

활주선의 정상 활주 상태 모델을 이용한 WIG선의 이수 상태 추정

여동진^{†*}, 윤현규^{*}, 이창민^{*}

한국해양연구원 해양시스템안전연구소^{*}

Estimation of WIGs' Take-off State Based on Planing Theory

Dong Jin Yeo^{†*}, Hyeon Kyu Yoon^{*} and Chang Min Lee^{*}

Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI^{*}

Abstract

This paper suggests the mathematical method for the estimation of the required engine output for WIG crafts. The engine size of a WIG craft is a key parameter in the design stage, because WIGs should overcome the hump drag during the take-off. Therefore, it is very important for a WIG designer to estimate required power and state change during take-off. The mathematical method was developed based on the steady planing state model of a planing boat. Through numerical calculations on various take-off states, it was found that the suggested method could give reasonable estimation of required power and state change during take-off.

※Keywords: WIG(위그선), Take-off state(이수 상태), Planing boat(활주선), Steady planing state model(정상 활주 상태 모델)

1. 서론

WIG선의 이수 과정은 WIG선의 운항에 있어 큰 엔진 출력이 요구되는 과정이다. WIG선의 설계에 있어 이수 과정의 소요 엔진 출력이 큰 경우 필요한 엔진의 최대 출력이 커지게 되고 이렇게 결정된 엔진 최대 출력과 순항 상태의 엔진 출력의 비가 큰 경우 엔진이 필요 이상의 공간 및 무게를 차지하게 되므로 가급적 이 비율을 줄이면서 순항

상태의 엔진 출력을 줄이려는 설계를 시도하게 된다.

이수 과정의 고려에 있어 초기 설계 단계에서 주날개 및 보조날개의 위치 및 추정 공력 특성, 엔진의 위치 등의 제한된 정보만을 바탕으로 이수에 필요한 엔진 출력 및 이수 상태의 대략적인 추정이 가능하다면 설계자가 설계에 대한 판단을 내리고, 나아가 설계 변경을 수행하는데 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

