

합성얼음을 이용한 얼음의 두께와 수선면각 변화에 따른 쇄빙상선 저항특성 연구

신병철¹·김문찬^{1,†}·이승호²·이승기¹
부산대학교 조선해양공학과¹
삼성중공업 해양설계팀²

Study on Resistance Performance of Icebreaking Cargo Vessel According to Variation of Thickness and Waterline Angle by Using Synthetic Ice

Byung-Chul Shin¹·Moon-Chan Kim^{1,†}·Seung-Ho Lee²·Seung-Ki Lee¹
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University¹
Offshore Machinery Design1, Samsung Heavy Industries Co. Ltd²

Abstract

The present paper deals with characteristics of resistance performance according to the variation of synthetic ice thickness and hull form. The resistance test has been conducted with pack ice condition in Pusan National University towing tank. Waterline angle has been chosen as a main parameter for the variation of hull form characteristics, which is the most important factor especially in icebreaking cargo vessel. The serial comparisons of resistance test have been done with the variation of hull form parameter as well as with the different thickness of synthetic ice. The different trend of resistance performances with increasing of waterline angle has been shown at each synthetic ice thickness. The present test results is expected to be confirmed by comparing the test results in ice tank in the near future.

Keywords : Towing tank(예인수조), Icebreaking cargo vessel(쇄빙상선), Synthetic ice(합성얼음), waterline angle(수선면각), Thickness variation(두께변화)

1. 서론

최근 러시아의 방대한 지하자원 개발 및 이에 따른 수출입 증가와 북극항로 개발로 북극 및 북극 주변 지역에 대한 관심이 점차 증가하고 있다. 이에 따라 세계 여러 빙수조를 중심으로 활발한 연구가 이루어지고 있으며 빙수조 운영이 용이하지 않은 학교의 경우 인력 양성 및 관련 연구를 위해 합성얼음(Synthetic ice)을 이용하여 빙 관련 연구를 수행하고 있다. 선행연구를 통하여 합성얼음의 밀도를 냉동얼음과 잘 맞출 경우 팩아이스(Pack ice) 상태의 경우 합성얼음과 냉동얼음 간의 저항특성이 정성적, 정량적으로 큰 차이가 없음을 확인 하였다(Lim, 2008). 이러한 연구를 토대로 실제로 팩아이스 상태에서 운항을 많이 하는 쇄빙상선에 대한 연구를 시도하였다. 선행 연구에서 쇄빙상선에서 중요한 선형요소 중 하나인 선수각을 바꿔가며 합성얼음과 냉동얼음간의 저항특성을 확인해 보았으며 그 결과 그 값이 상당히 잘 일치 하는 것을 확인하였다(Lee et al., 2010; Kim et al., 2009). 이와 같은 결과를 토대로 본 연구에서는 쇄빙선

및 쇄빙상선의 중요한 선형 요소중의 하나인 수선면각을 변화시켜 저항 특성을 연구하였으며 합성얼음의 두께와 얼음의 집중도 변화에 따른 최적 선형(수선면각) 간의 상관관계를 확인하기 위한 연구를 수행하였다.

합성얼음을 이용하여 팩아이스 상태에서 선형요소를 변화한 3개의 모형선을 제작하여 저항특성을 확인하였다. 모형선은 수선면각(Waterline angle) $\alpha=50^\circ$ 를 기준으로 하여 각각 30° , 40° 로 변화시켜 제작하였으며 합성얼음은 왁스타입(Wax type)으로 얼음의 집중도 조절에 용이하도록 160cm^2 와 110.5cm^2 의 두 가지 크기로 제작하였다. 또한 합성얼음의 두께변화에 따른 저항특성을 확인하기 위해 얼음의 두께를 20mm와 40mm로 변화시켜 실험을 수행하였다.

2. 시험 준비

본 연구를 위한 실험은 부산대학교 예인수조에서 실시하였다. 수조의 제원은 총 길이 100m, 폭 8m, 깊이 3.5m(최대깊이 8m),

최고예인속도 7m/s 이며 Fig. 1은 예인수조의 모습이다. 수조의 전 영역에 합성얼음을 띄워 실험하는 것은 비효율적이기 때문에 길이 25m, 폭 3.75m의 가이드를 쳐놓고 합성얼음을 채워서 실험을 수행하였다. 가이드 폭은 합성얼음이 가이드에 부딪혀 저항 값에 영향을 주는 blockage effect를 고려하여 모형선 폭의 6배로 하였다.(Aboulazm, 1989). Fig. 2는 실험에 앞서 가이드를 치고 합성얼음을 채워놓은 모습이다.



