

고유주파수와 감쇠비에 대한 시스템 손상도 비교

이석민¹, 정범석^{2*}

Comparison of Fragility Using Natural Frequency and Damping Parameter in System

Seok-Min Lee¹, Beom-Seok Jung^{2*}

Abstract: The purpose of the present study is to compare the reduction rate of natural frequency and the increase rate of damping parameter with structural damage in system. For this purpose, experiment and numerical simulation analysis are performed for the 2-span H-Beam with lower natural frequency and higher damping parameter from free vibration in structure. The response signal by impact load before and after damage is analyzed at 14 locations. The response signals for all locations are performed fast fourier transform to estimate the natural frequency reduction rate and wavelet transform to estimate the damping parameter increase rate. The time domain function corresponding to each scale(frequency) is separated from the response signal by wavelet parameter. The estimation of damping parameter increase rate using wavelet transform is more sensitive than the estimation of natural frequency reduction rate in structure.

Keywords: Wavelet transform, Fragility, Natural frequency, Damping parameter

1. 서 론

구조 시스템의 모드 변수(Modal Parameter)는 구조적 손상에 가장 크게 영향을 받는 요소이며, 이러한 모드 변수에는 고유주파수, 감쇠비, 모드 형상 등이 있다. 구조물의 손상은 구조 시스템의 모드 변수 평가를 통하여 모드해석법에 의해 추정된다(Kim and Kim, 2008; Jung, 1996). 일반적으로 공용 구조물에 대한 구조적 손상도의 평가는 가속도 응답신호에 대한 고유주파수 분석을 통하여 수행되며, 고유주파수는 푸리에 변환(Fourier Transform) 등을 통하여 분석될 수 있다. 이렇게 분석된 고유주파수는 이전에 분석된 고유주파수 및 준공 초기에 분석된 고유주파수와 비교됨으로써 시스템에 대한 손상 정도를 판단하게 된다. 다재하경로 시스템에 대하여 완전히 파손된 일부 부재는 구조계의 변화를 초래하여 고유주파수가 비교적 크게 감소하지만(Basu, 2005), 단재하경로 시스템에서 부분적으로 손상된 부재는 구조물의 강성에 대한 영

향이 작아 고유주파수의 변화가 미소하게 된다. 따라서 단재하경로 시스템 및 부재의 부분적 손상에 대한 강성 감소율 평가에 대한 정확성이 떨어질 수 있으며, 이는 모드해석법의 한계로 알려져 있다.

일반적으로 교량 등과 같은 토목구조물에 대한 응답신호는 비교적 고유주파수가 작고, 감쇠비가 큰 특징을 갖는다. 이러한 특성으로 인하여 일반적인 방법에 의한 감쇠비 평가는 오차가 크게 발생할 수 있다(Kijewski and Kareem, 2003). 또한, 각 모드에 대한 고유주파수가 주파수 영역에서 인접해 있는 경우에 일반적인 방법에 의한 감쇠비 평가는 거의 불가능하지만, 웨이블릿 변환은 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 도구가 될 수 있다(Lee et al., 2015).

웨이블릿 변환(Wavelet Transform)은 1980년대 초에 Morlet 과 Grossmann 등에 의해 수학적 체계가 형성되었으며(Grossmann and Morlet, 1984), 1986년 프랑스 수학자 Yves Meyer의 직교 웨이블릿 이론에 의해 이산 웨이블릿 변환의 수학적 토대가 구축됨으로써 기존의 주파수 분석 이론과는 차별화된 평가로 주목받고 있다(Meyer, 1986). 웨이블릿 변환은 푸리에 변환에 비해 신호에 포함되어 있는 스케일 분석능력이 뛰어나다. 웨이블릿 변환의 결과는 웨이블릿 기저함수(Mother Wavelet)에 대한 중심주파수에 따라 달라지며, 기저함수의 중심주파수는 분석하고자 하는 신호의 고유주파수에 따라 달리 적용되어야

¹정회원, 동의대학교 토목공학과, 조교수

²정회원, 동의대학교 토목공학과, 교수, 교신저자

*Corresponding author: bsjung@deu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Dong-eui University, 176, Eomgwang-ro, Busanjin-gu, Busan, 47340, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

한다(Lee et al., 2015). 따라서 본 연구에서는 각 모드 고유주파수에 대응되는 웨이블릿 스케일이 전체 스케일의 중심에 위치하도록 설정하여 웨이블릿 변환에 대한 정확성을 향상시키고자 하였다.

본 연구는 부재의 부분적 손상에 의한 구조 시스템의 손상도 평가에 관한 것이다. 이를 위하여 손상 전과 손상 후에 대한 수치해석 및 실내 실험을 수행하였으며, 각각에 대하여 푸리에 변환을 통한 고유주파수 감소율과 웨이블릿 변환을 통한 감쇠비 증가율을 평가하여 시스템의 손상도를 비교하였다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

2.1.1 웨이블릿 변환

시간 영역 응답 신호 $x(t)$ 에 대한 연속 웨이블릿 변환은 다음과 같이 정의된다(Chui, 1992).

$$W_g[x](a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)g^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \quad (1)$$

여기서, $g(t)$ 는 웨이블릿 기저함수, $g^*(t)$ 는 $g(t)$ 의 복소공액(Complex Conjugation), a 는 수축 계수(Dilatation Parameter), b 는 전이 계수(Translation Parameter)이다.

