

예인 음탐기용 케이블 개발

양승윤^{*1)} · 김정석²⁾ · 김철민³⁾ · 이진희³⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제6기술연구본부

²⁾ (주)한화 개발 3팀

³⁾ LS전선 기반기술 연구소

Development of Cable for Towed Array Sonar System

Seung-Yun Yang^{*1)} · Jung-Suk Kim²⁾ · Chul-Min Kim³⁾ · Jin-Hee Lee³⁾

¹⁾ The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

²⁾ Development Team 3, Hanwha Corporation, Korea

³⁾ R&D Center, LS Cable & System, Korea

(Received 23 December 2015 / Revised 11 July 2016 / Accepted 23 September 2016)

ABSTRACT

Cables for Towed Array Sonar System(TASS) were developed. In order to verify the performance of cables, environmental and operational conditions as well as functional requirements were investigated during design stage. Double armored high and low voltage integrated cable for towed body and two kinds of cables, armored and light weight power and optic hybrid cables for towed array sensor system were developed by modeling and simulation.

Customized manufacturing process and test method, such as foam extrusion and dynamic fatigue test were applied to this development. In conclusion, underwater towed hybrid cable with high tensile strength and compact structure were developed.

Key Words : Underwater Towed Power Optical Hybrid Cable(수중 예인용 전력 광 복합 케이블), Towed Array Sonar System(TASS, 예인 선배열 음탐 시스템), Neutral Buoyancy(중성부력), Foam Extrusion(발포 압출), Torque Balance(토크 균형), Armored Cable(인장보강 케이블)

1. 서론

수중용으로 사용되는 케이블은 고정 매설형과 이동형으로 나뉜다. 고정 매설형은 항만감시 센서용 광케

이블이 대표적인 제품으로 국산화 개발되어 운용 중에 있다. 이동형은 무인 원격운영 장비(Remotely Operated Vehicle), 측면주사 음향탐지 장치(Side Scan Sonar), 어뢰음향 대항체계(Torpedo Acoustic Counter Measure)등이 있다. Fig. 1을 통해 항만감시 체계(HUSS : Harbor Underwater Surveillance System) 및 수중 예인형 음향 탐지 시스템의 대표 적용 분야인 TASS(Towed Array Sonar

^{*} Corresponding author, E-mail: 0723yangsy@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

System)와 TACM(Torpedo Acoustic Counter Measure)등을 확인할 수 있다.

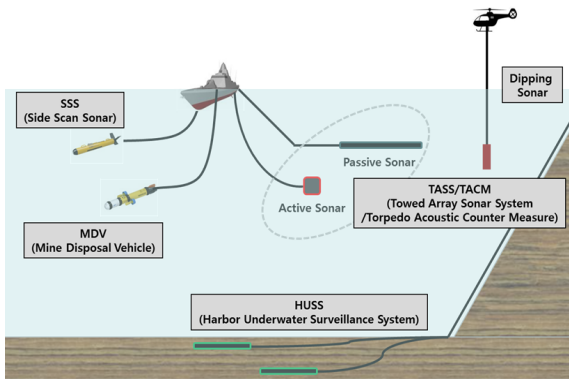


Fig. 1. Examples of underwater cable application

특히, TASS, TACM등에 사용되는 케이블의 경우 상대적으로 사용 수심이 깊고, 예인 환경에 대한 성능 확보가 중요한 요소이다. 이러한 기술적 난이도로 해외 제품에 대한 의존도가 높은 실정이다. 하지만, 최근 진행되는 신규 사업의 경우 시스템과 부품간의 상호 연관성, 비용 절감과 개발 기간 단축의 목적으로 국산화 개발이 시도되고 있다.

수중 예인 케이블에 대한 선행 연구로 해양 탐사 분야에서 사용되는 예인 케이블의 3차원 동적 해석에 대한 연구가 진행되었다^[1]. 케이블 자체의 설계 보다는 예인 속도 및 변화에 따른 예인 하중의 거동 특성 분석과 운용 관점의 시사점 도출이 목적 이었다. 본 연구개발은 운용 환경에 적합한 케이블의 설계제조와 검증에 중점을 두고 있다.

