

# 전진 속도를 가지는 부유체 운동 문제에 대한 방사기법 비교 연구

오승훈<sup>†</sup>  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

## Comparative Study on the Radiation Techniques for the Problem of Floating Body Motion with Forward Speed

Seunghoon Oh<sup>†</sup>  
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this paper, a comparative study on the radiation techniques for the motion analysis of the three dimensional floating structure with the forward speed was carried out. The Sommerfeld radiation condition, the damping technique, and the point shift technique were used for the comparative study. Radiated wave patterns and hydrodynamic coefficients of the heave motion of floating structure with the forward speed were compared and analyzed. The characteristics and limitations of each radiation technique were analyzed through the calculation results. To overcome the limitations of conventional radiation techniques, the hybrid radiation technique combining the Sommerfeld radiation condition with the damping technique was proposed. It is confirmed that the proposed method, the Hybrid radiation technique, improves the limitation of the speed range and the dissipation of the wave of the conventional radiation technique. The motion analysis code of the three dimensional floating structure with the forward speed based on the Rankine source method with hybrid radiation technique was developed. In order to validate the developed code, hydrodynamic analyses were carried and compared with published experiments.

**Keywords** : Radiation technique(방사 기법), Forward speed (전진속도), Wave pattern(파형), Hydrodynamic coefficient(유체동역학적 계수)  
Rankine source method(랜킨 소오스 방법)

## 1. 서 론

전진하는 부유체의 파랑 중 운동해석은 이상유체를 가정한 포텐셜이론이 널리 활용되고 있다. 주파수 영역 스트립 방법(Korvin-Kroukivsky & Jacobs, 1957; Gerritsma & Beukelman, 1967; Salvesen et al., 1970)의 성공 이후 더욱 엄밀한 3차원 해석법의 개발의 필요성이 대두되었다. 이러한 필요성에 의해 3차원 파랑그린함수를 이용한 방법과 랜킨 소오스를 그린함수로 이용하는 랜킨 소오스 방법의 개발이 진행되었다. 3차원 파랑그린함수를 이용한 방법(Lee & Yum, 1994; Jo et al., 1997; Choi et al., 2000)에는 동요하는 그린함수와 전진하면서 동요하는 그린함수를 이용하는 방법으로 나누어진다. 우선 동요하는 그린함수를 이용하는 방법은 전진속도를 엄밀하게 고려할 수

없기 때문에 조우주파수 효과를 고려하여 근사적으로 전진속도를 고려하며 안정적인 결과로 초기설계에 활용되고 있다. 이와 반대로 전진하면서 동요하는 그린함수를 이용하는 방법은 전진속도를 엄밀하게 고려할 수 있으나 정확한 포텐셜의 계산 및 수선 선적분의 어려움으로 실용적인 활용에 한계가 존재한다.

랜킨 소오스방법은 랜킨 소오스를 부유체 접수표면과 자유수면에 분포시켜 경계조건을 만족하도록 함으로써 경계치 문제의 해를 구하는 방법이다. 따라서 자유수면의 복잡한 경계조건도 쉽게 적용 가능하다는 장점 때문에 전진속도의 효과를 엄밀하게 고려할 수 있다. 이러한 장점때문에 전진하는 부유체의 파랑 중 운동해석에 랜킨 소오스방법이 널리 활용되고 있다(Nakos, 1990; Bertram, 1990; Hong & Choi, 1995; Iwashita, 1998; Yang et al., 2001; Kim & Kim, 2018). 주파수 영역 랜킨 소

오스방법의 경우, 적절한 방사조건의 부재로 Brard 수  $\tau = 0$  또는  $\tau > 0.25$ 의 제한된 속도 영역에서 수행되었다. 이러한 제한된 영역을 극복하고 비선형 해석의 확장을 위하여 시간 영역 랜킨 소오스방법이 대안으로 제시되어 성공적인 결과를 도출하였다(Sclacounos et al., 1997; Kim et al., 2011). 주파수 영역 랜킨 소오스방법은 시간 영역 랜킨 소오스방법과 비교하여  $\tau$ 의 제한이 있지만 계산이 효율적이라는 큰 장점이 있다. Oh et al.(2019)는 효율적인 측면에서 비특이화 간접적분방정식 방법을 활용하여 부유체의 응답과 비선형 평균표류하중에 대하여 성공적으로 적용한 바 있다.

최근 방사조건 부재로 인한 속도 영역의 제한을 극복하기 위해 여러가지 연구가 진행되고 있다. Södding and Bertram (2009)과 Yasuda et al.(2016)은 두가지의 방사조건을 혼합하는 방법을 통해 실용적인 방사조건을 제시하였고 모형 시험과 일치함을 보였다. Das and Cheung(2012)와 Yuan et al(2014)은 Sommerfeld 방사조건을 수정하는 방법을 통해 제시된 방사조건의 유효성을 성공적으로 입증하였다. 상기 제안된 방사기법들은 감쇠항 도입만으로 쉽게 적용 가능하지만 부유체의 방사 및 산란파의 감쇠를 동반하는 한계를 가지고 있거나 도플러 편이되는 파 주파수를 계산하기위하여 모든 방사 경계면의 비선형 연립방정식의 해를 구해야는 번거로움이 있다. 파형의 감쇠를 개선하고 적용이 용이한 방사 기법의 제안이 필요하다. 적절한 방사 기법을 제안하기 위하여 기존에 사용되는 방사 기법의 특성들을 체계적으로 파악하여 비교 분석하는 것은 필수적이다.

본 연구에서는 Sommerfeld 방사조건, 감쇠 기법(Damping technique)과 만점집 이동 기법(Point shift technique)을 원용하여 주어진 방사기법을 적용한 랜킨 소오스 방법을 이용하여 전진속도를 가지는 3차원 부유체의 상하동요에 의한 파형과 유체력 계수를 비교하였다. 비교 연구를 통하여 각 방사기법의 특성 및 한계를 파악하였다. 파악된 한계를 극복하기 위하여 2가지 방사기법을 혼합한 혼합 방사 기법(Hybrid radiation technique)을 제안하였고 본 기법으로 기존 방사기법에서 발생하는 속도 영역의 제한과 파형 감쇠가 개선됨을 확인하였다. 혼합 방사 기법이 적용된 랜킨 소오스 방법 기반 전진속도를 가지는 3차원 부유체 운동해석 코드를 개발하였으며 모형시험을 통하여 개발된 코드의 타당성을 검증하였다.

## 2. 수학적 정식화 및 수치방법

### 2.1 수학적 정식화

Fig. 1은 무한수심에서 부유체와 함께 이동하는 직교좌표계에서 일정한 전진속도  $U$ 로 진행하는 부유체를 나타낸다.

좌표계에서 수평좌표  $x, y$ 는 수선면의 면심에 위치하고 수직축  $z$ 는 평균수면을 기준으로 상방향을 향한다.  $A, \omega$  및  $\beta$ 는 각 입사파의 파고, 주파수 그리고 입사각으로 정의한다. 유체의 비압축과 비점성 그리고 유동의 비회전을 가정하면 속도포텐셜을

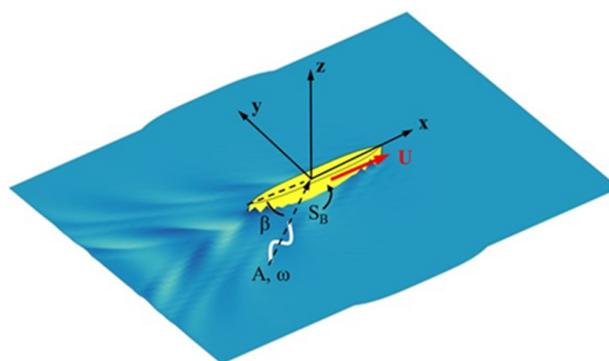


Fig. 1 Coordinate system

도입할 수 있으며 유체의 지배방정식인 연속방정식은 식(1)과 같이 라플라스방정식이 된다.

$$\nabla^2 \Psi(\vec{x}, t) = 0 \tag{1}$$

전진하는 부유체는 입사파에 의해 6자유도 운동을 한다. 입사파와 부유체의 의한 교란파를 미소하다고 가정하면 경계치 문제를 선형화 할 수 있다. 본 연구에서는 이중물체 선형화(Double body linearization)를 적용하였고 속도포텐셜  $\Psi$ 는 아래와 같이 분리할 수 있다.

$$\Psi(\vec{x}, t) = \Phi(\vec{x}) + \phi(\vec{x}) + \varphi(\vec{x}, t) \tag{2}$$

여기서  $\Phi$ 는 이중물체 속도포텐셜,  $\phi$ 는 정상 속도포텐셜,  $\varphi$ 는 비정상 속도포텐셜을 의미한다. 이중물체 속도포텐셜은 정상상태인  $\omega \rightarrow 0$  일때 자유표면의 조건  $\Phi_z = 0$ 을 만족시켜 줌으로써 구할 수 있다. 비정상 속도포텐셜 또한 선형화하여 식(3)과 같이 분리할 수 있다.

$$\varphi(\vec{x}, t) = Re \left\{ e^{i\omega_e t} \left[ A(\varphi_0 + \varphi_7) + \sum_{j=1}^6 \zeta_j \varphi_j \right] \right\} \tag{3}$$

여기서  $\zeta_j (j=1, 2, \dots, 6)$ 는 6자유도 운동의 진폭을  $\varphi_j (j=1, 2, \dots, 6)$ 은 부유체의 6자유도 운동에 기인한 속도포텐셜을 의미한다.  $\varphi_0$ 는 입사파의 속도포텐셜,  $\varphi_7$ 는 입사파가 부유체에 의해 산란된 속도포텐셜을 의미한다.  $i$ 는 허수,  $\omega_e$ 는 조우주파수를 나타내며 식(4)와 같이 정의된다.

