

화물창의 유체유동을 고려한 선체운동에 관한 연구

朴命圭* · 金順甲* · 金東俊**

A study on the Motions of a ship with Liquid Cargo Tanks

Park Myung-Kyu · Kim Soon-Kap · Kim Dong-Joon

〈 목 차 〉

- | | |
|-----------------------------|---------------|
| 1. 서 론 | 3-1 운동계산 프로그램 |
| 2. 화물창내의 유동해석 | 3-2 연성운동 방정식 |
| 2-1 수치해석 | 4. 계산결과 및 검토 |
| 2-2 부가질량 | 4-1 부가질량수정 |
| 2-3 자유표면이 없는 경우의
2 차모우먼트 | 4-2 운동계산검토 |
| 3. 운동계산 | 5. 결 론 |
| | 참고문헌 |

Abstract

In this paper the dynamic effects due to the free water motions in tanks upon the lateral motion of a floating body in regular waves are calculated, in order to obtain the relationship between a motion of a floating body and that of the free water in tanks.

Under the assumption that the fluid is ideal and motion amplitudes are small, velocity potential of the fluid in tanks is calculated by the source distribution method and the hydrodynamic forces and moments are calculated by the integration of fluid pressures over the tank surface.

Hydrodynamic effects of the fluid on the floating body are expressed in terms of added mass and coupling coefficient obtained from the integration.

Computations are carried out for a ship with seven wide center tanks and comparisons between the liquid cargo loading case and the rigid cargo loading case are shown.

* 正會員, 한국해양대학

** 正會員, 대한조선공사 설계실

1. 서 론

액화 가스나 액체를 보관하는 Tank 를 갖는 Plant Barge 나 혹은 선폭에 비해 비교적 큰 폭의 Wide Tank 를 갖는 선박의 경우 Tank 내 유체의 유동과 이러한 부유체의 운동은 연성되어 일어나게 된다.

특히 Tank 내 유체유동의 고유주기에서는 부유체의 운동은 크게 영향을 받게 되므로 초기설계시 이들의 연성운동에 대해 검토가 이루어져야 한다. 이러한 과도에 의한 부유체와 Tank 내 유체의 연성운동에 대한 연구는 일찍부터 수행되었으며 1981년 S. Yamashita¹⁾는 Prismatic 형상과 Cylindrical 형상의 Tank 에 대해 K. Senda, K. Nakagwa²⁾의 Analytic Solution 을 이용한 연성운동을 해석하고 이를 실험과 비교하였다.

본 연구에서는 Tank 와 유체표면에 Source 와 Dipole 을 분포 적분방정식을 구하고 이를 수치적으로 풀어냄으로서 형상의 제한을 없애고자 하였으며 이를 이용 Added Mass 의 Correction 에 의해 연성운동을 해석하고자 하였다. 그리고 이를 Wide Cargo Tank 를 갖는 선박의 경우에 적용, 연성운동 응답을 계산하여 보았다.

2. 화물창(Cargo hold)내의 유동해석

Cargo hold 내의 유체의 운동을 해석하기 위하여 Fig. 1 과 같이 평형상태의 자유표면상에

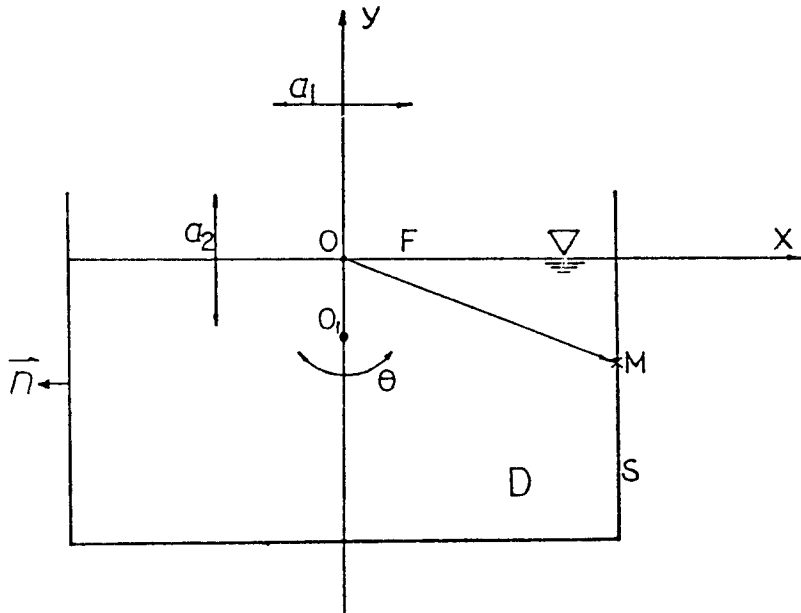


Fig. 1. Coordinate System

OX 축을 취하고, 자유표면의 수직상방으로 OY 축을 취한 좌표계를 Cargo hold의 평형위치에 고정시켜 hold 내의 유동을 해석하기로 한다.³⁾

선체가 미소진폭의 단순조화운동을 할 경우 hull 상의 한점 M 의 속도는

$$\vec{V}_M = \text{Re}\{\vec{v}_M e^{-i\omega t}\} = \frac{d\vec{OM}}{dt} \quad (1)$$

와 같이 쓸 수 있다.

운동진폭이 미소한 경우에 \vec{V}_M 은

$$\frac{d\vec{OM}}{dt} = \text{Re}\left\{-i\omega L \left[\frac{a_1}{L} \vec{e}_1 + \frac{a_2}{L} \vec{e}_2 + \theta \vec{e}_3 \times \frac{\vec{O}_1 \vec{M}}{L} \right] e^{-i\omega t} \right\} \quad (2)$$

으로 선형화 할 수 있다. 여기서 O_1 은 회전중심이고 a_1 , a_2 및 θ 는 각각 sway, heave 및 roll의 운동진폭이다. \vec{e}_1 , \vec{e}_2 는 x , y 방향의 단위벡터이고 \vec{e}_3 는 $\vec{e}_1 \times \vec{e}_2$ 이고 L 은 특성장이다.

