
 論 文

大韓造船學會論文集
 第29卷第3號 1992年8月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol.29, No. 3, August 1992

低速前·後進操縱에 의한 動流體力의 數學모델

金辰安*, 李承建*

Mathematical Model for the Hydrodynamic Forces in Forward or Backward Low Speed Maneuvering

by

Jin-Ahn Kim* and Seung-Keon Lee*

요 약

操縱運動의 正確한 豫測이 切實하게 요구되는 港灣內에서의 操縱運動과 같이, 低速이며 또 淺水域에서의 船舶의 操縱運動을 잘 表現하는 數學 Model은 아직 얻어지지 않고 있는 것이 현재까지의 實情이라 할 것이다.

일본의 Kose는 低速時 船體流體力의 새로운 Model을 提案한 바 있으나 아직 그 유용성에 대해서는 多方面에서 檢討가 必要하다고 할 것이다.

本 論文은 이러한 現實에서, 우선 低速時의 Hull 流體力를 잘 表現할 수 있는 새로운 方法을 모색하여 이를 Kose의 Model이나 從來의 M.M.G.Model 또는 Cross-Flow Drag Model등과 비교하여, 低速時의 船體에 作用하는 流體力를 잘 나타낼 수 있는 Model을 개발 하려고 한다.

數學 Model의 優劣을 判定하는 方法으로서, 일본의 RR-742部會에서 실험한 低速時 ($f_n = \pm 0.06$, $U = \pm 0.3\text{m/s}$)의 前後進에 대한 Bare Hull의 CMT결과로 얻어진 進후력, 횡력, 선회모멘트를 Data로 삼아 이들을 각각 Kose Model, Cross-flow Model, MMG Model 및 新 Model에 의하여 Fitting하고, Fitting의 標準偏差를 비교하였다.

Abstract

The Mathematical Model, which can describe the maneuvering motion of a ship in low speed, is highly required these days because it is directly related to the safety of ship in confused harbour.

Kose has presented a new model for the low speed maneuvering motion, but the usefulness of it is not confirmed widely. Lots of difficulties are revealed in the case of low speed

발표 : 1991년도 대한조선학회 추계연구발표회('91.11.16)
 접수일자 : 1991년 12월 12일, 재접수일자 : 1992년 5월 1일
 * 정회원, 부산대학교 조선공학과

maneuver, The first is the fact that a ship moves the stirred water region for the longer time than in the case of high speed. So, the hydrodynamic forces, exerted on the hull need to be treated strictly, not by the ordinary differential equation with constant coefficients.

Another difficulty is arised from the fact the lateral motion is relatively large comparing to the longitudinal motion in low speed. And, by the result the effect of cross-flow drag or vortex shedding effects are dominant.

Besides, the captive model tests of low speed motion has lots of problems. For example, the hydrodynamic forces do not converge to a certain values for the long time. And the absolute values of measured forces are very small, so we must expend lots of efforts to raise up the S/N ratio of the experiments.

In this paper, a new mathematical model for the maneuvering motion in low speed, is built up, and the usefulness is discussed, comparing with other models, for example, Kose's model or M.M.G.model or Cross-Flow model, The CMT data for a PCC model of 3.00 M length, released from the RR-742 of Japan, are used for the validation of each models.

1. 序 論

中·高速으로 運航하는 船舶의 操縱運動은 日本의 M.M.G數學 Model[1]과 같은 組合型의 Model을 사용하여 精正度높게 표현 됨은 周知의 사실이다.

한편, 操縱運動의 正確한 豫測이 切實하게 요구되는 港灣內에서의 操縱運動과 같이, 低速이며 또 淺水域에서의 船舶의 操縱運動을 잘 表現하는 數學 Model은 아직 얻어지지 않고 있는 것이 현재까지의 實情이라 할 것이다.

일본의 Kose[2]는 低速時 船體流體力의 새로운 Model을 提案한 바 있으나 아직 그 有用성에 대해서는 多方面에서 檢討가 必要하다고 할 것이다.

本 論文은 이러한 現實에서, 우선 低速時의 Hull 流體力을 잘 表現할 수 있는 새로운 方法을 모색하여 이를 Kose의 Model이나 從來의 M.M.G.Model 또는 Cross-Flow Drag Model등과 比較하여, 低速時의 船體에 作用하는 流體力을 잘 나타낼 수 있는 Model을 개발하려고 한다.

