

PML 무반사 기법을 이용한 부유식 해상풍력발전기의 수중폭발에 따른 동응답 수치해석

조진래^{1*} · 전수홍² · 정의봉²

¹홍익대학교 조선해양공학과, ²부산대학교 기계공학부

Numerical Analysis of Dynamic Response of Floating Offshore Wind Turbine to the Underwater Explosion using the PML Non-reflecting Technique

Jin-Rae Cho^{1*}, Soo-Hong Jeon² and Weui-Bong Jeong²

¹Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Hongik University, Sejong, 30016, Korea

²School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

Abstract

This paper is concerned with the numerical analysis of dynamic response of floating offshore wind turbine subject to underwater explosion using an effective non-reflecting technique. An infinite sea water domain was truncated into a finite domain, and the non-reflecting technique called the perfectly matched layer(PML) was applied to the boundary of truncated finite domain to absorb the inherent reflection of out-going impact wave at the boundary. The generalized transport equations that govern the inviscid compressible water flow was split into three PML equations by introducing the direction-wise absorption coefficients and state variables. The fluid-structure interaction problem that is composed of the wind turbine and the sea water flow was solved by the iterative coupled Eulerian FVM and Lagrangian FEM. And, the explosion-induced hydrodynamic pressure was calculated by JWL(Jones-Wilkins-Lee) equation of state. Through the numerical experiment, the hydrodynamic pressure and the structural dynamic response were investigated. It has been confirmed that the case using PML technique provides more reliable numerical results than the case without using PML technique.

Keywords : floating offshore wind turbine, underwater explosion, PML non-reflecting technique, fluid-structure interaction analysis, structural dynamic response

1. 서 론

무한 영역 내에서 정의되는 문제들은 각종 공학분야에서 쉽게 발견할 수 있으며, 지진파와 공기 그리고 수중에서의 폭발을 들 수 있다. 대부분의 경우, 이들 문제들은 무한한 매질과의 상호작용 특히 무한 영역 속에서의 파의 방사와 대류와 관련되어 있다. 이들 문제들에 대한 수치해석은 무한요소 혹은 경계적분법과 같은 특수한 해석기법을 적용하지 않는 한 무한영역을 유한한 영역으로 제한해야 한다. 하지만, 유한한

영역으로 제한하게 되면 무한 영역에서의 원래 문제의 거동을 제대로 표현할 수 있는 절단된 경계에서의 경계조건을 정의하는데 어려움이 따른다.

전자기파나 수중폭발에 따른 파동 문제를 유한 영역으로 제한하게 되면 절단된 경계에서의 반사와 발생으로 인해 수치해석은 부정확한 결과를 초래한다(Turkel, 1983). 이러한 파의 반사는 절단된 경계를 빠져나가려는 파가 완전히 흡수되지 않기 때문에 발생하는 현상으로(Thompson, 1987; Berenger, 1994), 이를 해결하기 위한 연구가 활발히 진행

* Corresponding author:

Tel: +82-44-860-2546; E-mail: jrcho@hongik.ac.kr

Received September 13 2016; Revised November 23 2016;

Accepted December 23 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

되었다. Thompson(1987)은 오일러(Euler) 방정식의 특성을 기초로 단순한 유출 경계조건을 제시하였으며, Bayliss와 Turkel(1980)은 원거리에서의 점근해를 토대로 보다 정교한 반사경계조건을 제시하였다. 또 다른 해결방안으로, Colonius 등(1992)과 Freud(1997)는 반사파를 점진적으로 완화하기 위해 전단된 경계에 버퍼(buffer) 혹은 스폰지(sponge) 층을 삽입하였다.

Berenger(1994)는 전자기파 문제에서의 반사파를 흡수하기 위해 절단된 경계에 일정한 두께를 갖는 PML층을 추가하는 PML(perfectly matched layer)기법을 소개하였다. 수치해석 결과로부터 이 방법은 기존에 제시된 방법에 비해 경계에서의 반사파를 월등히 억제할 수 있음을 확인하였다. Hu (1996)는 유사한 방법으로 PML기법을 음향장 문제로 확대하는 연구를 시도하였다. 한편, Martin과 Couder-Castaneda (2010)는 PML기법을 압축성 점성유동에 적용하여 경계에서의 반사파를 효과적으로 흡수하였다.

