

부력엔진 독립시험 모듈 해양공학수조 시험

Buoyancy Engine Independent Test Module Test in the Ocean Engineering Basin

이종무¹, 김형우^{2*}, 정태환³

Chong-Moo Lee¹, Hyung-Woo Kim^{2*}, Tae-Hwan Joung³

〈Abstract〉

The Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), which is developing the core technology for the buoyancy engine of underwater gliders, has developed a test module that can vertically ascend and descend with a buoyancy engine to verify the performance of the developed buoyancy engine. The independent test module was tested in a 15 metre deep pit in the Ocean Engineering Basin to verify its ability to ascend and descend. In order to test at a shallower depth than the real sea, it was necessary to know the negative buoyancy value during descent and the time at which the buoyancy engine would be activated. To do this, we solved the equation of motion in the vertical direction to obtain these values and applied them to the tank test. To validate the usefulness of solving the equation, we also compared the depth of descent over time measured in the test with the results calculated from the solution.

Keywords : Buoyancy Engine, Water Tank Test, Independent Test Module, Equation of Motion Solution, Underwater Free Fall Body

1 선박해양플랜트연구소 해양공공디지털연구본부, 책임연구원 1 Principal Researcher, Ocean and Maritime Digital Technology Research Division, KRISO
E-mail: jmlee@kriso.re.kr
2* 선박해양플랜트연구소 해양공공디지털연구본부, 책임연구원 2* Principal Researcher, Ocean and Maritime Digital Technology Research Division, KRISO
E-mail: hyungwoo4601@kriso.re.kr
3 선박해양플랜트연구소 국제해사기술센터, 책임연구원 3 Principal Researcher, International Maritime Research Center, KRISO
E-mail: thjoung@kriso.re.kr

1. 서론

선박해양플랜트연구소에서는 해양수산부 지원과 제로 수중글라이더용 부력엔진의 핵심기술을 개발하고 있다. 사업의 주관기관인 경북대에서 주로 사용하는 SLOCUM 글라이더에 탑재된 부력엔진을 참고하여 부력엔진을 개발하였다. 개발한 부력엔진의 작동성을 검증하기 위해 육상에서 반복 시험이 가능한 부력엔진 수압시험 장치를 개발하여 실제 부력엔진이 글라이더에 탑재되어 운용되는 환경과 유사하게 부력엔진에 가압과 감압을 반복하여 부력엔진의 반복 작동시험을 수행하여 그 내구성을 검증하였다. 이렇게 개발된 부력엔진을 수중글라이더와 유사하게 내압용기에 배터리와 함께 제어장치를 탑재하여 수중에서 수직으로 상승과 하강을 할 수 있는 부력엔진 독립시험 모듈을 개발하였다.

개발된 독립시험모듈은 부력엔진을 제어하는 제어부와 배터리 전원 시스템, 압력센서, 수중음향 고도계의 센서들과 수면에서 근거리 통신을 위한 WIFI통신, 원거리 통신을 위한 LTE통신 체계를 가지고 있다. 먼저 부력엔진 가동범위의 부력으로 상승과 하강을 할 수 있도록 부력재를 달아 양성 부력에서 수면에 통신용 안테나들을 수면 밖에 드러낼 수 있고 음성부력으로 수중으로 하강할 수 있도록 전체적인 발라스트를 하였다. 실제 바다에서는 1,000미터까지 잠수할 수 있으나 독립시험모듈의 기능을 시험하기 위해 연구소의 해양공학수조 피트를 이용해 시험하기로 하였다. 해양공학수조 피트는 수면에서 15미터 깊이를 갖는다.

