한국소음진동공학회지 제 9 권 제 4 호, pp. 813~821, 1999.

〈논 문〉

증기터빈·발전기축계의 지진응답해석
(제 2 보 : 웨이블렛 해석의 적용)

Seismic Response Analysis of Steam Turbine-Generator Rotor System
(2nd Report, Application of Wavelet Analysis)

양 보 석* · 김 병 욱** · 김 용 한**
Bo-Suk Yang, Byung-Wook Kim and Yong-Han Kim

(1999년 3월 31일 접수 : 1999년 7월 10일 심사완료)

Key Words : Steam Turbine-Generator(증기터빈·발전기), Seismic Response(지진응답), Wavelet Analysis (웨이블렛 해석), Daubechies Wavelet(다우비치 웨이블렛)

ABSTRACT

This paper presents the technique using wavelet analysis to solve the seismic response of a steam turbine-generator rotor system subjected to earthquake excitations. A brief review of the wavelet transform and its discretization, time-frequency representation of the earthquake wave and the seismic response for a rotor system is presented. The Daubechies wavelet has been used for describing the time-frequency characteristics of the input and the response in case of a recorded accelerogram during 1995 Hyogoken Nanbu earthquake. Also, the results in the wavelet domain has been illustrated through comparison with the time domain simulation results.

1. 서 론

지진에 대해 안전지역으로 생각되었던 우리나라도 홍성지진 이후 규모(magnitude) 4이상의 큰 지진이 최근 많이 발생하고 있고, 한반도와 인근지역의 지진활동이 점차적으로 활발해지고 있다[1]. 따라서 지진시의 안전성 평가를 비롯한 기기설계에 있어서 내진성의 향상을 위한 내진설계가 중요시되고 있다. 특히 원자력과 화력발전설비에서는 전력의 안정적 공급을 위해 설계지침에 따른 내진설계가 요구되고 있다. 종래 용기, 배관류 및 지지구조물 등의 정지기기류에 대한 내진해석의 연구는 많이 수행되어왔으나, 회전기기에 대한 검토예는 매우 적다. 이는 회전기기의 기능상의 요구 때문에 비교적 강구조로 설계되는 경우가 많았고, 지진에 대해 강도상으로 충분한 안전여유를 가지고 있었기 때문이다. 그러나 기기의 대형화와 경제적인 측면에서의 기초대의 유연구조화가 도모되고 있어 강도평가뿐만 아니라 기능유지적 측면에서의 평가에는 내진신뢰성의 평가가 필요로 된다[2].

즉 회전체의 대형화 및 장축화에 따라 고유진동수가 저하하고, 지진과 같은 저주파수의 외력에 대한 영향을 받기 쉽게 되는 점과 유연구조지지대와의 조합에 의해 가속도응답은 작게 할 수 있으나 변위응답이 크게 되므로 지진외력에 대한 응답특성의 파악이 필요하게 된다.

전보[3]에서는 증기터빈·발전기축계의 지진응답해석을 응답 스펙트럼 해석법, 모드중첩법 및 직접적

* 정회원, 부경대학교 기계자동차공학부
** 부경대학교 대학원

분법을 이용하여 수행하였고, 최대지진응답의 비교와 내진성능을 평가하였다. 그러나 이들 종래의 해석법은 시간영역 또는 스펙트럼영역에서 독립적으로 지진외력에 대한 응답을 평가하는 것으로, 지진파와 같은 비정상파형은 시간에 따라 탁월주파수가 변화하는 특성을 가지고 있고 이를 종래의 퓨리에 변환(Fourier transform)으로는 입력지진파와 이에 대한 응답을 효과적으로 분석하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 최근 시간-주파수 해석이나 비정상파형의 해석에 효과적으로 이용되고 있는 웨이블렛 변환(wavelet transform)을 이용한 해석결과를 전보에서 구한 시간응답과 비교 고찰한다.

웨이블렛 변환이란 국부적으로 존재(let)하는 파(wave)로서, 1980년경 Morlet이 석유탐사에 사용한 것을 계기로 다중해상도해석의 개념이 확립되면서 1988년에 Daubechies 웨이블렛이 구성된 것이 신호처리분야의 폭발적인 발전의 계기가 되었다.[4] 웨이블렛 해석은 국소적인 것에서부터 주파수정보와 함께 시간 또는 위치정보를 함께 얻을 수 있는 것이 최대 장점으로, 종래의 퓨리에 해석이 주파수영역으로 변환할 때 시간정보를 잃어버리므로 특정 사건(주파수)이 일어난 시기를 알려줄 수 없는 단점을 보완할 수 있다.[5] 웨이블렛 변환에 관한 많은 연구가 최근 세계적으로 발표되고 있고, 국내에서도 관련된 연구가 보고되고 있다.[6~7] 그러나 지진응답해석에 적용된 연구는 국내외적으로 찾아보기 힘들다.

따라서 본 논문에서는 제 1보에 이어 이러한 웨이블렛의 장점을 이용하여 지진파와 지진응답파에 대해 웨이블렛 변환을 수행하고 지진파 및 지진응답의 특성분석을 통하여, 이 분야에서 유용하게 이용될 수 있음을 확인하였다.

지진응답을 해석하는 부분에 대해서는, 여러 가지의 결정론적 지진응답해석법이 있으나 실용적으로 사용되고 있는 방법으로 응답스펙트럼 해석법, 시간이력 해석법이 있다. 시간이력해석법에는 모드중첩법과 직접적분법이 있지만, 증기터빈 · 발전기와 같은 대형의 복잡한 회전기계에 대해서는 정도높은 응답해석 방법인 시간응답해석법에 의존해야 하기 때문에 본 논문에서는 Newmark-β 법에 의해 얻어진 시간응답파형을 웨이블렛해석을 위한 파형으로 이용하였다.

