

익형 형상을 적용한 레저 선박용 안전 덕트 개발

박상준¹·김진욱^{1,†}·김문찬¹·진우석¹·정사교²
부산대학교 조선해양공학과¹
에이블 이앤씨²

Designing of Safe Duct for Leisure Boat with Wing Section

Sang-Jun Park¹·Jin-Wook Kim^{1,†}·Moon-Chan Kim¹·Woo-Seok Jin¹·Sa-Kyo Jung²
Pusan National University Naval Architecture and Ocean Engineering¹
Able ENC²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This study deals with the design of a safety device around a leisure boat propeller. The safety device is to be designed to minimize performance degradation attached to propulsors in coastal waters. These devices, important for preventing propeller accidents, negatively gives influence boat performance, especially at higher speeds. In order to minimize the negative effect, the accelerating ducts, normally used in ESDs (Energy Saving Devices) have been chosen as a safety device. The present study aims to design an optimal duct (minimizing negative effect) through the parametric study. Based on the Marine 19A nozzle, the nozzle's thickness and angle were varied to obtain the optimum parameter in the preliminary design by the computational fluid dynamics program Star-CCM+ Ver. 15.02. In the detailed design, a NACA 4-digit Airfoil shape resembling the Marine 19A by modification at the trailing edge was chosen and the optimum shape was chosen according to variation of camber, thickness, and incidence angle for optimization. The optimally designed duct shows a speed decrease of about 10% in the sea trial result, which is much smaller than the normal speed decrease of at least 30%. The present designing method can give wide applications to the leisure boat because the wake is almost the same due to using the outboard propulsor.

Keywords : Acceleration duct(가속덕트), Parametric study(매개변수적 연구), Airfoil section(익형 단면), Leisure boat(레저 선박)

1. 서론

연근해에서 운항하는 레저용 선박은 2017년 수중 레저 법 4장 21조에 의해 프로펠러 주변에 안전망을 착용하는 것이 의무화되었다. 이는 수상 레저스포츠를 즐기는 사람과 프로펠러 간의 충돌에 의한 사고를 방지하기 위한 것이기 때문에 안전망의 추가 저항은 선박 운행 시 더 많은 동력을 요구하게 된다. 또한 프로펠러 안전망은 프로펠러 주변에 장착되기 때문에 프로펠러의 성능을 저하해 추가적인 요구동력의 증가를 발생시킬 가능성이 있다. 그러나 안전망과 관련된 기술 혹은 선례 역시 매우 적은 상황이며 이러한 상황은 국내뿐만이 아니라 해외에서도 비슷하다. 이로 인해 안전망은 중소기업에서 별도의 연구 없이 제작되고 있으며, 그 형상과 성능 모두 제품에 따라 천차만별이다 (National Fire Research Agency, 2020) (Fig. 1).



Fig. 1 Various propeller guards

하지만 레저용 보트 시장은 매년 지속해서 성장할 것으로 예측되며 수상 레저스포츠에 대한 수요 역시 지속해서 증가할 것으로 예측된다 (Markets and Markets, 2021). 따라서 레저 선박에 대한 다양한 기술개발과 노하우의 축적은 필수적일 것이고 안전망 기술도 그중 하나일 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 안전망에 의한 저항 증가 및 요구동력 증가를 최소화하여 안전망을 부착한 레저 선박의 효율을 개선하고자 한다. 기존 선박에서 프로펠러 주변에 부착되는 장치 중 덕트의 경우 프로펠러를 완전히 감싸는 형태를 지니고 있어 프로펠러와 사람 간의 충돌을 막기 때문에 안전망으로써의 역할을 하기에 적합하다고 판단된다. 또한 관련된 연구 (Oosterveld, 1970)에서 덕트의 단면 형상 변화에 따른 성능 변화를 폭넓게 연구하였고, 이를 활용하여 목적에 따른 변형 설계가 용이하다. 그러나 덕트 프로펠러의 경우 Fig. 2와 같이 $B_p(NP_D^{0.5}/V_A^{2.5})$ 값이 큰 경우에는 다른 프로펠러에 비해 효율이 높으나 B_p 값이 작은 경우 다른 프로펠러에 비해 효율이 감소하게 된다. B_p 값의 계산에 사용된 변수는 프로펠러의 회전수, 전달머력, 선박의 속력 3가지이며 대상 선박의 B_p 값은 약 10 정도로 매우 낮다. 그러나 본 연구는 프로펠러를 재설계하는 것이 아니므로 덕트에 의한 저항 증가와 그에 따른 요구머력 증가를 최소화하는 것에 중점을 두었다.

설계 과정은 매개변수적 연구를 통해 덕트에 의한 저항 증가가 가장 낮은 케이스들을 선별하고 각 케이스 간의 추진 성능을 평가하였다. 설계를 완료한 후 덕트를 선박에 부착하여 수치해석을 진행, 부착하지 않은 경우와 비교해 요구머력 변화와 선속감소를 확인하였다. 이후 설계한 덕트의 시제품을 제작하여 실제 선박에 부착해 시운전을 진행하였다. 하지만 설계에 사용한 대상 선박에 문제가 발생하여 부득이하게 유사한 형상을 지닌 다른 선박을 이용해 시운전을 진행하였다. 시운전 선박에 대한 수치 해석 해석을 추가로 진행해 시운전 결과에 대한 신뢰성을 최대한 확보하고자 하였다. 레저 선박을 운용하는 선주 및 이를 제공하는 업체의 종합적인 의견에 의하면 기존 안전망은 약 30%의 선속감소율이 발생하는 것으로 확인되었기에 이보다 낮은 20%로 목표를 정하였다.

