

실해역 해빙 크기에 따른 Araon호의 쇄빙성능 비교연구

이춘주* · 김현수** · 최경식***

*한국해양과학기술원

**인하공업전문대학

***한국해양대학교

Comparative Study of Ice Breaking Performance according to Scale of Sea Ice on Ice Field

Chun-Ju Lee*, Hyun Soo Kim** and Kyungsik Choi***

*Marine & Ocean Engineering Research Institute, Korea Institute of Ocean Science & Technology(KIOST), Daejeon, Korea

**Dept. of Ship and Ocean Engineering, Inha Technical College, Incheon, Korea

***Dept. of Ocean Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

KEY WORDS: Ice floe 해빙, Ice breaking performance 쇄빙성능시험, Small floe 작은 빙판, Big floe 큰 빙판, Vast floe 거대 빙판, Araon performance 아라온 성능

ABSTRACT: The Korean icebreaking research vessel "Araon" performed four sea trials in the Arctic and Antarctic Seas. The ice properties, such as the ice thickness, floe size, ice strength, and power of the vessel were quite different in these trials. To compare the speeds of ship with the same ice strength and power, the AARC (Arker Arctic Research Center) method is used with a vessel power of 10 MW and an ice strength of 630 Pa in this paper. Based on the analysis results, the speed of the ship was 1.62 knots (0.83 m/s) with a 1.02-m ice thickness and 2.5-km floe size, 5.3 knots (2.73 m/s) with a 1.2-m ice thickness and 1.0-km floe size, and 13.8 knots (7.10 m/s) with a 1.1-m ice thickness and 200-m floe size. The analysis results showed that the ship speed and floe size have an inversely proportional relationship. Two reasonable reasons are given in this paper for the final result. One is an ice breaking phenomenon, and the other is the effect of the ice floe mass. For the breaking phenomenon, the ice breaking force is very small because the ice floe is not breaking but tearing when a ship is passing through a small ice floe. Regarding the effect of the ice floe mass, it is impossible for a ship to push and tear an ice floe if the mass of the ice floe is too large compared to the mass of the ship. The velocity of the ship decreases when the ice floe has a large mass and a large size because the ship has to break the ice floe to move forward.

1. 서 론

국내 유일의 쇄빙선인 Araon은 2009년 남극해 처녀항해를 시작으로 매년 남극과 북극을 오가며 극지 연구를 수행하고 있다. 2010년 AARI(Arctic and antactic research institute, Russia) 팀의 도움을 받아 수행된 첫 쇄빙성능시험에서 그 성능을 인정받았다. 이후에 한국해양연구원의 빙해수조팀을 필두로 하는 국내연구진에 의해 2010년 과 2011년 북극 척치해, 2012년 남극 아문젠해에서 세 번에 걸쳐 Araon의 쇄빙성능 확인을 위한 속도 시운전을 수행한바 있다. 러시아 쇄빙연구팀 1회와 국내연구진에 의한 3회의 실험은 빙판의 크기와 빙판의 두께 및 강도 등이 달랐으며, 이런 이유로 그 결과를 직접적으로 비교하기에는 어

려움이 있다.

서로 다른 해빙조건에서 실험한 결과를 비교하기 위해서는 각 조건을 보정한 후 그 결과를 비교하게 되는데, Lee et al.(2011)은 ITTC(Ice towing tank committee)와 HSVA(Hamburgische schiffbau - versuchs anstalt)에서 제안하는 경험식을 사용하여 모형시험과 실선결과를 비교한 바 있다. 본 연구에서는 AARI가 사용하는 경험식을 사용하여 그 강도와 엔진출력을 같게 놓은 상태에서 두께에 따른 선속을 시험빙판의 크기에 따라 비교함으로써 쇄빙 시 선속의 감소추이를 확인하였다. 시험빙판 크기에 따른 구분과 명칭은 Table 1와 같이 WMO(World metereological organization) 코드를 따랐다. 이 구분에 따르면 2010년 남극항해에서는 Vast floe, 2010과 2011년 북극항해에서는 Medium floe,