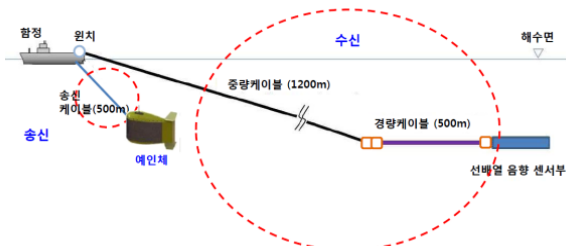


Fig. 2. Cable layout for towed array sonar system

예인 선배열 음탐용 시스템은 Fig. 2와 같이 구성된다. 송신과 수신이 동시에 사용 될 수 있는 개념으로 신호 송신용 예인체에 연결되는 송신용 케이블과 센서

부를 예인하는 수신부의 중량, 경량 케이블로 구성된다. 각각의 케이블은 전원 공급, 신호 송수신 그리고 예인 기능을 목적으로 사용된다. 모선과 피 예인 장비 간 운용 개념에 따라 내부 구성 요소인 전력선, 통신선 등의 구성요소가 설계되어 반영되어야 한다.

2. 케이블 설계

본 연구개발에서는 송신 장비용 고전압 복합 케이블 1종과 수신 센서용 광복합 중량, 경량케이블 2종 등 총 3종의 케이블을 개발하였다. 일반적인 케이블 설계 절차는 Fig. 3과 같다.

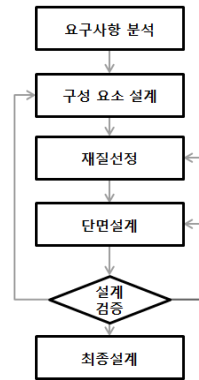


Fig. 3. Cable design process

요구사항 검토시 대표적인 고려 사항은 시스템의 전기적인 요구 용량, 통신 데이터의 양과 품질, 그리고 열적, 기계적 강도 등의 내환경 특성 요소이다.

첫 번째로 주요 구성요소인 전원과 통신에 대한 구성요소를 설계한다. 전원선의 경우 사용 전압과 허용 전류에 의한 도체 단면적과 절연 설계를 한다. 통신선의 경우 고객의 통신 방식에 따라 동 통신 또는 광통신 케이블을 선정하여 적용한다.

두 번째 단계는 이렇게 구성된 구성요소의 세부 설계 단계로 전송요소인 도체와 광섬유 그리고 이를 보호 하기 위한 절연, 베딩, 시스 및 외장 등의 재질과 구조 설계를 진행한다. 이러한 과정을 거쳐 Fig. 4와 같은 단면설계가 결정된다. 일반적으로 저압선(LV : Low Voltage)과 고압선(HV : High Voltage)과 같은 기능을 담당하는 구성 요소는 내부에 위치하고, 이를 보호하기 위한 베딩(Bedding)과 인장하중과 내부 구성요

소 보호를 위한 외장(Outer Armor)이 다음에 위치하고, 최외층 시스(Sheath)로 보호하는 구조로 구성하게 된다.

완성된 단면설계는 요구 사양에 준하는 외경, 굽힘 반경 등의 기계적인 특성과 허용전류 등의 전기적 열적 특성 값을 검증하는 단계를 거쳐서 최종 설계로 확정하게 된다.

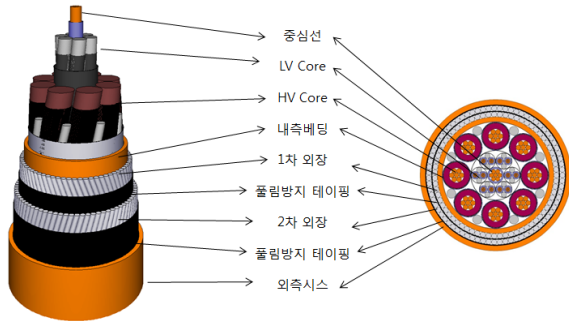


Fig. 4. Typical cross section of hybrid cable for towing application

2.1 케이블 설계 조건

Table 1과 같이 각각의 케이블에 대한 요구사항을 정리하였다. 이는 선행 연구를 통해서 제공되었으며, 케이블 설계의 기준으로 활용하였다.

