

남극 아문젠해에서 계측된 해빙의 재료특성 비교 분석

최경식¹·김현수^{2,†}·하정석³·이춘주³
한국해양대학교 해양공학과¹
인하공업전문대학 조선해양과²
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소³

A Comparative Analysis of Sea Ice Material Properties in the Amundsen Sea, Antarctica

Kyungsik Choi¹·Hyun Soo Kim^{2,†}·Jung Seok Ha³·Chun-Ju Lee³
Dept. of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University¹
Dept. of Ship and Ocean Engineering, Inha Technical College²
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO)³

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.

Field trial in ice-covered sea is one of the most important tasks in the design of icebreaking ships. To correctly estimate ice load and ice resistance on ship's hull, it is essential to understand the material properties of sea ice during ice field trials and to perform the proper experimental procedure by gathering sea ice data. A measurement of sea ice properties was conducted during February and March of 2012 with the Korean icebreaking research vessel "ARAON" in the Amundsen Sea, Antarctica. This paper describes a test procedure to obtain sea ice data which provide basic information to estimate ice loads and icebreaking performance of the ship. The data gathered from sea ice field trials during the 2012 Antarctic voyage of the ARAON includes ice temperature/salinity/density and the compressive/flexural strength of sea ice. This paper analyses the gathered Antarctic sea ice material properties comparing with the previous data obtained during ARAON's Arctic and Antarctic voyages in 2010.

Keywords : IBRV ARAON(쇄빙연구선 아라온), Ice field test(현장 계측시험), Antarctic sea ice(남극해 해빙), Compressive strengths(압축강도), Flexural strengths(굽힘강도)

1. 서론

최근 극지 개발의 관심이 증가하면서 새로운 쇄빙선박 및 구조물 설계에 대한 기초정보로서 해빙의 재료특성에 관한 연구 필요성이 제기되고 있다. 국내 최초의 쇄빙연구선인 아라온(ARAON) 호는 2009년 건조된 이후 매년 지속적으로 남/북극해에서 해빙 재료특성을 계측하는 현장시험을 수행해 왔다. 본 연구팀은 2012년 1월 31일~3월 20일 사이 아라온호의 아문젠해(Amundsen Sea) 탐사에 동승하여 남극해역에서의 실선 쇄빙성능시험을 통해 해빙의 재료특성을 조사하였다. 실선 쇄빙성능시험에서는 선체와 해빙과 충돌에 따른 빙하중 및 빙저항의 크기를 추정하기 위한 기초자료로서 해빙에 대한 재료강도특성 파악이 중요하다. 아울러 실선(full-scale) 쇄빙성능과 모형선 시험결과에 대한 상관관계

분석을 통해 보다 정확한 빙하중 및 빙저항 추정이 가능하므로 빙해역 실선쇄빙성능시험은 필수적으로 요구되는 추세이다.

본 연구팀은 아라온호를 이용해 최근 빙하의 유실이 두드러져 지구온난화의 요인을 제공하고 남극 주변 해양태순환의 변화를 감지할 수 있는 아문젠해를 다녀온 바 있다 (Fig. 1 참조). 연구의 목적은 계측된 해빙의 재료특성 데이터를 기반으로 빙하중과 빙저항을 추정하는데 필요한 기본적인 해빙의 강도특성을 추출하는데 있으며 향후 빙해역을 운항하는 쇄빙선박의 설계 시 필요한 자료를 확보하기 위한 것이다 (Ha, et al., 2012).

본 논문에서는 남극 아문젠해에서의 실선 쇄빙성능시험을 통해 계측된 주변 해빙(sea ice)의 온도, 밀도, 두께, 염도, 해빙의 결정 구조와 함께 해빙의 압축강도 및 굽힘강도에 대한 자료를 빙하중 설계 측면에서 분석하였다. 그리고 이 결과를 이전 2010년 및 2011년에 남북극 빙해역에서 아라온호의 쇄빙성능시험 시 계측된

타 연구자료와 비교하였다 (Likhomanov, 2010; Choi, et al., 2011; Jeong, et al., 2011). 함께 진행된 아라온호의 쇄빙성능시험에 관한 분석자료는 따로 발표된 바 있다 (Kim, et al., 2012).

