

船體運動에 關한 Strip Method 의 一考察

權 寧 中* · 黃 宗 屹**

A Note on the Strip Methods associated with Ship Motion Problems

by

Y. J. Kwon*, J. H. Hwang**

ABSTRACT

The coefficients of equations of heave, pitch and coupled motion are evaluated for the small typical fishing boat(KIST-MRC Fishing Boat) with transom stern in regular head sea. And the results of computations based on eight modes of strip theory are compared one another for the foward speed of Froude number 0.30.

There are some distinctive differences among those theories for the hydrodynamic and coupling coefficients. The former seems to be caused by the effects of the transom stern and the latter of the foward speed.

記 號

$a, b, c, d, e, h, \}$: 運動方程式의 係數
 $A, B, C, D, E, H, \}$

a_n : 斷面附加質量

A_H : heave 로 因한 進行波의 振幅과 heave 振幅과 의 比

b_n : sectional damping coefficient

B_n : 斷面의 水線幅

C_n : $\rho g B_n$

$F(t)$: exciting force

F_n : Froude number ($= u / \sqrt{Lg}$)

g : 重力加速度

I_y : mass moment of inertia

k : wave number ($= 2\pi/\lambda$)

K_A : 附加質量의 自由表面 影響係數

L : 배의 길이

M : 船體의 質量

M_A : longitudinal bending moment 의 振幅

$M(t)$: exciting moment

$O-X_0Y_0Z_0$: 空間의 固定된 座標系

$O'-XYZ$: 船體와 같은 速度로 進行하는 座標系

u : 배의 前進速度

Z : 上下搖動 變位

Z_A : 上下搖動 振幅

Z_{rA} : 相對變位振幅

Z_{vA} : 相對速度振幅

ϵ_z : 上下搖動 位相差

ϵ_θ : 縱搖動 位相差

ϵ_{acc} : 加速度 位相差

ϵ_r : 相對變位 位相差

ϵ_v : 相對速度 位相差

ϵ_M : longitudinal bending moment 位相差

ζ : instantaneous wave elevation

ζ_A : wave amplitude

θ : 縱搖動 位相角

接受日字 1971年 5月 5日

*正會員, 서울大學校 大學院

**正會員, 서울大學校 工科大學

θ_A : 縱搖動 振幅
 λ : 波長
 ρ : 물의 密度

ω : circular frequency
 ω_e : frequency of encounter

1. 緒 論

船體運動에 對한 問題는 造船學者들에게 오랜동안 解決되지 않은 宿題로 남아 있었다. 前世紀末 Kriloff 에 依하여 規則波에서의 船體運動에 關한 理論的 解析이 展開되었는데 이를 "Strip method"의 始稿라고 볼 수 있겠으나 滿足할 만한 解答를 주지 못했다. 그러나 1953 年에 St. Denis 와 Pierson[3]이 船體運動에 線型重疊原理를 導入함으로써 現今에 이르기까지 많은 學者들이 船體運動을 그들이 各自 誘導한 strip method 를 利用해서 解決하는 契機가 마련 되었다.

即 1955 年 Korvin-kroukovsky[7]가 Froude Kriloff 의 假定을 基盤으로 하여 heave 와 pitch 의 聯成運動에 strip method 를 適用했고 곧 이어 1957 年에 Korvin-Kroukovsky 와 Jacobs[8]가 그들의 첫번 方法을 修正했는데 이것이 實船에 適用될 수 있는 처음의 理論이며 이는 "Strip-Slender-Body Theory"로 알려져 있다. 그後 1958 年 Watanabe[25]가 Korvin-Kroukovsky 와 Jacobs 의 方法을 修正하였으며, 1959 年 Vossers[22]가 그의 方法을 發表했고 1967 年 Gerritsma 와 Beukelman[5]은 前進速度項을 加味하여 高速 destroyer 에 使用한 實例를 보여 주었다. 한편 1962 年 Timman 와 Newman[17]은 船體運動方程式 係數中 forward speed 에 關한 項의 symmetry relationship 을 밝혔으며, 1969 年 Söding[14], Tasai 와 Takaki[18] 및 Borodai 와 Netsvetayev 등은 高速과 large bulbous bow 를 가진 船型에 利用할 수 있는 strip method 를 展開했다. 또 1969 年에는 Ogilvie 와 Tuck[13]가 Slender-Body Theory 의 概念을 바탕으로 head sea 에서 진해 새로운 理論을 展開하여 所謂 "Rational Strip Theory"를 誘導해 냈으나 그中 몇개의 項은 아직 積分할 수가 없다. 最近에 Salvesen, Tuck, Faltinsen[15]은 strip method 를 利用하여 oblique sea 에서도 船體運動을 理論的으로 求할 수 있음을 밝혔으며 W. Frank, Salvesen[4]은 "Lewis Form Method"가 適用되지 않는 船型에 Frank 의 "Close-Fit Method"를 利用하여 實驗値와 比較의 近似한 解를 求했다.

以上的 여러 理論들은 船型, 船速 및 船體運動의 振動數 等の 影響에 따라 各各 長短點들을 갖고 있으나 아직 體系의 比較 檢討가 完全히 이루어 지고 있지 않은 것 같다. 이에 本論文에서는 韓國科學技術研究所에서 設計한 小型漁船(KIST-MRC Fishing Boat)에 對하여 8가지의 strip theory 를 運動方程式의 係數面에서 比較 檢討하였으며, 같은 船型에 對하여 head sea 에서의 上下搖動, 縱搖動, 船體中央部에 作用하는 縱 굽힘 모우멘트, 上下搖動과 縱搖動의 聯成運動에 따른 加速度, 船體와 波面과의 相對變位 내지 相對速度들을 몇개의 Froude number 別로 計算하여 比較하였다. 또 몇개의 船型에 對해서 船體運動의 比較檢討도 試圖하였다.

