

이산 웨이블릿 변환을 적용한 수정충격반향기법의 해석 Analysis of Modified Impact Echo applying Discrete Wavelet Transform

추진호¹⁾, Jin-Ho Choo, 조성호²⁾, Sung-Ho Joh, 황선근³⁾, Seon-Keun Hwang

¹⁾ 한국시설안전기술공단 직원, Employee, Korea Infrastructure Safety and Technology Cooperation

²⁾ 중앙대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor,
Dept. of Civil Engineering, ChungAng Univ.

³⁾ 한국철도기술연구원 책임연구원, Chief Researcher, Korea Railroad Research Institute

개요(SYNOPSIS) : Impact Echo method has been successful in detecting a variety of defects in concrete structure. This study has the objectives to show important aspects of applying the Discrete Wavelet Transform(DWT) to signal processing of Modified Impact Echo(ModIE) Measurement systems and to the understanding of the seismic wave propagation. The data of ModIE were processed by DWT and compared with the results of conventional ModIE Analysis. Although it is inconsistent in the evaluated thickness of concrete lining, the DWT provides the features of separation, synthesis and de-noising in the original signal. The application of technique by wavelet was explained numerically with ABAQUS and performed experimentally with a real scale model in this work. Further works on the possible ways for creating new mother wavelet are specially needed for the enhancement of seismic signal analysis.

주요어(Key words) : Wavelet, Discrete Wavelet Transform(DWT), Modified Impact Echo(ModIE),

1. 서론

지반조사에 사용되는 대부분의 실내·외 실험의 자료는 컴퓨터를 이용하여 저장 및 보존되고 있으며, 인터넷과 네트워크의 발달로 인하여 이러한 자료의 송·수신을 좀더 빠르게 전달하기 위해 자료의 압축이라는 필요성을 느끼게 되었다. 자료를 압축한다는 것은 하나의 신호를 나타냄에 있어 동일한 정보를 지니는 상태에서 그 표현의 방식에 간결성을 지니게 하는 것이다. 이산웨이블릿 변환(Discrete Wavelet Transform)은 하나의 신호에 대하여, 그 신호의 근간(Approximation)이 되는 부분과 상세한 성질(Detail)을 나타내는 부분의 두 영역으로 분할이 가능하다. 실제로 연속 웨이블릿 계수를 구한다는 것은 샘플링이 연속적이란 의미를 내포하고 있으나 대부분의 범용 오실로스코프나 다른 자료 획득장비는 일정한 시간 간격으로 측정하는 이산화된 상태(digitalized)를 의미한다. 이러한 자료에 대한 연속웨이블릿(Continuous Wavelet)의 해석은 실제로 상당히 많은 작업량을 만들어 다소 번거로우며 더 많은 시간이 소요된다. 이러한 이유로 같은 정확도를 제시하는 결과를 주면서 해석 양을 줄일 수 있는 방법을 찾게 되었다. 그것이 바로 이산 웨이블릿 변환이다. 이산웨이블릿 변환의 "이산" 되었다는 의미는 보편적인 내용과는 달리 등간격으로 표현된 하나의 신호를 2의 지수승(dyadic)마다 특정 주파수 대역의 필터를 이용하여 해당 구간의 신호에 대한 정보를 분석하여 상관되는 계수를 얻어 원래의 신호를 표현하는 방식이다. 본 연구에서는 이산웨이블릿을 이용하여 충격반향기법으로 수행된 실험 자료를 높은 해상도를 나타내주는 모웨이블릿(Mother Wavelet)을 선정한 이후에 신호를 분석하여 보다 정밀한 결과를 얻고자 하였다. 또한, 충격반향기법의 향상된 결과를 도출할 수 있는 수정충격반향기법의 신호 처리에 이산 웨이블릿을 적용하여 그 적용성을 평가하고자 하였다. 수정충격반향기법은 하나의 가진에 대하여 두 개의 감진기에서 신호를 취득하여 변위의 크로스파우워 스펙트럼을 이용하여 보다 높은 정밀도의 결과를 도출한 기법이다(2001, 김기봉 등).

