

# 전력선 용량증대를 위한 해저케이블 설계

손홍철\* · 문채주\*\* · 김동섭\*\*\*

## Design of Submarine Cable for Capacity Extension of Power Line

Hong-Chul Son\* · Chae-Joo Moon\*\* · Dong-Sub Kim\*\*\*

### 요 약

해저 전력케이블은 수면 아래로 전력을 운송하는 송전케이블이다. 최근 해저케이블은 해상의 재생에너지인 풍력, 파력 및 조류시스템 등의 전력을 육지로 전송하며, 이 케이블이 위치하는 장소에 따라 해저에 매설하거나 해저면에 놓여진다. 전력케이블은 극한 환경에서 이용되어 왔기 때문에 가혹한 조건들과 온도 및 강한 조류를 견디도록 제작되나, 해저조건은 해상케이블에 대해 수 많은 종류의 심각한 손상을 만들기에 충분한 조건을 갖는다. 이러한 원인은 전력전송을 중단시키는 케이블 손상을 가져온다. 본 논문에서는 케이블에 대한 설계기준과 시공절차와 난제 그리고 케이블 전환 접속시스템에 대하여 연구한다. 설계된 해저케이블의 규격은 154kV 기존 케이블 1회선과 신규 케이블 2회선 등 3회선으로 구성되고, 선로당 100MVA 전력용량을 갖는다. 해저케이블 매설깊이를 결정하고 기존 및 신규 케이블을 함께 배치하는 방법을 연구하였다. 지중선로에 대한 해저케이블의 전력용량 허용값을 계산하였고 그 결과 케이블 선로당 100MW 이상의 전력용량을 갖는다는 것을 확인하였다.

### ABSTRACT

A submarine power cable is a transmission cable for carrying electric power below the surface of the water. Recently, submarine cables transfer power from offshore renewable energy schemes to shore, e.g. wind, wave and tidal systems, and these cables are either buried in the seabed or lie on the ocean floor, depending on their location. Since these power cables are used in the extreme environments, they are made to withstand in harsh conditions and temperatures, and strong currents. However, undersea conditions are severe enough to cause all sorts of damage to offshore cables, these conditions result in cable faults that disrupt power transmission. In this paper, we explore the design criteria for such cables and the procedures and challenges of installation, and cable transfer splicing system. The specification of submarine cable designed with 3 circuits of 154kV which is composed of the existing single circuit and new double circuits, and power capacity of 100MVA per cable line. The determination of new submarine cable burial depth and cable arrangement method with both existing and new cables are studied. We have calculated the permission values of cable power capacity for underground route, the values show the over 100MW per cable line.

### 키워드

Submarine Cable, Transmission Line, Power Line Route, Renewable Energy, Offshore Wind  
해저 케이블, 송전선, 전력선 경로, 재생 에너지, 해상 풍력

\* 국립목포대학교 대학원(shc8710@naver.com) · Received : Dec. 06, 2021, Revised : Jan. 11, 2022, Accepted : Feb. 17, 2022  
\*\*\* 국립목포대학교 전기 및 제어공학과(kimdong01@mkpo.ac.kr) · Corresponding Author : Chae-Joo Moon  
\*\* 교신저자 : 국립목포대학교 스마트그리드연구소 Smart Grid Institute, Mokpo National University,  
· 접수일 : 2021. 12. 06 Email : cjmoon@mkpo.ac.kr  
· 수정완료일 : 2022. 01. 11  
· 게재확정일 : 2022. 02. 17

## 1. 서 론

육지와 도서간의 전력선은 기존의 해월 철탑을 이용한 가공송전 방식에서 해저케이블을 설치하는 방법을 채택한다. 도서지역에서는 에너지자립성을 추구하기도 하지만 대규모의 재생에너지는 전력을 육지로 보내야 한다. 도서지역의 재생에너지 보급을 촉진하기 위해서는 설치 위치 선정이 매우 중요하고 비용을 절감하는 요인이 된다. 재생에너지 용량이 클 경우 도서에서 육지로 연계하는 기존 해저케이블의 용량증설이 필수적이다[1-2].

육지에서는 연계선로의 접속용량을 증대하기 위하여 배전선로의 전력용량을 늘려서 공급하는 방안을 도입하고 있지만 해저케이블인 경우 연계용량이 포화되어 추가적인 케이블 포설이 요구되고 있다. 해저케이블 설치 및 보호에는 케이블선정, 보호설계, 케이블시공, 설치선의 운영 및 작업자의 안전관리 그리고 케이블 유지보수 까지 다양한 기술을 요구한다. 해외표준은 해저케이블 보호 및 설치에 관한 표준, 기준 등을 제안하고 있으며 국내에서는 해저케이블에 대한 규정 및 가이드라인 표준에 대한 요구사항은 많으나 해저케이블 제작, 설치, 운영과 관련된 기업의 사내규정 및 기준으로 두고 있다[3-4].