PML기법은 파의 전파와 대류를 특성으로 하는 각종 무한 영역 문제의 수치해석을 위해 효과적으로 적용될 수 있다. 그럼에도 불구하고 PLM기법을 수중폭발 상황에서의 부유식 해상풍력발전기의 동적 안정성연구에 적용한 예는 찾아보기 힘들다. 부유식 해상풍력발전기에 대한 거의 대부분의 연구는 파고와 풍하중에 따른 동적 거동 연구에 집중되어 있다. 이러한 맥락에서 본 연구에서는 수중폭발에 따른 스파(spar) 타입 부유식 해상풍력발전기의 동적 안정성을 PML기법을 적용하여 고찰하고자 한다. 부유식 해상풍력발전기는 자중, 부력, 무게추 그리고 계류장 장력의 조합으로 그 자세를 유지하고 있다. 하지만, 수중폭발과 같은 치명적인 사고가 발생하게 되면 동적 안정성은 심각하게 영향을 받게 된다.

2. 문제 정의

신재생 에너지의 가장 중요한 요구조건은 효율과 용량이며, 이러한 맥락에서 우리 주위에 산재해 있는 풍하중은 무한한 잠재력으로 인해 큰 관심을 끌고 있다(Hansen and Hansen, 2007). 풍력발전기는 초기에 지상에 설치되었으며 어느 정도 설치대수와 용량측면에서 급진적인 발전을 보였다. 하지만, 주거지역 침입과 윈드팜(wind farm)에 대한 한계로 인해 발전이 저하되었으며, 자연적으로 제약조건이 적은 해상으로 그 설치장소가 옮겨가고 있다.

2.1 스파타입 부유식 해상풍력발전기

해상풍력발전기는 윈드 타워를 지지하는 방식에 따라

고정식과 부유식으로 대별된다. 고정식과는 달리 여러가지 기술적인 문제가 완전히 해결되지 않아 아직 개념 연구 단계에 있다(Karimirad *et al.*, 2011). 특히, 부유체(floating platform)는 전체 풍력발전기를 지탱할뿐더러 동적 안정성에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 중요하게 취급되고 있다. 현재 부유체는 바지(barge) 타입, 텐션레그(TLP: tension leg) 타입 그리고 스파타입이 주류를 이루고 있다.

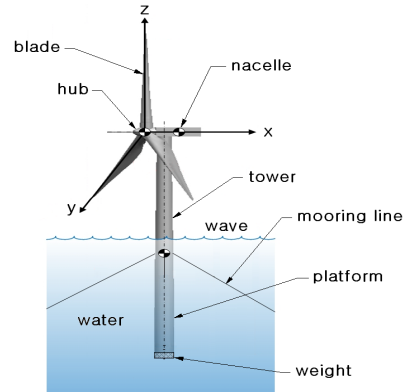


Fig. 1 Spar-type floating offshore wind turbine

Fig. 1은 전형적인 스파타입 부유식 해상풍력발전기를 보여 주고 있으며, 전체 풍력발전기는 부력에 의해 지지되며 수직 위치는 바닥의 추에 의해 조정된다. 그리고 풍하중과 파고 하중에 의한 동변위는 계류장의 장력에 의해 억제된다(Lefebvre and Collu, 2012). 한편, 부유식 해상풍력발전기의 동적 안정성은 Fig. 2에 나타난 3개의 병진자유도(서지, 스웨이, 히브) 그리고 3개의 회전자유도(피치, 롤, 요)에 의해 평가된다(Cho *et al.*, 2012). 이들 6자유도는 서로 연계되어 있으며, 동적 안정성 평가에는 피치와 롤이 중요하게 고려된다.

일반적으로 해상풍력발전기의 동적 안정성은 돌풍이나 파고에 의해 영향을 받기 때문에 대부분의 연구는 이러한 외란에 의한 영향에 집중되어 왔다. 하지만, 수중폭발은 동적 안정성 더

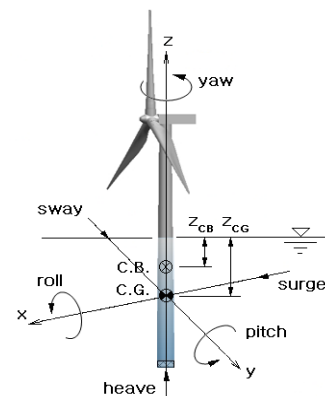


Fig. 2 Six-DOF rigid body motion (CB: center of buoyancy, CG: center of gravity)

나아가 구조적 안전성에 치명적인 영향을 미치기 때문에 그 중요성을 간과할 수 없다. 한편, 수치해석적인 측면에서 가장 심각한 문제는 유한 영역으로 제한함으로써 유발되는 경계에서의 반사와 발생이다. 본 연구에서는 Berenger(1994)가 제안한 PML기법을 수중폭발에 따른 비점성 압축성 유체-구조 연계문제에 적용하고자 한다.