이러한 위그선의 설계와 관련한 연구는 발표된 바가 그다지 많지 않으며 특히 국내의 경우는 그 수가 매우 적은 실정이다. 이들 중 일부를 살펴보

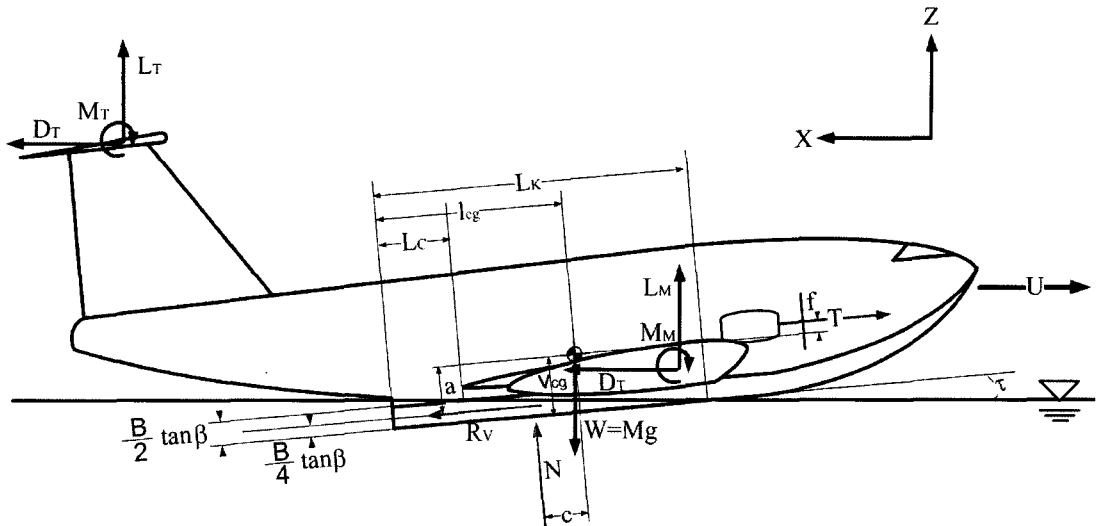


Fig. 1 Definition of symbols

면 김희정과 전호환(1999)은 비선형 최적화 기법을 이용한 위그선의 날개 단면 설계에 관한 연구를 수행하였으며, 전호환과 김민규(2001)는 PARWIG의 형태를 가지는 위그선의 성능에 대하여 프로펠러-선체의 상호작용을 확인하였다. 또한, 김윤식 등(2005)은 소형 위그선의 개념 설계에 대한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 활주선의 활주 평형 상태에 대한 모델을 바탕으로 초기 설계 단계에서 WIG선의 이수 상태 및 이수 상태의 필요 엔진 마력을 추정하기 위한 모델을 제시한다. 이는 하부 선체가 활주선 형태를 지니고 있는 WIG선의 이수 상태에 대한 추정을 위한 것으로, 활주선의 활주 평형 상태 모델에 WIG선의 주날개 및 보조날개에 작용하는 외력 성분 및 작용점을 고려하여 특정 속도에서의 평형 상태를 추정하는 모델이다.

이수 상태 추정 모델에 대한 검증을 위하여 주날개의 경우 Clark-Y 단면을 적용하고 보조날개의 경우 NACA0012 단면을 적용하며 날개 및 엔진의 배치는 김윤식 등(2005), 박영하 등(2005), 신명수 등(2006)에 제시된 자료를 적용한 후 소요 마력 등을 비교하였다.

2. 위그선의 이수 평형 상태 모델

2.1 가정

위그선의 이수 상황에 대한 유체역학적인 특성을 정확하게 규명하는 것은 쉽지 않다. 따라서 몇 가지 가정을 통하여 단순한 문제로 바꾸어서 해석할 필요가 있다. 본 논문에서는 활주선의 활주 평형 상태 모델을 바탕으로 위그선의 이수 평형 상태 모델을 수립한다.

Savitsky(1964)는 다음과 같은 가정을 도입하여 활주선의 평형 상태 모델을 제시하였다.

- ▶ 수면에 접촉하는 부분부터 선미까지 Planing hull의 횡단면의 형상은 일정하다. (Prismatic condition)
- ▶ 유동 박리(separation)는 Keel에서 시작하여 Low chine 상에서만 일어난다.
- ▶ 정상항주 상태에서 활주선에 작용하는 마찰 저항의 작용점은 Keel과 Low chine의 중간으로 한다.

2.2 기호 정의

위그선의 이수 상태에 작용하는 힘과 평형 상태를 표현하기 위한 기호들을 Fig. 1에 나타냈다.

Table 1은 각 기호들에 대한 설명을 나타낸 것이다.

Table 1. Nomenclature

기호	설명
T	추력
N	법선방향 유체력
R_V	마찰저항 성분
L_K	Keel의 침수길이
L_C	Chine의 침수길이
l_{cg}	무게 중심의 트랜섬으로부터 전후거리
v_{cg}	무게 중심의 Keel로부터 상하거리
B	Chine에서의 선폼
a	무게 중심에서 마찰저항 작용선까지의 거리
f	무게 중심에서 추력선까지의 거리
c	무게 중심에서 법선방향 유체력 작용선까지의 거리
β	Deadrise angle
τ	Trim
U	선속
L_M	주날개의 양력
D_M	주날개의 항력
M_M	주날개 공력중심에서의 모멘트
L_T	꼬리날개의 양력
D_T	꼬리날개의 항력
M_T	꼬리날개 공력중심에서의 모멘트

2.3 이수 평형식

수면 위의 한점을 원점으로 하고 연직 상방을 z 축, 후미 방향을 x축으로 하는 지구고정좌표계(관성좌표계로 간주)에 대하여 위그선의 힘과 모멘트 평형식은 다음 식 (1)과 같이 기술될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Mg &= N\cos\tau + T\sin\tau - R_V\sin\tau + L_M + L_T && \text{(수직방향)} \\
 T\cos\tau &= R_V\cos\tau + N\sin\tau + D_M + D_T && \text{(수평방향)} \\
 Nc + R_Va + Tf - M_M - M_T \\
 - L_M(x_{AC_M}\cos\tau - z_{AC_M}\sin\tau) - L_T(x_{AC_T}\cos\tau - z_{AC_T}\sin\tau) \\
 - D_M(x_{AC_M}\sin\tau + z_{AC_M}\cos\tau) - D_T(x_{AC_T}\sin\tau + z_{AC_T}\cos\tau) &= 0 && \text{(Pitch 모멘트) (1)}
 \end{aligned}$$

