

깨진 빙 채널 폭과 빙편 크기에 따른 내빙선박의 저항 특성 연구

정성엽[†]·장진호·김철희·염종길·강국진
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

A Study of Ship Resistance Characteristics for Ice-strengthened Vessel by Broken Ice Channel Width and Size of Broken Ice Pieces

Seong-Yeob Jeong[†]·Jinho Jang·Cheol-Hee Kim·Jong-Gil Yum·Kuk-Jin Kang
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KRISO

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.

Ships strengthened for navigation in ice encounter level ice, ice ridge and broken ice fields. Thus, the ship resistance in ice is a very critical concern to the designers of ice-going vessels. The objective of this study is to understand the physical aspects of ship performance in ice and to investigate the characteristics of the ship resistance in broken ice channels. In particular, this study identifies the ship resistance in ice associated with the broken ice channel width and the size of broken ice pieces. Model testings of towed-resistance condition in broken ice channels with three ship speeds were conducted in KRISO ice model basin. The influence of the ship resistance characteristics in broken ice channels for channel width and size of broken ice pieces was analyzed.

Keywords : Ship performance in ice(선박의 빙성능), Broken ice channel width(깨진 빙 채널 폭), Size of broken ice pieces(깨진 빙편 크기)

1. 서론

극지해역을 운항하는 내빙선박(ice-strengthened vessel)의 수요가 증가함에 따라 국내 조선소에서도 이러한 선박에 대한 건조가 활발히 이루어지고 있다. 특히 러시아 Yamal LNG 프로젝트로 생산될 천연가스(LNG)는 금년 말 첫 단계 생산 개시 이후, 2021년까지 단계적으로 북극해 항로를 활용한 아시아 해상운송 시장의 주요화물로 대두될 전망이다. 일반적으로 내빙선박은 해빙(sea ice)으로 덮혀있는 해역에서 독자적인 운항은 어렵지만 유도 쇄빙선(icebreaker escort)에 의해 깨진 빙 채널(broken ice channel)에서 운항이 가능한 선박을 일컫는다. 빙등급(ice class) 규정으로 살펴보면 국제 선급 협회(International Association of ship Classification Societies, IACS)에서 정의하고 있는 Polar Class 5 이하의 성능을 가진 선박 또는 핀란드-스웨덴 빙등급 규정(Finnish-Swedish Ice Class Rules, FSICR)에서 정의하고 있는 1A Super, 1A, 1B, 1C 등급의 선박으로 구분된다 (Finnish

Trans Port Safety Agency(Trafi) and Swedish Transport Agency, 2011). 앞서 언급한 내빙선박이 해빙으로 덮혀있는 해역 운항 시 가장 큰 어려움은 깨진 빙 채널 통과 시 발생하는 빙 저항과 깨진 빙편과의 상호작용에 의해 발생하는 저항 성분들과 밀접한 관련이 있다. 따라서 이러한 빙저항 특성은 선박의 선형설계 시 핵심요소 중 하나이므로 보다 효과적인 선형설계를 위해서는 다양한 빙상환경에 따른 선박의 빙저항 특성 연구가 필요하다.

현재 극지에서 생산되고 있는 원유와 가스를 수송하기 위해 건조되는 내빙선박의 경우 선폭이 유도 쇄빙선의 선폭보다 큰 경우가 다수인데, 이 경우 유도 쇄빙선에 의해 깨진 빙 채널의 폭은 내빙선박의 선폭보다 비교적 작으므로 유도 쇄빙선 뒤를 따라 운항하는 내빙선박은 깨진 빙 채널의 양쪽 끝단을 일부 쇄빙(icebreaking)하면서 운항하게 되고 이러한 과정에서 빙저항이 다소 증가하게 된다. 또한 유도 쇄빙선에 의해 깨진 빙편의 크기에 따라 빙 제거 저항 및 빙 부력 저항 성분들도 영향을 받게 되며, 이 또한 선박에 작용하는 빙저항 크기와 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 평탄빙(level ice)에서 선박의 빙저항 추정에 관한 연

