

빙-선체 상호작용 시 모형선에 작용하는 빙하중 분포 특성 분석

정성엽^{1,†} · 최경식² · 천은지²
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소¹
한국해양대학교 해양공학과²

An Analysis of Characteristic of Ice Load Distribution on Model Ship due to Ship and Ice Interaction

Seong-Yeob Jeong^{1,†} · Kyungsik Choi² · Eun-Jee Cheon²
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering¹
Departments of Ocean Engineering, Korea Maritime & Ocean University²

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.

Knowledge about ice load distribution along the ship hull due to ship-ice interaction can provide important background information for the development of design codes for ice-going vessels. The objective of this study is to understand ship and ice interaction phenomena and determine the magnitude of ice load acting along a ship hull. The model tests were performed in the ice model basin in Korea Research Institute of Ships and Ocean engineering (KRISO) with the model of icebreaking ship Araon. Self-propulsion tests in level ice were performed with three difference model ship speeds. In the model tests, three tactile sensors were installed to measure the spatial distribution of ice load acting at different locations on a model ship, such as the bow and shoulder areas. Variation in the distribution of ice load acting on a model hull with ship speed is discussed.

Keywords : Ice load(빙하중), Ship and ice interaction(빙-선체 상호작용), Tactile sensor(촉각센서)

1. 서론

빙해역을 운항하는 선박은 빙-선체 상호작용에 의해 선체에 빙하중(ice load)이 작용하게 되는데, 이 때 작용하는 빙하중의 크기와 분포 특성은 극지운항 선박의 안전 설계를 위한 선급규정 개발에 있어 중요한 정보로 활용될 수 있다. 그러므로 빙해역 구간에서 실선시험을 통해 계측된 빙하중 자료는 매우 유용하게 이용될 수 있지만, 실선시험에 따른 기술적 문제점을 비롯해 선체 구조의 안전 측면 그리고 가격적인 측면 등에서 다양한 어려움이 존재한다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위한 방법 중의 하나로 빙해수조를 활용한 모형시험이 수행되고 있는데, 이러한 경우 실선시험보다 더 다양한 환경조건에서 모형시험이 가능한 장점을 가지고 있다. 즉 실선시험 시 계측된 빙하중 자료는 대부분 정상운항 조건(normal operating condition)에서 계측된 형태이지만 모형시험의 경우 극한운항 조건

(extreme operating condition)에서도 선체에 작용하는 빙하중 계측이 가능하므로 계측된 빙하중 자료의 경우 보다 활용 가능성이 높은 편이다.

1980년대 후반부터 선박에 작용하는 빙하중의 특성을 분석하기 위한 연구가 기 수행된 바 있는데, Izumiyama, et al. (2001)은 모형선에 작용하는 빙하중을 계측하기 위해 모형선의 선체에 촉각센서(tactile Sensor)를 부착하고 다양한 빙상조건에서 선체에 작용하는 빙하중 계측시험을 수행한 바 있다. 또한 Frederking (2004)는 촉각센서를 이용해 쇄빙과정에서 선체에 작용하는 빙압력 분포 해석에 관한 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 빙-선체 상호작용 과정에서 선체에 작용하는 빙하중의 분포 특성 분석에 관한 연구를 수행하였다. 여기서 빙하중 계측을 위한 촉각센서의 고정방법을 도출하였고 이를 바탕으로 모형선에 촉각센서를 부착한 다음 평탄빙 조건에서 자유 항주 저항시험 시 모형선 속도 변화에 따라 모형선 선체에 작용하는 빙하중의 크기와 분포 특성을 분석하였다.

2. 빙해수조 모형시험

2.1 선박해양플랜트연구소 빙해수조 소개

빙하중 계측시험은 선박해양플랜트연구소 빙해수조에서 수행되었다. 선박해양플랜트연구소 빙해수조는 EG/AD-CD 모형빙(model ice)을 사용하고 있는데, 캐나다 NRC-OCRE(National Research Council-Ocean, Coastal, and River Engineering) 빙해수조에서 사용하고 있는 모형빙과 유사한 특징을 가지고 있다. 선박해양플랜트연구소 빙해수조에서 모형빙을 생성시키는 과정은 크게 4단계로 구성되어 있다.

