

수중용 TAS원치 전개/회수 성능 안정화 방안에 관한 연구

장호성^{1*}, 조규룡¹, 황재교¹, 이상용², 김용태³
¹국방기술품질원, ²(주)대우조선해양, ³(주)신우이앤디

A Study on Stabilization of Underwater TAS Winch System Deploy/Recover Operation Performance

Ho-Seong Chang^{1*}, Kyu-Lyong Cho¹, Jae-Gyo Hwang¹,
Sang-Yong Lee², Yong-Tae Kim³

¹Defense Agency for Technology and Quality,

²Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co.,Ltd, ³Shinwoo E&D Co.,Ltd

요약 본 논문은 수중용 TAS원치 전개/회수 성능 안정화 방안에 대한 내용을 서술하고 있다. TAS원치는 함미에 장착되어 자함과 이격되어 운용되는 센서, 예인케이블 및 꼬리로프의 전개/회수 기능을 수행하고, TAS에 대한 전원공급 경로, 수중환경 정보 및 수신된 음향신호 송/수신을 위한 데이터 전송 경로 제공 역할을 수행한다. TAS원치 시험평가 과정에서 간헐적으로 TAS 전개 중 멈춤현상 및 회전속도 변동현상이 식별되었다. TAS 전개/회수에 필요한 토크를 제공하는 구성요소인 원치모터에 대한 고장분석 결과, 구성품 중 회전자 정렬 틀어짐으로 인한 편심현상에 따른 자기장 왜곡이 발생한 것을 확인하였다. 자기장 왜곡 발생 방지를 위해 원치모터 회전자 및 슬립링 등 원치모터 구성품의 고정성 향상 방안을 제안하였다. 제안된 방안에 대한 신뢰성 확보를 위해 LBTS 환경에서 TAS원치 운용환경을 모사하여 TAS원치 전개/회수 성능을 검증하였다. 최종적으로 TAS원치 전개/회수 성능 뿐만 아니라 해상에서 TAS원치를 운용할 경우 요구되는 함 속력 및 타각별 TAS 지속 운용능력과 같은 여러 가지 항목에 대한 해상 시험평가를 수행함으로써 설계 요구조건 만족 및 제안 방안에 대한 타당성을 검증하였다.

Abstract This paper describes the stabilization of underwater TAS winch system Deploy/Recover operation performance. TAS winch installed on the stern of submarine performs to deploy/recover sensor, towing cable and rope tail which is deployed from the stern and separated from submarine itself. Also TAS winch provides transmission path of power to the sensor and data transmitting/receiving path which data are acquired from underwater environment like sound, depth and temperature. At the step of TAS winch evaluation test, sporadic standstill and rotating speed oscillation phenomenon were occurred. Winch motor provides the available torque to deploy/recover TAS and root cause analysis to the winch motor was done to find exact reason to sporadic malfunction. When winch motor was disassembled, eccentricity of rotor, slip-ring and the other composition part for winch motor were found. These might cause magnetic field distortion. To make TAS winch system more stable and block magnetic field distortion, this paper suggests methods to enhance fixing status installed in winch motor. For reliable data acquisition for TAS winch operation, the deploy/recover function of the improved type of TAS winch was verified in LBTS making similar condition with sea status. At the end of stage, improved type of TAS winch was tested on some functions not only deploy/recover function, but sustainability of TAS operation on specific velocity, steering angle of submarine in the sea trial. Improved type of TAS winch was verified in accordance with design requirement. Also, validity of suggested methods were verified by the sea trial.

Keywords : TAS winch, Winch Motor, PMSM, Rotor, Slip-ring, Eccentricity, Back-EMF, LBTS

*Corresponding Author : Ho-Seong Chang(Defense Agency for Technology and Quality)

Tel: +82-10-2937-6864 email: hschang@daq.re.kr

Received April 10, 2019

Revised May 27, 2019

Accepted June 7, 2019

Published June 30, 2019

1. 서론

선배열예인소나(TAS: Towed Array Sonar, 이하 TAS)는 함미에서 전개되어 예인되는 센서로 자함이 발생하는 소음과 이격하여 저주파 장거리 탐색이 가능하며, 수중환경 정보(수심, 수온) 측정 및 LF, MF, HF 대역 음향신호를 수신하여 전처리 및 전송함으로써 잠수함 함미에 대한 음파 탐지가 가능토록 하는 탑재장비이다. TAS 원치는 TAS 운용 시 센서, 예인케이블 및 꼬리로프의 전개/회수 기능을 수행하고, TAS에 대한 전원공급 및 통합 전투체계로 신호 데이터 전송을 위한 경로를 제공한다. 즉, 수중에서 운용되는 TAS의 작전운용 성능을 제대로 발휘하기 위해서는 함과 TAS의 연결 매체이며, 전기 및 기계적으로 TAS 예인과 직접적인 연관이 있는 TAS원치의 운용성능 신뢰성 확보가 필수적이라고 할 수 있다.

그러나, TAS원치 시험평가 과정에서 간헐적으로 TAS 전개 중 멈춤현상 및 회전속도 변동현상이 식별되었으며, 이는 잠수함이 음파 탐지성능이 우수한 TAS를 보유하고 있음에도 불구하고, 유사 시 즉각적으로 TAS를 전개/회수할 수 없어 작전운용 시 효과적으로 활용할 수 없음을 의미한다. 문제점 해결을 위해 역기전력(Back-EMF) 계측, 윈치모터 분해, 정류각(Commutation Angle) 계측 등 원인분석을 수행하였으며, 문제점 발생 원인으로 윈치모터 내 회전자, 슬립링 및 리졸버의 정렬 틀어짐으로 인한 편심현상을 식별하였다. 식별된 원인을 제거하기 위해 윈치모터 내 회전자 및 구성품의 고정성 향상 방안을 적용하였으며, 제안된 방안을 육상시험체계(LBTS:Land Based Test System, 이하 LBTS)를 통해 검증하고, 최종적으로 해상 시험평가를 통해 TAS원치 전개/회수 성능 안정화가 달성된 것을 확인하였다.

2. TAS원치 개요 및 구성

2.1 장비개요

TAS원치는 센서, 예인케이블 및 꼬리로프의 전개, 회수, 예인, 저장 및 절단기능을 수행한다. 또한 전개/회수 시 경로 제공, 함내 통합전투체계와 연동하여 일시정지 기능 및 비상 시 절단 기능을 제공한다. Fig. 1은 잠수함이 TAS원치를 이용하여 TAS 전개 후 수중 음향신호를 탐지하는 운용 모식도이다.

