creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

선수파 중 선박의 부가저항과 운동성능 수치해석 및 검증

Numerical Simulations and Validation of Added Resistance and Motions of a Ship in Head Waves

지도교수 박선호

2017년 2월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

서 성 욱

본 논문을 서성욱의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 서 영 교 (인)

위 원 박 선 호 (인)

위 원 하 승 현 (인)

2017년 1월 3일

한국해양대학교 대학원

Collection @ kmou

목 차

List of Tables iv
List of Figures v
Abstract vii

1. 서 론
1.1 연구 배경 1
1.2 연구 동향 2
1.2.1 포텐셜 이론 (Potential theory) 2
1.2.2 EFD (Experiment Fluid Dynamics) 3
1.2.3 CFD (Computational Fluid Dynamics) 4
1.2.4 OpenFOAM 5
1.3 연구 내용 6

2. 수치 모델링
2.1 지배방정식 8
2.2 체적비 이송방정식 (VOF) 9
2.3 난류 모델링 10
2.4 6자유도 운동 12
2.4.1 격자 변형 기법 12
2.4.2 6자유도 운동 해석 기법 13
2.5 수치 수조 구현 17
2.5.1 Relaxation zone 17
2.5.2 파 이론 18

Collection @ kmou

3. 해석 방법

3.1 푸리에 시리즈 (Fourier Series) ····· 20

3.2 부가저항 해석 ····· 21

3.3 운동응답 해석 ····· 22

3.4 불확실성 해석절차 ····· 22

4. 대상선의 제원 및 해석조건

4.1 대상선 ····· 25

4.2 해석 조건 ····· 26

4.3 시뮬레이션 조건 ····· 27

4.4 수치 방법 ····· 29

5. 해석결과

5.1 정수 중 ····· 30

5.2 파랑의 생성 ····· 32

5.3 불확실성 해석 ····· 35

5.4 부가저항 및 운동응답 수치해석 ····· 41

5.5 파랑별 선박의 부가저항 및 운동성능 변화 ····· 50

6. 결론 ····· 60

참고문헌 ····· 62

Collection @ kmou

List of Tables

Table 4.1 Principal particulars of KCS model ····· 25
Table 4.2 Simulation conditions in calm water and regular head waves ····· 27
Table 5.1 Result in calm water ····· 30
Table 5.2 1st harmonic wave amplitude in different wave conditions ····· 34
Table 5.3 Grid sizes for the uncertainty analysis ····· 35
Table 5.4 Grid length h for refinement ratio ····· 37
Table 5.5 Result of grid uncertainty analysis for Case 3 ····· 40
Table 5.6 C_T in difference wave conditions ····· 47
Table 5.7 Added resistance coefficient in difference wave conditions ····· 47
Table 5.8 Heave transfer function in difference wave conditions ····· 48
Table 5.9 Pitch transfer function in difference wave conditions ····· 48

Collection @ kmou

List of Figures

Fig. 1.1 Guide line of EEDI ····· 1
Fig. 2.1 Description of Earth-fixed and Ship-fixed coordinate systems ····· 14
Fig. 2.2 Relaxation zone with qualitative weighting function in wave generation zone and damping zone ····· 18
Fig. 4.1 KCS body plan and hull form ····· 26
Fig. 4.2 Domain extent, boundary conditions, and grid ····· 28
Fig. 4.3 Simulation domain for wave generation and damping zones ····· 29
Fig. 5.1 Wave pattern around KCS in calm water for free and fixed motions 31
Fig. 5.2 Hull wave profiles for free and fixed motions ····· 32
Fig. 5.3 Time history of wave elevation in different wave ····· 34
Fig. 5.4 KCS bow(left) and stern(right) magnified view of three meshes ····· 36
Fig. 5.5 One period of encounter for wave amplitude, C_T, σ_{aw}, TF_3, TF_5 for grid convergence study (Case 3, λ/L_{PP}=1.15) ····· 39
Fig. 5.6 Time history for C_T, heave and pitch motion of Case 1 (λ/L_{PP}=0.65) 42
Fig. 5.7 Time history for C_T, heave and pitch motion of Case 2 (λ/L_{PP}=0.85) 43
Fig. 5.8 Time history for C_T, heave and pitch motion of Case 3 (λ/L_{PP}=1.15) 44
Fig. 5.9 Time history for C_T, heave and pitch motion of Case 4 (λ/L_{PP}=1.37) 45
Fig. 5.10 Time history for C_T, heave and pitch motion of Case 5 (λ/L_{PP}=1.95) 46
Fig. 5.11 Results of added resistance coefficient, transfer functions of heave and pitch motions in different wave conditions ····· 50
Fig. 5.12 One encounter period of wave amplitude, added resistance coefficient, heave and pitch motions for various wave conditions ····· 53
Fig. 5.13 Wave pattern (top view) and motions (side view) over one encounter period of Case 1 (λ/L_{PP}=0.65) ····· 54

Collection @ kmou

Fig. 5.14 Wave pattern (top view) and motions (side view) over one encounter period of Case 2 (λ/L_{PP}=0.85) ····· 55
Fig. 5.15 Wave pattern (top view) and motions (side view) over one encounter period of Case 3 (λ/L_{PP}=1.15) ····· 56
Fig. 5.16 Wave pattern (top view) and motions (side view) over one encounter period of Case 4 (λ/L_{PP}=1.37) ····· 57
Fig. 5.17 Wave pattern (top view) and motions (side view) over one encounter period of Case 5 (λ/L_{PP}=1.95) ····· 58

Collection @ kmou

Numerical Simulations and Validation of Added Resistance and Motions of a Ship in Head Waves

Seo, Seonguk

Department of Ocean Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

As the International Maritime Organization (IMO) recently introduced the Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ship buildings and the Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) for ship operations, thus an accurate estimation of added resistance of ships advancing in waves has become necessary. In the present study, OpenFOAM, computational fluid dynamics libraries of which source codes are open to the public, was used to predict the added resistance and motions of a ship. Unstructured grid using a hanging-node and cut-cell method was used to generate find grid around a free-surface and ship. A dynamic deformation mesh method was used to simulate the motions of the ship. Five wave lengths from a short wave length (λ/L_{PP}=0.65) to a long wave length (λ/L_{PP}=1.95) were considered as head waves. The grid uncertainty was evaluated with respect to three grid systems for a wave length of λ/L_{PP}=1.15. The predicted added resistance, and heave and pitch motions with various head waves were compared with the data of model experiments. The wave pattern around the ship and motions of the ship analyzed with respect to individual waves.

KEY WORDS: Added resistance 부가저항; Ship motion 선박운동; Head wave 선수파; Uncertainty assessment 불확실성 해석; Computational fluid dynamics 전산유체역학; OpenFOAM 오픈폼;

Collection @ kmou

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

최근 전 세계적으로 지구 온난화의 주범인 온실가스 배출량 감축을 위한 친환경 운동에 대해 관심이 증가하고 있다. 이전부터 기후변화협약 및 교토의정서에 의하여 각종 산업에서 CO_2 배출량을 줄이고 있었으나, 조선 및 해양산업에서는 선박대기오염을 제외한 해양오염문제만이 주된 관심사였다. 그러나 최근, 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서 선박에서 대기로 방출하는 온실가스의 양을 규제하기 위해 기존의 운항중인 선박에 대해서는 선박운항 연비지표(Energy Efficiency Operational Indicator, EEOI), 신조선 설계에 대해서는 선박제조 연비지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI)를 도입하였다.

신조선 설계에 대한 에너지효율지수로서 EEDI는 신조선이 화물 1톤을 싣고 1마일을 항해 시 발생하는 이산화탄소 발생량을 의미한다. Fig. 1.1과 같이 단위운송 당 배출되는 CO_2의 양이 요구 EEDI 기준선보다 높은 선박은 운항이 불가능해진다(황태규, 2012). 또한 요구 EEDI는 단계적으로 강화할 예정이다. 이에 따라 조선 및 해운업계에서는 선박 연료 및 운항 효율에 대한 관심을 가지기 시작하였으며, 선박에 부가적인 장치를 장착하여 선체의 저항을 감소시키거나 추진 장치 주변 유동을 변화시켜 추진 효율을 향상시키는 방법 등 온실가스 감축을 위한 연구들을 진행하고 있다.

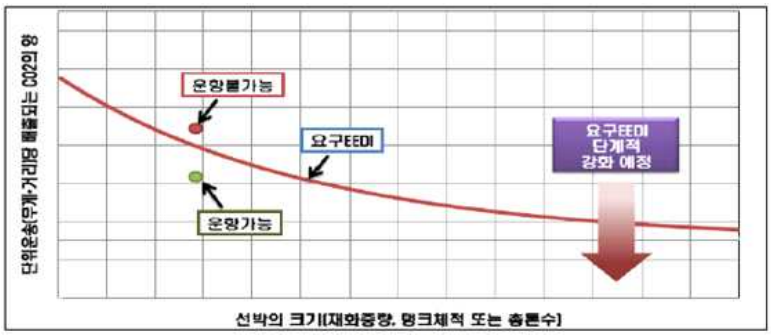


Fig. 1.1 Guide line of EEDI

Collection @ kmou

또한, 실제 해상에서 선박의 부가저항을 추정하고 이를 효과적으로 감소시키는 방법들이 고려되고 있다. 부가저항이란 선박이 실제 해상에서 운항하는 경우 바람이나 파랑에 의해 추가적으로 받는 저항을 의미하며, 일반적으로 부가저항은 정수 중에서 운항하는 저항 대비 약 15~30%까지 커지는 경우도 발생한다(Arribas, 2007). 따라서 신조선 설계 단계에서 선박의 운항 효율을 향상시키기 위해 우선적으로 실제 운항 상태에서의 선박의 부가저항을 정확히 예측해야 한다.

선박의 부가저항을 추정하는 방법에 있어 초기에는 주로 모형실험(Experimental Fluid Dynamics, EFD) 방법 및 포텐셜 이론(Potential theory) 방법을 기반으로 연구가 주로 진행되었다. 최근, 컴퓨터의 급속한 발달로 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 방법을 이용한 수치적 연구가 비약적인 발전을 이루고 활용 폭 또한 넓어지면서 전산유체역학을 이용한 선박의 부가저항 해석 연구도 활발히 진행되고 있다.

선박의 부가저항 수치해석 결과는 격자의 상태나 해석방법, 해석 프로그램에 따라 값의 차이가 발생한다. 이러한 부가저항 결과 값의 분산을 줄이기 위해 2010 Gothenburg CFD Workshop (Larsson, et al., 2013), 2015 Tokyo CFD Workshop (Larsson, et al., 2015) 등 각 기관마다 다양한 수치해석 프로그램으로 해석한 부가저항 값을 비교 및 검토하고 있으며, 보다 더 정확한 부가저항 값을 얻기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

1.2 연구 동향

1.2.1 포텐셜 이론(Potential theory)

파랑 중 선박의 운동 및 부가저항 추정에 관한 수치적인 접근법은 주로 포텐셜 이론에 입각한 수치해석 기법이 주로 사용되었다. Far-field 방법은 Maruo (1960)에 의해 제안되었으며, 무한 영역에서 유체의 모멘텀 플럭스와 생성된 파의 에너지를 이용하여 선체의 부가저항을 계산한다. Far-field 방법은 3차원 효과 및 선박의

Collection @ kmou

전진속도를 고려하면서 상대적으로 계산시간이 빠른 장점이 있으며, Gerritsma and Beukelman (1972)은 Far-field 방법을 정교하게 개선하였다. Near-field 방법은 베르누이 방정식과 테일러 전개식을 사용하여 선체 주위의 동압력을 직접 적분하는 방법이다. Faltinsen, et al. (1980)은 세장체 이론을 적용한 운동 해석 기법에 Near-field 방법을 적용하여 부가저항을 계산하였다. 이외에도, Fang and Chen (2006)은 주파수 영역에서의 그린 함수법(Green function method)을 이용한 Near-field 방법을 사용하여 부가저항을 수행한 바 있다. Joncquez, et al. (2008), Kim and Kim (2011)은 시간영역에서 고차의 랜킨패널법(Rankin panel method)을 이용하여 규칙파 및 불규칙파에 대한 부가저항을 계산하였다. Seo, et al. (2013)은 파랑 중 선박의 부가저항 계산을 3가지 수치해석 기법(Strip method, Rankine panel method, Cartesian grid method)으로 각각 계산을 수행하여 각 기법의 계산 정도를 비교하였다.

1.2.2 EFD(Experiment Fluid Dynamics)

선박의 부가저항에 대한 초기 연구로는 주로 실험에 의존하여 진행되었다. Gerritsma and Beukelman (1972)의 fast cargo ship에 대한 부가저항 연구를 시작으로 Strom-Tejsen (1973)은 Series 60 선형을, Nakamura and Naito (1977)은 S175 컨테이너선에 대한 부가저항 연구를 수행하였다. Journee (1992)는 중앙단면 계수(C_m)와 *Length/Breath* 비가 다른 4가지 Wigley 선형에 대해 체계적인 부가저항 실험을 수행하였다. Park, et al. (2015)는 모형실험에서 여러 가지 조건에 대한 반복실험을 통해 부가저항 실험값의 신뢰도를 파악할 수 있는 체계적인 불확실성 연구를 제시하였다.

최근에는 부가저항에 대한 실험적 연구로서 파랑 중 부가저항의 예측이외에도 파랑 중 선박의 형상이 부가저항에 미치는 영향에 관한 연구들이 지속적으로 진행하고 있으며, 부가저항을 감소시키기 위해 선수부 자체의 형상을 변형시키는 방법이 연구되고 있다. 선수부 자체의 형상 변형 모델은 대표적으로 일본에서 제안된 “AX-bow”와 “Leadge bow”가 있다. “AX-bow”는 흘수선 위쪽의 선수부 형상을 날카롭게 변형하여 입사파와 수선이 이루는 각도를 줄여 반사파를 감소시키는 장치이다. “Leadge bow”는 선수부의 자체 형상을 날카롭게 만들어 파랑에 의한

Collection @ kmou

부가저항을 감소시키는 장치이다. Kazuzyoshi, et al. (2004)는 저속 벌크선의 “AX-bow”의 수면 상부 선수형상을 날카롭게 변형함으로서 부가저항이 최대 30% 감소하는 효과를 실선실험을 통해 확인하였다. Hirota, et al. (2005)는 선박의 “Beak-bow”, “AX-bow”, “Leadge-bow”에 대한 부가저항 모형실험을 통해 앞부분이 선형이 날씬한 “AX-bow”의 경우 파랑 중 선박의 부가저항을 감소시키는 효과에 대해 연구하였다. Kuroda, et al. (2011)은 단파장 영역에서 컨테이너선의 기본선형을 기준으로 선수부의 형상을 다양하게 변화시키면서 선수부의 형상이 부가저항에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

1.2.3 CFD(Computational Fluid Dynamics)

CFD 방법은 시간 평균된 Reynolds average Navier-Stokes(RANS) 방정식을 계산하여 점성의 영향을 고려하는 방법으로, 비선형성이 강한 큰 유입파고 또는 높은 속도로 운항하는 선박에 대한 부가저항 계산 및 6자유도 운동 계산에 대해 포텐셜 이론보다 신뢰성이 높은 결과를 얻을 수 있다. 포텐셜 이론보다 시간 비용이 비싼 점이 있으나, 최근 컴퓨터의 급속한 발달 및 보급으로 계산 시간이 단축되고 있으며 제어할 수 있는 격자수가 점차 증가하여 복잡한 형상도 유체해석이 가능하다. 이에 따라 CFD를 이용한 선박의 저항성능 및 부가저항 해석에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

Sato, et al. (1999)는 밀도함수법(The marker-density-function method)을 이용하여 Wigley 선형과 series 60 선형을 대상으로 파랑 중 heave와 pitch 운동에 대해 연구하였다. Orihara and Miyata (2003)은 WISDAM-X라는 프로그램과 중첩 격자계(overlapping grid system)를 이용하여 SR-108 선박에 대한 부가저항을 해석하였으며, Weymouth, et al. (2005)는 CFDSHIP-IOWA 프로그램과 체적 추적법(surface tracking methods)를 이용하여 변형된 Wigley hull 선형에 대한 부가저항과 2자유도(heave & pitch)운동에 대해 고찰하였다. 동일한 방법으로 Wilson, et al. (2006)은 DTMB 5512 선형에 대한 roll motion을 해석하였다. Carrica, et al. (2007)은 중첩 격자계와 single-phase level-set 기법을 이용하여 DTMB 5512 선형에 대해 파랑 중 부가저항을 해석하였다. Simonsen, et al. (2013)은 KCS 선박에 대해

Collection @ kmou

URANS codes를 사용한 CFD 방법과 모형시험 결과를 비교 및 검증하였다. 비슷한 방법으로 Sadat-Hosseini, et al. (2013)은 KVLCC2 선박을 전후 동요 운동을 구속한 상태와 구속하지 않은 상태로 구분하여 CFD 방법과 모형시험 결과를 비교 및 검증하였다. Park, et al. (2013)은 WAVIS 2.2프로그램을 이용하여 DTMB 5415 선형을 대상으로 두 가지 선속 조건에 대한 부가저항을 해석하였으며, 선체의 운동을 비관성 좌표계법(non-inertial coordinates system)을 이용하여 유체의 상대운동으로 치환하는 방법을 이용하였다. Tezdogan, et al. (2015)는 KCS 선박을 실제 크기에서 저속운항을 할 때, CFD 방법 및 포텐셜 방법에 대한 계산 결과를 모형시험 결과와 비교한 후 계산방법 차이에 따른 온실가스 배출량 차이를 비교하였다. Oh, et al. (2015)는 랜킨패널법(WISH)과 상용 CFD(STAR-CCM+)을 이용하여 AFRAMAX급 유조선의 파랑 중 부가저항을 계산하였고 모형시험과 비교하였다. Sadat-Hosseini, et al. (2015)는 KCS 선박을 대상으로 FORCE Technology 기관과 IIHR 기관에서 수행한 모형시험 결과, CFD 해석결과 및 Potential Flow(PF) 부가저항 해석결과에 대해 종합하여 비교하였다.

1.2.4 OpenFOAM(Open Field Operation And Manipulation)

OpenFOAM은 소스코드가 공개되어 무료로 전산유체역학(CFD)를 해석할 수 있는 프로그램이다. 유한 체적법(Finite Volume Method, FVM)으로 편미분 방정식을 해석하는 구조이며 C++ 언어로 작성되어 있다. 1996년 영국 Imperial College에서 Henry Weller 박사와 Hrvoje Jasak 박사가 FOAM이라는 이름으로 개발이 시작되었으며 현재 누구나 사용할 수 있도록 오픈되어 있다. OpenFOAM은 압축성, 비압축성, 다상유동, 연소, 열전달 등의 문제에 대해 다양한 기본적인 해석 solver와 예제들을 제공하고 있으며 병렬계산을 지원한다. 상용 프로그램과는 달리 본인이 원하는 방법으로 solver를 수정이 가능하며 라이센스 비용이 없는 장점이 있다.

최근 OpenFOAM 해석 프로그램을 사용하여 조선과 해양산업 연구들이 진행되고 있다. 특히, OpenFOAM을 이용한 선박 저항 연구로서, Park, et al. (2013)은 OpenFOAM 소스공개 라이브러리를 사용하여 조선 및 해양 산업에 활용할 수 있는 선체 저항 성능 해석 라이브러리인 SNUFOAM을 개발하였다. Seo, et al. (2016)는

Collection @ kmou

OpenFOAM을 이용하여 선체 저항성능에 대해 격자 크기, 시간 간격, 반복 횟수에 대한 종합적인 불확실성을 고찰하였다. Shen, et al. (2015)는 OpenFOAM에 동적 중첩격자 기술(dynamic overset grid technique)을 적용하여 KCS 선박의 추진성능 및 운항성능을 평가하였다. Vukcevic, et al. (2016a, 2016b)는 비점성 해석코드와 점성 해석코드를 결합한 유체동역학 모델을 제시하였다.

1.3 연구 내용 및 논문의 구성

본 연구에서는 오픈소스 라이브러리인 OpenFOAM을 사용하여 KCS 선형에 대한 선수파 중 부가저항과 운동응답을 계산하였다. OpenFOAM의 표준 solver 중 체적비 이송방정식을 이용하여 2상 유동(two-phase flow)을 해석할 수 있고 격자변형기법을 통해 동적 자세변화를 고려할 수 있는 interDyMFoam solver를 사용하였다. 2.1~2.3장에서 사용한 지배방정식, 체적비 이송방정식 및 k-w SST 난류모델에 대해 자세하게 설명하였고, 2.4장에 격자변형기법을 통한 6자유도 운동 해석에 대해 설명하였다.

수치 수조의 파랑 환경을 구현하기 위해 interDyMFoam solver에 waves2Foam을 결합하였다(Jacobsen, et al. 2012). 수치 수조에서 파랑을 생성할 때, 반사파 및 산란파의 제거가 필요하다. 또한 waves2Foam 라이브러리에서 파랑의 파속(wave speed)은 파주기(wave period)와 파수(wave number)에 의해 생성될 수 있지만, 운항하는 선박의 선속(ship speed)은 없기에 이 부분을 추가하였다. 2.5장에서 수치수조 내에 파랑을 생성하는 방법, Relaxation zone에서의 파랑의 생성과 소멸을 통해 반사파 및 산란파를 제거하는 방법 및 파 이론에 선속 항을 추가한 내용을 다루었다.