Fig. 1 The facilities of PNU towing tank

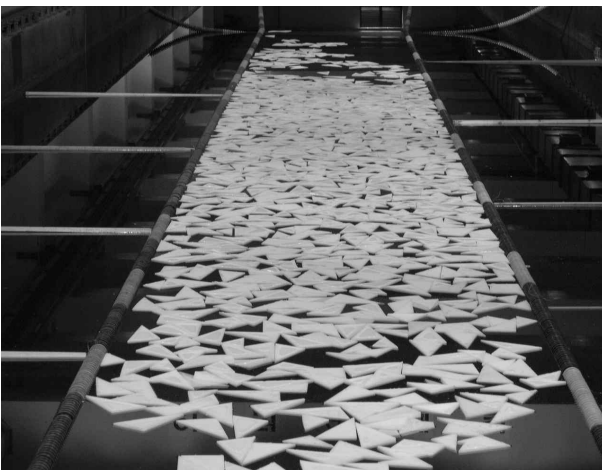


Fig. 2 Supporting as guide at general towing tank

세계 각국의 선급에선 극지에서의 선박운항에 관한 규정을 명시하고 있으며 본 연구에서는 러시아 선급(RMRS: Russian Maritime Register of Shipping)규정을 적용하였다. 러시아 선급 규정은 총 9단계의 등급으로 나뉘어져 있으며 각 등급에선 계절에 따른 쇄빙선 및 쇄빙상선이 운항 가능한 얼음의 두께를 정의하고 있다. 이중 LU7단계를 적용하여 이에 맞는 모형선 및 합성얼음을 제작하였다. Table 1은 러시아 선급에서 규정하고 있는 얼음의 두께를 보여준다.

선형설계는 부산대학교에서 쇄빙상선 선형에 대한 최적화를 수행하고 최적화된 선종에 선체형상변수인 수선면각(α)을 변화시켜 설계하였다. 시험을 위한 모형선의 축척비는 48:1, 길이는

5m, 폭은 0.625m이다. 선수각 25°, 수선면각 50°를 기준으로 선수각은 고정시키고 수선면각을 각각 30°, 40°로 변화시켜 제작하였으며 하나의 선미에 선수를 교체하여 사용할 수 있는 선수부리형으로 제작하였다. Fig. 3에서 수선면각을 변화시킨 선수부와 수선면각을 보여준다. 수선면각은 외판과 선수재가 만나는 지점에서 만재흡수선의 접선각을 말하며 이는 깨어진 빙판을 선체 좌우측으로 깨끗이 제거하는데 기인하는 선형요소이다.

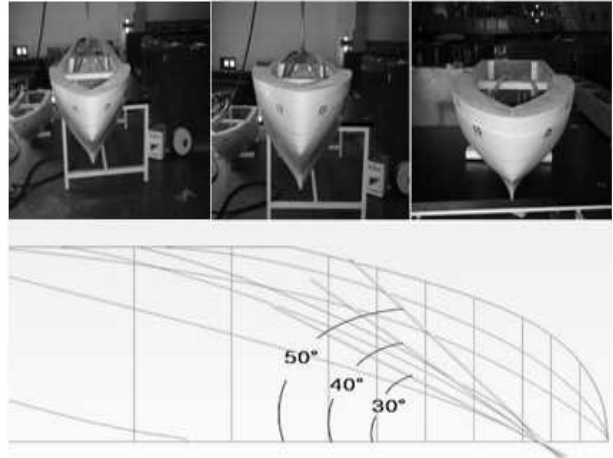


Fig. 3 Model ships of Icebreaking Cargo Vessel

Table 1 Ice class rule of RMRS

Ice class	Icebreaker escort			Independent navigation		
	Typical speed	winter-spring	summer-fall	Typical speed	winter-spring	summer-fall
		Typical ice thickness			Typical ice thickness	
Arctic ice class						
LU9	6	3.4+	3.2+	12	3.5	4.0
LU8	5	2.0-3.4	3.2+	10	2.1	3.1
LU7	4	1.2-2.0	1.7-3.2	8	1.4	1.7
LU6	4	0.9-1.2	1.2-1.7	8	1.1	1.3
LU5	4	0.7-0.9	0.7-1.2	8	0.8	1.0
LU4	3	0-0.7	0-1.0	8	0.6	0.8
Non arctic ice class						
LU3	3	0.65		5	0.70	
LU2	3	0.50		5	0.55	
LU1	3	0.35		5	0.40	

3. 합성 얼음

합성얼음에 대한 연구는 1960년대에 본격적으로 시작되어 많은 사람들에게 의해 연구가 되었으며, 그 종류 또한 Tryde-ice, MOD-ice, SYG-ice, DUT-1 과 같이 다양하다. Tryde-ice는 1975년 Tryde에 의해 만들어 졌으며 소석고와 소금, 붕사를 섞어 만들었다. MOD-ice는 1984년 Schultz 와 Free에 의해 만들어 졌으며 폴리에틸렌, 식물성기름, 스테아린산 등을 섞어 만들었다. SYG-ice는 Beltaos에 의해 만들어 졌으며 PVC 합성수지와 미세한 유리포말 등을 섞어서 만들었다. DUT-1은 Li와 Wang에 의해 만들어졌으며 SYG-ice로부터 아이디어를 착안하여 제작되었다. 폴리프로필렌과 시멘트, 물을 섞어 만들었으며 다른 합성얼음에 비해 굽힘강도와 탄성계수가 좋기 때문에 굽힘파손 실험에 적당한 합성얼음이다. (Zufelt et al., 1996)