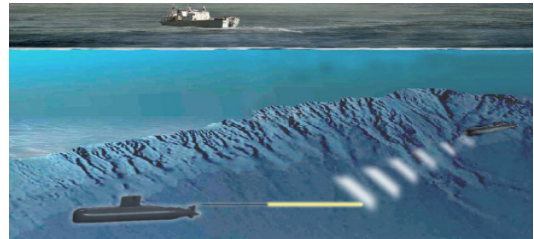


Fig. 1. Operational concept of TAS system

2.2 장비구성

TAS원치는 함내장비와 함외장비로 구성된다. 함내장비에는 유압캐비닛, 전시/제어장치, 함내제어캐비닛, 비상절단/정지 스위치 박스, DC ON/OFF 스위치 박스로 구성된다. 함외장비는 Fig. 2와 같이 윈치드럼 조립체, 전향장치 조립체, 전개장치 조립체, 절단장치 조립체, 가이드튜브 조립체, 카메라 세트 등으로 구성된다. Fig. 3은 함내장비 및 함외장비의 개략적인 형상과 연동 구성을 나타낸다. 본 연구에서 발생한 TAS 전개 중 멈춤현상 및 회전속도 변동현상은 함외장비와 관련도가 높으며, 함외장비의 개략적인 기능은 Table 1과 같다.

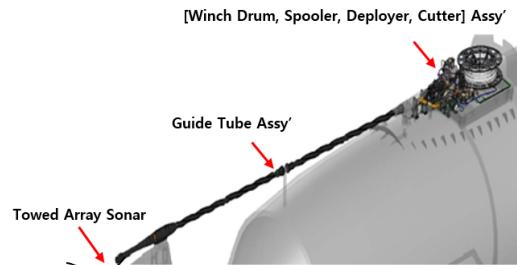


Fig. 2. Composition of TAS winch for outer part

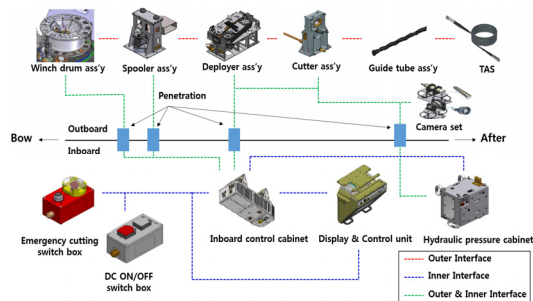


Fig. 3. Interface of TAS winch for inner & outer parts

Table 1. Function of TAS winch for outboard equipment

Part name		Function
Winch drum ass'y	Winch motor	Rotating winch drum Providing interface path to combat system by slip-ring
	Winch drum	Storing TAS
	Winch Brake	Stopping winch drum
	Compensator	Compensating pressure Blocking water flow to winch motor
Spooler ass'y	Spooler	Layering TAS during deploy/recover
Deployer ass'y	Sea water pump	Assisting initial deploying power
	Deployer	Providing initial deploying force
Cutter ass'y	Cutter	Cutting TAS cable on emergency
Guide tube ass'y	Guide tube	Providing deploying path
	Interference avoidance	Preventing interference with propeller & TAS cable

3. 원인분석 및 해결방안

3.1 멈춤현상 및 회전속도 변동 고장탐구

본 연구에서 발생한 TAS 전개 중 멈춤현상 및 회전속도 변동현상은 함내장비 소프트웨어 오류, 함내장비 및 함외장비 간 연동오류, 함외장비의 물리적 고장 등으로 발생할 수 있으며, 추정할 수 있는 원인은 Table 2와 같다. 해당 추정원인에 대한 분석을 위해 함외장비 육안점검, 윈치모터 회전자의 역기전력 계측, 윈치모터 고정자 및 회전자간 정렬상태를 확인하였다.

Table 2. Causes of TAS winch malfunction

Cause	Part
Software error	Inboard control cabinet
	Combat system
	Display & control unit
Interface error	Inboard control cabinet with winch drum ass'y
	Inboard control cabinet with spooler ass'y
	Inboard control cabinet with deployer ass'y
	Inboard control cabinet with cutter ass'y
	Inboard control cabinet with hydraulic pressure cabinet

Cause	Part	
Interface error	Inboard control cabinet with display & control unit	
	Inboard control cabinet with switch box	
Outer part physical error	Guide tube	Get tangled TAS Foreign object fixed
	Winch motor	Permanent magnetic rotator back-EMF hunting
Alignment error	Winch motor	Stator misalignment
		Slip ring misalignment
		Resolver misalignment

3.1.1 가이드튜브 조립체 및 윈치드럼 점검

TAS 전개 중 멈춤현상 및 회전속도 변동현상의 원인으로 가이드튜브 조립체 내 이물질 고착, 윈치드럼에 감겨있는 TAS의 꼬임과 같은 감김상태 불량 등이 의심되어 Fig. 4와 같이 함미 케이싱을 탈거하여 전반적인 함외장비 상태를 육안점검 하였다. 점검결과, 함외장비와 외부 물질간의 고착이나 윈치드럼 내 감김상태 불량과 같은 요소는 식별되지 않았다.

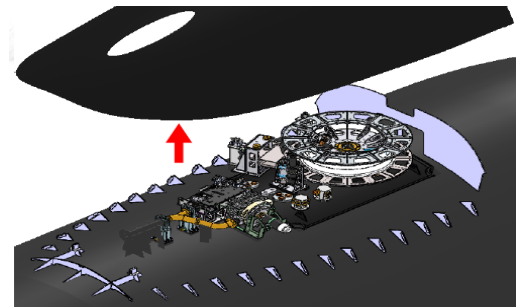


Fig. 4. Disassemble of stern casing of submarine

3.1.2 역기전력 계측

윈치모터는 Fig. 5와 같이 윈치드럼 내부에 장착되는 영구자석 동기 전동기(PMSM : Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 PMSM)로 전개/회수 시 TAS가 감겨있는 윈치드럼을 회전시키며, 기계적으로 연결되어 있는 슬립링 내 리졸버를 통해 윈치모터 위치를 검출한다. PMSM은 역기전력 형태가 정현파이므로 일정한 토크를 발생하기 위해서는 전류를 정현파로 정확하게 인가해야 하는 어려움이 있으나, 맥동토크가 발생하지 않고 높은 토크 및 제어성의 장점이 있어 정밀 분야에 많이 사용되고 있다[1-5].

