

비선형 해양파 수치 모사를 위한 고속 재현 기법

이상범¹, 최영명^{2*}

¹대우조선해양 선박해양연구소

²부산대학교 조선해양공학과

A fast reconstruction technique for nonlinear ocean wave simulation

Sang-Beom Lee¹, Young-Myung Choi^{2*}

¹Ship and Ocean R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. Ltd.

²Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University

요 약 최근 컴퓨터 성능 향상과 더불어 대규모 클러스터 서비스가 기존의 산업 및 연구기관뿐만 개인에게도 제공되고 있으며, 막대한 계산 성능을 이용한 공학 설계 활용은 빠르게 증가하고 있다. 이에 조선 해양 산업에서는 많은 계산 비용이 요구되는 전산유체역학 기법을 선박 및 해양구조물 설계에 활용하려는 노력이 증가하고 있다. 선박 및 해양구조물과 같은 부유체는 대양에서 해양파, 조류, 바람과 같은 환경 외란에 노출되어 있으며 이러한 환경 외란은 전산유체역학에서 고정도 모델링이 필요하다. 특히 해양파의 경우 비선형 전산유체역학의 특성상 기존의 선형 중첩법에서 벗어난 비선형 해양파가 고려되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 비선형 해양파 수치 모사를 위해 고속 재현 기법을 제안하고 전산유체역학 기법을 활용하여 검증을 수행하였다.

• 주제어 : 비선형 해양파, 해양파 재현, 전산유체역학, 역 푸리에 변환, ISO_C_BINDING

Abstract An improvement of computational resources with a large scale cluster service is available to the individual person, which has been limited to the original industry and research institute. Therefore, the application of powerful computational resources to the engineering design has been increased fast. In naval and marine industry, the application of Computational Fluid Dynamics, which requires a huge computational effort, to a design of ship and offshore structure has been increased. Floating bodies such as the ship or offshore structure is exposed to ocean waves, current and wind in the ocean, therefore the precise modelling of those environmental disturbances is important in Computational Fluid Dynamics. Especially, ocean waves has to be nonlinear rather than the linear model based on the superposition due to a nonlinear characteristics of Computational Fluid Dynamics. In the present study, a fast reconstruction technique is suggested and it is validated from a series of simulations by using the Computational Fluid Dynamics.

• Key Words : Nonlinear ocean waves, Ocean wave reconstruction, Inverse Fourier Transform, ISO_C_BINDING

Received 16 March 2022, Revised 26 March 2022, Accepted 28 March 2022

* Corresponding Author Young-Myung Choi, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, Korea, E-mail: youngmyung.choi@gmail.com

I. 서론

최근 컴퓨터의 발달 및 4차 산업 혁명으로 대규모 클러스터가 전 세계적으로 확보되고 있으며, 컴퓨터 코어 수로 대표되는 계산 능력이 빠르게 증대되고 있다. 대표적으로 아마존의 경우 기존의 온라인 쇼핑 사업에서 벗어나, 대규모 클러스터를 확보하여 클라우드 플랫폼 서비스(AWS; Amazon Web Services)를 시작하였고, 저렴한 가격으로 개인과 기업에 대규모 계산 능력을 제공하고 있다. 이에 힘입어 공학 분야에서 컴퓨터를 활용한 설계 기술이 점차 고도화되고 있다.

조선 해양 산업은 선박의 저항, 추진, 운동으로 대표되는 선박 및 해양구조물의 유체 성능 해석 분야의 실험 및 이상 유동 해석에 의존하여 선박의 외형, 즉 선형이 설계됐다. 하지만 최근 들어 비선형 및 점성 효과가 고려된 유체 거동 지배 방정식, 나비에-스토크스 방정식(Navier-Stokes equations)을 직접 푸는 전산 유체역학(Computational Fluid Dynamics; CFD) 기법을 활용한 설계가 빠르게 확산하고 있다. 선박 및 해양구조물의 경우, 대양 위에 부유(Flotation)하고 있고, 해양파(Ocean wave), 조류(Current) 및 바람(Wind)과 같은 환경 외란에 노출되어 있다. 이러한 환경 외란은 선박 및 해양구조물의 운동을 야기하고, 이는 설계에 동역학적 효과가 고려돼야 함을 의미한다. 특히 전산유체역학에서의 해양파 시뮬레이션은 전산유체역학이 태생적으로 내포하고 있는 수치 점성(Numerical damping; Natural damping)과 불규칙 해양파의 비선형성에 의해 정밀도(Precision)가 낮다. 이는 선박 저항, 추진 문제와 달리 해양파-부유체 연성(Coupling) 해석에 있어 전산유체역학 적용을 저해하는 중요한 요소로 작용한다. 이러한 수치 점성을 적게 하려고 시간 및 공간 격자가 조밀해져야 하나, 막대한 계산 능력 및 시간이 필요하다. 하지만 대규모 계산 클러스터 확보와 맞물려, 과거와 달리 해양파-부유체 연성(Coupling)에 전산유체역학 적용이 활발해지고 있다.

