
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 33 卷 第 2 號 1996 年 5 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 33, No. 2, May 1996

고속 카타마란선의 규칙 정면파중 운항자세 제어 시험

강창구*, 홍사영**, 서상현*, 이창민*, 김연규*, 공인영*

Attitude Control Tests for a High Speed Catamaran in Regular Head Waves

by

C.G. Kang*, S.Y. Hong**, S.H. Suh*, C.M. Lee*, Y.G. Kim* and I.Y. Gong*

요 약

현재 전 세계적으로 해상교통의 주역이 되리라고 생각되는 고속선에 대한 시험 연구를 수행하였다. 본 논문은 주행중 고속선에 가장 문제가 되는 파도중의 운항자세를 제어하는 시험을 수행한 결과이다. 선형은 카타마란 선형을 선택하였으며, 운항자세를 제어하기 위하여 선수와 선미부분에 제어판을 장치하였다. 자세 제어 시스템으로는 제어판과 제어판 구동장치, 운동 계측장비로 되어있으며, 운동 계측장비로부터 데이터를 취득하고 제어판 구동장치로 신호를 보내기 위하여 A/D, D/A 보드를 각각 1장씩 사용하였다. 이 장비를 이용하여 규칙 정면파중의 고속선의 운항자세를 제어하는 시험을 수행하였으며, 실험결과로부터 자세 제어 시스템이 작동하지 않을 때와 작동할 때의 차이를 비교하였다. 비교결과 종동요(Pitch)는 진폭이 많이 감소하였으나, 상하동요(Heave)는 많이 감소하지 않았다.

Abstract

An Attitude Control System for a high speed catamaran with control fins in waves is designed and investigated by the experimental methods. An optimal control theory is applied to design the automatic attitude control system of the high speed catamaran for its good seaworthiness. The experimental results performed in KRISO model basin for the high speed catamaran with control fins are shown. The motion responses such as displacements and accelerations for the model ship are measured in regular head waves. From the experimental results the effect of control planes is thought to be increasing with speed.

발 표 : 1993년도 대한조선학회 추계연구발표회('93. 11. 13)

접수일자 : 1995년 5월 8일, 재접수일자 : 1996년도 4월 23일

* 정회원, 선박해양공학연구소 선박성능연구부

** 정회원, 선박해양공학연구소 해양기술연구부

1. 서 언

21세기의 해상교통수단으로 일본을 비롯한 선진 각국이 고속선의 개발에 박차를 가하고 있다. 일본은 대량의 화물을 신속하게 운송할 수 있는 시속 50노트급의 고속 화물선(Techo Super Liner, TSL)을 개발하고 있으며, 노르웨이, 미국 등에서도 지금까지 개발된 기술을 바탕으로 고속선 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 국내에서도 최근에 고속선에 대한 관심이 고조되고 있으며 이미 40노트급 고속선을 설계, 건조하고 있다.

고속선은 재래선형과 달리 부력, 공기부양력, 양력 등 각종 지지방법을 적절히 조합한 복합지지형을 택하고 있다. 거친 해상에서 여러가지 교란이 있을 때 종동요, 횡동요와 진동을 일정 수준 이하로 감소시키는 것이 승객과 화물에 필수적이다. 또한 안전한 항해를 위하여 좋은 조종성을 확보할 필요가 있다. 이와 관련하여 전몰 수중익선에 대한 자세제어 기법이 Weist & Michell(1976) 등에 의하여 개발되어 왔으며, 또한 노르웨이에서 개최된 FAST '91에서는 Itoko, et al.(1991), Saito, et al.(1991) 등이 TSL 및 제트포일의 자세제어 시스템에 관한 연구를 발표하였다.

