
 論 文

大韓造船學會論文集
 第30卷第1號 1993年2月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 30, No.1, February 1993

항만내 파도응답과 계류선박의 운동해석(II)

조일형*, 최항순**

Wave Responses and Ship Motions in a Harbor Excited by Long Waves (II)

by

I. H. Cho* and Hang S. Choi**

요 약

본 논문에서는 항만안에 계류된 선박의 비대칭 운동응답(Sway-Yaw)을 취급하였으며, 사각형 모형항만안에 계류된 선박의 운동을 계측하여 항만내 선박의 운동특성을 밝혔다. 해석하는 유체 영역을 해양과 항만영역 그리고 선체주위영역으로 나누어 각 영역에서 경계치문제를 독립적으로 풀 다음, 인접한 영역의 해와 정합하여 미지수를 구하는 정합점근전개법을 사용하였다. 계산치와 실험치는 정성적으로 서로 비슷한 경향을 보이고 있으나, 정량적으로 차이가 있음을 확인하였다. 이는 수식전개 과정에서 고려하지 않은 점성의 영향과 비선형성 그리고 경계벽에서 파의 부분반사에 기인하였으리라 추정된다.

Abstract

The motion response of a ship moored in a rectangular harbor excited by long waves has been studied theoretically and experimentally. Experiments are performed in a shallow basin. A ship model is set moored by soft springs at various positions in a model harbor subjected to regular waves with period ranging from 2 to 3 seconds. Wave and ship responses are measured and compared with theory. It is found that theoretical results agree qualitatively with experimental results. The main source of quantitative discrepancies is presumably due to real fluid effects such as separation at the harbor entrance and friction on harbor boundaries.

접수일자: 1992년 8월 28일, 재접수일자: 1992년 10월 7일

* 정회원, 해사기술연구소

** 정회원, 서울대학교 조선해양공학과

大韓造船學會論文集 第30卷 1號 1993年 2月

1. 서 론

본 논문은 본 학회지 29권 2호(1992.5)에 게재된 저자들의 논문 "항만내 파도응답과 계류선박의 운동 해석(I)"[1]의 완결편이다. 논문의 전개과정에서 자주 인용되므로 위의 논문을 이제부터 (I)이라 표기한다.

항만내 계류선박의 운동을 해석하기 위하여는 우선 항만내 파랑분포를 알아야 하는데, 여기서는 Green 함수 방법을 이용하였다. 이렇게 구한 항만내 파랑분포를 이용하여 선박에 작용하는 파기진력을 구한다. 선체운동에 따른 동유체력을 구하는 방법으로는 유체영역을 항만영역과 해양영역 그리고 선체 주위영역으로 나누어 각 영역의 경계치문제를 우선 독립적으로 푼다. 이때 부족한 경계조건으로 부터 생기는 미지수는 인접한 영역에서의 해와 정합시켜 구한다. 항만내 계류된 선박의 운동은 Tuck[3]이 전개한 천수역 세장선 이론을 확장하여 해석하였다. 선박의 운동은 대칭운동과 비대칭 운동으로 구분할 수 있다. 대칭운동에 대한 문제는 (I)에서 자세히 소개하였고, 여기서는 좌우동요-선수동요(Sway-Yaw)가 연성으로 나타나는 비대칭 운동에 대한 정식화 과정을 수록하였다.

이론적인 연구와 병행하여 사각형 항만내 계류된 선박의 운동을 계측하는 실험을 수행하였다. 항내 파고분포만을 계측하는 수리모형실험은 해안공학에서 중요한 연구분야로 발전되어 왔다. 그러나 항만과 선박의 상호작용을 밝히는 실험은 국내에서는 자주 시도되지 않았으며, 외국에서도 최근에 와서야 본격적으로 연구가 진행되고 있는 실정이다. 모형실험을 통하여 해석 결과의 신뢰성을 검증하였고, 이론과 실험의 결과를 비교함으로써 점성의 영향과 비선형 효과 등을 대략적으로 고찰하였다.