$$\omega_e = \omega - Uk \cos(\beta) \tag{4}$$

무한수심에서의 입사파의 속도 포텐셜은 선형이론에 의해 식(5)와 같이 정의되며  $k (k = \omega^2 / g)$ 는 파수를,  $g$ 는 중력가속도를 의미한다.

$$\varphi_0 = i \frac{g}{\omega} e^{k(z - i[x \cos(\beta) + y \sin(\beta)])} \tag{5}$$

Nakos(1990)는 부유체의 운동에 기인한 방사문제(Radiation problem)와 입사파에 의한 산란문제(Diffraction problem)에 대한 선형화된 비정상 자유 표면 경계 조건을 식 (6)과 같이 정리하였다.

$$g \frac{\partial \phi_j}{\partial z} = \begin{cases} \omega_e^2 \phi_j - 2i\omega_e \nabla \Phi \cdot \nabla \phi_j \\ -\nabla \Phi \cdot \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \phi_j) \\ -\frac{1}{2} \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) \cdot \nabla \phi_j \\ +\Phi_{,zz} (i\omega_e \phi_j + \nabla \Phi \cdot \nabla \phi_j) \end{cases} \quad (j = 1, \dots, 6) \quad \text{on } S_F$$

$$g \frac{\partial \phi_j}{\partial z} = \begin{cases} -g \frac{\partial \phi_0}{\partial z} + \omega_e^2 (\phi_j + \phi_0) \\ -2i\omega_e \nabla \Phi \cdot \nabla (\phi_j + \phi_0) \\ -\nabla \Phi \cdot \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla (\phi_j + \phi_0)) \\ -\frac{1}{2} \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) \cdot \nabla (\phi_j + \phi_0) \\ +\Phi_{,zz} (i\omega_e (\phi_j + \phi_0) + \nabla \Phi \cdot \nabla (\phi_j + \phi_0)) \end{cases} \quad (j = 7) \quad (6)$$

방사문제에서의 부유체의 평균위치에서의 부유체의 경계조건은 식(7)과 같다.

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = i\omega_e n_j + m_j \quad (j = 1, \dots, 6) \quad \text{on } S_B \quad (7)$$

여기서  $n_j (1, 2, \dots, 6)$  는 부유체의 단위 수직벡터로 식(8)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} (n_1, n_2, n_3) &= \vec{n} \\ (n_4, n_5, n_6) &= \vec{x} \times \vec{n} \end{aligned} \quad (8)$$

전진하는 부유체의 경계조건에는 m-term이라고 불리우는  $m_j (1, 2, \dots, 6)$  이 추가되는데 이는 전진하는 부유체의 정상해와 비정상해의 상호 영향을 나타내며 식(9)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} (m_1, m_2, m_3) &= -(\vec{n} \cdot \nabla) \nabla \Phi \\ (m_4, m_5, m_6) &= -(\vec{n} \cdot \nabla) (\vec{x} \times \nabla \Phi) \end{aligned} \quad (9)$$

상기 m-term을 산정하기 위해서는 이중물체 속도포텐셜의 2계 미분 계산이 필연적이다. 일정강도 소오스 방법의 경우, 물체표면의 속도포텐셜의 2계 미분 직접계산에 오차가 발생한다고 알려져 있다(Zhao & Faltisen, 1989). 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 Chen and Malenica(1996)의 방법을 이용하여 정확한 2계 미분 계산을 수행하였다.

산란문제(Diffraction problem)에서의 부유체의 경계조건은 식(10)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} \quad (j = 7) \quad \text{on } S_B \quad (10)$$

바닥 경계조건의 경우, 무한수심으로 가정할 경우, 랜킨 소오스의 특성으로 자동 만족된다.

## 2.2 유체력 및 운동 방정식

주어진 경계조건으로 구성된 경계치 문제를 통해 비정상 속도포텐셜의 해를 구할 수 있다. 베르누이 방정식과 비정상 속도포텐셜을 통해 부유체의 작용하는 동압을 계산할 수 있다. 부유체 평균위치 상 접수표면의 동압을 적분하면 부유체 표면에 작용하는 비정상 유체력을 구할 수 있다.

부유체에 입사파가 입사하게 되면 파가 산란하게 되고 이에 의한 파랑 강제력이 작용하게 된다. 파랑 강제력은 입사파의 속도포텐셜  $\phi_0$  과 산란에 의한 속도포텐셜  $\phi_7$  에 의한 동압을 적분한 것으로 식(11)으로 표현된다.

$$F_i^E = -\rho \iint_{S_B} (i\omega_e (\phi_0 + \phi_7) + \nabla \Phi \cdot \nabla (\phi_0 + \phi_7)) n_i ds, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (11)$$

부유체는 파랑강제력에 의해 6 자유도 운동이 발생하고 이와 같은 운동으로 인한 비정상 유체력이 발생한다. 비정상 유체력은 식 (12)와 (13)과 같이 부가질량  $a_{ij}$  과 조파감쇠계수  $b_{ij}$  로 분리할 수 있다.

$$a_{ij} = -\frac{\rho}{\omega_e^2} \text{Re} \left\{ \iint_{S_B} (i\omega_e \phi_j + \nabla \Phi \cdot \nabla \phi_j) n_i ds \right\} \quad (12)$$

$$b_{ij} = \frac{\rho}{\omega_e} \text{Im} \left\{ \iint_{S_B} (i\omega_e \phi_j + \nabla \Phi \cdot \nabla \phi_j) n_i ds \right\} \quad (13)$$

뉴턴의 제 2법칙에 따라 주파수 영역의 6자유도 운동방정식을 구성하면 식(14)와 같다.

$$\sum_{j=1}^6 [-\omega_e^2 (M_{ij} + a_{ij}) + i\omega_e b_{ij} + C_{ij}] \zeta_j = F_i^E, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (14)$$

여기서  $M_{ij}$  은 질량행렬,  $C_{ij}$  는 복원계수행렬  $\zeta_j$  는 운동의 복소진폭을 의미한다. 자유수면의 높이는 식(15)와 같이 동역학적 자유수면 경계조건을 활용하여 구할 수 있다.

$$\eta = -\frac{i\omega_e}{g} \left( A(\phi_0 + \phi_7) + \sum_{j=1}^6 \zeta_j \phi_j \right) - \frac{1}{g} \nabla \Phi \cdot \nabla \left( A(\phi_0 + \phi_7) + \sum_{j=1}^6 \zeta_j \phi_j \right) \quad (15)$$

## 2.3 방사조건

부유체의 운동과 입사파의 산란에 의해 부유체로부터 파가 전파되어 나가도록 적절한 방사 조건이 필요하다. 본 연구에서는 3가지 방사조건에 대한 동유체력 및 파형을 비교 분석하여

각 방사조건의 특성을 파악하고자 한다.

Sommerfeld 방사 조건의 경우, 물체에 의해 생성된 발생파가 Fig. 2와 같이 방사경면 밖으로 진행함을 나타낸다. 본 조건의 경우, 이론적으로는 정지상태에서만 적용가능하나 본 연구에서는 조우주파수를 이용한 변형된 형태로 식(16)과 같이 정의하여 적용하였다.

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} - i \frac{\omega_e^2}{g} \phi_j = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, 7) \quad \text{on } S_{\text{radiation}} \quad (16)$$

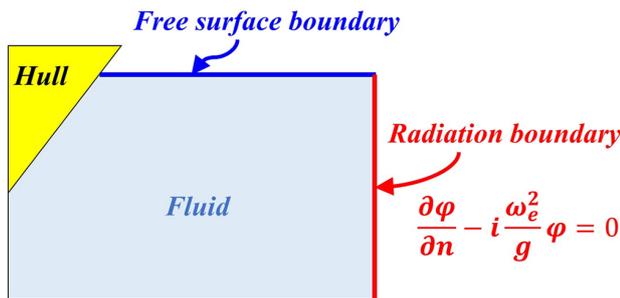


Fig. 2 Sommerfeld radiation condition

전진속도가 있는 선박의 정수 중 조파저항 문제의 방사조건으로 많이 활용되는 만족점 이동 기법은 만족점(collocation point)를 Fig. 3과 같이 상류방향으로 1 패널 이동시키는 방법으로 Bertram(1990)에 의해 선박의 비정상 문제에 처음 적용되었다. 본 방법은 선체에서 발생하는 산란파와 발산파의 군속도가 선박의 속도보다 느린 경우 적용 가능하기 때문에 이론적으로  $\tau$ 가 0.25 이상 일때만 유효하다. 하지만 실용적인 관점에서  $\tau$ 가 0.5이상에 적용하는 것을 제안하고 있다(Iwashita, 1998).