Received 27 November 2013, revised 11 December 2013, accepted 13 February 2014

Corresponding author Hyun Soo Kim: +82-032-870-2172, hyunsookim@inhac.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2012 in Daegu

Table 1 Classification of form of ice

Form of Ice	Size of floes	WMO code
Small ice cake brash ice	< 2m	1
Ice cake	< 20m	2
Small floe	20~100m	3
Medium floe	100~500m	4
Big floe	500~2,000m	5
Vast floe	2~10 km	6
Giant floe	> 10 km	7

2012년 남극항해에서는 Big floe에서 그 시험이 수행 되었다고 구분이 가능하다. 각 크기에 따른 쇄빙 시의 속도와 시험 빙판에 대한 특성은 본문에서 자세히 언급하도록 하겠다.

2. 실해역 실선 계측

Araon은 2009년 건조를 마친 후 2010년 1월 남극해를 시작으로 매년 남극과 북극을 오가며 극지연구를 수행하고 있는 국내 유일의 쇄빙연구선으로서 주요 제원은 아래 Table 2와 같다.

2.1 2010년 1월 남극해 실해역 실선계측

Araon은 2010년 1월 남극해에서 러시아 쇄빙선연구팀의 도움으로 첫 쇄빙성능시험을 수행 하였다. 러시아 쇄빙선연구팀은 쇄빙시험을 수행하기 전 시험을 하기 위해 선정된 얼음판에 내려 해빙의 두께, 염도, 밀도와 같은 해빙의 물성치를 계측하였다. Fig 1은 핸드드릴을 이용하여 시험을 수행할 빙판의 코어를 채취하는 모습이다.

이 시험에서 수행된 빙판의 크기는 약 2.5km 내외되는 빙판으로서 WMO 분류에 따르면 Code 6에 해당하는 Vast floe 이

Table 2 Principal Dimensions of the Araon

Item	Dimension
LOA (m)	111
LBP (m)	95
Breadth (m)	19
Depth (m)	9.9
Design Draft (m)	6.8
Light Ship Weight (ton)	6,001.4
Displacement (ton)	7,664
Gross Tonnage (ton)	7487
Design Speed (m/s)	6.17
Cruising Range (N.M)	20,000
Complement	Crew 25, Scientist 60
Design velocity (m/s) (Level ice thickness = 1 m)	1.54
Flexural strength = 630 kPa	



Fig. 1 Sampling of Ice cores by a hand tubular drill

다. Fig 2와 같이 채취된 해빙의 깊이 방향으로 온도를 계측하고, 온도를 계측한 지점을 중심으로 밀도와 염도를 계측한다. 계측한 해빙의 물성치를 Timco and O'Brien(1994)가 제안하는 식 (1)에 대입하여 해빙의 굽힘강도를 추정한다. 시험 해빙판에서 추정된 굽힘강도의 평균을 쇄빙성능 해석에 사용하였다.

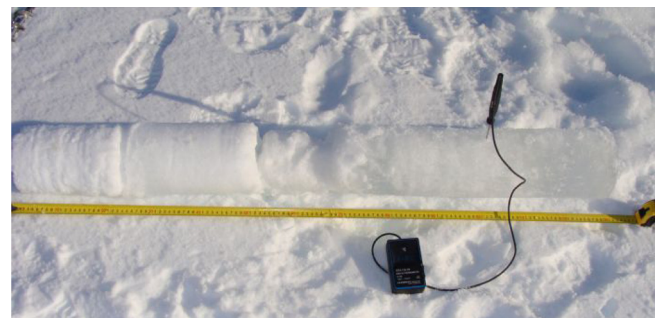


Fig. 2 Ice temperature and the thickness measured

$$\sigma_f = 1.76 \cdot e^{-5.88\sqrt{v_b}} \tag{1}$$

여기서

σ_f : Flexural ice strength, MPa

v_b : Relative volume of the liquid phase calculated by mean of dependence

S_i : Ice temperature, ‰

T_i : Ice temperature, °C

ρ : Ice density, mg/cm³

$$F_1(T_i) = -4.732 - 22.45 T_i - 0.6397 T_i^2 - 0.01074 T_i^3$$

$$(-2^\circ\text{C} \geq T_i \geq -22.9^\circ\text{C})$$



Fig. 3 Ice thickness measurement

Table 3 Average value for Ice breaking performance test (2010, Jan.)

