



무인쌍동선의 선체 간격에 따른 유체동역학적 특성 비교

남현승¹·송형도²·조석규^{2,†}

한국표준과학연구원¹

한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소²

Study on the Effect of Catamaran Hull Spacing on Hydrodynamic Characteristics

Hyun-Seung Nam¹·Hyung Do Song²·Seok Kyu Cho^{2,†}

Korea Research Institute of Standards and Science¹

Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering²

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 study, the hydrodynamic characteristics of a catamaran under zero-speed conditions are investigated with respect to variations in hull spacing. The seakeeping performance of USV catamaran is first analyzed using the frequency-domain analysis program AdFLOW, developed by KRISO, and the numerical results are validated against model test data. The hydrodynamic coefficients are then calculated to examine the influence of the inner free surface. The effects of the resonant modes of the inner free surface and the associated wave field around the catamaran are discussed in detail. Finally, the motion responses of the catamaran are evaluated and compared for different hull spacings and wave directions, providing insights into the hydrodynamic interference between twin hulls.

Keywords : Catamaran(쌍동선), Hull spacing(선체 간격), Hydrodynamic Characteristics(유체동역학 특성), AdFLOW(애드플로우), Ocean Engineering Basin(해양공학수조)

1. 서론

최근 해저 지형조사나 해저 수색, 수중감시와 같은 임무를 수행하기 위해 무인쌍동선, 무인잠수정 등과 관련된 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 무인수중체는 단독으로 사용할 경우 배터리 문제나 진회수의 어려움이 존재하고 시간과 범위에 제한이 있기 때문에 주로 유인선박과 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)의 복합 운용이 이뤄진다. 그러나 사람이 개입하여 수행하기 어려운 임무의 경우 USV(Unmanned Surface Vehicle)의 도입이 불가피하며, 최근 USV와 AUV를 복합하여 해양 업무를 수행하고자 하는 시도가 많이 시도되고 있다. 따라서 이와 관련된 USV-AUV의 복합체계 개발의 필요성이 중요해지고 있다.

USV-AUV 복합체계는 수중자율이동체 및 드론 등을 탑재한 무인쌍동선을 이용하여 대상 해역으로 이동한 뒤 업무를 수행, 복귀하는 총괄적인 복합체계를 의미한다. 무인쌍동선은 임무를

수행하는 해역에서 동적위치제어를 통해 정해진 위치에 머물며 수중자율이동체와 통신하며 회수 업무를 맡게 되고, 이때 부유체의 운동과 관련된 성능 검토가 필요하다. 특히 수직방향 운동성능은 드론의 착륙 또는 수중자율이동체의 도킹(docking) 과정 등의 회수단계의 성공 여부와 관련이 있으며, 설계 단계에서의 주요 체원들 중 쌍동선의 선체 간격은 두 선체 사이의 자유수면에 의한 효과로 인해 수직 방향 운동에 영향을 주게 되므로 이에 대한 유체동역학적 특성 검토가 필요하다.

쌍동선의 운동성능과 관련된 연구로써 Fang et al. (2004) 등은 3-D translating-pulsating 소오스를 이용하여 선수 파 및 선수사파에서의 수직방향 운동성능을 검토한 바 있으며, Thomas G. et al.(2007) 등은 사파 조건에서의 횡동요 및 종동요 운동을 스트립 이론 등을 통하여 해석한 바 있다. Castiglione et al. (2011), Broglia et al. (2011)은 NICOP 프로젝트로 DELFT-32 선형의 운동성능과 선체 간격에 따른 간섭 효과 등을 실험과 전

산유체역학을 이용해 검토 한 바 있다. 그러나 위 연구들은 기존 쌍동선의 목적에 맞게 전진 속도문제에서의 운동성을 해석했다는 점에서 동적위치제어가 이루어지는 본 문제와 차이를 보이며, 또한 이 경우 양 선체에서 생성되는 항주파가 선체 사이에서의 유동장을 주로 형성하기 때문에 선체 간격에 따른 영향성을 제대로 확인할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 전진속도가 없는 상황에서의 선체 간격 변화에 따른 무인 쌍동선의 유체동역학적 특성을 비교하였다. 먼저 기존 계획된 제원의 쌍동선에 대한 운동 성능을 선박해양플랜트연구소에서 개발한 주파수영역 해석 프로그램 AdFLOW를 이용하여 검토하였으며, 모형시험 결과와의 비교를 통해 수치해석 결과를 검증하였다. 이후 수치해석을 통해 선체 간격을 변화시켜가며 유체동역학적 계수와 및 주변 파랑장을 확인하여 특성을 파악하였다. 이를 통해 파랑 변화 및 선체 간격 변화에 따른 쌍동선의 운동 크기와 경향을 분석하였다.

2. 기존 무인쌍동선의 운동성능 해석

2.1 해석 모델 및 조건

무인쌍동선의 선체 간격 변화에 따른 영향을 확인하기 전에 기존 계획된 제원의 무인쌍동선의 운동성능 해석을 진행하였다. 모형시험 및 수치해석을 통해 운동성능을 해석하였으며, 해석 목적은 계획된 제원의 수치해석 결과 검증 및 파랑에 따른 경향성을 알아보기 위함이다. 해석 모델의 경우 ‘무인이동체-수중자율이동체 복합체계 개발’ 사업으로부터 개발된 USV의 선체 정보를 이용하였으며 Table 1와 Fig. 1에 주요 제원 및 형상이 나타나 있다. 현재 설계 단계의 무인 쌍동선이기 때문에 주요 제원들 중 회전 변경 성분의 경우 K_{yy} 와 K_{zz} 의 값은 모형시험으로부터 예측된 값으로, K_{xx} 의 경우 무게 분포를 통한 계산 값으로 산정하였다.

모형시험은 선박해양플랜트연구소의 해양공학수조에서 수행되

Table 1 Principal dimension of USV

Item	Full scale	Model scale
LOA [m]	11.909	2.65
BOA [m]	6.235	1.33
Distance between hull, D [m]	4.50	1.00
Inner waterline length, S [m]	2.765	0.614
Demihull breath, B [m]	1.735	0.386
Draft, T [m]	0.59	0.131
Displacement [ton]	9.978	0.109
KG [m]	1.488	0.33
K_{xx} [m]	2.25	0.50
K_{yy} [m]	3.60	0.80
K_{zz} [m]	3.36	0.75

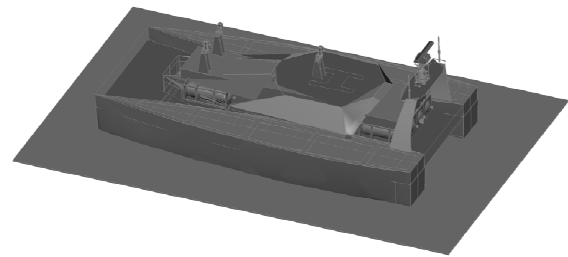


Fig. 1 Geometry of USV model

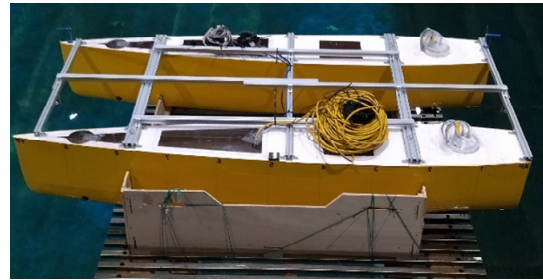


Fig. 2 USV model for model test

었다. 모형 축척비는 파도생성이 가능한 범위를 고려하여 1/4.5로 결정되었으며 Table 1은 모형선의 주요 제원을, Fig. 2는 모형시험에 사용된 모형선을 보여 준다. 모형시험의 목적은 내항 성능 및 동적위치제어 성능 검토이나, 본 연구에서는 내항 성능에 초점을 맞추어 해석을 진행하였다. 파도 조건은 수치해석과 운동 응답을 비교하기 위해 90도부터 180도까지 총 4파향에 대해 백색잡음파 조건이 선정되었다. Table 2와 Fig. 3은 백색잡음파 파도 조건을 보여준다.

