

소형 모듈 원자력(SMR) 발전 선박의 파랑 중 안정성 평가

이경완* · 최선돈** · 문병영***

* 블루마린 대표이사, ** 케이마린 연구원, *** 국립군산대학교 조선공학과 교수

Evaluation of Stability of Small Modular Reactor (SMR) Power Ship in Waves

Kyoungwan Lee* · Sundon Choi** · Byungyoung Moon***

* CEO, Engineering Part, Blue Marine, Busan 46726, Korea

** Researcher, Ocean Engineering Part, Kunsan 54150, Korea

*** Professor, Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, Kunsan National University, Kunsan 54150, Korea

요 약 : 지구온난화 문제에 대응하기 위해 온실가스 배출 저감을 위한 다양한 규제와 정책이 시행되고 있다. 이러한 배경 속에서 탄소중립을 목표로 하는 국가들이 늘어나고 있으며, 이에 따라 소형원자로모듈(Small Modular Reactor 이하 SMR)이 새로운 발전소 모델로 주목받고 있다. SMR은 전통적인 대형 원자력 발전소 크기의 5~10% 수준이지만, 수백 메가와트(MW)급의 발전 용량을 갖춘 고효율 시스템이다. 이 발전소는 화석 연료 기반 발전소에 비해 탄소 발생을 줄일 수 있으며, 신재생에너지의 불안정한 에너지 공급을 보완할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 원자력 발전소는 사고 시 방사선물질 누출의 위험성이 있어 주변 주민의 반대를 받아 왔다. 이러한 문제를 해결하기 위해 부유식 소형 원자력 발전선이 주목받고 있다. 부유식 소형 원자력 발전소는 해양에 설치되어 부지확보, 인근 거주민 보상, 협의 과정이 간소화되고, 자연재해에 대한 안전성이 높다. 본 연구에서는 SMR 발전선의 파랑 중 예인 안정성을 평가 하였다. 해상상태 3, 4, 5에서의 운동해석 결과, 해상상태 5 이하에서는 예인하여 목적지까지 이동하는데 필요한 내항성능 기준을 만족시킬 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 소형 모듈 원자력, SMR, 부유식 원자력 발전선, 전산유체역학, 운동해석, 선박안정성

Abstract : To address the issue of global warming, various regulations and policies for reducing greenhouse gas emissions are being implemented. In this context, the number of countries targeting carbon neutrality, the latter of which entails reducing net carbon emissions to zero, is increasing, and small modular reactors (SMRs) are investigated extensively as a new model for power plants. SMRs, although measuring only 5%~10% of the size of conventional large nuclear power plants, are highly efficient systems that can generate hundreds of megawatts of power. Compared with fossil fuel-based power plants, SMRs generate less carbon emissions and can complement the unstable energy supply from renewable sources. However, the use of SMRs is opposed by local residents owing to the risk of significant radioactive-material leakage when a nuclear-power-plant accident occurs. Hence, floating, small nuclear-power vessels are being investigated and installed in the ocean, thus simplifying the process of securing land, compensating nearby residents, and increasing safety against natural disasters. In this study, the towing stability of SMR power ships is analyzed, and the result shows no significant risk of towing to the destination in sea states 3, 4, and 5.

Key Words : Small modular nuclear reactor, SMR, Floating nuclear power plant, Computational fluid dynamics, Ship motion analysis, Stability

1. 서 론

1.1 연구 배경

온실가스 감축을 위해 신재생에너지 발전이 이루어지고

있다. 신재생에너지 발전은 전력 생산 단가가 높고 에너지 공급이 불안정한 단점이 있다. 소형원자로모듈(SMR)은 전력 생산 단가 및 발전 용량 측면에서 좋은 대안으로 제시되고 있다. 하지만 원자력 발전소의 사고 가능성에 대해 걱정하는 주민이 많아 육상 원자력 발전소 건설이 쉽지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 부유식 소형원자력 발전선이 대

* First Author : skykw@naver.com, 051-710-4566

† Corresponding Author : moonby@kunsan.ac.kr, 063-469-1854

안으로 주목받고 있다.