3장에서는 선박의 부가저항 및 운동응답에 대한 해석방법을 소개하였다. 또한, CFD에서 발생할 수 있는 불확실성을 평가하기 위해 대표적으로 격자 크기에 대한 불확실성 평가방법에 대해 소개하였다. 4장에서는 대상선의 제원 및 시뮬레이션 조건에 대해 설명하였고, 사용한 수치방법에 대해 간략히 소개하였다.

5장에서는 해석한 결과에 대해 논의하였다. 선박의 부가저항을 해석하기 위해 먼저

Collection @ kmou

정수 중 선박의 저항성능을 해석한 후, 단파(λ/L_{PP} = 0.65)에서 장파(λ/L_{PP} = 1.95)까지 5개의 파장으로 나누어 상하동요와 종동요 운동 성능과 부가저항을 해석하였다. 계산된 수치해석 결과를 검토하기 위해 Sadat-Hosseini, et al. (2015) 및 2015 Tokyo CFD Workshop에서 제공한 모형실험 결과와 비교하였으며, 격자 크기에 대한 불확실성 해석을 통해 검증하였다. 마지막으로 파랑별 선박의 운동성능 및 선박주위의 파형변화에 대해 설명하였다. 6장에서는 본 연구에 대한 결론을 도출하였다.

Collection @ kmou

제 2 장 수치 모델링

2.1 지배방정식

비압축성 유동에서 속도와 압력을 계산하기 위해 질량 보존방정식과 모멘텀 보존방정식을 지배방정식으로 사용하였으며 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot \overrightarrow{v_m} = 0 \tag{2.1}$$

$$\frac{\partial \rho_m \overrightarrow{v_m}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_m \overrightarrow{v_m} \overrightarrow{v_m}\right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\overline{\overline{\tau}}\right) + S \tag{2.2}$$

여기에서 ρ는 밀도, $\vec{v}$는 속도벡터, p는 정압력을 나타낸다. S는 소스항을 의미하고, 이러한 소스항에는 중력가속도가 포함된다. $\overline{\overline{\tau}}$는 점성 응력 텐서를 나타내고 비압축성 유동에서 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{\overline{\tau}} = \mu\left(\nabla \overrightarrow{v_m} + \nabla \overrightarrow{v_m^T}\right) \tag{2.3}$$

여기서, 아래첨자 m은 혼합류를 의미하고 혼합류에서의 밀도(ρ)와 점성계수(μ)는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_m = \alpha_{air}\rho_{air} + \alpha_{water}\rho_{water} \tag{2.4}$$

$$\mu_m = \alpha_{air}\mu_{air} + \alpha_{water}\mu_{water} \tag{2.5}$$

여기서, α는 체적분율을 나타내고, 제어체적에서 하나의 유체가 가지는 부피비를

Collection @ kmou

의미한다. 아래첨자 *air*과 *water*는 공기와 물을 의미한다.

난류를 고려하기 위해 운동량 보존 방정식을 시간평균하면 다음과 같이 Reynolds 응력항이 생성된다.

$$-\rho_m \overline{v_m v_m} = \mu_t \left(\nabla \overline{v_m} + \nabla \overline{v_m^T} \right) I \tag{2.6}$$

여기서, μ_t는 난류점성계수이고, I는 단위 텐서를 나타낸다.

2.2 체적비 이송방정식(VOF)

체적비 이송방정식은 2상 유동에서 물과 공기가 차지하는 유체 체적의 부피비를 통해 자유수면의 위치와 움직임을 표현하는 수치기법이다(Hirt and Nichols, 1981). 체적비 이송방정식은 상과 상이 서로 간섭하지 않는 유동에 적합하며, 격자 내 차지하는 체적분율(α)를 사용하여 경계면을 표현할 수 있다. 식은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_m) + \nabla \cdot \left(\alpha \rho_m \overline{v_m} \right) = -C_{ad} \nabla \cdot \left(\alpha (1-\alpha) \overline{v_r} \right) \tag{2.7}$$

여기서, $\alpha = 1$은 격자가 완전히 물로 채워진 경우, $\alpha = 0$는 격자가 완전히 공기로 채워진 경우를 의미한다. 자유수면에 위치하는 격자의 경우 α의 값은 $0 < \alpha < 1$의 값에 위치한다. 오른쪽 항은 인위적으로 해의 확산을 감소시키기 위한 확산항이다(Lee and Rhee, 2015; Park, et al., 2016). 여기서 C_{ad}는 확산 감소를 위한 상수이고, 0과 1사이의 값을 가진다. 본 논문에서는 파형이 최대한 깨지지 않는 수인 0.8을 사용하였다. $\overline{v_r}$은 자유수면 경계면에서의 속도를 나타낸다.

Collection @ kmou

2.3 난류 모델링

운동량 보존 방정식을 시간평균하면 속도 및 압력은 평균화된 속도와 압력으로 바뀌고 여러 가지 난류 변동들 사이의 상호작용으로 인하여 추가적인 응력항이 식 (2.6)과 같이 생성된다. 여기서 생성되는 난류점성계수 μ_t는 난류 모델로부터 비교적 간단하게 계산할 수 있다. 본 논문에서의 난류 모델은 $k-w$ SST으로 선정하였다.

$k-w$ SST (Shear Stress Transport) 난류 모델은 Menter (1994)에 의해 소개되었다. $k-w$ SST 난류 모델은 기존의 $k-\epsilon$ 모델과 $k-w$ 모델을 혼합한 혼성 함수(Blending function)이다. 벽 인접 지역에서는 $k-w$ 모델을 사용하고 벽에서부터 먼 충분히 발달된 난류 지역에서는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용함으로써, 두 모델이 가지고 있는 장점을 모두 살린 형태이다. 레이놀즈 응력의 계산식과 k-방정식은 동일하지만 ϵ-방정식은 $\epsilon = kw$ 방정식으로 치환되어 w-방정식으로 전환된다.

$k-\epsilon$의 지배방정식은 식 (2.8)과 같이, $k-w$ SST의 지배 방정식은 식 (2.9)와 같이 수학적으로 표현된다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \bullet \nabla k - \nabla \bullet (D_k \nabla k) + \beta_k k = F_k \tag{2.8}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \bullet \nabla w - \nabla \bullet (D_w \nabla w) - (1 - F_1) CD_{kw} + \beta_w w = F_w \tag{2.9}$$

여기서, k는 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)를 의미하고, w는 난류 진동(turbulent frequency)을 의미한다. D_k, D_w는 확산(diffusion) 항을, β_k, β_w는 소산(dissipation) 항을, F_k, F_w는 생성(production) 항을 의미한다. CD_{kw}는 교차 확산(cross diffusion) 항으로 혼성 함수에서 난류 모델 사이를 매끄럽게 연결하기 위한 값으로서 사용된다. 이 값들은 다음과 같다.

$$D_k = \nu + \sigma_k \nu_t, \; D_w = \nu + \sigma_w \nu_t \tag{2.10}$$

Collection @ kmou

$$\beta_k = \beta^* w,\ \beta_w = \beta w \tag{2.11}$$

$$F_k = \min\left[2\nu_t \left| \frac{\nabla u + (\nabla u)^t}{2} \right|^2;\ c_1 \beta^* kw\right],\ F_w = 2\gamma \left| \frac{\nabla u + (\nabla u)^t}{2} \right|^2 \tag{2.12}$$

$$CD_{kw} = \max\left(\frac{2\sigma_{w_2}}{w} \nabla k \bullet \nabla w;\ 10^{-10}\right) \tag{2.13}$$

Reynolds stress항으로 생성되는 난류운동점성계수(turbulent kinematic viscosity coefficient)는 다음과 같이 계산된다.

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max\left[a_1 w;\ F_2 \sqrt{2} \left| \frac{\nabla u + (\nabla u)^t}{2} \right|\right]} = \min\left[\frac{k}{w};\ \frac{a_1 k}{F_2 \sqrt{2} \left| \frac{\nabla u + (\nabla u)^t}{2} \right|}\right] \tag{2.14}$$

혼성 함수(blending function)는 벽면으로부터 먼 지역에서 표준 $k-\epsilon$ 모델로 계산한 점성계수와 벽 근처에서 변환된 $k-w$ 모델로 계산한 점성계수의 차이로 인한 수치적 불안전성을 보완하기 위해 사용한다. 혼성 함수는 F_1, F_2로 나타내고, 0 ~ 1 사이의 값을 가진다. 식은 다음과 같다.

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4),\ F_2 = \tanh(\arg_2^2) \tag{2.15}$$

$$\arg_1 = \min\left\{\min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* wy};\ \frac{500\nu}{wy^2}\right);\ \frac{4\sigma_{w_2} k}{CD_{kw} y^2}\right];\ 10\right\} \tag{2.16}$$

$$\arg_2 = \min\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* wy};\ \frac{500\nu}{wy^2}\right);\ 100\right] \tag{2.17}$$

여기서, y는 가까운 벽으로부터 해당 지점까지의 거리를 의미한다.

Collection @ kmou

C는 $k-w$ 모델에서 사용하는 상수 C_1과 $k-\epsilon$ 모델에서 사용하는 상수 C_2 사이를 연결하는 역할을 하며 벽과 경계층 끝의 사이를 부드럽게 연결하기 위해 사용된다. 식은 다음과 같다.

$$C = F_1 C_1 + (1 - F_1) C_2 \tag{2.18}$$

여기서, $k-\epsilon$ value, free stream, y >> 0 조건에서 F_1은 0의 값을, $k-w$ value, boundary layer, y ≅ 0 조건에서 F_1은 1의 값을 의미한다.

앞서 언급되지 않은 항은 모두 상수항으로 표현된다. $\sigma_{k_1} = 0.85$, $\sigma_{k_2} = 1$, $\sigma_{w_1} = 0.5$, $\sigma_{w_2} = 0.856$, $\beta_1 = 0.075$, $\beta_2 = 0.0828$, $\gamma_1 = 0.5532$, $\gamma_2 = 0.4403$, $\beta^* = 0.09$, $a_1 = 0.31$, $c_1 = 10.0$, $\kappa = 0.41$으로 정의되며, 여기서 아래첨자 1은 $k-w$에서의 값을 의미하며 아래첨자 2는 $k-\epsilon$에서의 값을 의미한다.

2.4 6자유도 운동

파랑 중 선박의 6자유도 운동 해석을 위해서는 선체에 작용하는 힘과 모멘트를 계산하여 선체의 운동 변위와 각도를 계산해야 한다. 선박의 6자유도 운동은 전후동요(surge), 좌우동요(sway), 상하동요(heave)와 같은 병진운동과 횡동요(roll), 종동요(pitch), 선수동요(yaw)와 같은 회전운동으로 구분된다. 6자유도 운동을 해석하기 위해 물체의 움직임으로 인한 격자의 변형 기법과 6자유도 운동 해석 기법이 필요하다.

2.4.1 격자 변형 기법

파랑하중에 의한 선체의 움직임을 구현하기 위해서는 격자를 변형시켜야 한다. 전체 도메인 내에서 격자의 변형은 라플라스 방정식을 이용한 방법을 사용하였으며 지배방정식은 다음과 같다.

Collection @ kmou

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla \overrightarrow{u_p}) = 0 \tag{2.19}$$

$$\gamma = \frac{1}{d^2} \tag{2.20}$$

여기서, γ은 확산계수이며 본 논문에서는 식 (2.20)과 같이 2차 기반의 확산계수를 사용하였다. d는 움직이고 있는 격자의 셀 중심과 임의의 셀 중심 사이의 거리를 의미한다. $\overrightarrow{u_p}$는 격자점의 이동 속도를 나타내고 확산계수의 크기에 따라 격자의 이동 속도를 조절할 수 있다.

격자점의 이동 속도를 얻은 후 내부 격자점들은 다음과 같은 과정을 통해 변형된다.

$$\overrightarrow{x_p} = \overrightarrow{x_{p0}} + \overrightarrow{u_p} \triangle t \tag{2.21}$$

여기에서 $\overrightarrow{x_{p0}}$는 기존 위치에서의 격자점을 의미하고, $\overrightarrow{x_p}$는 시간에 따른 변형된 최종 위치에서의 격자점을 의미한다. 이 방법은 격자점과 격자점의 거리 비가 일정하도록 격자를 변형시키기 때문에 매우 부드럽게 격자가 변형되는 장점을 가지고 있으며 직교성을 최대한 유지할 수 있도록 한다.

2.4.2 6자유도 운동 해석 기법

파랑에 의한 선박의 6자유도 운동을 해석하기 위해 직교 좌표계(Cartesian coordinate system)에서 선박을 강체로 간주하고 각 방향에 작용하는 힘과 모멘트의 합을 계산해야 한다. Fig. 2.1과 같이 2가지 좌표계를 이용하여 선박의 운동성능을 해석할 수 있다(Carrica, et al., 2007). 첫 번째 좌표계는 지구고정 좌표계(Earth-fixed coordinate system, oxyz)를 의미하고, 두 번째 좌표계는 선체의 기준이 되는 선체고정 좌표계(Ship-fixed coordinate system, o′x′y′z′)를 의미한다. 지구고정 좌표계 oxyz에서는

Collection @ kmou

선박이 이동하는 것과 같이 일정한 속도로 이동할 수 있으며, 선체고정 좌표계 o′x′y′z′에서는 선박의 중심에 일치하게 되며 선체고정 좌표계에서의 운동은 지구고정 좌표계에 대해서 표현된다.

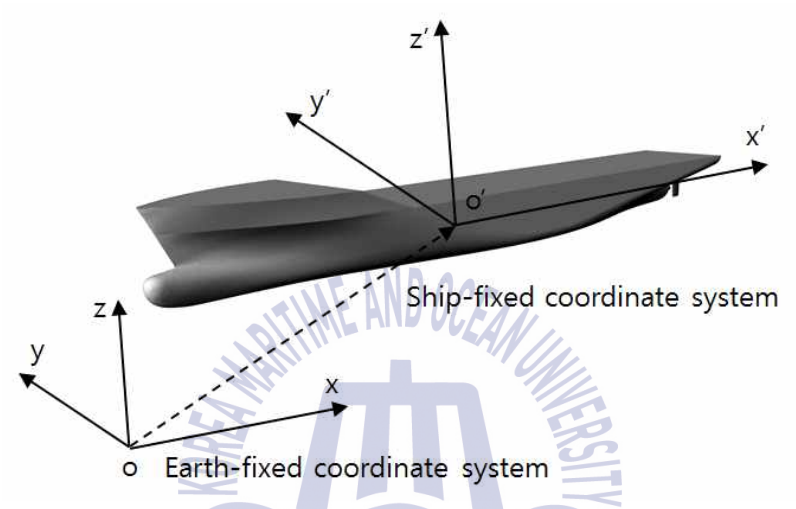


Fig. 2.1 Description of Earth-fixed and Ship-fixed coordinate systems

지구고정 좌표계에서 각 축에 대한 병진운동(translations)과 회전운동(rotations)의 변위와 각은 식 (2.22)과 같이 표현할 수 있으며, 마찬가지로 선체고정 좌표계에서 6자유도 운동으로 인한 속도와 가속도는 식 (2.23)과 같이 표현된다.

$$(\eta_1, \eta_2) = (x, y, z, \phi, \theta, \psi) \tag{2.22}$$

$$(v_1, v_2) = (u, v, w, p, q, r) \tag{2.23}$$

여기에서 x, y, z, ϕ, θ, ψ는 지구고정 좌표계의 각 변위와 각도 벡터를 의미하며 u, v, w, p, q, r는 선체고정 좌표계에서의 선박의 속도와 가속도 벡터를 의미한다.

Collection @ kmou

시간에 따라 고정된 장소를 지나는 유체의 특성을 측정하는 방법인 오일러 방법(Euler method)을 적용하여 지구고정 좌표계에 대한 선체고정좌표계의 상대속도는 식 (2.24)과 같이, 선체고정 좌표계에 대한 지구고정 좌표계의 상대속도는 식 (2.25)과 같이 표현된다.

$$v_1 = J_1^{-1} \cdot \dot{x}_1, \quad v_2 = J_2^{-1} \cdot \dot{x}_2 \tag{2.24}$$

$$\dot{x}_1 = J_1 \cdot v_1, \quad \dot{x}_2 = J_2 \cdot v_2 \tag{2.25}$$

여기에서 J_1와 J_2는 선체고정 좌표계에서 선속도벡터와 각속도벡터를 지구고정 좌표계의 선속도와 각속도로 변환하는 오일러 변환 행렬이다. J는 다음과 같은 행렬로 표현된다.

$$J = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix} \tag{2.26}$$

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi\cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \tag{2.27}$$

여기서 $\theta = \pm 90^\circ$ 에서 J의 값은 정의되지 않는다. 그러나 선체의 pitch가 $\pm 90^\circ$ 가 되는 경우는 없다고 가정할 수 있으므로 무시한다.

선체고정 좌표계에서 선박이 이동하는 속도에 대해 지구고정 좌표계에서의 벡터 행렬 J는 다음과 같이 표현된다.

$$J^{-1}a_e = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \sin\psi\cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\psi\cos\phi + \sin\phi\sin\theta\cos\psi & \cos\psi\cos\phi + \sin\phi\sin\theta\sin\psi & \sin\phi\cos\theta \\ \sin\phi\sin\psi + \cos\phi\sin\theta\cos\psi & -\sin\phi\cos\psi + \cos\phi\sin\theta\sin\psi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} a_e \tag{2.28}$$

Collection @ kmou

선체고정 좌표계에서 선박에 작용하는 힘과 모멘트의 합은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\sum F_x = m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pg - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \tag{2.29}$$

$$\sum F_y = m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] \tag{2.30}$$

$$\sum F_z = m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] \tag{2.31}$$

$$\sum M_x = I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \tag{2.32}$$

$$\sum M_y = I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] \tag{2.33}$$

$$\sum M_z = I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] \tag{2.34}$$

여기서, x, y, z는 선체고정 좌표계의 각 방향을 의미한다. 또한 F는 힘을, M은 모멘트를, I는 관성질량을 의미한다. u, v, w와 p, q, r은 각 방향에 대한 속도와 각속도를 나타낸다. 또한 $\dot{u}$, $\dot{v}$, $\dot{w}$와 $\dot{p}$, $\dot{q}$, $\dot{r}$는 각 방향에 대한 가속도와 각가속도를 의미한다. x_G, y_G, z_G는 회전중심점과 무게중심점 사이의 거리를 x, y, z방향으로 나타낸 값이다.

마지막으로, 선체고정 좌표계에서 계산된 힘과 모멘트를 지구고정 좌표계에 다음과 같은 식으로 이동하면, 최종적으로 두 좌표계에 대한 힘과 모멘트 계산을 통해 선체의 6자유도 운동을 구현할 수 있다.

$$F = J_1^{-1} \cdot F_e \tag{2.35}$$

$$M = J_1^{-1} \cdot M_e \tag{2.36}$$

여기서, 아래첨자 e는 지구고정 좌표계를 의미한다.

Collection @ kmou

2.5 수치 수조 구현

수치 수조 내에서 파랑 환경을 구현하기 위해 waves2Foam 라이브러리를 사용하였다(Jacobsen, et al., 2012). waves2Foam은 Relaxation zone techniques를 이용하여 파랑을 표현할 수 있으며, 1, 2, 5차 stokes 규칙파 및 불규칙파, 고립파 등 다양한 파랑 조건들을 생성할 수 있다.

2.5.1 Relaxation zone

파랑 환경을 수치적으로 구현하기 위해서는 파랑을 정확하고 일관되게 생성해야 할 뿐만 아니라 수치 수조 내에서 발생하는 반사파나 산란파 등을 효과적으로 제거할 수 있어야 한다. Relaxation zone은 Fig. 2.2와 같이 파랑을 생성하는 생성 구역(Wave generation zone)과 파의 반사를 방지하고 강제적으로 소멸시키는 감쇄 구역(Damping zone)으로 구성된다. 다음과 같은 식을 통해 속도(u)와 체적비(α)를 먼저 계산한 후 모멘텀 보존 방정식과 체적비 이송방정식을 계산한다.

$$u = (1-\omega)u_{target} + \omega u_{computed} \tag{2.37}$$

$$\alpha = (1-\omega)\alpha_{target} + \omega \alpha_{computed} \tag{2.38}$$

여기서, ω는 weighting function을 의미하고, relaxation zone은 $\omega \in [0, 1]$ 범위에서 계산된다. Jacobsen, et al. (2012)은 exponential 방법과 third order polynomial 방법을 사용하여 weighting function의 값을 표현하였으며, 본 논문에서는 exponential 방법을 이용하였다. 식은 다음과 같다.

$$\omega = 1 - \frac{e^{x^p} - 1}{e^1 - 1} \qquad \text{for } x \in [0, 1] \tag{2.39}$$

Collection @ kmou

여기서, $x \in [0, 1]$는 relaxation zone 내의 구간을 의미한다. x=0, ω=0 구간에서는 boundary 면과 relaxation zone 사이의 경계면을 의미하며, 이와 반대로 x=1, ω=1 구간에서는 relaxation zone과 computed zone 사이의 경계면을 의미한다. p는 기준 값으로 3.5를 사용하였다.

