
 論 文

大韓造船學會誌
 第24卷 第2號 1987年 6月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 24, No. 2, June 1987

Neumann-Kelvin 이론에 의한 조파 저항의 수치 계산

어민우* · 손봉룡* · 강신형**

Numerical Calculations of the Wave Resistance of Ships by Neumann-Kelvin Theory

M.W. Eo* · B.R. Son* · S.H. Kang**

Abstract

The wave resistance of ships is calculated with the numerical solution of the Neumann-Kelvin problem. For the sake of the numerical evaluation of the derivatives of the Green function, Shen and Farrell's method is used[7].

In particular, the contribution of the line intergral term in the Neumann-Kelvin problem to the calculated values of the wave resistance is shown.

For the Wigley's hull the calculated values of the wave resistance and the wave profiles at the hull surface are in fairly good agreement with the experimental data.

However, for the series 60 hull and the practical hull, a 454,000 cubic feet reefer vessel, the calculated results of the wave resistance show definite hollows and humps considering the experimental result.

1. 서 론

선박이 정수중에 항해할 때 받는 조파저항을 합리적으로 예측함은 선형의 개발 및 기본설계에 매우 중요하다. 그러나 Maruo[1] 등에서 지적되었듯이 선박유체역학의 여러분야중 가장 쉽게 생각되는 정수중에서의 조파저항의 예측이 실제로 가장 어려운 문제로 남아 있다. 현재 그 이유 중에서 선체가 발생하는 경계층 및 반류의 영향, 즉 유체의 점성에 의한 영향과 조파이론의 비선형문제가 가장 크다고 알려져 있다.

따라서 이에 관한 연구가 최근 활발하게 이루어지고 있으나 아직 선형개발 및 설계에 응용될 만한 단계에 있지는 않다. 그러나 현재까지 연구된 조파저항 이론

을 최대한 이용하여 선형개발에 응용하는 노력은 또 다른 차원에서 이루어져야 한다.

실제 선형에 적용할 수 있는 조파저항 이론은 크게 나누어 Neumann-Kelvin 이론[2], Low Speed Theory [3] 및 Guilloton's Method[4]가 있다. 물론 위 이론에 의한 조파저항의 계산, 이론들의 보완적 연구는 그동안 많이 이루어졌다. 그러나 아직 같은 이론하에 계산된 조파저항도 서로 많은 차이가 있는 만큼 이론 및 수치 계산방법에 따라 그 결과에 많은 차이가 있었다. 이론적인 조파저항의 예측이 아직 정확하지는 못하지만 선형개발과 설계과정에서 조파저항의 예측 및 국부 유동장의 계산을 위한 전산프로그램은 매우 유용하게 활용된다. 또한 어느 특정이론에 기초를 두더라도 이러한 소프트웨어를 확보하고 활용할 수 있어야만 앞으

접수일자 : 1986년 8월 27일, 재접수일자 : 1987년 3월 5일

* 정회원, 대한조선공사 기본설계부

** 정회원, 서울대학교 공과대학

로 깊이 있는 연구가 가능하다. 이에 본 연구는 Neumann-Kelvin 이론에 따라 조파저항 및 국부 유동을 예측할 수 있는 합리적이고 효과적인 전산프로그램을 개발하기 위하여 수행되었다.

Neumann-Kelvin 이론에 의한 조파저항 계산은 국내에서 좌순원 [5] 및 양승일 [6]에 의해서 시도되었다. 본 연구에서는 Havelock Function에 대한 수치계산의 오차를 가급적 줄이고 컴퓨터의 계산시간을 절약하도록 노력하였다. Havelock Function에 의한 속도 성분은 국부 파동항과 자유 파동항을 구분하여 Farrell [7]의 방법으로 미리 계산하여 컴퓨터에 저장시킨 후 필요에 따라 이용하였다. 선체표면은 Hess and Smith [8] 방법에 의해 4각형 판넬로 분할하고 조파에 의해 유기되는 속도와 연계시켰다. 작성된 프로그램은 우선 Wigley 선형과 Series 60 선형에 적용하여 그 다당성을 보았으며, 주로 선적분항의 처리에 따른 결과의 변화를 조사하였다. 또한 실적선인 45만 cuft 냉동선에 적용하여 실제 실험치와 비교해 보았다.

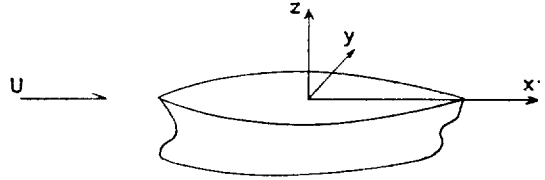


Fig. 1 Coordinate system

2. 기본 방정식 및 수치계산법

2-1. 기본방정식

좌표계는 Fig. 1과 같이 균일 흐름중에 정지되어 있는 선체에 고정시킨 우수 직교 좌표계를 선택하였으며, 유체는 이상유체로, 유동은 비회전 운동으로 가정하였다.

선체 표면의 한점 $Q(x_0, y_0, z_0)$ 에 있는 단위 소오스를 생각하면, Laplace 방정식을 만족하고 방사조건과 선형화된 자유표면 경계 조건을 만족하는 Green 함수는 아래와 같이 표현된다.

$$G(P, Q) = -\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} + \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} \frac{K}{K - k_0 \sec^2 \theta} e^{K(z+z_0) + i(x-x_0)\cos\theta + i(y-y_0)\sin\theta} d\theta dK + R_e 2i \int_{-\pi/2}^{\pi/2} k_0 \sec^2 \theta e^{k_0 \sec^2 \theta (z+z_0) + i(x-x_0)\cos\theta + i(y-y_0)\sin\theta} d\theta \quad (1)$$

여기서, $P(x, y, z)$: 계산점

$$\frac{P(\theta)}{Q(\theta)} = \int_S \sigma \frac{\cos}{\sin} [k_0 \sec^2 \theta (x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta)] e^{k_0 z_0 \sec^2 \theta} dS - \frac{1}{k_0} \int_L \sigma \frac{\cos}{\sin} [k_0 \sec^2 \theta (x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta)] n_x dy_0 \quad (5)$$

