한국동력기계공학회지 제22권 제4호 pp. 96-103 2018년 8월 ISSN 1226-7813(Print) ISSN 2384-1354(Online)
Journal of the Korean Society for Power System Engineering http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2018.22.4.096
Vol. 22, No. 4, pp. 96-103, August 2018

무동력 수중익의 작동에 따른 추력 예측과 최적운전에 관한 연구
Study for the Thrust Force Prediction and Optimal Operation on a Human-Powered Hydrofoil

조수용*† · 이승석** · 김창호***
Soo-Yong Cho*†, Sung-Seog Lee** and Chang-Ho Kim***

(Received 16 July 2018, Revision received 26 July 2018, Accepted 30 July 2018)

Abstract: A study was conducted on a human-powered hydrofoil that could move on the free water surface. This movement can be achieved when the hydrofoil is operated with pitching and plunging motion simultaneously. Hence, an investigation was conducted to find an appropriate thrust force and operation frequency for various operating conditions. The SD7003 airfoil was adopted for the hydrofoil, and the force on the hydrofoil was predicted using a computational analysis. The numerical algorithm was validated using an experimental result in literature. The thrust force and buoyancy force were obtained by the transient analysis. These forces were calculated to the periodic-averaged forces according to the different operation frequency. In an operation condition of 190,000 Reynolds number, the fast movement was obtained when the amplitude of angle of attack and Strouhal number were 5 degree and 0.6, respectively. For reducing movement speed, the amplitude of angle of attack should be increased.

Key Words : Hydroifoil, Thrust Force, Aquaskipper, Optimal Operating Point, Pitching and Plunging

— 기 호 설 명 —

A : 받음각진폭, [deg]
C_t : 추력계수
C_y : 부상력계수
c : 코드, [m]
dt : 시간단계, [s]
f : 주파수, [Hz]
h : 상하운동의 거리, [m]
L : 특성거리, [m]
Re : 레이놀즈수, $U_\infty c/\nu$
St : 스트로할수, fL/U_∞
T : 주기시간, [s]
t : 시간, [s]
U_∞ : 입구속도, [m/s]
u : x-방향속도, [m/s]
x, y, z : 직교좌표계, [m]

*† 조수용(교신저자) : 경상대학교 공과대학 항공기부품기술연구센터
E-mail : sycho@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-1586
**이승석 : 우진토탈
***김창호 : 부일하우징

*† Soo-Yong Cho(corresponding author) : ReCAPT, Gyeongsang National University.
E-mail : sycho@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-1586
**Sung-Seog Lee : Woojin Total Ltd.
***Chang-Ho Kim : Booil Housing Ltd., R&D Center.

그리스 문자

α : 받음각, [degree]
ρ : 밀도, [kg/m^3]
ν : 동점성계수, [m^2/s]

1. 서 론

인력에 의하여 수면 위를 이동할 수 있는 장치는 다양하지만, 수중익을 사용하는 장치는 다른 장치에 비하여 구조가 아주 단순하면서도 25 km/h 이상의 빠른 속도로 이동할 수 있는 특징이 있다. Fig. 1에서 보여주는 것과 같이 장치를 구성하는 것은 몇 개의 지지봉과 수면에서의 부상과 이동에 핵심이 되는 에어포일 형상의 윙(wing, 수중익; hydrofoil)으로 구성되어 있다. 이동에 대한 원리는 수중익의 앞전을 아래로 기울이면서 아래로 밀어주면, 수중익은 아래로 내려가지만, 동시에 앞으로 진행된다. 최저점에서 힘을 가하지 않으면 수중익은 위로 부상하게 되는데, 이처럼 수중익의 움직임에 따라 양력과 추력이 동시에 발생되어 부상과 전진이 가능하게 된다. 따라서 수중익에는 상하운동인 플런징(plunging)과 피칭(pitching)운동이 주기적으로 형성되어야 한다.

