

계류선박의 동요에 기초한 온산항의 하역가동률 평가 Estimation of Harbor Operation Rate of Onsan Harbor Based on Ship Motion

곽문수¹, 정계완², 안성필³, 편종근⁴

Moon Su Kwak¹, Jae Wan Choung², Sung Phil Ann³ and Jong Kun Pyun⁴

1. 서 론

최근 우리나라는 전세계 물동량의 30% 이상을 차지하는 동북아 허브항만의 역할을 차지하기 위하여 일본, 중국, 홍콩 등 주변국 항만들과 치열한 경쟁관계에 놓여있으며, 새롭게 건설되는 대형 항만들은 매우 높은 하역가동률을 필요로 하고 있다. 현재 기술기준에 규정된 박지의 정온도는 파고에 기초하여 소형선 0.3m, 중·대형선 0.5m, 초대형선 0.7~1.5m로 되어 있고 연간 97.5% 하역일수가 확보되도록 되어 있다. 그러나 항내정온도가 항만설계 기준에 만족, 설계된 항만일지라도 계류선박의 동요에 의해 하역에 지장을 초래하고 있는 사례가 빈번하게 보고되고 있다. 이러한 계류선박의 동요는 하역일수를 감소시켜 항만 가동률을 저하시킬 뿐만 아니라, 계류사 및 방현재 등과 같은 계류장치들의 파손 및 피로를 증대 시킴으로서 막대한 양의 수리비용을 불러 일으키게 된다. 특히, 항만이 외해에 접해있어서 장주기파의 출현이 빈번한 곳에서는 계류선박의 동요량이 커져 파고에 의한 정온도 평가만으로는 97.5%의 항만 가동률을 만족시킬 수 없다. 따라서 항내 계류선박의 동요에 기초한 가동률 평가는 계류선박의 안전성 확보 및 하역의 효율화에 기여하고 선박 계류시스템의 수명 연장 및 수리비용을 줄이게 해준다.

현재 국내에는 파고(항만설계기준)에 기초한 하

역가동률산정은 널리 사용 되어져 왔지만, 선박동요에 기초한 하역가동률산정은 아직 보고 된 적이 없다. 이미 많은 연구자들이 하역가동률에 미치는 계류선박의 동요에 대해서 연구하였다. 계류선박의 동요량을 해석하고 가동률을 평가한 연구로는 상전과 백석(1988)가 계류선박의 동요를 고려한 하역가동률의 계산법을 제시하였다. 이 계산법은 선박의 하역허용동요량에 의해 선석 전면에서의 하역한계파고를 파향·주기별로 도출하고, 또 항내파고 계산을 사용하여 하역가능 심해파고의 비초과 확률을 구하여 각 선석에서의 하역가동률을 산정 한 것이다. 구보 등(1993)은 상전과 백석(1988)가 제시한 계산법은 유효한 계산법이지만 막대한 계산이 요구되고, 파, 바람 등의 외력뿐만 아니라 계류시스템의 특성에 의해서도 크게 영향이 미치는 것을 인지하고 시험적으로 동요모의를 사용하여 하역가동률을 간이적으로 산정 할 수 있는 개략식을 제안 하였다. 특히 동요에 영향을 주는 인자 중 계류시스템의 주특성 인자인 방현재에 대해 평가하였다. 상전(1994)은 선박의 동요 및 이미 제안 한 하역허용파고로 가동률을 산정 하였으며 대상해역에서의 선박동요에 가장 많이 미치는 인자를 파악하였다. 본 연구에서는 상전 등(1994)의 방법을 참고하여 계류선박의 동요량을 고려한 하역가동률 평가방법을 제시하였다. 계류선박의 동요량을 고려하여 하역가동률을 평가하는 방법은 먼저 계류선박의 동요해석 결과와 하역가부에 따

1 명지전문대학 토목과 부교수
2 (주) 건일엔지니어링 항만부 기사
3 (주) 어드밴스드 마린테크 이사
4 명지대학교 토목환경공학과 교수

라 규정된 계류선박의 하역허용 동요량을 이용하여 선종, 선형, 파향, 주기별로 하역허용파고를 구한다. 다음으로는 수치계산 또는 수리모형실험으로부터 대상선석 전면의 구해진 파고비를 이용하여 하역허용심해파고를 산정하고, 이것과 심해에서 관측된 파고, 주기의 결합빈도분포로부터 선석별 하역가동률을 산정하였다.