2. 이론 해석론

해석해를 도출하기 위해서 아래와 같은 가정이 필요하다.

- 1) 선형포텐셜 유동으로 가정한다.
- 2) 입사파의 파장은 수심에 비해 아주 길다.
- 3) 항만입구의 폭은 입사파의 파장에 비해 매우 좁다.
- 4) 안벽은 수직벽으로 완전반사가 일어난다고 가정한다.

5) 선박은 길이가 폭과 깊이에 비해 긴 세장선으로 가정한다.

이러한 가정하에서 속도포텐셜을 도입하고 유동은 시간에 따라 조화운동을 한다고 가정하며 입사파는 임의의 각도로 해안선과 방파제에 들어오는 경우를 생각한다. 마찰과 박리에 따른 에너지 손실은 무시한다. 또한 위의 가정에 적합한 입사파는 장파이므로 수심이 일정할 때 선형 장파이론(Long Wave Theory)의 지배방정식은 2차원 Helmholtz 방정식이 된다. 자세한 유도과정은 참고문헌[1]과 [2]에 밝혔으므로 여기서는 논문의 전개상 필요한 최소한의 식만을 제시한다.

$$\begin{aligned}\Phi(x, y, t) &= \text{Re}\{\phi(x, y)e^{-i\omega t}\}, \\ \zeta(x, y, t) &= \text{Re}\{\eta(x, y)e^{-i\omega t}\}, \\ \nabla^2\eta + k^2\eta &= 0.\end{aligned}\quad (2.1)$$

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

$$\eta_j^s(x, y) = \frac{i\omega}{g} \int_{-a}^a u_j(y_0) \left[-\frac{i}{2} H_0^{(1)}(kr)\right] dy_0. \quad (2.2)$$

여기서 u_j 는 선체운동으로 유기된 항만입구에서의 속도분포이며 아직은 미지수이다.

선박은 세장선이라 가정하였기 때문에 선박에서 멀리 떨어진 위치에서 선체운동은 선박의 중심선을 따라 분포된 소오스와 다이폴로 표현된다. 편의상 선체에 고정된 좌표계 $O_2(x_2, y_2)$ 를 이용하였다(Fig.1).

Green 정리를 적용하면 선박의 비대칭 운동으로 야기된 항만안에서의 파형은 다음식으로 표시된다.

$$\begin{aligned}\eta_j^h(x_2, y_2) &= -\frac{i\omega}{g} \left\{ \int_{-l}^l \Delta\phi_j(x_0) \frac{\partial H(x_2, y_2, x_0, 0)}{\partial y_0} dx_0 \right. \\ &\quad \left. + \int_{l_1-a}^{l_1+a} u_j(y_0) H(x_2, y_2, l_1, y_0) dy_0 \right\} \\ &\quad (j = 2, 6).\end{aligned}\quad (2.3)$$

여기서 H 는 항만안의 임의의 위치에 소오스를 놓았을 때 지배방정식과 경계조건을 만족하는 Green 함수로 그 표현식은 (I)에 제시하였다.

Taylor 전개를 이용하여 윗식을 선체주위로 내부

전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \eta_j^h(x_2, y_2) &\sim \eta_j^h(x_2, 0^\pm) + y_2 \frac{\partial \eta_j^h(x_2, 0^\pm)}{\partial y_2} \\ &\sim \frac{i\omega}{g} \left\{ \pm \frac{\Delta \phi_j(x_2)}{2} + Y_j(x_2) + Z_j(x_2, y_2) \right\} \end{aligned} \quad (2.4)$$

