무한수심 부유체의 부가질량계수와 감쇠계수 결정을 위한 신 방법: 특이점 자유수면항의 유수적분

A New Method for determining Added Mass and Damping Coefficients of Floating Objects in Infinite Water Depth: Residue Integration of Singular Free Surface Term

전인식* · 오병철** · 김동하*** · 심재설***

*전국대학교 인프라시스템공학과

** (주)해강기술

***한국해양과학기술원 해양재난 · 재해연구센터

Insik Chun* · Byungcheol Oh** · Dong-Ha Kim*** · Jaeseol Shim***

*Department of Civil Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

**Sea & River Technology Inc., Gunpo, Korea

***Marine Disaster Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan, Korea

Abstract

It has been the case that the added mass and damping coefficients of a floating body are determined differently depending on the water depth condition which is finite or infinite. In the present study, Green functions for the finite and infinite depth conditions are compared, and a new method based on residue integration technique is proposed to determine the singular integral of the free surface term in the Green function of infinite water depth. The new method is semi-analytic in that it does not depend on any approximate transcendental functions or numerical calculations as generally appeared in the existing methods. Hence, it can be more advantageous in both accuracy and calculation time. The method is numerically implemented to a floating hemisphere. The results are compared with those of existing numerical studies, and they showed nice agreements. The depth criterion to judge whether to use finite or infinite water depth is discussed as well.

Keywords : floating structures, added mass coefficient, radiation damping coefficient, singularity distribution method, Green function

1. 서론

본고의 전편 (Chun *et al.*, 2020)에서는 특이점 분포법 (Sarpkaya and Isaacson, 1981; Garrison, 1978)을 적용하여 유한수심 부유체에 대한 그린함수를 해석하고 부가질량계수와 감쇠계수를 결정하는 방법에 대하여 고찰하였다. 본 유한수심에 대한 해석방법은 부유식 방파제 등의 해안구조물 그리고 수심이 비교적 얇은 항내의 정박선체 등에는 적용가능하나 (Chun, 1994), 수십 미터 수심에 설치되는 해상 관측부이나 대양항로 상의 선박처럼 대수심 조건의 부유체에 대해서는 적용할 수 없다. 따라서, 부유체 역학분야에서는 처음부터 수심조건을 유한수심과 무한수심으로 구분하여 해석을 수행하여 왔다. 유한수심의 경우와 마찬가지로 무한수심의 경우에도 별도의 그린함수가 존재한다. 문제는 유한수심 경우에서의 특이점적분 문제가 무한수심에서도 그대로 존재하며 이를 해결하기가 역시 어렵다는 점이다. 따라서, 그

간의 관련연구 이력을 보면 특이점적분을 회피하거나 용이하게 수행하기 위한 여러 형태의 그린함수가 거의 최근까지도 제시되어 왔다 (Xie *et al.*, 2018).

그린함수를 다루는데 있어서 또 하나의 문제점은 무한수심 그린함수가 유한수심 그린함수의 심해 쪽 점근치가 아니라는 점이다. 해안공학분야에서는 소위 심해파 또는 천해파라고 하는 점근치들이 있으며 이들은 수심/파장의 무차원 비에 따라 포텐셜 흐름의 단일 이론식으로부터 구해진다. 그러나, 그린함수를 지칭할 때의 유한수심 또는 무한수심은 이와는 개념이 완전히 다르다. 이들 무한 또는 유한수심 그린함수의 구분은 어느 정도는 구조물의 크기와 수심의 비에 의존하는 측면은 있지만 대부분은 절대수심 관점에서 정해지는 경우가 대부분이다. 따라서, 처음부터 유한수심 그린함수와 무한수심 그린함수로 구분되며 이들은 완전히 별개의 유도과정을 갖는다. 문제는 실제 적용에 있어서 이 두 그린함수의 적용 수심조건이 명확히 제시되어

있지 않다는 점이다.

