

정수중 및 파랑중 저수심에서의 초대형 컨테이너선에 작용하는 유체력 특성에 관한 연구

이상민^{*†}

* 군산대학교 해양생산학과

Study on Hydrodynamic Forces Acting on a Very Large Container Vessel at Lower Depths in Both Still Water and Waves

Sangmin Lee^{**†}

* Dept. of Marine Science and Production, Kunsan National University, Kunsan 54150, Korea

요 약 : 최근의 초대형 컨테이너선들은 점차 거대화되고 있으며, 흘수의 증가로 인한 연안해역 및 항만 등과 같은 저수심 수역에서의 안전항해에 많은 주의가 필요하다. 이러한 저수심 해역을 항행하는 초대형 컨테이너선은 정수중 뿐만 아니라 파랑중에서의 선박 운동 특성을 파악하여야 할 필요가 있다. 저수심 해역에서는 특히 선박의 상하운동에 의한 스쿼트 현상이 안전 항해의 중요한 평가 요소가 될 수 있으며, 수평방향으로 작용하는 파표류력은 선박의 조종성능에 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다. 본 연구에서는 저수심 해역을 항행하는 초대형 컨테이너선을 대상으로 선박에 수직방향으로 작용하는 파랑강제력과 수평방향으로 작용하는 파표류력에 대하여 전산유체역학에 의한 수치시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과 천수역에서 정수중 전저항 값이 큰 폭으로 증가하고 있는 것을 알 수 있었다. 파랑중 단파장 영역보다는 장파장 영역이 될수록 수심과 관계없이 파표류력은 작아지고 있는 모습을 보여주고 있다. 또한 파랑강제력은 천수역에서 다른 수심의 유체력 값에 비해 상당히 크게 작용하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 선체중앙 부분의 파고는 낮아지고 선미쪽 파고는 더욱 높아지는 현상을 파악할 수 있었다.

핵심용어 : 초대형 컨테이너선, 저수심, 스쿼트, 파표류력, 파랑강제력, 전산유체역학

Abstract : Recently, the size of container ships has been progressively increasing, and much attention is required for safe navigation in shallow areas such as coastal waters and ports due to increases in draft. It is necessary to understand the characteristics of ship motion not only in still waters but also with waves. Especially in shallow regions, squat due to the vertical movement of the ship can be an important evaluation factor for the safe navigation, and wave drift force acting in the horizontal direction can have a great influence on the maneuverability of a ship. In this study, a numerical simulation using computational fluid dynamics has been performed for the wave exciting force acting in the vertical direction and the wave drift force acting in the horizontal direction for a very large container vessel sailing in shallow zone. As a result, it was found that total resistance in still waters greatly increased in shallow water. Wave drift force was shown to decrease given longer wavelengths regardless of water depth. It was observed that the wave exciting force in shallow water was considerably larger than at other water depths. As wave height against the central part of the ship lowered, the aft side rose.

Key Words : Very large container vessel, Low water depth, Squat, Wave drift force, Wave exciting force, Computational fluid dynamics

1. 서 론

최근에 규모의 경제와 에너지 효율 향상 및 친환경 선박

등을 목표로 18,000 TEU급 이상의 초대형 컨테이너선들이 운항되고 있거나 향후 지속적으로 건조될 예정이다. 이러한 초대형 컨테이너선들은 점차 거대화되고 있으며, 흘수의 증가로 인한 연안해역 및 항만 등과 같은 저수심 수역에서의 안전항해에 많은 주의가 필요하다. 이러한 저수심 해역을 항행하는 초대형 컨테이너선은 정수중 뿐만 아니라 파랑중에서의 선박의 운동 특성을 파악하여야 할 필요가 있다.

† Corresponding Author : smlee@kunsan.ac.kr, 063-469-1814

※ 이 논문은 “파랑중 저수심에서의 초대형 컨테이너선에 작용하는 유체력 특성에 관한 연구”란 제목으로 2017년도 해양환경안전학회 춘계 학술대회에 발표되었음.

천수역과 관련된 기존 대부분의 연구는 정수층을 대상으로 선박의 침하 현상인 스쿼트와 저항 특성에 관한 분야가 대부분이었다(Kijima et al., 2001; Gourlay, 2008; Jachowski, 2008; Yao and Zou, 2010; Yun et al., 2014; Tezdogan et al., 2016a). 그리고 Lee(2015)는 천수역에서의 선미형상의 변화에 의한 침하안정성 및 선회운동 특성에 대한 연구결과를 발표하였다.