Speed (m/s)	Propulsion Power (MW)	Ice Thickness (m)	Snow Thickness (m)
0.87	7.85	0.78	0.25
0.60	9.60	0.94	0.29

Fig. 3은 Auger drill을 이용하여 실제 해빙의 두께를 측정한 사진이다. 쇄빙이 진행될 방향 주변으로 두께를 계측하여 그 평균값을 쇄빙성능시험에 사용하였다. 2010년 남극해 쇄빙성능시험은 총 2개의 얼음판에 대하여 수행하였으며, 그 얼음판의 굽힘강도와 두께, 쇄빙시의 선속, 엔진 출력 등은 모두 평균값을 사용하여 해석하였다. 두 번의 쇄빙 성능시험에 사용된 평균값들은 Table 3과 같다.

AARI에서는 눈의 밀도가 0.35g/cm²보다 크면 쇄빙성능해석을 할 때 사용하는 두께는 해빙두께와 눈 두께를 더하여 사용한다. Araon의 쇄빙시 설계속도와의 비교를 위하여 두 번의 쇄빙 성능시험에서 계측된 값들을 10MW에 630kPa로 보정을 하여 설계속도와의 비교를 시도하였다. 두 번의 시험에서 각각 7.85MW와 9.6MW의 출력을 사용하였으나, 이를 식 (2)를 이용하여 10MW일 때의 속도로 보정하고 눈 두께를 보정하면 Table 4와 같다.

$$V_{10MW} = V_m + 1.2 \times (10 - Power_m) \tag{2}$$

여기서

- V_{10MW} : correction ship velocity
- V_m : measured ship velocity
- $Power_m$: measured engine power

Table 4 Average value correction to engine power 10MW (2010, Jan)

Speed (m/s)	Propulsion Power (MW)	Equivalent ice thickness (m)
2.17	10	1.03
0.85	10	1.23

Table 5 Corrected experimental data for the flexural strength of 630kPa and 10MW engine power (2010, Jan.)

Speed (m/s)	Propulsion Power (MW)	Equivalent ice thickness (m)
2.17	10	0.86
0.85	10	1.02

Ionov(1988)는 같은 선속에서 굽힘강도 300kPa에서 630kPa로 보정하여 해석 할 때에는 해빙의 두께를 17% 감소시키는 방법으로 굽힘강도 보정을 하였는데 이러한 방법을 사용하여 Araon호의 시운전 상태와 같은 조건으로 보정한 최종 결과는 Table 5에 정리하였다.

Table 5에 의하면 Araon은 Vast floe에서 1.02m 두께에 630kPa의 굽힘강도를 가지는 해빙을 10MW의 출력을 사용하면 0.83 m/s의 속도로 쇄빙을 할 수 있고, 0.86m 두께에 630kPa의 굽힘강도를 가지는 해빙을 10MW의 출력을 사용하면 2.17m/s의 속도로 쇄빙을 할 수 있다. 이 값은 아라온의 공식 성능과는 약간의 차이가 있으나, 공식 성능에서의 값은 쇄빙선박의 흘수가 보정되어 있는 값으로 본 연구에서는 흘수에 대한 보정은 제외되어 있다.

2.2 2011년 북극 척치해 실패역 실선계측

2011년 8월 북극 척치해에서 국내 연구진에 의하여 쇄빙성능 시험이 수행되었다. 남극해와는 다르게 북극해의 해빙은 표면에 Melting pond가 많이 있고 눈이 거의 쌓이지 않은 상태였다. Fig 4는 첫 번째 쇄빙성능시험이 수행된 빙판으로서 그 크기는 약 200m 이내로 WMO 분류에 따르면 정도로 Code 4에 해당하는 Medium floe이다.