1단계에서는 수조수 온도를 0°C 부근까지 하강시키고 수조 내부의 대기온도는 -20°C 부근까지 하강시킨다. 2단계에서는 수조 표면에 결빙된 초기 얼음막을 제거시키고 미립자 형태의 담수를 공기 중으로 분사시키면서 수조 표면 전체가 균일하게 결빙을 시작하도록 준비한다. 3단계는 결빙(freezing)으로서 모형빙을 본격적으로 성장시키게 되는데, 이 때 모형빙은 기둥형(columar) 형태의 결정구조를 가지고 된다. 4단계에서는 생성된 모형빙의 강도를 시험조건에서 적합하도록 강도를 제어하게 된다. 특히 3, 4 단계에서는 수조 바닥에 설치된 마이크로 버블시스템을 이용해 500 μ m 크기의 공기방울을 발생시키고 이를 통해 모형빙의 밀도를 제어하게 된다. Fig. 1은 선박해양플랜트연구소 빙해수조에서 모형빙을 생성시키는 과정을 보여주고 있다.

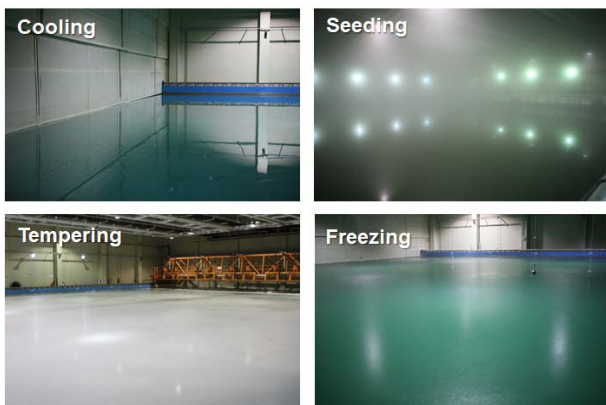


Fig. 1 Model ice preparation process in KRISO ice tank

2.2 촉각센서 교정시험

모형시험에서는 선체에 작용하는 빙하중을 계측하기 위해 촉각센서를 적용시켰다. 촉각센서는 일정한 하중이 가해지는 경우 센서 내부의 입자가 변하게 되고 이 과정에서 전류 변화에 따른 값을 계측하게 된다. 촉각센서의 경우 계측되는 값은 “raw sum”이란 형태로 표시되는데, 이 값은 물리적인 의미의 값이 아니기 때문에 이를 하중으로 변환시키기 위해서는 교정계수(calibration factor)가 필요하다. 촉각센서의 교정을 위해 다양한 방법이 존재

하는데 이는 교정시험 시 주변환경 및 센서의 민감도(sensitivity)와 관련이 있다 (Jeong, et al., 2015).

Izumiyama, et al. (2001)는 촉각센서의 교정을 위해 모형선의 길이방향으로 수선면 부위에 촉각센서를 설치하여 모형시험을 통해 선체에 작용하는 힘을 측정하고 그 힘의 수직력 성분과 선박의 빙저항 성분과의 관계를 바탕으로 교정계수를 도출한 바 있다. Sodhi, et al. (2001)은 일본 홋카이도 지역에서의 실규모 관입시험을 통해 동력계에서 계측된 힘 성분과 촉각센서에서 계측된 값의 관계를 이용하여 교정계수를 도출한 바 있으며, 최근에는 Lu, et al. (2013)이 2점 방법(two-point method)을 이용해 다양한 민감도 조건에서의 촉각센서 교정에 관한 연구를 시도한 바 있다.

