

RIB형 표적정의 수평면 조종운동 간략모델

윤현규^{†*}, 여동진*, 황태현*, 윤근항*, 이창민*

한국해양연구원 해양시스템안전연구소*

A Simplified Horizontal Maneuvering Model of a RIB-Type Target Ship

Hyeon Kyu Yoon^{†*}, Dong Jin Yeo*, Tae Hyun Fang*, Kun Hang Yoon* and Chang Min Lee*

Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI*

Abstract

A Rigid Inflatable Boat (RIB) is now widely used for commercial and military purpose. In this paper, it is supposed that seven-meter-class RIB be used as an unmanned target ship for naval training. In order to develop many tactical maneuvering patterns of a target ship, a simple horizontal maneuvering model of a RIB is needed. Therefore, models of speed and yaw rate are constructed as the first-order differential equations based on Lewandowski's empirical formula for steady turning circle diameter of a conventional planning hull. Some parameters in the models are determined using the results of sea trial tests. Finally, proposed models are validated through the comparison of the simulation result with the sea trial result for a specific scenario. Even though a simple model does not represent the horizontal motion of a RIB precisely, however, it can be used enough to develop tactical trajectory patterns.

※Keywords: RIB(고형부력선), Unmanned target ship(무인 표적정), Maneuvering model(조종모델), Sea trial(실선 시운전), Tactical pattern(전술 패턴)

1. 서론

RIB(Rigid Inflatable Boat)는 운항능력이 뛰어난 일반보트의 장점과 경량, 고부력을 얻을 수 있는 고무보트의 장점을 합친 소형 선박이다. 또한

제작이 용이하기 때문에 현재, 민간 및 군사 분야에서 다양한 용도로 널리 사용되고 있다.

한국해양연구원에서는 국방부 민군경용기술개발 과제인 “원격 선박통제 제어기술 개발”에서 무인선을 구성하고 있고, 그 형태를 RIB 선형으로 선정하였다. 이러한 무인선은 접근이 어렵거나 위험한 해역에서의 정보 계측 또는 구난 등의 작업을 수행할 수 있고, 군사용으로는 무인 표적정, 기뢰

접수일: 2007년 6월 24일, 승인일: 2007년 11월 6일

† 교신저자: hkyoon@moeri.re.kr, 042-868-7292

탐색정, 예인소나정 등으로 사용할 수 있다.

일반적으로 RIB는 고속으로 운항하므로 그 선형은 차인(Chine)이 있는 활주선형이고, 횡동요 안정성 및 부력 확보를 위하여 선미를 제외한 테두리에 고무 튜브를 장착한다. 이러한 활주선형은 운항시에 선형에 의한 양력으로 선체를 지지하므로, 정상상태 속도에 따라 수면하 형상이 달라진다. 또한 선회 중에는 큰 횡동요가 발생하며, 해상상태에 따라서 직진중에도 종동요가 크게 발생한다. 이러한 영향을 모두 고려한 RIB의 6자유도 운동은 상당히 복잡하며, 각 방향들에 대한 연성 효과도 매우 크다.

고속 활주선에 대하여는 다양한 분석이 시도된 바 있다. 국내에서는 활주선의 특성에 대한 연구로 황종홀과 이기표(1980)가 운동 성능을 계산한 바 있으며, 하문근과 Nakato(1994)는 활주선에서 발생하는 스프레이 및 선저 압력분포를 연구한 바 있다. 또한, 최근 신정일 등(2005)은 단을 가진 활주선의 저항특성을 실험적으로 살펴본 바 있다.

국외에서의 연구로는 활주선의 정상상태 속도에 따른 트림각, 침수깊이, 유효 마력을 형상에 따른 양력계수 실험식과 수직면에 대한 힘과 모멘트 평형식을 통하여 제안한 Lewandowski(2004), Savitsky(1964)의 연구가 대표적이다. 이렇게 계산된 정상상태 트림각과 Savitsky(1964)의 deadrise 각에 따른 임계 트림각 실험도표를 적용하면 종동요 안정성을 해석할 수 있다. Lewandowski(1997)는 간단한 횡동요 안정성 판별식과 수평면 운동방정식 안에 포함된 동유체력미계수에 대한 경험식을 제안하고 고유치 해석을 통하여 3자유도 수평면 운동에 대한 안정성을 해석하였다. 하지만 이러한 운동방정식은 선형 가정에 기초하고 있으므로, 전술 기동 패턴에서 요구하는 급선회 등의 운동을 모사하는데는 한계가 있다. Lewandowski(2004)는 Denny and Hubble(1991)이 수행한 12척의 고속활주선 선회시험 결과를 이용하여 정상선회반경 경험식을 제안하였다.

