

해빙과의 접촉 면적을 고려한 국부 빙압력 추정 연구

김태욱* · 이탁기**

*경상대학교 대학원, 해양시스템공학과
**경상대학교 조선해양공학과, 해양산업연구소

Study on Estimation of Local Ice Pressures Considering Contact Area with Sea Ice

Tae-Wook Kim*, Tak-Kee Lee**

*Dept. of Ocean System Eng., Graduate School, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

**Dept. of Naval Archi. & Ocean Eng., Gyeongsang National University, Institute of Marine Industry, Tongyeong, Korea

KEY WORDS: Local ice pressure 국부 빙압력, Contact area 접촉 면적, Arctic sea 북극해, Sea ice 해빙

ABSTRACT: Ice loads may be conveniently categorized as local ice loads and global ice loads. Local ice loads are often defined as ice pressures acting on local areas of shell plates and stiffeners. Therefore, local ice loads are defined in all ice class rules. However, directly measuring the local ice pressure using the actual ice class vessel is a very difficult task because appropriate instruments for direct measurement must be installed on the outer hull, and they are easily damaged by direct ice contacts/impacts.

This paper focuses on the estimation of the local ice pressure using the data obtained from icebreaking tests in the Arctic sea in 2010 using the Korean icebreaking research vessel (IBRV) ARAON. When she contacted the sea ice, the local deformation of the side shell was measured by the strain gauges attached to the inside of the shell. Simultaneously, the contact area between the side shell and sea ice is investigated by analyzing the distribution of the measured strain data. Finally, the ice pressures for different contact areas are estimated by performing a structural analysis.

1. 서 론

북극항로 (Northern Sea Route, NSR)가 주목받는 가장 큰 이유는 해상 운송에 있어서의 경제성에 기인한다. 부산 - 로테르담 기준으로 북극항로 이용 시 수에즈 운하를 통과하는 전통항로 대비 거리는 7,000km, 시간상으로는 10일의 단축효과가 있다. 이러한 북극항로의 경제성으로 인해 일본, 중국 등에서도 북극항로에 대한 연구를 진행하고 있다(Kang et al., 2013). 북극항로 운항 선박이 해빙과 접촉/충돌하여 받게 되는 빙하중은 얼음의 재료강도, 선체의 형상, 속도 등에 따라 달라진다. 그러나 얼음의 파괴 메커니즘에 대한 연구가 부족하고 선체와 빙판 사이의 상호작용 과정이 너무 복잡하기 때문에 빙하중을 엄밀히 산정하는 데는 많은 어려움이 있다.

빙하중은 편의상 국부 빙하중과 전체 빙하중으로 분류될 수 있다(ABS, 2011). 국부 빙하중은 일반적으로 판재와 보강재 상

의 일부 면적에 작용하는 빙압력으로 정의되며, 전체 빙하중은 선체 거더에 대한 굽힘 모멘트로 다룬다. 모든 빙해 선박 규칙에는 국부 빙압력이 정의되어 있는데, 실제 빙하중은 현장 계측과 모형 시험을 근거로 정해지는 것이다. 평균 빙압력은 접촉 면적으로 n 승에 비례하는 것으로 고려되고 DNV 규칙에서는 -0.5, 국제선급연합회의 극지 선박 규칙(Polar Class Rules)에서는 -0.3이다(ISSC, 2012).

스트레인 게이지를 이용한 국부 하중을 계측한 대표적인 선박은 Polar Sea호, Palmer호, St. Laurent호 그리고 Terry Fox호 등이 있다. Polar Sea는 1982년 여름과 1983년 겨울에 Beaufort Sea와 Chukchi Sea에서 약 1,400회의 충격을 계측하였다(St. John et al., 1990). 이때, 주로 횡프레임의 웹에 스트레인 게이지를 설치하여 압축 변형률을 계측하고 이로부터 빙압력을 추정하였다.

미국의 다목적 과학연구선인 Palmer호는 1992년 8-9월에 남

Received 24 June 2014, revised 8 October 2014, accepted 24 October 2014

Corresponding author Tak-Kee Lee: +82-55-772-9193, tklee@gnu.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2014 in Busan.

극에서 빙하중 계측시험을 수행하였다(St. John and Minnick, 1995). 이 시험에서는 선수부 측면, 선수부 바다 등 4 부분에 스트레인 게이지를 설치하였는데, 프레임 측면과 Floor 부재면도 포함하고 있다.

