장죽수로 조류발전건설시 작업특성에 따른 산업잠수 작업한계

김 원 석[†]
(부경대학교)

Critical Limits of Commercial Diving on the Construction of Tidal Current Power in Jangjuk Channel

Won-Seok KIM[†]
(Pukyong National University)

Abstract

The Korea has significant tidal current energy resources, but it is so hard to work underwater for tidal turbine installation. Therefore commercial diving work is very important for tidal current generator. Also, Jangjuk channel is vary famous as proper area to generate tidal current energy. Nevertheless, no one is studied about characteristics of commercial diving works with installation of tidal current generator. The purpose of this study is to introduce commercial diving with work types and investigate critical limits of diving working under the conditions, which are working only to minutes at slack tide during the neap tide. As the results, work types are five as like mooring installation, OMAS(Offshore Maintenance Access System), support structure installation, cable and turbine installation. Here, the original construction period is expected about 4 months, but the construction take 18 months to complete. The cause of extends construction period is insufficiency of researching tidal current conditions at the site and ignorance of slack tide which need to secure diving working time. Total diving working times are 110th during 18 months, the highest percentage of diving times is turbine installation about 43.6 %, and cable, mooring installation and support structure construction are 27.3 %, 15.5 %, 13.6 %, respectively. On the basis of this study, estimation of times of commercial diving is possible with work types of tidal current power, and has a significance as basic data to determining construction period.

Key words : Horizontal Axis Tidal current Turbines, Slack tide, Coastal environmental condition, Construction period

I. 서론

지구 온난화의 주범인 화석연료를 대체할 수 있는 친환경·신재생에너지 개발이 전 세계에 걸쳐 이루어지고 있다. 특히, 한반도의 지리적 여건

을 고려하면, 국내에서 해양 에너지를 이용할 수 있는 제반 여건이 충분한 것으로 판단되며, 그 중에서 가장 일정한 전력을 생산할 수 있고 생산량 또한 예측가능하며, 건설비용도 조류발전보다 저렴한 조류발전이 최근에 각광을 받고 있다.

[†] Corresponding author: 051-629-6580, ssu41th@gmail.com

최근에는 울돌목과 함께 장죽-맹골수로의 조류에너지 밀도가 높은 것으로 평가되고 있다 (KEMCO, 2008).

그러나 이러한 시설물은 유속이 빠른 수중에 설치되어야 하며, 케이블 설치 및 연결과 같은 세밀한 작업이 수행되기 위해서는 인간이 직접 잠수하여 관련된 작업을 수행하여야만 완전한 설치가 가능하다. 그러므로 잠수작업의 특성과 작업한계를 아는 것이 그 무엇보다 중요하다. 그러나 국내의 산업잠수는 외국의 선진 해양 국가들에 비하여 해양 및 수중에 대한 의식수준과 사고방식(인식)이 정립되어 있지 않았을 뿐만 아니라, 미흡한 관련 법규, 제도 및 기준 등이 발전을 저해하고 있다. 그 중에서도 전문적인 해양/수중 건설공사에서 산업잠수 작업에 대한 발주 기준이나 방법이 명확하지 않아서 인원 및 장비를 제대로 갖추지 못한 영세업체를 양산하는 등의 문제점이 발생하였다(Kim, 1999). 이와 같은 현실로 인해 조류발전단지 건설사업, 석유관련 파이프라인 및 부이(SPM) 설치 공사, 대심도 항만 토목공사 등과 같은 대단위 해양 건설공사에서 국제기준을 만족하는 대형 외국계 건설회사 및 수중공사업체가 사업을 수행할 가능성이 크다. 이는 국내 자본의 유출뿐만 아니라 신재생에너지 건설에 관한 원천기술 개발 및 습득에 상당히 부정적인 영향을 초래할 수 있다.

특히, 진도 장죽수로 조류발전 건설공사를 발주한 회사 또한 독일의 Voith Hydro사였으며 수중작업을 진행하는 회사 및 인원과 장비는 국제산업잠수협회(ADCI, IMCA)가 인정하는 잠수자격과 장비를 갖춘 업체만이 참여할 수 있었다.

