

전산유체역학을 이용한 FLNG의 풍하중 추정에 관한 연구

† 이상의

† 창원대학교 메카융합공학과 조교수

Numerical Estimation of Wind Loads on FLNG by Computational Fluid Dynamics

† Sang-Eui Lee

† Assistant Professor, Department of Mechatronics Convergence Engineering, Changwon National University, Changwon, 51140, Republic of Korea

요 약 : 큰 상부 형상을 가지는 FLNG (Liquefied Natural Gas Floating Production Storage Offloading Units, LNG FPSOs) 등의 해양구조물은 안정적인 운동성능 확보 및 계류라인 설계에 있어 정도 높은 풍하중 추정이 필수적이다. 따라서 본 연구의 목적은 FLNG의 풍하중 추정을 위한 수치해석 기법을 개발하는 데 있다. 특히, 본 연구에서 개발한 수치해석 기법은 저자의 이전연구를 FLNG에 맞추어 수정하였다. 풍하중 추정을 위한 수치해석은 15° 간격으로 0-360° 범위에서 균일 풍속 조건과 풍속 프로파일을 적용한 NPD (Norwegian Petroleum Directorate) 조건에서 수행하였다. 먼저, NPD 모델 풍속 프로파일 모델 개발을 위해 Sand-Grain Roughness 변화에 따른 풍속 프로파일을 분석하였다. 개발된 NPD 모델을 이용하여 3가지 풍향 (Head, Quartering & Beam)에 대한 메쉬 수렴성 시험을 수행하였다. 최종적으로 개발된 NPD 모델과 메쉬를 이용하여 균일한 풍속 조건과 NPD 조건에서의 풍하중을 평가하고 비교하였다. 본 연구에서는 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 기반 Solver인 STAR-CCM+ (17.02)를 이용하였다. 결과를 요약하면, 풍속 프로파일을 적용한 NPD 모델에서의 풍하중은 균일 풍속(10m/s) 조건과 비교하여, Surge와 Yaw 하중이 최대 20.35% 와 34.27% 증가하였다. 특히, 특정 일부 구간에서 만 큰 하중의 차이를 보인 Sway ($45^\circ < \alpha < 135^\circ$, $225^\circ < \alpha < 315^\circ$)와 Roll ($60^\circ < \alpha < 135^\circ$, $225^\circ < \alpha < 270^\circ$)은 구간별 평균 증가율이 15.60%와 10.89% 수준으로 나타났다.

핵심용어 : 균일 풍속, NPD 모델, 풍속 프로파일, 풍하중, FLNG, 전산유체역학

Abstract : It has been noted that an accurate estimation of wind loads on offshore structures such as an FLNG (Liquefied Natural Gas Floating Production Storage Offloading Units, LNG FPSOs) with a large topside plays an important role in the safety design of hull and mooring system. Therefore, the present study aims to develop a computational model for estimating the wind load acting on an FLNG. In particular, it is the sequel to the previous research by the author. The numerical computation model in the present study was modified based on the previous research. Numerical analysis for estimating wind loads was performed in two conditions for an interval of wind direction (α), 15° over the range of 0° to 360°. One condition is uniform wind speed and the other is the NPD model reflecting the wind speed profile. At first, the effect of sand-grain roughness on the speed profile of the NPD model was studied. Based on the developed NPD model, mesh convergence tests were carried out for 3 wind headings, i.e. head, quartering, and beam. Finally, wind loads on 6-degrees of freedom were numerically estimated and compared by two boundary conditions, uniform speed, and the NPD model. In the present study, a commercial RANS-based viscous solver, STAR-CCM+ (ver. 17.02) was adopted. In summary, wind loads in surge and yaw from the wind speed profile boundary condition were increased by 20.35% and 34.27% at most. Particularly, the interval mean of sway ($45^\circ < \alpha < 135^\circ$, $225^\circ < \alpha < 315^\circ$) and roll ($60^\circ < \alpha < 135^\circ$, $225^\circ < \alpha < 270^\circ$) increased by 15.60% and 10.89% against the uniform wind speed (10m/s) boundary condition.

Key words : uniform wind speed, NPD model, wind speed profile, wind loads, liquefied FPSOs, computational fluid dynamics

1. 서 론

해양구조물은 설계수명 동안 지정된 운용지역에서 파도, 바람, 조류 등의 해양환경 하중을 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야 한다 (Paik & Thayamballi, 2007). 특히, 상대적으로 큰 상부 구조를 가진 FLNG (Liquefied Natural Gas Floating

Production Storage Offloading Units, LNG FPSOs)는 풍하중의 영향이 상당히 클 것으로 예상된다. 따라서 지속적이고 안정적인 FLNG 운용을 위해서는 정도 높은 풍하중 추정기법 개발이 필요하다.

풍하중 추정법은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 대형 풍동 설비를 이용한 모형실험과 단순한 이론에 경험이 더해진 경험

† Corresponding author : 정희원, euui2000@changwon.ac.kr 055)213-3844

식, 마지막으로 전산역학을 (Computational Mechanics) 이용한 수치해석이다.

대형 풍동실험 설비를 이용한 풍하중 추정법(Shearer and Lynn, 1960; White, 1966; Aage, 1971; Isherwood, 1973; van Berlekom et al., 1975; van Berlekom, 1981; Gould, 1982; OCIMF, 1994; Blendermann, 1996)은 모형 사용으로 인한 축척 효과 (Scale Effect)가 필연적으로 나타나며, 많은 예산이 필요할 뿐만 아니라 많은 실험으로 긴 시간이 소요된다.

경험식에 의한 추정법(van Oortmerssen et al., 1987, Isherwood, 1972; Gould, 1982; Blendermann, 1993, 1994, 1995, 1996; Haddara and Guedes Soares, 1999)은 짧은 시간에 비교적 높은 정도의 결과를 얻을 수 있는 장점이 있으나, 상대적으로 다른 추정법과 비교하여 많은 오차를 가지고 있어 예비 설계 (Preliminary Design) 단계에 적절한 방법이다.

마지막으로 전산역학을 이용한 수치해석법(Koop et al., 2010; Wnęk et al., 2010, Kim et al., 2018, Berto et al., 2019, Yeon et al. 2022)은 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 이론의 발전과 계산기 성능의 비약적 개선이 급격한 적용 가능성 확대를 가져왔다. CFD를 이용한 추정이 실험보다 저렴한 방법으로 짧은 시간에 높은 정도를 얻을 수 있는 단계까지 이르렀으며, 그 결과 최근에는 CFD를 이용한 풍하중 추정 연구가 실험을 대체할 수 있는 수준까지 이른 것으로 평가된다(Kim et al., 2018, Berto et al., 2019, Yeon et al., 2022).