2. 하역허용파고 및 가동률 산정방법

2.1 하역허용파고 산정

Fig. 1에 나타난 하역허용파고의 계산순서를 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 선형마다 파랑조건(파향, 파고, 파주기), 계류조건(계류식, 방현재) 등을 달리하여 계류선박의 동요 시뮬레이션을 행한다. 수치시뮬레이션을 이용하여 구한 동요량에 대하여, 동요 성분별로 파고와 동요량의 진폭의 관계를 구한다. 즉, 파고와 각 동요성분의 최대치와의 회귀식을 구한다. 전술에서 구한 회귀식을 이용하여, 동요성분마다 선박의 동요가 하역허용 동요량 이하가 되는 파고, 즉, 동요성분별의 하역허용파고를 구한다. 계류선박의 하역허용 동요량으로서는 상전 & 백석(1988)에 의한 제안치. 그 외의 선종에 대해서는 Bruun(1981a 및 1981b)의 제안치를 기준으로 하였다. 동요성분별로 부터 구해지는 하역허용파고의 최소치를 가지고 해당조건에 있어서 하역허용파고로 한다. 단, 이 수치가 현행의 기술기준의 하역한계파고를 넘는 파고에 대해서는 기술기준의 하역한계파고를 하역허용파고로 한다.

2.2 하역가동률 산정

하역가동률 산정방법의 순서는 Fig. 2와 같다. 가동률 산정방법을 설명하면, 먼저 앞 절에서 설명한 하역허용파고를 산정한 후, 파랑해석 수치모형을 이용하여 평상파랑에 대한 각 대상 선석의 파고비를 구한다. 다음으로는 대상선석의 하역허용파고와 파고비를 이용하여 하역허용심해파고를 산정한다. 빈도분포표로부터 비초과 확률을 구한다. 이때 각 선석에 대해 비초과 확률을 구하면 각 선석의 가동률이 계산되어진다.

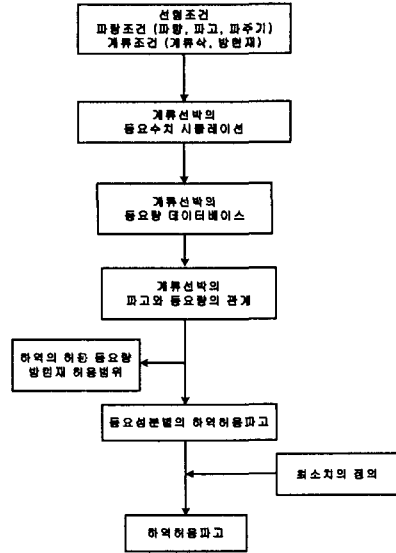


Fig. 1 Calculational flow chart of loading and unloading allowable wave height

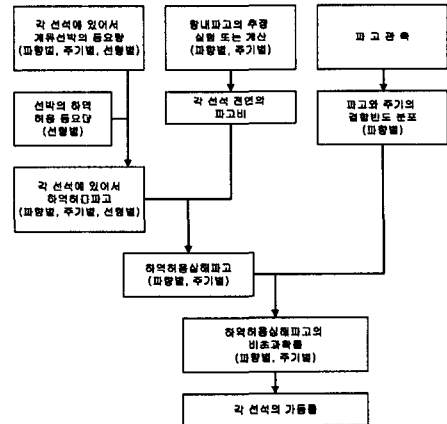


Fig. 2 Estimative flow chart of operation rate based on moored ship motion

3. 이 론

규칙파중에서 선체의 선형운동 방정식은 다음과 같다.

$$[-\omega^2(M_{jk} + A_{jk}) + i\omega B_{jk} + R_{jk}]a_k = F_j \quad (1)$$

여기서, M_{jk} 는 선체의 질량, A_{jk} 는 선체부가

질량, B_{jk} 는 감쇠계수, R_{jk} 는 복원력이며 ω 는 파 진동수, a_{jk} 는 선체운동의 진폭, F_j 는 파 강제력이다.

위 식에서 선체에 작용하는 유체력으로는 부가 질량과 감쇠력으로 나타내어지는 동유체력, 파랑에 의해 작용하는 파 강제력, 선체 운동에 의해 발생하는 부력의 변화에 의해 선체에 작용하는 유체 정역학적 힘이 있다. 또한 계류장치에 작용하는 계류력이 선박의 운동에 대해 복원력으로 작용한다. 계류선박에 작용하는 파력을 구하는 방법에는 스트립법, 특이점분포법, 경계요소법, 유한요소법 중 적절한 방법을 사용하지만 본 연구에 사용된 모형에서는 속도도텐셜을 특이점 분포를 이용하여 다음과 같은 적분방정식을 이용하여 구한다.

$$\frac{\partial \phi_j(P)}{\partial n_p} = -\frac{\sigma_j(P)}{2} - \frac{1}{4\pi} \int_{S_0} \frac{\partial \sigma_j(Q)}{\partial n_p} \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_p} dS(Q) \quad (2)$$

불규칙파 중에서의 운동은 불규칙적인 해상상태를 규칙적인 선형파들의 중첩으로 생각하여, 규칙파 중에서의 선체운동을 계산한 후 스펙트럼해석을 통하여 예측한다. 본 연구에 있어서는 유의파고와 특성주기의 변수로서 표현이 가능한 Bretschneider 스펙트럼을 이용하여 불규칙 해상상태를 가정하였다. 선박의 계류장치로는 계류삭과 방현재가 있는데 두 가지 모두 선체의 운동에 대해 비선형성을 갖는다. 그러나 본 연구에서는 주파수 영역에서의 선체의 운동을 해석하기 위해서 이들이 운동에 대해 선형성을 갖는다고 가정하여 계류력을 구하였다.

