

# Ringing 현상 해석을 위한 실험적 연구와 Wavelet 해석

권순홍\*, 이희성\*, 이형석\*\*, 하문근\*\*\*, 김용직\*\*\*\*

\*부산대학교 조선해양공학과

\*\*현대중공업 선박해양연구소

\*\*\*삼성중공업 조선플랜트 연구소

\*\*\*\*부경대학교 조선해양시스템공학과

## A STUDY ON RINGING BY EXPERIMENT AND CONTINUOUS WAVELET ANALYSIS

S.H. Kwon\*, H.S. Lee\*, H.S. Lee\*\*, M.K. Ha\*\*\*, Y.J. Kim\*\*\*\*

\*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University

\*\* Hyundai Heavy Industries Co, Ltd.

\*\*\*Shipbuilding and Plant R&D Center, Samsung Heavy Industries Co, Ltd.

\*\*\*\*Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University

**KEYWORDS** : Ringing, Continuous Wavelet Transform(연속 웨이블릿 변환), Breaking Waves(쇄파), Coherence Analysis, Spectral Analysis, Circular Cylinder(원주 실린더)

**ABSTRACT** : 본 연구에서는 연속 웨이블릿 변환을 이용하여 Ringing 현상을 연구하였다. 사용되어진 웨이블릿은 Morlet 웨이블릿이었고, 실험은 파수조에서 수행되었다. 또한 Ringing 현상을 다루고자 쇄파를 발생시켰다. 실험에 쓰인 모델은 수면을 통과하여 수직으로 고정된 원주 실린더였고, 이 실린더에 작용된 힘과 파고가 측정되어졌다. 이들은 연속 웨이블릿 변환으로 분석되어졌고, 이러한 분석으로 얻어진 scalogram 들은 고주파 성분이 쇄파 충격시 만들어진다는 사실을 시간영역상에서 보여주었다. 이는 기존의 스펙트럼 분석에서는 찾기 힘든 것이다. Coherence 분석도 위의 결론을 뒷받침해 주었다.

### 1. INTRODUCTION

본 연구의 동기는 단기적 신호들을 분석하는데 있어 웨이블릿 변환이 탁월한 방법이 된다는 사실에 착안하였다. Ringing 은 해양공학이란 영역에서는 대표적인 비정상상태로 해석할 수 있는 현상이다. Ringing 현상이 Hutton TLP 의 설계로 인해 알려진 이후로 여러 모델 시험과 분석 작업이 수행되었다 (C.H.Kim, 1996, 1997; Stansberg, 1995; Marthinsen, 1996; Welch, 1999). 본 연구의 목

적은 연속 웨이블릿 변환(Continuous Wavelet Transform)을 Ringing 분석에 적용하는데 있다. 이러한 연속 웨이블릿 분석을 Ringing 현상에 적용하는 첫번째 시도로, 본 저자는 실험결과에 연속 웨이블릿 분석을 수행해 보았다.

실험은 파수조에서 수행되었으며, 수직 원주 실린더는 쇄파가 발생하는 지점에 위치시켰다. 이러한 실험은 고정된 실린더로 수행되었기 때문에, 본 연구에서 다루어진 자료는 Ringing 응답이 아닌 실린더에 가해진 외

력이었다. 즉, 실린더에 작용된 파진폭과 파력을 측정, 분석하였다. 종래의 전통적인 방법인 스펙트럼 분석은 단지 주파수 영역에서의 에너지분포만을 제공해 주었다. 하지만, 연속 웨이블릿 변환을 하게 되면, 주파수 영역의 정보뿐만 아니라 시간영역에서의 정보까지 얻을 수 있었다. Ringing 현상의 시간 전개를 나타내는데 있어 연속 웨이블릿 변환의 능력을 보여주고자 Coherence 분석도 수행하였다.