2.2 수중폭발에 기인한 유체-구조 연계문제

Fig. 2를 참고하여 풍력발전기의 기하학적 영역을 $\Omega \in R^3$ 로 그리고 그 경계를 $\partial\Omega = \partial\Omega_D \cup \partial\Omega_N$ 으로 표기한다. 여기서, $\partial\Omega_D$ 와 $\partial\Omega_N$ 은 각각 풍력발전기의 변위 그리고 하중 경계 조건을 나타낸다. 수중폭발 하중을 받는 풍력발전기의 동변위 $\mathbf{u}(\mathbf{x};t)$ 는 다음 식과 ($i, j = x, y, z$)

$$\sigma_{ij}(\mathbf{u})_{,j} + \rho(f_i - \ddot{u}_i) = 0, \quad \Omega \times (0, T] \quad (1)$$

초기조건 $\mathbf{u}(\mathbf{x};0) = \mathbf{u}^0(\mathbf{x}), \dot{\mathbf{u}}(\mathbf{x};0) = \dot{\mathbf{u}}^0(\mathbf{x})$ 그리고 경계조건 $\mathbf{u}(\mathbf{x};t) = \hat{\mathbf{u}}(\mathbf{x};t), \sigma_{ij}(\mathbf{x};t)n_j = \hat{t}_i(\mathbf{x};t)$ 에 의해 결정된다. 위 식에서 σ_{ij} 는 Cauchy응력을 나타내고, ρ 와 f_i 는 각각 밀도와 자중을 의미한다. 그리고 \hat{t}_i 는 파고의 동수압 p 에 의해 부유체에 작용하는 외력을 의미한다.

한편, 해수의 물질 영역 $\Omega_F \in R^3$ 은 파고운동을 충분히 포함하기 위해 $\tilde{\Omega}_F$ 로 확장한다. 이 확장된 해수 영역 내에서 물과 공기 영역은 체적분율(volume fraction) F_V 의 값으로 물은 $F_V=1$ 로 반면 공기는 $F_V=0$ 로 구분된다. 확장된 해수영역 $\tilde{\Omega}_F$ 내에서 비점성 유동 $\mathbf{V}(\mathbf{x};t)$ 는 다음의 질량보존, 운동량 그리고 에너지 보존 방정식으로 결정된다.

$$\frac{\partial \rho_F}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_F \mathbf{V}) = 0, \quad \exists \tilde{\Omega}_F \times (0, T] \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho_F \mathbf{V})}{\partial t} + (\rho_F \mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \nabla \cdot \sigma^F, \quad \tilde{\Omega}_F \times (0, T] \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho_F e)}{\partial t} + \rho_F e \nabla \cdot \mathbf{V} = -\nabla \cdot (p \mathbf{V}), \quad \tilde{\Omega}_F \times (0, T] \quad (4)$$

그리고 물과 공기 영역을 구분짓는 체적분율 $F_V(\mathbf{x};t)$ 은 다음의 수송방정식과

$$\frac{\partial F_V}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla F_V = 0, \quad \tilde{\Omega}_F \times (0, T] \quad (5)$$

초기조건 $F_V(\mathbf{x};0) = F_{V,int}$ 으로 표현된다. 위 식에서 e 는

내부에너지, ρ_F 는 물의 비중, 그리고 T 는 관심이 되는 시간 영역이다. 한편, 수중 속에서의 응력 σ^F 는 단위 텐서 $\mathbf{1}$ 를 이용하여 $\sigma^F = -p\mathbf{1}$ 과 같이 계산된다.

부유체 변위와 파고의 연계는 오일러-라그랑지 연계기법에 의해 처리되며, 유체-구조 연계문제는 지그재그형 반복계산 기법(Cho *et al.*, 2008)에 의해 계산된다. 폭발의 시작과 성장을 계산하기 위해 다음의 JWL(Jones-Wilkins-Lee) 상태방정식(Lee and Tarver, 1980)을 적용하였다.

$$p = A \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) e^{-R_1/\eta} + B \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) e^{-R_2/\eta} + \omega \eta \rho_0 e \quad (6)$$

여기서, $\eta = \rho/\rho_0$ (ρ_0 : 기준 밀도) 그리고 A, B, ω, R_1 과 R_2 는 폭약에 대한 입력상수이다.

