

북극해에서의 쇄빙시 국부 빙하중 계측 신호에 대한 파형 분석

전영주* · 임채환** · † 이탁기

*경상대학교 대학원, ** 한국기계연구원, † 경상대학교 조선해양공학과, 해양산업연구소

Profile Analysis on Signal Measured Local Ice Load during Icebreaking in Arctic Sea

Young-Ju Jeon* · Chae-Whan Rim** · † Tak-Kee Lee

* Graduate school of Gyeongsang National University, Tongyoung, 650-160, Korea

** Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, 305-343, Korea

† Dept. of Naval Archi. & Ocean Eng., Gyeongsang National Univ., Institute of Marine Industry, Tongyoung, 650-160, Korea

요 약 : 본 연구의 목적은 빙해역을 운항하는 선박의 쇄빙시 깨진 해빙에 의해 선수부 좌현 외판에 작용하는 국부 빙하중을 계측한 신호의 특성을 조사하는 것이다. 한국 최초의 쇄빙연구선인 아라온호를 이용하여 2010년 8월초 북극해에서 실선 시험을 수행하여 선수부에 설치된 변형률 게이지로부터 국부적인 빙하중에 의한 신호를 계측하였다. 국부적인 빙하중에 의한 구조 응답 특성을 반영한 계측 신호는 전형적인 유체 충격압에 대한 하중-시간 이력과 다소 다른 특성을 갖는 것도 있음이 파악되었다. 본 연구에서는 계측 신호에 대한 시간 이력을 분석하고, 무차원화된 특성값들로 나타내었다.

핵심용어 : 국부 빙하중, 쇄빙선, 북극해, 실선 시험, 빙하중 구조 응답 특성, 하중-시간 이력, 유체 충격압

Abstract : The aim of this study is to investigate the characteristics on the profile of local ice load acting on side shell of port side in bow part due to broken ice during icebreaking of ships in ice covered waters. The first Korean icebreaking research vessel 'ARAON' had a sea ice field trial in the Arctic Sea during early August, 2010, and the signals due to local ice impact measured from several strain gauges installed at bow part were gathered. It is known that these data with structural response characteristics due to local ice impact have some different characteristics with a typical hydraulic impact pressure - time history. In this study, the time history on the measured signals was analyzed and the characteristic values were presented using non-dimensional parameters.

Key words : local ice load, icebreaker, Arctic Sea, full-scale field trial, structural response characteristics due to ice impact, load-time history, hydraulic impact pressure

1. 서 론

국제 원유가 고유가를 유지하고 기후변화로 인해 북극해의 얼음이 녹으면서 북극해 항로(Northern Sea Route: NSR)에 대한 관심이 커지고 있다. Kim and Hong(2012)에 의하면, 부산항에서 로테르담까지 기존의 수에즈 운하로 가게 되면 거리가 2만 1,000킬로미터에 달하지만, 북극해 항로를 이용하면 1만 2,700킬로미터로 수송거리가 40% 줄고, 수송기간도 10일 이상 단축되므로 북극해 항로를 통한 유럽과 아시아 간의 상업적인 수송은 상당히 효율적이라 할 수 있다.

그러나 북극해 항로는 1년 중 통상 3개월 정도의 기간만

이용할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그리고 이 기간 중에도 항로상에는 항상 유빙이 떠돌아다니는 선박과의 충돌 위험이 상존하고 있다. 따라서 이 항로를 운항하는 선박은 Ice class 등급을 받아야 하며, 이를 받은 선박이라 하더라도 쇄빙선의 에스코트를 받는 것이 권장되고 있다.

빙해 지역을 운항하는 선박을 건조할 때 가장 중요한 사항은 빙하중 산정 문제이며, 선박에 작용하는 빙하중을 산정하기 위해서는 빙하중의 개념과 함께 빙-선체 상호작용에 대한 이해가 필수적이다(Choi and Jeong, 2008). 여기서, 선체구조가 받게 되는 빙하중이란 빙해역에서 활동하는 선박이나 해양구조물이 해빙과 접촉하면서 받게 되는 힘을 말하며, 선박

† 교신저자 : 종신회원, tklee@gnu.ac.kr 055)772-9193

* 연회원, jyj2199@naver.com 055)672-3797

** 연회원, cwrim@kimm.re.kr 042)868-7415

의 종강도 측면에서 구조부재가 받게 되는 전체 하중이거나 구조부재에 직접 작용하여 탄성 혹은 탄소성 변형을 유발시키는 국부 하중을 의미한다(Kim et al., 2012).

