

수정된 밀도함수법을 이용한 고정된 반잠수식 해양구조물 주위 유동의 수치시물레이션

하윤진¹·이영길^{2,†}·정광열³·양인준⁴

한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소¹

인하대학교 조선해양공학과²

넥스트폼 기술연구소³

인하대학교 대학원 조선해양공학과⁴

Numerical Simulation of Flow around a Fixed Semi-submersible Offshore Structure Using the Modified Marker-density Method

Yoon-Jin Ha¹·Young-Gill Lee^{2,†}·Kwang-Leol Jeong³·In-Jun Yang⁴

Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KRISO, Daejeon, Korea¹

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea²

Research Center, NEXtfoam Co., Ltd., Seoul, Korea³

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, Inha University, Incheon, Korea⁴

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

It is important to research and understand the physical phenomenon around a semi-submersible offshore structure on waves and currents because the wave run-up and load occurs owing to the waves and currents. In this study, the numerical simulations are performed about flow around a fixed semi-submersible offshore structure. The Modified Marker-density method is adopted in the present computation procedure, this method is one of the various methods to define the free-surface. The present computation results are compared with existing experimental and numerical simulation(VOF method) results. And, the computation results are relatively coincident with the existing results of model test and numerical simulation by VOF method.

Keywords : Semi-submersible offshore structure(반잠수식 해양구조물), Wave load(파랑하중), Current(조류), Modified Marker-density method(수정된 밀도함수법), Cartesian grid system(직교격자계)

1. 서론

석유생산량에 관련하여 Douglas-Westwood사에서의 장기전망에 의하면, 2012년 이후 육상석유와 천해의 석유생산량은 감소하는 반면 심해의 석유와 신기술에 의한 생산량은 증가할 것으로 예상한 바가 있다. 또한 현재 해양석유는 전 세계 석유생산의 약 35% 정도를 차지하며, 이 중에 심해석유 생산량은 전생산량의 약 15% 정도의 수준이나 이후 지속적으로 성장하는 유일한 부문이 될 것이라 전망하고 있다. 이러한 심해에서의 유전개발을 위해서는 고정된 해양구조물에 비하여 수심이 깊은 바다에서 운영될 수 있는 반잠수식 해양구조물이 더 유리할 수 있다. 하지만 반잠수식 해양구조물의 경우에는 깊은 바다에서 운영되므로, 안

정성 및 안전성 확보와 운동성능의 향상을 필요로 한다. 이러한 반잠수식 해양구조물의 안정성, 안전성 확보와 운동성능에 대하여 반잠수식 해양구조물의 설계관점 중, Kim, et al. (2013)은 저주파수 표류력 특성은 매우 중요한 고려사항이며, 특히 조류와 파도의 복합적 환경하중에서 해양구조물의 설치 및 운용에는 문제가 야기 될 수 있을 것이라 하였다. 즉, 반잠수식 해양구조물에는 파도 뿐 아니라 조류 또한 중요한 설계요소이며, 이러한 해상조건에서는 반잠수식 해양구조물의 운동성능과 파도 및 조류에 의한 하중을 검토해야 한다. Park, et al. (1988)에서는 포텐셜 이론을 기반으로 손상 상태에서의 반잠수식 해양구조물의 운동 응답 및 표류력에 관한 연구를 수행하였는데, 여기서 표류력은 입사파의 입사각도에 따라 많은 영향을 받고 있으며, 이러한 현상들은 안정성 검토 시에 고려되어야 할 사항이라 언급하였다.

그리고 Lee, et al. (2012)의 연구에서는 반잠수식 해양구조물의 운동성능을 최적화하기 위하여 운동성능 인자를 파악하고, 이러한 운동성능에 영향을 미치는 주요 설계 인자들이 무엇인지 파악하였다. 또한 반잠수식 해양구조물의 주요제원과 형상들을 변화시켜 가며 최적의 운동성능을 가지는 반잠수식 해양구조물 형상을 도출하여, 이를 모형시험으로 확인한 바 있다. 그리고 Nam, et al. (2013)에서는 VOF법을 이용한 유동해석과 모형시험으로 반잠수식 해양구조물 기동 주위에 발생하는 파도의 run-up과 반잠수식 해양구조물에 작용하는 파랑하중에 대한 연구를 수행한 바 있다. 이 연구들의 경우에는 주로 비용이 많이 드는 모형시험과 포텐셜 이론을 기반으로 유동해석을 수행하였다. 이러한 포텐셜 이론으로 반잠수식 해양구조물에 대한 파도의 run-up이나 하중들을 해석할 경우, 반잠수식 해양구조물 하부에 폰톤 형상으로 인하여 두 번째 원형기둥에서 파도의 run-up을 예측하기 어려우며, 파도의 경사가 커질수록 비선형적인 특성 때문에 모형시험과 큰 차이를 보인다. 또한, 파도 뿐 아니라 조류를 고려할 경우, 반잠수식 해양구조물 주위 유동의 비선형적인 물리적 현상을 구현하기 어렵다는 단점이 있다 (Kristiansen, et al., 2004; Kristiansen, et al., 2005). 이러한 단점들을 극복하고자 비선형성이 강한 자유수면의 해석을 위하여 VOF법을 이용한 연구들이 있다. VOF법의 경우에는 단파장 영역에서 물체 주위의 jet와 같은 물리적인 현상 구현이 어려우며, 과도한 계산시간(100~300h)이 소요되는 것으로 알려져 있다 (Kristiansen, et al., 2004; Iwanowski, et al., 2009). 이들 선행연구들의 경우에는 주로 파도 중의 반잠수식 해양구조물 기동 주위 파도의 run-up 또는 반잠수식 해양구조물에 발생하는 파랑하중에 관한 연구를 수행하였지만, 바람과 조류에 의한 영향을 고려해 주지 않았다. 일반적으로 반잠수식 해양구조물의 경우에는 복원성이 좋지 못하며, 구조역학적으로 불리한 문제점을 지니고 있다. 따라서 바람에 의한 영향도 중요하지만, 조류에 의한 항력을 무시하기 어렵다. 본 연구에서는 수정된 밀도함수법을 이용하여 바람을 제외한 파도 및 조류 중 고정된 반잠수식 해양구조물에 대한 수치계산을 수행하고 그 결과에 대하여 정량적, 정성적인 검토를 수행하여, 해상환경 변화에 따른 고정된 반잠수식 해양구조물 주위 파도의 run-up과 하중에 측에 있어 본 수치계산 조직의 공학상 적용가능성을 검토하였다.