2. Heave 와 Pitch 의 聯成運動方程式

船體의 運動은 線型運動이며 波는 harmonic 이라고 假定했다. 또한 배의 symmetry 를 假定했는데 이에 덧붙여서 배를 long slender hull form 으로 보면 surge 에 聯關되는 hydrodynamic force 가 아주 작아져서 運動方程式에서의 surge 의 影響을 無視할 수 있다. 또한 head sea 에서 lateral motion 은 거의 나타나지 않는다는 등의 假定下에서 誘導되는 一般運動 方程式으로부터 heave 와 pitch 의 coupled motion 에 關한 運動方程式 및 그의 解는 다음과 같다.

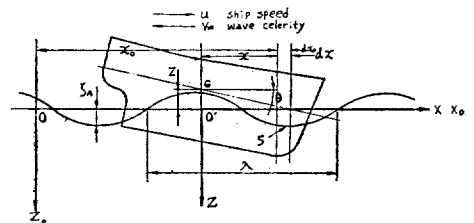


Fig. 1 Co-ordinate System

上下搖動方程式

$$(M+a)\ddot{Z} + b\dot{Z} + cZ + d\ddot{\theta} + e\dot{\theta} + h\theta = F(t) \tag{1}$$

縱搖動方程式

$$(I_y + A)\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + C\theta + D\ddot{Z} + E\dot{Z} + HZ = M(t) \tag{2}$$

coupled motion의 解

$$Z = \frac{\bar{M}Q - FS}{QR - PS}, \quad \theta = \frac{FR - \bar{M}P}{QR - PS} \tag{3}$$

여기서

$$P = -(M+a)\omega e^2 + i b \omega e + c \tag{4}$$

$$Q = -d\omega e^2 + i e \omega e + h \tag{5}$$

$$R = -D\omega e^2 + i E \omega e + H \tag{6}$$

$$S = -(I_y + A)\omega e^2 + i B \omega e + C \tag{7}$$

이며 Z, θ 및 F, \bar{M} 는 complex form이다.

上記 運動方程式의 係數는 序論에서 밝힌 바와 같이 여러 研究者들이 各各 다른 見地에서 算出하였으며, 各 理論들의 特徵을 Appendix에 整理해 놓았다.

3. 計算 및 結果

(1) 計 算

Ordinary strip method에 依하여 正面規則 波中에서의 船體運動 및 wave longitudinal bending moment 等を Tasai와 Takaki[18]에 倣해서 計算하였다.

計算한 F_n 및 波長의 길이 範圍는 다음과 같다.

$F_n = 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.39.$

$\lambda/L = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6.$

計算에 使用한 KIST-MRC fishing boat(供試船型)의 lines는 Fig. 2와 같으며, 主要치수는 다음과 같다.

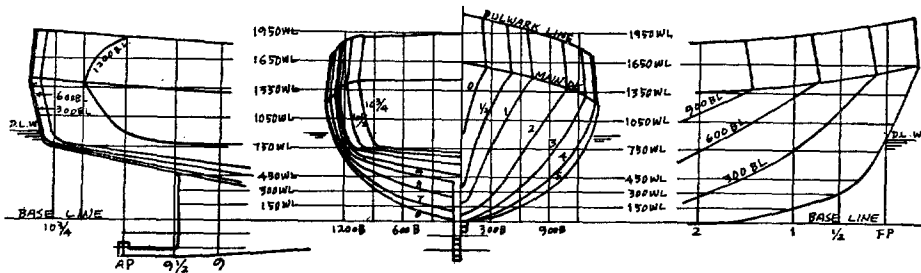


Fig. 2 Lines of KIST-MRC Fishing boat.

length over all	11.000 m	volume of disp.	11.58m ³
length between perpendiculars	9.670 m	block coeff.(C _b)	0.44
breadth(MLD)	2.800 m	midship coeff.(C _m)	0.79
depth(MLD)	1.220 m	L.C.B. forward from midship	2050m
draft(DLWL)	0.900 m	radius of gyration(assumed)	0.25L _{bp}

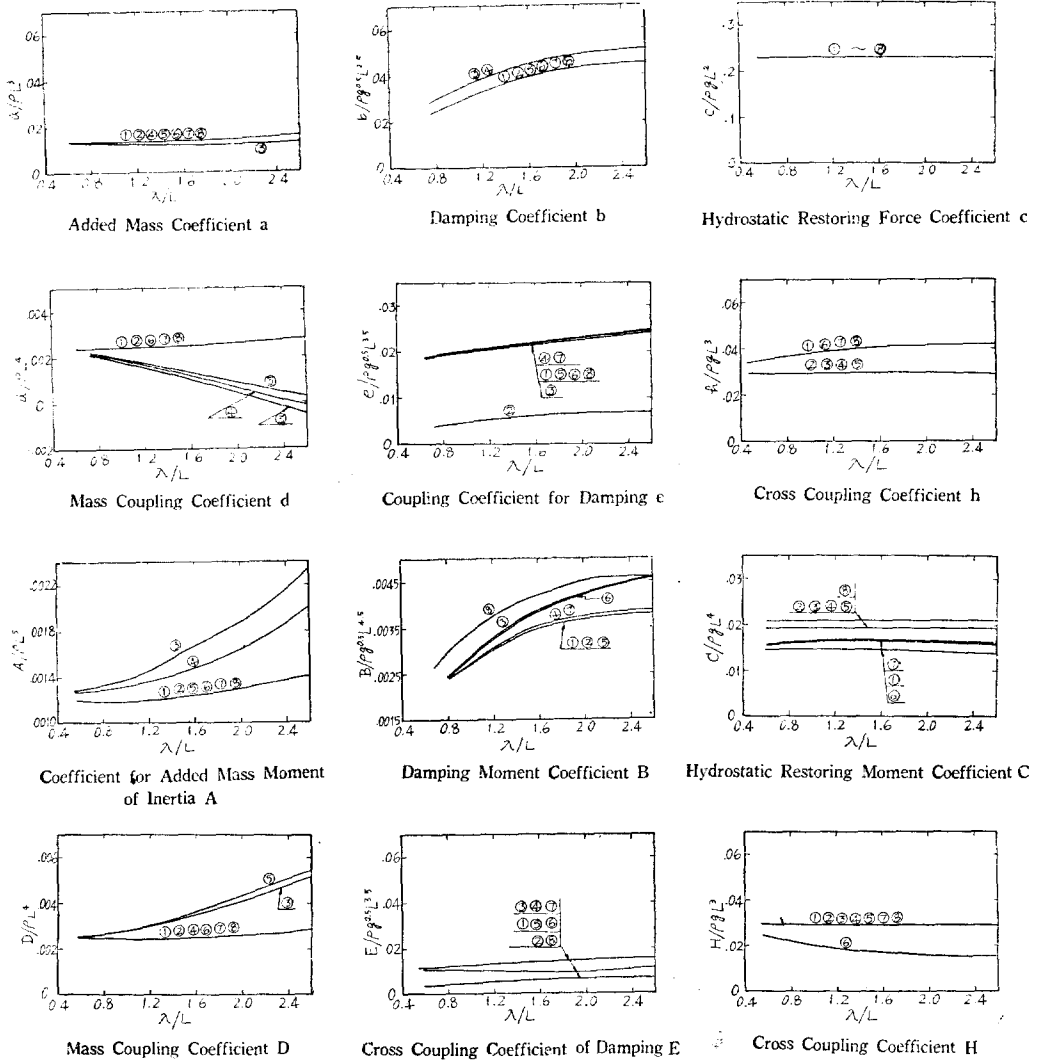
船型에 對한 比較에 使用한 船型들의 中央斷面은 Fig. 15에 圖示하였다.