본 논문에서는 고속선의 운항자세를 제어하기 위하여 최적제어 이론(Optimal Control Theory)을 이용하여 자동 자세제어 시스템을 구축하였고, 선형은 카타마란 선형을 택한 후, 운항자세를 제어하기 위하여 카타마란선의 선수와 선미부분에 제어판을 장치하였다. 자세제어 시스템으로는 제어판과 제어판 구동장치, 운동 계측장비로 되어있으며, 모형선의 운동을 계측하여 이 계측값으로부터 제어판의 명령 각도를 계산한 후 제어판 구동장치로 구동신호를 보내기 위하여 A/D, D/A 보드를 각각 1장씩 사용하였다. 이 장비를 이용하여 규칙 파중의 고속선의 운항자세를 제어하는 시험을 수행하였으며, 실험결과로부터 자세제어 시스템이 작동하지 않을 때와 작동할 때의 차이를 비교하였다.

2. 수학 모델

선체는 6 자유도 강제 운동으로 간주하고, 선체는 선수와 선미부에 설치된 제어판에 의하여 제어된다. 제어 시스템은 종동요(Pitch Motion)와 상하동요(Heave Motion)를 제어하도록 설계되어 있으며, 원하는 종동요와 상하동요를 갖도록 외력으로 선수, 선미부에 설치된 제어판을 움직여서 양력(Lift Force)을 가하도록 되어있다.

2.1 선체 운동 방정식

운동 방정식은 여러 문헌에 나와 있으며, 선체의 관성축들의 원점은 선체의 무게중심과 일치한다는 가정아래 수정된 형태의 운동 방정식이 얻어진다. Fig.1 에 선체에 대한 좌표계가 나타나 있다.

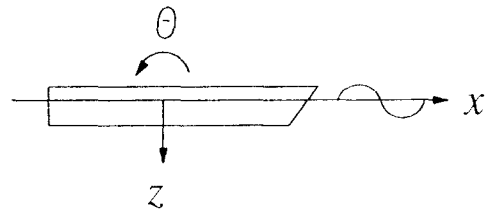


Fig. 1 Coordinate system

운동 방정식은 보통 다음과 같이 2가지 형태를 가지며, 각 방정식은 외력항을 포함하고 있으며, 계수들은 일정한 속도로 전진할 경우의 값을 사용하였다.

$$\text{선형 운동} : \vec{F} = m \vec{a}$$

$$\text{회전 운동} : \vec{M} = I \vec{\ddot{\theta}}$$

2.2 선형 운동 방정식

제어 시스템에 사용되는 운동 방정식은 선형화된 형태이며, 실제로 사용한 운동 방정식은 다음과 같이 w(상하 속도 성분), q(y축에 대한 각속도 성분)를 포함한 2자유도를 갖는 형태가 된다. δ_b 와 δ_s 는 각각 선수 제어판과 선미 제어판의 각도 변화를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m - Z_w & 0 & -Z_q & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -M_w & 0 & I_y - M_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ z \\ \dot{q} \\ q \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} Z_w & Z_z & Z_q & Z_\theta \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ M_w & M_z & M_q & M_\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ z \\ q \\ \theta \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} Z_{\delta_s} & Z_{\delta_b} \\ 0 & 0 \\ M_{\delta_s} & M_{\delta_b} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_s \\ \delta_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_0 \\ 0 \\ M_0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (1)$$

where m : mass of ship
 I_y : inertia about y-axis
 z : heave
 w : heave velocity
 θ : pitch
 q : pitch velocity
 Z : vertical force
 M : moment about y-axis

Z_0 와 M_0 는 각각 속도에 따라 변하는 정상 힘과 모멘트이다.

일반적으로 앞의 선형 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{x} = A x + B u, \quad (2)$$

where

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} \quad x = \begin{bmatrix} w \\ z \\ q \\ \theta \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} \delta_s \\ \delta_b \end{bmatrix}.$$

실제로 목적하는 값이 0 이 아니기 때문에 Linear Tracking Model(Dockhorn(1976)) 을 사용하였으며, 여기에 사용된 reference vector 는 다음과 같다.

$$r = \begin{bmatrix} 0 \\ r_2 \\ 0 \\ r_4 \end{bmatrix}$$

r_2 =ordered heave, r_4 =ordered pitch,

r_2, r_4 : constant

다음과 같이 y 와 \dot{y} 을 정의한 후,

$$\begin{aligned}
 y &= x - r \\
 \dot{y} &= \dot{x} - \dot{r}
 \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 식을 (3) 식에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{y} = A x + B u - \dot{r} \quad (4)$$

$$\dot{r} = 0 \quad \text{과} \quad A r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{을 이용하면 (4)}$$

식은

$$\begin{aligned}
 \dot{y} &= A[x-r] + B u \\
 \dot{y} &= A y + B u
 \end{aligned} \quad (5)$$

이 된다.

