

항만정온도 추정방법 개선방안 검토

Review of the Improvement of the Estimation Method of Harbor Tranquility

정원무* · 류경호**

Weon Mu Jeong* and Kyong-Ho Ryu**

요지 : 우리나라의 항만정온도 검토 방법에는 이상 시 항내정온도 검토와 항만가동율 검토 등이 있으며 대부분의 경우에 두 가지 방법을 모두 수행하고 있다. 전자에서는 정온도 기준을 합리적인 근거가 없는 항내파고 절대치로 판단하고 있는 문제점이 있으며 그 실효성에도 의문이 제기된다. 후자에서는 초과출현율 파 또는 장기간의 실측 및 역추산 자료의 파향-주기군을 사용하여 항만가동율을 산정하는 방법 등이 사용되고 있는데 이들 중 초과출현율 파의 사용은 정확도에 문제가 있으므로 장기간 자료를 사용하는 것이 바람직하다. 또한, 현재 적용되는 하역한계파고의 기준은 너무 단순하여 실제 상황을 반영하는데 한계가 있다. 본 논문에서는 부산항 신항에서 관측한 파고 실측 자료를 사용하여 현행 항만정온도 및 항만가동율 검토방법의 문제점을 실질적으로 입증하였으며 실측자료의 중요성을 강조하였다. 향후 우리나라 주요 항만 내·외에서 장기간의 실측 자료를 확보함으로써 개선된 항만정온도 기준을 마련하는데 적극적으로 활용하는 것이 바람직하다.

핵심용어 : 항만정온도, 항만가동율, 파고 기준, 한계파고, 실측 파랑자료

Abstract : In Korea, harbor tranquility is generally estimated by using both methods of investigating harbor calmness under abnormal wave condition and evaluating the harbor serviceability. The efficiency of the former method is questionable as the tranquility of a harbor is judged by a wave height criterion that is arbitrarily determined without rational basis. In case of the latter method, the utilization rate of a harbor is estimated by using the exceedance probability of wave height or the distribution of wave heights and periods that is obtained from long-term measured or hindcasted wave data. Use of long-term data is desirable in order to guarantee the accuracy of the exceedance probability. Meanwhile, the criterion for determining maximum allowable wave height for cargo handling works is too simple and has limitations for being used in an actual field condition. Problems of existing method for estimating harbor tranquility were verified by the wave observation data in Busan New Port. And the importance of the field observation data was emphasized. It is necessary to perform long-term wave monitoring inside and outside of major ports in Korea in order to establish more advanced standard for evaluating harbor tranquility based on such observed wave data.

Keywords : Harbor tranquility, Harbor serviceability, Wave height criterion, Threshold wave height, Measured wave data

1. 서 론

항만의 가장 중요한 기능은 여객 및 화물을 신속하고 안전하게 수송하는 것과 선박에게 안전한 피박지를 제공하는 것이다(Goda, 2010). 정온한 박지를 확보하는 것은 안전한 피박지의 필요조건일 뿐만 아니라 여객 및 화물의 수송효율이라는 관점에서도 중요하다. 이러한 정온도 문제는 최종적으로는 악천후 시에 계류선박의 동요량 또는 계류력의 문제로 귀착된다. 유럽의 경우에는 1970년대 초부터 대상 선석에 모형선박을 계류하고 그 동요 수준으로 항만계획의 적합성을 평가하여 왔으며 국제 상설 항해협회(PIANC; Permanent

International Association of Navigation Congress)는 다양한 선박 종류별로 하역작업 및 안전계류 조건과 선체동요를 고려하여 항내 하역작업 중단시간을 최소화하는 항만운영 시스템 및 항만설계 가이드라인을 제시한 바 있다(PIANC, 1995). 일본이나 우리나라에서는 항만의 특정 지점에서의 파고 또는 심해파에 대한 파고비로 항만의 정온도를 평가하고 있으며 우리나라의 항만 및 어항 설계기준(Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2005)이나 일본항만협회(The Ports and Harbours Association of Japan, 2007)에서는 박지의 정온도 기준으로 연간 97.5% 이상의 정박 또는 계류가 가능한 조건을 제시하고 있다. 또한 일본과 우리나라의 경우 항만가

*한국해양과학기술원 연안공학연구본부 책임연구원(Coastal & Environmental Engineering Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology, wmjeong@kiost.ac)

**한양대학교 ERICA 캠퍼스 건설환경공학과 박사과정(Corresponding author : Department of Civil & Environmental Engineering, ERICA, Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi-do, 426-791, Korea, Tel: +82-31-400-6319, Fax : +82-31-408-5823, ryukh75@kiost.ac)

동울 산정 시 하역한계과고 기준을 적용하는데 우리나라의 경우에는 소형선(500톤 이하)에 대해 0.3 m, 중·대형선(500~50,000톤)에 대해 0.5 m, 초대형선(50,000톤 이상)에 대해 0.7~1.5 m의 유의과고가 제시되고 있다. 반면에 일본의 경우에는 박지에서 하역한계과고를 설정할 때는 선박의 종류, 크기, 하역 특성, 파향, 주기 등도 고려하도록 기술하고 있다(The Ports and Harbours association of Japan, 2007).