본 연구를 위한 실험에서 사용한 합성얼음은 파라핀 왁스 (Paraffin wax)를 이용하여 제작을 하였다. 집중도를 맞추기에 용이하도록 삼각형 모양으로 제작하였으며, 160cm²와 110.5cm²의 서로 다른 크기로 제작이 되었다. 또한 러시아 선급 LU7 등급에서 규정하고 있는 얼음의 두께를 고려하여 각각 40mm와 20 mm로 제작하였다. Table 2와 Fig. 4는 본 실험에서 사용된 합성 얼음의 치수와 형상을 보여준다.

Table 2 Dimensions of Synthetic ice

	Synthetic ice
Shape	Right triangle
Thickness (mm)	40, 20
Density (kg/m ³)	870
Friction Coefficient	0.03
Area (cm ²)	160, 110.5

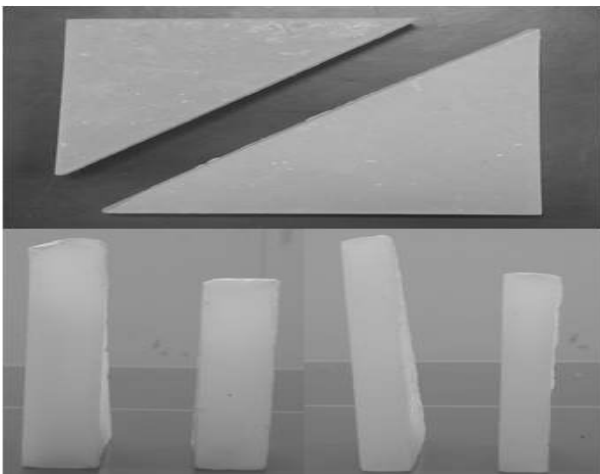


Fig. 4 Synthetic ice of PNU

4. 모형실험

모형실험은 부산대학교 예인수조에서 수행하였다. 합성얼음은 각각 90%, 80%, 60%로 3개의 집중도로 맞추었으며, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6m/s로 5개의 선속에서 실험을 수행하였다.

4.1 기본이론

쇄빙상선에 작용하는 저항요소에는 얼음을 깨면서 발생하는 쇄빙저항, 깨진 얼음을 좌우로 제거하면서 발생하는 배제저항, 깨진 얼음의 부력에 의해 발생하는 부력저항, 마지막으로 open water에서 발생하는 개수로 저항이 있다 (Kim et al., 2003).

$$R_T = R_{br} + R_c + R_b + R_{ow}$$

- R_{br} : 쇄빙저항 (*breaking resistance*)
- R_c : 배제저항 (*clearing resistance*)
- R_b : 부력저항 (*buoyancy resistance*)
- R_{ow} : 개수로저항 (*open water resistance*)

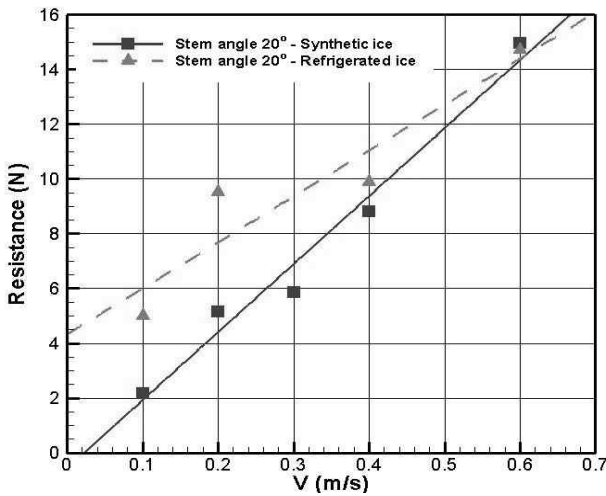
4.2 합성얼음과 냉동얼음간의 저항특성 검증

합성얼음을 사용한 팩아이스 실험의 가능성을 확인하고 합성 얼음과 냉동얼음간의 저항특성에 대한 검증을 위해 합성얼음과 냉동얼음을 사용하였을 때의 저항시험 결과 값을 비교해 보았다 (Kim et al., 2009). 20mm두께의 얼음에서 선수각과 얼음의 집중도를 바꿔가며 실험을 수행하였으며 모든 집중도에서 합성얼음과 냉동얼음 간의 저항 특성이 일치함을 확인 하였다. Fig. 5는 선수각 20°일 때 얼음의 집중도에 따른 합성얼음과 냉동얼음에서의 저항값을 비교해 놓은 그래프이다. 이러한 검증 과정을 통해 합성얼음을 사용한 팩아이스 실험의 가능성을 확인하였으며 이 결과를 바탕으로 본 연구를 수행하였다.