그렇다면 일반적으로 조류발전은 강한 유속이 발생하는 해역에서 발전량이 많을 것으로 생각되지만, 실제로는 안정적인 발전량 확보와 구조물의 내구성 유지를 위해서 발전 가능한 일정한 유속이 최대한 지속되어야 한다. 그러나 안정적인 발전량 확보를 위한 유속은 수중에서 작업하는 잠수사의 안전을 위협하는 가장 중요한 작업한계

요소이다. 또한, 공사 및 작업특성에 따른 효율적인 작업가능시간을 결정하는 요소로서 안정적인 잠수작업 시간을 확보하기 위한 정확한 정조(slack tide) 시간도 필요하나, 국지적인 조건으로 인해 예보와 다른 제약도 가지고 있다.

이러한 한계조건들이 존재함에도 불구하고, 현재 국내 대부분의 해양/수중작업에서 공사특성에 따른 산업잠수 작업한계에 대한 연구가 전무하고, 개괄적인 설명이 포함된 보고서나 논문 등의 자료들을 접할 수 없는 것이 현실이다.

그러므로 본 논문에서는 진도 장죽수로에서 조류발전 건설시 해양물리환경과 현장에서 적용된 잠수 감압표를 서술하고, 조류발전 공종별 작업특성을 기술하였다. 또한, 공종별로 수행된 잠수작업에서 잠수 작업일지로부터 실제 잠수작업시간 및 횟수를 산출하여 공종별 잠수작업 비율을 산출하고 공사계획 대비 실제 소요된 공사시간을 비교하여 산업 잠수작업 시 작업한계에 대해 고찰하였다.

II. 조류발전 건설시 적용된 산업잠수

1. 장죽수로 주변의 해양물리환경

조류발전기를 설치하기 이전, 조류발전량을 확인하기 위해서 ADCP를 이용하여 조류발전기 설치지점의 터빈의 중심에 해당하는 수심에서 유속을 측정하였다. 조류발전 터빈이 설치된 위치는 위도 N 34° 18' 48.8", 경도 E 126° 05' 46.4"이며, 설치시의 수심은 37 m이다.

[Fig. 1]은 Sustainable Marine Technologies, LTD (2009)에서 제공한 조류터빈이 설치된 위치 및 지상에서 조립 완료한 조류발전 터빈 구조물의 모습이다. 조류터빈은 Voith site라고 표시된 지점에 설치되었고, 설치 시 터빈의 높이 hub height는 바닥에서 약 13 m이며, 암반에 거치되도록 설계되었다.

[Fig. 1] Location and view of turbine installation

[Fig. 2]는 터빈의 설치 높이(수심: 24 m)에서 조류속을 측정한 값들의 발생빈도와 최대유속이 측정한 기간인 대조기 창·낙조 유속을 나타낸 것이다(Sustainable Marine Technologies, LTD, 2009). 최대 유속은 3.5 m/sec로서 창조와 낙조가 바뀌는 1시간 이내로 유속이 약 2 m/sec 이상으로 상승하며, 실제 잠수작업이 가능한 유속 1 m/sec이하는 약 30분 정도 밖에 되지 않았다. 따라서 주간에 일일 잠수가 가능한 회수는 최대 3회이며, 작업시간 또한 총 1시간 30분 내외가 되며, 정확한 정조시간의 판단만이 잠수 작업준비와 수행시간을 최대한 늘릴 수 있

는 방법이다. 그러므로 해양조사원에서 제공하는 실시간 조석자료를 참고하였으나, 진도검조소와 장죽수로와의 거리 차이로 인해 정조시간이 다르게 나타났다. 그리하여 현장에서 쉽게 확인이 가능한 방법으로 직접 추를 넣어 정조시간을 찾아내어 잠수작업을 수행하였다.

