

船波分析의 一實驗的方法

金 燾 喆* F. C. Michelsen**

An Experimental Method of Ship Wave Analysis

By

Hun Chol Kim* and F. C. Michelsen**

Abstract

The longitudinal cut method of experimental ship wave analysis, originally developed by J.N. Newman, is presented using autocorrelation function of aperiodic functions. The result on a C-201 model is presented and various plausible sources of error are discussed. A further use of autocorrelation function and crosscorrelation function when two wave systems are superposed is indicated.

1. 序 言

배의 造波抵抗은 從來 剩餘抵抗의 一部로서 그 統合的 結果인 抵抗値만이 論議되어 왔던것이 요즈음 特히 1963年 미시간大學校에서 열린 International Seminar on Theoretical Wave Resistance[1] 以後에 이르러 船型과 抵抗値의 中間役割을 하고 抵抗의 直接原因이 되는 波形自體에 對한 研究가 활발하여졌다. 이는 抵抗値를 求하는데 그 目的이 있을 뿐만 아니라, 波形의 成分을 分析해 내고 그 成分과 船型 또는 船型의 一部와의 因果關係를 찾아 그를 利用하여 最少抵抗船型을 얻는데에 그 목표가 있다고 본다. 日本東京大學의 Inui 教授가 Bulbous Bow Ship에 成功했던 것도 從來에 써오던 Bulb와 그 理論에 따르는 波形成分の 相殺性을 바로 利用할 수 있었다고 말할수 있고 그의 成功과 그의 主張[2]이 오늘날 활발해진 波形分析法에 크게 影響을 남겼다고 보아야겠다. 이 分析法은 널리 퍼져서 많은 곳에서 여러사람들에 依해서 研究되고 있고 代表的으로는 독일의 Eggers와 Sharma[1], 美國의 Newman[1], Pien[1], Shore[1] 및 Ward[1], 英國의 Gadd and Hogben[1], 日本의 Inui, Kajitani[1], Taniguchi[3] 및 Ikehata[4] 등이 있다.

여기에서 이들의 共通點을 찾는다면 波形分析法에서는 船波를 우선 하나의 주어진 事實(*fait accompli*)로서 인

接受日字 1968年 11月 1日

* 正會員, 韓國科學技術研究所(造船海洋技術研究室)

** Guest, Professor, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, Mich., U.S.A.

정하는 것이다. 다시 말하면 배가 물위를 갈때는 반드시 波動이 뒤를 따르고 여기에서 말하는 造波抵抗이란 定義에 의하여 이 實流體表面上에 남겨지는 波動에 의하여 定하여진다는 것이다. 우리가 오늘날 쓸수있는 理論이란 그와는 달리 Potential theory에 의해서만이 어느 程度 說明을 할수있고 거기에서 定義되는 造波抵抗이란 위의 것과는 약간다른것임을 지적하지 않을 수 없다. 물론 Potential theory 中에서도 數學的 表現方法이나 理論의 精度에 따라 相當한 差가 있을 뿐만 아니라 그 理論等を 實流體에 適用하는 데에서 오는 方法的差에 의하여 여러가지 “理論”이라 불려지는 學說이 있으며 著者等은 前에 이에 關하여 解說을 한바 있으나 여러學說中에서 優良을 가려내는 것은 어느것이나 一長一短이 있음으로서 그 學說들을 全部 한번씩이라도 써보지 않고서는 어려운 點이었다. 우선 理論에서 共通性이 있는 가정을 나열하면

- (1) 流體는 非粘性이고 流體運動은 非廻轉의이다.
 - (2) 自由表面에서는 境界條件은 線型化해서 생각한다.(大部分의 學說이)
 - (3) 流體運動은 不變하다(steady).
 - (4) 波形測定은 隣近波(local wave 局部攪亂波)의 영향을 무시할수 있는 곳에서 行한다.
- 등의 넷으로 이야기할 수 있는데 어디거나 實驗을 하려면 거의 조금씩은 위의 條件들을 위반하게되나 一般 Towing Tank에서는 마지막 조건이 더욱 문제시된다.

앞서 말한바와 같이 여러가지 理論들이 있는데 對照하는 目的으로서 다음 表를 소개한다. 자세한 것은 著者들의 前論文[5]을 參考하기 바란다.