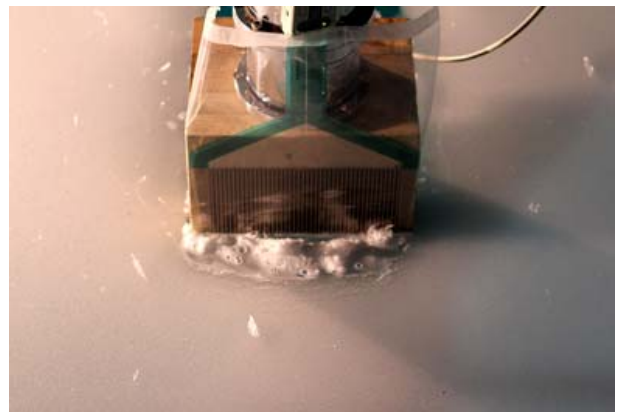


Fig. 2 Calibration test of tactile sensor

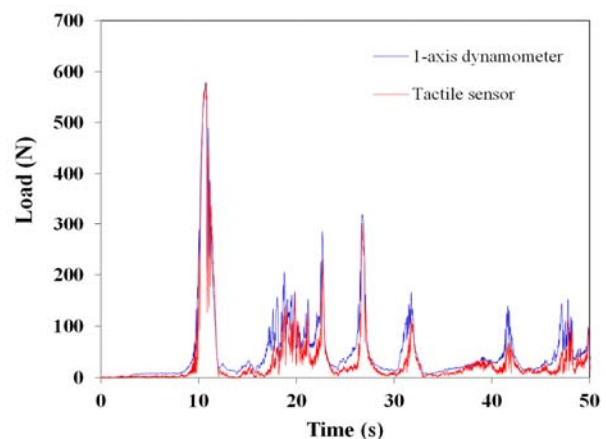


Fig. 3 Calibrated ice load results of tactile sensor in indentation test

본 연구에서는 교정시험(calibration test)을 모형시험과 동일한 조건에서 관입시험(indentation test) 형태로 수행하였다. 따라서 관입시험 시 센서 보호를 위해 촉각센서의 표면과 동일한 재질의 방수필름에 촉각센서를 넣고 모형선의 재질과 동일한 평판에 부착시킨 후 평판의 상부에는 1축 동력계를 부착시키고 평판을 일정한 속도로 관입시키면서 교정시험을 수행하였다. 특히 관입시험은 관입부의 폭이 얼음의 두께 보다 큰 조건이므로 빙판에 일정한 응력이 작용하는 평면응력 조건에서 수행되었다. 또한 빙판의 파괴양식은 Fig. 2와 같이 주로 원주형 균열(circumferential

crack)이 관측되었다. 또한 교정시험 시 구조물이 관입하는 경우 하중이력과 쇄빙주기, 빙하중 특성 등을 분석하기 위해 촉각센서와 동력계의 샘플링주파수는 100Hz로 조절하였다. 앞서 언급한 방법을 통해 모형시험 전 관입시험을 수행하였고 이 때 동력계에서 계속된 값과 촉각센서에서 계속된 raw sum 값을 바탕으로 기울기 값을 구하면 그 값이 교정계수가 된다. Fig. 2는 교정시험 모습을 보여주고 있으며, Fig. 3은 교정시험에서 계속된 동력계 결과와 교정된 촉각센서의 결과가 함께 도시되어 있다.

