
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 35 卷 第 3 號 1998 年 8 月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 35, No. 3, August 1998

시험선 『나래』의 자세 제어 기술 개발 및 실험

김진환*, 김연규*, 이경중*, 이창용**

Development of Motion Control Techniques and Sea Trials of The Test Ship 『NARAE』

by

J.W.Kim*, Y.G.Kim*, G.J.Lee* and C.Y.Lee**

요 약

본 논문에서는 시험선 『나래』에 적용된 자세 제어 기술 및 그 실험 결과를 보이고자 한다. 『나래』는 하부 몰수체와 그에 부착된 제어판을 이용하여 선체를 일정량 부상시키는 복합 지지선형을 채택하여 건조된 선박으로서, 본 연구원의 자체 설계를 거쳐 건조된 유인 시험선이다. 이러한 선형의 선박은 부상 상태에서 Heave, Pitch, Roll의 3자유도에 대해 복원력이 거의 작용하지 않기 때문에 정적 불안정성을 가지며, 그에 따라 자세 제어 시스템이 필수적으로 요구된다. 시험선 『나래』에는 제어판 구동을 위한 유압 구동 장치 및 선체 운동의 계측을 위한 각종 계측 장치가 설치되었다. 제어기로는 PID 제어기가 사용되었으며, 실시간 제어를 위해 Pentium급 산업용 PC가 탑재되었다. 약 3개월 여에 걸쳐 부상 시험 및 조종 시험을 포함한 실험이 수행되었으며, 만족스런 제어 성능이 발휘됨을 확인하였다.

Abstract

In this study, the motion control techniques applied to the test ship NARAE are summarized and the results of sea trials are presented. NARAE adopted a hybrid hull form with lower hull and submerged foils. This type of ship has a substantial instability in heave, pitch and roll modes at the foil-borne stage due to little restoring force, so an active control is indispensable to keep the stability. 4-hydraulic actuators with servo valves were installed to drive foils, and several sensors were used to measure the motion of the ship. PID controller was adopted as a motion controller, and for the real-time control, Pentium-class industrial PC was used. Sea

발 표 : 1998년도 대한조선학회 춘계연구발표회('98. 4. 23)

접수일자 : 1998년 5월 21일, 재접수일자 : 1998년 7월 13일

*정회원, 선박해양공학연구센터 해상안전방제연구단

**선박해양공학연구센터 선박성능연구부

trials including take-off, landing, and banked turn maneuvering were carried out for a period of over 3 months and quite satisfactory results were obtained.

1 서 언

21세기에는 고속 수송을 요하는 화물이 증가할 것이며, 공항시설의 한계, 도로 수송망의 혼잡도 증가 등으로 인해 고속 화물 수송체계의 변동이 불가피할 것으로 예상된다. 근래에 새로운 고속 화물 운송 수단으로 고속 화물선이 주목을 받고 있으며, 가까운 예로 일본의 경우 이미 89년부터 시속 50노트, 재화중량 1,000톤 급의 고속화물선(TSL) 개발을 추진해오고 있다[1]. 이러한 고속 화물선은, 기존의 여객 운송을 주목적으로 하는 소형 고속선들과는 달리 거친 해상 조건에서의 운항이 가능하여야 하며, 비교적 높은 파도 중에서도 안정적인 운동 성능을 가져야 한다.

그에 따라, 시험선 『나래』는 물수체의 부력과 물수체에 부착된 날개를 통한 양력을 이용하여 배를 띄워 달리는 부력-양력 복합지지선형을 채택하였으며, 선박의 대형화와 내항성의 향상이라는 기존 고속선의 단점을 극복하는 것을 목적으로 하여 건조가 이루어졌다. 이러한 선형의 가장 큰 장점으로서는 먼저 우수한 내항 성능을 들 수 있다. 이는 항주 상태에서는 수면 상에 상부 선체와 하부 선체를 연결하는 스트럿만 존재하므로 파랑에 의한 외력이 선체에 거의 전달되지 않기 때문이다. 그러나, 또한 이러한 점이 제어 장치 없이는 선박의 운용이 불가능하게 되는 단점의 원인이 된다. 즉, 부상 항주 상태에서는 선박의 무게 중심 위치가 높아지고 수면 상에 존재하는 선체의 표면적이 적어 정복원력이 거의 작용하기 않기 때문에, 별도의 자세 제어 장치 없이는 파랑 중에서는 물론, 파랑이 없는 정수 중에서도 부양을 포함한 항주 자체가 불가능하게 된다. 따라서, 본 선형에 있어 제어 장치는 승선감의 향상이나 요동의 저감 등을 위한 보조적 장치가 아닌 운항에 없어서는 안될 필수적인 요소라 할 수 있다.

이미, 시험선 『나래』의 건조에 앞서 초기 설

계 선형에 대한 시뮬레이션과 수조 모형 시험이 실시된 바 있다[2][3]. 단, 수조 모형 시험에서는 여러 가지 제약 조건으로 인해 일부 운동 자유도의 구속 상태에서 시험이 수행되었으며, 파랑 중 시험 역시 수행되지 못하였다. 그러나, 실제 실험 시험과 모형 시험의 보다 근본적인 차이는 단순한 크기의 차이 외에도, 계측 및 구동부를 포함한 전체적인 제어 시스템이 상당 부분 다를 수밖에 없다는 데 있으며, 실선에서 적용이 가능한 시스템을 고려한 제어 장치의 실제적 운용 가능 여부가, 최종 목표인 실선으로의 적용이 성공하느냐 실패하느냐를 좌우할 수 있는 중요한 관건이 된다. 시험선 『나래』의 경우 건조 과정에서부터 제어 및 계측 장치에 대한 설치 및 운용을 염두에 두고 작업이 이루어졌으며, 건조 과정 및 실험 시험 과정에서의 문제점들을 찾아내고 보완하는 과정에서 실제 상용 선박 건조에 도움이 될 수 있는 기술 및 Know-How의 습득이 이루어졌다. 특히, 3개월 여에 걸친 실험 시험 결과, 적어도 자세 제어의 측면에서는 상당히 만족스런 결과를 얻었으며, 파랑 중에서도 우수한 제어 성능이 나타남을 확인하였다.

본 연구에서는 실제 시험선에 적용된 제어기를 포함한 제어 장치 전반에 관해 설명하고, 제어기 이득 조정 과정을 포함한 실험 시험 결과를 보이고자 한다.

