



비특이화 간접경계적분방정식 방법을 이용한 부유식 구조물의 유체동역학적 거동에 대한 주파수영역 해석

Frequency Domain Analysis for Hydrodynamic Responses of Floating Structure using Desingularized Indirect Boundary Integral Equation Method

| | |
|--------------------|---|
| 저자 (Authors) | 오승훈, 정동호, 조석규, 남보우, 성홍근 Seunghoon Oh, Dongho Jung, Seok-kyu Cho, Bo-woo Nam, Hong Gun Sung |
| 출처 (Source) | 대한조선학회 논문집 56(1) , 2019.2, 11-22(12 pages) Journal of the Society of Naval Architects of Korea 56(1) , 2019.2, 11-22(12 pages) |
| 발행처 (Publisher) | 대한조선학회 The Society of Naval Architects of Korea |
| URL | http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07610879 |
| APA Style | 오승훈, 정동호, 조석규, 남보우, 성홍근 (2019). 비특이화 간접경계적분방정식 방법을 이용한 부유식 구조물의 유체동역학적 거동에 대한 주파수영역 해석. <i>대한조선학회 논문집</i> , 56(1), 11-22 |
| 이용정보 (Accessed) | 누리미디어 121.125.221.*** 2019/07/18 13:58 (KST) |

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

비특이화 간접경계적분방정식 방법을 이용한 부유식 구조물의 유체동역학적 거동에 대한 주파수영역 해석

오승훈[†]·정동호·조석규·남보우·성홍근
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

Frequency Domain Analysis for Hydrodynamic Responses of Floating Structure using Desingularized Indirect Boundary Integral Equation Method

Seunghoon Oh[†]·Dongho Jung·Seok-kyu Cho·Bo-woo Nam·Hong Gun Sung
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 Rankine source method is applied and validated to analyze the hydrodynamic response of a three-dimensional floating structure in the frequency domain. The boundary value problems for radiation and diffraction problem are solved by using a desingularized indirect boundary integral equation method (DIBIEM). The DIBIEM is simpler and faster than conventional methods based on the numerical surface integration of Green's function because the singularities of Green's function are located outside of fluid regions. In case of floating structure with complex geometry, it is difficult to desingularize the singularities of Green's function consistently. Therefore a mixed approach is carried out in this study. The mixed approach is partially desingularized except singularities of the body. Wave drift loads are calculated by the middle-field formulation method that is mathematically simple and has fast convergence. In order to validate the accuracy of the developed program, various numerical simulations are carried out and these results are analyzed and compared with previously published calculations and experiments.

Keywords : Rankine source method(랭킨 소오스 방법), Desingularized indirect boundary integral equation method (DIBIEM), 비특이화 간접 경계적분방정식 방법, Hydrodynamic response(유체동역학적 응답), Mean wave drift load (시간 평균 파랑 표류 하중), Floating structure(부유식 구조물)

1. 서론

육상 화석 에너지 자원의 고갈과 환경오염으로 인해 심해 해양자원 및 친환경 해양에너지원의 개발이 주목받고 있다. 심해 해양에너지에 대한 개발은 물론 친환경 해양에너지원의 개발을 위한 기반시설은 대부분 부유식 구조물이다. 따라서 해상에서 부유식 구조물의 특성을 이해하고 설계하는 것은 심해 해양자원 및 친환경 해양에너지원을 개발하는 초석이 된다. 항상 파도에 노출된 부유식 해양구조물은 파랑에 의한 구조물의 응답이 크기 때문에 파도와 구조물의 상호작용을 이해하고 정확히 예측하여 해양 구조물의 구조안정성을 평가하고 운용성을 결정해야 한다.

선박이나 부유식 해양 구조물의 파랑 중 운동해석은 전통적으로 선형 포텐셜 이론을 이용한 방법론으로 해석된다. 특히

Korvin-Kroukovsky & Jacobs(1957), Gerritsma & Beukelman (1967)과 Salvesen et al.(1970)의 주파수 영역 스트립 방법은 파랑 중 운동해석의 성공적인 사례이다. 추후 계산자원의 증가는 3 차원 파랑 중 운동해석이 가능하게 하였다. 특히 3 차원 파랑 그린함수를 이용한 주파수 영역 패널법은 저차패널법(Jo et al., 1997; Lee & Kwak, 1997)부터 고차패널법(Ahn et al., 2008)의 개발이 국내에서 지속적으로 이루어지고 있으며 WAMIT, AQWA 및 Hydrostar 등과 같은 상용코드도 출시되어 현재 선박과 해양 구조물의 파랑 중 운동해석에 널리 사용되고 있다. 선형 자유표면 경계조건만을 만족하는 파랑그린함수의 제한성 때문에 비선형 자유표면 경계조건 처리가 가능한 랭킨 소오스 방법이 도입되었으며 주파수 영역 해석(Nakos, 1990; Bertram, 1990; Hong & Choi, 1995; Yang et al.,

2001)을 거쳐 시간영역 해석(Sciacounos et al., 1997; Kim et al., 2011)이 성공적으로 적용되었다. 현재는 고성능 컴퓨팅 기술의 발달로 완전 비선형 해석이 가능한 CFD 해석 기법(Park et al., 2003; Carrica et al., 2007; Nam et al., 2012)이 적용되어 충격하중, 침수 현상 등을 동반한 비선형 운동 문제에 적용되고 있다. Fig. 1은 파랑 중 부유체 해석에 대한 계산시간을 표로 나타낸 것이다. 고성능 컴퓨팅과 같은 계산 자원의 증가에 따라 많은 연구자들은 고성능 수치기법인 CFD 또는 완전 비선형 시간영역 해석에 집중되고 있다. 하지만 계산 자원 증가에 따른 고속해석방법인 주파수 영역 해석의 정의 및 사용 전략이 변화될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 3 차원 주파수 영역의 해석에서 랜킨소오스의 계산효율 향상을 위해 비특이화 간접경계적분방정식방법(desingularized indirect boundary equation method, DIBEM)을 적용한 연구를 수행하여 고속해석법의 하나로 활용하고자 한다. 비특이화 간접경계적분방정식방법을 이용할 경우, 기존 방법과 비교하여 소오스의 면 적분이 1점 가우스 구적법(one node gauss quadrature)로 근사되기 때문에 영향계수 행렬 계산의 효율을 도모할 수 있다. 파랑그린함수법과 비교하여 자유수면 및 방사경계면을 이산화하여야 하기 때문에 행렬계산의 비용이 높으나 파랑그린함수법과 달리 주파수 별 커널 계산이 없어 행렬요소계산에는 상대적으로 효율적이다. 추가로 파랑그린함수법의 경우, 특이 주파수(irregular frequency)가 존재하며 이를 억제하기 위한 부유체 수선면 내부의 LID panel의 추가로 계산 행렬의 크기를 증가시킨다. 하지만 본 방법의 경우, 특이 주파수가 존재하지 않는 것 또한 장점이다.

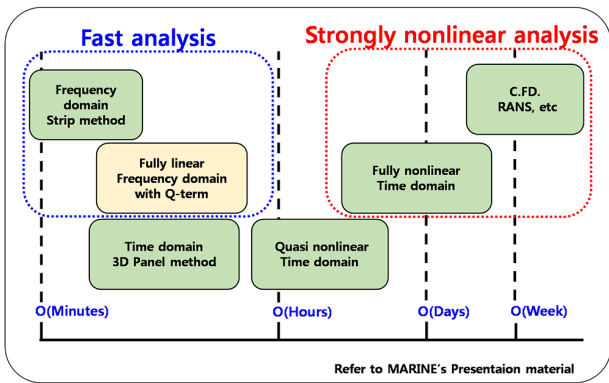


Fig. 1 Time scales of ship motion computation

비특이화 간접경계적분방정식방법은 주로 완전 비선형 자유수면의 시간영역의 해석에 널리 사용되고 있다(Cao et al., 1991; Beck, 1994; Celebi et al., 1998; Zhang et al., 2006). 이는 매 시간스텝마다 자유수면을 반영한 영향계수행렬의 계산에 효율적이기 때문이다. 특히 Cao et al.(1991)은 비특이화 간접경계적분방정식방법이 최적화된 비특이화 거리에서 평면 패널의 해석적 방법 대비 70 ~ 60% 이상의 계산시간이 감소됨을 확인하였다. 주파수 영역 해석의 경우, Cao & Zhang(2009)에 의해서 sloshing tank의 부가질량을 계산에 제한적으로 사용되어 선박운동에 적용한 사례가 있다. Zhang et al.(2006)에 의하

면 비특이화 간접경계적분방정식방법은 기존방법과 비교하여 복잡하고 계산 소요시간이 긴 커널의 특이적분을 생략할 수 있고 경계면에서 계산된 유체속도가 다른 경계면과 연속적이며 이론적으로 미분가능한 장점이 있다.