본고에서는 무한수심 그린함수 중에서 Rankine 원천항에 대해서는 Chun *et al.* (2020)이 제시한 패널 면적적분 기법을 적용하고 또한 자유수면항의 특이점적분에 대해서는 유수 적분기법 (Residue integration technique)을 이용하는 새로운 해석방법을 제안하였다. 해석방법의 정확도 및 적용성을 고찰하기 위하여 소정의 홀수를 갖는 구형 부유체에 대하여 해석방법을 적용하였으며 그 결과를 기존의 해석결과와 비교하였다. 아울러, 유한수심 그린함수 또는 무한수심 그린함수의 적용을 위한 수심조건의 판별에 대해서도 고찰하였다.

2. 수심조건 별 그린함수의 비교

Chun *et al.* (2020)에서 소개된 바 있는 Wehausen and Laitone (1960, 수식 13.18)의 유한수심 그린함수, G 를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 \quad (1)$$

$$G_1 = \frac{1}{R} \quad (2)$$

$$G_2 = \frac{1}{R} \quad (3)$$

$$G_3 = 2P \cdot V \cdot \int_0^\infty \frac{(\mu + \nu)e^{-\mu h} \cosh[\mu(\zeta + h)] \cosh[\mu(z + h)]}{\mu \sinh(\mu h) - \nu \cosh(\mu h)} J_0(\mu r) d\mu \quad (4)$$

$$G_4 = i \frac{2\pi(k^2 - \nu^2) \cosh[k(\zeta + h)] \cosh[k(z + h)]}{k^2 h - \nu^2 h + \nu} J_0(kr) \quad (5)$$

$$R = [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2]^{1/2} \quad (6)$$

$$R' = [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z + 2h + \zeta)^2]^{1/2} \quad (7)$$

$$r = [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]^{1/2} \quad (8)$$

$$\nu = \frac{\sigma^2}{g} = k \tanh(kh) \quad (9)$$

상기 식들에서 (ξ, η, ζ) = 소스점, (x, y, z) = 필드점, k = 파수, σ = 각주파수, h = 수심, ν = 심해파의 파수이다. 이와 같이 그린함수는 세부분의 실수와 하나의 허수로 구성되는 복소수 형태로서 실수부분은 다시 Rankine 원천항 (source term) G_1 , 바닥경상항 (bed mirror image term) G_2 , 자유수면항 (free surface term) G_3 로 구성되어 있다.

상기 유한수심 그린함수와 달리 무한수심 그린함수는 여러 종류의 형태가 제시되어 왔다. Xie *et al.* (2018)은 기존의 무한수심 그린함수들을 비교하였으며 이들 중에서 비교적 최근에 제시된 함수들의 정확도에 대한 정량적 검토를 수행한 바 있다. 이들 그린함수들은 대부분 자유수면항의 특이점적분을 처리하는 방법에서 차이가 있으며, 대별하여 고전적인 형태 (Wehausen and Laitone, 1960), 베셀함수 등의 단일 연속함수를 사용하는 근사적 방법 (Babarit and Delhommeau,

2015; Kim, 1965; Havelock, 1955), 적분변수의 구간별 근사적 급수함수를 사용하여 접속하는 방법 (Newman, 1985) 등이 있다. 이 중에서 Kim (1965)의 그린함수는 부유체 해석관련 연구들에서 많이 인용되고 있으나 Struve 함수와 Bessel 함수를 포함하는 매우 복잡한 형태를 띠고 있다. 더욱이, 자유수면항의 특이점을 회피하기 위하여 도입된 제2종 영차 Bessel함수 (Y_0) 및 이의 미분치 ($-Y_1$) 역시 $r=0$ 에서 특이점을 형성하므로 적분이 여전히 어려워지는 문제점이 있다. 그러나 이에 대한 해결방법이 동 문헌에는 제시되어 있지 않다. 본 연구에서는 Chun *et al.* (2020)에서 사용한 유한수심 그린함수와 일관성을 기하기 위하여 다음과 같은 Wehausen and Laitone (1960)의 식 (문헌상의 식 (13.17))을 사용하기로 한다.

