

波群에 따른 長週期波의 舉動特性 解析

Analysis on the Characteristics of the group-bounded long wave

李 哲 應* 李 吉 成* 片 宗 根**

1. 緒 論

短週期波群에 의하여 발생하는 長週期波를 나타내는 용어로 surf-beats, edge波 그리고 平均水位降下(set-down 또는 group bounded long wave)등이 사용되어지고 있다. 이들의 발생성격에 대한 물리적 특성으로, surf-beats와 edge波는 일반적으로 淺海域에서 발생하는 非線形干涉(碎波特性) 및 海岸線의 反射性和 관련있으며 平均水位降下는 단 지 단주기파에 의하여 형성된 波群의 특성과 관련을 갖게 된다. 따라서 平均水位降下는 반사의 영향이 전혀없는 深海波浪에서도 파군의 특성과 관련되어 일정한 크기로 발생되지만 surf-beats와 edge波는 천해역에서는 그 크기가 크다가 심해로 갈수록 감소하는 自由波(free wave)의 성질을 가지고 있다.

천해역에서 볼 수 있는 장주기의 水面變動에 대해서는 그 거동이 부체의 長週期動搖나 항만의 진동 뿐만 아니라 漂砂問題와도 깊게 관련되어 있다는 것이 지적되어, 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 분야이다. 특히 항만과 관련하여 港灣의 共振, 繫留線의 破壞 그리고 荷役作業의 支障 등 여러가지 역기능들은 보통 외해에서 내습하는 長週期波에 의하여 발생하게 된다. 이와 같은 長週期波의 발생원인 중 하나가 波群現象(wave grouping)이다. 이는 고파군의 유속이 저파군의 유속보다 크게되며 대기압하에서 고파군 아래의 壓力은 저파군 아래의 압력보다 유속의 제곱에 비례하여 작게된다. 따라서 고파군 아래에서는 水位降下가 발생되고 저파군 아래에서는 水位上昇이 일어나는 長週期動搖가 유발된다. 항만이나 선박의 振動과 관련된 주기는 일반적으로 20초에서 3분 정도로 파군에 의하여 유발되는 長週期波의 주기가 이범위에 속하게 된다. 비록 이와 같이 파군에 의하여 유발된 長週期波의 振幅이 파군의 진폭에 비례하여 작지만, 선박이나 항만의 에너지 減衰(energy damping)效果가 적은 경우에는 선박이나 항만의 제반 기능에 역효과를 주는 共振現象이 발생될 수 있다.

* 서울대학교 土木工學科(Department of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea)

** 明知대학교 土木工學科(Department of Civil Engineering, Myuonng Ji University, Seoul, 120-728, Korea)

본 연구에서는 파군에 의하여 유발되는 장주기파를 2차비선형이론, 잉여에너지론 및 에너지이력(Smoothed Instantaneous Wave Energy History : SIWEH)이론을 사용하여 유도하고 그 거동특성을 해석하고자 한다.

2. 解析方法

2.1 2次非線形理論

平均水位降下の 발생원인은 서론에서 언급한것 처럼, 波浪運動에 따른 고파군의 수입자 속도는 저파군(파군과 파군 사이)의 수입자 속도보다 당연히 크게 된다. Bernoulli 方程式에 따라 이것은 수입자 속도의 자승에 비례하는 壓力降下를 유발하여 고파군 아래에서는 수압이 낮아지게 된다. 만약 일정 대기압을 가정한다면, 平均水面은 파군아래에서 강하되고 그에 대응하는 평균수면의 상승은 波群사이에서 일어나게 된다. 이와 같은 水面動搖는 수면 아래에서 파랑과 같은 흐름을 유발할 것이고 이에 따라 장주기 교란이 형성된다. 유체가 비압축성이고 유체운동이 비회전성이라는 가정하에서, 波浪特性을 해석하기 위하여 사용되는 支配方程式 및 境界條件들은 다음 式 (1) ~ (4)와 같다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\eta = 0, \quad z = \eta \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad z = \eta \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = 0, \quad z = -h \quad (4)$$