2-2. Green 함수 및 유기속도

식 (1)의 Green 함수를 Shen and Farrell [7]에서와 같이 변수변환을 하여 나타내면 다음과 같다.

$$G(P, Q) = G^d(P, Q) + G^f(P, Q) + G^l(P, Q) \quad (6)$$

여기서 G^d 는 이중 모형에 해당되는 함수이고 G^f 은 이중적분항, 즉 국부 파동항이다. 한편 G^l 는 식 (1)의 마지막 항으로 자유파동에 해당하는 항이다. 위 각 항은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q(x_0, y_0, z_0): \text{소오스 분포점}$$

$$R = [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2]^{1/2}$$

$$R' = [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+z_0)^2]^{1/2}$$

$$k_0 = g/U^2$$

$$z + z_0 < 0$$

그리고, 선체에 의한 교란 속도 포텐셜은 Green 정리로부터 아래와 같이 얻어진다.

$$\phi(P) = \iint_S \sigma(Q) G(P, Q) dS - \frac{1}{k_0} \oint_L \sigma(Q) G(P, Q) n_x(Q) dy_0 \quad (2)$$

여기서, S : 선체표면

L : 선체표면과 자유표면과의 교선

n_x : 단위 법선벡터의 x 방향 여현

식 (2)의 첫째항은 선체표면에 의한 적분항이며, 둘째항은 수선을 따르는 선적분항으로서 Brard [2]에 의해 유도되었고, Neumann-Kelvin 문제라고 한다.

선체표면에 분포된 소오스 세기 σ 는 선체표면 경계 조건으로부터 구해지는데 식 (2)의 포텐셜 ϕ 가 선체표면 경계조건이 만족되도록 하면,

$$2\pi\sigma(P) + \int_S \sigma(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n(P)} dS - \frac{1}{k_0} \int_L \sigma(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n(P)} n_x(Q) dy_0 + U n_x(P) = 0 \quad (3)$$

와 같은 σ 에 대한 제 2종의 Fredholm 적분 방정식이 얻어진다. 식 (3)을 수치해석하여 σ 를 구하게 되고 조파저항은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R = 16\pi\epsilon k_0^2 \int_0^{\pi/2} [P^2(\theta) + Q^2(\theta)] \sec^3 \theta d\theta \quad (4)$$

여기서, $P(\theta)$, $Q(\theta)$ 는 진폭함수로서 각각 다음과 같다.

$$\begin{cases} G^z(P, Q) = -\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \\ G^t(P, Q) = R_c \left[\frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} k_0 \left\{ e^{\epsilon} E_1(\zeta) - \frac{1}{\zeta} \right\} dt \right] \\ G^r(P, Q) = R_c \left[2i \int_{-\infty}^{\infty} (1 + \text{sign} w) k_0 e^{\epsilon} dt \right] \end{cases} \quad (7)$$

$$t = \tan \theta$$

$$\zeta = k_0(x+z_0)(1+t^2) + ik_0\sqrt{1+t^2}\{(x-x_0) + t(y-y_0)\}$$

$$\begin{cases} G_x^t = -I_m \left[\frac{2}{\pi} k_0^2 \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{1+t^2} \left\{ e^{\epsilon} E_1(\zeta) - \frac{1}{\zeta} + \frac{1}{\zeta^2} \right\} dt \right] \\ G_y^t = -I_m \left[\frac{2}{\pi} k_0^2 \int_{-\infty}^{\infty} t \sqrt{1+t^2} \left\{ e^{\epsilon} E_1(\zeta) - \frac{1}{\zeta} + \frac{1}{\zeta^2} \right\} dt \right] \\ G_z^t = R_c \left[\frac{2}{\pi} k_0^2 \int_{-\infty}^{\infty} (1+t^2) \left\{ e^{\epsilon} E_1(\zeta) - \frac{1}{\zeta} + \frac{1}{\zeta^2} \right\} dt \right] \end{cases} \quad (8)$$

$$G_x^r = -4k_0^2 \int_A^B \sqrt{1+t^2} \left\{ e^{k_0(z+z_0)(1+t^2)} \times \cos[k_0\sqrt{1+t^2}\{(x-x_0)+t(y-y_0)\}] \right\} dt \quad (9)$$

$$G_y^r = -4k_0^2 \int_A^B t \sqrt{1+t^2} \left\{ e^{k_0(z+z_0)(1+t^2)} \times \cos[k_0\sqrt{1+t^2}\{(x-x_0)+t(y-y_0)\}] \right\} dt$$

$$G_z^r = -4k_0^2 \int_A^B (1+t^2) e^{k_0(z+z_0)(1+t^2)} \times \sin[k_0\sqrt{1+t^2}\{(x-x_0)+t(y-y_0)\}] dt \quad (9)$$

여기서, $A = \frac{x-x_0}{y-y_0}$, $B = \infty$; $y-y_0 > 0$ 일 때

$$A = -\infty, \quad B = -\frac{x-x_0}{y-y_0}; \quad y-y_0 < 0 \text{ 일 때}$$

이다.

그런데, 식 (8) 과 (9)를 매 계산시 마다 직접계산 하기에는 상당한 시간이 소요되므로 본 연구에서는 $k_0(x-x_0)$, $k_0(y-y_0)$, $k_0|z+z_0|$ 에 따라 Table 1과 Table 2와 같이 유기속도 계산치에 대한 수표를 만들어 두고 실제 계산시에는 이 값들로부터 보간법을 사용하여 얻었다. 대표적으로 $k_0|z+z_0|=2$ 이고, $k_0(y-y_0)=0$ 및 8일 때 G_x^t 과 G_x^r 의 $k_0(x-x_0)$ 에 따른 변화를 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2에서

여기서 $E_1(\zeta)$ 는 복소수 지수 함수이고, $\text{sign} w$ 는 $(x-x_0)+t(y-y_0)$ 의 부호에 따라서 1 또는 -1이다. $G^t(P, Q)$ 에 대한 파넬에서의 처리는 이미 Hess and Smith[8] 프로그램에 포함되어 있으므로 여기서는 자세히 설명하지 않고, 다만 조파에 의해 유기되는 속도에 관해서만 다루기로 한다. 식 (7)의 Green 함수의 gradient를 취하면 유기속도는 다음과 같이 된다.