6자유도 또는 수평면 3자유도 운동방정식을 기반으로 한 시뮬레이션 모델의 경우에는 매우 많은 입력자료가 필요하며, 수평면 운동만을 해석하는 경우에도 수직면 운동의 연성효과에 의한 침수거

리, 트림각 등이 계속해서 계산되어야 한다. 따라서 현재 제작된 RIB가 무인 표적정으로 사용된다고 가정할 때, 전술기동 패턴을 개발하기 위해서는 속력과 침로각에 대한 단순 1차 모델링이 여러 인자들이 요구되는 6자유도 모델링 보다 더욱 적합할 것이다. 본 연구에서는 수평면 조종운동 간략모델을 개발하고, 이를 Lewandowski(2004)의 정상 선회지름식을 기초로 표현하였다. 또한 Savitsky(1964)의 활주선에 대한 정상항주상태 트림각 계산결과와 실선 시운전 결과를 비교하였다.

2. 활주선형의 정상항주상태

2.1 트림각

Savitsky(1964)는 활주선이 운항할 때 유동박리는 차인에서 일어나고, 선폭의 변화는 없다는 가정에 따라 정상항주 속도에 대한 트림각(τ) 계산 방정식을 힘과 모멘트 평형식으로부터 유도하였다.

이때 선박에 대한 입력값은 기하학적 형상변수 및 운항변수들로써, 질량(M), 길이방향 무게중심거리(l_{cg}), 선폭(B), deadrise각(β), 선속(U), 저항작용점과 무게중심까지의 수직거리(a), 추력선과 무게중심간 거리(f), 선저선에 대한 추력선 각(ϵ) 이다. 전진방향과 상하방향 힘평형식과 종동요 모멘트 평형식을 연성하여, 추력과 유체력을 소거하고 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [Mg \cos(\tau + \epsilon) - R_V \sin \epsilon]c + R_V a \cos \epsilon \\ - (Mg \sin \tau + R_V)f = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, R_V , c 는 각각 활주선에 작용하는 전저항, 무게중심에서 유체력 작용점까지의 거리이고, g 는 중력가속도이다. R_V , c , τ , 침수깊이, 양력은 서로간의 비선형 관계식(Faltinsen 2005)에 의하여 결정된다. 트림각 τ 는 식(1)의 비선형 대수방정식을 수치적으로 풀면 계산할 수 있다.

2.2 선회지름

Lewandowski(2004)는 프로펠러와 타를 장착한 고속활주선이 선회하는 경우에 정상선회반경 근사

식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{D_s}{L} \approx \left[1.7 + 0.0222 F_{\nabla} \left(\frac{L}{\nabla^{1/3}} \right) \right] \left(\frac{30}{\delta} \right) \quad (2)$$

여기서, D_s , L , ∇ , F_{∇} , δ 는 각각 선회지름, 선박 길이, 배수 용적, 체적 Froude수, 타각(deg)을 나타낸다. 체적 Froude수는 길이 차원으로 배수 용적의 세제곱근, 속력은 접근속력을 사용한다.

식(2)의 유효범위는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 0.3 < F_{\nabla} < 4 \\ 4.5 \leq \frac{L}{\nabla^{1/3}} \leq 7 \end{aligned} \quad (3)$$

3. 조종운동 간략모델

무인표적정은 질점이고 횡동요는 무시할 수 있다고 가정하면 그 전술기동 패턴은 수평면에서의 궤적 변화율로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos \psi \\ \dot{y} &= V \sin \psi \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, x , y , ψ , V 는 각각 수면상의 임의의 원점에 대한 좌표값들과 침로각, 속력이다. 따라서 속력과 침로각에 대한 운동방정식이 주어지면 시간에 따른 궤적 변화를 계산할 수 있다.