주요 설계인자는 운용 환경에 따른 내환경 특성과 운용 중의 신뢰성 및 내구성을 검증하기 위한 항목들로 구성되었으며, 사용수심에 따른 수압, 진동과 염수 특성 등이다. 그 밖에 구조적인 특성으로 윈치에 감기고 풀림에 대한 굽힘 내구성과 예인체의 수중 항력이 고려된 인장강도 등이 있다. 수신 경량 케이블의 경우 센서의 수중 배열을 고려하여 중성부력이 요구되어 완성품의 비중이 중요 설계 지표로 반영되었다.

2.2 전원 공급용 케이블 설계

도체 설계는 요구되는 허용 전류와 밀접한 관련을 갖는다. 도체의 재질과 단면적 및 절연체의 종류에 따른 연속 사용 허용온도^[2] 등 다양한 변수들과 관계되어 있다. 설계에 적용한 NEC(National Electric Code)의 계산식은 아래 (1)과 같다. 줄발열(Joule heating)과 외부로의 열발산의 균형을 가정하여, 허용 전류를 산정하는 방식이다.

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc} \times (1 + R_{ac}) \times R_{ca}}} \quad (1)$$

Table 1. Parameters of cable design

구분		송신	수신
운용 환경	수심/수압	250 m / 5 MPa	250 m / 5 MPa
	온도	동작 : -5~40 °C 보관 : -35~70 °C	동작 : -5~40 °C 보관 : -35~70 °C
	진동	MIL STD 167 1A	MIL STD 167 1A
	염수	MIL STD 810 G	MIL STD 810 G
구조	길이	500 m	1200, 500 m
	외경/비중	48 mm 이하 / 3.0	35 mm 이하 / 2.7(중), 1.03(경)
전기	전압정격	2.5 kVAC / 500 V	300 V
	허용전류	20 A / 10 A	7 A
광	구성요소	-	멀티모드
기계적	파단강도	200 kN	200 kN(중량), 100 kN(경량)
	굽힘 내구성	5,000회	5,000회
	허용 곡률반경	≤1.3 m	≤1.0 m
	비틀림 균형	5 % 미만 (50 kN 인장)	5 % 미만 (10 kN 인장)

- 여기서, T_c : 도체의 연속 허용 최고 온도
- T_a : 케이블의 주위 온도
- ΔT_d : 유전체 손실에 의한 온도 상승분
- R_{dc} : 도체의 직류 저항
- R_{ac} : 표피 및 근접 효과 고려한 교류 저항
- R_{ca} : 주위 매질에 대한 열전달의 역수 값

Table 2. Conductor design parameters

T _c [°C]	T _a [°C]	Conductor	R _{dc} [mΩ/m]	R _{ca} [m ² °C/W]
90	40	13 mm ²	1.296	0.05
90	40	16 mm ²	1.028	0.05

Table 2는 선정된 도체 규격에 대한 허용 전류 만족 여부를 확인하기 위하여 계산식에 적용한 값이다. 절연

재료로 선정된 에틸렌 프로필렌 러버(EPR : Ethylene Propylene Rubber)의 연속 사용 가능 온도인 90 °C를 도체 허용 온도로 설정하였고, 케이블 주변온도는 40 °C로 가정하였다. 단, 사용 주파수가 높지 않은 점을 고려하여 유전체 손실과 교류 저항은 무시하고 계산하였다. 허용 전류값은 약 13 mm²의 경우 28 A, 16 mm²의 경우 32 A로 만족하는 결과를 확인하였다.