(2) 結 果

모든 係數들은 Fig. 3의 各圖의 縱座標軸에 表示한 바와 같이 無次元化하였다.

各理論의 係數 比較는 Fig. 3에 graphing 하였으며, F_n 의 變化에 따른 船體運動의 變化는 Fig. 4~Fig. 15에 收錄하였다.

또 heave와 pitch의 船型에 對한 比較는 F_n 0.30에 對한 結果단을 Fig. 17에 收錄하였다.



- ① Ordinary Strip Theory
- ② Vossers's Strip Theory
- ③ Vugt's (or Semenov-Tjan-Tsanskij) Strip Theory
- ④ Gerritsma & Beukelman's Strip Theory
- ⑤ Rational Strip Theory (Ogilvie & Tuck)
- ⑥ Tasai & Takaki's Strip Theory
- ⑦ Strip-Slender Body Theory (Korvin-Kroukovsky & Jacobs)
- ⑧ Pure Strip Theory (Vassilopoulos & Mandel)

Fig. 3. Comparison of the Coefficients.

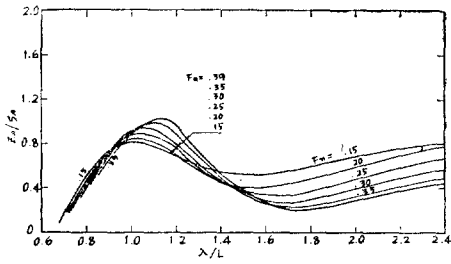


Fig. 4 Amplitude (heave)

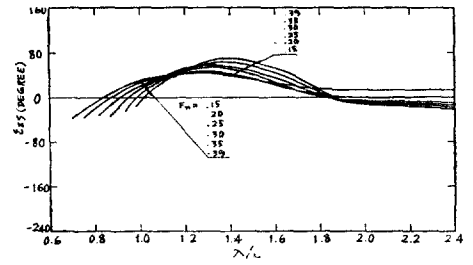


Fig. 5 Phase difference (heave)

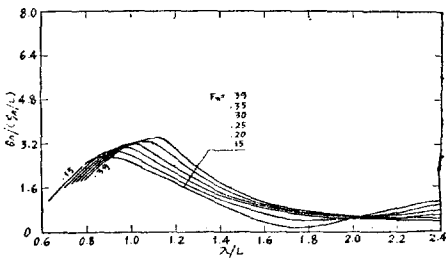


Fig. 6 Amplitude (pitch)

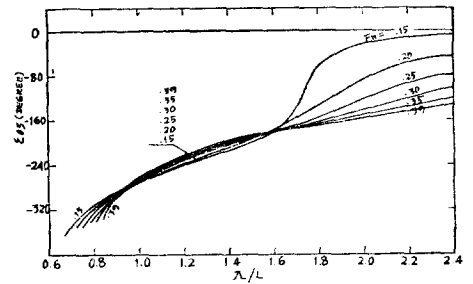


Fig. 7. Phase difference (pitch)

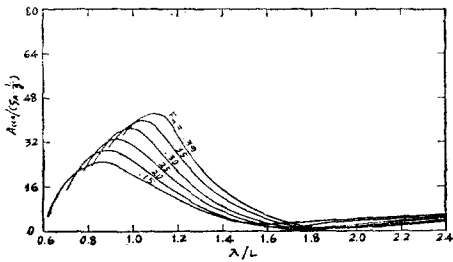


Fig. 8 Amplitude of acceration due to coupling motion

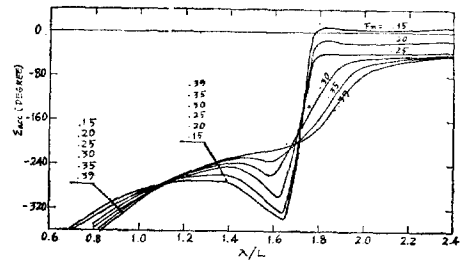


Fig. 9 Phase difference of acceration due to coupling motion

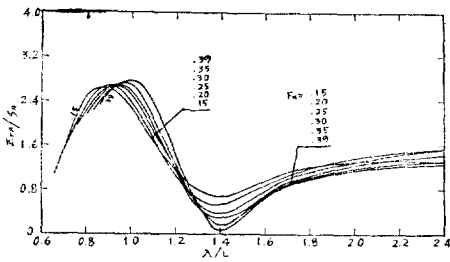


Fig. 10 Amplitude of relative displacement due to coupling motion(at bow)