천수역에서 파랑에 의한 선체운동과 관련해서 Oortmerssen (1976)은 유한수심에 의해 선박에 작용하는 파랑 유체력 및 모멘트가 심수역과 다르게 작용하고, 부가질량과 감쇄력과 같은 유체력 계수 값이 변화되는 특성이 있다고 보고하고 있다.

일반적으로 파도가 존재하는 해역에서 파랑이 선박에 미치는 영향은 선체운동의 발생, 선속의 저하, 파표류력의 작용 등으로 구분되어 질 수 있다(Ruiz et al., 2015). 저수심 해역에서는 특히 선박의 상하운동에 의한 스쿼트 현상이 안전항해의 중요한 평가 요소가 될 수 있으며, 수평방향으로 작용하는 파표류력은 선박의 조종성능에 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다. 본 연구에서는 저수심 해역을 항행하는 초대형 컨테이너선을 대상으로 정수층 전저항 및 파랑중 선박에 수직방향으로 작용하는 파랑강제력과 수평방향으로 작용하는 파표류력에 대하여 CFD에 의한 수치시뮬레이션을 실시하였으며, 그 특성에 대하여 조사 및 분석하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식 및 수치해석방법

수치시뮬레이션을 수행하기 위해서 본 연구에서는 Finite Volume Method를 기본으로 하는 CFD 상용프로그램인 STAR-CCM+를 사용하였다. 비압축 유동해석을 위한 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{\rho u'_i u'_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 밀도, \bar{u}_i 는 평균속도 성분, $\overline{\rho u'_i u'_j}$ 는 Reynolds stress를 나타낸다.

시간 이산화는 1차 음해법을 채택하였고, 속도-압력 연성은 SIMPLE 방법을 사용하였다. 난류모델은 Realizable k- ϵ 모델을 사용하였으며 wall function을 적용하였다. k- ϵ 모델은 산업 응용 분야에서 광범위하게 사용되고 있고 CPU 계산 시간의 경제성 등에 있어서 장점이 있으며(Tezdogan et al., 2016b), Sung and Park(2015)은 수치계산의 안정성과 효율을 위해 Realizable k- ϵ 모델을 선박의 동적 시험에 적용하는 등 현재

많이 사용되고 있는 난류모델이다.

자유수면은 VOF(Volume of Fluid)법을 적용하여 해결하였다. 본 연구에서는 파랑의 반사와 간섭현상을 억제하기 위하여 wave damping 기능을 이용하였으며, 선박길이에 해당하는 범위를 유출영역과 횡방향 측면쪽에 적용하여 수치계산을 수행하였다. Time step Δt 는 $0.0025L_{BP}/V_s \sim 0.005L_{BP}/V_s$ 의 범위에서 선택하였다. 본 연구에서는 상하동요와 종동요만을 고려하였으며, 다른 운동 모드는 구속된 상태에서 수치계산을 실행하였다.

수치해석에 사용된 해양파 모델은 Tezdogan et al.(2016b)의 연구를 참고하여 프로그램에서 해당되는 모델을 선택하여 수치계산을 수행하였다. 즉 무차원화된 τ (period number)를 먼저 구하고 ($\tau = T_W(g/h)^{1/2}$), $\tau > 8$ 인 경우에는 first-order Stokes wave를 사용하고 이외의 경우에는 fifth-order Stokes wave를 선택하여 수치계산을 실행하였다. 파고 2미터의 선수방향 규칙파를 기준으로 하였으며, 파장은 0.5L, 0.7L, 1.0L, 1.2L, 1.5L, 2.0L로 구분하여 파장에 의한 유체력 변화 특성을 분석하였다.

2.2 계산영역 및 격자계

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 계산영역과 좌표계를 보여주고 있다. 선수방향이 +x축이며, 선박의 좌현방향이 +y축, 중력의 반대방향이 +z축으로 하는 직교좌표계이다. 계산영역은 FP에서 선수방향으로 1.5L, AP에서 선미방향으로 2.5L, 선수미선에서 횡방향으로 2.0L, 수면에서 상방향으로 3.0T의 거리를 선정하여 수치해석을 수행하였다.

