
 論 文

大韓造船學會誌
 第26卷 第2號 1989年 6月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 26, No. 2, June 1989

쇄파현상을 고려한 선수형상개량법에 관한 연구

강 국 진*, 김 은 찬*

 A Study on the Improvement of Fore-Body Shape
 Considering Breaking Wave Phenomena
 by

K.J. Kang* and E.C. Kim*

요 약

본 논문에서는 선체로부터 멀리 전파해 나아가는 선형파와 선체 가까이에 존재하는 쇄파로 인한 조파저항성분을 최소화시키는 방법을 보여준다. 본 방법은 선형조파저항의 최적화방법과 시험자료 분석을 통한 쇄파저항의 통계적 최적화방법으로 구성된다. 응용목적으로서, 수선형상이 포물선이고 측면이 수직한 모형을 기본선형으로 택하였고, 선형파를 최적화하는 방법과 경험적인 방법을 통하여 선체전반부의 횡단면적 곡선을 변화시킨 두척의 수정모형선을 얻었다. 3척의 선형에 대한 시험 및 분석결과로부터 선체전반부의 횡단면적 곡선의 변화에 따른 선형파저항과 쇄파저항과의 상관관계를 살펴보았다. 본 방법으로 선체전반부가 최적화된 선형은 설계속도($F_n=0.26$)에서 기본선형에 비하여 약 47%의 조파저항감소를 보이고 있다.

Abstract

This paper presents a method of minimizing the wave resistance components, due to the linear wave propagating to the far field and the breaking wave in the vicinity of the hull. This method consists of the linear optimization method for the linear wave resistance and the statistical optimization method for the breaking wave resistance through the analysis of the experimental data. For the purpose of the application, a wall-sided model with parabolic waterplane shape was selected as a basic hull form, and two modified hull forms with varied C_p -curve of the fore-body were derived from the linear wave optimization method and the empirical method. The correlation between the linear wave resistance and the breaking wave resistance according to the C_p -curve variation of the fore-body was investigated through the experimental and analytical results for the three hull forms. The fore-body shape optimized by the present method shows the reduction of the wave resistance by 47% comparing to the basic hull form at the design speed ($F_n=0.26$).

본 논문은 1987년도 대한조선학회 춘계연구발표회에서 발표된 논문임.
 * 정희원, 한국기계연구소 대덕선박분소

1. 서 언

선박설계에 있어서 최소화항의 선형(hull form)을 찾아내는 것은 매우 중요하며 에너지절약형 선박설계의 기본이 된다. 선체저항가운데에서 조파저항은 커다란 부분을 차지하고 있는데, 이 조파저항은 선체후방으로 멀리까지 전파해 나가는 선형자유파(linear free wave)와 선체가가이에 존재하는 국부교란파(local disturbance wave) 성분으로 구성된다고 할 수 있는데, 국부교란파에는 선수와 선미에서 강하게 발생하는 쇄파(breaking wave)와 선체길이에 걸친 국부파(local wave)가 함께 존재한다. 따라서, 조파저항이 적은 선형을 구하기 위해서는 이러한 저항성분들을 동시에 최소화시키는 방법이 필요하다.

1960년대에 선형조파저항성분을 수조에서 분리계측하여 해석하는 파형해석법(wave pattern analysis method)이 개발되어 선형설계에 많이 응용되어 왔다.

파형해석법에는 transverse cut method, longitudinal cut method 및 X-Y method 등이 있는데, 이 중에서 Newman-Sharma[1,2]에 의한 longitudinal cut method가 일반적으로 널리 사용되어 지고 있다. 국내에서는 강신형 등[3]에 의하여 1980년에 이 방법이 도입 정착되었다. 파형해석법을 이용한 선형개발에 의 응용은 Baba[4], Tsutsumi[5,6], Matsui[7], 강신형 등[8,9]에 의하여 연구되어 왔는데, 이들은 선형파이론(linearized wave theory)과 파형해석자료를 이용하여 조파저항이 최소가 되는 선형을 구하려는 시도였다. 그리고 쇄파성분을 고려한 선형개발에 대한 연구가 계속 수행되어져야 할 것을 제시하였다. 근래에 이르러 Miyata 등[10,11,12]은 선체근처, 특히 선수 및 선미에서 강하게 발생하는 쇄파현상을 자유표면 충격파(free surface shock wave)라고 보고 wedge model에 의한 실험과 관찰을 통하여 그 특성을 규명하고자 하였으며, 계열선형에 대해서 자유표면충격파에 의한 저항성분을 실험적으로 조사하여 선형개발에 고려해야 할 사항으로 부각시키었다. 또한, Matsui 등[13]은 회류수조에서 4종류의 단순한 선수모형에 대한 비선형조파현상을 관찰한 바가 있다. 이러한 쇄파현상을 고려한 선형설계에의 응용으로서는 Nito 등[14]의 자유표면충격파를 고려한 선수형상의 개량 및 Miyata 등[15]의 최소조파저항의 선형 연구가 있는데, 이러한 연구들은 조파저항의 상당부분을 차지하는 쇄파성분을 선형설계시에 선형자유파성분과 동시에 고려함으로써

조파저항을 최소화하려는 방법이다.

본 연구에서는 지금까지 이루어진 파형해석을 이용한 선형설계방법과 Nito 등의 방법을 연구검토하여, 선형조파저항 및 쇄파저항을 동시에 최적화하는 방법을 정립하고자 하였다. 그리고, 응용예로서 수선형상이 포물선이고 측면이 수직한 모형선에 대한 계열시험을 실시하고 그 자료들을 이용하여 최소조파저항을 갖는 횡단면적곡선(C_p -curve)을 구하였다.

2. 선형조파저항이론 및 파형해석법

좌표계를 Fig. 1과 같이 하고, 배는 이상유체가운데 놓여 있으며 유속을 U 라고 하자.

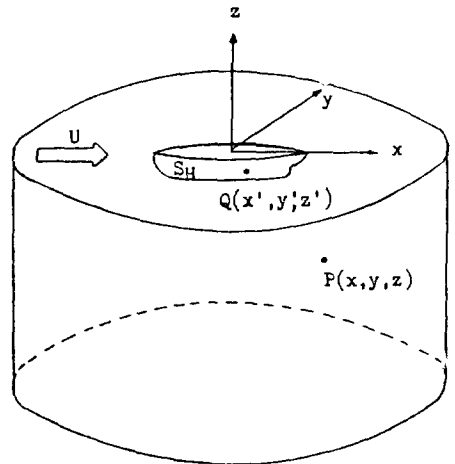


Fig. 1 Coordinate system

이미 정립된 선형조파저항이론 [16]으로부터, 배를 적당한 source들의 연속분포로 나타낼 수 있다고 하면, 임의의 field Point $p(x, y, z)$ 에서의 속도 potential $\phi(P)$ 는

$$\phi(P) = \frac{U}{4\pi} \int_{S_H} m(Q)G(P, Q)ds \tag{1}$$

단, $m(Q)$: 유속 U 로 무차원화된 source의 세기
 $Q(x', y', z')$: source point
 로 주어지고, (1)식에서 $G(P, Q)$ 는 Green 함수이며 무한후방에서 다음과 같다.

