

공기부양선의 추진기 고찰

강동우[†]*, 이인선*

한진중공업 기술연구소*

A Study of Aero for Hovercraft

Dong Woo Kang[†]* and In Sun Lee*

Hanjin Heavy Industries & Construction Co., LTD.*

Abstract

The hovercraft is the amphibious hovercraft. Design and manufacturing companies of the aero propeller exist rarely in the world. Hence the propeller has been designed and manufactured by manufacturing companies which make aero propeller mainly. In this paper, the hovercraft propeller of similar, which is building and designing by HHIC, is considered the type of aero propeller, rotational speed, diameter, number of blades, Open air propeller efficiency. As the result of check, hovercraft which is necessary huge static thrust is needed the ducted propeller in order to improve climbing capacity. However, the number of blades and turning direction almost do not affect.

※Keywords: Aero-Propeller(공기추진기), Propeller Duct(덕트 추진기), Propeller Blade (추진기 날개), Activity Factor(활동 계수), Propeller Arrangement(추진기 배치), Hovercraft(공기부양선), Bow Thruster(함수추진기)

1. 서론

Hovercraft 는 수면 또는 지면과의 마찰을 줄이기 위하여 공기압을 이용하여 수면 또는 지면 위로 부양시켜 운항하는 공기부양선으로 주로 공기 추진기를 사용한다. 본 논문에서는 설계 사양서에서 요구되는 함의 추진과 경사등반 그리고 장애물 극복을 위한 추진기 설계 자료를 제공하기 위해

작성되었던 추진기의 형식, 직경, 회전수, 날개수, 단독효율 및 배치측면에 대한 사항을 기술한다.

2. 설계 요구사항

Hovercraft 의 추진기를 선정과 관련이 있는 설계 요구사항은 성능 면에서 설계중량에서의 운항 속력 및 정지·등반능력이 있고, 작동 시 기후환경 조건이 있다.

3. 추진기 검토

추진기는 엔진의 회전력을 추진력으로 전환시키는 장비이다. Hovercraft 는 정지하고 있는 경우뿐만 아니라 움직이고 있는 경우에도 공기와 물로부터 저항력을 받기 때문에 이러한 저항력을 극복하여 움직일 수 있는 추진력을 발생하는 장치인 추진기의 선택이 매우 중요하다.

3.1 추진방식

일반적으로 추진 방식은 크게 물의 추진력을 이용하는 방식과 공기의 추진력을 이용하는 두 가지 방식으로 나눌 수 있으면, Hovercraft 의 경우 수상뿐만 아니라 육상에서의 임무를 수행해야 하므로 공기추진 방식을 채택한다.

공기추진기는 덕트(Duct)의 유무에 따라 덕트 추진기(Ducted Propeller)와 자유 추진기(Free or Unducted Propeller)로 나누어진다. 공기 추진기는 추력이 직경의 크기에 비례하기 때문에 큰 추력을 얻기 위해서는 직경을 크게 해야 한다. 효율이 좋을수록 일정 추력을 내기 위한 마력소모가 줄어들기 때문에 덕트의 유무에 따른 효율을 비교해야 한다.

추진기의 추력을 의미하는 추력계수 (C_T)는 다음과 같이 정의되어 진다.

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho V_A^2 A_P} \quad (3.1)$$

여기서 A_P : 추진기 선회 면적($\pi D_P^2/4$)
 V_A : 전진 속도
 T : 추력

자유 추진기의 최대효율(η_{free})은

$$\eta_{free} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + C_T}} \quad (3.2)$$

덕트 추진기의 최대효율(η_{duct})은

$$\eta_{duct} = \frac{4}{3 + \sqrt{1 + 2C_T}} \quad (3.3)$$

와 같이 나타내어진다.

Fig. 1 은 추력계수에 따른 자유 추진기와 덕트 추진기의 효율을 나타낸다.