빙해지역을 운항하는 선박이 해빙과 충돌하게 되면, 선체 구조는 하중을 받게 될 것이다. 이러한 하중을 받은 구조부재의 응답 특성을 파악하기 위해서는 먼저 충격하중이 구조부재에 가해지는 동안의 하중-시간관계 곡선을 규명하는 것이 중요하다(Paik et al., 1999).

본 연구에서는 우리나라 최초의 쇄빙연구선인 아라온호를 이용하여 2010년 8월초 북극해에서 수행된 국부 빙하중 계측 실선시험에서 얻어진 데이터를 하중 응답 특성 측면에서 분석하였다. 본 실선시험에서 계측한 해빙에 의한 충돌은 쇄빙시 선수에 의해 깨진 얼음조각이 이동하면서 발생하게 되는데, 이러한 얼음은 그 자체로 강체가 아니기 때문에 경우에 따라서는 짧은 충돌기간 동안에도 수차례의 충격이 나타날 수도 있다. 본 연구에서는 동적 응답 특성을 분석할 때 유용하다고 판단되는 충격압 특성을 파악하기 위하여 빙에 의한 하중 파형의 특성에 대한 분석을 시도하였다. 이때, 선박이나 방파제에 작용하는 유체 충격압과 바지가 교각에 충돌할 때의 충격압 특성과 비교하여 그 차이점을 확인하였다.

2. 유체 충격압의 특성

선박에 작용하는 유체 충격압에는 슬로싱, 슬래밍 또는 청파를 들 수 있다. 이들 유체 충격압의 대표적인 프로파일은 Fig. 1에 나타내는 바와 같고, 압력은 매우 짧은 시간 내에 최대값에 도달하고 지수함수 형태에 따라 소멸해 간다. 그림에서 알 수 있듯이, 충격압에 대한 대표적인 형상은 4가지 변수로 특징지어지는데, 최대압력 도달시간, 최대 압력, 소멸 형태 및 지속 시간이 그것이다.

Lee et al.(2007)은 북태평양을 운항하는 대형 컨테이너선에서 계측한 슬래밍 압력을 위와 같은 형상적 특성을 기준으로 분석한 바 있는데, 이때 계측된 슬래밍 압력은 Fig. 1과 같은 대표적인 형상 외에도 Fig. 2와 같이 소위 ‘impulsive tail’을 가지고 있는 경우도 있었다. 이러한 형상은 과거 몇몇 연구자들에 의해서도 보고된 것이며, 1차 유체 충격이후 유체의 공급이 일정시간 동안 지속될 때 나타나는 것으로 알려져 있다.

한편, Cuomo et al.(2011)은 케이슨식 방파제에 작용하는 임펄스와 준정적 파랑 하중의 시간 이력에 관한 몇 가지 모델을 정리해 두고 있다. 이들 모델은 하중 작용시 동적 응답을 해석하기 위한 것이며, 초기 충격하중과 이후의 준정적 하중을 구별하고 있기도 하다.

Fig. 3은 Cuomo et al.가 정리한 주요 파형을 보여주고 있다. 그림에서 Lundgren(1969), Oumeraci et al.(1994) 및 Shimosako et al.(1994)가 제안한 파형은 충격압 성분만을 단순화한 것이며, 나머지 3개 모델은 충격압 작용 후 준정적 하중 효과까지를 포함한 것이 특징이다. 준정적 하중 부분은

앞서 슬래밍 데이터에서 기술한 impulsive tail을 단순화시켜 포함하고 있는 것이다. 이 중에서 Shimosako et al.(1999)가 제안한 모델은 케이슨식 방파제에 의한 파랑 충격시 방파제의 미끄러짐(sliding)을 평가할 때 일본 내에서 가장 널리 채택되고 있다고 한다. 이 모델은 준정적 하중 부분을 sine 파형으로 처리하고 있다.