Table 2 Wave condition for model test

Wave ID	Wave height, H_s [m]	Wave frequency, [rad/s]
WHT01	0.2	1~6

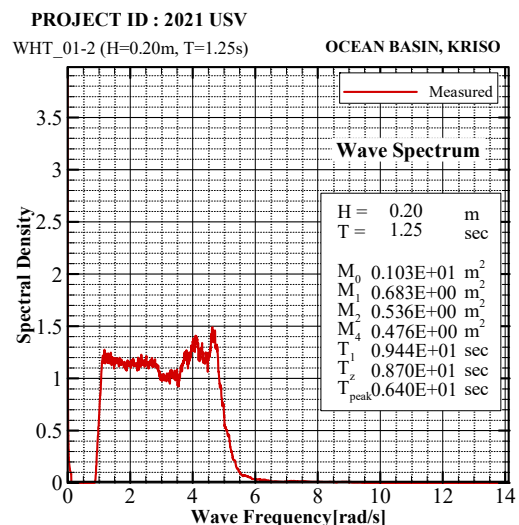


Fig. 3 Wave spectrum of WHT01

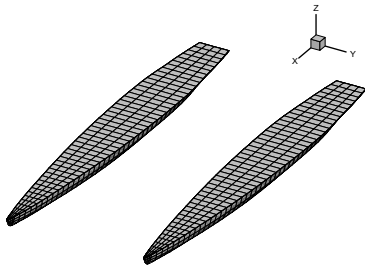


Fig. 4 Panel model of USV

여기서, T 는 흘수, S 는 쌍동선 사이의 자유표면 길이, BOA 는 쌍동선의 전체 폭을 나타낸다.

수치해석은 선박해양플랜트연구소에서 개발한 주파수영역 회절/산란 해석 프로그램인 AdFLOW(Advanced analysis system for FLOating body in Waves using high-order element method)을 사용하여 수행되었다. 위 프로그램은 포텐셜 유동을 기반으로 각 패널에 zero-speed의 파랑 그린 함수를 분포시켜 고차경계요소법으로 경계치 문제를 풀게 된다. 자세한 내용은

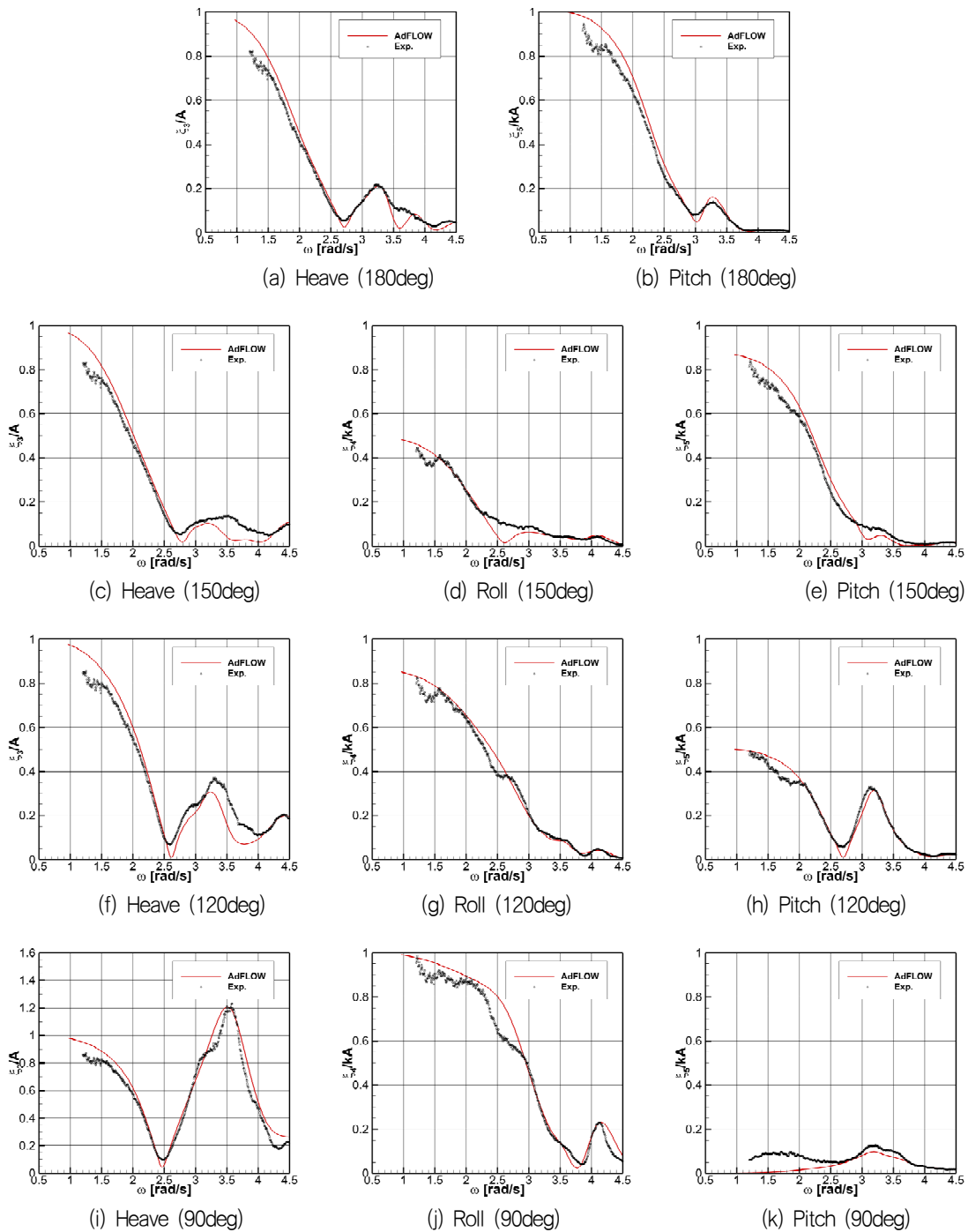


Fig. 5 Comparison of motion response between numerical and experiment results

Choi and Hong (2002)을 참고할 수 있다. 본 문제에서의 무인 쌍동선의 해석은 동적위치제어가 이루어지는 상황이므로 전진 속도가 없는 조건에서 해석을 진행하였으며, 선체 간격에 따른 유체동역학적 특성만의 해석을 위해 제어에 의한 추가적인 계류 강성의 영향 등은 고려되지 않았다. 모형시험과 동일한 조건으로 4파향에 대하여 운동 성능을 계산하여 비교하였다. 총 1,200개의 패널을 사용하였으며, Fig. 4는 해석에 사용된 패널 모델을 보여준다.

2.2 운동성능 해석 결과 비교

Fig. 5는 모형시험과 수치해석의 운동 응답 해석 결과를 보여 주고 있다. 먼저 전체적인 경향을 살펴보면, 수치해석 결과가 모형시험 결과와 유사하게 나오는 것을 확인할 수 있다. 수치해석 결과가 운동 응답의 피크(peak) 및 운동 응답이 0이 되는 cancellation frequency 등을 잘 계산하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 이는 모형시험 또는 무게 배치를 통해 산정한 회전반경들의 실험 세팅이 제대로 되었음을 의미한다. 또한 현재 수치해석 모델에 따라 횡동요 운동의 감소나 내부 유동에 의한 감소 등을 넣지 않았음에도, 운동 응답의 피크가 시험과 유사한 결과를 보이며 이는 쌍동선이 점성보다는 방사감쇠에 의한 영향이 지배적임을 알 수 있다. 또한, 운동의 크기가 단동선에 비해 작은 쌍동선의 특성을 잘 나타내고 있다. 이를 통해 본 수치해석 코드가 zero-speed 조건에서의 무인쌍동선의 운동을 잘 계산함을 검증하였으며, 추후 선체 간격 변화에 따라 동일한 조건을 적용하여 유체동역학적 특성을 비교하였다.