4. 수치모델의 검증

검증대상으로 한 모델케이스는 일반화물선 10,000DWT 경우에 대해 동요량과 하역허용파고를 계산하고 상전등(1994)의 산정 값과 비교하였다. 검증계산의 조건은 Table 1과 같다. Table 1에 나타난 계산조건은 박의 선종 및 선형과 선박의 치수, 계류장치, 입사파 조건 등으로 이루어져있다. 계산 조건 중에서 선박의 길이, 넓이, 흘수심 등은 상전등(1994)의 계산에 사용된 선박의 용적, 높이 등 구체적인 제원을 알 수가 없어서 국내에서 일반적으로 건조되는 일반화물선은 10,000DWT의 제원을 이용하여 본 모형의 계산조건을 구성하였다. 그밖에 박지수심은 10m, 계류삭수는 8개, 방현재수는

12개로 하였고, 입사파의 조건으로 파향은 15°~60°까지 4가지이며, 파고는 0.1m~0.8m, 주기는 6s~15s까지 5가지로 설정하였다. Fig. 3은 선박에 입사하는 파향이 45°인 경우에 대해 유의파고와 동요량의 관계를 주기별로 표시한 것이다. 본 모형에 의한 동요성분들은 상전 등(1994)의 결과와 허용동요량을 초과할 때 유의파고가 유사하게 나타나며 roll을 제외한 성분들의 주기별 동요량은 장주기에 가까울수록 두 결과가 일치하는 경향을 볼 수 있다. 허용동요량을 초과하는 유의파고 즉, 하역허용파고는 유의파고와 동요량의 계산결과로부터 파향별, 주기별로 산정하였다. Fig. 4는 파향별, 주기별 하역허용파고를 상전등(1994)의 결과와 비교한 것이다. 본 모형에 의한 하역허용파고의 계산결과는 입사파향 45°, 주기 12s초인 경우를 제외하면 상전 등(1994)의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Table 1. Computational conditions for verification of this model

	본 모형의 조건	Ueda 등 (1994)
선종	일반화물선	일반화물선
선형	10,000DWT	10,000DWT
Lpp	120m	127.5m
Breadth	17.42m	19.9m
Draft	6.0m	4.32m
박지수심	10m	10m
계류삭수	8	8
방현재수	12	12
파향	15°, 30°, 45°, 60°	15°, 30°, 45°, 60°
파고	0.1m ~ 0.8m	0.1m ~ 0.8m
주기	6s, 8s, 10s, 12s, 15s	6s, 8s, 10s, 12s, 15s

5. 현지항만의 적용

본 연구에서는 모형의 현지 적용성을 검토하기 위하여 울산광역시 울주군 온산항의 계류선박의 동요에 기초한 항만의 하역가동률을 산정하고 파랑에 의한 하역가동률과 비교해 보았다.

본 연구에서 사용된 대상 선박의 선종은 일반화물선이고 선형은 5,000DWT, 10,000DWT, 50,000DWT이다. 선박과 안벽의 상대위치, 계류삭, 방현재의 배치는 Fig. 5 Fig. 6과 같고, Fig. 7에서는 계산에 사용된 안벽의 개념적인 모양을 나타내었다. 하역허용파고는 일반적으로 만재시보다 공재시의 쪽이 작아지기 때문에 본 연구에서는 선박의 재하상태를 공재상태로 하였다. 파랑조건은 Fig. 8와 같이 주파수 영역에서의 계산은 반 시계