3. PML(perfectly matched layer) 무반사 기법

확장된 수중 영역 $\tilde{\Omega}_F$ 는 일반적으로 반 무한영역이기 때문에 수치해석을 위해 유한한 영역으로의 절단이 필수적이다. 수치해석을 위해 유한한 영역으로 절단한 수중 영역을 $\hat{\Omega}_F$ 로 표기하면, 2장에서 소개한 식 (2)~(5)는 다음과 같이 일반화된 수송방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0, \quad \hat{\Omega}_F \times (0, T] \quad (7)$$

여기서, 변수 U, F, G 와 H 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$U = \begin{Bmatrix} \rho_F \\ \rho_F V_x \\ \rho_F V_y \\ \rho_F V_z \\ \rho_F e \\ F_V \end{Bmatrix}, F = \begin{Bmatrix} \rho_F V_x \\ \rho_F V_x^2 + p \\ \rho_F V_x V_y \\ \rho_F V_x V_z \\ (R_F) V_x \\ F_V V_x \end{Bmatrix}, G = \begin{Bmatrix} \rho_F V_y \\ \rho_F V_x V_y \\ \rho_F V_y^2 + p \\ \rho_F V_y V_z \\ (R_F) V_y \\ F_V V_y \end{Bmatrix}, H = \begin{Bmatrix} \rho_F V_z \\ \rho_F V_x V_z \\ \rho_F V_y V_z \\ \rho_F V_z^2 + p \\ (R_F) V_z \\ F_V V_z \end{Bmatrix} \quad (8)$$

한편, 위 식에서 R_F 는 $(\rho_F e + p)$ 를 나타낸다.

PML 무반사기법에서는 Fig. 3에 도시한 바와 같이 절단된 수치해석 영역 $\hat{\Omega}_F$ 를 내부영역과 PML 영역으로 분할한다. 그리고 PML 영역에서는 U 를 방향별로 세 개로 분할하고 위 식 (7)을 다음과 같이 방향별로 세 개로 분리된 PML 방정식으로 표현한다.

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \sigma_x U_1 = 0 \quad (9)$$

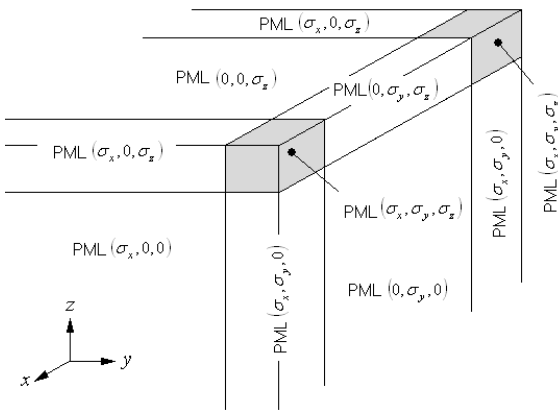


Fig. 3 3-D truncated simulation domain surrounded by the PML layers

$$\frac{\partial U_2}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial y} + \sigma_y U_2 = 0 \tag{10}$$

$$\frac{\partial U_3}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial z} + \sigma_z U_3 = 0 \tag{11}$$

위 식에서 세 개의 변수 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)를 흡수계수(absorption coefficients)라고 부르고 절단된 경계에서 파의 반사를 흡수하기 위해 도입되었다.

흡수계수는 내부 영역에서는 모두 0의 값으로 설정되며 PML 영역에서는 해당되는 면이 향하는 방향에 따라 선별적으로 1과 0의 값을 갖게 된다. 만약 흡수계수가 모두 0의 값을 가지면 PML 방정식 (9)~(11)은 원래 비점성 유동방정식인 식 (7) (즉, 식 (2)~(5))로 귀착된다. 따라서, PML 방정식 (9)~(11)은 비점성 유동방정식의 일반화된 수식으로 생각할 수 있다.

4. 수치실험 및 해석결과

Fig. 4는 수중폭발에 따른 동적 안정성을 수치해석 하기 위한 3차원 FVM-FEM 연계모델의 예제를 보여주고 있다.

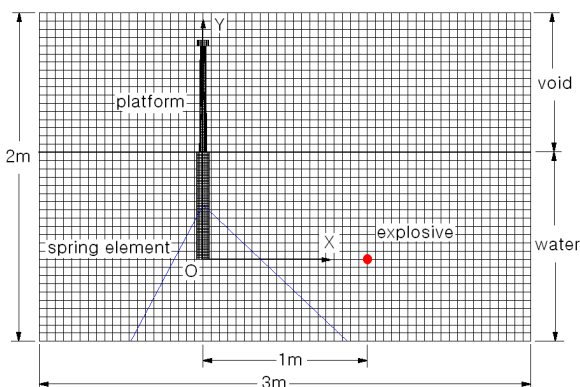


Fig. 4 A 3-D coupled FVM-FEM simulation model of underwater explosion

확장된 오일러 영역은 아래는 해수로 그리고 위는 공기로 채워져 있다. 시뮬레이션 영역의 높이는 2m로 설정되어 있고, 스파타입 부유식 해상풍력발전기의 상부 블레이드, 허브 그리고 나셀부는 집중질량으로 단순화시켰다. 중공으로 되어 있는 부유체(platform)는 강체로 가정하였으며 높이, 직경 그리고 두께는 각각 1.332, 0.04~0.08 그리고 0.0015m 이다. 세 개의 계류삭은 스프링 상수가 $k=1.0 \times 10^6 \text{N/m}$ 인 선형 스프링으로 모델링하였다. 부유체와 전체 오일러 영역은 8절점 육면체 요소로 요소망을 생성하였으며, 전체 요소수는 부유체가 11,244개이고, 오일러 영역은 144,000개이다.