파향 변화에 따라 운동 응답의 경향성을 살펴보면, 상하 운동은 사파 조건으로 이동할수록 기존의 단동선이 보이는 운동 응답의 그래프 개형과 차이를 보이는 것을 확인할 수 있으며, 특히 90도 조건에서 단파에서의 운동응답이 증가하는 것을 볼 수 있다. 종동요 및 횡동요 운동의 경우는 사파조건으로 이동할수록 장파에서 운동 응답 크기가 파도 방향에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있으며, 120도 조건의 종동요 운동과 90도 조건의 횡동요 운동에서 단파의 운동응답이 커진 것을 확인할 수 있다. 위 특징적인 사항들은 다음절에서 논의될 선체 간격에 따른 유체동역학적 특성 비교에서 보다 자세히 다루도록 하겠다.

3. 선체 간격에 따른 유체동역학적 계수 비교

3.1 수치해석 조건

다음으로 수치해석을 통해 선체 간격 변화에 따른 유체동역학적 특성을 확인하였다. 수치해석 프로그램은 2절에서 사용되었던 것과 동일하게 AdFLOW를 사용하였으며, 쌍동선의 패널은 동일하게 사용되되 두 선체 사이의 간격을 바꾸어 가며 해석을 진행

Table 3 Principal dimension for hull spacing variation

Item	#1	#2 (Base)	#3	#4	#5
D [m]	3.00	4.50	5.40	6.50	7.80
S/LOA [-]	0.11	0.23	0.31	0.40	0.50
Kxx [m]	1.50	2.25	2.70	3.25	3.90

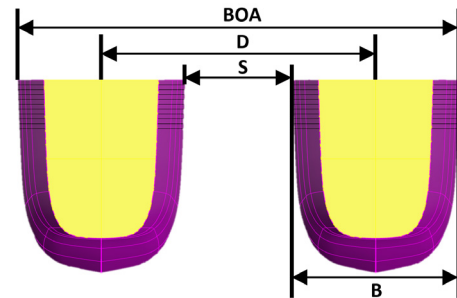


Fig. 6 Characteristic lengths of twin hull

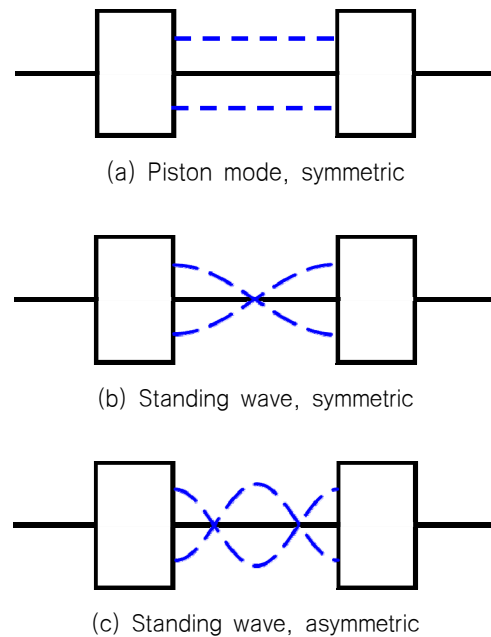
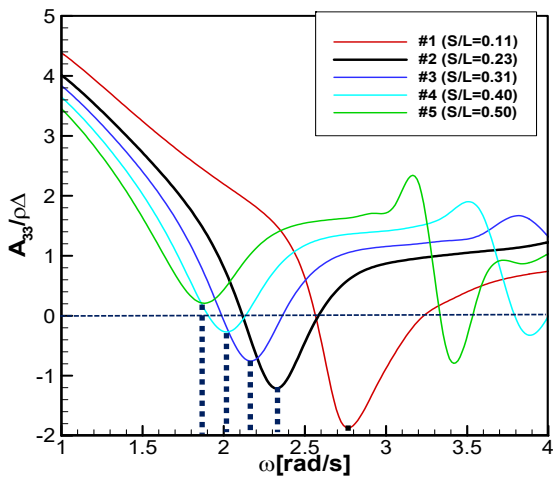


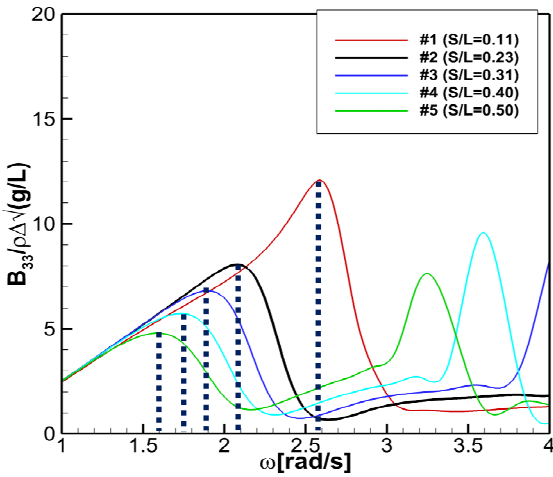
Fig. 7 Interaction between hulls

하였다. 해석 사항은 유체동역학적 계수, 파랑장, 및 파향에 따른 운동 응답이다. Table 3은 선체 간격에 따라 사용한 주요 제원을 나타내고 있다. 선체 간격은 S/LOA 기준으로 0.1에서 0.5 까지 총 5개의 간격으로 선정하였으며, 간격이 달라짐에 따라 주요 제원들 중 횡동요 회전반경의 값을 재산정하여 해석에 사용하였다. 선체 간격이 달라지면 GM, 횡동요 주기, 횡동요 감쇠가 변하지만 (R. Wahab, 1971) 본 연구에서는 KG와 관성반경의 변화만 고려하였다.

쌍동선의 선체 간격에 따른 유체동역학적 특성은 선체 사이의 유동으로 나타나며 단동선과 다르게 음의 부가질량이 발생할 수 있다. 선체 사이 유동은 2가지로 구분할 수 있으며, 대칭성을 가지는 상하동요, 종동요에 대한 유동과, 비대칭적인 좌우동요, 횡



(a) Added mass coefficient



(b) Damping coefficient

Fig. 8 Hydrodynamic coefficient of heave motion for hull spacing variation

동요에 대한 유동이 있다 (Hudson, 1995). 대칭성 유동은 2개의 모드가 존재하고, 하나는 Fig. 7(a)의 피스톤 모드, (b)의 정상파 모드(1/2파장)가 있다. 비대칭성 유동은 (c) 형태의 정상파(1파장) 형태가 존재한다. 선체에 의해 발생하는 방사파는 무한원방으로 퍼져나가는 파와 선체 내부에서 발생하는 정상파로 이루어진다. 이때 선체 내부의 유동 특성 주파수에서 선체 사이 발생파가 선체 운동과 위상이 180도가 되면서 음의 부가 질량이 나타난다 (Wang, 1971).