$$G = -4k_0 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sec^2\theta \exp\{k_0(z+z')\sec^2\theta\} \cdot \sin(k_0 w \sec^2\theta) d\theta \tag{2}$$

단, $w = (w-x')\cos + (y-y')\sin$
 $k_0 = g/U^2$; 파수

따라서, 선체로부터 충분히 떨어진 곳에서의 속도

potential은 다음과 같다.

$$\phi = -\frac{k_0}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \{P(\theta)\cos(k_0 p \sec^2\theta) + Q(\theta) \cdot \sin(k_0 p \sec^2\theta)\} \cdot \sec^2\theta \exp(k_0 z \sec^2\theta) d\theta \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{단, } P(\theta) \\ Q(\theta) \end{aligned} \right\} = U \int_{S_w} m(Q) \frac{\cos\{k_0 \sec^2\theta(x' \cos\theta + y' \sin\theta)\}}{\sin\{k_0 \sec^2\theta(x' \cos\theta + y' \sin\theta)\}} \cdot \exp(k_0 z \sec^2\theta) dS \quad (4)$$

$$p = x \cos + y \sin\theta$$

이로부터 파형 $\zeta(x, y)$ 와 조파저항계수 C_w 는 다음과 같이 구해진다.

$$\zeta(x, y) = -\frac{U}{g} \phi_x|_{z=0} = \frac{k_0}{\pi U} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \{P(\theta)\cos(k_0 p \sec^2\theta) + Q(\theta) \cdot \sin(k_0 p \sec^2\theta)\} \sec^3\theta d\theta \quad (5)$$

$$C_w = R_w / \frac{1}{2} \rho S U^2 = \frac{2k_0^2}{\pi S U^2} \int_0^{\pi/2} [P^2(\theta) + Q^2(\theta)] \cdot \sec^3\theta d\theta \quad (6)$$

단, R_w : wave resistance
 S : wetted surface area

파형해석은 선형에 따른 source의 분포대신에 조파 특성을 나타내는 진폭함수 $P(\theta)$, $Q(\theta)$ 를 실험으로부터 직접 구하여 조파저항을 계산하는 것으로서, 본 논문에서는 longitudinal cut method[3]를 사용하였으며 이를 간략히 요약하면 다음과 같다.

(5)식을 Fourier transform하고 $k_0 y$ 가 충분히 크다고 하면, 파형 $\zeta(x, y)$ 와 진폭함수 $P(\theta), Q(\theta)$ 와의 관계는 다음과 같이 근사적으로 주어진다.

$$P(\theta) + iQ(\theta) = U \cos\theta \sin\theta \exp(ik_0 y \tan\theta \sec\theta) \times \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(x, y) \exp(ik_0 x \sec\theta) dx \quad (7)$$

즉, 선체로부터 발생된 파형을 측정하면 (7)식과 (6)식으로부터 진폭함수와 파형조파저항계수 C_w 를 구할 수 있다.

3. 파형해석법을 이용한 쇄파성분 추출방법

선체 가까이에 존재하는 쇄파성분을 추출하기 위해서는 선체 가까운 곳과 충분히 떨어진 곳에 파형을 동시에 측정 비교함으로써 가능하다. 즉, 선체 가까이에서 측정한 파형에는 선형자유파, 극부파 및 쇄파가 존재하고, 선체로부터 멀리 떨어진 곳에서 측정한 파형에는 선형자유파만이 존재하므로 이 두가지의 파형을 해석하여 같은 선상에서 파형을 재생시켜서 비교해 보면 그 차이가 바로 쇄파성분과 극부파의 합이 된다. 그런

데, $k_0 y$ 가 충분히 커야만 성립하는 근사식을 선체 가까운 곳에서의 파형해석에 사용함으로써 야기되는 극부파의 영향을 우선 검토해야 한다.

3.1. 극부파와 근사식에 대한 검토

파형과 진폭함수와의 근사관계식 (7)은 y 가 충분히 크다는 조건하에서 성립하는데, 가장 오차가 클 것으로 예상되는 $y=0$ 에서 생각해 보기로 하자. 가상적으로 $y=0$ 에서 측정한 파형을 $\zeta(x, 0)$ 라고 하면, 진폭함수는

$$P(\theta) + iQ(\theta) = U \cdot \cos\theta \sin\theta \times \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(x, 0) \exp(ik_0 x \sec\theta) dx \quad (8)$$

이 되고, 이 진폭함수로부터 재생되는 파고 $\zeta^*(x, 0)$ 는

$$\zeta^*(x, 0) = \frac{k_0}{\pi} \left\{ \int_0^{\pi/2} \sec^2\theta \sin\theta \cos(k_0 x \sec\theta) d\theta \times \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(\xi, 0) \cos(k_0 \xi \sec\theta) d\xi + \int_0^{\pi/2} \sec\theta \sin\theta \sin(k_0 x \sec\theta) d\theta \times \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(\xi, 0) \sin(k_0 \xi \sec\theta) d\xi \right. \quad (9)$$

가 된다. 이때, $k_0 \sec\theta = a$ 로 하여 윗식을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\zeta^*(x, 0) = \zeta(x, 0) - \frac{1}{\pi} \int_0^{k_0} da \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(\xi, 0) \cos\{a(x-\xi)\} d\xi = \zeta(x, 0) + E(x) \quad (10)$$

(10)식으로부터 k_0 가 작을수록(즉, 속도가 빠를 때) 재생파형 ζ^* 는 측정파형 ζ 에 가깝게 재생되고, k_0 가 클수록(즉, 속도가 느릴 때) 계산오차가 커져서 재생파형 ζ^* 는 0으로 가까이 가는 것을 알 수 있다.

속도와 파장에 따른 오차의 크기를 조사하기 위하여 다음과 같이 극부파와 비슷한 형상의 cosine wave mode를 계산모형으로 하였다.

$$\begin{cases} \zeta(x) = -\cos(\pi x) & \left[-\frac{3}{2} \leq x \leq \frac{3}{2}\right] \\ \zeta(x) = 0 & \left[x < -\frac{3}{2}, x > \frac{3}{2}\right] \end{cases}$$

이것을 (10)식에 대입하여 얻은 재생파는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \zeta^*(x) &= -\cos(\pi x) + \frac{1}{\pi} \int_0^{k_0} da \int_{-3/2}^{3/2} \cos(\pi\xi) \cos\{a(x-\xi)\} d\xi \\ &= -\cos(\pi x) + \frac{1}{\pi} \int_0^{k_0} \cos(ax) \left[\frac{\sin\left\{\left(\pi-a\right)\frac{3}{2}\right\}}{\pi-a} + \frac{\sin\left\{\left(\pi+a\right)\frac{3}{2}\right\}}{\pi+a} \right] \end{aligned}$$

이것을 $k_0=5, 10$ ($Fn=0.316, 0.224$)에서 각각 수치

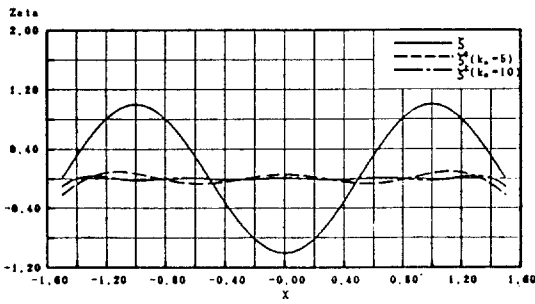


Fig. 2 Cosine wave mode(ζ) and regenerated wave(ζ^*)

계산을 하여 구한 재생파형은 Fig. 2와 같다.