2. Wavelet 해석

시간-주파수 영역해석기법에는 단시간 퓨리에 변환(Short Time Fourier Transform, STFT), 위그너-빌 분포(Wigner-Ville Distribution) 그리고 웨이블렛변환등이 있다. STFT는 창함수의 창폭이 일정하므로, 시간-주파수 영역의 분해능이 항상 고정되어진다. 불확정성 관계에 의해 창폭을 축소하면 시간분해능이 높아지지만 주파수 분해능이 낮아진다. 이와같은 성질을 가진 STFT를 회전기계의 고장진단 등에 응용하는 경우에는 사전에 최적인 시간-주파수 영역의 분해능을 명확하게 구할 수가 없는 경우가 많다. 또한 이 방법은 창폭과 일치한 국재진동파형을 고감도로 검출하지만, 일치하지 않는 국재파형은 실용적인 감도로 검출하는 것이 불가능하다. 위그너-빌 분포는 신호자체를 창으로 사용한 형태이기 때문에 단시간 퓨리에 변환보다 국재하는 주파수를 매우 잘 분석할 수 있다. 그러나, cross-term에 의한 간섭이 생기는 단점이 있다. Choi-William 커널을 이용하게 되면 이러한 간섭현상을 완화할 수 있으나, 시간-주파수 분해능이 저하되는 문제점이 있다.

웨이블렛 변환은 분석대상이 되는 신호를 시간-스케일 단위의 선형조합으로 분해하는 것이다. 웨이블렛이란 평균값이 0인 제한된 기간의 파형을 말하며, 웨이블렛 해석은 원 신호를 mother wavelet(또는 웨이블렛 기본함수(wavelet basic function)라 함)의 천이(translation)와 스케일(scale)값의 변화에 따라 여러 가지 신호성분으로 분해하는 것으로 시간에 따라 각각의 주파수성분의 변화추이를 알 수 있다.

웨이블렛은 신호나 시스템을 근사화하는데 이용되며, 웨이블렛의 구성요소는 mother wavelet이라고 불리는 하나의 기본함수에 의해 형성된다. 웨이블렛의 각 요소들은 스케일되고 천이된 mother wavelet이다. 하지만 이 웨이블렛 집합은 mother wavelet과 같은 수로 진동하고 mother wavelet이 가지고 있는 에너지와 동일한 에너지를 가지고 있다. 퓨리에해석은 신호를 다양한 주파수의 사인파로 분해하는 것과 유사하게 웨이블렛 해석은 신호를 천이하고 스케일한 mother wavelet의 형태로 분해한다. 퓨리에 변환도 진동하고 감소하는 기본함수(감소하는 지수함수)를 가지고 있지만, 항상 0을 중심으로 감소하고 시간스케일 대신에 주파수 이동이 있다. 그리고, 퓨리에 변환은 기본함수로써 단지 지수함수만을 선택할 수 있지만, 웨이블렛 변환에서는 허용조건을 만족하는 함수에 한해 mother wavelet으로 어떠한 함수도 가능하다.

2.1 연속 웨이블렛변환

연속 웨이블렛 변환(Continuous Wavelet Trans-

form, CWT)은 분석 대상신호 $f(t)$와 천이되고 스케일된 mother wavelet $\Psi_{a,b}$의 곱의 전 시간구간에 대해 적분한 것이다. 수학적인 표현으로는 지진파 또는 이에 의한 계의 지진응답을 나타내는 시간함수 $f(t)$의 연속 웨이블렛 변환은 다음과 같이 정의된다.[4]

$$CWT(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Psi_{a,b}dt \tag{1}$$

여기서

$$\Psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}}\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{2}$$

a는 스케일 파라메터, b는 천이 파라메터, Ψ는 mother wavelet을 나타낸다. 웨이블렛변환결과는 특정한 스케일과 천이에서의 신호 $f(t)$가 스케일되고 천이된 mother wavelet과의 상관성을 의미한다. 만약 신호 $f(t)$와 스케일되고 천이된 mother wavelet과 비슷하면 변환결과는 큰 값을 가질 것이다. 웨이블렛 변환에 있어 중요한 개념인 천이는 앞섬과 지연을, 스케일은 확장과 압축을 의미한다. 고주파 신호성분에 대해서는 시간영역에서의 감도를 높이고 저주파 신호성분에 대해서는 주파수 영역의 감도를 높인다. 이로 인하여 다중해상도 분석(multiresolution analysis)이 가능하다.

만약 $f(t)$와 Ψ가 유한 에너지 함수이고, Ψ가 실수 a, b에 대해 식 (2)를 만족하는 허용가능한 mother wavelet이면, 역 웨이블렛 변환(inverse wavelet transform)은 스케일-천이 평면에서 일차원인 시간이나 공간으로 이동한다. 연속 역 웨이블렛 변환을 수식적으로 나타내면 다음과 같다.

$$f(t) = \frac{1}{c_\Psi}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} CWT(a,b)\frac{1}{\sqrt{|a|}} \times \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)\frac{dbda}{a^2} \tag{3}$$

역변환은 mother wavelet에 가중치를 부여하여 더하는 것으로 행해진다. 만약 웨이블렛 변환에 사용하였던 mother wavelet과 역변환에 사용한 mother wavelet이 다를 경우에는 원 신호 $f(t)$를 복원할 수 없다.

2.2 이산 웨이블렛 변환

연속 웨이블렛 변환에서는 모든 스케일에서 웨이블렛 계수를 계산하므로 많은 시간을 요하고 많은 데이터를 생성한다. 이러한 결점을 보완하기 위해서 2의 누승이 되는 스케일에서 웨이블렛 변환을 수행함으로 정확성을 유지한 상태에서 계산시간을 훨씬 줄이므로써, 보다 효율적인 변환을 수행할 수 있다. 이산 웨이블렛 변환(Discrete Wavelet Transform, DWT)에 있어 스케일함수 $\phi(t)$와 웨이블렛 함수 $\Psi(t)$는 다음과 같이 정의된다.[5]

$$\phi(t) = \sum_k c_k\phi(2t-k) \tag{4}$$

$$\Psi(t) = \sum_k (-1)^k c_k\phi(2t+k-N+1) \tag{5}$$

여기서 N은 2의 누승인 데이터의 개수, c_k는 웨이블렛 계수이며, 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$\sum_{k=0}^{N-1} c_k = 2, \quad \sum_{k=0}^{N-1} c_k c_{k+2b} = 2\delta \tag{6}$$

여기서, δ는 Kronecker 델타를 의미한다.
식 (4), (5) 및 (6)을 이용한 이산 웨이블렛 변환식은 다음과 같다.

$$DWT[m,k] = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}}\sum x[n]g\left[\frac{k-na_0^m}{a_0^m}\right] \tag{7}$$

여기서, $g[n]$은 mother wavelet, 식 (1)에 나타낸 연속 웨이블렛 변환의 이동과 스케일 파라메터 a, b는 정수 m의 함수인 $a=a_0^m$과 $b=na_0^m$으로 표현된다.