3.1 기본 가정

수평면 조종운동 간략모델을 정립하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 최대 타각 또는 워터제트 변형각으로 선회하는 경우에 표적정의 속력은 정해진 비율 만큼 감소된다.
- 직진하다가 선회가 시작되는 경우에 천이구간에서의 선회각속도와 속력은 1차 미분방정식으로 나타내고 각각의 시정수로 표현할 수 있다.
- 선회시에 편류(drift)는 없다.
- 식(2)의 속도와 형상관련 부분은 일반적인 프로

펠러와 타를 장착한 활주선에 대한 것이지만 워터제트를 장착한 고속정에도 적용할 수 있다.

- 식(2)의 타각관련부분의 최대 타각은 워터제트를 장착한 RIB의 선회시험 결과를 통하여 선회지름이 같아지도록 치환할 수 있다.

3.2 속력

속력에 대한 1차 미분방정식은 다음과 같이 시정수와 워터제트 변형각으로 나타낸다.

$$T_V \dot{V} + V = V_a - K_V |\delta| \quad (5)$$

여기서, T_V , V_a , δ 는 각각 감속 관련 시상수, 접근 속도, 워터제트 변형각을 나타낸다. T_V 는 선박 형상에 따라 달라지므로 시운전 결과를 통해서 결정한다. K_V 는 워터제트 변형각에 따른 추력 감소영향을 나타내는 값으로써 다음과 같이 감속율에 대한 선형관계식으로 모델링하였다.

$$K_V = \frac{(1 - c_s) V_a}{\delta_0} \quad (6)$$

여기서, c_s , δ_0 는 각각 접근 속력에 대한 정상 선회시 속력 감소율과 시운전시 사용한 최대 워터제트 변형각으로써, 시운전 결과를 통하여 결정한다.

3.3 침로각

침로각에 대한 운동방정식은 선회각속도에 대한 Nomoto의 1차 미분방정식(침로각에 대하여는 2차 미분방정식(Lewis 1989))으로 다음과 같이 간단하게 표현한다.

$$T_{\psi} \ddot{\psi} + \dot{\psi} = K_{\psi} \delta \quad (7)$$

여기서, ψ , T_{ψ} , K_{ψ} 는 각각 선수동요각, 시정수, 선수동요모멘트 계수를 나타낸다.

시정수 T_{ψ} 는 T_V 와 마찬가지로 시운전 결과를 통하여 결정한다. 또한 선수동요모멘트 계수 K_{ψ} 는 식(7), 워터제트 변형각이 δ_0 로 정상선회시 접근 방향 속력 관계식, 접근 속력과 선회시 속력

간의 관계를 이용하여 나타낼 수 있다.

위터제트 변형각이 δ_0 로 정상선회시 선회각속도는 침로각에 대한 운동방정식, 선회각속도와 접선방향 속력과의 관계식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_s = K_\psi \delta_0 = \frac{180}{\pi} \frac{2V_s}{D_s} \quad (8)$$

여기서, r_s , V_s , D_s 는 각각 선회각속도 (deg/s), δ_0 로 정상선회시 접선 방향 속력 (= $c_s V_a$), 선회지름을 나타낸다.

D_s 가 결정되면 식(8)에 의하여 선수동요모멘트 계수를 결정할 수 있다. 이때 RIB의 형상이 소폭 변화하는 경우에도 적용할 수 있는 모델을 구성하기 위하여 실선시험에서 측정한 D_s 를 식(2)에 대입하여 D_s 를 소거하기로 하자. 위터제트 변형각 δ_0 로 정상선회시, 선회지름은 식(2)의 타각 30° 와 δ 에 각각 δ_{30} 과 δ_0 를 대입하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D_s \approx Lc_\delta \left(\frac{\delta_{30}}{\delta_0} \right) \quad (9)$$

여기서, $c_\delta = 1.7 + 0.0222F_\nabla \left(\frac{L}{\nabla^{1/3}} \right)$.

δ_{30} 은 식(2)의 타각관련 부분에 포함된 상수 30에 대응하는 값인데, 선회시험을 통하여 선회지름이 같아지도록 결정한다.

