

대형 컨테이너선의 플레어 슬래밍 계측 연구 (II) - 슬래밍 압력 특성 분석 -

이탁기^{†*}, 임채환^{*}, 김영남^{**}, 허주호^{***}, 김병현^{*}

한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부^{*}
(주)한진중공업^{**}, 대우조선해양(주)^{***}

A Study on Measurement of Flare Slamming of Large Container Vessel (II) - Characteristic Analysis of Measured Slamming Pressure -

Tak-Kee Lee^{†*}, Chae-Whan Rim^{*}, Young-Nam Kim^{**}, Joo-Ho Heo^{***}
and Byung-Hyun Kim^{*}

Korea Institute of Machinery & Materials^{*}, Hanjin Heavy Industries & Construction Co., Ltd.^{**}
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. Ltd.^{***}

Abstract

As a container vessel becomes larger, the bow flare becomes larger. The large bow flare structures are often subjected to dynamic pressure loads due to bow flare slamming occurring in rough seas. The aim of this paper is to investigate the characteristics of bow flare slamming pressure measured in a real voyage through the North Pacific Ocean. The characteristics of impact pressure load caused by slamming is addressed in terms of the pressure pulse-time history which involves rising time, peak pressure, decaying time and type of pressure decay. The values were presented using non-dimensional parameters.

※Keywords: Large container vessel(대형 컨테이너선), Flare slamming(플레어 슬래밍), Onboard measurement(실선 계측), Pressure transducer(압력계), North pacific(북태평양)

1. 서론

최근 컨테이너선은 보다 대형화되고 고속화되고 있다. 한국해양수산개발원의 최근 보고에 의하면, 8천TEU급 컨테이너선은 2002년 Maersk Zealand의 S Classic 컨테이너선 이후 2005년도 상반기

기준으로 총 30척 이상이 운항 중에 있으며, 1만 TEU급 선박도 금년도 중에 3척 이상이 인도될 전망이다.

컨테이너선의 선수 플레어 구조는 슬래밍에 의해 충격압을 받을 가능성이 높으며, 선박이 커질수록 선수 플레어 형상이 커지게 되어 거친 해상에서 슬래밍을 받을 확률도 높아지게 된다.

선수 플레어 슬래밍은 선박의 운동과 파 운동의 상호작용에 의해 선수 플레어 부분이 물속으로 요

동치면서 발생한다. 특히 대형 컨테이너선은 드물게 매우 심각한 선수 플레어 슬래밍을 만날 수도 있다. 선수 플레어 슬래밍과 같은 충격압은 상당히 짧은 시간 동안 지속되는 매우 높은 압력을 가진다고 알려져 있다.

Paik et al.(2004)은 선수 플레어 슬래밍을 포함하여 충격압 하에서 선체구조를 설계하기 위한 방법론을 제시하였다. 그들은 충격압의 특성에 대한 변수들을 변화시키면서 상용 프로그램을 이용하여 선체 판부재의 동적 구조 파손 거동을 검토하였다. 이 연구에서는 충격압의 실제적인 특성으로 압력-시간 이력을 제시하고 있는데, 이것은 최대 압력 도달시간 (rising time), 최대 압력 (peak pressure), 지속시간 (duration time) 및 압력소멸 형태 (type of pressure decay) 등으로 규정된다.

본 연구에서는 북태평양과 인도양을 거쳐 유럽 항로를 항해하는 대형 컨테이너선에 대한 실선의 선수 플레어 압력 계측 자료를 토대로 그 특성에 대한 분석을 시도하였다. 대상 선박은 선령이 10년인 5,300 TEU급 컨테이너선이며, 주요치수는 다음과 같다.