2. 이산 웨이블릿 변환(Discrete Wavelet Transform)의 소개

연속 웨이블릿 변환은 분석창의 스케일을 변화시키며, 매 스케일에 대해 시간에 따라 창을 이동시키고, 신호를 곱한 다음에 모든 시간에 걸쳐서 적분을 하는 과정을 거치게 된다. 이와는 달리 이산 웨이블릿 변환은 이산화된 신호 중에서 2의 지수증마다 주파수의 필터들을 이용하여 신호를 분석하는 방법이다. 즉, 고주파를 분석하기 위해 2의 지수승 배열의 하이패스(high-pass) 필터 시리즈를 이용하여 신호를 분석하여 신호의 상세한 성질을 표시하는 값과, 2의 지수승 배열의 저주파수를 분석하기 위해 로우패스(low-pass) 필터 시리즈를 통과시킨 신호의 근간을 표시하는 값으로 나누어 분석하게 된다. 신호의 상세한 성질을 나타내는 정도에 따라 측정되는 신호의 해상도는 필터링 작용에 의해 변화되고, 스케일(Scale)은 앨리어싱이 없도록 한 상태(anti-aliasing)의 범위에서 업 샘플링(upsampling)과 다운 샘플링(downsampling or subsampling)에 의해 변화된다(Robi, 2001; 조현숙, 2000).

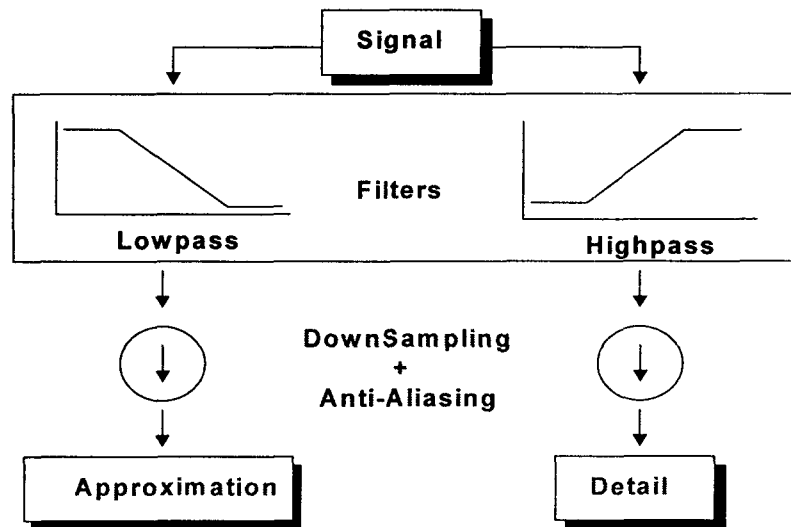


그림. 1 이산 웨이블릿 변환의 개념도(Michel et al, 1997)

하나의 신호에 대한 이산웨이블릿 변환은 그림. 1에서와 같은 기본적인 과정을 수행하게 된다. 먼저, 신호는 로우 패스필터와 하이 패스 필터를 통과하여 신호의 근간이 되는 부분과 상세한 성질을 나타내는 부분으로 분해된다. 이때 신호의 근간은 높은 스케일에 해당되는 저주파 성분으로 이 부분이 손상되면 마치 사람의 목소리가 동물의 소리와 같이 되어버리는 경우와 같으며, 상세한 성질은 낮은 스케일 성분에 해당하는 고주파 성분으로 신호의 상세한 성질을 나타내며 목소리의 경우 음색이나 어조를 느낄 수 있도록 하는 부분이라 할 수 있다(Michel et al, 1997)

이렇게 하나의 신호가 두 개의 하부의 값(subband coding)으로 표현되므로 실제로 해석된 값의 개수는 원 신호의 2배가 될 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 필터링 이후에는 다운 샘플링을 하게 된다. 다운 샘플링이란 합은 필터된 신호 중에서 매 2번째의 값을 버리고 홀수 번째의 값만을 취하여 신호의 개수를 반으로 줄이는 방법이다. 이와는 달리 매 신호마다 0의 값을 추가시키는 업샘플링을 이용하여 다운 샘플링된 신호를 특정 하위 대역(subband)의 상세한 성질을 제거한 이후에 다시 재생할 수 있다. 이것은 이산 웨이블릿 변환의 특징으로, 본 연구에서 그림. 1의 과정을 반복하는 그림. 2와 같은 이산 웨이블릿 변환의 다중레벨 분석을 실시하였다.

다중레벨 분석(Multiple-Level Decomposition)을 이용한 기존의 지질학 분야에서의 연구는 임의의 주파수 성분(노이즈, 구조적 불균질성, Ground roll)을 제거한 후에, 보다 순수한 신호만으로 신호를 재생하여 탄성파의 해석에 적용하고자 했다(최현석, 2000).