2. 검증계산

2.1 대상모형 및 계산조건

본 연구에서는 수정된 밀도함수법을 이용하여 고정된 반잠수식 해양구조물 주위 자유수면과 유동의 수치계산을 수행하였다. 수정된 밀도함수법은 직교교차격자계를 이용하여 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식에 대하여 Two step projection 기법으로 해를 구한다. 대류항의 공간 이산화에는 해의 안정성을 위하여 Kawamura-Kuwahara 기법이 사용되고, 시간 이산화에는 계산정도의 향상을 위하여 Adams-Bashforth 기법이 사용된다. 그리고 대류항을 제외한 나머지 항들의 경우에는, 공간에 대하여 2차 중심차분법이, 시간에 대해서는 1차 전진차분법이 이용되어 이산화

된다. 그리고 사용된 격자크기 이하에서의 난류특성을 고려하기 위하여 Sub-Grid Scale(SGS) 난류모델이 적용된다. 자유수면 위치는, 초기에 물과 공기 영역별로 실제 밀도의 물리량을 대입하고, 이후로는 물과 공기의 평균 밀도를 갖는 위치로 정의된다. 이러한 수치기법에 대한 자세한 내용은 Jeong and Lee (2014)에서 확인할 수 있다. 수정된 밀도함수법 계산결과와 신뢰성을 파악하기 위하여 Iwanowski, et al. (2009)의 고정된 반잠수식 해양구조물을 대상으로 수치계산을 수행하였다(Fig. 1). Iwanowski, et al. (2009) 모형시험 및 수치계산과 마찬가지로 축척 비 1:50의 모형에 대하여 본 연구에서 수치계산을 수행하였으며, 대상파도는 Table 1과 같다. 여기서, H 는 파고, T 는 주기, L_0 는 선형파 이론에 의한 파장, H/L_0 는 파경사를 의미한다.

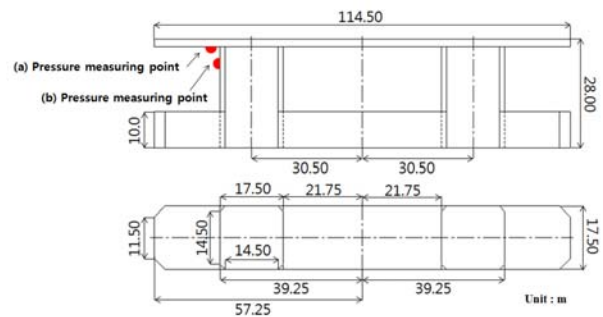


Fig. 1 Dimensions of the semi-submersible offshore structure for numerical computations in full-scale(points: the locations of pressure measurement, Iwanowski, et al., 2009)

Table 1 Conditions of the wave and current for the numerical computations in full-scale (Iwanowski, et al., 2009)

Wave conditions	H(m)	T(s)	L_0 (m)	H/L_0
Short	8.0	9.0	126.5	0.06
Medium	15.0	11.0	189.0	0.08
Long	20.0	13.0	264.0	0.08

Table 1의 대상파도는 Iwanowski, et al. (2009)의 모형시험과 계산에서의 대상파도와 같다. Fig. 2는 본 연구에서 수행한 계산 영역과 파고 계측 위치이다.

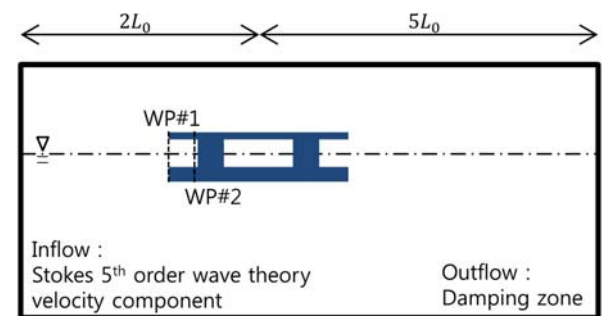


Fig. 2 Schematic view of the numerical computation domain

파도가 유입되는 위치부터 반점수식 해양구조물 중심까지의 거리는 파장의 2배, 반점수식 해양구조물 중심에서 유출부까지는 파장의 5배이며, 폭은 파장의 1배로 결정하였다. 그리고 파도의 유입은 스토크스 5차 파도 이론에 해당하는 속도성분들을 부여하였다. 구조물로부터 하류영역에는 파장의 3배정도로 감쇠영역(damping zone)을 설정하여, 유출부로부터 반사되는 파도가 생성되지 못하도록 함으로써 계산시간 동안 계산결과들의 오차를 줄이고자 하였다. 본 연구에서는 수치계산 시 사용될 격자의 크기와 격자수를 결정하기 위하여 격자의 수렴성 테스트를 수행하였다. Fig. 3은 격자의 수렴성 테스트를 위한 개략도이다.

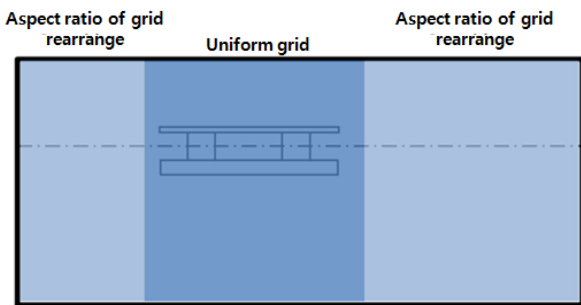


Fig. 3 Schematic view of the numerical computation domain for stretching coefficient determination

Fig. 3에서 균일격자영역은 격자의 크기가 일정한 영역을 의미하며, 격자종횡비의 재배열영역은 일정 비율에 따라 x-방향의 격자의 크기가 변경되는 영역을 의미한다. 따라서 균일격자영역 외의 영역에서는 종횡비에 따라 격자의 크기가 일정하게 변화한다. 그리고 격자의 종횡비 범위는 Iwanowski, et al. (2009)의 연구를 참고하여 결정하였다. Kristiansen, et al. (2004)에서는, 격자의 수렴성 테스트는 파도를 생성하는 데에 있어서 중요한 요소로, 격자의 크기보다 파장 당 격자 수가 중요함을 연구하였다. 본 연구에서도 반점수식 해양구조물 주위에는 균일격자로 반점수식 해양구조물 주위의 자유수면 수치시물레이션을 하기 위한 최소 격자 수와 격자 크기를 결정하였다. Fig. 4는 Iwanowski, et al. (2009)의 연구를 바탕으로 결정된 다양한 격자 종횡비에 따른 WP#1 위치에서의 유입파에 대한 생성된 파형들과 스토크스 5차 파도 이론에 의한 파형을 보여준다. Fig. 4를 보면, 격자 종횡비가 0.333인 경우가 스토크스 5차 파도 이론과 가장 근접한 결과를 보이고 있다. 그러나 격자의 종횡비가 0.337, 0.340 그리고 0.343인 경우를 보면, 파저에서는 스토크스 5차 파도 이론과 근접함을 확인할 수 있지만, 파정 위치의 경우 각각 매우 다르며, 진폭의 높이 또한 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 격자의 종횡비에 따른 파정 높이와 스토크스 5차 파도 이론의 파정 높이의 오차율은 최대 약 17% 정도로 격자의 종횡비가 0.343일 때 가장 크게 나타났으며, 격자 종횡비가 감소할수록 그 오차율은 점차 낮아지며, 격자 종횡비 0.333인 경우 오차율은 약 2% 정도로 가장 스토크스 5차 이론과 가장 근접하였다. 격자의 종횡비에 따른 격자 수렴성 테스트로부터 최종적으로 결정된 격자의 개수는 Table 2와 같으며, 사용된 격자의 크기도 Table 2에