상하운동과 피칭운동에 의하여 수면에서 이동할 수 있는 장치는 1953년 Schuck[1]에 의하여 발명되었으며, 당시의 장치는 Fig. 1에서 보여주는 장치와는 달리 수중익 두 개를 평행하게 설치하여, 두발을 지그재그로 움직이면서 작동하므로 운전자의 측면으로 이동할 수 있었다. 이 후에 수중익을 사용하는 많은 종류의 장치가 개발되었는데 1984년에 Flying Fish, 1989년에는 Pogofoil이 개발되었으며, 1998년에는 Trampofoil, 2003년과 2004년에는 Aquaskipper[2]와 Pumpabike가 개발되었다. 하지만 기본적인 동작의 원리는 앞서 설명한 원리와 차이가 없으며, 단지 사용자의 편의성이나 이동속도 등에 차이가 있을 뿐이다.

수중익을 활용한 장치는 레저산업의 발전에 따라 많은 보급이 이루어지고 있다. 따라서 이를 개발하기 위하여서는 수중익의 작동 조건에 따른

Fig. 1 Picture of moving on the water surface by operating an human-powered hydrofoil

올바른 추력과 양력을 예측하여야 최적의 장치를 개발할 수 있다. 수중익을 단순히 빠른 반복주기로 작동한다고 하여 전진속도가 빨라지거나 부상력이 향상되는 것이 아니라, 반대로 부상력이 형성되지 못하여 전복된다. 따라서 본 연구에서는 수중익의 운동조건에 따른 추력과 양력을 예측하여 최적의 수중익 운동조건을 제시하고자 하며, 이를 바탕으로 올바른 장치를 개발하는데 도움을 줄 수 있는 연구를 수행하고자 한다.

2. 수치해석 알고리즘 검정

2.1 수행되었던 연구현황

수중익에서 발생되는 힘을 예측하기 위하여 전산유체해석(CFD)을 활용하고자 한다. 이를 위하여 기본적으로 수치해석 알고리즘의 검정이 필요하므로 기존에 수행되었던 실험 결과를 활용한다. 수중익의 동작은 플래핑(flapping) 윙의 동작과 동일하므로 윙의 상하운동과 피칭운동이 혼합된 연구[3-6]들이 수행되었다. 이들 연구의 기본적인 목적은 비행 능력향상을 위한 연구에 초점을 맞추고 있다. 다행히 수동(water tunnel)에서 수행된 연구가 있으므로 이들의 실험결과[7,8]를 활용하고자 한다. 또한 수치해석의 결과들[9,10]도 있으므로 수치해석의 정확도를 알 수 있다.

2.2 수치해석 알고리즘

수중익의 동작을 해석하기 위하여 CFX[11]를 사

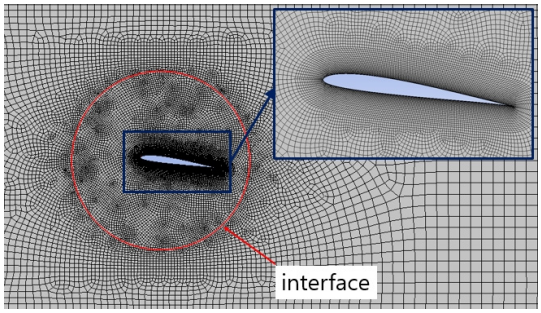


Fig. 2 Computational grid and interface

용하였으며, 적용된 알고리즘은 터빈 해석에 사용되었던 알고리즘[12]과 동일하다. 해석을 위한 영역은 4개의 영역으로 윗부분, 중간부분, 아랫부분, 그리고 Fig. 2에서 보여주는 원형의 수중익 부분으로 구분하였다. 특히 수중익이 피칭운동을 하는 경우에 맞닿은 경계영역(interface)에서 격자의 미끄럼이 발생되도록 하여 수중익 영역에서 격자의 직교성이 유지되도록 하였다.

