

소형 잠수정에 장착된 추진기의 특성 평가를 위한 새로운 시험 설비 개발

김기호, 이건영
광운대학교

Development of a new test facility for the evaluation of thrusters mounted on a small scale underwater vehicle

Ki Ho Kim, Keon Young Yi
Dept. Electrical Eng. Kwangwoon Univ.

Abstract - This paper reports a new test facility to investigate the characteristics of the thrusters mounted on the small scale underwater vehicle using Force/Torque sensor. With the test facility proposed here, No disassembly needs to be made to the target vehicle, which makes us possible to get the realistic forces of the vehicle rather than the forces of the thrusters themselves. Experimental data analyses, heave, sway, and surge, for the QI ROV are given as an example of this method.

1. 서 론

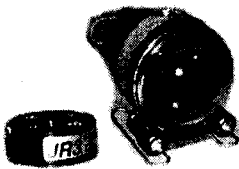
소형 잠수정의 움직임을 제어하기 위해서 자세 제어 추진기의 특성을 이해하는 것은 필수적이며, 현재 추진기의 사양서나 간단한 실험으로 추진기의 특성을 간단히 알 수 있다.[1] 그러나 추진기가 잠수정에 어떻게 장착되는지에 따라 각각의 자세 제어 추진기의 특성이 변하기 때문에 추진기의 특성들이 아무리 정확할지라도 잠수정의 힘을 설명하는데 충분하지 않다. 또한, 히브 운동(Heave motion)을 위해 4개의 추진기를 사용하는 잠수정이나 서지 운동(Surge motion)을 위해 2개의 추진기를 사용하는 잠수정의 힘을 분석하는 것은 더욱 어렵다.

현재 잠수정 추진기의 특성을 이해하기 위한 기존 연구는 추진기만을 센서에 바로 부착시켜서 힘과 토크(Torque)를 측정하며, 유량계(Flowmeter)로 속도를 측정하였다.[2] 하지만 비선형성 및 외란의 영향으로 추진기의 특성만으로는 잠수정의 특성을 정확히 이해할 수 없다.

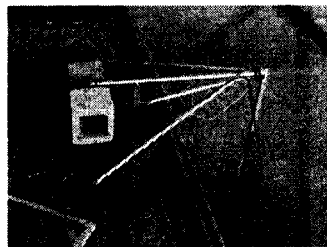
본 연구에서는 소형 잠수정에서 추진기를 분리하여 추진기 자체의 힘을 측정하기 보다는 JR3 힘/토크 센서(JR3 Force/torque sensor)[3] 하나만으로 잠수정의 실제 추진력을 측정하는 것이 가능한 설비의 개발을 다룬다. 이를 위하여 수조와 수영장에서 개발한 시험 설비로 소형 잠수정(QI Remotely Operated Vehicle)의 히브, 스웨이(Sway), 서지 운동에 대한 토크와 힘을 측정하고, 측정된 실험 데이터를 분석하여 해당 잠수정의 최대 추진력, 회전력, 부상력 및 잠수력을 알아본다.

다음 절에서는 시험 설비를 소개하며, 3절에서는 잠수정의 추진력에 대한 개요 및 시험 신호를 설명하고, 4절과 5절에서 실험 환경 및 실험결과와 결론을 기술한다.

2. 시험설비



〈그림 1〉 힘/토크 센서와 소형 잠수정(QI ROV)