St. Laurent호는 1994년 7~9월에 베링해협부터 북극해를 거쳐 북해의 스발바르제도까지 항해하면서 선수부, 선측 및 바다부 패널에 스트레인 게이지를 설치하여 빙하중을 계측하였다. Frederking(2000)에 의하면, 선수부에는 6개의 주프레임에 게이지를 설치하여 전단 변형을 차이를 계측하였다.

Terry Fox호는 2001년 6월 Newfoundland 북동부 해안에서 빙산조각과의 충돌을 계측하기 위한 실선시험을 수행하였다(Ritch et al., 2008). 이 시험에서는 계측부가 횡프레임과 횡보강재 및 수평 강력부재(Stringer)로 이루어진 격자구조인 점을 고려하여 이들 부재의 측면에 120개의 스트레인 게이지를 설치하였다.

저자 등(Lee et al., 2013)은 2010년 북극해에서의 빙하중 계측 자료를 이용하여 하나의 게이지를 둘러싸고 있는 영역을 기준으로 한 단위 면적(빙압력 추정 시 흔히 Sub-panel로 기술됨)에 대한 빙압력을 추정할 바 있다. 본 연구에서는 동일한 계측 자료에 대한 분석을 통해 해빙이 선체의 어느 정도 면적에 접촉하는지를 파악하고, 이를 토대로 접촉 면적에 따른 단위 압력부가 범위를 달리하면서 수행한 구조해석 결과를 이용하여 빙압력을 추정하였다. 최종적으로는 추정된 빙압력을 기존의 빙압력 - 접촉 면적 곡선에 표시하고 그 관계를 비교하고 분석하였다.

2. 쇄빙 시 해빙과의 접촉 면적

빙해지역을 운항하는 선박이 해빙과 접촉 또는 충돌할 때 선체가 받는 하중인 빙하중을 빙압력으로 환산하는 작업은 그리 만만한 작업이 아니다. 압력은 단위 면적당의 작용력으로 표현되기 때문에 얼마만한 힘이 어느 정도의 면적에 작용하는지를 알아야 한다. 그런데, 선박이 해빙과 접촉 또는 충돌할 경우 작용력은 스트레인 게이지 등을 통해 쉽게 계측할 수 있지만 그 힘이 어느 정도의 면적에 작용하였는가 하는 것을 판별하는 것은 쉬운 일이 아니다.

물론 선체 외판에 직접 압력센서를 도포한다면 그 작용면적과 압력 값이 센서로부터 곧바로 계측가능하다. 그러나 해빙과 직접 접촉하는 부분에 압력센서를 도포할 경우 센서의 파손 가능성뿐만 아니라 현실적인 설치의 어려움 등을 고려할 때 실현하기 어려운 방안이다. 그래서 일반적으로는 선체 내부에 적절한 센서를 설치하고 이로부터 빙하중을 계측하는 방법을 활용하고 있는 것이다(Sanderson 1995). 본 연구에서 활용하고 있는 2010년 북극해 빙하중 계측자료도 선체 내부에 스트레인 게이지를 설치하고 이로부터 계측된 것이다 (Lee et al. 2013).

본 연구에서는 계측된 신호를 분석하여 동시에 계측된 값이 일정 수준을 넘으면 해당 게이지 영역까지를 접촉 면적으로 취하는 방안을 적용하고자 한다. Fig. 1은 2010년 우리나라 쇄빙연구선인 아라온호를 이용하여 수행된 세 차례의 쇄빙시험 시 선