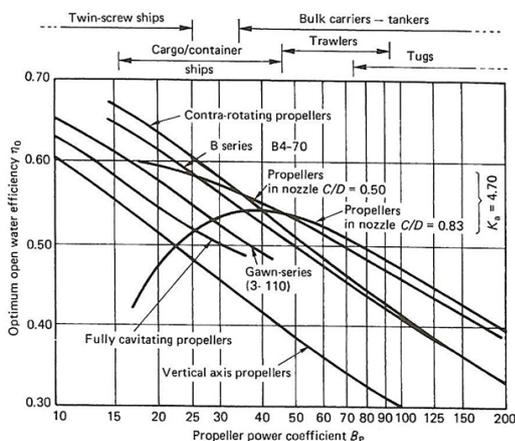


Fig. 2 Efficiency comparison by propeller type (J. Van Mannen, 1966)

2. 프로펠러 및 선박 제원

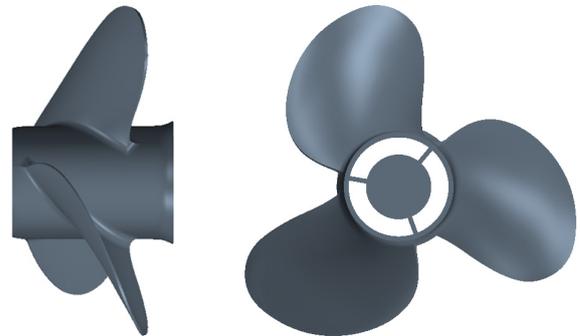


Fig. 3 Leisure boat propeller

Table 1 Target propeller properties

	Full scale	Model
λ (Scale ratio)	4	
Diameter [mm]	368.3	92.075
Chord length (0.7R) [mm]	173.6	43.4
Thickness (0.7R) [mm]	5.761	1.440
P/D (0.7R)	1.034	1.034
Z (Blade number)	3	

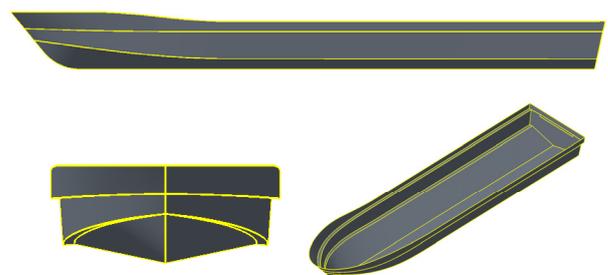


Fig. 4 Leisure boat

Table 2 Leisure boat properties

	Full scale	Model
λ (Scale ratio)	4	
LWL [m]	12.345	3.086
B [m]	2.725	0.681
T [m]	0.255	0.064
WSA (m ²)	31.019	1.939
∇ (m ³)	3.659	0.057

Figs. 3과 4, Tables 1과 2에 대상 선박과 프로펠러의 제원 및 형상을 나타내었으며 선박과 프로펠러 모두 동일한 축적비 4가 적용되었다. 프로펠러는 HONDA 사의 솔라스 뉴 새턴 모델이 사용되었다. 직경 14.5인치 피치 15인치로 피치비는 약 1.034이다. 선박은 연구를 함께 진행한 에이블 이앤씨의 에이블 호가 사용되었다. 대상 선박의 복원성 평가표를 참조해 경하 상태를 기준으로 하였으며 길이 약 12.345m, 흘수 약 255mm로 전형적인 활주선의 형상을 띄고 있으며 배수량은 약 3.7톤이다.

3. 수치해석

3.1 수치해석 방법

본 연구는 상용 수치해석 프로그램인 Star-CCM+ Ver. 15.02를 사용하여 수치해석을 진행하였다. 비압축성 난류 유동의 지배방정식과 연속방정식은 Reynolds Average Navier-Stokes Equation을 사용하였으며 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \rho u_i u_i \right) \tag{2}$$

지배방정식의 해는 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 이용하여 구하였으며 난류 모델은 Realized k-ε 모델을 사용하였다. 속도와 압력의 연성은 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation consistent) 알고리즘 방법을 사용하였다. 모든 해석에는 동일한 지배방정식과 난류 모델을 사용하였으며 VOF(Volume Of Fluid) 기법을 사용해 수면과 파도가 구현될 수 있도록 하였다. 선주가 제공한 복원성 평가표에 따르면 대상 선박은 무게중심이 선수부에 분포해 있어 정박 시 선수 트림이 발생한다. 이에 따라 레저선박임에도 불구하고 항해 중 트림이 거의 발생하지 않아 수평한 상태로 선박을 고정, 선박의 자유운동을 구현하지 않고 해석을 진행하였다. 격자계는 레저 선박에 관해 연구한 자료 (Shin, 2020; Mancini et al., 2017)를 참조해 구성하였으며 Fig. 5와 Table 3에 형상과 조건을 나타내었다.

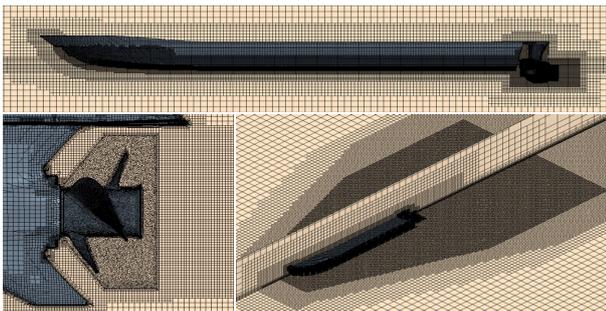


Fig. 5 Grid system of simulation

Table 3 Simulation condition

Index	Leisure boat
Program	Star-CCM+ (Ver. 15.02)
Governing equation	RANS equation
Turbulence model	k-ε Turbulent model
Rotation method	Sliding mesh
Cell discretization	Cell centered FVM
Velocity-Pressure coupling	SIMPLE algorithm
Computational domain	-2.5 ≤ x/L _{pp} ≤ 3.5 -2.0 ≤ y/L _{pp} ≤ 2.0 -1.0 ≤ z/L _{pp} ≤ 0.5
Cell number	6,300,000



Fig. 6 Grid system of simulation(Sea trial ship)

본 연구에서는 대상 선박을 이용한 수치해석 후 시운전을 통해 결과의 신뢰성을 더 확보하고자 하였으나 대상 선박에 문제가 발생하여 다른 선박으로 시운전 선박을 대체하게 되었다. 그러나 해당 선박의 경우 형상 및 제원에 대한 명확한 정보가 없어 대상 선박의 크기를 배수량에 맞춰 임의로 축소, 이에 대한 수치해석을 진행하였다. 또한 선박이 변경되었으므로 대상 선박에 대한 해석과 달리 자유운동을 구현하여 선박의 상하운동과 피치운동이 나타날 수 있도록 하여 수치해석을 진행하였다. 기존 격자계에 overset mesh를 적용하여 해석을 진행하였으며 격자계 형상을 아래 Fig. 6에 나타내었다.