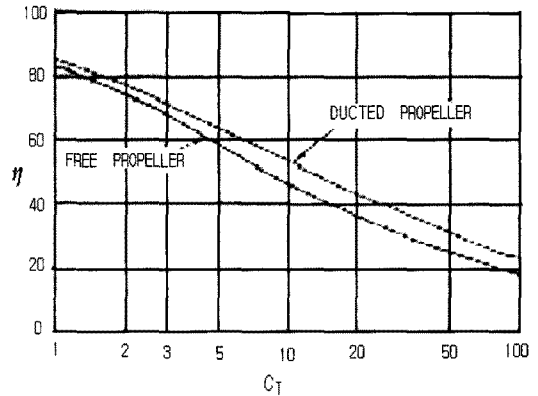


Fig. 1 Thrust efficiency

덕트 추진기는 덕트의 양쪽(Leading Edge)에서 흡입력(Suction Force)의 증가로 인해 추력이 증가하여 자유 추진기보다 추력 및 효율이 좋다.

정지 시 동일한 추진력을 내기 위해서 자유 추진기의 직경은 덕트 추진기의 직경보다 50~60% 이상의 크기를 필요로 한다. 정지 시 등반능력을 보유해야 하므로 동일 크기의 직경에서는 덕트 추진기가 자유 추진기보다 유리하다.

추진기와 추진기 덕트에 의해 발생하는 총 추력 중 추진기가 발생하는 추력의 비가 Fig. 2 에 나타나 있다. Fig. 2 에 의하면 정지추력(Static Thrust)의 경우 추진기 덕트에 의한 추력이 추진기 추력보다 크다는 것을 알 수 있으며 설계 속도에서도 전체 추력의 35 ~ 55% 정도 인 것을 알 수 있다.

덕트 추진기가 자유 추진기보다 추력 및 효율이 좋고, 소음의 발산이 적으며, 유입되는 공기양의 변화로부터 추진기가 보호되며, 추진기의 주위에 있는 사람을 보호하는 장점이 있다.

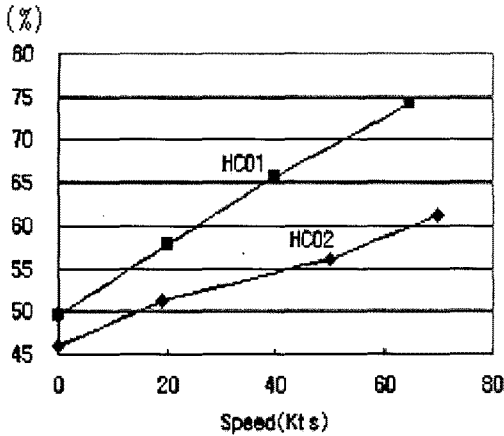


Fig. 2 Thrust ratio per speed for Ducted and Free propeller

3.2 추진형식

추진형식은 가변피치 추진기(Controllable Pitch Propeller, CPP)와 고정피치 추진기(Fixed Pitch Propeller, FPP)로 나눌 수 있다. CPP 는 FPP 에 초기투자비는 높지만 운항 상황에 따라 고정선회, 긴급정지, 정지, 후진이 용이하다. 통합 추진·부양 시스템을 사용하는 Hovercraft 에서는 부양팬(Lift fan)의 설계 회전수에 따라 추진기 회전수가 자동적으로 결정되므로 CPP 를 채택하여야 한다.

3.3 직경

추진기의 추력은 직경과 회전수(RPM)의 크기에 비례하므로, 직경이 커질수록 큰 추력을 얻을 수

Table 1 Angular distortion about the thickness

항목	LCAC	LSF-1	T-2000
국명	미국	한국	핀란드
덕트 최대 외직경(m)	4.12	4.09	4.49
덕트 최대 두께(m)	0.256	0.245	0.280
Tip Clearance(m)	0.013	0.01	0.014
추진기 직경 (m)	3.58	3.58	3.90

있으나, 모함에 탑재되어 운영하는 경우에는 선박 크기 및 설치되는 장비는 제약을 받는다. 그러므로 추진기 직경은 제약조건 하에서 가능한 최대 크기로 결정한다.

