

## 흘수변화가 선박 조종 성능에 미치는 영향에 관한 연구

임남균\*\*, 권석암\*\*, 김세은\*\*

목포해양대학교 해상운송시스템학부\*  
삼성중공업(주) 조선해양연구소 대덕선박연구센터\*\*

### The Study on the Effect of Loading Condition on Ship Manoeuvrability

Namkyun Im\*\*, Sukam Kweon\*\* and Se-Eun Kim\*\*

Division of Maritime Transportation System, Mokpo National Maritime University\*  
SSMB, Marine Research Institute, Samsung Heavy Industries Co., Ltd. \*\*

#### Abstract

IMO standards for ship manoeuvrability were applied from January 1, 2004. Though model test or sea trial in full load condition is needed, it is not always possible to get such data for every ships. Therefore it is required to study the effect of loading conditions on ship manoeuvrability. Approximate formulae to estimate the hydrodynamic forces acting on a ship and the 2<sup>nd</sup> overshoot angle of 10°/10° zig-zag test in certain loading condition are proposed in this study. These were derived from the results of model test and sea trial data. Captive model tests for 7 ships with 15 different loading conditions and sea trial data including free running test of 6 cases were used. Compared with experiment data and prediction formulae already proposed by others, the approximate formulae in this study show good agreement with model test results.

※Keywords : Manoeuvrability(조종성능), Loading Condition, PMM(구속모형시험)

#### 1. 서론

최근 IMO(2002)는 선박조종성능에 관한 기준을 최종 확정하여, 2004년 1월 이후 건조되는

접수일: 2004년 10월 28일, 승인일: 2004년 12월 27일

†주저자, E-mail: [namkyun.im@mmu.ac.kr](mailto:namkyun.im@mmu.ac.kr)

Tel. 061-240-7213

※연구수행당시 삼성중공업(주) 조선해양연구소 소속

선박에 대하여 적용하도록 하였다. 이 기준에 의하면, 선박 조종성능은 만재흘수 상태에서, IMO 조종성능 기준을 만족하도록 규정화 되어 있다. 여기서 규정한 만재흘수란, 하기 만재흘수인 Summer Load Line Draft를 의미하며, 허용오차범위는 그 흘수의 5%내외 오차, 트림 또한 전후 평균흘수의 5%라고 규정되어 있다.

그러나 탱커 이외의 선박에서는 사운전시 만재흘수상태로 조종성능을 검증하는 것에 사실상 어

려움이 많다. 따라서 현실적으로 해당 선박의 실행 가능한 흘수에서 시운전이 수행되고, 그 선박에 대한 만재흘수 상태에서의 조종성능을 어떤 형태로든 추정하는 것이 중요한 문제로 대두되고 있다. 본 연구는 이러한 선박조종성능에 관한 움직임에 대응하여, 선박의 흘수 변화가 조종성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수행되었다. 선박의 조종성능을 추정하기 위해서는, 데이터 베이스, 구속모형실험, 이론적 추정식 등으로 선박에 대한 유체력 미계수와 간섭계수 등을 얻고 이를 사용하여 조종운동의 수치계산을 수행하여야 한다.

과거에 수행된 선박조종성능 연구를 살펴보면, 선박 설계 초기단계에서 선박제원 등을 이용한 선박조종성능 추정 연구(이승건 등 1999, 이호영과 신상성 1998, 이호영 등 1999), 선미형상 파라미터를 이용한 조종성 추정연구(Kijima and Nakiri 1999) 등을 찾아 볼 수 있다. 이번 연구도 이러한 연구의 일환으로 수행되었으며, 흘수 변화에 따른 선박 조종성능 추정식을 도출하였다. 특히 선형 유체력 미계수의 변화와 IMO 조종성능 규정에서 가장 중요시 여겨지는 10°/10° zig-zag test 의 2<sup>nd</sup> Overshoot angle(이하 OSA)에 초점을 두고, 선박의 흘수변화에 따라 다른 흘수 상태에서의 조종성능을 추정하였다.

## 2. 기본 수학 모델

구속모형실험을 통해 얻은 선박 유체력 미계수 등을 이용하여 수치시뮬레이션을 수행하여, 선박 조종성능을 추정하였으며, 이때 사용한 좌표계는 Fig. 1 과 같다.