국부 파동항에 의한 유기속도 G_x^t 는 단순 소오스에 의한 속도와 비슷하게 비교적 완만히 변한다.

한편, 자유파동항에 해당되는 속도 성분 G_x^r 는 하루로 갈수록 일정한 주기로 진동하는 함수가 됨을 알 수 있다. 실제로 G^t 과 G^r 의 합은 전체적으로 완만히 변하는 연속함수가 되어야 한다.

그리고, Fig. 2와 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 G_x^t 는 상당히 매끄러운 곡선 형태를 나타내므로 1차 직선 보간법을 사용하였고, G_x^r 는 진동이 심한 형태를 나타내므로 한 과정에 8 내지 10개의 데이터가 들어가도록 하여 그 사이 값은 2차 포물선 보간법을 사용하여

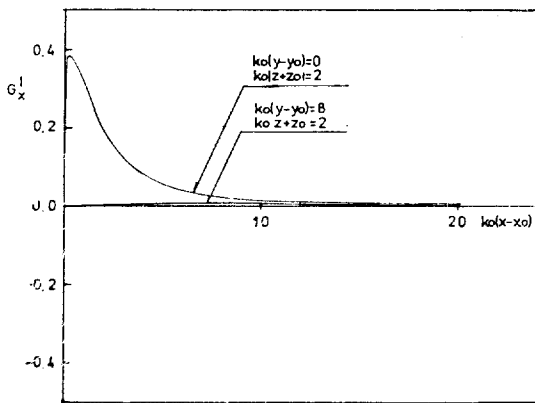


Fig. 2 Velocity components induced by local wave term

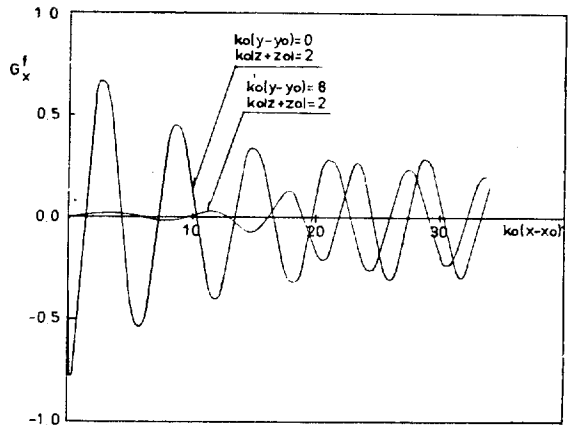


Fig. 3 Velocity component induced by free wave term

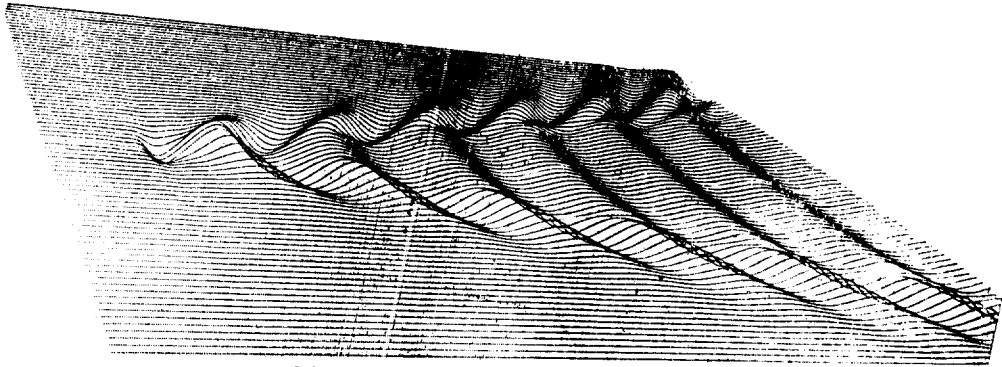


Fig. 4 Wave configuration Ak $k_0 z_0 = -2$

Table 1 Scheme of velocity components induced by local wave term (G^l)

	계산구간	간 격	계산점 갯수
$k_0(x-x_0)$	0~2	0.2	26
	2~10	1	
	10~30	5	
	30~90	20	
$k_0(y-y_0)$	0~2	0.2	21
	2~8	1	
	8~16	2	
$k_0 z+z_0 $	0~1	0.1	24
	1~5	0.5	
	5~15	2	

Table 2 Scheme of velocity components induced by free wave term (G^f)

	계산구간	간 격	계산점 갯수
$k_0(x-x_0)$	-13~89	1	103
$k_0(y-y_0)$	0~16	1	17
$k_0 z+z_0 $	0~2	0.2	16
	2~5	1	
	5~15	5	

Table 3 Sign of the gradients of Green function

$k_0(x-x_0)$	$k_0(y-y_0)$	G_x^f	G_y^f	G_z^f
+	+	+	+	+
+	-	+	-	+
-	-	-	-	+
-	+	-	+	+

$k_0(y-y_0)$	G_x^f	G_y^f	G_z^f
+	+	+	+
-	+	-	+

구하였다. 그리고, $k_0(x-x_0)$, $k_0(y-y_0)$ 가 음의 값을 가질 때는 Table 3과 같이 함수의 대칭성을 이용하였다.

x 방향의 유기속도 성분은 자유표면 경계조건에 의한 다음과 같은 파형으로 표현된다.

$$\zeta = -\frac{1}{k_0} G_x \tag{10}$$

참고로 $k_0 z_0 = -2$ 일 때의 파형을 Fig. 4에 나타내었다. 가로파와 발산파가 잘 나타나고 있다.