연속 웨이블릿 변환의 기본 개념은 응답 신호 $x(t)$ 를 웨이블릿 기저함수를 사용하여 웨이블릿 계수 $W_g[x](a,b)$ 로 분해하는 것이며, 이렇게 분해된 웨이블릿 계수는 수축 계수 a 및 전이 계수 b 에 대한 웨이블릿 기저함수와 대상 신호의 유사성 척도가 된다. 웨이블릿 변환은 시간-주파수 영역에서 일부 성분만을 독립적으로 분석하는 것이 가능하다. 따라서 다자유도 시스템은 시간-주파수 영역에서 주파수축에 대한 단자유도 성분의 중첩으로 표현될 수 있다(Curadelli et al., 2008).

본 연구에서는 주파수(하모닉) 분석에 가장 효과적인 것으로 알려져 있는 Complex Morlet 웨이블릿을 적용하였으며, Morlet 웨이블릿의 기저함수는 다음과 같다(Kijewski and Kareem, 2003).

$$g(t) = e^{i\omega_c t} e^{-t^2/2} = e^{-t^2/2} (\cos(\omega_c t) + i \sin(\omega_c t)) \quad (2)$$

여기서, ω_c 는 Morlet 웨이블릿 기저함수의 중심주파수(rad/sec)이다.

식 (2)의 Morlet 웨이블릿은 sine 함수와 cosine 함수로 구성되어 있으며, 중심주파수 ω_c 로 진동하는 가우시안-윈도우 푸

리에 변환이다. Morlet 웨이블릿의 기저함수는 수축 계수 a 에 의해서 웨이블릿의 고유주파수가 변하게 되고, 수축 계수 a 가 적용된 Morlet 웨이블릿은 푸리에 변환을 통하여 대상 신호의 고유주파수와 동일한 위치에서 연산된다. 식 (3)은 Morlet 웨이블릿의 주파수 영역 함수를 보여주고 있다.

$$G(a\omega_n) = \sqrt{2} \sqrt{\pi} e^{-(a\omega_n - \omega_c)^2/2} \quad (3)$$

웨이블릿 변환은 시간 영역에서 계산하는 것보다 주파수 영역에서 계산하고 시간 영역으로 전환하는 것이 계산 과정상 효율적이다. 식 (1)의 웨이블릿 계수 $W_g[x](a,b)$ 가 주파수 영역 계산에서 각각의 유효한 값들로 평가되기 위해서 식 (3)은 최대값으로 산정되어야 한다.

Fig. 1은 웨이블릿 변환 영역의 해상도를 보여주고 있으며, 하이젠버그의 불확실성 원리(Heisenberg's Uncertainty Principle)에 따라 시간 간격 Δt 와 주파수 간격 Δf 는 다음과 같이 표현될 수 있다(Chui, 1992).

$$\Delta t = a\Delta t_g \quad (4)$$

$$\Delta f = \frac{\Delta f_g}{a} \quad (5)$$

여기서, Δt_g 와 Δf_g 는 각각 웨이블릿 기저함수 $g(t)$ 의 시간 간격과 주파수 간격이다.

식 (4), (5)에 따라 Fig. 1의 모든 해상도 셀에서 Δt 와 Δf 의 곱은 항상 일정하게 된다.

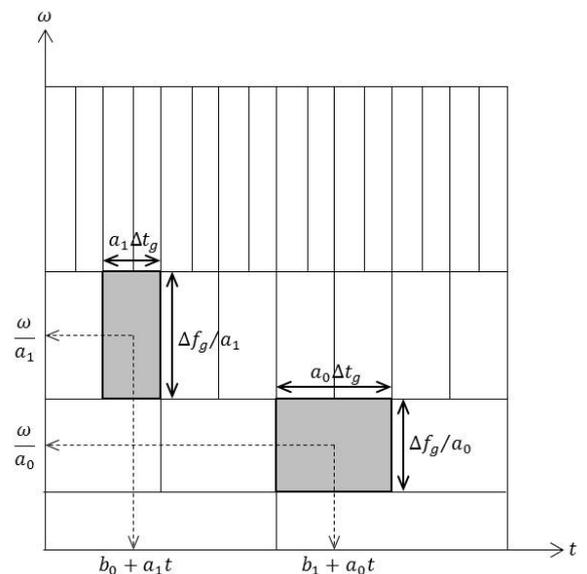


Fig. 1 Resolutions of Wavelet Domain

2.1.2 웨이블릿 변환을 적용한 시스템 감쇠변수 평가

응답 신호의 포락선(Envelope)은 신호의 시간축에 대한 크기 변화이다. 이러한 포락선은 로그 스케일 영역에서 직선으로 표현될 수 있으며, 응답 신호의 포락선 기울기는 신호의 감쇠비로서 평가될 수 있다(Hur and Santoso, 2009; Kijewski and Kareem, 2003; Slavic et al., 2003).