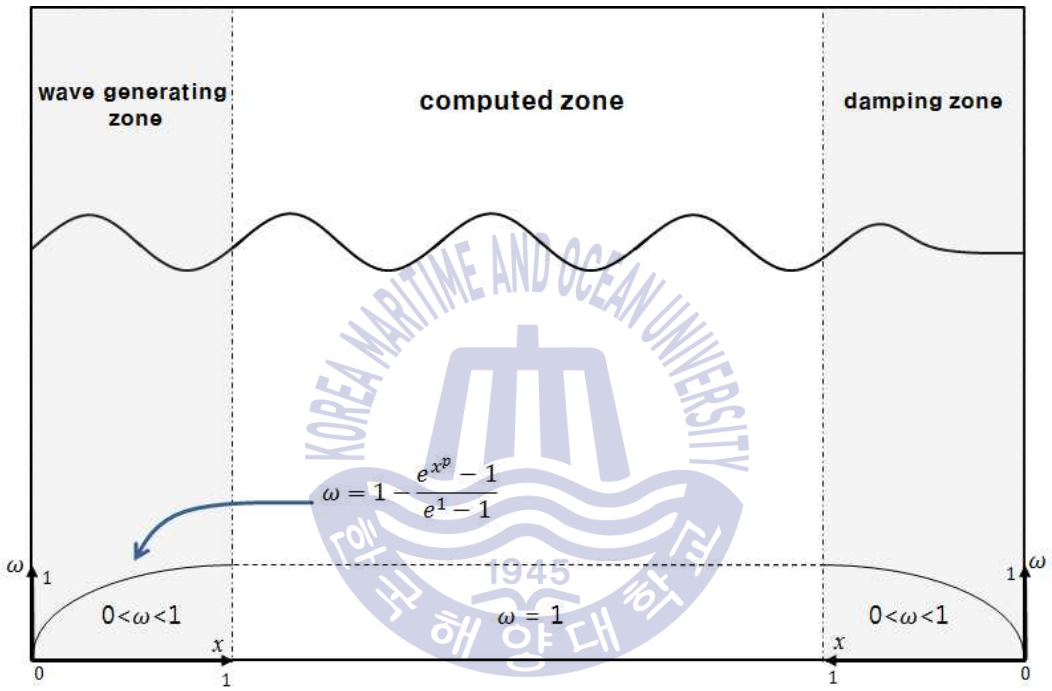


Fig. 2.2 Relaxation zone with qualitative weighting function in wave generation zone and damping zone

2.5.2 파 이론

2차 stokes 파 이론을 사용하여 파랑을 생성하였다. waves2Foam 라이브러리에는 파랑 자체의 속도를 포함하고 있지만 선박이 운항하는 선속(U_{ship}) 부분이 없기에 이 부분을 추가해야한다. Jacobsen, et al. (2012)에서 사용된 2차 stokes 파 이론식은 다음과 같이 정의된다.

Collection @ kmou

$$\eta = \frac{H}{2}\cos(\arg) + \frac{H^2 k}{16}\left(\frac{3}{\tanh^3(kh)} - \frac{1}{\tanh(kh)}\right)\cos 2(\arg) \tag{2.40}$$

$$u = \frac{\pi H}{T}\frac{\cosh k(z+h)}{\sinh(kh)}\cos(\arg) + \frac{3H^2\omega k}{16}\frac{\cosh 2k(z+h)}{\sinh^4 kh}\cos 2(\arg) \tag{2.41}$$

$$w = -\frac{\pi H}{T}\frac{\sinh k(z+h)}{\sinh(kh)}\sin(\arg) - \frac{3H^2\omega k}{16}\frac{\sinh 2k(z+h)}{\sinh^4 kh}\sin 2(\arg) \tag{2.42}$$

$$P = \rho g\frac{kH}{2}\frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}\sin(\arg) + \frac{1}{4}\rho g\frac{k^2H^2}{\sinh 2kh}\frac{3\cosh 2k(z+h)}{\sinh^2 kh - 1}\sin 2(\arg) \tag{2.43}$$

여기서, η는 파고의 위치를 의미하고, u, w는 파랑의 수평 방향과 수직 방향의 속도 성분을 의미한다. P는 압력을 의미하고, H는 파의 높이, k는 파수이며 h는 자유수면에서 바닥까지의 수심을 의미한다. x와 z는 수평 방향과 수직 방향의 좌표축을 의미한다. 또한, arg와 ω는 다음과 같다.

$$\arg = \omega t - kx + kU_{ship}t + \phi \tag{2.44}$$

$$\omega = \sqrt{gk\tanh(kh)} \tag{2.45}$$

여기서, 식 (2.44)에 선속(U_{ship})을 추가하였으며, ϕ는 위상차를, g는 중력 가속도를 의미한다.

Collection @ kmou

제 3 장 해석 방법

3.1 푸리에 시리즈(Fourier Series)

파랑에 의해 선체에 작용하는 저항과 운동성능은 시간에 따라 주기가 일정하지 않은 비선형적인 함수로서 표현된다. 비선형적인 시간성분에서 특정한 파고, 선체에 작용하는 저항과 운동성능의 크기를 분석하기 위해 푸리에 시리즈 해석방법을 이용하였다. 비선형 성분을 가진 그래프는 정형파인 cos파와 sin파의 조합으로 표현된 하나의 식으로 표현될 수 있으며, 각각의 비선형 시간성분에 대한 주기함수를 $\varphi(t)$라고 하였을 때, 아래의 식과 같이 표현된다.

$$\varphi(t) = \frac{\varphi_0}{2} + \sum_{n=1}^{N} \varphi_n \cos(2\pi f_e nt + \gamma_n) \tag{3.1}$$

여기에서 φ_0은 계산된 함수의 평균값을 의미하고, φ_n은 n 번째 조화 진폭(harmonic amplitude)을 의미한다. 1 번째 조화 진폭 φ_1은 비선형 시간성분에 대한 주기함수에서 선형 성분을 나타내는 값이다. 이와 반대로 $n \geq 2$인 조화 진폭에서는 비선형 시간성분에 대한 주기함수에서 비선형 성분을 나타내고, $n \geq 2$의 조화 진폭 값이 클수록 비선형 성분이 강한 주기함수를 나타낸다. γ_n은 n 번째 동 위상(corresponding phase)을 의미한다. 이러한 값들은 다음과 같은 식으로 정의할 수 있다.

$$\varphi_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \tag{3.2}$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T \varphi(t)\cos(2\pi f_e t)dt \qquad n=1,\ 2,\ 3\cdots \tag{3.3}$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T \varphi(t)\sin(2\pi f_e t)dt \qquad n=1,\ 2,\ 3\cdots \tag{3.4}$$

Collection @ kmou

$$\gamma_n = \tan^{-1}(\frac{b_n}{a_n}) - \gamma_I \tag{3.5}$$

여기에서 γ_I는 t=0일 때, 선수부분에 해당되는 파랑의 초기 위상을 의미한다.

3.2 부가저항 해석

정수 중일 때, 선박에 작용하는 전 저항은 선체에 작용하는 힘을 무차원화하여 계산할 수 있다.

$$C_T = \frac{F_{x,calm}}{0.5\rho A U_{ship}^2} \tag{3.6}$$

여기에서 $F_{x,calm}$은 정수 중 선체가 운항하는 x-방향으로 작용하는 힘을 나타낸 것이고, ρ는 밀도, A는 선체의 표면적, U_{ship}은 선박의 속도를 의미한다.

파랑으로 인한 선박의 부가저항은 파랑에 의해 계산된 저항과 정수 중에서 계산된 저항의 차로서 계산된다. 무차원화 된 값은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{aw} = \frac{(F_{x,wave} - F_{x,calm})}{\rho g \zeta_{I1} B_{WL}^2 / L_{PP}} \tag{3.7}$$

여기에서 $F_{x,wave}$은 파랑에 의해 계산된 0 번째 조화진폭에 해당되는 힘을 의미하고, g는 중력 가속도, ζ_{I1}은 1 번째 조화진폭에 해당되는 파고, B_{WL}은 수선에 해당되는 선체의 넓이, L_{PP}는 선박의 길이를 의미한다.

Collection @ kmou

3.3 운동응답 해석

파랑으로 인한 선박의 상하동요 및 종동요는 전달함수(transfer function, TF)를 사용하여 해석할 수 있다.

$$TF_3 = \frac{x_{31}}{\zeta_{I1}} \tag{3.8}$$

$$TF_5 = \frac{x_{51}}{\zeta_{I1} k} \tag{3.9}$$

여기에서 TF_3, TF_5는 각각 상하동요 종동요에 대한 전달함수를 의미하고, x_{31}, x_{51}, ζ_{I1}은 1 번째 조화진폭에 해당되는 상하동요, 종동요의 응답, 파고를 의미한다. 또한, k는 파랑에 대한 파수(wave number)를 의미한다.

3.4 불확실성 해석절차

ITTC에서 제안하는 절차와 방법에 따라 불확실성 해석을 진행하였다. 불확실성 해석에서 입력 파라미터(input parameter)로 나타낼 수 있는 수치적 에러로는 반복 횟수 (δ_I), 격자 크기(δ_G), 시간 간격(δ_T), 기타 변수(δ_P) 등으로 나타낼 수 있다. 종합적인 수치 에러(δ_{SN})와 수치 불확실성(U_{SN})은 다음과 같이 정의할 수 있다(ITTC, 2008; Seo, et al., 2016).

$$\delta_{SN} = \delta_I + \delta_G + \delta_T + \cdots \tag{3.10}$$

$$U_{SN}^2 = U_I^2 + U_G^2 + U_T^2 + \cdots \tag{3.11}$$

Collection @ kmou

보정계수(C)를 사용하여 수정된 수치 불확실성(U_{S_CN})을 정의할 수 있다.

$$U_{S_CN}^2 = U_{I_C}^2 + U_{G_C}^2 + U_{T_C}^2 + \cdots \tag{3.12}$$

불확실성을 구하기 위해 반복 횟수, 격자 크기, 시간간격 파라미터에 대한 수렴성 연구가 진행되어야 한다. 수렴상태를 결정하기 위해 3가지 격자계 및 시간 간격에 대한 각각의 수치 해를 $\hat{S}_{i,1}$, $\hat{S}_{i,2}$, $\hat{S}_{i,3}$ 이라 할 때 식 (3.12), (3.13)을 이용해 수렴비(R_i)를 구할 수 있다. 여기서 i 는 수치적 에러에 해당되는 입력 파라미터에 해당된다.

$$\epsilon_{i,21} = \hat{S}_{i,2} - \hat{S}_{i,1} \tag{3.13}$$

$$\epsilon_{i,32} = \hat{S}_{i,3} - \hat{S}_{i,2} \tag{3.14}$$

$$R_i = \epsilon_{i,21} / \epsilon_{i,32} \tag{3.15}$$

수렴비(R_i)를 이용하여 해의 수렴상태를 판별할 수 있다.

(i) Monotonic convergence : $0 < R_i < 1$ (3.16)

(ii) Oscillatory convergence : $R_i < 0$

(iii) Divergence : $R_i > 1$

식 (3.16)의 (i)로 수렴한 경우 ITTC 절차에 따라 Richardson 외삽법을 이용한다. 우선 refinement ratio (r_i)은 입력 파라미터의 비율($r_i = \triangle x_{i,2}/\triangle x_{i,1} = \triangle x_{i,3}/\triangle x_{i,2}$)로 나타낼 수 있다.

첫 번째, $r_i = r_{i,21} = r_{i,32}$ 이면, 정확도(P_i)의 값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

Collection @ kmou

$$p_i = \frac{\ln\left|\epsilon_{i,32}/\epsilon_{i,21}\right|}{\ln(r_i)} \tag{3.17}$$

두 번째, $r_{i,21} \neq r_{i,32}$ 일 때, 정확도(P_i)의 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_i = \frac{1}{\ln(r_{i,21})}\left|\ln\left|\epsilon_{i,32}/\epsilon_{i,21}\right| + q(p)\right| \tag{3.18}$$

$$q(p) = \ln\left(\frac{r_{i,32}^{p_i} - s}{r_{i,21}^{p_i} - s}\right) \tag{3.19}$$

$$s = sqn(\epsilon_{i,32}/\epsilon_{i,21}) \tag{3.20}$$

또한, 보정 계수(C)의 값을 적용하여 불확실성(U_i), 수정된 오차(δ^*_i), 수정된 불확실성(U_{i_C})을 정의할 수 있다.

$$C = \frac{r_i^{p_i} - 1}{r_i^{p_{i,est}} - 1} \tag{3.21}$$

$$\delta_i^* = C\delta_{RE_i}^* = C\left(\frac{\epsilon_{i,21}}{r_i^{p_i} - 1}\right) \tag{3.22}$$

$$U_i = \left|C\delta_{RE_i}^*\right| + \left|(1-C)\delta_{RE_i}^*\right| \tag{3.23}$$

$$U_{i_C} = \left|(1-C)\delta_{RE_i}^*\right| \tag{3.24}$$

여기서 $p_{i,est}$는 한계정확도 값이다.

Collection @ kmou

제 4 장 대상선의 제원 및 해석 조건

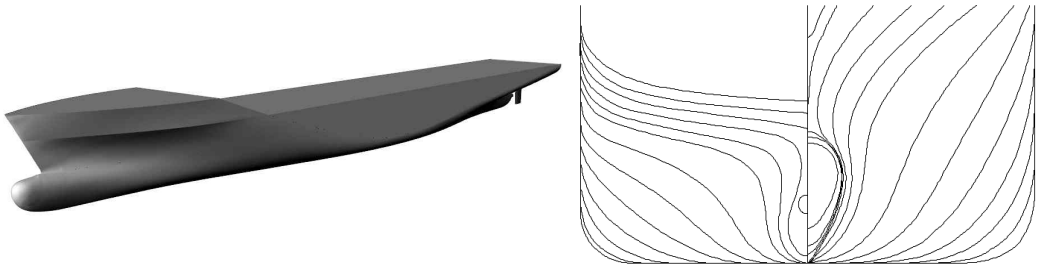
4.1 대상선

대상선(Ship model)은 선박해양플랜트연구소에서 설계한 3,600TEU 컨테이너선인 KRISO Container Ship(KCS)으로 선정하였다. 선박의 길이는 FORCE Technology 기관에서 수행한 6.0702m의 조건과 동일하게 설정하였다(Sadat-Hosseini, et al., 2015). KCS의 주요제원 및 선형은 Table 4.1, Fig. 4.1과 같으며 타(rudder)를 포함하였다.

Table 4.1 Principal particulars of KCS model

Principal particulars		Scale
Scale factor		1:37.9
Length between perpendiculars	L_{PP} (m)	6.0702
Length of water line	L_{WL} (m)	6.1357
Maximum beam of waterline	B_{WL} (m)	0.8498
Depth	D (m)	0.5015
Design draft	T (m)	0.2850
Displacement volume	∇ (m^3)	0.9571
Ship Wetted surface with rudder	S (m^2)	6.6978
Longitudinal center of buoyancy (fwd+)	LCB $(\%L_{PP})$	-1.48
Longitudinal center of gravity (from aft)	LCG (m)	2.945
Vertical center of gravity (from keel)	KG (m)	0.192
Metacentric height	GM (m)	0.0158
Moment of inertia	K_{xx} / B_{WL}	0.40
	K_{yy} / L_{PP}	0.25
	K_{zz} / L_{PP}	0.25
Reynolds number	Re	1.07×10^7
Froude number	Fr	0.261

Collection @ kmou



3-D view　　Bow and stern view

Fig. 4.1 KCS body plan and hull form

4.2 해석 조건

Table 4.2와 같이 정수(calm water, Case 0), 단파(short wave, Case 1~2), 중파(medium wave, Case 3), 장파(long wave, Case 4~5) 조건으로 분류하였다. 동일한 속도 조건에서 파랑에 의한 선박의 저항 증가에 가장 큰 영향을 미치는 상하동요와 종동요 운동 조건만을 고려하였고 나머지 운동 조건은 모두 구속하였다. 파의 기울기(wave steepness)는 모두 1/60으로 설정하였고, 무한 수심일 때로 가정하였다.

선박이 전진하는 속도와 규칙 파랑으로 발생하는 선박의 조우주파수(encounter frequency, f_e) 및 조우주기(encounter period, T_e)는 다음과 같이 계산된다.

$$f_e = \sqrt{g/(2\pi\lambda)} + U_{ship}/\lambda \tag{4.1}$$

$$T_e = 1/f_e \tag{4.2}$$

여기서, g는 중력가속도, λ는 파장, U_{ship}는 선박의 전진 속도를 의미한다.

Collection @ kmou

Table 4.2 Simulation conditions in calm water and regular head waves

Case no.	Froude number	Wave steepness H/λ	Wave length λ/L_{PP}	Encounter frequency f_e (Hz)	Encounter period T_e (s)
0	0.261	calm water (no waves)			
1	0.261	1/60	0.65	1.136	0.878
2	0.261	1/60	0.85	0.940	1.064
3	0.261	1/60	1.15	0.762	1.312
4	0.261	1/60	1.37	0.676	1.480
5	0.261	1/60	1.95	0.533	1.874

4.3 시뮬레이션 조건

경계 조건 및 전체 도메인의 크기는 Fig. 4.2와 같이 표현하였다. 직교좌표계를 사용하였으며, 선체의 무게중심을 기준으로 선미방향을 x축, 좌현방향을 y축, 높이 방향을 z축으로 설정하고 해석하였다.

전체 도메인은 직사각형 형태로 구성하였고 선체의 크기를 1L로 표현하였을 때, 선수 앞쪽은 2L, 선미 뒤쪽으로 5L로 설정하였다. 폭은 1L, 수면 위로는 0.5L, 수면 아래는 3L로 설정하였다. 계산의 효율을 위해 선체의 반에 해당되는 도메인으로 계산을 진행하였다.

입구면에서 속도, 난류, 체적비에 대한 경계조건은 Dirichlet 조건, 압력은 Neumann 조건으로 적용하였고, 이와 반대로 출구면에서 속도, 난류, 체적비는 Neumann 조건, 압력은 Dirichlet 조건으로 적용하였다. 물리적으로 y=0 면을 기준으로 대칭이기 때문에 y=0면에는 symmetry 조건, 선체 표면은 선체의 운동속도를 Dirichlet 조건으로 적용하였다.

Collection @ kmou

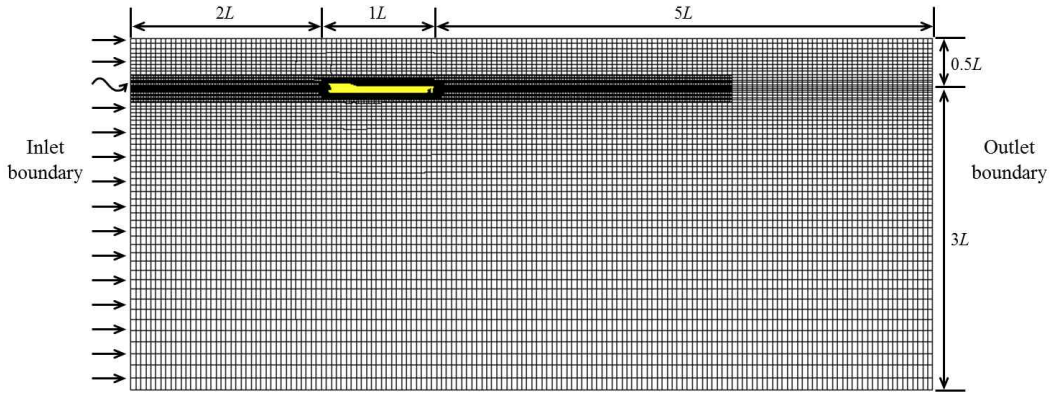


Fig. 4.2 Domain extent, boundary conditions, and grid

OpenFOAM에서 제공하는 자동 격자 생성 유틸리티인 blockMesh를 이용하여 전체 도메인에는 정렬 격자로 생성하였다. 그 다음, KCS 주위와 자유수면에 해당되는 격자는 snappyHexMesh를 이용하여 hanging node mesh와 cut cell mesh인 비정렬 격자로 생성하였다. 선체 주위의 부근과 자유수면 근처에 격자를 밀집시켰으며, 출구면으로 이동할수록 격자의 밀집도를 감소시켰다. 총 격자의 수는 약 370만개이고, 선체의 표면격자는 약 3만개를 사용하였다. 이는 뒤에서 이루어진 격자의존도 테스트에서 medium 격자의 기준이 된다.

파형을 생성하는 생성 구역(Wave generating zone)과 파의 반사를 방지하고 소멸시키는 감쇄 구역(Damping zone)을 설정하여 파를 생성하였다. 생성 구역과 감쇄 구역은 Fig. 4.3과 같이 설정하였고 파는 왼쪽에서부터 오른쪽으로 진행한다. 생성 구역과 감새구역의 크기는 단파에 해당되는 영역에 모두 2λ씩, 중파 및 장파에 해당되는 영역에는 1λ씩 설정하였다. 입사파는 2차 stokes 파 이론을 사용하였다. 파의 진행초기, x/λ=0 지점에서 파랑의 마루(crest)와 선체의 선수부분이 일치하도록 하여 입사파고의 초기위상(initial phase)는 0으로 설정하였다. x/λ=0.513 지점에 선체의 무게중심이 위치한다.