2.3 빙해수조 모형시험

빙하중 계속시험 시 모형선은 국내 쇄빙연구선 아라온 모형이 적용되었다. 쇄빙연구선 아라온 호는 1년생 빙(first-year ice)이 존재하는 빙해역을 운항할 수 있도록 구성되었는데, 1 m 두께의 평탄빙 구간에서 3 knot의 속도로 연속쇄빙이 가능하며, 선미부의 2축 azipod 추진시스템은 10 MW의 엔진출력을 가지고 있다. 모형시험에 사용된 쇄빙연구선 아라온 모형은 18.667의 축적비로 제작되었다. Table 1에는 쇄빙연구선 아라온 호의 주요제원이 정리되어 있으며, Table 2에는 모형시험 조건이 정리되어 있다. 그리고 모형시험은 직진시험(straight-going test)으로 수행되었다. 빙하중 계속을 위해 사용된 시스템은 “I-SCAN” 으로 하중을 계속할 수 있는 촉각센서와 PC, 데이터 로깅을 위한 handle로 구성되어 있다 (Fig. 4 참조). 모형시험에서는 Fig. 5와 같이 3개의 촉각센서가 사용되었는데, 주로 빙하중은 수선면 부근에서 작용하므로 선수정면과 선수 어깨부, 선측의 수선면 부근에 부착되었다. 또한 모형시험은 설계흘수(design draft) 조건에서 자유 항주 저항시험으로 수행되었고 3가지의 프로펠러 회전수에 따라 모형선이 빙판을 통과하면서 모형선의 속도와 함께 프로펠러 추력과 토크, 빙하중이 계속되었다.

Table 1 Principal particulars of the icebreaker Araon

Scale ($\lambda = 18.667$)	Model
Length between perpendiculars (m)	5.01
Maximum beam (m)	1.02
Design waterline (m)	0.36
Stem angle ($^{\circ}$)	35.0
Waterline entrance angle ($^{\circ}$)	34.0
Displacement (kg)	1142

Table 2 Model test conditions

Test No.	Ice thickness (mm)	Ice strength (kPa)	RPS (1/s)	Model ship speed (m/s)
1	52.8	21.9	8.0	0.206
2	54.6	23.0	11.0	0.354
3	55.4	36.5	12.0	0.704

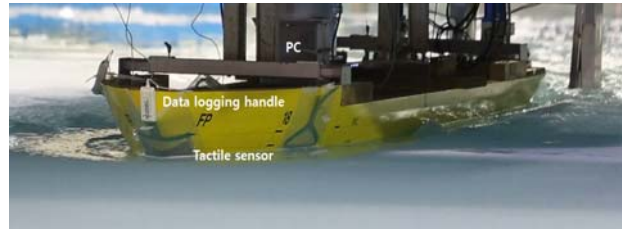


Fig. 4 Layout of “I-Scan” system

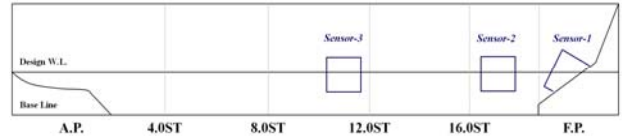


Fig. 5 Location of tactile sensors in straight-going test

3. 모형시험 결과 분석

3.1 빙하중 분포 특성

모형시험에서 계속된 빙하중의 크기는 매우 중요한 정보인데, 본 연구에서는 연속쇄빙 과정에서 선수 정면, 선수 어깨부, 선측 부에 작용하는 빙하중의 크기를 정리하였다. 촉각센서는 44×44의 격자로 구성되어 있는데, 각 격자의 간격은 0.54 cm 정도이고 계속면적은 0.29 cm²이다. 따라서 계속된 빙하중 결과는 이 격자 안에서 계속된 결과이다. 따라서 계속된 하중은 빙압력 또는 빙하중의 형태로 정의할 수 있는데, 본 연구에서는 빙하중의 관점에서 해석을 수행하였다. Fig. 6은 모형시험에서 쇄빙과정에서 계속된 빙하중 특성이 도시되어 있다. 여기서 시간이력에 따른 빙하중 특성은 빙-선체 상호작용과 관련이 있는데, 모형선의 선수부가 빙판과의 접촉과정에서 빙판에서는 1차적으로 분쇄(crushing)가 발생하게 되는데, 접촉면적이 점차 증가함에 따라 빙판에 작용하는 수직 하향력 성분도 커지게 되고 이 때 빙판에 수직 하향력 성분이 빙판의 굽힘강도(flexural strength of ice) 보다 큰 경우 빙판은 파괴가 발생하게 되며, 이러한 과정이 반복하는 특성을 나타내게 된다.