해양에 설치되는 원자력 발전선의 경우 설치방식에 따라 Fig. 1과 같이 선박형(Barge), 중력 기반구조(GBS), Spar, 잠수형(Submerged)으로 나뉜다. 선박형 설치방식이 경제적으로 가장 유리한 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2015).

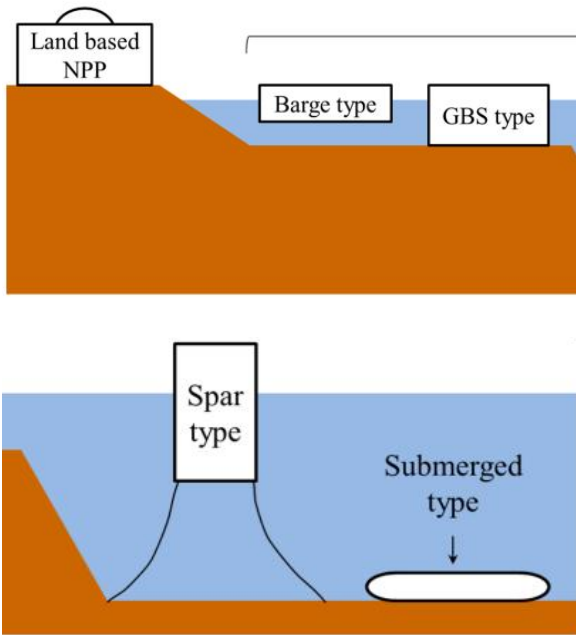


Fig. 1. Types of nuclear power plants installed at sea.

1.2 선행연구 검토

파랑 중 선박의 운동을 해석하기 위해서 크게 3가지 방법이 주로 사용된다. 포텐셜이론에 기반한 Strip 방법, Panel 방법 그리고 전산유체역학(Computation Fluid Dynamics 이하 CFD)이다. Strip 방법과 Panel 방법에 따른 계산의 경우 주로 주파수 영역에서 계산하여 운동 응답을 구하는 방식이며, 계산시간이 짧고 해석의 신뢰성이 높다(Heo et al., 2015).

포텐셜 방법의 경우 점성이 중요한 롤링 문제를 풀기 어려우며, 파랑 중 유체의 국부적인 현상을 파악하기 어려운 단점이 있다.

최근 컴퓨터 하드웨어의 발전으로 연산 처리 속도가 빨라져, 부유체의 파랑 중 운동 해석을 CFD를 이용하여 많이 수행하고 있다. CFD는 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있지만, 시간 영역에서 해석을 수행하여 부유체의 거동을 시간 별로 볼 수 있으며, 국부적인 현상을 파악하기 쉽다. 또한 점성에 기인한 롤링 문제 또한 직접적으로 풀 수 있다는 장점이 있다. 기존 연구에서 파랑 중 선박의 운동을 CFD를 이용하여 모형시험과 비교하여 신뢰성을 검증한 사례가 있다(Heo et al., 2015).

파랑 중 선박의 운동값을 구하기 위해서 포텐셜 방법은 단위 파에 의한 응답 값인 RAO(Response Amplitude Operator)를 구하고 난 후 과도 스펙트럼과 곱하여 운동 응답을 구한다.

CFD의 경우 파랑 스펙트럼을 이용하여 시간 영역에서 불규칙파를 생성하여 부유체의 거동을 직접 풀게 된다. CFD의 경우 사각 수조에서 파를 발생시켜 부유체의 운동을 예측하는 실험과 유사하게 해석이 진행된다.

파랑 중 선박 및 부유체 안정성을 평가하기 위한 여러 기준이 있다. 기존 연구에서 NORDFORSK(1987), NATO(2000), 국내 함정설계 기준을 비교하고 연안 LNG 병커링 선박에 대한 내항성능을 평가한 사례가 있다(Yi et al., 2020).

또한 국내 함정설계 기준을 바탕으로 10톤 미만 어선의 내항성능 기준을 정하는 연구가 있었다(Choi et al., 2022).