Hold 내의 유체는 비점성, 비압축성이라 가정하고 irrotational flow 일 경우 유체유동은 속도포텐셜 $\phi = \text{Re}\{\phi e^{-i\omega t}\}$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 ϕ 는 다음과 같은 조건을 만족시키는 함수이다.

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi = 0 \\ -k\phi + \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial \vec{n}} \Big|_M = -i\omega L \left[A_1 \vec{e}_1 + A_2 \vec{e}_2 + A_3 \left(\vec{e}_3 \times \frac{\vec{O}_1 \vec{M}}{L} \right) \right] \cdot \vec{n}_M, M \in S \end{cases} \quad (3)$$

여기서 $A_q = -\frac{a_q}{L}$, $q=1, 2$

$$A_3 = \theta$$

$$k = \frac{\omega^2}{g}, \quad g \text{는 중력가속도}$$

포텐셜 함수 ϕ 는 heave, sway, roll의 각각 운동에 대한 element potential을 중첩하여 나타낼 수 있다.

$$\phi = -i\omega L \sum_{q=1}^3 A_q \varphi_q \quad (4)$$

element potential φ_q 는 다음 조건을 만족시킨다.

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi_q = 0 & \text{in } D & \text{for } q=1, 2, 3 \\ -k\varphi_q + \frac{\partial \varphi_q}{\partial y} = 0 & \text{on } F & \text{for } q=1, 2, 3 \\ \frac{\partial \varphi_q}{\partial \vec{n}} \Big|_M = \vec{e}_q \cdot \vec{n}_M & M \in S & \text{for } q=1, 2 \\ \frac{\partial \varphi_3}{\partial \vec{n}} \Big|_M = \left(\vec{e}_3 \times \frac{\vec{O}_1 \vec{M}}{L} \right) \cdot \vec{n}_M & M \in S & \end{cases} \quad (5)$$

Cargo hold 의 heave motion 에 대한 유체의 포텐셜은 다음과 같이

$$\varphi_2 = y + \frac{1}{k} \tag{6}$$

구할 수 있다. 즉, 강제운동을 하는 것으로 나타난다.

φ_1 과 φ_3 값은 pulsating Rankine source 와 dipole 을 S 와 F 상에 분포하는 방법을 써서 구할 수 있다. Green function 을 다음과 같이 놓는다.

$$G(P, M) = \frac{1}{2\pi} \ln |z_P - z_M| \tag{7}$$

여기서, $z = x + iy$ 이며, M 은 source point 이고, P 는 field point 이다. 유체영역 D 에 Green 정리를 적용하고, M 이 SUF 상에 있을 때를 생각하면 다음 식을 얻는다.

$$\int_{SUF} \varphi(M) \frac{\partial G(P, M)}{\partial n_M} - \int_{SUF} G(P, M) \frac{\partial \varphi(M)}{\partial n_M} dl_M = \begin{cases} 0 & , P \in D \\ \varphi(P) & , P \in D \\ \frac{1}{2} \varphi(P) & , P \in SUF \end{cases} \tag{8}$$

식(8)에서 경계에서의 포텐셜을 고려하면 다음의 적분방정식을 얻는다.

$$\frac{1}{2} \varphi(P) - \int_{SUF} \varphi(M) \frac{\partial G(P, M)}{\partial n_M} dl_M = - \int_{SUF} \frac{\partial \varphi(M)}{\partial n_M} G(P, M) dl_M, P \in SUF \tag{9}$$

그런데 자유표면 조건으로부터

$$\frac{\partial \varphi(M)}{\partial n_M} = k\varphi(M), M \in F \tag{10}$$

가 성립되며, 식 (10)을 식 (9)에 대입하면

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \varphi(P) - \int_S \varphi(M) \frac{\partial G(P, M)}{\partial n_M} dl_M - \int_F \varphi(M) \left[\frac{\partial G(P, M)}{\partial n_M} - kG(P, M) \right] dl_M \\ = - \int_S \frac{\partial \varphi(M)}{\partial n_M} G(P, M) dl_M, P \in SUF \end{aligned} \tag{11}$$

와 같이 적분방정식이 얻어진다.

2-1 수치해석

우선 영역 D 의 경계 S 와 F 를 Fig. 2 와 같이 N segment 및 NO segment 로 나눈다.

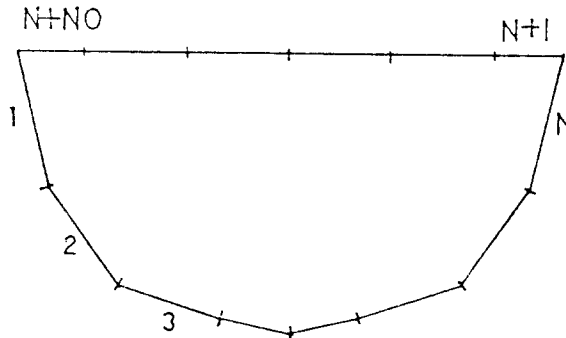


Fig. 2. Polygonal Approximation of Cylindrical Cross Section

미소 segment sj에서 φ 와 $\frac{\partial \varphi}{\partial n}$ 이 균일하다고 보고 각각 φ_j , σ_j 라고 하면 다음의 대수방정식을 얻는다.

$$\frac{1}{2} \sum_{j=1}^{NF} \delta_{ij} \varphi_j + \sum_{j=1}^M A_{ij} \varphi_j + \sum_{j=N+1}^{NF} [A_{ij} - kB_{ij}] \varphi_j = \sum_{j=1}^N B_{ij} \sigma_{ij} \quad (12)$$

여기서

$$\begin{aligned} \delta_{ij} &= \begin{cases} 0 & \text{for } i \neq j \\ 1 & \text{for } i = j \end{cases} \\ A_{ij} &= \begin{cases} -\vec{n}_j \cdot \int_{l_j} \nabla G(P_i, M) dl_M & \text{for } i \neq j \\ 0 & \text{for } i = j \end{cases} \\ \sigma_{ij} &= \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{l_j} \\ B_{ij} &= - \int_{l_j} G(P_i, M) dl_M \\ l_j &= | \overrightarrow{M_j M_{j+1}} | \\ NF &= N + NO \end{aligned}$$

식 (12)는 φ_j 에 관한 선형대수방정식이며 전산기를 이용하여 쉽게 풀수 있다.

cargo hold의 표면에 작용하는 압력은

$$P = -\rho \Phi_t = -\rho Re \{ -i\omega \phi e^{-i\omega t} \} \quad (13)$$

이며, 식 (4)를 대입하면 sway와 roll운동에 대한 무차원 압력은

$$\begin{aligned} P_s' &= \frac{P_s}{\rho \omega^2 L a_1} = \frac{\varphi_s}{L} \cos \omega t \\ P_r' &= \frac{P_r}{\rho \omega^2 L^2 \theta} = \frac{\varphi_r}{L} \cos \omega t \end{aligned} \quad \rho ; \text{액체 밀도} \quad (14)$$

와 같이 얻어진다. φ_1 은 임의의 점에서의 포텐셜 값을 나타낸다.