- Length (LBP)	= 265.0 m
- Breadth (moulded)	= 40.3 m
- Depth (moulded)	= 24.1 m
- Design draft (moulded)	= 12.0 m
- Scantling draft (moulded)	= 14.0 m
- Displacement	= 93050 ton
- Design speed	= 26.56 knots

선박의 운항 항로는 부산항을 기점으로 하여 시애틀과 밴쿠버에 이르는 북태평양 항로와 수에즈 운하를 통과하여 로테르담과 함부르크에 이르는 유럽항로를 번갈아 운항한다. 주 계측구간은 북태평양과 유럽 항로상이며, 본 계측과 관련된 자세한 사항은 참고문헌(이탁기 등 2005)을 참조하기 바란다.

2. 선수 압력계 설치

선수 플레어부의 슬래밍 압력을 계측할 목적으

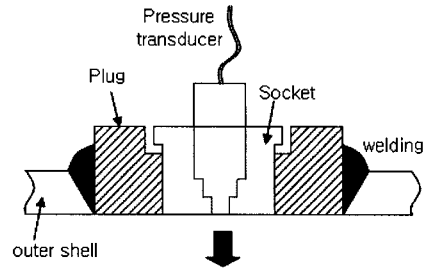


Fig. 1 Drawing for installation of pressure transducer

로 좌현에 3개의 압력계를 설치하였다. 압력계는 계측부가 평평한 형태로 최대 계측압력이 5MPa인 Kyowa사의 PGM-50KD를 이용하였다. 이 압력계는 스트레인 게이지 타입이고, 계측면의 직경은 8.2mm이다. 계측 데이터 취득 주파수로서 50Hz를 이용하였다. 선수 플레어 외판에 압력계를 직접 설치하기 위하여 자체 제작된 bottom plug를 이용하였으며, Fig. 1에 보이는 바와 같이 설치하였다. 이때, 외판에 구멍을 뚫고 bottom plug를 용접한 후 비파괴 검사를 포함한 선급 검사를 수행함으로써 안전성을 확보하였다. 설치 후 및 운항 중에 자체 제작한 압력 교정기를 이용하여 현장 보정을 수행하였다.

압력계 설치 위치는 동급의 컨테이너선에서 구조손상이 발생한 것으로 보고된 위치로 선정하였으며(임채환 등 2003), 최종 위치는 선수 123번 프레임 전방으로 상갑판 상부 2개소와 Fore Peak Tank 내부인 2nd Deck 상부 1개소이다. 상세한 설치 위치는 Table 1에 보이는 바와 같다.

3. 일반적인 충격압의 특성

Paik et al.(2004)에 의하면, 시간 의존 구조 응답을 야기시키는 어떤 '작용(action)'은 종종 동적 또는 충격하중으로 정의된다. 이들 동적 또는 충격 하중은 보통 다음의 세 종류로 구별된다(Jones 1997). 즉, 충격하중, 동적 또는 충격압력 그리고 임펄스 하중이 그것이다. 슬로싱, 슬래밍 또는 청파를 포함하는 수면충격은 동적 또는 충격 압력으로 분류된다.

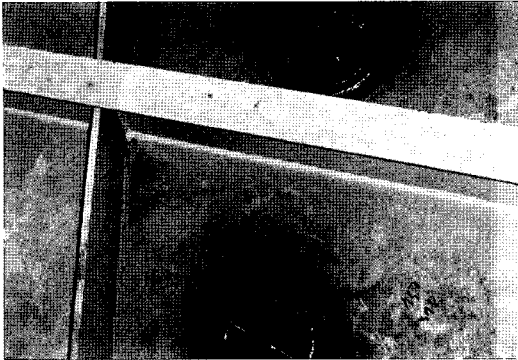


Fig. 2 View after installation of bottom plug

Table 1 Locations of pressure transducers

	Location
No.1	Fr.123+500(mm)[8600mm from FP], H=260(mm) from 2nd longi. of upper deck [25660 (A/B)]
No.2	Fr.123+350(mm)[8750mm from FP], H=520(mm) from 1st longi. of upper deck [25520 (A/B)]
No.3	Fr. 123+400(mm)[8700mm from FP], H=880(mm) from 2nd longi. of 2nd deck [221860(A/B)]

Fig. 3에는 충격압의 대표적인 프로파일을 보여 주고 있다. 압력은 매우 짧은 최대압력 도달시간으로 최대값에 도달하고, 지수함수 형태에 따라 소멸해 간다. 그림에서 알 수 있듯이, 충격압에 대한 대표적인 형상은 4가지 변수로 특징지워지는데, 최대압력 도달시간, 최대 압력, 소멸 형태 및 지속 시간이 그것이다.