구는 1970년대 후반부터 활발히 진행되어 다양한 경험식이 도출된 반면, 깨진 빙 채널 구간에서 선박의 빙저항 추정은 최근까지도 많은 연구가 진행되고 있다 (Wang & Derradji-Aouat, 2010; Metrikin, et al. 2012). 이는 극지항로를 통항하는 내빙선박의 수요가 증가하기 때문이고 실제 여름철 극지항로 운항 시 대부분 깨진 빙 채널에서의 운항이 이루어지기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 깨진 빙 채널 구간에서 선박의 빙저항을 정량적으로 추정하기 위해서는 선형과 선속, 빙 집적도, 빙두께, 빙편 크기 등과 같은 요소들이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 유도 쇄빙선에 의해 깨진 빙 채널 폭 크기에 따른 선박의 빙저항 특성과 유도 쇄빙선에 의해 깨진 빙편의 크기에 따른 빙저항 특성을 평가하였다. 모형시험은 선박해양플랜트 연구소 빙해수조(ice model basin)에서 수행되었고 초기 대상선은 내빙선박이었으나, 활용 가능한 모형선 재원이 없어 쇄빙연구선 아라온 모형을 사용하였다. 다만 모형시험은 전형적인 선속 쇄빙현상에 의한 빙저항 특성 분석이 아닌 깨진 빙 채널에서의 저항특성 분석이므로 시험결과를 그 경향을 분석하는데 활용이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 모형시험에서는 세 가지 빙 채널 폭 변화에 따른 빙저항 특성과 두 가지 빙편 크기를 고려한 빙저항 특성을 분석하였다.

2. 빙성능 평가시험

현재 러시아에서 운용되는 유도 쇄빙선의 선폭은 대부분 30 m 내외로서 최근 건조된 쇄빙 LNG 선박보다 선폭이 작은 경우가 많다. 따라서 Fig. 1과 같이 유도되는 내빙선박이 일부 깨진 빙 채널에서 운항을 하게 된다. 본 연구에서는 빙해수조에서 평탄빙을 생성시킨 다음 깨진 빙 채널을 구현하여 모형시험을 수행하였다. 모형시험을 위한 기본적인 모형빙 생성과정과 모형빙 특성 계측 방법은 Jeong, et al. (2015, 2017)에 정리되어 있다.

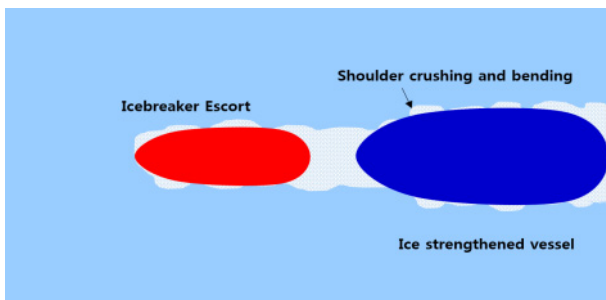


Fig. 1 Icebreaker escort and escorted ice strengthened vessel in ice-covered waters

모형시험에서는 유도 쇄빙선에 의해 깨진 빙 채널에서의 빙저항 특성을 분석하기 위해 세 가지 깨진 채널의 폭에 따른 빙저항 특성 시험을 수행하였다. 특히 모형시험에서 선폭은 유도되는 선박 선폭(B)의 0.5배와 0.7배를 우선적으로 고려하였고 향후 건조될 대형 원자력 쇄빙선의 선폭을 고려해 1.2배까지도 추가로 고려하였다. Table 1과 2에는 각각 모형시험 시 빙상환경과 모형선의 재원이 정리되어 있다.

Table 1 Ice model testing conditions

Test No.	Broken ice channel width	Ice thickness [mm]	Density of ice [kg/m ³]	Flexural strength of ice [kPa]	Avg. ice floe size [mm]
1	0.5B, 0.7B	32	870	36	200
2	0.5B, 0.7B, 1.2B	52	870	36	200
3	0.5B, 0.7B, 1.2B	32	870	36	50

※ Where B denotes the model ship width.

Table 2 Principal particulars of the icebreaker Araon (Jeong, et al. 2015)

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

깨진 빙 채널에서 선박의 운항 시 빙저항에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 얼음의 굽힘강도(flexural strength)이지만 깨진 채널 폭이 증가하는 경우에는 쇄빙 저항 성분보다는 주로 깨진 빙편과의 상호작용에 의해 발생하는 빙 제거 저항과 빙 부력 저항 성분을 알 수 있다. 일반적으로 발틱해(Baltic Sea)의 경우 유도 쇄빙선의 쇄빙 후 깨진 빙 채널에서 빙편의 크기는 대개 직경 2.0 m 이내의 크기를 가지게 되는데 (Jeong, et al., 2017), 2017년 쇄빙연구선 아라온의 북극항해에서도 쇄빙 후 깨진 빙 채널에서의 빙편 크기는 대략 1.0 m~3.0 m 정도로 관측되었다(Fig. 2 참조). 따라서 모형시험에서는 동일한 빙두께와 강도를 가지는 조건에서 깨진 빙 채널에서의 빙편 크기에 따른 저항 특성을 분석하기 위해 두 가지 빙편 크기에 따른 빙저항 특성도 함께 분석하였다(Fig. 5 참조).