특히 Fig. 6(b)에서 보면 모형선이 빙판과의 접촉에 의해 선체에 작용하는 빙하중은 점차 증가하게 되며, 하중이 얼음의 파괴 강도에 다다르게 되면 빙판에 파괴가 발생하면서 하중이 줄어들게 되고 이러한 현상이 반복적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 모형시험에서 경우 쇄빙주기(icebreaking cycle)는 대략 0.1에서 0.4초 사이에 발생하는 것을 알 수 있는데, 이를 상사법칙을 적용해 실제 현상으로 확장하게 되면 그 값은 0.4초에서 1.7초 이내에 쇄빙주기가 발생함을 알 수 있다. 하지만 정확한 쇄빙주기를 분석하기 위해서는 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)를 통한 분석이 필요할 것으로 판단된다. 빙하중은 선박의 쇄빙과정에서 발생하는 힘과 관련이 있고 이 힘은 쇄빙패턴과도 연관이 있다. Fig. 7에는 Test No. 2에 대한 모형시험 시 쇄빙과정 모습과 함께 쇄빙패턴 모습이 나타나 있다. 여기서 보면 선수

부에서 굽힘파괴가 시작되고 선측 어깨부에서 선측부로 이동하면 일부 깨진 빙편들은 회전하는 것을 알 수 있다.

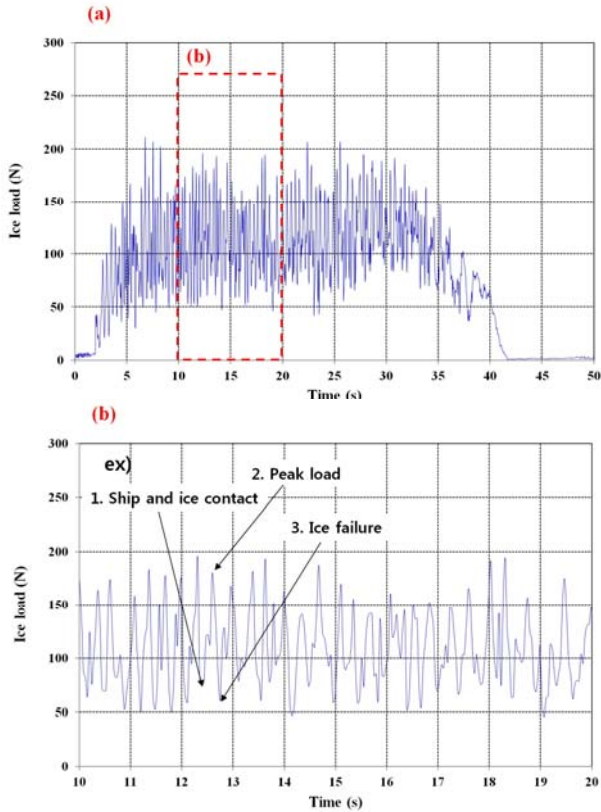


Fig. 6 (a) Characteristic of ice load in the model test
(b) Denotes the sample of icebreaking cycle during icebreaking

자유 항주 자항시험에서 선속이 일정한 구간에서의 최대 빙하중과 평균 빙하중 결과가 Table 3에 정리되어 있다. Table 3에서 보면 모형선의 속도가 증가할 때 선수정면에 작용하는 빙하중 또한 증가하는 경향을 확인할 수 있는데, 이러한 현상은 선수 어깨부에서도 동일한 경향이 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 선측부의 경우 빙하중의 크기는 선속과의 상관관계는 크지 않은 것을 알 수 있는데, 이 때 작용하는 빙하중의 크기는 선수부에서 1차 쇄빙 후 깨진 빙편이 선측부에서 회전하는 과정에서 발생하는 힘의 성분과 연관이 있음을 알 수 있다.