여기서

$$\begin{aligned} Y_j(x_2) &= - \int_{l_2-a}^{l_2+a} u_j(y_0) H(x_2, 0, x_0, 0) dy_0, \\ Z_j(x_2) &= - \int_{-l}^l \Delta \phi_j(x_0) \frac{\partial^2 H(x_2, 0, x_0, 0)}{\partial y_2 \partial y_0} dx_0 \\ &\quad - \int_{l_2-a}^{l_2+a} u_j(y_0) \frac{H(x_2, 0, l_2, y_0)}{\partial y_2} dy_0 \end{aligned}$$

선체주위영역에서의 비대칭 운동에 대한 경계치 문제를 구성하면

$$\begin{aligned} (j = 2, 6) \\ \left(\frac{\partial^2}{\partial y_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_2^2} \right) \phi_j^* &= 0, \\ \frac{\partial \phi_j^*}{\partial N} &= -i\omega \zeta_j n_j \quad \text{on ship,} \\ \frac{\partial \phi_j^*}{\partial z_2} &= 0 \quad \text{at } z_2 = 0 \text{ \& } -h, \\ \phi_j^* &\rightarrow y_2 Z_j(x_2) + Y_j(x_2) \pm \frac{\Delta \phi_j(x_2)}{2} \quad \text{as } y_2 \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (2.5)$$

와 같이 표현된다. 여기서 방사조건식은 선체의 외부 영역인 항만영역의 해를 선체주위로 내부전개한 식으로 표현된다. 선체의 좌우동요에 기인한 좌우양면의 포텐셜의 차이인 $\Delta \phi_2(x_2)$ 와 선체의 기하학적 형상함수인 C와의 관계식은 다음과 같은 적분방정식 형태로 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \phi_2(x_2)}{2C(x_2)} &= i\omega \zeta_2 - \int_{-l}^l \Delta \phi_2(x_0) \frac{\partial^2 H(x_2, 0, x_0, 0)}{\partial y_2 \partial y_0} dx_0 \\ &\quad - \int_{l_2-a}^{l_2+a} u_2(y_0) \frac{H(x_2, 0, l_2, y_0)}{\partial y_2} dy_0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

여기서 선체의 길이 방향의 함수인 C(x₂)는 선체의 각 단면에서의 2차원 Neumann 문제를 풀어 구한다

[3, 4, 5]. 선체의 각 단면에서 C(x₂)가 주어졌을 때, 적분방정식에서 $\Delta \phi_2(x_2)$ 를 구하려면 좌우동요에 의해 항만입구로 빠져나가는 유량 $u_2(y_2)$ 를 알아야 하며, 이 값은 항만입구에서 해양영역의 해와 항만영역의 해를 정합시켜 구할 수 있다. 이때 항만입구의 속도분포가 일정하다고 가정하면 비대칭운동에 기인한 항만입구에서의 속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_2 &= \frac{1}{(i/2 + F - X - Y)} \frac{1}{2a^2} \int_{-l}^l \Delta \phi_2(x_0) \\ &\quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cos k_n(x_0 + L - l_2)}{k_n B \sin k_n L} dx_0 \\ &\quad \times \sin \frac{n\pi}{B} \cos \frac{n\pi l_2}{B} \sin \frac{n\pi l_0}{B}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

윗식을 식(2.7)로 표시된 적분방정식에 대입하면 풀어야 할 최종적인 적분방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} - \frac{\Delta \phi_2(x_2)}{2C(x_2)} &= 1 + \int_{-l}^l \Delta \phi_2(x_0) \frac{\partial^2 H(x_2, 0, x_0, 0)}{\partial y_2 \partial y_0} dx_0 \\ &\quad + \frac{1}{(i/2 + F - X - Y)} \frac{1}{a^2} \int_{-l}^l \Delta \phi_2(x_0) \\ &\quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cos k_n(x_0 + L - l_2)}{k_n B \sin k_n L} dx_0 \times \sin \frac{n\pi a}{B} \cos \frac{n\pi l_2}{B} \sin \frac{n\pi l_0}{B} \\ &\quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cos k_n(x_2 + L - l_2)}{k_n B \sin k_n L} \times \sin \frac{n\pi a}{B} \cos \frac{n\pi l_2}{B} \sin \frac{n\pi l_0}{B}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

여기서 ϕ_j 는 정규화된 속도포텐셜이다 ($\phi_j = -i\omega \zeta_j \phi_j$).