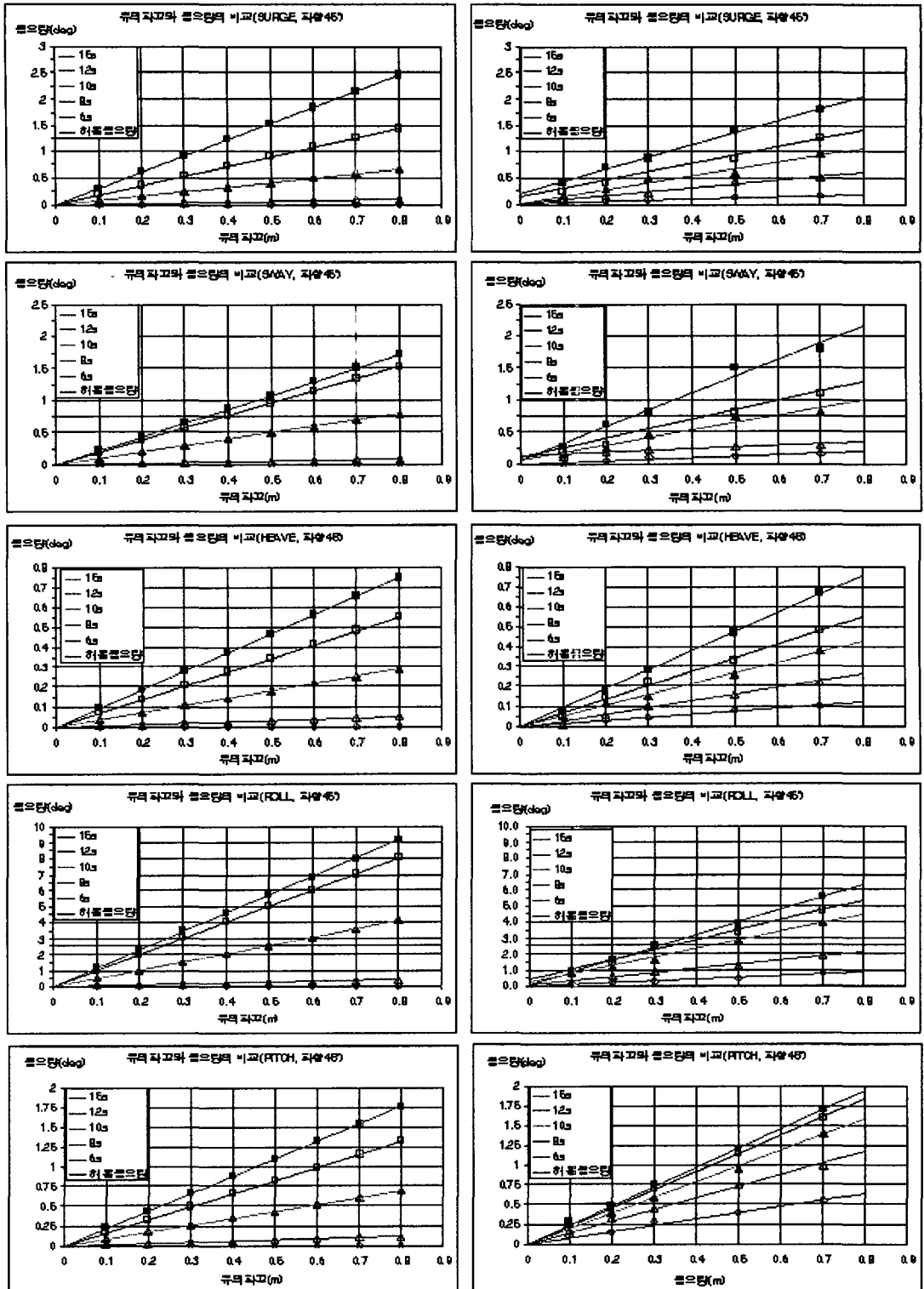


Fig. 3. Comparison between significant wave height and quantity of ship motion with wave period (This model and Ueda's model)

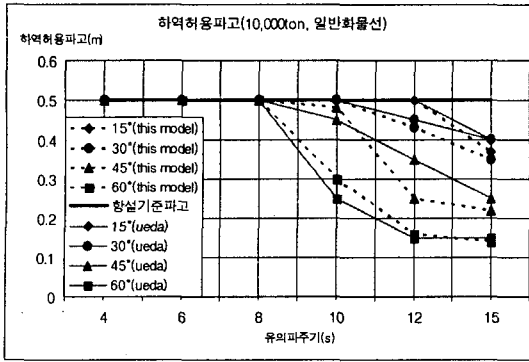


Fig. 4. Comparison between this model and Ueda's model with loading and unloading allowable wave height

방향의 각도로 했을 경우 15°, 30°, 45°, 60°로 하였다. 또, 유의파주기는 4, 6, 8, 10, 12, 15s로 하였다. 파고는 0.1~0.8m의 범위에서 계산하였는데, 초대형선인 50,000DWT에 대해서는 기술기준의 하역한계파고가 0.7m~1.5m이기 때문에 파고 1.0m, 1.5m, 2.0m에 대해서도 계산을 실시하였다. 바람의 조건은 계류선박의 동요에는 풍향 및 풍속이 영향을 미친다. 상전(1994)는 일반화물선(10,000DWT, 공재상태)에 대하여 파향 30° 및 60°의 조건에 대하여 바람 조건의 상이에 따른 하역허용의 파고를 산정하였다. 파향 30°의 경우에는 평균풍속 10m/s, 풍향 30°와 무풍상태에 대하여 비교하였는데 양자의 차이는 작다. 또, 파향 60°에서는 평균풍속 10m/s, 풍향 60°보다도 무풍상태의 하역허용파고가 작다. 이에 비하여 평균풍속 10m/s, 풍향 270°의 하역허용파고는 무풍상태 및 평균풍속 10m/s, 풍향 60°조건인 경우보다도 작다. 풍향 270°는 선박을 계선안에서 멀어지게 하는 방향으로 바람이 작용하는 조건으로서 계류선박의 동요에 대해서는 바람의 영향이 탁월하고, 계선안으로부터 멀어지는 sway의 동요량에 의해 하역허용파고가 정해진다. 가령 이 경우에 방파제를 정비하여 항내의 파고를 저감시켜도 가동물은 별로 향상되지 않는다. 따라서 바람의 영향은 그다지 크지 않기 때문에, 본 연구에서도 바람의 조건으로는 무풍상태로 하여 동요해석모형을 수행하였다. 감쇠력조건인 경우는 순수 동유체력만으로 계산하게 되면 횡동요의 경우 감쇠력이 작기 때문에 공진 주파수 근처에서 실제보다 상당히 큰 값을 주게 된다. 그러므로 횡동요의 경우에는 점성감쇠