$$G = G_1 + G_3 + G_4 \quad (10)$$

$$G_1 = \frac{1}{R} \quad (11)$$

$$G_3 = P \cdot V \cdot \int_0^\infty \frac{\mu + \nu}{\mu - \nu} e^{\mu(z + \zeta)} J_0(\mu r) d\mu \quad (12)$$

$$G_4 = 2i\pi\nu e^{\nu(z + \zeta)} J_0(\nu r) \quad (13)$$

상기 식들을 유한수심의 경우와 비교하여 보면, 바닥경상항 G_2 가 포함되어 있지 않다. 이는 무한수심의 경우, 부유체와 바닥 사이의 거리가 멀어 바닥으로부터 반사되어오는 파랑성분이 미미하다고 보고 무시한 것이다. 이와 같이 유한수심 또는 무한수심의 구분은 절대수심 관점에서 행해진 측면이 있다. 또한, 식 (12)와 식 (4)를 비교하면 임의의 파수 μ 와 수심 h 간의 곱은 수심/파장의 비를 반영하며 통상적인 심해파 접근조건 (수심/파장 $\rightarrow \infty$)을 적용하면 식 (12)는 바로 식 (4)의 심해파 접근치 임을 알 수 있다. 따라서, 식 (12)는 주파수 σ , 파수 μ 그리고 심해파 파수 ν 에만 의존하며 수심은 포함되어 있지 않다. 그러나, 이와 같은 방법으로 심해파 접근을 허수부분인 식 (5)에 적용하면 수심이 소거되지 않고 수식에 잔류하게 된다. 물론, 심해파 조건에서는 입사파 파수 k 가 ν 에 근접하게 되어 분자를 영으로 만들려는 성향이 있으나 역시 분자에 잔류된 수심의 영향으로 식 (5)의 계산값이 일정한 값으로 수렴되지 않는다. 결국, 대수심 및 무한수심에서는 식 (5)를 사용할 수 없다. 대신 기 제시된 무한수심의 그린함수들은 공통적으로 허수부분으로서 수심에 무관한 식 (13)을 사용하여 왔다.

3. 특이점적분의 수치해석

유한수심의 경우와 마찬가지로 무한수심에서도 두 종류의 특이점 적분이 존재한다. 하나는 식 (11)의 G_1 에 대한 패널 면적적분이고 다른 하나는 식 (12)의 주파수 μ 에 대한 적분이다. G_1 은 유한수심 경우와 무한수심 경우의 차이가

없기 때문에 본고의 전 편 (Chun *et al.*, 2020)에서 제시된 패넬 면적적분 방법을 그대로 사용하면 된다. G_3 의 적분함수를 보면 $\mu = \nu$ 에서 특이점이 존재한다. 전 편의 유한수심 경우에는 특이점 추출법 (Singularity extraction method)을 사용하여 적분을 수행하였으나 본 연구에서는 다음과 같은 유수적분기법 (Residue integration technique; Kreyszig, 1993; Kutt, 1975)을 이용하여 본 특이함수에 대하여 직접적인 적분을 수행하기로 한다.

적분은 두 구간, 즉, $0 - 2\nu$ 와 $2\nu - \infty$ 로 나누어 수행한 후 합산한다. 두 번째 구간은 일반적인 구적법을 적용하면 되며 적분상한치인 $\mu = \infty$ 는 $(100-200)k$ 정도의 매우 큰 값으로 대체해주면 된다. 유수적분기법에 의한 특이점적분은 구간 $(0-2\nu)$ 에 대해서만 적용한다. 차수 m 의 특이점 (pole) a 를 갖는 적분함수를 $f(x)$ 라 하면 특이점 a 에 대한 유수 $\rho(a)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho(a) = \frac{1}{(m-1)!} \lim_{x \rightarrow a} \left(\frac{d^{m-1}}{dz^{m-1}} (z-a)^m f(x) \right) \quad (14)$$

식 (12)의 적분함수에 1차 ($m=1$)의 특이점 ν 가 존재하므로 이에 대한 유수는 다음과 같다.

$$\rho(\nu) = 2\nu e^{\nu(z+\zeta)} J_0(\nu r) \quad (15)$$

본 특이점적분에서는 Hunter (1973)의 적분알고리즘을 이용하였으며 그 절차는 다음과 같다.