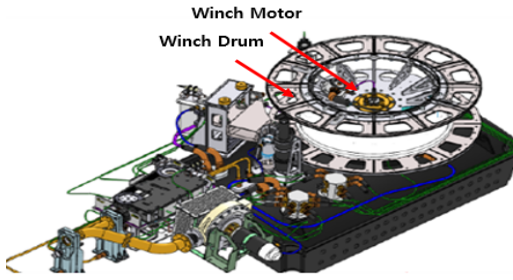


Fig. 5. The position and structure of winch motor

PMSM의 성능평가를 위한 시험항목 및 방법은 국내·외에서 다양하게 연구되고 있으며, 역기전력 계측, 최대 전압 및 최대속도 계측, 속도-토크 변화율 계측 등 여러 가지 확인 요소가 존재한다. 영구자석 이상 유무를 파악하기 위해 윈치모터의 정상 성능 발휘를 위한 핵심 요소인 역기전력을 계측하였다. 윈치모터에 전력을 공급하고 모터가 요구속도에 도달 및 안정화된 후 역기전력을 계측하여 회전수(rpm) 대비 역기전력이 정상인지 확인하였다[6]. 측정결과, Fig. 6과 같이 윈치모터 생산시점과 그로부터 2년이 지난 고장분석 시점 모두 3상 기준 정현파 형태로 12V/rpm이 계측되어 회전자인 영구자석은 이상이 없음을 확인하였다.

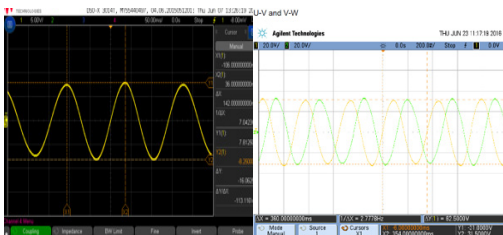


Fig. 6. Measuring back-EMF for winch motor
(a)Manufacture test (b)RCA(Root Cause Analysis) test

3.1.3 모터 고정자 및 회전자간 정렬확인

함의장비 중 TAS 전개/회수 성능과 직접적인 연관이 있으며, 전개/회수 시 필요한 토크를 발생 및 전달하는 윈치모터의 고정자 및 회전자간 정렬상태 확인 시험을 수행하였다. Fig. 7과 같이 윈치모터의 슬립링 내 설치된 리졸버에서 제공되는 위치정보 관련 피드백 신호를 차단하고, 별도 모터를 설치하여 이상적인 위치 정보를 윈치모터에 제공하도록 회로를 구성하였다.

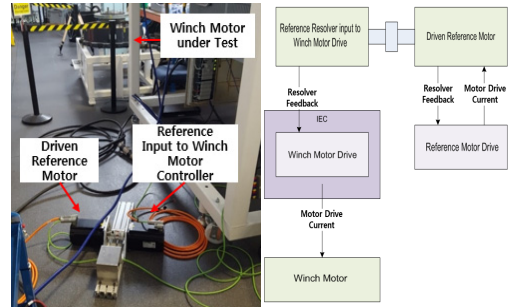


Fig. 7. Winch motor rotor/stator alignment check circuit
(a)Test part composition (b)Test circuit diagram

시험결과, 윈치모터 회전속도 변경 시 물리적 기계 소음이 발생하였으며, 이는 통상적으로 회전자의 고정 상태가 불량한 경우 발생한다. 최종 고장진단을 위해 윈치모터 분해 점검을 수행하였고, Fig. 8과 같이 윈치모터 내부 회전자 고정판에 체결된 볼트 및 워셔의 움직임이 식별되었다.

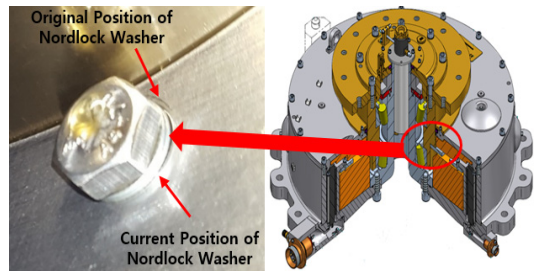


Fig. 8. The movement of washer installed in winch motor

3.2 원인분석

3.1절에서 앞서 기술한 TAS 전개 중 멈춤현상 및 회전속도 변동현상의 원인분석 결과는 Table 3과 같으며, 세부사항은 다음과 같다.

Table 3. Result of RCA(Root Cause Analysis)

Cause	Part	Result
Software error	Inboard control cabinet	OK
	Combat system	OK
	Display & control unit	OK
Interface error	Inboard control cabinet with winch drum ass'y	OK
	Inboard control cabinet with spooler ass'y	OK
	Inboard control cabinet with deployer ass'y	OK

Cause	Part		Result
Interface error	Inboard control cabinet with cutter ass'y		OK
	Inboard control cabinet with hydraulic pressure cabinet		OK
	Inboard control cabinet with display & control unit		OK
	Inboard control cabinet with switch box		OK
Outer part physical error	Guide tube	Get tangled TAS	OK
		Foreign object fixed	OK
	Winch motor	Permanent magnetic rotator back-EMF hunting	OK
Alignment error	Winch motor	Stator misalignment	NOT OK
		Slip ring misalignment	NOT OK
		Resolver misalignment	NOT OK

첫째, Fig. 3과 같이 TAS 전개/회수 관련 정보 통합 및 명령을 수행하는 핵심 탑재장비는 함내제어캐비닛이며, 통합전투체계 및 전시/제어장치가 보조역할을 하므로, 상기 세 가지 탑재장비에 대한 전개/회수 기능 관련 소프트웨어 오류 여부를 점검하였으며, 이상이 없는 것을 확인하였다.

둘째, 함내장비 및 함외장비 간 연동오류를 검토하였다. Fig. 3과 같이 함내제어캐비닛 연동 대상 장비인 윈치드럼 조립체, 전향장치 조립체, 전개장치 조립체, 절단장치 조립체, 전시/제어장치, 유압캐비닛, 비상절단/정지 스위치 박스, DC ON/OFF 스위치 박스 등과의 연동 관련 소프트웨어 오류 여부를 점검하였으며, 이상이 없는 것을 확인하였다.