해양구조물 설계에서 풍하중의 중요성이 커짐에 따라 SNAME (Society of Naval Architects and Marine Engineers)는 OC-8 패널 산하에 CFD 태스크포스(TF)를 두어 풍하중 비교연구를 수행하였다. 전 세계에서 25개 기업과 연구기관이 참여하였으며, 최종적으로 “Guidance on Wind Technologies”를 제안하였다. 동 가이드는 한 척의 반잠수식 해양구조물에 대한 참여기관별 실험, 경험식, 및 CFD 결과를 비교 분석하였다. 결과적으로 CFD Solver와 무관하게 연구에 적용된 5가지 프로그램에서 1% 이내의 오차로 풍속 분포곡선을 생성할 수 있었고, 생성된 풍속분포 곡선을 이용해 추정된 풍하중의 불확실성은 실험과 비교하여 4% 이내로 평가되었다 (Kim et al., 2018).

따라서 본 연구에서는 저자의 이전연구에서 개발한 CFD 해석기법(Lee, 2020)을 이용하여 FLNG의 풍하중을 정밀히 추정하고자 한다. 특히, 계산된 결과를 균일한 풍속을 가정한 결과와 비교하여 풍속 분포곡선의 영향을 분석하고자 한다.

Table 1 Principal dimensions of FLNG

LBP (m)	Breadth (m)	Draft (m)	Capacity (K)	Projected Area (m ²)	
				Front	Side
411.0	80.0	15.1	628.0	4,274.3	21,094.6

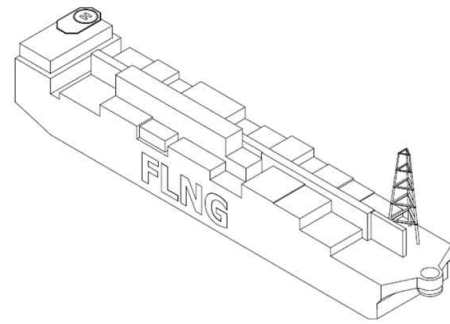


Fig. 1 Target structure, FLNG (Lee, 2015).

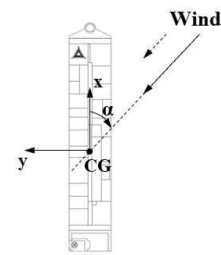


Fig. 2 Coordinate system.

2. 수치해석모델

본 연구는 풍하중 추정에 관한 저자의 연속연구로서 기존에 개발한 어선의 풍하중 추정에 사용된 수치해석 모델을 바탕으로 FLNG의 형상에 맞추어 해석모델을 수정하였다.

2.1 대상구조물

본 연구에서는 FLNG를 이용하여 풍하중을 추정하고자 한다. Fig. 1은 본 연구의 대상구조물인 FLNG를 나타내었으며, Table 1에 주요제원을 표기하였다. Fig. 2는 본 연구에 적용한 좌표계 시스템을 나타내며, 바람의 방향, α 을 선에서 0° 로, 선측에 90° 로, 선미에서 180° 로 정의한다.

2.2 유동해석

본 연구에서는 FLNG의 풍하중 추정을 위해 3차원 정상상태 비압축성 점성유동을 가정하여 수치해석을 수행하였다. 유동 지배방정식은 질량과 모멘텀 보존방정식으로 아래와 같다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{Du_j}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} + f_j \quad (2)$$

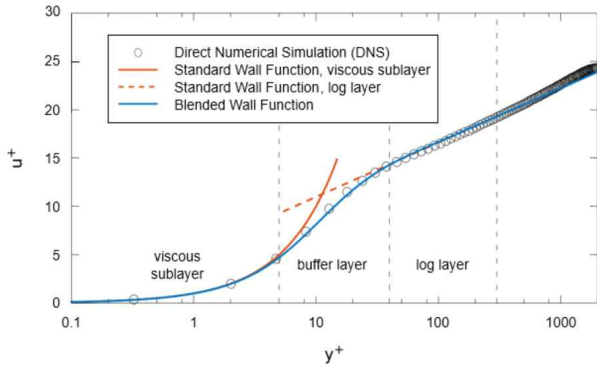


Fig. 3 Wall functions for velocity (STAR-CCM+, 2022).

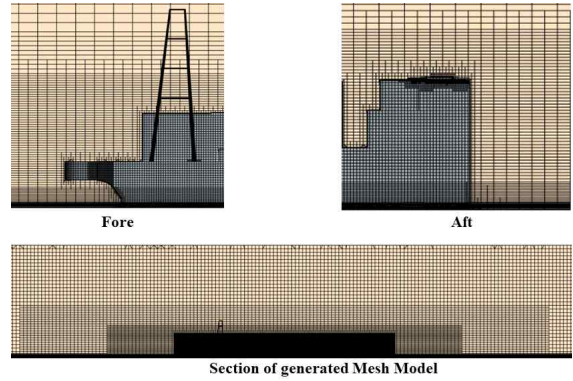


Fig. 5 Example of generated mesh model.

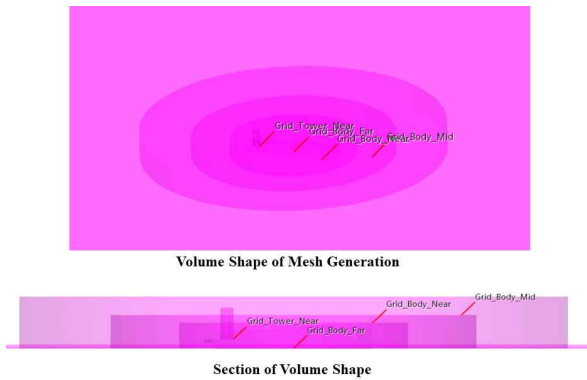


Fig. 4 Definition of mesh volume shapes.