비특이화 간접경계적분방정식방법에 대한 앞선 연구들은 대부분 시간영역 해석에 국한되어 있다. 따라서 본 연구에서는 수치알고리즘이 단순하고 빠르다는 실용적인 관점에서 비특이화 간접경계적분방정식방법을 주파수 영역의 3차원 부유체 운동 문제에 적용하였다. 이는 추후 연구로 진행될 조류와 같은 작은 전진 속도(small forward speed) 문제의 전단계로 수행되었으며 대한조선학회 공동학술대회에서 발표한 논문을 기반으로 있다(Oh et al., 2018). 방사와 산란문제를 풀기 위해 비특이화 간접경계적분방정식방법을 적용하여 경계치 문제 계산의 효율을 확보하였다. 형상이 단순한 자유수면 및 방사경계면에는 비특이화 간접경계적분방정식방법을 적용하였다. 하지만 부유체 표면에서는 형상의 복잡성 때문에 특이점을 일관성 있게 비특이화하기 어렵다. 따라서 기존방법과 동일하게 소오스를 부유체 표면에 분포시켰다. 시간 평균 표류하중을 계산하기 위해 수렴성이 우수하고 수학적으로 간단한 middle-field formulation (Chen, 2007)을 적용하였다. 적용된 수치 방법의 유효성을 확인하기 위해 반구, 바이지션 그리고 고정된 다중 부유체에 대한 기 발표된 계산과 모형시험 결과를 통하여 비교 검증하였다. 그리고 자유수면의 격자 수렴성을 확인하기 위하여 형상이 단순한 바이지션에 대하여 수렴도 테스트를 수행하였다. 마지막으로 고정된 다중 부유체 사이 유동의 공진모드를 자유수면 경계 조건에 감쇠항을 도입하여 제어하였다. 사이 유동의 제어를 통해 유동의 공진모드에 기인한 파랑강제력 및 시간 평균 표류하중의 비물리적 현상을 제거할 수 있음을 확인하였다.

2. 수학적 정식화 및 수치방법

2.1 수학적 정식화

Fig. 2는 유한 수심에서 부유체 운동의 경계치 문제를 나타내고 있다. 직교 좌표계에서 수평 좌표 x, y 는 부유체의 수선면의 면심에 위치하고 수직 축 z 는 평균 수면을 기준으로 상방을 향한다.

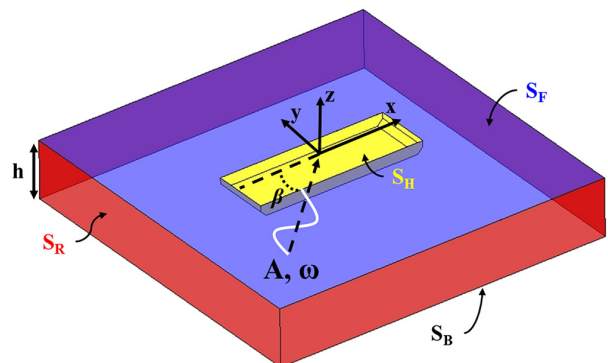


Fig. 2 Coordinate system and boundary value problem

진폭이 A인 규칙파가 균일한 수심 h에서 전파되고 파향은 x축을 기준하여 β로 정의된다. 부유체는 입사파로 인해 6자유도 운동을 한다. 입사파와 부유체에 의한 교란파를 미소하다고 가정하면 자유수면 S_F, 부유체 표면 S_H, 바닥면 S_B 그리고 방사 경계면 S_R으로 구성된 경계치 문제로 구성할 수 있다.

유체의 비압축과 비점성 그리고 유동의 비회전을 가정하면 속도포텐셜을 도입할 수 있으며 유체의 지배방정식인 연속방정식은 아래 라플라스방정식이 된다.

$$\nabla^2 \Phi(\vec{X}, t) = 0 \quad \text{in Fluid domain} \quad (1)$$

유체영역의 선형 속도포텐셜은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(\vec{X}, t) = \text{Re} \left\{ \sum_{j=1}^6 \zeta_j \phi_j(\vec{X}) e^{i\omega t} + A[\phi_0(\vec{X}) + \phi_7(\vec{X})] e^{i\omega t} \right\} \quad (2)$$

여기서 i는 허수단위, ω는 입사파의 주파수 그리고 A는 입사파의 진폭을 나타낸다. φ₀는 입사파의 속도포텐셜로 식(3)과 같다.

$$\phi_0 = i \frac{g}{\omega} \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} e^{ik(x \cos(\beta) + y \sin(\beta))} \quad (3)$$

여기서 g는 중력가속도이다. 식(2)에서 φ_j와 ζ_j (j=1~6)는 방사 속도포텐셜과 6자유도 운동의 복소진폭을 나타내고 φ₇는 산란 속도포텐셜을 나타낸다. 방사 및 산란 속도포텐셜을 구하기 위한 경계치 문제를 식(4)-(7)과 같이 구성할 수 있다.

$$-\frac{\omega^2}{g} \phi_j + \frac{\partial \phi_j}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z=0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = \begin{cases} i\omega n_j & j=1,2,\dots,6 \\ -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} & j=7 \end{cases} \quad \text{on } S_H \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = 0 \quad \text{at } S_B \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} - ik\phi_j = 0 \quad \text{on } S_R \quad (7)$$

2.2 유체력 및 운동방정식

부유체의 거동을 파악하기 위한 운동방정식은 식 (8)과 같다.

$$[M] \{\ddot{\zeta}\} = \int_{S_H} p \begin{Bmatrix} \vec{n} \\ x \times \vec{n} \end{Bmatrix} dS - \begin{Bmatrix} Mg\hat{e}_3 \\ x \times (Mg\hat{e}_3) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

부유체에 작용하는 유체력을 계산하기 위해서는 부유체의 접수면에 작용하는 압력 추정이 필요하며 식 (9)와 같이 유도 된다.

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \rho g Z_{relative} \quad \text{on } S_H \quad (9)$$

$$= -i\omega \rho \left[\sum_{j=1}^6 \zeta_j \phi_j + A(\phi_0 + \phi_7) \right] - \rho g(z + \zeta_3 + \zeta_4 y - \zeta_5 x)$$

식(9)에서 첫항은 동압이며 두 번째항은 정수압을 의미 한다. 식(9)를 접수면에 따라 적분하면 식(10)과 같이 부유체의 작용하는 방사 유체력, 파랑강제력과 정역학적 복원력을 계산할 수 있다.

$$\int_{S_H} p \begin{Bmatrix} \vec{n} \\ x \times \vec{n} \end{Bmatrix} dS - \begin{Bmatrix} Mg\hat{e}_3 \\ x \times (Mg\hat{e}_3) \end{Bmatrix} = \{F_R\} + \{F_E\} + \{F_{Res}\} \quad (10)$$

부유체의 6 자유도 운동에 기인한 방사 유체력은 단위진폭에 대하여 식(11)과 같이 치환된다.

$$F_{Ri} = \sum_{j=1}^6 \zeta_j \rho \int_{S_H} (-i\omega \phi_j) n_i dS \quad (11)$$

$$= \sum_{j=1}^6 \zeta_j (\omega^2 a_{ij} - i\omega b_{ij}) \quad (i=1,2,\dots,6)$$

여기서 a_{ij}는 부가질량계수, b_{ij}는 조파감쇠계수이다.

파랑 강제력은 Froud-Krylov힘과 산란력의 합으로 식(12)와 같이 유도된다.

$$F_{Ei} = A \rho \int_{S_H} [-i\omega (\phi_0 + \phi_7)] n_i dS \quad (i=1,2,\dots,6) \quad (12)$$

유체 정수압을 접수면에 대하여 적분하면 식 (13)과 같이 유체 정역학적 복원력이 계산된다.

$$F_{Res.i} = \rho g \left(\int_{S_H} (-z - \zeta_3 - \zeta_4 y + \zeta_5 x) n_i dS \right) - \begin{Bmatrix} Mg\hat{e}_3 \\ x \times Mg\hat{e}_3 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

$$= -C_{ij} \zeta_j \quad (i=1,2,\dots,6)$$

식 (11), (12)과 (13)을 식(8)에 대입하면 식(14)와 같이 운동방정식을 재구성 할 수 있다.

