

탄소섬유를 적용한 카누의 흘수에 따른 저항성능에 대한 수치적 연구

김주열* · 김준호** · 정재하*** · 임종길**** · 라인강**** · 오정근**†

*, ** 군산대학교 조선공학과, *** 진남조선해양, **** 코스텍유한회사

A Numerical Study on Resistance Performance According to the Draft CFRP Composite Canoe

Ju Yeol Kim* · Junho Kim** · Jae Ha Joung*** · Jongkil Lim**** · Inkang Ra**** · Jungkeun Oh**†

*, ** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kunsan National University, Korea

*** JINNAM Marine, Jinnam, Korea

**** KOSTEC Co., Ltd., Kunsan, Korea

요약 : 본 연구에서는 카누 선체 재료를 탄소섬유복합재료로 선정하였으며, 선형설계는 선박 설계 상용프로그램인 SOLIDWORKS를 이용하여 수행하였다. 카누의 유동해석은 상용프로그램인 STAR-CCM+를 이용하여 자유수면의 파형을 살펴보고 수치해석 결과를 통하여 저항성능을 확인하였다. 그 결과, 흘수가 0.09 m일 경우에 4 m/s 미만의 선속으로, 흘수가 0.24 m인 경우에는 2 m/s 미만으로 운항하면 안전하다고 판단되며, 두 명의 성인이 속도를 내는 데에도 무리가 없음을 확인하였다. 또한, 해석결과를 적용하고 CFRP를 이용하여, 기존의 재료보다 20% 가볍게 제작된 카누에 대해서도 간략히 소개하였다.

핵심용어 : 카누, 전산유체역학, 탄소섬유, 유동해석, 저항해석

Abstract : In this study, we selected CFRP to construct a canoe hull. A ship design was made using a commercial ship design program, SOLIDWORKS, and a flow analysis of the canoe on a free surface was calculated using STAR-CCM+. A flow field and waveform were obtained in this way. These results were used to check the resistant performance of the canoe. Results showed that if the draft is 0.09 m, it is safe to run at less than 4 m/s, and if draft is 0.24 m, it is safe to run at less than 2 m/s. Moreover, it was confirmed that those speeds can be made by two adults. The developed canoe, which is 20% lighter in comparison with conventional FRP models, was briefly introduced in this paper.

Key Words : Canoe, Computational fluid dynamics, Carbon fiber Reinforced plastics, Flow analysis, Resistance analysis

1. 서론

소득수준의 향상과 여가시간의 증가에 따라 점차적으로 사람들이 레저스포츠에 관심을 가지기 시작했고, 레저스포츠에 대한 관심은 수상에서 즐길 수 있는 수상레저스포츠로 확대되고 있다. 이에 정부에서는 우리나라 해양레저산업을 육성하기 위해 2008년 ‘해양레저산업 비전 및 발전전략’을 공표하고 해양레저산업을 3단계로 나누어 육성하는 정책을

정해 2020년까지 발전시키려는 의지를 표명하였다. 또한 마린나 항만법을 통해 2010년부터 2019년까지 전국 10권역 43개소의 마린나 산업을 개발하는 계획을 발표하였다.

이러한 해양레저산업에서 카누는 대중적이며 인기 있는 종목이다(Kim et al., 2009). 카누는 일반적으로 목재나 FRP 등으로 제작되고 있으나, 이러한 재료들은 인화성으로 인한 화재 위험, 폐기물 처리 문제 등 다양한 환경 문제와 안전 문제가 대두되고 있다. 이에 탄소섬유복합재료(CFRP)는 경량, 높은 강도 및 강성도, 내부식성, 내충격성, 친환경성 등 다양한 장점이 있는 재료로 현재 카누의 주재료로 사용되는 목재나 FRP 등이 가지는 환경문제와 안전 문제를 해결할 수

* First Author : method@kunsan.ac.kr, 063-469-1851

† Corresponding Author : jkoh@kunsan.ac.kr, 063-469-1857

있다. 탄소섬유복합재료 강도는 유리섬유의 2배이며 탄성을 또한 다른 재료들과 비교해 우수하여 기존의 FRP로 제작된 카누에 비해 약 20% 이상 경량화를 이룰 수 있다(Oh et al., 2013).

본 연구에 관련된 선행연구로 폴리에틸렌 카누의 구조해석과 제조에 관한 연구(Park et al., 2011), 초고압 공간지를 이용한 포터블 인플레터블 카약 제작(Park et al., 2013a)이 있으며, Star-CCM+를 이용한 유동해석의 선행연구에는 1인승 소형 보트 설계 및 속도성능 분석(Park and Park, 2014)이 있다.