3.2 유체동역학적 계수 및 파랑장 비교

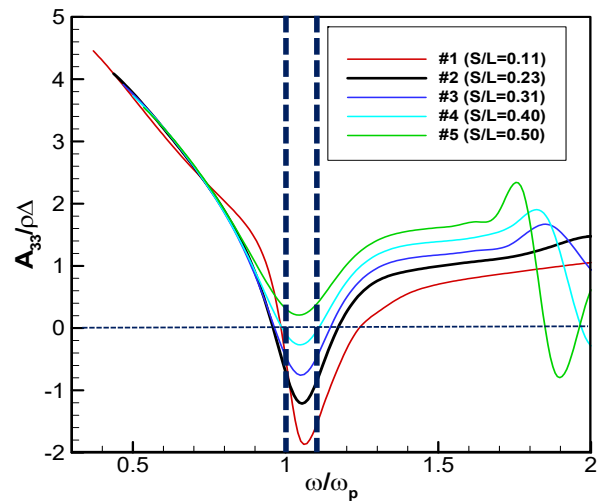
Fig. 8은 상하운동에 대한 유체동역학적 계수를 보여주고 있다. 부가질량 계수의 경우 쌍동선에서 특징적으로 발생하는 음의 부가질량 계수를 수치해석이 잘 나타내고 있는 것을 확인할 수 있으며, 비슷한 주파수에서 유체 감쇠 계수가 커지는 것을 확인할 수 있다. 선체 간격에 따른 경향성을 살펴보면 음의 부가질량 및 유체 감쇠계수의 그래프의 경향이 선체 간격이 넓어짐에 따라 장파로 이

Table 4 Piston mode for hull spacing variation

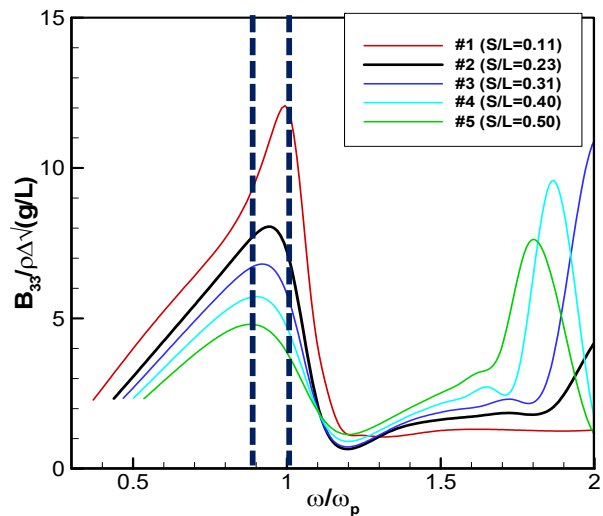
Item	#1	#2(Base)	#3	#4	#5
ω_p [rad/s]	2.60	2.21	2.06	1.93	1.80

동하는 것을 확인할 수 있으며, 특징적인 성분의 크기가 점차 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 쌍동선의 특징은 선체 사이의 유동장에서부터 기인한 것으로써 Molin (2001)와 Faltinsen (2005) 등은 moonpool 등의 2차원 내부 유동장이 존재하는 문제에서 유체동역학적 계수들을 검토한 바가 있고, 특정 주파수는 선체 사이 거리에 대한 심해파 파장으로도 추정할 수 있다 (Wang, 1971; Fang, 1996; van't Veer and Siregar, 1995). 이에 대한 경향성을 확인하기 위하여 내부 유동장의 길이 S를 이용하여 피스톤 모드(piston mode)로 무차원화시켰다.

피스톤 모드는 내부 유동장의 상하 진동에 대한 공진 주파수에서 나타난다. 피스톤 모드는 식 (1)로 표현되는 Molin (2001)에서



(a) Added mass coefficient



(b) Damping coefficient

Fig. 9 Hydrodynamic coefficient of heave motion normalized with piston mode

제시된 2차원 내부 유동장에서의 약산식을 이용하여 계산할 수 있으며, Table 4에 선체 간격에 따라 계산된 피스톤 모드의 주파수를 정리하였다. 고주파수(3~4 rad/s)에서 나타나는 두 번째 피크는 상하동요로 인한 두 번째 모드 주파수로 Wang과 Fang이 제시한 방법으로 예측될 수 있다. Fig. 9는 주파수를 피스톤 모드의 주파수로 무차원화 한 상하운동에 대한 유체동역학적 계수를 보여주고 있다. Table 4를 보게 되면 선체 간격이 넓어짐에 따라 내부 유동장의 피스톤 모드가 점점 장파로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 당연하게도 내부 유동장의 길이가 길어짐에 따라 상하 공진을 이루는 파장이 길어지기 때문이다. Fig. 9의 결과를 보게 되면 앞서 언급했던 쌍동선의 부가질량과 감쇠계수 특징적인 성분들이 피스톤 모드 근처에 몰려있는 것을 확인할 수 있으며, 선체간격이 증가할수록 내부 유동장의 공진에 의해 특징적으로 나타나는 음의 부가질량이나 유체감쇠계수의 값이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 선체 간격이 증가함에 따라 내부 유동장에서 일어나는 상하 공진이 작아지며 유체동역학적 계수에 미치는 영향이 적어지기 때문으로 판단된다. 이 결과는 내부 파랑장으로부터 확인할 수 있으며 Fig. 10은 음의 부가질량 계수를 가지는 주파수에서 선체 간격이 가장 작은 #1에서 #5의 주변 파랑장을 보여주고 있다. 선체 중앙에서 내부 유동장이 좌우 대칭으로 상하공진을 일으키는 것을 볼 수 있으며, 선체 간격이 넓어짐에 따라 그 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 내부 파랑장으로 인해 발생하는 음의 부가저항 크기가 작아지며,

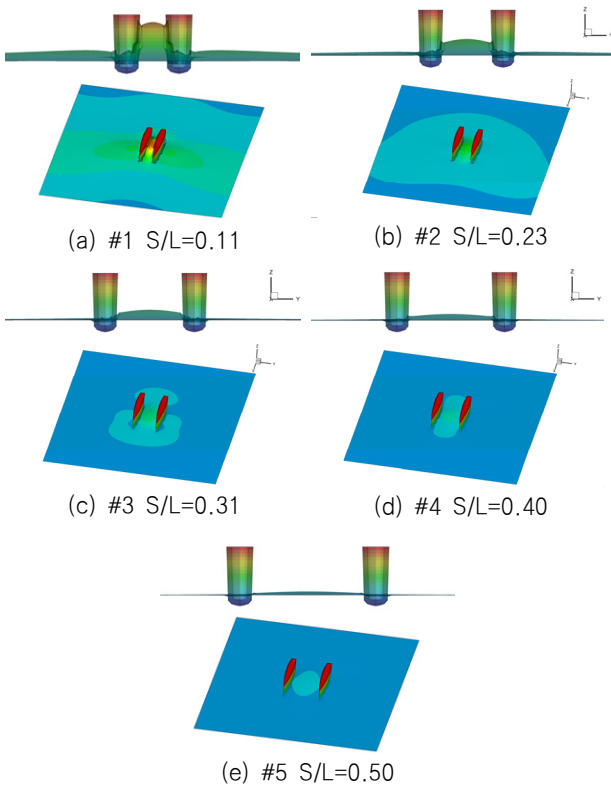
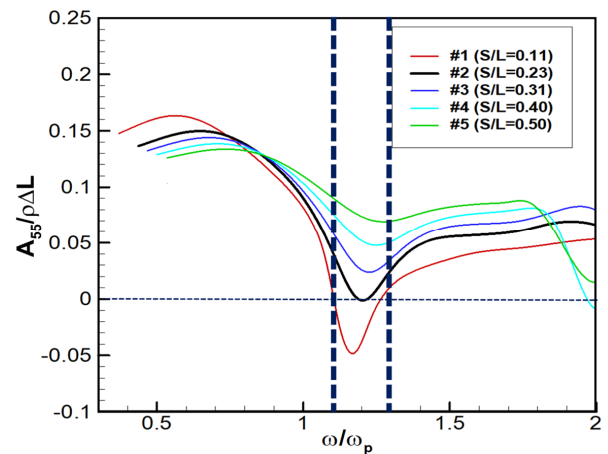


Fig. 10 Wave envelope from heave motion at negative added mass frequency

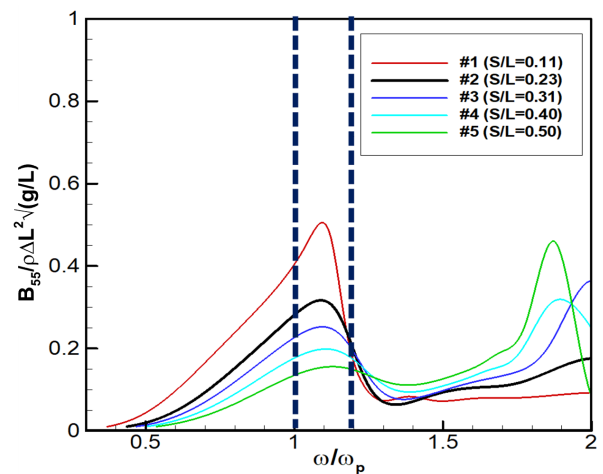
주변에 파랑을 생성하며 발생하는 감쇠계수의 크기가 작아지는 것을 볼 수 있다.

