

무인반잠수정의 진자식 횡동요 저감 장치 설계 및 감쇠계수 기반 검증

진우석¹·김용호²·정준호²·이광국^{3,†}·김동헌⁴
부산대학교 조선해양공학과¹
경남대학교 메카트로닉스공학과²
경남대학교 조선해양시스템공학과³
경남대학교 전기공학과⁴

Design of a Pendulum-type Anti-rolling System for USSV and Verification Based on Roll Damping Coefficient

Woo-Seok Jin¹·Yong-Ho Kim²·Jun-Ho Jung²·Kwangkook Lee^{3,†}·Dong-Hun Kim⁴
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea¹
Department of Mechatronics Engineering, Kyungnam University, Changwon, 51767, Korea²
Department of Naval Architecture & Ocean System Engineering, Kyungnam University, Changwon, 51767, Korea³
Department of Electrical Engineering, Kyungnam University, Changwon, 51767, Korea⁴

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The roll motion of a general vessel, which is more influenced by resonance as compared to other motions, adversely affects the passenger and hull. Therefore, reducing the roll motion through an anti-rolling system is critical, and most ships use various devices such as anti-rolling tanks, bilge keels, and fin stabilizers to accomplish this. In this study, a simplified model is developed for the application of an anti-rolling device for unmanned semi-submersible vessels. The applied anti-rolling device is installed on the stern and stem of a ship using a pair of servo motors with added weight, and the motor is controlled through the Arduino. The moment of the motor is designed and implemented based on a mathematical model such that it is calculated through the restoring force according to the heel angle of the ship. The performance of the proposed system was verified by utilizing the roll damping coefficient calculated by the free-roll decay test and logarithmic decrement method and was validated by a towing tank test. The system is expected to be used for unmanned vessels to perform sustainable missions.

Keywords : Unmanned semi-submersible vehicle(무인반잠수정), Anti-rolling device(횡동요 저감 장치), Free roll decay test(자유 횡동요 감쇠실험), Logarithmic decrement method(대수감쇠법), Roll damping coefficient(횡동요 감쇠계수)

1. 서론

무인선은 유인선으로 수행하는 임무 중 안전 측면에서 접근하기 어려운 천해역, 오염해역에서 주로 이용되며, 해양감시, 해양조사와 같은 장시간작업에는 운용경비와 승무원들이 피로 누적을 최소화할 수 있다. 또한 기뢰탐색 및 제거, 적진 침투 첩보, 황천종의 작업등과 같이 위험한 임무를 수행하는 용도로 주로 사용되며, 무인선은 주로 군사용 목적으로 많이 사용되고

있으나 최근 공공목적으로의 수요가 늘어나고 있으며 민수용으로는 아직 수요가 적은 편으로 주로 과학적 용도로 활용되고 있다(Kim & Kim, 2015).

Fig. 1과 같이 바다에서 운용 가능한 선박 중 무인선은 무인수상선, 무인반잠수정, 무인잠수정으로 분류 할 수 있다. 무인잠수정은 무인수상선에 비해 복원성 측면에서 뛰어나지만 무인수상선에 비해 이동속도가 느리며, 무인수상선은 통신장치와 외부 카메라가 수면위에 있어 통신환경이 뛰어나다. 따라서 무인수상선과 무인잠수정의 단점을 보완하기 위한 무인반잠수정

형태는 거친 해양환경에서 임무를 수행하기에 최적화된 플랫폼이라고 할 수 있다(Lee et al., 2017 cited in Jeong et al., 2018)

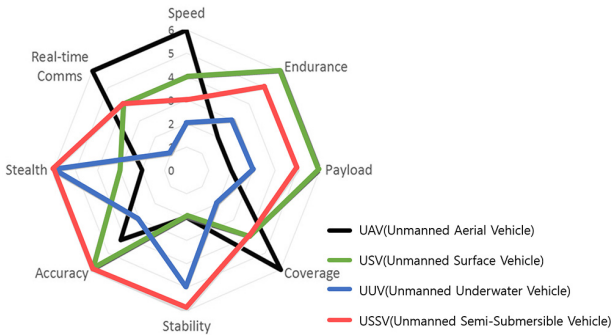


Fig. 1 Comparison of characteristics between unmanned semi-submersible and other unmanned vehicles (Lee et al., 2017 cited in Jeong et al., 2018)

선박은 수면에서 크고 작은 파도에 의하여 지속적으로 6자유도에 따른 회전, 병진 운동이 발생한다. 이러한 선박의 운동은 선체뿐만 아니라 선원이나 승객에게도 악영향을 미쳐 운항 중 안정성을 떨어뜨린다. 무인선은 탑승자가 없어 인원에게 악영향을 미치지 않지만 해양환경에 의해 선체가 전복되거나 동요로 인해 통신장비의 손상으로 주어진 임무를 수행할 기능을 상실할 수 있다. 따라서 무인선 또한 선박에서 사용되는 자세제어장치가 필요하다.

대부분의 선박은 자세제어장치를 통하여 선체의 동요를 최소화 하고 있으며 대표적인 횡동요 저감 장치에는 빌지킬(Bilge Keel), 핀 안정기(Fin Stabilizer), 감요수조(ART : Anti Rolling Tank) 등이 있다. 빌지킬은 선체에 부착된 가장 초기의 장치로 1870년로 거슬러 간다. 빌지킬은 횡동요 저감의 효과가 있고, 1920년대 Mitsubishi Shipbuilding의 Motora 박사에 의해 핀 안정기가 처음 소개되었다(Burger & Corbet, 1966). 핀 안정기에 의해 생성된 리프트 힘으로 인해 선박의 횡동요 감소를 얻을 수 있고, 제어 이론과 기술의 발전으로 방향타 안정기까지 등장했다(Amerongen et al. 1990; Sharif et al. 1996; Alarçin & Gulez 2007)