선체중앙에 좌표원점을 둔 이동좌표계(moving axes system)로 표시되었으며, 시뮬레이션에서 사용한 3 자유도의 수학모델은 식 (1)과 같다. 본 연구에서는 선박의 유체력을 선체, 프로펠러, 타에 미치는 힘과 간섭효과 등을 나누어 해석하는 분리 수학모형(SNAJ 1977)을 이용하였다.

$$\begin{aligned} m(\ddot{u}-vr-x_j^2) &= X_H\dot{u} + X_H + (1-t)T - (1-t_R)F_N \sin\delta \\ m(\dot{v}+ur+x_j^2) &= Y_v\dot{v} + Y_r\dot{r} + X_{jr}r + Y_H + Y_{HL} - (1+a_H)F_N \cos\delta \\ I_z\dot{r}^2 + m x_G(\dot{v}+ur) &= N_v\dot{v} + N_r\dot{r} + N_{HL} + N_{HNL} - (x_R + a_H x_H)F_N \cos\delta \end{aligned} \quad (1)$$

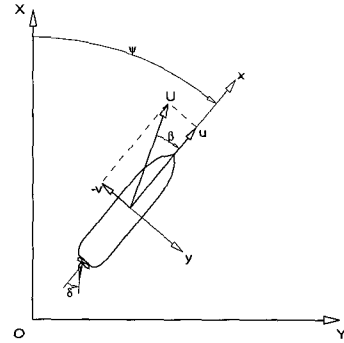


Fig. 1 Coordinate system

여기서 G 는 무게중심, 첨자 H 는 Hull 을 나타내며, Hull 에 작용하는 유체력은 다음과 같이 표현하였다.

$$\begin{aligned} X_H &= X(u) + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + (X_{vr} - Y_v)vr \\ Y_{HL} &= Y_vv + Y_r r \\ N_{HL} &= N_vv + N_r r \\ Y_{HNL} &= Y_{vvv}v^3 + Y_{rrr}r^3 + Y_{vvr}vvr + Y_{vrr}vrr \\ N_{HNL} &= N_{vvv}v^3 + N_{rrr}r^3 + N_{vvr}vvr + N_{vrr}vrr \end{aligned} \quad (2)$$

## 3. 조종성능 해석

일반적으로 선박의 만재상태에서의 조종성능을 추정하기 위한 방법으로는 아래 Fig. 2 와 같은 3 가지 방법을 거론할 수 있다고 알려져 있다. 방식 (a)는 Ballast 상태 혹은 Heavy Ballast 상태에서, 시운전이나 구속 모형실험이 실시되고, 이를 바탕으로 흘수변화에 따른 조종성능을 직접 추정하는 방식이다. 이는 Ballast 상태와 full load 상태에서 조종성능의 상관관계를 나타낼 수 있는 근사식을 작성하여 이를 이용하는 방법이다. 방식 (b)는 기존의 선박조종 연구분야에서 많이 수행되어 온 방식이다. 선박의 제원 특히 선미형상 등이 결정되면 이러한 파라미터를 이용하여, 유체력 미계수, 기타 간섭계수를 추정하며, 추정된 값을 수학모델에 대입하여, 수치적 시뮬레이션을 통해 조종성능을 추정하는 방식이다. 한편 방식 (c)는 이미 확보하고 있는 만재흘수 이외의 조건에서 얻은 데이터를 기반으로, 수학모델에 사용되는 여러가지 파라미터, 예를 들면 유체력 미계수, 간섭계수 등을

추정하는 관계식을 만들고, 관계식으로 추정된 값을 수학모델에 대입하여 수치적으로 시뮬레이션을 행하는 방법이다.

본 연구에서는 방식(a)와 방식 (c)를 중심으로 사용하였으며, 방식 (a)에서는 선박조종성능을 나타내는 항목 중 가장 중요시 여겨지는 10°/10° zig-zag 2<sup>nd</sup> OSA 을 중심으로 살펴보고, 방식 (c)에서는 유체력 미계수와 간섭계수 중 유체력 미계수의 선형항목에 대하여 중심으로 취급하였다.

흘수 변화에 따른, 유체력 미계수 변화 추이와, 조종성능 변화를 살펴보기 위하여, 구속모형실험이 실시되었다. 사용된 선박은 탱커, LNGC 등 7척에 대하여 각기 다른 흘수 총 15 case 에 대한 조종실험 데이터가 사용되었다. 모형실험에 사용된 선박제원은 Table 1 과 같다.

