

# AUV의 추진성능 추정 기법 연구

이종무\* · 최현택\* · 문일성\*\* · 이관목\*

\*한국해양연구원 해양시스템연구부

\*\*한국해양연구원 해양운송연구부

## An Estimation Technique for the Thrust Performance of AUVs

Chong-Moo Lee\*, Hyun-Taek Choi\*, Il-Sung Moon\*\* and Pan-Mook Lee\*

\*Ocean Engineering Research Department, KORDI, Daejeon, Korea

\*\*Marine Transportation Research Department, KORDI, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** AUV 자율무인잠수정, Thrust 추력, Thrust performance 추진성능, POW test 추진기 단독성능 시험, Max. speed 최고속도

**ABSTRACT:** Thrust is one of the important performance characteristics of an AUV. At the design stage, the resistance of an AUV at its maximum speed is estimated and then the thrust system is designed, including the propeller diameter, propeller rpm, driving system, and required power. However, it is not possible to be certain that the thrust system has been correctly designed until the AUV is launched and its speed is measured. If data from a propeller open-water test is available, the thrust and torque of the propeller at a certain speed can be estimated. In addition, if the motor's torque characteristics are available, the maximum speed saturated by the induced propeller torque can be estimated. In this paper, an easy technique for estimating the maximum speed of an AUV will be shown, even in a case where additional resistance is gained from appendages not considered at the design stage. Furthermore, the thrust performance changes by adjusting the diameter of the propeller can be easily investigated.

### 1. 서 론

자율무인잠수정(AUV)은 원격제어 무인잠수정(ROV)보다 운용이 용이하고 더 넓은 지역을 탐사하는 것이 가능하기 때문에 ROV와는 차별적으로 사용되어 왔다. 이러한 차별성은 더욱더 저렴한 제작비용과 운용 편의성을 지향하는 방향으로 AUV가 발전하도록 작용하였다. 이러한 발전방향과 함께 하부 시스템의 소형화, 고성능화 및 저렴화가 가능케 하는 기술의 발전에 따라 근래에 개발되는 AUV는 소형화의 추세를 보이고 있다 (Douglas-Westwood Limited, 2007).

또한 소형화에 따라 단일 추진기를 채용하여 주요 하부 시스템인 추진 시스템에 지拂되는 비용을 최소화하는 방향으로 발전하고 있어 근래에 개발되는 AUV의 경우 어뢰형(Torpedo type) AUV들이 많이 늘어나고 있다. 이러한 어뢰형 AUV에서 유일한 추진 시스템은 매우 중요한 요소이며 추진성능은 AUV 전체 시스템의 여러 부분에 그 영향을 미치게 된다(이종무, 2007). 따라서 설계 단계에서, 개발하려는 AUV의 추진시스템은 매우 중요한 요소이며 이를 정확히 설계하고 그 성능을 예측하는 것은 매우 중요한 과정이다.

한편 추진기 설계에서는 추진기 단독 성능시험(POW test; Propeller open water test)을 통해 추진기의 추력과 토크 특성을 측정한다. 무차원 계수들로 표현되는 추진기 특성은 추진기의 특정 전진속도와 회전수에서 추진기가 발휘하는 추력과 그 때

추진기에 유기되는 토크를 알 수 있게 해준다(이종무, 2008).

AUV의 추진기를 구동시키는 대부분의 동력 장치는 전기모터이며 추진기의 적정 회전수와 극복해야 되는 추진기 토크에 대응하여 감속기어를 채택하는 경우가 많다.

전기모터-감속기어-축계-추진기로 구성되는 동력계통은 AUV 추진 시스템의 일반적인 구성인데 모터의 최대 회전수에서 발휘되는 토크가 추진기에 유기되는 토크를 넘어서는 범위에서만 추진기가 회전하게 되고 추진기의 토크가 커지는 한계점 부근에서 그 회전수 이하로 회전을 계속하게 되므로 이때의 전진 속도가 AUV의 최대속도가 된다.