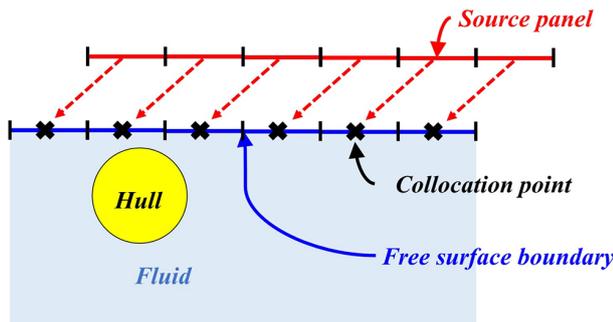


Fig. 3 Point shift technique

감쇠 기법의 경우, 일본 연구 그룹(Takagi, 1990; Yasukawa, 1990)에 의해 Rayleigh's artificial friction을 이용한 방사조건이 연구가 진행되었으며 Södding & Bertram(2009)과 Yasuda et al.(2016)에 의해 실용적 관점에서 인공감쇠 조건을 다른 방사조건과 혼합하는 연구가 진행하여 성공적인 결과를 도출한 바 있다. 본 연구에서는 Södding & Bertram(2009)의 연구에서 도출된 감쇠계수를 적용하였다. Södding & Bertram(2009)는 Fig. 4와 같이 부유체 근처 영역에는 작은 감쇠항을 적용하고 부유체에서 떨어진 영역에서는 강한 감쇠항을 적용하였다. 식(17)과

같이 감쇠항은 중력가속도에 복소수를 곱하여 도입된다.

$$g \rightarrow (1+vi)g \quad \begin{cases} \text{Small damping } v = 0.1 \\ \text{Strong damping } v = 0.3 \end{cases} \quad (17)$$

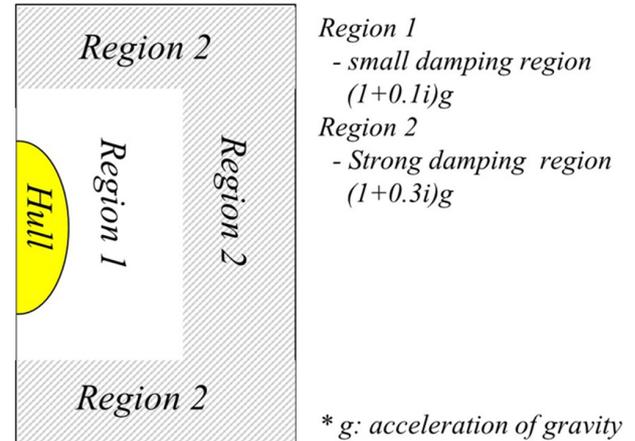


Fig. 4 Damping technique

### 2.4 수치방법

주어진 경계치 문제를 풀기 위해 간접경계적분방정식 방법을 이용하였다. 본 방법의 경우 기본해인 랜킨 소오스를 식(18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(\vec{x}, \vec{\xi}) = \begin{cases} -\frac{1}{4\pi r} - \frac{1}{4\pi r'} & \text{on } S_B \\ -\frac{1}{4\pi r} & \text{on } S_F \end{cases}$$

where

$$r = \sqrt{(x - \xi_1)^2 + (y - \xi_2)^2 + (z \mp \xi_3)^2} \quad (18)$$

경계적분방정식은 식(19)와 같다.

$$\phi(\vec{x}) = \int_{S_B + S_F} \sigma(\vec{\xi}) \cdot G(\vec{x}, \vec{\xi}) dS(\vec{\xi}) \quad (19)$$

식 (19)를 부유체와 자유수면에 대하여 N개의 패널로 이산화하면 아래와 같다.

$$\phi(\vec{x}_i) = \sum_j^N \sigma_j \int_{S_B + S_F} G(\vec{x}_i, \vec{\xi}) dS(\vec{\xi}) = \sum_j^N \sigma_j G_{ij} \quad (20)$$

식 (20)에 경계조건을 대입하여 연립방정식을 구성할 수 있다. 구성된 연립 방정식을 이용하여 소오스 강도  $\sigma$ 를 결정할 수 있으며 결정된 소오스 강도  $\sigma$ 를 식 (18)에 대입하여 속도포

텐션을 구할 수 있다. 자유수면의 패널은 Raised panel을 적용하였고 평균 수면을 기준으로  $\Delta z_i = \sqrt{S_i}$  만큼 비특이화 시켰다 (Oh et al., 2019). 여기서  $S_i$  는  $i$  번째 패널의 넓이를 의미한다.

### 3. 수치해석 및 결과

본 연구에서는 Fig. 5와 같이 Journee의 Wigley I 선형을 이용하여 방사조건에 따른 특성에 대한 수치해석을 수행하였다. Table 1은 Wigley I 선형의 주요치수를 나타낸다.

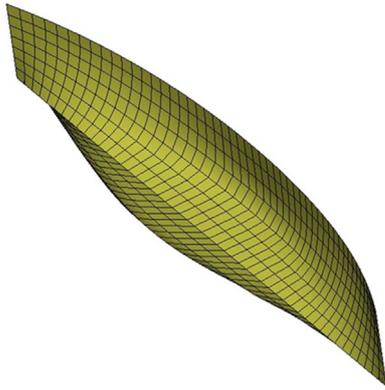


Fig. 5 Geometry of Wigley I hull (Journee, 1992)

Table 1 Main dimension of Wigley I hull (Journee, 1992)

Wigley I	
L [m]	3.0
B [m]	0.3
D [m]	0.1875
$\nabla$ [m <sup>3</sup> ]	0.0946

Table 2 Calculation condition for forced heave oscillation

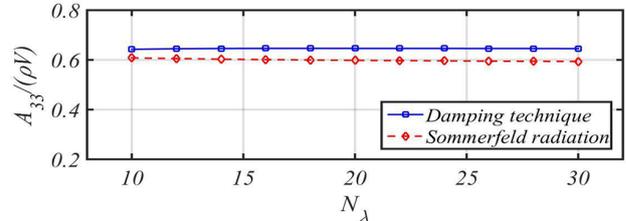
Fn	Wave Pattern	Hydrodynamic coefficients
0.000	$\tau = 0.00$ at $\lambda=1L$	$0.6 \text{ m} < \lambda < 9 \text{ m}$
0.083	$\tau = 0.25$ at $\lambda=1L$	$0.6 \text{ m} < \lambda < 9 \text{ m}$
0.200	$\tau = 0.75$ at $\lambda=1L$	$0.6 \text{ m} < \lambda < 9 \text{ m}$
0.300	$\tau = 1.32$ at $\lambda=1L$	$0.6 \text{ m} < \lambda < 9 \text{ m}$

본 연구에서는 각 방사조건을 파형과 유체력 계수를 비교하였다. 비교를 위해 Table 2와 같이 선속 변화와 주어진 계산 범위에서 해석을 수행하였다.

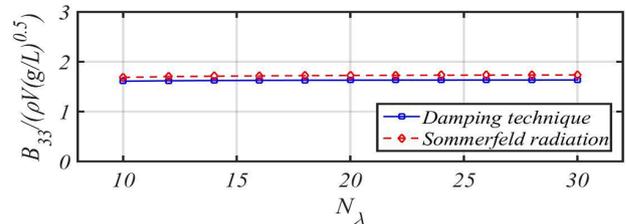
#### 3.1 자유수면 패널 수렴성 조사

비교연구에 앞서 자유수면 패널에 따른 수렴도 해석을 수행하였다. 모든 경계면을 이산화하는 랭킨 소오스 방법의 특성 상 자유수면의 패널의 수와 구성이 계산 결과에 많은 영향이 있다고

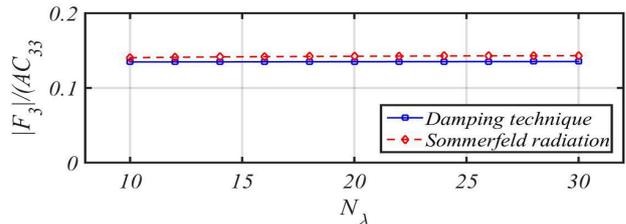
알려져 있다. 계산의 효율성을 위해 부유체의 대칭성을 이용한 mirror technique을 적용하였다. Wigley I의 패널 수는 반쪽 기준 350개를 고정하였다. 자유수면 영역은 상류방향으로 2L, 하류방향으로 2L 그리고 측면 방향으로 2L로 설정하였다. 방사경계면 또는 강한 감쇠항 영역의 영역은 1L로 고정하여 계산을 수행하였다.



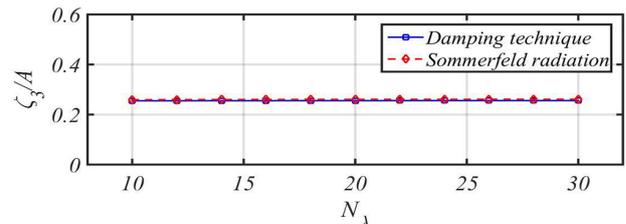
(a) Convergence of added mass



(b) Convergence of damping coefficient



(c) Convergence of wave exciting force



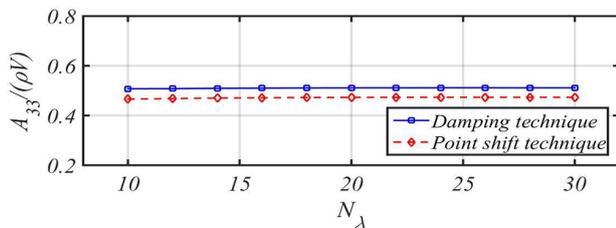
(d) Convergence of heave RAO

Fig. 6 Convergence of number of free surface panel(Fn=0.0)

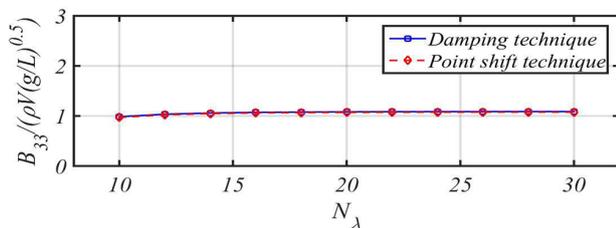
계산은  $Fn = 0.0, 0.2$ 에서  $\lambda = 1L$ 인 조건에 대하여 자유수면의 패널크기를 조절하면서 수행하였다.  $\lambda = 1L$ 은 선박 또는 해양구조물의 설계 관점에서 주요한 조건으로 알려져 있다 (Yuan et al., 2014). 파장 당 패널 수( $N_\lambda = \lambda/\Delta x$ )를 10 ~ 30 개로 변화를 주어 자유수면의 패널의 크기에 따른 부가질량, 조파감쇠, 파랑 강제력 그리고 상하동요 RAO를 계산하였다. 이론적 적용 구간을 고려하여  $Fn = 0.0$ 에서는 Sommerfeld 방사 조건과 감쇠 기법을 방사조건으로 적용하였고  $Fn = 0.2$ 에서는 만족점 이동 기법과 감쇠 기법을 방사조건으로 적용하였다. 이론적 적용 구간이 일치하는 Sommerfeld 방사 조건과 만족점 이동

기법이 해석해에 가깝다고 가정하였으며 이를 통해 감쇠 기법의 결과를 분석하였다. Fig. 6에  $F_n = 0.0$  에서의 부가질량, 조파감쇠, 파랑 강제력 그리고 상하동요 RAO의 수렴도를 나타내었고 파장 당 패널 수가 16개 이상 부터 수렴함을 확인할 수 있었다. 감쇠 기법의 경우, Sommerfeld 방사 조건과 비교하여 부가질량, 조파감쇠 및 파랑 강제력의 근소한 차이를 보이고 있다. 상대적으로 가장 큰 차이를 보인 것은 부가질량으로 Sommerfeld 방사조건 보다 약 8% 큰 것으로 계산되었다. 부가질량, 조파감쇠 및 파랑 강제력과 달리 상하동요 RAO는 Sommerfeld 방사 조건과 동일한 결과를 추정하는 것으로 확인하였다.