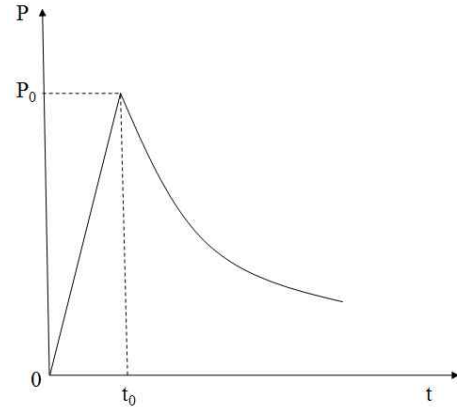


Fig. 1 A typical profile of impact pressure

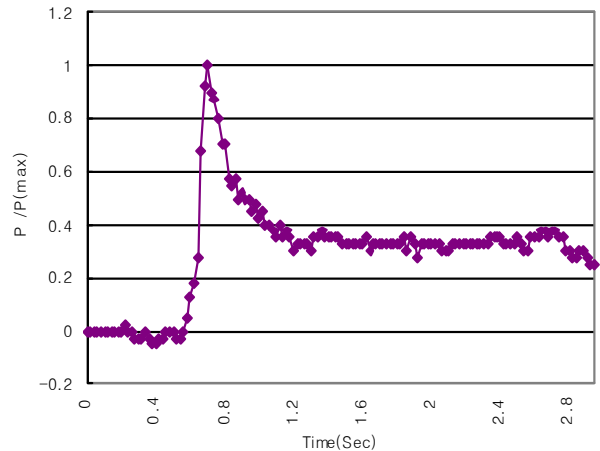


Fig. 2 A profile of impact pressure with impulsive tail

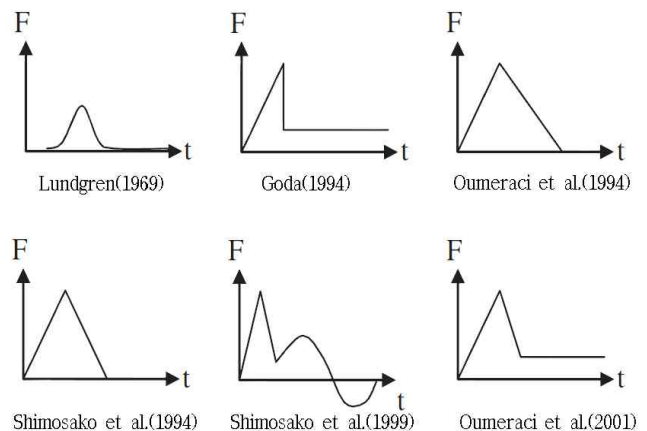


Fig. 3 Several wave impact-time history model against caisson breakwaters

3. 고체 충격압의 특성

Sha and Hao(2013)는 수로 상에 건설된 원형의 보강 콘크리트 교각과 바지가 충돌하는 상황을 시뮬레이션하면서 간단한 실험도 함께 수행하였는데, 이때 충격하중의 파형을 제시하고 있다. 이는 선박과 다른 고체와 충돌시 파형으로 고려할 수 있으므로 여기서 비교를 목적으로 나타내었다.

그들은 진자식 충격 시험 시스템을 소규모 실험을 수행하였으며, 충격자에 부착한 하중계와 교각 모형의 뒤에 설치한 변위계를 이용하여 충격시 하중과 변위를 계측하였다. Fig. 4는 실험시 얻어진 하중 데이터이며, 여기서 7.5도의 각도는 진자식 충격자가 들러 올려진 각도를 의미한다. 이 그림에서 알 수 있듯이 유체 충격압과는 다소 다른 파형을 보여주고 있다.

