

港灣內 波浪應答과 繫留船舶의 運動解析

Wave Responses and Ship Motions in a Harbour Excited by Long Waves

조일형*, 홍길표**, 최항순***

1. 서론

세계 교역량이 증대되면서 해상 교통량은 계속 증가하고 있으며, 후발공업국에서는 새로운 항만의 건조가 활발하게 이루어지고 있다. 우리나라의 경우에도 연안공업단지의 개발과 서해안 개발의 일환으로 기존 항만의 확충은 물론 신항만 건설이 추진되고 있다. 그러나 항만내 계류된 선박의 운동특성을 밝히는 이론이 아직 정립되어 있지 못하여 이에 대한 연구가 절실히 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 Green 함수 방법을 이용하여 항만내 파도응답의 특성과 항만내 계류된 선박의 운동을 고찰하였다. 유체영역을 항만영역과 해양영역으로 나누어 각 영역의 경계치문제를 독립적으로 풀 다음, 항만영역의 해와 해양영역의 해를 항만입구에서 정합시켜 얻어지는 적분방정식으로부터 파도응답을 구하였다. 한편 항만내 계류된 선체 운동은 천수역 세장선 이론을 확장시켜 해석하였다. 이론적인 해석방법과 병행하여 항만내 계류선박에 대한 실험을 수행하여 해석결과를 검증하였다.

2. 항만내 파도응답

선형포텐셜 유동이란 가정하에 입사파의 파장은 수심과 항만입구의 폭에 비하여 아주 길다고 가정한다. Fig.1에 도시한 바와 같이 사각형 항만의 안벽은 수직벽으로 완전반사가 일어난다. 수심이 일정할 때 선형 장파이론의 지배방정식은 2차원 Helmholtz 방정식이 된다.

$$\nabla^2 \eta + k^2 \eta = 0. \tag{1}$$

해양영역에서 파계(η^o)는 해양에서 항만으로 들어오는 입사파(η^i)와 방파제에 의하여 반사되는 반사파(η^r) 그리고 항만 입구에서 산란되는 산란파(η^s)로 구성된다.

$$\begin{aligned} \eta^o &= \eta^i + \eta^r + \eta^s \\ &= A \{ e^{-ik(x \cos \varphi - y \sin \varphi)} + e^{ik(x \cos \varphi + y \sin \varphi)} \} + \frac{i\omega}{g} \int_{-a}^a U(y_o) \left[-\frac{i}{2} H_0^{(1)}(kr) \right] dy_o. \end{aligned} \tag{2}$$

* 해사기술연구소

** 국립건설시험소

*** 서울공대 조선해양공학과

여기서 A는 입사파의 진폭이며, U(y)는 항만입구의 폭(2a)에 따른 속도분포를 나타낸다.

항만영역문제를 해석하기 위하여 편의상 Fig.1에 표시한 좌표계 O1(x1, y1)를 도입한다. 지배방정식과 안벽에서의 경계조건을 만족하는 항만내의 파형은 Green함수를 이용하면 다음과 같다.

$$\eta^h = \frac{i\omega}{g} \int_{l_e-a}^{l_e+a} U(y_0) G^h(x_1, y_1/y_0) dy_0. \quad (3)$$

여기서

$$G^h(x_1, y_1/y_0) = - \sum_{n=0}^{\infty} X_n(x_1) Y_n(y_1) Y_n(y_0),$$

$$X_n(x_1) = \frac{\epsilon_n \cos k_n(x_1 - L)}{k_n B \sin k_n L},$$

$$Y_n(y_1) = \cos \frac{n\pi}{B} y_1,$$

$$k_n = [k^2 - (\frac{n\pi}{B})^2]^{\frac{1}{2}},$$

지금까지 유체영역을 해양영역과 항만영역으로 나누어 각 영역에서 경계치 문제를 독립적으로 풀었다. 각 영역에서 미지수로 나타나는 항만입구에서의 속도분포를 구하기 위해 두 영역의 해를 항만입구에서 정합시켜야 한다. 이미 항만입구에서 속도분포는 같다고 놓았으므로 항만입구에서 파형이 서로 같다는 정합조건을 적용하면 아래와 같은 적분방정식을 얻게된다.

$$\frac{i\omega}{g} \int_{-a}^a U(y_0) M(y/y_0) dy_0 = 2A \cos(ky \sin \varphi), \quad (4)$$

여기서

$$M(y/y_0) = G^h(0, l_e - y/l_e - y_0) + \frac{i}{2} H_0^{(1)}(k | y - y_0 |).$$

윗식으로 주어진 적분방정식을 풀어 항만입구에서의 속도분포를 구하면 각 영역에서의 해는 완전해진다.