우리나라에서는 신항만을 계획 또는 설계할 때나 기존 항만의 개·보수를 고려하는 경우 아래와 같이 두 가지 방법에 의해 항만정온도를 검토하고 있다. 하나는 심해설계과에 대한 항내기준과고의 초과 여부로 판단하는 이상 시 항내정온도 검토(①), 다른 하나는 부두별 연간 하역가동율 97.5%(Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2005)의 만족 여부에 대한 항만가동율 검토(②)이며 대부분의 경우에 두 가지 방법을 모두 수행하고 있다. 방법 ①은 주로 50년 빈도의 심해설계과에 대해 반사과를 포함한 항내 수역에서의 과고가 제시된 임계값 이하로 유지되도록 항만의 배치를 결정하는 방법이며, Goda(2010)는 설계빈도에 해당되는 이상과가 내습할 때도 항내과고가 1.0 m 이하를 유지할 것을 권고하고 있다. 그리고 방법 ②는 선박의 규모에 따라 설정된 하역한계과고를 기준으로 구해진 부두별 연간 항만가동율의 합이 97.5%를 초과하도록 항만의 배치를 결정하는 방법이다.

방법 ①의 경우 우리나라의 신항만들은 대체로 입지조건이 열악하여 상기 권고값(1 m 이하)을 만족하는 신항만 개발이 거의 불가능하였다. 따라서 부산항 신항, 울산 신항, 영일만 신항, 새만금 신항 등 다수의 신항만개발 타당성조사, 기본계획 및 기본/실시설계에서는 해당 항만의 여건에 따라 이상 시 항내기준과고의 값을 1.5~2 m 정도로 상향시켜서 적용한 바 있다(Korea Maritime and Port Administration, 1994). 항만가동율 검토 방법(방법 ②)을 적용할 경우 신항만들의 연간 항만가동율은 대체로 97.5% 이상의 조건을 만족한 것으로 나타났다. 하지만 기존의 하역한계과고 기준으로 계산한 항만가동율과 실제 가동율의 차이가 심하게 나타나는 등 기존의 하역한계과고 기준이 실제상황을 반영하지 못하는 사례도 나타나고 있다(Pohang Regional Maritime Affairs and Port Administration, 2010).

우리나라의 두 가지 항만정온도 검토방법은 각각의 기준이 근거가 모호하거나 실제상황을 반영하지 못하는 등의 문제점을 가지고 있으며 입지조건이 열악하거나 너울의 영향이 큰 항만에서 적용하는 경우에는 방법 ②를 만족하더라도 방법 ①은 만족하지 못하는 문제점이 존재한다. 본 논문에서는 현행 항만정온도 검토방법의 문제점에 대해서 고찰하고 개선방안을 제시하였다.

2. 이상 시 항내정온도 검토 방법에 대한 고찰

우리나라의 항만정온도 검토방법에서 항만가동율 97.5% 이상을 확보하는 항만가동율 검토는 항만의 이용 효율 측면, 즉

항만물류 측면에서 정온도를 평가하는 방법이며 상시 파랑이 주된 검토 대상이 된다. 그러나 이상 시 항내정온도 검토는 악천후 시에 방파제, 부두 등 항만시설의 안전 및 방재 측면에서 설계빈도에 해당하는 이상 시 고파랑이 내습하는 경우 항내수역이 어떠한 파랑 상황에 놓이게 될지를 고려하고 이에 대비하기 위한 목적으로 수행된다.

2.1 현행 이상 시 항내정온도 기준과고의 기준 및 실효성 검토

태풍 또는 이동성 저기압 등에 의한 고파의 내습이 없거나 광양항과 같이 자연적으로 입사파가 차폐되는 지역이 정온도 확보 측면에서는 이상적인 항만의 입지조건이겠으나 앞에서 기술한 바와 같이 우리나라 대부분의 신항만은 그 입지조건이 열악하여 Goda(2010)의 권고치를 적용하지 못하고 1.5~2 m의 항내기준과고를 적용하여 왔다. 그러나 이러한 검토 방법의 문제점은 항내정온도 기준과고가 합리적인 근거 없이 임의로 적용되고 있다는 것이다. 실제로 영일만 신항의 경우 항내정온도 기준과고를 Goda(2010)의 권고치 1.0 m로는 설계가 불가능하여 1.5 m로 상향하였으나 별도의 근거를 제시하지는 못하였다(Korea Maritime and Port Administration, 1994).

합리적인 항내정온도 기준과고의 적용과는 별도로 기준과고가 실효성이 있는지도 고민해봐야 할 문제점이다. 항만 운영 상 문제가 전혀 없는 항만에서도 일시적으로 항내 과고가 1 m를 초과하는 경우가 나타날 수도 있다. 실제로 Busan Port Construction Office(2012)의 부산항 신항의 항내 관측정점 W4와 W5(Fig. 1 참조)에서 2010~2012년 동안 유의과고

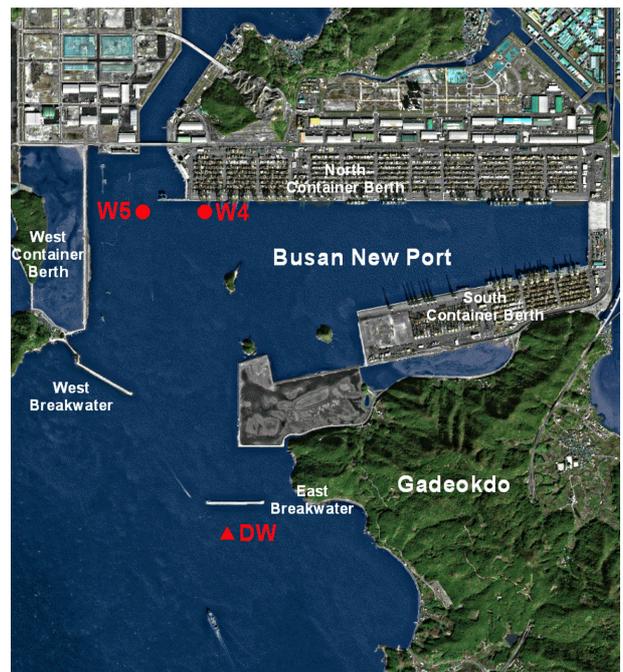


Fig. 1. Location map of wave measurement stations around Busan New Port (Circles are locations of pressure-type wave gage and triangle is location of Directional Waverider).