폭약은 직경이 0.112m이고 내부 에너지가 $e_{INT}=4.96 \times 10^6 \text{J/kg}$ 인 구형의 LANL COMP B를 사용하였으며 부유체에서 1m 우측에 설치하였다. 공기의 밀도는 $\rho=1.225 \text{kg/m}^3$

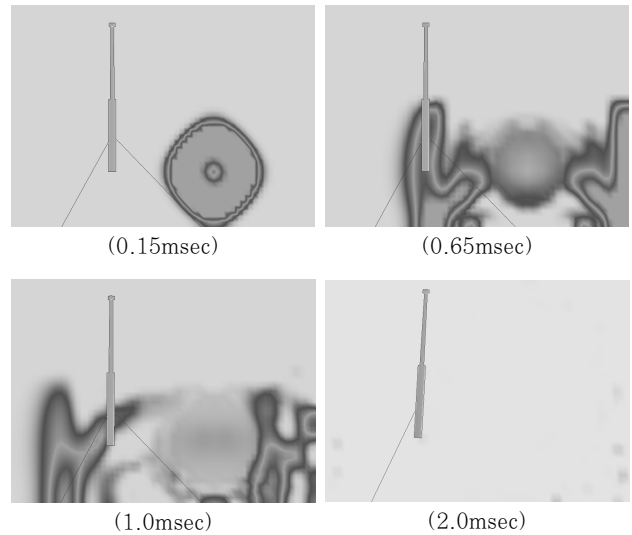


Fig. 5 Time histories of wave propagation without using the perfectly matched layers

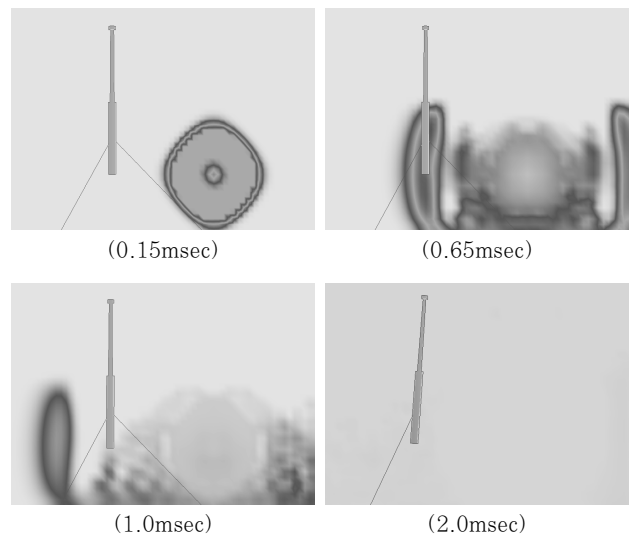


Fig. 6 Time histories of wave propagation using the perfectly matched layers

이고 해수의 밀도와 체적계수는 각각 $\rho_F=1,000\text{kg/m}^3$ 그리고 $K=2.2\times 10^9\text{N/m}^3$ 으로 설정하였다. 그리고 유체-구조 연계 해석은 MSC/Dytran(2006)으로 수행하였으며, Fig. 3에서의 PLM 층의 두께는 파라메트릭 예비해석을 통해 결정하였다.

Fig. 5와 6은 PML기법을 적용하지 않은 경우와 적용한 경우에 있어 시간에 따른 폭발파의 진행과 부유체의 움직임을 순차적으로 비교하고 있다. PML 기법을 적용하지 않은 경우에는 경계에서 반사파의 영향을 볼 수 있으며, 특히 마지막 단계에서 충격파가 완전히 빠져나가지 않고 반사되어 곳곳에 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 이와 달리, PML기법을 적용한 경우는 반사파에 따른 폭발파의 교란을 찾아볼 수 없으며, 마지막 단계에도 폭발파가 경계에서 반사없이 깨끗하게

빠져나가는 것을 확인할 수 있다. 따라서, PML기법을 적용하면 경계에서의 반사파를 완전히 흡수할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 7은 시간에 따른 x -축 방향으로의 동수압 분포를 서로 다른 세 시점에서 측정한 것이다. 여기서 x -축은 Fig. 4에 도시한 바와 같이 부유체 바닥에 원점을 두고 폭약방향으로 지정되어 있다. 초기에는 PML기법의 적용 여부에 무관하게 동수압 분포에 큰 차이가 발견되지 않는다. 하지만, PML 기법을 적용하지 않은 경우에는 시간과 더불어 우측 그리고 좌측 경계에서 파가 내부로 반사되어 들어오는 것을 볼 수 있다. 하지만, PML기법을 적용한 경우에는 파가 반사없이 좌우 경계를 빠져나감을 볼 수 있다. 따라서, PML기법을 적용하면 경계에서의 파의 반사가 방지됨을 재차 확인할 수 있다.

