

1. 서론

파워보트는 선체 길이에 비해 속도가 빠른 운항조건 즉, 높은 Froude수에서 항주하므로 선저에서 발생하는 양력으로 인해 비교적 트림(trim)이 큰 항주자세를 유지하게 되고, 이러한 파워보트의 특징은 선속, 복원성, 내항성, 조종성, 선체동요 등에 큰 영향을 준다. 선저 양력 발생은 파워보트의 큰 특징으로서 파워보트의 폭, dead-rise 등이 주요치수가 중요한 역할을 하므로 주요치수의 결정은 우수한 성능의 파워보트 개발을 위한 중요한 요소라 할 수 있다. 따라서 유체역학적 성능이 우수한 파워보트의 설계를 위해서는 주요치수를 결정하는 초기설계단계에서 주요치수가 절적인지를 판단할 수 있는 자료의 확보가 중요하다.

파워보트의 성능 추정에 관한 연구는 과거로부터 포텐셜 기반의 해석적 연구 및 실험 연구들이 다양하게 수행되어 왔으며(Savitsky, 1964; SNAK, 1978; Gane, 1973; Faltinsen, 2005), 현재에도 많이 활용되고 있다. 파워보트의 유효마력이나 트림각 등 유체역학적 성능을 추정하는데 있어서 Savitsky (1964)의 방법이 가장 널리 알려져 있다. Savitsky의 방법은 포텐셜 이론과 더불어 실험 등을 통한 경험식을 바탕으로 만들어진 파워보트의 유효마력 및 트림각 추정 알고리즘이며, 주요치수만으로 비교적 정확한 추정이 가능한 장점이 있다.

본 연구에서는 초기설계단계에서 파워보트의 주요치수를 결정하기 위한 유체역학적 성능 정보를 제공하기 위해 Savitsky(1964)의 방법을 기초로 하여 주요치수로부터 파워보트의 유효마력 및 트림각 등 유체역학적 성능을 추정할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 또한 유체 성능 추정 결과로부터 요구마력을 만족하면서도 최소 전개면적비를 가지는 프로펠러의 초기 주요치수를 도출하여 파워보트 설계자가 프로펠러 설계의 기준을 설정하는데 필요한 정보를 제공하고자 하였다.

2. 성능추정 방법

파워보트의 주요치수는 파워보트의 유체역학적 성능을 근본적으로 결정짓기 때문에 초기 설계 단계에서 요구 성능을 만족하는 적합한 주요치수를 결정하는 것은 매우 중요한 요소이다. 따라서 초기 설계 단계에서 파워보트의 유효마력, 트림각 등 유체역학적 성능을 추정하여 적절한 주요치수를 도출하

는 과정이 요구되며, 이로부터 선형설계, 프로펠러설계, 엔진의 선택 등 우수한 성능을 가지는 파워보트의 설계 기준 제시가 가능하다.

그림 1에는 초기 설계 단계에서 주요치수를 결정하기 위한 과정을 나타내었으며, 초기 선정된 주요치수는 유체역학적 성능추정을 통해 요구 성능을 만족하는지 여부를 확인하여 최종 주요치수를 결정하게 된다. 이 과정에서 수행되는 성능 추정은 보다 효과적으로 주요치수를 결정하고, 이 후 설계에서의 기준을 제시해 줄 수 있다. 본 연구에서는 Savitsky(1964)의 방법을 기본으로 하여 주요치수로부터 파워보트의 유효마력 및 트림각을 추정하고, 추정된 유효마력으로부터 설계 속도를 만족하는 추력을 얻기 위한 프로펠러 직경, 피치비, 전개면적비를 도출하는 프로그램을 개발하였다. 이로부터 초기 설계 단계에서 단시간에 효과적으로 파워보트 선체 및 프로펠러의 주요치수를 결정할 수 있는 정보를 제공하고자 하였다.