- 총 N_T 개의 정수를 다음 식에 의거하여 생성한다.

$$N_i = 2N_{i-1} + 1; N_0 = 1, i = 1, 2, \dots, N_T \quad (16)$$
- 모든 N_i 에 대해서 적분함수 $f(x)$ 의 적분구간 $(0, p)$ 를 N_i 개의 구간으로 나누고 총 $N_i + 1$ 개의 등간격 함수치를 다음과 같이 생성한다.

$$f_k = f(kp/N_i); kp/N_i \text{가 } f(x) \text{의 특이점(pole)에 일치하지 않을 때 } (k=0, \dots, N_i) \quad (17)$$

$$= \lim_{x \rightarrow kp/N_i} \frac{d}{dx} (x - kp/N_i); kp/N_i \text{가 } f(x) \text{의 특이점(pole)에 일치할 때 } (k=0, \dots, N_i)$$

- N_i 에 대한 f_k 를 이용하여 다음과 같은 일차 적분치를 구한다.

$$T_{N_i} = \frac{p}{N_i} \left\{ \frac{1}{2} (f_0 + f_{N_i}) + \sum_{k=1}^{N_i-1} f_k \right\} \quad (18)$$

- μ 에 대한 특이점 ν 와 유수 $\rho(\nu)$ 에 대하여 다음과 같은 적분 수정치를 계산한다.

$$R_{N_i} = \begin{cases} 0; & \nu = kp/N_i \\ \pi \rho \cot\left(\frac{N_i \pi \nu}{p}\right); & \nu \neq kp/N_i \end{cases} \quad (19)$$

- 이차 적분치를 다음과 같이 구한다.

$$T_{N_i}' = T_{N_i} + R_{N_i} \quad (20)$$

상기와 같은 절차를 거치면 N_i 가 증가하면서 T_{N_i}' 값이 수렴 값에 도달하며 이를 최종 적분치로 채택하면 된다. 대부분의 경우 충분한 정확도가 얻어지나 Hunter (1973)는 T_{N_i}' 를 이용한 Romberg 적분을 수행하여 정확도를 제고하기 위한 추가적인 알고리즘을 제시하였다.

4. 수치해석의 적용

4.1 입력조건

무한수심 그린함수로 계산된 부가질량계수와 감쇠계수의 정확성 및 적용성을 검토하기 위하여 예제해석을 수행하였으며 그 결과를 기존의 수치해석결과와 비교하였다. 대상 부유체는 반경이 0.5m인 구형 부유체가 정확히 반이 잠겨있는, 흘수가 0.5m인 부유체이다. 계산을 위하여 수중부 표면을 메쉬로 분할하였으며 메쉬크기에 따른 계산결과와의 차이를 검토하기 위하여 두 종류의 메쉬 (Mesh A, Mesh

Fig. 1. Two mesh types generated on the surface of the floating bodies selected for the sample calculations.

B)로 설정하였다(Fig. 1). Mesh A는 특성길이가 0.1m이며 Mesh B는 0.07m이다.