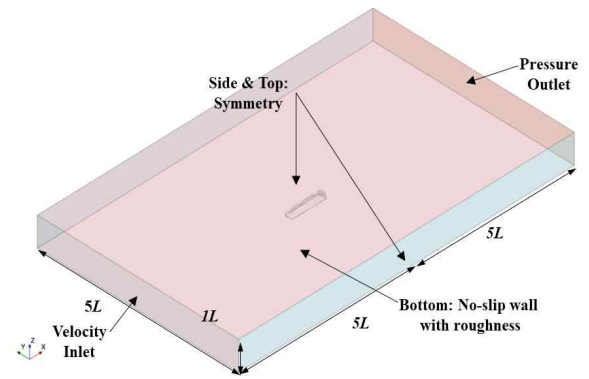


Fig. 6 Boundary conditions for computational domain.

여기서 $u_j = (u, v, w)$, $x_j = (x, y, z)$, f_j 는 체적력, ρ 는 밀도, ν 는 동점성계수를 의미한다.

난류 모델은 선형 Eddy Viscosity 접근법에 기초한 Two Equation 모델인 $k-\omega$ 를 적용하였으며, 경계층에는 Blended Wall Function을 적용하여 Viscous Sublayer와 Log Layer 사이에서 발생하는 에러를 최소화하고자 하였다(Fig. 3).

2.3 풍속모델

풍속 분포곡선은 Kim et al.(2018)이 NPD (Norwegian Petroleum Directorate)(Andersen & Løvseth, 2006) 모델에 Roughness Length (z_0)를 도입하여 제안한 모델을 적용하였다.

$$U(z) = U(z_{ref}) \left(1 + 0.0573 \sqrt{1 + 0.15 U(z_{ref})} \ln \frac{z + z_0}{z_{ref}}\right) \quad (3)$$

여기서 z_{ref} 는 기준 높이로 수면으로부터 10m를 의미하며, $U(z_{ref})$ 는 기준 높이에서의 기준속도를 나타낸다.

2.4 메쉬모델 및 경계조건

본 연구에서는 STAR-CCM+(17.02)를 사용하여 메쉬 모델을 생성하고 그 결과를 이용하여 풍하중을 추정하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 메쉬 생성에 사용된 5가지 Volume Shape을 나타내었다. 대상구조물을 중심으로 원기둥 형상이 커지는 방향으로 정의하였다. 생성된 전체 격자를 Fig. 5에 예로 나타내었다. 개별 Volume Shape의 격자 크기는 Base Size에 비례하여 생성하도록 설정하였으며 상세한 설정은 Table 2에 표기하였다.

Fig. 6은 해석에 사용된 전체 계산도메인의 경계조건을 나타내었다. 전체 도메인은 길이 방향으로 대상구조물 길이, L 의 10배로 정의하였고, 상류/하류 방향으로 5배, 폭 방향으로 6배, 높이 방향으로 1배가 되도록 영역을 정의하였다. 정면은 Velocity Inlet으로, 후면은 Pressure Outlet으로 옆면과 윗면은 Symmetry 정의하였다. 바닥은 NPD 모델을 적용하는 경우, No Slip-wall로 정의하여 Roughness에 따른 속도 프로파일이 생성되도록 정의하였고, Uniform 속도분포 계산의 경우 Symmetry로 정의하였다.

Table 2 Mesh Conditions of volume shapes

Base Size, B (m)	8.0
Body Far (% of B)	x-, y-axis = 100, z-axis = 50
Body Mid (% of B)	x-, y-axis = 100, z-axis = 25
Body Near (% of B)	x-, y-axis = 50, z-axis = 12.5
Bottom Mid (% of B)	x-, y-axis = 25, z-axis = 3.125
Bottom Near (% of B)	x-, y-axis = 12.5, z-axis = 1.5625

3. 해석 설정

본 장은 전산해석모델 개발을 위해 Sand-Grain Roughness, r 과 격자 수의 영향을 분석하였다.

3.1 Sand-Grain Roughness의 영향

Kim et al.(2018)의 정식화에서는 Sand-Grain Roughness, r 을 30에서 50 사이의 값으로 제안하였다. 따라서, 본 연구에서는 r 변화에 따른 NPD 모델 풍속의 변화를 제안된 범위에서 관찰하였다. 해석은 앞서 정의한 계산 영역에서 대상구조물을 제외한 후, 수행되었다. Fig. 7과 같이 풍속은 5지점에서 측정하여 비교하였다. 대상구조물인 FLNG의 중심은 $x=0m$ 인 지점에 있다.

Fig. 8은 $x=0m$ 에서 r 과 높이 변화에 따른 풍속 오차를 나타내었다. 오차는 각 위치에서 Inlet 속도대비 차이를 나타내며, 아래 식으로 계산한다.

$$Error = \frac{v_{x=0.0m} - v_{sections}}{v_{x=0.0m}} \quad (3)$$

r 값이 47을 기준으로 50에 가까지면 높이 30m 이하에서 -1% 오차 범위에서 목표 속도보다 낮은 프로파일이 생성되었다. 또한, r 값이 47에서 30에 가까워질수록 1% 오차 범위에서 목표 속도보다 높은 프로파일 형상이 생성되었다.

최적의 r 값을 선정하기 위해 전체 단면에서의 속도 결과를 Box-plot을 이용하여 분석하였다. Fig. 9는 중간값 (Median)을 기준으로 모든 단면에서의 속도분포 정도를 분석한 결과를 나타내었다. $r > 45$ 인 경우, 1.0보다 작은 영역에 치우친 결과가 나타났으며, $r < 45$ 인 경우, 1.0보다 큰 영역에 치우친 결과가 계산되었다. $r=45$ 인 경우, 1.0을 기준으로 Skew가 가장 적은 균형 잡힌 결과를 보여준다. 따라서 본 연구에서는 Sand-Grain Roughness, r 을 45로 설정한다. Fig. 10은 $r=45$ 일 때, 계산 영역에서 생성된 단면 별 풍속 프로파일을 나타내었다.

3.2 Mesh Convergence

본 절에서는 앞선 결과를 이용하여 Mesh Convergence 시험을 수행하였다. 격자의 크기는 Base Size를 변경하는 방법으로 수행하였으며, 적용한 메쉬 조건과 생성된 메쉬 수를 Table 3에 제시하였다. 메쉬 수는 2.2~14.0백만개 수준으로 나타났으며, 생성된 메쉬 모델을 Fig. 11에 제시하였다.

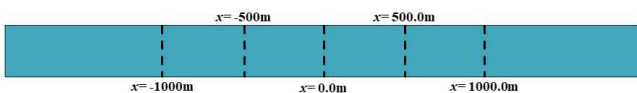


Fig. 7 Cross-section locations for monitoring wind speed.