해저케이블 설치작업을 위해서는 경과지 선정, 매설심도 선정, 해저케이블 포설기법, 해저케이블 매설기법, 해저케이블 보호공법, 지반조사, 지반정수 및 지지력계산 등을 수행하고 케이블 설계를 수행한다. 자연환경적인 유해요소의 분석 뿐만 아니라 케이블에 대한 설계, 매설, 포설, 보호 및 지중선로 설계까지 진행되어야 한다. 이러한 절차를 거친 해저케이블도 스코틀랜드 SSE사가 1991년부터 2006년까지 15년 동안 조사한 자료에 의하면 극한 환경조건인 화학적 부식, 물리적인 손상 및 덮개 손상 등 외부요소가 47.5%, 낚시나 선박앵커 및 선박충돌 등에 의한 제3자 손상이 26.7%, 절연이나 접지 등 제작상의 결함이 5%, 시공불량에 의한 손상이 8.3%, 원인불명이 12.5%에 이른다[5-6].

국내에서는 해저케이블의 설계기준, 보호공법 연구나 예방진단 및 복구기술 등 다양한 연구와 조사가 진행되어 왔다. 1979년 전남 신안군에서부터 시작된 해저 전력케이블 설치공사에서 배전선은 특별

한 보호공법을 적용하지 않고 대부분 포설만 되어 있어서, 소형 앵커나 조류의 영향으로 인한 손상 발생 시 주철관이나 모래주머니를 이용한 보강 공사를 시행하고 있다. 해저케이블의 유해요소의 종류에 따라서 보호공법을 적용하여 설치하고 있으나 새로운 유해 요소의 출현 등으로 예상하지 못했던 내부응력에 의한 손상 및 강한 파력에 의한 파손 등의 현상이 지속적으로 발생하였다. 제주해협 구간에서의 안강망 어선에 의한 해저케이블이 손상되어서 충분한 깊이에 케이블 매설을 재설시한 이후, 이 구간에서의 추가적인 이상구간은 발생되지 않고 있다. 그러나 해남 양식장 구간과 제주 연안 구간에서는 매년 이상 구간이 발생하여 보수 보강 공사를 시행하고 있다. 해남 양식장 구간은 보호설비의 내부 온도응력에 의해서 용기, 절단 현상이 발생하고 있으며, 쇠말목을 사용하는 양식장 구간이 존재하여 쇠말목의 관통으로 인한 해저케이블 손상의 위험성을 항상 내포하고 있다. 제주 연안 구간은 암반 지역으로 충분한 깊이의 트렌치를 구성하지 못하여 파력으로 인한 U-duct의 전도, 주철관파손, 해저케이블 손상 현상이 발생하였다. 이와 같이 연안역의 해저케이블 설치는 그 해역의 유해요소 및 해양 환경특성에 많은 영향을 받고 있는 실정이다[1],[7-8].

우리나라 서남해 해상풍력단지의 경우 154kV 외부망은 약 10.2km, 23kV 내부망은 약 17.3km에 이르고 현재 준공되어 2020년부터 상업운영되고 있다. 영국의 해상풍력단지인 경우 2017년 기준 내부 해저케이블 고장은 12%, 외부 인출 해저케이블 고장은 88%로 나타나고 전기적인 고장은 47%, 제작 및 설치결함은 37%, 외부환경요인은 13%, 교체는 3%로 조사되어 전기적인 고장이 많이 발생하여 지중선로 설계의 중요성을 확인할 수 있다. 또한 설치된 해저케이블의 신뢰성 확보를 위하여 장기간에 걸친 기계적인 스트레스를 견디도록 재포설과 신중한 매설심도를 유지하여야 한다. 일부분의 고장원인은 육상에 케이블을 설치하는 절차를 준용하기 때문에 발생하기도 한다[5],[9-10].

현재 해남 화원에서 안좌변전소 상호 송전되는 전력량은 100MW로 설치되어서 안좌지역의 재생에너지를 연계하기에는 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 총 300MW급 전력설비 용량을 설치하기 위

하여 기존 설비에 200MW를 추가하는 해저케이블을 설계하여 적용하고자 한다. 경과지 선정, 매설심도 선정, 해저케이블 포설기법, 해저케이블 매설기법, 해저케이블 보호공법, 지반조사, 지반정수 및 지지력계산 등을 제시한다. 자연환경적인 유해요소의 분석뿐만 아니라 케이블에 대한 설계, 매설, 포설, 보호 및 지중선로 설계까지 수행한다. 이와 같이 설계된 케이블의 전력용량을 계산하고 설계된 지중선로의 적합성도 확인하고자 한다.

