

외부 유체의 영향을 고려한 무인잠수정의 추진기 모델

Thruster Modeling for Underwater Vehicle with Ambient Flow Velocity and its Incoming Angle

김진현¹ · 정완균²

Jinhyun Kim¹ · Wan Kyun Chung²

Abstract The thruster is the crucial factor of an underwater vehicle system, because it is the lowest layer in the control loop of the system. In this paper, we propose an accurate and practical thrust modeling for underwater vehicles which considers the effects of ambient flow velocity and angle. In this model, the axial flow velocity of the thruster, which is non-measurable, is represented by ambient flow velocity and propeller shaft velocity. Hence, contrary to previous models, the proposed model is practical since it uses only measurable states. Next, the whole thrust map is divided into three states according to the state of ambient flow and propeller shaft velocity, and one of the borders of the states is defined as *Critical Advance Ratio (CAR)*. This classification explains the physical phenomenon of conventional experimental thrust maps. In addition, the effect of the incoming angle of ambient flow is analyzed, and *Critical Incoming Angle (CIA)* is also defined to describe the thrust force states. The proposed model is evaluated by comparing experimental data with numerical model simulation data, and it accurately covers overall flow conditions within 2N force error. The comparison results show that the new model's matching performance is significantly better than conventional models'.

Keywords: Thrusters, Underwater vehicle, Thrust modeling, Advance ratio, Incoming angle

1. 서론

무인 잠수정 시스템에서 추진기에 대한 모델링과 제어는 가장 낮은 단계의 제어를 구성하는 필수 요소이기 때문에 매우 중요하다. 일반적으로 추진력은 추진기 프로펠러 사이의 압력 구배에 의해서 결정되고, 각각의 압력은 추진기로 입사하는 유체의 속도와 빠져나가는 유체의 속도로 표현될 수 있다. 즉 유체의 속도가 프로펠러를 거치면서 얼마나 변화했는지에 따라서 추진력이 결정된다. 그러나 기존의 연구들에서 제안된 추진기 모델들은 외부 유체의 속도에 대한 영향을 잘 반영하지 못하고 있기 때문에 다소 부족한 면이 있다^[3-8].

이전의 연구들에는 크게 세 가지의 문제점이 있다. 첫째, 무인잠수정의 이동속도 또는 외부 유체 속도에 대한 고려가 미흡하다. 일반적으로 무인잠수정이 구동

하는 환경에서 프로펠러로 유입되는 유체의 속도는 끊임없이 변하게 되고, 실험결과들에 비추어보면 이 경우 추진력은 최대 30%까지 변하는 결과를 보여주기 때문에 외부 유체 속도에 대한 고려는 정확하게 반영하여야 한다. 또 [11]에 기술된 ODIN과 같은 형태의 무인잠수정의 경우에는 프로펠러의 방향이 진행방향과 평행하지 않기 때문에 외부 유체 속도뿐만 아니라 각도에 대한 영향도 고려해야 한다. 둘째, 외부 유체 속도를 고려한 기존의 연구들에 나타난 추진기 모델의 경우 대부분 실험식에 의존하고 있다. 따라서 물리적인 현상보다는 실험 결과에 근사한 관계식을 유도하는 것에 초점을 맞추고 있기 때문에, 외부 유체의 속도나 방향에 대한 영향에 대한 분석이 미흡하여, 실제 적용 시 많은 오차를 포함하고 있다. 셋째, 대부분의 추진기 모델들은 추진기 내부의 축 방향 유체 속도를 바탕으로 정의되어 있다. 하지만 축 방향 유체 속도의 경우 정밀한 실험 장치 없이는 측정이 불가능하기 때문에 실제 실험에서는 가정이나 예측기 설계를 통해서 추진기 모델을 구성하게 되

¹ 서울산업대학교 기계공학과 조교수
(E-mail : jinhyun@snut.ac.kr)

² 포항공과대학교 기계공학과 교수
(E-mail : wkchung@postech.ac.kr)

고 이로 인해 설계 자체의 복잡성이 증가하고 실제 실험 결과를 정확히 반영하지 못하는 문제점을 가진다.

언급한 문제점들을 해결하기 위해서 본 논문에서는 외부 유체의 속도와 각도에 대한 영향을 고려한 정확하고 실용적인 추진기 모델을 제안한다. 제안된 모델에서 추진기의 축 방향 유체 속도는 실제 실험에서 측정이 불가능하기 때문에 측정 가능한 외부 유체 속도와 프로펠러의 회전 속도로 재구성하여 표현하였다. 따라서 이전 모델과는 달리 제안된 모델은 내부 상태에 대한 복잡한 가정이나 추가적인 예측기 설계 등이 필요하지 않고, 따라서 실용적이라 할 수 있다. 다음으로 전체 추진력의 구성도를 외부 유체와 프로펠러의 회전 속도의 상태에 따라 세 부분으로 구분하였고, 그 경계 중의 하나를 임계 전위 비율(Critical Advance Ratio)로 정의하였다. 이러한 구분은 기존의 실험 결과에 물리적인 설명이 가능하게 한다. 이와 더불어 외부 유체의 입사각에 따른 영향도 고려하였고, 입사각에 따라서 역시 세 부분으로 전체 추진력 구성도를 구분하여, 그 경계들을 임계 입사 각도(Critical Incoming Angle)로 정의하였다.

