

화물창의 유체유동을 고려한 선체운동에 관한 연구

朴 命 圭 · 金 順 甲 · 金 東 俊

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

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

< 목 차 >

- | | |
|-----------------------------|--------------|
| 1. 서론 | 4. 계산결과 및 검토 |
| 2. 화물창내의 유동해석 | 4-2 부가질량 수정 |
| 2-1 수치해석 | 4-2 운동계산 검토 |
| 2-2 부가질량 | 5. 결론 |
| 2-3 자유표면이 없는 경우의
2차 모우먼트 | 6. 참고 문헌 |
| 3. 운동계산 | |
| 3-1 운동계산 프로그램 | |
| 3-2 연성운동 방정식 | |

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 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.

Hydrodynamic 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.

1. 서 론

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

특히 Tank 내 유체 유동의 고유주기에서는 부유체의 운동은 크게 영향을 받게 되므로 초기 설계시 이들의 연성 운동에 대해 검토가 이루어져야 한다. 이러한 파도에 의한 부유체와 Tank 내 유체의 연성 운동에 대한 연구는 일찍부터 수행되었으며 1981년 S. Yamashita¹⁾는 Prismatic 형상과 Cylindrical 형상의 Tank에 대해 K.Senda, K.Nakagawa²⁾의 Analytic Solution 을 이용 연성 운동을 해석하고 이를 실험과 비교하였다.

본 연구에서는 Tank와 유체 표면에 Source와 Dipole을 분포 적분 방정식을 구하고 이를 수치적으로 풀어냄으로써 형상의 제한을 없애고자 하였으며 이를 이용 Added Mass의 Correction에 의해 연성 운동을 해석하고자 하였다.

그리고 이를 Wide Cargo Tank를 갖는 선박의 경우에 적용 연성 운동 응답을 계산하여 보았다.

2. 화물창(Cargo hold) 내의 유동해석

Cargo hold 내의 유체의 운동을 해석하기 위하여 Fig. 1과 같이 평형상태의 자유표면 상에 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 M의 속도는

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

와 같이 쓸 수 있다.

운동진폭이 미소한 경우에 \vec{V}_M 은

$$\frac{d\vec{OM}}{dt} = \text{Re} \left\{ -i\omega L \left[\frac{a_1}{L} \vec{e}_1 + \frac{a_2}{L} \vec{e}_2 + \theta \vec{e}_3 \times \frac{\vec{O_1M}}{L} \right] e^{-i\omega t} \right\} \quad (2)$$

으로 선형화할 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.

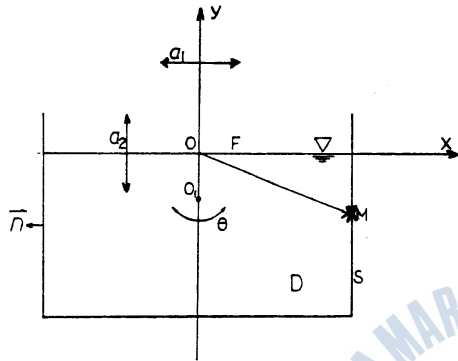


Fig. 1 Coordinate System

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.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta^2 \phi = 0 \\ -k\phi + \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} \Big|_M = -i\omega L \left[A_1 \vec{e}_1 + A_2 \vec{e}_2 + A_3 \left(\vec{e}_3 \times \frac{\vec{O_1M}}{L} \right) \right] \cdot \vec{n}_M, M \in S \end{array} \right. \quad (3)$$

여기서 $A_q = \frac{a_q}{L}, \quad q = 1, 2$

$A_3 = \theta$

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

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

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

$$P = -\rho \dot{\Phi}_t = -\rho \operatorname{Re} \{-i\omega \phi e^{-i\omega t}\} \quad (13)$$

이며 식(4)를 대입하면 sway와 roll 운동에 대한 무차원 압력은

$$\begin{aligned} P's &= \frac{P_s}{\rho \omega^2 L a_1} = \frac{\phi_1}{L} \cos \omega t \\ P'r &= \frac{P_r}{\rho \omega^2 L^2 \theta} = \frac{\phi_3}{L} \cos \omega t \end{aligned} \quad \rho: \text{액체 밀도} \quad (14)$$

와 같이 얻어진다. ϕ_1 은 임의의 점에서 포텐셜 값을 나타낸다.