4.3 얼음의 두께가 40mm 일 때의 저항특성

합성얼음의 두께가 40mm일 때 3개의 집중도에서 수선면각에 따른 저항값을 비교해 보았으며 그 결과 값은 Fig. 6~8과 같다. 수선면각 30° 일 때의 저항값이 가장 작게 나왔으며, 50° 일 때의 저항 값이 가장 크게 나왔다. 실험 데이터를 분석해 본 결과 높은 집중도 90%에선 수선면각 30° 와 40° 일 때의 저항값 차이가 거의 나지 않았으며 낮은 집중도 60%에선 40° 와 50° 일 때의 저항값 차이가 거의 나지 않음을 알 수 있다. 이러한 현상은 동영상 판독을 통해서 선체 주위의 합성얼음의 통과 속도를 통해 확인 할 수 있다. Fig. 9~11은 수중카메라를 사용하여 설계속도 0.4m/s일 때 선수부에서 팩아이스의 유동을 관찰한 사진이다.

앞서 결과분석에서 언급했듯이 집중도 90%에서 수선면각이 작아짐에 따라 얼음을 배제하는 성능이 좋아 질 것으로 예상되었으나 30° 와 40°의 저항 차이가 거의 나지 않았다.



(1) stem angle 20°, concentration 90%

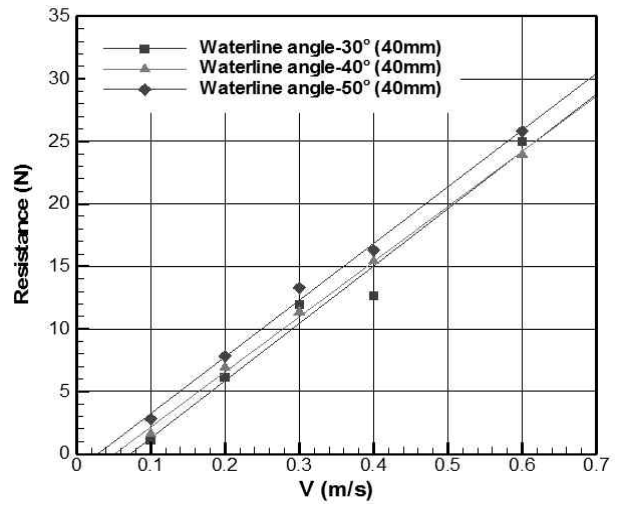
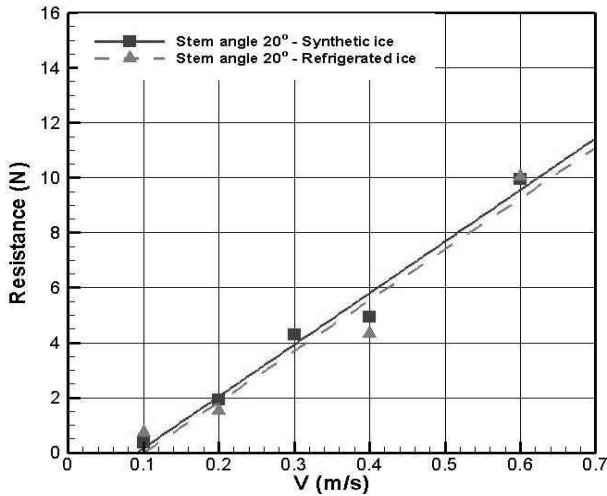


Fig. 6 Comparison of resistance according to the variation of waterline angle (Synthetic ice thickness 40mm, 90%)



(2) stem angle 20°, concentration 80%

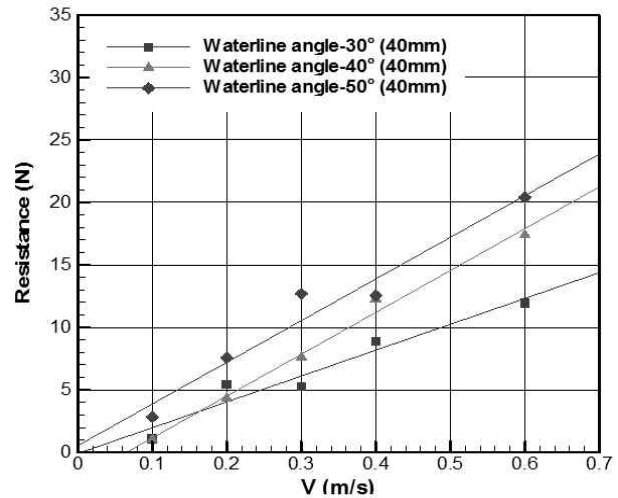
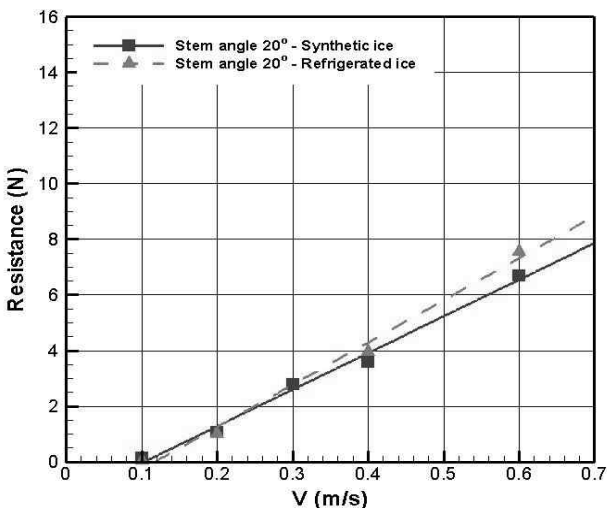