수직방향, 수평방향 힘평형식을 Pitch 모멘트 평형식에 포함하기 위하여 T, N 을 다음 식 (2)와 같이 정리한다.

$$T = Mg\sin\tau + R_V - (L_M + L_T)\sin\tau + (D_M + D_T)\cos\tau \quad (2)$$

$$N = Mg\cos\tau - (L_M + L_T)\cos\tau - (D_M + D_T)\sin\tau$$

Pitch 모멘트 평형식에 대입하면 T, N 이 소거된 모멘트 평형식이 얻어진다. 이 식을 $Q(\tau)$ 라 하자.

$$\begin{aligned}
 Q(\tau) &= \{Mg\cos\tau - (L_M + L_T)\cos\tau - (D_M + D_T)\sin\tau\}c \\
 &+ \{Mg\sin\tau + R_V - (L_M + L_T)\sin\tau + (D_M + D_T)\cos\tau\}f \\
 &+ R_Va - M_M - M_T \\
 &- L_M(x_{AC_M}\cos\tau - z_{AC_M}\sin\tau) - L_T(x_{AC_T}\cos\tau - z_{AC_T}\sin\tau) \\
 &- D_M(x_{AC_M}\sin\tau + z_{AC_M}\cos\tau) - D_T(x_{AC_T}\sin\tau + z_{AC_T}\cos\tau)
 \end{aligned} \quad (3)$$

3. 이수 평형 상태의 계산

이수 평형 상태의 계산에는 Faltinsen(2005)이 활주선의 활주 평형 상태 계산에 제시한 방법을 적용하였다. 이 방법은 실험식을 기준으로 평형 상태를 계산하는 방법으로 사용되는 실험식이 트림각(τ_{deg})의 경우 $2^\circ \leq \tau_{deg} \leq 15^\circ$, 무차원 평균 침수길이(λ_w)의 경우 $\lambda_w \leq 4$ 인 경우에 대한 식(Savitsky 1964)이므로 실험식에서 제시된 트림각과 무차원 평균 침수길이의 범위 내에서 그 결과의 유효성이 보장될 수 있을 것으로 판단된다.

3.1 $\tau, \lambda_w, L_C, L_K, EHP$ 의 계산

앞서 정리한 비선형 모멘트 평형식 $Q(\tau)=0$ 에서 τ 를 구한다. 이 때 c, R_V 는 모두 τ 의 함수이나, τ 에 대한 explicit한 식으로 나타낼 수는 없다. 따라서, τ 를 찾는 방법으로는 Newton 방법을 사용하였다. Trim각 τ_{deg} 의 초기치는 8.5° 로 설정하였다.

초기 τ 가 정해지면 다음의 과정을 통하여 c, R_V 를 구하고 $Q(\tau)$ 를 계산한다.

① τ 결정: 초기 τ_{deg} 결정

② 무차원 평균 침수길이 $\lambda_w = 0.5(L_K + L_C)/B$ 의 계산

식 (4)와 같은 무차원 평균 침수길이 λ_w 와

Deadrise angle이 0°인 경우의 양력계수(C_{L_0})에 대한 관계식을 식 (5)와 같이 $F(\lambda_w)=0$ 의 형태로 정리하자.

$$C_{L_0} = \tau_{deg}^{1.1} \left(0.012\lambda_w^{0.5} + 0.0055 \frac{\lambda_w^{2.5}}{F_{n_B}^2} \right) \quad (4)$$

여기에서 선폭 프루드수는 $F_{n_B} = \frac{U}{\sqrt{gB}}$ 와 같이 기술되며, C_{L_0} 는 Deadrise angle을 가지는 경우의 양력계수 C_{L_s} 와 식 (5)와 같은 관계를 가진다 (Savitsky 1964).