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

2.3 수치 해석 방법

주어진 경계치 문제를 풀기위해 비특이화 간접경계적분방정식방법을 이용하였다. 본 방법의 경우, 기본해인 식(15)와 경계적분방정식 (16)을 이용한다.

$$G(\vec{x}, \vec{\xi}) = -\frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \quad (15)$$

where

$$\begin{cases} r = \sqrt{(x-\xi_1)^2 + (y-\xi_2)^2 + (z-\xi_3)^2} \\ r' = \sqrt{(x-\xi_1)^2 + (y-\xi_2)^2 + (z+2h+\xi_3)^2} \end{cases}$$

$$\phi_j(\vec{x}) = \int_{S_H + S_F + S_B} \sigma(\vec{\xi}) G(\vec{x}, \vec{\xi}) dS(\vec{\xi}) \quad (16)$$

여기서 밀도함수 σ(ξ)는 단지 경계조건에 의해 결정되는 미지 값 이다. 계산효율을 도모하기 위하여 미러(mirror) 소스 1/r'을 두어 바닥경계조건을 부과할 요소를 소개하였다. 자유수면과

방사경계면의 경우, 형상이 단순한 평면이므로 비특이화 간접경계적분방정식방법을 적용하기 용이하다. 자유수면과 방사경계면의 소오스 면을 비특이화 거리(dingularized distance) l_d 로 정의된 특성길이만큼 유체영역 외부에 분포시킬 경우, 소오스 면 적분을 1점 가우스 구적법으로 근사가능하다. 따라서 식(16)는 식(17)으로 치환된다. 계산 경계면의 대하여 이산화하면 Fig. 3과 같다.

$$\phi_j(\vec{x}) = \int_{S_H} \sigma(\vec{\xi}) G(\vec{x}, \vec{\xi}) dS(\vec{\xi}) + \sum_{S_F+S_R} \sigma(\vec{\xi}) G(\vec{x}, \vec{\xi}) dS(\vec{\xi}) \quad (17)$$

식(17)의 경우, 식(16)과 비교하여 계산 속도가 향상되며 수치코드 작성이 단순해지는 장점이 있다(Cao et al., 1991; Cao and Beck, 2016). 특히 Cao et al.(1991)은 다양한 비특이화 거리(0.8 ~ 3.0 $(A_{mesh})^{1/2}$)에서 체계적인 연구를 수행하여 수치해석이 수행된 비특이화 거리의 범위에서 평면 패널의 해석적 방법 대비 70 ~ 60% 이상의 계산시간이 감소됨을 보고하였다. 그리고 경계면에서 계산된 속도가 다른 경계면과 연속적이며 이론적으로 미분가능하다(Zhang et al., 2006). 식(17)을 경계조건 식(4)-(7)에 대입하여 연립방정식을 구성할 수 있다. 구성된 연립방정식을 이용하여 밀도함수 σ 를 결정할 수 있으며 결정된 밀도함수 σ 와 식(17)을 이용하여 물체 표면의 potential을 계산할 수 있다.

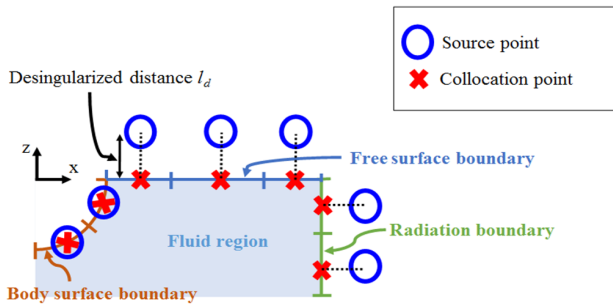


Fig. 3 Schematic diagram for discretization

본 연구에서는 l_d 를 식(18)과 같이 정의하였다(Cao et al., 1991; Beck, 1994). 여기서 A_{mesh} 는 국부격자 크기를 나타내며 a와 b는 Cao et al.(1991)과 Beck(1994)이 최적값으로 제안한 1과 0.5를 이용하였다.

$$l_d = a(A_{mesh})^b \quad (18)$$

2.4 시간 평균 표류하중 계산

비선형 하중인 표류하중은 부유체의 표류운동을 야기하여 위치 이동으로 인한 해상작업성을 저해할 수 있기 때문에 설계의 주요인자가 된다. 시간 평균 표류하중을 해석하는 방법은 Table 1과 같이 총 3가지가 있다. 본 연구에서는 계산이 간편하고 수렴성이 우수하다고 알려진 middle-field 방법을 이용하여 시간 평균 표류하중을 계산하였고 수식은 식(19)-(21)과 같

다(Chen, 2007). 여기서 η 는 입사파와 교란속도포텐셜에 의한 수면의 동요를 의미하며 S_C 는 계산에 사용된 제어표면을 의미한다.

Table 1 Calculation methods for mean drift loads

| Near-field (Pinkster & Oortmerssen 1977) | 원리 | 부유체 표면의 압력을 적분하여 계산 |
|--|----|--|
| | 특징 | <ul style="list-style-type: none"> - 6 방향의 힘과 모멘트를 모두 계산할 수 있음 - 물리적 해석이 용이함 - 해의 수렴성이 물체 표면 격자의 의존적임 |
| Far-field (Maruo 1960) | 원리 | 무한원방의 운동량 보존을 이용하여 계산 |
| | 특징 | <ul style="list-style-type: none"> - 해의 수렴성이 우수함 - 평면의 힘과 모멘트만 계산 가능함 - 다물체에 적용하기 어려움 |
| Middle-field (Chen 2007) | 원리 | 부유체 근방 제어표면의 운동량 보존을 이용하여 계산 |
| | 특징 | <ul style="list-style-type: none"> - 계산이 간편하고 수렴성이 우수함 - 평면의 힘과 모멘트만 계산 가능함 - 추가 제어표면이 필요 |

그리고 \vec{n}_i 는 제어표면적의 수선면의 법선벡터로 식(22)와 같다. 여기서 γ 는 n_i 와 수평면이 이루는 각도이다. 만약 제어표면이 수직 벽(wall-sided) 형태일 때 $\vec{n}_i = n_i$ 이다.

$$F_{D,x} = \frac{\rho g}{2} \oint_{S_C, W.L.} \eta^2 \vec{n}_1 dl + \rho \int_{S_C} [\Phi_n \Phi_x - (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi / 2) n_1] dS \quad (19)$$

$$F_{D,y} = \frac{\rho g}{2} \oint_{S_C, W.L.} \eta^2 \vec{n}_2 dl + \rho \int_{S_C} [\Phi_n \Phi_y - (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi / 2) n_2] dS \quad (20)$$

$$M_{D,z} = \frac{\rho g}{2} \oint_{S_C, W.L.} \eta^2 \vec{n}_6 dl + \rho \int_{S_C} \{\Phi_n [(x-x_0)\Phi_y - (y-y_0)\Phi_x] - (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi / 2) n_6\} dS \quad (21)$$

$$\vec{n}_i = \begin{cases} (n_1, n_2, 0) / |\cos(\gamma)| & i = 1, 2, 3 \\ r \times [(n_1, n_2, 0) / |\cos(\gamma)|] & i = 4, 5, 6 \end{cases} \quad (22)$$

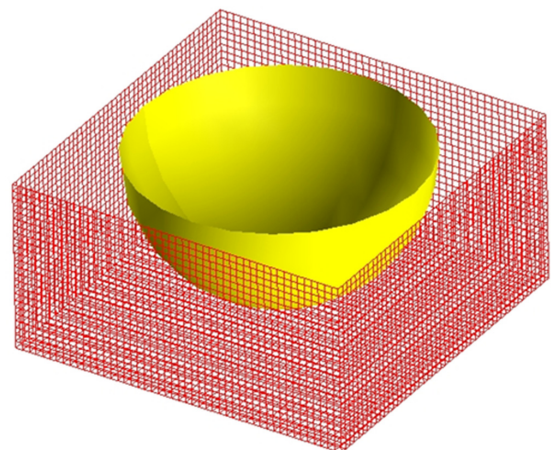


Fig. 4 Mesh model of control surface for mean drift loads

본 연구에서는 시간 평균 표류하중 계산을 위해 Fig. 4와 같은 형태의 제어표면 격자를 구성하였다.

3. 수치해석 및 결과

본 연구에서는 적용된 수치해석기법의 타당성 검증을 위해 바이지선(Pinkster & Oortmerssen, 1977; Jo et al., 1997), 반구(Chen et al., 2001; Kudoh, 1977; Choi et al., 2000) 그리고 수정된 Wigley-바이지 선(Kashiwagi et al., 2005)에 대하여 계산을 수행하고 결과를 비교하였다. 계산에 수행된 모델의 제원은 Table 2와 같다.

Table 2 Principal dimensions of numerical model

| Model | Barge | Hemi-sphere | Modified Wigley & Barge | |
|----------------------------|--------|-------------|-------------------------|-------|
| Length [m] | 150.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| Breadth [m] | 50.0 | 2.0 | 0.3 | 0.3 |
| Draft [m] | 10.0 | 1.0 | 0.125 | 0.125 |
| ∇ [m ³] | 75,000 | 2.094 | 0.04205 | 0.075 |
| Depth | 50.0 | Infinite | 7.0 | |

3.1 바이지 선

바이지선(Pinkster & Oortmerssen, 1977)의 경우, 형상이 단순하여 자유수면의 영역의 크기와 요소 크기 그리고 시간 평균 표류하중 계산을 위한 제어표면의 크기와 요소 크기에 대한 수렴도 테스트가 용이하기 때문에 관련된 계산을 수행하였다. 바이지선 계산에 사용된 표면 격자 모델의 형태를 Fig. 5에 도시하였다.