Fig. 7 Comparison of resistance according to the variation of waterline angle (Synthetic ice thickness 40mm, 80%)



(3) stem angle 20°, concentration 60%

Fig. 5 Comparison of pack ice resistance on stem angle 20°

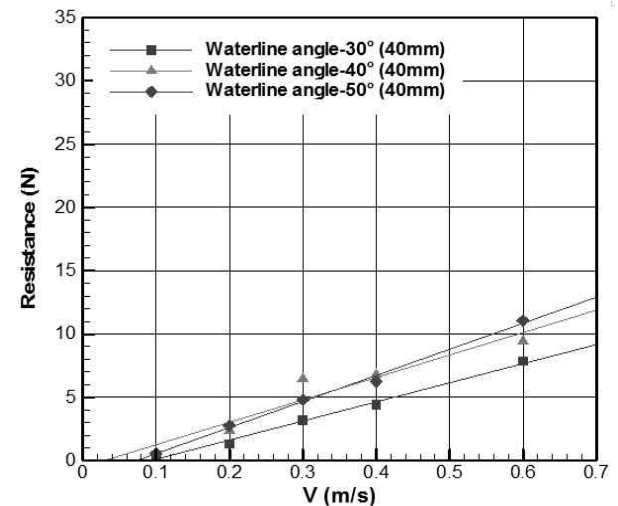


Fig. 8 Comparison of resistance according to the variation of waterline angle (Synthetic ice thickness 40mm, 60%)

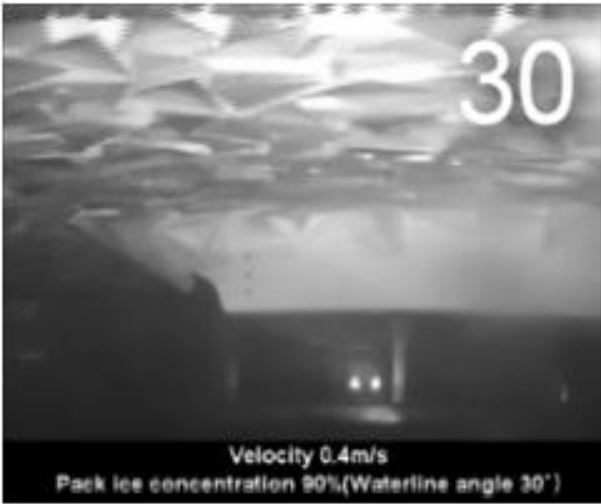


Fig. 9 Under water view of resistance test with 40mm pack ice (0.4m/s, 90%, $\alpha=30^\circ$)

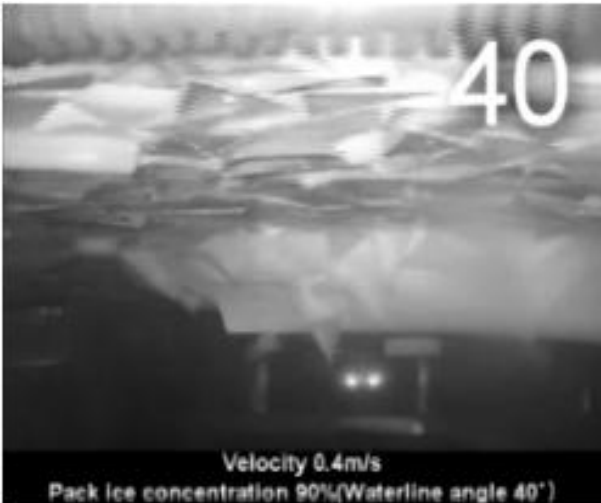


Fig. 10 Under water view of resistance test with 40mm pack ice (0.4m/s, 90%, $\alpha=40^\circ$)