3. 선체운동

앞에서 구한 항만내 파도응답이 항만안에 계류된 선박의 운동을 야기시키며 선체운동에 따라 항만안의 파고분포가 달라진다. 여기서는 항만안에 계류된 선박에 작용하는 동유체력과 운동응답을 구하였다. 이때 선체운동응답은 선박의 길이가 폭과 깊이에 비해 길다는 세장선가정에 입각하여 해석하였다.

선박의 운동으로 유기된 파의 대부분은 항만의 안벽에서 반사를 되풀이하면서 항만안에 남아있게 된다. 그러나 일부의 파는 항만입구를 통하여 해양으로 방사된다. 해양쪽으로 빠져나가는 파는 항만입구에 소오스를 분포하여 다음과 같은 적분식으로 표현할 수 있다.

$$\eta_j^o(x, y) = \frac{i\omega}{g} \int_{-a}^a u_j(y_0) [-\frac{i}{2} H_0^{(1)}(kr)] dy_0. \quad (5)$$

여기서 u_j 는 선체운동으로 유기된 항만입구에서의 속도분포이며 아직은 미지수이다. 지배방정식과 경계조건을 만족하는 Green함수를 구하고 Green정리를 적용하면 선박의 대칭운동으로 야기된 항만안에서의 파형은 다음식으로 표시된다.

$$\eta_j^h = \frac{i\omega}{g} \left\{ \int_{-l}^l \Delta v_j(x_0) H(x_2, y_2, x_0, 0) dx_0 - \int_{l_e-a}^{l_e+a} u_j(y_0) H(x_2, y_2, l_s, y_0) dy_0 \right\}, \quad (6)$$

윗식의 첫번째항은 y_2 축에 대칭인 운동에 기인하는 성분이며, 두번째항은 항만입구로 빠져나가는 파를 표현한다.

나중에 수행할 정합을 위하여 윗식을 선박주위로 내부전개시키면 다음의 결과를 얻는다.

$$\eta_j^h(x_2, y_2) \sim \frac{i\omega}{g} \left\{ W_j(x_2) + \frac{\Delta v_j(x_2)}{2} |y_2| + V_j(x_2) y_2 \right\} \quad (j = 1, 3, 5), \quad (7)$$

여기서

$$W_j(x_2) = \int_{-l}^l \Delta v_j(x_0) H(x_2, 0, x_0, 0) dx_0 - \int_{l_e-a}^{l_e+a} u_j(y_0) H(x_2, 0, l_s, y_0) dy_0,$$

$$V_j(x_2) = \int_{-l}^l \Delta v_j(x_0) \frac{\partial \tilde{H}(x_2, 0, x_0, 0)}{\partial y_2} dx_0 - \int_{l_e-a}^{l_e+a} u_j(y_0) \frac{\partial H(x_2, 0, l_s, y_0)}{\partial y_2} dy_0,$$

이다.

선체주위영역에서 최저차항만 고려하면 자유표면은 고정된 벽으로 대체된다. 따라서 선체주위영역에서의 지배방정식은 2차원 Laplace방정식이며 자유표면과 바닥에서 벽면 조건식이 되어야 한다. 한편 방사조건식은 항만영역의 해를 선체주위로 내부전개시킨 식(7)과 같다.

항만영역에서 필요한 미지수인 $\Delta v_j(x_2)$ 는 선체의 단면을 따라 발생한 유량은 무한 원방으로 빠져나가는 유량과 같다는 아래의 조건으로부터 구한다.

$$\Delta v_j(x_2) = -\frac{i\omega \zeta_j}{h} A_j(x_2),$$

$$A_j(x_2) = -\int_S n_j dl. \quad (8)$$

여기서 A_j 는 선박의 형상을 나타내는 함수들이다.

선박의 형상함수로 표현된 $\Delta v_j(x_2)$ 를 식(6)에 대입하여 항만내부의 파형식을 구하면

$$\eta_j^h(x_2, y_2) = \frac{\omega^2}{gh} \zeta_j \int_{-l}^l A_j(x_0) H(x_2, y_2, x_0, 0) dx_0$$

$$- \frac{i\omega}{g} \int_{l_e-a}^{l_e+a} u_j(y_0) H(x_2, y_2, l_s, y_0) dy_0 \quad (j = 1, 3, 5) \quad (9)$$

와 같다. 여기서 아직 미지수인 선체운동에 따른 항만입구에서의 속도분포는 2장에서와 비슷한 방법으로 항만내부영역의 해와 해양영역에서의 해를 항만입구에서 정합시켜 구한다. 이렇게 구한 항만입구에서의 속도를 식(9)에 대입하여 항만영역에서의 해를 얻는다.