셋째, 함외장비의 물리적 고장 중 가이드튜브 조립체 내 이물질 고착, 윈치드럼에 감겨있는 TAS의 꼬임과 같은 감김상태 불량 등을 점검하였으며, 이상이 없는 것을 확인하였다. 아울러, 회전자인 영구자석 이상 유무 확인을 위해 역기전력을 측정하였으며, 이상이 없는 것을 확인하였다.

넷째, 함외장비의 물리적 고장 중 윈치모터 내 조립체의 정렬 불량을 점검하였으며, 윈치모터 내 고정자 및 회전자, 리졸버 내 고정자 및 회전자, 슬립링 내 고정성 불량을 확인하였다.

모터와 같은 회전기에서 고정자 및 회전자의 의도하지 않은 접촉이나 정렬 불량은 진동, 소음, 부하토크 변동, 나아가서는 회전기 자체의 파손까지 일으켜 모터의 직접적인 성능에 영향을 미치게 된다[7,8]. 고정자 및 회

전자 접촉여부와 정렬 틀어짐 발생 여부 확인을 위해 윈치모터 분해 및 육안점검을 수행하였다. 확인결과, 고정자 및 회전자간 접촉은 발견되지 않았으므로 고정자 및 회전자간 정렬 틀어짐으로 인한 편심현상 발생 가능성이 높은 것으로 추정하였다.

Fig. 9는 PMSM 구조이며, 윈치모터는 상기 구조를 따른다. PMSM 모델을 d-q 전압방정식으로 표현하면 식 (1) 및 식 (2)와 같다[1,3].

$$v_d = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - w_r L_s i_q \quad (1)$$

$$v_q = w_r L_s i_d + R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + w_r \Phi_f \quad (2)$$

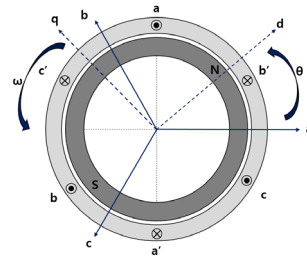


Fig. 9. Structure of PMSM

이때, v_d 및 v_q 는 정지 좌표계의 고정자 전압, i_d 및 i_q 는 정지 좌표계의 고정자 전류이다. R_s 는 고정자 권선 저항, L_s 는 고정자 인덕턴스, w_r 은 회전자 각속도, Φ_f 는 영구자석이 고정자 권선에 쇄교하는 자속이다. 단, 상기 모델은 히스테리시스와 와전류에 의한 손실을 무시, 자기포화화 및 누설 인덕턴스를 무시, 공극의 기자력은 정현파인 이상적인 모델일 경우로 한정한다. 토크식과 모터에 연결된 기계적 부분의 모델은 식 (3) 및 식 (4)와 같다[1,3].

$$T_m = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \Phi_f i_q = K_t i_q \quad (3)$$

$$T_m = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_L \quad (4)$$

이때, K_t 는 토크상수, P 는 전동기 극수, B 는 점성 마찰계수, T_L 은 부하토크이다. 윈치모터의 토크는 식 (3)에 따라 영구자석이 고정자 권선에 쇄교하는 자속에 영향을 받는다.

PMSM은 회전자 영구자석이 생성하는 자기장과 고정자 코일에 흐르는 전류 간의 상호 작용에 의해 구동하며,

회전자가 고정자의 기하학적 중심을 기준으로 회전하면 영구자석에 의한 자기장은 대칭 구조를 가지게 되며 원치모터의 토크인 T_m 을 발생한다. 그러나, 고정자 및 회전자간의 정렬 틀어짐이 발생하여 기하학적 중심이 불일치하게 될 경우 자기장 왜곡이 발생하여 회전토크와 함께 횡방향의 힘이 발생한다[9].

따라서 TAS 전개 중 멈춤현상 및 회전속도 변동 현상의 원인으로 고정자 및 회전자간 기하학적 정렬 틀어짐으로 인한 자기장 왜곡으로 최종 판단하였다.

3.3 원치모터 정류각 안정화 방안

함내장비 소프트웨어 오류, 함내장비 및 함외장비 간 연동오류, 함외장비의 물리적 고장 등은 발생하지 않았으므로 원치모터 및 구성품에 대한 기하학적 중심에 대한 검토를 수행하였다.

PMSM은 공극에서 발생하는 자속의 분포에 큰 영향을 받으며, 공극에서 생성된 힘의 법선방향 성분은 모터의 소음 및 진동의 원인이 되므로 이에 대한 저감을 위한 연구가 다양하게 이루어지고 있다[10]. 이때, 회전자의 편심과 타원형 공극은 비대칭 법선방향 힘을 유발하는 요소이며, 특히 회전자의 편심은 조립상의 부주의 또는 부품 불량 등으로 고정자와 회전자의 기하학적 중심이 벗어날 경우 발생 가능하다[11,12,13]. PMSM인 원치모터의 정상구동을 위해서는 구성품의 고정 및 정렬상태 확보가 필수적인 요소이므로 이에 대한 면밀한 검토를 수행하여 원치모터 정류각 안정화 방안을 도출하였다.

3.3.1 원치모터 회전자 기하학적 중심 유지

원치모터 정류각은 원치모터 중심에 위치한 고정자 및 회전자와 리졸버의 고정자 및 회전자의 정렬상태, 슬립링 고정상태 등 물리적 상태와 관련도가 높다. 정류각은 원치모터 컨트롤러 내부 펌웨어에 의해 일정한 값으로 정의되며, 원치모터 구성품의 물리적 변화는 원치모터의 성능에 영향을 주는 정류각 변경 요인으로 작용할 수 있다.

정류각 안정화 달성, 즉 원치모터 회전자의 기하학적 중심을 고정자의 중심에서 벗어나지 않도록 하기 위해 Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 Dowel Pin을 적용하였다. 적용 타입은 3가지이며, 총 8곳에 추가 설치를 하였다. 첫째, Fig. 10(b)의 ㉔위치인 회전자의 동력을 전달하기 위해 설치한 연결 고정판 외측에 안전율 2.0을 적용하여 90° 간격으로 4곳에 설치하였다. 둘째, Fig. 10(b)의 ㉑위치인 연결 고정판 내측에 안전율 2.3을 적용하여 180°

간격으로 2곳에 설치하였다. 셋째, Fig. 10(b)의 ㉓위치인 상부 덮개에 안전율 2.1을 적용하여 180° 간격으로 2곳에 설치하였다.