3.2 수치해석 검증

본 계산에 사용한 격자계를 위한 수치계산의 신뢰성 검증은 본래 선박의 실제 운항 자료와의 비교를 통해 진행해야 하나 정확한 운항 정보가 없는 관계로 선박의 최대 선속과 엔진의 최대마력을 이용하여 검증을 진행하였다. 이에 따라 대상 선박의 최대 선속인 30knots에 근접한 27knots~30knots 구간에 대해 해석을 진행하였으며 Fig. 7과 같이 엔진의 제동마력을 이용해 최대 선속을 추정하였다.

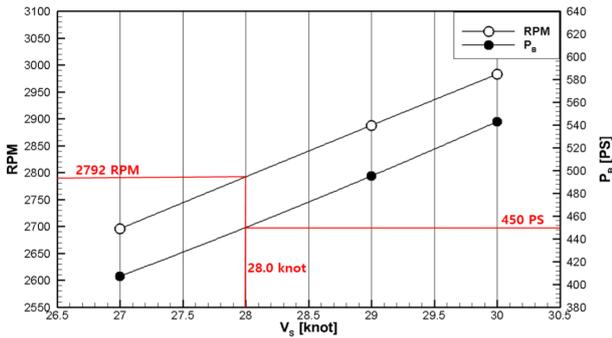


Fig. 7 Maximum speed estimation

추정 결과 최대출력인 450마력에서 약 28knots의 선속을 갖는 것으로 나타났다. 대상 선박의 최고 선속인 30knots에 비해 약 6.7%의 차이가 있다. 그러나 대상 선박의 경우 항해 정보가 명확하지 않아 추측의 비중이 커질 수밖에 없기에 해당 수준의 정확도도 충분하다 판단, 해당 격자계를 사용하기로 하였다.

4. 덕트 설계 및 분석

4.1 단면 형상 및 설계과정

덕트 설계는 덕트 형상에 따른 성능변화에 대해 연구한 자료 (Gaggero et al., 2017)를 참고하여 덕트 저항에 지배적인 변수를 선정하고 지배적인 변수부터 순차적으로 매개변수적 연구를 진행하였다. 효율적으로 설계를 진행하고자 한가지 변수에 대한 매개변수적 연구 결과에서 가장 성능이 뛰어난 덕트를 변형하는 방식을 통해 설계를 진행하였다. 이때 프로펠러 기준선과 덕트 코드선의 중간점이 일치하도록 위치를 조절하였다. 기초설계에서는 연구자료가 많은 MARIN 19A Nozzle을 이용하였다(Fig. 8). 하지만 19A nozzle은 프로펠러 축심을 기준으로 좌표만 주어지는 형상이기 때문에 변형을 위해 앞 끝과 뒤끝을 잇는 임의의 코드 선을 생성, 이를 기준으로 단면을 변형하였다(Fig. 9). 상세 설계 과정에서는 기초설계 결과를 기반으로 체계적으로 변수를 조절하여 덕트를 설계해야 하므로 기초설계를 수행한 단면을 NACA 4-digit Airfoil 표기법의 형태로 나타내었다. NACA 4-digit Airfoil(Fig. 10) (Abbott and Von Doenhoff, 1959)의 경우 4개의 숫자(FXTT)를 통해 최대 캠버 크기(C), 최대 캠버 위치(X), 두께(TT)를 정의하고 있어 체계적으로 단면을 변화시키기에 적합하다. 여기서 각 숫자는 각각의 크기를 코드 길이를 기준으로 한 퍼센트로 나타내 무차원화 되어있다. Fig. 11에 NACA 4-digit을 이용해 작성한 단면의 예시를 나타내었으며, 설계 시에 날개 끝의 파손을 방지하기 위해 3mm의 원으로 단면을 보강하였기 때문에 Fig. 9와는 차이점이 있는 것을 확인할 수 있다. 이때 전체 설계 과정에서 날개 끝 간극 변화에 의한 성능 차이를 방지하고자 각 덕트는 모두 동일한 날개 끝 간격이 적용되었다. 이 간격은 보통 작을수록 유리하나 제작상의 오차 및 한계를 고려하여 직경의 약 1.36%인 5mm를 적용하였다.

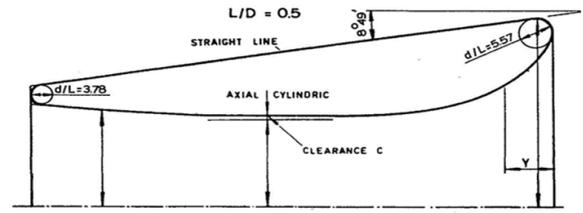


Fig. 8 Marin 19A nozzle (Schneekluth and Bertram, 1998)