여기서 $\phi(x, z, t)$ 는 速度 포텐셜, $\eta(x, t)$ 는 水面變位, h 는 平均水深이며 t 는 時間 이다. 위의 방정식으로부터 2次非線形의 영향을 찾아내기 위하여 攝動法을 이용하면, 다음 式 (5), (6)과 같은 해를 가정할 수 있다.

$$\phi = \varepsilon \phi^{(1)} + \varepsilon^2 \phi^{(2)} + \dots \quad (5)$$

$$\eta = \varepsilon \eta^{(1)} + \varepsilon^2 \eta^{(2)} + \dots \quad (6)$$

그러므로 式 (5)와 (6)을 式 (1) ~ (4)에 대입하여 ε^2 의 크기에 해당하는 平均水位降下 (長週期波)를 다음 式 (7)과 같이 얻을 수 있다.

$$\bar{\eta} = -\frac{1}{g} \left(\frac{KC_g^2}{gh - C_g^2} + \frac{\omega^2}{4\sinh^2(kh)} \right) \cdot \sum_{n,m} a_n a_m \cos(\Delta kx - \Delta \omega t + \Delta \chi) \quad (7)$$

여기서,

$$K = \frac{\omega^2}{4\sinh^2(kh)} \left[\frac{\sinh(4kh) + 3\sinh(2kh) + 2kh}{\sinh(2kh) + 2kh} \right]$$

$$\Delta \omega = \omega_n - \omega_m$$

$$\Delta k = k_n - k_m$$

$$\Delta \chi = \chi_n - \chi_m$$

2.2 剩餘應力理論

剩餘應力 S_{xx} 와 平均水面運動量 M 을 이용하면 連續方程式 (8)과 運動量方程式 (9)를 얻을 수 있다.

$$-\rho C_g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$\rho gh \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} - C_g \frac{\partial M}{\partial x} = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} \quad (9)$$

그러므로 式 (8)에 C_g 를 곱하여 式 (9)와 더한 후 x 에 대하여 적분하면 平均수위강하를 다음 式 (10)과 같이 얻을 수 있다.

$$\bar{\eta} = -\frac{1}{\rho} \frac{S_{xx}}{gh - C_g^2} \quad (10)$$

高波群 아래에서 S_{xx} 가 크게 되어 $\bar{\eta}$ 는 음수가 된다. 이것은 파랑의 진행방향과 반대 방향을 가지는 흐름을 형성하여 平均水面的 강하가 발생한다는 것을 의미한다. 한편 저 파군에서는 이에 대한 반사작용으로 흐름의 방향이 파랑의 진행방향과 동일하게 되어 平均水面이 上昇하게 된다.

2.3 SIWEH理論

2次非線形理論이나 剩餘應力理論은 規則波群에만 적용이 가능하며 불규칙파군으로 부터 長週期波를 유도한다는 것은 매우 어렵다. 현재까지 제안된 방법들은 주로 2次非線形理論에 근거한 방법으로 다음과 같은 과정을 통하여 不規則波群속에 내재된 長週期波를 유도하였다. 먼저 관측된 短週期波資料로 부터 스펙트럼을 구한 후, 스펙트럼 상에서

가장 에너지가 높은 임의의 주파수를 가지고 여러개의 規則波群과 그에 따른 長週期波를 이론적으로 구한다. 이와 같이 구하여진 規則波群과 長週期波를 합성하여 실측된 觀測資料와 유사한 형태의 短週期波群과 그에 따른 長週期波를 얻게된다. 그러나 이와 같은 방법은 여러 과정을 거쳐야하는 번거로움이 있고, 또한 아무리 많은 規則波群을 발생시켜 합성한다고 하여도 觀測資料와 동일한 자료를 얻을 수 없다는 問題點을 가지게 된다.