부유식 소형원자력 발전소의 파랑 중 안정성에 관한 연구는 부유식 발전소를 TLP(Tension Leg Platform)로 설계하여 해상상태 7까지 안정성을 확인한 사례가 있다(Lee et al., 2017).

1.3 연구의 목적

본 연구는 상업적으로 가장 성공적인 프로젝트인 러시아 아카데미 로모노소프호를 기반으로 진행하였다. 선박의 형상은 Fig. 2와 같다. 본 선박은 바지 타입의 선박으로 원자로, 원자력발전기 제어실, 승무원실, 증기터빈실, 발전실로 구성되어 있다. 2018년 5월 1일 상트페테르부르크에서 출발하여 무르만스크에서 핵연료를 공급받아 페백 지역에 설치되어 북극해 지역의 전력을 공급하고 있다. 발전 용량은 100MWe이며, 10만명 규모의 마을에 전력공급이 가능하다.



Fig. 2. The floating nuclear power vessel “Akademik Lomonosov.”

국내 SMR 발전선은 건조가 되지 않았지만, Fig. 3과 같이 거제도에서 건조하여 서산 인근에 설치되어 수도권에 전력을 공급한다는 시나리오를 바탕으로 연구를 진행하였다. 거제도에서 서산 인근까지 이동을 위해 예인선이 필요하여 예인 시 해상상태 6에서는 인근 항구로 피항하는 계획을 수립하였다. 해상상태 5 이하에서 예인하는 조건을 설정하였다.



Fig. 3. Transportation route of the floating nuclear power vessel.

2. 운동 성능 해석

2.1 대상선박

부유식 원자력 발전선은 러시아의 아카데미 로모노소프호와 동일한 제원으로 설정하였으며, 전력 생산 용량은 100MWe로 설정하였다. 대상 선박의 제원은 Table 1과 같다. 해석은 1/25의 비율로 축소하여 모형 크기에서 해석을 진행하였다.

Table 1. Main dimension of floating nuclear power vessel

	Ship	Model
Scale	1	1/25
Length (m)	140	5.60
Breadth (m)	30	1.20
Draft (m)	4.5	0.18
Weight (ton)	19,088	1.22

2.2 해석조건

예인선이 원자력 발전선을 5knot의 속도로 예인하는 조건에서 해석을 수행하였다. 예인시 파도의 방향은 선수와 선수 측면에서 오는 경우를 가정하였으며, 정박 때 선측에서 오는 파도를 고려하여 해석을 진행하였다. 해상상태는 6 이상에서는 피항하고, 해상상태 3, 4, 5에 운항하는 조건으로 해석을 진행하였다.

Wave spectrum은 Jonswap spectrum을 사용하였다. 스펙트럼은 아래 식(1)에서 식(3)과 같이 적용하였다(Lee et al., 2022).

$$S_J(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \gamma^{p^*} \quad (1)$$

$$p^* = \exp\left[-\frac{(T_p f - 1)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

$$\sigma \approx \begin{cases} \sigma_a = 0.07, & f \leq f_p \\ \sigma_b = 0.09, & f > f_p \end{cases} \quad (3)$$



Fig. 4. Wave Heading condition.

Fig. 4는 파랑의 입사 조건을 나타내며, 선수파, 선수사파 및 측면파를 나타내고 있다. 해상상태에 따른 유의파고와 파주기는 Table 2와 같다.

Table 2. Wave height and wave period by sea state

Sea State	Significant wave height(m)	Period(s)
3	0.88	7.5
4	1.88	8.6
5	3.25	9.7

선박 유동 해석에서 자유수면 유동 해석기법으로 가장 많이 사용되는 VOF(Volume of Fraction)기법을 사용하였다.

실선으로 해석할 경우 격자와 해석 시간의 문제로 1/25 scale의 모형으로 해석을 수행하였다. Pitch, Roll, Acceleration, Deck wetness, Slamming 등은 모형선결과를 실선과 동일하게 적용하였다. Heave의 경우 축척비 25만큼 곱하여 실선으로 확장 적용하였다. CFD 해석조건은 아래 Table 3과 같다.

