

# 不規則波 入力 Signal의 再現 方法

吳 榮 敏 \*

鄭 信 澤 \*\*

全 仁 植 \*\*\*

## 1. 序 論

우리나라는 근래에 들어와서 經濟의 高度成長과 인구의 증가에 따라 沿岸開發의 重要性이 강조되어 왔다. 한편 연안개발사업은 沿岸 構造物 設치의 增加를 초래했고, 그에 따라 구조물의 適正設計가 중요시 되었다. 구조물의 적정설계를 위해서는 數値解析的인 방법이 많이 이용되어져 왔는데, 이는 費用이 저렴하며 여러가지 경우를 고려하기 쉽다는 장점에도 불구하고 단순히 計算에만 의존하기 때문에 信賴性에 문제가 있다. 따라서 연안 구조물의 適正設計를 위해서는 수치해석적인 방법과 아울러 수리모형실험을 같이 고려하는 것이 바람직하다. 수리모형실험을 수행하기 위해서는 造波裝置를 갖추어야 하는데, 이 장치를 이용하여 水槽내에서 再現할 수 있는 파에는 크게 規則波와 不規則波가 있다. 과거에는 주로 規則波에 의한 실험이 수행되었으나 현재는 不規則波 造波 技術의 開發로 實際 現狀을 보다 正確하게 再現할 수 있게 되었다 (4,7,8,9,13). 한편 不規則波 造波

---

\* 해양연구소 해양공학연구실 연구원  
\*\* 해양연구소 해양공학연구실 연구원  
\*\*\* 해양연구소 해양공학연구실 선임연구원

裝置를 갖춘 수리 실험실이 國內에도 여러 곳 있으나, 造波 裝置에 대한 理解 不足으로 인하여 충분한 실험이 이루어지고 있지 못한 실정이다. 이를 解決하기 위해서는 造波 裝置의 獨自的 開發이 필요한데, 本 論文에서는 이를 위한 첫 단계로서 不規則波 造波에 널리 쓰이는 Wave superposition 方法과 Digital filtering 方法을 사용하여 조파 장치에 入力되는 Signal을 再現하였다.

## 2. 入力 Signal의 再現 方法

### 2.1 接近 方法

水槽 내에서 不規則波를 조파하기 위한 入力 Signal의 再現 方法에는 크게 Wave superposition 方法과 Digital filtering 方法이 있다. 각 방법은 서로 長短점을 가지고 있어서 어느 방법이 더 좋다고 단정할 수는 없으며 使用 目的에 따라서 선택할 수 있다. 두 방법은 모두 目的 Spectrum을 이용하여 不規則 波形을 재현한다는 점에서 一致한다. 각 방법의 入力 Signal의 正確한 再現 精度를 알기 위해서는 재현된 不規則 波形의 Spectrum을 구하여(1) 目的 Spectrum과 比較하여야 한다. 이때 使用된 Spectrum은 모두 Two-sided spectrum 이다. 두 방법의 基本式은 Borgman(2)에 의하여 연구되었으며 Wave superposition 方法은 時間 領域(Time domain)에서, Digital filtering은 Fast Fourier transform (FFT)을 이용한 周波數 領域(Frequency domain)에서 入力 Signal을 계산한다. 두 방법은 Tuah and Hudspeth(12)가 提案한 Deterministic spectral amplitude (DSA) model 과 Nondeterministic spectral amplitude (NSA) model에 각각 비교될 수 있다.

## 2.2 Wave superposition

有限個의 個別 正弦波를 合成하여 불규칙파를 만들어 내는 Wave superposition 방법은 Goda(5) 등에 의하여 연구되었으며 그 基本過程은 다음과 같다. 任意의 周波數( $f_n$ )과 位相( $\theta_n$ )을 가진 N 개의 正弦波의 合成에 의하여 生成되는 波浪 變位  $\eta(t)$ 는