응답 신호에 대하여 sine 함수와 cosine 함수의 진동 성분이 제거된 신호 $x(t)$ 의 크기는 식 (6)과 같이 절대값으로 평가될 수 있고, 양변에 로그를 취하면 식 (7)과 같다.

$$|\overline{x(t)}| = Ae^{-\xi\omega_n t} \quad (6)$$

$$\ln |\overline{x(t)}| = \ln(Ae^{-\xi\omega_n t}) = \ln(A) - (\xi\omega_n)t \quad (7)$$

여기서, A 는 신호의 크기(Magnitude), ξ 는 감쇠비이다. 식 (7)은 시간 t 에 관한 1차 방정식이며, 이 식의 기울기를 고려하면 다음과 같이 감쇠비를 평가할 수 있다.

$$\xi = \frac{-slope}{\omega_n} \quad (8)$$

2.2 수치해석 및 실내실험

2.2.1 고유주파수 감소율 분석

일반적으로 공용구조물의 안전진단시 동적 재하시험에 의한 가속도 응답신호의 고유주파수는 푸리에 변환을 통하여



Photo 1 H-Beam Test Set-Up

분석되고, 이렇게 분석된 고유주파수는 구조물의 준공시 초기 안전진단에 대한 고유주파수 또는 이전 안전진단에 대한 고유주파수와 비교됨으로써 구조물의 손상에 대한 평가가 수행된다.

본 연구에서는 Fig. 2와 Photo 1에서 볼 수 있는 바와 같이 2경간(2@7.95m) H-Beam 부재($H-150 \times 100 \times 6 \times 9$)에 대하여 손상 전과 손상 후 수치해석과 실내실험을 각각 수행하였다. 수치해석은 범용 구조해석 프로그램에 의해 수행되었고, St.1~St.14 모든 위치의 응답신호에 대하여 샘플링 주파수 200 Hz로 분석되었다. 실내실험은 초기변위에 대한 응답신호를 측정하였으며, 이때 초기변위는 대상 경간 중앙에 인위적인 강제 변위를 발생시킨 후 이를 제거함으로써 충격응답을 모사하였다.

Fig. 3과 4는 수치해석과 실내실험에 대한 St.3 응답신호의 푸리에 변환 결과를 보여주고 있으며, 손상 전과 손상 후에 대한 고유주파수는 각각 7.959 Hz와 7.715 Hz로 분석되어 고유주파수 감소율이 3.1%로 평가되었다. Table 1은 St.1~St.14의 모든 위치에 대한 고유주파수 분석 결과를 보이고 있으며, Fig. 5와 6은 각각 수치해석과 실내실험에 대한 고유주파수 분석 결과를 보이고 있다. 수치해석 응답신호에 대한 손상 전후

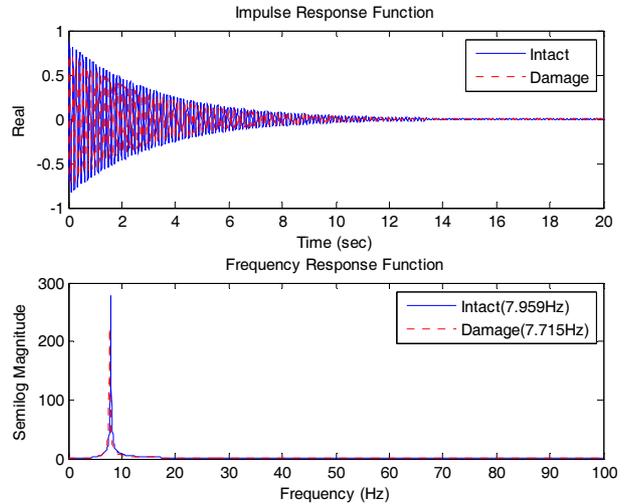


Fig. 3 Time Domain and Frequency Domain for Numerical Simulation Response Signal at St.3

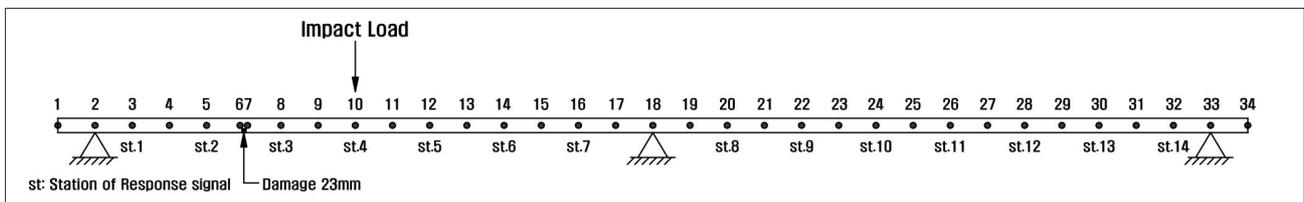


Fig. 2 Numerical Simulation Modeling After Damage

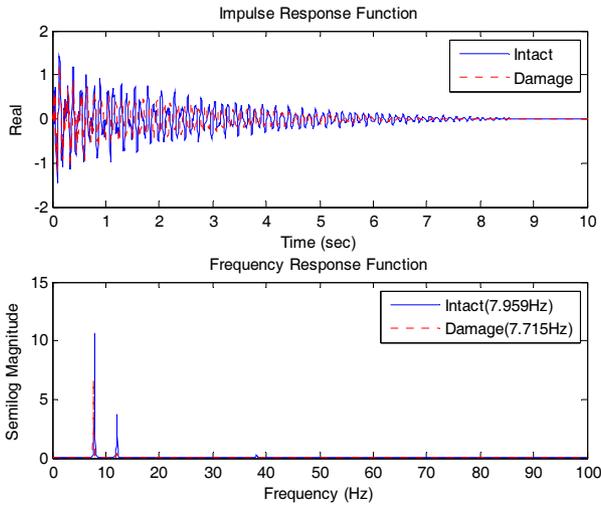


Fig. 4 Time Domain and Frequency Domain for Experiment Response Signal at St.3

Table 1 Natural Frequencies for Numerical Simulation and Experiment Response Signals