3. 최적 제어 이론

(Optimal Control Theory)

3.1 Linear Regulator Problem

최소화해야할 성능평가 함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 J &= \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [y^T(t) Q y(t) \\
 &\quad + u^T(t) S u(t)] dt
 \end{aligned} \quad (6)$$

(6) 식에서 최종시간 t_f 는 정해져있고 $y(t_f)$ 는 임의이다. Q 는 실 대칭(real symmetric) Positive Semi-definite 가중 행렬이고, S 는 실 대칭 Positive Definite 가중 행렬이다. 이렇게 식 (5), (6) 으로부터 선형 Regulator Problem 이 도출되었다.

매개변수 최적화의 해법을 따라 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{K}(t) = & -K(t)A \\ & + K(t)BS^{-1}B^T(t)K(t) \\ & - Q - A^TK(t). \end{aligned} \quad (7)$$

(7) 식, 즉 Riccati Equation, 에 대한 해는 2차 성능평가 함수를 근거로 정의된 수학 모형에 대한 최적 매개변수 행렬이 된다. 즉 Riccati Equation 에 의해 K 로 표현되는 제어 벡터 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u^*(t) = & -S^{-1}B^TK(t)y^*(t) \\ \text{or} \\ u^*(t) = & S^{-1}F^Ty^*(t) \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서 $F(t) = -K(t)B$ 이고 * 는 최적값을 나타내고, $u^*(t)$ 에 대한 최적 이득을 구하는 방법은 다음절에 나타나 있다.

Dockhorn(1976) 으로부터 $K(t_f) = 0.0$ 이고, 행렬 Q 와 S 는 다음의 형태를 갖는다.

$$\begin{aligned} Q = & \begin{bmatrix} qx_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & qx_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & qx_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & qx_4 \end{bmatrix} \\ S = & \begin{bmatrix} s_1 & 0 \\ 0 & s_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

여기에서 qx_i 는 상하동요 속도, 상하동요, 종동요 속도, 종동요의 오차에 대한 가중치이며, s_1 과 s_2 는 제어 입력에 대한 가중치이다.

3.2 최적 제어 이득 (Optimal Control Gain)

(7) 식에서 행렬 A, B, S, Q 는 상수 행렬이고, 시스템이 제어 가능하다는 가정아래 다음과 같이 놓는다.

$$K(t) \rightarrow K \text{ as } t_f \rightarrow \infty.$$

제어간격이 유한하고, 제어간격이 최적 이득의 응답 감소시간에 비해 충분히 길 때는 상수 제어

이득을 사용할 수 있다. (Dockhorn, 1976).

정상 상태 이득 K 를 얻기 위해서는 Riccati Equation (7) 을 적분할 수도 있고, 혹은 $\dot{K}(t)$ 을 0 으로 놓고, 대수 Riccati equation

$$\begin{aligned} 0 = & -KA - A^TK - Q \\ & + KBS^{-1}B^TK \end{aligned} \quad (10)$$

을 풀어도 된다. 물론 이 제어 이득은 카타마란선의 전진 속도 U 의 함수로 나타날 것이므로, 여러 가지 전진속도에 대하여 각각의 제어 이득들이 얻어질 것이다.

4. 자세 제어 시험

4.1 시험 장비 및 준비 과정

과도중의 운항 자세를 제어하기 위한 모형 시험이 KRISO 선형 수조에서 수행되었다. 모형선은 1.8 m 카타마란 선형(Catamaran, KS406)으로 선정하였으며, Table 1에 모형선의 주요제원이 나와 있으며, Table 2에 자세제어를 위한 제어판, 운동 전달 봉, 지지 스트럿 등에 대한 자세한 사항이 실려있다.