第 1 表 波形分析法

觀測方法에 依한 區分	分析成分에 依한 區分	測定計機에 依한 區分
1. 縱方向波形(Longitudinal Cut) 2. 橫方向波形(Transverse Cut) 3. 縱橫混成(Hybrid) 4. 立體寫眞法(Stereophotogrammetrical)	1. 傾斜方向(角)에 依하여 表示되는 振幅相關函數. 2. 波長 또는 Wave Number에 依하여 表示되는 振幅相關函數 3. 週期關係(Phase relationship)에 依하여 表示되는 相關函數	1. 浮力을 利用한 機械的 장치. 2. 電氣抵抗을 利用한 장치. 3. 電氣容量(Capacitance)을 利用한 장치. 4. 舊波反射를 利用한 장치. 5. 水壓變化를 利用한 장치. 6. 寫 眞

여기서는 주로 J.N. Newman[1]의 理論에 기준한 Longitudinal Cut Method를 發展시킨것을 소개하려고 한다. 分析成分은 週期關係라 말할수있고 測定計機로는 Capacitance probe[6]를 썼다. 이 方法은 觀測方法이 簡單한 長點이 있으며 자세한것은 뒤로 미루겠다.

2. 縱方向波形과 造波抵抗의 關係에 對한 理論

배가 水面을 一定한 速度 c 로써 달린다하자. 座標系를 그림과 같이 擇하고 船型이 어떤 Source distribution

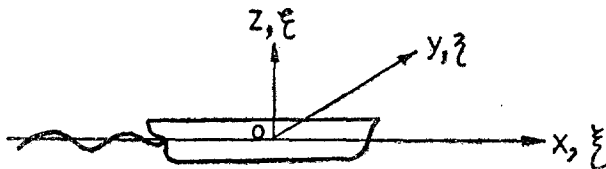


Fig. 1 Coordinate System

$\gamma(\xi, \eta, \zeta)$ 로서 表示된다고 하자. 그러면 어느一般點 (x, y, z) 에서의 Potential 은 Green's function 을 써서(7)

$$\phi(x, y, z) = \int_S \gamma(\xi, \eta, \zeta) G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) ds \quad (1)$$

단: S 는 $f(\xi, \eta, \zeta) = 0$ 인 船體 浸水表面을 말하며 ds 는 S 上의 單位面積이다.

線型適用을 가정하고 波高의 式은

$$\begin{aligned} \zeta(x, y, 0) &= \frac{c}{g} \left[\frac{\partial \phi(x, y, z)}{\partial z} \right]_{z=0} \\ &= \frac{c}{g} \int_S \gamma(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial G(x, y, 0; \xi, \eta, \zeta)}{\partial z} ds \end{aligned} \quad (2)$$

단: g 는 重力常數이다.

이에 依한 造波抵抗은 잘 알려져 있는바와 같이

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

단: ρ 는 流體密度이며

$$k_0 = g/c^2 \text{ 이고}$$

$$P(\theta) + iQ(\theta) = \int \int_S \gamma(\xi, \eta, \zeta) \exp[k_0(\zeta \sec^2 \theta + i\xi \sec \theta + i\eta \sec^2 \theta \sin \theta)] ds \quad (4)$$

$$\begin{aligned} G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) &= \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{4k_0}{\pi} \int_0^{\pi/2} d\theta \int_{0(\epsilon)}^{\infty} e^{k(z+\zeta)} \\ &\quad \frac{\cos[k(x-\xi)\cos\theta] \cos[k(y-\eta)\sin\theta]}{k \cos^2\theta - k_0} dk \\ &\quad + 4k_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sec^2\theta e^{k_0(z+\zeta)\sec^2\theta} \sin[k_0(x-\xi)\sec\theta] \cos[k_0(y-\eta)\sin\theta \sec^2\theta] d\theta \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{단: } R_1^2 = (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2$$

$$R_2^2 = (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\zeta)^2$$

Contour integration $\int_{(\epsilon)}$ 에는 特別한 注意가 必要하다.

(5)를 (2)에 代入하여 波高의 式을 求하고 이것을 Fourier 變換하면 다음이 求해진다.

$$\begin{aligned} &\int_{-\infty}^{\infty} \zeta(x, y) e^{i\lambda x} dx \\ &= \frac{4\pi\lambda^2}{k_0 c \sqrt{\lambda^2 - k_0^2}} \int_S \gamma(\xi, \eta, \zeta) e^{i\lambda\xi + \frac{\lambda^2}{k_0} \zeta + i\lambda(y-\eta) \sqrt{\lambda^2/k_0^2 - 1}} ds \end{aligned} \quad (6)$$

(4)와의 關係에서

$$P(\theta) + iQ(\theta) = \frac{c \sin \theta \cos \theta e^{-ik_0 y \sec^2 \theta \sin \theta}}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(x, y) e^{ik_0 \sec \theta x} dx \quad (7)$$