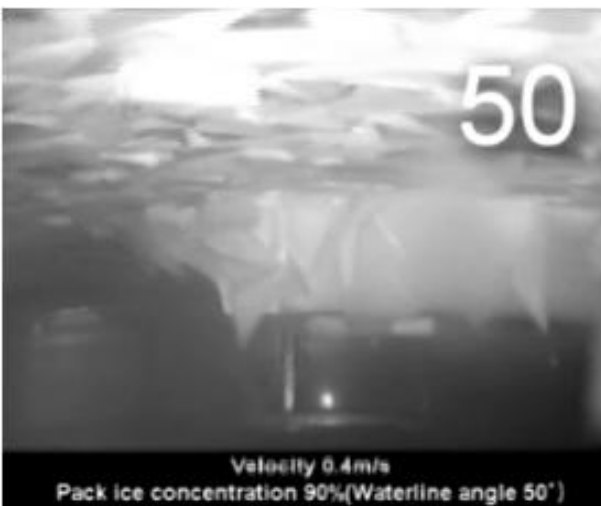


Fig. 11 Under water view of resistance test with 40mm pack ice (0.4m/s, 90%, $\alpha=50^\circ$)

그 이유는 수선면각이 작아짐에 따라 선수 경사부의 침수표면적이 넓어져 합성얼음과 선체의 표면간의 마찰저항이 증가해 저항차이가 거의 나지 않는 것으로 생각된다. 집중도 60%에서는 합성얼음의 수가 줄어들면서 전체적인 얼음의 집중도는 맞출 수 있지만 국부적인 얼음의 집중도를 맞추는데 어려움이 있었다. 그 결과 40°와 50°의 저항값의 차이가 거의 나지 않았으며 일부 속도에서 기존의 결과와 조금은 다른 결과값을 얻었으나 전체적인 경향을 봤을 때 기존과 동일한 결과 값을 나타냈다.

수중카메라를 통한 팩아이스의 유동을 관찰한 결과, 수선면각 30°의 경우 합성얼음이 선측을 통해 가장 잘 빠져나가는 것을 확인할 수 있었고 그 결과 저항능력이 가장 우수한 것으로 판단된다. 수선면각 40°의 경우 선측과 선저부로 유입되는 얼음이 자연스럽게 빠져나가지 못하고 정체하는 모습이 자주 보여졌다. 이로 인해 배제저항과 부력저항이 증가한 것으로 생각된다. 수선면각 50°의 경우 많은 양의 얼음이 선측과 선저부로 유입이 되는 것을 볼 수 있고 합성얼음이 서로 겹치는 현상이 관찰 되었다. 이로 인해 부력저항이 증가한 것으로 생각된다.

4.4 얼음의 두께가 20mm 일 때의 저항특성

합성얼음의 두께가 20mm일 때 또한 3개의 집중도에서 수선면각에 따른 저항값을 비교해 보았으며 그 결과 값은 Fig. 12~14과 같다. 얼음의 두께가 20mm일 때의 결과 값은 40mm일 때와 달리 수선면각 40° 일 때의 저항값이 가장 작게 나왔으며, 50°일 때의 저항값이 가장 크게 나왔다. 실험 데이터를 분석해 본 결과 높은 집중도 90%에선 수선면각 30°와 40° 일 때의 저항값의 차이가 거의 나지 않았는데 이는 얼음 두께 40mm때와 마찬가지로 배제저항보다 표면 마찰에 의한 저항이 더 크기 때문인 것으로 생각된다. 낮은 집중도 60%에선 30°와 50° 일 때의 저항값의 차이가 거의 나지 않음을 알 수 있다. Fig. 15~17은 수중카메라를 사용하여 설계속도 0.4 m/s일 때 선수부분에서 팩아이스의 유동을 관찰한 사진이다.

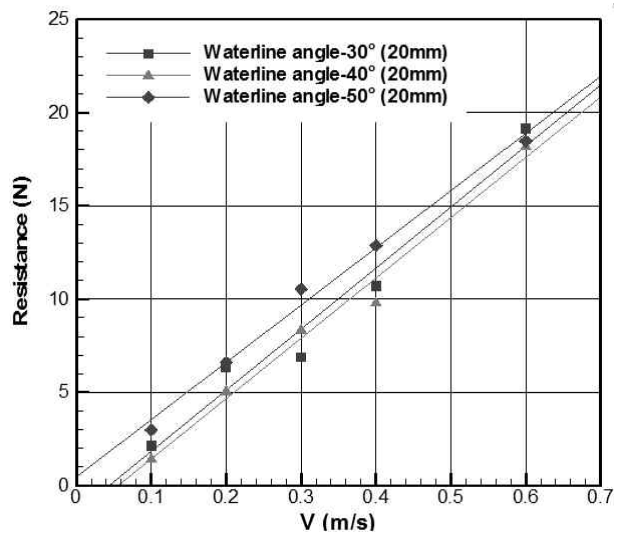


Fig. 12 Comparison of resistance according to the variation of waterline angle (Synthetic ice thickness 20mm, 90%)