이산 웨이블렛 변환을 필터 banks의 측면에서 살펴보면, Fig. 1과 같다. Fig. 1은 이산 웨이블렛 변환과정을 나타내는 개략도로써, 입력신호는 이산 웨이블렛 변환회로를 거치면서 고대역 통과필터(high pass filter)를 거친 신호는 웨이블렛 계수로 나타나고, 저대역 통과필터(low pass filter)를 통과한 신호는 다음 단계의 DWT회로로 이동하게 된다. 이와같은 과정을 반복함으로써 이산 웨이블렛 변환이 수행된다. Fig. 1의 아래 그림은 DWT회로들중 하나를 구체화한 것으로써 고대역 통과필터와 저대역 통과필터를 통과한 신호는 downsampling됨으로써 연산속도를 향상시킨다. 역 이산 웨이블렛 변환에서는 이산 웨이블렛 변환과는 반대의 과정을 수행한다. 즉, upsampling이 먼저 이루어지고 고대역 통과필터와 저대역 통과필터를 거쳤던 신호들이 합성됨으로써 원신호를 복원할 수 있다. 또한, 웨이블렛 변환결과를 scalogram의 형태로 나타냄으로써, 신호가 가지는 에너지분포를 알 수 있다. 본 논문에서는 스탠포드 대학에서 개발한 WAVELAB과 MATLAB TOOLBOX를 이용하여 이산 웨이블렛 변환을 수행

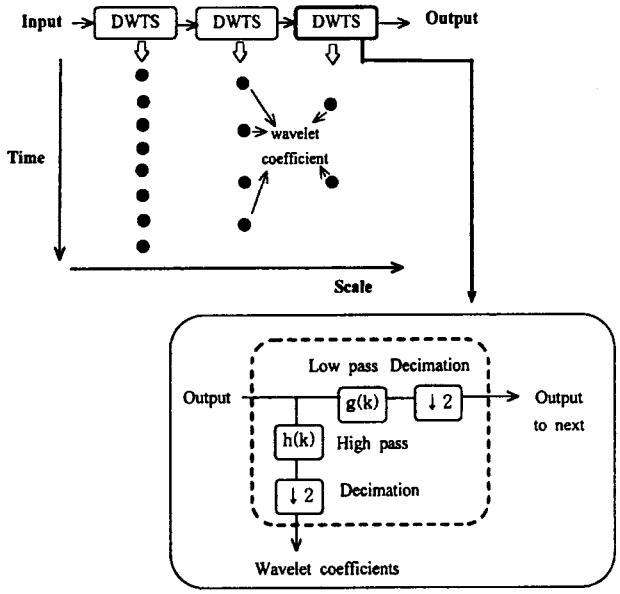


Fig. 1 Discrete wavelet transform

하였다. 웨이블렛 변환에 사용될 수 있는 웨이블렛은 무수히 많지만, 본 논문에는 일반적으로 널리 사용되며 넓은 범위의 시간에 대하여 각 시간대별 정보 취득이 용이한 Daubechies 웨이블렛(db 10)을 사용하여 이산 웨이블렛을 수행하였다.

3. 지진파의 웨이블렛 해석

본 논문에서는 입력 지진파로서 비교적 최근인 95년 1월 17일 발생하고 일본 고베 해양기상대(JMA Kobe)에서 계측된 고베지진(정식명칭은 Hyogoken Nanbu지진)의 동서방향(EW)성분과 상하방향(UD)성분의 지진파형을 이용하였다. 이 지진은 일본기상청(JMA) 진도 VII, 규모 7.2의 격진이었으며, 최대가속도가 NS 818 gal, EW 617 gal, UD 332 gal이었고, 탁월주기는 수평진동이 0.8~1.0초, 상하진동이 0.9~1.5초 및 0.2초정도로 파악되었다. Fig. 2에 고베지진의 EW 및 UD성분의 가속도시간파형을 나타낸다. 이 관측파는 샘플링간격 0.02초, 2048점(40.96초간)의 데이터로서, 이 데이터를 해석에 이용하였다. Fig. 2를 보면 EW성분에서 약 5초전후하여 2사이클정도의 과대한 초통과지진파가 발생하고, 이어서 8~10초사이에 또한 과대한 2차지진파가 발생하였음을 알 수 있다. 그림 (b)의 상하방향은 수평방향성분과 달리 지진발생초기부터 약 11초까지 비교적 높은 주파수가 포함된 복잡한 지진파가 발생하고 있다.