數學Model의 優劣을 判定하는 方法으로서는, 일본의 RR-742部會에서 실험한 低速時($F_n = \pm 0.06$, $U = \pm 0.3m/s$)의 前後進에 대한 Bare Hull의 CMT 결과로 얻어진 前後力, 橫力, 旋回모멘트를 Data로 삼아 이들을 각각 Kose Model, Cross-Flow Model, MMG Model 및 新 Model에 의하여 Fitting 하고, Fitting의 標準偏差를 比較하였다.

Fig. 1과 같은 좌표계를 使用하여 선체의 운동 및 流體力등을 표시하기로 한다.

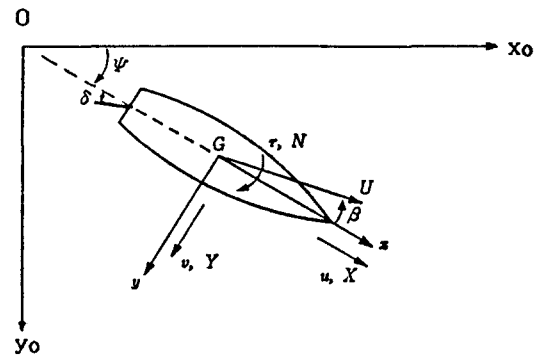


Fig. 1 Coordinate system

2. Bare Hull의 流體力의 表現

2.1 MMG Model(中·高速用)

선체에 작용하는 유체력의 주요부가 양력(Lift)이고 또, 전진운동에 비하여 횡운동은 그 Order가 작다고 하는 가정하에서 다음과 같은 多項式 Model이 성립되었다[3].

$$\begin{aligned}
 X_x' &= X_0' + X_{vv}' v'^2 + X_{vr}' v' r' + X_{rr}' r'^2 \\
 &\quad + X_{vvv}' v'^4 + X_{vvvr}' v'^3 r' \\
 Y_H' &= Y_v' v' + Y_r' r' + Y_{vvv}' v'^3 + Y_{vvr}' v'^2 r' \\
 &\quad + Y_{vrr}' v' r'^2 + Y_{rrr}' r'^3 \\
 N_H' &= N_v' v' + N_r' r' + N_{vvv}' v'^3 + N_{vvr}' v'^2 r' \\
 &\quad + N_{vrr}' v' r'^2 + N_{rrr}' r'^3
 \end{aligned} \tag{1}$$

2.2 Cross-Flow Drag Model

橫力과 旋回모멘트(N)에 대해 影響力은 Y_v, Y_r 과 N_v, N_r 를 導入하고, 非線形力는 Cross-Flow Drag의 개념을 도입하자. 船體橫斷面 주위의 유속의 2승에 비례하는 Cross-Flow Drag를 Fedyaersky와 Sobolev는 [4] 抵抗係數 $C_D(x)$ 를 사용하여

$$Y_{NL} = -1/2 \rho d \int_{-L/2}^{L/2} (v+xr) |v+xr| C_D(x) dx$$

$$N_{NL} = -1/2 \rho d \int_{-L/2}^{L/2} (v+xr) |v+xr| C_D(x) dx \quad (2)$$

로 표시하고 있다.

여기서, $C_D(x) = C_D$ 로 가정하고 回轉中心 $x_p = -v/r$ 를 使用하면 式(2)는,

$$Y_{NL} = -1/2 \rho L d C_D \{ 2(x_p/L)v |v+2[(x_p/L)^2 - (1/2)^2]Lv|r| + 2/3(x_p/L)^3 L^2 r|r| \}$$

$$N_{NL} = -1/2 \rho L d C_D \{ [(x_p/L)^2 - (1/2)^2]v |v| + 4/3(x_p/L)^4 Lv|r| + 1/2[(x_p/L)^4 - (1/2)^4] L^2 r|r| \} \quad (3)$$

와 같이된다.