력을 포함시켜 계산해야만 실제에 가까운 값을 얻을 수 있게 된다. 횡동요의 점성감쇠력은 운동변위에 대한 비선형 함수이다. 따라서 주파수 영역의 계산에 이 힘을 포함시키려면 선형화된 값을 써야 한다. 본 계산에서는 횡동요 5°까지의 에너지를 적분하여 대응하는 선형계수의 값을 구하여 계산에 포함시켰다. 방현재의 조건은 국내에서 제조된 고무방현재를 대상으로 검토하였다. 정반력형과 반력점증형의 방현재중 정반력형이 장주기에 가까울수록 하역허용파고가 작기 때문에 정반력형 방현재로 선택하였다. 계류삭 및 계류방법은 각 선형마다 동일하게 하였다. 단 계류삭의 초기장력은 절단하중의 7%로 하였다. 그밖에 선박의 동요 해석에 사용된 계류삭 및 방현재의 수와 계수값들을 정리하면 Table 3.과 같다.

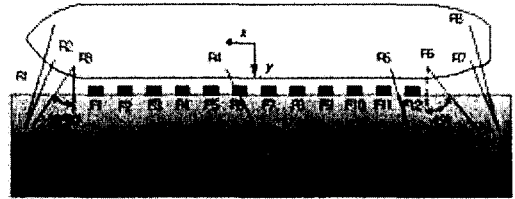


Fig. 5. Sketch of fender and mooring line

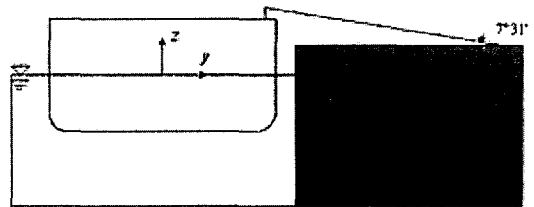


Fig. 6. Ship moored of jetty

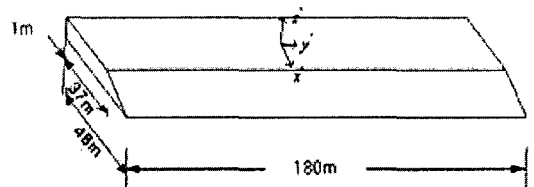


Fig. 7. Shape of jetty used in computation

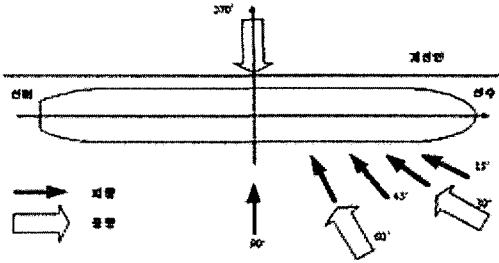


Fig. 8. Definition of wind direction and Wave direction

Table 3. Computational conditions for ship motion analysis

	동요해석모형 조건		
	일반화물선	일반화물선	일반화물선
선종	5,000DWT	10,000DWT	50,000DWT
선형	98m	120m	207m
Lpp	14.0m	17.42m	32.20m
Breadth	4.5m	6.0m	10.7m
Draft	8m	10m	15m
박지수심	8	8	10
계류삭수	1.54tf	2.21tf	3.57tf
계류삭 초기장력	10	12	12
방현재수	4.83tfm	9.50tfm	33.0tfm
방현재 단성계수	15°, 30°, 45°, 60°	15°, 30°, 45°, 60°	15°, 30°, 45°, 60°
파향	0.1m ~ 0.8m	0.1m ~ 0.8m	0.1m ~ 1.5m
파고	6s, 8s, 10s, 12s, 15s	6s, 8s, 10s, 12s, 15s	6s, 8s, 10s, 12s, 15s
주기			

