다. 삼각파형에서 교차주기 50은 사각파형의 교차주기 25에 해당한다.

그림 5(b)와 그림 5(c)의 경우도 이상대를 잘 표현하고 있으나 이상대의 크기와 속도가 그림 5(a)만큼 잘 표현되지는 않는다.



(a) 교차주기 50 (b) 교차주기 100 (c) 교차주기 200

Fig. 5. 삼각파형에 의한 전파형 역산법

4.3. 입력 파형이 삼각파(triangular wave)일 경우의 모형계산

4.2의 (2)실험에서 삼각파형을 만들어 입력하였을 경우 역산 결과 값이 좋아 이를 검증하기 위하여 모형계산을 시도하였다. 이상대의 모양을 바꾸어 공동모양으로 하였으며, 두개의 공동이 있을 때를 가정하여 모형 계산을 시도하였다. 계산 모형의 크기는 동일하게 가로 40cm X 세로 65cm 로 하였으며 공동의 크기는 6cm X 6cm로 하였다.

초기 추정값은 3500m/s로 하였으며, 진폭은 -0.0002 에서 +0.0002로 하여 계산을 시도

하였으며 삼각파형의 주기는 50으로 하였다.

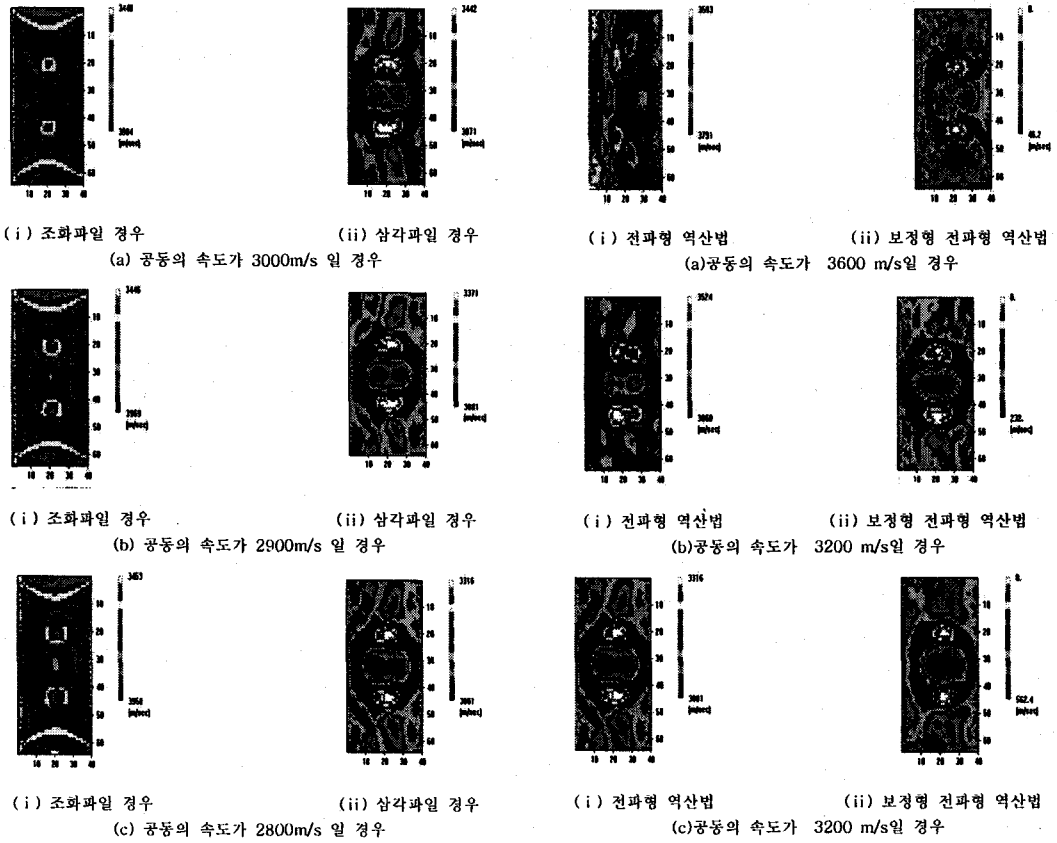


Fig. 6. 전파형 역산법에서 조화파와 삼각파의 비교

Fig. 7. 전파형 역산법과 보정형 전파형 역산법의 비교

그림 6은 조화파(harmonic wave)와 삼각파(triangular wave)의 비교를 위해 모든 조건을 동일하게 한 뒤 입력파형만을 달리 하여 모형 계산의 결과이다. 왼쪽은 조화파(harmonic wave)의 모형계산 결과이고 오른쪽은 삼각파(triangular wave)의 모형계산 결과이다.