나타내었다. 그리고 x-방향의 최소 격자 길이는 파장에 대하여 1/120, z-방향의 최소 격자 길이는 파고에 대하여 1/30에 해당된다. 사용된 총 격자수는 1,800,000개 이다. 수치계산 시의 초기 시간간격은 2/1000초이며, 계산 중 시간간격은 x-방향 속도 성분과 해당 격자의 x-방향 길이 그리고 시간간격으로 정해지는 local courant 수가 한계 값을 넘어서는 경우 시간간격이 변화되도록 수치계산을 수행하였다. 그리고 본 연구에서의 수치계산은 반점수식 해양구조물에 대칭조건을 반영하여 y방향으로 중앙 종단면을 경계로 반쪽만 계산하였다. 그리고 반점수식 해양구조물에 발생하는 압력은 Iwanowski, et al. (2009)의 연구와 마찬가지로 Fig. 1에서 표시된 두 부분에서 계측되었다.

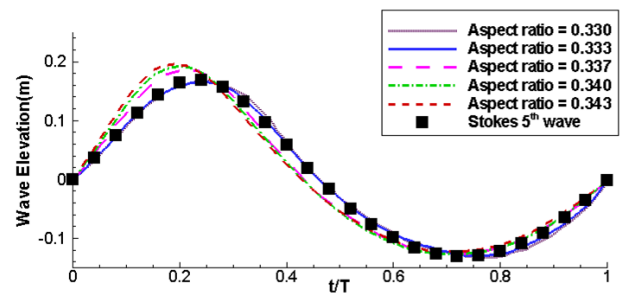


Fig. 4 Comparison of incident wave profiles(WP #1) according to aspect ratio

Table 2 Minimum grid sizes and numbers of grids for the numerical computations

	X	Y	Z
Minimum grid size	0.03	0.03	0.01
Number of grids	250	80	90

2.2 수치계산결과

수정된 밀도함수법을 이용한 고정된 반점수식 해양구조물의 수치시물레이션 결과들은 Iwanowski, et al. (2009)의 모형시험 및 계산 결과들과 비교되었다. Iwanowski, et al. (2009)의 연구에서는 고정된 반점수식 해양구조물 주위 파형과 압력에 대하여 모형시험과 수치계산을 수행하였는데, 그 결과들 중 고정된 반점수식 해양구조물 주위 파형의 경우에는 중간(medium) 파장의 파도 조건만 공개가 되어 있으며, 고정된 반점수식 해양구조물에 발생하는 압력은 긴(long) 파장의 파도 조건만 공개가 되어 있어, 이 두 가지 파도 조건에서만 비교검토를 수행하였다. Fig. 5(a), (b)는 중간 파장의 파도 조건에 대하여 WP#1, WP#2 위치에서의 파고에 대한 시간기록을 보여준다. 파정부근에서의 결과를 살펴볼 때, 본 연구의 수치시물레이션 결과는 Iwanowski, et al. (2009)의 모형시험 및 수치계산 결과들에 대하여 전체적으로 근접한 결과를 보여준다. 그러나 Fig. 5(a)의 WP#1에서 계측된 파저 위치를 보면, 본 연구에서의 수치계산결과와 Iwanowski, et al. (2009)의 수치계산결과 모두 실험 결과에 비하여 파저 높이가 작게 예측됨을 확인할 수 있다. Fig. 6(a), (b), (c) 그리고 (d)에서 보면, 본 연구에서의 대상모형은 고정된 반점수식 해양구조

물로 두 개의 기둥 아래에는 폰툰을 가지고 있다. Fig. 6(a)는 Fig. 5(a)의 950 sec 부분에서 파형을 보여준다. 그림에서 보면, 폰툰에 걸쳐서 파도가 지나가며, 그 이후 Fig. 6(b), (c) 그리고 (d)와 같은 형태로 고정된 반잠수식 해양구조물 주위에서 파도가 발생되는 것을 확인할 수 있다. 이 때, 수치계산결과 중 Fig. 5(a)의 WP#1에서 예측된 파저 높이가 Iwanowski, et al. (2009)의 모형시험결과보다 높게 예측됨은 수치계산에서 폰툰에 걸쳐 파도가 지나가는 경우에 그 정도가 떨어지는 것으로 생각된다.

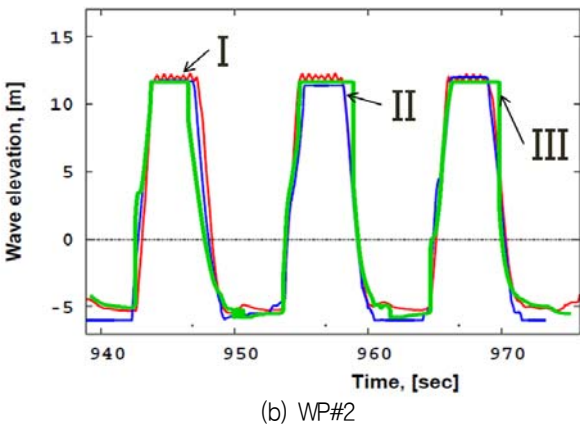
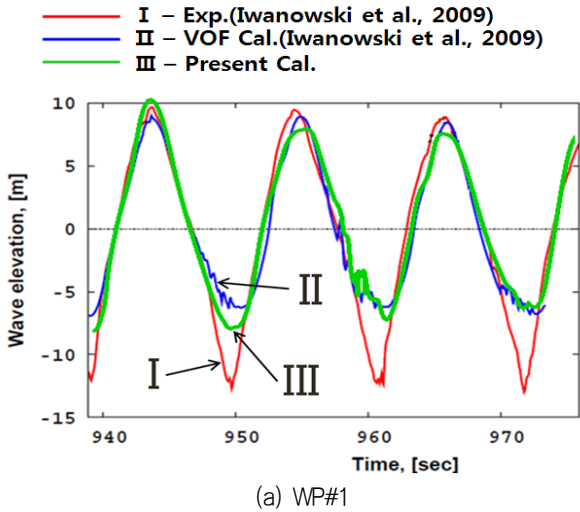