1 m 이상의 파랑이 관측된 사례들을 Table 1에 정리하였다.

Table 1을 살펴보면 북천테이너 부두에서 매년 유의파고 1 m를 초과하는 사상들이 출현하고 있으며, 특히 2012년 9월 17일에는 태풍 산바에 의한 폭풍파의 영향으로 동방파제 전면의 유의파고는 6.3 m였으며, 정점 W4에서는 유의파고 4.06 m가 관측되었다. 이 때 정점 W5에서의 유의파고는 1.62 m로 큰 차이를 보였으며, W4에서의 항내파고 4.06 m는 부두 전면에서 발생 가능한 중복파의 영향으로 판단된다. 부산항 신항의 경우 태풍 매미 때를 제외하면 실제 태풍 시에도 항만구조물의 안전 및 운영 상 큰 문제가 없었던 것으로 보고되고 있으며 정점 W4에서 관측된 실측자료로부터 계산된 항만가동율도 97.5%를 초과하고 있다. 이러한 부산항 신항의 사례로 볼 때 항만의 안전이나 운영 상 별다른 문제가 없는 항만에서도 일시적으로 항내 파고가 1~1.5 m를 초과하는 경우가 나타날 수 있으며 이는 국내에서 적용하고 있는 현재의 항내정온도 기준파고를 유지하는 것이 현실적으로 실효성이 없다는 것을 반증한다고 볼 수 있다.

2.2 이상시 항내정온도 기준파고의 개선 방향

2.1절에서 검토한 결과에서 나타난 바와 같이 현행 항내기준파고에 의한 이상시 항내정온도 검토는 이상 시 파랑에 대한 항만의 안전 및 재난 방지라는 목적을 감안하면 설계파 검토와 통합하여 월파에 의한 항만시설 및 적치물의 안전성 확보를 전제로 경제성을 고려하여 방파제 등 항만 외곽시설과 부두의 규모를 결정하는 방향으로 개선되는 것이 타당하다고 판단된다. 즉, 50년 재현빈도의 심해설계파를 적용하여 산정한 천해설계파를 대상으로 방파제의 유무 또는 방파제의 규모를 결정하고 이에 따른 부두의 마루높이를 결정하면 된다. 그러나 이러한 방법은 대부분 천해설계파 검토와 중복된다. 따라서 이상 시 항내정온도 기준파고를 만족하는지 검토하는 방법이 기준파고의 적정성과 실효성에 문제가 있다는 점을 더불어 생각하면 현행 이상 시 항내정온도 검토를 생략하고 이상 시 항

내 수역의 상황을 반영하여 천해설계파 검토와 외곽시설 및 접안시설의 마루높이 산정을 보다 적절히 결정할 수 있는 방안을 검토해봐야 할 것이다.

예를 들어 현재 우리나라에서 접안시설의 규모를 결정하는 마루높이 산정 방법을 대상으로 살펴보면 대상선박이 특별히 정해지지 않은 경우에 접안수심과 대상지역의 조차의 규정에 따라 설계고조위에 일정 수위를 고려하는 항만 및 어항 설계 기준(Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2005) 상의 방법, 설계고조위에 항내파고를 고려한 방법, 이상해면 상승을 고려한 방법, 인근 부두의 마루높이 현황을 고려한 방법 등 크게 4가지로 모든 방법들을 고려한 후 적정한 마루높이를 결정하고 있다. 그러나 안벽의 연장 등을 통한 기존 항만의 증축 또는 확장의 경우에는 주로 인접한 부두의 마루높이와 동일한 높이로 결정하는 방법이 사용되고 있다. 이들 방법들 중 파고를 반영하는 두 번째 방법은 식 (1)과 같다.

$$C_h = H.W.L + (H_{max}/2) \tag{1}$$

여기서, C_h 는 마루 높이(m), $H.W.L$ 은 삭망평균만조위(Highest Water Level, m), H_{max} 는 최대파고(m)를 각각 나타내며 최대 파고와 유의파고($H_{1/3}$) 사이에는 다음 관계식이 적용된다.

$$H_{max} = (1.6 \sim 2.0) \times H_{1/3} \tag{2}$$

여기서, 식 (2)는 H_{max} 와 $H_{1/3}$ 의 일반적인 관계식이다(Goda, 2010). 항만 설계시 설계고조위가 2.0 m이고 방파제 등 외곽 시설이 없는 경우의 천해파 검토결과, 부두전면의 유의파고 ($H_{1/3}$)가 2.0 m로 나타났을 때 부두의 마루높이는 3.6~4.0 m로 산정된다. 그러나 외곽시설을 건설하여 부두전면에서의 유의파고가 1.2 m로 나타난 경우에는 부두의 마루높이가 2.96~3.20 m로 산정된다. 그러나 태풍의 내습이 우려되는 지역에서 식 (1)을 반영하여 천해설계파를 검토할 경우, 천해설

Table 1. Occurrence of significant wave heights larger than 1 meter inside of Busan New Port during 2010~2012.