2-3. 수치 계산 방법

식 (3)의 적분 방정식을 해석하기 위하여 Hess & Smith[8]의 가정에 따라 선체 표면을 유한개의 파넬로 구분하고 각 파넬내에서의 소오스 세기 σ 는 일정한 것으로 가정하여 각 파넬중에 정의된 한 점(null point)에 대하여 선체표면 경계조건을 적용하면 식 (3)은 수치 계산이 용이한 선형 연립방정식이 되는데 이렇게 성립된 선형 연립 방정식의 kernel은 단위 소오스 세기에 의한 각 파넬의 null point에서의 유기 속도의 법선 방향 성분이 된다. 선 적분항은, 그 소오스 세기가 인접한 파넬의 소오스 세기와 같은 것으로 가정하여, 선형 연립방정식 중 수선을 따르는 소오스 세기를 따로 미지수로 처리하지 않고, 수선과 인접한 파넬에 의해 구분되는 각각의 분절된 수선에 의한 유기 속도 성분을 kernel 속의 각각의 인접한 파넬에 의한 유기 속도 성분에 더하여 kernel을 구성시켰다.

각 파넬에 의한 유기 속도 성분은 각각의 파넬 면적 요소 SQ 에 따른 적분이 수행되어야 하는데 본 계산에서는 파넬면 SQ 를 그 경사각에 따라 $x-y$ 또는 $x-z$

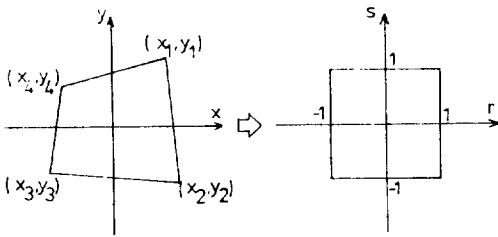


Fig. 5 Transform of $x-y$ plane to $r-s$ plane

평면상의 SQ' 를 Fig. 5에서와 같이 정사각형 평면으로 변환하였다.

좌표 변환은 다음의 관계식에 의해 이루어진다.

$$x = \sum_{i=1}^4 h_i(r, s) x_i$$

$$y = \sum_{i=1}^4 h_i(r, s) y_i \quad (11)$$

여기서, $h_1 = 1/4(1+r)(1+s)$, $h_2 = 1/4(1-r)(1+s)$, $h_3 = 1/4(1-r)(1-s)$, $h_4 = 1/4(1+r)(1-s)$ 이다. 그러던 점 P 에서의 파넬 SQ 에 의한 조파 유기 속도 성분은,

$$\vec{V}(p) = \int_{SQ} \nabla H \{P, Q(x_0, y_0, z_0)\} dSQ$$

$$= \frac{1}{\cos \gamma} \int_{SQ'} \nabla H \{P, Q(x_0, f(x_0, z_0), z_0)\} dx_0 dz_0$$

$$= \frac{1}{\cos \gamma} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \nabla H \{P, Q(\sum_{i=1}^4 h_i x_{0i}, f(\sum_{i=1}^4 h_i x_{0i}, \sum_{i=1}^4 h_i z_{0i}))\} \times |J| dr ds \quad (12)$$

여기서, $\vec{V}(p)$: null point P 의 유기 속도

$$H : G + G'$$

$$\frac{1}{\cos \gamma} : \sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z_0}\right)^2}$$

SQ' : SQ 의 x_0-z_0 평면의 투영면

$y_0 = f(x_0, z_0)$: SQ 의 평면 방정식

$$J : \frac{\partial(x_0, z_0)}{\partial(r, s)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_0}{\partial r} & \frac{\partial x_0}{\partial s} \\ \frac{\partial z_0}{\partial r} & \frac{\partial z_0}{\partial s} \end{vmatrix}$$

이다.

식 (12)의 적분을 수행하기 위하여 아래와 같은 Gauss 구적법을 이용하였다[13].

$$\frac{1}{4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 F(r, s) dr ds \approx \sum_{j=1}^4 w_j F(r_j, s_j) \quad (13)$$

$$\text{여기서, } \frac{(r_j, s_j)}{\left(\pm\sqrt{\frac{1}{3}}, \pm\sqrt{\frac{1}{3}}\right)} \frac{w_j}{\frac{1}{4}}$$

$$F = \frac{1}{\cos \gamma} \cdot \nabla H \cdot |J|$$

같은 방법으로 선적분항도 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$\int_{-1}^1 F(r) dr \approx \sum_{j=1}^3 w_j F(r_j) \quad (14)$$

여기서, $w_{1,2,3}$ 은 각각 $\frac{5}{9}, \frac{8}{9}, \frac{5}{9}$

$r_{1,2,3}$ 은 각각 $-\sqrt{\frac{3}{5}}, 0, \sqrt{\frac{3}{5}}$

2-4. 조파 저항 계산

Havelock의 결과에 따른 식 (4)를 수치 계산의 편이를 위해 $\lambda = \cos \theta$ 로 치환하고, $\lambda=1$ 일 때의 특이점을 제거해 주기 위하여 아래의 같이 변형하여 [12] 사용하였다.

$$R = 16\pi \rho k_0^2 \left[\int_1^\infty \left\{ (P^2(\lambda) + Q^2(\lambda)) \frac{\lambda^2}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} - (P^2(1) + Q^2(1)) \frac{\lambda e^{-(\lambda^2 - 1)}}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} \right\} d\lambda + (P^2(1) + Q^2(1)) \frac{-\sqrt{\pi}}{2} \right] \quad (15)$$

그리고 식 (5)의 진폭함수 $P(\theta)$, $Q(\theta)$ 중에서 선체 표면 S 에 대한 적분항은 각 파넬의 경사각에 따라 $x-z$ 평면 또는 $x-y$ 평면에 투영시켜 파넬면에 다른 적분을 수행하였는데 여기서 $x-z$ 평면에 투영시킨 진폭함수의 형태만 소개하면,

$$\frac{P(\theta)}{Q(\theta)} = \frac{1}{\cos \gamma} \int_{SQ'} \sigma \frac{\cos}{\sin} [k_0 \sec^2 \theta \{x_0 \cos \theta + (Ax_0 + Bz_0 + C) \sin \theta\}] \times e^{k_0 z_0 \sec^2 \theta} dx_0 dz_0,$$

$$\frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2}} \geq \frac{\sqrt{2}}{2} \text{일 때} \quad (16)$$

여기서, m, n : 파넬 SQ' 의 y, z 방향의 방향 여현

$y_0 = Ax_0 + Bz_0 + C$: 파넬의 평면방정식

으로 표현된다.