최근에는 Liu et al.(2019)과 Lihua et al.(2019) 연구가 대표적이다. Liu et al.(2019)은 인도네시아 동 자바 어선을 대상으로 사이드 빌지 킬을 모델링 및 시뮬레이션을 통해 설계하고 이를 실선 측정을 통해 검증하였다. 11.78%의 횡동요 저감과 4.87%의 전체 저항을 줄이는 효과를 보였다. Lihua et al.(2019)은 선박의 선회 시 핀 안정기의 영향에 대해 연구하기 위해 프로펠러, 리더, 핀안정기, 파력에 의한 선체 운동을 Matlab으로 모델링하고 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과에 따르면 핀 안정기는 선회 시 몬테카를로 시뮬레이션 기반 PID 제어를 통해 선회 반경이 줄어들고, 이를 통해 핀 안정기 제어에 몬테카를로 시뮬레이션 기반 PID제어가 효과적임을 밝혔다. 선체 부가물이 아닌 횡동요 저감 시스템에는 Moon et al.

(2004)의 연구에서 소형 선박용으로 제안된 진자식 횡동요 저감 장치와 Moon et al. (2004, 2005)의 연구에서 제안한 질량을 이용한 횡동요 저감 시스템(MD-ARS : Mass Driving Anti-Rolling System)등이 있다. 제주대학교 실습선 아라호의 능동형 횡동요 감쇠장치의 성능 연구(Moon et al. 2004)에 따르면 U-tube형으로써 각 탱크 중앙에는 유체 운동이 자유롭게 일어날 수 있도록 cross duct 형태로 구성되어 있고, 선박이 정지했을 때 47.5%, 운항 중 일 때 12.7%의 감쇠 효과가 있음을 설명한다. Alujevića et al.(2019)은 U-tube 형 ART를 수학적 으로 유도하여 파라메트릭 등가 모델을 창안하였다. 이는 ART의 주파수와 감쇠비를 조율함으로써 에너지 효율을 극대화 할 수 있는 방안을 제시하였다.

두 가지 타입을 모두 고려한 연구로 Chung et al.(2010)은 250TEU급 쌍동선 모바일 하버의 횡동요 저감을 위하여 tuned-type ART와 자기부상방식 AMD(Active Mass Driver)를 고안하여 개념설계 방안을 제안하였다. 대형선의 경우 U-tube 형 ART가 효과적이지만 무인선과 같은 소형 선박의 경우 부대 장비가 더 필요하기에 효율적이지 못하다. 이에 본 연구에서는 소형 선박에 적합한 진자식 횡동요 저감 장치에 대한 설계 및 검증을 보이하고자 한다.

본 연구에서 제안한 횡동요 저감 장치는 이전 연구에서 제안된 수동형 진자식 횡동요 저감 장치에서 고안한 것으로 아두이노 보드에 탑재된 코드에 의해 자율적으로 횡동요를 제어 가능한 진자식 횡동요 저감 시스템이다. 아울러 무인반잠수정의 특성과 목적상 추가적인 조작 없이도 작동 가능한 횡동요 저감 장치를 개발 및 검증 하고자 한다.

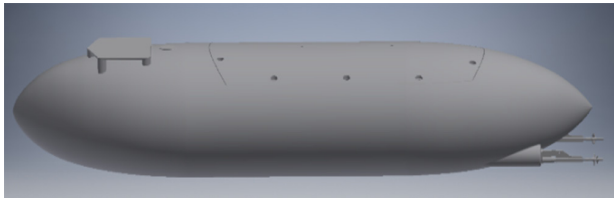
해당 장치는 실험모형의 자유횡동요주기를 기준으로 무게 추 회전 주기를 설정하고 장치를 작동하지 않은 상태와 회전 주기에 변화를 준 세 가지 시나리오를 더해 총 네 가지 시나리오에 대한 성능 비교를 실시한다. 성능 비교는 수조에서의 자유 횡동요 감쇠 실험(Free decay test)을 통해 얻은 자유 감쇠 횡동요의 시간이력(Time history)곡선과 횡동요 감쇠 계수를 통해 실시하며 그 특성을 분석하는 것을 목표로 하였다.

2. USSV(Unmanned Semi-Submersible Vehicle) 진자식 횡동요 저감 시스템의 설계 및 검증

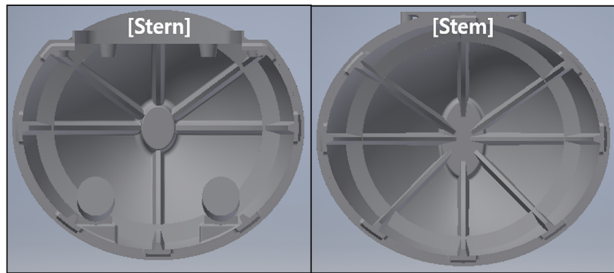
2.1 USSV 선형 및 사양

Myring hull(Shuzhe, et al. 2011)은 유선형 UUV(Unmanned Underwater Vehicle)의 가장 널리 사용되는 선체형태이며, 몸체길이/최대직경 비율에 대하여 유체의 저항을 최소화한 실린더 형태로 설계가 가능하다(Jeong 2011). 무인반잠수정의 선정한 길이와 폭을 고려하여, 선수부 30cm, 중앙부 38cm, 선미부 32cm로 모델 선형을 설계하였다. Twin propeller 사용을 위하여 선미부를 기존보

다 약 10%를 증가시킨 형상으로 Fig. 2와 같다. 해당 선형에 대한 동특성 검증은 Lee et al. (2017) 및 Lee et al. (2019)의 연구에서 횡동요에 취약함이 밝혀진 바 있다. 이에 해당 선형은 실린더 형상으로 횡동요 저감 시스템이 필요하다.



