

## 빙해역에서 해양구조물의 사향상태 빙저항 추정

김현수 (인하공업전문대학)

### 1. 서론

지구 온난화로 북극의 해빙이 가속화되면서 전 세계적으로 북극지역 자원 개발 가능성에 대한 관심이 증가하고 있다. 기온 상승에 따른 북극 해빙 면적의 감소 속도는 이론적인 기후 모델을 이용한 추정치보다 빠르게 나타나고 있어 북극지역 자원 개발 사업화 가능시점도 곧 실현 될 것으로 예상되고 있다. 북극의 해양구조물은 빙해에 노출되어 있으며, 이로 인한 외부 충격으로부터 구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 해양 구조물에 대한 빙 저항 산출이 우선적으로 고려되어야 한다.

빙 저항 산정에 관한 연구는 세계 각국에서 진행되어 왔지만, 기존까지 이루어진 대부분의 연구는 쇄빙선박이 빙 해역을 통과할 때의 추진력을 계산하기 위한 빙 저항 추정과 쇄빙선박의 쇄빙성능 관점에 대해서 진행되어 왔으며 해양구조물이 극지에 설치되는 상황을 가정하여 사향 상태에서 유빙에 의한 저항 추정과 위치 유지를 위한 빙 저항 산정에 관한 연구는 미흡한 상황이다.

최근 산업부 과제로 수행중인 연구과제에서 저자는 사향상태 빙저항 추정에 관한 부분을 담당하고 있는바 본 특집 기고를 통해 그 동안의 연구 결과를 간략히 소개하고자 한다. 주요 내용은 빙해역에서 사향 조건에 따른 빙 저항 추정에 관한 이론을 설명하고, 경험식을 이용한 사향각도의 빙 저항 추정 알고리즘을 설명하고, 다양한 사향각도에 대한 빙 저항을 산정하여 각도가 빙 저항에 미치는 영향을 분석하고, 선속 및 빙 두께에 대한 빙 저항의 경향을 확인하는 부분으로 구성되어 있다.

### 2. 사향시 빙저항 추정

#### 2.1 빙저항 추정 방법

저자는 빙저항 추정 관련 연구를 지난 10여년간 수행해오면서 Shimansky, 1938; Enkvist, 1972; Poznyak & Ionov, 1981의 경험식 기반을 조합하여 빙저항 계산 module (I-RES)을 개발하였다. 사용된 좌표계는 그림 1과 같다.

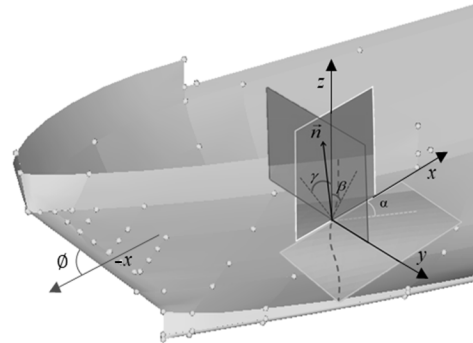


그림 1 Coordinate system

x-y 평면에서 수선의 임의의 점에서 접선(tangent line)을 그어 접선과 x축이 이루는 각을  $\alpha$ (수선면 각, water line angle)로 정의하였고, y-z 평면에서 정면도의 임의의 단면에서 접선을 그어 그 접선과 z축이 이루는 각을  $\beta$ (종단면 각, section angle or frame angle)로 정의하였고, x-z 평면에서 임의의 횡단면에서 접선을 그어 그 접선과 z축이 이루는 각을  $\gamma$ (횡단면 각, buttock angle)로 정의하였다. 또한 선수 형상(profile)을 x-z 평면에 그려서 선수 형상과 x축이 이루는 각도를  $\phi$ (선수각, profile angle)으로 정의하였다. 선체 표면의 임의의 점에서 법선 벡터(normal vector)를  $\vec{n}$ 로 정의하였고, 각각의 x, y, z 방향 단위 벡터를 각각  $\vec{n}_x, \vec{n}_y, \vec{n}_z$ 로 정의하였다. 전체 빙저항( $R_T$ )은 물에 의해 발생하는 유체저항( $R_{OW}$ ), 얼음을 깰 때 발생하는 쇄빙저항( $R_{Br}$ ), 선저로 들어간 얼음의 부력에 의해 발생하는 빙 부력저항( $R_{Bu}$ ) 그리고 얼음 조각들을 밀어내는 빙 제거저항( $R_{CI}$ ) 4가지 성분의 합으로 나타낼 수 있다(Spencer, 1992).