결국 Cross-Flow Drag 개념에 의한 선체의 횡유체력 Y와 모멘트 N은 다음과 같이 표시된다.

$$Y' = Y_v' v' + Y_r' r' + Y_{v|v|}' v' |v'| + Y_{v|r|}' v' |r'| + Y_{r|r|}' r' |r'|$$

$$N' = N_v' v' + N_r' r' + N_{v|v|}' v' |v'| + N_{v|r|}' v' |r'| + N_{r|r|}' r' |r'| \quad (4)$$

2.3 Kose의 Model(低速用)

Kose는 低速時 竝進運動의 流體力을 斜航試驗에서 決定한 후, 旋回에 의한 유체력을 PMM 試驗으로 求하여 兩者를 合하여 다음의 Model을 提案하였다.

$$X^* = (X_{vr}^* + m_y^*) v^* r^* + Y_{|u|u}^* |u^*| u^* + X_{uvv}^* u^* v^{*2} / U^*$$

$$Y^* = Y_v^* U^* v^* + Y_{|v|v}^* |v^*| v^* + Y_r^* r^* + Y_{ur}^* u^* r^* + Y_{vv}^* v^2 r^* u^* / U^{*2} + Y_{vrr}^* v^* r^{*2} / U^*$$

$$N^* = N_{uv}^* u^* v^* + N_r^* r^* + N_{rrr}^* r^{*3} + N_{ur}^* u^* r^* + N_{vvr}^* v^* v^{*2} r^* \quad (5)$$

여기서, *는 無次元화된 값을 뜻하고, Kose는 선속

U 대신 다음과 같이 배길이(L), 중력가속도(g)를 사용하여 무차원화를 행하였다.

$$X^* = X / (1/2 \rho L^3 g), N^* = N / (1/2 \rho L^4 g)$$

$$m^* = m / (1/2 \rho L^3 g), I_{zz}^* = I_{zz} / (1/2 \rho L^5 g)$$

$$u^* = u / \sqrt{Lg}, r^* = r / \sqrt{g/L}$$

$$\dot{u}^* = \dot{u} / g, \dot{r}^* = \dot{r} / \sqrt{g/L} \quad (6)$$

이를 종래의 MMG에 의한 無次元化 方法으로 바꾸면 式(6)은

$$X' = X_o' + X_{vr}' v' r' + X_{vv}' v'^2 + X_{uvv}' v'^2 \cdot \sqrt{1-v'^2}$$

$$Y' = Y_{ur}' u' r' + Y_v' v' + Y_{v|v|}' v' |v'| + Y_r' r' + Y_{vrr}' v'^2 r' + Y_{vrr}' v' r'^2$$

$$N' = N_r' r' + N_{uv}' u' v' + N_{ur}' u' r' + N_{rrr}' r'^3 + N_{vvr}' v'^2 r' \quad (7)$$

과 같이 된다.

2.4 新Model에 의한 流體力 表現

低速의 操縱運動時에는 前進運動에 대한 橫運動이 相對적으로 크므로, 通常의 操縱運動(Service Speed 前後)의 경우 처럼 橫力, 旋回모멘트의 評價時에 前進速度(u)를 分離해서 생각할 수 없다. 더욱 Y, N의 構成 要因으로서 Dynamic Lift는 작고, 各斷面에서의 Cross-Flow Drag가 클 것으로 豫想된다. 그러므로, 여기서 한가지 方法으로서, 먼저 병진에 의한 유체력을 Lift에 의한 成分과 Cross-Flow에 의한 Drag 成分으로 나누어 생각하고, 다음에 旋回에 의한 成分을 추가하는 方法을 고려해 보자.

먼저 선체를 揚力體로 보아, 入射角β로 進行時의 揚力과 誘導抗力(Induced Drag)은[5, 6]

$$L = C_L \cdot 1/2 \rho U^2 S$$

$$D = C_D \cdot 1/2 \rho U^2 S \quad (8)$$

여기서,

$$C_L = C_a \sin \beta / (1 + C_a \sin \beta) / (a + C_a / \pi \Lambda),$$

$$C_D = C_L^2 / \pi \Lambda$$

(Λ: Aspect ratio, C_a: 상수, 薄翼板의 경우 C_a=2π)

이므로, 결국 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} L &= C_1 \sin\beta \\ D &= C_2 \sin^2\beta \end{aligned} \quad (9)$$