$$C_{L_s} - [C_{L_0} - 0.0065\beta C_{L_0}^{0.6}] = 0 \quad (5)$$

힘의 평형 관계에 따라 수면 하부에서 발생한 양력과 주날개 및 꼬리날개에서 발생하는 양력, 자중은 평형을 이루어야 하므로

$$C_{L_s} = \frac{Mg - L_M - L_T}{0.5\rho U^2 B^2} \text{ 이어야 한다.}$$

힘의 평형 관계를 이용하고 식 (5)에서 제시된 λ_w 에 대한 비선형 방정식을 바탕으로 λ_w 를 갱신한다. 갱신되는 양은 식 (6)과 같다(Faltinsen 2005).

$$\Delta\lambda_w = h_{\lambda_w} F(\lambda_w) / \frac{dF}{d\lambda_w} \quad (6)$$

여기에서 h_{λ_w} 는 갱신 크기이고, $\frac{dF}{d\lambda_w} = \frac{dF}{dC_{L_0}} \frac{dC_{L_0}}{d\lambda_w}$

이며,

$$\frac{dF}{dC_{L_0}} = - \left(1 - 0.0065\beta \times 0.6 C_{L_0} \right)^{-0.4} \quad (7)$$

$$\frac{dC_{L_0}}{d\lambda_w} = \tau_{deg}^{1.1} \left(0.012 \times 0.5 / \sqrt{\lambda_w} + 0.0055 \times 2.5 \frac{\lambda_w^{1.5}}{F_{n_B}^2} \right) \quad (8)$$

과 같이 계산된다.

③ c 계산

압력중심을 계산하는 Savitsky 경험식을 바탕으로 법선방향 유체력 작용점까지의 거리 c 를 구한다.

$c = l_{cg} - l_p$ 와 같이 기술되며, 선미부터 동유체력 작용점 까지의 거리 l_p 는 다음 식 (9)와 같다 (Savitsky 1964).

$$l_p = \lambda_w B \left[0.75 - \frac{1}{5.21(F_{n_B}/\lambda_w)^2 + 2.39} \right] \quad (9)$$

④ Chine의 침수길이 L_C , Keel의 침수길이 L_K , 선미 흘수 D 계산

유동 박리가 일어나는 지점의 x_s 를 구한 후 앞서 구한 무차원 침수길이 식을 이용하여 구하게 된다. 유동 박리가 일어나는 지점은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다(Savitsky 1964).

$$x_s = \frac{B \tan \beta}{\pi \tau} \quad (10)$$

앞서 구한 무차원 침수길이의 정의는 $\lambda_w = 0.5(L_C + L_K)/B$ 이므로

$$L_C = \lambda_w B - 0.5x_s, \quad L_K = 2\lambda_w B - L_C, \quad D = L_K \sin \tau \quad (11)$$

과 같이 원하는 L_C, L_K, D 를 구할 수 있다.

⑤ R_V , EHP 계산

마찰저항은 다음 식 (12)와 같이 기술될 수 있다.

$$R_V = 0.5 C_F \rho S U^2 \quad (12)$$

위 식에서 마찰저항계수 C_F 는 매끈한 평판에 대한 성분과 표면 거칠기에 의한 성분의 합으로 나타낼 수 있다.

$$C_F = C_{F,TC} + \Delta C_F \quad (13)$$

매끈한 평판에 대한 마찰저항 성분은 식 (14)를 사용하였다(Lewis 1988).

$$C_{F, TC} = \frac{0.075}{(\log_{10} R_n - 2)^2}, R_n = \frac{UL_K}{\nu} \quad (14)$$

또, 표면 거칠기에 의한 성분은 식 (15)와 같이 표현된다(Faltinsen 2005).

$$\Delta C_F = 0.001 \left\{ 44 \left[\left(\frac{AHR}{L_K} \right)^{1/3} - 10 R_n^{-1/3} \right] + 0.125 \right\} \quad (15)$$

위 식에서 AHR은 평균 표면 거칠기를 의미한다.