선급에서는 선체 부재에 대한 치수 산정을 위해 실충격압력 대신 등가의 정적 압력 개념을 이용해 왔다. 이러한 등가 정적 압력은 강소성 이론을 적용하여 유도되는 다음의 하한계 공식으로부터 추정 가능하다(Paik and Thayamballi 2003).

$$P_c = \frac{16M_p}{b^2}(1 + \alpha^2) \quad (1)$$

여기서, $M_p = \sigma_y t^2 / 4$ 는 전단면 소성 모멘트이고, 이때 $\alpha = b/a$ 는 선체 판부재의 종횡비이다.

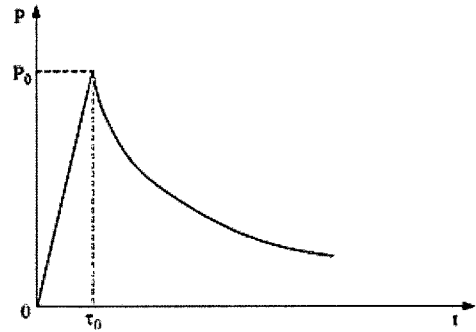


Fig. 3 A typical profile of impact pressure

한편, 본 계측에서 3개의 압력계가 설치된 판부재의 두께는 25mm이고, 항복은력은 315MPa이다. 횡프레임과 종보강재 사이의 판에 대한 치수는 1, 2번 압력계에 대하여는 $a \times b = 1,400 \times 900$ mm이고, 3번 압력계 설치 위치에 대응하는 판의 치수는 $a \times b = 2,800 \times 700$ mm이다. 식 (1)에 따라 계산된 등가 정적 압력은 각각 1.374 MPa과 1.708 MPa 이었으며, 이 값들은 계측된 최대 압력을 평가하는 기준값의 하나로 이용될 수 있을 것이다.

4. 계측된 슬래밍 압력에 대한 분석

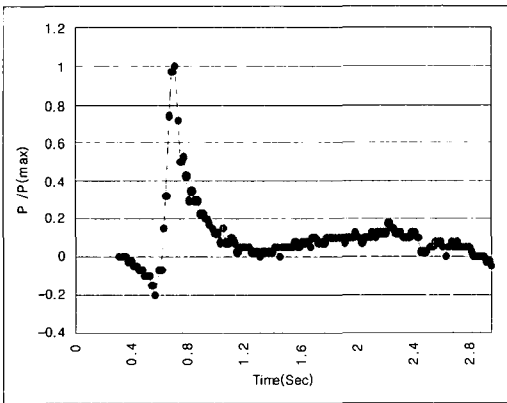
계측된 슬래밍 압력을 분석하기 위하여 가장 높은 압력이 계측된 3번 압력계를 기준으로 최대 압력으로부터 30개의 데이터를 선택하고, 각 압력이 계측된 시점의 피치 (pitch) 및 히브 (heave) 운동의 속도를 구하였다. 피치 및 히브 속도는 파의 수직방향 운동 속도와 함께 선수 플레어 외판에서 계측된 압력이 충격압인지 아닌지를 판별할 수 있는 지표가 되는 값이다. 즉, 그 속도가 특정값보다 클 경우 계측된 압력은 선수 플레어 슬래밍 압력으로 작용한다고 볼 수 있을 것이다. 최종적으로 선정된 경우에 대하여 압력-시간 이력의 주요 변수를 계산하였다. 이때, 최대압력 도달시간 외에 1/2 소멸시간을 구했는데, 1/2 소멸시간은 압력이 최대값에 도달한 이후 최대압력의 1/2이 되는 값으로 떨어질 때까지의 소요시간이다. 전체 소요시간 (duration time) 대신 최대압력 도달시간과 1/2

소멸시간을 이용한 것은 실선 자료의 경우 압력이 완전히 소멸되는 시간을 찾기가 어렵기 때문이다. Table 2는 최대 압력과 피치운동에 의한 계측점의 수직 속도 및 히브 속도를 포함하여 계측된 압력으로부터 구한 특성치들을 보여 주고 있다.