모형시험에서는 평탄빙을 생성한 후 깨진 빙 채널을 구현하기 위해 전기톱을 이용해 빙판을 미리 자른 후 ice pusher를 이용해 빙편을 부수는 방법을 이용하였다. Fig. 3은 깨진 빙 채널을 모사하기 위한 빙상환경 구현과정을 보여주고 있으며, Fig. 4는 빙두께가 32 mm, 굽힘강도가 36kPa 인 조건(Test No. 3, Table 1 참조)에서 모사된 세 가지 깨진 빙 채널을, Fig. 5에서는 모형시험에서 깨진 빙 채널에서의 두 가지 빙편 크기를 보여주고 있다. 모형시험에서 깨진 빙 채널의 빙 집적도(ice concentration)는 100% 조건으로 구성하였는데, 이는 실제 극지해역에서 선박이 통과한 후 채널이 다시 닫히는 현상을 모사한 것이며(Fig. 2 참조), 이 경우 빙 집적도 60% 또는 80% 조건보다 정량적인 실험 결과 도출이 가능한 장점을 가지고 있으므로 상기 조건에서 모형

시험을 수행하였다. 또한 모형시험 시 모형선은 알몸 선체(bare hull) 상태로 예인전차가 모형선을 예인하는 구속 빙저항 시험을 통해 모형선 속도 변화에 따른 빙저항 특성을 분석하였다.

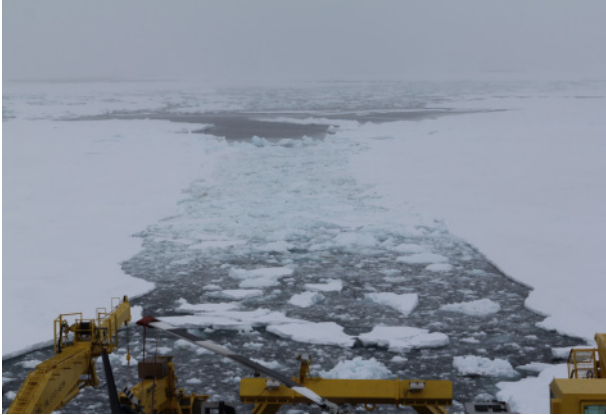


Fig. 2 Ice trial of Araon in 2017 around East Siberian Sea



Fig. 3 Broken ice channel preparation procedure

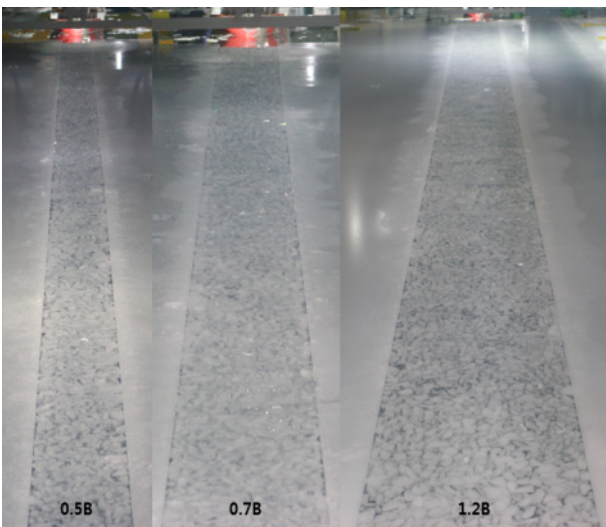


Fig. 4 Three broken ice channels for the model test at Test No. 3

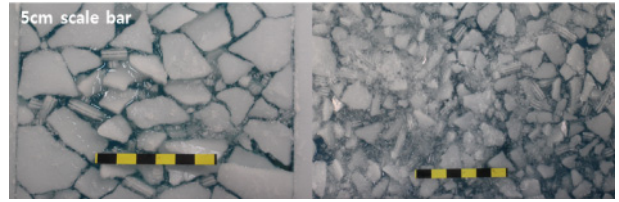


Fig. 5 Size of broken ice pieces in the broken ice channels (Left: Test No. 1; Right: Test No. 3)