Fig. 8은 부유체 무게중심에서의 병진운동 시간응답을 비교한 것이다. 3개의 병진운동 즉, 서지(surge), 스웨이 (sway) 그리고 히브(heave) 운동은 각각 x -, y - 그리고 z -방향으로 정의된다. 한편, 부유체의 무게중심은 Fig. 4에서 부유체의 바닥으로부터 0.0023m 높이에 위치한다. 부유체가 xy -평면에 대해 대칭이기 때문에 두 경우 모두 스웨이 운동은 발생하지 않는다. 한편, PML기법을 적용하지 않은 경우에는 서지운동은 보다 작게 반면 히브운동은 보다 크게 나타남을

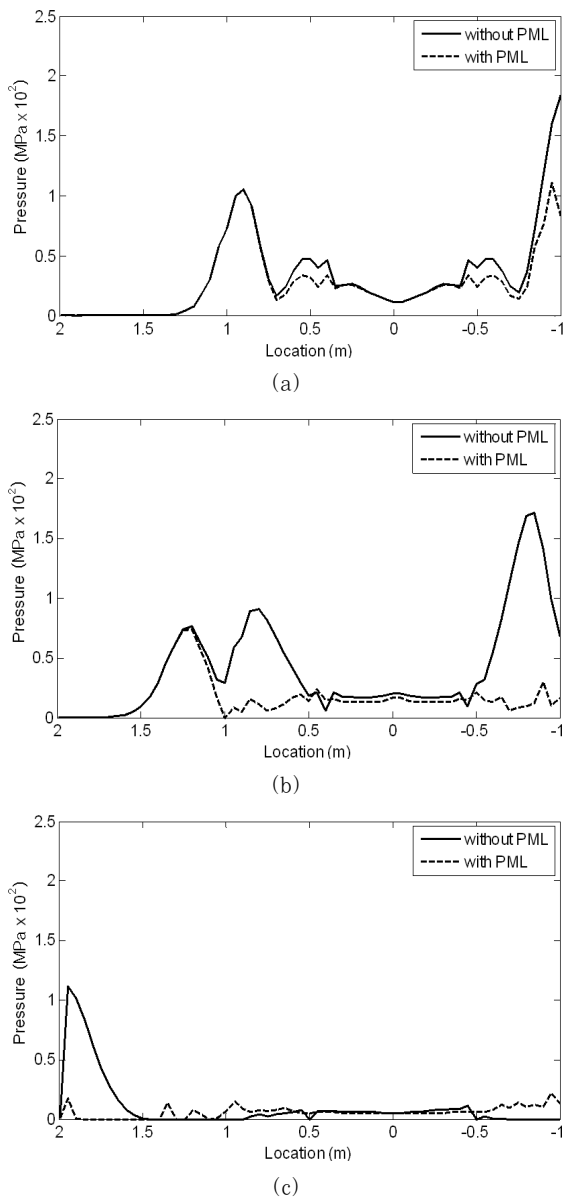


Fig. 7 Variation of hydrodynamic pressure distributions: (a) $t=0.6\text{msec}$, (b) $t=1.0\text{msec}$, (c) $t=1.4\text{msec}$

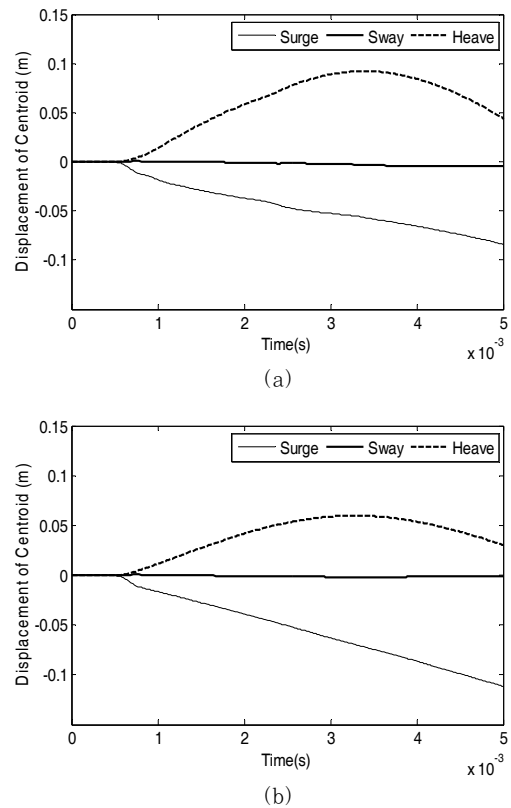


Fig. 8 Time histories of surge, sway and heave of floating platform: (a) without PML, (b) with PML