Fig. 4 The first sea trial test ice floe (August of 2011)



Fig. 5 Ice coring by engine core

2011년 실해역 실선성능시험 국내연구진은 쇄빙선의 쇄빙 진행 방향을 따라서 해빙의 두께와 해빙의 물성치를 계측하고, 계측된 값들의 평균값을 이용하여 Araon의 쇄빙성능을 평가하였다. Fig 5는 북극 척치해 부근 해빙의 물리적 특성을 계측을 위한 해빙시추 작업이다. 쇄빙선의 진행방향을 미리 정하고 그 방향으로 시추를 할 지점을 표시한 후에 그 지점에서 해빙을 시추한다.

계측된 코어의 깊이방향별 온도, 밀도, 염도를 식 (1)에 대입하여 해빙의 굽힘강도를 추정하였다. 해빙의 두께 또한 Auger drill을 이용하여 그 두께를 직접 계측하였다. 자세한 계측 방법은 Lee et al.(2010)와 Kim et al.(2011) 논문에서 상세히 설명되어 있다. 이렇게 계측된 굽힘강도와 두께는 그 평균값을 사용하여 실선의 성능해석에 사용하며 계측된 최종 결과는 Table 6에 정리하였다.

계측된 값을 엔진출력 10MW에 굽힘강도 630kPa로 두께와 선속을 보정하게 되면 Table 7과 같다. Table 7에 의하면 Araon 호는 Medium floe 중 1.11m 두께에서 7.01m/s의 속도로 쇄빙을 할 수 있고, 1.65m 두께에서 6.20m/s의 속도로 쇄빙을 할수 있다. 이러한 결과는 과도한 쇄빙 성능을 보여 주는데 그 이

Table 6 Average value for Ice breaking performance test (2011, August)

Speed (m/s)	Propulsion Power (MW)	Ice Thickness (m)
2.78	3	1.34
2.31	3.7	1.99

Table 7 Corrected experimental data for the flexural strength of 630kPa and 10MW engine power (2011, August)

Speed (m/s)	Propulsion Power (MW)	Ice Thickness (m)
7.10	10	1.11
6.02	10	1.65

유는 시험 대상이 된 빙판이 너무 작고, 빙판의 끝단이 구속이 되지 않고 밀려나서 연속 쇄빙이 이루어지지 않아 생긴 현상으로 분석된다.

2.3 2012년 남극 아문젠해 실해역 실선계측

2012년 2월 남극 아문젠해에서도 국내 연구진에 의하여 쇄빙 성능 시험이 수행되었다. 남극 아문젠해 해빙의 굽힘강도는 북극 척치해의 굽힘강도와 비슷하였다. 그러나 밀도 높은 눈이 높게 쌓여 있어 눈두께에 대한 보정이 필요하다. Fig 6을 2012년에 남극 아문젠해에서 두 번째 수행된 빙판이다. 북극해의 얼음과 다르게 표면에 Melting pond가 없고, 대체적으로 매끈한 표면을 가지고 있다.

2012년 남극 항해에서는 두 개의 얼음판에서 쇄빙성능 시험을 수행하였으며, 하나의 얼음판에서 엔진출력에 변화를 줘서 다양한 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 각 해빙의 두께와 강도 측정은 2011년 북극 척치해 실해역 성능시험과 같은 방법으로 이뤄졌으며, 추정된 굽힘강도와 계측된 해빙의 두께, 선속, 엔진출력 등은 평균값을 사용하였다. 해빙의 크기는 약 1km 이였으며, WMO 분류에 따르면 code 5에 해당하는 big floe이다.

아래 Table 8은 시험 해석에 사용된 평균값들이다. 평균 두께는 해빙의 두께에 눈 두께만을 보정한 값이며, 엔진출력은 변경 구간별 평균값이다. 속도 또한 변경 구간별 평균을 사용하고 있으며, 각 구간에 대한 자세한 내용은 Kim et al.(2012) 논문에서 자세히 설명되어 있다.