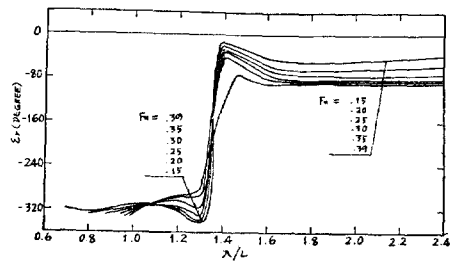


Fig. 11 Phase difference of relative displacement due to coupling motion(at bow)

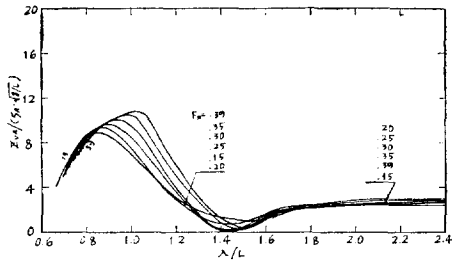


Fig. 12 Amplitude of relative velocity due to coupling motion(at bow)

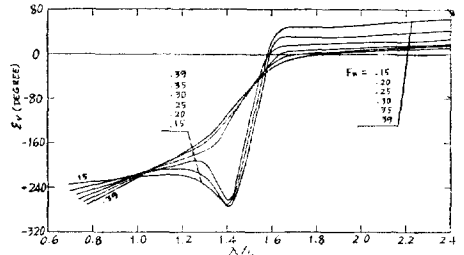


Fig. 13 Phase deference of relative velocity due to coupling motion(at bow)

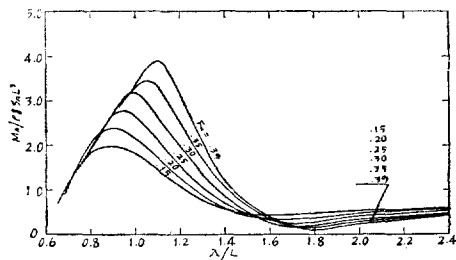


Fig. 14 Wave longitudinal bending moment(at midship section)

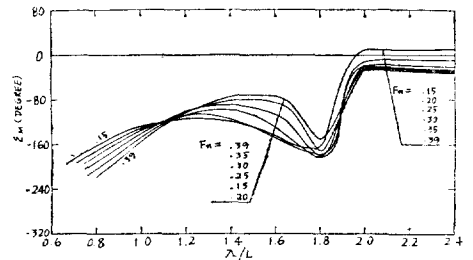


Fig. 15 Phase deference of wave bending moment(at midship section)

4. 考 察

(1) 여러 Strip Theory 의 係數에 關한 比較

運動方程式의 係數에 對하여 考察하여 보면 다음과 같다(但, 便宜上 Fig. 1 에서의 番號로 各 理論을 代身 하겠다).

係數 a 에서는 船尾 影響을 考慮한 ③의 理論이 나머지 理論보다 약간 작았으며 $\lambda/L \approx 0.7$ 에서 一致하고 波長이 길어짐에 따라 그 差가 커졌다.

b 에서도 b 와 마찬가지로 船尾 影響을 考慮한 ③, ④의 理論이 나머지 것보다 0.006 程度 大았으며 이 差는 波長의 影響을 거의 받지 않았다. Davidson-A 에 對하여 Beukelman 이 行한 實驗結果[2]로는 前進速度와 船尾 影響을 함께 考慮하여 준 ③, ④가 보다 더 컸으며 測定値와도 잘 맞았다. 이러한 傾向은 F_w 가 커질 수록 더욱 현저하게 나타났다. 한편 b 에 對해서는 ⑤가 ③, ④를 除外한 나머지 理論들과 같다는 點을 감안 할 때 transom stern 의 高速船에 對해서는 ③, ④가 더 正確하다고 볼 수 있다.

d 에서는 速度項과 sectional added mass 및 sectional damping 의 兩面에서 船尾 影響을 考慮하여 준 ④가 ③보다 조금 컸고 速度項만을 考慮하여 준 ⑤가 좀더 컸으나 ③, ④, ⑤의 差는 거의 없었고 速度 및 船尾 影響을 모두 考慮치 않은 나머지 方法과의 差는 현저 하였다. Beukelman 의 Davidson-A 의 實驗結果[2]로는 ③, ④, ⑤가 測定値와 比較的 잘 맞았다. 또 W.E. Smith 도 Friesland class frigate 에 對한 實驗을 通하여 d 에 미치는 速度의 影響이 至大함을 밝혔다. 上述한 3 가지 點으로 미루어 보아 高速에서는 ③, ④, ⑤의 d 가 妥當함을 알 수 있다.

e 에서는 速度項만을 修正하여 준 ①, ⑤, ⑥, ⑧과 速度外에 船尾 影響 까지도 考慮하여준 ④, ⑦ 및 ③의 理論들은 波長에 無關하게 거의 一致했으나 아무런 修正도 加하지 않은 ②만이 唯獨 작았다. Davidson-A 에 對하여 實驗한 Beukelman [2]의 結果를 보면 低速에서는 ③, ④, ⑤가 高速에서는 ③, ④가 測定値와 잘 맞았다.

h 에서는 速度項을 考慮하여 넣은 h1 과 考慮치 않은 h2 사이에 相當한 差를 볼 수 있었다.