2. 운동 제어기

선박의 운동 좌표계는 Fig.1과 같다.

2.1 제어기 구성

제어는 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 하나는 주 제어 대상이라 할 수 있는 선박의 운동 제어이며, 다른 하나는 제어판 구동 장치인 유압 실린더

의 위치 제어이다.

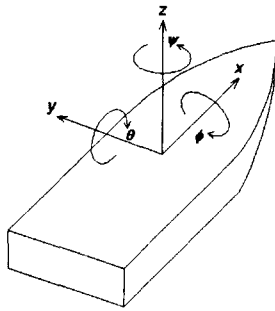


Fig. 1 Coord. System

제어기에는 여러 가지 종류가 있는데, 본 연구에서는 구동 시스템(유압 시스템)의 경우 비례 제어기를, 선체 운동 제어를 위해서는 현실적으로 가장 널리 사용되고 있는 PID(비례, 적분, 미분) 제어기를 사용하였다. PID 제어기는 보다 이후에 등장한 최적 제어 등의 근대 제어 방식에 비해 이론적으로는 그 성능이 다소 떨어지나, 시스템의 수식화가 쉽지 않거나, 비선형성이 심하게 나타나는 경우, 시스템의 제어 응답을 관찰해 가면서 직관적인 판단을 통해 제어 이득을 조정하는 방법이 유용하게 적용될 수 있다는 장점이 있다.

2.1.1 유압 실린더 위치 제어 (Foil 구동각 제어)

유압 시스템의 작동 시험 결과 유압 실린더의 위치 제어는 가장 기본적인 제어 방법인 비례 제어만으로도 충분히 만족스런 제어성능을 보이는 것으로 나타났다. 단, 사용된 유압 실린더가 단동형(Single Rod Type)인 관계로, 피스톤 양단에서의 체적 변화량이 서로 달라 팽창(Extend) 모드와 수축(Retract) 모드 사이에 필요 유량의 차이가 발생한다. 이러한 차이는 제어판의 운동 방향에 따라 다른 운동 특성(특히, 속도)이 나타남을 의미하므로, 이를 상쇄시켜 주기 위해 팽창 모드에서는 수축 모드에 비해 유량 밸브를 더 열어주어 보다 많은 유량이 공급되도록 하였다.

$$U_{Ser} = K_{Servo} \cdot (S_{Com} - S_{Sen}) \tag{1}$$

$$K_{Ser(E)} = A_{ratio} \cdot K_{Ser(R)}$$

U_{Ser} : Serve Valve의 유로 개폐율

K_{Ser} : 비례 제어 이득

S_{Com}, S_{Sen} : 실린더 스트로크 (명명값, 계측값)

$K_{Ser(R)}, K_{Ser(E)}$: 비례 제어 이득 (수축모드, 팽창모드)

A_{ratio} : 면적비 (A_E/A_R)

2.1.2 선체 운동 제어

선체 운동 제어를 위한 제어기 설계는 원칙적으로 운동 방정식을 구하고 이를 적절히 선형화한 후 일련의 과정을 거쳐 제어 이득을 결정하는 과정을 따른다. 그러나, 본 시험선과 같이 비선형성이 심하게 나타나고, 일반적인 개념의 유체력 미계수를 이용한 운동 방정식으로서의 표현이 쉽지 않은 경우 기존의 제어 이론을 적용하여 얻은 제어 이득 값이 실제적으로 유용한 것이 되기는 힘들다. 따라서, 본 연구에서는 시뮬레이션 및 수조 모형 시험을 통해 얻은 제어 이득 값을 바탕으로 하여, 실험역 예비 시험을 통한 제어 이득 조정(Control Gain Tuning)의 과정을 거쳐 제어 이득을 찾기로 하였다.

본 선박에 있어, 제어 대상은 6자유도 운동 가운데 Heave, Roll, Pitch의 3자유도 운동이 된다. 나머지 3자유도 운동(Surge, Sway, Yaw)은 전자에 비해 상당히 낮은 주파수 영역의 수평면 운동으로, 조선자(操船者)에 의한 추력과 조타 장치의 조작만으로도 충분히 제어가 가능한 부분으로 판단하였다.

제어판의 운동 좌표계를 Fig. 2로 정의할 때, 3자유도 운동 제어를 위한 제어판 거동은 다음의 3가지 운동 모드로 분리하여 생각할 수 있다.

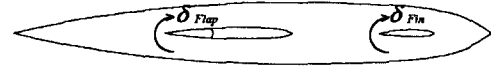


Fig. 2 Coord. System of Foils

• Heave 모드

$\delta_{Fin} > 0$, $\delta_{Flap} > 0$: Downward Force

$\delta_{Fin} < 0$, $\delta_{Flap} < 0$: Upward Force

• Pitch 모드

$\delta_{Fin} > 0$, $\delta_{Flap} < 0$: Bow-Down Moment

$\delta_{Fin} < 0$, $\delta_{Flap} > 0$: Bow-Up Moment

• Roll 모드

$\delta_{Flap(S)} > 0$, $\delta_{Flap(P)} < 0$: Stbd. Down Moment

$\delta_{Flap(S)} < 0$, $\delta_{Flap(P)} > 0$: Port-Down Moment

※ Fin : 선수부 제어판 , Flap : 선미부 제어판

이로부터, 다음의 식으로 표현되는 제어기를 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} U_H &= K_{P_H} z_e + K_{I_H} \int z_e dt + K_{D_H} \dot{z}_e \\ U_R &= K_{P_R} \phi_e + K_{I_R} \int \phi_e dt + K_{D_R} \dot{\phi}_e \\ U_P &= K_{P_P} \theta_e + K_{I_P} \int \theta_e dt + K_{D_P} \dot{\theta}_e \end{aligned} \quad (2)$$

U_H, U_P, U_R : 각 운동 Mode에 대한 제어판 제어입력

z_e, ϕ_e, θ_e : 제어명령과 계측입력의 차이값

K_P, K_I, K_D : 비례, 적분, 미분 제어이득

선수부 및 선미부 제어판은 그 면적과 Pitching 모멘트 암(Arm)이 다른 외에도 선수부 제어판은 전가동 핀(Fin) 형태이고, 선미부 제어판은 플랩(Flap) 형태라는 차이로 인해, 동일 양각에서 발생시키는 힘의 크기가 다르다. 이러한 점을 고려하기 위해 다음의 식 (3)에서와 같이 적절한 배분 상수를 적용하여, 최종적인 제어판 구동각을 결정하였다.