Cargo hold 내의 유동에 의한 파면 상승은

$$\eta = - \frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

으로부터 sway 및 roll운동에 대하여 각각

$$\begin{aligned} \eta_s' &= \frac{\eta_s}{a_1} = \frac{\omega^2}{g} \varphi_1 \cos \omega t \\ \eta_r' &= \frac{\eta_r}{L\theta} = \frac{\omega^2}{g} \varphi_1 \cos \omega t \end{aligned} \quad (15)$$

와 같이 된다.

2-2 부가질량(Added Mass)

식 (14)에서 얻어진 압력의 각 운동 방향으로의 성분을 구한 뒤 길이에 따라 적분하면 Tank 내 유체유동에 의한 힘(Force)과 Moment가 구해진다.

이들 힘과 Moment가 부유체 운동에 영향을 주므로 이들을 Added Mass의 개념으로 보아 부유체 운동방정식에 고려하여 주면 연성문제를 해석할 수 있다.

종방향으로 몇개의 Tank를 가지는 선박의 경우 각 Tank의 무게 중심에 이러한 Added Mass가 집중되어 있다고 가정하여 각 Tank에 대해 Sway, Roll, Sway-Roll 연성항의 Added Mass를 계산한뒤 배길이 방향으로의 Tank 무게 중심까지의 거리를 곱해 3차원 Added Mass를 구한다.

즉,

$$\begin{array}{l}
 ASS = MSS \times TL \\
 ARR = MRR \times TL \\
 ARS = MRS \times TL \\
 AYY = ASS \times r^2 \\
 ASY = ASS \times r \\
 ARY = ASR \times r
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 MSS : 2차원 단면에 대한 Sway 운동에 의한 Sway 방향 Added Mass \\
 MRR : 2차원 단면에 대한 Roll 운동에 의한 Roll 방향 Added Mass \\
 MRS : 2차원 단면에 대한 Coupling Added Mass \\
 A - : 3차원 물체에 대한 Added Mass \\
 TL : Tank Length \\
 r : 선박의 무게중심으로 부터 Tank의 무게 중심까지의 종방향 거리
 \end{array}
 \right.$$

의 형태가 된다.

종운동의 경우 앞에서 보인 것과 같이 Tank 내 유체 유동과 부유체의 종운동 사이에는 연성이 일어나지 않으므로 횡운동에 관련되는 Sway, Roll, Yaw, Sway-Roll, Sway-Yaw, Roll-Sway의 Added Mass가 구해지게 된다.

2-3 자유 표면이 없는 경우의 2차 모우먼트

Tank 내 유체가 자유표면을 가지는 경우는 앞에서 설명한 바와 같이 Tank 내 유체유동에 의한 힘과 Moment가 발생하였다. 여기서, Tank 내 유체를 적재하되 자유표면 없이 꼭채운 경우에 대해서 생각해보자.

•자유표면이 없다고 생각하면 포텐셜 ϕ 는 다음의 조건을 만족하면 된다.

$$\left\{
 \begin{array}{l}
 \nabla^2 \phi = 0 \\
 \left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_M = -iwL \left[A_1 \vec{e}_1 + A_2 \vec{e}_2 + A_3 \left(\vec{e}_3 \times \frac{\vec{O}_1 \vec{M}}{L} \right) \right] \cdot \vec{n}_M, M \in S, F \quad (16)
 \end{array}
 \right.$$

즉, 모든 구간에서 Body Boundary Condition만을 생각해주면 된다. 따라서, (12)식의 배수방정식에서 $N = NF$ 로 놓으면 쉽게 구해진다.

자유표면이 없으므로 Sway 방향으로의 힘은 변화가 없으나 Moment of Inertia 는 유체의 유동에 따라 달라지게 된다.

선박의 경우 Tank 를 가득채운 경우와 아닌 경우가 같이 일어나므로 연성운동 방정식에 역시 고려하여 주어야 한다.

계산에에서는 Tank 내 유체의 무게중심과 선체의 무게중심의 차이에 의한 Moment of Inertia 가 고려되었을 것으로 보고 선체의 Moment of Inertia 에서 이를 빼준뒤 유체운동을 고려한 Moment of Inertia 를 더해 주었다.

3. 운동 계산

연성을 고려한 문제로서 7개의 Wide Tank,를 갖는 선박의 경우를 예로 계산하여 보았다.

계산에 이용된 선박의 제원 및 Cargo Hold 형상 그리고 운동계산에 이용된 Loading Condition 이 Table 1 및 Fig.3에 수록되어 있다.

계산은 2가지 Loading Condition 에 대해 Tank 내 고체화물을 실었을 경우와 액체화물을 실었을 경우에 대해 각각 수행하여 비교하였다.

3-1 운동계산 프로그램

계산에 사용된 운동 Program 은 1975년 NSRDC'에서 발표된 것으로 Added Mass 와 Damping Coefficient 는 Frank 의 Close fit 방법을 사용하고 Strip theory 로는 S-T-F를 이용한 것으로 계산정도는 비교적 높으며 6자유도 계산이 가능하다. 좌표축과 부호규약은 Fig 4-A, B 와 같다.

또한 Fig. 5 의 Flowchart 에서 Tank 유동에 의한 Added Mass correction 과정과 운동계산 Program 과 연결이 표시되어 있다.