$$\omega_p \approx \sqrt{\frac{g}{T + (S/\pi) \left(\frac{3}{2} + \ln(BOA/2S) \right)}} \quad (1)$$

중요 운동의 경우에도 내부 파랑장에서 일어나는 상하 공진과 관련이 있으며, Fig. 11은 Fig. 9와 동일하게 중요 운동에 대한 부가질량계수 및 유체감쇠계수를 피스톤 모드로 무차원화시킨 결과이다. 상하동요 결과와 마찬가지로 특징적인 성분들이 피스톤 모드의 약 1.1배~1.2배에 몰려있는 것을 확인할 수 있다. 또한 유체동역학적 계수의 성분 크기가 선체간격이 증가함에 따라 작아지는 것을 확인할 수 있다. 내부 유동장의 공진을 확인하기 위하여 Fig. 12는 음의 부가질량 계수를 가지는 주파수에서 #1과 #5에 대한 주변 파랑장을 보여주고 있다. Fig. 12(a)를 보면 선체의 앞뒤에서 피스톤 모드가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, #1에 대한 파랑장 스냅샷(snapshot)인 Fig. 13을 확인해볼게 되면 내부 파랑장의 앞, 뒤에서 위상차를 가지며 상하 공진이



(a) Added mass coefficient



(b) Damping coefficient

Fig. 11 Hydrodynamic coefficient of pitch motion normalized with piston mode

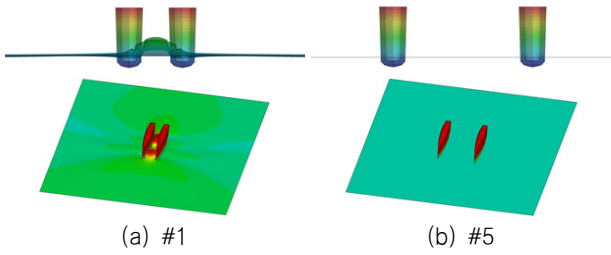


Fig. 12 Wave envelope from pitch motion at negative added mass frequency

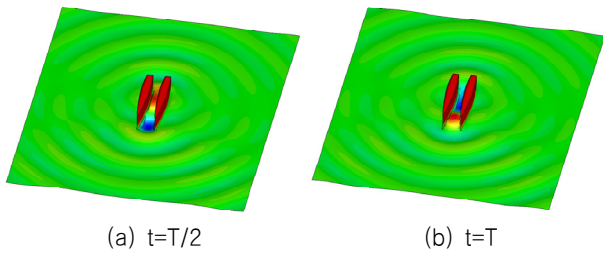
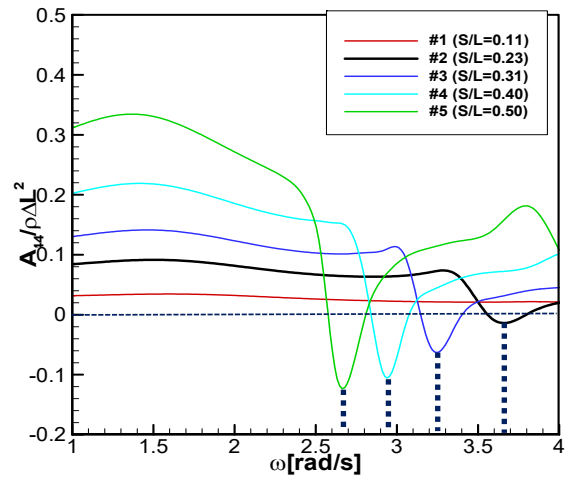


Fig. 13 Times series of wave field for #1

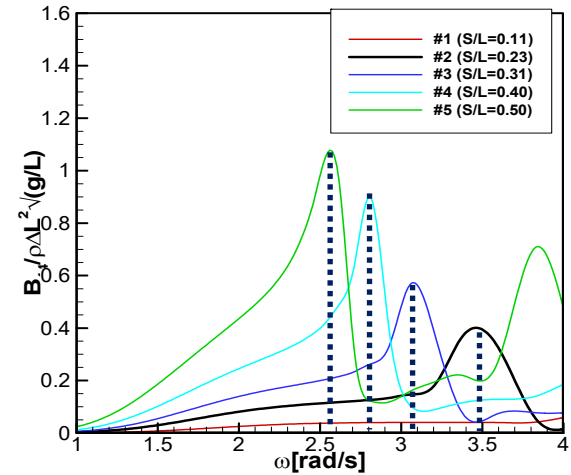
일어나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 앞서 확인하였던 선체 중앙에서의 공진이 아닌 종방향의 공진으로 인해 이가 음의 부가질량으로 작용한 것을 확인할 수 있다. 또한 선체 간격이 증가함에 따라 상하운동과 동일하게 내부 유동장의 상하 공진이 적어지기 때문에 쌍동선의 특징 성분이 작아지는 것을 Fig. 12(b)를 통해 확인할 수 있다. 다만 이러한 특징적인 주파수가 완벽하게 피스톤 모드에 일정한 배열로 형성되지 않는 이유는 무인선의 앞, 뒤 형상이 대칭적이지 않아 앞, 뒤에서의 내부 유동장의 공진 주기가 다르며, 현재 피스톤 모드가 선체 중앙에서 계산되었기 때문인 것으로 판단된다. 결론적으로 위에서 언급한 상하 운동과 종동요 운동의 경우에는 대해서는 선체 간격이 커질수록 쌍동선의 유체동역학적 특징이 적게 나타남을 확인할 수 있다.

다음으로 횡동요 운동의 유체동역학적 계수를 살펴보았다. Fig. 14는 선체 간격에 따른 횡동요 운동에 대한 부가질량계수 및 유체 감쇠계수를 보여주고 있다. 앞서 확인했던 상하 및 종동요 운동과 비슷하게 선체 간격이 넓어짐에 따라 쌍동선의 특징적인 주파수는 동일하게 장파로 이동하는 것을 확인할 수 있으나, 반대로 특징적인 성분은 점차 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 횡동요 운동에 영향을 주는 내부 유동장의 모드가 상하 모드가 아닌 횡방향의 모드가 형성되기 때문이며, 슬로싱 모드(Sloshing mode)로 이러한 현상을 분석하였다.

슬로싱 모드의 경우 1차 모드를 고려하였으며, 식 (2)로 표현되는 Molin (2001)에서 제시된 2차원 내부 유동장에서의 약산식을 이용하여 계산하였다. Table 5에 선체 간격에 따라 계산된 슬로싱 모드의 주파수를 정리하였다. Fig. 15는 주파수를 슬로싱 모드로 무차원화 한 횡동요 운동에 대한 유체동역학적 계수를 보여주고 있다. Table 5를 보게 되면 선체 간격이 넓어짐에 따라 내부 유동장의 길이가 증가하며 앞선 운동들과 동일하게 슬로싱 모드가 점점 장파로 이동하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 15의 결