Table 1 은 유사 Hovercraft 의 덕트 최대 외직경, 덕트 최대두께, Tip Clearance, 추진기 직경을 나타낸다.

3.4 회전수

추진기의 Tip Speed 가 커질수록 추력이 증가하는 장점이 있는 반면에 소음이 커지고 공기압축에 의한 추력손실이 발생하는 단점이 있다. 소음과 공기압축에 의한 추력손실을 고려하여 Tip Speed 는 152~274 m/sec 의 범위에서 잡는 것이 바람직하다. 따라서, 아래 식을 이용해서 회전속도로 환산할 수 있다.

$$V = \pi Dn \tag{3.4}$$

여기서 V : Tip Speed, D : 추진기 직경
n : 회전수

Table 2 는 유사 Hovercraft 의 회전수를 나타낸다.

Table 2 RPM and Tip speed

항목	LCAC	LSF-1	T-2000
회전수	1256	1020	1050
Tip Speed (m/sec)	238	187	214

Hovercraft 회전수는 소음과 공기압축에 의한 추력손실 및 유사 Hovercraft 의 회전수를 고려하여 초기 선정하고 추진기 및 감속기어 제작사와 협의하여 회전수를 확정한다.

참고로 LCAC 의 경우 추진기 회전의 최대상태 일 경우 1314 rpm 이다.

3.5 날개수

추진기 날개수 선정 시에는 원하는 추력, 가격, 중량, 진동, 강도 등의 문제를 고려하여야 한다.

장비제작사인 Dowty Propeller(4 익 제시)와 Hoffman Propeller(5 익 제시)에서 제공한 추진기가 요구 추력을 만족하였고, 추진기 날개의 추력과 강도에 관련이 있는 활동계수(Activity Factor, AF)는 아래와 같이 나타낸다.

$$AF = \frac{10^5}{D^5} \int cr^3 dr \tag{3.5}$$

여기서 D: 추진기 직경, r: 임의 반경, c: r 위치에서의 Chord.

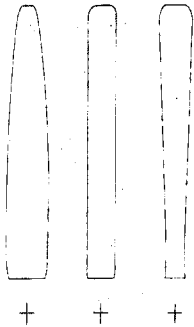


Fig. 3 Blade Configuration

Fig. 3 에 나와 있는 형상이 다른 날개는 상대적인 면적비는 1: 0.88 : 0.82 이지만 AF 는 90 으로 동일하다.

추진기 날개수가 증가할수록 활동계수가 작아져서 날개 한 개에 작용하는 강도가 작아지는 장점이 있다.

따라서 추진기가 설계 추력에서 받게 되는 하중을 견딜 수 있도록 날개의 수와 두께를 조절하여야 한다. 추진 시 추진기가 회전을 하기 때문에 선체, 특히 상부구조물 및 축계와의 공진형상을 회피해야 하고 축에 전달하는 기진력이 최소가 되도록 진동문제를 고려해 주어야 한다. 이런 측면에서 날개수가 5 개인 경우가 4 개인 경우보다 축계 진동이 적게 나타나는 장점이 있으며 시스템과의 연동에도 문제점이 없는 것으로 나타났다.

추진기 날개수가 증가하면 제작비가 증가하게 되는 단점이 있다. 또한 동일한 하중에서 작동할

때, 날개수가 많아질수록 중량이 증가하는 단점이 있다.

추진기는 강도와 소음 및 진동의 문제가 없다면 날개수를 감소시켜 효율을 증가시키고, 가격과 중량을 적게 하여야 한다. 그러나 높은 속력과 소요 마력을 요구하는 경우에는 요구강도와 소음, 진동 측면에서의 유리한 점 등을 고려하여 날개수를 증가시키기도 한다. Table 3. 제작사별 추진기 날개 특성을 나타낸다.