Fig. 5에 나타난 자유수면의 범위는 300(m)x300(m)로 Fig. 6에서 정의된 영역의 크기 비율(Ratio of domain size) 2.0과 같다. 방사경계면의 깊이는 수심과 동일하게 50(m)로 설정하였으며 입사각 $\beta=180^\circ$ 이다. 자유수면의 요소 크기와 영역의 크기는 Fig. 6과 같이 바이지선의 길이의 일정비율로 변화시켜가며 수렴도 테스트를 수행하였다. 수렴도 테스트에서는 자유수면의 요소의 종횡비는 대략 10이 되게 구성하였으며 사용된 바이지 표면의 요소 수는 520개로 고정하였다. 시간 평균 표류하중은 Table 3에서 정의된 제어표면적 $L_{c.s.02}$ 를 이용하여 일괄적으로 계산하였다.

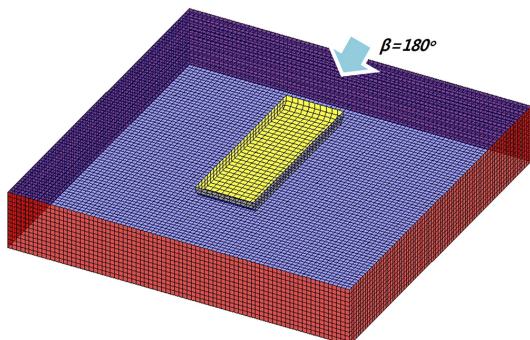


Fig. 5 Mesh models for Pinkster's barge

우선 자유수면의 요소 크기에 대한 수렴도 테스트를 수행하였다.

자유수면의 요소 크기 비율(Ratio of element size)은 15, 20, 30 및 40 으로 변화를 주었고 자유수면의 영역의 크기 비율은 2.0으로 고정하였다. 자유수면의 요소 크기에 대한 수렴도 테스트의 결과를 Fig. 7 - 10에 도시하였다. 전후동요와 종동요의 경우, 수렴도 테스트가 수행된 요소 크기 비율의 범위에서 변화가 둔감한 것으로 확인하였다. 상하동요의 경우, 무차원화된 주파수를 1.5 근방에서 요소 크기 비율이 30이상에서 수렴한다. 시간 평균 표류하중의 경우, Fig. 10에서 확인할 수 있듯 자유수면의 요소크기 비율에 민감하게 변화함을 확인하였으며 상하동요와 마찬가지로 요소크기 비율이 30이상에서 수렴하였다.

자유수면 영역의 크기에 대한 수렴도 테스트를 수행하였다. 자유수면 영역의 크기 비율은 1.6, 2.0 및 3.0으로 변화를 주었고 자유수면의 요소 크기 비율은 30으로 고정하였다. 부유체 운동의 결과는 자유수면의 영역의 크기의 변화를 수행한 수렴도 테스트 범위에서 동일한 결과를 보여주어 결과는 생략하였다. 시간 평균 표류하중은 Fig. 11에 도시하였다. 시간평균 표류하중 또한 영역 크기의 비율 1.6이상에서 유사한 결과를 보여줌을 확인하였다.

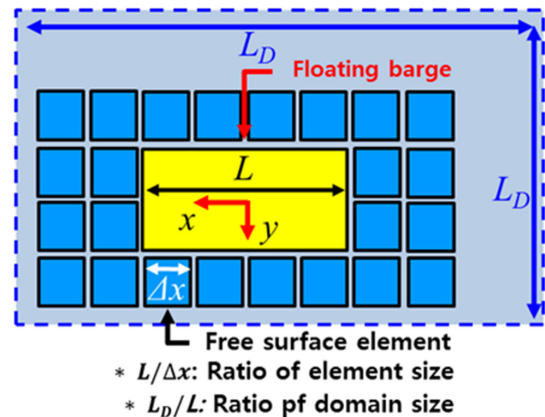


Fig. 6 Definition of ratio of element size(free surface)

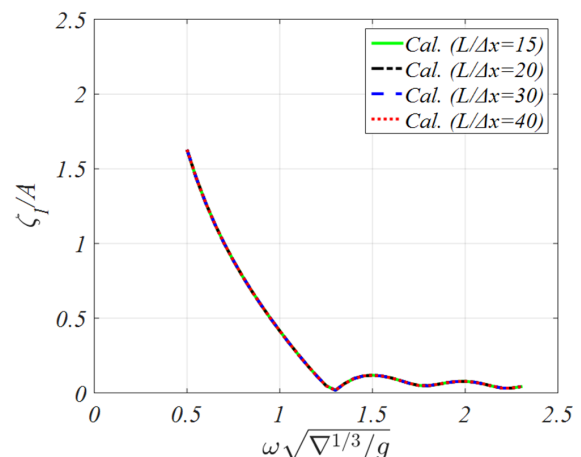


Fig. 7 Convergence of surge R.A.O. according to panel size

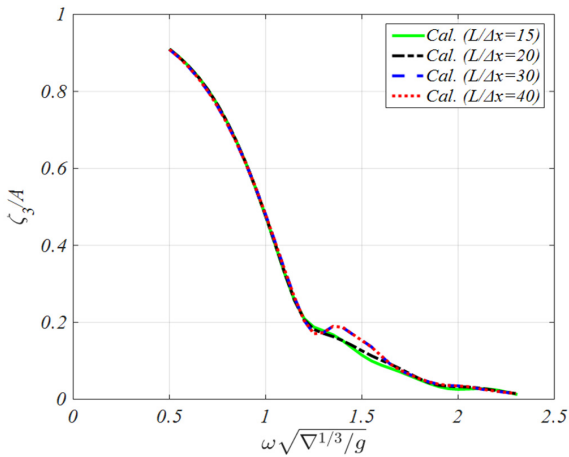


Fig. 8 Convergence of heave R.A.O. according to panel size

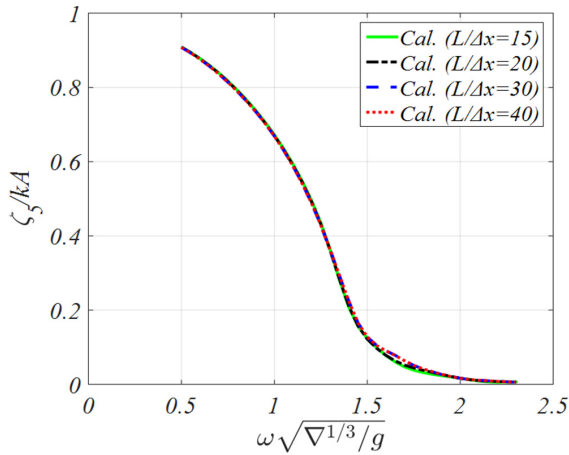


Fig. 9 Convergence of pitch R.A.O. according to panel size

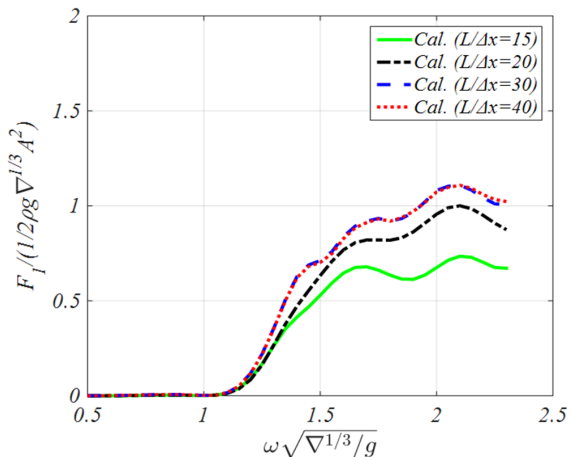


Fig. 10 Convergence of mean drift load according to panel size

추가로 Fig. 12와 같이 시간 평균 표류하중 계산을 위한 제어표면의 크기와 요소크기를 변화시켜가며 계산을 수행하였다. 자유수면 요소 크기 40, 자유수면의 영역 크기 비율 2.0 그리고 바야지 표면의 요소 수는 520개로 고정하였다. 제어표면의 크기는 Table 3과 같이 설정하였다.

먼저 제어표면의 요소크기 비율의 따른 수렴도 테스트를 수

행하였다. 제어표면(control surface, C.S.)의 크기는 Table 3의 LC.S. 02 와 같이 길이(L_{CS}) 160m, 폭(B_{CS}) 60m 및 깊이(D_{CS}) 15m 로 고정하였다. 제어표면의 요소크기 비율을 20, 40, 53, 80 및 107로 변화시키면서 수치계산을 수행하여 Fig. 13에 도시하였다. 제어표면의 요소크기 비율이 40 이상에서 수렴함을 확인하였다. 이를 통하여 시간 평균 표류하중 계산 시, 자유수면의 요소크기 비율 이상의 제어표면의 요소크기 비율을 유지해야 될 것으로 판단된다.

제어표면의 크기에 대한 수렴도 테스트를 수행하였다. 제어표면의 크기는 Table 3에서 정의한 3 가지 크기에 대하여 수행하였으며 제어표면의 요소크기는 3m로 요소크기 비율 50 이상을 유지하였다. 계산 결과는 Fig. 14에 도시하였으며 제어표면 크기에 따른 시간 평균 표류하중의 변화는 둔감한 것으로 판단된다.