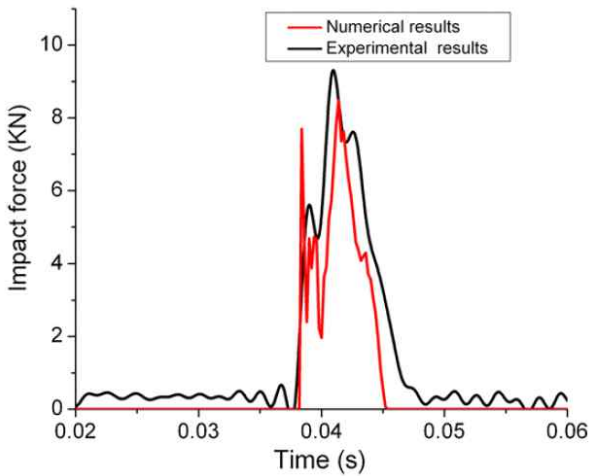


Fig. 4 Impact loads profiles between barge and impactor with 7.5° impact angle

4. 쇄빙시 빙하중 계측 자료 분석

본 연구에서는 빙해역을 쇄빙 운항시 선체에 작용하는 빙하중을 계측할 목적으로 2010년 8월초 한국 최초의 쇄빙연구선인 아라온호를 이용하여 선수부에 스트레인 게이지를 부착, 실선시험을 수행하였다. 이 논문에서는 실선시험 중 스트레인 게이지로부터 계측된 자료를 이용한 빙하중 파형 분석에 대한 것만 다룬다. 특히, 4차례의 쇄빙 시험 중 2차 시험시 나타나는 특징적인 하중 파형에 주목하고 있음을 밝힌다. 북극해 실선시험에 관한 전반적인 사항과 쇄빙 성능 및 해빙의 재료 특성에 관한 자료는 Kim et al.(2011), Park et al.(2011) 및 Kim et al.(2012)을 참고하기 바란다.

스트레인 게이지는 Fig. 5와 같이 6개의 1축 게이지와 8개의 로제트 게이지를 선수 thrust room 내의 좌현측 외판 내부에 부착하였으나, 실제 계측시에는 이용 가능한 앰프 채널의 제약으로 총 24개 채널의 신호만을 측정하였다. 그림에서

알 수 있듯이, R8이 가장 선수쪽에 설치한 게이지이며, Fr. 109 위치에 선수 쇄빙 knife edge가 있고 제2갑판의 수직선상 위치는 7,100 A/B이다. 2차 계측은 8월 3일 13시부터 77°N, 160°W 지역에서 실시하였는데, 대상 빙판은 200m × 80m × 2.2m (길이 × 폭 × 평균 두께)의 2년생 빙으로 추정되었으며 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 빙판의 일부는 얼음이 녹아 연못과 비슷한 폰드 상태였다. 이 빙판은 주변 얼음과 느슨하게 연결되어 있었으며, 건현 (freeboard)은 28cm, 얼음 위에 쌓인 눈의 두께는 9.3cm로 계측되었다.

2차 계측시 스트레인 게이지 설치 위치에서의 홀수는 약 7.3미터였으며, Kim et al.(2011)에 의하면 쇄빙시 평균속도는 약 4.79노트로 기록되었다. Fig. 7은 시험 수행시 우현에서 촬영된 쇄빙사진이며, 선상 크레인 뒷부분 아래가 스트레인 게이지 설치된 위치인데 쇄빙에 의해 일부 얼음은 깨진 상태로 선체와 접촉하고 있는 것으로 보인다.

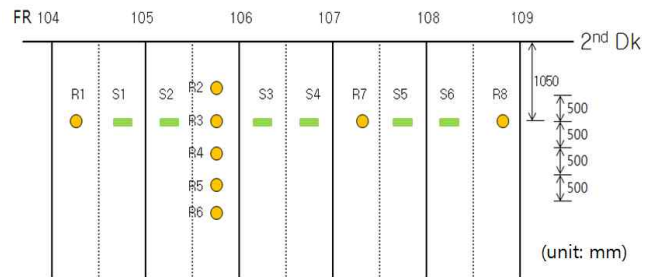


Fig. 5 Location of strain gauges



Fig. 6 Ice just before breaking in the 2nd measurement



Fig. 7 Photo in icebreaking (starboard side)