이러한 시험에서 독립시험모듈은 미리 정한 음성부력으로 하강하면서 종속도에 이르게 되고 이 속도로 하강하다가 바닥에 충돌하기 전에 양성부력으로 상승할 수 있어야 했다. 부력엔진은 마이크로 엑시얼피스톤펌프(axial piston pump)로 내장된 리저버(reservoir)에서 수중에 노출된 블래더(bladder)

로 오일을 이동시킨다. 충분한 부력을 얻기 위해 음성부력 상태에서 양성부력 상태로 블래더를 부풀리는 데는 수백초의 시간이 걸리므로 시험 전에 수직 하강과 상승을 하는 독립시험 모듈의 운동방정식을 이용해 사전 모의시험을 수행하여 하강 시작 후 몇 초 후에 부력엔진을 작동시키면 바닥에 충돌 없이 상승할 수 있는지를 검토해야 했다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장은 부력엔진 독립시험모듈 개발에 대한 내용을 다루었으며, 3장에서는 시험에 앞서 부력엔진 독립시험모듈에 대한 수치해석 및 유체에 의한 부가질량 계수 및 저항계수 산출을 위한 유체역학 해석을 다루었다. 4장에서는 해양공학수조에서 진행된 성능시험 및 성능시험 결과에 따른 고찰을 다루었다. 5장에서는 본 연구에서 개발된 부력엔진 독립시험모듈에 대한 결론을 다루고 있다.

2. 부력엔진 독립시험모듈

독립시험모듈은 부력엔진의 성능을 시험하기 위

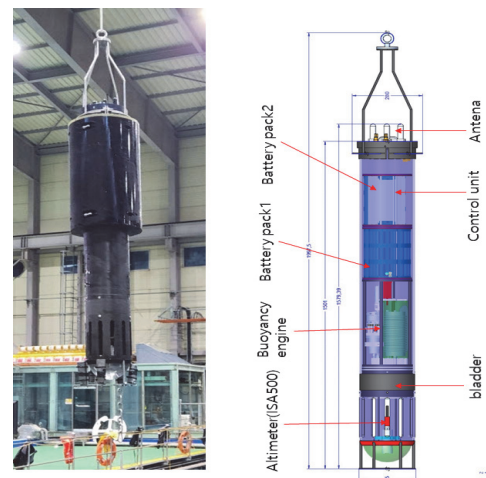


Fig. 1 Sub-system arrangement of the independent test module

한 시스템으로 일반적인 배치는 수중글라이더와 유사하게 되어 있으며 SLOCUM 글라이더(Teledyne Webb Research, 2017)와 동일한 내경을 갖는 원통형 선체에 부력엔진, 배터리팩, 제어부와 통신부를 배치하였다. 수중글라이더와 다른 점은 이러한 원통이 수직으로 운동한다는 것이고 부족한 부력은 원통 상부에 부력재를 붙여 발라스트를 한 것이다.

부력엔진을 제외한 주요장비들은 압력센서, 수중 음향 고도계, Wifi 모뎀 및 LTE 모뎀이 있으며 고도계는 별개의 시스템으로 아래부분의 침수구역에 배치되고 폴리비닐의 반구형 덮개가 설치되어 있다.

3. 수치시뮬레이션

3.1 운동방정식

독립시험모듈은 부력엔진에 의한 음성부력으로 수직으로 하강하고 양성부력으로 상승한다. 음성부력을 갖는 수중 물체의 자유낙하 운동방정식을 세워 이를 해석하면 독립시험모듈의 하강속도 변화와 심도변화를 알 수 있을 것이다.