Time	St. W4		St. W5		Remarks	
	H_s (m)	T_p (s)	H_s (m)	T_p (s)		
2010	8/11 9:00	-	-	1.05	11.64	Data missing (St. W4)
	9/2 4:00	1.40	9.85	0.73	5.33	
2011	6/26 16:00	1.14	11.64	-	-	Data missing (St. W5)
	8/8 03:00	1.61	12.80	1.01	7.11	
2012	8/28 10:30	2.06	9.14	1.28	9.14	Typhoon BOLAVEN
	8/30 15:00	1.15	12.80	1.26	9.14	
	9/17 12:00	4.06	12.80	1.62	12.80	
	12/14 19:30	1.12	8.53	0.86	9.14	
2013	2/1 16:30	1.96	8.53	-	-	Data missing (St. W5)
	4/24 5:30	1.03	7.53	0.75	7.53	
	10/8 21:30	1.11	12.80	0.57	16.00	

계파 검토 시 폭풍해일고를 반영한다는 점과 이상고조와 결합된 월파에 대한 부두 적치물의 안전 확보를 감안하면 최소한 태풍의 내습이 빈번한 지역에서는 식 (1)의 마루높이 산정 과정에 이상시 해면상승을 고려할 필요가 있다고 판단된다. 한편, 해당 지역에서 1년 이상 장기간 관측된 파고자료가 존재한다면 식 (2)의 계수값을 확인하여 반영하는 것도 필요할 것으로 판단된다.

천해설계파의 추정 결과가 항만시설의 안전성 및 경제성에 미치는 영향이 절대적인 만큼 천해설계파고의 추정 과정은 매우 중요하다. 아직까지 수리실험이나 수치실험에 의한 항내 파고 값은 입사값의 추정부터 현지 상황의 정확한 반영에 제한이 있는 등의 여러 가지 문제로 현장 실측자료에 비해 정확성이 떨어지므로 실측자료를 사용하는 것이 가장 바람직하다. 특히 항내의 경우는 항외에 비해 수치실험에 의한 재현성이 떨어지는 문제점이 두드러진다. 시간적, 경제적인 문제 등 여러 여건상 모든 항만시설에서 실측자료를 확보하는 것에는 제한이 있기는 하지만 최소한 대상지역의 인근해역에서 대형 태풍 내습 시 계측된 파랑 자료가 있는 경우 이를 잘 재현할 수 있도록 수치 또는 수리모형을 검증해야 한다. 아울러 항내파고의 동시관측 자료가 확보된 경우 이의 재현성도 확인할 필요가 있다. 이러한 측면에서 주요 항만의 항내·외 장기간 파랑 모니터링을 통한 실측 자료 확보는 매우 중요하다.

3. 항만가동을 산정 방법에 대한 고찰

2.의 검토를 통하여 항만시설의 안전성이 확보된다면 이제 사용성이 확보되어야 하며, 이를 평가하기 위해서 항만물류 측면에서 정온도를 평가하는 방법인 항만가동을 검토 방법을 통상적으로 사용한다. 우리나라에서는 항만 및 어항 설계기준(Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2005)에 제시된 것처럼 하역한계파고를 기준으로 항만가동을 97.5% 이상을 확보하도록 권고하고 있다. 여기에서는 항만가동을 산정에 필요한 파랑자료, 현행 항만가동 산정방법과 문제점 및 개선방향에 대해서 제시하였다.

3.1 용어의 정의

항만가동을 또는 항내정온도와 관련하여 사용되는 몇몇 용어가 혼동되어 사용되는 경우가 종종 있기 때문에 본 논문에서는 아래와 같이 몇 가지 용어들에 대한 정의를 제시하였다.

- 초과출현율 2.5% 파 : 대상 파향별 파고 자료들 중 상위 2.5%에 해당되는 파, 즉 해당 파고를 초과하는 확률이 2.5% 인 파

- 상시 파랑 : 알기쉬운 항만설계기준 핸드북(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010)에서는 혼동을 초래하기 쉬운 ‘평상파’라는 용어 대신 ‘이상시 파랑’에 대응되는 개념으로서의 ‘상시 파랑’이라는 용어를 다음과 같이

4가지 방법으로 설명한 바 있다. ① 16방위별로 파고가 상위 2.5%에 해당되는 파(전술한 초과출현율 2.5% 파와 동일하며, 항만가동을 약식 평가에 사용되기도 함), ② 계절별 대표파향의 파고를 평균한 파(퇴적물이동 수치실험에 사용 가능), ③ 풍랑주의보 발효 기준인 파고 3m의 파(소파 또는 해수소통 구조물 설계에 사용 가능), ④ 기타의 용도로 설계자가 산정하는 통계적인 파. 여기서 ①에 해당되는 파는 ‘(16방위별) 초과출현율 2.5% 파’로 칭하는 것이 타당하며, ②는 ‘계절별 평균파’로 정의하는 것을 추천한다. 또한, ③은 그의 미상 이상시 파랑에 대응되는 개념과 상충되는 점이 있으므로 사용하지 않는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

3.2 가용한 실측자료 및 장기간 역추산 자료

항만가동을을 산정하기 위한 파랑 자료로서 항입구 외측에서 최소한 1년 이상의 파향·파고 실측자료를 사용하는 것이 바람직하다. 일본의 경우에는 NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbors, Japan) 시스템을 통하여 다수의 항만에 활용할 수 있는 장기간 실측자료가 확보되었지만 우리나라의 경우에는 부산항 신항, 포항 신항 및 영일만 신항에서만 제한적으로 이러한 자료가 확보된 실정이다.

역추산 자료의 경우 과거 일시적으로 일본 기상청(JMA)에서 제공한 4년(1983~1986년) 간의 자료가 사용되기도 했지만, 최근에는 우리나라의 파랑 역추산 기술이 비약적으로 발전하여 국내에서 생성된 역추산자료가 현업에서 폭넓게 활용되고 있다. 제2세대 파랑추산 모델 HYPA 및 제3세대 모델 WAM을 사용하여 우리나라 주변 해역의 주요 지점에서 1979년부터 2003년까지의 파랑 역추산자료가 제공된 바 있다(Korea Ocean Research and Development Institute, 2005). 이 역추산 자료의 격자 간격은 1/6°(약 18.5 km)였으나, 최근에는 이보다 더 정밀한 1/12° 격자망에서 수치모형 WAM을 사용하여 2004년부터 2008년까지의 역추산 자료가 추가적으로 생성되었다(Jun, 2013). 1년 이상의 장기 연속관측된 실측자료가 없는 경우 역추산 자료를 분석하여 방향별 출현율 등을 구함으로써 특정 항만에서의 가동을 산정하는데 필요한 기초 자료로 활용할 수 있다.