실제 극지해역 운항 시 내빙선박은 구조적 안전성 확보를 위해 다소 느린 속도로 운항하게 되는데, 속도가 너무 느릴 경우에는 깨진 빙 채널에 갇힐 수도 있으므로 최소한의 선속 유지가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 채널 폭이 선폭보다 작은 경우도 함께 고려하였기 때문에 일반해역 운항조건 보다 낮은 조건에서 모형시험이 수행되었다(1 kts, 3 kts, 5 kts in full-scale). 이는 내빙선박 운항 시 깨진 빙편과의 상호작용 현상과 선박 어깨부의 쇄빙과정 시 선체 구조적 안전성을 고려한 것으로, FSICR에서는 Brash ice 채널 운항 시 선속을 5 kts 로 규정하고 있다.

3. 모형시험 결과 분석

본 연구에서는 모형시험에서 계측된 빙저항 특성과 함께 쇄빙 현상 및 빙편 거동 특성을 분석하였다. Fig. 6은 깨진 빙 채널 폭이 선폭 보다 작은 경우 선박의 어깨부에서 발생하는 쇄빙 현상에 의한 반달 모양의 빙편 형상(ice cusp)을 보여주고 있는데, 주로 빙편의 굽힘파괴에 의한 영향이 지배적임을 알 수 있으며, 일부 분쇄(crushing)에 의한 파괴도 발생함을 확인할 수 있다. 이처럼 유도 쇄빙선의 선폭이 그 뒤를 따른 내빙선박의 선폭 보다 작은 경우에는 일부 끝단에서 쇄빙 현상이 발생하면서 일반적인 유빙(pack ice) 조건보다는 큰 빙저항이 발생하게 된다. Test No. 2(Table 1 참조) 조건과 유사한 환경에서 수행된 평탄빙 저항시험 결과와 비교해 보면 채널 폭이 선폭의 0.5배 인 경우에 대하여 평탄빙 구간에서 발생하는 빙저항의 35% 내외 정도 낮은 수준임을 알 수 있다(Fig. 8과 9 참조).

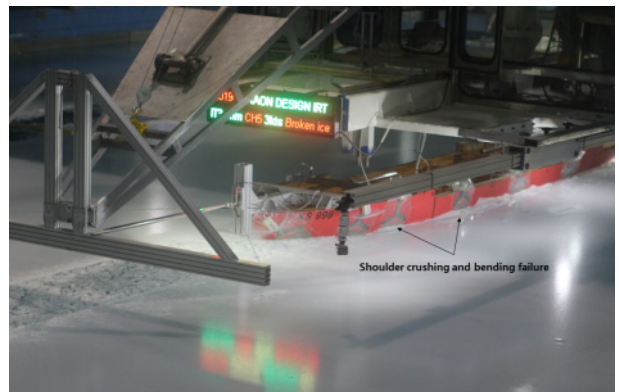


Fig. 6 Icebreaking phenomena during sailing through the broken ice channel

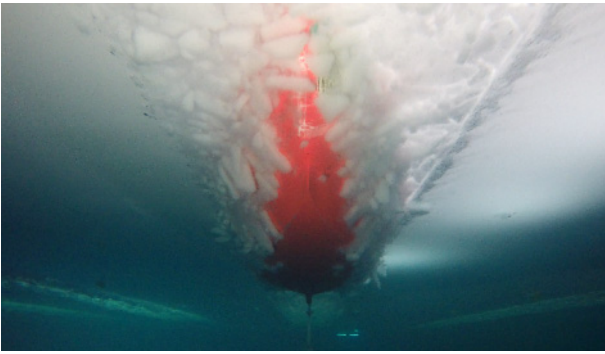


Fig. 7 Flow characteristics of submerged broken ice pieces long the ship bottom at Test No. 3 (1.2B width)

Fig. 7은 선박이 전진하는 과정에서 깨진 빙 채널을 채우고 있는 빙편들이 선저로 이동하는 모습을 보여주고 있다. 특히 선수부 주변에서 빙편들이 증착되는 현상과 함께 일부 빙편들은 선저를 따라 이동하게 되는데, 이러한 빙편들의 의해 빙 부력 저항이 발생하게 되고 일부 빙편들이 선미 프로펠러로 이동하는 경우에는 빙-프로펠러 상호작용도 발생하게 된다. 본 연구에서 수행된 모형시험 결과는 Fig. 8에 도시되어 있으며, Table 3에 값으로 정리되어 있다. 우선 Fig. 8에서 보면 깨진 빙 채널에서의 빙 저항은 속도에 선형적으로 증가하는 특성을 보이고 있으며, 채널 폭과 빙편의 크기에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있으므로 본 연구에서는 이러한 요인에 따른 빙저항 특성을 분석하였다.