다음으로, Cross-Flow Drag는 各 斷面에서 Cross-Flow 速度가 $U \cdot \sin\beta$ 이므로

$$R = C_3 \cdot (U \sin\beta)^2 \quad (10)$$

이 R의 흐름의 直角인 成分을 R_1 , 흐름에 平行인 成分을 R_2 라고 할 때,

$$\begin{aligned} R_1 &= C_4 \cdot \sin^2\beta \cos\beta \\ R_2 &= C_4 \cdot \sin^3\beta \end{aligned} \quad (11)$$

그 밖에 Drag 成分으로서 摩擦에 의한 抗力 $F_D = \text{const}$ 을 고려하면 결국 선체가 입사각 β 前進時, 흐름에 垂直인 힘의 成分 F_1 과 흐름에 平行인 힘의 成分 F_2 는

$$\begin{aligned} F_1 &= L + R_1 \\ F_2 &= D + R_2 + F_D \end{aligned} \quad (12)$$

과 같이 된다. 이 F_1, F_2 에 의해 선체의 종축 및 횡축 방향의 작용력은

$$\begin{aligned} X &= F_1 \sin\beta - F_2 \cos\beta \\ Y &= F_1 \cos\beta - F_2 \sin\beta \\ N &= \text{lever} \cdot Y \end{aligned} \quad (13)$$

이므로, 결국

$$\begin{aligned} X &= X_1 \sin^2\beta + X_2 \sin^2\beta \cos\beta + X_3 \cos\beta \\ Y &= Y_1 \sin^2\beta + Y_2 \sin\beta \cos\beta + Y_3 \sin^3\beta + Y_4 \sin\beta \\ N &= N_1 \sin^2\beta + N_2 \sin\beta \cos\beta + N_3 \sin^3\beta + N_4 \sin\beta \end{aligned} \quad (14)$$

($X_1, X_2, X_3, Y_1, \dots, N_4$ 는 常數이다.)

여기서 $u = U \cos\beta, v = -U \sin\beta, u = \sqrt{U^2 - v^2}$ 이므로 式(14)는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} X_H' &= X_{vv}' v'^2 + X_{uvv}' v' \sqrt{1-v'^2} \\ &\quad + X_u' \sqrt{1-v'^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_H' &= Y_{vv}' v'^2 + Y_{uv}' v' \sqrt{1-v'^2} + Y_{vvv}' v'^3 \\ &\quad + Y_v' v' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_H' &= N_{vv}' v'^2 + N_{uv}' v' \sqrt{1-v'^2} + N_{vvv}' v'^3 \\ &\quad + N_v' v' \end{aligned} \quad (15)$$

以上은 병진 運動時의 流體力를 생각한 것이고 旋回 運動이 加味된 경우의 流體力를 附加해야 한다. 本論文에서는 새로운 方法에 의해 流體力를 구하는 대신, 2,3에서 Kose가 PMM 시험으로 組立한 旋回에 의한 流體力 成分을 그대로 答습하여 式(15)에 追加키로 한다. 따라서, 最終인 低速時의 Bare Hull에 대한 유체력은 다음과 같이 表現될 수 있다.

$$\begin{aligned} X_H' &= X_{vv}' v'^2 + X_{uvv}' v' \sqrt{1-v'^2} + X_u' \sqrt{1-v'^2} \\ &\quad + X_{vr}' v' r' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_H' &= Y_{vv}' v'^2 + Y_{uv}' v' \sqrt{1-v'^2} + Y_{vvv}' v'^3 \\ &\quad + Y_r' r' + Y_{ur}' r' \sqrt{1-v'^2} + Y_v' v' \\ &\quad + Y_{vru}' v' r' \cdot \sqrt{1-v'^2} + Y_{vr}' v'^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_H' &= N_{vv}' v'^2 + N_{uv}' v' \sqrt{1-v'^2} + N_{vvv}' v'^3 \\ &\quad + N_v' v' + N_r' r' + N_{rr}' r'^2 + N_{vr}' v'^2 r' \\ &\quad + N_{ur}' r' \sqrt{1-v'^2} \end{aligned} \quad (16)$$

3. CMT에 의한 船體 流體力의 Fitting

日本の RR742部會에서 行한 3.00M級 PCC船의 CMT 結果($F_n = 0.06$, 前進 및 後進, 東京大學 水槽使用)를 2章에서 提示한 4가지 Model들을 이용하여 Fitting하고 그 精度를 比較하기 한다.