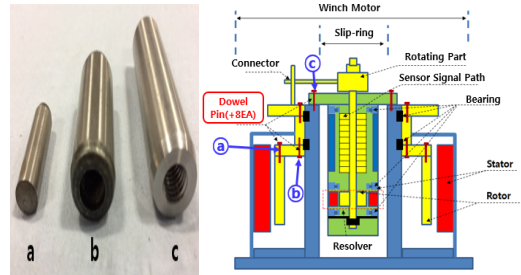


Fig. 10. Dowel pin installation to prevent movement of rotor

(a)Dowel pin type (b)Cross-sectional diagram

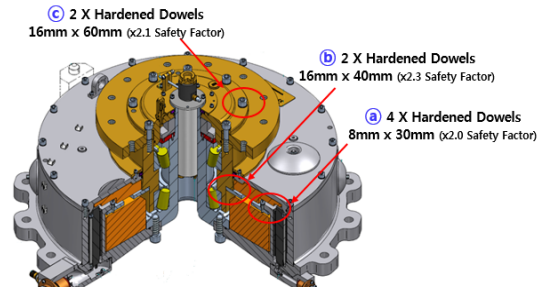


Fig. 11. Installation position & number of dowel pin

3.3.2 슬립링 기하학적 중심 유지

원치모터 중심에 설치된 슬립링의 경우 슬립링 설치 공간인 [D] mm 대비 슬립링 자체 구경이 5.6 mm 더 작아 모터 작동 시 발생하는 진동에 의해 움직임이 발생할 수 있다. 따라서 슬립링의 기하학적 중심을 고정자의 중심에서 벗어나지 않도록 하기 위해 Fig. 12와 같이 고정용 부재를 설치하여 빈 공간을 메움으로써 슬립링의 움직임을 방지하였다.

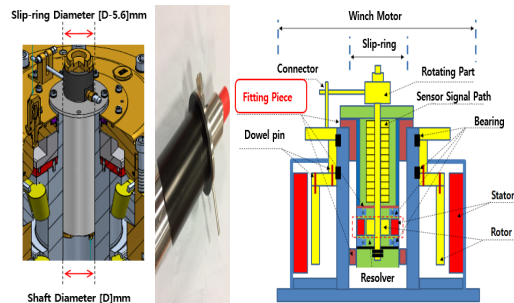


Fig. 12. Installation position of fitting piece

(a)Install structure (b)Fitting Piece (c)Cross-sectional diagram

3.3.3 리졸버 기하학적 중심 유지

원치모터는 PMSM으로 페루프 구동을 한다. 원치모터 컨트롤러에서 원치모터 회전속도에 상응하는 전류 공급 시 원치모터가 회전하고, 이때 원치모터와 슬립링간 기계적 연결 구조에 의해 슬립링 내 리졸버는 원치모터 위치를 검출한다[14,15]. 리졸버는 모터 축에 연결되어 고정자와 회전자로 구성되어 있다. 따라서 리졸버 내 고정자 및 회전자간 기하학적 정렬 틀어짐이 발생할 경우, 원치모터에 올바른 위치 정보를 피드백 할 수 없어 정상적인 페루프 구동을 할 수 없게 된다.

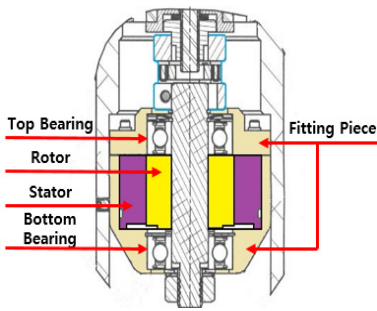


Fig. 13. Cross-sectional diagram of resolver

따라서 원치모터 작동 시 리졸버 내 회전자의 움직임을 방지하기 위해 Fig. 13과 같이 기존 대비 상부 베어링, 하부 베어링 및 고정용 부재를 고정자 및 회전자 상·하부에 설치하였다.

3.4 원치모터 정류각 안정화 방안 검증

원치모터 정류각 안정화 방안으로 제안된 3가지 개선방안에 대한 검증을 위해 정류각 계측을 수행하였다. 원치모터 정상작동을 위한 정류각 변동 범위는 $-A^\circ \sim A^\circ$ 이며, 개선방안 적용 전·후에 대한 정류각 계측결과는 Table 4와 같다. 개선방안 적용 전의 경우, 정류각은 정상작동 범위를 5회 시험 중 4회 초과하였고, 이때, 원치모터 멈춤 현상이 발생하였다. 개선방안 적용 후의 경우, 6회 시험 중 6회 모두 정상작동 범위 내에서 작동하였으며, 원치모터 멈춤 현상은 발생하지 않았다.

다음으로 개선방안 적용품의 수증환경에서의 충격 안정성 확인을 위해 FEM 해석을 수행하였다. 85g 조건에서 8ms 하중을 적용하였다. Fig. 14와 같이 주황색 영역에서 최고 응력인 460.5MPa가 발생하였으며, 원치드립 구조물 최대 허용 응력 570MPa 미만으로 이상이 없음을 확인하였다. 아울러, 개선방안이 적용된 영역은 연두

색 영역으로 응력 76.6MPa ~ 115MPa가 발생하였으며, 설계변경 전·후와 비교했을 때 큰 차이가 없고, 최대 허용 응력 미만임을 확인하였다.