$$\begin{aligned} \delta_{FinP} &= -C_{HF} U_{Heave} + C_{PF} U_{Pitch} \\ \delta_{FinS} &= -C_{HF} U_{Heave} + C_{PF} U_{Pitch} \\ \delta_{FlapP} &= -C_{HA} U_{Heave} - C_{PA} U_{Pitch} - U_{Roll} \\ \delta_{FlapS} &= -C_{HA} U_{Heave} - C_{PA} U_{Pitch} + U_{Roll} \end{aligned} \quad (3)$$

δ : 제어판 구동 명령각

C_{HF}, C_{HA} : Heave 제어 배분상수

C_{PF}, C_{PA} : Pitch 제어 배분상수

(P : 좌현 제어판 , S : 우현 제어판 , F : 선수 Fin

2.2 제어 시나리오

시험선 「나래」는 정지상태(Hull-Borne Mode)에서는 2.5m, 항주상태(Foil-Borne Mode)에서는 1.5m의 흘수를 갖는다. 즉, 정지 및 저속 상태에서는 하부 물수체의 부력 외에도 상부 선체의 부력을 함께 이용하여 떠 있다가, 속력을 증가시키면서 물수체에 부착된 양력면으로부터 양력을 얻어 정상 항주 상태에서는 물수체 부력과 양력면의 양력을 각각 50%씩 이용하여 달리도록 설계되었다. 따라서, 원활한 부상과 착수 동작을 위해서는 흘수 변화를 포함한 항주 중의 자세 변화에 대한 일련의 제어 시나리오의 가정이 필요하다. 시나리오는 크게 다음의 5단계로 나눌 수 있다.

- ① 가속 : 추진 장치의 출력을 높여가며 속력을 증가시킨다.
- ② 부상 : 속력 증가에 따라 발생하는 양력면의 양력을 이용하여 선체를 천천히 부상시킨다.
- ③ 항주 : 부상 흘수를 유지하며 계획된 항주 속력으로 떠서 달린다.
- ④ 착수 : 선체를 부상 이전의 흘수로 천천히 내린다.
- ⑤ 감속 : 추진장치의 출력을 줄여 정지시킨다.

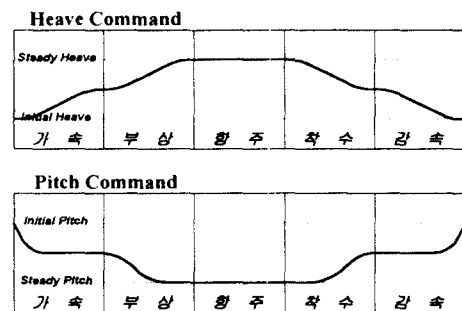


Fig. 3 Control Scenario

특히, 부상 및 착수 단계에서는 자세 변화로 인한 불안정 거동이 유발되기 쉬우므로, Overlapping 함수를 통해 부드러운 거동을 구현하는 것이 필요하다. 효율적인 Overlapping 함수의 도출을 위해 간략화된 운동 방정식으로부터 최적 자세 변화 경로를 계산한 결과 시간을 변수로 하는 3차 함수 형태를 얻었으나, 이 경우 부상 시간 및 부상 시작과 종료 시점에서의 자세에 따른 경로 재계산이 요구되었다. 이러한 번거로움을 피하기 위해, 최적 자세 변화 경로와 유사하면서도 계산이 보다 간단한, 조화함수를 이용한 Overlapping 함수를 사용하였다.

2.3 조종 운동시의 자세 제어

본 선체는 단순한 부상 항주 제어 외에도 조종 운동을 고려한 자세 제어가 필요하다. 부상 항주 중인 선체에는 높은 무게 중심과 적은 수선 면적으로 인해, 정복원력이 거의 존재하지 않는다. 여기에 조선(操船)을 위해 추진기의 분사 방향을 변화시킬 경우, 추력에 의한 전복 모멘트가 발생하며, 추진기 분사 방향의 변화에 따른 Yaw 모드에서의 회전 운동은 원심력을 발생시켜 추가적인 전복 모멘트를 유발한다. 따라서 이와 같은 위험 요소의 제거를 위해서는 전복 모멘트를 상쇄시킬 필요가 있다. 전복 모멘트의 상쇄는 Banked Turn의 도입을 통하여 해결한다. 즉, 침로 변경을 위한 선회 동작 중에는, 선체를 인위적으로 선회 방향으로 기울여서, 그에 따라 발생하는 중력에 의한 모멘트로 원심력에 의한 전복 모멘트를 상쇄시킨다. 그러나, 원심력을 완전히 상쇄시키고자 과도하게 선체를 기울이게 될 경우, 선속 저하 또는 기타 외란 등에 의해 선체가 선회 방향으로 넘어지는, 또 다른 위험이 유발될 수 있으므로, hBT (Banked-Turn Ratio)를 설정, 원심력의 일부만을 상쇄시킨다.

$$\phi_C = h_{BT} \cdot \tan^{-1} \left\{ \frac{\psi V}{g} \right\} \quad (5)$$

$\phi_C =$ Roll 제어 명령

$h_{BT} =$ Banked-Turn Ratio

$V =$ 선속(m/s)

$\psi =$ Yaw 각속도

Banked-Turn을 채택함으로써 얻게 되는 이익은 선체의 생존에 직결되는 안전성의 확보라는 측면 외에도 한 가지가 더 있다. 바로 선회 성능의 향상이다. 선체를 기울여 뒹으로 인해 선회 반경이 크게 줄어들며, 이는 단순한 선회 성능만이 아니라 전반적인 조종 성능의 향상을 의미한다.

3. 운동 제어 및 계측

3.1 구동 장치

운동 제어를 위한 구동 장치로는 총 4개의 유압 실린더가 설치되었다. 물수체 내부에 설치된 유압 실린더의 직선 왕복 운동은 구동 연결부를 통해 제어판의 회전 운동으로 변환된다. 설치된 제어판의 제원은 다음과 같다.