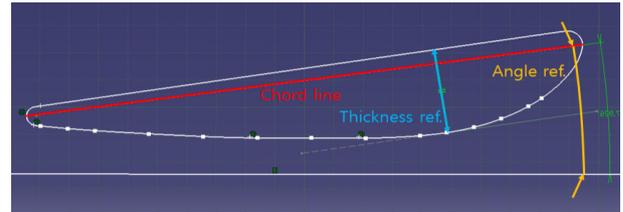


Fig. 9 Marine 19A nozzle deformation reference

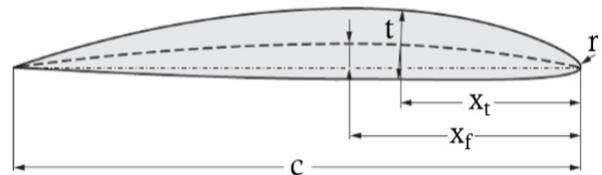


Fig. 10 NACA 4-digit airfoil section

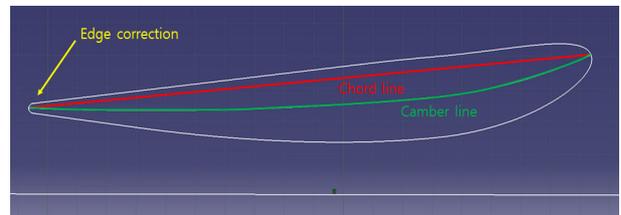


Fig. 11 Edge corrected NACA 4-digit Airfoil

4.2 매개변수적 연구

기초설계 과정에서는 상선에 사용되던 19A nozzle을 활주선에 사용하였기에 활주선에 부착된 덕트 주변 유동과 그 경향성에 대해 확인할 필요가 있어 저항해석을 진행하였다. 매개변수적 연구 변수는 덕트의 추력과 압력에 가장 큰 영향을 끼치는 두께와 각도 2가지를 선정하였다. 기준 선속인 20knots에서 해석을 진행하였으며 Table 4와 Table 5에 그 결과를 나타내었다. 대상 선박의 경우 선외기가 2개 부착되어 있어 각 선외기에 부착된 좌측 덕트 (Left duct)와 우측 덕트(Right duct)의 저항, 그리고 선박에서 발생한 저항과 덕트에서 발생한 저항을 모두 합한 전체 저항(Total) 3개의 항목으로 나눠 나타내었다. Table 4는 두께 변화에 따른 저항 결과로 덕트 저항은 두께가 0.6일 때, 전체 저항은 두께가 0.8일 때 가장 낮았다. 두 결과 간의 차이는 덕트 저항의 경우 약

0.66N, 전체 저항의 경우 0.5N으로 나타났다. 전체적인 결과를 고려한다면 덕트 두께가 0.8인 경우 덕트의 저항은 감소하나 선박의 저항을 증가시키기 때문에 0.6인 덕트가 좀 더 적합한 것으로 보인다. 하지만 덕트 변화에 따른 선박의 저항 증가가 약 1.16N으로 전체 저항의 약 0.86%로 비율이 매우 작다. 따라서 덕트에서 발생하는 저항에 좀 더 중점을 두어 두께가 0.8인 경우를 최적 덕트로 결정하였다. Table 5는 각도 변화에 따른 저항 결과로 앞의 두께 매개변수적 연구의 최적 덕트를 사용하였기에 두께 0.8인 덕트가 사용되었다. 해석 결과 덕트 각도가 6도인 경우 전체 저항이 가장 낮았으며 덕트 각도가 0도인 경우 덕트 저항이 가장 낮았다. 그러나 Fig. 12에 와 같이 각도가 4도 이하인 경우 덕트 내부 프로펠러 연결부에서 강한 볼텍스가 발생, 선체 저항이 급격하게 증가하는 현상이 나타났다. 이는 덕트 부착에 의해 유선 및 받음각이 교란되어 발생한 현상으로 판단된다. 따라

Table 4 Drag results according to the thickness variation (Basic design)

Thickness ratio	Drag [N]		
	Left duct	Right duct	Total
0.5	6.452	6.515	138.8
0.6	5.513	5.563	135.5
0.8	5.238	5.176	136.0
1.0	6.567	6.435	149.9

Table 5 Drag results according to the duct angle variation (Basic design, Thickness = 0.8 * Marine 19a thickness)

Duct angle [degree]	Drag [N]		
	Left duct	Right duct	Total
0	3.687	3.714	153.7
2	3.821	3.819	147.2
4	4.256	4.250	146.8
6	3.976	4.015	134.5
7.926	5.238	5.176	136.0

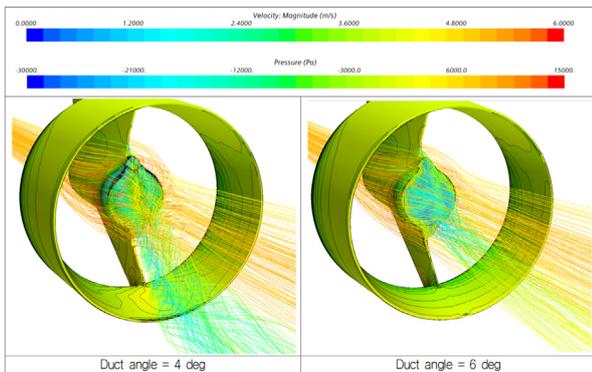


Fig. 12 Pressure and streamline distribution according to duct angle

서 4도 이하의 결과를 그대로 이용하기는 어렵다고 판단하여 두께 0.8, 각도 6도를 기초설계 결과로 채택하였다.

상세설계에서는 기초설계 결과를 기반으로 한 NACA 4-digit 단면을 작성해 상세설계를 진행하였다. 그러나 해당 단면을 다시 기초설계와 동일하게 두께와 각도에 대한 매개변수적 연구를 진행할 경우 유의미한 결과를 얻기 힘들 것으로 판단되었다. 따라서 유의미한 변화를 확인할 수 있는 다른 파라미터를 추가로 변형하여 그에 따른 변화를 확인하고자 하였다. 캠버에 관해 연구한 자료 (Celik et al., 2011) 를 살펴보면 기존 19A nozzle에 비해 휘어진 단면이 고속에서 더 성능이 높은 결과를 보여주고 있다. 그리고 연구 (Bontempo and Manna, 2018)는 캠버에 의해 발생하는 효율, 덕트 추력, 유량 등의 변화가 타 변수에 비해 더 큰 변화를 보여주고 있다. 따라서 캠버를 추가 변수로 선정해 캠버, 두께, 각도 3가지에 대한 매개변수적 연구를 순차적으로 진행하였다. 기초설계와 같은 20knots에서 해석을 진행하였으며 직접적인 동력 변화를 확인하기 위해 저항 해석을 진행하였다.