Table 3. CFD analysis conditions

	Value
Physics	Unsteady
Turbulent Model	Realizable k-ε
Phase Model	Volume of Fraction
Motion	DFBI, Overset
Solution Time (s)	120.0s
Time Step (s)	0.02

관성반경은 정확한 값을 알기 어려우므로 화물선 추정값을 기준으로 길이 방향 0.25L, 폭 방향 0.35B로 정하였다.

사용 CFD해석 프로그램인 Star CCM+ ver. 17을 사용하여

해석을 수행하였다. 본 해석의 지배방정식은 비정상상태 (Unsteady), 비압축성(Incompressible), 점성(Viscous) 유동을 고려한 RANS 방정식이며, 아래의 식으로 표현한다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (5)$$

여기서 u_i 는 속도, p 는 압력, t 는 시간, ρ 는 밀도, μ 는 점성계수, $\rho \overline{u'_i u'_j}$ 레이놀즈 응력(Reynolds stress)을 나타낸다.

본 해석에 적용된 경계 조건은 Fig. 5와 같으며, 입구 영역에서 Velocity inlet 조건을 사용하였으며, 출구 영역에서는 Pressure outlet 조건을 사용하였다. 수치 해석에 사용된 계산 영역은 선박의 Midship을 중심으로 하여 다음과 같다.

선박 길이 방향 : $-1.5 \leq X/L \leq 3.0$

선박 폭 방향 : $-1.5 \leq Y/L \leq 1.5$

선박 높이 방향 : $-4.0 \leq Z/L \leq 2.0$

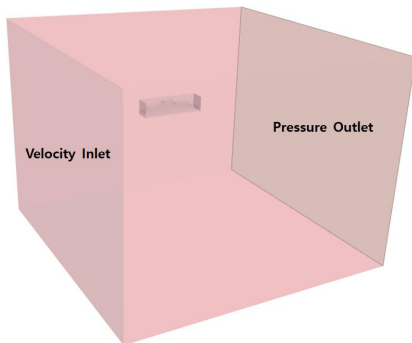


Fig. 5. CFD boundary conditions.

격자는 Trimmer mesh를 사용하였으며, 격자는 총 450만개이다. 선체 표면 격자와 해석에 사용된 좌표계는 Fig. 6과 같다. 선박의 움직임을 구현하기 위해 Overset mesh로 구성하였다. 선박 전진시 파형을 고려하기 위해서 Fig. 7과 같이 공간 격자를 구성하였다.

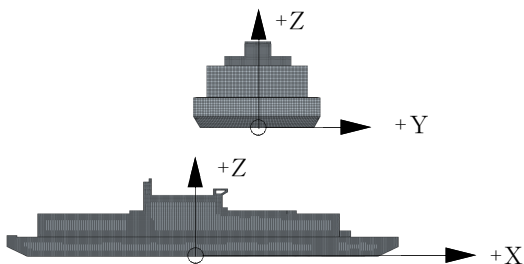


Fig. 6. Hull surface mesh and coordinate system.