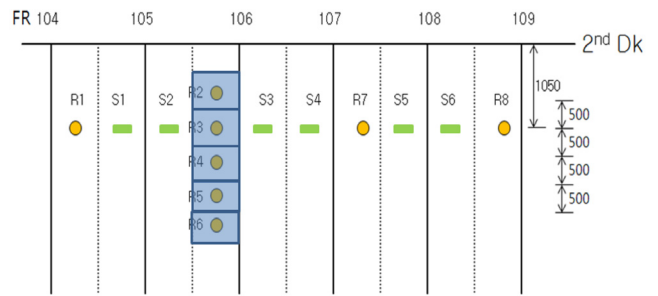


Fig. 1 Location of strain gauge during the Arctic measurement in 2010

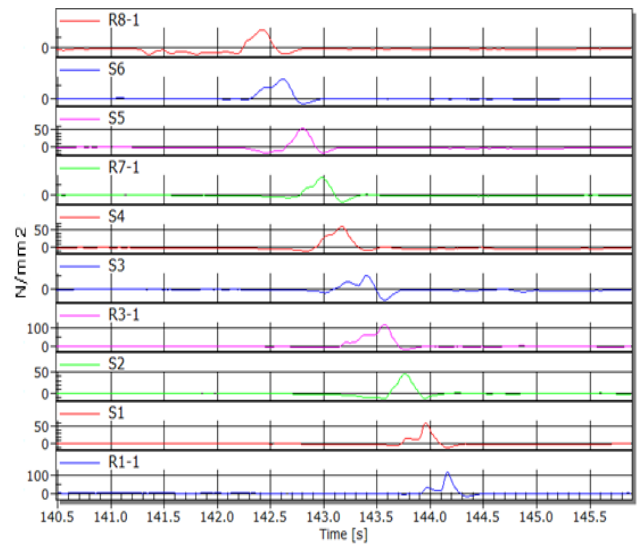


Fig. 2 Movement of peak stress along the longitudinal direction

수 스티스터실의 좌현 외판 내부에 설치된 스트레인 게이지의 위치를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 해빙이 주로 접촉할 것으로 예상되는 위치에 선수미 방향으로 1열, 그리고 기준 위치로 삼은 선수 어깨부 근처에 선체 깊이 방향으로 1열의 게이지를 부착하였다. 아라온호의 설계 흘수는 6.8m이고, 여름철 최대 흘수는 7.6m이며, 제2갑판은 7.1m A/B 위치에 설치되어 있다(Kim et al. 2011).

Fig 2에서는 쇄빙시험 시 계측된 응력값에 대한 선수미 방향의 경향을 보여주고 있다. 즉, Fig. 1에서 알 수 있듯이 R8 게이지는 가장 선수 쪽에 배치된 것이며, 그림에서 위로부터 아래로 선수에서 선미 쪽으로 부착된 순서대로 정리한 것이다. 해빙과의 접촉에 의해 나타나는 응력 파형이 선수 쪽에서부터 선미 쪽으로 움직이고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 선박이 전진함에 따라 선수 정면에서 깨진 빙판들이 게이지 부착된 부분을 접촉하면서 선미 쪽으로 이동하고 있기 때문에 생기는 것으로 보인다.

한편, 선체 깊이 방향으로 부착된 5개의 게이지에 의한 계측값을 살펴보면 Fig 3과 같이 하나의 채널에서 피크값일 때 다른 채널에서도 어느 수준 이상의 데이터가 계측된 것이 다수 있었다. 이는 빙두께가 두꺼울 경우 선체 깊이 방향으로 접촉하는 영

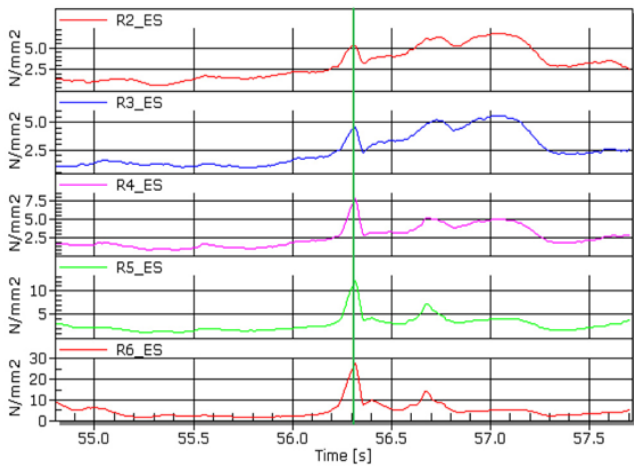


Fig. 3 Movement of equivalent stress along the vertical direction

역이 증가할 수 있으며 이를 반영한 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 R2~R6의 다섯 개 게이지가 수직방향으로 부착된 부분에서 계측된 값들을 중점적으로 고찰하고 이 값들을 기준으로 해빙의 접촉 면적으로 설정하여 이에 따른 빙압력을 추정하기로 한다.

3. 접촉 면적을 고려한 구조해석

앞서 기술한 내용을 기초로 하여 빙압력을 산정하기 위해서는 선체 깊이방향에서 해빙과의 접촉 면적을 고려한 응력과 압력과의 관계를 파악할 필요가 있다. 이때, 계측된 변형률을 응력으로 환산하고 이로부터 빙압력을 추정하는 기본적인 방법은 Lee et al.(2013)을 참조하기 바란다.

