

論 文

2차근사 수위변화에 관한 연구

김 창 제* · 이 경 연**

A Study on the Second-Order Water Level Variation

Chang-Je Kim* · Gyeong-Yeon Lee**

〈목 차〉

Abstract	4. 고찰 및 논의
1. 서론	5. 결론
2. 진행파에 의한 수위변화	참고문헌
3. 복소수를 이용한 수위변화 산정	

Abstract

This study aims to investigate theoretically and experimentally second-order water level variation. The simple method obtaining second-order water surface elevation and mean water level applicable to both progressive and diffraction wave is newly developed. In case of diffraction wave, mean water level set-down, as well as set-up occurs and it is shown to be in good agreement with the experimental results.

1. 서론

파가 해안가까이에 진입함에 따라서 파형구배는 커지고 결국 쇄파한다. 또한, radiation stress의 변화에 따라서 평균수위가 변화하며, radiation stress 구배, 평균수위 구배 및 파랑류(해빈류) 구배가 평형을 이루도록 파랑류가 발생한다. 이 파랑류에 의한 표사의 이동은 항로매몰, 해안침식 또는 해안퇴적의 원인이 된다. 즉, 평균수위는 항

로매몰, 해안침식 및 해안퇴적에 크게 기여하는 파랑류와 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 평행등심선 해안에 파가 직각으로 입사하는 경우에는, 해수에 해안방향 또는 외양방향의 파랑력 만이 작용하기 때문에, 평균수위의 하강이나 상승이 일어나며 파랑류는 발생하지 않는다. 즉, 파가 진행파이며, 쇄파하기 전에는 평균수위의 하강, 쇄파한 후에는 평균수위의 상승이 발생한다. 그러나 해안에 방파제 등의 대형 구조물이 설치되어 있는 경

* 정회원, 한국해양대학교 해사대학 교수

** 환경부 낙동강환경관리청

우, 그 구조물 주변에서의 파는 진행파와 반사파 및 회절파가 중합파를 형성하며, 복잡하게 변화한다.

이 연구에서는, 2차근사 수위변화를 산정할 수 있는 간단한 산정법을 제시하고, 일정수심의 연안 해역에 대형구조물이 설치되어 그 주변해역에 중합파동장이 형성되는 경우, 회절파에 의한 평균수위변화의 계산결과를 약간의 실험결과와 비교·검토한다.

2. 진행파에 의한 수위변화

진행파에 의한 변동수위에 관해서는, Stokes(1847)의 연구를 비롯하여 Skjelbreia and Hendrickson(1960), 磯部 등(1978)의 연구 등, 오래 전부터 많은 연구가 이루어졌으며, 그 성과 또한 매우 크다. 2차근사 변동수위에 관해서는 富永(1976)을 참조하면 좋을 것이다.

일정수심 해역을 단일 진행파가 진행하는 경우, radiation stress는 장소적으로 일정하므로 평균수위는 변화가 없고 정수위와 일치한다. 그러나, 진행파가 평행등심선의 해안을 직각으로 입사하는 경우나 구조물 등에 의해 중복파가 형성되는 경우에 평균수위는 변화한다. 즉, 평균수위는 진행파일 경우, 쇄파 전후에 각각 하강 및 상승하고, 중복파일 경우, 중복파의 마디 및 배에서 각각 하강 및 상승한다. 평면 1차원파에 있어서, Longuet-Higgins and Stewart(1962)가 파랑류방정식의 저면마찰항 및 수평확산항을 무시하여 얻은 평균수위와 Mei(1983)와 椎貝 등(1983)이 압력방정식을 시간적분하여 얻은 평균수위는 서로 일치한다. 이하, 쇄파 전의 Mei의 결과(1983)를 약술한다.

좌표계로서는 직교좌표계(x, y, z)를 사용한다. x 와 y 는 수평축이며, 좌표의 원점을 해안선의 어떤 점으로 한다. x 축은 외양방향을 양(+)으로 하는 축, y 축은 x 축과 직교하는 축, z 축은 정수면을 원점으로 하여 상방을 양으로 하는 연직축으로 한다. 유체는 비점성 및 비압축성, 유체운동은 비회전운동으로 가정한다. 이런 경우 속도포텐셜

$\Phi(x, y, z, t)$ (t 는 시간)를 정의할 수 있으며, 역학적 자유수면 경계조건은 Bernoulli방정식으로부터 대기압을 0으로 하면, 다음 식과 같이 정식화 된다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right\} + g\eta = 0 \\ : \text{at } z = \eta \quad (1)$$

여기에서, ∂ 는 편미분을 나타내는 기호, g 는 중력가속도, $\eta(x, y; t)$ 는 수위변동이다.