## 2. CONTINUOUS WAVELET TRANSFORM

신호  $s(t)$ 에 대한 연속 웨이블릿 변환은 다음과 같다.

$$W_S(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) s(t) dt \quad (1)$$

여기서  $\psi$ 는 웨이블릿 함수이고,  $a$ 는 스케일링 파라미터,  $b$ 는 이동 파라미터이며, \*는 공액복소수를 나타낸다. 위의 식은 연속 웨이블릿 변환이, 크기 조정과 위치 이동된 함수로 곱하여진 신호  $s(t)$ 의 실수부를 전 시간 영역에서 더한 것이라 하는 것을 나타낸다. 파라미터  $a$ 와  $b$ 는 연속적으로 변한다. 본 연구에서 사용되어진 웨이블릿 함수는 Morlet 웨이블릿이고, 이 함수의 형태는 다음과 같다.

$$\psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} \left( e^{-i\omega_0 t} - e^{-\frac{\omega_0^2}{2}} \right) e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (2)$$

두번째 항은 일명 허용 조건이라 하는 것을 만족시키고자 추가되었다. 하지만 큰  $\omega_0$  ( $\omega_0 \geq 5.2$ )에 대해서는 수정항이 수치적으로 무시된다. 그러므로 복소수 형태인 Morlet 웨이블릿은 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$\psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{-i\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (3)$$

이 웨이블릿의 Fourier 변환은 다음과 같다.

$$\hat{\psi}(\omega) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2}} \quad (4)$$

Figure 1은 Morlet 웨이블릿의 실수부와 허수

부를 나타내고 있으며, 이들의 스펙트럼을 Figure 2에 나타내었다.

## 3. MODEL TESTS

본 논문에서의 실험은 너비 2.5m, 길이 40m, 수심 1.2m인 부경대학교 파수조에서 수행되었다. 파력은 지름이 0.1m인 수직 원주 실린더상에 작용되어진 것을 측정하였으며, 실린더의 흘수는 1.08m로 하였다. 이 실린더의 총길이는 1.5m였고, 상부 끝단에 분력계를 부착시켰다. 실험 장비의 배치는 Figure 3과 같다. 쇄파는 조파기로부터의 쇄파발생 거리, 최대 조파기진폭, 그리고 조파기 작동시간과 쇄파 발생시간이라는 네가지 파라미터의 조작을 통해 만들어진다. 본 실험에서 사용된 쇄파는 각 파라미터를 23m, 0.2m, 29.5sec, 29.5sec로 고정시키고 만든 것으로, 이로 인해 발생된 실린더 전반부에서의 파고와 실린더에 작용한 힘은 Figures 4와 5에서 보여지고 있다.

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 5에 나타내어진 파력에 대한 시계열은 신호들이 쇄파에 의한 충격 후 실린더의 고유진동수에서 진동하고 있음을 보여준다. 파진폭과 파력의 연속 웨이블릿 변환은 Figure 6과 7에서 보여진다. 식 4에서의  $\omega_0$ 는 연속 웨이블릿 변환의 계산시 5를 사용한다. Figure 6을 보면, 고주파수 성분은  $a=6$  정도에서 나타나기 시작함을 알 수 있다. 이러한 새로이 생성된 고주파 성분은 쇄파의 충격시 만들어짐을 Figure 7을 통해 알 수 있다. 파와 파력에 대한 스펙트럼들을 Figures 8과 9에서 나타내었다. Figure 8에 나타난 생성된 쇄파의 스펙트럼은 주파수 영역 상에서 넓게 분포되어있다. 파력 스펙트럼으로부터 구하여진 실린더의 고유진동수가 2.8Hz이므로 본 실험에 쓰인 실린더의 고유진동수는 파 스펙트럼의 영역 안에 존재하였

다. 이는 Ringing 이 쇄파 충격으로 인한 구조물의 고유진동수 응답으로 이해될 수 있다는 사실을 의미한다. 연속 웨이블릿 변환의 결과로 coherence 분석이 수행되었는데, Fourier 변환에 의한 에너지 밀도 스펙트럼과의 유사성으로 인해 데이터 x(t)에 대한 웨이블릿 스펙트럼은 다음과 같이 정의된다.