본 연구에서는 탄소섬유복합재료를 적용한 카누의 설계 및 유동해석에 관한 연구를 수행하였으며 세부적인 연구내용은 다음과 같다.

첫째, 4.64 m급 2인승 카누를 기본치수에 맞춰 SOLIDWORKS를 이용하여 설계하였다.

둘째, 설계된 파일을 상용 CFD 코드인 STAR-CCM+를 이용하여 자유 수면에서의 파형을 확인하였으며, 저항성능을 평가하였다. 안전성이 유지되는 흘수를 결정해 적정무게를 산정하였다.

결과물을 기반으로 실제 탄소섬유복합재료를 적용하여 카누를 제작하였다.

2. 설계 과정

2.1 선형 설계

카누의 초기 설계단계에서는 승선 인원 수, 재료, 사용 목적등과 같은 설계변수를 고려하여 선형 설계를 하였다. 특히, 속도를 즐기는 목적보다는 다양한 수상레저활동을 목적으로, Fig. 1과 같이 2척 또는 그 이상으로 선체를 결합하고 연결부에는 그물망을 설치하여 레저용품 및 수하물들을 탑재할 수 있는 카누를 대상으로 설계하였다. 따라서 안정성을 높일 수 있는 U자형 선형을 채택하였으며, 운반이 수월할 수 있도록 탄소섬유를 이용하여 무게를 줄이고, 기존 카누보다 선형의 길이-폭(L/B) 비를 상대적으로 작게 하였다.

Fig. 2와 같은 통상적인 2인승 카누는 길이와 폭이 각각 약 4.8 m, 0.9 m 정도이며 선체 무게는 재질마다 다르나 36 kg ~ 40 kg 정도로 본 연구에서 설계한 카누에 비하여 길이-폭 비가 크고 선체무게도 약 35% 정도 무겁다.

Fig. 3은 SOLIDWORKS를 이용하여 카누를 설계하는 과정을 간략히 나타내고 있으며, Table 1은 카누의 주요치수 및 기본정보를 담고 있다.

방형계수가 일반적인 카누보다 큰 이유는 카누에 탑승하면서 다양한 활동을 위하여 카누의 길이-폭 비를 기존의 카누보다 상대적으로 작게 설정하였기 때문이다.

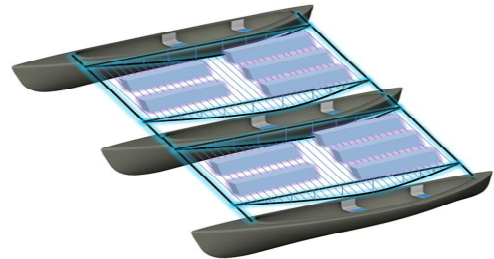
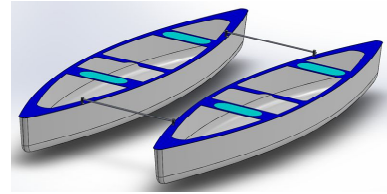


Fig. 1. Concept design of assemblable canoe. (upper: twins, lower: triplets)



Fig. 2. Example of conventional 2-person canoe. (source: <http://www.oldtowncanoe.com>)

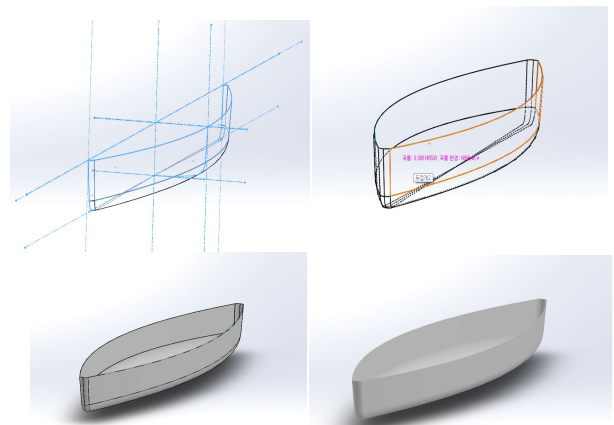


Fig. 3. Canoe hull design using SOLIDWORKS.

Table 1. Principal dimension of canoe

Items	Unit	Value
Length	m	4.64
Depth	m	0.36
Width	m	0.9
Volume	m ³	0.903
Person	-	2
Light displacement tonnage	kg	25
Full load displacement tonnage	kg	885
Material	-	Carbon Composites
C_b (Block Coefficient)	-	0.6
C_p (Prismatic Coefficient)	-	0.297

3. 수치해석

3.1 저항성능 수치해석

본 논문에서는 카누의 저항성능 수치해석을 수행하기 위해 상용코드인 STAR-CCM+를 사용하였다. STAR-CCM+는 유한체적법에 근거한 상용 CFD 코드로, 본 연구에서는 3차원 비정상상태 비압축성 점성 유동으로 가정해 계산하였다.