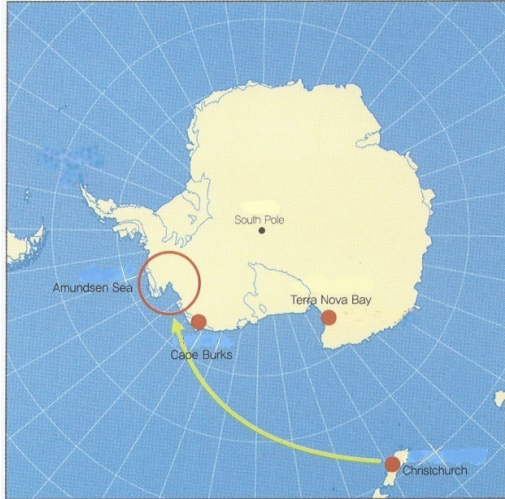


Fig. 1 Location of ice field test sites in the Antarctica (February/March 2012)

2. 빙해역 현장계측시험

해빙의 재료강도특성 계측을 위한 시험은 세 차례 가졌는데 첫 번째 빙판의 위치는 73°28'15"S, 110°09'58"W 이고 길이와 폭이 1km 이상으로서 실측한 결과 눈 두께 1m 이상, 얼음 두께도 3m 이상으로 아라온호가 최고 출력 8.5MW를 사용하여 쇄빙을 시도 하였으나 실패하였다. 따라서 첫 번째 빙판에서는 쇄빙시험을 할 수 있는 상황이 아니었기에 빙판의 두께 측정을 위주로 기본적인 항목만 검사하였다. 아라온호 접안 위치로부터 수직하게 안쪽으로 약 500m 정도 거리까지 두께 계측 장비인 EM31 (Electro-Magnetic 31)을 사용하여 빙판의 두께를 계측하였고 적설층 깊이는 눈금자로 계측하였다. 먼저 예상 주행거리 400m를 50m씩 나누는 뒤 각 지점에서 빙판의 두께(ice thickness)와 해수면까지의 깊이(freeboard), 적설층의 두께(snow depth) 등을 계측하고, 주행거리의 시작점에서 2개의 해빙 시추코어를 채취하였다. 현장에서는 온도분포만 조사하고 5개의 해빙 시편은 본선으로 운반하여 압축강도를 계측하였다.

Table 1 Ice thickness and snow depth on the first sea ice floe

| Position | -50m | 0m | 100m | 200m | 300m |
|--------------------|------|-----|------|------|------|
| Ice Thickness (cm) | 239 | 240 | 215 | 273 | 380 |
| Snow Depth (cm) | 71 | 60 | 120 | 119 | 40 |

두 번째 빙판은 2012년 2월 21일 73°30'43"S, 109°02'11"W 위치에서 900m×600m 정도인 1년생 빙판으로 두께가 1.5m 정도로 쇄빙시험에 적합한 것을 확인하고 계측시험 관련 모든 항목의 조사를 마친 후에 아라온호에 의한 쇄빙성능시험을 수행하였다. 처음 600m 구간에 대하여 100m 간격으로 시추하여 주행구간을 정했으나 후에 추가로 시작 지점과 끝나는 지점에서 100m씩 연장하여 총 주행구간을 800m로 결정하였다. 직접 시추를 통한 빙판의 두께 측정은 50m 간격으로 하였고 해빙의 시추코어는 시작점인 100m 지점에서 700m 지점까지 100m 마다 3개씩 채취하였다 (700m 지점은 1개만 채취). 해빙 위에서 계측작업을 수행할 때의 기온은 -3°C 이었고 후에 쇄빙성능시험을 수행할 때의 기온은 -5°C 로 기록되었다.