2012년에 이뤄진 실해역 데이터들을 10MW의 엔진출력에 굽



Fig. 6 Second sea trial test ice floe (Feb of 2012)

Table 8 Average value for Ice breaking performance test (2012, Feb)

Speed (m/s)	Propulsion Power (MW)	Equivalent ice thickness (m)
1.51	8.02	1.45
1.24	6.10	0.99
1.55	5.09	0.93
0.44	6.95	1.98
0.99	7.95	1.92

Table 9 corrected experimental data for the flexural strength of 630kPa and 10MW engine power (2012, Feb)

Speed (m/s)	Propulsion Power (MW)	Equivalent ice thickness (m)
2.73	10	1.21
3.65	10	0.82
4.58	10	0.77
2.31	10	1.64
2.26	10	1.6

힘강도 630kPa로 보정하게 되면 Table 9와 같다. 즉, Araon은 두께가 1.21m인 Big floe에서 2.73 m/s의 속도로 쇄빙을 할 수 있다. 이 결과도 공식적인 Araon호의 성능으로 알려진 1.54m/s 보다는 큰 속도 성능을 보여주고 있는데 이 역시 빙상환경이 Code 5인 Big floe로 Code 6보다는 작고, 빙판 주변의 구속 조건이 견고하지 못했으며, Table 8에서 보는 바와 같이 빙판의 얼음 두께의 편차가 커서 얻어진 결과로 분석된다.

3. 해석 결과의 분석

2010년, 2011년, 2012년 남북극해에서 같은 실험방법으로 Araon에 대하여 쇄빙성능시험을 수행하였다. 각기 다른 빙판에서 수행된 실선 시험데이터를 엔진출력과 굽힘강도가 같도록 보정하여 두께에 따른 선속을 비교한 결과가 Fig 7에 정리되었다. 비슷한 두께의 빙판이라도 Ice floe의 크기가 작아지면 쇄빙시 선속 또한 크게 증가함을 알 수 있었다.

이와 같은 현상의 원인으로 세 번의 실선 시운전을 통해 관찰한 결과에 의하면 빙판에서의 쇄빙현상, 빙판 주위의 구속조건, 빙판의 중량과 선박의 중량차이에 의한 빙판의 운동, 빙 두께의

균질도 등을 들 수 있다.

쇄빙현상은 빙판이 작은 경우 선수가 빙판에 진입할 때에는 굽힘에 의한 쇄빙이 되지만 선수부가 어느 정도 진입하면 빙판이 쇄빙선 진행방향으로 혹은 일정한 각도를 가지고 불규칙적으로 갈라져 연속쇄빙이 일어나지 못하여, 굽힘파괴에 의한 쇄빙저항이 없어지고 해빙에 의한 부력저항과 마찰저항이 선체에 미치는 대부분의 저항이 되어 저항이 감소하여 속도가 빨라지는 경향을 보였다. 실험역 시운전 결과에서도 같은 빙 두께와 엔진출력 조건에서 속도를 비교해 보면 굽힘파괴에 의한 연속쇄빙이 일어난 Big floe(WMO code 5) 와 Vast floe(WMO code 6)에서 결과가 쇄빙 현상이 부분적으로 발생한 Small floe에서 속도가 큰 것을 확인하였다.

빙판의 구속조건도 빙해역 시운전에서 대상 빙판의 결정에 중요한 요소의 하나로 Fig. 1과 같이 구속이 견고한 남극의 대형 빙판은 시험 기간동안 빙판이 밀리지 않았으나 빙판 주변의 구속이 견고하지 않은 Fig. 4, 6의 경우에는 빙판이 밀리는 것을 발견하였고, 이것이 Fig. 7과 같이 성능 계측과도 연관이 있는 것을 확인하였다.