수중익의 운동에 따른 힘을 계산하여야 하므로 비정상해석을 수행하여야 한다. 이를 위하여 우선 정상상태의 해석을 수행하고 이를 기준으로 비정상해석을 수행하였다. 비정상해석의 안정화를 위하여 5주기시간(T) 이상의 계산을 수행하였으며, 비정상해석의 시간단계(*dt*)는 시간단계를 4종류로 설정하여 시간단계의 변화에 대한 결과의 독립성이 확보되는 *dt*=T/720으로 정하였다. 격자의 경우도 동일한 방법으로 크기를 변경하여 격자를 정하였으며, 계산에 사용된 격자의 형상을 Fig. 2에서 보여주고 있다.

입구 경계조건은 일정 속도(U_∞)로 설정하였으며, 출구영역은 평균 정압력으로 설정하였다. 이를 위하여 출구영역은 수중익 코드의 22배 하류에 설치하였다. 수중익의 스팬(span)이 충분히 길다고 가정하여 양 측면은 대칭경계조건을 사용하였으며, 윗면과 아래면은 수동에서의 실험조건과 동일하게 벽면으로 처리하였다. 수중익은 벽면 경계조건으로 설정되었으며, 첫 번째 격자에서의 y+ 값이 5수준을 유지하도록 하였다.

계산에서 대류항은 고정도(high resolution)을 사용하였으며, 시간단계는 이차 후진 오일러(second order backward Euler)방법을 적용하였다. 난류모델은 SST(shear stress transport)모델과 표준 k-ε을 적용하여, 보다 정확하며 적용 가능한 난류모델을 선택하고자 하였다. 아울러 벽함수는 벽에서 부터 격자까지의 거리에 따라 자동으로 전환되어 계산되는 자동화(automatic)방식을 사용하였다.

2.3 실험결과와 비교

Fig. 3은 실험에 사용된 SD7003의 수중익의 형상과 피칭운동을 위한 회전 중심위치를 보여주고 있다. 상하운동과 피칭운동은 식 (1)과 (2)와 같이 시간에 따라 변한다.

$$h(t) = 0.5c\cos(2\pi ft) \tag{1}$$

식 (1)에서 c와 f는 코드와 주파수를 의미한다. 상하운동의 거리(h)는 삼각함수로 나타나며 진폭은 코드의 반이다.

$$\alpha(t) = \alpha_0 + 8.42^o\cos(2\pi ft + 90^o) \tag{2}$$

식 (2)에서는 피칭운동에 따른 받음각(α)의 변화를 나타내고 있으며, 상하운동과는 90°의 위상차를 가지고 있다. 실험[7-8]에서는 동일한 실험조건으로 각각 다른 장소에서 실험이 수행되었으므로 속도분포 등에 미세한 차이는 있지만 전반적으로 비슷한 결과를 보이므로 Baik[7]의 결과를 바탕으로 레이놀즈수가 60,000인 경우에 얻어진 결과와 비교를 수행한다.

Fig. 4는 식 (1)의 상하운동만 있는 경우에 입구 속도에 의하여 정규화된 x-방향의 유동속도(u)분포의 비교를 보이고 있다. 계산의 결과는 난류모델이 k-ε인 경우이며, SST모델을 사용하여 얻어진