## II. 경과지 선정

### 2.1 사업대상지역

154kV 화원-안좌 해저케이블 용량증대는 신안군 해상풍력단지조성과 간척지 태양광 등 재생에너지 건설이 급속하게 진행되어 송변전설비를 보강하기 위한 것이다. 기존 해저케이블 위치는 그림 1과 같이 안좌면 자라리와 해남군 화원면 인지리를 연결하며 거리는 6.65km로 이를 근거로 최적의 경과지 선정과 케이블 설계, 시공방법 및 보호공법 등을 선정한다.



그림 1. 사업대상지역  
Fig. 1 Project target area

### 2.2 경과지 선정

안좌면 자라리 산26-1번지에 설치된 기존 24번 철탑에서 화원까지 화원-안좌 해저케이블이 설치된 지역으로 기존 설치된 해저케이블 측면으로 추가 해저케이블을 설치할 수 있는 공간이 충분하며, 조간대 지역의 토질도 노출암반과 자갈, 모래 등이 혼재되어 있어 양육 작업여건이 전반적으로 우수하다. 그림 2와 같이 육상부와 전면 해상에는 해조류 양식장이

없어서 보상 및 민원 해결에 있어서 유리하므로 양육점은 작업 여건, 주변 지장물 간섭, 예상 보상 및 민원, 케이블 진입 경사도 등에서 좋은 조건을 갖는 이 구간을 사용한다.

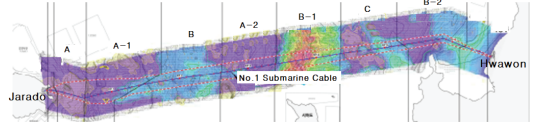


그림 2. 양육점 및 경과지  
Fig. 2 Landing spot and corridor

### 2.3 매설심도 선정

해저케이블 손상의 주된 원인은 선박 앵커의 투묘 및 주묘이다. 항만 주변이나 항로에는 해저에 설치된 주요 시설들이 표기되어 있고 이런 지역에는 앵커를 투묘하지 않게 규정되어 있다. 해저케이블의 안정성을 확보하기 위해서는 위해 요소에 대한 적정 매설심도를 산정하여야 한다. 이를 위해서는 경과지상의 해양토질 및 위해요소에 대한 정보가 필수적으로 요구된다. 해양토질의 성분과 구성은 해저면 경과지에 따라 다르고, 각 구간의 위해요소도 상이하다. 매설심도는 우선 해양 토질과 위해요소에 따른 관입깊이를 수치적으로 분석하고 그 결과를 검증한 후 여유 깊이를 더해서 결정하게 된다. 매설심도 이상으로 해저케이블을 시공할 경우 추가적인 보호공법이 필요하지 않다. 이는 위해 요소인 앵커의 투묘 및 주묘에 의한 관입깊이 이상으로 해저케이블이 설치되었으므로 안전성이 확보되기 때문이다.

저주파 음원을 사용한 다중채널 해양 탄성파탐사를 이용하여 지층탐사를 수행하였다. 노선상의 대부분 해저 지층은 음파의 투과가 거의 없는 암반으로 분포되어있고 일부 구간에는 얇은 모래 및 자갈 퇴적층이 존재하였다. 퇴적층의 두께는 2m 이하 범위로 분포하고 있었다. 시하도 부근 해역에서 두꺼운 사질퇴적층이 형성되어 있는 것으로 파악되었으며 그 두께는 15m로 나타나고 있다. 국내에서 사용되는 안강망 앵커의 사양 및 무게가 표준화되어 있지 않기 때문에, 최소 설계 매설심도 1.2m를 적용하면 표 1과 같이 계산된다.

표 1. 매설심도  
Table 1. Lay Depth

Section	Drilled Depth(m)	Lay Depth(m)	Remark
A, A-1	-	-	Rock
B	1.00	1.2	
A-2	-		Shipping Lanes
B-1, B-2	1.42	1.6	
C	-		Rock