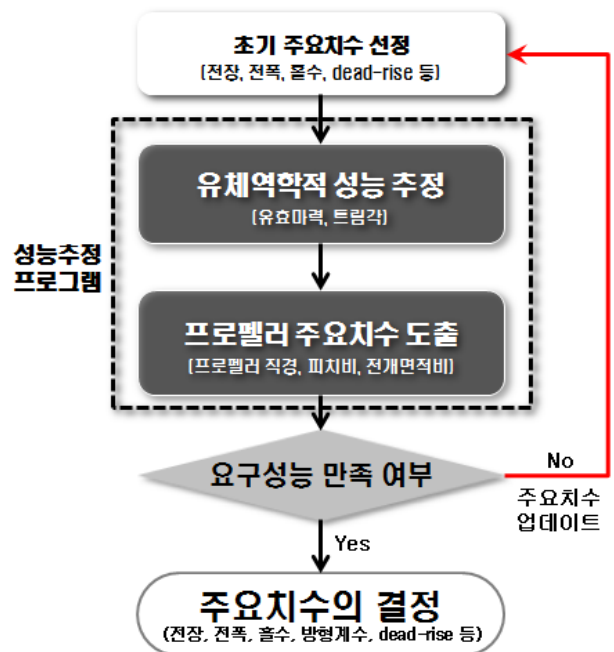


그림 1. 초기 설계시 주요치수의 결정 흐름도

2.1 파워보트 유체성능 추정 방법

파워보트의 주요치수로부터 유체성능을 추정하기 위해서

본 연구에서는 Savitsky(1964)의 방법을 사용하였다. 이 방법은 선저에 작용하는 양력이 선체 중량을 모두 지탱하는 dead-rise를 가지는 활주선형에 대한 것이며, 물이 접하는 부분에서 선체 횡단면의 폭과 dead-rise 각도가 길이방향으로 모두 일정하다는 가정을 하고 있다. 그림 2에는 파워보트의 개략도로서 선체에 작용하는 유체력과 주요 변수들을 나타내었다. 여기서 각 기호들의 정의를 표 1에 나타내었다.

Savitsky 방법은 기본적으로 모멘트 평형 방정식으로부터 저항 및 트림각을 도출한다. 모멘트 평형 방정식은 수직방향 힘 평형과 수평방향 힘 평형 그리고 피치 모멘트 평형 방정식을 정리하여 얻을 수 있으며(Faltinsen, 2005), 식 (1)과 같다.

표 1. 주요 변수 정의

Δ	총 중량
R_V	마찰저항
N	선저에 작용하는 압력에 기인한 유체력
T	추력
LCG	트랜섬으로부터 무게중심까지 거리
D	활주상태에서의 흘수
τ	트림각
ϵ	프로펠러 샤프트 경사각
C	유체력중심에서 무게중심까지의 수직거리
L_K	선저 중심선의 침수 길이
L_C	선측에서의 침수 길이
a	마찰저항 작용점에서 무게중심까지 수직거리
B	선폭
β	dead-rise 각도

$$Mg \left\{ \frac{(1 - \sin\tau \sin(\tau + \epsilon))C}{\cos\tau} - f \sin\tau \right\} + R_V(a - f) = 0 \quad (1)$$

여기서 M 은 선체 질량, g 는 중력가속도이다. 모멘트 평형 방정식에서 트림각과 마찰저항 작용점이 미지수이므로 먼저 트림각을 가정하여 방정식을 풀고, 모멘트 평형을 만족하지 않으면 다시 트림각을 가정하여 반복 계산한다. 이러한 유체 역학적 성능 추정 방법을 그림 3에 나타내었다. 이때 선저의 침수길이는 마찰저항의 작용점이나 압력에 기인한 유체력의 중심점을 결정하는데 중요한 변수인데, 이는 경험식에 의해 얻어진다. 한편 선저에 작용하는 압력에 의한 유체력 중심이 무게중심과 일치할 경우에는 평형 방정식을 이용하지 않고, 쉽게 트림각을 구할 수 있다. 총 저항의 경우에는 마찰저항, 표면거칠기저항, 압력저항의 합으로부터 구할 수 있으며, 이로부터 유효마력이 결정된다.

초기설계 단계에서 주요치수를 입력자료로 이용하며, 입력 데이터가 충분하지 않은 경우에도 일반적으로 사용되는 평균 값을 이용하여 계산이 수행될 수 있도록 하였다. 또한 주요치수 변화에 따른 차이를 빠르게 확인 가능하므로 주요치수 결정 시에 시간을 절약하고, 유체역학적으로 우수한 주요치수 결정이 가능할 것으로 사료된다.

본 유체역학적 성능 추정 프로그램을 이용하여 다음과 같은 결과들이 도출된다.