따라서,

$$\begin{aligned} &P^2(\theta) + Q^2(\theta) \\ &= \frac{c^2}{16\pi^2} \sin^2 \theta \cos^2 \theta \left\{ \left[\int_{-\infty}^{\infty} \zeta(x, y) \cos(k_0 x \sec \theta) dx \right]^2 \right. \end{aligned}$$

$$+ \left[\int_{-\infty}^{\infty} \zeta(x, y) \sin(k_0 x \sec \theta) dx \right]^2 \quad (8)$$

이것을 (3)에 代入하면

$$\begin{aligned} R_w &= \frac{\rho g k_0}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(x, y) dx \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(\xi, y) d\xi \int_0^{\pi/2} \sin^2 \theta \sec \theta \cos[k_0(x-\xi) \sec \theta] d\theta \\ &= \frac{\rho g k_0}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(x, y) \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(\xi, y) K[k_0(x-\xi)] dx d\xi \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{단: } K(z) = \int_0^{\pi/2} \sin^2 \theta \sec \theta \cos(z \sec \theta) d\theta \quad (10)$$

위가 Newman 에 依하여 求해진 式이다.

이 式은 보기보다 그 계산에 힘이 들므로 다음 方法을 써서 轉換한다.

$$x - \xi = \tau; \quad x = \xi + \tau; \quad dx = d\tau$$

로 놓으면 (9)는

$$R_w = \frac{\rho g k_0}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(k_0 \tau) \left[\int_{-\infty}^{\infty} \zeta(\xi, y) \zeta(\xi + \tau, y) d\xi \right] d\tau$$

[] 안은 統計學에서 aperiodic function 의 Auto-correlation function 이므로 그 定義에 따라

$$R_w = \frac{\rho g k_0}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{11}(\tau) K(k_0 \tau) d\tau \quad (11)$$

$$\text{단: } \varphi_{11}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(\xi) \zeta(\xi + \tau) d\xi \quad (12)$$

그런데 $\varphi_{11}(\tau)$ 와 $K(k_0 \tau)$ 函數들은 둘다 τ 에 對하여 對稱函數이므로

$$R_w = \frac{2\rho g k_0}{\pi} \int_0^{\infty} \varphi_{11}(\tau) K(k_0 \tau) d\tau \quad (13)$$

(10)의 K -函數는 Newman 에 依해서 주어졌으며 原點에서는 log 函數 비슷하고 한번만 계산하면 되며, 船型이나 縱方向波高測定位置(Transverse location of longitudinal cut)에 관계가 없고 주어진 速度만의 函數이다.

그러므로 (13)을 보면 알수있는 바와 같이 오직 $\varphi_{11}(\tau)$ 函數만이 船型의 특징을 포함하고 있다. 따라서 앞으로 $\varphi_{11}(\tau)$ 函數에 對한 기대가 크다고 할수 있다.

여기에서의 Auto-correlation function 은 Random function 이나 periodic 또는 aperiodic function 에 對하여 비슷하게 定義되며 잘 研究되어 있다[8].

(1) 振幅 Spectrum 이 같고 週期 spectrum 이 다른 두 函數는 같은 φ_{11} 을 갖고 있다.

(2) $\varphi_{11}(\tau) = \varphi_{11}(-\tau)$ 即 對稱函數이다.

(3) $\varphi_{11}(0) > \varphi_{11}(\tau)$ ($\tau \neq 0$) 即 極大値는 반드시 τ 가 零에서 있다.

(4) Random 函數이고 d-c 나 週期波를 포함하지 않은 函數는 반드시 $\varphi_{11}(\infty) = 0$ 에 수렴한다.

종합하여 말하면 縱方向의 波高 $\zeta(x)$ 를 實驗에 依하여 求하고 (12)에 따라 Auto-correlation function 을 求한 후 (13)의 적분을 하면 造波 저항을 求할수 있다. 方法과 式들이 간단하므로 實驗하기에 알맞다고 볼수 있다.

3. 實 驗

縱方向波高를 求하는 가장 쉬운 方法은 船型의 進路에서 橫方向으로 약간 떨어진 固定된 點에서 波高 即 水面

의 變化를 船型(實船이라도 可能)이 지나감에 따라 時間的 記錄으로 求하고 船型의 速度에 따라 이 時間的 記錄을 縱方向길이에 對한 기록으로 바꾸는 것이다. 여기에서 使用했던 計機는 水面의 上下運動에 따른 Capacitance의 變化를 測定한것으로서 Enamel wire (2mmφ 程度)에 적당한 기름을 바른 것으로서 linearity는 좋으나 Wetting(물이 wire에 묻는것) 때문에 週期性性能은 4 Hz 以下로 되어있다. 그래도 約 80 mm 程度의 測定범위에서 3 mm 程度의 精確성을 갖고있다. Capacitance는 Capacitance bridge에 의하여 Autobalance 回路에 의하여 tape나 종이에 기록한 것으로서 後에 digitize하거나 손으로 읽어서 數值化하여 計算에 쓴다.