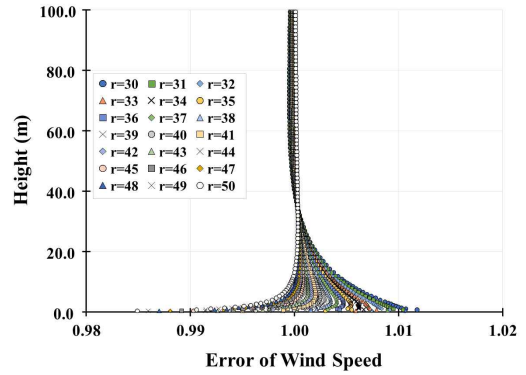


Fig. 8 Error of wind speed profile at $x=0m$.

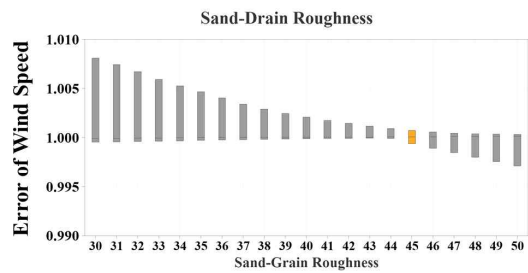


Fig. 9 Box-plot of wind speed profile error with varying sand-grain roughness at all locations.

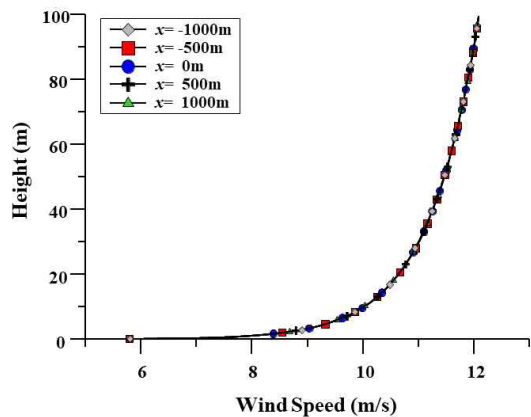


Fig. 10 Wind speed profile at sand-grain roughness, $r=45$.

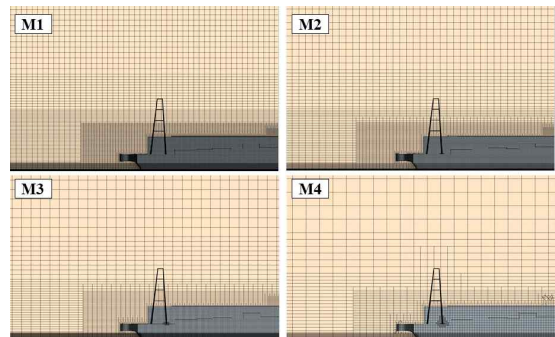


Fig. 11 Example of the generated mesh model.

본 연구는 바람의 방향 변화에 따른 풍하중을 추정하고자 하므로 대상구조물의 위치를 중심의 수직축 (z -axis)를 기준으로 회전시켜 6자유도 방향의 하중을 측정한다. 따라서 정도 높은 풍하중 추정을 위하여 3방향 ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)에 대한 Mesh Convergence 시험을 수행한다.

Mesh Convergence 시험은 먼저 $\alpha = 0^\circ$ 일 때, Surge와 Pitch 운동에 대하여, $\alpha = 45^\circ$ 일 때, 6 자유도 운동에 대하여 $\alpha = 90^\circ$ 일 때, Sway, Roll 및 Yaw에 대한 하중의 수렴성을 분석하였다. 또한, 정상상태 해석에 적용할 Iteration 수 선정을 위해 각 구간은 2,000 Iteration 별로 나누어 각 구간의 평균값 변화를 추적하여 비교하였다.

Fig. 12는 $\alpha = 0^\circ$ 일 때 Surge와 Pitch 하중에 대한 수렴성을 나타내었다. M4 메쉬 모델이 Surge에서 상대적으로 큰 값을 보이나, Pitch 하중에서는 모든 메쉬 모델에서 유사한 수준의 값을 보여준다.

Fig. 13-14는 $\alpha = 90^\circ$ 일 때 Sway, Roll 및 Yaw 하중에 대한 수렴성을 나타내었다. Fig. 13에서는 모든 메쉬 모델과 하중에서 "Iteration: 2,000-4,000"의 평균값이 상대적으로 큰 값을

이 관찰되었다. 하중의 수렴성은 M2 모델의 수준이 되어야 일정 수준 이상의 정확도가 확보될 것으로 판단된다. Fig. 14의 Yaw 하중에서는 Iteration 수가 8,000에 이르면 높은 수준의 하중을 추정할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서, M2 모델에서 높은 정도의 풍하중을 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 특히, Fig. 14의 Roll에서 M4가 M1과 유사한 수준의 값을 보여주는 것으로 판단할 수 있으나, Yaw 하중을 동시에 고려하면 M2 모델이 적절한 것으로 판단된다.

$\alpha = 45^\circ$ 조건에서는 앞선 두 풍향의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있어 본 논문에서는 상세한 기술을 생략한다.

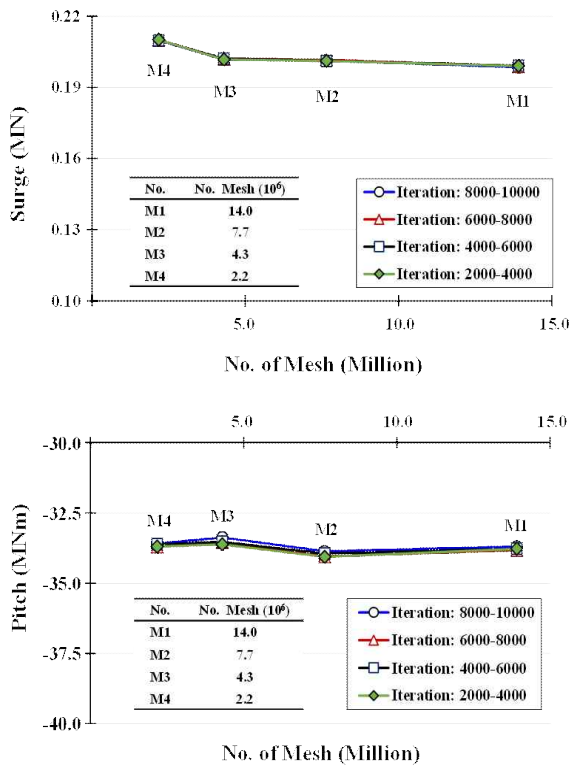


Fig. 12 Results of mesh convergence ($\alpha = 0^\circ$)