Cargo hold 내의 유동에 의한 파면 상승은

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

으로부터 sway 및 roll 운동에 대하여 각각

$$\begin{aligned} \eta's &= \frac{\eta_s}{a_1} = \frac{\omega^2}{g} \phi_1 \cos \omega t \\ \eta'r &= \frac{\eta_r}{L\theta} = \frac{\omega^2}{g} \phi_3 \cos \omega t \end{aligned} \quad (15)$$

와 같이 된다.

2-2. 부가질량 (Added Mass)

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

이들 힘과 Moment가 부유체 운동에 영향을 주므로 이들을 Added Mass의 개념으로 보아 부유체 운동 방정식에 고려하여 주므로 연성 문제를 해석할 수 있다.

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

즉,

$ASS = MSS \times TL$ $ARR = MRR \times TL$ $ARS = MRS \times TL$ $AYY = ASS \times r^2$ $ASY = ASS \times r$ $ARY = ASR \times r$	}	MSS : 2 차원 단면에 대한 Sway 운동에 의한 Sway 방향 Added Mass MRR : 2 차원 단면에 대한 Roll 운동에 의한 Roll 방향 Added Mass MRS : 2 차원 단면에 대한 Coupling Added Mass $A--$: 3 차원 물체에 대한 Added Mass TL : Tank Length r : 선박의 무게 중심으로부터 Tank의 무게 중심까지의 종방향거리
---	---	---

의 형태가 된다.

중운동의 경우 앞에서 보인 것과 같이 Tank 내 유체 유동과 부유체의 중운동 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 유체 유동에 의한 힘과 Moment가 발생하였다.

여기서, Tank 내 유체를 적재하되 자유표면 없이 꽉 채운 경우에 대해서 생각해 보자. 자유표면이 없다고 생각하면 포텐셜 ϕ 는 다음의 조건을 만족하면 된다.

$$\begin{cases} V^2 \phi = 0 \\ \left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_M = -iwL \left[A_1 \vec{e}_1 + A_2 \vec{e}_2 + A_3 \left(\vec{e}_3 \times \frac{\vec{O_1 M}}{L} \right) \right] \cdot \vec{n}_M \quad M \in S, F \end{cases} \quad (16)$$

즉, 모든 구간에서 Body Boundary Condition 만을 생각해주면 된다.

따라서, (12)식의 대수 방정식에서 $N=NF$ 로 놓으면 쉽게 구해진다.

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

선박의 경우 Tank를 가득 채운 경우와 아닌 경우가 같이 일어나므로 연성 운동방정식

3-1. 운동 계산 프로그램

계산에 사용된 운동 Program은 1975년 NSRDC⁴⁾에서 발표된 것으로 Added Mass와 Damping Coefficient는 FRANK의 Close-fit 방법⁵⁾⁶⁾을 사용하고 Strip theory⁷⁾로는 S-T-F를 이용한 것으로 계산 정도는 비교적 높으며 6자유도 계산이 가능하다.

좌표 축과 부호 규약은 Fig. 4-A, B와 같다.

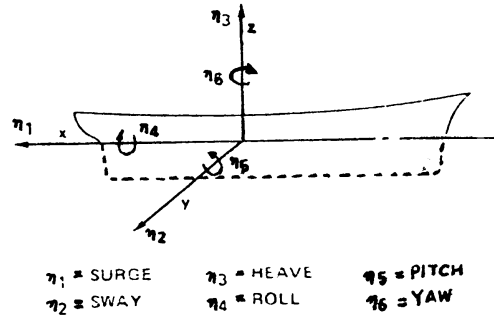


Fig. 4-A Sign Convention for Translatory and Angular Displacements

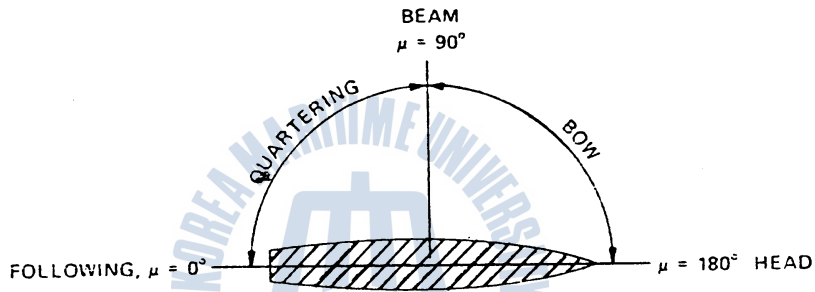


Fig. 4-B Definition of the Heading Angle, μ

또한 Fig. 5의 Flow Chart에서 Tank 유동에 의한 Added Mass Calculation은 부록 1로서 구성하였다.