〈그림 2〉 실험 설비

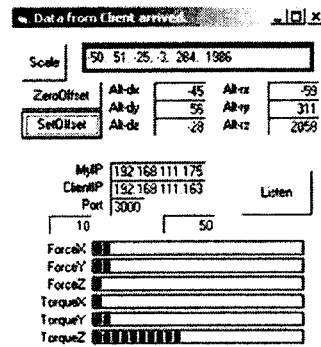
본 연구에서 제시하는 추진기의 특성 평가를 위한 시험 설비는 기초 프레임(Base frame)에 JR3 힘/토크 센서를 장착한 것으로 센서 끝에 지지대로 잠수정을 붙였다. 잠수정은 서지운동을 위한 2개의 추진기와 sway 운동을 위한 1개의 추진기, 히브 운동을 위한 1개의 추진기로 4개의 추진기를 장착하고 있다. DA(Digital to Analog) 제어기는 컴퓨터에 연결되었고 센서는 컴퓨터의 ISA 카드에 연결되었다. 수조와 수영장의 물에서 잠수정으로 시험 신호를 보내어 소형 잠수정을 동작시키고 센서로 잠수정의 힘과 토크를 측정하며, 측정된 데이터를 데이터 수집 프로그램으로 수집하였다.

2.1 QI ROV 지지대

소형 잠수정은 2종류의 지지대에 부착된다. 지지대는 서지 운동과 스웨이 운동을 위한 직선 타입(I형)과 히브 운동과 스웨이 운동을 위한 구부러진 타입(L형)으로 나누어진다. 먼저, I형은 1503 [mm]인 긴 금속 막대이고 수직방향으로 JR3 센서가 부착되어 있다. 다음으로, L형은 수평 710 [mm]

와 수직 1290 [mm]의 'L' 뒤집은 모양의 금속 막대로 JR3 센서가 부착되어 있다. 서지 운동(x축)과 스웨이 운동(y축), 히브 운동(z축)의 힘은 토크로 측정할 수 있다.

2.2 데이터 수집 프로그램



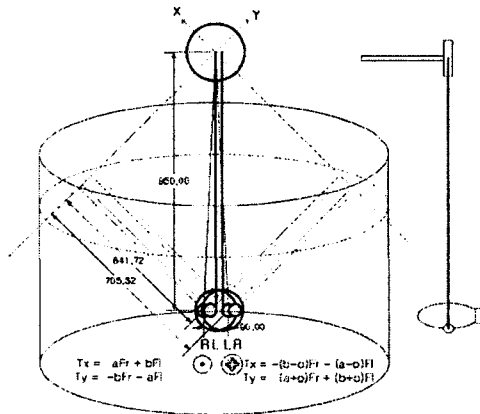
〈그림3〉 QiClient

데이터 수집 프로그램은 FtServer와 QiClient로 구성되어 있다. FtServer는 힘과 토크를 감지하고 이를 TCP/IP를 사용해서 클라이언트에게 보낸다. JR3 센서를 초기화 시킨 후 매 30ms 마다 데이터를 취득하고 데이터 표시 시간 간격은 500ms 이다. QiClient의 데이터 전송은 클라이언트의 요청으로 이루어진다. 결과 데이터는 DOS 창에서 콤마로 구분된 6개의 수직축의 힘과 토크 값을 확인 할 수 있다. QiClient는 DA 명령을 보내고 FtServer로부터 측정된 데이터를 받게 된다.

2.3 시험 신호

추진기의 토크를 두 가지의 스텝 응답(Step Response)을 30초간 적용함으로써 측정하였다. 이 스텝 응답은, 첫째로 소형 잠수정에 PL신호(Positive Large Power, 5V)로 소형 잠수정 추진기의 모터에 12V를 5초에서 25초간 인가하여 최대 출력을 내게 하고, 나머지 시간에 소형 잠수정 추진기의 모터에 0V를 인가하여 추진기를 멈추게 하였다. 둘째로 NL(Negative Large Power, -5V)로 잠수정 추진기의 모터에 -12V를 5초에서 25초간 인가하여 최대 역출력을 내게 하고 나머지 시간에 추진기의 모터에 0V를 인가하여 추진기를 멈추게 하였다. 서지 운동에 대해서 위상과 요(yaw)를 위한 5종류의 DA 명령 값(0V, 1.25V, 2.5V, 3.75V 5V)이 추가되었다. 램프 응답은 1분간 0V에서 +5V(-5V)까지 매 100ms마다 0.02V가 증가 또는 감소하게끔 적용하며, 서지운동의 조건은 스텝응답에서의 서지운동 조건과 같다.