이러한 원리를 이용해 추진기의 특성을 알고 구동모터와 감속기의 최대 토크를 안다면 주어진 AUV 선체의 저항을 추정하여 AUV의 최대속도를 추정할 수 있을 것이다.

AUV의 선체에는 필요에 따라 설계 당시에 생각하지 않았던 부가물이 추가되어 장착되는 경우가 발생한다. 이러한 부가물의 저항을 추정할 수 있다면 저항특성 변화에 따른 추진 성능의 변화를 이 원리를 이용하여 예측할 수 있다. 따라서 저항특성이 증가된 구성을 갖는 AUV의 추진성능을 예측할 수 있다. 또한 추진기의 형태가 기하학적 상사성을 갖는 경우 그 기본 특성은 변하지 않으므로 추진기의 직경을 변화시켜 갈 때 추진 성능이 어떻게 변화되는 가를 손쉽게 파악 할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 방법이 간단한 식으로 표현되는 과정을 보여 주고 얻어진 결과를 이용하여 저항과 추진기의 변화에

따른 AUV의 추진성능이 어떻게 변하는지를 실험을 통해 살펴 보기로 한다.

## 2. 추진기 성능추정 기법

### 2.1 추력과 저항과의 관계

서론에서 설명한 과정을 좀 더 체계적으로 만들기 위해 우리가 잘 알고 있는 선체 저항 공식과 추진기의 POW 시험에서 얻은 추력곡선으로부터 추정된 추력을 등가로 보면 소위 자항 점(Self-propulsion point)을 얻어낼 수 있다. 물론 여기에는 선체가 추진기의 성능에 영향을 미치는 요소인 추력감소계수(대한조선학회, 1993; Carlton, 2007)를 포함하면 다음의 관계식을 형성할 수 있다(Lewis, 1988).

$$(1-t)T = R_T \tag{1}$$

$$R_T = \frac{C_T}{2} \rho S V^2$$

$$T = K_T \cdot \rho n^2 d^4$$

$$(1-t)K_T \cdot \rho n^2 d^4 = \frac{C_T}{2} \rho S V^2$$

여기서

- t: 추력감소계수
- T: 추진기 추력
- RT: 선체의 총 저항
- CT: 선체 저항 계수
- S: 선체 표면적 또는 투영면적
- V: 선체 전진속도
- n: 추진기 회전수
- d: 추진기 직경
- K<sub>T</sub>: 추력 계수

이 관계식을 잘 정리하여 추진기의 주요변수인 전진비 J로 추력계수 K<sub>T</sub>를 표현하면 다음과 같이 표현된다.

$$J = \frac{V}{nd} \tag{2}$$

$$K_T = \frac{C_T \cdot J^2}{2d^2(1-t)} = const \cdot J^2$$

여기서  $const = \frac{C_T}{2d^2(1-t)}$

즉 위 관계식은 K<sub>T</sub>-J 평면상에서 원점을 지나는 2차 곡선으로 표현됨을 알 수 있으며 다음의 Fig. 1에 개념적으로 도시한 것처럼 이 곡선은 추진기의 POW 시험으로부터 얻은 K<sub>T</sub> 곡선과 한 점에서 만나는 것을 알 수 있다.

K<sub>T</sub>곡선은 POW 시험에서 측정한 자료 중의 3점으로부터 2차식으로 매우 근접하게 표현이 될 수 있으며 두 개의 2차식을 등가로 놓음으로써 근의 공식으로부터 자항점에서의 전진비인 J<sub>s</sub>를 어렵지 않게 구해 낼 수 있다. 즉 K<sub>T</sub>곡선을 다음과 같은 계수를 갖는 2차식으로 가정하고 이 곡선이 J의 2차 곡선과 만나

는 점은 2차 방정식의 근의 공식으로 구해질 수 있다.

$$K_T = aJ^2 + bJ + c = const \cdot J^2 \tag{3}$$

$$J_s = \frac{b + \sqrt{b^2 + 4(const - a)c}}{2(const - a)}$$

여기서 a, b, c는 K<sub>T</sub> 곡선을 나타내는 2차 방정식의 계수이고 Const는 앞서의 저항계수와 추진기 직경 및 추력감소계수로 표현되는 상수이다.