한편 선체의 운동응답을 구하기 위해 아래와 같은 운동방정식을 풀어야 한다.

$$\sum_j (-\omega^2 M_{ij} - T_{ij} + C_{ij}) \zeta_j = F_i \quad (10)$$

여기서 $j=1,3,5$ 은 전후동요, 수직동요, 종동요를 의미한다. 위의 운동방정식에서 M_{ij} 는 질량을 나타내며, C_{ij} 는 정유체력과 계류삭에 의한 복원력 계수이다. 한편 T_{ij} 는 동유체력 계수로 부가질량과 감쇠계수의 합으로 표현된다.

4. 계산결과 및 고찰

항만내 파도응답에 대한 계산으로 항만의 길이와 폭이 2000m인 사각형 항만을 채택하였다. 수심은 12m로 일정하며 항만입구의 폭은 60m이며 항만폭의 1/4에 위치한다 ($l_0 = 500m$, Fig.1참조). Fig.2는 항만의 안벽($x_1 = 2000m, y_1 = 0m$)에서 계산한 파도응답의 증폭비 ($|1\eta^h/2A|$)를 보여주고 있다. 극값을 나타내는 주파수는 항만의 고유주파수와 일치하며, $kL = 0.5$ 근방에서 나타나는 Helmholtz 모드에서의 증폭비가 가장 크며, $kL = 4.6$ 에서의 증폭비는 공진점에서의 증폭비중에서 가장 작음을 볼 수 있다. 즉, 고유진동모드에 따라 증폭비가 크게 달라진다. 물론 이러한 증폭비의 변화는 항만내 위치에 따라 변한다. 항만입구의 폭이 작을 때에는 공진점부근에서 공진폭이 좁아짐은 물론 진폭비가 더 크게 나타남을 알 수 있다.

항만내 파도응답에 대한 실험을 수행하기 위하여 길이가 9m, 폭이 4m인 직사각형 항만을 만들었다. 수심은 천수역 조건에 가능한 맞추도록 30cm로 택하였다. 항만입구의 폭은 이론의 가정에 적합한 50cm로 선택하였다. 조파기는 플랫폼 타입으로 방파제와 7m 떨어진 위치에 평행하게 놓았다. 항만안에 실선을 100분에 1로 축소시킨 길이 155cm, 폭 24.8cm인 화물운반선인 MARINER모형선을 항만내 여러 위치에 놓고 입사파의 주파수에 따르는 선체운동을 계속하였다. 실험장치의 개략도는 Fig.3에 도시하였다. Fig.4는 선박이 항만의 폭 방향의 가운데에 위치할 때 발생파의 주기에 따른 전후동요를 보여주고 있다. 전체적으로 이론계산결과는 실험결과를 잘 따라가는 것을 볼 수 있다. 여기에서도 공진점의 위치는 에너지 손실을 나타내는 여러가지 역학적인 기구들에 의하여 저진동수쪽으로 약간 이동하는 것을 볼 수 있었다. 한편 Fig.5는 계류선박이 위에서와 같이 항만의 중심선에 위치할 때 수직동요의 결과를 보여주고 있다. 실험 테이터의 부족으로 이론계산에서 나타나는 $T = 2.3$ sec의 공진현상을 보여주지 못하지만 나머지 공진점 부근에서의 정성적인 경향은 잘 들어맞는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

이상의 계산및 실험결과를 토대로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 입사파의 주파수와 항만의 고유진동수가 일치될 때 항만내 파고가 입사파의 파고보다 몇 배 이상 커지는 항만공진이 발생하며, 항만내 파도응답은 위치에 따라 많은 차이를 보인다.
- 2) 항만내 선박의 운동은 공진시 크게 야기됨을 확인할 수 있었고, 이로인하여 선박은 주위의 선박이나 안벽에 충돌할 수 있는 가능성을 밝혔다. 또한 선박이 놓여진 위치에 따라 기진력 및 응답의 차이가 있다는 사실을 밝혔다. 이러한 계산결과는 항만공진시 선박의 운동이 최소가 되는 항만내에서의 위치를 찾을 수 있음을 의미한다.
- 3) 항만내 계류된 선박의 운동응답에 대한 실험을 수행하여 계산과 비교한 결과 정성적인 경향은 서로 비슷하다는 사실을 밝혔다. 그러나 공진점의 위치가 저진동수쪽으로 약간 이동한 점과 정량적인 값의 차이는 이론에서 무시한 안벽이나 바닥에서의 마찰과 항만입구에서의 박리동에 기인한 것으로 생각된다.