좌표계의 원점은 수면과 부유체의 연직중심선과의 교점에 위치한다. 부유체의 반경을 r_f , 흘수를 c 라 할 때 $c/r_f = 1$ 이다. 부유체는 전체적으로 균일한 밀도를 가지며 무게중심은 원점으로부터 $z = -0.1875\text{m}$ 에 위치한다. 파랑주기는 0.7 - 20초의 범위에서 100 개의 주기를 파수 k 가 등간격이 되도록 설정하였다. 여기서는 선형과 가정을 사용하므로 파고는 부가질량과 감쇠계수에 무관하며 파 주기와 부유체의 크기 및 형상에만 의존한다. 무한수심의 경우에는 수심 조건이 필요치 않으나 유한수심 경우와 비교하기 위하여 수심을 $h = 2r_f, 10r_f, \infty$ 와 같이 세 종류로 정하였다. 계산 입력조건을 정리하면 Table 1과 같다.

4.2 계산결과 및 분석

설정된 대상 부유체에 대하여 Chun *et al.* (2020)에서 제시한 특이점 분포법을 이용하여 부가질량계수와 감쇠계수를 계산한 후 기존 연구결과와 비교하였다. 현재 삼차원 부유체에 대해서는 이들 계수들의 실험적 결과가 가용치 않기 때문에 대신 Garrison (1974)과 Kim (1965)의 수치해석 결과들을 이용하였다. Garrison (1974)은 유한수심의 그린함수에서 $1/R$ 에 대한 패널적분을 Hess and Smith (1962)의 방법을

이용하는 수치해석기법을 수립하고 구형 부유체의 surge (sway)와 heave에 대한 계수 값들을 계산하였다. Kim (1965)은 별도의 무한수심에 대한 그린함수를 유도하고 이를 이용하여 장축과 단축의 비를 달리하는 여러 종류의 회전타원체(spheroid)에 대하여 부가질량계수와 감쇠계수를 계산한 바 있다.

본 연구에서는 유한수심 경우와 무한수심 경우의 수심에 따른 적용성을 고찰할 것이기 때문에 먼저 Chun *et al.* (2020)에서 제시한 유한수심 수치해석방법의 유효성부터 검토하기로 한다. Fig. 2는 Mesh A에 대하여 유한수심 수치해석기법을 적용하여 구한 surge와 heave의 계산결과를

Table 1. Input conditions of the sample calculations

Dimension	Values
Radius of sphere (m)	0.5
Draft (m)	0.5
Number of element (node): mesh size	Mesh A: 194 (355): 0.1 m Mesh B: 378 (709): 0.07 m
Location of the Center of gravity (m)	(0,0,-0.1875)
Water depth (m)	1.0, 5.0, 10.0, ∞
Wave period (sec)	0.7 - 20.0

Fig. 2. Comparison of the calculated values with Garrison (1974)'s results for the added mass and damping coefficients in surge and heave motions of a half submerged floating hemisphere in finite depth condition. Here, h/r_f denotes the ratio of water depth to radius.

Garrison (1974)의 계산결과와 비교한 것이다. 여기서 수심의 효과를 알아보기 위하여 수심 (h)과 반경 (r_f)의 비를 $h/r_f = 2.0$ 과 $h/r_f = 10.0$ 의 두가지로 고려하였다. 전반적으로 특이점 적분 수치해석결과와 Garrison의 결과가 상호 잘 일치함을 볼 수 있다. 수치해석 결과에서 두 수심 간의 결과 차이는 전반적으로 작으나 Heave 감쇠계수의 고주파수 부분에서는 상당정도의 차이를 보인다. 한편, $h/r_f = 10.0$ 에 대한 Surge 감쇠계수를 보면 $r_f \sigma^2/g > 1.6$ 의 고주파수대에서 갑자기 이상 변화가 나타난다. 이에 대해서는 제5절에서 다시 언급하기로 한다.