Table 1 Dimensions of foils

	Span	Chord	제어판 Type
선수부 제어판	0.8	0.5	전가동형 Fin
선미부 제어판	1.46	1.22 (+0.46)	Flap형 () : Flap Chord

유압 실린더의 구동을 위해 많은 유압 장치 요소들을 함께 고려한 유압 회로의 설계가 수행되었다.

각 유압 요소 장치들의 용량 산정은 최대 작동 부하에 대한 계산을 바탕으로 하여, 액츄에이터, 펌프 및 축압기, 제어 밸브, 기타 부가 장치의 순서로 이루어진다. 액츄에이터로는 유압 실린더가 사용되었으며, 신속한 제어판 운동 응답을 위해 언제라도 충분한 유량의 공급이 가능하되 유압 회로의 효율 저하를 최소화하기 위해 가변용량식 피스톤 펌프를 사용하였다. 제어 밸브로는 제어 응

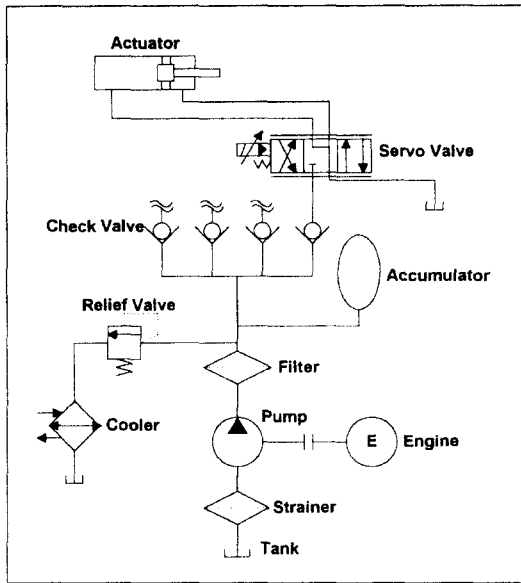


Fig. 4 Hydraulic circuit diagram

답성이 우수한 서보 밸브가 선정되었다. 이 밖에도 유압 탱크, 필터, 유온 유지를 위한 냉각기 등 유압 회로 구성에 필요한 많은 장치 요소들을 적절한 용량을 갖게끔 선정하여 설치하였다. 4개의 액추에이터로의 유로 분기를 위해 분기관(manifold)을 작동유 공급 유로 및 복귀 유로에 각각 설치하였으며, 액추에이터 작동시 발생할 수 있는 상호 간섭에 의한 압력 변동을 막기 위해 4개의 체크 밸브(check valve)를 설치하였다. 대부분의 배관은 고강도를 유지하되 부피와 중량을 최소화하기 위해 스테인레스 강관을 사용하였으며, 배압(背壓)을 최소화하기 위해 저압 라인인 복귀 유로에는 공급 유로에 비해 내압 강도는 약간 작되, 내경이 큰 강관을 사용하였다.

3.2 계측 및 제어 장치

시험선 「나래」의 제어 시스템 전체를 운용시킬 주 제어 장치로는 펜티엄(Pentium) 급의 산업용 PC가 사용되었다. 사용된 PC는 Single-Board, 모니터 일체형의 내진 기능을 갖춘 PC로서, 가혹 환경에서도 정상적인 성능을 발휘할 수 있도록 설

계된 제품이다. 여기에 각종 계측 센서로부터의 신호 취득과, 제어 신호의 전달을 위해 16채널 A/D 변환기와 4채널 D/A 변환기가 설치되었다.

3.2.1 유압 시스템 제어 장치

유압 시스템의 제어는 유압 실린더 위치의 제어를 의미한다. 실린더의 위치 검출은 유압 실린더 끝단에 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 부착시켜, 전기적인 신호를 취득하는 방법을 택하였다. 계측된 실린더의 위치를 이용하여, 실린더 윗부분에 부착된 서보 밸브 내의 작동유의 흐름과 방향을 제어함으로써 실린더 위치 제어를 수행한다. 서보 밸브 내의 플래퍼를 움직이기 위해서는 전류 신호가 필요하며, 전류 입력을 조절하여 유로의 방향 및 개폐율을 변화시키게 된다. 이를 위해 PC에 연결된 A/D 변환 장치에서의 전압 명령을 전류 명령으로 변환시켜주는 V/A 변환기가 사용되었다.

3.2.2 선체 운동 계측 장치

- Heave 운동 계측

선체 운동 계측에 있어 중요한 부분이면서도, 가장 큰 어려움이 예상되었던 부분이 바로 Heave의 계측이었다. Heave 변위의 계측을 위해 접촉식 파고계, 압력 센서, 초음파 센서의 3가지 계측 방법이 검토되었다. 그러나, 예비 시험을 통한 성능 시험 결과 접촉식 파고계와 압력 센서는 적용이 곤란한 것으로 판단되어, 최종적으로는 비접촉식 초음파 파고계가 사용되었다. 초음파 파고계로부터의 계측 신호는 단순히 센서로부터 수면까지의 거리를 의미하므로, Pitch에 의한 센서 위치 변화와 필터링을 통한 Wave Elevation 성분을 제거하는 과정을 거쳐야, 평균 수면에 대한 실제 Heave 성분을 얻을 수 있다. Heave 속도의 경우 가속도계로부터 들어온 신호를 적분하여 얻게 되는데, 적분 과정에서 Biased 오차로 인한 표류가 발생하지 않게끔 별도의 연산을 수행하였다.

• Roll 및 Pitch 운동 계측

Roll 과 Pitch 변위는 Heave에 비해 상대적으로 계측이 용이하다. 그 이유는 Heave와는 달리 중력을 이용한 절대 변위의 보정이 가능하기 때문으로, 계측을 위해 이러한 중력 보정 기능을 갖춘 2축 자이로를 사용하였다.

• Yaw 운동 및 선속 계측

2.3 에서 언급한 바 있는 Banked-Turn을 고려한 자세 제어를 위해서는 Yaw 각속도와 선속의 계측이 필요하다. Yaw의 경우 일반적인 1축 Rate 자이로를 사용하였으며, 선속 계측을 위해서는 소형 선박용으로 상용화된 GPS 수신 장치를 사용하였다. GPS의 오차 범위를 고려할 때, 의미 있는 선속 정보를 얻기 위해서는 상당 시간동안의 평균값 이용이 불가피하며, 그에 따라 실시간 제어 입력으로 이용되는 선속 정보는 커다란 시간 지연이 생기게 되나, 전반적인 제어 시스템 운용에는 커다란 문제를 일으키지 않을 것으로 판단하였다.