Collection @ kmou

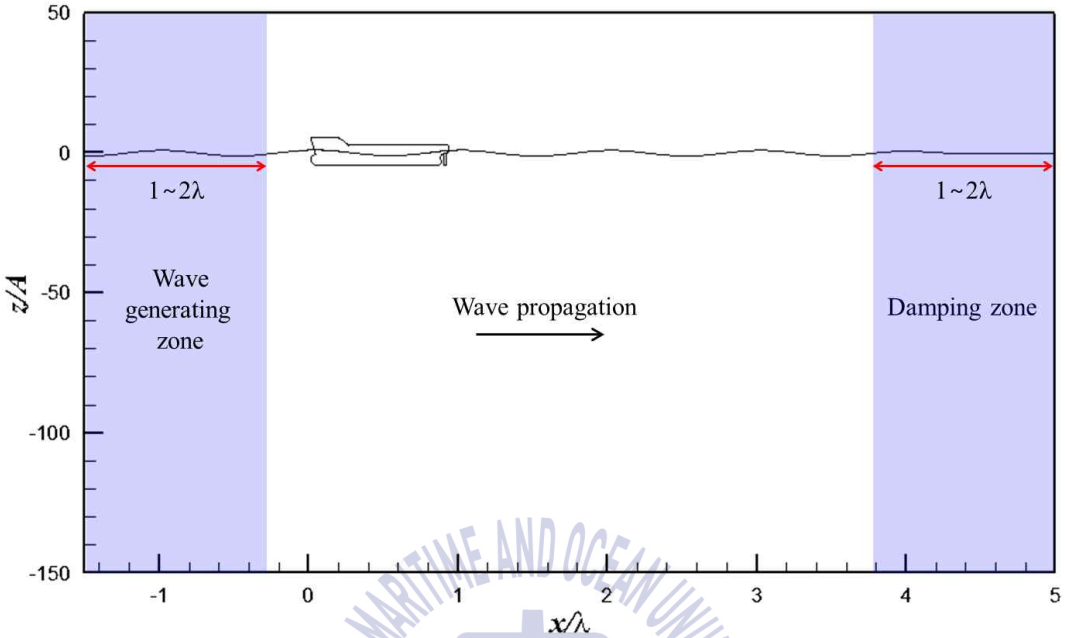


Fig. 4.3 Simulation domain for wave generation and damping zones

4.4 수치 방법

질량보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 난류모델 방정식을 비압축성 기반 비정상 상태에서 계산하였다. 셀 중심 차분법을 사용하였으며, 속도와 압력의 연성은 SIMPLE(Patankar and Spalding, 1972)과 PISO(Issa, 1986)를 결합한 PIMPLE 알고리즘을 선택하였다. 난류모델은 SST k-ω 모델(Menter, 1993)과 벽함수(Park, et al., 2013)를 사용하였다. 대류 항은 TVD scheme에 vanLeer (Van Leer, 1979) limiter로 차분을 적용하였고, 확산항은 2차 정확도의 중심 차분을 적용하여 계산하였다. 체적비는 하류차분과 상류차분을 혼합한 이산화 방법을 사용하여 계산하였다. 대수방정식의 수렴성을 증가시키기 위해 Algebraic Multi-Grid(AMG) 방법(Weiss, et al., 1999)을 사용하였고, Gauss-Seidel 반복 계산법을 사용하여 대수방정식을 계산하였다.

Collection @ kmou

제 5 장 해석 결과

5.1 정수 중

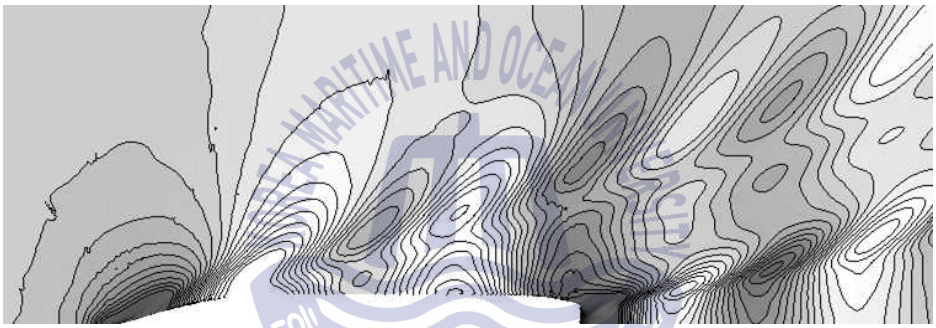
정수 중 조건일 때(Case 0), Fr=0.261의 선속에서 운동성능이 구속된 경우(motion fixed)와 구속되지 않은 경우(motion free)를 비교하였고, 선체에 작용하는 전 저항, sinkage, trim에 대한 계산결과 값을 실험결과 값과 비교하여 Table 5.1에 나타내었다. sinkage와 trim의 값이 음수인 것은 각각 기존의 위치에서 선체가 가라앉는다는 것과 선수부분이 선미부분 보다 아래로 기울어진 형태를 의미한다. 계산결과에서 KCS의 경우, 정수 중에서 운항할 때 선체는 가라앉으며 선수 부분이 아래쪽으로 기울어진 상태로 운항하는 것을 확인할 수 있다. Trim에 대한 계산은 설계흘수를 기준으로 선수(δ_b)와 선미(δ_s)의 수직 이동거리를 이용하여 Trim 각도($= \tan^{-1}(2|\delta_b + \delta_s|/L_{BP})$)를 계산한다. 전 저항과 sinkage 결과에 대한 비교오차는 5% 이내이며 trim은 2% 이내로 실험결과에 근접한 오차가 발생한 것을 확인할 수 있다. 선체의 저항에 대해서는 운동성능이 구속되지 않은 경우가 운동성능을 구속시킨 경우보다 큰 것을 알 수 있다.

Table 5.1 Result in calm water

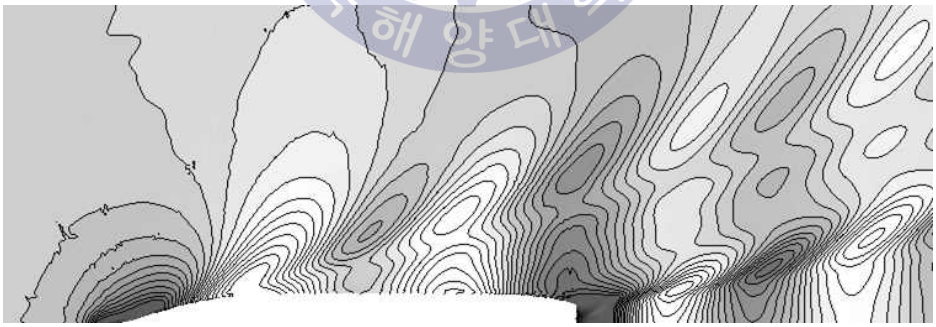
	motion	C_T ($\times 10^{-3}$)	sinkage/L_{PP} ($\times 10^{-3}$)	trim (deg.)
Present (Case 0)	free	4.018	-1.989	-0.1676
	fixed	3.876	.	.
EFD (Sadat-Hosseini, et al., 2015)	free	3.835	-2.074	-0.1646
Error (motion free % EFD)	.	-4.757	4.216	-1.845

Collection @ kmou

Fig. 5.1 및 Fig. 5.2는 정수 중에서 운항하는 선박 주위에 형성되는 파형과 선측 파고에 대한 결과를 운동성능이 구속된 경우와 구속되지 않은 경우로 비교한 것이다. 전반적으로 파형과 선측 파고는 매끄럽게 생성된 것을 확인할 수 있으며, 선측파고에 대한 진폭은 운동성능을 구속하지 않은 경우가 운동성능을 구속한 경우보다 큰 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 선측 주위에 형성되는 파형에서도 동일하게 관찰된다. 따라서 운동성능을 구속하지 않은 경우 운동성능을 구속한 경우보다 선수부분이 아래에 위치하며 파의 영향을 많이 받는다. 이로 인해 Table 5.1과 같이 운동성능을 구속하지 않았을 때의 전 저항의 크기 또한 운동성능을 구속한 경우보다 큰 것을 알 수 있다.



(a) free motion



(b) fixed motion

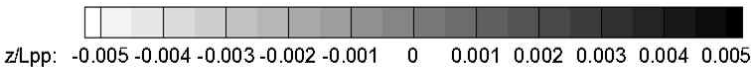


Fig. 5.1 Wave pattern around KCS in calm water for free and fixed motions

dCollection @ kmou

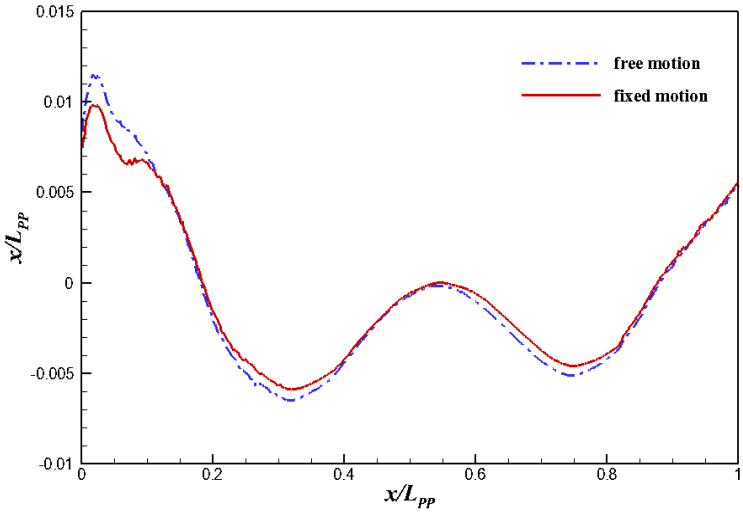


Fig. 5.2 Hull wave profiles for free and fixed motions

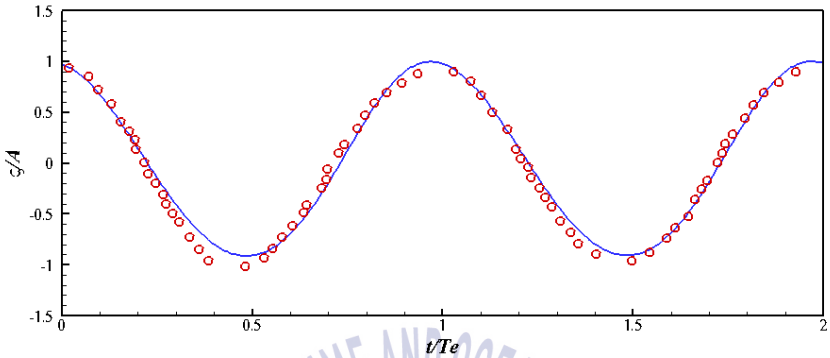
5.2 파랑의 생성

각기 다른 파장에 대한 파랑의 생성은 2차 stokes 파 이론을 사용하여 생성하였다. 모든 파랑에 대해 정확하고 일관된 파랑을 생성하는 것은 부가저항을 해석하는데 중요한 요소로 작용한다. 도메인 내에서 생성된 파랑이 정확하고 일관되게 생성되었는지 검증하기 위해 선박이 없는 자유수면 상태에서 파랑을 생성하였고, 선박의 선수부분과 파랑의 마루가 만나는 지점(x/λ=0)을 기준으로 시간에 따른 파고의 변화를 측정하여 실험 결과와 비교하였다. 실험결과는 http://www.t2015.nmri.go.jp에서 확인할 수 있다.

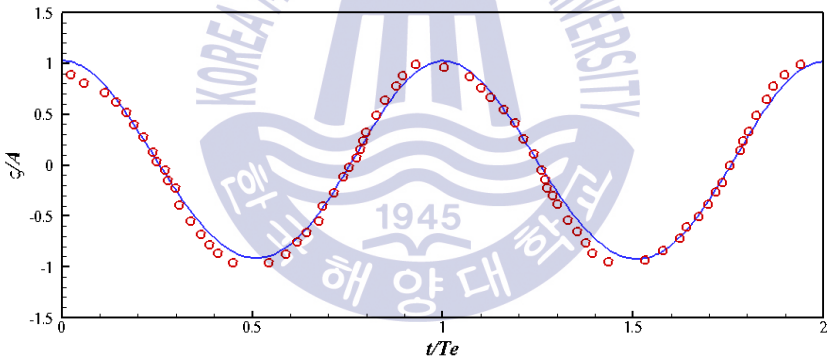
진행되는 파랑의 일반적인 경향성을 판단하기 위해 2주기 동안 진행되는 파고 주기를 출력하였고 실험 결과에 대한 비교 그래프를 Fig. 5.3에 나타내었다. 전반적으로 파형에 따른 주기는 모든 구간에서 실험 결과와 비슷한 형상으로 나타난 것을 확인할 수 있다. 또한, 계산 결과에 대해 푸리에 시리즈를 사용하여 각 파장에 대한 1차 조화진폭의 파고의 값을 모형실험 값과 비교하여 Table 5.2에 나타내었다. 동일한 격자를 사용하고 있기 때문에 파장이 커질수록 많은 격자가 파장 내에 위치하고 있어 오차가 줄어드는

Collection @ kmou

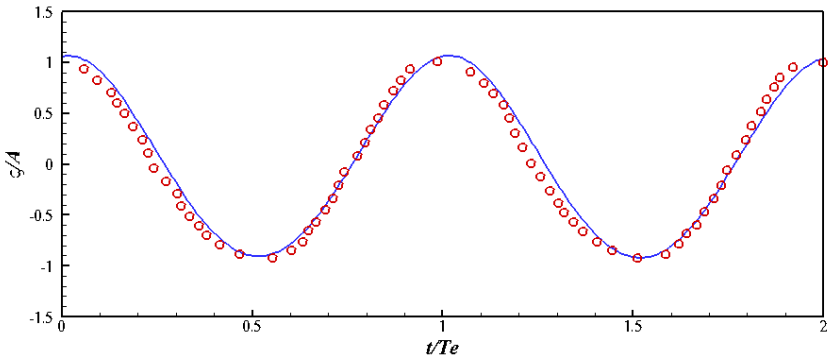
경향을 보였다. 실험 값 대비 오차는 5%범위 이내에서 만족하고 있으며 수치 방법, 격자의 크기 등이 파장과 파고가 각기 다른 파랑들을 비교적 일관되게 생성하는데 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다.



(a) Case 1 (λ/L_{PP}=0.65)

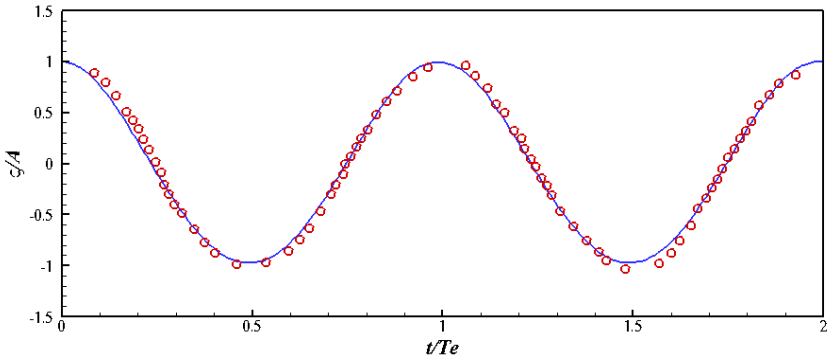


(b) Case 2 (λ/L_{PP}=0.85)

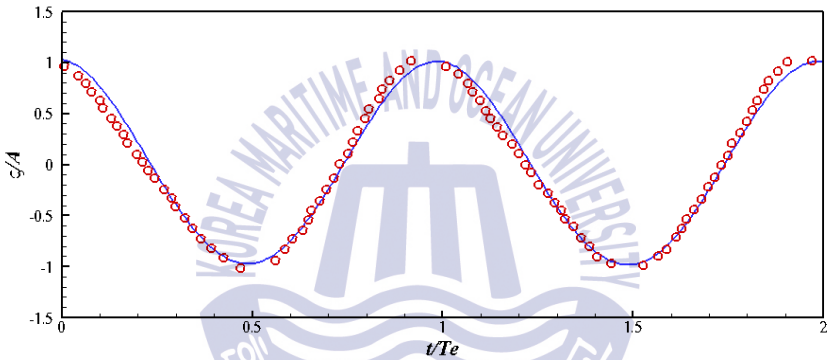


(c) Case 3 (λ/L_{PP}=1.15)

Collection @ kmou



(d) Case 4 (λ/L_{PP}=1.37)



(e) Case 5 (λ/L_{PP}=1.95)

Fig. 5.3 Time history of wave elevation in different waves

Table 5.2 1st harmonic wave amplitude in different wave conditions

	wave amplitude($\zeta_1/L_{PP}\times10^3$)				
Case	1	2	3	4	5
Present	4.883	6.226	10.033	12.169	16.111
EFD (Sadat-Hosseini, et al., 2015)	5.132	6.409	10.152	12.300	16.114
Error (% of EFD)	4.846	2.849	1.167	1.068	0.044

Collection @ kmou

5.3 불확실성 해석

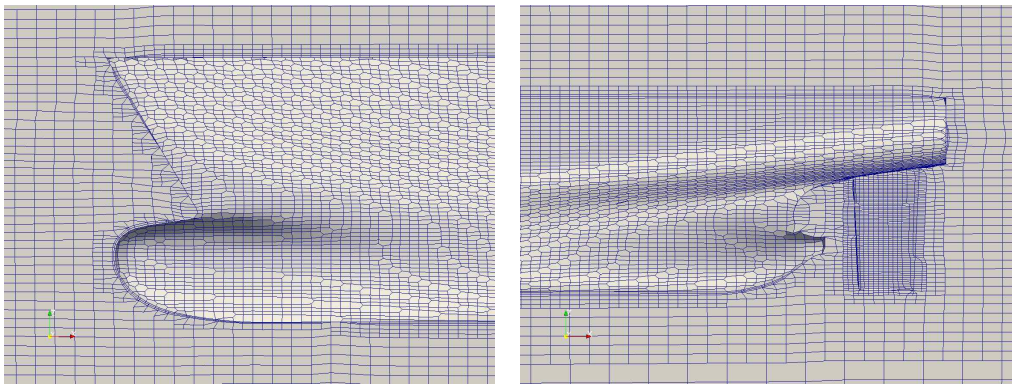
부가저항 수치해석 결과에 대한 불확실성을 검증하기 위해 3가지 격자로 나누어 격자에 대한 불확실성을 해석하여 비교 검토하였다. Table 5.3와 같이 격자의 크기는 coarse, medium fine 3단계로 설정하였으며, 배경 격자의 크기는 모든 방향으로 1.25배씩 증감시켰다. 또한, 3가지 격자계에 대한 종횡비(aspect ratio)는 모두 동일하게 설정하였다. Fig. 5.4는 KCS의 선수와 선미부분을 확대하여 3가지 격자계에 대한 세부적인 격자의 형상을 나타낸 것이다.

정렬 격자의 경우 격자의 임의성을 배제할 수 있지만, snappyHexMesh로 생성한 격자는 hanging node mesh와 cut cell mesh로 생성된 비정렬 격자로써 체계적으로 전체 격자의 수를 정확하고 일관되게 증가시키는 것은 어렵다. 그러나 snappyHexMesh의 세부 제어를 통해 비교적 일관되게 증가하였다고 가정하고 연구를 진행하였다(Seo, et al., 2016). 최종적으로 생성된 격자수는 coarse 격자 약 203만개, medium 격자 약 370만개, fine 격자 약 688만개이다.