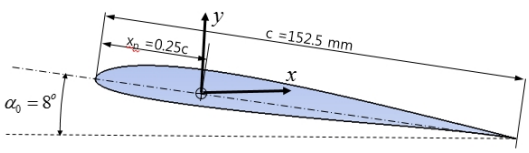


Fig. 3 SD7003 airfoil and pivot location

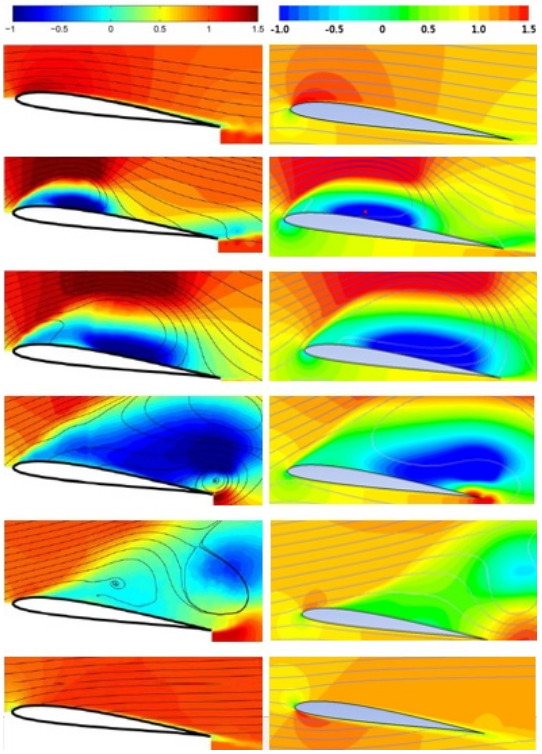


Fig. 4 Comparison of u/U_∞ velocity contours between experiment (Left) and computation (Right) for pure plunging motion. (t/T=0, 1/4, 1/3, 5/12, 1/2, 3/4 consecutive from top)

결과보다는 양호한 결과를 얻었다. 이러한 것은 Fig. 5에서 확인할 수 있으며 기존의 수치해석의 결과[9,10]보다 정확성이 높아졌음을 알 수 있었다.

Fig. 5의 경우는 상하운동만이 있는 경우에 t/T=0.25의 위치에서 x-방향의 위치가 다른 4경우에 대하여 수중익의 흡입면에서부터 y-방향을 따라 유동 속도의 변화를 비교하고 있다. SST 난류모델이 적용된 경우에 유동의 박리에 의한 역방향속도가 크게 나타남을 보여주고 있다.

Fig. 6은 상하운동과 피칭운동이 수중익에 동시에 작용하는 경우에 입구속도에 의하여 정규화된 x-방향의 유동속도를 실험결과와 비교한 결과를 보이고 있다. 상하운동만이 있는 경우와 마찬가지로 k-ε 난류모델을 적용한 경우가 실험결과에 보다 근사되는 결과를 보였다.

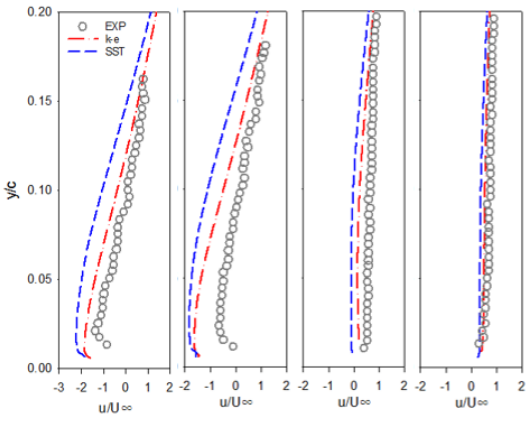


Fig. 5 Comparison of u/U_∞ velocity for pure plunging motion at t/T=0.25 (x/c=0.4, 0.5, 0.7, 0.8 consecutive from left)