$$R_T = R_{OW} + R_{Br} + R_{Bu} + R_{CI} \quad (1)$$

빙저항은 Shimansky (1938) 쇄빙저항 추정방법을 보완 없이 그대로 적용하였고, 빙 부력저항은 Enkvist(1972)가 평균 수심을 사용한 부력저항을 사용하였고, 계산의 정도를 높이기 위해 평면 각각의 부력중심을 사용하여 부력저항을 계산하는

방법을 적용하였다. 빙 제거저항의 경우 Poznyak & Ionov(1981) 빙 제거저항 추정방법을 보완하여 사용하였다.

I-RES는 선수 및 선미 쇄빙이 가능하도록 구성되어 있는데 추진기가 두 개 혹은 세 개가 장착되는 경우도 계산이 가능하고, Trim 있는 경우도 계산이 가능하도록 하였다. 모형시험 결과와 선박의 엔진 특성 정보 및 얼음의 종류에 따른 저항 결과와 선박이 낼 수 있는 속도도 계산이 가능하다. 빙저항 추정에 사용된 각 저항의 수식은 (2)~(4)와 같이 정의되며 선박의 기하학적 형상을 정의하는 igs형태의 파일을 읽어서 계산할 수 있다.

$$R_{Bv} = C\lambda\sigma_j h^2 B \frac{\int_0^{L/2} \frac{\tan^2\alpha \sqrt{1+\tan^2\alpha}}{1+\tan^2\alpha+\tan^2\beta} dx}{\int_0^{L/2} \frac{\tan\alpha\tan\beta \sqrt{1+\tan^2\alpha}}{1+\tan^2\alpha+\tan^2\beta} dx} \quad (2)$$

$$R_{Bu} = \frac{\rho gh \sum_0^{L/2} L_j \sum_0^B s_i b_i}{L/2} + fg\rho h \sum_0^{L/2} L_j \sum_0^B b_i \sin\beta \quad (3)$$

$$R_{Ca} = 2\rho gh B F n_B \left[ K'_3 \int_0^{L/2} \frac{[y'(x)]^2}{\cos\theta} dx + K''_3 f \int_0^{L/2} \frac{y'(x)}{\cos\theta} dx \right] \quad (4)$$

- |                        |                          |
|------------------------|--------------------------|
| $C$ : 얼음 응착계수          | $g$ : 중력가속도              |
| $\lambda$ : 축척비        | $L_j$ : 스테이션 간 길이        |
| $\sigma_j$ : 얼음의 굽힘 강도 | $s_i$ : 얼음 조각의 깊이        |
| $h$ : 얼음의 두께           | $b_i$ : 노드 간 둘레          |
| $L$ : 선체의 길이           | $f$ : 얼음의 마찰계수           |
| $B$ : 선체의 폭            | $F n_B$ : 선체 폭에 대한 프루드 수 |
| $\rho$ : 얼음의 밀도        | $K'_3, K''_3$ : 유체 상수    |

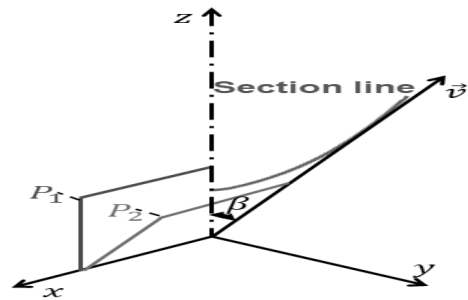
사향 조건에서 빙저항 추정은 기본적으로 위의 경험식 중 빙제거 저항과 부력저항을 보완한 방법을 적용하였다. 부력저항의 경우 Enkvist의 추정방법을 적용하였으며, 식 (5)와 같이 정의된다.  $R_{sp}$ 는 빙편의 위치에너지에 의한 저항성분이며,  $R_{sf}$ 는 선체와 얼음사이의 마찰에 의한 저항으로 두 가지 성분의 합으로 정의하였다. ( $R_{BU} = R_{sp} + R_{sf}$ )

$$R_{sp} = \frac{\sum_0^{L/2} L_i \sum_0^B \rho_{\Delta} g h \bar{s} b_i}{L/2},$$