이 實驗에 使用되었던 船型은 Takahei에 의하여 얻어진 C-201(Cosine ship)으로서 길이가 12 ft, 넓이 17.4 inch 이고 水線은 Sine 曲線 비슷한 數學的 船型이다. 第2圖에 거기에서 얻어진 波高들을 보인다. Cut 란 가장 위 것이 中央線에서 $13\frac{5}{8}$ in. 떨어져있고 各各 3 in. 씩 떨어져서 구한것이다. 전부 一定速度 6.5 ft/sec 때의 것들이다. 第2表에 變위의 기록에 해당하는 波高를 보인다.(이 表에서는 船首에 x軸의 原點이 있다).

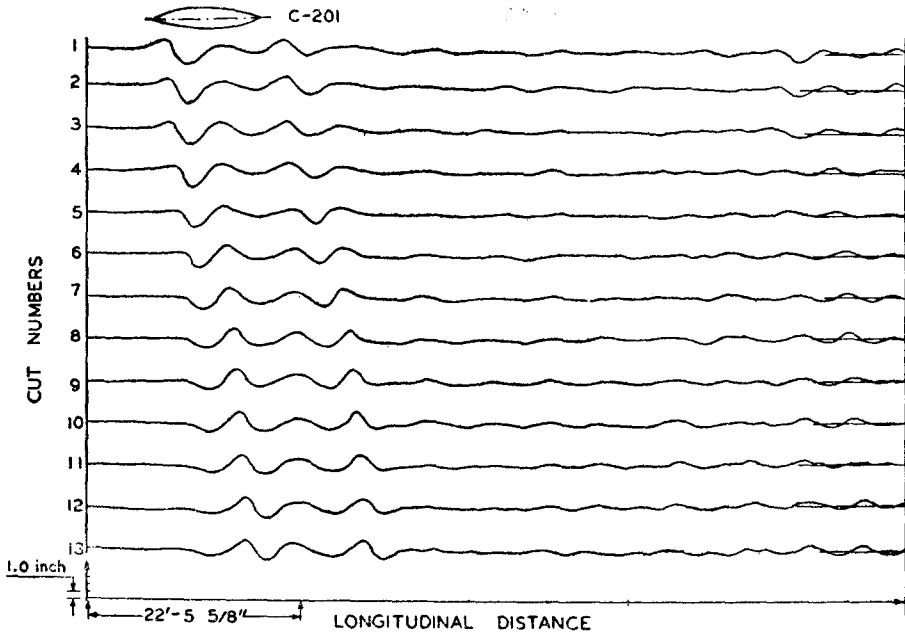


Fig. 2 Trace from Photograph Showing Wave Profiles for Various Lateral Position of Logitudinal Cuts for C-201 Model at a Constant Speed of 6.5 ft/sec. (Top record is near the Hull. Approximate Size and Location of the Model is shown on upper left corner).

第3圖는 Cut No. 1에 對한 $\varphi_{11}\left(\frac{x}{L}\right)$ 이고 第4圖는 Cut No. 3에 對한 것이다. 비슷하게 보이는 波高에서 아주 모양이 다른 $\varphi_{11}\left(\frac{x}{L}\right)$ 이 나타나는 이유는 아직 찾지 못했다. $\varphi_{11}\left(\frac{x}{L}\right)$ 의 계산은 第2表와 같은 경우에는 다음식을 쓰면 된다[8].

$$\varphi_{11}\left(\frac{x}{L}\right) \approx \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^{N-m} y_n y_{n+m} \quad (14)$$

단: y_0, y_1, y_2, \dots 는 波高의 表와 같은 數值들이다.