Table 3 Conditions of mesh convergence

Mesh Size	M1	M2	M3	M4
Base Size, B (m)	8	10	14	20
No. of Mesh (Million)	14.0	7.7	4.3	2.2

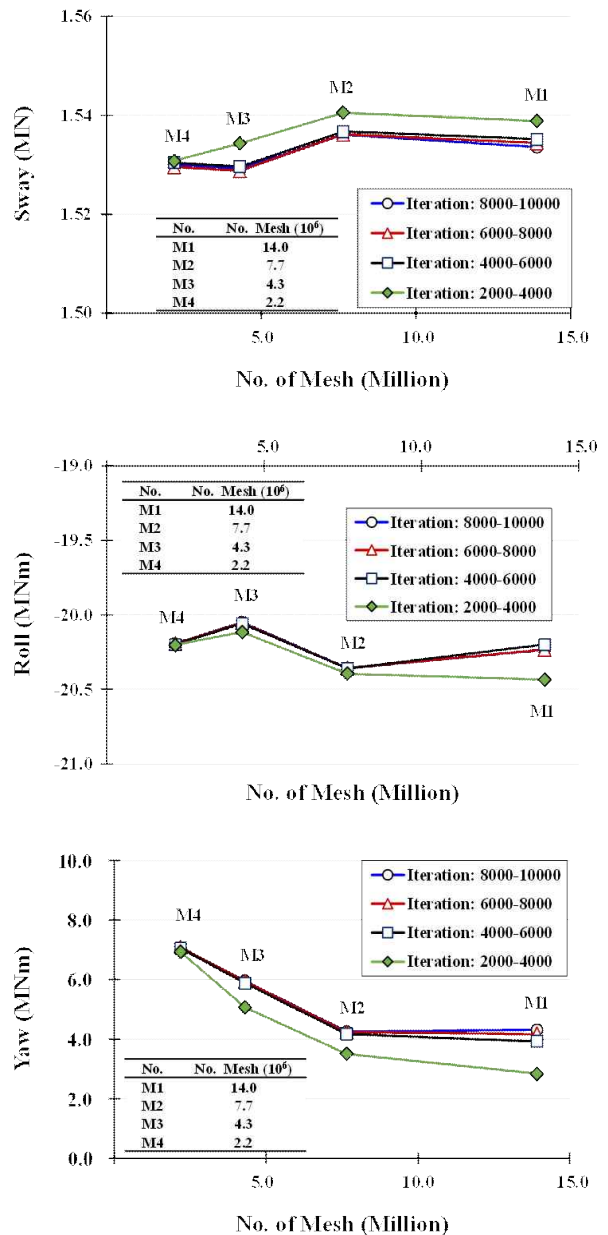


Fig. 13 Results of mesh convergence ($\alpha = 90^\circ$).

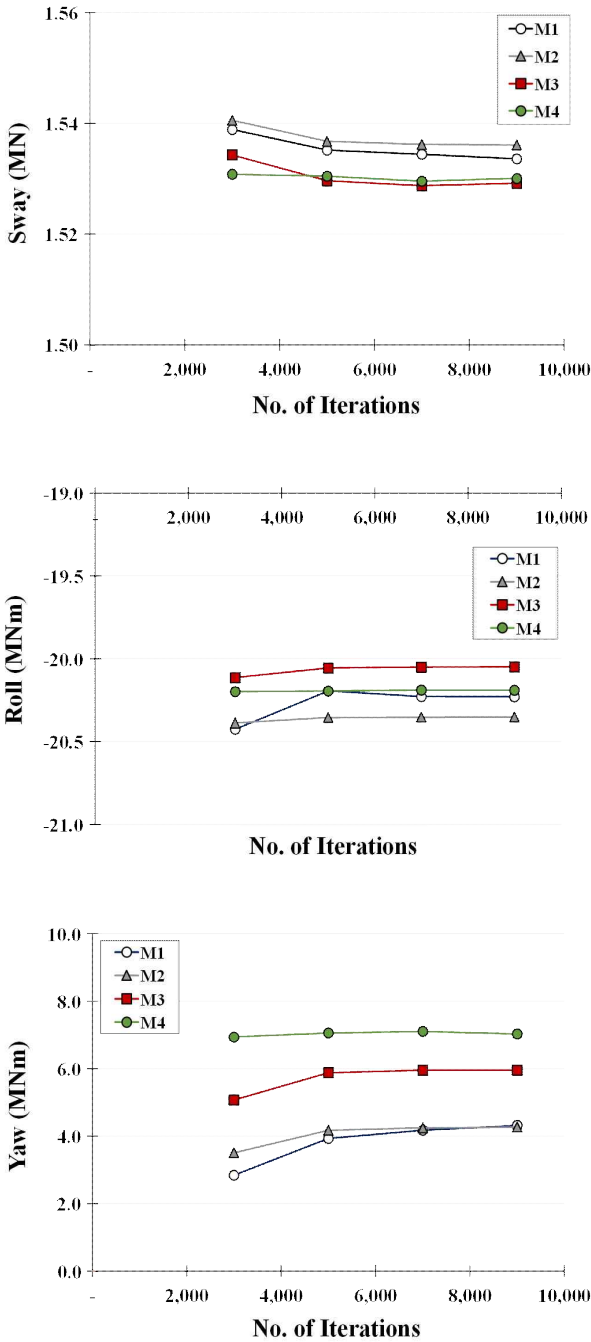


Fig. 14 Average wind loads for the range of individual iteration interval with the mesh model ($\alpha = 90^\circ$).