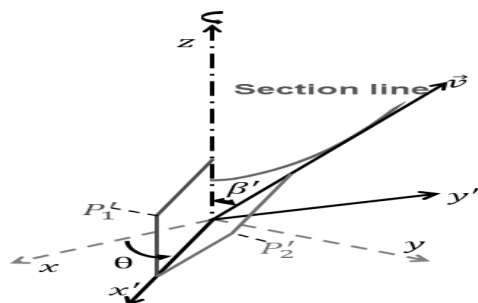
$$R_{sf} = \sum_0^{L/2} L_i \sum_0^B f_g \rho_{\Delta} g h b_i \sin\beta \quad (5)$$

여기서  $\rho_{\Delta}$ 는 물과 얼음의 밀도차이를 나타내며,  $L_i$ 는 각 Section 사이의 길이,  $b_i$ 는 각 Section의 둘레 길이이고,  $\bar{s}$ 는 얼음조각이 물에 잠긴 평균 깊이를 나타낸다.  $h$ 는 빙 두께,  $g$ 는 중력가속도,  $B$ 는 선체의 폭, 그리고  $f_g$ 는 마찰계수를 나타낸다.

사향조건 적용 시 부력 저항에 적용되는 선박 Section line의  $\beta$ 가 다르게 추출되어 경험식에 적용된다. 그림 2는 사향각도 적용 전후에 대한  $\beta$ 가 다르게 추출되는 것을 도식적으로 나타내었다. 그림 2(a)는 비사향조건일 때  $P_1$  평면과  $P_2$  평면 사이의 각을 구하여  $\beta$ 를 도출할 수 있으며, 그림 2(b)는 사향각도  $\theta$ 만큼 회전하였을 경우 회전변환된  $P'_1$  평면과  $P'_2$  평면 사이의 각을 구하여 사향된  $\beta'$ 을 도출할 수 있다.



(a) Non-oblique condition



(b) Oblique condition

그림 2 Schematic diagram of used section angles

## 2.2 빙저항 추정 절차 및 변수 정의

사향조건인 빙 저항 추정 순서는 그림 3에 나타내었다. 빙저항 추정 대상을 실스케일로 3D모델링하여 선형정보 추출 모듈을 통해 Section line과 Water line의 정보를 추출한다. Section line은 추진방향 또는 얼음의 진행방향에 대해 수직하게 교차하는 라인으로, 추출되는 데이터는 부력 저항 추정식에 적용되며, Water line은 해당 흘수에서 추출되어 쇄빙저

항, 빙저거 저항에 적용된다. 사향각도에 대한 새로운 정보가 추출되어 경험식 모듈의 입력 값으로 사용된다.

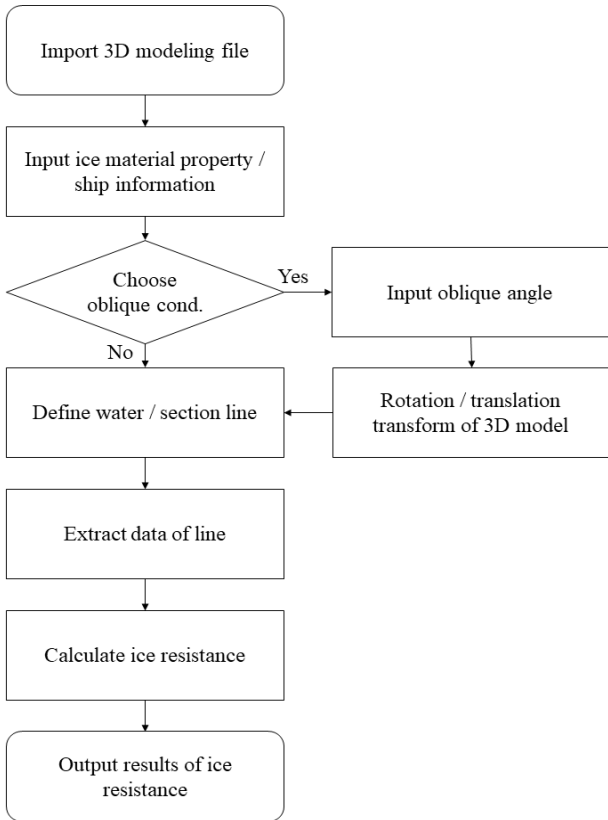


그림 3 Flowchart for estimation of ice resistance in oblique condition

그림 4는 추진방향 또는 얼음의 진행방향에 따라 추출된 Section line, Water line 데이터를 도식화하여 나타낸 것으로 좌표값, 법선벡터, 기준 축과의 각도가 다르게 도출된다. 좌표값  $(x', y', z')$  법선벡터  $(n_x', n_y', n_z')$ , 기준축과의 각도  $(\alpha', \beta', \gamma')$ 가 사향각도만큼 회전변환되며, 변환된 사향조건인 선형정보는 빙 저항 계산모듈을 통해 최종적으로 빙 저항 추정