Fig. 2는 독립시험모듈이 수중으로 하강하는 데 작용하는 힘들과 가속도의 관계를 도식한 개념도

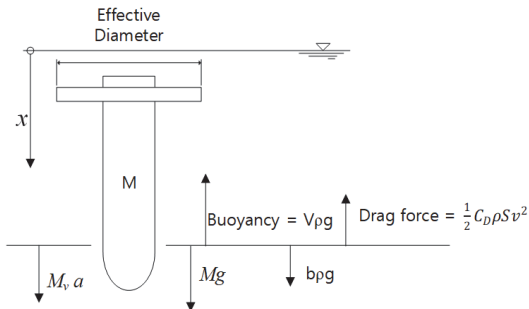


Fig. 2 Motion equation description

이다. 뉴턴의 제2 법칙에 따라 작용하는 힘과 이에 따라 생성되는 질량과 가속도의 곱으로 표현할 수 있다. 독립시험모듈에 작용하는 힘은 중력과 부력 및 저항력이 있으며 이에 의한 가속도는 자체질량과 부가질량을 더한 것에 작용하는 가속도가 될 것이다. 여기서 우리는 독립시험모듈의 발라스트를 통해 중력과 전체부력을 상쇄시켰고 오직 부력엔진에 의한 부력인 $b\rho g$ 의 힘만이 독립시험모듈을 하강시킨다고 할 수 있다. 이 부력에서 b 는 부력엔진에 의한 부피이다. 이 값이 하강력을 제공하고 이에 반대 방향으로 작용하는 힘은 독립시험모듈 동체에 의한 저항력으로 $C_D \rho S v |v| / 2$ 로 표현할 수 있다. 이러한 관계를 식으로 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다(Fossen, 2002).

$$F = M_v a \quad , M_v = M + M_a, M_a : \text{부가질량}$$

외력 항은 앞선 설명에 따라 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F = Mg - V\rho g + b\rho g - \frac{C_D}{2} \rho S v |v| \quad (1)$$

여기서 자중에 의한 힘 Mg 는 발라스트에 의해 부력 $V\rho g$ 와 상쇄되고 남는 항들을 정리하면 다음과 같은 속도에 대한 1차 미분 방정식으로 표현할 수 있다.

$$M_v \frac{dv}{dt} = b\rho g - \frac{C_D}{2} \rho S v |v| \quad (2)$$

이 방정식을 풀기 위해 양변을 M_v 로 나누어 주면 다음과 같다.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{C_D \rho S}{2M_v} \left(\frac{2bg}{C_D S} - v^2 \right) \quad (3)$$

여기서, $k^2 = \frac{2bg}{C_D S} \cdot q = \frac{C_D \rho S}{2M_v}$ 라 하면, 식(3)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dv}{dt} = q(k^2 - v^2) \quad (4)$$

식(4)의 해를 구하기 위해 다음과 같이 적분을 하면, 식(5)같이 표현된다.

$$\int \frac{dv}{(k^2 - v^2)} = \int q dt \quad (5)$$

식(5)의 해는 구하기 위해 좌측항에 부분분수를 적용하면, 식(6)과 같은 속도 v 에 대한 1차 분수 식으로 만들 수 있다.

$$\frac{1}{(k^2 - v^2)} = -\frac{1}{2k} \left(\frac{1}{(v-k)} - \frac{1}{(v+k)} \right)$$

$$\frac{1}{2k} \int \left(\frac{1}{(v-k)} - \frac{1}{(v+k)} \right) dv = - \int q dt \quad (6)$$

식(6)에 대한 해는 다음과 같다.

$$\frac{(v-k)}{(v+k)} = C e^{-2kqt}, C = e^{C_1} \quad (7)$$

식(7)을 속도 v 에 대해 정리하면, 식(8)과 같이 해를 구할 수 있다.

$$v = k \frac{(1 + C e^{-2kqt})}{(1 - C e^{-2kqt})} \quad (8)$$

식(8)에서 시작 조건인 시간이 0일 때 속도는 0이므로 적분상수는 -1임을 알 수 있다. 따라서 우리가 구하는 물체의 속도에 관한 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v = k \frac{(1 - e^{-2kqt})}{(1 + e^{-2kqt})} \quad (9)$$

앞서 식(9)에서 종속도를 구할 수 있는데 가속도가 0이 되는 순간이 종속도에 다다른 것이고 식(9)에서 시간이 무한히 갈 때 종속도에 이르게 되므로, 종속도를 v_t 라 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_t = k = \sqrt{\frac{2bg}{C_D S}} \quad (10)$$

식(9)의 시간영역에서의 해를 구하기 위해, 부가질량계수(M_a)와 저항계수(C_D)를 추정하여야 한다. 부가질량 계수 및 저항계수의 추정은 3.2절에서 다루고 있다.