3. 계산 결과 및 고찰

본 계산에 사용된 선형으로는 Wigley's model, Series 60 (4210W) 선형, 그리고 대한조선공사에서 건조된 454,000cuft 냉동선이 채택되었으며, 본 냉동선에 대한 주요 치수는 Table 4에 나타내었다.

파넬의 갯수는 Wigley's model의 경우 흡수 방향으로 4개, 길이 방향으로 40개로 하여 전부 160개로 이루어

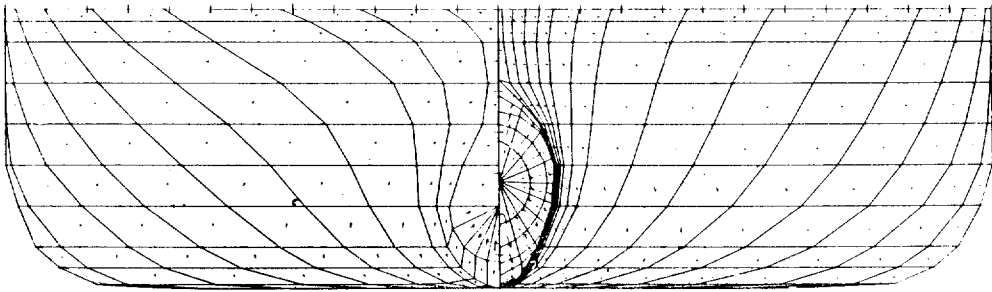


Fig. 6 Panel division and stream line of reefer vessel

Tbael 4 Main particulars of 454,000cuft reefer vessel

L.B.P. (M)	140.50
L.W.L. (M)	135.10
B (M)	24.00
D (M)	13.42
d (M)	6.80
DISPLACEMENT (M ³)	12850.00
WET. SURF. AREA (M ²)	3575.00
Lcb (%)	-0.9245
Cb	0.5605
Cp	0.5660

어렸으며, Series 60 선형의 경우는 흡수 방향으로 9개, 길이방향으로 20개로 하여 전부 180개로 이루어졌다. 실제적인 냉동선의 경우에는 선수미 부분의 곡부 형상에 따라 길이 및 흡수방향으로 파넬 갯수를 변화시켜 실제 형상을 충분히 반영시켜 주도록 하였으며, 특히 선수미 끝단은 4각형 파넬의 2점을 중복시켜 3각형 파넬로 처리하여 총 파넬 갯수를 320개로 하였다. 위의 세가지 대상선종 냉동선에 대한 선형 및 계산시 사용

된 파넬 구분 형태는 Fig. 6에 보였다.

소오스 세기가 각 파넬상의 null point에 집중되어 있다고 가정될 때 파넬상에 균일하게 분포되어 있다고 가정될 때와는 그 계산 결과에 있어서 상당한 차이가 있을 것으로 생각되어 본 계산에서는 파넬에 의한 유기 속도 성분 및 진폭 함수 계산시에 파넬면에 따른 적분을 수행하였다. 그리고 위의 두가지 방법에 대한 비교를 위하여 이중 모형항(G^d)만 사용하여 Wigley's model에 대하여 조파 저항값을 계산한 결과를 Fig. 7에 보였다.

도표를 통해 알 수 있듯이 높은 Froude 수에서는 두 값사이에 차이가 없으나 Froude 수가 작아질수록 큰 차이가 나고 있음을 알 수 있다. 이는 Froude 수가 작을수록 조파된 파의 파장이 짧아져 유기속도의 위치에 따른 상대적 변화가 심하기 때문이다.

따라서 집중된 소오스로 속도 계산 및 조파저항을 다루는 것은 저속에서 많은 오차가 발생된다.

세가지 선형종 Wigley's model과 Series 60(4210W) 선형에 대해서는 아래의 4가지 경우로 나누어 계산을 수행하여 주로 Neumann-Kelvin 문제중 선적분항의 기여도를 살펴보았다.

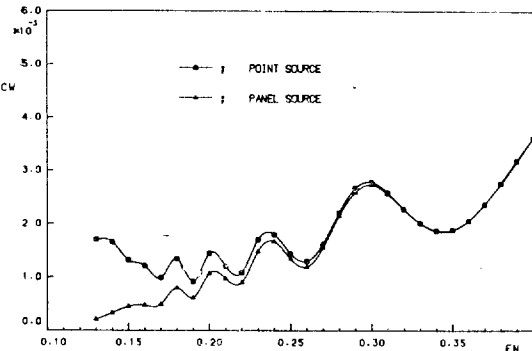


Fig. 7 Comparison of wave resistance coefficients calculated by point source and panel source for wigley model

(1) 이중 모형항 (G^d)만 사용하여 계산한 경우 (DOUBLE MODEL)

(2) 이중 모형항 (G^d), 자유파동항(G'), 곡부파동항(G'')을 모두 고려하여 소오스 세기 및 진폭 함수 계산시 선적분항이 무시된 경우 (N-K W/O L.I.)

(3) 소오스 세기 결정시에는 선적분항이 무시되나, 진폭함수 계산시에는 선적분항이 포함된 경우 (N-K W/ L.I. (APP))

(4) Neumann-Kelvin 문제를 엄밀하게 계산한 경우 (N-K W/ L.I.)