따라서 본 연구에서는 Funke와 Mansard(1980)이 제안한 에너지履歷理論을 이용하여 해양에서 관측되는 不規則波浪으로 형성된 파군속에 내재된 長週期波를 직접 유도할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 시간에 따른 연속적인 變化特性을 고려하기 위하여 에너지履歷理論을 이용하였는데, SIWEH가 진폭의 자승에 비례하는 에너지 변화를 시간에 따라 나타낸 것이기 때문에 SIWEH가 큰 부분에서는 高波群이 형성되어 平均水位降下가 발생하리라 예측할 수 있다. 이때 국부적인 특징, 장주기파의 진폭의 크기와 위상을 함께 고려하면 시간의 변화에 따른 長週期波를 유도할 수 있다.

淺水域($kh \ll 1$)이라는 가정하에 進行波의 잉여용력을 사용, 式 (8)과 (9)를 이용하면 다음 式 (11)을 얻을 수 있다.

$$\overline{\eta(x,t)} = -\frac{3g}{2\omega^2 h^2} [E(x,t) - \bar{E}] \quad (11)$$

式 (11)은 천수역에 대한 2차비선형이론의 결과 뿐만 아니라 잉여용력이론의 결과와도 일치하고 있다. 제안된 식을 해석적으로 얻을 수 있는 규칙파군과 불규칙파군에 대한 결과와 비교하여 검증한 후, 해양에서 관측된 실측자료에 적용하였다.

3. 長週期波의 舉動特性

3.1 規則波群

2次非線形理論에 의한 長週期波의 특성을 해석하기 위하여 임의로 발생시킨 규칙파군에 대하여 계산하였다. 이의 결과를 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 파군에 따른 長週期波는 2次非線形理論에 의한 결과와 에너지履歷理論을 이용하여 계산한 결과를 모두 제시하였다. Fig. 1에서 볼수 있듯이 두가지 방법이 모두 매우 잘 일치하고 있다. 고파군 아래에서의 평균수위강하, 평균수위강하량의 크기, 長週期波의 주기 그리고 장주기파의 位相이 포락선의 위상과 180° 차이를 보이는 등 解析解와 매우 잘 일치하고 있

다. Fig. 2는 Fig. 1보다 波群係數가 약간 큰 경우에 대한 결과로 동일한 특성을 나타내고 있다.

3.2 不規則波群

規則波群에 대한 이론적 배경과 에너지履歷理論에 의한 波群特性을 이용하여 다음과 같이 不規則波群에 대한 長週期波의 특성을 해석하였다. 먼저 Fig. 3에 나타낸 不規則波群은 Fig. 1과 Fig. 2의 規則波群을 합성하여 얻은 결과로 2차비선형이론에 의한 長週期波의 결과도 마찬가지로 합성하였다. Fig. 3을 보면 에너지履歷理論을 응용하여 구한 결과가 비록 規則波群을 합성하여 얻은 결과와 약간의 차이를 보이지만 비교적 잘 일치하고 있어 에너지履歷理論을 이용하는 방법이 不規則波群에도 무리없이 적용될 수 있다고 판단된다. 따라서 Fig. 4와 Fig. 5에 海洋研究所에서 1992년에 동해안에서 관측한 실측자료로부터 파군에 따른 長週期波를 구하였다. 이와 같은 長週期波는 순수한 波群效果에 의한 長週期波이기 때문에 실제와 약간의 차이가 있을 수 있다. 그러나 여러 研究者들이 언급하였 듯이 대규모 地震海溢이나 暴風海溢을 제외하고는 관측된 長週期波가 파랑의 波群성과 가장 가깝게 연관되어 있기 때문에 그 차이는 크지 않으리라 판단된다.