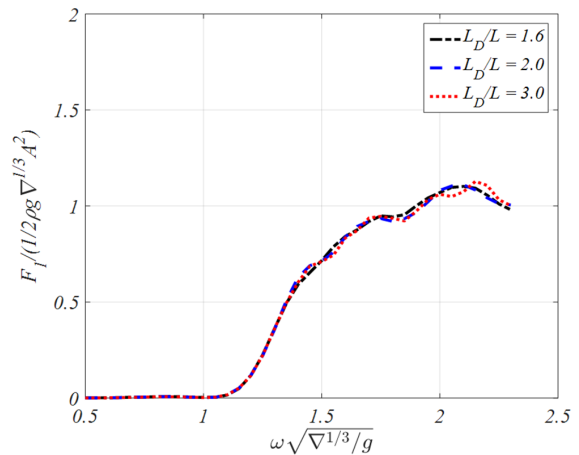


Fig. 11 Convergence of mean drift load according to domain size

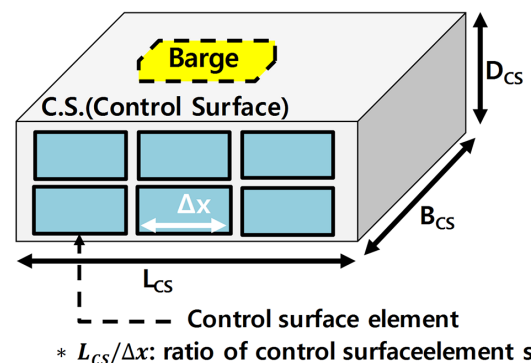


Fig. 12 Definition of ratio of element size of control surface

Table 3 Size of control surfaces for convergence test

| | LC.S[m] | BC.S[m] | DC.S[m] |
|-----------------------------|---------|---------|---------|
| LC.S. 01 (clearance 2.5 m) | 155.0 | 55.0 | 12.5 |
| LC.S. 02 (clearance 5.0 m) | 160.0 | 60.0 | 15.0 |
| LC.S. 03 (clearance 10.0 m) | 170.0 | 70.0 | 20.0 |

Barge (L:150m, B:50m, D: 10m ;panel size 5 m)

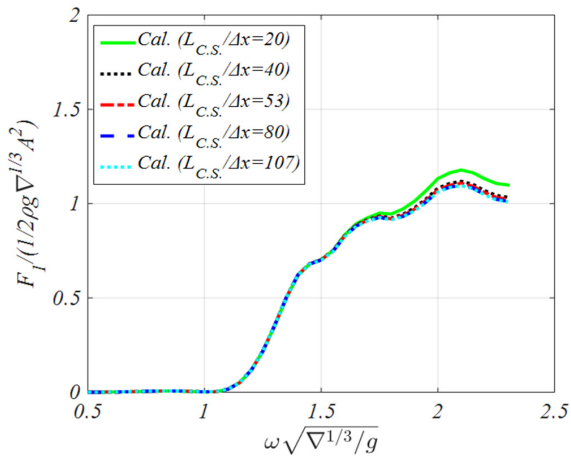


Fig. 13 Convergence of ratio of element size of LC.S.02

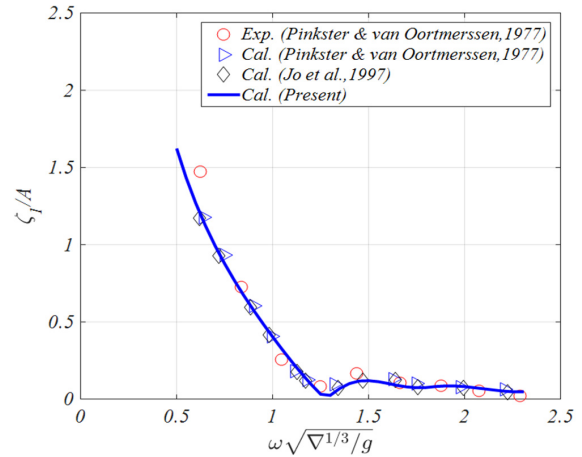


Fig. 16 Surge R.A.O. for Pinkster's barge

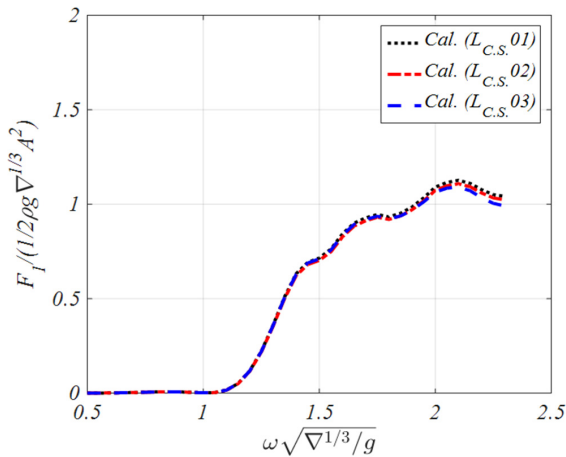


Fig. 14 Convergence of size of control surface

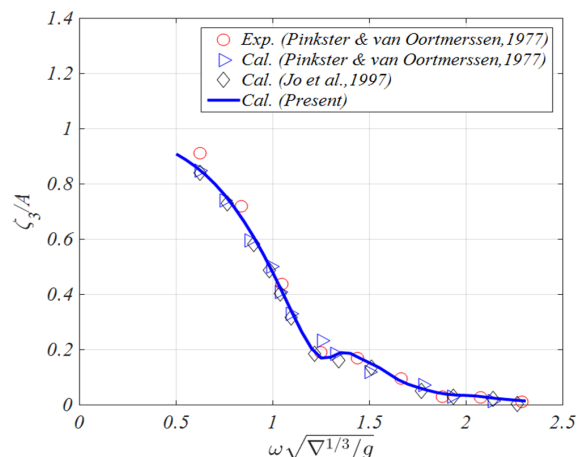


Fig. 17 Heave R.A.O. for Pinkster's barge

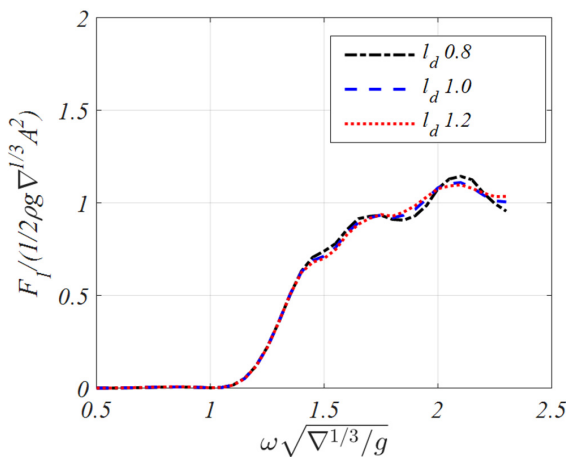


Fig. 15 Sensitivity test of desingularized distance

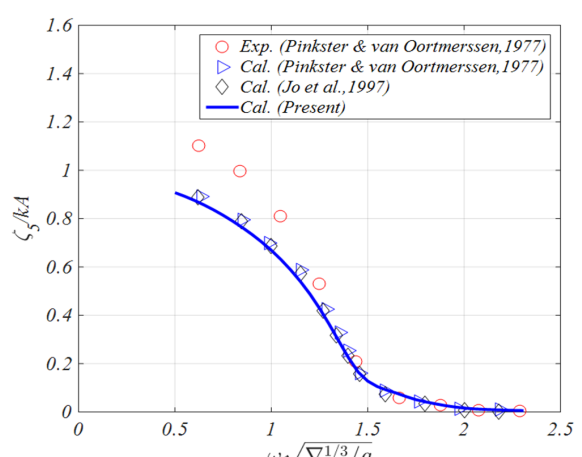


Fig. 18 Pitch R.A.O. for Pinkster's barge

비특이화 거리 l_d 의 변화에 대한 민감도 테스트 역시 수행하였다. 비특이화 거리는 Cao et al.(1991)에서 수행한 범위인 0.8, 1.0 그리고 1.2에 대하여 수행하였고 계산결과는 Fig. 15에 도시하였다. 수행된 비특이화 거리 범위 내에서 시간 평균 표준편차의 변화는 둔감한 것으로 판단된다.