Fig. 5 Comparison of wave elevations at medium wave condition in full-scale

Fig. 5(b)는 첫 번째 기둥에서의 수위변화를 보여주고 있다. 본 연구의 계산결과와 Iwanowski, et al. (2009)의 계산결과 및 실험결과들이 서로 근접함을 확인할 수 있으며, 파고가 가파르게 상승하는 run-up과 같은 현상도 근접하게 예측됨을 확인할 수 있다. Fig. 7은 긴 파장의 파도 조건에서 고정된 반잠수식 해양구조물에 발생하는 압력에 대한 시간기록이다. 본 연구에서의 수치계산결과들을 보면, Iwanowski, et al. (2009)의 수치계산과 모형시험결과들의 시간에 따른 압력의 변화와 근접한 것을 확인할 수 있다. 그러나 본 연구에서의 수치계산결과와 Iwanowski, et al. (2009)의 수치계산과 모형시험결과들 모두 시간에 따른 충격압력의 예측은 서로 다른 것을 알 수 있다. 이는 Iwanowski et al. (2009)에서 확인하기 어렵지만, 매우 짧은 시간에 발생하는

충격압력은 수치계산의 경우 격자 수에 따라 지배적일 것으로 생각되며, 모형시험의 경우에는 평균압력을 계속하게 되어 샘플링 수에 따라 그 결과가 달라질 것으로 생각된다. 따라서 Fig. 5의 시간에 따른 파형 변화와 Fig. 7의 시간에 따른 압력 변화를 보았을 때, 본 연구에서 사용된 수정된 밀도합수법의 경우 고정된 반잠수식 해양구조물 주위의 파형과 압력예측에 어느 정도 신뢰성은 있는 것으로 생각된다.

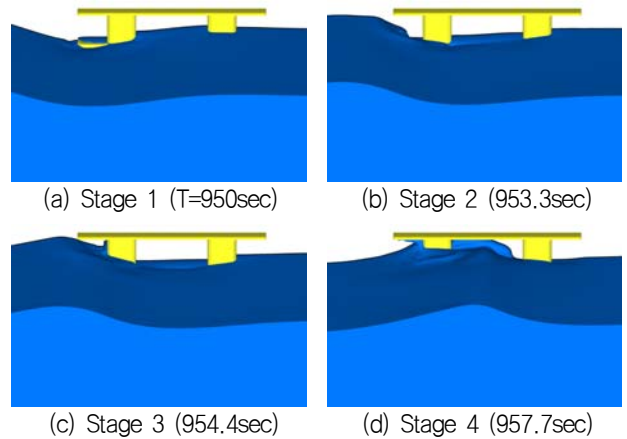


Fig. 6 Present computation results around the semi-submersible offshore structure in medium wave

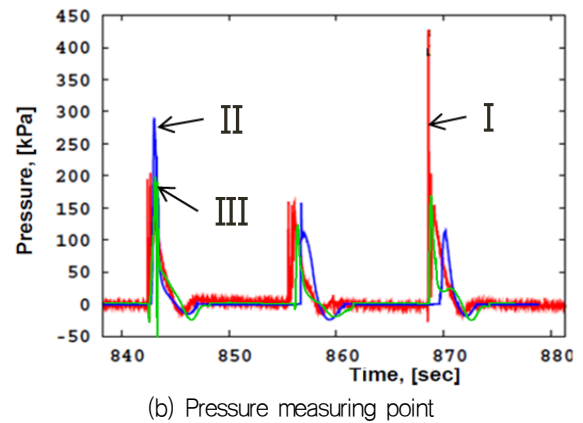
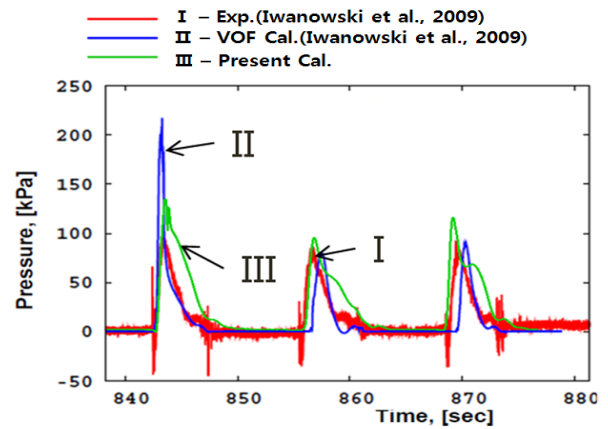


Fig. 7 Comparison of pressures at long wave in full scale

본 연구에서는 Iwanowski, et al. (2009) 연구에서의 VOF법과 본 연구에서 사용한 수정된 밀도함수법들의 사용된 격자 수와 수치계산 시간을 Table 3과 같이 비교하여 보았다.

Table 3 Comparison of the numbers of grids and CPU times

	Iwanowski, et al. (2009)		Present cal.	
Machine	AMD Opteron 2218, 2.6 GHz		Intel(R) Core(TM) i7-2700K, 3.50 GHz	
Wave conditions	Number of grids	CPU times	Number of grids	CPU times
Short	474 x 146 x 121 = 8,373,684	115h	280 x 80 x 90 = 2,016,000	36h
Medium	548 x 146 x 121 = 9,680,968	195h	280 x 80 x 90 = 2,016,000	49h
Long	612 x 146 x 121 = 10,811,592	296h	280 x 80 x 90 = 2,016,000	67h

Table 3을 보면, 수정된 밀도함수법을 이용하였을 때 Iwanowski, et al. (2009)의 방법보다 약 5배나 적은 격자수를 사용하였고, 총 계산 소요시간은 약 4배로 줄어들었다. 본 수치계산결과와 경우 Iwanowski, et al. (2009)의 모형시험결과와 비교하였을 때, WP#1에서 파도가 차이를 보이지만 Iwanowski, et al. (2009)의 수치계산결과와 근접함을 보여, 적은 격자수와 계산 소요시간으로도 만족할만한 결과를 도출할 수 있었다.

3. 파도 및 조류조건에서의 수치계산

3.1 대상모형

본 연구에서는 수정된 밀도함수법의 계산정도를 파악하기 위하여 기존의 모형시험결과가 수행된 Nam, et al. (2013)에서의 모형을 대상으로 수치계산을 수행하였다.