(a) Added mass coefficient

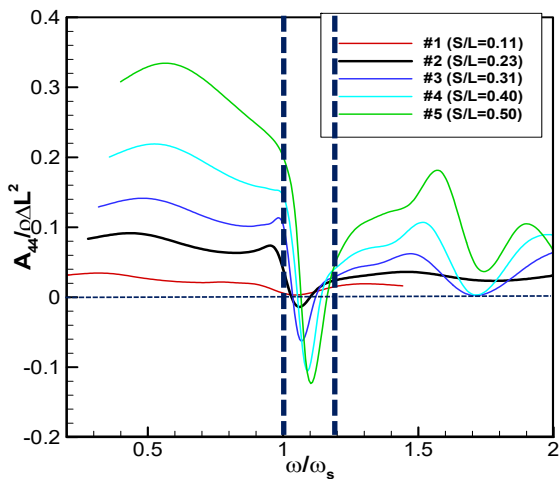


(b) Damping coefficient

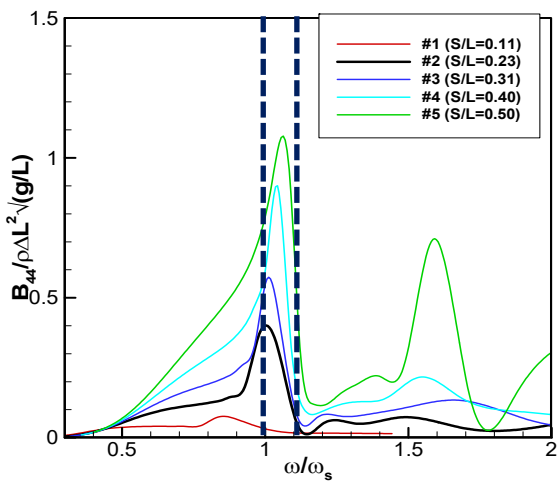
Fig. 14 Hydrodynamic coefficient of roll motion for hull spacing variation

과를 보게 되면 쌍동선의 음의 부가질량계수와 큰 유체감쇠계수가 슬로싱 모드 근처에 몰려 있는 것을 확인할 수 있으며, 선체간격이 증가할수록 이 특징이 커지는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과 또한 내부 유동장을 보게 되면 명확히 확인할 수 있다. Fig. 16은 음의 부가질량 계수를 가지는 주파수에서의 #1에서 #5에 대한 파랑장을, Fig. 17은 #5에 대한 시간에 따른 파랑장 스냅샷을 나타내고 있다. 먼저 Fig. 17로부터 선체 벽면의 파고가 위상차를 가지며 번갈아가며 최대가 되는 좌우 대칭 슬로싱 모드가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 또한 이러한 슬로싱 모드는 Fig. 16의 #1과 #5를 비교해 보게 되면, 선체 간격에 따라 구조물 내부 및 외부 파랑장이 변하는 것을 알 수 있다. 이로 인해 횡동요 운동에서는 상하 및 종동요 운동과는 다르게 선체 간격이 커짐에 따라 쌍동선의 특징이 더욱 잘 나타나는 것을 확인할 수 있다.

$$\omega_s \approx \sqrt{g \frac{\pi}{S} \coth\left(\frac{\pi T}{S} + 1.030\right)} \quad (2)$$



(a) Added mass coefficient



(b) Damping coefficient

Fig. 15 Hydrodynamic coefficient of roll motion normalized with sloshing mode

Table 5 Sloshing mode for hull spacing variation

Item	#1	#2(Base)	#3	#4	#5
ω_s [rad/s]	4.97	3.45	3.04	2.70	2.42

3.3 파향에 따른 운동 응답 비교

다음으로 파향 변화에 따른 운동 응답 변화를 비교하였다. Fig. 18은 180도 및 90도 조건에서의 선체간격 변화에 따른 상하 운동의 운동 응답을 보여주고 있다. 180도의 결과를 보게 되면 선체 간격이 변하여도 따라 피크(peak)점 및 운동 응답이 0으로 계산되는 cancellation frequency의 위치 이동 이외에는 큰 값의 차이가 없음을 확인할 수 있다. 특히 2 rad/s, 파 주기 약 3초를 기준으로 장파 영역에서는 운동응답이 거의 동일하게 나오는 것을 볼 수 있으며, Sea State 2(SS2)의 해상상태 이상의 파도의 피크 주기가 4~5초 이상임을 고려 할 때 선체 간격 변화에 따른 상하운동의 크기는 거의 동일하다고 할 수 있다. 이에 반해 90도의 결과를 보면 선체간격 변화에 따라 운동응답이 차이를 보이는

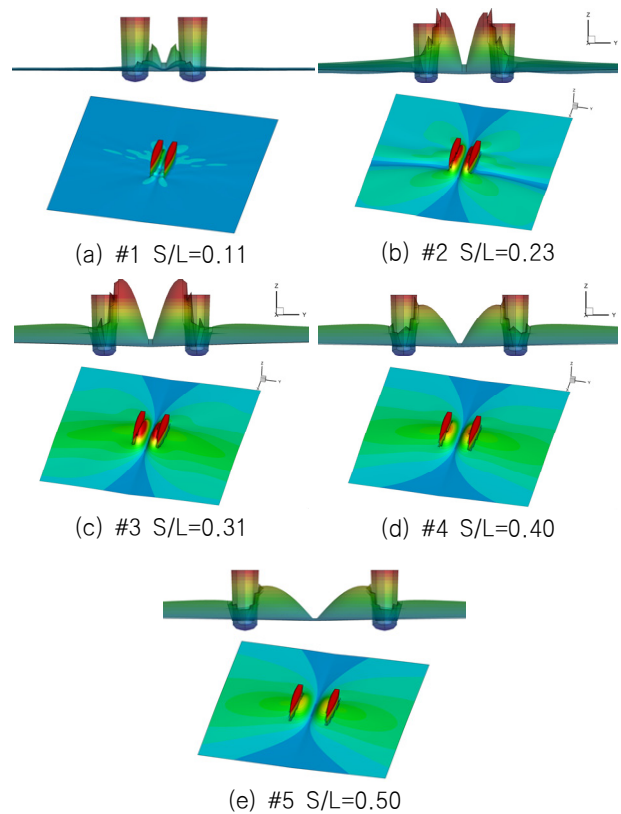


Fig. 16 Wave envelope from roll motion at negative added mass frequency

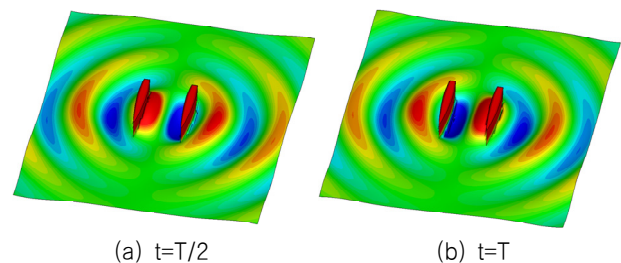
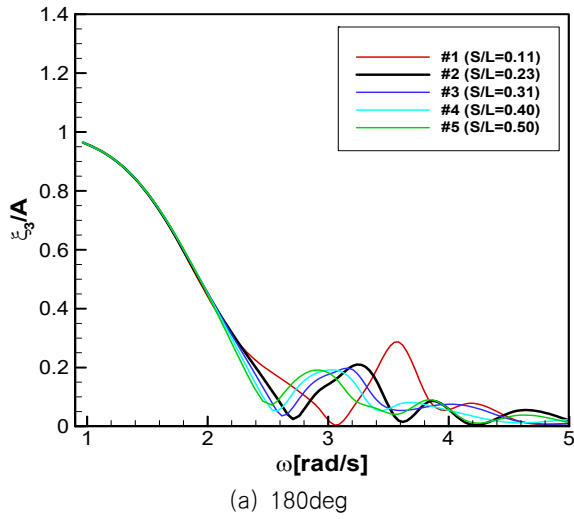


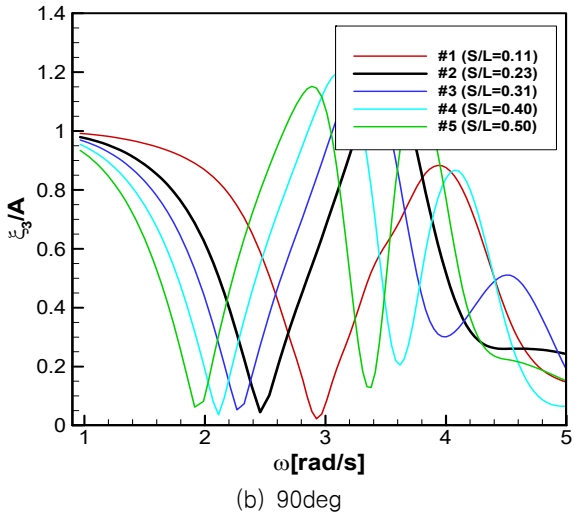
Fig. 17 Times series of wave field for #5

것을 확인할 수 있다. 180도 결과에 비해 선체 간격 변화에 의한 영향이 뚜렷하게 나타나며, 선체 간격이 넓어지면 장파영역에서는 운동응답의 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 선체 간격이 넓어짐에 따라 전체적인 그래프의 개형이 장파영역으로 이동하는 경향을 보인다.