(a) USSV's 3D hull model



(b) USSV's stern and stem



(c) USSV's 3D printing model

Fig. 2 USSV's hull model implementation(Lee et al., 2017)

2.2 USSV 진자식 횡동요 저감 시스템의 설계

USSV의 횡동요를 저감할 수 있는 장치에는 앞서 언급했듯이 여러 방법들이 있지만, 본 연구에서는 선수와 선미에 설치된 서보모터로 연결된 무게 추를 회전시킬 때 발생하는 모멘트를 통해 횡동요를 저감하는 방법을 선정했다. 각 서보모터는 선체 중앙부에 설치된 아두이노 우노(Arduino Uno)를 통해 제어되며 장치는 Fig. 3과 같이 센서를 통해 측정되는 횡경사각에 따라 세 가지 조건에 의해 작동된다.

Fig. 4와 같이 선박이 초기 정지 상태일 때는 무게 추를 선체의 횡방향 중심 위치로 이동하여 무게 중심을 낮춰 자세를 유지한다. 첫 번째 조건은 정지 상태인 선체가 한 방향으로 횡경사하기 시작하면 선수와 선미 쪽의 무게 추를 선체가 횡경사하는 반대 방향으로 이동시킨다. 이동하는 양은 증가하는 횡경사각에 비례하여 이동된다.

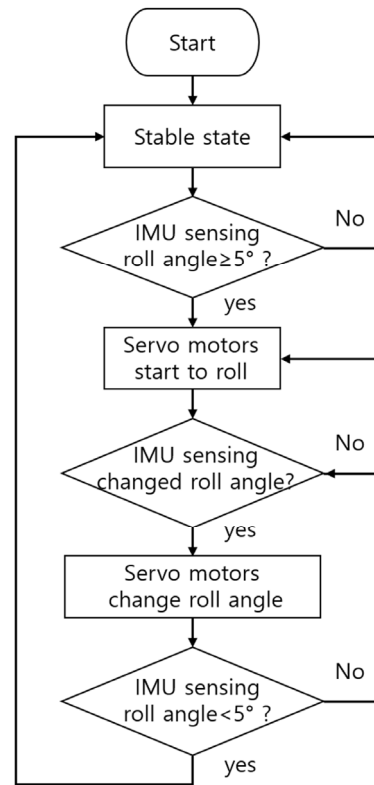


Fig. 3 Proposed anti-rolling system's operating flow chart

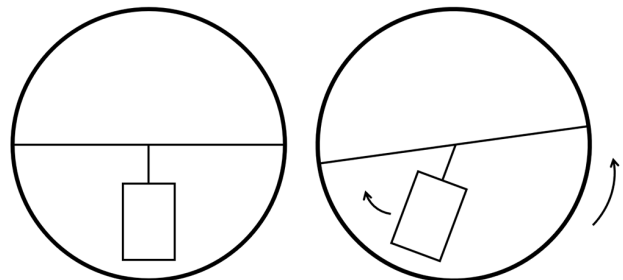


Fig. 4 Stable state and First condition

두 번째로 Fig. 5와 같이 선박이 한쪽으로 횡경사 중 반대방향으로 설정한 회전 오차범위를 벗어나 급격하게 횡경사하면 선박이 좌우 동요를 시작했다고 판단하여 이동시킨 무게 추를 설정된 주기로 좌우 회전시켜 횡동요를 저감한다. 마지막으로 선박의 횡경사각이 설정한 일정 범위($-5^{\circ} \sim 5^{\circ}$)로 지속되면 Fig. 6과 같이 안정화 되었다고 판단하여 장치를 초기상태로 되돌린다.

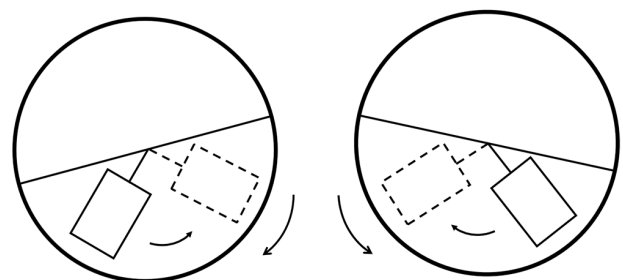


Fig. 5 Second condition

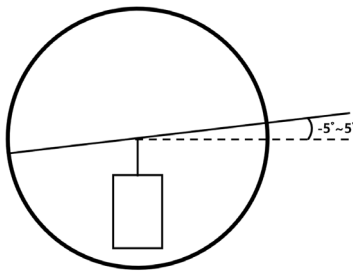


Fig. 6 Return to Stable state

설계한 횡동요 저감 장치의 성능에 영향을 미치는 요소에는 추가 회전하는 주기, 모터의 성능, 회전하는 무게 추의 중량 등 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 추를 회전시키는 주기에 따른 성능의 차이를 비교하였다. 모형스케일에서 선박의 경사에 따른 횡동요 주기에 변화가 없다고 보고 장치를 작동하지 않은 상태의 모형으로 자유 횡동요 시험을 진행하여 얻은 횡동요 주기인 1 sec (Fig. 7)를 기준으로 20%의 증감을 준 세 가지 모델(0.8, 1.0, 1.2 sec)로 설계하였다.

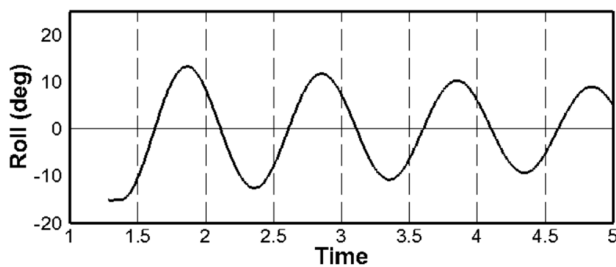
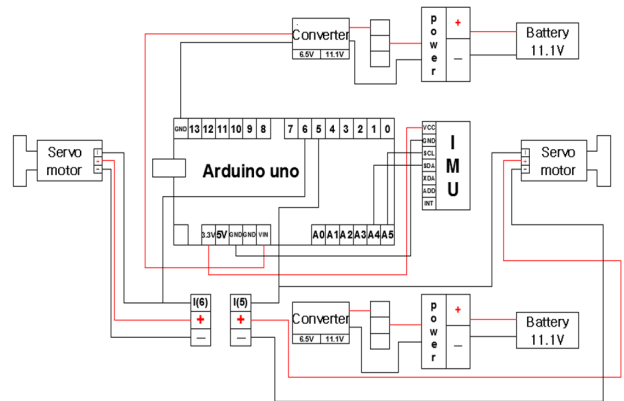