제안된 모델은 모의실험과 실험 결과를 비교함으로써 정확성을 검증하였고, 실제 실험결과와 약 0.5% 정도의 오차를 나타내고 있다. 또한 참고 문헌에 기초한 모델과 비교 실험을 수행하여 우수성을 검증하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 기본적인 추진기 모델과 무차원화를 통한 해석을 수행하고, 3장에서는 외부 유체의 속도와 입사 각도에 따른 영향을 살펴본다. 4장에서는 실험 결과를 보여주고, 5장에서는 기초 추진력 제어기와 성능에 대해서 검증하였다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

2. 추진기 모델

2.1 축 방향 유체 속도 정의에 근거한 추진기 모델

프로펠러는 A_p 의 면적을 가지는 압력의 불연속면을 유발하는 원판과 그 면에서의 축 방향 유체 속도(u_p)로 표현된다. 프로펠러를 통과하는 유체의 압력은 p_∞ 에서 그 원판의 직전까지 p_a 로 떨어지고, 원판을 지난 직후 p_b 로 증가하게 되고 다시 서서히 p_∞ 로 복귀하게 된다. 프로펠러가 압력 변화에 의해서 에너지를 생성하는 동안 변형이 없다면 그림 1과 같이

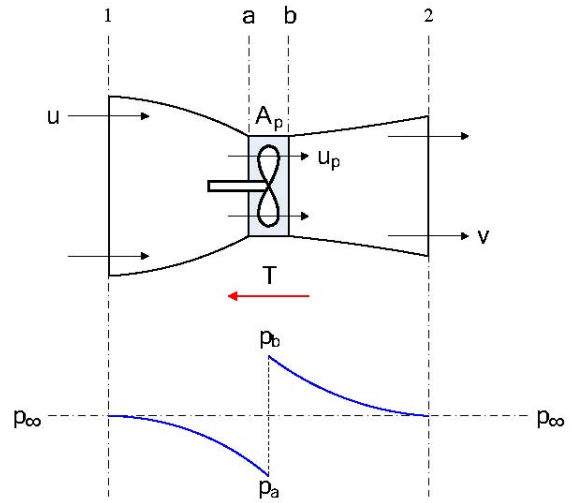


그림 1. 프로펠러 주위의 압력 변화

프로펠러가 고정된 축에 유체의 속도의 방향과 반대되는 방향으로 추진력 T 가 발생하게 된다^[2].

제어 체적을 이용한 수평 방향 모멘텀 관계를 위 그림의 영역 1, 2사이에 적용하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$T = \dot{m}(v - u). \quad (1)$$

비슷하게 제어 체적을 원판의 바로 직전과 직후 영역으로 하면 다음의 식을 얻는다.

$$T = A_p(p_b - p_a). \quad (2)$$

두 식을 동시에 표현하면 프로펠러의 추진력은 다음과 같이 표현된다.

$$T = A_p(p_b - p_a) = \dot{m}(v - u). \quad (3)$$

이상 유체라고 가정하면 물의 밀도, ρ ,에 대해서, 비압축 Bernoulli 관계식에 의해서 다음의 관계식이 성립된다.

$$\begin{aligned} \text{From 1 to a: } & p_\infty + \frac{1}{2}\rho u^2 = p_a + \frac{1}{2}\rho u_p^2, \\ \text{From b to 2: } & p_\infty + \frac{1}{2}\rho v^2 = p_b + \frac{1}{2}\rho u_p^2. \end{aligned} \quad (4)$$

프로펠러 단면을 통과하는 단위 시간당 질량은 $\dot{m} = \rho A_p u_p$ 이고, 이를 식(3-4)를 이용해서 $p_b - p_a$ 에 대한 관계식을 유도하면 식(5-6)과 같이 얻을 수 있다.

$$p_b - p_a = \frac{1}{2} \rho (v^2 - u^2) \quad (5)$$

$$u_p = \frac{1}{2} (v + u) \Rightarrow v = 2u_p - u \quad (6)$$

원판에 의해서 생성되는 추진력은 식(3)과 (6)에 의해서 u_p 와 u 를 이용해서 다음과 같이 구해진다.

$$T = 2\rho A_p u_p (u_p - u). \quad (7)$$

이제 축 방향 유체 속도 u_p 를 다음과 같이 정의해 보자.

$$u_p \triangleq k_1 u + k_2 D\Omega \quad (8)$$

여기서 k_1 과 k_2 는 상수 값이고, D 와 Ω 는 각각 프로펠러의 지름과 회전속도를 의미한다. 식(8)과 같이 제안된 축 방향 유체 속도의 관계식에 대한 개략도는 그림 2와 같다.

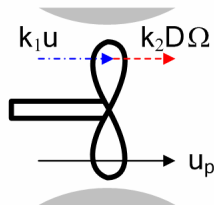


그림 2. 제안된 축 방향 유체 속도 정의 개략도

준 정상상태 유체의 경우 축 방향 유체 속도는 오직 외부에서 유입되는 유체의 속도와 프로펠러의 회전 운동에 의한 속도에 영향을 받는다. 보다 복잡한 외부 유체 속도와 프로펠러의 속도의 조합으로 축 방향 속도의 표현이 가능하지만 제안된 선형 관계식이 물리적인 현상을 잘 만족시키는 것을 이후에 실험을 통해서 보여준다. 이처럼 다소 단순한 정의가 추진력에 대한 많은 장점과 물리적인 의미를 부여한다.

식(8)을 (7)에 대입하면 다음과 같은 식으로 추진기 모델을 제안할 수 있다.

$$T = 2\rho A_p (k_1 u + k_2 D\Omega)(k_1 u + k_2 D\Omega - u), \quad (9)$$

$$= 2\rho A_p (k_1' u^2 + k_2' u D\Omega + k_3' D^2 \Omega^2).$$

식(9)와 같이 제안된 추진기 모델은 다음 장에서 무차원화 해석을 통해 검증할 것이다.

2.2 추진기 모델의 무차원화 해석

식(10)과 같이 표현되는 추진기 모델에 대한 무차원화 관계식은 추진력, 프로펠러 회전 속도와 외부 유체의 속도를 한 번에 표현할 수 있기 때문에 널리 사용되고 있다^[1-3].

$$K_T(J_0) = \frac{T}{\rho D \Omega |\Omega|} \quad (10)$$

여기서 $J_0 = \frac{u}{D\Omega}$ 이며, 전위 비율(advance ratio)을 의미한다. 그림 3은 [1][9] 등의 여러 참고문헌에 나타난 일반적인 무차원화 도표이다. 이전의 연구에서는 무차원화 관계식을 실험에 근거한 기준도표를 이용하거나 전 영역에 걸친 단순 선형 관계식을 사용하였다^[10].