3.2 부가질량 계수와 저항계수

물수체의 부가질량에 대한 연구에 따르면 세장비가 5인 스페로이드(spheroid)의 종방향 부가질량 계수는 약 0.06이므로(L.Sahin, 1993) 전반적인 형상과 부가물을 고려하여 독립시험모듈의 부가질량 계수를 0.1로 하여 가정하였다.

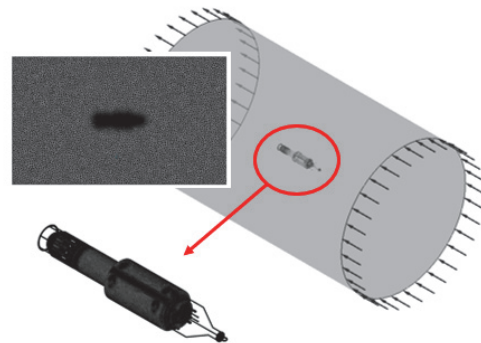


Fig. 3 Node/element distribution and boundary condition for the CFD analysis

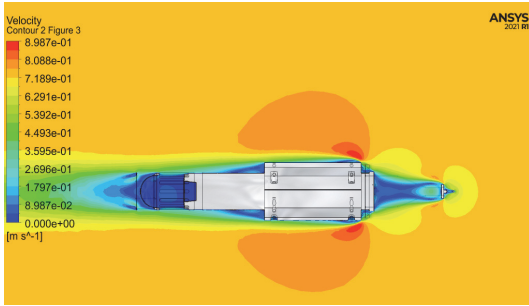


Fig. 4 CFD analysis result (1) - upward velocity distribution

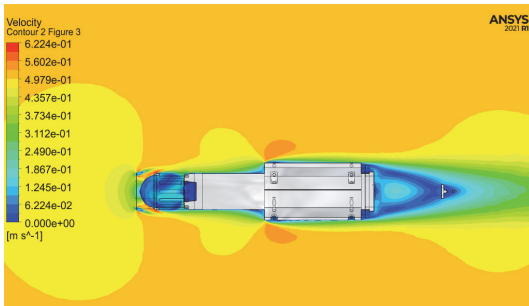


Fig. 5 CFD analysis result (2) - downward velocity distribution

Table 1. The result of CFD analysis

vel.(%)	저항(N) *element no.			C_D
	1256*	1654*	1934*	
0.25	1.452	1.455	1.46	0.485598
0.5	5.527	5.637	5.827	0.484517
0.75	13.07	13.12	13.17	0.486707
1	23.25	23.35	23.45	0.487469
				0.486073
-0.25	-1.472	-1.476	-1.48	-0.49225
-0.5	-5.738	-5.828	-5.928	-0.49292
-0.75	-13.15	-13.25	-13.35	-0.49336
-1	-23.52	-23.69	-23.72	-0.49308
				-0.4929

상승과 하강 시의 저항계수는 유동해석을 통해 구하였으며 ANSYS CFX를 사용하였다(ANSYS, Inc., 2021).

CFD 해석을 위하여 해석영역에 대해 Tetra/Prism 격자를 생성하였고, 격자수는 약 695만 node, 1934만 element의 격자가 사용되었으며, 수렴도가 충분함을 확인하였다. 난류모델은 해당 속도에 적당한 전단응력 운송모델(Shear Stress Transport Model) 이 적용되었다.

상승과 하강 방향에 대해서 0.25%에서 1.0% 까지 4개의 속도에 대한 저항력을 구하였다.

Table 1은 유동해석 결과를 표시한 것이다. 저항력으로부터 진행방향 투영면적에 대한 저항계수 C_D 를 구하고 그 평균값을 사용하였다(Robert L. Street, et al., 1996).