식(9)의 D_s 를 식(8)에 대입하면 K_ψ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_\psi = \frac{360}{\pi} \frac{c_s V_a}{c_\delta L} \frac{1}{\delta_{30}} \quad (10)$$

4. 시운전

RIB의 운동 및 조종특성을 해석하기 위한 해상 시운전을 부산 수영만, 광안리 인근 해역에서 수행하였다. 시험 해역이 내해였으므로, 파고는

1~1.5m, 풍속은 1~2m/s 정도로 매우 잔잔한 상태였다.

계측 시스템에 사용한 센서는 수직자이로 (Crossbow VG400CC-100)와 일반적인 DGPS이다. 수직자이로는 자세각, DGPS는 궤적을 계측하기 위하여 사용하였다. 자세각은 100Hz 샘플링 주파수를 적용하였고, 속력은 DGPS 궤적 데이터를 수치 미분하여 획득하였다.

4.1 대상 선박

Fig. 1에 해상시험을 수행한 RIB 사진을 도시하였고, Table 1에는 시험 당시의 RIB 주요제원을 나타내었다. 대상 RIB의 엔진은 230마력 볼보 펜타 인보드 디젤 엔진을 장착하였고 추진형태는 위터제트이다.

4.2 속력 시험

속력시험은 17.5, 27.5 knot의 2개 속도에 대하여 수행하였다.

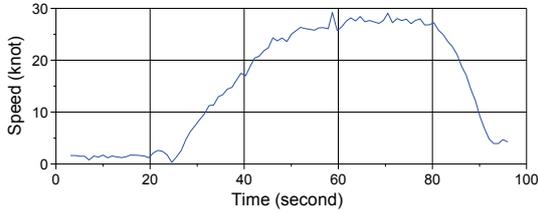
Fig. 2에는 2개 속도에 대하여 수행한 속력시험



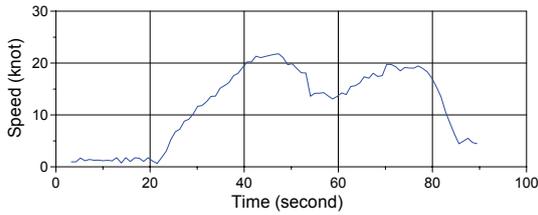
Fig. 1 Test RIB

Table 1 Principal particulars of a test RIB

항목	값
배수량	1,406 kg
길이	7.0 m
폭	1.1 m
선미흘수	0.43 m
선미부터 무게중심까지 거리	2.02 m
Deadrise 각	22°



(a) Speed = 27.5 knot



(b) Speed = 17.5 knot

Fig. 2 Speed test

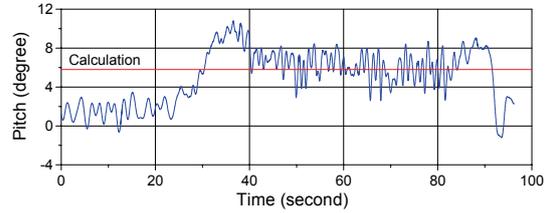
결과를 도시하였다. Fig. 2.(b)에서 일정한 속도를 유지할 수 없었던 이유는 RIB의 엔진 조정이 매우 민감하여 운항자가 매뉴얼로 쓰로를 제어하는 것이 어려웠기 때문이다. 이는 향후에 엔진 자동 제어모듈을 적용하면 개선되리라고 사료된다.

Fig. 3에는 속력시험시 계측한 트림각과 식(1)의 평형식에 의하여 계산한 트림각을 같이 도시하였다. 계산식에 의하면 속도가 커질수록 선미에서 작용하는 양력 때문에 트림각이 작아지는데, 그 영향이 시험 결과에서는 거의 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 RIB 경우에 트림각이 일정 각 이상 커지면 선미 고무 튜브가 수면과 접촉하여 부력에 의한 선수하강 트림모멘트가 작용하기 때문이다. Fig. 3에 의하면 트림각이 작은 경우에 계산식이 트림각을 잘 예측하는 것을 볼 수 있다.