북극해에서의 쇄빙시 국부 빙하중 계측 신호에 대한 파형 분석

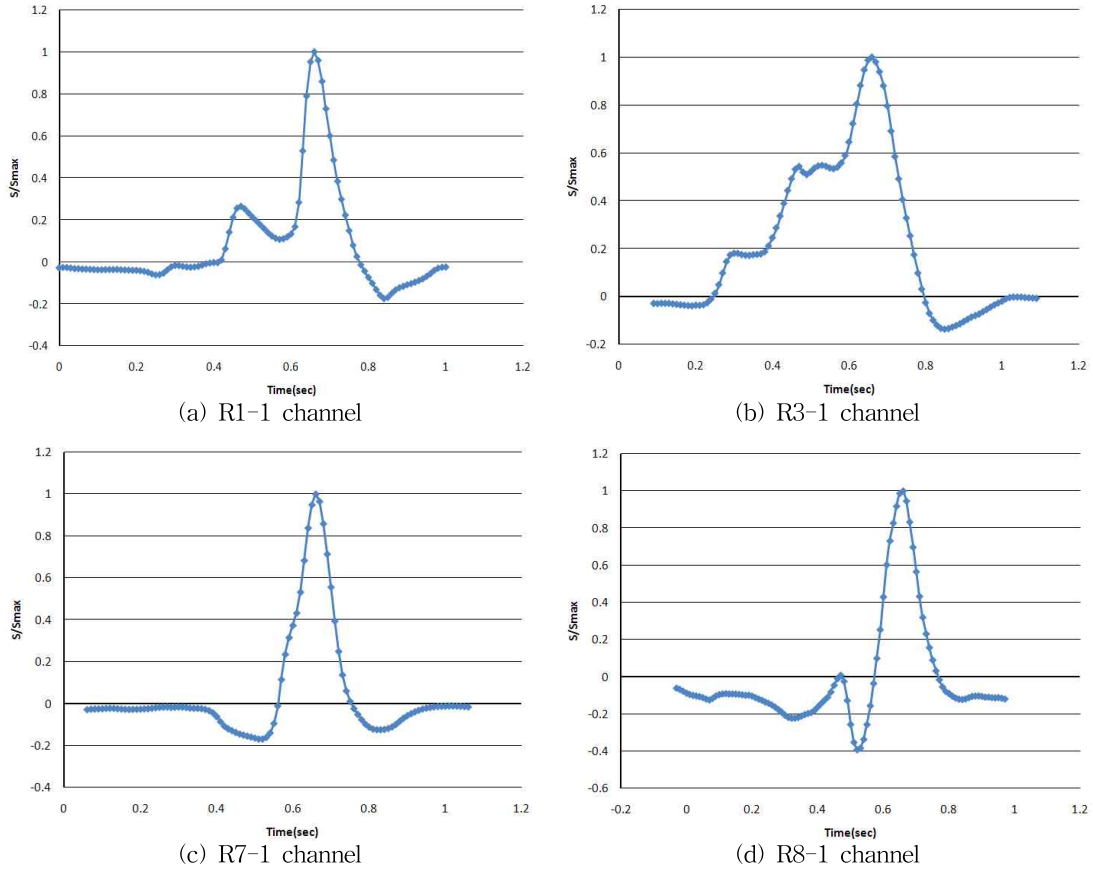


Fig. 8 Examples for peak stress data measured by rosette gauges in the Arctic Sea

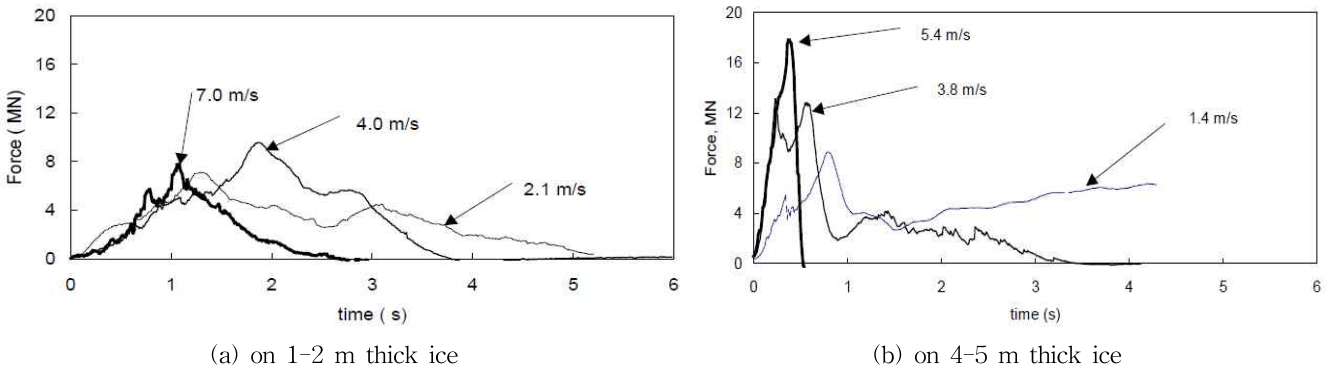


Fig. 9 Examples of ice impacts measured during the 1994 polar transit voyage of Louis S. St. Laurent