Station	Simulation			Experiment		
	Intact (Hz)	Damage (Hz)	Reduction Rate(%)	Intact (Hz)	Damage (Hz)	Reduction Rate(%)
1				7.959	7.715	3.1
2				7.959	7.715	3.1
3				7.959	7.715	3.1
4				7.959	7.715	3.1
5				7.959	7.715	3.1
6				7.959	7.861	1.2
7	7.959	7.715	3.1	7.959	7.861	1.2
8				7.959	7.861	1.2
9				7.861	7.861	0
10				7.861	7.861	0
11				7.861	7.861	0
12				7.910	7.861	0.62
13				7.910	7.861	0.62
14				7.910	7.861	0.62

고유주파수는 모든 위치에서 같은 값으로 분석되어 고유주파수 감소율 3.1%를 확인할 수 있었지만, Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 실내실험에 대한 고유주파수 분석은 응답신호의 위치에 따라 다소 다른 값으로 분석되고 있다. Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 실내실험에 대한 고유주파수 감소율은 0~3.1%로 평가되고 있다. 대상 부재의 우측 경간에 대한 고유주파수 분석시 손상 후 응답신호에 대한 고유주파수가 비교적 높게 분석되어 감소율이 감소하는 경향을 보이고 있으며, 따라서 고유주파수에 의한 구조물 손상도 평가에 신뢰성을

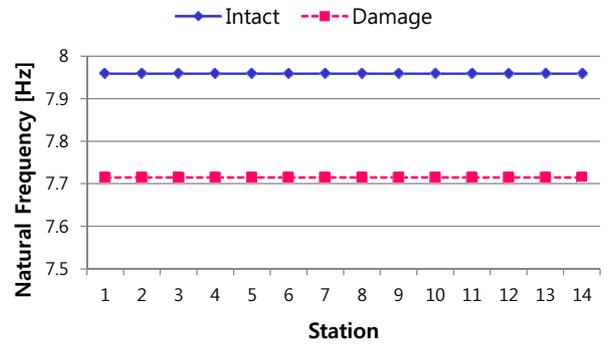


Fig. 5 Natural Frequencies for Numerical Simulation Response Signals

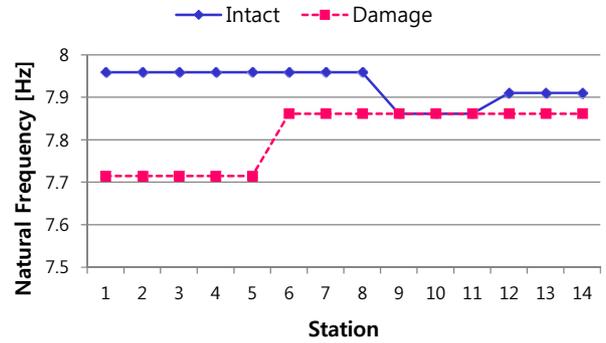


Fig. 6 Natural Frequencies for Experiment Response Signals

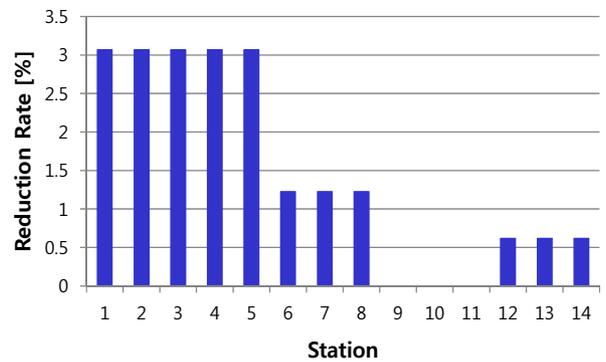


Fig. 7 Reduction Rates of Natural Frequencies for Experiment

떨어뜨리는 요인이 되고 있다. 2경간 연속보의 좌측 경간 손상에 대한 우측 경간의 고유주파수 분석시 이러한 오차 발생은 실제 공용구조물의 고유주파수 분석에서 흔히 발생할 수 있으며, 이는 고유주파수 분석에 의한 구조물 강성 감소율 평가에 한계성을 나타내는 것으로 판단된다.

2.2.2 감쇠비에 의한 분석

감쇠비를 통한 구조물 강성 감소율을 평가하기 위하여 2.2.1절과 같이 손상 전과 손상 후의 H-Beam에 대하여 수치해석과 실내실험을 수행하고, 생성된 응답신호에 대하여 웨이

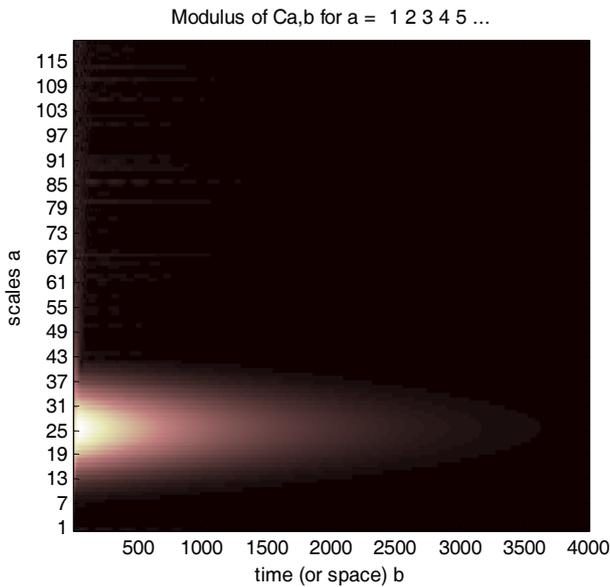


Fig. 8 Wavelet Transform for Numerical Simulation Response Signal Before Damage at St.3