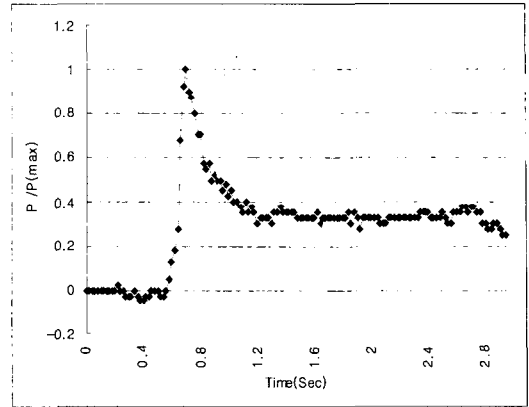
Fig. 4에는 계측 데이터로부터 선택된 몇 가지 경우의 압력 프로파일을 보여준다. 각 프로파일은 최대 압력으로 무차원화시켜 나타내었다. 그림 (a)의 경우, 압력은 최대값에 도달한 이후 거의 0까지 떨어지고 있다. 그러나 다른 그림들의 경우는 0까지 떨어지지 않는다. 그들은 소위 'impulsive tail'을 가지고 있다. 이러한 현상은 과거 몇몇 연구자들에 의해 보고된 것이다.

계측된 최대 압력은 0.1 ~ 0.1815 MPa 정도의 범위를 가진다. 최대값은 0.1815 MPa이며, 이 값은 해당 판부재의 등가 정적 압력의 10.6% 수준이다. 불행하게도 이번 계측에서는 등가 정적 압력 수준에 근접하는 최대압력은 계측되지 않았다.

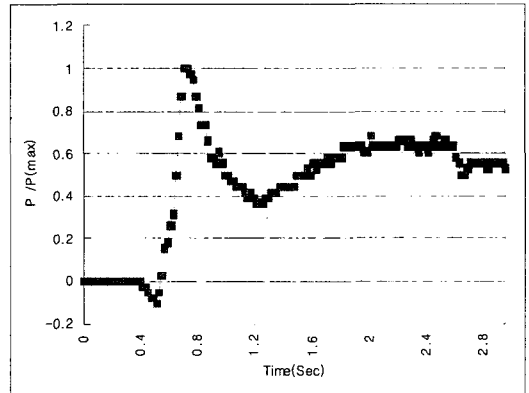
피치운동으로부터 계산된 계측점의 수직 속도는 0.47 ~ 4.27 m/sec이었으며, 선박 전체의 히브운동 속도는 0.106 ~ 1.91 m/sec 정도였다. 낮은 계측점 수직속도는 선수부가 매우 낮은 속도로 물 속으로 진입하는 것을 의미하며, 이것은 충격현상이 아니다. 한편, 상대적으로 높은 수직 속도는 슬래밍을 유발할 수 있고 슬래밍 측면에서는 이 경우에 계측된 데이터만이 의미가 있다. 슬래밍을



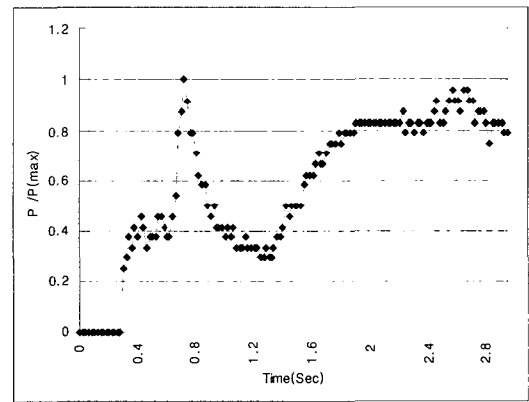
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4 Four typical profiles of measured pressure signal