이에 대응하는 지배방정식으로 연속방정식과 Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS)방정식을 사용하여 계산한다.

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

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) + \rho g_i \tag{2}$$

여기서, x_i 는 직교좌표계, $u_i = \bar{u}_i + u_i'$ 는 속도성분(\bar{u}_i 는 평균속도, u_i' 는 변동속도)이며, p 는 압력, ρ 는 밀도, μ 는 점성계수, $\overline{g_i}$ 는 중력가속도이다. 또한, 식(2)의 $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ 는 Reynolds Stress로 본 연구에서는 Reynolds Stress에 대한 난류 종결을 위해 Park et al.(2013a)이 유사한 선종인 카약에 적용한 Realizable $k-\epsilon$ 을 사용하였다.

3.2 수치격자 및 계산조건

계산영역은 Fig. 4와 같이 원점에서 선수부 방향으로 선체 길이의 2배, 선미부 방향으로 4배이며 폭 방향으로 2.5배이다. 선체에서 발생한 자유수면(free-surface)이 충분히 발달할 수 있으며 왜곡이 발생하지 않도록 설정하였다.

Fig. 5는 선박의 좌표계를 표현한다. 좌표계는 직교좌표계를 사용하였고 원점은 선체의 중앙부의 상부에 위치해 있다. 유동방향이 양(+)의 x축이고 선박의 좌현이 양의 y축이며, 중력방향의 반대방향이 양의 z축이다.

격자는 트리머(trimmed mesh)를 사용하였으며 Fig. 6에서 카누 주위의 격자를 보이고 있다. 트리머 격자의 경우 적은 수의 격자를 사용하여 선체 주변의 자유수면 해석에 유리하다(Park et al., 2013b).

총 격자수는 약 65만개이며 Volume Of Fluid(VOF) 방법을 선택해 공기와 물의 경계를 표현하였다. 계산은 각기 다른 홀수에 따른 속도 분포를 보여 주어 다양한 상황을 고려하였다. 또한 홀수에 따른 적정 속도 및 안전성을 확인하였다. 홀수는 0.09 m, 0.18 m, 0.24 m의 3가지, 유입속도는 0.3 m/s, 0.6 m/s, 0.9 m/s, 1 m/s, 1.2 m/s, 1.5 m/s, 2 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s, 3.5 m/s, 4 m/s의 11가지 경우에 대해 수치해석을 수행하였다. 홀수마다 배수량(displacement)이 다르기에 적재할 수 있는 중량이 다르므로 활동의 목적에 따라 몸무게가 80 kg인 성인 2인이 승선하였을 경우(홀수 0.09 m)를 비롯하여 다양한 레저활동의 상황에서는 홀수가 0.24 m까지 될 것이라고 가정하여, 총 3가지 홀수를 선정하고 배수량을 계산하였으며, Table 2에 나타내었다.

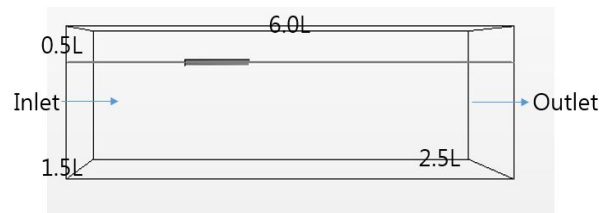


Fig. 4. Computational domain.

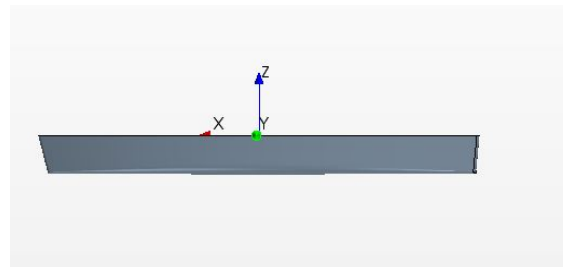


Fig. 5. Coordinate system.

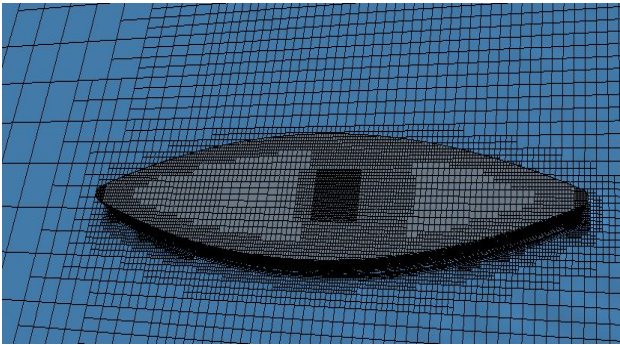


Fig. 6. Trimmed grid for numerical Simulation.