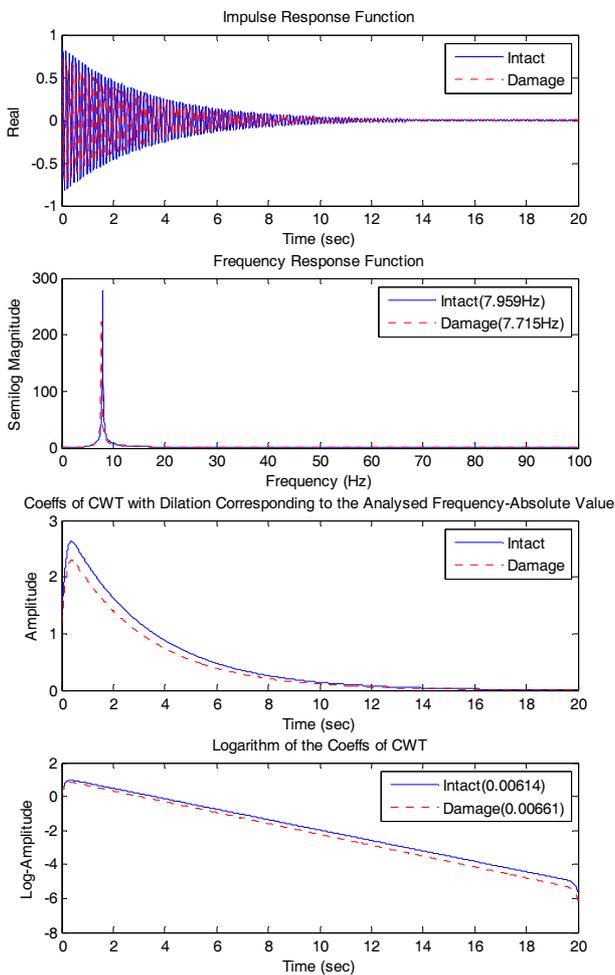


Fig. 9 Estimation of Damping Ratio for Numerical Simulation Response Signal Using Wavelet Transform at St.3

Table 2 Analysis Condition of Numerical Simulation for Damping Ratio Estimation

Sampling Frequency (Hz)	Data Length	Wavelet Center Frequency (rad/sec)	Undamped Natural Frequency (Hz)	Total Scale
200	4000	2.3	7.959	120

Table 3 Analysis Condition of Experiment for Damping Ratio Estimation

Sampling Frequency (Hz)	Data Length	Damped Natural Frequency(Hz)		Total Scale
		1 st Mode	2 nd Mode	
200	2000	7.959	12.109	120

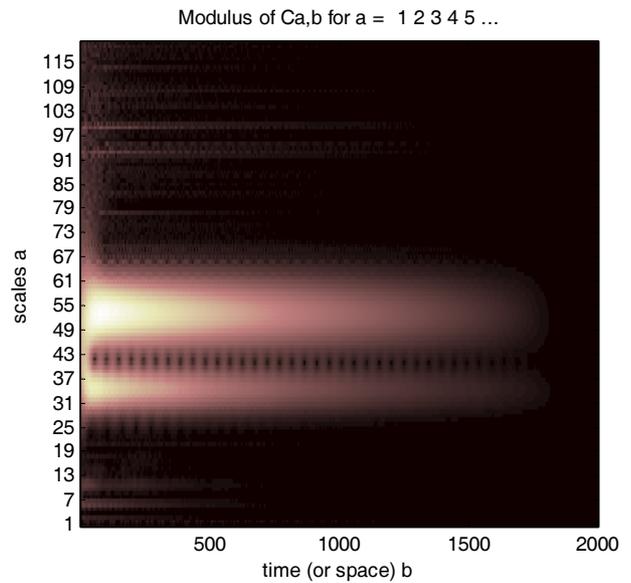


Fig. 10 Wavelet Transform for Experiment Response Signal Before Damage at St.5

블릿 변환을 통한 감쇠비를 분석하였다. 서론에서 언급한 바와 같이 웨이블릿 기저함수의 중심주파수는 전체 스케일의 1/2에 대응되는 주파수로 설정하였으며, St.1~St.14의 모든 위치에 대하여 감쇠비를 분석하였다.

Table 2는 수치해석 응답신호에 대한 감쇠비 분석시 적용된 조건을 나타내고 있으며, 웨이블릿 기저함수의 중심주파수는 2.3rad/sec를 적용하였다. Fig. 8은 수치해석 응답신호 중 St.3 위치에 대한 웨이블릿 변환 등고선도를 보여주고 있으며, 스케일 25에서 웨이블릿 계수가 가장 큰 것을 알 수 있다. 이러한 웨이블릿 변환 결과를 고려하여 손상 전과 손상 후에 대한 수치해석 응답신호의 감쇠비를 평가하는 과정이 Fig. 9에서 보여주고 있으며, 평가 결과 손상 전 감쇠비 0.00614와 손상 후 감쇠비 0.00661로 분석되었다.