(13)의 計算에서 $K(z)$ 函數는 z 가 零일때 無限대가 되므로 計算에 注意가 必要하다. 그래서

第 2 表

STA	X/L	WAVE HT/1	WAVE HT
1	-.3870E-01	.1000E-02	.0000E-00
2	-.2810E-01	.11947E-03	.3100E-02
3	-.1810E-01	.35586E-03	.2600E-01
4	-.8390E-02	.23194E-02	.3800E-01
5	.0770E-01	.34722E-02	1.1000E-01
6	.1220E-01	.59444E-02	.1720E-01
7	.2220E-01	-.69444E-02	-.2000E-01
8	.3220E-01	-.68972E-02	-.1900E-01
9	.4200E-01	-.19792E-02	-.5700E-01
10	.5200E-01	.34722E-02	1.1000E-02
11	.6200E-01	.29167E-02	.7400E-01
12	.7200E-01	.69444E-03	.2000E-01
13	.8200E-01	-.97222E-03	-.2800E-01
14	.9200E-01	-.23633E-02	-.6000E-01
15	.1020E-01	.52083E-03	.1500E-01
16	.1120E-01	.67114E-02	.1430E-01
17	.1220E-01	.19792E-02	.5700E-01
18	.1320E-01	-.31944E-02	-.9000E-01
19	.1420E-01	-.19037E-02	-.5500E-01
20	.1520E-01	.92278E-03	.2600E-01
21	.1620E-01	.27033E-02	.7800E-01
22	.1720E-01	.25694E-02	.7400E-01
23	.1820E-01	.10069E-02	.2900E-01
24	.1920E-01	-.11417E-03	-.3400E-01
25	.2020E-01	-.83333E-03	-.2400E-01
26	.2120E-01	-.79861E-03	-.2300E-01
27	.2220E-01	-.69444E-04	-.2000E-01
28	.2320E-01	.65972E-03	.1900E-01
29	.2420E-01	.72917E-03	.2100E-01
30	.2520E-01	.21139E-02	.5800E-01
31	.2620E-01	.27778E-03	.8000E-01
32	.2720E-01	-.58194E-03	-.1100E-01
33	.2820E-01	-.76549E-03	-.2200E-01
34	.2920E-01	-.31250E-03	-.9000E-01
35	.3020E-01	.11417E-03	.3000E-01

$$\int_0^{\infty} \varphi_{11}(\tau) K(k_0\tau) d\tau = \lim_{\epsilon_1 \rightarrow 0} \varphi_{11}(\epsilon_1) \cdot \frac{1}{k_0} \int_0^{\epsilon_1} K(z) dz + \lim_{M \rightarrow \infty} \int_{\epsilon_1}^M \varphi_{11}(\tau) K(k_0\tau) d\tau + \lim_{M \rightarrow \infty} \int_M^{\infty} \varphi_{11}(\tau) K(k_0\tau) d\tau \quad (15)$$

를 利用했다. 그러면 마지막 積分은 $\varphi_{11}(\tau)$ 이 아주 적은 범위에서는 무시하고

$$\int_0^{\infty} \varphi_{11}(\tau) K(k_0\tau) d\tau \approx \lim_{\epsilon_1 \rightarrow 0} \varphi_{11}(\epsilon_1) \int_0^{\epsilon_1} (1 + \gamma + \log \frac{1}{2} z) dz + \lim_{M \rightarrow \infty} \int_{\epsilon_1}^M \varphi_{11}(\tau) K(k_0\tau) d\tau \quad (16)$$

$$\approx \lim_{\epsilon_1 \rightarrow \infty} \varphi_{11}(\epsilon_1) \int_0^{\epsilon_1} \left[-\epsilon_1 \log \frac{\epsilon_1}{2} - \gamma \epsilon_1 \right] d\epsilon_1 + (\text{둘째 積分}) \quad (17)$$

단 : $\gamma = .57722$

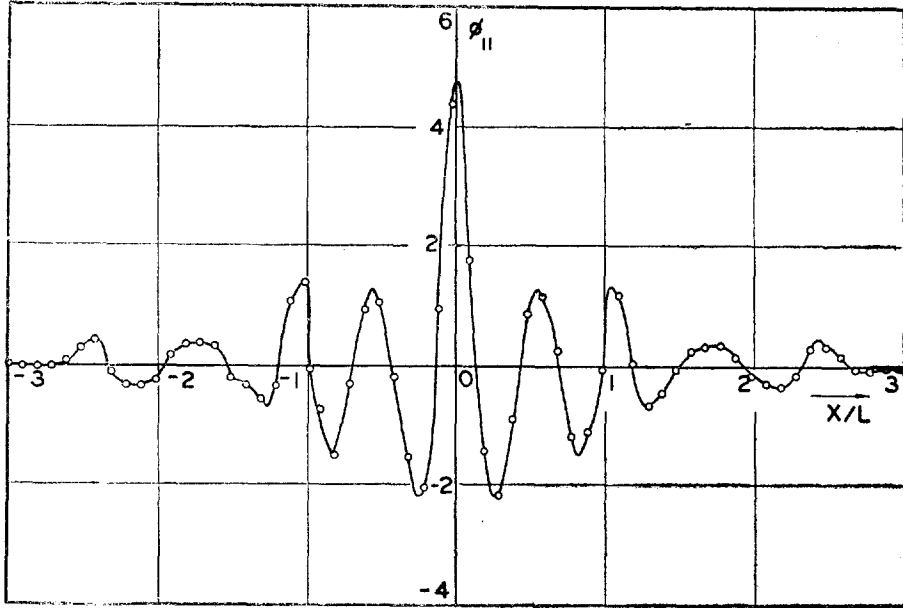


Fig. 3 Autocorrelation Function for Cut No. 1.