- 저항(마찰, 압력)
- 길이방향 유체력 중심 위치
- 트림각 및 트림시 흘수
- 침수길이, 침수면적

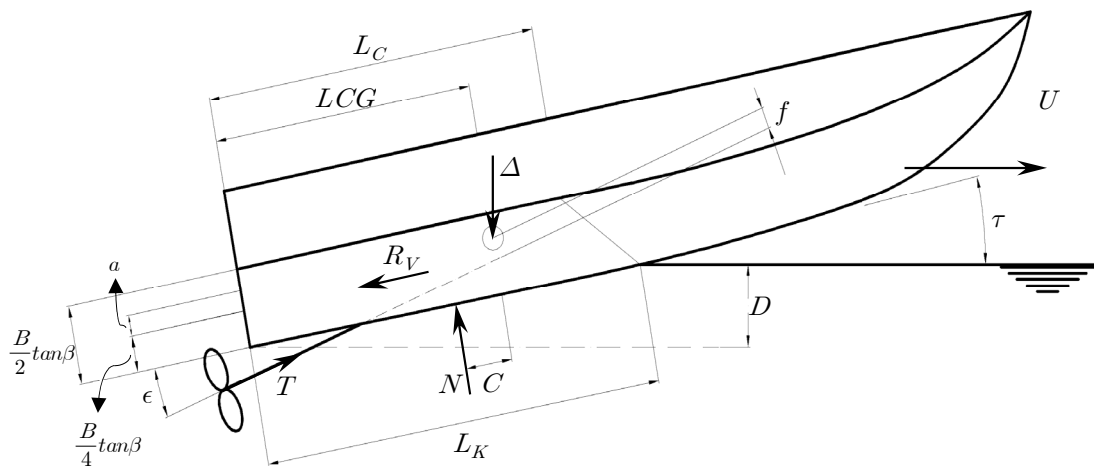


그림 2. 파워보트에 작용하는 힘 및 주요 변수

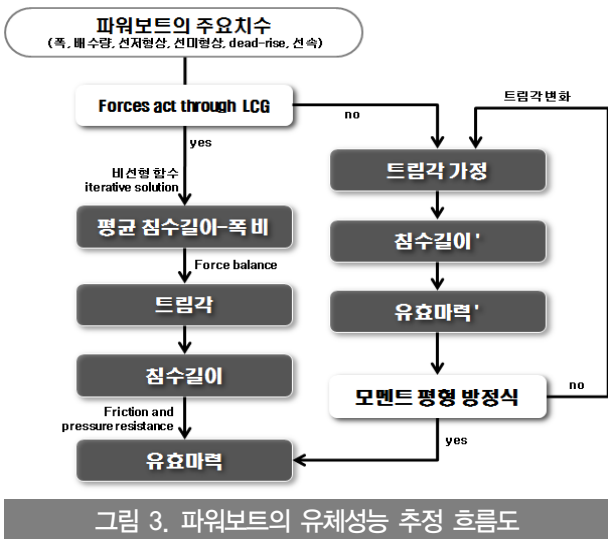


그림 3. 파워보트의 유체성능 추정 흐름도

2.2 프로펠러 주요 치수 도출 기법

파워보트의 프로펠러는 일반 상선의 프로펠러에 사용되는 날개 단면 외에 뼈기 형상 등 다양한 형태의 프로펠러가 발전되어 왔고, 대부분의 프로펠러가 공동현상이나 공기흡입 등의 어려운 문제를 포함하고 있기 때문에 경험적인 방법으로 설계 및 제작되었으며, 최근에는 Formula 1급의 경주용 파워보트에서는 초월공동(super-cavitation), 수면관통(surface-piercing) 프로펠러 등에 대한 연구가 이루어지고 있으나 관련 자료의 공개가 많지 않은 상황이다. 이처럼 파워보트의 프로펠러는 캐비테이션 등을 피하기 어렵고, 관련 자료가 많지 않기 때문에 기존 상선 프로펠러에서 초기 검토 시 활용되는 계열 프로펠러 자료를 이용하였다(서정천과이창섭, 1984; 안성수와이창섭, 1993).

Design speed prediction Require Power vs. Available Power

- 저항/자항 성능 추정자료
 - MAU-Series** 단독성능 및 B_p - δ chart
- 여러 확장면적비에 대한 도달 가능한 마력을 계산
 - 요구 마력과 비교하여 설계속도를 추정

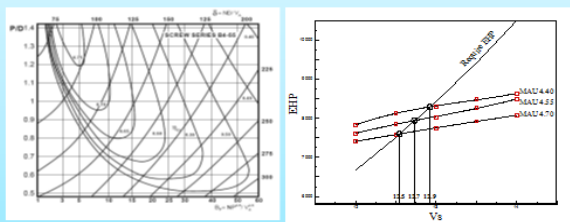


그림 4. 설계속도 추정 단계

그림 4에는 MAU 계열 프로펠러의 단독성능 및 B_p - δ 곡선을 이용하여 직경 및 확장면적비가 설계속도를 만족하는 마력을 계산하는 과정을 나타내었다. 설계속도와 전달동력, 회전수로 부터 동력계수가 결정되면 계열 자료로부터 최적 직경과 피치비를 추정할 수 있다. 전달동력(P_D)은 앞서 유체성능추정 프로그램으로부터 도출된 유효마력을 바탕으로 하여 준추진효율을 고려해 결정되며, 입력된 준추진효율 자료가 없는 경우 0.5로 가정하였다. 회전수는 입력 정보가 없을 경우 직경 추정식을 바탕으로 환산한다.