Pinkster와 Oortmerssen(1977)의 시험 데이터와 계산 결과

그리고 Jo et al.(1997)의 계산과 본 연구에서 수렴된 계산결과를 비교하였다. Fig. 16-18은 운동 RAO를 비교한 것으로 전후동요 및 상하동요 RAO는 모형시험과 잘 일치 하나 종동요의 경우 저주파수에서 다소 차이가 나는 것을 확인하였다. 이러한 경향성은 Pinkster와 Oortmerssen (1977)와 Jo et al.(1997)의 계산에서도 유사하게 관찰할 수 있다. Jo et al.(1997)는 종동요의

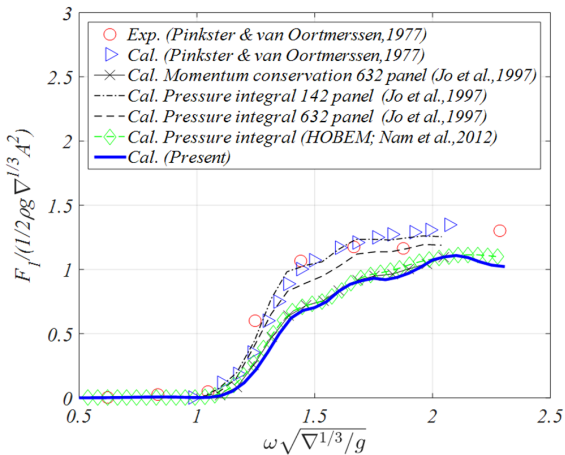


Fig. 19 Mean surge drift load for Pinkster's barge

시험과 계산의 차이에 대하여 모형시험의 관성반경의 오차로 추론하였다. 시간 평균 표류하중 또한 Pinkster와 Oortmerssen (1977)의 모형시험과 Jo et al.(1997)의 압력적분법 계산 및 모멘텀보존법의 결과 그리고 Nam et al.(2012)에 의해 수행된 압력적분법 계산 결과와 비교하였다. 시간 평균 표류력의 경향성은 모형시험과 유사하지만 정량적으로 다소 작은 값이 예측되고 있음을 확인하였다. 이에 대하여 Jo et al.(1997)는 Pinkster의 비지선에 대하여 압력적분법과 모멘텀보존법의 비교 계산을 수행하였으며 부유체 격자를 조밀하게 할수록 압력적분법의 결과가 모멘텀보존법 결과에 수렴함을 확인하였다. 이를 Fig. 19에 도시하였다. 따라서 본 연구에서 계산된 결과는 Jo et al.(1997)의 모멘텀보존법과 비교하여 수치방법의 타당성을 확인 하였다. 모멘텀보존법 결과는 이론해에 가깝다고 알려져 있기때문에 시험과의 차이는 Jo et al.(1997)에서 추론한 중 동요 차이와 마찬가지로 시험의 준비 및 계측 오차에 기인한 것으로 추정되며 이를 판단하기 위해 시험 결과에 대한 엄밀한 검토가 필요한 것으로 사료된다.

3.2 반구

반구 계산에 사용된 표면 격자 모델을 Fig. 20에 도시하였다. 본 계산에 사용된 자유수면 범위는 8(m)x8(m)이며 계산 효율을 위해 방사경계면의 깊이는 2(m)로 설정하였다. 이와 같은

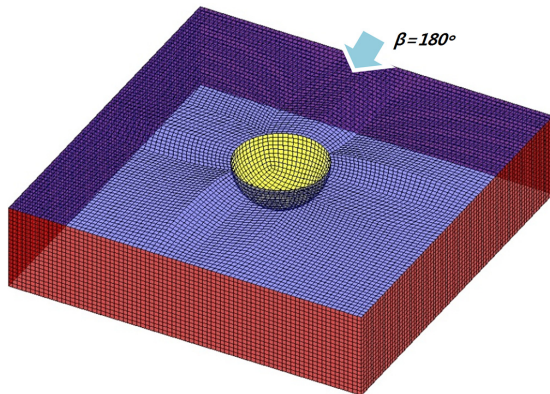


Fig. 20 Mesh model for hemi-sphere

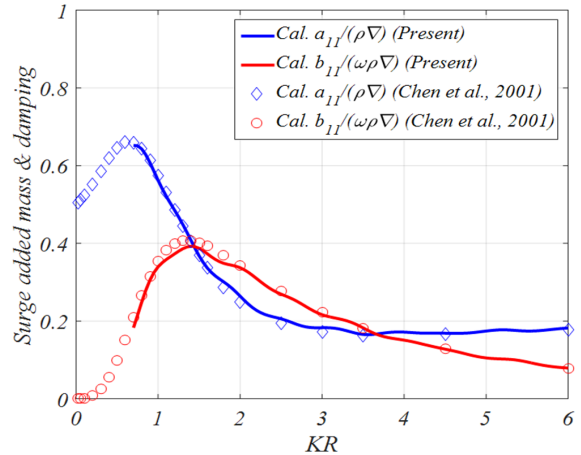


Fig. 21 Surge added mass and damping for hemi-sphere

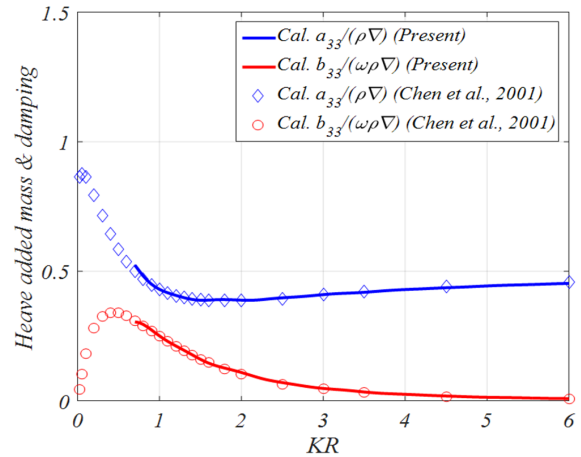


Fig. 22 Heave added mass and damping for hemi-sphere

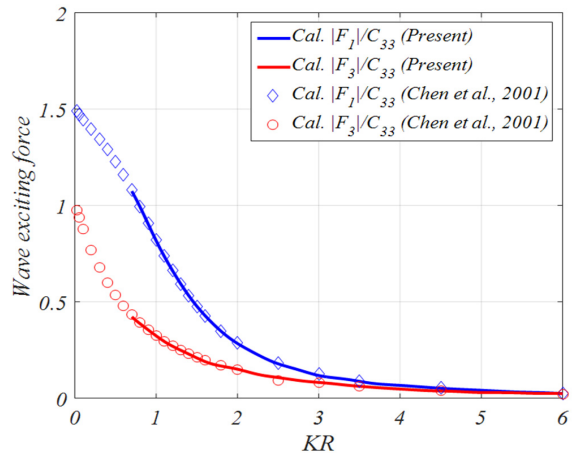


Fig. 23 Wave exciting forces for hemi-sphere

한정된 방사경계면으로 인해 저주파수에서 신뢰성을 확보 할 수 없지만 우리가 관심을 가지는 주파수 영역에서 신뢰성 있는 해석을 수행할 수 있다. 파랑강제력을 비교하기 위해 입사파의 180° 조건으로 설정하여 방사 및 산란 경계치 문제를 구성하였다. 수치계산에는 반구 표면에 734개 요소를 포함하여 총 13,278개요소를 사용하였다. Chen et al.(2002)의 계산결과를 본 연구에서 계산한 부가질량, 조파 감쇠력 및 파랑 강제력을

비교하여 Fig. 21-23에 도시하였고 잘 일치함을 확인하였다. 운동 R.A.O.의 경우, Chen et al.(2001)의 유체력 미계수와 파랑강제력을 이용하여 계산한 결과를 비교하였으며 잘 일치함을 Fig. 24에서 확인하였다. 시간 평균 표류하중 또한 Kudou (1977)와 Choi(2000)의 계산결과와 비교하여 Fig. 25에 나타내었고 본 연구와 잘 일치함을 확인하였다.

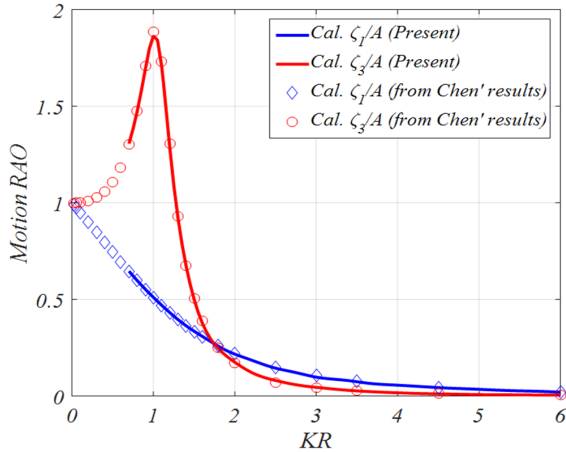


Fig. 24 Motion R.A.O.s for hemi-sphere

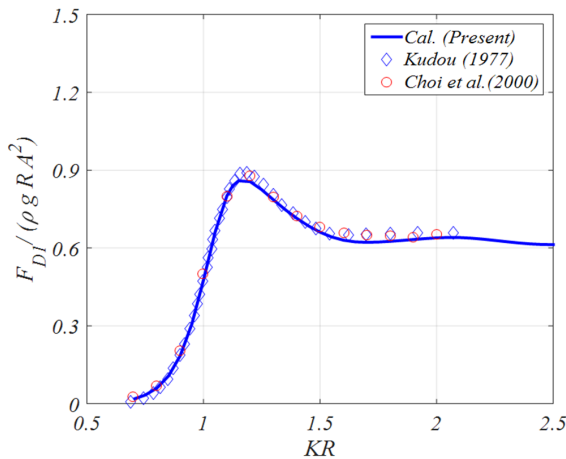


Fig. 25 Mean surge drift load for hemi-sphere

3.3 고정된 복수 구조물 (수정된 Wigley-바이지선)

계산에 사용된 표면 격자 모델을 Fig. 26에 도시하였다. 본 계산에 사용된 자유수면 범위는 6(m)x6(m)이며 방사경계면의 깊이는 1.5(m)를 설정하였다. 두 부유체의 거리 S 1.097(m) 그리고 수심 7(m)로 Kashiwagi et al.(2005)의 시험과 동일한 조건에서 계산을 수행하였다. 입사각 β=90°에서 고정된 두 부유체의 파랑 강제력과 시간 평균 표류하중을 계산하여 Kashiwagi et al.(2005)의 시험 데이터와 비교하였다. 수치계산에는 수정된 Wigley 표면에 742개 요소와 바이지선에 1,440개의 요소를 포함하여 총 11,872개 요소를 사용하였다.