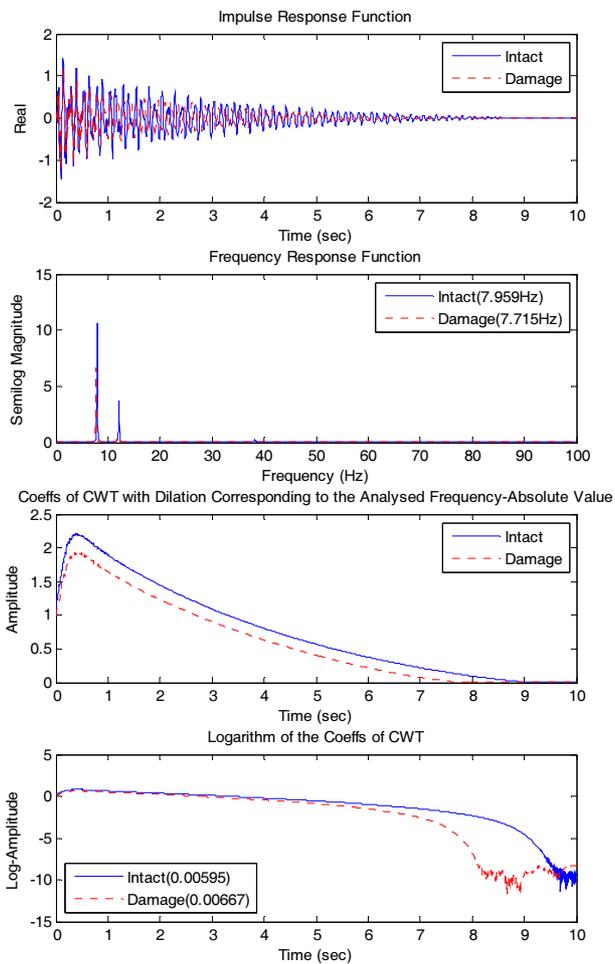


Fig. 11 Estimation of Damping Ratio for Experiment Response Signal Using Wavelet Transform at St.5

Table 3은 실내실험 응답신호에 대한 웨이블릿 변환시 적용된 조건을 보여주고 있으며, 응답신호에 대한 1차 모드와 2차 모드의 고유주파수가 각각 7.959 Hz와 12.109 Hz로 분석되었다. Fig. 10은 실내실험 응답신호에 대한 웨이블릿 변환 결과를 보여주고 있으며, St.5 위치에 대한 감쇠비 분석 결과인 Fig. 11에서 볼 수 있는 바와 같이 손상 전과 손상 후에 대한 감쇠비는 각각 0.00595와 0.00667로 분석되었다.

Table 4는 St.1~St.14의 모든 위치에 대한 감쇠비 분석 결과이며, Fig. 12에서 볼 수 있는 바와 같이 수치해석 응답신호에 대한 감쇠비 증가율은 7.0~7.1%로서 비교적 일정하다. Fig. 13과 14는 실내실험 응답신호에 대한 감쇠비 분석 결과와 감쇠비 증가율을 각각 보여주고 있으며, 우측 경간에 대한 감쇠비가 좌측 경간 감쇠비의 1/2정도로 분석되고 있음을 알 수 있다. 또한 감쇠비 증가율 역시 우측 경간에서 작게 분석되고 있다. 감쇠비는 구조물의 동적 고유 특성으로서 2경간 연속보에

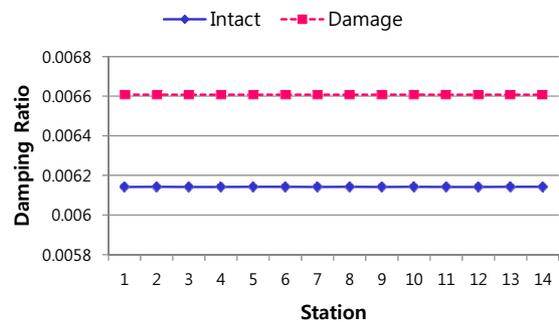


Fig. 12 Damping Ratios for Numerical Simulation Response Signals Using Wavelet Transform

Table 4 Damping Ratios for Numerical Simulation and Experiment Response Signals Using Wavelet Transform

St.	Simulation			Experiment		
	Intact	Damage	Increase Rate(%)	Intact	Damage	Increase Rate(%)
1	0.0061417	0.0066072	7.0	0.0055974	0.0061657	9.2
2	0.0061419	0.0066073	7.1	0.0056222	0.0065216	14
3	0.0061418	0.0066072	7.0	0.0059235	0.0066427	11
4	0.0061418	0.0066073	7.1	0.0059401	0.0065606	9.5
5	0.0061419	0.0066072	7.0	0.0059520	0.0066685	11
6	0.0061419	0.0066072	7.0	0.0057840	0.0060589	4.5
7	0.0061418	0.0066072	7.0	0.0061142	0.0067154	9.0
8	0.0061419	0.0066072	7.0	0.0062446	0.0067468	7.4
9	0.0061418	0.0066072	7.0	0.0031785	0.0032551	2.4
10	0.0061419	0.0066072	7.0	0.0032491	0.0032887	1.2
11	0.0061418	0.0066071	7.0	0.0032909	0.0032956	0.14
12	0.0061417	0.0066072	7.1	0.0029631	0.0030898	4.1
13	0.0061419	0.0066071	7.0	0.0029606	0.0031159	5.0
14	0.0061419	0.0066072	7.0	0.0029515	0.0031242	5.5