서로 다른 흘수에서의 조종성능간의 상관관계를 구하기 위해 가장 유용하게 활용할 수 있는 데이터는 실 선박의 시운전의 데이터이다. 그러나 현실적으로 서로 다른 흘수에서 시운전을 실시하는 것은 극히 드문 일이므로, 본 연구에서는 구속 모형실험 데이터를 사용하였다. 이러한 실험 데이터의 신뢰성을 뒷받침하기 위하여, 실제 시운전 데이터와 구속모형실험으로 얻은 조종성능 중 10°/10° zig-zag 2<sup>nd</sup> OSA 의 비교 결과를 나타내었다. 사용된 구속모형 실험 중 총 4 case 의 구속모형 실험과 동일한 조건하에서 시운전이 실시되었고, 이들의 결과를 비교한 것이 Fig. 3 이다. 그림에서 보는 바와 같이, 시운전의 결과와 구속모형실험으로 얻은 결과가 대체로 비슷한 경향을 나타내고 있다. 따라서 같은 방식으로 수행되고 분석된 구속모형실험으로 얻은 다른 흘수에서의 유체력 미계수와 선박조종성능은 나름대로 본 연구의 목적에 부합되는 신뢰성을 포함하고 있다고 판단된다.

4. 흘수변화에 따른 조종성능 변화

선박의 흘수 변화가 조종성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 우선 선박유체력 미계수의 변화를 그림으로 나타냈다. Fig. 4 는 횡축에 만재흘수 상태를 기준으로 배수량변화 비율을 표시하여, 흘

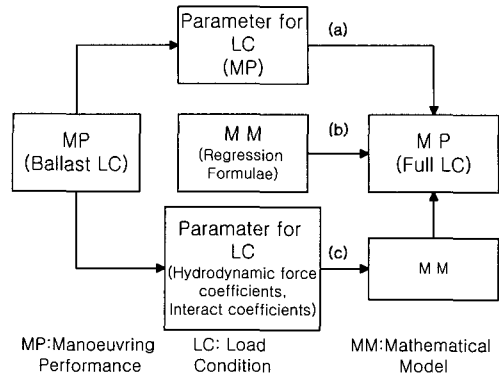


Fig. 2 Prediction flow of manoeuvrability for full load condition

Table 1 Experiments condition of model ships: 7 ships of COT/LNGC

	COT, LNGC
L/B	5.35-6.31
B/d	2.58-4.54
Cb	0.73-0.83
Loading Condition	7 data at full load 8 data at 78%-95% of full load

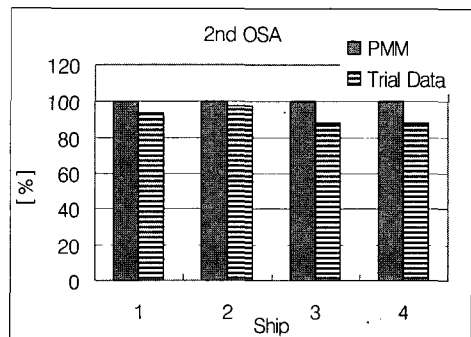


Fig. 3 Comparison of 2<sup>nd</sup> OSA in 10°/10° zig-zag test between experiments and trial data