우선, 低速時의 拘束模型試驗에서는 船體근방에 교란류가 머무르게 되어, 船體는 장시간에 걸쳐 그 유장의 영향을 받게 되므로, 결국 과거의 履歷에 流體力가 變化하게 된다. 또 低速時는 流體力의 절대치가 작으므로 計測結果의 S/N比(Scale to Noise Ratio)에도 주의하여야 한다.

各 數學 Model의 優劣을 判定하는 기준으로서 實驗值 y_i 와 數學 Model $f(u_i, v_i, r_i)$ 와의 殘差 R_i 를 계산하고, R_i 의 標準偏差(Standard Deviation)을 구해 이를 比較하기로 한다. 즉,

$$R_i = |y_i| - f(u_i, v_i, r_i)^2 \quad (17)$$

$$S.D. = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2} \quad (18)$$

$$\bar{R} = 1/N \sum_{i=1}^N R_i \quad (\text{여기서 } N \text{은 Data 數}) \quad (19)$$

먼저 前進의 경우($U=0.3\text{m/s}$, $|v'| < 1.0$, $|r'| < 0.8$, Data 數=126)를 對象으로 하여, 各 數學的 Model에 의한 Fitting 結果가 Fig. 2~Fig.4이다.

또 이때의 Fitting 標準偏差를 Table.1 에 提示하였다.

그 結果 橫力, 旋回모멘트에 대해서는 新Model이 가장 Fitting精度가 좋은 것으로 나타났다.

한편 前後力에 대해서는 어느 Model도 그다지 特徵이 없으나, 이는 원래 CMT결과로 얻어진 前後力이 흩어짐이 많고, 計測精度에 問題가 있어, 이를 基準으로 Model의 Fitting優劣을 판단하기는 힘들다고 생각된다.

다음으로, 後進($U=-0.3\text{m/s}$, $|v'| < 1.0$, $|r'| < 0.8$, Data數=99)에 대한 CMT 結果도 同一하게 4가지 Model로서 Fitting하고, 그 標準偏差를 구하여 보면 Table. 2와 같다.