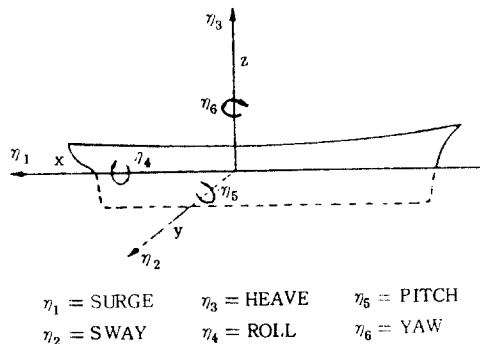
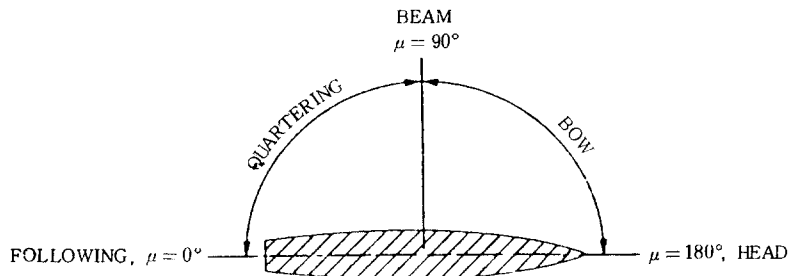


Fig. 4-A. Sign Convention for Translatory and Angular Displacements

Fig. 4-B. Definition of the Heading Angle, μ **Table 1** Ship Particulars and Load Case*** SHIP PARTICULARS**

Principle Ship Dimensions	Loading Condition	
	A	B
Length between perpendiculars(M)	175.0	
Breadth(M)	31.95	
Draft forward(M)	12.98	12.00
Draft aft(M)	12.95	12.00
Displacement(Metric Ton)	61820	56737
Metacentric height(M)	1.940	2.259
Bilge keel	YES	YES

*** CARGO HOLD LOAD CASE.**

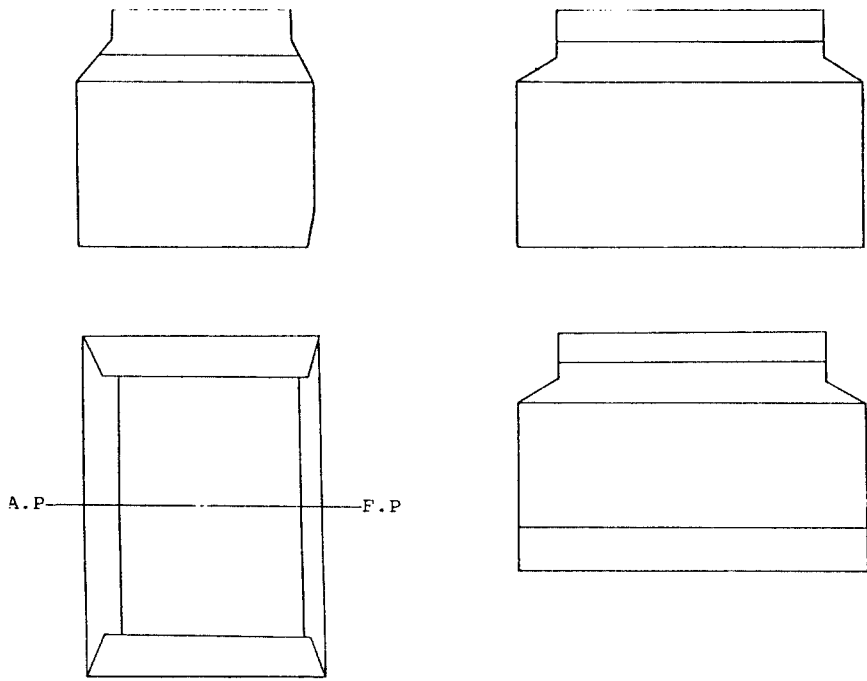
1. Loading Condition A

Fill ratio cargo hold No. 1 : 97.1%
 No. 3 : 98.1%
 No. 4 : 31.7%
 No. 5 : 96.8%
 No. 7 : 97.0%

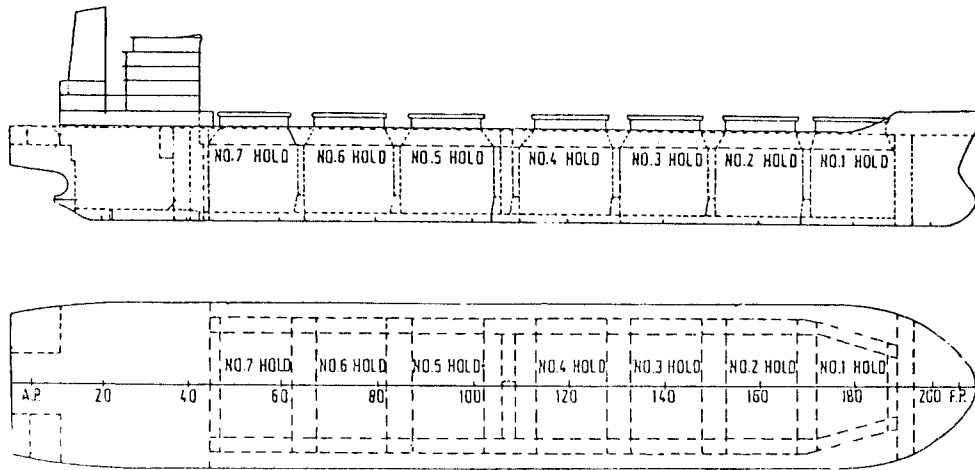
2. Loading Condition B

Fill ratio cargo hold No. 1 : 69.3%
 No. 3 : 98.1%
 No. 5 : 96.8%
 No. 7 : 58.5%

* fill ratios are given as percentages of the length from the double bottom to the hatch.



