# 해빙 농도 변화에 따른 파랑 전파 및 주파수 스펙트럼의 공간 변화

Yoonjae Eom[1], Yun Ji Song[1], Chaewook Lim[2], Jong Wook Kim[2], Seung-Buhm Woo[1,*]
[1] 인하대학교 해양과학과 [2] 인하대학교 인공지능융합연구센터 // E-mail: yjocean@gmail.com, sbwoo@mpl.inha.ac.kr*

## 1 Introduction

- 북극항로는 해빙 경계 해역을 통과하거나 이에 인접하므로, 항로상의 파랑을 예측하려면 이 해역에서 나타나는 파랑의 전파와 감쇠 특성을 이해할 필요가 있다.
- 그러나 실제 해역에서는 바람과 해빙 분포 등 여러 환경 요인이 동시에 변하므로, 해빙 농도의 영향만 분리해 살펴 보기 어렵다.
- 이에 본 연구는 바람 조건과 해빙 경계 위치를 고정한 비구조격자 이상실험을 수행하여, 해빙 농도에 따른 파랑의 전파 및 감쇠 양상을 분석하였다.

## 2 Methodology

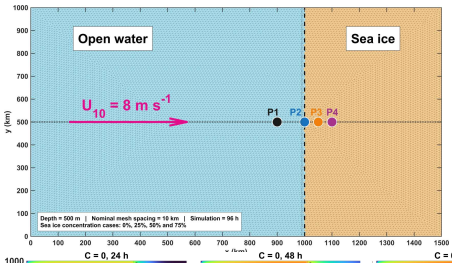



**Figure 1**. Experimental domain and sea-ice configuration based on the idealized numerical experiments of Meylan et al. (2020) and Perrie et al. (2022). Blue and orange indicate the open-water and sea-ice regions, respectively, and the arrows indicate the wind direction from west to east. The wind speed was maintained at 8 m/s up to $x$ = 990 km and then decreased linearly to zero over $x$ = 990–1,000 km. P1–P4 are analysis points located along the domain centerline ($y$ = 500 km) at $x$ = 900, 1,000, 1,050, and 1,100 km, respectively.

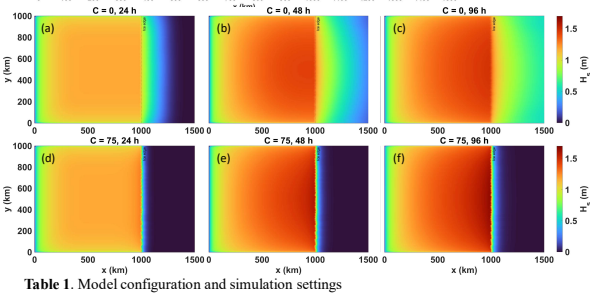



**Figure 2**. Spatiotemporal evolution of significant wave height ($H_s$) for sea-ice concentrations of $C$ = 0 % at (a) 24 h, (b) 48 h, and (c) 96 h, and $C$ = 75% at (d) 24 h, (e) 48 h, and (f) 96 h. The dashed vertical line marks the ice edge at x = 1000 km. The common color scale highlights the strong attenuation and limited penetration of waves into the ice-covered region for $C$ = 75%

**Table 1**. Model configuration and simulation settings

| | | |
|---|---|---|
| **WAVEWATCH III (WWIII)** | **Grid type** | Triangular unstructured grid |
| | **Grid resolution** | 10 km |
| | **Water depth** | 500 m (uniform) |
| | **Ice thickness** | 1 m |
| | **Maximum floe size** | 40 m |
| | **Simulation duration** | 96 h |

**Table 2**. Experimental cases and analysis configuration

| | C0 | C25 | C50 | C75 |
|---|---|---|---|---|
| Sea ice concentration | 0% | 25% | 50% | 75% |
| Figure 3 Hs | Centerline y = 500 km, x = 0-1,500 km, at 96 h | | | |
| Figure 4 E(f) spectra | (a) C0 P1-P4 | (b) C25 P1-P4 | (c) C50 P1-P4 | (d) C75 P1-P4 |
| Figure 5 Mean directional spread | Centerline y = 500 km, d = 0 - 1,000 km, at 96 h | | | |