Fig. 8에는 이 시험에서 각 채널별 최대값이 얻어진 구간에서 계측된 변형률을 응력으로 환산하고 최대 응력으로 나누어 무차원화한 빙하중 파형을 R1, R3, R7, R8의 주요 4개 채널에 대하여 보여주고 있다. 이들 4개의 로제트 게이지로부터 계측된 신호들 중 선수미 방향의 값을 대표값으로 취하였는데, 이는 선수에서 쇄빙에 의해 깨진 얼음이 선박의 진행에 따라 선측 외관을 타고 흐른다고 가정하였으며 이는 로제트 게이지의 응력 해석을 통해서도 확인할 수 있었다.

Fig. 8의 (c), (d)는 앞서 살펴본 유체 및 고체 충격압과 매우 유사한 형태로, Shimosako et al.(1994)이 제안한 최대압력 도달시간과 소멸시간이 같은 이등변 삼각형 형태로 분류할 수 있을 것이다. 반면, (a), (b)는 이번 계측에서 특징적으

로 발견할 수 있는 것으로 최대압력에 도달하는 과정에서 1-2회의 단계를 가지는 형상적 특징을 가지고 있다. 이는 선수에 의한 쇄빙 시 깨진 얼음의 일부가 선수선측을 따라 이동하다가 계측 부위에서 선체와 접촉할 때 그 얼음의 가장자리 일부가 충격 직후 떨어져 나가거나 빙 조각이 선체와 부딪히면서 초기 접촉후 순간적으로 약간 회전하면서 생기는 현상으로 판단된다. 이러한 현상 중 작은 회전을 동반한 것은 비교적 작은 부유물에 의한 선체충돌시에 국부적으로 나타날 수 있는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 캐나다의 쇄빙선인 Louis S. St. Laurent호에서 계측된 하중 파형을 보여주고 있다(Fredering, 1999). 두께가 다른 빙에 충돌할 때 속도별 빙하중 파형의 특징을 살펴 볼

수 있으며, 이들 파형에서도 최대하중에 도달하기 전에 단계가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 선박은 일반적인 쇄빙선수를 가지고 있으며, 평면상의 수선각 (waterline angle)은 22도, 단면상의 프레임각 (frame angle)은 35.5도이다.

또한, Table 1은 각 채널에서 계측된 최대 응력과 빙하중 신호의 최대압력 도달시간 그리고 1/2 소멸시간을 정리하였으며, 앞서 언급한 단계가 있을 경우 각 단계에서의 무차원화된 응력도 포함하여 표시해 두었다. 이때, 응력 상태의 주각이 0도 또는 180도인 점을 고려하여 로제트 게이지의 선수미 방향 성분만을 정리하였다. 표에서 게이지 번호 다음의 1은 로제트 게이지의 기준방향인 선수미 방향으로 부착된 로제트 게이지 성분을 의미한다. 표에서 첫 번째 단계의 응력 부분에 표시된 *는 Fig. 8의 (c)에서와 같이 뚜렷하지는 않지만 최대압력에 도달하는 중간에 데이터의 변화가 보이는 부분의 중간점을 첫 번째 단계의 응력으로 그 값을 정리해 둔 것이다.

표에서 최대압력 도달시간은 최대압력 앞에서 0의 값이 나타난 시점부터 최대압력 도달시까지의 시간을 계산한 것이며, 1/2 소멸시간은 최대압력 시점부터 무차원화된 값이 0.5가 된 시점까지의 소요시간이다. 그리고 각 단계에서의 무차원화된 응력은 각 단계가 나타나는 구간 중에서 가장 높은 응력을 정리한 것이다.