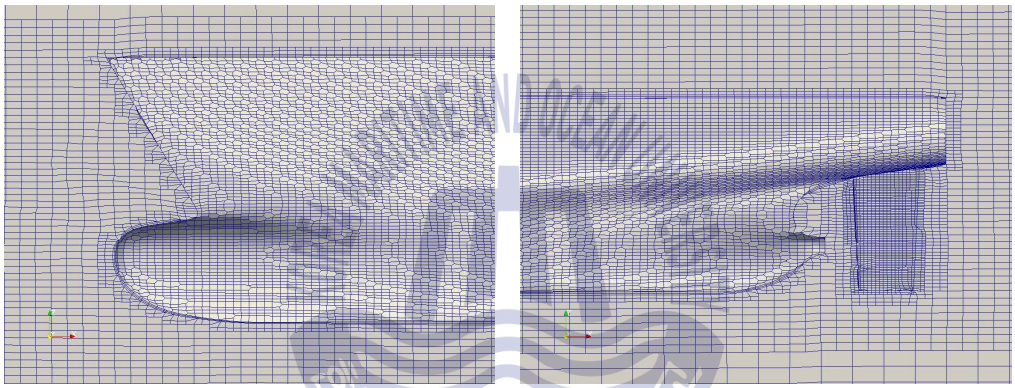
Table 5.3 Grid sizes for the uncertainty analysis

Grid system		Number of background of mesh	Number of mesh
coarse	(1)	128×16×48	2,026,386
medium	(2)	160×20×60	3,700,684
fine	(3)	200×25×75	6,877,501

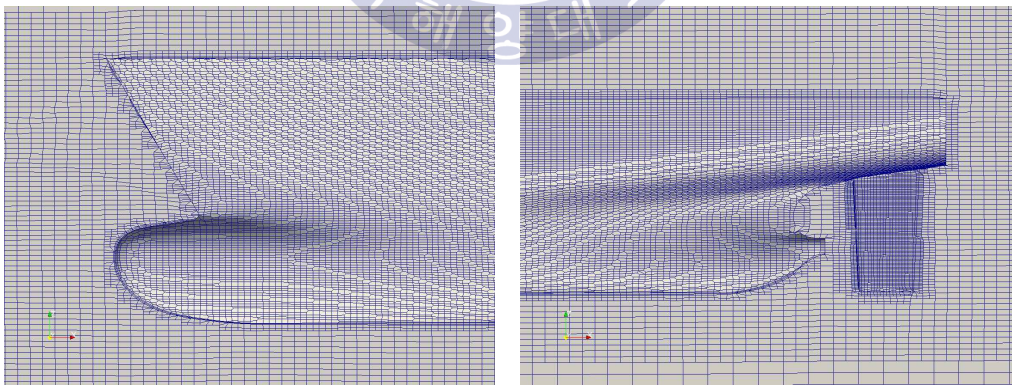
Collection @ kmou



(a) coarse mesh



(b) medium mesh



(c) fine mesh

Fig. 5.4 KCS bow(left) and stern(right) magnified view of three meshes

Collection @ kmou

전체 격자 수 만으로 refinement ratio를 판별하기 어렵다. 따라서 격자의 길이 방향을 h라고 정의하였을 때, 3차원 계산에서 h의 값은 식 (5.1)와 같이 정의할 수 있다(Celik, et al., 2008).

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (\triangle V) \right]^{1/3} \tag{5.1}$$

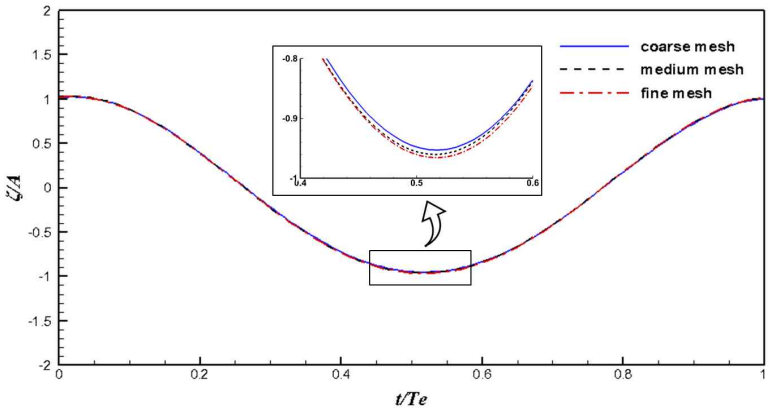
여기서 $\triangle V$는 격자의 부피를 의미하며, N은 총 격자수를 의미한다. Table 5.4는 식 (5.1)으로부터 얻은 h의 값을 사용하여 $r_{G,32}$, $r_{G,21}$의 값을 나타낸 것이다. snappyHexMesh로 생성된 비정렬 격자는 refinement ratio의 비율이 다른 $r_{i,21} \neq r_{i,32}$의 형태로 계산된다.

Table 5.4 Grid length h for refinement ratio

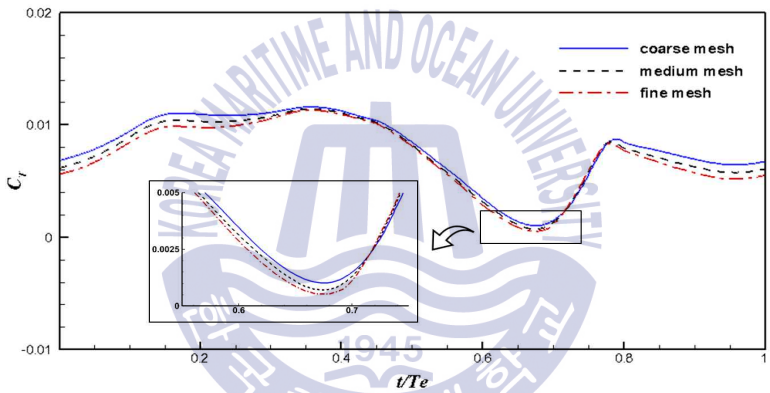
Total volume (m^3)	h_1 (m)	h_2 (m)	h_3 (m)	$r_{G,12}$	$r_{G,32}$
6262.778	0.146	0.119	0.097	1.222	1.229

격자의 불확실성을 해석하기 위해 case 3을 대표로 선정하였고, 격자 크기에 따라 1 조우주기에 대한 파랑의 파고, 전 저항, 부가저항, 상하동요 및 종동요 운동응답 그래프를 Fig. 5.5에 나타내었다. 또한, 격자 변화에 대한 결과의 변화율을 보기위해 특정한 구간을 확대하여 표시하였다. 3가지 격자의 불확실성 해석에 대한 결과를 살펴보면 격자의 밀집도에 따라 파고, 전 저항, 운동응답의 크기의 차이가 발생하였고, 특히 전 저항에 대한 변화율이 다른 응답에 비해 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 그래프를 확대해서 볼 때, 결과 간격은 coarse에서 fine 격자로 이동할수록 크기 변화가 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 경우에는 단조 수렴한다고 볼 수 있으며, Richardson 외삽법을 이용해서 불확실성을 해석할 수 있다.

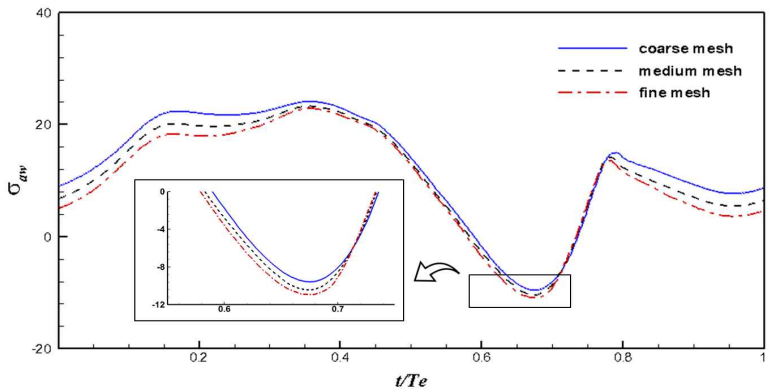
Collection @ kmou



(a) wave amplitude

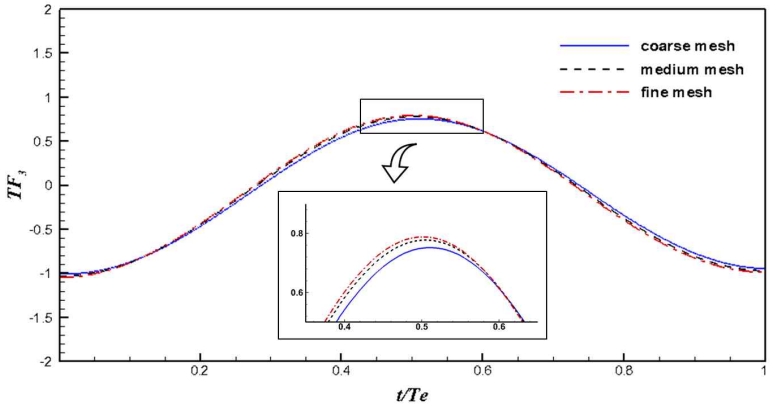


(b) C_T

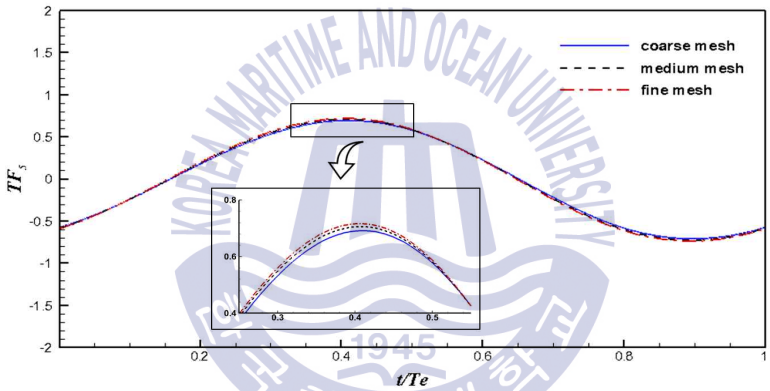


(c) σ_{aw}

Collection @ kmou



(d) TF_3



(e) TF_5

Fig. 5.5 One period of encounter for wave amplitude, C_T, σ_{aw}, TF_3, TF_5 for grid convergence study (Case 3, λ/L_{PP}=1.15)

Table 5.5에 3가지 격자계에 대한 파고, 전 저항, 부가저항, 상하동요 및 종동요 전달함수의 불확실성 검증 결과를 나타내었다. 한계정확도($P_{G,est}$)의 값은 2를 사용하였으며, 모든 결과에 대해 단조 수렴하는 것을 알 수 있다. 파고의 불확실성은 0.78%, 수정된 불확실성은 0.30%으로 파고는 격자의 변화에 대해 덜 민감한 것을 알 수 있다. 상하동요 전달함수 불확실성은 2.92%, 수정된 불확실성은 0.68%이며, 종동요 전달함수 불확실성은 7.97%, 수정된 불확실성은 2.60%이다. 그러나 전 저항에 대한 불확실성은 17.67%, 수정된 불확실성은 9.32%이고, 부가저항에 대한 불확실성은 31.89%,

Collection @ kmou

수정된 불확실성은 11.74%으로 다른 결과에 비해 상대적으로 큰 수치로 확인되었다. Simonsen, et al. (2014) 논문에서 실험에 대한 부가저항의 불확실성 결과는 7.88%으로 수치해석 결과에서의 부가저항 불확실성이 더 크다. 이와 같은 결과를 종합해 볼 때, 파랑 중 선체에 작용하는 부가저항 불확실성의 크기는 격자의 크기 변화에 대해 매우 민감하다고 판단할 수 있다.

Table 5.5 Result of grid uncertainty analysis for Case 3

		ζ_{I1}	C_T	σ_{aw}	TF_3	TF_5
Solution	S_3	0.0605	15.69	12.188	0.882	0.713
	S_2	0.0609	14.907	10.807	0.901	0.724
	S_1	0.0611	14.296	9.797	0.911	0.733
	EFD	0.0616	14.157	9.911	0.899	0.748
R_G (convergence)		0.401 (MC)	0.780 (MC)	0.731 (MC)	0.556 (MC)	0.840 (MC)
P_G		4.216	1.048	1.356	2.661	0.697
C		2.715	0.472	0.632	1.433	0.674
δ^* (% S_1)		-0.291×10^{-3} (-0.48%)	1.194 (8.35%)	1.974 (20.15%)	-2.047×10^{-2} (-2.25%)	-3.938×10^{-2} (-5.38%)
U_G (% S_1)		0.475×10^{-3} (0.78%)	2.526 (17.67%)	3.125 (31.89%)	2.665×10^{-2} (2.92%)	5.839×10^{-2} (7.97%)
U_{GC} (% S_1)		0.184×10^{-3} (0.30%)	1.333 (9.32%)	1.15 (11.74%)	0.618×10^{-2} (0.68%)	1.901×10^{-2} (2.60%)

* Convergence : MC=Monotonic Convergence; OC=Oscillatory Convergence; MD=Monotonic Divergence; OD=Oscillatory Divergence

Collection @ kmou

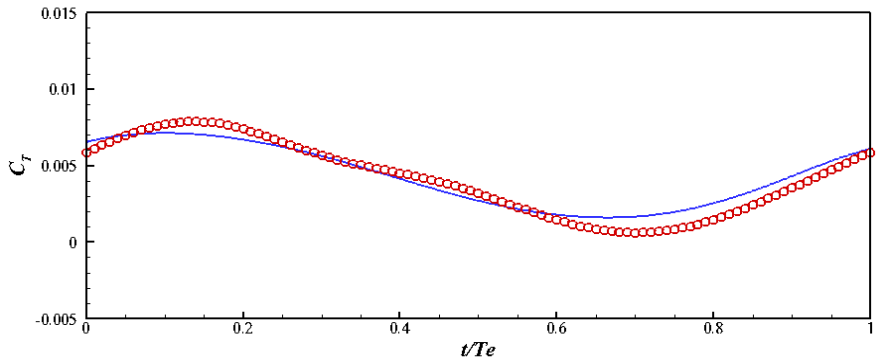
5.4 부가저항 및 운동응답 수치해석

Fig. 5.6~5.10은 파랑에 의한 선박의 전 저항, 상하동요 응답, 종동요 응답에 대한 계산 결과를 실험 결과와 각각 비교한 그래프이다. 1주기 동안 계산된 수치해석 결과를 실험 결과와 비교하였으며, FORCE Technology 기관에서 제공한 6.07m KCS 선박에 대한 모형실험 결과를 사용하였다. 모형실험 결과에 대한 세부적인 자료는 http://www.t2015.nmri.go.jp에서 확인할 수 있다.

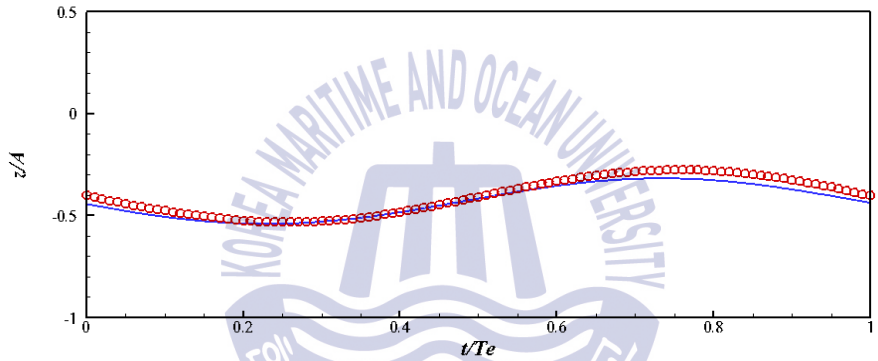
Case 1~2에서 종동요 응답 계산결과는 실험결과와 다소 차이가 발생하였고, 상하동요 응답 계산 결과를 실험결과와 비교해보면 진폭의 차이보다는 약간의 위상차이가 발생한 것을 확인할 수 있다. Case 4의 상하동요 및 종동요 계산 결과 또한 마찬가지로 실험결과와의 위상차이가 발생하였다. 그러나 Case 3,5에서 상하동요와 종동요 응답은 실험 결과와 대부분 일치하는 것을 확인할 수 있다.

전 저항 계산 결과는 Case 5를 제외한 나머지 영역에서 실험결과와 대부분 다른 형태로 진동한다. 특히, Case 2의 경우 전 저항 계산 결과는 실험결과와 다른 주기 형태로 진동하고 있음을 알 수 있다. 2015 Tokyo CFD Workshop에서 발표된 수치해석 결과에서도 마찬가지로 실험결과와 차이를 확인할 수 있으며 이번 연구에서 해석 프로그램으로 사용한 OpenFOAM 결과와 비슷한 형상으로 진동하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 차이가 발생한 원인을 살펴보았을 때, 모형시험에서 단파 생성시의 불확실성, 모형시험과 수치해석 계산결과에서 발생할 수 있는 초기조건 차이 또는 단파영역에서 선박에 미치는 반사파 영향의 차이 등으로 생각해 볼 수 있다. Case 3에서 실험결과는 변동 폭이 크게 나타나기에 1 주기에 대한 평균값으로 나타내었으며 마찬가지로 수치해석 결과 또한 변동 폭이 큰 것을 확인할 수 있다. Case 4의 저항 계산 결과는 모형실험 결과와 진동이 다르게 나타나지만, 전체적인 경향은 유사하다.

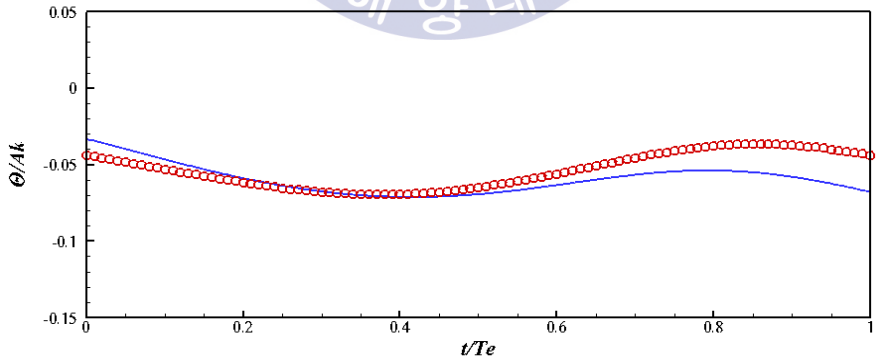
Collection @ kmou



(a) C_T



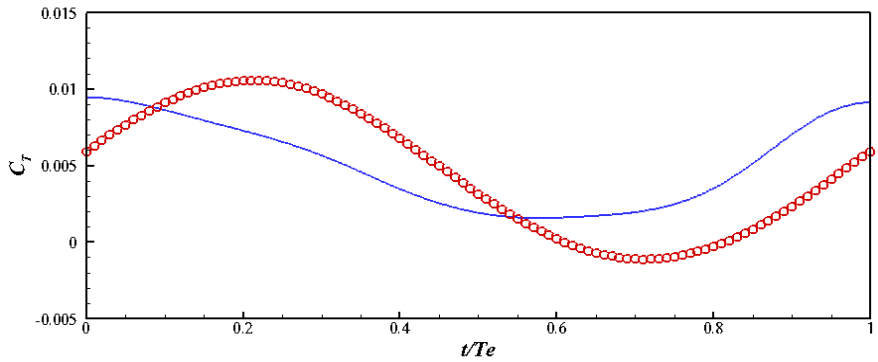
(b) heave



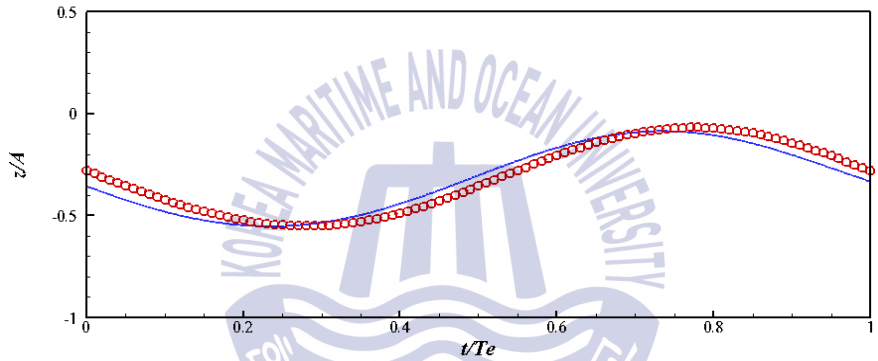
(c) pitch

Fig. 5.6 Time history for C_T, heave and pitch motion of Case 1 (λ/L_{PP}=0.65) (EFD : symbol, Present : line)

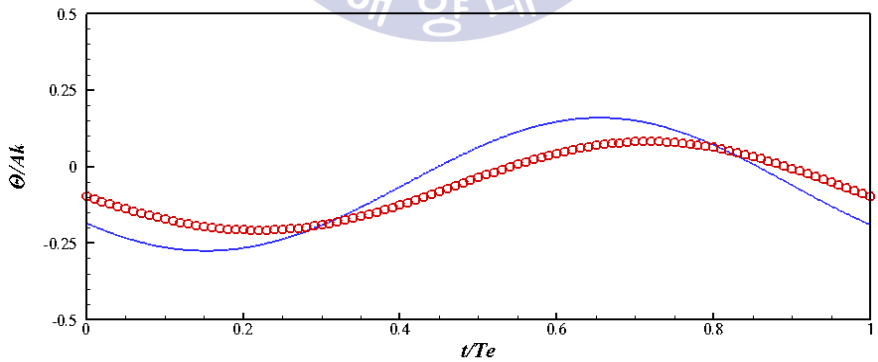
Collection @ kmou



(a) C_T



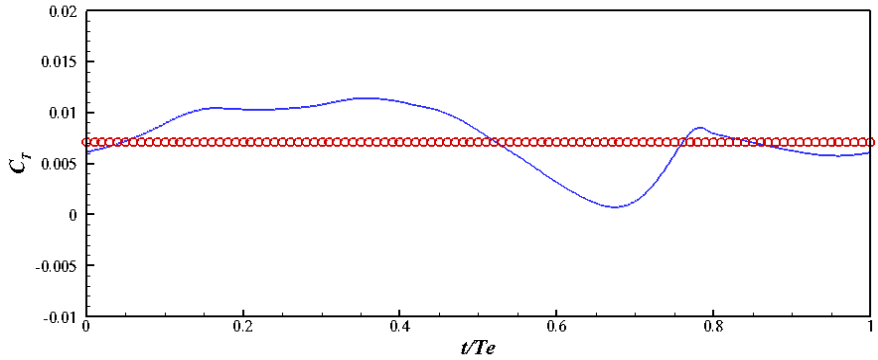
(b) heave



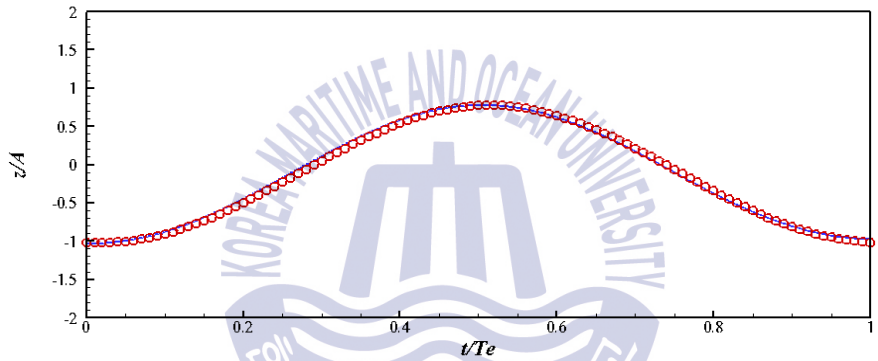
(c) pitch

Fig. 5.7 Time history for C_T, heave and pitch motion of Case 2 (λ/L_{PP}=0.85) (EFD : symbol, Present : line)