마찰저항 계산을 위해서는 침수표면적의 값을 구해야 하며 이는 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$S = S_1 + S_2 \quad (16)$$

식 (16)에서 S_1 은 Keel이 잠긴 점부터 Chine에서 유동 박리가 일어나는 지점까지 spray에 의한 침수 표면적이며, S_2 는 Chine에서 유동 박리가 일어나는 지점부터 선미까지 침수 표면적이다. 각각은 다음 식과 같이 계산된다(Savitsky 1964).

$$S_1 = \frac{\tan^2 \beta}{\sin \beta} \left(\frac{B^2}{2\pi\tau} \right), S_2 = \frac{B}{\cos \beta} L_C \quad (17)$$

EHP는 $P_{HP} = R_T U / 745.7$ 로 계산되며 전저항은 다음 식과 같이 마찰저항과 잉여저항, 주날개와 꼬리날개의 저항 성분으로 표현된다.

$$R_T = R_V + R_P + D_M + D_T \quad (18)$$

여기서, 잉여저항 성분은 $R_P = (Mg - L_M - L_T)\tau$ 로 표현된다.

⑥ 추정 τ 의 갱신

τ, c, R_V 를 모멘트 평형식에 대입하여 좌변을 계산하고, 그 값을 $Q(\tau_0)$ 로 한다. 이 때 $\tau = \tau_0$ 이다.

현재 τ 에 대하여 $\Delta\tau = -h_r Q(\tau_0) / Mg$ 의 증분을 더하여 ①~⑤의 과정을 반복한다. 여기에서 h_r 는 τ 에 대한 갱신 크기를 나타낸다.

4. WIG 이수 상태 추정 프로그램

앞서 기술된 이수 평형 상태 모델을 바탕으로 GUI 프로그램을 작성하였다. Fig. 2는 프로그램의 실행 화면이다.

4.1 대상 모델의 선정

작성된 이수 상태 추정 모델 및 이를 바탕으로 작성된 프로그램에 대하여 김윤식 등(2005), 박영하 등(2005), 신명수 등(2006)에 제시된 20인승 위그선의 제원 자료를 이용하고, 주날개와 보조날개의 공력 성분을 적절히 가정하여 입력 정보를 결정한 후 이수 상태 추정 결과를 비교하였다. 가정한 위그선의 기본이 되는 20인승 위그선의 제원은 Table 2와 같다.

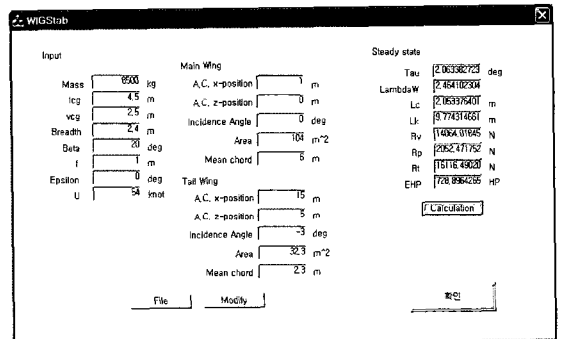


Fig. 2 GUI program for the estimation of WIG's take-off state

Table 2 Principal particulars of a 20 passenger class WIG(김윤식 등 2005)

항목	값
이수 속도 (Km/h)	100.0
만재 배수량 (Ton)	8.5
동체 폭 (m)	2.4
주날개 평균 코드 (m)	6.0
주날개 면적 (m ²)	104.0
꼬리날개 평균 코드 (m)	2.3
꼬리날개 면적 (m ²)	32.3

각 날개의 공력 성분에 있어 주날개는 Clark-Y 단면의 공력 특성(Zimmerman 1932)을 적용하였으며 보조날개의 경우 NACA0012 공력 특성(Abbott and Von Doenhoff 1959)을 적용하였다. 주날개의 경우 Aspect ratio 3의 경우를 선택하였으며, 보조날개의 경우 대부분의 위그선에 있어 보조날개의 Aspect ratio가 크므로 2차원 날개의 공력 특성을 그대로 적용하였다.

4.2 이수 상태 추정 결과

이수 상태 계산을 위하여 가정된 위그선에 대한 추가적인 정보를 설정하였다. Table 3은 추가적으로 설정된 정보들에 대한 수치를 나타낸 것이다.