그림. 2는 이산 웨이블릿 변환의 다중레벨 분석을 보이고 있다. 실제의 해석의 대부분은 상용프로그램인 Matlab®의 윈도우 형식으로 된 “wavemenu” 도구를 이용하여 쉽게 분석할 수 있으며, 그림. 3과 같이 특정신호를 제외하거나 합성이 가능하다. 제공되는 프로그램상의 기본 구조는 앞서 기술한 다운 샘플링과 업 샘플링을 바탕으로 용이하게 수행할 수 있도록 되어있다.

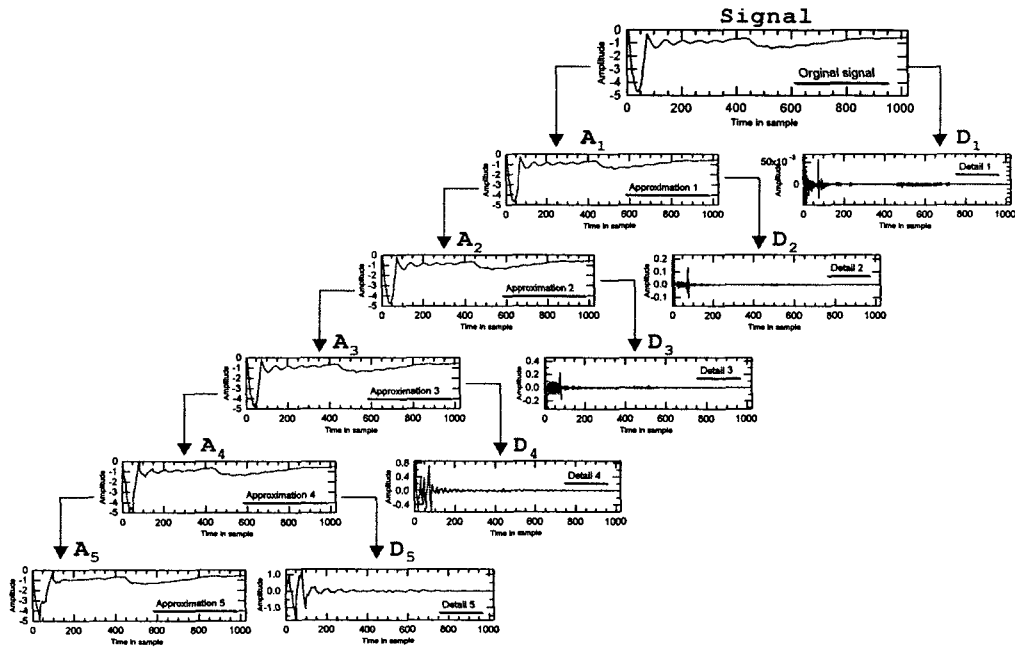


그림. 2 이산 웨이블릿 변환의 다중레벨 분석의 개념도(Michel et al, 1997)

그림. 3의 내용은 다음과 같다. 원 신호를 이산 웨이블릿 변환을 수행하면 낮은 주파수를 통과시키는 로우패스 필터와 높은 주파수를 통과시키는 하이패스 필터를 이용하여 분할한 이후에 다시 신호의 개수를 맞추기 위하여 다운 샘플링을 수행한다. 첫 번째 분석의 근간(A₁)을 다시 분할하고 다운 샘플링을 반복하면 두 번째의 근간(A₂)와 첫 번째의 상세한 성질(D₂)로 분석된다. 이러한 분할 분석(decomposition)을 통하여 웨이블릿 계수(wavelet coefficient)를 구하게 되며 이는 신호를 종류별로 나누어 놓은 것과 같은 의미를 지니며 식 (2.18)로 표현 가능하다. 이와 같이 하나의 신호는 분리된 웨이블릿 계수로 표현이 된다. 이후에, 임의의 주파수 성분을 제거하여 업 샘플링 하여 순수한 신호만을 재생할 수 있으며 식 (2) 와 같이 표현된다. 그림. 3의 생성부분(Reconstruction Inverse DWT)은 웨이블릿 계수 중에서 상세한 성질로 분리된(D₁) 부분을 100% 특정신호를 제거(De-noising)함을 의미하여 D₁의 값에 zero값을 넣고 새롭게 생성하면 생성된 신호는 특정 주파수 성분을 제외한 순수한 신호만으로 재생된 것을 나타낸다.