추가로, 상용해석 다중 물리 해석 소프트웨어인 콤솔(COMSOL)을 활용하여 진행한 온도 해석결과는 Fig. 5와 같다. 목표 허용 전류인 20 A 대비 안전율 1.5를 적용 30 A 기준으로 절연체 허용온도 90 °C 이하의 만족여부를 검증하였으며, 도체 단면적 기준 13 mm², 16 mm² 모두 만족함을 알 수 있다.

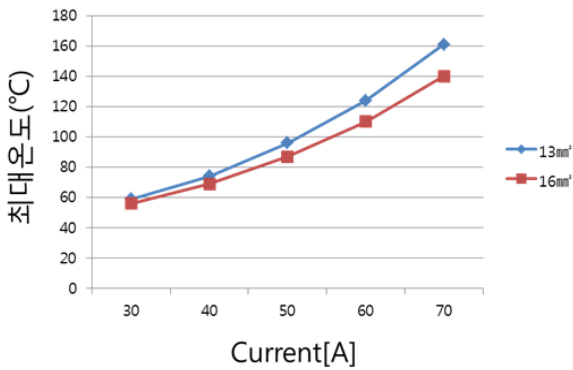


Fig. 5. Results of temperature analysis with respect to current

2.3 통신용 광케이블 설계

광케이블은 예인하중, 굽힘 그리고 사용 수심을 고려하여 금속 튜브형(Metal tube type)광케이블을 선정하여 적용하였다. 균일한 외압을 받는 튜브의 좌굴(buckling)이 발생하는 임계 압력은 아래와 같은 식으로 알려져 있다^[3].

$$P_{cr} = \frac{(n^2 - 1)E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{R}\right)^3 \tag{2}$$

- 여기서, n = number of wave
- E = 탄성계수
- ν = 포아송 비
- t = 튜브의 두께
- R = 튜브의 반경

Table 3. Critical pressure of stainless steel tube for optical fiber cable

n	E(GPa)	ν	t(mm)	R	P _{cr} (MPa)
2	190	0.25	0.2	0.98 mm	430

설계에 적용한 튜브 재질은 스테인레스로, Table 3과 같이 계산결과 사용수심 기준을 상회하는 내압 성능을 확인 하였다. 또한, 금속 튜브 안에 위치한 광섬유의 수밀 특성을 유지하기 위하여 수분 침투 및 이동을 억제하는 젤타입의 수밀재를 충진하는 구조로 적용하였다.

2.4 중성부력 설계 및 적용

경량 케이블의 경우 중성부력이 요구된다. 센서 배열이 수중에서 수평한 상태를 유지하기 위해서이다. 이를 위해 베딩층과 인장보강선 사이에 저 비중 발포층을 적용하였다. 발포는 물리적인 발포와 화학적인 발포의 두 가지 방식이 있으며, 본 개발에서는 Fig. 6과 같이 원재료에 화학발포 촉진제(CFA : Chemical Foaming Agent)를 추가하는 화학 발포 방식으로 진행하였다.

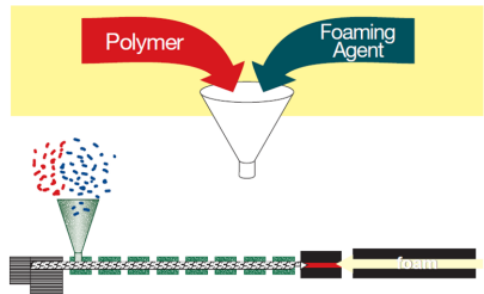


Fig. 6. Concept of chemical foam extrusion



Fig. 7. Cross section of cable with foam extrusion layer

발포도 60 %를 목표로 압출물의 비중 0.65~0.7이 되도록 발포축진제의 함량과 공정 조건을 조절하여 적용하였다. 1.5~2 % 수준으로 적용한 발포 압출제품의 단면은 Fig. 7과 같다.