Table 3 Preliminary aerodynamic characteristics of a WIG

항목	값
l_{cg} (m)	4.5
v_{cg} (m)	2.5
Deadrise angle (deg)	20.0
Thrust distance (m)	1.0
주날개 A.C.와 C.G.의 x 거리 (m)	1.0
주날개 A.C.와 C.G.의 z 거리 (m)	0.0
꼬리날개 A.C.와 C.G.의 x 거리 (m)	15.0
꼬리날개 A.C.와 C.G.의 z 거리 (m)	5.0

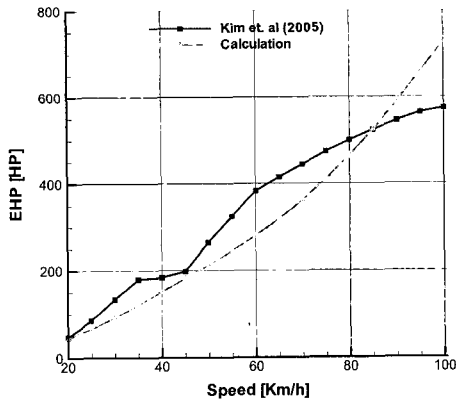


Fig. 3 Comparison of estimated EHP

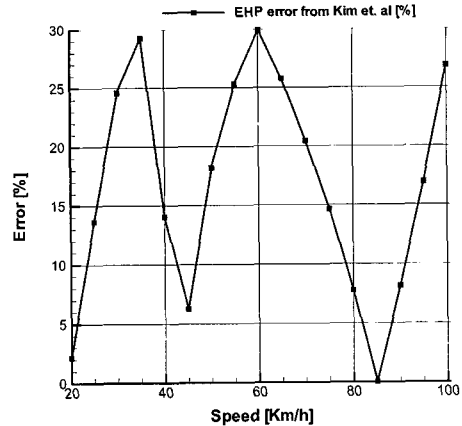


Fig. 4 EHP error from estimated maximum EHP of 20 passenger class WIG craft

Fig. 3은 Table 2, Table 3에서 제시된 정보를 바탕으로 각 속도별 소요 마력을 추정된 결과를 김윤식 등(2005)에서 제시된 20인승 위그선의 속도별 저항 추정 결과를 소요 마력으로 변환한 결과와 비교한 그림이다. Fig. 4에는 각 속도별로 20인승 위그선 소요 마력 추정치와의 차이를 백분율로 나타냈다.

본 논문에서 적용한 모델을 이용하여 김윤식 등(2005)이 수조모형시험 결과를 바탕으로 제시한 20인승 위그선의 소요 마력 추정값을 최대 소요 마력 대비 30% 오차 내로 추정할 수 있는 것을 위 두 그림에서 확인할 수 있다. 단, 이수 과정의 중반부로 갈수록 소요 마력이 20인승 위그선의 소요 마력 추정은 마력이 하강하는 결과를 보이거나 본 논문에서 제시된 모델은 증가하는 추세를 보이는 것은 확인할 수 있는데, 이는 본 논문에서 적용한 모델이 유동 박리가 Low chine 상에서 발생하는 가정을 가지고 있으나 이수의 중반에 해당하는 속도에 이르러서는 선체가 이미 상당히 부상하여 본 가정의 적용이 어려운 상태가 되기 때문에 생각된다.

그러나, 본 모델의 목적은 위그선의 초기 설계 단계에서의 이수 상태 추정이므로 이를 고려한다면 본 결과는 초기 설계에서의 사용이 충분히 가능한 결과일 것으로 생각된다.

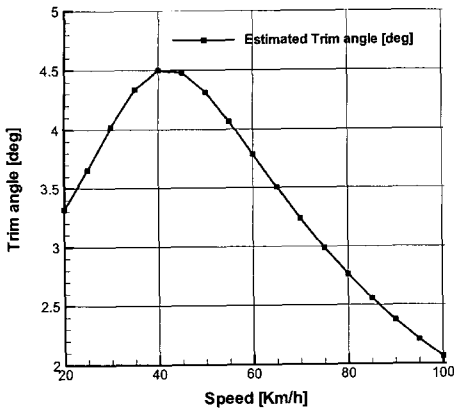


Fig. 5 Estimated trim angle during take-off

Fig. 5는 이수 과정 중 트림각 변화를 추정한 그림이다. 위 그림에서 이수 초기에는 하부 선체에 의한 양력이 무게 중심보다 앞쪽에 작용하여 트림각이 증가하는 것으로 판단되며 일정 속도 이상이 되면 하부 선체에 의한 양력의 작용점이 무게 중심보다 뒤쪽으로 이동하고, 날개에 의한 양력, 특히 꼬리 날개에 의한 양력에 의하여 트림각이 점차 작아지는 것으로 판단된다. 초기 설계에 있어 이러한 결과는 제어면의 역할을 고려하지 않은 상태에서 주날개 및 꼬리 날개의 크기 등을 변경하는데 있어 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결론