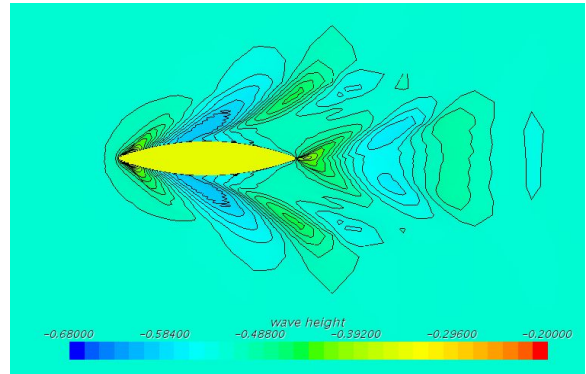


Fig. 8. Wave Height of draft 0.18 m.

Table 2. Volumes and displacements according to draft

	draft 0.24 m	draft 0.18 m	draft 0.09 m
volume (m ³)	0.669	0.53	0.212
displacement (kg)	650	519	208

4. 계산결과 및 고찰

4.1 흘수에 따른 파형과 저항특성

대표적으로 2.5 m/s에 대해 각기 다른 흘수에서의 파형은 다음의 Fig. 7~Fig. 9에서 보이고 있는데 이는 선수에서의 압력증가로 인하여 파고가 높으며 선체의 어깨를 지나는 부분에서는 압력저하로 인하여 파고가 낮아지고 있음을 알 수 있고 이러한 파형은 전형적인 켈빈파형(Kelvin's wave pattern)을 보여주고 있어서 계산의 결과를 신뢰할 수 있다고 판단된다. 한편, 흘수가 다른 3 경우에 대하여 파고(wave height)의 범례(legend)를 동일하게 놓고 비교하기 때문에 자유수면의 색이 다르게 나타나고 있다.

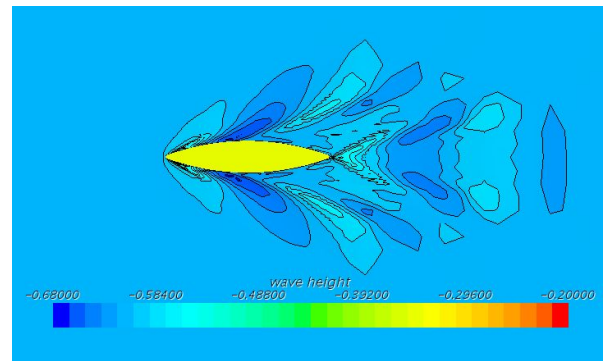


Fig. 9. Wave Height of draft 0.09 m.

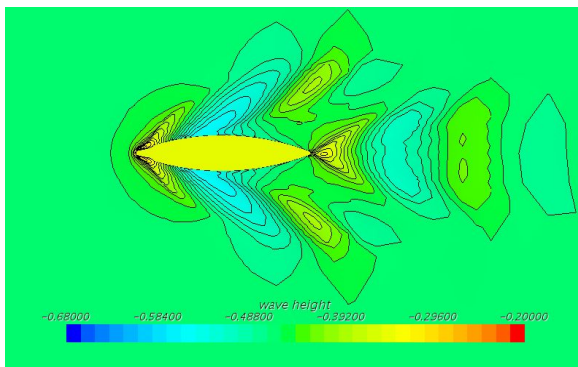


Fig. 7. Wave Height of draft 0.24 m.

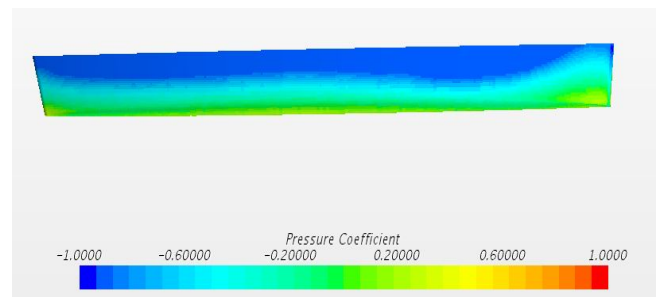


Fig. 10. Pressure Coefficient on the draft 0.24 m hull surface.

선체에 걸리는 압력은 Fig. 10~Fig. 12에 나타내었는데 선수부에 국부적으로 큰 압력이 발생하는 것을 알 수 있으며, 흘수의 변화마다 그 압력이 걸리는 면적이 각기 다를 수 있다. 또한 선수부에 다른 선체 부위보다 큰 압력을 받음을 알 수 있다.