윗식으로부터 선체의 각 단면에서의 $\Delta \phi_2(x_2)$ 를 구하기 위해 선체를 길이방향에 따라 여러개의 단면으로 분할하고, 각 단면에서의 $\Delta \phi_2$ 가 일정하다고 가정하면 적분방정식은 대수방정식으로 근사시킬 수 있다.

선체의 운동응답은 아래와 같은 운동방정식을 풀어 구한다.

$$\sum_j (-\omega^2 M_{ij} - T_{ij} + C_{ij}) \zeta_j = F_i \quad (i, j = 2, 6). \quad (2.9)$$

여기서 j=2,6은 좌우동요, 선수동요를 의미한다. 본 논문에서는 천수역 장파 이론에 입각하여 문제를 해석하였으므로 수심방향의 변화를 무시하였다. 따라서 선체에 작용하는 좌우방향 힘의 합력의 작용점은

압력분포면의 중심이 되며, 또한 저주파수 영역에서의 정확한 횡동요를 구하기 위하여는 점성을 포함시켜야하나 본 논문에서는 이를 고려하지 않았으므로 횡동요인 $j=4$ 항은 포함시키지 않았다. 윗식을 이용하여 항만내 계류된 선박의 운동응답 ξ 를 구한다.

3. 선체운동 실험

항만내 파도응답에 대한 실험을 수행하기 위하여 길이가 9m, 폭이 4m인 항만을 제작하였다. 가능한 천수역 조건을 맞추기 위해 수심은 30cm로 잡았다. 항만입구의 폭은 이론결과와 비교할 목적으로 항만의 길이와 폭에 비해 작은 50cm로 결정하였으며, 방파제는 입사파에 수직하게 놓았다. 또한 항만밖의 방파제와 안벽을 따라 스테인레스 겹질로 만든 소파기를 설치하여 실험의 정확도를 기하고자 하였다. 실험은 우선 배가 없는 상태에서 조파기를 작동하여 발생파의 주파수를 변화시키면서 항만내의 여러위치에서 파도응답을 계측하였다. 항만입구의 중심에서 항만밖으로 2m 떨어진 위치에 파고계를 설치하여 이 지점에서 파고가 2cm가 되도록 조파기를 작동하였다. 따라서 이 지점의 파고가 항만내에서 계측된 파고나 선박의 운동응답의 기준값이 된다. 파도응답은 용량식 파고계로 계측하여 증폭기로 증폭된 신호를 펜 레코더에 기록하였다.

실선을 100분에 1로 축소시킨 길이 155cm, 폭 24.0cm인 화물운반선인 MARINER모형선을 항만내 여러 위치에 놓고 입사파의 주파수에 따르는 선체운동을 계측하였다. 선박은 강성계수가 0.3675Kg중/m인 비교적 연한 선형용수철로 선수와 선미에 각각 2개씩 모두 4개의 위치에서 계류시켰다. 계류선박의 운동실험은 2가지 경우에 대하여 수행하였다. 첫번째 실험은 선박이 항만내 안벽에 가까이 평행하게 계류되어 있을 때 계류선박의 운동과 항만내의 파고를 측정하였다. 두번째 실험은 선박이 항만의 폭 방향으로 가운데 계류되어 있는 경우에 대하여 수행하였다. 계류선박의 운동은 $T=2\text{sec}$ 부터 $T=3\text{sec}$ 사이의 22개의 주기에 대해 살펴보았다. 이 실험의 목적은 입사파의 주파수와 항만의 고유주파수가 일치될 때 생기는 공진 현상과 그에 따르는 선체운동의 변화이므로 입사파의 진동수의 간격을 가능한 작게 잡도록 노력하였다. 선체운동은 6-자유도운동계측기로 측정된 전기신호를 증폭하여 A/D 변환기를 통하여 전산기에 입력시켰다. 실험장치의 개략