위 그림에서 얻어지는 특정 전진비 J<sub>s</sub>는 자항점을 나타낸다고 볼 수 있으며 알다시피 선체와 추진기가 조합된 상태에서의 자항점은 추진기의 회전수에 따라 속도가 정해진다는 뜻이다. 앞서의 관계식 도출에서는 저항계수와 추력감소 계수가 항상 일정한 상수라는 것을 가정하고 있다.

### 2.2 모터의 한계 토크

Fig. 1에서 도시된 바와 같이 이렇게 해서 구해진 J<sub>s</sub>에 상응하는 토크 곡선(K<sub>Q</sub>-curve)으로부터의 K<sub>Q</sub> 값을 구하면 다음의 관계식으로부터 각 회전수에 상응하는 추진기의 유체력에 의하여 야기된 토크를 구해낼 수 있다. 이때도 K<sub>Q</sub>곡선을 2차 곡선으로 가정하면 간단하게 J<sub>s</sub>에 상응하는 K<sub>Qs</sub>를 구할 수 있다.

$$K_{Qs} = a'J_s^2 + b'J_s + c' \tag{4}$$

여기서 a', b', c'는 K<sub>Q</sub>곡선을 2차식으로 표현하는 계수

K<sub>Qs</sub>는 자항점 전진비인 J<sub>s</sub>에 상응하는 값이다. 위의 식으로부터 얻어진 K<sub>Qs</sub>를 이용해 다음과 같이 추진기 토크 계수의 정의로부터 주어진 회전수와 추진기 직경에 대해서 추진기에 유기되는 토크를 구할 수 있는 것이다.

$$K_{Qs} = \frac{Q}{\rho n^2 d^5} \tag{5}$$

$$Q = K_{Qs} \cdot \rho n^2 d^5$$

실제적으로 추진기 축계에 작용하는 토크는 추진기의 부하

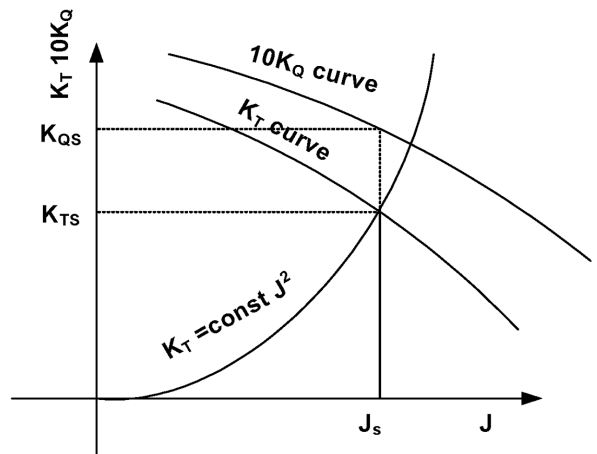


Fig. 1 Self-propulsion point on K<sub>T</sub>-curve

로 유기되는 유체력에 의한 것과 축계에서의 마찰력이 있다. AUV와 같이 완벽한 방수를 요구하는 시스템에서는 축계의 방수 계통에 의한 마찰이 추진모터의 성능에 끼치는 영향이 크다고 볼 수 있다.