본 연구에서는 접촉 면적에 따른 단위압력 부가 범위를 Fig. 1의 R2~R6 영역 중 인근 영역의 조합으로 설정하고 구조해석을 수행하였다. 기본적으로 Fig. 1에 표시된 R2~R6의 각 부분에 대해 개별/조합하여 단위압력을 부가한다. 이때, 5개의 사각형을 대상으로 단위압력을 가할 수 있는 조합을 고려하면, 총 15 케이스가 된다. 여기서, R2와 R4 위치에서 동시에 응력이 나타나는 경우와 같이 연속되지 않은 경우는 서로 다른 빙편이 접촉하는 것으로 보아 빙압력 계산에서 제외하였다.

Fig. 1에 사각형으로 표시된 영역의 크기는 프레임을 포함한 보강재 간격(400mm)과 게이지 설치 간격을 고려하면 400mm×500mm(가로×세로)이다. 응력은 사각형 중심 위치에서의 응력 값이 필요하다. 또한, 구조해석 시에는 하나의 사각형 범위를 16개로 요소 분할한 모델을 이용하였다(Lee et al., 2013). Fig. 4는 아라온호 좌현의 구조 해석 모델을 보여주고 있다.

4. 압력계산 및 고찰

2010년 북극해 계측 데이터를 등가응력(Equivalent stress) 기준으로 피크값이 20MPa 이상인 데이터를 정리하였다. 피크값이 계측된 영역과 인접한 게이지 영역에서 일정 응력값 이상인

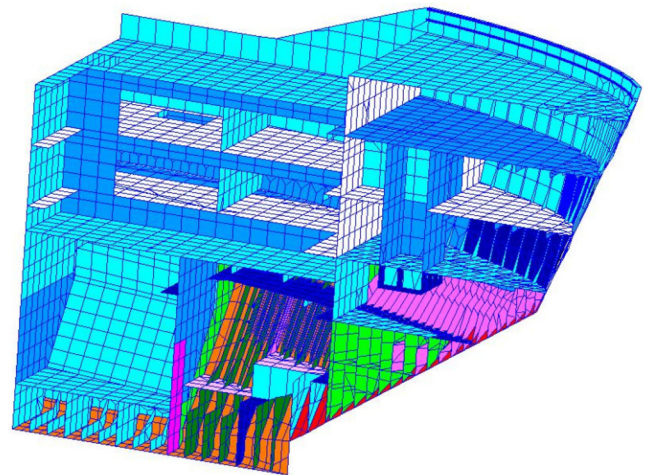


Fig. 4 Structural analysis model of port side of the Araon

경우 해빙이 동시에 접촉하는 것으로 간주하였다. 동시 접촉 여부를 판별하는 기준인 이 일정 응력값은 10MPa과 3MPa의 두 가지로 설정하였다.

예를 들어, Fig. 1의 R3에서 피크값이 계측되었는데, 동일 시각에 R2에서는 기준 응력값 이상의 데이터가 계측되었고 R4에서는 그 이상의 데이터가 계측되지 않았을 경우에 R2와 R3 영역을 접촉 면적으로 보아 구조해석을 수행하고 이로부터 구해진 응력-압력 관계를 이용하여 압력을 계산하였다. 이때, 두 값 중 큰 값을 기준으로 계산된 값을 빙압력의 최대값이라 하고, 두 값에 대해 계산한 개별적인 빙압력의 평균을 취하여 빙압력의 평균값으로 정의하였다.

앞서 설명한 바와 같이, 만약 R2에서 피크값이 계측되었을 때 R3에서는 일정 응력값 이상의 데이터가 계측되지 않고, R4에서는 일정 응력값 이상의 데이터가 계측되었다면 그 데이터는 계산에서 제외하였다. 총 38개 데이터 중 위의 계산을 위한 조건에 해당하지 않는 경우인 인접한 영역이 아닌 떨어진 영역에서의 응력이 일정 값 이상인 3개 데이터는 제외하고 35개 데이터를 계산에 이용하였다.