$$S_X(a,b) = W_X(a,b)W_X^*(a,b) = |W_X(a,b)|^2 \quad (5)$$

동시에 측정된 두 데이터 x(t), y(t)의 분석에 대한 상호 웨이블릿 스펙트럼은 다음과 같이 정의된다.

$$S_{XY}(a,b) = W_X(a,b)W_Y^*(a,b) \quad (6)$$

웨이블릿 coherency 와 웨이블릿 coherence 도 다음과 같이 정의된다.

$$\Gamma(a,b) = \frac{S_{XY}(a,b)}{\sqrt{W_X(a,b)W_Y(a,b)}} \quad (7)$$

$$\Gamma^2(a,b) = \frac{[\text{Re}S_{XY}(a,b)]^2 + [\text{Im}S_{XY}(a,b)]^2}{W_X(a,b)W_Y(a,b)} \quad (8)$$

여기서 Re 과 Im 은 각각 복소수값의 실수부와 허수부를 나타낸다.

b=0.25 에서 실린더에 작용한 파고와 파력의 웨이블릿 스펙트럼에 대한 단면은 Figures 10 에서 나타내었다. Coherence 의 실수부와 허수부, 그리고 coherence 의 위상은 Figures 11 에서 나타내었다. 최대 coherency 는 위상값이 영일 경우 나타난다. Ringing 을 의미하는 최대 coherence 는 a= 6.9 일때 나타난 것으로 보인다. 연속 웨이블릿 변환을 이용하여 수행되어진 본 연구는 ringing 의 응답으로 보이는 주파수 성분뿐만 아니라 이러한 현상이 일어나는 특정 시간대도 찾아낼 수 있었다. 이러한 결과는 전통적인 Fourier 분석에서는 찾아볼 수 없는 것이다.

## 5. CONCLUSIONS

본 연구에서는 연속 웨이블릿 변환을 통하여

ringing 에 대한 분석을 수행하였다. 전통적인 스펙트럼 분석도 실시하였다. 파진폭과 파력 시계열의 연속 웨이블릿 변환으로 시간영역에서 ringing 현상을 유도한다고 믿어지는 고주파 성분의 형태를 설명할 수 있었다. 이는 연속 웨이블릿 변환의 성질이 전통적인 스펙트럼 분석보다 낫다는 것이다. Coherency 분석도 파와 구조물 사이가 최대로 연관되는 정확한 시간을 찾는 데 역시 이용되어질 수 있다는 것을 보였다. 본 연구 결과, Ringing 은 쇄파충격에 의한 구조물의 공진현상으로 해석되어짐을 보였다.

## References

- Kim C.H., Xu Y., Zou J. and Won Y.S.(1996). A Model for Weak Impacting Force on Vertical Truncated Cylinder Due to Steep Asymmetric Wave. *Proceedings of the Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference* vol.3, 215-220.
- Kim C.H., Zhao C.T., and Xu Y. (1997). Spring and Ringing Due to Laboratory-Generated Asymmetric Waves. *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 7:1, 30-35.
- Marthinsen T., Stansberg C.T., and Krokstad J.R. (1996). On the Ringing Excitation of Circular Cylinders. *Proceedings of the Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference* vol 1, 196-204.
- Stansberg C.T., Huse E. Krokstad J.R., and Lehn E. (1995). Experimental Study of Non-Linear Loads on Vertical Cylinders in Steep Random Waves. *Proceedings of the Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference* vol 1, 75-82.
- Welch S., Levi C., Fontain E., and Tulin M.P. (1999). Experimental Study of the Ringing Response of a Vertical Cylinder in Breaking Wave Groups, *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 9:4, 276-282.