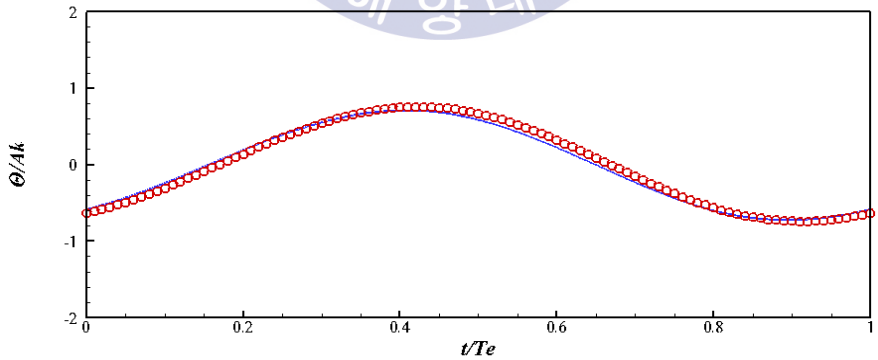
Collection @ kmou



(a) C_T



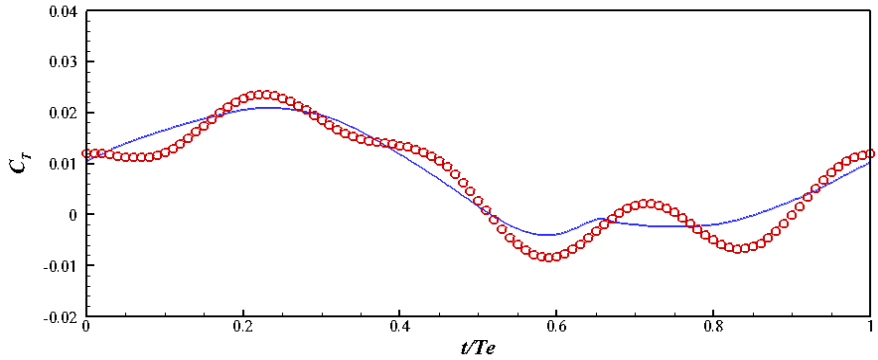
(b) heave



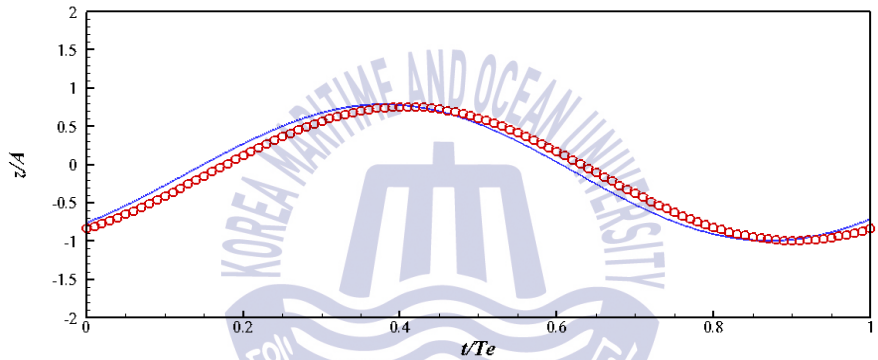
(c) pitch

Fig. 5.8 Time history for C_T, heave and pitch motion of Case 3 (λ/L_{PP}=1.15) (EFD : symbol, Present : line)

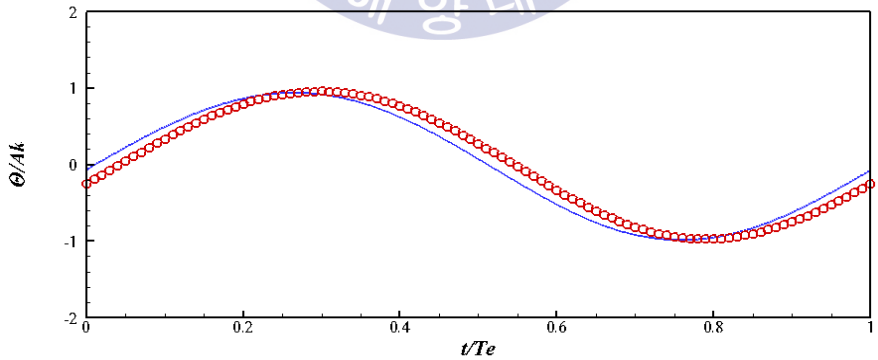
Collection @ kmou



(a) C_T



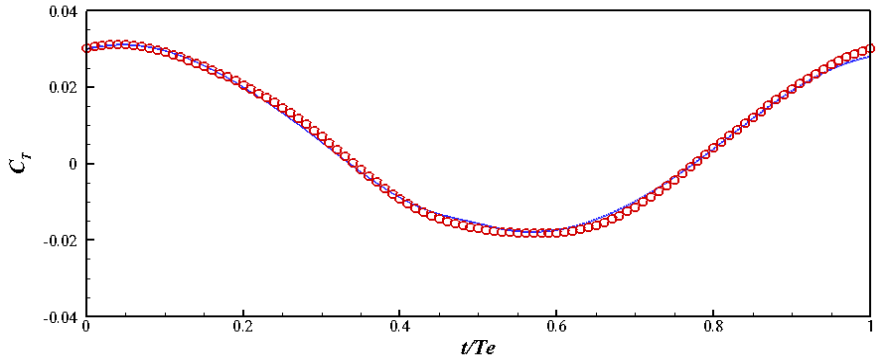
(b) heave



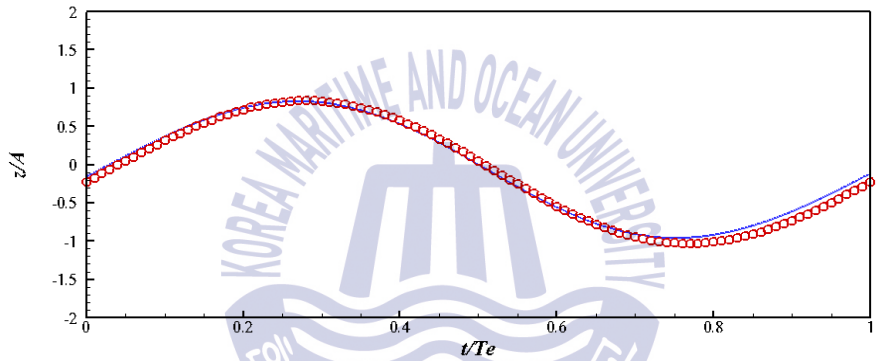
(c) pitch

Fig. 5.9 Time history for C_T, heave and pitch motion of Case 4 (λ/L_{PP}=1.37) (EFD : symbol, Present : line)

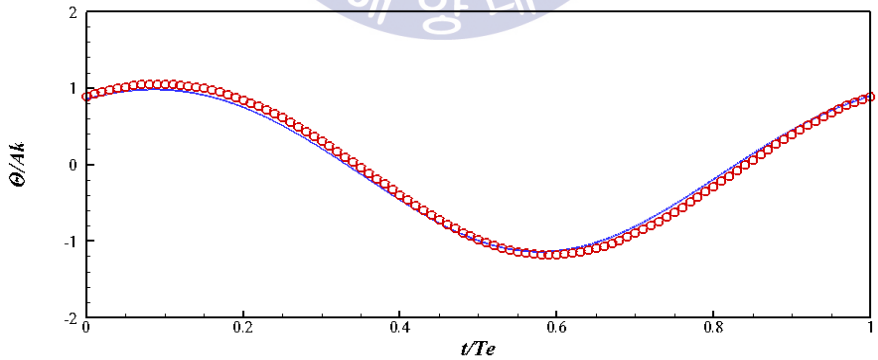
Collection @ kmou



(a) C_T



(b) heave



(c) pitch

Fig. 5.10 Time history for C_T, heave and pitch motion of Case 5 (λ/L_{PP}=1.95) (EFD : symbol, Present : line)

Collection @ kmou

Table 5.6~5.9는 계산한 수치해석 결과를 바탕으로 실험과의 정량적인 비교를 위해 각 파장별 선체에 작용하는 전 저항과 부가저항, 전달함수로 나타낸 운동응답에 대한 결과값을 실험 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 전반적으로 부가저항 및 종동요의 결과가 전 저항과 상하동요의 오차보다 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 단파영역(Case 1~2)에 대한 오차가 상대적으로 다른 영역보다 크다. 이와 같은 이유는 Fig. 5.6~5.7의 단파영역에서 수치해석 결과와 실험 결과와의 차이가 크기 때문이다. 전 저항 결과만으로 분석하였을 때, 파장 별 전 저항 오차는 실험 값 대비 9% 이내로 발생한다. 그러나 부가저항의 오차는 전 저항 오차보다 큰 것으로 나타나는데 이러한 이유는 전 저항 오차에 추가적으로 정수 중 저항의 오차 및 첫 번째 조화 파고의 오차가 복합적인 요소로 작용하여 부가저항의 오차가 증가한 것으로 나타난다. 종동요 전달함수의 오차값은 단파영역에서 실험 결과와 많은 차이를 보이는데, 이 조건에서 종동요 전달함수의 크기는 매우 작은 값이기 때문에 수치적으로 실험결과에 약간만 벗어나더라도 큰 오차를 유발하여 다른 영역보다 수치적으로 큰 값이 나온 것으로 판단된다.

Table 5.6 C_T in difference wave conditions

	C_T ($\times 10^3$)				
Case	1	2	3	4	5
Present	4.379	5.036	7.451	7.559	5.514
EFD (Sadat-Hosseini, et al., 2015)	4.127	4.622	7.078	6.977	5.421
Error (% of EFD)	-6.120	-8.944	-5.271	-8.335	-1.725

Table 5.7 Added resistance coefficient in difference wave conditions

	σ_{aw}				
Case	1	2	3	4	5
Present	4.803	8.320	10.807	7.577	1.828
EFD (Sadat-Hosseini, et al., 2015)	3.386	6.102	9.911	6.512	1.909
Error (% of EFD)	-41.853	-36.353	-9.042	-16.348	4.252

Collection @ kmou

Table 5.8 Heave transfer function in difference wave conditions

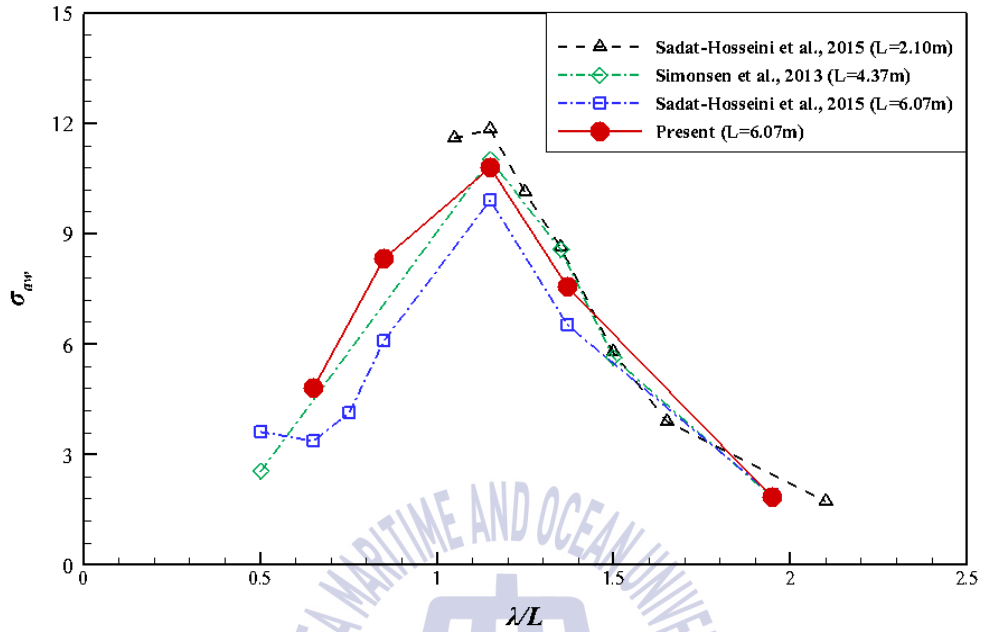
	TF_3				
Case	1	2	3	4	5
Present	0.117	0.242	0.901	0.899	0.890
EFD (Sadat-Hosseini, et al., 2015)	0.130	0.241	0.899	0.875	0.933
Error (% of EFD)	9.936	-0.446	-0.242	-2.760	4.615

Table 5.9 Pitch transfer function in difference wave conditions

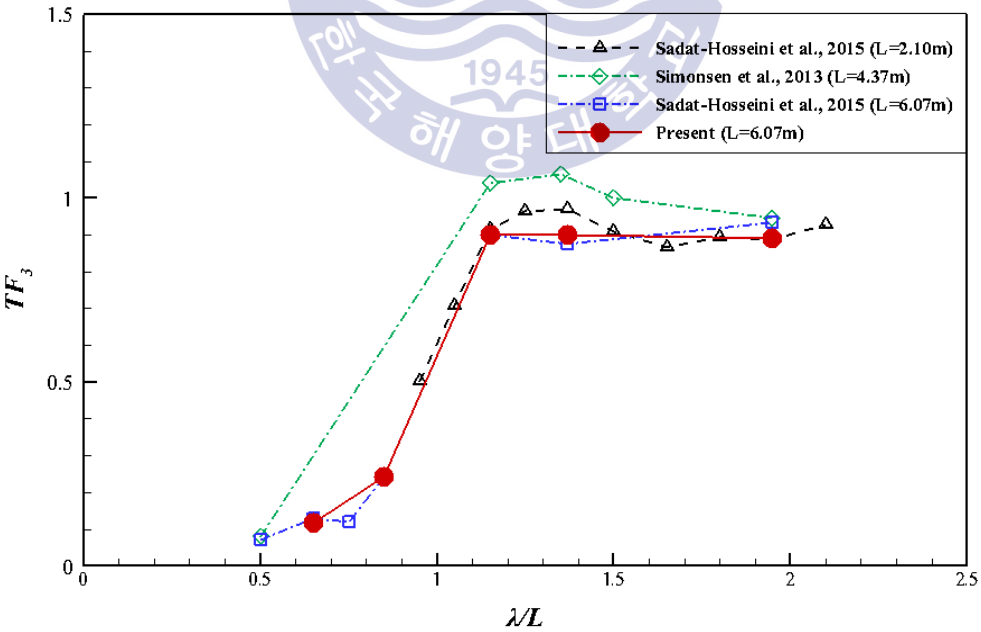
	TF_5				
Case	1	2	3	4	5
Present	0.010	0.225	0.724	0.971	1.067
EFD (Sadat-Hosseini, et al., 2015)	0.017	0.146	0.748	0.966	1.119
Error (% of EFD)	42.000	-53.573	3.294	-0.578	4.652

Fig. 5.11은 부가저항 및 운동응답에 대한 전달함수의 크기를 파장별로 나타낸 그래프이다. 동일한 크기인 6.07m KCS 모형실험 결과 이외에도 4.37m KCS 모형실험 결과(Simonsen, et al., 2013)와 2.10m KCS 모형실험 결과(Sadat-Hosseini, et al., 2015)도 함께 표기하였다. 부가저항의 수치해석 결과는 대부분 동일한 크기의 모형실험 결과보다 상대적으로 높은 값으로 형성되어 있지만 다른 크기의 모형실험 결과와 비교하였을 때 모형실험 결과 범주 내에 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한, 상하동요 및 종동요의 전달함수 수치해석 결과는 동일한 크기의 모형실험 결과와 대부분 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다. Fig 5.6~5.7의 전 저항 그래프와 단파영역에서 상하동요와 종동요 응답 그래프는 실험 결과와 차이를 보이지만, 크기를 파장별로 나타내면 실험과 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 부가저항을 해석하기 위해서는 크기를 파장별로 보는 것도 중요하지만 정확한 해석을 위해서는 시간에 따른 변화를 볼 필요가 있다.

Collection @ kmou

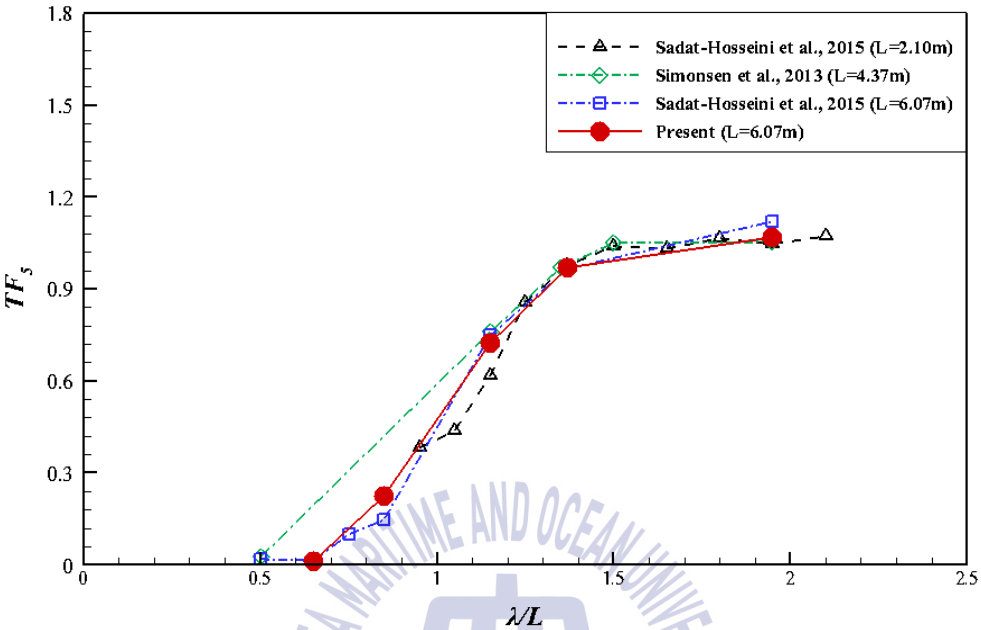


(a) added resistance coefficient



(b) heave motion

Collection @ kmou



(c) pitch motion

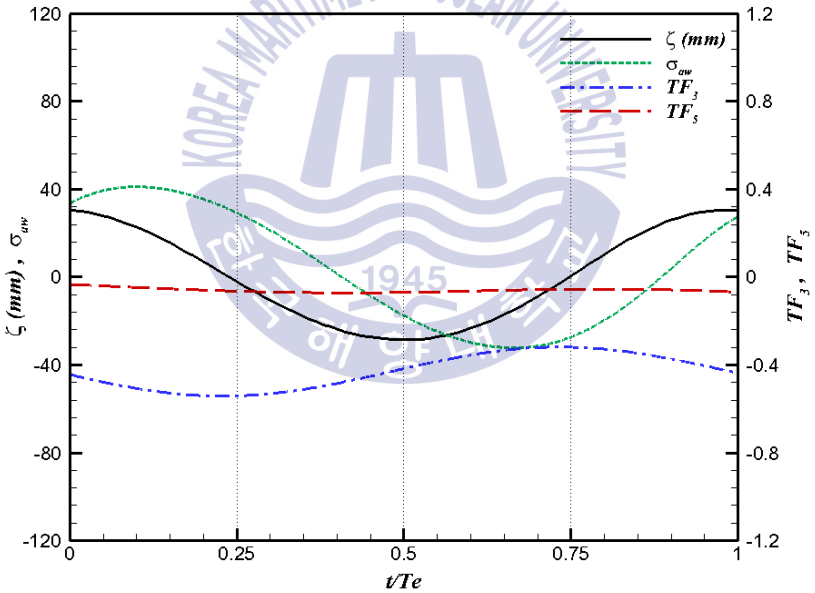
Fig. 5.11 Results of added resistance coefficient, transfer functions of heave and pitch motions in different wave conditions

5.5 파랑별 선박의 부가저항 및 운동성능 변화

Fig. 5.12는 1주기에 대한 파의 진폭, 부가저항 계수, 상하동요 및 종동요의 전달함수를 나타낸다. 일반적으로 파장이 커질수록 상하동요 및 종동요의 운동은 커진다. Case 1~2는 파의 진폭과 주기가 짧은 단파영역으로 선체의 운동에 거의 영향을 주지 못한다. 따라서 상하동요와 종동요의 진동은 파랑이 없는 정수 중 선박의 sinkage와 trim 값과 비슷하게 대부분 음의 값에서 진동한다. Case 3~5에서 파의 진폭과 주기는 부가저항과 선체의 운동에 충분한 영향을 미치기 시작한다. Case 3의 경우, 파랑의 마루가 선수에 위치하는 지점(t/T_e=0)에서 종동요는 음의 최대값으로, 선수는 파랑의 영향을 가장 많이 받게 된다. 파랑의 골이 선수에 위치하는

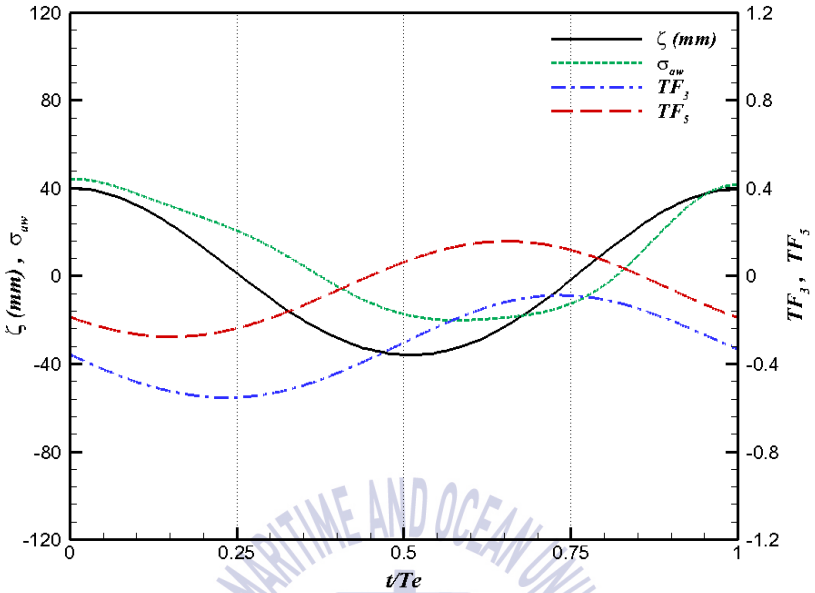
Collection @ kmou

지점(t/T_e=0)에서 종동요는 양의 최대값으로 이동하며, 선수의 위치도 가장 높다. 이와 같이, 파가 진행하면서 선체는 파랑의 움직임과는 반대로 거스르면서 움직이기 때문에 파의 영향을 가장 많이 받는다. 따라서 Table 5.7의 부가저항 결과 값에서 알 수 있듯이, Case 3의 부가저항이 다른 경우보다 큰 것을 알 수 있다. 이와 반대로 Case 5의 경우, t/T_e=0에서 종동요는 양의 최대값에 근접하며 선수는 기준 위치보다 높은 지점에 위치한다. 파가 진행하면서 선체는 파랑에 미끄러지며 움직이기 때문에 파의 영향은 가장 작게 받는다. 따라서 부가저항은 다른 Case 경우 보다 작은 것을 알 수 있다.