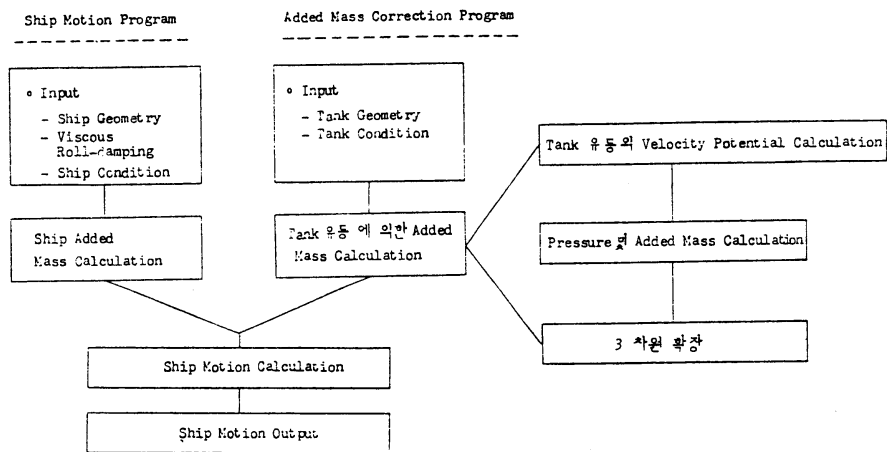


Fig. 5 Flow Chart

3-2. 연성 운동 방정식

연성 문제를 풀기 위해 Cargo hold tank에 대해 계산된 Added Mass를 Frequency에 따라 선체의 Added Mass에 더하여 운동 방정식의 Mass Matrix를 재구성하였다.

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

; 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. 계산 결과 및 검토

4-1. 부가질량 수정 (Added Mass Correction)

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

높이 0.11 M, 0.20 M, 폭 0.4 M를 갖는 2개의 직사각형 단면에 대하여 계산한 결과를 Table 2에 보이고 있다.