Table 2 Calculation results on properties of measured peak pressures

No.	Date	Peak Pressure (MPa)	Rising time (sec)	Half decay time (sec)	Vertical Velocity (m/sec)	Velocity of Heave (m/sec)
1	3/24	0.1815	0.208	0.174	2.7042	0.9611
2	3/24	0.1546	0.262	0.224	4.1779	1.2880
3	3/24	0.1522	0.292	0.272	1.6103	1.9108
4	1/4	0.1416	0.100	0.300	0.5565	0.3456
5	1/7	0.1416	0.080	0.120	1.4311	0.3647
6	3/24	0.1351	0.222	0.684	2.1476	0.5712
7	1/7	0.1343	0.360	0.400	1.5251	0.7956
8	1/7	0.1318	0.280	0.160	2.0057	0.2362
9	3/2	0.1302	0.116	0.132	2.8423	0.9037
10	1/4	0.1270	0.120	0.480	0.4688	0.2815
11	3/24	0.1253	0.168	0.218	3.4363	0.3401
12	3/24	0.1253	0.282	1.360	3.3689	0.6242
13	1/4	0.1245	0.160	0.720	0.9105	0.1110
14	1/5	0.1245	0.160	2.580	0.5913	0.3420
15	1/6	0.1245	0.320	3.580	1.5658	0.3375
16	1/6	0.1245	0.320	3.560	1.5658	0.6048
17	1/7	0.1245	1.480	1.880	1.4864	0.1392
18	1/8	0.1221	0.180	0.040	3.5999	0.8821
19	1/6	0.1196	1.320	1.840	0.4565	0.3040
20	1/6	0.1179	0.880	1.020	0.1777	0.1844
21	1/4	0.1172	0.160	1.440	0.6565	0.1326
22	1/7	0.1172	0.160	0.160	1.6715	1.0506
23	1/7	0.1147	0.180	0.220	1.1347	0.4232
24	1/4	0.1123	0.360	0.780	0.1420	0.5568
25	1/6	0.1123	0.200	0.140	0.6148	0.1301
26	1/7	0.1123	0.200	0.180	4.2743	0.7794
27	1/8	0.1123	0.180	0.100	2.2734	0.5144
28	1/7	0.1025	0.680	1.880	1.2956	0.1059
29	1/6	0.1001	1.140	1.900	0.6141	0.1996
30	1/7	0.1001	0.240	0.240	2.3154	0.6172

유발할 수 있다고 생각되는 피치운동에 의한 수직 속도를 임계 수직속도라고 표현할 수 있으며, 궁극적으로는 앞서 언급한 바와 같이 선박과 해수면의 상대적인 속도가 중요하다. 즉, 선수부의 특정 단면에서의 상대 속도가 임계값보다 크면 슬래밍 현상이 발생할 가능성이 높다.

Ochi and Motter(1973)에 의하면, 이 값은 Froude 법칙과 관련되고 길이가 520 ft인 선박에서 12fps(약 3.66 m/sec) 정도이다. 이 식으로부터 다음 식이 유도될 수 있다.

$$V_{th} = 0.0093 \sqrt{gL} \quad (2)$$

여기서, $g = 9.801m/sec^2$ 은 중력가속도이며, L 은 선박의 수선장장 (LBP)을 의미한다.