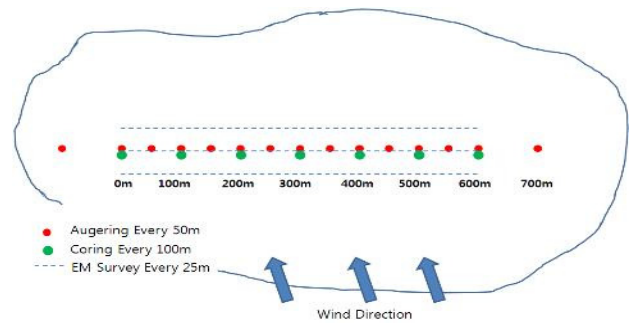


Fig. 2 Sketch of works on second sea ice floe

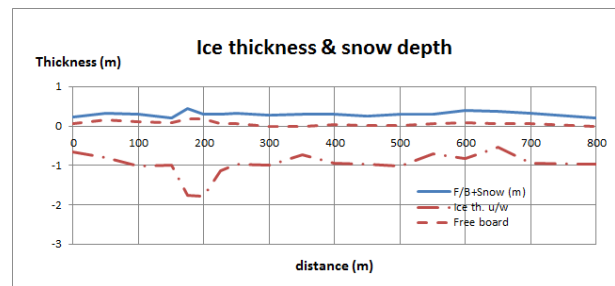


Fig. 3 Ice thickness and snow depth on the second ice floe

세 번째 빙판은 2012년 3월 3일 헬리콥터 탐색을 통해 발견하여 착륙 후 두께에 관한 기초조사를 한 뒤 그 다음 날 조사팀과 장비를 모두 헬리콥터로 수송하여 계측작업을 수행하였다. 빙판의 위치는 72°15'11"S, 117°49'32"W 이었고 크기는 1,100m X 600m 정도로 빙판의 가운데에 평탄빙 보다 두꺼운 부분(ridge)이 있는 구조였다. 먼저 시작점을 정하고 이로부터 500m 떨어진 곳까지 주행구간을 확정하고 매 50m 마다 빙판의 두께를 계측하고 해수면의 높이와 적설층의 두께를 계측하였다. 그리고 재료특성을 파악하기 위한 해빙 시추코어는 시작점을 포함 400m 지점까지 100m 간격으로 세 개씩 채취하였다 (400m 지점은 1개만 채취). 세 번째 빙판은 한쪽 변이 커다란 빙산에 막혀 있는 비교적 평탄한 1m 내외의 1년생 빙판이지만 빙판의 중앙부에 3m를 넘는 두꺼운 빙백(ridge)이 있어서 전체 빙판 두께 분포를 알기 위

하여 몇 군데 더 시추지점을 추가하였다. 이 빙백은 다년생빙일 가능성보다는 1년생 빙판이 서로 겹쳐지며 생겨난 것으로 추정된다. 모든 조사를 마치고 선내에서 해빙시편의 압축시험을 수행하였고 아라온호가 이동하여 목표 빙판에 도달한 즉시 쇄빙성능시험을 수행하였다. 해빙 위에서 계측작업을 수행할 때 기온은 -3°C 로 기록되었다.

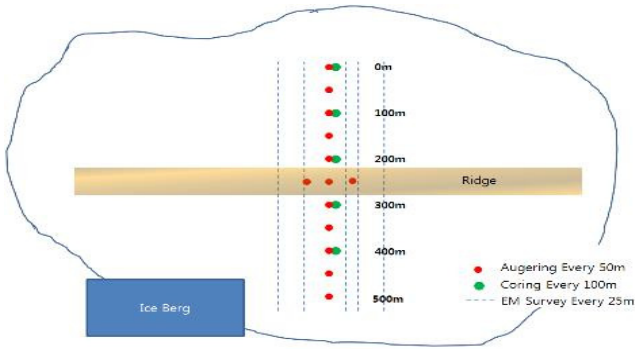


Fig. 4 Sketch of works on the third sea ice floe

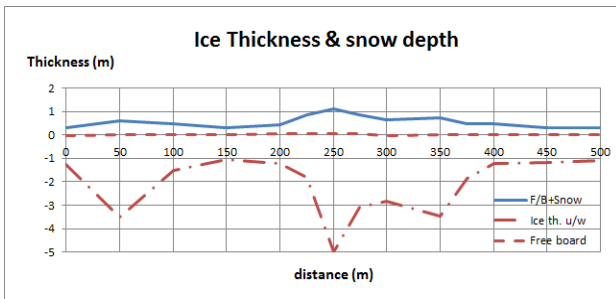


Fig. 5 Ice thickness and snow depth on the third ice floe

3. 남극 아문젠해 해빙의 재료특성

빙해역 실선 쇄빙성능시험 과정에서 계측되는 해빙의 재료강도특성에 관한 시험항목은 얼음의 두께와 두께 방향의 깊이별 온도와 염도 및 밀도, 그리고 얼음의 결정구조이다. 한편 구조물의 설계빙하중과 관련하여 중요한 것은 얼음의 압축강도와 굽힘강도이다. 압축강도는 1축압축시험기를 이용하여 해빙에서 추출된 원통형의 시편에 축방향 압축하중을 가해서 파괴되는 순간의 하중을 계측하였다. 빙해역 현장에서 얼음의 굽힘강도 계측법으로 외팔보(cantilever) 측정법이 가능하지만 빙판 두께에 비례하여 현장에서 대규모 외팔보를 만들어야 하고 여기에 수직하중을 줄 수 있는 장치 마련이 쉽지 않다. 따라서 간접적인 방법으로 해빙의 온도와 염도 그리고 밀도에 기초한 경험식(1)을 사용하였다 (Timco & O'Brien, 1974).