Nam, et al. (2013)의 반잠수식 해양구조물 모형은 1개의 폰툰과 2개의 기둥을 가진다. 모형의 폰툰은 앞뒤로 반원의 형태를 가지고 있으며, 반잠수식 해양구조물의 기둥은 사각기둥 형태이지만 각 모서리에는 둥근 형상을 가지고 있다. Fig. 8은 본 연구에서의 대상모형에 대한 주요제원과 3차원 형상을 보여준다. 그리고 대상 모형의 축척비는 Nam, et al. (2013) 연구의 모형시험과 직접 비교하기 위하여 1:80으로 하였다.

3.2 파도 및 조류조건

본 연구에서는 수정된 밀도함수법의 파도만 있는 경우에 대하여 파도의 run-up에 대한 수치계산을 수행하였으며, 파도뿐 아니

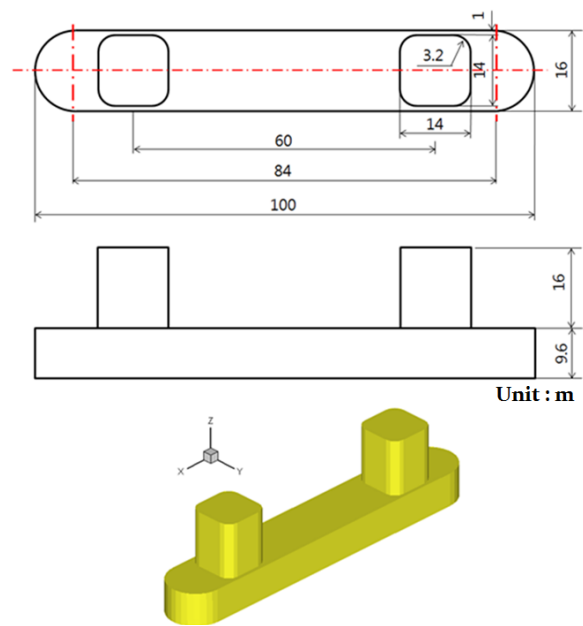


Fig. 8 Dimensions and perspective view of the semi-submersible offshore structure for numerical computations in full-scale (Nam, et al., 2013)

라 조류가 있는 경우에 대해서는 하중변화에 대하여 수치계산을 수행하였다. 수치계산 영역의 크기와 격자수는 대상으로 하는 반잠수식 해양구조물의 크기가 앞서서와 상대적으로 크게 다르지 않기 때문에 Fig. 2, Table 2와 동일하게 수치계산을 수행하였다. Table 4는 각 수치계산에 대한 모형의 흘수조건과 파도 및 조류에 대한 조건을 보여주며, Fig. 9는 파도와 조류의 방향을 보여준다.

Table 4 Conditions of the waves and currents for the numerical computations in full-scale

Item	Survival condition (wave run-up simulation)	Operation condition (wave and current load)
Draft(m)	14.5	17
Wave height(m)	3	2
Wave period(sec)	6, 7, 8, 8.5, 10, 12, 14, 16, 18	6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 16, 21
Current(knots)	0	0, -5, 5

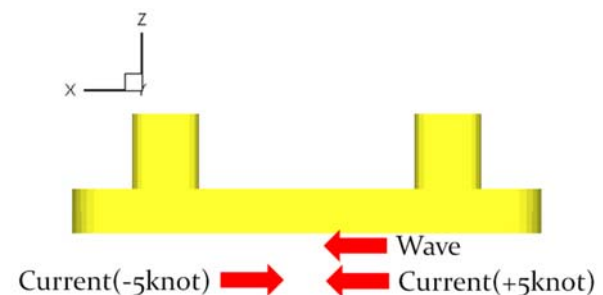


Fig. 9 Directions of the wave and currents (Nam, et al., 2013)

3.3 파도의 run-up

본 연구에서는 수정된 밀도함수법을 이용하여 고정된 반잠수식 해양구조물 주위에 발생하는 파도의 run-up에 대한 수치계산을 수행하고, 그 결과들을 Nam, et al. (2013)의 수치계산 및 모형시험결과들과 비교검토를 수행하였다.

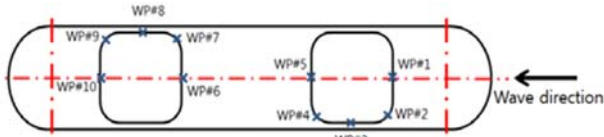


Fig. 10 Measurement positions of the wave elevations (Nam, et al., 2013)

그리고 수정된 밀도함수법에 의한 계산결과의 신뢰성을 파악하기 위하여 파도의 경사가 클 것으로 예상되는 3 m의 파고에 대하여 수치계산을 수행하였다. Fig. 10은 Nam, et al. (2013) 모형에서의 고정된 반잠수식 해양구조물 기둥 주위의 파고 측정 위치들이며, 이 중 Nam, et al. (2013)에서 공개되어진 WP#01, 03, 05, 06, 08, 10에서만 비교검토를 수행하였다. Fig. 11은 주기 7초 인 파도에서 WP#01 위치의 Nam, et al. (2013) 수치계산결과, 모형시험결과들과 본 연구에서의 계산결과들에 대한 파고의 시간기록들을 비교한 그림이다. Nam, et al. (2013)의 연구를 보면, 수치계산결과를 모형시험결과와 비교하였을 때 파고 높이는 약 25%정도의 큰 차이를 보이고 있다. 그러나 본 연구에서의 계산결과를 Nam, et al. (2013)의 모형시험결과와 비교하였을 때는, 파고 높이가 약 15%정도의 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

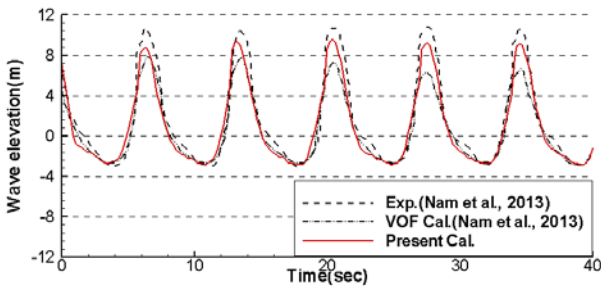


Fig. 11 Comparison of the time histories of the wave elevations(WP#01)

이를 Fig. 12와 같이 다양한 파장에서 각 측정위치별 고정된 반잠수식 해양구조물 기둥 주위 파고들을 비교하여보면, 장파장 영역의 경우는 VOF법을 이용한 수치계산결과와 본 연구에서의 수정된 밀도함수법 모두 모형시험결과와 근접함을 확인할 수 있다. 그러나 단파장 영역으로 갈수록 VOF법의 경우 모형시험결과와 큰 차이를 확인할 수 있지만, 본 연구에서의 수정된 밀도함수법의 경우 상대적으로 모형시험결과와 근접함을 확인할 수 있다. 이는 Krstiansen, et al. (2004)와 Iwanowski, et al. (2009) 연구에서와 같이, VOF법의 경우 물체 주위에서의 jet와 같은 비선형적인 자유수면 해석의 어려움을 가지며, 자유수면에 두께가 있는