2.5 예인력을 고려한 인장부재 설계

예인 케이블의 요구 특성인 예인 하중을 만족하기 위하여 송신용과 수신 중량 케이블의 경우 아연도 강선을 적용하였으며, 수신 경량 케이블의 경우 고인장 섬유를 적용하였다. 케이블에 적용하는 인장보강재의 경우 일정한 피치를 갖는 연합(Strand)형태로 적용하며, 실제 인장강도는 개별 소선이 갖는 인장강도와 피치 등을 고려하여 산정한다. 이때, 개별 소선간의 접촉과 마찰 등의 상호작용으로 실제 파단강도는 설계치와 다르게 나타날 수 있다⁴⁾. 선행 연구를 통하여 설정된 케이블 인장강도 허용치에 재료의 편차를 고려한 1.2 수준의 안전 계수를 반영하였다. 외경 제한 조건을 만족하기 위하여 인장강선의 파단강도는 900 MPa급으로 케이블에 요구되는 파단강도 20톤(약 196 kN)을 만족하는 설계를 구현하였다. 아래 Fig. 8은 복합 케이블 전용 선형 해석 프로그램인 케이블 캐드(Cable Cad)를 통한 송신용 케이블의 응력 해석결과이며, 인장선에 발생하는 응력은 약 600 MPa 수준으로 파단강도의 약 67 % 수준임을 알 수 있다. 실제로 인장선 간의 마찰에 의한 영향은 고려되지 않았으나, 본 결과를 바탕으로 제작한 제품에서 실제 검증을 진행하였다.

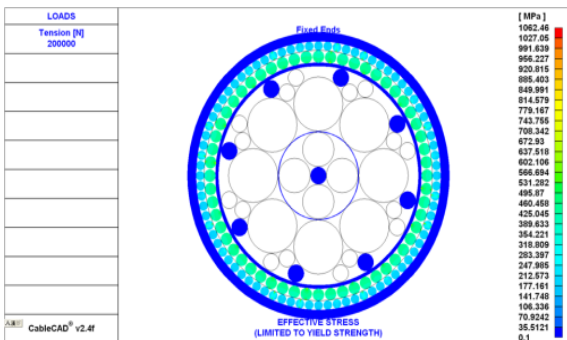


Fig. 8. Stress analysis result of cable armor

2.6 회전균형 설계

예인 케이블의 경우 인장 강도와 굽힘 유연성을 동시에 확보하여야 한다. 따라서, 강선은 일정한 피치를

갖는 구조로 연합하여 구성되게 된다^{5,6)}. 이러한 사용 환경과 강선의 구조를 고려하면, 비틀림 균형설계가 누락된 외장 설계는 인장 하중에 따른 자가 회전 현상을 발생시킬 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 두층 이상의 인장선을 구성하게 되며, 이때 각 층의 인장선의 전체 강성과 연합 피치 등을 고려한 비틀림 균형설계를 통해 자가 회전성을 최소화 하였다. 본 연구개발에서는 이중 외장강선(DA : Double Armored) 구조를 적용하였으며, 내층과 외층의 설계 변수에 따른 비틀림 비율은 아래와 같은 수식으로 검토 하였다.

$$R_t = \frac{N_o d_o D_o \sin q_o}{N_i d_i D_i \sin q_i} \tag{3}$$

- 여기서, N = 각층의 외장선의 수
- d = diameter of tension member
- D = Stranded diameter of each layer
- q = lay angle
- o = outer
- i = inner

같은 재질을 사용하였으므로, 탄성계수는 제외 하였으며, 인장부재의 직경, 소선의 수 그리고 연합 각도 등으로 비틀림 특성을 정의하여 비틀림 특성을 설계 하였다. 일반적으로 마찰 등을 고려하여 0.95~1.05 범위로 설계하며, Table 4와 같이 적합함을 확인 하였다. 비율은 절대값으로 환산하였다.

Table 4. Results of torque balance design

N_i	d_i	D_i	q_i	R_t
67	1.6	37	21.5	
N_o	d_o	D_o	q_o	1.02
73	1.6	40	-18.5	

2.7 케이블 설계 결과

3종 케이블의 설계된 최종 단면은 아래 Fig. 9와 같다. 송신은 2.5 kV와 500 V의 복합 구성으로, 수신은 멀티모드 광섬유와 전원선이 복합된 구조이다. 송신과 수신 중량은 강선 외장이며, 수신 경량은 고인장 섬유 외장으로 구성되었다.