제3절에서 기술한 무한수심 특이점 적분 수치해석기법을 이용하여 구형 부유체에 대한 부가질량계수와 감쇠계수를 계산한 후 이들을 Kim (1965)의 계산결과와 비교하였다. 본 비교에서는 표면 메쉬의 크기에 따른 계산결과와 차이를 검토하기 위하여 Mesh A와 Mesh B에 대하여 계산을 수행하였다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 Kim의 주파수 범위 내 ($r_f \sigma^2/g < 3.6$)에서는 비교적 일치정도가 양호한 것으로 나타났다. 다만, 고주파수대에서 부가질량계수와 감쇠계수 공히 스파이크가 나타남을 볼 수 있다. 이는 고주파수로 가면서 입사파장에 대한 메쉬의 상대적 크기가 증가함으로 말미암아 계산결과와 해상도가 저하되기 때문인 것으로 의심해 볼 수 있다. 그러나, 메쉬의 조밀도가 서로 다른 두

메쉬에서 스파이크 발생이 매우 유사한 것으로 보아 원인은 다른 곳에 있는 것으로 판단된다. 사실상, 이와 같은 스파이크의 출현은 특이점 분포법의 적용에서 흔하게 발생하는 문제이다. Penalba *et al.* (2017) 역시 오픈소스 프로그램인 NEMOH와 그리고 상용 프로그램인 WAMIT에서도 동일한 문제가 발생하며 인위적 평활화 (smoothing)를 통하여 스파이크를 제거할 수 있다고 언급한 바 있다. Fig. 3의 Kim (1965)의 결과에서도 모종의 평활화를 시도한 것으로도 보여지나 동 문헌에서 이에 대한 언급은 발견되지 않는다.

5. 유한수심과 무한수심의 판별에 대한 고찰

서론에서 기술하였듯이 유한수심 그린함수가 수심이 깊어짐에 따라 자동적으로 무한수심 그린함수로 접근하는 형태가 아니기 때문에 이 두 그린함수의 적용을 판별하기 위한 수심임계조건을 설정할 필요가 있다. Fig. 4는 수심 h 와 부유체 반경 r_f 간의 무차원수 h/r_f 의 크기에 따른 유한수심 수치해석의 결과를 무한수심 ($h/r_f = \infty$)의 결과와 비교한 것이다. 유한수심에 대한 결과는 음수와 과도치들을 제외한 유효범위의 값들에 한정하여 제시하였다. 세부 그림들에는 검토목적 상 사용된 파랑주기를 유차원으로 같이 도시하였다.

Fig. 3. Comparison of the calculated values with Kim (1965)'s results for the added mass and damping coefficients in surge and heave motions of a half submerged floating hemisphere in infinite depth condition.

Fig. 4. Comparison of added mass and damping coefficients in surge and heave motions between finite ($h/r_f = 10, 20$) and infinite depth conditions ($h/r_f = \infty$).

Fig. 4에서 보듯이 h/r_f 가 증가하면서 유한수심 해석결과들이 무한수심 결과에 수렴함을 볼 수 있다. 이는 최소한 수심과 파장 L 간의 무차원수 h/L 의 크기가 증가하면서 관련 수식이 심해파로 자동 접근하는 일반적인 파동역학에서의 양상과는 매우 다른 것이다. 부유체 해석에서 유한수심과 무한수심의 구분은 h/L 이 아닌 h/r_f 에 의존한다는 사실이며 자동적 수식 접근이 이루어지지 않는다. 이와 같은 h/r_f 에 대한 의존성은 Garrison (1974)도 지적한 바가 있으며, $h/r_f = 5$ 에 대한 유한수심 결과가 Kim (1965)의 무한수심 결과와 거의 동일함을 보였다. 그러나, h/r_f 가 증가한다고 해서 무조건 무한수심의 결과로 수렴되는 것은 아니다. 이미 Fig. 2에서 $h/r_f = 10$ 일 때 고주파수대의 결과에서 이상 징후를 목격한 바 있다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 h/r_f 가 증가할수록 무한수심의 결과에 수렴하는 주파수 범위의 상한치가 감소한다. 즉, $h/r_f = 20$ 의 경우 (red open circle)가 $h/r_f = 10$ 의 경우 (blue solid circle)에 비하여 유효주파수 범위가 저주파수 쪽으로 좁아져 있다. h/r_f 의 값을 계속 증가시키면 유한수심 계산결과는 결국 무한수심의 값에서 벗어나 극히 작은 주파수를 제외하고는 거의 전 주파수 범위에서 음수 값 또는 비정상적인 과도치들을 보이게 된다. Fig. 4에 도시되어 있는 파랑주기의 변화를 보면 주기가