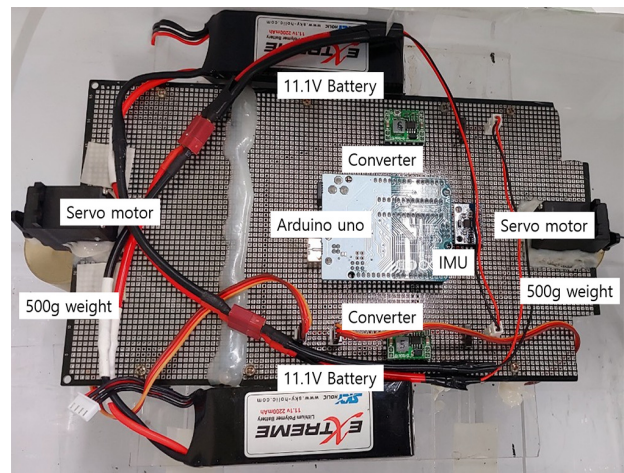
Fig. 7 Time history curve of the free roll decay test

제안한 횡경사 저감 장치를 위한 제어기는 아두이노 우노 R3로 구성하였고, 기울기 값을 측정하는 IMU(Inertia Measurement Unit) 센서, 서보모터(Servo motor) 2개, 11.1V 배터리(Battery) 2개, 컨버터(Converter) 2개로 Fig. 8 (a)와 같이 회로를 구성하였다. 사용된 IMU 센서(InvenSense, 2014)는 초당 8,000~32,000 개의 데이터를 샘플링 할 수 있으며 분석에 사용된 횡경사각을 측정할 광학 센서(Natural Point, 2011)는 초당 1,000~50,000 개의 데이터 샘플링이 가능하다.

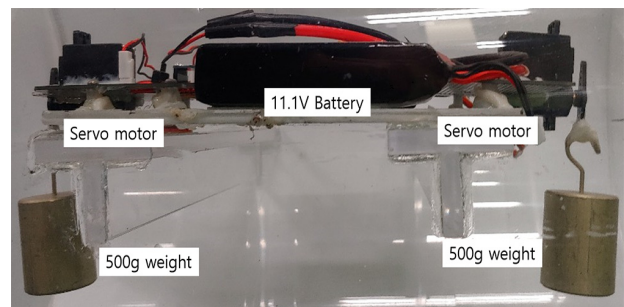
Fig. 8 (b)는 구성된 회로도를 기반으로 제어보드를 구성한 모습이다. 횡동요 저감을 위한 질량으로 Fig. 8(c)와 같이 양측 서보 모터에 500g 무게 추를 부착한 모습을 볼 수 있다. 500g 무게 추가 달린 양측 서보모터는 큰 토크를 필요로 하기 때문에 컨버터를 사용하여 최대 토크를 낼 수 있는 6.5V를 인가하였고, 아두이노와 IMU센서에는 다른 컨버터를 사용하여 5V의 전압을 인가하였다. 제어기에 연결된 IMU센서가 횡경사 저감 장치의 기울기를 측정하며, 선체의 회전을 감지하면 서보모터가 설정된 주기로 좌우 회전하여 횡동요를 저감한다. 횡경사 저감 장치의 기울기가 설정한 일정 범위(-5°~5°)값으로 감소하게 되면 서보모터가 정지하게 된다. 횡동요 저감을 위한 서보 모터 제어는 C 언어 기반의 PWM (Pulse-Width Modulation) 으로 구현하였다.



(a) Mainboard circuit diagram



(b) Control unit board(top view)



(c) Control unit board(side view)

Fig. 8 Hardware configuration

2.3 USSV 진자식 횡동요 저감 시스템의 검증

감쇠계수를 산출하는 방법에는 상대감쇠법이 주로 사용되지만 본 연구에서는 상대적으로 유도 과정이 간편한 대수감쇠법을 통해 얻은 무차원 등가 선형 감쇠계수 ζ 를 네 가지 모델에 대하여 비교하였다.

Kim et al. (2015)의 연구에 따르면 대수감쇠법은 횡동요 비선형 감쇠 과정을 바로 등가의 선형 감쇠에 의한 과정으로 간주하여 동요 구간별 무차원 감쇠계수를 구하며, 이 구간별 무차원 감쇠계수를 회귀분석을 통해 횡동요 진폭의 1차 함수로 표현하는 방법으로 해당 논문에서 실험 결과의 비교를 통한 검증이 이

루어졌다.

감쇠계수를 구하는데 사용되는 횡동요 피크값은 자유 횡동요 실험을 통해 측정되며 측정값의 양의 피크값(Positive peaks)이나 음의 피크값(Negative peaks) 또는 두 가지 모두를 포함하는 피크값(Double peaks)을 사용 할 수 있으나 본 논문에서는 양의 피크값을 사용했다. Fig. 9에서 볼 수 있는 i 번째와 $i + 1$ 번째 횡동요 피크값의 평균 진폭을 A_i , 피크값의 비에 자연대수를 취한 대수감쇠(logarithmic decrement) 값을 δ_i 로 정의한다.