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

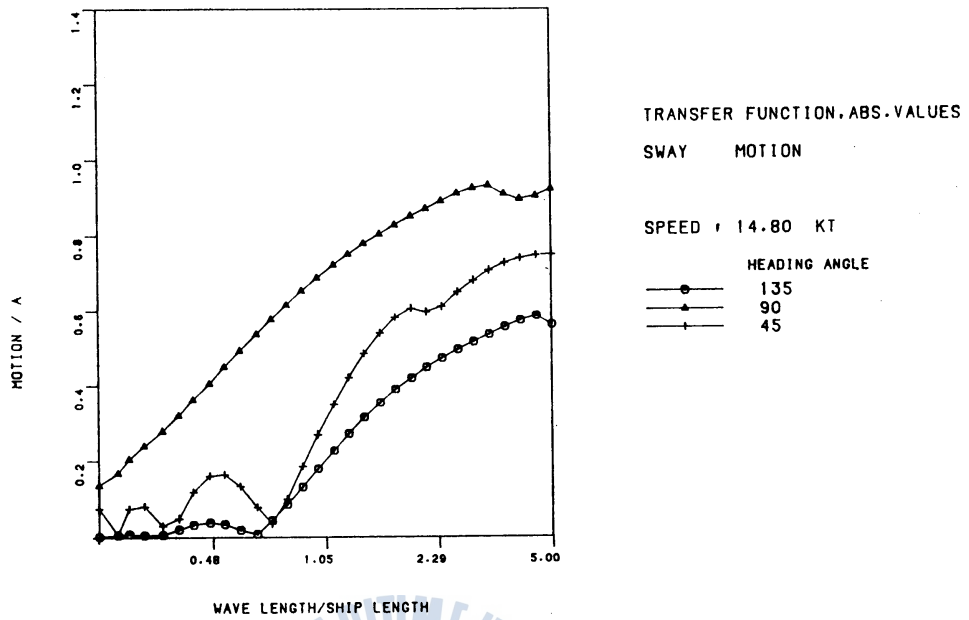


Fig. 6 LOAD CASE A WITHOUT ADDED MASS CORRECTION

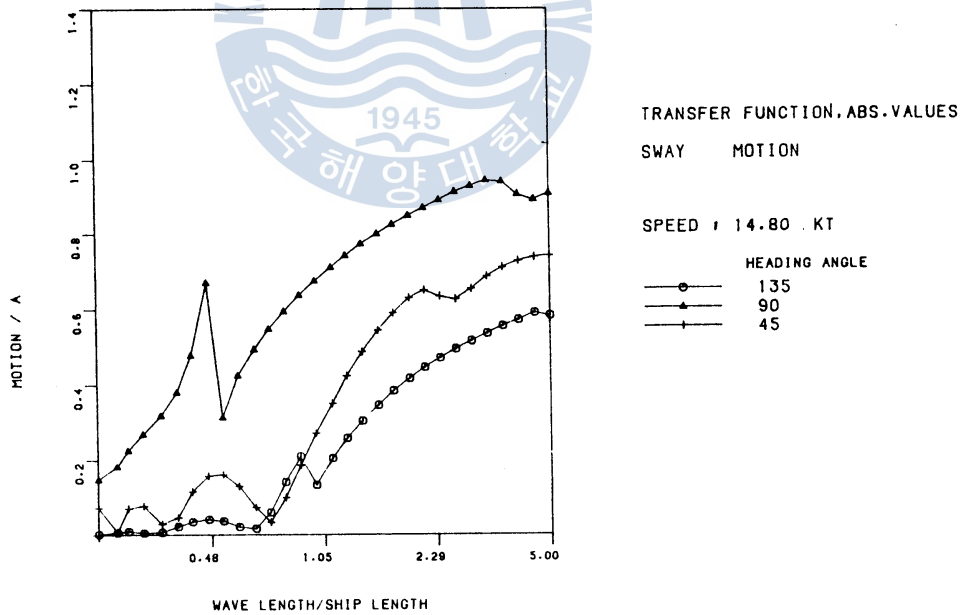


Fig. 7 LOAD CASE A ADDED MASS CORRECTION

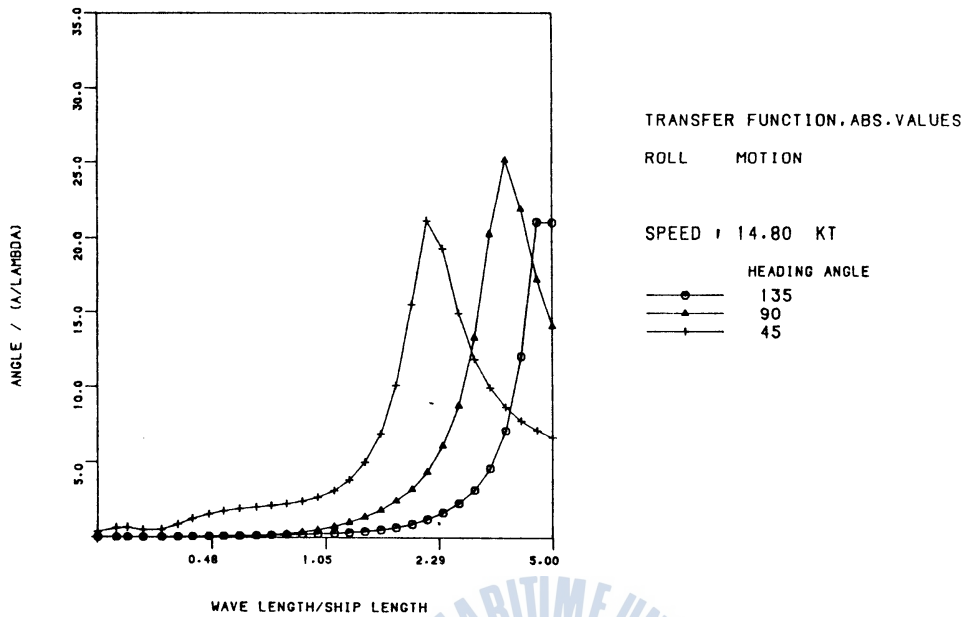


Fig. 8 LOADED CASE A WITHOUT ADDED MASS CORRECTION

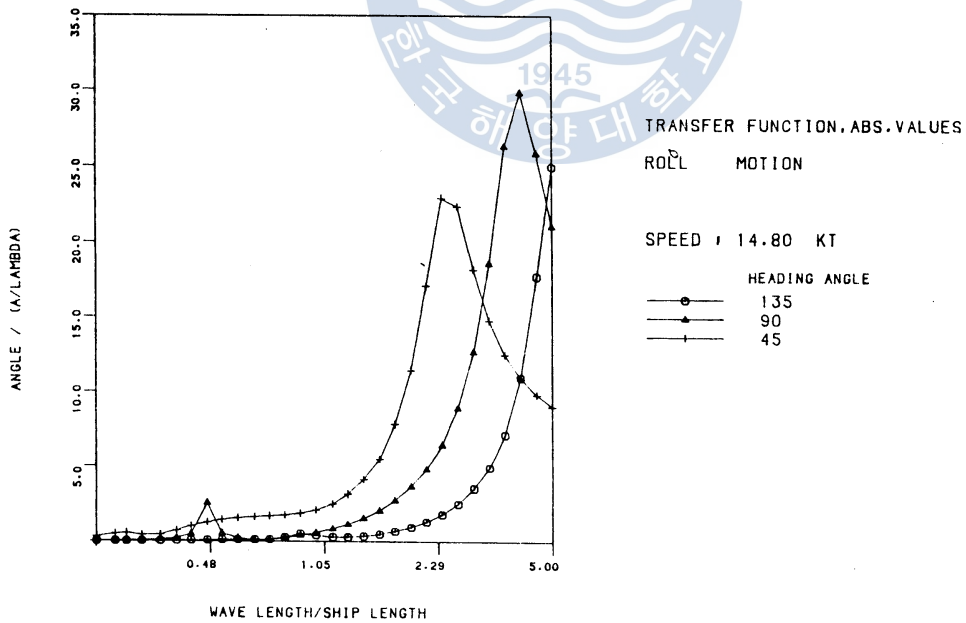


Fig. 9 LOAD CASE A ADDED MASS CORRECTION

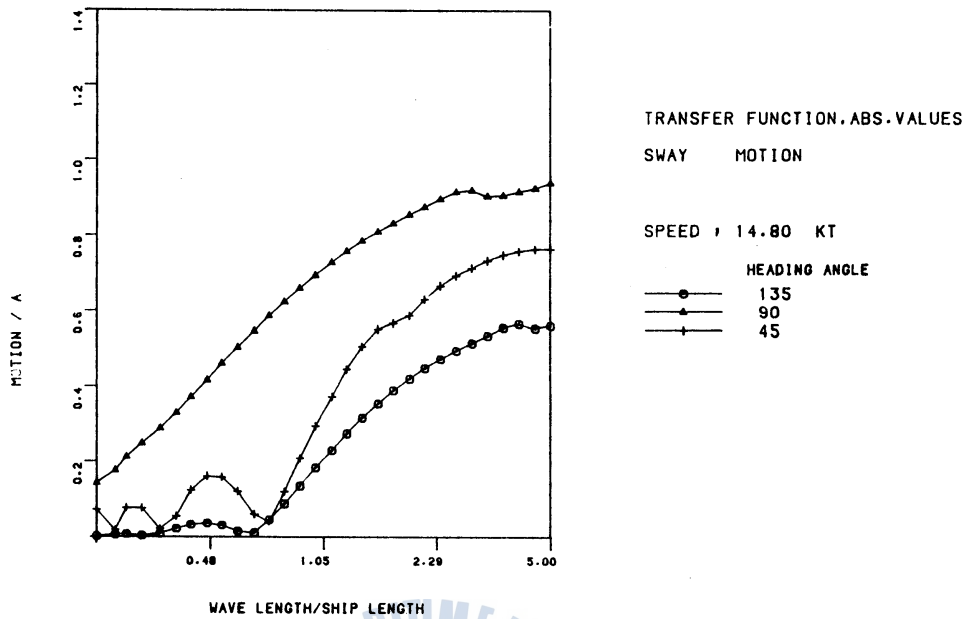


Fig. 10 LOAD CASE B WITHOUT ADDED MASS CORRECTION

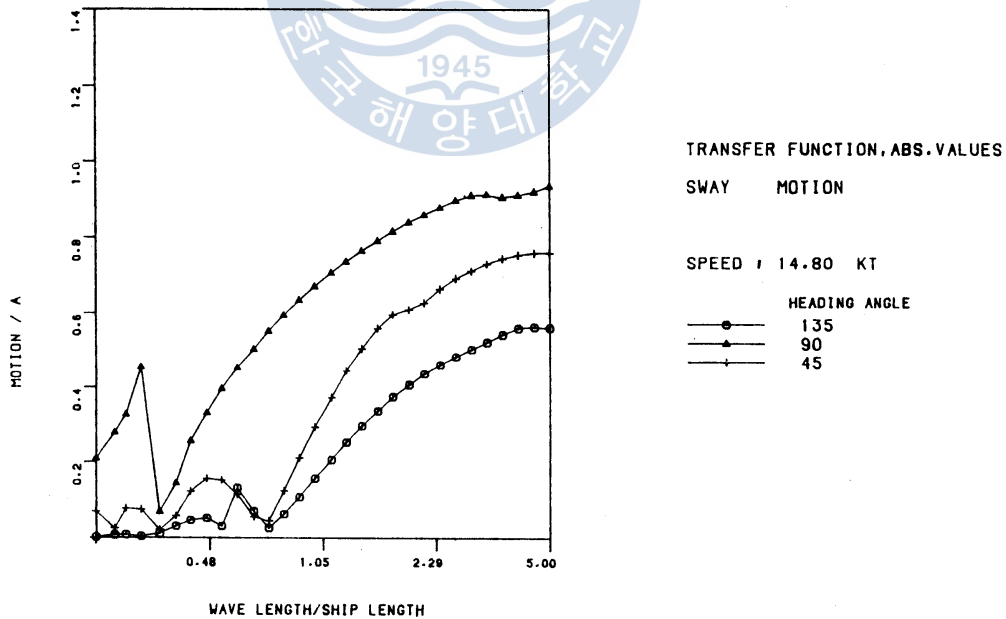


Fig. 11 LOAD CASE B ADDED MASS CORRECTION

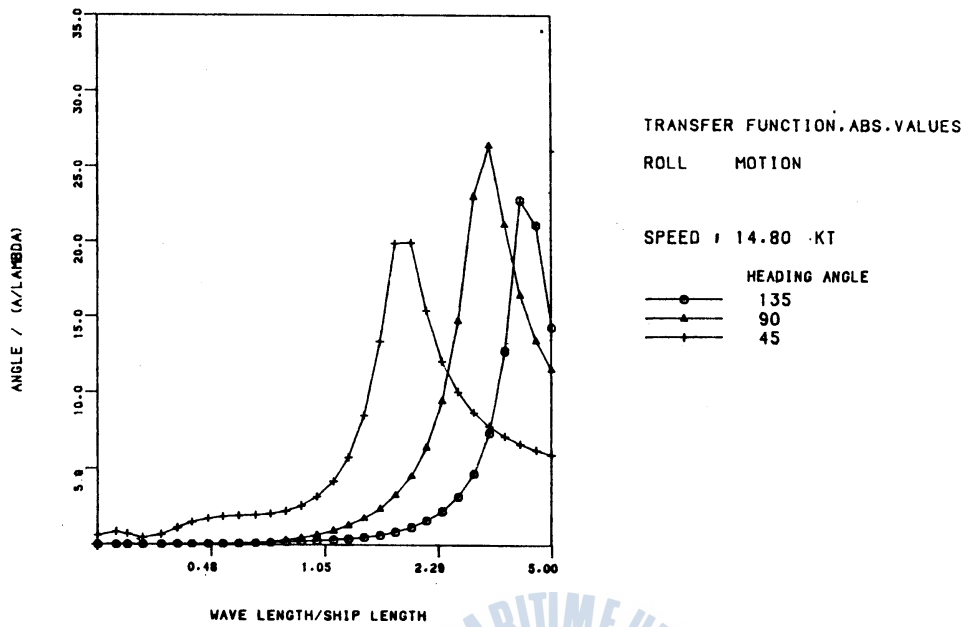