A 에서는 前進速度 및 船尾의 影響을 考慮한 ③, ④와 考慮치 않은 나머지와는 多少의 差를 나타 냈으나

Davidson-A에 對한 Beukelman의 實驗[2]에서는 ③보다도 아무런 修正을 하지않은 나머지가 오히려 測定値와 잘 맞았다. 또한 Tuck가 主張하는 바와 같이 前進速度에 따른 pitch added moment의 變化는 普通船舶에서는 無視할 수 있다는 點[19] 등으로 미루어 보아 A에서의 前進速度 影響은 적을 것으로 생각한다.

前進速度 및 船尾影響의 考慮에 多樣한 異論을 자아낸 B는 다른 係數에 비해 各 理論들 사이에 別差가 없었다. 또 Beukelman의 實驗結果[2]로는 速度나 船尾影響을 考慮치 않은 ⑤가 影響을 考慮한 ③, ④보다는 오히려 測定値와 잘 맞았고 Tuck가 主張하는 바와 같이 高速船을 除外하고는 pitch damping correction을 無視할 수 있다는 點[19] 등으로 보아 B에 對한 各 理論의 修正은 再考되어야 할 것 같다.

C는 速度와 船尾 修正項들 關係로 波長에 無關하게 多少의 差를 보여 주었으며 最大差는 ③과 ⑥의 0.007이었다. ①과 ⑦이 거의 一致한 點으로 보아 ⑦의 船尾修正項은 거의 無視할 수 있을 程度이다.

D에서는 symmetry theorem에 따라 前進速度를 考慮한 ③과 ⑤는 別差가 없었으나 修正을 하지 않은 나머지 理論들과는 相當한 差가 있었다. Beukelman은 Davidson-A의 實驗을 통하여 ③과 ⑤는 測定値와 매우 잘 맞았다고 밝혔고[2], 또 Smith도 symmetry theorem에 依한 速度의 修正이 高速船에서 重要함을 實驗을 통하여 證明한 點[4]으로 보아 高速船의 D는 ③이나 ⑤가 妥當한 듯하다. ③과 ⑤가 無視할 程度이나 差를 나타 낸 것은 ③의 船尾考慮에 基因된다 하겠다.

E에서도 對稱論의 見地에서 速度項을 考慮한 ③, ④, ⑦ 및 ①, ⑤, ⑥과 修正않은 ②, ⑧과는 波長の 全 範圍에서 제법 큰 差를 보였다. Beukelman은 Davidson-A의 實驗을 통하여 高速에서는 ③, ④가 普通速度에서는 ⑤가 測定値와 잘 맞음을 보여 주었다는 點[2]과 W. Frank 및 N. Salvesen의 主張으로 보아 Newman-Timman의 對稱論에 依한 速度의 修正은 船速이 빨라짐에 따라 E項에서도 不可避한 것으로 보인다. 또한 같이 速度修正은 하였으나 船尾修正을 하지 않은 ①, ⑤, ⑥과 船尾考慮까지도 하여준 ③, ④, ⑦과의 相當한 差는(最大 0.005) transom stern의 影響이 E에 미치는 힘이 큼을 짐작할 수 있다.

H에 對해서는 靜的項 $\int_L C_n x dx$ 외에 速度項을 包含한 ⑥이 나머지 것보다 相當히 작다(最大差 $\lambda/L=2.5$ 에서 0.015).

(2) 船體運動에 對한 前進速度의 影響

規規則波中の 各種 船體動動에 對한 前進速度의 影響을 供試船型에 對한 O.S.M.에 依한 計算結果를 中心으로 檢討하여 보겠다.

上下搖動振幅은 $\lambda/L=0.9\sim 1.4$ 에서 最大가 된다. F_n 가 클수록 最大값도 커지며, 이값이 나타나는 λ/L 의 값도 커진다. $F_n=0.39$, $\lambda/L=1.15$ 때 振幅比가 最大며 그 값은 1.02이다. $\lambda/L=1.4$ 이상에서는 船速이 빨라 질수록 振幅比가 오히려 작아진다. 上下搖動位相差는 F_n 의 影響을 別로 받지 않았으며 $\lambda/L=1.8$ 이상의 long wave에서는 零度에 收斂한다.

縱搖動振幅도 上下搖動 振幅과 거의 같은 傾向을 가진다. $\lambda/L=1.13$, $F_n=0.39$ 때 振幅比가 最大며, 그 크기는 3.3이다. 縱搖動位相差의 경우 $\lambda/L=1.6$ 以下에서는 F_n 의 影響이 거의 없었고 그 以上の wave에서는 F_n 의 影響이 뚜렷하였다.

聯成運動에 依한 加速振幅 $\left(Acc_A / \left(\zeta_A \frac{L}{g} \right) \right)$ 도 heave amp.와 全般的인 傾向이 같다. $\lambda/L=1.13$ 때 最大며 그 값은 42이다. $\lambda/L=1.6$ 以上에서는 船速의 影響을 거의 받지 않는다. 位相差의 傾向도 pitch 때와 類似하다.

船首에 對한 聯成運動의 相對變位 및 相對速度의 振幅比는 $\lambda/L=1.3$ 에서 $F_n=0.39$ 때 最大가 된다. 그 크기는 各各 2.78 및 10.8이다. 最大값이 나타나는 波長 및 F_n 에 對한 變化는 pitch나 heave 때와 비슷하며 $\lambda/L=1.4$ 때 極少가 된다. 相對變位 및 相對速度의 位相差는 F_n 의 影響을 거의 받지 않는다.

船體中央部 wave longitudinal bending moment의 傾向도 heave amp. 때와 大差없다. 振幅比는 $\lambda/L=1.1$ 때 最大며($F_n=0.39$) 그 값은 3.9이다. 位相差는 長波에서는 零에 收斂한다.