Lee et al.(2007)의 계측 자료에 의하면, 컨테이너선의 플레어 슬래밍 계측시 최대압력 도달시간과 1/2 소멸시간은 각각 0.116 -0.282초 및 0.04-1.36초 정도였으며, Wheaton et al.(1970)이 수행한 선수 선저 슬래밍시 전체 소요시간은 0.025-0.25초의 범위라고 보고되어 있다. 본 연구에서 정리한 자료와 비교하면, 1/2 소멸시간은 0.039-0.076초로 낮은 범위에 속하여 유사하나, 최대압력 도달시간은 0.087-0.415초로 상당히 긴 시간이 소요된 것도 있음을 알 수 있다. 표에서 살펴보면, 최대압력에 이르는 중간에 단계가 나타나면서 시간이 늘어나는 것을 알 수 있는데, 이와 관련하여 최대압력 도달 중간에 단계가 나타나는 것들을 별도로 모아 그려보면 Fig. 10과 같다. 이 그림으로부터 중간 피크 부근에서 시간이 걸리고 있음을 명확히 알 수 있다. 중간 피크 현상이 나타나지 않는 데이터들의 최대압력 도달시간은 평균 0.104초 정도이며, 중간 피크가 뚜렷한 6개의 평균 시간은 0.306초로 상당히 길다.

5. 결 론

본 연구는 한국 최초 쇄빙연구선인 아라온호의 2010년 북극해 실선시험을 통해 쇄빙시 계측한 선수부의 국부 빙하중 신호를 분석한 것이다. 선수부 좌현 외판 내부에 설치한 스트레인 게이지로부터 얻어진 데이터를 응력으로 환산하고, 선수미 방향으로 계측된 신호를 중심으로 각 채널의 피크 값에 대한 파형을 분석하였다.

분석 결과, 일반적인 유체 및 고체 충격압의 파형과는 달리

최대압력에 도달하기 이전에 1개 또는 2개 정도의 단계를 가지는 파형도 일부 발생되고 있음을 확인하였는데, 이는 쇄빙시 깨진 해빙의 특성과 관련이 있을 것으로 추정되었다. 그리고 이러한 파형은 충격압에 대한 분석에서 중요한 최대압력 도달시간을 길게 하는데 평균 3배 정도로 상당히 크게 기여하는 것으로 분석되었다. 이러한 분석 결과는 빙층돌에 의한 선체구조의 구조응답을 상세히 파악하는 과정에서 중요한 하중-시간 이력에 대해 고려할 때 유용할 것으로 판단된다.

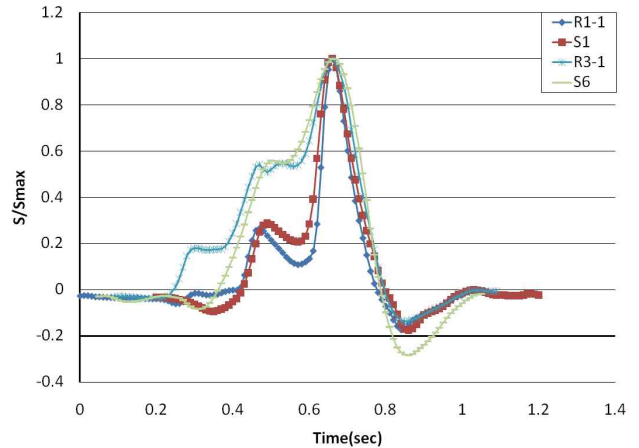


Fig. 10 Comparison of peak stress data with steps

Table 1 Characteristics of measured peak stress

Ch. No.	S _{max} (MPa)	Rising time (sec)	Half decaying time (sec)	1st step stress/S _{max}	2nd step stress/S _{max}
R1-1	24.2	0.248	0.049	0.266	-
S1	12.0	0.236	0.057	0.288	-
S2	9.17	0.143	0.076	0.315*	-
R2-1	32.24	0.118	0.065	-	-
R3-1	23.44	0.415	0.069	0.180	0.543
R4-1	30.9	0.395	0.059	0.414	-
R5-1	16.4	0.245	0.056	0.103	-
R6-1	45.22	0.114	0.046	-	-
R7-1	48.22	0.099	0.044	0.374*	-
S3	13.43	0.091	0.053	-	-
S4	24.56	0.121	0.047	0.380*	-
R8-1	19.11	0.087	0.045	-	-
S5	15.89	0.109	0.039	-	-
S6	15.25	0.298	0.080	0.558	-
max	48.22	0.415	0.076	0.558	-
min	9.17	0.087	0.039	0.103	-
mean	23.57	0.19	0.06	0.26	-