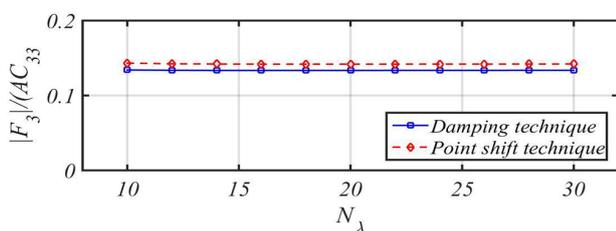
Fig. 7에서는  $F_n = 0.2$  조건의 수렴도를 나타내고 있으며 패널 수가 20개 이상 부터 수렴함을 확인할 수 있다. 감쇠 기법의 경우, 만족점 이동 기법과 비교하여 부가질량, 조파감쇠 및 파랑 강제력의 근소한 차이를 보이고 있다. 상대적으로 가장 큰 차이를 보인 것은 부가질량으로 만족점 이동 기법 보다 약 8% 큰 것으로 계산되었다. 부가질량, 조파감쇠 및 파랑 강제력과 달리



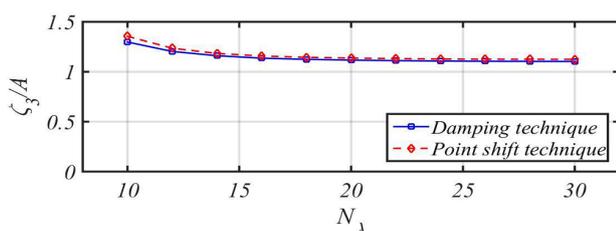
(a) Convergence of added mass



(b) Convergence of damping coefficient



(c) Convergence of wave exciting force



(d) Convergence of heave RAO

Fig. 7 Convergence of number of free surface panel( $F_n=0.2$ )

상하동요 RAO는 만족점 이동 기법과 동일한 결과를 추정하는 것으로 확인하였다.

추후 비교 연구에서는 수렴성 조사에서 수행한 조건과 동일하게 설정하였고 기준 파장( $\lambda = 1L$ ) 당 패널 수를 30개로 고정하여 계산을 수행하였다. 계산에 사용되는 총 패널 수는 Sommerfeld 방사조건을 적용할 경우, 반쪽 기준 14,750개, 만족점 이동 기법의 경우, 7,490개 그리고 감쇠 기법을 사용할 경우, 16,550개의 이산화 요소를 사용하였다.

### 3.2 Wave pattern 비교

방사조건과 선속 변화에 따른 Wigley I의 상하 강제 동요 시 발생하는 파형을 관찰하였다. Table 2의 계산조건에 대하여 계산결과를 도시하였다. Fig. 8 - 11은 선속변화에 따라 Sommerfeld 방사 조건의 파형을 감쇠 기법과 만족점 이동 기법이 적용된 파형을 비교한 것이다. 감쇠 기법과 만족점 이동 기법에서는 선속이

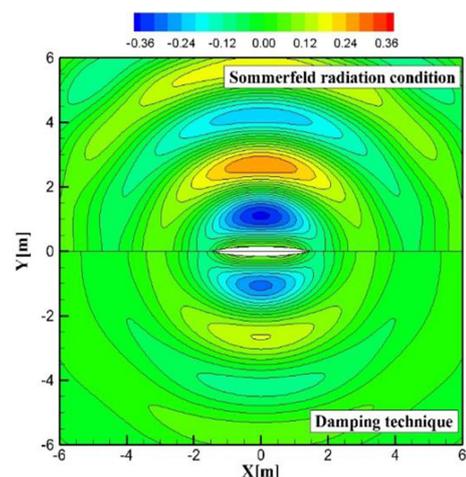


Fig. 8 Radiated waves for unit heave at  $F_n=0.0$  with Sommerfeld radiation condition and damping technique( $\tau=0.0$ )

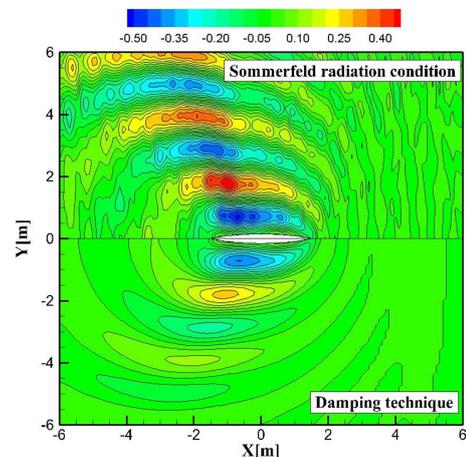


Fig. 9 Radiated waves for unit heave at  $F_n=0.083$  with Sommerfeld radiation condition and damping technique( $\tau=0.25$ )

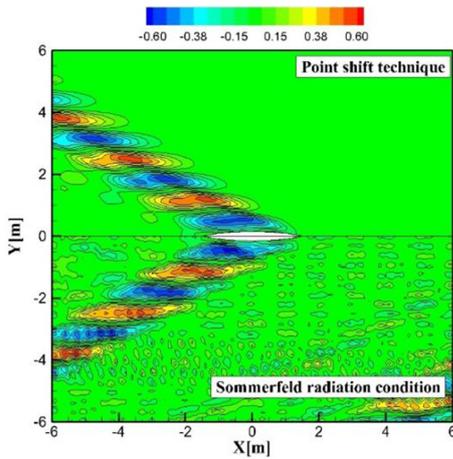


Fig. 10 Radiated waves for unit heave at  $F_n=0.20$  with Sommerfeld radiation condition and point shift technique( $\tau=0.753$ )

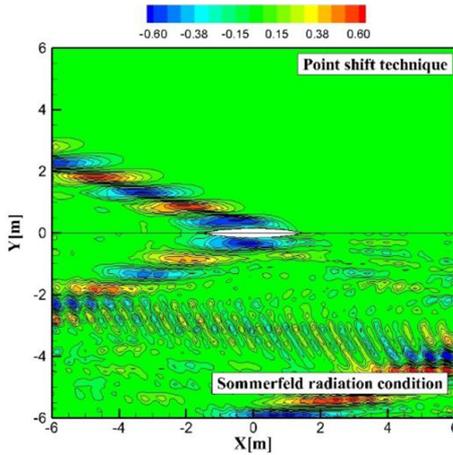


Fig. 11 Radiated waves for unit heave at  $F_n=0.30$  with Sommerfeld radiation condition and point shift technique( $\tau=1.32$ )

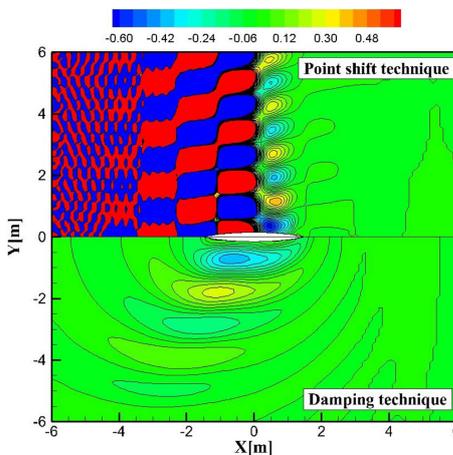


Fig. 12 Radiated waves for unit heave at  $F_n=0.083$  with point shift technique and damping technique ( $\tau=0.25$ )

증가함에 따라 하류 방향으로 파형 변조가 발생하며  $\tau=0.25(F_n = 0.083)$  이상에서 Wigley I 상류로 전파되지 않음을 확인할 수

있다. 하지만 Sommerfeld 방사 조건의 경우, 방사경계면에 단일한 조우주파수로 정의되는 제한때문에 선속이 증가함에 따라 파형의 일그러짐이 점점 커짐을 확인할 수 있다. 이는 선속이 증가함에 따라 완전히 방사되지 않는 파 성분이 증가함을 의미한다. 방사되지 않는 파를 처리할 수 있는 수치적인 기법이 필요한 것으로 판단된다. Fig. 8, 9, 13 및 14는 선속변화에 따라 감쇠 기법의 파형을 Sommerfeld 방사 조건과 만족점 이동 기법이 적용된 파형을 비교한 것이다.

선속이 증가함에 따라 파의 방사 형태가 Sommerfeld 방사 조건과 만족점 이동 기법과 유사하게 생성 전파되지만 Wigley I에서 멀어질수록 파고 급격히 감쇠됨을 확인할 수 있다. 이는 자유수면에 부가된 감쇠항에 기인한 것으로 판단되며 유체력 계수에 미치는 영향을 확인할 필요가 있음을 보여 준다. Fig. 12는  $\tau=0.25$ 에서 만족점 이동 기법의 파형을 감쇠 기법과 비교한 것으로 파가 상류로 전파되는 조건인  $\tau$ 가 0.25 이하에서는 적용할 수 없음을 보여주고 있다.