3.2.3 기타 장치

교류 전원 확보를 위해 900W Inverter 2대가 설치되었으며, 센서의 기진(Excitation) 전원 공급을 위해 직류 전원 변환기를 소비 용량을 고려하여 설치하였고, PC의 직렬 포트를 이용한 GPS 신호 취득을 위해 RS-422/RS-232C 신호 변환기가 사용되었다.

이 밖에도, 예상치 못했던 위급 상황에서의 대처를 위한 비상 착수 기능을 위해 Relay를 이용한 비상 스위치가 설치되었다. 비상 스위치를 작동시키면 PC에서의 제어 명령과는 무관하게 4개의 제어판에 대해 선체를 가라앉히는 방향으로의 구동 제어 출력이 발생되도록 하였다.

4. 실험역 시험

시제선 『나래』호의 주요 제원 및 외형을 Table 2 와 Fig. 5 에 보인다.

Table 2 Dimensions of 『NARAE』

길이 (m)	11.065
폭 (m)	4.65
하부선체 최대직경 (m)	0.7
배수량 (ton)	8.8
LCG (m)	-0.475
VCG (m)	2.7
Hull-Borne 흘수 (m)	2.5
Foil-Borne 흘수 (m)	1.5
주기관	370hp×2800rpm×2기
추진기	물제트 추진장치 2기

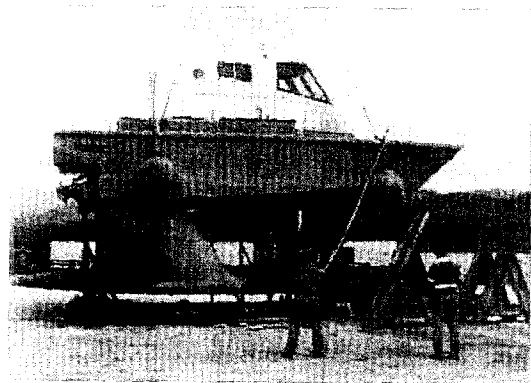


Fig. 5 『NARAE』 in launching

4.1 예비 시험

4.1.1 제어판 동작 시험

제어판 동작 시험은 제어판의 정상적인 동작 여부를 확인하는 외에도, 구동 장치의 취부 과정에 수 있는 설치 오차의 보정을 위해 필요하다. 동작 시험은 Step 구동 입력 및 Sinusoidal 구동 입력의 두 가지에 대해 진폭과 주파수를 변화시켜가며 수행되었다. 이러한 과정을 통해, 유압 제어기의 제

어 이득과 조정과 신호 잡음의 영향으로 나타나는 진동과 소음의 제거를 위한 필터링 작업도 함께 수행되었다. 필터로는 신호 처리를 통한 디지털 필터 외에 간단한 아날로그 필터가 함께 사용되었다. 필터 성능의 확인을 위해 수행된 제어판 구동 시험 결과의 일부를 Fig. 6 에 보인다.

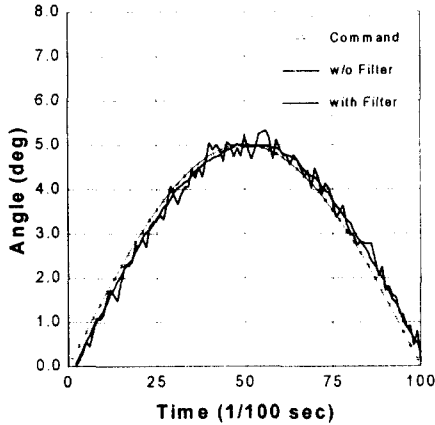


Fig. 6 Foil driving test results

4.1.2 제어 이득의 조정

예비 시험 단계에서는 Pitch 및 Roll 모드에 대한 제어 이득 조정이 우선적으로 수행되었다. Heave 모드의 제어 이득 조정은 부상 시험 단계에서 수행하였다.

• Pitch 모드의 제어

시험선은 선형 특성상, Foil-Borne 상태에서는 3자유도 모두 정적 복원력 측면에서의 불안정성이 존재한다. 그러나, Hull-Borne 상태에서도, 속력의 증가에 따라 불안정성이 점진적으로 증가하여 나타나게 되는데, 이 때 불균형 모멘트가 가장 먼저 그리고 가장 크게 발생할 수 있는 운동 모드가 바로 Pitch 운동 모드이다. 따라서 Pitch 모드에 대한 제어 이득 조정이 가장 먼저 수행되었다. 이를 위해, 일단 Roll 과 Heave 모드로는 인위적인 제어를 수행하지 않은 상태에서, 명령 Pitch 각을 얼마간 변화시켜 가면서 만족스런 거동이 나타나도

록 시험 주행을 통한 제어 이득의 조정을 수행하였다.

• Roll 모드의 제어

Roll 모드의 경우, Hull-Borne 홀수 상태에서는 일정량 선속을 증가시키더라도 Pitch 모드에 비해 상대적으로 충분한 정복원력이 작용하기 때문에, 운동에 대한 제어의 영향을 파악하기가 힘들다. 따라서, Roll 모드 운동 제어의 효과를 파악하기 위해 항주 속력을 조금 더 올려 어느 정도 자연스런 Heave 부상이 일어나도록 하였다. Heave 부상은 결국 상부 선체에 의한 복원력을 약화시켜 Roll 모드로의 정적 불안정성을 유발시킨다. 따라서 이러한 상태에서 제어의 성능에 대한 확인과 제어 이득 조정 작업이 가능하게 된다. 또한 Roll과 Pitch간의 상호 연성 관계를 고려하여, Roll 모드에 있어서는 Pitch 모드와 동시에 제어 이득 조정 작업이 이루어졌다. 단, 이 때의 Pitch 모드 제어 이득 조정은 앞서 결정된 제어 이득을 바탕으로 미소한 범위 내에서 수행하였다.