Table 3. Comparative Blade Characteristics

제작사	Dowty	Hoffman
날개수	4	5
날개면적	0.618	0.546
AF	188	172
TAF	752	860

(TAF : Total Activity Factor)

3.6 회전방향

탑재된 2 개의 추진기가 동일한 방향으로 회전하면 추진기의 예비부품(Spare Part) 확보 및 보수유지가 용이하다. 또한, 2 축의 추진기를 탑재한 Hovercraft 에서 추진기가 동일한 회전방향을 가지면 추진기관 및 감속기어가 좌우 동일하게 제작 가능하므로 설치비용이 적게 드는 장점이 있다. LCAC 는 모두 반 시계 방향으로 회전하고 LSF-I, T-2000 은 모두 시계방향으로 회전한다.

따라서, 예비부품 확보 및 보수유지의 장점을 위해 두 개의 추진기가 같은 방향으로 회전하도록 선정하며, 회전 방향의 차이에 대한 특별한 이점이 없기 때문에 선정된 추진기관 및 감속기를 고려하여 선정한다.

4. 배치 검토

4.1 횡 방향 간격

소형 Hovercraft 를 제외한 대부분의 Hovercraft 는 Fig 4 와 같이 2 축의 추진기를 사용하고 있다. 2 축 추진기를 설치한 Hovercraft 의 경우 2 x T 만 큼의 추력을 받게 된다.

함수추진기를 가지고 있지 않는 Hovercraft 의 경우, 선착장에서 고정선회를 하기 위해 좌우 추진기의 추력의 방향을 반대로 하여 선회모멘트를 발생시켜 선회한다. 이 경우 선회모멘트는 추진기간격(w)에 비례하므로 간격이 큰 것이 고정선회에 유리하다.

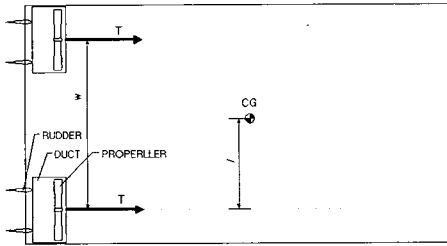


Fig.4 Distance between the propeller

반면에 운용상 추진기 한 개가 사용 불가능한 상태에서의 운항하는 비상시(Emergency)를 고려할 경우에는 $T \times l$ 만큼의 선회모멘트(Turning Moment)가 작용하게 된다. 이러한 경우에 함수추진기(Bow Thruster)와 타(Rudder)를 사용하여 선회모멘트를 보상하며 직진하여야 하므로 추진기 간격(w)이 작은 것이 유리하다. Table 4. 유사 Hovercraft 의 추진기 간격(w)을 나타낸다.

따라서 Hovercraft 의 운용 요구사항 및 함수추진기의 성능을 고려하여 추진기 간격(w)를 결정한다.

Table 4 Interface between the propeller

항목	LCAC	LSF-1	T-2000
추진기 직경 (m)	3.58	3.58	3.90
덕트 최대 외직경(m)	4.12	4.09	4.49
추진기 덕트 사이 거리(m)	4.98	2.78	-
추진기 간격(m)	9.1	6.87	-
함수추진기	유	유	유
함미램프	유	무	무

4.2 수직방향 높이

Hovercraft 가 운항 시 공기역학적 효과(Aero dynamic Effect)에 의하여 선수 쪽이 올라가는 Bow-up Moment 가 발생하고, 배치 특성상 추진기의 추력 및 스커트(Skirt) 접촉저항(wetting Drag)에 의하여 선수 쪽이 내려가는 Bow-down Moment 가 발생한다. Fig. 5 와 같이 추진기 추력에 의해 함수가 가라앉는 Bow-down Moment 가 $T \times l$ 의 크기로 발생하게 된다.