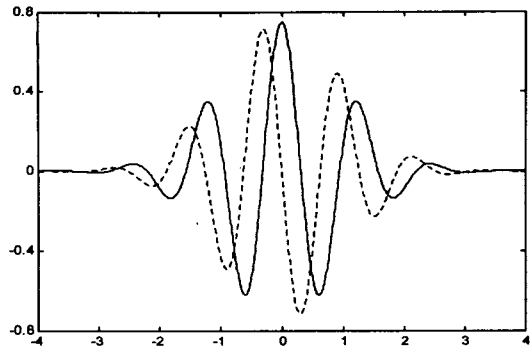


Figure 1: Real & imaginary part of Morlet wave

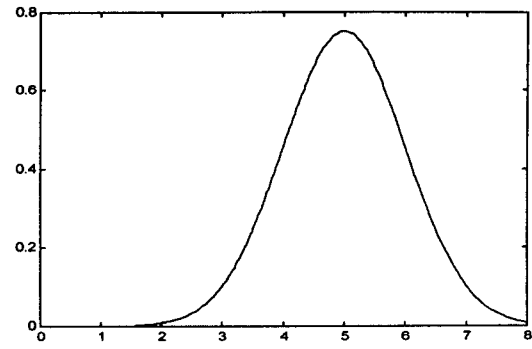


Figure 2: Spectrum of Morlet wave

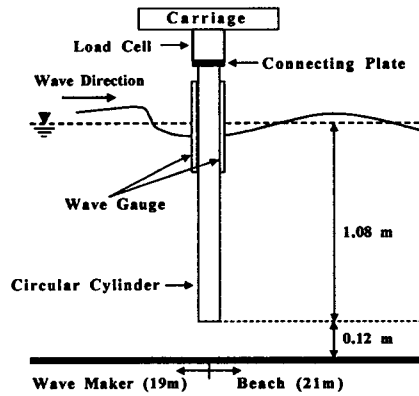


Figure 3: Experimental Setup

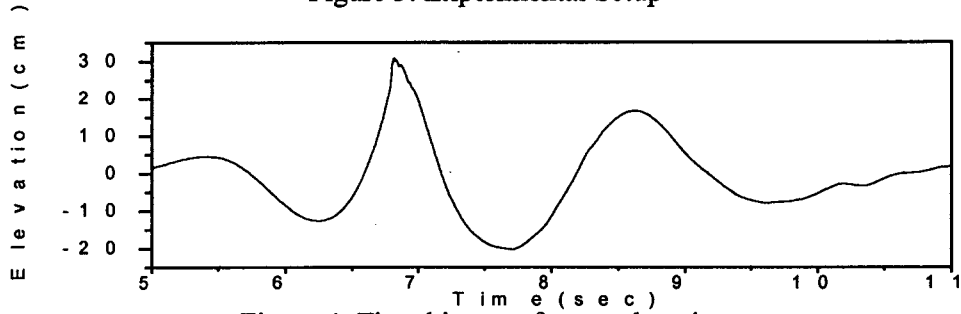


Figure 4: Time history of wave elevation

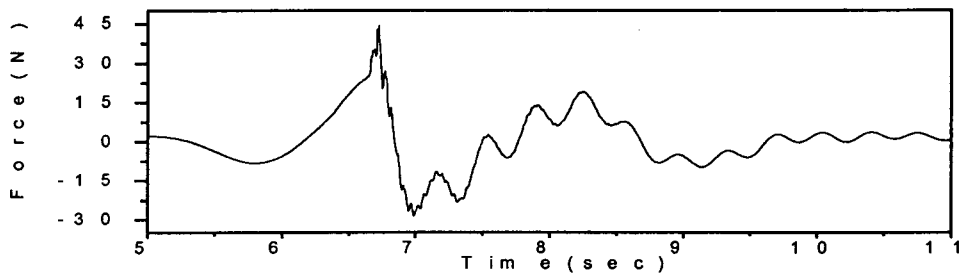