우선, 식(1)의 속도포텐셜 Φ 및 수위변동 η 를 다음과 같이 섭동전개한다.

$$\Phi = \epsilon \Phi_1 + \epsilon^2 \Phi_2 + \dots, \quad \eta = \epsilon \eta_1 + \epsilon^2 \eta_2 + \dots \quad (2)$$

다음에, 식(1)을 정수면($z=0$)주위로 Taylor전개하여 2차 근사항 만을 취하면 다음 식과 같이 된다.

$$g\eta_2 + \frac{\partial \Phi_2}{\partial t} + \eta_1 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial t \partial z} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial z} \right)^2 \right\} = 0 \quad : at z = 0 \quad (3)$$

식(3)을 시간평균하면, 식(4)가 된다.

$$\overline{g\eta_2} + \overline{\eta_1 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial t \partial z}} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\overline{\frac{\partial \Phi_1}{\partial x}} \right)^2 + \left(\overline{\frac{\partial \Phi_1}{\partial y}} \right)^2 + \left(\overline{\frac{\partial \Phi_1}{\partial z}} \right)^2 \right\} = 0 \quad (4)$$

(—)은 시간평균을 나타낸다.

식(4)의 좌변 제2항은, 동역학적 자유수면 경계조건을 적용하여 변형하면 다음과 같이 된다.

$$\overline{\eta_1 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial t \partial z}} = - \overline{\left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial z} \right)^2} \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하면 평균수위 $\overline{\eta_2}$ 는 식(6)처럼 된다.

$$\overline{\eta_2} = - \frac{1}{2g} \left\{ \overline{\left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial y} \right)^2} - \overline{\left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial z} \right)^2} \right\} \quad (6)$$

식(6)에 진행파의 속도포텐셜 ϕ_1 을 대입하여 정리하면 평균수위 $\bar{\eta}_2$ 은 다음 식처럼 된다.

$$\bar{\eta}_2 = -\frac{kH_i^2}{8\sinh 2kh} \quad (7)$$

여기에서, k 는 파수, H_i 는 진행파의 파고, h 는 정수심이다.

식(7)에서 알 수 있듯이, 쇄파 전의 평균수위 $\bar{\eta}_2$ 는 항상 음(-)의 값이며 이것은 평균수위의 하강을 의미한다. 또한, 식(7)은 radiation stress와 평균수위의 균형관계로부터 얻어진 평균수위(Longuet-Higgins and Stewart, 1962)와 일치한다.

한편, Longuet-Higgins and Stewart(1962), Mei(1983)와 椎貝 등(1983)의 방법에 의해서는 2차근사 변동수위를 산정할 수 없다.

3. 복소수를 이용한 수위변화 산정

상술한 바와 같이, 진행파의 평균수위는 항상 음의 값을 취하며, 또한 위의 2절의 예와 같은 방법으로는 변동수위를 산정할 수 없다. 따라서, 식(3)의 속도포텐셜 ϕ 와 수위변동 η 를 각각 식(8)과 (9)처럼 복소형식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{1}{2} \{ \phi_1(x, y) \exp(-i\sigma t) + \phi_1^*(x, y) \exp(i\sigma t) \} \\ \phi_2 &= \text{Real}[\phi_2(x, y) \exp(-2i\sigma t)] + \overline{\phi_2}(x, y) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{1}{2} \{ \zeta_1(x, y) \exp(-i\sigma t) + \zeta_1^*(x, y) \exp(i\sigma t) \} \\ \eta_2 &= \text{Real}[\zeta_2(x, y) \exp(-2i\sigma t)] + \overline{\zeta_2}(x, y) \end{aligned} \quad (9)$$

식(8)과 (9)에서, ϕ_1, ϕ_2 는 각각 1차, 2차의 속도포텐셜의 복소진폭, $i (= \sqrt{-1})$ 는 허수단위, σ 는 각주파수, *은 공액복소수, Real은 실수부, $\overline{\phi_2}$ 은 정상속도포텐셜, ζ_1, ζ_2 는 각각 1차, 2차의 수위변동의 복소진폭, $\overline{\zeta_2}$ 는 평균수위를 나타낸다.