[Fig. 2] Frequency and time series of current velocity at hub height (ebb & flood, D.L.; 24 m)

2. 현장에서 사용된 잠수 감압표

이번 장죽수로 조류발전 현장에서는 세계적으로 가장 인정받고 많이 사용하고 있는 U.S. Navy(2005) Diving Manual Revision 5의 Volume 2 Air Diving Operations을 기준으로 2011년 4월 터빈 설치 시까지 잠수작업을 진행하였고, 이후 조류발전 유지보수 기간에는 새로이 적용된 U.S. Navy(2008) Diving Manual

Revision 6의 잠수 규정을 이용하여 2011년 12월까지 수중작업을 진행하였다.

이번 작업에 사용된 U.S. Navy Diving Manual의 Air Decompression에서는 5가지 종류의 감압표로 구분되어져 있다. 따라서 실제 진도 장죽수로 조류발전 현장에서는 각 공중에 따라 작업 수심과 작업시간의 차이가 있어 잠수 감압표를 각 수심과 작업시간에 맞게 적용하였다.

특히, 짧은 시간 수중 작업에서는 비감압한계 감압표나 표준공기 감압표를 사용하여 1~5분 정도의 수중감압으로 작업을 종료 할 때도 있었지만, 약 37 m의 깊은 수심과 해양환경(짧은 정조시간)으로 인하여 산소사용 표면감압을 주로 사용하여 수중 감압 시간을 줄이고 선상에서 챔버 감압을 시행함으로써, 고압에 노출된 잠수사의 신체에 녹아있는 질소를 100% 산소를 이용하여 단시간에 배출시켜 잠수사의 생리적 문제점들을 해소시키는 안전한 잠수작업을 행하였다.

Table 1은 130 Ft/40 min 작업시간에 대한 5가지 감압표의 수중 감압 시간과 챔버 감압 시간을 요약한 것이다. 비감압한계 감압표(No "D")에서는 수중에서의 감압이 필요치 않으며, 반복 잠수도표는 잠수사의 1일 1회 잠수작업으로 제외하였다. 표준공기 감압표(Std Air)는 수중에서 35분 감압, 표면 챔버 감압은 0분으로 총 감압시간은 35분이며, 공기사용표면 감압표(Sur D/Air)는 수중감압이 10분, 표면 챔버 감압이 35분으로 총 감압시간이 45분으로 가장 길었으며, 산소사용 표면 감압표(Sur D/O2)는 수중감압이 0분, 표면 챔버 감압이 21분으로 총 감압시간 21분으로 가장 짧은 것으로 나타났다.

따라서 조류가 세고, 정조시간이 짧은 장죽수로 조류발전 현장의 해양 환경조건에 있어 수중에서의 감압시간이 짧고 강한조류에 대한 잠수사의 환경적 위험요소가 적은 산소사용 표면 감압표(Sur D/O2)를 사용하여 조류발전 시설물설치 공사를 완료하였다.

<Table 1> Comparative between decompression tables

Diving Table	Water Stop Time (min)	Chamber Time (min)	TDT (min)
No "D"	0	0	0
Repetitive Dives	-	-	-
Std Air	35	0	35
Sur D/O2	0	21	21
Sur D/Air	10	35	45

Ⅲ. 조류발전 공종별 특성 및 잠수작업환경

1. 공종별 작업특성

진도 장죽수로 수평축 조류발전 설치를 위한 세부공종은 다음과 같이 크게 5개의 공종으로 나눌 수 있다.

가. 계류 시설물 설치

조류발전 기초 구조물 및 터빈을 설치하기 위한 12개의 105톤 콘크리트 블록, 38 mm 체인, 계류부이 설치로 조류 터빈 설치 전용선의 6점 계류로 조류터빈 구조물 및 터빈 설치 시 터빈 설치 전용선의 움직임을 최소화하여 정밀 시공을 하기 위함이다. [Fig. 3]은 6개의 계류지점에 대하여 1개의 계류라인에 2개의 콘크리트 블록을 설치한 모식도이고, [Fig. 4]는 콘크리트 블록과 부이를 설치하는 모습과 위치를 나타낸 것이다.