5.2 동요량 계산 및 하역허용파고 산정

본 연구에서는 동요량을 고려한 현지항만의 가동률을 평가하기 위하여 온산항의 각 5,000DWT, 10,000DWT, 50,000DWT 선석에 대하여 선박의 동요량을 계산하였다. 동요량 계산결과는 각 성분별로 유의파고와 동요량의 관계중 각 선형에 대한 입사파향중 60°인 경우 하역허용동요량이 다른 파향에 비해 허용파고가 낮으므로 60°파향의 동요량 결과에서 하역허용파고를 산정하였다. 하역허용파고를 산정하는 방법은 먼저, 유의파고와 동요량이 대체적으로 선형의 관계에 있으므로 양자의 관계에 대한 회귀식을 각 주기별로 구한다. 다음으로 이 회귀식과 전술한 하역허용 동요량과의 교점, 즉 하역허용파고를 주기별로 구한다. 이것을 각 동요성분별로 반복하여 구한다. 또한, 방현재에 대해서는 최대변위와 그 허용변위로부터 동일한 방

법으로 하역허용파고를 구한다. Table 4는 5,000DWT 화물선의 입사파향 60°에 대한 하역허용파고의 산정 예를 나타낸 것이다. Table 에는 주기별로 각 동요성분에 대하여 회귀식과 허용동요량의 교점으로부터 구한 유의파고를 나타내고 있으며, 이들 값 중에서 최소치를 하역허용파고를 선정한다. 단, 이 수치가 기술기준의 하역허용파고를 초과하는 것에 대해서는 기술기준파고를 하역허용파고로 정한다. 각 선형별 파향과 주기에 따른 하역허용파고를 정리하면 Table 5. 와 같다. 먼저 동일한 파향에 있어서 주기에 대한 하역허용파고의 변화를 살펴보면 주기가 길 수록 하역허용파고는 작아진다. 이것은 장주기 일 수록 계류선박의 동요량이 커지기 때문이다. 또한 동일한 주기에 있어서 비교하면 파가 선박에 대하여 측면방향으로부터 입사 할 수록 하역허용파고는 작아진다. 즉, 파향이 90°에 가까울 수록 sway, roll의 동요량이 커지기 때문이다.

Table 4. Loading and unloading allowable wave height with ship motion

조건	일반화물선	선박동요량	방현재허용변위	
선종	5,000DWT	SURGE	1.0m(1.0)	
풍향	무풍	SWAY	0.75m(0.5)	
풍속	0m/s	HEAVE	0.5m(0.5)	
파향	60°	ROLL	2.5°(2.5°)	
		PITCH	1.0°(1.0°)	
		YAW	1.5°(1.0°)	
		방현재 허용변위	0.575m	
		허용파고(m)		
파주기	7	9	12	15(s)
동요성분				
SURGE	33	3.1	0.9	0.5
SWAY	9.3	4.3	0.8	0.3
HEAVE	0.45	0.4	0.13	0.12
ROLL	37.3	0.4	0.36	0.12
PITCH	90	3.4	0.39	0.13
YAW	20.8	15.2	0.76	0.26
하역허용 파고	0.45	0.4	0.13	0.12

5.3 파랑장 해석 및 파고비 산정

온산항 해역의 파랑장해석은 에너지 평형방정식 모형을 이용한 광역계산과 시간의존완경사 방정식 모형을 이용한 상세역 계산을 실시하였다. 광역의 입사파 조건은 Table 6과 같고 겨울철의 NNE, NE, ENE, E방향과 여름철의 SSW, SW방향에 대해 평상파 제원으로 하였다. 계산결과는 동계 주파향인 NNE, NE, ENE, E 파향의 파고비가 하계

Table 5. Loading and unloading allowable wave height of Onsan Harbor (unit : m)

선형	파향	파 주기 (s)			
		7	9	12	15
5,000DWT	15°	0.5	0.5	0.4	0.3
	30°	0.5	0.4	0.3	0.3
	45°	0.5	0.4	0.3	0.2
	60°	0.45	0.4	0.13	0.12
10,000DWT	15°	0.5	0.5	0.5	0.37
	30°	0.5	0.5	0.43	0.35
	45°	0.5	0.5	0.25	0.22
	60°	0.5	0.3	0.16	0.14
50,000DWT	15°	0.7	0.7	0.7	0.7
	30°	0.7	0.7	0.7	0.7
	45°	0.7	0.7	0.7	0.6
	60°	0.7	0.6	0.4	0.4

주 파향보다는 높게 나타났다. 각 선석의 가동률 산정 위치는 Fig. 9와 같다. 대상 선석의 위치를 나타낸 것이다.