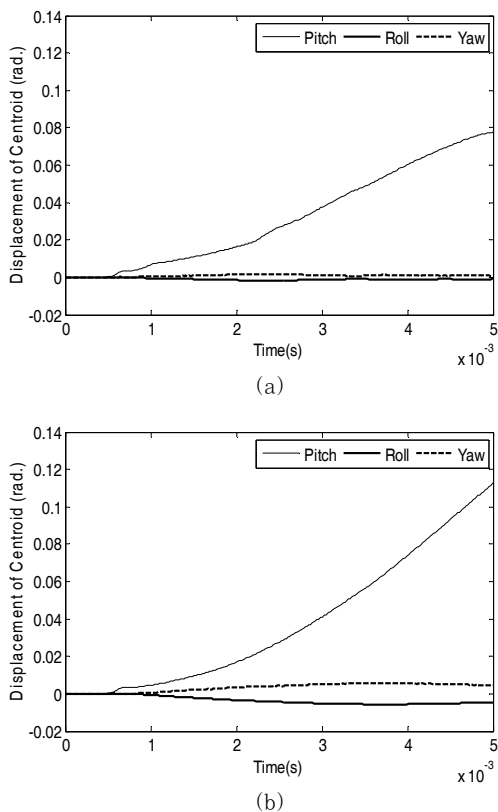


Fig. 9 Time histories of pitch, roll and yaw of floating platform: (a) without PML, (b) with PML

확인할 수 있다. 또한, 서지운동은 현저한 요동을 포함하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 PML기법을 적용하지 않은 경우에 바닥면에서의 반사파가 히브운동을 증폭시키는 반면 좌측 경계에서의 반사파가 서지운동을 억제시키기 때문이다.

Fig. 9는 부유체의 회전자유도에 대한 시간응답을 비교하고 있다. 두 경우 모두 피치(pitch)운동이 주도적임을 확인할 수 있는데, 이것은 폭약이 부유체에 대해 피치방향에 설치되어 있기 때문이다. PML기법을 적용하지 않은 경우가 피치운동에 요동이 심하며 진폭 역시 작게 나타남을 볼 수 있다. 이는 앞의 서지운동에서와 같이 좌측 경계에서의 파의 반사가 피치운동을 억제하고 또한 심한 요동을 야기하기 때문이다. 롤(roll)과 요(yaw)운동은 극히 미미한 반면, PML기법을 적용한 경우가 다소 큰 진폭을 나타냄을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 수중폭발을 받는 스파타입 부유식 해상풍력발전기의 동적 안정성을 PML 무반사기법을 적용하여 수치해석적으로 분석하였다. PLM기법을 적용하기 위해 절단된 유체영역의 경계에 PML층을 삽입하였으며, 층의 두께는 과라 매트릭 예비해석을 통해 최적으로 선정하였다. 수중폭발에

기인한 파고와 풍력발전기의 유체-구조 상호작용은 오일러 기반의 FVM과 라그랑지 기반의 FEM을 연계하여 근사화하였으며, 폭발에 따른 동수압의 변동은 JWL 상대방정식을 도입하여 계산하였다.

수치실험을 통해 PML 무반사기법을 적용한 경우와 적용하지 않은 두 경우를 비교함으로써 PML 무반사기법의 우수성을 입증하였다. 또한, 두 경우에 대한 상대비교를 통해 다음의 주요한 결과를 확인할 수 있었다. 첫째, PML기법을 적용하지 않은 경우에는 파가 경계를 통해 완전히 빠져나가지 않고 반사되어 파의 전파에 현저한 악영향을 끼쳤다. 하지만, 이러한 반사파 현상은 PML기법으로 완전히 해결되었으며 아무런 반사를 일으키지 않고 경계를 깨끗이 빠져나감을 확인하였다. 이러한 반사파의 완전한 흡수는 유동방정식을 3개로 분리하고 유동영역 경계에 PML 층을 도입함으로써 반사파가 PML 층을 통과하는 동안 감쇠되기 때문임을 알게 되었다. 둘째, 이러한 파의 경계에서의 반사와 역제 현상은 파고의 동수압 분포의 시간응답을 통해서도 확인할 수 있었다. 마지막으로, PML기법을 적용하지 않은 경우에는 바닥면 그리고 좌측 경계에서의 파의 반사로 인해 히브운동은 증가하고 서지 그리고 피치운동은 억제되었다. 그리고 현저한 요동이 야기됨을 볼 수 있었다. 하지만, PML기법을 적용하게 되면, 이러한 반사파에 따른 진폭의 증감과 요동이 방지됨을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2016학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

References

Bayliss, A., Turkel, E. (1980) Radiation Boundary Conditions for Wave-like Equations, *Commun. Pure & Appl. Math.*, 33, pp.707~725.