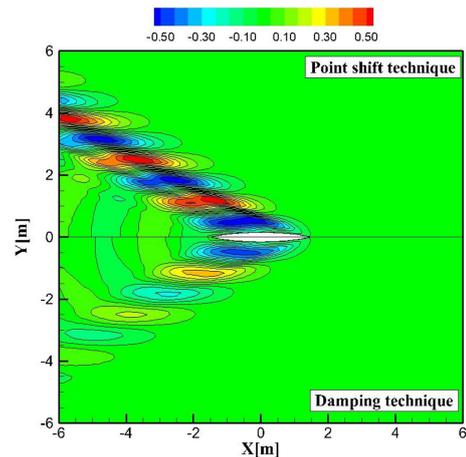


Fig. 13 Radiated waves for unit heave at  $F_n=0.20$  with point shift technique and damping technique( $\tau=0.753$ )

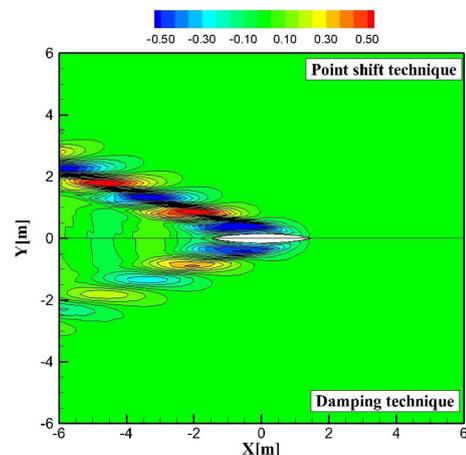


Fig. 14 Radiated waves for unit heave at  $F_n=0.30$  with point shift technique and damping technique( $\tau=1.32$ )

### 3.3 유체력 계수 비교

방사조건과 선속 변화에 따른 Wigley I의 상하 강제 동요 시 발생하는 부가질량과 조파감쇠계수를 관찰하였다. Fig. 15와 16은  $Fn = 0.0$ 에서 Wigley I의 상하 강제동요에 의한 부가질량과 조파감쇠계수를 나타낸 것이다. Sommerfeld 방사 조건으로 계산된 부가질량과 조파감쇠계수는 자유수면 그린함수법의 결과와 거의 일치함을 확인할 수 있다. 이에 반해 감쇠 기법으로 계산된 부가질량과 조파감쇠계수는 전반적으로 유사하나 국부적으로 근소한 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 특히 조파 감쇠계수의 공진지점에서 약 6%의 차이를 보이고 있다. 이는 파고에서 확인된 급격한 감쇠와 비교하여 작은 차이로 판단된다.

Fig. 17와 18은  $Fn = 0.083$ 에서 Wigley I의 상하 강제동요에 의한 부가질량과 조파감쇠계수를 나타낸 것이다. 만족점 이동 기법을 적용하여 계산된 부가질량과 조파감쇠계수는  $\tau$ 가 0.25 이하에서는 신뢰할 수 없는 결과를 보여주며 이는 만족점 이동 기법의 이론적 한계와 일치한다. Sommerfeld 방사 조건을 적용하여 계산된 부가질량과 조파감쇠계수는 계산범위에서 방사조건이 완전히 만족하지 않아 작은 오차를 동반한 결과를 보이고 있으나 이는 무시할만한 수준으로 판단된다. 감쇠 기법을 적용한 부가질량과 조파감쇠계수는  $Fn = 0.0$ 에서와 같이 다른 방사조건을 적용한 결과와 전반적으로 유사하나 국부적으로 차이를 보이고 있다.

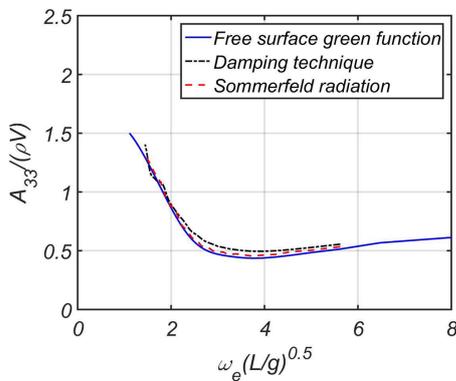


Fig. 15 Heave added mass at  $Fn=0.0$  with damping technique and Sommerfeld radiation condition

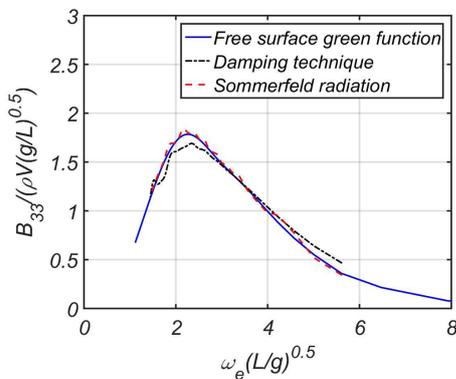


Fig. 16 Heave wave damping coef. at  $Fn=0.0$  with damping technique and Sommerfeld radiation condition

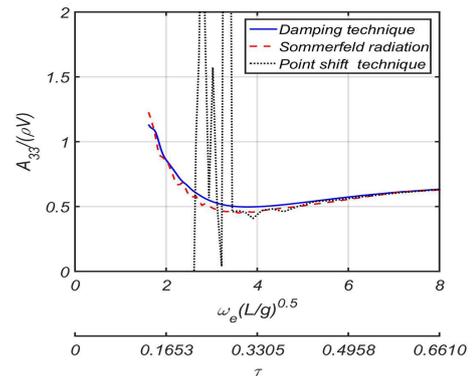


Fig. 17 Heave added mass at  $Fn=0.083$  with damping technique, Sommerfeld radiation condition and point shift technique

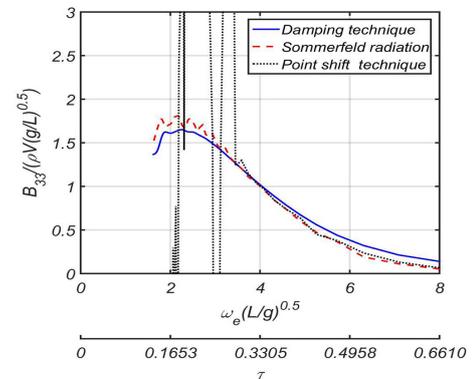


Fig. 18 Heave wave damping coef. at  $Fn=0.083$  with damping technique, Sommerfeld radiation condition and point shift technique

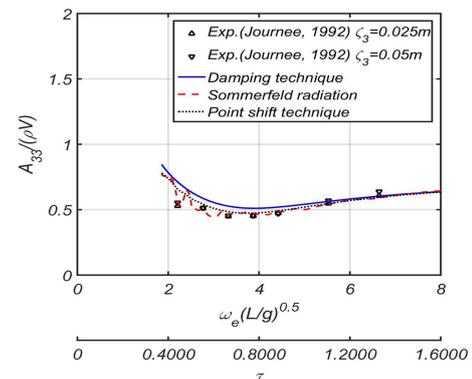


Fig. 19 Heave added mass at  $Fn=0.20$  with damping technique, Sommerfeld radiation condition and point shift technique

Fig. 19와 20은  $Fn = 0.2$ 에서 Wigley I의 상하 강제동요에 의한 부가질량과 조파감쇠계수를 나타낸 것이다. Sommerfeld 방사 조건을 적용하여 계산된 부가질량과 조파감쇠계수는 선속의 증가함에 따라 계산범위에서 오차가 커지는 것을 확인할 수 있고 일부 범위에서 모형시험의 결과와 차이를 보이고 있다. 만족점 이동 기법과 감쇠 기법은 전반적으로 유사하나 만족점 이동 기법이 모형 시험과 더욱 유사한 결과를 보여주고 있다.

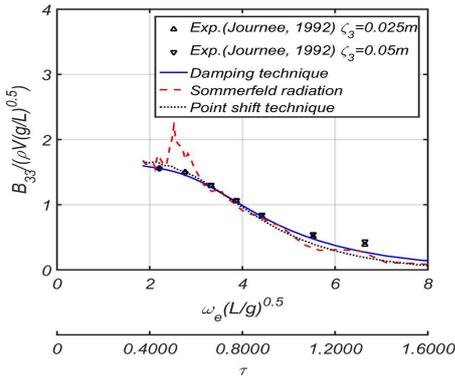


Fig. 20 Heave wave damping coef. at  $F_n=0.20$  with damping technique, Sommerfeld radiation condition and point shift technique

Fig. 21와 22은  $F_n = 0.3$ 에서 Wigley I의 상하 강제동요에 의한 부가질량과 조파감쇠계수를 나타낸 것이다. Sommerfeld 방사 조건을 적용하여 계산된 부가질량과 조파감쇠계수는 선속의 증가함에 따라 계산범위에서 오차가 더욱 커짐이 확인되었고 모형시험과도 상당한 차이를 보이고 있다.  $F_n = 0.2$ 와 유사하게 만족점 이동 기법과 감쇠 기법은 전반적으로 유사하나 만족점 이동 기법이 모형 시험과 더욱 유사한 결과를 보여주고 있다.