The wave frequency spectrum $E(f)$, significant wave height $H_s$, and mean directional spread $SPR$ over the full spectrum were derived from the directional spectrum $S(f,\theta)$.

$$E(f) = \int_0^{2\pi} S(f,\theta)\, d\theta \qquad m_0 = \int E(f)\, df \qquad H_s = 4\sqrt{m_0}$$

$$R_1 = \frac{\sqrt{\left(\iint S(f,\theta)\cos\theta\, d\theta\, df\right)^2 + \left(\iint S(f,\theta)\sin\theta\, d\theta\, df\right)^2}}{m_0}$$

$$SPR = \frac{180}{\pi}\sqrt{2(1-R_1)}$$

$m_0$ is the zeroth-order spectral moment, and $R_1$ is the magnitude of the normalized first-order directional moment. A larger $SPR$ indicates a broader directional distribution of wave energy.

## 3 Results

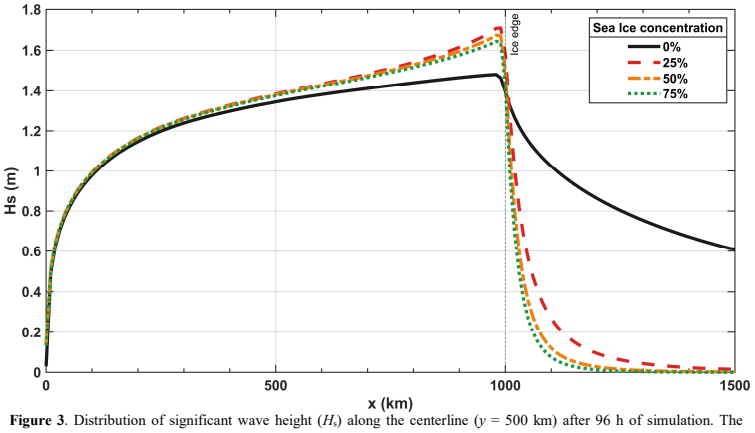



**Figure 3**. Distribution of significant wave height ($H_s$) along the centerline ($y$ = 500 km) after 96 h of simulation. The vertical line indicates the sea-ice edge ($x$ = 1,000 km). Within the ice-covered region, waves attenuate more rapidly as the sea-ice concentration increases. The black, red, orange, and green lines represent sea-ice concentrations of 0%, 25%, 50%, and 75%, respectively.

- 유의파고는 해빙 경계(x=1,000 km) 직전까지 증가하다가, 해빙 조건에서 급격히 감소하였다.
- 경계 직전 유의파고는 해빙 농도 25% > 50% > 75% 순으로 나타났다.
- x=1,000 km 이후에는 바람 입력이 없고 무해빙 조건에서도 파고가 감소하므로, 감소분 전체를 해빙의 영향으로 볼 수는 없다.