[Fig. 3] Mooring installation image

[Fig. 4] Installation of mooring block and buoy

나. 전용선 개조 공사(OMAS)

조류발전기 터빈 설치를 위해 Revolving crane barge선이 터빈 발전기 설치전용(OMAS; Offshore Maintenance Access System)선으로 개조가 선행되었다. 각 계류 부이와의 6점 계류를 실시해 터빈 설치 전용선이 설치 지역의 거센 조류를 안정적으로 지탱할 수 있는 35톤 Mooring winch 6기(개별 또는 중앙 집중식의 윈치 조정실을 설치하여 정확한 지점에 위치를 유도)와 일정 장력을 유지하며 조류터빈을 설치하기 위한 Guideline chain winch 2기를 탑재하였다. 또한 각각의 윈치들을 구동시키며 안정적인 전력공급을 위한 주보기 발전기를 설치하였으며, 각 윈치 구조물들의 하부를 지지하기 위해 구조 안정성 검토를 거친 후 전용선 내부를 보강하였다.

다. 기초 구조물 설치

중량 850톤의 기초 구조물로서 터빈을 지탱하며, 터빈의 효율적인 발전을 위해 DGPS/USBL 자이로스코프 등의 정밀한 측정 장비를 이용하여 목표 방위 및 계획지점에 정확하게 거치하였다. 해저바닥의 불규칙한 표차로 인하여 기초 구조물 하부에 4개의 유압잭을 설치하

여 구조물이 편심을 받지 않도록 수평을 맞추었다([Fig. 5]).

또한, 구조물이 해저바닥면의 불규칙한 지면과 기초구조물 하부 공간에 수중 콘크리트를 타설하여 구조물의 중량으로 인해 발생할 수 있는 침하와 조류터빈의 작동 시 발생하는 진동으로부터 구조물의 편심을 방지하고자 구조물 하부 보강을 완료하였다.

[Fig. 5] Installation of support structure

라. 수중 케이블 매설

해상에 설치된 조류 발전기의 발전 전력을 육상으로 안전하게 송전하기 위해 1.6 km의 해저 케이블을 설치하는 공정으로서 DP(Dynamic Position) 선박에서 Subsea cable laying 공정과 더불어 케이블이 해저 바닥에서 조류에 휩쓸리지 않도록 해저 케이블을 고정할 수 있는 콘크리트 매트(Concrete mat)를 케이블 매설 이후 상부에 거치하는 공정이다. 잠수 전용선이 아닌 Cable laying DP 선박에서는 잠수사가 잠수작업에 투입될 수 없기 때문에 콘크리트 매트를 자동으로 거치하는 장비를 개발하여 케이블 매설 후 해당 작업을 수행하였다([Fig. 6]).

[Fig. 6] Cable installation

바. 터빈 설치

터빈 설치 는 수중 기초 구조물과 전용 선박의 CT 윈치에 유도체인 2라인을 설치하였고 터빈 설치 보조 장치(NRM; Nacelle Retrieval Module)를 유도 체인에 연결하여 터빈의 위치와 경로 이탈을 방지하면서 설치 완료하였다([Fig. 7]).

[Fig. 7] Turbine installation

특히, NRM 내부에는 여러 대의 수중 카메라를 설치하여 터빈과 기초구조물의 거리와 모습을 확인하였고, 또한 DGPS/USBL 등의 정밀한 측정 장비를 이용하여 터빈의 방향, 위치, 구조물과의 거리를 실시간 모니터링 하면서 터빈 설치를 완료하였다.

2. 공종별 잠수작업내용 및 작업환경

<Table 2>는 다섯 가지 공종별로 잠수작업 내용을 나타낸 것이다.

첫 번째 공정인 계류시설물 설치에서는 수중에 설치한 콘크리트 블록의 shackle 해체를 위해 잠수작업을 실시하였다.

두 번째, OMAS는 조류발전 터빈 설치를 위한 전용선 개조작업으로서 육상 dry dock에서 작업을 진행하여 잠수 작업이 없이 진행되었으며, OMAS 완료 후 조류발전 터빈 설치 전용선의 독일선급(GL)을 신청·취득하였다.

