

빙해역에서 유조선의 조종 모형시험에 대한 연구

김현수^{†*}, David Molyneux^{**}

인하공업전문대학 선박해양시스템과^{*}
Institute for Ocean Technology, St. John's Canada^{**}

Maneuvering Experiments in Ice on a Single Screw Tanker

Hyun Soo Kim^{†*} and David Molyneux^{**}

INHA Technical college, Dept. of ship & Ocean system^{*}
Institute for Ocean Technology, St. John's Canada^{**}

Abstract

Samsung Heavy Industries (SHI) and NRC's Institute for Ocean Technology (IOT) collaborated on a project to predict the performance of a new design for a Suezmax size tanker that had acceptable open water performance but was also capable of operating in ice. The resulting hull form was a single screw, single rudder design with a bulbous bow, modified for operation in ice. An important design consideration is the ability of the ship to maneuver in different ice conditions.

This paper presents the results of maneuvering experiments in pack ice and level ice, using a free running model.

※Keywords: Maneuvering experiment in ice condition(빙해역 조종시험), Ice maneuvering performance(빙해역 조종 성능)

1. 서론

빙해역과 일반해역을 모두 운항하는 선박의 조종성능추정은 두 해역 모두에서 조종성능이 검증되어야 한다. 일반해역의 조종성능 확보를 위한

모형시험 방법은 체계화되어 대부분 PMM 시험과 자유항주시험을 통해 수행되고 있다. 그러나 빙해역에서 조종성능 확보를 위한 모형시험은 대부분 자유항주 시험을 수행하는데 이것은 현재 IMO 나 각국 선급 등에서 빙해역의 조종성능을 규제하는 Rule 이 존재하지 않기 때문에 선주는 Rule 을 만족하는 결과보다는 실해역에서 안전운항 관점에서 조종성능 결과를 요구하고 있다. 하지만 지구 온난화의 영향으로 대형 빙해선박의 운항이 많아

접수일: 2008년 7월 21일, 승인일: 2008년 9월 22일

†교신저자: hyunsookim@inhac.ac.kr,

032-870-2172

질 것으로 예상되는 상황에서 빙해역에서 정확한 조종성능추정을 위해 수치해석 기법과 모형시험을 통한 검증이 Canada 의 IOT(Institute for Ocean Technology, NRC-CNRC, St. Johns, NF Canada) 등에서 수행되고 있다. 본 논문에서는 이러한 노력의 일환으로 수행된 빙해수조에서의 PMM 조종 시험과 그 결과에 대하여 소개하고자 한다.

빙해수조에서 조종성능 검증을 위한 모형시험을 수행할 때에는 저항시험과 마찬가지로 얼음의 특성과 선박의 제원, 선박의 추진력, snow effect 를 포함한 외부 환경의 영향을 고려해야 하며 실제 선박의 운항이 예상되는 평탄빙, rubble ice, pack ice 등의 조건에서 전진 및 후진시의 조종성능이 평가되어야 한다. 또한 channel 을 벗어나려는 channel out test 등 channel 에서의 운항 상황을 조종 모형시험에서 고려해야 하는 경우, 수행해야 하는 모형시험의 종류와 횟수는 상당히 많게 된다. 위에서 언급된 Rubble ice 는 얼음 산맥(ice ridge) 과는 구별되는 개념으로 깨어진 얼음이 두 겹 혹은 세 겹씩 중첩되어 있는 얼음을 의미하고 pack ice 는 깨어진 얼음이 중첩됨 없이 해역에 분포되어 있는 얼음을 표현한다.