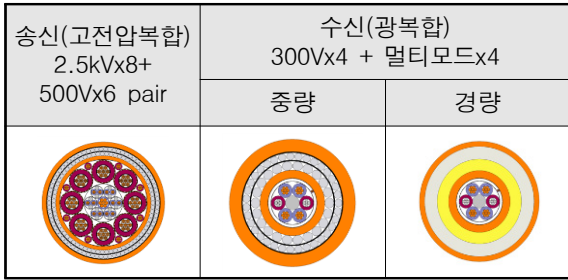


Fig. 9. Cross section design of cables

3. 평가 결과

설계를 기반으로 제조된 케이블은 주요 시험 설비를 이용하여 성능을 검증하였다. 전기적인 시험의 경우 내전압, 절연저항 및 도체 저항 시험을 광케이블이 포함된 경우는 광전송 특성을 측정하였다. 기계적인 요구 성능인 파단강도, 굽힘 내구성, 정수압 및 내환경 특성은 전용 시험 설비를 통하여 시험하였다. 대표적인 시험의 방법과 결과 및 고찰은 각 시험 항목별로 정리 하였다.

3.1 구조시험 결과

먼저, 외경과 비중에 대한 측정 결과는 아래 Table 5 와 같다. 기준에 만족하는 결과를 확인하였으며, 특히 수신 경량 케이블의 경우 중성 부력을 만족함을 알 수 있었다.

Table 5. Measurement results of diameter and specific density

구 분	비중계 측정	샘플 중량/부피 시험				기준 (합부)
		외경 (mm)	길이 (mm)	중량 (g)	비중	
중량 케이블	2.74	35.0	37.0	95.90	2.69	2.7 (Pass)
경량 케이블	1.01	35.6	50.2	50.87	1.01	1.03 (Pass)
송신 케이블	3.04	48.2	1,125	6125	2.96	3.0 (Pass)

압출 공정의 특성상 공정을 거치는 동안 선속과 압출량에 따라 케이블 완성 외경의 편차가 발생할 수 있

으며, 이는 실시간 모니터링을 통해 제어하는 것이 중요하였다.

3.2 전기/광전송 성능

내전압 시험을 통해 절연설계가 만족함을 확인 하였고, 허용 전류 시험을 통해, 기준치 이하의 온도상승 결과를 확인하였다. 수신용 케이블의 광케이블 전송 특성은 운용환경의 영향을 받는다. 실제 측정은 원치 환경과 유사한 케이블 이동용 보빈(bobbin)에 감겨진 상태로 측정하여 기준치에 만족함을 확인하였다. 결과는 Table 6과 같이 각각의 파장대역에서 기준을 만족 하는 결과를 확인 하였다. 파단 이외의 시험 항목에서는 내전압 또는 절연저항 그리고 광손실의 측정을 통해, 케이블 전송 성능을 확인 하였다.

Table 6. Results of optical loss measurement

측정 파장 대역	측정값
850 nm	2.6~2.7 dB/km
1300 nm	0.6~0.7 dB/km
1310 nm	0.7 dB/km

3.3 기계적 성능

인장시험의 경우 파단강도와 운용하중에서의 신율을 각각 측정하였으며, 각각의 요구 성능과 기준 신율을 만족하는 결과를 획득하였다. 상세 결과는 결과 종합 3.5의 Table 8에 정리 하였다. 외장형 케이블의 경우 인장시험을 위한 별도의 아머팟(Armor Pot)을 적용하여 시험을 진행 하였다. 인장시험의 구성(Layout)은 Fig. 10과 같다.