Fig. 5~8에는 10MPa과 3MPa인 두 응력을 기준으로 한 경우

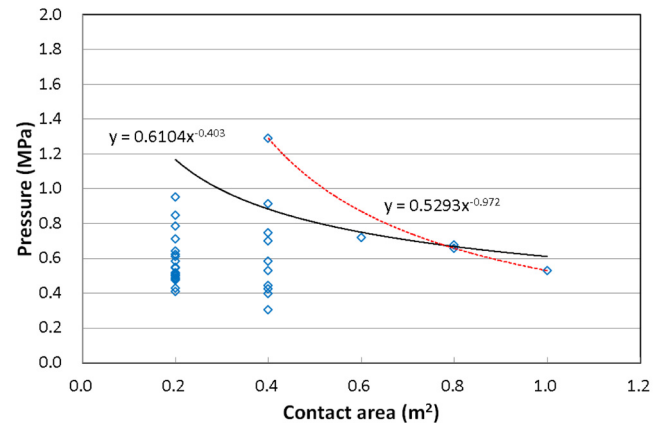


Fig. 5 Maximum pressures in case of more than 10MPa

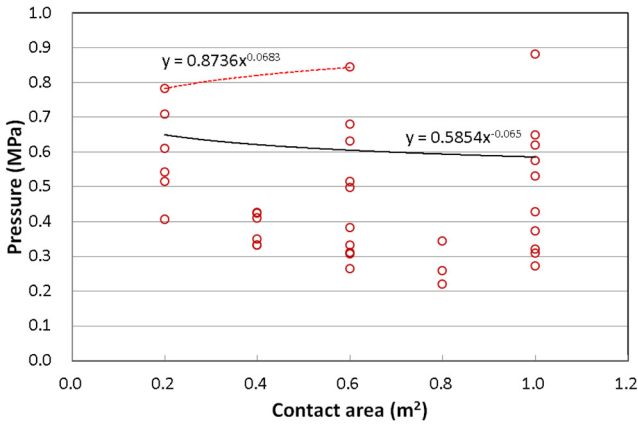


Fig. 6 Maximum pressures in case of more than 3MPa

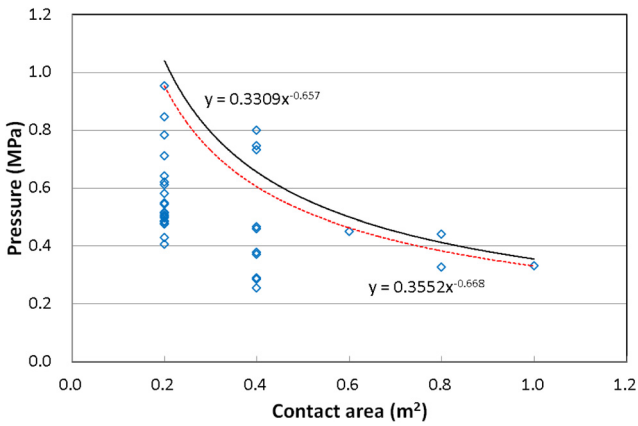


Fig. 7 Average pressures in case of more than 10MPa

에 대하여 각각 빙압력 최대값과 평균값을 이용한 접촉면적-빙압력 그래프를 나타내었다. 또한 그래프에 Envelop 개념의 추세선인 빨간 점선과 각 면적별로 최대값에 대한 추세선인 검은 실선을 각각 나타내었다. Fig. 5~8에서 3MPa 이상인 경우의 최대값을 나타낸 그래프를 제외하면 접촉 면적이 증가할수록 빙압력은 감소하는 경향을 보이며, DNV에서 제시한 -0.5 승 가까운 값으로 비례하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9, 10에 10MPa와 3MPa 이상인 경우에서 하나의 단위면적에 해당하는 영역에 대한 데이터를 직접법으로 계산한 빙압력 (P_{unit area})과 접촉 면적을 조사한 후 해당 면적에 단위압력을 부가하여 계산한 빙압력(P_{contact area})을 비교하였다. 10MPa 이상인 경우에 P_{contact area}와 P_{unit area}의 비는 0.879이고, 3MPa 이상인 경우에 대해서는 P_{contact area}와 P_{unit area}의 비는 0.675이다. 따라서 10MPa 이상인 경우에 대하여 계산한 빙압력이 직접법으로 계산한 결과와 더 밀접하다.

Table 1에 10MPa 이상인 경우 접촉 면적에 따른 최대값, 평균값, 최소값을 나타내었고, 빙해역에서의 쇄빙선을 이용한 빙압력 실험 데이터와 충격해머 실험을 통한 데이터를 바탕으로 그려진 빙압력-면적 곡선(Sanderson, 1995)에 본 연구에서 계산된 Table 1의 10MPa 이상인 경우의 빙압력 중 접촉 면적을 기준으로 0.2m², 0.4m², 0.6m², 0.8m², 1.0m²에서의 최대 빙압력,

평균 빙압력, 최소 빙압력을 Fig. 11에 나타내었다. 각각 가장 높은 점이 최대값, 가장 낮은 점이 최소값, 표식이 있는 점이 평균값을 나타낸다. 접촉 면적이 0.6m², 1.0m²인 경우에는 데이터가 하나이므로 최대값과 최소값은 동일하다.