빙 수조에서 자유항주시험을 수행함에 있어 수조 폭에 제한을 받는 경우 PMM 시험을 수행하는데 간단한 선박의 궤적을 보는 자유항주시험과는 달리 이 경우에 정확한 해석을 위해서는 모형시험에서 계측되는 각 방향의 힘과 모멘트를 계측할 때 각 성분을 분리하는 기술과 수학 모형을 통한 표현이 시험해석의 관건이 된다. 삼성 중공업과 IOT 에서는 빙해역과 일반해역에서 운항 가능한 내빙선을 개발하여 이 선박에 대한 저항 및 추진 성능을 Kim et al.(2006)이 소개한 바 있다. 이 선박은 단추진기 선박으로 타가 한 개 부착되었으며, 구상선수를 가지고 있다. 본 논문은 개발된 선박의 빙해역에서 조종모형시험에 대한 것으로 평탄빙과 pack ice 에서 조종모형시험결과와 경험 등을 소개하고, Heeling 각을 준 상태에서 실시한 PMM 시험에 대한 결과를 통해 초기 모멘트가 조종성능에 미치는 영향을 고찰해 보고자 한다.

2. 모형시험 개요

계측 시스템 및 모형선

IOT 수조 크기와 stock 프로펠러의 크기를 고려하여 모형선의 축척 비는 1:74 을 사용하였다. 전기 모터를 사용하여 모형 프로펠러를 구동하였고 회전수와 yaw rate 를 회전속도계로 계측하였다. 타는 Servomotor 로 조작하고, potentiometer 로 타각을 계측하였다. 개념설계단계의 선형으로 Yaw 와 roll 의 관성 반경은 배 길이의 25% 와 배 폭의 35%를 각각 사용하였다.

PMM 장비를 예인전차에 고정시키고 Control system 으로 모형선의 Turning circle 과 Zig-Zag test 를 구현하였다. 전차에 고정된 두 대의 telescope 로 모형선 중앙에서 상대위치를 측정해 모형선 위치를 계측하였다. 모든 data 는 계측 시스템에서 50 Hz 의 주기로 기록되었다. Photo 1 은 모형선의 선미사진이고, Photo 2 는 선수사진이다.

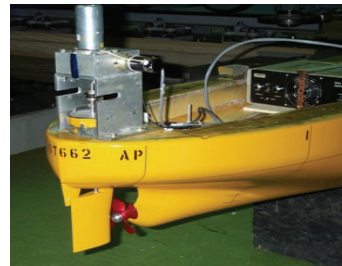


Photo 1 Stern view of model, outfitted for maneuvering

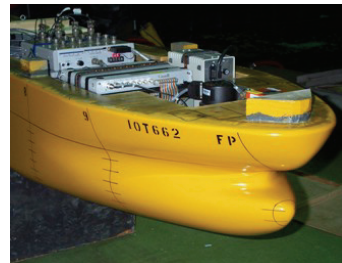


Photo 2 Bow view of model, outfitted for maneuvering

모델 Ice

모형시험에 사용된 얼음 모형은 EGADS(CD)이다. 이 모형 얼음은 IOT 에서 사용하는 얼음모형으로 화학약품을 사용하여 얼음의 강도와 두께, 밀도를 조절할 수 있다. 해석할 때 사용하기 위해서 모형선의 경로를 따라 수집된 얼음의 밀도, 두께가 계측되고, 수집된 얼음은 외팔 보 시험을 통해 파단 강도를 알 수 있다. 시험이 수행되는 모든 구간에서, 파단 강도, 압축 파단 응력 등이 일정 간격으로 구해져 해석에 사용된다. Pack ice 의 밀집도(Concentration)는 모형얼음의 수직 상부에서 촬영한 사진판독 결과로 결정한다. 얼음과 선박 사이의 마찰 계수는 모형선에 도색을 할 때 거칠기를 조정하여 조절한다. Pack ice 는 선박의 저항 시험 후에 파단된 빙편의 크기와 비슷한 크기로 얼음을 잘라서 분포시켜 만드는데 본 실험에서는 85%의 pack ice 가 사용되었다.