그러나 그림 3에서 보여지듯이 식(11)^[1,9,10]은 추진기 계수 특성을 제대로 반영하지 못하며, 특히 $J_0 < 0$ 인 영역에서는 많은 왜곡이 발생한다. 선형 관계식 보다는 2개의 불연속점을 포함하는 2차 방정식에 가깝다는 것을 알 수 있다. 더군다나 특별한 물리적인 의미를

$$K_T(J_0) = a_1 J_0 + a_2. \quad (11)$$

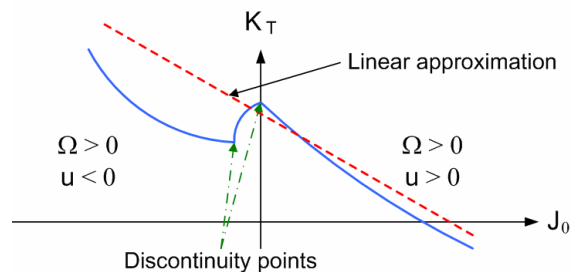


그림 3. 전위 비율에 따른 추진기 무차원화 도표

가지는 것이 아니라 단지 실험 결과에 근거한 가정에 지나지 않는다.

제안된 축 방향 유체 속도 가정은 이러한 문제점에 대한 해법을 제시할 수 있다. 식(9)를 이용한 무차원화는 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{T}{\rho D^4 \Omega^2} = \frac{\pi}{2} \left[k_1' \left(\frac{u}{D\Omega} \right)^2 + k_2' \left(\frac{u}{D\Omega} \right) + k_3' \right]. \quad (12)$$

그러면 2차 추진기 계수 방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$K_T(J_0) = \frac{\pi}{2} [k_1' J_0^2 + k_2' J_0 + k_3']. \quad (13)$$

따라서, 이전에 제안된 다른 모델과 달리 식(8)에 의한 축 방향 유체 속도는 추진기 모델과 무차원화 관계식 간의 적절한 관계를 설명해 준다. 따라서 무차원화 관계식을 물리적인 의미를 포함하여 유도할 수 있다. 또한 식(13)은 2차 방정식의 추진기 계수 특성을 반영한다. 이러한 현상들로부터 식(8)과 같은 축 방향 유체 속도 정의는 타당하다는 것을 알 수 있다. 2차 방정식의 계수는 하드웨어 특성에 따라서 바뀔 수 있다. 그러나 그림 3에서 보여지는 불연속점에 대한 해답은 여전히 의문으로 남아있다. 이 문제는 다음 장에서 해결하기로 한다.

3. 외부 유체 속도를 포함한 추진기 모델

외부에서 추진기로 유입되는 유체의 속도와 방향에 변화가 생기게 되면, 동일한 프로펠러 회전 속도에 대해서 외부 유체가 정지 유체 (Bollard-pull) 상태의 유체 상태에 변화를 주게 되어 추진력은 변하게 된다. 유체 상태는 프로펠러 회전 속도, 외부에서 유입되는 유체의 속도와 각도에 의해서 복잡한 관계에 의해서 결정된다. 이어지는 절에서 각 성분들이 어떻게 영향을 미치는지 자세히 다루도록 한다.

3.1 CAR을 이용한 유체 상태 정의

이 절에서 세가지 유체 상태를 전위 비율과 축 방향 유체 상태에 따라 정의한다. 그 상태들을 구분하기

위해서 임계 전위 비율(Critical Advance Ratio, CAR) J^* 를 정의한다.

세 가지 상태는 다음과 같이 정의된다.

- 등방향 상태 (Equi-directional state)
-

$$J_0 > 0, \quad (14)$$

$$u_p = k_1 u + k_2 D\Omega > 0. \quad (15)$$

- 역방향 상태 (Anti-directional state)
-

$$J^* < J_0 < 0, \quad (16)$$

$$u_p = k_1 u + k_2 D\Omega > 0. \quad (17)$$

- 불특정 방향 상태 (Vague directional state)
-

$$J^* > J_0, \quad (18)$$

$$u_p = k_1 u + k_2 D\Omega < 0. \quad (19)$$

그림 4는 위에서 정의된 세가지 상태를 개략적으로 나타낸다.

등방향 상태: 등방향 상태는 외부에서 유입되는 속도의 방향과 프로펠러 회전에 의해서 발생하는 축 방향 유체 속도의 방향이 일치할 경우에 발생한다. 이 상태에서는 외부 유체의 속도가 증가하면 압력의 차이가 줄어들게 되고, 결국 추진력은 작아지게 된다. streamline은 일반적인 형태로 나타난다. (그림 4(a))

역방향 상태: 역방향 상태는 외부에서 유입되는

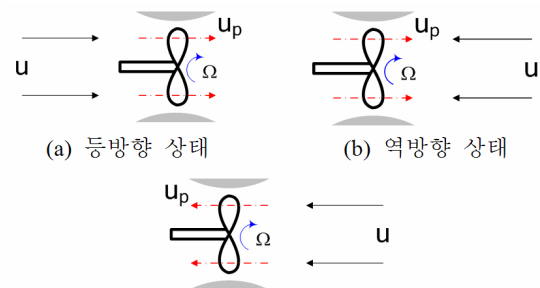


그림 4. 세가지 유체 상태

속도의 방향과 프로펠러 회전에 의해서 발생하는 축 방향 유체 속도의 방향이 반대일 경우 발생한다. 그러나, 축 방향 유체가 외부에서 유입되는 유체를 밀어낼 수 있는 상태이기 때문에 streamline은 sink와 source의 형태로 형성된다. Bernoulli 방정식의 적용도 가능하고 추진기 방정식도 계수의 변화가 있지만 여전히 유효하다. 또한 외부 유체의 속도가 증가함에 따라 압력의 차이가 커지기 때문에 추진력도 증가하게 된다. (그림 4(b))