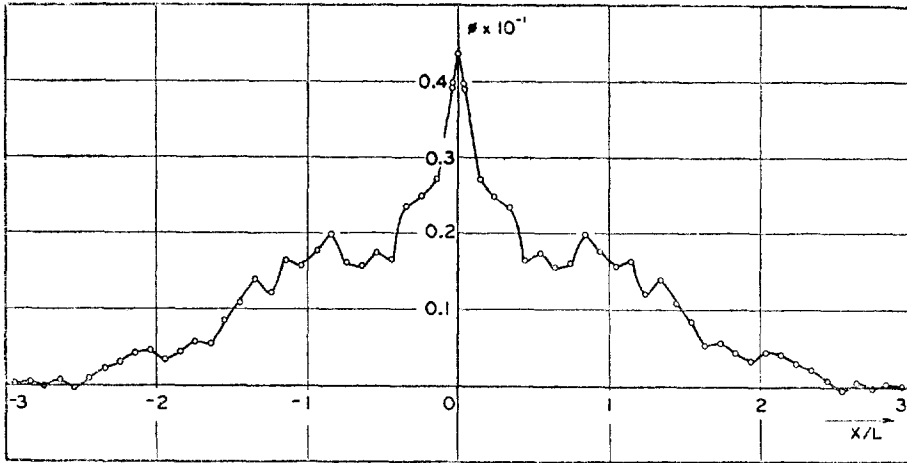


Fig. 4 Autocorrelation function for Cut No. 3.

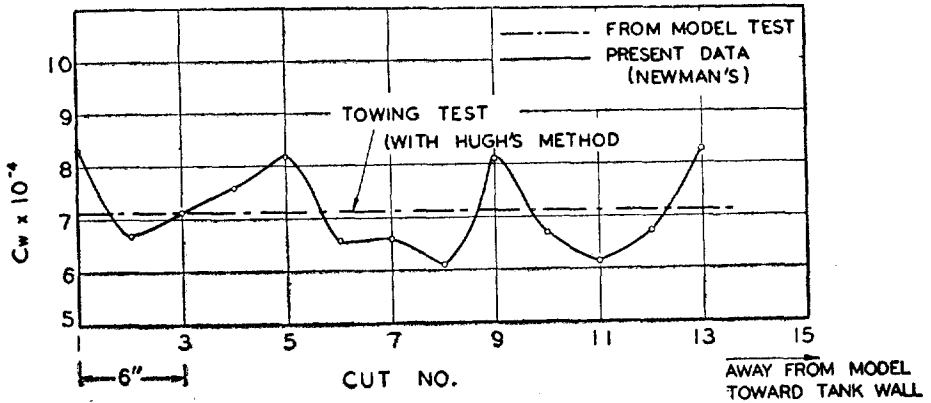


Fig. 5 Wave Resistance for C-201, All at $v_m = 6.5$ ft/sec

위에서의 오차는 다음과 같다. (第3表)

第3表

ϵ_1	$K(z)$	$-1-\gamma-\log \frac{1}{2}z$	오차
0.001	6.023689	6.023687	10^{-6}
0.10	3.721270	3.721102	10^{-4}
0.1	1.429561	1.418517	10^{-2}
1.0	-.365054	-.884068	10^0

그래서 (13)은結局 ϵ_1 을 0.01로 잡았으며 둘째적분은 Simpson's Rule을 썼다. 그計算結果의一例를 第5圖에表示한다. 같은 그림에 Towing test에서推定된結果도表示했다. 一般의인 의미에서 波形分析結果는 의외로 좋다고 보아야겠으나 位置에 따라서 그 값에 相當한 差가 있음을 알수있고 아직 이것을 說明하지 못하고 있다. 이러한 點은 Towing Tank가 좁은 理由에 基因하는지도 모르겠고 幅이 넓은 Tank에서 實驗해볼 수 있는 機會가 있으면 한다.

誤差는 여러곳에서 올수있는것으로 약간 그에 對한 解析을 해보기로 한다.

어느 理論이나 Potential Theory에 基盤을 두었으므로 粘性流體內에서 일어나는 波動과는 差가 있다. 例를들어서 船尾뒤 wake 있는 部分에는 波動이 事實上거의 없는것으로 아는데 이와의 關聯에 따라 造波現象이 影響을 받을 것은 틀림없고 더우기 測定場所에 따라 그 影響에 差가 있으리라 본다.