Fig. 12 LOAD CASE B WITHOUT ADDED MASS CORRECTION

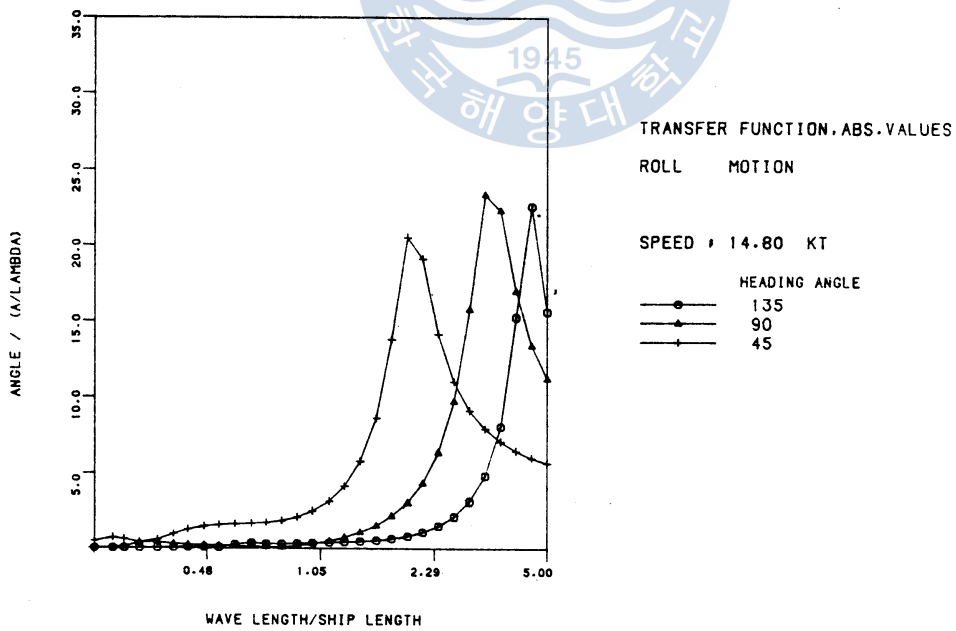


Fig. 13 LOAD CASE B ADDED MASS CORRECTION

```

      ZL(I) = ZL(I)/AL
35  CONTINUE
      DO 45 I= 1, NF
      ZL2 = ZL(I+1)
      ZL1 = ZL(I)
      ZE(I) = (ZL1+ ZL2)/2.
      ZL21 = ZL2-ZL1
      F2=CABS(ZL2)
      F1=CABS(ZL1)
      SG(I)=CABS(ZL21)
      AN(I,1) = - ZI * ZL21/SG(I)
      AN(I,2) = -(F2 * F2 - F1 * F1 + 2. * ZL21 * (ZI * YO - XO))/2./SG(I)
45  CONTINUE
      DO 65 I= 1, NF
      ZM = ZE(I)
      DO 75 J= 1, NF
      IF(I.EQ.J) GO TO 75
      Z1 = ZM - ZL(J+1)
      Z2 = ZM - ZL(J)
      Z3 = ZM + CONJG(ZL(J+1))