이 장에서는 Fig. 2의 지진파형을 이산 웨이블렛

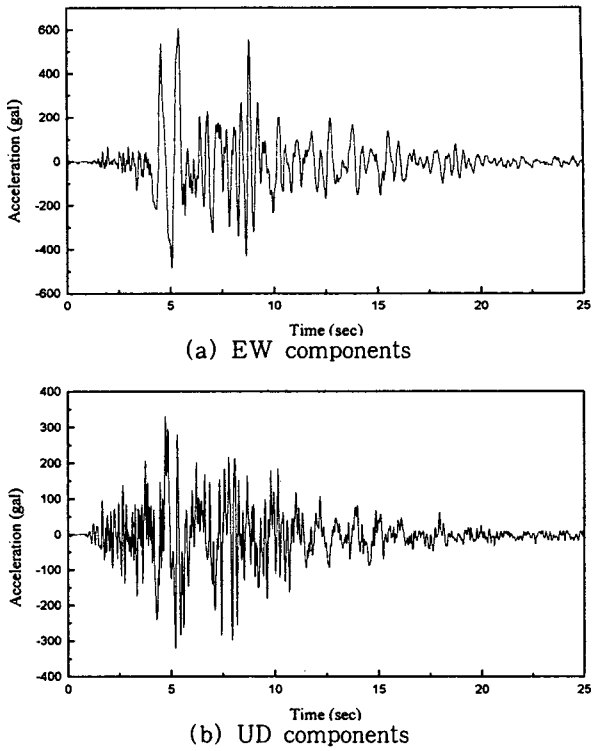
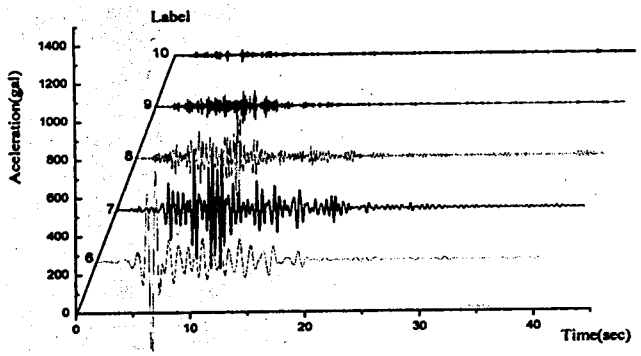
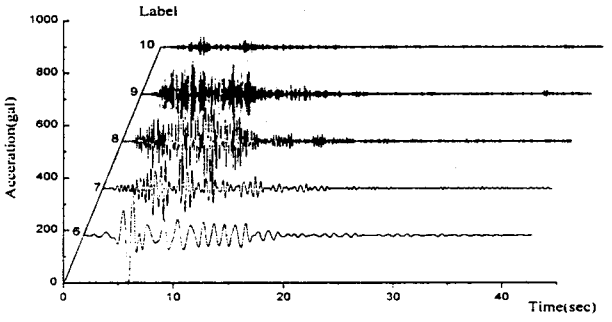


Fig. 2 Acceleration records of Kobe earthquake(JMA Kobe)

변환을 이용하여 해석한 결과를 통하여 지진파형의 특징을 설명한다. 해석에는 Daubechies의 D10 웨이블렛을 이용하여 변환을 수행하였고, 지진파를 각 레벨(주파수)별로 분해하였다. Fig. 3은 각 레벨중에서 특히 진폭이 큰 레벨 6~10에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 각 레벨은 주파수대역을 의미하며, 레벨 6은 0.78125 Hz~1.5625 Hz, 레벨 7은 1.5625 ~ 3.125 Hz, 레벨 8은 3.125 ~ 6.25 Hz, 레벨 9은 6.25 ~ 12.5 Hz, 레벨 10는 12.5 ~ 25 Hz의 주파수대역에 해당된다. 저주파수(레벨 1 ~ 레벨 5)의 성분은 진폭이 작기 때문에 나타내지 않았다. 그림 (a)의 EW성분에서 레벨 6의 경우가 진폭이 가장 탁월하며, 이 주파수 대역 즉, 0.78125 Hz~1.5625 Hz의 주파수성분이 가장 탁월한 성분이며 시간대역은 약 5초 부근으로 초통과지진파가 주로 이 성분에 대응하는 것을 알 수 있다. 그림 (b)의 UD성분에서는 초통과파의 주파수대역이 레벨 6인 것은 EW성분과 같으나, 레벨 7~9의 높은 주파수대역의 진폭이 상대적으로 크고, 긴 시간동안 작용하고 있고 이 때문에 지진피해가 더욱 컸던 것으로 알려지고 있다. 이와 같이 일반적인 퓨리에 스펙트럼을 통해서는 파악할 수 없는 탁월 주파수 성분에 대한 시간영



(a) EW components

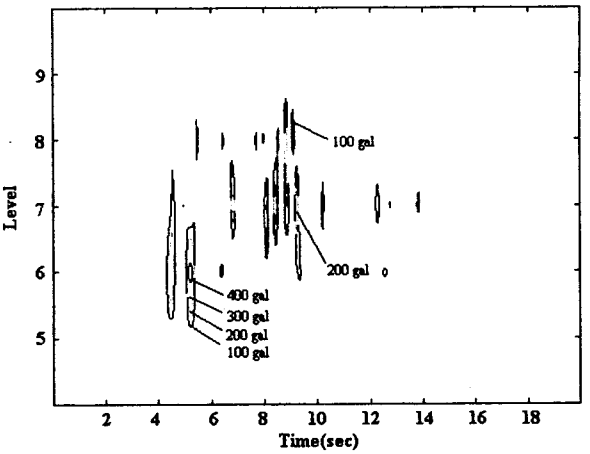


(b) UD components

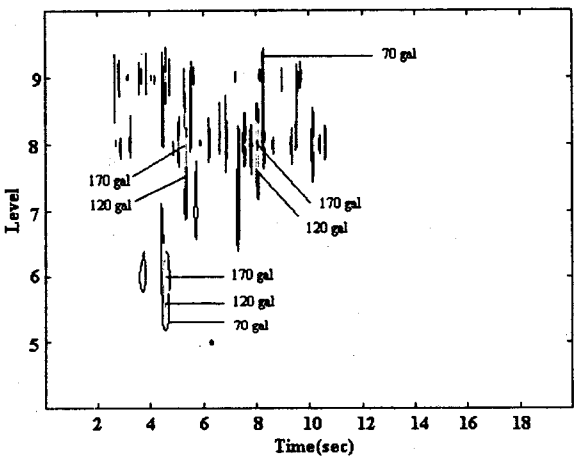
Fig. 3 Wavelet decomposition of earthquake record

역의 정보를 웨이블렛 변환을 통하여는 상세히 파악할 수 있는 장점이 있다. 각 레벨에 대한 EW와 UD 성분의 진폭을 비교하면, 레벨 7까지는 EW성분의 약 반정도였던 UD성분의 진폭이 레벨 8에서는 거의 동일하고 레벨 9 이상에서는 오히려 UD성분의 진폭이 약 1.5배 이상 크게되고 있다.