첫 번째 빙판의 경우 현장에서 측정된 시추코어 한 세트의 온도분포를 관찰한 결과 빙판의 깊이 방향으로 시작점부터 240cm의 구간에 걸쳐 $-1.6\sim-1.7^{\circ}\text{C}$ 사이의 분포를 가지고 있었다. 작업 당시 짙은 안개와 많은 눈으로 거의 기온변화가 없었으며 대기온

도는 -2°C , 해수의 온도도 -1.9°C 정도로 판단할 때 온도구배가 거의 없는 균질한 상태로 판단된다. 염도는 시편 평균 2.38% 이었고 밀도는 $0.916\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 측정되었다. 또한 상태가 좋은 코어를 냉동고에서 4일 보관 후 꺼내 6시간 대기온도에 노출 후 측정된 2개는 압축강도가 3.95MPa, 굽힘강도는 406kPa 였고 12시간 후 측정된 3개의 시편은 압축강도가 2.01MPa, 굽힘강도는 388kPa 이었다. 이 결과는 이후 수행된 두 차례 계측시험에서 얻은 강도보다 비교적 높는데 그 이유는 계측을 위해 비교적 상태가 좋은 시편만을 골랐고 일반적으로 온도가 낮으면 강도가 높아지는 얼음의 특성상, 대기에 노출하는 시간을 두긴 했으나 현장에서의 온도에 비해 낮은 냉동고 온도 때문에 압축강도/굽힘강도가 모두 높게 나온 것으로 예상된다. 따라서 이 수치는 빙판의 강도를 대표하는 값으로 볼 수 없기에 본 연구의 분석에서는 제외하였다.

$$\sigma_f = 1.76 e^{-5.88 \sqrt{\nu_b}} \quad (1)$$

여기서

σ_f : 해빙의 굽힘강도 (MPa)

ν_b : 염수체적비 (무차원) = $\rho S_i / F_1(T_i)$

ρ : 해빙의 밀도 (g/cm^3)

S_i : 해빙의 염도 (%)

T_i : 해빙의 온도 ($^{\circ}\text{C}$)

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

$(-1.9^{\circ}\text{C} \geq T_i \geq -22.9^{\circ}\text{C})$

Table 2에 두 번째 빙판에서 계측된 해빙의 재료특성을 요약하였다. 깊이에 따른 분포 뿐 아니라 빙판 전체에 대한 얼음의 온도가 -1.72°C 로 해빙의 용융점 온도와 차이가 거의 없었고, 염분이 빠져 나가면서 조직손상이 많아 밀도는 비교적 낮은 $0.843\text{g}/\text{cm}^3$ 이었고 염도는 거의 균일한 4.0% 임을 보여주고 있다. 해빙의 시편은 Fig. 4에 표시된 위치에서 3개 이상을 채취하였으며 압축강도용 시편의 길이는 19cm으로, 굽힘 강도용 시편은 10cm의 길이를 사용하였다. 채취된 시편은 깊이 방향으로 파손 등 육안으로 확인하여 결함이 없거나 상대적으로 적은 부분을 취하여 사용하였다. 해빙의 강도는 압축강도용으로 전체 30개 시편의 평균을 취해 1.45MPa를 얻었고, 굽힘강도용으로 82개 시편의 평균을 취해 274kPa을 얻었다. 이 값은 2010년 러시아의 AAR에서 수행한 아라온호의 시운전 자료에서 식 (1)을 사용하여 제시된 평균값인 299kPa에 비해 작은 값이었다 (Table 4). 압축강도의 경우 직접 비교할 자료가 없으나 이 역시 비교적 작은 값으로 추정할 수 있다. 다만 쇄빙선 설계에 사용되는 선급규정 기준치인 550kPa에 비해서는 상당히 작은 값인데 이것은 시기적으로 여름철 기간을 막 지나고 있는 남극해의 현재 시기(2월말)로

볼 때 기온이 낮은 겨울철의 최고 강도 기준에 비해 낮을 수밖에 없다고 판단된다.