Fig. 27-28은 계산된 파랑강제력을 모형시험과 비교한 것으로 사이 유동의 공진이 발생하는 0.67 λ/L을 제외한 영역에서

좋은 일치도를 보여주고 있다. 시간 평균 표류하중 또한 Fig. 29-30과 같이 0.67 λ/L을 제외한 영역에서 시험과 본 연구의 계산결과가 유사한 경향을 보이고 있다.

선형이론을 기반한 본 방법은 이상 유체 및 쇄파가 없음을 가정하였기 때문에 사이 유동의 공진 주파수에서 비현실적인 파랑장이 계산된다. 사이 유동의 공진을 면밀히 관찰하기 위하여 0.67 λ/L에서 파랑장을 살펴보았다. Fig. 31의 파랑장은 입사파의 파 진폭 비로 나타내었다. 사이 유동의 공진의 영향으로 파랑이 입사파의 약 4배 가까이 증가함을 알 수 있다.

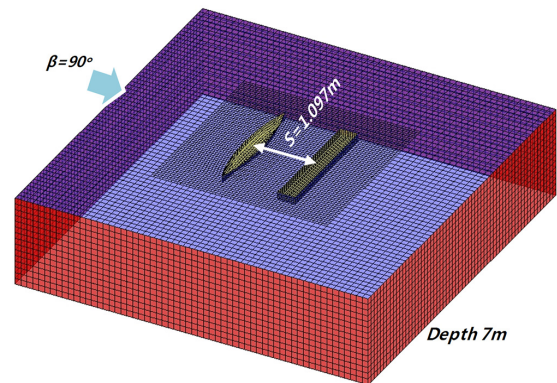


Fig. 26 Mesh models for modified Wigley-barge

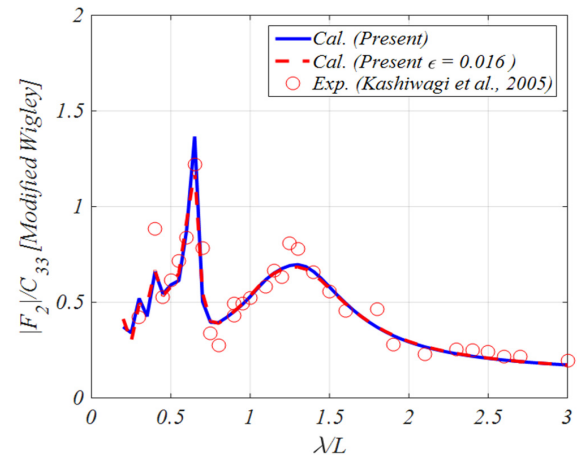


Fig. 27 Sway exciting force for modified Wigley

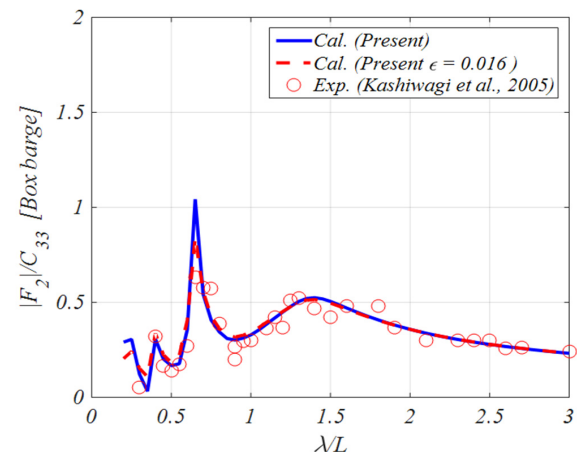


Fig. 28 Sway exciting force for box barge

계산결과에서도 확인할 수 있듯 파랑 강제력과 시간 평균 표류하중의 비물리적 값은 두 부유체 사이 유동의 공진에 기인한 것으로 이는 포텐셜 유동의 한계로 실제 현상을 반영하지 못한다. 이에 Chen(2004)은 두 부유체 사이에 LID panel을 배치하고 감쇠항을 자유수면 경계조건에 도입하여 사이 유동의 공진을 제어하였다.

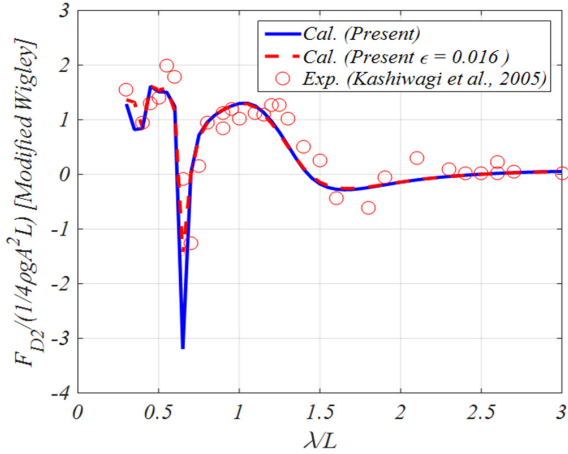


Fig. 29 Mean sway drift load for modified Wigley

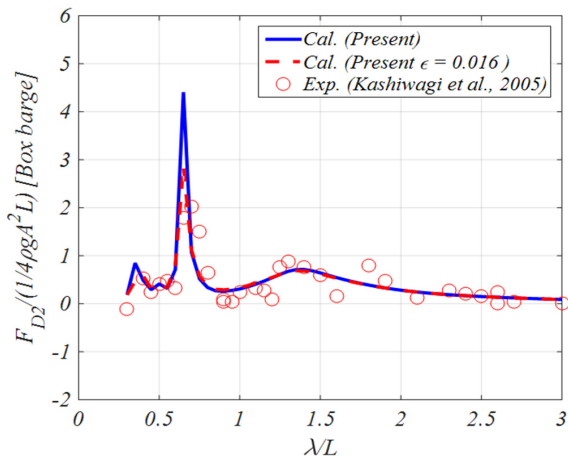


Fig. 30 Mean sway drift load for box barge

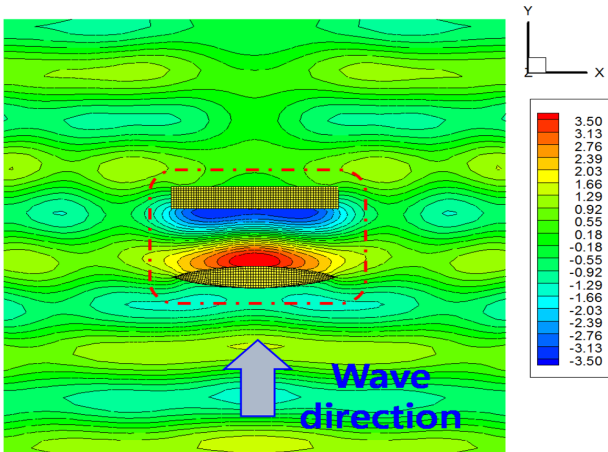


Fig. 31 Wave field without damping at gap region($\beta = 90^\circ$, $\lambda/L=0.67$ $\epsilon = 0.0$)

본 방법의 경우, 파랑그린함수법과 달리 부유체 사이의 자유수면에 요소가 배치되어 있기 때문에 감쇠항 도입에 더욱 유연하다. Fig. 32와 같이 사이 유동영역을 지정하고 자유수면 경계조건 식(4)에 감쇠항을 도입하여 식(23)으로 치환하였다.

$$-\frac{\omega^2}{g}\phi_j + \frac{\partial\phi_j}{\partial z} - i\epsilon\frac{\omega^2}{g}\phi_j = 0 \quad \text{on Gap region} \quad (23)$$