세 번째, 기초구조물 설치 작업에서는 해상 크레인선(1500톤)으로 850톤 기초 구조물을 권상, 해저면에 안착시켜 수중에서 잠수사가 8개의 들고리 shackle을 해체하였고, 기초 구조물의 전도 및 위치 이탈을 방지하기 위해 기초구조물에 트레미관을 설치하여 수중 콘크리트 타설을 시행하였으며, 수중 콘크리트 타설이 잘 되었는지 수중 검사 작업을 시행하였다.

네 번째, 해저 케이블 설치 는 수중 포설된 케이블의 손상여부와 정위치에 포설 되었는지 확인하였고, 수중 포설된 케이블이 조류에 의한 이동 및 손상 방지를 위해 체인 매트리스를 덮어 보강하였다.

마지막으로, 터빈 설치 시에는 NRM 유도 체인을 기초구조물과 전용선에 연결하는 작업을 하였고, 또한 각 중 센서들과 해양 물리조사 장비인 ADCP를 수중에 설치하여 조류의 흐름과 터빈의 원활한 작동을 확인하였다.

진도 장죽수로는 국내의 대표적인 빠른 조류의

흐름이 있는 곳으로 작업구역의 수심은 34~38 m이며 평균 수심 (M.S.L.)은 37 m이다. 바닥면은 고르고 편평한 암반층으로 이루어져 있으며, 수중 시야는 소조기시 많은 부유사의 영향으로 시계가 0 cm에 가깝다. 하지만 수중 라이트를 비추었을 경우 대략 30~100 cm 정도 시야가 확보되었다. 빠른 조류로 인해 대조기에는 작업이 불가능하며 조석표상 13물에서 3물까지 대략 6일 정도가 작업 가능한 일수이다. 이 또한 1일 3~4회 물의 흐름이 가장 적은 정조(Slack tide) 시간 대략 20~50분 정도만 수중 잠수작업이 가능하였다. 하지만 영등사리(음력 2월경)와 백중사리(음력 8월경) 전과 후의 물때에는 소조기라고는 하나 정조(slack tide)가 없어 잠수작업이 불가능한 경우도 존재하였다.

<Table 2> Contents of diving works classified by work types

Work Type	Contents
Mooring installation	• Release anchor lift • Chain hook up etc.
OMAS	
Support structure installation	• Release 8 shackles on SS • USBL & Motion sensor recovery • HPU hose connected(recovery) On SS • Connect(disconnect) concrete pipe an foot print etc.
Cable installation	• Subsea cable inspection • Stainless steel clamp attach • Seabed transition chute installation • Lay down chain mattress etc.
Turbine installation	• SS inspection • ADCP install • SS USBL beacon installation • CT chain connecting to SS • SS datum line installation • HPU power & data cable installation etc.

IV. 잠수작업한계

1. 잠수작업에 영향을 주는 인자

잠수작업에 영향을 주는 인자로는 조류의 유속, 수중시야, 수온, 날씨, 풍랑, 안개, 태풍, 계절풍 등의 다양한 요소들이 있다. 그 중 조류의 유속, 수중시야, 수온 등은 잠수사에게 직접적으로 영향을 주는 인자이지만, 나머지의 경우 작업 선박의 운항에 영향을 주는 인자들이다. 이에 진도 장죽수로 현장에서의 잠수작업에 가장 큰 영향을 주는 요인을 살펴보면 다음과 같다.

첫째로, 잠수작업에 가장 큰 영향을 주는 인자는 조류의 유속이다. 상시 수중작업을 행할 수 있는 동해안이나 남해안과 달리 조류의 유속이 강해 소조기시(13물~3물 사이) 조류의 흐름이 거의 없는 정조(slack tide)시간에만 작업이 가능하였다. 이에 정조 시간을 맞추기 위해 2~3시간 전에 현장에서 도착해 전용선에서 추를 바다에 넣어 추가 이루는 각을 측정하여 잠수작업에 임하였다. 국내 국립 해양조사원에서 조석 예보표(2009~2011)를 참고하였으나, 진도검조소와 장죽수로와의 거리 차이로 인해 정조시간이 1~2시간 정도로 오차범위가 너무 차이가 커 사용하지 못하였고, 발주처인 Voith Hydro사에서 수치 계산한 조석표에서도 대략 1시간정도의 오차를 나타내었다. 그나마 국내 바다타임이란 웹사이트의 진도 하조도 지역의 조석 예보표가 40분정도의 오차범위를 나타내고 있어 가장 많이 참고하였다.