### III. 해저케이블 지반평가

#### 3.1 해저케이블 포설기법

선박의 투묘에 의한 손상이나 선박 항행시 지장의 우려가 없고, 저인망 어업 등에서 어구, 어업시설 등이 케이블에 손상을 주지 않는 경우와 해저가 암반 등 단단한 지반이고, 케이블을 보호공으로 보호했을 경우 케이블 등을 해저에 포설하는 것은 매설을 원칙으로 해저에 부설한다. 해저케이블의 포설방법은 투입 가능한 포설 장비, 포설할 지역적 특성, 공사기간 및 비용 등 모든 사항들을 종합적으로 고려하여 결정한다. 포설방법은 S형 부설법(s-lay Method), J형 부설법(j-lay Method), 릴 부설법(reel lay Method) 등 부설선 방법(Lay Barge Method), 해상 풀링법, 해저 풀링법 등 풀링법(Pulling Method), 해상 예인법(Surface Tow Method), 해수면하 예인법(Below-Surface Tow Method), 수중 예인법(Mid-Tow Method), 해저 예인법(Bottom Tow Method) 등 부양 예인법(Floating-Tow Method) 등이 있다. 가장 일반적인 포설방법인 부설선 방법을 사용한다.

#### 3.2 해저케이블 매설기법

매설공법은 트랜치를 선조성하고 케이블을 트랜치 내에 포설한 후 사석 등으로 되메우기하여 케이블을 매설하는 PLT 선행 트랜칭 공법(Pre Lay Trenching)과 트랜치를 조성함과 동시에 케이블을 매설하는 공법으로 장비를 지중에 매입하여 트랜치를 조성하거나 지반을 교란하면서 케이블을 매입시킨 후 자연스럽게 원토로 되메우기가 이루어지는 동시 매설방식인 SLB 공법(Simultaneous Lay and Burial), 케이블 포설 후 매설하는 PLB 공법(Post Lay Burial)으로 구분하여 적용한다.

#### 3.3 해저케이블 보호공법

해저케이블 보호공의 설치 목적은 조류나 파력 등의 자연적인 환경에 의해 해저케이블이 노출되는 것을 방지하고, 경과지 주변의 양식장 및 어로활동에서 사용되는 말뚝 등의 어업도구와 항로구간을 통항하는 대형선박의 앵커 등의 인위적인 위해요소에 의한 해저케이블의 손상 및 고장 등을 예방한다. 해저케이블 보호를 위해 고려해야 할 위해요소는 크게 해저면의 자연적 변형, 선박, 어구, 흐름 및 파랑, 어업활동 등으로 나뉘며, 기술적 측면에서는 안전성, 신뢰성, 시공성 등을 고려해야 하고 경제적 측면으로는 건설비, 유지관리비 및 제반 비용 등을 고려하여 적절한 보호공법을 선정한다.

#### 3.4 해저지반 조사

준설선에 의한 암반 굴착 및 트랜치 조성을 계획함에 있어 열악한 해상여건, 항로확단 및 원거리 투기 등 공사특성을 고려하여 안전하고 경제적인 최적의 굴착공법을 선정한다. 본 연구의 경과지 주변에는 다수의 양식장이 분포하고 있으며, 목포항의 범정항로와 인근 연안을 통항하는 여객선 등 선박의 통항이 빈번하고, 수심은 0~40m, 지반은 모래, 실트, 자갈, 암반 등 다양한 토질로 이루어져 있으며, 해저케이블 설치를 위한 소규모 굴착 단면으로 계획되어 있어 수심조건과 토질조건을 만족하면서 소규모 굴착이 가능한 굴착방법에 대해 조사하였다. 토사 및 모래, 자갈 지반 등의 굴착공법은 준설선의 종류에 따라 그레브 준설, 펌프 준설, 호퍼 준설 등이 있으며, 협소한 장소에서 트랜치나 소규모 단면 준설에 적합하고, 점토, 모래, 자갈 등 다양한 토질에 적용이 가능한 그레브 준설로 선정하였으며, 암반의 굴착공법은 쇄암봉을 이용하여 암반을 파쇄한 후 그레브 준설선으로 준설하는 방법으로 적용한다.

#### 3.5 지반정수 및 지지력 계산

안정성 확인을 위한 지반정수를 계산하여야 한다. 사석 수중단위 중량은  $10. \text{kN/m}^3$ , 직접전단시험 결과 모래 내부 마찰각은  $37.0 \sim 43.0$  범위이나 직접전단시험은 원위치 시험이 아닌 실내시험이므로 해상에 적용된 느슨한 모래의 특성을 고려하여 30을 적용한다. 점토의 점착력은 직접전단시험 결과  $13.6 \sim 15.0 \text{kPa}$  이나  $13.6 \text{kPa}$ 를 적용한다. 해저케이블 지름  $d = 0.17 \text{m}$ , 주강관을 포함한 해저케이블 하량  $M =$

1.0kN/m, 단위 길이당 해저케이블 한 가닥의 부피는 식(1)로 계산된다.