또한 Scantling 관점에서 선박에 작용하는 평균 빙하중 보다는 최대 빙하중의 크기가 보다 중요한 성분이므로 Fig. 8에는 선박의 각 위치에서 선속에 따른 최대 빙하중의 크기가 도시되어 있다. 여기서 보면 선속이 0.704 m/s 인 경우 선수부에 작용하는 최대 빙하중은 선속이 0.206 m/s, 0.354 m/s인 경우보다 상당히 큰 것을 알 수 있는데, 모형빙의 두께에 따른 영향보다는 모형빙의 강도와 함께 선속 증가에 따라 선박의 운동에너지 또한 증가하면서 빙-선체 상호작용 과정에서 빙충격 하중 또한 증가한 것으로 판단된다. 그리고 모형선의 속도가 0.206 m/s에서 0.354m/s로 증가하는 경우 선수부에 작용하는 최대 빙하중의 크기는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있는데, 쇄빙과정에서 선수 어깨부에서의 빙하중 증가에 따른 영향으로 판단된다. 이는 쇄빙과

정에서 선박의 운동특성 변화와 밀접한 관련이 있을 것으로 판단되므로 향후 시험에서는 쇄빙과정에서 선박의 운동특성 계측도 필요할 것으로 판단된다.



Fig. 7 Icebreaking phenomena and breaking pattern in the model test

Table 3 Calculated maximum and average ice load results

Sensor No.	Model ship speed (m/s)	Maximum ice load (N)	Average ice load (N)
1	0.206	70.9	19.2
	0.354	66.5	36.7
	0.704	206.9	121.9
Sensor No.	Model ship speed (m/s)	Maximum ice load (N)	Average ice load (N)
2	0.206	37.2	7.3
	0.354	69.6	10.1
	0.704	89.7	21.2
Sensor No.	Model ship speed (m/s)	Maximum ice load (N)	Average ice load (N)
3	0.206	22.0	3.3
	0.354	16.1	4.7
	0.704	21.8	8.8

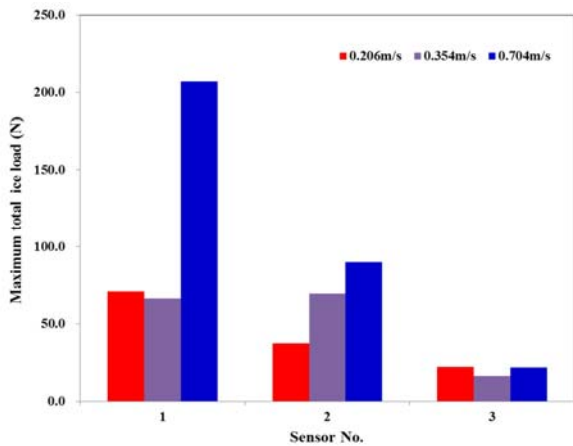


Fig. 8 Maximum ice loads results for each sensor location

아울러, Lee, et al. (2013)의 연구에 따르면 쇄빙연구선 아라온 호에 대한 북극해 실선시험을 통해 측정된 국부 빙압력의 크기는 1.236MPa 정도인데, 국부 빙압력 계산을 위해 부착된 스트레인게이지의 위치는 선수 Thrust room 내의 좌현측 외판 내부로서 Sensor No. 1의 위치 부근임을 알 수 있다. 그러므로 Sensor No. 1에 대한 모형시험 결과를 실선으로 확장하면 그 값은 대략 1.08~3.36 MPa 정도이나 모형시험 시 빙상환경(두께, 강도)과 운항조건(선속)이 실선시험 조건과 다소 차이가 있으므로 직접적인 비교는 어려울 것으로 판단된다.

3.2 무차원 빙하중 해석

모형시험 시 빙두께 및 강도에 따른 편차가 발생하기 때문에

이를 고려해 빙하중에 대한 무차원 해석을 수행하면 보다 정확한 분석이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 두 개의 무차원 수를 고려하여 빙하중 특성을 분석하였다. 우선 무차원된 빙하중은 선수부에 작용하는 수직력 성분을 굽힘강도와 빙두께와의 관계를 통해 구할 수 있다. 또한 모형선 속도는 모형선의 수선간 길이에 대한 Froude 수로 무차원화 시킬 수 있다. 따라서 두 가지 무차원수에 대한 빙하중 특성은 Fig. 9에 도시되어 있다.