한편, 일반적으로 항만가동에 사용되는 파고값 산정역시 수리실험이나 수치실험에 의한 산정방법이 대부분이므로 정확한 입사값의 산정이나 실험영역 선정 등에 있어 항외의 적절한 위치에서 관측된 실측 파랑자료가 역추산 자료에 비해서 정확한 항만가동을 산정에 더 도움이 된다. 때문에 항외 실측자료의 계측 위치는 항내로 내습하는 입사파를 대표할 수 있는 지점이 되도록 선정되는 것이 바람직하다. 또한 항만건설 초기단계부터 파랑관측을 실시하면 외곽시설의 설치가 완공되는 시점부터는 항외 입사파고는 물론 계획부두 전면의 파랑자료를 확보할 수 있게 되어 수치 또는 수리실험에 의존하지 않고 관측자료에 의한 정확한 항만가동을 산정할

수 있다. 특히 항만으로서의 입지조건이 열악한 곳에 항만이 건설될 경우 계획 단계에서는 항만가동율 기준이 만족되더라도 완공 후 실제 항만가동율에는 문제가 발생할 가능성도 있다. 따라서 가동율이 가장 낮을 것으로 예상되는 부두 전면에서의 장기 모니터링 자료는 현황 파악 및 대책 마련을 위해서 반드시 필요하며, 앞으로 주요 항만의 경우 계획단계에서부터 항내·외 주요 정점에서의 파랑 모니터링 계획의 수립 및 시행이 필요할 것으로 사료된다.

3.3 초과출현율 파를 적용한 항만가동율 산정방법

초과출현율 파에 대한 용어는 3.1절에서 정의한 바 있으며, 초과출현율 파를 적용하여 항만가동율을 산정하는 방법은 다음과 같다. 우선 항외측에서 16방위별로 구해진 초과출현율 2.5% 파를 입력조건으로 하여 수치 또는 수리모형실험을 수행하여 대상 부두 전면의 파고를 구한다. 고려한 모든 파향에 대해서 계산된 부두 전면에서의 파고가 하역한계파고 값보다 작게 되는 비율로서 항만가동율을 계산하며, 가동율 97.5%를 확보하는 것을 목표로 하게 된다. 이 방법은 수치계산량이 작고, 수치계산 결과와 해당 지역의 파랑자료를 가지고 가동율을 산정하는 별도의 절차가 없기 때문에 항만의 타당성조사, 기초조사 및 기본계획 등에서 적용한 사례가 상당수 있다. 한편, 이러한 사례 중에는 초과출현율 2.5% 파와 년 최대파를 사용한 경우도 있었는데 그 이유는 명확하지 않다 (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2008).

초과출현율 파를 적용하는 방법은 파향별로 하나의 주기값만을 사용하므로 주기별 파랑 특성을 무시하는 문제점이 존재한다. 또한, 단순히 계산된 파고와 하역한계파고만을 비교하여 적합 여부를 따지기 때문에 실제 적용 시에는 문제점이 나타나는 경우도 있다. 예를 들어 초과출현율 2.5% 파를 입사파 조건으로 사용하여 부두에서의 항만가동율을 평가하는 경우 모든 파향에 대한 계산결과가 하역한계파고 이하일 때는 문제가 없겠지만 일부 파향에 대해서 하역한계파고 기준을 만족시키지 못하는 경우 항만가동율 판정이 곤란한 경우가 발생하게 된다.

3.4 현행 항만가동율 산정방법

일반적으로 우리나라에서는 현재 실측자료 또는 역추산 자료의 파향-주기 구간별 출현율 분포를 이용하여 해당 선석에서 계산된 파고값을 가지고 항만가동율을 산정하는 방법이 사용되고 있으며 절차 등 방법 자체는 적절하다고 판단된다. 수치실험에 사용되는 모형은 불규칙파를 고려할 수 있어야 하며 파의 천수, 굴절, 회절, 쇄파 및 반사 현상을 재현할 수 있어야 한다. 수치모형이 결정되면 항입구 외측과 항내에서의 파고 동시관측 자료가 확보된 경우 이를 재현하여 모형의 정확도를 검증하는 것이 필요하다. 그러나 수치모형의 한계가 있기 때문에 부두 전면에서의 실측자료에 근거하여 산출된 항만가동율에 비해서는 정확도가 떨어지게 된다. 경우에 따라

가용한 3차원 수리모형실험 결과가 있는 경우 가동율 산정 정확도의 향상을 기대할 수 있다. 이러한 점에서 위에서 기술한 바와 같이 신허항 또는 대형 항만 등 주요 항만의 경우 항내·외 대표 관측정점을 설정하고 연속적인 장기간 파랑 모니터링을 수행하는 것이 바람직하다. 한편 일반적으로 적용되는 항만가동율 산정 절차는 아래와 같다.