또한 線型理論을 썼으나 造波現象이란 非線型이라는 것이 二次元問題에서는 잘알리져 있고 어느程度의 誤差를 가져오는가 하는것은 여기에서는 모르는 일이다. 隣近波(local wave)의 影響도 Landweber[1]에 依하든는 무시할수 없이 큰것이 되겠다. Towing Tank에서는 測定할수있는 記錄의 길이때문에 隣近波의 문제를 알면서도 船型가까이에서 實驗해야하는 短點이 있다. 지금의 結果로 보아서는 이 影響은 過히 문제되는 것같이 보이지만 斷言할수는 없는것이다.

다음에 重要한것은 船體中心面에서 縱方向波高測定點까지의 거리인데 Ikehata-Nozawa의 理論[4]과 달라 本實驗이보여 주는 結果는 그 測定場所에 따라 그 값이 上下하는 結果를보여주고 있다. 그리고 船型가까이에서와 船型멀리서의 結果에 均一한 差를 보여주지 않고있다. 이點은 잘 理解할수는 없으나 Ikehata-Nozawa의 理論의 適用性에 의심을 두지 않을수 없고 아마 다른 理由에서 說明되어야 할 것 같다. 위의 原因들은 Towing Tank를 쓰는 限 除去가 事實上 어려운 點이 있고 어느理論이나 共通된 問題點이다.

Towing Tank에서 實驗을 하면 양쪽벽에 波動이 反射됨으로써 그 記錄이 뜻대로 길게되지 못한다. 여기에 서는 배의 길이의 約 3倍程度이나 짧러운 記錄部分은 Newman의 理論을 쫓아

$$\zeta = \zeta_0 \frac{\cos(k_0x - \epsilon)}{\sqrt{|x|}} \tag{18}$$

단: ζ_0 는 記錄波高의 마지막높이 ϵ 는 波高와 (18)을 연속시키는 Phase shift

로 가상의 波動을 넣어서 連續시켜 보았다. 그 結果 事實上의 差를 發見하지 못했으므로 이 問題는 그리 엄리 할것이 아닐줄안다. 그외에도 (Transient error)過度의 現象에서 오는 誤差가 있는데 船型의 始發點 約 230ft 點에서 測定했으므로 크게 지장은 없었을 것으로 推산된다.

結果의으로 말하면 이 實驗方法은 造波抵抗을 研究하는데 相當한 기여를 할수있다고 본다. 다만 造波成分等を 定性的意味에서 分析하기는 쉬어도 定量的意味에서는 아직도 어려운 문제들이 남아있다. φ_{11} 函數에 對해서 많은 기제가 름을 再記하고 다음에 그 利用의 한가지에 對해서 多少言及하여 보겠다.

4. 二物體의 경우

線型理論이 適用된다고 가정하여 두개의 波動系가 합치는 경우를 생각해보자 그 경우에는 合成波는

$$\zeta_0(x) = \zeta_1(x) + \zeta_2(x+\alpha) \tag{19}$$

단: α 는 週期 Phase lag 이다.

이 경우의 autocorrelation function 은

$$\begin{aligned} \varphi_{00}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} [\zeta_1(\xi) + \zeta_2(\xi+\alpha)][\zeta_1(\tau+\xi) + \zeta_2(\tau+\xi+\alpha)]d\xi \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \zeta_1(\xi)\zeta_1(\xi+\tau)d\xi + \dots \\ &= \varphi_{11}(\tau) + \varphi_{22}(\tau) + \varphi_{21}(\tau-\alpha) + \varphi_{12}(\tau+\alpha) \end{aligned} \tag{20}$$

단: φ_{12} 는 Crosscorrelation function 이라 부른다.

여기에서

$\varphi_s(\tau) = \varphi_{12}(\tau+\alpha) + \varphi_{21}(\tau-\alpha)$ 로 定義하면

$$\begin{aligned} \varphi_s(\tau) &= \varphi_{21}(-\tau-\alpha) + \varphi_{12}(-\tau+\alpha) \\ &= \varphi_s(-\tau) \end{aligned} \tag{21}$$

即 $\varphi_s(\tau)$ 函數는 對稱函數이다. (그렇지 않으면 K 函數가 對稱函數이므로 造波 저항에 기여하지 않는다) 따라서

$$\varphi_{00}(\tau) = \varphi_{11}(\tau) + \varphi_{22}(\tau) + \varphi_{12}(-\tau+\alpha) + \varphi_{12}(\tau+\alpha) \tag{22}$$

단: $\varphi_{21}(\tau-\alpha) = \varphi_{12}(-\tau+\alpha)$

위에서 φ_{11} 과 φ_{22} 에서 오는 造波抵抗은 언제나 零보다 큼으로서 萬若에 $\varphi_{00}(\tau)$ 에서 오는 波造抵抗이 어느 하나에서 오는 抵抗보다 작으려면 $\varphi_{12}(-\tau+\alpha) + \varphi_{12}(\tau+\alpha)$ 項이 零보다 작고 그 절대치가 $\varphi_{11}(\tau) + \varphi_{22}(\tau)$ 와 같아야 한다.