Fig. 9에서 보면 무차원된 선속이 증가하는 경우 무차원된 빙하중 또한 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 빙-선체 상호작용에 의해 따른 접촉면적이 증가함에 따라 모형선에 작용하는 빙하중 또한 증가하는 것을 알 수 있으며, 속도가 빠른 구간에서도 이러한 경향이 잘 나타남을 알 수 있다. 따라서 이들에 대한 회귀분석을 통해 얻어진 관계는 식 (1)과 같다.

$$y = 4.8142x^{0.2405} \tag{1}$$

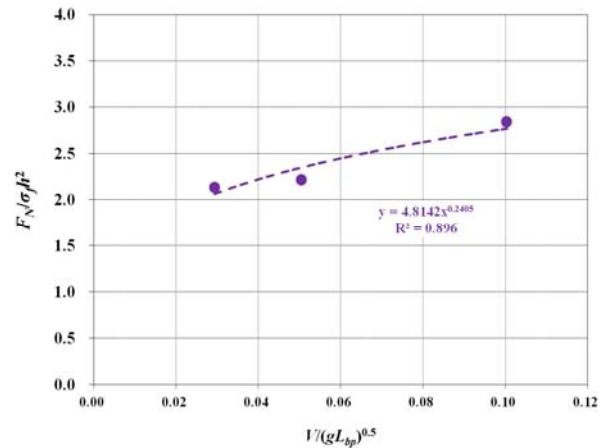


Fig. 9 Non-dimensional relationships between normal ice load and model ship speed

아울러, 무차원 해석을 바탕으로 빙-선체 상호작용과 관련된 변수(굽힘강도, 두께, 선속 등)들의 함수관계를 이용하면 선체에 작용하는 빙하중은 식 (2)와 같은 형태로 도출할 수 있으며, 다양한 선박에 대한 실선 빙하중 결과를 확보하면 보다 빙하중 추정식 도출이 가능할 것으로 판단된다.

$$F_N = C\sigma_f h^2 \left(\frac{V}{\sqrt{gL_{bp}}} \right)^\alpha \tag{2}$$

여기서 C 와 α 는 무차원 해석을 통해 얻어지는 계수이다.

4. 결론

본 연구에서는 빙-선체 상호작용 과정에 따른 선박에 작용하

는 빙하중의 특성을 분석하기 위해 빙해수조에서 쇄빙연구선 아라온 모형에 대한 모형시험을 수행하였다. 모형시험은 자유 항주 저항 조건에서 수행되었는데, 모형선에 작용하는 빙하중을 계속하기 위해 선수 정면과 선수 어깨부, 선측부에 촉각센서를 부착시켰다. 본 연구를 통해 도출된 빙하중 특성은 다음과 같다.

- (a) 빙하중 계측을 위해 사용된 촉각센서의 경우 계측된 결과값을 빙하중 값으로 변환하기 위해서는 교정계수가 필요한데, 본 연구에서는 교정계수를 도출하기 위해 모형시험과 동일한 조건에서 관입시험을 수행하였고 이를 통해 도출된 교정계수를 이용해 환산된 빙하중 결과는 1축 동력계에서 계측된 결과를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 따라서 수행된 교정시험 및 도출된 교정계수가 적절함을 알 수 있다.
- (b) 모형시험을 통해 계측된 시간이력에 따른 빙하중 특성에서 쇄빙주기는 0.1에서 0.4초 이내에 발생함을 알 수 있으며, 실선으로 확장 시 0.4에서 1.7초 이내에 발생함을 알 수 있다. 따라서 실제 현상에서 쇄빙현상이 아주 짧은 시간 안에 발생함을 알 수 있으며, 실선을 이용한 빙하중 계측시험 시 샘플링 주파수는 이를 고려한 값이 적용되어야 할 것으로 판단된다.
- (c) 직진시험에서 선수 정면과 선수 어깨부에 작용하는 빙하중은 선속과 밀접한 관련이 있는 것을 알 수 있지만, 선측부의 경우 발생하는 빙하중의 크기는 선수부에 의해 깨진 빙판과의 상호작용에 의해 발생하는 것을 알 수 있으며, 선속과는 큰 연관성이 없음을 알 수 있다.