불특정 방향 상태: 불특정 방향 상태에서는 축 방향 유체에 대해서 정의하기가 어렵다. 축 방향 유체가 외부에서 유입되는 유체를 밀어낼 수 없기 때문에 축 방향 유체의 방향이 명확하지 않다. 이러한 모호한 운동이 유체흐름을 교란시키고 이로 인해 추진력이 감소하게 된다. 이 경우 streamline의 형태를 예측하는 것이 어렵고, 따라서 제안된 추진기 관계식을 적용하는 것이 불가능 하다. 그렇지만 추진기 계수 조정을 통한 실험 결과에서 제안된 추진기 모델을 통해서 비교적 정밀하게 모사가 가능하다는 것을 알 수 있다. (그림 4(c))

이전까지의 연구에서는 역방향 상태와 불특정 방향 상태에 대해서 고려가 이루어지지 않았다. 그러나 위의 상태들은 무인 잠수정이 정지하려고 하거나, 유체의 흐름을 거스르는 방향으로 이동하고자 하는 경우 필연적으로 나타나는 상태이다. CAR은 그림 5에서 나타낸 바와 같이 두 상태 사이를 구분하는 역할을 하고, 추진기의 중요한 특징 중 하나를 의미한다. CAR 지점에서 외부 유체와 프로펠러 회전 운동은 평형을 이루고, 따라서 반대 방향의 운동을 할 경우 전위 비율을 CAR 이상으로 유지하는 것이 그림 6에서와 같이 추진기의 효율을 높이기 위해서 유리하다.

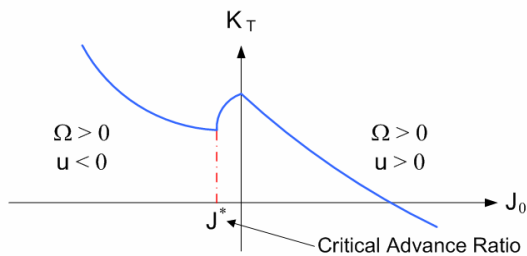


그림 5. 임계 전위 비율

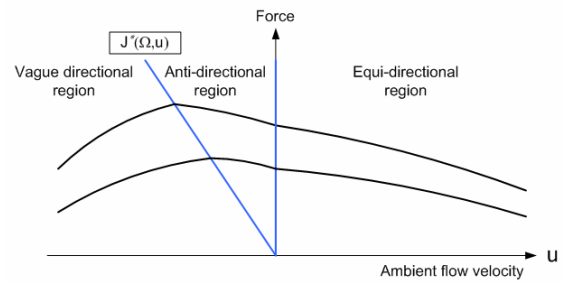


그림 6. 외부 유체 속도에 따른 추진력 함수

3.2 외부 유체 입사 각도에 따른 추진력 변화

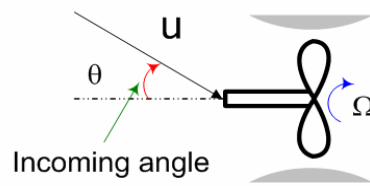


그림 7. 외부 유체 입사 각도

이 절에서는 외부 유체 입사 각도가 추진력에 미치는 영향에 대해서 살펴본다. 그림7은 입사 각도의 정의를 나타낸다. 외부 유체의 진행방향과 추진력의 방향이 일치하지 않는다면 추진력은 입사 각도에 따라서 변하게 된다. 기본적으로 외부 유체 속도에 입사 각도만큼의 코사인(Cosine) 함수를 곱하여 추진기 모델을 얻을 수 있다. 그러나 이 경우 계산된 추진력은 0도와 180도 부근을 제외하고는 실험 결과와 일치하지 않았다. 이것은 외부 유체 입사 각도에 따른 추가적인 해석이 필요하다는 것을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 실험에 근거하여 새로운 관계식을 얻었고 그림 8은 그 결과를 나타낸다.

그림 8에서 전 각도 영역을 이 전 절에서와 같이 세 영역으로 구분할 수 있다. 그리고 세 영역의 경계를 임계 입사 각도(Critical Incoming Angle, CIA)로

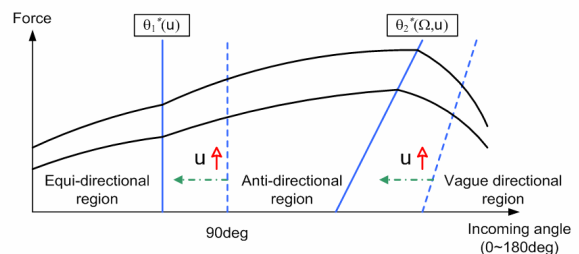


그림 8. 입사 각도에 따른 추진력 함수

다음의 식과 같이 정의한다.

$$\theta_1^*(u) = \frac{\pi}{2} - a_1 u, \quad (20)$$

$$\theta_2^*(\Omega, u) = a_2 u(\Omega - b_2) + \theta_1^* \quad (21)$$

여기서 a_1, a_2, b_2, c_2 는 모두 양의 상수들이고 $\theta_1^*(u)$ 와 $\theta_2^*(\Omega, u)$ 는 각각 첫 번째와 두 번째 CIA이다. CIA 관계식을 설명하기 위한 이론적인 근거는 좀 더 연구가 필요하지만, 실험적인 결과들은 위에서 제안된 수식들과 잘 일치한다. 등방향 유체 영역과 역방향 유체 영역은 첫 번째 CIA에 의해서 구분된다. 첫 번째 CIA는 오직 외부 유체의 속도에 의해서만 영향을 받는다. 두 번째 CIA는 역방향과 불특정 방향 유체 상태를 구분한다. 두 번째 CIA는 외부 유체의 속도뿐만 아니라 외부 유체의 속도에서 영향을 받는다. 식(20-21)에 의하면 외부 유체의 속도가 증가함에 따라 세 영역은 왼쪽으로 이동된다는 것을 알 수 있다.