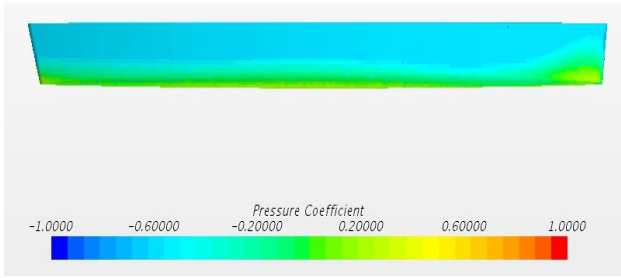


Fig. 11. Pressure Coefficient on the draft 0.18m hull surface.

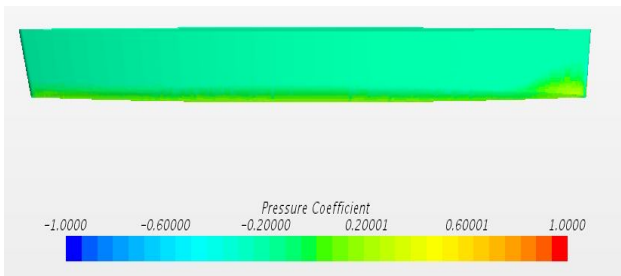


Fig. 12. Pressure Coefficient on the draft 0.09 m hull surface.

Fig. 13은 각 흘수마다 계산시간을 0.01초 간격으로 30초까지 계산을 하여 30초에서 수렴한 선체 전체 저항 값이 속도에 따른 변화를 보여주고 있다. 선체에 작용하는 저항은 세 가지 흘수에서 유사하게, 속도가 증가함에 따라 저항이 조금씩 상승하다가 속도가 2 m/s인 지점부터 저항이 급격히 커지는 걸 볼 수 있다. 이는 조파저항의 증가에 따른 영향으로 분석되며 잉여저항계수를 통하여 다시 한 번 분석하겠다.

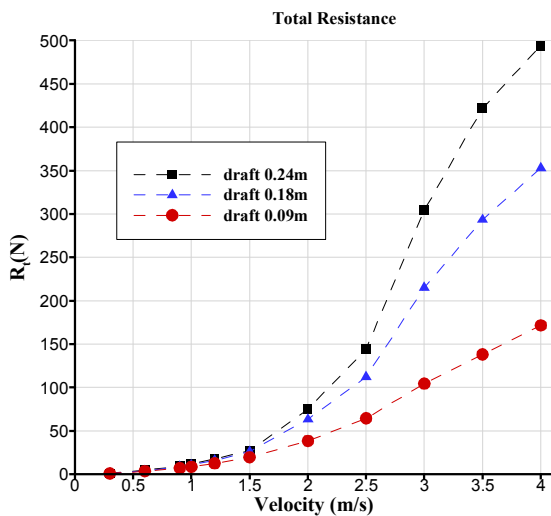


Fig. 13. Resistance curves according to velocity at draft of 0.24 m, 0.18 m, and 0.09 m.

한편, Park et al.(1999)에 따르면 한국 평균 성인남성 두 사람이 카누에 가할 수 있는 토크는 128.3 Nm이다. 따라서 노의 길이가 약 70 cm이므로 약 183 N의 저항을 이겨낼 수 있다. 따라서 흘수가 0.24 m, 0.18 m, 0.09 m에서 이론적인 최대 속도는 각각 약 2.7 m/s, 2.8 m/s, 4 m/s로 추정된다. 따라서 설계한 CFRP 카누의 성능은 스피드를 즐기는 경우에도 적합한 속도이며 2척 이상의 카누를 연결하여 다목적 레저 활동을 즐기기에 적합한 속도라고 판단된다.

대상선박 운항 시 프루드 수에 따른 저항성능을 확인하기 위해서 각 저항계수를 계산하였다. 저항계수는 해석된 저항 값을 이용하여 식(3)~(5)를 이용하여 계산하였다. 식(3)은 전체저항계수(total resistance coefficient), 식(4)는 ITTC-1957에서 제안하는 마찰저항계수(frictional resistance coefficient)이며, 식(5)는 잉여저항계수(residual resistance coefficient), 식(6)은 프루드 수(Froude's number) 이다.

$$C_t = \frac{R_t}{0.5\rho S V^2} \quad (3)$$

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} R_n - 2)^2} \quad (4)$$

$$C_r = C_t - C_f \quad (5)$$

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (6)$$

Table 3에는 흘수에 따른 침수표면적과 흘수에 따른 수선 간장의 길이를 나타내었다. 이를 이용하여 식(4)를 계산하여 마찰저항계수를 각 흘수에 따라 구하였다.