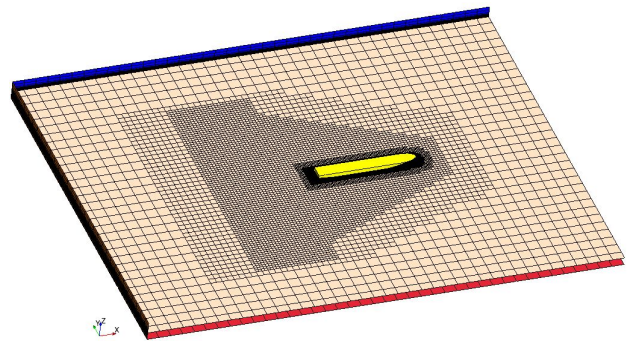


Fig. 1. Computational domain and coordinate system of DTC.

수심은 H , 흘수는 T 로 나타낼 경우, $H/T > 3.0$ 은 deep water, $1.5 < H/T < 3.0$ 은 medium deep water, $1.2 < H/T < 1.5$ 은 shallow water, $H/T < 1.2$ 는 very shallow water로 구분되어 진다는 기준(PIANC, 1992)을 토대로 하여, 본 연구에서는 $H/T = 5.0$ 은 deep water, $H/T = 2.0$ 은 medium deep water, $H/T = 1.5$ 은 shallow water로 나누어 수심별 정수층 및 파랑중 유체력 변화 특성에 대하여 분석하였다. 이와 같은 수심별 구분 조건을 Table 1에 나타내고 있다.

Table 1. Cases for water depth condition

Case No.	H/T	Water depth condition
1	5.0	Deep water
2	2.0	Medium deep water
3	1.5	Shallow water

공간격자 및 선체표면격자는 각각 trimmed mesh와 prism layer를 사용하여 생성하였다. 선박의 선수부분, 선미부분, 자유수면 및 발산과 영역에서의 유동을 보다 정밀하게 구현하기 위해서 base size보다 더 조밀한 크기의 격자를 volumetric control을 이용하여 생성하도록 하였다. 정수중 심수역에서의 격자 민감도 테스트를 실시한 결과, 실험값(El Moctar et al., 2012)과 5.28%(coarse mesh ; 756,332cells), 4.82%(medium mesh ; 1,336,101cells), 4.83%(fine mesh ; 2,869,708cells)의 오차가 발생하는 것을 확인하였다. 이와 같은 검증 결과에 의해 본 연구에서는 medium mesh에 해당하는 격자 크기를 base size로 하여 수치계산에 적용하였다.

심수역과 천수역에서 선박에 작용하는 유체력 특성을 수치시뮬레이션 하기 위하여 본 연구에서는 14,000TEU급 실선 크기의 초대형 컨테이너선(Duisburg Test Case, DTC)을 대상 선박으로 선택하였으며, 기본적인 제원과 형상은 Table 2와 Fig. 2에 나타내고 있다. 보다 상세한 내용은 El Moctar et al.(2012)의 자료를 참조하였다. 또한 저수심에서의 항행을 가정하여 설계속력(25노트)이 아닌 13노트($Fn = 0.113$)를 기준으로 하여 정수중 및 파랑중 수치계산을 실행하였다. 수치해석에 사용된 격자수는 파랑중 계산을 고려하여 자유수면 격자를 증가시킨 160만개 정도이며, 평균 $y+$ 값은 496이었다.



Fig. 2. Side view of DTC container ship.

Table 2. Main particulars of DTC container ship

Parameters	Full-scale
L_{BP} (m)	355.0
B (m)	51.0
T (m)	14.5
Δ (m ³)	173,467.0
C_B	0.661
Sw (m ²)	22,032.0
V_S (knots)	13
Fn	0.113
Rn	2.364×10^9

3. 수치계산 결과

3.1 정수중 유체력 특성 분석

저수심 해역을 항행하는 초대형 컨테이너 선박에 작용하는 파랑에 의한 유체력 특성을 분석하기 전에, 정수중에서의 각 수심별 저항의 변화를 살펴보았다. 비교하고자 하는 저항은 정수중 전저항 계수 C_T ($C_T = R_T / \frac{1}{2} \rho S V^2$)로서 Fig. 3에 나타내고 있다. 수심대 흘수의 비율(H/T)이 2.0인 경우 심수역(H/T=5.0)에 비해서 전저항 계수 값이 8.95% 증가하고 있음을 수치계산을 통하여 알 수 있었다. 반면에 가장 수심이 얇은 천수역(H/T=1.5)의 경우 전저항 계수 값의 증가율은 37.41%로서 매우 큰 폭으로 저항이 커지고 있는 모습을 보여주고 있다. 이러한 천수역에서의 저항 증가는 선회권의 크기와 같은 선박 조종성능과 연관성이 있을 것으로 판단되며, 천수역에서의 선회성 및 침로안정성에 관한 후속 연구가 필요하다고 할 수 있다.