이제 입사 각도에 의한 추진력 변화에 대한 관계식을 살펴보자.

$$K_T^a = K_T^0 + f_a(J_0, \theta), \quad (22)$$

$$T = K_T^a \rho D^4 \Omega |\Omega|. \quad (23)$$

여기서 $K_T^0 = K_T^T(J_0 = 0)$ 이고,

$$f_a = \begin{cases} f_1, & 0 \leq \theta \leq \theta_1^* \\ f_2, & \theta_1^* \leq \theta \leq \theta_2^* \\ f_3, & \theta_2^* \leq \theta \leq \pi \end{cases} \quad (24)$$

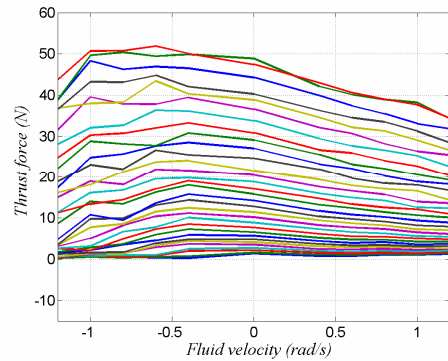
여기서 f_1, f_2, f_3 는 각각 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} f_1 &= (K_T^0 - K_T^+) \left[\sin \left(\frac{\theta - \pi}{\theta_1^*} \right) - 1 \right] \\ f_2 &= K_a J_0 \sin \left(\frac{\theta - \theta_1^*}{\pi - \theta_1^*} \right) \\ f_3 &= \left[K_a J_0 \sin \left(\frac{\theta_2^* - \theta_1^*}{\pi - \theta_1^*} \right) - (K_T^- - K_T^0) \right] \cos \left(\frac{\theta - \theta_2^*}{\pi - \theta_2^*} \right) \\ &+ (K_T^- - K_T^0) \end{aligned}$$

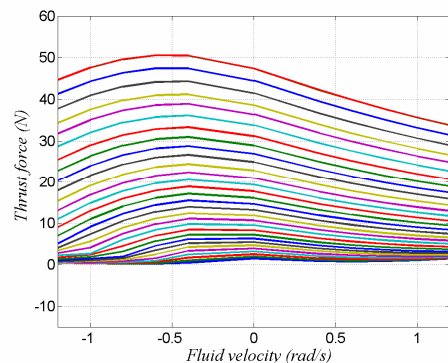
식(24)에서 K_a 는 실험으로부터 구해지는 상수 값이다. 그리고 $K_T^+ = K_T(J_0)$, $K_T^- = K_T(-J_0)$. 식(22)는 0도와 180도에서 식(13)과 일치한다. 따라서 식(22)는 외부 유체의 모든 영향을 포함하는 추진기 모델이다. 즉, 제안된 추진기 모델은 정지 유체상태(Bollard-pull)의 추진력, K_T^0 와 외부 유체의 의해서 추가적으로 발생하는 추진력, $f_a(J_0, \theta)$ 로 표현된다.

4. 실험 결과

제안된 모델을 검증하기 위해 추진기를 0도의 입사 각도와 다양한 외부 유체 속도($\pm 1.2\text{m/s}$, $\pm 1.0\text{m/s}$, $\pm 0.8\text{m/s}$, $\pm 0.6\text{m/s}$, $\pm 0.4\text{m/s}$, 0m/s)를 이용하여 실험하였다. 다음으로 0.4m/s, 0.6m/s, 0.8m/s의 외부 유체 속도에 대해서 추진기의 각도를 5도씩 증가시키면서 0도부터 180도까지 변화시켰다. 편의상 $\Omega > 0$ 인 영역에 대해서만 실험을 수행하였다.



(a) 실험 결과

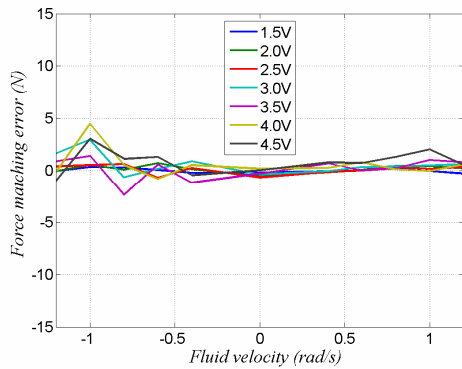


(b) 모의 실험 결과

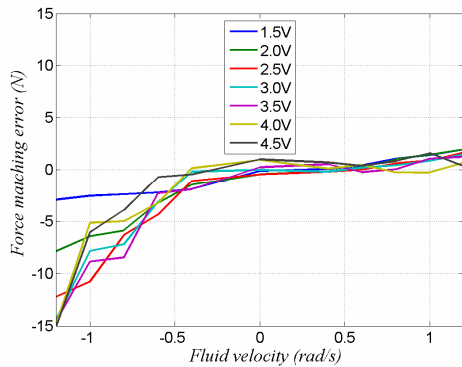
그림 9. 추진기의 비교 실험 결과

그림 9에서 실험에 의한 추진력을 제안된 추진기 모델에 의한 모의 실험 결과와 비교하였다. 몇몇의 벗어난 점을 제외하고는 매우 유사하게 일치하는 것을 알 수 있다. 여기서 벗어난 부분은 실험장치의 특성상 추진기가 충분히 깊은 곳에 위치하지 않았기 때문에 역방향 상태와 불특정 방향 상태에서 streamline이 제대로 형성되지 못했기 때문이다.

제안된 모델의 효율성을 강조하기 위해서 실험결과를 식(11)에서 제안된 모델의 결과와 비교하였다. 비교 결과는 그림 10에 나타냈다. 이 그림을 통해서 제안된 모델의 결과가 이전 모델에 비해서 뛰어나게 좋다는 것을 알 수 있다. 특히 역방향과 불특정 방향 유체 상태에서 매우 큰 차이를 보이고 있다.