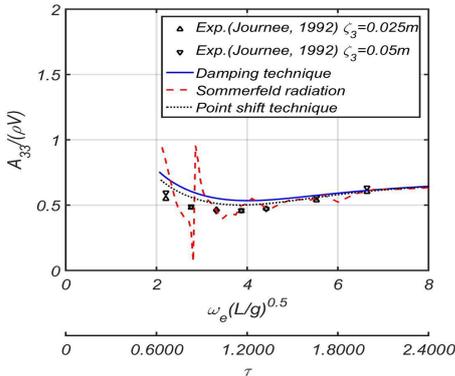


Fig. 21 Heave added mass at  $F_n=0.30$  with damping technique, Sommerfeld radiation condition and point shift technique

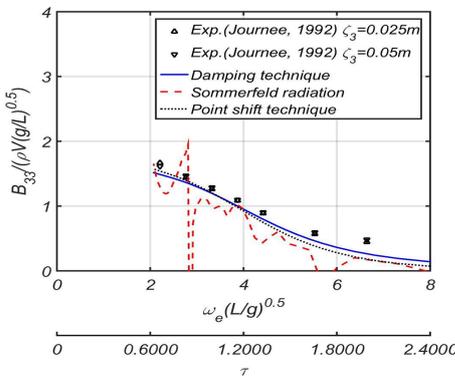


Fig. 22 Heave wave damping coef. at  $F_n=0.30$  with damping technique, Sommerfeld radiation condition and point shift technique

파형과 유체력 계수 비교를 통해 각 방사조건에 대한 특성을 도출하였다. Sommerfeld 방사 조건의 경우,  $F_n = 0.0$ 에서 자유수면 그린함수를 이용한 결과와 높은 일치도를 보이며 선속이 증가함에 따라 완전히 방사되지 않은 파 성분이 증가로 인한 오차가 증가함을 확인하였다. 하지만  $F_n=0.083$  이하의 저속에서는 오차는 무시할만한 수준이며 일부 저속에서 제한적으로 사용 가능할 것이라 판단된다. 만족점 이동 기법의 경우  $\tau$ 가 0.25 이하에서는 신뢰할 수 없는 결과를 제공하였으며 계산의 결과 (Fig. 17, 18)를 근거로 실용적인 관점에서  $\tau$ 가 0.30이상에서 적용 가능하는 것이 합리적이라고 사료된다. 마지막으로 감쇠 기법의 경우, 모든 속도 영역에서 국부적인 차이는 있으나 전반적으로 잘 일치함을 확인하였고 속도 영역의 제한없이 사용할 수 있는 실용적인 방사기법으로 판단된다.

### 3.4 혼합 방사 기법 (Hybrid radiation technique)

앞서 방사조건의 비교 연구를 통해 혼합된 방사조건을 제안할 수 있다. Sommerfeld 방사 조건의 경우, 선속이 증가함에 따라 파형의 일그러짐과 유체력 계수의 오차가 커지기 때문에 이를 억제하기 위하여 자유수면조건에 감쇠항을 추가할 수 있다. 식(21)과 같이 속도에 비례하는  $\phi_{xx}$  항을 직관적으로 선택하여 감쇠항을 도입하였다.

$$\phi_{xx} \rightarrow (1 + \nu i)\phi_{xx} \text{ at Free surface B.C.} \quad (21)$$

Sommerfeld 방사 조건에 자유수면 조건에 감쇠항을 도입하였기 때문에 혼합 방사 기법(Hybrid radiation technique)이라 명하였다.  $\phi_{xx}$ 에 감쇠항을 도입하였기 때문에  $F_n = 0.0$ 에서는 Sommerfeld 방사 조건과 동일하며 선속이 커질수록  $\phi_{xx}$ 의 비중이 증가하기 때문에 선속에 따라 증가하는 파형의 일그러짐과 유체력 계수의 진동을 억제할 수 있다. 도입된 감쇠항  $\nu$ 를  $-0.4 \sim 0.1$ 까지 0.1 간격으로 변화시켜가며 수치시험을 수행하였고 감쇠항  $\nu$ 에  $-0.1$ 을 채택하였다.

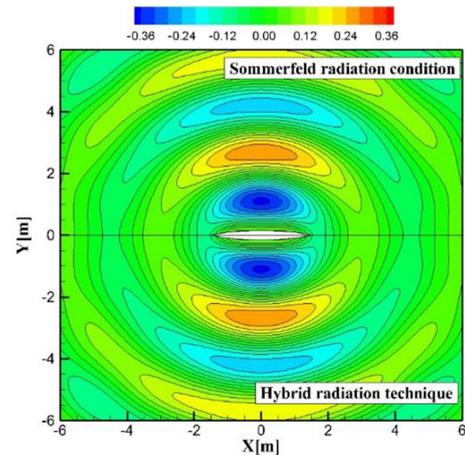


Fig. 23 Radiated waves for unit heave at  $F_n=0.0$  with Sommerfeld radiation condition and hybrid radiation technique( $\tau=0.0$ )

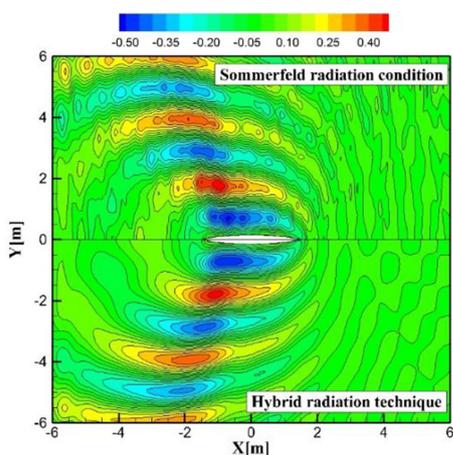


Fig. 24 Radiated waves for unit heave at  $F_n=0.083$  with Sommerfeld radiation condition and hybrid radiation technique( $\tau=0.25$ )

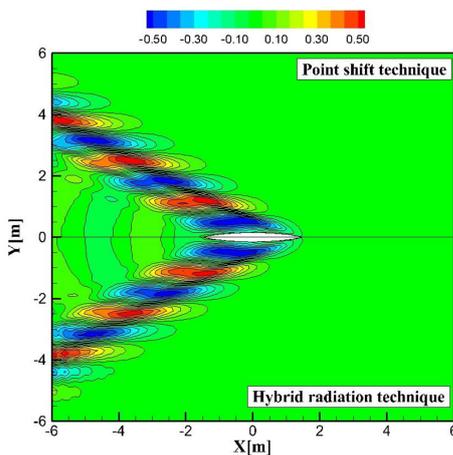


Fig. 25 Radiated waves for unit heave at  $F_n=0.20$  with Sommerfeld radiation condition and hybrid radiation technique( $\tau=0.753$ )

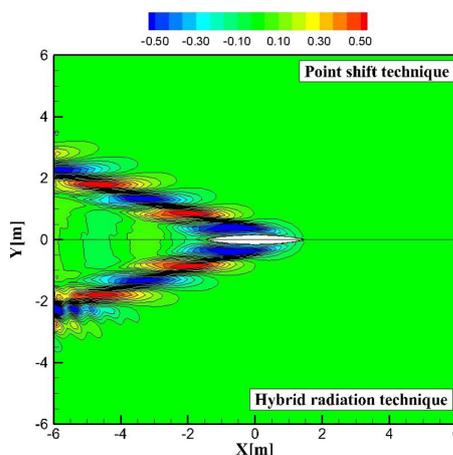


Fig. 26 Radiated waves for unit heave at  $F_n=0.30$  with Sommerfeld radiation condition and hybrid radiation technique( $\tau=1.32$ )

Fig. 23-26은 선속의 변화에 따른 Wigley I의 상하 강제 동요 시 발생하는 파형을 도시하였다. 새롭게 제안된 혼합 방사 기법의 경우,  $F_n = 0.0$ 에서 Sommerfeld 방사 조건과 동일한 파형을 보이고 있다.

$F_n = 0.083$ 에서 Sommerfeld 방사 조건에서 발생하는 파형의 일그러짐이 완화됨을 확인할 수 있다. 그리고  $F_n = 0.2$ 와  $0.3$ 에서 만족점 이동 기법과 비교하여 원방에서 약간의 일그러짐이 있으나 전반적으로 잘 일치함을 확인할 수 있다. Fig. 27-34는 선속 변화에 따른 Wigley I의 상하 강제 동요 시 발생하는

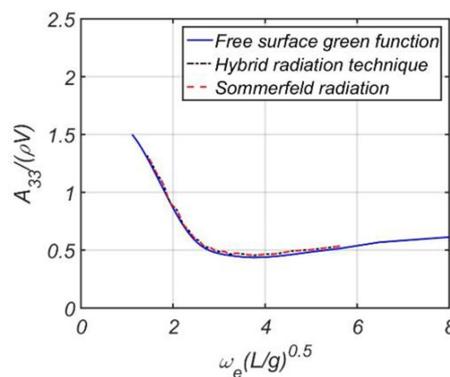


Fig. 27 Heave added mass at  $F_n=0.0$  with Sommerfeld radiation condition and hybrid radiation technique

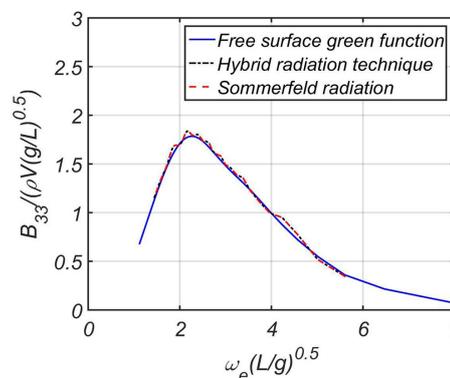


Fig. 28 Heave wave damping coef. at  $F_n=0.0$  with Sommerfeld radiation condition and hybrid radiation technique

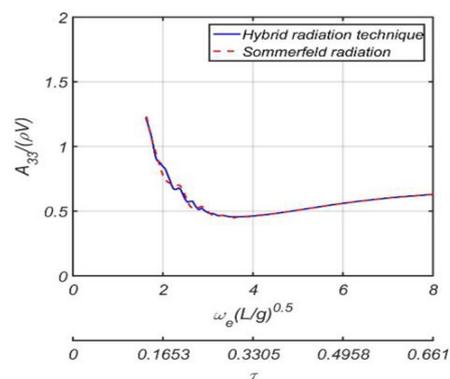


Fig. 29 Heave added mass at  $F_n=0.083$  with Sommerfeld radiation condition and hybrid radiation technique

부가질량과 조파감쇠계수를 도출하였다. 제안된 혼합 방사 기법의 경우,  $F_n = 0.0$ 에서 Sommerfeld 방사 조건과 동일한 결과를 보여주며 자유수면 그린함수법의결과와 전반적으로 유사함을 확인할 수 있다.  $F_n = 0.083$ 에서는 Sommerfeld 방사 조건보다 오차가 감소함을 확인할 수 있다.  $F_n = 0.2$ 과  $0.3$ 에서는 만족 점 이동 기법과 동일한 결과를 보여주고 있으며 모형시험과도 유사함을 확인하였다. 제안된 혼합 방사 기법의 경우, 수학적으로 엄밀하지 않으나 해석된 결과 비교를 통해 실용적인 관점에서 활용 가능할 것이라 판단된다.