Table 2 Physical-mechanical properties of sea ice measured from the second sea ice floe

| Coring Position | Temperature [°C] | Density [kg/m ³] | Salinity [%] | Compressive Strength [MPa] | Flexural Strength [kPa] |
|-----------------|------------------|------------------------------|--------------|----------------------------|-------------------------|
| 100m | -1.45 | 915.3 | 3.8 | 1.30 | 205 |
| 200m | -1.72 | 843.5 | 3.8 | 1.41 | 292 |
| 300m | -1.67 | 855.8 | 4.4 | 1.64 | 239 |
| 400m | -1.68 | 850.9 | 4.3 | 1.24 | 240 |
| 500m | -1.82 | 824.5 | 3.8 | 1.35 | 302 |
| 600m | -1.72 | 852.1 | 4.0 | 1.72 | 281 |
| 700m | -1.77 | 792.2 | 4.4 | N/A | 267 |
| Mean | -1.72 | 842.6 | 4.0 | 1.45 | 274 |

Table 3 Physical-mechanical properties of sea ice measured from the third sea ice floe

| Coring Position | Temperature [°C] | Density [kg/m ³] | Salinity [%] | Compressive Strength [MPa] | Flexural Strength [kPa] |
|-----------------|------------------|------------------------------|--------------|----------------------------|-------------------------|
| 0m | -1.43 | 864.6 | 4.0 | 0.28 | 214 |
| 100m | -1.79 | 842.4 | 3.7 | 0.67 | 310 |
| 200m | -1.74 | 895.4 | 3.1 | 0.68 | 312 |
| 300m | -1.45 | 891.6 | 3.5 | 1.40 | 256 |
| 400m | -1.48 | 891.0 | 3.7 | 2.26 | 235 |
| Mean | -1.55 | 875.4 | 3.6 | 1.32 | 266 |

Table 3에는 세 번째 빙판에서 계측된 해빙의 재료특성치를 요약하였다. 해빙의 용융점은 염도에 따라 차이가 있으나 대략 -1.7°C ~ -1.8°C의 분포를 갖는데 세 번째 빙판의 경우 얼음의 온도는 해빙의 용융점보다도 낮은 -1.55°C로 기온이 높아 얼음이 계속 녹는 상황이었고 조직 손상도 많아 밀도는 비교적 낮은 0.875g/cm³ 이었고 염도는 거의 균일한 3.6% 이었다. 세 번째 빙판의 경우 전체 500m의 주행구간 중 0m 지점에서 400m 지점까지 매 100m 마다 3개씩의 해빙의 시추코어를 채취하였다 (400m 지점은 1개만 채취). 하지만 이번 경우는 시추한 코어 대부분 조직이 많이 와해되어 있어서 압축강도를 계측하기 위한 시편을 선택하기가 힘들었다. 시편의 개수도 적었고 계측에 사용된 시편 또한 강도가 매우 약하거나 시험에 사용하기 전 부서지는 것도 많았다. 전반적으로 두 번째 빙판의 계측치에 비해 밀도, 강도 측면에서 아주 낮은 값을 얻었다. 쇠빙성능시험을 수행할 때의 기온은 -3°C 정도로 기록되었다.

해빙의 강도는 19개 시편 평균으로 압축강도 1.32MPa, 54개 시편의 평균값으로 굽힘강도 266kPa을 얻었다. 계산된 굽힘강도 값은 두 번째 빙판의 굽힘강도 값보다 작은 값이었다. 세 번째 빙판의 경우 300m 지점의 중간 역전층을 제외하고는 깊이에 따라 해빙의 염도가 점차 감소하는 경향을 보였다.

Table 4 Physical-mechanical properties of sea ice measured from various locations