이로부터 극부파의 재생파형은 거의 0이 된다는 사실을 알 수가 있다. 따라서, $F_n=0.22$ 이상일 때 선체가 가까이에서 계측한 파형으로부터 재생시킨 파형에는 극부파가 거의 존재하지 않는 것으로 간주할 수 있다.

다음, 쇄파의 형상(진폭과 파장)과 배의 속도(F_n)에 따른 재생정도를 살펴보기 위하여 다음과 같은 pulse 형상을 생각하기로 하자.

$$\zeta = A_0 e^{-b^2 x^2}$$

이에 대한 재생오차 $E(x)$ 는 (10)에 의해

$$E(x) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{k_0} da \int_{-\infty}^{\infty} A_0 e^{-b^2 \xi^2} \cdot \cos[a(x-\xi)] d\xi$$

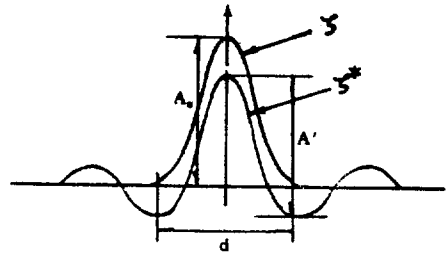
이 되고, $a=k_0 t$ 로 치환하여 정리하면, 최대오차가 발생하는 $x=0$ 에서의 $E(0)$ 는 다음과 같다.

$$E(0) = \frac{A_0 k_0}{\sqrt{\pi} b} \left\{ 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{k_0}{4b} \right)^2 + \dots \right\} \quad (11)$$

따라서, 재생오차 $E(0)$ 는 k_0/b 에 비례하므로, 오차

Table 1 Error ratio ($1 - \frac{A'}{A_0}$) of regenerated wave

k	$b(d/l)$	30(0.075)	20(0.11)	10(0.2)
5		0.004	0.010	0.052
7.5		0.010	0.031	0.154
10		0.026	0.056	0.310



$$d = 2 |x_1|, \quad e^{-b^2 x_1^2} = 0.01$$

를 작게하기 위해서는 k_0 가 작거나 폭 b 가 커야 한다. k_0 와 폭 b 의 변화에 따른 재생오차를 알기 위하여 (11) 식을 수치적분하면 Table 1과 같다.

이상으로부터 속도가 빠를수록, 파형의 분포범위가 좁을수록 재생오차가 작아짐을 알 수 있으며, 이후로는 재생오차를 고려하여 A' 를 최대쇄파진폭 Δh 로 표시하기로 한다.

3.2. 쇄파성분 추출방법

쇄파성분의 추출방법을 정리하여 Fig. 3에 보이고 있다.

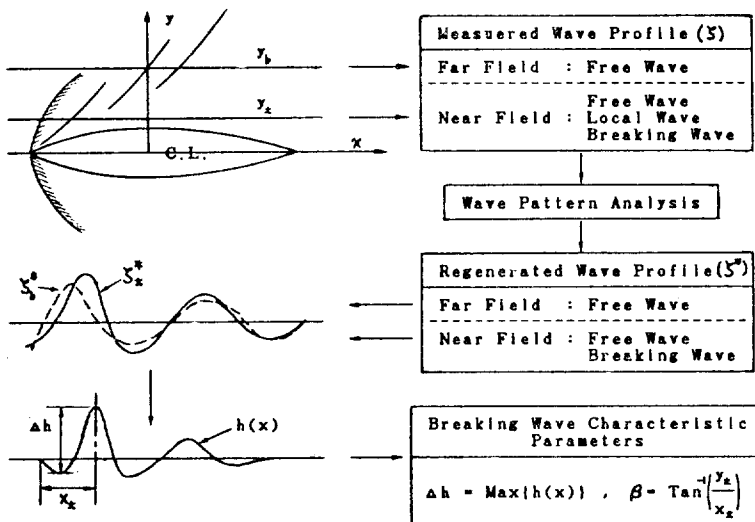


Fig. 3 Extraction procedure of breaking wave characteristic parameters ($\Delta h, \beta$)

쇄파성분은 선체가 가까운 곳과 선체로부터 멀리 떨어진 곳에서 파형을 동시에 계측하여 같은 선상에서 재생시켜 비교해봄으로써 추출할 수 있다. 선체가 가까운 곳의 계측선을 시험선(y_i), 선체로부터 충분히 멀리 떨어진 곳의 계측선을 기준선(y_b)으로 하고, 이 두선상에서 계측된 파형을 각각 $\zeta_i(y_i)$ 과 $\zeta_b(y_b)$ 라 하면, $\zeta_i(y_i)$ 에는 선형자유파와 쇄파 및 국부파성분이 혼합되어 있고 $\zeta_b(y_b)$ 에는 선형자유파만이 존재한다.

이 두개의 파형으로부터 각각의 진폭합수를 구한 후에 같은 계측선인 시험선(y_i)상에서 재생시키고 이들을 $\zeta_i^*(y_i)$, $\zeta_b^*(y_i)$ 로 표시한다. 여기서, 재생파형 $\zeta_i^*(y_i)$ 에는 앞절에서 검토한 바와 같이 국부파가 재생과정에서 거의 소멸되어 무시할 수 있으므로 약간의 재생오차를 지니고 있는 선형자유파와 쇄파성분만이 존재하는 것으로 간주할 수 있다.

따라서, 이 두개의 재생파형의 차이로부터 쇄파성분을 추출할 수 있는데, 쇄파파고 $h(x)$ 는 두개의 재생파형의 차이 ($\zeta_i^* - \zeta_b^*$)로부터 구해지고, 선수부의 쇄파 특성변수인 최대쇄파진폭과 쇄파각도는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{cases} h = \max(h(x)) \\ \beta = \tan^{-1}(y_i/x_i) \end{cases} \quad (12)$$

4. 모형시험과 해석 및 쇄파특성변수 추출

본 논문에서는 문제를 단순화시키기 위해서 선체전반부의 늑골형상을 변화시키지 않고 C_p -curve의 최적화만을 꾀하기로 한다. 따라서 시험에 사용된 3척의 모형선(MMS 1, MMS 2, MMS 3)은 모두 측면이 수직인 선형으로서 선체전반부의 C_p -curve차이에 따른 조파저항, 파형조파저항, 쇄파저항 및 쇄파특성변수를 비교검토하고, 이로부터 선체전반부 C_p -curve의 최적화를 위한 자료를 마련하고자 하였다. 기본선형(MMS1)