먼저 모터와 감속기어로 구성되는 구동부가 추진축계에 전개하는 토크의 한계를 알아보기로 한다. 어떠한 구동 시스템이건 간에 회전수가 올라가면 회전축의 한계 토크는 낮아진다. 추진모터와 조합된 감속기의 최종 단계에서의 토크가 회전수에 따라 변화하는 관계식을 알아보면 다음과 같이 표현된다 (Maxon motor, 2008).

$$Q = -\frac{Q_H i^2 \eta}{n_0} \cdot n + Q_H i \eta \quad (6)$$

- 여기서  $Q_H$ : Stall torque
- $i$ : Inverse of reduction ratio
- $\eta$ : Efficiency of reduction gear
- $n_0$ : No load speed (RPM)
- $n$ : RPM

위의 식을 이용해 토크와 회전수에 대해 도식해 보면 초기 값을 갖는 단순감소 직선으로 나타난다. 이론상으로 이 직선에 추진기에 의한 토크 곡선이 만나는 점에서 추진모터에 의한 출력 토크가 유체력에 의해 포화된다고 볼 수 있다.

또한 전절에서 설명한 추진모터와 감속기의 출력 토크 곡선과 위에서 얻어진 토크 곡선을 조합하면 추진모터와 감속기의 조합체가 출력하는 토크가 어느 회전수에서 포화되는지 알 수 있다, 즉 다음의 2차식의  $n$ 에 대한 근을 구하면 포화된 회전수  $n_s$ 를 구할 수 있다. 즉 이 회전수 이상으로는 추진모터-감속기가 더 이상 회전할 수 없다는 의미이다.

$$Q = -\frac{Q_H i^2 \eta}{n_0} \cdot n + Q_H i \eta = K_{QS} \cdot \rho n^2 d^5 \quad (7)$$

$$K_{QS} \cdot \rho d^5 \cdot n^2 + \frac{Q_H i^2 \eta}{n_0} \cdot n - Q_H i \eta = 0$$

$$n_s = \frac{-\frac{Q_H i^2 \eta}{n_0} + \sqrt{\left(\frac{Q_H i^2 \eta}{n_0}\right)^2 + 4 \cdot K_{QS} \cdot \rho \cdot d^5 \cdot Q_H i^2 \eta}}{2 \cdot K_{QS} \cdot \rho \cdot d^5} \quad (8)$$

이 때 전진비의 관계식으로부터 포화된 회전수에서의 속도를 구해낼 수 있다. 포화된 속도는 전진비의 정의((2)의 첫 번째 식)에 의해서 다음과 같이 표현된다.

$$V_s = J_s \cdot dn_s \quad (9)$$

즉 (5)식에서 구해진  $K_{QS}$ 를 이용하여  $n_s$ 를 구하고  $J_s$ 를 이용하면 포화되는 속도, 추진모터-감속기가 회전할 수 있는 최고 회전수, 다시 말해 AUV의 최고속도  $V_s$ 를 구할 수 있다. 위의 관계식에서 얻어진 최고속도  $V_s$ 는 축계의 마찰을 고려하지 못했기 때문에 이를 감안하면 실제 최고속도는 더 작은 값이 될 것임을 예측할 수 있다.

### 3. 추진성능 추정

#### 3.1 저항이 변화된 경우

한국해양연구원에서 개발 중인 이십이100 AUV의 경우, 설계 당시에는 단순 선체에 대한 저항만을 고려하여 추진 시스템을 설계하였으나 실험에서의 운용을 고려하여 수중통신 소나와 도플러 속도계 등이 추가적으로 설치되었으며 이로 인해 처음 설계 당시에 예상했던 최고속도에 못 미치는 속도를 낼 수밖에 없었음이 확인되었다. 이 경우 최고속도가 어떻게 예측되었는지를 살펴보기로 한다.