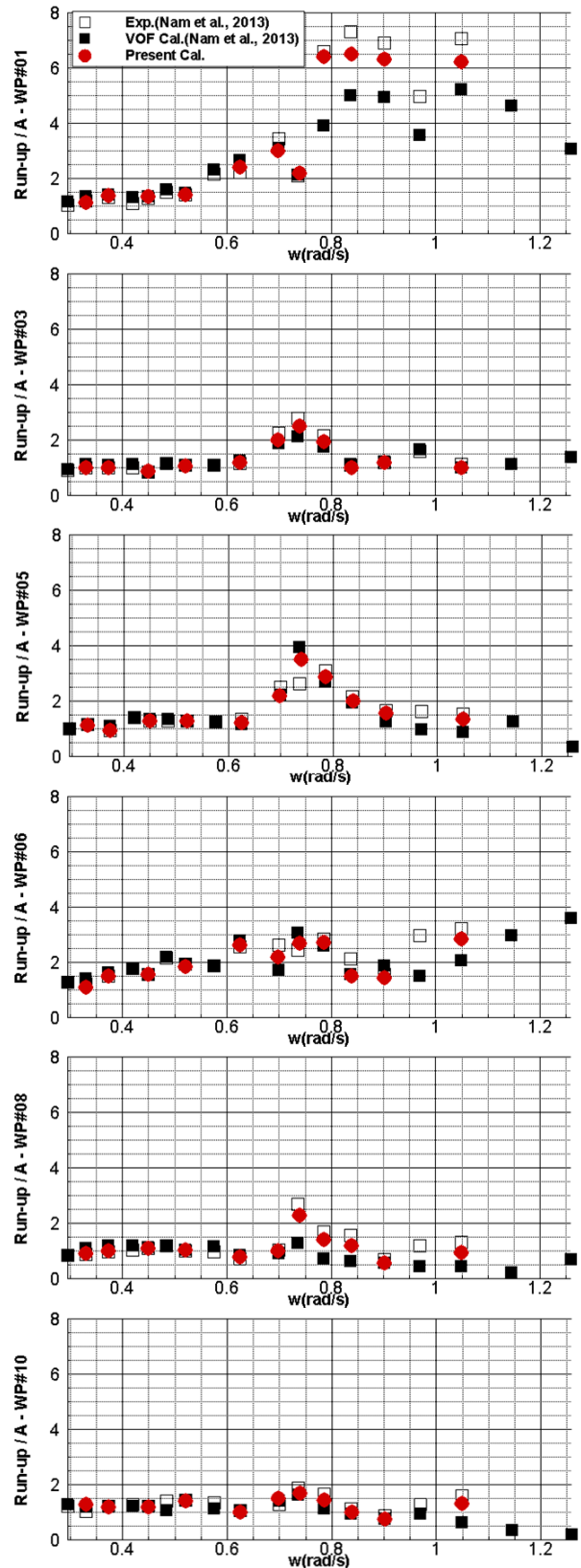


Fig. 12 Comparisons of the wave run-ups around the columns of the semi-submersible offshore structure

것과 같은 효과가 발생되기 때문으로 생각된다. VOF법의 경우에

는 물과 공기의 체적비율로 자유수면을 결정하기 때문에 공간적 불연속성이 없어서 해는 안정적이거나, 자유수면 위치 정의 시 체적비율의 수송방정식은 대류방정식이기 때문에 수치적 확산이 발생된다. 수정된 밀도함수법의 경우에는 자유수면을 두께가 없는 경계면으로 정의하며, 물과 공기의 실제 물리량들이 지배방정식에 각각 사용된다. 따라서 본 연구에서와 같은 물체 주위 비선형 자유수면 해석에서는 VOF법에 비하여 상대적으로 수정된 밀도함수법이 유리할 수 있다. 실제로 Fig. 11에서 모형시험결과들과 비교하였을 때, VOF법의 경우 최대 약 25%정도의 오차를 보이며, 수정된 밀도함수법의 경우 최대 약 15%정도 오차로 모형시험결과와 근접한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다.

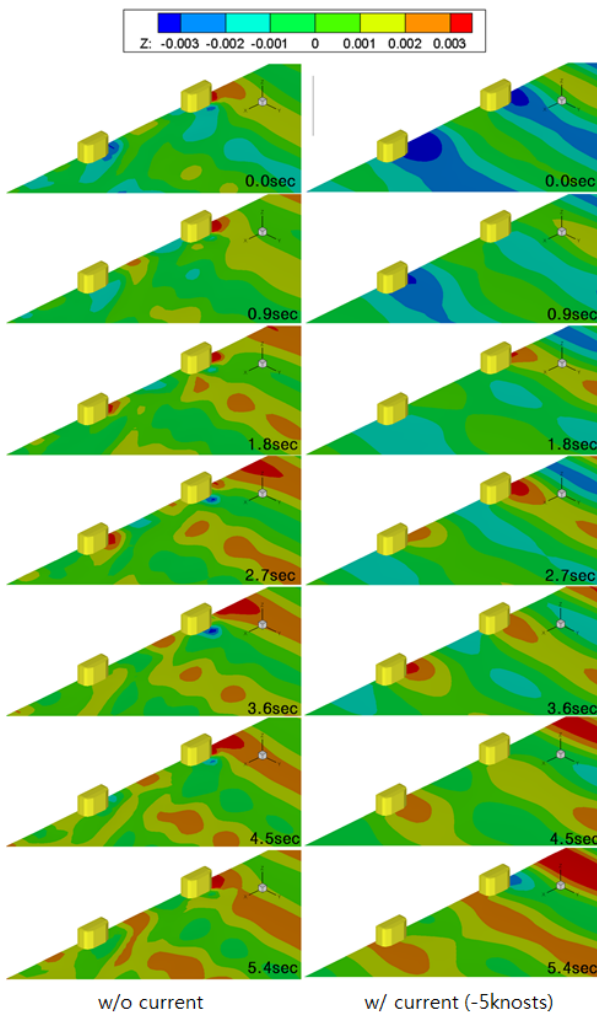


Fig. 13 Comparisons of the wave height contours around the columns of the semi-submersible offshore structure according to the current

3.4 파도 및 조류에 의한 하중변화

본 연구에서는 수정된 밀도함수법을 이용하여 파도 및 조류에 의한 하중변화에 대하여 연구를 수행하였다. 그리고 최종적으로 파장에 따른 파도 및 조류에 의한 하중변화도 비교검토를 수행

하였다. 그리고 수치계산결과와 신뢰성을 파악하고자 operation condition에 대하여서만 Kim, et al. (2013)의 연구결과와 x 방향 힘을 비교하였다. Kim, et al. (2013) 연구에서는 Fig. 9의 조류 방향 중 파도와 같은 진행방향 조류속도 +5 knots에서 주기 8초 이하 짧은 주기 파도의 경우, 파도가 조류에 떠 밀려 모형시험결과에서 제외하였다. 긴 주기 파도의 경우는 파속이 상대적으로 조류보다 빠르지만, 짧은 주기에서는 그렇지 못하여 조류에 의한 영향이 상대적으로 클 것으로 생각된다.