4. 參考文獻

- 李哲應, 波群效果를 고려한 港灣의 振動解析, 서울大學校 博士學位論文, 1993, 2.
- Barthel, V., E.P.D. Mansard, S.E. Sand and F.C. Vis, "Group bounded long waves in physical models", *Ocean Eng.*, Vol.10, No.4, pp.261-294, 1983.
- Bowen, A.J. and R.A. Holman, "Shear instabilities of mean longshore current : 1. Theory", *J. Geophys. Res.*, Vol.94, No.C12, pp.18023-18030, 1989.
- Bowers, E.C., "Long period disturbances due to wave groups", *Proc. 17th ICCE*, pp.610-623, 1980.
- Funke, E.R. and E.P.D. Mansard, "On the synthesis of realistic sea states", *Proc. 17th ICCE*, pp.2974-2991, 1980.
- Huntley, D.A., "Long-period waves on a natural beach", *J. Geophys. Res.*, Vol.81, No.36, pp.6441-6449, 1976.
- Kostense, J.K., "Measurements of surf beat and set-down beneath wave groups", *Proc. 14th ICCE*, pp.724-740, 1984.
- Longuet-Higgins, M.S and R.W. Stewart, "Radiation stresses in water waves: A physical discussion, with applications", *Deep-Sea Res.*, Vol.11, pp.529-562, 1964.