3. QI ROV의 추진력 측정 개요 및 시험 신호



〈그림3〉 수조에서의 추진기 토크 성분

3.1 히브 운동

히브 운동은 토크의 z 방향 성분(Tz)과 관계가 있기 때문에 센서에 의해 측정된 토크는 $T_z = L \cdot F_{ht}$ 이다. 금속 막대의 유효 길이가 $L = 710 - 67/2 \cong 677mm = 26.65$ [inch]이므로 추진기가 생성하는 힘은 식(1)과 같다.

$$F_{hv} = T_z / 26.65 \text{ [lbs]} \quad (1)$$

3.2 스웨이 운동

스웨이 운동 역시 T_z 와 관계가 있기 때문에 센서에 의해 측정된 토크는 $T_z = L \cdot F_{sw}$ 이다. 금속 막대의 유효길이가 $L = 1503 + 155 - 67/2 \cong 1625\text{mm} = 63.98$ [inch]이므로 추진기가 생성하는 힘은 식(2)과 같다.

$$F_{sw} = T_z / 63.98 \text{ [lbs]} \quad (2)$$

3.3 서지 운동

서지 운동의 경우 <그림3>에서 x축 성분(T_x), y축 성분(T_y)과 관계가 있으므로 센서에 의해 측정된 토크는

$$T_x = -L \cdot \sin(45^\circ + \theta) \cdot F_{sR} - L \cdot \sin(45^\circ - 2\theta) \cdot F_{sL}$$

$$T_y = L \cdot \sin(45^\circ - 2\theta) \cdot F_{sR} + L \cdot \sin(45^\circ + 2\theta) \cdot F_{sL}$$

이고, 금속 막대의 유효길이와 각도는

$$L = 1503 + 150/2 - 67/2 \cong 1545\text{mm} = 60.83 \text{ [inch]},$$

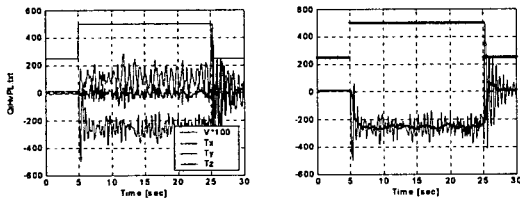
$$\theta = \sin^{-1}(90/2/L) = 1.67^\circ \text{ 이므로 추진기가 생성하는 힘은 식(3)과 같다.}$$

$$F_{sR} = -(44.22 \cdot T_x + 40.45 \cdot T_y) / (44.22^2 - 40.45^2) \text{ [lbs]} \quad (3)$$

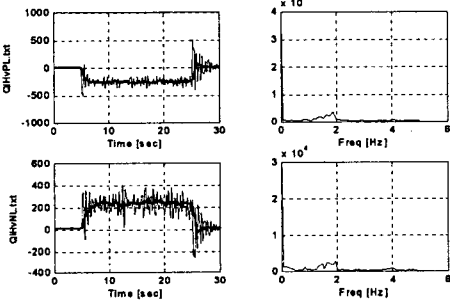
$$F_{sL} = (40.45 \cdot T_x + 44.22 \cdot T_y) / (44.22^2 - 40.45^2) \text{ [lbs]}$$

4. 실험 환경 및 실험 결과

시험 설비의 실험은 수조의 크기, 지름(타원) 1270~1220 [mm]이고 높이 770 [mm]인 수조에서 시행했다. 수조 안의 소형 잠수정 위치는 물 표면에서 아래로 290 [mm], 바닥에서 위로 140 [mm]이다. 수영장에서 실험도 수조에서와 같은 환경에서 시행되었다.