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{2S(f_n)\Delta f_n} \cos(2\pi f_n t + \theta_n) \quad (2.1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $S(f_n)$ 은 目的 Spectrum이며, 주어진 觀測 時間 間隔 ( $\Delta t$ )에 대하여 周波數  $f_n$ 은

$$0 \leq f_n \leq f_N = f_c (= 1/2\Delta t) \quad (2.2)$$

을 만족하는 값이고, 이 範圍를 벗어나는 주파수에 대해서는  $S(f)=0$ 이라고 가정한다. 한편  $\theta_n$ 은  $(0, 2\pi)$  사이의 값을 갖는 Random number 이다. 波浪 變位  $\eta(t)$ 를 얻기 위하여 累加 Spectrum  $S_a(f)$ 를

$$S_a(f) = 2 \int_0^f S(f) df \quad (2.3)$$

와 같이 정의하면 식 (2.1)은

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{S_a(f_n) - S_a(f_{n-1})} \cos(2\pi f_n t + \theta_n) \quad (2.4)$$

로 變換될 수 있으며, 波의 週期성을 避하기 위하여 周波數  $f_n$  은

$$Sa(f_n) = \frac{n}{N} Sa(\infty) \quad (2.5)$$

에 의하여 구한다.

### 2.3 Digital filtering

Digital filtering 에 의한 波浪 變位  $Y_k$  는

$$Y_k = \sum_{n=-N}^N a_n \cdot X_{k-n} \quad k = N+1, N+2, \dots \quad (2.6)$$

의 Convolution 形態로 표시된다. 여기서 變數  $X_{k-m}$  은 正規 分布  $N(0,1)$ 을 만족하며, 單位 Spectrum을 갖는 Gaussian white noise 이다. Medina 등(11)이 제안한 식에 의하면 目的 Spectrum  $S_{yy}(f)$ 는

$$S_{yy}(f) = 2 \sigma_x^2 \Delta t |H(f)|^2 \quad (2.7)$$

의 관계를 가지며 여기서  $\sigma_x^2$  은 Gaussian white noise의 Variance 이며  $H(f)$ 는 周波數 應答 函數이다. 한편 식 (2.6)에서 變數  $a_m$  은 주파수 應答 함수  $H(f)$ 를 Cosine inverse Fourier transform (3) 하여 구할 수 있는데 그 關係式은 다음과 같다.

$$a_m = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N H(f) \cos\left(\frac{2\pi n k}{N}\right) \quad (2.8)$$

### 3. 入力 Signal의 再現 및 再現 結果

#### 3.1 入力 Signal의 再現

不規則 造波機에 입력되는 Signal을 재현하기 위하여 平均 波高  $\bar{H} = 0.2$  m 와 平均 週期  $\bar{T} = 5.0$  s 를 갖는 Bretschneider spectrum을 目的 Spectrum으로 사용하였다. 入力 Signal의 時間 間隔은 Kimura 등(9)이 제안한

$$\Delta t \leq 0.05 / f_p \quad (3.1)$$

식에 따라 0.1 秒로 하였는데, 여기서  $f_p$ 는 尖頭 周波數이다. 이때 解象度(resolution)는 0.01 Hz로 하였다. Wave superposition 방법에서 사용한 Random number는 Multiplicative linear congruential generator(10)를 사용하여 (0,1) 사이의 값을 製造한 후에  $2\pi$ 를 곱하여 구하였다.

#### 3.2 再現 結果

Bretschneider spectrum을 使用하여 Wave superposition 方法과 Digital filtering 方法에 의하여 재현한 波浪 變位와 재현된 파랑 變위의 Spectrum은 각각 Fig. 3.1, 3.2 와 같다. 두 그림을 살펴보면, 前者의 방법이 後者の 방법보다 Spectrum의 再現 效果가 더