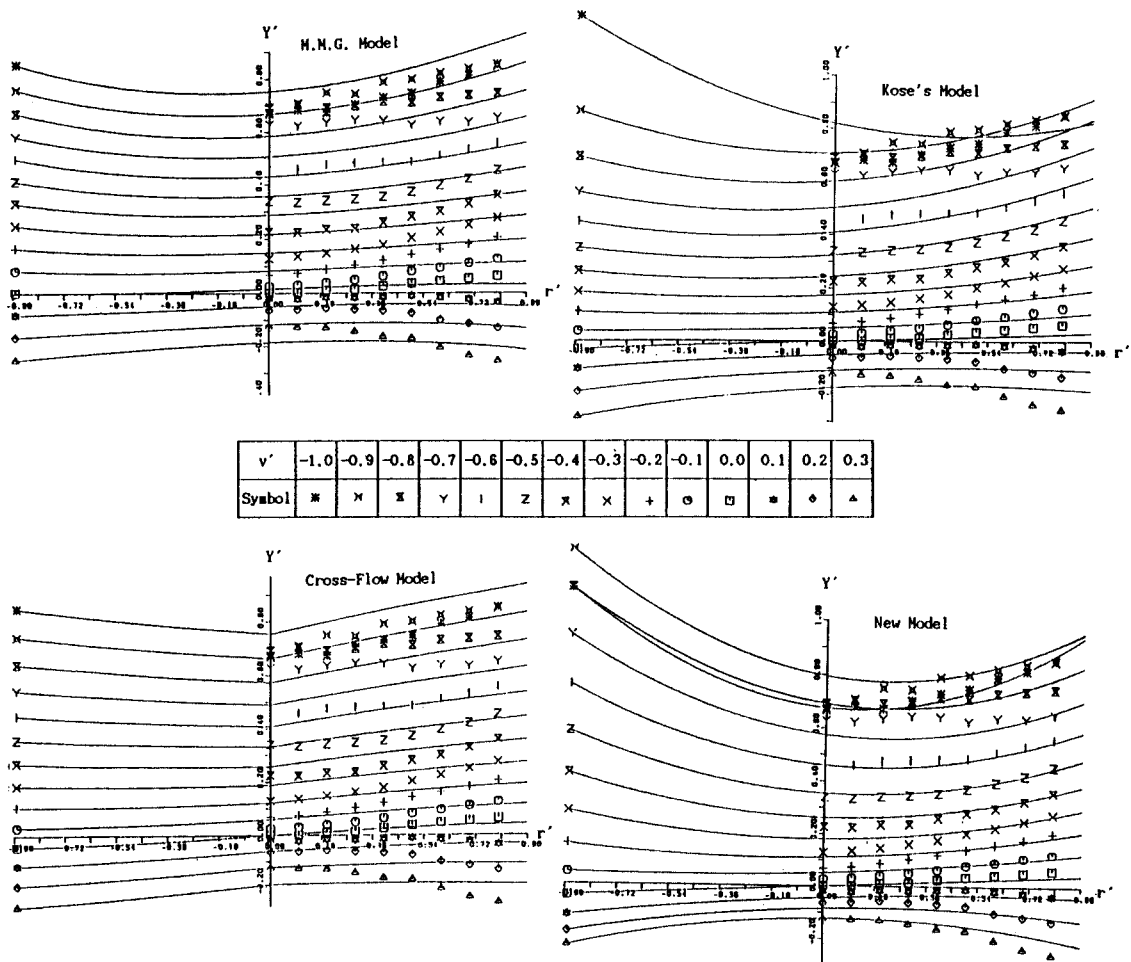


Fig. 2 Fitting of the hydrodynamic sway force of hull from CMT

Table 1 Standard deviation of each fitting($U>0.0$)

Model Name	Y	N	X
MMG Model	0.02992	0.01121	0.001935
Kose's Model	0.02793	0.01186	0.001853
Gross-Flow Model	0.03097	0.01164	■
New Model	0.01914	0.00557	0.001881

Table 2 Standard deviation of each fitting($U<0.0$)

Model Name	Y	N	X
MMG Model	0.01804	0.00844	0.00298
Kose's Model	0.01836	0.01015	0.00305
Gross-Flow Model	0.01905	0.00980	■
New Model	0.01327	0.00711	0.00304