해양공학수조에서 이십이의 시험을 수행한 결과 선수부의 추가적인 센서들 때문에 저항이 증가하여 원하는 정도의 속도를 얻을 수 없었다. '이십이100 AUV'의 해양공학 수조 시험은 이십이 AUV와 같이 CPMC(Computerized planar motion carriage)가 카메라로 수중의 '이십이100 AUV'를 추적 하는 방식으로 수행되었다. 속도 계측은 CPMC에 설치한 인코더 방식의 속도계와 '이십이100 AUV'에 설치된 DVL로부터 얻어졌다. AUV 내부 공간상의 문제로 인해 이번 시험에서도 추진 모터의 회전수는 계측하지 못했으며 공기 중에서 추진모터에 내린 명령값과 추진기의 회전수를 광학방식의 회전수 계측기로 직접 계측한 값을 비교하였다.

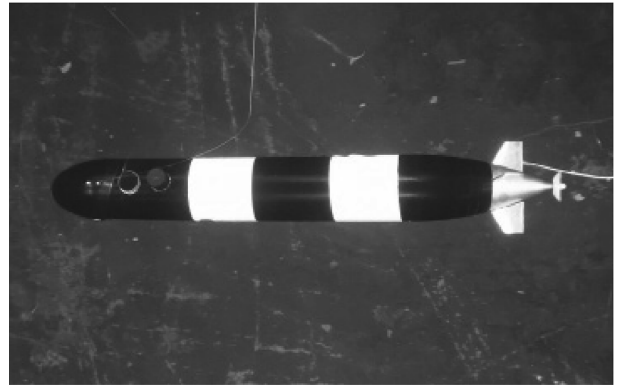


Fig. 2 ISIMI100 at Ocean Engineering Square tank

Table 1 Command voltage, propeller RPM and AUV velocity

Voltage (V)	RPM (in Air)	CPMC vel (m/s)	DVL vel (m/s)
0.0	165 rpm		
0.5		0.31	0.315
1.0	654 rpm	0.54	0.54
1.5		0.76	0.77
2.0	1100 rpm	0.98	0.97
2.5	1285 rpm	1.19	1.18
3.0	1470 rpm	1.25	1.25
3.5		1.26	1.26
4.0	1600 rpm	1.29	1.27
5.0	1670 rpm		

Fig. 2는 해양공학 수조에서 시험 중인 '이십이100 AUV'의 모습을 보여주고 있다. 선수부 직 후방에 센서들이 붙어 있는 것을 볼 수 있으며 그 아래쪽에는 DVL센서가 부착되어 있다. 선미부에서 뒤로 향하는 케이블은 시험에서 계측된 자료를 저장하기 위해 캐리지로 연결된 네트워크 케이블이다.

부가물과 케이블의 단면이 원형이라는 점은 저항을 증가시키는 역할을 더욱 크게 하고 있다. 다음의 Table 1은 공기 중에서 계측한 명령값과 이에 상응하는 추진기의 회전수 및 수조시험에서 명령 값에 따른 계측 속도를 표로 정리한 것이다.

추진기에 작용하는 유체력과 축계에서의 마찰력에 의해 추진기의 회전수는 더 이상 증가하지 못했을 것으로 추측된다.

시험결과 분석을 위해 선수부의 부가물과 외부로 연결된 케이블의 저항을 선체의 저항과 비교하였다. 선수부의 부가물 중 원형 단면을 갖는 소나센서와 케이블은 이론적인 저항계수인 1을 사용하였고(Newman, 1977; Hoerner, 1965) DVL은 형상이 복잡하여 포함시키지 않았다. 케이블의 저항에 영향을 주는 길이는 '이십이100 AUV'의 심도인 1m로 하였다.

선체의 저항에서 저항계수는 지난번의 저항해석과 시험 결과로부터 약간의 여유를 둔 것이지만 설계 관점에서 사용하는 0.15로 하였다. 다음의 Fig. 5는 이러한 추정 값들의 비교를 위해 도시한 그림이다.