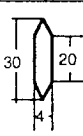
예인 봉(Towing Rod)과 상하지지 봉(Heaving Rod), 운동계측 봉(Motion Gauge Rod) 및 가속도계 등으로 이루어져 있는 운동계측 장비들은 Fig.2에 자세히 나와있다.

Table 1 Principal Dimensions of the Catamaran(KS406)

	Full Load
Lpp (m)	1.8
B (m)	0.472
TF (m)	0.1295
TA (m)	0.0570
△ (ton)	0.01929
LCB (m)	-0.1109

Table 2 Characteristics of Control Fins. Moving Rod and Struts for Tests of Attitude Control System

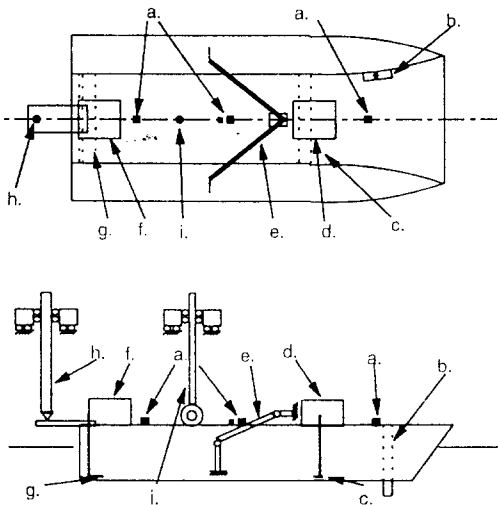
(Model Scale)

	Section	Fore	Aft
Strut		Height (mm)	
		159.4	112.5
Moving Rod	D = 4 mm	Height (mm)	
		190.0	143.0
Control Fin	Fore Fin : NACA0020 Chord = 40 mm Aft Fin : NACA0015 Chord = 60 mm Flap Chord = 15 mm	Span (mm)	
		135 X 2	100 X 2
		Station No.	
		7	0.5
		Height from Base Line (mm)	
8	35		

- g. Flap type Fin
- h. Heaving Rod
- i. Motion Gauge Rod

Fig. 2 Test Arrangement for the Attitude Control System of the Catamaran

모형선의 운동계측과 제어판의 구동은 0.055 sec 마다 수행되며, 현재까지는 시간 간격을 줄일 수 없어서 단 과장 과의 경우 충분한 제어를 할 수가 없었다. 시간 간격을 더 작게하는 것이 선결 문제로 남아있으나, 다음 시험까지는 수정이 되리라고 본다. Fig.3에 자세제어 시스템에 대한 구조도가 나타나 있다. 운동계측은 A/D 보드를 사용하고, 제어판의 구동은 서보 모터 시스템(Servo Motor System)에 D/A 보드를 통하여 신호를 보낸다.



- a. Accelerometer
- b. Resistance type Wave Probe
- c. All Movable Fin
- d. Fin Driving Motor
- e. Towing Rod
- f. Fin Driving Motor

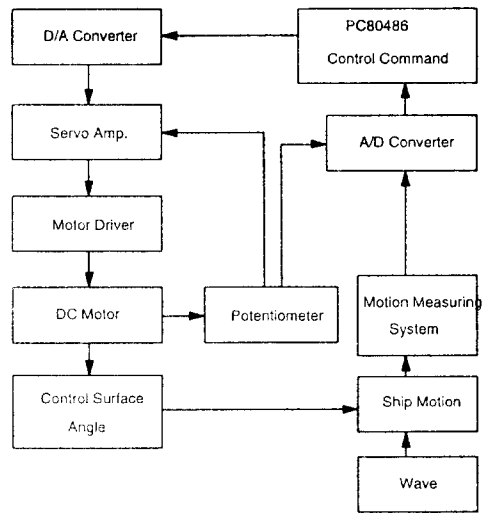


Fig. 3 Block Diagram of Attitude Control System

제어판은 모형선의 쌍동선체 사이에 2조가 설치되어 있으며, 선수 제어판은 왼쪽과 오른쪽에 같은 크기의 전가동 핀으로 구성되어있고, 단면형상은 NACA0020 이다. 선미 제어판은 왼쪽과 오른쪽에 같은 크기의 플랩(Flap)이 있는 제어판으로 구성되어 있고, 플랩의 길이는 전체 길이의 0.25에

해당하며, 단면형상은 NACA0015 이다. 선미 제어판의 경우 플랩부분만 움직이며, 선미 제어판의 플랩 및 선수 제어판은 모형선의 운동을 제어하기 위하여 $\pm 15^\circ$ 이내에서 움직이도록 되어있고, 구동장치로는 선체 갑판부에 4개의 DC 모터가 설치되어있으며, 제어판과 운동전달 봉으로 연결되어있다.