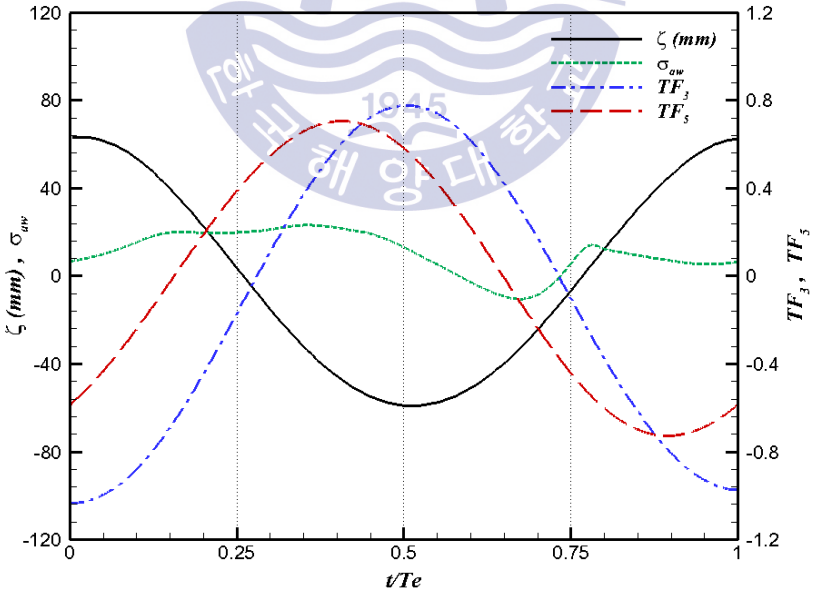


(a) Case 1 (λ/L_{PP}=0.65)

Collection @ kmou

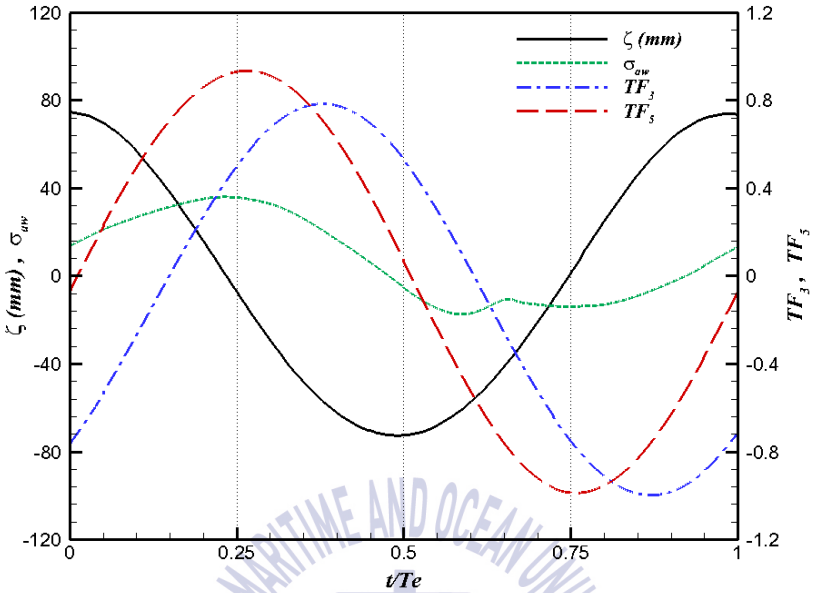


(b) Case 2 (λ/L_{PP}=0.85)

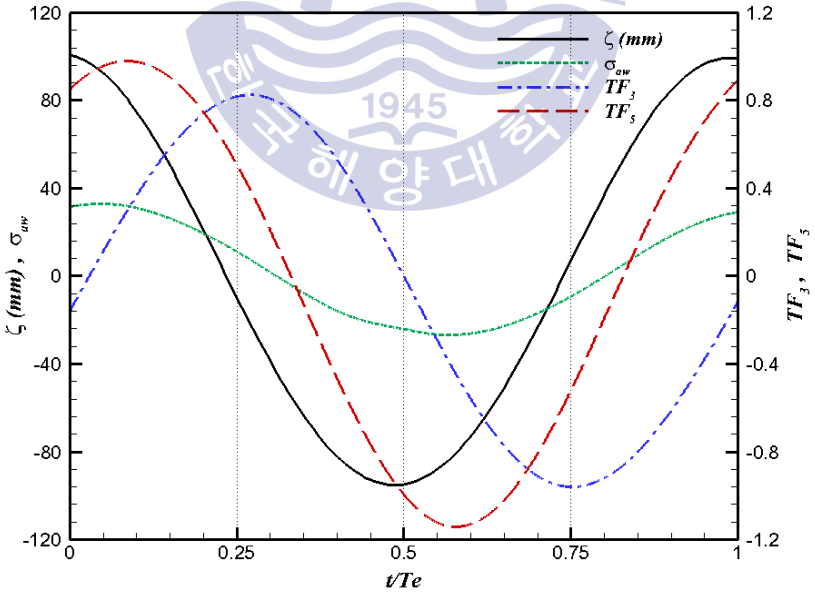


(c) Case 3 (λ/L_{PP}=1.15)

Collection @ kmou



(d) Case 4 (λ/L_{PP}=1.37)



(e) Case 5 (λ/L_{PP}=1.95)

Fig. 5.12 One encounter period of wave amplitude, added resistance coefficient, heave and pitch motions for various wave conditions

Collection @ kmou

Figure 5.13~5.17은 각 파장에 대해 t/T_e=0, 1/4, 2/4, 3/4 주기에서 선체 주위의 파형 분포(top view)와 상하동요와 종동요 응답(side view)을 나타낸 것이다. Fig 5.13은 Case 1 (λ/L_{PP}=0.65)일 때의 선체 주위의 파형과 운동응답을 나타낸다. 파의 주기가 짧고 파고 또한 작은 파랑으로 선체 주위에 생성되는 파형 또한 상대적으로 얕고 주기가 짧은 파형이 생성된다. 파랑에 의한 선체의 상하동요 및 종동요 응답은 매우 작으며 모두 음의 값에 분포한다. 또한 선체의 움직임은 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

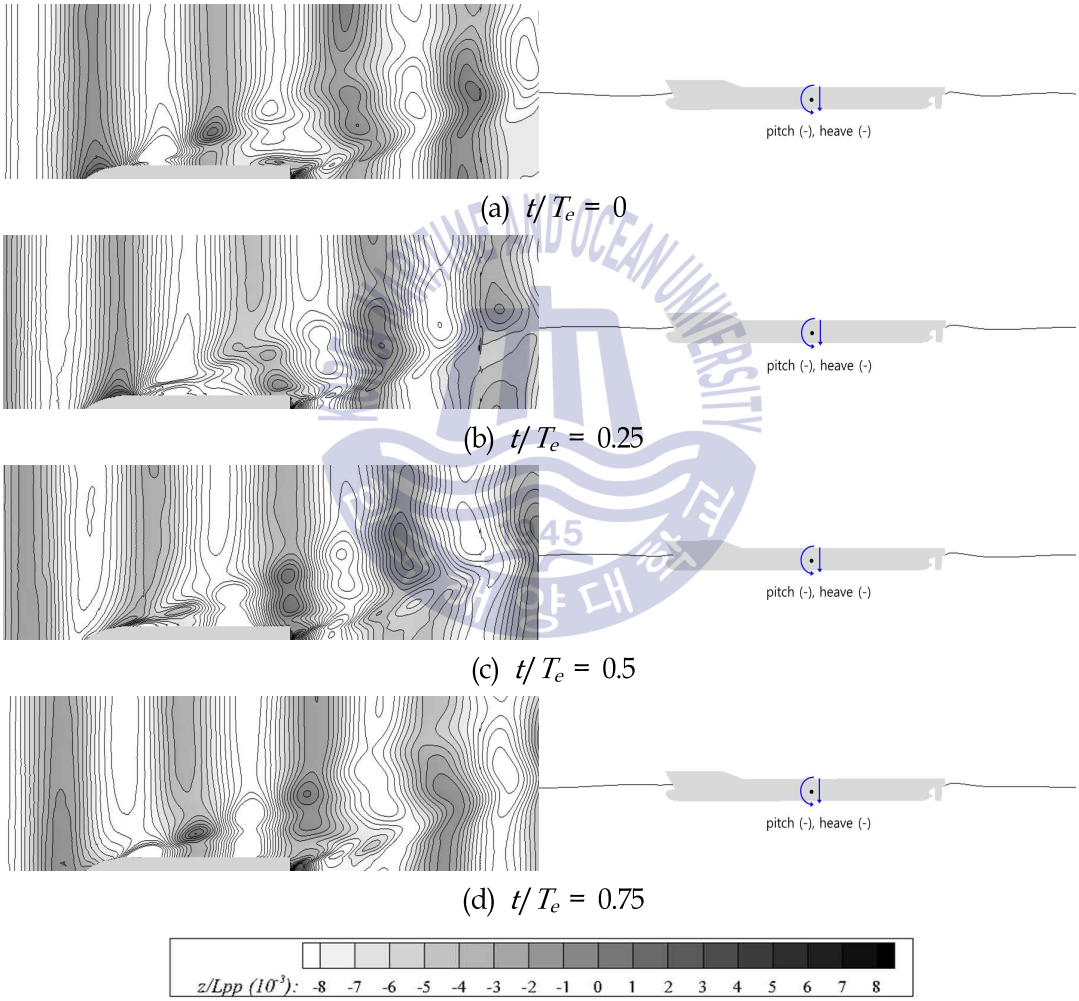


Fig. 5.13 Wave pattern (top view) and motions (side view) over one encounter period of Case 1 (λ/L_{PP}=0.65)

Collection @ kmou

Fig 5.14는 Case 2 (λ/L_{PP}=0.85)일 때의 선체 주위의 파형과 운동응답을 나타낸다. Case 1과 마찬가지로 파의 주기가 짧고 파고 또한 작은 파랑으로 선체 주위에 생성되는 파형의 주기가 짧으며 파랑의 진폭 또한 작다. 그러나 Case 1보다는 파랑의 진폭과 주기가 크기에 t/T_e=0.5에서 상하동요와 t/T_e=0.75에서 종동요가 양의 값을 가지기 시작한다. 그러나 Case 1과 마찬가지로 파랑에 의한 선체의 움직임은 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

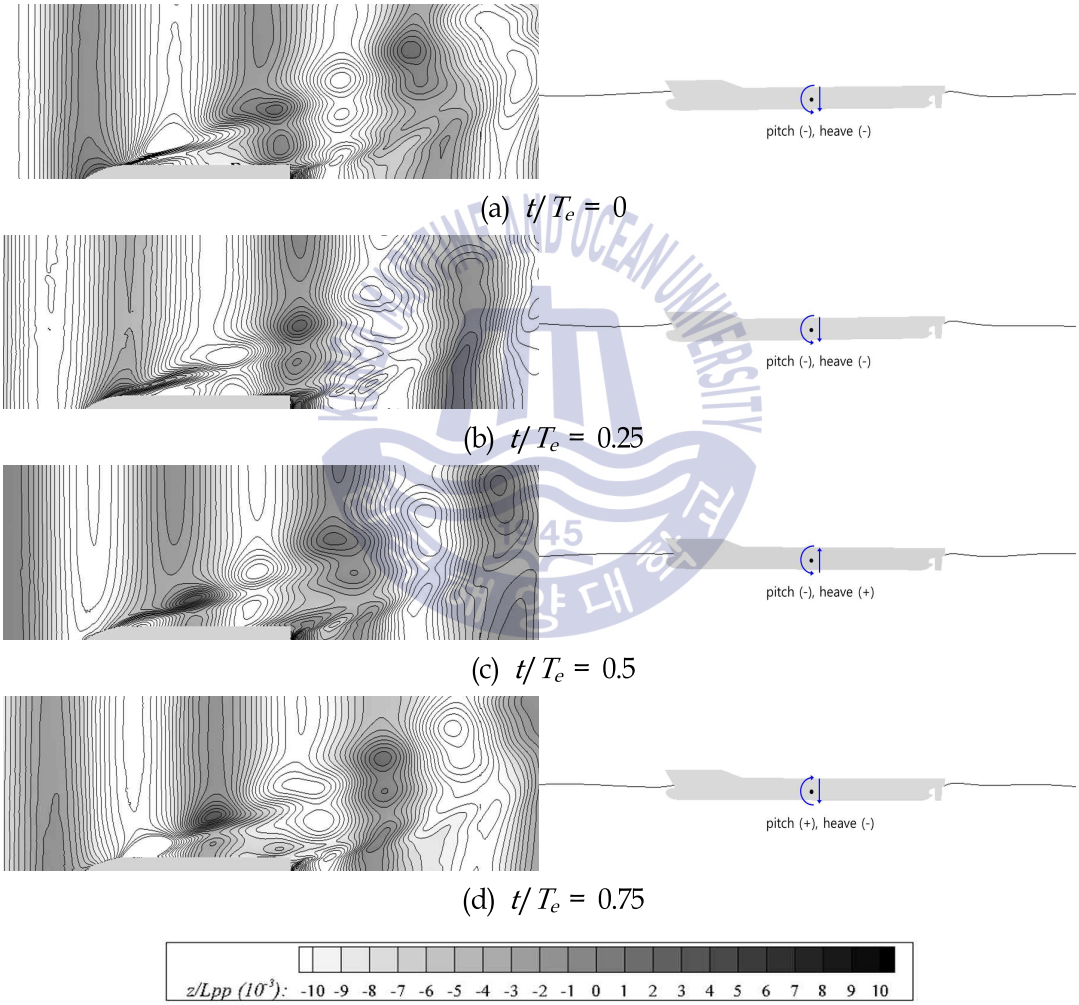


Fig. 5.14 Wave pattern (top view) and motions (side view) over one encounter period of Case 2 (λ/L_{PP}=0.85)

Collection @ kmou

Fig 5.15는 Case 3 (λ/L_{PP}=1.15)일 때의 선체 주위의 파형과 운동응답을 나타낸다. 파의 주기와 파랑의 진폭이 적당한 파로써 Case 1~2와는 달리 선체의 운동에 많은 영향을 미치기 시작한다. 파랑의 마루가 선수에 위치하게 되는 t/T_e=0 지점에서 선수는 가장 낮게 위치하게 되며 물에 가장 많이 잠기게 된다. 파랑의 골이 선수에 위치하게 되는 t/T_e=0.5 지점에서는 선수는 가장 높게 위치하게 된다. 따라서 Case 3의 파랑은 선체에 많은 영향을 미치면서 이동하고, 선체는 파랑에 거스르며 진행하는 것을 알 수 있다.

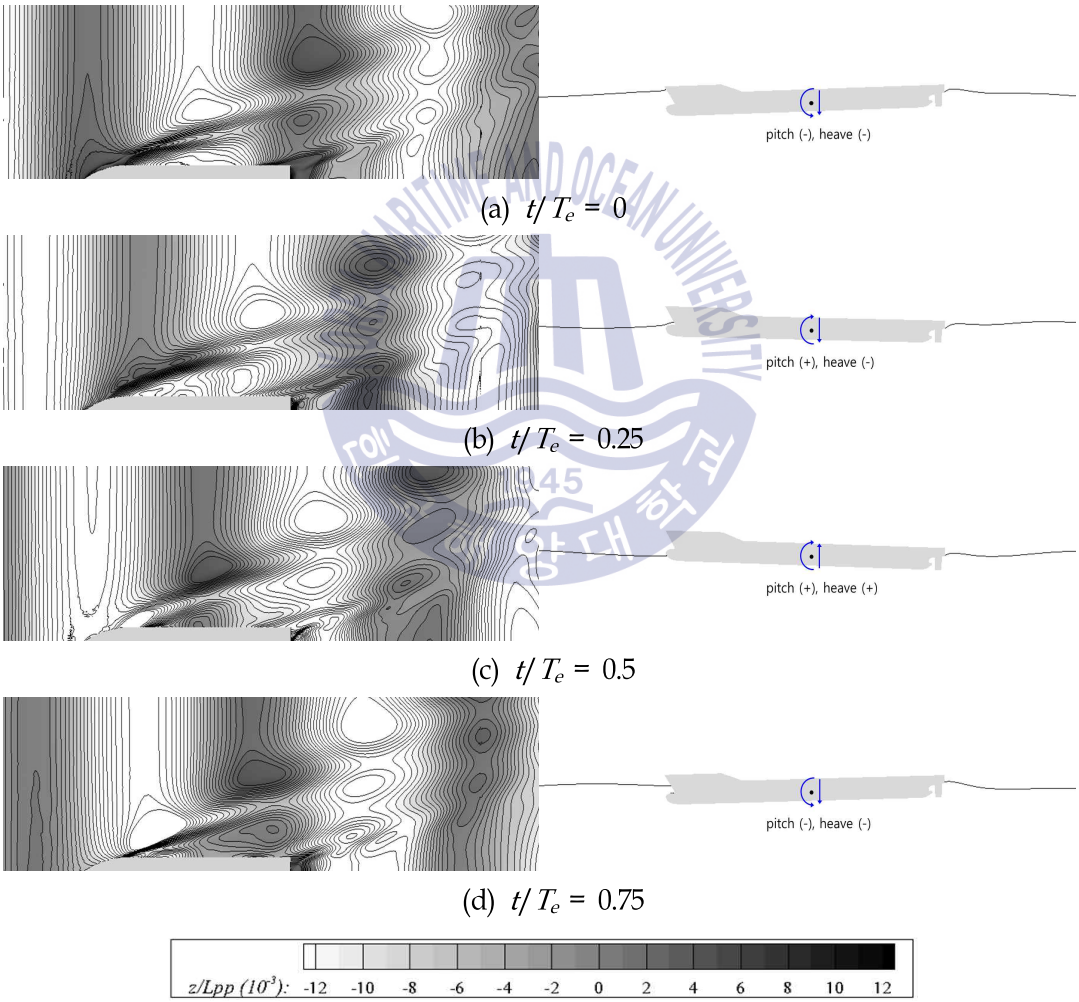


Fig. 5.15 Wave pattern (top view) and motions (side view) over one encounter period of Case 3 (λ/L_{PP}=1.15)

Collection @ kmou

Fig 5.16은 Case 4 (λ/L_{PP}=1.37)일 때의 선체 주위의 파형과 운동응답을 나타낸다. 파의 주기와 파랑의 진폭은 적당히 큰 파랑으로, t/T_e=0 지점에서 선수의 회전운동은 거의 없으나 상하동요가 크기에 선체의 무게중심이 가장 낮은 위치에 있다. 파가 진행하면서 t/T_e=0.25 지점에서는 선수부분이 가장 높게 위치하며, t/T_e=0.5 지점에서는 다시 원래대로 복귀한다. t/T_e=0.75 지점에서 선수부분이 가장 낮게 위치한다. Case 4의 경우에는 Case 3 보다는 작지만 파랑이 선체에 적당한 영향을 미치며 진행하는 것을 알 수 있다.