- ① 실측 또는 역추산 파랑 자료를 16방위로 구분하고 항내외로 침입이 가능한 파향들에 속하는 파향군으로 자료를 분리
- ② 각 파향군에 속한 자료들을 다시 적절한 주기군(예를 들면 4초 이하, 4~6초, 6~8초, 8~10초, 10~12초, 12~14초, 14초 이상 등)으로 세분화
- ③ 입사파 조건별로 수치실험을 실시하고(예를 들어 4개 파향군마다 6개 주기군이면 24개의 입사파 조건이 설정되며 입사파고는 파고비 계산의 편의상 1 m로 설정하기도 함) 대상 부두전면 또는 선석구간에서의 평균 파고비를 산출
- ④ 하역한계 파고(Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2005)를 각 구간별 평균 파고비로 나누어 하역한계를 유발하는 작업한계 입사파고를 산정
- ⑤ 각각의 자료군 별로 대상영역에서의 하역한계파고를 초과하는 입사파 조건의 개수를 구하여 합산한 결과가 하역불능을 유발하는 파의 개수이며 전체 개수에 대한 비율이 하역불능율임
- ⑥ 부두 또는 선석별 항만가동율(100-하역불능율, [%])을 검토하여 항만설계기준에 제시된 97.5%를 초과해야 하며 미달하는 경우 평면 변경 또는 소파구조물의 성능 개선을 통한 항내파고 저감을 도모해야 함

3.5 항만가동율 산정 기준의 개선 방향

3.4절에서 기술한 바와 같이 항만가동율을 산정하는 절차 등의 방법은 적절하다고 판단된다. 그러나 부두의 하역 상황은 근본적으로 선체 동요량에 의해 결정되기 때문에 하역의 가부(可否)를 판단하는 기준은 현행 국내 하역한계파고 기준처럼 단순한 기준보다는 선체 동요량과 각 선석의 파랑조건을 고려하여 선박 규모와 계류상황 별로 세부적인 기준으로 정해질 필요가 있다.

우선 1.에서 제시한 우리나라의 현재 하역한계파고 기준은 너무 단순하다. 예를 들어 표준선형이 50,000톤급인 선박의 경우 하역한계파고 기준이 0.5 m와 0.7 m로 중복된다. 이러한 경우, 실무에서는 보수적으로 0.5 m를 적용하는 경우가 대부분이지만 개선이 필요한 것은 확실하다. 또한 상당히 넓은 범위의 중대형선 선박 규모(500~50,000톤)에 대해서 하역한계파고 기준이 0.5 m의 단일값으로 설정되어 있는 것도 문제가 있다. 더불어 선박별 하역방식 또는 선박 종류에 따라 구분된 기준이 마련되어 있지 않아 개선의 필요성이 있는 것으로 판단된다. 이상의 문제점에 대해서는 차후 체계적이고 지

속적인 연구를 통해 개선방안을 도출할 필요가 있다. 실제로 최근 포항 신항에 대해서 수행된 연구 결과(Pohang Regional Maritime Affairs and Port Administration, 2010)를 보면 중·대형선 선박의 실질적인 하역한계파고가 평균 0.3 m 정도로 나타나서 현행 기준과 큰 차이를 보였는데, 향후 지속적인 연구를 통해서 항내 파랑특성에 따라 하역한계파고를 수정하고 세분화할 필요가 있다. 한편, 1.에서 언급한 바와 같이 일본의 경우에는 부두별 연간 항만가동율의 합이 97.5%를 초과하도록 규정하고 있는 점에서는 우리나라와 차이가 없으나 선박 종류 및 톤수, 선박에 입사하는 파의 방향, 주기 등 다양한 기준에 따라 하역한계파고를 다르게 적용하고 있다. 40,000 DWT급 컨테이너선을 예로 들면 주기 4~10초의 파에 대해서는 입사각에 무관하게 0.5 m의 하역한계파고를 설정하고 있으나 주기 15초인 파의 경우 입사각 15°와 30°에 대해서는 0.5 m, 45°와 60°에 대해서는 0.2 m의 하역한계파고를 적용하고 있다.

4. 부산항 신항 북컨테이너 부두의 항만가동율 검토

부산항 신항 동방파제 전면에서의 실측 자료를 입사파 조건으로 사용한 수치실험을 수행하여 북컨테이너 부두의 항만가동율을 우리나라 기준 및 표준해석법이라고 불리는 일본 기준(Coastal Development Institute of Technology, 2004)에 의해 각각 계산하고, 대상선석에서의 실측자료와 비교한 결과를 다음에 제시하였다.

적용 선박의 규모는 부산항만공사에서 홈페이지에 제시하는 2011~2012년 물동량 통계치를 참조하여 부산항 신항에서 입출항 빈도가 가장 높은 30,000~50,000톤급 선박의 중간값인 40,000톤급 선박으로 결정하였다. 대상 선석은 북컨테이너 2-1단계 부두의 선석으로 선택하였는데, 그 이유는 이 선석이 현재 부산항 신항에서 운영 중인 선석 중에서 항만가동율이 가장 낮을 것으로 예상되었기 때문이다.

항만가동율을 계산하기 위해 범용 파랑변형 수치모형 SWAN을 사용하였다. 항외의 관측정점 DW와 항내 관측정점 W4(가동율 대상선석 위치)는 전술한 Fig. 1과 같다. 수치실험은 30 m 정방격자로 구성된 단일격자 체계로 수행되었으며, 입사파 조건은 부산항 신항 동방파제 남쪽으로 약 400 m 지점에 설치한 파향·파고계(Fig. 1의 정점 DW)를 이용하여 1999년 이후 관측한 자료 중에서 결측율이 가장 낮은 연속 3년(2001년 4월~2004년 3월)간의 파향·파고자료를 활용하여 결정하였다. 한편, SWAN 모형의 경우 일반적으로 반사파, 회절파의 재현성 문제로 인해 항내 파랑재현 실험에 사용하지 않는 것이 바람직하다. 그러나 부산항 신항의 관측정점 W4의 경우(Fig. 1 참조)에는 정점의 위치가 항입구와 남북방향으로 거의 일직선상에 위치하여 있으며 수치실험을 위해 작성된 수심도의 경계면에서 파의 진행방향으로 수심이

일정하여 SWAN 모형의 회절과 재현성 문제가 큰 영향을 미치지 않을 것(Shin, 2005)으로 판단하였다. 또한 일반적으로 항만가동율 산정에서 부두전면의 파고(비) 산정시 해당영역 격자점들의 평균파고를 사용하는 점을 감안하면 SWAN 모형과 같은 phase averaging 모형을 사용하는 것과 중복파의 재현이 가능한 phase resolving 모형을 사용하는 것이 큰 차이가 없을 것으로 판단하였다.