      Z4 = ZM + CONJG(ZL(J))
      Z5 = CLOG(Z1/Z2)
      Z6 = CLOG(Z3/Z4)
      S(I,J) = SG(J) * (0.5 * CLOG(Z1 * Z2 / (Z3 * Z4)) - Z5 * (ZM - ZE(J))
      ε      / (ZL(J+1) - ZL(J)) - Z6 * (ZM + CONJG(ZE(J)))
      ε      / (CONJG(J+1)) - CONJG(ZL(J))) / TPI
      D(I,J) = - ZI * (Z5 + Z6) / IPI
75  CONTINUE
      Z7 = ZM + CONJG(ZL(I+1))
      Z8 = ZM + CONJG(ZL(I))
      Z9 = CLOG(Z7/Z8)
      S(I,I) = SG(I) * (ALOG(0.5 * SG(I)) - 0.5 * CLOG(Z7 * Z8) - Z9
      ε      * (ZM + CONJG(ZE(I))) / (CONJG(ZL(I+1)) - CONJG(ZL(I))) / TPI
      D(I,I) = - 0.5 - ZI * Z9 / TPI
65  CONTINUE
      DO 85 K= 1, 2
      DO 85 I= 1, NF
      UCİK= 0.

```

```

DO 95 J=1, N
UCIK= UCIK + AN (J, K) * S (I, J)
95 CONTINUE
UC (I, K)= UCIK
85 CONTINUE
NMAX= 60
MM= AF + 2
DIMS = AL
DIMS = AL * AL
ALG= AL/G
AL2 = AL * AL
RHOTL= RHO * TL
MQ= 60
W= 0.14
DW= 0.04
C IN CASE OF RIGID FREE SURFACE GO TO 300
IF (N1. EQ. NF1) GO TO 300
DO 200 KKK= 1, MQ
W= W + DW
T(KKK)= TPI/W
AKO= W* W* ALG
DO 115 K= 1, 2
M= K + NF
DO 115 I= 1, NF
DS (I, M) = UC (I, K)
115 CONTINUE
DO 105 I=1, NF
DO 105 J=1, NF
IF (J. GT. N) GO TO 96
DS (I, J) = D (I, J)
GO TO 105
96 DS (I, J) = D (I, J) - AKO*S (I, J)
105 CONTINUE
CALL GERS (DS, NMAX, NF, MM)
DO 125 K=1, 2
M= K + NF
DIMM= DIMS
IF (K. EQ. 2) DIMM= DIMR