실험 계획

IOT 의 빙해수조는 조종시험에 주로 사용하는 사각 수조가 아닌 세계 최장의 빙해 예인수조로 조종시험을 원활히 하기 위해서 작은 모형선을 사용하였으며, 조종성능 시험은 Turning Circle test 와 Zig-Zag test 을 수행하였다. 실험에 사용된 평탄빙의 두께는 실선으로 환산할 경우 720mm 이고, 빙 강도는 실선 scale 로 600 kpa 이다.

Turning Circle test 는 시험 중 수조 벽과 충돌을 방지하기 위하여 가능한 벽에 가까운 위치를 출발지점으로 잡아 길이방향으로 선회를 수행하였으며, 모형선의 속도를 증가시켜 설계속도에 도달했을 때 타각을 변화시켰다. 타각은 35 도까지 사용하였으며 프로펠러 회전수는 설계 선박의 Engine power 에 맞추어 모형선 scale 로 14rps 를 사용하였다. 그러나 주어진 프로펠러 회전수로 모형선이 선회를 실패할 경우에 대비하여 프로펠러 회전수가 20rps 까지 작동이 가능하도록 고안 하였다. 선박의 power 가 20rps 에서도 선회가 되지 않을 경우 선체에 횡 경사를 주어 선회를 시도할 수

있도록 준비하였고 최고 횡 경사는 8 도까지 줄 수 있도록 하였다. 14 rps 는 기존의 엔진을 장착하여 power 를 낼 수 있는 회전수로 약 17 Mw 의 power 이다. 20rps 는 현존하는 디젤 엔진으로는 구현이 불가능한 power 로 14 rps 의 약 2.8 배에 해당하는 power 이다.

위와 같이 과도한 power 와 heeling angle 등을 고려한 이유는 빙해역에서 선회를 할 경우 사항상태가 되어 선체와 접촉하여 쇄빙을 하는 부분이 늘어남에 따라 선회를 경우 상당히 큰 power 가 필요할 것으로 예상되었기 때문이다.

Zig-Zag 시험도 turning circle 시험과 마찬가지로 일반해역에서 운항하는 선박의 모형시험과 같은 방법을 사용하였다. 하지만 수조 폭이 좁은 예인수조의 특성상 수조 벽에 충돌하는 사고를 방지하기 위한 각별한 주의를 기울였다.

3. 결과 고찰

평탄빙에서 Turning 시험

Ballast draft 와 full load draft 로 평탄빙에서 Turning circle test 를 수행한 결과를 Table1 에 정리하였다.

평탄빙에서 Full load draft test 는 프로펠러 회전수 14 rps 에서 수행하였고 heeling angle 은 주지 않았다. 그러나 steady yaw rate 를 얻는데 실패하였다. Engine power 가 부족한 것으로 판단하여 회전수를 20rps 로 올렸음에도 불구하고 steady yaw rate 를 얻을 수 없었다. 조종 운동시 Ice Breaking 성능을 증가시키기 위해 Heeling angle 을 4 도로 변화를 준 상태에서 20 rps 로

Table 1 Summary of steady turns in level ice

Run number	Initial speed, m/s	Rudder angle, deg.	Steady yaw rate, deg/s	Time to reach steady turn, sec	Shaft rotation, rps	Draft	Heel angle, deg.
run 007	0.305	35	0	36.6	14	Load	8
run 008	0.23	35	0.5	23	20	Load	8
run 014	0.45	35	0.7	18.8	20	Ballast	0
run 015	0.276	35	0.1	25.9	14	Ballast	0

시험하였으나 이 경우 역시 steady yaw rate 를 얻지 못하였다. Heeling angle 을 8 도로하고 회전수를 20 rps 로 하여 선회를 시도한 후에야 비로소 성공적인 steady yaw rate 를 얻을 수 있었다. 이러한 실험은 빙해역과 일반해역을 모두 운항해야 하는 선박의 경우 일반해역에서 성능을 최대화하기 위해 구상선수를 적용하는데 이러한 상황에서 선박의 빙해역 조종성능을 알아보기 위한 목적으로 수행되었다. Ballast condition 의 경우 14 rps 에서 heeling angle 없이 선회를 시도하여 성공적으로 steady yaw rate 를 얻을 수 있었다. Turning test 에서 선속은 실선 scale 2 ~ 4 knots 를 사용하였다.