$$A_i = \frac{1}{2}(\phi_i + \phi_{i+1}) \tag{1}$$

$$\delta_i = \ln \frac{\phi_i}{\phi_{i+1}} \tag{2}$$

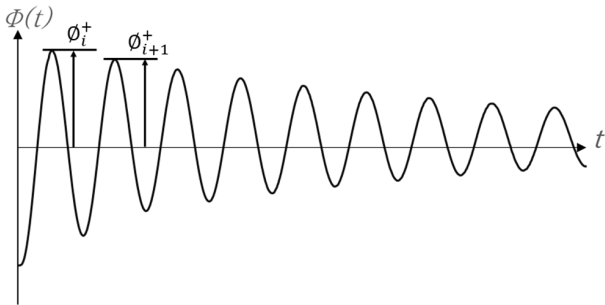


Fig. 9 The roll time history curve

Kim et al. (2015)의 연구에 의하면 이 대수감쇠 δ_i 는 각 순간에서의 등가 선형감쇠에 의해 일어난다고 가정하여 무차원 등가 선형 감쇠계수 ζ_i 와 다음의 관계를 갖는다.

$$\zeta_i = \frac{\delta_i^2}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta_i^2}} \tag{3}$$

Fig. 10은 x값으로 표현된 평균 횡동요 진폭에 따른 식(3)으로 계산된 y값의 무차원 감쇠 계수 데이터를 바탕으로 선형회귀 분석 (Linear regression)방법인 최소자승법(Least square estimation)을 사용하여 구한 추세선을 나타낸다.

$$\zeta_i = r + sA_i \tag{4}$$

식(4)는 대수감쇠법으로 산출한 무차원 등가 선형 감쇠계수를 횡동요 진폭 A_i 에 따른 1차식으로 표현한 것으로 Fig. 10의 추세선을 의미한다.

A_i 는 횡동요 진폭 ϕ_a 로 대체 될 수 있으므로 무차원 감쇠계수 ζ 는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\zeta = r + s\phi_a \tag{5}$$

식(5)의 ζ 가 대수감쇠법으로 산출한 무차원 등가 선형 감쇠 계수이며 이렇게 산출한 감쇠계수를 비교하여 각 모델별 성능을 검증하였다.

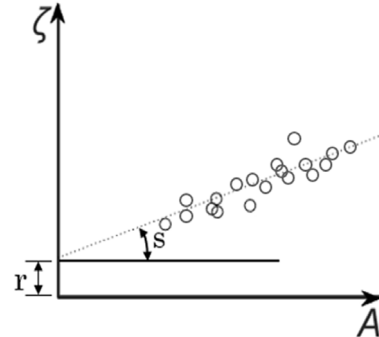


Fig. 10 Nondimensional damping coefficient vs. Roll amplitude

3. 실험방법 및 결과고찰

3.1 실험모형

실험에 앞서 횡동요에 대한 저감을 집중적으로 관찰하기 위해 USSV의 모형을 사용하는 대신 선형의 길이를 반으로 줄인 프로토타입을 구현하여 실험하였다. Fig. 11는 실험에 사용된 모델은 3D모델로 실제 실험모형은 8mm 두께의 아크릴로 제작하였다. 모형자체의 무게가 배수량에 비하여 작았기 때문에 흡수를 높이기 위한 무게 추를 모형 바닥에 추가로 설치했다. Table 1은 제작한 모형의 기본 제원을 나타낸다.

Table 1 Main Specification of model hull

Length L (mm)	500
Breadth B (mm)	350
Depth D (mm)	350
Draft d (mm)	150
Thickness t (mm)	8

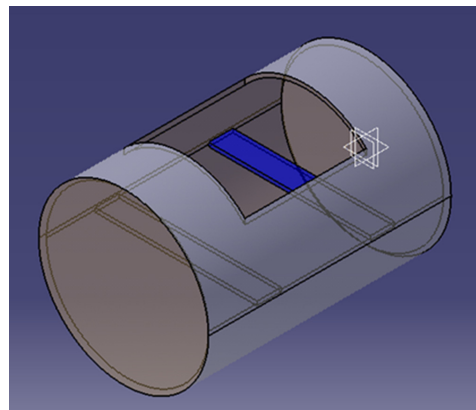


Fig. 11 3D prototype hull model

3.2 실험방법

실험 장소는 길이 20.0m × 폭 14.0m × 깊이 1.8m의 3차원 조파수조이다. 실험모형은 동요로 인해 외벽에서 발생하는 반사 파의 영향을 최소화하기 위하여 수조 중앙에 위치하였다. 실험의 재현성을 위해 동요 후 같은 위치를 유지하도록 Fig. 12와 같이 와이어와 스프링을 통해 계류된 상태로 실험을 진행하였다. 횡경사각은 선체 중앙에 설치한 3개의 포인트를 인식하는 광학센서로 계측되었다. 자유 횡동요 실험으로 진행되었으며 초기 횡경사각을 유지하기 위하여 선박의 우측에 줄을 매달 수 있는 작은 고리를 설치하였다. 모형의 수직방향 위쪽에 설치된 크레인 과 모형을 가볍고 쉽게 절단 가능한 줄로 연결한 후 줄을 끌어 당겨 횡경사 시키고 횡경사각을 유지할 정도의 무게를 가진 추를 연결하여 고정시켰다. 모형의 초기 기울기를 15°로 설정하였으며 센서를 통해 측정된 기울기가 15°로 유지될 때 순간적으로 줄을 절단하여 자유 횡동요 시켰다. 회전주기에 증감을 준 3 가지 모델에 대하여 실험을 진행하였다.

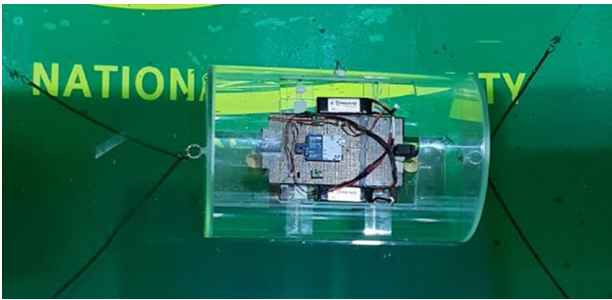


Fig. 12 Experimental test setup

3.3 실험결과고찰

Figs. 13 ~ 16은 횡동요 저감 장치를 작동하지 않은 모델인 0 sec (No operation)와 횡동요 저감 장치를 작동시켰으며 회전주기에 증감을 준 3가지 모델(0.8, 1.0, 1.2 sec)의 자유 횡동요 실험을 통해 얻은 횡동요 시간이력 곡선을 비교한 것이다. 그래프 상에서는 주기가 1.0 sec와 1.2 sec 일 때 횡동요 저감이 일어난 것으로 보이며 0.8 sec에서는 오히려 횡동요 피크값이 증가한 부분이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 특히 Fig. 14의 주기 1.0 sec에서의 곡선을 비교하면 모델이 횡경사를 시작하고 안정 상태(-5°~5°)가 되기까지 0 sec에 비하여 확연히 줄어들었다. 또한 Fig. 15에서 횡동요 감쇠가 일어난 1.0 sec와 1.2 sec의 곡선을 비교해도 1.0 sec의 횡동요 저감이 더 뛰어난 것을 확인 할 수 있다.