4. 성능시험 및 고찰

4.1 수치 모의시험

앞서 시험목적에서 설명했듯이 독립시험모듈의 전체 시스템이 제대로 작동하는 지를 검증하기 위해 해양공학수조의 피트(pit)에서 시험을 수행하였다. 성능시험 전에 독립시험모듈의 제어부가 부력엔진 작동 시점을 어떻게 설정해야 바닥에 충돌 없이 상승할 수 있는가를 미리 알아보기 위해 3장에서 계산된 부력엔진의 해석해를 적용하여 수치모의시험을 수행하였다.

부력엔진은 작동시간이 길어서 바로 부력이 발생하지 못한다. 따라서 미리 작동시켜야 바람직한 시점에서 상승을 할 수 있다.

식 (9)를 이용하여 독립시험모듈의 하강력을 생

성하는 b 값 즉 부력엔진에 의한 부력을 변동시켜 속도 변화를 알 수 있으며 속도의 변화를 시간에 대해 적분하면 이동 거리 즉 하강 깊이를 계산할 수 있다. 앞서 구한 부가질량 계수, 저항계수, 투영면적 및 전체 중량 값을 이용하면 독립시험모듈의 시간에 대한 운동 궤적을 알 수 있다.

초기 음성부력 값인 b_0 와 부력엔진 가동 시작 시점인 t_i 를 조정하여 해양공학수조 피트 깊이인 15미터보다 얇은 깊이에서 독립시험모듈이 떠오르도록 하는 계산을 반복하였다. 투영면적은 부력재의 외경에 대한 것으로 하였고 음성부력 값은 0.2kgf로, 부력엔진 시작 시점은 30초로 하였을 때 다음의 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다. 속도의 그래프를 보면 종속도에 이르기 전에 부력엔진이 작동하기 시작하여 하강 속도가 줄어들고 음수 값에 이르러 상승하기 시작함을 알 수 있다.

Fig. 6에서 식 (9)의 결과는 상승이나 하강 중 한 가지 상황만을 표현하기 때문에 상승하는 경우는 앞서 구한 저항계수 값을 달리 적용하였고 외력에 해당하는 부력 변화 값도 양수로 적용하여 결과를 반전시켜 하강 부분의 그래프와 이어 붙인 결과이다.

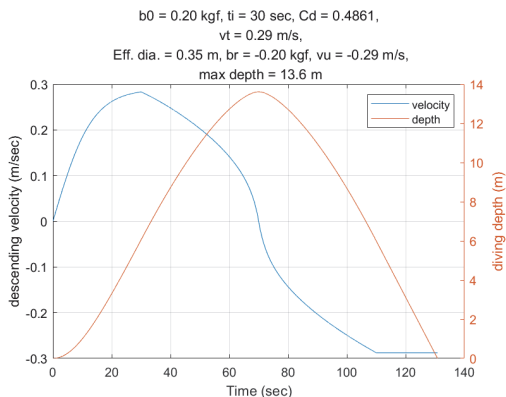


Fig. 6 An estimated motion of independent test module

4.2 해양공학수조 성능시험

독립시험모듈을 해양공학수조 피트에서 성능시험을 수행하였다. 수조의 깊이는 설정에 따라 변하지만 시험 당시 피트의 측정 깊이는 15.03m였다. 피트의 직경은 5m이고 해양공학수조의 전차를 피트 중앙에 위치 시키고 하강과 상승 시험을 하였다.

독립시험모듈은 Wifi모뎀을 통해 하강 부력 설정값과 부력엔진 시작 시점을 내려받아 작동을 시작한다. 다만 부력엔진의 음성부력 설정은 양성부력 상태에서 부력엔진 블레이드에 차 있던 기름이 내압선체의 음압에 의해 리저버로 이동하는데 밸브의 느린 작동시간으로 인해 정확한 설정값으로 설정하기가 어려웠으며, 독립시험모듈이 물속에 잠기면 통신이 끊어진다. Fig. 7은 해양공학수조 시험의 개념도이다.