$$Signal = A_1 + D_1 \quad (1.a)$$

$$= A_2 + D_1 + D_2 \quad (1.b)$$

$$Synthesis Reconstruction Signal = A_2 + D_2 \quad (2)$$

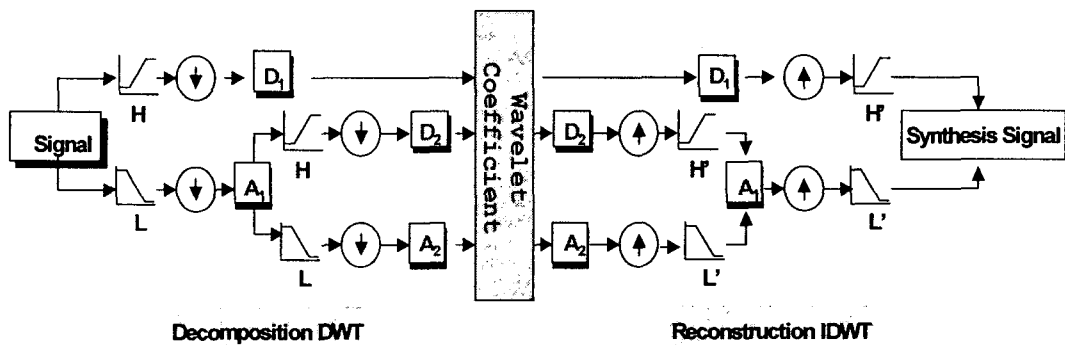


그림. 3 이산 웨이블릿 변환의 다중레벨 분석 및 재생에 관한 개념도(Michel et al,1997)

3. 유한요소 해석결과를 이용한 이산 웨이블릿 해석

콘크리트 구조물에 수행된 본 연구의 타당성을 사전 평가하기 위하여 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS 를 이용하여 모델링하였다. 그림. 4와 같이 메쉬를 생성하였으며, 총 61,969개의 요소와 62,660개의 질점으로 구성하였다. 축 대칭으로 콘크리트의 물성은 p 파의 속도 3206m/sec, 포아송 비 0.23으로, 반사면의 역할을 위한 콘크리트 하부면의 전단파 속도 100m/sec, 포아송 비 0.33로 흙을 모델하였으며, 그 밖의 반사면이 없도록 흙 하부면과 콘크리트의 우측 경계는 무한요소를 설정하였다.

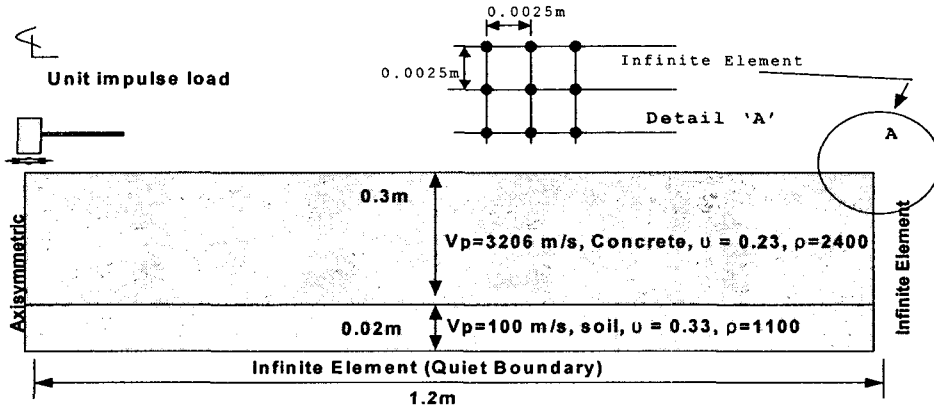


그림. 4 ABAQUS 해석시 사용된 모델의 개략도

균열이 없는 모델에서 가진점으로부터 6cm, 10cm, 14cm에서의 수신점들의 신호에 대한 이산 웨이블릿 변환을 이용하여 주파수 대역별로 신호를 분리한 후 특정 대역을 제거한 후에 다시 재생하는 방식을 통하여 충격반향 기법에 사용되는 공진 주파수의 변화에 대한 성질을 조사하였으며 본 연구에서 제안한 이산 웨이블릿 변환을 이용한 탄성과 시험결과의 적용 순서는 다음과 같다.