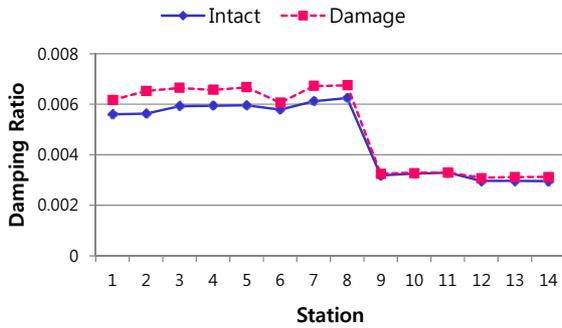


Fig. 13 Damping Ratios for Experiment Response Signals Using Wavelet Transform

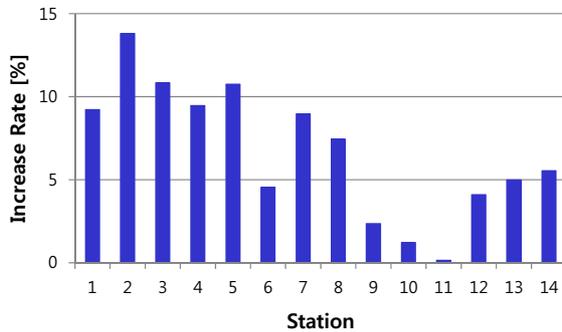


Fig. 14 Increase Rates of Damping Ratios for Experiment

서도 고유한 값으로 평가되어야 한다. 그러나 실내실험 결과에 따르면 두 번째 경간에서 오차가 상당히 크게 분석되고 있으며, 2.2.1절의 고유주파수 분석 결과와 유사하게 나타나고 있다. Fig. 14에서 볼 수 있는 바와 같이 St.2와 St.3에서 감쇠비의 증가율이 가장 크게 나타나며, 이는 손상 위치와 동일함을 알 수 있다. 따라서 감쇠비 증가율 분석을 통하여 손상 위치에 대한 추정도 가능할 것으로 예상되며, 이는 향후 지속적인 연구를 통하여 규명될 것이다. Table 4에서 볼 수 있는 바와 같이 실내실험에 대한 최대 감쇠비 증가율은 14%이다. Table 1의 최대 고유주파수 감소율 3.1%와 비교해 볼 때 구조물에 대한 손상도 추정은 고유주파수에 의한 방법보다 감쇠비에 의한 방법이 좀 더 신뢰성 있는 결과를 보여줄 것으로 판단된다.

2.2.3 비교 분석

시스템의 손상도 평가는 손상으로 인하여 구조적 강성이 감소하게 되면 외부하중으로 인한 응답신호가 손상전과 달라진다는 점을 이용하는 것이다. 구조물의 손상으로 인하여 달라지는 대표적인 변수는 모드 변수가 고려될 수 있다. 모드 변수에는 구조물의 고유주파수, 감쇠비, 모드형상 등이 포함되며, 이러한 모드 변수를 손상 평가에 이용하는 모드해석법의 단점 중 하나는 모드 변수가 구조물의 작은 손상에 대하여 많은 변화를 보이지 않아 민감하지 않다는 것이다. 본 연구에서

Table 5 Comparison of Fragility for Numerical Simulation and Experiment Response Signals

Fragility		Simulation	Experiment
Intact	Natural Frequency(Hz)	7.959	7.959
	Damping Ratio	0.00614	0.00592
Damage	Natural Frequency(Hz)	7.715	7.715
	Damping Ratio	0.00661	0.00664
Δ_{max} Frequency(%)		3.1 (▽)	3.1 (▽)
Δ_{max} Damping Ratio(%)		7.1 (△)	14 (△)

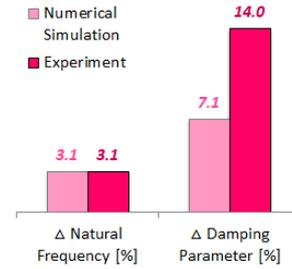


Fig. 15 Comparison of Fragility for Numerical Simulation and Experiment Response Signals

는 이러한 단점을 극복하고자 푸리에 변환에 의한 고유주파수 감소율과 웨이블릿 변환에 의한 감쇠비 증가율을 비교 분석함으로써 응답신호에 의한 구조적 손상도 평가에 신뢰성을 높이고자 하였다.

Table 5에서 볼 수 있는 바와 같이 대상 H-Beam의 동일한 손상에 대하여 고유주파수 감소율은 3.1%로 분석되었고, 감쇠비 증가율은 14%로 분석되었다. 따라서 감쇠비 증가율이 고유주파수 감소율에 비해 좀 더 민감한 결과를 보여주고 있으며, 구조 시스템의 손상도 분석시 고유주파수 분석과 더불어 감쇠비 분석을 추가 수행하면 좀 더 신뢰성 있는 결과를 나타낼 수 있을 것이다. Fig. 15에서 볼 수 있는 바와 같이 감쇠비 증가율에 대한 수치해석 결과 7.1%와 실내실험 결과 14%의 차이가 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이는 프로그램에 의한 수치해석시 가정된 수학적 이론과 실제 현상과의 차이로 보이며, 또한 실내실험에 대한 부재의 상향 진동은 균열 단합 현상이 발생되지만, 수치해석은 요소 접촉(Contact)에 대한 고려가 되지 않아 균열 단합 현상을 구현할 수 없기 때문인 것으로 판단된다.