독립시험모듈에 설치된 압력센서는 아주 정밀한 것이 아니고 내압시험을 대비하여 전체 측정 범위

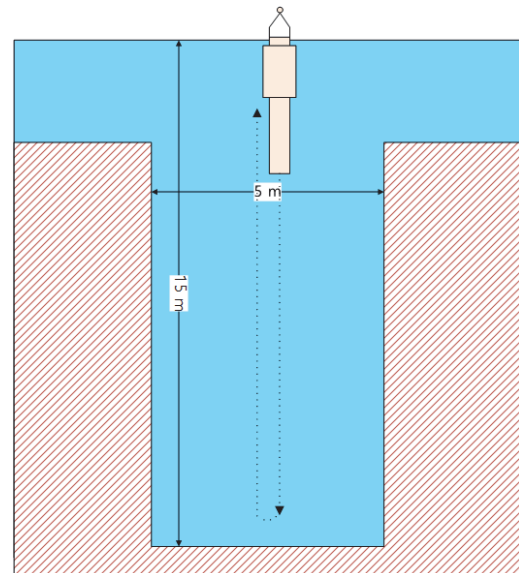


Fig. 7 Concept of test in the Ocean Engineering Basin

가 160bar인 것을 사용하였는데 시험에서는 겨우 1/100 수준의 압력만이 측정되어 계측값의 정확도가 떨어지는 것을 확인하였다.

Fig. 8은 독립시험모듈이 피트에서 상승하여 수면에 떠오른 모습을 나타내고 있다. 독립시험모듈 내부 제어장치는 모든 센서 값을 저장하게 되어 있었는데 프로그램 오류로 인해 고도계의 값은 저장하지 못했다.

Fig. 9는 독립시험모듈에 저장된 부력엔진 리저버(reservoir)의 용량을 나타내는 선형 센서값과 압력계의 측정값을 같이 도시한 것이다. 이 값들은 여러 번의 반복 시험 중 일부를 나타낸 것으로 직선으로 나타나는 선이 부력엔진의 작동(선형센서)을 나타낸다. 오른쪽 축에 블래더로 유입된 유량을 cc(ml) 단위로 표시하였고, 그래프 왼쪽의 초기값이 300cc에서 음성부력을 갖는 음수 값으로 변화하는 시점을 나타낸 것이다. 50초가 지난 시점에서 부력엔진의 펌프가 작동하여 리저버의 기름을 블래더로 밀어내어 다시 양성부력을 갖게



Fig. 8 A test scene of independent test module in the Ocean Engineering Basin

되어 상승함을 알 수 있다. 처음 수면에 떠있는 상태에서 부력엔진 밸브를 열면 블래더의 기름이 독립시험모듈 내부의 음압으로 인해 리저버로 밀려 들어가며 음성부력이 발생하여 가라앉으면서 외부 압력이 높아져 유입되는 기름의 속도가 높아 지므로 음성부력이 되어가는 과정의 그래프는 직선이 아니라 곡선으로 나타나게 된다.

계측값과 모의시험 값을 비교하기 위해 부력엔진의 작동을 Fig. 9의 선형센서값의 시점(중성부력 점 추정과 실제적인 음성부력 값)과 맞추어서 부력값 변화를 적용하여 계산한 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 예측 모의시험과는 달리 정확한 중성