Table 2는 각 회전 주기별 무차원 횡동요 감쇠계수를 비교한 것으로 횡경사별 성능을 비교해 볼 수 있다. 선박이 크게 경사할 수록 1.0 sec의 감쇠계수와 다른 모델의 감쇠계수의 차이가 커지는 것을 확인 할 수 있다. 횡경사각이 25°일 때를 보면 1.0 sec주기의 모델이 5.18%로 감쇠계수가 가장 크며 작동하지 않은 상태인 0.0 sec가 0.61%로 약 8.49배의 차이를 보인다.

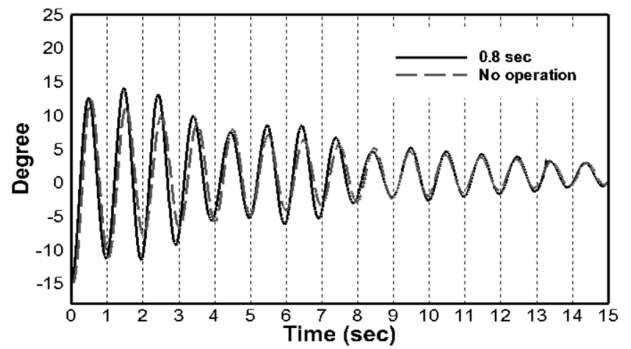


Fig. 13 Comparison of roll time history curves (No vs 0.8 sec)

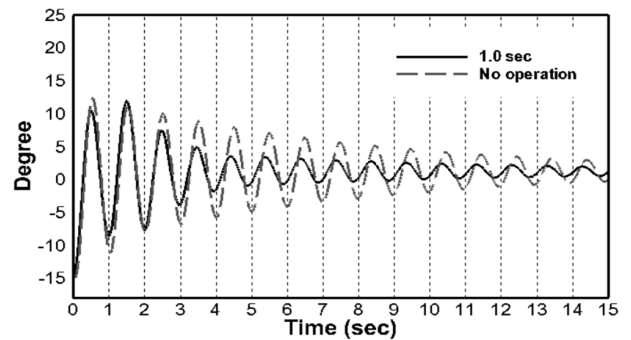


Fig. 14 Comparison of roll time history curves (0 vs 1.0 sec)

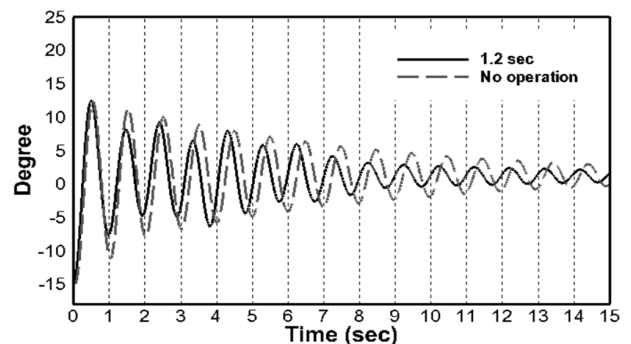


Fig. 15 Comparison of roll time history curves (No vs 1.2 sec)

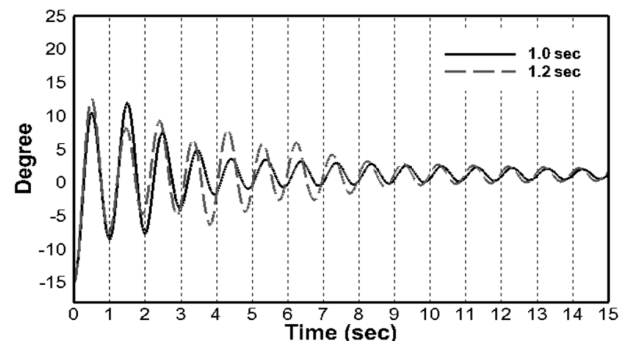


Fig. 16 Comparison of roll time history curves (1.0 vs 1.2 sec)

무게 추의 회전주기가 선박의 횡동요 주기와 일치할 때 가장 횡동요 저감 성능이 뛰어나며 모델의 횡동요 주기보다 회전 주기가 더 느려지거나 빨라지면 감쇠효과가 줄어든다는 것을 알 수 있다.

Figs. 17 ~ 20은 각 케이스별 15°에서의 x값으로 표현된 평균 횡동요 진폭에 따른 y값의 무차원 감쇠 계수 데이터를 바탕으로 최소자승법(Least square estimation)을 사용하여 구한 추세선을 나타낸 것으로 Fig. 21을 보면 주기가 1.0 sec 일 때의 기울기가 가장 큰 것을 확인할 수 있다.