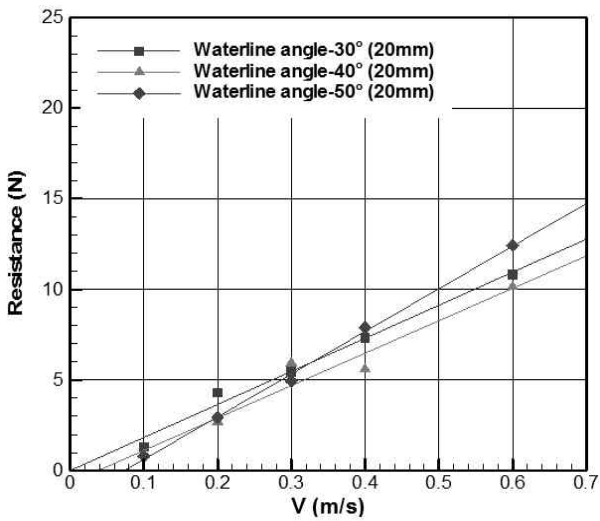


Fig. 13 Comparison of resistance according to the variation of waterline angle (Synthetic ice thickness 20mm, 80%)

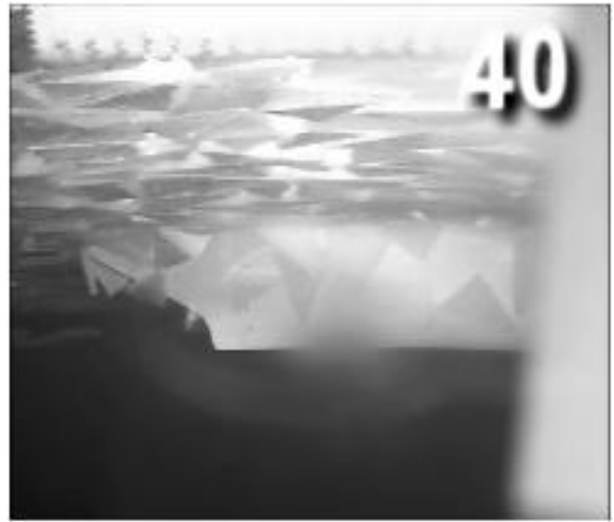


Fig. 16 Under water view of resistance test with 20mm pack ice (0.4 m/s, 90%, $\alpha=40^\circ$)

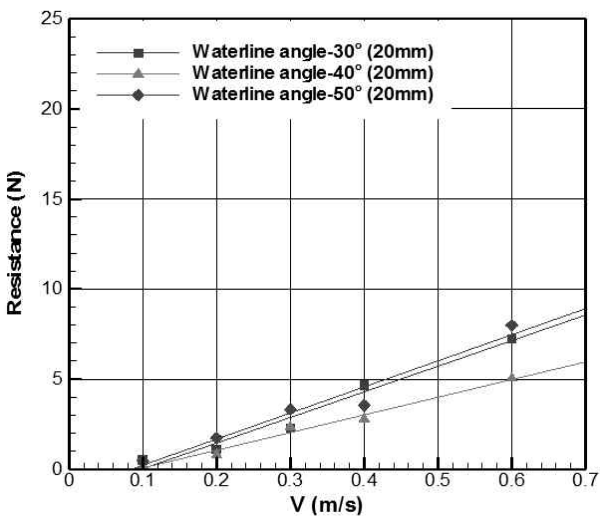


Fig. 14 Comparison of resistance according to the variation of waterline angle (Synthetic ice thickness 20mm, 60%)

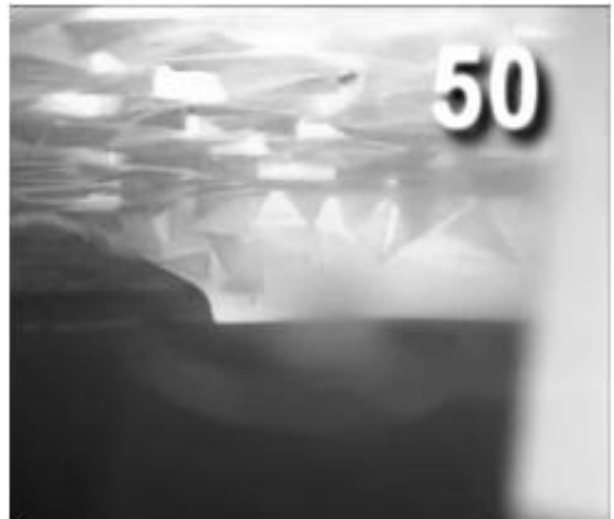


Fig. 17 Under water view of resistance test with 20mm pack ice (0.4m/s, 90%, $\alpha=50^\circ$)



Fig. 15 Under water view of resistance test with 20mm pack ice (0.4 m/s, 90%, $\alpha=30^\circ$)

수선면각 30°의 경우 수선면각이 작아지면서 선수 경사부의 면적이 넓어지고 이로 인해 마찰저항이 증가한 것으로 생각된다. 또한 합성얼음의 두께가 얇아지면서 서로 겹치는 현상이 발생하는데 이로 인해 부력저항이 증가한 것으로 생각된다. 수선면각 50°의 경우 수선면각이 커지면서 배제저항이 증가하고 선수에서 선저로 내려가면서 합성얼음이 쌓여 정체하는 현상이 발생하였는데 이로 인해 부력저항이 증가한 것으로 생각된다. 수선면각 40°의 경우는 합성얼음이 선측과 선저부로 자연스럽게 흘러나갔으며, 선수에 쌓이는 얼음의 양이 가장 적은 것을 확인 할 수 있었다.