4. 해석결과

본 연구는 FLNG 풍하중 추정을 위해 2가지 풍속에 대한 전산모델링 기법을 개발하였다. 개발된 기법을 이용하여 0-360°까지 15° 간격으로 총 25가지 풍속 조건에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 15는 5가지 풍향 ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 및 180°)에서 FLNG에 발생하는 압력분포를 두 가지 풍속 조건에 대하여 비교하였다. 풍향에 따른 압력분포를 살펴보면, 높이 10m 이하에서는 NPD 모델을 적용한 해석결과가 상대적으로 낮은 압력분포를 보였다. 반면, 대부분의 구조물이 높이 10m 이상인 FLNG에서는 NPD 모델을 적용한 해석에서 높은 압력이 발생하였다. 이는 NPD 모델이 기준 위치 10m를 기준으로 속도 프로파일을 생성하는 데 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 16은 FLNG에 균일 풍속과 NPD 모델을 적용하여 추정된 풍하중을 결과를 비교하였다. Surge에서는 두 모델 사이에 비슷한 하중 수준으로 나타나고 있으나, 일부 구간 ($45^\circ < \alpha < 90^\circ$, $155^\circ < \alpha < 210^\circ$, $255^\circ < \alpha < 300^\circ$)에서 차이를 보인다. 가장 높은 하중은 두 모델 모두 $\alpha = 165^\circ$ 에서 발생하고 있으며, NPD 모델이 0.059MN 만큼 크게 추정하였으며, 이는 균일한 풍속 해석결과와 비교해 20.35% 증가한 수준이다.

Sway에서는 두 모델에서의 하중의 형상에 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. 최대 하중은 균일 풍속 조건에서는 $\alpha = 300^\circ$ 에서 NPD 모델에서는 $\alpha = 315^\circ$ 에서 발생하였다. 특히, 가장 큰 하중의 차이는 $\alpha = 315^\circ$ 에서 0.282MN의 차이를 보였으며, 그 비율은 23.35% 증가한 수준이다. 또한, 풍향이 $45^\circ < \alpha < 135^\circ$ 와 $225^\circ < \alpha < 315^\circ$ 구간에서 발생한 풍하중의 평균 증가율은 15.60% 수준이다.

Heave 하중은 $45^\circ < \alpha < 135^\circ$ 와 $225^\circ < \alpha < 315^\circ$ 구간에서 NPD 모델이 균일 풍속 조건보다 작은 하중이 발생하는 것으로 나타났으며, 평균 감소율은 1.58% 수준으로 나타났다.

Roll 하중은 두 가지 풍속 모델에서 큰 차이가 없는 것으로 나타난다. 다만, 균일 풍속 작용 시 Roll 하중 최대는 풍압면이 가장 큰 $\alpha = 90^\circ, 270^\circ$ 에서 발생하지만, NPD 모델을 적용하면 $\alpha = 225^\circ$ 에서 최대가 발생한다. 동 풍향에서의 하중 증가율은 18.27% 수준이다. Roll 하중 차이가 보이는 $60^\circ < \alpha < 135^\circ$ 와 $225^\circ < \alpha < 270^\circ$ 구간에서의 평균 증가율은 10.89%이다.

Pitch 하중에서도 두 가지 풍속 모델에서 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 균일한 풍속 조건에서는 $\alpha = 60^\circ$ 에서부터 지속적으로 하중이 증가하여 $\alpha = 180^\circ$ 에서 최대가 된 후, $\alpha = 300^\circ$ 까지 감소하는 경향을 보인다. 이와는 달리 NPD 모델에서는 $75^\circ < \alpha < 105^\circ$ 구간에서 감소하는 구간이 발생하며, 이는 풍속 프로파일 적용에 따른 변화로 분석된다.

마지막으로 Yaw 하중의 경우, 두 가지 풍속 모델에서 동일하게 $\alpha = 45^\circ, 315^\circ$ 에서 최대가 나타났다. 그러나 가장 큰 하중의 차이는 $\alpha = 315^\circ$ 에서 23.6MNm 수준으로 나타났으며, 증가율은 34.27% 수준이다.