식(8)과 (9)를 식(3)에 대입하여 좌변의 각 항을 정리하면 다음과 같다(식(10)~(15)).

제 1항 :

$$g\eta_2 = g \text{Real}[\zeta_2 \exp(-2i\sigma t)] + g \overline{\zeta_2}. \quad (10)$$

제 2항 :

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial t} = -\text{Real}[2i\sigma \phi_2 \exp(-2i\sigma t)] \quad (11)$$

제 3항 :

$$\begin{aligned} \eta_1 \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial \theta z} &= \frac{1}{2} \{ \zeta_1 \exp(-i\sigma t) + \zeta_1^* \exp(i\sigma t) \} \\ &\quad \times \frac{1}{2} (-i\sigma) \left\{ \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \exp(-i\sigma t) - \frac{\partial \phi_1^*}{\partial z} \exp(i\sigma t) \right\} \\ &= -\frac{i\sigma}{4} \left\{ \zeta_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \exp(-2i\sigma t) - \zeta_1^* \frac{\partial \phi_1^*}{\partial z} \exp(2i\sigma t) \right. \\ &\quad \left. - \zeta_1 \frac{\partial \phi_1^*}{\partial z} + \zeta_1^* \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \right\} \\ &= -\frac{\sigma}{2} \text{Real} \left[i \left\{ \zeta_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \exp(-2i\sigma t) - \zeta_1^* \frac{\partial \phi_1^*}{\partial z} \right\} \right] \\ &= \frac{1}{2} \frac{\sigma^4}{g^2} \{ \text{Real}[(\phi_1)^2 \exp(-2i\sigma t)] - |\phi_1|^2 \} \end{aligned} \quad (12)$$

위식 (12)에서 $| |$ 은 절대값을 나타낸다. 또한, $\zeta_1 = \frac{i\sigma}{g} \phi_1$ 과 $\frac{\partial \phi_1}{\partial z} = \frac{\sigma}{g} \phi_1$ 을 이용하였다.

제 4항 :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right)^2 &= \frac{1}{8} \left\{ \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \exp(-i\sigma t) + \frac{\partial \phi_1^*}{\partial x} \exp(i\sigma t) \right\}^2 \\ &= \frac{1}{8} \left\{ \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right)^2 \exp(-2i\sigma t) + \left(\frac{\partial \phi_1^*}{\partial x} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. \exp(2i\sigma t) + 2 \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \frac{\partial \phi_1^*}{\partial x} \right\} \\ &= \frac{1}{4} \left\{ \text{Real}[\left(\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right)^2 \exp(-2i\sigma t)] + \left| \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right|^2 \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

제 5항 :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial y} \right)^2 &= \frac{1}{4} \left\{ \text{Real}[\left(\frac{\partial \phi_1}{\partial y} \right)^2 \exp(-2i\sigma t)] \right. \\ &\quad \left. + \left| \frac{\partial \phi_1}{\partial y} \right|^2 \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

제 6항 :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial z} \right)^2 &= \frac{1}{4} \left\{ \text{Real} \left[\left(\frac{\partial \phi_1}{\partial z} \right)^2 \exp(-2i\sigma t) \right] \right. \\ &\quad \left. + \left| \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \right|^2 \right\} \\ &= \frac{1}{4} \frac{\sigma^4}{g^2} \left\{ \text{Real} \left[(\phi_1)^2 \exp(-2i\sigma t) \right] \right. \\ &\quad \left. + |\phi_1|^2 \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

식(10)~(15)를 식(3)에 대입하고, 2 차의 변동 수위 ζ_2 와 평균수위 $\bar{\zeta}_2$ 로 나누어 재정리하면 식(16)과 (17)과 같이 된다.