```

```

DO 125 I = 1, NF
UK (I, K) = DS (I, M)* DIMM
125 CONTINUE
PRS = 0.
PRR = 0.
CRS = 0.
DO 135 I = 1, N
SWAYDI=AN (I, 1) * SG (I) * AL
ROLLDI = AN (I, 2) * SG (I) * AL2
PRS = PRS + UK (I, 1) * SWAYDI
PRR = PRR + UK (I, 2) * ROLLDI
CRS = CRS + UK (I, 2) * SWAYDI
135 CONTINUE
ASS = 2. * PRS * RHOTL - RHOTL * AMAS
ARR = 2. * PRR * RHOTL
ASR = 2. * CRS * RHOTL
Ayy = ASS * XG * XG
ASY = ASS * XG
ARY = ASR * XG
TS1 (IQ, KKK) = ASS
TR1 (IQ, KKK) = ARR
TY1 (IQ, KKK) = Ayy
TS2 (IQ, KKK) = ASR
TS3 (IQ, KKK) = ASY
TR2 (IQ, KKK) = ARY
200 CONTINUE
GO TO 1000
300 CONTINUE
WW = 1.0
AKO = WW * WW * ALG
DO 315 K = 1, 2
M = K + NF
DO 315 I = 1, NF
DS (I, M) = UC (I, K)
315 CONTINUE
DO 305 I = 1, NF
DO 305 J = 1, NF
IF (J. GT. N) GO TO 396

```

```

DS (I, J) = D (I, J)
GO TO 305
396 DS (I, J) = D (I, J) - AKO * S (I, J)
305 CONTINUE
CALL GERS (DS, NMAX, NF, MM)
DO 325 K=1, 2
M = K + NF
DIMM = DIMS
IF (K.EQ. 2) DIMM = DIMR
DO 325 I = I, NF
UK (I, K) = DS (I, M) * DIMM
325 CONTINUE
PRS = 0.
PRR = 0.
CRS = 0.
DO 335 I = I, N
SWAYDI = AN (I, 1) * SG (I) * AL
ROLLDI = AN (I, 2) * SG (I) * AL2
PRS = PRS + UK (I, 1) * SWAYDI
PRR = PRR + UK (I, 2) * ROLLDI
CRS = CRS + UK (I, 2) * SWAYDI
335 CONTINUE
AMM = RHOTL * AMAS
R2 = (YOD + ABS (.5 * AL)) ** 2
ASS = 2. * PRS * RHOTL - AMM
SOL = AMM * R2
ARR = 2. * PRR * RHOTL - SOL
ASR = 2. * CRS * RHOTL
Ayy = ASS * XG * XG
ASY = ASS * XG
ARY = ASR * XG
DO 400 KKK = I, MQ
W = W + DW
T (KKK) = TPI / W
TS 1 (IQ, KKK) = ASS
TR 1 (IQ, KKK) = ARR
TY 1 (IQ, KKK) = Ayy
TS 2 (IQ, KKK) = ASR

```

```

    TS 3 (IQ, KKK) = ASY
    TR 2 (IQ, KKK) = ARY
400 CONTINUE
1000 CONTINUE
    DO 1100 I = 1, MQ
    DO 1100 J = 1, NOT
    TSS (I) = TSS (I) + TS 1 (J, I)
    TRR(I) = TRR(I) + TR1 (J, I)
    TYY(I) = TYY(I) + TY1 (J, I)
    TSR (I) = TSR(I) + TS 2 (J, I)
    TSY (I) = TSY(I) + TS 3 (J, I)
    TRY(I) = TRY(I) + TR2 (J, I)
1100 CONTINUE
    TMAS = RHOSO * ALPP * BMLD * DRFT * BLCO
    EI 33 = TMAS * ALPP ** 2
    EI 55 = TMAS * ALPP
    DO 500 I = 1, MQ
    W = 2 * PI / T (I)
    TSSN = TSS (I) / TMAS
    TRRN = TRR (I) / EI 33
    TYYN = TYY (I) / EI 33
    TSRN = TSR (I) / EI 55
    TSYN = TSY (I) / EI 55
    TRYN = TRY (I) / EI 33
    WRITE (15, 98) T(I), W, TSSN, TRRN, TYYN, TSRN, TSYN, TRYN
500 CONTINUE
98 FORMAT (2F6.2, 6F10.6)
50 FORMAT (8I 5)
51 FORMAT (8F10.4)
52 FORMAT (20A 4)
    STOP
    END

```