Full load draft 에서는 구상선수가 선회를 방해하는 것을 관찰할 수 있는데 파쇄된 얼음이 구상선수의 영향으로 0.5 station 부근에서 원만하게 선저로 이동하지 못하고 얼음이 정체하여 저항이 상당히 증가한다. 하지만 Ballast 상태에서는 파쇄된 얼음이 구상선수로 인한 흐름에 영향을 받지 않아 원만하게 선저로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 영향으로 Full load draft 에서는 선회가 되지 않았으나 Ballast draft 에서는 선회가 원만히 이루어졌고 steady yaw rate 를 얻을 수 있었다. 이상의 결과에서 구상선수가 얼음의 흐름을 방해하여 조종성능을 저하시키므로 Full load 에서 구상선수를 적용하지 않을 경우 선회성능에 긍정적인 영향을 줄 것임을 알 수 있었다.

선회시험에서 선회하고자 하는 방향으로 Heeling 각을 줄 경우 선회가 가능한 이유는 선체가 횡방향으로 경사되는 경우 선박의 자중에 의해 쇄빙능력이 향상되고 이에 따른 초기 선회 moment 가 생기는 것으로 생각할 수 있다. Heeling 이 없을 경우 과도한 엔진마력에도 선회가 어려웠으나 8 도의 heeling 을 줄 경우 발생하는 자중에 의한 쇄빙 능력 향상과 초기 모멘트로 인하여 선회가 성공적으로 이루어져서 steady yaw rate 를 얻을 수 있었다.

이상의 결과에서 알 수 있는 사실은 Heeling 의 영향이 선회 성능에 효과적으로 작용하고 있다는

것으로 실제 배가 빙해역에서 운항할 경우 선박의 ballasting 을 이용하여 Heeling 을 주면 선회가 가능할 수 있음을 시사하는 것으로 실제 운항 중에 선박이 선회 중에 정지하는 일이 발생하는 경우 이러한 방법으로 운항을 한다는 사실을 실험을 통해 입증하였다.

Pack ice 에서 Turning 시험

Pack ice 에서의 시험은 Ballast, Full load 의 두 draft 에 대하여 heeling angle 없이 수행하였다. 이 실험에서는 모형선이 선회할 때 부서진 얼음을 잘 밀어내는 것을 관찰 할 수 있었는데 85% pack ice 에서는 선회가 잘 이루어지는 것을 알 수 있었다. Fig. 1 과 Fig. 2 는 pack ice 에서의 선회 시험 결과를 그래프로 표시한 것으로 ballast 와 Full load 의 결과를 하나의 그래프로 표시하였다. Fig. 1 은 타각과 yaw rate 와의 관계를 보여주고 있으며, Fig. 2 는 타각과 Steady turn 에 이르는 시간과의 관계를 보여주고 있다.

Fig. 1 은 Ballast draft 에서의 Yaw rate 가 Full load 에서의 yaw rate 보다 큰 것을 보여주고 있고 또한 Full load 에서는 15 도 이상의 타각을 사용할 경우 적정한 yaw rate 를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 1 에서 볼 수 있듯이 ballast draft 에서의 turning rate 가 Full load draft 에서 turning rate