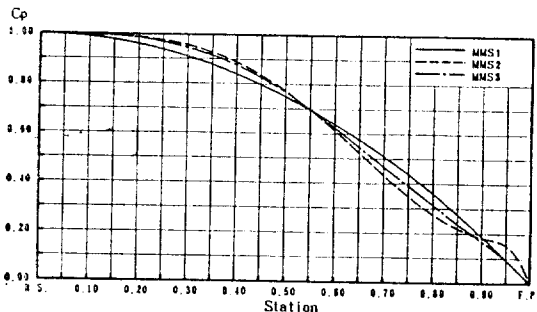


Fig. 4 C_p -curves of ship's fore-body (MMS 1, MMS 2, MMS3)

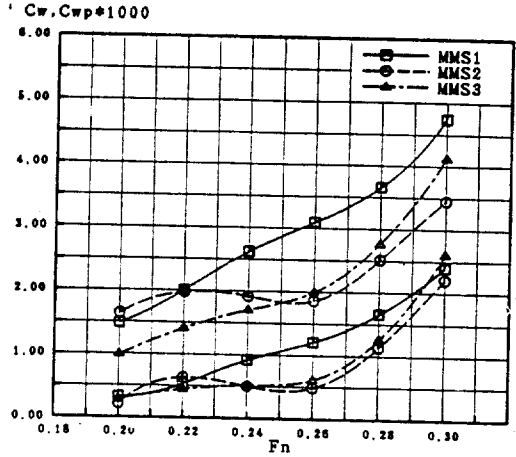


Fig. 5a Curves of C_w and C_{wp}

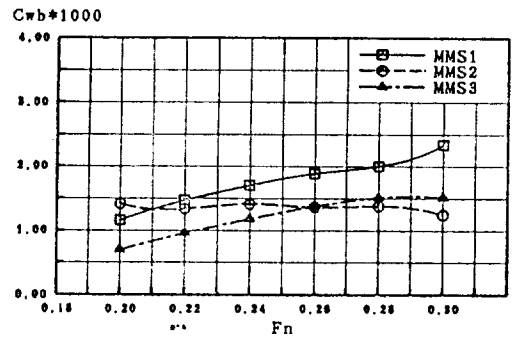


Fig. 5b Curves of C_{wb}

의 C_p -curve는 포물선형상으로서 전후대칭선이며, 2차 선형(MMS2)은 기본선형의 선체전반부 C_p -curve를 반실험적 최적화기법 [8]으로, 3차선형(MMS3)은 앞의 두가지 선형의 시험결과자료를 경험적으로 이용하여 개발시킨 선형이다. 이들의 주요계원인 길이(3.3m), 폭(0.6m), 설계흘수(0.14m), 방형비척계수(0.6634)는 모두 같으며, 그 선체전반부 C_p -curve를 함께 비교하여 Fig. 4에 보이고 있다.

실시된 모형시험은 저항시험과 파형계측시험이고, 저항해석시에 마찰저항계수 C_f 는 1957-ITTC 상관곡선을 사용하였으며, 파형해석시는 longitudinal cut method[3]를 사용하였다. 결과해석으로부터 조파저항계수 C_w 와 파형조파저항계수 C_{wp} 를 Fig. 5a에 보이며 이들의 차이($C_w - C_{wp}$)로부터 구해진 쇄파저항계수 C_{wb} 는 Fig. 5b에 보인다.

한편, 쇄파성분을 추출하기 위하여 세선상에서 파형을 계측하였는데, 그 위치는 선체중심선으로부터 모형

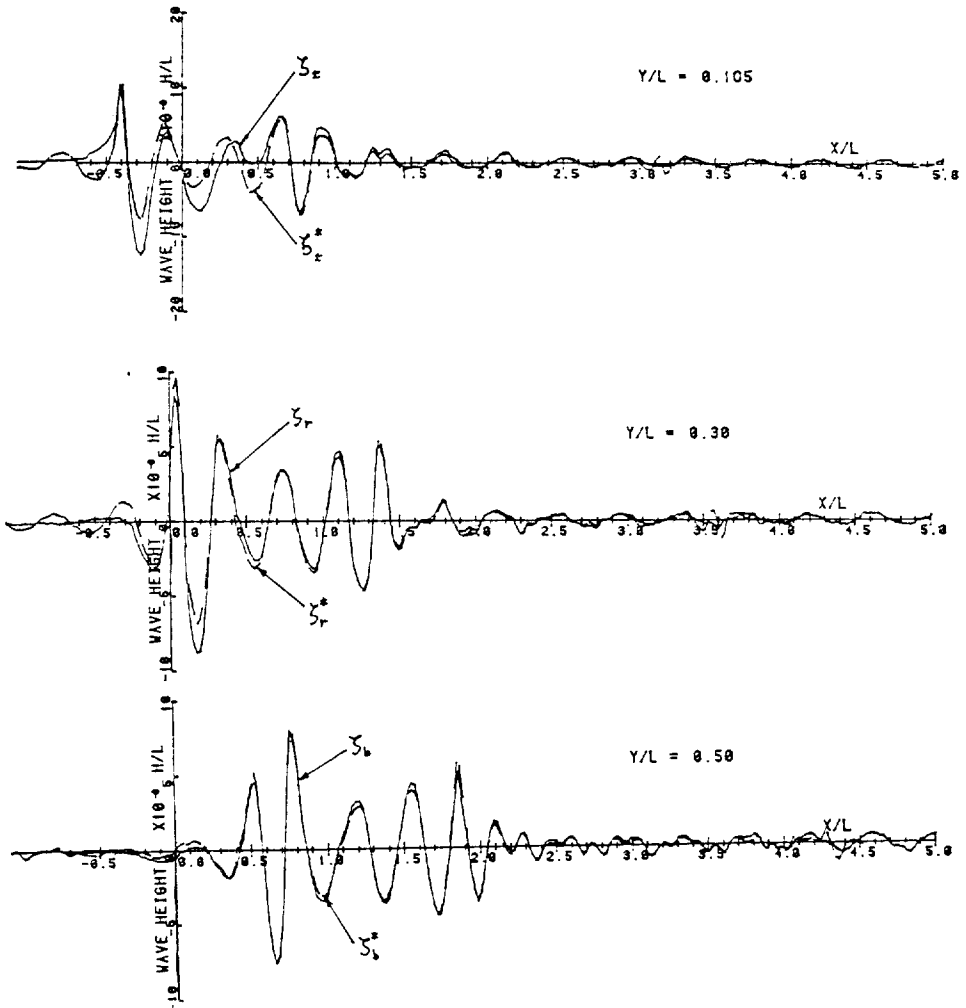


Fig. 6 Measured(ζ) and regenerated wave profiles(ζ^*) (MMS1, $F_n=0.26$)

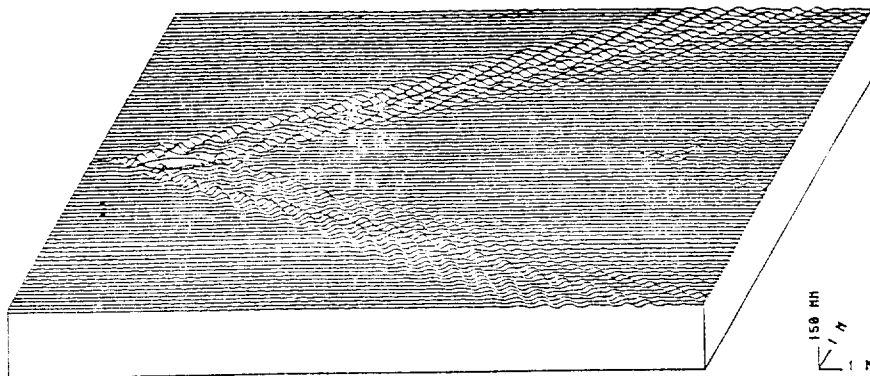


Fig. 7 Prospects of regenerated wave pattern (MMS1, $F_n=0.26$)

선길이의 0.105, 0.3, 0.5배 만큼 떨어진 곳으로서 각각 y_1, y_2, y_3 에 해당한다. 여기서, y_1 은 선체중심선으로부터 멀어짐에 따른 쇄파성분의 감쇄량을 조사하기 위한 참고계측선이다.