앞선 2절의 해석을 바탕으로 피스톤 모드로 90도 운동응답의 가로축을 무차원화 시키게 되면 Fig. 19의 결과를 얻을 수 있다. cancellation frequency가 피스톤 모드 근처에서 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 파향에 따라 상하동요, 횡동요, 종동요의 변화를 살펴보면, 파향 180도와 150도에서는 피스톤 모드(주파수 1.8~2.6rad/s)로 인한 상하동요와 종동요 RAO의 변화는 관찰되지 않지만, 슬로싱 모드(주파수 2.4~4.9rad/s)에서 상하동요와 종동요 RAO의 증가가 보인다. 이는 슬로싱 모드 주기에서 상하동요 부가질량의 영향으로 추정된다. 파향 90도에서는 운동

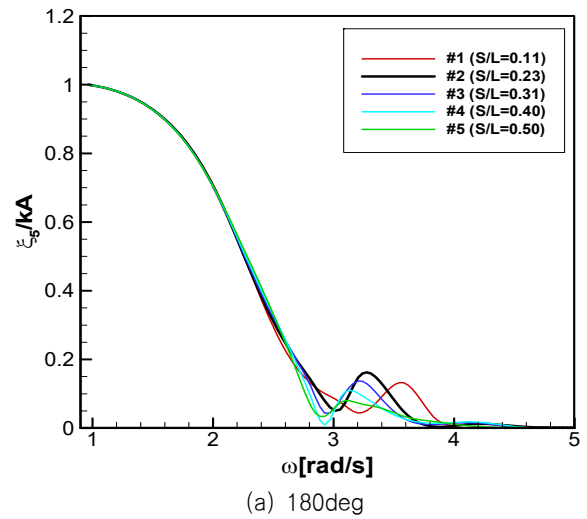


(a) 180deg

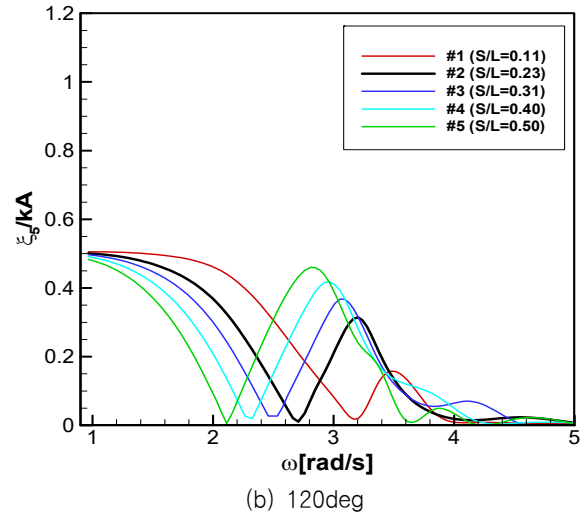


(b) 90deg

Fig. 18 RAO of heave motion



(a) 180deg



(b) 120deg

Fig. 20 RAO of pitch motion

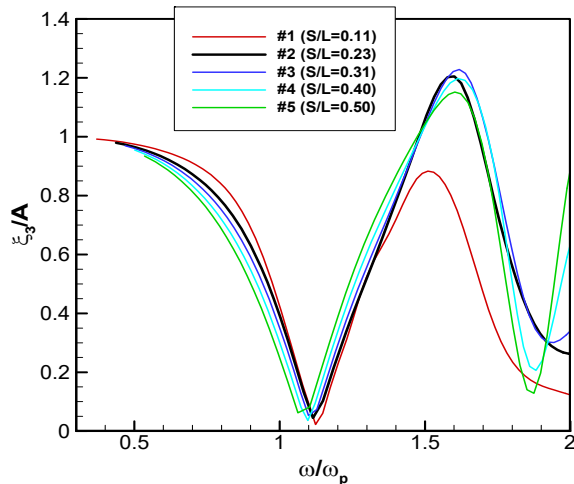


Fig. 19 RAO of heave motion for 90deg normalized with piston mode

응답의 변화가 뚜렷하게 관찰되는데, 상하동요 응답은 피스톤 모드 주기 영역에서 응답이 감소하다 증가하는 경향을 나타내고, 슬로싱 모드 주기 영역에서 상하동요가 크게 증가하는 현상을 볼

수 있다. 120도에서는 상하동요와 종동요 연성이, 90도에서는 상하동요와 횡동요의 연성을 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 2rad/s 보다 작은 주기 영역에서는 선체 사이 유동의 영향은 나타나지 않는다.

다음으로 Fig. 20은 180도와 120도 조건에서의 선체간격 변화에 따른 종동요 운동의 운동응답을 보여주고 있다. 종동요 운동은 90도 조건에서 운동응답이 작기 때문에, 대신 120도의 결과를 비교 하였다. 180도 결과를 보게 되면 상하운동과 동일하게 장파영역에서는 선체 간격 변화에 따라서 운동응답 크기가 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 그러나 120도의 결과를 살펴보면 선체 간격 변화에 따라 운동응답이 차이를 보이는 것을 확인할 수 있으며, 상하운동과 동일하게 장파 영역에서 종동요 운동 응답의 크기가 작아지는 것을 볼 수 있다. 이 또한 피스톤 모드로 무차원화 시킨 결과를 Fig. 21에 도시하였다. Cancellation frequency가 피스톤 모드에 1.2배 정도에서 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 종동요 운동의 경우에도 피스톤 모드에 의한 영향이 사파조건으로 이동함에 따라 점점 크게 나타난다.