해양파의 비선형성은 해양파가 대양에서 전파함에 따라 각기 다른 주파수 파 성분이 연성 되어 발생한다 [1]. 이러한 비선형성은 대양에서 전파하는 해양파와 동일하게 전산유체역학 기법에서 수치 격자를 따라 해양파가 전파할 때 발생한다. 이러한 비선형성과 대조적으로, 불규칙 해양파 모델링은 전산유체역학 기법에

서는 초기값과 경계값으로써 선형 중첩법(Linear superposition)에 기반한다. 경계면에서 선형 해양파가 주어지고 계산 격자 내에서 비선형성이 발현된 해양파의 불일치성에 의해 계산의 정밀도가 낮아지게 된다.

본 연구에서는 비선형성이 고려된 파랑 수치 결과 처리를 통해, 전산유체역학 격자 내에서 비선형 파랑 재현을 목적으로 한다. 이때 대표적인 비선형 해양파 모델은 의사-스펙트럼 기법의 하나인 Higher-Order-Spectrum (HOS)을 사용하였다[2]. 수치 모사를 통해 얻은 비선형 해양파의 Modal amplitudes를 역 푸리에 고속 변환(Inverse Fast Fourier-Transform; Inverse FFT) 및 다차원 b-spline 보간법 (Multi-dimensional b-spline interpolation)을 통해 고속으로 재현할 수 있도록 하였다. 비선형 파랑 모델과 전산유체역학 수치 모델과의 데이터 통신을 위해 ISO_C_BINDING 프로토콜을 사용하여 C 언어 기반의 데이터 통신 기법 적용 및 Function API(Application Programming Interface)를 개발하여 표준성을 확보하였다[3]. 개발된 기법을 전산유체역학 모델에서 비선형 해양파를 재현하여 비교 검증하였다.

II. 비선형 해양파 고속 재현 기법

2.1 비선형 해양파 정규 격자 재현

Higher-Order-Spectral (HOS) 수치 모델은 의사-스펙트럼 기법에 기반하고 있으며, 이때 비선형 해양파의 파고(Elevation) 및 속도 포텐셜(Velocity potential)은 모드 진폭 및 모드 함수에 의해 식 (1)과 식 (2)에 의해 표현된다.

$$\eta(x, t) = \sum_{n=1}^N A_n(t) \exp(ik_n x) \quad (1)$$

$$\phi(x, z, t) = \sum_{n=1}^N B_n(t) \exp(ik_n x) \frac{\cosh k_n(z+h)}{\cosh k_n h} \quad (2)$$

η , ϕ 는 해양파의 파고 및 속도 포텐셜, $A_n(t)$, $B_n(t)$ 는 시간에 따른 모드 진폭을 나타내며, k_n 은 파수(Wavenumber), h 는 수심(Water depth)을 나타낸다. 비선형 해양파가 모사되는 영역(Domain)의 길이가 주

어질 경우 파수가 결정되므로 미지수는 시간에 따른 모드 진폭만이 남게 된다. 이러한 모드 진폭은 해양파의 전파에 따라 자유수면 경계조건에 의해 결정된다[2]. 비선형 해양파의 수치 모사 이후, 얻어진 모드 진폭 시계열 및 x 방향 모드 함수 ($\exp(ik_n x)$)의 역변환, 즉 역 고속 푸리에 변환을 통해 HOS 모델의 정규 격자상에 비선형 해양파를 재현할 수 있다. Fig. 1은 HOS 모델에 따른 정규 격자 상의 재현을 위한 계산 알고리즘을 나타내고 있다.