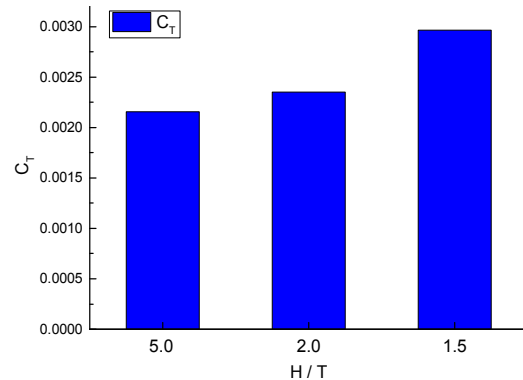


Fig. 3. Total resistance coefficient in still water at three different water depth.

Fig. 4 ~ Fig. 6은 정수중에서 각 수심별 선체에 작용하는 압력분포와 선박 주위의 유동장에 대한 선저쪽 모습을 나타내고 있다. 본 수치계산은 설계속도가 아닌 비교적 저속인 13노트의 상태에서 계산되었기 때문에 설계속도에서 볼 수 있는 선체 주위 파형과는 다른 모습을 보여주고 있다. 먼저 H/T=5.0인 경우에 선체 주위에 작은 물결과 같은 파도가 선수쪽부터 선미방향으로 선측을 따라서 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 반면에 수심이 얇아질수록 선미쪽 파형의 파고는 심수역에 비해서 높아지고 선체 중앙부분의 파고는 넓은 범위로 점점 낮아지고 있는 현상을 볼 수 있다. 그리고 선박에 작용하는 압력분포는 수심이 낮아질수록 선수쪽 압력이 높아지고 있으며, 선체중앙부의 압력은 전체적으로 낮아지고 있다. 선수쪽 압력이 높아지는 것으로 인해 선박의 종방

항 유체력인 전저항 값이 천수역이 될수록 점차 증가하는 원인으로 판단되며, 선체중앙부의 압력 저하는 천수역에서의 선체침하 현상인 스쿼트를 발생하게 하는 원인이라고 추정할 수 있다.

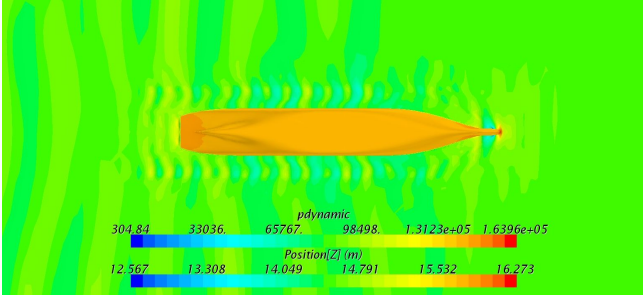


Fig. 4. Pressure and free surface contour in still water at $H/T=5.0$.

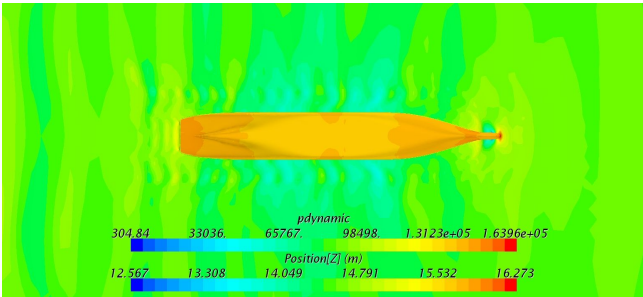


Fig. 5. Pressure and free surface contour in still water at $H/T=2.0$.

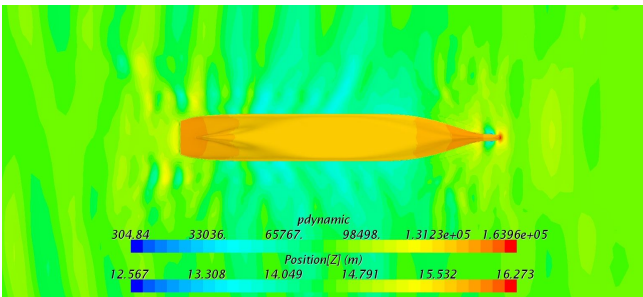


Fig. 6. Pressure and free surface contour in still water at $H/T=1.5$.