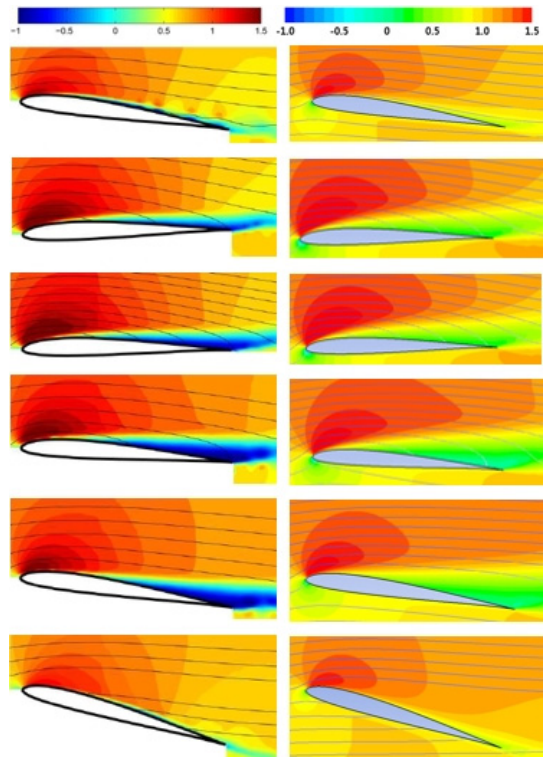


Fig. 6 Comparison of u/U_∞ velocity contours between experiment (Left) and computation (Right) for pitching and plunging motion. (t/T=0, 1/4, 1/3, 5/12, 1/2, 3/4 consecutive from top)

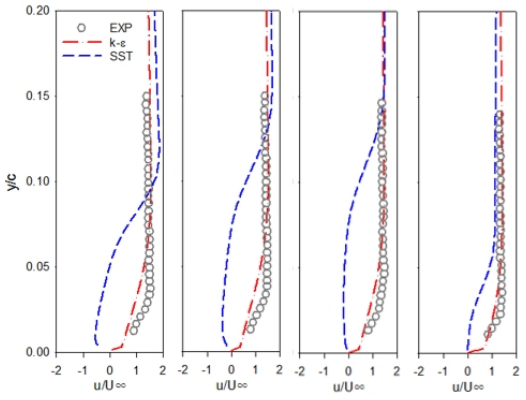


Fig. 7 Comparison of u/U_∞ velocity for pitching and plunging motion at x/c=0.25 (t/T=0.25, 1/3, 5/12, 1/2 consecutive from left)

Fig. 7은 피칭운동의 회전중심 위치인 x/c=0.25의 위치에서 상하운동과 피칭운동이 있는 경우에 시간에 따라 수중익의 흡입면에서 y 방향을 따라 측정된 유동속도와의 비교를 보여주고 있다. 본 결과에서도 SST 난류모델을 사용한 경우보다, k-ε 난류모델을 사용한 경우가 실험결과와 근사한 결과를 보여주고 있다. 이상으로 수중익을 수동에 실험한 결과와의 비교에서 난류모델은 k-ε을 적용하였을 때 전반적으로 실험결과와 보다 근사하게 일치되고 있음을 알 수 있으므로 다른 운전조건에서도 동일한 계산 알고리즘을 적용하여 힘을 예측하고자 한다.

3. 운전조건에 따른 힘의 예측

Fig. 8은 수중익 장치의 구조를 보여주고 있는데, 1번의 수중익으로부터 추력과 양력을 동시에 얻게 된다. 사용자가 5번의 핸들을 잡고, 4번의 발판을 누르게 되면, 발판에 연결된 3번과 2번의 지지대에 의하여 수중익의 전단은 아래로 향하게 되어 α의 각도가 형성된다. 또한 5번의 핸들도 동시에 누르게 되어 6번의 용수철이 늘어나면서 각도 β도 증가한다. 7번의 카나드(canard)는 수평력 유지와 방향변동에 대한 안정성을 제공한다. 수중

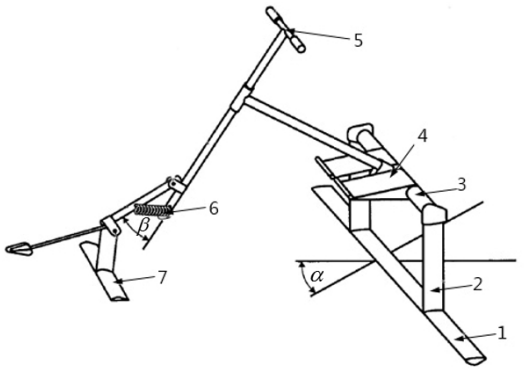


Fig. 8 Structure of human powered hydrofoil

익이 아래로 내려가면서 α의 각도는 점차적으로 줄어들면서 수평상태로 되고, 발판에 힘을 가하지 않으면 다시 상승하게 되는 과정을 거치면서 초기상태로 돌아간다. 이와 같이 수중익 장치의 작동과 관련한 운동은 앞서 실험에 적용되었던 상하운동의 식 (1)이나 피칭의 식 (2)와는 차이가 있다. 따라서 본 연구에서는 수중익장치의 운동을 분석하여 상하운동과 피칭운동을 각각 식 (3)과 식 (4)와 같이 얻었다.