고속선의 운항자세를 제어하기 위하여 사용된 제어판에 의하여 생기는 양력(Lift Force)과 힌지 모멘트(Hinge Moment)는 제어 시스템의 외력항에 해당하는 값이고, 또한 힌지 모멘트의 경우 모터 용량을 결정하는데 사용된다. 그래서 2차원 수중익 이론(2-Dimensional Hydrofoil Theory)을 이용하여 제어판의 양력과 힌지 모멘트를 계산하였다.(강창구(1993))

또한 홍도천 등(1985)에 의하여 개발된 카타마란 선형의 운동해석 프로그램인 SWAMO 를 이용하여 부가질량 계수, 감쇠 계수, 복원력을 계산하였다. 제어이득(Control Gain)을 구하는데 사용된

부가질량 계수와 감쇠 계수는 $\lambda/L = 2.0$, $Fn = 1.014$ 에 대한 것이다.

4.2 실험 결과

실험 조건은 다음과 같다.

Table 3 Test Condition

Speed (Fn)	0.548, 0.786, 1.014
Wave Length (λ/L)	1.5, 2.0, 2.5, 3.0

Fig.4 와 Fig.5에 규칙과중의 운항자세 실험 결과가 보여져 있으며, 각 그림의 처음 부분은 자세 제어를 하지 않은 상태이고, 중간 부분부터 자세 제어를 시작하여 그 결과를 비교하였다. 비교 결과 Fig.5의 경우 중동요는 약 85% 까지 감소하는 것을 볼 수 있었다.

Fig.6 과 Fig.7에는 중동요와 상하동요에 대한

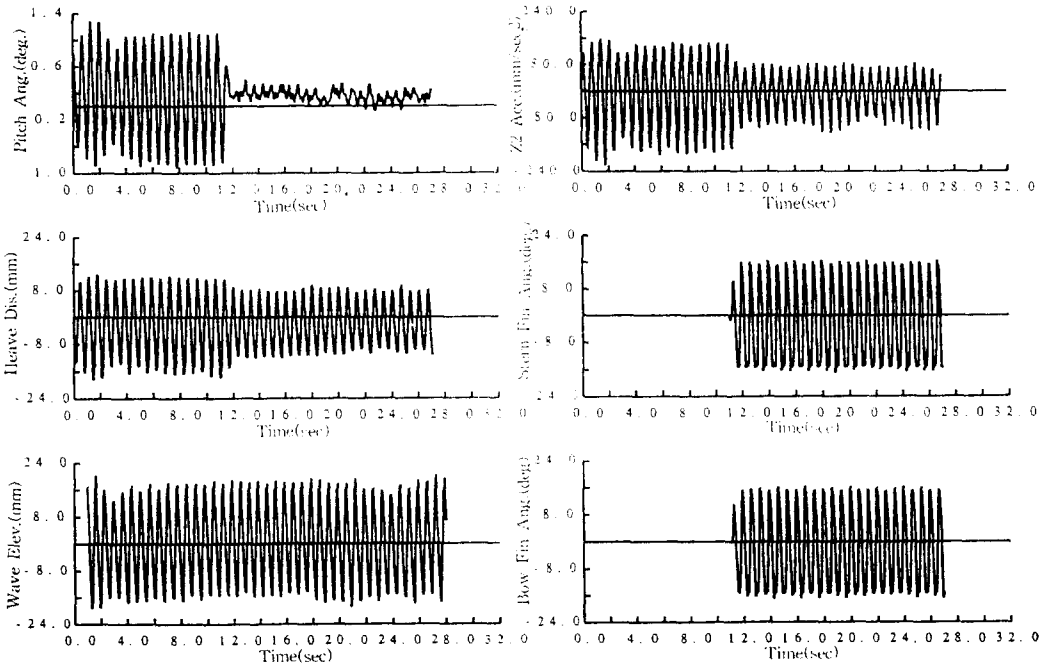


Fig. 4 Experimental Results in Regular Waves ($\lambda/L = 2.5$, $Fn = 0.786$)