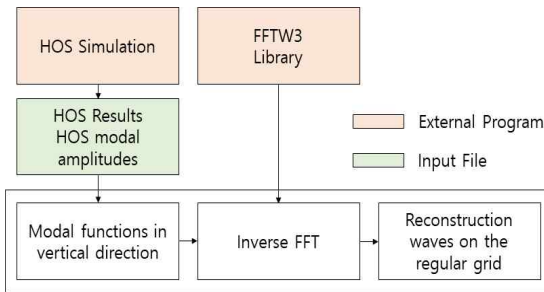


Fig. 1. Reconstruction HOS waves in regular grid of HOS model

2.2 HOS 정규 격자 보간 기법

전산유체역학에서 사용되는 시간 및 공간 계산 격자는 HOS 모델 정규 격자보다 매우 조밀하다. 일반적인 선박/해양구조물-파랑 해석에 사용되는 전산유체역학의 공간 격자는 3백만에서 1천만 개 정도가 사용되고 있지만[4], 2차원 HOS 모델의 공간 격자는 수십에서 수천개의 격자가 사용된다[2]. 또한, 수치 모사의 시

간 간격 또한 약 100여배 정도 차이가 보인다. 공간 분포에 대한 이해를 돕기 위해 Fig. 2에 CFD와 HOS 공간 격자 예시를 나타내었다. 따라서, HOS 정규 격자에 재현된 비선형 해양파의 CFD 구현을 위해 다차원 보간이 필요하다. 이러한 다차원 보간을 위해, 본 연구에서는 b-spline 보간법을 사용하였으며, 계산 효율을 위해 de Boor가 제안한 b-spline 보간 알고리즘을 채택하였다[5].

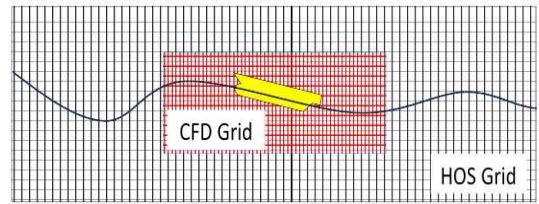


Fig. 2. Schematic view of spatial Grid differences between CFD and HOS model

2.3 전산유체역학 모델 통신 및 인터페이스

HOS 정규 격자 보간을 통해 전산 유체 역학 내의 임의의 시간, 계산 영역에 대해 비선형 해양파의 파고, 속도, 압력이 계산될 수 있다. 전산유체역학 모델의 경우, C, C++, Fortran과 같은 다양한 프로그래밍 언어로 쓰이기 때문에, 다양한 전산유체역학 모델에 적용되기 위해 표준성이 확보되어야 한다.

이를 위해 본 연구에서는 컴퓨터 메모리상의 주소 값과 C 언어 형식 데이터를 교환을 기반하는 ISO_C_BINDING 프로토콜을 사용하였다[3]. 이를 기반

Table 1. Representative Function API used for the reconstruction of nonlinear ocean waves

Function name	Functionality
__modgrid2grid_initializegrid2griddict	Initialization the interface model and construct HOS regular grid
__modgrid2grid_correctgrid2grid	Update the CFD simulation time to reconstruct a series of HOS wave fields near the CFD simulation for b-spline interpolation
__modgrid2grid_gethoseta	Get wave elevation for given spatial position (CFD spatial grid)
__modgrid2grid_gethosu	Get fluid velocity for given spatial position (CFD spatial grid)
__modgrid2grid_gethospd	Get pressure for given spatial position (CFD spatial grid)

으로 정보 전달을 위해 Function API를 정의한 후, 전산유체역학 모델에서 초깃값 및 경계값으로 필요로 하는 임의의 시간, 계산 영역 정보가 해양파 재현 모델에 전달이 되고, 보관된 비선형 해양파의 파고, 속도, 압력이 전산유체역학 모델에 회신 될 수 있다. 개발된 모델의 대표적인 Function API가 Table 1에 주어저 있다.

III. 비교 및 검증

3.1 전산유체역학 모델

본 연구에서 적용한 전산유체역학 모델은 오픈소스 프로젝트 OpenFOAM 환경에서 구축된 foamStar를 사용하였다. foamStar는 선박 및 해양구조물의 파랑 연성 문제 해석을 위해 프랑스 선급, Ecole Centrale de Nantes와 부산대가 공동 개발 및 연구를 진행하는 In-house code이다. 파랑 생성을 위해 오픈 소스 프로젝트 waves2Foam에서 구축된 Relaxation 기법을 적용하였다[6]. Relaxation 기법은 전산유체역학 공간 격자 상에 Relaxation 영역을 설정한 후, 0에서 1 사이의 Weight function을 정의한다. Relaxation zone에서 목표 물리량을 대입할 수 있는 기법이다. 이러한 기법은 물리량의 경계값 적용 시 다른 수치 기법보다 수치 안정성을 보인다고 보고되었다[6]. 전산유체역학 모델에 적용되는 Relaxation 기법을 Fig. 3에 도식적으로 나타내었다.