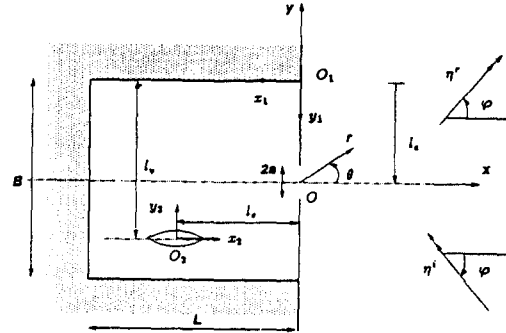


Fig.1 Definition sketch for a ship in a rectangular harbor

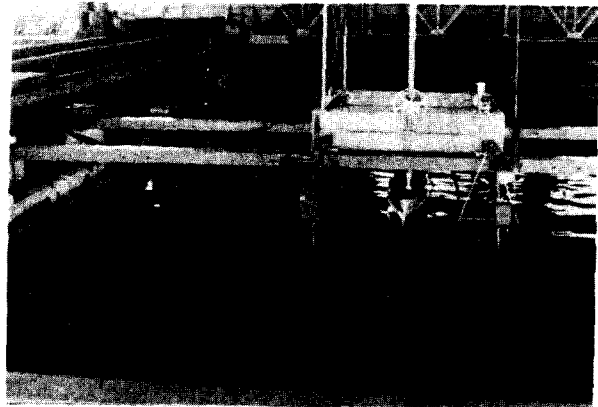


Fig.2 Experimental set-up

도는 Fig.2에 사진으로 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

해석결과와 실험결과를 비교하기 위하여 실험조건을 해석해를 도출할 때 사용한 가정에 가능한한 적합하게 맞추도록 노력하였으나, 실험설비의 제한으로 완벽하게 상사성을 만족시키지는 못하였다. 이론해석에서 수심은 입사파의 파장에 비하여 작다고 가정하였다. 조파기에서 만든 가장 짧은 파와 수심의 비(h/λ)는 0.09이며, 가장 긴 파장과의 비는 0.06이다. 이러한 값들은 천수역 조건에는 미흡하지만 실험장치의 크기나 조파기의 특성으로 인하여 더 큰 장파를 만들기는 불가능하였다. 한편 항만입구의 폭은 항만의 길이와 폭에 비하여 작게 제작하였다. 항만입구의 폭과 항만의 길이의 비는 0.056이며,

Table 1 Particulars of Mariner Cargo Ship

Ship Length(l)	154.99(m)
Beam at Midship(b)	24.08(m)
Draft at Midship(d)	8.23(m)
Displacement	18250(tons)
Center OF GRAVITY(KG*)	4.59(m)
Center of Gravity(LCG**)	61.79(m)
Center of Buoyancy(KB*)	4.59(m)
Center of Floatation(LCF**)	81.59(m)
Pitch Gyration(K_w)	37.19(m)
Waterplane Area(A_w)	2683.77(m ²)
Block Coefficient(C_b)	0.583