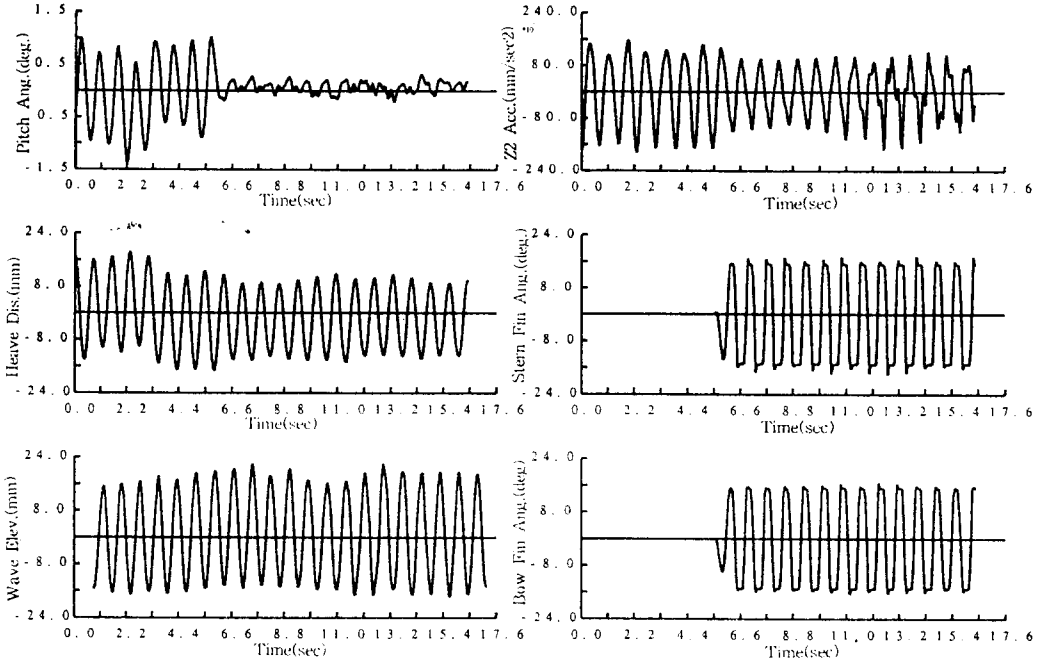


Fig. 5 Experimental Results in Regular Waves ($\lambda/L = 3.0$, $F_n = 1.014$)

제어효과가 나타나 있다. 자세제어의 경우 종동요에는 매우 효과적이거나 이번 실험의 경우 상하동요에는 그렇게 효과적이지 못하다. 실험결과를 보면 제어판의 효과는 시험 속도가 커짐에 따라 증가하는 것을 알 수 있는데, 이것은 제어판의 양력이 U^2 에 비례하기 때문이다. 그러나 부가질량, 감쇠력, 파랑 강제력은 스트립 이론(Strip Theory)에 의하면 주로 주파수에 대한 함수라고 할 수 있다.(Beck 등(1989))

5. 결론

본 연구에 의하여 수중익을 갖는 고속 카타란 선의 파도중의 운항 자세제어 시스템이 종동요, 상하동요에 대한 선형 방정식을 이용한 최적 제어 이론에 의하여 설계되었다. 이 시스템을 검증하기 위하여 선형 수조에서 모형 시험이 수행되었고, 수행 결과 효과적인 제어 시스템이라고 판단된다. 실험 결과를 보면 제어판의 효과는 실험 속도가 증가함에 따라 커지는 것을 알 수 있었는데, 이것은 제어판의 양력이 속도의 제곱에 비례하기 때문

이다. 그리고 종동요는 매우 효과적으로 운동이 감소하였으나 상하동요는 그렇지 못하다는 것을 알 수 있었다.