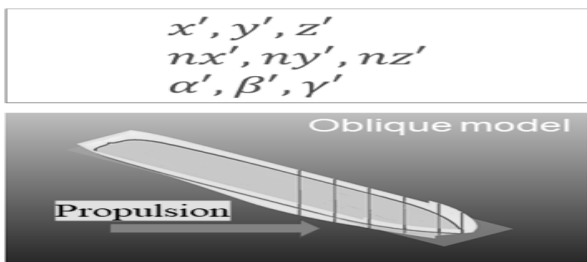


그림 4 Definition of hull components for oblique condition

위에서 언급한 경험식을 기반으로 새로이 입력 변수를 정리하여 사향조건인 빙저항 추정 알고리즘을 정립하였으며, 기존의 I-RES에 사향 module을 추가하여 사향조건인 빙 저항 추정이 가능하도록 하였다.

### 3. 결과 검증

빙저항 추정의 타당성을 검증하기 위해 대상 선박을 선정하여 모형시험을 수행하고 모형시험 결과와 계산 결과를 직접 비교하는 방법을 사용하고자 하였다.

모형시험은 해양구조물의 평탄빙에서 운용은 과도한 추력이 필요해 managed ice에서 운용을 하는 점을 반영하여 pack ice에 대한 실험을 수행해야 하는데 사향시 pack ice 모형시험 역시 세계적으로 실험을 수행한 사례가 거의 없고, pack ice에서의 사향실험을 위해 고려해야 하는 것들이 많아 아직은 비교 가능한 모형시험을 결과를 얻지 못하고 있는 실정이다. 따라서 현재의 상황에서 최선의 결과인 I-RES 계산 결과만을 가지고 사향상태의 경향성을 파악하는 것에 본 기사의 목적을 두고자 한다. 2019년 6월 말에 수행예정인 모형시험이 완료되면 두 결과를 비교하는 좋은 기회가 있을 것으로 논문 등을 통해 독자들과 그 결과를 공유하고자 한다.

사향시 빙저항 Module 역시 보완해야하는 여러 가지 요소들이 있다. 사향시 빙저거 저항과 빙부력 저항에 대한 추정에서 선수로 운행하는 선박과는 개념이 다르기 때문에 계산 정확도를 높이기 위한 여러 가지 노력을 수행하고 있다. 하지만 본 기고에서는 그 결과를 공유하지 못함을 아쉽게 생각한다.

계산에서 사용한 선박은 모형시험이 수행될 선박으로 삼성중공업이 설계한 FPU 선형으로 선정하였으며 계산된 사향 조건과 해석 조건은 표 1에 정리하였다.

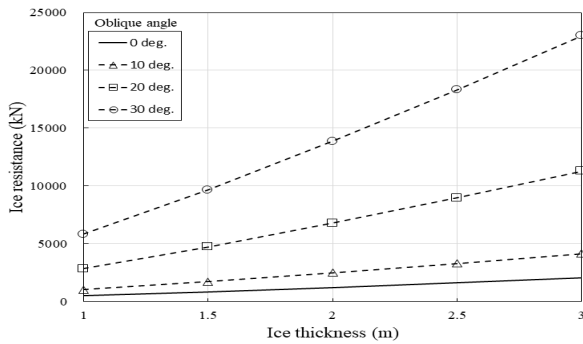
표 1 Input variables for calculation of ice resistance in oblique condition

Items	values
Ship speeds	0.5 ~ 3 knots (interval: 0.5)
Flexural Strength	800 kPa
Ice thickness	1 ~ 3 m (interval: 0.5)
Friction Coefficient	0.05 (Ice and Ship)
Density	880(ice), 1000(water) kg/m <sup>3</sup>