둘째로, 날씨의 영향을 들 수 있다. 풍랑, 안개, 태풍 등 국내 기상청에서 전국의 바다날씨를 예보하고 있지만, 다양한 기상예보를 통한 원활한 작업진행을 위해 진도 현장에서는 기상청 예보 자료뿐만 아니라 미국의 Buoyweather 기상 유료 사이트에서 날씨변화를 실시간 제공받아 참고하였다.

셋째로, 수중시야의 영향을 이야기 할 수 있

다. 실제 진도 해역에서의 수중 시야는 소조기 임에도 빠른 조류의 영향으로 부유사가 많으며, 정조시에도 수심과 물의 탁도에 의해 시계가 0 cm에 가깝다. 하지만 수중 라이트를 비추었을 경우 대략 30~100 cm 정도가 확보되었다.

넷째로, 계절풍을 들 수 있다. 진도지역은 지구 물리학적 특성상 겨울철 계절풍의 영향으로 거센 바람과 풍랑을 일으켜 해상선단의 운영을 지장을 주는 경우가 상당수 있었으며, 이 시기의 현장에선 주요작업을 제외한 단시간에 끝낼 수 있는 작업 또는 육상에서 할 수 있는 작업들로 대체 시행하였다.

다섯째로, 수온에 의한 잠수사의 체온 손실을 들 수 있다. 잠수사가 장시간 작업으로 심한 추위를 느끼는 경우 수중작업의 어려움 및 감압시 잠수 감압표의 변경이 요구된다. 이는 추위로 인해 인체에 더 많은 미세 질소 방울들이 포화 되어 기존 계획 감압표보다 한 단계 높은 감압표를 사용하여 보다 장시간 미세 질소 방울들을 배출 시켜야 한다. 이를 방지하기 위해서는 온수 공급 시스템을 운영하여 수중에서 잠수사의 저체온을 방지하여야 한다.

2. 공종별 소요기간 및 잠수 횟수

공사기간은 2009년 11월부터 2011년 4월 터빈 설치 시까지 총 18개월이 소요되었다. [Fig. 8]은 18개월 동안 기록된 잠수작업 일지의 잠수 횟수를 월별 잠수작업 횟수로 나타낸 것이다. 월별 최대 잠수 횟수는 17개월의 14회이며, OMAS 기간을 제외한 최소 잠수 횟수는 1개월의 2회이다. <Table 3>은 각 공종별 순서를 공종번호(W-1 ~W-5)로 표현하여, 소요된 작업 기간과 잠수횟수 및 그 비율을 나타낸 것이다. 5개의 공종 중 계류시설설치 3개월, 전용선 개조작업 4개월, 기초구조물 설치 3개월, 수중케이블 포설 4개월, 터빈 설치 4개월의 시간이 소요되었고, 각 공종별 잠수 횟수는 계류시설물 설치 17

회, 전용선개조작업 0회, 기초구조물 설치 15회, 수중 케이블 포설 30회, 터빈 설치 48회로 총 110회의 잠수 작업을 수행하였다.

[Fig. 8] Monthly diving working times during the construction

전체 잠수작업이 110회를 100%라고 할 때, 터빈설치에 43.6%의 잠수작업이 실시되었고 다음으로 케이블 매설에 27.3%, 계류시설물설치는 15.5%, 마지막으로 기초구조물 설치에 13.6%의 잠수작업이 수행되었다. 터빈 설치 및 케이블 매설에 전체 잠수작업 중 70.9%를 차지하는 것으로 나타났으며, 그 중에서 케이블 매설시 2회 실패 후 3회 때 성공하여 전체 잠수작업 횟수를 크게 증가시키는 원인이 되었다.