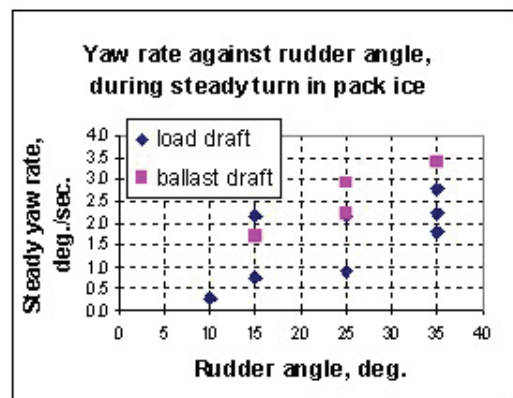


Fig. 1 Yaw rate against rudder angle during steady turn in pack ice

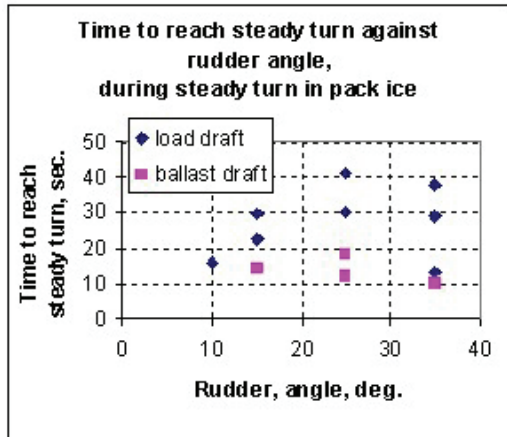


Fig. 2 Time to reach steady yaw rate against rudder angle during steady turn in pack ice



Photo 3 Load draft, maneuvering in level ice

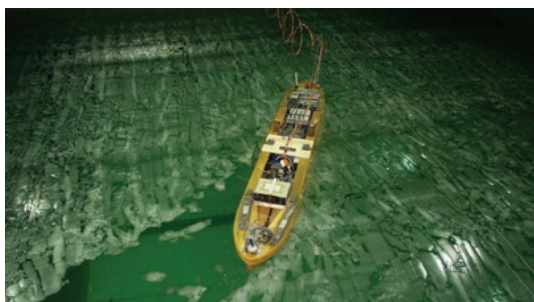


Photo 4 Load draft, maneuvering in pack ice

보다 훨씬 큰 것과 Fig. 2 에서 확인할 수 있듯이 ballast draft 에서 steady turn 에 도달하는 시간이 Full load draft 에서 steady turn 에 도달하는

시간보다 짧은 것으로 미루어 볼 때 Ballast draft 에서의 선회 성능이 Full load 에서 선회 성능보다 훨씬 우수한 것을 알 수 있다.

Photo 3 과 Photo 4 는 평탄빙과 Pack ice 조건에서 모형시험을 하는 사진으로 모형 선박에 의해 만들어진 궤적의 일부를 보여주고 있다.

Pack ice 에서 Zig-Zag 시험

Pack ice 상태에서 Zig-Zag 시험은 일반해역에서 사용하는 타각인 10 도, 20 도 대신 25 도를 사용하였다. 빙해역에서는 일반해역과 달리 선급 등에서 강제하는 규정이 없기에 우수한 조종성능을 보고자 하였기 때문이다. 평탄빙에서 Zig-Zag 시험은 수행하지 않았는데 그 이유는 타각 35 도로 수행한 선회시험이 heeling angle 8 도를 주어야 겨우 yaw rate 를 얻은 것에서 유추해 볼 때 평탄빙에서 타각 25 도에서 Zig-Zag 시험이 실패할 것이 분명하였기 때문이다.

실험 결과에 의하면 Ballast draft test 의 결과가 Full load draft test 결과보다 steady yaw rate 까지 도달하는 시간이 짧은 것으로 나타나 Ballast draft 에서의 Zig-Zag 조종 성능이 우수한 것으로 판단 할 수 있다.