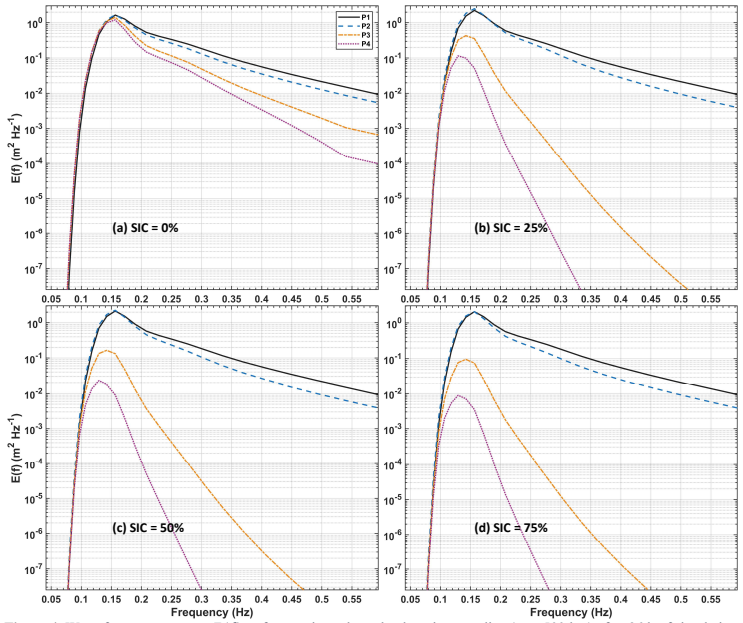



**Figure 4**. Wave frequency spectra $E(f)$ at four stations along the domain centerline ($y$ = 500 km) after 96 h of simulation. Panels (a)–(d) show sea ice concentrations of 0%, 25%, 50%, and 75%, respectively.
P1–P4 are located at $x$ = 900, 1,000, 1,050, and 1,100 km, respectively. The horizontal axis shows frequency (Hz), and the vertical axis shows the direction-integrated spectral density (m²/Hz).

- 모든 해빙 농도 조건에서 동쪽 정점으로 갈수록 파랑 주파수 스펙트럼 $E(f)$의 크기가 전반적으로 감소하였다.
- 해빙 내부 정점(P3·P4)에서는 해빙 농도가 높을수록 주파수별 $E(f)$ 값이 더 낮게 나타났다.

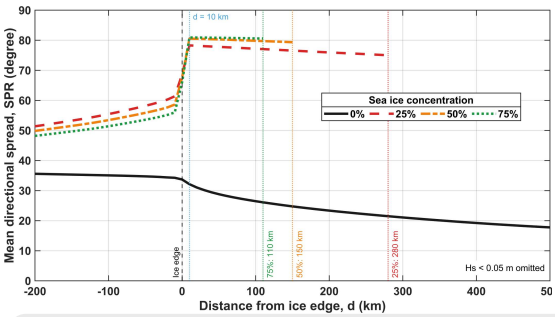



**Figure 5**. Mean directional spread (SPR) as a function of distance $d$ from the sea-ice edge ($x$ = 1,000 km) along the centerline ($y$ = 500 km) after 96 h of simulation. The curves represent sea-ice concentrations of 0%, 25%, 50%, and 75%. The black and light-blue dashed lines indicate the sea-ice edge ($d$ = 0) and $d$ = 10 km, respectively. The concentration-colored dashed lines indicate the farthest locations at which SPR is plotted with $H_s \geq 0.05$ m. Points with $H_s < 0.05$ m are omitted.

- 해빙 농도가 낮을수록 해빙 경계로부터 먼 지점까지 상대적으로 큰 유의파고가 유지되었다.
- 해빙 경계 전에는 SPR이 25% > 50% > 75% 순이었으나, 해빙 구역에서는 75% > 50% > 25% 순으로 역전되었다.
- 해빙 경계 이후 $d$ = 10 km 지점에서 0%를 제외하고 모든 해빙 농도 조건에서 SPR 최댓값이 나타났다
- 이러한 SPR 차이는 파랑의 방향 분포 변화를 보여주지만, SPR만으로 해빙 산란의 기여도를 판단할 수는 없다.

## 4 Conclusions

- 해빙 구역에서 유의파고는 해빙 농도가 높을수록 감소하였고, 해빙 내부 정점의 파랑 주파수 스펙트럼 $E(f)$은 농도가 높을수록 감소하였으며, 고주파 성분의 감소가 두드러졌다.
- 해빙 경계 전면의 개수역에서 나타난 유의파고와 SPR의 증가는 파랑 산란 가능성을 시사하지만, SPR만으로는 후방산란 또는 반사파의 기여를 명확히 구분하기 어렵다.
- 이 결과는 본 이상실험에서 해빙 농도가 파고와 주파수별 에너지의 해빙 내부 전달에 영향을 주었음을 보여준다.

- 이 논문은 2025년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(지속가능한 해양 신산업 인재 양성을 위한 해양공간·자원 활용 연구(RS-2025-02220608))
- 이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 탈플라스틱 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임