<Table 3> Diving working times and period of work types

No.	Diving Table	Month	Times	%
W-1	Mooring installation	3	17	15.5
W-2	OMAS	4	0	0
W-3	Support structure installation	3	15	13.6
W-4	Cable installation	4	30	27.3
W-5	Turbine installation	4	48	43.6
Summation		18	110	100

3. 공기 지연 분석을 통한 산업잠수 작업한계

전술한 바와 같이 잠수작업은 해상상황과 작업의 성공유무에 따라 작업횟수와 기간의 변동이 육상공사와 달리 클 수밖에 없다. 또한 이전의 공사에서는 잠수 작업 상황을 고려하여 공사기간을 산정하는 어떤 매뉴얼도 존재하지 않아, 작업기간을 설정함에 있어서 상당한 어려움을 가지고 있다. 따라서 장죽수로 조류발전 예정 공사기간이 2009년 11월부터 2010년 2월까지 약 4개월로 예상하였으나, 실제 작업에 투입된 기간은 2009년 11월부터 2011년 4월 터빈 설치 시까지 총 18개월이 소요되었다. 공사 기간이 지연된 내용을 살펴보면 계류시설물 설치 공사의 예상공정은 1개월이었지만 해상 크레인선 앵커 손괴, 앵커 와이어 절단 등의 영향으로 실공정은 3개월로 증가하였다. 이에 따라 처음 공사계획에 포함 되지 않았으나 해상 크레인선의 위험요소들을 보완하고 수리하여 터빈 설치 전용선으로 변경하는데 4개월의 공사기간이 증가하였다. 기초 구조물 설치의 경우 처음 1개월로 예상하였지만 우리나라 겨울철 계절풍의 영향으로 봄철인 4월로 연기 총 3개월의 시간이 소요되었다.

또한 수중 케이블 포설 역시 2회의 실패 후 3회째 포설 성공으로 인한 수중 케이블 확인 및 회수 작업으로 인하여 0.5개월에서 4개월로 공사 기간이 증가하였으며, 마지막으로 터빈 설치의 경우 기 설치된 기초 구조물의 각종 센서 및 장비들이 수중케이블 포설 실패의 영향으로 손상되어 재 설치에 들어감으로써 공사기간이 0.5개월에서 4개월로 연장 시행되었다. 즉, 총 공사기간이 처음 계획보다 약 4.5배 정도 증가한 것이며, 이는 실제 사전 환경답사와 더불어 해양물리 환경에 따른 잠수작업이 가능한 시간을 전혀 고려하지 않았고, 또한 선진국의 대형 선단에 비해 국내 선박 및 해상크레인의 노후화를 생각지 않고 단순 계산에 의한 값으로만 공사기간을 설정하였기 때문이다. 특히 5개의 작업 공정별로 예

정된 공사기간에 대비 실제 공사기간을 비교한 결과, 터빈 설치와 케이블 매설에서 최대 8배의 공사기간이 증가하였으며, 이것은 조류발전 건설에 대한 잠수작업 경험이 전무하고, 대상해역의 빠른 조류로 인해 짧은 작업시간과 열악한 작업 환경 때문인 것으로 판단된다(<Table 4>).

<Table 4> Comparison between planed (P) and real (R) schedule

Work Mon.	W-1		W-2		W-3		W-4		W-5	
	P	R	P	R	P	R	P	R	P	R
'09	Nov.									
	Dec.									
	Jan.									
	Feb.									
	Mar.									
'10	Jun.									
	Jul.									
	Aug.									
	Sep.									
	Oct.									
'11	Nov.									
	Dec.									
	Jan.									
	Feb.									
	Mar.									
	Apr.									
Sum.	1	3	0	4	1	3	0.5	4	0.5	4

V. 결 론

본 논문에서는 진도 장죽수로에서 조류발전 건설시 해양물리환경과 현장에서 적용된 잠수 감압표를 서술하고, 조류발전 공종별 작업특성을 기술하였다. 또한, 각 공종별 잠수 작업일지로부터 실제 잠수작업시간 및 횟수를 산출하여 공정별 잠수작업 비율을 산출하고 공사계획 대비 실제 소요된 공사기간을 비교하여 산업잠수 작업시 작업한계에 대해 고찰하였다.