후 기

본 논문은 지식경제부 지원 산업원천기술과제 (Grant No. 10033460)의 연구비 지원으로 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] Choi, K. S. and Jeong, S. Y.(2008), "Ice Load Prediction Formulas for Icebreaking Cargo Vessels", J. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 2, pp. 175-185.
- [2] Cuomo, G., Lupoi, G., Shimosako, K., and Takahashi, S.(2011), "Dynamic response and sliding distance of composite breakwaters under breaking and non-breaking wave attack", Coastal Engineering, Vol. 58, pp. 953-969.
- [3] Frederking, R.(1999), "The local pressure-area relation in ship impact with ice", Proc. 15th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions(POAC'99), Vol. 22, Helsinki, Finland, pp. 687-696.
- [4] Goda, Y.(1994), "Dynamic response of up-right breakwater to impulsive force of breaking waves", special issue on vertical breakwaters, Coastal Engineering, Vol. 22, pp. 135-158.
- [5] Kim, D. H., Park, Y. J. and 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", J. of Ocean Engng. and Tech., Vol. 26, No. 1, pp. 1-8.
- [6] Kim, G. T. and Hong, S. W.(2012), "A Possibility of Northern Sea Route as Global Supply Chain", Proc. of the Korean Institute of Industrial Engineers/The Korean Operations Research and Management Science Society, 2012, pp. 754-760.
- [7] Kim, H. S., Lee, C. J., Choi, K. S. and Kim, M. C.(2011), "Study on icebreaking performance of the Korean icebreaker ARAON in the arctic sea", Inter. J. Nav. Archit. Ocean Engng, Vol. 3, pp. 208-215.
- [8] Lee, T. K., Rim, C. W., Kim, Y. N., Heo, J. H. and Kim, B. H.(2007), "A Study on Measurement of Flare Slamming of Large Container Vessel (II) -Characteristic Analysis of Measured Slamming Pressure-", J. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 3, pp. 279-284.
- [9] Lundgren, H.(1969), "Wave shock forces: an analysis of deformations and forces in the wave and in the foundation", Proc. Symp. on Research in Wave Action, Delft Hydraulics Lab., Delft, The Netherlands, pp. 1-20.
- [10] Paik, J. K., Chung, J. Y. and Paik, Y. M.(1999), "A Study on the Collapse Strength Characteristics of Ship Bottom Plating Subject to Slamming Induced Impact Lateral Pressure Loads", J. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 36, No. 2, pp. 77-93.
- [11] Park, Y. J., Kim, D. H. and Choi, K. S.(2011), "Material Properties of Arctic Sea Ice during 2010 Arctic Voyage of Icebreaking Research Vessel ARAON: Part 1-Sea Ice Thickness, Temperature, Salinity, and Density", J. of Ocean Engng. and Tech., Vol. 25, No. 2, pp. 55-61.
- [12] Oumeraci, H. and Kortenhaus, A.(1994), "Analysis of dynamic response of caisson breakwaters", special issue on vertical breakwaters, Coastal Engineering, Vol. 22, pp. 159-183.
- [13] Oumeraci, H., Kortenhaus, A., Allsop, N. W. H., De Groot, M. B., Crouch, R. S., Vrijling, J. K., Voortman, H. G.(2001), Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters, Balkema, Rotterdam.
- [14] Sha, Y. and Hao, H.(2013), "Laboratory tests and numerical simulations of barge impact on circular reinforced concrete piers", Engineering Structures, Vol. 46, pp. 593-605.
- [15] Shimosako, K. and Takahashi, S.(1999), "Application of deformation-based reliability design for coastal structures", Proc. of Coastal Structures, Vol. I, Balkema, Santander, Spain, pp. 363-371.
- [16] Shimosako, K., Takahashi, S. and Tanimoto, K.(1994), "Estimating the sliding distance of composite breakwaters due to wave forces inclusive of impulsive forces", Proc. of 24th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, Kobe, pp. 1580-1594.
- [17] Wheaton, J. W., Kano, C. H., Diamant, P. T. and Bailey, F. C.(1970), "Analysis of slamming data from the S.S. Wolverine State", Ship Structure Committee, Report No. SSC-210.

원고접수일 : 2013년 01월 31일
 심사완료일 : 2013년 04월 12일
 원고채택일 : 2013년 04월 12일