Wigley's model의 경우 길이에 따른 소오스 세기의 변화를 Froude 수 0.25에서 계산한 결과를 Fig. 8에

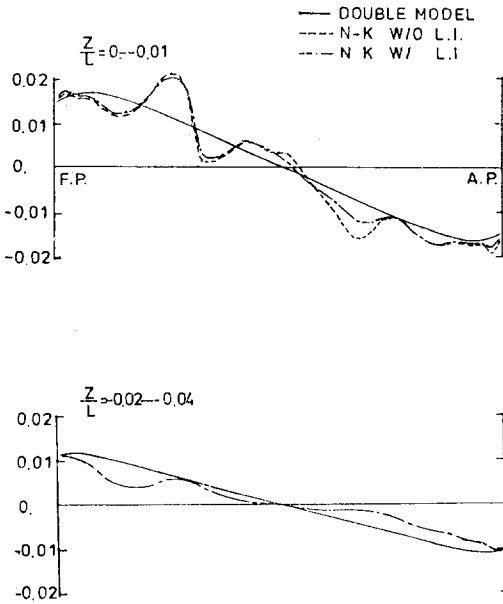


Fig. 8 Source strength of wigley model at $fn=0.25$

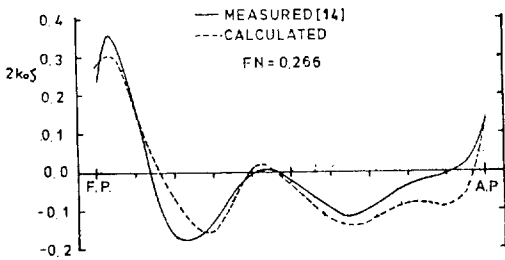


Fig. 9 Wave profile of wigley model

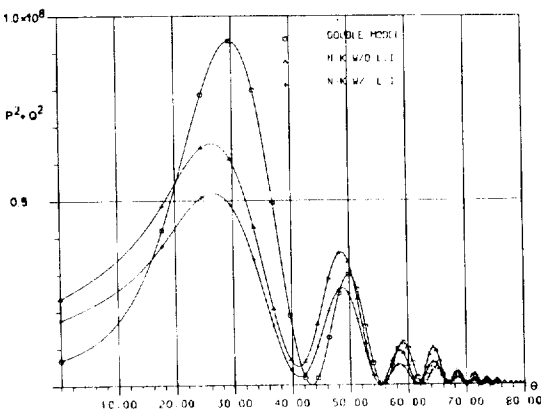


Fig. 10 Wave spectrum of wigley model at $fn=0.25$

나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 조파효과가 고려되었을 때와 이중모형으로 계산된 결과와는 많은 차이가 났으며, 그 효과는 자유표면에 근접할수록 더 크

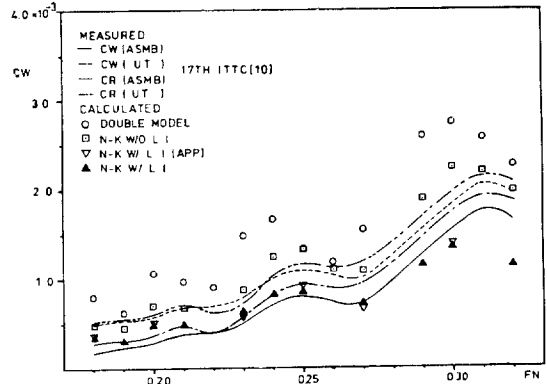


Fig. 11 Comparison of calculated and measured wave resistance coefficients of wigley model

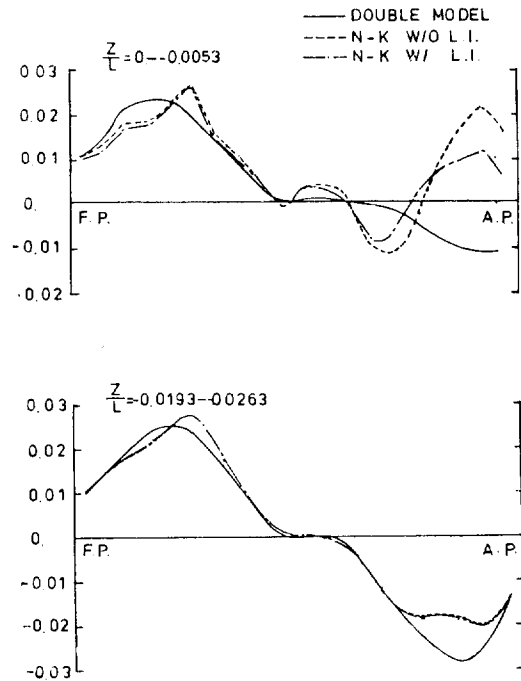


Fig. 12 Source strength of series 60 at $fn=0.25$

게 나타난다.

이 경우 선적분항의 영향은 크지 않았다.

Fig. 9에는 Froude 수 0.266에서 선적분항이 없이 계산된 파형을 실험치와 비교하였다. 실험치에 상당히 근접한 결과를 보여 주고 있다.

Fig. 10에는 Froude 수 0.25에서의 진폭함수 값을 나타내었다.

DOUBLE MODEL, N-K W/O L.I., N-K W/ L.I. 순으로 그 값이 감소하였으며, 위상은 거의 변화가 없

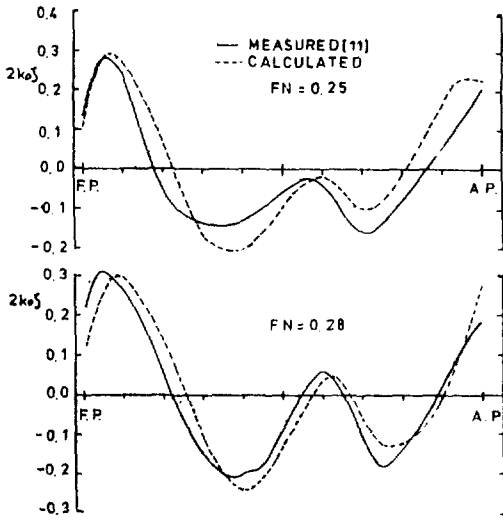


Fig. 13 Wave profile of series 60

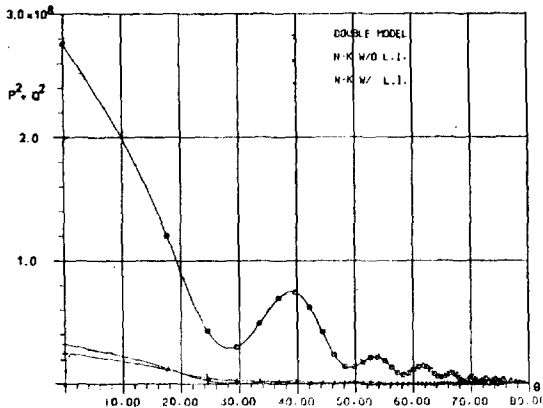


Fig. 14 Wave spectrum of series 60 at fn=0.25

었다. 조파저항 값도 감소하는 경향을 나타낼 것으로 유추할 수 있다.