수 변화를 나타내었고, 종축은 선형 유체력 미계수를 각각 나타내었다. 여기서 Ship 1 은 VLCC,

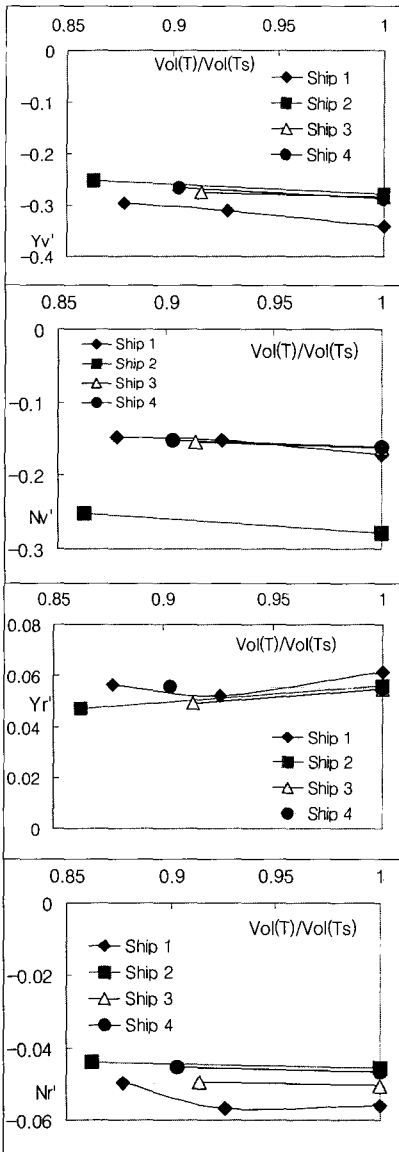


Fig. 4 Hydrodynamic coefficients with loading condition

Ship 2는 Suezmax, Ship 3, 4는 Aframax 급 선박을 각각 나타내고 있다. 대체로 4 척의 선박 모두 만재출수에서 배수량이 감소함에 따라, 유체력이 감소함을 보여주고 있다. 선박 상호간에 큰 차이는 보이지 않으며, 정성적인 경향은 대체로 비슷함을 알 수 있다.

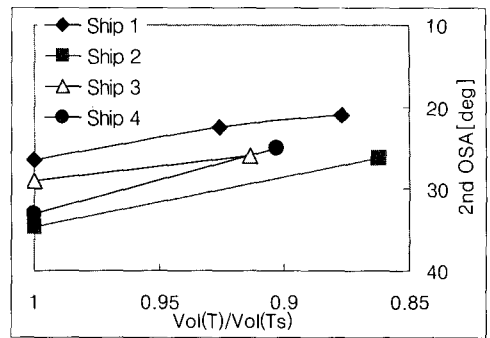


Fig. 5 2<sup>nd</sup> OSA of 10°/10° zig-zag test

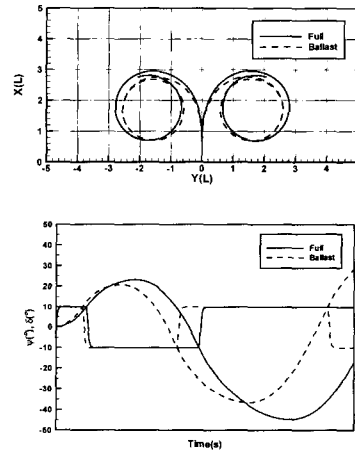


Fig. 6 Turning circle and 2<sup>nd</sup> OSA of 10°/10° zig-zag test

여기서  $\gamma$ 는 임의의 흘수를 의미하며,  $T_s$ 는 만재흘수,  $Vol$ 은 배수량을 의미한다.

유체력 미계수의 변화 추이뿐 아니라, 흘수변화에 따른, 조종성능 특히 10°/10° zig-zag test의 2<sup>nd</sup> OSA의 변화 추이를 Fig. 5에 그림으로 나타냈다. 그림에 사용된 데이터는 4척의 선박, 총 9 case의 경우가 사용되었으며, 횡축에는 흘수변화에 따른 배수량 변화율, 종축에는 2<sup>nd</sup> OSA의 변화를 표시하여 흘수변화에 따른 변동을 표시하였다. 4척 모두 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 만재흘수의 85%에 해당하는 배수량에서 만재흘수로 변화함에 따라 대략 10° 전후의 OSA의 증가를

보여주고 있다.

탱커 중 한 선박에 대하여, 출수변화에 따른 선회 성능, zig-zag test 결과를 나타내었다. Fig. 6 에서 보는 바와 같이, zig-zag 의 OSA 는 출수가 증가 함에 따라 증가함을 보여주고 있고, 이와는 반대로 선회성능의 경우, 배수량이 감소함에 따라 오히려, 만재출수에서의 값보다 다소 작아지는 것을 보여 주고 있다. 통상 배수량이 감소하고 트림이 발생하게 되면, 만재상태의 경우에 비해 선회반경이 현저히 증가하는 것으로 알려져 있다. 그러나 트림이 없이, 배수량이 감소된 조건에서 오히려, 선회반경이 감소한다는 연구 결과(Kijima et al. 1990)가 있다. 본 연구에서 수행된 실험결과 역시 대체로 선회반경은 배수량이 감소함에 따라 오히려 작아지는 경향을 보이고 있다. 통상 컨테이너 선처럼 직진 안정성이 뛰어난 선박의 경우, zig-zag test 의 OSA 가 작은 반면, 비대선인 탱커등과 비교하여 상당히 큰 선회반경을 갖는다. 이런 점을 감안하면, 만재출수에서 출수가 낮아짐에 따라, 선회반경이 감소하는 현상은 출수 변화에 따라, 타에 의해 발생한 제어 힘이 선체를 보다 쉽게 제어하는 조건으로 변화하였다는 것을 의미한다.