Table 4. Measuring C/A on deploy/recover function test

Test	C/A	Criteria	Result	
Before	Trial #1	-2.00A°	-A° ~ A°	NOT OK
	Trial #2	0.05A°		OK
	Trial #3	-1.78A°		NOT OK
	Trial #4	-2.43A°		NOT OK
	Trial #5	-2.90A°		NOT OK
After	Trial #1	0.65A°	OK	
	Trial #2	0.55A°	OK	
	Trial #3	0.20A°	OK	
	Trial #4	0.45A°	OK	
	Trial #5	0.40A°	OK	
	Trial #6	0.05A°	OK	

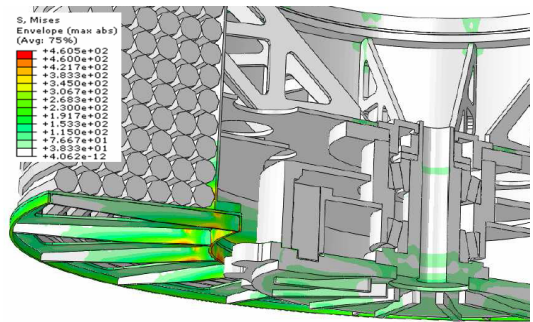


Fig. 14. The result of FEM Analysis

4. 성능입증

4.1 개선방안 적용 및 LBTS 기능시험

개선방안에 대한 신뢰성 확보를 위해 Fig. 15와 같이 육상시험체계를 통해 수증환경을 모사하여 TAS원치 속도 변경 및 전개/회수 기능 확인시험을 수행하였다. 이때, 모사한 수증환경 요인은 함속이며, TAS 전개 시 함 운용속력인 Okts에 해당하는 장력을 Fig. 15에 명시한 방향으로 인가하였다. 해당 상태에서 100회 이상 원치모터 속도 변경 및 전개/회수 기능시험을 수행하였으며, 간헐적 원치모터 멈춤현상 및 회전속도 변동현상은 해소된 것을 확인하였다.

악조건에서의 원치모터 내 구성품의 고정 및 정렬상태 신뢰성 검증을 위해 기존 설계대비 안전율 1.5에 해당하는 함 속력인 O+2kts 추진 시 발생하는 장력을 원치모

터에 인가하여 동일 시험을 수행하였으며, 간헐적 원치모터 멈춤현상 및 회전속도 변동현상은 발생하지 않음을 재검증하였다.

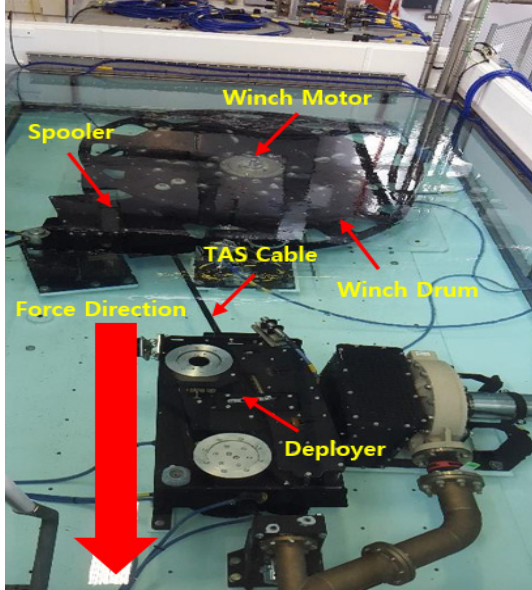


Fig. 15. LBTS test environment for verifying winch motor speed control & deploy/recover function

개선방안 적용품에 대해 국방기술품질원이 입회하여 LBTS 환경에서 공식적인 성능입증 시험을 수행하였다. 성능입증 시험은 총 4회 수행하였으며, 합격 기준은 TAS원치 전개/회수 소요시간 설계 요구조건인 “OO분 이내”를 기준으로 하였다. 4회 시험결과, Fig. 16과 같이 설계 요구조건 대비 최대 52%, 최소 30%의 소요시간이 측정되어 전개/회수 기능이 정상적인 확인할 수 있었다.

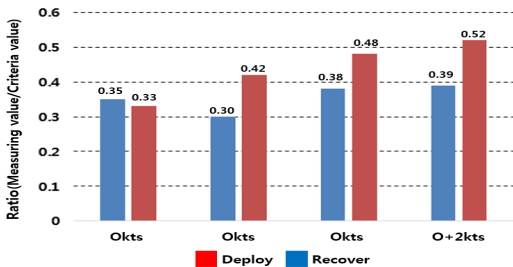


Fig. 16. Result of winch motor deploy/recover function test

4.2 해상 시험평가

원치모터 성능에 영향을 미칠 수 있는 수중환경 요소

는 함 속력에 따른 TAS원치에 작용하는 장력 외에도 수압, 수온, 유속, 수중 미생물 등 다양한 요소가 존재하며, 육상시험체계는 상기 요소를 구현하는데 제한사항이 있다. 따라서 상기 요소가 종합적으로 반영된 실제 해상 시험평가를 통해 TAS원치 전개/회수 성능 안정화 달성여부를 최종 검증하였다.

Table 5. Sea trial evaluation result of TAS winch

Item	Requirement		Result	
Interface with combat system	AC power control On/Off		OK	
	Monitoring TAS winch by CCTV		OK	
	Adjusting brightness of CCTV		OK	
	Commanding deploy/recover of TAS		OK	
	Setting deploy/recover length		OK	
	Recording on TAS winch operation		OK	
Maneuver ability	TAS stave	Okts	OK	
		O+4kts	Checking TAS stave status	OK
		O+8kts	OK	
	Sustainability	O+4kts	Checking data received by TAS	OK
		O+11kts		OK
		O+16kts		OK
Pilot (Rudder)	Steering	-20°~20°	OK	
	Horizontal	-10°~10°	OK	
Deploy/Recover	Winding status	Deploy	5 times	OK
		Recover	5 times	OK
	Time	Deploy	≤ OOmin	OK
		Recover	≤ OOmin	OK
	Change motor speed	Deploy	0rpm~5rpm	OK
		Recover	0rpm~5rpm	OK

Table 5는 TAS원치 요구사항, 해상 시험평가 항목 및 확인결과를 나타낸다. TAS원치 전개/회수 성능 안정화 방안은 크게 3가지 분야에 대해 검증이 이루어졌다.

첫째, 함내 통합전투체계와의 정상연동을 검증하였다. 자함은 자체기동 하였으며, 상세 확인대상은 통합전투체계를 통한 TAS원치 AC 전원 인가, 콘솔 상에서 함외 CCTV를 통한 TAS원치 전개/회수 상태 확인, 함외 CCTV 밝기조절, 전개/회수 명령, 전개/회수길이 설정, 함외 카메라를 통한 전개/회수 상태 녹화이다. 검증 결과, 연동 관련 모든 기능이 정상적으로 연동되어 구동함을 통합전투체계를 통해 확인하였다.