(3) 供試船型과 他 船種과의 比較檢討

供試船型과 他船種 Davidson-A, Series 60($C_B=.70$)을 $F_n=0.30$ 때 pitch 와 heave 에 對하여 Fig. 17~18 을 中心으로 比較 檢討하였다.

heave 의 경우 $\lambda/L=1.15$ 以下인 波에 對해서는 供試船型이 他 船種에 比하여 나쁘며, $\lambda/L=1.15$ 와 $\lambda/L=1.4$ 인 波에서는 Brave 級 planning hull 보다 좀 나쁘지만 Davidson-A 나 Series 60 보다는 매우 좋다. $\lambda/L=1.4$ 以上の 波에서는 供試船型이 가장 좋다.

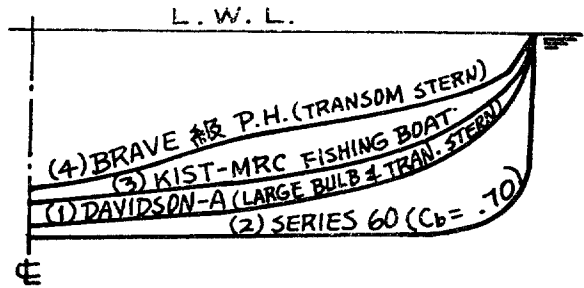
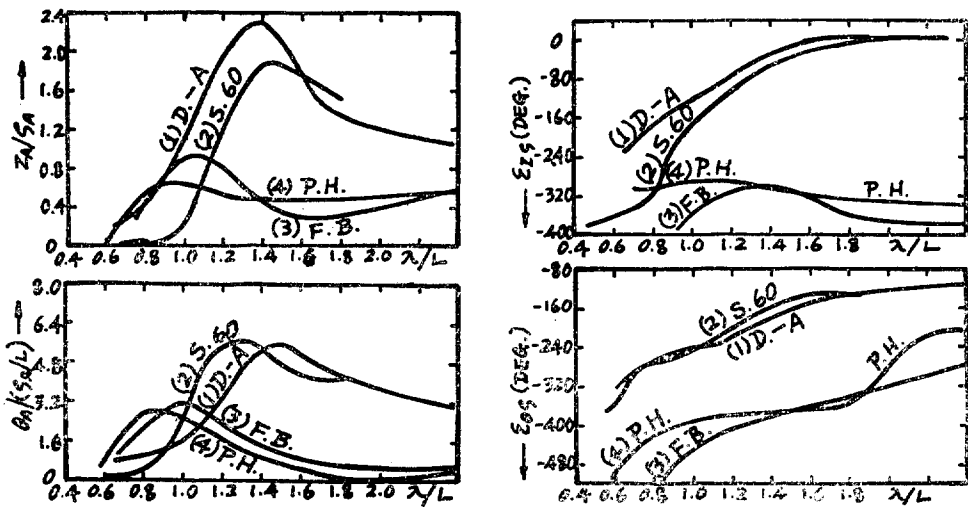


Fig. 16 Midship Section



(a) Heave and pitch amplitudes

(b) Phase difference

Fig. 17 Comparison of heave and pitch characteristics for various hull forms($F_n=.30$)

pitch 의 경우 $\lambda/L=0.9$ 以下에서는 Brave 級 planning hull 보다는 나쁘며, $\lambda/L=1.1$ 以上の 波에 對해서는 Brave 級 planning hull 을 除外한 나머지 두 船種보다는 매우 좋은 것 같다.

5. 結 論

係數 a 에 transom stern effect 를 考慮하여 준 Vugts 의 方法이 end effect 를 考慮치 않은 나머지 것 보다 작았으며, b 에서도 end effect 를 加味한 Vugts 의 方法이나 Gerritsma 와 Beukelman 의 結果가 end effect 를 考慮치 않은 나머지 方法들 보다 相當히 靚고, 또 E 에서도 船尾考慮를 하여준 Vugts 等의 方法이 end effect 를 考慮치 않은 나머지 方法들 보다 靚다는 點으로 보아 stern effect 가 coeff. a , b 및 E 에 미치는 影響은 큰 것 같다.

前進速度를 考慮하여 준 Vugts, Gerritsma 와 Beukelman 및 Ogilvie 와 Tuck 等의 結果가 係數 d, e, h, D, E, H 等에서 考慮치 않은 他 方法의 結果와 相當한 差를 나타냈다는 點(특히 e 에서 速度項을 考慮치 않은 Vos-sers 의 方法과 이를 考慮한 他 結果와의 差가 靚지함)으로 보아 前進速度의 coupling coeff. 에 對한 影響은 크다.

또 係數中 a, d, h, A, D, H , 等은 波長의 배의 長이에 對한 比에 影響을 많이 받으며, b, e, B, E 는 거의 影響을 받지 않는다.

供試船型과 같은 transom 船尾를 가지는 船型에 對해서도 普通船尾를 가지는 船型과 마찬가지로 上下搖動, 縱搖動 等의 最大振幅은 배의 길이와 비슷한 波長의 波에서 나타나며, 前進速度가 빨라질 수록 各運動의 最大振幅이 나타나는 波長도 점점 길어지며, 그 最大振幅도 커진다.

後 記

여러가지 資料를 提供하여 주시고 有益한 助言을 주신 韓國科學技術研究所의 金燾喆博士에게 感謝를 드리며 또 本 論文作成에 있어서 여러가지로 도와 준 崔恒洵, 金正濟, 申起元君에게 感謝한다.

本研究에 關聯된 計算은 서울大學校 工科大學의 IBM 1130 計算組織을 使用하여 遂行되었다.