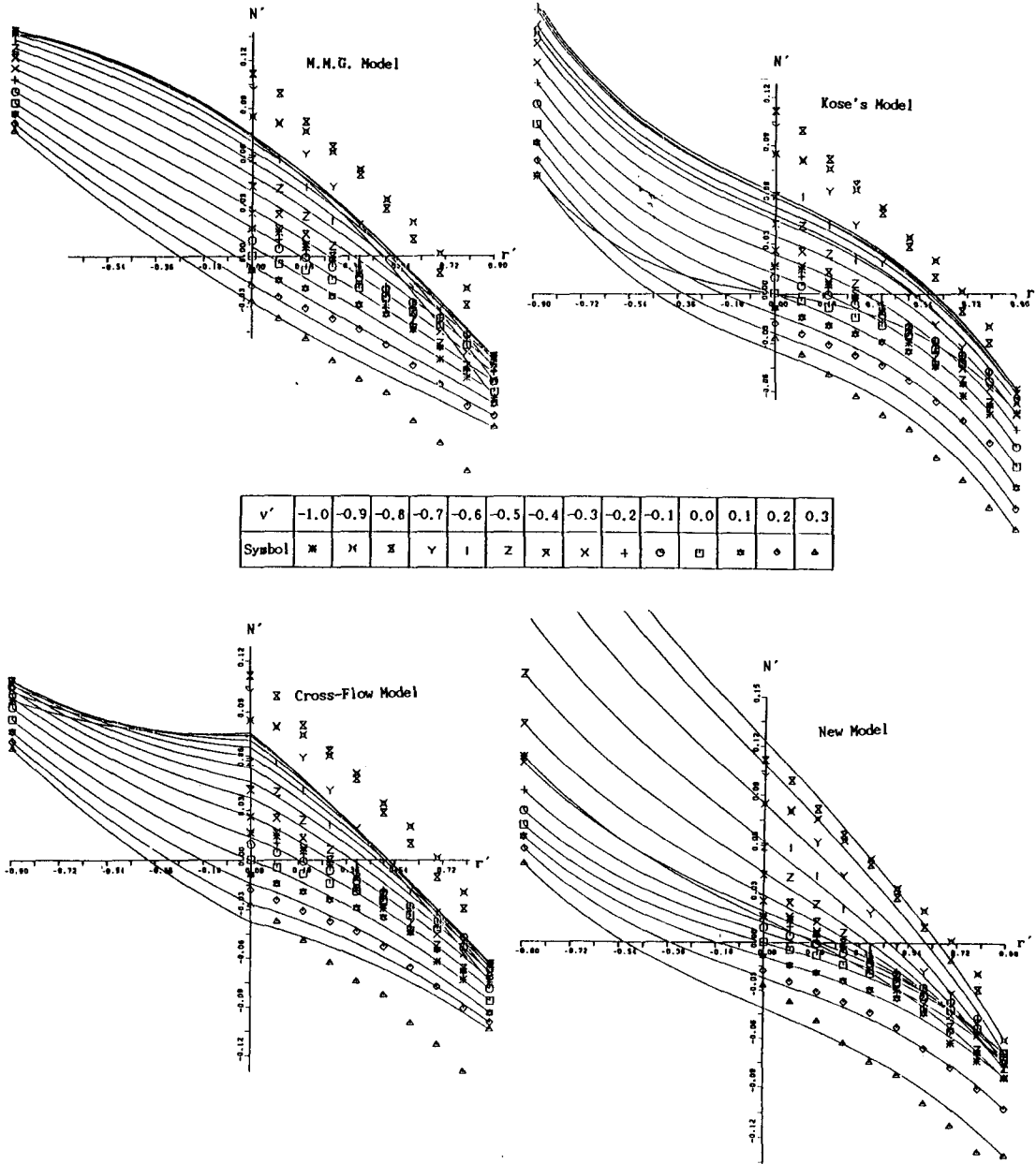


Fig. 3 Fitting of the hydrodynamic yaw moment of hull from CMT

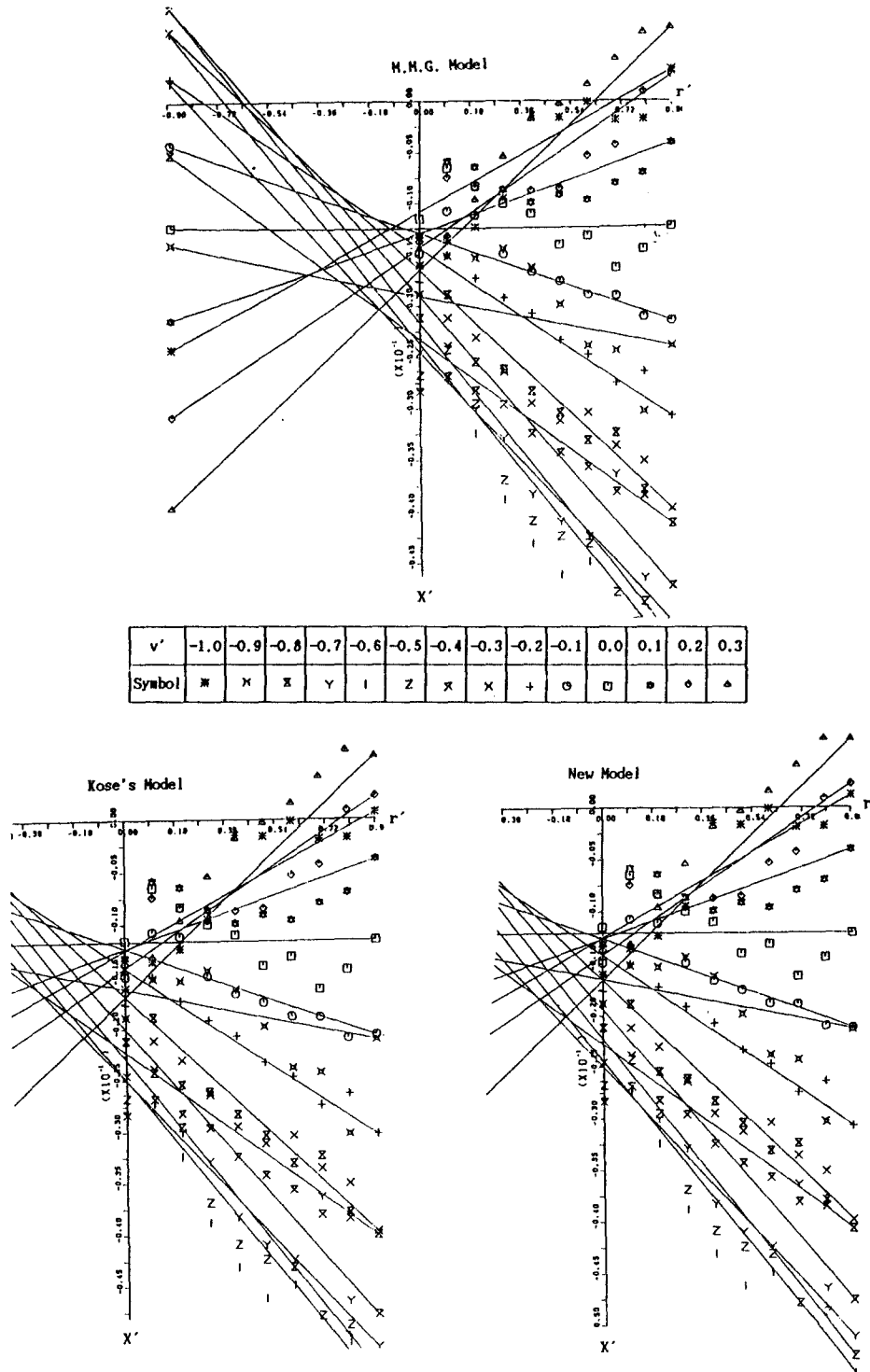


Fig.4 Fitting of the hydrodynamic surge force, of hull from CMT

여기서도, 横, 旋回에 대해서는 新Model이 가장 Fitting 精度가 높음을 알 수 있다.

4. 結 論

低速時 Bare Hull의 流體力를 表現할 수 있는 數學 Model로서, 종래의 MMG Model과 Cross-Flow Drag Model, Kose의 Model 및 본 論文에서 提案한 成分分離型의 新Model 등 4가지에 대해 考察해 보았다. 한편 PCC船 모형($L_{pp}=3.0M$)의 CMT 試驗으로 얻어진 前後力, 横力, 旋回모멘트를 Data로 삼아, 앞서 언급한 4가지 Model들을 使用하여 Fitting해 본 결과 新Model이 가장 優秀함을 보았다.

그러나 이는 PCC船에 대한 Data만을 考察한 것이므로 좀더 廣範圍한 船型이나 運動등에 대해 보다 一般的이고 우수한 수학 Model을 찾는 것이 앞으로의 課題라 할 것이다.

參 考 文 獻

- [1] 小瀬邦治, 湯室彰規, 芳村康男, “操縱運動의 數學モデル의 具體貨”, 第3回 操縱性 ツンボツウム 日本造船學會(1981)
- [2] 小瀬邦治外, “底速で航行する船の 操縱運動モデルについて”, 日本造船學會論文集, 第155號(1984).
- [3] 日本造船學會, “第3回 操縱性 ツンボツウム・テキサ”(1981)
- [4] Fedyaevsky K.K., & Saboley, G.V., “Application of the solution of some steering problems”, symposium on the behavior of ships in a seaway at Wageningen(1957)
- [5] Bollay, W. A non-linear wing theory and its application to rectangular wings of small aspect ratio, ZAMM(1937)
- [6] Newman, J.N. “Marine Hydrodynamics”, MIT Press(1977)
- [7] RR742部會, “低速時操縱運動 モデハの標準化”, 東大 Report(1986)
- [8] 小山建夫, 周正會, 元良誠三, “Circular Motion Test(CMT) について”, 日本造船學會論文集, 第138號(1975)
- [1] 小瀬邦治, 湯室彰規, 芳村康男, “操縱運動의 數