3.2 파랑중 유체력 특성 분석

저수심을 항행하는 선박의 안전성에 영향을 미치는 파랑에 의한 유체력은 크게 2가지 요소로 구분되어 질 수 있다. 즉 수평방향으로 작용하는 파표류력과 선체침하 현상인 스쿼트에 영향을 미치는 수직방향의 유체력이 가장 큰 평가요소라고 할 수 있다.

Fig. 7은 파진폭의 제곱에 비례하는 비선형 유체력인 파표류력을 각 파장에 대한 무차원화된 값으로 나타내고 있다.

무차원화는 밀도 ρ , 중력가속도 g , 파진폭 ζ_A , 선폭 B 및 수선간길이 L 을 이용하여 표시하고 있다. 본 연구에서는 선수파만을 대상으로 수치해석을 실시했으므로 파표류력은 길이 방향인 x 방향의 표류력 성분만을 표시하고 있다. 심수역 ($H/T=5.0$)에서는 $\lambda/L=1.2$ 에서 최대값을 나타내고 있으며 장파장 영역에서는 파표류력이 점차 작아지고 있는 모습을 볼 수 있다. 또한 단파장 영역에서는 선수부에서 반사하는 파에 기인하는 원인으로 발생하는 일정한 유체력 값을 나타내고 있다. 심수역에서의 파표류력 분포는 일반적인 선박의 파랑중 부가저항(R_{AW}) 분포와 유사한 모습을 보여주고 있다. 부가저항은 길이 방향으로 작용하는 파표류력과 동일하다고 할 수 있기 때문에(Faltinsen, 1998), 본 수치해석법에 의하여 계산되어진 결과는 정성적으로 심수역에서의 파표류력을 잘 나타내고 있다고 판단된다. 다음으로 $H/T=2.0$ 인 수역과 $H/T=1.5$ 인 천수역에서의 파표류력을 비교해 보면, $H/T=2.0$ 수역의 $\lambda/L=1.0$ 을 제외하고 거의 유사한 경향을 보여주고 있다. 단파장 영역보다는 장파장 영역이 될수록 파표류력은 더욱 작아지고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 $\lambda/L=2.0$ 과 같은 장파장 영역에서는 대부분의 파랑이 선체를 통과하는 투과파이기 때문에 나타나는 현상이라고 추정된다.

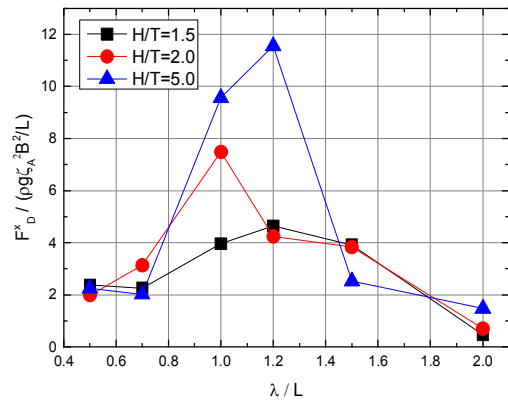


Fig. 7. Mean wave drift force at three different water depth.

Fig. 8~Fig. 10은 각각 수심대 흘수의 비율이 $H/T=5.0$, $H/T=2.0$, $H/T=1.5$ 인 상태에서의 선체에 수직방향으로 작용하는 파랑강제력(F_z) 값을 각 파장별 무차원화된 값으로 변환하여 보여주고 있다. 무차원화는 밀도 ρ , 중력가속도 g , 배수용적 V , 파진폭 ζ_A 및 수선간길이 L 을 이용하여 표시하고 있다. 각 수심에서 선체에 수직 방향으로 작용하는 유체력의 비선형성을 확인하기 위하여 푸리에해석에 의한 1차 성분부터 3차 성분까지를 그래프에 함께 나타내도록 하였다. $H/T=5.0$ 과 $H/T=2.0$ 의 경우, 선체에 작용하는 유체력은 $\lambda/L=0.7$ 에서 최대치를 나타내고 있으며, $\lambda/L=1.0$ 에서 급격

히 작아진 후 장파장 영역으로 되면서 유체력이 증가하고 있음을 확인 할 수 있다. 그리고 $H/T=5.0$ 에서는 비선형성이 거의 나타나고 있지 않지만, $H/T=2.0$ 의 $\lambda/L=1.0, 1.2, 1.5, 2.0$ 에서는 비선형적인 유체력이 작용하고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 $\lambda/L=1.2$ 에서 매우 큰 비선형 유체력이 작용하는데, 이 영역에서 입사파와 해저면과의 간섭영향이 가장 크게 미치고 있기 때문인 것으로 판단된다.