參 考 文 獻

- [1] M.A. Abkowitz, L.A. Vassilopoulos and F. H. Sellas, "Recent Developments in Seakeeping Research and its Application to Design", *advanced copy of paper to be presented at annual meeting*, New York, N.Y., November 1966.
- [2] W. Beukeleman, "Pitch and Heave Characteristics of a Destroyer," *Delt, Netherlands, Shipbuilding Laboratory, Report No. 157*, January 1970.
- [3] M. St. Denis and W.J. Pierson, "On the Motions of Ships in Confused Seas," *Tran. SNAME*, vol. 61, 1953.
- [4] W. Frank and N. Salvensen, "The Frank Close-Fit Ship Motion Computer Program," *Department of Hydromechanics Research and Development, Report No. 3289*, June 1970.
- [5] J. Gerritsma and W. Beukelman, "Analysis of the Modified Strip Theory for the Calculation of Ship Motions and Wave Bending Moments," *Neth. Ship Research Center, Report No. 96S*, June 1967.
- [6] W.P.A. Joosen, R. Wahab and J.J. Woortman, "Vertical Motion and Bending Moments in Regular Waves" *Netherlands, Shipbuilding Laboratory, Report No. 67-093-ZT*. June 1967.
- [7] B.V. Korvin-Kroukovsky(1955c), "Investigation of Ship Motions in Regular Waves," *SNAME*, vol. 63, 955.
- [8] B.V. Korvin-Kroukovsky and W.R. Jacobs, "Pitching and Heaving Motions of a Ship in Regular Waves," *Trans. SNAME*. Vol. 65, 1957.
- [9] B.V. Korvin-Kroukovsky, "*Theory of Seakeeping*,"(text) Published by *SNAME*, 1961.
- [10] E.V. Lewis, "*The Motion of Ships in Waves*"(text) P.N.A. chapter IX.
- [11] L. Lendweber and M.C. de Mecagno, "Added Mass of Two Dimensional Forms Oscillating in a Free Surface," *Journal of Ship Research*, November 1957.
- [12] T.F. Ogilvie, "Recent Progress Toward the Understanding and Prediction of Ship Motion," *Proceedings of the ONR Fifth Symposium on Naval Hydrodynamics*, Bergen, Norway, 1964.
- [13] T.F. Ogilvie and E. O. Tuck, "A Rational Strip Theory of Ship Motion: Part I," *Department of Naval Architecture, the University of Michigan, Report No. 013*, 1969.
- [14] H. Söding, "Eine Modifikation der Streifen Method," *Schiffstechnik* Bd. 16, Heft 80, 1969.
- [15] N. Salvesen, E.O. Tuck and O. Faltinsen, "Ship Motions and Sea Loads," *advanced copy of paper to be presented at the annual Meeting*, New York, N.Y., November 12-13, 1970.
- [16] W.E. Smith, "Computation of Pitch and Heave Motions for Arbitrary Ship Forms," *International Shipbuilding Progress*, Vol. 14, 1967.
- [17] R. Timman and J.N. Newman, "The Coupled Damping Coefficients of Symmetric Ships," *Journal of Ship Research*, vol. 5, No. 4, 1962.

- [18] F. Tasai and M. Takaki, "Theory and Calculation of Ship Responses in Regular Waves," (in Japanese), *Symposium on Seaworthiness of Ships, Japan Society of Naval Architects*, 1969.
- [19] E.O. Tuck, "A systematic Asymptotic Expansion Procedure for Slender Ships," *Journal of Ship Research*, vol. 8. No. 1, 1964.
- [20] F. Ursell, "On the Heaving Motion of a Circular Cylinder on the Surface of a Fluid," *Quart. Journal Mech. and Applied Math.*, vol. II 1949.
- [21] L. Vassilopoulos and P. Mandel, "A New Appraisal of Strip Theory," *Proceedings of the ONR Fifth Symposium on Naval Hydrodynamics*, Bergen, Norway, 1964.
- [22] G. Vossers, "Some Applications of the Slender Body Theory in Ship Hydrodynamics," *Publication No. 214. of the Netherlands Ship Model Basin*
- [23] J.H. Vugts, "The Hydrodynamics Coefficients for Swaying, Heaving," *Shipbuilding Laboratory Report No. 194* January 1968.
- [24] G. Vossers, "Fundamentals of the Behaviour of Ships in Waves," *International Shipbuilding Progress* vol. 6, No. 64, December 1959.
- [25] K. Watanabe, "On the Theory of Pitch and Heave of a Ship," *Technology Reports of the Kyushu University*, vol. 31, No. 1, January 1958.
- [26] Kurt Wendel, "Hydrodynamische Massen und Hydrodynamische Massenträgheit Momente," *JSTG*, bane 44, 1950.
English translation "Hydrodynamic Masses and Hydrodynamic Moments of Inertia," *DTMB No. 260* July 1956.

Appendix

여러가지 strip theory

① Ordinary strip theory[10], [18]

取扱이 容易하고 工學的인 精度를 滿足시켜 주므로 一般的으로 추천되어 저나 高速範圍에서 잘 맞지 않는다.

② Vosser's strip theory[22]

船體를 兩端이 뾰족한 slender body 로 看做하고, 배의 前進速度와 流體粒子의 orbital motion 에 관한 Smith effect 를 無視했다.

③ Vugts(or Semenof-Tjan-Tsanskij) strip theory[2]

Timman 과 Newman 의 symmetry relationship 을 滿足시키도록 forward speed term 을 修正하였다.

④ Gerritsma and Beukelman's theory[5]

Transom stern 의 end effect 를 考慮하여 주었고, Davidson-A type 와 같은 高速船에 適用될 수 있도록 速度項을 修正하였으나, 前進速度의 영향이 크게 作用하는 [16] D 에는 symmetry relationship 이 맞지 않는다.

⑤ Ogilvie and Tuck's theory(Rational Strip Theory)[13]

d 와 D 에 forward speed term 이 있고 symmetry relationship 을 滿足하므로 高速船에서는 比較的 잘 맞는다[15]. 그러나 對稱論이 適用될 수 없는 Davidson-A type 와 같은 transom stern 을 갖는 때에는 不適當하다[2].

⑥ Tasi's theory[18]

O.S.T.에 缺如되어 있는 速度項을 補充하였으나 係數 d 와 D 에 symmetry theorem 을 適用시키지 않고 있다.