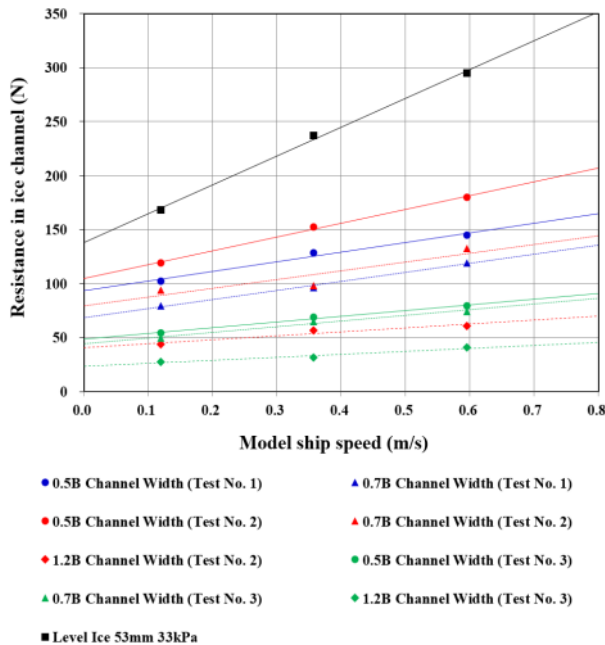


Fig. 8 Relationship between ship resistance in broken ice channel and model ship speed

Fig. 9에는 평탄빙에서의 빙저항과 깨진 빙 채널 폭 변화에 따른 빙저항 특성이 함께 도시되어 있고 Fig. 10에는 선속에 따른 깨진 빙 채널 폭 크기 변화에 따른 빙저항 특성이 도시되어 있다.

여기서 보면 깨진 채널 폭이 증가할수록 선박의 빙저항이 전체적으로 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 깨진 빙 채널 폭이 증가하면서 선박의 어깨부 쇄빙 현상이 줄어들어 빙저항이 감소하기 때문으로 판단된다.

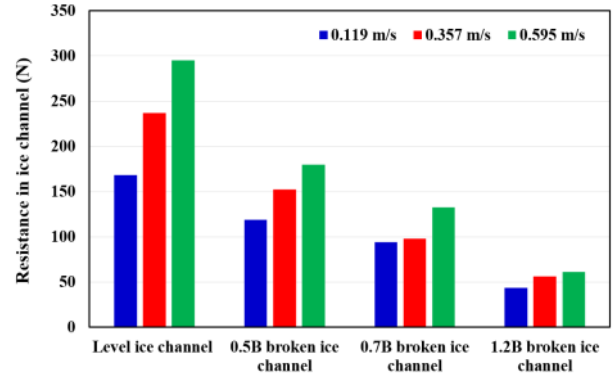


Fig. 9 Tendency of resistance characteristics on ice channel for model ship speeds at Test No. 2

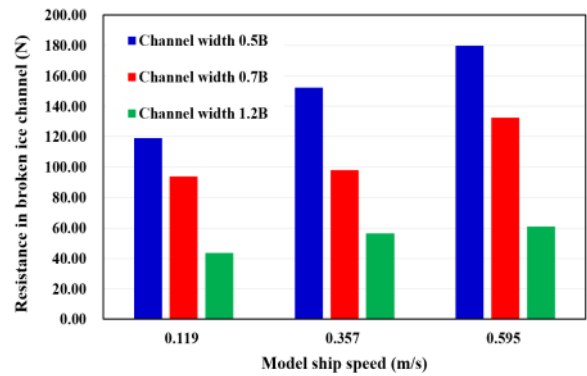


Fig. 10 Resistance characteristics in broken ice channel for broken ice channel width variations at Test No. 2