Table 6은 저항 해석을 진행한 각 case에 적용된 파라미터와

Table 6 Duct drag results according to parametric study

Case No.	Section	Duct angle	Duct drag [N]
1	NACA 1213	6 degree	0.061
2	NACA 2213		-0.377
3	NACA 3213		-0.432
4	NACA 4213		0.062
5	NACA 6213		0.850
6	NACA 7213		2.305
7	NACA 2209		0.069
8	NACA 2211		0.009
9	NACA 3207		-0.176
10	NACA 3209		-0.427
11	NACA 3211		-0.464
12	NACA 3209	2 degree	1.097
13	NACA 3209	4 degree	-0.209
14	NACA 3209	8 degree	-

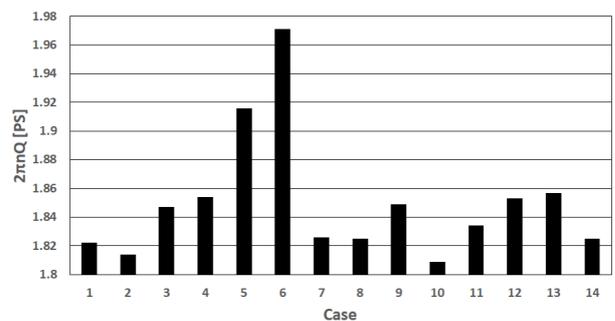


Fig. 13 Comparison of $2\pi nQ$ results for various cases (Detail design)

덕트 저항의 함에 대해 작성한 것이며, Fig. 13은 모형의 자항점에서 전달마력을 나타낸 것이다. 동일 회전수 4,400RPM에서의 결과를 비교하였으며, 예외적으로 case 14의 경우 자항점의 회전수가 낮아 4,400RPM에 대한 해석을 진행하지 않아 값을 따로 표기하지 않았다. case 4가 기초설계 결과를 기반으로 작성한 NACA 단면으로 캠버 4.4%, 캠버 위치 22%, 두께 13%가 적용되었다. 캠버 변화에 따른 결과(case 1 ~ case 6) 동력은 case 2가, 덕트 저항은 case 3가 가장 낮게 나타났다. 본 연구의 목표인 덕트 저항 최소화 및 요구마력 증가량 최소화를 고려한다면 요구마력이 가장 낮고 덕트 저항이 두 번째로 낮은 case 2를 채택하는 것이 가장 합리적으로 판단된다. 하지만 case 3의 경우 case 2와 함께 유이하게 덕트 저항이 음수인 점, case 2에 비해 요구마력이 약 1.82%로 아주 큰 차이를 보이고 있지는 않다는 점을 고려한다면 case 3 또한 추가적인 매개변수적 연구를 진행해 볼 필요가 있을 것으로 판단하였다. 따라서 2% 캠버와 3% 캠버를 채택하여 두께 변화에 따른 결과를 확인하였다(case 7 ~ case 11). 두께 변화에 대한 결과 2% 캠버를 적용한 경우 두께가 감소할수록 덕트 저항과 요구마력 모두 증가하였으나, 3% 캠버를 적용한 경우 덕트 저항과 요구마력이 가장 낮은 경우가 서로 다르게 나타났다. 전체 결과를 비교해 보면 case 10이 가장 요구마력이 낮으며 덕트 저항은 case 11이 가장 낮게 나타났다. 마찬가지로 덕트 저항과 요구마력 2가지를 모두 고려한다면 case 10이 요구마력이 가장 낮고 덕트 저항 역시 가장 낮은 경우와 비슷한 수준을 보이고 있기에 이를 채택하여 각도 변화에 대한 결과를 확인하였다(case 12 ~ case 14). 비교 결과 case 10이 가장 마력과 저항이 낮게 나타났다. case 14의 경우 4400 RPM에 대해 비교할 수는 없었으나 case 10과 case 14의 4300 RPM에 대한 비교 결과 case 14의 덕트 저항이 더 크게 나타났다.

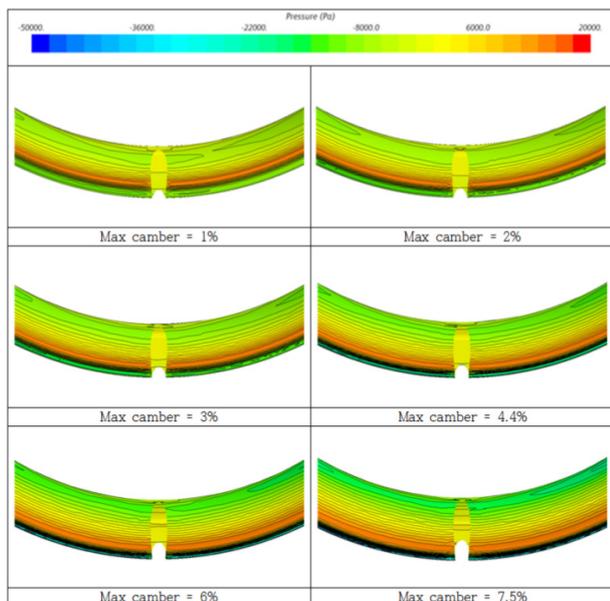


Fig. 14 Pressure distribution inside of the duct according to the camber variation (looking downstream, RPM = 4400)

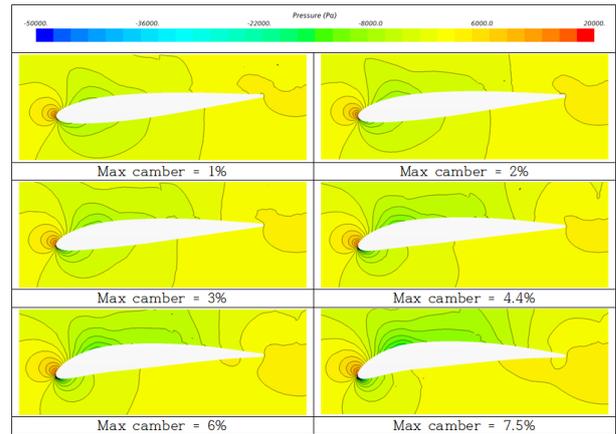


Fig. 15 Pressure distribution near duct according to the camber variation (side view, RPM = 4400)