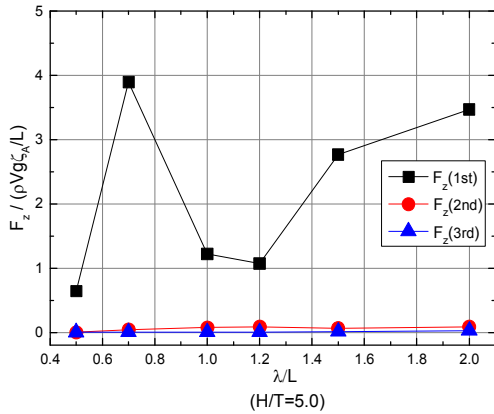


Fig. 8. Heave wave exciting force at $H/T=5.0$.

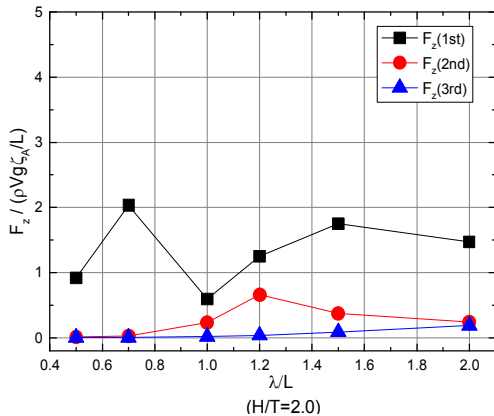


Fig. 9. Heave wave exciting force at $H/T=2.0$.

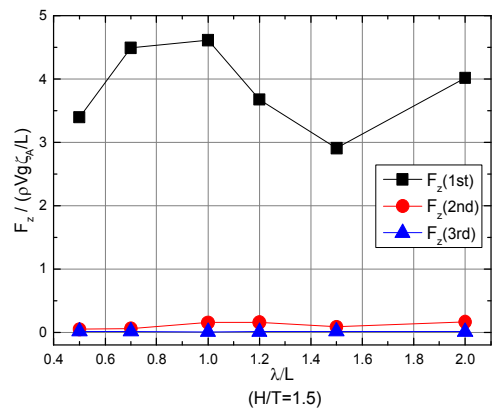


Fig. 10. Heave wave exciting force at $H/T=1.5$.

반면에 $H/T=1.5$ 의 경우에는 단파장 영역에서 수직방향의 유체력 값이 다른 수심의 유체력 값에 비해 상당히 크게 분포되어 있으며, 각 파장에 의한 결과 값도 다른 수심에서 나타나는 경향과 다르게 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 단파장 영역에서의 유체력 증가는 수심이 얕아짐으로 인해 발생하는 천수효과에 의한 것으로 추정되며, 파장과 관계없이 수직방향으로 작용하는 유체력에 미치는 비선형적인 영향은 거의 없는 것으로 보여진다.

Fig. 11 ~ Fig. 13은 파랑중에서 각 수심별 선체에 작용하는 압력분포와 선박 주위의 유동장에 대한 선저쪽 모습을 나타내고 있다. $\lambda/L=1.2$ 인 상태에서 입사파가 선수부에 도달했을 때의 상황을 보여주고 있다. 심수역인 $H/T=5.0$ 의 경우 선

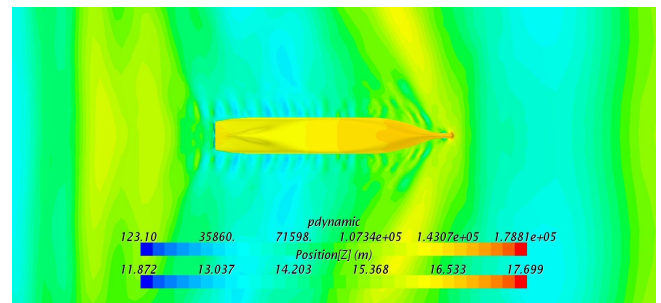


Fig. 11. Pressure and free surface contour in wave at $H/T=5.0$ ($\lambda/L=1.2$).