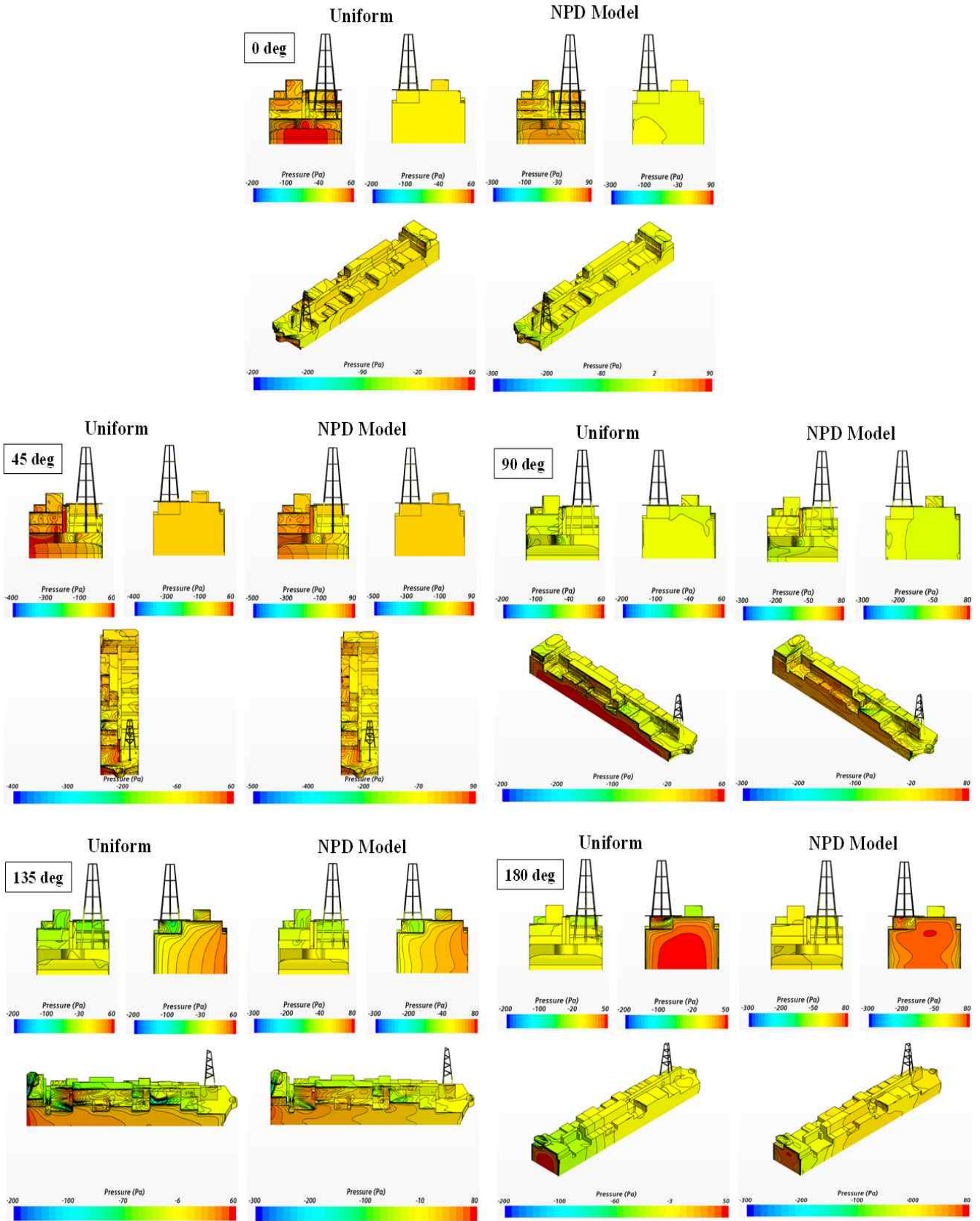


Fig. 15 Pressure contour comparison between uniform and NPD wind profile for the FLNG at 5 wind directions ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ and 180°)

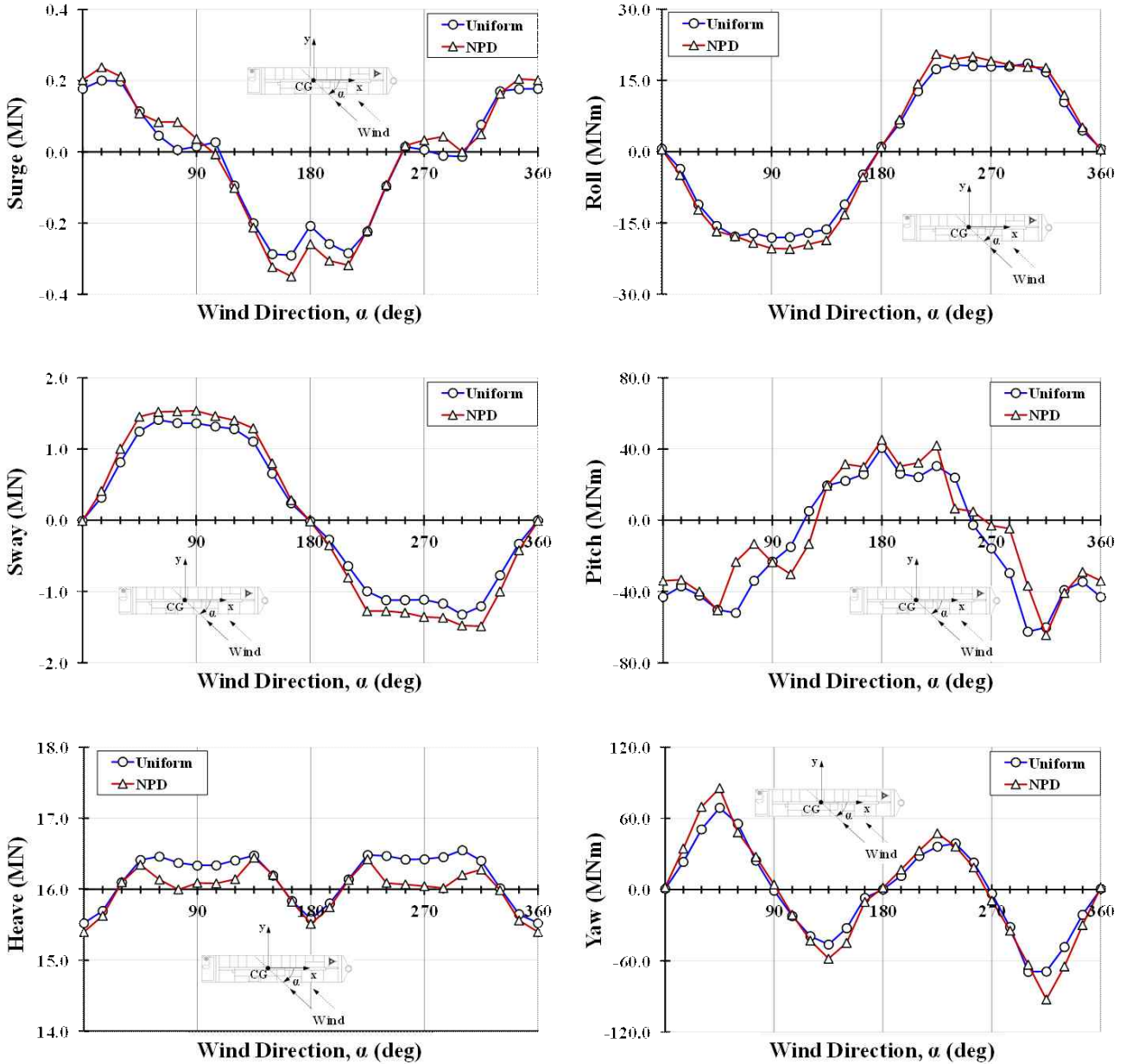


Fig. 16 Comparison of wind loads for the FLNG under uniform and NPD wind profile.

5. 결 론

본 연구의 목적은 FLNG의 풍하중을 전산역학을 이용하여 수치적으로 평가할 수 있는 기법개발에 있다. 본 연구의 결론을 간략히 정리하면 다음과 같다.

(1) 4가지 메쉬 모델을 이용하여 3가지 풍향에 대한 Mesh Convergence 시험을 수행하여 수렴성 높은 메쉬 모델을 개발하였다.

(2) Sand-Grain Roughness, r 이 NPD 풍속 프로파일에 미치는 영향을 분석하기 위해 시리즈 해석을 수행하였으며, 그 결과 최적의 r 값을 45로 선정하였다.

(3) 25가지 방향과 2가지 풍속 모델에서의 FLNG 풍하중을 추정하기 위한 시리즈 해석을 수행하였다.

(4) 결과를 요약하면, NPD 모델에 의한 풍하중은 균일 풍속 조건과 비교하면, Surge와 Yaw에서 최대 20.35%와 34.27% 증가하였다. 특히, 특정 구간에서만 큰 하중 차이를 보인 Sway와 Roll은 15.60%와 10.89%의 구간 평균 증가율을 보였다.