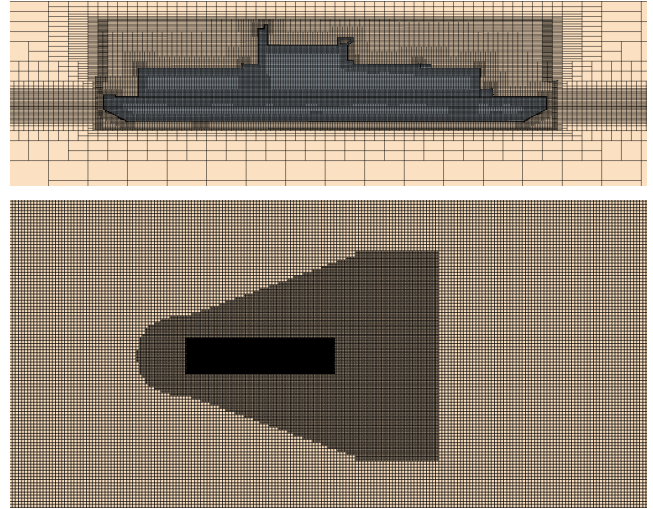
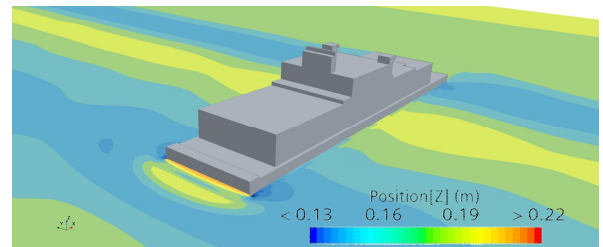
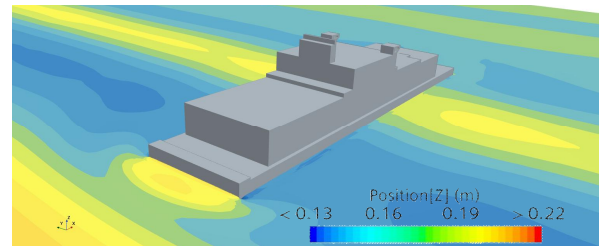


Fig. 7. CFD mesh system.

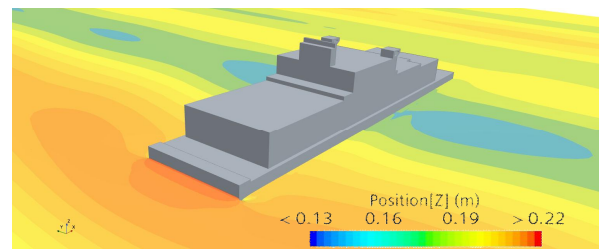
과의 전진 방향을 +X로 두어 해석을 진행하였으며, 예인 방향은 -X 방향이다. 모형선 기준으로 흘수 0.18m 기준으로 해석을 수행하였다.



a) Sea State 3, wave direction 180deg



b) Sea State 4, wave direction 180deg



c) Sea State 5, wave direction 180deg

Fig. 8. Ship motion under head sea condition.

소형 모듈 원자력(SMR) 발전 선박의 파랑 중 안정성 평가

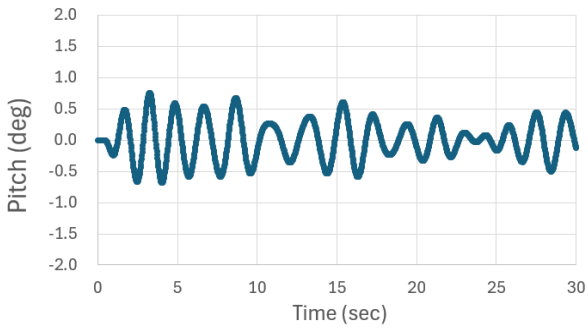


Fig. 9. Pitch motion (sea state 5, wave direction 150deg).

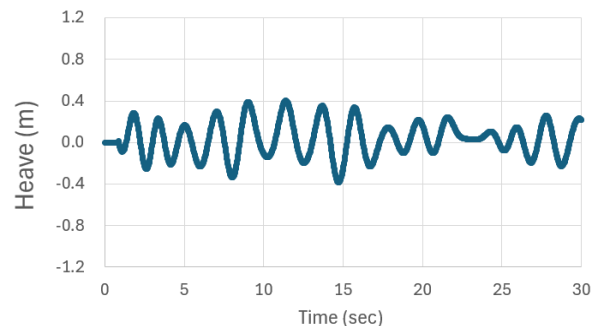
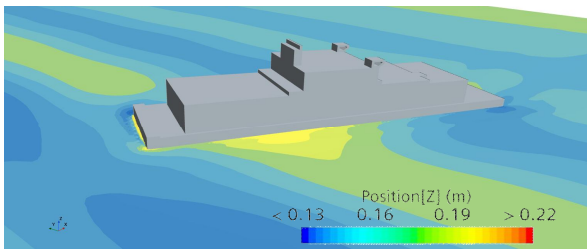


Fig. 11. Heave motion (sea state 5, wave direction 150deg).