그림 5에는 Burrill의 실험에 의한 캐비테이션 판정기준을 고려하여 프로펠러의 직경, 평균피치비, 전개면적비를 도출하는 과정을 나타내었다. 여러 전개면적비에 대해 프로펠러 직경과 평균피치비를 계산하여 캐비테이션 기준을 만족하는 최소 확장면적비를 추정하며, 이에 대응되는 프로펠러 주요제원을 도출하게 된다. 프로그램을 통해 도출되는 프로펠러 주요제원은 다음과 같다.

- 속도에 따른 전달마력
- 프로펠러 직경, 평균피치비, 전개면적비, 단독효율

D, P/D, A_E/A_0 Optimization Diameter, Mean Pitch, Expanded Area

- 여러 확장면적비에 대한 직경과 평균 피치비를 계산
- 캐비테이션 또는 요구마력 기준을 만족하는 최소 확장면적비를 추정
- 결정된 확장면적비에 대응하는 직경, 평균 피치비 선속을 계산

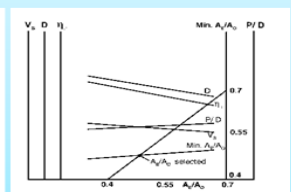
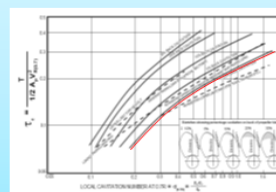


그림 5. 프로펠러 주요제원의 최적화

2.3 프로그램 사용 예

계산에 필요한 파워보트의 주요치수는 그림 6과 같으며, 각 부분은 다음과 같이 정의 된다.

L_{oa} : 전장

B : 폭

LCG : 트랜섬으로 부터 무게중심까지의 종방향 거리

KG : 킬(keel)로 부터 무게중심까지의 높이방향 거리

P_z : 킬(keel)로 부터 프로펠러까지의 높이방향 거리
 P_x : 트랜섬(transom)으로 부터 프로펠러 중심까지의 길이방향 거리
 β : dead-rise 각도
 ϵ : 프로펠러 샤프트 각도

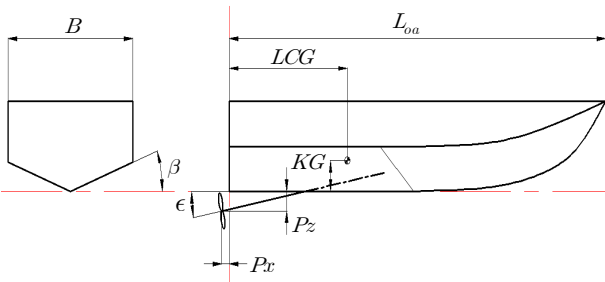


그림 6. 주요치수의 정의

표 2에는 계산에서 요구하는 입력변수들을 나타내었다. 여기서 필수요소는 ●로 표시하였는데, 이는 계산에서 꼭 필요하기 때문에 없는 경우에는 계산이 수행되지 않으며 가정도 할 수 없는 변수들이다.

표 2. 입력 데이터

순번	제원	단위	필수요소
1	전장 LOA	m	●
2	전폭 Beam	m	●
3	깊이 Depth	m	△
4	흘수 Draft	m	●
5	선속 Speed	knot	●
6	배수량	kg	●
7	Dead-rise	degree	●
8	LCG	m	△
9	KG	m	△
10	prop center position from keel	m	△
11	prop center position form transom	m	△
12	prop inclined angle	degree	△
13	전달효율 η_D	-	△
14	날개수 Z	EA	△
15	프로펠러 직경	m	△

△로 표시한 다른 변수들은 계산이 수행될 때 사용되기는 하지만 반드시 필요한 것은 아니며, 값이 없는 경우 일반적으로

로 알려진 평균값을 사용하고, 값이 있는 경우에는 보다 정확한 추정치가 가능하다. 초기 설계시에는 대부분의 변수 특히 무게중심이나 프로펠러 위치가 결정되지 않은 상황이 많으므로 계산 수행을 위해서 전장과 흘수로부터 개략적인 방법(여기서는 통계적 방법에 의해 전장 및 흘수에 대한 비율로 간단히 결정한다.)에 의해 가정하고 계산이 수행된다. 본 연구의 추정 프로그램은 트림각 2 ~ 15° 인 경우에는 어느 정도 타당한 결과를 주는 것으로 알려져 있다(Faltinsen, 2005).