* Keel Reference
 ** F.P. Reference

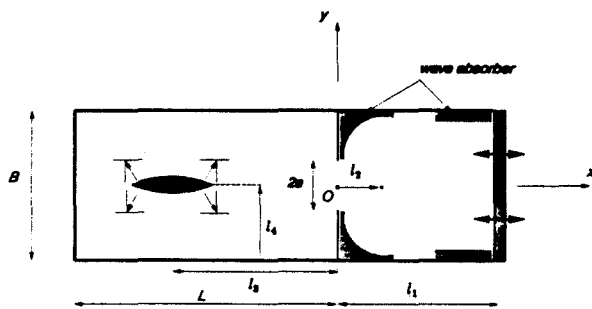


Fig.3 Definition sketch of experiment

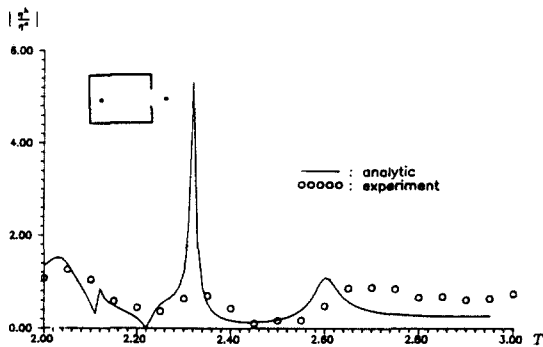


Fig.4 Wave response in a rectangular harbor($x=-6m, y=0m$)

항만 폭과의 비는 0.125이다. 항만에 계류된 선박의 운동응답은 세장선이론에 근거하여 해석하였다. 따라서 실험에서 사용한 선박의 C_b (Block Coefficient)는 작아야 한다. 실험에서 이용한 모형선인 MARINER 선형의 C_b 는 0.583이므로 세장선 가정에 비교적 적합하다고 할 수 있다(Table 1 참조). 실험의 개략도를 Fig.3에 도시하였다.

Fig.4는 항만밖($x=2m, y=0m$)에 설치된 파고계에서 측정된 파고(η^a)와 항만안($x=-6m, y=0m$)에서 측정된 파고(η^b)의 비를 보이고 있다. 그림에서 실선은 장파이론에 근거하여 $T=2$ 부터 3초까지 100개의 진동수에서 계산한 결과이며, 동그라미는 실험결과들을 보여주고 있다. 단허진 사각형 항만의 고유주기를 계산한 결과 2초부터 3초사이에 5개(2.098, 2.130, 2.276, 2.332, 2.623)의 고유주기가 존재함을 알 수 있었다. 우선 이론결과를 살펴보면 공진점의 위치는 항만의 고유주파수의 값과 거의 일치함을 알 수 있다. 약간의 차이는 항만입구를 통하여 빠져나가는 방사감쇠에 기인한다. 21개의 주파수에서 항만내 파고를 측정하였다. 측정된 데이터의 부족으로 정확한 공진점부근에서의 거동을 파악할 수 없었다. 그렇지만 두 결과를 비교하면 실험에서 측정된 공진주기가 이론치보다 약간 긴것을 알 수 있다. 이러한 경향은 계산 결과에서 무시한 항만입구에서의 박리나 항만의 안벽과 바닥에서의 마찰등 점성의 영향에 연유된다고 사료된다. 실제로 실험에서 항만입구에서 박리현상이 크게 일어나는 것이 관측되었다. 특히 항만의 안벽과 바닥을 콘크리트로 제작하였기 때문에 그에 따른 점성에 의한 에너지 손실이 비교적 컸을 것으로 짐작된다. 이러한 물리적인 현상뿐 아니라 실험조건이 이론전개 과정에서 도입한 가정 즉, 장파이론의 가정에 정확히 부합하지 않은 점도 실험과 이론결과의 차이를 유발한 요소로 사료된다. 또한 조파기와 방파제 사이의 간격이 짧기 때문에 조파기에 의해 생성된 파가 방파제에서 반사되어 다시 조파기에 영향을 주는 문제점도 안고 있다. 이러한 문제점을 없애기 위하여 방파제를 따라 소파기를 설치하였지만 반사파를 완전히 제거할 수는 없었다. 그럼에도 불구하고 공진점부근을 제외하면 실험과 이론의 결과가 정성적으로 비슷하다는 것을 확인할 수 있다.