4.1 우리나라 기준에 따른 항만가동율 산정

항만가동율 산정 절차에 따라 우선 항외의 관측정점 DW에서 수집된 3년간의 파랑 실측자료를 분석하여 파향·주기 구간별 출현율(①)을 구하고 부산항 신항의 지역적인 특성과 현상태의 평면배치 현황을 고려하여 수치실험을 위한 입사파 조건을 파향 5개(SSE, S, SSW, SW, WSW), 주기 6개(4, 6, 8, 10, 12, 15초)로 결정하였다(②). 입사파 조건에 따른 수치실험을 통해 부두 전면의 파고비를 계산(③)하고 항만 및 어항 설계기준의 중·대형선(500~50,000톤)에 대한 하역한계파고 0.5 m를 대상 정점의 파고비로 나누어 작업한계 입사파고를 계산하였다(④). 계산된 작업한계 입사파고와 매시간 파고, 주기 및 파향 실측자료를 이용하여 각 파향·주기 구간별로 하역한계 입사파고를 초과하는 파의 수를 합하고 이를 전체 파랑 자료수로 나누어 하역불능율을 산정하였다(⑤). 마지막으로 (100-하역불능율)로부터 항만가동율을 산정하였으며(⑥), 북컨테이너 부두의 경우 가동율이 97.5%로 제시되었다.

4.2 항내 실측 파고자료로 평가한 항만가동율 산정

정점 W4와 W5의 북컨테이너 부두와 작업 부두 전면에서 관측된 2010년~2012년 동안의 파고 실측자료로부터 우리나라 하역한계파고 기준 0.5 m에 의한 40,000톤급 선박의 항만가동율을 산출해 보면 각각 98.7% 및 99.5%로 나타난다. 즉, 4.1절에 보인 수치실험에 의한 항만가동율 산정 결과인 97.5%에 비해 가동율이 더 높게 나타남을 확인할 수 있다. 수치실험에 비해 항만가동율이 높게 계산된 이유는 수치모형의 파고 재현성에도 일부 기인한 것으로 추정되지만, 한편으로는 항외 뿐만 아니라 항내 파고 실측자료의 확보가 중요함을 보여주는 사례라고 할 수 있다. 한편, 실제 항만의 부두에서는 설계기준 톤수보다 작은 선박의 하역작업이 빈번함을 감안한다면 50,000톤급 부두의 경우 50,000톤급 초과에 해당하는 하역한계파고 0.7 m보다는 500~50,000톤에 해당하는 0.5 m로 하는 것이 보다 보수적인 접근이라고 사료된다.

4.3 일본 표준해석법 기준에 따른 항만가동율 산정

4.1절에서 보인 수치실험 결과와 대상선석에서의 입사파향을 가지고 일본 표준해석법에 의한 하역한계파고 기준을 적용하여 항만가동율 산정 절차에 따라 계산한 결과 97.1%로 나타났다. 해당 선석의 입사파향에 따라 주기가 12초 이상인 경우 우리나라 하역한계파고 기준에 비해서 하역한계파고 기

준값이 작아지는 영향으로 항만가동율이 97.5%에 미치지 못하는 것으로 판단된다. 즉, 일본 표준해석법은 선석에서의 입사 파향에 따라 너울 등 비교적 주기가 긴 파를 별도로 고려하여 항만가동율을 산정하고 있기 때문에 우리나라 기준에 비해서 항만가동율이 더 낮게 산정될 수 있음을 확인하였다. 그러나 4.1절과 4.2절의 결과 비교에서 볼 수 있듯이 수치모형이 실제 관측된 항내파고를 충분히 재현하지 못하고 있을 수 있기 때문에 이 결과만으로 부산항 신항의 항만가동율이 문제가 있다고 판단할 수는 없다. 추후 부산항 신항의 항내파고를 보다 정밀하게 재현한 수치모형을 구축하거나 파향을 포함하는 복수 정점에서의 항내파고 관측 자료가 확보된다면 보다 엄밀하게 항만가동율을 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론 및 토의

본 논문에서는 우리나라의 항만정온도 검토 방법의 문제점과 개선 방안을 제시하고자 하였으며, 부산항 신항을 대상으로 검토 사례를 제시하였다. 본 논문의 주요한 결론 및 토의 사항을 다음에 정리하였다.

- 현행 이상 시 항내정온도 검토 방법은 항내 정온도 기준을 합리적인 근거가 없는 파고 1.5~2 m의 임의의 절대치로 판단하고 있으며, 부산항 신항의 사례로 볼 때 항만의 안전이나 운영 상 별다른 문제가 없는 항만에서도 일시적으로 항내 파고가 1~1.5 m를 초과하는 경우가 나타나는 등 실효성에도 의문이 제기된다. 또한 이상 시 파랑에 대한 항만의 안전 및 재난 방지라는 목적을 감안하면 현행 이상 시 항내정온도 검토를 생각하고 기존 천해설계파 검토에 이상 시 항내 수역의 상황을 반영하여 월파에 의한 항만시설 및 적치물의 안전성 확보와 경제성을 고려하여 방파제 등 항만 외곽시설과 부두의 마루높이를 결정하는 방향으로 개선되는 것이 타당하다고 판단된다.