본 연구에서는 직진시험에 따른 빙하중 분포 특성에 대한 연구를 수행하였다. 직진시험과 달리 선회시험에서는 선수 어깨부와 선측부에 작용하는 빙하중 특성은 직진시험과는 상의할 것으로 판단되므로 향후 연구에서는 선회시험에서 선체에 작용하는 빙하중 특성 분석에 관한 연구가 추가로 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 보다 정확한 빙하중 특성 및 쇄빙주기를 분석하기 위해서는 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT) 또는 연속 웨이블릿 변환(continuous wavelet transform) 기법이 필요할 것으로 판단된다.

최근 노르웨이를 중심으로 선박의 빙성능 평가를 위한 수치모델 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 보다 정확한 선박의 빙성능을 평가하기 위해 빙-선체 상호작용에 따른 쇄빙패턴의 정의가 필요하다 (Su, et al., 2010, Lubbad & Loset, 2011). 따라서 향후 연구에서는 선박의 선형과 빙두께, 빙강도에 따른 쇄빙패턴 분석에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

끝으로, 쇄빙연구선 아라온 호의 빙해역 실선 운항 시 스트레인지티가 부착된 위치를 분석하여 모형시험에서 동일한 위치에 촉각센서를 배치시키고 실선 운항 조건과 동일한 조건에서의 모형시험을 통해 모형선-실선 상관관계를 도출하면 쇄빙연구선 아라온 호의 실선 빙성능 평가 연구에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 논문은 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 주 요사업인 “쇄빙연구선 아라온호의 실시간 빙충격 하중 계측 통합 시스템 개발 (PES2090)” 과제와 해양수산부 해양안전 및 해양교통시설기술개발 사업인 “북극항로 운항선박용 항해안전지원시스템 개발(PMS3190)” 과제의 연구비 지원으로 수행된 결과임.

References

- Frederking, R., 2004. Ice Pressure Variations during Indentation. *Proceedings of the 17th International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR)*, 2, pp.307-314.
- Izumiyama, K. Wako, D. & Uto, S., 2001. Ice Pressure acting over a Model Ship Hull. *Proceedings of the 16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*, 2, Ottawa, 12-17 August 2001, pp.793-802.
- Jeong, S.Y. Choi, K. Ha, J.S. Kang, K.J. and Cheon, E.J., 2015. Distribution of ice load acting on model hull due to ship-ice interaction. *Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*, Trondheim, 14-18 June 2015, pp.1-6.
- Lee, T.K. Kim, T.W. Rim, C.W. and Kim, S., 2013. A Study on Calculation of Local Ice Pressures for ARAON Based on Data Measured at Arctic Sea. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(5), pp.88-92.
- Lu, W. Serre, N. Høyland, K. and Evers, K., 2013. Rubble ice transport on arctic offshore structure (RITAS), part IV: tactile sensor measurement of the level ice load on inclined plate. *Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*, POAC13_087, Espoo, 9-13 June 2013, pp.1-14.
- Lubbad, R. & Loset, S., 2011. A numerical model for real-time simulation of ship-ice interaction. *Cold Regions Science and Technology*, 65, pp.11-127.
- Sodhi, D. Takeuchi, T. Kawamura, M. Nakazawa, N. and Akagawa, S., 2001. Measurement of ice forces and interfacial pressure during medium-scale indentation tests. *Proceedings of the 16th International Conference on Port and Ocean*

Engineering under Arctic Conditions (POAC), 2, Ottawa, 12-17 August 2001, pp.617-626.

Su, B. Riska, K. and Moan, T., 2010. A Numerical Method for the Prediction of Ship Performance in Level Ice. *Cold Regions Science and Technology*, 60, pp.177-188.