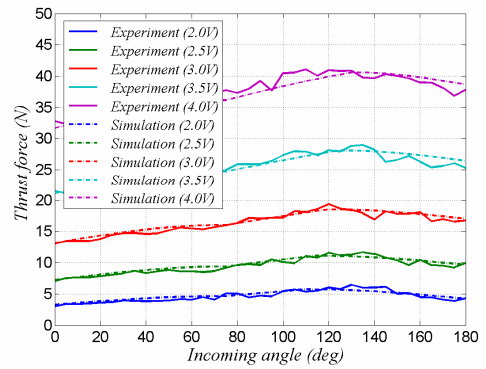
(a) 제안 모델 실험 결과



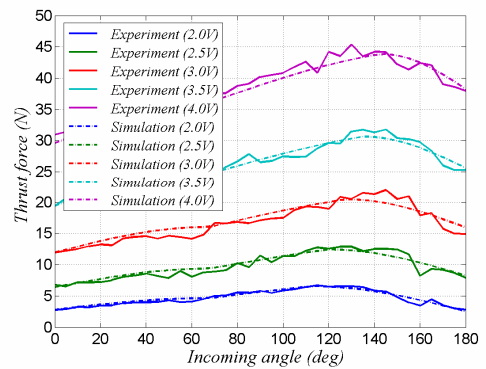
(b) 기존 모델 실험 결과

그림 10. 기존 모델과의 비교 실험

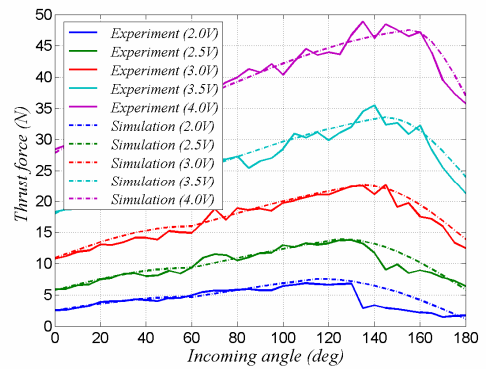
그림 11~12은 입사 각도에 따른 추진력 함수에 대한 실험 결과와 모의 실험 결과를 나타낸다. 매칭 오차는 그림에서 보여지듯이 대부분 $\pm 2\text{N}$ 이내이다. 최대 추진력이 50N이라는 점을 감안하면 매우 좋은 결과이다.



(a) 0.4m/s



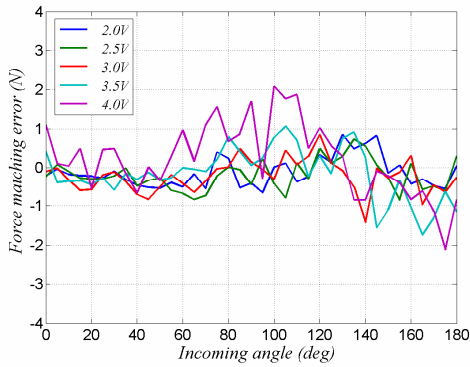
(b) 0.6m/s



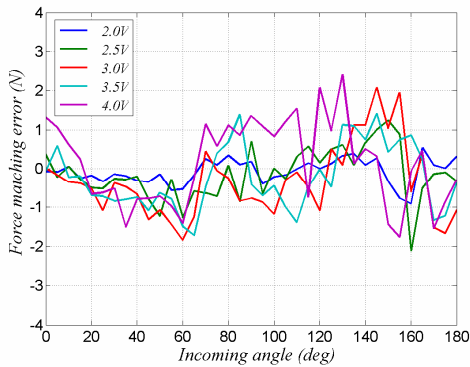
(c) 0.8m/s

그림 11. 입사 각도에 대한 실험과 매칭 결과

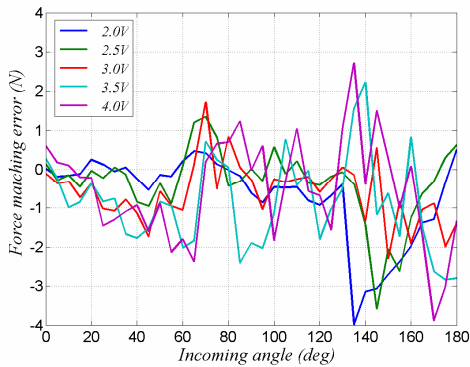
외부 유체의 속도와 입사 각도를 변화시키면서 얻은 실험과 모의 실험의 매칭 결과를 통해서 2장에서 설명한 축 방향 유체의 가정은 유효하고, 다양한 유체 속도와 입사 각도에 대해서 실용적인 추진기 모델이라는 것을 알 수 있다.



(a) 0.4m/s



(b) 0.6m/s



(c) 0.8m/s

그림 12. 입사 각도에 대한 실험과 오차

5. 추진기 제어기

5.1 프로펠러 속도 제어기

원하는 추진력을 얻기 위한 되먹임(feedback) 제어기를 구성하기 위해서는 측정이 가능한 프로펠러

속도를 이용하여 프로펠러 속도 제어기를 먼저 구성하여야 한다. 본 논문에서 사용된 추진기는 타코미터(tachometer)를 이용해서 프로펠러의 속도를 측정할 수 있다. 먼저 프로펠러 속도 제어를 위해서 개루프 제어기와 폐루프 제어기를 활용하여 실험하였다.