Table 3. Wetted surface area and LBP at each draft

Draft	0.24 m	0.18 m	0.09 m
Wetted surface Area (m ²)	4.31	3.78	3
LBP (m)	4.38	4.35	4.31

Fig. 14 ~ Fig. 16에서 볼 수 있듯이 속도가 증가함에 따라 마찰저항계수는 감소함을 알 수 있다.

식(5)를 사용해 잉여저항계수를 구해서 보면 저속에서는 프루드 수가 증가할수록 감소하는 경향을 보이다가, 프루드 수 0.14, 속도 1 m/s를 기점으로 증가하는 경향을 보인다. 이후, 프루드 수 0.46, 속도 3 m/s를 기점으로 지속적으로 커지던 잉여저항계수가 작아지기 시작하는 경향을 볼 수 있다.

탄소섬유를 적용한 카누의 흘수에 따른 저항성능에 대한 수치적 연구

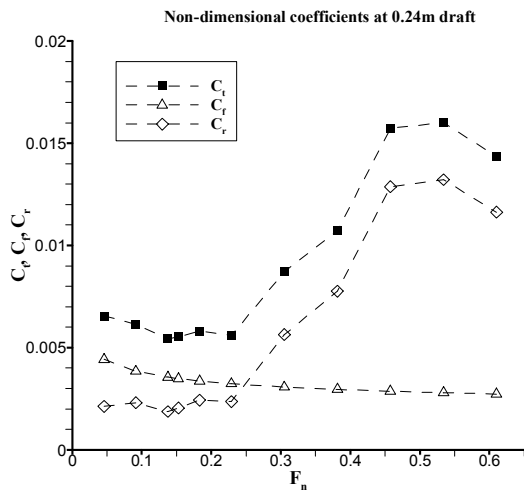


Fig. 14. Non-dimensional coefficients at 0.24 m draft.

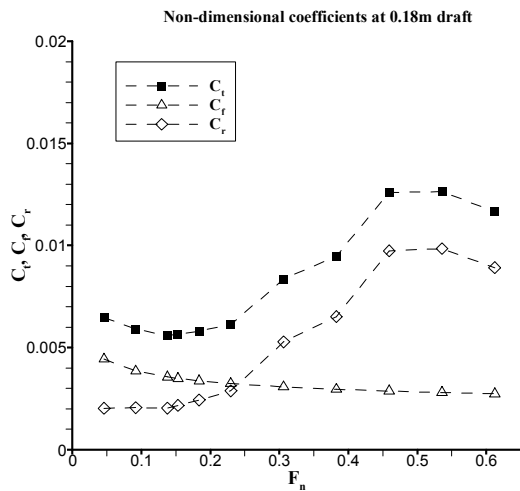


Fig. 15. Non-dimensional coefficients at 0.18 m draft.

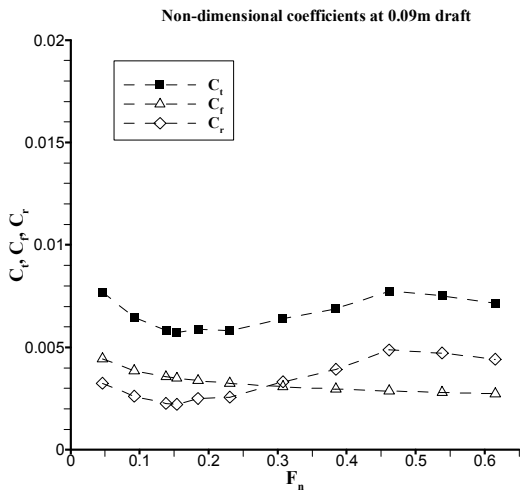


Fig. 16. Non-dimensional coefficients at 0.09 m draft.

4.2 선속에 따른 저항성분 분석

Table 4~Table 6은 각각 흘수 0.24 m, 0.18 m, 0.09 m에서의 전체저항에 대한 마찰저항계수의 비율과 잉여저항(조파저항)의 비율을 나타내고 있다.