$$h(t) = h_0 \cos(\frac{5\pi}{4} ft) - h_0,\ 0 < t \le \frac{4T}{5} \qquad (3)$$
$$= -h_0 \cos(5\pi ft) - h_0,\ \frac{4T}{5} < t \le T$$

$$\alpha(t) = -A\sin(\frac{5\pi}{2} ft), 0 < t \le \frac{T}{5} \qquad (4)$$
$$= -A, \frac{T}{5} < t \le \frac{3T}{5}$$
$$= A\sin(\frac{5\pi}{2} ft), \frac{3T}{5} < t \le \frac{4T}{5}$$
$$= \frac{A}{2}\sin(5\pi ft), \frac{4T}{5} < t \le T$$

식 (3)에서 상하운동의 진폭(h_0)은 장치의 작동에서 0.5 c 수준이며, 식 (4)에서의 A는 받음각의 진폭을 의미한다. 또한 장치가 일정한 속도로 진행하는 것이 아니므로 한 주기의 운동에서도 초기에 시작하여 속도가 증가하고 주기의 끝에서는 다시 감소하여 초기 이동속도로 반복되므로 식

(5)와 같이 얻어졌다.

$$u(t) = \frac{U_\infty}{2}\,(\sin(\frac{5\pi}{2}ft)+1), 0<t\le\frac{T}{5} \quad (5)$$
$$= U_\infty, \frac{T}{5}<t\le\frac{3T}{5}$$
$$= \frac{U_\infty}{2}\sin(\frac{5\pi}{4}f(t-\frac{T}{5})+1), \frac{3T}{5}<t\le T$$

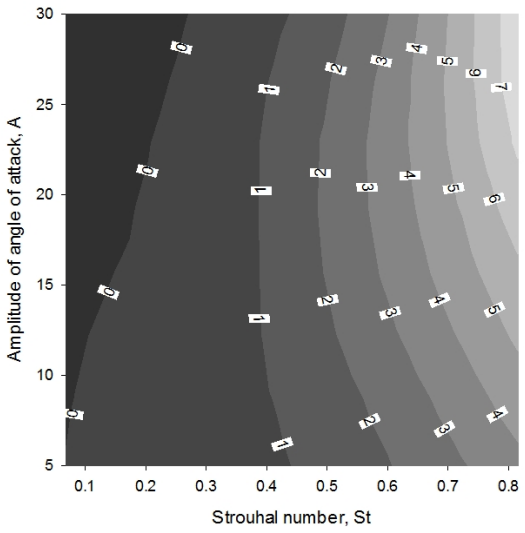
이상과 같이 장치의 작동과 관련한 변수는 받음각의 진폭(A), 최대진행속도(U_∞), 주파수(f)가 된다. 최대진행속도는 레이놀즈수($U_\infty c/\nu$)로 나타낼 수 있으며, 주파수는 스트로할수(Strouhal number: fc/U_∞)로 표현되어진다. 본 연구에서는 가장 효과적인 작동상태를 찾는 경우이므로 최대진행속도는 장치의 일반적인 이동속도를 고려하여 레이놀즈수 190,000에서 작동하는 것으로 설정한다. 따라서 본 연구에서는 받음각의 진폭과 스트로할수의 변동에 따라 수중익에서 항력과 양력으로부터 각각의 이동시간에 따른 추력(f_t)과 부상력(f_y)을 얻어서 최종적으로 식 (6)과 같이 주기평균한 추력(F_t)과 부상력(F_y)을 찾는 것이다.