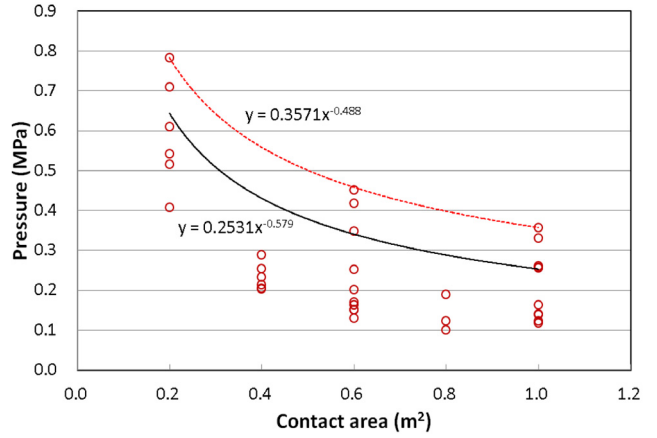


Fig. 8 Average pressures in case of more than 3MPa

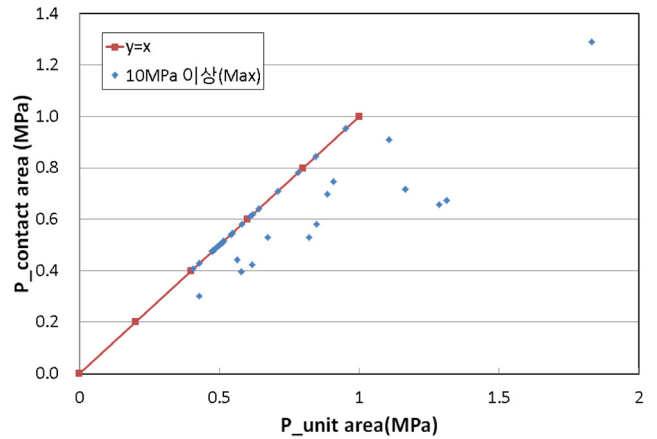


Fig. 9 Comparison of pressures between unit area and contact area in case of more than 10MPa

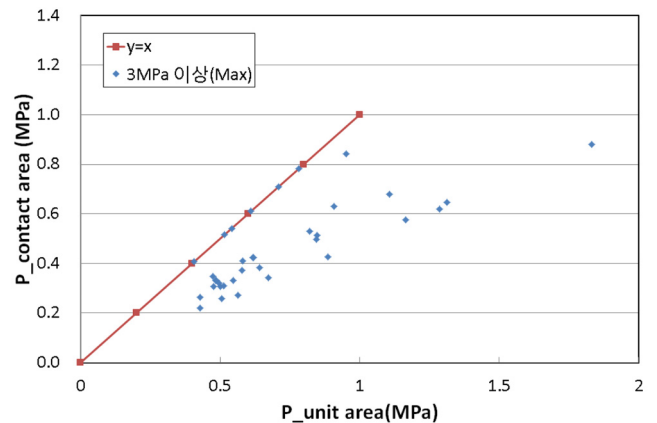


Fig. 10 Comparison of pressures between unit area and contact area in case of more than 3MPa