Fig.5는 공진점 부근인 $T=2.65$ sec.에서 측정된 전후동요, 수평동요, 수직동요, 종동요의 거동들을 측정된 시간에 따라 그렸다. 여기서 측정시간간격은 0.05 sec.이며, 1024개의 데이터를 읽어 그렸다. 대체로 깨끗한 조화함수 형태의 파가 측정되었음을 알 수 있었고, 공진시 운동응답이 큰 것을 볼 수 있다.

Fig.6은 선박이 항만의 폭 방향의 가운데 위치할 때 발생파의 주기에 따른 전후동요를 보여주고 있다. 전체적으로 이론계산결과는 실험결과를 잘 따라가는 것을 볼 수 있다. 여기에서도 공진점의 주기는

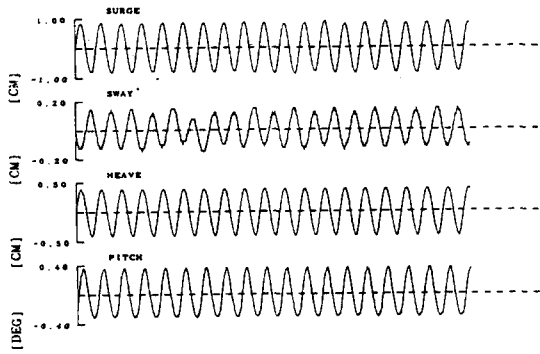


Fig.5 Measured motion records($T=2.65\text{sec}$)

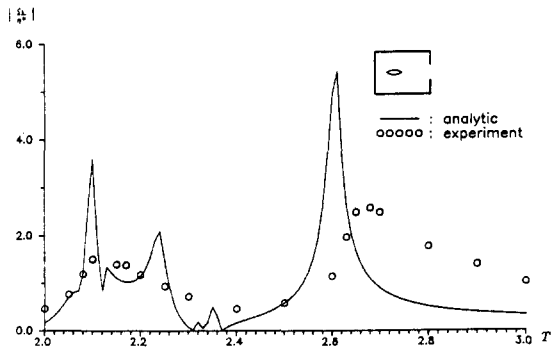


Fig.6 Surge motion amplitude of a ship in a rectangular harbor($x_c=-6\text{m}, y_c=0\text{m}$)

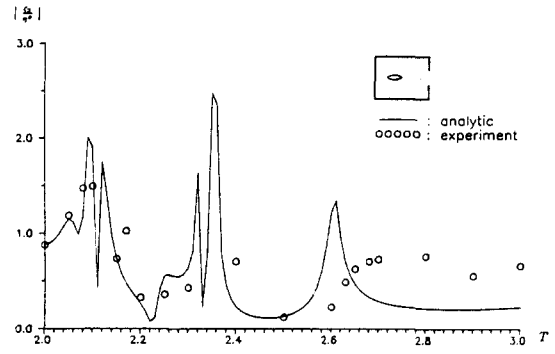


Fig.7 Heave motion amplitude of a ship in a rectangular harbor($x_c=-6\text{m}, y_c=0\text{m}$)

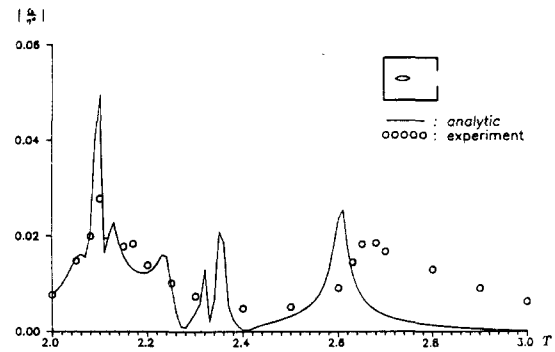


Fig.8 Pitch motion amplitude of a ship in a rectangular harbor($x_c=-6\text{m}, y_c=0\text{m}$)

에너지 손실을 나타내는 여러가지 역학적인 기구들에 의하여 이론치보다 약간 긴것을 볼 수 있다. 각 성분들의 정량적인 기여도를 밝히려면 상당히 정밀한 계측을 많은 주기에 대하여 수행하여야 한다는 어려움이 뒤따른다.