일반해역에서 조종성능은 overshoot angle 로 조종성능의 우수성 혹은 Criteria 만족 등을 평가 하지만 빙해역에서는 이러한 규정이 존재하지 않는다. 따라서 본 결과에서는 Steady yaw rate 에

Table 2 Ballast draft, Zig-Zag test in pack ice

Time	Rudder angle	Yaw rate	Yaw angle
0	0	0	0
1.5	25	0	0.5
16.7	25	-2.1	28.1
17.5	0	-1.3	29.5
18.6	-25	0.1	30.1
43.2	-25	2.8	-25.6
43.8	0	2.3	-27.1
44.8	25	0.4	-28.5
77	25	-2.4	44.3
77.9	0	-1.3	45.2
78.8	-25	0.2	45.6
103.5	-25	2.9	-19.7
105.1	0	1.5	-23.2

Table 3 Load draft, Zig-Zag test in pack ice

Time	Rudder angle	Yaw rate	Yaw angle
0	0	0	0
0.9	25	-0.4	0.1
54.7	25	-0.6	26.4
55.3	0	-0.3	26.5
56.2	-25	0.2	26.5
190.4	-25	0.6	-28.8
191	0	0.1	-29
191.7	25	-0.1	-29.1
272.7	25	0.7	22.8
273.3	0	-0.7	23.3
274.1	-25	-0.1	23.4
328.2	-25	0.6	-11.5
328.8	0	-0.1	-11.8

도달하는 시간을 가지고 Ballast draft 와 Design draft 의 상대적인 Zig-Zag 성능 우월성만을 판단하였다. 실험 결과는 Table 2 와 Table 3 에 정리하였다.

결과 고찰

일반해역에서 유조선의 조종성능은 Esso Osaka 에 관한 ITTC 보고서(2002) 에 설명된 바와 같이 선회 초기에 최대 yaw moment 가 발생한 후 그 값이 점차 감소하여 steady 상태를 이루게 된다. 이와 같이 일반해역에서는 타각을 조작하면 충분한 초기 선회모멘트를 가지게 되어 선회하는데 아무런 문제가 되지 않으나 빙해역에서는 초기 moment 가 충분히 발생하지 못하여 yaw rate 가 steady 상태에 도달하지 못하고 정지하는 경우가 발생한다. 타와 추진기가 선박이 선회하는데 필요한 충분한 선회모멘트를 생성할 수 있도록 power 가 제공되어야 steady yaw rate 를 구할 수 있게 되는데 실험을 통해 관찰된 결과에 의하면 타각의 변화에 의해 만들어지는 yaw angle 이 선박을 사항 상태로 만들어 얼음과의 접촉면적이 넓어져서 breaking 해야 할 얼음이 많아짐으로 선박이 선회할 때 저항은 선박이 직진하는 것보다 훨씬 더 큰 저항이 발생함을 알 수 있었다. 이러한 결론은 Kim et al.(2006)의 논문에 의하면 Full load draft 에서 14rps 의 power 로 3 knots 의 속도를

얻었으나 같은 조건에서 선회에 실패한 것으로부터 확인할 수 있다.

Heeling angle 을 주는 것은 선체 측면의 경사로 인해 자중에 의한 쇄빙 효과를 극대화시켜 선회 초기에 선회 모멘트를 발생함으로 쇄빙선박의 선회성능을 증가시키는 효과를 확인하려는 의도에서 수행되었다.

3. 결론

146,000 ton 의 배수량을 갖는 선박에 17 Mw 엔진을 장착한 경우 빙해역 조종성능을 검증하기 위하여 ballast 와 Full load draft 조건에서 pack ice 와 평탄빙 상태로 선회 모형시험과 Zig-Zag 모형시험을 수행하였다.

그 결과 Pack ice 상태에서는 Draft 와 상관없이 선회와 Zig-zag 운동이 가능한 것을 확인하였고 Full load 보다는 Ballast draft 에서 선회성능과 Zig-Zag 성능이 우수한 것을 확인하였다.

평탄빙에서의 조종 모형시험도 같은 draft 와 power 조건에서 수행되었다. Ballast 조건에서의 선회모형시험은 Heeling angle 없이 steady yaw rate 를 얻을 수 있었으나 그 값이 pack ice 의 값 대비 너무 작아 360 도 선회를 위해서는 상당히 큰 공간이 필요할 것으로 예상되었다. 회전수를 20 까지 올리는 경우 Full load, pack ice 조건에서 15 도 타각을 사용할 때와 비슷한 yaw rate 를 주었다. 이와 같은 사실은 ballast draft 로 평탄빙에서 20rps 의 회전수로 선회를 할 경우 Full load 흘수로 pack ice 에서 15 도 타각으로 선회하는 것과 같은 정도의 선회공간이 필요함을 의미하는 것으로 평탄빙에서 ballast draft 선회성능이 그다지 좋지 않음을 알 수 있다.