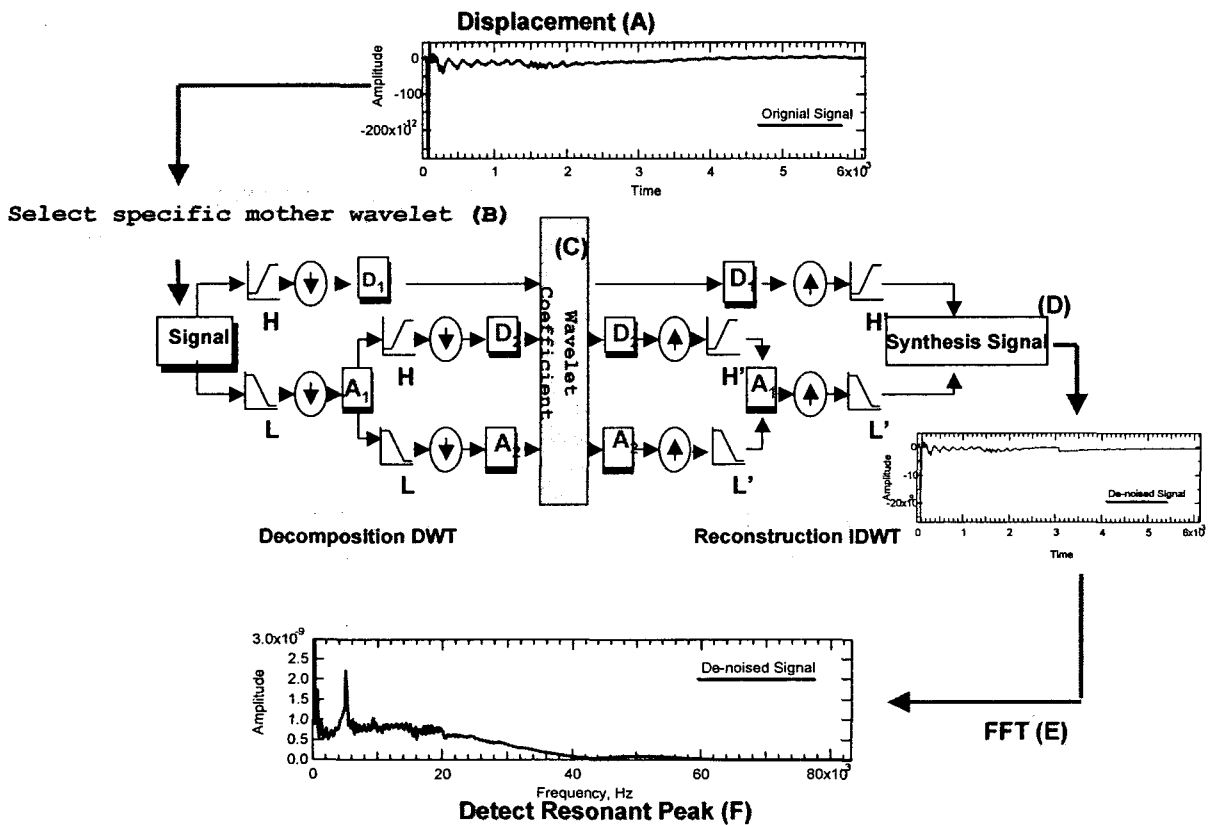


그림. 5 제안된 이산 웨이블릿 변환을 적용한 충격반향기법의 개략도

- 1) 먼저, 그림. 5의 (A)와 같은 변위에 관한 시간영역 신호를 사용한다.
- 2) 이러한 신호를 시간의 해상도가 더 좋거나, 복소수의 분석에 대한 해상도가 더 높은 정도에 따라 절절하게 모웨이블릿을 선정한다(B).
- 3) 시간 영역의 신호 중에서 낮은 주파수 성분은 로우패스 필터를 이용하고, 높은 주파수 성분은 하이패스 필터를 이용하여 신호의 근간과 상세한 성질로 나눈다. 이후에 주파수 대역을 좁더 여러 개의 좁은 영역으로 분할할 수 있으며 이는 그림. 2에서와 같이 이산 웨이블릿 변환의 다중레벨 분석을 실시하여 웨이블릿 계수를 얻게 된다(C).
- 4) 이산 웨이블릿의 가장 큰 특징으로는 이산 웨이블릿으로 분할한 상세한 성질을 나타내는 부분을 적절히 임계값(Threshold)을 선정하여 De-noise시킨 후에 신호를 재생성 할 수 있다는 점이다(D).
- 5) 마지막으로, 새롭게 생성된 신호를 푸리에 변환을 통하여 주파수 성분(E)으로 표현을 하면 특정 주파수 성분이 제거된 결과를 도출할 수 있다(F).