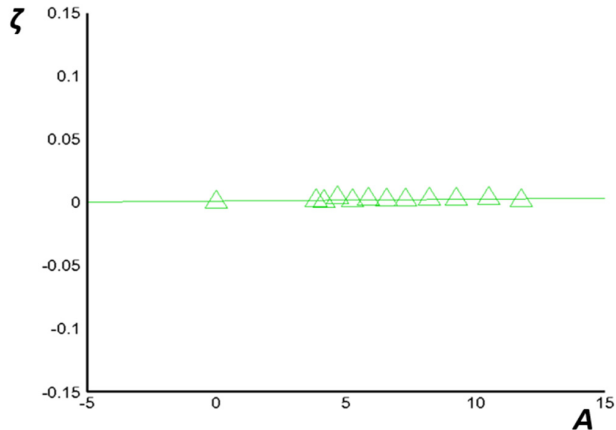


Fig. 17 Nondimensional damping coefficient vs. Roll amplitude (No operation, 15°)

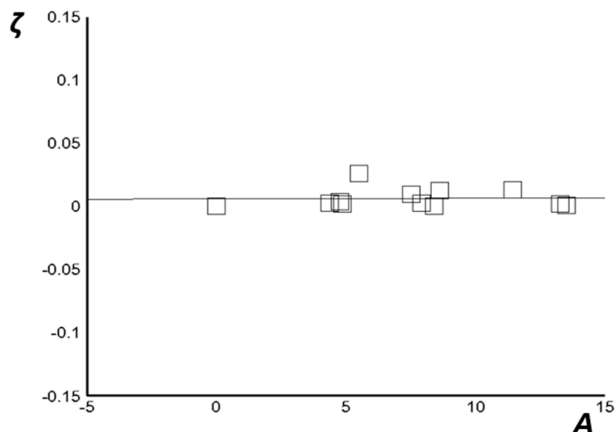


Fig. 18 Nondimensional damping coefficient vs. Roll amplitude (0.8 sec, 15°)

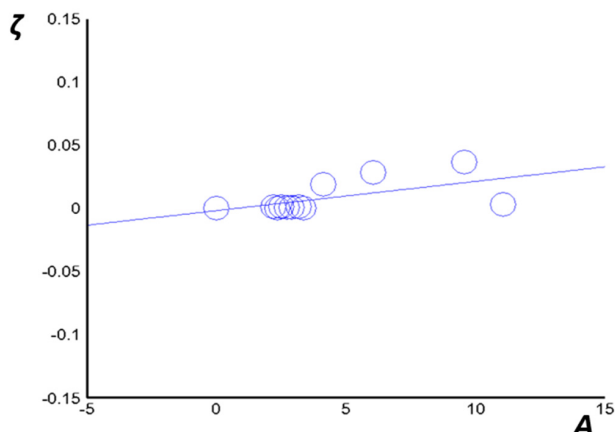


Fig. 19 Nondimensional damping coefficient vs. Roll amplitude (1.0 sec, 15°)

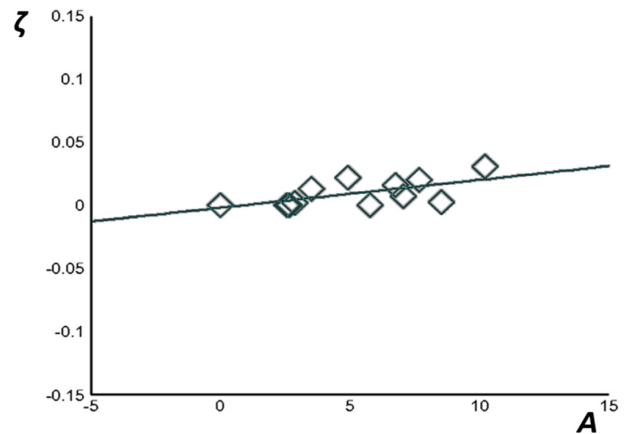


Fig. 20 Nondimensional damping coefficient vs. Roll amplitude (1.2 sec, 15°)

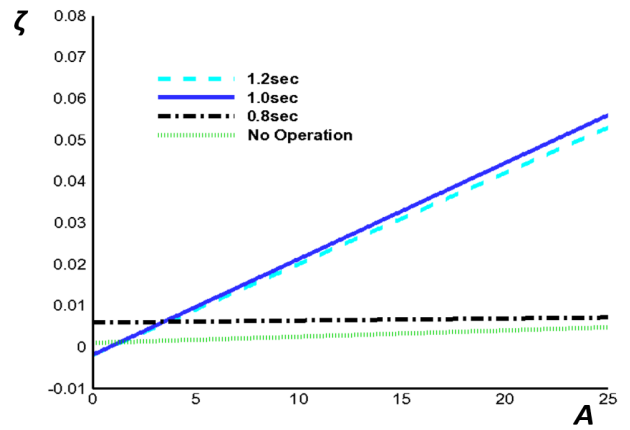


Fig. 21 Nondimensional damping coefficient vs. Roll amplitude (All)

Table 2 Comparison of the nondimensional damping coefficients

Case	Roll damping coefficient, ζ (%)				
	$\phi_a = 5^\circ$	$\phi_a = 10^\circ$	$\phi_a = 15^\circ$	$\phi_a = 20^\circ$	$\phi_a = 25^\circ$
0.0	0.13	0.25	0.37	0.49	0.61
0.8	0.38	0.65	0.93	1.21	1.49
1.0	0.99	2.04	3.08	4.13	5.18
1.2	0.94	1.92	2.90	3.88	4.86

4. 결론

본 연구에서는 무인반잠수정에 적용 가능하고 아두이노에 탑재된 코드로 제어되며 선박의 횡경사를 감지해 작동하는 무게 추를 사용한 진자식 횡동요 저감 시스템에 대해 제안하였다. 또한 재현성 높은 모형실험을 통해 데이터를 계측하고 대수 감쇠법을 통해 산출한 횡동요 감쇠 계수의 비교를 통한 성능 검증을 진행하였으며 무게 추의 회전주기에 따른 횡동요 저감 성능의 차이를 확인하였다.