Fig. 10. Test setup of cable break load

또한, 운용 시 케이블에 적용되는 굽힘 및 인장의 복합 하중에 의한 케이블의 내구성을 확인하였다. Fig. 11과 같이 시험 장비에 시료를 장착하여 진행 하였으며, 시험 조건과 결과는 아래 Table 7과 같다. 곡률반경의 경우 케이블의 최소 곡률 지름을 반영하였으며,

인장 하중은 케이블이 가이드 룰에 밀착 될 수 있도록 적용한 값이다. 반복횟수의 산정은 사용기대 수명과 운용 횟수를 기준으로 산정하였으며, 안전율을 고려 실제 횟수는 이의 2배로 적용 하였다.



Fig. 11. Fatigue test equipment for bending and tension

Table 7. Test condition of fatigue

곡률지름	인장	반복횟수	시험결과
1.0 m	200 kg	5,000회	도체저항, 광손실 이상 없음

3.4 환경 특성 시험

대표적인 내환경 특성인 정수압의 경우 사용수심의 두배인 5 MPa의 압력에서의 시험을 통해 성능을 검증 하였다. 온도시험은 보관온도와 운용온도 조건을 적용 하여 이상 없음을 확인 하였다.

3.5 시험결과종합

아래 Fig. 12는 실제로 제조한 3종의 케이블의 샘플이다. 왼쪽에서부터, 송신용 고전압 복합 케이블 그리고 수신용 강선외장 케이블과 고인장 섬유 중성 부력 케이블 이다.



Fig. 12. Samples of cable developed

Table 8. Summary of test results

구분	시험 결과
수심/수압	5 MPa 정수압 특성 만족
염수	내염수 특성 만족 (Salt water Immersion 시험)
외경/비중	48 mm 이하 / 3.0 35 mm 이하 / 2.7(중량), 1.025(경량)
전압정격	내전압 시험 만족
허용전류	사용기준 최대 전류 인가시 절연체 온도상승 기준 만족(90도 이하)
광 코어	멀티모드 전송 특성 만족 3.0 dB/km@850 nm, 1.0 dB/km@1300 nm
파단강도	송신 : 200 kN 이상 수신 : 200 kN 이상(중량), 85 kN 이상(경량)
인장신율	신율 1 % 이하(운용하중)
굽힘 내구	굽힘 5,000회 시험 만족

케이블 상기 각 시험에 대한 성능검증 시험결과와의 종합은 Table 8과 같다.

4. 결론

본 연구개발을 통해 예인 음탐기용 케이블 3종의 설계, 제작과 성능 검증을 완료하였다. 이를 통해 확보된 수중 예인형 복합 케이블에 대한 핵심 기술은 방산 분야의 국산화 개발을 촉진함은 물론 민간 분야에도 확대 적용이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] D. H Jung, J. K. Kim and H. I. Park, "A Study on Three-Dimensional Dynamic Analysis of a Towing Cable for Marine Survey Instruments," Korea Ocean Science Journal, Vol. 8, No. 2, pp. 203-209, 2003.
- [2] International Standard IEC 60502-1, "Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories, Part

- 1 Rated Voltages from 1 kV up to 30 kV”.
- [3] O. Kenko, “Buckling Behavior and Design of Steel Liner under External Hydrostatic Pressure,” Chapter 2. Free Pipe under External Pressure, pp. 21-22, 2009.
- [4] Ivan Argatov, “Response of a Wire Rope Strand to Axial and Torsional Loads: Asymptotic Modeling of the Effect of Interwire Contact Deformations,” International Journal of Solids and Structures 48, pp. 1413-1423, 2011.
- [5] Kenta Inagaki, Johan Ekh, Said Zahrai, “Mechanical Analysis of Second Order Helical Structure in Electrical Cable,” International Journal of Solids and Structures 44, pp. 1657-1679, 2007.
- [6] NISHIDA Takato, NAGATOMI Osamu, “Latest Technologies and the OCC-SC300 Optical Submarine Cable,” pp. 18-22, 2010.
- [7] S. Y. Yang, “Design and Experimental Verification on a Towing Winch,” Journal of Control Automation and Systems Engineering, 1999.