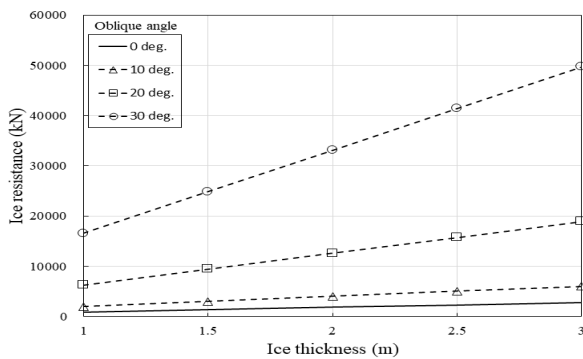
#### 3.1 사향 각도와 빙저항

그림 5는 빙두께와 사향 각도를 변화하여 빙저항을 계산한

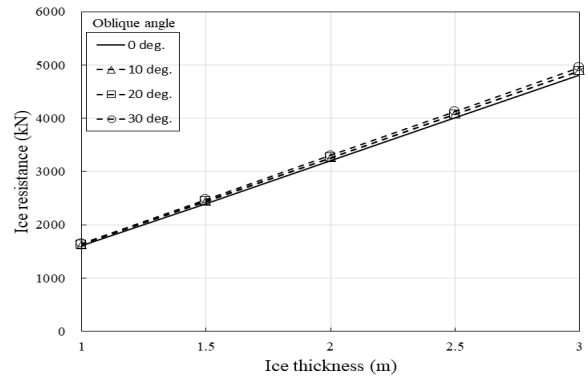
결과로 성분별 빙 저항과 전체 빙 저항을 정리하였다. 빙 두께가 증가함에 따라 3가지 빙 저항 성분은 전체적으로 증가하였으나, 사항각도가 각 빙 저항 성분에 미치는 영향은 다르게 나타났다. 그림 5(a)는 쇄빙 저항을 나타낸 것으로 사항각도가 10° 씩 증가함에 따라 쇄빙 저항은 평균 약 2.3배 증가함을 나타내었으며, 그림 5(b)는 빙제거 저항을 나타낸 것으로 쇄빙 저항에 비해 약 2배 더 큰 값으로 계산되었다. 빙제거 저항의 경우는 사항각도가 10° 씩 증가함에 따라 평균 약 2.6배 증가하였다. 그림 5(c)는 부력 저항을 나타낸 것으로 전체 빙 저항에서 차지하는 비율이 가장 낮은 것으로 계산되었고, 빙 두께에 대한 빙 저항 증가율은 평균 약 1.4로 나타났다. 부력 저항의 경우는 사항각도가 빙 저항에 미치는 영향이 작은 것으로 나타났으며, 이는 사항조건에서 빙 저항 추정대상의 Section line 비대칭 현상이 부력 저항 계산 시 비중이 작은 것으로 판단할 수 있으나, 빙 저항 추정 대상에 따라 달라질 수 있다. 그림 5(d)는 빙 두께가 증가함에 따라 사항각도별 전체 빙 저항을 나타낸 것으로 쇄빙 저항과 빙제거 저항은 전체 빙 저항에서 차지하는 비율이 부력 저항에 비해 상대적으로 크기 때문에 쇄빙 저항과 빙제거 저항 그래프 경향과 비슷하게 나타남을 알 수 있다.