앞으로 검토해야 할 부분은 단 파장 파 및 불규칙 파중에서도 제어가 가능하도록 제어시간 간격을 작게 하는 것과 카타란 선의 비선형 운동 해석 및 파랑하중 계산이다.

후 기

본 연구는 과학기술처의 첨단요소기술과제인 "파도중 초고속 운항자세제어 기술 개발(II)" 과제 중 수행한 결과이다.

참 고 문 헌

- [1] 강창구, "2차원 플랩타의 간극이 양력에 미치는 영향", 대한조선학회 '93년도 춘계연구발표회, 1993. 4
- [2] 홍도천 등, "Development of a Computer Pro-

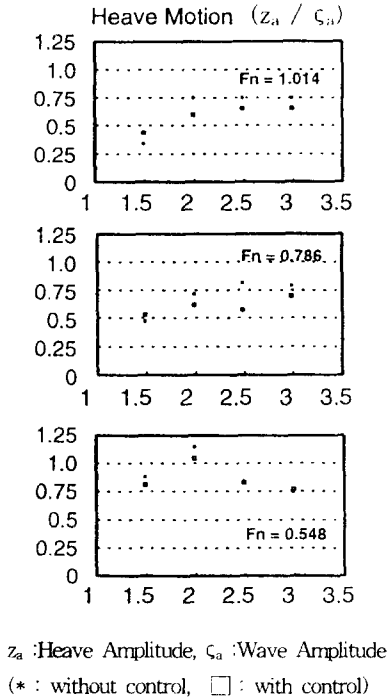


Fig. 6 Effect of the Control on the Heave Motion of the Catamaran in Regular Waves

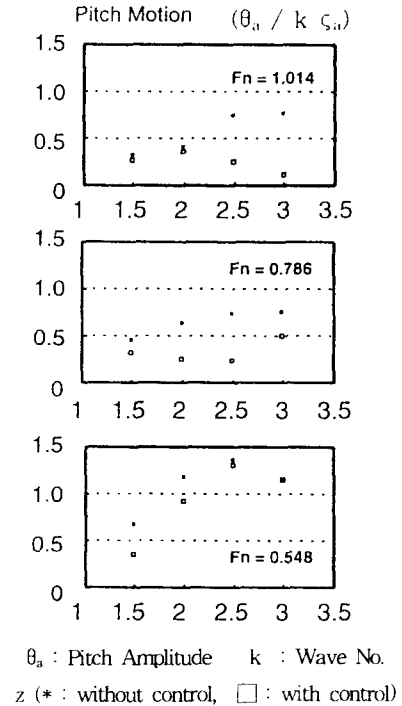


Fig. 7 Effect of the Control on the Pitch Motion of the Catamaran in Regular Waves

gram for the Analysis of Catamaran-type Ship or Offshore Structure”, KIMM 보고서 UCE244-649.D

- [3] BECK R.F., CUMMINS W.E., DALZELL J.F., MANDEL P., and WEBSTER W.C.(1989) Motions in Waves, Principles of Naval Architecture, 2nd Revision, SNAME.
- [4] DOCKHORN H-D. (1976) "Microcomputer Based Pitch and Depth Controller for a Submarine Using Optimal Control Theory", Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California.

- [5] ITOKO T., HIGASHINO S., YAMAGAMI Y., and IKEBUCHI T. (1991) "The Development of an Automatic Control System for a Submerged Hull and Foil Hybrid Super-High-Speed Liner", FAST '91, Trondheim.
- [6] SAITO Y., OKA M., IKEBUCHI T., and ASAO M. (1991) "Rough Water Capabilities of Fully Submerged Hydrofoil Craft 'Jetfoil' ", FAST '91, Trondheim
- [7] WEIST W.R. and MITCHELL W.I. (1976) "The Automatic Control System for the Boeing Commercial 'Jetfoil' ", IEEE National Aerospace and Electronics Conference, Pages 366-375.