흘수가 0.24 m일 때 프루드 수가 0.31(유속 2 m/s)을 기점으로 마찰저항계수는 급격히 줄고 잉여저항계수가 커짐을 볼 수 있는데, 이는 조파저항이 크게 증가함을 의미한다. 이 경우의 파의 생성정도를 Fig. 17에서 볼 수 있는데, 파의 높이가 선체보다 높게 형성되어 선내로 물이 유입되는 것을 알 수 있다. 따라서 흘수가 0.24 m인 경우에는 선속을 2 m/s 이상으로 운행할 시 침수가 시작되므로 2 m/s 이상으로 운행하면 위험하다는 사실을 알 수 있다. 흘수가 0.18 m일 경우 또한 2 m/s로 운항시 파고가 선체에 대해 상대적으로 많이 높아지며, 2.5 m/s로 운항을 할 때 침수가 시작됨을 알 수 있다.

이에 반해서, 흘수가 0.09 m인 경우에는 4 m/s로 운항하여도 Fig. 18에서 알 수 있듯이 파가 선체 선수부의 흘수보다 높아지지만 선수부 형상에 의하여 파를 가르기 때문에 침수가 발생하지 않게 되어 안전함을 알 수 있다.

Table 4. Ratio of frictional resistance and residual resistance to total resistance at 0.24 m draft

F_n	0.05	0.09	0.14	0.15	0.18	0.23	0.31	0.38	0.46	0.53	0.61
C_f/C_t	0.68	0.63	0.65	0.63	0.58	0.58	0.35	0.28	0.18	0.17	0.19
C_r/C_t	0.32	0.37	0.35	0.37	0.42	0.42	0.65	0.72	0.82	0.83	0.81

Table 5. Ratio of frictional resistance and residual resistance to total resistance at 0.18 m draft

F_n	0.05	0.09	0.14	0.15	0.18	0.23	0.31	0.38	0.46	0.53	0.61
C_f/C_t	0.69	0.65	0.64	0.62	0.58	0.53	0.37	0.31	0.23	0.22	0.23
C_r/C_t	0.31	0.35	0.36	0.38	0.42	0.47	0.63	0.69	0.77	0.78	0.77

Table 6. Ratio of frictional resistance and residual resistance to total resistance at 0.09 m draft

F_n	0.05	0.09	0.14	0.15	0.18	0.23	0.31	0.38	0.46	0.53	0.61
C_f/C_t	0.58	0.60	0.61	0.61	0.57	0.56	0.48	0.43	0.37	0.37	0.38
C_r/C_t	0.42	0.40	0.39	0.39	0.43	0.44	0.52	0.57	0.63	0.63	0.62

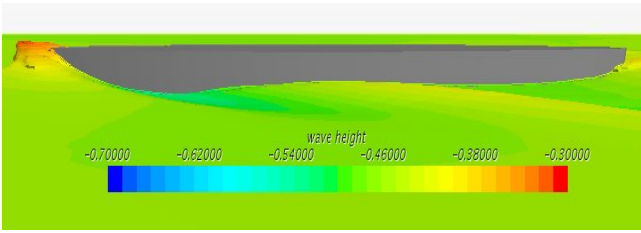


Fig. 17. Wave pattern of 0.24 m draft at 2.0 m/s.

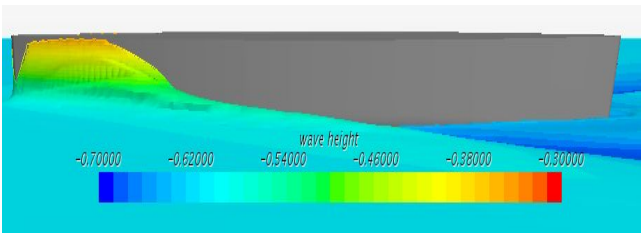


Fig. 18. Wave pattern of 0.09 m draft at 4.0 m/s.

5. 시제품 소개

Fig. 19는 카누의 제작 과정을 보여주는데, 프레임을 만들기 위해 트러스 구조의 작업대를 제작 후 각 영역 단면의 가장자리를 트림하여 기본 골격을 생성하였고 기본골격에 k15와 폴리에스테르 수지를 합성하여 곡면을 생성 하였다. 마스터 플러그를 완성 후, 플러그에 매트와 로빙을 적층하여 몰드를 생성하였다. 몰드 탈형 후 탄소섬유를 배열 한 후 진공성형 공법을 이용하여 선형을 완성하였다. 완성된 선형은 기존 FRP 대비 약 20% 이상의 경량화를 실현하였고, 균산의 비응향 및 새만금 내수면에서 시운전을 하였다.

완성된 최종선형은 Fig. 20에 나타내었다.