Fig 6은 기본선형(MMS1)의 설계속도 $F_n=0.26$ 에 대하여, 계측된 파형과 재생파형을 겹쳐서 그린 것이다. 이 두개의 파형을 $-0.5(F.P.)$ 부터 $0.5(A.P.)$ 사이에서 살펴보면, y_3 상에서는 파형이 거의 일치하고 있지만, y_1 로 갈수록 차이가 커지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 선체가 가까이로 갈수록 국부파의 영향이 크게 미치기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 그 차이가 앞장의 점도과정에서 언급한 바와 같이 재생과정을 통하여 소멸되어 버린 국부파의 크기로 볼 수가 있다.

Fig. 7은 모형선으로부터 생성된 전체파형을 앞에서 언급된 세곳의 계측파형(Fig. 6 참조)을 이용하여 재생시켜 그린 것이다.

Fig. 8은 파형계측위치에 따라서 쇄파의 파형이 어느정도 감쇄되는가를 알아보기 위한 것인데, y_1 의 위치만 되더라도 그 크기가 상당히 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 세가지 선형에 대해서 추출된 쇄파의 파형

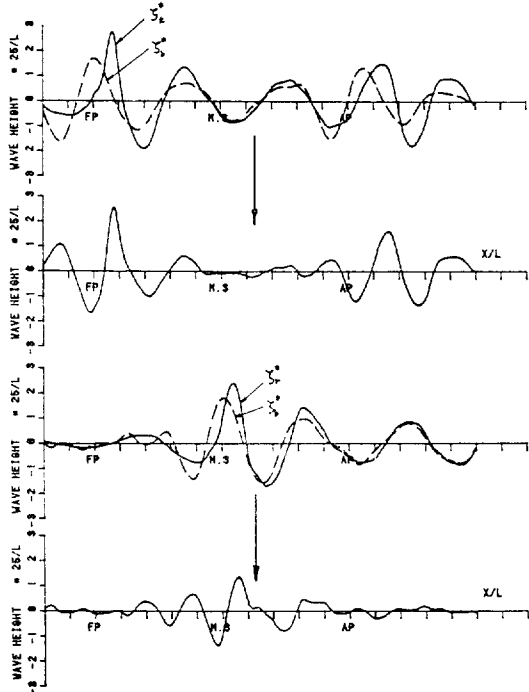


Fig. 8 Breaking wave profiles according to the distance from hull center line (MMS1, $F_n=0.26$)

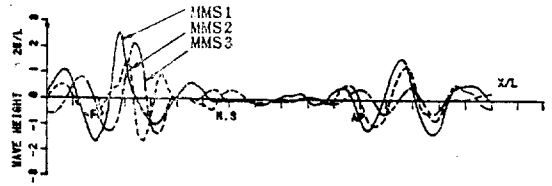


Fig. 9 Breaking wave profiles at $F_n=0.26$

을 보여주고 있는데, 이로부터 선수와 선미에서 쇄파가 크게 발생한다는 것과 선형에 따라서 그 크기가 다르다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 세가지 선형의 속도(F_n)에 따른 최대쇄파파고 (Δh)와 쇄파각도 (β)를 보이고 있는데, F_n 과 Δh 와의 관계는 Fig. 5b의 C_{wb} 와의 모양과 비교해 보면 상당히 유사한 경향을 보여주고 있다. 한편 β 는 F_n 가 커짐에 따라서 전반적으로 줄어들지만 C_{wb} 와는 뚜렷한 경향을 보여주지 못하는 것 같다.

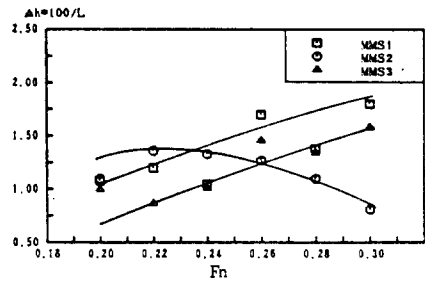


Fig. 10 Maximum breaking wave height Δh

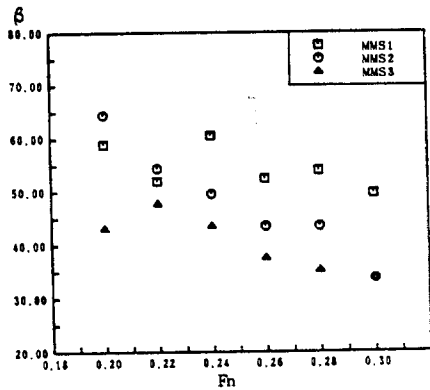


Fig. 11 Breaking wave angle β

5. 쇄파저항을 고려한 횡단면적곡선의 최적화 방법

5.1. 선수부형상과 쇄파저항과의 관계

선형조파저항이론에서는 선형과 파형 및 저항이 2장

에의 관계식과 같이 정립하고 있다. 그러나, 선수형상과 쇠파저항을 직접 결부시킬 수 있는 이론적 연구가 아직 미흡하므로, 본 논문에서는 그 관계를 찾기 위해 모형시험 결과자료로부터 다음과 같이 정리하여 볼 수 있다.

① 세계선형의 속도(F_n)에 따른 최대진폭함수(Δh)의 크기를 Fig. 10에 보이고 있는데, 이는 Fig. 5b의 쇠파저항곡선과 거의 유사한 경향을 보이고 있는 것으로 보아 Δh 와 C_{wb} 와는 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

② 한편, 세계선형의 속도(F_n)에 따른 쇠파저항도(β)의 크기를 Fig. 11에 보이고 있는데, F_n 가 커짐에 따라서 전반적으로 작아지고 있지만 C_{wb} 와의 관계에 있어서는 뚜렷한 경향을 보여주지 못하는 것 같다.

따라서 쇠파저항은 주로 최대쇄파진폭의 생성에 소비된 에너지로 간주할 수 있고, 이 최대쇄파진폭은 선수부형상에 기인된 것이므로 선수부형상을 잘 설계하면 쇠파저항을 작게 할 수 있을 것이다. 그런데 선수부형상의 설계시에는 횡단면적곡선과 늑골형상을 동시에 고려해야 하지만, 초기설계 단계에서는 횡단면적곡선의 결정이 중요하므로 본 논문에서는 횡단면적곡선에 대해서만 고려하기로 한다.