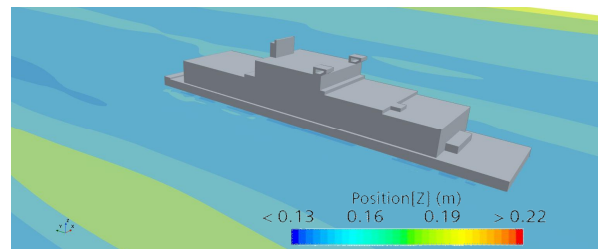
해상상태 3, 4, 5 조건에서 운동 해석을 수행하였고, 그 중 파랑 입사각이 150도와 180도의 선박 거동은 Fig. 8, Fig. 10에 나타내었다. 배의 크기에 비해 파의 크기가 상대적으로 작아서 운동이 크지는 않았다. Pitch는 최대값은 Fig. 9와 같으며, 해상상태 5에서 150도로 파가 입사 될 때 가장 크게 일어났다. Heave의 최대값은 Fig. 11과 같으며, 해상상태 5에서 150도로 파가 입사 될 때 가장 크게 나왔다. 파랑조건에 따른 Pitch, Heave 최대값은 Table 4와 같다.

Table 4. Analysis results under head sea and quartering sea conditions

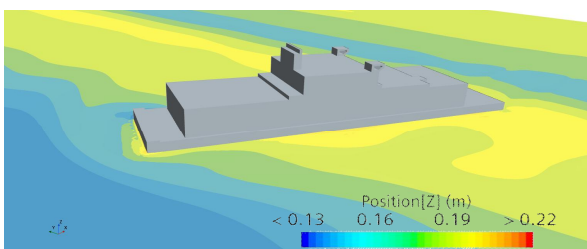
Sea State	Wave direction(deg)	Pitch(deg)	Heave(m)
3	180	0.1	0.14
4	180	0.2	0.18
5	180	0.7	0.33
3	150	0.1	0.18
4	150	0.4	0.23
5	150	0.8	0.43



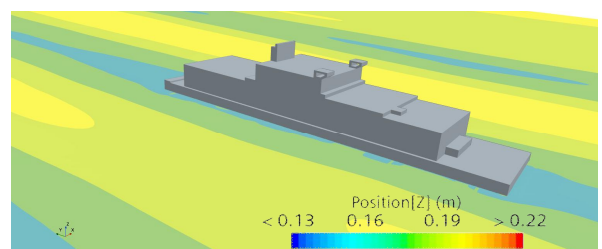
a) Sea State 3, wave direction 150deg



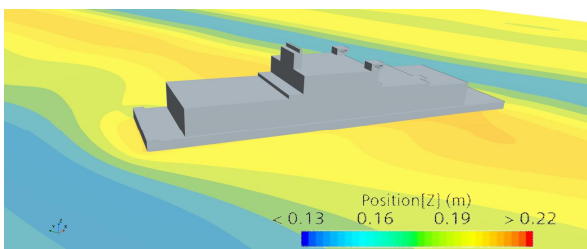
a) Sea State 3, wave direction 90deg



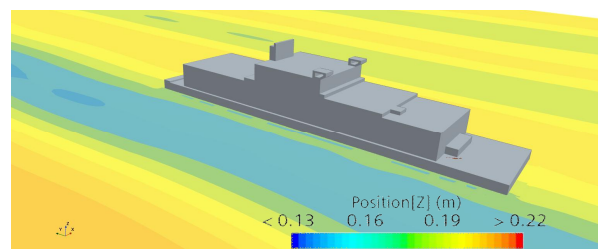
b) Sea State 4, wave direction 150deg



b) Sea State 4, wave direction 90deg



c) Sea State 5, wave direction 150deg



c) Sea State 5, wave direction 90deg

Fig. 10. Ship motion under quartering sea condition.