### 5. 추정식

앞장에서 서술한 출수변화에 따른 선형유체력 미계수의 변화, 선박조종성능의 변화 추이를 이용하여, 근사 추정식을 구성하였다. 이 추정식은 만재출수가 아닌 상태에서의 시운전 결과나 실험결과를 이용하여, 만재상태에서의 조종성능을 추정할 때 사용할 수 있다. Fig. 7 에서 출수변화에 따른 선형 유체력미계수의 변화 추이를 나타내었다.  $Yr'$  를 제외하고는 대부분 규칙적인 변화를 도출 있었다. 또한 zig-zag test 의 2<sup>nd</sup> OSA 에 대한 변화추이를 배수량 변화율로 나타내었는데 Fig. 8 과 같다. 총 8 척에 대하여, 각기 다른 배수량에서의 zig-zag test 의 2<sup>nd</sup> OSA 변화율을 도출하였다. 그림에서처럼 그 경향성을 확연히 나타낼 수 있었으며, 출수량 변화에 따른 변화추이를 간단한 2 차 곡선으로 나타낼 수 있었다. 이 그림에서  $\Delta$  는 실제 선박의 시운전 결과를 표시한 것이다. 이 선

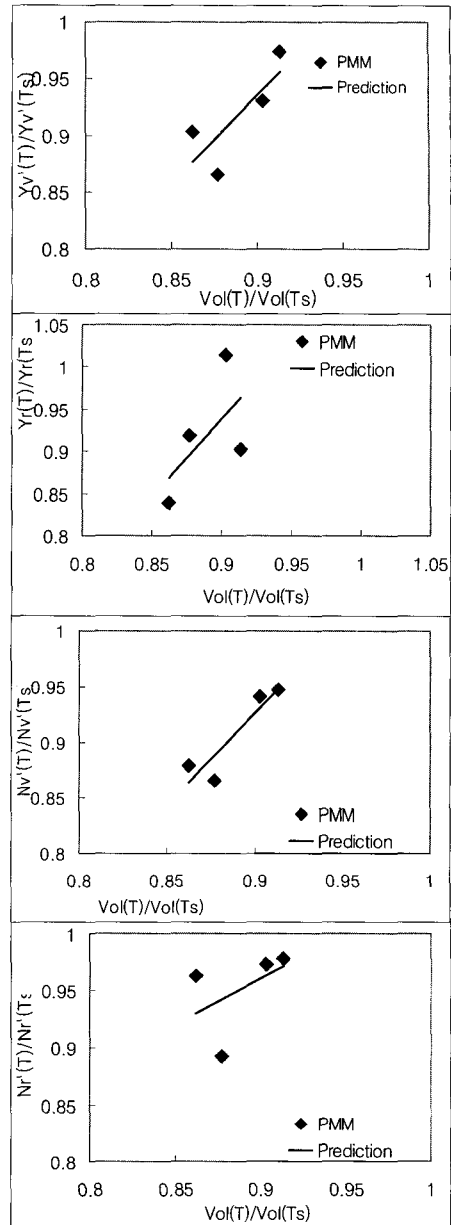


Fig. 7 Relationship between hydrodynamic coefficients and displacement

박은 만재상태에서 자유항주 실험이 실시되었으며 Heavy Ballast 상태에서 시운전이 실시된 사례이다. 이 결과를 그림과 함께 표시한 결과 구속모형실험으로 얻은 결과와 비슷한 경향을 보이고

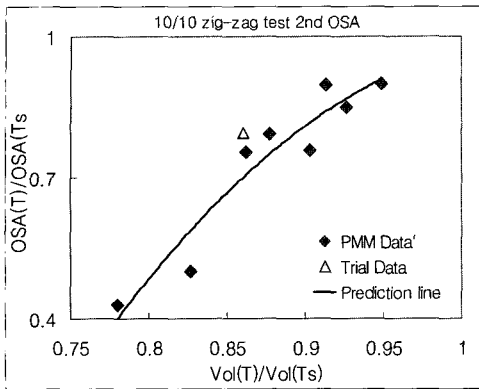


Fig. 8 Relationship between 2<sup>nd</sup> OSA of 10°/10° zig-zag test and displacement