Fig. 4는 고베지진파의 EW와 UD성분의 데이터를 웨이블렛 변환하여 scalogram으로 나타낸 그래프로서, 시간과 주파수에 따른 지진파에 대한 에너지의 분포를 전체적으로 파악할 수 있다. 그림 (a)의 EW 성분은 레벨 6의 주파수대역에서 약 4.5초에서 초통과파의 첫 사이클이, 그리고 약 0.6초후인 5.1초에서 두 번째 파가 지나가고 이어서 2차지진파가 약 8~10초 사이에 있었음을 알 수 있다. 그림 (b)의 UD 성분은 약 4.5초 전후의 탁월한 초통과파의 첫 사이클 통과후 EW성분과는 달리 탁월성분이 레벨 8~9에서 주로 발생하고 있다. 즉 약 5.3초와 8초에서 탁월성분이 레벨 8에서 나타나는 것이 EW성분과의 다른 점이다. 결과적으로 레벨의 차이는 있으나, EW 및 UD성분 모두 탁월한 진폭이 3개의 시간대역, 즉 4.5초, 5.1~5.3초 및 8~10초에서 발생하고 있다. 이는 지진 발생부터 약 10초사이에 큰 지각



(a) EW components



(b) UD components

Fig. 4 Scalogram of earthquake record

의 파괴가 3회 발생하였고,[8] 이때 발생된 에너지에 대응하는 것으로 생각된다.

4. 지진응답의 웨이블렛 해석

이 장에서는 제 1보[3]에서 이용한 증기터빈 · 발전기축계의 모델에 대해 동서방향(EW)의 지진가속도만을 이용하여 수평방향의 지진응답을 계산한 경우와, 동서 및 상하방향(UD)의 지진가속도가 동시에 작용하는 경우의 수평 및 수직방향의 응답에 대한 웨이블렛 해석결과를 검토한다. 지진응답은 Newmark β 법($\beta = 1/4$)을 이용하였으며, 시간간격은 지진파의 관측 샘플링간격인 0.02초로 40.96초까지를 계산하였다.

4.1 EW성분만 가진시

Fig. 5는 고베지진의 EW성분을 수평으로 가진했

을 경우의 터빈 · 발전기축계의 각 베어링절점에서의 변위응답을 Newmark β 법을 이용하여 구한 결과이다. 여기서는 특징적인 2개의 베어링 절점에서의 응답을 나타내었으며, 위의 그림은 고압터빈로터(HP rotor)의 우측베어링 절점(No. 2 베어링), 아래는 발전기로터(GEN rotor)의 좌측베어링 절점(No. 9 베어링)의 응답변위를 나타낸다. No. 2 베어링은 초통과파의 첫 사이클이 지난 직후인 약 4.6초에서 461 μm의 최대변위응답이 발생한후 둘째 사이클에서도 비슷한 정도의 응답이 발생하고, 2차지진파의 통과시인 8.8초에서 약 410 μm정도의 진동진폭이 발생함을 알 수 있다. 그러나 No. 9 베어링에서의 변위응답파형은 초통과파에서 약 530 μm의 응답이 발생하지만, 최대응답은 2차지진파의 통과시인 약 8.8초

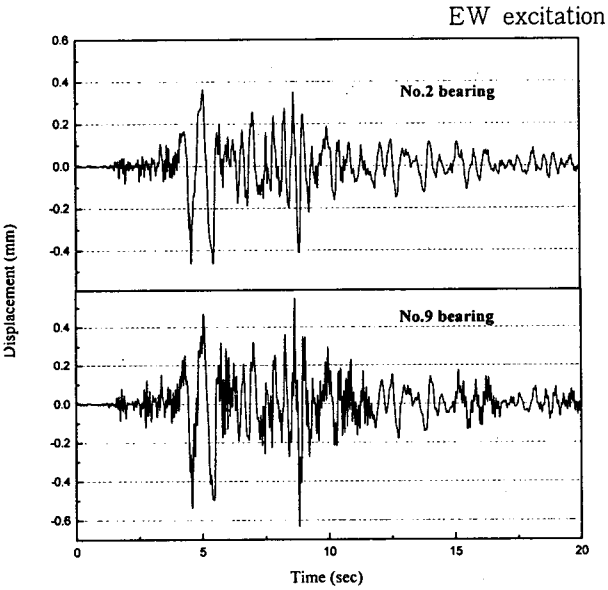


Fig. 5 Displacement response wave of horizontal direction by direct integration method

Table 1 Natural frequencies of a steam turbine-generator rotor system (N=1800 rpm)[9]

Mode	Natural frequency(Hz)	Period(sec)
1st	11.566	0.0865
2nd	14.715	0.0680
3rd	16.365	0.0611
4th	17.987	0.0556
5th	16.783	0.0596
6th	19.170	0.0522
7th	27.725	0.0361
8th	29.274	0.0342

에서 634 μm의 최대변위를 나타내는 것이 No. 2 베어링과의 다른 점이다.

Fig. 6은 2번 베어링과 9번 베어링절점에서의 직접적분법에 의해 구해진 변위응답(Fig. 5)에 대해 웨이블렛 해석을 수행한 결과이다. 지진파의 웨이블렛 해석결과인 Fig. 3과 비교하여 보면, 그림 (a)의 2번 베어링절점에서의 변위응답에 대한 웨이블렛 해석결과는 전체적으로 지진파의 웨이블렛 특성과 비슷한 경향을 보이며, 고차성분의 진폭이 약간 증폭된 것을 알 수 있다. 이는 Table 1에 나타내는 계의 고유진동수[9]가 지진파의 탁월주파수성분에 비해 높은 영역에 있어 탄성적인 변형이 작음을 의미하며, 계의 1차 고유진동수를 포함하는 레벨 9에서 약간 응답이 증폭되는 것을 알 수 있다. 반면, 그림 (b)의 9번 베어링에서는 2번 베어링에 비해 전체 레벨에 걸쳐 진폭이 증가하고 있고, 특히 레벨 9에서 특징적으로 진폭이 증가함을 알 수 있다. 이는 1, 2차 고유진동수에 해당되는 모드가 발전기 로터의 진폭이 큰 모드이고,[9] 발전기 로터부분이 고압 터빈 로터보다는 훨씬 유연하기 때문이다. Fig. 7은 이에 대한 scalogram으로써, 그림 (a)의 2번 베어링의 경우는 지진파에 대한 Fig. 4(a)와 비교할 때 입력지진동의