4.5 Open water 저항특성

모형선의 수선면각을 변화시켜 실험한 결과 Open water 저항의 차이는 크지 않았다. 이를 통해 수선면각의 변화는 전체 저항에는 큰 영향을 주지 못한다는 것을 알 수 있다. Fig. 18은 Open water 저항값을 나타낸다.

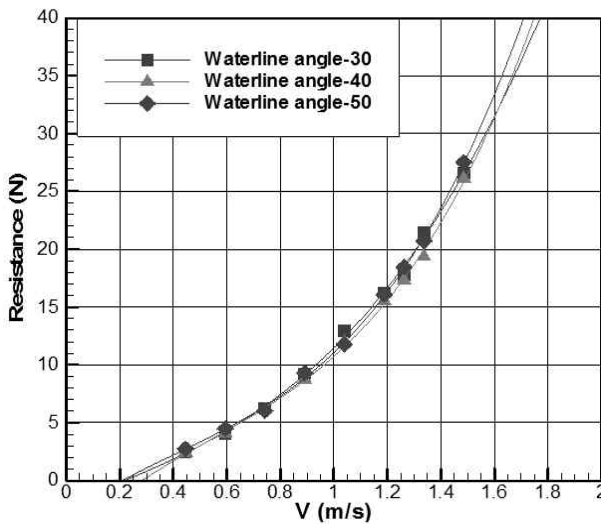


Fig. 18 Comparison of resistance at the open water test

5. 결론

본 연구에서는 팩아이스 상태에서의 쇄빙상선 실험 시 고려되어야 할 중요한 변수인 얼음의 두께와 얼음의 집중도, 수선면각의 관계를 확인하기 위해 합성 얼음을 통한 연구를 수행하였으며 다음은 연구를 통해 도출된 결과이다.

- 합성얼음의 두께에 변화에 따른 저항특성을 알아본 결과 얼음의 두께가 두꺼울수록 저항값이 더 큰 것을 확인 할 수 있었으며 40mm두께의 얼음의 경우 수선면각이 30° 일 때 저항성능이 가장 우수하였으며, 20mm두께의 얼음의 경우 수선면각이 40° 일 때 저항성능이 가장 우수하였다.

- 이러한 결과는 팩아이스들이 두께 변화에 따른 크기 변화에 의해 배제저항과 부력저항 간에 작용하는 힘의 비율의 변화라고 생각할 수 있으며 일반적으로 생각할 수 있는 수선면각이 작을수록 저항이 작게 나타나는 경향에서 벗어날 수 있음을 보여 주었다고 하겠다.

- 이와 같은 결과로 볼 때 선형 최적화는 항로에 따른 빙 두께를 고려하여 결정되어야 하리라 생각된다.

- 수선면각을 변화시켜 open water 실험을 수행한 결과 저항값의 차이는 크지 않았으며 이를 통해 볼 때 빙해역과 open water 해역을 모두 운항하는 쇄빙상선의 경우 open water 해역에서의 저항 절감보다 빙해역에서의 저항 절감을 위한 설계가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

- 빙수조에서의 검증 실험과 얼음의 두께와 선형요소와의 상관관계에 대한 더 많은 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 논문의 내용은 빙해선박의 극지항로 안전운항기술 및 극저온 빙성능 시험평가 기법개발과제(5년)에 의해 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- Lim, T.W., 2008. *Comparative Study on Resistance and Self-propulsion of Icebreaker with Synthetic ice and Refrigerated ice*. Master's thesis, Pusan National University.
- Lee, S.H. Kim, M.C. Chun, H.H. & Shin, B.C., 2010. Comparative study on resistance performance of icebreaking cargo vessel according to hull form variation by using synthetic ice and refrigerated ice. *Journal of the Society of Naval Architectures of Korea*, 47(3), pp.350-358.
- Kim, M.C. Lee, S.H. Shin, B.C. & Wang, J., 2009. Comparative study of resistance performance with refrigerated ice and synthetic ice according to variation of hull form. *Proceeding of 2009 International conference on ship and offshore technology*, Pusan, Korea, pp.1-8.
- Aboulazm, A.F., 1989. *Ship Resistance in Ice Flow Covered Waters*. Ph.D thesis, Memorial University of Newfoundland, Canada.
- Zufelt, J.E. Ettema, R., 1996. Model ice properties. CRREL Report 96-1. *Cold Regions Research and Engineering Laboratory*, Hanover, NH, USA.



신병철

김문찬

이승호

이승기