CARGO HOLD CONFIGURATION (NO.4)



GENERAL ARRANGEMENT

Fig. 3. Arrangement and Type of Cargo hold

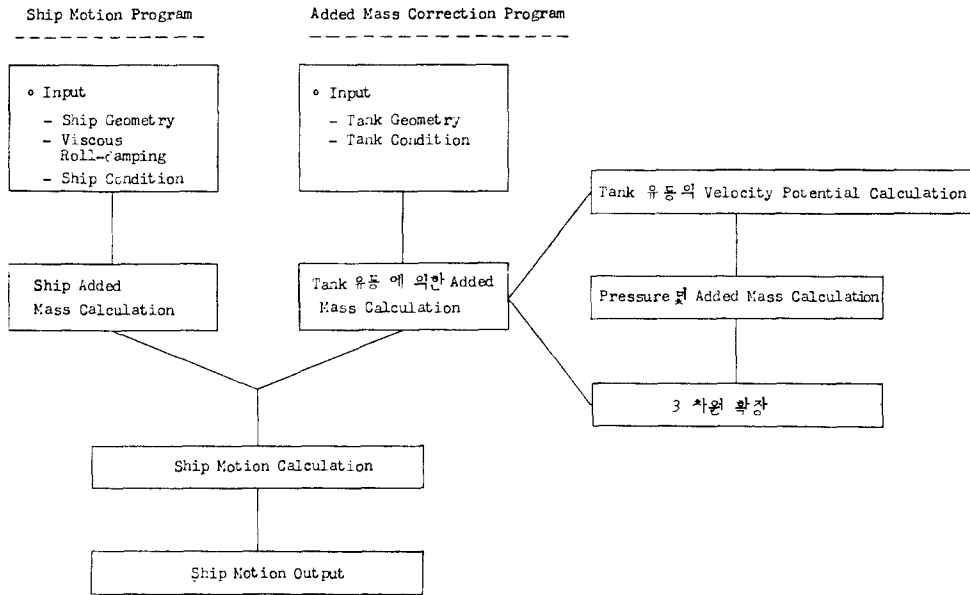


Fig. 5. Flow chart

3-2 연성 운동 방정식

연성문제를 풀기 위해 Cargo hold tank 에 대해 계산된 Added Mass 를 Frequency 에 따라 선체의 Added Mass 에 더하여 운동 방정식의 Mass Matrix 를 재구성 하였다.

$$M_{jk} = \begin{pmatrix} M & 0 & 0 & 0 & M_{xg} & 0 \\ 0 & M & 0 & M_{xg} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{xg} & 0 & I_4 & 0 & I_{46} \\ M_{xg} & 0 & 0 & 0 & I_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{46} & 0 & I_6 \end{pmatrix}$$

; Mass Matrix

$$A_{jk} = \begin{pmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} & 0 & A_{15} & 0 \\ 0 & A_{22} + ASS & 0 & A_{24} + ARS & 0 & A_{26} + ASY \\ A_{31} & 0 & A_{33} & 0 & A_{35} & 0 \\ 0 & A_{42} + ARS & 0 & A_{44} + ARR & 0 & A_{46} + ARY \\ A_{51} & 0 & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & A_{62} + ASY & 0 & A_{64} + ARY & 0 & A_{66} + AYY \end{pmatrix}$$

: Added Mass Matrix

4. 계산결과 및 검토

4-1 부가 질량 수정 (Added Mass Correction)

Source 및 Dipole 분포법에 의해 Added Mass의 계산정도를 알아보기 위해 Yamashita가 사용하였던 Analytic Solution과 비교하여 보았다.

높이 0.11M, 0.20M, 폭0.4M를 갖는 2개의 직사각형 단면에 대하여 계산한 결과를 Table. 2에 보이고 있다.

결과에서 볼 수 있듯이 공진주기에서의 최대치를 제외하고는 거의 오차가 없으며 분포한 특이점의 갯수가 많을수록 정확한 결과를 주고 있다.

4-2 운동 계산검토

계산결과는 2가지의 Loading Condition에 대해 각각 Tank내 고체화물을 실었을 경우와 액체화물을 실었을 경우에 있어서 Roll, Sway Motion을 Fig. 6-13에 보이고 있다.

그림에서 볼 수 있듯이 운동 응답은 2개의 Peak 값을 보여주고 있는데, 이는 선체 자신의 공진주기와 Tank내 유체운동의 공진주기에 의한 것으로 Tank내 유체운동에 의한 연성효과를 확연히 알 수 있다.

고체화물을 실었을 경우에 비해 액체화물을 실었을 경우에 Roll Motion이 커지는 것은 Tank내 유체운동에 기인한 것으로 이 운동에 Phase를 주게되면 Roll Motion을 줄이게 되고 이것은 Anti-rolling Tank와 같은 효과가 된다.

그리고 두 경우에 Roll의 Peak 주기가 다른 것은 Moment of Inertia 변화에 기인한다.

또한 Load Case A에 비해 B의 경우가 연성효과가 적은 것은 Load Case A에 Tank내 유체운동이 큰 Lower fill ratio가 있기 때문이다.

Table 2 Comparative table of Rectangle section.

* ADDED MASS 결과 비교

i) $h=0.11M$, $b=0.4M$ 인 직사각형 단면

λ/B	SWAY			ROLL		
	해 식 해	28 개	22 개	해 식 해	28 개	22 개
0.7	-1.2460	-1.2494	-1.2521	-0.1635	-0.1642	-0.17187
0.9	-1.7401	-1.7439	-1.7542	-0.9073	-0.9106	-0.9288
1.1	-2.8080	-2.8226	-2.8598	-2.5454	-2.5676	-2.6254
1.3	-7.0893	-7.2707	-7.5793	-9.1431	-9.4298	-9.8984
1.5	13.8273	12.7401	11.7819	23.1191	21.4672	19.9625
1.7	3.5118	3.3953	3.3168	7.2122	7.0425	6.9105
2.0	1.6601	1.61479	1.5954	4.3590	4.2960	4.2584
2.3	1.0878	1.0578	1.0492	3.4783	3.4378	3.4179
2.6	0.8092	0.78547	0.7809	3.0499	3.0187	3.0053
3.0	0.6034	0.5338	0.5815	2.7338	2.7086	2.6992
3.5	0.4579	0.4410	0.4401	2.5106	2.4892	2.4822

* SWAY 는 MASS 로 ROLL 은 $MASS \times h$ 로 무차원된 값.