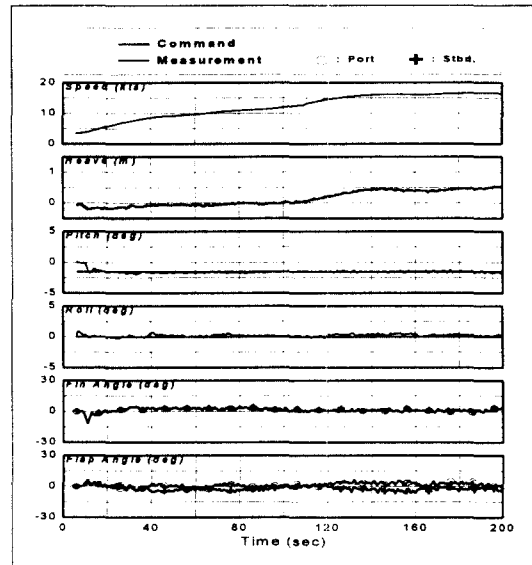


Fig. 7 Pitch & Roll Control Only

Fig. 7 은 Pitch 및 Roll 에 대한 제어 이득 조정이 완료된 상태에서의 시험 결과이다. 선체의

자연적인 일정량 부상을 위해, 정상 Pitch각을 1.5°로 설정하였다. 초기에는 Pitch가 수평을 유지하다 제어가 시작되면서 바로 제어값을 따라가는 것을 확인할 수 있으며, 선체에 일정량 부상이 일어난 후에도 Pitch 모드와 Roll 모드 모두, 제어 여유력이 충분히 확보된 상태에서 원활한 제어가 이루어짐을 알 수 있다.

4.2 부상 시험

부상 시험 과정에서 Heave 모드에 대한 제어 이득 조정이 이루어졌는데, 명령 부상량을 0.5m부터 계획 부상량인 1.0m까지 약 10cm 간격으로 단계적인 증가를 시켜가며 거동 관찰을 통한 제어 이득 조정이 수행되었다. 또한 보다 원활한 부상 및 착수가 이루어지게끔 부상 시나리오의 수정도 함께 수행되었다. 그 결과를 Fig. 8에 보인다.

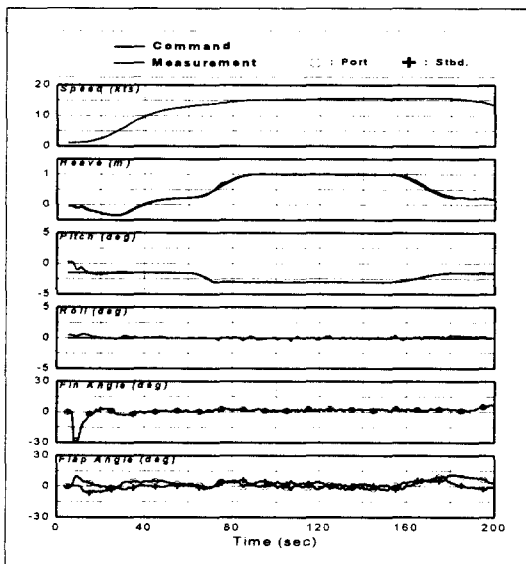


Fig. 8 Take off height 1.0m
Initial pitch : 1.5°
Added take off pitch : 1.5°

Total Take-Off Pitch 각이 3°가 되도록 시나리오를 설정한 결과, 부상 항주 상태에서도 충분한 제어 여유력의 확보가 가능하였다. 부상 및 착수 동작에서의 소요 시간은 20초로 설정하였는데,

이는 초기 부상량을 고려할 때 평균 3cm/sec 정도의 연직 부상 속도를 갖게끔 고려한 것으로, 선체의 불안정성이 유발되기 쉬운 부상 및 착수 단계에서도 만족스런 자세 제어가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. (착수 과정에서 제어판 구동각이 증가하는 것은 엔진 출력을 줄여 선속을 감속시켰기 때문이다. GPS로부터의 재측 선속에 얼마간의 시간 지연이 나타남을 이미 설명한 바 있다.) 부상 전후의 명확한 홀수 비교를 위해 Fig. 9~10에 정지 상태와 부상 상태의 모습을 보인다.

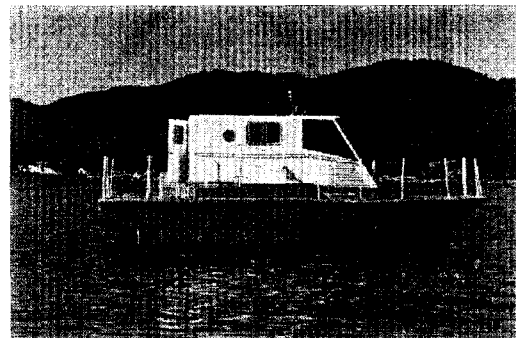


Fig. 9 Hull-borne state

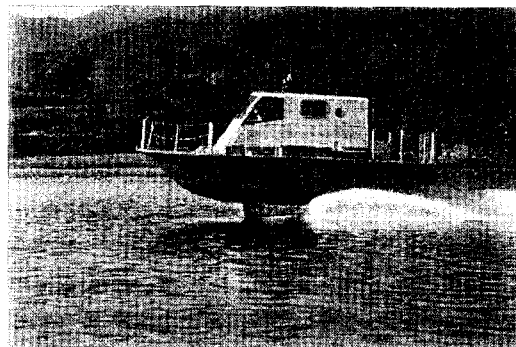


Fig. 10 Foil-borne state

4.3 선회 시험

본격적인 선회 시험에 앞서 수행된 몇 차례의 조선 시험을 통하여, Banked-Turn Ratio 값 hBT는 0.5로 결정하였다. 그런데, 시험 과정에서 시험선의 직진 안정성이 다소 부족하고, 선회로 인한 선속 저하가 초기 예상보다 다소 크게 나타나는

것이 관찰되었다. 이러한 상황에서 급격한 조선은 곧 선체 운동의 불안정을 유발할 것으로 판단되어, 의미있는 선회 궤적의 취득이 가능하되 자세 제어 안정성 확보에 문제가 없는 범위 내에서, 적절한 물체트 Bucket각을 유지하는 것을 원칙으로 하여 선회 시험이 수행되었다. 그리고, 시험 해역의 조류가 비교적 강한 지역임을 감안, 이에 대한 궤적 보정을 염두에 두고 720° 선회를 계획하였으나, 속력 저하로 인한 불안정 운동의 발생으로 인해 540° 선회가 수행되었다.