(a) PL 신호에서의 히브 운동(L형 지지대)



(b) 주파수 분석

<그림 4> 히브 운동에서의 스텝 응답으로 측정된 토크와 주파수 분석

<그림 4>는 소형 잠수정에 스텝 신호를 보내어 히브 운동의 토크를 시간에 따른 그래프로 표시한 것이다. <그림 4> (a)의 오른쪽과 (b)의 왼쪽의 그래프에서 검정색선은 추진기의 토크 결과를 11.1Hz의 차단주파수를 가지는 버터워스 필터(Butterworth filter)로 여과한 것이다. 이 검정색선은 QI의 최대 부상력 및 최대 잠수력을 의미한다. <그림 4> (b) 왼쪽의 그래프는 여과된 토크를 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)을 통해 10Hz의 샘플링 율로 고주파를 제거한 10Hz 이하의 주파수 성분이며, 시험 설비의 기계적 진동과 거의 유사한 주파수에서 첨두치를 볼 수 있다. 이는 토크의 진동 원인이 시험 설비의 기계적 진동임을 알 수 있다.

스웨이 운동에 대한 토크와 힘 측정의 경우 잠수정 지지대가 두 종류이므로 각각의 종류에 대하여 토크와 힘을 측정하고 주파수 분석을 하므로 해서 측면 이동력을 알 수 있게 하였다. 서지 운동에 대한 토크와 힘 측정의 경우, 5종류의 좌·우 DA 명령은 전·후진 DA명령과 함께 추진기에 내렸다. 이는 좌, 우측 추진기의 출력을 달리하여 QI의 최대 전진, 후진 추진력을 측정할 수 있음을 의미할 뿐만 아니라, 전·후진 DA명령 없이 좌·우DA 명령으로 잠수정의 최대 좌·우 회전력을 알 수 있었다.

<표1> 히브, 스웨이 운동에서 스텝 응답으로 측정된 QI의 실험 결과

운동	시험 장소	지지대 타입	시험 신호	토크 [lbs·inch]	힘 [lbs]	f_m [Hz]	f_t [Hz]
히브	수조	L	PL/NL	250/250	9.8/9.8	1.8	1.85
			PL/NL	2950/1420	60.7/29.2	1.2	1.17
스웨이	수영장	I	PL/NL	2050/990	50.6/24.4	1.9	1.95
			PL/NL	3590/1760	56.1/27.5	1.2	1.18

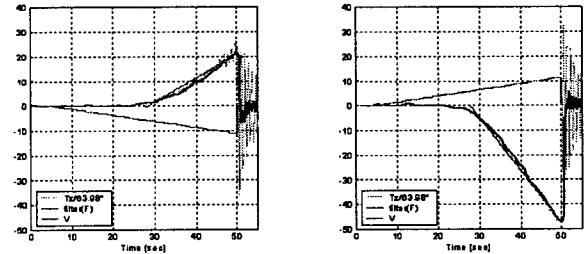
작은 수조에서 추진기가 동작하는 동안 수류 현상과 물의 요동이 크기 때문에 오차를 발생시킬 수 있으므로 수조보다 훨씬 큰 수영장에서 수조에서 시행된 실험과 같은 방법으로 실험하였다. 특히 스웨이 운동에 대한 실험에서 램프 응답을 추가해서 전압과 힘의 관계식을 도출하였다.