대상선박의 LBP = 265m이므로, V_{th} 는 약 4.74 m/sec 정도가 된다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 임계의 수직속도를 2.0 m/sec 정도로 가정하였다. 따라서 Table 2에서 음영으로 표시한 11개 경우가 선수 플레어 슬래밍으로 취급할 수 있다. 엄밀하게는 피치와 히브의 연성운동과 함께 파의 수직방향 이동 속도도 고려해야 하지만, 본 계측에서는 파에 대한 계측을 수행하지 않았고, 히브와의 연성에 대한 효과도 고려하지 않았다. 한편, 수직 속도는 낮고 압력값이 높은 경우는 계측점이 접수하는 동시에 너울 등이 서서히 밀려와 생기는 현상으로 추정된다.

최종적으로 선정된 데이터에 대한 분석 결과, 최대압력 도달 시간과 1/2 소멸 시간은 각각

0.116~0.282 및 0.04~1.36초 정도이었다. Table 2에는 이 두 시간 값이 요약되어 있다. 참고로 선수 선저에서 발생하는 슬래밍에 대한 전체 소요시간은 0.025 ~ 0.25초의 범위라고 보고되고 있다 (Wheaton et al. 1970).

한편, Fig. 4에서 알 수 있듯이 충격압의 종료 시간을 결정하는 하는 것은 매우 어려운 문제이다. 이것이 전체 소요시간 대신에 1/2 소멸 시간을 계산한 이유이기도 하다. 또한, 선수 선저 슬래밍과 선수 플레어 슬래밍에 대한 압력-시간 이력을 직접적으로 비교하는 것은 부적절한 것으로 생각된다. 이는 두 현상이 슬래밍이라는 측면은 유사하지만 차이점도 존재하기 때문이다. Table 2의 11개 경우로부터 최대압력 도달시간과 1/2 소멸 시간의 합을 구해보면 0.22~1.642초 정도이며, 평균 0.537초이다. 이러한 값은 선수 선저 슬래밍의 경우에 비해 비교적 긴 시간이다.

5. 결론

본 연구에서는 북태평양 항로를 운항하는 대형 컨테이너선을 대상으로 계측한 선수 플레어 압력 자료에 대한 분석을 수행하였다. 압력-시간 이력의 특성인 최대압력 도달시간, 최대 압력, 1/2 소멸시간, 압력 소멸 형태 등을 검토하였다.

특히, 선체 운동에 대한 계측을 바탕으로 피치 운동의 속도를 계산하여 계측된 압력이 슬래밍 현상일 가능성이 높은 것을 선정 후 선정된 압력 자료에 대한 분석을 수행하였다. 분석 결과, 일부 계측 압력은 'impulsive tail'을 가지고 있음이 확인되었으며, 최대압력 도달후 0까지 압력이 떨어지는 경우도 있었다. 이번 계측에서 최대압력 도달시간은 0.18~0.282초 범위에 있었으며, 1/2 소멸시간은 0.04~1.36초 정도였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 후원으로 수행된 “선박 안전성 평가 및 방음/방진 기술 개발” 과제의 연구 성과 중 일부임을 밝혀 드립니다.

참 고 문 헌

- 이탁기, 임채환, 김영남, 양철호, 허주호, 2005, "대형 컨테이너선의 플레어 슬래밍 계측 연구(I) - 계측 시스템 및 데이터 초기 분석-", 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1352-1357.
- 임채환 외 20인, 2003, 선수플레어 구조강도 평가 기법 개발, 한국기계연구원 보고서.
- Jones, N., 1997, Structural Impact, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Ochi, M.K. and Motter, L.E., 1973, "Prediction of Slamming Characteristics and Hull Responses for Ship Design," SNAME Transactions, Vol. 78, pp. 144-176.
- Paik, J.K. and Thayamballi, A.K., 2003, Ultimate Limit State Design of Steel-plated Structures, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Paik, J.K., Lee, J.M., Shin Y.S. and Wang G., 2004, "Design Principles and Criteria for Ship Structures under Impact Pressure Loads Arising from Sloshing, Slamming and Green Seas", SNAME Transactions, Vol. 112, pp. 292-313.
- 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.



< 이 탁 기 >



< 임 채 환 >



< 김 영 남 >



< 허 주 호 >



< 김 병 현 >