한편 Fig.7과 Fig.8은 계류선박이 위에서와 같이 항만의 중심선에 위치할 때의 수직동요와 radian/m의 차원을 갖는 종동요의 결과를 보여주고 있다. 실험 데이터의 부족에도 불구하고 공진점 부근에서의 정성적인 경향은 비교적 잘 들어맞는 것을 볼 수 있다.

선박이 안벽에 계류되어 있을 때 좌우동요의 계산 및 실험결과는 Fig.9에 그렸다. 비교적 저주기에서의 운동응답이 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, $T=2.4\text{ sec}$. 부근에서 뚜렷한 공진현상을 볼 수 있다. 저주기 영역에서의 실험결과는 이론치를 정성적으로 잘 따라가고 있지만, 주기가 커질수록 이론과의 차이를 보이고 있다. 이는 선체주위영역을 해석할 때

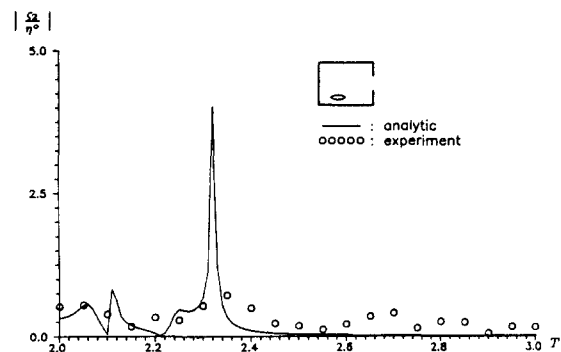


Fig.9 Sway motion amplitude of a ship in a rectangular harbor($x_c=-6\text{m}, y_c=3.57\text{m}$)

안벽의 효과를 포함시키지 않는 것에 기인하며, 항만 입구에서의 박리, 선박과 안벽 그리고 바닥에서의 마찰등 점성의 영향에 연유한다.

5. 결 론

항만내 파도응답과 계류된 선박의 운동응답에 대한 실험을 수행하여 이론과 비교한 결과 공진점 주위에서 정성적인 경향은 서로 비슷하다는 것을 밝혔다. 항만내 계류된 선박이 파진행 방향과 평행하게 놓여있을 때, 천수역 효과로 진동주요가 지배적으로 나타남을 밝혔으며 항만 고유진동수에 대한 해석은 매우 정확함을 알 수 있었다. 그러나 공진점의 위치가 약간씩 저 진동수쪽으로 이동한 점과 정량적인 값의 차이는 이론에서 무시한 안벽이나 바닥에서의 마찰과 항만입구에서의 박리등 점성의 영향에 기인한 것으로 사료된다. 특히 선박이 안벽 가까이 위치하는 경우, 선체주위영역 해석시 안벽효과를 포함시켜야 한다.

끝으로 본 연구는 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행하였음을 밝히며 상기 재단에 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- [1] 趙一衡, 崔恒洵, “港灣內 波濤應答과 繫留船舶의 運動解析 (I)”, 大韓造船學會 論文集 第29卷 第2號, 1992.
- [2] 趙一衡, “港灣內 波濤應答과 繫留船舶의 運動解析”, 서울大學校 博士學位論文, 1991.
- [3] Tuck, E.O., “Ship Motions in Shallow Water”, *J. Ship Research*, 317-328, 1970.
- [4] Beck, R.F. & Tuck, E.O., “Computation of Shallow Water Ship Motions”, *Proc. 9th Symp. Naval Hydrodyn.*, Office of Naval Research 1543-1585, 1972.
- [5] Taylor, P.J., 1973. “The Blockage Coefficient for Flow about Arbitrary Body Immersed in a Channel”, *J. Ship Research*, Vol.17, No.2, 97-105, 1973.
- [6] Mei, C.C., “The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves”, John Wiley & Sons, 1983.