본 연구에서는 전산유체역학 모델에서 계산된 물리량 중, 파고를 나타낼 수 있는 Volume of Fluid (VOF) 와 유체 속도를 재현된 비선형 해양파의 파고로부터 계산된 VOF와 유체속도를 목표 물리량으로 설정하여 경계값을 대입하였다. 이때, Relaxation zone에서 적용되는 수식은 (3)과 (4)와 같다.

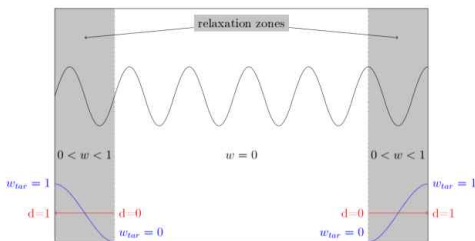


Fig. 3. Relaxation technique in Computational Fluid Dynamics

$$\alpha = (1 - w)\alpha_{CFD} + w\alpha_{HOS} \quad (3)$$

$$\mathbf{u} = (1 - w)\mathbf{u}_{CFD} + \mathbf{u}_{HOS} \quad (4)$$

α , \mathbf{u} 는 전산유체역학에 Relaxation 기법 적용 후, 전산유체역학 수치 모사에 사용될 VOF, 유체 속도를 의미하며, 첨자 q_{CFD} 와 q_{HOS} 는 Relaxation 기법 적용 전, 전산유체역학으로부터 얻어진 값과 고속 재현 기법을 통해 얻어진 목표 물리량을 각각 나타낸다.

3.2 비교 및 검증

재현된 비선형 해양파의 비교 검증을 위해 Table 2의 해상 조건을 가진 불규칙 파가 고려되었다. HOS에서 구현된 비선형 해양파가 전산유체역학 모델에서 재현된 2차원 및 3차원 해양파 수치 모사를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4 (a)는 수치 모사된 2차원 해양파를 나타내고 있으며, 물(Water)과 공기(Air)는 각각 파란색, 빨간색으로 표현되었다. 여기서 모사된 해양파의 파고는 공기와 물의 경계면으로 나타내어진다. 초깃값 및 경계값은 재현된 HOS 모델로부터 주어졌으며, 수치 모사가 시간에 따라 진행됨에 따라 Relaxation zone에서 경계값이 식 (3)과 식(4)에 의해 주어진다. 2차원 해양파 수치 모사에서 적용된 Relaxation 영역은 노란색으로 표현되었으며, 비선형 해양파가 전산유체역학 격자를 진행하는 부분은 중간에 나타내었다.

Fig. 4 (b)는 수치 모사된 3차원 해양파의 수면을 나타내고 있다. 3차원 해양파의 특징인 단파봉 (Short-crested waves)이 수치 모사에서 나타나고 있으며, Pure CFD domain을 제외한 영역이 Relaxation zone에 해당한다. 결과 비교를 위해 수치 모사에 사용된 HOS 모델에서 얻어진 파고 시계열을 전산유체역학에서 얻어진 파고 시계열과 비교하여 Fig. 5에 각각 나타내었다. 결과에서 전산유체역학에서 재현된 파고 시계열이 HOS 모델과 잘 일치함을 확인할 수 있다.

Table 2. Irregular wave condition

Item	Value	
	2D	3D
Peak period	0.702 s	1.0 s
Significant wave height	0.0288 m	0.1 m
Magnification factor	3.3	3.3