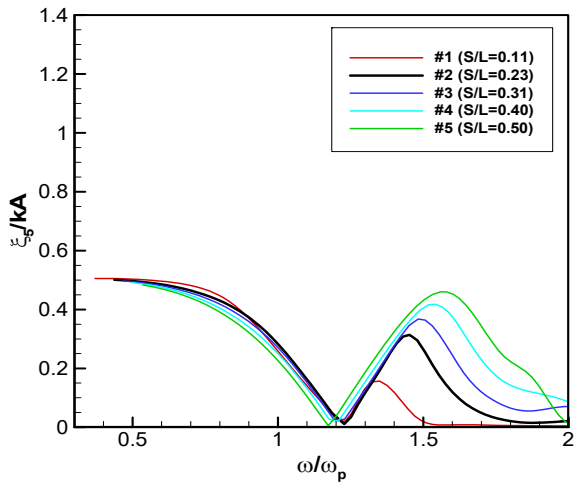


Fig. 21 RAO of pitch motion for 120deg normalized with piston mode

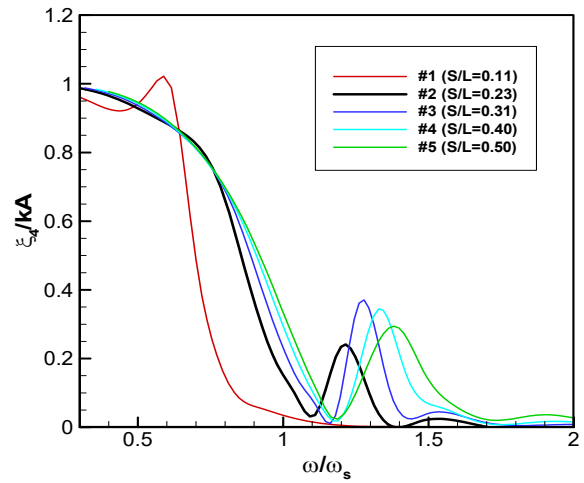
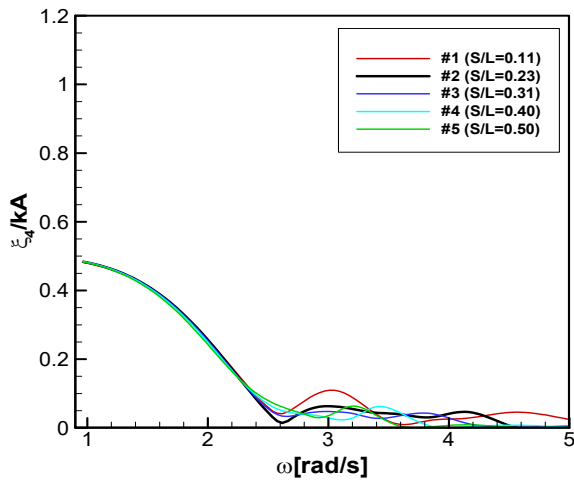
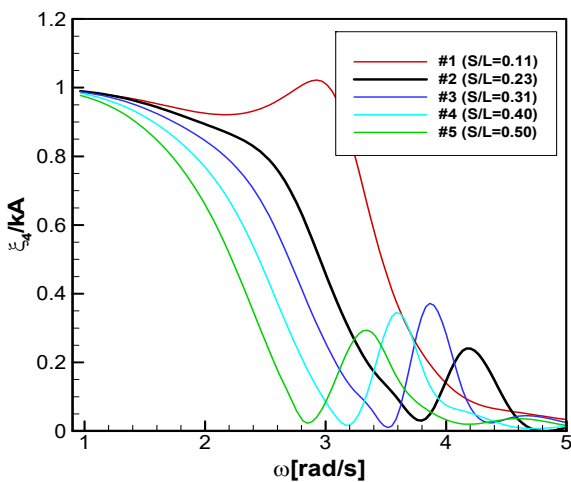


Fig. 23 RAO of roll motion for 90deg normalized with sloshing mode



(a) 150deg



(b) 90deg

Fig. 22 RAO of roll motion

마지막으로 Fig. 22는 150도와 90도 조건에서의 선체간격 변화에 따른 횡동요 운동의 운동응답을 보여주고 있다. 횡동요 운

동은 180도 조건에서 운동응답이 작기 때문에, 대신 150도의 결과를 비교 하였다. 150도 결과를 보게 되면 동일하게 장파영역에서는 선체 간격 변화에 따라서 운동응답 크기가 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있으나, 90도 결과에서는 선체 간격에 따라 운동응답이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 앞선 운동들과 동일하게 선체 간격이 넓어짐에 따라 장파영역에서의 운동응답 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 슬로싱 모드로 무차원화 시킨 Fig. 23에서부터 이러한 그래프의 변화 원인은 슬로싱 모드의 영향이 나타나기 때문으로 해석할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 선체 간격 변화에 따른 무인쌍동선의 유체동역학적 특성을 비교하였다. 유체동역학적 특성을 계산하기 위해 선박해양플랜트연구소에서 개발된 주파수영역 해석 프로그램 AdFLOW를 이용하였으며, 먼저 기존 계획된 제원의 쌍동선에 대한 운동성능을 해석하고 모형시험 결과와 비교를 통해 수치해석 결과를 검증하였다. 이후 무인 쌍동선의 선체 간격을 변화시켜 가며 유체동역학적 계수 및 주변 파랑장을 검토하여 특성을 파악하였다. 이후 선체 간격 및 파랑 변화에 따른 쌍동선의 운동 응답의 크기 및 경향성을 분석하였다. 이러한 연구를 통해서 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- AdFLOW를 이용한 무인쌍동선의 운동응답 수치해석 결과가 4 파향 조건에 대해서 운동의 경향성 및 값들이 모형시험과 잘 일치하는 것을 확인
- 상하운동 및 종동요 운동의 부가질량계수 및 유체감쇠계수가 내부 파랑장의 상하공진을 나타내는 피스톤 모드와 관련이 있음을 확인하였음. 또한 쌍동선에서 특징적으로 나타나는 음의 부가질량 및 유체감쇠계수의 최댓값의 크기가 선체 간격이 넓어짐에 따라 작아지는 것을 확인하였으며, 이러한 결과가 주변 파랑장을 통해 검토

- 횡동요 운동의 부가질량계수 및 유체감쇠계수가 내부 파랑장의 횡방향 공진을 나타내는 슬로싱 모드와 관련이 있음을 확인하였음. 음의 부가질량 및 유체감쇠계수의 크기는 선체 간격이 넓어짐에 따라 커지는 것을 확인하였으며, 주변 파랑장을 통해 검토
- 무인 쌍동선의 운동응답의 크기가 선수파(180도) 조건에서는 선체 간격에 따라 큰 차이를 보이지 않으나, 사파 (90도) 조건으로 이동할수록 상하운동 및 종동요 운동은 피스톤 모드에 의한 영향이, 횡동요 운동은 슬로싱 모드에 의한 영향이 나타났음. 이러한 모드들은 선체 간격이 넓어짐에 따라 장파로 이동하기 때문에, 사파 조건에서 선체 간격이 넓어짐에 따라 운동 응답 크기가 작아지는 것을 확인

후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소 기본사업 “해상작업 운동저감 신개념 해양구조물 핵심기술 개발”, 과기부 “무인수상선 및 자율운항 기술 개발”로 수행된 연구결과입니다.

References

Brogli, R., Zaghi, S. and Di Mascio, A., 2011. Numerical simulation of interference effects for a high-speed catamaran. *Journal of Marine Science and Technology*, 16, pp.254-269.

Castiglione, T., Stern F., Bova S. and Kandasamy M., 2011. Numerical investigation of the seakeeping behavior of a catamaran advancing in regular head waves. *Ocean Engineering*, 16, pp.1806-1822.

Choi, Y.R. and Hong, S.Y., 2002. An analysis of hydrodynamic interaction of floating multi-body using higher-order boundary element method. *12th International Offshore and Polar Engineering Conference(ISOPE)*, Kitakyushu, Japan, 2002.

Faltinsen, O., 2005. *Hydrodynamics of high-speed marine vehicles*. Cambridge University Press, Inc.

Fang, C.C. 1996. *An investigation of motions of catamarans in regular waves*. PhD Thesis, University of Glasgow.

Fang, C.C. and Chan, H.S., 2004. Investigation of seakeeping characteristics of high-speed catamarans in waves. *Journal of Marine Science and Technology*, 12(1), pp.7-15.

Hudson, D.A., Price, W.G. and Temarel, P. 1995. Seakeeping performance of high speed displacement craft. *FAST'95 3rd International Conference on Fast Sea Transportation*, Lubeck-Travemunde, Germany, September 1995.

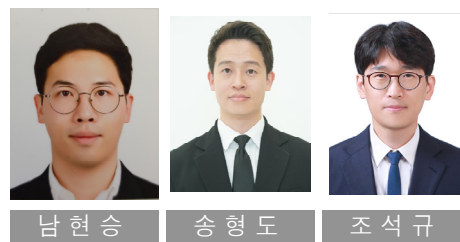
Molin B., 2001. On the piston and sloshing modes in moonpools. *Journal of Fluid Mechanics*, 430, pp.27-50.

Thomas, G., Lawrence, J., Patrick C. and Mani, H., 2007. Catamaran motions in beam and oblique seas. *9th International Conference on Fast Sea Transportation*, Shanghai, China, September 2007.

Wahab, R. Pritchett, C. and Ruth, L.C. 1971. On the behaviour of the ASR catamaran in waves. *Marine Technology*, 8, pp.334-360.

Wang, S. and Wahab, R., 1971. Heaving oscillation of twin cylinders in a free surface. *Journal of Ship Research*, 15,(1), pp.33-48.

van't Veer, A.P. and Siregar, F.R.T., 1995. The interaction effects on a catamaran traveling with forward speed in waves. *FAST'95 3rd International Conference on Fast Sea Transportation*, Lubeck-Travemunde, Germany, September 1995.



남현승

송형도

조석규