Table 6. Computational incident wave condition conditions

파향	파고(m)	주기(s)
NNE	3.5	7.2
NE	3.5	7.2
ENE	2.5	6.2
E	2.5	6.2
SSW	4.0	8.0
SW	4.0	8.0

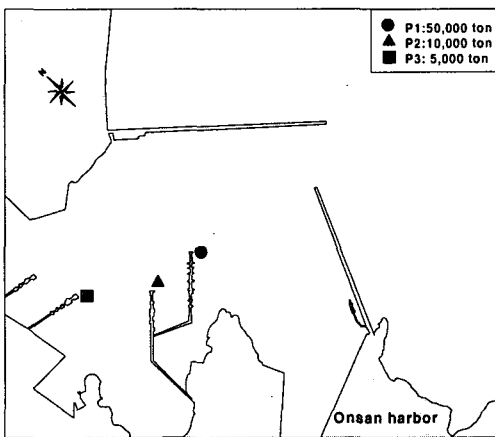


Fig. 9. Location map of each berth

대상선석은 항입구로부터 내측방향으로 P1(50,000DWT),

P2(10,000DWT), P3(5,000DWT) 이며, 그림에는 각각 ●, ▲, ■ 로 표시하였다. Table 7.은 항내파랑장 해석에 기초하여 구한 P1, P2, P3선석의 파고비를 파향별로 나타낸 것이다. 파고비는 대상 선석 전면의 파고를 상세역 입사파고로 나누어 무차원 값으로 구하였다. 파향별 파고비 산정 결과를 살펴보면, E방향의 입사파가 전 선석에서 가장 큰 영향을 주고 있으며 파고비는 0.4~0.5를 나타내었다. 특히, P1의 경우는 항 입구에 근접해 있으므로 다른 선석에 비하여 다소 큰 파고비를 나타내었고 0.3~0.5의 분포를 보였다. 그 밖의 선석별 파고비 결과는 P2선석이 파향별로 0.2~0.5의 분포를 보였고, P3선석은 0.2~0.4의 분포를 나타내었다.

Table 7. Relative wave height of each berth

	NNE	NE	ENE	E	SSW	SW
P1	0.4	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3
P2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.2	0.2
P3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2

5.4 하역가동률 산정

온산항에 대한 하역가동률 산정조건은 Table 8.과 같다. 가동률 산정의 대상 선종은 일반화물선이고, 선형은 5,000DWT, 10,000DWT, 50,000DWT의 3종류이다. 그리고 선박에 입사하는 파향은 동요량에 가장 큰 영향을 주는 60°방향으로 설정하였다. 또한 가동률 산정에 필요한 심해파의 파향-주기 결합빈도분포는 온산항 전면해역의 장기파랑 관측자료를 사용하였다.

Table 8. Estimative conditions of operation rate for Onsan harbor

선석명	선 종	선 형	파향
P1	일반화물선	50,000DWT	60°
P2	일반화물선	10,000DWT	60°
P3	일반화물선	5,000DWT	60°

5.5 가동률 산정 결과

하역가동률 산정은 대상 선석 전면이 파고비와 하역허용파고의 관계로부터 하역허용심해파고로 산출한 후, 현장 관측 결과에서 얻은 파고-주기 결합확률자료로부터 하역허용심해파고의 비초과 확률을 산정한다. 하역가동률 결과는 백분율로 표시하여 Table 9.에 나타내었다. 또, 현행의 항만설계기준에 따른 가동률의 결과에 함께 나타내었다.

Table 9. Operation rate of Onsan harbor (unit : %)

	P1(50,000 DWT)		P2(10,000 DWT)		P3(5,000 DWT)	
	설계기준에 의한 가동률	본 연구에 의한 가동률	설계기준에 의한 가동률	본 연구에 의한 가동률	설계기준에 의한 가동률	본 연구에 의한 가동률
NNE	99.8	95.2	99.8	97.3	99.9	98.1
NE	90.6	84.7	86.4	82.1	99.8	97.9
ENE	83.4	82.3	81.1	78.9	96.3	85.1
E	93.9	93.5	89.1	87.5	92.0	90.5
SSW	99.5	97.1	99.5	98.2	99.7	98.9
SW	99.9	99.5	99.9	98.1	99.9	99.9

6. 결 론

본 방법에 의한 온산항의 하역가동률은 항만설계기준에 의한 가동률보다 ENE와 NE파향의 경우에 있어서 2~11% 정도 더 저하되는 것을 알 수 있었다. 그 밖에 온산항에 대한 계산결과로부터 얻은 일반적인 결론은 다음과 같다. 계류선박의 하역허용파고는 입사파의 주기가 장주기에 가까울수록 작아졌으며, 동일파 주기에 있어서는 선체에 입사하는 파향이 90°에 가까울수록 작아졌다. 즉, 파향이 90°에 가까울수록 sway, roll 의 동요량이 커져서 하역허용파고가 작아지게 된다. 동일파향, 동일파주기에 대해서는 선형이 대형일수록 하역허용파고가 커졌다. 이상과 같은 결과로부터, 장주기가 탁월할 것으로 예상되는 항만에서는 항만설계기준에 의한 하역가동률 평가뿐만 아니라 계류선박의 동요를 고려한 하역가동률 평가를 함께 검토하여 평면배치 계획을 수립하여야 할 것이다.

참고문헌

곽문수, 편종근 (1998). Green함수법에 의한 회절파 해석. 대한토목학회 논문집, 349-352.