특히 깨진 빙 채널에서의 빙저항은 빙두께와도 밀접한 연관성을 가지게 되는데, Fig. 11에서 보면 동일한 빙편 크기를 가진 깨진 빙 채널에서 빙두께가 증가할수록 선박의 빙저항도 함께 증가하는 경향을 보이며, 빙두께가 클수록 선속별 빙저항의 차이도 더 큰 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 선박의 빙저항 추정 시 빙두께가 주요 변수임을 알 수 있다. 깨진 빙 채널에서 빙편의 크기도 선박의 빙저항에 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나로 인식된다. 따라서 Fig. 12에는 빙편의 크기에 따른 선속별 빙저항 특성이 도시되어 있다. 여기서 보면 동일한 선속에서 빙편의 크기가 클수록 선박의 빙저항도 증가하는 것을 보여주고 있다. 이는 선박이 깨진 빙 채널을 운항하는 경우 주요 빙저항은 쇄빙 저항 보다는 빙 제거 저항과 빙 부력 저항 성분들의 영향을 받기 때문인데, 빙편의 크기가 클수록 빙-선체 마찰력이 증가하게 되고 일부 선저로 잠기는 빙편들의 부력에 의해 선박의 빙저항을 키우는 요인으로 판단된다.

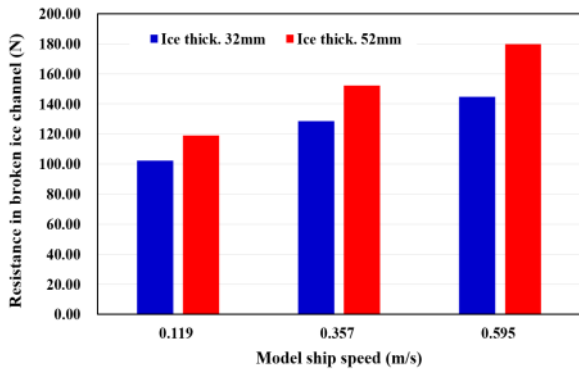


Fig. 11 Resistance characteristics in broken ice channel (channel width=0.5B) for difference in ice thickness at Test No. 1 and 2

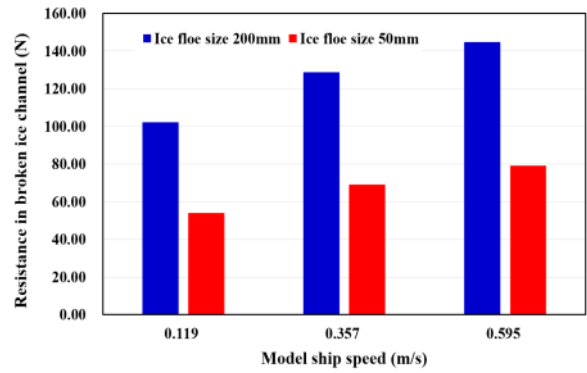


Fig. 12 Resistance characteristics in broken ice channel for two broken ice floe sizes at Test No. 1 and 3

Table 3 Summary of model test results

Test No.	Broken ice channel Width	Ice thickness (mm)	Ice floe size (mm)	Model ship speed (m/s)	Resistance in broken ice channel (N)
1	0.5B	32	200	0.119	102.31
				0.357	128.66
				0.595	144.80
2		52	200	0.119	118.94
				0.357	152.37
				0.595	179.77
3	32	50	0.119	54.11	
			0.357	69.11	
			0.595	79.26	
1	0.7B	32	200	0.119	79.47
				0.357	96.28
				0.595	119.41
2		52	200	0.119	93.92
				0.357	98.10
				0.595	132.55
3	32	50	0.119	49.43	
			0.357	65.16	
			0.595	74.49	
2	1.2B	52	200	0.119	43.59
				0.357	56.45
				0.595	60.98
3		32	50	0.119	27.57
				0.357	31.80
				0.595	40.71

4. 결론

본 연구에서는 유도 쇄빙선에 의해 깨진 빙 채널 폭 크기에 따른 선박의 빙저항 특성과 유도 쇄빙선에 의해 깨진 빙편의 크기에 따른 빙저항 특성을 평가하기 위해 빙해수조에서 모형시험을 수행하였다. 모형시험에서는 두 가지 빙편 크기 조건에서 세 가지 채널 폭을 고려하였고 대상선박은 쇄빙연구선 아라온 모형선을 사용하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