Fig. 13은 본 연구에서 수행한 최대 짧은 주기인 6초의 파도에서 동일시간 대에 조류(파도와 반대 방향)에 의한 자유수면의 변화를 보여준다. 자유수면 변화를 보면, 조류가 없는 경우에 비하여 조류가 있는 경우는 조류 속도에 의하여 고정된 반잠수식 해양구조물 주위 파도의 위상이 매우 달라지며, 조류에 의하여 조우주기가 길어짐을 확인할 수 있다.

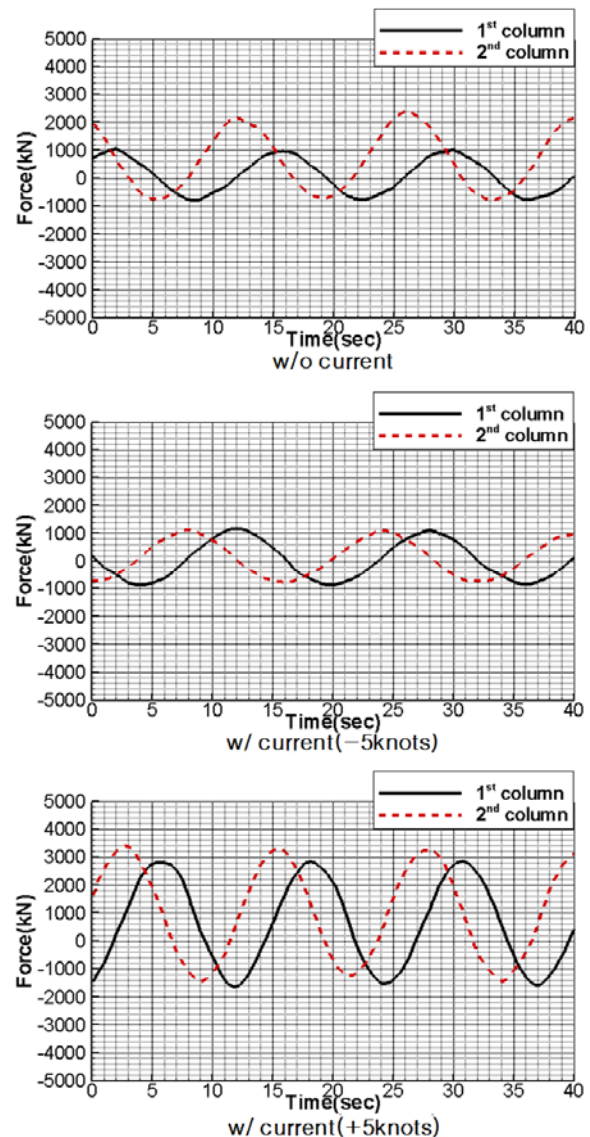


Fig. 14 Comparisons of the time histories of the loads on the each columns of the semi-submersible offshore structure according to the current

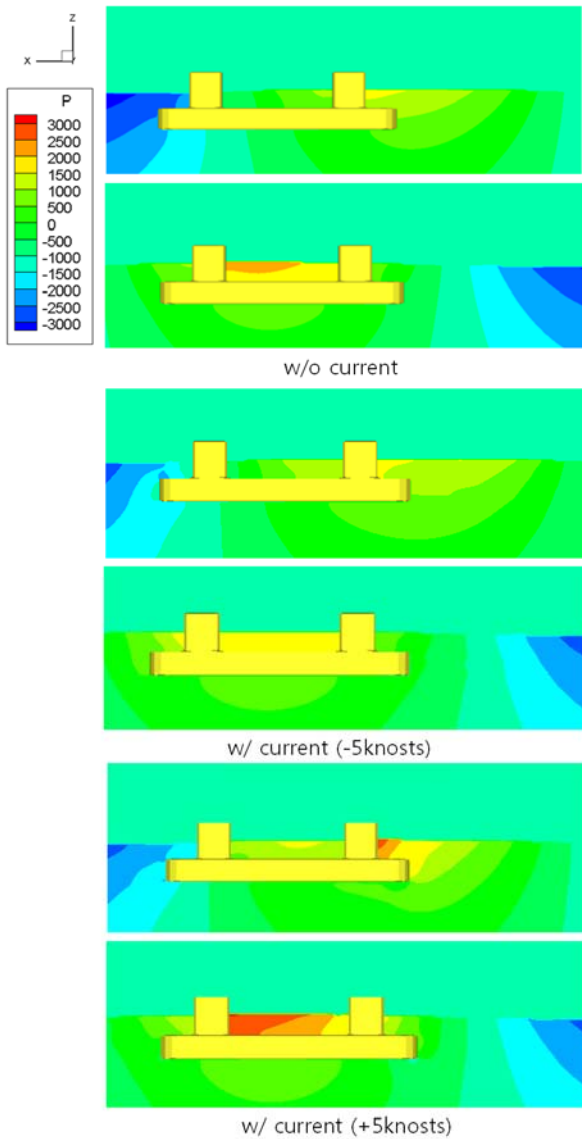


Fig. 15 Comparisons of the pressure contours according to the current at the moments of the peak load on 1st and 2nd columns

Fig. 14는 본 연구에서 중간정도 주기(12초)의 파도에서 반잠수식 해양구조물의 각 원형기둥들에 발생하는 하중에 대하여 실선으로 환산하여 계산된 시간기록을 보여준다. 각 원형기둥들에 발생하는 하중은 원형기둥 표면에 발생하는 법선방향의 압력들을 적분하여 얻어낸 것이다. 먼저 주기를 보면, 조류가 파도와 반대방향으로 진행할 때 조류에 의하여 조우주기가 길어지는 것을 확인할 수 있으며, 실제로 조류가 파도와 같은 방향으로 진행할 때, 조우주기가 짧아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 15는 반잠수식 해양구조물의 첫 번째 및 두 번째 원형기둥에서 힘이 극대일 때의 압력분포를 보여준다. 조류가 없는 경우에는 반잠수식 해양구조물의 첫 번째 원형기둥을 지나, 원형기둥 사이에 파도가 모이면서 두 번째 원형기둥에 큰 하중을 전달한다. 그리고 조류와 파도의 진행방향이 같은 경우에는 주기가 짧아짐으로 인하여 첫 번째 원형기둥에 큰 하중을 전달하고, 원

형기둥 사이에 파도가 모이면서 두 번째 원형기둥에도 큰 하중을 전달한다.