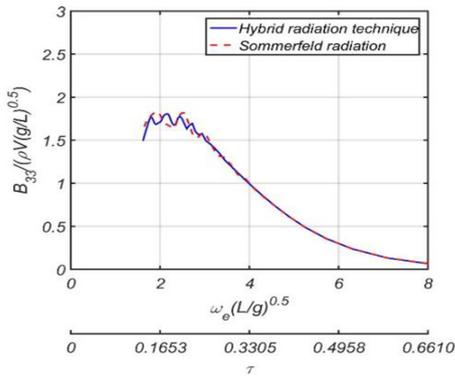


Fig. 30 Heave wave damping coef. at  $F_n=0.083$  with Sommerfeld radiation condition and hybrid radiation technique

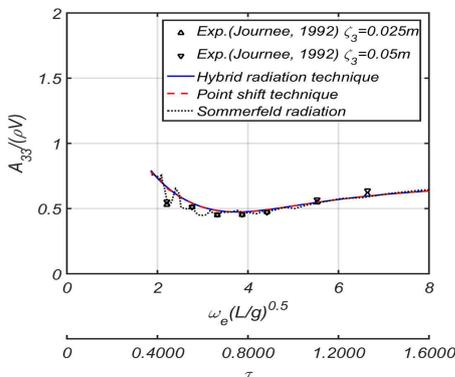


Fig. 31 Heave added mass at  $F_n=0.20$  with point shift technique and hybrid radiation technique

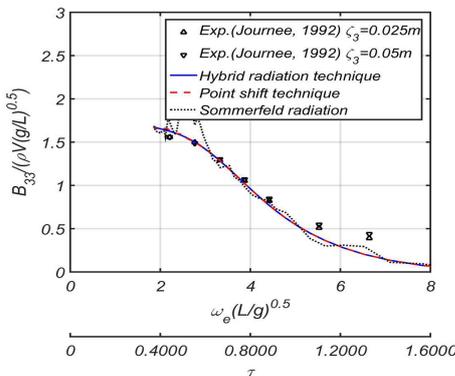


Fig. 32 Heave wave damping coef. at  $F_n=0.20$  with point shift technique and hybrid radiation technique

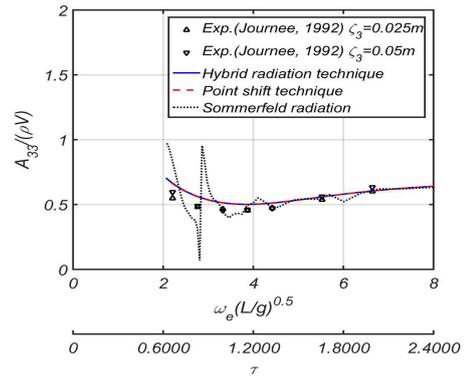


Fig. 33 Heave added mass at  $F_n=0.30$  with point shift technique and hybrid radiation technique

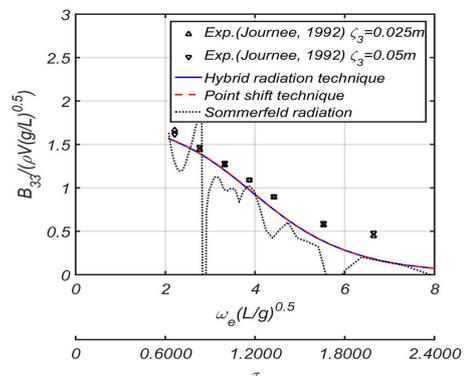


Fig. 34 Heave wave damping coef. at  $F_n=0.30$  with point shift technique and hybrid radiation technique

### 3.5 Wigley I을 이용한 코드 검증

Wigley I의 모형시험(Journee, 1992) 결과를 이용하여 제안된 혼합 방사 기법이 적용된 랜킨 소스 방법 기반 운동코드의 검증을 수행하였다.

Fig. 35 - 38에 상하동요와 종동요의 부가질량과 조파감쇠계수를 도출하였다.  $F_n = 0.0$ 에서는 자유수면 그린함수로 계산된 부가질량과 조파감쇠계수와 잘 일치함을 확인할 수 있다.  $F_n = 0.2$ 에서 또한 모형시험과 전반적으로 유사한 결과를 예측하고 있다. Fig. 39과 40에서는 off-diagonal의 부가질량과 조파