유도 쇄빙선에 의해 깨진 빙 채널을 내빙선박이 운항하는 경우 선박의 빙저항은 크게 채널의 폭과 채널을 구성하는 빙편의 크기와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 여기서 깨진 채널 폭이 내빙선박의 선폭보다 작을 경우 내빙선박의 어깨부 주변에서 일부 쇄빙 현상이 발생하게 되고 이러한 경우 선박의 빙저항이 증가하게 된다. 특히 Kashtelian, et al. (1969)에 따르면 깨진 빙 채널에서의 빙저항 추정 시 주요 변수는 빙편의 크기, 빙 집적도, 빙 두께, 빙밀도, 빙-선체 마찰계수, 선박의 길이, 폭, 수선면 진입 각 등과 밀접한 관련이 있는데, 추정식의 경우 빙 집적도에 선형적으로 증가하므로 내빙선박의 선단 구성 시 선단 사이의 빙 집적도가 중요한 변수로 작용함을 알 수 있다. 따라서 내빙선박의 선형 개발 시 선수부와 어깨부 주변에서 깨진 빙편들이 선측을 따라 잘 빠져나갈 수 있도록 플레어 각(flare angle)을 키워주는 것이 하나의 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

반면 깨진 채널 폭이 증가할수록 선박의 빙저항은 감소하게 되고 이러한 경우 선박의 빙저항은 깨진 빙 채널에서의 빙편 크기에 영향을 받게 된다. 특히 빙편의 크기가 큰 경우 내빙선박의 운항 시 빙-선체 마찰현상에 의해 빙 제거 저항이 증가하게 되고 일부 빙편들은 선저로 잠겨 이동하는 빙편들의 부력에 의해 빙 부력 저항도 증가함을 알 수 있다. 특히 모형시험 결과를 살펴보면 빙편의 크기가 50 mm 인 경우 빙저항 크기는 200 mm 인 경우의 대략 53.8% 정도 차지하는 것을 알 수 있는데, 이는 선수 선형과도 연관이 있으므로 구상선수를 가지는 선박의 경우에는 그 정도가 달라질 수 있으나, 경향은 유사할 것으로 판단된다. 그러므로 실제 극지해역에서는 유도 쇄빙선이 쇄빙 과정에서 빙편의 크기를 줄여주는 것이 그 뒤를 따르는 내빙선박의 운항 효율성을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

아울러, 내빙선박의 경우 깨진 빙 채널 폭이 선폭 보다 큰 경우에는 보다 빠른 속도로 운항이 가능하므로 이를 고려해 향후 연구에서는 보다 빠른 선속에 대한 빙성능 평가와 함께 구상선수를 가진 내빙선박에 대한 깨진 빙 채널에서의 구속 빙저항 시험을 통해 엔진 운용(engine operation) 관점에서 깨진 채널 폭에 따른 선박의 소요마력 특징이 분석된다면 초기 설계단계에서 내빙선박의 엔진출력 선정에 도움이 될 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 해양수산부의 국가연구개발사업인 “북극항로 운항 선박용 항해안전지원시스템 개발(PMS3880)” 및 선박해양플랜트

연구소의 주요사업인 “선박의 유체성능평가를 위한 특수시험 계측 기반 구축(PES9440)”에 의해 수행되었습니다.

References

- Finnish Transport Safety Agency (Trafi) and Swedish Transport Agency, 2011. *Guidelines for the application of the finnish-swedish ice class rules*. Finnish and Swedish Maritime Administration: Helsinki.
- Jeong, S.Y. Choi, K. & Cheon, E.J., 2015. An analysis of characteristic of ice load distribution on model ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(6), pp.469-475.
- Jeong, S.Y. Jang, J.H. Kang, K.J. & Kim, H.S., 2017. Implementation of ship performance test in brash ice channel. *Ocean Engineering*, 140, pp.57-65.
- Kashteljan, V.I. Poznyak, I.I. & Ryvlin, A.Ya., 1969. *Ice resistance to motion of a ship*. Marine Computer Application Corporation: Leningrad.
- Metrikin, I. LU, W. Lubbad, R. Løset, S. & Kashafutdinov, M., 2012. Numerical simulation of a floater in a broken-ice field: part I-model description. *31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, 1-6 July 2012.
- Wang, J. & Derradji-Aouat, A., 2010. *Ship performance in broken ice floes-preliminary numerical simulations*. Newfoundland: Institute for Ocean Technology (IOT) Report No. TR-2010-24.



정성엽



장진호



김철희



염종길



강국진