개루프 제어기 (open loop controller) (그림 14(a))

$$V_{in} = \frac{1}{k_t}(\dot{\Omega}_d + k_{f1}\Omega_d) + \frac{k_{f0}}{k_t} \text{sgn}(\Omega_d) \quad (25)$$

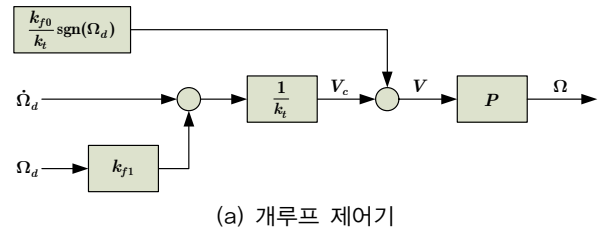
폐루프 제어기 (closed loop controller) (그림 14(b))

$$V_{in} = \frac{1}{k_t}(\dot{\Omega}_{ref} + k_{f1}\Omega) + \frac{k_{f0}}{k_t} \text{sgn}(\Omega) \quad (26)$$

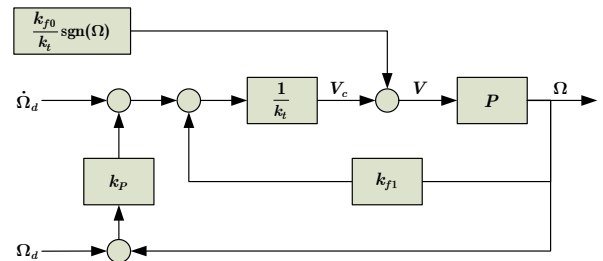
위 식에서 $\dot{\Omega}_{ref}$ 는 다음과 같다.

$$\dot{\Omega}_{ref} = \dot{\Omega}_d + k_p(\Omega_d - \Omega) + k_I \int (\Omega_d - \Omega) \quad (27)$$

그림 13에서 P 는 추진기 플랜트를 나타내고, V 은 제어기를 거쳐서 최종적으로 추진기에 가해지는 입력을 의미한다.



(a) 개루프 제어기



(b) 폐루프 제어기

그림 13. 프로펠러 속도 제어기

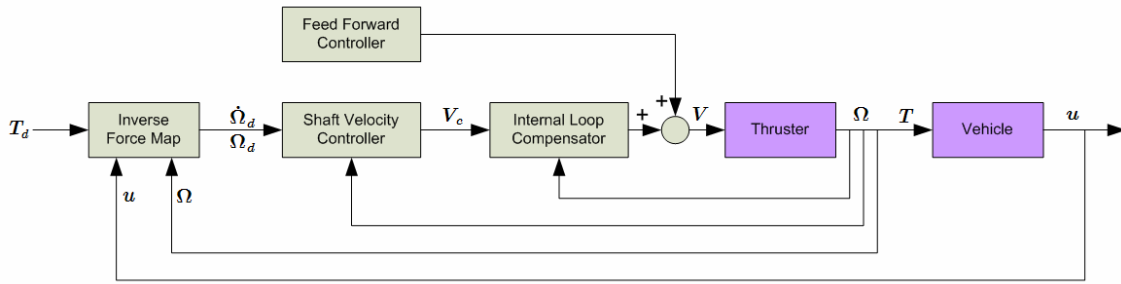


그림 14. 추진력 제어기 블록 선도

5.2 추진력 제어기

전반적인 추진력 제어기는 그림 14와 같이 구성된다. 그러나 (23)식과 같은 구조의 추진기 모델에서는 목표 추진력에 대한 목표 프로펠러 속도만 구할 수 있기 때문에 프로펠러 제어기에서 사용하기 위한 목표 프로펠러 가속도가 필요하다. 이를 위해서 주어진 목표 프로펠러 속도를 활용하여 목표 가속도를 필터를 활용하여 미분해서 사용한다.

5.3 기초 실험 결과

그림 13(b)에 제안된 페루프 추진기 제어기를 활용한 추진력 추종 실험 결과는 그림 15와 같다. 그림 15(c)에서 보여지듯이 추진력 추종 오차는 최대 1N 이내로 잘 추종하는 결과를 보여주고 있다. 반면 그림 15(d)에 나타난 결과를 분석해 보면 모델링 오차에 의해서 발생하는 실제 추진력 추종 오차는 약 3N으로 목표 추진력을 얻기 위해서는 제어 성능을 높이는 것보다 정확한 모델링 작업을 수행하는 것이 더 중요하다는 것을 보여준다.

6. 결 론

본 논문에서 새로운 추진기 모델을 제안하였다. 첫째, 측정이 불가능한 축 방향 유체 속도를 측정이 가능한 외부 유체의 속도와 프로펠러 회전 속도의 선형 관계식으로 정의하였다. 따라서 실용적이라 할 수 있다. 또한 제안한 선형 관계식을 이용하여 무차원화 방정식을 이끌어 낼 수 있기 때문에 물리적으로 의미를 지니고 있고, 이것은 실험을 통해서 검증하였다.

다음으로 등방향, 역방향, 불특정 방향 유체 상태를 전위 비율과 축 방향 유체 상태에 의해서 정의하였다. 이전 연구에서는 역방향과 불특정 방향 유체 상태에 대해서 다루어지지 않았지만, 잠수정이 멈추는 경우와 외부 유체의 속도를 거슬러서 진행하는 경우와 같이 무인잠수정이 운용되는 환경에서 필연적으로 발생하는 유체 상태이다. 역방향, 불특정 방향 유체 상태는 CAR(Critical Advance Ratio)로 정의된 지수에 의해서 구분되었고, CAR은 추진기의 효율을 높일 수 있는 지표로 사용될 수 있다.