그림에서 보듯이 부가물의 저항이 선체저항 보다 더 큰 것을 알 수 있다. 케이블은 서로 흩어지는 것을 막기 위한 수십 센티미터 간격의 케이블 타이가 감겨있어 정확히 저항을 추정하기는 어렵지만 직경 6밀리미터의 케이블이 1미터 전진 방향에 수직으로 서 있는 것으로 가정하였다. 케이블에 의한 저항이 선체 저항이나 부가물에 의한 저항보다도 더 큰 것을 알 수 있다. 전체 저항의 값이 추력보다도 큰 것으로 나타나 있는 것으로 보아 부가물의 저항은 약간 과장되었음을 알 수 있다.

2절에서 설명한 방법을 이용하여 각 부가물의 저항을 선체 저항에 추가하고 자항점의 전진비  $J_s$ 를 구해 최종적으로 한계 회전수에 해당하는  $n_s$ 로부터 최고속도에 해당하는  $V_s$ 를 계산

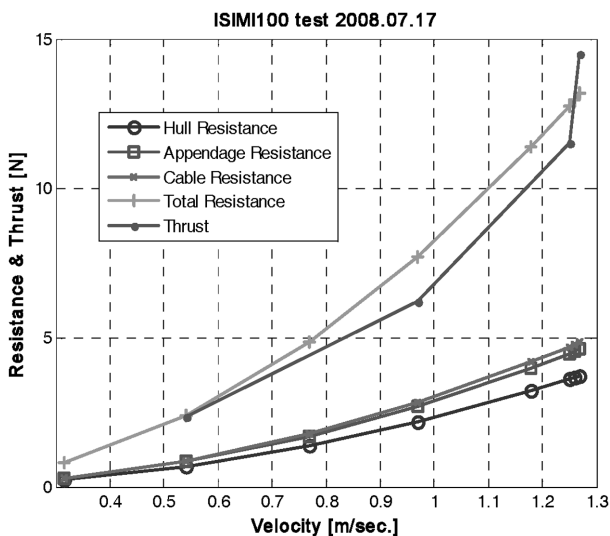


Fig. 3 Estimation of the resistance components of ISIMI100 AUV

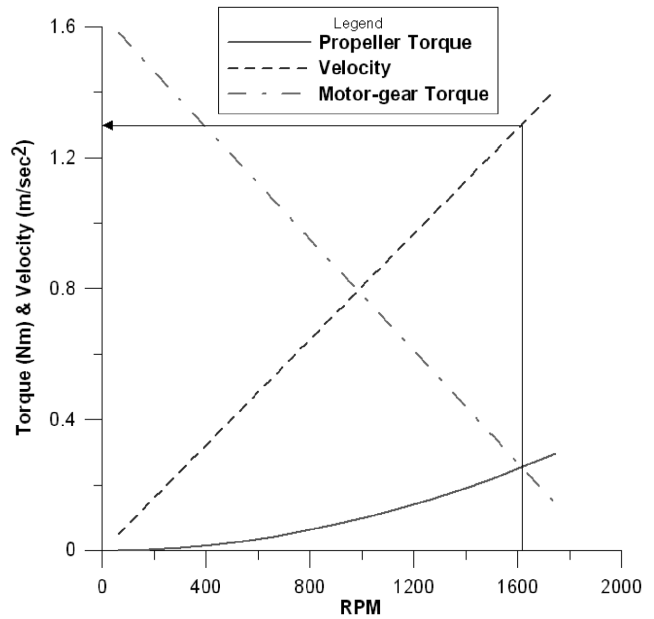


Fig. 4 Propulsion performance of ISIMI100 AUV with appendages

하였다. 한계 회전수는 1615rpm이었으며 최고속도는 1.30311m/s로 계산되었다. 다음의 Fig. 4는 이러한 과정을 도식적으로 보여준다. 그림에서 화살표의 시작점은 한계회전수를 나타내고 끝점의 위치는 최고속도를 나타낸다. 이렇게 예측한 결과와 Table 1의 계측한 결과가 거의 유사한 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 추진기의 직경이 변하는 경우

2절에서 제시한 방법의 유용성을 보이기 위해 추진기의 직경을 변화시켜 부착한 경우의 추진 성능들을 추정해 보았다. 이러한 과정은 기하학적 상사성을 갖는 서로  $d_x$ 과정은의 추진기를 이용해 추진성능을 개선해 보고자 할 때 유용할 것이다.