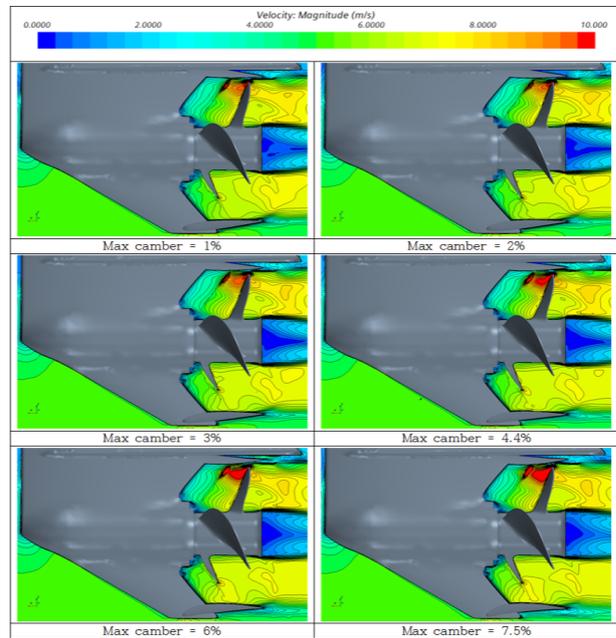


Fig. 16 Velocity distribution inside of duct according to the camber variation (looking downstream, RPM = 4400)

Table 7 Thrust, torque and duct drag results according to the camber variation (RPM = 4400)

Max camber [%]	TPM [N]	QPM [N·m]	Duct drag [N]	
			Friction	Pressure
1	115.0	2.690	4.197	-4.136
2	112.0	2.629	4.281	-4.658
3	109.2	2.588	4.335	-4.767
4.4	108.2	2.560	4.390	-4.328
6	101.3	2.435	4.391	-3.541
7.5	99.8	2.432	4.392	-2.087

덕트에서 발생하는 유체역학적 변화를 확인하고자 각 덕트 표면과 단면 주변의 압력분포, 덕트 저항 그리고 프로펠러의 추력과 토크 변화를 확인하였으며 그중 변화가 가장 두드러지게 나타난 캠버별 결과를 Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16 그리고 Table 7에 나타내었다. 덕트 표면 압력은 캠버가 증가할수록 전체적으로 감소하는 경향이 나타났으며 이에 따라 내부 유속이 감소, 추력과 토크가 감소하는 결과가 나타났다. 또한 유속 증가에 의해 마찰저항은 캠버 증가에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있으나 압력저항은 3% 캠버를 최저로 하여 비선형적인 결과가 나타났다. 덕트 표면과 덕트 주변의 압력 분포를 나타낸 Fig. 14와 Fig. 15를 확인해 보면 덕트 형상과 관계없이 전반적인 압력 분포 형상은 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이때 캠버 증가에 따라 점차 최저 압력은 지속해서 감소하는 반면 덕트 형상의 변화로 인해 압력에 의한 수직응력의 방향이 변화하고 있음을 알 수 있다. 즉, 캠버가 증가하여 수직응력의 방향이 선박의 진행 방향과 유사해지며 덕트의 저항 증가에 영향이 증가한 것으로 보인다.

4.3 선속별 덕트 성능 비교

레저 선박의 경우 일반적인 상선과 달리 다양한 선속에서 운용하게 되는 경우가 많다. 따라서 10~30knots 구간에 대해 10knots 간격으로 수치해석을 진행하여 요구마력 변화를 비교하였다. 성능이 좋았던 덕트 중 4개를 선정하여 해석을 진행하였으며 그 결과를 Fig. 17에 나타내었다. 해석 결과 두께가 두꺼워질수록 저속에서 요구마력이 더 낮았으며 고속에서 요구마력이 더 높게 나타났다. 캠버의 경우 2가지 밖에 없어 경향성에 대해 판단하기는 어려우나 NACA 2213이 NACA 3213에 비해 모든 선속에서 요구마력이 더 낮게 나타났다. 기존 평가 기준으로 선정된 10~20knots 구간에서의 성능을 고려하면 전반적으로 요구마력이 낮은 NACA 2213 단면을 선택하는 것이 가장 합리적으로 생

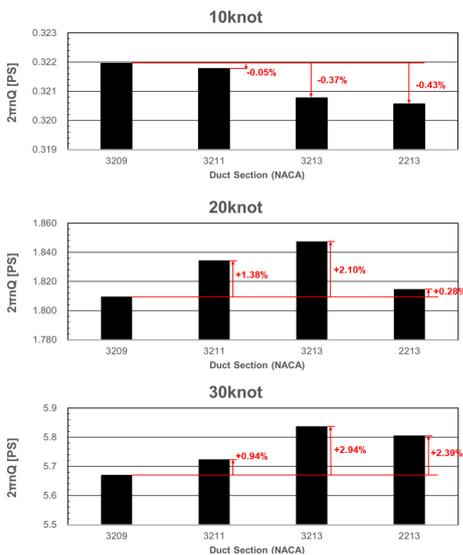


Fig. 17 Comparison of $2\pi nQ$ according to variation of velocity and duct section

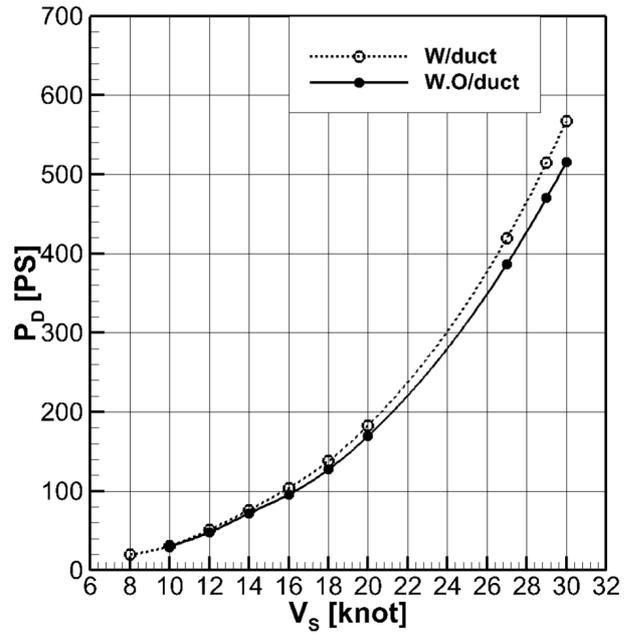


Fig. 18 Ducted and non-ducted propeller P_D results (Leisure boat)

각된다. 그러나 10knots의 경우 각 덕트 간에 그 차이가 0.5% 미만으로 매우 작으며, 30knots의 경우에는 NACA 3209에 비해 NACA 2213가 요구마력이 약 2.4% 더 높게 나타났다. 따라서 일반적으로 고속으로 운항하는 레저 선박의 특징을 고려한다면 NACA 3209를 최적 설계로 선정하는 것이 가장 합리적인 것으로 판단되어 이를 최종 단면으로 선정하였다.