(5) Heave와 Pitch 하중은 거의 동일한 경향성을 유지하는 수준에서 발생하였으나, Heave의 경우 NPD 모델에서 평균 감소율 1.58% 수준으로 나타났다. 특히, Pitch의 경우, 균일한 풍속 조건에서 발견하지 못한 급격한 하중 변화 구간 ($75^\circ < \alpha < 105^\circ$)이 관찰되었다.

(5) NPD 모델 적용으로 인한 풍하중 증가 및 하중 분포 경향성의 변화는 FLNG의 운동성능에 직접적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

(6) 풍하중 추정은 대형 상부 구조물을 가지는 FLNG 등의 해양구조물 운동성능 평가에 필수적이다. 따라서 본 연구 결과를 이용한 운동성능 평가 연구가 필요하다.

본 연구에 적용된 FLNG는 상부 구조물의 형상 정보가 부족하여 블록 형상으로 모델링을 수행하여 풍하중을 추정하였다. 이러한 조건은 상대적으로 큰 하중을 추정하는 결과를 가져왔을 것으로 판단된다. 따라서 높은 정도의 풍하중 추정은 상부 구조물 전체의 모델링을 통해서 가능할 것으로 판단한다.

사 사

이 논문은 2021-2022년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구 결과임.

References

- [1] Andersen, O. J. and Løvseth, J.(2006), “The Frøya Database and Maritime Boundary Layer Wind Description”, Marine Structure, Vol. 19, No. 2-3, pp. 173-192.
- [2] Aage, C.(1971), “Wind Coefficients for Nine Ship Models”, Report No. A-3, Hydro- and Aerodynamic Laboratory, Lyngby, Denmark.
- [3] Berto, K., Hodapp, D. and Falzarano, J.(2019), “A Detailed Look into the 2017 SNAME OC-8 Comparative Wind Load Study”, The Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May.
- [4] Blendermann, W.(1993), “Wind Loads on Moored and Manoeuvring Vessels”, Proceedings of the ASME 12th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 20-24, Glasgow, UK., Vol. I, pp. 183-189.
- [5] Blendermann, W.(1994), “Parameter Identification of Wind Loads on Ships”, Journal of Wind Energy and Industrial Aerodynamics, Vol. 51, pp. 339-351.
- [6] Blendermann, W.(1995), “Estimation of Wind Loads on Ships in Wind with a Strong Gradient”, Proc. of the ASME 14th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 18-22, Copenhagen, Denmark, Vol. 1-A, pp. 271-277.
- [7] Blendermann, W.(1996), “Wind Loading of Ships-collected Data from Wind Tunnel Tests in Uniform Flow”, Institut fuer Schiffbau der Universitat Hamburg, Hamburg, Germany.
- [9] Gould, R. W. F.(1982), “The Estimation of Wind Loadings on Ship Superstructures”, The Royal Institution of Naval Architects, Marine Technology Monograph No. 8.
- [10] Haddara, M. R. and Guedes Soares, C.(1999), “Wind Loads on Marine Structures”, Marine Structures, Vol. 12, pp. 199-209.
- [11] Isherwood, R. M.(1972), “Wind Resistance of Merchant Ships”, Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 114(3), pp. 327-338.
- [12] Kim, J. W., Jang, H. C., W. Xu, Shen, Z., Kara, M., Yeon, S. M. and Yan, H.(2018), “Numerical Modelling of Neutrallystable and sustainable Atmospheric Boundary Layer for the Wind Load Estimation on an Offshore Platform”, The 37th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Madrid, Spain, June 17-22.
- [13] Koop, A., Klaij, C. and Vaz, G.(2010), “Predicting Wind Loads for FPSO Tandem Offloading using CFD”, Proc. of the ASME 29th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, June 6-11, Shanghai, China.
- [14] Lee, S. E.(2015), A Probabilistic Approach to Determine Niminal Values of Tank Sloshing Loads in Structural Design of LNG FPSOs, PhD Thesis, Pusan National University.
- [15] Lee, S. E.(2020), “Effect of Wind Speed Profile on Wind Loads of a Fishing Boat”, Journal of The Korea Society of Marine Environment & Safety, Vol. 27, No. 6, pp. 922-930.
- [16] OCIMF(1994), Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs (2nd Ed.), Witherby and Co., London, UK.
- [17] Paik J. K. and Thayamballi A. K.(2007), Ship-shaped Offshore Installations: Design, Building, and Operation, Cambridge (UK), Cambridge University Press.
- [18] Shearer, K. D. A. and Lynn, W. M.(1960), “Wind Tunnel Tests on Models of Merchant Ships”, Transactions of the North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders, Vol. 76, pp. 229-266.
- [19] STAR-CCM+(2022), User’s Guide (Ver. 17.02), SIEMENS, Munich.
- [20] van Berlekom, W. B., Tragardh, P. and Dellhag, A.(1975), “Large Tankers-wind Coefficients and Speed Loss due to Wind and Waves”, The

Transactions of The Royal Institution of Naval Architects, Vol. 117, pp. 41-58.

- [21] van Berlekom, W. B.(1981), "Wind Forces on Modern Ship Forms- Effects on Performance", Transactions of the North East Coast Institute of Engineers and Shipbuilders, Vol. 97(4), pp. 123-134.
- [22] van Oortmerssen, G., van der Vegt, J. J. W. and van Walree, F.(1987), "Forces on Cylinders in Oscillatory Flow: a Comparison of the Results of Numerical and Physical-models", Proc. of the 3rd Int. Sym. Practical Design of Ships and Other Floating Structures, June 22-26, Trondheim, Norway.
- [23] White, G. P.(1966), Wind Resistance-suggested Procedure for Correction of Ship Trial Results, NPL TM116.
- [24] Wnęk, A. D., Guedes Soares, A., Zhou, X-Q. and Guedes Soares, C.(2010), "Numerical and Experimental Analysis of the Wind Forces Acting on LNG Carrier", V European Conference on Computational Fluid Dynamics, June 14-17, Lisbon, Portugal.
- [25] Yeon, S. M., Kwon, C. S., Kim, Y. C. and Kim, K. S.(2022), "Study of the Lift Effect on Wind Load Estimation for a Semi-submersible Rig using the Maritime Atmospheric Boundary Layer Model", Int. J. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 14, 100419.

Received 24 November 2022

Revised 05 December 2022

Accepted 07 December 2022