Fig. 11~12 가 선회 시험 결과이다. 이 때 물체트의 Bucket 각은 우현 8° 정도였다. Fig. 11 에 나타나듯이 선회 과정에서 Roll 각은 일정한 양의 값을 유지, 즉 선체를 우현으로 기울여 놓고 있으며, 전체적으로 만족스런 제어 성능이 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 12 에서의 선회 반경은 약 23 L 정도이다. 물체트를 사용하는 일반 고속선의 선회 반경이 10~15 L 정도로, 위의 값과는 얼마간 차이가 있으나, 시험선의 경우, 선회 능력 자체의 문제라기보다는 부상량 유지를 통한 제어 능력 확보를 우선한 선회 결과인 점을 고려한다면, 있을 수 있는 차이라고 판단된다. 그러나, 결과적인 선회 성능의 향상을 위한 작업은 필요할 것으로 생각되며, 이는 선회시의 부상량을 의도적으로 줄이거나, 보다 정확한 선속 계측을 통한 능동적인 부상량 제어를 통해, 불안정성의 유발을 억제시킬 수 있다면, 충분히 가능할 것으로 판단된다.

4.4 파랑 중에서의 운동 성능

실험역 시험인 만큼, 원하는 해상 상태를 찾는 것이 쉽지 않은 관계로, 파랑 중에서의 체계적인 시험을 수행하는데는 많은 어려움이 있었다. 결국 파랑 하중 시험이 독립적으로 수행되지는 못하였다. 따라서, 실험역 시험 과정 중에 기록된 파랑 조건에 대한 정보를 바탕으로 대표적인 경우에 대한 결과를 보이고, 그를 바탕으로 파랑 중에서의 운동 성능에 관해 설명하는 것으로 하겠다. 다음의 Fig. 13 은 유의 파고 약 0.6m에서 수행된

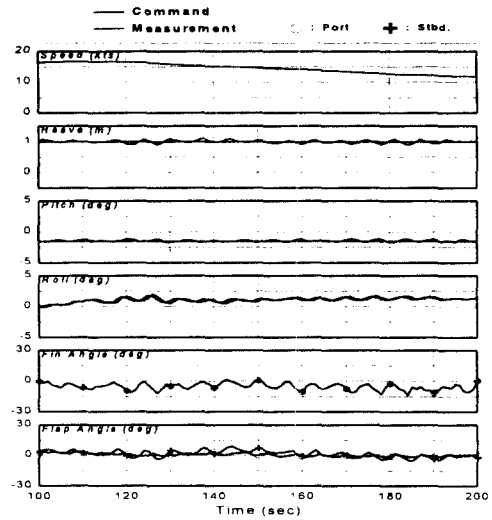


Fig. 11 Take off height 1.0m banked-turn ratio : 0.5

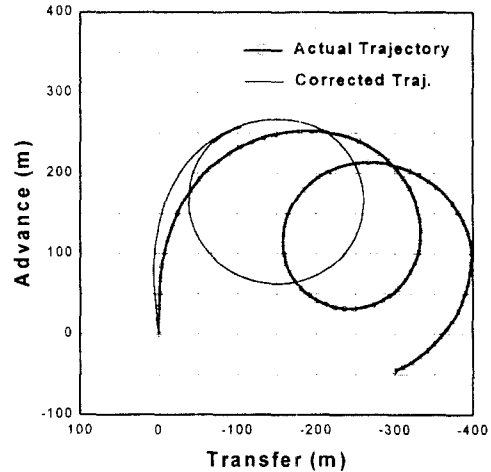


Fig. 12 Turning trajectory

운동 제어 시험의 결과이다. 시험선이 실제 목적선의 1/8 축소선임을 감안할 때 실제로는 유의 파고 4.8m에 해당하는 해상 상태이다. 시험선 운항의 설계 최대 파고는 1.0m이나, 이는 단순히 스트러트의 길이를 고려한 값으로 최대 파고와 유의 파고의 차이점, 선체 운동이나 Wave Elevation에 의해 초음파 센서의 계측 영역이 줄어들다는 점등을 고려하면, 실제 운항이 가능한 파고는 최대 파고

0.8m, 유의 파고 0.6m 정도가 한계값으로 판단된다.

제어가 시작되기 전의 선체 거동을 보면 Heave 및 Pitch 운동 응답이 비교적 크게 나타나고 있는 것으로 보아 해상 상태가 썩 좋은 상황이 아님을 알 수 있다. 그러나 제어가 시작되면서(약 10초 이후) 해상 상태가 비교적 좋은 상태에서 수행된 앞서의 결과와 크게 다르지 않음을 확인할 수 있다. 제어판 거동도 다소 큰 폭으로 움직이고 있기는 하나, 제어에 있어 별다른 문제점은 나타나지 않았다. 결국, 시험선의 파랑 중 성능은 정수 중에서도 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

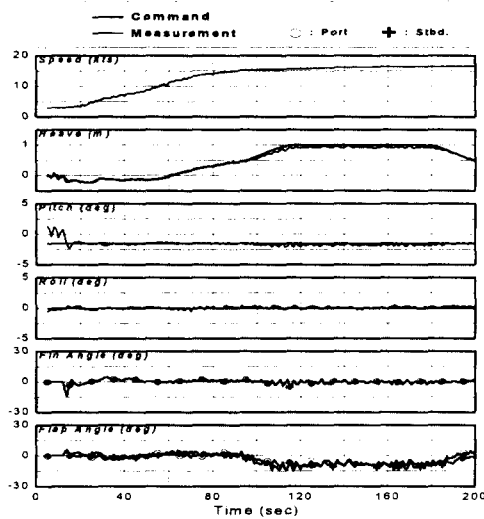


Fig. 13 Take Off Height 1.0m H1/3 : 0.6m

5. 검토 및 결론

시험선 『나래』의 개발에 있어 가장 핵심이 되는 기술 요소가 바로 선체 자세 제어와 관련된 부분이다. 이와 관련된 기술에 관해 거의 알려진 바가 없는 관계로 개발 과정에서 적지 않은 어려움과 시행 착오가 있었으나, 설계와 제작, 실험에 이르는 일련의 건조 작업을 통해 많은 기술과 Know-How의 습득이 이루어졌다.