4.4 선속감소를 추정

설계를 완료한 NACA 3209 덕트를 부착한 경우에 대해 저항해석을 진행하였다. 선속감소를 추정하기 위해 8knots~20knots 구간에 대해 2knots 간격으로, 최대선속 근처인 27knots~30knots에 대해 해석을 진행하였다. 해석 결과는 관련된 International Towing Tank Conference(ITTC) (2017a, b, 2021) 권장 절차를 참조하여 실선 확장을 진행하였으며 선속에 따른 P_D값을 Fig. 18에 나타내었다. 덕트를 부착하지 않은 경우에 필요한 P_D 대비 덕트를 부착한 경우의 선속을 확인하여 선속감소율을 추정하였다. 그 결과 선속 감소율이 평균 약 2.6%로 나타나 전반적으로 양호한 수준을 갖는 것으로 확인되었으며 최대 선속인 30 knot에서도 약 3.28%의 선속 감소율이 나타나 설계한 덕트가 고속에서도 양호한 성능을 갖는 것을 확인하였다.

4.5 시운전 결과

설계를 완료한 덕트의 성능을 검증하고자 실제 선박에 대해 시운전을 진행하였다. 그러나 덕트 설계에 사용한 선박에 문제가 발생하여 불가피하게 타 선박을 이용해 시운전을 진행하였다. 따라서 기존 선박과 유사한 형상을 지니고 동일한 선외기와 동일한



Fig. 19 Sea trial target ship



Fig. 20 Engine and duct

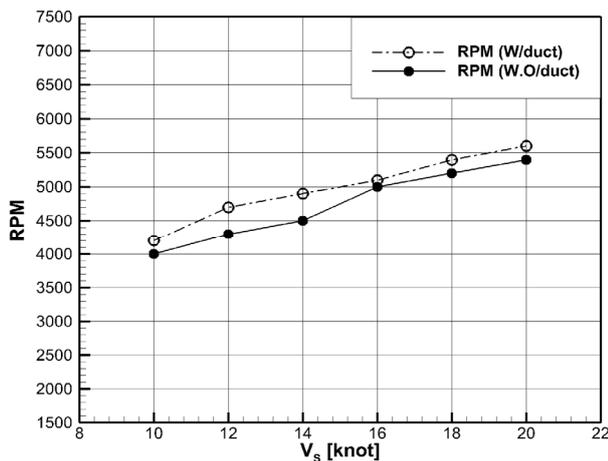


Fig. 21 Sea trial test results

프로펠러를 사용하는 선박을 사용하여 기존 선박과 최대한 유사한 조건에서 시운전을 진행해 차이를 줄이고자 하였다. 사용한 시운전 선박의 배수량은 2.85톤, 엔진은 250마력으로 다음 Fig. 19과 Fig. 20에 실제로 제작한 덕트와 함께 사진으로 나타내었다.

시운전은 평가 기준인 10~20knots 구간에 대해 2knots 간격으로 시운전을 진행하였다. 선외기를 사용하였기에 토크를 측정하기가 어려워 선속 변화에 따른 엔진의 RPM 변화를 측정하였으며 이를 Fig. 21에 나타내었다. 선속 감소율은 RPM이 같은 경우 엔진 출력이 같다고 가정하여 이를 기준으로 추정하였으며 평균 약 11.4% 정도의 선속 감소율이 나타났다. 수치 해석을 통한 예측과는 차이가 크나 시운전에 사용한 선박의 경우 대상 선박과 달리 항주 시 트림이 발생하여 프로펠러 및 덕트의 성능이 변화한 것이 주된 원인으로 생각된다. 그리고 선속에 따른 편차치가 크게 나타났는데 이는 여건상 시운전을 1회밖에 수행하지 못한 것이 주된 원인으로 판단된다.

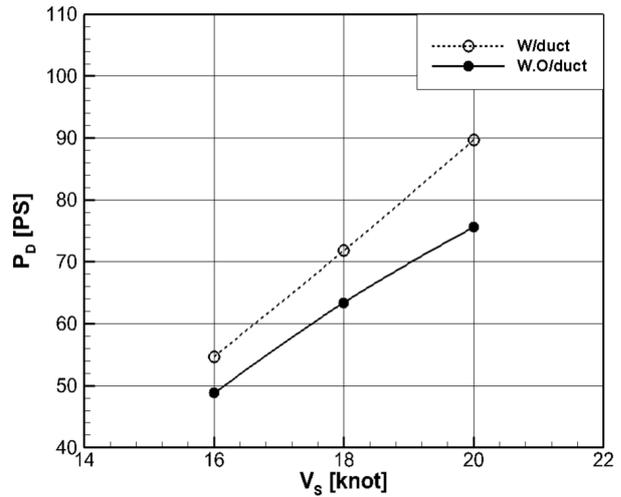


Fig. 22 Ducted and non-ducted propeller P_D results (Sea trial ship)