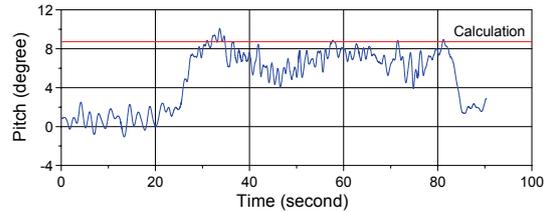
4.3 선회 시험

RIB가 빠른 속력으로 운항하다가 급선회를 할 경우 사고가 발생할 수 있으므로, 선회시험은 접근속력 17.5 knot에 대해서만 수행하였다. 하지만 이 속력을 매뉴얼로 일정하게 유지하는 것은 어려웠고, 실제 접근 속력은 16.2 knot로 측정되었다.

Fig. 4에 좌우현 선회시험 결과를 도시하였다. Fig. 4에 의하면 선회지름은 약 6.5m 정도인 것을



(a) Speed = 27.5 knot



(b) Speed = 17.5 knot

Fig. 3 Trim angles of speed test

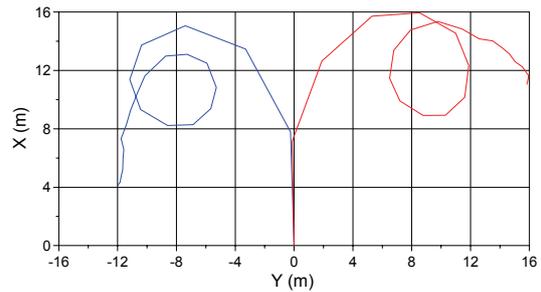


Fig. 4 Turning test

볼 수 있다. 대상 RIB는 워터제트를 사용하므로 프로펠러 추진기와는 달리 좌우방향 불평형성이 많지 않을 것이다. 따라서 Fig. 4의 좌우 비대칭 영향은 워터제트 영점 조향각의 편향 때문이라고 판단된다.

Fig. 5에는 우현 선회시험시의 선회각속도와 속도를 나타내었다. Fig. 5에 의하면 선회시에 선회각속도와 속력에 대한 시정수 T_V , T_ψ 는 정상상태값의 63.2%가 되는 시간으로 각각 2.5, 1.0초 정도인 것을 알 수 있다. 속력은 16.2 knot에서 3.8 knot 정도로 감속되고 있으므로, 식(6)에 포함된 감속비 c_s 는 0.23이고, 이때 사용한 워터제트 변형각은 12° 이므로, δ_0 는 12이고, 선회지름이 같아지도록 결정한 δ_{30} 은 6.5이다.

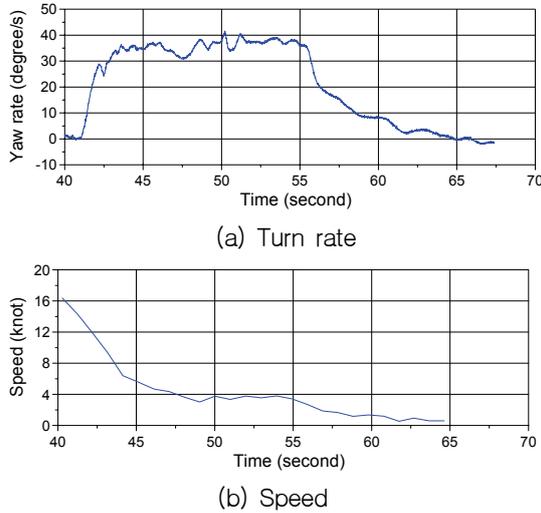


Fig. 5 Reduction of turn rate and speed at right turning test

5. 모델 검증

식(5),(7)의 속력과 침로각에 대한 운동모델의 검증을 위하여 지그재그 시험을 시뮬레이션과 해상시험을 통하여 수행하였다. 이때 워터제트 변형 각은 한쪽으로 12° 변경하고 3초간 유지한 후, 다시 반대쪽으로 12° 변경하는 시나리오로 수행하였다.

Fig. 6에는 시뮬레이션한 선회각속도, 속력을 실제 해상시험에서 수행한 시험결과와 비교하여 나타내었다. 간략모델임에도 불구하고 정량적인 크기나 변화 경향은 대체적으로 일치하는 것을 볼 수 있다. 하지만 비정상상태의 선회각속도를 약간 작게 추정하고, 속력의 감소는 큰 것을 알 수 있다. 이는 식(5)로 모델링한 속력 감소 영향이 너무 단순하고, RIB의 경우에는 선회시에 횡동요가 크게 발생하는데 간략모델에서는 이에 대한 고려가 없으므로, 실선시험 경우가 선회각속도가 더욱 크게 나타났다고 사료된다.