3. 결론

웨이블릿 변환은 구조 시스템의 응답신호를 분해하여 고유주파수에 대응되는 스케일 성분을 웨이블릿 계수로 평가하며, 이렇게 평가된 웨이블릿 계수에 대한 스케일 시간 함수는

그 기울기를 분석함으로써 구조 시스템의 감쇠비 평가에 적용될 수 있다.

Fig. 15에서 실내실험 응답신호에 대한 고유주파수 감소율은 3.1%를 보이고 있다. 실제 안전진단 현장에서 3.1% 크기의 감소율은 고유주파수 분석 도구와 계측시 적용된 샘플링 주파수의 설정에 따라 충분히 발생 가능한 오차 범위이다. 따라서 고유주파수 감소율 3.1%를 근거로 구조물의 구조적 강성 감소를 판단하게 되면 그 신뢰성이 떨어지게 된다. Fig. 15에서 실내실험 응답신호에 대한 감쇠비 증가율은 14%를 보이고 있으며, 이는 고유주파수 감소율 3.1%와 비교해 볼 때 상당히 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 공용 구조물 응답신호에 대하여 웨이블릿 변환을 적용한 감쇠비 분석은 구조 시스템의 손상도 평가에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

대상 H-Beam의 고유주파수는 1차 모드와 2차 모드가 각각 7.959 Hz와 12.109 Hz로 분석되었다. 본 연구에서 수행된 고유주파수 감소율 및 감쇠비 증가율은 1차 모드를 기준으로 분석된 결과이다. 웨이블릿 변환을 적용한 감쇠비 평가는 중첩된 모드에 대하여 각각의 스케일 시간 함수로 분리될 수 있으므로, 다중 모드에 대한 감쇠비 증가율 및 손상도 추정도 가능할 것이다.

Fig. 14에서 볼 수 있는 바와 같이 감쇠비 증가율에 대한 최대값 위치는 St.2이며, 이는 손상 위치가 St.2와 St.3 사이임을 고려해 볼 때 최대 감쇠비 증가율 위치 분석을 통한 시스템 손상 위치 추정도 가능할 것으로 판단된다.

웨이블릿 변환을 적용한 감쇠비 평가를 통하여 다중 모드에 대한 분석 및 손상 위치 추정에 관한 연구는 향후 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2017학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호 201702920001).

References

- Basu, B. (2005), Identification of Stiffness Degradation in Structures Using Wavelet Analysis, *Construction and Building Materials*, 19, 713-721.
- Chui, C. K. (1992), *Wavelet Analysis and Its Application: An Introduction to Wavelets*, Academic Press, New York, 49-74.
- Curadelli, R. O., J. D., Ambrosini, D., and Amani, M. G. (2008), Damage Detection by Means of Structural Damping Identification, *Engineering Structures*, 30, 3497-3504.
- Grossman, A. and Morlet, J. (1984), Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape, *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, SIAM., 15(4), 723-736.
- Jung, B. S. (1996), A Study on Damage Detection and Assessment of Structures Using Static and Modal Test Data, Ph. D. Thesis, Univ. of Seoul National.
- Kijewski, T. and Kareem, A. (2003), Wavelet Transform for System Identification in Civil Engineering, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18, 339-355.
- Kim, H. S. and Kim, H. S. (2008), Damage Evaluation of a Structure Using Continuous Wavelet Transform, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI., 12(6), 140-146 (in Korean).
- Lee, S. M., Jung, B. S., and Hong, S. W. (2015), Estimation of System Damping Parameter Using Wavelet Transform, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI., 19(5), 30-37 (in Korean).
- Meyer, Y. (1986), *Ondelletes et fonctions splines*, Seminaire Equaions aux Derivees Partielles, Ecole Polytechnique, Paris, France.

Received : 07/07/2017

Revised : 11/23/2017

Accepted : 11/30/2017

요 지 : 본 연구의 목적은 구조 시스템의 구조적 손상에 의한 고유주파수 감소율과 감쇠변수 증가율을 비교 분석하는 것이다. 이를 위하여 저주파 영역의 고유주파수와 비교적 높은 감쇠변수 특성을 갖는 2경간 H-Beam을 대상으로 실내실험과 수치해석을 수행하였으며, 충격하중에 대한 손상 전과 손상 후 응답신호를 각각 14개 위치에서 분석하였다. 각 위치에 대한 손상 전과 손상 후 응답신호는 푸리에 변환을 통하여 고유주파수 감소율을 분석하였으며, 감쇠변수 증가율은 웨이블릿 변환을 통하여 수행되었다. 웨이블릿 변환은 최대 웨이블릿 계수에 대응되는 스케일의 시간함수 분리가 가능하기 때문에 감쇠변수 평가에 대한 정확성을 높일 수 있다. 손상 전과 손상 후 계측된 응답신호에 대하여 고유주파수 감소율은 민감하지 못한 결과로 평가되었고, 감쇠변수 증가율은 비교적 큰 변화량을 보여 구조 시스템의 손상도 평가에 신뢰할 수 있는 결과를 보여주었다.

핵심용어 : 웨이블릿 변환, 손상도, 고유주파수, 감쇠변수