감쇠계수 (artificial damping coefficient) ϵ 는 Chen(2004)과 동일하게 0.016으로 설정하고 모든 주파수에 적용하여 계산하였다. Fig. 27-30에서 사이유동의 공진영역인 $0.67 \lambda/L$ 에서 파랑강제력과 시간 평균 표류력의 비물리적 현상이 제거됨을 확인하였다. 파랑장의 개선을 확인하기 위하여 Fig. 33과 같이 감쇠항이 적용된 파랑 장을 계산하였다. 이를 통해 감쇠항을 적용하지 않은 Fig.31과 비교하여 사이유동이 약 25% 가까이 감소한 것을 확인할 수 있다. 본 감쇠항을 도입하여 이상유체의 한계로 발생하는 비물리적인 제거할 수 있음을 확인하였다. 물론 감쇠항의 적절한 감쇠계수와 감쇠모델을 선정하는 것에 많은 어려움이 있는 것은 사실이며 추후 더 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

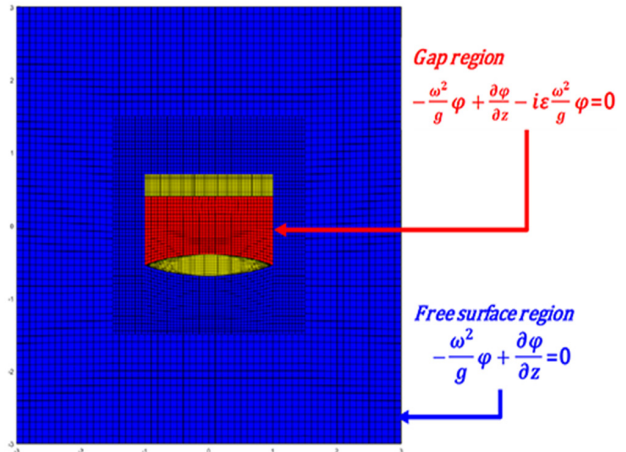


Fig. 32 Gap region introduced damping factor

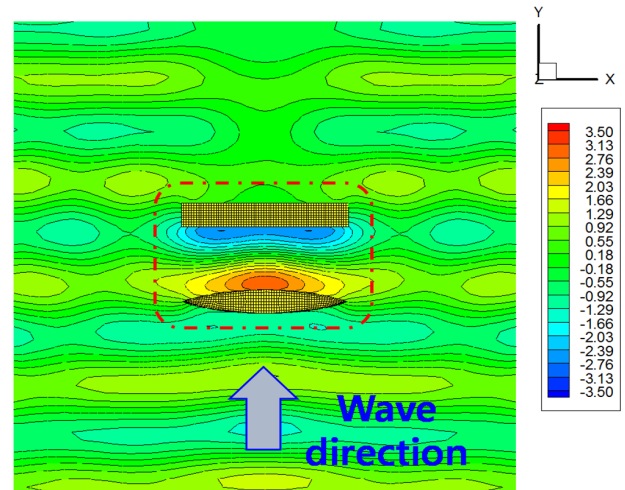


Fig. 33 Wave field with damping at gap region($\beta = 90^\circ$, $\lambda/L=0.67$ $\epsilon = 0.016$)

4. 결 론

본 논문에서는 랭킨 소오스 방법을 이용하여 3차원 부유체의 유체동역학적 응답을 주파수 영역에서 계산하였다. 실용적인 관점에서 비특이화 간절경계적분방정식방법을 적용하여 자유수면과 방사경계면의 소오스를 비특이화하여 면적분에 소요되는 계산비용을 절감하는 동시에 코드의 간결성을 확보하였다. 수렴성이 우수하고 수학적으로 단순한 middle-field formulation을 시간 평균 표류하중을 계산에 적용하였다. 적용된 수치 기법을 바아지선, 반구 및 고정된 복수 부유체에 대하여 계산을 수행하고 발표된 계산 및 시험과 비교하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

- (1) 본 연구를 통해 3 차원 부유체의 유체동역학적 응답을 주파수영역 랭킨 소오스 방법 프로그램을 개발하였으며 개발된 계산 및 시험결과들과 유사한 결과를 얻었다.
- (2) 형상이 단순한 바아지선에 대하여 수렴도 테스트를 수행하였다. 그 결과 유체동역학적 응답이 자유수면의 요소 크기에 의존적이며 부유체의 길이를 기준으로 30개 이상의 요소가 적절함을 확인하였다.
- (3) 본 방법에 적용된 middle-field 방법의 특성을 수렴도 테스트를 통해 확인하였다. 시간 평균 표류하중을 계산하기 위한 제어표면의 크기에는 둔감하며 제어표면의 요소 크기는 자유수면의 요소크기와 같거나 작은 크기가 적당한 것으로 판단된다.
- (4) 복수 부유체의 사이 유동의 공진이 파랑강제력 및 파랑표류력과 같은 유체동역학적 응답에 영향을 주는 것을 확인하였다. 경계조건 처리가 유연한 랭킨 소오스 방법의 장점을 이용하여 사이 유동의 공진을 제어하기 위한 감쇠항을 자유수면 경계조건에 도입하였고 유체동역학적 응답에서 비물리적인 현상이 제거됨을 확인하였다.

향후 본 연구를 통해 다양한 부유체의 유체동역학적 응답계산과 파랑-조류 상호작용에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소에서 지원하는 “초심해역용 라이저(SLWR) 설계엔지니어링 핵심기술 개발(PES8920)”의 결과물임을 밝히는 바입니다.

References

- Ahn, B.K., Lew, J.M., Lee, H.Y. & Lee, C.S., 2008. Application of the B-spline based high order panel method to floating body dynamics. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 22(5), pp. 25-30.
- Beck, R.F., 1994. Time-domain computations for floating bodies. *Applied Ocean Research*, 16, pp. 267-282.
- Bertram, V., 1990. *A rankine source method for the forward-speed diffraction problem*. Ph. D Thesis, Hamburg University of Technology.
- Cao, Y. & Beck, R.F., 2016. Desingularized boundary integral equations and their applications in wave dynamics and wave-body interaction problems. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 1, pp.11-29.
- Cao, Y., Schultz, W.W. & Beck, R.F., 1991. Three-dimensional desingularized boundary integral methods for potential problem. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 12, pp.785-803.
- Cao, Y. & Zhang, F., 2009. Effects of fluid motions in liquid tanks on vessel motions using a simple panel method. *28th International Conference Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Honolulu, Hawaii, USA, 31 May - 5 Jun 2009.
- Carrica, P.M., Wilson, R.V., Noack, R.W. & Stern, F., 2007. Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids. *Computers & Fluids*, 36(9), pp.1414-1433.
- Celebi, M.S., Kim, M.H. & Beck, R.F., 1998. Fully nonlinear 3-D numerical wave tank simulation. *Journal of Ship Research*, 42(1), pp. 33-45
- Chen, X.B., 2004. Hydrodynamics in offshore and naval applications Part I. *The 6th International Conference on HydroDynamics*, Perth, Australia, 24-26 November 2004.
- Chen, X.B., 2007. Middle-field formulation for the computation of wave-drift loads. *Journal of Engineering Mathematics*, 59, pp. 61-82.
- Chen, X.B., Diebold, L. & Doutreleau, Y., 2001. New green-function Method to predict wave-induced ship motions and loads, *Twenty-Third Symposium on Naval Hydrodynamics*.
- 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.
- Geritsma, 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.
- 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.
- Kashiwagi, M., Endo, K. & Yamaguchi, H., 2005. Wave drift forces and moments on two ships arranged side by side in waves. *Ocean Engineering*, 32, pp.529-555.

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 WSH 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.

Kudoh, K., 1977. The drifting force acting on a three-dimensional body in waves. *Journal of Society of Naval Architects in Japan*, 141, pp.71–77.

Lee, H.Y. & Kwak, Y.K., 1997. Analysis of added resistance of ship advancing in waves. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 11(2), pp. 91–99.

Maruo, H., 1960. The drift of a body floating on waves. *Journal of Ship Research*, 4(3), pp.1–10.

Nam, B.W., Kim, Y., Yang, K.K., Hong, S.Y. & Sung, H.G., 2012. Numerical study on wave-induced motion of offshore structures using cartesian-grid based flow simulation method. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(6), pp. 7–13.

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., 2018. Development and application of rankine source method for three dimensional frequency domain analysis of hydrodynamic responses. *Proceedings of the Annual Meeting the Society of Naval Architects of Korea*, Jeju, Republic of Korea, 24–25 May 2018, pp.680–684.

Park, J.C., Chun, H.H. & Song, K.J., 2003. Numerical simulation of body motion using a composite grid system. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(5), pp.36–42.

Pinkster, J.A. & van Oortmerssen, G., 1977. Computation of

the first and second order wave forces on oscillating bodies in regular waves, *Proceeding of Second International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, pp. 136–159.

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.

Sciacounos, 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

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.

Zhang, X.T., Khoo, B.C. & Lou, J., 2006. Wave propagation in a fully nonlinear numerical wave tank: a desingularized method. *Ocean Engineering*, 33, pp. 2310–2331.



오승훈



정동호



조석규



남보우



성홍근