'이십이100 AUV'에서 현재 사용 중인 KP452 추진기의 직경을 원래의 9.3cm에서 10cm, 12cm로 증가 시켰을 때 '이십이100 AUV'의 추진 성능을 예측해 보았다. 추진기는 동일한 기하학적 형태를 가질 경우 무차원화된 POW 시험 데이터는 일정하다. 이는 추진기의 성능이 점성의 영향을 거의 받지 않아 레이놀드수의 효과는 무시되므로 기하학적 축척비의 영향만 있기 때문이다.

추진기의 제작비용을 낮추기 위해 원형을 복제하는 경우 확대 또는 축소가 가능하므로 원하는 직경의 추진기를 제작하는 것이 가능하다.

다음의 Fig. 5는 추진기의 직경이 10cm로 확장된 경우이다. 1500RPM 정도에서 추진기의 토오르가 모터와 감속기 조합체가 내는 토오르를 넘어설 것으로 예상되며 그때 속도는 1.6m/s 즉 약 3.2kts 정도를 가질 것으로 예상된다. 이는 계산에서 포함되지 않은 축계의 마찰력에 의한 토오르의 감소를 감안한 값이다.

추진기의 직경이 증가함에 따라 회전수에 따른 유체역학적인 토오르가 증가했음을 볼 수 있으며 이에 따라 포화 회전수는 감소했지만 추력이 증가하여 속도를 더 낼 수 있음을 알 수 있다.

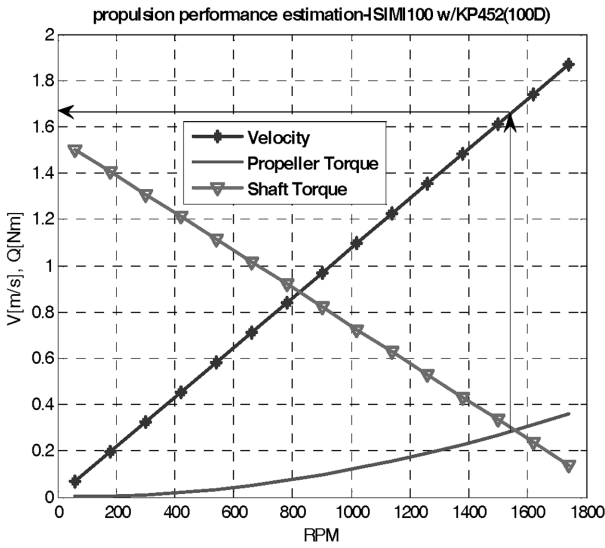


Fig. 5 Propulsion performance of ISISMI100 AUV with KP452 (D: 10cm)

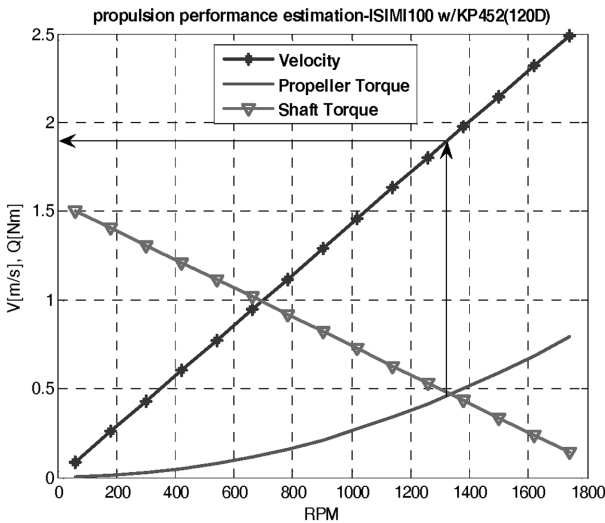


Fig. 6 Propulsion performance of ISISMI100 AUV with KP452 (D: 12cm)

다음의 Fig. 6은 추진기의 직경을 12cm로 확장하였을 경우이다. 추진기의 직경이 커지면서 추진기의 토크가 증가하여 1300RPM 정도에서 추진기의 회전수가 포화될 것으로 예상되며 그 때 '이십이100 AUV'의 속도는 1.8m/s로 역시 약 3.6kts로 속도가 더욱 증가할 것으로 예상된다.