변동수위 :

$$\begin{aligned} \zeta_2 &= \frac{1}{g} \text{Real} \left[2i\sigma\phi_2 - \frac{1}{4} \left\{ \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial y} \right)^2 \right\} \right. \\ &\quad \left. - \frac{3}{4} \frac{\sigma^4}{g^2} (\phi_1)^2 \right] \end{aligned} \quad (16)$$

평균수위 :

$$\bar{\zeta}_2 = -\frac{1}{4g} \left\{ \left| \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial \phi_1}{\partial y} \right|^2 - \frac{\sigma^4}{g^2} |\phi_1|^2 \right\} \quad (17)$$

식(16)의 변동수위 ζ_2 는 진행파일 경우, Stokes 파의 2차근사 변동수위(富永, 1976)와 일치하며, 산정과정이 매우 간단함을 알 수 있다. 회절파일 경우, 신뢰성 높은 2차의 속도포텐셜의 복소진폭 ϕ_2 의 개발이 요구되며, 앞으로의 큰 과제라 할 수 있다. 식(17)의 평균수위 $\bar{\zeta}_2$ 은 식(6) 및 (7)의 $\bar{\eta}_2$ 와 일치하며, 진행파일 경우, 식(7)이 된다.

4. 고찰 및 논의

Fig. 1, 2에 회절파에 의한 평균수위를 도시한다. 식(17)에서 1차의 속도포텐셜의 복소진폭 ϕ_1 은 특이점분포법을 사용하여 산정하였다(김과 김, 1995). 또한, 계산치 및 실험치 둘다 식(17)에서 입사파에 의한 평균수위를 제외시킨 것이다. 계산 및 실험의 조건은 고립구조물(단일원통구조물)을 기준으로 할 때, 대형구조물의 조건($D/L \geq 0.2$, D 는 구조물의

직경, L 은 입사파의 파장)(Isaacson, 1979)을 만족하도록 하였다. 또한, 좌표의 원점은 두 구조물의 중앙으로하고, x 축은 입사파의 입사각도 α 가 0° 일 경우에 대응하여 입사파의 진행방향을 양(+)으로 하는 축, y 축은 x 축과 직교하는 축으로 하였다.

Fig. 1은, $D/L=0.49$, $e_1/D=1.0$ (e_1 은 구조물 설치간격), $H_1/L=0.03$, $h/L=0.11$, $\alpha=0^\circ$ 일 때의 2원통구조물 주변에 있어서의 회절파에 의한 평균수위의 등고선도이다. 그럼에서, 실선은 계산한 등고선, ●은 수위의 계측점, 팔호 속의 숫자는 계산치, 팔호가 없는 경우의 숫자는 실험치이다. 또한, 입사파의 입사각도 $\alpha=0^\circ$ (직작입사)일 때, 평균수위분포는 $y/L=0$ 축을 중심으로 하여 거의 대칭이므로 전영역의 반만을 나타내었다. 이 경우에 구조물II는 입사파의 진행방향에서 볼 때 구조물I의 좌측에 위치한다. 구조물전면의 외양측 영역에서는 부분중복파동장의 특징을 보인다. 즉, 부분중복파의 배에 해당하는 $x/L \approx -0.25, -0.75$ 부근에서는 평균수위가 상승하고, 마디에 해당하는 $x/L \approx -0.50$ 부근에서는 평균수위가 하강한다. 그리고, 구조물간의 내측영역에서는 평균수위가 하강하는 경향을 보인다. 진행파 만에 의한 평균수위 $\bar{\eta}_2$ (식(7))는 항상 하강(-)을 나타내지만, 그럼에서 알 수 있듯이, 회절파에 의한 평균수위는 하강 뿐만 아니라 상승도 일어나며 계산치와 실험치는 비교적 잘 일치한다.

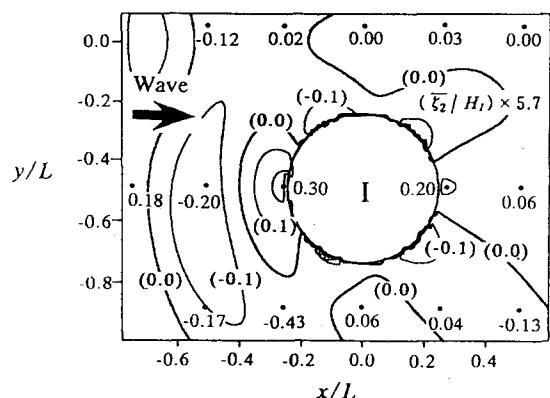


Fig. 1 Mean water level distribution around cylinder I ($D/L=0.49$, $e_1/D=1.0$, $H_1/L=0.03$, $h/L=0.11$, $\alpha=0^\circ$)