있어, 실험결과로 도출한 추정식이 실제 사용하는 데 있어서 그리 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

본 연구에서 도출한 선형 유체력미계수와 10°/10° zig-zag test의 2<sup>nd</sup> OSA에 대한 추정식을 식(3)-(4)에 표시하였다. 이를 이용하면, 특정 흘수에서 시행된 시운전 혹은 모형실험 데이터를 바탕으로 만재흘수 혹은 타 흘수 상태에서의 선형 유체력 미계수, 10°/10° zig-zag test의 2<sup>nd</sup> OSA를 간단히 추정할 수 있다. 유체력미계수의 추정 유효 범위는 만재흘수에서 85% 배수량이 감소한 흘수, 10°/10° zig-zag test의 2<sup>nd</sup> OSA는 75% 전후로 배수량이 감소한 흘수까지이다.

$$\frac{Yv'(T)}{Yv'(Ts)} = 0.85 \frac{Vol(T)}{Vol(Ts)} + 0.15$$

$$\frac{Nv'(T)}{Nv'(Ts)} = 0.94 \frac{Vol(T)}{Vol(Ts)} + 0.06$$

$$\frac{Yr'(T)}{Yr'(Ts)} = 0.895 \frac{Vol(T)}{Vol(Ts)} + 0.115$$

$$\frac{Nr'(T)}{Nr'(Ts)} = 0.49 \frac{Vol(T)}{Vol(Ts)} + 0.51 \tag{3}$$

$$\frac{2nd\ OSA(T)}{2nd\ OSA(Ts)} = -8.28 \left( \frac{Vol(T)}{Vol(Ts)} \right)^2 + 17.3 \left( \frac{Vol(T)}{Vol(Ts)} \right) - 8.08 \tag{4}$$

한편 위에서 도출한 선형유체력 미계수 추정식에 대한 효용성을 알아보기 위하여, 기존의 연구

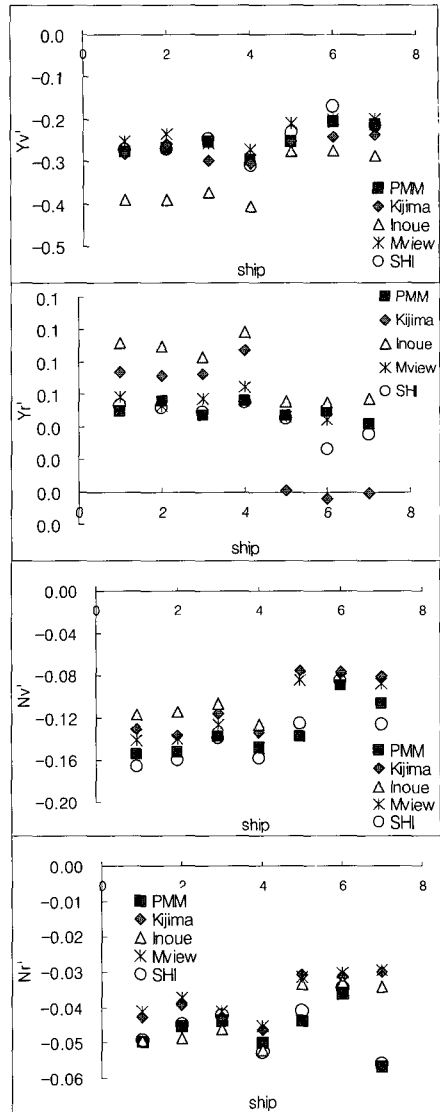


Fig. 9 Comparison of prediction and experiments for hydrodynamic coefficients

에서 제시한 추정식과 비교하였다. 기존의 연구에서 제시한 선형 유체력 미계수 추정식은 선형의 변화, 선미형상의 변화를 반영하기 위해 수행된 연구이다.