5.2. 횡단면적곡선의 최적화 방법

본 논문에서는 파형조파저항과 쇠파저항의 합이 최소가 되는 횡단면적곡선을 구하려는 것으로서, Nito등 [14]과 같은 개념에서 출발하였으며, 그 기본은 파형 해석을 이용한 선형개발방법 [9]에 두고 있다. 즉, 모선과 유사선의 파형해석자료로부터 파형조파저항이 최소가 되는 횡단면적곡선을 구하면서, 쇠파저항과 밀접한 관계를 가지고 있는 특성의 스테이션을 찾아내어 쇠파저항이 최소가 되는 횡단면적계수를 구하여 고려해줌으로써 파형조파저항과 쇠파저항을 동시에 최적화시키는 방법이다. 따라서, 횡단면적곡선의 최적화에는 모선과 유사선의 자료가 필요하며, 쇠파저항과 밀접한 관계를 가지는 스테이션을 찾기 위해서는 통계적인 방법이 사용된다. 그리고, 이것은 모선과 유사선의 횡단면적 곡선을 선형결합시킴으로써 구할 수 있다는 가정 하에서 성립하는 것이다.

임의의 스테이션의 단면적을 선체중양부의 단면적으로 나누었을 $C_p(x)$ 라 하면, 임의선형의 횡단면적 곡선은 다음과 같이 모선과 유사선형들의 선형결합으로 주어진다.

$$C_p(x) = C_{ps}(x) + \sum_{j=1}^N \alpha_j \cdot \Delta C_{pj}(x) \tag{13}$$

단, N : 유사선의 수

α_j : 선형계수

$$\Delta C_{pj}(x) : C_{pj}(x) - C_{ps}(x)$$

여기서, 첨자 0는 모선, 첨자 j 는 유사선에 대한 것을 각각 나타내기로 하며, 이후에도 마찬가지이다.

그리고, 배수량을 변화시키지 않는다고 하는 조건으로부터 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\int_{-1}^1 \Delta C_{pj}(x) dx = 0 \tag{14}$$

쇠파저항과 밀접한 관계가 있는 스테이션을 s 로 하면, 그곳의 $C_p(x)$ 값은 $C_p(s)$ 가 된다. 이때, 통계적인 방법으로 모선 및 유사선들의 $C_p(s)$ 와 쇠파저항계수(C_{wb})와의 관계를 근사식으로 나타낼 수 있으며, 유사선의 자료가 많을수록 통계적인 신뢰성이 강해지는데, 본 논문에서는 다음과 같이 2차근사식을 쓰기로 한다.

$$C_{wb} = a_0 + a_1 \cdot C_p(s) + a_2 \cdot C_p^2(s) \tag{15}$$

여기서, 계수 a_0, a_1, a_2 는 최소자승법으로 구한다.

(13)식의 횡단면적 곡선으로 주어지는 선형의 파형진폭함수 $P(\theta), Q(\theta)$ 는 다음과 같이 선형중첩시켜 구한다.

$$\begin{cases} P(\theta) = P_0(\theta) + \sum \alpha_j \cdot \Delta P_j(\theta) \\ Q(\theta) = Q_0(\theta) + \sum \alpha_j \cdot \Delta Q_j(\theta) \end{cases} \tag{16}$$

$$\text{단, } \begin{cases} \Delta P_j(\theta) = P_j(\theta) - P_0(\theta) \\ \Delta Q_j(\theta) = Q_j(\theta) - Q_0(\theta) \end{cases}$$

그리고, 조파저항증감량 ΔC_w 는 다음과 같이 구할 수 있고,

$$\Delta C_w = (C_{wp} - C_{wps}) + (C_{wb} - C_{wbs}) \tag{17}$$

(6), (13), (15) 및 (16)식으로부터 다음과 같이 정리된다.

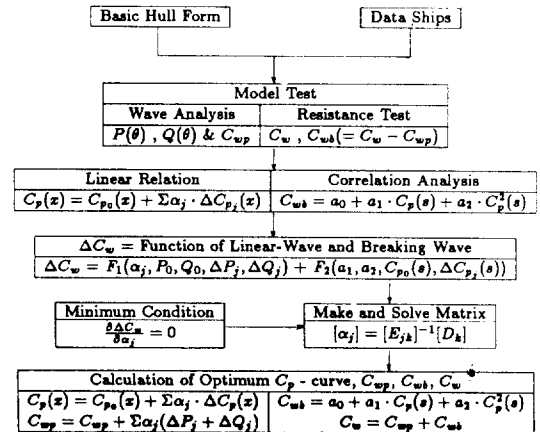


Fig. 12 Flow chart of the C_p -curve optimization method

$$\begin{aligned}
 \Delta C_w &= r_0 \int_0^{\pi/2} \{ [P^2(\theta) + Q^2(\theta) - \{P_0^2(\theta) + Q_0^2(\theta)\}] \sec^3 \theta \, d\theta \\
 &\quad + \{a_0 + a_1 \cdot C_{p1}(s) + a_2 \cdot C_p^2(s)\} - \{a_0 + a_1 \cdot C_{p1}(s) + a_2 \cdot C_p^2(s)\} \\
 &= 2r_0 \int_0^{\pi/2} \{ \Sigma \alpha_j \{ P_0(\theta) \cdot \Delta P_j(\theta) + Q_0(\theta) \cdot \Delta Q_j(\theta) \} \} \sec^3 \theta \, d\theta \\
 &\quad + r_0 \int_0^{\pi/2} \{ \{ \Sigma \alpha_j \cdot \Delta P_j(\theta) \} + \{ \Sigma \alpha_j \cdot \Delta Q_j(\theta) \} \} \\
 &\quad \sec^3 \theta \, d\theta + a_1 \Sigma \alpha_j \Delta C_{p1}(s) + a_2 \{ C_{p1}(s) + \Sigma \alpha_j \cdot \Delta C_{p1}(s) \}^2 - a_2 \cdot C_p^2(s)
 \end{aligned} \tag{18}$$

단, $r_0 = \frac{2k_0^2}{\pi s U^2}$

한편, 최적 선형을 주는 선형계수 α_j 는 다음과 같은 극치조건으로부터 구해진다.

$$\frac{\partial \Delta C_w}{\partial \alpha_j} = 0 \quad (j=1, 2, \dots, N) \tag{19}$$

5.3. 적용예

기본선형(MMS 1)을 모선으로, 2척의 수정선형(M-MS 2, MMS 3)를 유사선으로 하여 그들의 시험자료와 앞장의 방법으로부터 조파저항이 최소가 되는 선체전반부 횡단면적 곡선의 선형(MMS 4)을 구하고자 하였으며, 그 과정 및 결과는 다음과 같다.

① 설계속도($F_n=0.26$)에서 쇄파저항과 밀접한 관계가 있는 특정스테이션 s 를 찾기 위하여 선수부의 형상과 관계가 깊은 곳이라고 생각되는 세계의 스테이션(0.7, 0.8, 0.85)으로 범위를 좁히기로 한다. 각각의 스테이션에서 세계선형의 C_p 값에 따른 쇄파저항계수(C_{wb})를 Fig. 13에 보이는데, 모두 비슷한 포물선의 관계를 보여주고 있으며, 그중에서 0.8스테이션의 C_p 값이 변화폭이 커서 선형변화를 다양하게 할 수 있는 곳이라고 판단된다.