시운전 결과가 수치해석 결과와 큰 차이를 보이고 있으므로 시운전에 사용된 선박에 대해 수치해석을 추가로 진행하였다. Fig. 22는 평가 기준 중 일부인 16knots~20knots에 대해 수치해석을 진행한 결과로 덕트 부착에 따른 P_D 변화를 나타낸 것이다. 관련된 ITTC 권장 절차를 참조하여 실선확장을 진행하였으며 대상 선박에 대한 선속감소를 추정 과정과 동일한 방식으로 선속감소율을 추정하였다. 그러나 여건상 14knots 이하의 선속에 대해서는 해석을 진행하지 못하였기에 16knots의 선속감소율은 외삽법을 이용해 선속감소율을 추정하였다. 그 결과 평균 약 5.9%의 선속감소율이 나타나 대상 선박에 비해 큰 선속감소율을 갖는 것으로 나타났다. 시운전 결과 중 동일 구간의 선속감소율이 평균 약 7.5%인 것과 비교하면 어느 정도 유사한 결과가 나타난 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 덕트 단면 형상의 파라미터를 변경해 가며 다양한 덕트에 대한 저항 및 자항 해석을 진행, 그 결과를 확인하였다. 기초설계 과정에서는 19A nozzle의 두께와 각도를 변형하며 레저 선박에서 효율적인 덕트 형상의 기준을 잡았으며, 이를 기반으로 NACA 4-digit 단면을 생성해 상세설계를 진행하였다. 상세설계 과정에서는 캠버, 두께, 각도 3가지 요소를 순차적으로 매개변수적 연구를 진행하며 최적의 형상을 찾고자 하였다. 이때 기초설계와 달리 자항 해석을 통하여 덕트에서 발생하는 저항과 요구마력 2가지를 모두 비교하면서 설계를 진행하였다. 상세설계까지 후 성능이 뛰어난 덕트 중 4가지의 덕트를 선정하여 선속에 따른 효율을 비교하였다. 전체 결과를 비교했을 때 NACA 3209와 NACA 2213이 서로 비슷한 성능을 보여주었지만 30knots의 고속에서는 차이가 증가하여 NACA 3209를 최종 단면으로 선택하였다. 이후 설계를 완료한 덕트에 의한 선속 감소율을 수치 해석을 통해 추정하였으며, 그 결과 선속 감소율이 평균 약 3.34%

로 나타나 양호한 성능의 덕트를 설계하였음을 확인하였다. 수치 해석 외에 시운전을 통해서도 이를 다시 한번 검증하고자 하였으나 설계에 사용한 선박에 문제가 발생하여 불가피하게 형상이 비슷하고 동일한 엔진과 프로펠러를 사용하는 다른 선박을 이용해 시운전을 진행하였다. 그 결과 평균 약 11.4% 정도의 선속 감소율이 나타났으나 시운전을 1회밖에 진행하지 못해 편차치를 확인하지 못해 선속에 따라 선속감소율이 크게 변화하는 결과가 나타났다. 이를 보완하고자 선박의 자유운동을 구현해 시운전 선박에 대해서도 수치 해석을 진행하였으며 그 결과 평균 약 5.9%의 나타났다. 동일한 구간에 대해 수치해석과 시운전 결과를 비교하면 선속감소율이 각각 약 5.9%와 7.5%로 어느 정도 유사한 결과가 나타나는 것을 확인하였다. 결과적으로 설계한 덕트가 20% 이하의 선속 감소율을 달성하였으며, 기존 안전망의 선속감소율 30%에 비해 상당히 뛰어난 성능을 갖고 있음을 확인하였다. 비록 본 연구에서는 1개의 선박에 대해서만 설계를 진행하였고, 계획되어 있지 않은 선박에 덕트가 적용되어 예상치 보다는 높은 선속감소율이 나타났다. 하지만 본 연구에서 적용한 최적 덕트 설계 방법을 사용한다면 다른 레저선박에 대해서도 선속감소율이 적은 덕트를 충분히 설계할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년) 및 부산대학교 BK21 4단계 스마트 조선해양공학 교육연구단의 지원에 의하여 연구되었음.

References

Abbott, I.H. and Von Doenhoff, A.E., 1959. *Theory of wing sections : Including a Summary of Airfoil Data*. Dover Publications, Inc : New York.

Bontempo, R. and Manna, M., 2018. Performance analysis of ducted marine propellers. Part II-Accelerating duct. *Applied Ocean Research*, 75, pp.153-164.

Celik, F., Dogrul, A. and Arikan, Y., 2011. Investigation of the optimum duct geometry for a passenger ferry. In: *Proceedings of the 9th Symposium on High Speed Marine Vehicles*. Naples, 25-27 May 2011.

Gaggero, S., Villa, D., Tani, G., Viviani, M. and Bertetta, D., 2017. Design of ducted propeller nozzles through a RANSE-based optimization approach. *Ocean Engineering*, 145, pp.444-463.

International Towing Tank Conference(ITTC), 2017. *High speed marine vehicles resistance test* [Online]. (Updated June 2017) Available at: <https://www.ittc.info/media/9665/75-02-05-02.pdf>[Accessed 12 April 2022].

International Towing Tank Conference(ITTC), 2017. *High speed marine vehicles propulsion test* [Online]. (Updated March 2017) Available at: <https://www.ittc.info/media/9663/75-02-05-01.pdf> [Accessed 12 April 2022].

International Towing Tank Conference(ITTC), 2021. *1978 ITTC performance prediction method* [Online]. (Updated March 2021) Available at: <https://www.ittc.info/media/9872/75-02-03-014.pdf> [Accessed 12 April 2022].

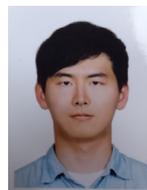
Markets and Markets, 2021. *Recreational boat market by boat type (sailboats, PWC, inflatables), size (<30 feet,>50 feet), engine placement (outboards, inboards), engine (ICE, electric), material (aluminium, fiberglass), activity type, power source & region-global forecast to 2027*, Pune:Markets and Markets

Mancini, S., Luca, F.D. and Ramolini, A., 2017. Towards CFD guidelines for planing hull simulations based on the Naples Systematic Series. *VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*, Marine 2017, pp.1071-1085.

National Fire Research Agency, 2020. *Fire and rescue boat also requires a propeller guard*, Fire Prevention News, 2020.5, pp.66-74.

Oosterveld, M.W.C., 1970. *Wake adapted ducted propellers*. Ph.D. Delft: Technische Universiteit Delft.

Shin, S.W., 2020. *A study on the performance characteristics of planing hull with spray rail*. PH.D. Busan: Pukyong National University.



박상준



김진욱



김문찬



진우석



정사교