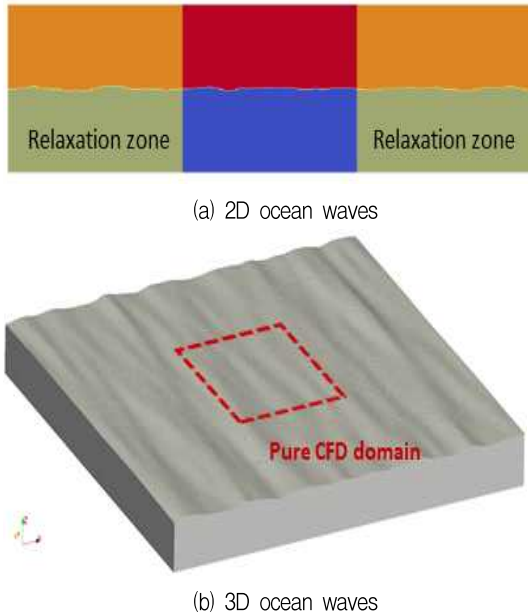


Fig. 4. Reconstructed nonlinear ocean waves in Computational Fluid Dynamics

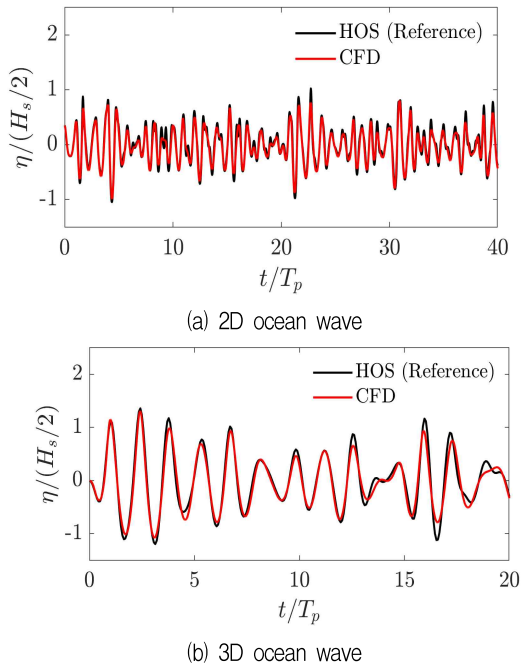


Fig. 5. Comparison of HOS reference wave and reconstructed waves in CFD model

IV. 결론

본 연구는 해양파-선박/해양구조물 해석에 적용이 확대되고 있는 전산유체역학 모델에 비선형성이 고려된 해상 상황 수치 모사를 위한 고속 재현에 중점을 두었다. 이를 위해 역 푸리에 변환과 함께 다차원 보간법을 통해, 고 정밀도와 함께 고속 계산이 가능하도록 하였다. 이때, 다양한 전산유체역학 모델에 적용이 가능할 수 있도록 ISO_C_BINDING 프로토콜을 기반으로, 표준성을 확보하였다. 제안된 기법을 OpenFOAM 환경의 전산유체역학 모델에 적용하여, 비선형 해양파 재현이 가능함을 보였을뿐더러, 비교에서 높은 일치도를 보임을 확인하였다. 이러한 연구는 향후 해양파-선박/해양구조물 해석에 실질적으로 사용될 수 있어, 조선 해양 산업 현장 적용이 가능하다. 또한 모형시험 없이 비선형성이 고려된 해양파 모델링이 필요할 경우, 다양한 활용성이 기대된다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음

REFERENCES

- [1] J. H. Lee, D. W. Lee and M. B. Heo. (2012). Wave Height Measurement System Based on Wind Wave Modeling, Journal of the Institute of Convergence Signal Processing, vol.13 no.1, pp. 166-172.
- [2] D. G. Dommermuth and D. K. P. Yue. (1987). A high-order spectral method for the study of nonlinear gravity waves. Journal of Fluid Mechanics, vol.184 pp. 267-288.
- [3] M. Metcalf, J. Reid and M. Cohen. "Moden Fortran explained," Oxford University Press Inc., New York, 2011.
- [4] A. Serani, M. Diez, F. van Walree and F. Stern. (2021) URANS analysis of a free-running destroyer sailing in irregular stern-quatering waves at sea state 7. Ocean Engineering, vol 237, 109600.

- [5] C. De Boor, "A practical guid to splines," Springer-Verlag, New York, 1978.
- [6] N. G. Jacobsen, D. R. Fuhrman and J. Fredsoe. (2012). A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM®. International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol.70 no.9, pp. 1073-1088.

저자소개

이 상 범 (Sang-Beom Lee)



2003년 2월 : 부산대학교
조선해양공학과(공학사)
2007년 2월 : 부산대학교
조선해양학과(공학석사)
2013년 8월 : 부산대학교
조선해양학과(공학박사)
2018년 4월~현재 : 대우조선해양

선박해양연구소 책임연구원

관심분야 : 선박운동, 슬로싱, 전산유체역학

최 영 명 (Young-Myung Choi)



2011년 8월 : 부산대학교
조선해양공학과(공학사)
2013년 8월 : 부산대학교
조선해양공학과(공학석사)
2019년 12월 : Ecole Centrale de
Nantes, 유체공학 (공학박사)
2021년 8월~현재 : 부산대학교

조선해양공학과 조교수

관심분야 : 선박 운동/조종, 해양유체, 해양파,
전산유체역학