$$F_t = \frac{\sum_{i=dt}^{T}(f_t)_i}{\sum_{i=dt}^{T} n}, F_y = \frac{\sum_{i=dt}^{T}(f_y)_i}{\sum_{i=dt}^{T} n} \quad (6)$$

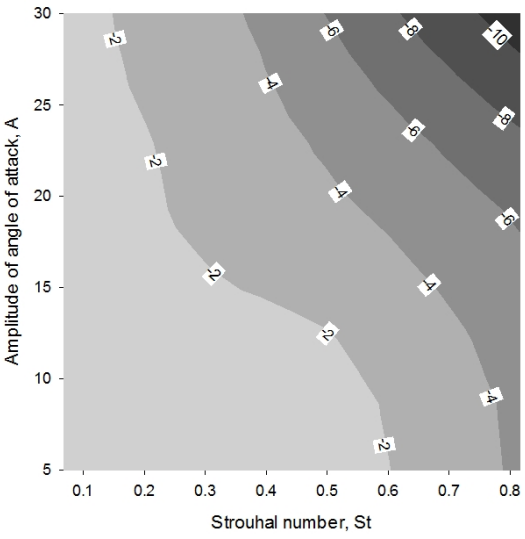
식 (6)의 주기평균 추력과 부상력은 유동조건을 고려하여 각각 식 (7)과 같이 추력계수(C_t)와 부상력계수(C_y)로 얻어진다.

$$C_t = \frac{F_t}{0.5\rho U_\infty^2 c}, C_y = \frac{F_y}{0.5\rho U_\infty^2 c} \quad (7)$$

본 계산에서는 장치의 작동을 고려하여 계산영역도 확장하여 입구에서의 폭은 코드의 13배로 하였으며, 위측 경계조건은 자유수면인 것을 고려



(a) Thrust coefficient



(b) Bouyancy coefficient

Fig. 9 Thrust coefficient and bouyancy force for a pitching and plunging hydrofoil

하여 오프닝(opening)으로 설정하였다. 장치에서의 수중익 운동을 고려하여 Table 1에서 보여주는 것과 같이 받음값의 진폭은 5도에서 30도까지 7종류와 스토로할수는 작업자의 운동조건에 따라 0.068에서 0.815까지 9종류로 구분하여 총 63개의 계산을 수행하였다.

Table 1 63 cases for numerical study

Parameter	Values
Amplitude of angle of attack (6 cases)	3, 5, 10, 14, 18, 26. 30
Strouhal number (9 cases)	0.068, 0.082, 0.102, 0.122, 0.153, 0.204, 0.306, 0.489. 0.815

Fig. 9는 받음각의 진폭과 스트로할수에 따른 추력계수와 부상력계수를 보여주고 있다. 계수의 값이 1 이상의 값이 얻어진 것은 수중익이 정적인 상태가 아니고 사용자에 의하여 피칭과 상하운동의 힘을 가하고 있기 때문이다. 추력은 스트로할수의 증가와 받음각의 증가에 따라 증대하는 결과를 보여주고 있는데, 이는 강한 힘으로 받음각의 진폭을 증대하면서 빠른 속도로 반복하여 이동하는 경우이다. 하지만 이 경우에 부상력의 감소를 초래할 수 있는데, 부상력의 감소는 수중익의 움직임에 따른 결과이다. 따라서 전체 부상력은 수중익 및 장치에 부착된 다른 부품들에 의한 부력이 포함되어야 한다. 총 부상력이 작업자의 중량을 능가하지 않으면 운동에 따라 작업자는 침몰하게 되므로 적절한 스트로할수에서 운전되어야 함을 알 수 있다. 본 장치에서 부력을 부상력계수로 환산하면 2정도의 수준이므로 실질적으로 부상력계수가 -2인 경우를 따라서 작동되어야 함을 알 수 있다.