Figure 5: Time history of force

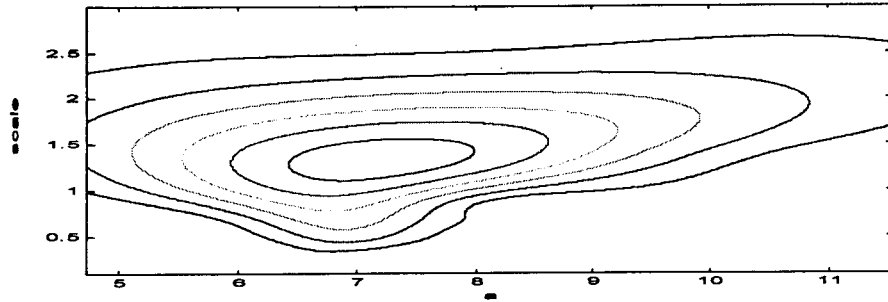


Figure 6: Scalogram for wave

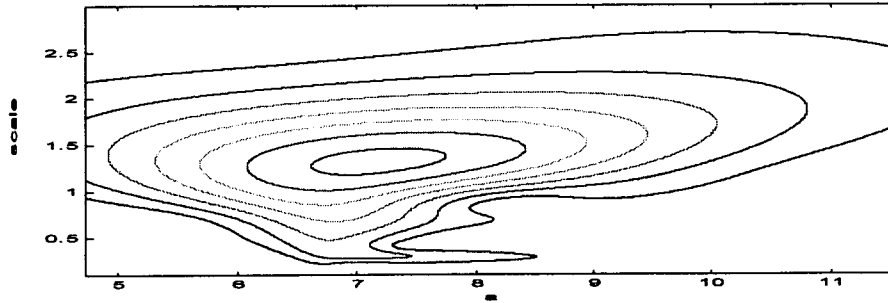


Figure 7: Scalogram for force

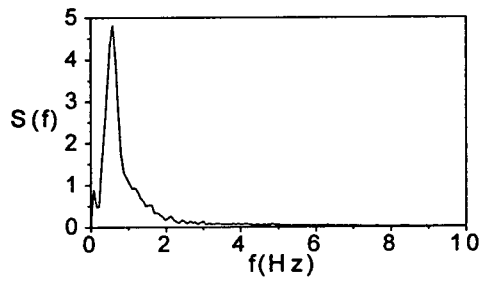


Figure 8: Spectrum of wave

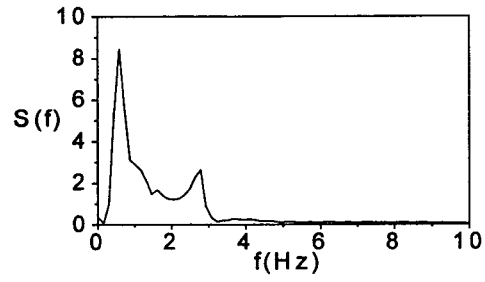
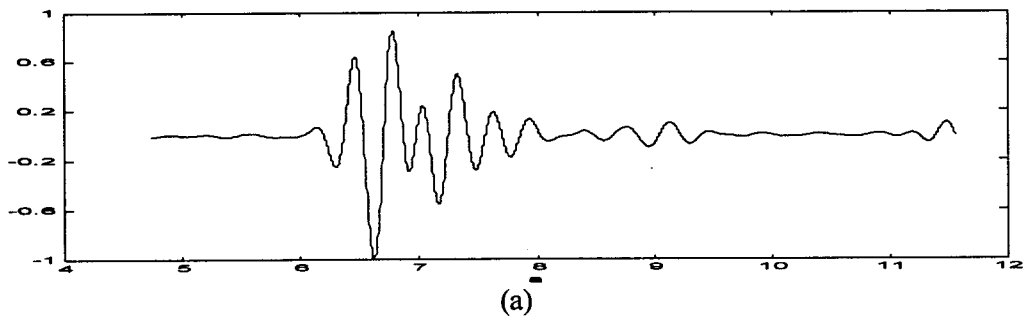
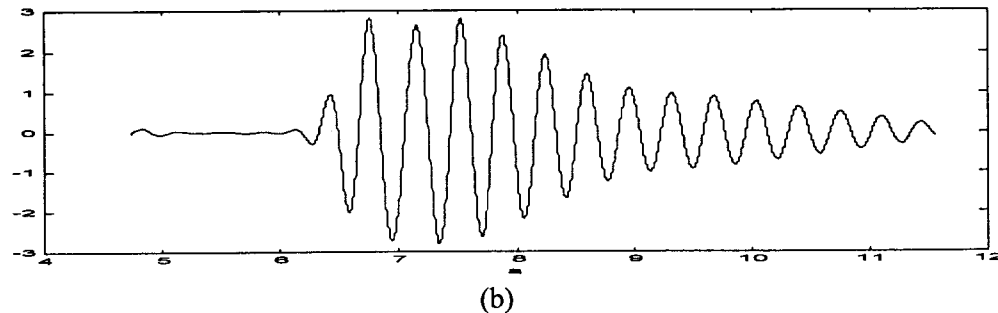