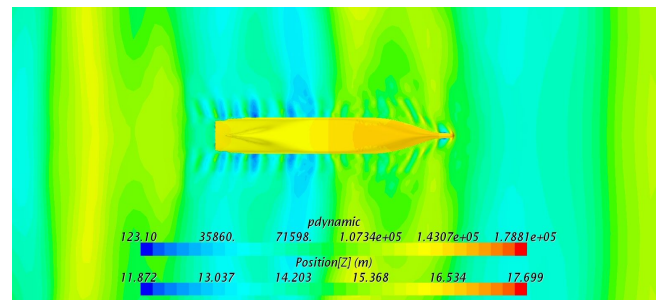


Fig. 12. Pressure and free surface contour in wave at $H/T=2.0$ ($\lambda/L=1.2$).

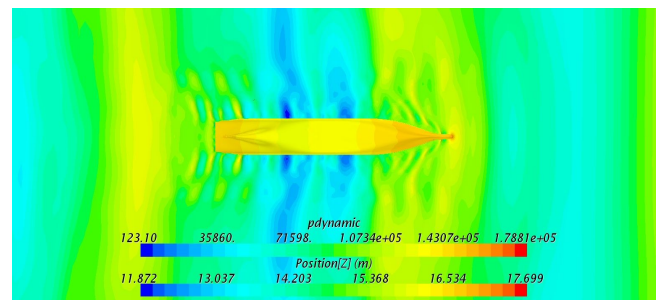


Fig. 13. Pressure and free surface contour in wave at $H/T=1.5$ ($\lambda/L=1.2$).

수부에서의 입사파는 발산파 형태로 형성되어 전파되어 가는 것을 볼 수 있다. 선체중앙부분은 파저에 해당되고 선미 뒤쪽으로는 다시 파도의 파정부분이 나타나고 있는 모습을 보여주고 있다. 그러나 수심이 얕아질수록 이러한 파형은 전혀 다른 모습을 나타내고 있다. 선수쪽의 입사파는 심수역과는 다르게 발산파 형태로 생성되지 않고 있으며, 선체중앙부분의 파저는 심수역보다 더 낮은 형태로 형성되고 있다. 또한 선미 뒤쪽의 파정에 해당하는 파고는 더욱 높아지고 있는 형태를 보여주고 있다. 즉 천수역이 될수록 선체중앙부분의 파형과 선미 뒤쪽 파형의 진폭 차이가 더욱 크게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 그리고 천수역인 $H/T=1.5$ 인 경우에는 선미 부근에 다른 형태의 파형이 생성되어 남아 있는 것을 알 수 있다. 이 파형의 영향에 의해 스케그에서 선미 끝단까지의 압력 분포가 다른 수심에 비해 높게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 선체 주위의 유동장 변화에 의한 압력 등으로 인하여 천수역에서 수직방향으로 작용하는 유체력 값이 다른 수심에 비해 비교적 크게 나타나고 있는 원인이라고 추정되어 진다.

4. 결론

본 연구에서는 저수심 해역을 항행하는 초대형 컨테이너선을 대상으로 정수중에서의 전저항과 파랑중에서의 선박에 수직방향으로 작용하는 파랑강제력과 수평방향으로 작용하는 파표류력에 대하여 CFD에 의한 수치시뮬레이션을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

정수중에서의 유체력 특성을 살펴보면, 심수역($H/T=5.0$)에 비해서 $H/T=2.0$ 인 경우 전저항 계수 값이 8.95% 증가하고 있으며, 천수역($H/T=1.5$)의 경우 전저항 계수 값의 증가율은 37.41%로서 매우 큰 폭으로 저항이 커지고 있는 것을 확인하였다. 선박에 작용하는 압력분포는 수심이 낮아질수록 선수쪽 압력이 높아지고 있으며, 선체중앙부의 압력은 점차 감소되어 천수역에서의 선체침하를 발생시키는 원인이라고 판단된다.

심수역에서의 파표류력 분포는 일반적인 선박의 파랑중 부가저항 분포와 유사한 모습을 보여주고 있다. $H/T=2.0$ 인 수역과 $H/T=1.5$ 인 수역에서의 파표류력을 비교해 보면, $H/T=2.0$ 수역의 $\lambda/L=1.0$ 을 제외하고 거의 유사한 경향을 보여주고 있다. 단파장 영역보다는 장파장 영역이 될수록 파표류력은 더욱 작아지고 있는 것을 알 수 있다.