② 설계속도($F_n=0.26$)에서 세 스테이션을 각각 특정스테이션 s 로 보고 위의 자료로부터 $C_p(s)$ 와 쇄파저

Table 2 Calculated C_w , C_{wp} and C_{wb} (MMS 4)

F_n	C_w ($\times 10^{-3}$)	C_{wp} ($\times 10^{-3}$)	C_{wb} ($\times 10^{-3}$)	α_1	α_2	s
0.26	1.652	0.320	1.333	0.5518	0.2912	8.5
0.26	1.650	0.319	1.331	0.5487	0.2927	9.0
0.26	1.682	0.320	1.362	0.5411	0.3126	9.25
0.20	0.751	0.077	0.673	0.1932	0.4725	9.0
0.22	1.186	0.230	0.956	0.2898	0.4853	9.0
0.24	1.419	0.241	1.178	0.3551	0.4552	9.0
0.26	1.650	0.319	1.331	0.5487	0.2927	9.0
0.28	2.293	0.871	1.422	0.7009	0.8388	9.0
0.30	3.121	1.799	1.323	0.8367	0.8870	9.0

항과의 관계식 (13)의 계수 a_0, a_1, a_2 를 구한 후, 최적 선형의 선형계수 α_j 를 (20)식으로부터 구하고, 파형조파저항계수(C_{wp})와 쇄파저항계수(C_{wb})를 (6)식과 (15)식으로부터 각각 계산하여 Table 2에 정리하였다. 이로부터, 0.8스테이션에 대한 것이 가장 적은 조파저항 값을 줄과 동시에 선형변화도 다양하게 할 수 있으므로 0.8스테이션을 특정스테이션 s 로 선정하기로 한다.

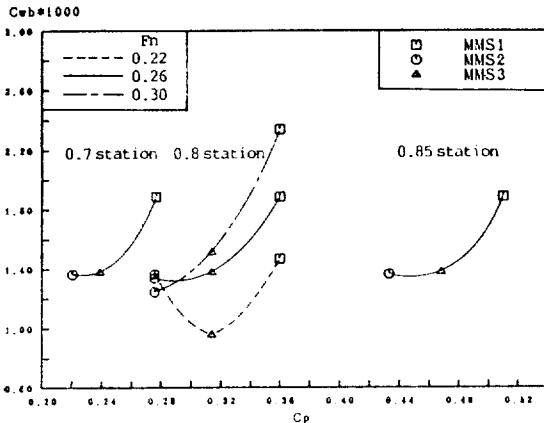


Fig. 13 Relation between C_p and C_{wb}

$C_w, C_{wp} \times 1000$

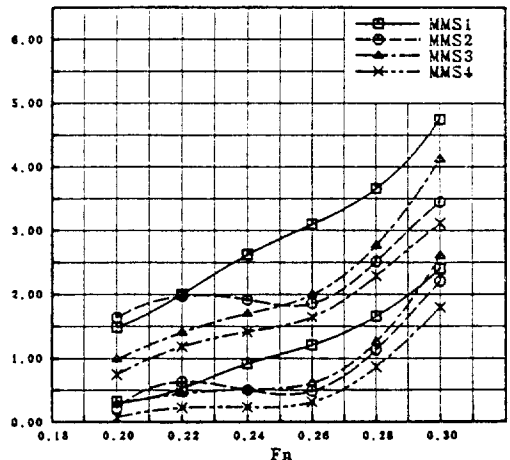


Fig. 14a Curves of C_w and C_{wp}

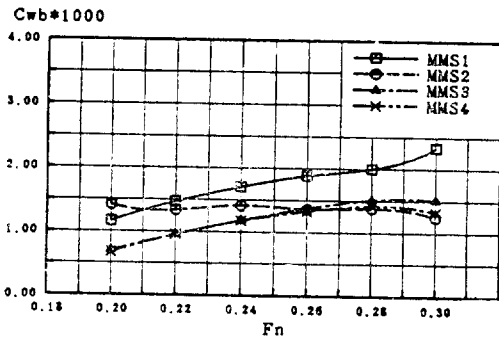


Fig. 14b Curves of C_{wb}

③ 설계속도가 달라도 특정스테이션 s 는 변하지 않는 것으로 보고 $F_n=0.20$ 부터 $F_n=0.30$ 까지의 최적 선

형계수 α_j 와 각종계수를 계산하여 Table 2에 정리하였으며, 모선(MMS 1) 및 수정선형(MMS 2, MMS 3)과 함께 비교하여 Fig. 14a와 Fig. 14b에 보이고 있다. 이로부터 최적선형(MMS 4)의 조파저항이 전체적으로 줄어들었으며, 특히 파형조파저항이 많이 줄었으며 쇄파저항이 동시에 감소되었음을 알 수 있다.

④ 본 방법과 파형조파저항계수만을 최소화시키는 방법 [9]으로 각각 최적화시킨 선수부 최적횡단면적 곡선을 $F_n=0.26$ 과 $F_n=0.30$ 에서 비교하여 Fig. 15a와 Fig. 15b에 보이는데, 그 차이는 작지만, 쇄파저항을 감소시키는 선수부형상의 특성을 보여주는 것으로 판단된다.

⑤ 설계속도가 다를 때 최적횡단면적 곡선의 차이를 알아보기 위하여 $F_n=0.22, 0.26, 0.30$ 에서의 최적횡

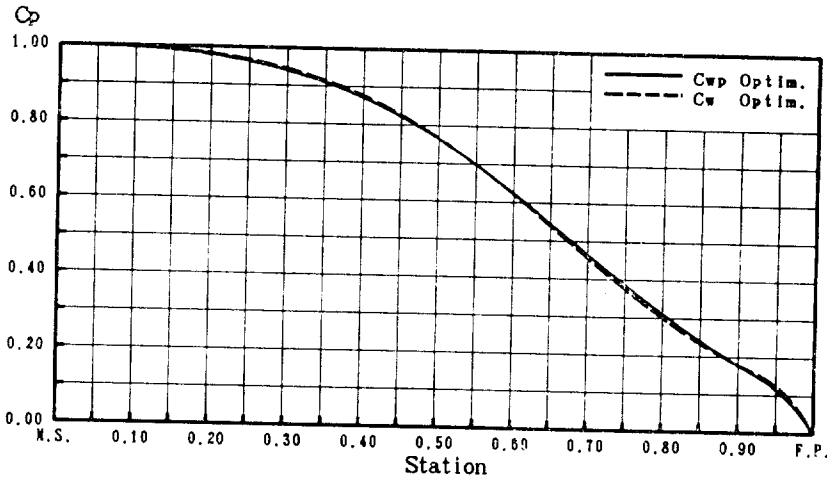


Fig. 15a Comparison of optimum C_p -curve (MMS 4, $F_n=0.26$)