<표2> 서지 운동에서 스텝 응답으로 측정된 QI의 실험 결과

시험장소	시험신호	힘(R) [lbs]	힘(L) [lbs]
	회전방향		
수조	PL/NL	48/38	10/13
	CW/CWW	38/48	29/34
수영장	PL/NL	58/36.5	29/34
	CW/CWW	58/67	26/44

<표1>과 <표2>는 각 운동에서 잠수정 지지대와 테스트 신호에 따라 측정된 토크와 힘, 시험 설비의 진동(f_m), 센서에 의해 측정된 토크를 버터워스 필터로 여과하여 고주파를 제거한 주파수(f_t)를 정리한 표이다. 수조에서와 수영장에서 실험 결과가 조금 차이가 있는데 이것은 앞서 지적한 수류 현상과 물의 요동 때문일 것이다. 수영장에서 실험을 기준으로 하면, 히브 운동 결과로부터 소형 잠수정의 부상력/잠수력은 둘 다 9.8[lbs]이고, 서지 운동 결과로부터 잠수정의 최대 추진력은 전진 69[lbs], 후진 49[lbs]이며, 잠수정의 회전력은 시계방향 22[lbs] 반시계방향 23[lbs]임을 알 수 있다. 또한 우 측면 이동력은 56.1 [lbs]이고 좌측면 이동력은 27.5[lbs]임을 알 수 있다.

스웨이 운동 결과 중 수조에서 PL 신호로 측정된 I형 지지대 실험 결과는 T_y 성분이 고려되지 않았으므로 측정 에러를 가지고 있다. 그러나 T_y 성분은 11.98[inch](304.06 [mm])의 길이를 기준으로 했을 때 결과는 같은 것으로 PL 신호의 스웨이 운동에서 추진기는 61[lbs]의 힘을 가진다. PL신호를 NL 신호로 바꾸었을 때 수조, 수영장에서 실험은 측정 에러를 가지고 있다. 왜냐하면 몇몇의 토크 성분(수조에서의 L형 지지대 실험에서 T_z , 수조에서의 I형 지지대 실험, 수영장에서 T_x 와 T_y)은 고려되지 않았기 때문이다. 그러나 첫 번째와 세 번째 실험에서 NL 신호의 스웨이 운동에서의 추진기는 28[lbs]의 힘을 가진다.



(a) PL 신호에서의 실험 결과 (b) NL 신호에서의 실험 결과
<그림 5> 스웨이 운동에서의 램프 응답에 대한 실험 결과

<그림 5> 스웨이 운동에서의 램프 응답에 대한 실험 결과를 보여주는 데 약 30초까지는 추진력이 없다. 입력 신호가 대략 5.7V인 28초 때부터 추진력이 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것을 선형화하면, (a) 그림에서 식(4), (b) 그림에서 식(5)을 유도할 수 있다.

$$f = -8.53 V + 48.33 \text{ [lbs]} \quad V > 5.72 \text{ [V]} \quad (4)$$

$$f = -3.93 V - 23.30 \text{ [lbs]} \quad V < -5.72 \text{ [V]} \quad (5)$$

5. 결 론

본 연구에서 소형 잠수정에 장착된 자체 제어 추진기를 평가하기 위한 시험 설비를 제안했다. 기초 프레임과 JR3 힘/토크 센서, 소형 잠수정 지지대로 시험 설비를 구현하였고, 센서로 측정된 잠수정의 토크와 힘은 데이터 수집 프로그램을 이용해서 데이터를 수집하였다.

이 데이터를 토대로 연구 결과를 분석해보면, 토크의 진동은 시험 설비의 진동이고, 전압과 힘의 관계를 알므로 해서 잠수정의 실제적인 추진력을 구할 수 있다. 그러므로 새로운 시험 설비는 잠수정에서 추진기를 분리하지 않고도 잠수정의 추진력 특성을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] A.J. Healey, S.M. Rock, D. Miles, and J.P. Brown, "Toward an Improved Understanding of Thruster Dynamics for Underwater Vehicles," IEEE J. Oceanic Engineering, Vol. 20, No. 4, October 1995.
- [2] R. Bachmayer, L. Whitcomb, M. Nakamura, and M. Grosenbaugh, "Unsteady Three-Axis Force, Torque and Flow Dynamical Modeling and Experiments with Marine Thrusters," Proceedings of the 10th Int. Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology,
- [3] JR3, Inc. 홈페이지 : <http://www.jr3.com/>