우수함을 알 수 있다. 두 方法에 의하여 재현된 波浪 變位の 平均 波高와 平均 週期를 구하여 初期値와 比較한 結果는 表 3.1 과 같다. 再現 效果를 알아 보기 위하여 再現率을 사용하였는데,

$$\text{再現率} = \frac{\text{再現値}}{\text{初期値}} \times 100 (\%) \quad (3.2)$$

로 정의하였다. 이 表에서 알 수 있는 사실은 前者의 方法이 後者の 方法보다 波高는 좀 높게 나타났으며, 週期는 두 方法 모두 初期値에 一致하지는 않았지만 前者의 方法에 의한 재현 效果가 더 優秀하였다. 두 方法에 의하여 再現된 波浪 變位와 計算된 波高 資料가 각각 正規 分布와 Rayleigh 分布를 따르는지를 알아 보기 위하여 一定한 確率 階級을 갖는 Chi-square test(6)를 실시하였다. 이 Test를 적용한 결과, 두 方法에 의하여 재현된 波浪 變位는 모두 正規 分布에 대하여 90 %의 신뢰 구간을 만족하지 않았고, 波高 자료는 Rayleigh 分布에 대하여 90 %의 信賴 區間을 만족하였다. 현장 관측 자료를 實驗室에서 再現하는 데에는 Digital filtering 方法이 훨씬 간편하고 정확하다. 실제로 이 方法을 사용하여 東海岸의 측면에서 시간 간격 0.5 秒로 관측한 2,048 個의 資料를 再現해 보았으며 그 결과는 각각 Fig. 3.3, 表 3.2 와 같다. 이 그림과 表에서 보듯이 目的 Spectrum과 再現된 Spectrum은 거의 一致된 모양을 보였으며, 波浪 變位는 代表 波浪 變數들을 비교한 결과 再現 效果가 매우 優秀한 것으로 나타났다.

표 3.1 Bretschneider spectrum 의 再現 效果 比較

代表 變數	初期值	W. S.		D. F.	
		再現值	再現率	再現值	再現率
平均 波高	0.20 m	0.21 m	105 %	0.20 m	100 %
平均 週期	5.00 s	4.79 s	96 %	4.39 s	88 %

표 3.2 D.F.을 이용한 現場 Spectrum 의 再現 效果

代表 變數	初期值	再現值	再現率
平均 波高	0.33 m	0.32 m	97 %
平均 週期	3.73 s	3.79 s	102 %

#### 4. 結 論

Wave superposition 方法과 Digital filtering 方法의 적용에 따른 各種 分析 結果로 부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 前者의 방법은 波高 再現 效果가, 後者의 방법은 週期 再現 效果가 각각 우수하였다.
- 2) 後者의 방법은 入力 Signal 의 再現 速度가 前者의 방법보다 4 倍 정도 빠르며, 現場 觀測 資料를 손쉽게 재현할 수 있다는 장점이 있다.
- 3) 두 方法에 의하여 재현된 波高 資料는 모두 Rayleigh 分布를 따른다.

## 参 考 文 献

1. Bendat, P., Random Data, John Wiley & Sons, Inc., U.S., 1971.
2. Borgman, L.E., "Ocean Wave Simulation for Engineering Design", Jou. of the Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol.95, No.WW4, Nov., 1969, PP.557-583.
3. Brigham, E.O., The Fast Fourier Transform, Prentice-Hall, inc., Englewood Cliffs, N.J., 1974.
4. Funke, R., "Random Wave Signal Generation by Minicomputer", Proc. 14th Conf. Coastal Eng., 1974, PP.352-371.
5. Goda, Y., Random Sea and Design of Maritime Structures, Univ. of Tokyo Press, 1985.
6. Haan, C.T., Statistical Methods in Hydrology, Iowa State Univ. Press., 1977.
7. Hudspeth, R.T. and L.E. Borgman, "Efficient FFT Simulation of Digital Time Sequences", Jou. of the Eng. Mechanics Division, ASCE, Vol.105, No.EM2, Apr., 1979, PP.223-235.
8. Hudspeth, R.T. and M.C. Chen, "Digital Simulation of Non-linear Random Waves", Jou. of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol.105, No.WW1, Feb., 1979, PP.67-85.
9. Kimura, A. and Y. Iwagaki, "Random Wave Simulation in a Laboratory Tank", Proc. 15th Conf. Coastal Eng., 1976, PP.368-387.
10. Law, A.M. and W.D. Kelton, Simulation Modeling and Analysis, McGraw-Hill, Inc., 1982.
11. Medina, J.R., J. Aguilar and J.J. Diez, "Distortions Associated with Random Sea Simulators", Jou. of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol.111, No.WW4, July, 1985, PP.603- 627
12. Tuah, H. and R.T. Hudspeth, "Comparison of Numerical Random Sea Simulations", Jou. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol.108, No.WW4, Nov., 1982, PP.569-584.
13. Webber, N.B. and C.D. Christian, "A Programmable Irregular Wave Generator", Proc. 14th Conf. Coastal Eng., 1974, PP.340-351.