Fig. 9에서 선형 유체력 미계수의 추정 결과를 나타내고 있다. 보는 바와 같이, 기존의 추정식 중 과거 선박의 선형 데이터를 많이 쓰고 있는 식

(Inoue 1981)은 실험결과와 많은 차이를 보이고 있고, 선미형상 변화를 반영하고 있는 Kijima 식(Kijima and Nakiri 1999)은 보다 접근한 결과를 보여주고 있다. 한국조선기술연구조합과제로 수행된 추정식 Mview (한국조선기술연구조합 2001)의 경우 주로 비대선을 대상으로 연구가 수행되었는데, 기존의 외국연구가 제시한 추정식 보다 우수한 결과를 나타내고 있음을 보여준다. 본 연구에서 제시한 추정식 또한 보다 개선된 결과를 보여주고 있다.

### 6. 결론

본 연구는 만재흘수 상태가 아닌 흘수에서 시행된 시운전의 결과 및 구속모형실험을 바탕으로 만재흘수 상태에서의 조종성능을 추정하기 위해 수행되었다. 흘수변화에 따른 선형유체력 미계수의 변화, 10°/10° zig-zag test 의 2nd OSA 변화 추이를 간단히 추정할 수 있는 방안을 연구하였다. 이를 위하여, 7 척 선박에 대하여 총 15 case 의 구속모형 실험 데이터, 5 척의 시운전 및 1 척의 자유항주 실험 데이터 등이 사용되었다. 이를 통해 아래와 같은 연구결과를 얻었다.

- (1) 흘수 변화에 따라 선형 유체력 미계수 중  $Yr'$  을 제외하곤 대체로 그 경향성이 뚜렷하게 나타났으며, 이를 이용하여 흘수변화에 따른 추정식을 도출하였다.
- (2) 흘수변화에 따른 10°/10° zig-zag test 2<sup>nd</sup> OSA 추정식을 유도하였다.
- (3) 도출된 추정식을 이용하여 기존의 연구가 제시한 유체력미계수와 비교작업을 수행하였으며, 대체로 기존의 추정식보다 우수한 추정결과를 나타내었다.

한편 이번 연구에서는 흘수변화에 대한, 선형유체력 미계수, 10°/10° zig-zag test 의 2<sup>nd</sup> OSA 변화에 중점을 두고 이루어졌다. 그러나 이외에도 선체와 프로펠러, 타와의 간섭계수의 변화 추이, 비선형 유체력 미계수의 변화 추이 또한 정확한 조종성능 추정을 위해 살펴보아야 할 항목 중 하

나이다. 향후 이러한 문제 또한 검토할 예정이며, 보다 많은 실험 데이터 및 시운전 데이터를 확보하여 추정식에 대한 신뢰성을 높여갈 예정이다.

### 참 고 문 헌

- 이승건, 최재영, 서영석, 이우진 1999, “ 초기 설계시 선박의 선미형상을 고려한 조종성능 추정에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 36 권, 제 2 호, pp. 72-76.
- 이호영, 신상성, 1998, "선박조종성능 추정을 위한 근사적 기법에 관한 연구", 대한조선학회 논문집, 제 35 권, 제 4 호, pp. 19-26.
- 이호영, 신상성, 염덕준, 1998, “ 초기설계단계에서 선박의 조종성능 추정에 대한 정도향상 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 35 권, 제 1 호, pp. 46-53.
- 한국조선기술연구조합, 2001, 선박의 조종성능 추정 정도 향상을 위한 연구 III
- Kijima K., Katsuno T., Nakiri Y. and Furukawa Y. 1990. “ On the manoeuvring performance of a ship with the parameter of loading condition, ” The Society of Naval Architecture of Japan, Vol. 168 , pp. 141-148.
- Kijima K. and Nakiri Y. 1999, “ Approximate Expression for Hydrodynamic Derivatives of Ship Manoeuvring Motion taking into account of the Effect of Stern Shape,” The Journal of West-Japan Society Naval Architects, Vol. 98, pp. 67-77.
- IMO, 2002, MSC 76/23, Resoulution MSC 137(76), Standards for Ship Manoeuvrability, Report of the Maritime Safety Committee on Its 76<sup>th</sup> Session-Annex 6
- Inoue S., 1981, “ Hydrodynamic derivatives on Ship Manoeuvrability, ” ISP, Vol. 28, No. 321
- SNAJ, 1977, MMG Report 1-IV, Bulletin of the Society of Naval Architects of Japan, No.575, No.577, No.578, No.579, No.616



< 임남균. >



< 권석암 >



< 김세은 >