마지막으로 외부 유체의 입사 각도가 추진력에

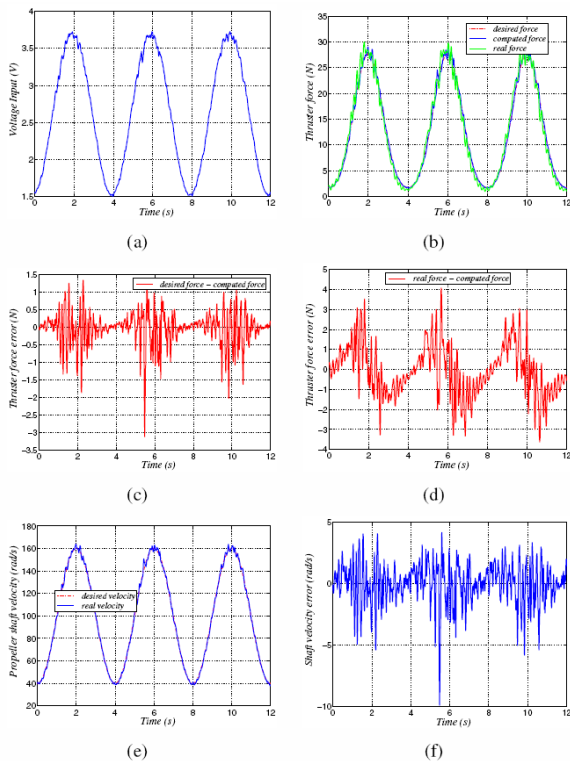


그림 15. 제안된 모델을 활용한 추진력 제어 실험:
 (a) 제어 입력 (b) 추진력 추종 성능 (c) 추진력 추종 오차
 (d) 추진력 모델링 오차 (e) 프로펠러 속도 추종 성능
 (f) 프로펠러 속도 추종 오차

미치는 영향에 대해 살펴보았다. 전방향 구동 잠수정, 혹은 잠수정이 방향을 전환할 때 외부 유체의 입사 각도는 잠수정의 진행 방향과 평행하지 않고 계속해서 변하게 된다. 이 경우에도 외부 유체 속도에 따른 유체상태와 동일하게 등방향, 역방향, 불특정 방향 상태로 구분하였고, 각 구간은 CIA(Critical Incoming Angle)로 정의된 지수에 의해 나눌 수 있다.

다양한 외부 유체 속도 및 각도 실험 환경에서 모의 실험과 실험 결과는 오차 범위 $\pm 2N$ 이내의 매우 훌륭한 매칭 결과를 보여주고 있다. 기존의 모델들과의 비교 실험에서도 뛰어난 결과를 보여주고 있다.

또 제안된 추진기 모델을 활용한 모델에 근거한 추진력 제어기를 구성하였고, 제어 실험 결과를 통해서 제어기의 성능을 살펴보았다. 결과에서 나타난 것과 같이 제어기의 성능에 의한 추진력 추종 오차보다는 제어기 모델링에 의한 오차가 더 크다는 것을 알 수 있었다. 이는 무인 잠수정 시스템에서 중요한 역할을 하는 추진기의 제어 성능을 높이기 위해 정확한 모델링이 필요하다는 것을 의미한다.

참고 문헌

[1] J. D. V. Manen and P. V. Ossanen, *Principles of Naval Architecture, Second Revision, Volume II: Resistance, Propulsion, and Vibration*, E. V. Lewis, Ed. Jersey City, NJ: Soc. of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.

[2] J. N. Newman, *Marine Hydrodynamics*. MIT Press, Cambridge, MA, 1977.

[3] D. R. Yoerger, J. G. Cooke, and J.-J. E. Slotine, "The influence of thruster dynamics on underwater vehicle behavior and their incorporation into control system design," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 15, no. 3, pp. 167-178, July 1990.

[4] A. J. Healey, S. M. Rock, S. Cody, D. Miles, and J. P. Brown, "Toward an improved understanding of thruster dynamics for underwater vehicles," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 20, no. 4, pp. 354-361, Oct. 1995.

[5] L. L. Whitcomb and D. R. Yoerger, "Development, comparison, and preliminary experimental validation of nonlinear dynamic thruster models," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 24, no. 4, pp. 481-494, Oct. 1999.

[6] L. L. Whitcomb and D. R. Yoerger, "Preliminary experiments in model-based thruster control for underwater vehicle positioning," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 24, no. 4, pp. 495-506, Oct. 1999.

[7] R. Bachmayer, L. L. Whitcomb, and M. A. Grosenbaugh, "An accurate four-quadrant nonlinear dynamical model for

marine thrusters: Theory and experimental validation," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 146-159, Jan. 2000.

[8] R. Bachmayer and L. L. Whitcomb, "Adaptive parameter identification of an accurate nonlinear dynamical model for marine thrusters," *J. of Dynamic Sys., Meas., and Control*, vol. 125, no. 3, pp. 491-494, Sept. 2003.

[9] M. Blanke, K.-P. Lindegaard, and T. I. Fossen, "Dynamic model for thrust generation of marine propellers," in *IFAC Conf. Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC'2000)*, 2000, pp. 23-25.

[10] T. I. Fossen and M. Blanke, "Nonlinear output feedback control of underwater vehicle propellers using feedback from estimated axial flow velocity," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 25, no. 2, pp. 241-255, Apr. 2000.

[11] S. K. Choi, J. Yuh, and G. Y. Takashige, "Development of the omnidirectional intelligent navigator," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 2, no. 1, pp. 44-53, 1995.



김진현

1998 포항공과대학교 기계공학과(공학사)
 2000 포항공과대학교 기계공학과(공학석사)
 2005 포항공과대학교 기계공학과(공학박사)

2005~2007 한국생산기술연구원 로봇기술본부 선임연구원

2007~현재 서울산업대학교 기계공학과 조교수
 관심분야 : Redundant Manipulator, Underwater robots, Hovering robots, Neuro Robotics



정완균

1981 서울대학교 기계설계학(학사)
 1983 한국과학기술원 기계공학 (석사)
 1987 한국과학기술원 생산공학 (박사)

1987~1993 포항공과대학교 기계공학과 조교수
 1988 CMU 방문 교수

1995 U.C. Berkeley visiting scholar
 1993~2000 포항공과대학교 기계공학과 부교수
 2000~현재 포항공과대학교 기계공학과 교수
 관심분야 : SLAM, Navigation, Underwater robots, Robust controller