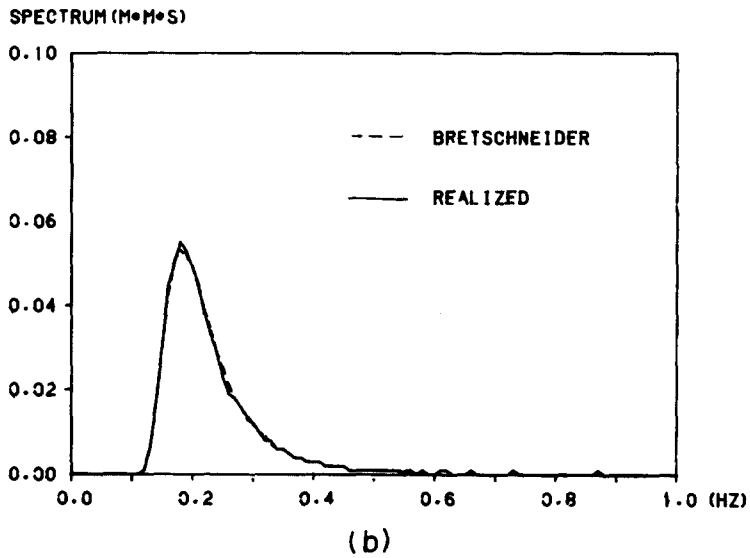
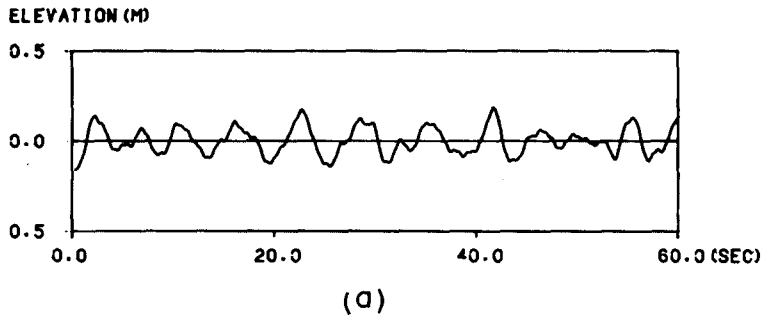


Fig. 3.1 Wave superposition 방법을 이용하여  
재현한 입력 Signal(a)과 Spectrum(b)  
( $\bar{H} = 0.2 \text{ m}$ ,  $\bar{T} = 5.0 \text{ s}$ ,  $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ )

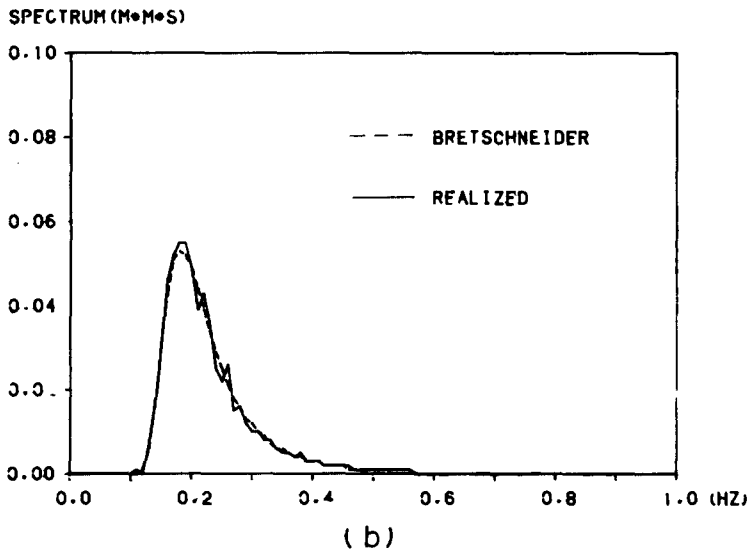
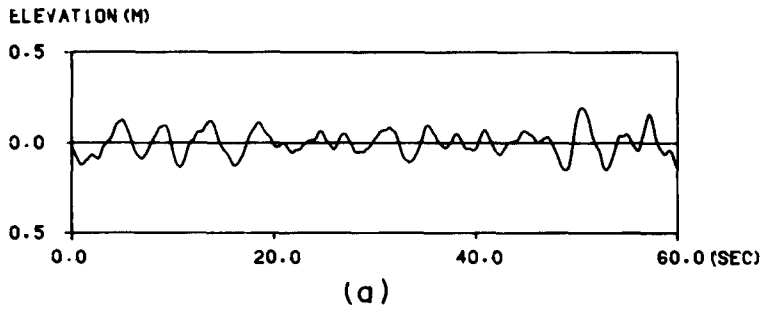
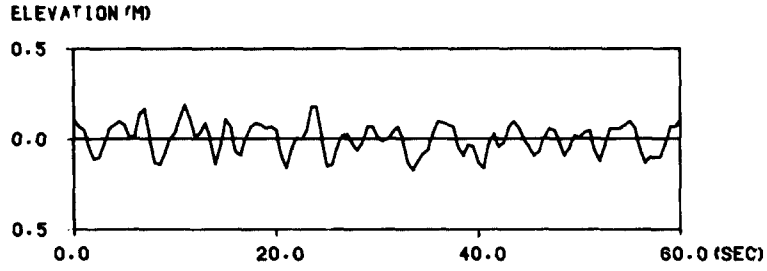
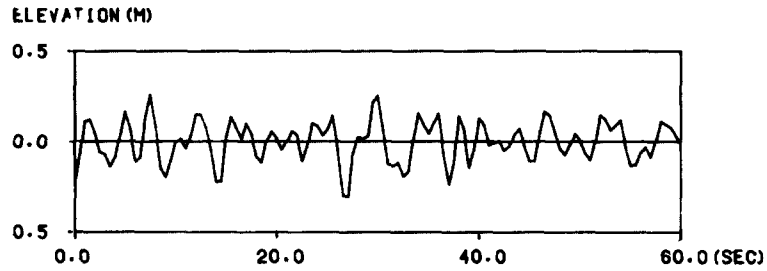


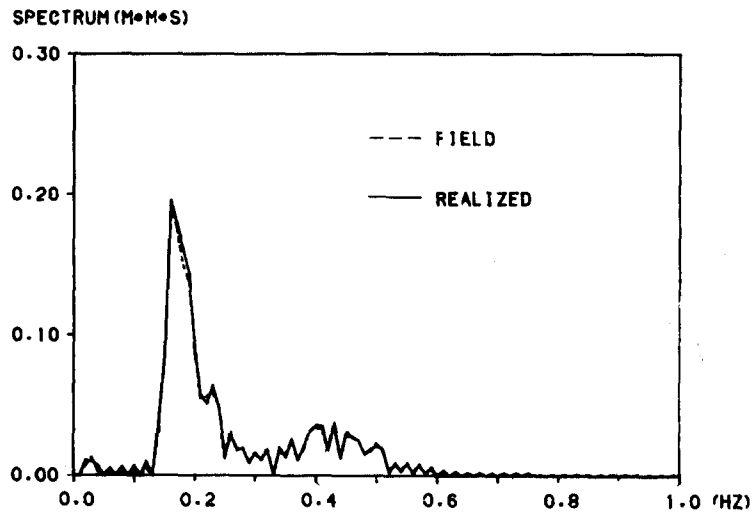
Fig. 3.2 Digital filtering 방법을 이용하여  
재현한 입력 Signal(a)과 Spectrum(b)  
( $\bar{H} = 0.2$  m,  $\bar{T} = 5.0$  s,  $\Delta t = 0.1$  s)



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.3 현장 자료(a)를 이용하여 재현한 입력 Signal(b)과 Spectrum(c) ( $\bar{H} = 0.33$  m,  $\bar{T} = 3.73$  s,  $\Delta t = 0.5$  s)