둘째, TAS 운용에 따른 함정 기동성 및 조종성능을 검증하였다. 함정 기동성 검증을 위해 자함은 Fig. 17에 따라 기동하였으며, TAS에서 음파 탐지가 정상적으로 이루어지고 있음을 명확하게 식별하고자 조음기를 이용하여

모의 소음을 송출하였다. 상세 확인대상은 최고 예인속력을 포함한 함 속력별 TAS 지속운용 상태, 소나 스테이브, 수중환경 정보(수심, 수온) 및 자함의 heading정보 전시상태이다. 시험 결과, Fig. 18 및 Fig. 19와 같이 소나 스테이브를 포함한 기타 정보, 수심, 수온과 같은 수중환경 정보가 정상 전시되는 것을 확인하였다.

측정합정 조종성능 검증을 위해 자함은 Fig. 20에 따라 기동하였으며, 상세 확인대상은 수평타 $\pm 10^\circ$ 및 수직타 $\pm 20^\circ$ 범위에서 침로를 변경 및 유지 시 TAS 지속운용 상태이다. 시험 결과, 침로 변경 및 유지 시 TAS 예인중 조종성능이 정상임을 확인하였다.

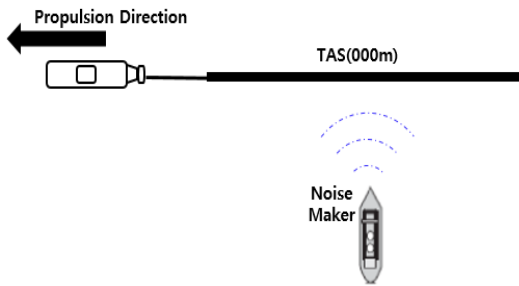


Fig. 17. Scenario for checking maneuverability(I)

셋째, TAS원치 전개/회수 성능을 검증하였다. 자함은 자체기동 하였으며, 상세 확인대상은 전개/회수 각 5회 시 TAS 감김 상태, 전개/회수 소요시간, TAS 구간별 원치모터 회전속도 정상변경 여부이다. 시험 결과, 5회 모두 구간별 원치모터 회전속도 정상 변경 및 00분 이내로 TAS원치 전개/회수가 정상적으로 이루어진 것을 확인하였다.

TAS원치 전개/회수 성능 안정화 검증과 직접적으로 연관이 있는 방안은 세 번째 방안이나, TAS원치의 작전 운용 성능 확보를 위해서는 전개/회수 성능과 더불어 통합전투체계와의 정상연동, TAS 운용에 따른 함정 기동성 및 조종성능 확보가 동시에 이루어져야 하므로 종합적인 검증 방안을 수립하여 해상 시험평가를 수행하였다.

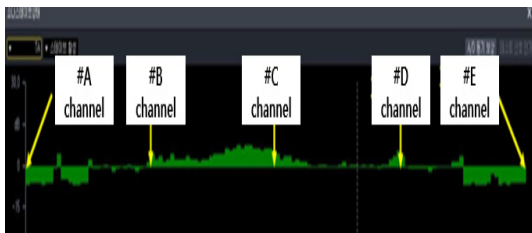


Fig. 18. Sonar stave status obtained from TAS

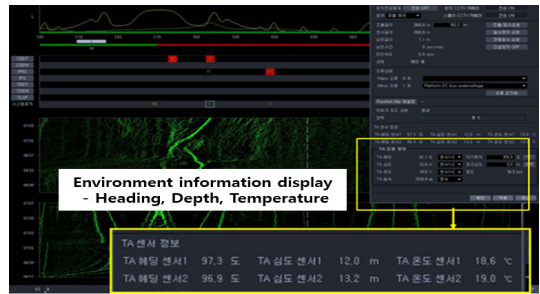


Fig. 19. Environment data status obtained from TAS

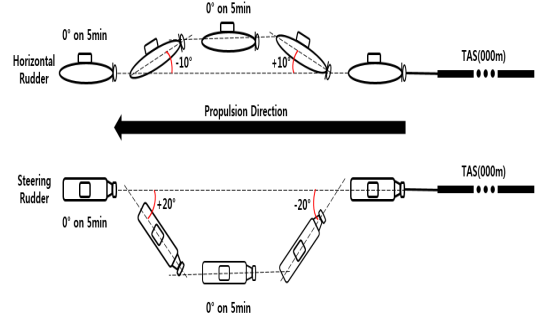


Fig. 20. Scenario for checking maneuverability(II)

5. 결론

본 논문에서는 수중용 TAS원치 시험평가 과정에서 발생한 간헐적 TAS 전개 중 멈춤현상 및 회전속도 변동현상에 대한 원인분석 및 전개/회수 성능 안정화 방안에 대해 기술하였다. 문제 발생 원인분석을 위해 역기전력 계측, 원치모터 분해 점검을 수행하였으며, 원치모터 내 고정자 및 회전자간 정렬 틀어짐이 발생하여 자기장 왜곡이 발생한 것을 확인하였다.

원치모터 성능에 영향을 주는 요인인 정류각 안정화를 위해 원치모터 내 고정자 및 회전자, 리졸버 내 고정자 및 회전자, 그리고 슬립링 고정성 향상 방안을 적용하였다. 첫째, 원치모터 회전자 기하학적 중심 유지를 위해 Dowel pin을 3개소 8곳에 적용하여, 원치모터 내 회전자 움직임을 방지하였다. 둘째, 슬립링 기하학적 중심 유지를 위해 고정용 부재를 설치하여 슬립링 움직임을 방지하였다. 셋째, 리졸버 기하학적 중심 유지를 위해 상부 및 하부 베어링 설치, 고정자 및 회전자 상·하부에 고정용 부재를 설치하여 리졸버 내 회전자의 움직임을 방지하였다.

개선방안 적용품 성능검증을 위해 정류각 계측 및

FEM 해석을 실시하여 제안된 방안에 대한 1차 타당성 검증을 수행하였으며, 육상시험체계를 통해 수중환경을 모사하여 TAS원치 속도 변경 및 전개/회수 기능 확인시험을 수행함으로써 2차 타당성 검증을 수행하였다. 최종적으로 해상에서 TAS원치 전개/회수 성능 뿐만 아니라 함내 통합전투체계와의 정상연동, TAS 운용에 따른 함정 기동성 및 조종성능을 통합적으로 확인함으로써 개선방안 적용품에 대한 3차 타당성 검증을 수행하였다.