$$V = A \times L = \frac{\pi \times 0.17^2}{4} \times 1.00\text{m} = 0.0227\text{m}^3 \quad (1)$$

해저케이블 단위중량은 식(2)로 계산된다.

$$r = \frac{M}{V} = \frac{1.0}{0.0227} = 44.1\text{kN/m}^3 \quad (2)$$

하중을 계산하면 사석+피복석은 59.50kN/m<sup>2</sup>, 원토 퇴매움+사석은 23.90kN/m<sup>2</sup>이고 W-Mattress 하중은 21.57kN/m<sup>2</sup>으로 계산되었다. 사질토인 경우 형상계수는 0.5를 적용하고 지지력계수 19.7과 22.5를 대입하고 안전율은 2.5를 적용한다. 점성토지반은 허용지지력 계수는 5.14를 대입하고 안전율은 2.5를 적용한다. 따라서, 사석+피복석은 286.38kN/m<sup>2</sup>, 원토 퇴매움+사석은 285.48kN/m<sup>2</sup>. W-Mattress 하중은 27.96kN/m<sup>2</sup>으로 계산되어 대상지역의 지반적용에 문제가 없음을 확인할 수 있다.

침하량은 사질토지반인 경우 사석+피복석은 0.0035m, 원토퇴매움+사석은 0.014m로 계산되고 점성토지반의 W-Mattress는 0.041로 계산되었다. 준설 후 퇴매움하는 사석+피복석과 원토퇴매움+사석 구간 최대 침하량은 35mm로 신축성이 있는 케이블 재질 고려시 침하량은 미미하며, W-Mattress 구간 최대 침하량은 41mm로 1차 보호공인 UP-Pipe와 W-Mattress 상부 구조물과의 설계여유 147mm 이 내로 발생하여 문제가 없는 것으로 나타났다.

느슨한 모래지반에 진동하중이 작용할 경우 모래입자의 재배치로 인하여 순간적으로 간극수압이 상승하고, 지반의 유효응력은 감소하여 포화사질토가 전단저항력을 잃게 된다. 모래가 출현한 구간에 대하여 액상화 예측법 중 예비평가인 입도분포에 의한 액상화 가능성 평가를 실시해야 한다. 피스톤 코어 조사 및 실내시험 결과로 액상화 가능성 예비평가를 수행한 결과 액상화 발생 가능성이 높은 것으로 나타나 S-PS 검증, 표준관입시험, 콘관입시험, 시료채취 및 진동반복 삼축시험 등 토질시험을 수행하였다.

## IV. 해저케이블 설계

### 4.1 자연환경 설계조건

경과지 구간 구분은 항로를 기준으로 안좌와 화원으로 구분되어 있으나, 본 경과지에 대한 수치모형 실험시 신안군 요령도에서 관측된 결과를 적용한 파랑 및 흐름에 대한 위해 요소를 계산하였으므로 동일한 조건의 신안군 요령도 조위를 적용한다. 해저케이블을 보호하기 위한 보호공에 적용하는 설계파랑은 50년 재현 빈도의 파랑을 적용하고, 공사 중에 사용되는 임시시설인 오탐방지막 등은 10년 재현 빈도의 파랑을 적용한다. 설계풍속은 목포지역 최대 풍속 29.1m/s, 순간 최대풍속 37.8m/s를 적용한다.

### 4.2 케이블 설계조건

케이블은 전압형 HVAC 도체귀로 방식의 154kV로 송전용량은 400MVA이고 전격전류는 700A이다. 케이블 허용 곡률반경은 전력케이블 외경의 20배, 허용장력은 7(kgf/mm<sup>2</sup>)×케이블 선심수×케이블 도체단면적(mm<sup>2</sup>)이다. 폴링아이를 사용하여 3개의 케이블을 당길 때 삼각배열, 요람배열 모두 2선이 모든 포설 장력을 받기 때문에 케이블 수는 2로 계산한다. 선박의 투묘에 의한 손상이나 선박 항행시 지장 등의 우려가 없고, 저인망 어업 등에서 어구, 어업시설 등이 케이블에 손상을 주지 않는 경우와 해저가 암반 등 단단한 지반이고, 케이블을 보호공으로 보호했을 경우 등을 제외하고는 매설을 시행한다.

### 4.3 케이블 포설공법

가장 대표적인 포설 방법인 부설선 방법에서는 포설선의 종류가 여러 가지이므로 해저케이블, 수심, 설계파고, 공사기간 및 비용 등 주변 여건에 따라 적절한 포설선을 선택하여 사용한다. 포설선이 동원되기 어려운 곳에서는 폴링법과 부양예인법이 사용되며, 해저 폴링법 및 해저 예인법은 해상 폴링법과 해상 예인법 보다 작업시 외부 환경으로부터 보호 받을 수 있는 장점이 있으나, 해저면과 마찰로 인해 폴링력이 증가한다.