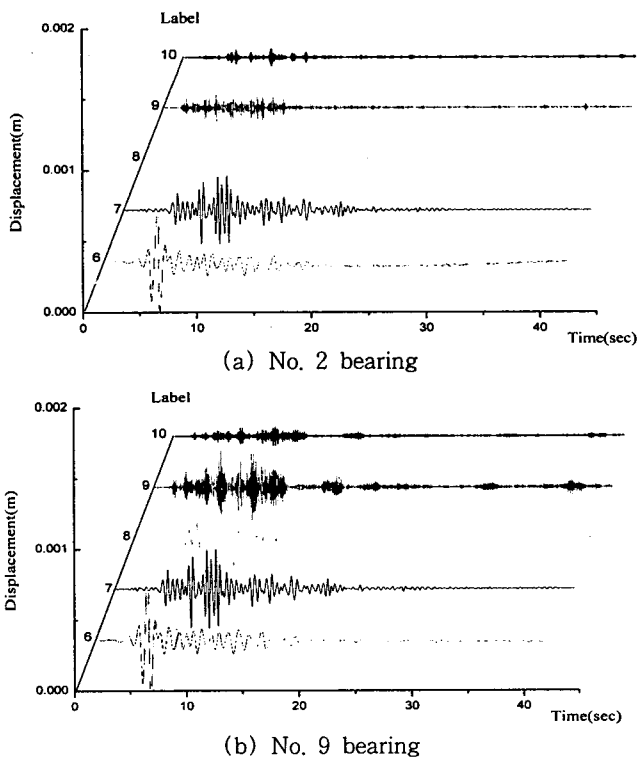


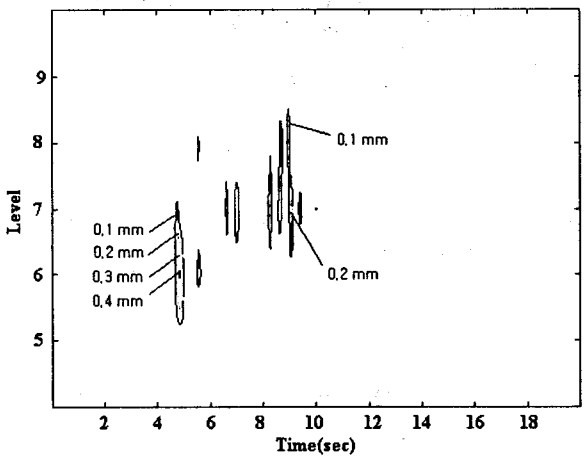
Fig. 6 Wavelet decomposition of horizontal displacement response wave for EW excitation only

탁월주파수로 가진되는 거의 동일한 유형을 나타내지만, 9번 베어링절점의 응답에서는 초통과파 가진 이후에는 고주파성분(레벨 9)이 탁월하며 넓은 시간 영역에 분포되어 있음을 알 수 있다. 이는 입력지진동의 탁월주파수에 의한 강제진동보다는 터빈 · 발전기축계의 고유진동수성분이 포함되는 레벨 9 주파수 대역에서 공진에 의해 진동이 주로 발생하고 있음을 명확히 알 수 있다.

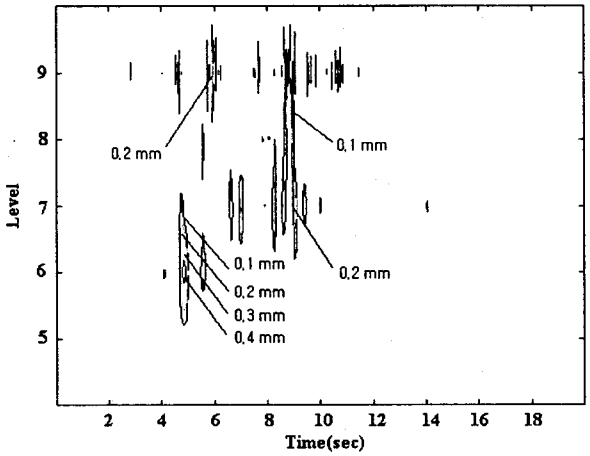
4.2 EW와 UD 성분의 동시 가진시

Fig. 8은 고베지진의 EW성분과 UD성분을 각각 수평과 수직방향으로 동시 가진했을 경우의 터빈 · 발전기축계의 2번과 9번 베어링절점에서의 수평방향 변위응답을 Newmark β 법을 이용하여 계산한 결과이다. EW성분만으로 1방향(수평방향)가진시의 Fig. 5와 비교하여보면, 거의 유사한 응답파형을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 지진가속도의 크기가 EW성분에 비해 UD성분이 작고, 두 방향의 상호연성효과가 거의 없음을 의미한다.

Fig. 9는 2번 베어링과 9번 베어링에서의 직접적분법에 의해 구해진 변위응답파형(Fig. 8)의 수평방향성분에 대해 웨이블렛 해석을 수행한 결과이다.



(a) No. 2 bearing



(b) No. 9 bearing

Fig. 7 Scalogram of horizontal displacement response wave for EW excitation only

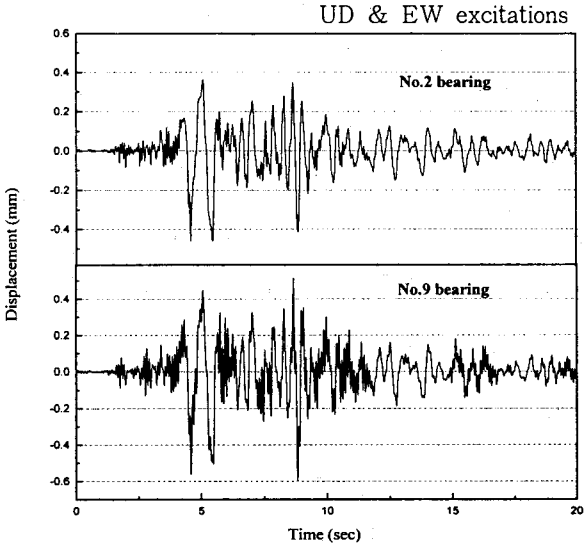
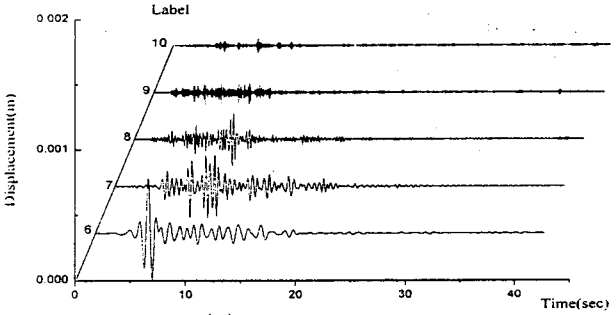
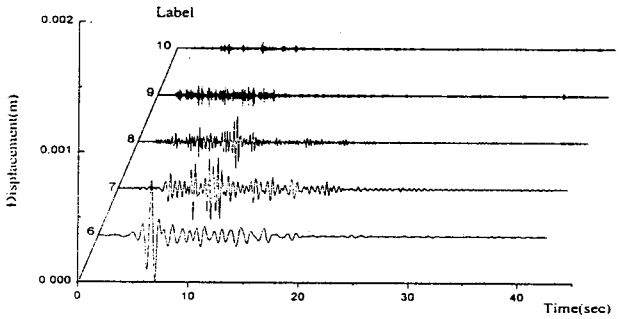