萬若 $\alpha=0$ 가 될수 있다면 $\varphi_{12}(\tau)$ 項을 對稱項과 非對稱項으로 나누어서

$$\varphi_{12}(\tau) = \varphi_{12, \text{odd}}(\tau) + \varphi_{12, \text{even}}(\tau)$$

그러면

$$\varphi_{12}(-\tau) = -\varphi_{12, \text{odd}}(\tau) + \varphi_{12, \text{even}}(\tau) \tag{23}$$

그래서

$$\varphi_{12}(\tau) + \varphi_{12}(-\tau) = 2\varphi_{12, \text{even}}(\tau) \tag{24}$$

그러므로 $\alpha=0$ 의 경우에는

$$\varphi_{00}(\tau) = \varphi_{11}(\tau) + \varphi_{22}(\tau) + 2\varphi_{12, \text{even}}(\tau) \tag{25}$$

$\alpha \neq 0$ 인 경우에는 같은 論理를 써서

$$\varphi_{00}(\tau) = \varphi_{11}(\tau) + \varphi_{22}(\tau) + 2\varphi_{12, \text{even}}(\tau+\alpha) \tag{26}$$

이며 α 는 다음에 依하여 求한다.

처음에 두 物體를 따로 따로 實驗하여 그 縱波高를 求하고 $\varphi_{11}(\tau) + \varphi_{22}(\tau)$ 를 求한다. 그 結果는 第6圖와 같을 것이다.

다음에 φ_{12} 를 求하면 그 結果는 第7圖와 같은 것이다. (반드시 極大値가 있는것이 特徵이다).

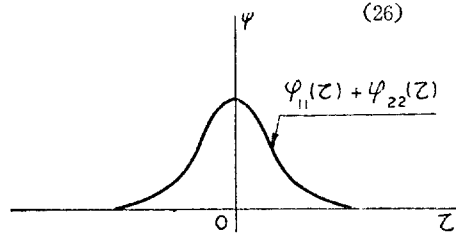


Fig. 6

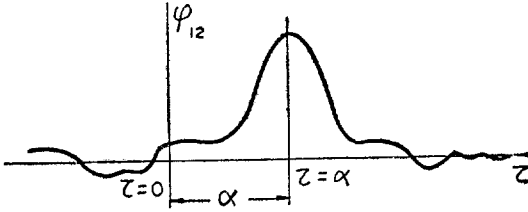


Fig. 7 Cross-Correlation Function

驗結果는 하나만 있으면足할수도 있다. 이렇게하여서 일어진 α 의 값과 $\zeta_2(x+\alpha)$ 의 값은 實際로 옮길수 있으므로 이것을 직접에서 船體와 Bulb와 같은 二物體를 부치는 경우에 쓸수가 있는 것이다.

여기에서는 앞으로 利用할수있는 하나의 方案을 내세웠다. 그쳐에도 使用方法이 있으리라 믿는다.

끝으로 이 實驗을 도와준 Michigan 大學의 Hydrodynamics Laboratory의 諸氏에게 感謝를 드린다.

參 考 文 獻

- [1] *Proceedings of the International Seminar on Theoretical Wave-Resistance*, August 1963, Ann Arbor, Michigan
- [2] Taniguchi, Kaname: "Measurement of Wave Resistance," a paper presented to *the Transactions of Japan Society of Naval Architects*, 1965.
- [3] Inui, Takao: "Study of Wave-making Resistance of Ships," 60th Anniversary Series, vol. 2, *Japan SNA*, 1957.
- [4] Ikehata, M and Nozawa, K; "波形解析による造波抵抗の算定" 日本造船協會 論文集, 第121號, 1967.
- [5] Kim, Hun Chol and F.C, Michelsen: *Experimental Wave Component Analysis as Applied to Ship Wave Systems*, Part 1, June 1966, The Univ. of Michigan ORA Report 07402.
- [6] Campbell, W.S: *An Electronic Wave Height Measuring Apparatus* DTMB Report 859, 1953.
- [7] Wehausen and Laition: "Surface Waves," Section 21, vol. 9, *Handbuch der Physik*, Springer Verlag.
- [8] Lee, Y.W: *Statistical Theory of Communication*, John Wiley and Sons, 1964.