곽문수, 홍길표, 편종근 (1990). 시간의존 환경사방정식을 이용한 항내 파고 분포 계산, 해안해양공학회지, 2(1):18-27

김규한, 김덕중 (2002). 장주기파에 의한 하역가동률 산정, 토목학회 발표논문집, 114-118.

김동준, 최향순, (1990). 해상에 계류된 부유체의 운동 응답 해석, 대한조선학회지, 27(4):3-14

대한조선학회 (1974). 조선공학개론, 동명사.

미국조선학회, 임상전 역 (1971). 기본조선학(P.N.A), 대한교과서주식회사.

안성필 (1986). 3차원 특이점 분포방법에 의한 계류시 부유체의 운동응답해석, 석사학위논문, 서울대학교.

이기표, 안성필 (1987). 상호작용을 고려한 두 바아지의 운동응답, 대한조선학회지, 24(1):29-34.

편종근 (1997). 개념파악을 위한 수리학, 명지대학교 출판사.

한국종합기술개발공사(주) (1990). 동해펄프(주) 전용부두 건설에 따른 선박 계류시 영향 검토 연구 보고서, 명지대학교 공학기술연구소

해양수산부 (1997). 울산 신항만 방파제 기본설계보고서.

현대중공업(주) (1986). Offshore heavy lifting시 충격 해석연구, 서울대학교.

Bruun, P. (1981). Port Engineering. 3rd Edition, Gulf Pub.

Bhattacharyya (1978). Dynamics of Marine Vehicles. Wiley Interscience Pub.

Copeland, G.J.M. (1985). A practical alternative to the mild slope wave equation, Coastal engineering, No. 9 : 129-149

Dennis V. Padron., Edward H.Y. (1983). Fender system problems in U.S. ports, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean engineering, ASCE, 109(3), pp 296-309

Hiraish et al. (1995). Field observation of harbor oscillation by long period waves, J. of Coastal Eng., In Japan, in Japanese, Vol. 42, pp. 301-305.

Lee, J. J. (1971). Wave-induced oscillations in harbour of arbitrary geometry. J. Fluid Mechanics, Vol. 45, Part 2, pp. 375-394.

Newman, J. N. (1977). Marine hydrodynamics, The MIT Press.

Rafael, G., Eduardo, G., Fernando, P. (1998). Utilization of moored vessels in hydraulic models of harbors, Coastal engineering, ASCE, pp. 2979-2990

Ueda, S. (1987). Motions of moored ships and their effect on wharf operation efficiency. 26(5), Report of port and harbour res. Inst., Japan, pp. 319-373.

- Ueda, S., S. Shiraisi. (1988). The allowable ship motions for cargo handling at wharves. 27(4), Report of port and harbour res. Inst., Japan,
- Van der Molen, W., Ligteringen, H., Vander Lem, J. C., De Waal, J. C. M. (2003). Behavior of a Moored LNG Ship in Swell Waves. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean engineering, ASCE, 129(1), pp.15-21
- Van Oortmerssen, G. (1976). The motions of a moored ship in waves, Ph.d. Thesis, Univ. of Wageningen, Utrecht, Netherlands
- Watanabe, A., Maruyama, K. (1986). Numerical modelling of nearshore wave field under combined refraction, diffraction and breaking. Coastal Eng. in Japan, 29, 19-39.
- Yuen A.F., Burke M.G, Leung T.C. (1986). Ship Motion Study for the 2010 and 2020 Plan in the San Pedro Bay, California, Coastal Engineering, ASCE, pp.2742~2755.
- 西村仁嗣・丸山康樹・平口博丸. (1983). 直接数値積分による波の場の解析. 海岸工学講演会論文集, 第30巻, pp. 123-127.
- 西村仁嗣, 松岡道男, 松本朗, 篠田伸昌 (1993). クリーン函数法による港内静穏度解析, 海岸工学論文集, 第40巻(印刷中), pp.126-127.
- 上田茂, 白石悟, 大島弘之, 浅野恒平 (1994). 繫岸船舶の動揺に基づく荷役許容波高の提案及び稼働率. 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 916-920.
- 上田茂 白石悟, 大島弘之, 浅野恒平 (1994). 繫岸船舶の動揺に基づく荷役許容波高の提案及び稼働率. 港湾技研資料, No. 779
- 永井紀彦, 橋本典明, 浅井正, 戸引勳, 伊藤一教, 東江隆夫, 小林昭男, 柴田孝雄 (1994). 現地一タに基づく港内係留船舶の動揺に及ぼす港外長周期波, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.931-935.
- 久保雅義, 榊原繁樹 (1993). 年間荷役稼働率からみた繫留システムの比較について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 941-945.
- 久保雅義, 榊原繁樹 (1995). 荷役稼働率計算における波群副振動による長周期波の影響について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 931-935.
- 郭文秀・西村仁嗣. (1998). クリーン函数法による回折波の解析, ながれ, Vol. 17, No. 1, pp. 22-27.