본 장치에서 적절한 작동점은 받음각의 진폭이 5도 정도이며, 스트로할수가 0.6인 작동점이 된다. 이때의 이동속도는 21 km/h가 된다. 만일 천천히 이동을 하고자 하는 경우에는 받음각의 진폭을 증가하여 작동하여야 하므로 작업자가 반복주기에서 증가된 힘으로 발판을 밀어서 받음각의 진폭을 증가하여 작동하여야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 수중익을 사용하여 수면을 이동하는 장치에서의 최적 운동조건을 찾았다. 또한 상하운동과 피칭운동을 동시에 하는 경우에 발생되는 추력 및 부상력을 예측하였다. 빠른 속도로 이동하고자 하면 받음각의 진폭을 적게 하면서 빠른 주기로 작동하여야 하며, 속도를 낮추어서 작동하고자 하는 경우에는 작동주기를 줄이면서 받음각의 진폭을 증대하여야 함을 알 수 있었다. 본 연구의 수중익 작동조건에서 빠른 주기의 작동을 하는 경우에 시간당 21 km의 이동거리가 얻어졌다. 본 연구에서는 수중익의 단면을 SD7003 형상을 적용하였으므로 추가적인 연구로 다른 형상의 수중익에서도 연구를 수행하여 적절한 수중익의 형상을 찾을 필요가 있다.

후 기

본 연구는 전남테크노파크에서 지원한 지역수요 맞춤형 연구개발사업인 “무동력 수상레저 및 스포츠용 이동장치개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. http://human-powered-hydrofoils.com/hydrofoils/1593-the-wasserlaeufer-by-dipling-julius-schuck/ (2018. 7 open access).
2. S. Chen, 2006, "Self Propelled Hydrofoil Device", Patent No. US 7021232 B2.
3. J. M. Anderson, K. Streitlien, D. S. Barrett and M. S. Triantafyllou, 1998, "Oscillating Foils of High Propulsive Efficiency", J. Fluid Mech. Vol. 360, pp. 41-72.
4. S. Yang, S. Luo, F. Liu and H. Tsai, 2006, "Optimization of Unstalled Pitching and Plunging Motion of an Airfoil", 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, pp. 9-12.
5. Y. Lian, M. OL and W. Shyy, 2008, "Comparative Study of Pitch-Plunge Airfoil Aerodynamics at Transitional Reynolds Number", 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, pp. 7-10.

6. M. Moriche, O. Flores and M. Garca-Villalba, 2015, "Generation of Thrust and Lift with Airfoils in Plunging and Pitching Motion", Journal of Physics, Conference Series Vol. 574, p. 012163.
7. Y. Baik, J. M. Rausch and L. P. Bernal, 2009, “Experimental Investigation of Pitching and Plunging Airfoils at Reynolds Number between 1×10^4 and 6×10^4”, AIAA 2009-4030, 39th AIAA Fluid Dynamics Conference, pp. 22-25, June 2009, San Antonio, Texas, USA.
8. M. V. Ol, L. Bernal, C. Kang and W. Shyy, 2009, "Shallow and Deep Dynamic Stall for Flapping Low Reynolds Number Airfoils", Experimental Fluids, Vol. 46, pp. 883-901.
9. C. Kang, Y. Baik, L. Bernal, M. V. Ol, and W. Shyy, 2009, "Fluid Dynamics of Pitching and Plunging Airfoils of Reynolds Number between 1×10^4 and 6×10^4", AIAA 2009-536, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, pp. 5-8.
10. C. Kang, H. Aono, P. Trizila, Y. Baik, J. M. Rausch L. Bernal, M. V. Ol and W. Shyy, 2009, "Modeling of Pitching and Plunging Airfoils at Reynolds Number between 1×10^4 and 6×10^4", AIAA 2009-4100, 27th AIAA Applied Aerodynamics Conference, pp. 22-25.
11. CFX, 2017, "Ansys CFX", version 18.2.
12. S. Y. Cho, Y. B. Jung and K. P. Kyun, 2018, "Design Technology of 2-Stages 100 kW Class Radial Turbines for Organic Rankine Cycle", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 11-22. (DOI:10.9726/kspse.2018.22.3.011)