Fig. 8 Displacement response wave of horizontal direction by direct integration method



(a) No. 2 bearing

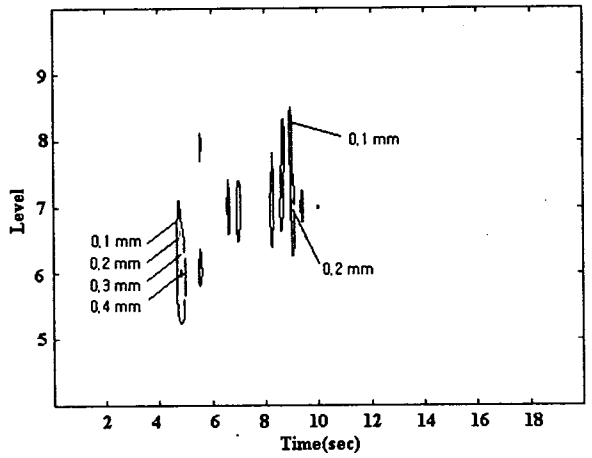


(b) No. 9 bearing

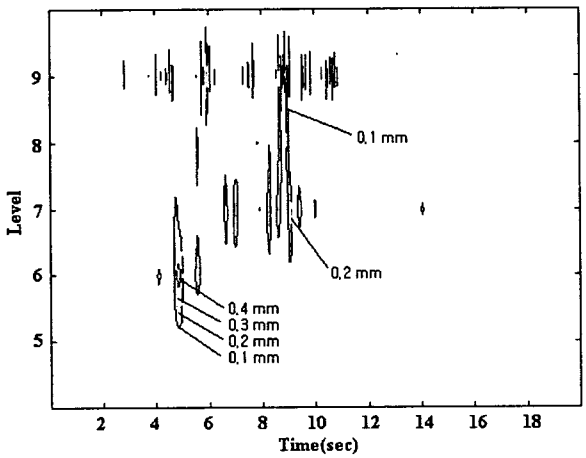
Fig. 9 Wavelet decomposition of horizontal displacement response wave for UD and EW excitations

Fig. 8의 응답파형과 마찬가지로 거의 변화가 없음을 알 수 있다. Fig. 10은 이에 대한 scalogram이다.

Fig. 11은 고베지진의 EW성분과 UD성분을 각각 수평과 수직방향으로 동시 가진했을 경우의 터빈·발전기축계의 2번과 9번 베어링절점에서의 수직방향 변위응답을 Newmark β 법을 이용하여 계산한 결과이다. 수평방향의 변위응답(Fig. 8)과 비교할 때, 전체적으로 수평방향과 유사한 응답파형을 보이나 최대진폭이 2번과 9번베어링에서 각각 187 μm, 212 μm로, 수평방향진폭이 약 40.6%, 33.4%정도로 낮다. Fig. 12는 EW와 UD성분을 각각 수평과 수직방향으로 동시 가진하였을 경우의 2번 베어링과 9번 베어링절점에서의 수직방향응답에 대한 웨이블렛 변환결과를 나타내며, Fig. 13은 이에 대한 scalogram이다. 2번 베어링절점의 응답은 수평방향응답에 비해 크기는 작으나, 수평방향의 응답(Fig. 9)과 비슷한 경향을 나타낸다. 9번 베어링절점에서의 응답은 고주파영역의 성분(레벨 9)이 수평방향응답의 경우에 비해 좀 더 탁월하며 폭넓은 시간영역에서 발생한다. 특히 4초전후에서는 수평방향에서는 나타나지



(a) No. 2 bearing



(b) No. 9 bearing

Fig. 10 Scalogram of horizontal displacement response wave for UD and EW excitations

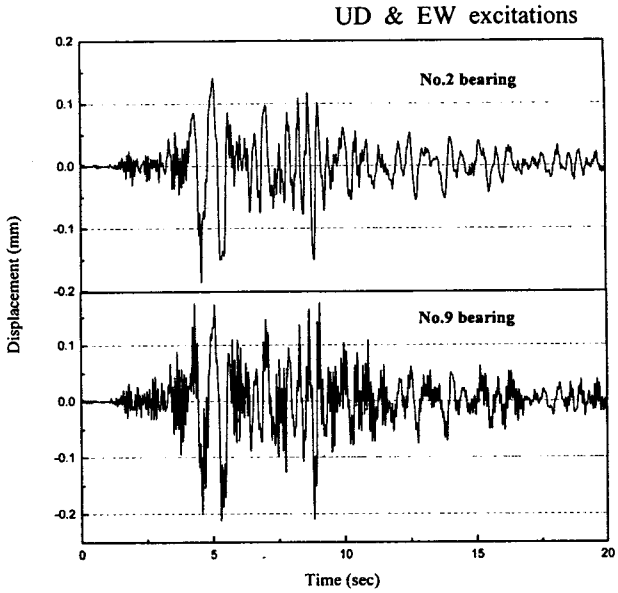
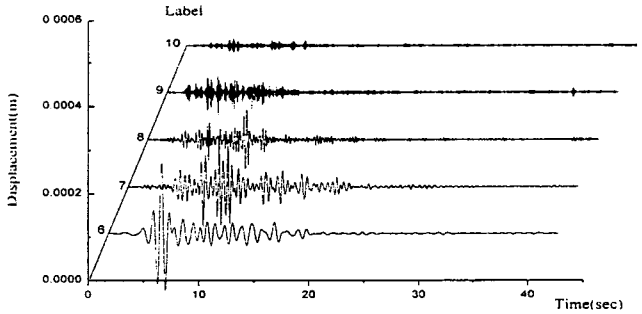
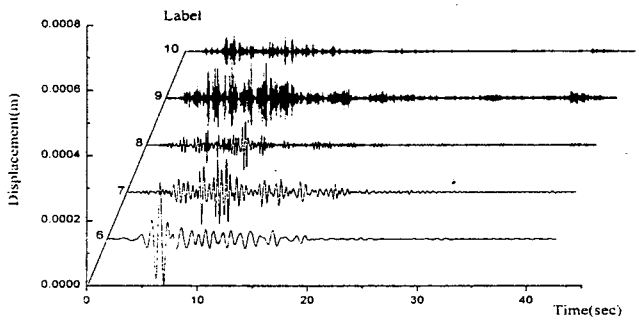