Berenger, J.P. (1994) A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves, *J. Comput. Phys.*, 127, pp.363~379.

Cho, J.R., Han, K.C., Kwang, S.W., Cho, C.S., Lim, O.K. (2012) Mobile Harbor: Structural Dynamic Response of RORI Crane to Wave-induced Excitation, *Struct. Eng. & Mech.*, 43(5), pp.679~690.

Cho, J.R., Park, S.W., Kim, H.S., Rashed, S. (2008) Hydroelastic Analysis of Insulation Containment of LNG Carrier by Global-local Approach, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 76, pp.749~774.

- Colonius, T., Lele, S.K., Moin, P.** (1992) Boundary Conditions for Direct Computation of Aerodynamic Sound Generation, In: *14th DGRA/AIAA Aeroacoustics Conf. Proc.*, 1, pp.438~447.
- Freud, J.B.** (1997) Proposed Inflow/outflow Boundary Conditions for Direct Computation of Aerodynamics Sound, *AIAA J.*, 35(4), pp.740~742.
- Hansen, A.D., Hansen, L.H.** (2007) Wind Turbine Concept Penetration over 10 Years (1995~2004), *Wind Energy*, 10, pp.81~97.
- Hu, F.Q.** (1996) On Absorbing Boundary Conditions for Linearized Euler Equations by a Perfectly Matched Layer, *J. Comput. Phys.*, 129, pp.201~209.
- Karimirad, M., Meissonnier, Q., Gao, Z., Moan, T.** (2011) Hydroelastic Code-to-Code Comparison for a Tension Leg Spar-Type Wind Turbines, *Mar. Struct.*, 24, pp.412~435.
- Lee, E.L., Tarver, C.M.** (1980) Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosive, *Phys. Fluids*, 23(12), pp.2362~2372.
- Lefebvre, S., Collu, M.** (2012) Preliminary Design of a Floating Support Structure for a 5MW Offshore Wind Turbine, *Ocean Eng.*, 40, pp.15~26.
- MacNeal Schwedleer Corp.** (2006) MSC/Dytran Theory Manual (ver. 2005r3), Los Angeles, CA, USA.
- Martin, R., Couder-Castaneda, C.** (2010) An Improved Unsplit and Convolutionary Perfectly Matched Layer Absorbing Technique for the Navier-Stokes Equations using Cut-off Frequency Shift, *Comput. Modeling Eng. & Sci.*, 63(1), pp.47~77.
- Thompson, K.W.** (1987) Time Dependent Boundary Conditions for Hyperbolic Systems, *J. Comput. Phys.*, 68, pp.1~24.
- Turkel, E.** (1983) Progress in Computational Physics, *Comput. & Fluids*, 11, pp.121~144.

요 지

본 논문은 효과적인 무반사 기법을 이용한 수중폭발에 따른 부유식 해상풍력발전기의 동응답 수치해석에 관한 내용이다. 수치해석을 위해 무한한 바다 영역을 유한한 영역으로 한정하고 그 경계에서 필연적인 충격파의 반사를 흡수하기 위해 PML(perfectly matched layer)이라 불리는 무반사 기법을 적용하였다. 수중폭발을 수반한 비점성 압축성 유동을 표현하는 일반화된 수중방정식은 방향별 흡수계수와 상태변수를 도입하여 3개의 PML 방정식으로 분리하였다. 풍력발전기와 해수 유동으로 구성된 유체-구조 연계문제는 오일러 기반의 유한체적법과 라그랑지 기반의 유한요소법을 연계하여 반복계산으로 해석하였다. 그리고 수중폭발에 따른 동수압은 JWL 상태방정식으로 계산하였다. 수치실험을 통해 수중폭발에 따른 동수압과 구조 동응답을 분석하였으며, PML 무반사 기법을 적용한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 보다 정확한 해석결과를 제공함을 확인하였다.

핵심용어 : 부유식 해상풍력발전기, 수중폭발, PML 무반사 기법, 유체-구조 연계해석, 구조 동응답