표 3에는 본 프로그램을 이용하여 계산을 수행하기 위한 개발 파워보트의 주요치수이다. 이를 이용하여 계산된 결과를 표 5 및 6에 나타내었다. 표 5의 실험결과는 중소조선연구원 에서 수행된 것이다.

표 3. 대상 파워보트의 주요제원

Particulars	Ship
LOA(m)	8,534
B(m)	2,830
Draft(m)	0.460
Δ (kg)	3828
Speed(knot)	24
LCF(m)	3,094
KG(m)	0,600
Dead-rise(deg.)	19
Prop. shaft angle(deg.)	0
No. of blade	3

표 4. 프로그램 수행 결과 - 유효마력 및 트림각

속도	유효마력(PS)		트림각(deg.)	
	EXP.	Cal.	EXP.	Cal.
17	81,78	79,12	3,78	6,18
19	91,36	90,03	3,90	5,61
21	108,98	102,29	3,27	5,07
23	135,41	116,41	2,92	4,58
24	138,43	124,27	3,15	4,36

표 5. 프로그램 수행 결과 - 프로펠러 주요제원

프로펠러 직경	평균피치비	확장면적비	단독효율
0,335	1,044	1,100	0,607

3. 결론

본 연구에서는 파워보트의 초기 설계 단계에서 주요치수를 결정하는데 활용할 수 있는 파워보트의 유체성능추정 프로그램을 개발하였다. 또한 프로펠러 직경, 평균피치비, 전개면적비 등의 주요제원도 도출할 수 있도록 하였다. 본 프로그램은 초기 설계 단계에서 주요치수만으로 계산이 수행되므로 쉽게 유체성능 및 프로펠러 치수를 도출할 수 있으며, 빠르게 해석이 수행되므로 여러 변수에 따른 유체성능 변화도 확인 가능하다. 주요치수에 대한 정보가 부족하더라도 일반적인 평균값을 프로그램 내에서 가정하여 계산하여 사용자가 편리하게 이용할 수 있도록 하였다. 따라서 초기 설계단계에서 유체역학적 특성을 고려한 주요치수의 결정이 가능하며, 프로펠러 및 엔진 선택에 필요한 정보를 제공받을 수 있다.

본 프로그램은 활주선형을 가지는 파워보트에 대해 주요치수 정보만으로 단시간에 유체역학적 성능 및 프로펠러 제원에 대한 추정이 가능하므로 파워보트 초기설계 단계에서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

D. Savitsky [Hydrodynamic Design of Planing Hulls] (1964).
 SNAK [Lecture for field engineers, Small craft engineering resistance, propulsion, and sea keeping] (1978).
 ODD M. Faltinsen [Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles] (2005).
 Peter Du Gane [High-Speed Small Craft] (1973).
 서정천, 이창섭[MAU 프로펠러단독특성의수식표현] (1984) 한 국기계연구소소보제11권.

안성수, 이창섭[선체-프로펠러-주기관사이의맞춤에의한선박 추진계통의최적화] (1993) 대한조선학회논문집, 제30권, 제 1호, pp.20-29.



최정규

- 1979년생
- 2009년 충남대학교 선박해양공학과 석사
- 현재 : 충남대학교 선박해양공학과 박사과정
- 관심분야 : 선박저항추진
- 연락처 : 042-821-7765
- E-mail : cnujk@cnu.ac.kr



장현길

- 1980년생
- 2012년 충남대학교 공학박사
- 현재 : 대우조선해양
- 관심분야 : 선박저항추진
- 연락처 : 042-821-7762
- E-mail : jhgprop@dsmc.co.kr



이창섭

- 1947년생
- 1977년 M.I.T. 공학박사
- 현재 : 충남대학교 명예교수
- 관심분야 : 프로펠러/캐비테이션
- 연락처 : ***-****-****
- E-mail : csleepro@cnu.ac.kr



김형태

- 1956년생
- 1989년 Univ. of IOWA 공학박사
- 현재 : 충남대학교 선박해양공학과 교수
- 관심분야 : 선박저항추진
- 연락처 : 042-821-6629
- E-mail : h-tkim@cnu.ac.kr