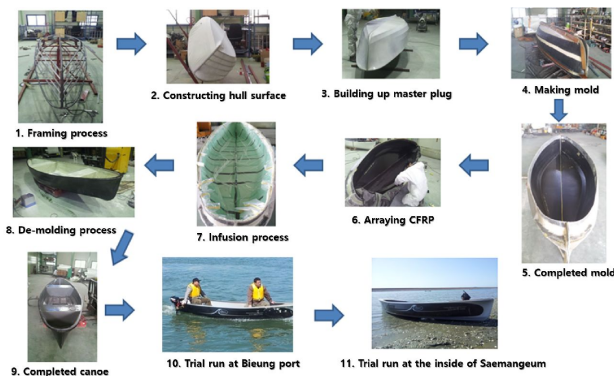


Fig. 19. Manufacturing process of CFRP canoe.

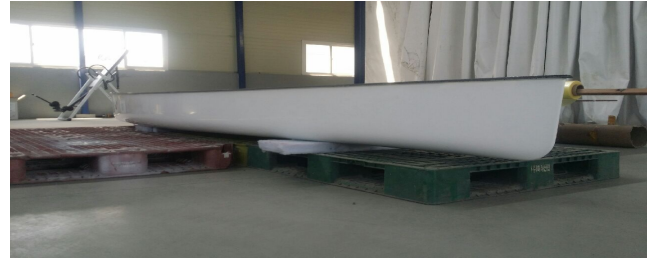


Fig. 20. Prototype of CFRP canoe.

6. 결 론

본 연구에서는 CFRP를 적용한 다목적 카누에 대하여 상용코드를 이용하여 수치해석을 수행하여, 흘수에 따른 저항 특성 및 파형을 분석하였고, 이를 토대로 제작한 카누를 소개하였다.

본 연구의 대상체인 CFRP 카누의 흘수가 0.24 m인 경우에는 2 m/s 미만으로, 흘수가 0.18 m인 경우에는 2.5 m/s 미만으로, 그리고 흘수가 0.09 m인 경우에는 4 m/s 미만으로 운항하면 선수부 방향에서 선내로 유입되는 파가 없을 것으로 분석되어 안전한 운항속도를 알 수 있었으며, 전체저항을 기준으로 살펴보면 성인 두 명이 노를 저을 때 충분한 속도가 나올 수 있음을 확인하였다.

수치해석을 통하여 설계한 CFRP 카누의 성능을 확인한 후, 시제품을 만들었으며 시운전까지 완료하였다.

CFRP를 적용한 카누를 제작되어 흘수가 같은 크기의 FRP 재질인 카누보다 낮게 되고, 이로 인해 선체에 적재할 수 있는 중량이 증가하게 되어 카누에서 다양한 목적을 가지고 레저 활동을 할 수 있다는 점을 해석을 통하여 간접적으로 확인할 수 있었다.

추후 수조모형시험 및 Particle Image velocimetry(PIV) 시험을 통해 CFD 해석결과에 대한 검증은 수행할 예정이며, 자세변화에 따른 저항 성능에 대한 추가적인 연구도 예정하고 있다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “지역특화산업육성사업”으로 수행된 연구 결과입니다. (R0004765)

References

[1] Kim, H. J., S. H. Kim and J. H. Jeng(2009), A Study on the Development of Ship Building for the Wooden Canoe by Piling-up Laminated Wooden Plates Kit [1] - A Design

- for canoe hull and laminating wooden plates for piling-up kit, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 33, No. 5, pp. 762-769.
- [2] Oh, D. K., C. W. Lee and U. C. Jung(2013), A Study on the Basic Design and its Characteristics of 50ft-class CFRP Cruise Boat, Journal of The Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 19, No. 6, pp. 674-680.
- [3] Park, C. H., B. H. Park and J. D. Park(2013a), Manufacture of Portable Inflatable Kayak Using Ultra High Pressure Drop Stitch, Korean Institute of Navigation and Port Research, Vol. 37, No. 5, pp. 551-558.
- [4] Park, C. K., M. G. Kim and S. S. Cho(2011), Study on Structural Analysis and Manufacturing of Polyethylene Canoes, Transactions of the Korean Society of mechanical engineers, Vol. 35, No. 3, pp. 309-316.
- [5] Park, D. W. and G. M. Park(2014), An Analysis on the Design and Speed Performance of a One-man Boat, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 20, No. 5, pp. 552-557.
- [6] Park, D. W., S. B. Lee, S. B. Chung, H. W. Seo and J. W. Kwon(2013b), Effects of Trim on Resistance Performance of a ship, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 50, No. 2, pp. 88-94.
- [7] Park, S. Y., H. H. Choi and C. B. Park(1999), A Study of Comparison on the Isometric and Isokinetic Muscular Strength in Collegiate Students, The Journal of Physical Education, Vol. 27, pp. 273-286.

Received : 2016. 10. 22.

Revised : 2016. 11. 30. (1st)

: 2016. 12. 09. (2nd)

Accepted : 2016. 12. 28.