| Test Site and Season | Feb. 2012 | Jan. 2010 | Aug. 2011 | Aug. 2010 |
|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| | Amundsen Sea (Antarctic) | Ross Sea (Antarctic) | Chukchi Sea (Arctic) | Beaufort Sea (Arctic) |
| Total No. of Cores | 34 | 17 | 6 | 9 |
| Total No. of Specimen | 136 | - | 18 | 140 |
| Sea Ice Temperature (°C) | -2.3~-1.0 (Mean: -1.58) | -0.9~-3.7 (Mean: -1.95) | -1.7~0.2 (Mean: -0.71) | -1.7~0.0 (Mean: -0.84) |
| Sea Ice Density (kg/m ³) | 580 ~ 960 (Mean: 856) | 670 ~ 940 (Mean: 840) | 740 ~ 930 (Mean: 866) | 750 ~ 980 (Mean: 913) |
| Sea Ice Salinity (%) | 1.15~5.90 (Mean: 3.84) | 1.2~8.6 (Mean: 4.19) | ~2.6 (Mean: 1.01) | ~5.0 (Mean: 2.18) |
| Comp. Strength (MPa) | 0.52~3.57 (Mean: 1.398) | | | 0.69~3.70 (Mean: 1.830) |
| Flexural Strength (kPa) | 125~443 (Mean: 272) | 190~490 (Mean: 299) | 244~554 (Mean: 351) | 10~660 (Mean: 190) |
| Ref. | Choi et al. (2012) | Likhomanov (2010) | Jeong et al. (2011) | Choi et al. (2011) |

4. 결론

2012년 2~3월 현장시험이 수행된 아문젠해 73~75°S 해역에는 여름철에도 상당한 해빙이 남아있는 곳이지만 평년보다 남아 있는 해빙의 규모나 두께가 예상보다 커서 쇠빙시험을 수행하기 위한 적절한 빙상조건을 찾는 데 어려움이 있었다. 특히 2010년의 북극해 탐사에 비해 기상조건이 좋지 않아서 목측이나 헬리콥터를 이용한 빙판 탐색도 쉽지 않았다. 이번에 얻어진 온도, 염도의 데이터는 남극해에서 2010년에 러시아 AARI 연구팀이 계측한 값 (Table 4 참조)에 비해서 차이를 보이고 있는데 이 차이는 두 시기가 남극해의 해빙이 여름철 한창인 시기와 절정기를 지나고 이제 결빙기로 접어드는 시기의 차이라고 보인다. 그리고 온도가 용융점에 가깝거나 오히려 높아서, 계측된 온도와 밀도, 염도를 사용하여 굽힘강도를 추정하는 경험식을 사용하기에 무리가 있다는 것을 확인하였다. 추후 현장 실험은 기온이 낮고 균일한 빙질

이 보장되는 늦은 가을철 혹은 겨울철에 이루어져야 한다는 점을 시사하고 있다.

이번 남극 아문젠해의 아라온호 실선시험은 제한된 지역에서 실험을 했기 때문에 남극 해빙의 재료강도특성에 대한 전반적인 정보라고는 할 수 없지만 전년에 이어서 지속적인 빙해역 실선시험을 통해 독자적인 해빙에 대한 재료강도특성 데이터 축적과 현장계측에 사용되는 계측기기의 사용방법과 표준화된 계측방법을 만들었다는 점에서 의의를 찾을 수 있다. 아울러 향후 북극해와 남극해에서의 실선시험을 지속하기 위해 필요한 표준화된 실선시험 절차를 정립한 것도 본 연구를 통한 중요한 성과라고 할 수 있다.

후 기

본 논문은 지식경제부 지원 산업원천기술과제 (Grant No.10033640) 연구비 지원으로 수행된 연구결과로 연구비 지원에 감사드립니다.

References

Choi, K. Lee, C.J. Rim, C.W. & Kim, H.S., 2011. Strength Characteristics of Arctic Sea Ice from Ice Field Tests of the Icebreaking Research Vessel ARAON. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), pp.254-259.

Ha, J.S. Choi, K. Kim, H.S. Choi, G.G. & Lee, J.M., 2012. Measurement of Sea Ice Material Properties

and IBRV ARAON's Ice Field Tests in the Amundsen Sea, Antarctica. *Proceedings of the Annual KAOST*, Daegu, Korea, 31 May 2012, pp.546-549.

Jeong, S.Y. Choi, G.G. & Kim, S.H., 2011. Sea Ice Material Properties of Chukchi Sea. *Proceedings of the Autumn Meeting of SNAK*, Mokpo, Korea, 3 November 2011, pp.74-80.

Kim, H.S. Lee, C.J. & Choi, K., 2012. Speed Trial Analysis of Korean Ice Breaking Research Vessel ARAON on the Big Floes. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(6), pp.478-483.

Likhomanov, V., 2010. *Full-Scale Ice Trials of the Korean Research Icebreaker ARAON*. Arctic and Antarctic Research Institute, Russian Antarctic Expedition Report.

Timco, G.W & O'Brien, S., 1994. Flexural Strength Equation of Sea Ice. *Cold Regions Science and Technology*, 22, pp.285-298.