실험 결과 무게 추를 회전시키는 주기에 따른 장치의 성능의 차이가 존재한다는 것을 확인 하였다. 수행된 실험의 결과를 보면 선박의 횡동요 주기와 근사한 회전 주기를 갖는 횡동요 저감 장치의 성능이 가장 뛰어나며 횡동요 주기에 비해 빠른 회전 주기보다는 느린 회전 주기를 갖는 장치가 횡동요 저감에 크게 기여한다는 것을 알 수 있었다. 그 이유는 선박의 횡동요 방향이 전환될 때 무게 추가 반대 방향의 모멘트를 일으키는 방향으로 회전되어야 횡동요 저감 효과를 기대할 수 있지만 모델의 횡동요 주기와 회전 주기가 달라지면 오히려 선박이 횡동요하는 방향으로 회전 하는 힘이 생겨 횡동요의 증폭이 일어난다고 볼 수 있다.

횡동요 저감 장치를 적용 시 선박의 동특성에 따른 설계 변수의 최적화가 이루어져야 하며 대상 선박의 선종과 목적에 따른 적절한 횡동요 저감 장치의 선정 또한 중점적으로 고려되어야 하는 사항이다. 본 연구에서는 거친 해양환경에서 기뢰탐색 및 제거, 적진 침투 첩보, 황천중의 작업등과 같이 위험한 임무 수행을 목적으로 하는 무인반잠수정에 적용하기 위한 자동형 진자식 횡동요 저감 장치를 설계하였다. 설계된 횡동요 저감 장치는 대상 선박의 횡동요 주기에 따른 진자의 회전주기를 주요 설계 변수로 설정하여 실험을 통해 검증 하였다.

실험에 사용된 제어장치는 아두이노 우노 기판을 사용하였으며 그로 인한 제어 딜레이와 장착된 센서의 노이즈를 고려하면 작동 오차가 있을 것이고, 고성능 센서로의 교체를 통한 정도 높은 환경사각의 측정이나 나아가 PID(proportional-integral-derivative) 제어 또는 퍼지 제어 알고리즘의 적용 등 아직 개선의 여지가 많을 것으로 보인다. 향후 제작한 모형과 정립된 실험 방법은 개선된 횡동요 저감 장치를 적용한 데이터와의 비교 분석할 수 있는 기반이 될 것이다. 나아가 선형 및 선종에 따른 진자 무게 증감 모델의 성능을 비교하거나 해당 선형에 적합한 제어 알고리즘 비교하는 연구가 필요할 것으로 고대된다.

후 기

이 논문은 2017년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2017R1A2B4011329).

References

- Amerongen, J. van, Klugt P. van der, & Nauta Lemke H. van, 1990. Rudder roll stabilization for ships, *Automatica* 26 (4), pp.679-690.
- Alarçin, F., & Gulez, K., 2007. Rudder roll stabilization for fishing vessel using neural network approach. *Ocean Engineering*, 34(13), pp.1811-1817.
- Alujević, N., Čatipovića, I., Malenicab, Š., Senjanovića, I., Vladimira, N., 2019, Ship roll control and power absorption using a U-tube anti-roll tank, *Ocean Engineering*, 172, pp.857-870.
- Burger, W., Corbet, A., 1966. Ship Stabilizers: A Hand Book for Merchant Navy Officers, Pergamon.
- Chung, T. Y., et al., 2010, A study on conceptual design of anti-rolling devices for 250 TEU class mobile harbors. *The Korean Society of Noise and Vibration Engineering*, 20(7), pp.629-636.
- InvenSense Inc., 2014. *MPU-9250 Product Specification*, InvenSense Inc.
- Jeong, M.J., 2019. *Simulation modeling and performance verification of motion characteristics for USSV's SILS*. Master's Thesis. Kyungnam University.
- Kim, J.H. & Kim, S.Y., 2015. Development trends and industry status of unmanned ship technology. *Korea Evaluation Institute of Industrial Technology*, 15(3), pp.83-95.
- Kim, N.W., Kim, Y.J. & Ha, Y.R., 2015. Experimental study of the free roll decay test for the evaluation of roll damping coefficients. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(6), pp.460-470.
- Lee, K., Jeong, M.J. & Kim, D.H., 2017. Software-In-the-loop based modeling and simulation of unmanned semi-submersible vehicle for performance verification of autonomous navigation, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 280, 012042.
- Lihua, L., Peng, Z., Songtao, Z., & Jia, Y., 2019, Simulation analysis of fin stabilizers on turning circle control during ship turns, *Ocean Engineering*, 173, pp.174-182.
- Liu, W., et al., 2019, Bilge keel design for the traditional fishing boats of Indonesia's East Java. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11, pp.380-395.
- Lee, K., Jeong, M.J. & Kim, D.H., 2019, Simulation modeling and performance verification of motion characteristics for USSV's SILS, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 25(5), pp.388-397.
- Moon, S.J., Park, C.I., Jeong, J.A., Kim, B.I. & Yun H.K., 2004. A sea-trial test of a pendulum-type mass driving anti-rolling system for small ships. *Korean Society for Noise and Vibration Engineering(KSNVE)*, 2004.5, pp.438-441.
- Moon, S.J., Kim, B.I., Lee, S.H., Ham, S.Y., Jeong, J.A., & Lee, K.J., 2004. An experimental study on mass driving anti-rolling system for ships. *Korean Society for Noise and Vibration Engineering(KSNVE)*, 2004.11, pp.727-730.
- Moon, S.J., Jeong, J.A., Yoon, H.K., Lee, G.J. & Ann, S.P., 2005. An experimental study on mass driving anti-rolling system for ships. *The Society of Naval Architects of Korea*, 42(6), pp.666-672.

Netural Point, Inc., 2011. *TECH SPECS – V120:Trio*. [Online] (Updated 2011) Available at: <https://optitrack.com/products/v120-trio/specs.html> [Accessed 18 July 2019].

Sharif, M., Roberts, G., & Sutton, R., 1996. Final experimental results of full scale fin/rudder roll stabilisation sea trials, *Control Engineering Practice*, 4(3), pp.377–384.

Shuzhe, C., Soon, H.G., Hong, E.Y., & Chitre, M.D. 2011. Modular modeling of autonomous underwater vehicle. *OCEANS'11 MTS/IEEE KONA*.



진우석



김용호



정준호



이광국



김동현