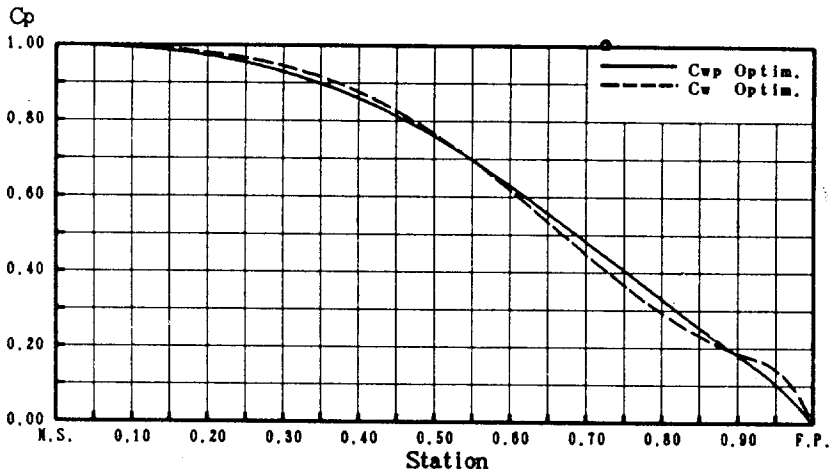


Fig. 15b Comparison of optimum C_p -curve (MMS 4, $F_n=0.30$)

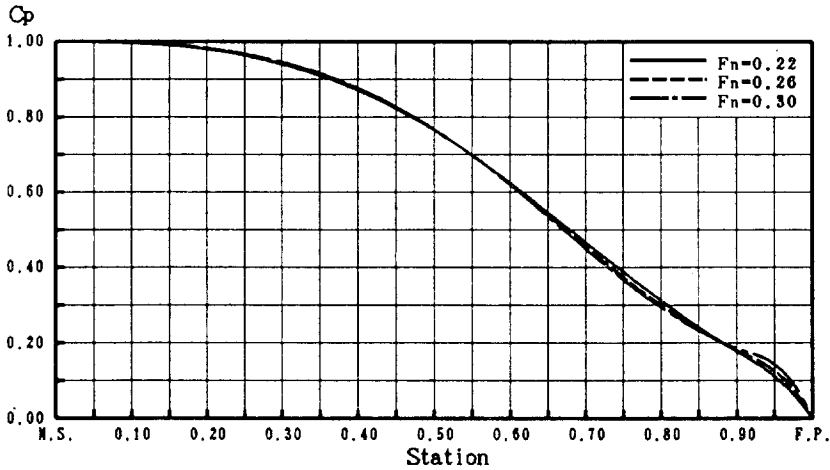


Fig. 16 Optimum C_p -curves of fore-body (MMS 4)

단면적 곡선을 구하여 Fig. 16에 보이고 있는데, 설계 속도가 높을수록 쇄파저항과 관계가 깊은 특정스테이션의 C_p 값이 작아지는 경향을 보이고 있다.

참 고 문 헌

6. 결 언

① 본 논문에서는 파형해석법을 이용하여 계측파형으로부터 파형을 재생시키는 방법과 선체가까운 곳과 멀리 떨어진 곳에서 계측한 두개의 파형을 재생시켜 비교함으로써 선체가까이에 존재하는 쇄파성분을 추출하는 방법을 보였다.

② 선수형상이 포물선이고 측면이 수직한 단순모형 선을 모선으로 하고, 선수부의 횡단면적 곡선을 변화시킨 2척의 수정선형에 대한 저항시험과 파형계측시험을 실시하여 그들의 결과해석으로부터 조파저항성분들과 쇄파최대진폭 및 쇄파각도를 구하였다. 그리고, 이들을 비교검토하여 선수부형상과 쇄파저항성분과의 관계를 조사함으로써 선수부의 특정스테이션형상이 쇄파저항과 관계가 있다는 것을 알 수 있었다.

③ 조파저항이 최소가 되는 선형의 횡단면적 곡선을 찾기 위하여 파형조파저항과 쇄파저항을 동시에 최적화시키는 횡단면적 곡선의 최적화방법을 정립하였다.

④ 본 방법을 측면이 수직한 단순모형선에 적용하여 선체전반부의 횡단면적 곡선을 최적화시킨 개량선형을 얻었으며, 계산결과로부터 설계속도 $F_n=0.26$ 에서 횡단면적 곡선의 형상이 포물선인 기본선형에 비하여 조파저항면에서 약 4%의 감소를 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

[1] Newman, J.N., "The Determination of Wave Resistance from Wave Measurements along a Parallel Cut", International Seminar on Theoretical Wave Resistance, Ann Arbor, Michigan, 1963.
 [2] Sharma, S.D., "A Comparison of the Calculated and Measured Free-Wave Spectrum of an Inuid in Steady Motion", International Seminar on Theoretical Wave Resistance, Ann Arbor, Michigan, 1963.
 [3] 강신형, 이영길, "파형해석법 및 기기개발에 관한 연구", 한국기계연구소연구보고서 UCE 54-67.80, 1980.
 [4] Baba, E., "An Application of Wave Pattern Analysis to Ship Form Improvement", *J.S.N.A.J.*, Vol. 132, 1972.
 [5] Tsutsumi, T., Ogiwara, S. & Jinnaka, T., "On the Principal Particulars of Ship Hull Form and Wave Resistance", *J.S.N.A.J.*, Vol. 136 (1974), Vol. 137, 1975.
 [6] Tsutsumi, T., "An Application of Wave Resistance Theory to Hull Form Design", *J.S.N.A.J.*, Vol. 144, 1978.
 [7] Matsui, M., Tsuda, T. & Ohkubo, K., "A Method for Optimization of Ship Hull Forms

- Based on Wave Pattern Analysis Data”, *J.S.N.A.J.*, Vol. 147, 1980.
- [8] 강신형, 이영길, “파형해석자동화법 및 선형개발에 관한 연구”, 한국기계연구원연구보고서 UCE 75-114. D, 1981.
- [9] 강신형, 이영길, 현범수, “저항성분측정에 의한 선형개발 연구”, 한국기계연구소 연구보고서 UCN 108-189.D, 1982.
- [10] Miyata, H. & Inui, T., “Free Surface Shock Wave around Ships and Their Effects on Ship Resistance”, *J.S.N.A.J.*, Vol. 147, 1980.
- [11] Takahashi, M. & Miyata, H., “Characteristics of Free Surface Shock Waves around Wedge Models”, *J.S.N.A.J.*, Vol. 148, 1980.
- [12] Kawamura, N. & Miyata, H., “Experimental Investigation on the Resistance Component due to Free Surface Shock Waves on Series”, *J.K.S.N.A.*, Vol. 179, 1980.
- [13] Matsui, M., Kitazawa, T. & Nagahama, M., “Observation of Nonlinear Waves around Ship Bow Models”, *J.K.S.N.A.*, Vol. 190, 1983.
- [14] Nito, M., Kajitani, H. & Miyata, H., “Free Surface Shock Waves and Method for Hull Form Improvement (1st, 2nd Report)”, *J.S.N.A.J.*, Vol. 150, 1981, Vol. 152, 1982.
- [15] Miyata, H., Kajitani, H. & Nishimura, S., “A Method of Minimizing Wave Resistance for Hull Forms of Middle-Speed Ships”, *J.K.S.N.A.*, Vol. 189, 1983.
- [16] Wehausen, J.V., “Wave Resistance of Ships,” *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 13, 1973.