첫째로, 현장의 잠수작업시간 산정을 위해 U.S. Navy Diving Manual에 나와 있는 4가지 감압조건과 현장수심을 고려하여 작업시간을 130 Ft에서 최대 90분까지 수중 작업이 가능한 것으로 나타났다. 그러나 조류가 세고 정조시간이 짧은 장죽수로 해양환경 특성상 수중에서의 감압시간이 짧고 강한조류에 대한 잠수사의 위험요소가 적은 산소사용 표면 감압(Sur D/O2)을 사용하여, 소조기의 정조(slack tide)시간을 맞추어 작업하였으며, 평균적으로 40분간 작업을 할 수 있었다.

둘째로, 예정 공사기간이 2009년 11월부터 2010년 2월까지 약 4개월이었으나 2009년 11월부터 2011년 4월 터빈 설치 시까지 총 18개월이 소요되었다. 총 110회의 잠수작업을 100%라고 할 때, 터빈 설치에 43.6%, 케이블 설치 27.3%, 계류 설치 15.5%, 마지막으로 기초구조물 설치에 13.6%의 잠수작업이 실시되었다. 이것은 총 공사기간이 약 4.5배 정도 증가한 것이며, 이에 대한 원인으로 지형 및 계절별 특성을 고려하지 않고 짧은 기간 동안 해양 물리 환경조사를 함으로써, 잠수작업 한계요소(조류속, 날씨, 수중시야, 계절풍, 수온) 및 조류발전 터빈을 설치한 장죽수로의 해양 특성을 제대로 이해하지 못한 채 공사를 시작하였다. 이로 인해 잠수작업이 가능한 정확한 시간을 예측하지 못하였고, 또한 잘못 해석된 통계치로 공사기간을 설정하여 발생한 문제인 것으로 판단된다.

마지막으로, 국제적으로 공인된 잠수 매뉴얼에 따라 계획 잠수작업시간을 설정하였으며, 산업잠수사와 선상의 감독관이 실시간 모니터링을 통한 작업을 수행하여 작업미숙에 의한 잠수횟수 증가를 미연에 방지함에도 불구하고 예상기간보다 많은 공기 소요가 발생하였다. 따라서 변화무쌍한 해상상황 속에서도 성공적인 공사를 위하여 잠수작업의 효율을 높이하고자 전술한 작업한계와 더불어

설계단계에서부터 산업잠수의 역할과 효율적인 잠수작업 방법이 반영되어야만 불확실한 해양/수중공사에서 공기가 지연됨을 막을 수 있다고 판단된다. 앞으로 풍력, 조류, 파력, 조력과 같은 다양한 해양 신재생 에너지 개발 사업, 해양 석유 및 자원 개발, 해양 토목 등의 분야에서 수중에 구조물을 설치 및 운영하기 위해서는 수중로봇 뿐만 아니라 산업잠수사의 역할이 매우 중요하다. 왜냐하면, 다양한 해양산업 개발을 위해서도 실제 세밀한 현장 사전답사와 더불어 수중 잠수 작업의 특성을 이해하여 작업 공중 및 공정을 보다 구체적으로 계획을 세워 인적 및 물적 손실을 줄이고 안전하게 해양 신재생 에너지 사업을 추진해야 할 것이다.

Reference

- Kim Do-Hyun(1999). Commercial Diving in Korea - Present Condition and Development Scheme - <Revision 1>.
- Korea Energy Management Corporation(2008). Renewable Energy White Paper, 161~165.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration(2009~2011). Tide table.
- Sustainable Marine Technologies. LTD(2009). Prototype TISEC Technical & Operational Information- 110kW prototype TISEC installation, Jangjuk Channel, Jindo, Korea.
- U.S. Navy(2005). Diving Manual vol. 2 Air Diving Operations, Rev. 5.
- U.S. Navy(2005). Diving Manual Vol. 5 Diving Medicine and Re-compression Chamber Operations, Rev. 5.

-
- 논문접수일 : 2013년 05월 10일
  - 심사완료일 : 1차 - 2013년 06월 12일
  - 게재확정일 : 2013년 06월 22일