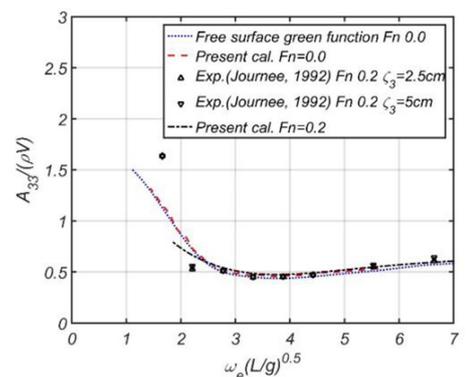


Fig. 35 Heave added mass of Wigley I

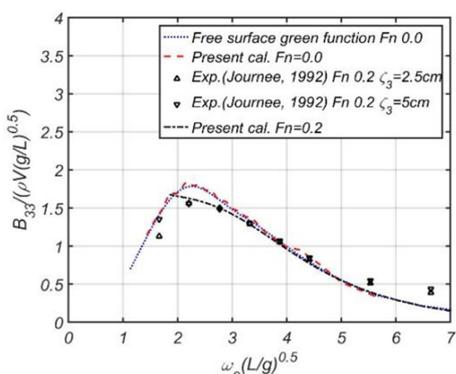


Fig. 36 Heave wave damping coef. of Wigley I

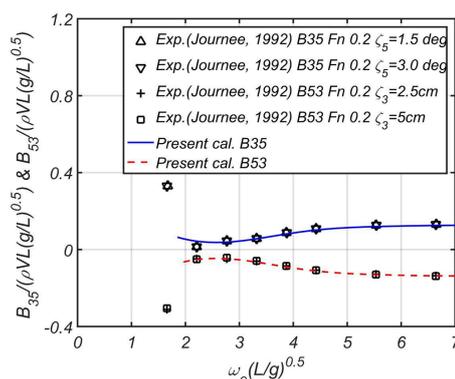


Fig. 40 Off-diagonal wave damping coef. of Wigley I

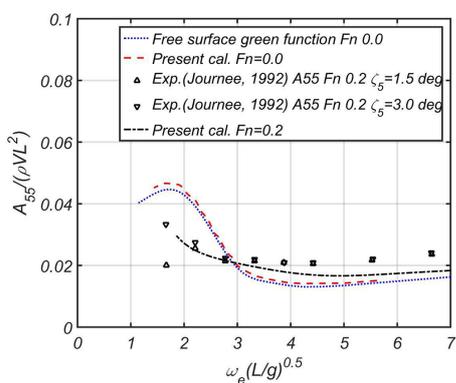


Fig. 37 Pitch added mass of Wigley I

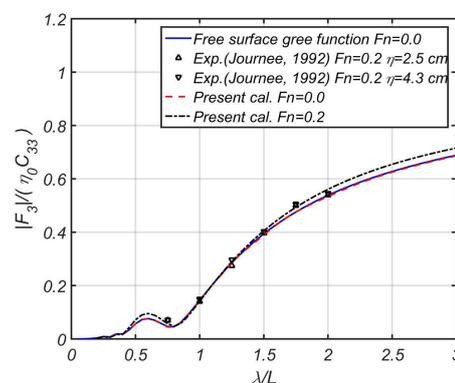


Fig. 41 Heave wave exciting forces of Wigley I

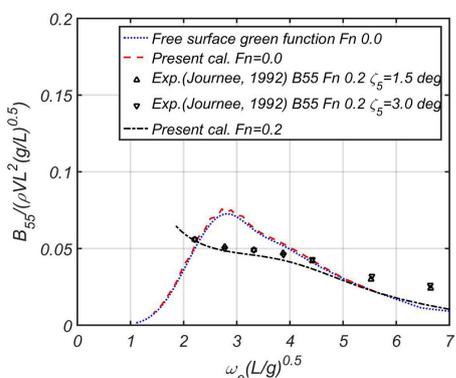


Fig. 38 Pitch wave damping coef. of Wigley I

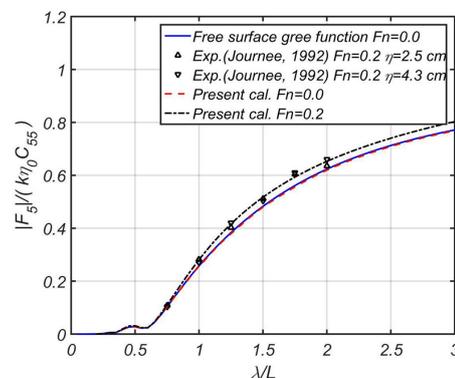


Fig. 42 Pitch wave exciting forces of Wigley I

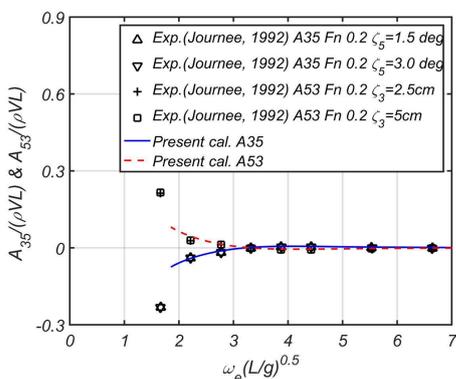


Fig. 39 Off-diagonal added mass of Wigley I

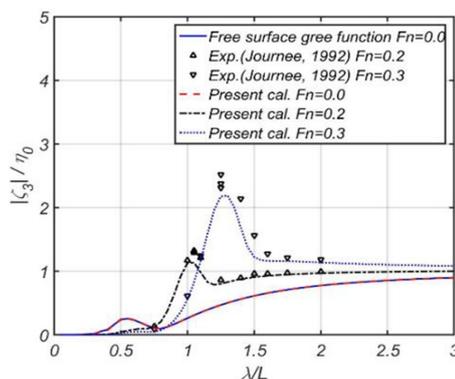


Fig. 43 Heave R.A.O. of Wigley I

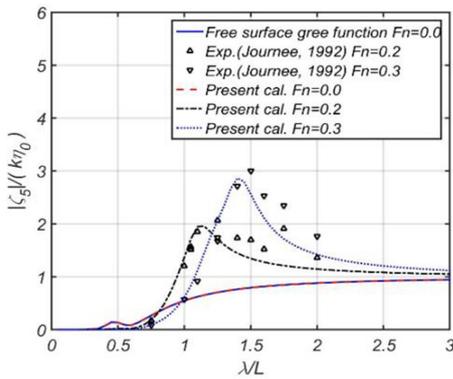


Fig. 44 Pitch R.A.O. of Wigley I

감쇠계수를 도출하였고 모형시험과 잘 일치함을 확인하였다. 부가질량과 조파계수가 각각 대칭을 나타내고 있으며 이는 수치적으로 Timman-Newman 관계(Timman & Newman, 1962)를 만족함을 의미한다. Fig. 41과 42는 상하동요와 종동요 파랑 강제력을 나타내며 모형시험과 잘 일치함을 확인하였다. Fig. 43과 44는 상하동요와 종동요의 R.A.O를 나타내며 다양한 속도 영역에서 자유수면 그린함수로 계산과 모형시험의 결과와 높은 일치도를 보임을 확인할 수 있다. 개발된 랭킨 소오스 방법 기반 운동코드의 결과가 Wigley I의 모형시험(Journee, 1992)결과와 전반적으로 유사한 결과를 보이며 이를 통해 검증을 확인하였다.

### 4. 결론

본 논문에서는 Sommerfeld 방사조건, 감쇠 기법과 만족점 이동 기법을 원용하여 주어진 방사기법을 적용한 랭킨 소오스 방법을 이용하여 전진속도를 가지는 3차원 부유체의 상하동요에 의한 파형과 유체력 계수를 비교하였다. 방사기법의 비교를 통해 방사기법의 특성 및 한계를 파악하였다. 분석된 한계를 극복하기 위하여 두 방사기법을 혼합한 혼합 방사 기법을 제안하여 파형과 유체력 계수를 기존 방사기법과 모형시험의 결과와 비교하였고 개선사항을 확인하였다. 수행된 비교 분석을 통해 아래와 같은 결과를 도출하였다.

- (1) Sommerfeld 방사기법의 경우, 속도가 증가함에 따라 방사되지 않는 파성분이 증가하고 이로인한 파형의 일그러짐과 유체력 계수의 오차가 커짐을 확인하였다. 하지만  $Fn=0.083$  이하의 저속에서는 파형의 일그러짐과 오차가 무시할 만한 수준으로 일부 저속에서 제한적으로 사용 가능할 것이라 판단된다.
- (2) 만족점 이동 기법의 경우, 파형과 유체력 계수의 비교를 통하여  $\tau$ 가 0.25이하에서 이상 파형과 큰 오차를 보이고 있음을 확인하였고 실용적인 관점에서  $\tau$ 가 0.3 이상에서 활용 가능한 것으로 판단된다.
- (3) 감쇠 기법의 경우, 파형의 방사형태는 기존 방사조건과 유사하지만 자유수면의 감쇠항에 기인한 파고의 급격한

감쇠가 발생하였다. 파고의 급격한 감쇠와 비교하여 유체력 미계수는 수행된 속도 영역에서 국부적으로 근소한 차이를 보이거나 전반적으로 유사함을 확인하였다. 속도에 영역에 제한없이 사용할 수 있는 실용적인 기법으로 사료되며 비선형 고차 유체력을 계산에 활용할 수 있도록 파고의 감쇠를 줄이는 수치기법의 개발이 필요하다.

- (4) 상기 3가지 방사기법의 특성을 근거로 직관적인 감쇠항의 수치시험을 통해 Sommerfeld 방사기법에 감쇠항을 적용한 혼합 방사 기법을 제안하였다. 제안된 기법으로 계산된 파형과 유체력 계수의 비교를 통해 속도 증가로 인한 파형의 일그러짐과 유체력 계수의 오차가 개선됨을 확인하였다. 추후 제안된 기법의 엄밀한 분석이 필요할 것으로 판단된다.
- (5) 혼합 방사 기법을 적용한 전진속도를 가지는 3차원 부유체 운동해석 코드를 개발하였고 모형시험의 결과 비교를 통해 개발된 코드가 합리적인 유체력 및 운동해석 결과를 예측함을 검증하였다.

향후 개발된 기법의 엄밀한 추가 분석이 필요할 것으로 판단되며 개발된 기법을 활용하여 비선형 고차 유체력 연구를 수행할 예정이다.

### 후기

본 연구는 선박해양플랜트연구소에서 지원하는 “파-조류 상호작용(저속영역)이 고려된 부유체의 유체동역학적 해석을 위한 주파수영역 랭킨 소오스 방법 개발(PES3370)”의 결과물임을 밝히는 바입니다.

### References

Bertram, V., 1990. *A rankine source method for the forward-speed diffraction problem*. Ph. D Thesis, Hamburg University of Technology.

Chen, X. B. & Malenica, S., 1996. Uniformly valid solution of the wave current-body interaction problem. *Proceedings of the 11th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, Hamburg, Germany. 17-20 March 1996.

Choi, Y.R., Hong, S.Y. & Choi, H.S., 2000. An analysis of second-order wave forces on floating bodies by using a higher-order boundary element method. *Ocean Engineering*, 28, pp.117-138.

Das, S. & Cheung, K.F., 2012. Scattered waves and motions of marine vessels advancing in a seaway. *Wave Motion*, 49, pp.181-197.

Gerritsma, J. & Beukelman, W., 1967. Analysis of the modified

- strip theory for the calculation of ship motions and wave bending moments. *International Shipbuilding Progress*, 14(156), pp.319–337.
- Hong, S.Y. & Choi, H.S., 1995. Analysis of steady and unsteady flow around a ship using a higher-order boundary element method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 32(1), pp. 32–57.
- Iwashita, H. & Ito A., 1998. Seakeeping computations of a blunt ship capturing the influence of the steady flow, *Ship Technology Research*, 45(4), pp.159–171.
- Jo, H.J., Lee, C.H., Kim, I.C. & She, K.Y., 1997. A study on the steady drift forces on barge. *Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology*, 33(1), pp.38–45.
- Journee, J.M.J., 1992. Experiments and Calculations on 4 Wigley Hull Forms in Head Waves. *Report No. 0909. Ship Hydromechanics Laboratory, Delft University of Technology, The Netherlands*.
- Lee, H.Y. & Yum, D.J., 1994. On the removal of irregular frequencies in the prediction of ship motion in waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 31(4), pp.73–81.
- Kim, B.S. & Kim Y., 2018. Analysis of added resistance on ships in waves based on a frequency-domain Rankine panel method. *Proceedings of the Annual Meeting the Society of Naval Architects of Korea*, Jeju, Republic of Korea, 24–25 May 2018, pp.727–736.
- Kim, Y., Kim, K.H., Kim, J.H., Kim, T., Seo, M.G. & Kim, Y., 2011. Time-domain analysis of nonlinear motion responses and structural loads on ships and offshore structures: development of WISH program. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 3, pp.37–52.
- Korvin-Kroukovsky, B.V. & Jacobs, W.R., 1957. Pitching and heaving motions of a ship in regular waves. *Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 65.
- Nakos, D.E., 1990. *Ship wave patterns and motions by three dimensional rankine panel method*. Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Oh, S., Jung, D.H., Cho, S.K., Nam, B.W. & Sung, H.G., 2019. Frequency domain analysis for hydrodynamic responses of floating structure using desingularized indirect boundary integral equation method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(1), pp.11–22.
- Salvesen, N., Tuck, E.O. & Faltinsen, O.M., 1970. Ship motions and sea loads. *Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 78, pp.250–279.
- Sclacounos, P.D., Kring, D.C., Huang, Y., Mantzaris, D.A. Kim, S. & Kim, Y., 1997. A computational method as an advanced tool of ship hydrodynamic design. *Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 105, pp.375–397.
- Söding, H. & Bertram, V., 2009. A 3-d rankine source seakeeping method. *Ship Technology Research*, 56, pp.50–68.
- Takagi, K., 1990. An application of rankine source method for unsteady free surface flows. *Journal of the Kansai Society of Naval Architects*, 213, pp.1–9.
- Timman, R. & Newman, J. N., 1962. The coupled damping coefficients of symmetric ships. *Journal of Ship Research*, 5(4), pp.34–55.
- Yang, J.H., Song, K.J. & Chun, H.H., 2001. Computation of the hydrodynamic coefficients of ships in waves by Rankine source panel methods. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 38(1), pp.43–51.
- Yasuda, E., Iwashita, H. & Kashiwagi, M., 2016. Improvement of Rankine panel method for seakeeping prediction of a ship in low frequency region, *35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Busan, South Korea, 19–24 June 2016.
- Yasukawa, H., 1990. A Rankine panel method to calculate unsteady sipping hydrodynamic forces. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 168, pp.131–140.
- Yuan, Z.M., Incecik & A., Jia, L., 2014. A new radiation condition for ships travelling with very low forward speed. *Ocean Engineering*, 88, pp.298–309.
- Zhao, R. & Faltisen, O. 1989. A discussion of the m-terms in the wave-current-body interaction problem, *3rd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, Norway, pp. 1–4.



오승훈