개선방안 타당성 검증을 위한 1차, 2차 및 3차 시험 결과, TAS 전개 중 멈춤현상 및 회전속도 변동현상은 해소된 것을 확인하였다.

본 연구를 통해 선배열에인소나 운용에 필수적인 수중용 TAS원치의 전개/회수 성능 안정화를 달성함에 따라 잠수함 작전운용 성능을 확보하고, 군 전력증강에 기여할 수 있는 계기가 되었다. 본 논문에 제시된 TAS원치 전개/회수 성능 안정화 방안은 향후 유사장비 개발 시 참고자료가 될 수 있으며, 유사 문제점 발생 시 원인분석 및 개선방안을 수립하는데 있어 유용한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

References

- [1] H. M. Lee, "Disturbance Observer Based Speed Controller for PMSM under Uncertain Time-varying Load", Master Thesis, Gwang-un University, Dec. 2011.
- [2] D. H. Lee and Y. B. Choo, "Speed Control of PMSM using DTC-PWM Approach", Journal of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 14, No. 4, pp 268-269, 2009. Available from : <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01229568>
- [3] E. Y. Kim, S. M. Lee, G. P. Kwak, M. C. Kim, S. K. Park and B. J. Ko, "Design of Sliding Mode Controller for AC Servo Motor of Circular Interpolation Error Improvement", Journal of the Korean Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 8, No. 8, pp 1685-1686, 2004. Available from : <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02253862>
- [4] Pragasen Pillay and Ramu Krishnan, "Application Characteristics of Permanent Magnetic Synchronous and Brushless dc Motor for Servo Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 5, pp 986-988, 1991. DOI: <http://doi.org/10.1109/28.90357>
- [5] M. Depenbrock, "Direct Self-control of Inverter-fed Machine", IEEE Trans. Power Electron, Vol. 3, pp 420-429, 1988. DOI: <http://doi.org/10.1109/63.17963>
- [6] J. H. Kong, K. H. Park, W. C. Kwon and J. Y. Yoon, "Study for Performance Evaluations of the AC Servo Motor Made in Korea", Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 16, No. 1, pp 19-25, 2007. Available from : <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00926193>
- [7] Martin Blodt, Pierre Granjon, Bertrand Raison and Jeremi Regnier, Mechanical Fault Detection in Induction Motor Drives through Stator Current Monitoring - Theory and Application Examples, p.452-457, In tech, 2010.
- [8] Y. S. Choi, J. M. Kim and H. K. Chung, "Effect of Friction and Eccentricity on Rubbing Phenomenon", Journal of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering, Vol. 6, No. 6, pp 819-820, 1996. Available from : <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02402533>
- [9] D. Y. Kim, M. K. Kim and M. K. Noh, "Modeling of Air-Gap Magnetic Field Distribution in Permanent-Magnet Synchronous Motors with Rotor Eccentricity", The Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference, pp 2993-2995, 2013. Available from : <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02366098>
- [10] C. W. Lee, "Analysis of Radial Force on a Permanent Magnet Synchronous Motor Caused by Dimensional Variation", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 59, No. 11, pp 1990-1995, 2010. Available from : <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01546714>
- [11] J. C. Park, S. H. Park, G. S. Kim, J. M. Kim and J. P. Hong, "Analysis of Back EMF and Cogging Torque in PMSM Considering the Effects of Static Eccentricity", The Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conference, pp 721-722, 2016. Available from : <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07011542>
- [12] H. M. Kim, Y. J. Kim and S. Y. Jung, "Characteristic Analysis According to SPMSM Stator Design", The Korean Institute of Electrical Engineers Spring Conference, pp 35-37, 2017. Available from : <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07299237>
- [13] C. G. Kim, S. G. Lee and S. Y. Jung, "Design of Cogging Torque and Torque Ripples Reduction for High Precision Controlled SPMSM", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 58, No. 10, pp 1923-1929, 2009. Available from : <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01394188>
- [14] S. G. Lim, J. W. Lee, Y. K. Moon, D. L. Jeon, S. H. Jin, I. H. Oh, D. I. Kim and S. K. Kim, "Development of AC

Servo Motor Controller for Industrial Robot and CNC Machine System", Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers, pp 1211-1214, 1992. Available from : <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01335644>

[15] Dwight Byrd, "Closed-loop Motor Control: An Introduction to Rotary Resolvers and Encoders", Texas Instruments, pp.5-6, 2014.

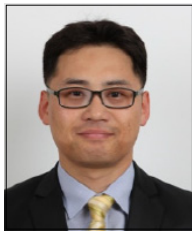
장 호 성(Ho-Seong Chang) [정회원]



- 2011년 2월 : 부산대학교 전자전기통신공학과 (공학사)
- 2014년 12월 : 현대중공업 전기전자시스템사업부 전기구조 설계
- 2015년 1월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 선임연구원

<관심분야>
전투체계, 소나체계, 수중음향, EMI/EMC

조 규 룡(Kyu-Lyong Cho) [정회원]



- 2002년 2월 : 영남대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2010년 2월 : 한국해양대학교 해양공학과 (공학석사)
- 2017년 8월 : 한국해양대학교 전기전자공학과 (공학박사)
- 2004년 2월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 선임연구원

<관심분야>
신호처리, EMI/EMC, 수중음향

황 재 교(Jae-Gyo Hwang) [정회원]



- 2013년 8월 : 건국대학교 전자공학과 (공학사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 연구원

<관심분야>
전투체계, 소나체계, 수중음향, EMI/EMC

이 상 용(Sang-Yong Lee) [정회원]



- 2003년 2월 : 연암공업대학교 정보통신학과 (전문학사)
- 2011년 2월 : 한국방송통신대학교 경영학과 (학사)
- 2003년 12월 ~ 현재 : (주)대우조선해양 특수선 무장설계부 전투/소나체계 분야 설계담당 과장

<관심분야>
전투체계, 정보통신, 수중음향

김 용 태(Yong-Tae Kim) [정회원]



- 1998년 3월 : 육군사관학교 러시아어과 (학사)
- 2003년 2월 : 육군 항공 헬기 조종사
- 2014년 3월 : 민간 항공사 조종사 및 운항본부장

• 2014년 7월 ~ 현재 : (주)신우이앤디 함정사업본부 TAS원치 수석연구원

<관심분야>
전투체계, 소나체계, TAS원치