⑦ Korvin-Kroukovsky and Jacob's theory[8]

Froude-Kriloff hypothesis 를 利用했던 1955年 Korvin-Kroukovsky 의 理論에 波에 따른 energy dissipation

을 考慮하였고, 速度項(or damping)을 修正하였다[8]. 하지만 station間的 wave system의 영향을 無視했고 pitch damping coeff.에 前進速度를 考慮치 않았다[1].

③ Vassilopoulos and Mandel's strip theory[21]

Strip-Slender-body theory의 係數中 e, B, C, E 項에 3-dimensional하게 速度項을 考慮해 넣고, Symmetry theorem도 適用시켰다.

各 理論들의 係數들은 다음과 같다. 便宜上 係數들은 同型인 것을 모아 a_i, b_i, \dots, h_i 및 A_i, B_i, \dots, H_i 로 表示했으며, 比較目的으로 Korvin-Kroukovsky의 表記法을 使用하였다.

Table 1 Comparison of the Coefficients

Coeff.	Corresponding theories	Coeff	Corresponding theories
a	①②④⑤⑥⑦⑧< a_1 >; ③< a_2 >	A	①②⑤⑥⑦⑧< A_1 >; ③< A_2 >; ④< A_3 >
b	①②⑤⑥⑦⑧< b_1 >; ③④< b_2 >	B	①②⑤< B_1 >; ④⑦< B_2 >; ③< B_3 >; ⑥< B_4 >; ⑧< B_5 >
c	①~⑧< c >	C	①< C_1 >; ②③④⑤< C_2 >; ⑥< C_3 >; ⑦< C_4 >; ⑧< C_5 >
d	①②⑥⑦⑧< d_1 >; ③< d_2 >; ④< d_3 >; ⑤< d_4 >	D	①②④⑥⑦⑧< D_1 >; ③< D_2 >; ⑤< D_3 >
e	①⑤⑥⑧< e_1 >; ④⑦< e_2 >; ②< e_3 >; ③< e_4 >	E	①⑤⑥< E_1 >; ②⑧< E_2 >; ③④⑦< E_3 >
h	①⑥⑦⑧< h_1 >; ②③④⑤< h_2 >	H	①②③④⑤⑦⑧< H_1 >; ⑥< H_2 >

$$a_1 = \int a_n dx$$

$$a_2 = \int a_n dx + \frac{u}{w_e^2} \int \frac{db_n}{dx} dx$$

$$b_1 = \int b_n dx$$

$$b_2 = \int b_n dx + u \int \frac{da_n}{dx} dx$$

$$c = \int c_n dx$$

$$d_1 = - \int a_n x dx$$

$$d_2 = - \int a_n x dx - \frac{2u}{w_e^2} b_n dx + \frac{u^2}{w_e^2} \int \frac{da_n}{dx} dx - \frac{u}{w_e^2} \int \frac{b_n}{db_n} x dx$$

$$d_3 = - \int a_n x dx - \frac{u}{w_e^2} \int b_n dx + \frac{u^2}{w_e^2} \int \frac{da_n}{dx} dx$$

$$d_4 = - \int a_n x dx - \frac{u}{w_e^2} \int b_n dx$$

$$e_1 = - \int b_n x dx + u \int a_n dx$$

$$e_2 = - \int b_n x dx + 2u \int a_n dx + u \int \frac{da_n}{dx} x dx$$

$$e_3 = - \int b_n x dx$$

$$e_4 = - \int b_n x dx + 2u \int a_n dx + u \int \frac{da_n}{dx} x dx + \frac{u^2}{w_e^2} \int \frac{db_n}{dx} dx$$

$$h_1 = - \int c_n x dx + u \int b_n dx$$

$$A_1 = \int a_n x^2 dx$$

$$A_2 = \int a_n x^2 dx + \frac{2u}{w_e^2} \int b_n x dx - \frac{u^2}{w_e^2} \int \frac{da_n}{dx} x dx + \frac{u}{w_e^2} \int \frac{b_n}{db_n} x^2 dx$$

$$A_3 = \int a_n x^2 dx + \frac{u}{w_e^2} \int b_n x dx - \frac{u^2}{w_e^2} \int \frac{da_n}{dx} x dx$$

$$B_1 = \int b_n x^2 dx$$

$$B_2 = \int b_n x^2 dx - 2u \int a_n x dx - u \int \frac{da_n}{dx} x^2 dx$$

$$B_3 = \int b_n x^2 dx - 2u \int a_n x dx - u \int \frac{da_n}{dx} x^2 dx - \frac{u}{w_e^2} \int \frac{db_n}{dx} x dx$$

$$B_4 = \int b_n x^2 dx + \frac{u^2}{w_e^2} \int b_n dx$$

$$B_5 = \int b_n x^2 dx - u \int a_n x dx$$

$$C_1 = \int c_n x^2 dx - uE$$

$$C_2 = \int c_n x^2 dx$$

$$C_3 = \int c_n x^2 dx - u^2 \int a_n dx$$

$$C_4 = \int c_n x^2 dx - u \int b_n x dx + u^2 \int \frac{da_n}{dx} x dx$$

$$C_5 = \int c_n x^2 dx - u \int b_n x dx$$

$$D_1 = d_1$$

$$h_2 = - \int c_n x dx$$

$$D_2 = - \int a_n x dx - \frac{u}{w_e^2} \int \frac{db_n}{dx} x dx$$

$$D_3 = - \int a_n x dx + \frac{u}{w_e^2} \int b_n dx$$

$$E_1 = - \int b_n x dx - u \int a_n dx$$

$$E_2 = - \int b_n x dx$$

$$E_3 = - \int b_n x dx + u \int \frac{da_n}{dx} x dx$$

$$H_1 = - \int c_n x dx$$

$$H_2 = - \int c_n x dx - u \int b_n dx$$