Full load draft 의 경우 평탄빙에서는 선회시험을 실패하였고, 회전수를 20rps 까지 올려도 선회가 불가능함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 실험한 선박은 power 를 2.8 배까지 증가시켜도 선회가 되지 않는 것으로 빙해역 조종성능을 전혀 고려하지 못한 것으로 평가할 수 있다.

Heeling angle 8 도를 주고 power 를 2.8 배 증가시킨 경우 steady yaw rate 가 0.5deg/s 이었다. 이 결과는 Heeling angle 이 있을 경우 선체 자중에 의한 쇄빙효과로 인해 선회성능의 향상을 기대할 수 있다는 결과로 실제 해역에서 선박이 고립된 경우 ballasting 을 하여 heeling 을 주면 선박이 선회가 가능함을 시사해주는 결과로 분석할 수 있다.

평탄빙에서 조종성능은 흘수와 상관없이 선회성능과 Zig-Zag 성능이 좋지 않으나 pack ice 조건에서는 steady yaw rate 가 2~3.5deg/s 로 선회 및 Zig-Zag 성능이 우수하다고 평가할 수 있다.

빙해역에서 조종운동을 할 경우 직진할 때보다 훨씬 큰 저항이 필요하다는 것을 확인함과 동시에 빙해역과 일반해역을 동시에 운항하는 선박을 설계하는 경우 현재는 일반해역만이 규제조항이 있어, 선형 설계할 때 빙해역의 조종성능을 고려함에 있어 다소 소홀한 경향이 있으나, 이런 경우 빙해역에서 조종성능에 문제가 될 수 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다.

빙해역에서 선박의 조종성과 관련해서는 앞으로도 많은 연구가 필요하다. 자유 항주시험 혹은 PMM 시험등을 통한 선박의 조종성능시험은 향후 빙해역 조종성능 해석법 구축을 위한 중요한 자료로 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

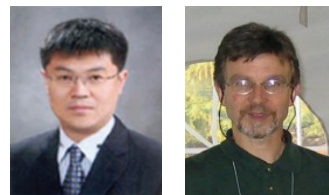
본 논문은 설계된 선박이 기존의 엔진을 장착할 경우 빙해역 조종성능을 만족할 수 있는지를 알아 보기 위한 PMM 시험의 사례를 소개한 것으로 실제 해역을 운항할 때 Heeling angle 을 사용한 조종성능 향상을 입증한 좋은 시험결과로 널리 활용 되기를 기대한다.

후 기

본 연구는 저자가 삼성중공업에 재직할 때 2007 년 추계 학회 특별세션에 발표된 논문으로 논문집에 게재합니다.

참 고 문 헌

- ITTC, 2002, Report of the Specialist Committee on ' Esso Osaka' , Proceedings of 23rd International Towing Tank Conference, pp 573-609.
- Kim, H.S., Ha, M.K., Ahn, D. and Chun, H. H., 2003, "Development of an Arctic Tanker Design," Journal of Society of Naval Architects of Korea, Vol. 40, No. 6, pp. 21-29.
- Kim, H.S., Ha M.K., Bak M.C., Kim S.H., Park, J.W., Chun H.H., 2004, " Development of 115K Tanker Design adopted Ice class 1A, " Journal of Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 6, pp. 121-126.
- Kim, H.S., Ha, M.K., Ahn, D. and Molyneux, D., 2006, "Hull Form Designs for Icebreaking Tankers," Proceedings of Ictech 2006, Ictech06-116-R1



< 김 현 수 > < David Molyneux >