결과에 대한 평가에 앞서 시험 과정을 통해 발

견된, 보완이 필요할 것으로 판단되는 부분들에 대해 지적하고자 한다. 이러한 문제점들은 이후 실용화에 있어 중요한 참고 자료로 활용될 수 있을 것이다. 문제점은 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 첫째는 선형 설계 상의 문제점, 둘째는 계측 상의 문제점, 셋째는 제어 상의 문제점이다.

● 선형 설계 상의 문제점

시험선 『나래』는 기본적으로 저항 추진의 관점에서 설계된 선박으로, 선형 설계 단계에서 조종성에 대한 고려가 결여된 것이 사실이며, 실제로도 직진 안정성이 다소 부족한 것으로 나타났다. 따라서 초기 설계 단계에서 조종성을 고려한 선형 설계의 수행이 가장 바람직 할 것으로 판단되나, Center 스트럿 및 Spray Rail의 형상 보완이나 물수체에 대한 연직 핀과 같은 새로운 부가물의 설치도 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

● 계측 상의 문제점

시험선에 설치된 각종 계측 장비의 특성 상 실험해역과 같은 악조건에서의 계측 및 운용에 적지 않은 문제점이 발견되었다. 특히 시험선에서의 진동이 일부 계측 센서의 오작동을 유발시키는 심각한 문제가 발생하였다. 이의 해결을 위해 주파수 영역의 특성 확인을 거쳐 Wire Coil 형식의 방진재를 이용한 방진 마운트가 설계, 장착되었다. 방진 마운트 설치를 통해, 문제가 되었던 센서의 오작동 문제를 해결한 외에도, 진동으로 인한 기타 센서들의 잡음 레벨이 크게 줄어들어 보다 정확한 운동 계측이 가능하였다. 실제 상용 선박으로의 적용시에도 유사한 문제점이 발생할 소지가 충분한 만큼 이에 대한 철저한 대비가 있어야 할 것이다.

● 제어 상의 문제점

제어 로직 상에도 보완을 필요로 하는 부분이 발견되었다. 선속에 따른 능동적인 부상량 조절 기능과 Roll의 선택적 제어의 필요성이 그것이다. 전자의 경우 보다 정확한 선속 계측이, 후자의 경우 조타 장치(Bucket Lever)의 조작에 대한 계측

방법이 마련된다면, 제어 프로그램과의 연동을 통해 선체의 제어 안정성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 시험선에 적용된 주 제어 기인 PC의 경우 그다지 안정적인 시스템이 아니다. 고속으로 떠서 달리는 이와 같은 선박에 있어, 제어 시스템의 오작동은 심각한 사고를 유발할 수 있다. 따라서, 상용화를 위해서는 충분한 신뢰성을 지닌 전용 제어기의 적용과 함께, 일부 시스템의 고장 또는 오작동 시에도 정상적인 성능을 발휘할 수 있도록 2대 이상의 제어기를 이용한 병렬 제어 구조를 갖도록 하여야 할 것이다.

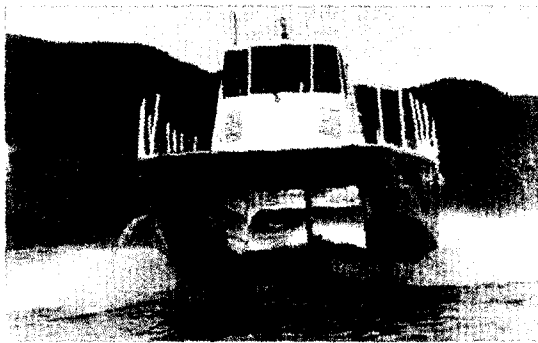


Fig. 14 「NARAE」 in cruising

3개월 여에 걸쳐 수행된 실해역 시험은 전반적으로 성공적이었으며, 적어도 자세 제어 기술 개발이라는 측면에서는 상당히 만족스런 결과를 얻었다. 항주 상태는 물론, 부상 및 착수 동작 중에도 안정적인 제어 성능을 나타냈으며, 특히 파랑중 운동 제어에 있어서도 우수한 제어 성능을 확인하였다. 본 과제를 통해 개발된 기술의 실제 상용선으로의 적용에도 큰 문제는 없을 것으로 판단되며, Jet-Foil 선과 같은 특수 선박에 대해서도 유사한 제어 기술이 적용되는 만큼 이의 직접적인 적용이 가능할 것이다.

후 기

시험선 건조와 실해역 시험 과정에서 많은 도움을 주신 주식회사 「세모」 관계자 여러분께 감사 를 드린다. 본 연구는 과학기술부의 기관고유사업

의 일환으로서 수행된 “차세대 선박 핵심기술개발” 과제에 대한 연구결과의 일부이다.

참 고 문 헌

- [1] テクノス-ノ-ライナー-實海域試驗報告書, テクノス-ノ-ライナー-技術研究組合, 1995.
- [2] 강창구 외, 수중익형 선체운동제어 기술 개발, UCN345-1873D 연구보고서, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터, 1995.
- [3] 강창구 외, 파랑중 운동제어 기술 개발, UCN008-1590D 연구보고서, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터, 1996.
- [4] 양승일 외, 파랑중 운동제어 기술 개발, UCN020-2049D 연구보고서, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터, 1997.
- [5] Arii, T., et al., "Development of a Motion Control System for a Foil-Assisted Catamaran "Superjet-30" ", Proceedings of FAST'93, Yokohama, 1993.
- [6] Toki, N., et al., "Model Tests and the Development of Control System for the Super-Shuttle 400 "RAINBOW" " , Proceedings of FAST'93, Yokohama, 1993.
- [7] Ogata, K., *Modern Control Engineering - 2nd Edition*, Prentice-Hall International Inc., 1990.
- [8] Kirk, D. E., *Optimal Control Theory*, Prentice-Hall International Inc., 1970.
- [9] 不二越油壓研究그룹, 알고 싶은 유압 - 증보판, 기전연구소, 1992.
- [10] Sullivan, J. A., *Fluid Power*, Prentice-Hall International Inc., 1989.
- [11] Bendat J. S. and Piersol, A. G., *Random Data : Analysis And Measurement Procedures*, John Wiley & Sons Inc., 1971.
- [12] 강창구 외, "고속 카타마란선의 규칙 정면파중 운항자세 제어 시험", 대한조선학회 논문집 33 권 제 2호, 1996.
- [13] 이심용 외, "수중익 쌍동선의 운동성능 및 자세 제어 연구", '96 초고속선 Workshop, 1996.