그림을 보면 조화파일 경우보다 삼각파일 경우가 콘크리트와 공동의 속도를 이룬 속도가 가깝게 나타내고 있으며 콘크리트와 공동의 속도의 차이가 적을때도 삼각파형의 경우가 공동을 잘 나타내고 있는 것을 볼 수 있다.

5. 보정형 전 파형 역산법에 의한 모형 계산

전파형 역산법에서 입력 파형이 조화파(harmonic wave)일때보다 삼각파(triangular wave)일때 모형계산의 결과가 더 이룬 모형에 비슷하다는 것을 모형계산을 통해 고찰하였다. 하지만 전파형 역산법에서는 초기 추정 속도에 따라 모형 계산 결과가 현저히 달라지는 것을 볼 수 있었다.

그림 7은 전 파형 역산법에서 초기 추정 속도 입력을 생략해도 되는 전 파형 보정형 역

산법을 이용하여 모형 계산을 하고 이 결과와 전 파형 역산법과 비교하여 보고자 모형계산을 시도한 결과이다. 두 역산법 모두 입력 파형은 삼각파(triangular wave)를 이용하였고 다른 모든 조건은 동일하게 하여 모형 계산을 시도하였다.

그림 7(a)에서 콘크리트와 공동의 속도 차이가 적을 때 전파형 역산법에서는 공동의 위치를 나타내지 못하였고 보정형 전파형 역산법에서는 공동의 위치를 찾을 수 있었다. 그림 7(b),(c)도 전파형 역산법보다 보정형 역산법의 경우가 콘크리트의 속도와 공동의 속도와 공동의 크기등이 이론모형과 일치하는 것을 볼 수 있다.

6. 결론

수치 모델링을 통하여 콘크리트 구조물에 이상대를 설정하고 정밀 지반조사에 응용되는 탄성과 토모그래피를 이용하여 초동주시 역산법과 전파형 역산법 그리고 보정형 전파형 역산법으로 모형계산을 행하였다. 초동주시 역산법에 의한 모형 계산에서는 공동이 1개 존재할 경우에는 주위에 약간의 잡음은 존재하지만 공동의 위치 및 크기가 비교적 정확하게 나타남을 알 수 있다. 그러나 2개의 공동이 존재할 경우에는 중앙에 커다란 공동이 1개 존재하는 것처럼 나타나는 것을 볼 수 있었다. 전 파형 역산법에 의한 모형 계산에서는 초동주시 역산법보다 분해능이 뛰어났으며, 역산 초기에 입력해 주는 초기 추정 속도에 따라 역산의 결과가 현저한 차이를 보여주었다. 전 파형 역산법에 의한 모형 계산 중 입력 파형이 조화파일 경우의 주파수는 초기의 입력 파형의 주파수에 큰 영향을 받았다. 전 파형 역산법에 의한 모형 계산 중 입력 파형이 조화파일 경우 교차주기를 변화하면서 모형 계산을 하였을 때 좋은 결과를 보였지만 경계면이 좋지 않아 진폭의 변화를 부드러운 삼각파형을 입력파형으로 사용하였다. 전 파형 역산법에 의한 모형 계산 중 입력 파형이 삼각파일 경우의 모형 계산에서는 조화파와 동일 조건으로 계산하여 비교하였을 때 조화파보다 더 좋은 결과를 보여주었다. 전 파형 역산법의 경우 초기 추정 속도를 계산해서 입력해 주어야 하는 번거로움이 있는데 이를 없애기 위해서 초기 추정 속도를 생략해도 되는 보정형 전파형 역산법을 적용하여 모형 계산을 시도하였다. 입력 파형을 삼각파형을 하여 기존의 전 파형 역산법과 비교하여 본 결과 기존의 전 파형 역산법의 경우보다 보정형 전 파형 역산법의 경우가 이론 모형에 가까움을 알 수 있었다.

참고문헌

- 심옥진, 1995 성수대교/한강교량의 안전진단과 교훈 한국강구조 학회지, Vol.7 , No1, 25-30
- 안제훈, 2002, 충격반향기법의 주파수 영역 해석을 이용한 구조물 안전진단에 관한 연구:공학석사학위논문, 강원대학교
- 장선용, 2001, 다양한 초동주시 역산법을 이용한 콘크리트 구조물내의 결함탐지에 관한 연구:공학석사학위논문, 강원대학교