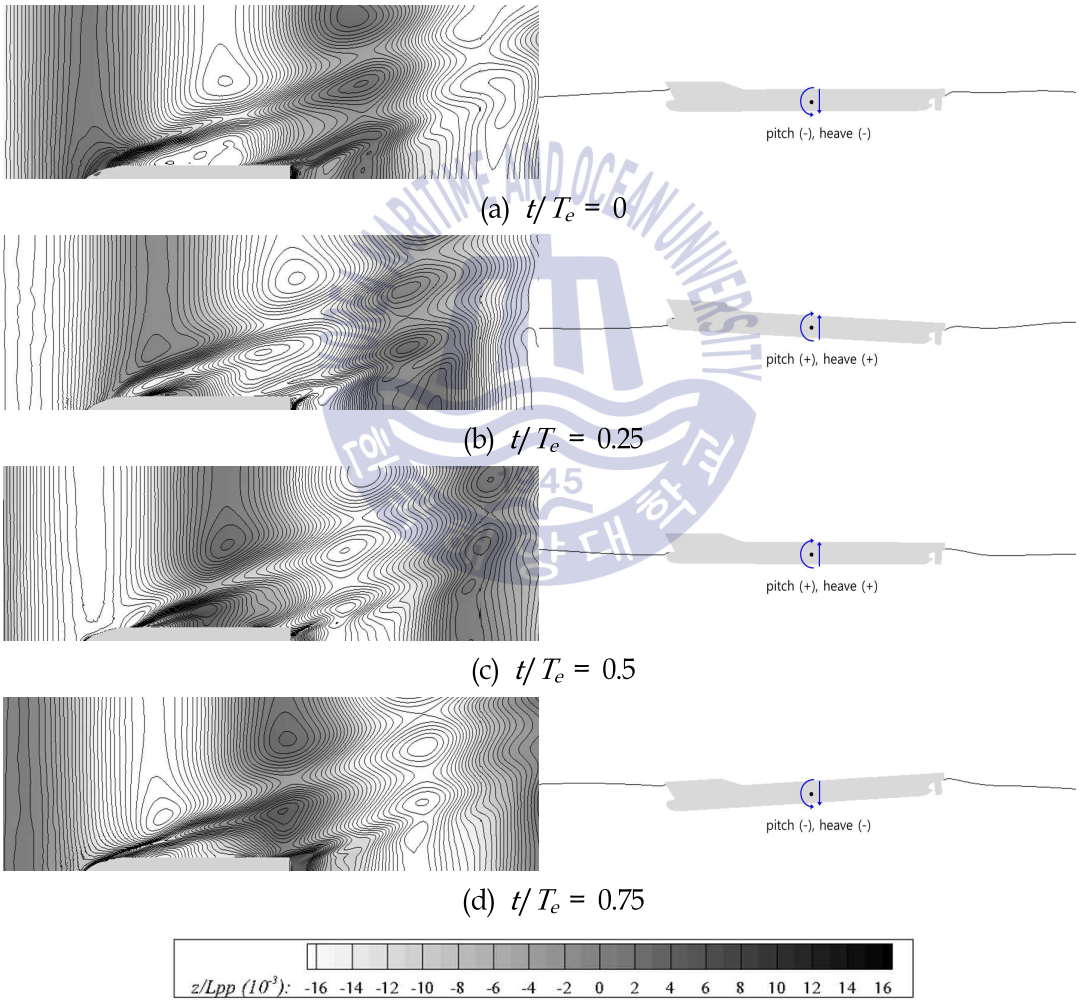


Fig. 5.16 Wave pattern (top view) and motions (side view) over one encounter period of Case 4 (λ/L_{PP}=1.37)

Collection @ kmou

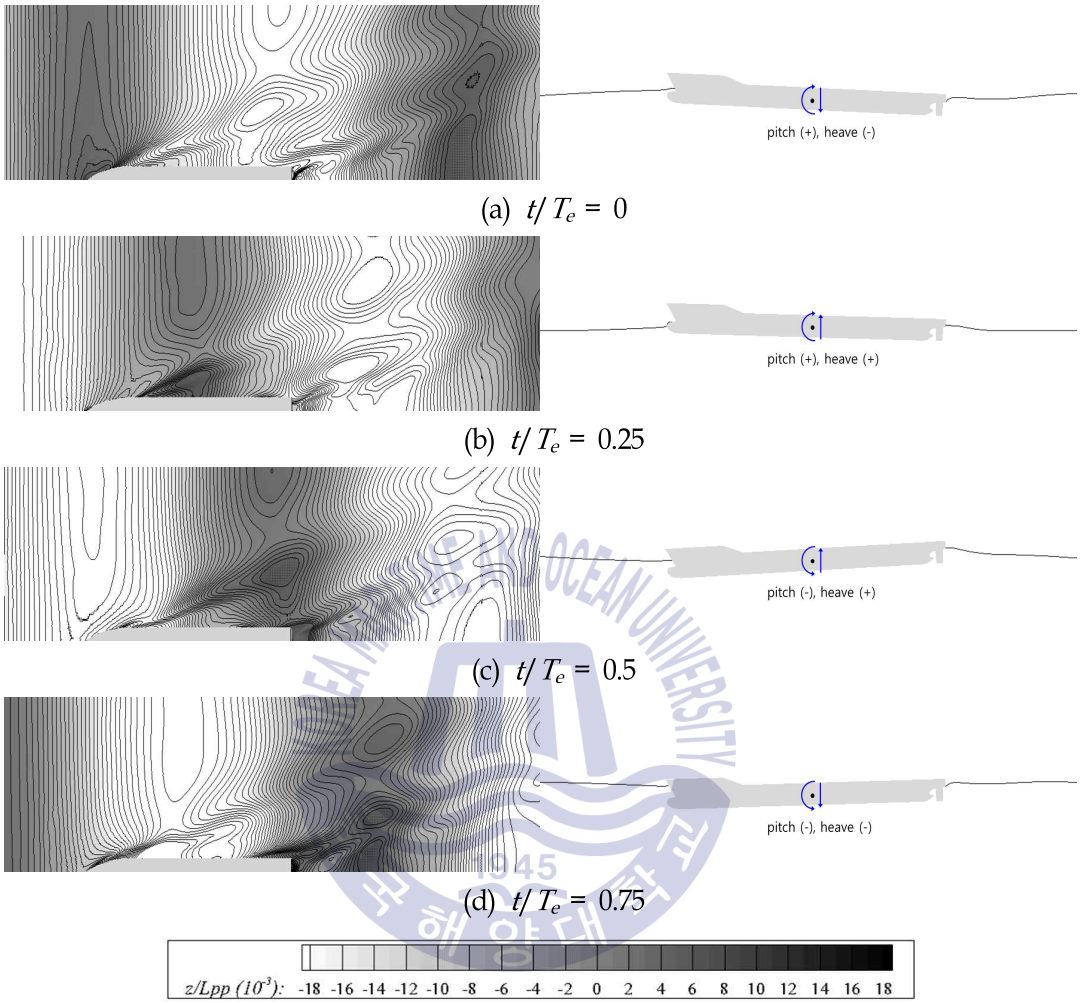


Fig. 5.17 Wave pattern (top view) and motions (side view) over one encounter period of Case 5 (λ/L_{PP}=1.95)

Fig 5.17은 Case 5 (λ/L_{PP}=1.95)일 때의 선체 주위의 파형과 운동응답을 나타낸다. 파의 주기와 파랑의 진폭이 가장 큰 지점으로, t/T_e=0 지점에서 선수는 가장 높은 위치에 있으며, 선체의 무게중심은 초기 선체의 무게중심과 비슷한 지점에 위치한다. 파가 진행하면서 t/T_e=0.25 지점에서는 점차 선수의 위치는 낮아지고 선체의 무게중심은 높게 위치한다. t/T_e=0.5 지점에 위치하게 될 때, 선수는 가장 낮은 위치에 있으며 선체의 무게중심은 다시 기존의 위치로 이동한다. t/T_e=0.75 지점에서는 선수는

Collection @ kmou

다시 올라오기 시작하고 선체의 무게중심은 가장 낮게 위치한다. Case 5의 경우 파의 진행과 선체의 움직임을 종합해보면, 파랑은 선체에 미비한 영향을 미치고, 선체는 파랑에 미끄러지면서 진행하는 것을 확인할 수 있다.

Collection @ kmou

제 6 장 결 론

본 연구에서는 오픈소스 라이브러리인 OpenFOAM을 사용하여 선수파 중 KCS 선형의 부가저항 및 운동성능을 해석하였다. 5가지 파랑에 대해 단파 및 중·장파영역으로 나누고, 파고와 파장이 각기 다른 파형을 비교적 일관되게 생성할 수 있는 격자와 수치방법을 찾은 후 실험 결과와 비교하였다. 또한 격자에 대한 불확실성을 평가함으로서 부가저항 및 운동성능에 대한 검증을 진행하였다. 마지막으로 각 파장에 대한 부가저항과 운동응답 계산 결과를 모형실험 결과와 비교하였다.

정수 중 조건에서 선박의 전 저항, sinkage 및 trim의 결과를 실험결과와 비교하였을 때 5% 이내에서 만족하는 결과를 보인다. 또한 운동성능을 구속한 경우 구속하지 않은 경우보다 파의 영향을 약간 더 받는다. 마찬가지로 전 저항도 운동성능을 구속한 경우가 약간 더 큰 수치인 것을 확인할 수 있다. 파랑의 생성은 실험 결과 대비 5% 이내의 오차로 비교적 일관되게 생성되며 파장이 커질수록 많은 격자가 파랑 내에 위치하여 오차가 줄어드는 것으로 확인되었다. 또한 격자에 대한 부가저항과 운동응답의 불확실성을 해석하고 이에 대한 신뢰도를 평가하였다. 격자가 조밀해질수록 파랑의 파고와 전 저항, 부가저항 및 운동응답은 모형실험 결과에 수렴하는 것을 알 수 있다. 부가저항의 불확실성은 31.89%, 수정된 불확실성은 11.74%로 가장 높게 추정되었으며 격자의 밀집도는 부가저항 해석에서 큰 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다.

각 파랑에 대한 선체의 전 저항 결과 및 단파 영역에서 상하동요와 종동요 응답 결과 그래프는 실험 결과 그래프와 다소 차이를 보이며 진동한다. 그러나 푸리에 시리즈를 이용하여 계산된 수치해석의 결과를 비교해볼 때, 선박에 작용하는 선박에 작용하는 전 저항과 상하동요 응답은 10% 이내로 형성되어 결과와 대체적으로 비슷한 것을 알 수 있다. 부가저항 결과는 Case 1에서 41.85%의 최대 오차가 발생하였고, Case 5에서 4.25%의 최저 오차가 발생하였다. 전달함수로 나타낸 상하동요는 실험결과와 10% 이내의 오차로 생성되며, 종동요의 결과는 단파영역에서 최대 53.57%의 최대

Collection @ kmou

오차가 발생하며 다소 큰 차이를 보인다.

파랑별 선박 주위의 파형과 선체의 움직임에 대한 결과는, 단파영역에서는 파랑의 진폭의 절대적인 크기가 작기 때문에 선체가 받는 부가저항의 크기가 작다. 장파영역에서는 선박이 파랑의 이동방향에 따라 미끄러지며 운동하므로 부가저항의 크기는 작다. 그러나 파장과 선박의 크기가 비슷한 중파의 경우 선박은 파랑에 거스르며 운동하므로 다른 파장에 비해 부가저항의 크기가 큰 것을 확인할 수 있다.

향후, 특정한 주기를 가진 경사 파(oblique wave)에서 선박에 작용하는 부가저항과 운동응답에 대해 수치해석 검증을 확장할 필요가 있다.

Collection @ kmou

참고문헌

황태규, 2012. *선박에너지효율등급 도입에 따른 친환경-고효율 조선 요소부품 경쟁력 제고 전략*. 한국산업기술진흥원.

Arribas, F.P., 2007. Some methods to obtain the added resistance of a ship advancing in waves. *Ocean Engineering*, 34, pp.946-955.

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, pp.1415-1433.

Celik, I.B. Ghia, U. Roache, P.J. Freitas, C.J. Coleman, H. & Raad, P.E., 2008. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. *Journal of Fluids Engineering*, 130(7), pp.078001.

Gerritsma, J. & Beukelman, W., 1972. Analysis of the resistance increase in waves of a fast cargo ship. *International Shipbuilding Progress*, 19(217), pp.285-293.

Faltinsen, O.M. Minsaas, K.J. Liapis, N. & Skjørdal, S.O., 1980. Prediction of resistance and propulsion of a ship in a seaway. *Proceeding of the 13th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Tokyo, Japan, 6-10 October, 1980.

Fang, M.C. & Chen, G.R., 2006. On the nonlinear hydrodynamic forces for a ship advancing in waves. *Ocean Engineering*, 33, pp.2119-2134.

Hirota, K. Matsumoto, K. Takagishi, K. Yamasaki, K. Orihara, H. & Yoshida, H., 2005, Development of bow shape to reduce the added resistance due to waves and verification of full scale measurement. *Proceedings of the International Conference on Marine Research and Transportation*, pp.63-70.

Hirt, C.W. & Nichols, B.D., 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamic of free boundaries. *Journal of computational physics*, 39(1), pp.201-225.

Issa, R.I., 1985. Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting. *Journal of Computational Physics*. 62, pp.40-65.

ITTC – Quality Manual 7.5-03-01–01, 2008. CFD General. Uncertainty Analysis in CFD

Collection @ kmou

verification and Validation Methodology and Procedures. *ITTC Recommended Procedures and Guidelines*.

Jacobsen, N.G. Fuhrman, D.R. & Fredsøe, J., 2012. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70(9), pp.1073-1088.

Joncquez, S.A.G. Bingham, H.B. Andersen, P. & Kring, D., 2008. Validation of Added Resistance Computations by a Potential-Flow Boundary-Element Method. *Proceeding of the 27th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Seoul, Korea, 5-10 October, 2008.

Journee, J.M.J., 1992. Experiments and Calculations on 4 Wigley Hull Forms in Head Waves. *Delft University of Technology*, Report No. 0909.

Kashiwagi, M. Ikeda, T. & Sasakawa, T., 2009. Effects of Forward Speed of a Ship on Added Resistance in Waves. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 20(3), pp.196-203.

Kim, K.H. & Kim, Y., 2011. Numerical study on added resistance of ships by using a time-domain Rankine panel method. *Ocean Engineering*, 38, pp.1357-1367.

Kuroda, M. Tsujimoto, M. Sasaki, N. Ohmatsu, S. & Takagi, K., 2012. Study on the bow shapes above the waterline in view of the powering and greenhouse gas emissions in actual seas. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 226(1), pp.23-35.

Larsson, L. Stern, F. & Visonneau, M., 2013. *Numerical Ship Hydrodynamics - An Assessment of the Gothenburg 2010 Workshop*, Dordrecht, Springer.

Larsson, L. Stern, F. Visonneau, M. Hirata, N. Hino, T. & Kim, J., 2015. *Proceedings, Tokyo 2015 Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics*. National Maritime Research Institute, Tokyo, Japan.

Lee, H. & Rhee, S.H. 2015. A dynamic interface compression method for VOF simulations of high-speed planing watercraft. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(5), pp.1849-1857.

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

Collection @ kmou

pp.1 - 10.

Menter, F.R., 1993. Zonal two equation k-w turbulence models for aerodynamic flows. *24th Fluid Dynamics Conference*, AIAA Paper 93-2906, Orlando, Florida, 6-9 July.

Nakamura, S. & Naito, S., 1977. Propulsive Performance of a Container Ship in Waves. *The Society of Naval Architects of Japan*, 15, pp.24-48.

National Maritime Research Institute, 2015. *Tokyo 2015 A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics*. [Online] (Updated 1 August 2016) Available at: http://www.t2015.nmri.go.jp [Accessed 18 October 2016].

Oh, S. Yang, J. & Park S.-H., 2015. Computational and Experimental Studies on Added Resistance of AFRAMAX-Class Tankers in Head Seas. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(6), pp.471-477.

Orihara, H. & Miyata, H., 2003. Evaluation of added resistance in regular incident waves by computational fluid dynamics motion simulation using an overlapping grid system. *Journal of Marine Science and Technology*, 8, pp.47-60.

Park, DM. Lee, J. & Kim, Y., 2015. Uncertainty analysis for added resistance experiment of KVLCC2 ship. *Ocean Engineering*, 95, pp.143-156.

Park, I.R. Kim, J. Kim, Y.-C. Kim, K.-S. Van, S.-H. & Suh, S.-B., 2013. Numerical Prediction of Ship Motions in Wave using RANS Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(4), pp.232-239.

Park, S. Park, S.W. Rhee, S.H. Lee, S.B. Choi, J.-E. & Kang, S.H., 2013. Investigation on the wall function implementation for the prediction of ship resistance. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5, pp.33-46.

Park, S. Lee, H. & Rhee, S.H., 2016. Numerical investigation of Anti-Diffusion Source Term for Free-Surface Wave Flow. *Journal of Advanced Research in Ocean Engineering*, 2(2), pp.48-60.

Patankar, S.V. & Spalding, D.B., 1972. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 15, pp.1787-1806.

Collection @ kmou

Sadat-Hosseini, H. Wu, P.C. Carrica, P.M. Kim, H. Toda, Y. & Stern, F., 2013. CFD verification and validation of added resistance and motions of KVLCC2 with fixed and free surge in short and long head waves. *Ocean Engineering*, 59, pp.240-273.

Sadat-Hosseini, H. Toxopeus, S. Kim, D.H. Castiglione, T. Sanada, Y. Stocker, M. Simonsen, C. Otzen, J.F. Toda, Y. & Stern, F., 2015. Experiments and computations for KCS added resistance for variable heading. *World Maritime Technology Conference*, Providence, RI, 1-5 November, 2015.

Sato, Y. Miyata, H. & Sato, T., 1999. CFD simulation of 3-dimensional motion of a ship in waves: application to an advancing ship in regular heading waves. *Journal of Marine Science and Technology*, 4, pp.108-116.

Seo, M.-G. Park, D.-M. Yang, K.-K. & Kim, Y., 2013. Comparative study on computation of ship added resistance in waves. *Ocean Engineering*, 73, pp.1-15.

Seo, S. Song, S. & Park, S., 2016. A study on CFD uncertainty analysis and its application to ship resistance performance using open source libraries. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(4), pp.338-344.

Shen, Z. Wan, D. & Carrica, P.M., 2015. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering. *Ocean Engineering*, 108, pp.287-306.

Simonsen, C.D. Otzen, J.F. Joncquez, S. & Stern, F., 2013. EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head wave. *Journal of Marine Science and Technology*, 18, pp.435-459.

Simonsen, C.D. Otzen, J.F. Nielsen, C. & Stern, F., 2014. CFD prediction of added resistance of the KCS in regular head and oblique waves. 30th Symposiumon Naval Hydrodynamics, Hobart, Australia, 2-7 November.

Storm-Tejsen, J. Yeh, H.Y.H. & Moran, D.D., 1973. Added resistance in waves. *Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions*, 81, pp.250-279.

Tezdogan, T. Demirel, Y.K. Kellett, P. Khorasanchi, M. Incecik, A. & Turan, O., 2015. Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming. *Ocean Engineering*, 97, pp.186-206.

Collection @ kmou

Van Leer, B., 1979. Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme. V. A Second-Order Sequel to Godunov's Method. *Journal of Computational Physics*, 32(1), pp.101-136.

Vukcevic, V. Jasak, H. & Malenica, S., 2016a. Decomposition model for naval hydrodynamic applications, Part I: Computational method. *Ocean Engineering*, 121, pp.37-46.

Vukcevic, V. Jasak, H. & Malenica, S., 2016b. Decomposition model for naval hydrodynamic applications, Part II: Verification and validation. *Ocean Engineering*, 121, pp.76-88.

Weiss, J.M. Maruszewski, J.P. & Smith, W.A., 1999. Implicit Solution of Preconditioned Navier–Stokes Equations Using Algebraic Multigrid. *AIAA Journal*, 37(1), pp. 29-36.

Weymouth, G.D. Wilson, R.V. & Stern, F., 2005. RANS Computational Fluid Dynamics Predictions of Pitch and Heave Ship Motions in Head Seas. *Journal of Ship Research*, 49(2), pp.80-97.

Wilson, R.V. Carrica, P.M. & Stern, F., 2006. Unsteady RANS method for ship motions with application to roll for a surface combatant. *Computers & Fluids*, 35, pp.501-524.

Collection @ kmou