5초 이상의 저주파수 파랑에 대해서는 실제 h/r_f 값은 매우 크다 할지라도 $h/r_f = 10$ 이라 간주하고 유한수심 해석을 수행해도 무방할 것으로 보인다. 그러나, 이는 어디까지나 규칙과 입사에 대한 주파수영역 해석에 국한된다. 불규칙파와 입사에 대한 시간영역 해석을 수행할 경우에는 무한대 주파수에서의 감쇠계수 정보가 요구되기 때문에 수심이 깊을 경우에는 아예 처음부터 무한수심 해석을 수행하는 것이 바람직하다. 따라서, 관측목적으로 수심 미터 이상의 수심에 설치되는 해상부이는 거의 무한수심의 경우에 해당되며, 따라서 부이의 성능검토 시에는 무한수심해석을 수행해야 한다. 만약 h/r_f 가 10 이하일 때는 당연히 수심효과의 정밀한 반영을 위하여 유한수심 해석을 수행해야 할 것이다. 부유체가 구형부이가 아닌 비축대칭 부유체일 경우에는 수심 판별조건을 일률적으로 설정하는 것은 매우 어려우며 동일한 부유체와 설치수심에 대해서 유한수심 해석과 무한수심 해석을 공히 수행하여 그 결과들을 비교해보는 것이 권장된다. 만약 유한수심의 결과가 음수 또는 과도치 등의 이상 값들을 보이면 바로 무한수심 해석 결과를 채택하면 된다. 일반적으로 무한수심 해석이 유한수심해석의 경우보다 컴퓨터 계산시간이 월등 짧다는 점도 필히 고려해야 되는 사항이다.

6. 결론

파랑에 의한 부유체의 운동변위 및 부유체에 작용하는 파력을 계산하기 위해서는 부유체 운동의 동역학적 방정식을 해석해야 되며 이를 위해서는 입사파랑 조건과 부유체 형상이 반영된 부가질량계수와 감쇠계수를 사전 결정해야 한다. 본 연구에서는 무한수심 그린함수를 이용하여 이들 계수들을 결정하는 새로운 방법을 제시하였으며 기존의 해석결과와 비교하여 그 적용성을 검토하였다. 세부결론은 다음과 같다.

- 기존 연구들에서 제시된 무한수심 그린함수는 여러 수식형태가 존재하나 본 연구에서는 수식 내 자유수면항의 주파수 적분구간에 특이점을 그대로 포함하고 있는 고전적인 함수형태를 채택하였다. 유수적분기법 (Residue integration method)을 적용하여 특이점적분을 수행한 결과 기존의 수치해석 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 본 적분방법은 준 해석적 해를 제공하기 때문에 근사적 초월함수를 사용하거나 수치해석에 의존하는 기존의 방법들에 비하여 계산시간과 정확도면에서 성능이 보다 우수할 것으로 판단된다.
- 유한수심해석 또는 무한수심해석의 적용을 위한 수심 판별은 부유체 크기 대비 수심의 상대적 비에 의존하는 성향이 있으며 이 비가 증가하면서 유한수심해석 결과가 무한수심해석 결과에 접근하는 것으로 나타났다. 그러나 이 비 값이 소정 값 이상으로 증가하면서 유한수심해석의 유효 주파수 범위가 저주파 쪽으로 감소한다. 해상관측부이 등 구형 부유체의 경우에는 이 비 값이 10 이하 일 때는 유한수심해석을, 그 이상일 때는 무한수심해석을 수행하는 것이 바람직하다.
- 일반적인 비대칭 부유체의 경우에는 유한수심해석과 무한수심해석을 동시에 수행하여 결과들을 비교하는 것이 바람직하며 유한수심해석의 결과가 음수 및 과도 값 등의 이상 값들을 보일시에는 무한수심해석 결과를 채택하는 것이 권장된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원에서 2020년 해양수산부의 재원으로 수행중인 종합해양과학기지 구축 및 활용연구와 산업통상자원부의 재원으로 수행중인 첨단 해양산업 오픈랩 구축 및 실감형 융합 콘텐츠 개발 사업의 지원을 받아 수행되었음.