### 4.4 케이블 매설공법

케이블을 보호하는 가장 기본적인 보호공법은 케이블을 매설하는 방법으로 매설을 통해 선박의 앵커

나 어구 등의 위해요소로부터 케이블을 보호할 수 있다.

매설공법은 #1 HVDC(해남-제주) 해저케이블 건설공사와 #2 HVDC(진도-제주) 해저케이블 건설공사와 같이 장연장의 공사에서는 지반조건, 수심, 해양환경에 따라 3가지 공법인 SLB 공법, PLB 공법, PLT 공법 등을 병행 시공한다. 3가지 공법 중 SLB 공법과 PLB 공법은 시공성 및 경제성 확보를 위해 전용장비를 이용하여 매설이 가능한 퇴적층 두께가 두껍게 분포하고 충분한 수심이 확보되는 장연장(#1 HVDC(해남-제주) 매설구간인 약 70km, #2 HVDC(진도-제주) 매설구간인 약 82km 구간의 해저케이블 매설공사에 적용사례를 반영하였으며, PLT 공법은 전용장비로 매설이 곤란한 지반인 암반지반, 자갈지반, 단단한 퇴적토 지반 등과 경과지 연장이 10km 내외로 짧고 대부분 수심이 매설 전용장비를 사용하기 곤란한 30m 이하 수심에 적용한다.

해저케이블 매설이 필요한 구간을 조사한 결과, 그림 2와 같이 남측은 6.6km, 북측은 6.6km로 남측과 북측 2개 노선 총연장 약 13.2km이므로 보호공 시공을 제외한 매설구간은 남측과 북측 2개 노선 중 4개 구간인 B, B-1 약 4.3km로 전체 총 연장에 비해 매우 짧고 남측과 북측 4개 구간으로 산재해 있으며, 원지반도 모래질 퇴적층으로 비교적 단단한 지반이고, 수심은 DL(-)9.0~(-)40.0m로 일부 구간은 저수심 구간이 존재하는 것으로 확인되었다.

#### 4.5 케이블 보호공법

해저케이블 보호공의 설치 목적은 조류나 파력 등의 자연적인 환경에 의해 해저케이블이 노출되는 것을 방지하고, 경과지 주변의 양식장 및 어로활동에 사용되는 말뚝 등의 어업도구와 항로구간을 통항하는 대형선박의 앵커 등의 인위적인 위해요소에 의한 해저케이블의 손상 및 고장 등을 예방하는데 그 목적이 있다. 해저케이블 보호를 위해 고려해야 할 위해요소는 크게 해저면의 자연적 변형, 선박, 어구, 흐름 및 파랑, 어업활동 등으로 나뉘며, 기술적 측면에서는 안전성, 신뢰성, 시공성 등을 고려해야 하고 경제성 측면으로는 건설비, 유지관리비 및 제반 비용 등을 고려하여 적절한 보호공법을 선정하여야 한다. 해저케이블 보호공법은 전구간 매설 및 1차 보호공 취부를 원칙으로 하고 있기 때문에 1차 보호공 취부에 대한 검토가 필요하다. 해저에 설치된 케이블이

어로행위나 자연적 환경에 의해 발생하는 외력으로 인한 노출 및 변형을 방지하는 용도 외에 사석 쌓기나 섬유 돌망태 등의 보호물로부터 해저케이블의 손상을 방지하기 위해 해저케이블을 감싸 보호하는 방식의 1차 보호공법을 적용하였다. 해저에 설치된 케이블이 흐름 및 파랑 등의 자연환경과 경과지 주변의 어로활동, 선박의 정박 및 기타 인위적인 외력에 의한 해저케이블의 손상 및 고장 등을 예방하기 위해 2차 보호공을 검토하였다. 2차 보호공법 분류는 크게 재료에 의해 구분이 되며 1단계 검토에서는 주재료로 사용할 수 있는 사석 및 콘크리트를 사용한 보호공법을 비교하여 검토하였다.

결론적으로 안좌 및 화원 육양부는 파랑 및 조류속에 대한 안전성 확보, 안좌 암반 A 및 A-1은 통항선박 앵커에 대한 안전성 확보, 안좌 퇴적층 B는 통항선박 및 안강망 앵커에 대한 안전성 확보, 항로 A-2는 통항선박의 비상시 투묘 및 주묘에 대한 안전성 확보, 화원 퇴적층 및 연안항로 B-1과 C는 통항선박 및 안강망 앵커에 대한 안전성 확보, 화원 연안인근 B-2는 대나무 말뚝에 대한 안전성 확보 등이 고려되어야 한다.