Fig. 12. Ship motion under beam sea condition.

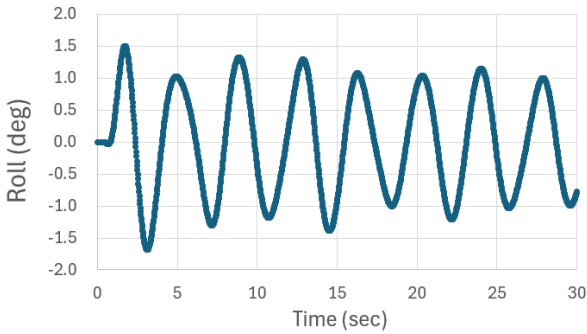


Fig. 13. Roll motion (sea state 5, wave direction 90deg).

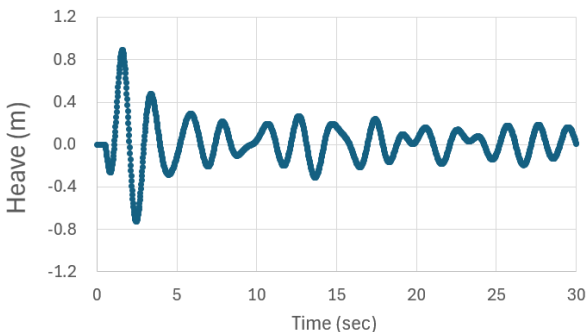


Fig. 14. Heave motion (sea state 5, wave direction 90deg)

Table 5. Analysis Results under beam sea conditions

Sea State	Wave direction(deg)	Roll(deg)	Heave(m)
3	90	0.2	0.21
4	90	1.3	0.75
5	90	1.7	0.85

파랑입사각이 90도일 때 선박 거동은 Fig. 12와 같고 최대 운동값은 Table 5와 같다. Roll은 해상상태 5에서 90도로 파가 입사 될 때 Fig. 13과 같이 가장 크게 일어났으며, 그 값은 1.7도이다. Heave도 Fig. 14와 같이 해상상태 5에서 90도로 파가 입사 될 때 가장 크게 나왔으며, 그 값은 0.85m이다.

3. 결론

3.1 내항성능 기준

서론에서 언급한 바와 같이 내항성능 기준은 한국선급(KR)의 함정설계 기준을 적용하였다(Yi et al., 2020). 함정 설계 기준에서는 Table 6과 같이 선체 구조, 승선자의 복잡한 작업 수행, 승선자의 간단한 수 작업 수행에 대하여 선박 운동 요소에 따른 작업 능률을 정의하였다. 예를 들어 선체 구

조에 영향 없이 100%의 성능을 발휘하려면 슬래밍은 시간당 20회 이하여야 하고, Deck wetness는 시간당 30회 이하여야 한다. Roll이 4도 이상 발생할 경우 승선자는 섬세한 작업의 효율이 100%에서 순차적으로 감소하게 된다. Roll이 10.6도 발생할 경우 승선자의 섬세한 작업 효율이 80%가 된다.

이러한 효율을 기준으로 내항성능 기준을 정하게 된다.

내항성능 기준은 Table 7과 같으며, 운영 조건에 따른 운동 제한값을 정의하고 있다(Choi et al., 2022).

Roll은 Table 6에서 승조원의 간단한 수작업의 효율 90% 이상을 기준으로 하였으며, Pitch의 경우 간단한 수작업 효율 80%를 기준으로 하였다. 수직 가속도의 경우 승조원의 간단한 수작업 효율 90%를 기준으로 하였다. Deck wetness와 Slamming의 경우 선체 구조 효율 100%를 기준으로 하였고, 이 기준이 선박의 내항성능을 평가하는 데 많이 사용되고 있다.