ii) $h=0.2M$, $b=0.4M$ 인 직사각형 단면

λ/B	SWAY			ROLL		
	해 식 해	37 개	27 개	해 식 해	37 개	27 개
0.7	-1.3026	-1.3061	-1.3103	-0.0529	-0.0535	-0.0546
0.9	-2.6985	-2.7202	-2.7476	-0.5528	-0.5584	-0.5668
1.1	53.3940	40.7271	34.4135	19.5497	14.9683	12.6867
1.3	2.4685	2.4072	2.3781	1.2994	1.2742	1.2616
1.5	1.2657	1.2400	1.23173	0.8684	0.8572	0.8528
1.7	0.8516	0.8346	0.8307	0.7200	0.7124	0.7099
2.0	0.5716	0.5593	0.5576	0.6198	0.6141	0.6125
2.3	0.43022	0.4201	0.4192	0.5692	0.5643	0.5632
2.6	0.3450	0.3360	0.3356	0.5386	0.5343	0.5334
3.0	0.2729	0.2648	0.2647	0.5128	0.5089	0.5082
3.5	0.2164	0.2090	0.2091	0.4926	0.4890	0.4884

* 갯수는 분포한 SOURCE 의 갯수를 의미한다.

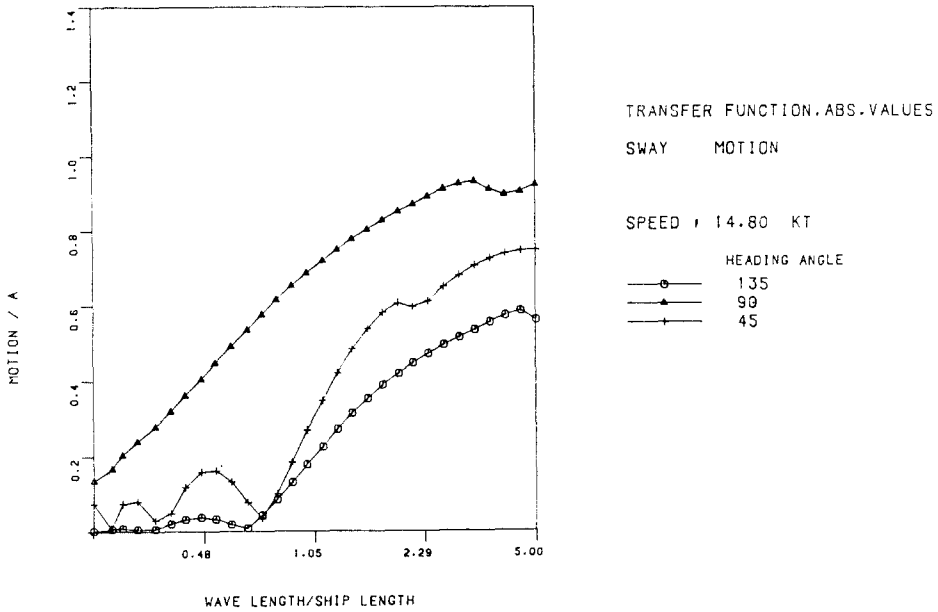


Fig. 6. LOAD CASE A; WITHOUT ADDED MASS CORRECTION

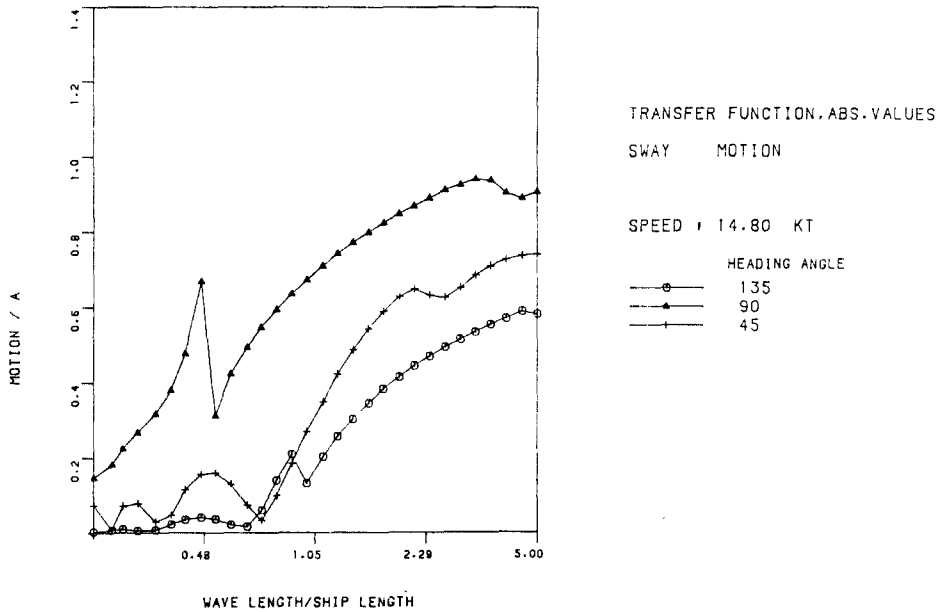