#### 4.6 지중선로 설계

154kV 화원~안좌 해저케이블 용량 증대사업의 육상구간 경과지는 화원면 인지리 23번 철탑~양육점, 양육점~안좌면 자라리 24번 철탑 간 최적의 경과지 선정과 케이블 포·매설 시공법 및 보호공법을 결정한다. 선로 계통도는 그림 3과 같이 해저, 지중, 가공선로로 구성되며, 6.6km 구간의 해저구간이 있다.

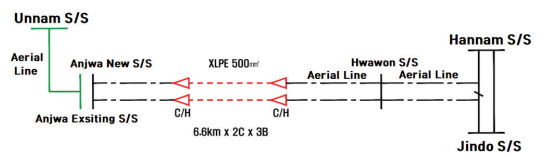


그림 3. 해저케이블의 계통도  
Fig. 3 Power system of submarine cable

송전특성은 AC 154kV 2회선, 100MVA×3B(신설+기설), 약 300MVA(회선당)이고 케이블 규격은 해저와 지중선로인 경우 154kV XLPE 500mm<sup>2</sup>(3심) × 2C × 2B, 가공선로인 경우 154kV PIAC 330mm<sup>2</sup> × 2C, 광케이블은 FO Single Mode 48 Core이다. 해저

케이블의 배치는 그림 4와 같이 기존 케이블을 중심으로 신설 케이블을 설치한다. 케이블의 허용전류는 매설깊이, 회선수 및 주변여건 등을 종합 고려하였으며, 육상부 및 해저부 약조건 구간으로 추정되는 구간을 선정하여 계산하였다.

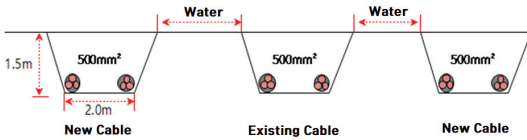


그림 4. 해저케이블 배치도  
Fig. 4 Arrangement plan of submarine cable

구간 B, 구간 B-1 및 구간 B-2로 나누어 허용 전력용량을 계산한다. 케이블 종류는 154kV 3Cx500mm² XLPE 광복합 해저 케이블(기설 케이블 적용), 주위 온도 조건은 25℃, 토양 열저항은 0.9 K.m/W, 도체 최고 허용온도는 90℃, 시스템 접지방식은 양단 직접 접지 방식을 적용한다. 송전 용량은 해당 T/L의 역률 cosθ는 0.9를 적용하여 계산하였으며, 그 결과는 표 2와 같이 나타난다.

표 2. 허용 전력용량 계산결과  
Table 2. Calculation Results of Permission Power Capacity

	Section B	Section B-1	Section B-2
Line Distance	2,000mm	2,000mm	2,000mm
Cable Center Distance	2,208mm	2,208mm	2,208mm
Permission Current(A)	601	571	554
T/L Capacity(MW)	144	137	133

화원~안좌 154kV 3심 해저케이블 선로의 허용전류는 해저부, 육상부 각 구간별 케이블 설치조건, 주위환경, 보호조건 등을 고려하여 1단계 선로 요구 용량인 선로당 100MW를 만족시키는 허용전력 용량값이 계산되었으며, 최대의 약조건인 해저구간 B-2에서도 만족함을 알 수 있다.

## V. 결론

신안 안좌지역 송전용 이용계약은 33개 발전사업자의 총 1.1GW이고 배전용 이용계약은 325MW 접속율이 24%에 이르는 등 2011년 11월 기준 대기물량은 총 1.116GW 재생에너지의 변전소 접속이 어려운 실정이다. 해남 화원에서 안좌변전소 송전되는 전력량은 100MW로 안좌지역의 재생에너지 연계를 하기에는 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서 설계된 해저케이블은 총 300MW급으로 많은 신안의 재생에너지 대기물량을 해소할 수 있을 것이다.

해저케이블의 설계는 앞으로 신안지역 8.2GW 해상풍력단지의 내부케이블 포설과 육지로 연계되는 인출케이블의 설계 및 시공에도 활용할 수 있을 것이다. 특히 육지로 연계되는 양육지 변전소가 도서에 위치한 경우 설계 수량은 다수가 될 것으로 예상되며, 장기적인 측면에서 사전 검토와 조사가 이루어져야 한다.

전남은 약 175개의 유인도서가 존재하기 때문에 지속적으로 해저케이블을 통한 전력공급이 이루어져야 할 것이며, 지역적인 해양조건이 상이하기 때문에 이를 반영한 설계 및 시공방법이 다시 검토되어야 할 것이다.