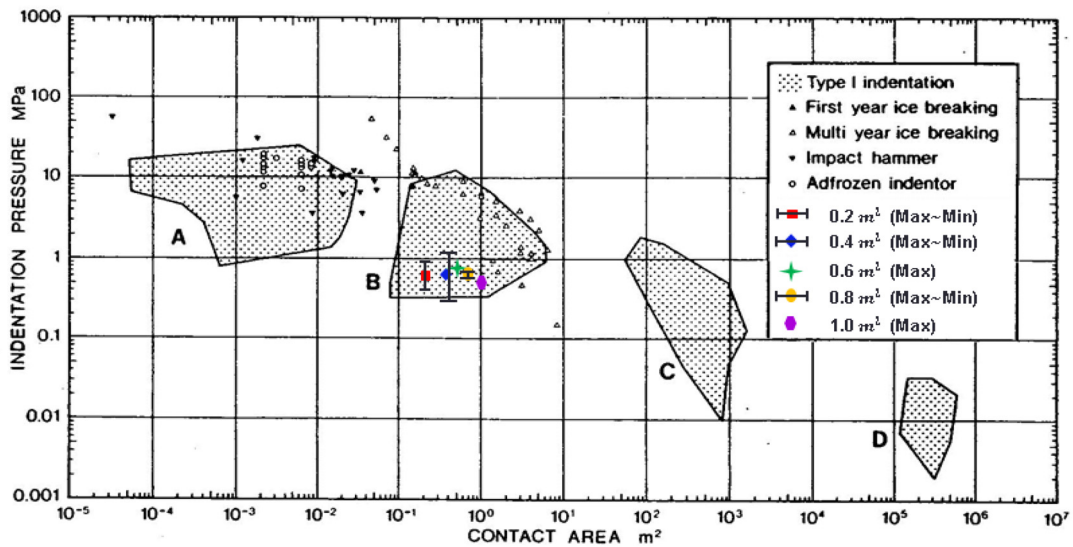


Fig. 11 Ice pressure - contact area curve including the present results

Fig. 11로부터 본 연구에서 추정된 빙압력은 이전의 계측값에 비해 다소 낮게 나타났다. 이러한 결과는 Kim et al.(2012)이 2010년 북극해에서 계측한 해빙들의 특성을 분석하면서 지적한 바와 같이, 2010년 계측 당시 비교적 높은 기온으로 극지역에서 계측된 타 연구결과에 비해 해빙의 강도가 낮았던 것이 주요 원인으로 판단된다.

Table 1. Estimated maximum, mean and minimum pressures considering contact area in case of more than 10MPa

Area [m ²]	Maximum [MPa]	Mean [MPa]	Minimum [MPa]
0.2	0.95	0.58	0.41
0.4	1.29	0.63	0.30
0.6	0.72	0.72	0.72
0.8	0.68	0.67	0.66
1.0	0.53	0.53	0.53

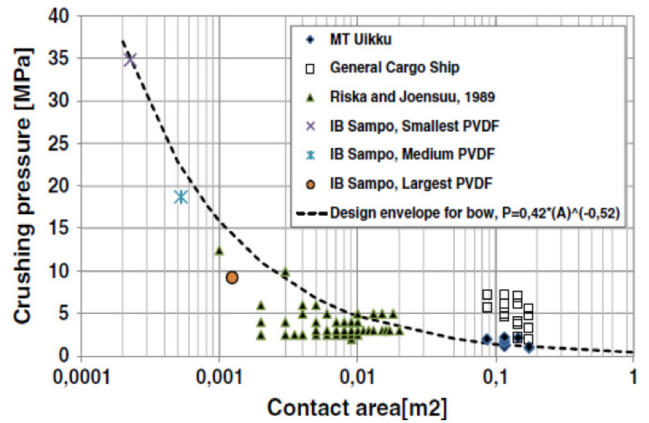


Fig. 13 Ice pressure vs. contact area curve included design envelop graph (Kujala and Arughadhoss, 2011)

Design envelope와 접촉 면적당 최대, 평균, 최소 빙압력을 비교한 그래프를 Fig 12에 나타내었다. 본 연구의 계산 결과 중 접촉 면적이 0.4m²을 넘는 경우 대부분이 그 양은 얼마되지 않으나 Design envelope를 초과하고 있는 것으로 나타났다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 이전에 구해진 이 Envelope에 대해 접촉 면적이 다소 큰 일반 화물선의 경우도 대부분 그 Envelope를 초과하고 있다(Kujala and Arughadhoss, 2011). 따라서 보다 주의 깊은 추가적인 검토가 필요해 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 2010년 북극해에서 수행한 2, 3, 4차 쇄빙시험의 계측 자료를 바탕으로 해빙이 선체 깊이방향으로 어느 정도 면적에 접촉하는지를 파악하고, 이를 고려하여 접촉 면적에 따른 빙압력 추정을 시도하였으며, 추정된 빙압력에 대해 접촉 면적과의 관계를 고찰하고 비교 분석하였다.

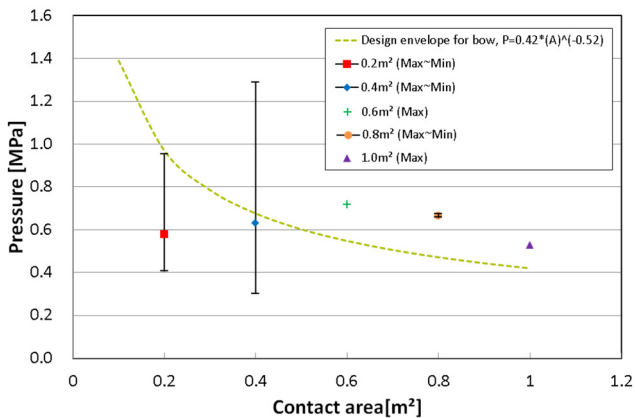


Fig. 12 Comparison between design envelope and pressures accounting for contact area

2010년 북극해에서 스트레인 게이지를 통해 계측한 변형률 데이터를 등가응력(Equivalent stress)기준으로 20MPa 이상인 데이터를 정리하였고, 각각 피크값 이외의 영역에서 10MPa 이상 및 3MPa 이상인 2가지 경우를 기준으로 접촉 면적을 고려하였다. 계산 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 기준응력 3MPa 이상이고 최대값을 이용한 경우를 제외하면 기존의 계측결과와 같이 접촉 면적이 증가할수록 빙압력은 감소하는 경향을 보인다는 것을 알 수 있고, 접촉 면적과는 약 -0.5 승에 비례하는 것으로 조사되었다.