특정 추진기가 선정되면 직경의 변화에 따라 추진 성능이 변화되기는 하지만 추진기의 전진비인  $J_s$ 는 저항점에서 한 가지 값  $J_s$ 로 고정된다. 물론 이는  $J_s$  값이 추진기 직경 변화에 따라 변한다는 의미이다. 그러나 대부분의 추진기는  $J_s$ 가 0.7~0.8 사이에서 설계가 이루어지고 추진기 효율이 가장 적합한 지점으로 언급되는 부분이다. 위에 언급한 경우는 직경이 커지면서 고정 값  $J_s$ 가 증가하기는 했으나 추진기의 토크가 증가 하면서 모터의 최대 회전수 전에서 포화되는 현상을 보였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 자율무인잠수정을 설계할 때에 요구되는 속도를 얻기 위해 추진기를 선정하는 방법을 보다 간편화하였다. 이 방법은 손쉽게 다양한 추진기를 적용할 때 얻을 수 있는 추진 성능의 한계를 구할 수 있음을 보여 주었다. 처음 설계 시에 고려하지 못했던 부가물로 인해 저항이 증가한 경우에도 추진성능의 추정이 용이하며 크기에 상관없이 적정한 성능(POW)을 갖는 추진기를 선정하여 추진기의 직경을 정하는 것이 가능함을 보여 주었다.

실제 연구소에서 수행한 시험결과들로부터 분석한 예에서는 저항점의 변동이 나타나고 추력감쇄 계수가 일정하지 않게 예측 되는데 이러한 부분의 연구가 진행되면 보다 정확한 예측 방법을 구축하는 게 가능하리라 기대한다. 한편 이러한 방법은 향후 자율무인잠수정과 유사한 잠수체의 성능 예측에서도 보다 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

#### 후 기

본 연구는 해양수산부에서 지원한 '차세대 심해무인잠수정 개발' 사업과 한국해양연구원 기본연구사업인 '해저지형 자율 맵핑 핵심기술 개발' 사업의 일환으로 수행된 연구결과 중 일부를 밝히는 바이다.

#### 참 고 문 헌

대한조선학회 (1993). 조선해양공학개론, 동명사.  
 이종무 (2007). "소형 무인잠수정의 추진시스템 설계 및 성능 검증", 선박해양기술 제44호, pp 45-52. ISSN 1225-987X.  
 이종무 (2008). "자율 무인잠수정의 추진성능 추정", 선박해양기술 제46호, pp 53-60. ISSN 1225-987X.  
 Carlton, J.S. (2007). Marine Propellers and Propulsion, MPG Books Ltd, Bodmin Cornwall, Great Britain, ISBN: 978-07506-8150-6.  
 Douglas-Westwood Limited 2007. The AUV Gamechanger Report, 2008-2017.  
 Hoerner, Sighard F. (1965). Fluid-Dynamic Drag, Published by The Author, Great Britain.  
 Lewis, E.V. (1988). "Principles of Naval Architecture Volume II, 2nd rev.", The Society of naval Architects and Marine Engineers, NJ.  
 Maxon motor 2008, Maxon DC motor and maxon EC motor, Key information.  
 Newman, J.N. (1977). Marine Hydrodynamics, The Massachusetts Institute of Technology

2009년 4월 29일 원고 접수  
 2009년 7월 16일 심사 완료  
 2009년 8월 19일 게재 확정