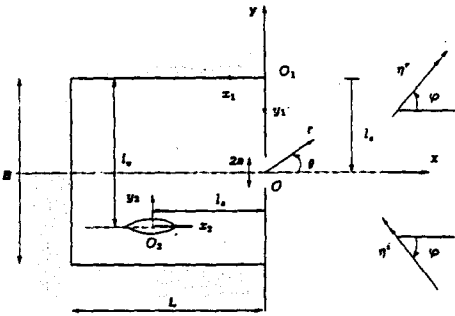


Fig.1 Definition sketch for a ship in a rectangular harbour

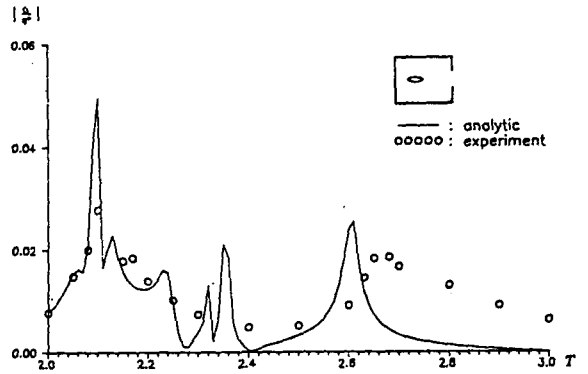


Fig.4 Surge motion amplitude of a ship in a rectangular harbour ($x_c = -6m, y_c = 0m$)

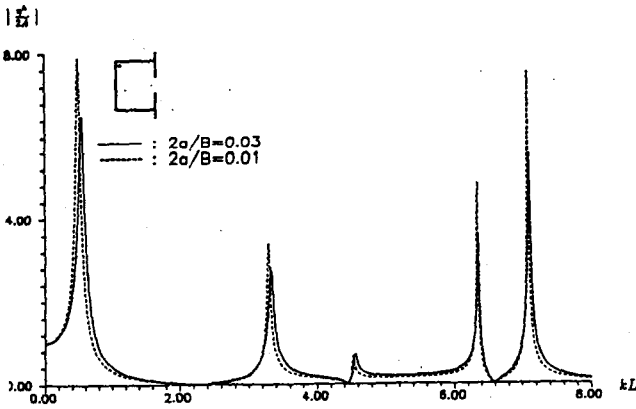


Fig.2 Amplification factor of wave response in a rectangular harbour ($x_1 = 2000m, y_1 = 0m$)

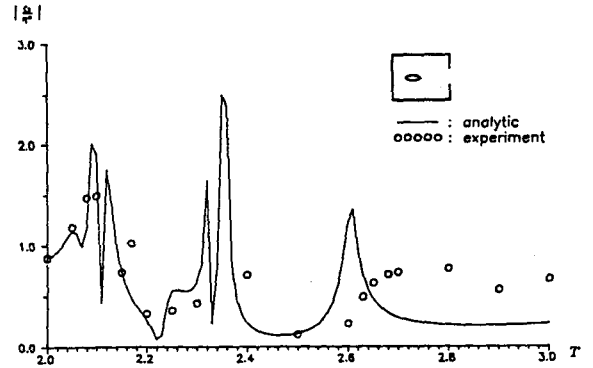


Fig.5 Heave motion amplitude of a ship in a rectangular harbour ($x_1 = 2000m, y_1 = 0m$)

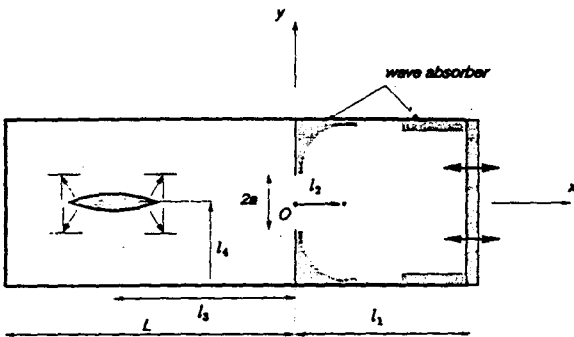


Fig.3 Experimental set-up