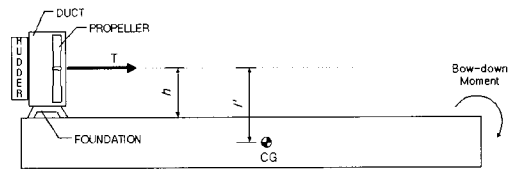


Fig. 5 Propeller height

Hovercraft 부양압력에 의해 지지되지만, 고속으로 활주할 경우에는 비행기와 같이 공기역학적 효과가 발생하여 필요한 부양압력이 작아진다. 그러나 Hovercraft 의 운항속도가 낮을 경우 공기역학적 효과에 의한 Bow-up Moment 의 발생은 무시할 정도로 미미하다. 그러므로 Bow-down Moment 가 커지면 공기역학적 효과에 의한 동조현상으로 Plow-in 현상이 일어나게 되어 Overturning 발생할 수도 있다. Hovercraft 의 성능을 저하시키는 Bow-down Moment 를 줄이기 위해서는 추진기의 높이를 줄여야 하므로 추진기 덕트를 지지하고 있는 받침대의 높이도 고려하여야 한다. 또한 Table 5 는 유사 Hovercraft 의 주갑판(Main Deck)에서 추진기 중심까지의 거리(h)를 나타낸다.

Table 5 Comparative propeller height

항목	LCAC	LSF-1	T-2000
추진기 직경 (m)	3.58	3.58	3.90
h (m)	2.19	2.32	2.80

4.3 길이방향 위치

추진기 후부에 위치한 타는 항의 주 조종수단이 다. 추진기가 함미와 가까울수록 타에 걸리는 Moment 가 커지기 때문에 타의 조종성능을 최대로 하기 위해서는 추진기를 함미에 가깝게 위치시켜야 한다. 그러나 타의 손상을 막기 위해 타의 끝단이 스커트의 폭 안에 위치해야 한다. Fig. 6 은 추진기의 길이방향 위치를 나타낸다.

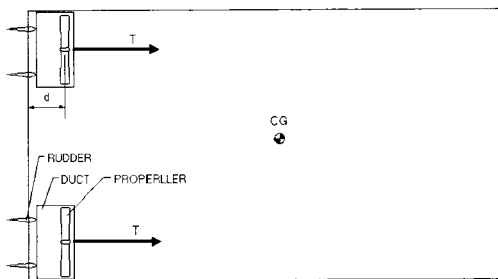


Fig. 6 Location of propeller

Fig 6 에서 d 는 함미와 추진기 중심과의 거리를 나타낸다. 유사 Hovercraft 의 선미와 추진기 사이의 거리(d)는 Table 6 과 같다.

Table 6 Comparative duct arrangement

항목	LCAC	LSF-1	T-2000
선미와 덕트 사이의 거리 (m)	0.59	0.26	-
d (m)	1.885	0.328	-

4. 결론

항의 크기가 제한되는 Hovercraft 및 등반능력을 향상시키기 위해 큰 정지추력을 요구되는 Hovercraft 에서는 덕트 추진기가 요구되며, 날개 수, 회전방향 등은 큰 영향을 주지 않는 것으로 보여지고 있다. 건조중인 Hovercraft 의 추진기는 다음 같은 특성 값을 가진 것으로 선정하였다.

Table 7 Propeller Characteristics of design hovercraft

구분	선정	
추진방식	덕트 공기추진방식	
추진형식	가변피치 추진기	
직경	약 3.58 m	
회전수	약 1250 rpm	
날개수	5 개	
회전방향	시계 방향, 동일방향	
배치	축 간격	약 9.1 m
	축 높이	약 2.2 m

참 고 문 헌

- 이성진, 이재우, " 공기부양선 ", 교양문화
- BLA, "2nd Technical Meeting Presentation"
- BLA, "WP 759-53 Design of a Propeller Shroud Assembly for the HHIC LSF-II Air Cushion Vehicle"
- Dowty, "Propeller Aerodynamic Design"
- Donald M. Black, Harry S. Wainauski, "Shrouded Propellers - A Comprehensive Performance Study", AIAA 5th Annual Meeting and Technical Display
- Peter J. Mantle, "Air Cushion Craft Development", University Press of the Pacific Honolulu, Hawaii



< 강 동 우 >



< 이 인 선 >