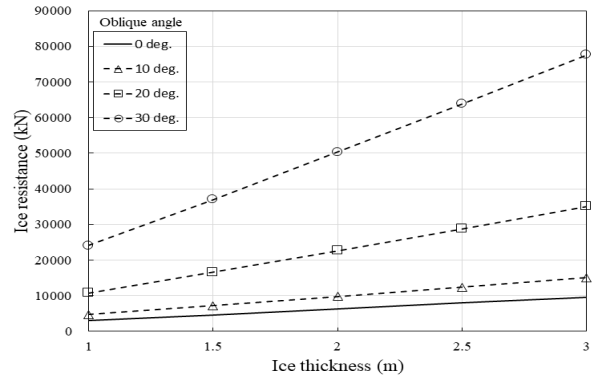
(a) Breaking resistance



(b) Clearing resistance



(c) Buoyancy resistance

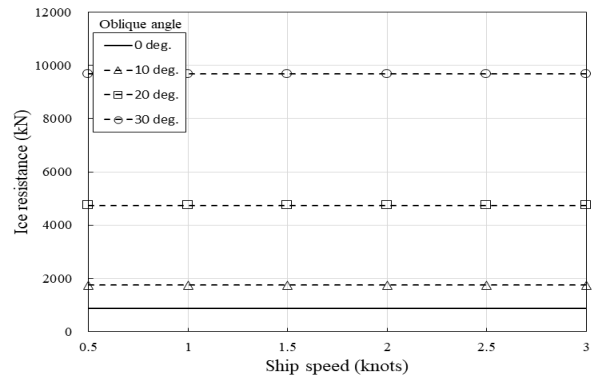


(d) Total ice resistance

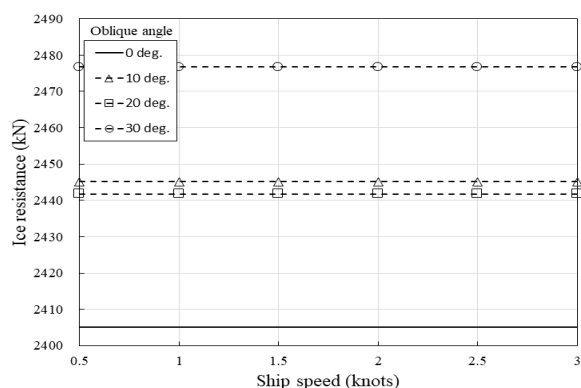
그림 5 The graph of ice resistance vs. ice thickness

### 3.2 선속과 사항시 빙저항

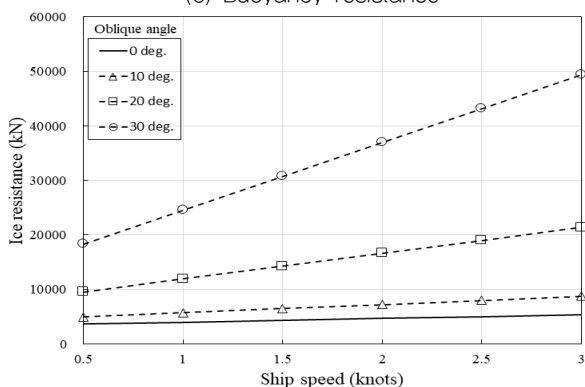
그림 6에는 일정한 빙두께에서(1.5m) 사항 각도의 변화에 따른 각각의 빙 저항 성분과 전체 빙 저항 변화에 대한 결과를 정리하였다.



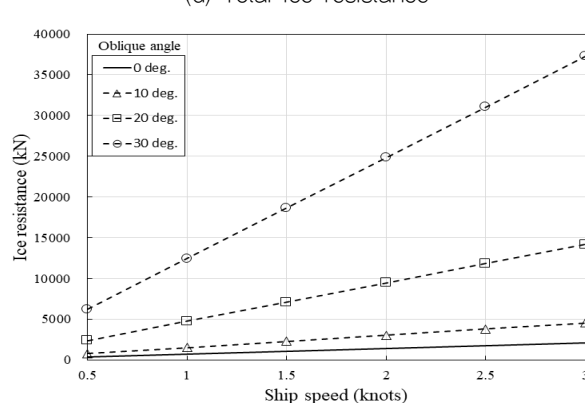
(a) Breaking resistance



(c) Buoyancy resistance



(d) Total ice resistance



(b) Clearing resistance

그림 6 The graph of ice resistance vs ship speed

선속이 증가함에 따라 빙제거 저항과 전체 빙 저항은 증가하였으나, 쇄빙 저항과 부력 저항은 선속에 따른 영향이 없는 것으로 나타났으며, 사향각도가 각 빙 저항 성분에 미치는 영향은 다르게 나타났다.