그러나 조류가 파도와 반대 방향으로 진행할 때, 파장이 길어지며 반잠수식 해양구조물의 원형기둥들 주위에서 낮은 파고로 상대적으로 작은 하중을 전달한다. 반잠수식 해양구조물의 첫 번째와 두 번째 각 원형기둥들의 하중이 최대일 때 위상차를 비교하면, 조류가 없는 경우는 3.5초정도, 조류와 파도의 진행방향이 같은 경우 3초정도, 조류와 파도가 반대 방향인 경우 4초정도이다. Fig. 16은 본 연구에서 사용된 수정된 밀도함수법의 계산정도를 파악하기 위하여, Kim et al.(2013)연구에서의 모형시험결과와 고차경계요소법(HOBEM) 기반의 일정 주파수영역 부유체 해석 프로그램 (Kim, et al., 2013), 그리고 본 연구에서의 수치계산결과에 대하여, 고정된 반잠수식 해양구조물에 발생하는 x 방향 힘만을 비교하여 보았다. 수정된 밀도함수법으로 계산된 결과들이 Kim, et al. (2013)의 모형시험결과와 비교하였을 때, 최대 약 7%정도의 오차를 보이지만, 긴 파장부터 짧은 파장영역까지 모형시험결과와 근접함을 보인다. 그리고 앞서 언급한 것과 마찬가지로 조류가 없는 경우, 파도와 조류의 진행방향이 서로 반대인 경우 그리고 파도와 조류가 같은 방향으로 진행할 경우 파장 변화로 인하여 힘의 특성이 변하는 것을 확인할 수 있다.

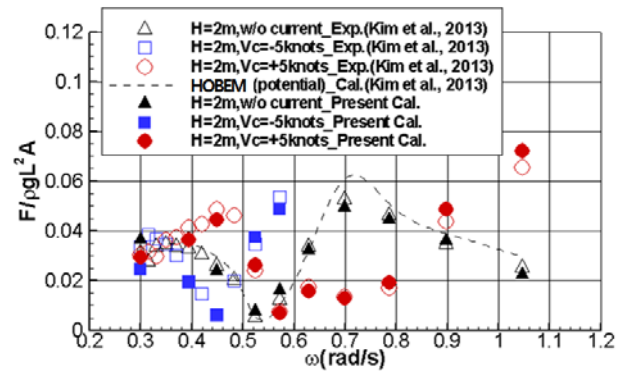


Fig. 16 Comparisons of the exciting forces on the semi-submersible structure

4. 결론

본 연구에서는 수정된 밀도함수법으로 고정된 반잠수식 해양구조물 주위 유동에 대하여 수치시물레이션을 수행하였다.

- 1) 두 가지 반잠수식 해양구조물에 대하여 수정된 밀도함수법을 이용한 수치시물레이션을 수행하였을 때, 정성적인 유동현상이 VOF법에 의한 계산결과 및 모형시험결과들과 근접하며, 하중에측의 경우 모형시험과 비교하였을 때, 최대 약 7%정도의 오차로 정량적으로 근접함을 보인다.
- 2) 수치시물레이션 결과 수정된 밀도함수법은 VOF법에 비하여 상대적으로 파도의 경사가 큰 단파장영역에서 파도의 run-up과 같은 비선형적인 물리적 현상들에 대한 예측에 유리하며,

모형시험결과와 비교하였을 때 최대 약 10%정도의 오차를 보임으로 VOF법에 비하여 더 계산정도가 높음을 알 수 있다.

- 3) 향후 수정된 밀도함수법은 해양구조물 설계를 위한 유동해석에 적절할 것으로 생각되며, 보다 더 적용성의 향상을 위해서는 운동성능을 고려한 연구가 이어져야 할 것으로 사료된다. 또한, 본 연구를 통하여 파도뿐만 아니라 조류에 의한 영향을 고려하는 것은 파도의 특성이 변화되기 때문에 반잠수식 해양구조물 설계를 위하여 중요한 요소가 됨을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2012R1A 1A2044939)과 인하대학교의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Iwanowski, B. Lefranc, M. & Wemmenhoww, R., 2009. CFD simulation of wave run-up on a semi-submersible and comparison with experiment. *Proceedings of OMAE 2009*, Hawaii, USA, May 2009, pp.1-11.

Jeong, K.L. & Lee, Y.G., 2014. Numerical Simulation of Spilling Breaker Using the Modified Marker-density Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(1), pp.58-66.

Kim, N.W. Nam, B.W. Sung, H.G. Lee, D.Y. Cho, Y.S. & Choi, Y.M., 2013. An experimental study of wave force on semi-submersible offshore structures in regular waves and current. *Proceeding of the Annual Autumn Meeting, The Korean Society of Ocean Engineers*, Seoul, Republic of Korea, October 2013, pp.160-163.

Kristiansen, T. Baarholm, R. & Stansberg, C.T., 2004. Validation of second-order analysis in predicting diffracted wave elevation around a vertical circular cylinder. *Proceedings of the 14th ISOPE*, Toulon, France, May 2004, pp.23-28.

Kristiansen, T. Baarholm, R. Stansberg, C.T. Hansen, E.W. & Rortveit, G., 2005. Kinematic in a diffracted wave field: particle image velocimetry(PIV) and numerical models. *Proceedings of OMAE 2005*, Halkidiki, Greece, June 2005, pp.12-17.

Lee, D.Y. Lee, J.H. & Kim, S.E., 2012. A study of non-linearity of heave motion in waves. *Proceeding of the Annual Autumn Meeting*, The Korean Society of Ocean Engineers, Daegu, Republic of Korea, May 2013, pp.119-124.

Nam, B.W. Kim, N.W. Kim, Y.H. Hong, S.Y. & Sung, H.G., 2013. Computation of nonlinear wave run-up around a semi-submersible platform. *Proceeding of the PRADS 2013*, Chanwon, Republic of Korea, October 2013, pp.809-815.

Park, R.S. Kim, S.C. & Kim, J.H., 1988. A Study on the Motion Responses and the Drift Forces of Semi-submersible Drilling Rigs in the Damaged Condition. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 2(2), pp.227-236.



하윤진



이영길



정광열



양인준