Table 6. Work efficiency chart of Naval Ship Design standard

Component	Evaluation criteria	Short-term performance efficiency		
		100%	80%	60%
Hull Structure	Deck wetness (No./h)	30	37	42
	Slamming (No./h)	20	28	37
Crew (Delicate Work)	Roll(deg)	4.0	10.6	13.3
	Pitch(deg)	1.0	3.9	5.0
	Vertical acceleration (g)	0.05	0.19	0.28
Crew (Simple Manual Work)	Roll(deg)	5.0	12.7	17.6
	Pitch(deg)	2.0	4.8	7.6
	Vertical acceleration (g)	0.1	0.3	0.5

Table 7. Seakeeping performance criteria of naval ship

Motion response	Reference location	Unit	Criteria
			operation
Roll	Center of gravity	deg	8.0
Pitch	Center of gravity	deg	4.8
Vertical acceleration	Center of bridge	g	0.4
Deck wetness	F.P	No./h	30
Slamming	0.15LBP abaft F.P	No./h	20

내항성능 기준에서 Roll, Pitch는 각도를 기준으로 평가하고, Vertical acceleration의 경우 중력가속도 단위인 g를 기준으로 평가한다. 그리고 Deck wetness와 Slamming의 경우 시간당 발생 횟수를 기준으로 평가한다.

3.2 내항성능 평가

부유식 원자력 발전선 5knot 예인시 해상상태 3, 4 에서는 Pitch 값이 1도 이하로 크지 않았다. Heave값 또한 1m 이하로 크지 않았다. 해상상태 5에서 Roll 값이 2도 이하로 나왔으며, Heave 값은 1.0m 이하로 나왔다. Slamming의 경우 모든 해석조건에서 발생하지 않았다. Deck wetness의 경우 운동값이 크지 않아 모든 조건에서 발생하지 않았다.

Table 8과 같이 본 부유식 원자력 발전선의 경우 해상상태 5 이하에서 내항성능 기준에 만족하는 것을 보여 주고 있다.

추후 원자력 발전 관련 장비의 운동 제한 조건이 명확히 정의된다면 보다 엄밀한 운동성능 평가가 이루어질 것으로 예상된다.

Table 8. Seakeeping Evaluation of Floating SMR Power Plant

Motion response	Unit	Criteria	Max. Value
Roll	deg	8.0	1.70
Pitch	deg	4.8	0.81
Vertical acceleration	g	0.4	0.12
Deck wetness	No./h	30	0.00
Slamming	No./h	20	0.00

후 기

This research was supported by "Regional Innovation Strategy (RIS)" through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(MOE) (2023RIS-008). This research was supported by Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology(KEIT) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea(RS-2023-00284683).

References

[1] Choi, G. Y., C. U. Song, Y. S. Park, and J. B. Park(2022), Basic Study to Establish Marine Activity Criteria Based on the Seakeeping Performance of Less Than 10-tons Fishing

Vessels, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 28, No. 6, pp. 965-972.

[2] Heo, J. K., Y. B. Oak., J. C. Park., S. M. Jeong, and H. Akimoto(2015), Overset-Grid Simulation Technique for Analysis of 2-DOF Ship Motion in Waves, 20/J. Comput. Fluids Eng. Vol. 20, No. 3, pp. 20-26.

[3] Lee, K. H., M. G. Kim., J. I. Lee, and P. S. Lee(2015), Recent Advance in Ocean Power Plants, Energies 2015, Vol. 8, No. 10, pp. 11470-11492.

[4] Lee, P. S.(2017), Development of Core Technologies for a 100MWe Floating Nuclear Power Plant Equipped with SMART.

[5] Lee, U. J., W. M. Jeong, and H. Y. Cho(2022), Estimation and Analysis of JONSWAP Spectrum Parameter Using Observed Data around Korean Coast, Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(5), 578.

[6] Yi, M. A., J. B. Park, and C. H. Lee(2020), Performance Assessment of Navigation Seakeeping for Coastal Liquefied-Natural-Gas Bunkering Ship, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 26, No. 7, pp. 904-914.

Received : 2024. 05. 28.

Revised : 2024. 07. 08. (1st)

: 2024. 07. 23. (2nd)

Accepted : 2024. 08. 29.