그림 6(a)는 쇄빙 저항을 나타낸 것으로 사향각도가 10° 씩 증가함에 따라 쇄빙 저항은 평균 약 2.3배 증가하였으며, 그

림 6(b)는 빙제거 저항을 나타낸 것으로 빙제거 저항의 경우는 사향각도가 10° 씩 증가함에 따라 평균 약 2.6배 증가하였다. 이는 앞서 두께에 따른 쇄빙 및 빙제거 저항과 비슷한 결과이며, 쇄빙 및 빙제거 저항은 두께 및 선속과 관계없이 사향각도에 따른 증가량이 일정하다고 판단할 수 있다. 그림 6(c)는 부력 저항을 나타낸 것으로 쇄빙 저항과 마찬가지로 선속에 따른 영향이 없는 것으로 나타났으며, 전체 빙 저항에서 부력 저항이 차지하는 비율은 가장 낮게 계산되었다. 사향각도 0° 와 30° 일 때의 빙 저항 차이는 약 71.7kN으로 사향각도가 부력 저항에 미치는 영향은 쇄빙 및 빙제거 저항에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 마지막으로 그림 6(d)는 선속이 증가함에 따라 사향각도별 전체 빙 저항을 나타낸 것으로 빙제거 저항은 전체 빙 저항에서 차지하는 비율이 쇄빙 저항, 부력 저항에 비해 상대적으로 크기 때문에 빙제거 저항 그래프 경향과 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 그러나 빙제거 저항은 선속에 따른 변화가 커서, 선속이 작을 때는 쇄빙 저항보다 작게 계산되었다.

## 4. 결론

극지에서 운용하는 해양구조물에 대해 사향조건에 따른 빙 저항 산정의 필요성을 설명하였으며, 사향조건에 따른 빙 저항 산정을 위해서 비사향조건(일반적인 쇄빙선)의 빙 저항 추정 이론을 사향조건에 적합하도록 수정하였다. 기 검증된 빙 저항 산정 프로그램을 이용하여 사향조건에 따른 빙 저항 추정 알고리즘을 제시하였으며, 이 알고리즘의 타당성을 확보하기 위해 FPU 선형에 대한 다양한 사향조건에 따른 쇄빙 저항, 빙제거 저항 및 부력 저항을 추정하였으며, 다음과 같이 결론을 요약 정리하였다.

- (1) FPU 선형의 경우, 빙 두께 및 선속에 관계없이 사향각도가 증가할수록 쇄빙 저항과 빙제거 저항은 일정한 증가율을 보였으며, 이는 빙 두께 및 선속이 사향각도에 따른 빙 저항에 미치는 영향은 작은 것으로 판단할 수 있다.
- (2) 부력 저항은 사향각도에 따른 변화가 미미하였으며, 사향각도에 따른 선형정보(Section line)의 비대칭성이 빙 저항에 미치는 영향은 작은 것으로 판단된다.

경험식을 이용한 사향조건에 따른 빙 저항 추정 방법을 제시하였고, FPU의 사향조건에 따른 빙 저항을 추정하여 사향각도에 따른 영

항을 평가하였다. 이 결과는 FPU의 사항조건 빙 저항 추정 시 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 추후 이에 대한 모형 실험과 비교검증을 통해 사항조건에 따른 정량적인 빙 저항을 도출할 수 있을 것이라고 예상되며, 향후 다른 극지해양구조물의 사항조건 빙 저항 추정 시에도 활용될 수 있을 것이다.

## 후 기

본 기고는 참고 문헌 [1],[2]로 발간된 논문을 근거로 특집으로 재구성하였음을 밝힙니다.

## 참 고 문 헌

- [1] “경험식을 이용한 유빙 얼음에서의 도달 속도 추정”, 대한조선학회논문집 제55권 제4호, 2018년 8월, 김현수, 한동화, 이재빈, 정성엽
- [2] “깨어진 해빙의 사항조선에서 빙 하중 추정법 연구”, 한국해양공학회지 제32권 제3호, 2018년 6월, 김현수, 이재빈
- [3] Shimansky Y.A., 1938, Conditional Standards of Ice Qualities of a Ship, Northern Sea Route Administration Publishing House Leningrad, vol.130, Translation T-381-01 by Engineering Consulting and Translation Center (ECTC), New-York,
- [4] Poznyak,I.I., Ionov,B.P., 1981, The division of ice breaking resistance into components, Proceedings of the Sixth STAR Symposium, SNAME, NewYork, pp.249-252.
- [5] Enkvist, E.,1972, On the Ice Resistance Encountered by Ships Operating in the Continuous Mode of Ice breaking, Report No.24, The Swedish Academy of Engineering Sciences in Finland, Helsinki.



김 현 수

- 1964년생
- 1988년 인하대학교 조선공학과 졸업
- 현 재 : 인하공업전문대학 교수
- 관심분야 : 빙해공학
- 연락처 : \*\*\*-\*\*\*-\*\*\*
- E-mail : hyunsookim@nhatc.ac.kr