References

Babarit, A. and Delhommeau, G. (2015). Theoretical and numerical aspects of the open source bem solver nemoh. In Proc. EWTEC.

- Chun, I. (1994). "For the good time of floating breakwaters in Korea - A numerical and experimental study." *Proceedings of International Workshop on Floating Structures in Coastal Zone*, Hiroshima, Japan, pp. 271-281.
- Chun, I., Min, I.-K., and Oh, B. (2020). "Reexamination on the determination of added mass and damping coefficients of floating objects." *J. Coastal Disaster Prevention*, Vol. 7, No. 4, pp. 297-305 (in Korean).
- Garrison, C. J. (1978). "Hydrodynamic loading of large volume offshore structures: three dimensional source distribution methods." In: O. C. Zienkiewicz, R. W. Lewis and K. G. Stagg (eds.). *Numerical Methods in Offshore Engineering*. John Wiley & Sons, pp. 87-140.
- Garrison, C. J. (1974). "Hydrodynamics of large objects in the sea: Part I - Hydrodynamic analysis." *J. Hydronautics*, Vol. 8, No. 1, pp. 5-12.
- Havelock, T. H. (1955). "Waves due to floating sphere making periodic heaving oscillations." *Proc. Roy. Soc. Lond.*, A231, pp. 1-7.
- Hess, J. L. and Smith, A. (1962). "Calculation of non-lifting potential flow about arbitrary three-dimensional bodies." Report No. E.S. 40622, Douglas Aircraft Co., Inc.
- Hunter, D. (1973). "The numerical evaluation of Cauchy principal values of integrals by Romberg integration." *Numerische Mathematik*, Vol. 21, No. 3, pp. 185-192.
- Kim, W. D. (1965). "On the harmonic oscillations of a rigid body on a free surface." *J. Fluid Mech.*, Vol. 21, No. 3, pp. 427-451.
- Kreyszig, E. (1993). "Advanced engineering mathematics." *John Wiley & Sons, Inc.*, pp. 837-858.
- Kutt, H. (1975). "The numerical evaluation of principal value integrals by finite-part integration." *Numerische Mathematik*, Vol. 24, No. 3, pp. 205-210.
- Newman, J. N. (1985). "Algorithms for the free-surface Green function." *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 19, pp. 57-67.
- Penalba, M., Kelly, T., and Ringwood, J. (2017). "Using NEMOH for modelling wave energy converters: A comparative study with WAMIT." *Proceedings of the 12th European Wave and Tidal Energy Conference, Cork, Ireland*, pp. 631.1-631.10.
- Sarpkaya, T. and Isaacson, M. (1981). "Mechanics of wave forces on offshore structures." *Van Nostrand Reinhold Company Inc.*, pp. 435-445.
- Wehausen, J. V. and Laitone, E. V. (1960). "Surface waves." In *Fluid Dynamics/Strömungsmechanik: Springer*, pp. 446-778.
- Xie, C., Choi, Y., Rongère, F., Clément, A. H., Delhommeau, G., and Babarit, A. (2018). "Comparison of existing methods for the calculation of the infinite water depth free-surface Green function for the wave-structure interaction problem." *Applied Ocean Research*, Vol. 81, pp. 150-163.