마지막으로 파랑강제력과 관련해서, $H/T=5.0$ 과 $H/T=2.0$ 의 경우 $\lambda/L=0.7$ 에서 최대치를 나타내고 있으며 $\lambda/L=1.0$ 에서 급격히 작아진 후 장파장 영역으로 되면서 유체력이 증가하고 있는 것을 확인하였다. 또한 $H/T=2.0$ 에서 비선형적인 유

체력 영향을 받고 있는 것으로 보여진다. $H/T=1.5$ 의 경우에는 단파장 영역에서 수직방향의 유체력 값이 다른 수심의 유체력 값에 비해 상당히 크게 분포되어 있다. 천수역이 될수록 선체중앙부분의 파형과 선미 뒤쪽 파형의 진폭 차이가 더욱 크게 나타나고 있는 현황을 확인할 수 있었다.

천수역과 관련된 기존 대부분의 연구는 정수중을 대상으로 선박의 스퀴트와 저항특성에 관한 분야가 대부분이었지만, 본 연구에서는 정수중 뿐만 아니라 파랑중에서의 초대형 컨테이너선 주위 유동장 및 압력분포 등을 해석함으로써 선박의 안전운항과 관련된 유체력들의 영향을 정량적으로 조사·분석하였다.

향후 Reynolds Stress Model(RSM)과 같은 다른 난류모델을 이용한 수치해석을 실시하여 난류모델의 선택에 의한 수치계산 결과의 차이 등에 대하여 연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2017년 군산대학교 수산과학연구소 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] El Moctar, O., V. Shigunov and T. Zorn(2012), Duisburg Test Case: Post-Panamax Container Ship for Benchmarking, Ship Technology, Res 59(3), pp. 50-64.
- [2] Faltinsen, O. M.(1998), Sea Loads on Ships and Offshore Structure, Cambridge University Press, p. 145.
- [3] Gourlay, T.(2008), Slender-Body Methods for Predicting Ship Squat, Ocean Engineering, Vol. 35, No. 2, pp. 191-200.
- [4] Jachowski, J.(2008), Assessment of Ship Squat in Shallow Water Using CFD, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 27-36.
- [5] Kijima, K., R. Tanaka, Y. Furukawa and T. Kaneko(2001), Simple Prediction Method on Squat, Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, No. 103, pp. 101-110.
- [6] Lee, S. W.(2015), A Study on the Manoeuvrability as Function of Stern Hull Form in Shallow Water, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 21, No. 5, pp. 552-557.
- [7] Oortmerssen, G. V.(1976), The Motions of a Ship on Shallow Water, Ocean Engineering, Vol. 3, pp. 221-255.
- [8] PIANC(1992), Capability of Ship Manoeuvring Simulation

Models for Approach Channels and Fairways in Harbours.
Report of Working Group No. 20 of Permanent Technical
Committee II, Supplement to PIANC Bulletin No. 77.

- [9] Ruiz, M. T., S. De Caluwe, T. Van Zwijusvoorde, G. Delefortrie and M. Vantorre(2015), Wave Effects in 6DOF on a Ship in Shallow Water, MARSIM 2015.
- [10] Sung, Y. J. and S. H. Park(2015), Prediction of Ship Manoeuvring Performance Based on Virtual Captive Model Tests, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 52, No. 5, pp. 407-417.
- [11] Tezdogan, T., A. Incecik and O. Turan(2016a), A Numerical Investigation of the Squat and Resistance of Ships Advancing through a Canal Using CFD, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 21, No. 1, pp. 86-101.
- [12] Tezdogan, T., A. Incecik and O. Turan(2016b), Full-scale Unsteady RANS Simulations of Vertical Ship Motions in Shallow Water, Ocean Engineering, Vol. 123, pp. 131-145.
- [13] Yao, J. X. and Z. J. Zou(2010), Calculation of Ship Squat in Restricted Waterways by Using a 3D Panel Method, 9th International Conference on Hydrodynamics, pp. 489-493.
- [14] Yun, K. H., B. J. Park and D. J. Yeo(2014), Experimental Study of Ship Squat for KCS in Shallow Water, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 51, No. 1, pp. 34-41.

Received : 2017. 07. 27.

Revised : 2017. 09. 22. (1st)

: 2017. 09. 28. (2nd)

Accepted : 2017. 10. 28.