본 논문에서는 WIG선의 초기 설계 단계에서 소요 마력과 이수 각도를 추정하기 위한 모델을 제시하고 이를 바탕으로 이수 상태 추정 프로그램을 작성하여 그 결과를 확인하였다. 현재 한국해양연구원에서 개발되고 있는 20인승 위그선에 대한 기 발표된 결과와 비교해 보았을 때 본 논문에서 제시된 모델을 통해 이수 상태에서의 소요 마력과 이수 각도에 대한 적절한 예측이 가능한 것을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제시된 모델의 경우 이수 과정의 종반부로 갈수록 소요 마력이 증가하는 추세를 보였는데, 이는 선체가 이미 상당히 부상하여 유동

박리가 Low chine 상에서 발생한다는 가정의 적용이 어렵기 때문으로 생각된다. 그러나, 위그선의 초기 설계 단계에서의 이수 상태 추정이라는 목적을 고려할 때, 본 결과는 초기 설계 단계에서 설계자에게 상당히 많은 도움을 줄 수 있을 것이라 생각된다.

현재 본 논문에서 제시된 모델의 경우 경험식의 사용 범위가 트림각 $2^\circ \leq \tau_{deg} \leq 15^\circ$, 무차원 평균 침수길이 $\lambda_w \leq 4$ 인 경우이나 설계 후 추정된 결과가 이 범위를 벗어날 가능성도 충분히 존재하므로 물에 의한 유체력 부분의 모델을 보완하여 이를 해결하기 위한 연구를 수행 중이다.

후 기

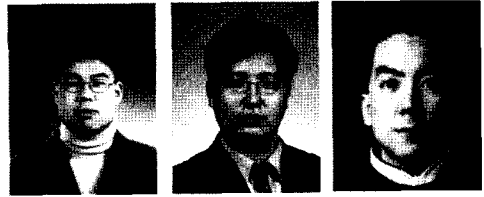
본 연구는 국방부 민군경용기술과제인 “원격 선박통제 제어기술 개발” 사업과 산업자원부의 민군경용기술과제인 “20인승급 소형 위그선 개발” 사업의 지원에 의해 수행 되었습니다.

참 고 문 헌

- 김윤식, 신명수, 강국진, 2005, “20인승급 위그선 초기 개념설계,” 선박해양기술, 제 40권, pp. 165-172.
- 김희정, 전호환, 1999, “비선형 최적화 기법을 이용한 2차원 지면효과익의 형상설계,” 대한조선학회 논문집, 제 36권, 제 3호, pp. 50-59.
- 박영하, 이영연, 김윤식, 신명수, 강국진, 2005, “20인승급 위그선 선형개발,” 선박해양기술, 제 40권, pp. 40-49.
- 신명수, 김윤식, 이경중, 강국진, 박영하, 이영연, 2006, “소형 위그선 개념설계,” 대한조선학회 논문집, 제 43권, 제 1호, pp. 850-862.
- 전호환, 김민규, 2001, “포텐셜 유동에 의한 프로펠러-WIG선의 상호작용 및 성능해석,” 대한조선학회 논문집, 제 38권, 제 4호, pp. 11-22.
- Abbott, I.H. and Von Doenhoff, A.E., 1959, Theory of Wing Sections, Dover Publications.
- Faltinsen, O.M., 2005, Hydrodynamics of High-speed Marine Vehicles, Cambridge

University Press.

- Lewis, E.V., 1988, Principles of Naval Architecture Volume II-Resistance, Propulsion and Vibration, The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Savitsky, D., 1964, "Hydrodynamic Design of Planing Hulls," Marine Technology, pp. 71-95.
- Zimmerman, C.H., 1932, "Characteristics of Clark Y Airfoils of Small Aspect Ratios," NACA Report No. 431.



< 여 동 진 > < 윤 현 규 > < 이 창 민 > .