## References

- [1] H. Jang, H. Kim, G. Kim, and S. Yoon, "A Study on Development of Guidelines for Offshore Wind Support Structure and Subsea Cable," *J. of Korean Society of Civil Engineers, Autumn Conference*, Busan, Korea, 2017, pp. 1721-1722.
- [2] S. Kim, J. Oh, O. Kim, H. Lim, and C. Moon, "A Study on Decision Plan of Hosting Capacity for Distribution Feeder," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 4, 2021, pp. 653-660.
- [3] J. Choi, C. Moon, and Y. Chang, "A Study on System Retrofit of Complex Energy System," *J. of the Korea Institute of Electronic*

*Communication Sciences*, vol. 16, no. 1, 2021, pp. 61-68.

- [4] C. Moon, Y. Chang, M. Jeong, Y. Kim, and S. Lee, "A Study on Design of Optimal Location for Renewable Energy Facility Using GIS," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 2, 2018, pp. 357-368.
- [5] Y. Lee, S. Kim, Y. Yu, and G. Yun, "A Study on the Selection of Target Ship for the Protection of Submarine Power Cable," *J. of the Korea Society of Marine Environment & Safety*, vol. 24, no. 6, 2018, pp. 662-669.
- [6] D. Flynn, C. Bailey, M. Pecht, C. Yin, P. Rajaguru, and V. Robu, "Predicting Damage and Life Expectancy of Subsea Power Cables in Offshore Renewable Energy Applications," *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 54658-54669.
- [7] S. Ahn, J. Yu, H. Ryu, S. Hwang, C. Kim, and D. Kim, "Study on Submarine Cable Protection Methods for Grid Connection of Offshore Wind Farm," *The Korean Society for Marine Environment & Energy, Autumn Conference*, Busan Korea, 2011, pp. 205-211.
- [8] Y. Song, M. Kim, and J. Kim, "A Study for Separation Distance of Subsea Power Cables in Offshore Wind Farm," *The Korean Institute of Electrical Engineers, Summer Conference*, Gangwon Korea, 2014, pp. 1075-1076.
- [9] E. Gulski, G. Anders, R. Jongen, J. Parciak, J. Sieminski, E. Piesowicz, S. Paszkiewicz, and I. Irska, "Discussion of Electrical and Thermal Aspects of Offshore Wind Farms Power Cables Reliability," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 151, -Article 111580, 2021, pp. 1-14.
- [10] Z. Zhang, Z. Ding, Y. Dong, Z. Yuan, H. Tao, and J. Wang, "The Study of Burial Depth and Risk Assessment of Submarine Power Cable," *4<sup>th</sup> International Conference on Green Materials and Environment Engineering*, Beijing China, 2018, pp. 1-8.

## 저자 소개

### 손흥철(Hong-chul Son)



1987년 전남대 공학사, 2000년 전남대 공학석사  
1987년 한국전력공사에 입사  
2019년~현재 광주전남건설지사장  
2020년~현재 국립목포대학교 대학원 전기공학과

광주전남본부 해남변환소장, 송전부장, 변전부장, 계통운영부장, 신광주전력지사장, 전북본부 송전운영부장, 부산울산본부 북부산전력지사장을 역임  
※ 관심분야 : 해상풍력, HVDC 전력변환시스템, ESS 시스템

### 문채주(Chae-Joo Moon)



1981년, 1983년 및 1994년 전남대학교 공학사, 공학석사, 공학박사  
1997년~현재 목포대학교 공과대학 전기 및 제어공학과 교수  
2017년~현재 (사)에너지밸리리산학융합원장

한국전력기술(주) 책임연구원, 광주일보 테마칼럼니스트, (사)전력전자학회 부회장, 이투스 칼럼니스트, 한국전기신문 칼럼니스트, 기초전력연구원 에너지밸리분원장 역임  
※ 관심분야 : 풍력발전시스템, 전력변환시스템, 전력시스템

### 김동섭(Hak-Jae Kim)



19812, 2000년 한양대학교 공학사, 공학석사, 2014년 연세대학교 공학박사  
2020년~현재 목포대학교 공과대학 전기 및 제어공학과 교수  
2016년~현재 IEC MSB 이사

2019년~현재 공학한림원 회원, 대한전기학회 부회장, 국제배전망협의회(CIRED) 한국위원장, 대한전기협회 비상임이사, 한국스마트그리드사업단 비상임이사, 한국산업기술진흥협회 비상임이사 역임  
※ 관심분야 : 에너지관리시스템, 배전선로 전압제어, 신재생에너지 운영시스템