Fig. 7. LOAD CASE A; ADDED MASS CORRECTION

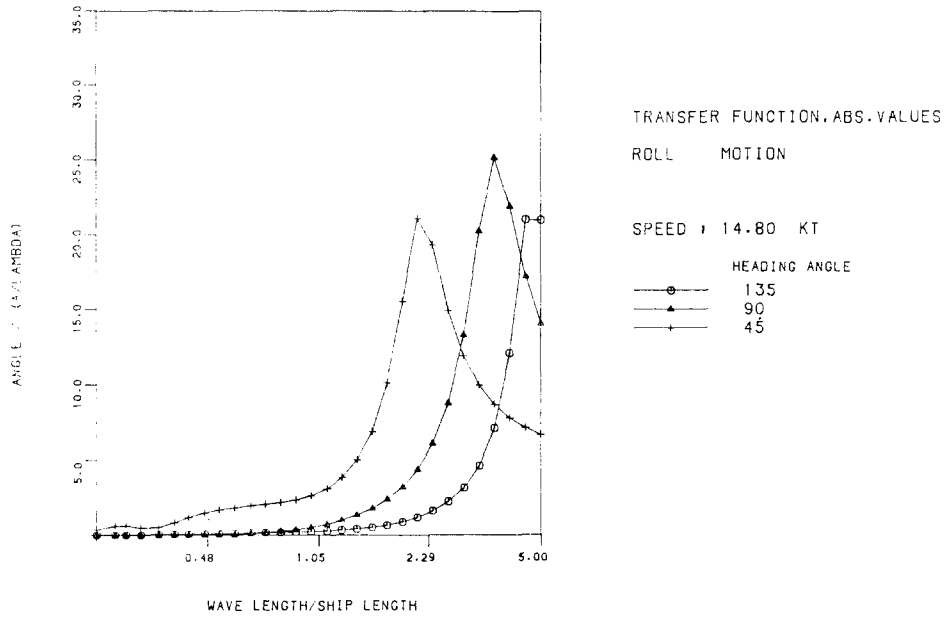


Fig. 8. LOAD CASE A; WITHOUT ADDED MASS CORRECTION

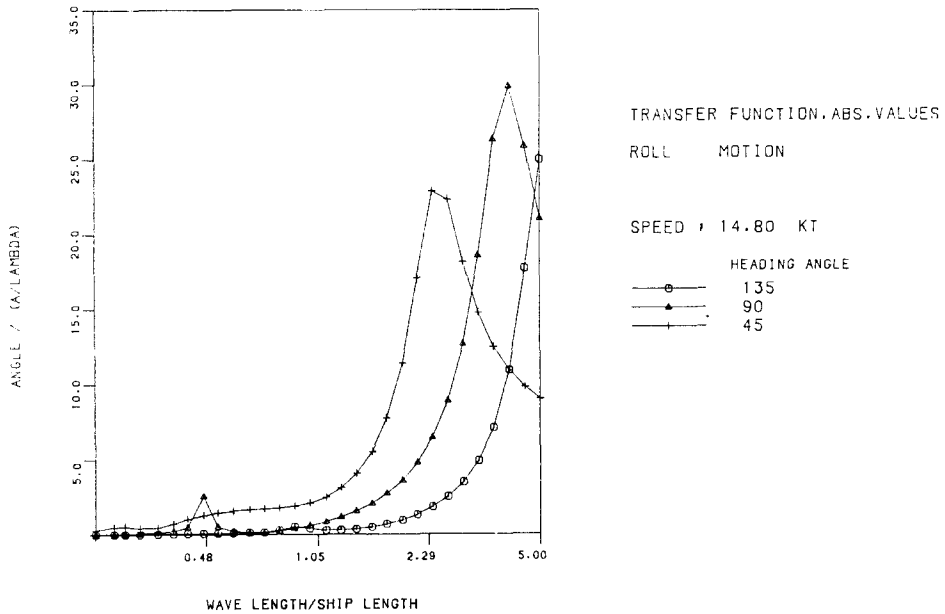


Fig. 9. LOAD CASE A; ADDED MASS CORRECTION

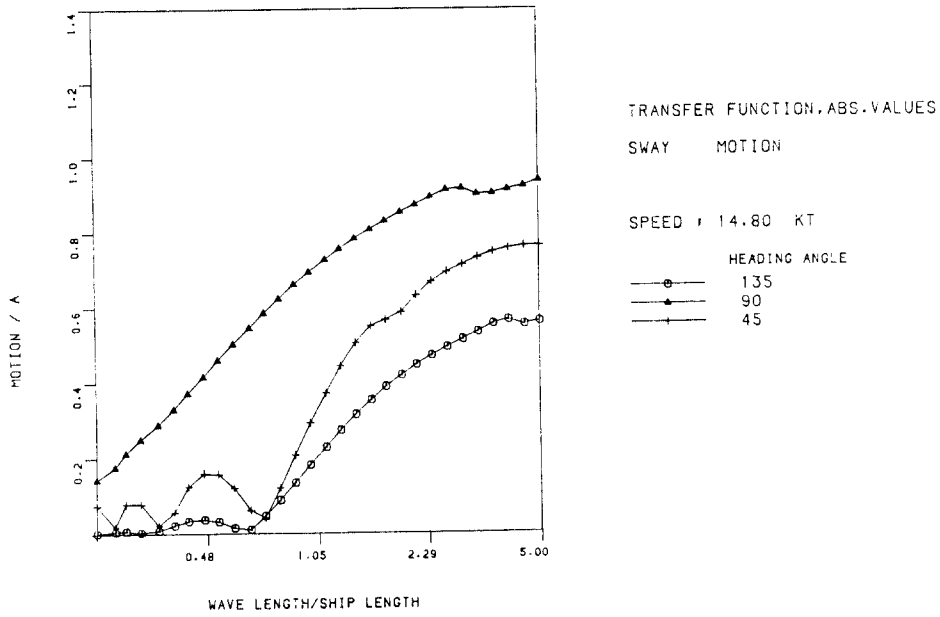


Fig. 10. LOAD CASE B; WITHOUT ADDED MASS CORRECTION

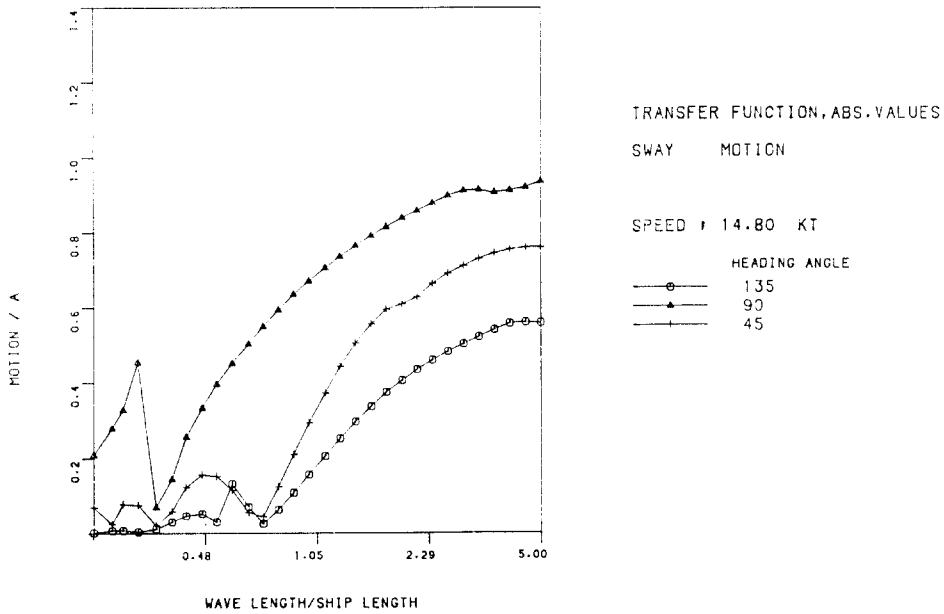


Fig. 11. LOAD CASE B; ADDED MASS CORRECTION

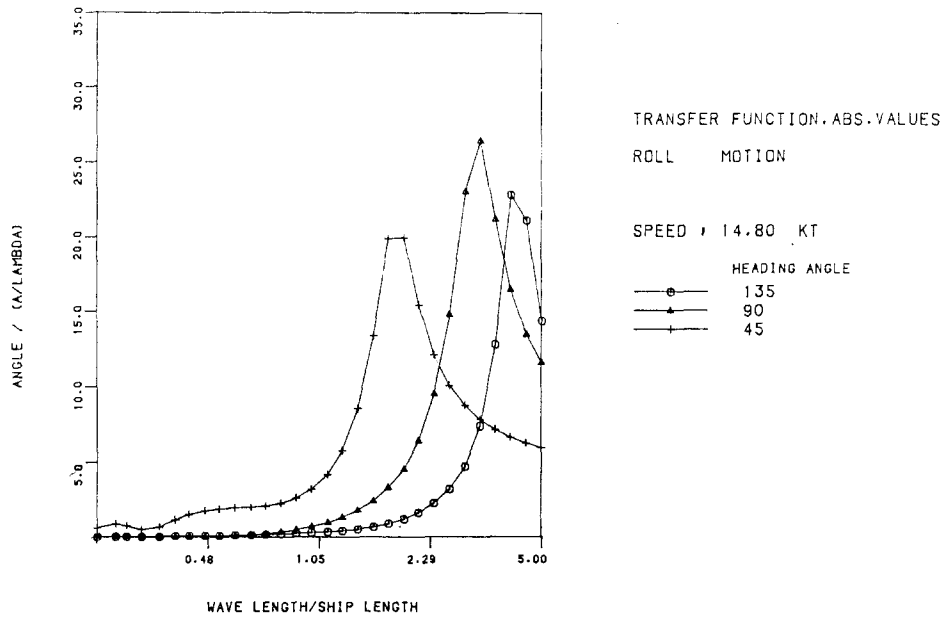


Fig. 12. LOAD CASE B; WITHOUT ADDED MASS CORRECTION

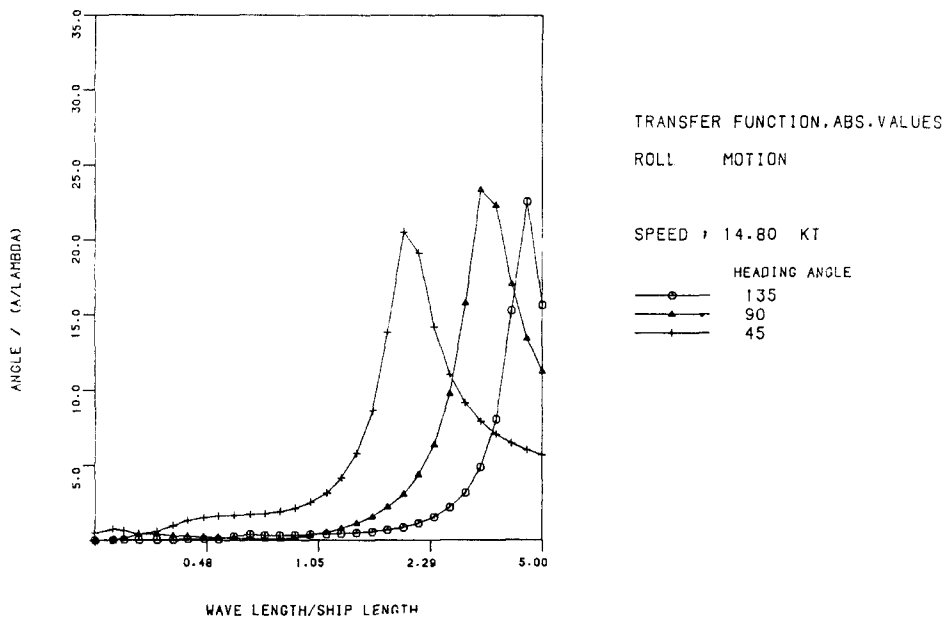


Fig. 13. LOAD CASE B; ADDED MASS CORRECTION

5. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 첫째, Source 및 Dipole 분포법에 의해 Tank 내 유체운동을 해석할 수 있으며 따라서 단면형상에 제한을 받지 않게 된다.
- 둘째, 부유체에 비해 비교적 큰 Tank 를 갖는 경우 부유체의 운동 특성은 변하며, 특히 Tank 내 유동의 고유 주기와 같은 Wave 일 경우 부유체 운동은 충분히 고려되어야 한다.
- 셋째, 최근 문제가 되고 있는 Tank 내 유체운동에 의한 Sloshing 현상의 설계 Force 는 Tank 내 유체운동의 고유주기에 있어서의 운동상황에서 고려되어야 하는데 이러한 경우 현재의 방법에 의해 연성운동을 계산할 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) S. Yamashita, "Motions of a floating Body with a Liquid Storage tank", Trans. of the West-Japan Society of Naval Architects No. 61 March, 1981.
- 2) K. Senda and K. Nakagawa; "On the Vibration of an Elevated Water-tank-1", The 4th Japan National Congress of Applied Mechanics, 1954.
- 3) "Etude Theorique et calcul d'une Citerne Flottante Oscillante", Report No. 8206-CI, Sept. 1982. ENSM, Nantes, France.
- 4) W. G. Meyers, D. J. Sheridan, N. Salvessen; "Manual NSRDC SHIP-MOTION AND SEA-LOAD COMPUTER PROGRAM", Report 3376, NSRDC, 1975.