Fig. 11 Displacement response wave of vertical direction by direct integration method

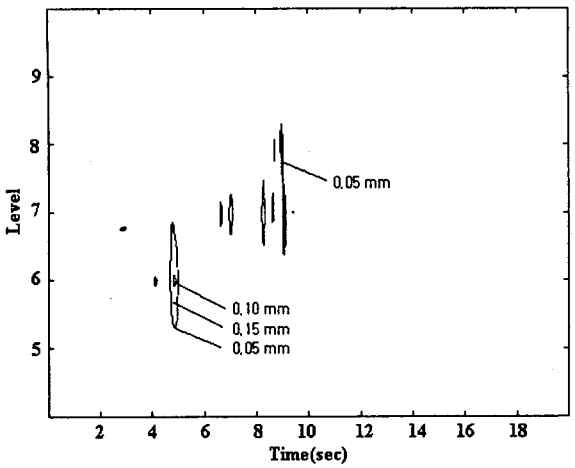


(a) No. 2 bearing

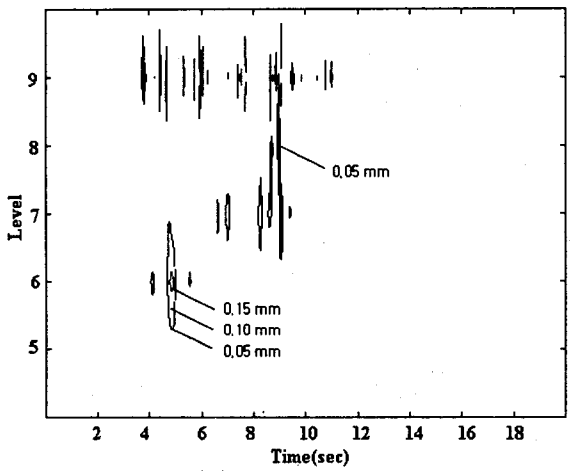


(b) No. 9 bearing

Fig. 12 Wavelet decomposition of vertical displacement response wave for UD and EW excitations



(a) No. 2 bearing



(b) No. 9 bearing

Fig. 13 Scalogram of vertical displacement response wave for UD and EW excitations

않는 성분이 존재함을 Fig. 13을 통해서 알 수 있다. UD성분의 지진파에 대한 Fig. 4(b)와 비교하여 보면, 레벨 8의 지진파주파수대역이 응답에서는 거의 나타나지 않는 반면, 레벨 9에 대한 응답이 터빈 · 발전기축계와의 공진영역내에 있게되어 확대되는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 원자력 발전소용의 대형 증기터빈 · 발전기축계에 대한 체계적인 지진응답해석에 관한 일련의 연구의 제 2보로써, 제 1보에 이어 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 웨이블렛 해석기법을 지진파와 지진응답특성을 검토하기 위해 새로이 도입하였다. 즉 입력지진동의 가속도파와 Newmark β법에 의해 계산된 시간응답을 웨이블렛 변환을 통하여 시간-스케일 영역에서 그 특성을 상호 비교분석하고, 종래의 주파수스펙트럼이나 시간응답파형에서 명확히 검토할 수 없었던 시간-주파수 영역정보를 이용하여 그 특성을 명확히 하였다. 고베지진파를 입력지진동으로 하여 EW성분만 수평가진시와, EW와 UD성분을 각각 수평과 수직방향으로 동시에 가진하였을 때의 특징적인 고압 터빈 로터의 우측 베어링과 발전기로터의 좌측 베어링 절점에서의 지진변위응답을 직접적분법으로 구하고, 이들 각각의 응답에서 대해서 웨이블렛 변환을 수행하여 비교 · 검토하였으며, 주파수 성분 뿐만 아니라 탁월 주파수 성분의 시간대역을 파악할 수 있는 웨이블렛의 장점이 내진해석분야에도 유용하게 이용될 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) 건설교통부, 1996, 내진설계기준연구(I), 연구보고서.

(2) H. Mimuro and S. Hisa, 1984, Aseismic Strength and Design of a Rotating Machine, JSME, Vol. 87, No. 792, pp. 1267~1272.

(3) 양보석, 김용한, 1999, 증기터빈 · 발전기축계의 지진응답해석(제 1보, 로터베어링 시스템만을 고려한 경우), 한국소음진동공학회지, Vol. 9, No. 3, pp. 554~564.

(4) C. K. Chui, 1992, An Introduction to Wavelets, Academic Press.

(5) I. Daubechies, 1992, Ten Lectures on Wavelets, SIAM, Pennsylvania, USA.

(6) 한윤식, 이종원, 1998, 방향성 조화 웨이브렛 해석 기법, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 256~272.

(7) 김이곤, 배영철, 1998, 압연기 베어링 고장-진단 시스템 설계, 한국퍼지 및 지능 시스템학회 논문집, Vol. 8, No. 7, pp. 36~43.

(8) N. Shimizu, 1996, Wavelet Analysis-Present State and Future Prospect, Proceeding of Spring Meeting, JSME, April 2-4, pp. 509~512.

(9) 양보석외 3인, 1999, 구분모드합성법을 이용한 증기터빈 · 발전기축계의 진동해석, 한국소음진동공학회지, Vol. 9, No. 2, pp. 401~408.