이와 같은 과정을 통하여 이산 웨이블릿 변환을 이용한 특정 주파수가 제거된 신호를 이용하여 수정 충격반향기법의 해석시 사용되는 공진 주파수의 변화를 파악하고자 하였다. 본 연구에서 사용된 ABAQUS 해석의 결과는 감진기의 위치가 가진점에서 6, 10, 14cm에서의 변위에 관한 시간영역의 변화와 주파수 영역에서의 변화를 나타내었으며 각 신호에 대해 IDWT가 가능한 Haar, Daubechies2, Daubechies10, Biorthogonal등의 모웨이블릿을 대역별 De-noise시켜 신호를 재생성한 이후에 푸리에 변환으로 후보 공진주파수의 변화를 검토하였다.

역 이산 웨이블릿 변환(IDWT)이 가능한 모 웨이블릿에 대하여 공통되게 상세한 성질을 나타내는 D_{10} 과 D_9 를 제거하는 경우는 공진 주파수에 영향은 거의 없게 나타나고 있으나 D_8 이하의 경우를 제거하는 경우는 원 신호의 특성을 잃게되는 결과를 보여주고 있다. 즉, D_{10} 과 D_9 까지의 성분이 주요한 특성에 영향을 주지 못하여 De-noise를 통하여 보다 명확한 피크의 해석이 가능하지만, 이외의 성분은 실제 신호에 있어서 반드시 요구되는 성분으로 판단되었다.

4. 현장 실험 결과의 이산 웨이블릿 적용

이산 웨이블릿의 적용성을 평가하기 위하여 중앙대학교에 제작된 실규모 터널벽체를 모사한 모델에서 수정 충격반향기법 실험을 수행하였다. 라이닝으로 설치된 상부 30cm 콘크리트 면 위에서, 균열이나 이상체가 없는 부분 7m에서 자료를 획득하였다.

모델실험의 결과에서 수치해석의 결과로부터 판별한 D_9 - D_{10} 의 성분을 제거하는 경우, 다른 4가지의 모웨이블릿에 비하여 Daubechies10을 사용하는 경우 그림. 7과 같이 180Hz 미만에 대하여 진폭을 크게 감소시키면서도 후보 공진 성분(6687.5Hz)에는 영향을 주지 않아 탄성파를 이용한 공진 주파수의 해석에 유용한 결과를 제시하는 것으로 판단하였으며 김기봉 등(2001)이 실시한 수정충격반향기법의 자료에 대해 Daubechies10을 적용한 결과를 DC성분의 대역을 확대하여 그림. 8에 도시하였다.