Fig. 2에 $D/L=0.26$, $H_1/L=0.03$, $h/L=0.11$, $\alpha=0^\circ$, $r/D=0.53$ (r 은 구조물I의 중앙에서 반경방향으로의 거리)일 때의 2원통구조물 둘레의 θ (입사파가 구조물을 최초로 도달한 점으로부터의 각도이며 그 방향은 입사파의 진행방향에서 볼 때 시계방향으로 한다)에 따른 회절파에 의한 평균수위의 특성을 보인다. 그림에서, 실선, 쇄선은 각각 구조물의 설치간격 $e_1/D=1$ 과 2일 경우의 계산치, \blacktriangle , \square 는 계산치에 대응하는 실험치이다. 평균수위는 계산치, 실험치 둘 다 구조물 전면영역 $\theta \approx 0^\circ$ 또는 360° 부근과 배후영역 $\theta \approx 180^\circ$ 부근에서는 상승, 구조물 간의 내측영역 $\theta \approx 270^\circ$ 부근의 구조물 근방에서는 하강하며, 그 대응은 상당히 좋다. 상술한 바와 같아, 회절파에 의한 평균수위는 하강 뿐만 아니라 상승도 일어나며, 진행파 만의 경우와는 다름을 알 수 있다.

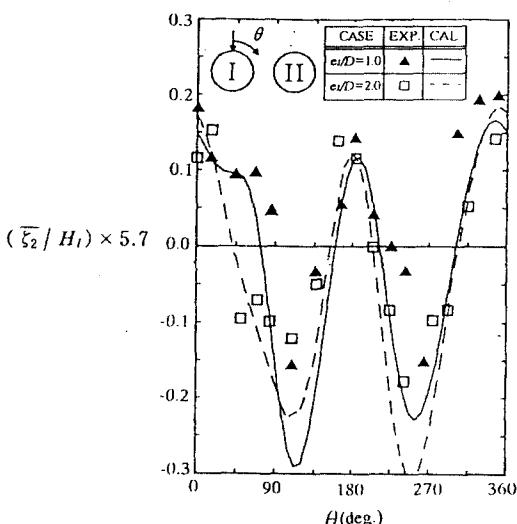


Fig. 2 Mean water level distribution along two cylinders($D/L=0.26$, $H_1/L=0.03$, $h/L=0.11$, $\alpha=0^\circ$, $r/D=0.53$)

5. 결 론

이상, 이 논문에서는 2차근사 변동수위와 평균

수위를 간단히 산정할 수 있는 산정법이 제시되었 다. 2차근사 변동수위에 관해서는, 회절파의 2차 속도포텐셜의 개발이 시급한 과제로 남아있다. 평 균수위에 관해서는, 진행파일 경우와는 달리, 회 절파일 경우에는 평균수위하강 뿐만 아니라 평균 수위상승도 일어나며, 계산결과는 실험결과와 잘 일치한다.

참 고 문 헌

- [1] 김창제, 김정렬, 1995. 근접설치된 대형구조물에 의한 구조물주변의 파의 변형, 해양안전학회지, 제 1권 제 1호 : 61-67.
- [2] Isaacson, M. Q., 1979. Wave induced forces in the diffraction regime, in Mechanics of Wave-Induced Forces on Cylinders, ed. T. L. Shaw, Pitman: 68-89.
- [3] Longuet-Higgins ,M. S. and R. W. Stewart, 1964. Radiation stresses in water waves-A physical discussion with applications, Deep-Sea Res., Vol. 11: 529-562.
- [4] Mei, C. C., 1983. The applied dynamics of ocean surface waves, John Wiley & Sons, New York : 740p.
- [5] Skjelbreia, L. and J. Hendrickson, 1960. Fifth order gravity wave theory, Proc. 7th Coastal Eng. Conf. ASCE: 184-196.
- [6] Stokes, G. G., 1847. On the theory of oscillatory waves, Trans. Camb. Phil. Soc., Vol. 8 : 441-455.
- [7] 磯部雅彦, 西村仁祠, 堀川清司, 1978. 보존파의 섭동해의 파고에 의한 표시, 제 33회 년차학술강연회강연개요집, 제 2부, 일본토목학회 : 760-761(in Japanese).
- [8] 富永, 1976. 海洋波動, 共立出版, 東京: 56-61 (in Japanese).
- [9] 椎貝博美, 西村仁祠, 京藤敏達, 1983. 정형파의 이론에 있어서의 미분섭동법의 응용, 제 30회 해안공학강연회논문집, 일본토목학회 : 59-63(in Japanese).