Fig. 11에는 위의 4가지 경우에 대해 계산된 조파저항 계수값을 비교하였다. 이중 모형으로 계산하였

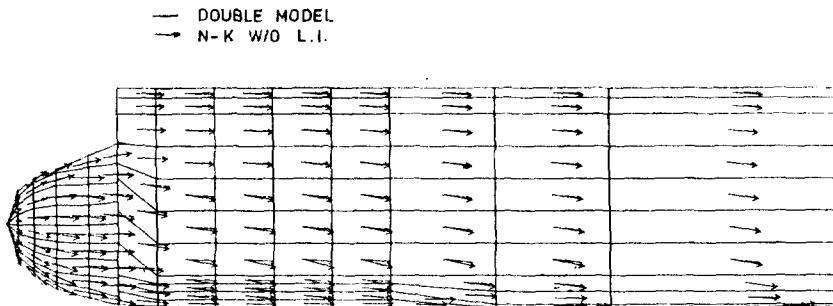


Fig. 16 Streamlines calculated by double model and Neumann-Kelvin theory

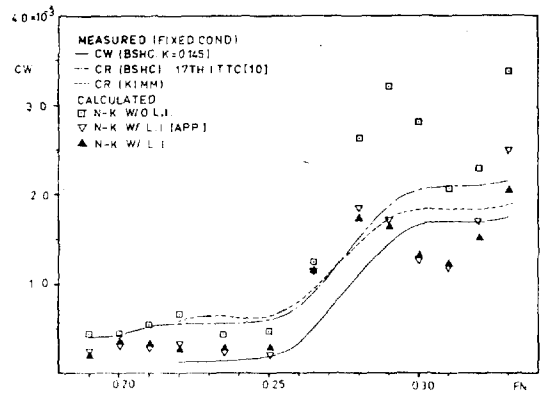


Fig. 15 Comparison of calculated and measured wave resistance coefficients of series 60 (4210W)

을 경우 보다 조파효과, 선적분항의 영향을 첨가할수록 그 값이 감소하면서 실험치에 접근하였다. 특히 선적분항을 고려하였을 경우에는 상당히 실험치에 가까운 결과를 나타내었으며, N-K W/ L.I.(APP)와 N-K W/ L.I.의 두 값 사이에는 큰 차이가 나지 않았다.

실제 선형에 가까운 Series 60 (4210W) 선형에서는 일반적으로 조파효과 및 선적분항의 영향이 Wigley's model에서 보다 강하게 나타났다.

Fig. 12에는 Froude 수 0.25에서 소오스 세기의 변화를 보였다. 조파효과를 고려했을 때는 이중 모형으로 계산되었을 때와 많은 차이를 나타내었으며, 특히 선미부에 강한 소오스가 나타난 것이 특징이었다.

Fig. 13는 Froude 수 0.25와 0.28에서 계산된 파형으로서 각각 실험치와 비슷한 경향을 보여 주고 있다.

Fig. 14는 Froude 수 0.25에서의 진폭함수 값으로서 조파효과를 고려하였을 때가 이중 모형으로 계산되었을 때 보다 훨씬 적은 값을 보였으며, 이러한 경향은 Wigley's model에서 보다 더 크게 나타났다.

Fig. 15에는 계산된 조파저항 값을 비교하였다.

Wigley's model에서 보다 선적분항의 영향이 더 크게 나타나고 있으며, N-K W/ L.I. (APP)와 N-K W/ L.I. 값 사이에는 Wigley's model에서의 경우와 마찬가지로 큰 차이가 나지 않았다. 선적분항이 고려되었을 때가 실험치와 가장 근접하였는데, 비록 계산치에 hollow, hump의 경향은 크게 나타났으나 그 값들의 전체적인 크기는 비교적 실험치에 접근하고 있음을 보여 주고 있다. 그리고 Fig. 16에는 도시되지 않았지만 DOUBLE MODEL의 경우에는 위 세가지 경우의 계산결과에 비해 상당히 큰 값을 나타내었다.

이상의 2가지 선형에 대한 계산 결과를 보면 DOUBLE MODEL로 계산하였을 때 보다 조파효과 및 선적분항을 고려했을 때가 점점 실험치에 근접했으며, N-K W/ L.I. (APP.)와 N-K W/ L.I.와의 결과 사이에는 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있었다.

N-K W/ L.I.(APP.)와 N-K W/ L.I. 사이에 큰 차이가 나지 않은 것은 소오스 세기 결정시에 선적분항의 영향이 각 파면의 소오스 세기에 큰 영향을 미치지 않았기 때문이라 생각되는데, 이것은 본 연구에서 인접한 파면간의 소오스 세기들은 크기에서 서로 큰 차이가 나지 않고 연속적으로 분포된다는 점에 착안하여, 수선상의 소오스 세기와 인접한 파면의 소오스 세기를 같다고 가정할때서 연유한다고 생각된다.

그러나 제 2종 Fredholm적분방정식 해석시 수선상의 소오스 세기를 미지수로 처리하게 되면 수선상의 소오스가 실제로 자유표면상의 소오스임에도 불구하고, 물체 표면 경계 조건을 만족시켜야 하는 무리가 따르게 된다. 그러므로, 앞으로 선적분항의 효과적인 처리에 대한 연구가 더 필요하다고 생각된다.

위의 2가지 선형에 대한 계산결과 들에 의하면 N-K W/ L.I.와 N-K W/ L.I. (APP.)와의 결과 사이에는 큰

차이가 나지 않으므로 실제 선형에서는 N-K W/ L.I. (APP.)의 방법을 사용해도 무리가 없을 것으로 판단하고, Table 3의 냉동선에 대해 N-K W/ L.I. (APP.)로 계산한 조파저항 값을 Fig. 17에 실험치와 같이 도시하였다.