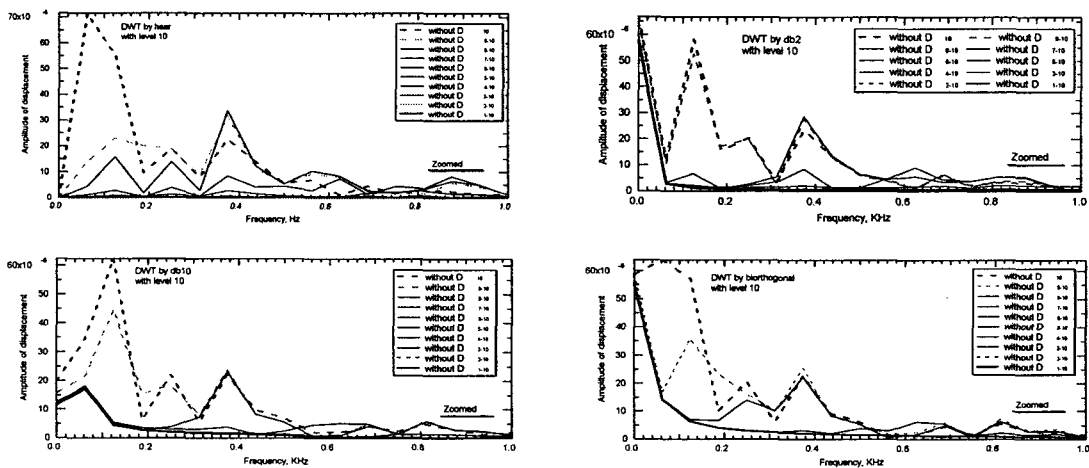


그림. 7 모델에서 수행된 수정충격반향기법 결과에 대한 4 종류의 이산 웨이블릿 해석

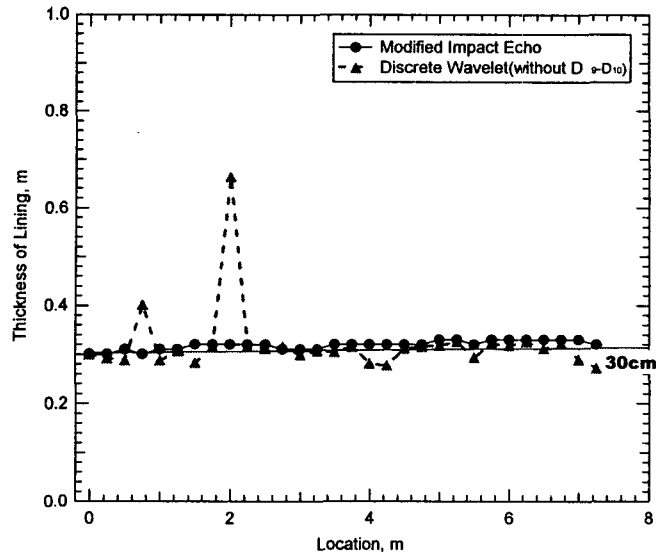


그림. 8 기존의 수정 충격반향 기법과 Daubechies10 이산 웨이블릿을 이용한 해석 결과

5. 결론

그림. 8과 같은 해석 결과를 바탕으로 현장 자료의 최적 해석을 제시하는 Daubechies10을 모웨이블릿으로 선정하였다. 기존의 수정 충격반향기법에 의해 해석된 전체의 실험 자료에 대하여 상세한 성질을 나타내는 성분 중에서 낮은 주파수의 필터로 분해된 성분(D₉-D₁₀)을 제거하여 재생성한 신호의 푸리에 변환을 사용한 후 공진 주파수를 이용하여 터널 벽체 모델의 두께를 산정하였다. 본 연구의 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 이산 웨이블릿을 이용하여 주파수 성분에 따른 신호의 분리가 가능함을 확인하였으며, 이러한 신호의 분리능을 이용하여 현장 실험 시 발생하는 Ground roll과 전기적인 노이즈를 제거될 수 있을 것으로 사료된다.
- 2) 이산 웨이블릿을 이용하여 분리된 신호의 재생성을 통하여 DC성분을 감소시킬 수 있으며 대역 또한 축소가능하나 모 웨이블릿의 설정에 따라 그 영향은 달라지는 것으로 사료된다.
- 3) 기존의 충격반향 기법에서 파악되는 공진 주파수는 이산 웨이블릿을 사용하는 경우, DC 성분의 제거로 지배 주파수를 명확하게 파악하여 해석의 정확도를 높일 수 있으나, 일정한 분해능을 보이지 않아 그림. 8과 같은 기존의 수정 충격 반향기법보다 낮은 해상도의 결과를 도출하였다. 하지만 이러한 것은 DWT의 다양한 적용성에 대한 충분한 가능성을 남겨주고 있는 부분이라 사료된다.

참고문헌

1. 김기봉, 추진호, 조성호, 조미라, "터널 콘크리트 라이닝의 구조적 특성평가를 위한 탄성과 기법, MiSA의 개발", 한국지반공학회, 봄 학술발표회, 2001. 3
2. 김응훈, "웨이블릿 변환을 이용한 구조물의 결함진단 기법연구" 2000.2, 서울대학교 기계설계학과, 공학석사학위논문
3. 조현숙(2000), "Wavelet Tutorial", 대전대학교 영상처리 연구실
4. 최현석, "Wavelet transform을 이용한 탄성과 탐사 자료처리", 2000.2, 전남대학교 자원공학과 공학석사학위논문
5. Mary J. Sansalone and William B. Streett(1997), "Impact-Echo : non-destructive evaluation of concrete and masonry", Bullbrier Press Ithaca, N.Y. 339 pp.
7. Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim, Jan-Michel Poggi, "Matlab[®]-wavelet toolbox ver6.1-user's guide version1
8. Robi Polikar(2001), "The Engineer's ultimate guide to wavelet analysis", The university of Iowa State.