- 항만가동율 검토 방법에는 초과출현율 파 또는 장기간의 실측 및 장기간 역추산 자료의 파향-주기군을 사용하여 항만가동율을 산정하는 방법이 사용되고 있으며 초과출현율 파를 사용하는 방법은 지양하는 것이 바람직하다.

- 일본의 경우 선박의 종류, 규모, 선박에 입사하는 파의 방향 및 주기 등에 따라 다양한 하역한계기준을 항만가동율 산정에 적용하고 있으며 유럽의 경우 선종별로 하역작업 및 안전계류조건과 선체의 운동을 고려하여 항만정온도를 검토하고 있으나, 우리나라에서 적용하는 항만 및 어항 설계기준 (Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2005)에 제시된 하역한계파고의 기준은 너무 단순하여 실제 상황을 반영하는데 한계가 있으므로 지속적인 연구를 통하여 하역한계기준을 개선할 필요가 있을 것으로 판단된다.

- 한편, 항만정온도 검토방법의 보완 및 개선을 위해 실측 자료의 중요성을 다시 확인하였으며 우리나라 주요 항만 내·외에서 실측 자료를 확보하여 개선된 정온도 기준을 마련하

는데 적극적으로 활용할 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원의 “조류발전 시스템 성능 향상 기술개발” 및 “천해용 해상도시 건설을 위한 계류앵커 기술 개발” 연구사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Ahn, H.-D., Shin, S.-H., Jeong, W.-M. and Lee, K.-H. (2002). Wave measurement (Introduction to coastal wave monitoring). Korea Ocean Research and Development Institute, 202 p.

Ahn, K. and Chun, J. D. (2004). A methodology of estimating design waves for the operable harbor condition using long-term wave data. J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 16(3), 178-189.

Busan Port Construction Office (2012). Research and development of the coastal hydraulic phenomena in Busan New Port, Sixth Report.

Callaghan, D. P., Nielsen, P., Short, A. and Ranasinghe, R. (2008). Statistical simulation of wave climate and extreme beach erosion. Coast. Eng., Vol. 55(5), 375-390.

Coastal Development Institute of Technology (2004). The manual for long period wave impact evaluation in harbour, Japan.

Goda, Y. (1974). A new method of wave pressure calculation of the design of composite breakwaters, Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng., 1,702-1,720.

Goda, Y. (2010). Random seas and design of maritime structures. 3rd Edition, Advanced Series on Ocean Engineering. Vol. 33, World Scientific.

Jun, K.-C. (2013). Estimation of design waves and design water levels around Korean coastal waters, Special lectures, Proc. of 21st Conf. on Korean Society of Coastal and Ocean Engineers.

Jun, K.-C., Kang, S.-H., Lee, D.-Y. and Park, K.-S. (2001). Estimation of typhoon induced air pressure and wind for simulation of storm surge, Proc. of Korean Meteorological Society, Atmosphere, 11(3), 52-56.

Kang, S.-H., Jun, K.-C., Park, K.-S. and Bang, G.-H. (2002). A comparison of typhoon wind models with observed winds. The Sea J. of the Korean Society of Oceanography, 7(3), 100-107.

Korea Maritime and Port Administration (1984). Analysis report of wave data (1978~1982).

Korea Maritime and Port Administration (1986). Research report of improvement for wave measurement works. 174 p.

Korea Maritime and Port Administration (1994). Project report of enforcement design of counter facilities for the development of Yeongilman New Port, Vol. 2, Numerical experiment, 551 p.

Korea Ocean Research and Development Institute (2005). Report of deepwater wave estimation for Korean coastal waters.

Kuik, A.J., van Vledder G.Ph. and Holthuijsen, L.H. (1988). A method for the routine analysis of pitch-and-roll buoy wave

- data, *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1,020-1,034
- Lee, D.-Y. and Jun, K.-C. (2006). Estimation of design wave height for the waters around the Korean peninsula. *Ocean Science J.* 41(4), 245-254.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2008). Report of preliminary design for north container berth (2-6) in Busan New Port.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010). Handbook of design criteria for harbors.
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (2001). Measurement and investigation of ocean waves. 635 p.
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (2005). Design criteria for harbors and fishery ports.
- PIANC, 1995, Criteria for movements of moored ships in harbours - a practical guide, Report of Working Group No. 24 of the Permanent Technical Committee .
- Pohang Regional Maritime Affairs and Port Administration (2010). A study on the cause analysis and reduction methods of swell in Pohang New Harbor. Vol. 2, Ocean monitoring data report, 633 p.
- Shin, M. C. (2005). Applicability of SWAN in Shallow Water. Master Dissertation, pp. 21-33
- SK Construction Company (2012). Final report for the installation and monitoring of directional wave measuring instrument for the construction of counter facilities in the Yeongil Bay Port (stage 2-1).
- Suh, K.D., Kwon, H.D. and Lee, D.Y., (2010). Some statistical characteristics of large deepwater waves around the Korean Peninsula, *Coastal Engineering*, Vol. 57, 375-384.
- The Fisheries Agency (1988). Report of deepwater waves estimation for Korean coastal waters (the East Sea and South Sea). 281 p.
- The Ports and Harbours association of Japan (2007). Technological Standards for Port Facilities and Manual.
- Ueda, S., Shiraishi, S., Oshima, H. and Asano, K. (1994) Allowable wave height and wharf operation efficiency based in the oscillations of ships moored to quay walls, Technical note of the Port and Harbour Research Institute of Ministry of Transport, Japan, No. 779.

Received 2 April, 2014

1st Revised 27 August, 2014

2nd Revised 1 December, 2014

Accepted 29 December, 2014