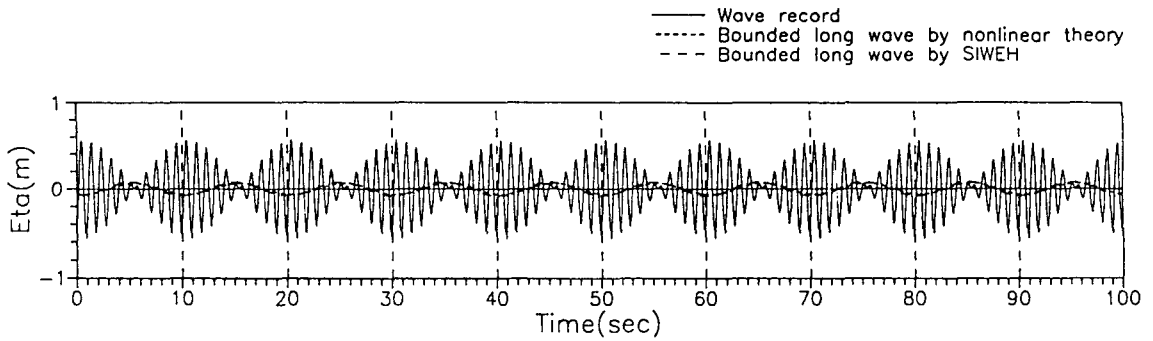


Fig. 1 Group Bounded Long Wave of the Regular Wave Group A

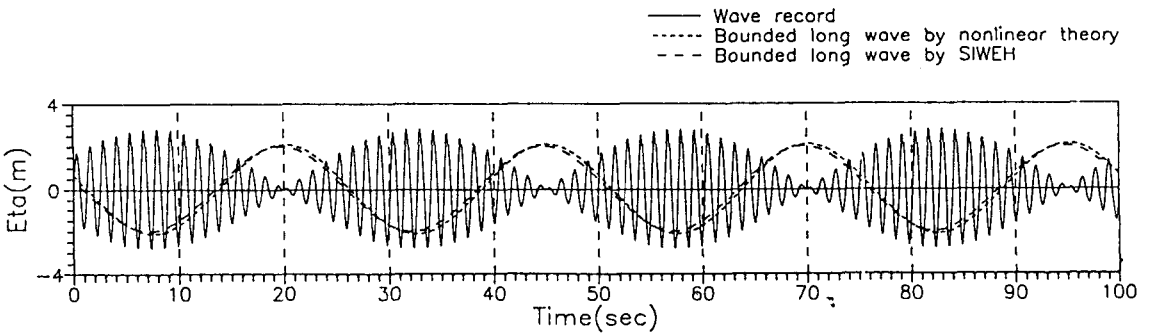


Fig. 2 Group Bounded Long Wave of the Regular Wave Group B

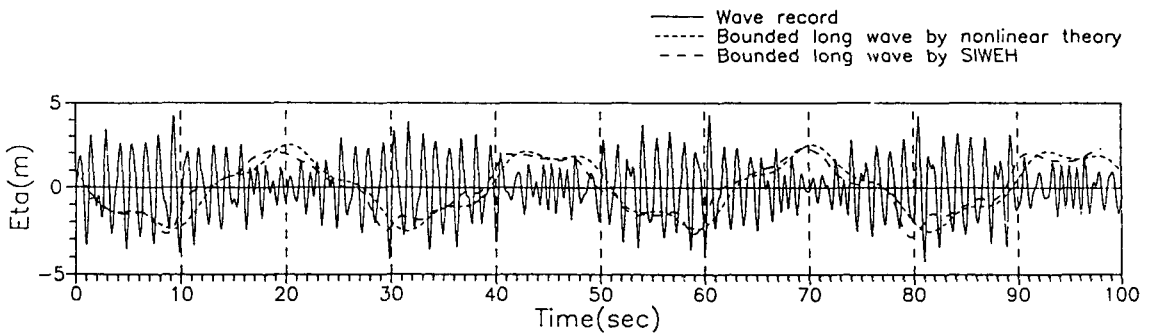


Fig. 3 Group Bounded Long Wave of the Synthesized Irregular Wave Group

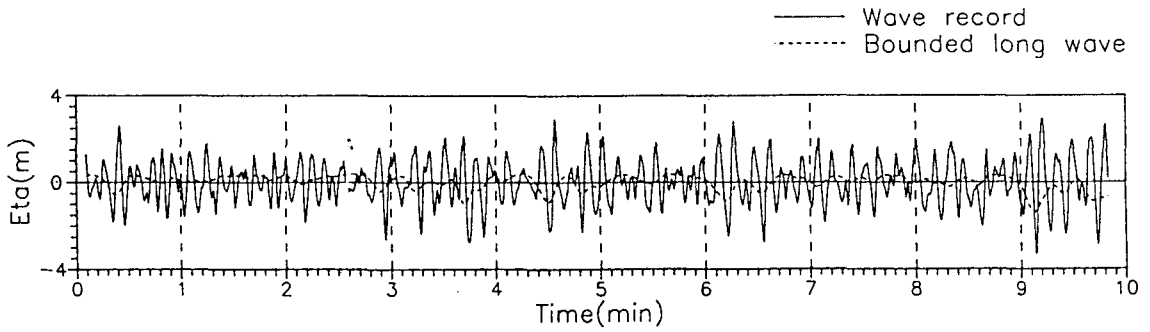


Fig. 4 Group Bounded Long Wave of the Observed Irregular Wave Group A

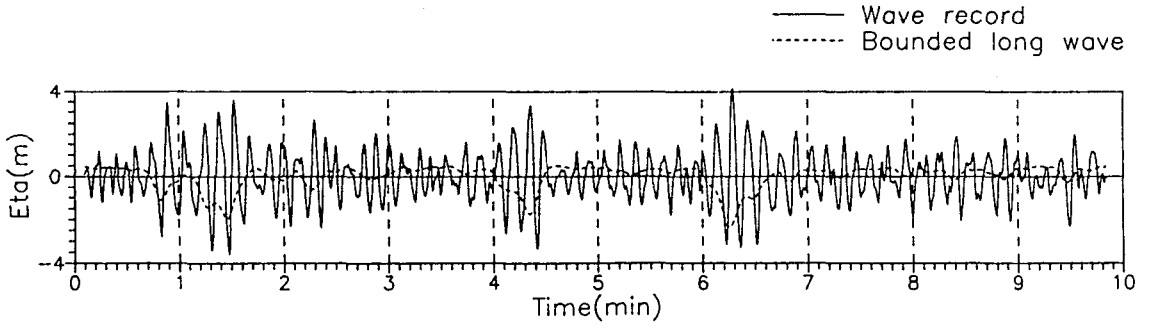


Fig. 5 Group Bounded Long Wave of the Observed Irregular Wave Group B