Figure 9: Spectrum of force

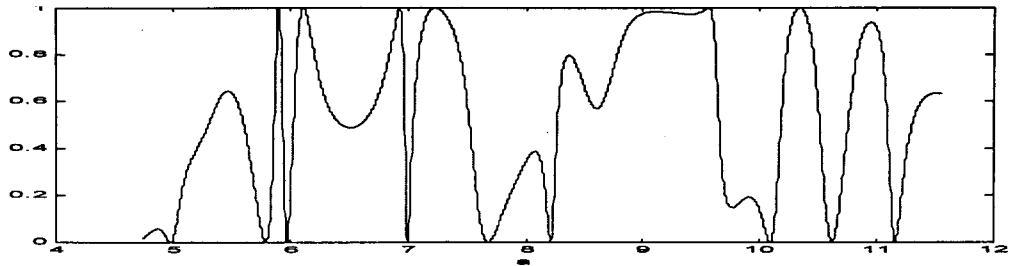


(a)

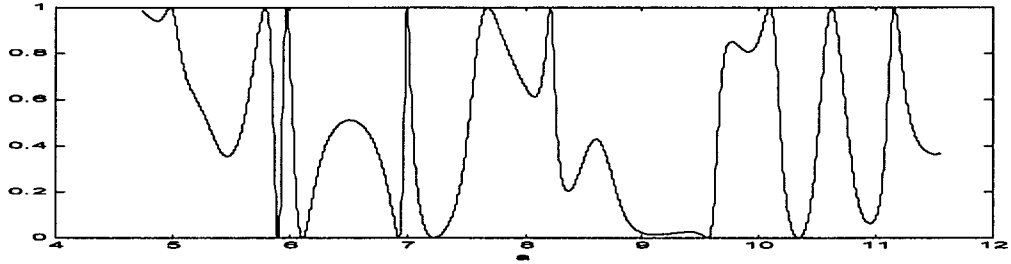


(b)

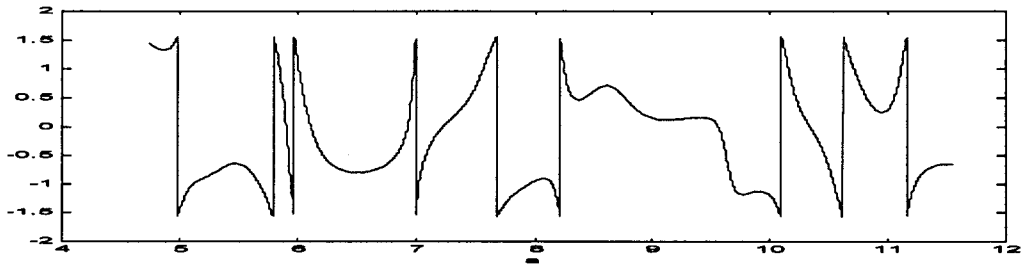
Figure 10: Wavelet spectrum of wave elevation at  $b=0.25$ (a), wavelet spectrum of force at  $b=0.25$ (b)



(a)



(b)



(c)

Figure 11: Real part of  $\text{Coh}^2$ (a), imaginary part of  $\text{Coh}^2$ (b), phase of coherence(c)