6. 결론

본 논문에서는 RIB가 무인 표적정으로 사용될 때, 전술기동 패턴 구성에 필요한 수평면 조종운

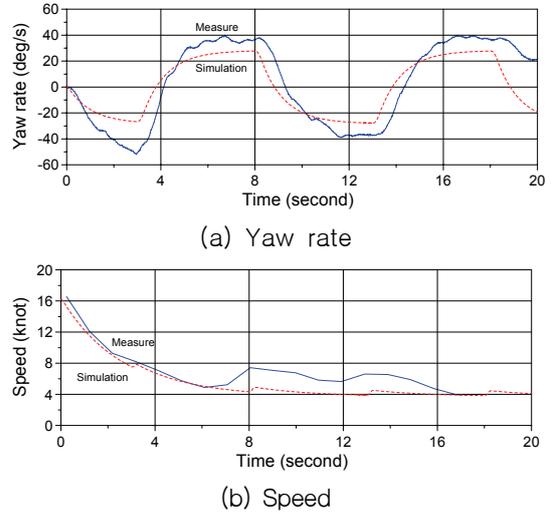


Fig. 6 Validation of models of speed and yaw angle

동 간략모델을 개발하였다.

수평면 운동은 속력과 선수동요 각속도에 대한 2자유도 운동으로 구성하며, 각각에 대한 1차 미분방정식으로 정립하였다. 선수동요 각속도는 Lewandowski(2004)가 제안한 경험식 형태로 기술하여 워터제트 및 유사 RIB에도 적용 가능하도록 실험상수들을 결정하였다.

정립된 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 시운전 결과를 비교한 결과, 간략모델이 전술기동 특성의 개발을 위한 대체적인 운동 특성은 반영하고 있다고 사료된다. 또한 선회 특성을 더 잘 기술하기 위해서는 횡동요 운동을 연성하여야 한다는 것을 알 수 있었다.

현재 모델 개발에 있어서 기반이 되는 선회지름식은 일반적인 프로펠러와 타를 장착한 선박에 대한 것이므로, 워터제트 장착 선박에 적합하도록 많은 시험결과를 통하여 개선할 필요가 있고, 유사 RIB에 대한 실선시험을 통하여 정립된 모델의 사용이 적합한지 확인하여야 한다.

후 기

본 논문은 국방부 민군겸용기술개발사업인 “원격 선박통제 제어기술 개발” 과제의 지원하에 수

행되었다.

참 고 문 헌

- 신정일, 양지만, 박호원, 김재성, 김효철, 2005, “고속 예인시스템을 이용한 단을 가진 활주형선의 저항특성 고찰,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 4호, pp. 341-349.
- 하문근, Michio NAKATO, 1994, “주상활주선형의 SPRAY 관측과 저면압력분포,” 대한조선학회 논문집, 제 31권, 제 3호, pp. 100-111.
- 황종흠, 이기표, 1980, “활주형 고속정의 횡파중에서의 순항시의 운동성능 계산 프로그램의 개발,” 대한조선학회 논문집, 제 17권, 제 4호, pp. 39-45.
- Denny, S.B. and Hubble, E.N., 1991, "Prediction of Craft Turning Characteristics," Marine Technology, Vol. 28, No. 1, pp. 1-13.
- Faltinsen, O.M., 2005, Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles, Cambridge University Press., pp. 360-362.
- Lewandowski, E.M., 2004, The Dynamics of Marine Craft, World Scientific, pp. 361-396.
- Lewandowski, E.M., 1997, "Transverse Dynamic Stability of Planing Craft," Marine Technology, Vol. 34, No. 2, pp. 109-118.

- Lewis, E.V., 1989, Principles of Naval Architecture 2nd Ed. Vol. III Motions in Waves and Controllability, SNAME, pp. 207-208.
- Savitsky, D., 1964, "Hydrodynamic Design of Planing Hulls," Marine Technology, pp. 71-95.
- Crossbow 홈페이지 : <http://www.xbow.com/>



< 윤 현 규 >



< 여 동 진 >



< 황 태 현 >



< 윤 근 향 >



< 이 창 민 >