빙판의 중량과 선박의 중량차이에 의한 빙판의 운동관점에서 1m 빙두께, 1km × 0.8km 크기의 Big floe 경우에는 빙판의 질량이 Araon호의 질량의 1.2배 정도로 비슷한 질량을 가진 두 물체가 운동을 하는 상황으로 빙판의 Moment 중심에 따라 운동하는 현상이 관찰되었다. 따라서 빙판의 크기의 결정에서 전체 빙판의 질량 혹은 중량도 중요한 고려 요소가 되어야 함을 알 수 있었다. 얼음 두께의 균질도도 연속 쇄빙에 많은 영향을 주는 것을 Table 9에서 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 실험역에서 수행된 3회의 실험역 속도 성능 계측 결과를 사용하여 빙판의 크기가 성능 계측에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 그 결과에 따르면 빙판의 크기가 Fig. 7과 같이 속도 성능에 많은 영향을 미치는 것을 확인하였고, 그 원인으로 빙판 크기의 차이에 따른 빙판 중량의 차이가 주는 상대 운동 및 쇄빙현상의 차이, 빙판 주위의 구속조건, 빙판 두께의 균질도의 차이에 의한 계측 신뢰도 문제 등을 제시하였다. 본 논문은 실험역 시운전시 가장 첫 단계이면서 가장 중요한 대상 빙판의 선정에 활용되기를 기대하며 향후 모형수조에 Pack Ice 실험 시 모형빙 조각의 크기에 따른 저항특성실험을 수행하여 비교하면, 빙판의 크기가 쇄빙저항에 미치는 영향을 좀 더 정확히 파악 할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “빙해선박의 극지항로 안전운항기술 및 극저온 빙성능 시험평가 기법 개발 (과제번호 10033640)” 중 1세부 및 2세부과제의 연구비 지원으로 수행된 결과입니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

Full Power(10MW) & Flexural Strength(630kPa)

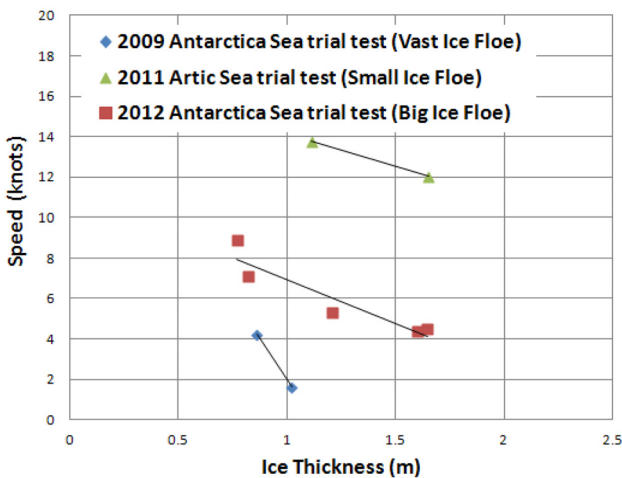


Fig. 7 Comparative of ship speed to ice thickness and Ice floe size at 10MW engine and 630kPa Flexural Strength

References

- Ionov, B.P., 1988. Ice resistance and its components. L.:Gidrometeoizdat.
- Kim, H.S., Lee, C.-J., Jeong, S.-Y., Choi, K., 2011. A Study on the Speed Sea Trial on the Ice Field using Ice Breaking Research Vessel "Araon". Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 48(5), 420-424.
- Kim, H.S., Lee, C.-J., Choi, G.-G., Lee, J.M., Choi, K., Ha, J.S., 2012. Speed Trial analysis of Korean ice Breaking Research Vessel 'Araon' on the Big Floe. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 49(6), 478-483.
- Lee, C.-J., Jeong, S.-Y., Ahn, D.-S., Kim, H.-S., 2010. The Ice Field Tests of Araon in Arctic Ocean. Proceeding of the society of Naval Architects of Korea, 2010. Autumn, 134-140.
- Lee, S.-K., Kim, M.-C., Lee, W.-J., Kim, H.-S., Lee, C.-J., 2011. Study on the Correction Method of Ice Strength and Thickness Applied to the Sea Trial Condition Based on the Ice Model Test Results. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 48(5), 457-464.
- Timco, G.W., O'Brien, S., 1994. Flexural Strength Equation for Sea Ice. Cold Regions Science and Technology, 22, 285-298.