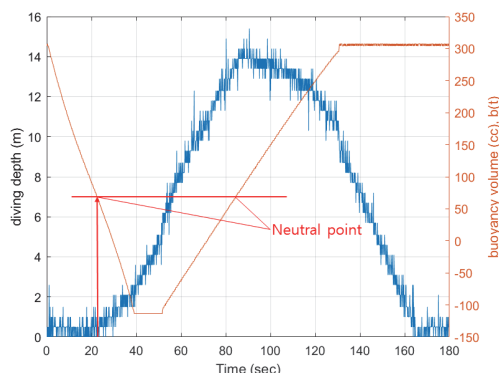


Fig. 9 A measured data graph of independent test module

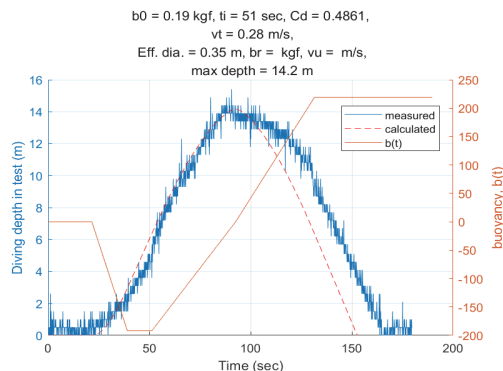


Fig. 10 A comparison of the measured and estimated data

부력 점을 찾기가 어려워 수면에서 가라앉기 시작하는 시점을 잡아 그 점을 중성부력 점이라 가정하고 계산하였다. 중성부력 위치는 하강하는 시점의 부력엔진 선형 센서값으로부터 추정하여 b의 변화를 Fig. 9의 부력부피를 나타낸 직선이라 가정하고 그 변화량을 일치시켜 시험 모듈의 속도식 (9)에 적용하여 그 변위를 계산하였다. 앞서 언급한 바와 같이 압력센서 값의 오차가 커서 정밀하게 반영되지 못하였다.

비교 결과를 보면 하강하는 부분은 어느 정도 일치하지만 상승하는 부분의 차이가 상대적으로 크게 나타나는데 이는 실제 시험에서는 독립시험 모듈이 수조 바닥에 접촉 후 양성부력이 될 때까지 머물다가 상승하기 시작하여 모의시험 결과와 차이가 나는 것으로 판단된다. 이는 압력센서의 위치가 시험모듈 하단에서 1.5미터 높이의 덮개 부분에 있어 13.5미터 이상의 깊은 수치적으로도 실제로도 바닥에 이미 닿은 위치이기 때문이다. 향후 수행할 예정인 심해공학수조의 50미터 피트 시험에서는 이와 동일한 조건으로 시험을 하여 비교해 볼 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 논문에서는 부력엔진 독립시험 모듈 개발에 관한 내용을 다루었다. 수중글라이더에 적용 가능한 부력엔진 모듈을 개발하였으며, 이를 검증하기 위해 부력엔진 독립시험 모듈을 개발하였다. 개발된 부력엔진 독립시험 모듈은 선박해양플랜트연구소의 해양공학수조에서 성능을 검증하였다. 또한 성능검증에 앞서 유체역학 해석을 통해 부가질량 계수 및 저항계수에 대한 값을 추정하였으며, 독립시험 모듈에 대한 운동방정식으로부터 해를 구하여 수조 성능시험 결과와 비교를 하였다. 해석

결과와 성능시험의 결과가 조금 차이가 있는 것을 확인하였으며, 이는 해양공학수조의 피트의 짧은 길이로 인한 것으로 추정되었다. 하지만 하강구간에서는 성능시험결과와 해석결과가 일치하는 것을 확인하였다.

하강구간에 대한 검증을 보강하기 위해 좀 더 깊은 수조시험(선박해양플랜트연구소 심해공학수조)에서 성능시험을 준비 중에 있으며, 이를 바탕으로 실해역 성능검증 시험을 수행할 예정이다.

사 사

본 논문은 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: 20200482, 사업명: 부력엔진 원천기술 개발(PMS 5630)).

참고문헌

- [1] Iskender Sahin, Jan W. Crane and Kennard P. Watson: Added mass coefficients for submerged bodies by a low-order panel method, pp. 452-456, (1993).
- [2] Thor I. Fossen : Marine Control Systems, Trondheim, Norway, pp.88-114,(2002).
- [3] Teledyne Webb Research : Slocum G3 Glider Maintenance Manual, (2017).
- [4] ANSYS, Inc., ANSYS-CFX Users Guide, pp.190-191, (2021).
- [5] Robert L. Street, Gary Z. Watters and John K. Vennard. : Elementary Fluid Mechanics (7th Edition), pp.453-491, (1996).

(접수: 2023.10.24. 수정: 2023.11.20. 게재확정: 2023.11.30.)