(2) 가장 작은 단위면적에 해당하는 영역에 대한 데이터를 직접 방법으로 계산한 빙압력($P_{unit\ area}$)과 접촉 면적을 고려하여 계산한 빙압력($P_{contact\ area}$)을 비교한 결과, 10MPa 이상인 경우에 $P_{contact\ area}$ 와 $P_{unit\ area}$ 의 비는 0.879이고, 3MPa 이상인 경우에 대해서는 $P_{contact\ area}$ 와 $P_{unit\ area}$ 의 비는 0.675이다. 따라서 10MPa 이상인 경우에 대하여 계산한 빙압력이 직접 방법으로 계산한 결과와 더 밀접하다는 것을 알 수 있다.

(3) 빙해역에서의 쇄빙선을 이용한 빙압력 실측 데이터를 포함하고 있는 기존의 빙압력-면적 곡선에 본 연구에서 계산된 접촉 면적과 빙압력을 표시한 결과, 다년생 빙에 대한 쇄빙 자료보다 낮은 영역에 위치하지만, 비교적 합리적인 범위이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 지원 산업원천기술과제 (Grant No. 10033640)의 연구비 지원과 교육부와 한국연구재단의 BK21 플러스 프로그램(No. 31Z20130012972)의 후원으로 수행된 연구 결과이며, 지원에 감사드립니다.

References

- ABS 2011. Guide for Ice Load Monitoring Systems, ABS, Houston, TX, USA.
- Choi, K.S., 1995. Ice Mechanics: Risks to Offshore Structures, Seoul: Cheong Moon Gak Publishers (Original work published in 1988 by Sanderson, T.J.O.).
- Frederking, R., 2000. Local Ice Pressures from the Louis S. St. Laurent 1994 North Pole Transit. NRC, Canadian Hydraulics Centre, Technical Report HYD-TR-054.
- ISSC, 2012. Arctic Technology, 18th International Ship and Offshore Structures Congress, Committee V.6 Report, 09-13 September 2012, Rostock, Germany.
- Kang, W.S., Park, Y.S., Lee, Y.H., 2013. North Pole Route Development Status & Related Shipbuilding Industry Technology Trends, KEIT (Korea Evaluation Institute of Industrial Technology) PD Issue Report, May 2013 Vol. 13-5.
- Kim, D.H., Park, Y.J., Choi, K.S., 2012. Material Properties of Arctic Sea Ice during 2010 Arctic Voyage of Icebreaking Research Vessel ARAON: Part 2 - Compressive Strength, Flexural Strength and Crystal Structures. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(1), 1-8.
- Kim, H.S., Lee, C.J., Choi, K.S., Kim, M.C., 2011. Study on Icebreaking Performance of the Korea Icebreaker ARAON in the Arctic Sea, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 3, 208-215.
- Kujala, P., Arughadhoss, S., 2011. Statistical Analysis of Ice Crushing Pressures on a Ship's Hull during Hull-ice Interaction. *Cold Regions Science and Technology*, 70, 1-11.
- Lee, T.K., Kim, T.W., Rim, C.H., Kim, S.C., 2013. A Study on Calculation of Local Ice pressures for ARAON Based on Data Measured at Arctic Sea, *Journal of Ocean Engineering and Technology* 27(5), 88-92.
- Ritch, R., Frederking, R., Johnston, M., Browne, R., Ralph, F., 2008. Local Ice Pressures Measured on a Strain Gauge Panel during the CCGS Terry Fox Bergy Bit Impact Study. *Cold Regions Science and Technology*, 52, 29-49.
- St. John, J.W., Daley, C., Blount, H., 1990. Ice Loads and Ship Response to Ice -Summer 1982/Winter 1983 Test Program-, Ship Structure Committee (SSC), Report No. 329.
- St. John, J.W., Minnick, P.V., 1995. Ice Load Impact Study on the National Science Foundation's Research Vessel Nathaniel B. Palmer. Ship Structure Committee (SSC), Report No. 376.