계산치의 경우 실험치에 비해 hollow, hump의 경향이 상당히 크게 나타났지만, 전체적인 값의 크기는 실험치에 비교적 근접한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 16에는 냉동선 선수 부분에 대하여 이중 모형으로 계산했을 때와 Froude 수 0.269에서 조파효과를 고려하였을 때의 유선을 도시하였다.

Bulb를 통과한 유선이 큰 차이를 나타내었으며, 자유 표면 부근에서도 약간의 차이를 보이고 있다. 실제로 자유 표면에 근접할수록 큰 차이가 나타나 예상하였는데 계산 결과는 그렇지 못한 값을 보이고 있다. 이것은 본 선형이 실제 상선의 범위에서 상당히 고속이고 세장한 선형이어서, 일반적으로 파형이 선수에서 파편이 발생하여 선미까지 긴 파장으로 형성되므로 유선의 경사각이 심하지 않았기 때문으로 추측된다.

4. 결 론

본 논문의 방법으로 Wigley's model, Series 60 (4210 W), 454,000 cuft 냉동선등의 3가지 선형에 대해 소오스 세기, 파형, 진폭함수, 조파저항 계수등을 계산한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 선적분항의 효과가 소오스 세기에는 별로 큰 영향을 미치지 않았으나, 진폭함수 및 조파저항 계산시에는 상당한 영향을 미쳤다. 이와같은 이유로 Neumann-Kelvin 문제의 엄밀한 해석을 통한 방법과 소오스 세기 계산시에는 선적분항을 포함시키지 않고 진폭함수 계산시에만 선적분항을 고려하여 계산한 방법에 의한 결과가 비슷하게 나타났으며, 실제 선형에서는 후자의 방법을 사용하는 것도 유용할 것으로 생각된다.

둘째, 조파저항 값은 수학선형인 Weigley's model의 경우에는 계산치가 실험치에 비교적 일치하고 있으나, Series 60, 냉동선등 실험에서는 계산치가 실험치보다 hollow, hump의 경향이 크게 나타났다. 그러나, 그 값들의 전체적인 크기는 비교적 일치하고 있다. 계산치에 나타난 hollow, hump 경향은 선미부 점성유동의 효과를 고려하지 못했기 때문이라고 추측되는데 앞으로 이러한 점성효과를 고려한 연구가 계속되는 것이 바람직한 것으로 생각된다.

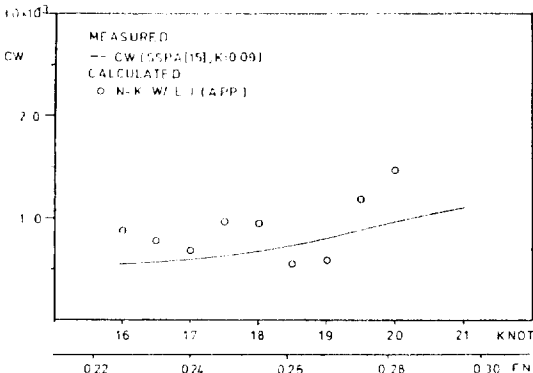


Fig. 17 Calculated and measured wave resistance coefficients of 454,000cuft reefer vessel

셋째, 본 연구를 통해 완성된 프로그램으로 부터 구해진 유선, 파형 및 조파저항 값들은 비록 실험치와 경량적으로 잘 일치하지 않지만, 그 값들의 정성적인 경향을 파악하여 실제 선형에 적용한다면 조파 선형선계에 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

끝으로, 본 연구는 대한조선공사 연구개발과제로 수행되었음을 밝히며, 본 연구가 수행될 수 있도록 많은 도움을 주신 대한조선공사 설계실의 김근배 상무님 그리고 수치계산 과정에서 도움을 주신 봉유중씨 및 여러 실원들에게 깊은 감사사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Maruo, "Challenge to Better Agreement between Theoretical Computations and Measurements in Ship Hydrodynamics", The 6th David Taylor Lecture Note, DTNSRDC-80/046, Aug., 1980.
- [2] R. Brard, "The Representation of a Given Ship Form by Singularity Distributions when the Boundary Condition on the Free Surface is Linearized", *J.S.R.*, Vol. 16, 1972.
- [3] E. Baba and K. Takekuma, "A Study on Free-Surface Flow around Bow of Slowly Moving Full Forms", *J.S.N.A.*, No. 137, 1975.
- [4] R. Guilloton, "L' tude Theorique du Bateau en Fluid Parfait", *Bull. Assoc. Tech. Mar. Aeronaut.*, Vol. 65, 1965.
- [5] 좌순원, "선체 표면 특이점 분포에 의한 조파저항 계산에 관한 연구", 인하대학교 공학석사 학위논문, 1983.
- [6] 양승인, "선박의 정수중 추진 성능 해석 및 최적 선형선계에의 응용", 대한조선학회지, 제22권, 제 2호, 1985.
- [7] H.T. Shen and C. Farrell, "Numerical Calculation of the Wave Integrals in the Linearized Theory of Water Waves", *J.S.R.*, Vol. 21, No. 1, 1977.
- [8] J.L. Hess and A.M.O. Smith, "Calculation of Nonlifting Potential Flow about Arbitrary Three Dimensional Bodies", *J.S.R.*, Vol. 8, No. 2, 1964.
- [9] N. Ishii, I. Tanaka and A. Kimura, "Neumann-Kelvin 造波 問題の實用船型數値解析", 관서조선학회지, 제189호, 1983.
- [10] H. Kajitani, On the Global Data of ITTC Cooperative Experiments, Meeting Report, 1985.
- [11] 강신형 외, "저항 성분 측정에 의한 선형개발법 연구", 한국기계연구소연구보고서, UDC 629.11, 1928.
- [12] 강신형, "얇은 배에 대한 고차 조파저항 계산", 대한조선학회지, 제16권, 제 3호, 1979.
- [13] M. Abramowitz and I.A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, U.S. Gov. Print. Off., 1964.
- [14] Proceedings of the Workshop on Ship Wave Resistance Computation, DTNSRDC, 1979.
- [15] Reefers for Salen; Self Propulsion and Resistance Tests, Report 2741-4, SSPA, 1982.